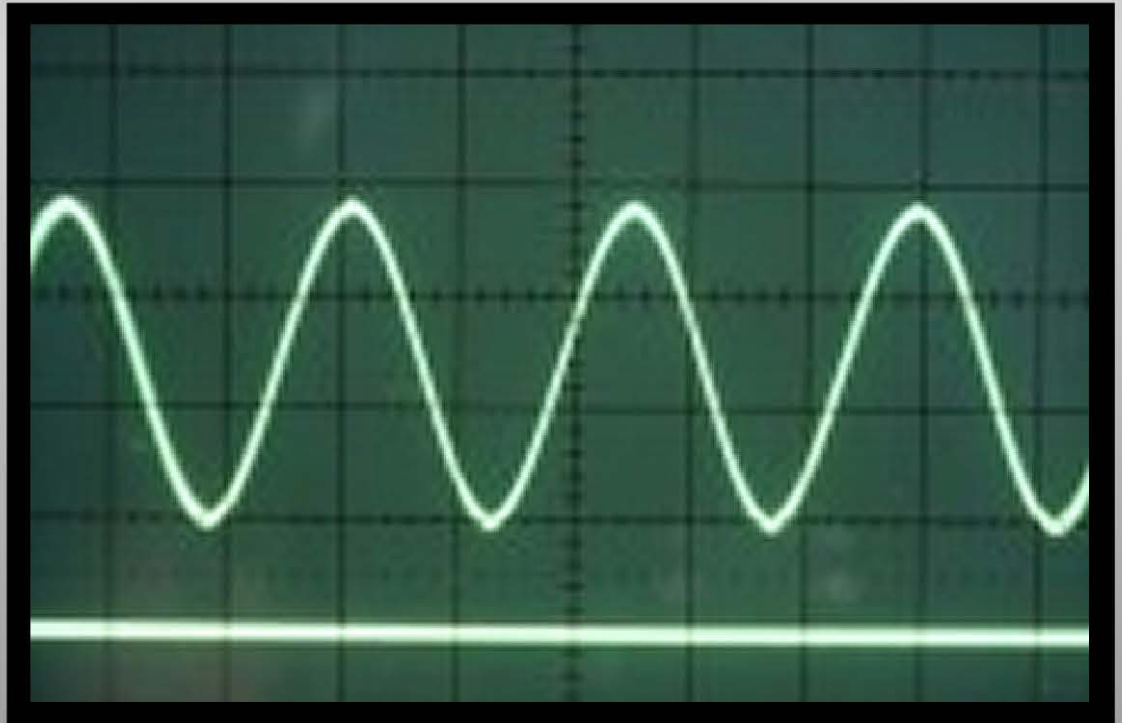




Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΓΕΦΥΡΑ ΙΣΧΥΟΣ ΠΛΗΡΩΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ



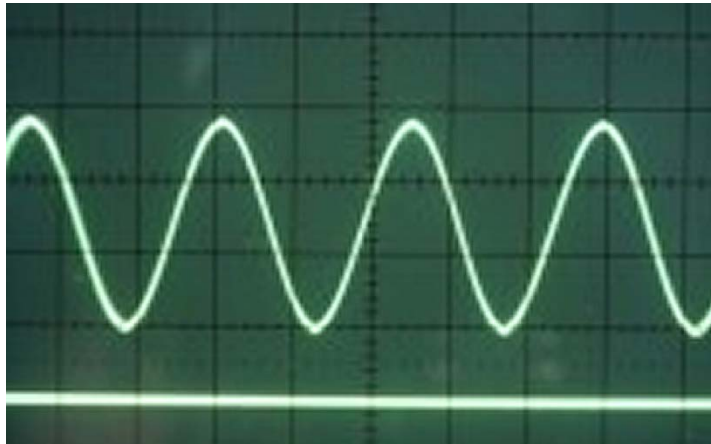
Επ.Καθ. : ΗΡΑΚΛΗΣ ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ

Φοιτητές: ΒΡΟΥΤΣΗΣ ΣΤΑΜΑΤΙΟΣ
ΧΩΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Δεκέμβριος 2012



«ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΓΕΦΥΡΑ ΙΣΧΥΟΣ ΠΛΗΡΩΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ»



Φοιτητές:

ΒΡΟΥΤΣΗΣ ΣΤΑΜΑΤΙΟΣ Α.Μ. 32130
ΧΩΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ Α.Μ. 35007

Επ.Καθ. : ΗΡΑΚΛΗΣ ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ

Δεκέμβριος 2012

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον καθηγητή κ. **Ηρακλή Βυλλιώτη**, Καθηγητή Εφαρμογών στο Τ.Ε.Ι. Πειραιά, τμήμα Ηλεκτρολογίας που ήταν ο επιβλέπων της πτυχιακής εργασίας μας, για την βοήθειά του, τις γνώσεις, τις συμβουλές και την ουσιαστική καθοδήγησή του έτσι ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ/ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	2
1.ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ	3-7
1.1.Είδη μετατροπέων.....	3
1.1.1.Μετατροπέας Ε.Ρ./Σ.Ρ. (ανορθωτής).....	3
1.1.2.Μετατροπέας Ε.Ρ./Ε.Ρ. (σταθερής συχνότητας).....	4
1.1.3.Μετατροπέας Σ.Ρ./Σ.Ρ.....	5
1.1.4.Μετατροπέας Σ.Ρ./Ε.Ρ. (αντιστροφέας).....	6
2.ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΙΣΧΥΟΣ	8-25
2.1.Δίοδος Ισχύος.....	8
2.2.Τρανζίστορ Επαφής (Bipolar Junction Transistor, BJT).....	10
2.3.MOSFET Ισχύος.....	11
2.4.Θυρίστορ.....	12
2.5.Triac.....	14
2.6.Gate Turn Off Thyristor (GTO).....	16
2.7.Τελεστικός Ενισχυτής.....	18
2.7.1.Εφαρμογές τελεστικών ενισχυτών.....	19
3.ΕΙΔΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΩΝ ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ	26-39
3.1.Μονοφασική μη ελεγχόμενη γέφυρα.....	26
3.2.Μονοφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα.....	29
3.3.Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα.....	31
3.3.1. Θεωρητικό μέρος.....	31
4.ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	40-51
4.1.Ανάλυση κυκλώματος έναυσης.....	40
4.2.Θεωρητικά κυκλώματα έναυσης.....	41
4.3.Θεωρητικό κύκλωμα τροφοδοτικού.....	42
4.4.Τυπωμένο κύκλωμα έναυσης $0^\circ - 180^\circ$	43
4.5.Τυπωμένο κύκλωμα έναυσης $180^\circ - 360^\circ$	44
4.6.Τυπωμένο κύκλωμα τροφοδοτικού	45
4.7.Φωτογραφικό υλικό	47
4.8.Επιβεβαίωση παλμών κατασκευής από παλμογράφο.....	49
4.9.Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα κατασκευή.....	51
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	53-54

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα ισχύος, όπου συνήθως μια τυπική διάταξη είναι με τέσσερα θυρίστορ. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τα βασικά είδη των μετατροπέων. Στο δεύτερο κεφάλαιο ακολουθεί μια σύντομη παρουσίαση των κυριότερων ημιαγωγίμων στοιχείων που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά ισχύος, τόσο σε κλασικές εφαρμογές όσο και στις πλέον σύγχρονες. Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στα είδη μονοφασικών ανορθωτικών διατάξεων. Και τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο, το οποίο είναι και το κατασκευαστικό μέρος, παρουσιάζουμε, ανάλυση του κυκλώματος έναυσης, τυπωμένο κύκλωμα έναυσης, τροφοδοτικό, φωτογραφικό υλικό κι επιβεβαίωση παλμών κατασκευής από παλμογράφο.

Λέξεις κλειδιά

Μονοφασική γέφυρα, θυρίστορ, μετατροπείς, ημιαγωγοί, ανορθωτικές διατάξεις, κύκλωμα έναυσης, τυπωμένο, τροφοδοτικό, παλμογράφος.

Συντομογραφίες ή Ακρωνύμια
Abbreviations or Acronyms
(που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία)

A

A. Amper
AC. Alternating Current

B

BJT. Bipolar Junction Transistor – διπολικό
τρανζίστορ επαφής.
BTX. Balanced Technology Extended

D

DC. Direct Current

E

E.P. Εναλλασσόμενο Ρεύμα

G

GTO. Gate turn-off thyristor – ανήκει στην
οικογένεια των Θυρίστορ.

I

IGBT. Insulated-gate bipolar transistor

K

κΩ. kilo -Ohm

M

MOSFET. Metal Oxide Semiconductor Field
Effect Transistor
MW. Megawatt
mw. Milliwatt
μV. Micro Volt

Σ/S

Σ.Ρ. Συνεχές Ρεύμα
SCR. Thyristor -Θυρίστορ

T

TRIAC. 3 ακροδέκτες, χειρισμός εναλ/νου
ρεύματος.

V

V. Volt

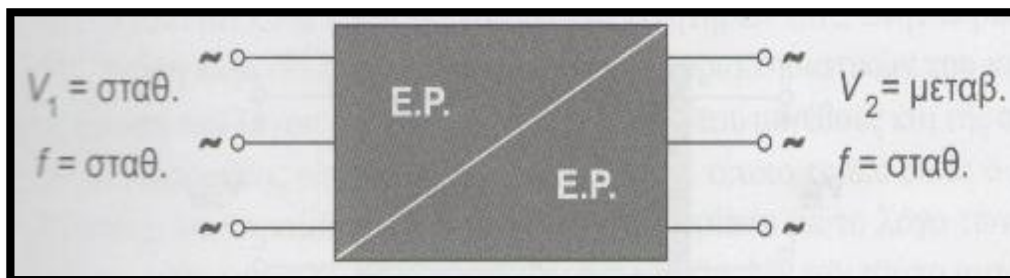
1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ

1.1. Είδη Μετατροπέων

Τα βασικά είδη μετατροπέων είναι τα εξής: 1)Μετατροπέας Ε.Ρ./Σ.Ρ (ανορθωτής), 2)Μετατροπέας Ε.Ρ/Ε.Ρ (σταθερής συχνότητας), 3)Μετατροπέας Σ.Ρ./Σ.Ρ, 4) Μετατροπέας Σ.Ρ/Ε.Ρ. (αντιστροφέας).

1.1.1. Μετατροπέας Ε.Ρ./Σ.Ρ. (ανορθωτής)

Ο μετατροπέας Ε.Ρ./Σ.Ρ. σύμφωνα με το σχ.1.1, έχει ως είσοδο εναλλασσόμενη τάση σταθερού μέτρου και συχνότητας και ως έξοδο συνεχή τάση, σταθερή ή ρυθμιζόμενη. Η τάση εξόδου δεν είναι ιδανικά συνεχής, όπως στην περίπτωση μιας γεννήτριας Σ.Ρ., αλλά χρονικά μεταβαλλόμενη (εμφανίζει κυμάτωση) με σταθερή πολικότητα. Η φορά της ισχύος μιας ανορθωτικής διάταξης, είναι από την πλευρά του εναλλασσομένου προς την πλευρά του συνεχούς.



Σχήμα 1.1 Μετατροπέας Ε.Ρ./Σ.Ρ.

Ανάλογα με τα διακοπτικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται (δίοδοι, θυρίστορ ή και συνδιασμός αυτών) καθώς επίσης και από τη συνδεσμολογία τους, οι συγκεκριμένοι μετατροπείς διακρίνονται σε:

- μονοφασικούς
- τριφασικούς
- μη ελεγχόμενους
- ημιελεγχόμενους και
- πλήρως ελεγχόμενους

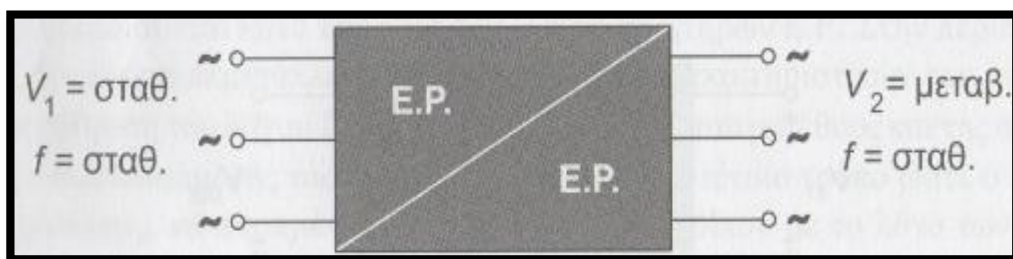
Οι μη ελεγχόμενοι μετατροπείς, χρησιμοποιούν ως διακοπτικά στοιχεία διόδους, είναι πιο απλοί στην κατασκευή και πιο οικονομικοί έναντι των υπολοίπων (καθόσον δεν απαιτείται κύκλωμα ελέγχου), αλλά δεν έχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης εξόδου.

Ο πλήρως ελεγχόμενος μετατροπέας, κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις (ύπαρξη ενεργητικού φορτίου από την πλευρά του συνεχούς) μπορεί να λειτουργήσει σε δύο τεταρτημόρια, δηλαδή εκτός από ανορθωτής και ως αντιστοφείας, όπου πλέον η φορά της ισχύος είναι αντίθετη από εκείνη για λειτουργία ανορθωτή.

Για παράδειγμα, κατά την αναγεννητική πέδηση ενός κινητήρα Σ.Ρ., η κινητική ενέργεια των στρεφομένων μαζών μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια και διοχετεύεται πίσω στο δίκτυο. Εάν δεν είναι απαραίτητη η λειτουργία στο δεύτερο τεταρτημόριο (ως αντιστροφεία), τότε οι ημιελεγχόμενες διατάξεις πλεονεκτούν έναντι των αντιστοίχων πλήρως ελεγχόμενων ανορθωτικών διατάξεων. Πράγματι, εκτός του μικρότερου κόστους και του πιο απλού κυκλώματος ελέγχου, έχουν μεγαλύτερη μέση τιμή της τάσης εξόδου, μικρότερη κατανάλωση αέργου ισχύος και δεν απαιτούν επιπρόσθετη δίοδο «ελεύθερης ροής» για επαγωγικά φορτία.

1.1.2. Μετατροπέας Ε.Ρ./Ε.Ρ. (σταθερής συχνότητας)

Ο μετατροπέας Ε.Ρ./Ε.Ρ. σταθερής συχνότητας (σχ.1.2), έχει ως είσοδο εναλλασσόμενη τάση σταθερού μεγέθους και συχνότητας και ως έξοδο εναλλασσόμενη τάση ρυθμιζόμενου μεγέθους και σταθερής συχνότητας (ίση με τη συχνότητα εισόδου).



Σχήμα 1.2 Μετατροπέας Ε.Ρ./Ε.Ρ. (σταθερής συχνότητας)

Η λειτουργία του συγκεκριμένου μετατροπέα, είναι ανάλογη εκείνης του μετασχηματιστή. Τα διακοπτικά στοιχεία του κυκλώματος ισχύος, ως προς τη φορά ροής του ρεύματος, είναι στοιχεία δύο κατευθύνσεων. Για μικρές ισχύς (της τάξης μερικών KW) χρησιμοποιούνται Triacs, ενώ για μεγαλύτερες ισχύς αντιπαράλληλα θυρίστορ. Τα δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ, ως διακόπτης εναλλασσομένου, έχει πολύ καλύτερες επιδόσεις από το Triac. Η λογική του κυκλώματος ελέγχου, μοιάζει με εκείνη των ανορθωτικών διατάξεων. Με κατάλληλη ρύθμιση της γωνίας έναυσης, το μέγεθος της τάσης εξόδου μπορεί να μεταβάλλεται στην περιοχή τιμών

$$0 < V_2 < V_1$$

Οι εν λόγω μετατροπείς, βρίσκουν εφαρμογή σε κυκλώματα ρύθμισης φωτισμού (μονοφασικά και τριφασικά) καθώς και σε διατάξεις εκκίνησης κινητήρων Ε.Ρ. Σε αντίθεση μάλιστα με τους κλασικούς εκκινητές (αστέρα/τρίγωνο, κ.λ.π.), οι συγκεκριμένοι εκκινητές, εκτός από τη δυνατότητα ομαλής εκκίνησης (soft-starting), προσφέρουν και τη δυνατότητα της ομαλής διακοπής του κινητήρα (soft-stopping), δυνατότητα ιδιαίτερα χρήσιμη σε αντλητικά συστήματα για την αποφυγή του υδραυλικού πλήγματος.

1.1.3. Μετατροπέας Σ.Ρ./Σ.Ρ.

Ο μετατροπέας Σ.Ρ./Σ.Ρ. (σχ.1.3), έχει ως είσοδο συνεχή τάση (σταθερού μεγέθους) και ως έξοδο συνεχή τάση ρυθμιζόμενου μεγέθους.

Η λειτουργία του είναι ανάλογη με εκείνη του μετασχηματιστή, αλλά για συνεχές ρεύμα. Ανάλογα με το μέγεθος της τάσης εξόδου, οι συγκεκριμένοι μετατροπείς διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

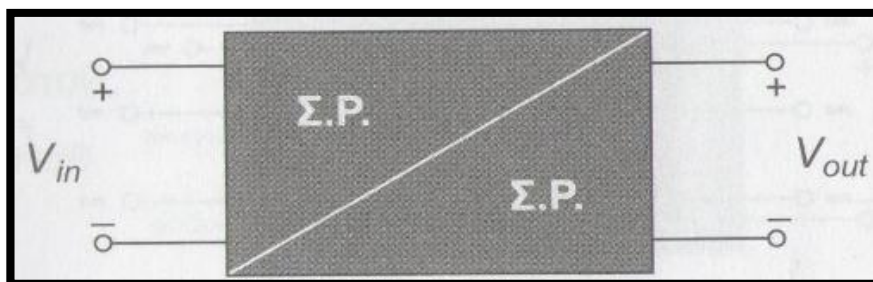
α) Στους μετατροπείς υποβιβασμού (step-down dc/dc converters), για τους οποίους το μέγεθος της τάσης εξόδου κυμαίνεται στην περιοχή τιμών:

$$0 < V_{out} < V_{in}$$

και

β) στους μετατροπείς ανύψωσης (step-up dc/dc converters), για τους οποίους ισχύει ότι:

$$V_{out} > V_{in}$$

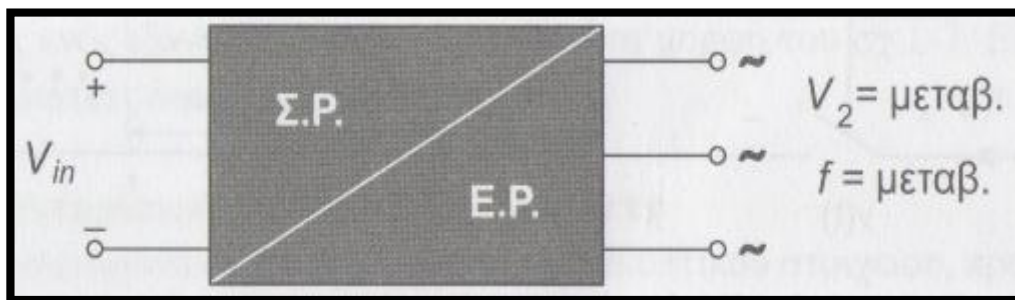


Σχήμα 1.3 Μετατροπέας Σ.Ρ./Σ.Ρ.

Ως διακοπτικά στοιχεία χρησιμοποιούνται τρανζίστορ ισχύος και πιο συγκεκριμένα τύπου MOSFET και IGBT ή και GTO (gate turn-off thyristor) για μικρές ισχύς (λόγω του ότι το ρεύμα σβέσης του συγκεκριμένου θυρίστορ, είναι κατά πολύ μεγαλύτερο του αντίστοιχου ρεύματος κατά την έναυση). Ο λόγος που δεν χρησιμοποιούνται τα κλασικά θυρίστορ, είναι ότι απαιτούν επιπλέον κυκλώματα για την εξαναγκασμένη μεταγωγή τους (σβέση), σε αντίθεση με τις ανορθωτικές διατάξεις όπου η σβέση τους γίνεται με φυσική μεταγωγή από την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου. Υπάρχουν δύο τεχνικές για την εντολοδότηση του διακοπτικού στοιχείου, η μία βασίζεται στη διαμόρφωση του εύρους του παλμού (pulse-width modulation) και η άλλη στη διαμόρφωση συχνότητας (frequency modulation). Η πρώτη μέθοδος, προτιμάται για φορτία κίνησης. Οι μετατροπείς Σ.Ρ./Σ.Ρ., ανάλογα με τα τεταρτημόρια λειτουργίας, διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες (κλάσεις A,B,C,D και E).

1.1.4. Μετατροπέας Σ.Ρ./Ε.Ρ. (αντιστροφείας)

Ο μετατροπέας Σ.Ρ./Ε.Ρ., σύμφωνα με το σχ.1.4, έχει ως είσοδο συνεχή τάση σταθερού μεγέθους και ως έξοδο, εναλλασσόμενη τάση μεταβαλλόμενου μεγέθους και συχνότητας.



Σχήμα 1.4 Μετατροπέας Σ.Ρ./Ε.Ρ.

Οι μετατροπείς αυτοί μπορεί να είναι μονοφασικοί ή τριφασικοί. Υπάρχουν δύο παραλλαγές:

- οι αντιστροφείς πηγής τάσης και
- οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος.

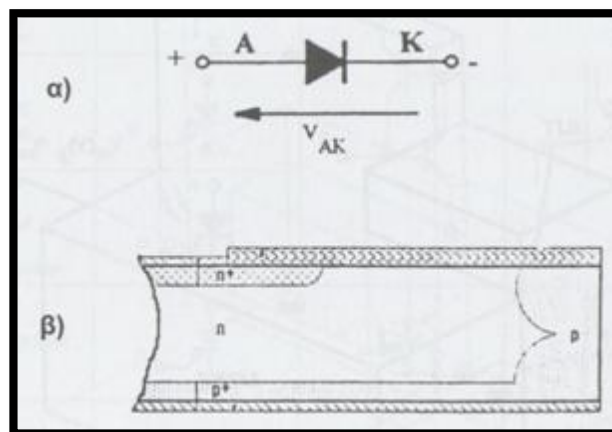
Τα διακοπτικά στοιχεία, συνήθως είναι τρανζίστορ ισχύος τύπου MOSFET ή IGBT. Οι συγκεκριμένοι μετατροπείς (συνδυαζόμενοι στην είσοδο με ένα μετατροπέα (Ε.Ρ./Σ.Ρ.), χρησιμοποιούνται κατά κόρον για τον έλεγχο κινητήρων Ε.Ρ. Στην περίπτωση αυτή, για την πλήρη εκμετάλλευση των μαγνητικών χαρακτηριστικών του κινητήρα, γίνεται ρύθμιση του λόγου $\frac{V}{f}$. Δηλαδή η ρύθμιση του μεγέθους και της συχνότητας της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου, γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο λόγος τάσης/συχνότητας, να παραμένει σταθερός και ίσος περίπου με το λόγο των αντίστοιχων ονομαστικών τιμών των συγκεκριμένων μεγεθών. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η λειτουργία του κινητήρα με ονομαστική ροή (και κατ' επέκταση βέλτιστη ροπή), ανεξάρτητα από τη συχνότητα λειτουργίας.

2. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΙΣΧΥΟΣ

2.1. Δίοδος Ισχύος

Η δίοδος ισχύος είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο μιας επαφής το οποίο χρησιμοποιείται για την κατασκευή μη ελεγχόμενων ανορθωτικών διατάξεων. Επίσης, χρησιμοποιείται στους αντιστροφείς ισχύος (DC-AC) σαν δίοδος ελεύθερης διέλευσης και σε πολλούς άλλους μετατροπείς για διαφόρους άλλους λόγους. Υπάρχουν δίοδοι ισχύος που έχουν ονομαστική τιμή ρεύματος που φθάνει έως και 5.000 Ampere και ονομαστική τιμή τάσης αποκοπής που φθάνει έως και 5.000 Volt. Όσον αναφορά την διακοπτική τους ταχύτητα αυτή κυμαίνεται από 1msec για εφαρμογές πολύ μεγάλης ισχύος (MW), έως μερικών δεκάδων nsec για εφαρμογές πολύ μικρής ισχύος (mW).

Στο σχήμα 2.1, παρουσιάζεται το σύμβολο της διόδου καθώς και η κάθετος τομή του κρυστάλλου της. Όπως βλέπουμε η δίοδος έχει δύο ακροδέκτες, την Άνοδο (Anode) και την Κάθοδο (Cathode). Επίσης από το σχήμα 2.1β) διαπιστώνουμε ότι είναι στοιχείο δύο στρωμάτων ενός τύπου n και ενός τύπου p ώστε να δημιουργείται στον κρύσταλλο μια επαφή ή ένωση p-n.



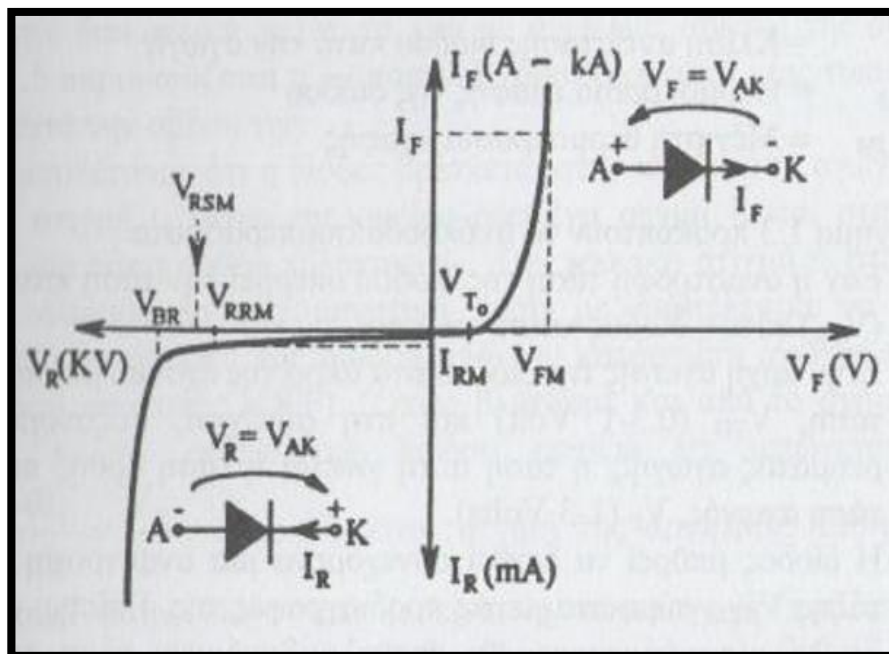
Σχήμα 2.1 Δίοδος Ισχύος: α)Σύμβολο, β) Κάθετος τομή κρυστάλλου διόδου

Η διακοπτική χαρακτηριστική ενός ημιαγωγικού στοιχείου έχει να κάνει με τη δυναμική συμπεριφορά λειτουργίας του όταν αυτό μεταβαίνει από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγής και το αντίθετο. Η δυναμική συμπεριφορά των ημιαγωγικών στοιχείων χρειάζεται για δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι για να πετύχουμε με εξωτερικά κυκλώματα καλύτερους χρόνους σβέσης και ο δεύτερος

λόγος είναι για να γνωρίζουμε τις απώλειες ισχύος κατά την έναυση και κατά τη σβέση τους. Γνωρίζοντας τις απώλειες των ημιαγωγικών στοιχείων μπορούμε να υπολογίσουμε την απόδοση ισχύος της ηλεκτρικής συσκευής μέσα στην οποία βρίσκονται.

Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η V-I χαρακτηριστική μιας διόδου. Όπως βλέπουμε και από το σχήμα αυτό, η διάδος λειτουργεί στο πρώτο και στο τρίτο τεταρτημόριο. Όταν η διάδος είναι θετικά πολωμένη (δηλαδή η άνοδος να έχει μεγαλύτερη τάση από την κάθοδο με αναφορά κάποιο σημείο) τότε η διάδος μεταβαίνει στην κατάσταση αγωγής και το ρεύμα της ανόδου αρχίζει να αυξάνεται, όπως παρουσιάζεται στο πρώτο τεταρτημόριο της V-I χαρακτηριστικής του σχήματος 2.2. Όταν η διάδος άγει και κάποια στιγμή πολωθεί αρνητικά (δηλαδή η τάση καθόδου να γίνει μεγαλύτερη από την τάση ανόδου) τότε η διάδος μεταβαίνει στην κατάσταση ανάστροφης αποκοπής. Το τρίτο τεταρτημόριο της V-I χαρακτηριστικής προσδιορίζει την φάση της αρνητικής αποκοπής της διόδου.

Η διάδος μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μη ελεγχόμενος ημιαγωγικός διακόπτης που όταν πολώνεται θετικά κλείνει (ON) και όταν πολώνεται αρνητικά ανοίγει (OFF).

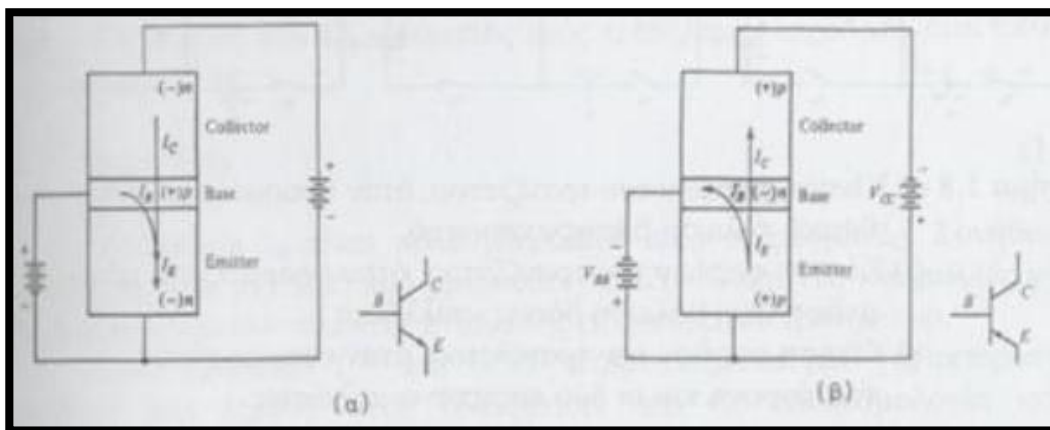


Σχήμα 2.2 Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V μιας επαφής P-N διόδου.

2.2. Τρανζίστορ Επαφής (Bipolar Junction Transistor, BJT)

Το τρανζίστορ που ονομάζεται τρανζίστορ επαφής ή και διπολικό τρανζίστορ, ήταν το πρώτο ημιαγωγικό στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε σαν στοιχείο ενίσχυσης. Το όνομα διπολικό οφείλεται στο ότι το ρεύμα του δημιουργείται από δύο είδη φορέων φορτίου με διαφορετικές πολικότητες, δηλαδή τα ηλεκτρόνια και τις οπές. Οι δύο τύποι τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι του npn που κατασκευάζεται από πυρίτιο και του pnp που κατασκευάζεται από γερμάνιο.

Το τρανζίστορ έχει τρεις ακροδέκτες που ονομάζονται εκπομπός (E,Emitter), βάση (B,Base) και συλλέκτης (C,Collector).

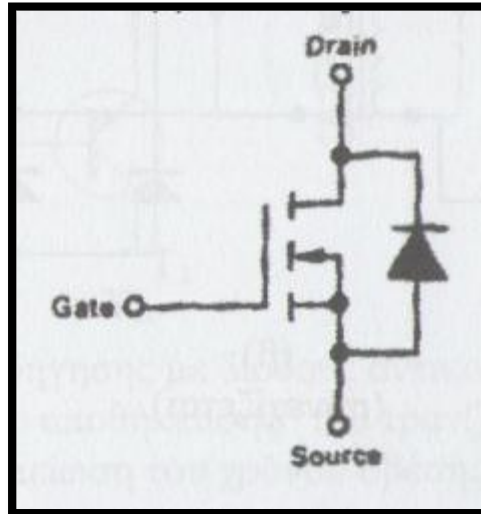


Σχήμα 2.3 Τρανζίστορ επαφής α) τύπου npn και β) τύπου pnp και οι πολικότητες τροφοδοσίας τους

Γενικά, κατά τη λειτουργία των τρανζίστορ, πρέπει μεταξύ εκπομπού και βάσης να εφαρμόζεται ορθή πόλωση, ενώ μεταξύ συλλέκτη και βάσης ανάστροφη πόλωση. Το είδος της πόλωσης εξαρτάται από τον τρόπο συνδεσμολογίας των πηγών, που παρέχουν τις συνεχείς τάσεις πολώσεων.

2.3. MOSFET Ισχύος

Το MOSFET όπως και το BJT τρανζίστορ είναι ημιαγωγικό στοιχείο τριών ακροδεκτών, στο οποίο η πύλη (gate) ελέγχει τη ροή του ρεύματος μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου που είναι η πηγή (source) και η υποδοχή (drain). Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται το σύμβολο ενός MOSFET με δίαυλο τύπου n.



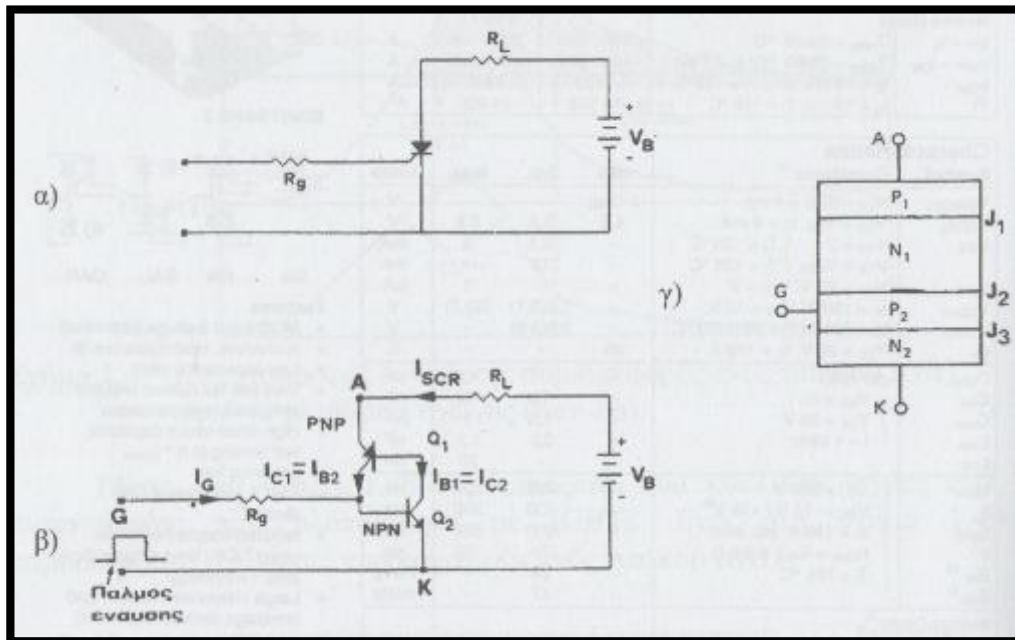
Σχήμα 2.4 Σύμβολο του MOSFET διαύλου τύπου n

Οι χαρακτηριστικές V-I ενός MOSFET διαύλου τύπου p είναι οι ίδιες με εκείνες του MOSFET με δίαυλο τύπου n με τη διαφορά ότι οι πολικότητες του ρεύματος και της τάσης είναι ανεστραμμένες έτσι ώστε οι χαρακτηριστικές του MOSFET διαύλου τύπου p να εμφανίζονται στο τρίτο τεταρτημόριο του πεδίου $i_D - v_{DS}$.

Στις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται MOSFET, τα MOSFET λειτουργούν σαν διακόπτες για τον έλεγχο της ισχύος φορτίου όπως γίνεται και με τα τρανζίστορ ισχύος. Επομένως, στις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος το MOSFET λειτουργεί είτε στην περιοχή αποκοπής όταν δεν άγει, είτε στην ωμική περιοχή όταν άγει.

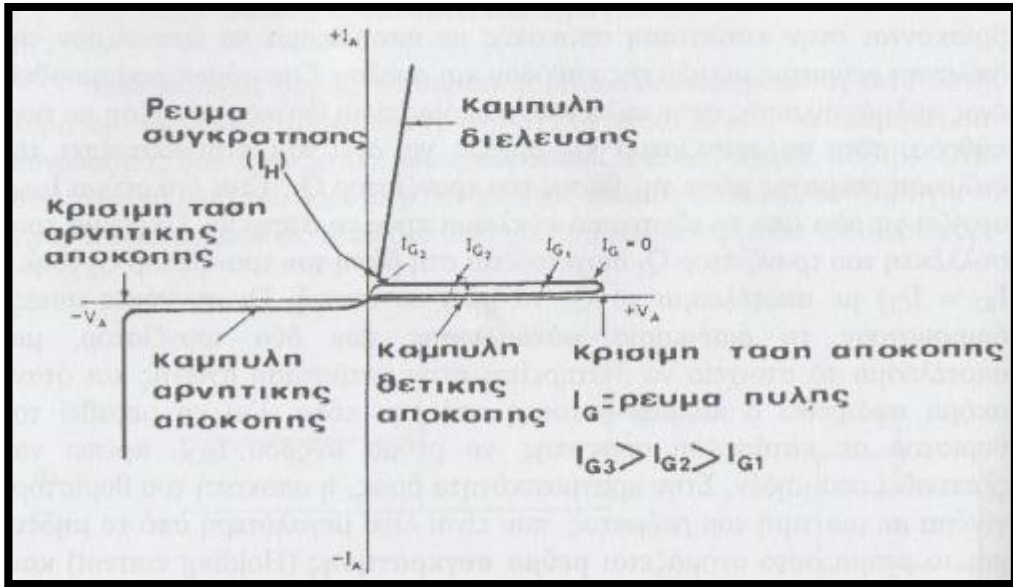
2.4. Θυρίστορ

Από πλευράς δομής, το θυρίστορ είναι ένας ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου τεσσάρων στρωμάτων (p-n-p-n), το οποίο μπορεί να θεωρηθεί σαν συνδιασμός δύο τρανζίστορ, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5. Όταν στην πύλη (gate) του θυρίστορ δεν υπάρχει παλμός έναυσης, ανεξάρτητα αν είναι θετικά πολωμένο, τότε δεν υπάρχει ροή ρεύματος μέσω του θυρίστορ.

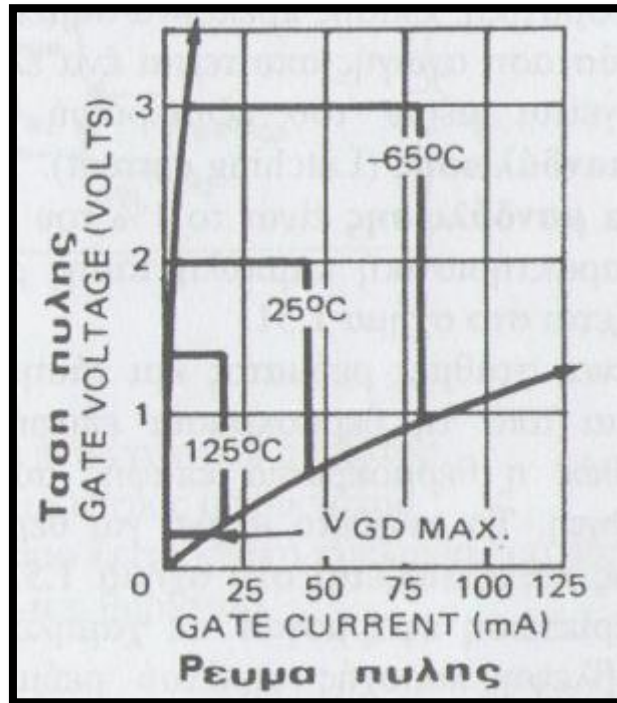


Σχήμα 2.5 Λειτουργία ενός τυπικού θυρίστορ: α) Κύκλωμα ισχύος με θυρίστορ, β) Ισοδύναμο λειτουργικό κύκλωμα του θυρίστορ, γ) Η δομή του θυρίστορ.

Για να μεταβεί το θυρίστορ σε κατάσταση αγωγής, πρέπει στην πύλη του να δοθεί παλμός έναυσης, με την προϋπόθεση ότι το θυρίστορ είναι θετικά πολωμένο. Ένα τέτοιο στοιχείο όταν βρεθεί στην κατάσταση αγωγής, μετά την εφαρμογή του παλμού έναυσης, θα εξακολουθεί να παραμένει στην κατάσταση αυτή, ακόμα και αν ο παλμός έναυσης αφαιρεθεί. Μπορεί να διακοπεί η κατάσταση αγωγής μόνο όταν το ρεύμα, το οποίο ρέει μέσα από το θυρίστορ μηδενισθεί ή η πολικότητα της ανόδου γίνει αρνητική σε σχέση με την κάθοδο.



Σχήμα 2.6 Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος ενός τυπικού θυρίστορ



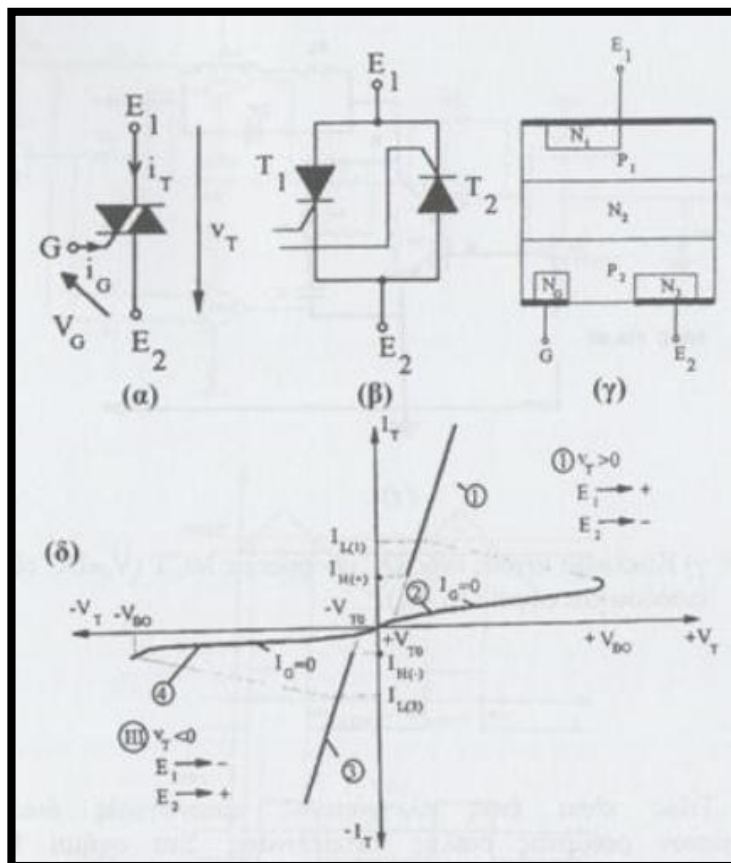
Σχήμα 2.7 Κρίσιμες τάσεις και κρίσιμα ρεύματα πύλης που χρειάζονται για την έναυση ενός τυπικού θυρίστορ

2.5. Triac

Το Triac είναι ένας ελεγχόμενος ημιαγωγικός διακόπτης εναλλασσομένου ρεύματος διπλής κατεύθυνσης. Στο σχήμα 2.8(α) παρουσιάζεται το σύμβολό του, το οποίο όπως βλέπουμε έχει τρεις ακροδέκτες, τους E_1 , E_2 και G . Οι ακροδέκτες E_1 , E_2 είναι οι ακροδέκτες ισχύος, ο δε ακροδέκτης G (Gate) είναι η πύλη του Triac όπου εφαρμόζουμε τους παλμούς έναυσης και σβέσης. Οι παλμοί του Triac, V_G , εφαρμόζονται μεταξύ των ακροδεκτών G και E_2 . Το Triac σε αντίθεση με το θυρίστορ, επιτρέπει έλεγχο ρεύματος και προς τις δύο κατευθύνσεις από τον ακροδέκτη E_1 προς τον E_2 (θετικό ρεύμα I_T) και από τον ακροδέκτη E_2 προς τον E_1 (αρνητικό ρεύμα I_T)

Όταν το δυναμικό του ακροδέκτη E_1 είναι μεγαλύτερο του E_2 και εφαρμόσουμε έναν θετικό παλμό V_G στην πύλη του Triac, τότε αυτό μεταβαίνει στην αγωγή και το ρεύμα I_T ρέει από τον E_1 προς τον E_2 . Όταν το δυναμικό του ακροδέκτη E_2 , είναι μεγαλύτερο του E_1 , και εφαρμόσουμε έναν αρνητικό παλμό στην πύλη του Triac τότε αυτό μεταβαίνει πάλι στην αγωγή αλλά το ρεύμα I_T ρέει από τον ακροδέκτη E_2 προς τον E_1 .

Στο σχήμα 2.8(β) παρουσιάζεται το κατασκευαστικό ισοδύναμο κύκλωμα του Triac που είναι δύο θυρίστορ συνδεδεμένα αντιπαράλληλα.



Σχήμα 2.8 Triac: α) Σύμβολο, β) Κατασκευαστικό ισοδύναμο, γ) Δομή, δ) V-I χαρακτηριστική

Στο σχήμα 2.8(δ) παρουσιάζεται η V-I χαρακτηριστική του Triac. Όπως διαπιστώνεται από αυτό το σχήμα το Triac, σε αντίθεση με το θυρίστορ, λειτουργεί ως διακόπτης αγωγής και αποκοπής σε δύο τεταρτημόρια, στο πρώτο και στο τρίτο. Σύμφωνα με το σχήμα 2.8(δ) το Triac μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις ακόλουθες καταστάσεις λειτουργίας:

Κατάσταση (1): Σ' αυτή την κατάσταση το Triac μεταβαίνει στην κατάσταση αγωγής όπου, θετικό ρεύμα I_T αρχίζει να ρέει ενώ μειώνεται η τάση V_T .

Κατάσταση (2): Σ' αυτή την κατάσταση το Triac λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης και αποκόπτει θετική τάση.

Κατάσταση (3): Σ' αυτή την κατάσταση το Triac μεταβαίνει στην κατάσταση αγωγής όπου, αρνητικό ρεύμα I_T αρχίζει να ρέει μέσα από αυτό ενώ μειώνεται η αρνητική τάση V_T .

Κατάσταση (4): Σ' αυτή την κατάσταση το Triac λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης αλλά αποκόπτει αρνητική τάση.

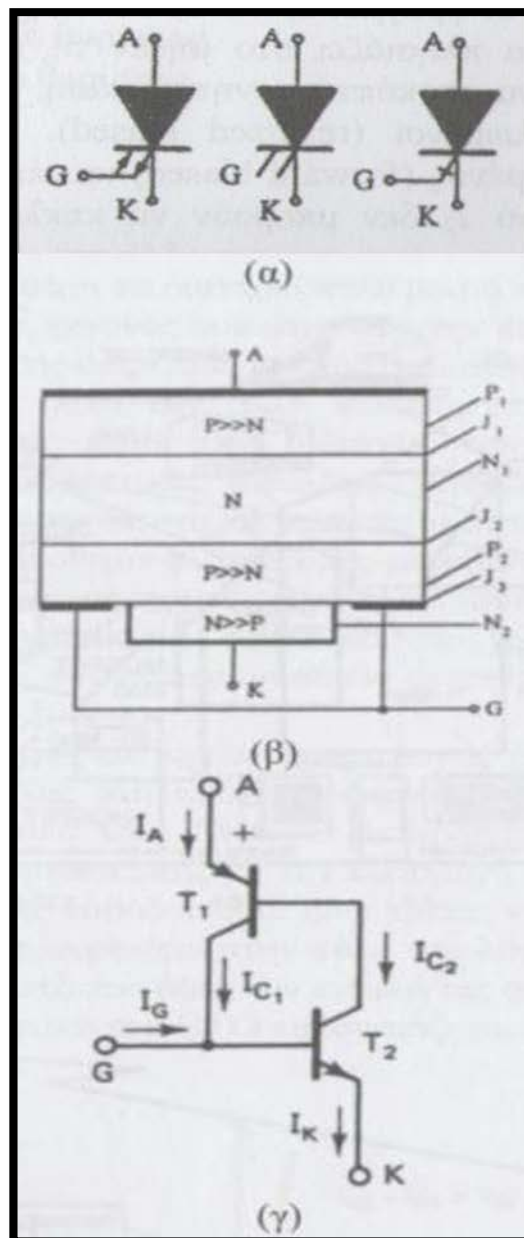
Πρέπει να σημειώσουμε ότι όταν το Triac πάει στην κατάσταση αγωγής μανδαλώνει λόγω της εσωτερικής του κατασκευής. Το Triac φεύγει από την κατάσταση αυτή (της μανδάλωσης) ή όταν το ρεύμα I_T του γίνει μηδέν ή πολωθεί ανάστροφα.

2.6. Gate Turn Off Thyristor (GTO)

Θυρίστορ με αποκοπή από την πύλη του

Το ημιαγωγικό στοιχείο GTO (Gate Turn Off) θυρίστορ, είναι ένα είδος θυρίστορ του οποίου η σβέση ή η αποκοπή επιτυγχάνεται μέσω της πύλης του (Gate). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το απλό θυρίστορ του οποίου η αποκοπή δεν επιτυγχάνεται μέσω της πύλης του αλλά μέσω του μηδενισμού του ρεύματος του ή μέσω της ανάστροφης πόλωσής του.

Στο σχήμα 2.9(α) παρουσιάζονται όλα τα πιθανά χρησιμοποιούμενα σύμβολα του GTO, στο σχήμα 2.9(β) παρουσιάζεται η κάθετος τομή του GTO και στο σχήμα 2.9(γ) παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας του.



Σχήμα 2.9 GTO θυρίστορ: α) Πιθανά σύμβολα, β) Δομή, γ) Ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας.

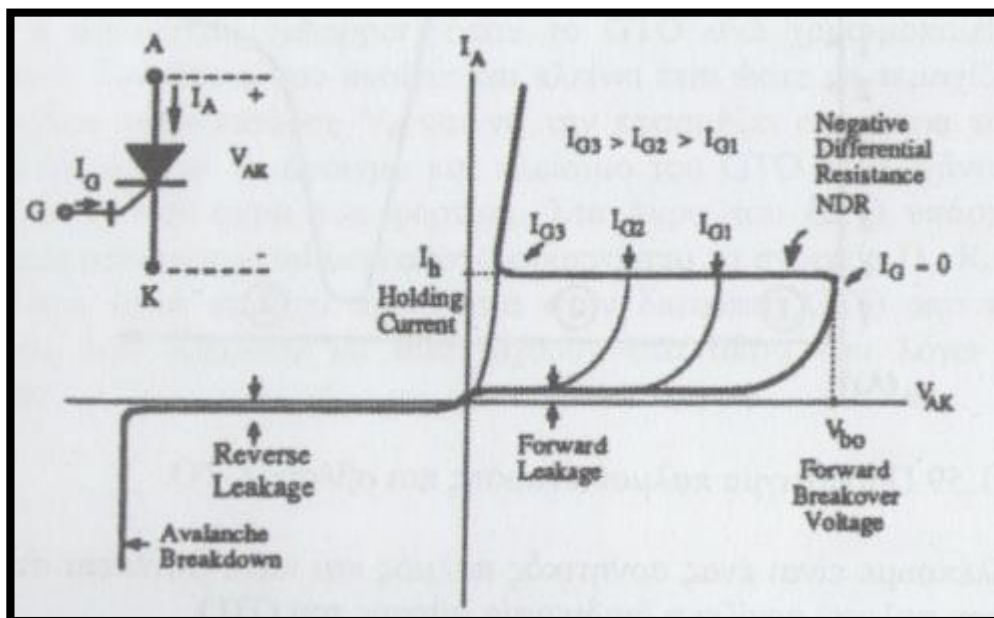
Οι εφαρμογές ισχύος μεταξύ 3 και 10 MW αποτελούν το πεδίο χρήσης του GTO ως ημιαγωγικού διακόπτη. Η διακοπτική του ταχύτητα φθάνει και έως 10KHz.

Το GTO είναι σε θέση να διατηρεί πολύ μικρή πτώση τάσης στα άκρα του κατά την αγωγή του, γεγονός που επιτρέπει την διέλευση υψηλών τιμών ρεύματος, ενώ ένας μικρής διάρκειας παλμός ρεύματος αρκεί για να το φέρει σε κατάσταση αγωγής. Από την άλλη πλευρά το GTO έχει μεγάλους χρόνους μετάβασης και κατά την διάρκεια των μεταβάσεων αυτών παρουσιάζει υψηλές διακοπτικές απώλειες γεγονός που περιορίζει τη μέγιστη διακοπτική του συχνότητα σε μερικές εκατοντάδες Hz.

Επίσης το GTO είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε απότομες μεταβολές ρεύματος κατά την μετάβαση αγωγής και σε απότομες μεταβολές τάσης κατά τη μετάβαση αποκοπής. Αυτή η ευαισθησία επιβάλλει τη χρήση προστατευτικών κυκλωμάτων (snubbers) για να περιορισθούν οι ρυθμοί αύξησης ρεύματος και τάσης (di/dt , dv/dt).

Το GTO μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής όταν μια θετική τάση εφαρμοσθεί μεταξύ πύλης και καθόδου δημιουργώντας έτσι ένα θετικό ρεύμα έναυσης στην πύλη του. Το GTO μεταβαίνει από την κατάσταση αγωγής στην κατάσταση αποκοπής με την εφαρμογή μιας αρνητικής τάσης μεταξύ της πύλης και της καθόδου του. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι το αρνητικό ρεύμα που δημιουργείται στην πύλη του λόγω της εφαρμογής της αρνητικής τάσης είναι αυτό που δίνει την εντολή της σβέσης του.

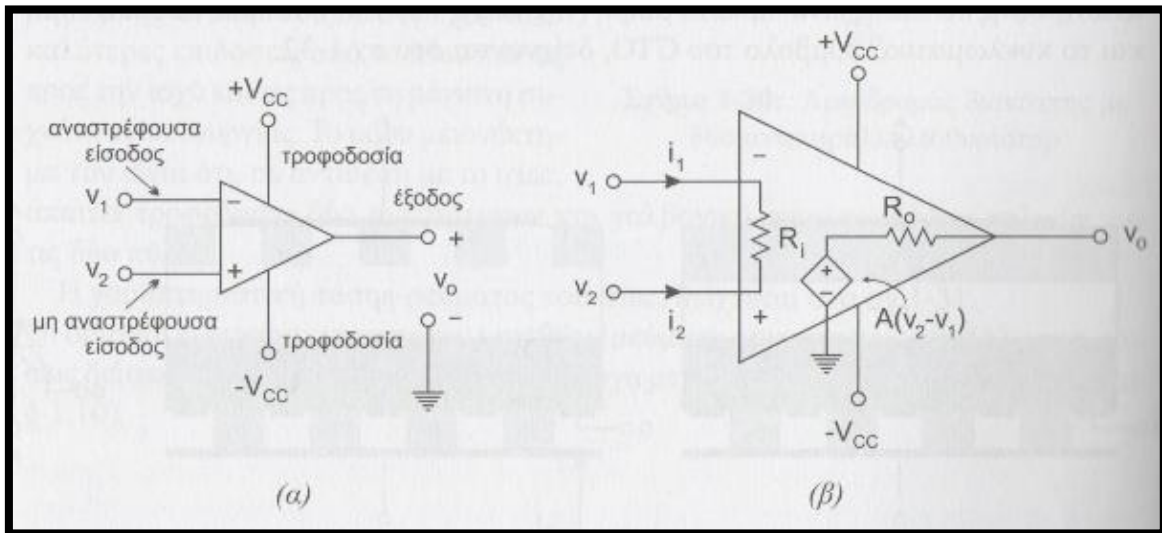
Η V-I χαρακτηριστική του GTO παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.10 V-I χαρακτηριστική του GTO

2.7. Τελεστικός Ενισχυτής

Ο τελεστικός ενισχυτής (**operational amplifier**), αποτελεί μία ειδική περίπτωση D.C. ενισχυτή υψηλού κέρδους. Χρησιμοποιείται ευρέως σε κυκλώματα ελέγχου μετατροπέων με ηλεκτρονικά ισχύος, κυκλώματα μετρήσεων, προσαρμογής, ηλεκτρονικά φίλτρα κ.λπ. Το κυκλωματικό σύμβολο του τελεστικού ενισχυτή καθώς και το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα, δίνονται στο σχήμα 2. 11.



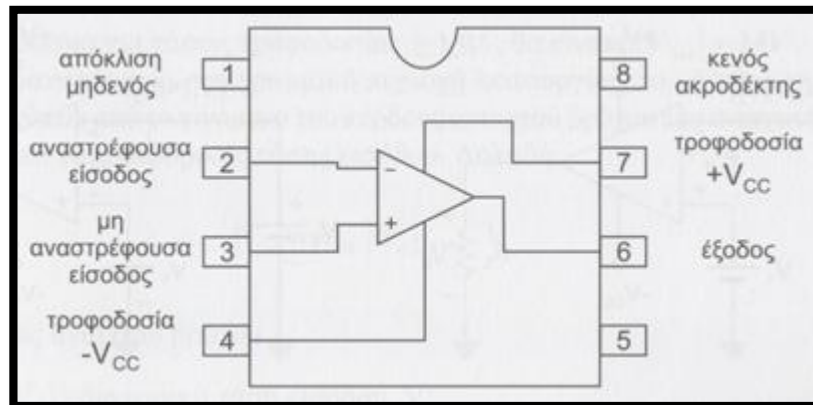
Σχήμα 2.11 Τελεστικός ενισχυτής (α) Κυκλωματικό σύμβολο (β) ισοδύναμο κύκλωμα

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

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

Οι βασικοί ακροδέκτες ενός τελεστικού ενισχυτή είναι πέντε. Δύο από αυτούς είναι εισοδοί, δύο είναι για την τροφοδοσία και ένας έξοδος.

Η είσοδος με το σύμβολο “-” είναι γνωστή ως αναστρέφουσα είσοδος (**inverting input**) και η είσοδος με το σύμβολο “+” ως μη αναστρέφουσα είσοδος (**non inverting input**).



Σχήμα 2.12 Ο τελεστικός ενισχυτής ως ολοκληρωμένο 8 ακροδεκτών (8-leads, dip top view)

Η πιο συνηθισμένη μορφή συσκευασίας που συναντάται ένας τελεστικός ενισχυτής, είναι ως ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα οκτώ ακροδεκτών, σχ. 2.12 .

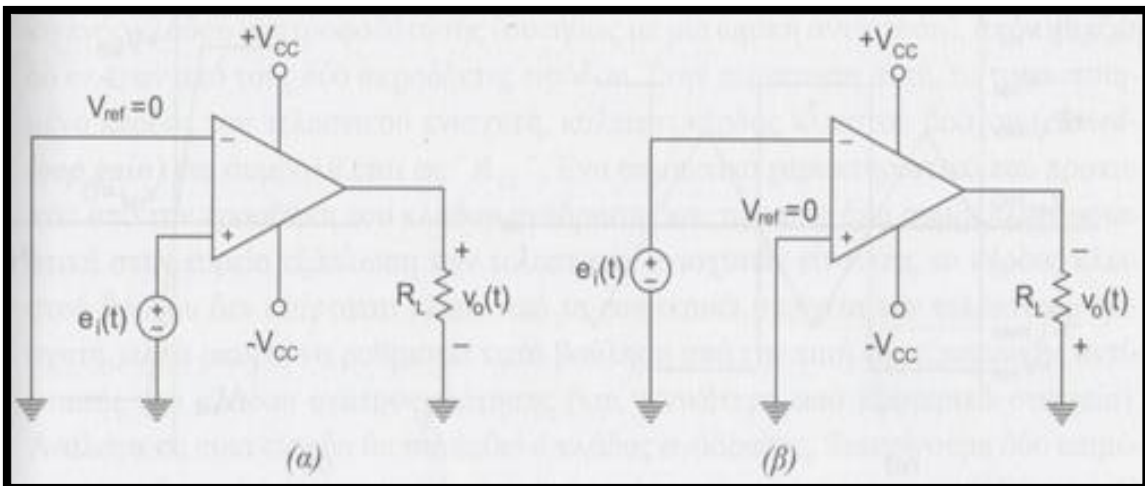
Σύμφωνα με το σχ. 2.12, η αναστρέφουσα είσοδος συνδέεται στον ακροδέκτη 2, η μη αναστρέφουσα είσοδος στον ακροδέκτη 3, η έξοδος στον ακροδέκτη 6 και οι δύο dc τροφοδοσίες (θετική και αρνητική) στους ακροδέκτες 7 και 4 αντίστοιχα. Οι ακροδέκτες 1 και 5 χρησιμεύουν για τη ρύθμιση και την εξισορρόπηση της λειτουργίας του τελεστικού ενισχυτή και ο ακροδέκτης 8 είναι κενός (μη συνδεδεμένος).

2.7.1. Εφαρμογές τελεστικών ενισχυτών

Παρακάτω παραθέτονται μερικές αντιπροσωπευτικές εφαρμογές των τελεστικών ενισχυτών, αρκετά χρήσιμες για την κατασκευή κυκλωμάτων ελεγχού.

- **Συγκριτής**

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



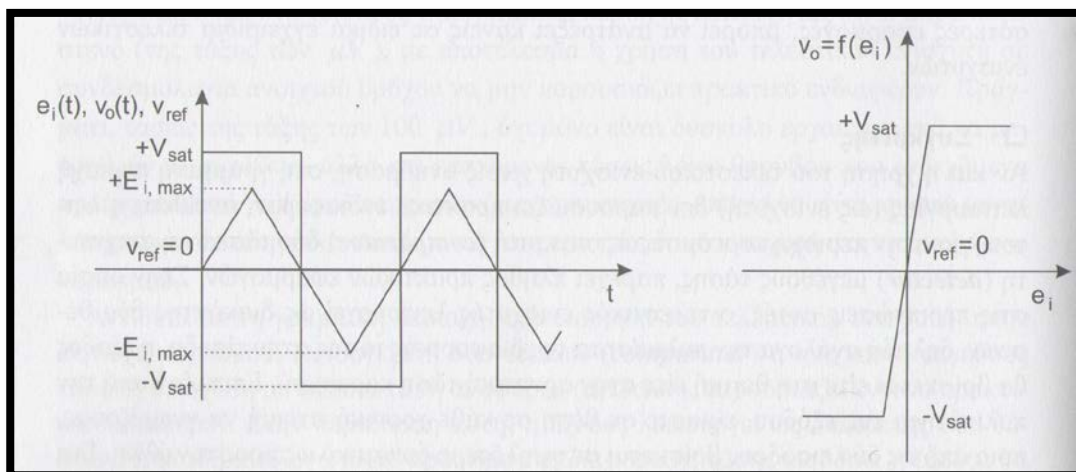
Σχήμα 2.13 Ανιχνευτής διέλευσης μηδενός: (α) Μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία, (β) Αναστρέφουσα συνδεσμολογία

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

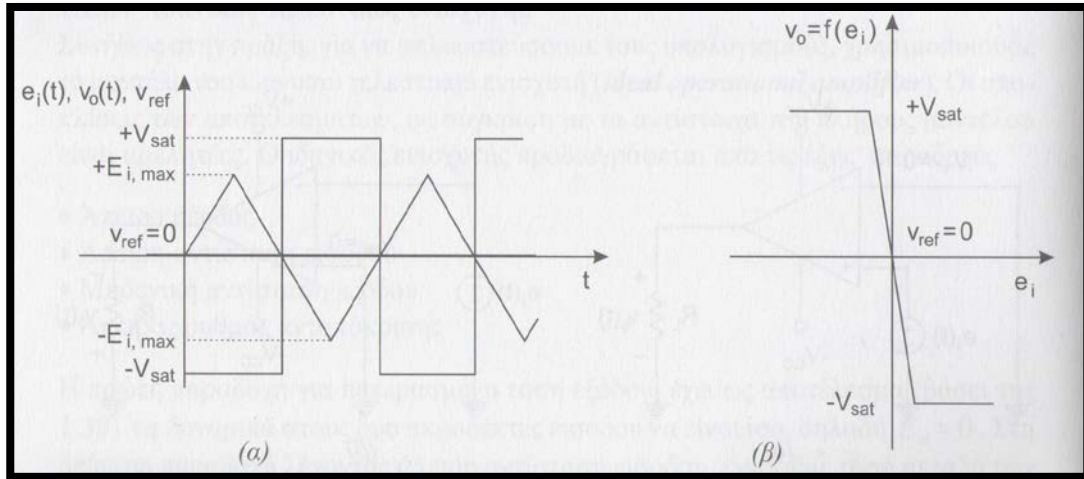
Στη λειτουργία του συγκριτή, γίνεται στην ουσία σύγκριση μιας γενικά χρονικά μεταβαλλόμενης τάσης με μια τάση αναφοράς.

Στην περίπτωση του ανιχνευτή διέλευσης μηδενός, η τάση αναφοράς είναι μηδενική. Ανάλογα σε ποιον ακροδέκτη θα συνδεθεί η τάση αναφοράς (δηλαδή ποιος από τους δύο ακροδέκτες εισόδων θα γειωθεί), διακρίνουμε τις εξής δύο συνδεσμολογίες, σχ.2.13 .

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



Σχήμα 2.14 Μη αναστρέφων ανιχνευτής μηδενός: (α) Κυματομορφές τάσεων εισόδου-εξόδου, (β) Γραφική απεικόνιση εισόδου-εξόδου

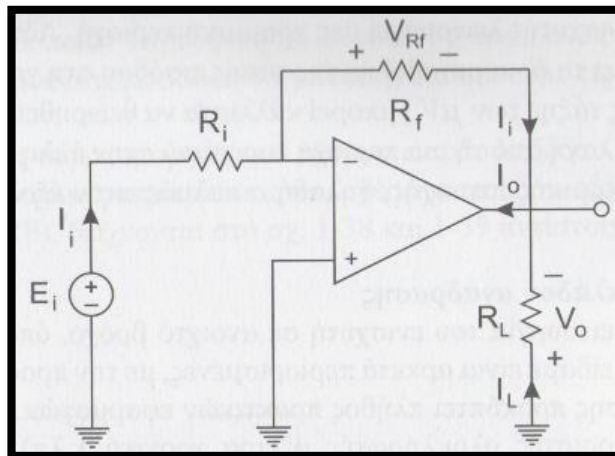


Σχήμα 2.15 Αναστρέφων ανιχνευτής μηδενός: (α) Κυματομορφές τάσεων εισόδου-εξόδου, (β) Γραφική απεικόνιση εισόδου-εξόδου

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

▪ **Αναστρέφουσα συνδεσμολογία**

Η συνδεσμολογία του αναστρέφοντος ενισχυτή (inverting amplifier), επιτυγχάνεται με τη σύνδεση του κλάδου ανάδρασης στην αναστρέφουσα είσοδο (σχ.2.16).



Σχήμα 2.16 Αναστρέφων ενισχυτής

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

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

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

$$I_i = \frac{E_i}{R_i}, A \quad (1)$$

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

$$V_{Rf} = I_i R_f = \frac{E_i}{R_i} R_f, V \quad (2)$$

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

$$V_o = -V_f = -\frac{R_f}{R_i} E_i = -A_{cl} E_i, V \quad (3)$$

Όπου:

$$A_{cl} = -\frac{R_f}{R_i} \quad (4)$$

Το πρόσημο (-) στην (3), εισάγει μια διαφορά φάσης 180° στο σήμα εξόδου, σε σχέση με το σήμα εισόδου.

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

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

$$I_o = I_i + I_L = \frac{E_i}{R_i} + \frac{V_o}{R_L}, A \quad (5)$$

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

▪ **Αθροιστής (inverting adder)**

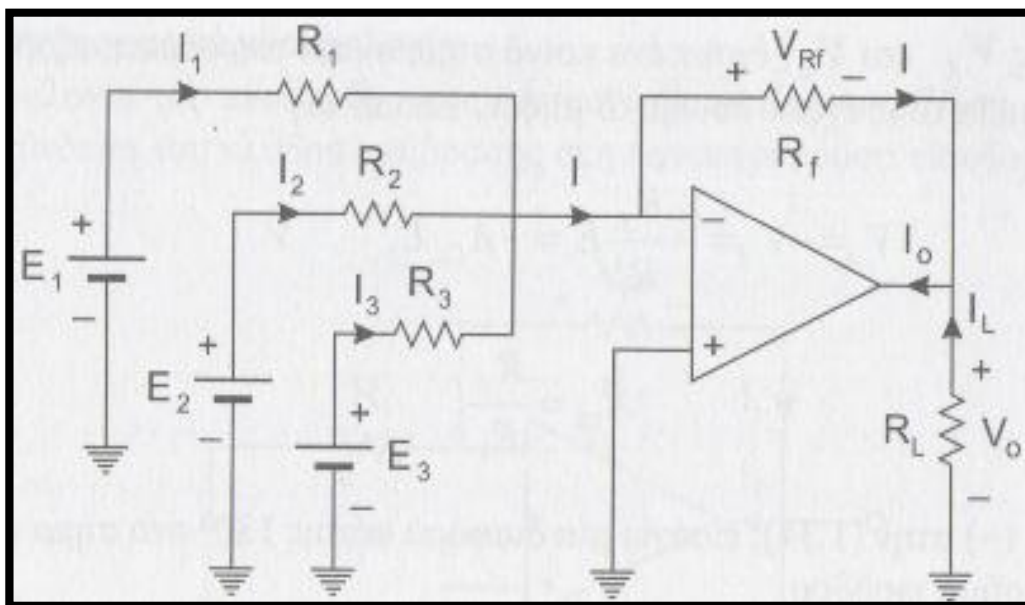
Με την διάταξη του σχήματος 2.17, η οποία αποτελεί εφαρμογή του αναστρέφοντος ενισχυτή, μπορούμε να αθροίσουμε οσαδήποτε σήματα εισόδων με κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας. Τα σήματα αυτά δεν είναι απαραίτητο να είναι συνεχή, αλλά μπορεί να είναι οποιασδήποτε μορφής και πολικότητας.

Σύμφωνα με το σχήμα 2.16 και λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση της λειτουργίας του αναστρέφοντος ενισχυτή, ισχύουν τα εξής:

$$V_{(+)} = V_{(-)} = 0 V \quad (6)$$

Τα ρεύματα εισόδου I_1, I_2, I_3 δίνονται από τις σχέσεις:

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1}, \quad I_2 = \frac{E_2}{R_2}, \quad I_3 = \frac{E_3}{R_3}, \quad A \quad (7)$$



Σχήμα 2.17 Συνδεσμολογία αθροιστή

Επιπλέον

$$I = I_1 + I_2 + I_3, \quad A \quad (8)$$

Επομένως:

$$V_o = -V_f = -R_f I = -\left(\frac{R_f}{R_1} E_1 + \frac{R_f}{R_2} E_2 + \frac{R_f}{R_3} E_3\right), \quad V \quad (9)$$

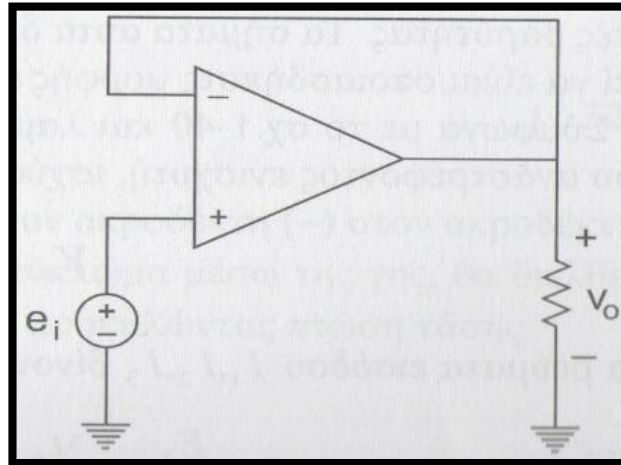
Πράγματι λοιπόν σύμφωνα με την σχέση (8), η τάση εξόδου προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους τάσεων εισόδου, με συντελεστές βαρύτητας τα επιμέρους κέρδη κλειστού βρόχου.

Στην ειδική περίπτωση όπου $R_1 + R_2 + R_3 = R_f$, η (8) παίρνει την μορφή:

$$V_o = -(E_1 + E_2 + E_3), \quad V \quad (10)$$

- **Ακόλουθος τάσης**

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



Σχήμα 2.18 Συνδεσμολογία ακολούθου τάσης

Ο ακόλουθος τάση (voltage follower) ή ο ενισχυτής απομόνωσης (buffer amplifier), σχ.2.18, αποτελεί την ιδανική λύση της “ενδιάμεσης βαθμίδας”, για την προσαρμογή αντίστασης μεταξύ δύο βαθμίδων, στις οποίες οι απαιτήσεις απευθείας σύζευξης δεν ικανοποιούνται.

Σύμφωνα με το σχ.2.18 ισχύουν τα εξής:

$$V_{(+)} = V_{(-)} = e_i , V \quad (11)$$

Αλλά λόγω της συγκεκριμένης σύνδεσης του κλάδου ανάδρασης,

$$v_o = e_i , V \quad (12)$$

Επομένως, σε κάθε χρονική στιγμή η τάση εξόδου ισούται κατά μέγεθος και φάση με την τάση εισόδου. Δηλαδή η τάση εξόδου “ακολουθεί” την τάση εισόδου, εξού και η ονομασία ακόλουθος τάσης. Προφανώς λόγω της σχέσης (12), το κέρδος της ακόλουθης τάσης ισούται με την μονάδα.

3.ΕΙΔΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΩΝ ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

3.1.Μονοφασική μη ελεγχόμενη γέφυρα

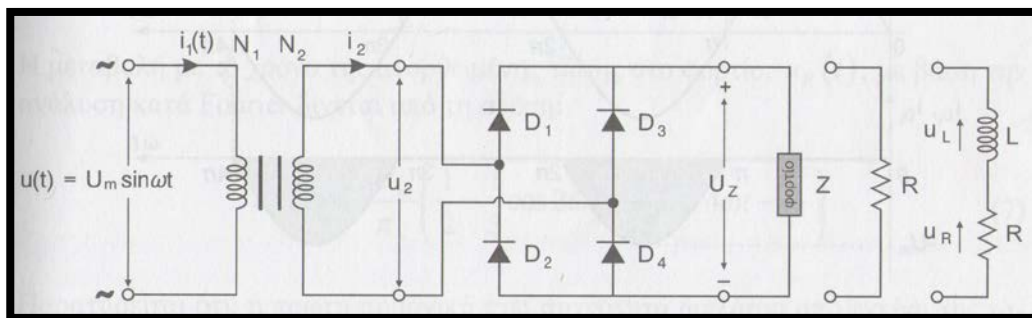
Αυτή η μονοφασική γέφυρα είναι γνωστή και ως διφασική γέφυρα ή γέφυρα δύο παλμών (ανά περίοδο της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου)

Κατά την θετική ημιπερίοδο οι δίοδοι D_1 και D_4 είναι ορθά πολωμένες και κλείνουν κύκλωμα μέσω του φορτίου. Ενώ κατά την αρνητική ημιπερίοδο, είναι ορθά πολωμένες οι δίοδοι D_2 και D_3 .

Λειτουργία με ωμικό φορτίο R

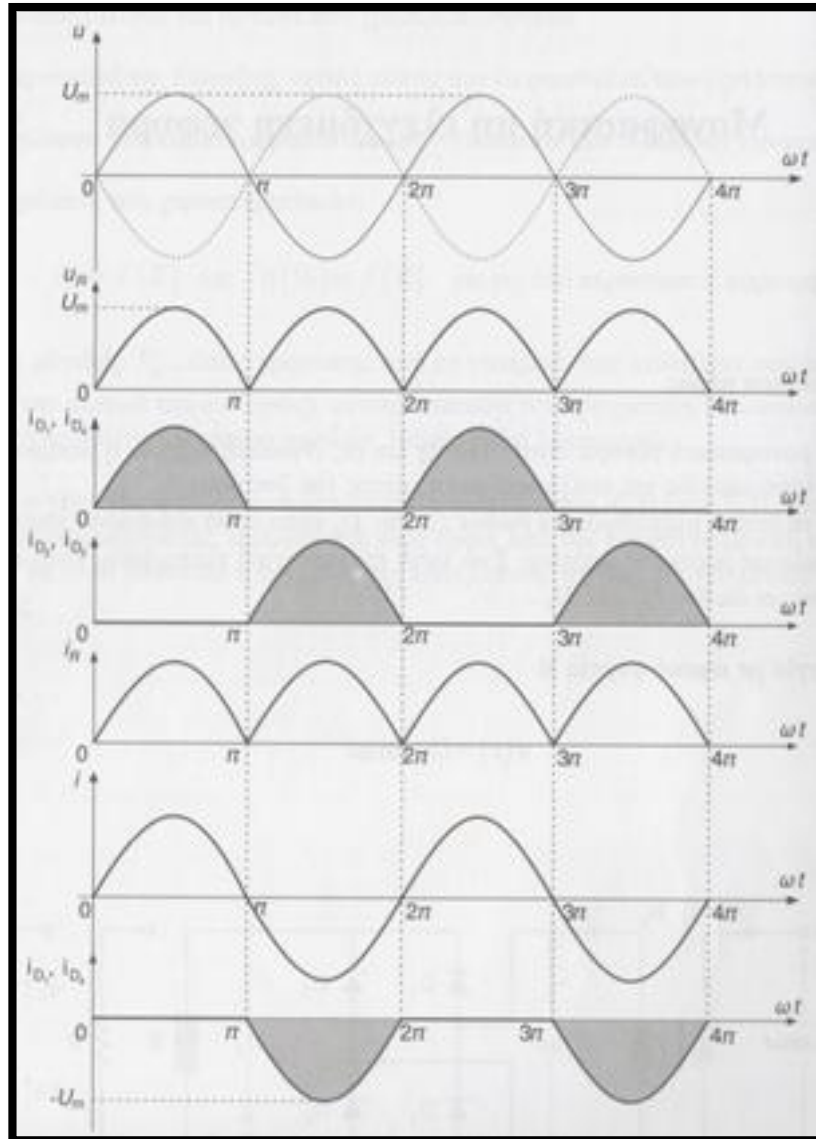
Έστω:

$$u(t) = U_m \sin \omega t$$



Σχήμα 3.1 Μη ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα

Από τα διαγράμματα του σχήματος 3.2 παρατηρούμε ότι για κάθε ημιπερίοδο άγουν δύο δίοδοι χιαστί. Σε σύγκριση δε με το κύκλωμα της απλής ανόρθωσης, έχουμε διπλάσια τιμή της τάσης και καλύτερη ποιότητα της κυματομορφής ως προς τη προσέγγιση της συνεχούς συνιστώσας (δηλαδή μικρότερη κυμάτωση).



Σχήμα 3.2 Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων μονοφασικής μη ελεγχόμενης γέφυρας δύο παλμών με ωμικό φορτίο και λόγο μετασχηματισμού $\frac{N_1}{N_2} = 1$.

Λειτουργία με ωμικό – επαγωγικό φορτίο

Το ηλεκτρικό κύκλωμα του μετατροπέα, με ωμικό – επαγωγικό φορτίο παρουσιάζεται στο σχ. 3.1 όπου στη θέση του φορτίου είναι μια ωμική αντίσταση σε σειρά με μια καθαρή αυτεπαγωγή.

Η μεταβολή των μεγεθών, στο χρόνο, φαίνεται στο σχ. 3.3

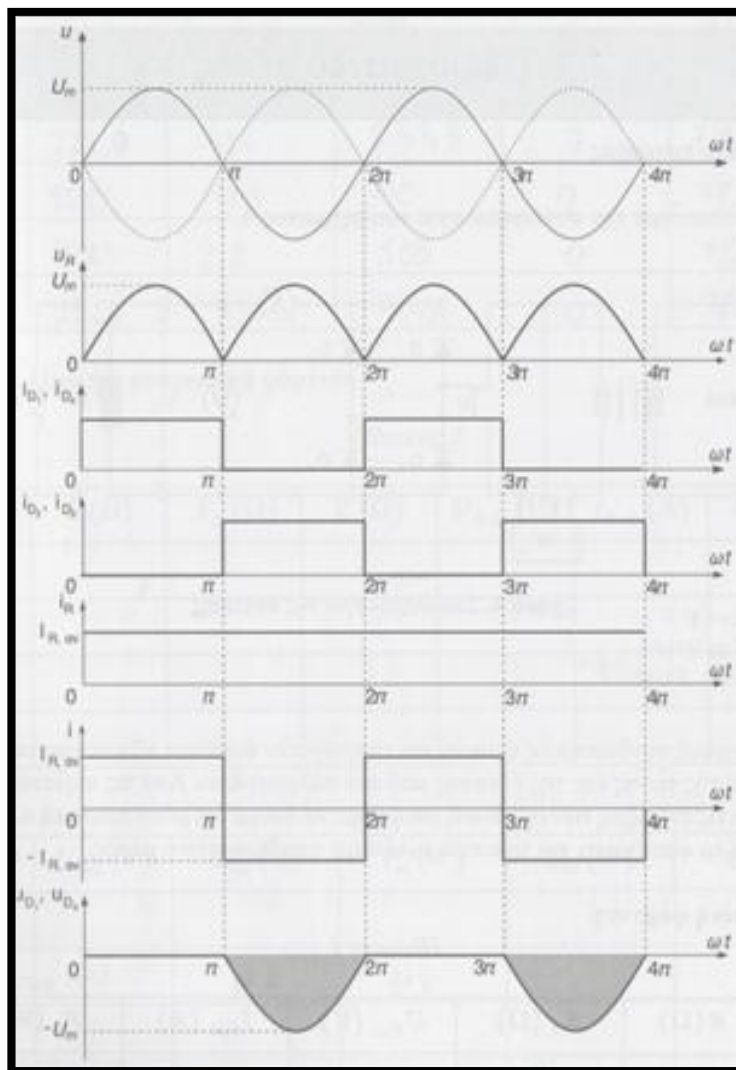
Όπως και στην περίπτωση της λειτουργίας με ωμικό φορτίο, για τα διαστήματα:

- $0 \leq \omega t \leq \pi$, μεταξύ των διόδων με κοινή κάθοδο (D_1, D_3), θα άγει αυτή που έχει άνοδο με θετικότερο δυναμικό, δηλαδή η D_1 , και μεταξύ των διόδων με κοινή άνοδο (D_2, D_4), θα άγει αυτή που έχει κάθοδο με αρνητικότερο δυναμικό, δηλαδή η D_4 .

- $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$, μεταξύ των διόδων με κοινή κάθοδο (D_1, D_3), θα άγει αυτή που έχει άνοδο με θετικότερο δυναμικό, δηλαδή η D_3 , και μεταξύ των διόδων με κοινή άνοδο (D_2, D_4), θα άγει αυτή που έχει κάθοδο με αρνητικότερο δυναμικό, δηλαδή η D_2 .

Λειτουργία με ωμικό – χωρητικό φορτίο

Η λειτουργία με ωμικό - χωρητικό φορτίο, είναι ανάλογη με τη λειτουργία του μη ελεγχόμενου μονοφασικού μετατροπέα με δύο διόδους.



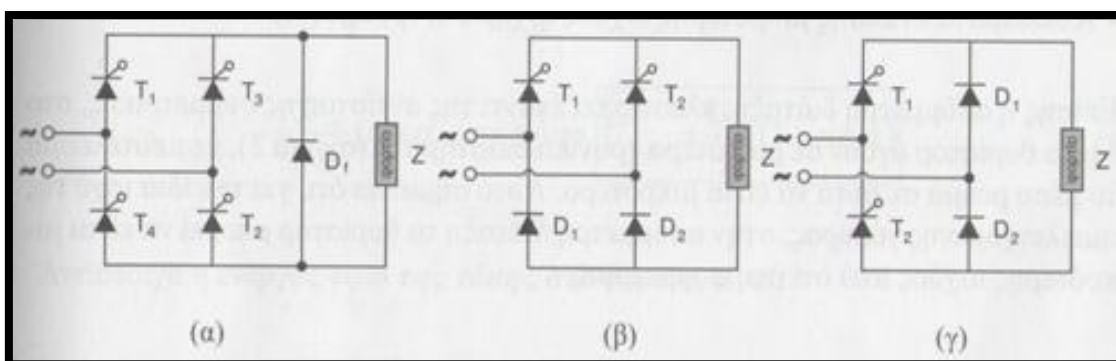
Σχήμα 3.3 Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων μονοφασικής μη ελεγχόμενης γέφυρας δύο παλμών με ωμικό - επαγωγικό φορτίο.

3.2. Μονοφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα

Γενικά με τον όρο “**ημιελεγχόμενες διατάξεις**” εννοούμε τις διατάξεις εκείνες που περιλαμβάνουν ελεγχόμενα και μη ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία (π.χ. θυρίστορ και διόδους). Δηλαδή οι ελεγχόμενες διατάξεις, είναι κάτι το ενδιάμεσο μεταξύ των πλήρως ελεγχόμενων και των απλών διατάξεων με διόδους.

Στο σχήμα 3.4, παρουσιάζονται οι τρεις διαφορετικοί τύποι μονοφασικών ημιελεγχόμενων διατάξεων, ενώ στο σχήμα 3.5 οι αντίστοιχες κυματομορφές τάσεων - εντάσεων ρεύματος, καθώς και τα διαστήματα αγωγής των επιμέρους διακοπτικών στοιχείων, στην περίπτωση ωμικής φόρτισης.

Το κύκλωμα (α), αποτελείται από μια **πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα και μια δίοδο ελεύθερης ροής** παράλληλα με το φορτίο. Η δίοδος αυτή ενεργοποιείται (βραχυκυκλώνοντας το φορτίο), όταν η τάση στο φορτίο πάει να γίνει αρνητική.



Σχήμα 3.4 Μονοφασικές ημιελεγχόμενες διατάξεις: (α) πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα με δίοδο ελεύθερης ροής, (β) συμμετρική ημιελεγχόμενη γέφυρα, (γ) ασύμμετρη ημιελεγχόμενη γέφυρα.

Το κύκλωμα (β), είναι γνωστό ως **συμμετρική ημιελεγχόμενη διάταξη**, διότι κάθε κλάδος του παρέχει μία δίοδο και ένα θυρίστορ.

Ανάλογα η διάταξη (γ) η οποία περιέχει τις διόδους και τα θυρίστορ σε ξεχωριστούς κλάδους, είναι γνωστή ως **ασύμμετρη ημιελεγχόμενη διάταξη**.

Σε αντίθεση με τις πλήρως ελεγχόμενες, οι ημιελεγχόμενες διατάξεις λειτουργούν μόνο στο πρώτο τεταρτημόριο, δηλαδή ως ανορθωτές και όχι ως αναστροφείς. Η τάση στα άκρα του φορτίου, σύμφωνα με το σχήμα 3.4, δεν μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές, διότι κάθε φορά κάποιος συγκεκριμένος κλάδος βραχυκυκλώνει το φορτίο, με αποτέλεσμα την εκφόρτιση της μαγνητικής ενέργειας της αυτεπαγωγής (μονοπάτι ελεύθερας ροής).

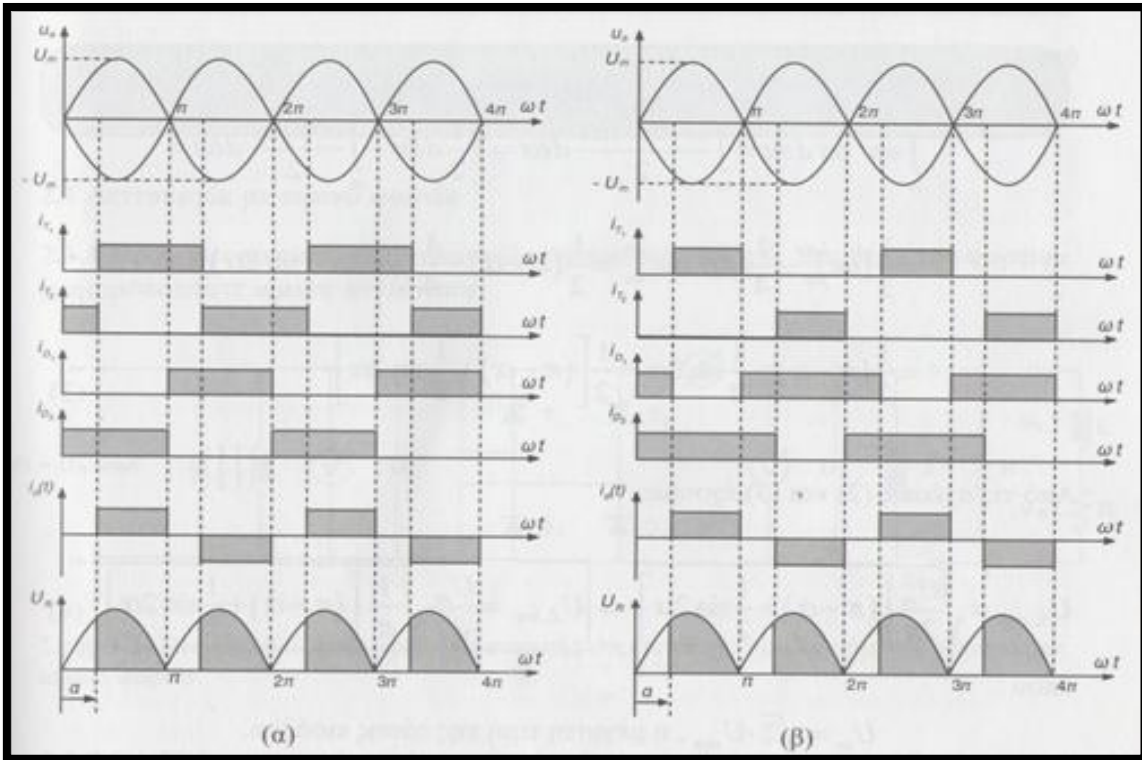
Σύμφωνα με το σχήμα 3.4, στην περίπτωση της συνεχούς αγωγής και για μια περίοδο της εναλλασσόμενης τάσης, στα χρονικά διαστήματα, $\alpha \leq \omega t \leq \pi + \alpha$ και $2\pi \leq \omega t \leq 2\pi + \alpha$, έχουμε τη δράση των εξής κλάδων ελεύθερης ροής ανά κύκλωμα.

Κύκλωμα	Πρώτη ημιπερίοδο	Δεύτερη ημιπερίοδο
(α)	Κλάδος D_f	Κλάδος D_f
(β)	Κλάδος $T_1 - D_1$	Κλάδος $T_2 - D_2$
(γ)	Κλάδος $D_2 - D_1$	Κλάδος $D_1 - D_2$

Για λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο (λειτουργία ανορθωτή), οι **ημιελεγχόμενες διατάξεις** πλεονεκτούν έναντι των αντίστοιχων **πλήρως ελεγχόμενων**, στα εξής:

- Έχουν μικρότερο κόστος, διότι χρησιμοποιούν τα μισά θυρίστορ
- Μικρότερη κατανάλωση αέργου ισχύος, καλύτερο συνημίτονο
- Δεν χρειάζονται ξεχωριστή δίοδο ελεύθερης ροής [σχ. 3.4 (β), και (γ)]
- Κυκλώματα έναυσης μικρότερης ισχύος [σχ. 3.4 (β), και (γ)]

Επίσης η ασύμμετρη διάταξη, πλεονεκτεί έναντι της αντίστοιχης συμμετρικής, στο ότι τα θυρίστορ άγουν σε μικρότερα χρονικά διαστήματα (σχ.3.5), με αποτέλεσμα το μέσο ρεύμα σε αυτά να είναι μικρότερο. Αυτό σημαίνει ότι, για την ίδια ισχύ της ημιελεγχόμενης γέφυρας, στην ασύμμετρη διάταξη τα θυρίστορ μπορεί να είναι μικρότερης ισχύος από ότι στη συμμετρική.



Σχήμα 3.5 Κυματομορφές μονοφασικής ημιελεγχόμενης διάταξης με ωμικό φορτίο: (α) συμμετρική ημιελεγχόμενη γέφυρα (β) ασύμμετρη ημιελεγχόμενη γέφυρα

3.3. Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα

3.3.1. Θεωρητικό μέρος

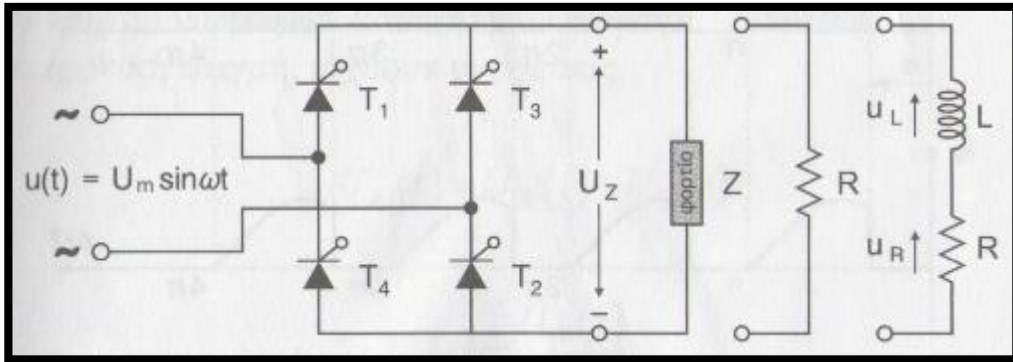
Η πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα (Σχήμα 3.6) αποτελεί την πληρέστερη διάταξη μονοφασικής ανόρθωσης. Η χρήση μετασχηματιστή στην είσοδο της διάταξης είναι προαιρετική, συνίσταται όμως για λόγους προστασίας (γαλβανική απομόνωση του φορτίου).

Όπως θα δείξουμε στη συνέχεια, η διάταξη αυτή είναι 2 τεταρτημορίων. Δηλαδή, με κατάλληλες προϋποθέσεις, εκτός από **λειτουργία ανορθωτή** (ροή ισχύος από το δίκτυο στο φορτίο), μπορούμε να έχουμε και **λειτουργία αντιστροφέα** (δίνοντας πλέον από την πλευρά του συνεχούς ρεύματος, ισχύ στο δίκτυο του εναλλασσομένου ρεύματος).

Ο παραπάνω μετατροπέας αποτελείται από τέσσερα θυρίστορ, δύο ανά ημιγέφυρα.

Για την ύπαρξη ρεύματος στο φορτίο, θα άγουν ταυτόχρονα τα θυρίστορ T_1 και T_2 , και αντίστοιχα τα T_3 και T_4 , τα οποία θα πυροδοτούνται, επίσης ταυτόχρονα.

Οι παλμοί έναυσης των δύο θυρίστορ που ανήκουν στην ίδια ημιγέφυρα, θα έχουν διαφορά φάσης 180° .



Σχήμα 3.6 Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα

Λειτουργία με ωμικό φορτίο

Η τάση τροφοδοσίας είναι ημιτονοειδής:

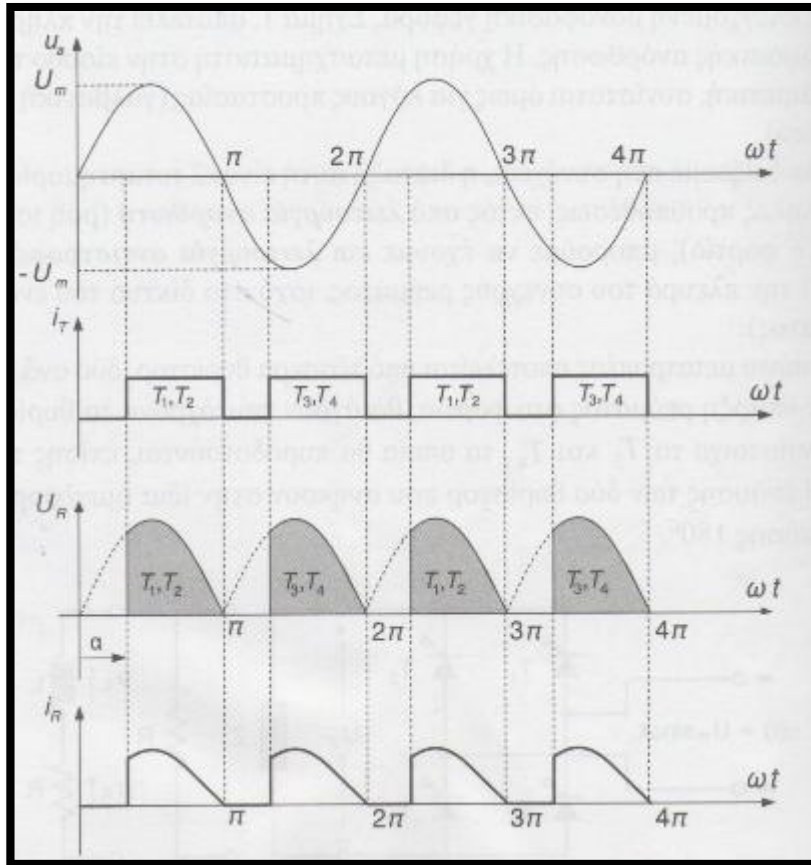
$$u(t) = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

- ✓ Για $\alpha < \omega t < \pi$, σε αγωγή εισέρχονται τα θυρίστορ T_1 και T_2 .
- ✓ Για $\pi + \alpha < \omega t < 2\pi$, σε αγωγή εισέρχονται τα θυρίστορ T_3 και T_4 .

Στο σχήμα 3.7, παρουσιάζονται τόσο οι κυματομορφές τάσεων και εντάσεων του ρεύματος, όσο και οι περιοχές αγωγής των θυρίστορ για τυχαία γωνία έναυσης α .

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου, δίνεται από την σχέση:

$$\begin{aligned}
 U_{L,\alpha v} &= \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi} [-\cos]_{\alpha}^{\pi} = \\
 &= \frac{U_m}{\pi} (\cos \alpha - \cos \pi) \Rightarrow \boxed{U_{L,\alpha v} = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)} \quad (2)
 \end{aligned}$$



Σχήμα 3.7 Κυματομορφές τάσεων - εντάσεων πλήρως ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας με ωμικό φορτίο

Αντίστοιχα η **ενεργός τιμή της τάσης στο φορτίο**, είναι:

$$U_{L,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m^2 \sin^2 \omega t d\omega t} = \sqrt{\frac{U_m^2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t d\omega t} \quad (3)$$

όπου:

$$\begin{aligned} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t d\omega t &= \int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} d\omega t = \int_{\alpha}^{\pi} \frac{1}{2} d\omega t - \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\cos 2\omega t}{2} d\omega t = \\ &= \frac{1}{2} [\omega t]_{\alpha}^{\pi} - \frac{1}{4} [\sin 2\omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{1}{2} (\pi - \alpha) - \frac{1}{4} (\sin 2\pi - \sin 2\alpha) = \\ &= \frac{1}{2} (\pi - \alpha) + \frac{1}{4} \sin 2\alpha = \frac{1}{2} [(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha] \end{aligned} \quad (4)$$

Από τις σχέσεις (3) και (4), έχουμε:

$$U_{L,rms} = \sqrt{\frac{U_m^2}{2\pi} \left[(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right]} \Rightarrow$$

$$\boxed{U_{L,rms} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right]}} \quad (5)$$

Λειτουργία με ωμικό – επαγωγικό φορτίο

Στη λειτουργία ανορθωτή και όταν το φορτίο έχει επαγωγικό χαρακτήρα, συνίσταται η τοποθέτηση μιας διόδου ελεύθερης ροής παράλληλα στο φορτίο.

Στο σχήμα 3.8, παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσεων - εντάσεων, των διαφόρων συνιστωσών του κυκλώματος, για τυχαία γωνία έναυσης “α”.

Στις κυματομορφές του σχήματος 3.8, υποτίθεται ότι η αυτεπαγωγή του φορτίου έχει την απαιτούμενη τιμή, έτσι ώστε να εξασφαλίζει συνεχή αγωγή, με αποτέλεσμα η τάση στο φορτίο να παίρνει και αρνητικές τιμές.

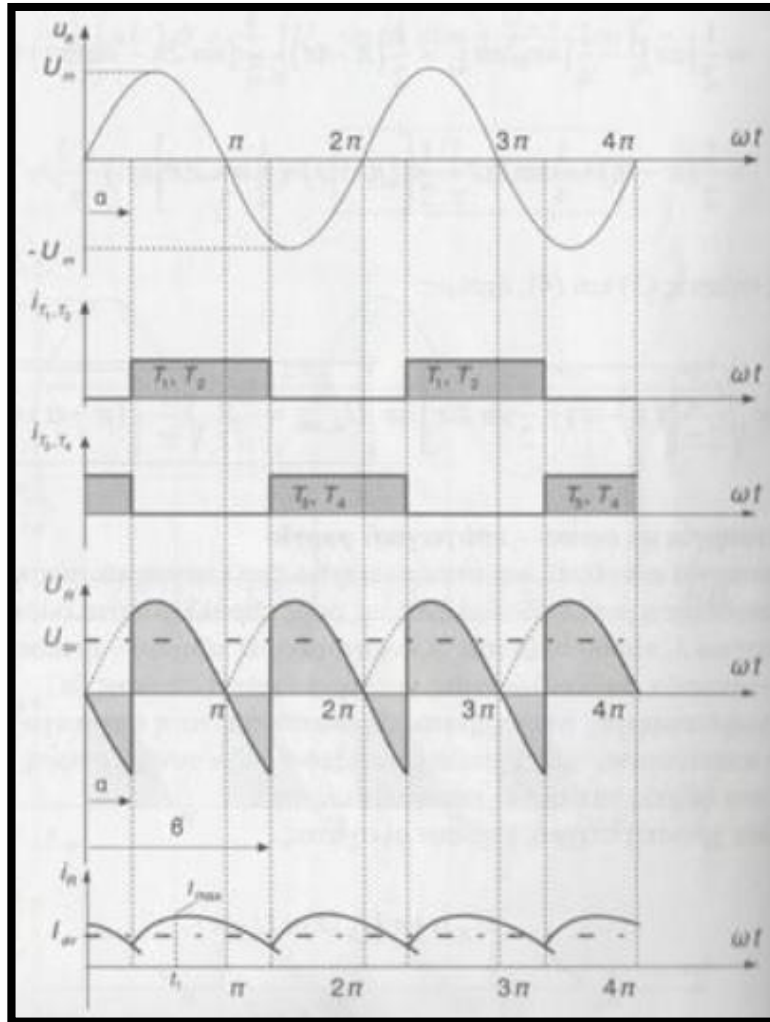
Σε κάθε χρονική στιγμή, ισχύουν οι σχέσεις:

$$U_Z(t) = U_R(t) + U_L(t) \quad (6)$$

$$I_Z(t) = \frac{U_R(t)}{R} \quad (7)$$

Σύμφωνα με το σχήμα 3.8, διακρίνουμε τις εξής περιοχές λειτουργίας:

- Στο διάστημα, $\alpha \leq \omega t \leq \pi$ και οι τρεις τάσεις (U_Z , U_R , U_L) είναι θετικές (το ρεύμα είναι πάντα θετικό καθόσον τα θυρίστορ είναι μονοφάρα στοιχεία), με αποτέλεσμα το δίκτυο να δίνει ενέργεια και στην αντίσταση και στην αυτεπαγωγή. Η μαγνητική ενέργεια της αυτεπαγωγής όμως δεν καταναλίσκεται (άεργη ισχύς) και ούτε μπορεί να χαθεί (λόγω της αρχής διατήρησης της ενέργειας), με αποτέλεσμα την παράσταση του διαστήματος αγωγής πέρα των 180° (όπου η τάση του δικτύου τείνει να πολώσει ανάστροφα τα θυρίστορ που άγουν), μέχρι την πλήρη εκφόρτιση του πηνίου.



Σχήμα 3.8 Κυματομορφές τάσεων - εντάσεων, πλήρως ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας με ωμικό - επαγωγικό φορτίο για συνεχή αγωγή

Το διάστημα φόρτισης της αυτεπαγωγής, βρίσκεται εύκολα από τη σχέση τάσεως - ρεύματος στα άκρα της:

$$U_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (8)$$

Πράγματι σύμφωνα με τη σχέση 8 και το σχήμα 3.8, στο διάστημα $\alpha \leq \omega t \leq t_1$ είναι θετικό με αποτέλεσμα την φόρτιση της αυτεπαγωγής καθότι:

$$U_L(t), U_Z(t) > 0 \quad (9)$$

Επομένως στο διάστημα αυτό, $\alpha \leq \omega t \leq t_1$, το δίκτυο δίνει ενέργεια και στην αντίσταση και στην αυτεπαγωγή. Δηλαδή:

$$P_{in}(t) = P_R(t) + P_L(t) \quad (10)$$

- Στο διάστημα $t_1 \leq \omega t \leq \pi$, έχουμε:

$$\frac{dI_Z}{dt} < 0 \quad U_L < 0 \quad (11)$$

και

$$U_R > 0, \quad U_Z > 0 \quad (12)$$

Οπότε στο διάστημα αυτό, η αντίσταση τροφοδοτείται και από το δίκτυο αλλά και από την αυτεπαγωγή. Επομένως:

$$P_{in}(t) + P_L(t) = P_R(t) \quad (13)$$

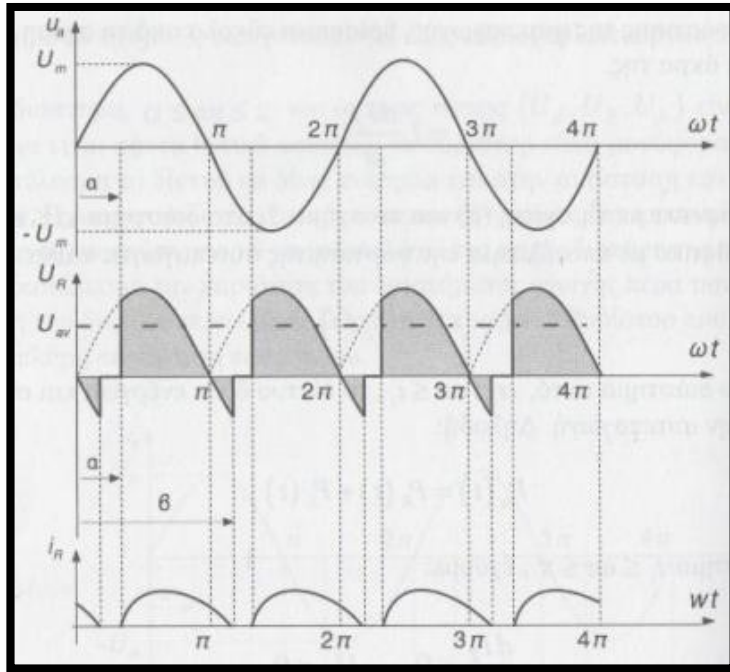
- Τέλος στο διάστημα $\pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha$, η τάση του δικτύου γίνεται αρνητική, η τάση στα άκρα της αυτεπαγωγής εξακολουθεί να είναι αρνητική, με αποτέλεσμα στο ανωτέρω διάστημα η αυτεπαγωγή να δίνει ενέργεια και στο δίκτυο και στην αντίσταση. Άρα:

$$P_L(t) = P_{in}(t) + P_R(t) \quad (14)$$

Στην περίπτωση όπου η τιμή της αυτεπαγωγής δεν μας εξασφαλίζει συνεχή αγωγή, το διάστημα αγωγής περιορίζεται στην περιοχή (σχήμα 3.9) :

$$\alpha \leq \omega t \leq \beta \quad \text{όπου} \quad \pi \leq \beta \leq \pi + \alpha \quad (15)$$

όπου β , η τυχαία γωνία μηδενισμού του ρεύματος.



Σχήμα 3.9 Κυματομορφές τάσεων - εντάσεων, πλήρως ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας με ωμικό - επαγωγικό φορτίο για ασυνεχή αγωγή.

Για τη **μέση τιμή της τάσης στο φορτίο**, ανάλογα με το είδος της αγωγής, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

α. Συνεχής αγωγή (φορτίο R, L)

$$\begin{aligned}
 U_{L,\alpha\nu} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} U_m \sin \omega t \, d\omega t = \frac{U_m}{\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi+\alpha} = \frac{U_m}{\pi} [\cos \alpha - \cos(\pi+\alpha)] = \\
 &= \frac{U_m}{\pi} [\cos \alpha - \cos \pi \cos \alpha + \sin \pi \sin \alpha] \Rightarrow \boxed{U_{L,\alpha\nu} = \frac{2U_m}{\pi} \cos \alpha} \quad (16)
 \end{aligned}$$

β. Ασυνεχής αγωγή (φορτίο R, L)

$$\begin{aligned}
 U_{L,\alpha\nu} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} U_m \sin \omega t \, d\omega t = \frac{U_m}{\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\beta} \Rightarrow \\
 &\boxed{U_{L,\alpha\nu} = \frac{U_m}{\pi} (\cos \alpha - \cos \beta)} \quad (17)
 \end{aligned}$$

Αντίστοιχα, η **ενεργός τιμή της τάσης στο φορτίο RL** στις αντίστοιχες περιπτώσεις, είναι:

α. Συνεχής αγωγή (φορτίο R, L)

$$U_{L,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} U_m^2 \sin^2 \omega t \, d\omega t} = \sqrt{\frac{U_m^2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sin^2 \omega t \, d\omega t} \quad (18)$$

όπου:

$$\begin{aligned} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sin^2 \omega t \, d\omega t &= \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \frac{1-\cos 2\omega t}{2} \, d\omega t = \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \frac{1}{2} \, d\omega t - \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \frac{\cos 2\omega t}{2} \, d\omega t = \\ &= \frac{1}{2} [\omega t]_{\alpha}^{\pi+\alpha} - \frac{1}{4} [\sin 2\omega t]_{\alpha}^{\pi+\alpha} = \frac{1}{2} (\pi + \alpha - \alpha) - \frac{1}{4} [\sin 2(\pi + \alpha) - \sin 2\alpha] = \\ &= \frac{1}{2} \pi - \frac{1}{4} [\sin 2\pi \cos \alpha + \cos 2\pi \sin 2\alpha - \sin 2\alpha] = \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (19)$$

Από τις σχέσεις (18) και (19) έχουμε:

$$U_{L,rms} = \sqrt{\frac{U_m^2}{2\pi} \cdot \frac{\pi}{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = U_{rms} \Rightarrow \boxed{U_{L,rms} = U_{rms}} \quad (20)$$

β. Ασυνεχής αγωγή (φορτίο R, L)

$$U_{L,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} U_m^2 \sin^2 \omega t \, d\omega t} = \sqrt{\frac{U_m^2}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \sin^2 \omega t \, d\omega t} \quad (21)$$

όπου:

$$\begin{aligned} \int_{\alpha}^{\beta} \sin^2 \omega t \, d\omega t &= \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1-\cos 2\omega t}{2} \, d\omega t = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{2} \, d\omega t - \int_{\alpha}^{\beta} \frac{\cos 2\omega t}{2} \, d\omega t = \\ &= \frac{1}{2} [\omega t]_{\alpha}^{\beta} - \frac{1}{4} [\sin 2\omega t]_{\alpha}^{\beta} = \frac{1}{2} (\beta - \alpha) - \frac{1}{4} [\sin 2\beta - \sin 2\alpha] = \\ &= \frac{1}{2} [(\beta - \alpha) - \frac{1}{2} (\sin 2\beta - \sin 2\alpha)] \end{aligned} \quad (22)$$

Από τις σχέσεις (21) και (22), έχουμε:

$$U_{L,rms} = \sqrt{\frac{U_m^2}{2\pi} [(\beta - \alpha) - \frac{1}{2} (\sin 2\beta - \sin 2\alpha)]} \Rightarrow$$

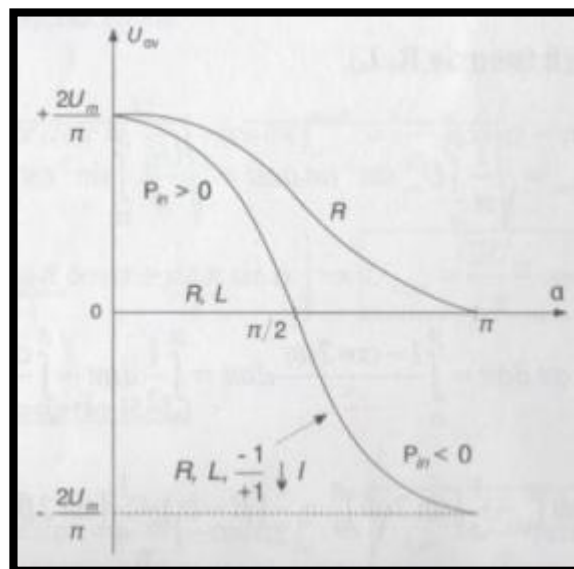
$$U_{L,rms} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} [(\beta - \alpha) - \frac{1}{2} (\sin 2\beta - \sin 2\alpha)]} \quad (23)$$

Η γραφική παράσταση της $U_{av} = f(\alpha)$, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.10 .

Είναι σημαντικό να διευκρινίσουμε, ότι και στην ακραία περίπτωση όπου η αυτεπαγωγή του φορτίου είναι αρκετά μεγάλη ($L \rightarrow \infty$), η συνεχής αγωγή περιορίζεται για μεταβολές της γωνίας έναυσης στο διάστημα, $0 \leq \alpha \leq \pi/2$. Σε αντίθετη περίπτωση, σύμφωνα με τη σχέση (16), η μέση τιμή της τάσης θα είναι αρνητική, που σημαίνει μόνιμη παραγωγή ενέργειας της αυτεπαγωγής προς το δίκτυο, πράγμα άτοπο.

Σε περίπτωση όμως σύνδεσης ενεργητικού φορτίου από την πλευρά του συνεχούς (πηγή Σ.Ρ. τάσεως ή μηχανή Σ.Ρ.), μπορούμε να επεκτείνουμε την γωνία έναυσης στην περιοχή $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$ και να έχουμε λειτουργία αντιστροφεία (αλλαγή τεταρτημορίου) δίνοντας ισχύ στο δίκτυο Ε.Ρ. Η μέθοδος αυτή, χρησιμοποιείται αρκετά για την αναγεννητική πέδηση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

Στην περίπτωση ωμικού φορτίου, η γωνία "α", σύμφωνα με το σχήμα 3.9, μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή στο διάστημα $0 \leq \alpha \leq \pi$. Η μέση τιμή της τάσης στην περίπτωση ωμικής φόρτισης, έχει τη μέγιστη δυνατή τιμή.



Σχήμα 3.10 Γραφική παράσταση της $U_{av} = f(\alpha)$

4.ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1. Ανάλυση κυκλώματος έναυσης

Η εναλλασσόμενη τάση του δικτύου (220V/50Hz) μέσω μετασχηματιστή υποβιβάζεται σε μέγεθος της τάξης των 6–12V (κυματομορφή 1) και εισέρχεται στο κύκλωμα ελέγχου. Ως αρχή μέτρησης των γωνιών έναυσης, λαμβάνουμε τα σημεία μηδενισμού της τάσης του δικτύου. Υπό αυτή την έννοια λέγοντας ότι, το κύκλωμα ελέγχου θα πρέπει να συγχρονιστεί με το δίκτυο Ε.Ρ. εννοούμε ότι, θα πρέπει να “γνωρίζει” τα σημεία μηδενισμού της εναλλασσόμενης τάσης. Για το σκοπό αυτό, η κυματομορφή 1, μετατρέπεται μέσω κατάλληλου κυκλώματος ανιχνευτή διέλευσης του μηδενός (zero-crossing detector) και ενός ψαλιδιστή τάσης, σε τετραγωνικό παλμό (κυματομορφή 2) και λόγω της διόδου λαμβάνουμε τελικά στην έξοδο μόνο τους θετικούς παλμούς (κυματομορφή 3).

Στη συνέχεια μέσω μιας βαθμίδας ολοκλήρωσης, ο τετραγωνικός παλμός (κυματομορφή 3) μετατρέπεται στην πριονωτή κυματομορφή 4 (θετική ημιπερίοδος), επειδή όμως θέλουμε έλεγχο και στις αρνητικές ημιπεριόδους θα χρησιμοποιήσουμε άλλο ένα κύκλωμα συγκριτή, ολοκληρωτή ο οποίος θα παράγει πριονωτό σήμα κατά τις αντίστοιχες αρνητικές ημιπεριόδους (κυματομορφή 5).

Από τη σύγκριση της πριονωτής κυματομορφής, με μια συνεχή τάση (κυματομορφή 6), η οποία μπορεί να μεταβάλλεται μέσω ποτενσιόμετρου ακριβείας, από μηδέν μέχρι και τη μέγιστη τιμή της πριονωτής κυματομορφής, προκύπτει η γωνία έναυσης. Από τη σύγκριση των δύο προαναφερθέντων τάσεων, προκύπτει στην έξοδο του συγκριτή η κυματομορφή 7, της οποίας το πλάτος είναι μεταβαλλόμενο και άμεσα εξαρτώμενο από την τιμή της γωνίας έναυσης.

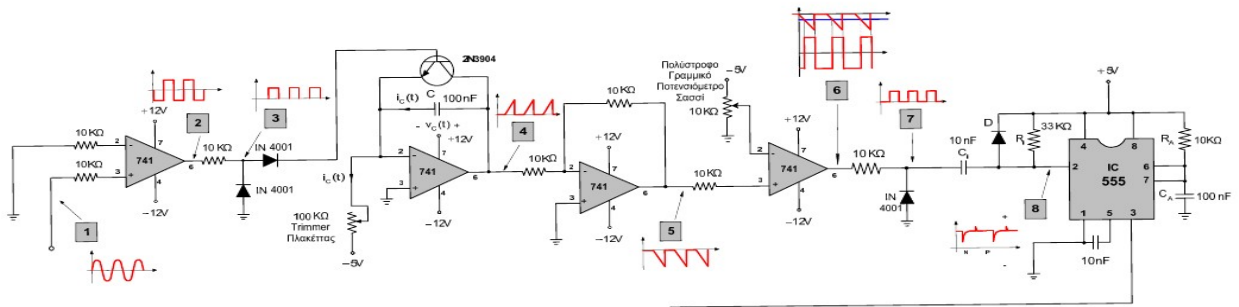
Η κυματομορφή 8 μας δείχνει το σήμα σκανδαλισμού που δέχεται το 555. Το θυρίστορ, για την πυροδότηση του απαιτεί στην πύλη ένα παλμό τάσης της τάξης των 1–3V και ένα αντίστοιχο ρεύμα της τάξης των 100–300mA.

Η χρονική διάρκεια του παλμού έναυσης (η οποία κατά προτίμηση είναι σταθερή), μπορεί να είναι της τάξης των 0.1–0.5ms, για συχνότητα τροφοδοσίας 50Hz (δηλαδή ημιπερίοδο 10ms).

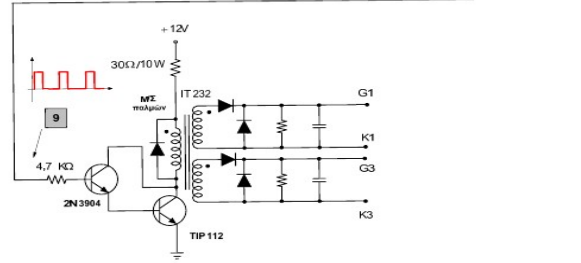
Η επίτευξη παλμού έναυσης σταθερής διάρκειας (κυματομορφή 9), επιτυγχάνεται από την κυματομορφή 7, μέσω ενός πολυδονητή μιας βολής.

Στη συνέχεια, επειδή ο παλμός αυτός προέρχεται από ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (στο οποίο το ρεύμα δεν μπορεί να είναι πρακτικά μεγαλύτερο από 20mA), ενισχύεται μέσω κατάλληλης διάταξης Darlington και μέσω μετασχηματιστή παλμών (για γαλβανική απομόνωση), οδηγείται στην πύλη του θυρίστορ.

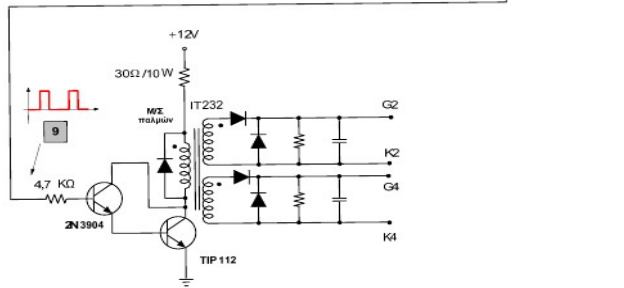
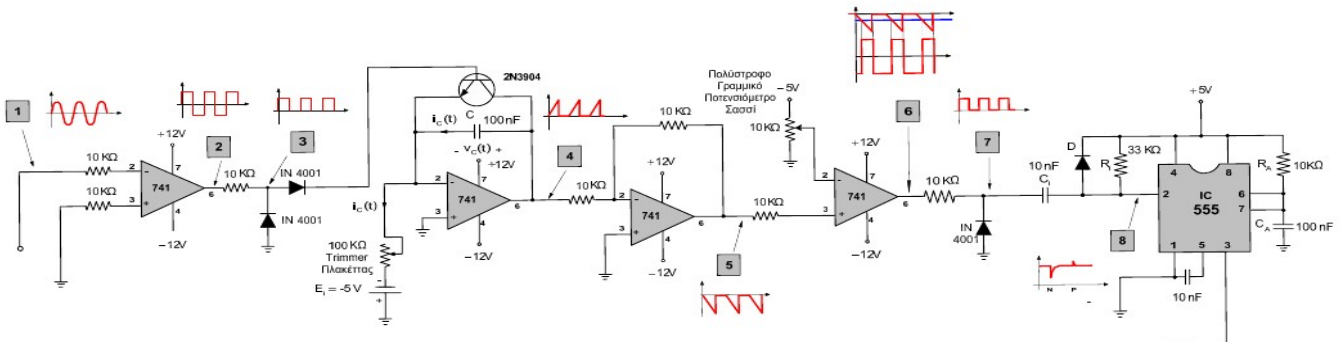
4.2. Θεωρητικά κυκλώματα έναυσης



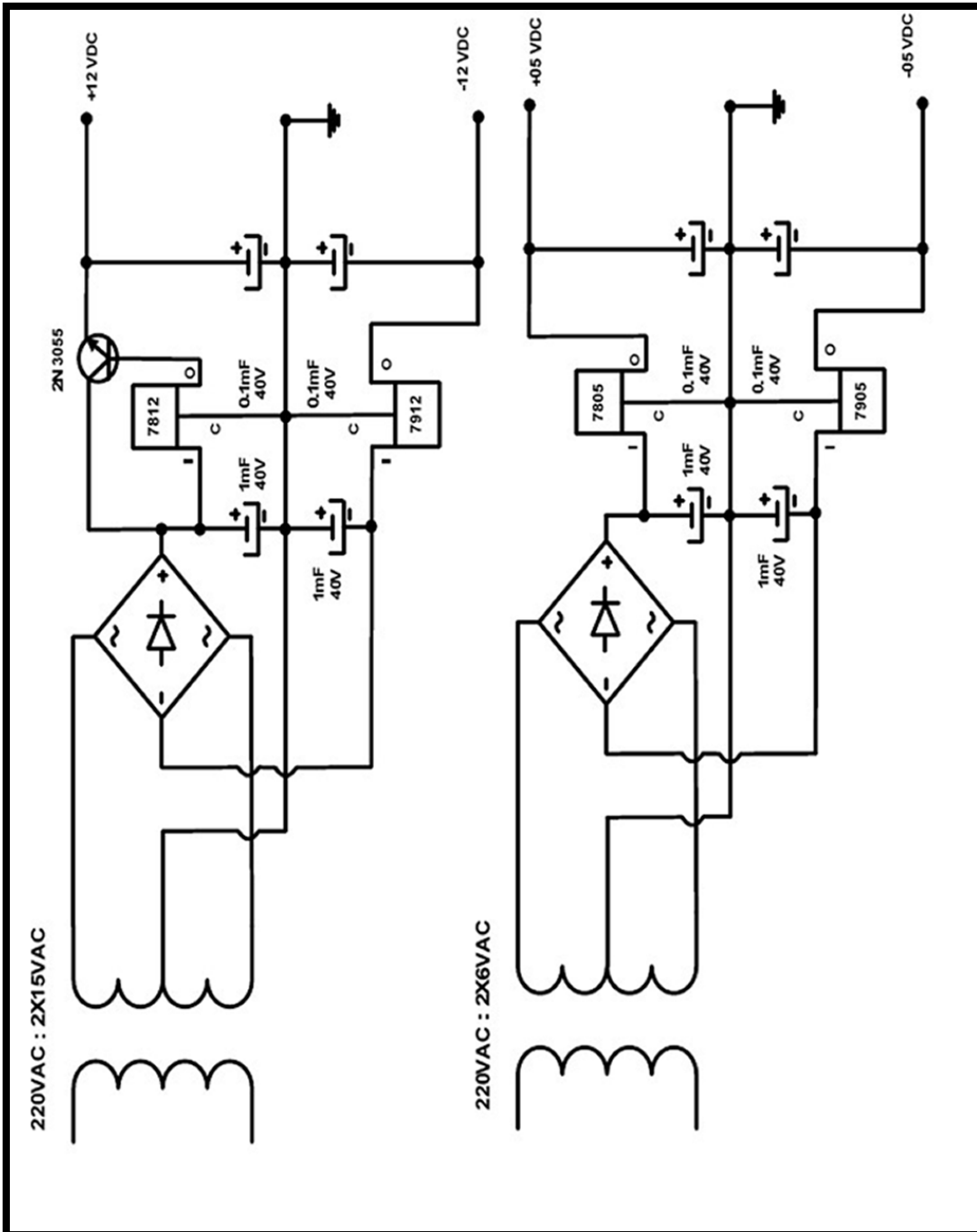
ΒΑΘΜΙΔΑ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΠΑΛΜΩΝ 0-180



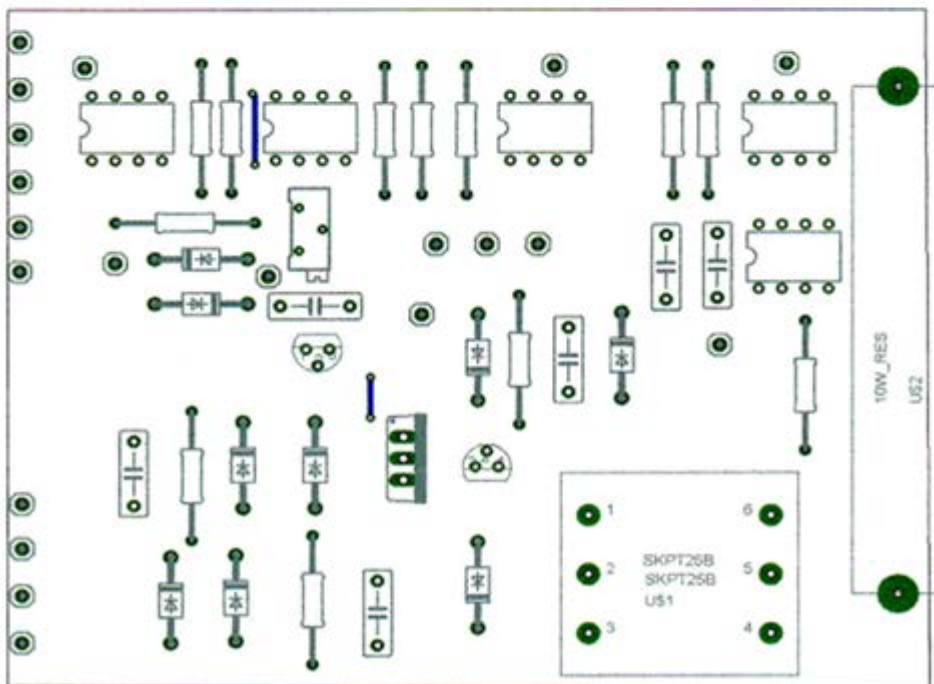
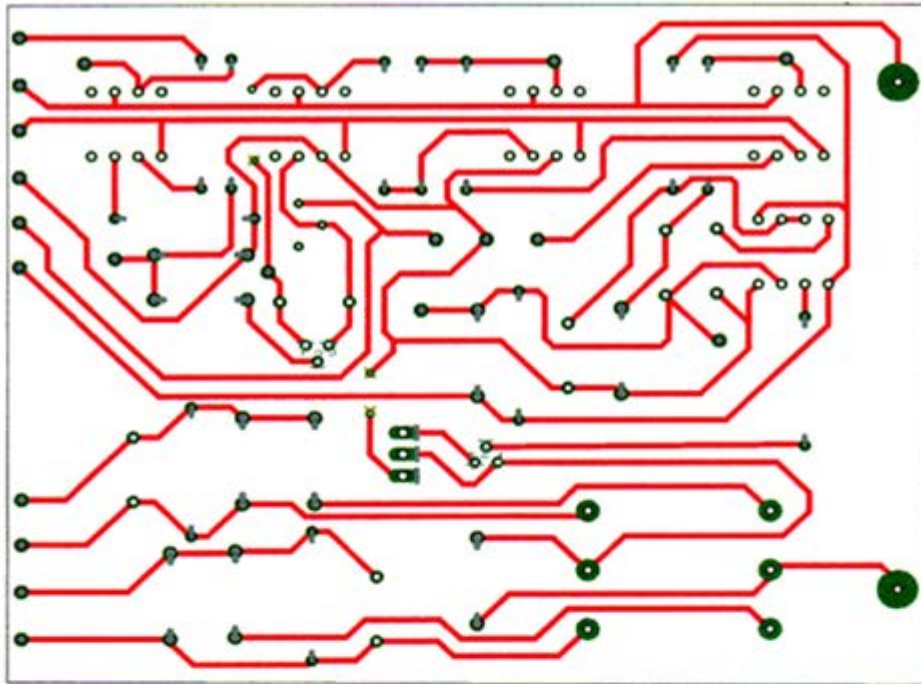
ΒΑΘΜΙΔΑ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΠΑΛΜΩΝ 180-360



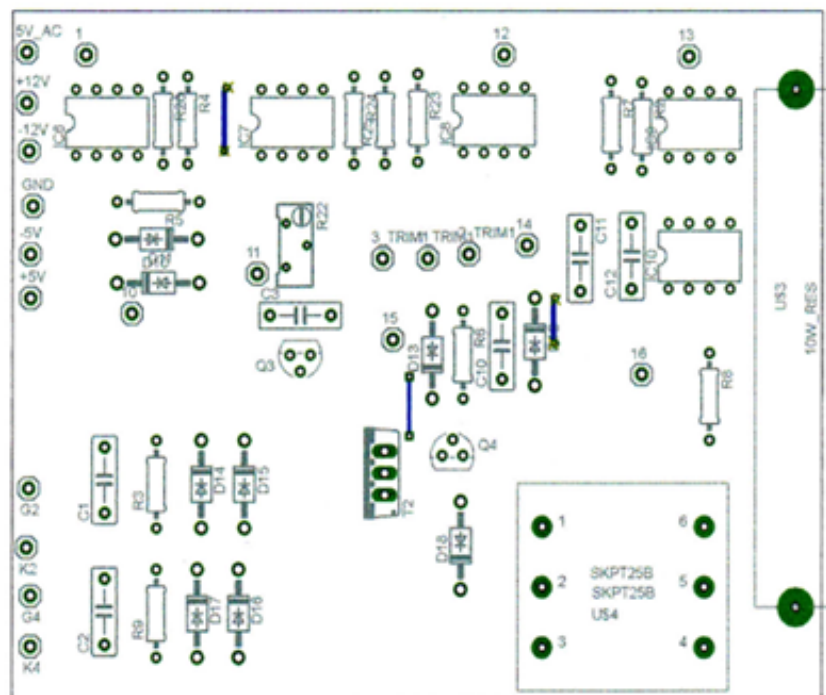
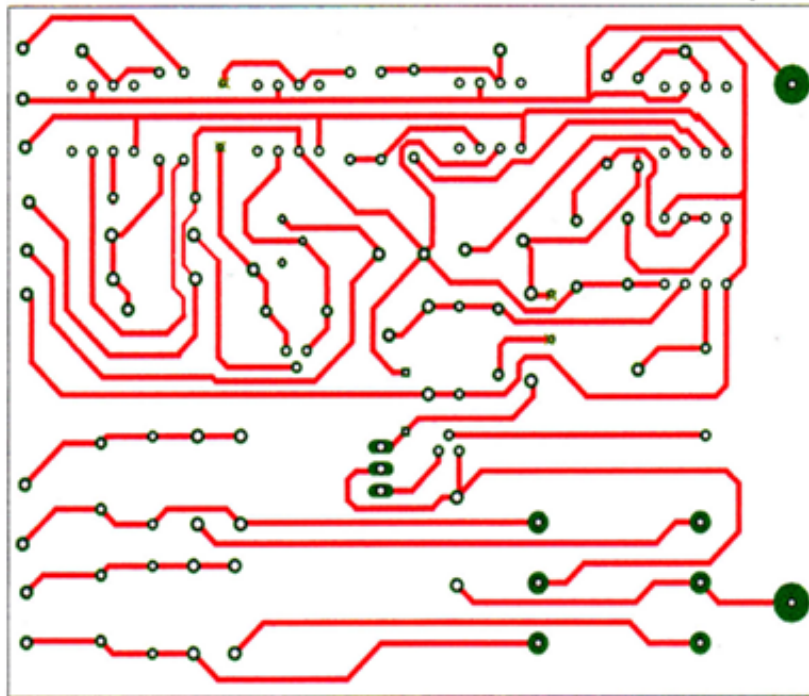
4.3. Θεωρητικό κύκλωμα τροφοδοτικού



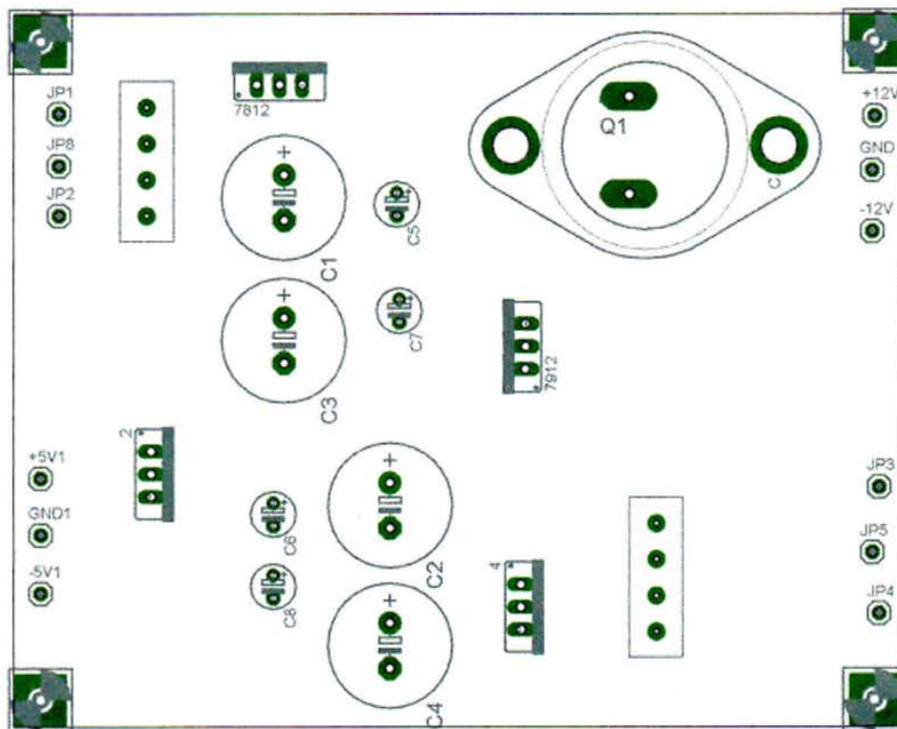
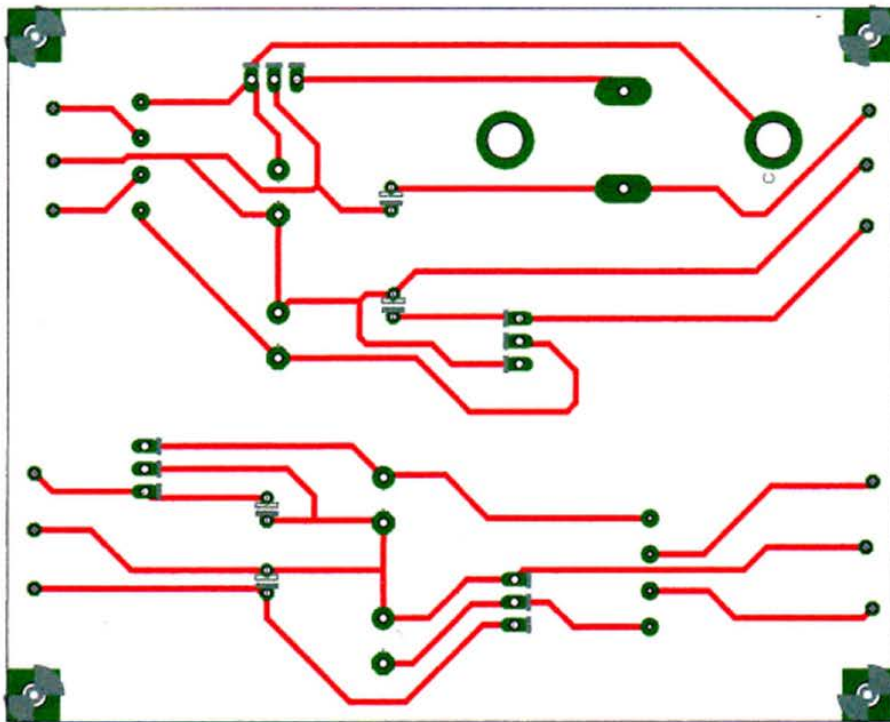
4.4. Τυπωμένο κύκλωμα έναυσης $0^{\circ} - 180^{\circ}$

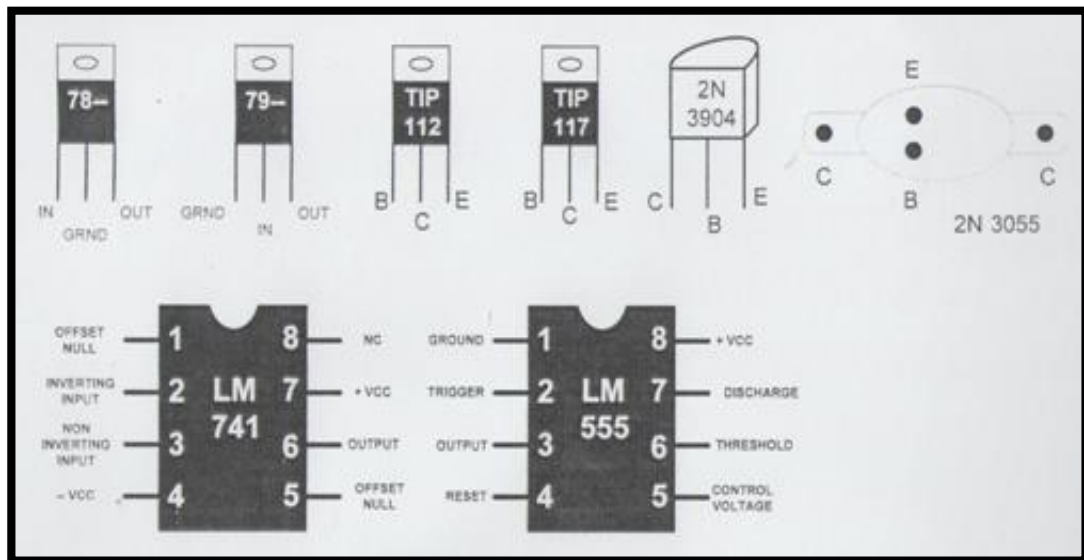
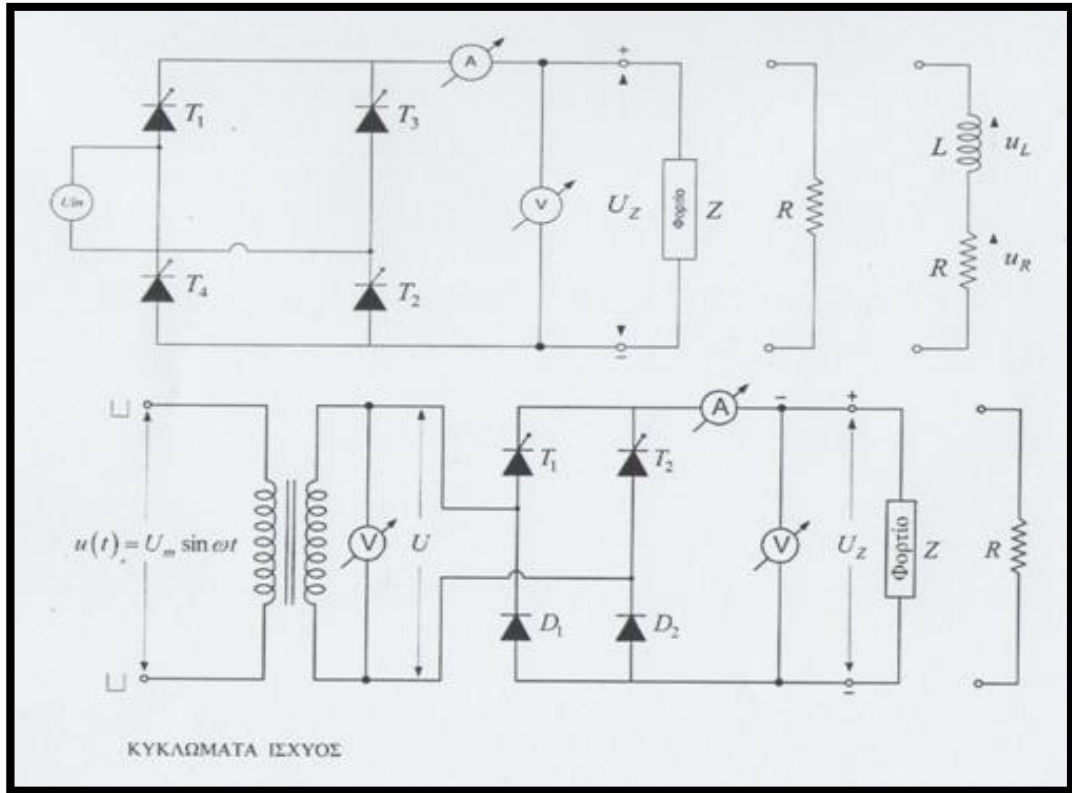


4.5. Τυπωμένο κύκλωμα έναυσης 180° - 360°



4.6. Τυπωμένο κύκλωμα τροφοδοτικού

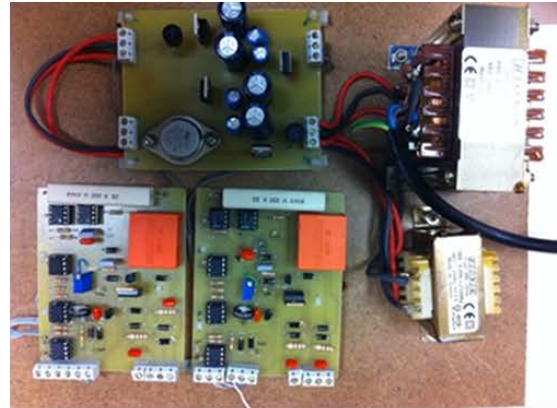




4.7. Φωτογραφικό υλικό κατασκευής



Φωτο 1: Αρχικό στάδιο – πλακέτες



Φωτο 2: Ολοκλήρωση κολλήσεων & τοποθέτηση σε βάση με μετασχηματιστές



Φωτο 3: Τοποθέτηση σε κουτί



Φωτο 4: Δημιουργία εξόδων & σημείων ελέγχου πλακέτας



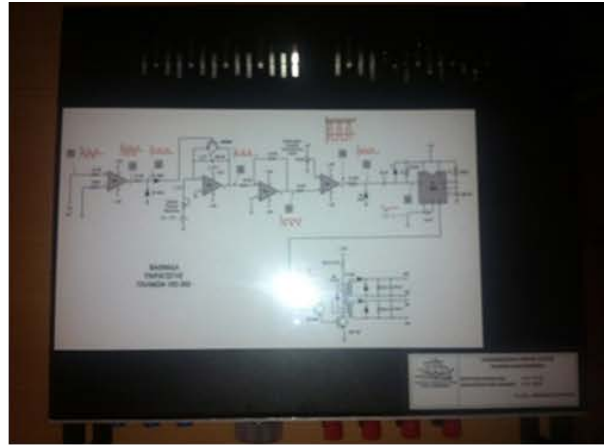
Φωτο 5: Σύνδεση καλωδίων & τοποθέτηση προστατευτικού καλωδίων



Φωτο 6: Ολοκλήρωση κατασκευής



Φωτο 7



Φωτο 8



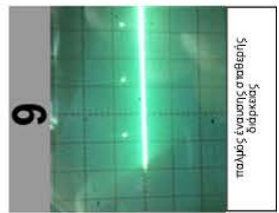
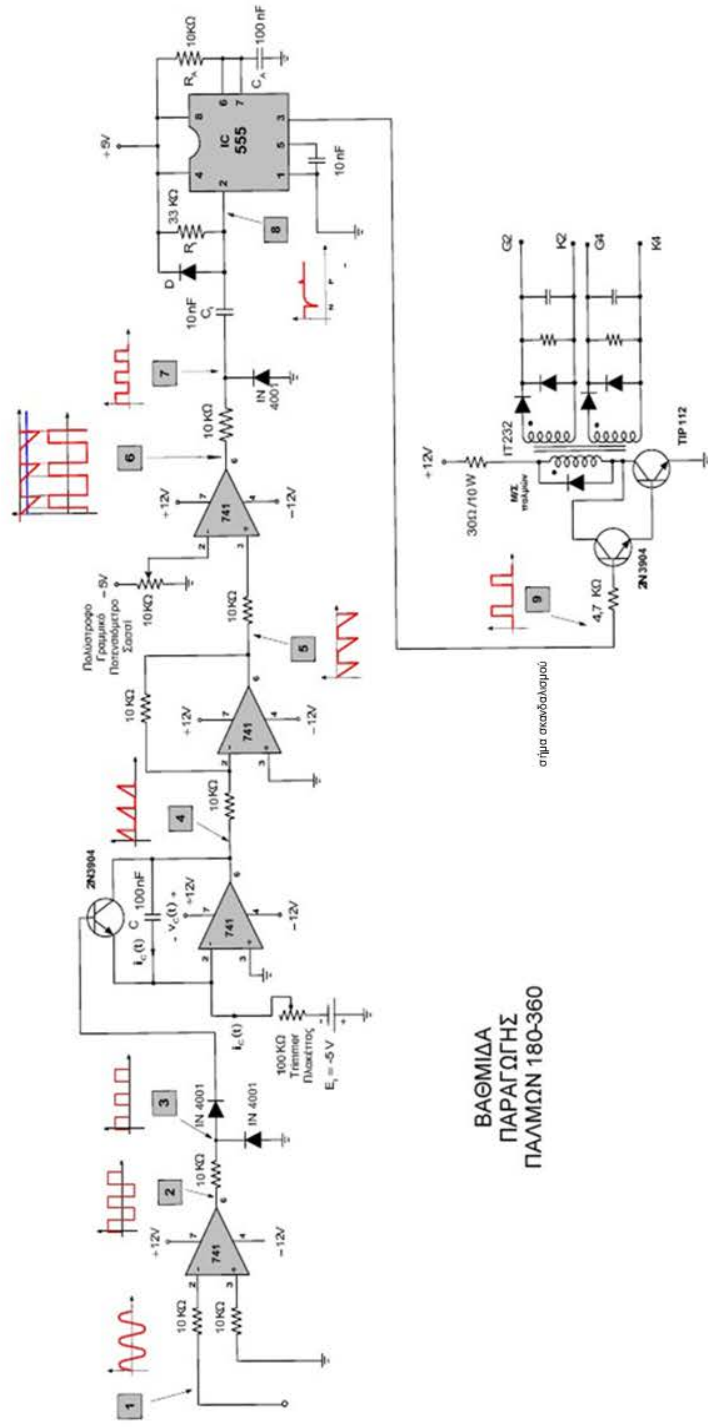
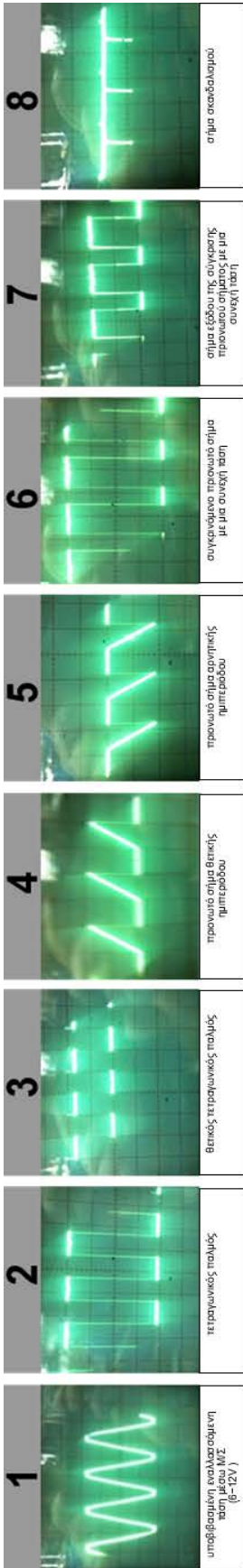
Φωτο 9

Φωτο 7,8,9:
τοποθέτηση
αυτοκόλλητων
στο κουτί






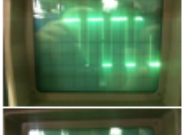


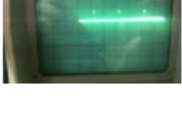


Φωτο 10: Αλλαγή παλιού ποτενσιόμετρου & τοποθέτηση
καινούργιου γραμμικού πολύστροφου 10κΩ

4.8. Επιβεβαίωση παλμών κατασκευής από παλμογράφο



Κυματομορφές¹

1		υποβιβασμένη εναλλασσόμενη τάση μέσω Μ/Σ (6-12V)
2		τετραγωνικός παλμός
3		θετικός τετραγωνικός παλμός
4		πριονωτό σήμα θετικής ημπεριόδου
5		πριονωτό σήμα αρνητικής ημπεριόδου
6		συγκρινόμενο πριονωτό σήμα με μια συνεχή τάση
7		σήμα εξόδου της σύγκρισης πριονωτού σήματος με μια συνεχή τάση
8		σήμα σκανδαλισμού
9		παλμος έναυσης σταθερής διάρκειας

¹ Βλ. σελίδα 49.

4.9. Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή

4.9.1. Υλικά για την κατασκευή κυκλωμάτων παλμών έναυσης

ΕΙΔΟΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ
Αντίσταση	10KΩ	16
Αντίσταση	100Ω	4
Αντίσταση	33KΩ	2
Αντίσταση	4.7KΩ	2
Αντίσταση	33Ω/10W	2
Γραμμικό ποτενσιόμετρο πολύστροφο σασσί	10KΩ	1
Δίοδος	1N4002	18
Κλέμες πλακέτας		12
Μετασχηματιστής	220/6V-1A	1
Μετασχηματιστές παλμών	SKPT 25b3	2
Πυκνωτής	10nF	4
Πυκνωτής	100nF	8
Ρυθμιστική αντίσταση (trimmer) πλακέτας	100KΩ	2
Τελεστικοί ενισχυτές	LM741	8
Τρανζίστορ	2N3904	4
Τρανζίστορ	TIP 112 ή BTX 53	2
Χρονοιστής	555 timer	2

4.9.2. Υλικά για την κατασκευή τροφοδοτικού

ΕΙΔΟΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ
Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής	1mF/40V	4
Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής	0.1mF/40V	4
Μετασχηματιστής	220V/2x15V/2A	1
Μετασχηματιστής	220V/2x6V	1
Μονοφασικές γέφυρες	2KBP06	2
Σταθεροποιητής +12V	7812	1
Σταθεροποιητής -12V	7912	1
Σταθεροποιητής +5V	7805	1
Σταθεροποιητής -5V	7905	1
Τρανζίστορ	2N3055	1

4.9.3. Υπόλοιπα υλικά που χρειάστηκαν για την κατασκευή

ΕΙΔΟΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ
Μπόρνες	Κόκκινο-μαύρο-κίτρινο-μπλε	18
Διακόπτης on/off	Κόκκινος με LED	1
Κουμπί ποτενσιόμετρου	Ασημί	1
LED Ενδείξεως	Κόκκινο	1
Καλώδιο τροφοδοσίας	Μαύρο (3x1.5mm)	1
Βύσμα υποδοχής καλωδίου	Μαύρο με θήκη για ασφάλεια	1
Ασφάλεια	2 A	1
Κουτί μεταλλικό	28,5 x 22,5 x 9 cm	1
Τυλίγματα καλωδίων	Διαφανή	6

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΜΑΛΑΤΕΣΤΑΣ, Παναγιώτης & ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ, Ηρακλής, *Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρονικών Ισχύος*, σελ. 336, ISBN: 960-418-050-9, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2004.

ΜΑΝΙΑΣ, Στέφανος Ν. & ΚΑΛΕΤΣΑΝΟΣ, Αθανάσιος, *Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά*, σελ. 498, ISBN: 960-7888-25-1, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2003.

ΜΑΝΙΑΣ, Στέφανος Ν., *Ηλεκτρονικά Ισχύος*, σελ. 608, ISBN: 960-7888-74-7, Εκδόσεις Συμεών, 6^η Έκδοση, Αθήνα 2007.

Αγορά Υλικών για το πρακτικό μέρος

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΥΛΙΚΟ:

ΜΑΡΚΙΔΗΣ

Μάκρης 8 – Αιγάλεω

Τηλ: 210-59.09.833

Fax: 210-59.09.833

ΞΕΝΟΦΩΝ ΒΕΝΙΕΡΗΣ

Κηφισού & Αγ.Παύλου 57 – Περιστέρι

Τηλ: 210 57 52 791-5

Fax: 210 57 22 675

ΦΑΝΟΣ

Σωλομού 39 – Αθήνα

Τηλ: 210-3828 748

Fax: 210-3847 896

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΑΚΕΤΑΣ:

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΚΑΙΣΑΡΗΣ

Στυλ. Γονατά 48 – Περιστέρι

Τηλ: 210 5723200 / 6972608427

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΠΑΛΜΩΝ:

ΡΑΔΙΟ ΚΑΤΟΥΜΑ

Θηβών & Καβάλας

SCHAFFNER 242 ή SCHAFFNER 313 ή

αντίστοιχος

ΞΕΝΟΦΩΝ ΒΕΝΙΕΡΗΣ

Κηφισού & Αγ.Παύλου 57 – Περιστέρι

SEMIKRON - SKPT 25b3