



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

---

# Μελέτη και Κατασκευή Μετατροπέα DC-DC για την οδήγηση Ηλεκτρικού Οχήματος

## Design and Development DC to DC Converter for driving Electric Vehicle

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σιμιτσής Παναγιώτης

**Επιβλέπων :** Βυλλιώτης Ηρακλής  
Καθηγητής Εφαρμογών

Πειραιάς, Δεκέμβριος 2013





ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

---

# Μελέτη και Κατασκευή Μετατροπέα DC-DC για την οδήγηση Ηλεκτρικού Οχήματος

## Design and Development DC to DC Converter for driving Electric Vehicle

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σιμιτσής Παναγιώτης

**Επιβλέπων :** Βυλλιώτης Ηρακλής  
Καθηγητής Εφαρμογών

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 18<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2013.

.....  
Βυλλιώτης Ηρακλής  
Επιβλέπων  
Καθηγητής Εφαρμογών

.....  
Μαλατέστας Παντελής  
Μέλος Επιτροπής  
Καθηγητής

.....  
Καραϊσάς Πέτρος  
Μέλος Επιτροπής  
Καθηγητής Εφαρμογών

Πειραιάς, Δεκέμβριος 2013

.....

Σιμιτσή Παναγιώτης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε.Ι Πειραιά

Copyright © Σιμιτσή Παναγιώτης, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους με βοήθησαν κατά την διάρκεια της καθώς η συμβολή τους ήταν καθοριστική για την εκπόνηση της.

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου κ. Ηρακλή Βυλλιώτη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα εργασία, την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία για την ολοκλήρωσή της.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στην οικογένεια μου και στην μνήμη της πολυαγαπημένης μου γιαγιάς.

Είναι αναπόφευκτο  
ο πρωτόπορος, που βρίσκεται  
μπροστά από την εποχή του ,να  
μην συναντά την κατανόηση, αλλά  
να υποφέρει από πικρία  
και απογοήτευση. Ταυτόχρονα  
όμως ικανοποιείται προκαταβολικά  
από την ανώτερη τιμή, την οποία  
θα του προσφέρουν  
οι μελλοντικές γενιές.

**Νικόλα Τέσλα**

## Πρόλογος

Η επιστημονική περιοχή των ηλεκτρονικών ισχύος σε συνδυασμό με τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, παγκοσμίως βρίσκεται μεταξύ των δραστηριοτήτων αιχμής. Σε μια διαδρομή πέντε δεκαετιών σημειώθηκε τεράστια πρόοδος με ραγδαίους ρυθμούς στην κατάκτηση νέων γνώσεων και στην ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών.

Οι εφαρμογές εκτείνονται σε ένα ευρύτατο φάσμα της σύγχρονης τεχνολογίας με ευεργετικά αποτελέσματα για την αυτοματοποίηση και τον εκσυγχρονισμό, την εξοικονόμηση ενέργειας, την προστασία του περιβάλλοντος, την οικονομική ανάπτυξη και την ποιοτική αναβάθμιση της κοινωνίας.

Σκοπός των ηλεκτρονικών ισχύος είναι ο μετασχηματισμός των κυματομορφών των ηλεκτρικών μεγεθών, όπως είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσεως σε συνεχή ή αντίστροφα, η μετατροπή συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη, μεταβάλλοντας την συχνότητα και την ενεργό τιμή αυτής. Μέσω αυτών των μετατροπέων επιτυγχάνεται η τροφοδοσία διάφορων ηλεκτρικών φορτίων, π.χ. μηχανών συνεχούς ρεύματος, μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος κ.α., όπου ιδιαίτερη σημασία έχει ο έλεγχος της ποσότητας ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του χρήστη, οι οποίες συνήθως είναι αρκετά πολύπλοκες. Επιπλέον, οι διαδικασίες μετατροπής των ηλεκτρικών μεγεθών με ταυτόχρονη μετατροπή της ενέργειας π.χ. από ηλεκτρική σε μηχανική, πρέπει να διεκπεραιώνεται γρήγορα, αξιόπιστα, με υψηλές τιμές του βαθμού απόδοσης και του συντελεστή ισχύος, καθώς και με μικρό κόστος. Στις εφαρμογές τα συστήματα με ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος εκτείνονται από την περιοχή των μικρών μεγεθών ισχύος (mW) μέχρι πολύ μεγάλες τιμές (MW).

Πρέπει να επισημανθεί με ιδιαίτερη έμφαση, ότι οι διαδικασίες μετατροπών ενέργειας διεκπεραιώνονται από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος με την βοήθεια ηλεκτρονικών διατάξεων χαμηλής ισχύος, κυρίως δε μέσω μικροεπεξεργαστών. Αυτό είναι αναγκαίο, διότι τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος στην ουσία είναι διακοπτικές μονάδες, των οποίων η διακοπτική λειτουργία διεκπεραιώνεται με εντολές προερχόμενες από ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα κατάλληλα προγραμματισμένα σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις των φορτίων. Συνεπώς, η πρόοδος της επιστήμης και της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος καθορίζεται αφενός από τα επιτεύγματα στη δημιουργία νέων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος αφετέρου και από τις εξελίξεις στα ηλεκτρονικά χαμηλής ισχύος.



## Abstract

The scientific field of power electronics in conjunction with the electric driving systems, worldwide is between the peak activity. In a stroke of five decades made tremendous progress rapidly to capture new knowledge and develop innovative technologies.

The applications extend a wide range of modern technology with beneficial effects for automation and modernization, energy saving, environmental protection, economic development and improve the quality of society.

The purpose of power electronics is the transformation of the waveforms of electrical quantities such as the conversion of the alternating voltage in a continuous or conversely, converting the DC voltage into AC by varying the frequency and the effective value thereof. Through these converters achieve power various electrical loads , e.g. DC machines , AC machines , etc. , where it is particularly important to control the amount of power at all times satisfy the requirements of the user, which is usually quite complicated . Furthermore, procedures for conversion of electrical quantities with simultaneous conversion of energy e.g. from electrical to mechanical , must be dealt with quickly , reliably , with high values of efficiency and power factor , and low cost. Applications systems with electronic power devices ranging from small area of effect sizes (mW) to very large values (MW).

It should be noted with emphasis that the energy conversion process handled by the electronic power converters by means of low-power electronic devices , particularly through microprocessors. This is necessary because the semiconductor power modules are essentially Switching units , of which the switching operation is handled with instructions from digital electronic circuits appropriately programmed according to the individual requirements of the load . Therefore , the progress of science and technology of power electronics is determined firstly by the achievements in the creation of new power semiconductor components and other developments in low power electronics .

## Περιεχόμενα

➤	<b>Κεφάλαιο 1</b>	- Γενικά περί Κινητήρων και Συστημάτων Ηλεκτρικής Κίνησης.	
	1.1	Ηλεκτρικά Οχήματα	11
	1.2	Γενικά	13
	1.3	Κινητήρες DC	13
	1.3.1	Κινητήρας DC παράλληλης διέγερσης	14
	1.10.8	Κινητήρας DC διέγερσης σειράς	16
	1.3.3	Κινητήρας DC σύνθετης διέγερσης	17
	1.4	Πέδηση κινητήρων DC	18
	1.4.1	Δυναμική Πέδηση	19
	1.10.7	Αναγεννητική πέδηση	20
	1.4.3	Plugging	21
	1.5	Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης	22
	1.6	Χαρακτηριστικές λειτουργίας κινητήρα – φορτίου	23
	1.7	Τεταρτημόρια Λειτουργίας	27
➤	<b>Κεφάλαιο 2</b>	- Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος	
	2.1	Εισαγωγή	28
	2.2	Δίοδος	29
	2.2.1	Χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος διόδου	30
	2.3	Δίοδος δύο κατευθύνσεων (Diac)	31
	2.4	Δίοδος Zener	32
	2.5	Διπολικό Τρανζίστορ	33
	2.5.1	Περιοχές λειτουργίας	34
	2.5.2	Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού	35
	2.5.3	Χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος	36
	2.6	Τρανζίστορ Επίδρασης πεδίου – MOSFET	38
	2.6.1	Χαρακτηριστικές $i_D = f(v_{DS})$	39
	2.7	Θυρίστορ	41
	2.8	Triac	43
	2.9	GTO	44
	2.10	Τελεστικός Ενισχυτής (Operational Amplifier)	46
	2.10.1	Τροφοδοσία	47
	2.10.2	Ακροδέκτες εισόδου	47
	2.10.3	Ακροδέκτες εξόδου	48
	2.10.4	Ιδανικός τελεστικός ενισχυτής	50
	2.10.5	Εφαρμογές Τελεστικού Ενισχυτή	50
	2.10.6	Προσθήκη κλάδου ανάδρασης	52
	2.10.7	Ενισχυτής με ανάδραση	52
	2.10.8	Μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία	56
	2.11	Σύγκριση ελεγχόμενων ηλεκτρονικών διακοπών	57
	2.11.1	Σύμβολα και χαρακτηριστικές των ηλεκτρονικών διακοπών	61
➤	<b>Κεφάλαιο 3</b>	- Μετατροπείς DC-DC	

3.1	Εισαγωγή .....	63
3.2	Έλεγχος των μετατροπέων DC-DC .....	63
3.3	Είδη μετατροπέων ηλεκτρικής ενέργειας .....	65
3.4	Ειδικά για τον μετατροπέα DC-DC .....	65
3.5	Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης ( stepdown converter ) .....	67
3.6	Μετατροπέας ανύψωσης τάσης ( stepup converter ) .....	71
3.7	Μετατροπέας υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης ενός διακόπτη... ..	75
3.8	Έλεγχος τάσης εξόδου του μετατροπέα DC-DC .....	77
3.9	Εφαρμογές των μετατροπέων DC-DC .....	78
➤	<b>Κεφάλαιο 4 - Έλεγχος Κινητήρων Σ.Ρ. Μέσω Μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ.</b>	
4.1	Γενικά για τον έλεγχο κινητήρων .....	79
4.2	Έλεγχος κινητήρα με μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ. Εξισώσεις για συνεχή και ασυνεχή αγωγή. ....	84
➤	<b>Κεφάλαιο 5 – Εισαγωγή στον Arduino</b>	
5.1	Περιγραφή .....	90
5.2	Λειτουργία .....	90
5.2.1	Είσοδοι – έξοδοι .....	90
5.3	Τροφοδοσία .....	92
5.4	Ενσωματωμένα κουμπιά και Led .....	93
5.5	Arduino IDE και σύνδεση με τον υπολογιστή .....	94
5.6	Γλώσσα προγραμματισμού .....	95
➤	<b>Κεφάλαιο 6 – Κατασκευαστικό Μέρος</b>	
6.1	Γενικά για το κύκλωμα ελέγχου .....	98
6.1.1	Σχηματικό και τοπογραφικό πλακέτας κυκλώματος ελέγχου και ισχύος .....	105
6.1.2	Υλικά κατασκευής του μετατροπέα .....	108
6.2	Υλοποίηση τροφοδοτικού .....	109
6.2.1	Μετασχηματιστής τάσεως .....	110
6.2.2	Ανόρθωση .....	110
6.2.3	Φιλτράρισμα .....	110
6.2.4	Σταθεροποίηση .....	111
6.2.5	Υλικά τροφοδοτικού .....	111
6.3	Υλοποίηση κυκλώματος κατασκευής βολτομέτρου και αμπερομέτρου με την χρήση του Arduino .....	115
6.3.1	Υλικά που απαιτήθηκαν για την υλοποίηση της κατασκευής ...	116
6.3.2	Κώδικας .....	117
6.3.3	Πλακέτες για το όργανο μετρήσεως .....	126
6.3.4	Πλακέτες (Σχεδιασμός – Κατασκευή) .....	128
6.4	Συναρμολόγηση Κατασκευής .....	128
6.4.1	Σχεδιασμός στο Front Panel Designer .....	129
6.4.2	Υλικά κατασκευής που απαιτήθηκαν για το κουτί .....	131
➤	<b>Κεφάλαιο 7 – Πειραματικές Μετρήσεις</b>	
7.1	Μετρήσεις με ωμικό φορτίο .....	132
7.2	Μετρήσεις με επαγωγικό φορτίο .....	134

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Γενικά περί Κινητήρων και Συστημάτων Ηλεκτρικής Κίνησης

### 1.1 Ηλεκτρικά Οχήματα

Η ιστορία των ηλεκτρικών οχημάτων ξεκινάει στα μέσα του 19ου αιώνα όταν και πρωτοεμφανίστηκαν στην αμερικάνικη αγορά καταφέροντας μέσα σε ένα διάστημα 50 ετών να ανταγωνιστούν επάξια τα οχήματα εσωτερικής καύσης της εποχής και να κερδίσουν το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς.

Τα επόμενα χρόνια όμως η αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων ακολούθησε πτωτική πορεία εξαιτίας τόσο της πτώσης της τιμής του πετρελαίου όσο και σημαντικών τεχνολογικών εξελίξεων. Η κατασκευή νέων δρόμων για την σύνδεση των μεγάλων πόλεων καθώς και η πολύ χαμηλή χωρητικότητα των μπαταριών της εποχής και η έλλειψη επαρκούς ηλεκτρικού δικτύου περιόρισαν την χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων μονό μέσα στα όρια των οικισμών και οδήγησαν σταδιακά στην κυριαρχία των οχημάτων εσωτερικής καύσης τα οποία και πέρασαν στην μαζική παραγωγή.

Το ενδιαφέρον για την ηλεκτρική κίνηση πυροδοτήθηκε και πάλι τις τελευταίες δεκαετίες εξαιτίας της αυξανόμενης ανησυχίας για τις επιπτώσεις στο περιβάλλον και το κλίμα του πλανήτη από την αλόγιστη καύση υδρογονανθράκων στην οποία βασίζεται το μεγαλύτερο κομμάτι του δικτύου μεταφορών παγκοσμίως. Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας των συσσωρευτών και των ηλεκτρικών συστημάτων σε συνδυασμό με την άνοδο των τιμών του πετρελαίου οδήγησαν σε μια προσπάθεια εξηλεκτρισμού των μέσων μεταφοράς με σημαντικότερα παραδείγματα τα τραίνα και τα πλοία. Η προσπάθεια αυτή τα τελευταία χρόνια επεκτάθηκε και στις αυτοκινητοβιομηχανίες που προτείνουν τα αμιγώς ηλεκτρικά και τα υβριδικά οχήματα ως βασική λύση για την μείωση της εκπομπής ρύπων στην ατμόσφαιρα και αναπτύσσουν τεχνολογίες που θα επιτρέψουν το πέρασμα στην μαζική παραγωγή τους.

Η λύση των ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα εξαιτίας τόσο της μηδενικής εκπομπής ρύπων όσο και των υψηλών επιδόσεων που προσφέρει το κινητήριο σύστημα τους:

- Μηδενική εκπομπή ρύπων, βλαβερών ουσιών ή διοξειδίου του άνθρακα.
- Προκαλούν ελάχιστη θερμική επιβάρυνση στο περιβάλλον (θερμική μόλυνση), εξαιτίας του εξαιρετικά υψηλού βαθμού απόδοσης του ηλεκτρικού κινητήρα.
- Η ενέργεια που απαιτείται για την ηλεκτρική κίνηση μπορεί εύκολα να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές και να διοχετευτεί, μέσω κατάλληλων υποδομών, στο δίκτυο διανομής.
- Ακόμα και αν η παραγωγή της ενέργειάς γίνεται με συμβατικές μεθόδους (λιγνίτης) ο βαθμός απόδοσης είναι πολύ μεγαλύτερος συγκριτικά με την επιτόπου καύση των συμβατικών κινητήρων. Επιπλέον, στα κέντρα παραγωγής ενέργειας η διαδικασίες καθαρισμού και αποκατάστασης της ρύπανσης μπορεί να γίνουν πολύ πιο αποτελεσματικές σε σχέση με την

αντιμετώπιση της ρύπανσης σε κάθε ένα από τα χιλιάδες οχήματα που κυκλοφορούν στις πόλεις.

- Προκαλούν μηδενική ηχορύπανση συμβάλλοντας έτσι στην δραστική βελτίωση της ποιότητας της ζωής στην πόλη.
- Οι επιδόσεις τους παρουσιάζουν επίσης σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα οχήματα εσωτερικής καύσης. Το ηλεκτρικό σύστημα κίνησης διαθέτει μεγαλύτερη επιτάχυνση και σε πολύ μεγαλύτερο εύρος στροφών με αποτέλεσμα να μην είναι αναγκαία η χρήση συστήματος ταχυτήτων. Επιπλέον οι ηλεκτρικοί κινητήρες έχουν πολύ μικρότερο μέγεθος και βάρος από τους αντίστοιχους συμβατικούς κινητήρες και απαιτούν λιγότερη συντήρηση.

Το ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα έχει την δυνατότητα αντίστροφης λειτουργίας παράγοντας ενέργεια κατά την επιβράδυνση σε κατηφορικό δρόμο ή κατά το φρενάρισμα. Η ενέργεια αυτή διοχετεύεται στις μπαταρίες με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος κίνησης. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται στην βιβλιογραφία «αναγεννητική πέδηση».

- Η χαμηλή απαίτηση ψύξης του κινητηρίου συστήματος τους επιτρέπει στους σχεδιαστές την κατασκευή οχημάτων με πολύ καλύτερη αεροδυναμική μειώνοντας τις διόδους ροής αέρα που απαιτούν τα οχήματα εσωτερικής καύσης και βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο την μετωπική τους επιφάνεια.

Από την άλλη πλευρά τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα τα οποία σχετίζονται κυρίως με την πηγή ισχύος τους:

- Περιορισμένη αυτονομία. Παρά την τεράστια πρόοδο της τεχνολογίας στον τομέα των μπαταριών και τον μεγάλο βαθμό απόδοσης του ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος, η απόσταση που μπορούν να διανύσουν μέχρι την επόμενη φόρτιση τους είναι περιορισμένη.
- Η φόρτιση τους χρειάζεται επίσης σημαντικό χρόνο (από 1 έως 8 ώρες) και απαιτεί την πρόσβαση σε κατάλληλα διαμορφωμένες υποδομές του δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Το κόστος και το βάρος των μπαταριών παραμένουν αρκετά υψηλά, ενώ οι περιορισμένοι κύκλοι φόρτισης τους οδηγούν σε μία τουλάχιστον αντικατάσταση τους κατά την διάρκεια ζωής του οχήματος. Η αντικατάσταση των μπαταριών εκτός από δαπανηρά μπορεί να αποδειχθεί πολύ επιζήμια για το περιβάλλον αν δεν ληφθούν κατάλληλα μέτρα για την ανακύκλωση των υλικών τους.

Τα ηλεκτρικά οχήματα χωρίζονται με βάση την λειτουργία του κινητηρίου συστήματός τους σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- **Υβριδικά:** Οχήματα που διαθέτουν κινητήρα εσωτερικής καύσης σε συνδυασμό με έναν ή περισσότερους ηλεκτροκινητήρες. Η σύνδεση των κινητηρίων συστημάτων γίνεται με τρόπο που να ελαχιστοποιεί την συνολική κατανάλωση του οχήματος και μπορεί να βασίζεται είτε στην φόρτιση των συσσωρευτών μέσω του κινητήρα εσωτερικής καύσης και χρήση του ηλεκτρικού συστήματος για την πρόωση (σύνδεση σε σειρά), είτε στην παράλληλη λειτουργία των δύο συστημάτων για την κίνηση του οχήματος (παράλληλη σύνδεση). Τα οχήματα αυτά αποτελούν ένα συμβιβασμό ανάμεσα στα οφέλη του ηλεκτρικού συστήματος κίνησης και την αυξημένη αυτονομία των συστημάτων εσωτερικής καύσης, ενώ θεωρούνται ως βραχυχρόνια λύση

μέχρι να επιλυθούν τα τεχνικοοικονομικά ζητήματα που δεν επιτρέπουν την μαζική παραγωγή και κυκλοφορία των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων.

- **Ηλεκτρικά με κυψέλες καυσίμου:** Οχήματα που διαθέτουν ηλεκτρικό σύστημα κίνησης αλλά η πηγή ισχύος τους είναι οι κυψέλες καυσίμου. Η λειτουργία τους βασίζεται σε ένα μηχανισμό ηλεκτροχημικής μετατροπής ενέργειας, σύμφωνα με τον οποίο η χημική αντίδραση υδρογόνου και οξυγόνου παράγει νερό, ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν με υδρογόνο, ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε άλλο καύσιμο περιέχει υδρογόνο, όπως η μεθανόλη, η αιθανόλη, το φυσικό αέριο, κ.τ.λ. Τα οχήματα αυτά δεν απαιτούν φόρτιση αφού η τροφοδοσία του κινητήρα γίνεται από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, ωστόσο, ο χαμηλός βαθμός απόδοσης των κυψελών καυσίμου και η χαμηλή πυκνότητα ενέργειας τους οδηγούν σε υβριδικά συστήματα συνδυασμού κυψελών με μια δεύτερη πηγή ενέργειας (πιθανόν κάποιον συσσωρευτή).
- **Αμιγώς ηλεκτρικά:** Οχήματα που χρησιμοποιούν αποκλειστικά ηλεκτρικό σύστημα κίνησης και η ηλεκτρική τους ενέργεια προέρχεται από μπαταρίες τοποθετημένες στο εσωτερικό τους. Δεδομένου του ότι η πρόωση τους βασίζεται σε έναν ή περισσότερους ηλεκτροκινητήρες, θεωρούνται οχήματα μηδενικής εκπομπής ρύπων (Zero Emission Vehicles, ZEVs). Η αυτονομία τους, ωστόσο, περιορίζεται από την ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν οι μπαταρίες τους. Οι ραγδαίες όμως τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της αποθήκευσης ηλεκτρικής ισχύος σε συνδυασμό με την υψηλή απόδοση του κινητηρίου συστήματος τους έχουν οδηγήσει σε εμπορική διάθεση οχημάτων που η αυτονομία τους ξεπερνά τα 400 χλμ.

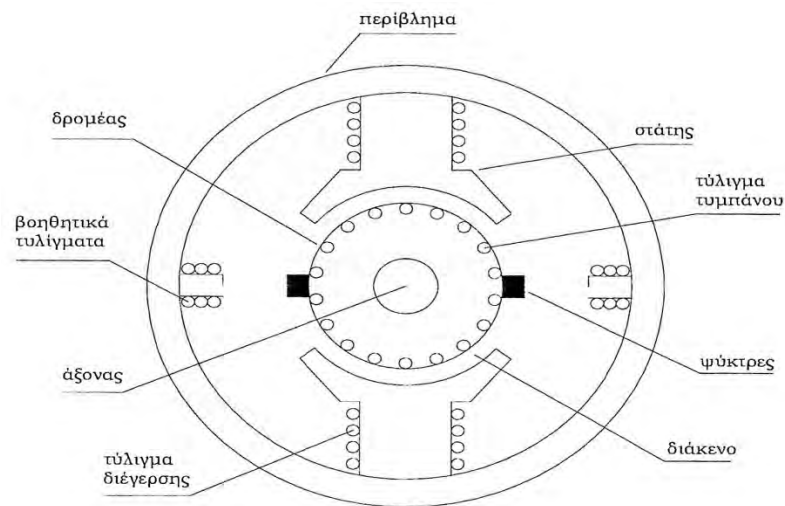
## 1.2 Γενικά

Ο Ηλεκτρικός κινητήρας είναι μια διάταξη που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια και η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην επίδραση του μαγνητικού πεδίου σε αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα. Τον συναντάμε καθημερινά σε απλές ή σύνθετες χρήσεις και διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες.

- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος DC
- Κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος AC

## 1.3 Κινητήρες DC

Τα βασικά μέρη ενός DC κινητήρα είναι ο στάτης και ο ρότορας. Ο στάτης αποτελείται από το ζύγωμα (κορμός της μηχανής), τους μαγνητικούς πόλους, το τύλιγμα διέγερσης, τους βοηθητικούς πόλους και τις ψήκτρες. Ο ρότορας αποτελείται από τον άξονα, το επαγωγικό τύμπανο (πυρήνας και το τύλιγμα του δρομέα) και τον συλλέκτη. Παρακάτω φαίνεται σε τομή η διάταξη τους στον κινητήρα.



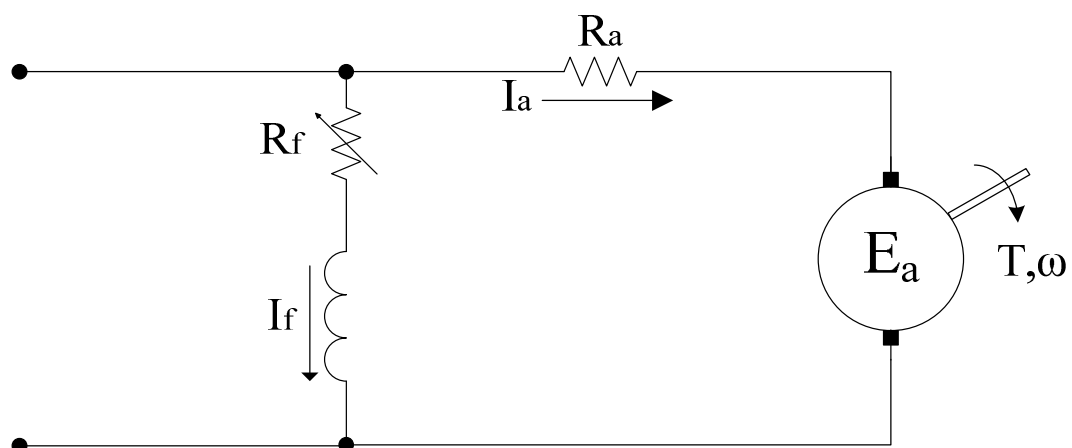
**Σχήμα 1.1** Δομή ενός DC κινητήρα

Οι DC κινητήρες χωρίζονται σε επί μέρους κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο διέγερσης.

- Παράλληλης διέγερσης
- Εν σειρά διέγερσης
- Σύνθετης διέγερσης
- Ξένης διέγερσης

### 1.3.1 Κινητήρες DC παράλληλης διέγερσης

Κινητήρας παράλληλης διέγερσης λέγεται ο κινητήρας του οποίου το τυλίγμα διέγερσης είναι συνδεδεμένο παράλληλα με το τυλίγμα του δρομέα.



**Σχήμα 1.2** Ισοδύναμο κύκλωμα DC κινητήρα παράλληλης διέγερσης

Οι σχέσεις που ισχύουν είναι :

$$U = E_a + R_a I_a$$

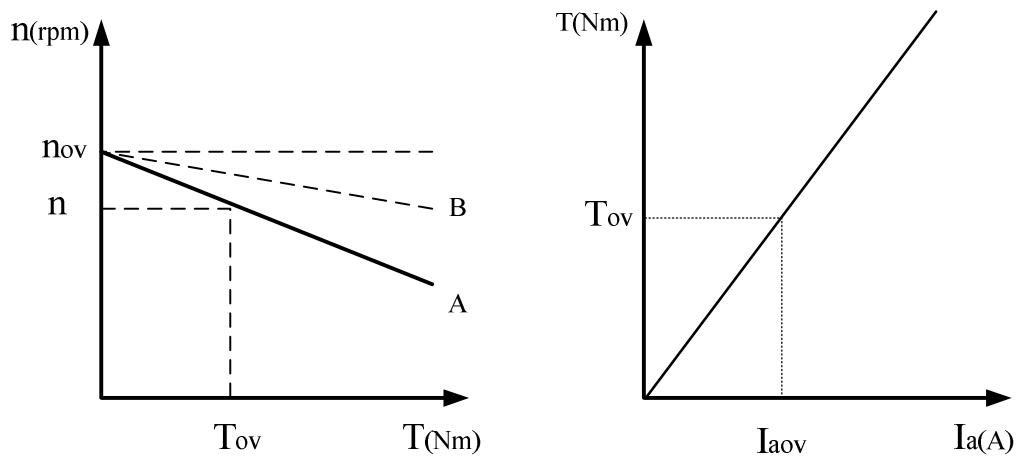
$$I = I_a + I_f \quad (1.2)$$

$$T = K_m \Phi I_a \quad (1.3)$$

Σε κάθε κινητήρα παράλληλης διέγερσης με τυλίγματα αντιστάθμισης, η ροή  $\Phi$  του πεδίου διέγερσης είναι σταθερή για σταθερό ρεύμα διέγερσης και τότε ισχύει :

$$n = \frac{U_a}{K_g \Phi} - \frac{R_a}{K_g K_m \Phi^2} T \quad (1.4)$$

$$\text{Όπου } K_m = \frac{60}{2\pi} K_g \quad (1.5)$$



**Σχήμα 1.3** Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής και ροπής-ρεύματος τυμπάνου

Αν η μηχανή δεν διαθέτει τυλίγματα αντιστάθμισης η μεταβολή των στροφών είναι μικρότερη (καμπύλη B σχ.1.3) από την αντίστοιχη (καμπύλη A σχ.1.3) όπου υπάρχουν τυλίγματα λόγω μιας μικρής εξασθένησης του πεδίου διεγέρσεως.

Βλέπουμε ότι η διακύμανση των στροφών και στις δύο περιπτώσεις δεν είναι πολύ μεγάλη και αυτός είναι ο λόγος που οι κινητήρες παράλληλης διέγερσης καλούνται και σταθερής ταχύτητας. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι ρύθμισης των στροφών αυτών των κινητήρων:

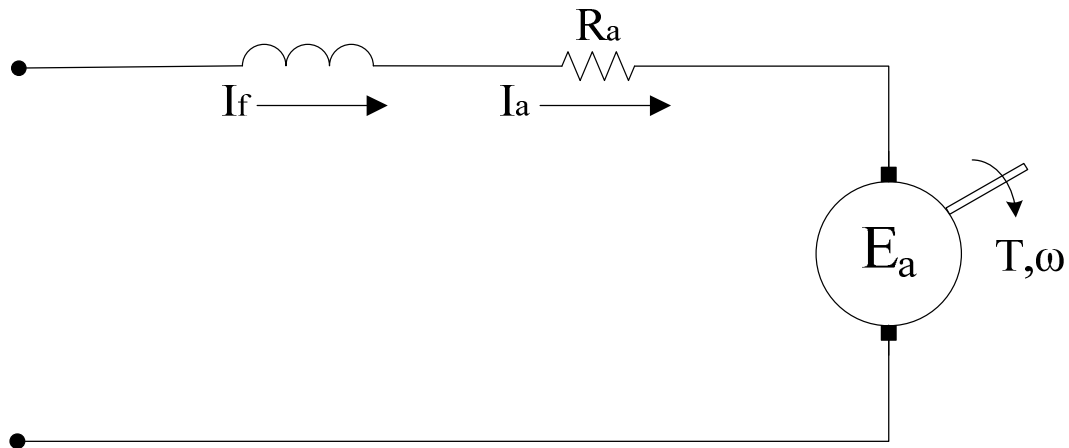
- Με μεταβολή της  $R_a$
- Με μεταβολή της  $I_f$
- Με μεταβολή της  $E_a$

Αλλά ο τελευταίος είναι πλέον χρησιμοποιούμενος.

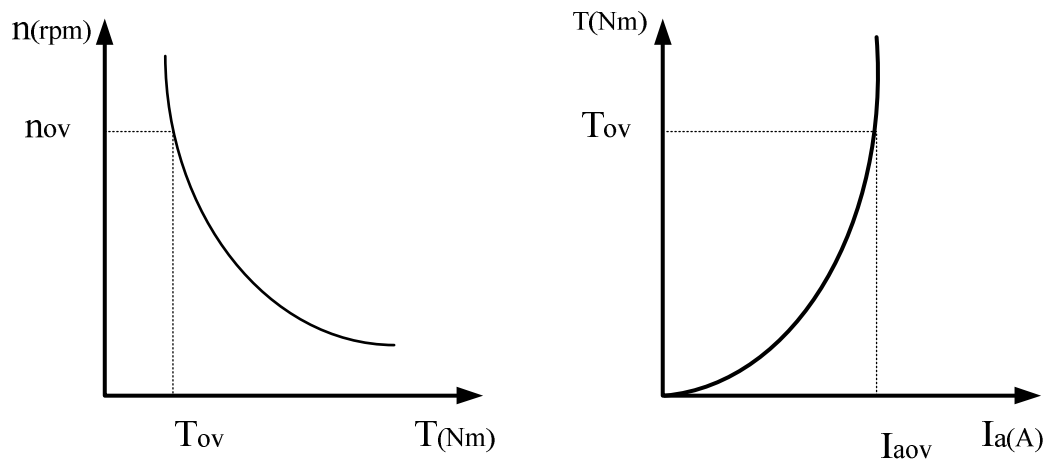


### 1.3.2 Κινητήρας DC διέγερσης σειράς

Ο κινητήρας σειράς έχει το τύλιγμα διέγερσης σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα διέγερσης είναι ίσο με το ρεύμα του δρομέα.



**Σχήμα 1.4** Ισοδύναμο κύκλωμα DC κινητήρα διέγερσης σειράς.



**Σχήμα 1.5** Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής και ροπής-ρεύματος τυμπάνου

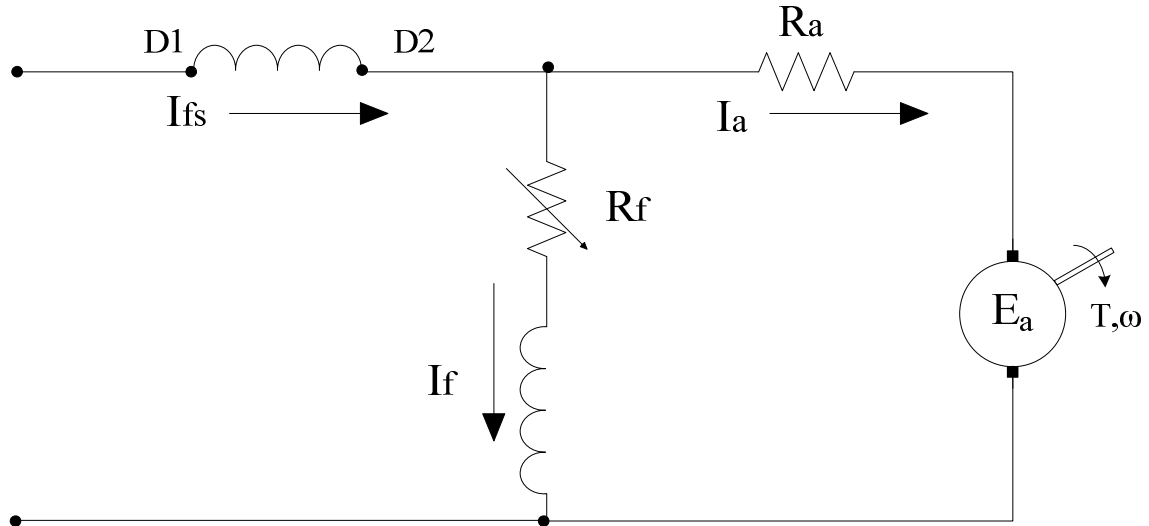
Όταν κατά την εκκίνηση δεν υπάρχει φορτίο ή είναι πού μικρό, η ροή  $\Phi$  είναι μικρή, με συνέπεια την μεγάλη άνοδο των στροφών που θα έχει καταστροφικά αποτελέσματα στον κινητήρα.

Βλέπουμε ότι οι κινητήρες σειράς μας δίνουν μεγάλη ροπή κατά την εκκίνηση γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με ανάλογες απαιτήσεις (γερανοί, ανελκυστήρες φορτίων).

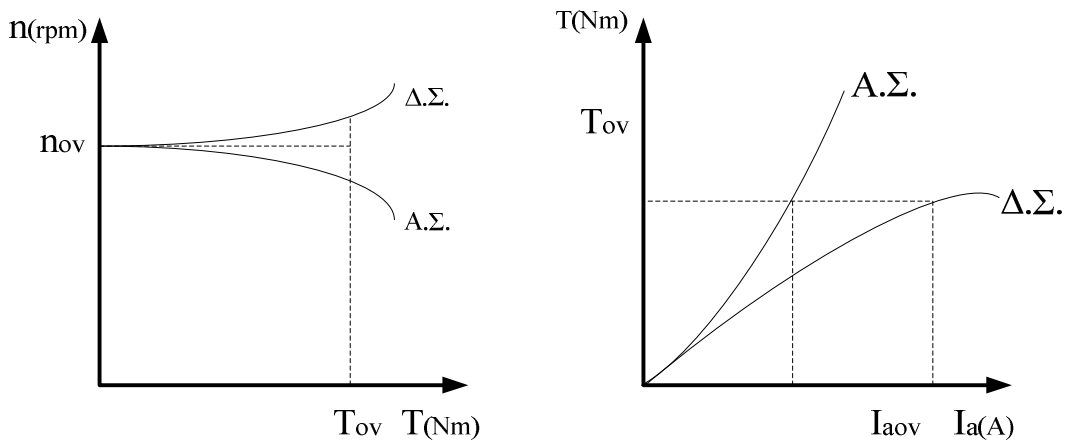
### 1.3.3 Κινητήρες DC σύνθετης διέγερσης

Ο κινητήρας αυτός συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του κινητήρα σειράς (μεγάλη ροπή εκκίνησης) και το χαρακτηριστικό του κινητήρα παράλληλης διέγερσης είναι ότι οι στροφές του δεν μεταβάλλονται πολύ.

Επιπλέον αυτός ο κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει χωρίς φορτίο σε αντίθεση με τον κινητήρα σειράς που δεν ξεκινά χωρίς φορτίο.



Σχήμα 1.6 Ισοδύναμο κύκλωμα DC Κινητήρα σύνθετης διέγερσης



Σχήμα 1.7 Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής και ροπής-ρεύματος τυμπάνου

Ανάλογα με την πολικότητα σύνδεσης του τυλίγματος σειράς σε σχέση με εκείνη της κύριας διέγερσης, για την παραγόμενη ηλεκτρική ροπή ισχύουν τα εξής :

- Προσθετική σύνδεση

$$T = K_m (\Phi_{fp} + \Phi_{fs}) I_a \quad (1.6)$$

- Αφαιρετική σύνδεση

$$T = K_m (\Phi_{fp} - \Phi_{fs}) I_a \quad (1.7)$$

Όπου  $\Phi_{fp}$  η ροή του τυλίγματος παράλληλης διέγερσης και  $\Phi_{fs}$  η ροή του τυλίγματος διέγερσης σειράς.

Οι κινητήρες σύνθετης διέγερσης δεν χρησιμοποιούνται συχνά γιατί μετά από ένα ορισμένο φορτίο παρουσιάζουν μεγάλη αστάθεια λειτουργίας. Η σχέση που μας δίνει τις στροφές ενός κινητήρα σύνθετης διέγερσης είναι:

$$n = \frac{U_a - I_a (R_a + R_{fs})}{\Phi_{fp} - \Phi_{fs}} \quad (1.8)$$

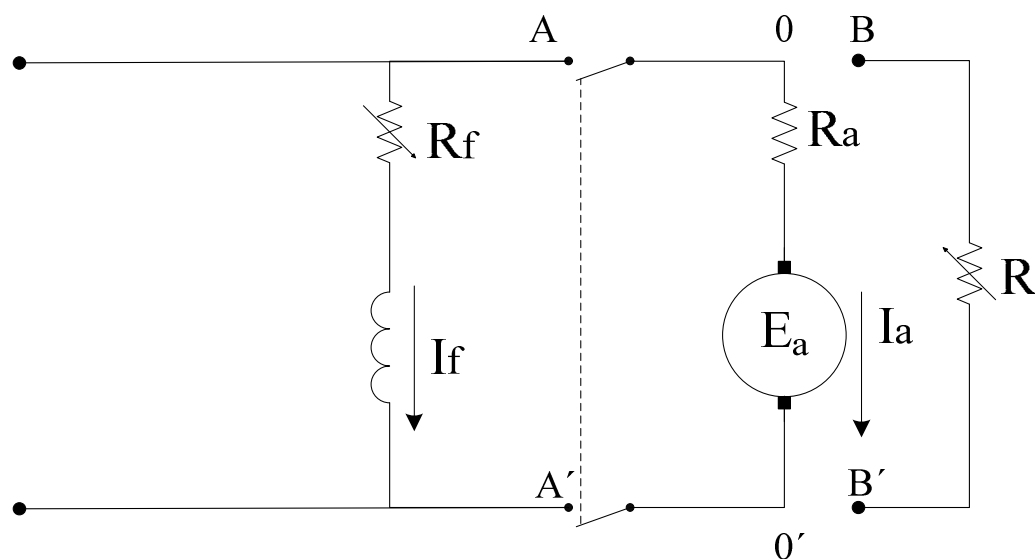
Η αύξηση του φορτίου προκαλεί αύξηση των στροφών και για αρκετά μεγάλα φορτία η  $\Phi_{fs}$  γίνεται μεγαλύτερη από την  $\Phi_{fp}$  με αποτέλεσμα την αλλαγή φοράς του συνισταμένου πεδίου. Αυτό προκαλεί μείωση των στροφών μέχρι μηδενισμού και την αλλαγή φοράς περιστροφής. Όταν χρησιμοποιούνται αυτοί οι κινητήρες πρέπει το τύλιγμα σειράς να απομονώνεται, προς αποφυγή της αντίθετης φοράς περιστροφής του δρομέα λόγω των υψηλών ρευμάτων εκκίνησης, με συνέπεια τις αρκετά αυξημένες τιμές της ροής  $\Phi_{fs}$ .

#### 1.4 Πέδηση Κινητήρων DC

Πέδηση είναι η διαδικασία μείωσης των στροφών του κινητήρα, από έναν αριθμό στροφών  $n$  σε στάση  $N=0$ . Οι μέθοδοι πέδησης είναι :

- Δυναμική Πέδηση
- Αναγεννητική Πέδηση
- Plugging

### 1.4.1 Δυναμική Πέδηση



**Σχήμα 1.8** Δυναμική Πέδηση σε κινητήρα Παράλληλης διέγερσης

Στο σχήμα 1.8 βλέπουμε έναν κινητήρα παράλληλης διέγερσης όπου το τύλιγμα του τυμπάνου έχει την δυνατότητα να συνδεθεί, μέσω ενός μεταγωγικού διακόπτη, με την τροφοδοσία ή να βραχυκυκλωθεί με μια αντίσταση  $R$ . Αν γυρίσουμε τον διακόπτη στην θέση (0,0') ο κινητήρας θα αρχίσει να επιβραδύνει, λόγω των μηχανικών απωλειών (ελεύθερη πέδηση). Αν γυρίσουμε τον διακόπτη στην θέση (B,B') λόγω της  $e_a(t)$  θα δημιουργήσει ένα ρεύμα  $i_a(t)$  όπου :

$$i_a(t) = \frac{e_a(t)}{R_a + R} = \frac{K_g \Phi_n(t)}{R_a + R} \quad (1.9)$$

και

$$T(t) = K_m \Phi i_a(t) \quad (1.10)$$

Το ρεύμα που δημιουργήθηκε θα έχει την αντίθετη φορά από το ρεύμα στην θέση (A,A') με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας ροπής αντίθετης στην ροπή περιστροφής του δρομέα. Αυτό οδηγεί τον δρομέα σε κατάσταση ηρεμίας σε μικρό χρονικό διάστημα και αρκετά ομαλά.

Η γενική μορφή της εξίσωσης των μηχανικών ταλαντώσεων κατά την διάρκεια της πέδησης είναι :

$$J = \frac{d\omega_r(t)}{dt} + B\omega_r(t) = T(t) - T_L(t) < 0 \quad (1.11)$$

Και η μηχανική σταθερά χρόνου για την δυναμική πέδηση είναι :

$$T_{\mu}(\text{sec}) = \frac{J\pi R_{eq}}{B\pi R_{eq} + 30K'\Phi^2} \quad (1.12)$$

Όπου :

$B$  = σταθερά απόσβεσης (Nm\*s)

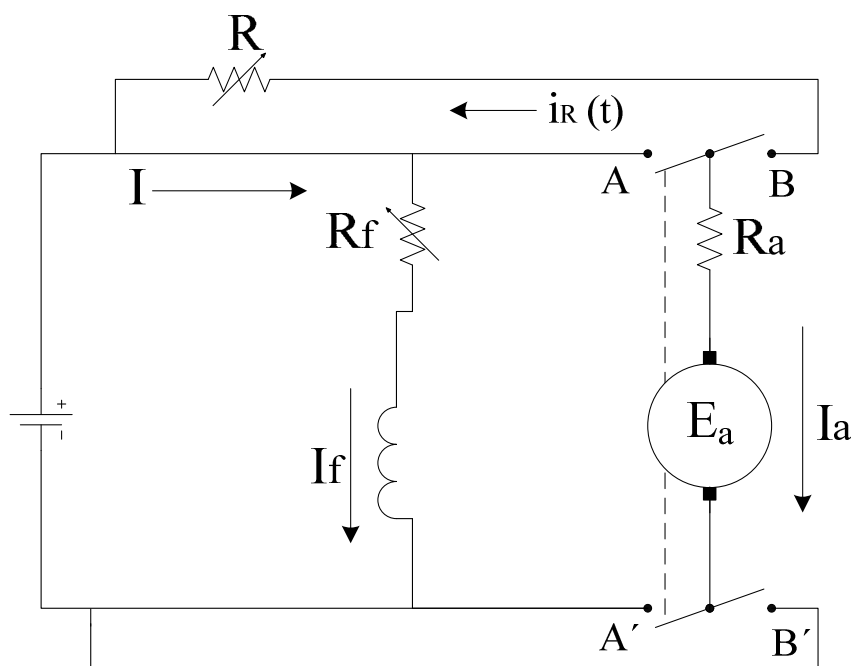
$T_L$  = ροπή φορτίου (Nm)

$\omega_r$  = γωνιακής ταχύτητα περιστροφής δρομέα (r/s)

$$R_{eq} = R_a + R$$

### 1.4.2 Αναγεννητική Πέδηση

Με την αναγεννητική πέδηση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.9, όταν ο διακόπτης βρίσκεται στην θέση (B,B') η ενέργεια που παράγεται από τον κινητήρα επιστρέφει το δίκτυο και δεν καταναλώνεται ως θερμότητα όπως γίνεται στην δυναμική πέδηση.



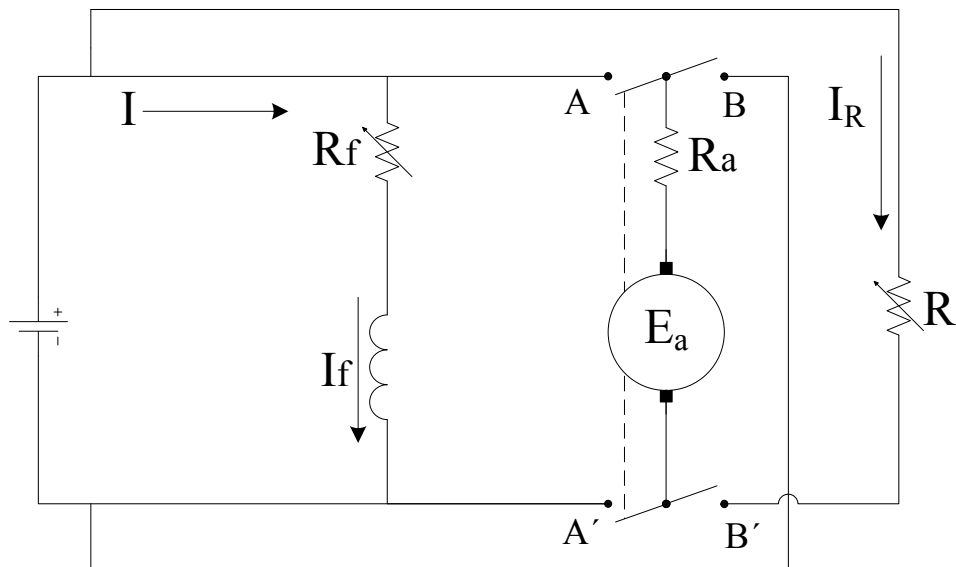
**Σχήμα 1.9** Αναγεννητική πέδηση σε κινητήρα παράλληλης διέγερσης

Το ρεύμα πέδησης δίνεται από την σχέση:

$$i_a(t) = \frac{e_a(t) - v(t)}{R_a + R} = i_R(t) \quad (1.13)$$

Το μέγεθος του ρεύματος πέδησης καθορίζεται από την διαφορά της  $e_a(t)$  και την τάσης τροφοδοσίας. Το ρεύμα με την σειρά του καθορίζει την αναπτυσσόμενη αντίρροπη δηλαδή τον χρόνο πέδησης του κινητήρα.

### 1.4.3 Plugging



**Σχήμα 1.10** βλέπουμε την συνδεσμολογία της μεθόδου plugging.

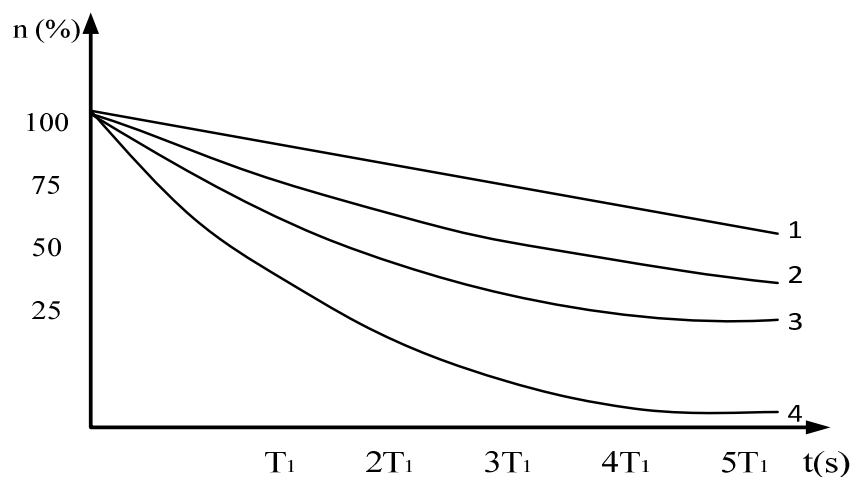
Το ρεύμα τυμπάνου από την σχέση (1.1) είναι :

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a} \quad (1.14)$$

Όταν ο διακόπτης θα είναι στην θέση (B,B') το τύλιγμα τυμπάνου δέχεται την τάση  $U_a + E_a$ . Η τάση αυτή δημιουργεί ένα ανάστροφο ρεύμα στο τύμπανο :

$$I_R = \frac{U_a + E_a}{R_a + R} \quad (1.15)$$

Το οποίο είναι αρκετά μεγάλο με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση του χρόνου πέδησης όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.11.



**Σχήμα 1.11** Χαρακτηριστικές πέδησης

Πρέπει να προσέξουμε ότι ακόμη και όταν μηδενιστούν οι στροφές υπάρχει ρεύμα στο τύμπανο :

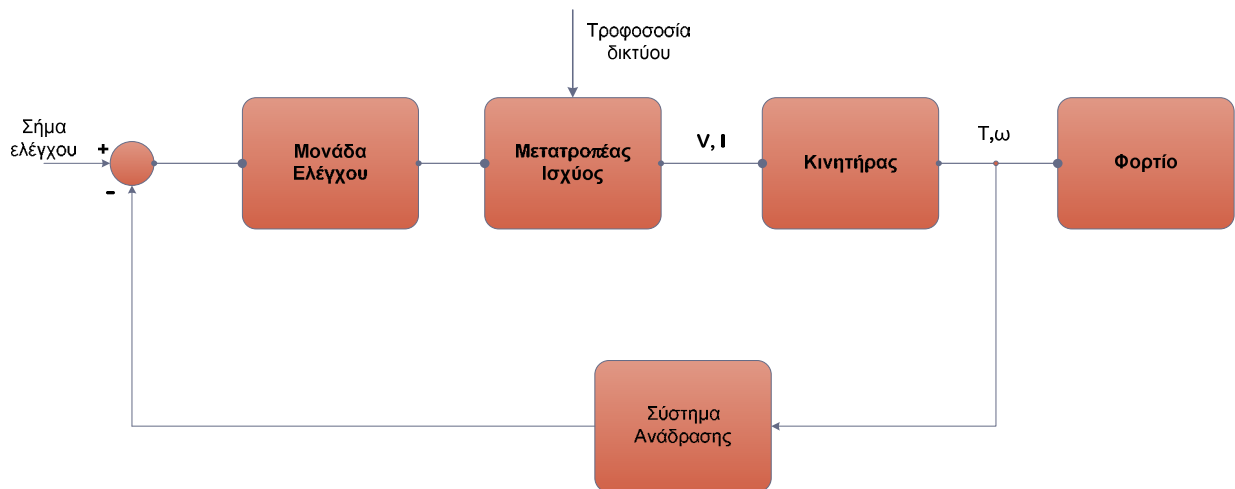
$$I_a(n=0) = \frac{U_a}{R_a + R} \quad (1.16)$$

γί αυτόν τον λόγο θα πρέπει, όταν οι στροφές πλησιάζουν στο μηδέν, η τροφοδοσία να διακόπτεται. Σε διαφορετική περίπτωση ο κινητήρας θα αλλάξει τεταρτημόριο και θα λειτουργεί πάλι σαν κινητήρας αλλά με αντίθετη φορά.

## 1.5 Δομή ενός συστήματος Ηλεκτρικής κίνησης

Η Ηλεκτρική κίνηση σχετίζεται με διατάξεις ελέγχου και οδήγησης ηλεκτρικών κινητήρων με σκοπό την αναπροσαρμογή της κινητήριας μηχανής στις απαιτήσεις του κινούμενου συστήματος. Η σωστή σχεδίαση ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης απαιτεί πλήρη γνώση της στατικής και της δυναμικής συμπεριφοράς όλων των επιμέρους συνιστωσών του, καθόσον με την δράση και την αλληλεπίδραση τους επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η βασική δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης είναι:



**Σχήμα 1.15** Δομικό διάγραμμα ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης

Ο κινητήρας μαζί με τον μετατροπέα ισχύος αποτελούν το λεγόμενο «σύστημα οδήγησης» του μηχανικού φορτίο. Βασικές μεταβλητές ελέγχου είναι η ροπή, η επιτάχυνση, η ταχύτητα, η θέση ή κάποιος συνδυασμός τους. Στα βιομηχανικά συστήματα οδήγησης διακρίνουμε τρεις βασικές κατηγορίες αναλόγως του κινητήρα και της τάσης που χρησιμοποιούν.

- Κινητήρες AC            τροφοδοσία AC
- Κινητήρας DC        τροφοδοσία AC
- Κινητήρας DC        τροφοδοσία DC

Στην πρώτη κατηγορία χρησιμοποιούνται κατά κόρον ασύγχρονοι κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα ενώ στην δεύτερη και στην Τρίτη κατηγορία χρησιμοποιούνται κινητήρες ξένης διέγερσης.

Για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος οδήγησης πρέπει να λάβουμε υπόψη σημαντικές παραμέτρους όπως :

- Αγοραστικό κόστος
- Περιοχή μεταβολής στροφών
- Απόδοση
- Ρύθμιση ταχύτητας
- Τεταρτημόρια λειτουργίας
- Αξιοπιστία
- Συντελεστή φόρτισης και κύκλο λειτουργίας
- Τάση δικτύου
- Επίδραση στο δίκτυο (αρμονικές,  $\cos\phi$ )
- Λειτουργικό κόστος
- Επίδραση στο περιβάλλον

## 1.6 Χαρακτηριστικές Λειτουργίας κινητήρα-φορτίου

Οι χαρακτηριστικές λειτουργίας κινητήρα – φορτίου μας βοηθούν στο να έχουμε την βέλτιστη δυνατή συνεργασία τους . Όταν το σύστημα κίνησης λειτουργεί στην μόνιμη κατάσταση, η ροπή κίνησης και η ροπή περιστροφής είναι σταθερές.

$$\frac{d\omega}{dt} = 0 \quad (1.21)$$

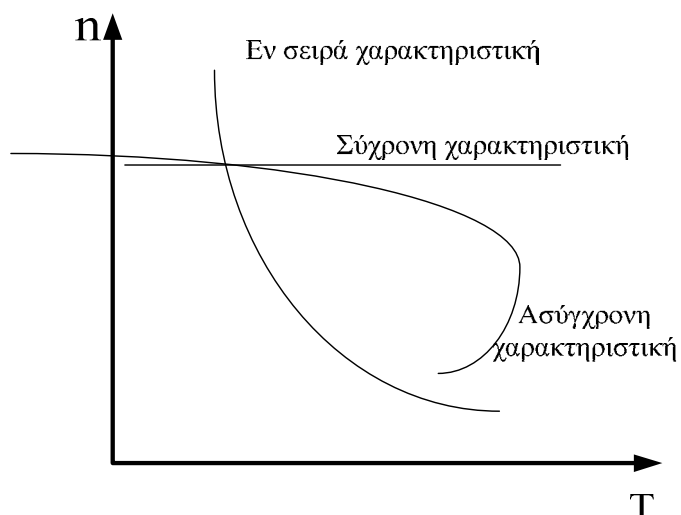
Στην περίπτωση αυτή , εάν αγνοήσουμε τις πάσης φύσεως μηχανικές απώλειες θα ισχύει ότι :

$$T_m = T_L \quad (1.22)$$

Όπου :

$\omega$	=	γωνιακή ταχύτητα περιστροφής,	r/s
$T_m$	=	παραγόμενη ροπή από τν κινητήρα	Nm
$T_L$	=	ροπή φορτίου	Nm





**Σχήμα 1.16** Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας ηλεκτρικών κινητήρων.

Η λειτουργία μόνιμης κατάστασης ενός οποιουδήποτε κινητήρα, ανεξαρτήτως της αρχικής λειτουργίας του, χαρακτηρίζεται από την σχέση μεταξύ παραγόμενης ροπής και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής. Υπάρχουν τρεις βασικές περιπτώσεις χαρακτηριστικών ροπής-ταχύτητας όπως παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα.

- Η σύγχρονη χαρακτηριστική. Την συναντάμε στους σύγχρονους κινητήρες.
- Η ασύγχρονη χαρακτηριστική. Την συναντάμε στους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες και στους κινητήρες DC παράλληλης ή ξένης διέγερσης.
- Η εν σειρά χαρακτηριστική. Την συναντάμε στους κινητήρες DC με διέγερση σειράς.

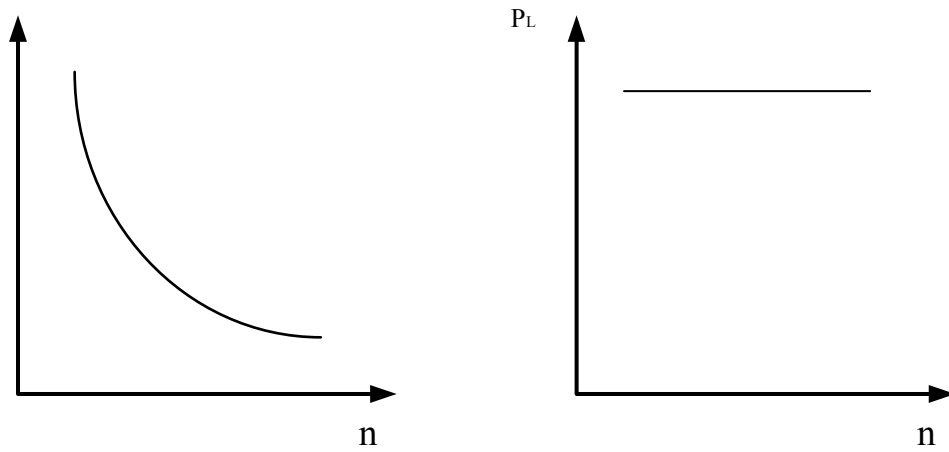
Η χαρακτηριστική (ροπή, ισχύος)-στροφών του φορτίου είναι ένα από τα βασικότερα κριτήρια για την επιλογή του κινητήρα. Οι γενικές αναλυτικές εκφράσεις των μεγεθών  $T_L$  (ροπή-φορτίου) και  $P_L$  (ισχύς-φορτίου) έχουν την μορφή :

$$T_L(\omega) = T_0 + (T_N - T_0) \left( \frac{\omega}{\omega_N} \right), \quad (1.23)$$

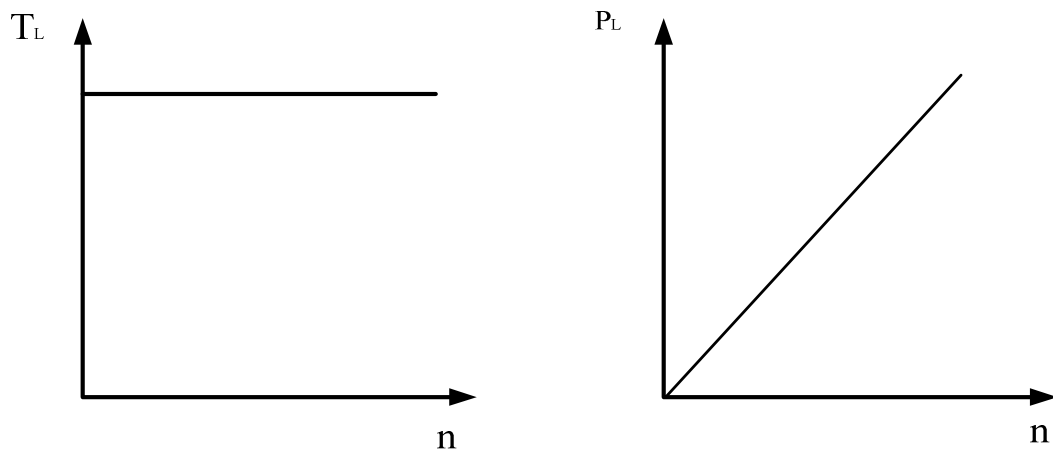
Και

$$P_L(\omega) = \omega T_L(\omega) \quad (1.24)$$

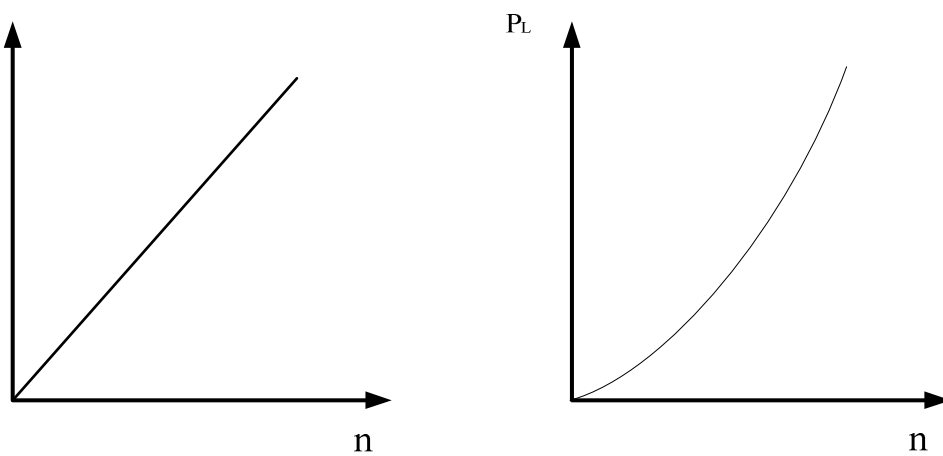
Παρακάτω βλέπουμε τις χαρακτηριστικές ροπής και ισχύος για διάφορα φορτία.



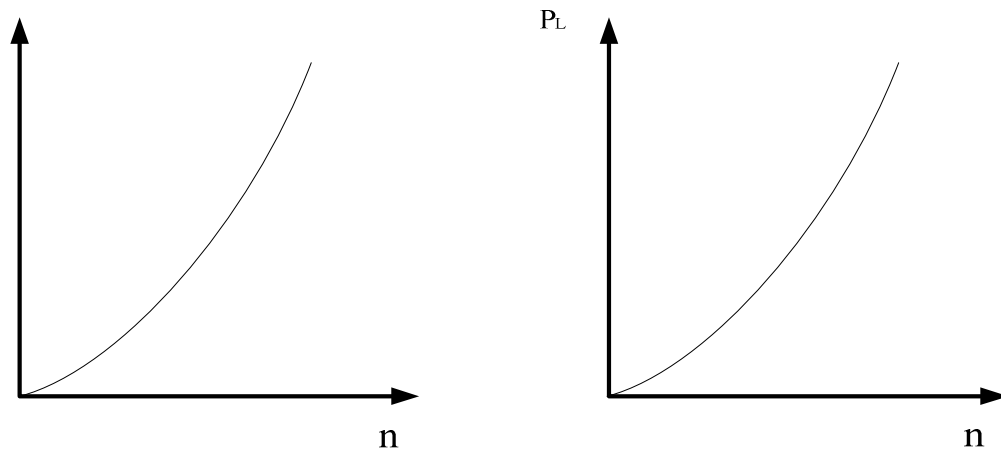
Σχήμα 1.17 Φορτίο σταθερής ισχύος



Σχήμα 1.18 Φορτίο σταθερής ροπής



Σχήμα 1.19 Φορτίο γραμμικής ροπής

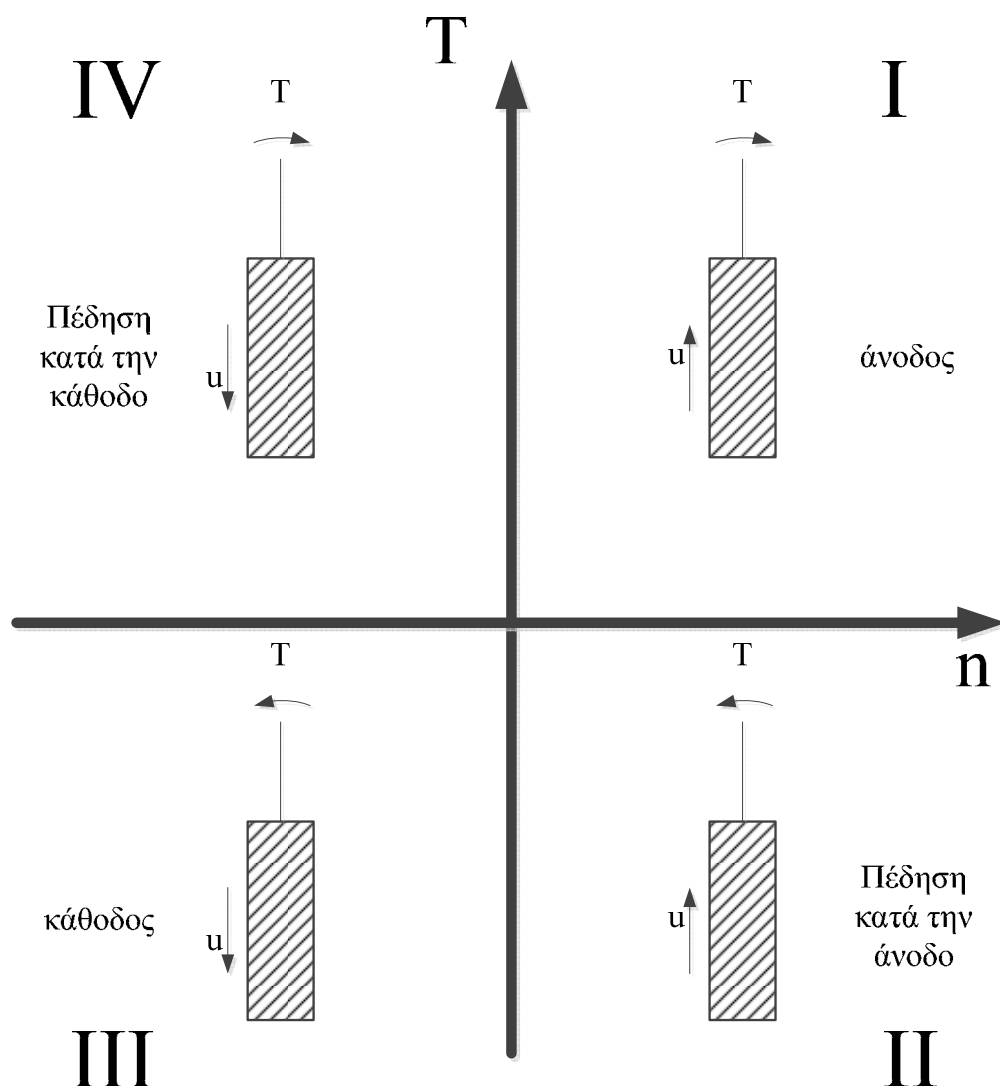


Σχήμα 1.20 Φορτίο παραβολικής ροπής

### 1.7 Τεταρτημώρια Λειτουργίας

Για να είμαστε σε θέση να ελέγξουμε όλους τους παραπάνω τύπους φορτίων, το σύστημα οδήγησης θα πρέπει να λειτουργεί και στα τέσσερα τεταρτημώρια της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών. Σαν παράδειγμα θα αναφέρουμε την λειτουργία ενός ανελκυστήρα όπου όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, στο πρώτο και στο δεύτερο τεταρτημώριο έχουμε τις φάσεις της ανόδου και της πέδησης κατά την άνοδο ενώ στο τρίτο και τέταρτο τεταρτημώριο έχουμε την κάθοδο και την πέδηση κατά την κάθοδο.

Στο δεύτερο και τέταρτο τεταρτημώριο ο κινητήρας συμπεριφέρεται ως γεννήτρια και ανάλογα με το είδος της πέδησης μπορούμε να επιστρέψουμε ενέργεια στο δίκτυο.



Σχήμα 1.21 Λειτουργία ανελκυστήρα και στα τέσσερα τεταρτημώρια.

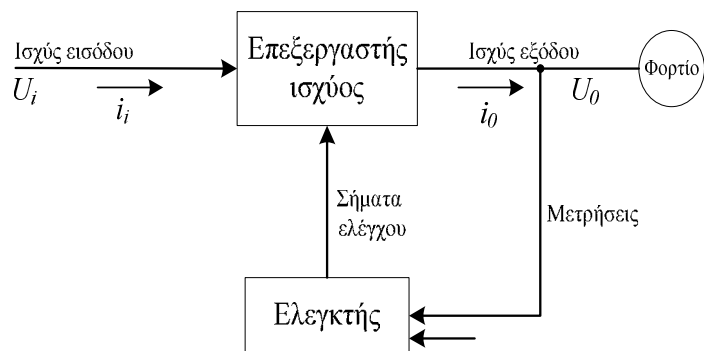
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος

#### 2.1 Εισαγωγή

Η αποστολή των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος με την ευρεία έννοια του όρου είναι η επεξεργασία και ο έλεγχος της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με την παροχή τάσεων και ρευμάτων με βέλτιστα διαμορφωμένη μορφή, κατάλληλη για το χρησιμοποιούμενο φορτίο. Στο σχήμα 2.0 δίνεται το λειτουργικό διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού συστήματος ισχύος. Η ισχύς εισόδου του μετατροπέα ισχύος παρέχεται συνήθως (αλλά όχι πάντοτε) από το δίκτυο (μονοφασικό ή τριφασικό) και έχει συχνότητα 50 ή 60 Hz. Η γωνία φάσης ανάμεσα στην τάση και το ρεύμα εισόδου εξαρτάται από την τοπολογία και τον έλεγχο του μετατροπέα ισχύος. Η επεξεργασμένη έξοδος (τάση, ρεύμα, συχνότητα, αριθμός φάσεων) είναι αυτή που ταιριάζει στο φορτίο. Αν ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή τάσεως, το ρεύμα εξόδου και η διαφορά φάσεως ανάμεσα στο ρεύμα και την τάση εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του φορτίου. Συνήθως η έξοδος του μετατροπέα ισχύος συγκρίνεται με μια επιθυμητή είσοδο (είσοδο αναφοράς) και το μεταξύ τους σφάλμα ελαχιστοποιείται με την βοήθεια ενός ελεγκτή. Σ' αυτά τα συστήματα η ροπή της ισχύος πρέπει να είναι αμφίδρομη, ώστε να εναλλάσσονται οι ρόλοι της εισόδου και της εξόδου.

Τα τελευταία χρόνια ο τομέας των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος γνώρισε μεγάλη ανάπτυξη, η οποία οφείλεται στην συμβολή αρκετών παραγόντων. Ο ελεγκτής στο σχήμα 2.0 αποτελείται από αναλογικά ολοκληρωμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα ή και από ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος (DSP). Οι επαναστατικές πρόοδοι, που έχουν γίνει στην μικροηλεκτρονική, έχουν επιτρέψει στην ανάπτυξη τέτοιων ελεγκτών. Ακόμη, αυτές οι πρόοδοι στην τεχνολογία κατασκευής των ημιαγωγών έκαναν δυνατή την σημαντική αύξηση των τάσεων και των ρευμάτων, που μπορούν να χειριστούν οι ημιαγωγοί ισχύος, και τη αύξηση των ταχυτήτων μετάβασης. Επιπλέον, έχει διευρυνθεί σημαντικά και η αγορά των ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος. Οι βιομηχανίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των Η.Π.Α. εκτιμούν ότι μετά το έτος 2000 περισσότερα από το 50% των φορτίων θα τροφοδοτούνται μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος, όπως αυτό του



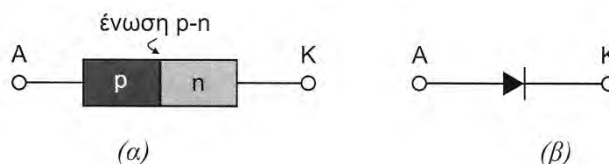
Σχήμα 2.0: Λειτουργικό διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού συστήματος ισχύος

σχήματος 2.0. Αυτή η ανάπτυξη της αγοράς θα είναι μεγαλύτερη σε άλλα μέρη του κόσμου, όπου το κόστος της ενέργειας είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό στις Η.Π.Α.

## 2.2 Δίοδος

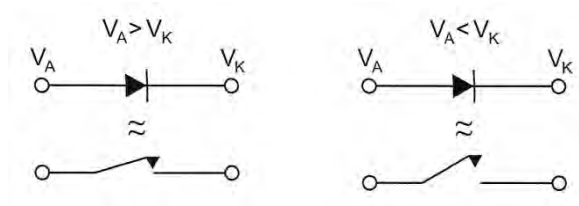
Η δίοδος κατασκευάζεται από δύο στρώματα ημιαγώγιμου υλικού (συνήθως πυριτίου), τύπου 'p' και τύπου 'n', σχηματίζοντας μια ένωση p-n, σχήμα 2.1.

Οι δύο ακροδέκτες της διόδου, η άνοδος (**anode**) και η κάθοδος (**cathode**), συνδέονται με τα αντίστοιχα ημιαγώγιμα στρώματα μέσω κατάλληλων μεταλλικών επαφών. Η δίοδος είναι ένας μη ελεγχόμενος διακόπτης και αυτό είναι προφανές, διότι δεν διαθέτει επιπλέον ακροδέκτη ελέγχου για τον λόγο της έναυσης ή της σβέσης. Πράγματι, όπως θα φανεί στην συνέχεια, το εάν η δίοδος βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής ή μη, καθορίζεται από τις λειτουργικές συνθήκες του κυκλώματος ισχύος στο οποίο είναι συνδεδεμένη.



**Σχήμα 2.1:** Δίοδος (α) κατασκευαστική σύνθεση, (β) κυκλωματικό σύμβολο

Πρακτικά μια δίοδος βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής όταν είναι ορθά πολωμένη, δηλαδή το δυναμικό του ακροδέκτη της ανόδου είναι θετικότερο του δυναμικού του ακροδέκτη της καθόδου. Σε αντίθετη περίπτωση, είναι ανάστροφα πολωμένη και βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής, σχήμα 2.2.

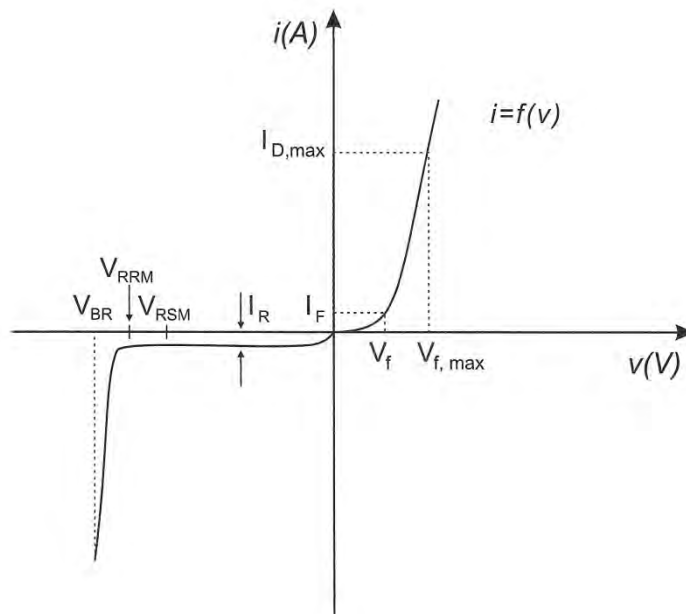


**Σχήμα 2.2:** Συνθήκες αγωγής-αποκοπής διόδου

### 2.2.1 Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος διόδου

Τα διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη, η γνώση των οποίων είναι απαραίτητη για την ορθή επιλογή μιας διόδου για συγκεκριμένη εφαρμογή, απορρέουν από την χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος αυτής. Σχήμα 2.3

Σύμφωνα με το σχήμα 2.3, η διάδος λειτουργεί σε δύο τεταρτημόρια. Στο πρώτο (ορθή πόλωση) και στο τρίτο (ανάστροφη πόλωση). Κατά την ορθή πόλωση και για τάσεις μικρότερες της τάσης αποκοπής-έναυσης ' $V_f$ ' (περίπου 0.6-0.7V), το ρεύμα ορθής φοράς είναι αρκετά μικρό (της τάξης του 1% του ονομαστικού), δηλαδή πρακτικά η διάδος βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής. Όταν η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα της διόδου γίνεται μεγαλύτερη της  $V_f$ , εμφανίζεται απότομη αύξηση του ρεύματος. Υπάρχει ένα μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα ορθής φοράς ' $I_{D,max}$ ' για συνεχή λειτουργία (υπό συγκεκριμένες συνθήκες ψύξης), το οποίο χαρακτηρίζει την ασφαλή λειτουργία της διόδου και το οποίο προφανώς σχετίζεται άμεσα με την μέγιστη ισχύ θερμικών απωλειών της διόδου. Κατά την ανάστροφη πόλωση και για τάσεις μικρότερες της τάσης διάσπασης της διόδου ' $V_{BR}$ ' (**breakdown voltage**), υπάρχει ένα ανάστροφο ρεύμα κόρου ή ρεύμα διαρροής της τάξης των nA. Στις συνηθισμένες πρακτικές εφαρμογές, το ρεύμα αυτό αμελείται. Για ανάστροφες τάσεις μεγαλύτερες της τάσης διάσπασης, εμφανίζεται απότομη αύξηση του ανάστροφου ρεύματος (υπό σταθερή τάση) λόγω του φαινομένου της χιονοστιβάδας με αποτέλεσμα την μόνιμη καταστροφή της διόδου.



Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος διόδου

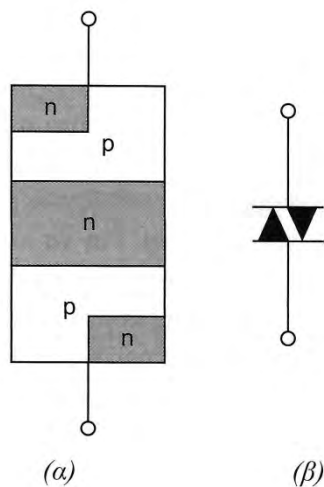
Άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη στην ανάστροφη πόλωση, είναι η μέγιστη επαναλαμβανόμενη ανάστροφη τάση ' $V_{RRM}$ ' (repetitive peak reverse voltage), η οποία

αντιπροσωπεύει την μέγιστη με επαναλαμβανόμενο ρυθμό συνεχή τάση που μπορεί να δεχθεί χωρίς να καταστραφεί η δίοδος. Επίσης η μέγιστη μη επαναλαμβανόμενη τάση ' $V_{RSM}$ ' (**non-repetitive peak reverse voltage**), αντιπροσωπεύει την μέγιστη μη επαναλαμβανόμενη ανάστροφη τάση που μπορεί να δεχθεί η δίοδος.

$$\text{Προφανώς } |V_{RSM}| > |V_{RRM}|.$$

### 2.3 Δίοδος δύο κατευθύνσεων (Diac)

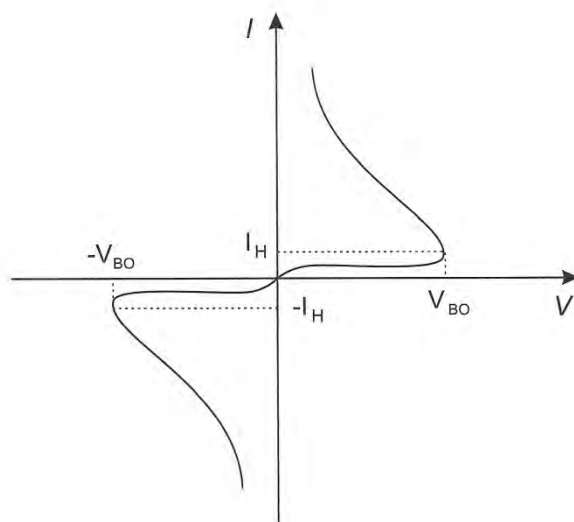
Η δίοδος δύο κατευθύνσεων, αποτελεί μη ελεγχόμενο διακόπτη δύο κατευθύνσεων (διακόπτης εναλλασσομένου). Η κρυσταλλική δομή και το κυκλωματικό σύμβολο του συγκεκριμένου στοιχείου, δείχνονται στο σχήμα 2.4.



**Σχήμα 2.4:** Δίοδος δύο κατευθύνσεων (Diac)

(α) κρυσταλλική δομή (β) κυκλωματικό σύμβολο

Στην ουσία το στοιχείο αυτό, προέρχεται από την αντιπαράλληλη σύνδεση δύο δίοδων τεσσάρων στρωμάτων (δίοδοι Shockley ή δίοδοι pnpn). Η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος του diac, δείχνεται στο σχήμα 2.5.





### Σχήμα 2.5: Χαρακτηριστική τάσης - ρεύματος Diac

Σύμφωνα με το σχήμα 2.5, το diac πρακτικά βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής, για κάθε τάση

$$-V_{BO} < V < V_{BO} \quad (2.1)$$

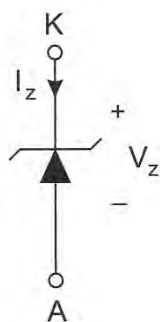
Όπου

$V_{BO}$ , τάση διάσπασης (V)

Για κάθε τάση  $|V| > |\pm V_{BO}|$ , το diac μεταβαίνει από την κατάσταση αποκοπής σε κατάσταση αγωγής. Δηλαδή, η ωμική αντίσταση του στοιχείου ελαττώνεται σημαντικά και το ρεύμα που το διαρρέει, περιορίζεται πλέον από τις συνθήκες του κυκλώματος στο οποίο είναι συνδεδεμένο. Για να επανέλθει το diac σε κατάσταση αποκοπής, θα πρέπει το ρεύμα του να γίνει μικρότερο από το αντίστοιχο ρεύμα συγκράτησης. Τυπικές τιμές της τάσης κυμάτωσης  $V_{BO}$ , κυμαίνονται στα όρια από μερικές δεκάδες έως και μερικές εκατοντάδες Volts. Το diac χρησιμοποιείται συχνά σε κυκλώματα έναυσης των θυρίστωρ.

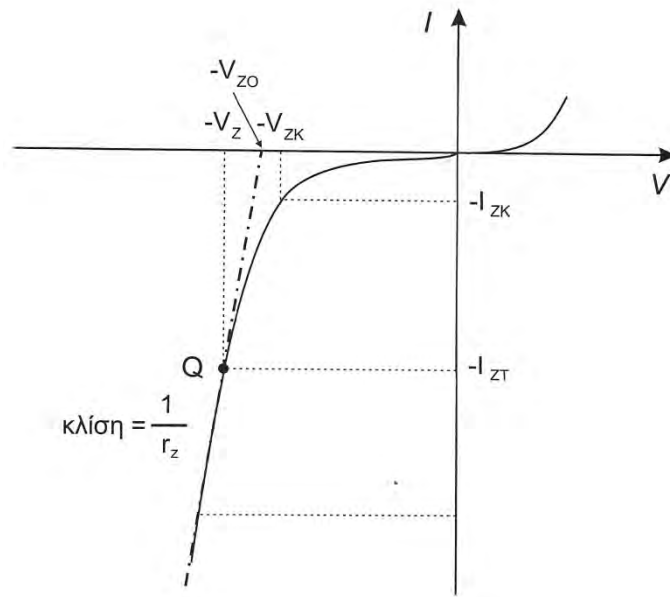
## 2.4 Δίοδος Zener

Η απότομη κλίση της χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος της διόδου στην περιοχή διάσπαση, (σχήμα 2.3) και η σχεδόν σταθερή πτώση τάσης που η κλίση της αντιπροσωπεύει, καθιστά την διόδο στην συγκεκριμένη περιοχή κατάλληλη για χρήση σε κυκλώματα σταθεροποίησης της τάσης. Η διόδος Zener (ή διόδος διάσπασης), σχήμα 2.6, είναι μια ειδικά κατασκευασμένη διόδος, η οποία μπορεί να λειτουργεί στην περιοχή διάσπασης. Όπως προαναφέραμε, η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος της διόδου Zener, δεν διαφέρει από εκείνη της κοινής διόδου. Στο σχήμα 2.7, δείχνεται η χαρακτηριστική  $V - I$ , με έμφαση στην περιοχή διάσπασης.



Σχήμα 2.6: Κυκλωματικό σύμβολο διόδου Zener

Παρατηρούμε σύμφωνα με το σχήμα 2.7 ότι, η καμπύλη της διόδου για ανάστροφα ρεύματα μεγαλύτερα από το ρεύμα γονάτου ( $I_{ZK}$ ), είναι σχεδόν ευθεία γραμμή.



**Σχήμα 2.7:** Χαρακτηριστική V-I, διόδου Zener

Συνήθως, ο κατασκευαστής δίνει την πτώση τάσης κατά μήκος της Zener, για κάποια καθορισμένη πειραματική τιμή του ρεύματος  $I_{ZT}$  (ρεύμα δοκιμής). Η αντίσταση  $r_z$  που ορίζεται στο σημείο δοκιμής, είναι γνωστή ως δυναμική αντίσταση (ή αντίσταση μικρών μεταβολών) της διόδου.

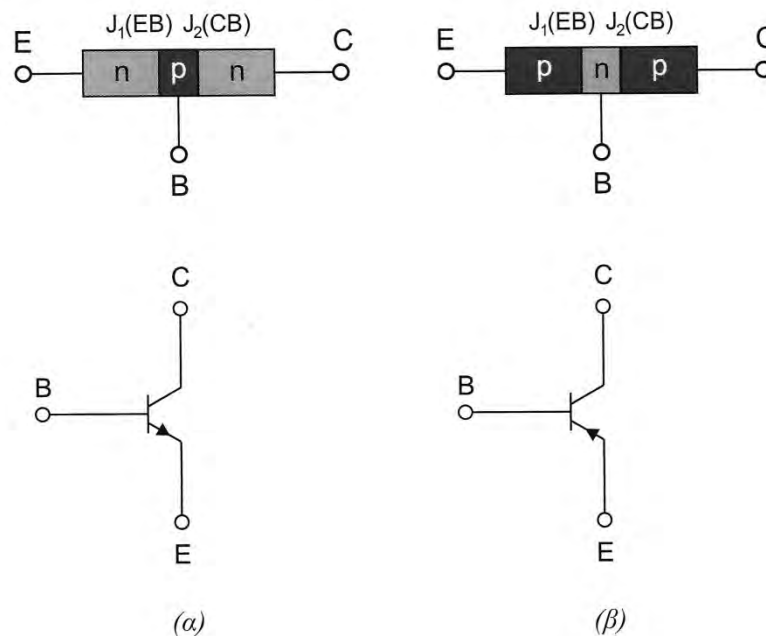
$$r_z = \frac{\Delta V}{\Delta I|_Q} \quad (2.2)$$

Οι διόδοι Zener κατασκευάζονται με τάσεις  $V_Z$ , από μερικά volts έως και μερικές εκατοντάδες volts. Εκτός από τις τιμές  $V_Z$  (για το αντίστοιχο  $I_{ZT}$ ),  $I_Z$  και  $I_{ZK}$ , ο κατασκευαστής καθορίζει επίσης και την μέγιστη ισχύ  $P_{max}$ , για την οποία το στοιχείο μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια.

## 2.5 Διπολικό Τρανζίστορ

Το διπολικό τρανζίστορ (**bipolar transistor junction-BTJ**) ή τρανζίστορ επαφής, έχει τρεις ακροδέκτες, τον εκπομπό (**emitter**), την βάση (**base**) και τον συλλέκτη (**collector**). Ο ακροδέκτης της βάσης αποτελείτο ηλεκτρόδιο ελέγχου. Ο εκπομπός είναι μια έντονα εμπλουτισμένη περιοχή, προορισμός του είναι να εκπέμπει ηλεκτρόνια προς την βάση. Η βάση είναι λιγότερο εμπλουτισμένη και πολύ λεπτή περιοχή. Το πάχος της, επιτρέπει στα περισσότερα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από τον εκπομπό, να φτάνουν στον συλλέκτη. Το επίπεδο εμπλουτισμού του συλλέκτη,

βρίσκεται ανάμεσα σε εκείνο του εκπομπού και της βάσης. Υπάρχουν δύο τύποι διπολικοί τρανζίστορ, το 'npn' και το συμπληρωματικό του το 'pnp', σχήμα 2.8.



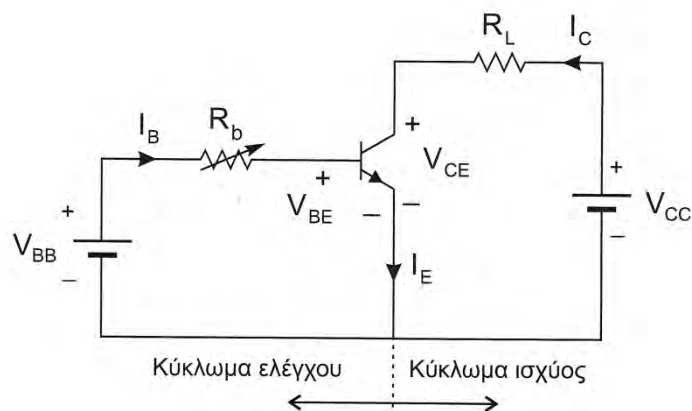
**Σχήμα 2.8:** Κατασκευαστική δομή και κυκλωματικό σύμβολο διπολικού τρανζίστορ (α) τύπος npn (β) τύπος pnp

### 2.5.1 Περιοχές Λειτουργίας

Το διπολικό τρανζίστορ, είναι στοιχείο ελεγχόμενο από ρεύμα. Δηλαδή, με την ρύθμιση ενός μικρού ρεύματος του ρεύματος βάσης, επιτυγχάνεται ο έλεγχος του κατά πολύ μεγαλύτερου ρεύματος του συλλέκτη. Το διπολικό τρανζίστορ μπορεί να λειτουργήσει σε τρεις διαφορετικές περιοχές, την περιοχή αποκοπής (διακόπτης ανοιχτός), την ενεργό περιοχή (ως ενισχυτής) και την περιοχή κορεσμού (διακόπτης κλειστός). Κάθε περιοχή, χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες πολικότητες διαφορών δυναμικού στις δύο επαφές ( $J_1$  και  $J_2$ ) του τρανζίστορ. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή αποκοπής η ένωση  $J_2$  είναι ανάστροφα πολωμένη, το ίδιο ισχύει και για την ένωση  $J_1$ . Στην ενεργό περιοχή η ένωση  $J_2$  είναι ορθά πολωμένη, ενώ η ένωση  $J_1$  ανάστροφα πολωμένη. Τέλος στην περιοχή κορεσμού και οι δύο ενώσεις είναι ορθά πολωμένες.

## 2.5.2 Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

Στην συνδεσμολογία κοινού εκπομπού, ο ακροδέκτης του εκπομπού είναι κοινός στους βρόχους της βάσης και του συλλέκτη, σχήμα 2.9.



**Σχήμα 2.9:** Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

Μέσο της ρυθμιστικής αντίστασης  $R_b$  του κυκλώματος ελέγχου (ή κυκλώματος οδήγησης), ελέγχεται η ροή ρεύματος βάσης και κατά συνέπεια η ροή ρεύματος του συλλέκτη ή ισοδύναμα η ροή ισχύος στην αντίσταση φορτίου  $R_L$ . Με βάση τους νόμους τάσης-ρεύματος του Kirchhoff, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις

$$V_{BB} = I_B R_b + V_{BE} \quad , \quad V \quad (2.3)$$

$$V_{CC} = I_C R_L + V_{CE} \quad , \quad V \quad (2.4)$$

$$I_E = I_C + I_B \quad , \quad A \quad (2.5)$$

Η (1.13) σε άξονες  $(V_{CE}, I_C)$  παριστάνει μια ευθεία γραμμή, η οποία είναι γνωστή ως "χαρακτηριστική ευθεία" φορτίου. Όπως θα δούμε στην συνέχεια, το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ, καθορίζεται από το σημείο τομής της ευθείας φορτίου με τις χαρακτηριστικές τάσεις – ρεύματος του τρανζίστορ. Το ρεύμα της βάσης είναι αρκετά μικρότερο του ρεύματος συλλέκτη, επομένως σύμφωνα με την (2.5) τα ρεύματα εκπομπού και συλλέκτη είναι περίπου ίδια. Το πόσο κοντά βρίσκονται οι τιμές των δύο αυτών ρευμάτων, καθορίζεται από ένα μέγεθος το οποίο είναι γνωστό ως 'dc άλφα' του τρανζίστορ. Δηλαδή:

$$a_{dc} = \frac{I_C}{I_E} \quad (2.6)$$

Στα συνηθισμένα τρανζίστορ του εμπορίου, το συγκεκριμένο μέγεθος κυμαίνεται στα όρια

$$0.95 < a_{dc} < 0.99 \quad (2.7)$$

Ένα επίσης αρκετά σημαντικό μέγεθος, είναι ο συντελεστής ενίσχυσης ρεύματος γνωστός και ως dc κέρδος ρεύματος. Συμβολίζεται ως  $\beta_{dc}$  ή  $h_{FE}$  και δίνεται από την σχέση

$$\beta_{dc} = h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \quad (2.8)$$

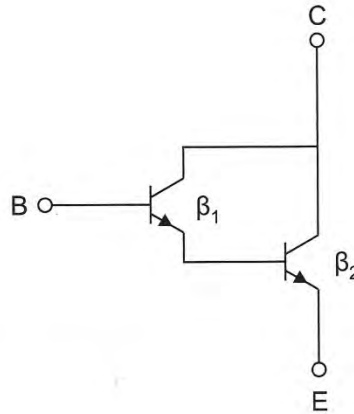
Οι τιμές του συντελεστή ενίσχυσης, για συνηθισμένα τρανζίστορ του εμπορίου κυμαίνονται στα όρια

$$20 < \beta_{dc} < 200 \quad (2.9)$$

Στις περιπτώσεις που απαιτείται μεγαλύτερος συντελεστής ενίσχυσης, γίνεται χρήση της διάταξης Darlington, σχήμα 2.10.

Στην περίπτωση αυτήν, το συνολικό κέρδος πρακτικά ισούται με το γινόμενο των επιμέρους κερδών των δύο τρανζίστορ. Δηλαδή

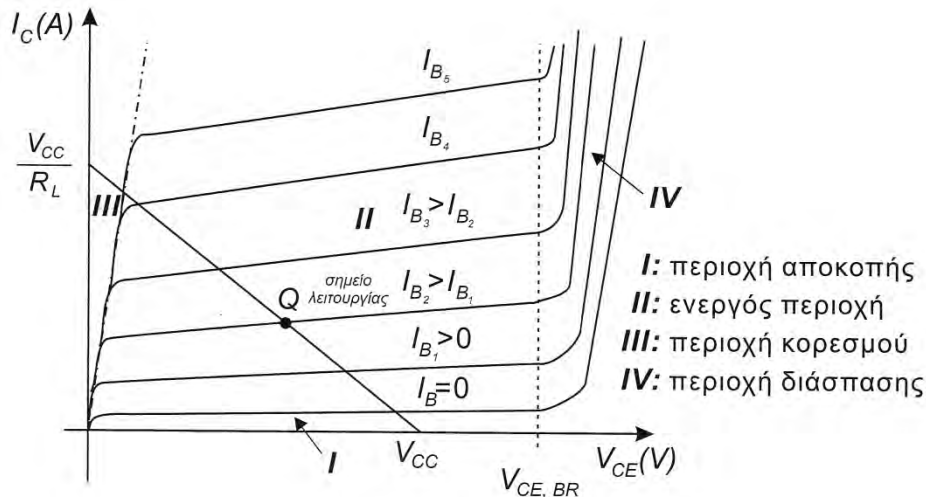
$$\beta = \beta_1 \beta_2 \quad (2.10)$$



Σχήμα 2.10: Διάταξη Darlington

### 2.5.3 Χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος

Το διπολικό τρανζίστορ, λειτουργεί μόνο στο πρώτο τεταρτημόριο. Οι χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος ( $V_{CE}, I_C$ ) με παράμετρο το ρεύμα βάσης (καθώς και η χαρακτηριστική ευθεία φορτίου), δείχνοντας στο σχήμα 2.11. Στην περιοχή αποκοπής, υπάρχει μόνο ένα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής στην επαφή του συλλέκτη. Πρακτικά, στην συγκεκριμένη περιοχή το τρανζίστορ θεωρείται ως ανοιχτός διακόπτης. Στην περιοχή κόρου (σχεδόν κατακόρυφο τμήμα κοντά στην αρχή των αξόνων), ανεξαρτήτως του ρεύματος στον συλλέκτη, η τάση μεταξύ συλλέκτη-εκπομπού, παραμένει σταθερή σε μια πολύ μικρή τιμή της τάξης των μερικών δεκάτων βολτ.



Σχήμα 2.11 : Χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος, συνδεσμολογία CE

Προφανώς, στην συγκεκριμένη περιοχή το τρανζίστορ μπορεί να θεωρηθεί ως ένας κλειστός διακόπτης. Επομένως, εάν επιθυμούμε διακοπτική λειτουργία του τρανζίστορ, η λειτουργία του περιορίζεται στις περιοχές I και III της χαρακτηριστικής, δηλαδή στις περιοχές αποκοπής και κορεσμού.

Στην ενεργό περιοχή οι χαρακτηριστικές είναι περίπου οριζόντιες, δηλαδή το ρεύμα συλλέκτη για σταθερό ρεύμα βάσης πρακτικά παραμένει σταθερό ανεξαρτήτως των μεταβλητών της τάσης συλλέκτη εκπομπού. Στην συγκεκριμένη περιοχή, το ρεύμα συλλέκτη ισούται περίπου με το γινόμενο του συντελεστή ενίσχυσης και του ρεύματος βάσης. Τέλος, υπάρχει και η περιοχή διάσπασης, η οποία προφανώς αποτελεί απαγορευμένη περιοχή. Όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των επαφών συλλέκτη-εκπομπού, ξεπεράσει μια χαρακτηριστική τιμή της  $V_{BR,CE}$  ( τάση διάσπασης), θα έχει ως αποτέλεσμα την μόνιμη καταστροφή του τρανζίστορ λόγω υπερβολικής κατανάλωσης ισχύος. Στην περιοχή κορεσμού, ισχύει

$$I_{C,sat} = \frac{V_{CC} - V_{CE,sat}}{R_L} = \frac{V_{CC}}{R_L} \quad (2.11)$$

Το ρεύμα βάσης που μόλις προκαλεί τον κορεσμό για συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, βάσει της (2.8) είναι

$$I_{B,sat} = \frac{I_{C,sat}}{\beta_{dc}} \quad (2.12)$$

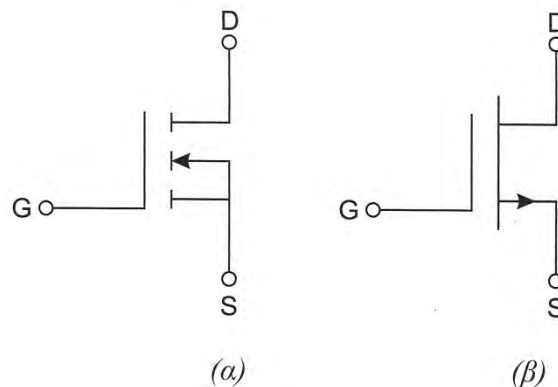
Όταν το ρεύμα βάσης γίνει μεγαλύτερο από  $I_{B,sat}$  (υπέροδηση του τρανζίστορ), το ρεύμα του συλλέκτη δεν πρόκειται να αυξηθεί περαιτέρω, επειδή η επαφή του συλλέκτη δεν είναι πλέον πολωμένη ανάστροφα. Με άλλα λόγια το  $I_{C,sat}$  είναι το μέγιστο ρεύμα συλλέκτη που μπορεί να προκληθεί για δεδομένη αντίσταση φορτίου  $R_L$  και δεδομένη τάση  $V_{CC}$ . Συνήθως για την εξασφάλιση της λειτουργίας στην περιοχή κορεσμού, έναντι πιθανών διακυμάνσεων της τάσης τροφοδοσίας (οι οποίες μπορεί να μετατοπίσουν το

σημείο λειτουργίας στην ενεργό περιοχή με καταστροφικές συνέπειες για το τρανζίστορ λόγω υπερβολικής κατανάλωσης ισχύος), συνηθίζεται η υπεरोδήγηση του τρανζίστορ σε μερικά επίπεδα βέβαια, διότι επηρεάζεται άμεσα (αυξάνεται) ο χρόνος σβέσης.

## 2.6 Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου – MOSFET

Το MOSFET ανήκει στην κατηγορία των FET's (field effect transistors). Η φύση της λειτουργίας του, είναι τελείως διαφορετική από εκείνη των διπολικών τρανζίστορ. Στα διπολικά τρανζίστορ, το ρεύμα οφείλεται σε δύο είδη φορέων (οπές και ηλεκτρόνια) και ο μηχανισμός δημιουργίας του ρεύματος οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ανομοιόμορφη κατανομή των φορτίων (ρεύματα διάχυσης). Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου είναι μονοπολικά τρανζίστορ, δηλαδή το ρεύμα οφείλετε σε έναν μόνο τύπο φορτίου, σε ηλεκτρόνια (n-καναλιού) ή σε οπές (p-καναλιού). Επιπλέον τα ρεύματα των MOSFET, είναι ρεύματα ολίσθησης (αγωγιμότητας) και όχι διάχυσης και τα οποία ελέγχονται από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί η τάση που εφαρμόζεται από ηλεκτρόδιο ελέγχου. Τα ρεύματα αυτά ρέουν σε μια συγκεκριμένη περιοχή στο σώμα του τρανζίστορ (η οποία δημιουργείται λόγω του πεδίου), η οποία ονομάζεται κανάλι. Από την οικογένεια των MOSFET, ως διακοπτικά στοιχεία ισχύος, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα MOSFET πύκνωσης n-καναλιού, σχήμα 2.12.

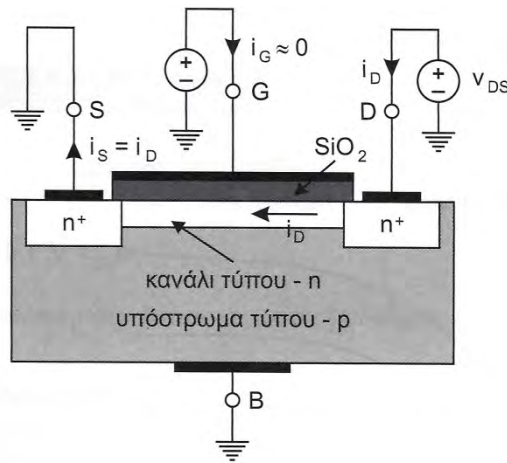
Ο ακροδέκτης G, είναι το ηλεκτρόδιο ελέγχου (πύλη-Gate), οι άλλοι δύο ακροδέκτες, S και D ονομάζονται αντίστοιχα πηγή (Source) και υποδοχή (Drain). Η δομή του MOSFET πύκνωσης n-καναλιού δείχνεται στο σχήμα 2.13.



**Σχήμα 2.12:** Κυκλωματικό σύμβολο MOSFET πύκνωσης – n-καναλιού (α) πλήρες (β) απλοποιημένο

Επειδή το ηλεκτρόδιο της πύλης είναι μονωμένο από το υπόλοιπο σώμα του τρανζίστορ (με στρώμα διοξειδίου του πυριτίου -  $SiO_2$ ), το ρεύμα της πύλης για την οδήγηση του τρανζίστορ είναι εξαιρετικά μικρό ( της τάξης των  $10^{-15} mA$  ) και πρακτικά θεωρείται μηδενικό. Αυτό σημαίνει ότι, το μονοπολικό τρανζίστορ

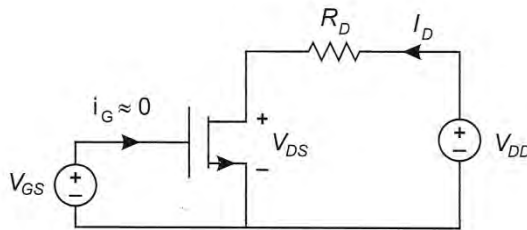
(MOSFET) σε αντίθεση με το διπολικό τρανζίστορ (BJT), είναι στοιχείο ελεγχόμενο από τάση.



**Σχήμα 2.13:** Δομή MOSFET πύκνωσης n-καναλιού

### 2.6.1 Χαρακτηριστικές $i_D = f(v_{DS})$

Έστω το κύκλωμα του σχήμα 2.14. Το μονοπολικό τρανζίστορ, λειτουργεί μόνο στο πρώτο τεταρτημόριο. Οι χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος ( $V_{DS}, i_D$ ) με παράμετρο



**Σχήμα 2.14:** MOSFET πύκνωσης n-καναλιού – λειτουργία υπό φορτίο

την τάση  $V_{GS}$  μεταξύ των ηλεκτροδίων πύλης και πηγής, (καθώς και η χαρακτηριστική ευθεία φορτίου), δείχνονται στο σχήμα 2.15.

Σύμφωνα με το σχήμα 2.15, υπάρχουν τρεις χαρακτηριστικές περιοχές λειτουργίας, η περιοχή αποκοπής, η περιοχή τριόδου ή γραμμική περιοχή και η περιοχή κορεσμού.

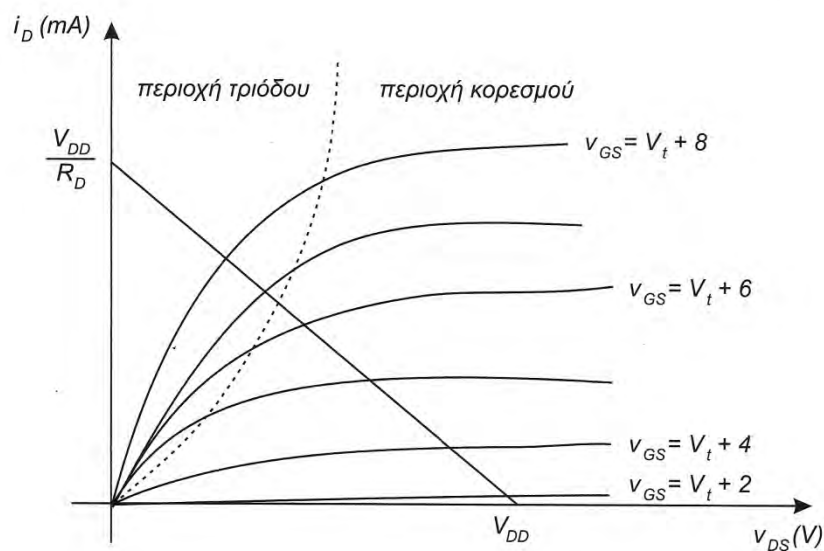
Η λειτουργία στην περιοχή του κορεσμού, επιλέγεται μόνο στην περίπτωση που επιθυμούμε λειτουργία ενισχυτή. Σε διακοπτικές εφαρμογές, το τρανζίστορ λειτουργεί εναλλάξ στην γραμμική περιοχή και την περιοχή αποκοπής. Το τρανζίστορ βρίσκεται σε αποκοπή όταν

$$V_{GS} < V_t \quad (2.13)$$

Όπου,

$V_t$ , τάση κατωφλίου (V)





**Σχήμα 2.15 :** Χαρακτηριστικές  $i_D = f(v_{DS})$  με παράμετρο την  $V_{GS}$

Για λειτουργία στην γραμμική περιοχή, θα πρέπει πρώτα να έχει σχηματιστεί κανάλι.

Δηλαδή θα πρέπει

$$V_{GS} > V_t \quad (2.14)$$

Η συνθήκη αυτή, εισάγοντας την διαφορά δυναμικού  $V_{DS}$ , μπορεί να πάρει την μορφή

$$V_{GS} - V_{DS} > V_t \quad (2.15)$$

Στην γραμμική περιοχή το ρεύμα  $i_D$ , δίνεται από την σχέση

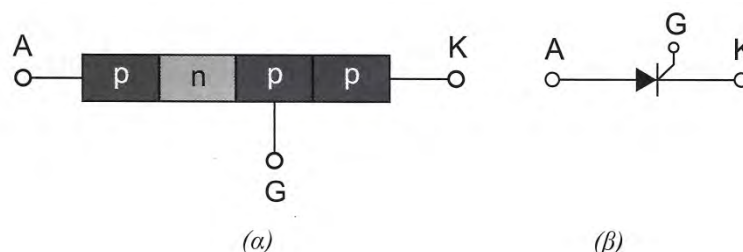
$$i_D = K \left[ 2(v_{GS} - V_t)v_{DS} - v_{DS}^2 \right] \quad (2.16)$$

Όπου

$K$ , κατασκευαστική σταθερά του τρανζίστορ ( $A/V^2$ )

## 2.7 Θυρίστορ

Το θυρίστορ είναι ένας ελεγχόμενης έναυσης ηλεκτρονικός διακόπτης. Από πλευράς δομής, το θυρίστορ είναι ένας ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου τεσσάρων στρωμάτων (p-n-p-n), σχήμα 2.16.



**Σχήμα 2.16:** Θυρίστορ (α) Κατασκευαστική σύνθεση, (β) Κυκλωματικό σύμβολο

Οι δύο ακροδέκτες, άνοδος-κάθοδος, αποτελούν το κύκλωμα ισχύος του διακόπτη, ενώ ο έλεγχος της έναυσης πραγματοποιείται μέσω του ηλεκτροδίου ελέγχου (πύλη-gate). Σε αντιδιαστολή με την διόδο, όταν στην πύλη του θυρίστορ δεν δοθεί παλμός έναυσης, ανεξάρτητα αν είναι ορθά πολωμένο δεν διαρρέεται από ρεύμα.

Για την έναυση του θυρίστορ, δηλαδή την μετάβαση του από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγιμότητας, θα πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα οι εξής δύο προϋποθέσεις :

- Να είναι ορθά πολωμένο, δηλαδή το δυναμικό της ανόδου να είναι μεγαλύτερο του δυναμικού της καθόδου ( $V_A > V_K$ ).
- Να δοθεί στο ηλεκτρόδιο ελέγχου, παλμός ικανής έντασης και χρονικής διάρκειας .

Εάν κατά την χρονική διάρκεια του παλμού έναυσης , το ρεύμα του θυρίστορ γίνει μεγαλύτερο μίας συγκεκριμένης χαρακτηριστικής τιμής, η διαδικασία της έναυσης έχει ολοκληρωθεί. Σε αντίθετη περίπτωση, μετά το πέρας του παλμού το θυρίστορ επανέρχεται στην κατάσταση αποκοπής. Η οριακή αυτή τιμή του ρεύματος πύλης, που εξασφαλίζει την έναυση του θυρίστορ , είναι γνωστή ως *ρεύμα μανδάλωσης* ‘  $I_L$  ’ (**latching current**) και δίνεται στα φυλλάδια του κατασκευαστή. Για την σβέση του θυρίστορ, δηλαδή την μετάβαση του από την κατάσταση αγωγιμότητας στην κατάσταση αποκοπής, θα πρέπει ανεξαρτήτως των συνθηκών της πύλης, το *ρεύμα συγκράτησης* ‘  $I_H$  ’ (**holding current**).

Πρακτικά για τα ρεύματα μανδάλωσης και συγκράτησης, ισχύει η παρακάτω σχέση.

$$I_H = \frac{I_L}{2} \quad (2.17)$$

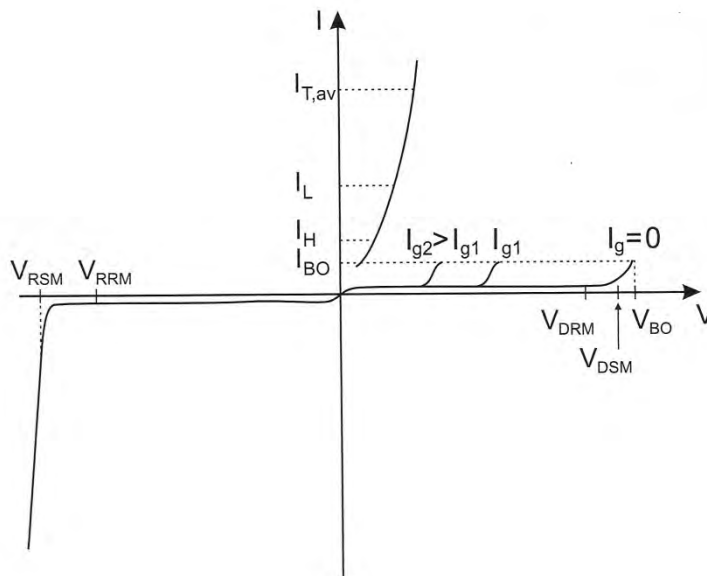
Η τυπική μορφή της στατικής χαρακτηριστικής του θυρίστορ, δείχνεται στο σχήμα 2.17. Σύμφωνα με το σχήμα 2.17, σε αντίθεση με την διόδο και το

διπολικό τρανζίστορ, θυρίστορ μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις παρακάτω τρεις καταστάσεις:

- Κατάσταση αποκοπής (**conduction state**), στην οποία το θυρίστορ διαρρέεται από ρεύμα (διακόπτης κλειστός).
- Κατάσταση θετικής αποκοπής (**forward blocking state**), όπου το θυρίστορ είναι μεν πολωμένο ορθά αλλά δεν διαρρέεται από ρεύμα (εάν εξαιρέσουμε ένα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής) καθότι δεν έχει δοθεί παλμός έναυσης (διακόπτης ανοιχτός).
- Κατάσταση αρνητικής αποκοπής (**reverse blocking state**). Το τμήμα αυτό της χαρακτηριστικής είναι απολύτως όμοιο με εκείνο της διόδου. Δηλαδή κατά την ανάστροφη πόλωση (ανεξαρτήτως των συνθηκών του κυκλώματος ελέγχου) το θυρίστορ διαρρέεται από ένα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής (διακόπτης ανοιχτός).

Τα βασικά μεγέθη της στατικής χαρακτηριστικής του θυρίστορ με βάση το σχήμα 2.17 είναι τα εξής:

- Επαναλαμβανόμενη τάση κορυφής ορθής φοράς (**repetitive peak forward voltage -  $V_{DRM}$** ). Είναι η μέγιστη με επαναληπτικό ρυθμό εφαρμοζόμενη επιτρεπόμενη τάση ορθής φοράς, η οποία διατηρεί το θυρίστορ σε κατάσταση αποκοπής. Εφαρμόζεται με μηδενική ή αρνητική τάση πύλης ως προς την κάθοδο.
- Επαναλαμβανόμενη ανάστροφη τάση κορυφής (**repetitive peak reverse voltage -  $V_{RRM}$** ). Είναι η μέγιστη με επαναλαμβανόμενο ρυθμό ανάστροφη ανοδική τάση που διατηρεί τα θυρίστορ σε αποκοπή. Εφαρμόζεται μη μηδενική ή αρνητική τάση μεταξύ πύλης και καθόδου.



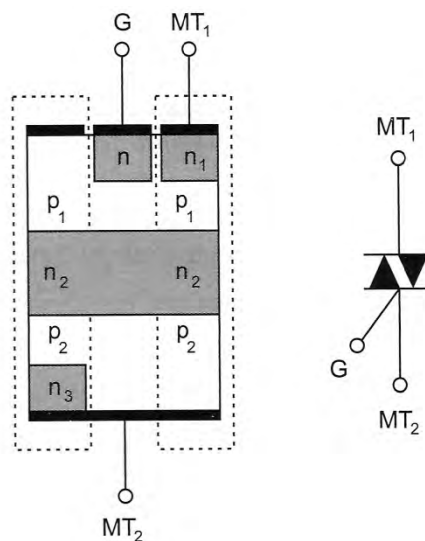
Σχήμα 2.17: Στατική χαρακτηριστική του θυρίστορ

- Μη επαναλαμβανόμενη τάση κορυφής ορθής φοράς, κατάσταση αποκοπής (**non-repetitive peak off-state voltage** -  $V_{DSM}$ ). Είναι η ορθή τάση εκείνη η οποία όταν εφαρμόζεται με κάποιο συγκεκριμένο ρυθμό (και όχι συνεχώς), εξακολουθεί να διατηρεί το θυρίστορ σε αποκοπή.
- Μη επαναλαμβανόμενη ανάστροφη τάση κορυφής φραγμού (**non-repetitive reverse blocking voltage** -  $V_{RSM}$ ). Είναι η μη επαναλαμβανόμενη με κάποιο ρυθμό ανάστροφη τάση η οποία διατηρεί το θυρίστορ σε κατάσταση αποκοπής.

## 2.8 Triac

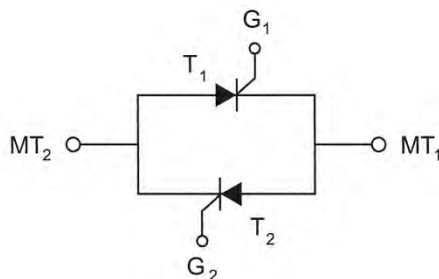
Το triac είναι ένας αμφίδρομος ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου.

Η κρυσταλλική δομή του και το κυκλωματικό του σύμβολο, δείχνονται στο σχήμα 2.18. Στην ουσία αποτελείται από δύο θυρίστορ σε αντιπαράλληλη σύνδεση, με κοινή όμως πύλη ελέγχου. Προφανώς, το triac ως διακόπτης δύο κατευθύνσεων, βρίσκει εφαρμογές σε μετατροπείς Ε.Ρ./Ε.Ρ. Το triac ελέγχεται και με θετικούς και με αρνητικούς παλμούς. Η πολικότητα των παλμών αυτών, δεν επηρεάζει την φορά αγωγιμότητας, η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από την σχετική πολικότητα των κύριων ακροδεκτών (main terminals) MT2 και MT1.



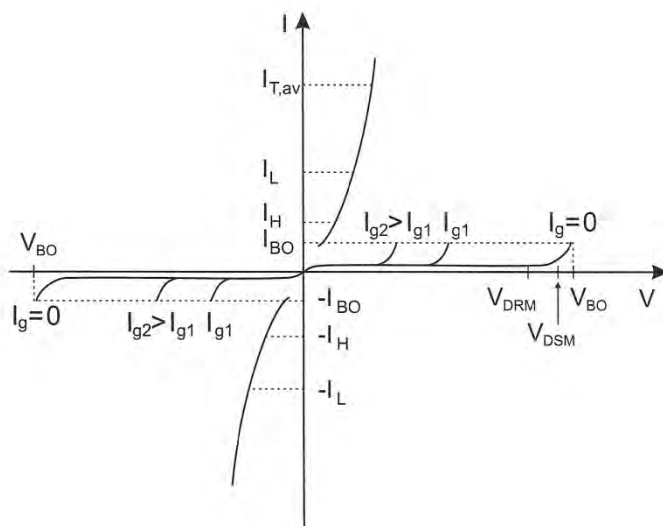
Σχήμα 2.18: κρυσταλλική δομή και κυκλωματικό σύμβολο triac

Για μικρές ισχύς (της τάξης μερικών KW) και κυρίως μικρές συχνότητες (<400Hz) χρησιμοποιούνται triacs, ενώ για μεγαλύτερες ισχύς, αντιπαράλληλα θυρίστορ, σχήμα 2.19.



**Σχήμα 2.19:** Αμφίδρομος διακόπτης με δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ

Τα δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ, ως διακόπτης εναλλασσομένου, έχει πολύ καλύτερες επιδόσεις από το triac και ως προς την ισχύ και ως προς την μέγιστη συχνότητα λειτουργίας. Το μόνο μειονέκτημα του είναι ότι, σε αντίθεση με το triac, απαιτεί τροφοδοσία δύο ανεξάρτητων και γαλβανικά απομονωμένων παλμών για τις δύο πύλες. Η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος του triac, δείχνεται στο σχήμα 2.20. Οι ορισμοί των χαρακτηριστικών μεγεθών (ρεύματα συγκράτησης, μανδάλωσης, τάσεις διάσπασης κ.λ.π.), είναι ακριβώς ανάλογα με τα αντίστοιχα των θυρίστορ (βλέπε §1.10).

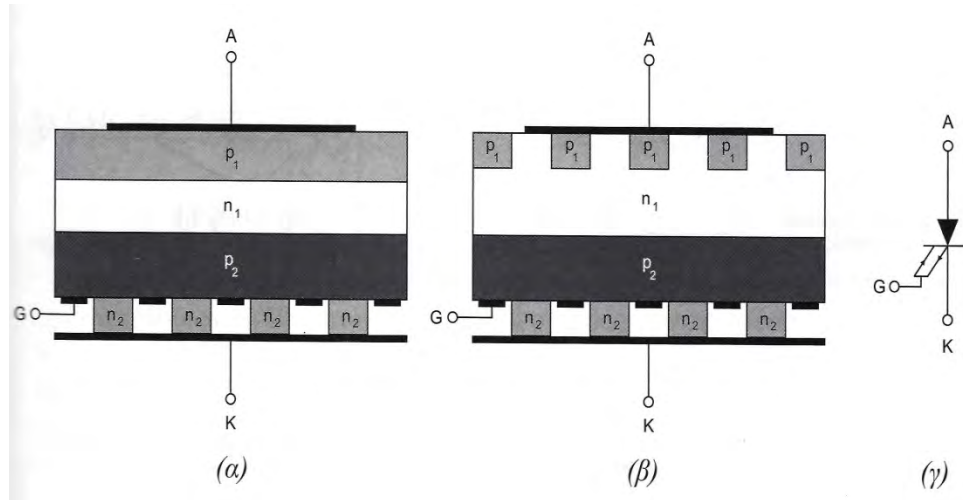


**Σχήμα 2.20:** Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος triac

## 2.9 GTO

Στο κλασικό θυρίστορ μπορούμε να ελέγξουμε μόνο την έναυση του. Η σβέση του εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τις συνθήκες του κυκλώματος με το οποίο είναι συνδεδεμένο (και επιτυγχάνεται όταν το ρεύμα του γίνει μικρότερο του ρεύματος συγκράτησης). Το GTO (**gate turn-off thyristor**), είναι ένας τύπος θυρίστορ με δύο ηλεκτρόδια ελέγχου, με το ένα από αυτά ελέγχεται η

έναυση (όπως στα κλασικά θυρίστορ) και με το άλλο η σβέση του. Το κλασικό θυρίστορ, απουσία παλμού, έχει την ικανότητα να μπλοκάρει (αποκόπτει) τάσεις σχεδόν του ίδιου μεγέθους, τόσο κατά την ορθή όσο και κατά την ανάστροφη πόλωση. Στα GTOs, υπάρχουν δύο τύποι, ο **“reverse blocking type”** που έχει την ικανότητα να μπλοκάρει (αποκόπτει) τάσεις σχεδόν του ίδιου μεγέθους, τόσο κατά την ορθή όσο και κατά την ανάστροφη πόλωση και ο **“anode short type”**, του οποίου η ικανότητα στην αποκοπή τάσεων ανάστροφης πόλωσης είναι αρκετά μικρή (της τάξης των 15V). Η κρυσταλλική δομή και το κυκλωματικό σύμβολο του GTO, δείχνονται στο σχήμα 2.21.



**Σχήμα 2.21:** Θυρίστορ ελεγχόμενης σβέσης (GTO),

(α) “reverse blocking type” (β) “anode short type”, (γ) κυκλωματικό σύμβολο.

Για την έναυση του, απαιτείται ένα μικρό ρεύμα όπως και στην περίπτωση του κλασικού τύπου θυρίστορ. Δηλαδή το ρεύμα της πύλης κατά την έναυση είναι ανεξάρτητο του ρεύματος που θα διέλθει από το GTO μετά την έναυση του. Τα πράγματα είναι τελείως διαφορετικά για τις συνθήκες σβέσης, καθότι το μέγεθος του απαιτούμενου ρεύματος πύλης για την σβέση, εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του διερχόμενου ρεύματος από το GTO την χρονική στιγμή της σβέσης. Για το απαιτούμενο ρεύμα στην πύλη για την σβέση, ισχύει η σχέση

$$I_G = \frac{I}{\beta_{off}} \quad (2.18)$$

Όπου

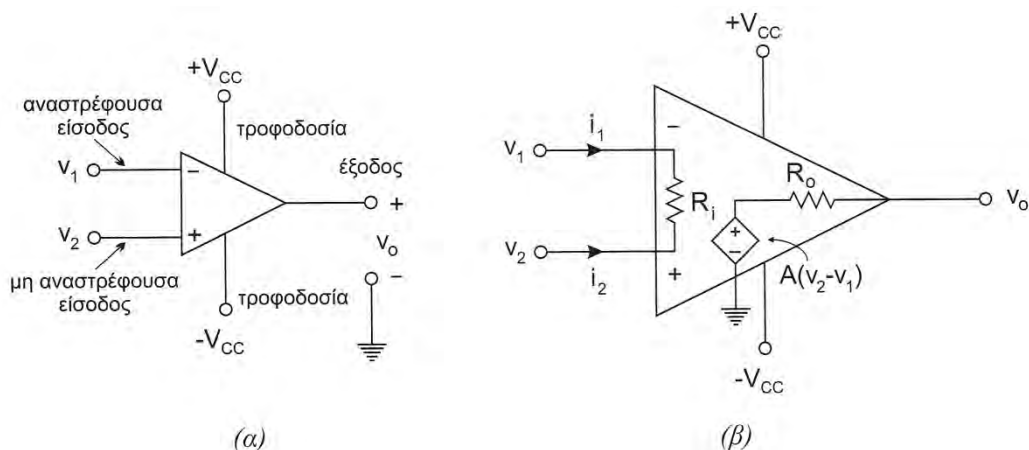
$I$ , το διερχόμενο ρεύμα από το GTO

$\beta_{off}$ , το κέρδος ρεύματος κατά την σβέση (turn off current gain)

Τα θυρίστορ ελεγχόμενης σβέσης, βρίσκουν μεγάλες εφαρμογές στους μετατροπείς Σ.Π./Σ.Π.

## 2.10 Τελεστικός ενισχυτής

Ο τελεστικός ενισχυτής (operational amplifier), αποτελεί μια ειδική περίπτωση D.C. ενισχυτή υψηλού κέρδους. Χρησιμοποιείται ευρέως σε κυκλώματα ελέγχου μετατροπέων με ηλεκτρονικά ισχύος, κυκλώματα μετρήσεων, προσαρμογής, ηλεκτρονικά φίλτρα κ.λ.π. Το κυκλωματικό σύμβολο του τελεστικού ενισχυτή καθώς και το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα, δίδονται στο σχήμα 2.22.

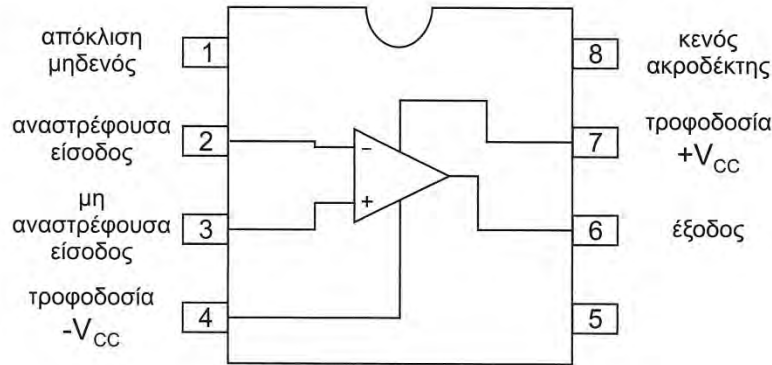


**Σχήμα 2.22:** Τελεστικός ενισχυτής (α) Κυκλωματικό σύμβολο (β) Ισοδύναμο κύκλωμα

Ένα πολύ σπουδαίο χαρακτηριστικό των τελεστικών ενισχυτών, το οποίο έχει συμβάλει στην ευρεία εξάπλωση της χρήσης τους είναι ότι, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους όπως (κέρδος, σύνθετες αντιστάσεις εισόδου-εξόδου, απόκριση συχνότητας κ.λ.π.) εξαρτώνται σχεδόν αποκλειστικά και μόνο από συνιστώσες (αντιστάσεις, πυκνωτές, κ.λ.π.) εξωτερικές ως προς τον ενισχυτή. Δηλαδή, με κατάλληλη επιλογή των τιμών των συνιστωσών αυτών, μπορούμε να προδιαγράψουμε την συμπεριφορά του ενισχυτή, ώστε να ανταποκρίνεται πλήρως στις απαιτήσεις της εφαρμογής, χωρίς να χρειάζεται να γνωρίζουμε λεπτομέρειες για την εσωτερική δομή του.

Η τάση εξόδου του τελεστικού ενισχυτή, είναι ίση με την διαφορά των τάσεων των δύο ακροδεκτών εισόδου, πολλαπλασιασμένη με το κέρδος του ενισχυτή. Τυπικές τιμές κέρδους διαφόρων τελεστικών ενισχυτών, κυμαίνονται μεταξύ  $10^4$  έως  $10^7$ .

Οι βασικοί ακροδέκτες ενός τελεστικού ενισχυτή σύμφωνα με το σχήμα 2.21, είναι πέντε. Δύο από αυτούς είναι εισοδοί, δύο είναι για την τροφοδοσία και ένας έξοδος. Η είσοδος με το σύμβολο "-" είναι γνωστή ως αναστρέφουσα είσοδος (**inverting input**) και η είσοδος με το σύμβολο "+" ως μη αναστρέφουσα είσοδος (**non inverting input**). Ο λόγος της συγκεκριμένης ονομασίας των δύο εισόδων θα γίνει κατανοητός στην συνέχεια.



**Σχήμα 2.23:** Ο τελεστικός ενισχυτής ως ολοκληρωμένο 8 ακροδεκτών (8-leadmins, dip top view)

Η πιο συνηθισμένη μορφή συσκευασίας που συναντάται ένας τελεστικός ενισχυτής, είναι ως ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα οκτώ ακροδεκτών σχήμα 2.23.

Σύμφωνα με το σχήμα 2.23, η αναστρέφουσα είσοδος συνδέεται στον ακροδέκτη 2, η μη αναστρέφουσα είσοδος στον ακροδέκτη 3, η έξοδος στον ακροδέκτη 6 και οι δύο dc τροφοδοσίες (θετική και αρνητική) στους ακροδέκτες 7 και 4 αντίστοιχα. Οι ακροδέκτες 1 και 5, χρησιμεύουν για την ρύθμιση και την εξισορρόπηση της λειτουργίας του τελεστικού ενισχυτή και ο ακροδέκτης είναι κενός (μη συνδεδεμένος).

### 2.10.1 Τροφοδοσία

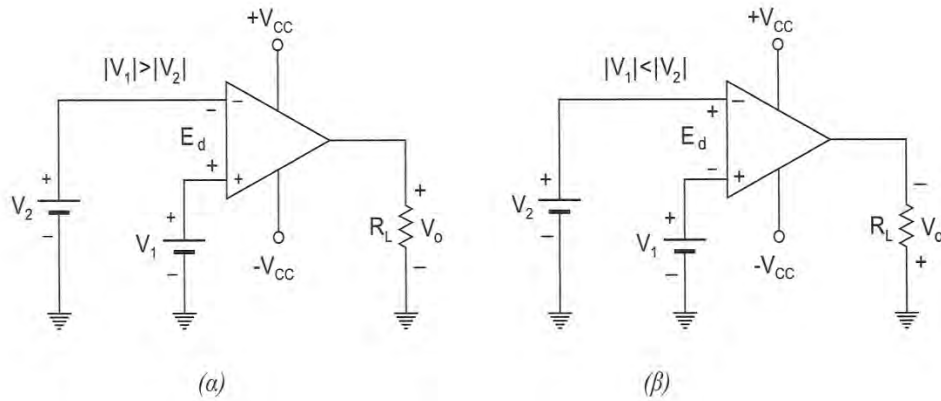
Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι τάσεις τροφοδοσίας των τελεστικών ενισχυτών είναι συμμετρικές. Τυπικές τιμές τάσεων τροφοδοσίας είναι,  $\pm 18V$ ,  $\pm 15V$ ,  $\pm 12V$ ,  $\pm 6V$ . Υπάρχουν βέβαια και οι περιπτώσεις τελεστικών ενισχυτών ή εφαρμογών, που απαιτούν ασύμμετρες τάσεις τροφοδοσίας (π.χ.  $+12V$  και  $-6V$  ή  $30V$  και  $0V$ ).

Η μέγιστη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ακροδεκτών τροφοδοσία, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν πρέπει να ξεπερνάει τα  $36V$  κατ' απόλυτη τιμή.

### 2.10.2 Ακροδέκτες εισόδου

Όπως προαναφέραμε, υπάρχουν δύο ακροδέκτες εισόδου, η αναστρέφουσα και η μη αναστρέφουσα είσοδος, με συμβολισμούς "-" και "+" αντίστοιχα. Συνήθως, καλούνται και ακροδέκτες διαφορικής εισόδου (**differential input terminals**), διότι η τάση στην έξοδο του ενισχυτή (γραμμική περιοχή λειτουργίας) ισούται με το γινόμενο της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο ακροδεκτών εισόδου και του κέρδους ανοιχτού βρόχου του ενισχυτή. Η πολικότητα της τάσης εξόδου, εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την πολικότητα της διαφορικής τάσης εισόδου, σχήμα 2.24.





**Σχήμα 2.24:** Πολικότητα τάσης εξόδου τελεστικού ενισχυτή  
(α) Θετική τάση εξόδου (β) Αρνητική τάση εξόδου

Σύμφωνα λοιπόν με το σχήμα 2.24, όταν το δυναμικό της μη αναστρέφουσας εισόδου είναι θετικότερο σε σχέση με το δυναμικό της αναστρέφουσας εισόδου, το δυναμικό του ακροδέκτη εξόδου είναι θετικό ως προς την γη (η οποία εξ' ορισμού έχει δυναμικό μηδέν). Αντίθετα, εάν το δυναμικό της αναστρέφουσας εισόδου είναι θετικότερο του δυναμικού της μη αναστρέφουσας εισόδου, τότε το δυναμικό του ακροδέκτη εξόδου είναι αρνητικό σε σχέση με την γη. Από τα παραπάνω, γίνεται προφανής ο χαρακτηρισμός των δύο εισόδων.

### 2.10.3 Ακροδέκτης εξόδου

Ο τελεστικός ενισχυτής έχει έναν ακροδέκτη εξόδου. Το ένα άκρο του φορτίου συνδέεται στον ακροδέκτη εξόδου και το άλλο άκρο στην γη (σχήμα 2.24). Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα εξόδου ενός τελεστικού ενισχυτή, περιορίζεται στα 10-20 mA. Υπάρχουν βέβαια και τελεστικοί ενισχυτές όπως ο 741, οι οποίοι διαθέτουν εσωτερικό κύκλωμα επιτήρησης και περιορισμού του ρεύματος εξόδου. Για παράδειγμα το ρεύμα εξόδου του 741 ακόμη και σε περίπτωση καθαρού βραχυκυκλώματος της εξόδου, περιορίζεται περίπου στα 25 mA.

Λόγω της εσωτερικής δομής του τελεστικού ενισχυτή, ανάλογοι περιορισμοί ισχύουν και για τη μέγιστη τιμή της τάσης εξόδου. Η μέγιστη κατ' απόλυτη τιμή της τάσης εξόδου πρακτικά δεν μπορεί να υπερβεί την τάση τροφοδοσίας (κατ' απόλυτη τιμή) μείον 1V. Η μέγιστη θετική τιμή της τάσης εξόδου, καλείται θετική τάση κορεσμού (**positive saturation voltage**) και συμβολίζεται ως  $+V_{sat}$ . Εντελώς ανάλογα, η μέγιστη αρνητική τάση καλείται αρνητική τάση κορεσμού (**negative saturation voltage**) και συμβολίζεται ως  $-V_{sat}$ . Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, θα ισχύει:

$$+V_{sat} \approx +V_{cc} - 1 \text{ , V} \quad (2.19)$$

$$-V_{sat} \approx -V_{cc} + 1 \text{ , V} \quad (2.20)$$

Για παράδειγμα για τάσεις τροφοδοσίας  $\pm 15V$ , θα είναι  $|\pm V_{sat}| = 14V$ .

Όπως προαναφέραμε, στην γραμμική περιοχή λειτουργίας, το μέγεθος της τάσης εξόδου προκύπτει από το γινόμενο του κέρδους ανοιχτού βρόχου του ενισχυτή (**open-loop gain**) και της διαφορικής τάσης εισόδου. Δηλαδή:

$$|V_o| = A_{OL} |E_d| \text{ , V} \quad (2.21)$$

Όπου

$A_{OL}$  = κέρδος ανοιχτού βρόχου

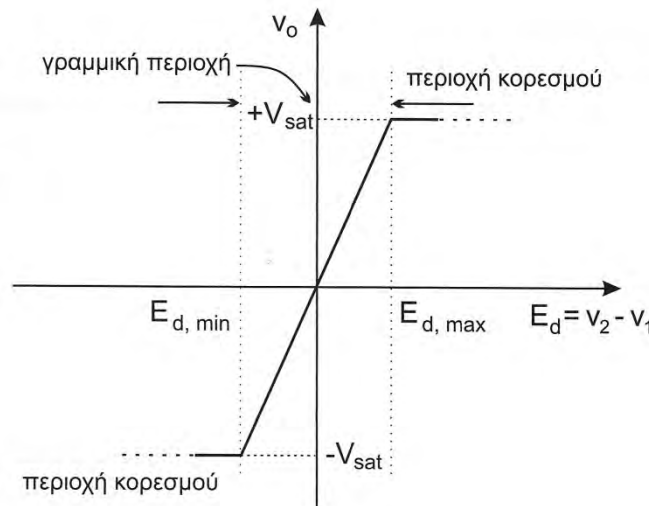
$|E_d| = |V_1 - V_2|$  = διαφορική τάση εισόδου, V

Για τα όρια της γραμμικής περιοχής λειτουργίας, δηλαδή της περιοχής στην οποία ο τελεστικός ενισχυτής λειτουργεί ως ενισχυτής, προφανώς θα ισχύει ότι

$$E_{d,\min} = -\frac{V_{sat}}{A_{OL}} < E_d < E_{d,\max} = +\frac{V_{sat}}{A_{OL}} \quad (2.22)$$

Προφανώς για κάθε τάση  $|E_d| > \left| \pm \frac{V_{sat}}{A_{OL}} \right|$ , ισχύει  $|V_o| = |V_{o,\max}| \approx |\pm V_{sat}| - 1$ . Δηλαδή, ο

τελεστικός ενισχυτής φεύγει από την γραμμική περιοχή λειτουργίας και εισέρχεται στην περιοχή κορεσμού, καθότι αδυνατεί να δώσει μεγαλύτερη τάση στην έξοδο, σχήμα 2.25.



**Σχήμα 2.25:** Χαρακτηριστική εισόδου-εξόδου τελεστικού ενισχυτή

Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε τον τελεστικό ενισχυτή 741, με κέρδος ανοιχτού βρόχου  $10^5$  και τάσεις τροφοδοσίας  $\pm 12V$ . Σύμφωνα με την (2.22), τα όρια της γραμμικής περιοχής λειτουργίας είναι

$$-\frac{11V}{10^5} = -110\mu V < E_d < +\frac{11V}{10^5} = +110\mu V$$

Δηλαδή για κάθε τάση  $E_d$  μεγαλύτερη από  $110 \mu V$ , ο ενισχυτής εισέρχεται στην περιοχή του κορεσμού.

Παρατηρούμε ότι, το εύρος της γραμμικής περιοχής λειτουργίας είναι πάρα πολύ στενό (της τάξης των  $\mu V$ ), με αποτέλεσμα η χρήση του τελεστικού ενισχυτή σε συνδεσμολογία ανοιχτού βρόχου να μην παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον. Πράγματι, τάσεις της τάξης των  $100 \mu V$ , όχι μόνο είναι δύσκολο εργαστηριακά να μετρηθούν με ακρίβεια, αλλά και επαγόμενες τάσεις λόγω θορύβου που ενδεχόμενα προέρχεται από γειτονικά παρευρισκόμενες συσκευές, μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερες και να οδηγήσουν από μόνες τους τον τελεστικό ενισχυτή στην περιοχή του κορεσμού.

Αντίθετα με την γραμμική περιοχή, η λειτουργία του τελεστικού ενισχυτή στην περιοχή κορεσμού, ως συγκριτή δύο τάσεων (**comparator**) ή ανιχνευτή μεγέθους τάσεως σε σχέση με κάποια τάση αναφοράς (**detector**), παρουσιάζει έντονο πρακτικό ενδιαφέρον. Στην περίπτωση αυτή, η έξοδος λειτουργεί ως διακόπτης δύο θέσεων. Δηλαδή ανάλογα με το πρόσημο της διαφορικής τάσης εισόδου, η έξοδος θα βρίσκεται είτε στη θετική είτε στην αρνητική περιοχή του κορεσμού.

#### 2.10.4 Ιδανικός τελεστικός ενισχυτής

Συνήθως στην πράξη, για να απλουστεύσουμε τους υπολογισμούς, χρησιμοποιούμε το μοντέλο του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή (**ideal operational amplifier**). Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα του πλήρους μοντέλου είναι αμελητέες. Ο ιδανικός ενισχυτής προδιαγράφεται από τις εξής παραδοχές

- Άπειρο κέρδος
- Άπειρη αντίσταση εισόδου
- Μηδενική αντίσταση εξόδου
- Άπειρος ρυθμός ανταπόκρισης

Η πρώτη παραδοχή για πεπερασμένη τάση εξόδου, έχει ως αποτέλεσμα (βάσει της 1.30) τα δυναμικά στους δύο ακροδέκτες εισόδου να είναι ίσα, δηλαδή  $E_d = 0$ . Στην δεύτερη παραδοχή λέγοντας άπειρη αντίσταση εισόδου, εννοούμε τόσο μεταξύ των δύο εισόδων όσο και μεταξύ μιας οποιασδήποτε εκ των δύο εισόδων και της γης. Βάσει της συγκεκριμένης παραδοχής, τα ρεύματα που απορροφούν οι είσοδοι είναι μηδενικά ( $i_1 = i_2 = 0$ ). Από την τρίτη παραδοχή, συνεπάγεται  $R_o = 0$ . Ως ρυθμό ανταπόκρισης (**slew rate**), ορίζουμε τον μέγιστο χρονικό ρυθμό μεταβολής της εξόδου. Δηλαδή στον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή θεωρούμε ότι, η έξοδος του μπορεί να αλλάξει ακαριαία από μια τιμή σε άλλη (απεριόριστο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας). Τέλος, με την πέμπτη παραδοχή θεωρούμε μηδενικές τάσεις απόκλισης τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο.

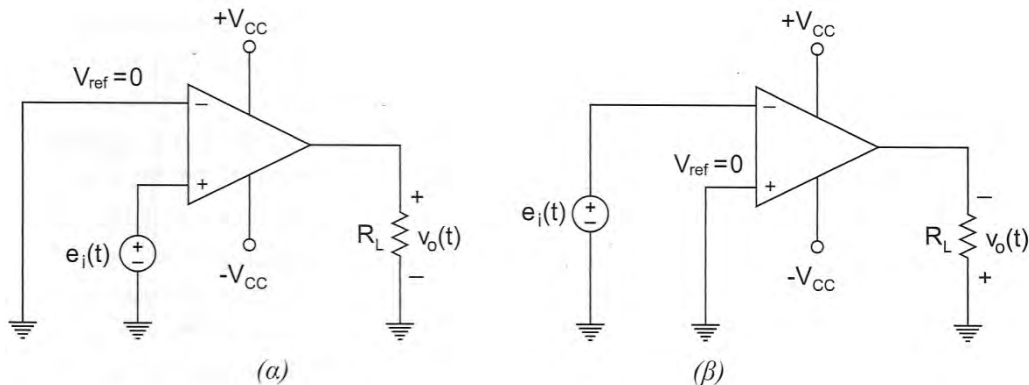
#### 2.10.5 Εφαρμογές τελεστικών ενισχυτών

Στην συνέχεια, παραθέτουμε μερικές αντιπροσωπευτικές εφαρμογές των τελεστικών ενισχυτών, αρκετά χρήσιμες για την κατασκευή κυκλωμάτων ελέγχου. Για περισσότερες εφαρμογές, μπορεί να ανατρέξει κανείς σε ειδικά εγχειρίδια τελεστικών ενισχυτών.

##### ▪ Ο Συγκριτής

Αν και η χρήση του τελεστικού ενισχυτή χωρίς ανάδραση, στην γραμμική περιοχή λειτουργίας (ως ενισχυτή) δεν παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον, αντίθετα η λειτουργία στην περιοχή κορεσμού, ως συγκριτή (**comparator**) δύο τάσεων ή ανιχνευτή (**detector**) μεγέθους τάσης, παρέχει πλήθος πρακτικών εφαρμογών. Στην ουσία στις περιπτώσεις αυτές, ο τελεστικός ενισχυτής λειτουργεί ως διακόπτης δύο θέσεων, δηλαδή ανάλογα την πολικότητα της διαφορικής τάσης στην είσοδο, η έξοδος θα βρίσκεται είτε στη θετική είτε στην αρνητική τάση κορεσμού. Επιπλέον από την πολικότητα της εξόδου, είμαστε σε θέση σε κάθε χρονική στιγμή να γνωρίζουμε,

ποια από τις δύο εισόδους βρίσκεται σε υψηλότερο δυναμικό ως προς την άλλη. Στην συνέχεια, ακολουθεί μία αντιπροσωπευτική εφαρμογή του τελεστικού ενισχυτή, ως ανιχνευτή διέλευσης μηδενός.



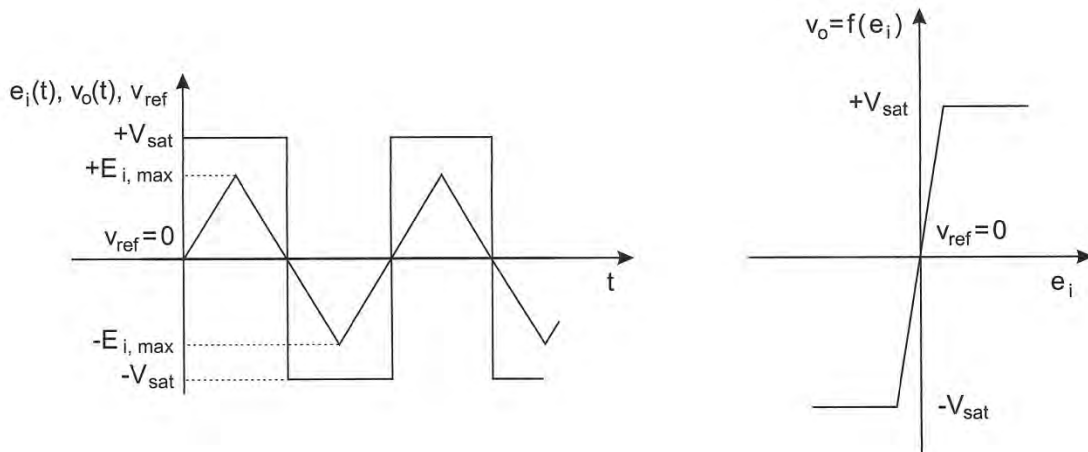
**Σχήμα 2.26:** Ανιχνευτής διέλευσης μηδενός, (α) Μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία, (β) Αναστρέφουσα συνδεσμολογία

▪ **Ο Ανιχνευτής διέλευσης μηδενός (zero-crossing detector)**

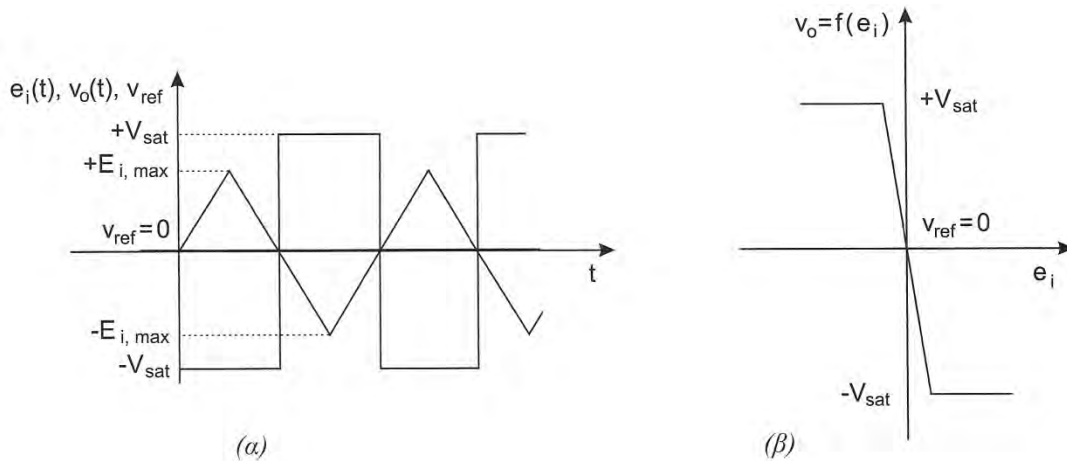
Στην λειτουργία του συγκριτή, γίνεται στην ουσία σύγκριση μιας γενικά χρονικά μεταβαλλόμενης τάσης με μία τάση αναφοράς.

Στην περίπτωση του ανιχνευτή διέλευσης μηδενός, η τάση αναφοράς είναι μηδενική. Ανάλογα σε ποιόν ακροδέκτη θα συνδεθεί η τάση αναφοράς (δηλαδή ποιος από τους δύο ακροδέκτες εισόδων θα γειωθεί), διακρίνουμε τις εξής δύο συνδεσμολογίες, σχήμα 2.27.

Οι αντίστοιχες κυματομορφές των τάσεων εισόδου-εξόδου (για πριονωτή είσοδο) καθώς και γραφικές απεικονίσεις των σχέσεων εισόδου-εξόδου για τις δύο περιπτώσεις (α) και (β), δείχνονται στο σχήμα 2.27 και σχήμα 2.28 αντίστοιχα.



**Σχήμα 2.27:** Μη αναστρέφων ανιχνευτής μηδενός, (α) Κυματομορφές τάσεων εισόδου-εξόδου, (β) Γραφική απεικόνιση εισόδου-εξόδου



**Σχήμα 2.28:** Αναστρέφων ανιχνευτής μηδενός, (α) Κυματομορφές τάσεων εισόδου-εξόδου, (β) Γραφική απεικόνιση εισόδου-εξόδου

Παρατηρούμε ότι, στην γειτονιά των σημείων μηδενισμού της  $e_i$ , η τάση εξόδου αλλάζει πρόσημο ανάλογα με την κλίση της  $e_i$  (θετική ή αρνητική). Στην πραγματικότητα, ο παλμός της εξόδου στα σημεία μηδενισμού του ρεύματος δεν είναι εντελώς κατακόρυφος και αυτό οφείλεται στο ότι, στην γειτονιά των σημείων μηδενισμού ο τελεστικός ενισχυτής λειτουργεί στη γραμμική περιοχή. Λόγω του ότι, όμως όπως έχουμε εξηγήσει τα όρια μεταβολής της τάσης εισόδου στη γραμμική περιοχή λειτουργίας είναι της τάξης των  $\mu\text{V}$ , μπορεί κάλλιστα να θεωρηθεί με αρκετά καλή προσέγγιση ότι, η αλλαγή από τη μια περιοχή κορεσμού στην άλλη γίνεται χωρίς τη μεσολάβηση της γραμμικής περιοχής, δηλαδή ο παλμός στην έξοδο είναι ιδανικά κατακόρυφος.

### 2.10.6 Προσθήκη κλάδου ανάδρασης

Σε αντίθεση με την λειτουργία του ενισχυτή σε ανοιχτό βρόχο, όπου οι πρακτικές εφαρμογές του όπως είδαμε είναι αρκετά περιορισμένες, με την προσθήκη κατάλληλου κλάδου ανάδρασης προκύπτει πλήθος πρακτικών εφαρμογών (ενισχυτές, γεννήτριες σημάτων, αθροιστές, ολοκληρωτές, φίλτρα, χρονικά, κ.λ.π). Λόγω του πλήθους των εφαρμογών που μας παρέχει η λειτουργία του τελεστικού ενισχυτή σε κλειστό βρόχο, θα περιοριστούμε επιλεκτικά σε μερικές από αυτές.

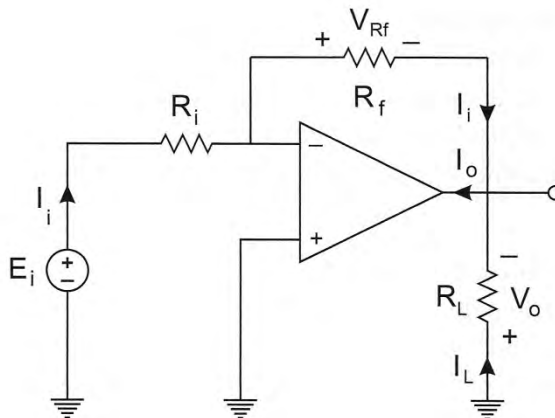
### 2.10.7 Ενισχυτής με ανάδραση

Ο ιδανικός ενισχυτής εμφανίζει στην έξοδο του, το σήμα εισόδου χωρίς παραμόρφωση και ενισχυμένο, σύμφωνα με την σταθερά ενίσχυσης ή αλλιώς το κέρδος. Είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο ότι, η πολύ υψηλή τιμή κέρδους του τελεστικού ενισχυτή, είχε ως αποτέλεσμα τον σημαντικό περιορισμό της γραμμικής περιοχής λειτουργίας. Για να έχει πρακτική εφαρμογή ως ενισχυτής, θα πρέπει τα όρια της γραμμικής περιοχής να αυξηθούν (στην κλίμακα των  $\text{mV}$  ή ακόμη και των μερικών  $\text{V}$ ). Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει προφανώς να μειωθεί το κέρδος του ενισχυτή. Όπως θα δούμε στην συνέχεια, ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με την προσθήκη ενός κλάδου ανατροφοδότησης (συνήθως με μια ωμική αντίσταση), από την έξοδο σε έναν από τους δύο ακροδέκτες εισόδου. Στην περίπτωση αυτή, το τροποποιημένο κέρδος του τελεστικού ενισχυτή, καλείται κέρδος κλειστού βρόχου (**closed-loop gain**) και συμβολίζεται ως  $A_{CL}$ . Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που προκύπτει από την προσθήκη του κλάδου ανάδρασης και το οποίο έχει συμβάλλει

ουσιαστικά στην ευρεία εξάπλωση των τελεστικών ενισχυτών είναι ότι, το κέρδος κλειστού βρόχου δεν εξαρτάται πλέον από τα εσωτερικά στοιχεία του τελεστικού ενισχυτή, αλλά μπορεί να ρυθμιστεί κατά βούληση από την τιμή της εξωτερικής αντίστασης του κλάδου ανατροφοδότησης (και γενικότερα από εξωτερικά στοιχεία). Ανάλογα σε ποια είσοδο θα συνδεθεί ο κλάδος ανάδρασης, διακρίνουμε δύο επιμέρους συνδεσμολογίες ενισχυτή, την αναστρέφουσα και τη μη αναστρέφουσα. Ο χαρακτηρισμός της κάθε μιας από αυτές, θα γίνει κατανοητός στην συνέχεια.

- **Αναστρέφουσα συνδεσμολογία**

Η συνδεσμολογία του αναστρέφοντος ενισχυτή (*inverting amplifier*), επιτυγχάνεται με την σύνδεση του κλάδου ανάδρασης στην αναστρέφουσα είσοδο, σχήμα 2.29.



**Σχήμα 2.29:** Αναστρέφων ενισχυτής

Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία του παραπάνω κυκλώματος υπενθυμίζουμε ότι, βάσει των παραδοχών του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή, η αντίσταση εισόδου θεωρείται άπειρη και κατά συνέπεια τα απορροφούμενα ρεύματα από τις εισόδους είναι μηδενικά. Επιπλέον, λόγω του αρκετά υψηλού κέρδους ανοιχτού βρόχου, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο εισόδων θεωρείται μηδενική, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι το κύκλωμα λειτουργεί στην γραμμική περιοχή. Με βάση τις παρατηρήσεις αυτές και λαμβάνοντας υπόψη ότι η μη αναστρέφουσα είσοδος είναι γειωμένη, έχουμε

$$V_{(+)} = V_{(-)} = 0$$

Επομένως το ρεύμα εισόδου  $I_i$ , εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την πηγή και την αντίσταση εισόδου  $E_i$  και  $R_i$  αντίστοιχα. Δηλαδή

$$I_i = \frac{E_i}{R_i} \quad , \quad \text{A} \quad (2.23)$$

Το ρεύμα αφού δεν μπορεί να διέλθει από τον ακροδέκτη (-) στον ακροδέκτη (+) της εισόδου του τελεστικού ενισχυτή και να κλείσει κύκλωμα μέσω της γης, θα διέλθει μέσω της αντίστασης  $R_f$  του κλάδου ανάδρασης προκαλώντας πτώσης τάσης

$$V_{Rf} = I_i R_f = \frac{E_i}{R_i} R_f \quad , \quad \text{V} \quad (2.24)$$

Οι δύο τάσεις  $V_{Rf}$  και  $V_o$ , έχουν ένα κοινό σημείο (τον ακροδέκτη εξόδου) και τα άλλα σημεία τους έχουν δυναμικό μηδέν. Επομένως

$$V_o = -V_f = -\frac{R_f}{R_i} E_i = -A_{CL} E_i \quad , \quad V \quad (2.25)$$

Όπου 
$$A_{CL} = \frac{R_f}{R_i} \quad (2.26)$$

Το πρόσημο (-) στην (2.25), εισάγει μία διαφορά φάσης 180° στο σήμα εξόδου, σε σχέση με το σήμα εισόδου.

Παρατηρούμε ότι, το κέρδος κλειστού βρόχου του ενισχυτή εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τις δύο εξωτερικές αντιστάσεις  $R_i$  και  $R_f$ . Επιλέγοντας κατάλληλες τιμές στις συγκεκριμένες αντιστάσεις, μπορεί να ρυθμιστεί κατά βούληση, διευρύνοντας την γραμμική περιοχή λειτουργίας στις απαιτήσεις της οποιασδήποτε εφαρμογής.

Το συνολικό ρεύμα στην έξοδο του ενισχυτή, ισούται με το άθροισμα των ρευμάτων εισόδου και φορτίου. Δηλαδή

$$I_o = I_i + I_L = \frac{E_i}{R_i} + \frac{V_o}{R_L} \quad , \quad A \quad (2.27)$$

Προφανώς, εάν η πολικότητα της τάσης εισόδου αναστραφεί, θα αναστραφεί και η πολικότητα της τάσης εξόδου. Επιπλέον, δεν υπάρχει περιορισμός στην μορφή της τάσης εισόδου, δηλαδή μπορεί να είναι χρονικά μεταβαλλόμενη οποιασδήποτε μορφής.

• **Αθροιστής (inverting adder)**

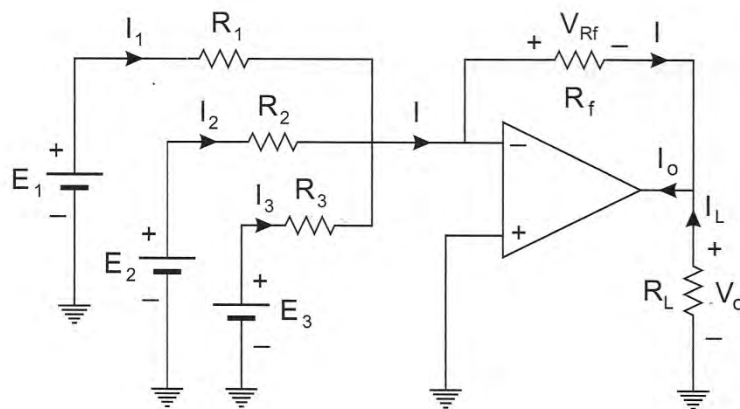
Με την διάταξη του σχήμα 2.30, η οποία αποτελεί εφαρμογή του αναστρέφοντος ενισχυτή μπορούμε να αθροίσουμε οσαδήποτε σήματα εισόδων με κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας. Τα σήματα αυτά δεν είναι απαραίτητο να είναι συνεχή, αλλά μπορεί να είναι οποιασδήποτε μορφής και πολικότητας.

Σύμφωνα με το σχήμα 2.29 και λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση της λειτουργίας του αναστρέφοντος ενισχυτή, ισχύουν τα εξής

$$V_{(-)} = V_{(+)} = 0 \text{ V} \quad (2.28)$$

Τα ρεύματα  $I_1, I_2, I_3$  δίνονται από τις σχέσεις

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1}, I_2 = \frac{E_2}{R_2}, I_3 = \frac{E_3}{R_3}, \quad A \quad (2.29)$$



Σχήμα 2.30: Συνδεσμολογία αθροιστή

Επιπλέον

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad , \quad A \quad (2.30)$$

Επομένως

$$V_O = -V_f = -R_f I = -\left( \frac{R_f}{R_1} E_1 + \frac{R_f}{R_1 2} E_2 + \frac{R_f}{R_3} E_3 \right) \quad , \quad V \quad (2.31)$$

Πράγματι λοιπόν σύμφωνα με την (2.31), η τάση εξόδου προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους τάσεων εισόδου, με συντελεστές βαρύτητας τα επιμέρους κέρδη κλειστού βρόχου.

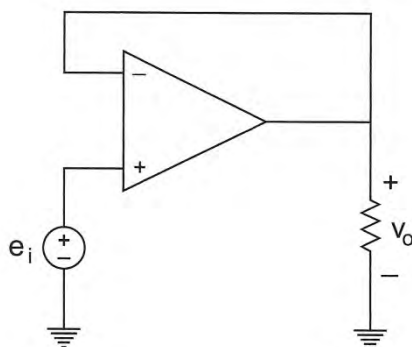
Στην ειδική περίπτωση όπου  $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$  , η (2.31)

παίρνει την μορφή

$$V_O = -(E_1 + E_2 + E_3) \quad , \quad V \quad (2.32)$$

#### ▪ Ακόλουθος τάσης

Για να είναι επιτυχής η σύζευξη μεταξύ δύο βαθμίδων, θα πρέπει η αντίσταση εξόδου της πρώτης βαθμίδας να είναι κατά πολύ μικρότερη της αντίστασης εισόδου της επόμενης βαθμίδας. Σε αντίθετη περίπτωση, η δεύτερη βαθμίδα αποτελεί φορτίο για την πρώτη, με αποτέλεσμα την αλλοίωση της επιθυμητής λειτουργίας.



**Σχήμα 2.31:** Συνδεσμολογία ακόλουθου τάσης

Ο ακόλουθος τάσης (**voltage follower**) ή ενισχυτής απομόνωσης (**buffer amplifier**), σχήμα 2.31, αποτελεί την ιδανική λύση της "ενδιάμεσης βαθμίδας", για την προσαρμογή αντίστασης μεταξύ δύο βαθμίδων, στις οποίες οι απαιτήσεις απευθείας σύζευξης δεν ικανοποιούνται.

Σύμφωνα με το σχήμα 2.31 ισχύουν τα εξής

$$V_{(+)} = V_{(-)} = e_i \quad , \quad V \quad (2.33)$$

Αλλά λόγω της συγκεκριμένης σύνδεσης του κλάδου ανάδρασης

$$v_o = e_i \quad , \quad V \quad (2.34)$$

Επομένως, σε κάθε χρονική στιγμή η τάση εξόδου ισούται κατά μέγεθος και φάση με την τάση εισόδου. Δηλαδή η τάση εξόδου "ακολουθεί" την τάση εισόδου, εξού και η

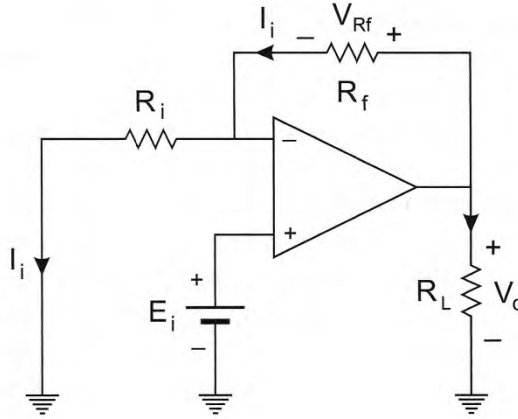


ονομασία ακόλουθος τάσης. Προφανώς λόγω της (2.34), το κέρδος του ακόλουθου τάσης ισούται με την μονάδα.

### 2.10.8 Μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία

Με την συνδεσμολογία του σχήμα 2.32 του μη αναστρέφοντος ενισχυτή (**non-inverting amplifier**), η πολικότητα της τάσης εξόδου είναι η ίδια με εκείνη της τάσης εισόδου. Δηλαδή η φασική απόκλιση μεταξύ των δύο τάσεων είναι μηδενική.

Ενώ η αντίσταση εισόδου του αναστρέφοντος ενισχυτή ισούται με την αντίσταση  $R_i$  (της τάξης των μερικών ΚΩ), στην περίπτωση του μη αναστρέφοντος ενισχυτή



Σχήμα 2.32: Συνδεσμολογία μη αναστρέφοντος ενισχυτή

είναι ίση με την αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή (της τάξης των 100ΜΩ). Με βάση το σχήμα 2.32, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις.

$$V_{(-)} = V_{(+)} = E_i \quad , \quad V \quad (2.35)$$

Επομένως

$$I_i = \frac{V_{(-)}}{R_i} = \frac{E_i}{R_i} \quad , \quad A \quad (2.36)$$

Επιπλέον

$$V_{Rf} = I_i R_f = V_o - E_i \quad , \quad V \quad (2.37)$$

Αλλά από τις (2.36) και (2.37), έχουμε

$$\begin{aligned} V_o - E_i &= E_i \frac{R_f}{R_i} \Rightarrow E_i \left( 1 + \frac{R_f}{R_i} \right) = V_o \Rightarrow \\ V_o &= \left( 1 + \frac{R_f}{R_i} \right) E_i = A_{CL} E_i \end{aligned} \quad (2.38)$$

Επομένως στην περίπτωση του μη αναστρέφοντος ενισχυτή

$$A_{CL} = \left( 1 + \frac{R_f}{R_i} \right) = \left( \frac{R_i + R_f}{R_i} \right) \geq 1 \quad (2.39)$$

## 2.11 Σύγκριση ελεγχόμενων ηλεκτρονικών διακοπών

Η δυνατότητα διαχείρισης αυξημένων ποσοτήτων ισχύος, η ευκολία ελέγχου και το μειωμένο κόστος των σύγχρονων ημιαγωγών ισχύος, σε σύγκριση με εκείνους του σύγχρονου παρελθόντος, έχουν καταστήσει τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος οικονομικά εφικτούς για έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών και έχουν εγκαινιάσει ένα πλήθος από νέες τοπολογίες μετατροπέων. Για την σαφή κατανόηση της πραγματικότητας αυτών των νέων τοπολογιών και εφαρμογών, είναι σημαντικό να συγκριθούν τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων διακοπτικών στοιχείων στερεάς κατάστασης.

Στην περίπτωση που οι ηλεκτρονικοί διακόπτες θεωρηθούν ιδανικοί διακόπτες, η ανάλυση των μετατροπέων γίνεται πολύ πιο εύκολη. Το πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής, είναι ότι οι λεπτομέρειες της λειτουργίας του ηλεκτρονικού διακόπτη ισχύος, δεν επηρεάζουν την βασική λειτουργία του κυκλώματος. Έτσι, μπορούν να γίνουν καλύτερα κατανοητά τα βασικά χαρακτηριστικά των μετατροπέων ισχύος.

Η εμφάνιση του θυρίστορ το 1956, οδήγησε στην πραγματοποίηση μιας σειράς από νέους ηλεκτρονικούς διακόπτες ισχύος, όπως:

- ✓ Το θυρίστορ με σβέση ελεγχόμενη από την πύλη (**Gate Turn-Off thyristor – GTO**)
- ✓ Το διπολικό τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (**Insulated Gate Bipolar Transistor - IGBT**)
- ✓ Το τρανζίστορ στατικής επαγωγής (**Static Induction Transistor – SIT**) ή τρανζίστορ φαινομένου πεδίου με επαφή ισχύος (**Junction Field Effect Transistor – JFET**)
- ✓ Το θυρίστορ στατικής επαγωγής (**Static Induction Thyristor – SITH**) ή θυρίστορ ελεγχόμενο από πεδίο (**Field – Controlled Thyristor – FCT**)
- ✓ Το ελεγχόμενο MOS θυρίστορ (**MOS – controller thyristor**)

**Θυρίστορ.** Έχει μια μοναδική δομή με τέσσερα στρώματα διαδοχικών περιοχών τύπου p και τύπου n. Το τμήμα ορθής πόλωσης της χαρακτηριστικής i-v του θυρίστορ έχει δύο ευσταθείς περιοχές, η μια είναι η κατάσταση αγωγιμότητας και η άλλη είναι η κατάσταση αποκοπής. Το θυρίστορ είναι ένα αργό διακοπτικό στοιχείο σε σύγκριση με τα BJT ή με τα MOSFET, εξαιτίας των μεγάλων χρόνων ζωής των φορέων που χρησιμοποιούνται, ώστε να είναι μικρές οι απώλειες αγωγιμότητας και εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας αποθηκευμένων φορτίων. Για τον λόγο αυτό τα θυρίστορ συνήθως χρησιμοποιούνται, όταν οι ταχύτητες μετάβασης είναι μικρές. Επίσης τα θυρίστορ έχουν μεγάλα ρεύματα ανάστροφης αποκατάστασης.

**Θυρίστορ με σβέση ελεγχόμενη από την πύλη (GTO).** Έχει την ίδια δομή με τέσσερα στρώματα, όπως το κοινό θυρίστορ, αλλά στην δομή γίνονται ειδικές τροποποιήσεις ώστε η πύλη να μπορεί να αποκόψει το στοιχείο. Το τμήμα ορθής πόλωσης της χαρακτηριστικής i-v του GTO είναι το ίδιο με του κοινού θυρίστορ, αλλά το GTO με βραχυκύκλωση της ανόδου, έχει πολύ περιορισμένη ικανότητα

ανάστροφης αποκοπής. Για εφαρμογές μέσης και μεγάλης ισχύος χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά θυρίστορ GTO. Το GTO πρέπει να προστατεύεται ιδίως από υπερεντάσεις, επειδή η πύλη δεν μπορεί να διακόπτει ρεύματα που υπερβαίνουν μια ορισμένη μέγιστη τιμή.

**Πίνακας 2.11.1**

	<b>Θυρίστορ</b>	<b>GTO</b>	<b>MOSFET</b>	<b>IGBT</b>
<b>Μέγιστη τιμή (V)</b>	6000	4500	500	1200
<b>Μέγιστη τιμή (A)</b>	3500	3000	50	400
<b>Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)</b>	-40 -125	-40 -125	-55 -150	-20 -150
<b>Συχνότητα μεταγωγής (Hz)</b>	<1200	<1200	<100000	<20000
<b>dv/dt (V/ms)</b>	30	Οριακό από τις απώλειες του στοιχείου	Οριακό από το effect Miller	Οριακό από τις απώλειες του στοιχείου
<b>di/dt (A/ms)</b>	200	300	Πολύ μεγάλο	Πολύ μεγάλο
<b>Χρόνος εισόδου στην αγωγή (ms)</b>	1.1	4	0.00009 (90 ns)	0.9
<b>Χρόνος εξόδου από την αγωγή (ms)</b>	220	10	0.14	1.4
<b>Πτώση τάσης</b>	1.9	4	3.2	3.2
<b>Περιοχή εφαρμογής</b>	Συστήματα κίνησης Σ.Ρ. και Ε.Ρ. πηγές ισχύος, ηλεκτρονικοί διακόπτες	Συστήματα κίνησης με ηλεκτρικές μηχανές, συστήματα UPS	Πηγές ισχύος σε μετάβαση, συστήματα κίνησης με κινητήρες χωρίς ψήκτες, ηλεκτρονικοί ηλεκτρονόμοι.	Συστήματα κίνησης Ε.Ρ, συστήματα UPS, Πηγές ισχύος σε μετάβαση

**Διπολικά τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (IGBT).** Είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί ως MOSFET με μια περιοχή έκχυσης στην πλευρά του απαγωγού, που προκαλεί διαμόρφωση της αγωγιμότητας της περιοχής απαγωγού – μετατόπισης ώστε να ελαττώνονται οι απώλειες αγωγιμότητας. Με αυτόν τον τρόπο, η λειτουργία του IGBT βρίσκεται μεταξύ της λειτουργίας του MOSFET και της λειτουργίας του BJT. Είναι ταχύτερο από το συγκρίσιμο BJT, αλλά βραδύτερο από το συγκρίσιμο MOSFET.

Η δομή του IGBT περιέχει ένα παρασιτικό θυρίστορ το οποίο δεν επιτρέπεται να τίθεται σε κατάσταση αγωγιμότητας, επειδή τότε η πύλη θα χάσει την ικανότητα της να θέτει το στοιχείο σε κατάσταση αποκοπής.

**Τρανζίστορ στατικής επαγωγής (SIT) ή τρανζίστορ φαινομένου πεδίου με επαφή ισχύος (JFET).** Είναι ένα στοιχείο με φορείς πλειονότητας που σε κανονικές συνθήκες βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας. Η χαρακτηριστική  $i - v$  του στοιχείου αυτού μοιάζει με την χαρακτηριστική της τρίοδης λυχνίας. Στα διακοπτικά χαρακτηριστικά με τα MOSFET και έχει λίγο μεγαλύτερες απώλειες αυτήν κατάσταση αγωγιμότητας.

**Πίνακας 2.11.2**

	<b>SIT</b>	<b>SITH</b>	<b>MCT</b>
<b>Μέγιστη τιμή (V)</b>	1200	1200	1000
<b>Μέγιστη τιμή (A)</b>	300	300	100
<b>Θερμοκρασία Λειτουργίας ( ° C )</b>	-50 -150	-40 -125	-55 -150
<b>Συχνότητα μεταγωγής (Hz)</b>	<70000	Μερικά kHz	<20000
<b>dv/dt (V/ms)</b>	Πολύ μεγάλο	2000	5000
<b>di/dt (A/ms)</b>	Πολύ μεγάλο	900	1000
<b>Χρόνος εισόδου στην αγωγή (ms)</b>	0.25	2	1
<b>Χρόνος εξόδου από την αγωγή (ms)</b>	0.3	9	2.1
<b>Πτώση τάσης</b>	1.8	4	1.1
<b>Περιοχή εφαρμογής</b>	Γεννήτριες AM/FM, γεννήτριες υπερήχων, στατικοί αντισταθμιστές.	Στατικοί αντισταθμιστές, ταχείες ασφάλειες.	Συστήματα κίνησης, E.P, συστήματα UPS, στατικοί αντισταθμιστές.

**Θυρίστορ στατικής επαγωγής (SITH) ή θυρίστορ ελεγχόμενο από πεδίο (FCT).**

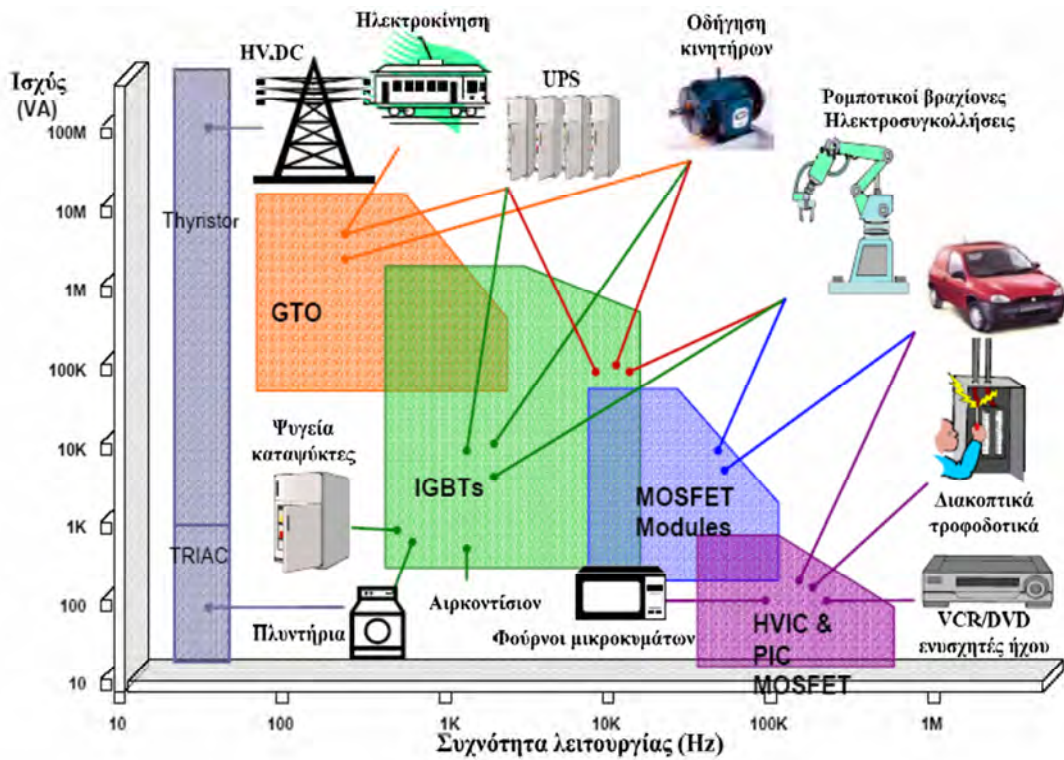
Έχει έναυση και σβέση ελεγχόμενες από την πύλη και έτσι είναι ο πιθανός αντικαταστάτης του GTO. Εμφανίζεται να έχει μεγαλύτερες ταχύτητες μετάβασης από το GTO.

Ελεγχόμενο MOS θυρίστορ (MCT). Είναι ουσιαστικά ένα GTO με ολοκληρωμένες πύλες που οδηγούνται από MOS και οι οποίες ελέγχουν και την έναυση και την σβέση. Το MCT είναι πιθανό ότι θα απλουστεύσει σημαντικά την σχεδίαση

κυκλωμάτων που χρησιμοποιούν το GTO.

Πρέπει να σημειωθεί ότι παράλληλα με τις βελτιώσεις αυτών των ημιαγωγικών στοιχείων, εξετάζονται και νέες διατάξεις. Η πρόοδος στην τεχνολογία των ημιαγωγών, θα οδηγήσει αναμφισβήτητα σε υψηλότερες ονομαστικές τιμές ισχύος, μεγαλύτερες ταχύτητες μετάβασης και χαμηλότερο κόστος. Στο σχήμα 2.33 παρουσιάζεται μια ανακεφαλαίωση των δυνατοτήτων των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος.


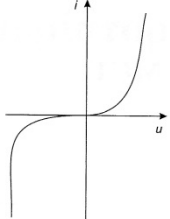
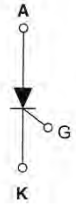
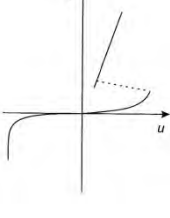
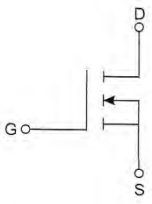
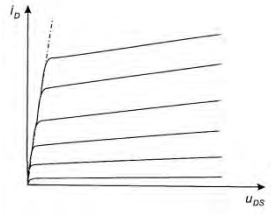
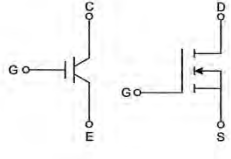
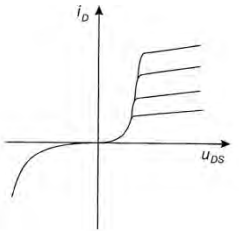
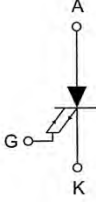
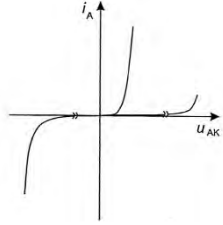
Απ' ότι φαίνεται στο σχήμα όλα τα στοιχεία εκτός από το MCT, έχουν μια σχετικά αναπτυγμένη τεχνολογία και αναμένονται γι' αυτά μόνο εξελικτικές βελτιώσεις των δυνατοτήτων τους στα επόμενα λίγα χρόνια. Ωστόσο, η τεχνολογία του MCT βρίσκεται σε κατάσταση ταχείας ανάπτυξης και είναι πιθανές σημαντικές βελτιώσεις των δυνατοτήτων του, όπως σημειώνεται στο διάγραμμα με το βέλος ανάπτυξης.

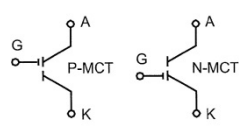
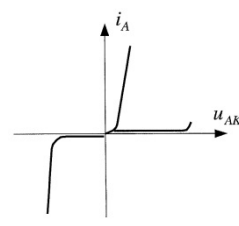
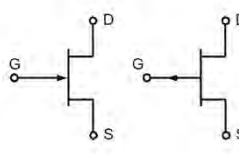
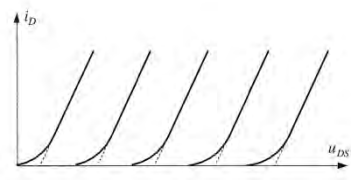
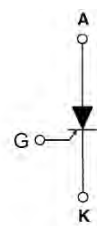
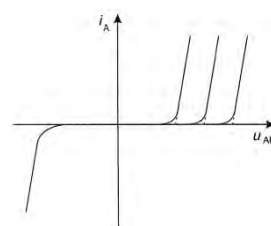


Σχήμα 2.33: Ανακεφαλαίωση των δυνατοτήτων των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος

### 2.11.1 Σύμβολα και χαρακτηριστικές των ηλεκτρονικών διακοπών

Πίνακας 2.11.3

Ονομασία Ηλεκτρονικών διακοπών	Σύμβολο	$i - v$ χαρακτηριστικές
Δίοδος		
Θυρίστρον		
MOSFET		
IGBT		
GTO		

<p>MCT</p>		
<p>SIT ή JFET</p>		
<p>SITH ή FCT</p>		

## Κεφάλαιο 3

### Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης DC-DC (DC CHOPPERS)

#### 3.1 Εισαγωγή

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης ή ψαλιδιστές συνεχούς τάσης (DC Choppers) είναι τα κυκλώματα εκείνα, τα οποία μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς τάσης σε πηγή συνεχούς τάσης άλλης τιμής και ορισμένες φορές άλλης πολικότητας. Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης υλοποιούνται χρησιμοποιώντας ημιαγωγούς όπως το τρανζίστορ ισχύος, το IGBT, το MOSFET ισχύος, το θυρίστορ ή κάποιο ελεγχόμενο ημιαγωγό ισχύος καθώς επίσης διόδους και LC κυκλώματα. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ελεγχόμενοι αυτοί ημιαγωγοί μπορούν να βρεθούν σε μόνο δύο καταστάσεις λειτουργίας. Συγκεκριμένα στην κατάσταση αγωγής όσο διαρκεί ο παλμός έναυσης στην πύλη τους και στην κατάσταση αποκοπής όταν αυτός αφαιρεθεί. Στην συνέχεια θα εξετάσουμε τους ίδιους μετατροπείς αλλά σε εφαρμογές ελέγχου κινητήρων συνεχούς ρεύματος όπου στην περίπτωση αυτή το φορτίο (δηλαδή ο κινητήρας) αποτελείται από αυτεπαγωγή των πηνίων του τυμπάνου, της εσωτερικής αντίστασης των πηνίων καθώς και την αντιελεκτρεγερτική δύναμη ή τάση.

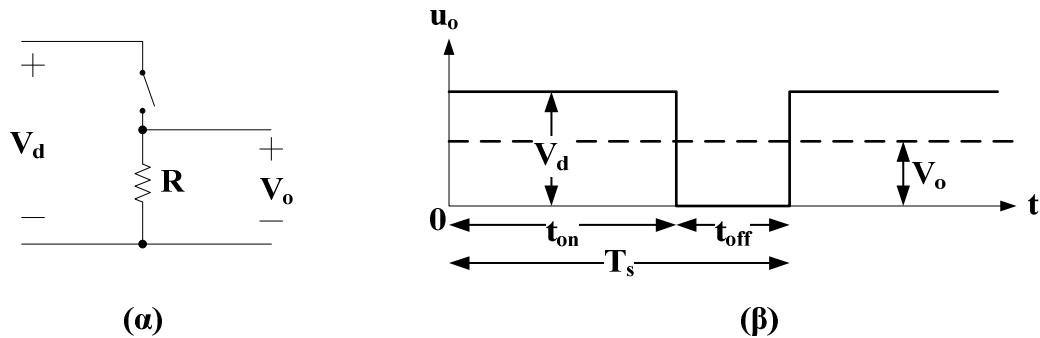
#### 3.2 Έλεγχος των μετατροπέων DC-DC

Στους μετατροπείς dc-dc η μέση dc τάση εξόδου πρέπει να ελέγχεται, ώστε να είναι σε ένα επιθυμητό επίπεδο, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι η τάση εισόδου και το φορτίο μπορούν να αυξομειώνονται. Οι μετατροπείς dc-dc διακοπτικού τύπου χρησιμοποιούν έναν ή περισσότερους διακόπτες για το μετασχηματισμό της dc τάσης από ένα επίπεδο σε ένα άλλο. Σ' ένα dc-dc μετατροπέα με δεδομένη τάση εισόδου, η μέση τάση εξόδου ρυθμίζεται ελέγχοντας τους χρόνους έναυσης και σβέσης ( $t_{on}$  και  $t_{off}$ ) των διακοπών. Για να καταστεί φανερή η αρχή της μετατροπής διακοπτικού τύπου, ας θεωρηθεί ένας βασικός dc-dc μετατροπέας, όπως αυτός του **Σχ.3α**. Η μέση τιμή  $V_0$  της τάσης εξόδου  $U_0$ , στο **Σχ.3β**, εξαρτάται από τους χρόνους  $t_{on}$  και  $t_{off}$ . Μια από τις μεθόδους ελέγχου της μέσης τάσης εξόδου χρησιμοποιεί σταθερή συχνότητα μετάβασης (και συνεπώς σταθερή περίοδο μετάβασης  $T_s = t_{on} + t_{off}$ ) και ρύθμιση της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Σ' αυτήν τη μέθοδο, που ονομάζεται μετάβαση με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse-Width Modulation, PWM), μεταβάλλεται η *σχετική διάρκεια αγωγής* (duty ratio)  $D = t_{on} / t_s$ , που ορίζεται ως ο λόγος της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός προς την περίοδο μετάβασης.

Η άλλη μέθοδος ελέγχου είναι γενικότερη. Σύμφωνα με αυτήν μεταβάλλονται, τόσο η συχνότητα μετάβασης (και η περίοδος), όσο και η διάρκεια κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο σε μετατροπείς dc-dc που χρησιμοποιούν thyristors με εξαναγκασμένη μετάβαση και για το λόγο αυτό δεν θα εξεταστεί σ' αυτό το



βιβλίο. Οι μεταβολές της συχνότητας μετάβασης καθιστούν δύσκολο το φιλτράρισμα της κυμάτωσης των κυματομορφών της εισόδου και της εξόδου.



Σχήμα 3: Διακοπτική dc-dc μετατροπή

Στην διαμόρφωση με PWM με σταθερή συχνότητα μετάβασης, το σήμα ελέγχου του διακόπτη, το οποίο ελέγχει την κατάστασή του (κλειστός ή ανοιχτός), παράγεται με τη σύγκριση του επιπέδου τάσης του σήματος ελέγχου  $u_{control}$  με μια περιοδική κυματομορφή σταθερού πλάτους, όπως φαίνεται στα Σχ.3α και 3β. Γενικά, το σήμα της τάσης ελέγχου λαμβάνεται ενισχύοντας το σφάλμα ή τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής τάσης εξόδου και της επιθυμητής της τιμής. Η συχνότητα της περιοδικής κυματομορφής (συνήθως είναι πριονωτή), καθορίζει τη συχνότητα μετάβασης. Στον έλεγχο με PWM η συχνότητα αυτή διατηρείται σταθερή και επιλέγεται σε μια περιοχή από μερικά kHz μέχρι μερικές εκατοντάδες kHz. Όταν το ενισχυμένο σήμα σφάλματος, που μεταβάλλεται πολύ αργά με το χρόνο σε σχέση με τη συχνότητα μετάβασης, είναι μεγαλύτερο από την πριονωτή κυματομορφή, το σήμα ελέγχου του διακόπτη γίνεται high, προκαλώντας το κλείσιμο του διακόπτη. Διαφορετικά, ο διακόπτης είναι ανοιχτός. Σύμφωνα με το Σχ.3, η σχετική διάρκεια αγωγής μπορεί να εκφραστεί, ως συνάρτηση της  $u_{control}$  και του πλάτους της πριονωτής κυματομορφής  $\hat{V}_{st}$  με την σχέση

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{u_{control}}{\hat{V}_{st}}$$

Οι μετατροπείς dc-dc μπορούν να λειτουργούν με δύο διαφορετικούς τρόπους: (1) με αγωγή συνεχούς ρεύματος και (2) με αγωγή ασυνεχούς ρεύματος. Στην πράξη, ένας μετατροπέας μπορεί να λειτουργεί και με τους δύο τρόπους, οι οποίοι έχουν έντονα διαφορετικά χαρακτηριστικά. Για τον λόγο αυτό, ένας μετατροπέας και ο έλεγχός του πρέπει να σχεδιάζονται με βάση και τους δύο τρόπους λειτουργίας.

### 3.3 Είδη μετατροπέων ηλεκτρικής ενέργειας

Αναλόγως με το είδος της μετατροπής της ηλεκτρικής ισχύος, που θέλουμε να πετύχουμε έχουμε τις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες μετατροπέων :

- 1) **Ανορθωτής τάσεως (AC/DC Rectifiers):** Σε αυτήν την κατηγορία επιτυγχάνουμε την μετατροπή μια εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή τάση.
- 2) **Αντιστροφείς (DC/AC Inverters):** Σε αυτήν την κατηγορία μπορούμε να μετατρέψουμε μια συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη τάση.
- 3) **Μετατροπείς τάσεως (DC/DC Converters):** Σε αυτήν την κατηγορία επιτυγχάνουμε την παροχή ελεγχόμενης συνεχής τάσης από μια πηγή ορισμένης τιμής συνεχής τάσης.
- 4) **Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσεως :** Σε αυτήν την κατηγορία μπορούμε να μετατρέψουμε μια εναλλασσόμενη τάση ορισμένης τιμής, συχνότητας και αριθμού φάσεων σε μια άλλη εναλλασσόμενη τάση με διαφορετική τιμή, διαφορετική συχνότητα και διαφορετικό αριθμό φάσεων.

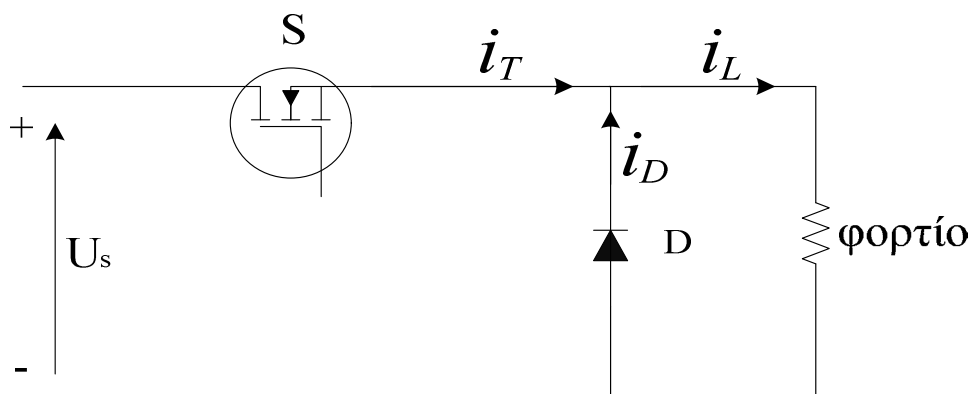
### 3.4 Γενικά για τον μετατροπέα DC/DC

Ο μετατροπέας Σ.Ρ./Σ.Ρ. χρησιμοποιείται για την παροχή ελεγχόμενης συνεχής τάσης από μια πηγή ορισμένης τιμής συνεχής τάσης. Οι μετατροπείς αυτοί είναι γνωστοί και με το όνομα Chopper. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο μετατροπέας Σ.Ρ./Σ.Ρ. είναι το ισοδύναμο του «μετασχηματιστή» για το συνεχές ρεύμα.

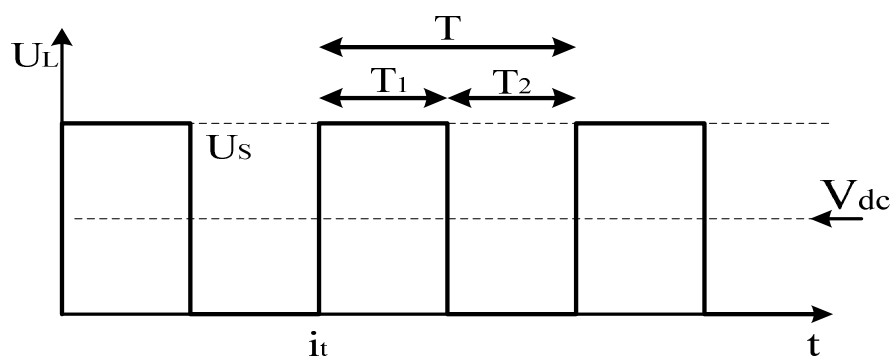
Επίσης, καλό είναι να σημειωθεί πως υπάρχουν άλλοι τρεις κλασσικοί τρόποι που μπορούμε να πετύχουμε μετατροπή Σ.Ρ./Σ.Ρ. απλά με τον μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ. έχουμε μερικά σοβαρά πλεονεκτήματα:

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

Στο σχήμα 3.1 φαίνεται ένα κύκλωμα μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ. σχήμα (α) και η χαρακτηριστική της τάσης εξόδου του σχήμα (β).



(α)



(β)

Σχήμα 3.1

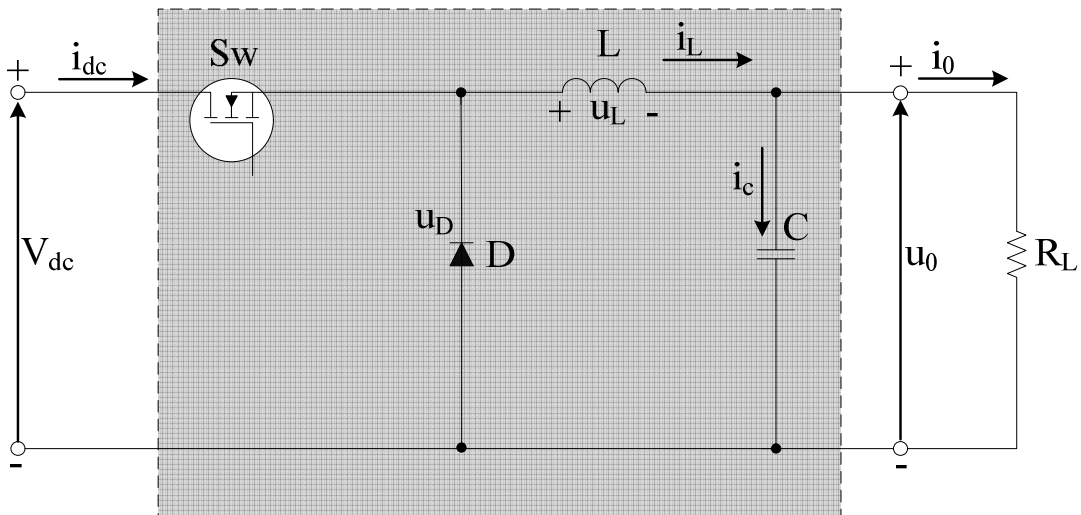
Από τα παραπάνω σχήματα βλέπουμε ότι, η μέση τιμή της τάσης  $U_L$  η οποία τροφοδοτεί το φορτίο μπορεί να πάρει τιμές τάσης πολύ χαμηλές σχεδόν κοντά στο μηδέν έως τιμές που να πλησιάζουν την τιμή της τάσης  $U_s$ .

Η μέση τιμή της τάσης  $U_L$  εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες :

- 1) Από την συχνότητα  $F = \frac{1}{T}$  επανάληψης του ανοίγματος και του κλεισίματος του διακόπτη S. Η συχνότητα F είναι ανάλογη με την μέση τιμή της τάσης  $U_L$ , επομένως όσο αυξάνεται η συχνότητα F τότε αυξάνεται και η μέση τιμή της τάσης  $U_L$ .
- 2) Από την διάρκεια του χρόνου  $t_{on}$  κατά τον οποίο παραμένει ανοικτός ο διακόπτης S. Η διάρκεια του χρόνου  $t_{on}$  είναι ανάλογη με την μέση τιμή της τάσης  $U_L$ , άρα όσο αυξάνεται η διάρκεια του χρόνου  $t_{on}$  αυξάνεται και η μέση τιμή της τάσης  $U_L$ .
- 3) Από συνδυασμό των παραπάνω παραγόντων.

### 3.5 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης ( stepdown converter )

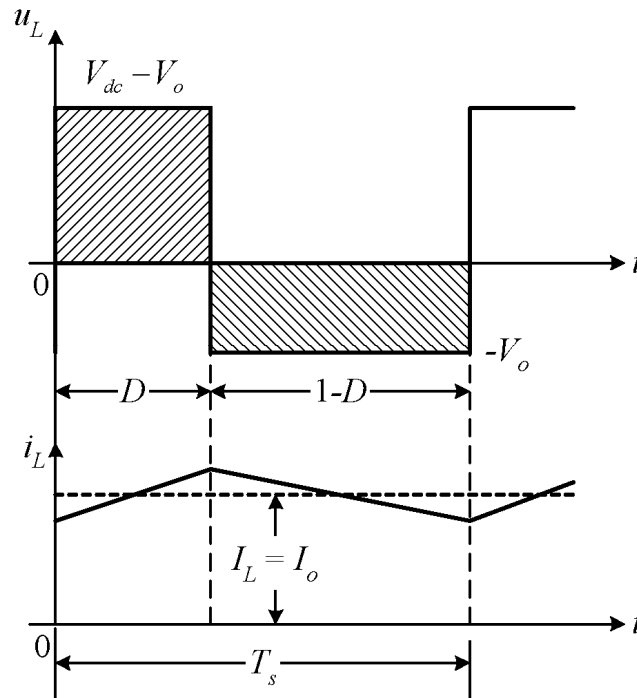
Όπως γίνεται αντιληπτό και από την ονομασία του, σε αυτόν τον μετατροπέα η τάση εξόδου έχει μικρότερη τιμή από αυτή της εισόδου. Κατά το διάστημα που ο διακόπτης  $S_w$  είναι σε αγωγή η πηγή εισόδου παρέχει ενέργεια στο φορτίο και την επαγωγή, ενώ η διόδος ελευθέρως ροής δεν άγει καθώς είναι ανάστροφα πολωμένη. Κατά την περίοδο σβέσης του διακόπτη το ρεύμα της επαγωγής ρέει μέσω της διόδου. Όταν το ρεύμα ρέει στην επαγωγή καθ' όλο το διάστημα αποκοπής του διακόπτη, ο μετατροπέας λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος, ενώ όταν μηδενίζεται στη περίοδο αποκοπής του διακόπτη, τότε ο μετατροπέας λειτουργεί με ασυνεχή αγωγή του ρεύματος. Η δομή του μετατροπέα υποβιβασμού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.2:Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Η χρήση του φίλτρου LC αποσκοπεί στην αντιμετώπιση του προβλήματος της διακύμανσης της τάσης, ενώ η διόδος ελευθέρως ροής χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση των υπερτάσεων.

Συνεχής αγωγή ρεύματος



**Σχήμα 3.3:** Κυματομορφές μετατροπέα υποβιβασμού για συνεχή αγωγή ρεύματος

Ο διακόπτης άγει για  $t_{on} = D \cdot T_s$  (3.1)

και βρίσκεται σε αποκοπή για  $t_{off} = (1 - D) \cdot T_s$  (3.2)

Κατά το διάστημα αποκοπής, το ρεύμα της επαγωγής  $i_L$  ρέει μέσω της διόδου ελευθέρως ροής. Η μέση τιμή της  $u_L$  είναι 0 καθώς η αυτεπαγωγή δεν καταναλώνει άεργο ισχύ.

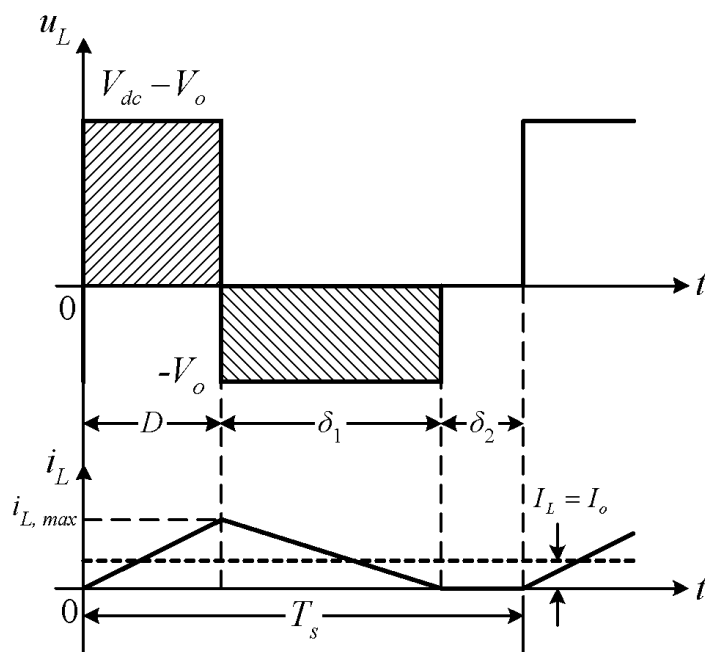
Άρα:  $(V_{dc} - V_o)D \cdot T_s = V_o(1 - D) \cdot T_s$  (3.3)

Από όπου προκύπτει :  $\frac{V_o}{V_{dc}} = D$  (3.4)

Επειδή τα στοιχεία του μετατροπέα θεωρούνται ιδανικά η ισχύς εισόδου θα είναι ίση με αυτή της εξόδου, δηλαδή:

$$V_{dc} I_{dc} = V_o \cdot I_o \Rightarrow \frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{I_o}{I_{dc}} = D \quad (3.5)$$

### Ασυνεχής αγωγή του ρεύματος



**Σχήμα 3.4:**Κυματομορφές μετατροπέα υποβιβασμού για ασυνεχή αγωγή ρεύματος

Αν το ρεύμα του φορτίου  $I_0$  μειωθεί αρκετά, το ρεύμα στην επαγωγή γίνεται ασυνεχές. Κατά το διάστημα  $\delta_2 T_s$ , η τάση και το ρεύμα στην επαγωγή είναι μηδέν και ο πυκνωτής του φίλτρου παρέχει το ρεύμα στο φορτίο.

Άρα θα ισχύει: 
$$(V_{dc} - V_o)D \cdot T_s - V_o \delta_1 T_s = 0 \quad (3.6)$$

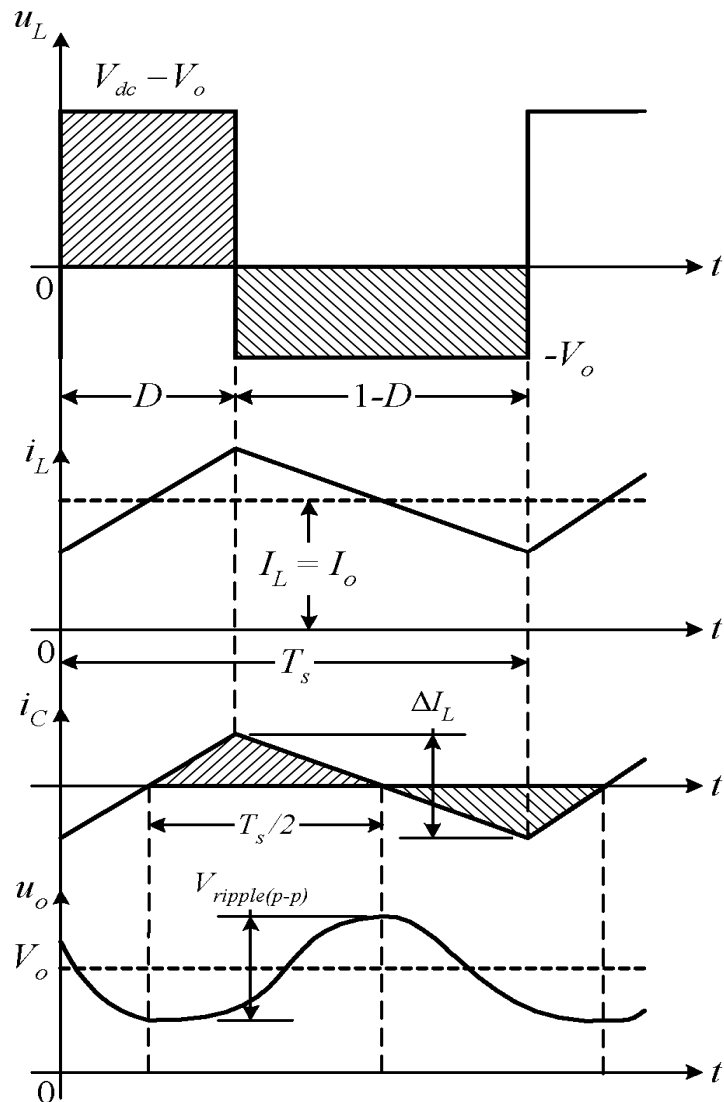
Από όπου προκύπτει: 
$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{D}{D + \delta_1} \quad (3.7)$$

Η μέση τιμή του ρεύματος επαγωγής και εξόδου θα είναι:

$$I_L = I_o = \frac{\delta_1 T_s}{2 \cdot L} D \cdot V_{dc} \quad (3.8)$$

### Κυμάτωση της τάσης εξόδου (ripple)

Η τάση εξόδου στην πράξη δεν είναι απολύτως σταθερή, αλλά μεταβάλλεται γύρω από τη μέση τιμή  $V_o$ . Η κυμάτωση αυτή οφείλεται στο μεταβαλλόμενο ρεύμα μηδενικής μέσης τιμής, το οποίο ρέει μέσω του πυκνωτή.



**Σχήμα 3.5:**Κυμάτωση τάσης εξόδου μετατροπέα υποβιβασμού για συνεχή αγωγή

Η κυμάτωση ορίζεται από την σχέση:

$$V_{ripple(p-p)} = \frac{\Delta_Q}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{T_s}{2} \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3.9)$$

Η διακύμανση του ρεύματος στην επαγωγή είναι:

$$\Delta I_L = \frac{V_o(1-D)T_s}{L} \quad (3.10)$$

Η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου LC είναι:

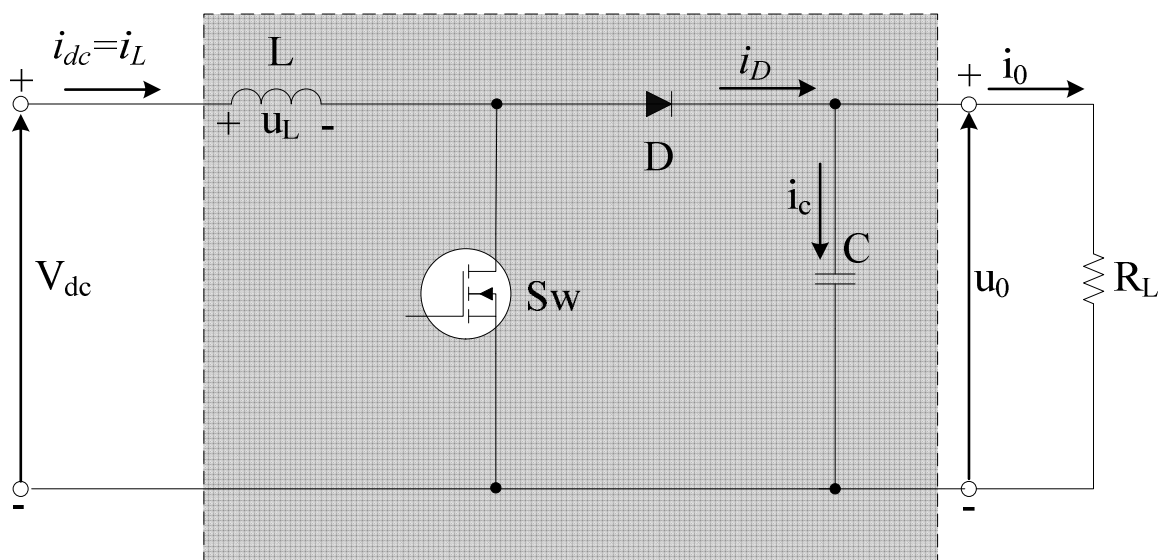
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.11)$$

Και τελικά:

$$V_{ripple(p-p)} = \frac{\pi^2}{2} V_0 (1-D) \left( \frac{f_c}{f_s} \right)^2 \quad (3.12)$$

### 3.6 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης ( stepup converter )

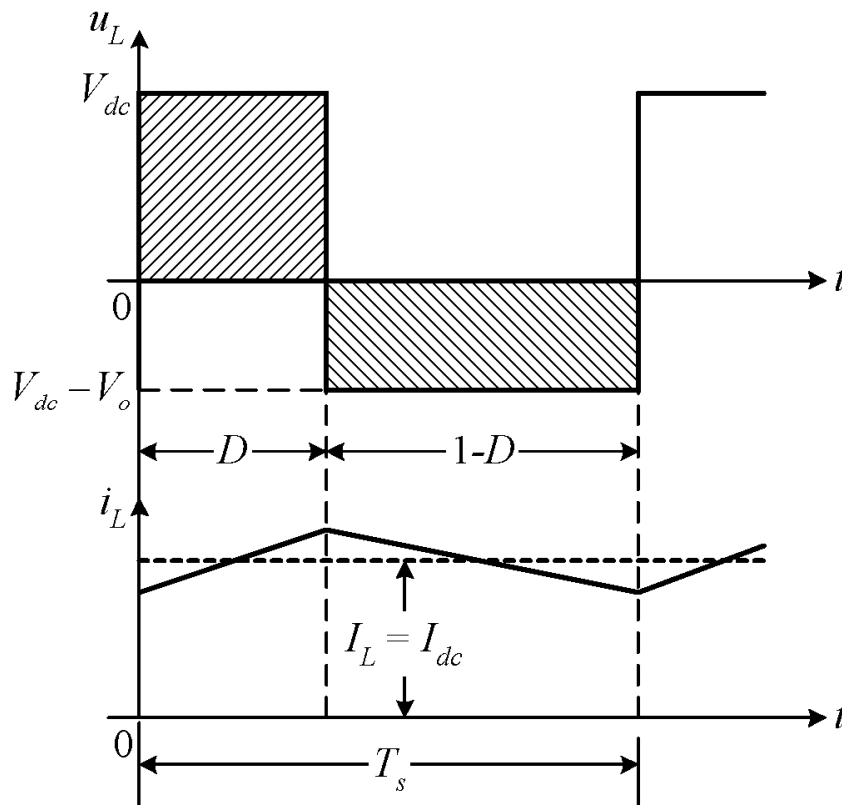
Αντίθετα με την περίπτωση του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, σε αυτόν τον μετατροπέα η τιμή της τάσης εξόδου είναι μεγαλύτερη αυτής της εισόδου. Όταν ο διακόπτης  $S_w$  είναι σε αγωγή, η πηγή εισόδου παρέχει ενέργεια στη επαγωγή τη οποία και αποθηκεύει σε μορφή μαγνητικού πεδίου. Η δίοδος δεν άγει γιατί είναι ανάστροφα πολωμένη και η έξοδος είναι απομονωμένη από την είσοδο. Όταν ο διακόπτης είναι σε αποκοπή, το ρεύμα στην επαγωγή μειώνεται και η  $U_L$  αλλάζει πολικότητα. Μόλις η τάση επαγωγής γίνει ίση με  $V_{dc}-V_0$ , η δίοδος πολώνεται ορθά και η ενέργεια μεταφέρεται από την πηγή και την επαγωγή στο φορτίο.



Σχήμα 3.6:Κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης τάσης



Συνεχής αγωγή του ρεύματος



Σχήμα 3.7:Κυματομορφές μετατροπέα ανύψωσης για συνεχή αγωγή ρεύματος

Άρα: 
$$V_{dc}D \cdot T_s + (V_{dc} - V_o)(1-D) \cdot T_s = 0 \quad (3.13)$$

Από όπου προκύπτει: 
$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{1}{1-D} \quad (3.14)$$

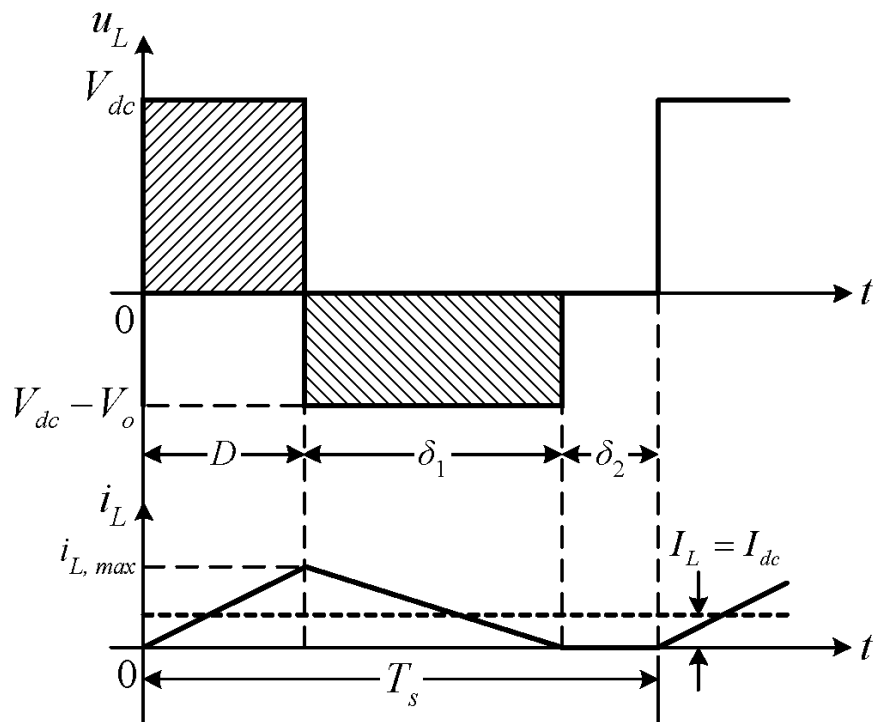
Θεωρώντας τις απώλειες μηδενικές θα πρέπει:

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

$$V_{dc}I_{dc} = V_oI_o \Leftrightarrow$$

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{I_{dc}}{I_o} = \frac{1}{1-D} \quad (3.15)$$

Ασυνεχής αγωγή του ρεύματος



Σχήμα 3.8: Κυματομορφές μετατροπέα ανύψωσης για ασυνεχή αγωγή ρεύματος

Η μέση τιμή της  $U_L$  είναι μηδέν, άρα θα ισχύει:

$$V_{dc}D \cdot T_s + (V_{dc} - V_o)\delta_1 \cdot T_s = 0 \quad (3.16)$$

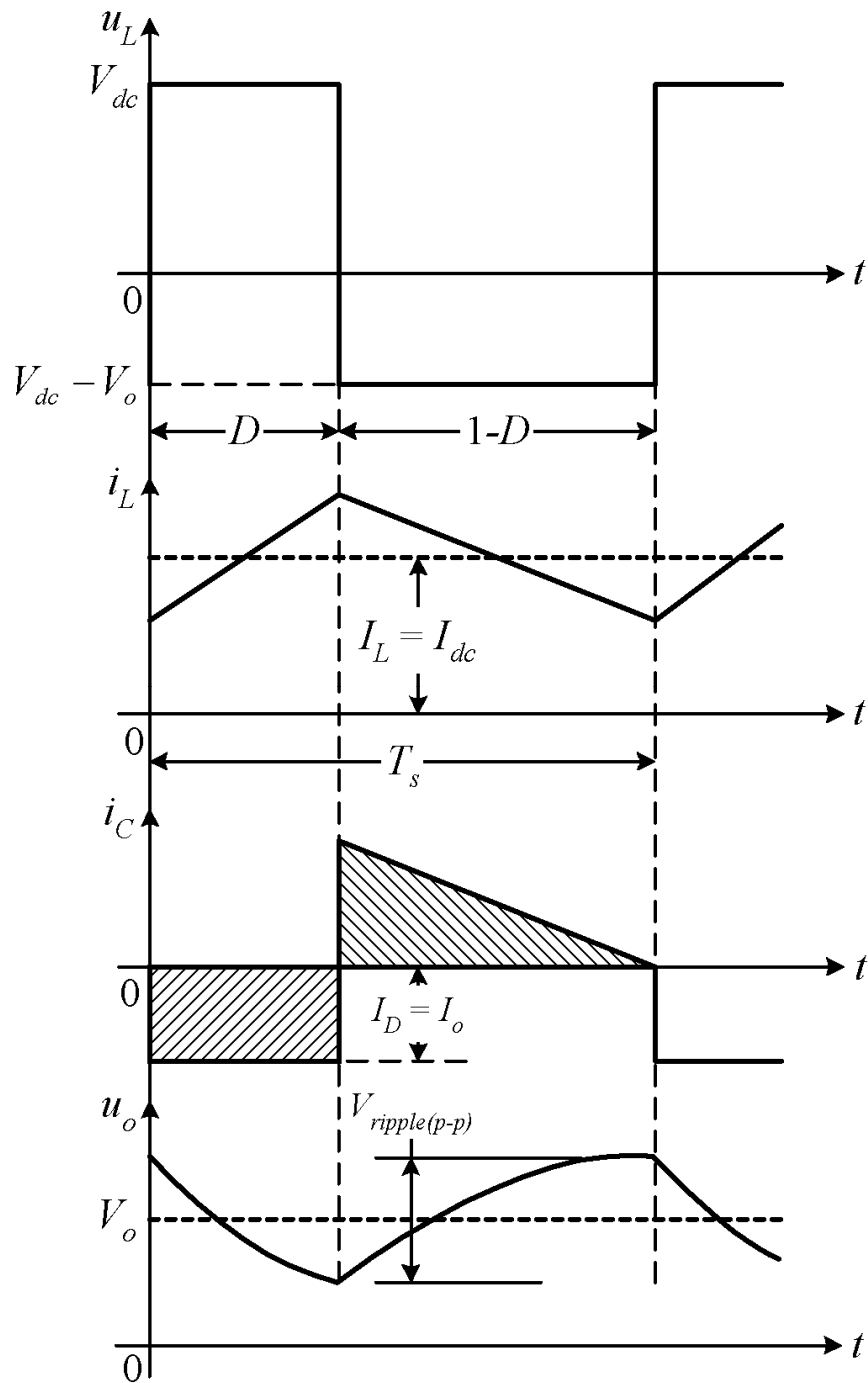
Από όπου προκύπτει:

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{I_{dc}}{I_o} = \frac{D + \delta_1}{\delta_1} \quad (3.17)$$

Για το ρεύμα εισόδου ισχύει:

$$I_{dc} = I_L = \frac{D + \delta_1}{2} \frac{V_{dc}}{L} D \cdot T_s \quad (3.18)$$

**Κυμάτωση της τάσης εξόδου**



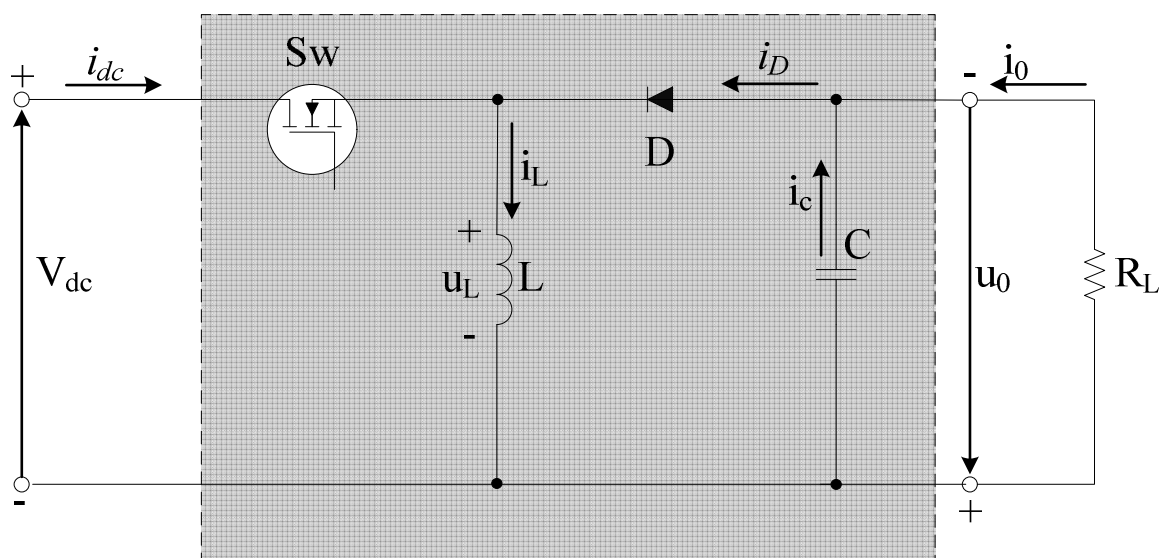
**Σχήμα 3.9:**Κυμάτωση της τάσης εξόδου μετατροπέα ανύψωσης με συνεχή αγωγή ρεύματος

Η κυμάτωση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{ripple} = \frac{\Delta_Q}{C} = \frac{I_o D \cdot T_s}{C} = \frac{V_o}{R_L C} D \cdot T_s \quad (3.19)$$

### 3.7 Μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης τάσης ενός διακόπτη

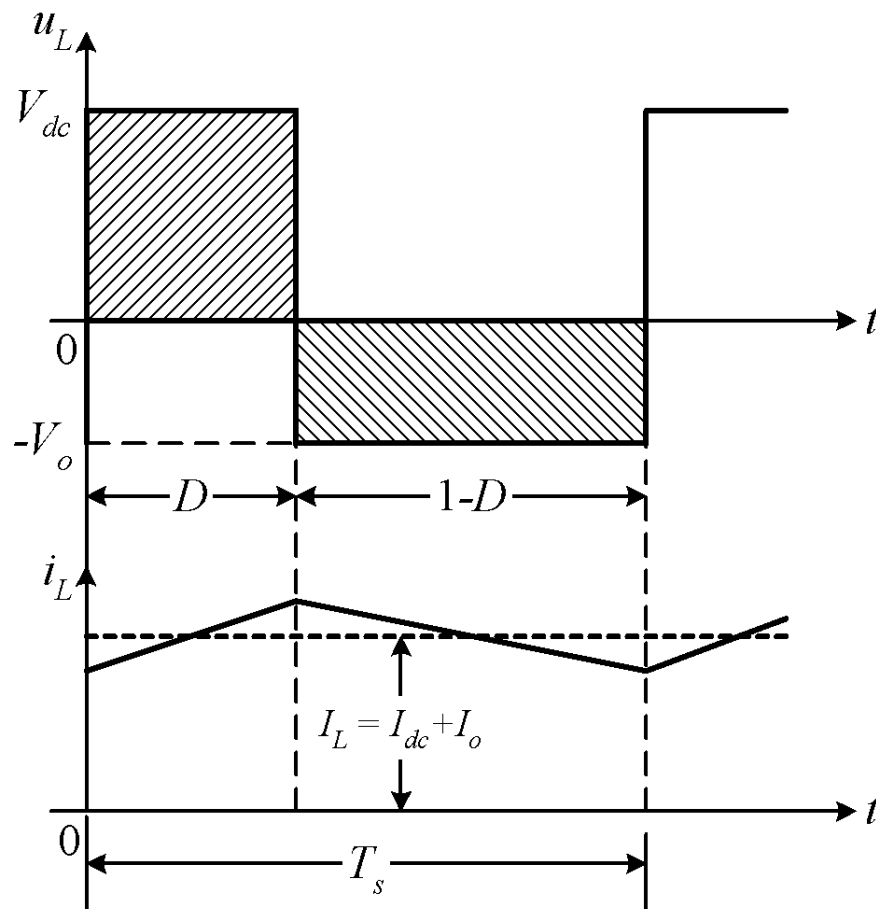
Σε κάποιες εφαρμογές που η τάση εξόδου απαιτείται να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της συνεχούς τάσης εισόδου, χρησιμοποιείται μια μεγάλη ποικιλία μετατροπέων, οι οποίοι περιλαμβάνουν ένα ή δύο ελεγχόμενους διακόπτες ισχύος.



**Σχήμα 3.10:**Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης της τάσης, με ένα διακόπτη

Σε αυτό το είδος μετατροπέα, η τάση εξόδου είναι αντίθετης πολικότητας από αυτή της τάσης εισόδου. Κατά το διάστημα αγωγής του διακόπτη Sw, η πηγή εισόδου παρέχει ενέργεια στην επαγωγή. Η διάδος είναι ανάστροφα πολωμένη, επομένως δεν μεταφέρεται ισχύς στο φορτίο. Όταν ο διακόπτης οδηγηθεί στην αποκοπή, η τάση επαγωγής αλλάζει πολικότητα και μόλις γίνει ίση με την τάση εξόδου, η διάδος πολώνεται ορθά. Μέσω της διάδου ένα μέρος της ενέργειας (συνεχής αγωγή του ρεύματος), η όλη η ενέργεια (ασυνεχής αγωγή του ρεύματος), η οποία έχει αποθηκευτεί στην επαγωγή, μεταφέρεται στην έξοδο. Η πηγή δεν προσφέρει ενέργεια στο κύκλωμα, καθώς ο διακόπτης είναι σε αποκοπή.

Συνεχής αγωγή



**Σχήμα 3.11:**Κυματομορφές μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης τάσης ενός διακόπτη, για συνεχή αγωγή ρεύματος

Η μέση τιμή της τάσης  $u_L$  είναι μηδενική, οπότε :

$$V_{dc} \cdot D \cdot T_s - V_o \cdot (1-D) \cdot T_s = 0 \quad (3.20)$$

Όμως, θεωρώντας ότι  $V_{dc} \cdot I_{dc} = V_o \cdot I_o$

Τότε 
$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{I_{dc}}{I_o} = \frac{D}{1-D} \quad (3.21)$$

Σύμφωνα με το σχήμα 3.10 και λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέση τιμή του ρεύματος στον πυκνωτή είναι μηδέν, οι μέσες τιμές των ρευμάτων εισόδου, εξόδου και επαγωγής συνδέονται ως εξής:

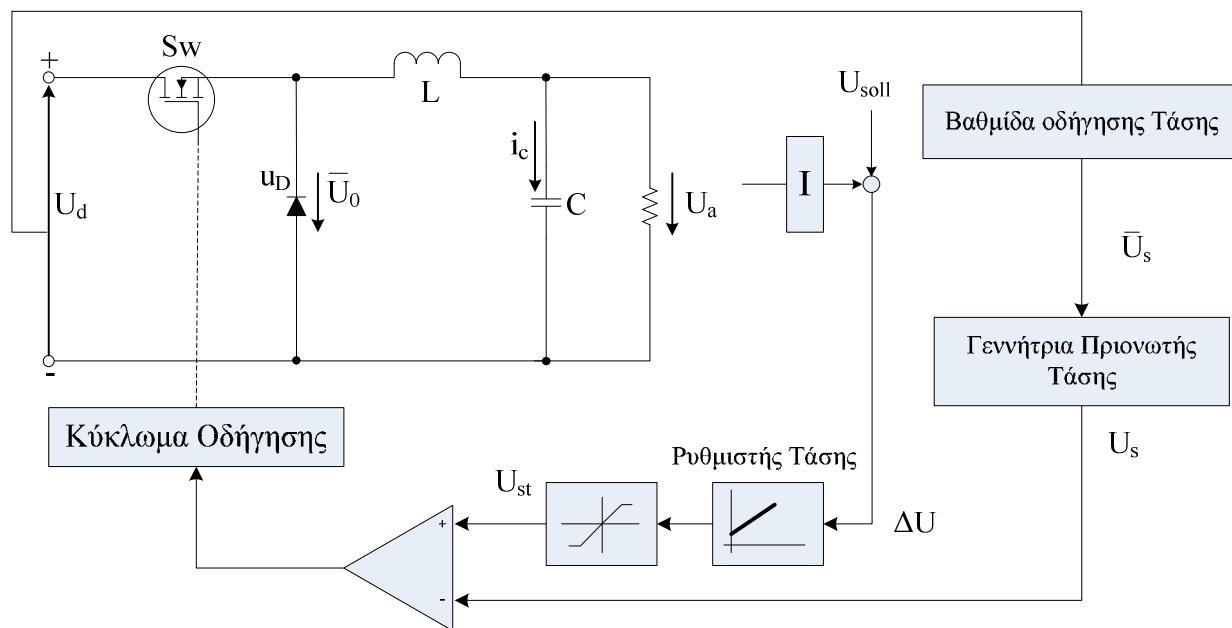
$$I_L = I_{dc} + I_D \quad (3.22)$$

Από τις (3.21) και (3.22), προκύπτει:

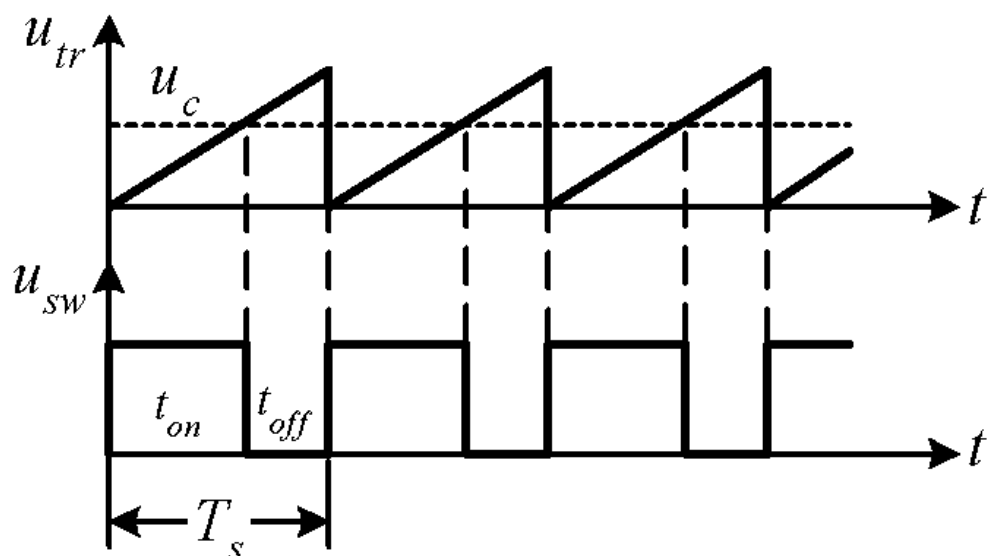
$$I_0 = I_L \cdot (1 - D) \quad (3.23)$$

### 3.8 Έλεγχος τάσης εξόδου του μετατροπέα DC/DC

Επειδή η ανάγκη για σταθερή τιμή τάσης εξόδου είναι τα βασικότερα κομμάτια του ελέγχου ενός κινητήρα Σ.Ρ./Σ.Ρ. με την βοήθεια σήμερα και των ψηφιακών ηλεκτρονικών (PWM controller) κατασκευάζουμε διατάξεις που να ελέγχουν την έξοδο του μετατροπέα μας και αυτομάτως να επεμβαίνουν στο κύκλωμα οδήγησης των παλμών και να διορθώνουν τυχόν σφάλματα. Είναι πολύ εύκολο να καταλάβουμε ότι όταν σε έναν κινητήρα, που επιθυμούμε να περιστρέφεται με έναν συγκεκριμένο αριθμό στροφών, μεταβάλλουμε το φορτίο στον άξονα του αυτομάτως μεταβάλλονται και οι στροφές τους είτε αυξάνονται αν αφαιρέσουμε το φορτίο είτε μειώνονται εάν προσθέσουμε παρακάτω φαίνονται μερικά σχήματα από τις πιο σύγχρονες εφαρμογές ελέγχου που χρησιμοποιούμε.



Σχήμα 3.12: Απλή περίπτωση ελέγχου τάσης



Σχήμα 3.13: Επίδραση του ελέγχου στο βαθμό χρησιμοποίησης και στην τάση εξόδου

### 3.9 Εφαρμογές των μετατροπέων DC/DC

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης βρίσκουν εφαρμογές στις εξής περιοχές :

- Συστήματα ηλεκτρικής τροφοδοσίας τηλεπικοινωνιών και διαστημικών συστημάτων.
- Συστήματα μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.
- Παλμοτροφοδοτικά ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων τα οποία είναι τροφοδοτικά υψηλής συχνότητας και υψηλής απόδοσης.
- Διόρθωση συντελεστή ισχύος ανορθωτικών διατάξεων με διόδους.
- Συστήματα ελέγχου ταχύτητας ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος, που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, στα ηλεκτρικά τρένα και σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

## Κεφάλαιο 4

### Έλεγχος Κινητήρων Σ.Ρ. Μέσω Μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ.

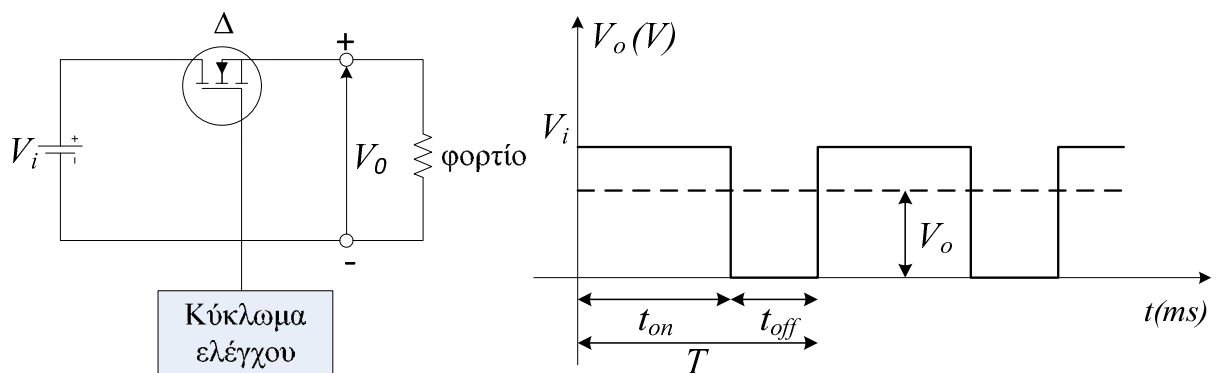
#### 4.1 Γενικά για τον έλεγχο κινητήρων

Σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεταβλητή ταχύτητα στροφών ενός κινητήρα, χρησιμοποιούνται κυρίως οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Για την μεταβολή της ταχύτητας αυτών των κινητήρων χρησιμοποιούμε τους τέσσερις τρόπους που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την μεταβολή ταχύτητας μέσω μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ. υποβιβασμού τάσης.

Πρακτικά ο μετατροπέας Σ.Ρ./Σ.Ρ. χρησιμοποιείται κυρίως για την ηλεκτρική έλξη και την ηλεκτρική κίνηση όπου απαιτείται μεγάλο εύρος ρύθμισης στροφών. Με τον μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ. πετυχαίνουμε υψηλό βαθμό απόδοσης σχετικά χαμηλό κόστος και γρήγορη δυναμική απόκριση έναντι των άλλων τρόπων ρύθμισης στροφών Σ.Ρ. κινητήρων.

Ο μετατροπέας Σ.Ρ./Σ.Ρ. χρησιμοποιεί υψηλή συχνότητα, συνήθως 100Hz με 1KHz, επομένως εύκολα μειώνουμε την κυμάτωση στα άκρα του φορτίου μας. Παλιότερα οι μετατροπείς κατασκευάζονταν από θυρίστορ αλλά τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται transistor ισχύος (MOSFET) με αποτέλεσμα μετατροπείς Σ.Ρ./Σ.Ρ. έχουν κατασκευαστεί μέχρι και 10MW. Με τον μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ. μπορούμε να έχουμε έλεγχο από τον χρήστη ή και αυτόματα.

Ο μετατροπέας Σ.Ρ./Σ.Ρ. (σχήμα 4.1), μετατρέπει μια συνεχή τάση σε μια ακολουθία (τραίνο) θετικών παλμών. Μεταβάλλοντας τον βαθμό χρησιμοποίησης (**duty-cycle**) των παλμών αυτών, δηλαδή τον χρόνο αγωγής (χρονική διάρκεια παλμού) σε σχέση με την περίοδο λειτουργίας, ελέγχουμε την μέση τιμή της τάσης εξόδου.





**Σχήμα 4.1:** Μετατροπέας Σ.Ρ./Σ.Ρ. - τάση εξόδου

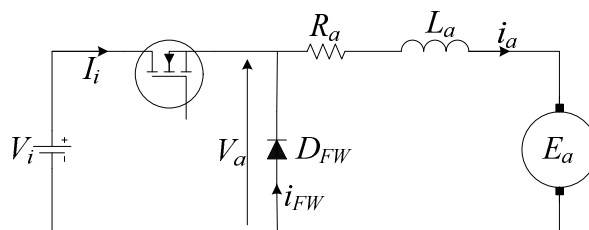
Ο ψαλιδιστής λοιπόν, είναι το ισοδύναμο του μετασχηματιστή στο Σ.Ρ., καθόσον μια σταθερή τάση στην είσοδό του, μετατρέπεται στην έξοδο σε μια συνεχή τάση διαφορετικής τιμής, παρέχοντας επιπλέον τη δυνατότητα της αναλογικής μεταβολής του "λόγου μετασχηματισμού" σε ευρεία όρια. Οι μετατροπείς Σ.Ρ./Σ.Ρ., ανάλογα με τα τεταρτημόρια λειτουργίας (σε άξονες V-I), στα οποία μπορούν να λειτουργήσουν, διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες, σχήμα 4.2.

Σύμφωνα λοιπόν με το σχήμα 4.2, με τον μετατροπέα κλάσης A, η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας στο 1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο. Ο μετατροπέας κλάσης B (μετά τη μετάβαση της μηχανής από το πρώτο στο δεύτερο τεταρτημόριο) μας παρέχει επιπλέον την δυνατότητα αναγεννητικής πέδησης, όπου με την αναστροφή του ρεύματος τυμπάνου, ένα μέρος της κινητικής ενέργειας των στρεφόμενων μαζών επιστρέφει στο δίκτυο. Ο μετατροπέας κλάσης C, λειτουργεί στα δύο πρώτα τεταρτημόρια, συνδυάζοντας τη λειτουργία των δύο προηγούμενων μετατροπέων A και B.

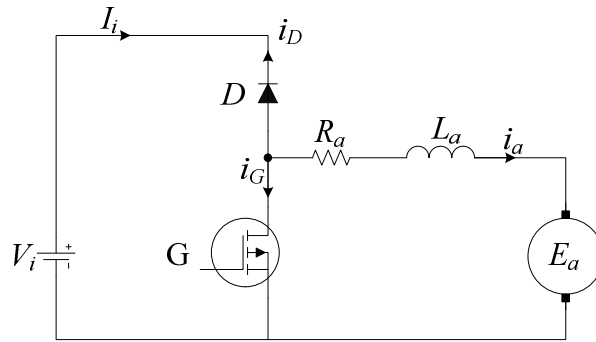
Ο μετατροπέας κλάσης D, λειτουργεί στο 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο και ο μετατροπέας κλάσης E και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Οι ελεγχόμενοι ηλεκτρονικοί διακόπτες, που παρεμβάλλονται μεταξύ πηγής και φορτίου, μπορεί να είναι τρανζίστορ ισχύος, θυρίστορ ή GTO. Η χρήση των τρανζίστορ (MOSFET ισχύος, IGBT) και των GTO προσφέρεται περισσότερο, διότι αποφεύγονται τα κυκλώματα εξαναγκασμένης μεταγωγής που απαιτεί η χρήση των θυρίστορ. Η μεταβολή του βαθμού χρησιμοποίησης, επιτυγχάνεται με δύο τρόπους, σχήμα 4.3.

Με σταθερή συχνότητα (δηλαδή  $f = \frac{1}{T} = \text{σταθερό}$ .) και μεταβάλλοντας τον χρόνο αγωγής  $t_{on}$  (**pulse - width modulation**)

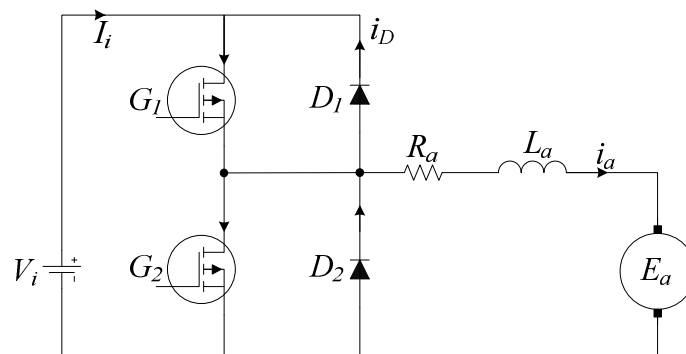
Έχοντας το  $t_{on}$  ή το  $t_{off}$  σταθερό και μεταβάλλοντας την περίοδο T του παλμού (**frequency modulation**)



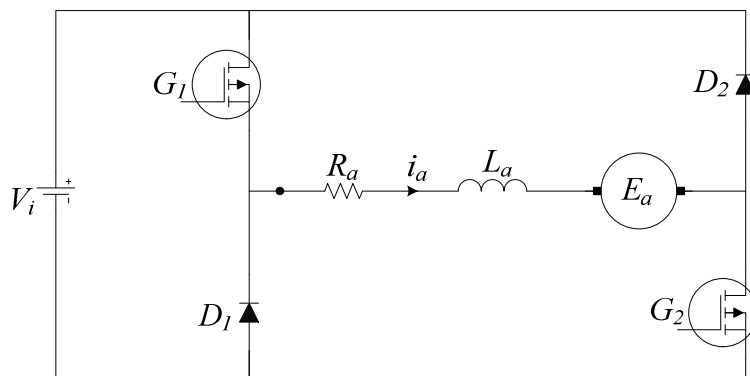
(α). Μετατροπέας κλάσης "Α"



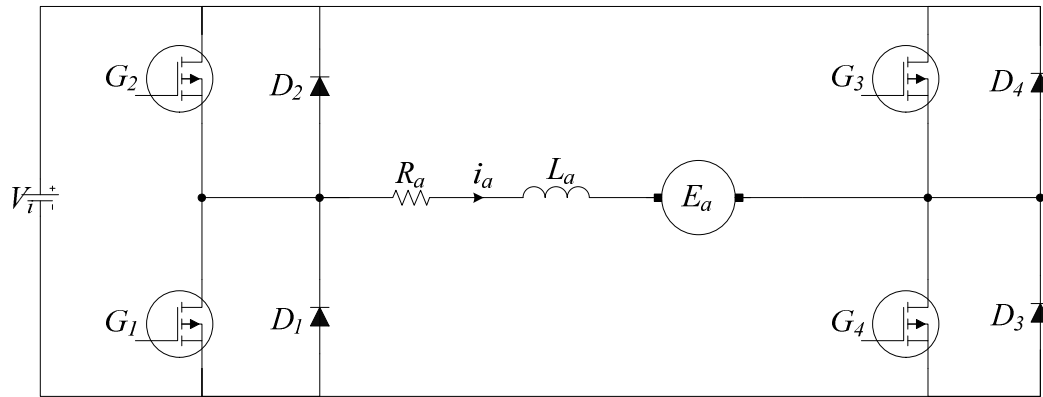
(β). Μετατροπέας κλάσης "B"



(γ). Μετατροπέας κλάσης "C"

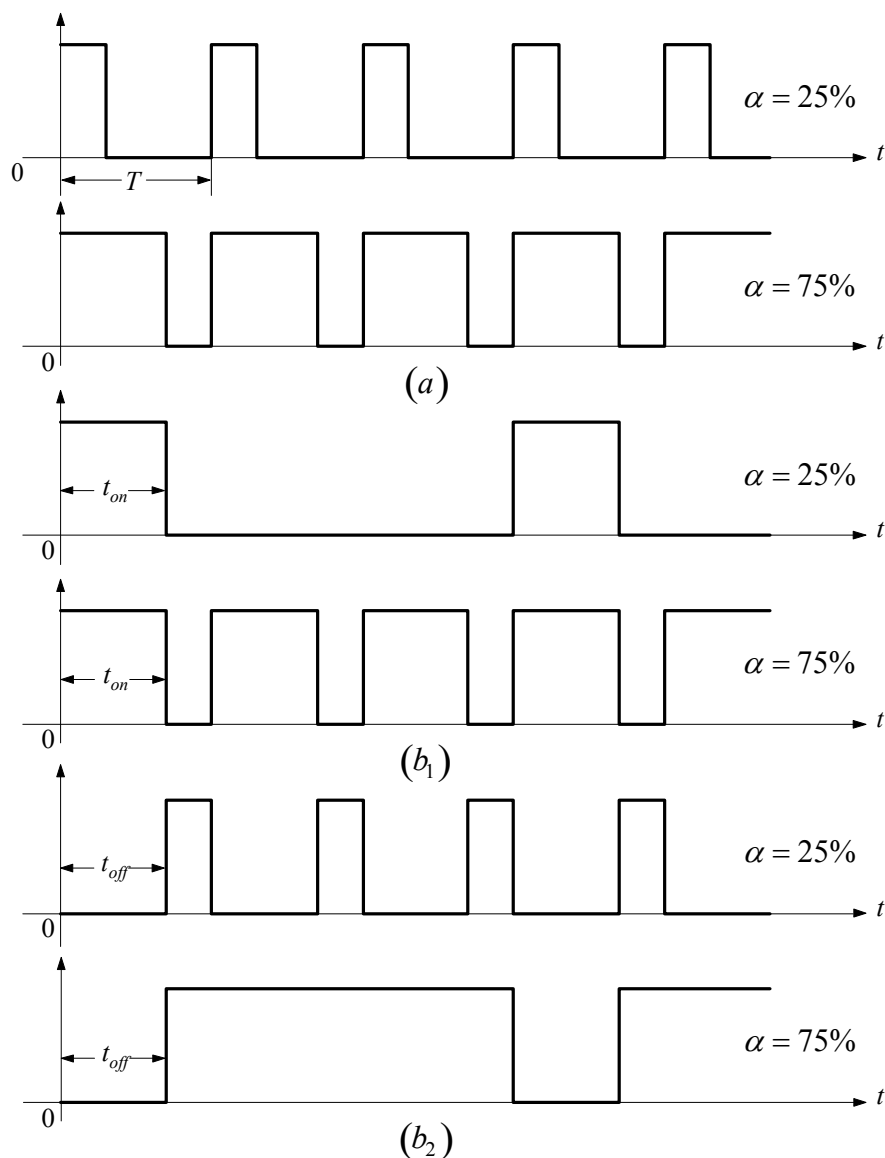


(δ) Μετατροπέας κλάσης "D"



(ε). Μετατροπέας κλάσης "E"

**Σχήμα 4.2:** Ταξινόμηση των μετατροπέων Σ.Ρ./Σ.Ρ. ανάλογα με τα τεταρτημόρια λειτουργίας τους,



**Σχήμα 4.3:** Μέθοδοι μεταβολής του βαθμού χρησιμοποίησης

a. Σταθερή συχνότητα

b. Μεταβαλλόμενη συχνότητα (b<sub>1</sub>. Σταθερό t<sub>on</sub>. b<sub>2</sub>. Σταθερό t<sub>off</sub>)

Η δεύτερη μέθοδος παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

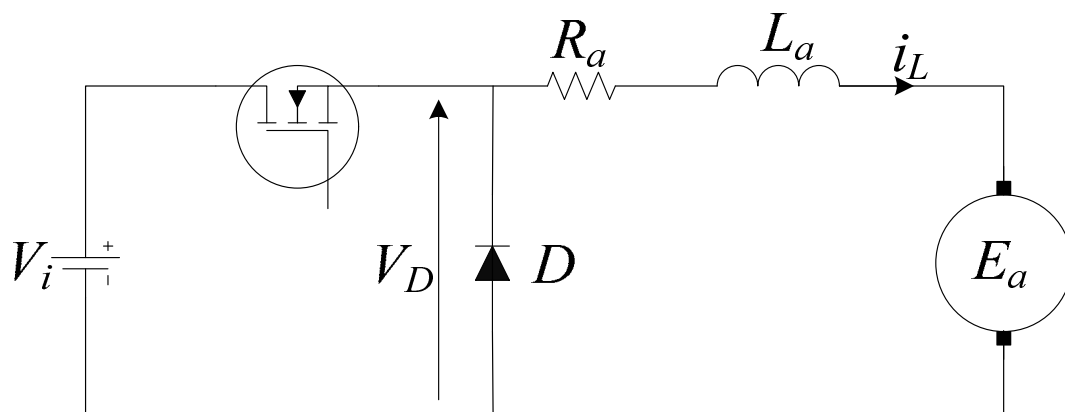
Για την μεταβολή της τάσης, η συχνότητα πρέπει να μεταβάλλεται σε αρκετά μεγάλη κλίμακα, γεγονός που δυσκολεύει την σχεδίαση των απαιτούμενων φίλτρων. Επίσης, στις υψηλές συχνότητες, έχουμε έντονη ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση (EMI).

Τα μεγάλα διαστήματα μη αγωγής (t<sub>off</sub>) σε χαμηλές τάσεις, δημιουργούν στις περιπτώσεις τροφοδοσίας κινητήρων, την ασυνέχεια του ρεύματος τυμπάνου, πράγμα το οποίο είναι ανεπιθύμητο.

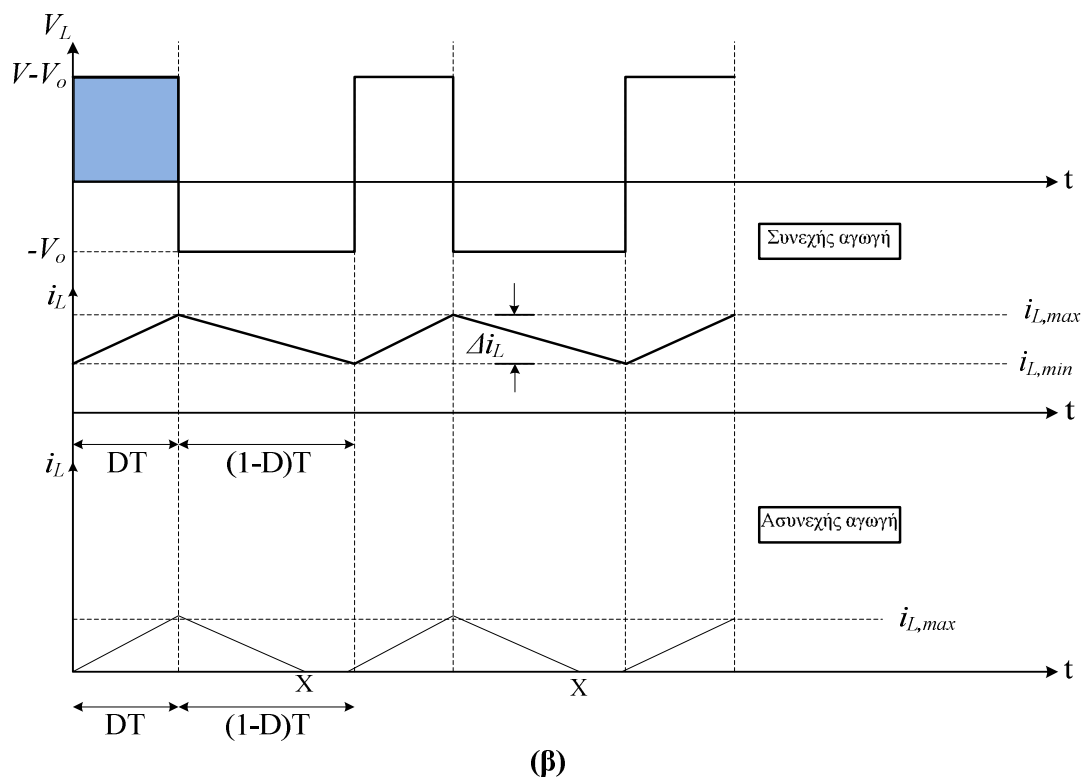
Λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους, της υψηλής απόδοσης και της ταχείας δυναμικής απόκρισης, οι μετατροπείς Σ.Ρ./Σ.Ρ. χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε εφαρμογές ηλεκτρικής έλξης και κίνησης.

#### 4.2 Έλεγχος κινητήρα με μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ. Εξισώσεις για συνεχή και ασυνεχή αγωγή.

Στα δύο παρακάτω σχήματα βλέπουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του μετατροπέα και του κινητήρα σχήμα 4.4:(α) και τις χαρακτηριστικές τάσης έντασης για την συνεχή και ασυνεχή λειτουργία σχήμα 4.4:(β).



Σχήμα 4.4: (α)



(β)

## Σχήμα 4.4

## Συνεχής αγωγή εξισώσεις:

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου είναι:

$$V_{L,average} = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{t_{on}} V_0 dt + \int_{t_{on}}^T 0 dt \right] = \frac{t_{on}}{T} \cdot V$$

Όπου  $\frac{t_{on}}{T} = a$  είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης (duty - cycle) του μετατροπέα.

$$V_{L,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_L^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} V_0^2 dt} = V_0 \sqrt{\frac{t_{on}}{T}}$$

Από την ανάλυση κατά Fourier, για την συνεχή αγωγή η αναλυτική έκφραση της τάσης εξόδου είναι:

$$V_L(t) = aV_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_0}{n\pi} [\sin(2n\pi a) \cdot \cos(n\omega t) + (1 - \cos(2n\pi a)) \sin(n\omega t)]$$

$$\text{Όπου } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Η διαφορική εξίσωση του κινητήρα εάν αμελήσουμε την κυμάτωση της Α.Η.Ε.Δ.

$$\text{είναι: } V_L(t) = R_a \cdot i_L(t) + L_a \frac{di_L(t)}{dt} + E_a \quad (4.2.1)$$

Από το σχήμα 4.4:(β) στο διάστημα  $0 < t < t_{on}$

$$\text{Για } t = 0^+, V_L = V_0 \text{ και } i_L = i_{L,\min}.$$

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω συνθήκες στην σχέση (4.2.1) η γενική μορφή της λύσης παίρνει την μορφή:

$$i_L(t) = I_{L,\min} e^{-t/\tau} + \left( \frac{V_0 - E_a}{R_a} \right) \cdot \left( 1 - e^{-t/\tau} \right) \quad (4.2.2)$$

Όπου  $\tau = \frac{L_a}{R_a}$  είναι η σταθερά χρόνου του τυλίγματος τυμπάνου.

Επίσης από το σχήμα 4.4:(β) για  $t = t_{on}^-$  είναι  $i_L = i_{L,\max}$  αντικαθιστώντας στην σχέση (4.2.2) έχουμε.

$$i_L(t = t_{on}^-) = I_{L,\max} = I_{L,\min} e^{-t_{on}/\tau} + \left( \frac{V_0 - E_a}{R_a} \right) \cdot \left( 1 - e^{-t_{on}/\tau} \right) \quad (4.2.3)$$

Στο διάστημα  $t_{on} < t < T$  λειτουργεί η δίοδος ελευθέρως ροής  $V_L(t) = 0$ .

Επομένως για  $t = t_{on}^-$  είναι  $i_L(t_{on}^-) = i_L(t_{on}^+) = I_{L,max}$ .

Και  $t = T$  είναι  $i_L(T) = i_L(0) = I_{L,min}$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η γενική μορφή του ρεύματος γίνεται:

$$i_L(t') = C'e^{-t'/\tau} - \frac{E_a}{R_a}$$

Όπου:  $t' = t - t_{on}$

Στο διάστημα αυτό οι οριακές συνθήκες είναι:

Για  $t' = 0^+$  είναι  $i_L(t_{on}^+) = i_L(t_{on}^-) = I_{L,max}$

Για  $t' = t_{off}$  είναι  $i_L(T) = i_L(0) = I_{L,min}$

$$\text{Επομένως} \quad i_L(t) = I_{L,max} e^{-t'/\tau} - \frac{E_a}{R_a} \left(1 - e^{-t'/\tau}\right) \quad (4.2.4)$$

$$\text{Και} \quad i_L(t' = t_{off}) = I_{L,min} = I_{L,max} e^{-T-t_{on}/\tau} - \frac{E_a}{R_a} \left(1 - e^{-T-t_{on}/\tau}\right) \quad (4.2.5)$$

Επομένως τώρα μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τις τιμές των  $i_{L,max}$  και  $i_{L,min}$  από την επίλυση του συστήματος των δύο σχέσεων (4.2.3) και (4.2.5).

Άρα:

$$I_{L,max} = \frac{V_0}{R_a} \cdot \left[ \frac{1 - e^{-t_{on}/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} \right] - \frac{E_a}{R_a}$$

$$I_{L,min} = \frac{V_0}{R_a} \cdot \left[ \frac{e^{-t_{on}/\tau} - 1}{e^{-T/\tau} - 1} \right] - \frac{E_a}{R_a}$$

Επίσης για  $a = 1$ , δηλαδή  $t_{on} = T$  έχουμε

$$I_{L,\max} = I_{L,\min} = \frac{V_0 - E_a}{R_a}$$

Έχοντας υπολογίσει λοιπόν τις οριακές τιμές των  $I_{L,\max}$  και  $I_{L,\min}$  του ρεύματος τυμπάνου, μπορούμε μέσω των σχέσεων (4.2.3) και (4.2.4) να υπολογίσουμε το ρεύμα σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή της περιόδου λειτουργίας.

### Ασυνεχής αγωγή εξισώσεις:

Η αναλυτική έκφραση της τάσης εξόδου, στην περίπτωση της ασυνεχούς αγωγής, είναι:

$$V_L(t) = aV_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_0}{n\pi} [\sin(2n\pi a) \cdot \cos(n\omega t) + (1 - \cos(2n\pi a)) \sin(n\omega t)] - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E_a}{n\pi} [\sin(n\omega X) \cdot \cos(n\omega t) + (1 - \cos(2n\omega X)) \sin(n\omega t)]$$

Οι κυματομορφές τάσης - ρεύματος, στην περίπτωση της ασυνεχούς λειτουργίας παρουσιάζονται στο σχήμα 4.4:(β).

$$V_L = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{t_{on}} V_0 dt + \int_{t_{on}}^X 0 dt + \int_X^T E_a dt \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_L = \frac{1}{T} [t_{on} \cdot V_0 + (T - X) E_a] = aV_0 + \left(1 - \frac{X}{T}\right) E_a$$

Και

$$V_{L,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_L^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left( \int_0^{t_{on}} V_0^2 dt + \int_X^T E_a^2 dt \right)} \Rightarrow V_{L,rms} = \sqrt{aV_0^2 + \left(1 - \frac{X}{T}\right) E_a^2}$$

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος τυμπάνου στην περίπτωση αυτή, είναι διαφορετική από αυτή στην συνεχή αγωγή. Προφανώς η ελάχιστη τιμή για το ρεύμα στην ασυνεχή αγωγή είναι μηδέν. Η ανάλυση κατά Fourier είναι ίδια με της συνεχούς αγωγής.

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου είναι:

$$V_{L,average} = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{t_{on}} V_0 dt + \int_{t_{on}}^T 0 dt \right] + \frac{t_{on}}{T} \cdot V_0$$

Όπου  $\frac{t_{on}}{T} = a$  είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης (duty - cycle) του μετατροπέα.

$$V_{L,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_L^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} V_0^2 dt} = V_0 \sqrt{\frac{t_{on}}{T}}$$



Από την ανάλυση κατά Fourier, για την συνεχή αγωγή η αναλυτική έκφραση της τάσης εξόδου είναι:

$$V_L(t) = aV_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_0}{n\pi} [\sin(2n\pi a) \cdot \cos(n\omega t) + (1 - \cos(2n\pi a)) \sin(n\omega t)]$$

Όπου  $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Η διαφορική εξίσωση του κινητήρα εάν αμελήσουμε την κυμάτωση της Α.Η.Ε.Δ. είναι:

$$V_L(t) = R_a \cdot i_L(t) + L_a \frac{di_L(t)}{dt} + E_a \quad (4.2.1)$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (4.2.5) το  $i_{L,\max}(0^+) = i_{L,\min} = 0$  προκύπτει:

$$i_{L,\max}(t) = \frac{V_0 - E_a}{R_a} \left[ 1 - e^{-t/\tau} \right]$$

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος, είναι για  $t = t_{on}$ .

Επομένως 
$$i_{L,\max} = i_L(t = t_{on}) = \frac{V_0 - E_a}{R_a} \left[ 1 - e^{-t_{on}/\tau} \right]$$

Στο διάστημα,  $t_{on} < t < X$  της μη αγωγής του διακόπτη S, η μαγνητική ενέργεια της αυτεπαγωγής εκφορτίζεται μέσω της διόδου ελευθέρως ροής. Μέρος της ενέργειας αυτής, καταναλίσκεται ως θερμότητα στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου  $R_a$  και το υπόλοιπο ως μηχανική ισχύς στον άξονα της μηχανής. Σε όλο το διάστημα αυτό, η τάση των ακροδεκτών παραμένει μηδενική. Η τιμή του μέγιστου ρεύματος δίνεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$i_{L,\max}(t') = \frac{V_0 - E_a}{R_a} \left[ 1 - e^{-t_{on}/\tau} \right] e^{-t'/\tau} - \frac{E_a}{R_a} \left[ 1 - e^{-t'/\tau} \right] \quad (4.2.6)$$

Όπου  $t' = t - t_{on}$  και  $t_{on} < t < X$ .

Έστω ότι για  $t = X$  έχουμε μηδενισμό του ρεύματος. Αντικαθιστώντας στην (4.2.6) όπου  $t' = X - t_{on}$  και θέτοντας όπου  $i_a = 0$ , υπολογίζουμε το χρόνο X με την παρακάτω σχέση:

$$X - \tau \ln \left[ e^{t_{on}/\tau} \left[ 1 + \frac{V_0 - E_a}{E_a} \left[ 1 - e^{-t_{on}/\tau} \right] \right] \right] \quad (4.2.7)$$

Τα όρια συνεχής και ασυνεχής αγωγής, σε συνάρτηση του βαθμού χρησιμοποίησης α βρίσκονται στην παρακάτω συνάρτηση, αν θέσουμε  $I_{L,\min} = 0$  ή από την (4.2.7) αν θέσουμε όπου  $X = T$ .

$$I_{L,\min} = \frac{V_0}{R_a} \cdot \left[ \frac{e^{t_{on}/\tau} - 1}{e^{-T/\tau} - 1} \right] - \frac{E_a}{R_a} \Rightarrow \frac{E_a}{V_0} = \frac{\left[ e^{-t_{on}/\tau} - 1 \right]}{\left[ e^{T/\tau} - 1 \right]} e^{a'T/\tau} = 1 + \frac{E_a}{V_0} \left[ e^{T/\tau} - 1 \right]$$

Όπου:

$$a' = \frac{t'_{on}}{T} = \frac{\tau}{T} \ln \left[ 1 + \frac{E_a}{V_0} \left[ e^{T/\tau} - 1 \right] \right]$$

Δηλαδή, αν το κύκλωμα λειτουργεί με κάποιον συγκεκριμένο βαθμό χρησιμοποίησης «α'» τότε ισχύουν τα ακόλουθα:

Εάν,  $\alpha > \alpha'$  τότε έχουμε συνεχή αγωγή.

Εάν,  $\alpha < \alpha'$  τότε έχουμε ασυνεχή αγωγή.

## Κεφάλαιο 5

### Εισαγωγή στον Arduino

#### 5.1 Περιγραφή

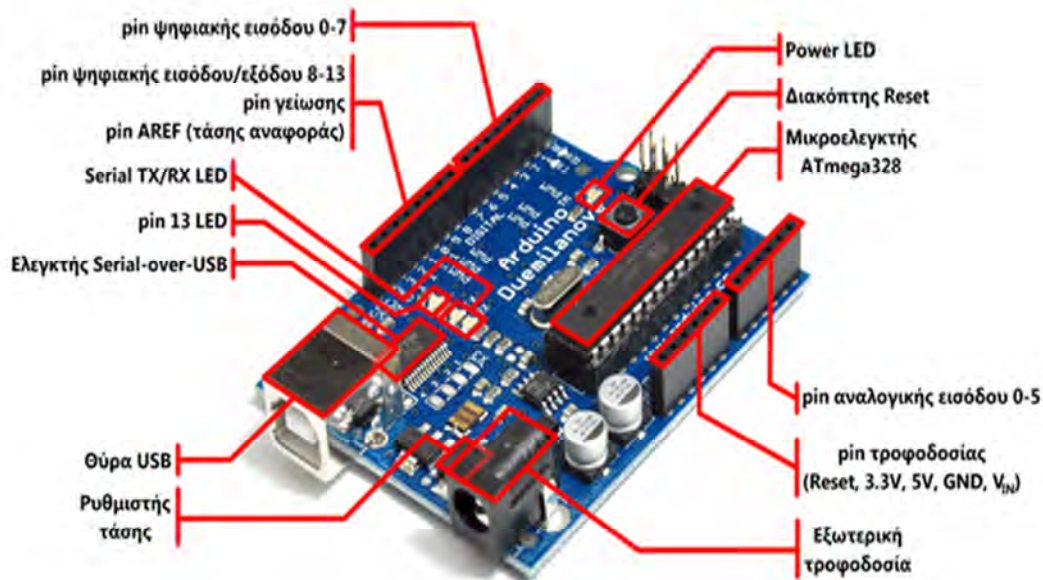
Το **Arduino** είναι μια υπολογιστική πλατφόρμα βασισμένη σε μια απλή μητρική πλακέτα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, και η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με την γλώσσα Wiring (ουσιαστικά πρόκειται για την C++ με κάποιες μετατροπές). Το Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ανεξάρτητων διαδραστικών αντικειμένων αλλά και να συνδεθεί με υπολογιστή μέσω προγραμμάτων σε Processing, Max/MSP, Pure Data, SuperCollider. Οι περισσότερες εκδόσεις του Arduino μπορούν να αγοραστούν προ-συναρμολογημένες· το διάγραμμα και πληροφορίες για το υλικό είναι ελεύθερα διαθέσιμα για αυτούς που θέλουν να συναρμολογήσουν το Arduino μόνοι τους.

Το πρόγραμμα Arduino έλαβε τιμητική μνεία στην κατηγορία *Digital Communities* στο *Prix Ars Electronica* το 2006.

#### 5.2 Λειτουργία Arduino

##### 5.2.1 Είσοδοι – Έξοδοι

Καταρχήν το Arduino διαθέτει σειριακό interface. Ο μικροελεγκτής ATmega υποστηρίζει σειριακή επικοινωνία, την οποία το Arduino προωθεί μέσα από έναν ελεγκτή Serial-over-USB ώστε να συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω USB. Η σύνδεση αυτή χρησιμοποιείται για την μεταφορά των προγραμμάτων που σχεδιάζονται από τον υπολογιστή στο Arduino αλλά και για αμφίδρομη επικοινωνία του Arduino με τον υπολογιστή μέσα από το πρόγραμμα την ώρα που εκτελείται.



Επιπλέον, στην πάνω πλευρά του Arduino βρίσκονται 14 θηλυκά pin, αριθμημένα από 0 ως 13, που μπορούν να λειτουργήσουν ως ψηφιακές εισοδοι και έξοδοι. Λειτουργούν στα 5V και καθένα μπορεί να παρέχει ή να δεχτεί το πολύ 40mA.

Ως ψηφιακή έξοδος, ένα από αυτά τα pin μπορεί να τεθεί από το πρόγραμμά σας σε κατάσταση HIGH ή LOW, οπότε το Arduino θα ξέρει αν πρέπει να διοχετεύσει ή όχι ρεύμα στο συγκεκριμένο pin. Με αυτόν τον τρόπο μπορείτε λόγω χάρη να ανάψετε και να σβήσετε ένα LED που έχετε συνδέσει στο συγκεκριμένο pin. Αν πάλι ρυθμίσετε ένα από αυτά τα pin ως ψηφιακή είσοδο μέσα από το πρόγραμμά σας, μπορείτε με την κατάλληλη εντολή να διαβάσετε την κατάστασή του (HIGH ή LOW) ανάλογα με το αν η εξωτερική συσκευή που έχετε συνδέσει σε αυτό το pin διοχετεύει ή όχι ρεύμα στο pin (με αυτόν τον τρόπο λόγω χάρη μπορείτε να «διαβάσετε» την κατάσταση ενός διακόπτη).

Μερικά από αυτά τα 14 pin, εκτός από ψηφιακές εισοδοί/έξοδοι έχουν και δεύτερη λειτουργία. Συγκεκριμένα:

- Τα pin 0 και 1 λειτουργούν ως RX και TX της σειριακής όταν το πρόγραμμά σας ενεργοποιεί την σειριακή θύρα. Έτσι, όταν λόγω χάρη το πρόγραμμά σας στέλνει δεδομένα στην σειριακή, αυτά προωθούνται και στην θύρα USB μέσω του ελεγκτή Serial-Over-USB αλλά και στο pin 0 για να τα διαβάσει ενδεχομένως μια άλλη συσκευή (π.χ. ένα δεύτερο Arduino στο δικό του pin 1). Αυτό φυσικά σημαίνει ότι αν στο πρόγραμμά σας ενεργοποιήσετε το σειριακό interface, χάνετε 2 ψηφιακές εισόδους/εξόδους.
- Τα pin 2 και 3 λειτουργούν και ως εξωτερικά interrupt (interrupt 0 και 1 αντίστοιχα). Με άλλα λόγια, μπορείτε να τα ρυθμίσετε μέσα από το πρόγραμμά σας ώστε να λειτουργούν αποκλειστικά ως ψηφιακές εισοδοί στις οποίες όταν συμβαίνουν συγκεκριμένες αλλαγές, η κανονική ροή του προγράμματος σταματάει \*άμεσα\* και εκτελείται μια συγκεκριμένη συνάρτηση. Τα εξωτερικά interrupt είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε εφαρμογές που απαιτούν συγχρονισμό μεγάλης ακρίβειας.
- Τα pin 3, 5, 6, 9, 10 και 11 μπορούν να λειτουργήσουν και ως ψευδοαναλογικές έξοδοι με το σύστημα PWM (Pulse Width Modulation), δηλαδή το ίδιο σύστημα που διαθέτουν οι μητρικές των υπολογιστών για να ελέγχουν τις ταχύτητες των ανεμιστήρων. Έτσι, μπορείτε να συνδέσετε λόγω χάρη ένα LED σε κάποιο από αυτά τα pin και να ελέγξετε πλήρως την φωτεινότητά του με ανάλυση 8bit (256 καταστάσεις από 0-σβηστό ως 255-πλήρως αναμμένο) αντί να έχετε απλά την δυνατότητα αναμμένο-σβηστό που παρέχουν οι υπόλοιπες ψηφιακές έξοδοι. Είναι σημαντικό να καταλάβετε ότι το PWM δεν είναι πραγματικά αναλογικό σύστημα και ότι θέτοντας στην έξοδο την τιμή 127, δεν σημαίνει ότι η έξοδος θα δίνει 2.5V αντί της κανονικής τιμής των 5V, αλλά ότι θα δίνει ένα παλμό που θα εναλλάσσεται με μεγάλη συχνότητα και για ίσους χρόνους μεταξύ των τιμών 0 και 5V.

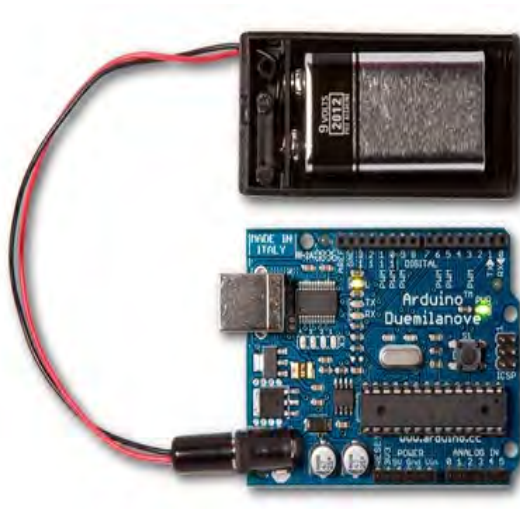
Στην κάτω πλευρά του Arduino, με τη σήμανση ANALOG IN, θα βρείτε μια ακόμη σειρά από 6 pin, αριθμημένα από το 0 ως το 5. Το καθένα από αυτά λειτουργεί ως αναλογική είσοδος κάνοντας χρήση του ADC (Analog to Digital Converter) που είναι ενσωματωμένο στον μικροελεγκτή. Για παράδειγμα, μπορείτε να τροφοδοτήσετε ένα από αυτά με μια τάση την οποία μπορείτε να κυμάνετε με ένα ποτενσιόμετρο από 0V ως μια τάση αναφοράς  $V_{ref}$  η οποία, αν δεν κάνετε κάποια αλλαγή είναι προρυθμισμένη στα 5V. Τότε, μέσα από το πρόγραμμά σας μπορείτε να «διαβάσετε» την τιμή του pin ως ένα ακέραιο αριθμό ανάλυσης 10-bit, από 0 (όταν η τάση στο pin είναι 0V) μέχρι 1023 (όταν η τάση στο pin είναι 5V). Η τάση αναφοράς μπορεί να ρυθμιστεί με μια εντολή στο 1.1V, ή σε όποια τάση επιθυμείτε (μεταξύ 2

και 5V) τροφοδοτώντας εξωτερικά με αυτήν την τάση το pin με την σήμανση AREF που βρίσκεται στην απέναντι πλευρά της πλακέτας. Έτσι, αν τροφοδοτήσετε το pin AREF με 3.3V και στην συνέχεια δοκιμάσετε να διαβάσετε κάποιο pin αναλογικής εισόδου στο οποίο εφαρμόζετε τάση 1.65V, το Arduino θα σας επιστρέψει την τιμή 512.

Τέλος, καθένα από τα 6 αυτά pin, με κατάλληλη εντολή μέσα από το πρόγραμμα μπορεί να μετατραπεί σε ψηφιακό pin εισόδου/εξόδου όπως τα 14 που βρίσκονται στην απέναντι πλευρά και τα οποία περιγράφηκαν πριν. Σε αυτή την περίπτωση τα pin μετονομάζονται από 0~5 σε 14~19 αντίστοιχα.

### 5.3 Τροφοδοσία

Το Arduino μπορεί να τροφοδοτηθεί με ρεύμα είτε από τον υπολογιστή μέσω της σύνδεσης USB, είτε από εξωτερική τροφοδοσία που παρέχεται μέσω μιας υποδοχής φινις των 2.1mm (θετικός πόλος στο κέντρο) και βρίσκεται στην κάτω-αριστερή γωνία του Arduino.



Για να μην υπάρχουν προβλήματα, η εξωτερική τροφοδοσία πρέπει να είναι από 7 ως 12V και μπορεί να προέρχεται από ένα κοινό μετασχηματιστή του εμπορίου, από μπαταρίες ή οποιαδήποτε άλλη πηγή DC.

Δίπλα από τα pin αναλογικής εισόδου, υπάρχει μια ακόμα συστοιχία από 6 pin με την σήμανση POWER. Η λειτουργία του καθενός έχει ως εξής:

- Το πρώτο, με την ένδειξη RESET, όταν γειωθεί (σε οποιοδήποτε από τα 3 pin με την ένδειξη GND που υπάρχουν στο Arduino) έχει ως αποτέλεσμα την επανεκκίνηση του Arduino.
- Το δεύτερο, με την ένδειξη 3.3V, μπορεί να τροφοδοτήσει τα εξαρτήματά σας με τάση 3.3V. Η τάση αυτή δεν προέρχεται από την εξωτερική τροφοδοσία αλλά παράγεται από τον ελεγκτή Serial-over-USB και έτσι η μέγιστη ένταση που μπορεί να παρέχει είναι μόλις 50mA.
- Το τρίτο, με την ένδειξη 5V, μπορεί να τροφοδοτήσει τα εξαρτήματά σας με τάση 5V. Ανάλογα με τον τρόπο τροφοδοσίας του ίδιου του Arduino, η τάση αυτή προέρχεται είτε άμεσα από την θύρα USB (που ούτως ή άλλως λειτουργεί στα 5V), είτε από την εξωτερική τροφοδοσία αφού αυτή περάσει από ένα ρυθμιστή τάσης για να την «φέρει» στα 5V.

- Το τέταρτο και το πέμπτο pin, με την ένδειξη GND, είναι φυσικά γειώσεις.
- Το έκτο και τελευταίο pin, με την ένδειξη Vin έχει διπλό ρόλο. Σε συνδυασμό με το pin γείωσης δίπλα του, μπορεί να λειτουργήσει ως μέθοδος εξωτερικής τροφοδοσίας του Arduino, στην περίπτωση που δεν σας βολεύει να χρησιμοποιήσετε την υποδοχή του φιν των 2.1mm. Αν όμως έχετε ήδη συνδεδεμένη εξωτερική τροφοδοσία μέσω του φιν, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε αυτό το pin για να τροφοδοτήσετε εξαρτήματα με την πλήρη τάση της εξωτερικής τροφοδοσίας (7~12V), πριν αυτή περάσει από τον ρυθμιστή τάσης όπως γίνεται με το pin των 5V.

## 5.4 Ενσωματωμένα κουμπιά και LED

Πάνω στην πλακέτα του Arduino υπάρχει ένας διακόπτης micro-switch και 4 μικροσκοπικά LED επιφανειακής στήριξης.

Η λειτουργία του διακόπτη (που έχει την σήμανση RESET) και του ενός LED με την σήμανση POWER είναι μάλλον προφανής.

Τα δύο LED με τις σημάνσεις TX και RX, χρησιμοποιούνται ως ένδειξη λειτουργίας του σειριακού interface, καθώς ανάβουν όταν το Arduino στέλνει ή λαμβάνει (αντίστοιχα) δεδομένα μέσω USB. Σημειώστε ότι τα LED αυτά ελέγχονται από τον ελεγκτή Serial-over-USB και συνεπώς δεν λειτουργούν όταν η σειριακή επικοινωνία γίνεται αποκλειστικά μέσω των ψηφιακών pin 0 και 1.

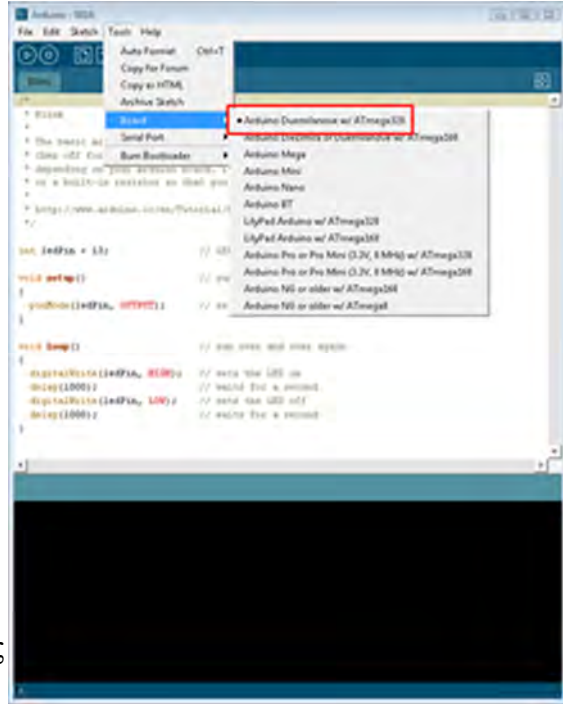
Τέλος, υπάρχει το LED με την σήμανση L. Η βασική δοκιμή λειτουργίας του Arduino είναι να του αναθέσετε να αναβοσβήνει ένα LED (θα το δείτε αυτό στην συνέχεια όταν θα φτιάξετε την πρώτη εφαρμογή σας). Για να μπορείτε να το κάνετε αυτό από την πρώτη στιγμή, χωρίς να συνδέσετε τίποτα πάνω στο Arduino, οι κατασκευαστές του σκέφτηκαν να ενσωματώσουν ένα LED στην πλακέτα, το οποίο σύνδεσαν στο ψηφιακό pin 13. Έτσι, ακόμα και αν δεν έχετε συνδέσει τίποτα πάνω στο φυσικό pin 13, αναθέτοντάς του την τιμή HIGH μέσα από το πρόγραμμά σας, θα ανάψει αυτό το ενσωματωμένο LED.

## 5.5 Arduino IDE και σύνδεση με τον υπολογιστή

Ότι χρειάζεστε για την διαχείριση του Arduino από τον υπολογιστή σας το παρέχει το Arduino IDE, την τελευταία έκδοση του οποίου μπορείτε να κατεβάσετε από το επίσημο site για καθένα από τα τρία δημοφιλέστερα λειτουργικά συστήματα.

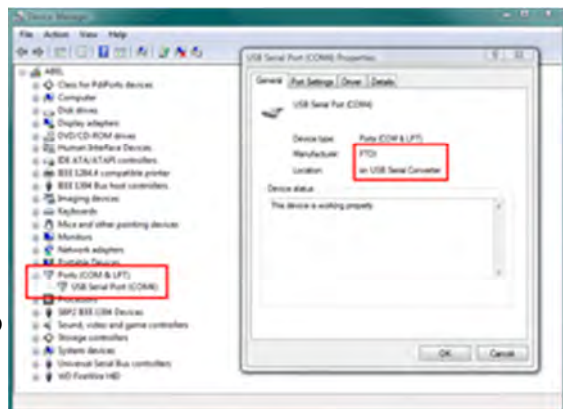
Το Arduino IDE είναι βασισμένο σε Java και συγκεκριμένα παρέχει:

- ένα πρακτικό περιβάλλον για την συγγραφή των προγραμμάτων (τα οποία ονομάζονται sketch στην ορολογία του Arduino) με συντακτική χρωματική σήμανση,
- αρκετά έτοιμα παραδείγματα,
- μερικές έτοιμες βιβλιοθήκες για προέκταση της γλώσσας και για να χειρίζεστε εύκολα μέσα από τον κώδικά τα εξαρτήματα που συνδέετε στο Arduino,
- τον compiler για την μεταγλώττιση των sketch,
- ένα serial monitor που παρακολουθεί τις επικοινωνίες της σειριακής (USB), αναλαμβάνει να στείλει αλφαριθμητικά της επιλογής στο Arduino μέσω αυτής και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για το debugging των sketch
- και την επιλογή να ανεβάσετε το μεταγλωττισμένο sketch στο Arduino.



Για τα δύο τελευταία χαρακτηριστικά βέβαια, το Arduino πρέπει να έχει συνδεθεί σε μια από τις θύρες USB του υπολογιστή και, λόγω του ελεγκτή Serial-over-USB, θα πρέπει να αναγνωριστεί από το λειτουργικό σας σύστημα ως εικονική σειριακή θύρα.

Για την σύνδεση θα χρειαστείτε ένα καλώδιο USB από Type A σε Type B, όπως αυτό των εκτυπωτών. Για την αναγνώριση από το λειτουργικό θα χρειαστεί να εγκαταστήσετε τον οδηγό του FTDI chip (δηλαδή του ελεγκτή Serial-over-USB) ο οποίος υπάρχει στον φάκελο drivers του Arduino IDE που κατεβάσατε. Την τελευταία έκδοση αυτού του οδηγού μπορείτε επίσης να κατεβάσετε για κάθε λειτουργικό σύστημα από το site της FTDI. Σημειώστε ότι στους τελευταίους πυρήνες του Linux υπάρχει εγγενής υποστήριξη του συγκεκριμένου ελεγκτή.



Αν όλα έγιναν σωστά, το κεντρικό παράθυρο του Arduino IDE θα εμφανιστεί όταν το εκτελέσετε και στο μενού Tools → Serial Port θα πρέπει να εμφανίζεται η εικονική σειριακή θύρα (συνήθως COM# για τα Windows, /dev/ttyusbserial## για το MacOS και /dev/ttyusb## για το Linux). Επιλέξτε αυτή την εικονική θύρα και στην συνέχεια επιλέξτε τον τύπο του Arduino σας (Arduino Duemilanove w/ ATmega328) από το μενού Tools → Board.

Το Arduino είναι πλέον έτοιμο να δεχτεί τα sketch σας. Αν εμφανίστηκε οποιοδήποτε πρόβλημα διαβάστε τις αναλυτικές οδηγίες εγκατάστασης για κάθε λειτουργικό σύστημα στη διεύθυνση <http://arduino.cc/en/Guide/HomePage>.

## 5.6 Γλώσσα προγραμματισμού

Η γλώσσα του Arduino βασίζεται στη γλώσσα Wiring, μια παραλλαγή C/C++ για μικροελεγκτές αρχιτεκτονικής AVR όπως ο ATmega, και υποστηρίζει όλες τις βασικές δομές της C καθώς και μερικά χαρακτηριστικά της C++. Για compiler χρησιμοποιείται ο AVR gcc και ως βασική βιβλιοθήκη C χρησιμοποιείται η AVR libc.

Λόγω της καταγωγής της από την C, στην γλώσσα του Arduino μπορείτε να χρησιμοποιήσετε ουσιαστικά τις ίδιες βασικές εντολές και συναρτήσεις, με την ίδια σύνταξη, τους ίδιους τύπων δεδομένων και τους ίδιους τελεστές όπως και στην C. Πέρα από αυτές όμως, υπάρχουν κάποιες ειδικές εντολές, συναρτήσεις και σταθερές που βοηθούν για την διαχείριση του ειδικού hardware του Arduino. Οι πιο σημαντικές από αυτές επεξηγούνται στον πίνακα που ακολουθεί:

Όρισμα	Είδος	Τύπος	Παράμετροι	Περιγραφή
LOW	Σταθερά	int	-	Έχει την τιμή 0 και είναι αντίστοιχη του λογικού false.
HIGH	Σταθερά	int	-	Έχει την τιμή 1 και είναι αντίστοιχη του λογικού true.
INPUT	Σταθερά	int	-	Έχει την τιμή 0 και είναι αντίστοιχη του λογικού false.
OUTPUT	Σταθερά	int	-	Έχει την τιμή 1 και είναι αντίστοιχη του λογικού true.
pinMode	Εντολή	-	(pin, mode)	Καθορίζει αν το συγκεκριμένο ψηφιακό pin θα είναι pin εισόδου ή pin εξόδου ανάλογα με την τιμή που δίνεται στην παράμετρο mode (INPUT ή OUTPUT αντίστοιχα).
digitalWrite	Εντολή	-	(pin, pinstatus)	Θέτει την κατάσταση pinstatus (HIGH ή LOW) στο συγκεκριμένο ψηφιακό pin.
digitalRead	Συνάρτηση	int	(pin)	Επιστρέφει την κατάσταση του συγκεκριμένου ψηφιακού pin (0 για LOW και 1 για HIGH) εφόσον αυτό είναι pin εισόδου.
analogReference	Εντολή	-	(type)	Δέχεται τις τιμές DEFAULT, INTERNAL ή EXTERNAL στην παράμετρο type για να καθορίσει την τάση αναφοράς ( $V_{ref}$ ) των



				αναλογικών εισόδων (5V, 1.1V ή η εξωτερική τάση με την οποία τροφοδοτείται το pin AREF αντίστοιχα)
analogRead	Συνάρτηση	int	(pin)	Επιστρέφει έναν ακέραιο από 0 έως 1023, ανάλογα με την τάση που τροφοδοτείται το συγκεκριμένο pin αναλογικής εισόδου στην κλίμακα 0 ως $V_{ref}$ .
analogWrite	Εντολή	-	(pin, value)	Θέτει το συγκεκριμένο ψηφιακό pin σε κατάσταση ψευδοαναλογικής εξόδου (PWM). Η παράμετρος value καθορίζει το πλάτος του παλμού σε σχέση με την περίοδο του παραγόμενου σήματος στην κλίμακα από 0 ως 255 (π.χ. με value 127, το πλάτος του παλμού είναι ίσο με μισή περίοδο).
millis	Συνάρτηση	unsigned long	()	Μετρητής που επιστρέφει το χρονικό διάστημα σε ms από την στιγμή που άρχισε η εκτέλεση του προγράμματος. Λάβετε υπόψη ότι λόγω του τύπου μεταβλητής (unsigned long δηλ. 32bit) θα γίνει overflow σε $2^{32}$ ms δηλαδή περίπου σε 50 μέρες, οπότε ο μετρητής θα ξεκινήσει πάλι από το μηδέν.
delay	Εντολή	-	(time)	Σταματά προσωρινά την ροή του προγράμματος για time ms. Η παράμετρος time είναι unsigned long (από 0 ως $2^{32}$ ). Σημειώστε ότι παρά την προσωρινή παύση, συναρτήσεις των οποίων η εκτέλεση ενεργοποιείται από interrupt θα εκτελεστούν κανονικά κατά την διάρκεια μιας delay.
attachInterrupt	Εντολή	-	(interrupt, function, triggermode)	<p>Θέτει σε λειτουργία το συγκεκριμένο interrupt, ώστε να ενεργοποιεί την συνάρτηση function, κάθε φορά που ικανοποιείται η συνθήκη που ορίζεται από την παράμετρο triggermode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• LOW (ενεργοποίηση όταν η κατάσταση του pin που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο interrupt γίνει LOW)</li> </ul>

				<ul style="list-style-type: none"> <li>• RISING (όταν από LOW γίνει HIGH)</li> <li>• FALLING (όταν από HIGH γίνει LOW)</li> <li>• CHANGE (όταν αλλάξει κατάσταση γενικά)</li> </ul>
detachInterrupt	Εντολή	-	( <i>interrupt</i> )	Απενεργοποιεί το συγκεκριμένο <i>interrupt</i> .
noInterrupts	Εντολή	-	()	Σταματά προσωρινά την λειτουργία όλων των <i>interrupt</i>
interrupts	Εντολή	-	()	Επαναφέρει την λειτουργία των <i>interrupt</i> που διακόπηκε προσωρινά από μια εντολή <i>noInterrupts</i> .
Serial.begin	Μέθοδος κλάσης	-	( <i>datarate</i> )	Θέτει τον ρυθμό μεταφοράς δεδομένων του σειριακού <i>interface</i> (σε <i>baud</i> )
Serial.println	Μέθοδος κλάσης	-	( <i>data</i> )	Διοχετεύει τα δεδομένα <i>data</i> για αποστολή μέσω του σειριακού <i>interface</i> . Η παράμετρος <i>data</i> μπορεί να είναι είτε αριθμός είτε αλφαριθμητικό.

Επιπλέον, στην γλώσσα του Arduino κάθε πρόγραμμα αποτελείται από δύο βασικές ρουτίνες ώστε να έχει την γενική δομή:

// Ενσωματώσεις βιβλιοθηκών, δηλώσεις μεταβλητών...

**void setup()**

```
{
// ...
}
```

**void loop()**

```
{
// ...
}
```

// Υπόλοιπες συναρτήσεις...

Η βασική ρουτίνα *setup()* εκτελείται μια φορά μόνο κατά την εκκίνηση του προγράμματος ενώ η βασική ρουτίνα *loop()* περιέχει τον βασικό κορμό του προγράμματος και η εκτέλεσή της επαναλαμβάνεται συνέχεια σαν ένας βρόγχος *while(true)*.

Αν και πρόκειται μόνο για τις πιο βασικές λειτουργίες της γλώσσας του Arduino, με αυτές και με λίγες βασικές γνώσεις C θα μπορέσετε να δημιουργήσετε το *sketch*.

## Κεφάλαιο 6 Κατασκευαστικό Μέρος

### Εισαγωγή

Για την διεξαγωγή του κατασκευαστικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας η σχεδίαση των κυκλωμάτων που αποτυπώθηκαν στις πλακέτες έγινε με την χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος CadSoftE.A.G.L.E. (Easily Applicable Layout Editor) και η σχεδίαση του μπροστινού μέρους του κουτιού που προσαρμόσαμε τις πλακέτες έγινε με το σχεδιαστικό πρόγραμμα Front Panel Designer.

### 6.1 Γενικά για το κύκλωμα ελέγχου

Όπως αναφέρθηκε από την έως τώρα μελέτη ο μετατροπέας DC-DC μετατρέπει μία συνεχή τάση σε μία ακολουθία θετικών παλμών. Μεταβάλλοντας τον χρόνο αγωγής (duty cycle)

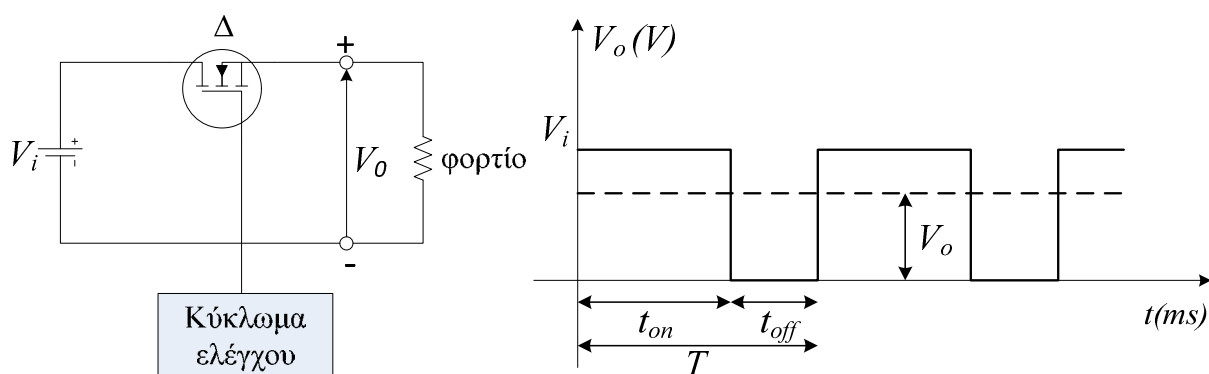
των παλμών αυτών, σε σχέση με την περίοδο, ελέγχεται η μέση τιμή της τάσης εξόδου. Υπάρχουν δύο τρόποι μεταβολής του χρόνου αγωγής:

- Με σταθερή την συχνότητα και μεταβάλλοντας το  $t_{on}$ .
- Έχοντας το  $t_{on}$  σταθερό, μεταβάλλοντας την περίοδο  $T$  του παλμού.

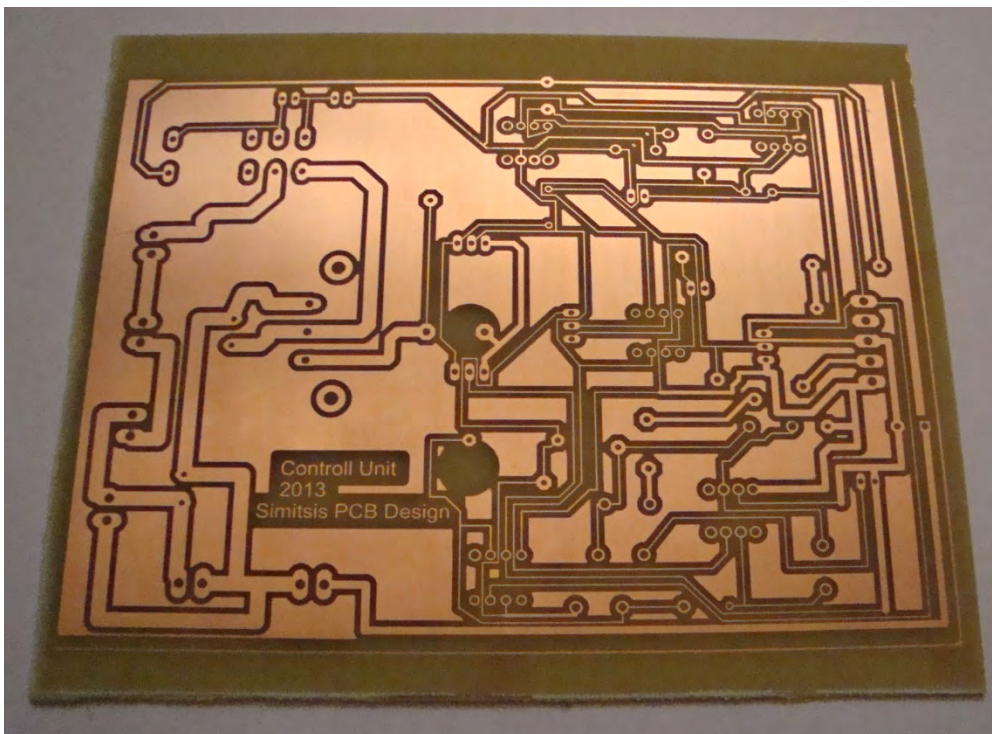
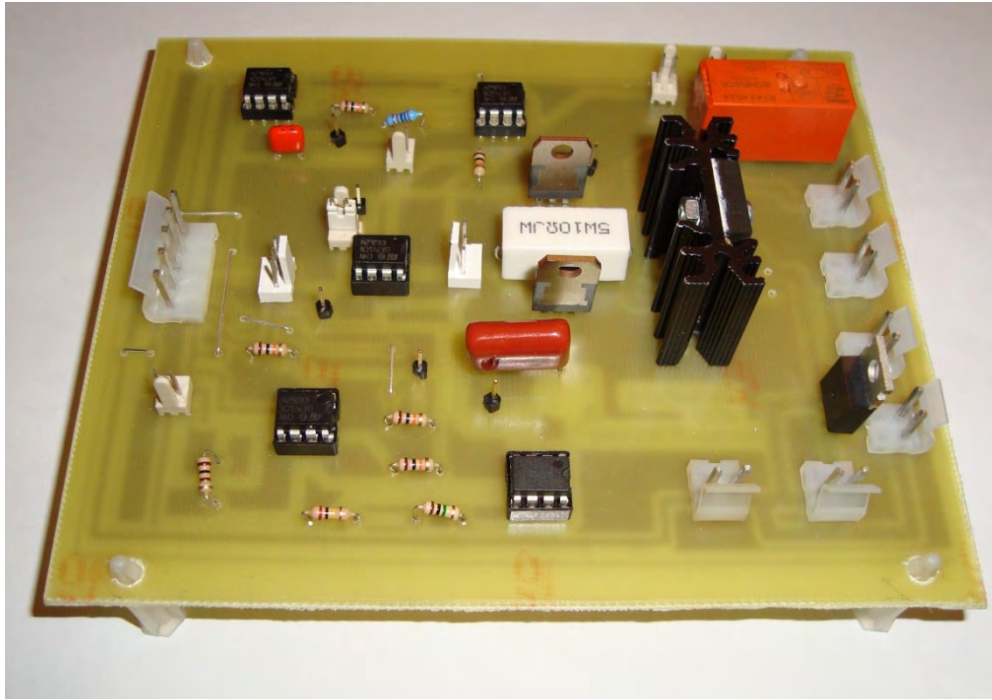
Στην συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιείται ο πρώτος τρόπος μεταβολής του χρόνου αγωγής, γιατί ο δεύτερος τρόπος παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

- Στις υψηλές συχνότητες παρουσιάζεται έντονη ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση.
- Στις χαμηλές τάσεις δημιουργείται ασυνέχεια του ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα.

Για να επιτευχθεί μεταβολή του χρόνου αγωγής με σταθερή συχνότητα, χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα ελέγχου του διακοπτικού στοιχείου.

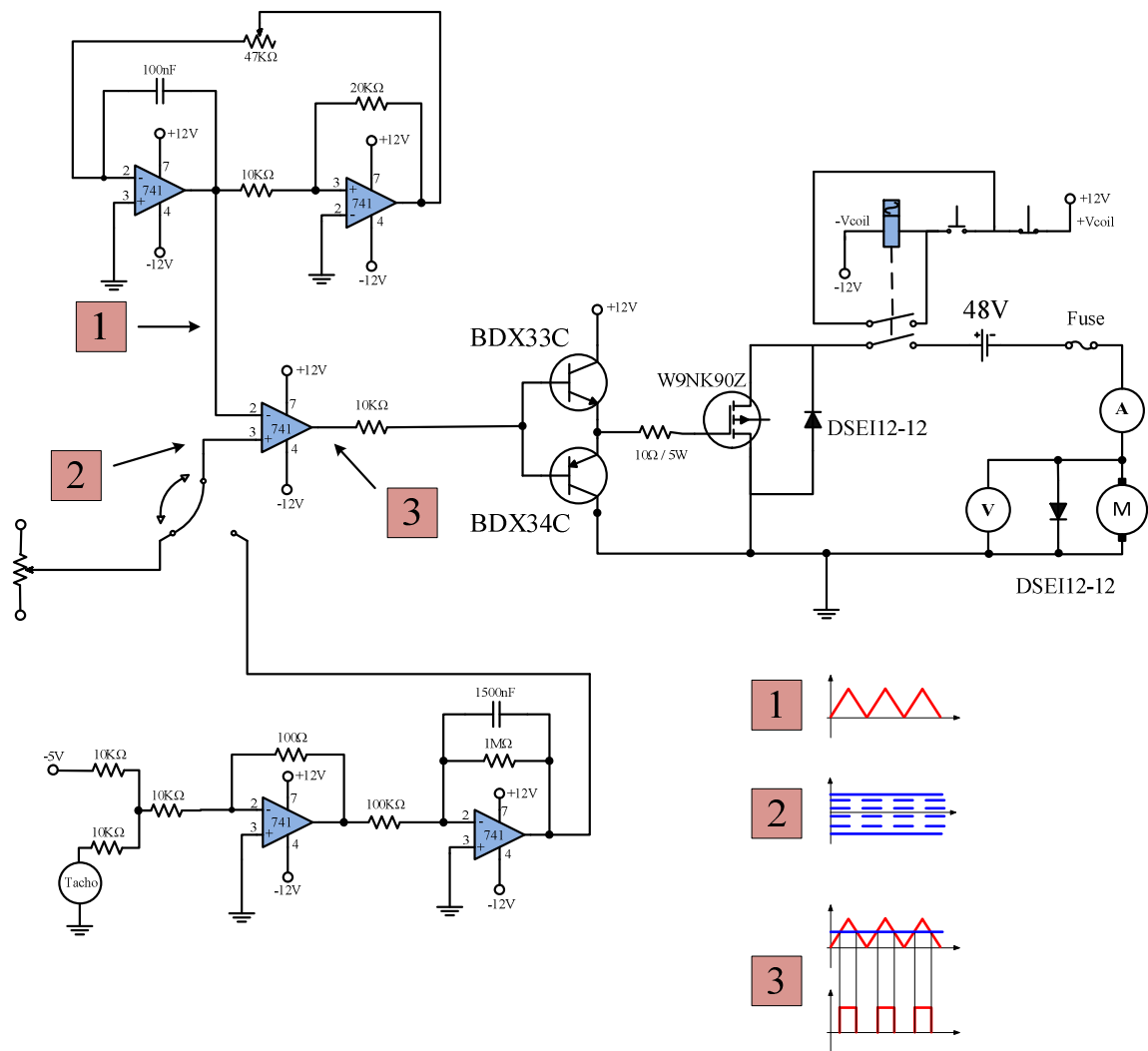


**Σχήμα 6.1:** Κύκλωμα ελέγχου του διακοπτικού στοιχείου και σήμα εισόδου στο κύκλωμα ελέγχου του διακοπτικού στοιχείου.



Σχήμα 6.2: Φωτογραφίες κυκλώματος ελέγχου και ισχύος του διακοπτικού στοιχείου.

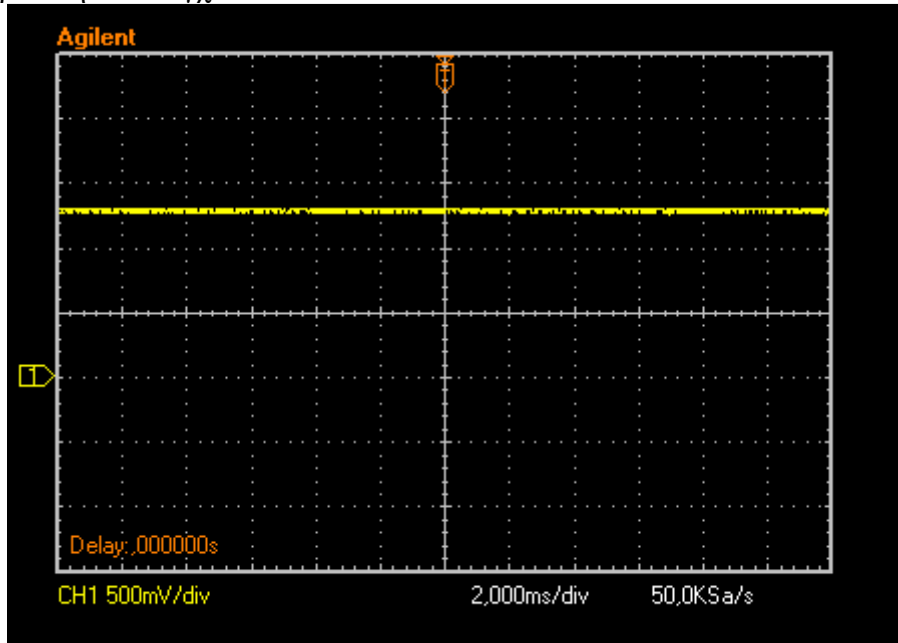
## Μελέτη και Κατασκευή Μετατροπέα DC-DC για την Οδήγηση Ηλεκτρικού Οχήματος



**Σχήμα 6.3:** Διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου του διακοπτικού στοιχείου.

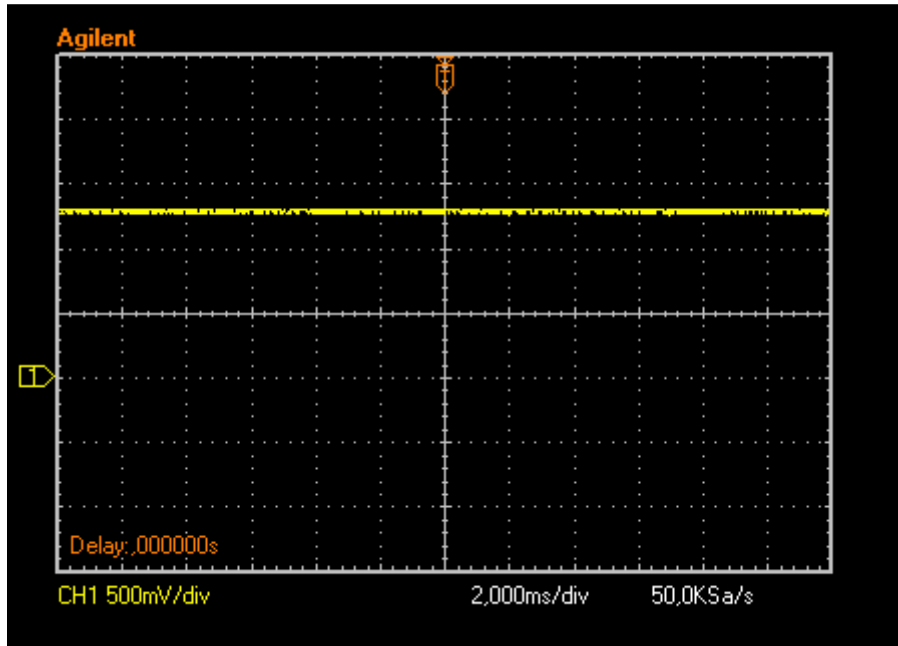
Για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία του κυκλώματος έλεγχου, μπορεί να εξετασθεί επιμεριστικά, δηλαδή να αναλυθεί η συμπεριφορά κάθε βαθμίδας ξεχωριστά.

Στην πρώτη βαθμίδα (**I**) υπάρχει ένα ποτενσιόμετρο ακριβείας, το οποίο σαν έξοδο του έχει μια συνεχή τάση, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα του χειροκίνητου ελέγχου.



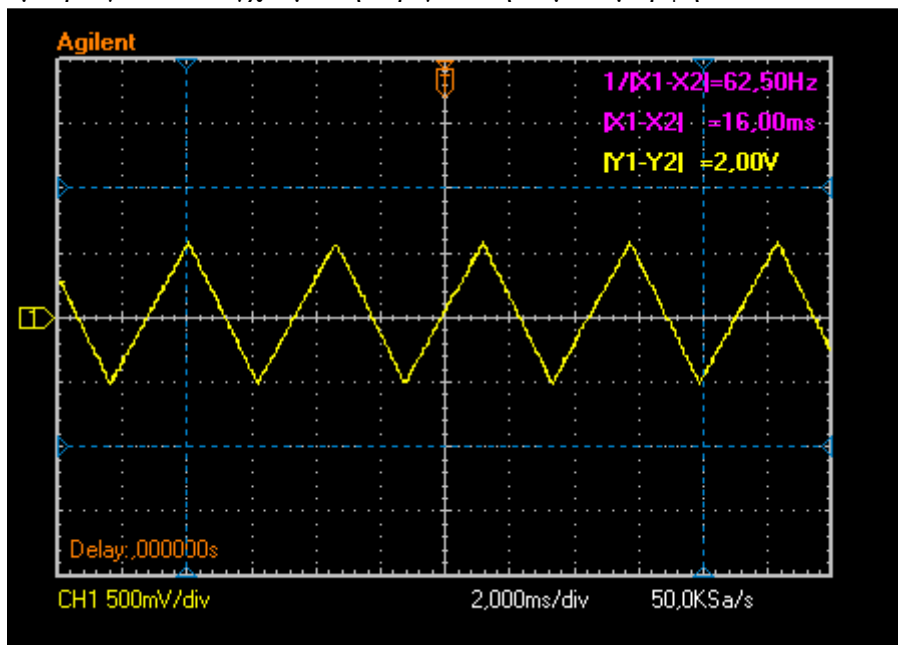
Σχήμα 6.4: Συνεχής τάση εξόδου ποτενσιόμετρο ακριβείας.

Στην δεύτερη βαθμίδα (**II**) υπάρχει σαν έξοδος μια συνεχή τάση με την διαφορά όμως ότι η ρύθμιση της ελέγχεται αυτόματα με την βοήθεια μιας ταχογεννήτριας. Το κύκλωμα αυτόματου ελέγχου αποτελείται από έναν αθροιστή ο οποίος προσθέτει δυο τάσεις, μια σταθερή και μια που προέρχεται από την ταχογεννήτρια και από έναν ολοκληρωτή ο οποίος με την φόρτιση και την εκφόρτιση του πυκνωτή, επιτυγχάνει αργές μεταβολές του σήματος της τάσης εισόδου, λόγω του ότι η μεταβολή της τάσης του κινητήρα μπορεί να είναι απότομη. Η ταχογεννήτρια παράγει τάση ανάλογη των στροφών του κινητήρα, για την οποία ισχύει  $V_{tach} = K * n$ . Η τιμή της σταθερής τάσης αντιστοιχεί στις ονομαστικές στροφές του κινητήρα (-5V). Για  $n_{ov}$  λαμβάνεται  $t_{on} = t_{off}$ . Αν μειωθούν οι στροφές θα αυξηθεί το  $t_{on}$  και το σύστημα θα επαναφέρει τις στροφές του στις ονομαστικές, ενώ αν αυξηθούν θα μειωθεί το  $t_{on}$  με το ανάλογο αποτέλεσμα.



**Σχήμα 6.5:** Συνεχής τάση εξόδου η ρύθμιση της οποίας ελέγχεται αυτόματα με την βοήθεια μιας ταχογεννήτριας.

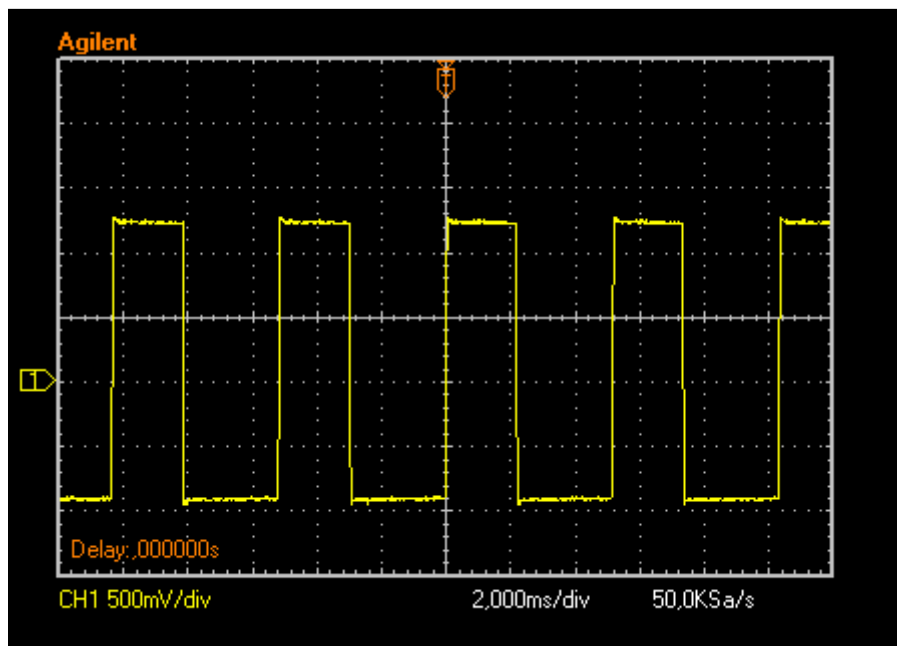
Στην τρίτη βαθμίδα (**III**) ο ταλαντωτής παράγει έναν τριγωνικό παλμό με την βοήθεια του ολοκληρωτή, εξαιτίας του πυκνωτή του, ο οποίος φορτίζεται και εκφορτίζεται, τα όρια του οποίου καθορίζονται από τον συγκριτή υστέρησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν αυξηθεί η αντίσταση που βρίσκεται στην είσοδο του ολοκληρωτή, με σταθερή την χωρητικότητα του πυκνωτή, μειώνεται η συχνότητα της κυματομορφής και αντίστροφα γι' αυτό τον λόγο έχουμε βάλει ένα ποτενσιόμετρο για να ελέγχουμε την τριγωνική κυματομορφή.



**Σχήμα 6.6:** Τριγωνικός παλμός ολοκληρωτή.

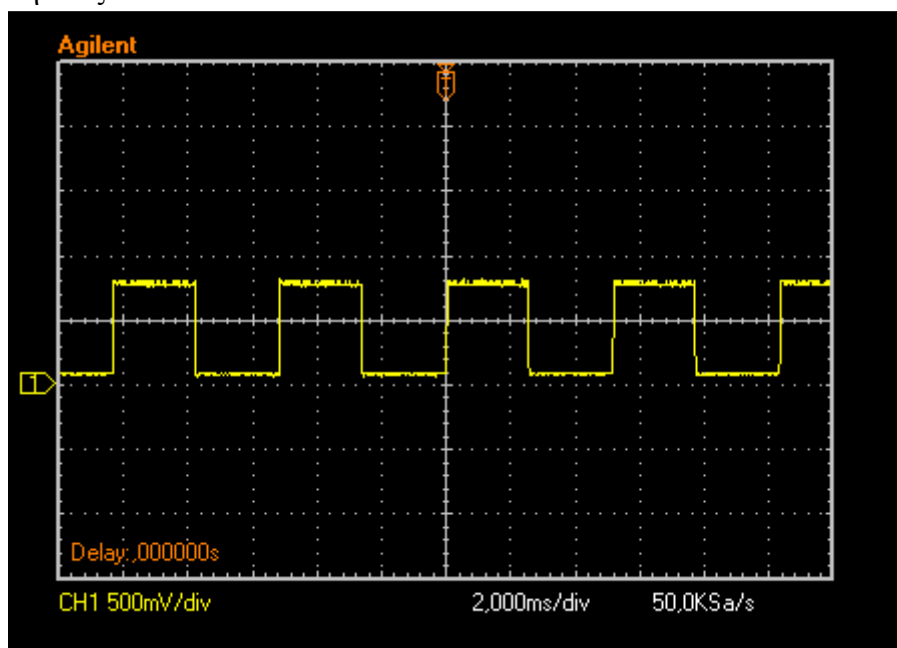
Στην τέταρτη βαθμίδα (**IV**) οδηγείται ο τριγωνικός παλμός στην αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή και την σταθερή τάση, είτε με χειροκίνητο είτε με αυτόματο έλεγχο, στην μη αναστρέφουσα είσοδο. Από την σύγκριση της τριγωνικής

κυματομορφής με την σταθερή τάση προκύπτει μια τετραγωνική κυματομορφή.



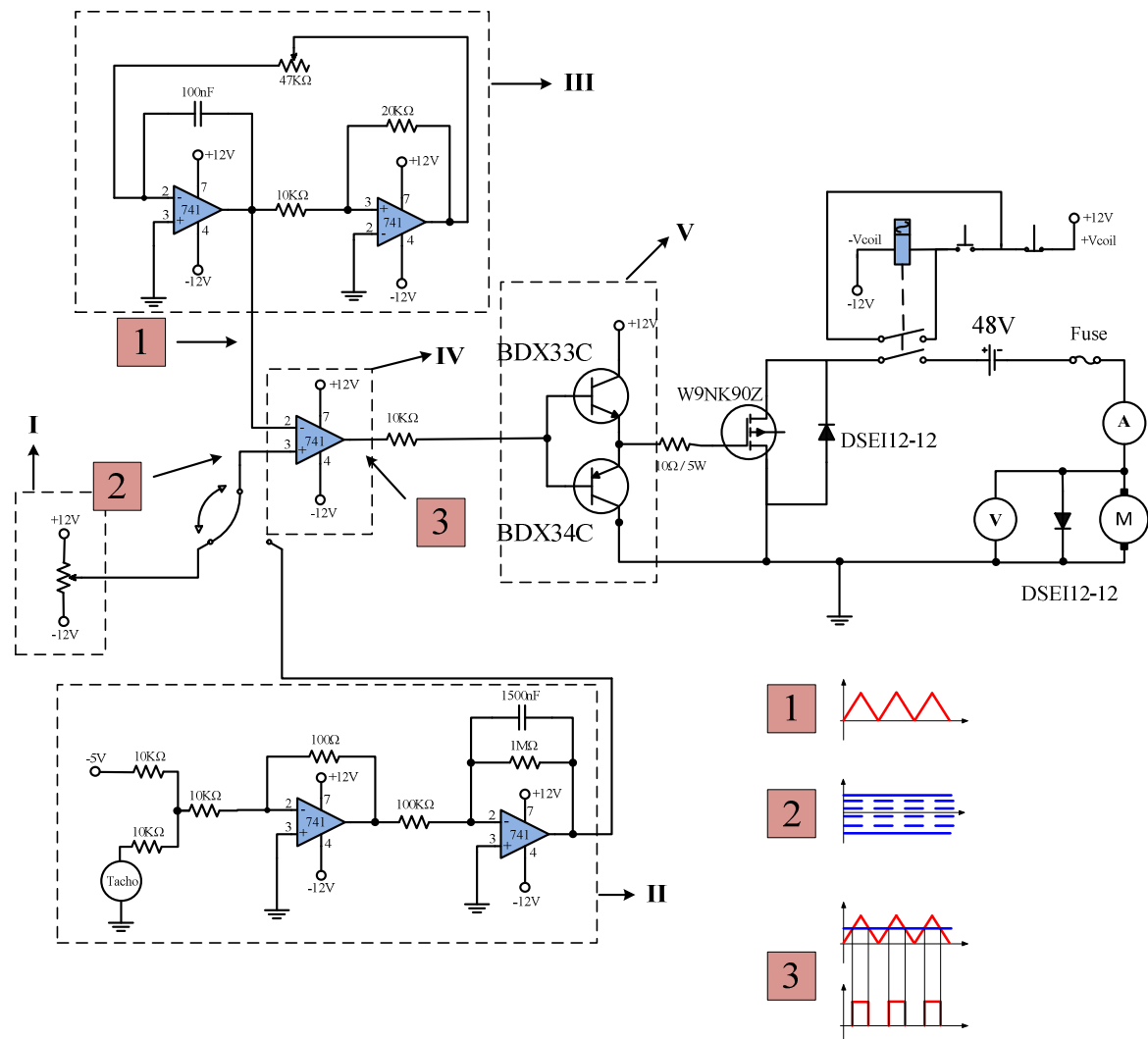
**Σχήμα 6.7:** Τετραγωνικός παλμός αποτέλεσμα σύγκρισης της τριγωνικής κυματομορφής με την σταθερή τάση.

Στην πέμπτη βαθμίδα (**V**) ο τετραγωνικός παλμός οδηγείται σε μια ενισχυτική διάταξη totem pole, η οποία αποτελείται από ένα τρανζίστορ BDX33C και το συμπληρωματικό του DBX34C. Το BDX33C είναι τύπου NPN, το οποίο είναι πολωμένο ορθά και τροφοδοτείται από +12V. Το BDX34C είναι τύπου PNP και έχει γειωθεί. Κατά την θετική ημιπερίοδο του τετραγωνικού παλμού, άγει το BDX33C το οποίο ενισχύει την θετική τιμή του τετραγωνικού παλμού. Στην αρνητική ημιπερίοδο άγει το BDX34C το οποίο και την μηδενίζει. Συνεπώς στην έξοδο αυτής της βαθμίδας προκύπτει ένας τετραγωνικός παλμός ο οποίος οδηγείται στην πύλη ενός MOSFET.



**Σχήμα 6.8:** Τετραγωνικός παλμός ο οποίος οδηγείται στην πύλη MOSFET.

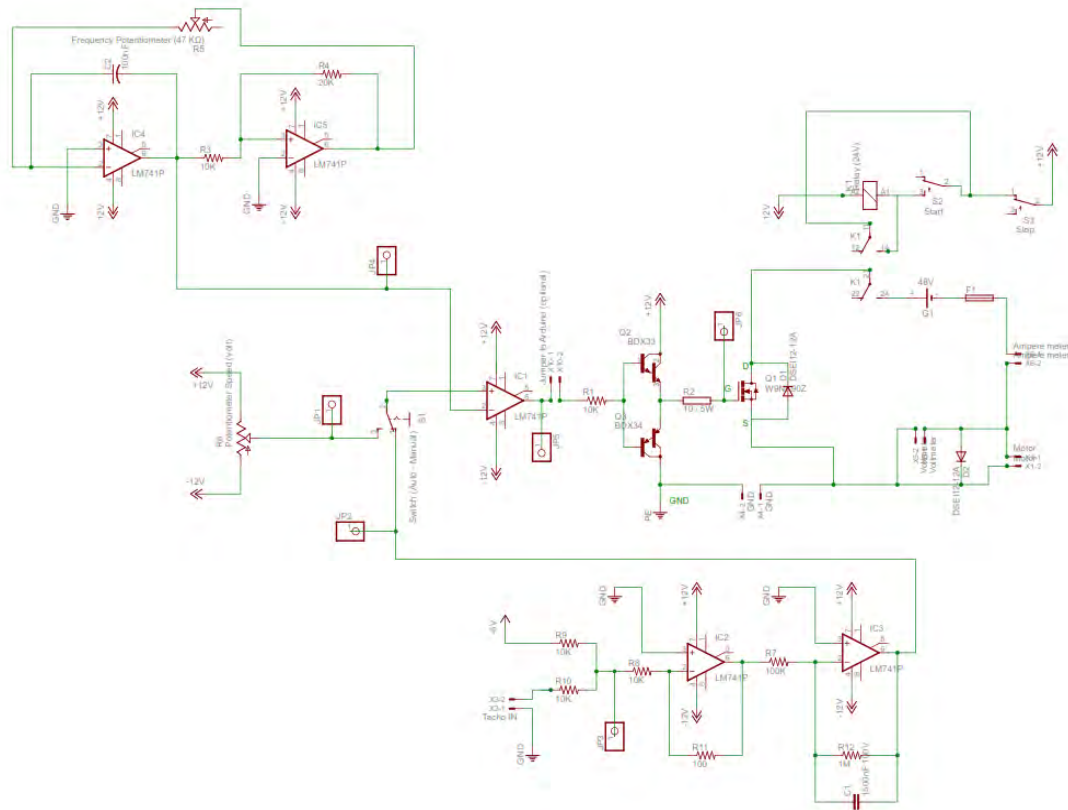




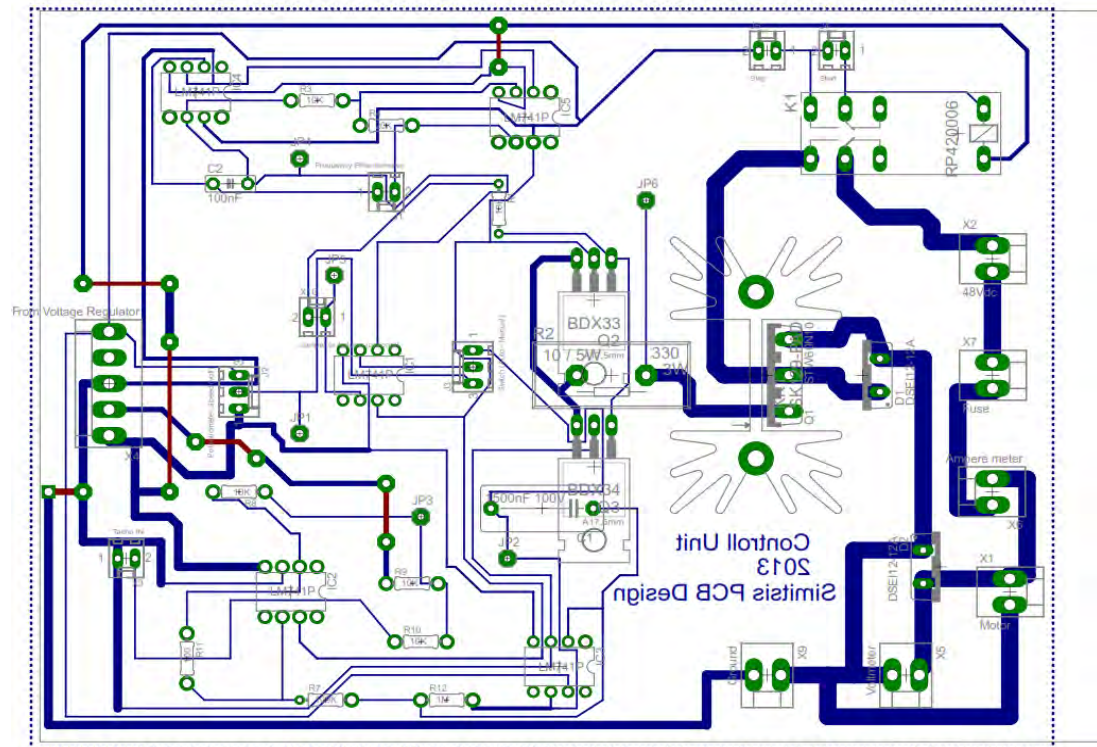
Σχήμα 6.9: Διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου χωρισμένο σε βαθμίδες.

### 6.1.1 Σχηματικό και Τοπογραφικό Πλακέτας Κυκλώματος Ελέγχου και Ισχύος.

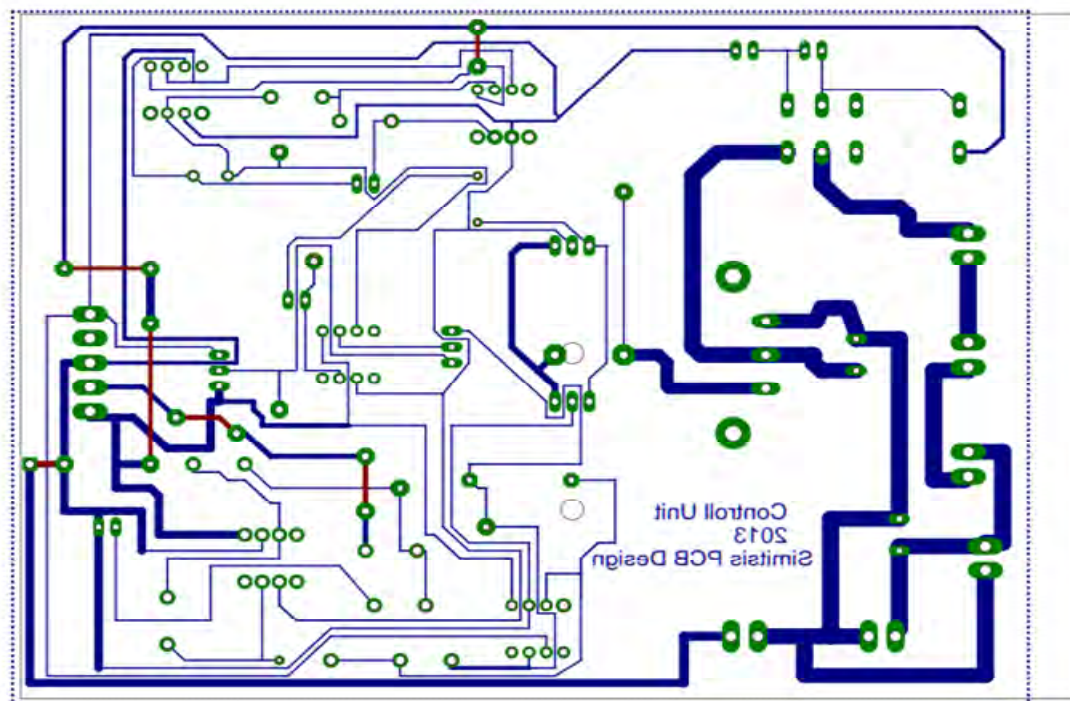
Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται το σχηματικό της πλακέτας του κυκλώματος ελέγχου και ισχύος τα οποία δημιουργήθηκαν στο σχεδιαστικό πρόγραμμα E.A.G.L.E. καθώς και το τοπογραφικό σε διάφορες εκδοχές μία εκ των οποίων είναι και οι διάδρομοι που τυπώθηκαν για το κατασκευαστικό μέρος της διπλωματικής εργασίας.



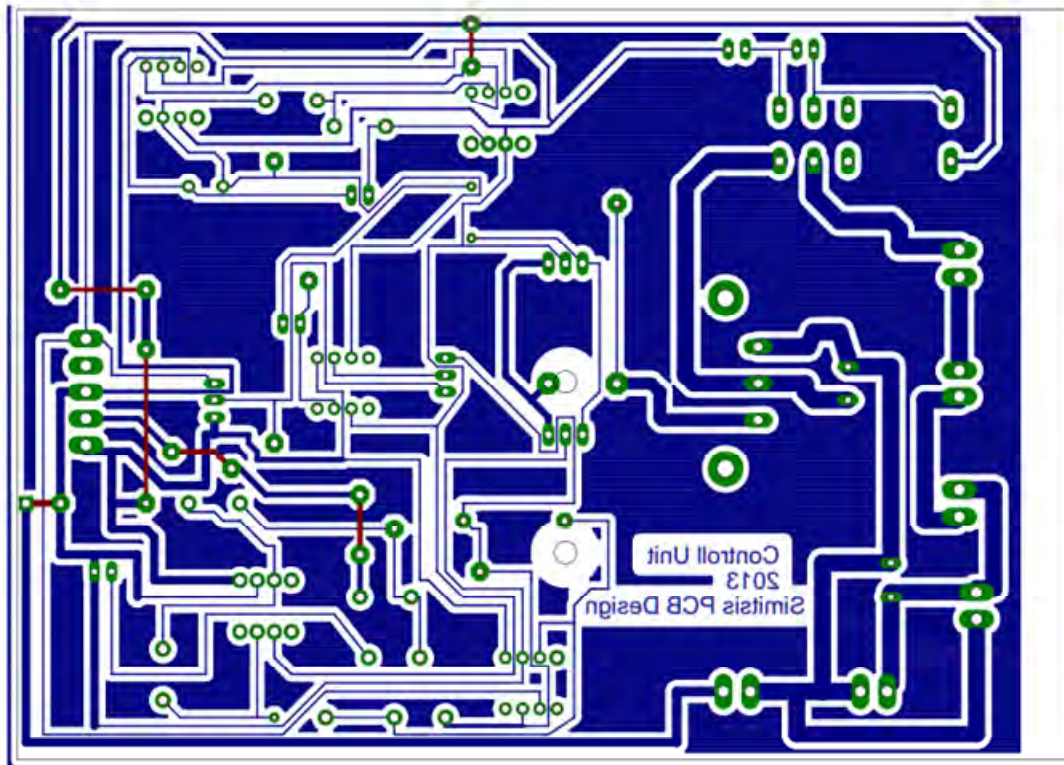
**Σχήμα 6.10:** Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος ελέγχου και ισχύος σχεδιασμένο στο Eagle.



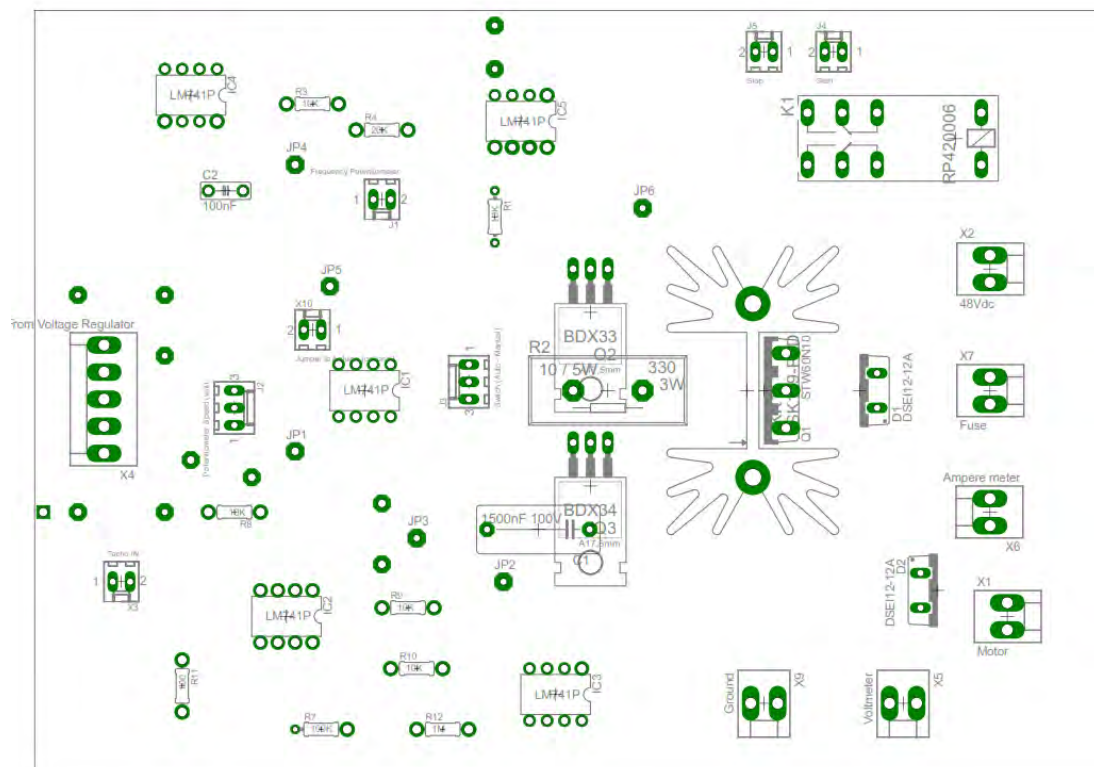
Σχήμα 6.11: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος ελέγχου στο οποίο απεικονίζονται οι χάλκινοι διάδρομοι (το κάτω μέρος της πλακέτας) και τα εξαρτήματα (επάνω μέρος της πλακέτας) σχεδιασμένα στο Eagle.



Σχήμα 6.12: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος ελέγχου στο οποίο απεικονίζονται οι χάλκινοι διάδρομοι (το κάτω μέρος της πλακέτας) και τα Jumper (επάνω μέρος της πλακέτας) σχεδιασμένα στο Eagle.



Σχήμα 6.13: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος ελέγχου στο οποίο απεικονίζονται οι χάλκινοι διάδρομοι (το κάτω μέρος της πλακέτας) όπως αποτυπώθηκαν στην διαφάνεια σχεδιασμένα στο Eagle.



Σχήμα 6.14: Τοπογραφικό διάγραμμα σύμφωνα με το οποίο κολλήθηκαν τα εξαρτήματα στην πλακέτα σχεδιασμένα στο Eagle.

### 6.1.2 Υλικά κατασκευής του μετατροπέα

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μετατροπέα DC-DC της διπλωματικής αυτής εργασίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

α/α	Περιγραφή υλικών	Τεμάγια
1	Φωτοευαίσθητη πλακέτα	1
2	Τελεστικός Ενισχυτής LM741 (8 DIP)	5
3	Βάση για τη τοποθέτηση του LM741	5
4	Power Transistor BDX33C (NPN) (TO-220)	1
5	Power Transistor BDX34C (PNP) (TO-220)	1
6	Power Mosfet W9NK90Z (N-CHANNEL) (TO -3P)	1
7	Ψήκτρα για το Mosfet (TO -3P)	1
8	IXYS DSEI12-12 Fast Recovery Epitaxial Diode	2
9	Relay πλακέτας με τάση πηνίου (24V)	1
10	Ποτενσιόμετρο 10KΩ (γραμμικό)	1
11	Ποτενσιόμετρο 47KΩ (γραμμικό)	1
12	Πυκνωτής Κεραμικός 100nF 100V	1
13	Πυκνωτής Κεραμικός 1500μF 100V	1
14	Αντίσταση 10KΩ (1/4W)	5
15	Αντίσταση 20KΩ (1/4W)	1
16	Αντίσταση 100KΩ (1/4W)	1
17	Αντίσταση 100Ω (1/4W)	1
18	Αντίσταση 1MΩ (1/4W)	1
19	Αντίσταση 10Ω (5W)	1
20	Μεταγωγικός διακόπτης	1
21	Button N.O.	1
22	Button N.C.	1
23	Mollex Connectors για PCB (male) 2Pin	10
24	Mollex Connectors (female) 2Pin	10
25	Mollex Connectors για PCB (male) 3Pin	2
26	Mollex Connectors (female) 3Pin	2
27	Mollex Connectors για PCB (male) 5Pin	1
28	Mollex Connectors (female) 5Pin	1

## 6.2 Υλοποίηση τροφοδοτικού

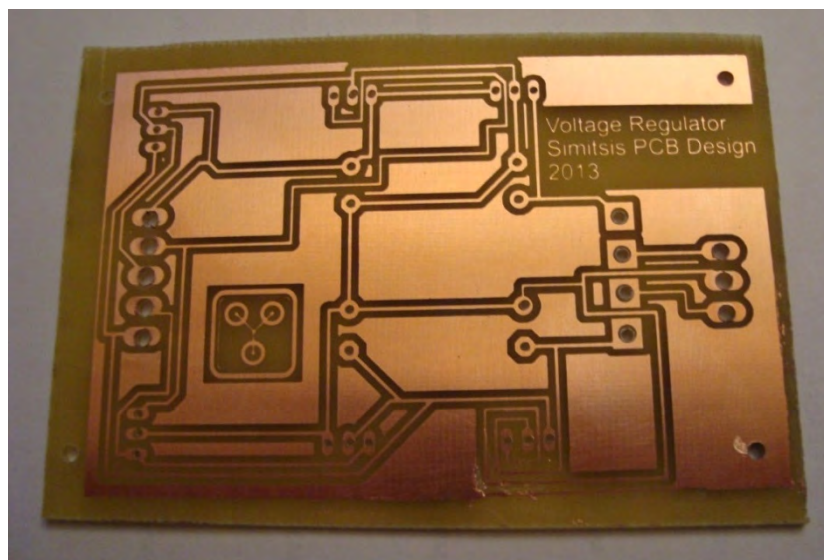
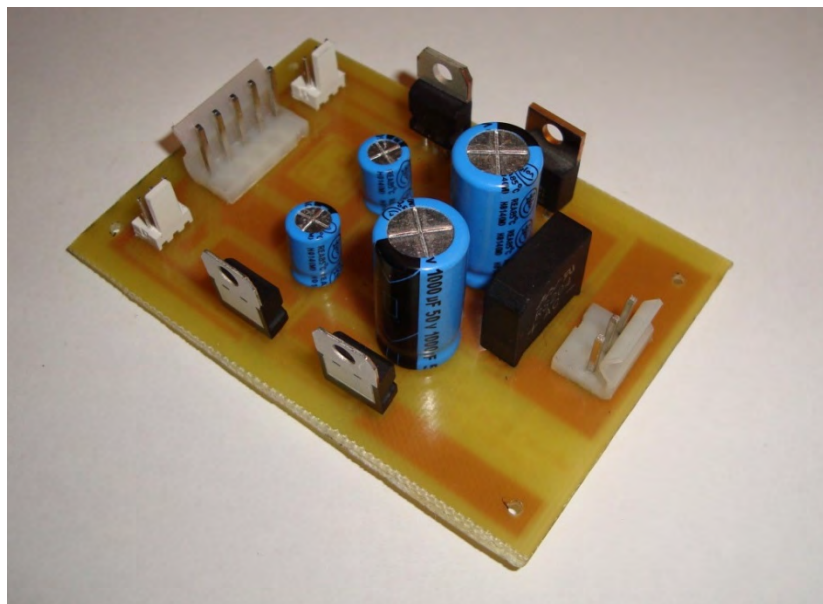
Σχεδόν όλες οι ηλεκτρονικές συσκευές για να λειτουργήσουν, χρειάζονται πηγή συνεχούς τάσης. Στις συσκευές που απαιτούν μεγάλη ισχύ, χρησιμοποιούνται διατάξεις που

μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή.

Οι συσκευές που μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή λέγονται τροφοδοτικά.

Για την αυτονομία ενός ηλεκτρικού οχήματος χρειαζόμαστε πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που την παίρνουμε από συσσωρευτές (μπαταρίες) .

Στην συγκεκριμένη πτυχιακή θα τροφοδοτήσουμε το κύκλωμα ελέγχου από το τροφοδοτικό που θα κατασκευαστεί παρακάτω με σκοπό την εξομοίωση της μπαταρίας.



**Σχήμα 6.15:** Φωτογραφίες τροφοδοτικού από το κατασκευαστικό μέρος της εργασίας.

Οι βασικές λειτουργίες ενός τροφοδοτικού αναλύονται στις ακόλουθες παραγράφους.

### 6.2.1 Μετασηματιστής τάσεως

Η αλλαγή της τιμής της εναλλασσόμενης τάσεως σε μια τιμή τέτοια, ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί η κατάλληλη συνεχής τάση.

Ο μετασηματιστής είναι αναγκαίος ακόμα κι αν δεν πρόκειται να μετατραπεί η τιμή της τάσης για λόγους προστασίας από ηλεκτροπληξίες.



Σχήμα 6.16: Φωτογραφία μετασηματιστή τάσης από το κατασκευαστικό μέρος της εργασίας.

### 6.2.2 Ανόρθωση

Κάθε ηλεκτρονική διάταξη που παρουσιάζει μικρή αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα κατά την πόλωσή της κατά μια φορά και μεγάλη κατά την πόλωσή της αντίθετα, λέγεται ανορθωτής.

Ο ανορθωτής μπορεί να μετατρέψει ένα εναλλασσόμενο ρεύμα σε ρεύμα το οποίο θα περιέχει μια συνεχή συνιστώσα που μπορεί να εκμεταλλευθεί (στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε γέφυρα ανόρθωσης).

### 6.2.3 Φιλτράρισμα

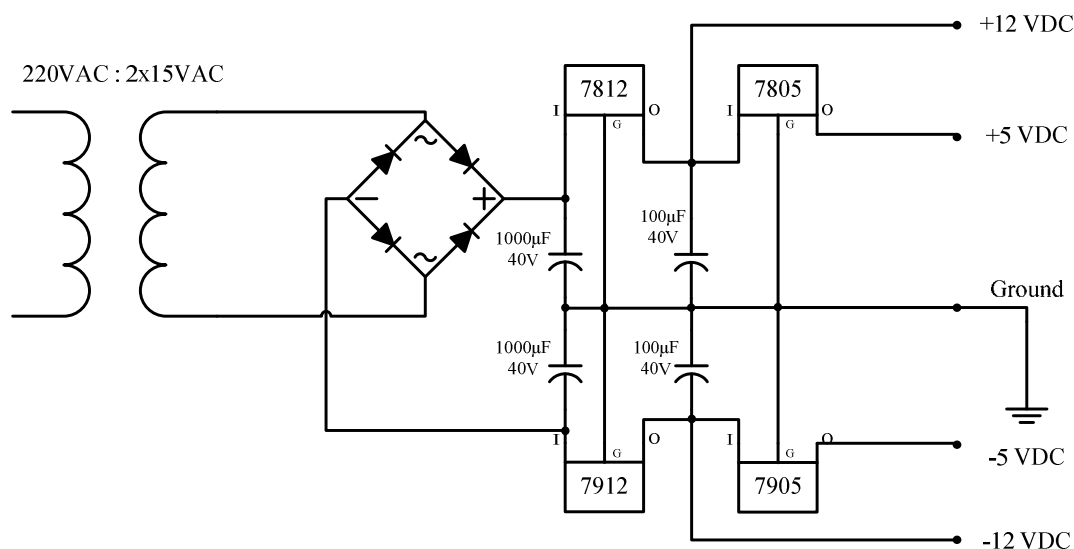
Η τάση που συναντάμε μετά την ανόρθωση, εκτός από συνεχή συνιστώσα, περιέχει και πλήθος από εναλλασσόμενες συνιστώσες που οδηγούν σε αρμονικές μεγαλύτερης συχνότητας από αυτής του δικτύου. Η επίδραση αυτών των αρμονικών υποβιβάζεται χρησιμοποιώντας ειδικά κυκλώματα που ονομάζονται φίλτρα. Τα πιο συνηθισμένα φίλτρα κατασκευάζονται με συνδυασμούς πυκνωτών οι οποίοι έχουν επιλεγθεί έτσι ώστε να αντέχουν στην μέγιστη τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα τους (στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές , 2x1000 $\mu$ F και 2x100 $\mu$ F).

### 6.2.4 Σταθεροποίηση

Σε πολλά τροφοδοτικά υπάρχουν ειδικά κυκλώματα που κρατούν σταθερή την τάση που δίνει το τροφοδοτικό όταν μεταβάλλεται το ρεύμα του φορτίου του ή η τάση του δικτύου. Αυτό γίνεται με την βοήθεια των σταθεροποιητών.

Στο κύκλωμα του τροφοδοτικού της διπλωματικής αυτής εργασίας για την σταθεροποίηση χρησιμοποιούνται ο LM7812 για τα +12V, ο LM7912 για τα -12V, ο LM7805 για τα +5V και ο LM7905 για τα -5V.

Η λειτουργία τους στηρίζεται στην ικανότητα τους να κρατάνε πάντα την έξοδο τους σταθερή, αν και εφόσον η είσοδος τους είναι ελάχιστα volt μεγαλύτερη από την τάση εξόδου. Έτσι, ανεξάρτητα από τις μεταβολές του φορτίου η τάση διατηρείται συνεχώς στην επιθυμητή τιμή.

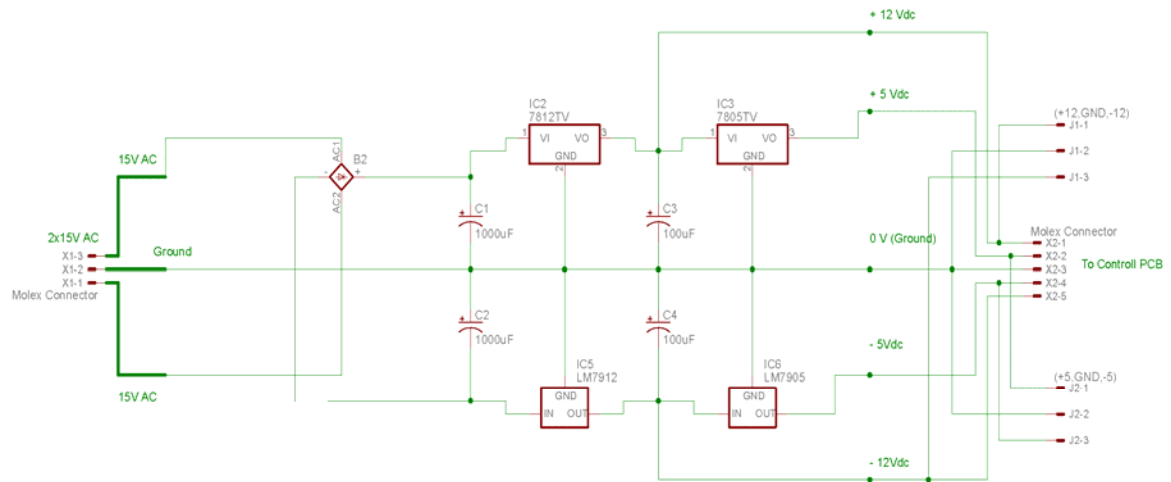


Σχήμα 6.17: Συνδεσμολογία τροφοδοτικού.

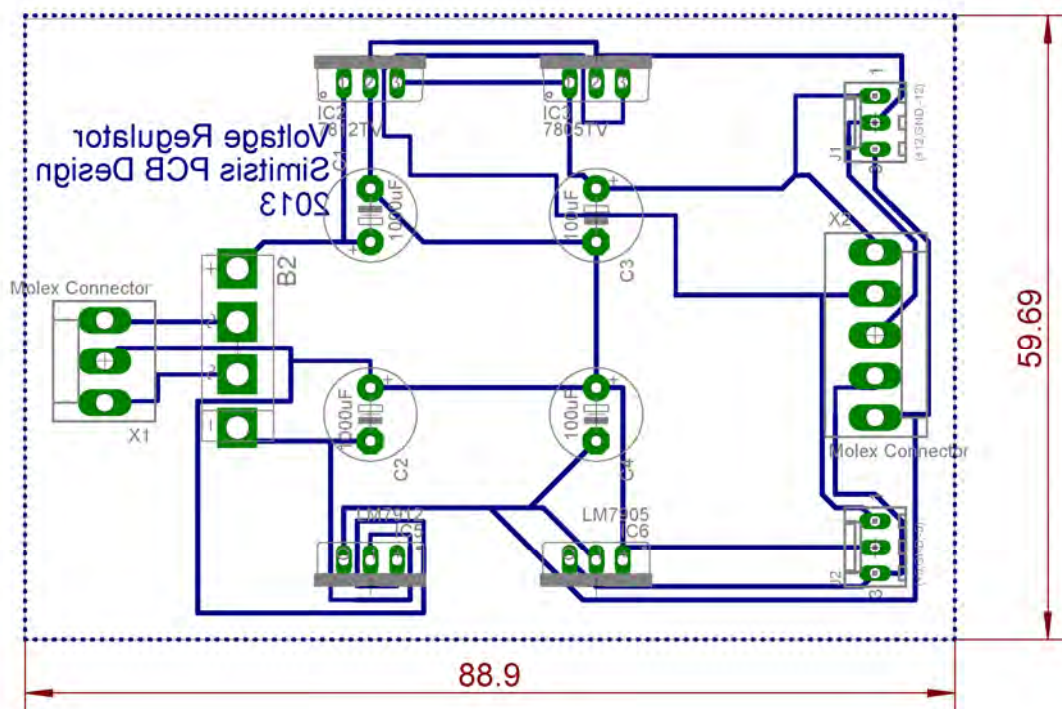
### 6.2.5 Υλικά τροφοδοτικού

α/α	Περιγραφή υλικών	Τεμάχια
1	Γέφυρα ανόρθωσης ισχύος (2A)	1
	LM7812 (TO-220)	1
	LM7805 (TO-220)	1
	LM7912 (TO-220)	1
	LM7905 (TO-220)	1
	Πυκνωτής Ηλεκτρολυτικός 1000µF 50V 85°C	2
	Πυκνωτής Ηλεκτρολυτικός 100µF 50V 85°C	2
	Mollex Connectors για PCB (male) 3Pin	3
	Mollex Connectors (female) 3Pin	3
	Mollex Connectors για PCB (male) 5Pin	1
	Mollex Connectors (female) 5Pin	1

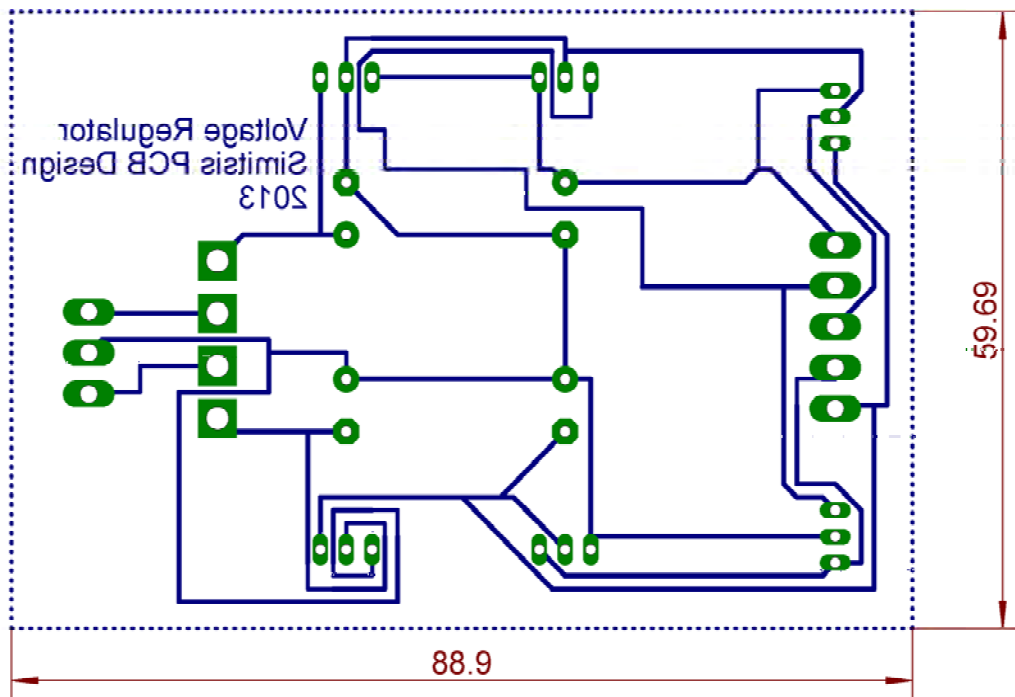




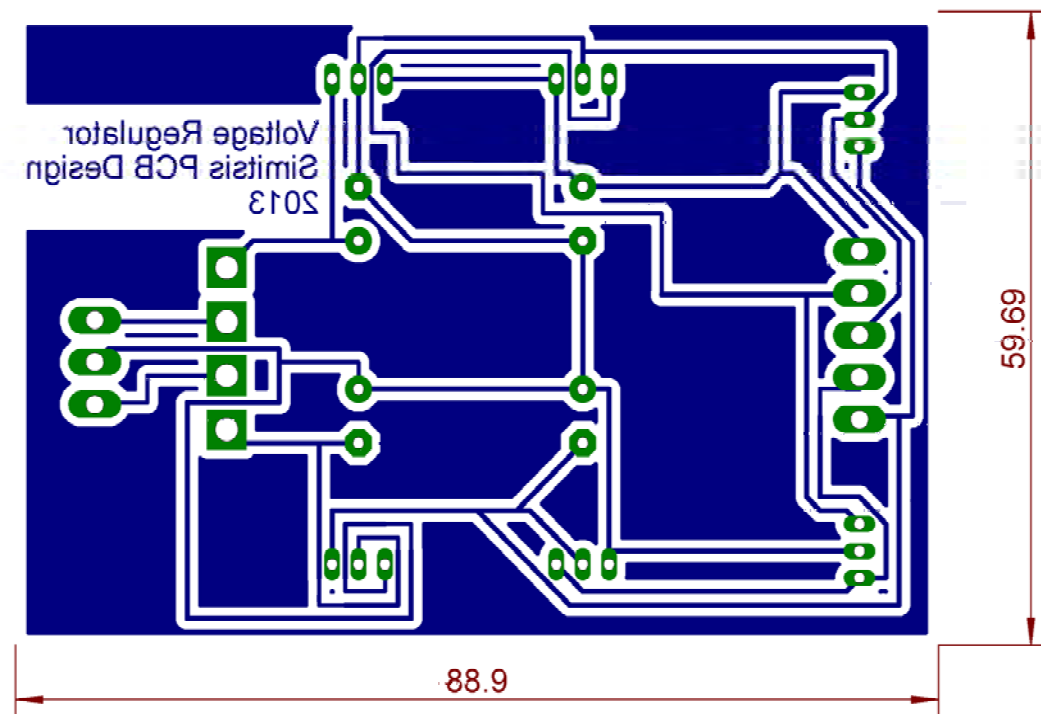
Σχήμα 6.18: Σχηματικό διάγραμμα του τροφοδοτικού σχεδιασμένο στο Eagle.



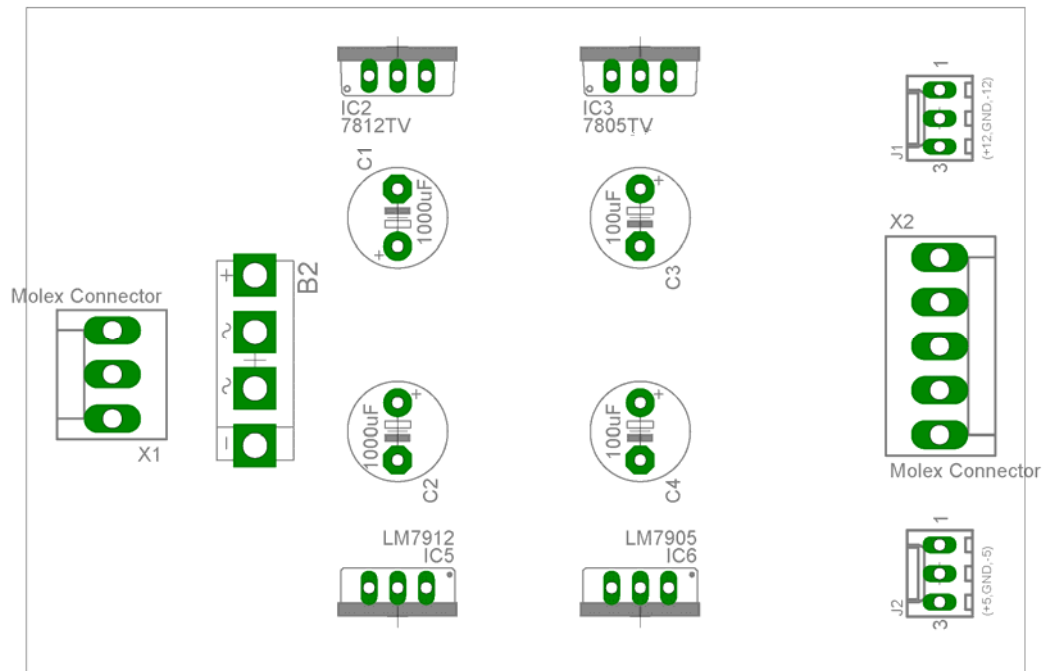
Σχήμα 6.18: Σχηματικό διάγραμμα του τροφοδοτικού στο οποίο απεικονίζονται οι χαλκίνοι διάδρομοι (το κάτω μέρος της πλακέτας) και τα εξαρτήματα (επάνω μέρος της πλακέτας) σχεδιασμένο στο Eagle.



**Σχήμα 6.19:** Σχηματικό διάγραμμα του τροφοδοτικού στο οποίο απεικονίζονται οι χάλκινοι διάδρομοι δηλαδή το κάτω μέρος της πλακέτας σχεδιασμένο στο Eagle.



**Σχήμα 6.20:** Σχηματικό διάγραμμα του τροφοδοτικού στο οποίο απεικονίζονται οι χάλκινοι διάδρομοι (το κάτω μέρος της πλακέτας) όπως αποτυπώθηκαν στην διαφάνεια σχεδιασμένο στο Eagle.

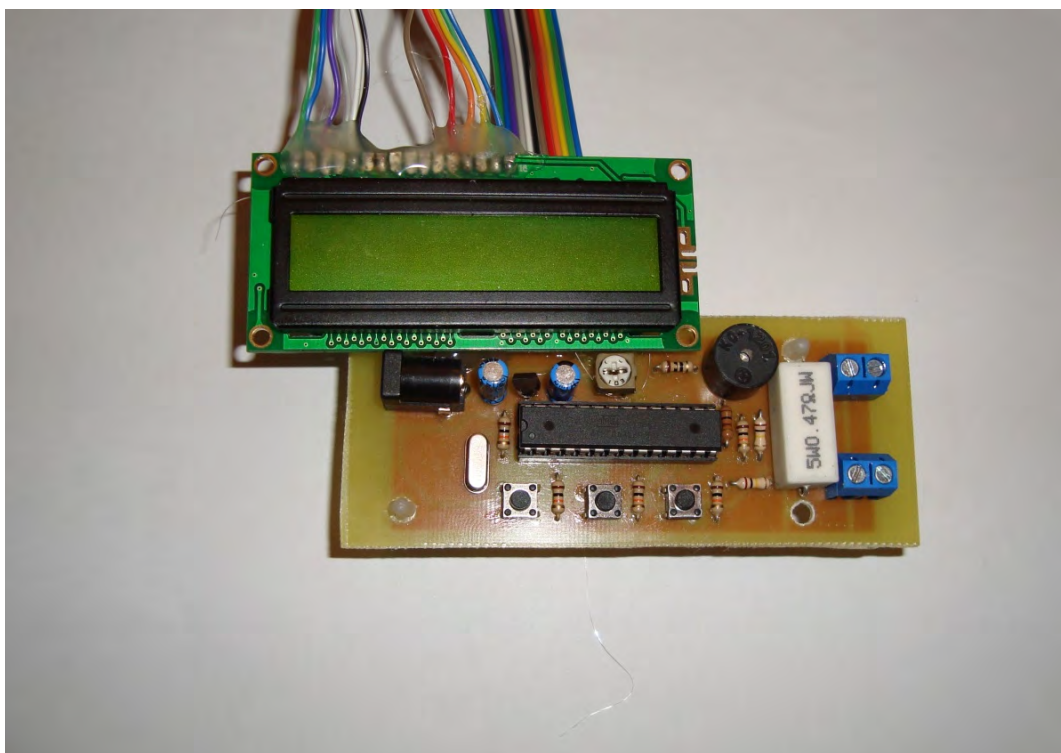


**Σχήμα 6.21:** Τοπογραφικό διάγραμμα σύμφωνα με το οποίο κολλήθηκαν τα εξαρτήματα στην πλακέτα σχεδιασμένα στο Eagle.

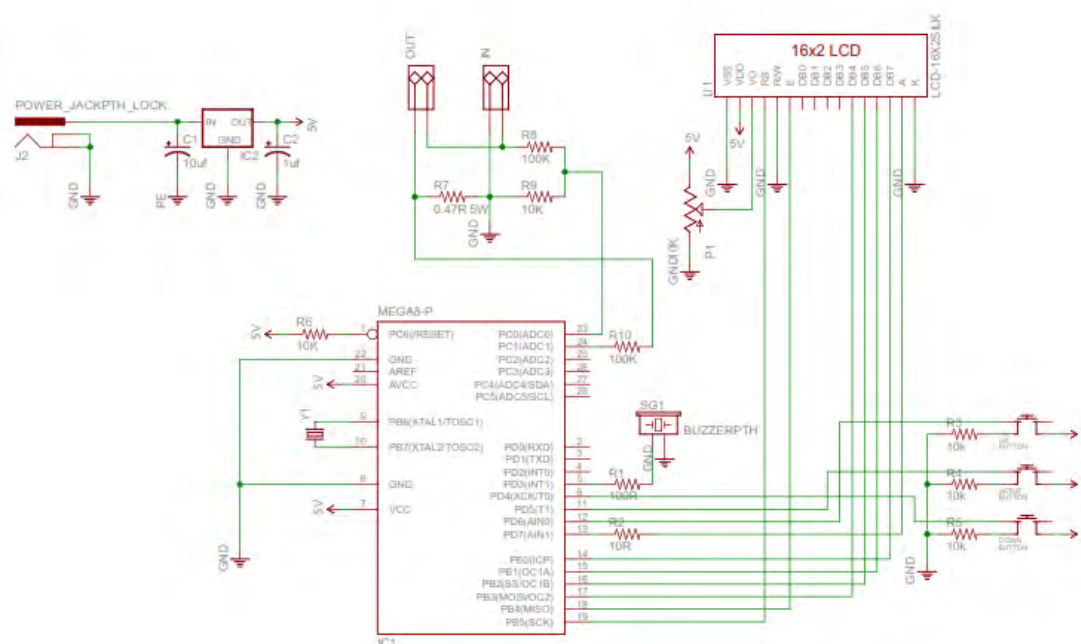
### 6.3 Υλοποίηση Κυκλώματος Κατασκευής Βολτομέτρου και Αμπερομέτρου με την χρήση του Arduino.

#### Εισαγωγή

Για να μπορούμε να έχουμε έλεγχο της τάσης και του ρεύματος χωρίς να συνδέσουμε εξωτερικά κάποια συσκευή μετρήσεως, θα κατασκευάσουμε ένα βολτόμετρο και ένα αμπερόμετρο εύρους 0-50V και 0-10A με την βοήθεια του Arduino το οποίο θα τοποθετηθεί στο μπροστινό μέρος της κατασκευής. Στο πέμπτο Κεφάλαιο αναλύεται η λειτουργία του Arduino, οπότε παρακάτω συνεχίζεται η παρουσίαση της κατασκευής του βολτομέτρου και του αμπερομέτρου.



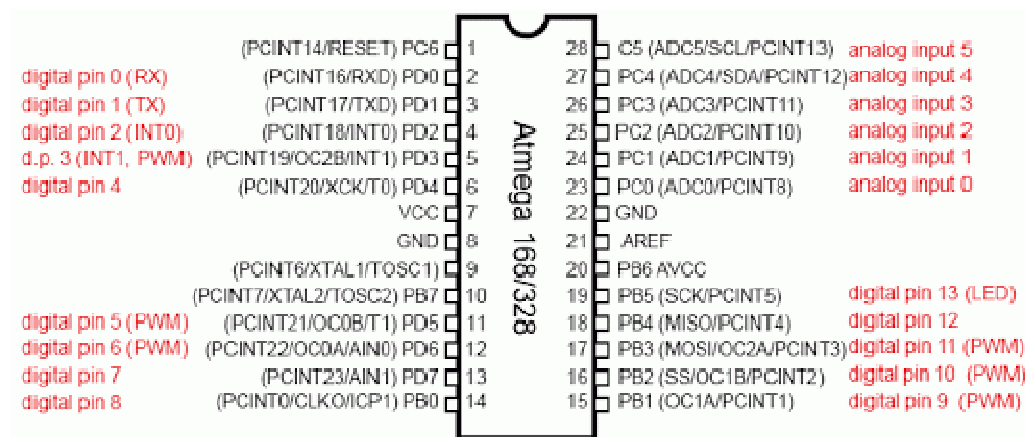
**Σχήμα 6.22:** Φωτογραφία πλακέτας κατασκευής οργάνου μετρήσεως τάσης και έντασης.



Σχήμα 6.23: Σχηματικό διάγραμμα οργάνου μετρήσεως σχεδιασμένο στο Eagle.

### 6.3.1 Υλικά που απαιτήθηκαν για την υλοποίηση της κατασκευής

α/α	Περιγραφή υλικών	Τεμάχια
1	Arduino Uno	1
2	ATMega328P	1
3	LCD Display (2x16)	1
4	Buzzer (5V)	1
5	Tacticle Switch	3
6	Trimmer 10K	1
7	Αντιστάσεις 10KΩ	6
8	Αντιστάσεις 10KΩ	2
9	Αντίσταση 100KΩ	1
10	Αντίσταση 10Ω	1
11	Αντίσταση 10K 0.47Ω 5W	1
12	Power Jack connector για PCB	1
13	LM78L05 σταθεροποιητής	1
14	Πυκνωτής 10μF	1
15	Πυκνωτής 1μF	1
16	Κρύσταλλος 16MHz	1



Σχήμα 6.24: ATmega328P

### 6.3.2 Κώδικας:

```
//version
#define NAME "Arduino Ammeter"
#define VERSION "0.9"

//debug flag (avoid enabling. it makes your device slower)
//#define DEBUG

//pins
const int PIN_BACKLIGHT = 7;
const int PIN_BUZZER = 3;
const int PIN_VOLTAGE = 0;
const int PIN_CURRENT = 1;
const int PIN_BUTTON_UP = 6;
const int PIN_BUTTON_SETUP = 5;
const int PIN_BUTTON_DOWN = 4;

// includes
#include <LiquidCrystal.h>
#include <EEPROM.h>

// initialize the library with the numbers of the interface pins
LiquidCrystal lcd(13, 12, 11, 10, 9, 8);

//variables
//voltage
int VOLTAGE_CURRENT;
int VOLTAGE_LAST=99999;
unsigned long VOLTAGE_MILLIS;
float VOLTAGE_CALCULATED;
float VOLTAGE_MAP = 50; //default voltage map... calibration needed
//current
int CURRENT_CURRENT;
int CURRENT_LAST=99999;
unsigned long CURRENT_MILLIS;
float CURRENT_CALCULATED;
float CURRENT_MAP = 10; //default current map... calibration needed
//buttons
boolean BUTTON_PRESSED = false;
unsigned long BUTTON_MILLIS = false;
byte BUTTON_LAST;
```

```
boolean SETUP_MODE = false;
byte SETUP_ITEM;
boolean SETUP_DELAYBEEP;
//...
unsigned long MILLIS;
unsigned long SETUP_BLINKMILLIS;
boolean SETUP_BLINKSTATE;

//parameters
const int SENSOR_INTERVAL = 500;
const int BUTTON_HOLDTIME = 2000;
const int SETUP_MAXITEMS = 2;
const int SETUP_BLINKINTERVAL = 300;
const byte EEPROM_VALIDATOR = 73; //random number
const float VOLTAGE_STEP = 0.1;
const float CURRENT_STEP = 0.1;

//configuration
const byte EEPROM_CONFIGADDRESS = 0;
struct config_t
{
    byte Validator;
    ////////////////
    float VOLTAGE_MAP;
    float CURRENT_MAP;
    ////////////////
    byte ValidatorX2;
} EEPROM_DATA;

void setup() {
    //configure pins
    pinMode(PIN_BACKLIGHT, OUTPUT);
    pinMode(PIN_BUZZER, OUTPUT);
    pinMode(PIN_VOLTAGE, INPUT);
    pinMode(PIN_CURRENT, INPUT);
    pinMode(PIN_BUTTON_UP, INPUT);
    pinMode(PIN_BUTTON_SETUP, INPUT);
    pinMode(PIN_BUTTON_DOWN, INPUT);

    //set up LCD
    lcd.begin(16, 2);

    //initial message
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(NAME);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Version ");
    lcd.print(VERSION);

    //lights up
    digitalWrite(PIN_BACKLIGHT, HIGH);

#ifdef DEBUG
    delay(2000);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Debug enabled! ");
    lcd.print(VERSION);
#endif
}
```

```
Serial.begin(9600);
Serial.println("=====");
Serial.println(NAME);
Serial.println("Version ");
Serial.println(VERSION);
Serial.println("=====");
Serial.println("Debug messages:");
Serial.println("-----");
#endif

//try to load the configuration
loadConfiguration();

//show initial message for a while then clear and beep
delay(2000);
lcd.clear();
showLabels();

//beep
beepStart();
}

void loop() {
  processButtons();

  MILLIS = millis();

  if ( (MILLIS - VOLTAGE_MILLIS) >= SENSOR_INTERVAL )
  {
    readVoltage();

    if (!SETUP_MODE || SETUP_ITEM!=1) {
      showVoltage();
    }

    VOLTAGE_MILLIS = MILLIS;
  }

  if ( (MILLIS - CURRENT_MILLIS) >= SENSOR_INTERVAL )
  {
    readCurrent();

    if (!SETUP_MODE || SETUP_ITEM!=2) {
      showCURRENT();
    }

    CURRENT_MILLIS = MILLIS;
  }

  if (SETUP_MODE)
  {
    if ( (MILLIS - SETUP_BLINKMILLIS) >= SETUP_BLINKINTERVAL )
    {
      if (SETUP_BLINKSTATE)
      {
        if (SETUP_ITEM==1)
          showVoltage();
        else if (SETUP_ITEM==2)

```



```
        showCURRENT();

        SETUP_BLINKSTATE = false;
    } else {
        if (SETUP_ITEM==1)
            hideVoltage();
        else if (SETUP_ITEM==2)
            hideCURRENT();

        SETUP_BLINKSTATE = true;
    }

    SETUP_BLINKMILLIS = MILLIS;
}
}
}

void processButtons()
{
    if (digitalRead(PIN_BUTTON_UP) == HIGH)
    {
        if (!BUTTON_PRESSED)
        {
#ifdef DEBUG
            showDebug("Pressed UP");
#endif

            BUTTON_LAST = PIN_BUTTON_UP;
            BUTTON_PRESSED = true;
        }
    }
    else if (digitalRead(PIN_BUTTON_SETUP) == HIGH)
    {
        if (!BUTTON_PRESSED)
        {
#ifdef DEBUG
            showDebug("Pressed SETUP");
#endif

            beepButton();
            BUTTON_LAST = PIN_BUTTON_SETUP;
            BUTTON_MILLIS = millis();
            BUTTON_PRESSED = true;
            SETUP_DELAYBEEP = false;
        } else {
            if ((millis() - BUTTON_MILLIS) > BUTTON_HOLDTIME)
                if (!SETUP_DELAYBEEP)
                {
                    beepButton();
                    SETUP_DELAYBEEP = true;
                }
        }
    }
}
else if (digitalRead(PIN_BUTTON_DOWN) == HIGH)
{
    if (!BUTTON_PRESSED)
    {
```

```
#ifndef DEBUG
  showDebug("Pressed DOWN");
#endif

  BUTTON_LAST = PIN_BUTTON_DOWN;
  BUTTON_PRESSED = true;

}
}
else
{
  if (BUTTON_PRESSED) {
    if (BUTTON_LAST == PIN_BUTTON_SETUP)
    {
#ifndef DEBUG
      showDebug("Released SETUP");
#endif

      if (!SETUP_MODE && (millis() - BUTTON_MILLIS) > BUTTON_HOLDTIME) {
#ifndef DEBUG
        showDebug("Entered setup mode!");
#endif

        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("  Setup Mode  ");
        SETUP_MODE = true;
        SETUP_ITEM = 1;
      }
      else {
        if (SETUP_ITEM == SETUP_MAXITEMS) {
#ifndef DEBUG
          showDebug("Exited setup mode!");
#endif

          showLabels();
          SETUP_MODE = false;
          SETUP_ITEM = 0;
          saveConfiguration();
        }
        else {
          SETUP_ITEM++;
        }

        showVoltage();
        showCURRENT();
      }
    }
  }
  else if (BUTTON_LAST == PIN_BUTTON_UP) {
#ifndef DEBUG
    showDebug("Released UP");
#endif

    if (SETUP_MODE) {
      beepButton();

      if (SETUP_ITEM==1) { //voltage
        VOLTAGE_MAP+=VOLTAGE_STEP;
        readVoltage();
      }
    }
  }
}
```

```
#ifndef DEBUG
    startDebug("New VOLTAGE_MAP: ");
    Serial.println(VOLTAGE_MAP,6);
#endif
    } else if (SETUP_ITEM==2) { //current
        CURRENT_MAP+=CURRENT_STEP;
        readCurrent();

#ifndef DEBUG
        startDebug("New CURRENT_MAP: ");
        Serial.println(CURRENT_MAP,6);
#endif
    }
}
else if (BUTTON_LAST == PIN_BUTTON_DOWN) {
#ifndef DEBUG
    showDebug("Released DOWN");
#endif

    if (SETUP_MODE) {
        beepButton();

        if (SETUP_ITEM==1) { //voltage
            VOLTAGE_MAP-=VOLTAGE_STEP;
            readVoltage();

#ifndef DEBUG
            startDebug("New VOLTAGE_MAP: ");
            Serial.println(VOLTAGE_MAP,6);
#endif
        } else if (SETUP_ITEM==2) { //current
            CURRENT_MAP-=CURRENT_STEP;
            readCurrent();

#ifndef DEBUG
            startDebug("New CURRENT_MAP: ");
            Serial.println(CURRENT_MAP,6);
#endif
        }
    }

    BUTTON_PRESSED = false;
}
}
}

#ifndef DEBUG
void showDebug(char* Message)
{
    Serial.print(millis());
    Serial.print(": ");
    Serial.println(Message);
}

void startDebug(char* Message)
```

```
{
  Serial.print(millis());
  Serial.print(": ");
  Serial.print(Message);
}
#endif

void showLabels()
{
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Volts      Amps");
}

void showVoltage()
{
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(VOLTAGE_CALCULATED, 2);
  lcd.print(" V");

  if (VOLTAGE_CALCULATED<10)
    lcd.print(" ");
}

void hideVoltage()
{
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("      ");
}

void showCURRENT()
{
  lcd.setCursor(9, 0);

  if (CURRENT_CALCULATED<10)
    lcd.print(" ");

  lcd.print(CURRENT_CALCULATED, 2);
  lcd.print(" A");
}

void hideCURRENT()
{
  lcd.setCursor(9, 0);
  lcd.print("      ");
}

void beepStart()
{
  for (int i=0; i<300; i++) {
    digitalWrite(PIN_BUZZER, HIGH);
    delayMicroseconds(200);
    digitalWrite(PIN_BUZZER, LOW);
    delayMicroseconds(200);
  }
}

void beepButton()
{
```

```
    for (int i=0; i<20; i++) {
        digitalWrite(PIN_BUZZER, HIGH);
        delayMicroseconds(700);
        digitalWrite(PIN_BUZZER, LOW);
        delayMicroseconds(700);
    }
}

void readVoltage()
{
    VOLTAGE_CURRENT = analogRead(PIN_VOLTAGE);
    if ( VOLTAGE_CURRENT != VOLTAGE_LAST || SETUP_MODE ) {
        VOLTAGE_LAST = VOLTAGE_CURRENT;
        VOLTAGE_CALCULATED = fmap(VOLTAGE_CURRENT, 0, 1023, 0.0, VOLTAGE_MAP);

#ifdef DEBUG
        if (!SETUP_MODE)
        {
            startDebug("New voltage: ");
            Serial.print(VOLTAGE_CALCULATED);
            Serial.println("V");
        }
#endif
    }
}

void readCurrent()
{
    CURRENT_CURRENT = analogRead(PIN_CURRENT);
    if ( CURRENT_CURRENT != CURRENT_LAST || SETUP_MODE ) {
        CURRENT_LAST = CURRENT_CURRENT;
        CURRENT_CALCULATED = fmap(CURRENT_CURRENT, 0, 1023, 0.0, CURRENT_MAP);

#ifdef DEBUG
        if (!SETUP_MODE)
        {
            startDebug("New current: ");
            Serial.print(CURRENT_CALCULATED);
            Serial.println("A");
        }
#endif
    }
}

float fmap(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float
out_max)
{
    return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min;
}

int EEPROM_writeConf()
{
    byte Address = EEPROM_CONFIGADDRESS;

    const byte* p = (const byte*)(const void*)&EEPROM_DATA;
    int i;
    for (i = 0; i < sizeof(EEPROM_DATA); i++)
```

```
        EEPROM.write(Address++, *p++);
    return i;
}

int EEPROM_readConf()
{
    byte Address = EEPROM_CONFIGADDRESS;

    byte* p = (byte*)(void*)&EEPROM_DATA;
    int i;
    for (i = 0; i < sizeof(EEPROM_DATA); i++)
        *p++ = EEPROM.read(Address++);
    return i;
}

void loadConfiguration()
{
    //read data from eeprom
    EEPROM_readConf();

    //verify validators
    if (EEPROM_DATA.Validator == EEPROM_VALIDATOR && EEPROM_DATA.ValidatorX2
    == EEPROM_VALIDATOR*2)
    {
        //copy data
        VOLTAGE_MAP = EEPROM_DATA.VOLTAGE_MAP;
        CURRENT_MAP = EEPROM_DATA.CURRENT_MAP;

#ifdef DEBUG
        showDebug("Configuration loaded from EEPROM!");
        startDebug("  VOLTAGE_MAP: ");
        Serial.println(VOLTAGE_MAP,6);
        startDebug("  CURRENT_MAP: ");
        Serial.println(CURRENT_MAP,6);
#endif
    } else {
#ifdef DEBUG
        showDebug("Configuration NOT loaded from EEPROM!");
#endif
    }
}

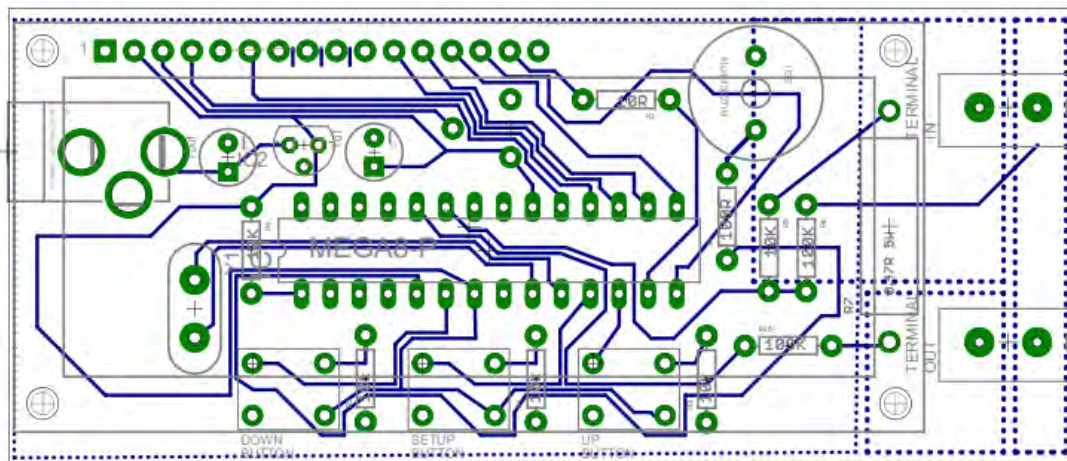
void saveConfiguration()
{
    if ( EEPROM_DATA.VOLTAGE_MAP != VOLTAGE_MAP ||
        EEPROM_DATA.CURRENT_MAP != CURRENT_MAP
    ) {
        //copy validators
        EEPROM_DATA.Validator = EEPROM_VALIDATOR;
        EEPROM_DATA.ValidatorX2 = EEPROM_VALIDATOR*2;

        //copy data
        EEPROM_DATA.VOLTAGE_MAP = VOLTAGE_MAP;
        EEPROM_DATA.CURRENT_MAP = CURRENT_MAP;

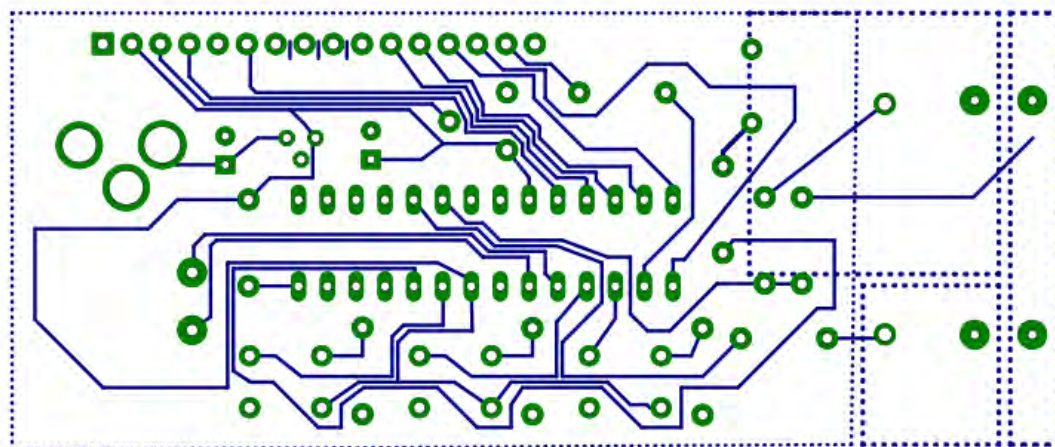
        //save data to eeprom
        EEPROM_writeConf();
    }
}
```

```
#ifndef DEBUG
    showDebug("Configuration saved!");
#endif
} else {
#ifdef DEBUG
    showDebug("Configuration not changed!");
#endif
}
}
```

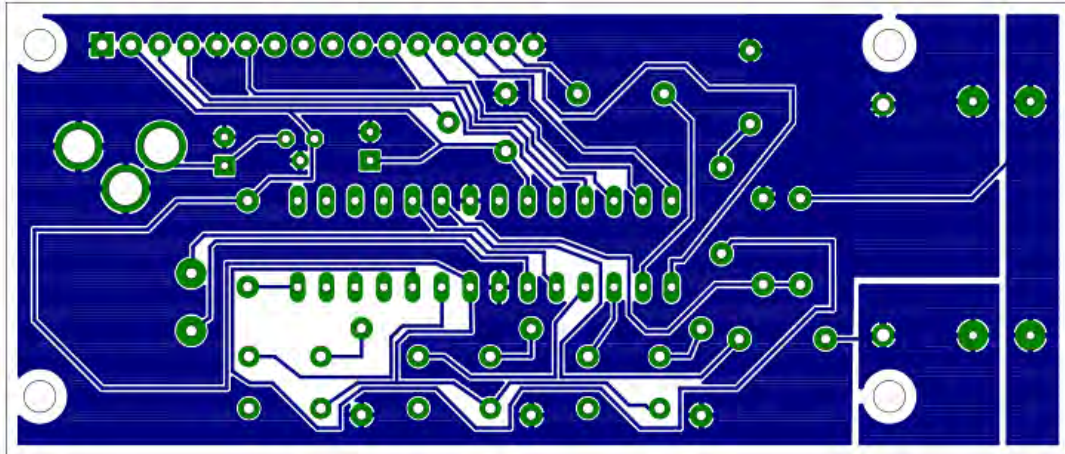
### 6.3.3 Πλακέτες για το όργανο μετρήσεως



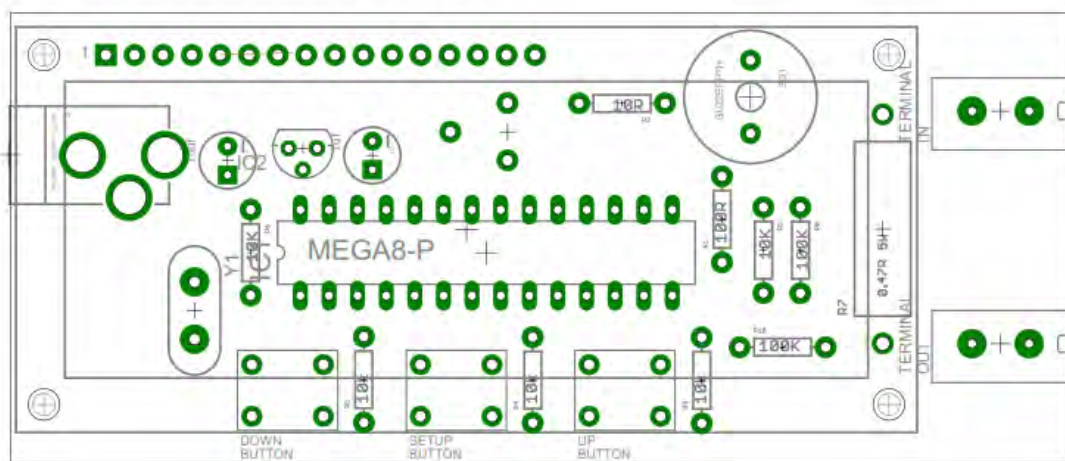
**Σχήμα 6.25:** Σχηματικό διάγραμμα οργάνου μετρήσεως στο οποίο απεικονίζονται οι χάλκινοι διάδρομοι (το κάτω μέρος της πλακέτας) και τα εξαρτήματα (επάνω μέρος της πλακέτας) σχεδιασμένο στο Eagle.



**Σχήμα 6.26:** Σχηματικό διάγραμμα οργάνου μετρήσεως στο οποίο απεικονίζονται οι χάλκινοι διάδρομοι (το κάτω μέρος της πλακέτας) σχεδιασμένο στο Eagle.



**Σχήμα 6.27:** Σχηματικό διάγραμμα οργάνου μετρήσεως στο οποίο απεικονίζονται οι χάλκινοι διάδρομοι (το κάτω μέρος της πλακέτας) έτσι όπως αποτυπώθηκαν στην διαφάνεια σχεδιασμένο στο Eagle.



**Σχήμα 6.28:** Τοπογραφικό διάγραμμα σύμφωνα με το οποίο κολλήθηκαν τα εξαρτήματα στην πλακέτα σχεδιασμένα στο Eagle.



### 6.3.4 ΠΛΑΚΕΤΕΣ (ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ)

Το κατασκευαστικό μέρος περιέχει τρεις πλακέτες . Η μια πλακέτα αποτελεί το τροφοδοτικό η άλλη το κύκλωμα ελέγχου και η τρίτη το κύκλωμα μέτρησης τάσης και έντασης καθώς και την οδήγηση LCD οθόνης για την απεικόνιση των μετρήσεων.

Η διαδικασία που δρομολογήθηκε για την δημιουργία των πλακετών περιγράφεται παρακάτω:

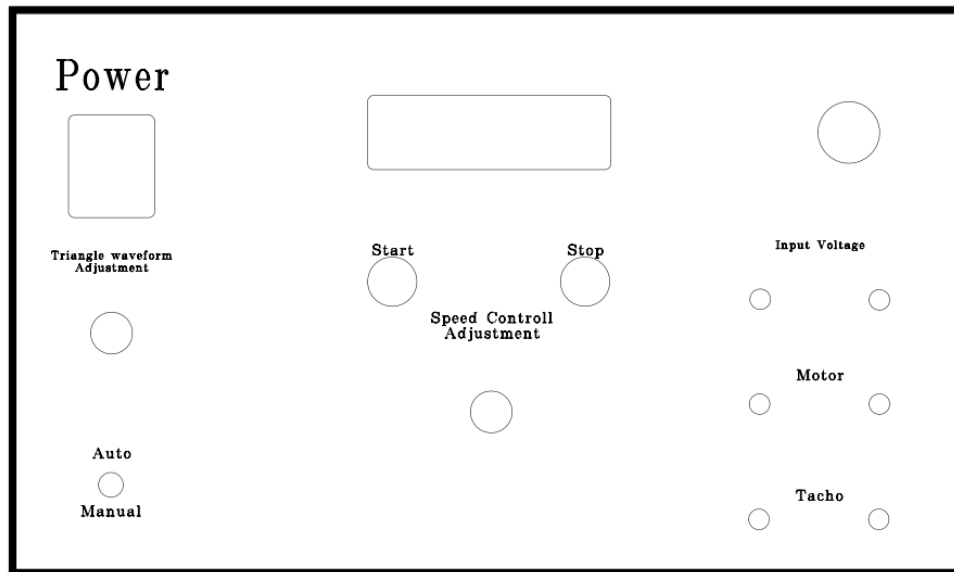
- Σχεδιασμός των θεωρητικών κυκλωμάτων (τροφοδοτικού - κυκλώματος ελέγχου και κυκλώματος μετρήσεων και απεικόνισης) σε τυπωμένα κυκλώματα με την βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος CadSoft EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor).
- Τύπωση κυκλωμάτων σε διαφάνεια ειδική για εκτυπωτή Laser.
- Τύπωση του κυκλώματος επάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα με την διαδικασία της φωτογραφικής μεθόδου.
- Έκθεση της πλακέτας σε UV (υπεριώδης ακτινοβολία).
- Εμφάνιση της πλακέτας σε διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου (καυστική σόδα - NaOH).
- Εμβάπτιση της πλακέτας σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέως (HCl) και υπεροξειδίου του υδρογόνου (Peridrol – H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) με σκοπό την αποχάλκωση της πλακέτας στα σημεία που το φωτοευαίσθητο υλικό εξαφανίστηκε κατά την προηγούμενη διαδικασία.
- Έπειτα πραγματοποιήθηκε το τρύπημα της πλακέτας.
- Τέλος, πραγματοποιήθηκε η κόλληση των εξαρτημάτων πάνω στην πλακέτα σύμφωνα με το τοπογραφικό του σχεδίου.

## 6.4 Συναρμολόγηση Κατασκευής

Αφού κατασκευάσαμε τις τρεις πλακέτες του τροφοδοτικού και του κυκλώματος ελέγχου επιλέγουμε τις διαστάσεις του κουτιού που θα φιλοξενήσει την κατασκευή μας για να είναι προσιτή στον χρήστη. Οπότε μετράμε τον χώρο που θέλουμε για τις πλακέτες μαζί με τον μετασχηματιστή και δεν ξεχνάμε και το βάθος που θα χρειαστούν τα όργανα που θα τοποθετηθούν στην πρόσοψη της κατασκευής μας. Για αυτόν τον λόγο , δηλαδή την τοπολογία των υλικών που θα αναρτηθούν στην πρόσοψη της κατασκευής θα χρησιμοποιήσουμε το σχεδιαστικό πρόγραμμα Front Panel Designer. Επίσης ένα σημαντικό κομμάτι που δεν πρέπει να ξεχνάμε είναι ότι η κατασκευή χρειάζεται τον κατάλληλο χώρο για τον επαρκή αερισμό της.

Στις φωτογραφίες παρακάτω φαίνεται η κατασκευή μας εξωτερικά και εσωτερικά καθώς και το σχέδιο του τοπογραφικού από το πρόγραμμα Front Panel Designer.

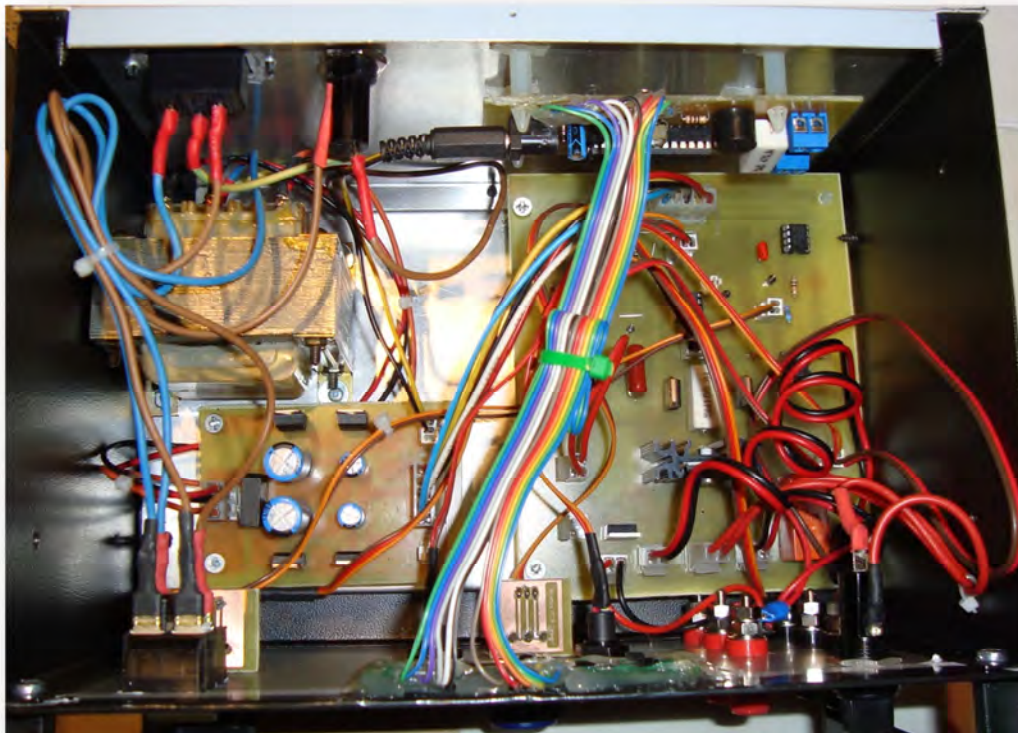
### 6.4.1 Σχεδιασμός στο Front Panel Designer



**Σχήμα 6.29:** Πρόσοψη με το τοπογραφικό των υλικών του κουτιού που θα φιλοξενήσει τις πλακέτες και τον Μ/Τ.



Σχήμα 6.30: Αυτοκόλλητη Πρόσοψη της κατασκευής.



Σχήμα 6.31: Εσωτερικό της κατασκευής.



Σχήμα 6.32: Πρόσοψη της κατασκευής.

#### 6.4.2 Υλικά Κατασκευής που απαιτήθηκαν για το κουτί

Τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε για την υλοποίηση του κουτιού της κατασκευής μας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

α/α	Περιγραφή	Τεμάχια
1	Button έναρξης (N.O.)	1
2	Button τερματισμού (N.C.)	1
3	Μεταγωγικός Διακόπτης 2 θέσεων	1
4	Διακόπτης (ON/OFF) με φωτισμό	1
5	Μπόρνες Κόκκινο – Μαύρο	6
6	Ασφαλειοθήκη Βιδωτή	1
7	Πλαστικοί αποστάτες	12
8	Κουτί κατασκευής 26cm (πλάτος) 18cm (βάθος) 15,5cm (ύψος)	1
9	Ασφάλεια γυάλινη 6A	1

## Κεφάλαιο 7

### Πειραματικές Μετρήσεις

#### Εισαγωγή

Σε αυτό κεφάλαιο εφαρμόζουμε συνεχή τάση στην κατασκευή μας και δύο διαφορετικά φορτία, ωμικό και επαγωγικό. Στην συνέχεια για διάφορες τιμές του συντελεστή χρησιμοποίησης  $a = \frac{t_{on}}{T}$  παίρνουμε από τον παλμογράφο και την

ανάλογη απεικόνιση.

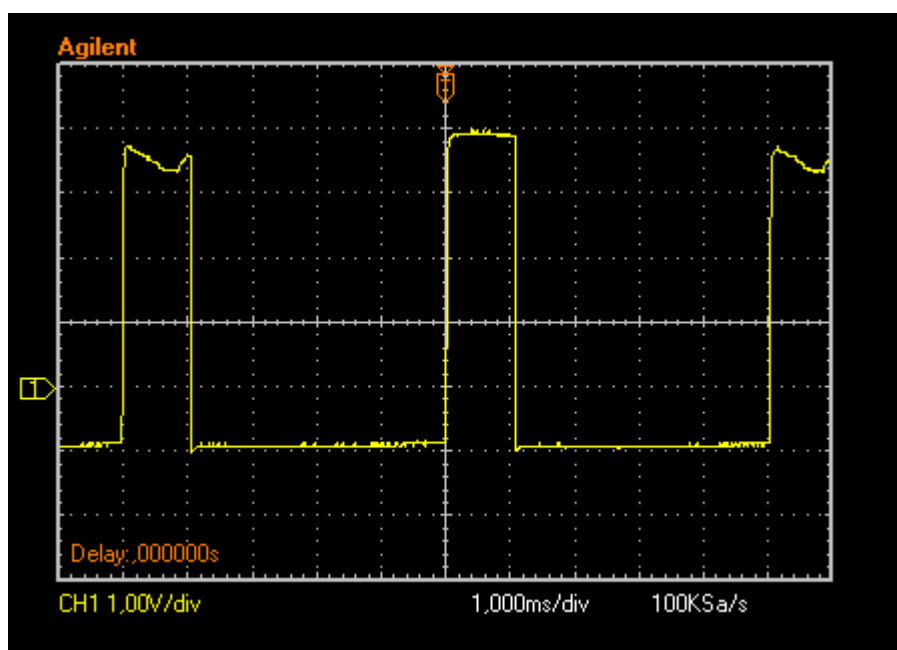
Η τάση που θα εφαρμόσουμε στον μετατροπέα DC/DC είναι τριφασική ανορθωμένη στα 48V.

#### 7.1 Μετρήσεις με ωμικό φορτίο

Το ωμικό φορτίο που θα χρησιμοποιήσουμε έχει αντίσταση 150Ω και η τάση που θα εφαρμόσουμε στον μετατροπέα DC/DC έχει την τιμή των 48V.

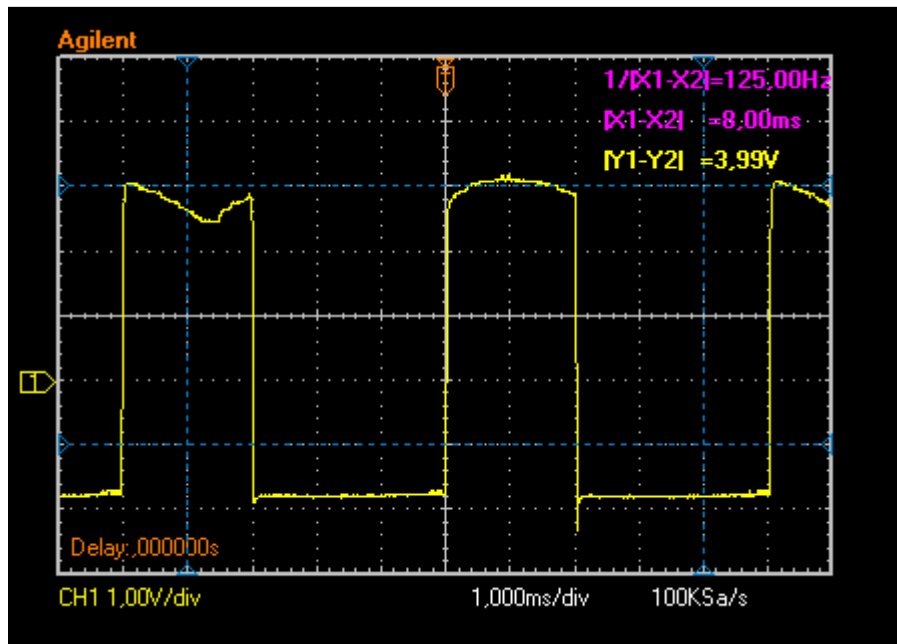
Η μέτρηση που πραγματοποιήσαμε με ωμικό φορτίο είναι για  $T=5ms$  δηλαδή συχνότητα  $f=200Hz$ , στην συνέχεια παρουσιάζονται οι εικόνες που πήραμε από τον παλμογράφο για διαφορετικό συντελεστή χρησιμοποίησης  $a = \frac{t_{on}}{T}$ .

Πρώτη μέτρηση για  $t_{on}=1ms$



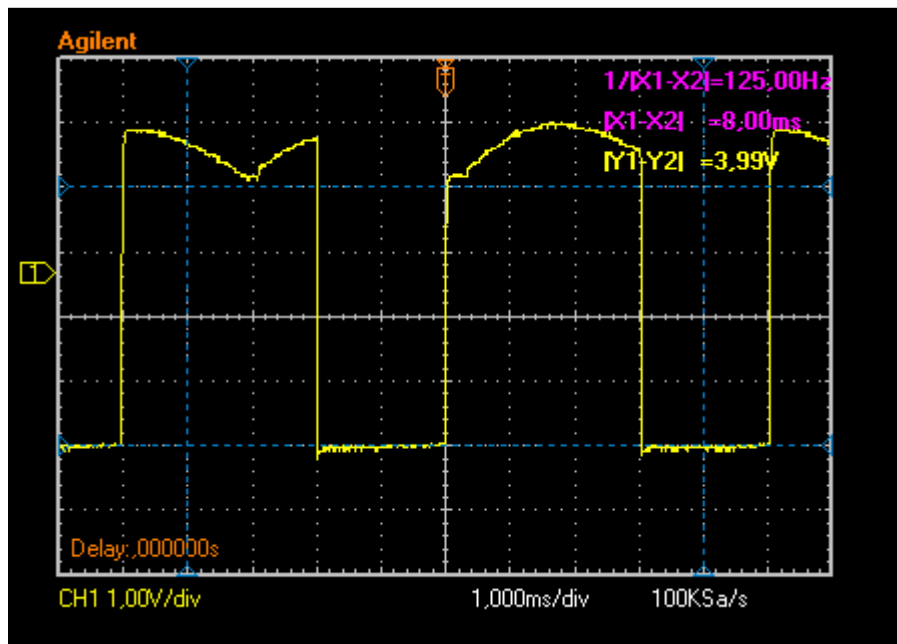
$$a = \frac{t_{on}}{T} = \frac{0,001}{0,005} = 0,2$$

Δεύτερη μέτρηση για  $t_{on}=2\text{ms}$



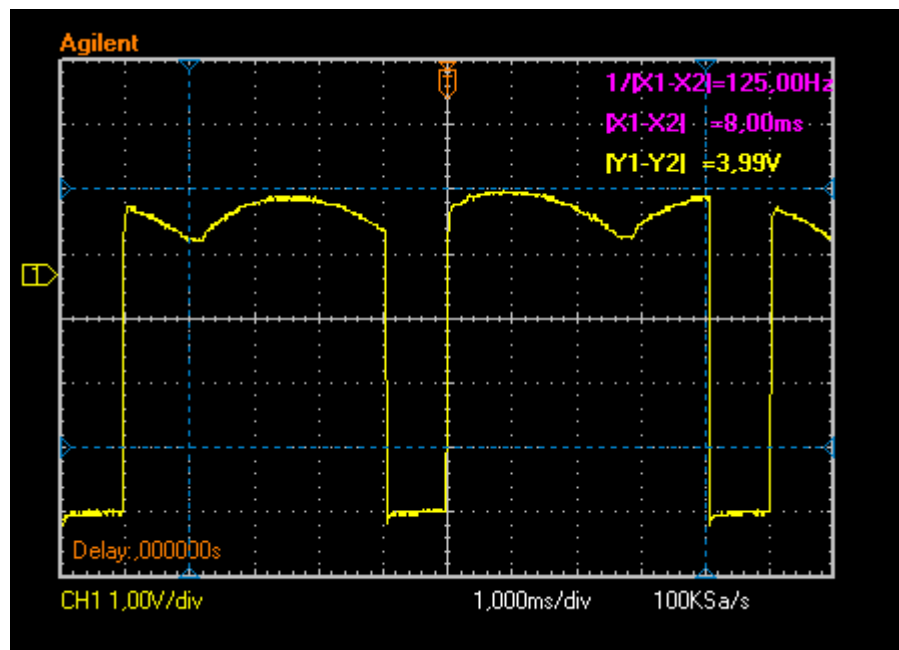
$$a = \frac{t_{on}}{T} = \frac{0,002}{0,005} = 0,4$$

Τρίτη μέτρηση για  $t_{on}=3\text{ms}$



$$a = \frac{t_{on}}{T} = \frac{0,003}{0,005} = 0,6$$

Τέταρτη μέτρηση για  $t_{on}=4ms$



$$a = \frac{t_{on}}{T} = \frac{0,004}{0,005} = 0,8$$

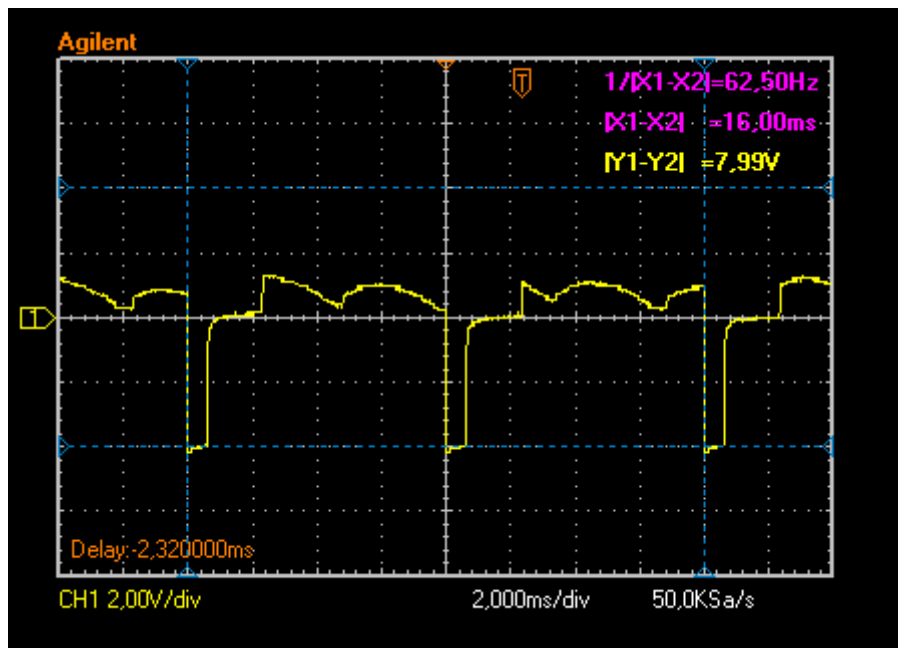
### 7.3 Μετρήσεις με επαγωγικό φορτίο

Το επαγωγικό φορτίο που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος 3Hp με εξωτερική διέγερση και η τάση που θα εφαρμόσουμε στον μετατροπέα DC/DC έχει την τιμή 48V.

Η μέτρηση που πραγματοποιήσαμε με επαγωγικό φορτίο είναι για  $T=8ms$  δηλαδή συχνότητα  $f=125Hz$ , στην συνέχεια παρουσιάζονται οι εικόνες που πήραμε από τον παλμογράφο για διαφορετικό συντελεστή χρησιμοποίησης

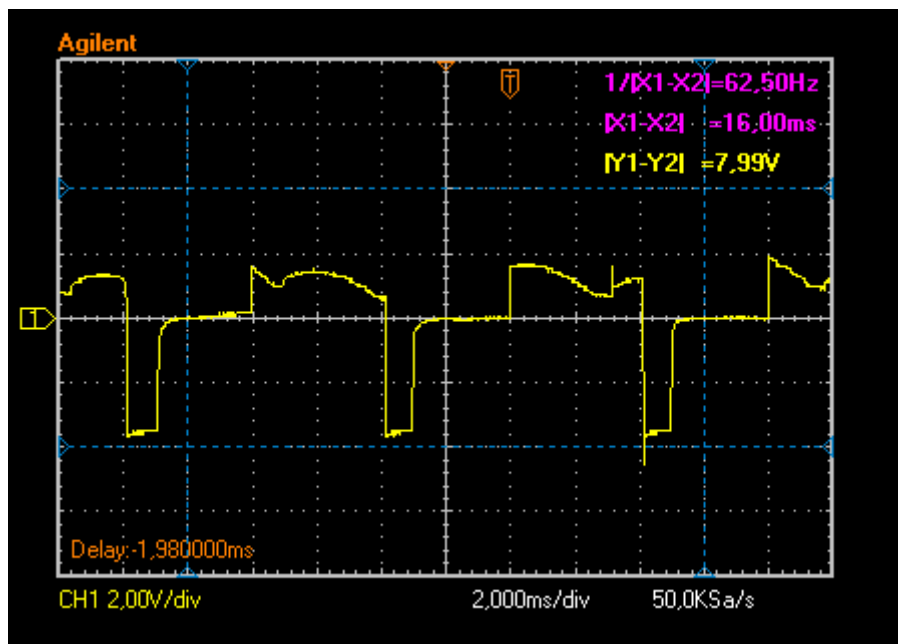
$$a = \frac{t_{on}}{T}.$$

Πρώτη μέτρηση για  $t_{on}=5,6ms$



$$a = \frac{t_{on}}{T} = \frac{5,6ms}{8ms} = 0,7$$

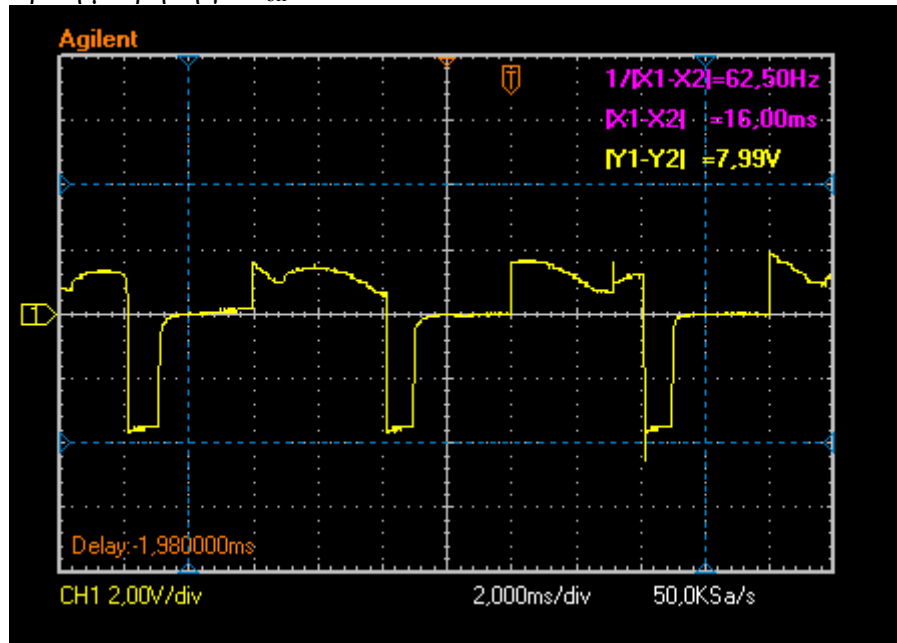
Δεύτερη μέτρηση για  $t_{on}=4ms$



$$a = \frac{t_{on}}{T} = \frac{4ms}{8ms} = 0,5$$



Τρίτη μέτρηση για  $t_{on}=2ms$

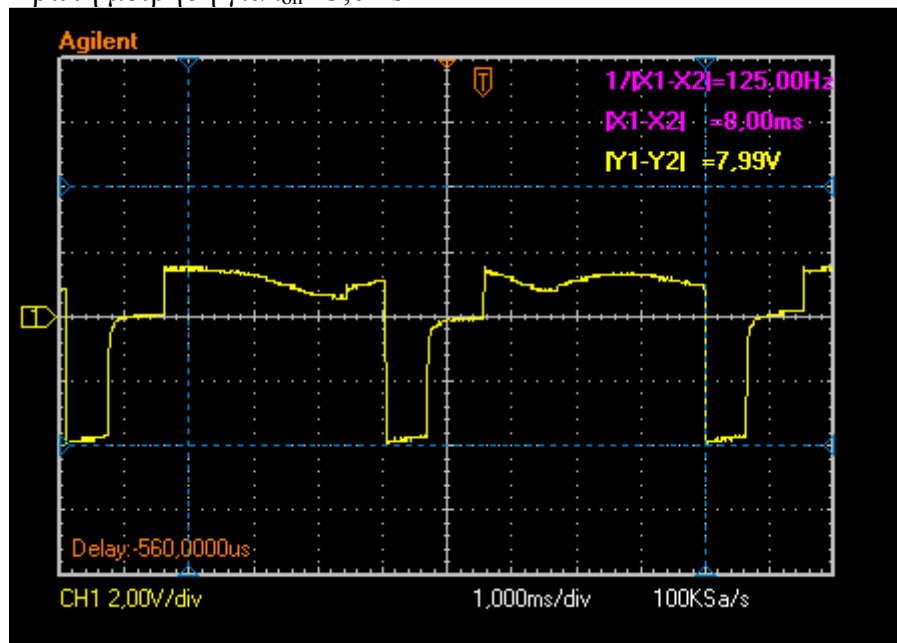


$$a = \frac{t_{on}}{T} = \frac{2ms}{8ms} = 0,25$$

Δεύτερη μέτρηση που πραγματοποιήσαμε με επαγωγικό φορτίο είναι για  $T=5ms$  δηλαδή συχνότητα  $f=200Hz$ , στην συνέχεια παρουσιάζονται οι εικόνες που πήραμε από τον παλμογράφο για διαφορετικό συντελεστή

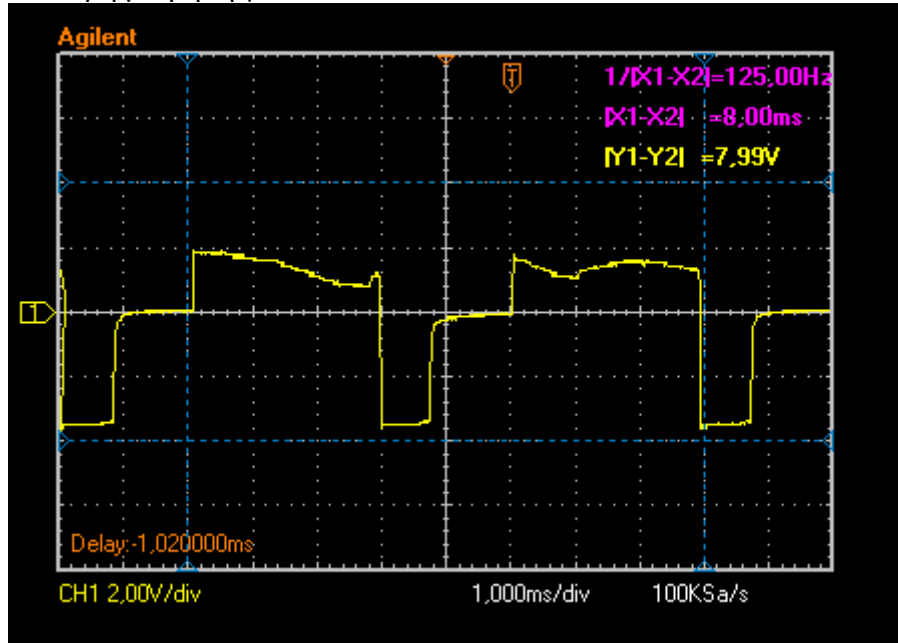
χρησιμοποίησης  $a = \frac{t_{on}}{T}$ .

Πρώτη μέτρηση για  $t_{on}=3,6ms$



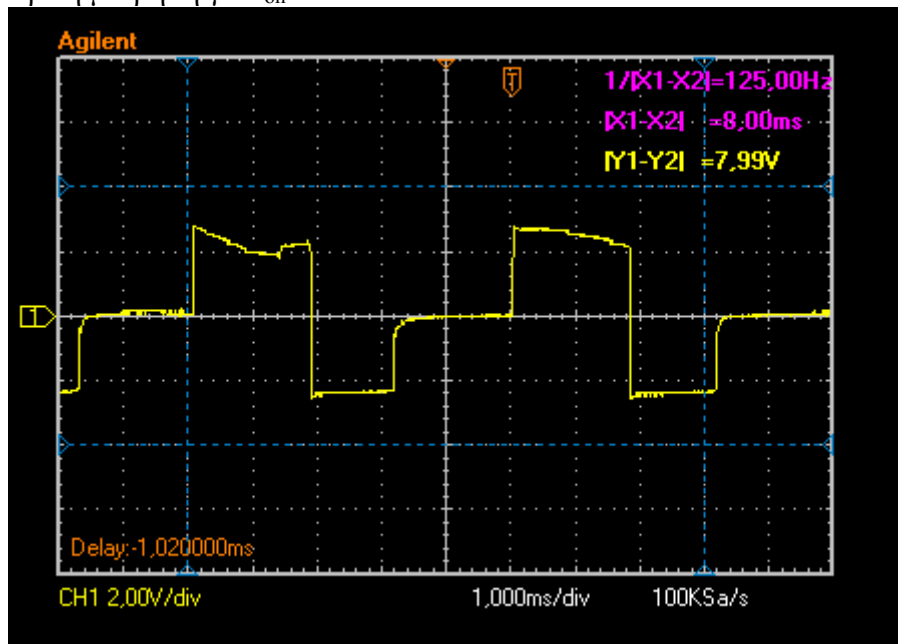
$$a = \frac{t_{on}}{T} = \frac{3,6ms}{5ms} = 0,72$$

Δεύτερη μέτρηση για  $t_{on}=3ms$



$$a = \frac{t_{on}}{T} = \frac{3ms}{5ms} = 0,6$$

Τρίτη μέτρηση για  $t_{on}=2ms$



$$a = \frac{t_{on}}{T} = \frac{2ms}{5ms} = 0,4$$

## Βιβλιογραφία :

- {1}. **Ηλεκτρική Κίνηση** / Παντελής Β. Μαλατέστας 3<sup>η</sup> Έκδοση. Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις Τζιόλα , ©2010
- {2}. **Εργαστηριακές ασκήσεις ηλεκτρικής κίνησης : με συνοπτική θεωρία** / Παντελής Β. Μαλατέστας, Ηρακλής Αθ.Βυλλιώτης Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις Τζιόλα , ©2005
- {3}. **Εργαστηριακές ασκήσεις ηλεκτρονικών ισχύος : με συνοπτική θεωρία** / Παντελής Β. Μαλατέστας, Ηρακλής Αθ. Βυλλιώτης Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις Τζιόλα , ©2004
- {4}. **Ηλεκτρονικά Ισχύος** / Στέφανος Ν. Μανιάς – 6<sup>η</sup> έκδοση Αθήνα: ©2007
- {5}. **Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά** / Στέφανος Ν. Μανιάς, Αθανάσιος Καλετσάνος Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών, ©2004
- {6}. **Ηλεκτρικές μηχανές AC-DC** / Stephen J. Chapman. - 3<sup>η</sup> έκδοση. Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις Τζιόλα, Α. , ©2003
- {7}. **Συστήματα αυτόματου ελέγχου** / Παντελής Β. Μαλατέστας Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις Τζιόλα , ©2001-2004
- {8}. **Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος** / Mohan-Undeland-Robbins 3<sup>η</sup> Έκδοση. Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις Τζιόλα , ©2010
- {9}. **Τελεστικοί ενισχυτές : κυκλώματα πειραματικές μετρήσεις και μέθοδοι** / Πορλίδας Δημήτρης Αθήνα: ©2009
- {10}. **POWER ELECTRONICS HANDBOOK** MUHAMMAD H. RASHID 2001 by ACADEMIC PRESS
- {11}. **The Power Electronics Handbook** Timothy L. Skvarenina, *Purdue University* 2002 by CRC Press LLC
- {12}. **www.arduino.cc**

Η κοινωνία μας  
αντέχει μια αλλαγή  
κάθε φορά.  
Την πρώτη φορά  
που πήγα να αλλάξω  
τον κόσμο με είπαν  
οραματιστή.  
Την δεύτερη φορά  
μου ζήτησαν ευγενικά  
να αποσυρθώ...

**Νικόλα Τέσλα**