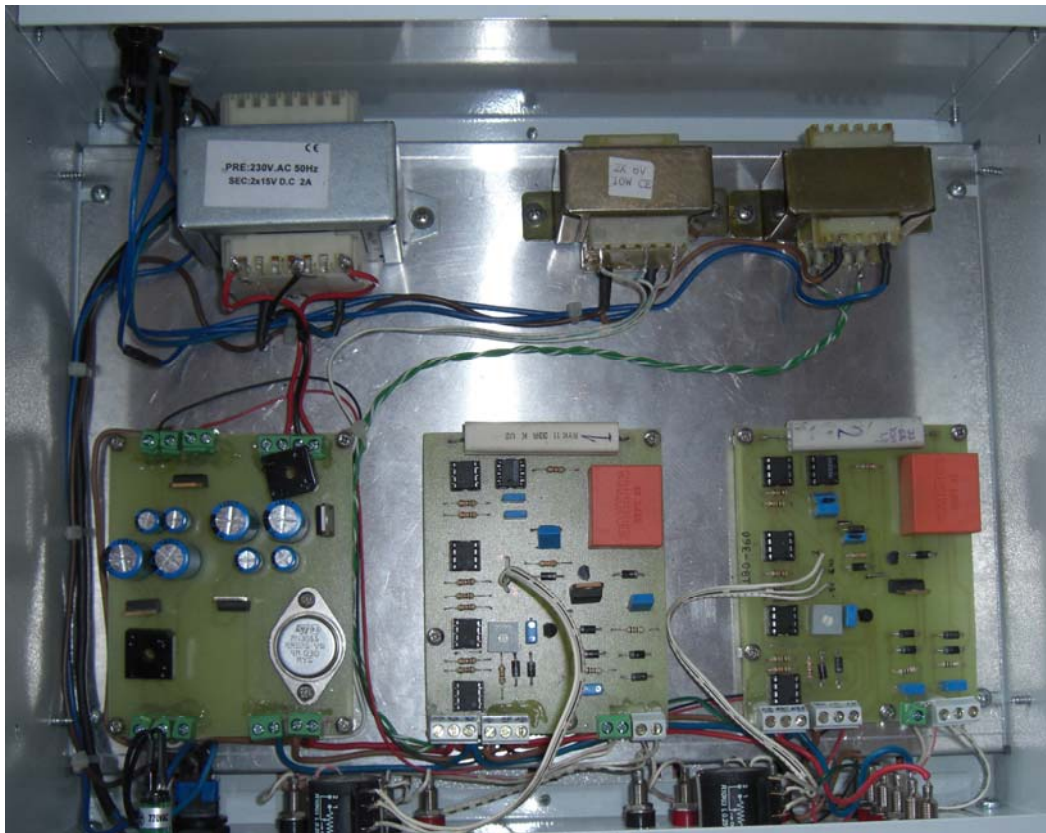




Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

“Πλήρως Ελεγχόμενη Γέφυρα Ισχύος”



Επιβλέπων Καθηγητής: Βυλλιώτης Ηρακλής – Καθηγητής Εφαρμογών
Βενέτας Νικόλαος – Εργαστηριακός Συνεργάτης

Σπουδαστές : Κατεβαίνης Δημήτριος 36485
Κίτσος Γεώργιος 36147

Πειραιάς, Ιούλιος 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα	- 1 -
Λίστα Εικόνων	3
Summary	5
Πρόλογος	6
1^ο - Κεφάλαιο “Ηλεκτρονικά Ισχύος”	7
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά των Ηλεκτρονικών Ισχύος	9
1.3 Πεδία Χρησιμότητας των Ηλεκτρονικών Ισχύος	12
2^ο - Κεφάλαιο “Κυριότεροι Ημιαγωγικοί Διακόπτες Ισχύος”	15
2.1 Εισαγωγή	15
2.2 Δίοδος	16
2.3 Thyristor.....	18
2.4 Ελεγχόμενα Διακοπτικά Στοιχεία	21
2.4.1 Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής (BJT).....	24
2.4.2 Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου Μεταλλικών Οξειδίων Ημιαγωγών (MOSFET)	29
3^ο - Κεφάλαιο “ Τελεστικοί Ενισχυτές ”	34
3.1 Εισαγωγή	34
3.2 Γενική εξίσωση	35
3.3 Κυκλώματα αναλογικού ελέγχου P	36
3.4 Κυκλώματα ελέγχου PI.....	36
3.5 Κυκλώματα ολοκληρωτικού ελέγχου I.....	37
3.6 Κυκλώματα διαφορικού ελέγχου D	37
3.7 Κυκλώματα ελέγχου PD	39
3.8 Κυκλώματα ελέγχου PID	40
3.9 Αθροιστής	41
3.10 Περιοριστής	42
3.11 Ανάλυση του κυκλώματος έναυσης.....	43
3.11.1 Βαθμίδα 1	43
3.11.2 Βαθμίδα 2	44
3.11.3 Βαθμίδα 3	45
3.11.4 Βαθμίδα 4	46
4^ο - Κεφάλαιο “Είδη Μετατροπέων”	47
4.1 Εισαγωγή	47
4.2 Μετατροπείς AC/DC	48
4.3 Μετατροπείς DC/AC	50
4.4 Μετατροπείς DC/DC	51
4.5 Μετατροπείς AC/AC	52

5^ο - Κεφάλαιο “Μετατροπέας AC/DC”	54
5.1 Εισαγωγή	54
5.2 Μονοφασική μη Ελεγχόμενη Γέφυρα	55
5.3 Μονοφασική Ημιελεγχόμενη Γέφυρα	57
5.4 Μονοφασική Πλήρως Ελεγχόμενη Γέφυρα.....	59
5.5 Κινητήρες Συνεχούς (DC) Ρεύματος	63
5.6 Έλεγχος Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με Μονοφασική Ημιελεγχόμενη Γέφυρα .	66
5.7 Έλεγχος Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με Μονοφασική Πλήρως Ελεγχόμενη Γέφυρα	70
6^ο - Κεφάλαιο “Υλοποίηση και Έλεγχος Κυκλώματος”	74
6.1 Απόπειρα Πρακτικής Υλοποίησης Μονοφασικής Πλήρως Ελεγχόμενης Γέφυρας Ίσχύος	74
6.2 Πρακτική Υλοποίηση Κυκλώματος Έναυσης AC-DC.....	76
Συμπεράσματα	88
Αναφορές - Βιβλιογραφία	89

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 - Μπλοκ διάγραμμα της τυπικής μορφής ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος ισχύος. [1]	
Εικόνα 2 - Σύμβολο απλής διόδου. [6]	
Εικόνα 3 - Χαρακτηριστική Τάσης - Ρεύματος μίας διόδου. [5]	
Εικόνα 4 - Σύμβολο Thyristor. [7]	
Εικόνα 5 - Χαρακτηριστική Τάσης - Ρεύματος ενός Thyristor. [7]	
Εικόνα 6 - Σύμβολο αναπαράστασης διακόπτη. [8]	
Εικόνα 7 - Συμβολισμός ενός BJT. [9]	
Εικόνα 8 - Δομή κατακόρυφης διατομής ενός BJT τύπου npn. [9]	
Εικόνα 9 - Χαρακτηριστική Τάσης - Ρεύματος ενός BJT ισχύος τύπου npn και περιοχές λειτουργίας αυτού. [9]	
Εικόνα 10 - Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας Ορθής Πόλωσης (Forward Biased Safe Operating Area - FBSOA) ενός BJT. [9]	
Εικόνα 11 - Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας Ανάστροφης Πόλωσης (Reversed Biased Safe Operating Area – RBSOA) ενός BJT. [9]	
Εικόνα 12 - MOSFET ισχύος με πλευρική δομή διπλής διάχυσης. [10]	
Εικόνα 13 - Κατακόρυφη δομή MOSFET ισχύος με πλευρική δομή διπλής διάχυσης [10]	
Εικόνα 14 - Δομή ενός μέσου MOSFET ισχύος. [10]	
Εικόνα 15 - Κυκλωματικό σύμβολο ενός MOSFET n-καναλιού (αριστερά) και ενός MOSFET p-καναλιού (δεξιά). [10]	
Εικόνα 16 - Χαρακτηριστικά τάσης-ρεύματος ενός MOSFET. [10]	
Εικόνα 17 - Περιοχές ασφαλούς λειτουργίας ενός MOSFET ισχύος. [10]	
Εικόνα 18 - Μετατροπέας AC/DC σε λειτουργία ημιανόρθωσης. [11]	
Εικόνα 19 - Μετατροπέας AC/DC σε λειτουργία πλήρους ανόρθωσης. [11]	
Εικόνα 20 - Μπλοκ διάγραμμα μετατροπέα DC/AC. [12]	
Εικόνα 21 - Μη ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα. [17]	
Εικόνα 22 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μη ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας. [17]. - 55 -	
Εικόνα 23 - Μονοφασική συμμετρική ημιελεγχόμενη γέφυρα με ωμικό φορτίο. [16]	
Εικόνα 24 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας με ωμικό φορτίο. [16]	
Εικόνα 25 - Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα. [16]	
Εικόνα 26 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας με ωμικό φορτίο. [16]	
Εικόνα 27 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας με ωμικό - επαγωγικό φορτίο και συνεχή αγωγή. [16]	
Εικόνα 28 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας με ωμικό - επαγωγικό φορτίο και ασυνεχή αγωγή. [16]	
Εικόνα 29 - Δομή κινητήρα συνεχούς ρεύματος. [19]	
Εικόνα 30 - Μονοφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα. [19]	
Εικόνα 31 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας σε συνεχή αγωγή. [19]	
Εικόνα 32 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας σε ασυνεχή αγωγή. [19]	
Εικόνα 33 - Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα. [19]	

Εικόνα 34 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας για $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$. [19]	
Εικόνα 35 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας για $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$. [19].....	
Εικόνα 36 – Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα ισχύος.....	
Εικόνα 37 – Προσομοίωση της λειτουργίας της μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας ισχύος της εικόνας 36.	
Εικόνα 38 – Βαθμίδα παραγωγής παλμών (0-180).	
Εικόνα 39 – Βαθμίδα παραγωγής παλμών (180-360).	
Εικόνα 40 – Τροφοδοτικά των τελεστικών ενισχυτών των κυκλωμάτων βαθμίδα παραγωγής παλμών (0-180) και βαθμίδα παραγωγής παλμών (180-360).....	
Εικόνα 41 – Αναλυτικότερη παρουσίαση των στοιχείων (τρανζίστορ, τελεστικοί ενισχυτές) που συγκροτούν τα κυκλώματα βαθμίδα παραγωγής παλμών (0-180) και βαθμίδα παραγωγής παλμών (180-360).	
Εικόνα 42 – Πρακτική υλοποίηση κυκλώματος έναυσης AC-DC (οπτική γωνία 1).	
Εικόνα 43 – Πρακτική υλοποίηση κυκλώματος έναυσης AC-DC (οπτική γωνία 2).	
Εικόνα 44 – Πρακτική υλοποίηση κυκλώματος έναυσης AC-DC (οπτική γωνία 3).	
Εικόνα 45 – Πιστοποίηση πλάτους DC τάσης τροφοδοτικού στα -5 Volts.	
Εικόνα 46 – Πιστοποίηση πλάτους DC τάσης τροφοδοτικού στα +5 Volts.	
Εικόνα 47 – Πιστοποίηση πλάτους DC τάσης τροφοδοτικού στα -12 Volts.	
Εικόνα 48 – Πιστοποίηση πλάτους DC τάσης τροφοδοτικού στα +12 Volts.	
Εικόνα 49 – Μέτρηση κατά τη σύνδεση με φορτίο και γωνία έναυσης 0°	
Εικόνα 50 – Μέτρηση κατά τη σύνδεση με φορτίο και γωνία έναυσης 54°	
Εικόνα 51 – Μέτρηση κατά τη σύνδεση με φορτίο και γωνία έναυσης 90°	
Εικόνα 52 – Μέτρηση κατά τη σύνδεση με φορτίο και γωνία έναυσης 126°	
Εικόνα 53 – Σήμα τάσης στο σημείο 2.	
Εικόνα 54 – Σήμα τάσης στο σημείο 4.	
Εικόνα 55 – Σήμα τάσης στο σημείο 5.	
Εικόνα 56 – Σήμα τάσης στο σημείο 6.	
Εικόνα 57 – Σήμα τάσης στο σημείο 8.	
Εικόνα 58 – Σήμα τάσης στο σημείο 9.	

SUMMARY

The power electronics is a separate field of computer science with great progress in recent decades. This is an area in which they are based too many important applications. The spread and evolution of power electronics can provide significant results in the automation and development of many electronic systems, energy conservation, and improve the quality of our many daily activities. With continued advances in power electronics at the same rate, it is almost certain that the future will be increasing demand for skilled engineers and technicians who are perfectly aware of the power electronics.

This thesis made an introductory analysis techniques, and fields that can be applied to power electronics. This is done in the first chapter. In the second chapter, we present the main characteristics and properties of the major semiconductor circuit breakers. In the third chapter, we present the technical characteristics and properties that govern the main types of inverters. In the fourth chapter of our work we make a detailed report in converters AC / DC and their circuitry, focusing on those provisions, such as single-phase uncontrolled bridge, single-phase half controlled bridge and single-phase fully controlled bridge. Later in the chapter we talk about DC motors and how to control them using single-phase half controlled bridge topology and single phase fully controlled bridge. In the fifth chapter, we carry out certification of proper operation and performance of a circuit single-phase half controlled bridge with two trigger pulse transformers for low power thyristors. Certification is carried out in simulated OrCAD. The sixth and final chapter of the thesis work we formulate our conclusions for the whole above our study.

Keywords: Power Electronics, power semiconductor switches, converters, uncontrolled bridge, half controlled bridge, fully controlled bridge.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα ηλεκτρονικά ισχύος αποτελούν ένα ξεχωριστό τομέα της επιστήμης των ηλεκτρονικών με ιδιαίτερη πρόοδο τις τελευταίες δεκαετίες. Πρόκειται για ένα τομέα στον οποίο στηρίζονται πάρα πολλές και σημαντικές εφαρμογές. Η διάδοση και η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος μπορεί να προσφέρει σημαντικά αποτελέσματα στην αυτοματοποίηση και την ανάπτυξη πολλών ηλεκτρονικών συστημάτων, στην εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και στη βελτίωση της ποιότητας πολλών καθημερινών μας δραστηριοτήτων. Αν συνεχιστεί η πρόοδος των ηλεκτρονικών ισχύος με τον ίδιο ρυθμό, είναι σχεδόν βέβαιο ότι στο μέλλον θα αυξάνεται συνεχώς η ζήτηση εξειδικευμένων μηχανικών και τεχνικών οι οποίοι να είναι άριστοι γνώστες των ηλεκτρονικών ισχύος.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιείται μία εισαγωγική ανάλυση των τεχνικών, αλλά και των πεδίων στα οποία βρίσκουν εφαρμογή τα ηλεκτρονικά ισχύος. Αυτό πραγματοποιείται στο πρώτο της κεφάλαιο. Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας μας παρουσιάζουμε τα κυριότερα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των βασικότερων ημιαγωγών διακοπών ισχύος. Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας μας παρουσιάζουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες που διέπουν τα κυριότερα είδη μετατροπέων. Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας μας πραγματοποιούμε μία αναλυτικότερη αναφορά στους μετατροπείς AC/DC εστιάζοντας σε κυκλωματικές διατάξεις αυτών, όπως είναι η μονοφασική μη ελεγχόμενη γέφυρα, η μονοφασική ημieleγχόμενη γέφυρα και η μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αναφερόμαστε στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος και στον τρόπο ελέγχου αυτών με χρήση κυκλωματικής τοπολογίας μονοφασικής ημieleγχόμενης γέφυρας και μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας. Στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας μας πραγματοποιούμε την πιστοποίηση της ορθής λειτουργίας και απόδοσης ενός κυκλώματος ημieleγχόμενης μονοφασικής γέφυρας με δύο παλμικούς μετασχηματιστές σκανδάλης για thyristors χαμηλής ισχύος. Η πιστοποίηση πραγματοποιείται σε περιβάλλον προσομοίωσης OrCAD. Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο της πτυχιακής μας εργασίας διατυπώνουμε τα συμπεράσματα μας για όλη την προαναφερθείσα μελέτη μας.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρονικά ισχύος, ημιαγωγικοί διακόπτες ισχύος, μετατροπείς, μη ελεγχόμενη γέφυρα, ημieleγχόμενη γέφυρα, πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα.

1^ο - ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ”

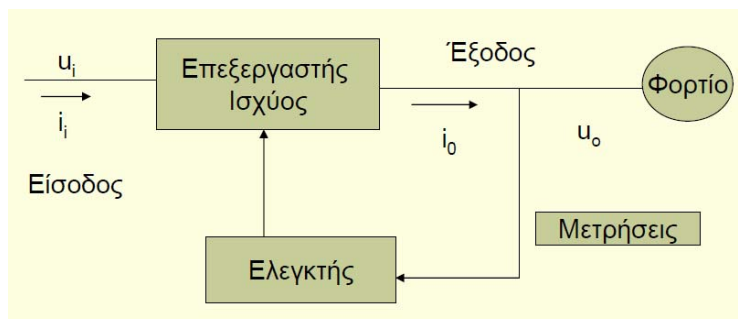
1.1 Εισαγωγή

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος έχουν ως αποστολή να επεξεργάζονται και να ελέγχουν την παρεχόμενη σε αυτά ηλεκτρική ενέργεια. Στόχος αυτών των συσκευών είναι να παρέχουν στην έξοδο τους ρεύματα και τάσεις με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο δείκτη διαμόρφωσης, ώστε να είναι εφικτή η αποτελεσματική τροφοδοσία κάθε φορτίου το οποίο συνδέεται σε αυτά. Συνήθως η είσοδος αυτών των συστημάτων παρέχεται από το δίκτυο τροφοδοσίας. Το δίκτυο είναι είτε μονοφασικό είτε τριφασικό με συχνότητα παροχής 50 ή 60 Hz. Η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης εισόδου και του ρεύματος εισόδου καθορίζεται από την εκάστοτε κυκλωματική τοπολογία. Ο σκοπός είναι η έξοδος της διάταξης να παρέχει σήμα που να ταιριάζει στις απαιτήσεις τάσεως, ρεύματος, συχνότητας όποιου φορτίου συνδεθεί στους ακροδέκτες εξόδου της.

Σε περίπτωση που ένας μετατροπέας ισχύος συμπεριφέρεται σαν μία πηγή τάσης τότε τόσο το ρεύμα στην έξοδο του όσο και η διαφορά φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσης, θα διαμορφώνονται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του συνδεδεμένου φορτίου. Για να είμαστε περισσότερο εξασφαλισμένοι συγκρίνουμε συνήθως την έξοδο του μετατροπέα ισχύος με ένα σήμα αναφοράς και έπειτα προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε, το οποίο σφάλμα διαπιστώσουμε, χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλα διαμορφωμένο ελεγκτή. Καλό είναι επίσης σε μία τέτοια διάταξη να υπάρχει αμφίδρομη ροή ισχύος ώστε να λαμβάνουν χώρα διαδοχικές εναλλαγές μεταξύ του σημείου του κυκλώματος που λαμβάνεται ως είσοδος και του σημείου του κυκλώματος που λαμβάνεται ως έξοδος.

Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα της τυπικής μορφής ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος ισχύος. Ένα τέτοιο κύκλωμα τροφοδοτείται συνήθως από το δίκτυο και αποδίδει είτε συνεχή (DC) έξοδο με σταθερό πλάτος, είτε συνεχή (DC) έξοδο με ρυθμιζόμενο πλάτος, είτε εναλλασσόμενη (AC) έξοδο σταθερής συχνότητας και μεταβαλλόμενου πλάτους, είτε εναλλασσόμενη (AC) έξοδο μεταβαλλόμενης συχνότητας και μεταβαλλόμενου πλάτους. Ο ελεγκτής ο οποίος συνδέεται στο

κύκλωμα αποτελείται από αναλογικά ολοκληρωμένα κυκλώματα σε συνδυασμό με ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος. Με βάση την πρόοδο που έχει σημειώσει τα τελευταία χρόνια ο τομέας της μικροηλεκτρονικής έχει γίνει εφικτή η κατασκευή πολλών τέτοιων πανομοιότυπων ελεγκτών. [1]



Εικόνα 1- Μπλοκ διάγραμμα της τυπικής μορφής ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος ισχύος. [1]

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει πραγματοποιηθεί αλματώδης πρόοδος στον κλάδο των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος. Αυτή η εξέλιξη συνδέεται και με την πρόοδο σε αρκετούς επιμέρους τομείς όπως είναι ο τομέας της μικροηλεκτρονικής, αλλά και με την πρόοδο στον τρόπο και στις τεχνικές κατασκευής πολλών ημιαγωγών. Η εύρεση κυκλωματικών στοιχείων με δυνατότητα λειτουργίας με ακόμα μεγαλύτερες τιμές τάσης και ρεύματος, η ελαχιστοποίηση των απωλειών των ημιαγωγικών διακοπτικών στοιχείων, η βελτίωση των συστημάτων ψύξης και προστασίας πολλών ημιαγωγικών στοιχείων και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, συναίνεσαν στην αύξηση του πλήθους των τάσεων και των ρευμάτων που μπορούν να επεξεργαστούν οι ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος. Αυτό είχε ως άμεσο αντίκτυπο την άνθηση της αγοράς των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ισχύος. Οι εκτιμήσεις των ειδικών αναφέρουν ότι η άνθηση αυτή θα είναι εντονότερη σε περιοχές του πλανήτη όπου το ενεργειακό κόστος είναι μεγαλύτερο. [1]

Σύμφωνα πάλι με άλλες εκτιμήσεις διεθνών ερευνητών, το 60% περίπου της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ξοδεύεται για την τροφοδοσία ηλεκτρικών κινητήρων ενώ το 24% αυτής ξοδεύεται ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες φωτισμού και θέρμανσης. Με την αποτελεσματική εισαγωγή κατάλληλων κυκλωμάτων ηλεκτρονικών ισχύος στα συστήματα που μας παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια, επιτυγχάνεται θεαματική βελτίωση του συντελεστή απόδοσης των συστημάτων αυτών. Με αυτό τον τρόπο θα έχουμε σε μεγάλο ποσοστό εξοικονόμηση ενέργειας,

κάτι που αποτελεί πλέον και το μεγάλο στόχο της ανθρωπότητας, αφού η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται ολοένα και περισσότερο. Οι ενεργειακές διατάξεις στις οποίες υπεισέρχονται κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος προσδίδουν ευκολία και απλούστευση στον ποσοτικό τρόπο ρύθμισης της ισχύος, βελτιώνοντας παράλληλα τη γενικότερη απόδοση και λειτουργία της συσκευής. [2]

1.2 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά των Ηλεκτρονικών Ισχύος

Οι συσκευές των ηλεκτρονικών ισχύος είναι στην ουσία διατάξεις οι οποίες έχουν ως αποστολή να ρυθμίζουν τη ροή της ισχύος που παρέχεται από το δίκτυο. Η ρύθμιση αυτή επιτυγχάνεται με την κατάλληλη επεξεργασία της παρεχόμενης τάσης, η οποία είναι ημιτονοειδούς μορφής. Η αλματώδης πρόοδος της επιστήμης της μικροηλεκτρονικής επιτάχυνε την εξέλιξη των τεχνολογιών που διέπουν τους υπολογιστές και τις τηλεπικοινωνίες. Παράλληλα εξελίχθηκε ιδιαίτερα και η τεχνολογία των συνοδευτικών τους, ηλεκτρονικών συσκευών. Όλες οι παραπάνω συσκευές χρειάζονται για τη σωστή τροφοδότηση τους, ρυθμιζόμενα τροφοδοτικά σταθερής παροχής και σε πολλές περιπτώσεις συστήματα που να έχουν την ικανότητα να παρέχουν ισχύ αδιάλειπτα. Επειδή παρατηρείται η ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση του κόστους της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμια βάση, η ανάγκη για οικονομία καθίσταται πλέον επιτακτική. Λύση προς την κατεύθυνση αυτή, μπορούν να προσφέρουν τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος. Όσο παρατηρείται βελτίωση των επιδόσεων των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος σε συνδυασμό με τη μείωση του κόστους κατασκευής τους, τόσο περισσότερο θα εισέρχονται τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος στις καθημερινές μας δραστηριότητες. [3]

Είναι απαραίτητο να τονίσουμε ότι το μέγεθος της ισχύος παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση στις διάφορες κυκλωματικές διατάξεις των ηλεκτρονικών ισχύος, αφού κυμαίνεται από μερικά Watt μέχρι μερικές εκατοντάδες MWatt. Ο βασικότερος στόχος που έγκειται στη βελτιστοποίηση των επιδόσεων των κυκλωμάτων των ηλεκτρονικών ισχύος έχει να κάνει με την ελαχιστοποίηση των απωλειών που παρουσιάζουν και τη μεγιστοποίηση της απόδοσης λειτουργίας τους. Αν αυτές οι δύο παράμετροι βελτιωθούν σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό, τότε και μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση θα έχουμε και λιγότερη θερμότητα θα παράγεται κατά την κατανάλωση ενέργειας. Ακόμα, σπουδαίοι παράγοντες που καθορίζουν τη

χρηστικότητα αυτών των διατάξεων είναι το βάρος τους, ο όγκος που καταλαμβάνουν και το κόστος υλοποίησής τους. Στόχος είναι και οι τρεις να είναι όσο το δυνατόν μικρότεροι. Αν προσπαθούσαμε να υλοποιήσουμε ένα αναλογικό κύκλωμα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά τότε θα πρέπει να υπάρχει και ένας μετασχηματιστής ώστε να επιτυγχάνεται ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ των ηλεκτρονικών στοιχείων του κυκλώματος και του δικτύου παροχής. Σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ισχύος αυτή η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς τη χρήση μετασχηματιστή. [1]

Οι μονάδες χαμηλής ισχύος τροφοδοτούνται συνήθως από μονοφασικές πηγές. Οι υπόλοιπες μονάδες οι οποίες αποδίδουν μεγαλύτερη ισχύ τροφοδοτούνται από τριφασικές πηγές. Οι κινητήρες χαμηλής και μέσης ισχύος (της τάξεως μερικών kWatts) τροφοδοτούνται συνήθως από παροχές με τάση γύρω στα 400 Volts. Οι κινητήρες υψηλότερης ισχύος τροφοδοτούνται από παροχές με τάση 3.3 kVolts, 6.6 kVolts, 11 kVolts ή υψηλότερη. Σε περίπτωση που έχουμε να κάνουμε με αεροσκάφη ή με διαστημικές εφαρμογές τότε η τροφοδοσία πραγματοποιείται με εναλλασσόμενο (AC) ρεύμα συχνότητας 400 Hz. Ορισμένα φορτία είναι εφικτό να τροφοδοτηθούν από μπαταρίες όπως για παράδειγμα συμβαίνει σε περνοφόρα οχήματα ή σε φορητά ψυγεία. Ανάλογα με το μέγεθος των τροφοδοτούμενων κινητήρων οι μπαταρίες συνεχούς (DC) τροφοδοσίας παρέχουν τιμές τάσης 6 Volts, 12 Volts, 24 Volts, 48 Volts και 110 Volts. Οι φωτοβολταϊκές διατάξεις οι οποίες χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές τροφοδοτούνται συνήθως από παροχές χαμηλής συνεχούς (DC) ισχύος.

Οι διαμορφωτές ισχύος (power modulators) πραγματοποιούν μία ή περισσότερες από τις παρακάτω τέσσερις λειτουργίες.

1. Μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας της πηγής στα μέτρα των απαιτήσεων του φορτίου. Αν το φορτίο είναι ένας συνεχής (DC) κινητήρας, τότε η έξοδος του διαμορφωτή (modulator) πρέπει να είναι μια συνεχής (DC) και εύκολα ρυθμιζόμενη τάση. Αν το φορτίο είναι ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας τότε ο διαμορφωτής (modulator) θα πρέπει να παρέχει στα τερματικά της εξόδου του εύκολα ρυθμιζόμενη τάση και εύκολα ρυθμιζόμενη συχνότητα.
2. Επιλέγει τον τρόπο λειτουργίας του κινητήρα. Για παράδειγμα επιτάχυνση ή ελάττωση του αριθμού των στροφών.

3. Διαμορφώνει τη ροή της ισχύος που παρέχεται από την πηγή στον κινητήρα, με τέτοιο τρόπο ώστε να μεταδίδονται στον κινητήρα τα χαρακτηριστικά και η απαραίτητη ροπή στρέψης που απαιτούνται για τη σωστή τροφοδοσία του φορτίου.
4. Κατά τη διάρκεια εξέλιξης μεταβατικών λειτουργιών όπως είναι η εκκίνηση η επιβράδυνση και η αναστροφή ταχύτητας περιορίζονται τόσο τα ρεύματα που διαρρέουν την πηγή όσο και τα ρεύματα που διαρρέουν τον κινητήρα σε ορισμένες επιτρεπόμενες τιμές. Αυτό συμβαίνει διότι αν από την πηγή παρέχεται υπερβολικό ρεύμα τότε μπορεί να προκληθεί υπερφόρτωση.

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος είναι.

- Συνεχείς (DC) κινητήρες. Πρόκειται για κινητήρες παράλληλους ή σε σειρά και κινητήρες σύνθετου ή μόνιμου μαγνήτη.
- Επαγωγικοί κινητήρες. Πρόκειται κυρίως για γραμμικούς κινητήρες.
- Σύγχρονοι κινητήρες. Πρόκειται για κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.
- Συνεχείς (DC) brushless κινητήρες.
- Βηματικοί κινητήρες.
- Κινητήρες εξαναγκασμένης μεταγωγής.

Οι διαμορφωτές ισχύος (power modulators) ελέγχονται με τη βοήθεια μίας κατάλληλης και ειδικά διαμορφωμένης μονάδας ελέγχου. Η φύση και τα χαρακτηριστικά της μονάδας ελέγχου σε ένα συγκεκριμένο σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος εξαρτάται από το διαμορφωτή ισχύος (power modulator) που χρησιμοποιείται. Η μονάδα ελέγχου όμως λειτουργεί με πολύ χαμηλότερη τάση και σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα ισχύος. Μία κατάλληλα διαμορφωμένη αισθητήρια μονάδα μετρά τις παραμέτρους λειτουργίας του φορτίου και τις συγκρίνει με την εντολή που έχει δοθεί στον κινητήρα. Οι διαφορές μεταξύ παραμέτρων μεταποιούνται από τις συνιστώσες της μονάδας ελέγχου, ελέγχοντας πλέον την ενεργοποίηση των ημιαγωγικών συσκευών ισχύος που χρησιμοποιούνται από τους διαμορφωτές ισχύος (power modulators). Συνεπώς η λειτουργία του κυκλώματος φόρτου μπορεί να τεθεί

υπό έλεγχο, για ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων, με κατάλληλη προσαρμογή των αντίστοιχων εντολών. [4]

1.3 Πεδία Χρησιμότητας των Ηλεκτρονικών Ισχύος

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ραγδαία αύξηση στη ζήτηση των κυκλωματικών διατάξεων των ηλεκτρονικών ισχύος, αφού τα ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές της καθημερινότητας μας. Η όλο και μεγαλύτερη ζήτηση που παρουσιάζουν οφείλεται επίσης στο ότι πολλές συσκευές απαιτούν πλέον για την αποτελεσματική τροφοδοσία τους διακοπτικά τροφοδοτικά συνεχούς (DC) ρεύματος ή τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS). Επιπρόσθετα η αύξηση της ζήτησης των ηλεκτρονικών ισχύος οφείλεται και στο νέο μεγάλο στοίχημα των περισσότερων βιομηχανικών εφαρμογών, που δεν είναι άλλο από την κατά το δυνατό μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Ακόμα και η εξέλιξη που παρατηρείται στον τομέα των βιομηχανικών αυτοματισμών έχει βοηθήσει στην αύξηση της ζήτησης των ηλεκτρονικών ισχύος, αφού σε αυτό τον τομέα χρησιμοποιούνται κατά κόρον αντλίες, συμπιεστές μεταβλητής ταχύτητας και ηλεκτρικοί κινητήρες υψηλής απόδοσης (σερβοκινητήρες). Στον κλάδο των μεταφορών χρησιμοποιούνται όλο και πιο πολύ τα τρένα καθώς και τα ηλεκτρικά οχήματα, των οποίων οι φορτιστές περιλαμβάνουν και κυκλωματικές διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος. Ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται επίσης και σε διατάξεις μεταφοράς και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως είναι τα φωτοβολταϊκά και τα αιολικά συστήματα. Όλοι οι παραπάνω λόγοι μας κάνουν να καταλάβουμε το λόγο που τα ηλεκτρονικά ισχύος έχουν τόσο μεγάλη ζήτηση στις μέρες μας, αφού πρόκειται για διατάξεις που έχουν παρόν και όπως φαίνεται λαμπρό μέλλον.

Κατόπιν θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τα διάφορα πεδία χρήσης, στα οποία τα ηλεκτρονικά ισχύος παρουσιάζονται ιδιαίτερα χρήσιμα και διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο.

- **Οικιακοί χώροι.** Ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται σε ψυγεία, καταψύκτες, εγκαταστάσεις θέρμανσης, κλιματιστικά, κουζίνες, εγκαταστάσεις φωτισμού, τηλεοράσεις, στερεοφωνικά, υπολογιστές.
- **Εμπορικά κτήρια.** Ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις θέρμανσης, εγκαταστάσεις εξαερισμού και

κλιματισμού, εγκαταστάσεις φωτισμού, υπολογιστές, συσκευές γραφείου, UPS, ανελκυστήρες, συστήματα αυτοματισμού γραφείου.

- **Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις.** Ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται σε αντλίες, συμπιεστές, εξαεριστήρες, εργαλειομηχανές, εγκαταστάσεις φωτισμού, εγκαταστάσεις επαγωγικής θέρμανσης, βιομηχανικά laser.
- **Μέσα Μεταφοράς.** Ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα, φορτιστές μπαταριών, τραμ, τρόλεϊ, αυτοκίνητα, υπόγεια τρένα, υπέργεια τρένα για τον έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής των κινητήρων τους αλλά και για την πλήρη εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας κατά τη διαδικασία πέδησης των παραπάνω οχημάτων.
- **Συστήματα κοινής ωφέλειας.** Ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος, γραμμές μεταφοράς υψηλής συνεχούς (DC) τάσης, σε ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκές διατάξεις, υδραγωγεία, συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος τα οποία υπάρχουν σε χειρουργικές μονάδες νοσοκομείων και σε μονάδες εντατικής θεραπείας για τη μηχανική υποστήριξη ασθενών.
- **Τηλεπικοινωνίες.** Ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται σε τροφοδοτικά τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, σε τροφοδοτικά τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων, σε φορτιστές κινητών τηλεφώνων, σε μετατροπείς AC/AC, σε μετατροπείς DC/DC, σε παλμοτροφοδοτικά, σε τροφοδοτικά συνεχούς (DC) και ρεύματος και UPS.
- **Διαστημικά ερευνητικά προγράμματα.** Ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται σε συστήματα ηλεκτρονικής τροφοδοσίας των διαστημικών λεωφορείων, σε συστήματα ηλεκτρονικής τροφοδοσίας δορυφόρων.
- **Ηλεκτροχημεία.** Ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται σε συστήματα ηλεκτροκόλλησης και κατά τη διαδικασία τήξης ορισμένων μετάλλων η οποία πραγματοποιείται με τη βοήθεια μαγνητικού πεδίου ιδιαίτερα υψηλής συχνότητας.

Με βάση το μεγάλο πλήθος των πεδίων στα οποία χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρονικά ισχύος γίνεται πλέον αντιληπτό ότι ο καλύτερος και πιο αξιόπιστος τρόπος για να ελέγξουμε τη ροή της ισχύος στις ηλεκτρονικές συσκευές και στα διάφορα ηλεκτρονικά συστήματα είναι η χρήση κυκλωματικών τοπολογιών ηλεκτρονικών ισχύος. [1], [2], [3]

2^ο - ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΟΙ ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ”

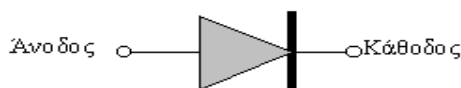
2.1 Εισαγωγή

Οι μετατροπείς ισχύος χρησιμοποιούνται πλέον σε ευρεία κλίμακα σε πλήθος εφαρμογών, διότι και από τεχνικής άποψης εξελίσσονται συνεχώς και από οικονομικής άποψης έχουν γίνει ιδιαίτερα προσιτοί. Επίσης έχουν τη δυνατότητα να διαχειρίζονται μεγάλα ποσά ισχύος με ευκολία. Ένα μεγάλο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση πραγματοποιήθηκε και από τη μείωση του κόστους των σύγχρονων ημιαγωγών ισχύος, η οποία οδήγησε στην ανάπτυξη νέων τοπολογιών μετατροπέων ισχύος. Επειδή σε πολλές περιπτώσεις οι ημιαγωγοί ισχύος είναι εφικτό να λειτουργήσουν ως ιδανικοί διακόπτες, διευκολύνεται και η μελέτη των μετατροπέων ισχύος. Ένα άλλο πλεονέκτημα των ημιαγωγών ισχύος είναι ότι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους δεν επηρεάζουν τη συνολική λειτουργική συμπεριφορά του εκάστοτε κυκλώματος. Αυτό το χαρακτηριστικό τους βοηθάει και στην ευκολότερη ανάδειξη των χαρακτηριστικών των μετατροπέων ισχύος. Με βάση τις χαρακτηριστικές καμπύλες των ημιαγωγών ισχύος μπορούμε να προσδιορίσουμε αν πρόκειται ή όχι για ιδανικά κυκλωματικά στοιχεία. Οι ήδη γνωστοί ημιαγωγοί ισχύος διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το ποσοστό ελεγχιμότητας τους.

1. **Δίοδοι.** Παρουσιάζουν δύο καταστάσεις λειτουργίας. Η μία είναι η κατάσταση αγωγιμότητας και η άλλη είναι η κατάσταση αποκοπής και ελέγχονται με τη βοήθεια του κυκλώματος ισχύος.
2. **Thyristors.** Συνήθως κλείνουν από ένα σήμα ελέγχου και ανοίγουν υπό την επίδραση του κυκλώματος ισχύος.
3. **Ελεγχόμενοι διακόπτες.** Ανοίγουν και κλείνουν από τα σήματα ελέγχου. Σε αυτή την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται και τα Διπολικά Τρανζίστορ Επαφής (Bipolar Junction Transistor - BJT), καθώς και τα Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου Μεταλλικών Οξειδίων Ημιαγωγών (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - MOSFET). [1]

2.2 Δίοδος

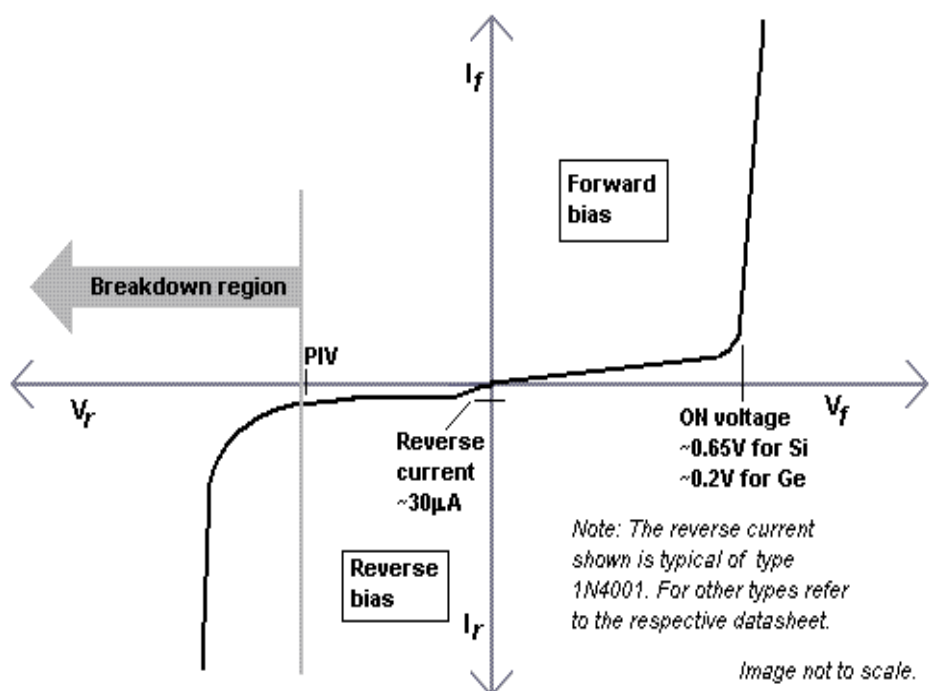
Η διάδος είναι ένα μη γραμμικό εξάρτημα δύο ακροδεκτών στα ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος. Το βασικό χαρακτηριστικό της είναι ότι επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος προς μία μόνο κατεύθυνση, η οποία καθορίζεται από τον τρόπο σύνδεσης της στο κύκλωμα. Από αυτό ακριβώς το χαρακτηριστικό υποδηλώνεται και η μη γραμμικότητα που διέπει τη σχέση της τάσης στα άκρα της και της έντασης του ρεύματος που τη διαρρέει. Η διάδος εμφανίζει σχεδόν μηδενική αντίσταση κατά τη φορά διέλευσης του ρεύματος και σχεδόν άπειρη αντίσταση κατά την αντίθετη φορά. Έτσι οι δύο ακροδέκτες της διόδου δεν πραγματοποιούν την ίδια λειτουργία, ανάλογα βέβαια και με τον τρόπο σύνδεσης της στο κύκλωμα. Ο ένας συμπεριφέρεται αποκλειστικά ως είσοδος ρεύματος, ενώ ο άλλος αποκλειστικά ως έξοδος. Όταν η διάδος επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος τότε λέμε ότι είναι ορθά πολωμένη, ενώ όταν δεν επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος τότε λέμε ότι είναι ανάστροφα πολωμένη. Από τη στιγμή που ροή ρεύματος παρατηρείται μέσω της διόδου μόνο κατά την ορθή της πόλωση, τότε ο ακροδέκτης από τον οποίο εισέρχεται το ρεύμα είναι σε υψηλότερο δυναμικό σε σύγκριση με τον ακροδέκτη από τον οποίο εξέρχεται το ρεύμα. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται το σύμβολο μίας απλής διόδου.



Εικόνα 2 - Σύμβολο απλής διόδου. [6]

Η διάδος πάντα άγει, δηλαδή επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος, κατά τη φορά του βέλους. Ο ακροδέκτης από τον οποίο εισέρχεται το ρεύμα ονομάζεται άνοδος, ενώ ο ακροδέκτης από τον οποίο εξέρχεται το ρεύμα ονομάζεται κάθοδος. Κατά την ορθή της πόλωση η διάδος μπορεί να θεωρηθεί ως ιδανικός διακόπτης επειδή διαρρέεται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα από ρεύμα, συγκριτικά με τα μεταβατικά φαινόμενα που παρουσιάζονται στο κύκλωμα ισχύος. Κατά την ανάστροφη της πόλωση το ρεύμα στο κύκλωμα αντιστρέφεται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα μέχρι τελικά να μηδενιστεί. Το χρονικό αυτό διάστημα ονομάζεται χρόνος ανάστροφης αποκατάστασης. Το ανάστροφο αυτό ρεύμα αποκατάστασης είναι απαραίτητο ώστε να εκμηδενιστεί η περίσσεια φορέων στη διάοδο και να καταστεί εφικτή η αποκοπή. Σε επαγωγικά κυκλώματα αυτό το ρεύμα είναι πιθανό να προκαλέσει υπερτάσεις. Στα πιο πολλά όμως κυκλώματα δεν ασκεί επιρροή στη χαρακτηριστική εισόδου - εξόδου

του μετατροπέα, οπότε η διόδος θεωρείται ιδανική κατά τη μετάβαση στην κατάσταση αγωγιμότητας. Η χαρακτηριστική τάσης - ρεύματος μίας διόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3 που ακολουθεί.



Εικόνα 3 - Χαρακτηριστική Τάσης - Ρεύματος μίας διόδου. [5]

Από την παραπάνω χαρακτηριστική τάσης - ρεύματος διαπιστώνουμε ότι για να άγει η διόδος κατά την ορθή της πόλωση δεν πρέπει απλά η τάση στα άκρα της να είναι θετική, αλλά πρέπει να είναι και μεγαλύτερη από μία ελάχιστη τιμή τάσης, η οποία ονομάζεται τάση κατοφλίου και η τιμή της καθορίζεται από το ημιαγωγικό υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η διόδος. Κατά την ανάστροφη πόλωση της διόδου, η κατάρρευση της επαφής εμφανίζεται όταν έχουμε ακαριαία αύξηση του ανάστροφου ρεύματος και η αρνητική τάση στα άκρα της διόδου είναι πολύ κοντά στο να ξεπεράσει μία συγκεκριμένη για κάθε διόδο τιμή τάσης, η οποία ονομάζεται δυναμικό ή τάση Zener. Τελικά η τάση στα άκρα της διόδου σταθεροποιείται στην τιμή της τάσης Zener. [1], [6]

Στα κυκλώματα των ηλεκτρονικών ισχύος χρησιμοποιούνται κυρίως τρία είδη διόδων.

1. **Διόδος Schottky.** Αυτό το είδος διόδου χρησιμοποιείται όταν χρειαζόμαστε μικρές τιμές πτώσης τάσης της τάξεως των 0.3 Volts. Αυτό είναι επιθυμητό συνήθως σε κυκλώματα τα οποία αποδίδουν πολύ

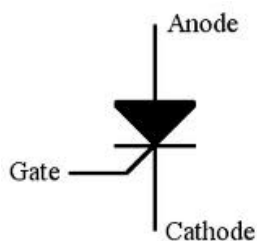
μικρή τάση στην έξοδο τους. Αυτές οι διόδους παρουσιάζουν τάση διάσπασης σε ένα εύρος τιμών από 50 έως και 100 Volts.

2. **Δίοδος ταχείας αποκατάστασης.** Αυτό το είδος διόδου είναι με τέτοιο τρόπο σχεδιασμένο και κατασκευασμένο ώστε να χρησιμοποιείται σε υψίσυχνα κυκλώματα τα οποία διαθέτουν ελεγχόμενους διακόπτες. Έτσι αυτή η διόδος χαρακτηρίζεται από μικρό χρόνο ανάστροφης αποκατάστασης. Ειδικότερα για τάσεις της τάξεως αρκετών μερικών εκατοντάδων Volts και για ρεύματα της τάξεως αρκετών εκατοντάδων Amperes αυτού του είδους οι διόδους εμφανίζουν χρόνους ανάστροφης αποκατάστασης μικρότερους από μερικά msec.
3. **Δίοδος συχνότητας δικτύου.** Αυτό το είδος διόδου είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε η πτώση τάσης που παρουσιάζει στα άκρα της κατά την ορθή της πόλωση να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Η μικρή πτώση τάσης οδηγεί σε μεγαλύτερους χρόνους ανάστροφης αποκατάστασης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές με συχνότητα ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Αυτές οι διόδους έχουν ονομαστικές τάσεις διάσπασης της τάξεως αρκετών kVolts και ονομαστικά ρεύματα της τάξεως αρκετών kAmperes. Επίσης έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν και σε σειρά, αλλά και παράλληλα, ώστε να ικανοποιήσουν οποιαδήποτε απαίτηση τόσο σε τάση όσο και σε ρεύμα.

[1]

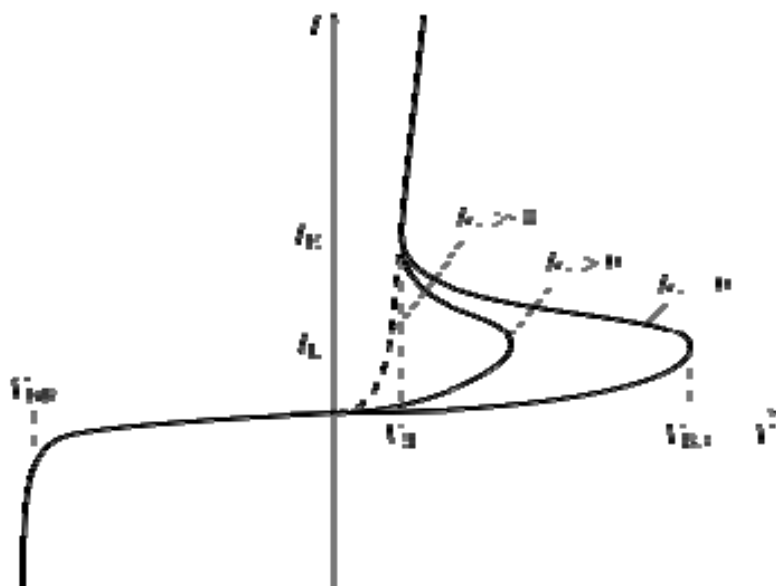
2.3 Thyristor

Ο τρόπος με τον οποίο συμβολίζεται το Thyristor απεικονίζεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4 - Σύμβολο Thyristor. [7]

Το κύριο ρεύμα σε ένα Thyristor ρέει από την Άνοδο (A) προς την Κάθοδο (K). Όταν βρεθεί σε κατάσταση αποκοπής τότε είναι ικανό να αποκόψει μία ορθή τάση και να μην άγει. Αυτό φαίνεται και στη χαρακτηριστική τάσης ρεύματος του Thyristor που παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5 - Χαρακτηριστική Τάσης - Ρεύματος ενός Thyristor. [7]

Ένα Thyristor άγει υπό την επιρροή ενός μικρού θετικού παλμού πύλης αρκεί να είναι ορθά πολωμένο. Η ορθή πτώση τάσης όταν αυτό άγει είναι της τάξεως μερικών μόνο Volts και καθορίζεται από την ονομαστική τιμή της τάσης διάσπασης του. Όταν το Thyristor αρχίσει να άγει, συνεχίζει να βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας ακόμα και όταν σταματήσει η εφαρμογή του ρεύματος πύλης. Ένα Thyristor άγει όπως περίπου άγει μία δίοδος. Όταν αρχίσει να άγει, το ρεύμα του τείνει να μηδενιστεί μόνο όταν το ρεύμα της ανόδου τείνει να πάρει αρνητική τιμή υπό την επίδραση των υπόλοιπων στοιχείων του κυκλώματος στο οποίο είναι συνδεδεμένο. Έτσι δίνεται η δυνατότητα στην πύλη να πάρει και πάλι τον έλεγχο, ώστε να αρχίσει και πάλι το Thyristor να άγει σε κάποια δεδομένη χρονική στιγμή αφού βρεθεί σε κατάσταση ορθής πόλωσης. Κατά την ανάστροφη πόλωση και για τιμές τάσης μικρότερες από την ανάστροφη τάση διάσπασης, υπάρχει μόνο ένα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής. Τα χαρακτηριστικά τάσης του Thyristor τόσο για τις τάσεις ορθής πόλωσης όσο και για τις τάσεις ανάστροφης πόλωσης είναι πανομοιότυπα. Αντίστοιχα οι προδιαγραφές ρεύματος προσεγγίζονται τόσο από τη μέση τιμή ρεύματος όσο και από τη μέγιστη ενεργό (rms) τιμή ρεύματος που αυτό μπορεί να άγει. [1], [7]

Για την εξέλιξη των διαφόρων ειδών Thyristors λαμβάνονται συνήθως υπόψη η τάση, το ρεύμα, ο χρόνος σβέσης, η ορθή πτώση τάσης, ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος, ο ρυθμός μεταβολής της τάσης. Τα διάφορα είδη των Thyristors παρουσιάζονται παρακάτω προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες μίας μεγάλης γκάμας εφαρμογών στις οποίες υπεισέρχονται.

- **Phase-control Thyristor (Thyristor ελέγχου φάσης).** Σε ορισμένες περιπτώσεις χαρακτηρίζονται και ως Thyristors-μετατροπείς και χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές ανόρθωσης τάσεων και ρευμάτων με συχνότητα ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Συνήθως τα Thyristors αυτά χρησιμοποιούνται σε ανορθωτές, οι οποίοι εξαρτώνται από τη συχνότητα και συνδέονται είτε με συνεχείς (DC) είτε με εναλλασσόμενους (AC) κινητήρες και σε δίκτυα που χρησιμοποιούνται για μεταφορά ισχύος με ιδιαίτερα υψηλή συνεχή (DC) τάση. Το θεωρητικά βέλτιστο Thyristor ελέγχου φάσης έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται ιδιαίτερα υψηλές τιμές τάσης και ρεύματος και να εμφανίζει πολύ μικρή πτώση τάσης στα άκρα του όταν είναι σε κατάσταση αγωγιμότητας. Η διάμετρος του υποστρώματος ενός τέτοιου Thyristor είναι γύρω στα 10 cm, με μέση τιμή ρεύματος 4000 Amperes για τάσεις αποκοπής της τάξεως των 5 έως 7 kVolts. Η ορθή πτώση τάσης όταν το Thyristor άγει είναι γύρω στα 1,5 Volts για στοιχεία του 1 kVolt και γύρω στα 3 Volts για στοιχεία από 5 έως 7 kVolts.
- **Inverter-grade Thyristor (Thyristor αντιστροφέων).** Αυτό το είδος Thyristor σχεδιάζεται έτσι ώστε όταν βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας, να παρουσιάζει όσο το δυνατόν μικρότερο χρόνο σβέσης και όσο το δυνατόν χαμηλότερες τιμές ορθής πτώσης τάσης. Οι τιμές τάσης ενός τέτοιου στοιχείου φθάνουν τα 2500 Volts, ενώ οι τιμές ρεύματος τα 1500 Amperes. Ο χρόνος σβέσης παρουσιάζει διακύμανση της τάξης μερικών msec και η τελικά του τιμή καθορίζεται από την τιμή της τάσης αποκοπής και την τιμή της ορθής πτώσης τάσης όταν το Thyristor βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας.
- **Light-activated Thyristor (Thyristor φωτεινής διέγερσης).** Αυτό το είδος Thyristor μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση αγωγιμότητας υπό την επίδραση ενός φωτεινού παλμού, ο οποίος οδηγείται με τη βοήθεια

οπτικών ινών σε μία ειδικά και ιδιαίτερα ευαίσθητη περιοχή του Thyristor. Αυτή η ιδιότητα που εμφανίζει ο συγκεκριμένος τύπος Thyristor στην ικανότητα που παρουσιάζει το φως, όταν διοχετεύεται σε κατάλληλα μήκη κύματος, να δημιουργεί πλεόνασμα ζευγών οπών (p) - ηλεκτρονίων (n) όταν προσπίπτει σε Πυρίτιο (Si). Αρχικά αυτός ο τύπος Thyristor έβρισκε χρήση όπου υπεισέρχονταν ιδιαίτερα υψηλά ποσά τάσης, όπως για παράδειγμα κατά τη μεταφορά ιδιαίτερα υψηλής συνεχούς (DC) τάσης όπου πολλά τέτοια Thyristor είναι συνδεδεμένα σε σειρά ώστε αν συνθέσουν ένα διακοπτικό σύστημα για ένα μετατροπέα. Όμως στο συγκεκριμένο τύπο Thyristor παρουσιάζονται και δυσλειτουργίες εξαιτίας της ανάπτυξης πολλών διαφορετικών και ιδιαίτερα υψηλών τιμών δυναμικού με αποτέλεσμα να συναντάμε δυσκολίες κατά την εφαρμογή των παλμών διέγερσης. Η τάση σε αυτό το είδος Thyristor είναι γύρω στα 4 kVolts και το ρεύμα γύρω στα 3 kAmperes. Η ορθή πτώση τάσης όταν αυτό άγει είναι περίπου 2 Volts και η απαίτηση ισχύος από τη φωτεινή διέγερση γύρω στα 5 mWatt.

Ανάλογα με την εφαρμογή που θέλουμε να υποστηρίξουμε συναντάμε και διάφορες παραλλαγές των παραπάνω τύπων Thyristor:

- **Gate-Assisted Turn off Thyristor - GATT (Thyristor με Σβέση Υποβοηθούμενη από την Πύλη).**
- **Asymmetrical Silicon Controlled Rectifier - ASCR (Ασύμμετροι Ελεγχόμενοι Ανορθωτές Πυριτίου).**
- **Reverse-Conducting Thyristor - RCT (Thyristor Ανάστροφης Αγωγιμότητας).**
- **Mos Controlled Thyristor - MCT (Thyristor Ελεγχόμενο από MOSFET).** [1], [9]

2.4 Ελεγχόμενα Διακοπτικά Στοιχεία

Πολλοί από τους ημιαγωγούς ισχύος, όπως είναι το Διπολικά Τρανζίστορ Επαφής (Bipolar Junction Transistor - BJT) και το Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου Μεταλλικών Οξειδίων Ημιαγωγών (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - OMOSFET), έχουν τη δυνατότητα να κλείνουν και να ανοίγουν υπό την

επίδραση σημάτων ελέγχου, τα οποία εφαρμόζονται στον ακροδέκτη ελέγχου του εκάστοτε στοιχείου. Αυτά τα στοιχεία είναι οι λεγόμενοι ελεγχόμενοι διακόπτες. Το σύμβολο με το οποίο αναπαρίσταται ένας διακόπτης παρουσιάζεται στην Εικόνα 6. Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός δεν περνάει ρεύμα, σε αντίθεση με την περίπτωση που είναι κλειστός οπότε περνάει.



Εικόνα 6 - Σύμβολο αναπαράστασης διακόπτη. [8]

Ένας ιδανικός ελεγχόμενος διακόπτης παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Προκειμένου να διεγερθεί αρκεί να δεχθεί ένα πολύ μικρό (ελάχιστο) ποσό ισχύος από την πηγή ελέγχου.
- Όταν είναι κλειστός υπάρχει διαρροή ρεύματος με ιδιαίτερα υψηλή ένταση και παρουσιάζει μηδενική πτώση τάσης στα άκρα του.
- Σε περίπτωση που δεχθεί κάποιο σήμα διέγερσης τότε μεταπίπτει σε αμελητέο χρόνο από την κατάσταση αγωγιμότητας στην κατάσταση αποκοπής και το αντίστροφο.
- Σε περίπτωση που είναι ανοιχτός τότε δε διαρρέεται από ρεύμα και μπορεί να αποκόψει ιδιαίτερα μεγάλες τιμές ορθών και ανάστροφων τάσεων.

Βέβαια ένας πραγματικός ημιαγωγός ισχύος δεν παρουσιάζει τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Συνεπώς όταν χρησιμοποιείται σε διάφορα κυκλώματα θα καταναλώνει ισχύ. Είναι επίσης πιθανό να υπάρξει και υπερκατανάλωση ισχύος με αποτέλεσμα όχι μόνο την καταστροφή του ίδιου του ημιαγωγικού διακόπτη, αλλά και άλλων εξαρτημάτων του κυκλώματος. Επειδή λοιπόν δεν είναι εφικτό να συναντήσουμε τα ιδανικά χαρακτηριστικά που επιθυμούμε και να προσεγγίσουμε την ιδανική περίπτωση ελεγχόμενου διακόπτη, παρουσιάζουμε μερικά από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που είναι εφικτό να συναντήσουμε σε ένα πραγματικό ελεγχόμενο ημιαγωγικό διακόπτη.

- Υψηλή ονομαστική τιμή τόσο του ρυθμού μεταβολής της τάσης στα άκρα του όσο και του ρυθμού μεταβολής της έντασης του ρεύματος που τον διαρρέει. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι τόσο απαραίτητη η χρήση εξωτερικών κυκλωμάτων προστασίας, τα οποία

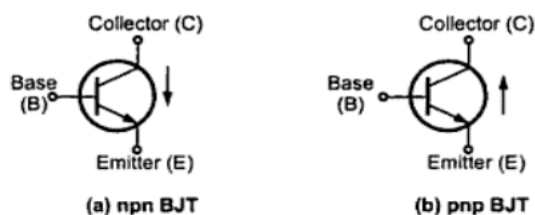
σε άλλες περιπτώσεις είχαν ως αποστολή τον περιορισμό των παραπάνω ρυθμών μεταβολής στο ημιαγωγικό στοιχείο ώστε να μην καταστραφεί.

- Όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής τότε το ρεύμα διαρροής πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρό.
- Πρέπει να είναι εφικτό να αντέχει ο διακόπτης τόσο την ονομαστική τάση στα άκρα του όσο και το ονομαστικό ρεύμα διαρροής, ταυτόχρονα κατά τη διαδικασία μετάβασης από την κατάσταση αγωγιμότητας στην κατάσταση αποκοπής και αντίστροφα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η χρήση εξωτερικών προστατευτικών κυκλωμάτων (snubber) στα άκρα της διάταξης.
- Όταν ο διακόπτης άγει, καλό θα είναι να παρουσιάζει κατά το δυνατόν πολύ μικρή τάση αγωγιμότητας, ώστε οι απώλειες ισχύος να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρές.
- Η ισχύς ελέγχου για τη μετάβαση του διακόπτη από την κατάσταση αγωγιμότητας στην κατάσταση αποκοπής και αντίστροφα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη ώστε γίνεται όσο το δυνατόν πιο απλός και ο τρόπος σχεδίασης του κυκλώματος ελέγχου.
- Όσο πιο μικρός είναι ο χρόνος έναυσης και ο χρόνος σβέσης τόσο σε πιο υψηλές συχνότητες μετάβασης θα είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί η διάταξη.
- Η αντίσταση αγωγιμότητας του διακόπτη πρέπει να παρουσιάζει θετικό θερμοκρασιακό συντελεστή. Εφόσον συμβαίνει αυτό το ρεύμα θα διαμοιράζεται εξίσου σε όλα τα παράλληλα συνδεδεμένα στοιχεία.
- Το ρεύμα αγωγιμότητας καλό θα είναι να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ονομαστική τιμή έντασης. Αυτό βοηθάει σε περίπτωση που θέλουμε να τρέξουμε εφαρμογές με πολύ υψηλές τιμές έντασης ρεύματος διότι οι ανάγκες για παράλληλη σύνδεση ημιαγωγών στοιχείων θα είναι πολύ πιο μικρές με αποτέλεσμα να παύει να υφίσταται το πρόβλημα του τρόπου κατανομής του ρεύματος.
- Η τιμή τόσο της ορθής όσο και της ανάστροφης τάσης αποκοπής πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μεγάλη. Αυτό θα βοηθήσει διότι θα χρειάζεται να συνδέσουμε λιγότερα ημιαγωγικά στοιχεία σε σειρά

οπότε θα απλουστεύεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των κυκλωμάτων ελέγχου και των κυκλωμάτων προστασίας. Επειδή τα περισσότερα ημιαγωγικά στοιχεία παρουσιάζουν μία ελάχιστη τιμή τάσης αγωγιμότητας η οποία δεν εξαρτάται από την τιμή της τάσης αποκοπής, αν τα συνδέσουμε σε σειρά θα προκληθεί αύξηση της συνολικής τιμής της τάσης αγωγιμότητας με αποτέλεσμα να αυξηθούν και οι αντίστοιχες απώλειες αγωγιμότητας. [1]

2.4.1 Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής (BJT)

Ο τρόπος με τον οποίο συμβολίζουμε ένα Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής (Bipolar Junction Transistor - BJT) παρουσιάζεται στην Εικόνα 7. Στο αριστερό μέρος της εικόνας απεικονίζεται ένα BJT τύπου npn, ενώ στο δεξιό μέρος της εικόνας απεικονίζεται ένα BJT τύπου pnp.

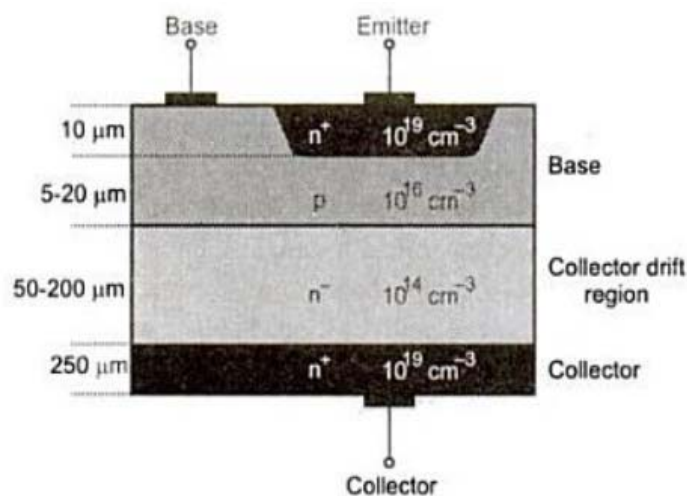


Εικόνα 7 - Συμβολισμός ενός BJT. [9]

Το BJT ονομάζεται και τρανζίστορ ισχύος γενικότερα και είναι στοιχείο τριών ακροδεκτών. Ο πρώτος ακροδέκτης είναι ο συλλέκτης (Collector - C), ο δεύτερος ακροδέκτης είναι η βάση (Base - B) και ο τρίτος ακροδέκτης είναι ο εκπομπός (Emitter - E). Σε ένα BJT τύπου npn όταν η επαφή Βάσης - Εκπομπού είναι ορθά πολωμένη, το τρανζίστορ άγει με αποτέλεσμα να έχουμε ροή ρεύματος από το Συλλέκτη προς τον Εκπομπό. Σε αυτή την περίπτωση λέμε ότι το τρανζίστορ είναι στον κόρο και η πτώση τάσης μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού γίνεται αμελητέα. Το BJT παύει να άγει μόλις η επαφή Βάσης - Εκπομπού πολωθεί ανάστροφα. Σε περίπτωση που έχουμε να κάνουμε με BJT τύπου pnp τότε όταν η επαφή Βάσης - Εκπομπού είναι ορθά πολωμένη το τρανζίστορ άγει με αποτέλεσμα να έχουμε ροή ρεύματος από τον Εκπομπό προς το Συλλέκτη. Και σε αυτή την περίπτωση το τρανζίστορ σταματάει να άγει όταν η επαφή Βάσης - Εκπομπού πολωθεί ανάστροφα. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι το ρεύμα βάσης έχει τον πλήρη έλεγχο για το πότε το BJT

βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας και τότε όχι. Η τάση αγωγιμότητας ενός τρανζίστορ ισχύος κυμαίνεται από 1 έως 2 Volts. Το συνεχές (DC) κέρδος ενός τρανζίστορ ισχύος κυμαίνεται από 5 έως 10. Ένα BJT ισχύος διατίθεται στο εμπόριο με προδιαγραφές τάσης γύρω στα 1400 Volts και προδιαγραφές ρεύματος της τάξεως μερικών εκατοντάδων Amperes. Τα σύγχρονα BJT ισχύος είναι εφικτό να συμμετέχουν και σε παράλληλες συνδέσεις αρκεί κατά τη διαδικασία της σχεδίασης τους να έχει ληφθεί υπόψη αυτή η προοπτική σε συνδυασμό με την πρόληψη για διάθεση ενός μικρού επιπλέον περιθωρίου στην τιμή της έντασης του ρεύματος. [1], [9]

Η δομή ενός BJT ισχύος είναι διαφορετική σε σύγκριση με τη δομή των τρανζίστορ μικρού σήματος. Στην Εικόνα 8 που ακολουθεί απεικονίζεται η δομή της κατακόρυφης διατομής ενός BJT τύπου npn. Η κατακόρυφη δομή μπορεί να μεγιστοποιήσει το εύρος της διατομής μέσω της οποίας έχουμε ροή ρεύματος στη συσκευή. Όταν το τρανζίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας, τότε έχουμε μείωση της αντίστασης και της ισχύος που τραβάει η συσκευή.



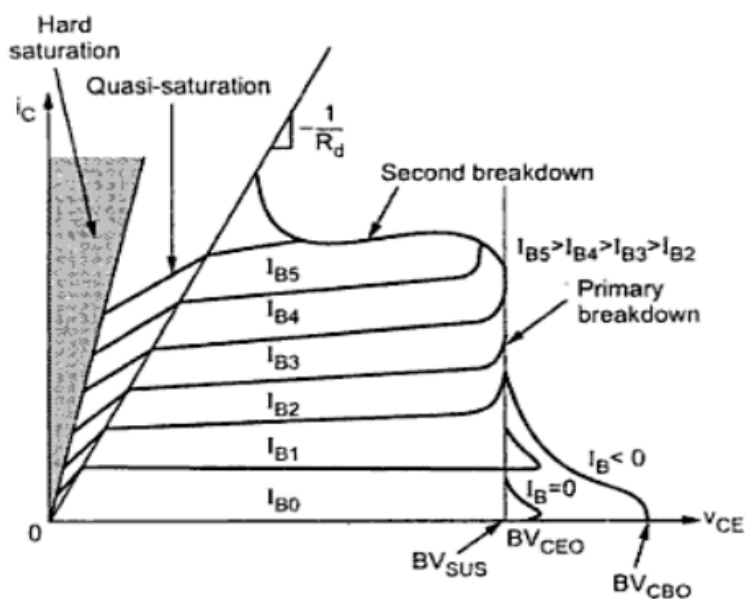
Εικόνα 8 - Δομή κατακόρυφης διατομής ενός BJT τύπου npn. [9]

Στην παραπάνω δομή παρατηρούμε ότι υπάρχει μία ισχυρά ντοπαρισμένη περιοχή Εκπομπού, η οποία έχει πάχος γύρω στα 10 μm . Η Βάση είναι μέτρια ντοπαρισμένη και έχει πάχος το οποίο ποικίλλει από 5 έως 20 μm . Το μικρό πάχος της Βάσης παρέχει ποικιλία δυνατοτήτων και επιλογών κατά την πραγματοποίηση εφαρμογών. Όμως για μικρό πάχος Βάσης έχουμε και μείωση του δυναμικού κατάρρευσης του τρανζίστορ. Όπως βλέπουμε στην εικόνα, ο συλλέκτης χωρίζεται σε δύο περιοχές. Αυτές οι δύο περιοχές είναι η n^- και η n^+ . Στη n^- το ποσοστό ντοπαρίσματος είναι

χαμηλό και καλείται περιοχή drift του συλλέκτη. Το πάχος της περιοχής n^- καθορίζει και το δυναμικό κατάρρευσης του τρανζίστορ. Η περιοχή n^+ είναι ιδιαίτερα ισχυρά ντοπαρισμένη. Το ποσοστό ντοπαρίσματος της είναι ανάλογο με αυτό της περιοχής του Εκπομπού.

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική τάσης - ρεύματος ενός BJT ισχύος. Σε αυτή την εικόνα βλέπουμε τη διακύμανση του ρεύματος Συλλέκτη i_c (για διάφορες τιμές τάσης Συλλέκτη - Εκπομπού) ως προς το ρεύμα της Βάσης i_B . Όπως διαπιστώνουμε στην εικόνα αυτή, υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του BJT.

1. **Κατάσταση αποκοπής.** Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας το ρεύμα που διαρρέει τη Βάση είναι σχεδόν μηδέν. Έτσι δεν υπάρχει ροή ρεύματος στην περιοχή του Συλλέκτη, οπότε το τρανζίστορ δε λειτουργεί.
2. **Κατάσταση ψευδοκόρου (Quasi Saturation).** Κατά την κατάσταση ψευδοκόρου αλλά και κατά την κατάσταση κόρου υπάρχει ροή ρεύματος στη Βάση και το τρανζίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας. Οπότε η ροή του ρεύματος στο Συλλέκτη εξαρτάται από το φορτίο. Ένα BJT ισχύος δε λειτουργεί ποτέ στην ενεργό περιοχή, για παράδειγμα σαν ενισχυτής.



Εικόνα 9 - Χαρακτηριστική Τάσης - Ρεύματος ενός BJT ισχύος τύπου npn και περιοχές λειτουργίας αυτού. [9]

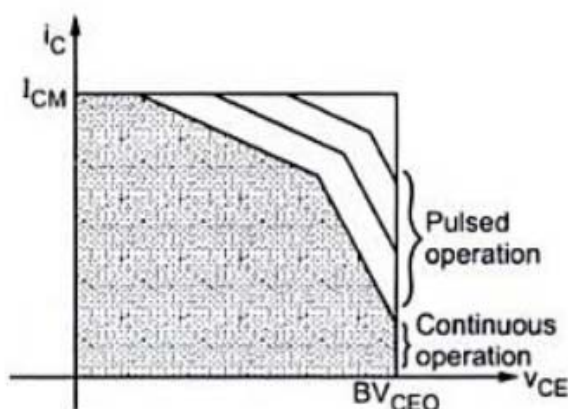
Λειτουργεί στην κατάσταση αποκοπής και στην κατάσταση κόρου. Για αυτό ακριβώς το λόγο λέμε ότι ένα BJT ισχύος δρα ως διακόπτης. Η τιμή τάσης BV_{SUS} που βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα είναι η μέγιστη τιμή τάσης μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού, που μπορεί να παρατηρηθεί όταν το BJT φέρει υπολογίσιμη τιμή ρεύματος Συλλέκτη. Η τιμή τάσης BV_{CEO} είναι η μέγιστη τιμή του δυναμικού κατάρρευσης, που μπορεί να παρατηρηθεί μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού όταν η Βάση δε διαρρέεται από ρεύμα. Η τιμή τάσης BV_{CBO} είναι η τιμή του δυναμικού κατάρρευσης μεταξύ Συλλέκτη και Βάσης όταν ο Εκπομπός λειτουργεί σαν ανοιχτό κύκλωμα.

3. **Κατάσταση πρωτογενούς κατάρρευσης (Primary Breakdown).** Η περιοχή πρωτογενούς κατάρρευσης σε ένα BJT ισχύος παρατηρείται εξαιτίας της κατάρρευσης χιονοστιβάδας της επαφής μεταξύ Συλλέκτη και Βάσης. Τα μεγάλα ποσά ισχύος που χάνονται οδηγούν στην κατάσταση πρωτογενούς κατάρρευσης.
4. **Κατάσταση δευτερογενούς κατάρρευσης.** Από την Εικόνα 9 παρατηρούμε ότι για μεγάλες τιμές ρεύματος στο Συλλέκτη, η τιμή της τάσης στην επαφή μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού ελαττώνεται. Εξαιτίας αυτής της πτώσης τάσης το ρεύμα του Συλλέκτη αρχίζει να αυξάνεται. Έτσι υπάρχει ουσιαστική αύξηση της ισχύος που τραβάει η συσκευή. Αυτή η διάχυση ισχύος δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το εύρος της συσκευής. Το μεγαλύτερο ποσοστό συγκεντρώνεται σε περιοχές όπου η θερμοκρασία παρουσιάζει ραγδαία αύξηση και το τρανζίστορ κινδυνεύει να καταστραφεί.

Προκειμένου να αποφευχθεί η καταστροφή ενός BJT ισχύος υπάρχει μία περιοχή στην οποία μπορεί να λειτουργεί και να μην κινδυνεύει να καταστραφεί. Αυτή η περιοχή ονομάζεται **Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας (Safe Operating Area - SOA)** και ορίζεται από ένα συνδυασμό τιμών ρεύματος (στο Συλλέκτη) και τάσεων (στην επαφή Συλλέκτη - Εκπομπού), όπου το BJT μπορεί να λειτουργεί χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να καταστραφεί.

Σε περίπτωση που το BJT ισχύος είναι ορθά πολωμένο τότε η περιοχή στην οποία μπορεί να λειτουργήσει χωρίς φθορές ονομάζεται **Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας Ορθής Πόλωσης (Forward Biased Safe Operating Area - FBSOA)**. Τα

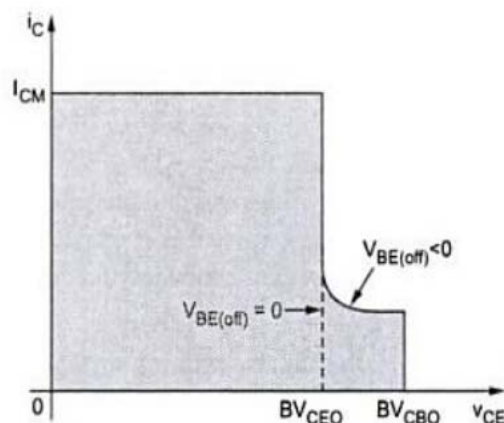
χαρακτηριστικά ρεύματος Συλλέκτη και τάσης μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού που συνθέτουν αυτή την περιοχή παρουσιάζονται στην Εικόνα 10 που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή είναι η περιοχή SOA για συνεχόμενη ή για συνεχή (DC) λειτουργία. Η θερμοκρασία της επαφής μεγιστοποιείται κατά μήκος των ορίων της περιοχής SOA. Το εύρος της περιοχής SOA αυξάνεται αισθητά στην περίπτωση που έχουμε παλμική λειτουργία. Από τη στιγμή που τα BJT χρησιμοποιούνται κανονικά σε παλμική λειτουργία δηλαδή στις υψηλές συχνότητες, καταλαβαίνουμε ότι τότε η ενεργός περιοχή SOA θα είναι μεγαλύτερη.



Εικόνα 10 - Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας Ορθής Πόλωσης (Forward Biased Safe Operating Area - FBSOA) ενός BJT. [9]

Η τιμή του ρεύματος i_{CM} είναι η μέγιστη τιμή ρεύματος Συλλέκτη ακόμα και στην περίπτωση παλμικής λειτουργίας. Η τιμή τάσης BV_{CEO} είναι η μέγιστη τιμή τάσης στην επαφή μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού όταν η Βάση δε διαρρέεται από ρεύμα. Η περιοχή SOA πρέπει να παρέχεται από τους κατασκευαστές του BJT στο φυλλάδιο με τα χαρακτηριστικά της συσκευής.

Σε περίπτωση που το BJT ισχύος είναι ανάστροφα πολωμένο τότε η περιοχή στην οποία μπορεί να λειτουργήσει χωρίς φθορές ονομάζεται **Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας Ανάστροφης Πόλωσης (Reversed Biased Safe Operating Area - RBSOA)**. Η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας RBSOA κατά την ανάστροφη πόλωση του τρανζίστορ παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος από την αντίστοιχη περιοχή FBSOA κατά την ορθή πόλωση του τρανζίστορ εξαιτίας της τιμής της τάσης BV_{CBO} μεταξύ των επαφών Συλλέκτη και Βάσης για μικρές τιμές ρεύματος στο Συλλέκτη. Στην Εικόνα 11 που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα παρουσιάζουμε την περιοχή ασφαλούς λειτουργίας RBSOA ενός BJT ισχύος. [9]

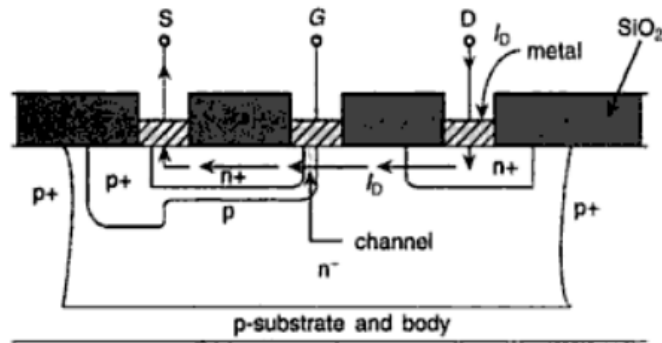


Εικόνα 11 - Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας Ανάστροφης Πόλωσης (Reversed Biased Safe Operating Area – RBSOA) ενός BJT. [9]

2.4.2 Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου Μεταλλικών Οξειδίων Ημιαγωγών (MOSFET)

Σε σύγκριση με τα BJT τα οποία είναι συσκευές ελεγχόμενες από ρεύμα, τα Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου Μεταλλικών Οξειδίων Ημιαγωγών (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - MOSFET) είναι συσκευές ελεγχόμενες από τάση. Τα MOSFET ισχύος διαφέρουν από τα BJT ισχύος στην αρχή λειτουργίας, στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και στην απόδοση. Στην πραγματικότητα τα χαρακτηριστικά απόδοσης των MOSFET είναι ανώτερα από τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των BJT. Αυτό ισχύει διότι τα MOSFET χαρακτηρίζονται από πολύ μικρότερους χρόνους μεταγωγής, απαιτούν απλούστερα κυκλωματικά μοντέλα τροφοδοσίας, έχουν δυνατότητα παράλληλης σύνδεσης, παρουσιάζουν σταθερή απολαβή και δίνουν ικανοποιητική απόκριση για μία μεγάλη ποικιλία θερμοκρασιών. Ένα MOSFET ισχύος έχει τρεις ακροδέκτες. Ο πρώτος είναι η πηγή (Source - S), ο δεύτερος είναι η πύλη (Gate - G) και ο τρίτος είναι ο απαγωγός ή καταβόθρα (Drain - D). Μάλιστα από το δυναμικό μεταξύ της πύλης και της πηγής ελέγχεται αν η συσκευή άγει ή όχι. Το MOSFET ισχύος αποτελεί εξέλιξη του MOSFET μικρού σήματος που χρησιμοποιείται σε κυκλώματα χαμηλής ισχύος. Το συμβατικό MOSFET μικρού σήματος χαρακτηριζόταν από μικρές τιμές ρεύματος, μικρή ανάστροφη αντίσταση και μεγαλύτερες απώλειες στην κατάσταση αγωγιμότητας. Αντίστοιχα το MOSFET ισχύος διαθέτει μία πλευρική δομή διπλής διάχυσης (Double Diffused structure), για αυτό το λόγο ονομάζεται και DMOS, η οποία χρησιμεύει για υψηλές τάσεις και ρεύματα. Αυτή η δομή προσφέρει ένα κανάλι μικρό σε μήκος και

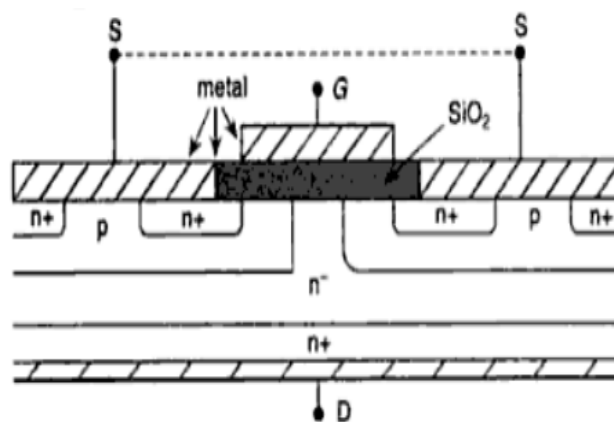
υψηλής πυκνότητας, χαμηλή αντίσταση και χαμηλές απώλειες ισχύος στην κατάσταση αγωγιμότητας. Η δομή του DMOS απεικονίζεται στην Εικόνα 12. [10]



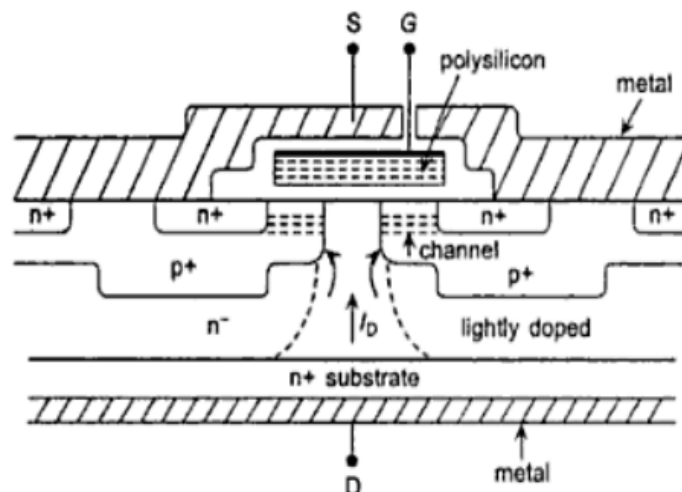
Εικόνα 12 - MOSFET ισχύος με πλευρική δομή διπλής διάχυσης. [10]

Κατά την περαιτέρω εξέλιξη της δομής του DMOS εγκρίθηκε η κατακόρυφη δομή. Σε αυτή τη δομή ο ακροδέκτης του απαγωγού βρίσκεται τοποθετημένος στο κάτω μέρος της πλάκας ώστε να αυξηθεί περισσότερο η πυκνότητα του καναλιού. Αρχικά η κατακόρυφη δομή χρησιμοποιήθηκε για τη βελτίωση της επαφής του τερματικού πύλης, όμως στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ευρύτερα. Αυτή η δομή μεγιστοποιεί την περιοχή διέλευσης τόσο του ρεύματος της πηγής όσο και του ρεύματος του απαγωγού. Η κατακόρυφη δομή DMOS παρουσιάζεται στην Εικόνα 13.

Το υλικό της πύλης (πολυσιλικόνη) βρίσκεται ανάμεσα σε δύο στρώματα Διοξειδίου του Πυριτίου (SiO_2), με το μέταλλο της πηγής να καλύπτει ολόκληρη την ενεργό περιοχή. Έτσι μειώνεται και η αντίσταση στην κατάσταση αγωγιμότητας άρα και οι απώλειες στην κατάσταση αγωγιμότητας. Πρακτικά όλα τα MOSFET ισχύος κατασκευάζονται με τη δομή που απεικονίζεται στην Εικόνα 14.



Εικόνα 13 - Κατακόρυφη δομή MOSFET ισχύος με πλευρική δομή διπλής διάχυσης [10]



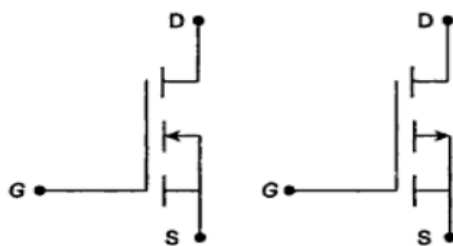
Εικόνα 14 - Δομή ενός μέσου MOSFET ισχύος. [10]

Βέβαια πραγματοποιούνται και πολλές τροποποιήσεις ανάλογα με τον τρόπο χρήσης της συσκευής, ώστε να βελτιωθούν τόσο η απόδοση της όσο και τα λειτουργικά της χαρακτηριστικά.

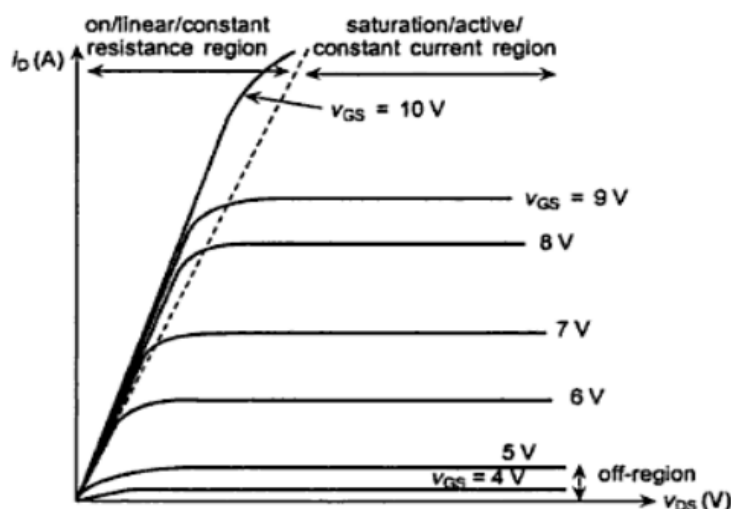
Το κυκλωματικό σύμβολο ενός MOSFET n-καναλιού και ενός MOSFET p-καναλιού παρουσιάζεται στην Εικόνα 15 που ακολουθεί.

Η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος ενός MOSFET παρουσιάζεται στην Εικόνα 16.

Το MOSFET βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας λειτουργώντας προσεγγιστικά σαν ένας ιδανικός διακόπτης, όταν το δυναμικό μεταξύ πύλης και πηγής παίρνει αρκετά υψηλές τιμές. Αντίστοιχα, θα βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής όταν το δυναμικό μεταξύ πύλης και πηγής είναι χαμηλότερο από μία ορισμένη τιμή η οποία ονομάζεται δυναμικό κατωφλίου. Ο χρόνος για τη μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη είναι ιδιαίτερα μικρός, της τάξεως του nsec. Τα MOSFET διατίθενται στο εμπόριο είτε με ονομαστική τάση μεγαλύτερη από 1000 Volts και πολύ μικρό ονομαστικό ρεύμα είτε με ονομαστικό ρεύμα γύρω στα 100 Amperes και μικρή ονομαστική τάση. Η μέγιστη διαφορά δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής είναι γύρω στα 20 Volts. [1], [10]



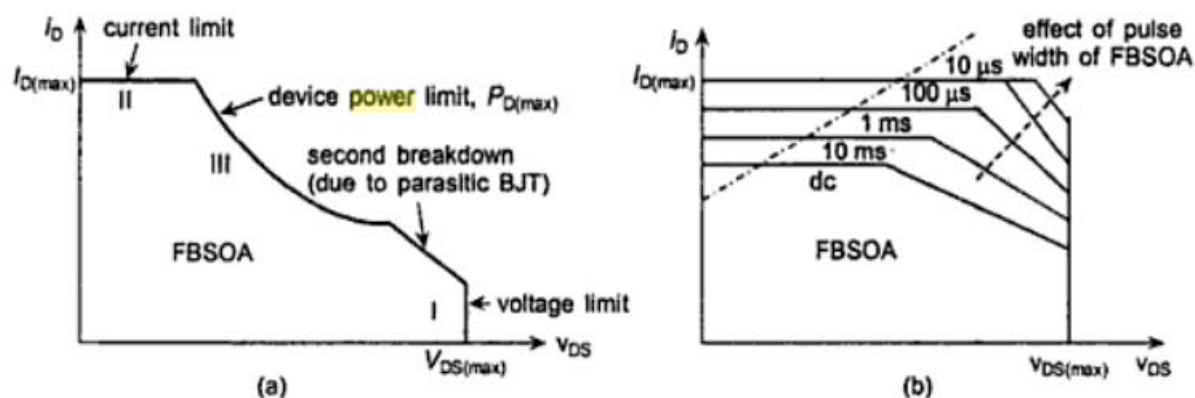
Εικόνα 15 - Κυκλωματικό σύμβολο ενός MOSFET n-καναλιού (αριστερά) και ενός MOSFET p-καναλιού (δεξιά). [10]



Εικόνα 16 - Χαρακτηριστικά τάσης-ρεύματος ενός MOSFET. [10]

Προκειμένου να αποφύγουμε την πιθανή καταστροφή του MOSFET ισχύος υπάρχει μία περιοχή στην οποία μπορεί να λειτουργεί και να μην κινδυνεύει να καταστραφεί. Αυτή η περιοχή ονομάζεται **Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας (Safe Operating Area - SOA)** και ορίζεται από ένα συνδυασμό τιμών ρεύματος και τάσης. Για ένα MOSFET ισχύος υπάρχουν δύο διαφορετικές περιοχές ασφαλούς λειτουργίας. Η Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας Ορθής Πόλωσης (Forward Biased Safe Operating Area - FBSOA) και η **Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας κατά τη Μεταγωγή (Switching Safe Operating Area - SSOA)**. Οι καμπύλες της περιοχής SSOA θέτουν τους περιορισμούς της τάσης και του ρεύματος στην κατάσταση αποκοπής και μοιάζουν με τις αντίστοιχες καμπύλες της περιοχής RBSOA ενός BJT ισχύος. Η καμπύλη της περιοχής FBSOA ορίζει τους περιορισμούς στις τιμές της τάσης και του ρεύματος καθώς και το ποσό της ισχύος που μπορεί η συσκευή να διαχειριστεί (Εικόνα 17(a)). Η πιο σημαντική οριακή τιμή για ένα MOSFET ισχύος είναι η

μέγιστη τιμή του δυναμικού μεταξύ πηγής και απαγωγού. Αν σε μία συσκευή εφαρμοστεί υψηλότερη τιμή δυναμικού από αυτή τη μέγιστη τιμή, τότε θα καταστραφεί. Ακόμα και μια υψηλότερη τιμή δυναμικού με πολύ μικρή διάρκεια μπορεί να αποβεί καταστροφική για τη συσκευή. Για αυτό το λόγο κυκλώματα εξωτερικής προστασίας (snubber) είναι απαραίτητα για ένα MOSFET. Επίσης το ρεύμα I_D της συσκευής δεν πρέπει να υπερβαίνει την οριακή τιμή I_{Dmax} ούτε στιγμιαία, αλλιώς το εισερχόμενο ρεύμα στον κινητήρα ή στον μετατροπέα θα μπορεί να προκαλέσει καταστροφή της συσκευής. Η καμπύλη της περιοχής FBSOA μεταβάλλεται γρηγορότερα για ένα συνεχές (DC) ρεύμα και για ένα ρεύμα παλμών (Εικόνα 17(b)). Αντίστοιχα στις χαμηλές τιμές του δυναμικού μεταξύ πηγής και απαγωγού το επιτρεπόμενο όριο του ρεύματος i_D ελαττώνεται. [10]



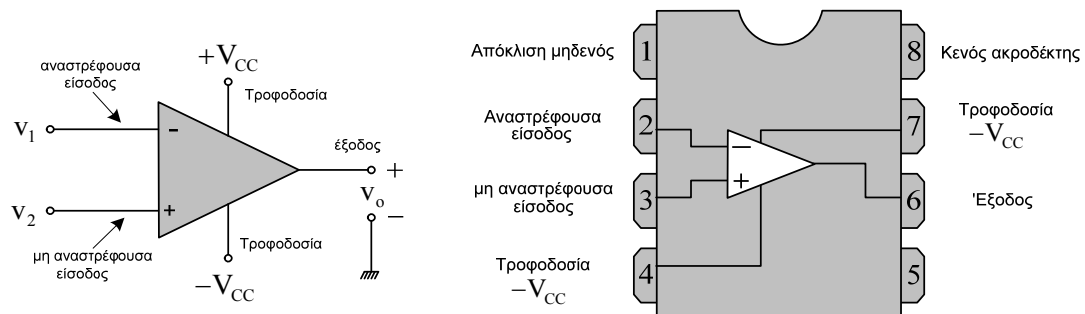
Εικόνα 17 - Περιοχές ασφαλούς λειτουργίας ενός MOSFET ισχύος. [10]

3^ο - ΚΕΦΑΛΑΙΟ

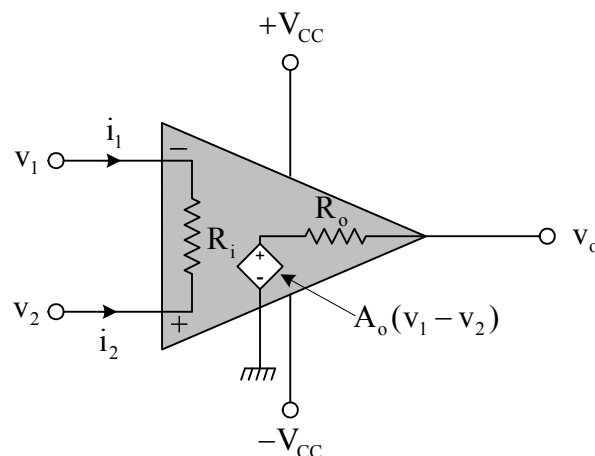
“ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ”

3.1. Εισαγωγή

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένας ενισχυτής με δύο εισόδους και μια έξοδο. Η μια είσοδος λέγεται **αναστρέφουσα** κι η άλλη **μη αναστρέφουσα**. Για να λειτουργήσουν χρειάζονται μια τάση τροφοδοσίας συνήθως $\pm 12\text{ V}$ έως $\pm 15\text{ V}$.



Ο τελεστικός ενισχυτής παριστάνεται και έχει τα εξής χαρακτηριστικά:



1. Αντίσταση εισόδου R_i άπειρη (πρακτικά μεγαλύτερη από $1\text{ M}\Omega$)
2. Αντίσταση εξόδου R_o μηδέν (πρακτικά της τάξης μερικών $\text{m}\Omega$)
3. Ενίσχυση A_o που τείνει στο άπειρο, χωρίς ανάδραση (πρακτικά 100000 φορές)

4. Απόκριση συχνότητας που τείνει στο άπειρο

Οι τελεστικοί ενισχυτές είναι ενισχυτές τάσης και όχι ρεύματος.

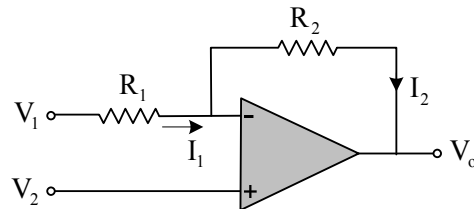
Το ρεύμα εξόδου σ' έναν τέτοιο ενισχυτή είναι της τάξης των 5 mA. Γι' αυτό και στην έξοδο των κυκλωμάτων συνήθως χρησιμοποιούμε ενισχυτικές διατάξεις ρεύματος (π.χ. συνδεσμολογία DARLINGTON)

Η λειτουργία του τελεστικού ενισχυτή είναι η εξής:

Όταν στην αναστρέφουσα είσοδο έχουμε κάποιο σήμα, τότε στην έξοδο του θα πάρουμε το σήμα αυτό ενισχυμένο και ανεστραμμένο

Σ' αντίθετη περίπτωση όταν έχουμε κάποιο σήμα στην μη αναστρέφουσα είσοδο, τότε στην έξοδο θα πάρουμε το ίδιο σήμα ενισχυμένο.

3.2. Γενική εξίσωση



Η ενίσχυση είναι:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_1 - V_2}$$

Είναι φανερό πως όταν $V_1 = V_2 \Rightarrow A_v \rightarrow \infty$

Στο παραπάνω κύκλωμα έχουμε δυο ρεύματα, I_1 και I_2 . Επειδή η αντίσταση εισόδου R_i είναι άπειρη, όλο το ρεύμα της εισόδου περνάει στην είσοδο. Είναι δηλαδή $I_1 = I_2$. Επομένως:

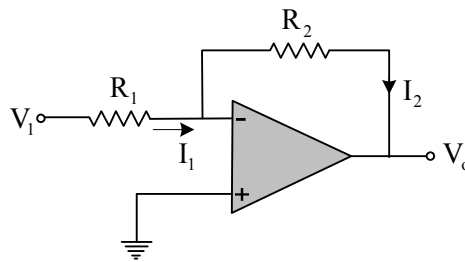
$$I_1 - I_2 \Rightarrow \frac{V_1 - V_2}{R_1} = \frac{V_2 - V_o}{R_2} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1}(V_1 - V_2) = V_2 - V_o \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{R_2}{R_1}(V_1 - V_2) - V_2 = V_o \Rightarrow V_o = V_2 - \frac{R_2}{R_1}(V_1 - V_2) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_o = \frac{R_1}{R_1}V_2 + \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1) \Rightarrow V_o = \frac{R_1}{R_1}V_2 + \frac{R_2}{R_1}V_2 - \frac{R_2}{R_1}V_1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1}$$

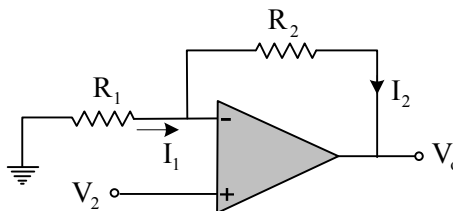
3.3 Κυκλώματα αναλογικού ελέγχου P (PROPONTIAL)



Γειώνοντας την μη αναστρέφουσα είσοδο έχουμε $V_2 = 0$.
 Επομένως η βασική εξίσωση γίνεται:

$$\boxed{V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_1} \quad \text{και για} \quad \boxed{R_1 = R_2 \Rightarrow V_o = -V_1}$$

Το (-) στην παρακάτω εξίσωση σημαίνει ότι το σήμα της εισόδου αναστρέφεται.

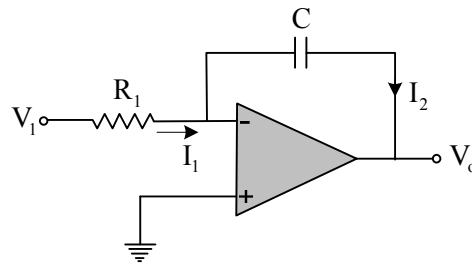


Γειώνοντας την αναστρέφουσα είσοδο έχουμε $V_1 = 0$.
 Επομένως η βασική εξίσωση γίνεται:

$$\boxed{V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_2} \quad \text{και για} \quad \boxed{R_2 = 0 \Rightarrow V_o = V_2}$$

Και τα δύο προηγούμενα κυκλώματα λέγονται κυκλώματα αναλογικού ελέγχου P (PROPONTIAL). Εάν τροφοδοτήσουμε την είσοδο με τάση οποιασδήποτε μορφής, τότε στην έξοδο θα πάρουμε σήμα είτε της ίδιας μορφής είτε ανεστραμμένο.

3.3. Κυκλώματα ολοκληρωτικού ελέγχου I (INTEGRAL)



Γειώνοντας την μη αναστρέφουσα είσοδο και αντικαθιστώντας την R_2 με έναν πυκνωτή C , έχουμε:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_1 = -\frac{1/\tau C}{R_1} V_1 = -\frac{1}{\tau C R_1} V_1$$

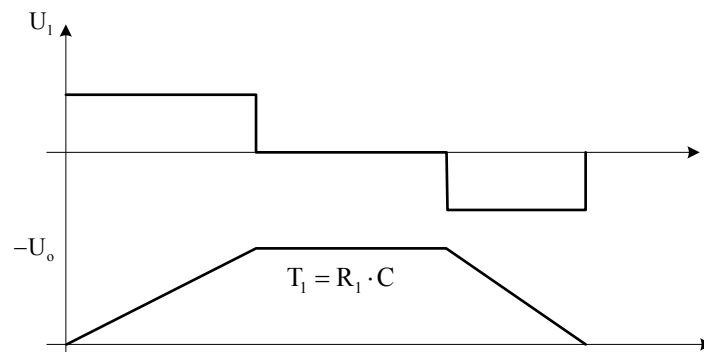
όπου :

$$\tau = R_2 C \text{ η σταθερά χρόνου του ολοκληρωτή}$$

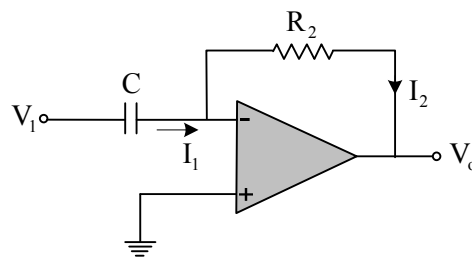
Επειδή $I_1 = I_2$

και η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι $V_c = \frac{1}{C} \int_0^t i d(t)$

Η τάση εξόδου ολοκληρώνεται, δηλαδή έχουμε στην έξοδο μια καμπύλη εξομάλυνσης



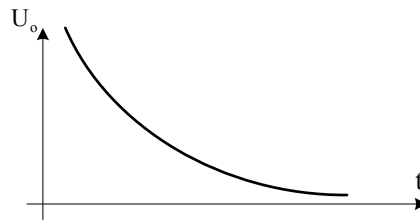
3.5. Κυκλώματα διαφορικού ελέγχου D (DIFFERENTIAL)



Αντίθετα γειώνοντας την μη αναστρέφουσα είσοδο και αντικαθιστώντας την R_1 με έναν πυκνωτή C , έχουμε:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_1 = -\frac{R_2}{1/\tau C} V_1 = -\tau C R_1 V_1$$

Εφαρμόζοντας δηλαδή ένα παλμό στην είσοδο, η απόκριση είναι μέγιστη και άμεση, η οποία όμως μηδενίζεται με τον χρόνο.

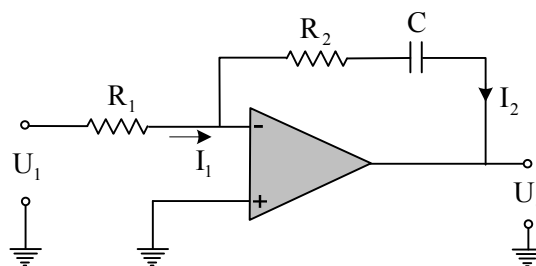


(Τάση εξόδου ως προς τον χρόνο όταν το σήμα εισόδου είναι παλμός μεγάλης διάρκειας)

Είναι φανερό ότι οι χρόνοι ανόδου στα κυκλώματα ολοκληρωτικού ελέγχου και οι χρόνοι απόσβεσης στα κυκλώματα διαφορικού ελέγχου, εξαρτώνται κάθε φορά από τα στοιχεία R και C .

Εκτός από τα τρία βασικά κυκλώματα ελέγχου, P (αναλογική απόκριση), I (απόκριση με ολοκλήρωση του σήματος) και D (απόκριση με διαφόρηση του σήματος), μπορούμε να κάνουμε και το συνδυασμό τους, δηλαδή μπορούμε να φτιάξουμε κυκλώματα PI , PD και PID .

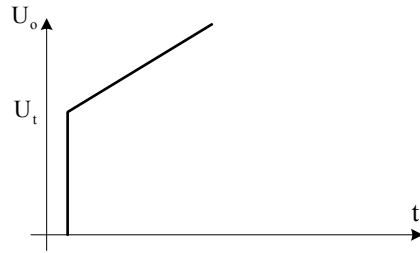
3.6. Κυκλώματα ελέγχου PI



Η ενίσχυση του παραπάνω κυκλώματος (έχοντας σαν τάση εισόδου ένα παλμό μεγάλης διάρκειας) θα είναι:

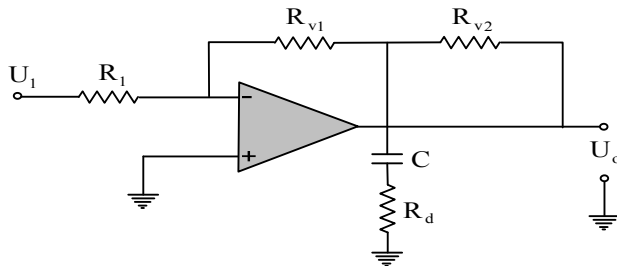
$$A = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + \tau C R_2}{\tau C R_2}$$

και η τάση εξόδου:



Το κύκλωμα αυτό δηλαδή μπορεί να μας χρησιμεύσει για μια περιοχή λειτουργίας με όριο την U_t .

3.7. Κυκλώματα ελέγχου PD



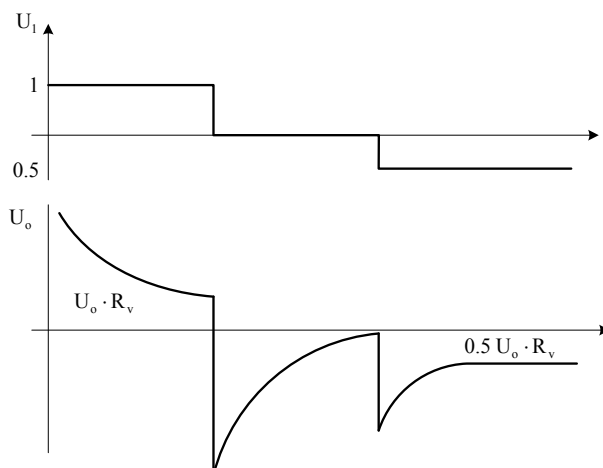
$$A = \frac{R_{v1} + R_{v2}}{R_1} \left(1 + \tau \cdot \frac{R_{v1} \cdot R_{v2}}{R_{v1} + R_{v2}} \cdot C \right)$$

Βάζοντας

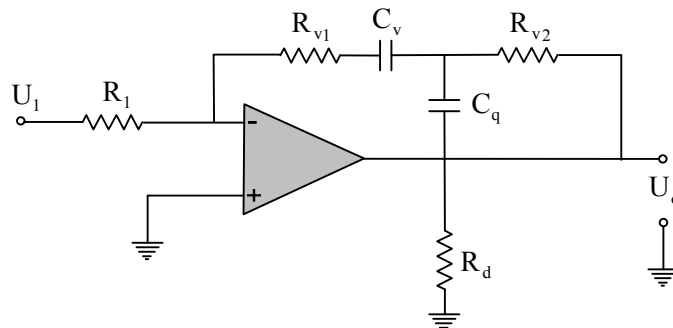
$$\frac{R_{v1} \cdot R_{v2}}{R_{v1} + R_{v2}} \cdot C = T_V \quad \text{και} \quad \frac{R_{v1} + R_{v2}}{R_1} = R_V$$

έχουμε

$$A = G(s) \quad , \quad pd = R_V (1 + \tau \cdot T_V)$$



3.8. Κυκλώματα ελέγχου PID

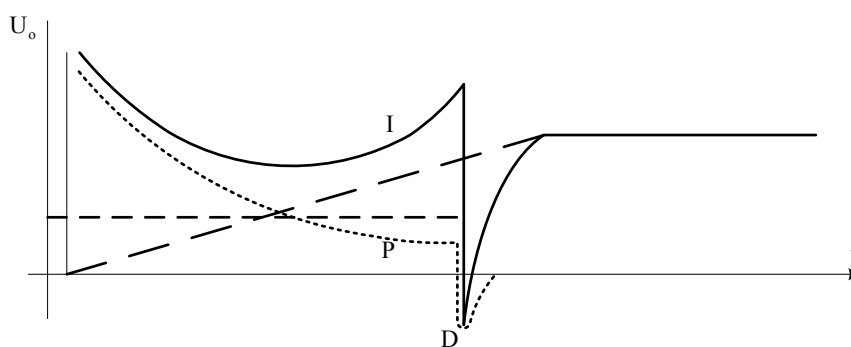


$$A = G(s)_{pid} = \frac{1 + \tau \cdot (R_{v1} + R_{v2}) \cdot C_v + 1 + \tau \cdot \left(\frac{R_{v1} \cdot R_{v2}}{R_{v1} + R_{v2}} \right)}{\tau \cdot R_1 \cdot C_v \cdot (1 + \tau \cdot R_d \cdot C_q)}$$

- Θέτοντας:
- $T_i = R_1 \cdot C_v$ (χρόνος ολοκλήρωσης)
 - $T_n = (R_{v1} + R_{v2}) \cdot C_v$ (χρόνος καθυστέρησης)
 - $T_v = \frac{R_{v1} \cdot R_{v2}}{R_{v1} + R_{v2}}$ (χρόνος διαφόρησης)
 - $t_d = R_d \cdot C_q$ (παρασιτική σταθερά χρόνου)

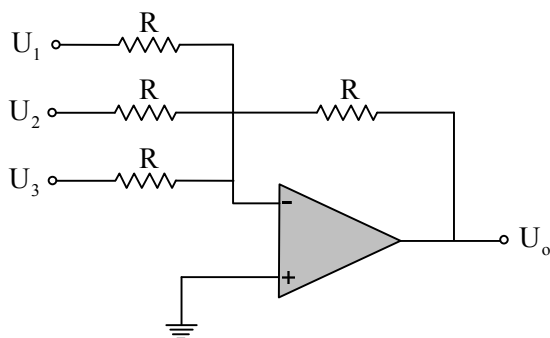
Η εξίσωση μεταφοράς γίνεται:

$$A = G(s)_{pid} = \frac{1 + \tau \cdot T_n + (1 + \tau \cdot T_v)}{\tau \cdot T_i \cdot (1 + \tau \cdot t_d)}$$

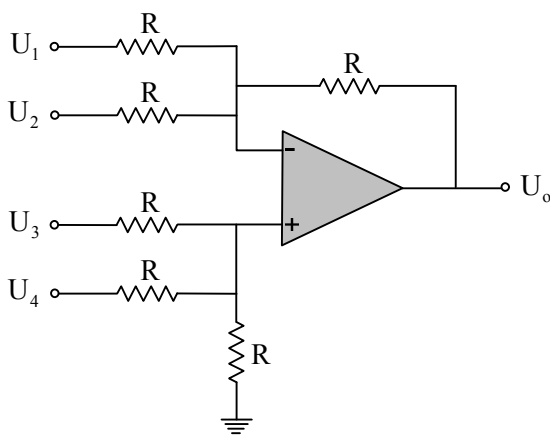


Προκειμένου να κατασκευάσουμε ένα κύκλωμα PID, μπορούμε επίσης να κατασκευάσουμε τα τρία επί μέρους κυκλώματα σε σειρά, οπότε έχουμε και καλύτερη ρύθμιση στις παραμέτρους.

3.9. Αθροιστής

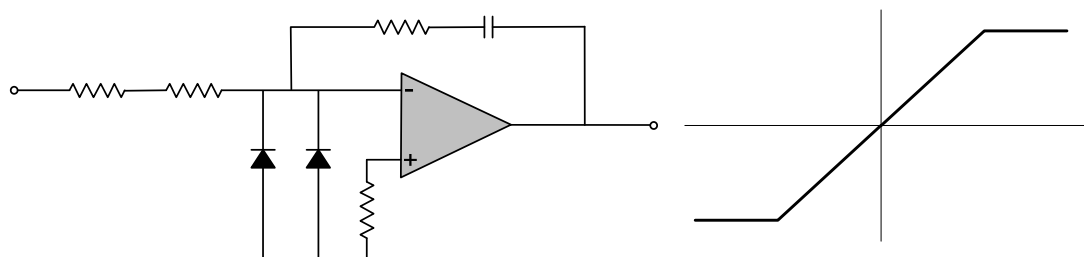


$$U_o = -(U_1 + U_2 + U_3)$$



$$U_o = -(U_1 + U_2) + (U_3 + U_4)$$

3.10. Περιοριστής



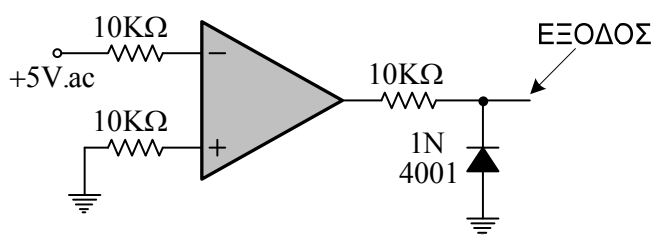
Οι δίοδοι περιορίζουν το σήμα εισόδου και κατά συνέπεια και τη τάση εξόδου. Άρα δουλεύουμε σε περιορισμένη περιοχή λειτουργίας. (π.χ. οι στροφές ενός κινητήρα, δεν μπορούν ν' ανέβουν πάνω από ένα όριο)

3.11. Ανάλυση του κυκλώματος έναυσης

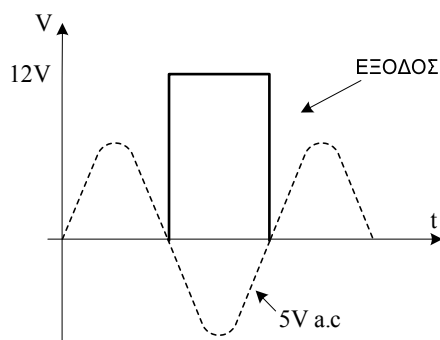
3.11.1 ΒΑΘΜΙΔΑ 1^η

Οι παλμοί είναι ανάλογοι του σήματος της L1. Επομένως είναι λογικό να χρησιμοποιείται η L1 σαν αναφορά σε κάποιο σημείο του κυκλώματος. Αυτό συμβαίνει στην πρώτη βαθμίδα. Το κύκλωμα της πρώτης βαθμίδας είναι ένας τελεστικός ενισχυτής σε συνδεσμολογία συγκριτή. Ίδιο παράδειγμα παρουσιάζεται στο κεφάλαιο στους τελεστικούς ενισχυτές.

Η τροφοδοσία των τελεστικών ενισχυτών είναι ίση με $\pm 12\text{ V}$.



Η έξοδος δίνει -12 V στη θετική ημιπερίοδο της L1 ενώ στην αρνητική ημιπερίοδο δίνει έξοδο $+12\text{ V}$. Το σήμα εξόδου είναι ένας τετραγωνικός παλμός και λόγω της διόδου λαμβάνουμε τελικά στην έξοδο μόνο τους θετικούς παλμούς.



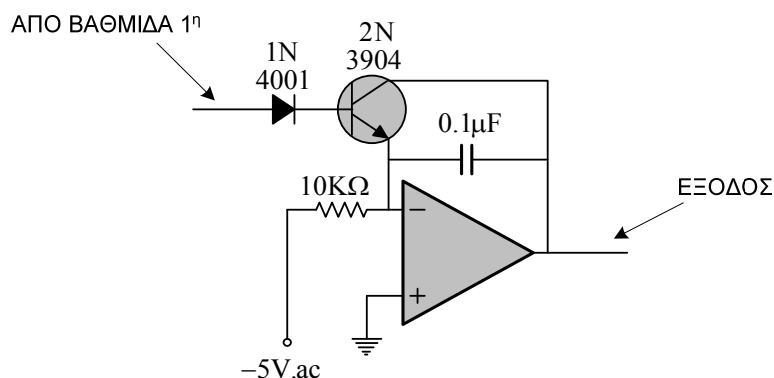
Η αντίσταση των $10\text{ K}\Omega$ στην έξοδο προστατεύει τον τελεστικό ενισχυτή και αυτό γιατί περιορίζει το ρεύμα εξόδου στα $1,2\text{ mA}$ το πολύ

$$\frac{12\text{V}}{10\text{K}\Omega} = 1,2\text{ mA}$$

Συγχρόνως αποτελεί και αντίσταση βάσης του τρανζίστορ που τροφοδοτεί παρακάτω. Οι αντιστάσεις στην είσοδο δεν είναι απαραίτητες γιατί η αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή είναι πρακτικά άπειρη.

3.11.2. ΒΑΘΜΙΔΑ 2^η

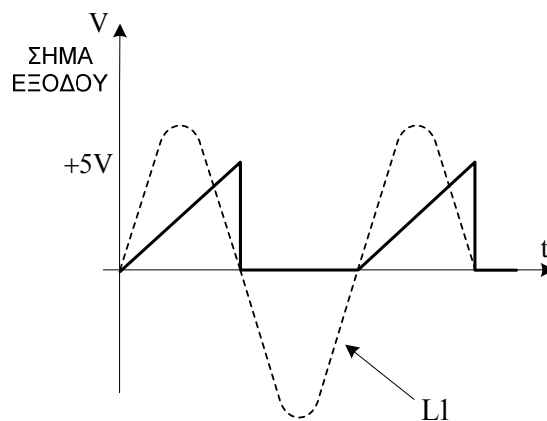
Στη συνέχεια χρησιμοποιούμε ένα κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή ως ολοκληρωτή.



Στο κύκλωμα αυτό το δυναμικό της επαφής της αναστρέφουσας εισόδου είναι μηδέν. Όσο δεν υπάρχει τάση στη βάση του τρανζίστορ, από την πρώτη βαθμίδα, ο πυκνωτής φορτίζει γραμμικά δίνοντας θετικό αναρριχητικό σήμα στην έξοδο. Το σταθερό ρεύμα φόρτισης του πυκνωτή εξαρτάται από την αντίσταση των 100 KΩ και είναι ίσο με

$$\frac{5V}{100K\Omega} = 50 \mu A$$

Εάν η βάση του τρανζίστορ δεχτεί θετική τάση τότε αυτό άγει και βραχυκυκλώνει τον πυκνωτή οπότε η έξοδος δίνει μηδέν.



Έτσι στην έξοδο το σήμα που λαμβάνουμε είναι πριονωτό, ενώ η μέγιστη τιμή του είναι

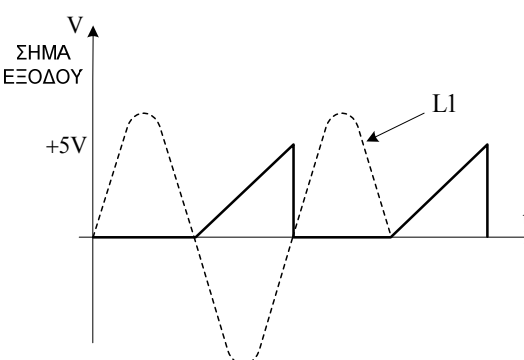
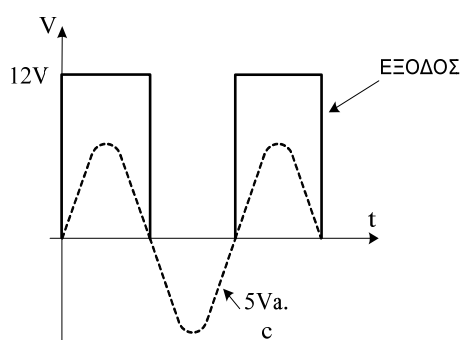
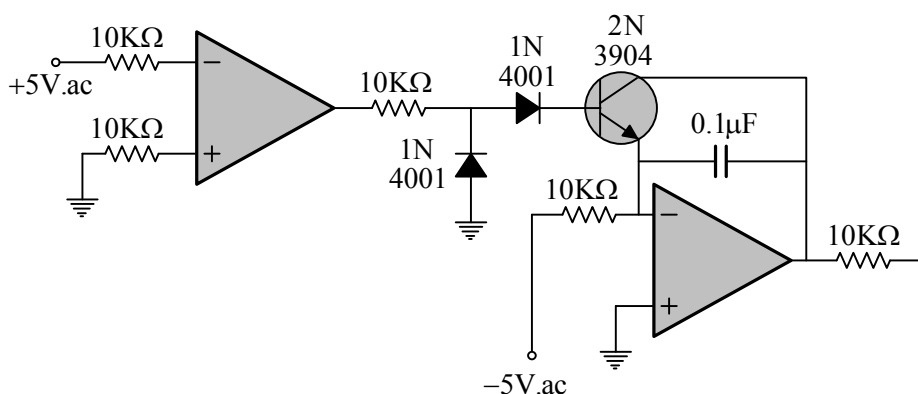
$$\Delta V_{\text{πυκνωτή}} = \frac{I\Delta t}{C}$$

Με τις συγκεκριμένες τιμές έχουμε

$$I = 50 \mu A, C = 100 \text{ nF}, \Delta t = 10 \text{ ms} \Rightarrow V_{\text{μεγιστο}} = 5 \text{ V}$$

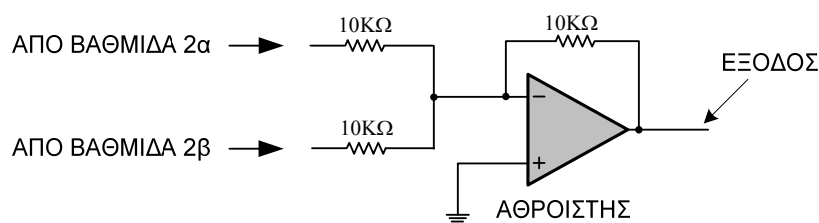
Έως τώρα δημιουργήσαμε πριονωτό σήμα κατά τις αντίστοιχες θετικές ημιπεριόδους της L1. Από το σήμα αυτό θα βγάλουμε παλμούς οι οποίοι θα ελέγχουν τις θετικές ημιπεριόδους της L1. Επειδή όμως θέλουμε έλεγχο και στις αρνητικές ημιπεριόδους της L1 θα χρησιμοποιήσουμε άλλο ένα κύκλωμα συγκριτή, ολοκληρωτή ο οποίος θα παράγει πριονωτό σήμα κατά τις αντίστοιχες αρνητικές ημιπεριόδους της L1.

Στην περίπτωση αυτή δίνουμε το εναλλασσόμενο σήμα στην μη αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή.

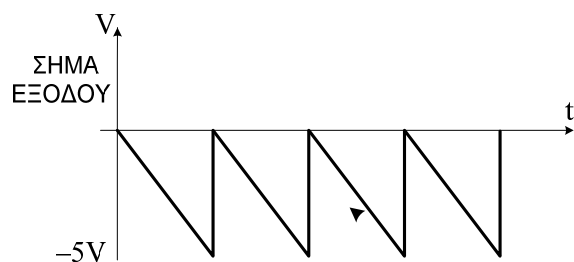


3.11.3. ΒΑΘΜΙΔΑ 3^η

Τα δύο πριονωτά σήματα που δημιουργήσαμε με τα επιμέρους κυκλώματα θα πρέπει να τα ενώσουμε με ένα σήμα. Η ένωση αυτή επιτυγχάνεται με έναν αθροιστή.



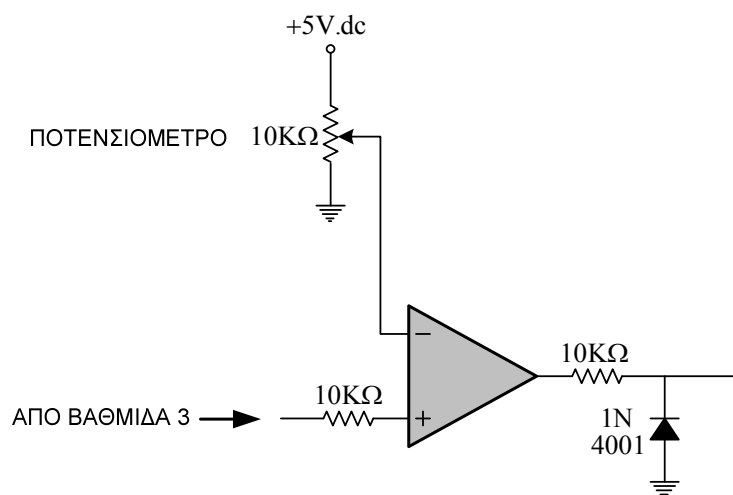
Το άθροισμα των δύο σημάτων της δεύτερης βαθμίδας θα μας δώσει ένα συνεχόμενο πριονωτό σήμα στην έξοδο. Το σήμα θα αναστραφεί και θα δώσει αρνητικό σήμα λόγω του ότι έχουμε άθροιση στην αναστρέφουσα είσοδο.



Επειδή οι τρεις αντιστάσεις είναι ίδιες δεν έχουμε ενίσχυση του σήματος εξόδου οπότε και η μέγιστη τιμή είναι -5 V .

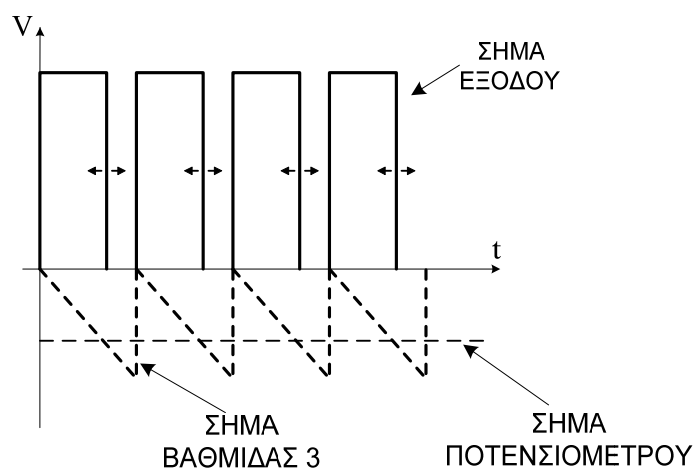
3.11.4. ΒΑΘΜΙΔΑ 4^η

Το πριονωτό σήμα το συγκρίνουμε με μία αρνητική τάση ενός ποτενσιόμετρου.



Η έξοδος δίνει θετικούς παλμούς $+12\text{ V}$. Εάν μεταβάλλουμε το ποτενσιόμετρο τότε μεταβάλλεται και το πλάτος των παλμών από 0 έως π ακτίνια (0 έως 10 ms).

Παρακάτω παρουσιάζεται διάγραμμα με τα σήματα εισόδου και εξόδου της 4^{ης} βαθμίδας.



4^ο - ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ”

4.1 Εισαγωγή

Τα περισσότερα ηλεκτρικά φορτία διακρίνονται από το χαρακτηριστικό της απαίτησης για τροφοδοσία με διαφορετικές τάσεις σε σχέση με αυτές που δίνουν τα δίκτυα των ηλεκτρικών παρόχων. Για να καλυφθούν αυτές οι ανάγκες σε τροφοδοσία συνήθως χρησιμοποιούνται κατάλληλοι μετατροπείς ώστε να μετατρέπεται η παρεχόμενη τάση στην επιθυμητή μορφή με όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες και χαμηλότερο κόστος. Επειδή στις μέρες μας η απαίτηση για ελαχιστοποίηση των απωλειών γίνεται ολοένα και εντονότερη είναι επιβεβλημένο οι μετατροπείς ισχύος να λειτουργούν και ως διακόπτες. Για αυτό το λόγο τα ημιαγωγικά εξαρτήματα ενός μετατροπέα θα λειτουργούν είτε σε κατάσταση πλήρους αγωγιμότητας είτε σε κατάσταση πλήρους αποκοπής. Έτσι θα αυξάνεται συνεχώς η απόδοση του μετατροπέα χωρίς να αναπτύσσονται μεγάλα ποσά θερμότητας στα ημιαγωγικά του στοιχεία. Στόχος είναι η ισχύς που διακινείται στη διάταξη του μετατροπέα να είναι αποδεκτή τόσο από την πηγή όσο και από το φορτίο χωρίς να προκαλείται φθορά στα ημιαγωγικά στοιχεία.

Συνήθως η διάκριση των μετατροπέων ισχύος γίνεται ανάλογα με τον τύπο της μετατροπής που πραγματοποιούν, τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η μεταγωγή των ημιαγωγικών διακοπών και τη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος από την πηγή στο φορτίο και αντίστροφα. Οι πρώτοι μετατροπείς ισχύος που κυκλοφόρησαν στο εμπόριο ήταν στρεφόμενοι ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς, οι οποίοι ήταν και συνεχούς (DC) και εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος οι οποίοι ήταν συζευγμένοι μηχανικά μεταξύ τους. Στις μέρες μας δε χρησιμοποιούνται τέτοιοι μετατροπείς, αλλά σύγχρονοι στατικοί μετατροπείς ισχύος. Οι μετατροπείς ισχύος διακρίνονται ανάλογα με το είδος της μετατροπής που πραγματοποιούν:

- **Μετατροπείς AC/DC.** Ονομάζονται και Ανορθωτές (Rectifiers) και μετατρέπουν την εναλλασσόμενη (AC) τάση και συνεχή (DC) τάση.
- **Μετατροπείς DC/AC.** Ονομάζονται και Αντιστροφεείς (Inverters) και μετατρέπουν τη συνεχή (DC) τάση σε εναλλασσόμενη (AC) τάση

σταθερού ή μεταβαλλόμενου πλάτους και σταθερής ή μεταβλητής συχνότητας.

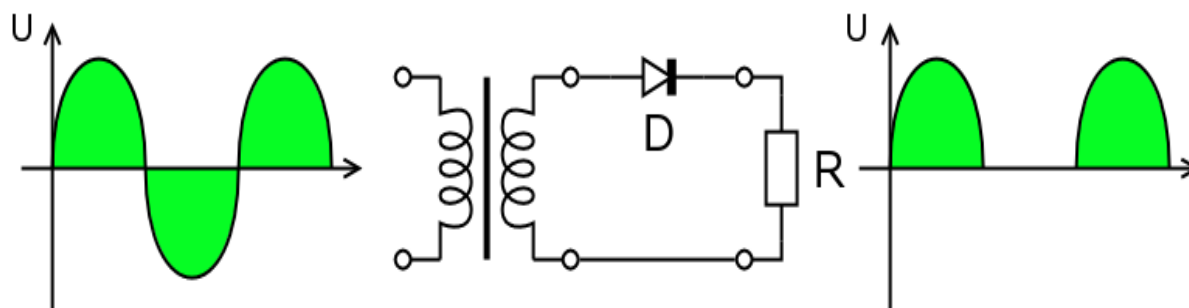
- **Μετατροπείς DC/DC.** Ονομάζονται και κατατημητές (Choppers) συνεχούς (DC) τάσης και μετατρέπουν μία συνεχή (DC) με ορισμένη τιμή και ορισμένη πολικότητα σε συνεχή (DC) τάση διαφορετικής τιμής και ανάλογα με τις ανάγκες τροφοδοσίας διαφορετικής ή όχι πολικότητας.
 - **Μετατροπείς AC/AC.** Ονομάζονται και Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters) και μετατρέπουν μια εναλλασσόμενη (AC) τάση ορισμένου πλάτους, ορισμένης συχνότητας και ορισμένου πλήθους φάσεων σε μία αλλά εναλλασσόμενη (AC) τάση διαφορετικής συχνότητας, διαφορετικού πλάτους και διαφορετικού πλήθους φάσεων.
- [3]

4.2 Μετατροπείς AC/DC

Ένας μετατροπέας AC/DC ονομάζεται και ανορθωτής (rectifier) και μετατρέπει μία εναλλασσόμενη (AC) τάση σταθερού πλάτους στην είσοδο του σε συνεχή (DC) τάση μεταβλητού πλάτους στην έξοδο του. Αυτοί οι μετατροπείς τροφοδοτούνται από μία ή περισσότερες πηγές εναλλασσόμενης (AC) τάσης ή εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος μία ή πολλών φάσεων. Η μεταβαλλόμενη έξοδο είναι ένα συνεχές (DC) ρεύμα ή μία συνεχής (DC) τάση χαμηλής κυμάτωσης. Τα κυκλώματα αυτών των μετατροπέων χρησιμοποιούν την τάση γραμμής για να πραγματοποιήσουν τη μετατροπή για αυτό το λόγο ονομάζονται και κυκλώματα μετατροπής γραμμής. Τα κυκλώματα αυτών των μετατροπέων περιλαμβάνουν ανορθωτικές διόδους και μονοφασικά ή τριφασικά ελεγχόμενα κυκλώματα. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως συστήματα μεταφοράς υψηλής συνεχούς (DC) τάσης, κυκλώματα οδήγησης DC κινητήρων, ρυθμιζόμενα DC τροφοδοτικά, στατικοί αντισταθμιστές, κυκλώματα φόρτισης μπαταριών και μετατροπείς ανεμογεννητριών. [4]

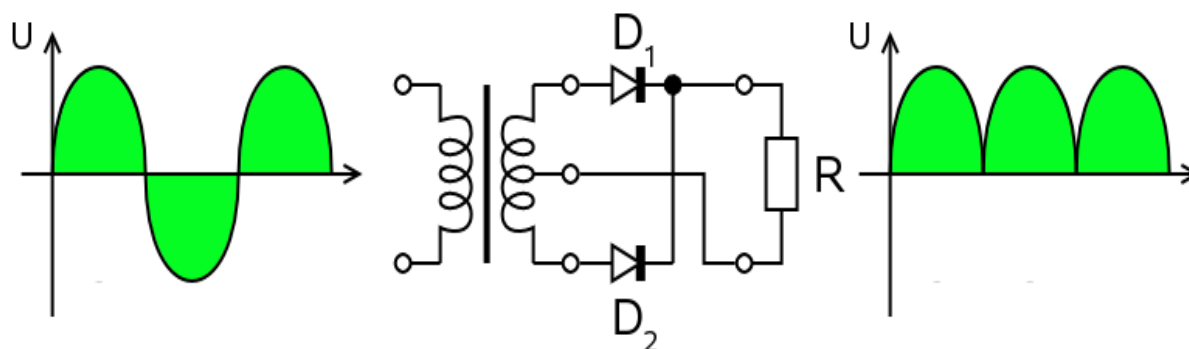
Ένα τυπικό παράδειγμα κυκλώματος μετατροπέα AC/DC μαζί με τις αντίστοιχες κυματομορφές εισόδου και εξόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 18. Πρόκειται για ένα κύκλωμα ημιανόρθωσης. Κατά τη θετική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου και για όσο χρόνο η τιμή του σήματος εισόδου έχει ξεπεράσει την τιμή της τάσης κατωφλίου

της διόδου, η διόδος θα είναι ορθά πολωμένη συνεπώς θα άγει και θα παρουσιάζει σταθερή τάση στα άκρα της η οποία καθορίζεται από το υλικό κατασκευής της. Κατά την αρνητική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου η διόδος θα είναι ανάστροφα πολωμένη συνεπώς δε θα άγει και θα συμπεριφέρεται σαν άπειρη αντίσταση.



Εικόνα 18 - Μετατροπέας AC/DC σε λειτουργία ημιανόρθωσης. [11]

Ένα ακόμα παράδειγμα κυκλώματος μετατροπέα AC/DC μαζί με τις αντίστοιχες κυματομορφές εισόδου και εξόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 19.



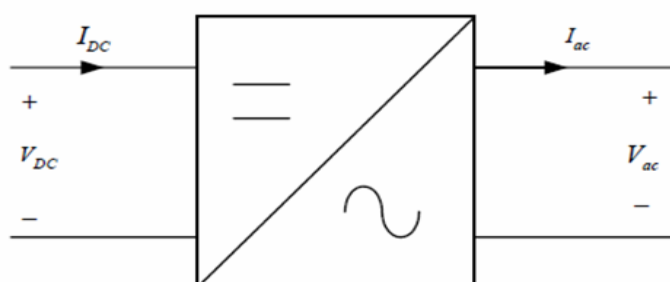
Εικόνα 19 - Μετατροπέας AC/DC σε λειτουργία πλήρους ανόρθωσης. [11]

Πρόκειται για ένα κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης. Κατά τη θετική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου και για όσο χρόνο η τιμή του σήματος εισόδου έχει ξεπεράσει την τιμή της τάσης κατωφλίου της διόδου, η διόδος D_1 θα είναι ορθά πολωμένη συνεπώς θα άγει και θα παρουσιάζει σταθερή τάση στα άκρα της η οποία καθορίζεται από το υλικό κατασκευής της. Σε αυτή την ημιπερίοδο η διόδος D_2 θα είναι ανάστροφα πολωμένη. Το ακριβώς αντίστροφο θα συμβαίνει στην αρνητική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου με τη διόδο D_2 να άγει και τη διόδο D_1 να είναι ανάστροφα πολωμένη. Η συνιστώσα της κυματομορφής εξόδου θα είναι κάθε φορά το αποτέλεσμα της αγωγιμότητας μίας εν των δύο διόδων. [6]

4.3 Μετατροπείς DC/AC

Ένας μετατροπέας DC/AC ονομάζεται και αντιστροφέας (inverter) και μετατρέπει μία σταθερή συνεχή (DC) τάση σε μία εναλλασσόμενη (AC) τάση με μεταβαλλόμενο ή όχι πλάτος και μεταβαλλόμενη ή όχι συχνότητα. Ένας πρακτικός μετατροπέας DC/AC διαθέτει είτε μία μπαταρία, είτε μία ηλιακά τροφοδοτούμενη πηγή DC τάσης είτε μία συχνότητα γραμμής της τάξεως των 50 Hz. Οι μετατροπείς DC/AC σχεδιάζονται συνήθως χρησιμοποιώντας ημιαγωγικές συσκευές όπως είναι τα BJT ισχύος, τα MOSFET ισχύος και τα thyristors. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως συσκευές αδιάλειπτης παροχής ισχύος, συστήματα παροχής ισχύος για αεροπλάνα και διαστημόπλοια, κυκλώματα οδήγησης επαγωγικών και σύγχρονων κινητήρων, συστήματα μεταφοράς συνεχούς (DC) τάσης και συστήματα παροχής επαγωγικής θέρμανσης. Οι μετατροπείς DC/AC χρησιμοποιούνται γενικότερα σε φορητά ηλεκτρονικά συστήματα πολύ χαμηλής ισχύος αλλά και σε βιομηχανικά συστήματα υπερυψηλής ισχύος. [4]

Το μπλοκ διάγραμμα ενός μετατροπέα DC/AC παρουσιάζεται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20 - Μπλοκ διάγραμμα μετατροπέα DC/AC. [12]

Οι μετατροπείς DC/AC ταξινομούνται με διάφορους τρόπους και κριτήρια. Ο γενικότερος τρόπος διάκρισης των μετατροπέων DC/AC τους κατατάσσει σε δύο μεγάλες κατηγορίες και πραγματοποιείται με βάση την πηγή τροφοδοσίας. Με βάση αυτό το κριτήριο οι μετατροπείς DC/AC (αντιστροφείς) διακρίνονται σε Αντιστροφείς Πηγής Τάσης (Voltage Source Inverters - VSI) και σε Αντιστροφείς Πηγής Ρεύματος (Current Source Inverters - CSI). Οι CSI τροφοδοτούνται από μία πηγή ρεύματος η οποία παρουσιάζει εσωτερική αντίσταση με ιδιαίτερα υψηλή τιμή. Η αποτελεσματική τροφοδοσία τους πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας πηνία ή επαγωγικές συσκευές που υπόκεινται ρευματικούς περιορισμούς. Οι VSI τροφοδοτούνται από μία πηγή συνεχούς (DC) τάσης με μικρή εσωτερική αντίσταση.

Η τελική τάση εξόδου τους παραμένει σχεδόν σταθερή ανεξάρτητα από το εξαγόμενο ρεύμα φόρτου. [12]

Βέβαια οι κλασσικές διατάξεις μετατροπών DC/AC εμφανίζουν δύο σημαντικά προβλήματα. Δεν είναι πάντα εφικτό να συνδεθούν σε δίκτυα με πολύ υψηλή τιμή τάσης (της τάξεως των 2.2 kVolts), αφού οι σύγχρονοι ημιαγωγικοί διακόπτες δεν παρέχουν την απαιτούμενη ασφάλεια. Επίσης οι μετατροπείς αυτοί εμφανίζουν χαμηλή ποιότητα ισχύος εξόδου, αφού οι κυματομορφές τους περιέχουν αρμονικές συνιστώσες. Για να παρακαμφθούν τα δύο παραπάνω μειονεκτήματα, χρησιμοποιούμε μετατροπείς DC/AC πολλαπλών επιπέδων, οι οποίοι αποτελούν διατάξεις μετατροπών, των οποίων οι κυματομορφές φασικών τάσεων εμφανίζουν βηματική μεταβολή στο AC τους μέρος. Αυτή ακριβώς η βηματική μεταβολή προκαλεί ελάττωση του πλήθους των αρμονικών συνιστωσών, αφού πλησιάζει περισσότερο τη μορφή της ημιτονοειδούς κυματομορφής και ελαττώνει την καταπόνηση που δέχονται οι μονώσεις. Συνεπώς ο στόχος είναι η τάση να χαρακτηρίζεται από όσο γίνεται περισσότερα ενδιάμεσα επίπεδα. Οι διατάξεις των μετατροπών DC/AC ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

1. **Μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων με διόδους περιορισμού.**
2. **Μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων με πυκνωτές περιορισμού.**
3. **Μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων οι οποίοι αποτελούνται από επιμέρους μετατροπείς συνδεδεμένους σε σειρά.** [13]

4.4 Μετατροπείς DC/DC

Ένας μετατροπέας DC/DC ονομάζεται και κατατητής (Chopper) και μετατρέπει τη σταθερή συνεχή (DC) τάση που λαμβάνει στην είσοδο του σε μία μεταβαλλόμενη συνεχή (DC) τάση εξόδου. Η DC τάση εξόδου μπορεί να έχει διαφορετικό πλάτος από αυτό της πηγής εισόδου. Οι μετατροπείς DC/DC σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας ημιαγωγικές συσκευές όπως είναι τα BJT ισχύος, τα MOSFET ισχύος και τα thyristors. Η τάση εξόδου μπορεί να μεταβάλλεται ελέγχοντας το συντελεστή απόδοσης της συσκευής με σήματα χαμηλής ισχύος τα οποία προέρχονται από μία μονάδα ελέγχου. Ένας μετατροπέας DC/DC διαθέτει είτε μία συχνότητα γραμμής γύρω στα 50 Hz, είτε μία μπαταρία, είτε μία ηλιακά τροφοδοτούμενη πηγή DC τάσης. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως συνεχή (DC) κυκλώματα

τροφοδοσίας, υπόγεια οχήματα, οχήματα τροφοδοτούμενα από μπαταρίες, κυκλώματα τροφοδοσίας ηλεκτρικών κινητήρων και τροφοδοτικά διακοπτικής λειτουργίας. [4]

Σε πολλά συστήματα ισχύος είναι απαραίτητη η μετατροπή μίας συνεχούς τάσης πολύ μεγάλης τιμής σε μία συνεχή τάση με διαφορετική τιμή. Σαν παράδειγμα αναφέρουμε τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, όπου χρησιμοποιούνται μετατροπείς DC/DC, ώστε να τροφοδοτηθεί ο οπλισμός της μηχανής με τάση υψηλής τιμής. Επίσης σε πολλά φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται μετατροπείς DC/DC για την αύξηση ή την ελάττωση της τάσης που προέρχεται από φωτοβολταϊκές συστοιχίες σε κατάλληλες τιμές για την αποτελεσματική τροφοδοσία του φορτίου. Επειδή όμως σε αυτά τα συστήματα απαιτείται η διακίνηση ιδιαίτερα υψηλών ποσών τάσεως και ισχύος, δε χρησιμοποιούνται συμβατικοί μετατροπείς DC/DC, αφού αυτοί δεν είναι όσο αποτελεσματικοί χρειάζεται. Κυρίως χρησιμοποιούνται κατάλληλες τοπολογίες μετατροπέων DC/DC πολλαπλών επιπέδων ώστε να είναι εφικτή η αποτελεσματική διαχείριση των ιδιαίτερα υψηλών ποσών τάσεως και ισχύος που διακινούνται. Οι χρησιμοποιούμενες τοπολογίες είναι:

1. **Μετατροπέας DC-DC πολλαπλών επιπέδων με διόδους περιορισμού.**
2. **Μετατροπέας DC-DC πολλαπλών επιπέδων με αιωρούμενους πυκνωτές.**
3. **Αμφίπλευρος μετατροπέας DC-DC πολλαπλών επιπέδων.**
4. **Μετατροπέας DC-DC πολλαπλών επιπέδων με μετατροπείς σε συνδεδεμένους σε σειρά.** [14]

4.5 Μετατροπείς AC/AC

Ένας μετατροπέας AC/AC ονομάζεται και κυκλομετατροπέας (Cycloconverter) και μετατρέπει απευθείας μία σταθερή εναλλασσόμενη (AC) τάση καθορισμένης συχνότητας και πλάτους σε μία νέα εναλλασσόμενη (AC) τάση διαφορετικής συχνότητας και διαφορετικού πλάτους. Ο σχεδιασμός αυτών των μετατροπέων περιλαμβάνει thyristors. Η έξοδος τους ελέγχεται με χαρακτηριστικά σήματα ενεργοποίησης τα οποία λαμβάνονται από μία κατάλληλη μονάδα ελέγχου. Η συχνότητα εξόδου είναι χαμηλότερη από της συχνότητα της πηγής τροφοδοσίας και

συνήθως είναι ένα κλάσμα της τιμής της συχνότητας της πηγής τροφοδοσίας. Αυτοί οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα βιομηχανικών μονάδων ιδιαίτερα υψηλής ισχύος. [4]

Ένας μετατροπέας AC/AC αποτελείται από μία συστοιχία ημιαγωγικών διακοπών οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι είτε back to back είτε αντίστροφα-παράλληλα. Από το ελεγχόμενο άνοιγμα και κλείσιμο των διακοπών είναι πιθανό να παραχθούν στην έξοδο κυματομορφές τάσης με θεμελιώδη συχνοτική συνιστώσα ίση με την επιθυμητή συχνότητα εξόδου. Οι μετατροπείς AC/AC ταξινομούνται σε δύο ευρύτερες κατηγορίες.

1. **Μετατροπείς AC/AC ελεγχόμενης φάσης.** Σε αυτούς τους μετατροπείς η διαφορά φάσης ελέγχεται από μία θύρα ρυθμιζόμενων παλμών.
2. **Μετατροπείς AC/AC φακέλου (envelope).** Σε αυτούς τους μετατροπείς οι διακόπτες παραμένουν κλειστοί και άγουν για διαδοχικές ημιπεριόδους. [15]

5^ο - ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ AC/DC”

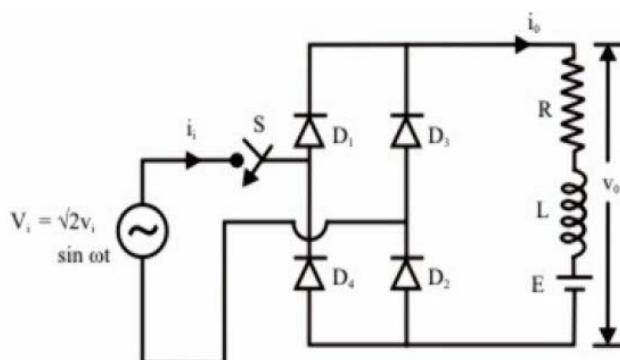
5.1 Εισαγωγή

Ένας μετατροπέας AC/DC λαμβάνει στην είσοδο του εναλλασσόμενη (AC) τάση με σταθερό μέτρο και σταθερή συχνότητα και παρέχει στην έξοδο του συνεχή (DC) τάση σταθερή ή μεταβαλλόμενη. Η φορά της ισχύος σε ένα τέτοιο κύκλωμα είναι από την πλευρά του εναλλασσόμενου προς την πλευρά του συνεχούς. Οι μετατροπείς AC/DC ταξινομούνται με βάση τα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα τους αλλά και τον τρόπο σύνδεσης αυτών των στοιχείων, σε επιμέρους κατηγορίες.

- **Μονοφασικοί μετατροπείς AC/DC.**
- **Τριφασικοί μετατροπείς AC/DC.**
- **Μη ελεγχόμενοι μετατροπείς AC/DC.** Αυτοί οι μετατροπείς χρησιμοποιούν ως ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία διόδους και αποτελούν το οικονομικότερο είδος μετατροπέων AC/DC ειδικά σε περιπτώσεις που δε χρησιμοποιείται συνοδευτικό κύκλωμα ελέγχου. Έχουν απλό τρόπο κατασκευής αλλά δεν παρέχουν δυνατότητα ρύθμισης της τάσης εξόδου.
- **Ημιελεγχόμενοι μετατροπείς AC/DC.** Πρόκειται για διάταξη σχετικά μικρού κόστους και με κύκλωμα ελέγχου απλής μορφής. Παρουσιάζουν τάση εξόδου με μεγαλύτερη μέση τιμή, καταναλώνουν μικρότερο ποσό έργου ισχύος και δε χρειάζονται δίοδο ελεύθερης ροής για τα επαγωγικά τους φορτία.
- **Πλήρως ελεγχόμενοι μετατροπείς AC/DC.** Πρόκειται για διάταξη η οποία έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει και ως ανορθωτής αλλά και ως αντιστροφέας έχοντας διαφορετική φορά ισχύος σε κάθε μία από τις δύο αυτές περιπτώσεις. [16]

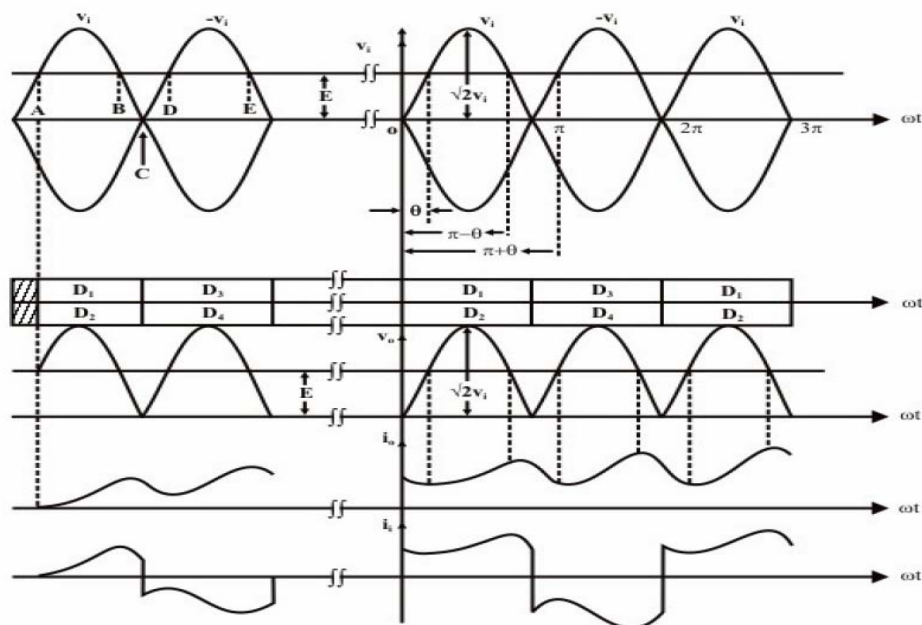
5.2 Μονοφασική μη Ελεγχόμενη Γέφυρα

Η κυκλωματική συνδεσμολογία της μονοφασικής μη ελεγχόμενης γέφυρας παρουσιάζεται στην Εικόνα 21 της επόμενης σελίδας. Κατά τη θετική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου οι δίοδοι D_1 και D_2 είναι ορθά πολωμένες και σχηματίζουν κλειστό κύκλωμα μαζί με το φορτίο, ενώ οι δίοδοι D_3 και D_4 είναι ανάστροφα πολωμένες και δεν άγουν. Αντίστοιχα κατά την αρνητική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου οι δίοδοι D_3 και D_4 είναι ορθά πολωμένες και σχηματίζουν κλειστό κύκλωμα μαζί με το φορτίο, ενώ οι δίοδοι D_1 και D_2 είναι ανάστροφα πολωμένες και δεν άγουν.



Εικόνα 21 - Μη ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα. [17]

Οι αντίστοιχες κυματομορφές παρουσιάζονται στην Εικόνα 22 που ακολουθεί.



Εικόνα 22 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μη ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας. [17]

Αυτή η συνδεσμολογία είναι από τις πιο δημοφιλείς και ευρύτερα χρησιμοποιούμενες σε εφαρμογές που απαιτούν συνεχή (DC) ισχύ εξόδου με τιμή από μερικές εκατοντάδες Watts έως αρκετά kWatts. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας που παρουσιάζουμε είναι συνδεδεμένος με R-L-E φορτίο το οποίο μπορεί να αναπαραστήσει είτε ένα DC κινητήρα είτε μία μπαταρία αποθήκευσης. Ωστόσο η λειτουργία του παρουσιάζει πλήρη αναλογία και στην περίπτωση που συνδέεται με χωρητικό φορτίο. Όταν ο διακόπτης S είναι κλειστός κατά τη θετική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου V_i δεν υπάρχει ροή ρεύματος στο κύκλωμα μέχρι η V_i να πάρει την τιμή E στο σημείο A. Από το σημείο αυτό και πέρα οι διόδους D_1 και D_2 είναι ορθά πολωμένες από την V_i και το ρεύμα i_0 αρχίζει να αυξάνεται μέχρι το σημείο B. Μετά το σημείο B η τιμή της V_i πέφτει κάτω από την τιμή E και το ρεύμα i_0 αρχίζει πάλι να μειώνεται. Ανάλογα με τις τιμές των R, L και E το ρεύμα i_0 μπορεί εμφανίσει τις ακόλουθες διακυμάνσεις:

- Μπορεί να πάρει την τιμή μηδέν πριν η τάση εισόδου μηδενιστεί στο σημείο C.
- Μπορεί να έχει μη μηδενική τιμή και πέρα από το σημείο C και να μηδενιστεί πριν το σημείο D.
- Μπορεί να έχει μη μηδενική τιμή ακόμα και στο σημείο D.

Απλώς πρέπει να τονίσουμε ότι για όσο χρονικό διάστημα το ρεύμα i_0 δεν είναι μηδέν άγουν εναλλάξ τα ζεύγη διόδων D_1, D_2 και D_3, D_4 όπως φαίνεται στην Εικόνα 22. Με βάση αυτή την εικόνα παρατηρούμε ότι σε κάθε χρονική περίοδο για τις τάσεις και τα ρεύματα εισόδου και εξόδου ισχύει: [17]

- Για $0 < \omega t \leq \pi$. $v_0 = v_i = \sqrt{2} V_i \sin\omega t$ και $i_i = i_0$
- Για $\pi < \omega t \leq 2\pi$. $v_0 = -v_i = -\sqrt{2} V_i \sin\omega t$ και $i_i = -i_0$ (4.1)

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_{0AV} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_i \sin\omega t dt = \frac{2}{\pi} V_i \quad (4.2)$$

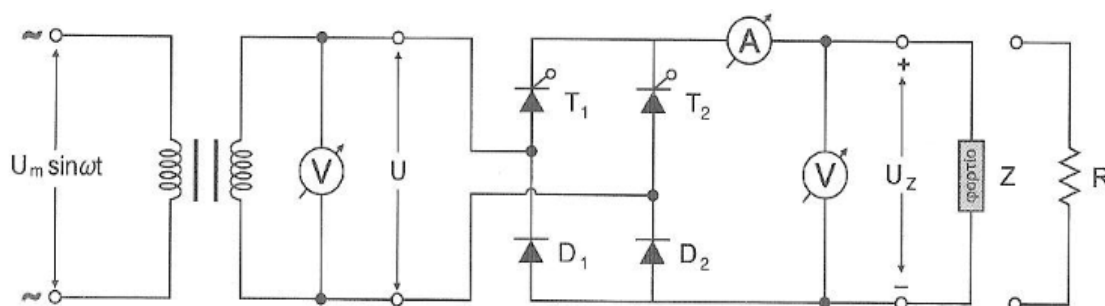
Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_{0RMS} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_i^2 (\sin\omega t)^2 dt = \frac{V_i}{\sqrt{2}} \quad (4.3)$$

όπου V_i είναι το πλάτος της τάσης εισόδου.

5.3 Μονοφασική Ημieleγχόμενη Γέφυρα

Μία ημieleγχόμενη διάταξη αποτελεί έναν ενδιάμεσο τύπο διάταξης, σε σύγκριση με μία πλήρως ελεγχόμενη διάταξη και μία απλή διάταξη με διόδους. Πρόκειται για μία διάταξη που περιλαμβάνει και ελεγχόμενα και μη ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία. Στην Εικόνα 23 παρουσιάζεται η κυκλωματική συνδεσμολογία μίας μονοφασικής συμμετρικής ημieleγχόμενης γέφυρας με ωμικό φορτίο η οποία ονομάζεται έτσι διότι κάθε κλάδος της περιέχει και ένα thyristor.



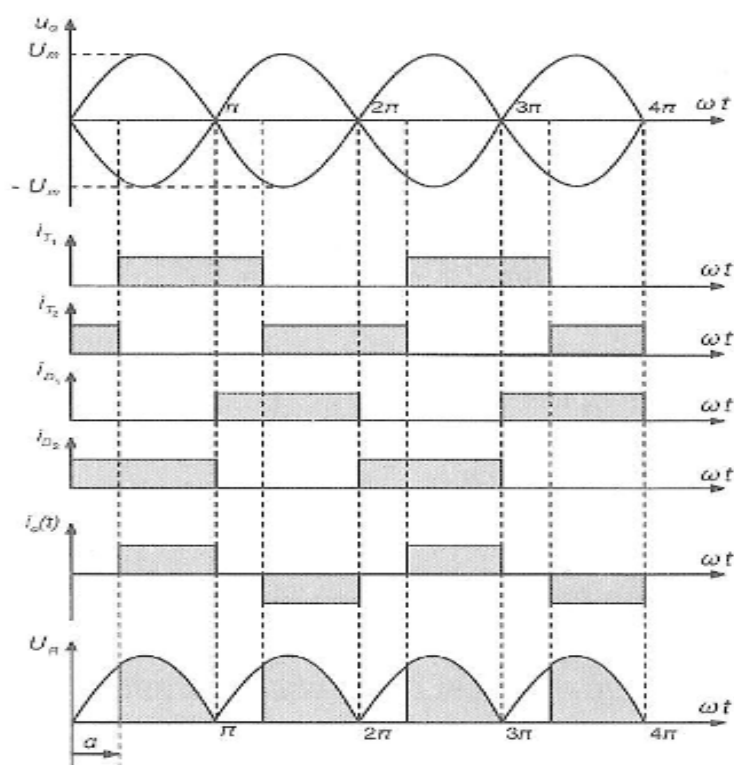
Εικόνα 23 - Μονοφασική συμμετρική ημieleγχόμενη γέφυρα με ωμικό φορτίο. [16]

Πρέπει να τονίσουμε ότι αυτή η ημieleγχόμενη διάταξη θα λειτουργεί μόνο στο πρώτο τεταρτημόριο, δηλαδή ως ανορθωτής και όχι ως αντιστροφέας. Η τάση στα άκρα του φορτίου δεν παίρνει αρνητικές τιμές, διότι ένας καθορισμένος κάθε φορά κλάδος θα το βραχυκυκλώνει με αποτέλεσμα να εκφορτίζεται η μαγνητική ενέργεια της αυτεπαγωγής μέσω του λεγόμενου μονοπατιού ελεύθερης ροής. Κατά την πρώτη ημιπερίοδο του σήματος εισόδου θα άγει ο κλάδος που περιλαμβάνει το thyristor T_1 και τη δίοδο D_1 . Κατά τη δεύτερη ημιπερίοδο του σήματος εισόδου θα άγει ο κλάδος που περιλαμβάνει το thyristor T_2 και τη δίοδο D_2 .

Η παραπάνω διάταξη παρουσιάζει τέσσερα πλεονεκτήματα κατά τη λειτουργία της στο πρώτο τεταρτημόριο σε σύγκριση με μία αντίστοιχη πλήρως ελεγχόμενη διάταξη.

1. Είναι σαφώς φθηνότερη διότι η κυκλωματική της συνδεσμολογία περιλαμβάνει ακριβώς τα μισά thyristor.
2. Καταναλώνει πολύ λιγότερη άεργη ισχύ, δηλαδή εμφανίζει καλύτερη τιμή συνημίτονου.
3. Δεν απαιτεί την ύπαρξη ξεχωριστής διόδου ελεύθερης ροής.
4. Χρησιμοποιεί κυκλώματα έναυσης χαμηλότερης ισχύος.

Οι αντίστοιχες κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων παρουσιάζονται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής ημieleγχόμενης γέφυρας με ωμικό φορτίο. [16]

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{U_{LAV} = \frac{U_m}{\pi} (1 + \epsilon \cos \alpha)} \quad (4.4)$$

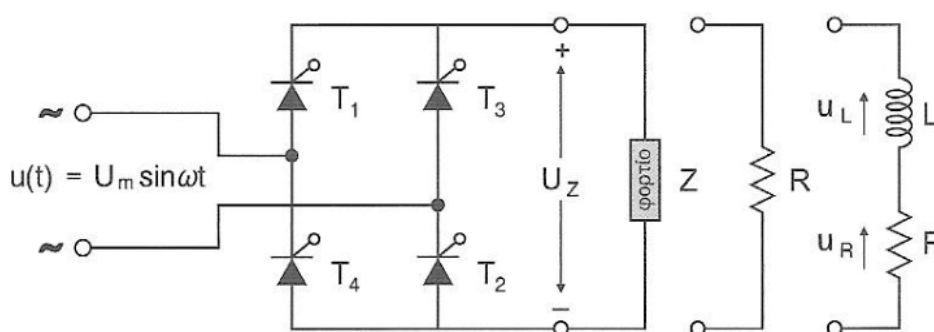
Η ενεργός τιμή της τάσης στο φορτίο δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{U_{Lrms} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right]}} \quad (4.5)$$

όπου U_m το πλάτος της τάσης εισόδου και α η γωνία έναυσης. [16]

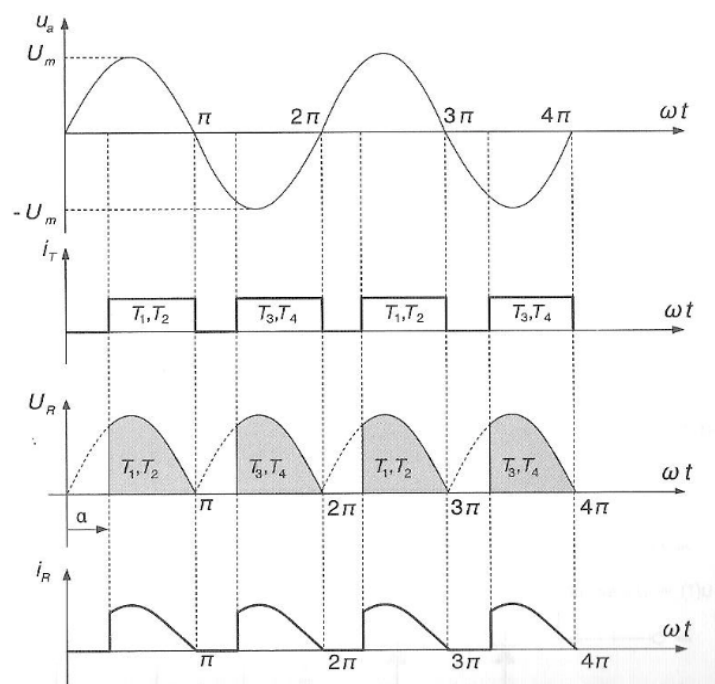
5.4 Μονοφασική Πλήρως Ελεγχόμενη Γέφυρα

Η μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα είναι στην ουσία η πιο πλήρης κυκλωματική συνδεσμολογία για την πραγματοποίηση μονοφασικής ανόρθωσης. Η χρήση μετασχηματιστή στην είσοδο του κυκλώματος προτείνεται για λόγους ασφαλείας. Η διάταξη λειτουργεί σε δύο τεταρτημύρια, δηλαδή ως ανορθωτής και ως αντιστροφέας. Η κυκλωματική συνδεσμολογία παρουσιάζεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25 - Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα. [16]

Η παραπάνω συνδεσμολογία αποτελείται από τέσσερα thyristor, δύο σε κάθε ημιγέφυρα. Τα thyristor άγουν ανά ζεύγη, δηλαδή στην πρώτη ημιπερίοδο του σήματος εισόδου θα άγουν τα T_1 , T_2 και στη δεύτερη τα T_3 , T_4 . Οι παλμοί έναυσης των thyristor που είναι συνδεδεμένα στην ίδια ημιγέφυρα παρουσιάζουν διαφορά φάσης 180° . Οι κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για την περίπτωση ωμικού φορτίου παρουσιάζονται στην Εικόνα 26.



Εικόνα 26 - Κομματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας με ωμικό φορτίο. [16]

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου σε περίπτωση που έχουμε ωμικό φορτίο δίνεται από τη σχέση:

$$U_{LAV} = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos\alpha) \quad (4.6)$$

Η ενεργός τιμή της τάσης στο ωμικό φορτίο δίνεται από τη σχέση:

$$U_{Lrms} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right]} \quad (4.7)$$

όπου U_m το πλάτος της τάσης εισόδου και α η γωνία έναυσης. [16]

Σε περίπτωση που στα άκρα της διάταξης συνδεθεί και ωμικό και επαγωγικό φορτίο τότε σε περίπτωση που η διάταξη λειτουργεί ως ανορθωτής καλό θα είναι να υπάρχει και μία δίοδος ελεύθερης ροής παράλληλα συνδεδεμένη με το φορτίο. Η αυτεπαγωγή του φορτίου είναι τέτοιας τιμής ώστε να καθίσταται εφικτή η συνεχής αγωγή, γι αυτό η τάση στα άκρα του φορτίου μπορεί να παίρνει και αρνητικές τιμές.

Στην πρώτη ημιπερίοδο του σήματος εισόδου οι τάσεις του δικτύου, της αντίστασης και της αυτεπαγωγής θα έχουν θετική τιμή, οπότε το κύκλωμα θα διοχετεύει ενέργεια τόσο στην αντίσταση όσο και στο πηνίο. Η μαγνητική ενέργεια λόγω αυτεπαγωγής ούτε καταναλώνεται ούτε χάνεται, με αποτέλεσμα το διάστημα αγωγής να

επιμηκύνεται και πέρα από τις 180^0 (σημείο ανάστροφης πόλωσης των thyristor), έως ότου το πηνίο εκφορτιστεί πλήρως. Κατά τη δεύτερη ημιπερίοδο του σήματος εισόδου οι τάσεις του δικτύου και της αυτεπαγωγής θα έχουν αρνητική τιμή, οπότε η αυτεπαγωγή θα προσφέρει ενέργεια τόσο στο δίκτυο όσο και στην αντίσταση. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι η τιμή της αυτεπαγωγής μπορεί να εξασφαλίζει συνεχή αγωγή μπορεί όμως και να μην εξασφαλίζει.

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου σε περίπτωση που έχουμε και ωμικό και επαγωγικό φορτίο για συνεχή αγωγή, δίνεται από τη σχέση:

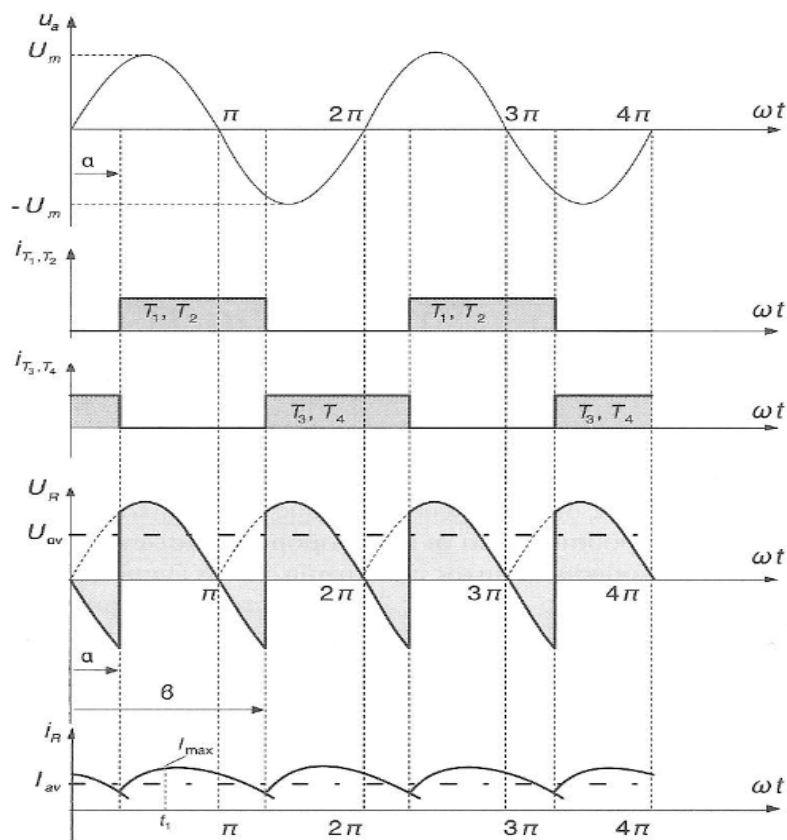
$$U_{LAV} = \frac{2 U_m}{\pi} \cos \alpha \quad (4.8)$$

Η ενεργός τιμή της τάσης στο ωμικό και επαγωγικό φορτίο για συνεχή αγωγή δίνεται από τη σχέση:

$$U_{Lrms} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (4.9)$$

όπου U_m το πλάτος της τάσης εισόδου και α η γωνία έναυσης. [16]

Οι κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για την περίπτωση ωμικού - επαγωγικού φορτίου για συνεχή αγωγή παρουσιάζονται στην Εικόνα 27 της επόμενης σελίδας.



Εικόνα 27 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας με ωμικό - επαγωγικό φορτίο και συνεχή αγωγή. [16]

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου σε περίπτωση που έχουμε και ωμικό και επαγωγικό φορτίο για ασυνεχή αγωγή, δίνεται από τη σχέση της επόμενης σελίδας:

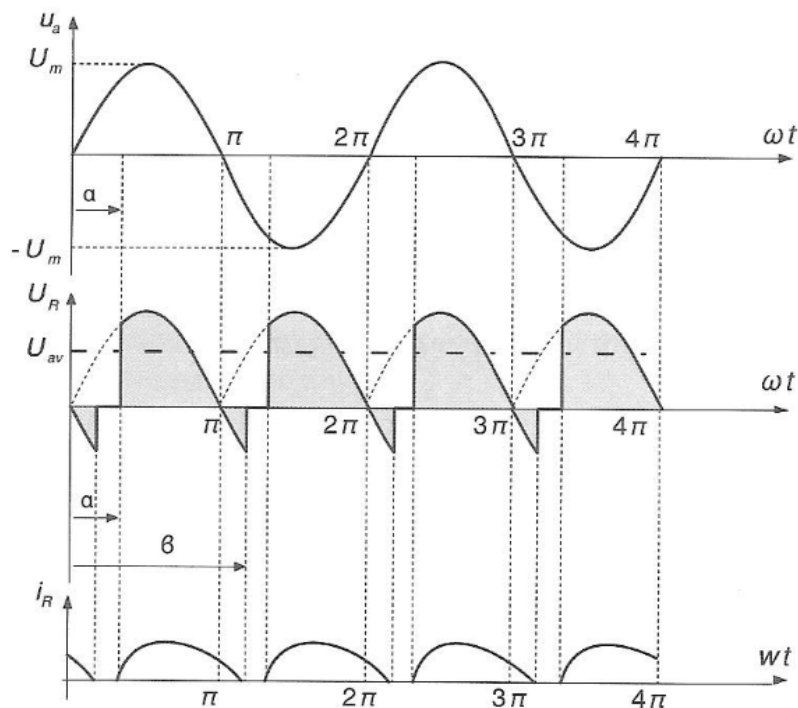
$$U_{LAV} = \frac{U_m}{\pi} (\cos \alpha - \cos \beta) \quad (4.10)$$

Η ενεργός τιμή της τάσης στο ωμικό και επαγωγικό φορτίο για ασυνεχή αγωγή δίνεται από τη σχέση:

$$U_{Lrms} = U_m / \sqrt{2} \sqrt{(1/\pi) [(\beta - \alpha) - 1/2 (\sin 2\beta - \sin 2\alpha)]} \quad (4.11)$$

όπου U_m το πλάτος της τάσης εισόδου, α η γωνία έναυσης και β τυχαία γωνία στην οποία το ρεύμα μηδενίζεται. [16]

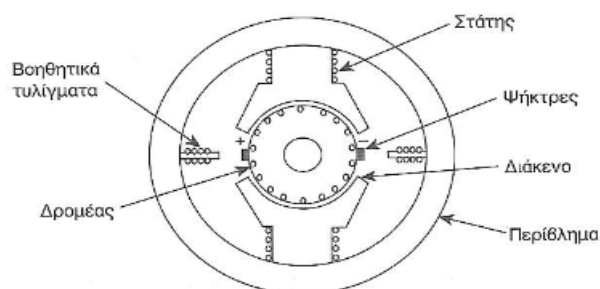
Οι κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για την περίπτωση ωμικού - επαγωγικού φορτίου για ασυνεχή αγωγή παρουσιάζονται στην Εικόνα 28 της επόμενης σελίδας.



Εικόνα 28 - Κοματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας με ωμικό - επαγωγικό φορτίο και ασυνεχή αγωγή. [16]

5.5 Κινητήρες Συνεχούς (DC) Ρεύματος

Ένας κινητήρας συνεχούς (DC) ρεύματος αποτελείται από ένα σταθερό (ακίνητο) μέρος το οποίο ονομάζεται στάτης και από ένα κινούμενο μέρος το οποίο ονομάζεται δρομέας. Η δομή ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 29.



Εικόνα 29 - Δομή κινητήρα συνεχούς ρεύματος. [19]

Ο στάτης αποτελείται από τα εξής επιμέρους στοιχεία:

- **Ζύγωμα.** Είναι το κύριο μέρος του κινητήρα και συνδέει μηχανικά τους μαγνητικούς πόλους. Έχει σχήμα κυλίνδρου και είναι στην ουσία η

βάση στήριξης του κινητήρα. Το υλικό κατασκευής του είναι ο χυτοχάλυβας ή ο ελατός σίδηρος.

- **Μαγνητικοί πόλοι.** Πρόκειται για το μέσο διέγερσης της μηχανής αφού προσφέρουν μαγνητική ροή στο διάκενο. Κάθε πόλος διαθέτει τον πυρήνα και το τύλιγμα του, με μονωτικό υλικό να παρεμβάλλεται μεταξύ τους. Ο πυρήνας αποτελείται από μονωμένα σιδερένια ελάσματα και τα τυλίγματα από χάλκινες συρμάτινες μονωμένες σπείρες τυλιγμένες με βαμβάκι.
- **Βοηθητικοί πόλοι.** Βρίσκονται ανάμεσα στους κύριους πόλους και αποτρέπουν την έξπανση σπινθήρα στην περιοχή του συλλέκτη. Κατασκευάζονται όπως οι κύριοι πόλοι αλλά έχουν μικρότερο μέγεθος.
- **Ψηκτροφορέας και ψήκτρες.** Ο ψηκτροφορέας αποτελείται από ένα σιδερένιο δακτύλιο, τους βραχίονες και τις ψηκτροθήκες. Οι ψήκτρες κατασκευάζονται από σκληρό άνθρακα ή από γραφίτη ή με ανάμιξη άνθρακα και χαλκού. Τόσο ο ψηκτροφορέας όσο και οι ψήκτρες χρησιμεύουν για την προσαγωγή και απαγωγή του ρεύματος των τυλιγμάτων του δρομέα.
- **Καλύμματα.** Στερεώνονται με βίδες στο ζύγωμα και χρησιμοποιούνται για τη στήριξη του άξονα του δρομέα και του ψηκτροφορέα αλλά και για να προφυλάξουν το εσωτερικό της μηχανής.

Ο δρομέας αποτελείται από τα εξής επιμέρους στοιχεία:

- **Άξονας.** Στον άξονα στερεώνονται το επαγωγικό τύμπανο (πυρήνας και τύλιγμα), ο συλλέκτης και ο ανεμιστήρας.
- **Επαγωγικό τύμπανο.** Αποτελείται από τον πυρήνα και το τύλιγμα. Ο πυρήνας προσφέρει ένα διάυλο με μικρή μαγνητική αντίσταση για τη διέλευση των μαγνητικών γραμμών του πεδίου και φέρει το τύλιγμα του τυμπάνου. Είναι κατασκευασμένος από πλήθος μαγνητικών ελασμάτων. Το τύλιγμα κατασκευάζεται από μονωμένο χάλκινο αγωγό με διατομή κυκλικού ή ορθογώνιου σχήματος.
- **Συλλέκτης.** Κατασκευάζεται από πλήθος χάλκινων ελασμάτων τα οποία ονομάζονται τομείς συλλέκτη και στερεώνονται ανάμεσα σε δύο χαλύβδινα κοίλα κυλινδρικά τμήματα με παρεμβολή μονωτικού υλικού.

- **Ανεμιστήρας.** Τοποθετείται στον άξονα ώστε να δημιουργεί ρεύμα αέρα κατά την περιστροφή του. Αυτό το ρεύμα αέρα παρέχει την απαραίτητη ψύξη στον κινητήρα αφού εισέρχεται από το ένα κάλυμμα και εξέρχεται από το άλλο. [18], [19]

Ένας κινητήρας συνεχούς (DC) ρεύματος μπορεί να διεγερθεί με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους:

1. Με ξένη διέγερση η οποία προέρχεται από ξεχωριστή πηγή.
2. Με παράλληλη διέγερση η οποία προέρχεται από την πηγή τροφοδοσίας του επαγωγικού τυμπάνου.
3. Με διέγερση σειράς η οποία πραγματοποιείται με τη σε σειρά σύνδεση του τυλίγματος διέγερσης με το επαγωγικό τύμπανο.
4. Με σύνθετη διέγερση η οποία αποτελεί συνδυασμό παράλληλης και σε σειρά διέγερσης.

Η ηλεκτρική ισχύς που απορροφάει ένας κινητήρας συνεχούς (DC) ρεύματος είναι ανάλογη με το μηχανικό φορτίο του κινητήρα. Ο αριθμός των στροφών ενός κινητήρα συνεχούς (DC) ρεύματος, σε συνάρτηση με ορισμένα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του, δίνεται από τη σχέση:

$$n = \frac{V - I_a R_a}{k \Phi}$$

(4.12)

όπου V είναι η τάση τροφοδοσίας, I_a το ρεύμα του τυμπάνου του κινητήρα, R_a η αντίσταση του τυλίγματος του τυμπάνου, k μία σταθερά με τιμή εξαρτώμενη από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κινητήρα και Φ η μαγνητική ροή ανά πόλο.

Με βάση την παραπάνω σχέση παρατηρούμε ότι:

1. Για τάση τροφοδοσίας σταθερής τιμής, εφόσον μειώσουμε την ένταση της διέγερσης θα έχουμε μείωση της μαγνητικής ροής Φ με ταυτόχρονη αύξηση της ταχύτητας του κινητήρα. Βέβαια η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα δεν πρέπει να αυξηθεί ανεξέλεγκτα διότι ελλοχεύει ο κίνδυνος να καταστραφεί.
2. Για ένταση διέγερσης σταθερής τιμής, ο αριθμός των στροφών του κινητήρα θα είναι ανάλογος της τάσης τροφοδοσίας. Βέβαια η τάση

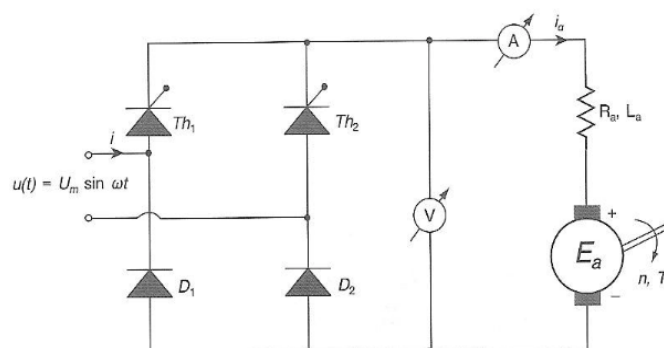
τροφοδοσίας δεν πρέπει να αυξηθεί ανεξέλεγκτα διότι υπάρχει κίνδυνος καταστροφής της μόνωσης των αγωγών.

3. Για ένταση διέγερσης και τάση τροφοδοσίας σταθερής τιμής, ο αριθμός των στροφών του κινητήρα θα είναι ανάλογος της έντασης του ρεύματος του τυμπάνου.

Από τα παραπάνω αντιλαμβανόμαστε ότι ο αριθμός των στροφών του κινητήρα ελαττώνεται πρακτικά όταν ελαττώνεται και η τάση τροφοδοσίας, ενώ αυξάνεται όταν μειώνεται το ρεύμα διέγερσης. [18]

5.6 Έλεγχος Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με Μονοφασική Ημιελεγχόμενη Γέφυρα

Μία ημιελεγχόμενη διάταξη λειτουργεί ως γνωστόν στο πρώτο τεταρτημόριο, δηλαδή ως ανορθωτής. Το κύκλωμα της μονοφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας που θα χρησιμοποιήσουμε παρουσιάζεται στην Εικόνα 30 που ακολουθεί. Η συγκεκριμένη συνδεσμολογία καλείται και συνδεσμολογία συμμετρικών κλάδων.



Εικόνα 30 - Μονοφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα. [19]

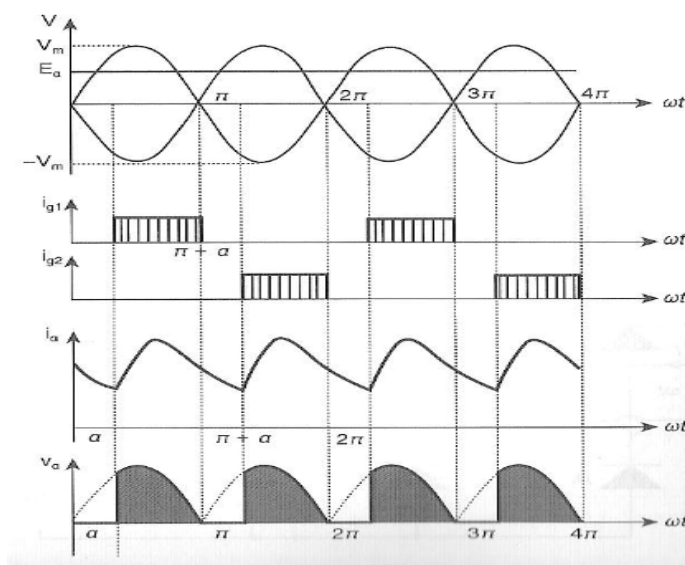
Αν η αυτεπαγωγή L_a του τυλίγματος του τυμπάνου του κινητήρα έχει αρκούντως μεγάλη τιμή τότε θα είναι εφικτή η συνεχής αγωγή σε όλο το φάσμα της λειτουργίας του μετατροπέα. Τότε η τροφοδοσία των thyristor με παλμούς θα γίνεται με συμμετρικό τρόπο, οπότε αν η έναυση του Th_1 πραγματοποιείται με γωνία α τότε η έναυση του Th_2 θα πραγματοποιείται με γωνία $\pi + \alpha$.

- Για $\alpha < \omega t < \pi$. Τότε ο κινητήρας θα τροφοδοτείται από το δίκτυο μέσω του thyristor Th_1 και της διόδου D_2 και στην ουσία λαμβάνει από

το δίκτυο ηλεκτρική ενέργεια. Ένας μέρος αυτής αποθηκεύεται ως μαγνητική στην αυτεπαγωγή και ως κινητική στις στρεφόμενες μάζες. Το υπόλοιπο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται με τη μορφή μηχανικής ενέργειας στο φορτίο. Σε αυτό το διάστημα η λειτουργία του κυκλώματος θα μοιάζει με την αντίστοιχη λειτουργία μίας πλήρως ελεγχόμενης διάταξης.

- **Για $\omega t > \pi$.** Τότε η τάση του δικτύου γίνεται αρνητική οπότε η τάση του τυλίγματος του τυμπάνου του κινητήρα τείνει να αναστραφεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να πολωθεί ορθά η δίοδος ελεύθερης ροής και τελικά να βραχυκυκλωθεί το τύλιγμα του τυμπάνου. Σε αυτή την περίπτωση ένα μέρος της μαγνητικής ενέργειας της αυτεπαγωγής καταναλώνεται με τη μορφή μηχανικής ενέργειας, ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση του τυμπάνου.

Οι κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων της μονοφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας για την περίπτωση συνεχούς αγωγής παρουσιάζονται στην Εικόνα 31 που ακολουθεί.



Εικόνα 31 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας σε συνεχή αγωγή. [19]

Για συνεχή αγωγή η μέση τιμή της τάσης του τυλίγματος του τυμπάνου θα είναι:

$$V_a = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (4.13)$$

Για συνεχή αγωγή η μέση τιμή του ρεύματος του τυλίγματος του τυμπάνου θα είναι:

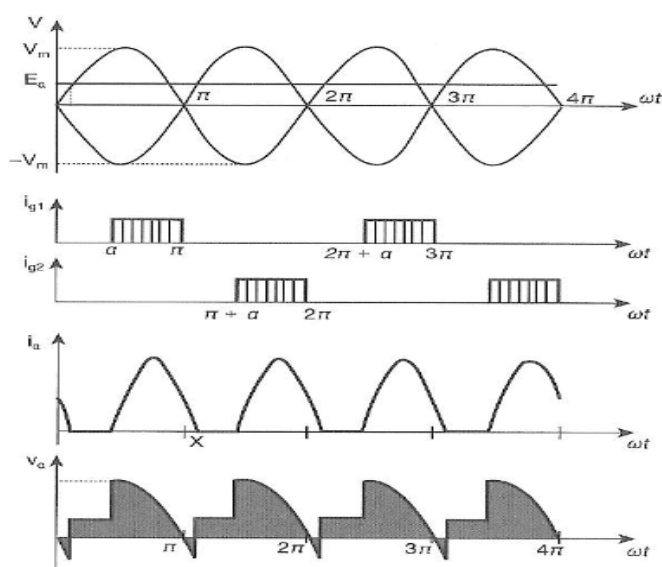
$$V_a = \frac{V_m}{\pi R_a} (1 + \cos a) + \frac{E_a}{R_a} \quad (4.14)$$

όπου V_m η μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης φασικής τάσης του δικτύου, E_a η μέση τιμή της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης, R_a η αντίσταση του τυλίγματος του τυμπάνου και a η γωνία έναυσης.

Αν η αυτεπαγωγή L_a του τυλίγματος του τυμπάνου του κινητήρα δεν έχει αρκετά μεγάλη τιμή, τότε το ρεύμα που διαρρέει το τύμπανο θα μηδενίζεται μέσω της διόδου ελεύθερης ροής εντός του διαστήματος $\pi < \omega t < \pi + a$. Καλό είναι βέβαια να αποφεύγεται ο μηδενισμός της τιμής του ρεύματος διότι συνήθως συνοδεύεται με μείωση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος, αύξηση της κυμάτωσης και δημιουργία παρασιτικών ροπών. Οπότε στην περίπτωση ασυνεχούς αγωγής θα έχουμε:

- **Για $a < \omega t < \pi$.** Ο κινητήρας θα επικοινωνεί με το υπόλοιπο δίκτυο μέσω του thyristor Th_1 και της διόδου D_2 . Το ρεύμα θα μεταβάλλεται παρόμοια με την αντίστοιχη λειτουργία του κυκλώματος για συνεχή αγωγή.

Οι κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων της μονοφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας για την περίπτωση ασυνεχούς αγωγής παρουσιάζονται στην Εικόνα 32 που ακολουθεί.



Εικόνα 32 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής ημieleγχόμενης γέφυρας σε ασυνεχή αγωγή. [19]

Για ασυνεχή αγωγή η μέση τιμή της τάσης του τυλίγματος του τυμπάνου θα είναι:

$$V_a = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) + E_a \left(\frac{\pi + \alpha - X}{\pi} \right) \quad (4.15)$$

Για ασυνεχή αγωγή η μέση τιμή του ρεύματος του τυλίγματος του τυμπάνου θα είναι:

$$I_a = \frac{V_m}{\pi R_a} (1 + \cos \alpha) + \frac{E_a}{R_a} \left(\frac{\pi + \alpha - X}{\pi} \right) \quad (4.16)$$

όπου V_m η μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης φασικής τάσης του δικτύου, E_a η μέση τιμή της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης, R_a η αντίσταση του τυλίγματος του τυμπάνου, α η γωνία έναυσης και X η γωνία μηδενισμού του ρεύματος του τυμπάνου.

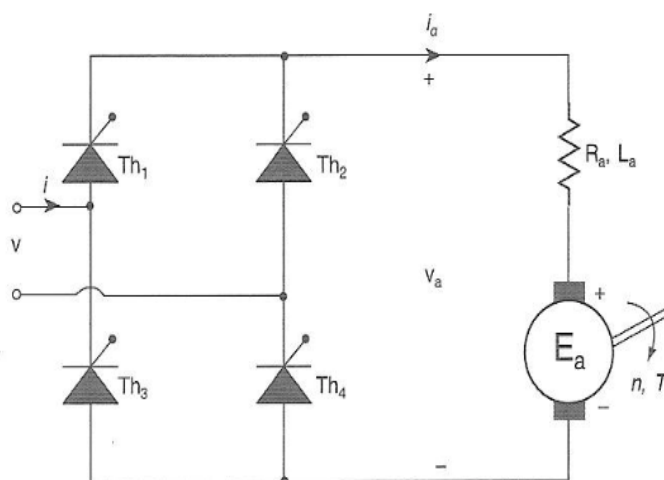
Ο συντελεστής ισχύος του κυκλώματος θα δίνεται από τη σχέση.

$$P.F. = \frac{2 \sqrt{2}}{\pi (\pi - \alpha)} \left(\cos \left[\left(\frac{\alpha}{2} \right) \right] \right)^2 \quad (4.17)$$

όπου α η γωνία έναυσης.

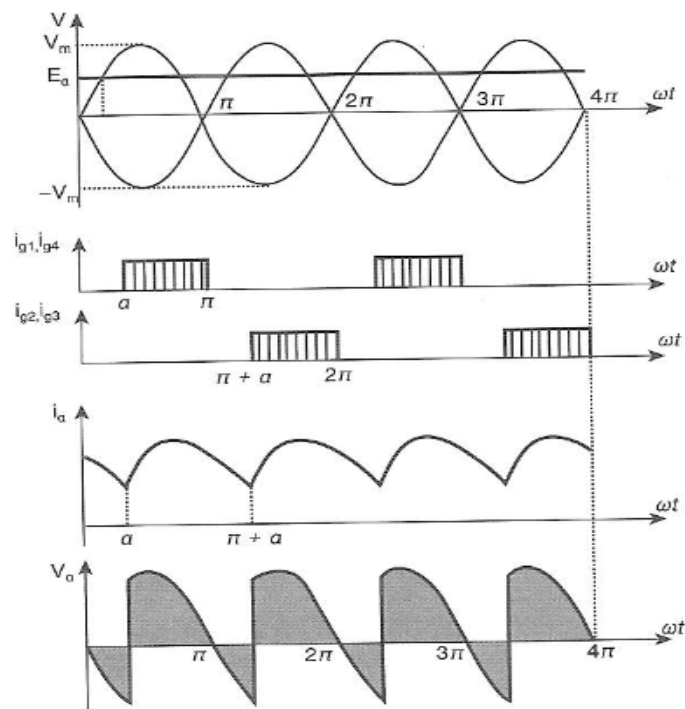
5.7 Έλεγχος Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με Μονοφασική Πλήρως Ελεγχόμενη Γέφυρα

Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος ελεγχόμενος από πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει σε δύο τεταρτημόρια, δηλαδή και ως ανορθωτής αλλά και ως αντιστροφέας. Η κυκλωματική συνδεσμολογία της πλήρως ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας παρουσιάζεται στην Εικόνα 33 που ακολουθεί.



Εικόνα 33 - Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα. [19]

Κατά τη λειτουργία του κυκλώματος ως ανορθωτή, δηλαδή για $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ η τάση του τυμπάνου του κινητήρα V_a θα παρουσιάζει κυμάτωση διπλάσια της αντίστοιχης κυμάτωσης του ρεύματος του τυμπάνου του κινητήρα i_a . Οι αντίστοιχες κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων της μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας για $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ παρουσιάζονται στην Εικόνα 34 που ακολουθεί.



Εικόνα 34 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας για $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$. [19]

Η μέση τιμή της τάσης του τυλίγματος του τυμπάνου για $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ θα είναι:

$$V_\alpha = \frac{2 V_m}{\pi} \cos \alpha \quad (4.18)$$

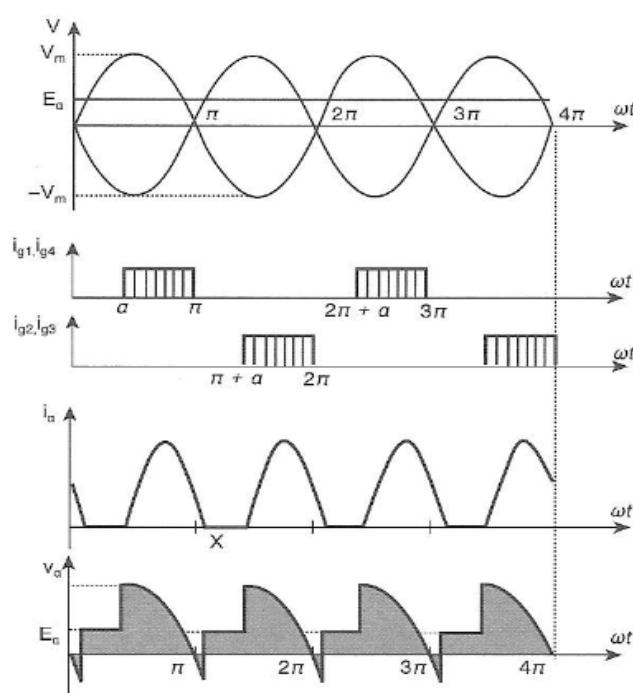
Η μέση τιμή του ρεύματος του τυλίγματος του τυμπάνου για $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ θα είναι:

$$I_\alpha = \frac{2 V_m}{\pi R_\alpha} + \frac{E_a}{R_\alpha} \quad (4.19)$$

όπου V_m η μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης φασικής τάσης του δικτύου, E_a η μέση τιμή της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης, R_α η αντίσταση του τυλίγματος του τυμπάνου και α η γωνία έναυσης.

Κατά τη λειτουργία του κυκλώματος ως αντιστροφέα, δηλαδή για $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ η τάση του τυμπάνου του κινητήρα V_a γίνεται αρνητική και ταυτόχρονα αντιστρέφεται η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη. Αν το μηχανικό φορτίο στον άξονα του κινητήρα είναι παθητικό έχουμε λειτουργία πέδης, ενώ αν είναι αρνητικό έχουμε λειτουργία γεννήτριας.

Αν η γωνία έναυσης ξεπεράσει τις 90° και δεν αντιστραφεί η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη τότε το ρεύμα του τυλίγματος του τυμπάνου μηδενίζεται και ο κινητήρας αποσπάται από το δίκτυο. Οι αντίστοιχες κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων της μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας για $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ παρουσιάζονται στην Εικόνα 35 που ακολουθεί.



Εικόνα 35 - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας για $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$. [19]

Η μέση τιμή της τάσης του τυλίγματος του τυμπάνου για $90^0 \leq \alpha \leq 180^0$ θα είναι:

$$V_a = \frac{V_m}{\pi} (\cos \alpha - \cos X) + \frac{E_a}{\pi} (\pi + \alpha - X) \quad (4.20)$$

Η μέση τιμή της έντασης του τυλίγματος του τυμπάνου για $90^0 \leq \alpha \leq 180^0$ θα είναι:

$$V_a = \frac{V_m}{\pi R_a} (\cos \alpha - \cos X) + \frac{E_a}{\pi R_a} (\pi + \alpha - X) \quad (4.21)$$

όπου V_m η μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης φασικής τάσης του δικτύου, E_a η μέση τιμή της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης, R_a η αντίσταση του τυλίγματος του τυμπάνου, α η γωνία έναυσης και X η γωνία μηδενισμού του ρεύματος του τυμπάνου.

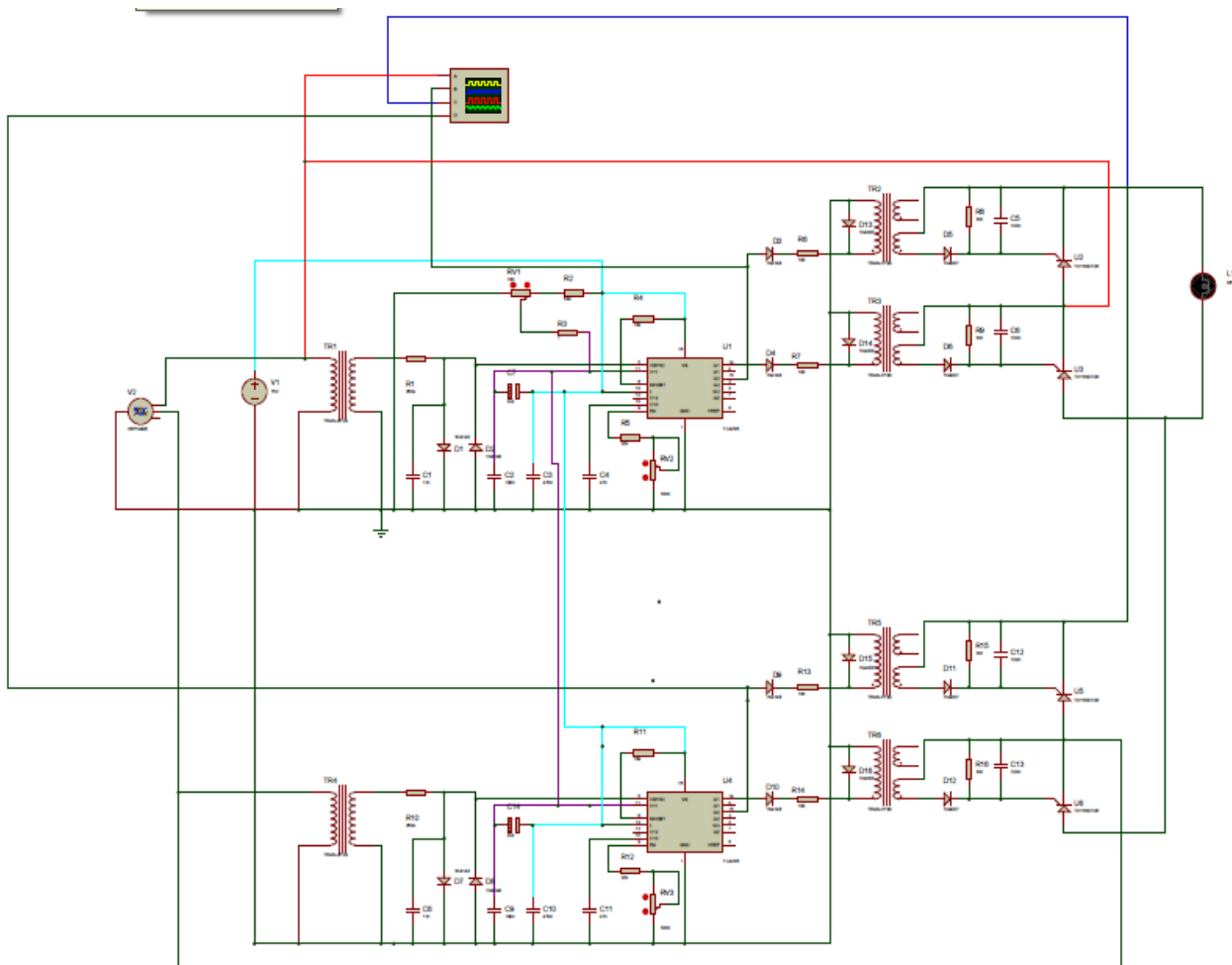
[19]

6^ο - ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΈΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ”

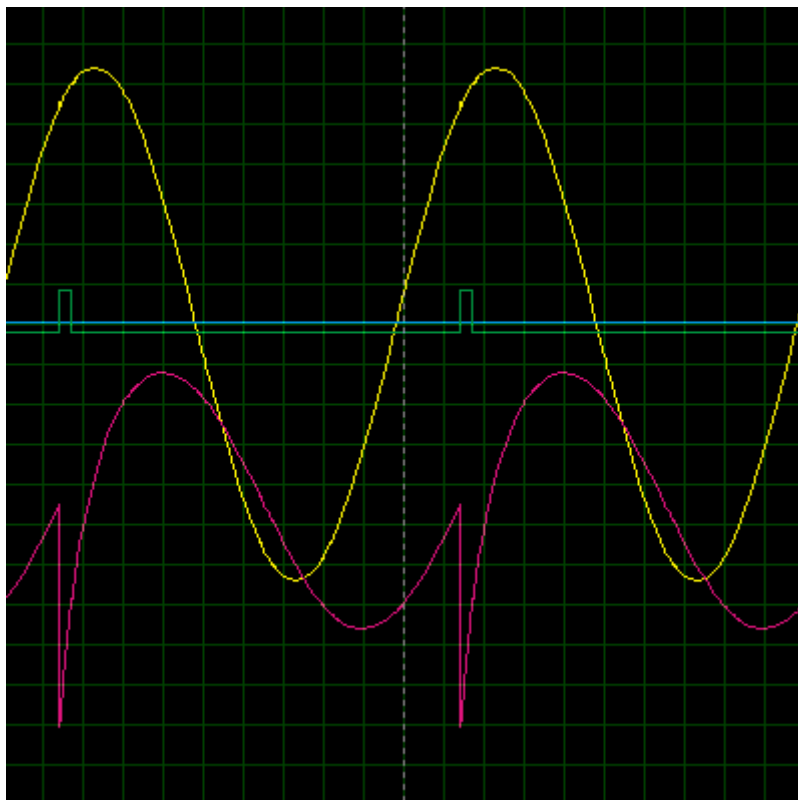
6.1 Απόπειρα Πρακτικής Υλοποίησης Μονοφασικής Πλήρως Ελεγχόμενης Γέφυρας Ισχύος

Στο σημείο αυτό θα πραγματοποιηθεί η πρακτική υλοποίηση μίας μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας ισχύος. Προς την κατεύθυνση αυτή, πραγματοποιείται αρχικά η προσομοίωση της λειτουργίας του αντίστοιχου κυκλώματος. Η κυκλωματική συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 36 – Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα ισχύος.

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της λειτουργίας του παραπάνω κυκλώματος παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 37 – Προσομοίωση της λειτουργίας της μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας ισχύος της εικόνας 36.

Το κύκλωμα τροφοδοτήθηκε από ένα σήμα τάσης με πλάτος 220 Volts και συχνότητα 50 Hz. Το σήμα εισόδου αντιστοιχεί στην κυματομορφή που παρουσιάζεται με κίτρινο χρώμα στην παραπάνω εικόνα και στην ουσία είναι το εναλλασσόμενο ρεύμα που προέρχεται από την τριφασική πηγή στην είσοδο του κυκλώματος. Αφού το σήμα διέλθει από το ολοκληρωμένο κύκλωμα ρύθμισης φάσης (phase regulation) λαμβάνεται η κυματομορφή που παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα στην παραπάνω εικόνα. Η κυματομορφή αυτή είναι ένας τετραγωνικός παλμός, δηλαδή ο αναμενόμενος τύπος κυματομορφής. Δυστυχώς όμως, η περίοδος που παρουσιάζει δεν είναι η αναμενόμενη. Το σήμα εξόδου του κυκλώματος το οποίο λαμβάνεται στο λαμπτήρα (φορτίο) αντιστοιχεί στην κυματομορφή που παρουσιάζεται με ροζ χρώμα στην παραπάνω εικόνα. Η κυματομορφή αυτή είναι διαφορετική από την αναμενόμενη. Έτσι έγινε αντιληπτό ότι το κύκλωμα δε λειτουργεί σωστά.

Για την επίλυση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε αρχικά έλεγχος για την ορθή λειτουργία των μετασχηματιστών, οι οποίοι φάνηκε να παρουσιάζουν διάφορα προβλήματα. Ο έλεγχος εστιάστηκε στους μετασχηματιστές διότι παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο για τη συνολική λειτουργία του κυκλώματος, αφού πρέπει να συντονίζονται κατάλληλα προκειμένου να ληφθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Έτσι υπολογίστηκε το πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα με βάση την τάση. Δυστυχώς όμως και πάλι οι μετασχηματιστές δε φάνηκε να δουλεύουν σωστά.

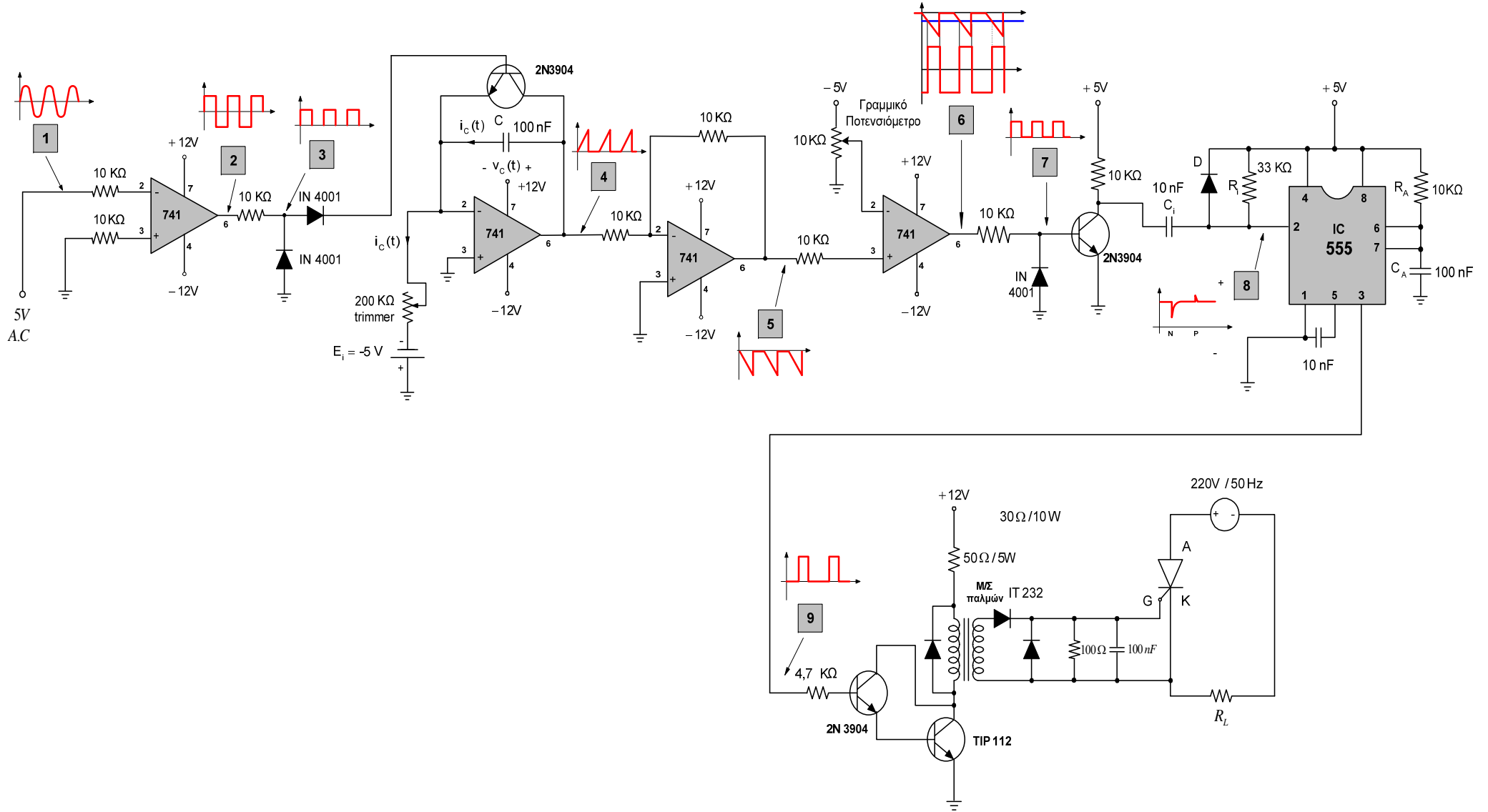
Στη συνέχεια, η έρευνα συνεχίστηκε εξετάζοντας και διάφορα άλλα στοιχεία του κυκλώματος όπως είναι οι αντιστάσεις και οι πυκνωτές. Έτσι πραγματοποιήθηκαν διάφορες μετατροπές στις τιμές τους, χωρίς όμως να υπάρξει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Μετά από πλειάδα δοκιμών και μετατροπών με επίκεντρο τα τυλίγματα των μετασχηματιστών και τις τιμές των αντιστάσεων και των πυκνωτών, έγινε αντιληπτό ότι οι καλύτερες κυματομορφές που μπόρεσαν να παραχθούν για το συγκεκριμένο κύκλωμα, ήταν αυτές που απεικονίζονται στην εικόνα 37. Συνεπώς δεν είναι δυνατό να πιστοποιηθεί η λειτουργία του συγκεκριμένου κυκλώματος (εικόνα 36) ως μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα ισχύος. Το κύκλωμα αυτό λειτουργεί ως ανορθωτής. Το πρόβλημα εστιάζεται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα ρύθμισης φάσης (phase regulator) το οποίο δεν παρουσιάζει την επιθυμητή απόκριση, με αποτέλεσμα να απαιτείται διπλάσια συχνότητα λειτουργίας (100 Hz) ώστε να ληφθεί αυτή η επιθυμητή απόκριση. Ένας επιπλέον λόγος της απόκλισης που παρατηρείται είναι και η έλλειψη συντονισμού μεταξύ των μετασχηματιστών.

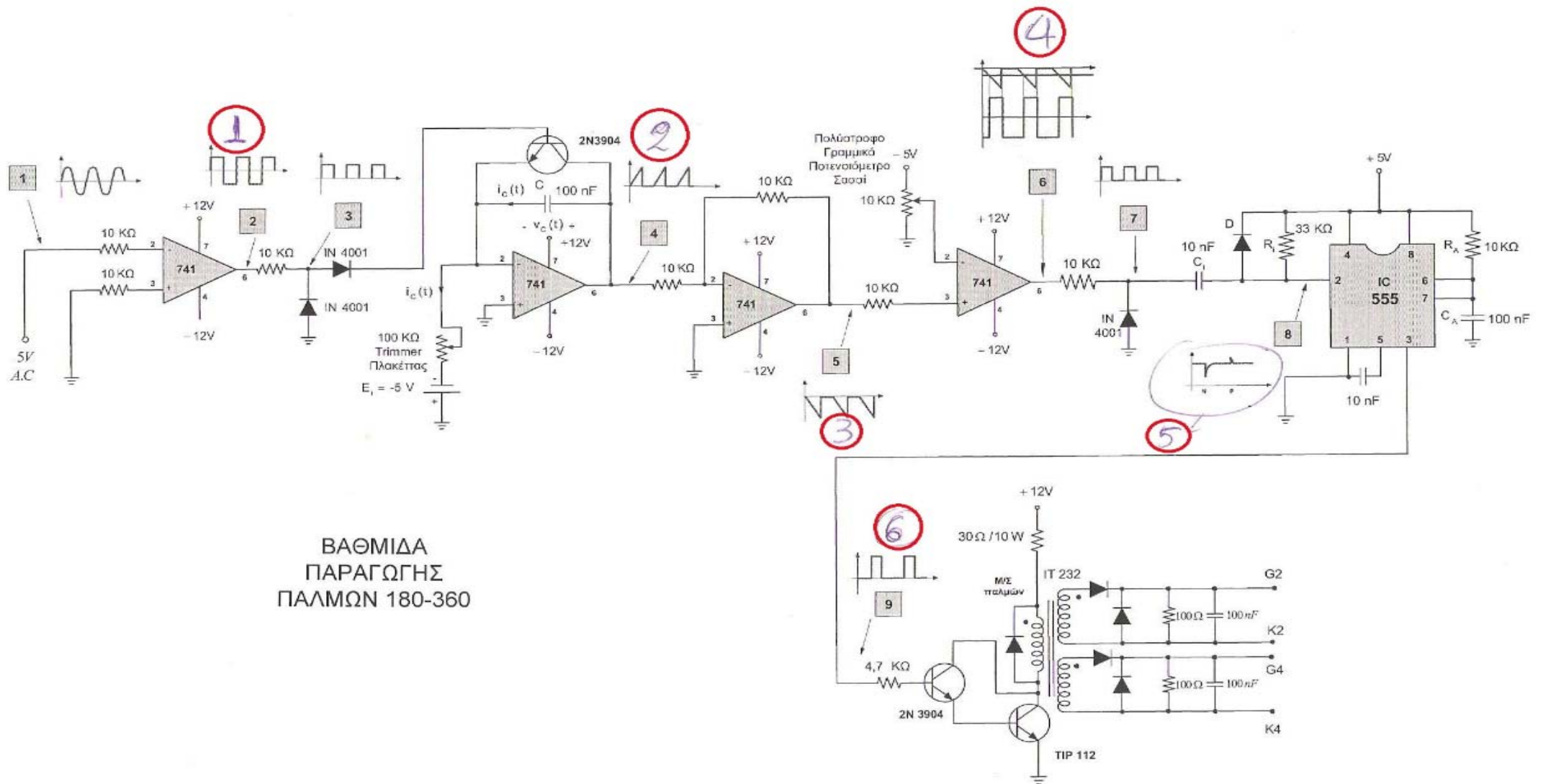
Από τη στιγμή που πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του κυκλώματος της εικόνας 36 και διαπιστώθηκε ότι δε λειτουργεί σωστά, αποφασίστηκε να μην πραγματοποιηθεί η πρακτική υλοποίηση του.

6.2 Πρακτική Υλοποίηση Κυκλώματος Έναυσης AC-DC

Αντί για τη μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα ισχύος, υλοποιήθηκε ένα κύκλωμα έναυσης AC-DC. Στις δύο εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται η βαθμίδα παραγωγής παλμών (0-180) και η βαθμίδα παραγωγής παλμών (180-360).



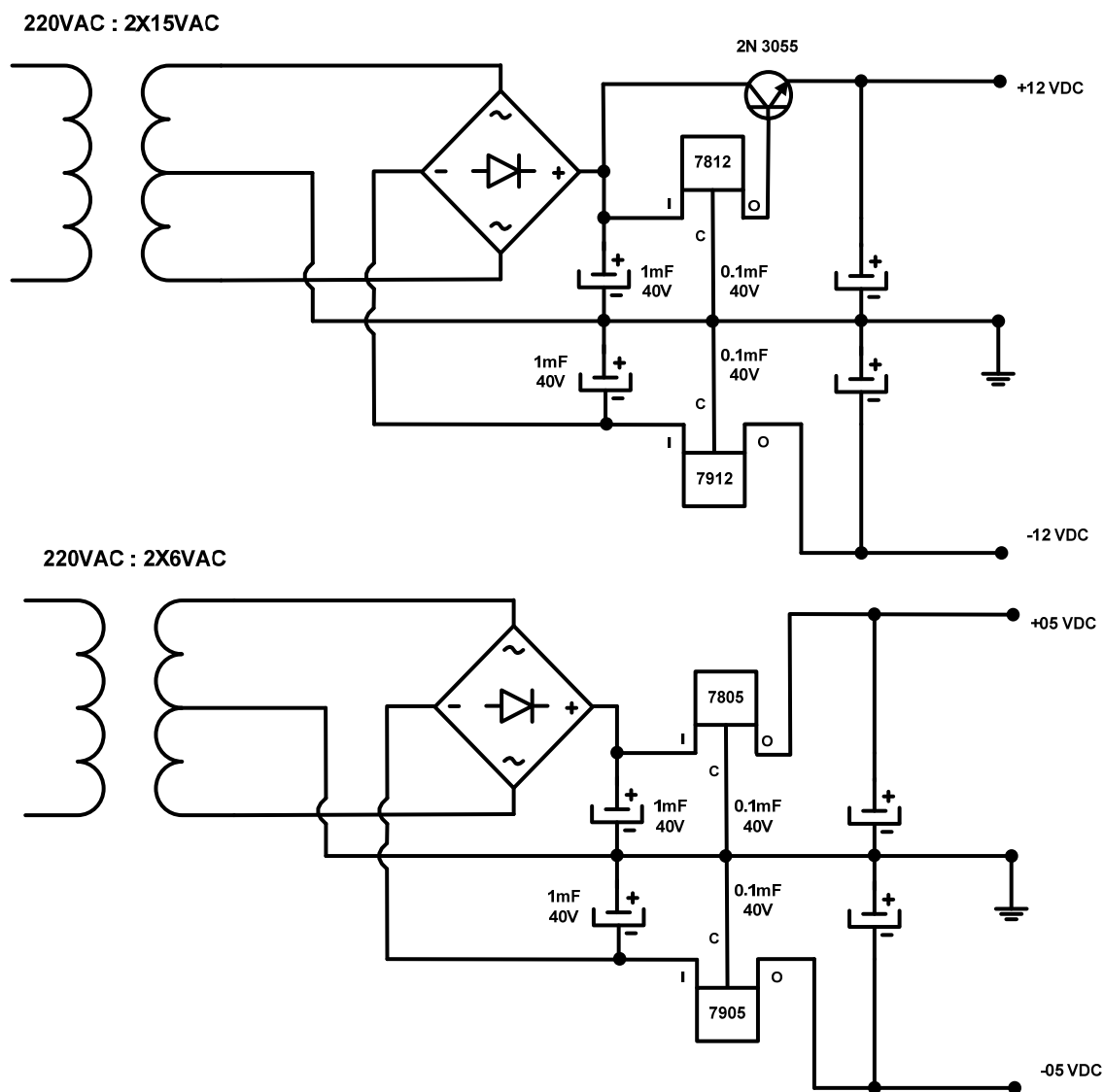
Εικόνα 38 – Βαθμίδα παραγωγής παλμών (0-180).



ΒΑΘΜΙΔΑ
 ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
 ΠΑΛΜΩΝ 180-360

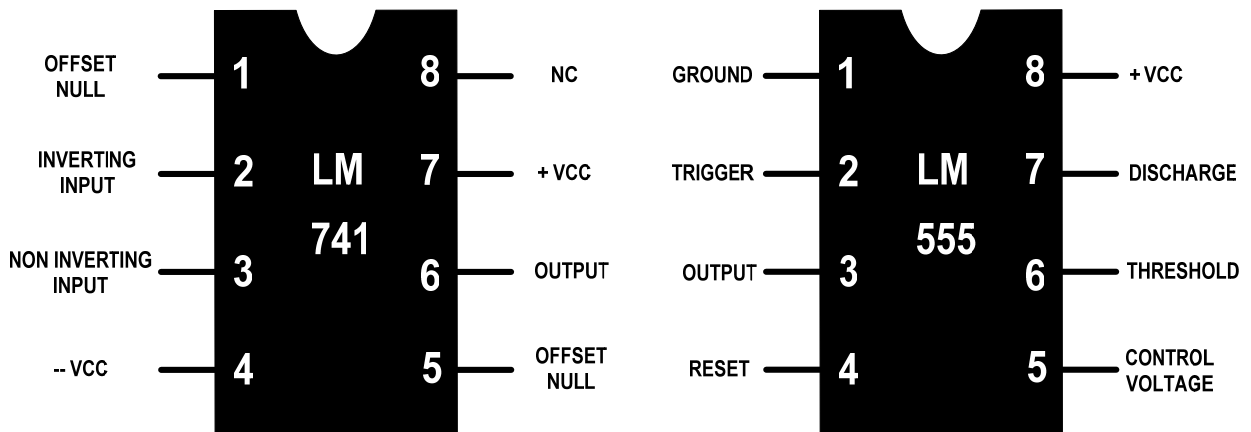
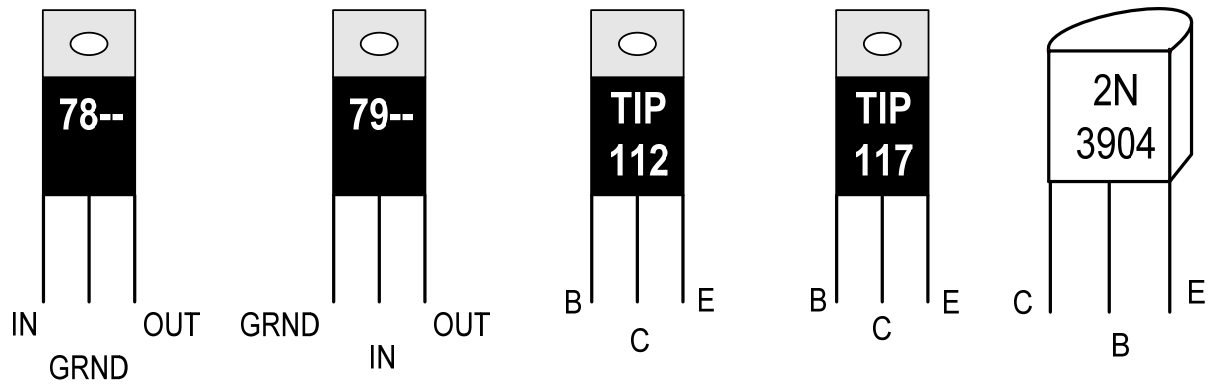
Εικόνα 39 – Βαθμίδα παραγωγής παλμών (180-360).

Τα τροφοδοτικά των τελεστικών ενισχυτών των δύο παραπάνω κυκλωμάτων δίνουν στην έξοδο τους τάσεις τροφοδοσίας ± 5 Volts και ± 12 Volts και παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα.



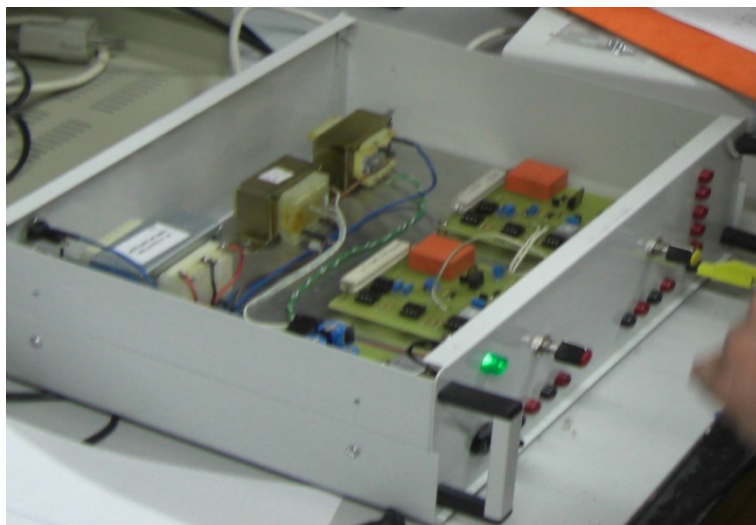
Εικόνα 40 – Τροφοδοτικά των τελεστικών ενισχυτών των κυκλωμάτων βαθμίδα παραγωγής παλμών (0-180) και βαθμίδα παραγωγής παλμών (180-360).

Τα χαρακτηριστικά των κυριότερων επιμέρους στοιχείων (τρανζίστορ, τελεστικοί ενισχυτές) των κυκλωμάτων βαθμίδα παραγωγής παλμών (0-180) και βαθμίδα παραγωγής παλμών (180-360) παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα. Στην εικόνα αυτή αποτυπώνεται ξεκάθαρα τι ακριβώς αντιπροσωπεύει ο κάθε ακροδέκτης του κάθε στοιχείου.

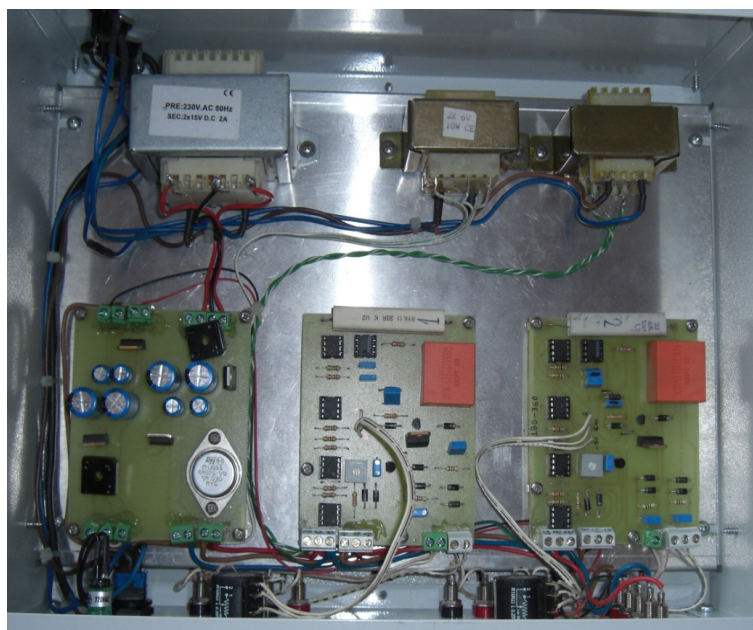


Εικόνα 41 – Αναλυτικότερη παρουσίαση των στοιχείων (τρανζίστορ, τελεστικοί ενισχυτές) που συγκροτούν τα κυκλώματα βαθμίδα παραγωγής παλμών (0-180) και βαθμίδα παραγωγής παλμών (180-360).

Η πρακτική υλοποίηση του κυκλώματος έναυσης AC-DC παρουσιάζεται στις εικόνες που ακολουθούν και δείχνουν το κύκλωμα από τρεις διαφορετικές οπτικές γωνίες.



Εικόνα 42 – Πρακτική υλοποίηση κυκλώματος έναυσης AC-DC (οπτική γωνία 1).

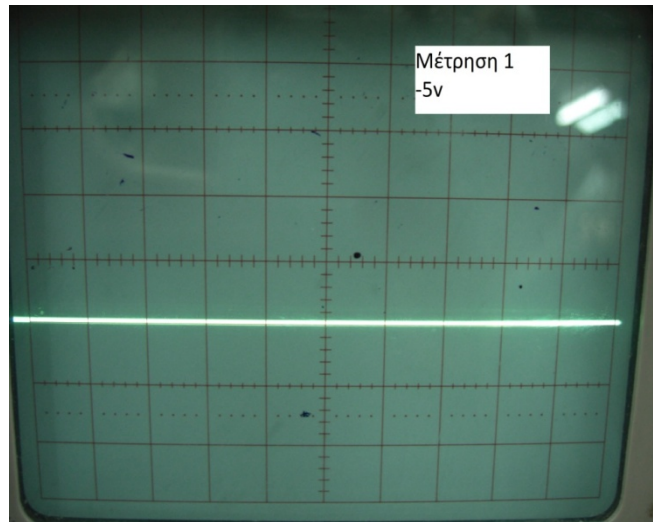


Εικόνα 43 – Πρακτική υλοποίηση κυκλώματος έναυσης AC-DC (οπτική γωνία 2).

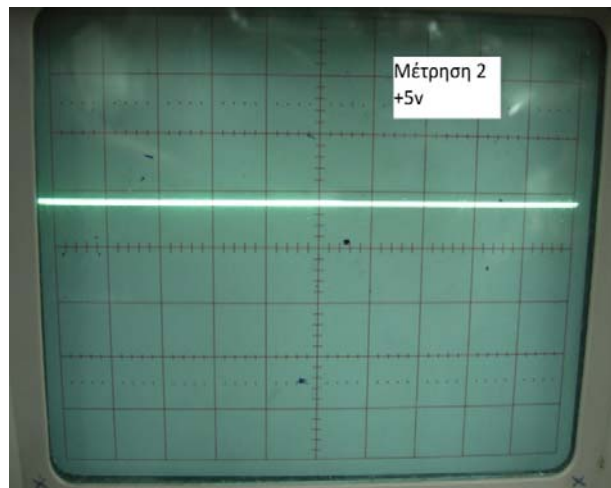


Εικόνα 44 – Πρακτική υλοποίηση κυκλώματος έναυσης AC-DC (οπτική γωνία 3).

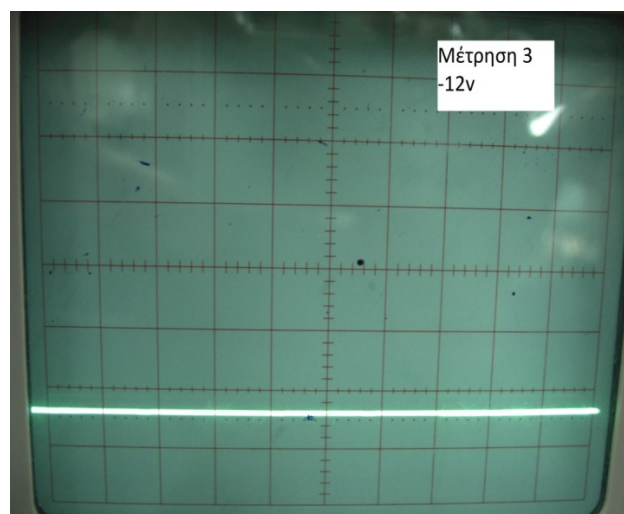
Πριν αρχίσει η λήψη μετρήσεων από το κύκλωμα, πραγματοποιείται ο έλεγχος του σήματος εξόδου των τροφοδοτικών της εικόνας 40, ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή τροφοδοσία των τελεστικών ενισχυτών του κυκλώματος. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με κατάλληλη ρύθμιση των αξόνων X-Ψ και της κλίμακας τάσεων και χρόνου του παλμογράφου, ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια του. Οι επιθυμητές τιμές τάσης είναι ± 5 Volts και ± 12 Volts.



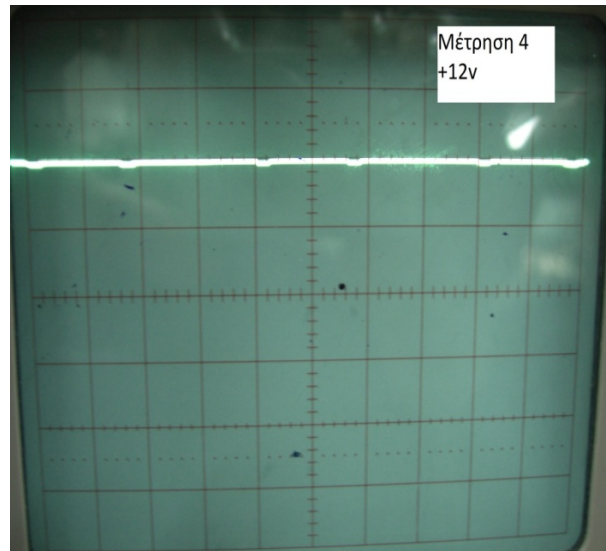
Εικόνα 45 – Πιστοποίηση πλάτους DC τάσης τροφοδοτικού στα -5 Volts.



Εικόνα 46 – Πιστοποίηση πλάτους DC τάσης τροφοδοτικού στα +5 Volts.

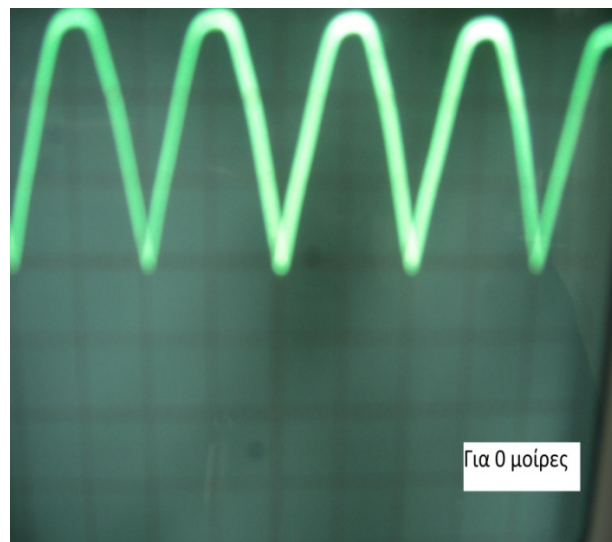


Εικόνα 47 – Πιστοποίηση πλάτους DC τάσης τροφοδοτικού στα -12 Volts.



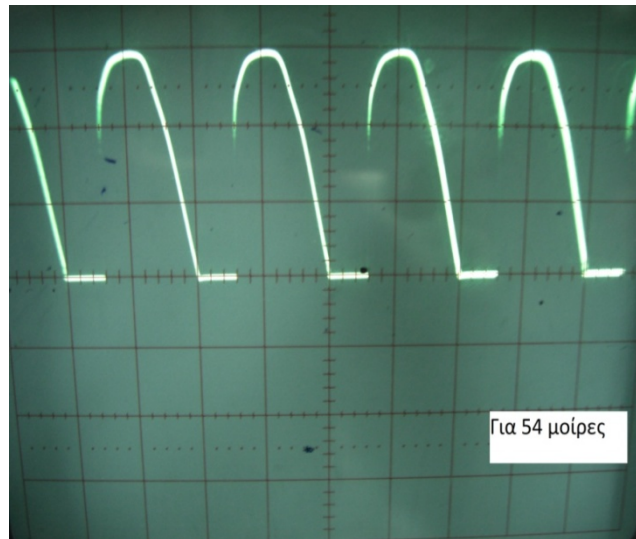
Εικόνα 48 – Πιστοποίηση πλάτους DC τάσης τροφοδοτικού στα +12 Volts.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη σύνδεση με φορτίο, για διάφορες γωνίες έναυσης. Για γωνία έναυσης 0° λαμβάνεται μία πλήρως ανορθωμένη ημιτονοειδής κυματομορφή.



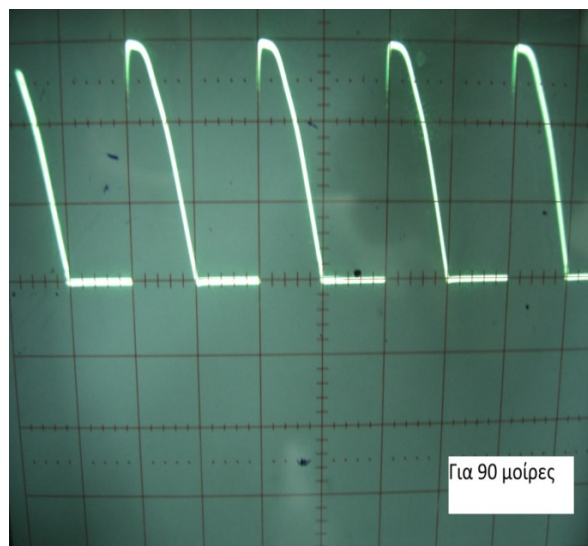
Εικόνα 49 – Μέτρηση κατά τη σύνδεση με φορτίο και γωνία έναυσης 0° .

Για γωνία έναυσης 54° λαμβάνεται μία ελαφρώς παραμορφωμένη, ημιανορθωμένη ημιτονοειδής κυματομορφή.



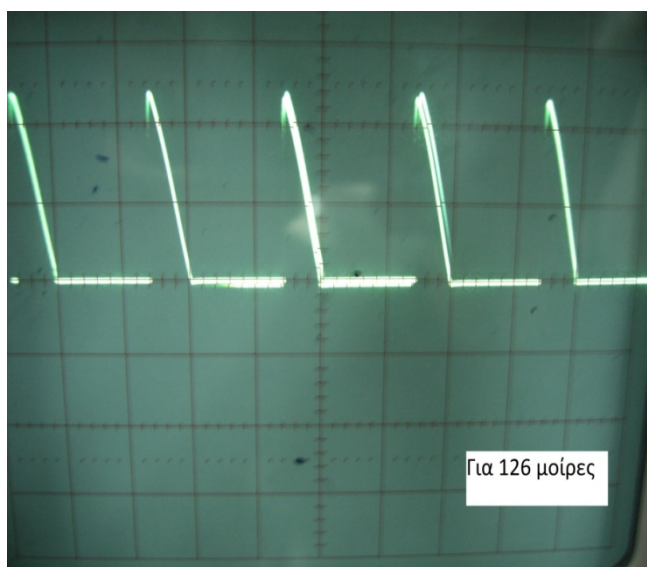
Εικόνα 50 – Μέτρηση κατά τη σύνδεση με φορτίο και γωνία έναυσης 54° .

Για γωνία έναυσης 90° λαμβάνεται μία παραμορφωμένη, ημιανορθωμένη ημιτονοειδής κυματομορφή.



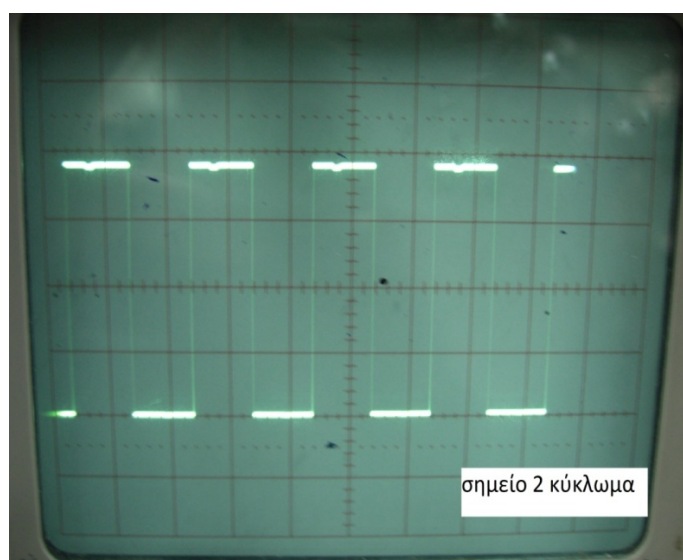
Εικόνα 51 – Μέτρηση κατά τη σύνδεση με φορτίο και γωνία έναυσης 90° .

Για γωνία έναυσης 126° λαμβάνεται μία παραμορφωμένη ημιανορθωμένη ημιτονοειδής κυματομορφή η οποία έχει εκφυλιστεί και μοιάζει με ημιανορθωμένη τριγωνική κυματομορφή.

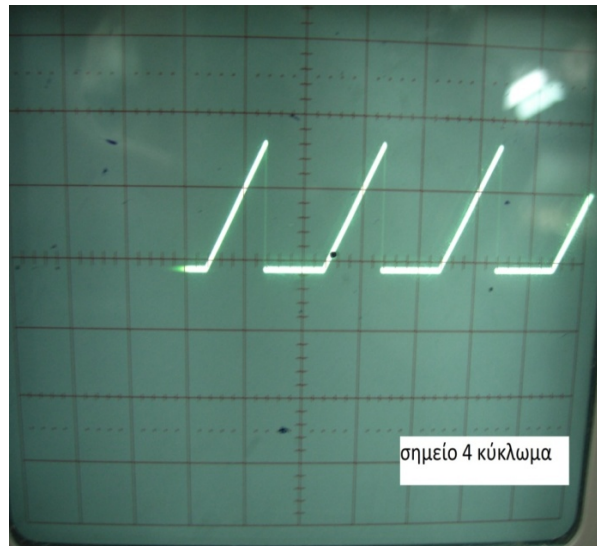


Εικόνα 52 – Μέτρηση κατά τη σύνδεση με φορτίο και γωνία έναυσης 126° .

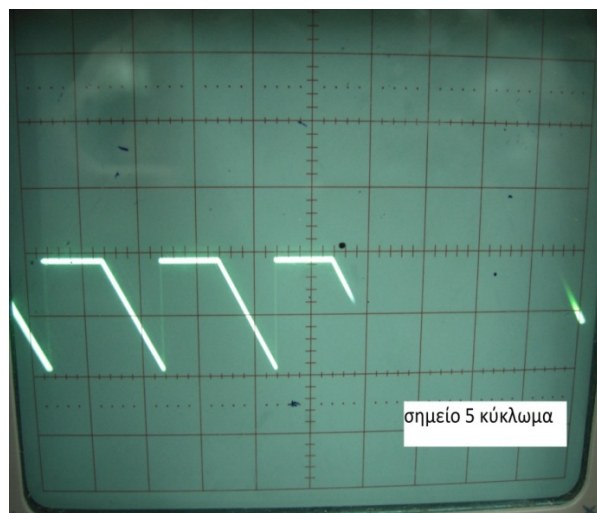
Κατόπιν ακολουθεί η λήψη μετρήσεων με τη βοήθεια του παλμογράφου. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε διάφορα σημεία του κυκλώματος, τα οποία αριθμούνται από το 1 έως και το 9 (γκρίζα κουτάκια στις εικόνες 38 και 39). Προκειμένου οι μετρήσεις να είναι ακριβείς πραγματοποιείται κατάλληλη ρύθμιση των αξόνων X-Ψ, της κλίμακας τάσεων και χρόνου του παλμογράφου και σωστή σύνδεση των ακροδεκτών του στα αντίστοιχα σημεία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μία προς μία οι μετρήσεις



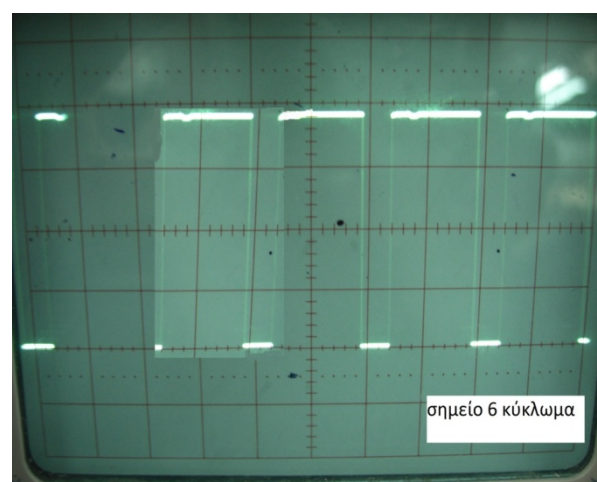
Εικόνα 53 – Σήμα τάσης στο σημείο 2.



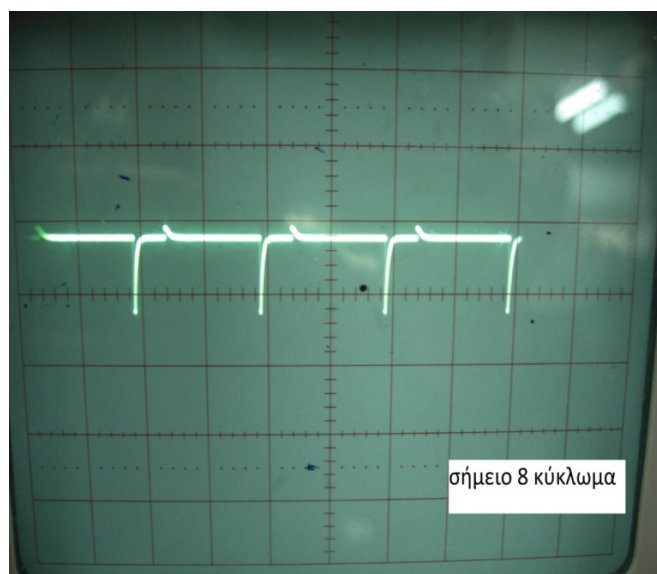
Εικόνα 54 – Σήμα τάσης στο σημείο 4.



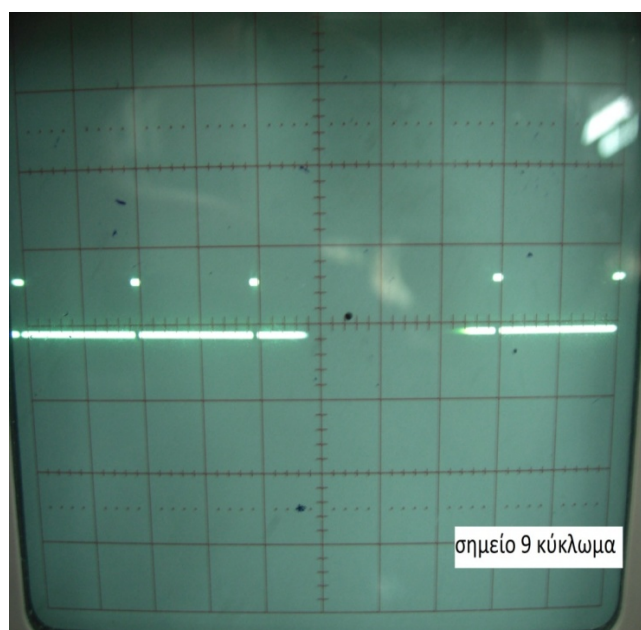
Εικόνα 55 – Σήμα τάσης στο σημείο 5.



Εικόνα 56 – Σήμα τάσης στο σημείο 6.



Εικόνα 57 – Σήμα τάσης στο σημείο 8.



Εικόνα 58 – Σήμα τάσης στο σημείο 9.

Σε όλες τις παραπάνω ληφθείσες κυματομορφές παρατηρείται ταύτιση με τις θεωρητικά αναμενόμενες μορφές οι οποίες απεικονίζονται δίπλα στα γκρίζα αριθμημένα κουτάκια στις εικόνες 38 και 39. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι το κύκλωμα λειτουργεί σωστά και συνεπώς πιστοποιείται η ορθή λειτουργία του.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος αποτελούν το σημαντικότερο ίσως κομμάτι της επιστήμης των ηλεκτρονικών, αφού χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την επεξεργασία και τον έλεγχο της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας από μία μορφή σε μία άλλη (ανάλογα με τις ανάγκες που παρουσιάζονται), χρησιμοποιούνται μετατροπείς (converters) οι οποίοι μπορεί να είναι AC/DC, DC/DC, AC/AC. Συνήθως τροφοδοτούνται από το δίκτυο και στην έξοδο τους παραδίδουν ενέργεια με κατάλληλα χαρακτηριστικά (τάση, ρεύμα, συχνότητα κλπ) ώστε να ταιριάζει με τις απαιτήσεις του εκάστοτε φορτίου.

Μία μη ελεγχόμενη γέφυρα αποτελείται από μη ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία. Μία ημιελεγχόμενη γέφυρα αποτελείται από ελεγχόμενα και μη ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία και λειτουργεί ως ανορθωτής και ως αντιστροφέας. Αντίστοιχα μια πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα αποτελείται μόνο από ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία, είναι η πληρέστερη ανορθωτική κυκλωματική συνδεσμολογία και λειτουργεί ως ανορθωτής και ως αντιστροφέας.

Κατά την πρακτική υλοποίηση της μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας, εκτός από τις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν, διαπιστώθηκε πόσο σημαντικό ρόλο παίζουν οι μετασχηματιστές, τα χαρακτηριστικά των επιμέρους στοιχείων (αντιστάσεις πυκνωτές, τρανζίστορ, δίοδοι) και η συχνότητα της παρεχόμενης από το δίκτυο τάσης.

Η επιτυχία στην υλοποίηση του κυκλώματος έναυσης AC-DC οφείλεται στο καλό ταίριασμα όλων των επιμέρους κυκλωματικών στοιχείων (πυκνωτές, αντιστάσεις, τρανζίστορ, τελεστικοί ενισχυτές, δίοδοι) που το απαρτίζουν. Επίσης πολύ σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των μετρήσεων έπαιξε το γεγονός ότι δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή κατά τη λήψη τους με σωστή ρύθμιση της κλίμακας του παλμογράφου, αποφυγή ύπαρξης dc συνιστώσας στο σήμα εισόδου του κυκλώματος, σωστή ρύθμιση των dc τάσεων τροφοδοσίας των τροφοδοτικών των τελεστικών ενισχυτών και χρήση καλωδίων καλής ποιότητας στα κανάλια του παλμογράφου ώστε να αποφευχθεί η ύπαρξη θορύβου.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Mohan, Underland, Robbins. Ηλεκτρονικά Ισχύος. Δεύτερη Έκδοση. Εκδόσεις Τζιόλα.
- [2] Αθανάσιος Ν. Σαφάκας. Ηλεκτρονικά Ισχύος. Γενική Θεώρηση της Υφιστάμενης Κατάστασης. Τάσεις και Προοπτικές. Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [3] Στέφανος Μανιάς. Ηλεκτρονικά Ισχύος, Εκδόσεις Συμείων 2000.
- [4] M. D. Singh. K.B. Khanchandani. Power Electronics. Second Edition. McGraw - Hill Companies.
- [5] Wikipedia.
http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Rectifier_vi_curve.GIF
- [6] Γιώργος Σ. Τόμπρας. Εισαγωγή στην Ηλεκτρονική. Εκδόσεις Δίαυλος.
- [7] Wikipedia. Thyristor. <http://en.wikipedia.org/wiki/Thyristor>
- [8] Wikipedia. Switch. <http://en.wikipedia.org/wiki/Switch>
- [9] J. S. Chitode. Power Electronics. Technical Publications Pune.
- [10] M. S. Jamil Aghar. Power Electronics. Easter Economy Edition.
- [11] Engineering. Rectifier. <http://engineering.wikia.com/wiki/Rectifier>
- [12] Dr. Zainal Salam 2002. Power Electronics and Drives (Version 2).
- [13] Στέφανος Ν. Μανιάς. Ευάγγελος Α. Καρφόπουλος. Μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος Πολλαπλών Επιπέδων για Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [14] Στέφανος Μανιάς. Ε. Καρφόπουλος. Π. Πάχος. Π. Παναγής. Κ. Παύλου. DC-DC Μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος Πολλαπλών Επιπέδων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [15] William Shepherd. Li Zhang. Power Converter Circuits.
- [16] Παντελής Β. Μαλατέστας. Ηρακλής Αθ. Βυλλιώτης. Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρονικών Ισχύος. Εκδόσεις Τζιόλα.
- [17] Module 2 AC to DC Converters. Lesson 9 Single Phase Uncontrolled Rectifier. Version 2 EE IIT, Kharagpur.
<http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Power%20Electronics/PDF/L-9%28DK%29%28PE%29%20%28%28EE%29NPTEL%29.pdf>
- [18] Τμήμα Βιομηχανικής Πληροφορικής Τ.Ε.Ι. Καβάλας. Σημειώσεις Βιομηχανικών Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος.
http://iiu.teikav.edu.gr/iw/courses/eksamino_04/ilisxios/BIOM_SYST_HL_EN/Theory/dcmach0.pdf
- [19] Παντελής Β. Μαλατέστας. Ηρακλής Αθ. Βυλλιώτης. Ασκήσεις Ηλεκτρικής Κίνησης. Εκδόσεις Τζιόλα.