



ΤΜΗΜΑ

**ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ



Ανώτατο  
Εκπαιδευτικό  
Ιδρυμα  
Πειραιά

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### **ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΩΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ**

***(DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SINGLE PHASE FULLY  
CONTROLLED BRIDGE RECTIFIER)***

ΦΟΙΤΗΤΕΣ:

ΛΑΜΙ ΑΝΤΙ

: Α.Μ. : 40490

ΚΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΜΙΧΑΛΗΣ : Α.Μ. : 41367

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :

ΗΡΑΚΛΗΣ ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ ΜΑΙΟΣ 2017

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή Ηρακλή Βυλλιώτη που μας στήριξε στην υλοποίηση της πτυχιακής μας εργασίας και ήταν παρόν στο να μας συμβουλέψει, καθώς και στους εργαστηριακούς συνεργάτες που ήταν πρόθυμοι να μας βοηθήσουν και να μας στηρίξουν, σε όλοι αυτήν την προσπάθεια για να βγάλουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η εργασία μας αποτελείται από το θεωρητικό και το κατασκευαστικό μέρος της. Το θεωρητικό μέρος που αποτελείται από 3 κεφάλαια τα οποία περιλαμβάνουν: αναλυτική περιγραφή των ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της παλμογεννήτριας και του τροφοδοτικού. Στο 4 κεφάλαια γίνεται περιγραφή της παλμογεννήτριας και παρουσιάζονται αναλυτικές εικόνες από το πειραματικό και κατασκευαστικό μέρος. Επίσης αναφέρουμε και το σύνολο των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της κατασκευής.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4-5

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> – ΤΑ ΤΕΣΣΕΡΑ ΕΙΔΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ

1.1 Εισαγωγή.....	6-7
1.2 ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ.....	8
1.2.1 ΑΝΟΡΘΩΤΗΣ (AC-DC CONVERTERS).....	8
1.2.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ DC-DC (CONVERTERS).....	9
1.2.3 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ (DC-AC CONVERTERS).....	10-11
1.2.4 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ (AC-AC CONVERTE).....	11-12

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

2.1 ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ.....	13
2.1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ.....	13-15
2.1.2 Ο Τελεστικός Ενισχυτής 741.....	15-20
2.2 Εσωτερική Δομή Ολοκληρωμένου 555 .....	21
2.2.1 Τρόποι λειτουργίας του 555.....	21-22
2.3 ΔΙΟΔΟΣ.....	23
2.3.1 Η Δίοδος Χωρίς Πόλωση.....	23-24
2.3.2 Περιοχή Απογύμνωσης.....	24-25
2.3.3 Φράγμα Δυναμικού.....	25-27
2.3.4 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΓΥΜΝΩΣΗΣ ΔΙΕΥΡΥΝΕΤΑΙ.....	28
2.3.5 ΡΕΥΜΑ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕΙΟΝΟΤΗΤΑΣ.....	29
2.3.6 ΕΠΙΦΑΝΙΑΚΟ ΡΕΥΜΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ.....	29-30
2.3.7 ΔΙΑΣΠΑΣΗ.....	30-31
2.3.8 ΦΡΑΓΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ & ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.....	31
2.3.9 ΔΙΟΔΟΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΑ ΠΟΛΟΜΕΝΗ.....	31-32
2.3.10 ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΟΔΩΝ.....	32-33
2.4 ΔΙΟΔΟΣ ZENER.....	34
2.5 ΔΙΟΔΟΙ ΙΣΧΥΟΣ.....	35-36
2.6 Η VARACTOR.....	36-37
2.7 ΘΥΡΙΣΤΟΡ.....	37-39
2.8 MOSFET.....	39-40
2.9 ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ.....	40-41
2.10 TRIAC.....	41-42
2.11 GTO.....	43-44

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>- Ανορθωτικές διατάξεις – Τροφοδοτικά**

3.1.	Γενικά.....	45-47
3.2.	Τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός τροφοδοτικού.....	47-48
3.3.	Τύποι ανορθωτικών διατάξεων.....	49
3.4.	Ανορθωτική διάταξη μισού κύματος (Απλή ανόρθωση).....	49-50
3.5.	Ανορθωτική διάταξη πλήρους κύματος.....	50-51
3.6.	Ανόρθωση με γέφυρα.....	51-52
3.7.	Εξομάλυνση και φίλτρα.....	52-53
3.8.	Λειτουργία με ωμικό φορτίο.....	54-56
3.9.	Λειτουργία με ωμικό - επαγωγικό φορτίο.....	57-58
3.10.	Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα.....	59
3.11.	Λειτουργία με ωμικό φορτίο.....	89-61
3.12.	Λειτουργία με ωμικό-επαγωγικό φορτίο.....	61-66

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>- ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

4.1.	Περιγραφή κυκλώματος.....	67-70
4.2.	Σχέδιο τροφοδοτικού.....	71
4.3.	Υλικά για την κατασκευή τροφοδοτικού.....	71
4.4.	Κύκλωμα έναυσης 0 <sup>ο</sup> έως 180 <sup>ο</sup> .....	72
4.5.	Κύκλωμα έναυσης 180 <sup>ο</sup> έως 360 <sup>ο</sup> .....	73
4.6.	Υλικά κατασκευής κυκλωμάτων έναυσης.....	74
4.7.	Φωτογραφικό υλικό Multisim -ultiboard.....	75-82
4.8.	Τροφοδοτικό.....	83-84
4.9.	Φωτογραφίες πειραματικού μέρους.....	85-87
	Βιβλιογραφία.....	88

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ

### **1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Για την εξέλιξη της παραγωγής σε ταχύτητα, βελτίωση ποιότητας προϊόντος, αλλά και την μείωση του κόστους έχουν οδηγήσει στην καθιέρωση της χρήσης των ηλεκτρονικών ισχύος για να μπορούν να κάνουν με ακρίβεια τις μετρήσεις, την επεξεργασία αλλά και την μετατροπή μιας παραγωγικής διαδικασίας. Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος (Power Electronics) ασχολείται επομένως με τεχνικές μετατροπής ή όπως πολλές φορές αναφέρεται τεχνικές επεξεργασίας ηλεκτρικής ισχύος από μια μορφή σε άλλη χρησιμοποιώντας ημιαγωγούς ισχύος. Αυτοί οι ημιαγωγοί μπορεί να είναι, IGBTs, MOSFETs ισχύος, θυρίστορ, GTOs, MCTs, Triacs και δίοδοι ισχύος. Ανάλογα με το είδος μετατροπής της ηλεκτρικής ισχύος και τη ροή ενέργειας, διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες μετατροπέων:

Α) Μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC Converters): Μετατρέπουν τη συνεχή τάση μιας ορισμένης τιμής και πολικότητας σε συνεχή τάση άλλης τιμής και κατά περιπτώσεις άλλης πολικότητας.

Β) Αντιστροφείς (DC-AC Inverters): Μετατρέπουν τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη, όπου η ενέργεια μεταφέρεται από ένα σύστημα συνεχούς τάσης σε ένα σύστημα εναλλασσόμενης τάσης.

Γ) Ανορθώσεις (AC-DC Rectifiers): Μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή, όπου η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από ένα σύστημα εναλλασσόμενης τάσης σε ένα σύστημα συνεχούς τάσης.

Δ) Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης (Cyclo converters): Μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση μιας ορισμένης τιμής, συχνότητας και αριθμού φάσεων σε εναλλασσόμενη τάση άλλης τιμής, άλλης συχνότητας και κατά περιπτώσεις διαφορετικού αριθμού φάσεων.

Οι μετατροπείς ισχύος όχι μόνο μετατρέπουν την τάση εισόδου τους σε κάποια άλλη μορφής τάση αλλά και τη σταθεροποιούν, με αποδόσεις πάνω από 95%. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι μεγάλες αποδόσεις των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος οφείλονται στο ότι οι ημιαγωγοί λειτουργούν είτε στην περιοχή αποκοπής (Cut off region) είτε στην περιοχή κορεσμού (saturation region) και ποτέ στην αναλογική περιοχή όπου έχουμε και τις περισσότερες απώλειες. Δηλαδή με λίγα λόγια οι ημιαγωγοί αυτοί λειτουργούν ως διακόπτες και άγουν όταν βρίσκονται στον κορεσμό ενώ όταν βρίσκονται στην περιοχή αποκοπής δεν άγουν. Χρησιμοποιώντας ημιαγωγικούς διακόπτες μπορούμε να προγραμματίσουμε την αγωγή τους έτσι ώστε να συνθέσουμε μια επιθυμητή τάση στην έξοδο του μετατροπέα διαφορετική από αυτή της εισόδου.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι, όπως υπάρχουν οι επεξεργαστές ασθενών σημάτων (Digital Signal Processors, DSPs) για τον ίδιο λόγο υπάρχουν και μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος για την επεξεργασία ισχυρών σημάτων.

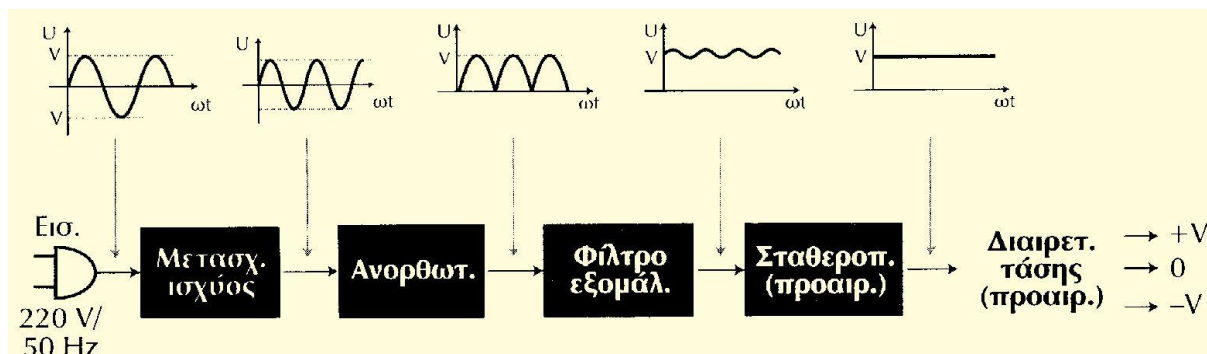
Οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος βρίσκουν εφαρμογές σε:

- Συστήματα ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών. Βιομηχανικές εγκαταστάσεις, ηλεκτρικά οχήματα και ηλεκτρικά πλοία.
- Συστήματα ανανεώσεων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Για παράδειγμα σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, ανεμογεννήτριες και υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις.
- Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες καυσίμου (Fuel cells).
- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μετατροπή εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή και το αντίστροφο. Στα έξυπνα δίκτυα (Smart Grids). Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενεργά για την εξάλειψη αρμονικών τάσης και ρεύματος από το δίκτυο. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αντισταθμιστές ισχύος για τη μείωση της άεργου ισχύος από το δίκτυο έξυπνα δίκτυα (Static Var Compensators και Flexible AC Transmission Systems, FACTS). Τέλος χρησιμοποιείται η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος στα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (Energy Storage System).
- Τροφοδοτικά για τροφοδοσία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Αυτά τα τροφοδοτικά χαρακτηρίζονται για το μικρό τους μέγεθος και κόστος καθώς και τη μεγάλη τους απόδοση.
- Συστήματα αδιάκοπης παροχής ισχύος (Uninterruptible Power Supply systems, UPS).

## 1.2. ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΡΤΟΠΕΩΝ

### 1.2.1 ΑΝΟΡΘΩΤΗΣ (AC-DC CONVERTERS)

Οι AC-DC μετατροπείς ονομάζονται και ανορθωτές. Οι ανορθωτές είναι κυκλώματα τα οποία χρησιμοποιούνται σε συστήματα όπου η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται, από ένα σύστημα εναλλασσόμενης τάσης σε ένα σύστημα συνεχούς τάσης, για να μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή, όπως φαίνεται στο (σχήμα 1.1):



Σχήμα 1.1: Μετατροπέας AC/DC

Αν χρησιμοποιηθούν διόδοι τότε ονομάζονται μη ελεγχόμενοι ανορθωτές ή ανορθωτές διόδων. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν θυρίστορ ονομάζονται ελεγχόμενοι ανορθωτές ή ανορθωτές με θυρίστορ. Στις περισσότερες εφαρμογές ισχύος, όπως οδήγηση εναλλασσόμενου κινητήρα συνεχούς ρεύματος, χρησιμοποιείται ανορθωτής με διόδους. Το χαμηλό κόστος ενός τέτοιου ανορθωτή είναι η βασικότερη αιτία της επικράτησης του έναντι του ανορθωτή με ημιαγωγικούς διακόπτες. Στους ανορθωτές με διόδους η ροή ισχύος έχει μία μόνο κατεύθυνση, από την πλευρά της εναλλασσόμενης τάσης προς την πλευρά της συνεχής τάσης.

Το μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι μη ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις έγκειται στο γεγονός ότι η τάση εξόδου μεταβάλλεται σύμφωνα με τις μεταβολές της τάσης τροφοδοσίας. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί, μέχρι ενός βαθμού, με τη χρήση ενός πυκνωτή μεγάλης χωρητικότητας στην έξοδο, ο οποίος θα λειτουργεί ως φίλτρο. Ωστόσο, υπάρχουν εφαρμογές, όπως η φόρτιση μπαταριών, στις οποίες η dc τάση (ρεύμα) εξόδου είναι απαραίτητο να έχει σταθερή τιμή. Σε τέτοιες περιπτώσεις η χρήση ανορθωτών με ημιαγωγικά στοιχεία (θυρίστορ, IGBTs, Mosfets κτλ) κρίνεται απαραίτητη.

Οι ανορθωτές βρίσκουν εφαρμογές στις ακόλουθες περιοχές:

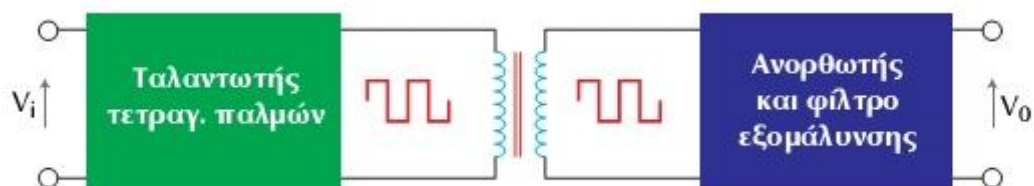
- Φορτιστές συσσωρευτών.
- Τροφοδοσία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών.
- Συστήματα ηλεκτρονικού ελέγχου κινητήρων συνεχούς ρεύματος.
- Συστήματα αδιάκοπης παροχής ηλεκτρικής ισχύος (UPS).
- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Συστήματα διασύνδεσης σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Πλήρη ανάλυση του μετατροπέα AC-DC θα γίνει στα επόμενα κεφάλαια.

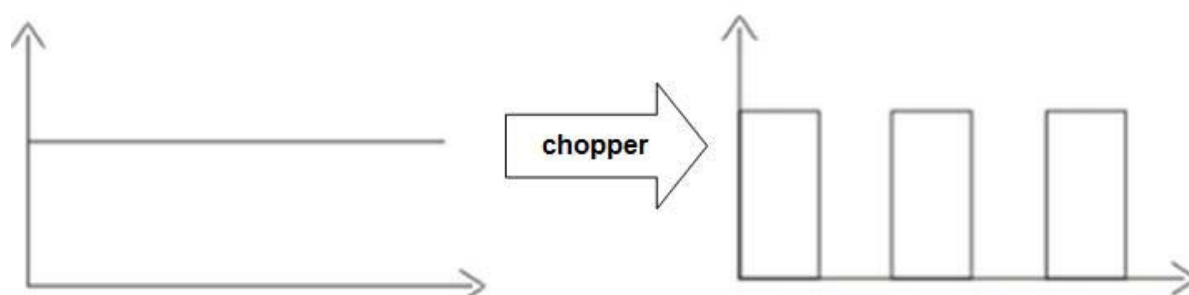


### 1.2.2. ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ DC-DC (CONVERTERS)

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή ή ψαλιδιστές συνεχούς τάσης (DC CHOPPERS) (σχήμα 2), είναι τα κυκλώματα εκείνα τα οποία μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς τάσης σε πηγή συνεχούς τάσης άλλης τιμής και ορισμένες φορές και άλλης πολικότητας. Στο (σχήμα 1.2), μπορούμε να δούμε το δομικό διάγραμμα του μετατροπέα dc/dc.



Σχήμα 1.2: διάγραμμα μετατροπέα dc/dc



Σχήμα 1.3: διάγραμμα chopper

Οι μετατροπείς DC-DC βρίσκουν εφαρμογές της εξής περιοχής:

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

Οι μετατροπείς DC-DC υλοποιούνται χρησιμοποιώντας ημιαγωγούς της τα IGBT, το MOSFET ισχύος, το θυρίστορ ή κάποιο άλλο ελεγχόμενο ημιαγωγό ισχύος, καθώς της με διόδους και LC κυκλώματα. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ελεγχόμενοι από την πύλη της ημιαγωγοί λειτουργούν ως διακόπτες. Οι ελεγχόμενοι αυτοί

ημιαγωγοί μπορούν να βρεθούν σε μόνο δυο καταστάσεις λειτουργίας, στην κατάσταση αγωγής ή στην κατάσταση αποκοπής. Εάν σε ένα IGBT ή MOSFET δοθεί της παλμός οδήγησης στην πύλη της τότε αυτά μεταβαίνουν στην κατάσταση αγωγής και θα παραμείνουν εκεί καθ' όλη τη διάρκεια του παλμού. Όταν ο παλμός οδήγησης γίνει μηδέν, τότε μεταβαίνουν στην κατάσταση αποκοπής. Τέλος οι μετατροπείς DC-DC διακρίνονται σε:

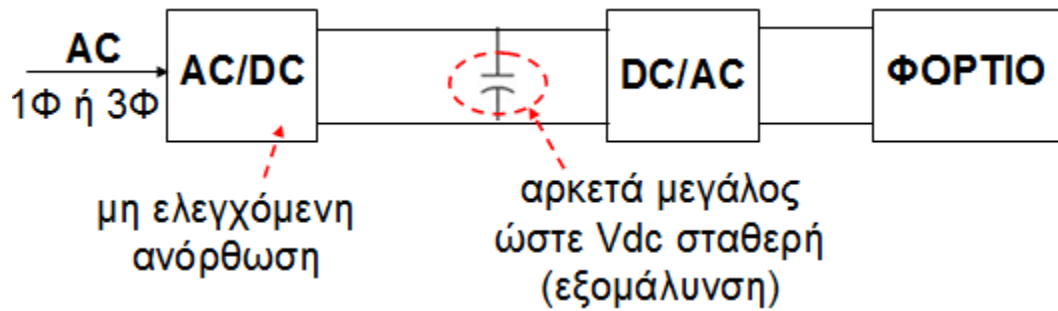
1. Μετατροπείς ανύψωσης συνεχούς τάσης (Boost DC-DC converter)
2. Μετατροπείς υποβιβασμού συνεχούς τάσης (Buckή Step-up DC-DC converter)
3. Μετατροπείς υποβιβασμού-ανύψωσης συνεχούς τάσης (Buck-Boost DC-DC converter)
4. Έλεγχος τάσης εξόδου DC-DC μετατροπέων με την τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation, PWM)
5. Παλμοτροφοδοτικά ή διακοπτικά τροφοδοτικά (Switched Mode Power Supplies)

### **1.2.3. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ (DC-AC CONVERTERS)**

Οι αντιστροφείς, που αποτελούν ένα είδος μετατροπέων, είναι στατές ηλεκτρονικές διατάξεις, οι οποίες έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος σε εναλλασσόμενη, με μεταβλητή συχνότητα και πλάτος. Για παράδειγμα, αν έχουμε ένα συσσωρευτή των 12 Volts και επιθυμούμε να παράγουμε εναλλασσόμενη τάση, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν αντιστροφέα ισχύος, ο οποίος να της δώσει στην έξοδο του 220 Volts RMS, συχνότητας 50Hz (60Hz για κάποιες χώρες της Αμερικής). Το φάσμα εφαρμογής των αντιστροφέων είναι αρκετά ευρύ:

- Σε συστήματα ελέγχου ταχύτητας εναλλασσόμενων ηλεκτρικών μηχανών.
- Σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ως στατοί αντισταθμιστές αέργου ισχύος (SVC-Static Var Compansator ) ή ως ενεργά φίλτρα σε ευέλικτα συστήματα μεταφοράς ισχύος (FACTS-Flexible AC Transmission Systems).
- Σε συστήματα ελέγχου τάσης εξόδου αιολικών συστημάτων μετατροπής ενέργειας.
- Σε συστήματα ελέγχου θερμοκρασίας με επαγωγή.
- Σε συστήματα ήπιων μορφών ενέργειας.
- Σε συστήματα Αδιάκοπης Παροχής Ισχύος (UPS-Uninterruptible Power Supplies).

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα τυπικό σύστημα οδήγησης μιας εναλλασσόμενης ηλεκτρικής μηχανής. Η απαιτούμενη DC τάση εισόδου του αντιστροφέα παρέχεται έμμεσα από το δίκτυο. Η AC τάση του δικτύου ανορθώνεται, μέσω ανορθωτικών διατάξεων, και στη συνέχεια, αφού φιλτραριστεί η DC πλέον τάση μέσω του πυκνωτή – φίλτρου, παρέχεται στην είσοδο του αντιστροφέα.



Σχήμα 1.4: αντιστροφέας AC-DC

Οι αντιστροφείς AC-DC διακρίνονται κυρίως σε δύο κατηγορίες:

1. Στους αντιστροφείς πηγής τάσεως (VSI-Voltage Source Inverters) που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσεως και
2. Στους αντιστροφείς πηγής ρεύματος (CSI - Current Source Inverters) που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος.

Οι αντιστροφείς πηγής τάσεως συμπεριφέρονται ως φυσική πηγή τάσης, κάτι που απαιτείται από τις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές και γι' αυτό είναι πιο διαδεδομένοι στην πράξη. Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος χρησιμοποιούνται σε μηχανές πολύ υψηλής ισχύος. Εξ αιτίας της περιορισμένης χρήσης των αντιστροφέων πηγής ρεύματος.

Οι δύο παραπάνω κατηγορίες μπορούν να υποδιαιρεθούν:

- i) Στους μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας,
- ii) Στους μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία γέφυρας
- iii) Στους τριφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας.

Ανάλογα με τα επίπεδα της φασικής τάσης εξόδου τους οι αντιστροφείς μπορούν να διακριθούν σε αντιστροφείς δύο επιπέδων, τριών επιπέδων, τεσσάρων επιπέδων, πέντε επιπέδων κτλ.

#### **1.2.4 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ (AC-AC CONVERTE)**

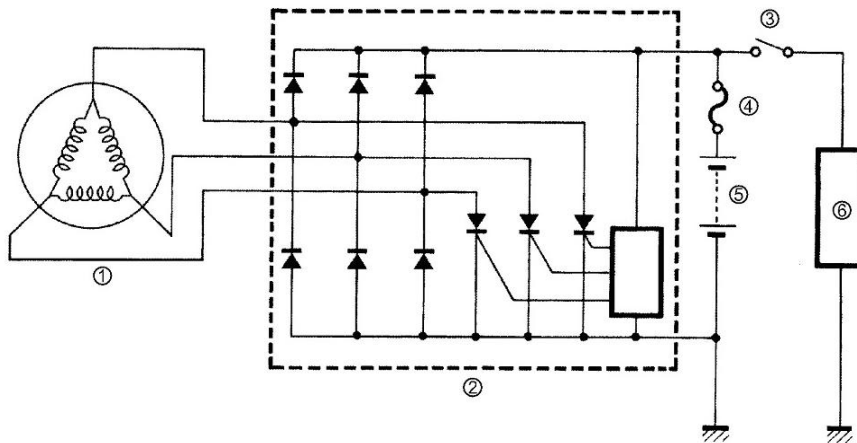
Οι AC-AC μετατροπείς χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες: τους AC ρυθμιστές ή AC ελεγκτές που μεταβάλλουν μόνο την ενεργό τιμή της τάσης και τους κυκλομετατροπείς που μεταβάλλουν και την συχνότητα, δηλαδή είναι κυκλώματα που μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση μιας ορισμένης τιμής, συχνότητας και αριθμού φάσεων σε εναλλασσόμενη τάση άλλης τιμής, άλλης συχνότητας και κατά περιπτώσεις άλλου αριθμού φάσεων. Οι συνηθέστερες εφαρμογές τους είναι σε ηλεκτρονικούς διακόπτες (διακόπτες στερεάς κατάστασης), στον έλεγχο και ομαλή εκκίνηση AC κινητήρων, σε ροοστάτες και σε λειτουργίες αντιστάθμισης. Το απλούστερο κύκλωμα ενός AC ρυθμιστή αποτελείται από δύο θυρίστορ συνδεδεμένα αντιπαράλληλα όπως φαίνεται στην εικόνα. Το πρώτο

Θυρίστορ λαμβάνει παλμό στην θετική ημιπερίοδο ενώ το δεύτερο στην αρνητική. Οι δύο παλμοί απέχουν μεταξύ τους διάστημα που αντιστοιχεί σε γωνία  $180^\circ$ . Μια τέτοια συνδεσμολογία προφανώς μπορεί να αποδώσει ενεργό τιμή της τάσης εξόδου μικρότερη ή ίση για  $\alpha=0^\circ$  της τάσεως εισόδου. Ο πραγματικός συντελεστής ισχύος της διάταξης αντίστροφα είναι ίσος για  $\alpha=0^\circ$  ή μικρότερος της μονάδας.

Σε περίπτωση ωμικού επαγωγικού φορτίου πρέπει να τονιστεί το εξής :

Δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί συνεχής αγωγή παρά μόνο οριακά, καθώς όταν το ένα θυρίστορ είναι σε κατάσταση αγωγή δηλαδή διαρρέεται από ρεύμα, το άλλο θυρίστορ θα είναι ανάστροφα πολωμένο εφόσον τα δύο θυρίστορ είναι παράλληλα συνδεδεμένα.

Στο παρακάτω (σχήμα 1.5), παρουσιάζεται ένας μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσης.



Σχήμα 1.5: μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

#### **2.1. ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ**

##### **2.1.1. Ορισμός**

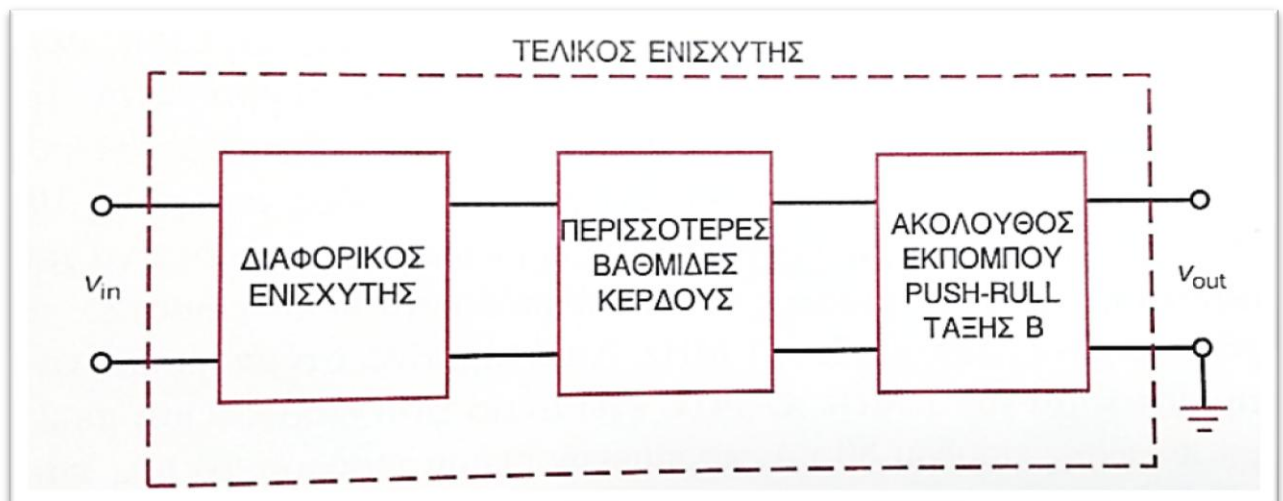
Παρόλο που διατίθενται ορισμένοι τελεστικοί ενισχυτές υψηλής ισχύος, περισσότεροι είναι συσκευές οι χαμηλής ισχύος με μέγιστο περιορισμό ισχύος λιγότερο από 1 WATT. Ορισμένοι τελεστικοί ενισχυτές βελτιώνονται όσον αφορά στο εύρος ζώνης άλλοι όσον αφορά στις παραμένουσες χαμηλές εισόδους. τους. άλλοι όσον αφορά στο χαμηλό θόρυβο, κτλ. Γι' αυτό και η ποικιλία των τελεστικών ενισχυτών που διατίθενται στο εμπόριο είναι πολύ μεγάλη. Μπορείτε να βρείτε έναν τελεστικό ενισχυτή για κάθε σχεδόν αναλογική εφαρμογή. Οι τελεστικοί ενισχυτές αποτελούν βασικά ενεργά εξαρτήματα των αναλογικών συστημάτων. Για παράδειγμα, συνδέοντας δύο εξωτερικές αντιστάσεις, μπορούμε να ρυθμίσουμε το κέρδος τάσης και το εύρος ζώνης ενός τελεστικού ενισχυτή, όπως επιθυμούμε. Ακόμη, με άλλα εξωτερικά εξαρτήματα, μπορούμε να κατασκευάσουμε μετατροπείς κυματομορφής, ενεργά φίλτρα, και άλλα ενδιαφέροντα κυκλώματα. Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής είναι καταρχήν ενισχυτής. Αυτό σημαίνει ότι για να γίνει κατανοητή η λειτουργία του θα πρέπει πρώτα να γίνουν κατανοητά τα βασικά χαρακτηριστικά των ενισχυτών. Οι βασικοί ακροδέκτες ενός τελεστικού ενισχυτή είναι πέντε. Δύο από αυτούς είναι είσοδο, δύο είναι για την τροφοδοσία και ένας έξοδος. Η είσοδος με το σύμβολο "''-" είναι γνωστή ως αναστρέφουσα είσοδος (invertinginput) και η είσοδος με το σύμβολο "''+" ως μη αναστρέφουσα είσοδος (noninvertinginput). Ένας τυπικός ενισχυτής έχει εισόδους (όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα), μία κανονική έξοδο και μία γειωμένη έξοδο. Οι δύο πρώτες είσοδο διαμορφώνουν μια διαφορά δυναμικού στον ενισχυτή, ώστε η τάση που εξέρχεται να ισούται με τη διαφορά δυναμικού επί το συντελεστή ενίσχυσης υπό ιδανικές συνθήκες. Οι άλλες δύο είσοδοι εισάγουν στον ενισχυτή δύο, θεωρητικά συμμετρικές, τάσεις με βάση τις οποίες λειτουργεί η ενίσχυση. Όταν ενισχύεται η τάση, η επιπλέον τάση τροφοδοτείται στον ενισχυτή από δεύτερο ζευγάρι εξόδων, ως αποτέλεσμα η ενίσχυση δε μπορεί να ξεπεράσει αυτές τις τάσεις, οι οποίες ονομάζονται τροφοδοσία. Ο ιδανικός ενισχυτής ενισχύει την ηλεκτρική τάση γραμμικά μέχρι δύο συμμετρικά σημεία, ένα στα θετικά και το συμμετρικό στα αρνητικά. Το ( σχήμα 2.1), δείχνει το λειτουργικό διάγραμμα ενός τελεστικού ενισχυτή. Η βαθμίδα εισόδου είναι ένας διαφορικός ενισχυτής, που ακολουθείται από περισσότερες βαθμίδες απολαβής, και έναν ακόλουθο εκπομπού push-pull τάξης Β. Επειδή ο διαφορικός ενισχυτής αποτελεί την πρώτη βαθμίδα, καθορίζει τα χαρακτηριστικά εισόδου του τελεστικού ενισχυτή. Στους περισσότερους τελεστικούς ενισχυτές η έξοδος είναι ενός άκρου, όπως φαίνεται. Με θετικές και αρνητικές τροφοδοσίες, η έξοδος ενός άκρου έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχει μηδενική τιμή ηρεμίας. Έτσι η μηδενική τάση εισόδου έχει σαν συνέπεια, στην ιδανική περίπτωση, μηδενική τάση εξόδου Δεν σχεδιάζονται όλοι οι ενισχυτές με αυτόν τον

τρόπο .Για παράδειγμα, ορισμένοι δεν χρησιμοποιούν έξοδο push-pull τάξης Β, και άλλοι μπορεί να έχουν έξοδο δύο-άκρων. Επίσης, οι τελεστικοί ενισχυτές δεν είναι τόσο απλοί. Ο εσωτερικός σχεδιασμός ενός μονολιθικού τελεστικού ενισχυτή είναι πολύ περίπλοκος.

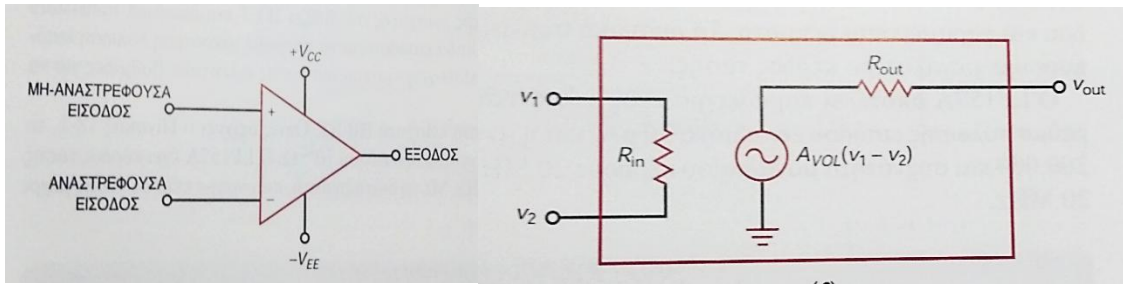
Χρησιμοποιεί δεκάδες transistors ως καθρέφτες ρεύματος, ενεργά φορτία, και άλλες καινοτομίες. Το (σχήμα 2.1) παρουσιάζει δύο σημαντικά χαρακτηριστικά που εφαρμόζονται στους συνηθισμένους τελεστικούς ενισχυτές:

- τη διαφορική είσοδο
- και την έξοδο ενός άκρου.

Το (σχήμα 2.2), αποτελεί το σχηματικό σύμβολο ενός τελεστικού ενισχυτή. Έχει μια μη αναστρέφουσα και μια αναστρέφουσα είσοδο καθώς και μια έξοδο ενός άκρου. Στην ιδανική περίπτωση το σύμβολο αυτό σημαίνει ότι ο ενισχυτής έχει άπειρο κέρδος τάσης, άπειρη σύνθετη αντίσταση εισόδου, και μηδενική σύνθετη αντίσταση εξόδου. Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής παριστάνει έναν τέλειο ενισχυτή τάσης και συχνά ονομάζεται πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση (voltage-controlled voltage source, VCVS). Μπορούμε να δούμε μια VCVS, όπου η  $R_{in}$  είναι άπειρη και η  $R_{out}$  είναι μηδενική. Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής έχει άπειρο κέρδος τάσης, άπειρη συχνότητα μοναδιαίου κέρδους, άπειρη σύνθετη αντίσταση εισόδου, και άπειρο CMRR. Επίσης, έχει μηδενική αντίσταση εισόδου, μηδενικό ρεύμα πόλωσης, και μηδενικά παραμένοντα ρεύματα.



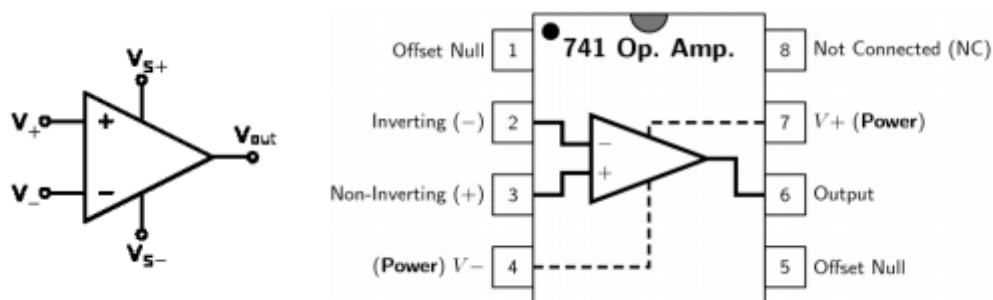
Σχήμα 2.1: τελεστικοί ενισχυτές



Σχήμα 2.2: σύμβολο τελεστικού ενισχυτή

### 2.1.2. Ο Τελεστικός Ενισχυτής 741

Το 1965 η Fairchild Semiconductor κατασκεύασε τον  $\mu A709$ , τον πρώτο ευρέως χρησιμοποιούμενο μονολιθικό τελεστικό ενισχυτή. Παρόλο που σημείωσε επιτυχία, ο τελεστικός ενισχυτής πρώτης γενιάς είχε και πολλά μειονεκτήματα. Αυτό οδήγησε σε ένα βελτιωμένο τελεστικό ενισχυτή γνωστό σαν  $\mu A741$ . Επειδή είναι οικονομικός και εύχρηστος, ο  $\mu A741$  σημείωσε τεράστια επιτυχία. Άλλοι σχεδιασμοί 741 έκαναν την εμφάνιση τους από διάφορους κατασκευαστές. Για παράδειγμα, η Motorola δημιούργησε τον MC1741, η National Semiconductor τον LM741, και η Texas Instruments τον SN72741. Όλοι αυτοί οι μονολιθικοί τελεστικοί ενισχυτές είναι ισοδύναμο με τον  $\mu A741$ , επειδή έχουν τις ίδιες προδιαγραφές στα φυλλάδια δεδομένων τους. Για ευκολία, οι περισσότεροι δεν χρησιμοποιούν τα προθέματα και αποκαλούν αυτόν τον εύχρηστο τελεστικό ενισχυτή απλώς 741, όπως μπορούμε να δούμε στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.3: τελεστικός ενισχυτής 741

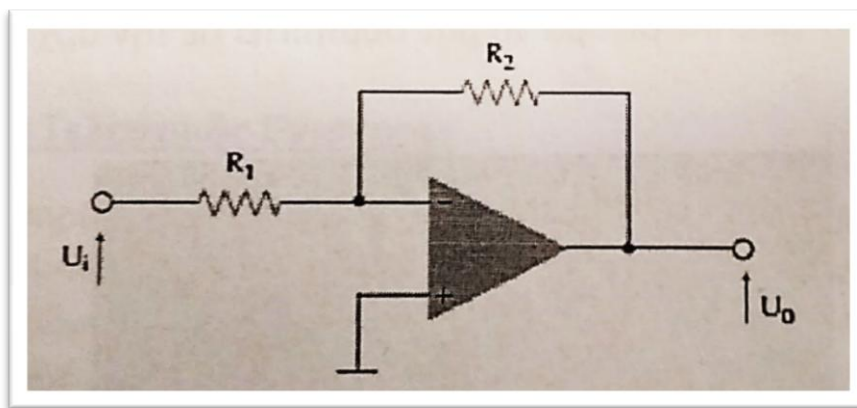
## Βασικά κυκλώματα με χρήση Τ.Ε.

Η υψηλή απολαβή τάσης (ανοικτού βρόχου), η άπειρη αντίσταση εισόδου και η μηδενική αντίσταση εξόδου ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή επιτρέπουν τη σχεδίαση μεγάλης ποικιλίας κυκλωμάτων για την επιτέλεση διαφόρων ηλεκτρονικών λειτουργιών.

### Αναστρέφων ενισχυτής

Το παρακάτω σχήμα δείχνει το κύκλωμα του (κλειστού βρόχου) Τ.Ε. συνδεσμοποιημένος ως αναστρέφων ενισχυτής. Το κύκλωμα αυτό δημιουργεί διαφορά φάσης 180° μεταξύ του σήματος της εισόδου και της εξόδου, άρα αντιστρέφει την πολικότητα της τάσης εισόδου. Αποδεικνύεται, ότι ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$U_{out} = \frac{R_2}{R_1} * U_{in}$$



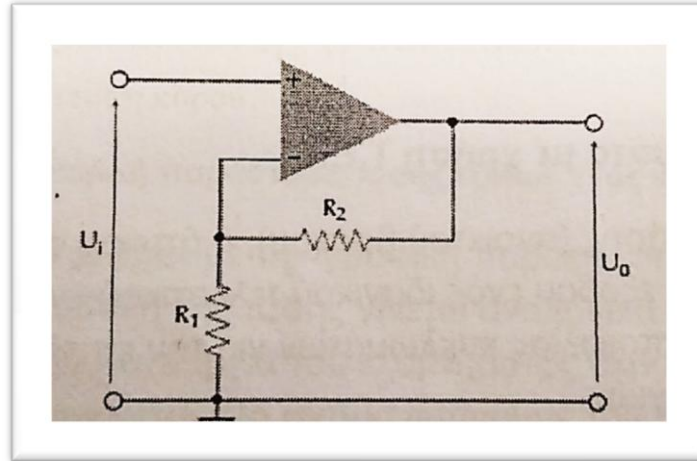
Σχήμα 2.4: αναστρέφων ενισχυτής

### Μη αναστρέφων ΤΕ

Η ενίσχυση ανοικτού βρόχου όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ενός πραγματικού Τ.Ε. είναι πολύ μεγάλη. Για αυτό το λόγο τα πολύ μικρά σήματα με χαμηλή συχνότητα μπορούν να ενισχύονται άνετα χωρίς παραμόρφωση. Τα σήματα όμως αυτά είναι πολύ επιδεκτικά στο θόρυβο. Εκτός αυτού, η ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου του Τ.Ε. δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και την τάση τροφοδοσίας λόγω της μεγάλης παραγωγής των Τ.Ε. από τους κατασκευαστές. Επιπλέον, το εύρος διέλευσης συχνοτήτων (δηλ. η ζώνη των συχνοτήτων για την οποία η ενίσχυση διατηρείται σταθερή) για τους περισσότερους ΤΕ είναι σχεδόν αμελητέα (πολύ μικρή). Για το λόγο αυτό πρακτικά οι ΤΕ με ανοικτό βρόχο δε χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές AC.

$$U_{out} = \frac{1 + R_2}{R_1} * U_{in}$$



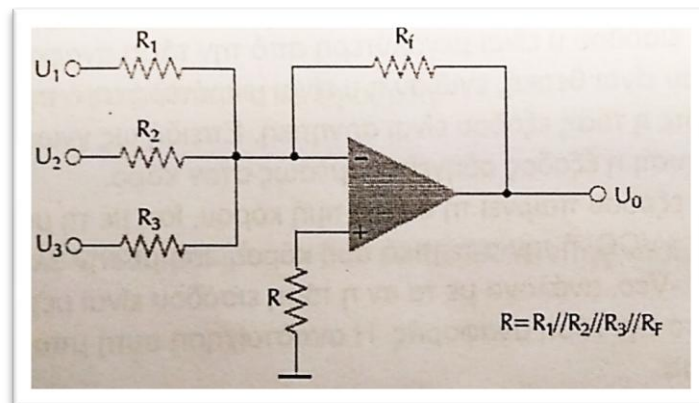


Σχήμα 2.5: μη αναστρέφων Τ.Ε.

### Αθροιστής

Η ανεξαρτησία που υπάρχει μεταξύ των δυο εισόδων, “+” και “-” ενός Τ.Ε. επιτρέπει τη χρησιμοποίηση του σε κύκλωμα που εκτελεί άθροιση τάσεων και που γι' αυτό ονομάζεται αθροιστής. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τον Τ.Ε. σε συνδεσμολογία αθροιστή με τρεις εισόδους  $u_1$ ,  $u_2$  και  $u_3$ . Αποδεικνύεται, ότι η τάση έξοδο του δίνεται από την σχέση:

$$U_0 = \frac{R_f U_1}{R_1} + \frac{R_f U_2}{R_2} + \frac{R_f U_3}{R_3}$$

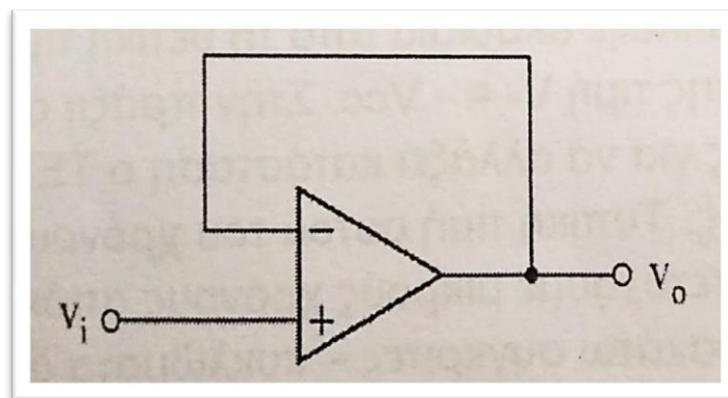


Σχήμα 2.6: αθροιστής

## Ακολουθητής τάσης

Ο ακολουθητής ενισχυτής (follower amplifier) είναι το απλούστερο και συγχρόνως ένα από τα χρησιμότερα κυκλώματα Τ.Ε. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το τυπικό κύκλωμα του ακολουθητή ενισχυτή. Η έξοδος του Τ.Ε. είναι συνδεδεμένη με την αναστρέφουσα είσοδο, οπότε θα είναι  $v_o = v_-$ . Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας των Τ.Ε. θα πρέπει ο Τ.Ε. να αναπτύξει τάση εξόδου, που θα εξισώνει τις τάσεις στις δύο εισόδους, ώστε  $v_+ = v_-$ . Το σήμα εισόδου εφαρμόζεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο, δηλ.  $v_+ = v_i$ , οπότε η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

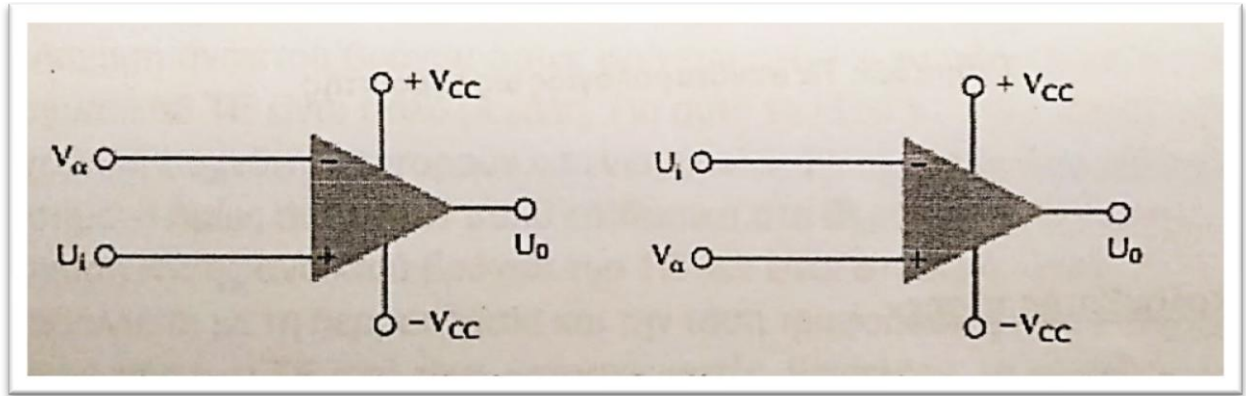
$$U_o = U$$



Σχήμα 2.7: ακολουθητής τάσης

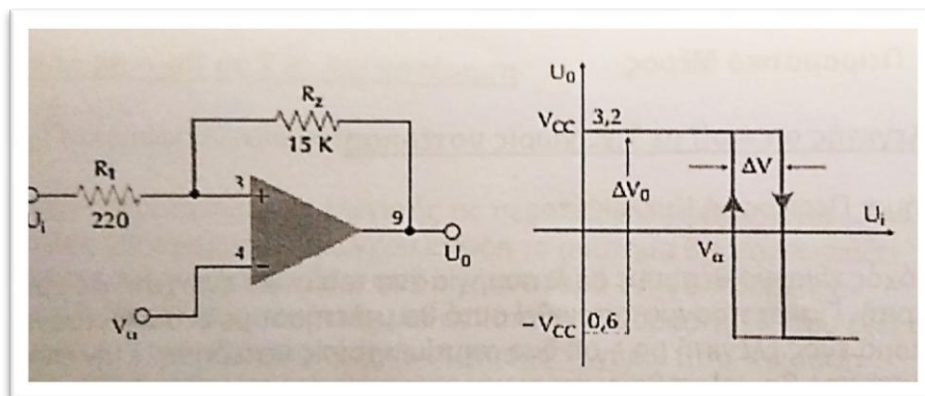
## Συγκριτής τάσης

Μερικές φορές είναι απαραίτητο να συγκρίνουμε δυο τάσεις για να προσδιορίσουμε ποια είναι η μεγαλύτερη ή να καθορίσουμε ένα κατώφλι λειτουργίας. Ένα παράδειγμα είναι ηλεκτρονικός θερμοστάτης που μετατρέπει τη θερμοκρασία σε τάση. Όταν η τάση που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του δωματίου είναι η μικρότερη τάση της επιθυμητής θερμοκρασίας και αντιστοιχεί σε ορισμένη θέση-κατώφλιο του θερμοστάτη, το σύστημα δημιουργεί ένα σήμα διαφοράς που θέτει σε λειτουργία το καλοριφέρ. Η συνθετότερη περίπτωση είναι ο συγκριτής κόρου, που είναι ένας διαφορικός ενισχυτής με Τ.Ε. και εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Όταν η τάση εισόδου  $u$  είναι μεγαλύτερη από την τάση αναφοράς  $v_n$  ( $u > v_n$ ) η τάση εξόδου είναι θετική, ενώ αν η  $u$  είναι μικρότερη από την τάση αναφοράς τότε η τάση εξόδου είναι αρνητική. Επειδή ως γνωστό, ο Τ.Ε. έχει μεγάλη ενίσχυση η έξοδος οδηγείται αμέσως στον κόρο. Έτσι, η τάση εξόδου παίρνει τη θετική τιμή κόρου, ίση με τη μια τάση τροφοδοσίας  $+V_{CC}$ , ή την αρνητική τιμή κόρου, ίση με την άλλη τάση τροφοδοσίας  $-V_{CC}$ , ανάλογα με το αν η τάση εισόδου είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση αναφοράς. Η αντιστοίχιση αυτή μπορεί να λειτουργεί και αντίστροφα.



Σχήμα 2.8: συγκριτής τάσης

Όταν η είσοδος μεταβάλλεται περνώντας από την τάση αναφοράς  $V_a$ , δημιουργείται στην έξοδο μια μετάβαση από τη μια κατάσταση στην άλλη, μόλις η τάση εισόδου  $u$  διέρχεται από τον άξονα της τάσης  $v_a$ . Δηλαδή, τη μια χρονική στιγμή η τάση εισόδου μπορεί να είναι μικρότερη από την τάση αναφοράς, ενώ την επόμενη στιγμή συμβαίνει το αντίθετο. Στην ιδανική περίπτωση, η έξοδος θα άλλαζε ακαριαία από τη θετική τιμή της τάσης κόρου,  $V_+ = V_{CC}$ , στην αρνητική της τιμή  $V_- = -V_{CC}$ . Στην πράξη όμως, απαιτείται πάντα ένας μικρός χρόνος για να αλλάξει κατάσταση ο Τ.Ε. Ο χρόνος αυτός καλείται χρόνος απόκρισης. Τυπική τιμή αυτού του χρόνου απόκρισης είναι λίγα  $\mu s$ . Προκειμένου να πετύχουμε μικρούς χρόνους απόκρισης χρησιμοποιούμε τους παρακάτω συγκριτές - κυκλώματα δηλαδή με υστέρηση.



Σχήμα 2.9: συγκριτές - κυκλώματα

Η υστέρηση του συγκριτή δίνεται από τη σχέση:

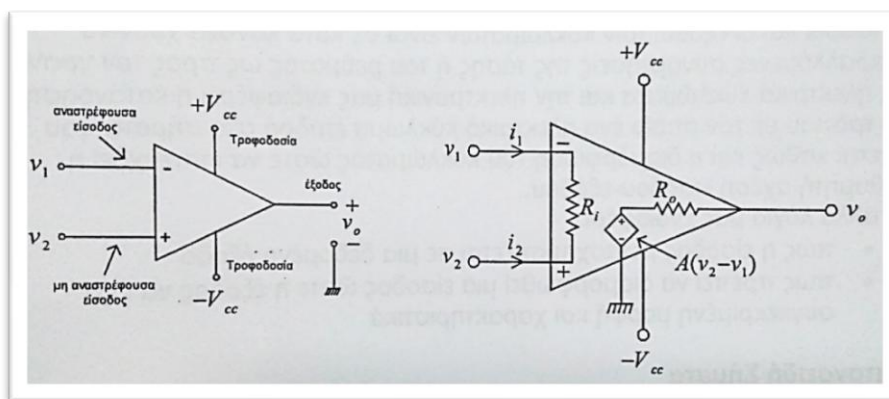
$$\Delta V = \frac{R_1}{R_1 + R_2} * \Delta V_0$$

όπου  $\Delta V_0$  είναι η διαφορά μεταξύ των δύο καταστάσεων της τάσης εξόδου.

Δηλαδή:  $\Delta V_0 = (V_+) - (V_-)$

## Διαφορά Τ.Ε. σε χρήση ενίσχυσης έναντι τρανζίστορ

Η διαφορά του από ένα ενισχυτή με τρανζίστορ είναι ότι έχει μεγαλύτερη σταθερότητα λειτουργίας μιας και δεν αντιμετωπίζει προβλήματα θερμοκρασιών ή ενδοχώρητικότητας που έχουμε στα τρανζίστορ. Τους βρίσκουμε σε μορφή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Ακόμα ένα θετικό στοιχείο τους είναι ότι παρουσιάζουν θεωρητικά άπειρη σύνθετη αντίσταση εισόδου-εξόδου άρα έχουμε και καλύτερη απομόνωση μεταξύ των 2. Σαν αρνητικό τους είναι η τροφοδοσία τους που πρέπει να είναι συμμετρική (+15/- 15volt), αν και υπάρχουν κάποιες που δέχονται και απλή. Καταλήγοντας ο τελεστικός ενισχυτής (operatio nalamplifier), αποτελεί μια 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, φαίνονται στο παρακάτω (σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10: κυκλωματικό σύμβολο τελεστικού ενισχυτή

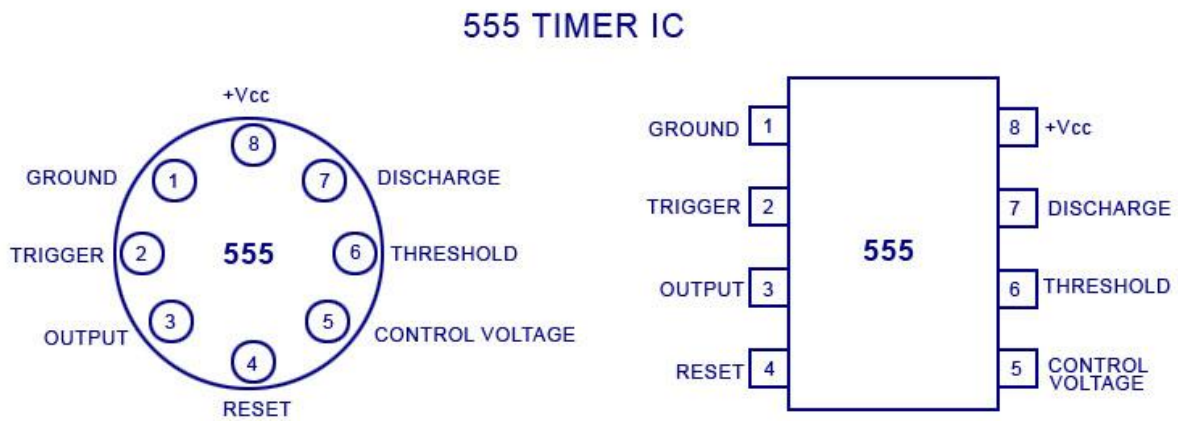
Η τάση εξόδου του τελεστικού ενισχυτή, είναι ίση με τη διαφορά των τάσεων των δύο ακροδεκτών εισόδου, πολλαπλασιασμένη με το κέρδος του ενισχυτή. Τυπικές τιμές κέρδους διαφόρων τελεστικών ενισχυτών, κυμαίνονται μεταξύ  $10^4$  έως  $10^7$ .

## Τροφοδοσία Τ.Ε.

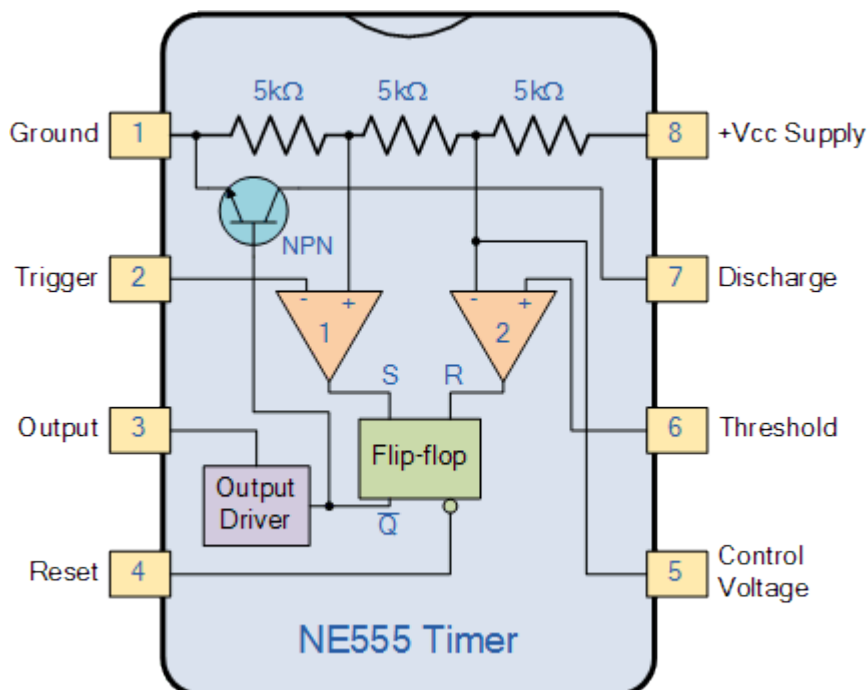
Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι τάσεις τροφοδοσίας των τελεστικών ενισχυτών είναι συμμετρικές. Τυπικές τιμές τάσεων τροφοδοσίας είναι  $\pm 18V$ ,  $\pm 15V$ ,  $\pm 12V$  και  $\pm 6V$ . Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις τελεστικών ενισχυτών ή εφαρμογών, που απαιτούν ασύμμετρες τάσεις τροφοδοσίας (π.χ.  $+12V$  και  $-6V$  ή  $30V$  και  $0V$ ). Η μέγιστη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ακροδεκτών τροφοδοσίας, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν πρέπει να ξεπερνάει τα  $36 V$  κατ' απόλυτη τιμή.

## 2.2. Εσωτερική Δομή Ολοκληρωμένου 555

Το 555 είναι αξιόπιστο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών και το κόστος είναι σχετικά μικρό. Μπορεί να λειτουργήσει όπως αναφέραμε ονομαστικά παραπάνω με τάση τροφοδοσίας από 5V έως +18V και έτσι είναι συμβατό με τα κυκλώματα TTL (τρανζίστορ-τρανζίστορ), λογική καθώς και με τους τελεστικούς ενισχυτές. Το 555, λειτουργικά μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα κουτί το οποίο περιέχει δύο συγκριτές, δύο τρανζίστορ, τρεις ίσες αντιστάσεις, ένα φλιπ-φλόπ και μία βαθμίδα εξόδου (Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.11 : Δομή timer 555



Σχήμα 2.12 : Εσωτερική Δομή timer 555

### **2.2.1. Τρόποι λειτουργίας του 555**

Το ολοκληρωμένο 555 μπορεί να λειτουργήσει δύο τρόπους με:

(α) Σαν ασταθής πολυδομητής και

(β) σαν μονοσταθής πολυδομητής

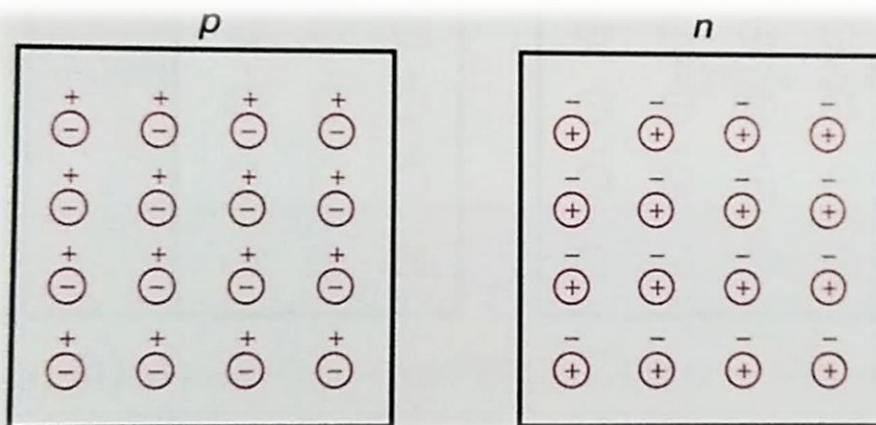
Όταν το χρονοκύκλωμα λειτουργεί σαν ασταθής πολυδομητής η τάση εξόδου αλλάζει από υψηλή σε χαμηλή στάθμη και πάλι στην υψηλή. Στην ασταθή κατάσταση, μπορεί να δημιουργήσει ορθογώνια σήματα με μεταβλητό κύκλο εργασίας. ο χρόνος κατά τον οποίο η έξοδος είναι υψηλή είτε χαμηλή καθορίζεται από ένα κύκλωμα αντιστάσεως -πυκνωτή το οποίο είναι συνδεδεμένο εξωτερικά με το 555. Όταν το χρονοκύκλωμα λειτουργεί σαν μονοσταθής πολυδομητής η τάση εξόδου είναι χαμηλή έως ότου εφαρμοστεί ένας αρνητικός παλμός σκανδαλισμού. Τότε η έξοδος γίνεται υψηλή. Σε αυτή την κατάσταση μπορεί να δημιουργήσει ακριβείς χρονικές καθυστερήσεις από microseconds μέχρι ώρες οι οποίες καθορίζονται από μια αντίσταση και έναν πυκνωτή που συνδέονται στο χρονοκύκλωμα. Στο τέλος του χρονικού διαστήματος η έξοδος επιστέφει στην χαμηλή στάθμη.

## 2.3. ΔΙΟΔΟΣ

Αυτό καθ' εαυτό, ένα κομμάτι ημιαγωγού τύπου **n** είναι περίπου το ίδιο χρήσιμο με μια αντίσταση από άνθρακα. Το ίδιο ισχύει και για έναν ημιαγωγό τύπου **p**. Αλλά όταν ένας κατασκευαστής εμπλουτίσει έναν κρύσταλλο έτσι ώστε το μισό αυτού να είναι τύπου **p** και το άλλο μισό τύπου **n**, τότε δημιουργείται κάτι νέο. Η οριακή περιοχή μεταξύ ημιαγωγού τύπου **p** και τύπου **n** ονομάζεται επαφή **pn**. Η επαφή **pn** έχει οδηγήσει σε όλων των ειδών τις ανακαλύψεις συμπεριλαμβανομένων των διόδων, των transistors, και των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η κατανόηση της επαφής **pn** θεωρείται βασική για την κατανόηση όλων των ειδών των ημιαγωγικών διατάξεων.

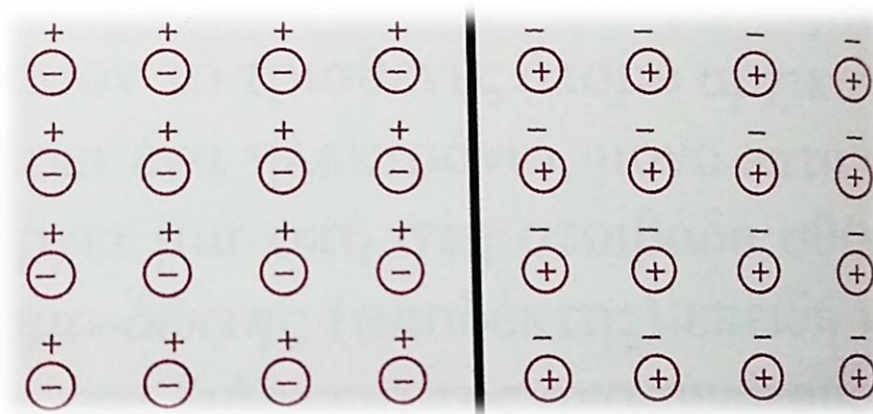
### 2.3.1. Η Δίοδος Χωρίς Πόλωση

Μπορούμε να φανταστούμε ένα κομμάτι ημιαγωγού τύπου **p** όπως φαίνεται στο (σχήμα 2.13). Κάθε “πλην” μέσα σε κύκλο παριστά ένα τρισθενές άτομο, και κάθε “συν” είναι η οπή στη στοιβάδα σθένους του.



Σχήμα 2.13: ημιαγωγός τύπου p

Ομοίως, μπορούμε να φανταστούμε τα πεντασθενή άτομα και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ενός ημιαγωγού τύπου **n** όπως φαίνεται στο (σχήμα 2.14). Κάθε “συν” σε κύκλο αναπαριστά το πεντασθενές άτομα και κάθε “πλην” είναι το ελεύθερο ηλεκτρόνιο που συνεισφέρει στον ημιαγωγό. Κάθε κομμάτι ημιαγωγικού υλικού είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, επειδή ο αριθμός των “συν” είναι ίσος με τον αριθμό των “πλην”. Έτσι μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα μεμονωμένο κρύσταλλο με υλικό τύπου **n** από την μια πλευρά και τύπου **p** από την άλλη πλευρά όπως φαίνεται στο Σχ. 2. Η επαφή είναι το όριο όπου συναντώνται οι περιοχές τύπου - **p** και τύπου - **n** και η ονομασία δίοδος επαφής είναι μια άλλη για τον κρύσταλλο **pn**. Η λέξη “δίοδος” είναι μια σύντμηση των λέξεων δυο ηλεκτροδίων (twoelectrodes).

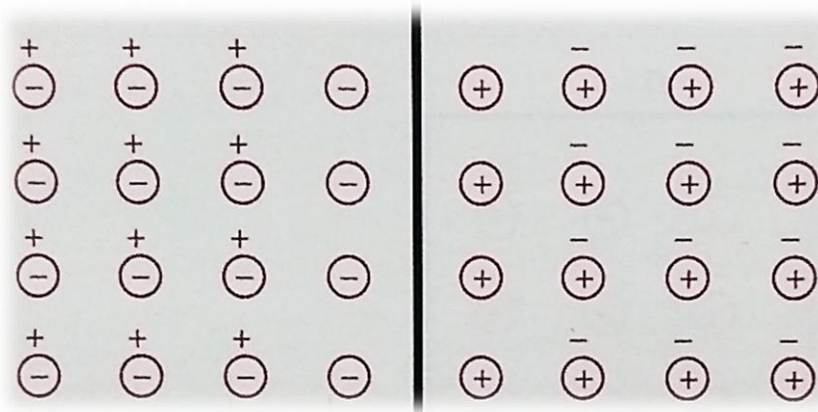


Σχήμα 2.14: ημιαγωγού τύπου n

### **2.3.2 Περιοχή Απογύμνωσης**

Λόγο της απώθησης μεταξύ τους, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στην πλευρά τύπου **n** του (σχήμα 2.15), τείνουν να διαχυθούν προς όλες τις κατευθύνσεις. Μερικά από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια διαχέονται διαμέσου της επαφής. Όταν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο εισέρχεται στην περιοχή τύπου **p**, γίνεται ένας φορέας μειονότητας, ο οποίος με τόσες πολλές σπές γύρω του έχει έναν πολύ μικρό χρόνο ζωής. Αμέσως μετά την είσοδο του στην περιοχή **p**, το ελεύθερο ηλεκτρόνιο ανασυνδέεται με μια σπή. Όταν συμβεί αυτό, η σπή εξαφανίζεται και το ελεύθερο ηλεκτρόνιο γίνεται ένα ηλεκτρόνιο σθένους. Κάθε φορά που ένα ηλεκτρόνιο διαχέεται διαμέσου της επαφής, δημιουργείται ένα ζεύγος ιόντων. Όταν ένα ηλεκτρόνιο αφήνει την πλευρά τύπου **n**, αφήνει πίσω ένα πεντασθενές άτομο που του λείπει ένα αρνητικό φορτίο και το οποίο γίνεται ένα θετικό ιόν. Στην πλευρά όμως τύπου **p**, όταν το ελεύθερο ηλεκτρόνιο της πλευράς τύπου **n** πέσει σε μια σπή, σχηματίζεται ένα αρνητικό ιόν από το τρισθενές άτομο που το έλαβε. Το (σχήμα 2.15) δείχνει αυτά τα ιόντα σε κάθε πλευρά της επαφής. Τα “συν” μέσα στους κύκλους είναι τα θετικά ιόντα, και τα “πλην” μέσα στους κύκλους είναι τα αρνητικά ιόντα. Τα ιόντα είναι σταθερά στην κρυσταλλική δομή λόγω του ομοιοπολικού δεσμού και δεν μπορούν να κινούνται ελεύθερα όπως τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι σπές.





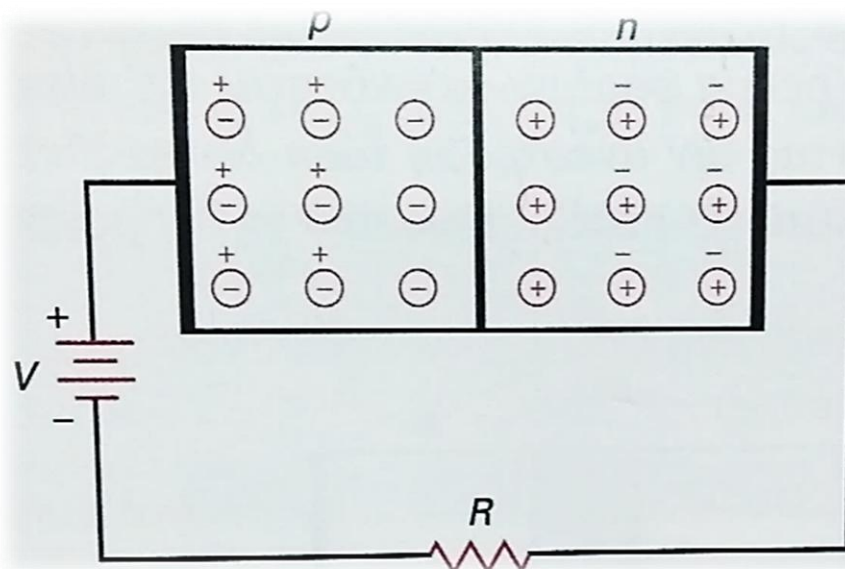
Σχήμα 2.15: ελεύθερα ηλεκτρόνια στην πλευρά τύπου n

Κάθε ζεύγος θετικού και αρνητικού ιόντος στην επαφή ονομάζεται **δίπολο**. Η δημιουργία ενός διπόλου σημαίνει ότι ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή έχουν τεθεί εκτός κίνησης. Καθώς ο αριθμός των διπόλων αυξάνει, η περιοχή κοντά στην επαφή αδειάζει από φορείς (φορτία), και την ονομάζουμε περιοχή απογύμνωσης (depletion layer).

### 2.3.3 Φράγμα Δυναμικού

Κάθε δίπολο έχει ένα ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ θετικού και αρνητικού ιόντος. Συνεπώς, αν επιπλέον ελεύθερα ηλεκτρόνια εισέλθουν στην περιοχή απογύμνωσης, το ηλεκτρικό πεδίο προσπαθεί ν' απωθήσει αυτά τα ηλεκτρόνια πίσω στην περιοχή τύπου **n**. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται με κάθε εισερχόμενο ηλεκτρόνιο, έως ότου αποκατασταθεί η ισορροπία. Αυτό σημαίνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο τελικά σταματά τη διάχυση ηλεκτρονίων διαμέσου της επαφής. Στο (σχήμα 2.16), το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ιόντων είναι ισοδύναμο με μια διαφορά δυναμικού που καλείται φράγμα δυναμικού. Στους 25°C, το φράγμα δυναμικού ισούται περίπου με 0.3 V για διόδους γερμανίου και με 0.7 V για διόδους πυριτίου.

## Ορθή πόλωση



Σχήμα 2.16: πηγή dc στα άκρα της διόδου

Το (σχήμα 2.16), δείχνει μια πηγή dc στα άκρα μιας διόδου. Το αρνητικό άκρο της πηγής συνδέεται στο υλικό τύπου- $p$ . Αυτή η σύνδεση καλείται ορθή πόλωση.

## ΡΟΗ ΕΛΕΥΘΕΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ

Στο (σχήμα 2.16), η μπαταρία ωθεί σπές και ελεύθερα ηλεκτρόνια προς την επαφή. Αν η τάση της μπαταρίας είναι μικρότερη από το φράγμα δυναμικού, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δεν διαθέτουν αρκετή ενέργεια ώστε να περάσουν την περιοχή απογύμνωσης. Όταν εισέρχονται στην περιοχή απογύμνωσης, τα ιόντα θα ωθήσουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια πίσω στην περιοχή- $n$ . Γι' αυτό δε διαρρέει ρεύμα τη δίοδο. Όταν η πηγή dc τάση είναι μεγαλύτερη από το φράγμα δυναμικού, η μπαταρία και πάλι ωθεί σπές και ελεύθερα ηλεκτρόνια προς την επαφή. Αυτή τη φορά, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να διαπεράσουν την περιοχή απογύμνωσης και να ανασυνδυαστούν με τις σπές. Αν θεωρήσουμε ότι όλες οι σπές στην περιοχή- $p$  κινούνται προς τα δεξιά και όλα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια προς τα αριστερά, θα μπορέσουμε να κατανοήσουμε τη βασική ιδέα. Κάπου κοντά στην επαφή, αυτά τα αντίθετα φορτία ανασυνδυάζονται. Αφού τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συνεχώς εισέρχονται στο δεξί άκρο της διόδου και οι σπές δημιουργούνται συνεχώς στο αριστερό άκρο, τότε έχουμε συνεχές ρεύμα διαμέσου της διόδου.

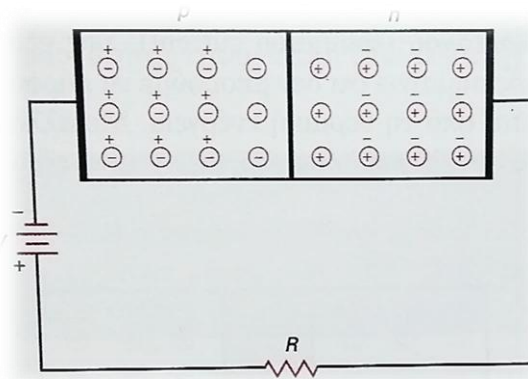
## ΡΟΗ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ

Ας ακολουθήσουμε ένα ηλεκτρόνιο που κινείται μέσα σε ένα κύκλωμα. Από την στιγμή που το ελεύθερο ηλεκτρόνιο φύγει από το αρνητικό άκρο της μπαταρίας, εισέρχεται στο δεξί άκρο της διόδου. Αυτό διασχίζει την περιοχή- $n$  μέχρι να φτάσει στην επαφή. Όταν η

τάση της μπαταρίας είναι μεγαλύτερη από 0,7 V, το ελεύθερο ηλεκτρόνιο έχει αρκετή ενέργεια ώστε να διασχίσει την περιοχή απογύμνωσης. Αμέσως μετά την είσοδο του ελεύθερου ηλεκτρονίου στην περιοχή-p, ανασυνδυάζεται με μια οπή. Με άλλα λόγια, το ελεύθερο ηλεκτρόνιο γίνεται ηλεκτρόνιο σθένους. Σαν ηλεκτρόνιο σθένους, συνεχίζει να κινείται προς τα αριστερά, περνώντας από τη μια οπή στην άλλη, μέχρι να φτάσει στο αριστερό άκρο της διόδου. Όταν φεύγει από το αριστερό άκρο της διόδου, εμφανίζεται μια νέα οπή και η διαδικασία ξαναρχίζει. Αφού υπάρχουν δισεκατομμύρια ηλεκτρονίων που κάνουν την ίδια διαδρομή, παίρνουμε συνεχές ρεύμα διαμέσου της διόδου. Μια αντίσταση σε σειρά χρησιμοποιείται για να περιορίσουμε την τιμή του ορθού ρεύματος.

### **ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΠΟΛΩΣΗ**

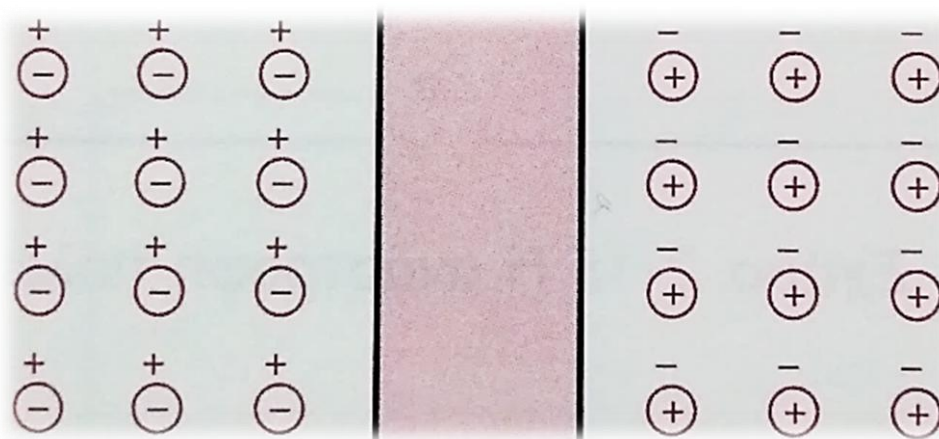
Αλλάζοντας την πολικότητα της dc πηγής η διόδος πολώνεται ανάστροφα όπως φαίνεται στο (σχήμα 2.17). Τώρα το αρνητικό άκρο της μπαταρίας συνδέεται στην πλευρά τύπου-p, και το θετικό άκρο της μπαταρίας στην πλευρά τύπου-n. Αυτή η σύνδεση καλείται ανάστροφη πόλωση.



Σχήμα 2.17: ανάστροφη πόλωση

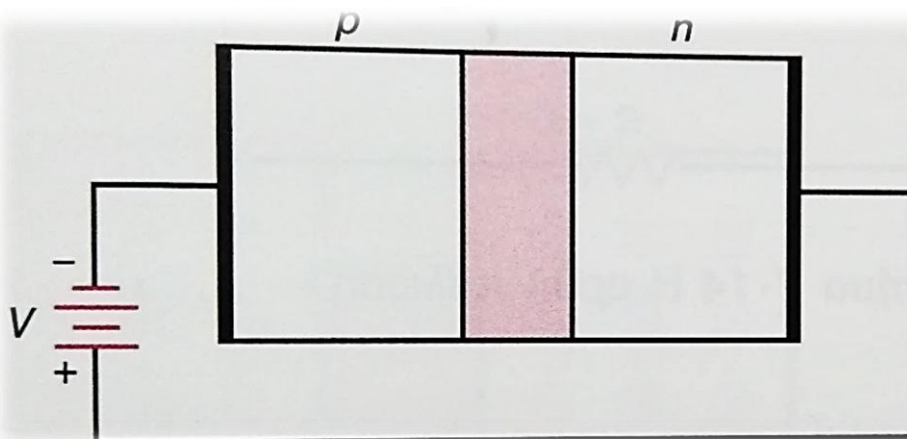
### 2.3.4 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΓΥΜΝΩΣΗΣ ΔΙΕΥΡΥΝΕΤΑΙ

Το αρνητικό άκρο της μπαταρίας έλκει τις οπές, και το θετικό άκρο της μπαταρίας έλκει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Λόγο αυτού, οι οπές και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ρέουν απομακρυνόμενα από την επαφή. Συνεπώς η περιοχή απογύμνωσης διευρύνεται.



Σχήμα 2.18: περιοχή απογύμνωσης

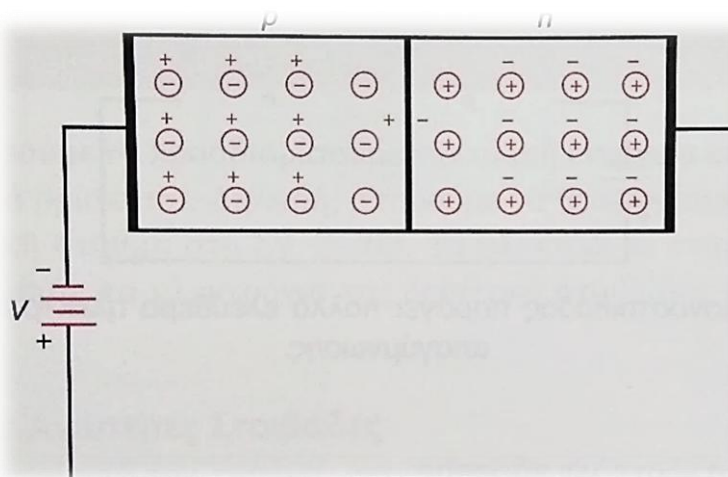
Πόσο ευρεία γίνεται η περιοχή απογύμνωσης στο (σχήμα 2.18). Όταν οι οπές και τα ηλεκτρόνια κινούνται απομακρυνόμενα από την επαφή, τα νέα ιόντα που δημιουργούνται αυξάνουν τη διαφορά δυναμικού στα άκρα της περιοχής απογύμνωσης. Όσο ευρύτερη είναι η περιοχή απογύμνωσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά δυναμικού. Η περιοχή απογύμνωσης σταματά να μεγαλώνει όταν η διαφορά δυναμικού της γίνει ίση με την εφαρμοζόμενη ανάστροφη τάση. Όταν συμβεί αυτό, σταματά η απομάκρυνση ηλεκτρονίων και οπών από την επαφή. Μερικές φορές η περιοχή απογύμνωσης φαίνεται σαν μια σκιασμένη περιοχή όπως αυτή του (σχήμα 2.19), το εύρος αυτής της σκιασμένης περιοχής είναι ανάλογο προς την ανάστροφη τάση. Όταν αυξάνεται η ανάστροφη τάση, η περιοχή απογύμνωσης γίνεται ευρύτερη.



Σχήμα 2.19: σκιασμένη περιοχή απογύμνωσης

### 2.3.5 ΡΕΥΜΑ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕΙΟΝΟΤΗΤΑΣ

Υπάρχει ένα μικρό ρεύμα με ανάστροφη πόλωση. Γνωρίζουμε πως η θερμική ενέργεια δημιουργεί συνεχώς ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν λίγοι φορείς μειονότητας και στις δυο πλευρές της επαφής. Οι περισσότεροι από αυτούς ανασυζεύγγονται με τους φορείς πλειονότητας. Αλλά αυτοί που βρίσκονται μέσα στην περιοχή απογύμνωσης μπορεί να υπάρχουν για αρκετό χρονικό διάστημα όταν διασπάσουν την επαφή. Όταν αυτό συμβεί ένα μικρό ρεύμα ρέει στο εξωτερικό κύκλωμα. Το (σχήμα 2.20), απεικονίζει την ιδέα. Έστω ότι η θερμική ενέργεια δημιουργεί συνεχώς ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών κοντά στην επαφή. Η περιοχή απογύμνωσης σπρώχνει το ελεύθερο ηλεκτρόνιο προς τα δεξιά, αναγκάζοντας ένα ηλεκτρόνιο να αφήσει το δεξιό άκρο του κρυστάλλου. Η οπή στην περιοχή απογύμνωσης απωθείται προς τα αριστερά. Αυτή η επιπλέον οπή στην περιοχή-p αφήνει ένα ηλεκτρόνιο να εισέλθει στο αριστερό άκρο του κρυστάλλου και να πέσει μέσα σε μια οπή. Εφόσον η θερμική ενέργεια δημιουργεί συνεχώς ζεύγη ηλεκτρονίου – οπής μέσα στη περιοχή απογύμνωσης, θα πάρουμε ένα μικρό συνεχές ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα.



Σχήμα 2.20: ρεύμα φορέων

Το ανάστροφο ρεύμα που προκαλείται από τους θερμικά παραγόμενους φορείς μειονότητας καλείται ρεύμα κορεσμού (saturation or current). Στις εξισώσεις, το ρεύμα κορεσμού συμβολίζεται με  $I_s$ . Ο όρος κορεσμός σημαίνει ότι δεν μπορούμε να πάρουμε περισσότερο ρεύμα φορέων-μειονότητας από αυτό που παράγεται από τη θερμική ενέργεια. Με άλλα λόγια, αυξάνοντας την ανάστροφη τάση δεν αυξάνεται ο αριθμός των θερμικά δημιουργούμενων φορέων μειονότητας. Αυτό εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία.

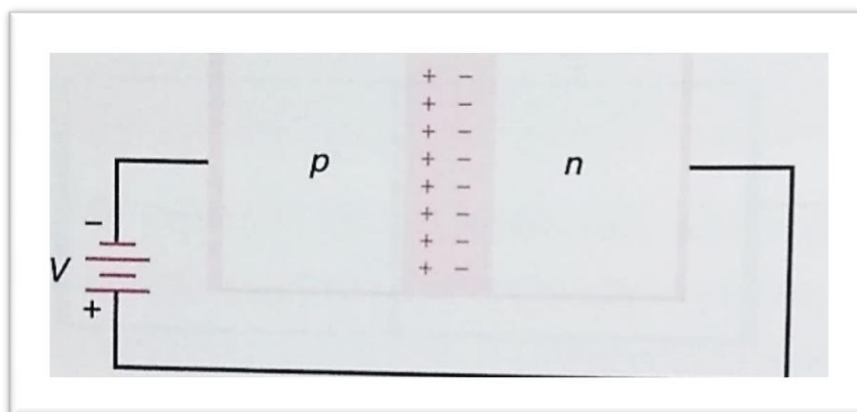
### 2.3.6 ΕΠΙΦΑΝΙΑΚΟ ΡΕΥΜΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ

Εκτός από το θερμικά παραγόμενο ρεύμα φορέων-μειοψηφίας, υπάρχει ένα μικρό ρεύμα ρέει στην επιφάνεια του κρυστάλλου. Γνωστό σαν επιφανειακό ρεύμα διαρροής (surface-leakage current), αυτό προκαλείται από επιφανειακές προσμείξεις και ατέλειες στην κρυσταλλική δομή. Γενικά πρέπει να θυμόμαστε ότι το ολικό ανάστροφο ρεύμα σε μια δίοδο αποτελείται από ένα ρεύμα φορέων μειονότητας (πολύ μικρό και ανάλογο της

θερμοκρασίας) και ένα επιφανειακό ρεύμα διαρροής (πολύ μικρό και είναι ανάλογο της τάσης). Στις περισσότερες εφαρμογές, το ανάστροφο ρεύμα σε μια δίοδο πυριτίου είναι τόσο μικρό που ούτε καν το αντιλαμβανόμαστε.

### **2.3.7 ΔΙΑΣΠΑΣΗ**

Οι δίοδοι έχουν μέγιστες τιμές τάσης. Υπάρχει ένα όριο στην ανάστροφη τάση που μπορεί να αντέξει μια δίοδος πριν καταστραφεί. Αυξάνοντας συνεχώς την ανάστροφη τάση, φθάνουμε στην τάση διάσπασης ή κατάρρευσης της διόδου. Για πολλές διόδους, η τάση διάσπασης είναι συνήθως μεγαλύτερη από 50 V. Η τάση διάσπασης δίνεται στο φυλλάδιο προδιαγραφών της διόδου. Στην τάση διάσπασης, ένας μεγάλος αριθμός φορέων μειονότητας εμφανίζεται ξαφνικά στην περιοχή απογύμνωσης και η δίοδος άγει πάρα πολύ. Η υπέρβαση της τάσης κατάρρευσης της διόδου δε σημαίνει απαραίτητα την καταστροφή της διόδου. Όσο το γινόμενο της ανάστροφης τάσης επί το ανάστροφο ρεύμα δεν υπερβαίνει τη μέγιστη τιμή επιτρεπόμενης ισχύος της διόδου, η δίοδος θα επανέλθει πλήρως. Παράγονται από το φαινόμενο χιονοστιβάδας (avalanche effect), (σχήμα 2.21), το οποίο συμβαίνει σε υψηλότερες ανάστροφες τάσης. Ως συνήθως, υπάρχει ένα μικρό ανάστροφο ρεύμα φορέων μειοψηφίας. Όταν αυξάνεται η ανάστροφη τάση, αναγκάζει τους φορείς μειονότητας να κινηθούν γρηγορότερα. Αυτοί οι φορείς μειονότητας συγκρούονται με τα άτομα του κρυστάλλου. Όταν αυτοί οι φορείς μειοψηφίας έχουν αρκετή ενέργεια, μπορούν να αποδεσμεύσουν ηλεκτρόνια σθένους και να τα καταστήσουν ελεύθερα. Αυτοί οι νέοι φορείς μειονότητας συγκρούονται με άλλα άτομα. Η διαδικασία είναι γεωμετρική επειδή ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο ελευθερώνει ένα ηλεκτρόνιο σθένους για να πάρουμε δυο ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αυτά τα δύο ελεύθερα ηλεκτρόνια κατόπιν ελευθερώνουν δύο ηλεκτρόνια ώστε να πάρουμε τέσσερα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου το ανάστροφο ρεύμα γίνει τεράστιο.



Σχήμα 2.21: τάση διάσπασης

Η ανάστροφη τάση πόλωσης αναγκάζει το ελεύθερο ηλεκτρόνιο να κινηθεί προς τα δεξιά. Καθώς κινείται το ηλεκτρόνιο αυξάνει την ταχύτητα του. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανάστροφη πόλωση, τόσο ταχύτερα κινείται το ηλεκτρόνιο σθένους του πρώτου ατόμου σε μια μεγαλύτερη τροχιά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα δύο ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία κατόπιν επιταχύνονται και ελευθερώνουν άλλα δύο ηλεκτρόνια. Με αυτόν τον τρόπο, ο αριθμός των φορέων μειονότητας μπορεί να καταστεί αρκετά μεγάλος και η δίοδος να άγει

πάρα πολύ. Η τάση διάσπαση μιας διόδου εξαρτάται από το πόσο μεγάλο ποσοστό προσμίξεως έχει μια δίοδος. Στις διόδους ανόρθωσης (ο συνηθέστερος τύπος), η τάση διάσπασης είναι συνήθως μεγαλύτερη από 50 V.

### **2.3.8 ΦΡΑΓΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ & ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ**

Η θερμοκρασία επαφής είναι η θερμοκρασία εντός της διόδου, ακριβώς στην επαφή των υλικών τύπου-p και τύπου-n. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα. Όταν η δίοδος άγει, η θερμοκρασία της επαφής είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, λόγω της θερμότητας που παράγεται από τον ανασυνδυασμό οπών-ηλεκτρονίων. Η τιμή του φράγματος δυναμικού εξαρτάται από θερμοκρασία επαφής. Μία υψηλότερη θερμοκρασία επαφής δημιουργεί περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές στις περιοχές πρόσμιξης. Καθώς αυτά τα επιπλέον ηλεκτρόνια και οπές διαχέονται στην περιοχή απογύμνωσης, ελαττώνουν το πλάτος της, που ισοδυναμεί με ελάττωση του φράγματος δυναμικού. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μικρότερο φράγμα δυναμικού, σε υψηλές θερμοκρασίες επαφής. Πριν συνεχίσουμε, θα πρέπει να ορίσουμε ένα σύμβολο:

**$\Delta$  = μεταβολή σε κάποια ποσότητα**

Ο ελληνικός χαρακτήρας  **$\Delta$**  συμβολίζει τη μεταβολή σε κάποια ποσότητα. Για παράδειγμα,  **$\Delta V$**  είναι η μεταβολή τάσης, ενώ  **$\Delta T$**  είναι η μεταβολή θερμοκρασίας. Ο λόγος  **$\Delta V / \Delta T$**  υποδηλώνει τη μεταβολή τάσης προς τη μεταβολή θερμοκρασίας. Το φράγμα δυναμικού μιας διόδου πυριτίου ελαττώνεται κατά 2 mV για κάθε αύξηση θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό Κελσίου. Έτσι έχουμε:

$$(\Delta V / \Delta T) = - 2 \text{ mV } / ^\circ\text{C}$$

Δηλαδή:

$$\Delta V = (- 2 \text{ mV } / ^\circ\text{C}) * \Delta T$$

Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να υπολογίσουμε το φράγμα δυναμικού σε οποιαδήποτε θερμοκρασία επαφής.

### **2.3.9 ΔΙΟΔΟΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΑ ΠΟΛΟΜΕΝΗ**

Γνωρίζουμε ότι το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης μεταβάλλεται σε εύρος όταν μεταβάλλεται η ανάστροφη τάση. Αυτό συνεπάγεται.

a) Μεταβατικό ρεύμα:

Όταν η ανάστροφη τάση αυξάνεται, οι οπές και τα ηλεκτρόνια απομακρύνονται από την επαφή. Καθώς τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές απομακρύνονται από την επαφή, αφήνουν πίσω θετικά και αρνητικά ιόντα. Συνεπώς, η περιοχή απογύμνωσης γίνεται ευρύτερη. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανάστροφη πόλωση, τόσο ευρύτερη γίνεται η περιοχή

απογύμνωσης. Όσο χρόνο η περιοχή απογύμνωσης προσαρμόζεται στο νέο της πλάτος, ένα ρεύμα ρέει στο εξωτερικό κύκλωμα. Αυτό το μεταβατικό ρεύμα πέφτει στο μηδέν όταν η περιοχή απογύμνωσης σταματήσει να μεγαλώνει.

Ο χρόνος ροής του μεταβατικού ρεύματος εξαρτάται από την σταθερά χρόνου RC του εξωτερικού κυκλώματος και είναι της τάξης των ns. Συνεπώς, μπορούμε να αγνοήσουμε τις επιδράσεις του μεταβατικού ρεύματος για συχνότητες μικρότερες των 10 MHz.

b) Ανάστροφο ρεύμα κορεσμού:

Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία επαφής τόσο πιο μεγάλο είναι το ρεύμα κορεσμού. Μια χρήσιμη προσέγγιση για να θυμόμαστε το γεγονός αυτό είναι το εξής: Το  $I_s$  διπλασιάζεται για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά  $10^\circ\text{C}$ . Έτσι, έχουμε:

- **Ποσοστιαία επί τοις εκατό μεταβολή του  $\Delta I_s = 100\%$  για αύξηση θερμοκρασίας κατά  $10^\circ$**

Με άλλα λόγια, η μεταβολή του ρεύματος κορεσμού είναι 100% για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά  $10^\circ\text{C}$ . Αν οι μεταβολές της θερμοκρασίας είναι μικρότερες από  $10^\circ\text{C}$ , μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτόν τον ισοδύναμο κανόνα:

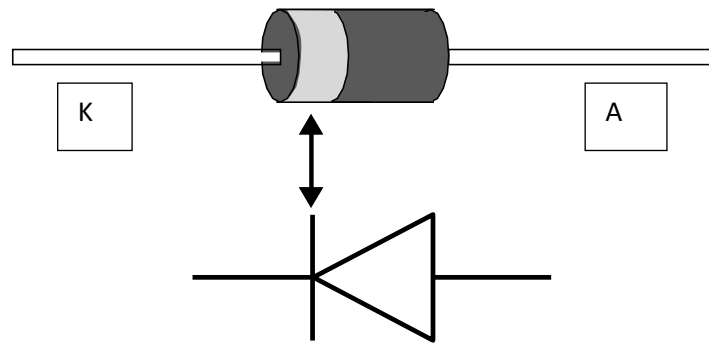
- **Ποσοστιαία μεταβολή  $\Delta I_s = 7\%$  ανά βαθμό  $^\circ\text{C}$**

Με άλλα λόγια, η μεταβολή στο ρεύμα κορεσμού είναι 7% για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 7 βαθμούς Κελσίου. Αυτή η λύση του 7% είναι καλή προσέγγιση του κανόνα των  $10^\circ\text{C}$ .

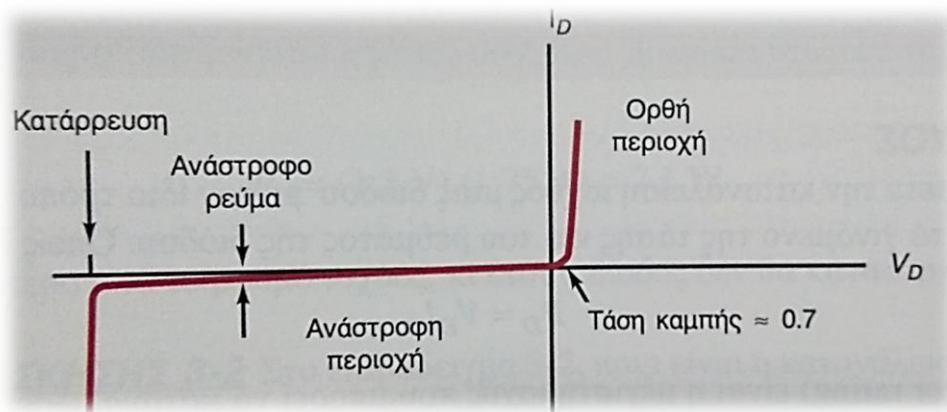
### **2.3.10 ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΟΔΩΝ**

Οι δίοδοι είναι ασύμμετρες ηλεκτρονικές διατάξεις με δύο ακροδέκτες. Η ασυμμετρία αυτή πηγάζει από το γεγονός ότι, ως επαφές p-n, οι δίοδοι συμπεριφέρονται με άλλον τρόπο στην ορθή και με άλλον τρόπο στην ανάστροφη πόλωση. Το άκρο μιας διόδου που αντιστοιχεί στο τμήμα τύπου **p** της επαφής ονομάζεται άνοδος ενώ το άκρο που αντιστοιχεί στο τμήμα τύπου **n** καλείται κάθοδος. Η κάθοδος σε μια διακριτή δίοδο σημειώνεται με μια γραμμή όπως φαίνεται στο (σχήμα 2.22). Το ηλεκτρονικό σύμβολο μιας διόδου αποτελείται από ένα βέλος που δείχνει την επιτρεπτή φορά του ρεύματος και μια κάθετη γραμμή που συμβολίζει την κάθοδο. Η αγωγιμότητα της επαφής p-n στην ορθή της πόλωση εξασφαλίζεται όταν η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της είναι μεγαλύτερη από τον φραγμό δυναμικού  $V_0$ . Επομένως, το όριο (κατώφλι) της εξωτερικής τάσης πάνω από το οποίο μια ορθά πολωμένη δίοδος θα επιτρέψει τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος θα είναι ίσο με την τιμή του φραγμού δυναμικού. Το όριο αυτό ονομάζεται τάση κατωφλίου (thresh old voltage) και συμβολίζεται συνήθως με  $V_T$ . Μια τυπική τιμή για την τάση κατωφλίου μιας διόδου πυριτίου (Si) είναι 0.7 Volts. Για δίοδους γερμανίου (Ge) η τιμή αυτή είναι μικρότερη (0.3Volts).





Σχήμα 2.22: ηλεκτρονικό σύμβολο διόδου



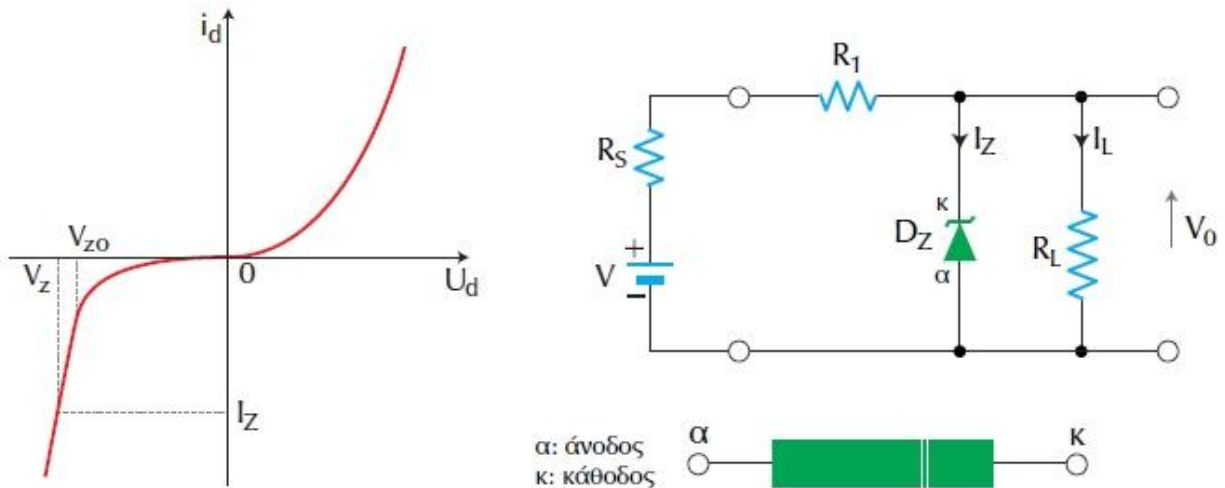
Σχήμα 2.23: Γραφική παράσταση του ρεύματος της διόδου σε σχέση με την τάση της

Στην πραγματικότητα η διάδος επαφής p-n είναι στοιχείο μη γραμμικό, η τάση δηλαδή μεταξύ των ακροδεκτών της δεν είναι ανάλογη του ρεύματος που τη διαρρέει. Στο τμήμα αυτό το ρεύμα είναι πολύ μικρό, ειδικά για διόδους πυριτίου. Για τις συγκεκριμένες διόδους, ο λόγος της αντίστασης στην ανάστροφη πόλωση προς την αντίσταση στην ορθή είναι πολύ μεγαλύτερος από 1000. Γνωρίζουμε πως όταν η ανάστροφη τάση ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή (τάση κατάρρευσης break down voltage  $V_{br}$ ) το ανάστροφο ρεύμα που διαρρέει τη διάοδο γίνεται εξαιρετικά μεγάλο. Η διάδος έχει εισέλθει στην περίπτωση αυτή στην περιοχή κατάρρευσης (break down region). Όταν συμβαίνει αυτό μια κοινή διάodos καταστρέφεται. Σε ειδικούς τύπους διόδων γίνεται εκμετάλλευση της μεγάλης τιμής του ρεύματος στην περιοχή κατάρρευσης. Όταν η διάodos βρίσκεται σε ορθή πόλωση τότε η τάση αγωγής ( $V_D$ ) στα άκρα της είναι σχετικά ανεξάρτητη από το ρεύμα ( $I_D$ ) που διαρρέει τη διάοδο, όπως προκύπτει από τη μεγάλη κλίση της χαρακτηριστικής του (σχήματος 2.23).

## 2.4. ΔΙΟΔΟΣ ZENER

Η δίοδος Zener είναι μία δίοδος που έχει σχεδιαστεί ώστε να χρησιμοποιείται στην ανάστροφη πόλωση, στην περιοχή κατάρρευσης. Η δίοδος Zener λειτουργεί βασικά ως εξής:

- σε ορθή πόλωση συμπεριφέρεται σαν μία κανονική δίοδος.
- σε ανάστροφη πόλωση συμπεριφέρεται σαν μία κανονική δίοδος μέχρι να φτάσει στην τάση κατάρρευσης (κανονικά ονομάζεται τάση Zener,  $V_Z$ ). Σ' αυτό το σημείο, το ανάστροφο ρεύμα αυξάνει γρήγορα ενώ η τάση στα άκρα της παραμένει περίπου σταθερή. Ο όρος κατάρρευση δεν είναι πραγματικά κατάλληλος γι' αυτό τον τύπο δίοδου. Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε τον τρόπο με τον οποίο τοποθετείτε μια δίοδος zener σε ένα κύκλωμα :



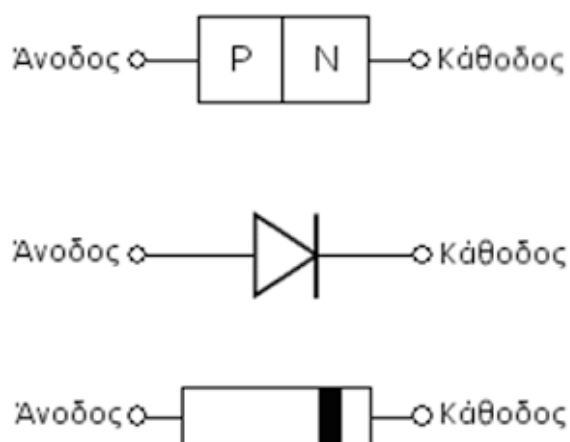
Σχήμα 2.24: δίοδος zener

Ποίο συγκεκριμένα, οι δίοδοι μικρού σήματος και ανόρθωσης δεν λειτουργούν ποτέ στην περιοχή κατάρρευσης, επειδή μπορεί να καταστραφούν. Μια δίοδος zener είναι διαφορετική. Συγκεκριμένα είναι μια δίοδος πυριτίου η οποία έχει κατασκευαστεί για λειτουργία στην περιοχή κατάρρευσης. Η δίοδος zener αποτελεί τον κορμό των σταθεροποιητών τάσης, δηλαδή, των κυκλωμάτων εκείνων που κρατούν την τάση φορτίου σχεδόν σταθερή, ανεξάρτητα από τις μεγάλες μεταβολές στην τάση της γραμμής και στην αντίσταση φορτίου. Οι δίοδοι zener παράγονται σε τάση από 2 ως 1000V. Οι δίοδοι αυτές μπορούν να λειτουργούν σε οποιαδήποτε από τις τρεις περιοχές : ορθή, ανάστροφη και κατάρρευσης. Στην ορθή περιοχή αρχίζει να άγει γύρο στα 0.7V, όπως ακριβώς μια συνήθης δίοδος πυριτίου. Στην ανάστροφη περιοχή (μεταξύ μηδέν και κατάρρευσης), διαθέτει μόνο ένα μικρό ανάστροφο ρεύμα. Σε μια δίοδο zener η κατάρρευση έχει μια πολύ απότομη καμπή, η οποία ακολουθείται από μια σχεδόν κατακόρυφη αύξηση του ρεύματος.

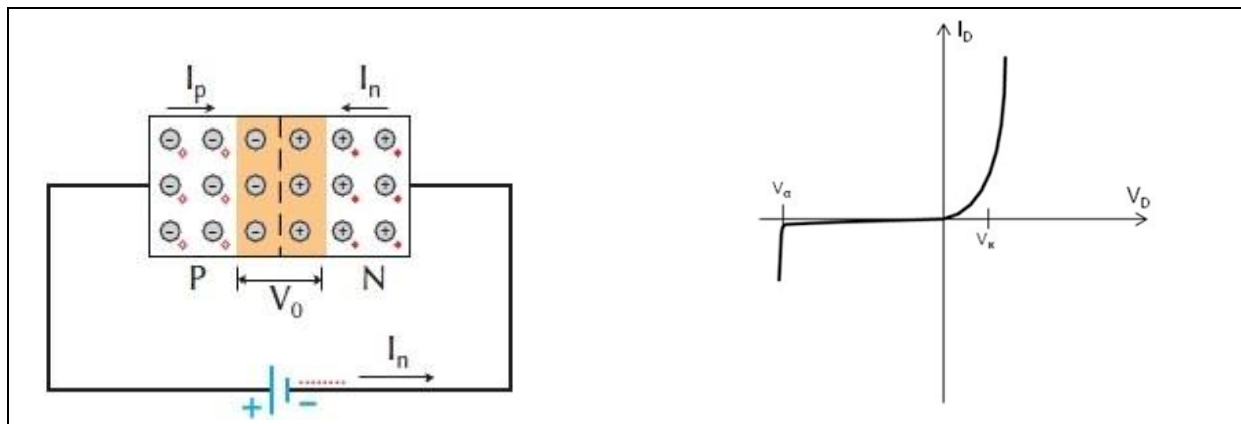
## 2.5 ΔΙΟΔΟΙ ΙΣΧΥΟΣ

Αν και η δίοδος είναι μία απλή διάταξη, αποτελεί τη βάση για έναν ολόκληρο κλάδο της Ηλεκτρονικής. Τα τρανζίστορς, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και οι μικροεπεξεργαστές βασίζονται στην θεωρία και την τεχνολογία των διόδων. Στον σημερινό κόσμο οι ημιαγωγοί βρίσκονται παντού γύρω μας. Αυτοκίνητα, τηλέφωνα, καταναλωτικά ηλεκτρονικά και πολλά ακόμη εξαρτώνται από διατάξεις ημιαγωγών για την σωστή λειτουργία τους.

Μία δίοδος πολώνεται αν τοποθετήσουμε μια διαφορά δυναμικού στα άκρα της. Επειδή το θετικό δυναμικό εφαρμόζεται στην άνοδο και το αρνητικό στην κάθοδο, η περιοχή απογύμνωσης εξαφανίζεται (σχήμα 2.25). Το ρεύμα ρέει από τον αρνητικό ακροδέκτη της μπαταρίας μέσα από την περιοχή τύπου N, διασχίζει την ανύπαρκτη περιοχή απογύμνωσης και μέσω της περιοχής τύπου P προς τον θετικό ακροδέκτη της μπαταρίας (σχήμα 2.26). Χρειάζεται μια συγκεκριμένη τιμή τάσης για να αρχίσει να άγει η δίοδος. Περίπου 0.3V για μια δίοδο γερμανίου ή 0.7V για μια δίοδο πυριτίου είναι απαραίτητα για να δώσουν αγωγιμότητα κατά την ορθή πόλωση. Μία δίοδος γερμανίου απαιτεί μικρότερη τάση λόγω του μεγαλύτερου ατομικού αριθμού της, πράγμα που την καθιστά πιο ασταθή. Το πυρίτιο χρησιμοποιείται πολύ περισσότερο από το γερμάνιο στις διατάξεις στερεάς κατάστασης εξ αιτίας της σταθερότητάς του.



Σχήμα 2.25: συμβολισμός διόδου



Σχήμα 2.26: ροή ρεύματος μέσα στην δίοδο

Ανάστροφη πόλωση επιτυγχάνεται αν εφαρμόσουμε θετικό δυναμικό στην κάθοδο και αρνητικό δυναμικό στην άνοδο. Το θετικό δυναμικό στην κάθοδο έλκει ηλεκτρόνια από την περιοχή απογύμνωσης. Την ίδια στιγμή το αρνητικό δυναμικό στην άνοδο έλκει οπές. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η αύξηση του πλάτους της περιοχής απογύμνωσης.

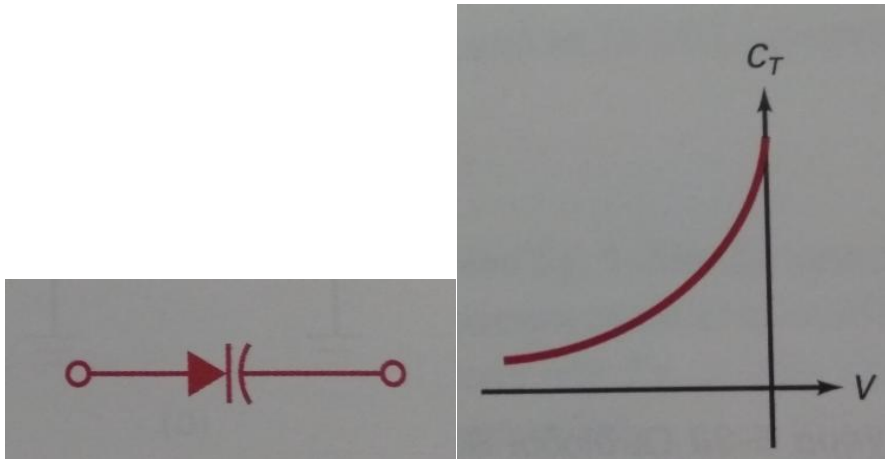
Η βασική αρχή λειτουργίας μιας διόδου είναι ότι άγει όταν η τάση στην άνοδο είναι μεγαλύτερη από την τάση στην κάθοδο ( η δίοδος τότε είναι ορθά πολωμένη).

Οι δίοδοι ισχύος χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες :

1. Τις δίοδους γενικού σκοπού (ή δίοδος δικτύου) κατάλληλες για μεγάλες τάσεις και ρεύματα αλλά όχι για μεγάλες συχνότητες (εξ ου και ο χαρακτηρισμός <<δικτύου>> καθώς συνίσταται η επιλογή τους για εφαρμογές που απαιτούν την λειτουργία των δίοδων στην συχνότητα του δικτύου).
2. Τις δίοδους Schottky με κύριο χαρακτηριστικό την μικρότερη πτώση τάσης κατά την αγωγή και την υψηλή απόδοση σε μικρές στάθμες τάσης και ρεύματος.
3. Τις δίοδους ταχείας αποκατάστασης με δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες.

## **2.6 Η VARACTOR**

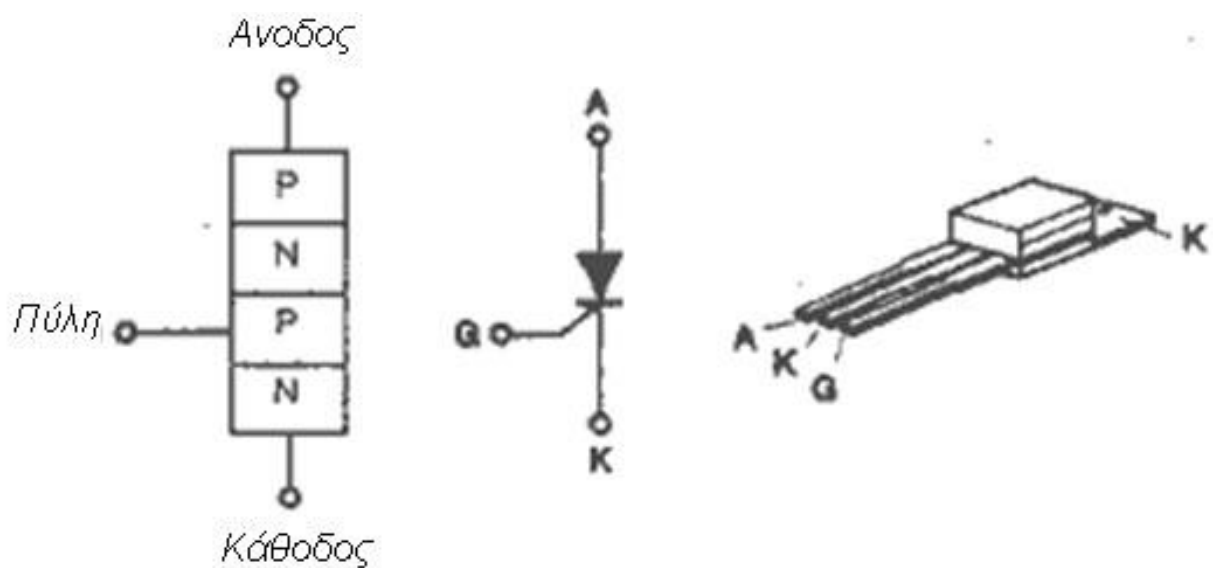
Η Varactor που ονομάζεται επίσης και χωρητικότητα μεταβλητής-τάσης (voltage-variable capacitance), varicap, ericap και δίοδος συντονισμού (tuning diode) χρησιμοποιείται ευρέως σε τηλεοπτικούς δέκτες, FM δέκτες και άλλους επικοινωνιακούς εξοπλισμούς, γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ηλεκτρονικό συντονισμό. Η περιοχή απογύμνωσης (εκκένωσης) βρίσκεται μεταξύ των περιοχών n και p. Οι περιοχές p και n είναι σαν τους οπλισμούς ενός πυκνωτή, ενώ η περιοχή απογύμνωσης είναι σαν το διηλεκτρικό. Όταν μια δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη, το εύρος της περιοχής απογύμνωσης αυξάνεται με την ανάστροφη τάση. Εφόσον η περιοχή απογύμνωσης γίνεται ευρύτερη με περισσότερη ανάστροφη τάση, η χωρητικότητα γίνεται μικρότερη. Είναι σαν να απομακρύνονται οι οπλισμοί ενός πυκνωτή. Η ιδέα κλειδί είναι ότι η χωρητικότητα ρυθμίζεται από την ανάστροφη τάση, επειδή η χωρητικότητα είναι ελεγχόμενη από την τάση.



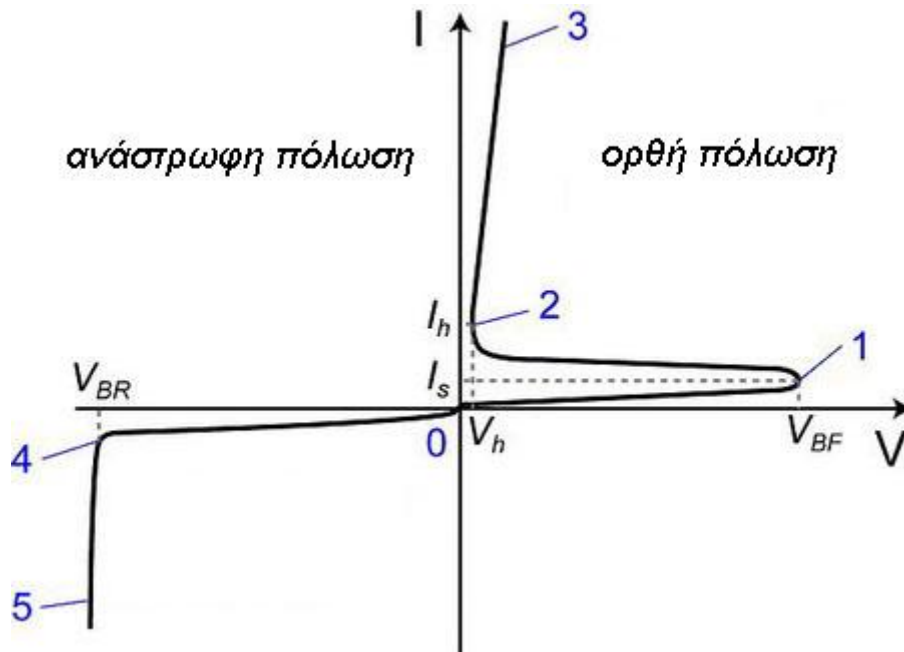
Σχήμα 2.27: συμβολισμός και διάγραμμα της τάσης του Varactor

## 2.7 ΘΥΡΙΣΤΟΡ

Τα θυρίστορ στην απλούστερη μορφή τους λέγονται και ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου (Silicone Controlled Rectifiers ή SCR) και έχουν τους δύο ακροδέκτες ανόδου (A) και καθόδου (K) όπως μια διάδος με την προσθήκη όμως και ενός τρίτου ακροδέκτη που ονομάζεται πύλη (G), όπως φαίνεται στο παρακάτω (σχήμα 2.28) :



Σχήμα 2.28: συμβολισμός θυρίστορ



Σχήμα 2.29: Χαρακτηριστικά τάσης ρεύματος

Για να μεταβεί ένα θυρίστορ σε κατάσταση αγωγής πρέπει να είναι ορθά πολωμένο (η τάση ανόδου να είναι μεγαλύτερη από την τάση καθόδου) και να δεχτεί κατάλληλο παλμό στην πύλη του. Η σβέση γίνεται αντίστοιχα με την δίοδο. Συνεπώς ένα SCR είναι ένα μερικώς ελεγχόμενο στοιχείο (ελέγχεται η έναυση αλλά όχι η σβέση του). Παρόλα αυτά, με προσθήκη ενός κατάλληλου κυκλώματος σβέσης είναι δυνατή η κατασκευή ενός πλήρως ελεγχόμενου διακόπτη με χρήση θυρίστορ (για παράδειγμα ένα δεύτερο θυρίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να παράσχει τάση στην κάθοδο του πρώτου, ελέγχοντας έτσι την σβέση του). Τέτοιες διατάξεις έχουν το μειονέκτημα του πρόσθετου κόστους για την κατασκευή τους αλλά και την επίτευξη χαμηλότερης διακοπτικής συχνότητας σε σχέση με τα νεώτερα στοιχεία (MOSFET, IGBT). Έτσι παρόλο που χρησιμοποιούνται ευρέως σε πληθώρα εφαρμογών μέχρι σχετικά πρόσφατα (π.χ. έλεγχο DCμηχανών), η χρήση τους περιορίσθηκε με την εισαγωγή και ευρεία χρήση των νεώτερων στοιχείων. Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στα αμφίδρομα τριαδικά θυρίστορ ή TRIAC που ισοδυναμούν με δύο αντιπαράλληλα συνδεδεμένα θυρίστορ (χρησιμοποιούνται για έλεγχο δύο κατευθύνσεων).

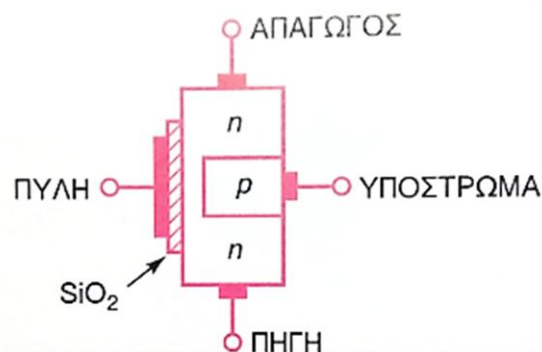
Τα θυρίστορ με σβέση από την πύλη (Gate Turn Off Thyristor ή GTO) αποτελούν μετεξέλιξη των απλών SCR με την διαφορά ότι η σβέση τους μπορεί να ελεγχθεί από τον ακροδέκτη-πύλη (με αρνητικό παλμό). Έχουν όμως μειονεκτήματα όπως την ανάγκη χρήσης κυκλωμάτων προστασίας (snubbers) και τον όχι τόσο στιβαρό έλεγχο. Βελτίωση του GTO μπορεί να θεωρηθεί το ολοκληρωμένο θυρίστορ με μεταγωγή από την πύλη (Integrated Gate Commutated Thyristor ή IGCT). Τα στοιχεία αυτά (IGCTS) μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πλειοψηφία των εφαρμογών χωρίς να απαιτούν κυκλώματα προστασίας, επιτυγχάνουν μεγαλύτερη διακοπτική συχνότητα και γνωρίζουν αυξανόμενη χρήση σε διατάξεις ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν αναπτυχθεί και άλλα στοιχεία

που ανήκουν στην ευρύτερη οικογένεια των θυρίστωρ (π.χ. MCT και MTO) με την χρήση τους όμως να είναι ιδιαίτερα περιορισμένη, έως ανύπαρκτη ακόμα.

Ο SCR χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, οι οποίες περιλαμβάνουν έλεγχο τόσο συνεχών και εναλλασσομένων ρευμάτων. Δυστυχώς, όταν χρησιμοποιείται σε AC εφαρμογές, ένας απλός SCR είναι ικανός να λειτουργεί μόνο σε εναλλαγή κάθε AC κύκλου εισόδου. Για την επίτευξη πλήρους ελέγχου, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν δύο SCR συνδεδεμένοι παραλλήλως, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ή είναι απαραίτητο να μετατραπεί ολόκληρος κάθε AC κύκλος, σε ένα παλμικό DC σήμα, πριν αυτό τροφοδοτήσει ένα απλό SCR.

## **2.8 MOSFET**

Το FET ημιαγωγός οξειδίου-μετάλλου (Metal oxide semiconductor), ή αλλιώς MOSFET, διαθέτει πηγή, πύλη και απαγωγό. Ωστόσο, το MOSFET διαφέρει από το JFET, στο ότι η πύλη είναι μονωμένη από το κανάλι. Γι' αυτό, το ρεύμα πύλης είναι ακόμη μικρότερο απ' ό,τι σ' ένα JFET. Το MOSFET μερικές φορές ονομάζεται IGFET (insulated-gate FET), που σημαίνει FET μονωμένης-πύλης. Υπάρχουν δύο είδη MOSFET, το MOSFET τύπου-αραίωσης και το MOSFET τύπου πύκνωσης. Το MOSFET τύπου πύκνωσης χρησιμοποιείται ευρύτατα και στα διακριτά και στα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Στα διακριτά κυκλώματα, η κύρια χρήση είναι στη μεταγωγή ισχύος, που σημαίνει ότι θέτει σε κατάσταση on και off μεγάλα ρεύματα. Στα ολοκληρωμένα κυκλώματα, η κύρια χρήση είναι στη ψηφιακή μεταγωγή, τη βασική διαδικασία πίσω από τους σύγχρονους υπολογιστές. Παρόλο που η χρήση των MOSFET τύπου-αραίωσης έχει μειωθεί αρκετά, ακόμα τα βρίσκουμε στο κύκλωμα εισόδου των τηλεπικοινωνιακών κυκλωμάτων ως RF ενισχυτές. Στο παρακάτω σχήμα δείχνει ένα MOSFET τύπου αραιώσης, ένα τμήμα υλικού n με μονωμένη πύλη στα αριστερά και μια περιοχή p στα δεξιά. Η περιοχή p ονομάζεται υποστρώμα. Τα ηλεκτρόνια που ρέουν από την πηγή στον επαγωγό θα πρέπει να περάσουν μέσω του στενού καναλιού που υπάρχει μεταξύ πύλης και υποστρώματος p. Ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) εναποτίθεται στην αριστερή πλευρά του καναλιού. Το διοξείδιο του πυριτίου μοιάζει με γυαλί, άρα αποτελεί μονωτή. Σ' ένα MOSFET, πύλη αποτελείται η από μέταλλο. Επειδή η μεταλλική πύλη μονώνεται από το κανάλι, αμελητέα ποσότητα ρεύματος πύλης ρέει ακόμη κι όταν η τάση πύλης είναι θετική.

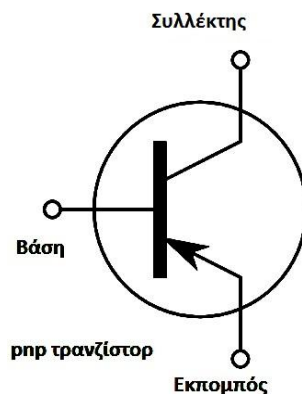


Σχήμα 2.30: MOSFET

Η τάση κατωφλίου είναι ιδανική για χρήση σαν μια μεταγωγική διάταξη. Όταν η τάση πύλης είναι μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου, η διάταξη μεταβάλλεται από την αποκοπή στον κόρο και το αντίθετο. Αύτη η κατάσταση "on- off" αποτελεί το κλειδί της ηλεκτρονικής δομής των υπολογιστών. Όταν μελετάτε τα κυκλώματα υπολογιστών, θα διαπιστώνετε πώς ένας τυπικός υπολογιστής χρησιμοποιεί εκατομμύρια E-MOSFET σαν on-off διακόπτες για την επεξεργασία δεδομένων (Δεδομένα είναι οι αριθμοί, τα κείμενα, τα γραφικά, και όλες οι άλλες πληροφορίες που μπορούν να κωδικοποιηθούν σαν δυαδικοί αριθμοί). Το EMOS υψηλής ισχύος διαφέρει. Μ' ένα EMOS υψηλής ισχύος, το E-MOSFET είναι μια διακριτή συσκευή που χρησιμοποιείται ευρύτατα σε εφαρμογές που ελέγχουν κινητήρες, λαμπτήρες, οδηγούς δισκετών, εκτυπωτές, τροφοδοτικά, κλπ. Σε ορισμένες εφαρμογές, το E-MOSFET ονομάζεται FET ισχύος. Οι κατασκευαστές δημιουργούν διάφορες συσκευές όπως VMOS, TMOS, hex FET, MOSFET με βαθούλωμα, και wave FET. Όλα αυτά τα FET ισχύος χρησιμοποιούν κανάλια με διαφορετική γεωμετρία για να αυξήσουν τις ονομαστικές τιμές τους. Οι συσκευές αυτές έχουν περιορισμό ρεύματος από 1 A μέχρι πάνω από 200 A, και περιορισμό ισχύος από 1 W μέχρι πάνω από 500 W.

## **2.9 ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ**

Τα διπολικά τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor ή BJT) έχουν τρεις ακροδέκτες: την βάση (B), τον εκπομπό (E) και τον συλλέκτη (C) όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 2.31: Transistor

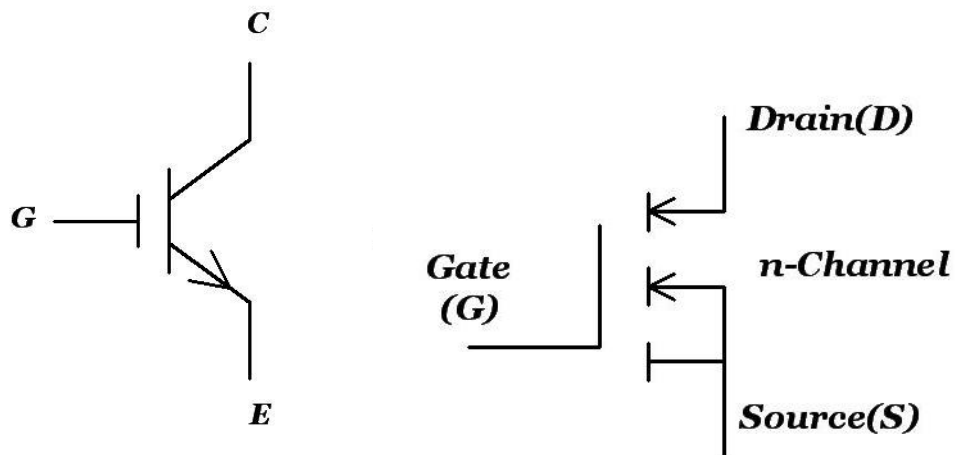
Είναι διατάξεις ελεγχόμενες από ρεύμα (για να μείνουν σε αγωγή πρέπει το ρεύμα βάσης να είναι μεγαλύτερο από ένα όριο) και γνωρίζουν μικρή εφαρμογή σε διατάξεις ισχύος. Από την οικογένεια των τρανζίστορ μεγάλη εφαρμογή σε διατάξεις ισχύος γνωρίζουν τα IGBT και τα MOSFET ισχύος. Τα MOSFET ισχύος (τρανζίστορ μεταλλικών οξειδίων ημιαγωγών με επίδραση πεδίου ή (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) είναι διατάξεις ελεγχόμενες από τάση επίσης με τρεις ακροδέκτες που ονομάζονται πύλη (G), πηγή (S) και υποδοχή(D).

Τα IGBT διπολικά τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (Insulated Gate Bipolar Transistor) έχουν επίσης τρεις ακροδέκτες με παρόμοια ονομασία με αυτούς των BJT (πύλη-εκπομπός-



συλλέκτης), αλλά ελέγχονται από τάση όπως τα MOSFET. Αποτελούν ένα συνδυασμό των BJT και MOSFET ισχύος ώστε να παραχθεί ένα στοιχείο με ανώτερη απόδοση σε συγκεκριμένες εφαρμογές και έχουν σε μεγάλο ποσοστό αντικαταστήσει τα BJT στις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος.

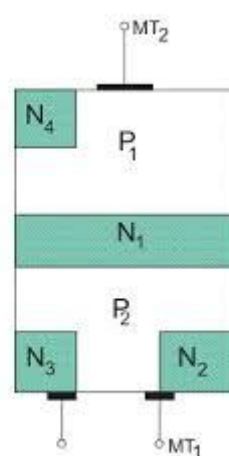
Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε το σύμβολο του IGBT :



Σχήμα 2.32: συμβολισμός IGBT

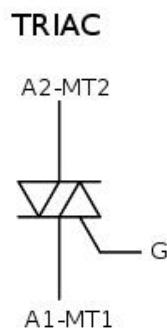
## 2.10 TRIAC

Το triac είναι ένας αμφίδρομος ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου όπως μπορούμε να δούμε στο παρακάτω (σχήμα 2.33).



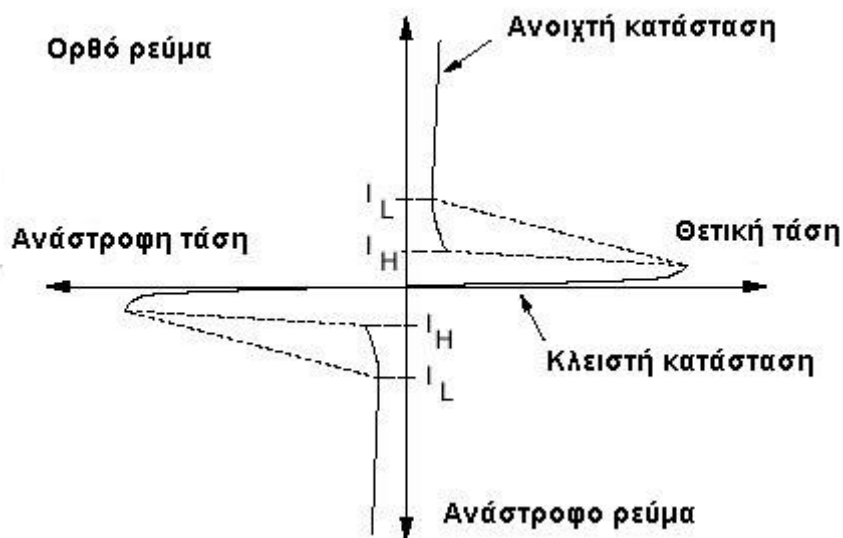
Σχήμα 2.33: ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου

Χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο εφαρμογής AC ισχύος σε διάφορους τύπους φορτίων ή κυκλωμάτων. Οι συνθήκες που απαιτούνται για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση ενός triac, σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, είναι παρόμοιες με τις συνθήκες που απαιτούνται για τον έλεγχο του SCR. Αμφότερες οι συσκευές μπορούν να ενεργοποιηθούν, από ένα ρεύμα πύλης και να απενεργοποιηθούν, μειώνοντας τα ανοδικά ρεύματα λειτουργίας, κάτω από τις σχετικές τιμές συγκράτησής τους. Το σχηματικό σύμβολο, που χρησιμοποιείται, συνήθως, για να αναπαραστήσει το triac φαίνεται στο (σχήμα 2.34), που ακολουθεί.



Σχήμα 2.34: συμβολισμός triac

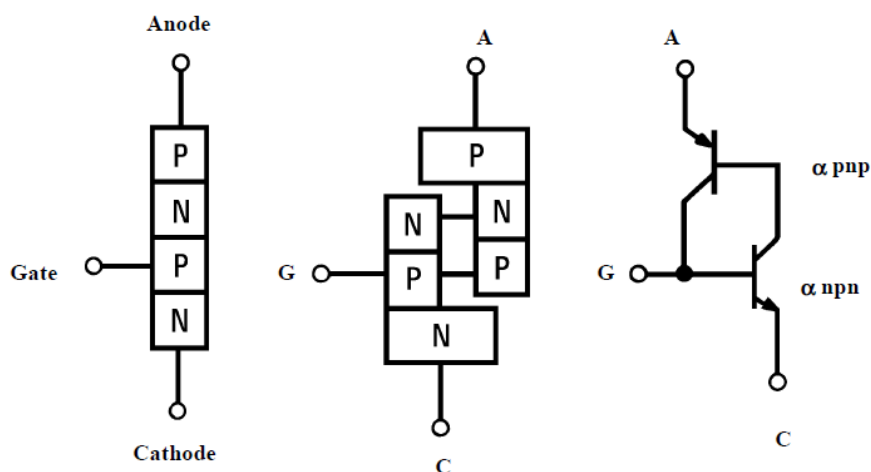
Επίσης, η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης - ρεύματος (V-I) για ένα τυπικό triac δείχνει τη σχέση μεταξύ της ροής ρεύματος διαμέσου των κυρίων ακροδεκτών του, σε κάθε κατεύθυνση και της παρεχόμενης τάσης στους κύριους ακροδέκτες του σε κάθε κατεύθυνση, όπως μπορούμε να διακρίνουμε και στο παρακάτω (σχήμα 2.35).



Σχήμα 2.35

## 2.11 GTO

Το GTO είναι ένα διακοπτικό στοιχείο τριών ακροδεκτών που ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των θυρίστωρ, όπως μπορούμε να δούμε στο (σχήμα 2.36):



Σχήμα 2.36: GTO

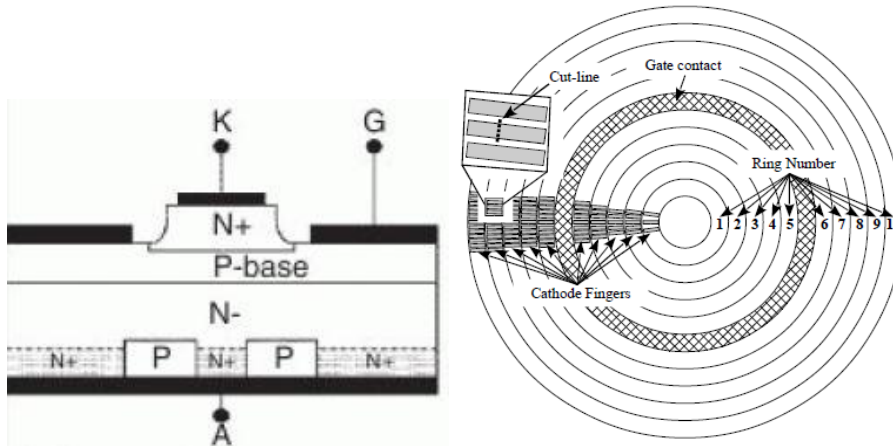
Είναι ένας ημιαγώγιμος διακόπτης που συναντάται σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος κυρίως για τις μεγάλες τιμές τάσης και ρεύματος που μπορεί να χειριστεί. Η σημαντικότερη διαφορά του από το θυρίστωρ (SCR) είναι η ικανότητα πλήρους ελέγχου της έναυσης και σβέσης από τη πύλη. Ενώ στο απλό SCR η σβέση επιτυγχάνεται μόνο αν η τάση ορθής πόλωσης μηδενιστεί ή το ρεύμα αγωγής πέσει σε τιμή μικρότερη από το ρεύμα συγκράτησης, στο GTO η σβέση επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός αρνητικού παλμού τάσης στη πύλη. Η λειτουργία αυτή επέτρεψε την επέκταση του πεδίου εφαρμογής των GTO και σε DC συστήματα (έλεγχος DC μηχανών, συστήματα HVDC) καθιστώντας εφικτή τη κατασκευή συστημάτων συνεχούς ρεύματος πολύ μεγάλης ισχύος με τη χρήση ημιαγώγιμων στοιχείων σήμερα. Στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται δύο τύποι GTO:

- Τα συμμετρικά τα οποία έχουν ικανότητα διακοπής εξίσου για τη τάση ανόδου-καθόδου και την ανάστροφη τάση καθόδου-ανόδου.
- Τα ασύμμετρα, που είναι και περισσότερο διαδεδομένα δεν έχουν μεγάλη ικανότητα ανάστροφης πόλωσης ενώ φέρουν και αντιπαράλληλη δίοδο ολοκληρωμένη στο ίδιο στρώμα πυριτίου. Χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές συνεχούς τάσης που δεν απαιτείται ικανότητα ανάστροφης πόλωσης.

Η εσωτερική δομή του GTO δεν αποτελείται από ενιαία ημιαγώγιμα στρώματα, αλλά χωρίζεται σε πολλές ημιαγώγιμες κυψέλες κάθε μια από τις οποίες έχει την ίδια δομή με το θυρίστωρ, αποτελείται δηλαδή από 4 στρώματα P-N-P-N. Οι κυψέλες αυτές βρίσκονται διατεταγμένες σε ομόκεντρους κύκλους, και πάνω από αυτές εφαρμόζεται ένας αγωγίμος δίσκος υπό πίεση ώστε να διατηρεί τη δομή σταθερή και να δημιουργεί ένα αγωγίμο μονοπάτι για το ρεύμα. Ανάμεσα σε αυτή τη δομή των διατεταγμένων κυψελών εφαρμόζεται το ηλεκτρόδιο πύλης που τροφοδοτεί τις κυψέλες με το ρεύμα του παλμού έναυσης και σβέσης. Στην απόδοση του GTO τον βασικότερο ρόλο παίζει ο αριθμός των κυψελών που το συνθέτουν. Όσο μεγαλύτερος είναι ο επιμερισμός της καθόδου, τόσο

γρηγορότερη είναι η απόκριση του ημιαγωγού καθώς μειώνεται σημαντικά ο χρόνος που χρειάζεται οι κυψέλες για έναυση και ως εκ τούτου είναι εφικτή η έναυση με πολύ μεγάλο  $di/dt$ .

Η δομή της κάθε κυψέλης και ολόκληρου του ημιαγωγού σε κάτοψη παρουσιάζετε στο παρακάτω (σχήμα 2.37):



Σχήμα 2.37: δομή της κυψέλης και του ημιαγωγού

Κατά την αγωγή του GTO ο μόνος περιορισμός που υπάρχει είναι το ρεύμα αγωγής να βρίσκεται πάνω από τη τιμή του ρεύματος συγκράτησης (holding current) ώστε να μη συμβεί ανεπιθύμητη σβέση του στοιχείου. Αν λόγω κάποιου μεταβατικού, το ρεύμα πέσει κάτω από τη τιμή αυτή στιγμιαία είναι πιθανό να υπάρξει σβέση ορισμένων περιοχών του ημιαγωγού και μεγάλη αύξηση του ρεύματος σε άλλες κυψέλες με επακόλουθο πιθανή καταστροφή του ημιαγωγού λόγω τοπικής υπερθέρμανσης. Για να αποφευχθεί αυτή τη κατάσταση διατηρείται συνεχώς μια θετική τιμή ρεύματος στη πύλη στο GTO μεγαλύτερη από το ελάχιστο ρεύμα πύλης. Επίσης στη μόνιμη κατάσταση αγωγής το GTO συμπεριφέρεται σχεδόν ως μια γραμμική συσκευή.

Στη κατάσταση σβέσης αυτό που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή είναι η μη επιθυμητή έναυση του GTO. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξαλειφθεί είτε διατηρώντας μια μικρή αρνητική τάση στη πύλη, είτε χρησιμοποιώντας μια αντίσταση μεταξύ πύλης και καθόδου. Τέλος, η δυναμική συμπεριφορά του GTO μελετάται σε δύο φάσεις, την έναυση και τη σβέση. Και στις δύο περιπτώσεις ο ημιαγωγός υπόκειται σε μεγάλους ρυθμούς ανόδου ρεύματος και τάσης αντίστοιχα με αποτέλεσμα να χρειάζεται σχεδιασμός ώστε να περιοριστεί το φαινόμενο και να προστατευτεί η συσκευή από αστοχίες. Έτσι εισάγονται κυκλώματα προστασίας με σκοπό να μειωθεί ο ρυθμός του ρεύματος και της τάσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

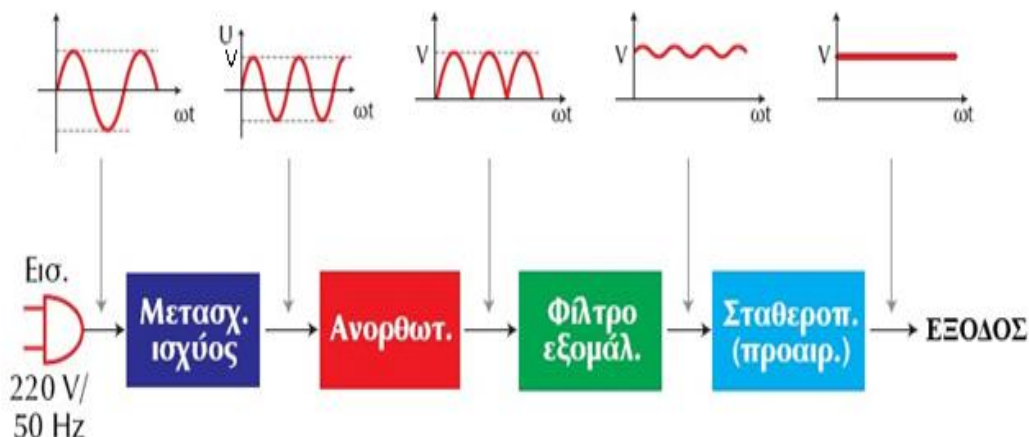
### Ανορθωτικές διατάξεις – Τροφοδοτικά

#### 3.1. Γενικά

Σήμερα η ηλεκτρική ενέργεια συνήθως για λόγους πρακτικούς και οικονομικούς προσφέρετε από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) με τη μορφή εναλλασσόμενης τάσης (230 Volts AC). Για να τροφοδοτήσουμε μια σειρά από ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές διατάξεις (ενισχυτές, ταλαντωτές, συγκριτές, τηλεόραση, υπολογιστές και άλλα) που περιέχουν παθητικά στοιχεία (αντιστάσεις, πυκνωτές, τρανζίστορ) χρειαζόμαστε ηλεκτρική ενέργεια με την μορφή μιας συνεχούς τάσης. Στις περισσότερες φορές μάλιστα χρειάζεται η συνεχής αυτή τάση να έχει και σταθερή τιμή.

Οι διατάξεις που μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή λέγονται Ανορθωτικές Διατάξεις ή απλά Τροφοδοτικά.

Στο παρακάτω (σχήμα 3.1), δίνεται μια σχηματική απεικόνιση των επιμέρους βαθμίδων από τις οποίες αποτελείται ένα τροφοδοτικό.



Σχήμα 3.1: σχηματική απεικόνιση των βαθμίδων τροφοδοτικού

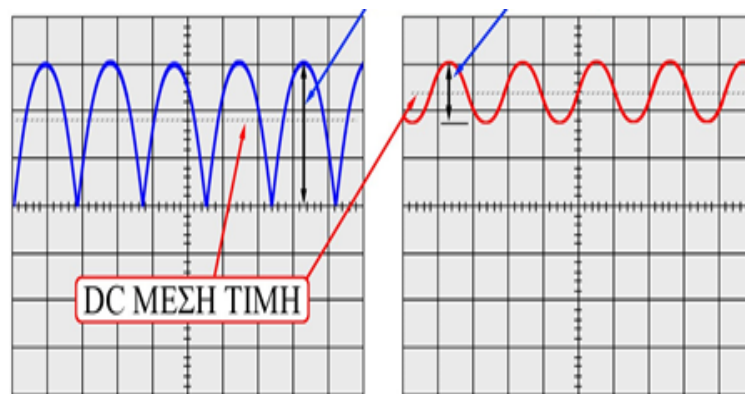
1. Ο Μετασχηματιστής μεταφέρει από το εναλλασσόμενο δίκτυο της ΔΕΗ την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια παρέχοντας απομόνωση από αυτό. Ταυτόχρονα παρέχει την κατάλληλη εναλλασσόμενη τάση στο δευτερεύον του ώστε στην έξοδο της τροφοδοτικής διάταξης να έχουμε την επιθυμητή DC Τάση. Απομόνωση μεταξύ δύο ηλεκτρικών διατάξεων είναι η μη ύπαρξη ηλεκτρικού δρόμου ανάμεσα τους (άπειρη αντίσταση). Αυτό είναι κάτι πολύ απαραίτητο στις τροφοδοτικές διατάξεις γιατί αυξάνει την ασφάλεια των χρηστών της ηλεκτρονικής συσκευής που τροφοδοτεί η διάταξη.
2. Το κύκλωμα Ανόρθωσης εμπεριέχει διόδους και μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση που εμφανίζεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή σε τάση μιας

πολικότητας. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας χρήση της βασικής ιδιότητας των διόδων να επιτρέπουν την διέλευση του ρεύματος μόνο κατά την μία πολικότητα.

### 3. Φίλτρο:

Όπως φαίνεται στο παραπάνω (σχήμα 3.2), η συνεχής τάση στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης δεν έχει σταθερή τιμή. Παρουσιάζει μια διακύμανση (κυμάτωση) γύρω από μια συγκεκριμένη τιμή (τη μέση τιμή της τάσης εξόδου).

Κυμάτωση ονομάζεται η περιοδική διακύμανση που εμφανίζει η τάση εξόδου (η μεταβολή της τάσης εξόδου από κορυφή σε κορυφή – peak to peak)



Σχήμα 3.2: φίλτρο

Δηλαδή η συνεχής (αλλά μεταβαλλόμενη) τάση στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης ουσιαστικά αναλύεται σε ένα αριθμό από εναλλασσόμενες συνιστώσες (ανάλυση κατά Fourier) και από την DC μέση τιμή της. Επειδή όμως τα περισσότερα ηλεκτρονικά κυκλώματα χρειάζονται για την τροφοδοσία τους μια σταθερή DC τάση όμοια με αυτή που παράγει μια μπαταρία, η τυχόν εμφάνιση AC συνιστωσών στην έξοδο της τροφοδοτικής διάταξης δημιουργεί πρακτικά προβλήματα (π.χ σε έναν ενισχυτή ήχου θα έχει σαν αποτέλεσμα να ακουστεί στα μεγάφωνα ένας βόμβος που θα οφείλεται στην κυμάτωση της DC τάσης τροφοδοσίας).

Για να περιορίσουμε λοιπόν τις AC συνιστώσες της ανορθωτικής διάταξης (ώστε να μείνει όσο το δυνατόν μόνο η DC μέση τιμή), βάζουμε στην έξοδο της ειδικά κυκλώματα που ονομάζονται φίλτρα και έχουν σαν στόχο την ελάττωση των AC συνιστωσών. Η λειτουργία τους αυτή λέγεται φιλτράρισμα ή εξομάλυνση. Τα φίλτρα υλοποιούνται κυρίως με παθητικά στοιχεία (πυκνωτές και πηνία).

### 4. Σταθεροποιητής ( Regulator):

Παρά την τοποθέτηση των φίλτρων εξομάλυνσης (για τον περιορισμό των AC συνιστωσών), η συνεχής τάση στην έξοδο τους (των φίλτρων) δεν είναι ακόμα απολύτως σταθερή. Έχει μια μικρή κυμάτωση. Επιπλέον η DC Μέση τιμή της τάσης εξόδου δεν είναι σταθερή. Εξαρτάται και από την αντίσταση που παρουσιάζει το φορτίο (η συσκευή που τροφοδοτεί το τροφοδοτικό μας). Για κάποιες συσκευές αυτό μπορεί να μην δημιουργεί προβλήματα οπότε μπορούμε να πούμε ότι το τροφοδοτικό με το φίλτρο που του έχουμε βάλει είναι ικανοποιητικό για την

δουλειά που το θέλουμε. Για πολλές όμως άλλες εφαρμογές (ηλεκτρονικά κυκλώματα ακριβείας, ψηφιακά κυκλώματα, διάφορες συσκευές), οι μεταβολές των τάσεων τροφοδοσίας δεν είναι ανεκτές, δημιουργούν προβλήματα. Σε αυτές λοιπόν τις περιπτώσεις απαιτείται στην έξοδο του φίλτρου να τοποθετηθούν διατάξεις σταθεροποίησης τάσης, οι λεγόμενοι σταθεροποιητές. Ο ρόλος των σταθεροποιητών είναι να βγάλουν στην έξοδο τους μια απολύτως σταθερή τάση ανεξαρτήτως της τιμής του φορτίου (μέσα στα όρια των δυνατοτήτων του τροφοδοτικού).

Τα Τροφοδοτικά που περιέχουν και Σταθεροποιητή Τάσης ονομάζονται Σταθεροποιημένα τροφοδοτικά και είναι πιο δαπανηρά από τα απλά τροφοδοτικά που έχουν μόνο φίλτρο εξομάλυνσης. Ένα συνηθισμένο σταθεροποιημένο τροφοδοτικό έχει προδιαγραφές κυμάτωσης και σταθεροποίησης τάσης με τιμές μικρότερες από 100 mV.

Πριν μερικά χρόνια τα κυκλώματα σταθεροποίησης τάσης αποτελούνταν από διακριτά εξαρτήματα όπως δίοδοι zener, transistor. Σήμερα όμως στην εποχή της μικροηλεκτρονικής υπάρχει μεγάλη ποικιλία φθηνών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που επιτυγχάνουν καλύτερη σταθεροποίηση με λιγότερο κόστος.

### **3.2 Τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός τροφοδοτικού είναι:**

- Η DC τάση εξόδου του τροφοδοτικού (χωρίς φορτίο στην έξοδο)
- Το Μέγιστο Ρεύμα Εξόδου.
- Η κυμάτωση της τάσης εξόδου σε Volt ή σε ποσοστιαία τιμή. Η κυμάτωση σε ποσοστιαία τιμή δίνεται από την σχέση:

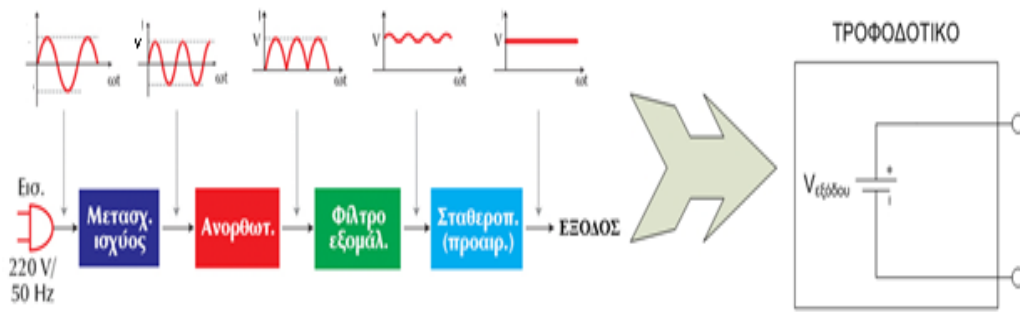
$$r = \frac{\text{Κυμάτωση}(\Delta V)}{\text{Μέση τιμή(DC)τάσης εξόδου}}$$

Η εσωτερική αντίσταση της Τροφοδοτικής Διάταξης

$$R_{\text{εσο}} = \frac{\Delta V \text{ εξόδου}}{\Delta I \text{ εξόδου}}$$

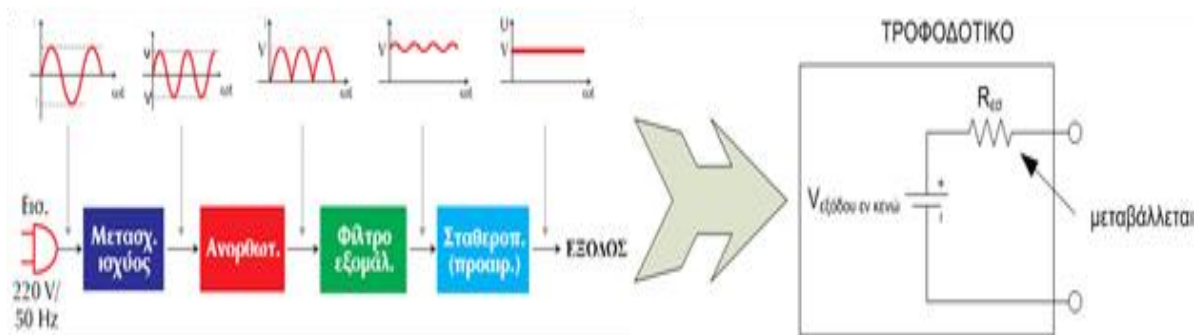
Εδώ διακρίνουμε δυο περιπτώσεις:

- A. Για Τροφοδοτική Διάταξη που περιέχει και Σταθεροποιητή, η Εσωτερική της Αντίσταση  $R_{\text{εσο}}$  είναι περίπου ίση με  $0\Omega$  (για ρεύμα εξόδου μικρότερο ή ίσο του Μέγιστου ρεύματος εξόδου). Σ' αυτή την περίπτωση η όλη Τροφοδοτική Διάταξη ισοδυναμεί με μια ιδανική πηγή τάσης.



Σχήμα 3.3: χαρακτηριστικά τροφοδοτικού με σταθεροποιητή

Β. Για Τροφοδοτική Διάταξη που περιέχει μόνο Φίλτρο (χωρίς Σταθεροποιητή), η Εσωτερική της Αντίσταση  $R_{εσ}$  δεν είναι σταθερή αλλά Μεταβάλλεται. Η όλη Τροφοδοτική Διάταξη ισοδυναμεί τώρα με το παρακάτω ισοδύναμο



Σχήμα 3.4: χαρακτηριστικά τροφοδοτικού με φίλτρο

Η εσωτερική αντίσταση της Τροφοδοτικής Διάταξης  $s'$  αυτή την περίπτωση μεταβάλλεται συναρτήσει του ρεύματος εξόδου και δίνεται από την σχέση:

$$R_{εσ} = \frac{\Delta V_{εξόδου}}{\Delta I_{εξόδου}}$$

Η Ικανότητα του τροφοδοτικού να κρατά σταθερή την τάση εξόδου ανεξάρτητα από τις μεταβολές του φορτίου εξόδου  $R_L$  ονομάζεται Σταθεροποίηση φορτίου και δίνεται από την σχέση: Σταθεροποίηση Φορτίου =  $\frac{\text{Μεταβολή της DC τάσης Εξόδου}}{\text{DC τάση Εξόδου χωρίς Φορτίο } R_L}$

Όσο μικρότερη Σταθεροποίηση φορτίου έχει ένα τροφοδοτικό, τόσο καλύτερο είναι. Τέλος να αναφέρουμε ότι οι σύγχρονες τροφοδοτικές διατάξεις (που περιέχουν σταθεροποιητή) περιλαμβάνουν και αυτόματη λειτουργία περιορισμού του ρεύματος εξόδου σε περίπτωση βραχυκυκλώματος (ηλεκτρονική ασφάλεια).



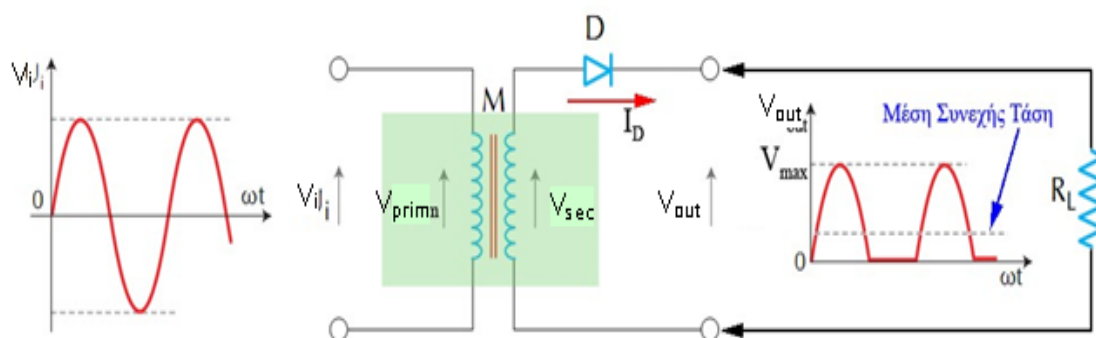
### 3.3 ΤΥΠΟΙ ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Οι βασικοί τύποι ανορθωτικών διατάξεων είναι τρεις:

- Ανορθωτική Διάταξη Μισού Κύματος (με μια δίοδο) που κάνει απλή ανόρθωση (ημιανόρθωση)
- Ανορθωτική Διάταξη Πλήρους Κύματος (με δυο διόδους) που χρησιμοποιεί μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και κάνει διπλή (ή πλήρη) ανόρθωση.
- Ανορθωτική Διάταξη Γέφυρας (με τέσσερις διόδους) που κάνει διπλή (ή πλήρη) ανόρθωση.

### 3.4 ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΙΣΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ (ΑΠΛΗ ΑΝΟΡΘΩΣΗ)

Το βασικό κύκλωμα της απλής ανόρθωσης (ή ημιανόρθωσης) φαίνεται στο (σχήμα 3.5)



Σχήμα 3.5: κύκλωμα απλής ανόρθωσης

Η ημιανόρθωση είναι η απλούστερη ανορθωτική διάταξη (μια δίοδος) με την οποία μπορούμε να παράγουμε DC τάση από AC είσοδο. Η λειτουργία της είναι η εξής: Στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση πλάτους  $V_i$  και στο δευτερεύον τύλιγμα του επάγεται τάση  $V_{sec}$ . Συνήθως η εφαρμοζόμενη εναλλασσόμενη τάση εισόδου προέρχεται από το δίκτυο της ΔΕΗ οπότε το πλάτος της είναι:

$$V_i = V_{rms} * \sqrt{2} = 230 * \sqrt{2}$$

και η συχνότητα της είναι  $f = 50\text{Hz}$ . Για τον μετασχηματιστή ξέρουμε ότι ο λόγος των τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του είναι ίσος με τον λόγο των σπειρών του, δηλαδή:

$$\frac{V_{prim}}{V_{sec}} = \frac{N_1}{N_2}$$

Όπου  $N_1$ ,  $N_2$  είναι ο αριθμός σπειρών του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, αντίστοιχα. Η εκλογή τώρα του κατάλληλου μετασχηματιστή για μία τροφοδοτική διάταξη γίνεται με δυο βασικά κριτήρια:

- Η τάση εξόδου στο δευτερεύον του μετασχηματιστή να είναι τέτοια ώστε στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης να έχουμε την επιθυμητή DC τάση εξόδου
- Η ισχύς του μετασχηματιστή να είναι λίγο μεγαλύτερη από την μέγιστη ισχύ εξόδου της τροφοδοτικής διάταξης, η οποία είναι

$$P_{\text{εξόδου max}} = V_{\text{DCεξόδου}} * I_{\text{DCεξόδου max}}$$

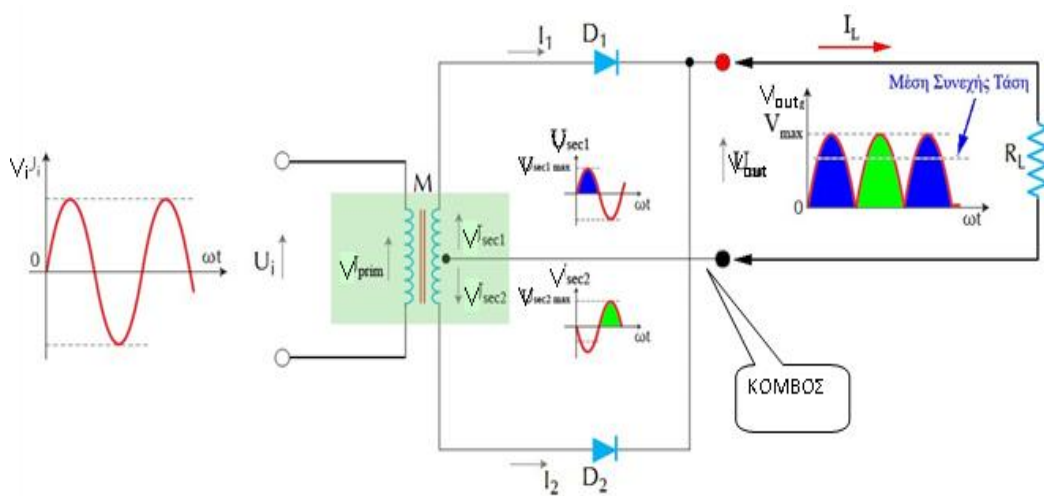
Κατά την εμφάνιση τώρα της θετικής ημπεριόδου της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, η άνοδος της διόδου  $D$  γίνεται πιο θετική από την κάθοδο της και έτσι η διάοδος πολώνεται ορθά και άγει. Σαν αποτέλεσμα της αγωγής της διόδου είναι η διέλευση ηλεκτρικών φορτίων (ρεύματος) από το δευτερεύον του μετασχηματιστή μέσω της διόδου  $D$  προς το φορτίο  $RL$  και η εμφάνιση τάσης στα όρια του (του φορτίου). Κατά την εμφάνιση της αρνητικής ημπεριόδου της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, η άνοδος της διόδου γίνεται αρνητική ως προς την κάθοδο της και έτσι η διάοδος πολώνεται ανάστροφα και δεν άγει (θεωρούμε αμελητέο το ανάστροφο ρεύμα). Άρα δεν θα υπάρχει διέλευση ηλεκτρικών φορτίων (ρεύματος) από το δευτερεύον του μετασχηματιστή και έτσι η τάση στα όρια του φορτίου  $RL$  θα είναι  $0V$ . Ουσιαστικά δηλαδή εκμεταλλευόμαστε την βασική ιδιότητα της διόδου που είναι ότι επιτρέπει την διέλευση του ρεύματος από μέσα της μόνο κατά την μία κατεύθυνση (όταν η άνοδος της γίνεται πιο θετική από την κάθοδο – βλέπε χαρακτηριστική καμπύλη αγωγής της διόδου). Έτσι μετατρέπουμε την εμφανιζόμενη εναλλασσόμενη τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή σε τάση μίας πολικότητας (DC μεταβαλλόμενη).

### **3.5 ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΛΗΡΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ**

- Ανόρθωση με διόδους και μετασχηματιστή με μεσαία λήψη (Διπλή Ανόρθωση)  
Όπως προαναφέραμε ένα από τα μειονεκτήματα της ημιανόρθωσης είναι η σχετικά μικρή τιμή της DC τάσης εξόδου. Γι αυτό σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούμε ανορθωτική διάταξη όχι ημιανόρθωσης αλλά πλήρους ανόρθωσης. Η πλήρης ανόρθωση μπορεί να υλοποιηθεί με δύο βασικά κυκλώματα. Ή χρησιμοποιώντας μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και δυο διόδους, ή χρησιμοποιώντας απλό μετασχηματιστή και ανορθωτική διάταξη γέφυρας (τέσσερις διόδους).

Το κύκλωμα (σχήμα 3.6), κάνει πλήρη ανόρθωση χρησιμοποιώντας μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και δυο διόδους. Η χρήση μετασχηματιστή  $M$  με δύο όμοια δευτερεύοντα ( $U_{\text{sec1}}=U_{\text{sec2}}$ ) και η προσθήκη μιας επιπλέον διόδου (σε σχέση με την απλή ανόρθωση) επιτρέπει την διέλευση ρεύματος προς το φόρτο και κατά τις δύο ημπεριόδους του σήματος εισόδου. Λόγω δηλαδή της μεσαίας λήψης οι είσοδοι στις δύο διόδους έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης  $180^\circ$  (ως προς τον κόμβο του πην). Έτσι κατά την μια ημπερίοδο το ρεύμα προς το φορτίο  $RL$

διέρχεται μέσω του ενός δευτερεύοντος και της διόδου D1 ενώ κατά την άλλη ημιπερίοδο το ρεύμα διέρχεται μέσω του άλλου δευτερεύοντος και της διόδου D2. Δηλαδή το ολικό ρεύμα του φορτίου  $I_L$  είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο ρευμάτων  $I_1$  και  $I_2$ . Συνοψίζοντας τα κύρια πλεονεκτήματα της Διπλής Ανόρθωσης είναι η ικανοποιητική τιμή της DC τάσης εξόδου και η σχετικά καλή Απόδοση. Η συχνότητα κυμάτωσης είναι διπλάσια απ' ότι στην απλή ανόρθωση και έτσι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων «βολευόμαστε» με ένα μέτριο φίλτρο. Στα μειονεκτήματα είναι το μεγαλύτερο κόστος που απαιτείται για τον μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και η διπλάσια ανάστροφη τάση που πρέπει να αντέχουν οι δύο διόδοι (σε σχέση με την απλή ανόρθωση).



Σχήμα 3.6: κύκλωμα πλήρης ανόρθωσης

### 3.6 Ανόρθωση με Γέφυρα

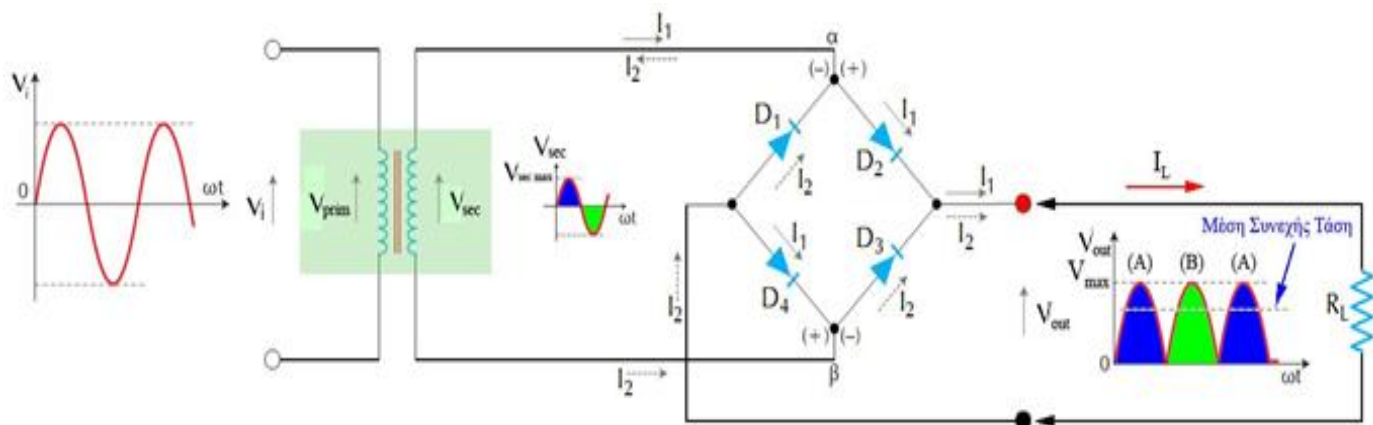
Η Ανορθωτική Διάταξη Γέφυρας (σχήμα 3.7), μοιάζει σε αρκετά σημεία με την Διπλή Ανόρθωση που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα. Έχει την ίδια συχνότητα κυμάτωσης με αυτή και την ίδια DC τάση εξόδου. Τα δυο κυκλώματα διαφέρουν ως προς τον αριθμό των διόδων (τέσσερις για ανορθωτική διάταξη γέφυρας και δυο για την διπλή ανόρθωση). Επιπλέον μια ακόμα βασική διαφορά τους είναι ότι για την ανορθωτική διάταξη γέφυρας χρησιμοποιούμε απλό μετασχηματιστή ( $N1/N2$ ) ενώ για την διπλή ανόρθωση χρησιμοποιούμε μετασχηματιστή με μεσαία λήψη ( $N1/2 \times N2$ ).

Όπως βλέπουμε στο σχήμα τα δύο άκρα της γέφυρας είναι συνδεδεμένα στα άκρα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή ενώ από τα άλλα δυο άκρα της παίρνουμε την DC τάση εξόδου. Η λειτουργία της έχει ως εξής:

- a) Όταν η τάση στο κόμβο α είναι θετική ως προς τον κόμβο β, δηλαδή κατά την πρώτη ημιπερίοδο του σήματος εισόδου, άγουν οι διόδοι D2 και D4, αφού οι άνοδοι τους είναι θετικά πολωμένες ως προς την κάθοδο τους και το ρεύμα  $I_1$  ακολουθεί το δρόμο που δείχνεται στο (σχήμα 3.7), (δηλαδή από το δευτερεύον του μετασχηματιστή μέσω του κόμβου α, της διόδου D2, του φορτίου  $R_L$ , της διόδου D4

και τέλος του κόμβου β, ξαναγυρνά στον μετασχηματιστή). Η κυματομορφή της τάσης εξόδου κατά αυτή την διαδρομή του ρεύματος απεικονίζεται στο (σχήμα 1) σαν (Α) – μπλε χρώμα.

- b) Κατά την δεύτερη ημιπερίοδο του σήματος εισόδου, όπως αυτό αναπτύσσεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, ο κόμβος α γίνεται αρνητικός ως προς τον κόμβο β οπότε άγουν τώρα οι διόδους D1 και D3, αφού οι άνοδοί τους είναι τώρα πιο θετικές από τις αντίστοιχες καθόδους. Το ρεύμα I2 ακολουθεί το δρόμο από το δευτερεύον του μετασχηματιστή στον κόμβο β, μέσω της διόδου D3 στο φορτίο RL, και στη συνέχεια μέσω της διόδου D1 και του κόμβου α επιστρέφει στο μετασχηματιστή. Η κυματομορφή της τάσης εξόδου κατά αυτή την διαδρομή του ρεύματος απεικονίζεται στο (σχήμα 3.7), σαν (B) – πράσινο χρώμα. Το ολικό ρεύμα εξόδου I<sub>L</sub> είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο ρευμάτων I<sub>1</sub> και I<sub>2</sub>

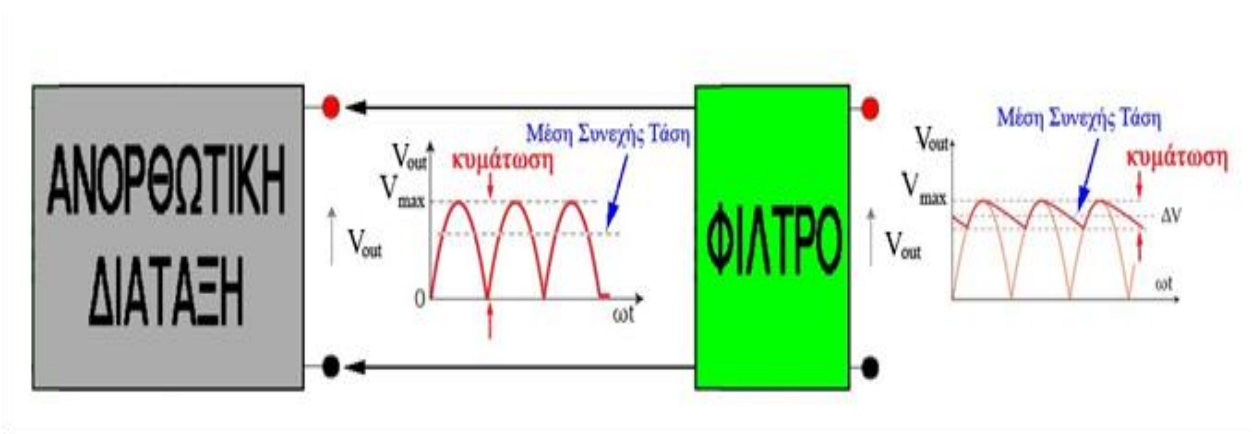


Σχήμα 3.7: ανορθωτική διάταξη γέφυρας

Το κύριο πλεονέκτημα της ανόρθωσης με γέφυρα είναι ότι έχουμε πλήρη ανόρθωση χρησιμοποιώντας απλό μετασχηματιστή. Το μειονέκτημα της (ασήμαντο μειονέκτημα) είναι ότι χρησιμοποιούμε τέσσερις διόδους αντί για δυο και αυξάνεται λίγο το κόστος και η πολυπλοκότητα του κυκλώματος.

### 3.7 ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΚΑΙ ΦΙΛΤΡΑ

Όπως προαναφέραμε φιλτράρισμα ή εξομάλυνση ονομάζεται η διαδικασία που έχει σαν στόχο να περιορίσει τις AC συνιστώσες που προκύπτουν από την Ανορθωτική Διάταξη ώστε να μείνει όσο το δυνατόν μόνο η DC Μέση τιμή της τάσης. Για να το πετύχουμε αυτό βάζουμε στην έξοδο της Ανορθωτικής Διάταξης (σχήμα 3.8), ειδικά κυκλώματα που ονομάζονται φίλτρα και υλοποιούνται κυρίως με παθητικά στοιχεία (πυκνωτές και πηνία).



Σχήμα 3.8: φίλτρο ανορθωτικής διάταξης

Όπως φαίνεται και από το (σχήμα 3.8), στη γενική περίπτωση η εξομάλυνση δεν είναι πλήρης με αποτέλεσμα η τελική τάση  $V_{out}$  να εμφανίζει μια μικρή περιοδική διακύμανση που όπως έχουμε πει ονομάζεται κυμάτωση. Το εύρος  $\Delta V$  της κυμάτωσης (σε Volt) αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό μιας τροφοδοτικής διάταξης.

Συχνά η κυμάτωση εκφράζεται και σε ποσοστιαία μορφή, δηλαδή από το συντελεστή:

$$r = \frac{\text{Κυμ άτωση} \Delta V}{\text{Μέση τιμ ή (DC) τάσης εξόδου}}$$

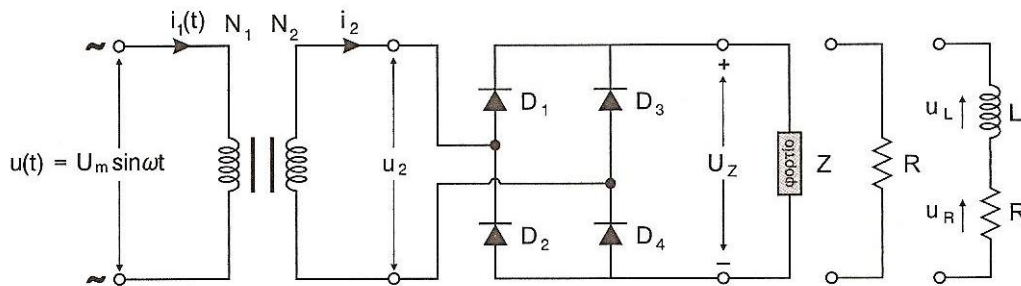
Υπάρχουν διάφοροι τύποι φίλτρων. Οι πιο γνωστοί είναι:

- Φίλτρο με πυκνωτή (R - C)
- Φίλτρο με επαγωγικής εισόδου (L - C)
- Φίλτρο τύπου Π ( $C1 = C2$ )
- Φίλτρο τύπου Π ( $C1 > C2$ )

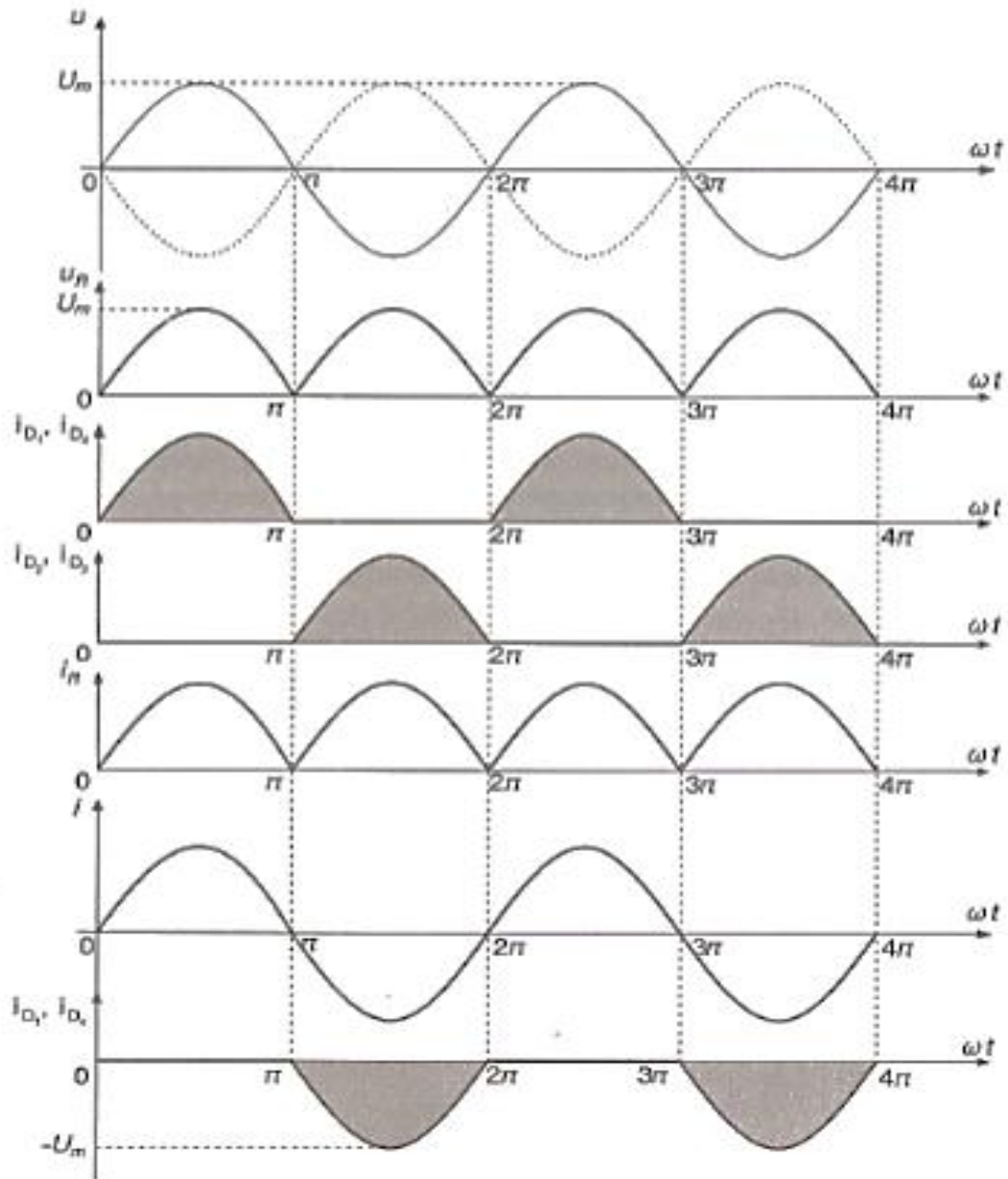
### 3.8 Λειτουργία με ωμικό φορτίο

Για κάθε ημiperίοδο 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 που σημαίνει μικρότερη κυμάτωση.

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



Σχήμα 3.8: λειτουργία με ωμικό φορτίο



Σχήμα 3.10: διάγραμμα ωμικού φορτίου

Από τα διαγράμματα του παραπάνω σχήματος μπορούμε να βγάλουμε τα εξής συμπεράσματα :

- Η μέση τιμή της τάσης στο φορτίο είναι :

$$U_{R,av} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} U_m \sin \omega t \, dt = \frac{2U_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2} U_{rms}}{\pi} \quad (1)$$

- και η αντίστοιχη ενεργός τιμή θα είναι :

$$U_{R,rms} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} U_m^2 \sin^2 \omega t dt = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

- Η μέση τιμή του ρεύματος στο φορτίο, λόγω καθαρά ωμικού του χαρακτήρα θα είναι :

$$I_{R,\alpha\nu} = \frac{U_{R,\alpha\nu}}{R} = \frac{2U_m}{\pi R} = \frac{2}{\pi} I_m \quad (3)$$

- και η αντίστοιχη ενεργός τιμή του :

$$I_{R,rms} = \frac{U_{R,rms}}{R} = \frac{U_m}{\sqrt{2} R} \quad (4)$$

- η παρεχόμενη ισχύς του φορτίου :

$$P_R = \frac{1}{T} \int_0^T u_R i_R dt = \frac{U_{R,rms}^2}{R} = I_{rms}^2 * R = \frac{U_m^2}{2R} \quad (5)$$

Η ισχύς  $P_{DC}$  που οφείλεται στη συνεχή συνιστώσα της τάσης, δίνεται από την σχέση:

$$P_{dc} = U_{R,\alpha\nu} * I_{R,\alpha\nu} = \frac{2U_m}{\pi} \frac{2U_m}{\pi R} = \frac{4U_m^2}{\pi^2 R} = \frac{8}{\pi^2} P_R \quad (6)$$

Η μεταβολή με το χρόνο της ανορθωμένης τάσης στο φορτίο,  $u_R(t)$ , με βάση την ανάλυση κατά FOURIER δίνεται από την σχέση :

$$u_R(t) = \frac{4U_m}{\pi} \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t - \dots \right) \quad (7)$$

Παρατηρούμε πως η πρώτη αρμονική έχει συχνότητα διπλάσια από εκείνη της τάσης τροφοδοσίας. Η ενεργή τιμή της τάσης εναλλασσόμενης συνιστώσας της τάσης στο φορτίο, υπολογίζεται από την σχέση :

$$U_{ac,rms} = \sqrt{U_{R,rms}^2 - U_{R,\alpha\nu}^2} = \sqrt{\frac{U_m^2}{2} - \frac{4U_m^2}{\pi^2}} = 0,307U_m^2 = 0,433U_{rms} \quad (8)$$



### 3.9 Λειτουργία με ωμικό-επαγωγικό φορτίο

Το ηλεκτρικό κύκλωμα του μετατροπέα, με ωμικό-επαγωγικό φορτίο παρουσιάζεται στο (σχήμα 3.8), όπου στη θέση του φορτίου είναι μια ωμική αντίσταση σε σειρά με μια καθαρή αυτεπαγωγή Η μεταβολή των μεγεθών, στο χρόνο, φαίνεται στο (σχήμα 3.11). Όπως και στην περίπτωση της λειτουργίας με ωμικό φορτίο, για τα διαστήματα:

- $0 \leq \omega t \leq \pi$ , μεταξύ των διόδων με κοινή κάθοδο (D1, D3), θα άγει αυτή που έχει άνοδο με θετικότερο δυναμικό, δηλαδή η D1, και μεταξύ των διόδων με κοινή άνοδο (D2, D4), θα άγει αυτή που έχει κάθοδο με αρνητικότερο δυναμικό, δηλαδή η D4
- $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$ , μεταξύ των διόδων με κοινή κάθοδο (D1,D3), θα άγει αυτή που έχει άνοδο με θετικότερο δυναμικό, δηλαδή η D3, και μεταξύ των διόδων με κοινή άνοδο (D2,D4), θα άγει αυτή που έχει κάθοδο με αρνητικότερο δυναμικό. δηλαδή η D2

Το ρεύμα στα τυλίγματα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή, αλλάζει φορά σε κάθε ημιπερίοδο, δηλαδή είναι ένα εναλλασσόμενο αλλά όχι ημιτονοειδές ρεύμα. Η τάση στο φορτίο έχει την ίδια μορφή όπως και στην περίπτωση της λειτουργίας με ωμικό φορτίο και επομένως ισχύουν οι αντίστοιχες σχέσεις υπολογισμού. Η ενεργός τιμή του ρεύματος του δευτερεύοντος τον μετασχηματιστή, είναι:

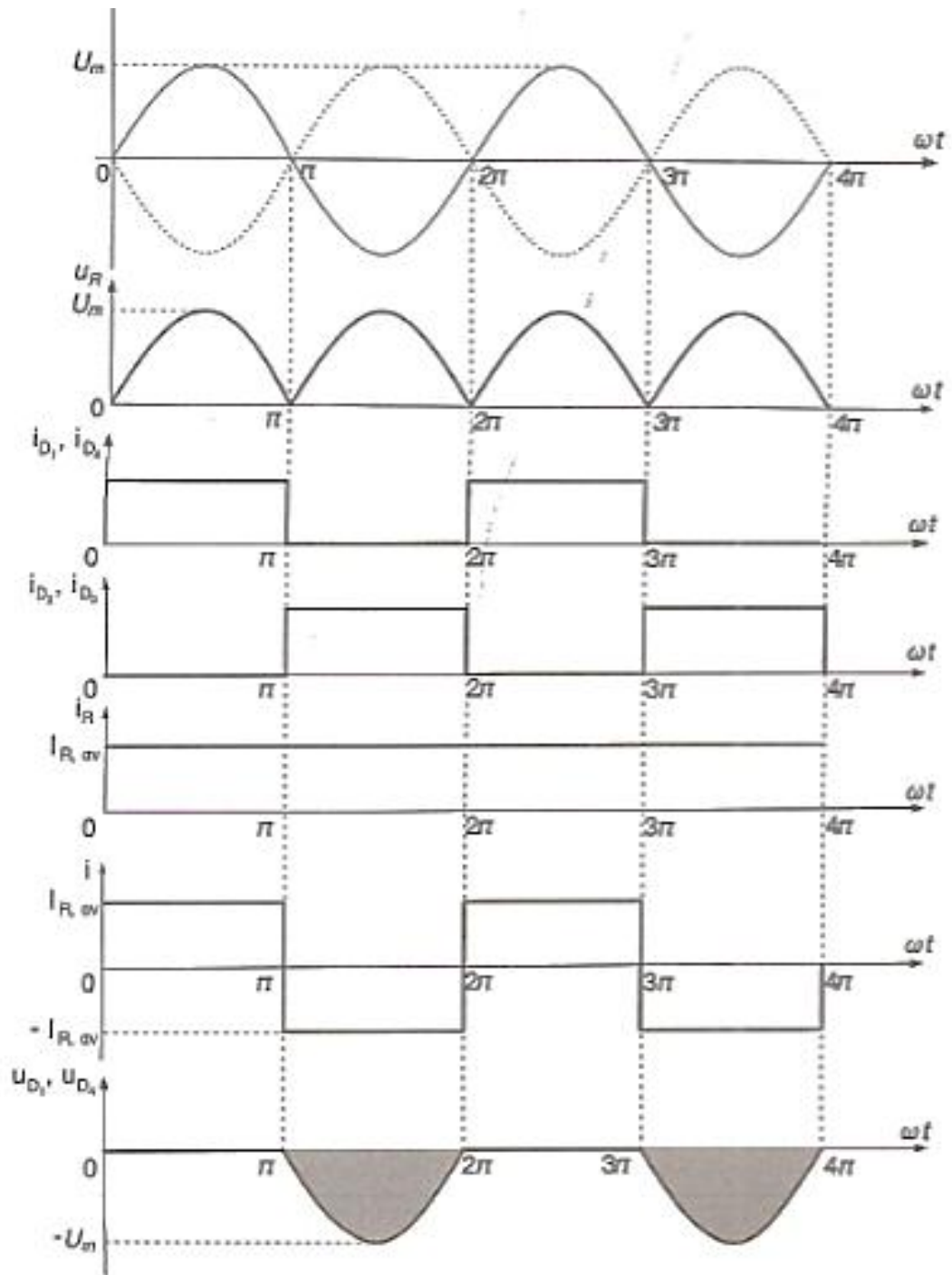
$$i_{2,rms} = I_{Z,\alpha v} \quad (9)$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος του πρωτεύοντος τον μετασχηματιστή, είναι:

$$I_{1,rms} = \frac{N_2}{N_1} I_{2,rms} = \frac{N_2}{N_1} I_{Z,\alpha v} \quad (10)$$

Όπου,  $N_1/N_2$ , ο λόγος μετασχηματισμού.

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



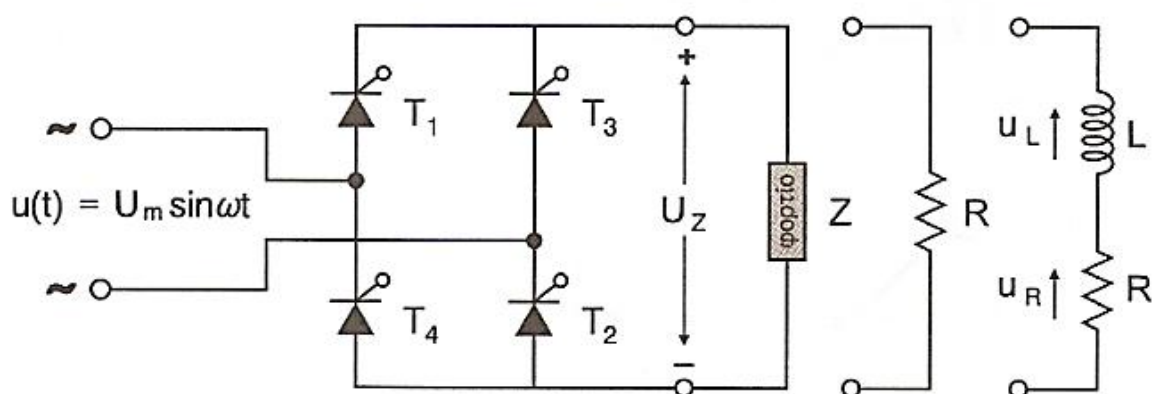
Σχήμα 3.11: μεταβολή των μεγεθών στο χρόνο (ωμικό - χωρητικό φορτίο)

### 3.10 Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα

Η πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα, (σχήμα 3.12), αποτελεί την πληρέστερη διάταξη μονοφασικής ανόρθωσης. Η χρήση μετασχηματιστή στην είσοδο διάταξης της 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 T1 και T2, και αντίστοιχα τα T3 και T4, τα οποία θα πυροδοτούνται, επίσης ταυτόχρονα. Οι παλμοί έναυσης των δύο θυρίστορ που ανήκουν στην ίδια ημιγέφυρα, θα έχουν διαφορά φάσης  $180^\circ$ .



Σχήμα 3.12: πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα

### 3.11 Λειτουργία με ωμικό φορτίο

Η τάση τροφοδοσίας είναι ημιτονοειδής

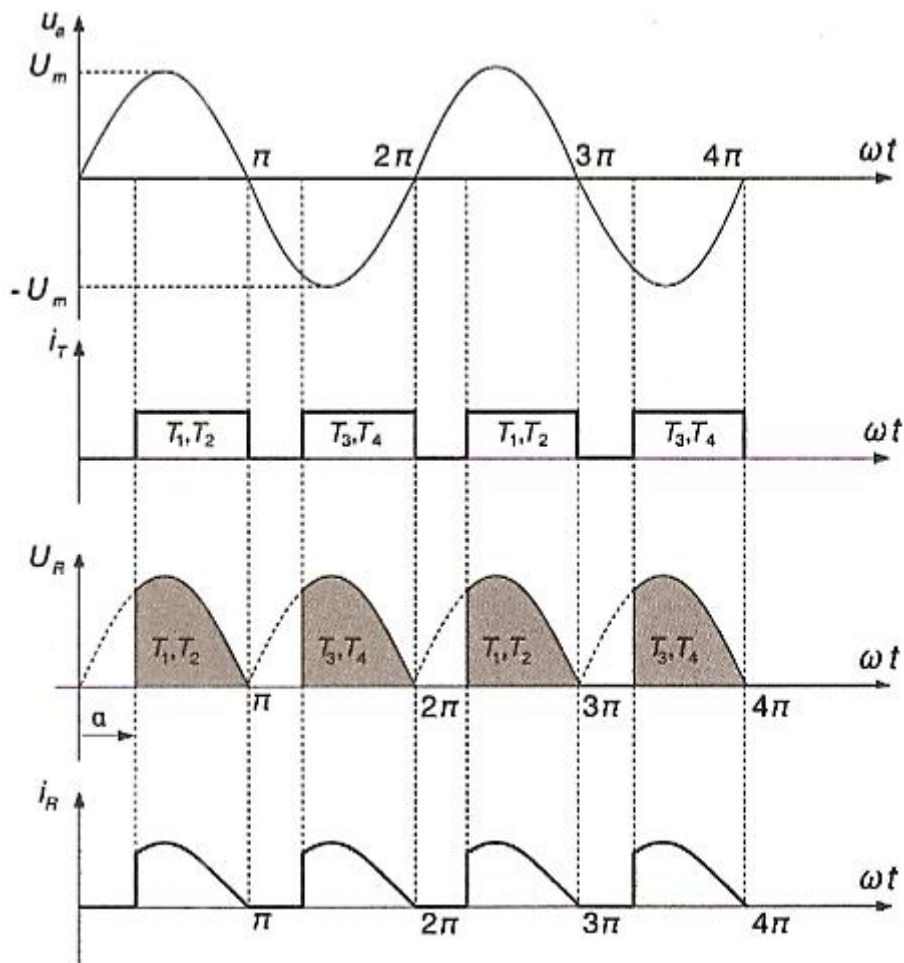
$$U(t) = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

- Για  $\alpha < \omega t < \pi$  σε αγωγή εισέρχονται τα θυρίστορ T1 και T2
- Για  $\pi + \alpha < \omega t < 2\pi$ , σε αγωγή εισέρχονται τα θυρίστορ T3 και T4

Στο (σχήμα 3.13), παρουσιάζονται τόσο οι κυματομορφές τάσεων και εντάσεων του ρεύματος, όσο και οι περιοχές αγωγής των θυρίστορ για τυχαία γωνία έναυσης  $\alpha$ . Η μέση τιμή της τάσης εξόδου, δίνεται από τη σχέση:

$$U_{L,av} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{2}{2\pi} \int_\alpha^\pi U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi} [-\cos]_\alpha^\pi =$$

$$= \frac{U_m}{\pi} (\cos \alpha - \cos \pi) \Rightarrow U_{L,\alpha v} = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (2)$$



Σχήμα 3.13: οι κυματομορφές τάσεων και εντάσεων του ρεύματος

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 :

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

Από τις σχέσεις (3) και (4) έχουμε :

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

### **3.12 Λειτουργία με ωμικό-επαγωγικό φορτίο**

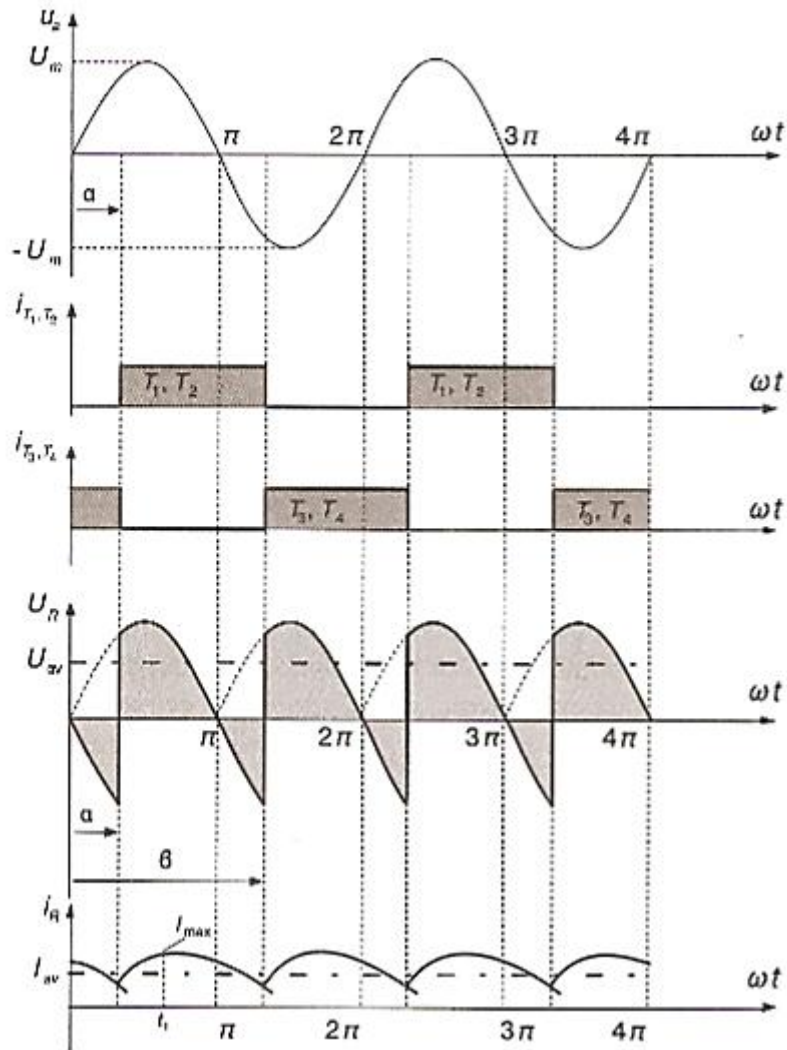
Στη λειτουργία ανορθωτή και όταν το φορτίο έχει επαγωγικό χαρακτήρα, συνίσταται η τοποθέτηση μιας διόδου ελεύθερης ροής παράλληλα στο φορτίο. Στο (σχήμα 3.14), παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσεων- εντάσεων, των διαφόρων συνιστωσών του κυκλώματος, για τυχαία γωνία έναυσης''α''. Στις κυματομορφές του (σχήματος 3.14), 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 3.14), διακρίνουμε τις εξής περιοχές λειτουργίας:

Στο διάστημα,  $\alpha < \omega t < \pi$  και οι τρεις τάσεις ( $U_Z, U_R, U_L$ ) είναι θετικές (το ρεύμα είναι πάντα θετικό καθόσον τα θυρίστορ είναι μονόπορα 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 παράταση του διαστήματος αγωγής πέρα των  $180^\circ$  (όπου η τάση του δικτύου τείνει να πολώσει ανάστροφα τα θυρίστορ που άγουν), μέχρι την πλήρη εκφόρτωση του πηνίου.



Σχήμα 3.14: κυματομορφές τάσεων- εντάσεων

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 3.14), στο διάστημα  $\alpha \leq \omega t \leq t_1$  το  $di_L/dt$  είναι θετικό με αποτέλεσμα την φόρτιση της αυτεπαγωγής καθότι:

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

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

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

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, αντίσταση τροφοδοτείται και από το δίκτυο αλλά και απ' την αυτεπαγωγή. Επομένως:

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

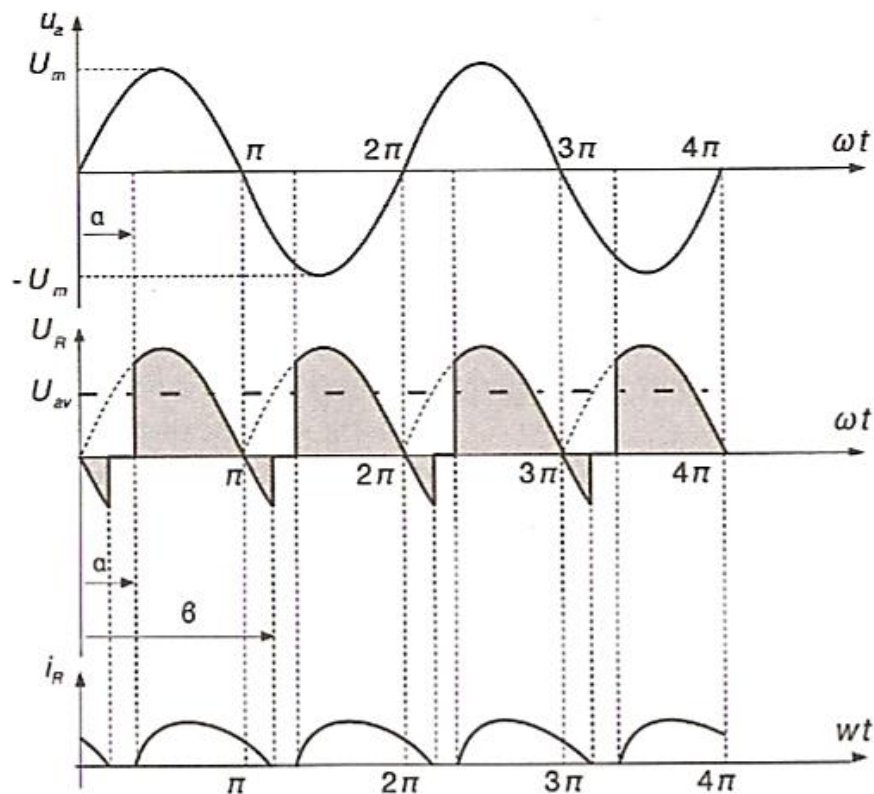
Τέλος στο διάστημα  $\pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha$ , η τάση του δικτύου γίνεται αρνητική, η τάση στα άκρα της αυτεπαγωγής εξακολουθεί να είναι αρνητική, με αποτέλεσμα στο ανωτέρω διάστημα η αυτεπαγωγή να δίνει ενέργεια και στο δίκτυο και στην αντίσταση. Αρα:

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

Στην περίπτωση όπου η τιμή της αυτεπαγωγής δεν μας εξασφαλίζει συνεχή αγωγή, το διάστημα αγωγής περιορίζεται στην περιοχή (σχήμα 3.15):

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

Όπου  $\beta$ , η τυχαία γωνία μηδενισμού του ρεύματος.



Σχήμα 3.15: κυματομορφές τάσεων- εντάσεων

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

- Συνεχή αγωγή (φορτίο R,L)

$$\begin{aligned}
 U_{L,\alpha\nu} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi+\alpha} \\
 &= \frac{U_m}{\pi} [\cos \alpha - \cos(\pi + \alpha)] \\
 &= \frac{U_m}{\pi} \left[ \cos \alpha - \underbrace{\cos \pi}_{-1} \cos \alpha + \underbrace{\sin \pi}_0 \sin \alpha \right] \Rightarrow U_{L,\alpha\nu} = \frac{2U_m}{\pi} \cos \alpha \quad (16)
 \end{aligned}$$

- Ασυνεχή αγωγή (φορτίο R,L)

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

Αντίστοιχα η ενεργός τιμή της τάσης στο φορτίο R,Λις αντίστοιχες περιπτώσεις είναι :

- Συνεχή αγωγή (φορτίο R,L)

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

Όπου:

$$\begin{aligned}
 \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sin^2 \omega t dt &= \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \frac{1-\cos 2\omega t}{2} d\omega t = \int_{\pi}^{\pi+\alpha} \frac{1}{2} d\omega t - \int_{\pi}^{\pi+\alpha} \frac{\cos 2\omega t}{2} d\omega t = \\
 &= \frac{1}{2} [\omega t]_{\alpha}^{\pi+\alpha} - \frac{1}{4} [\sin 2\omega t]_{\alpha}^{\pi+\alpha} = \frac{1}{2} (\pi + \alpha - \alpha) - \frac{1}{4} [\sin 2(\pi + \alpha) - \sin 2\alpha] = \\
 &= \frac{1}{2} \pi - \frac{1}{4} \left[ \underbrace{\sin 2\pi}_0 \cos 2\alpha + \underbrace{\cos 2\pi}_1 \sin 2\alpha - \sin 2\alpha \right] = \frac{\pi}{2} \quad (19)
 \end{aligned}$$



Από τις σχέσεις (18) και (19), έχουμε :

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

- Ασυνεχή αγωγή (φορτίο R,L)

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

Όπου :

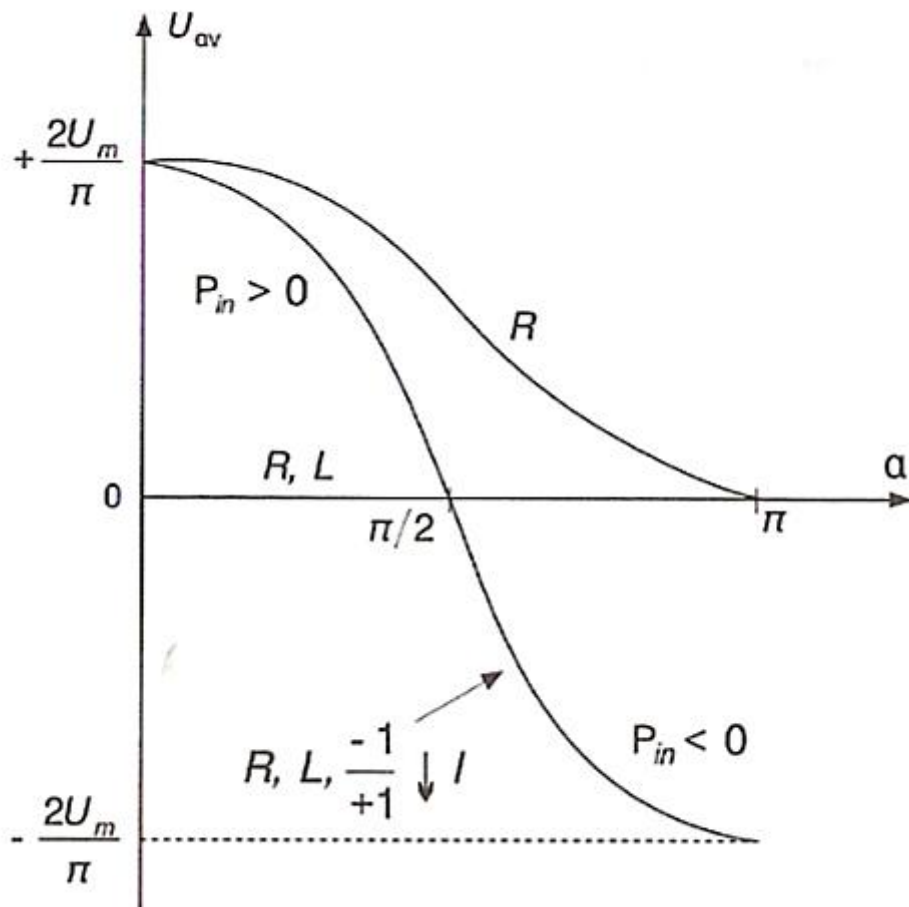
$$\begin{aligned} \int_a^{\beta} \sin^2 \omega t dt &= \int_a^{\beta} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} d\omega t = \int_a^{\beta} \frac{1}{2} d\omega t - \int_a^{\beta} \frac{\cos 2\omega t}{2} d\omega t = \\ &= \frac{1}{2} [\omega t]_{\alpha}^{\beta} - \frac{1}{4} [\sin 2\omega t]_{\alpha}^{\beta} = \frac{1}{2}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

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

$$\begin{aligned} U_{L,rms} &= \sqrt{\frac{U_m^2}{2\pi} \left[ (\beta - \alpha) - \frac{1}{2} (\sin 2\beta - \sin 2\alpha) \right]} \Rightarrow \\ U_{L,rms} &= \frac{U_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[ (\beta - \alpha) - \frac{1}{2} (\sin 2\beta - \sin 2\alpha) \right]} \quad (23) \end{aligned}$$

Η γραφική παράσταση της  $U_{av} = f(\alpha)$ , παρουσιάζεται στο (σχήμα 3.16). Είναι σημαντικό να διευκρινίσουμε, ότι και στην ακραία περίπτωση όπου η αντεπαγωγή 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 ΣΡ τάσεως ή μηχανή Σ.Ρ), μπορούμε να επεκτείνουμε τη γωνία έναυσης στην περιοχή  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$  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. Στη αντίθετη περίπτωση,

σύμφωνα σχέση (16), η μέση τιμή της τάσης θα είναι αρνητική, που με τη 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  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ . και να έχουμε λειτουργία αντιστροφέα (αλλαγή τεταρτημορίου ) δίνοντας ισχύ στο δίκτυο Ε.Ρ. Η μέθοδος αυτή, χρησιμοποιείται αρκετά για την αναγεννητική πέδηση των κινητήρων συνεχώς ρεύματος. Στην περίπτωση ωμικού φορτίου, η γωνία "α", σύμφωνα με το (σχήμα 3.15), μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή στο διάστημα  $0 \leq \alpha \leq \pi$  κα  $\pi$ . Η μέση τιμή της τάσης στην περίπτωση ωμικής φόρτισης, έχει τη μέγιστη δυνατή τιμή.



Σχήμα 3.16: γραφική παράσταση της  $U_{av} = f(\alpha)$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

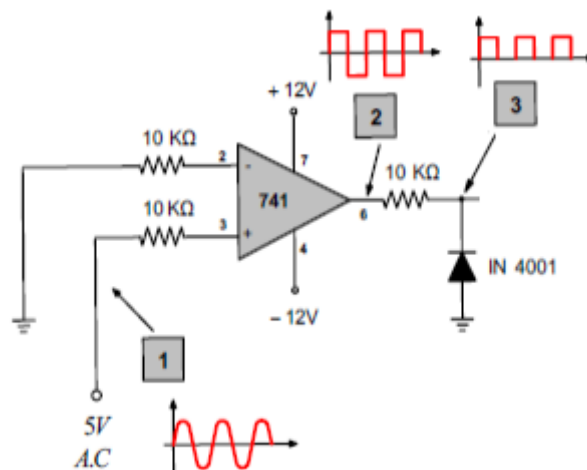
### ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

#### 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τον τρόπο με τον οποίο πυροδοτούμε τα θυρίστορ ( $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$  και  $180^{\circ}$ - $360^{\circ}$ ).

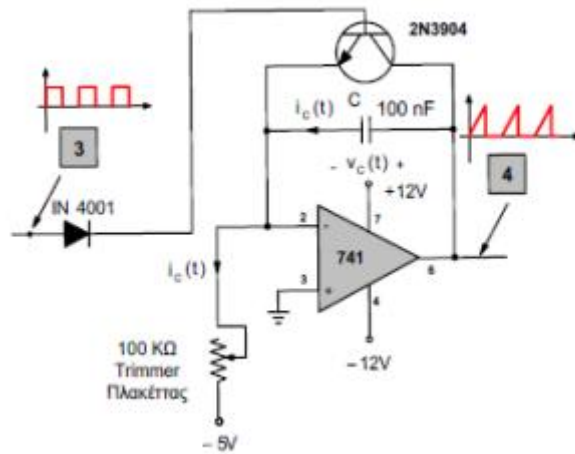
Για την παραγωγή των παλμών ένευσης το κύκλωμα ελέγχου θα πρέπει να συγχρονιστεί με την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου και η γωνία έναυσης θα πρέπει να μπορεί να μεταβάλλεται από  $0^{\circ} \leq \alpha \leq 180^{\circ}$ . Να υπάρχει γαλβανική απομόνωση μεταξύ του κυκλώματος ελέγχου και του κυκλώματος ισχύος καθώς το κύκλωμα ελέγχου θα λειτουργεί με χαμηλή τάση.

Στην πρώτη βαθμίδα σκοπός είναι να γνωρίζουμε τα σημεία μηδενισμού της εναλλασσόμενης τάσης. Για να το πετύχουμε αυτό μετατρέπουμε την εναλλασσόμενη τάση σε τετραγωνικό παλμό όπως δείχνει το παρακάτω (σχήμα 4.1):



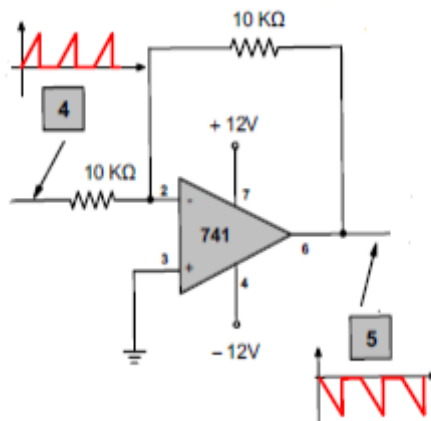
Σχήμα 4.1: βαθμίδες συγκριτή-ψαλιδιστή τάσης

Στην 2<sup>η</sup> βαθμίδα σκοπός είναι να μετατρέψουμε τον τετραγωνικό παλμό σε πριονωτό:



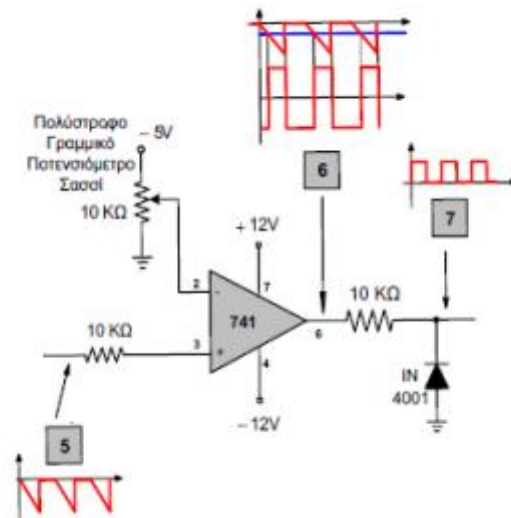
Σχήμα 4.2: βαθμίδα τετραγωνικής κυματομορφής σε τριγωνική

Το κύκλωμα της 3<sup>η</sup> βαθμίδας θα μας δίνει μια πριονική κυματομορφή της αρνητικής μηπεριόδου επειδή θέλουμε να εκμεταλλευτούμε και την αρνητική τάση.



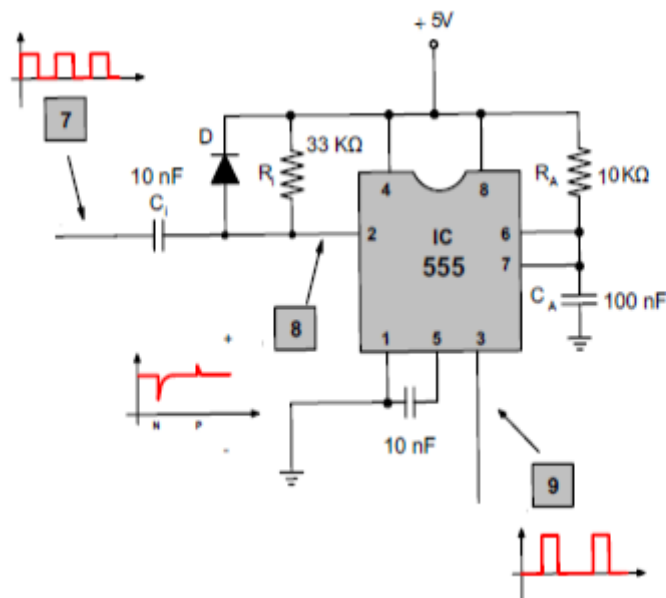
Σχήμα 4.3: βαθμίδα πριονική με αρνητικές τιμές

Στην 4<sup>η</sup> βαθμίδα θα συγκρίνουμε την πριονική κυματομορφή με μια συνεχή τάση η οποία μεταβάλετε μέσω ποτενσιόμετρου από 0 μέχρι την μέγιστη τιμή της πριονικής κυματομορφής.



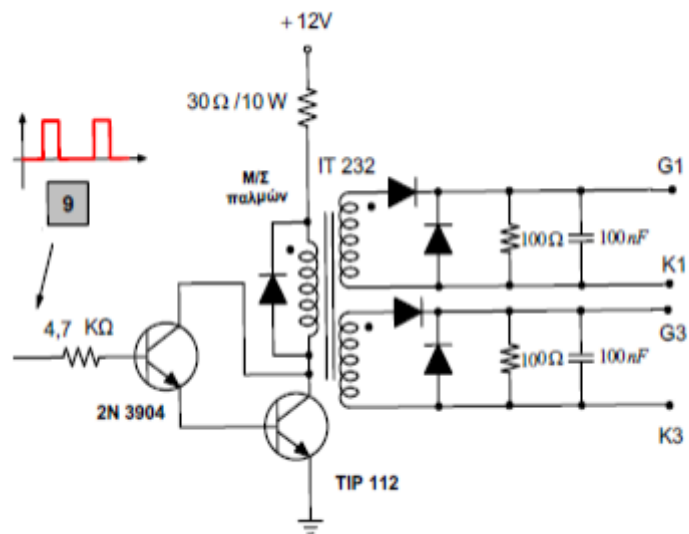
Σχήμα 4.4: βαθμίδα σύγκρισης

Το κύκλωμα της 5<sup>η</sup> βαθμίδας περιλαμβάνει το χρονιστή 555 σαν μονοσταθή πολυδονητή. Ο μονοσταθής πολυδονητής βγάζει παλμό στην έξοδο μόνο όταν δεχθεί "αντίστροφο παλμό". Επίσης, ο "αντίστροφος παλμός" πρέπει να έχει διάρκεια μικρότερη από αυτή του παλμού εξόδου του χρονιστή. Έτσι επιτυγχάνουμε παλμούς έναυσης σταθερής διάρκειας :



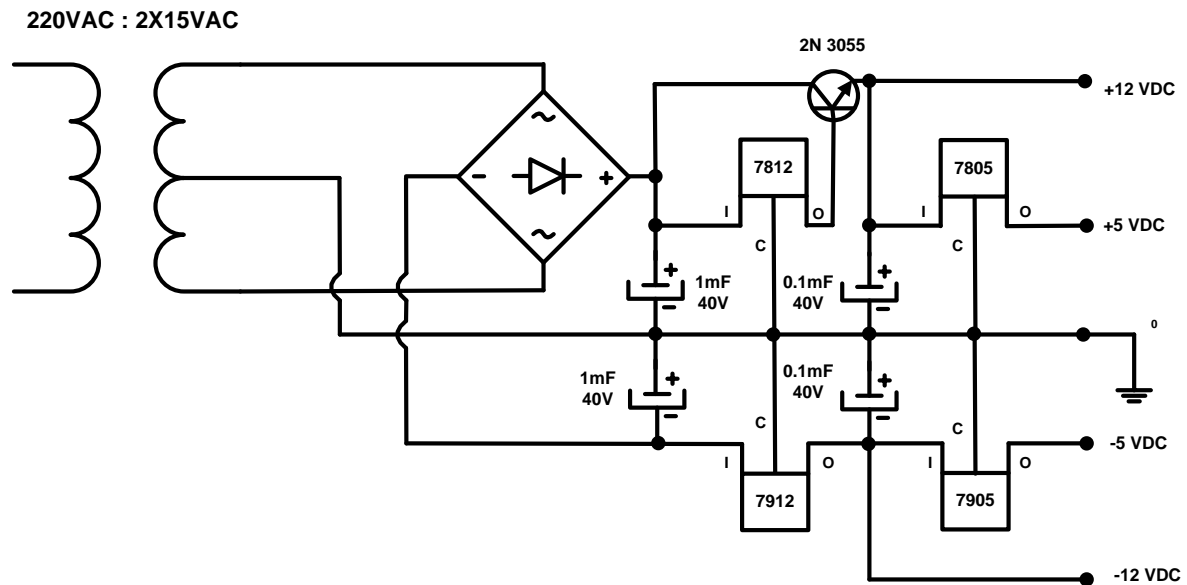
Σχήμα 4.5: παραγωγή παλμού έναυσης σταθερού πλάτους

Στην 6<sup>η</sup> βαθμίδα επειδή ο παλμός προέρχεται από ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα το ενισχύουμε μέσω κατάλληλης διάταξης Darlington και μέσω μετασχηματιστή παλμών για να έχουμε γαλβανική απομόνωση, οδηγείται τελικά στην πύλη των θυρίστωρ.



Σχήμα 4.6: κύκλωμα ενίσχυσης και γαλβανικής απομόνωσης του παλμού έναυσης

## 4.2 Σχέδιο τροφοδοτικού

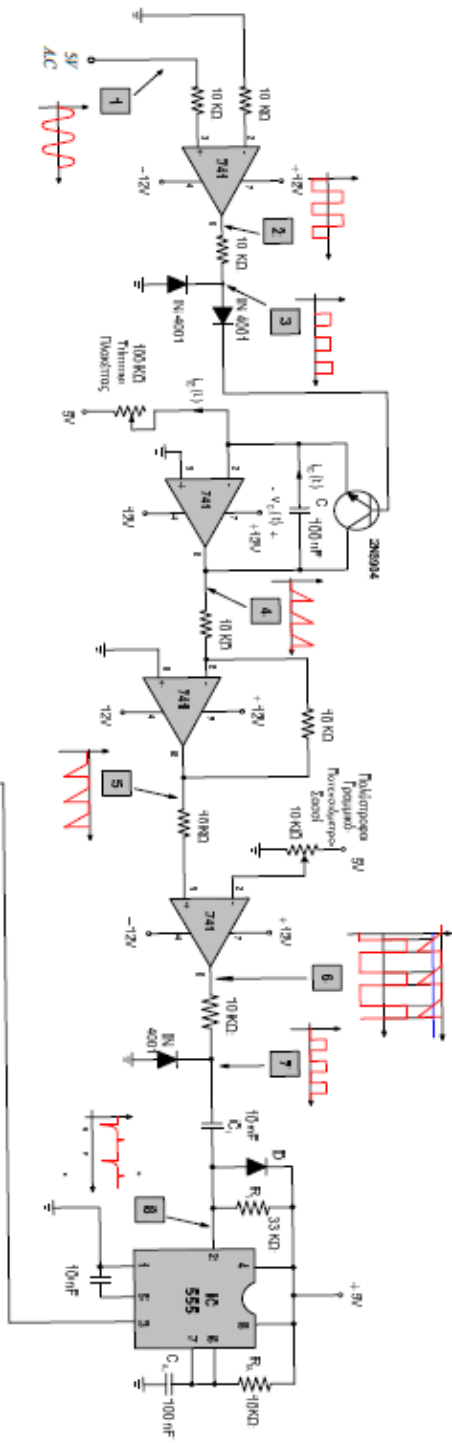
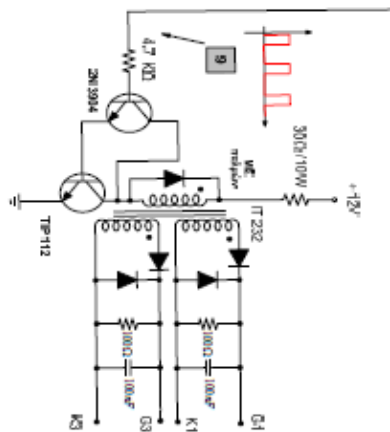


## 4.3 Υλικά για την κατασκευή τροφοδοτικού

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

## 4.4 Κύκλωμα έναυσης 0° έως 180°

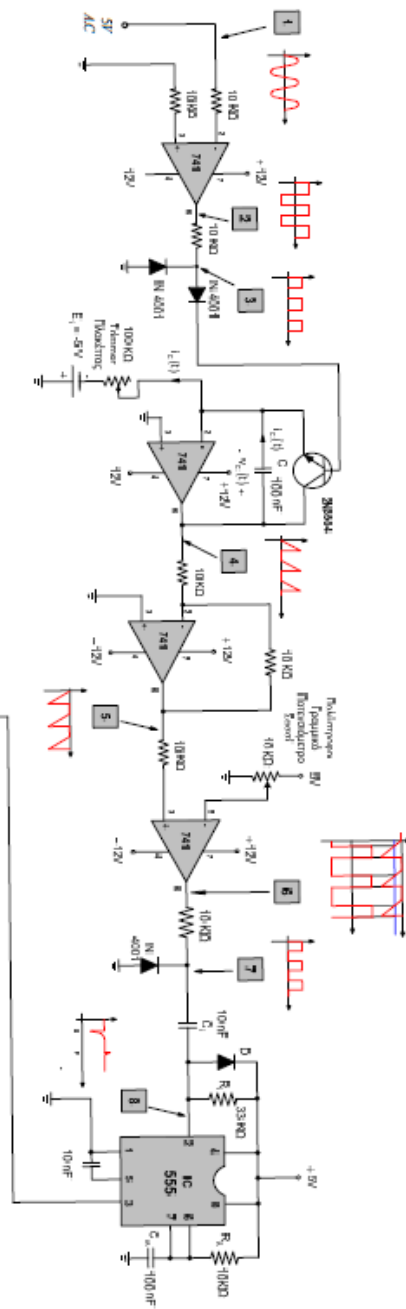
ΒΑΘΜΙΔΑ  
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΠΑΛΜΩΝ 0-180



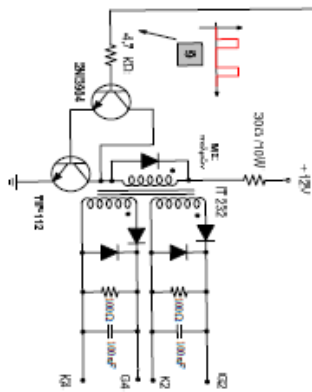
Ενέργεια



## 4.5 Κύκλωμα έναυσης 180° έως 360°



ΒΑΣΜΙΔΑ  
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΠΑΛΜΩΝ 180-360



Ερευνητικό

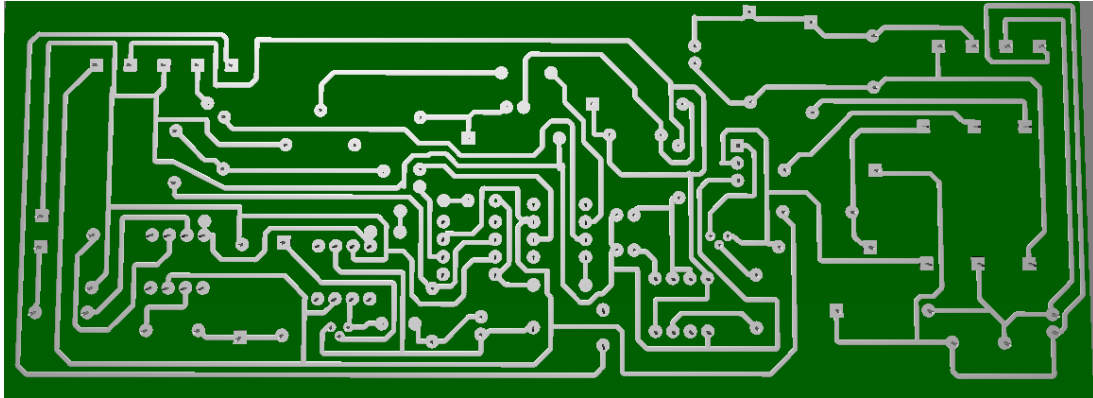
#### 4.6 Υλικά κατασκευής κυκλωμάτων έναυσης

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

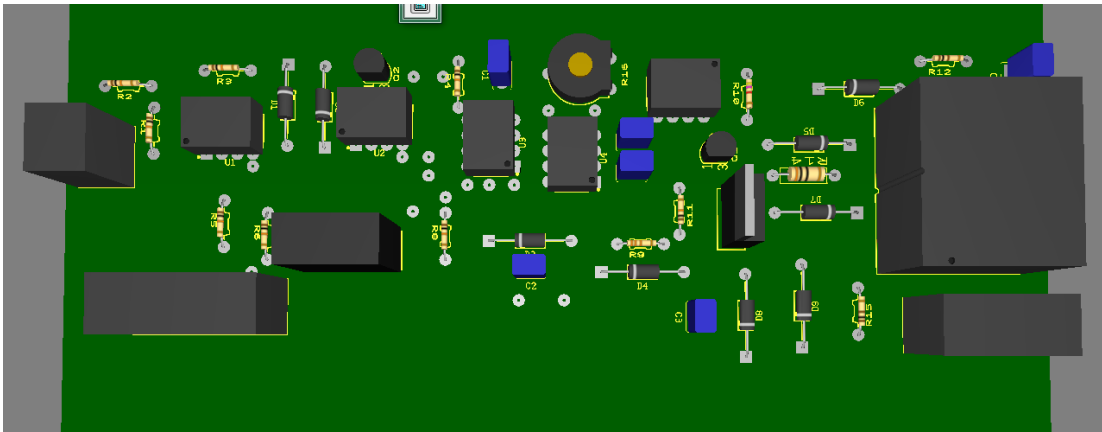
Ένε  
..

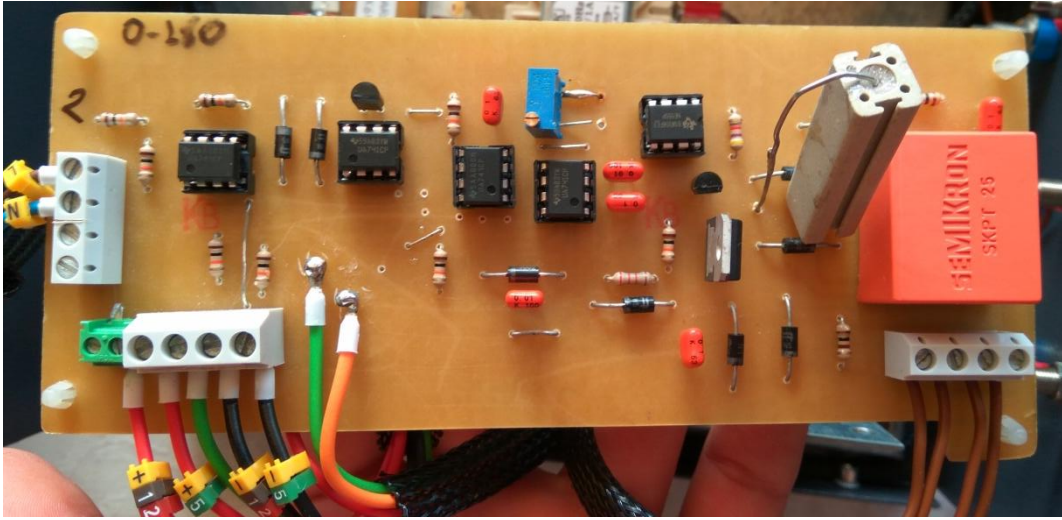


Κάτοψη πλακέτας :

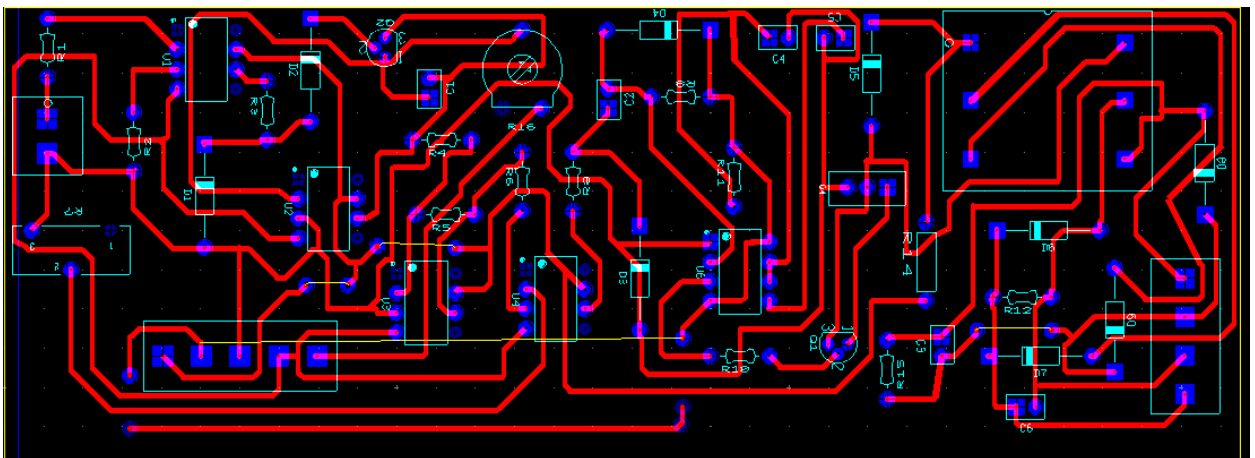
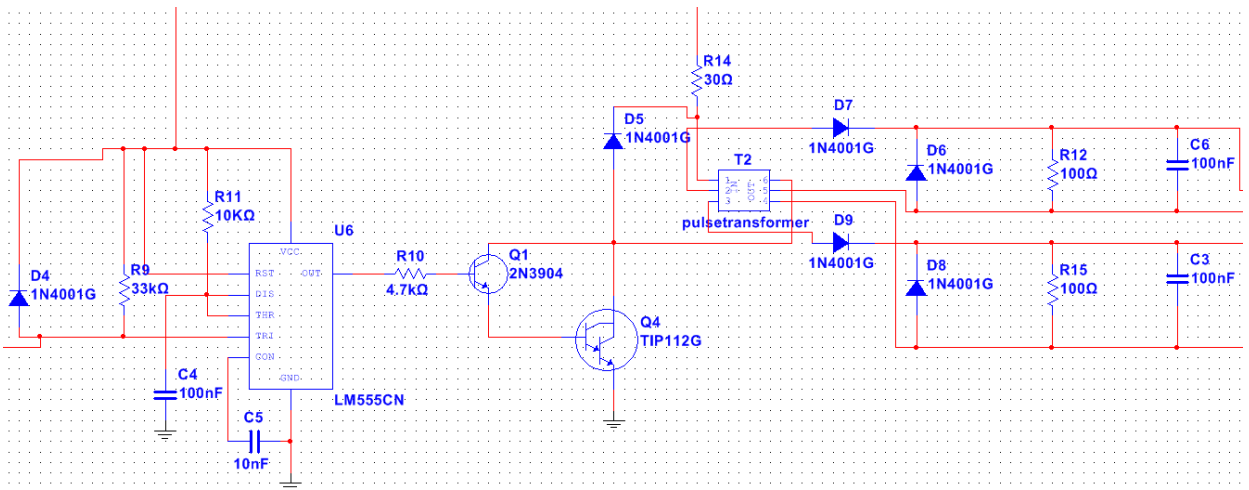
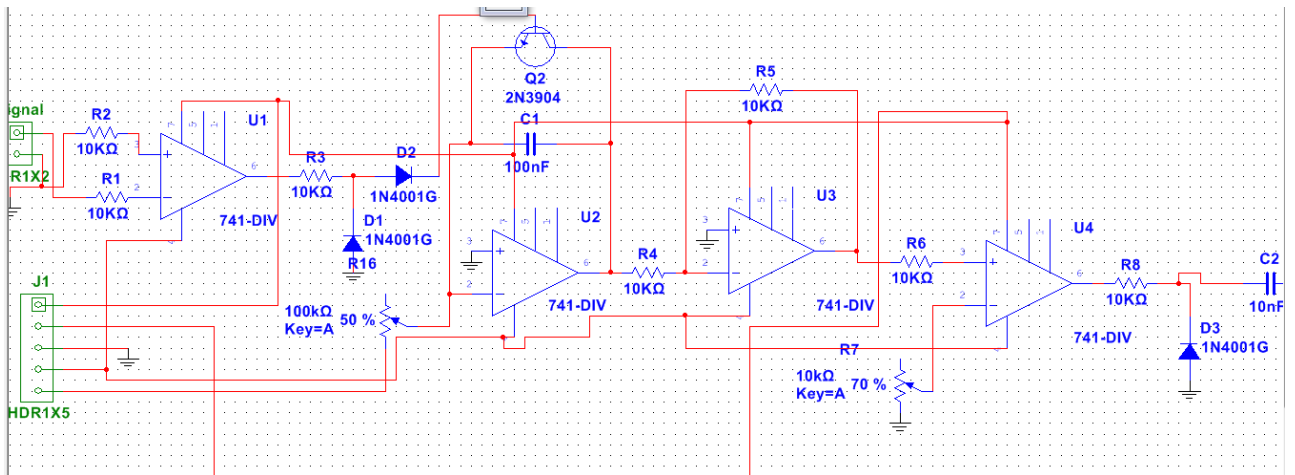


3D πλακέτας

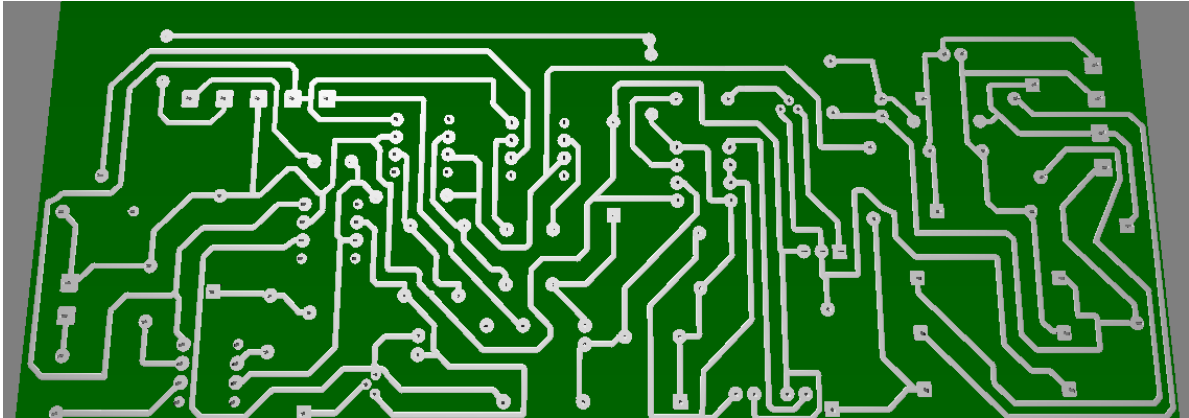




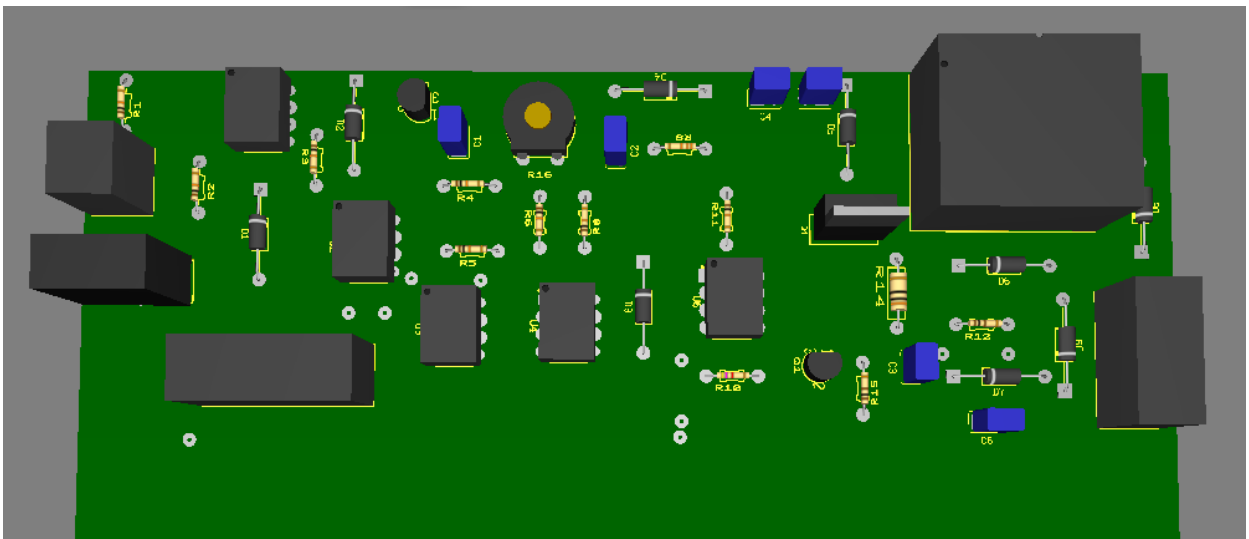
# 180° έως 360°

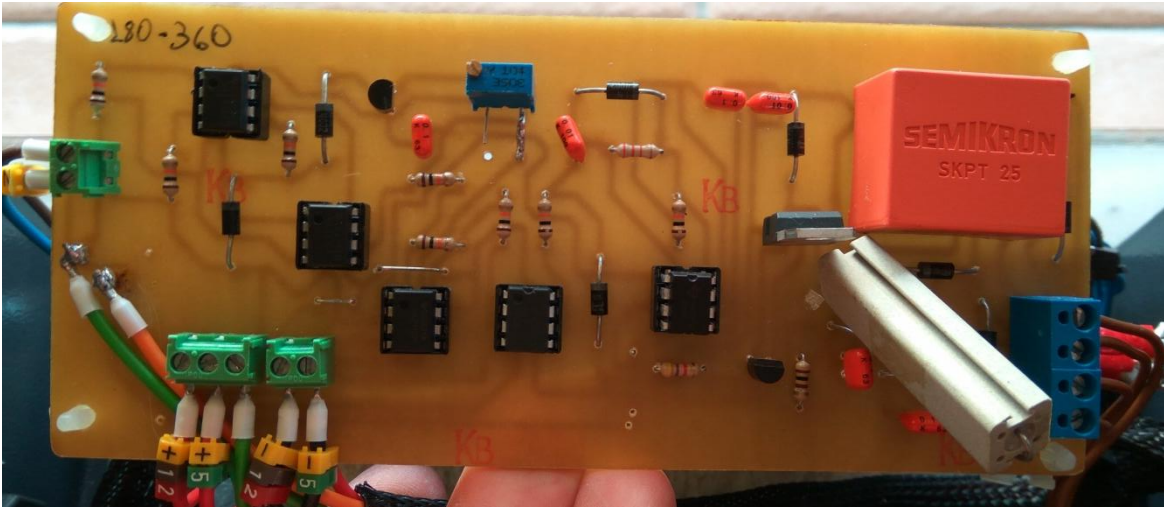


Κάτοψη πλακέτας :

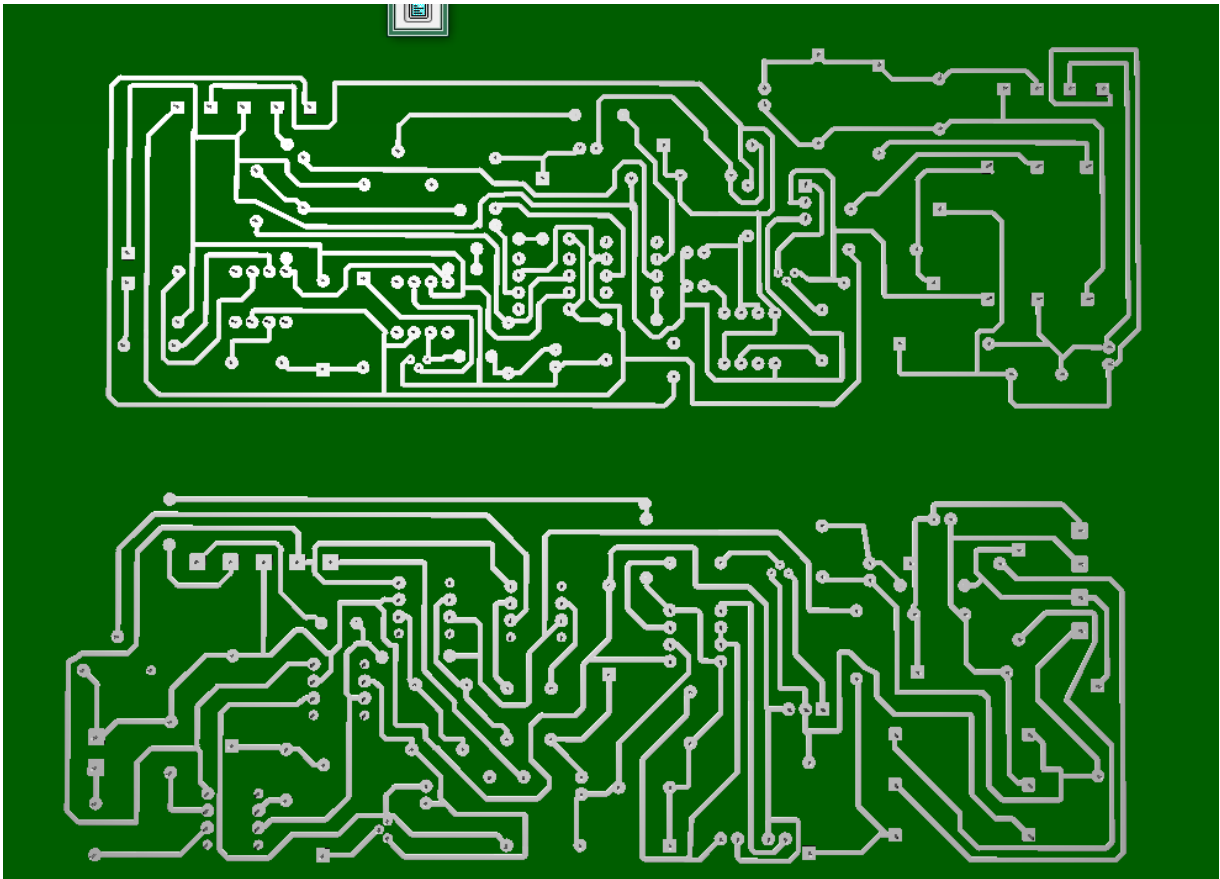
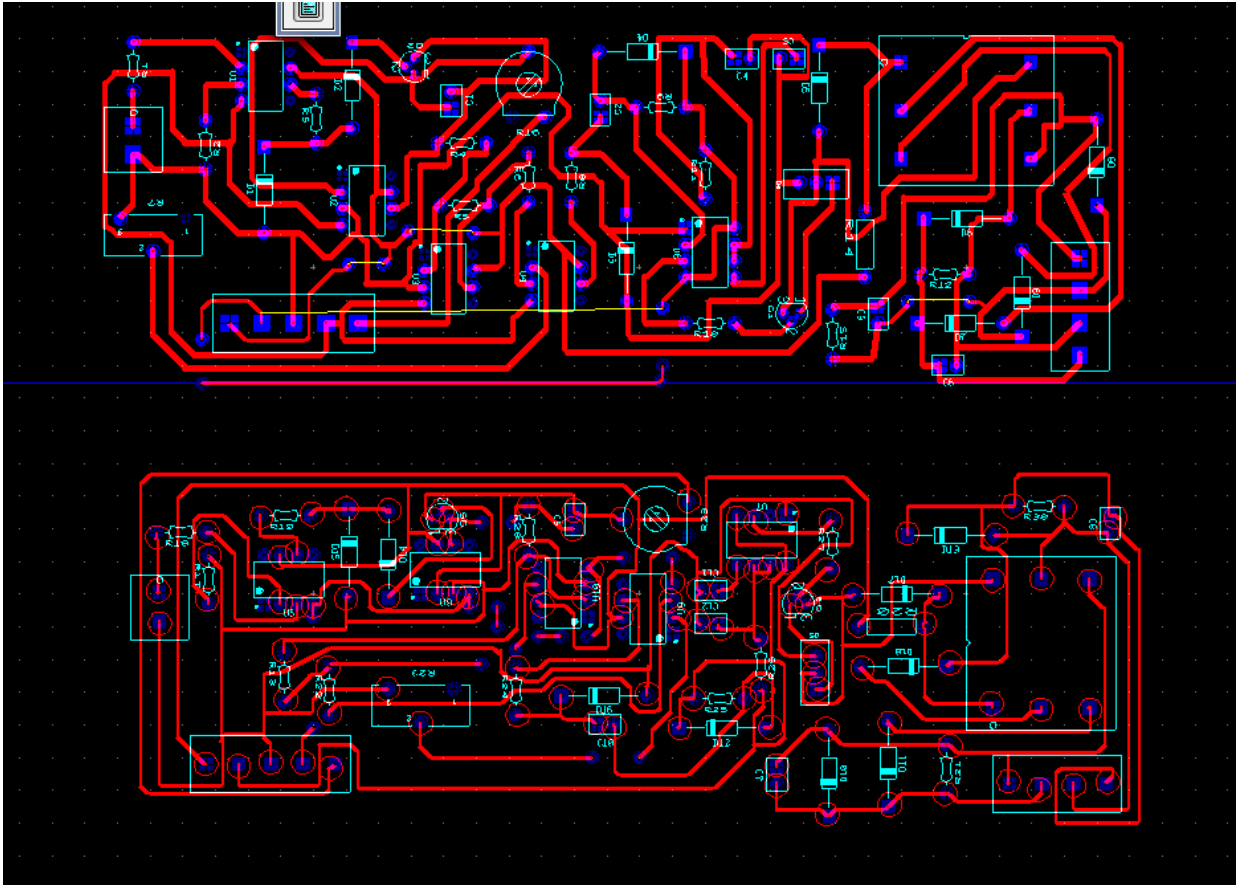


3D πλακέτας



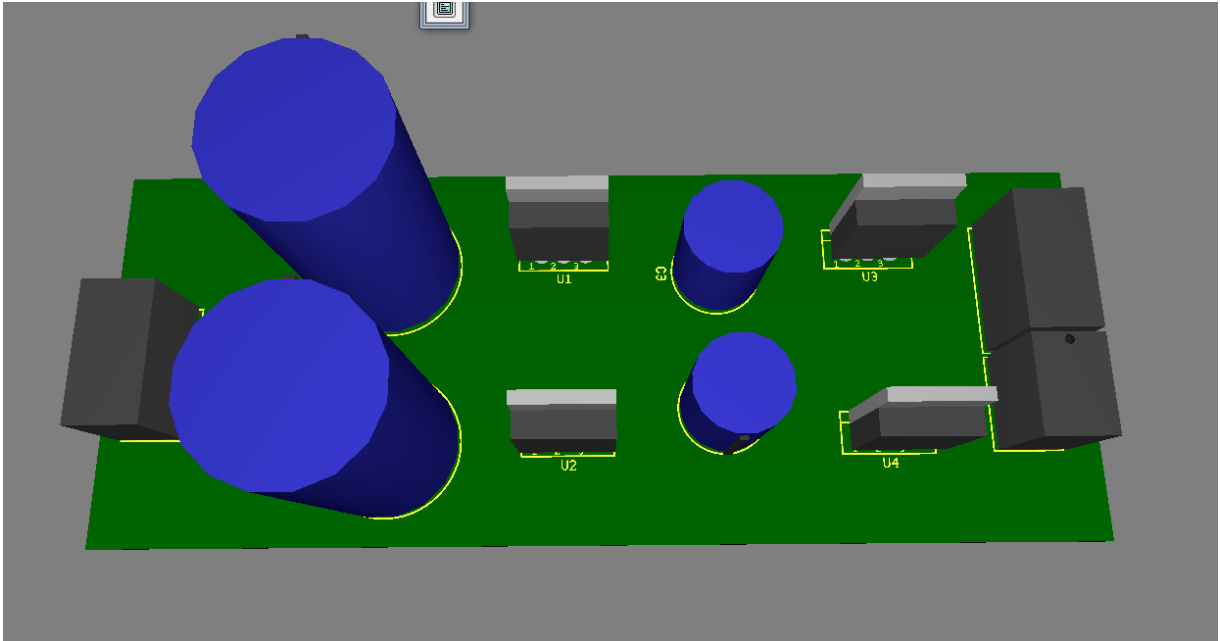




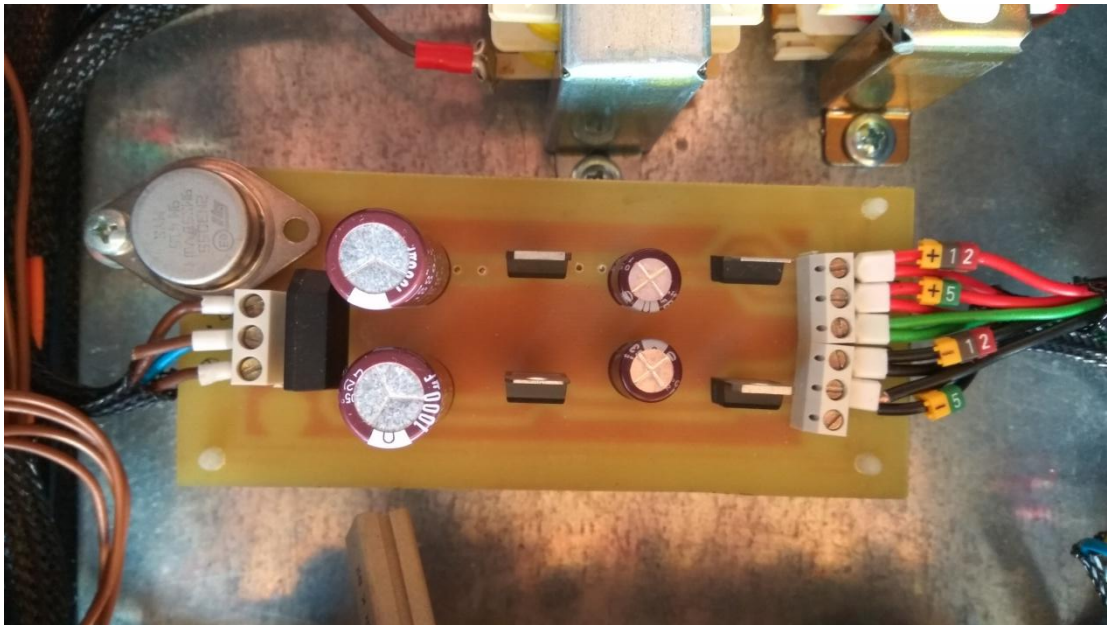






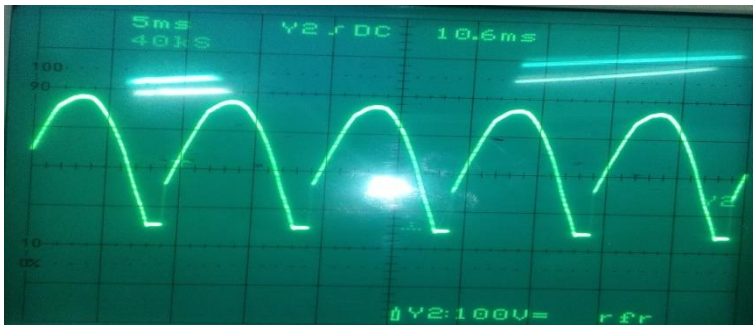


3D πλακέτας

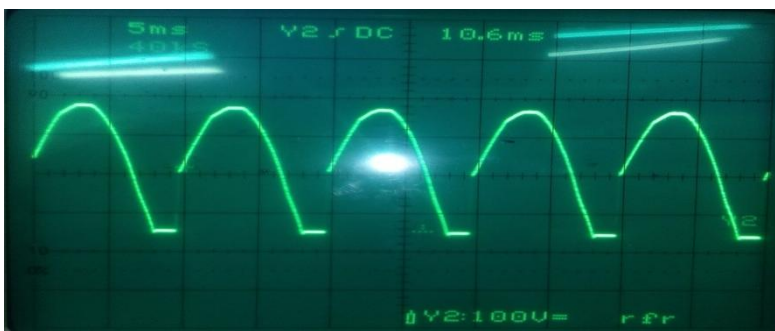


## 4.8 Φωτογραφίες πειραματικού μέρους

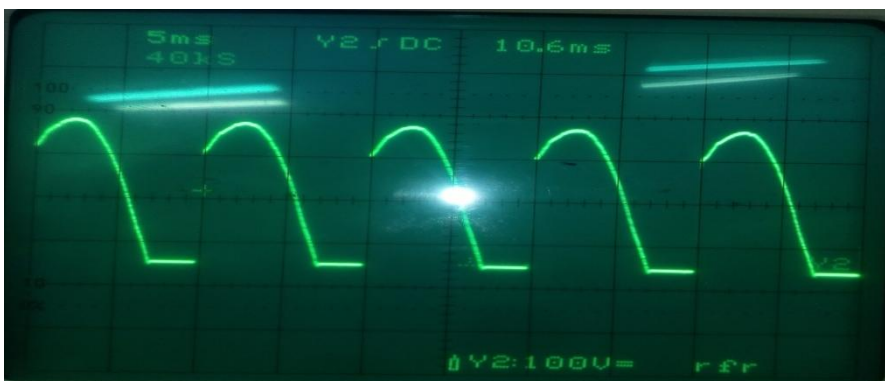
$A=18^\circ$



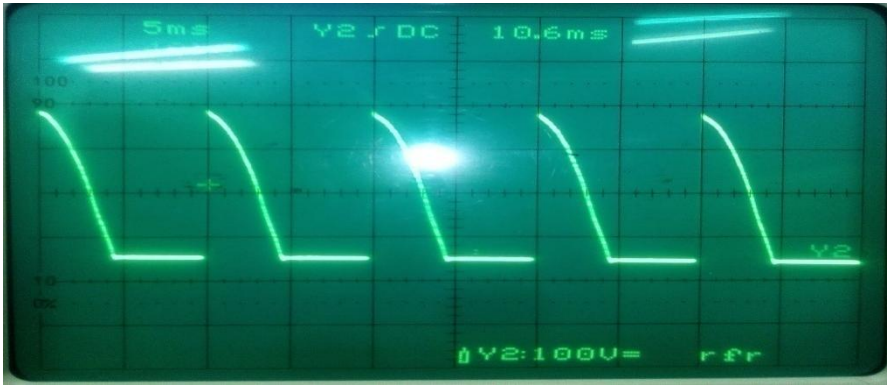
$A=36^\circ$



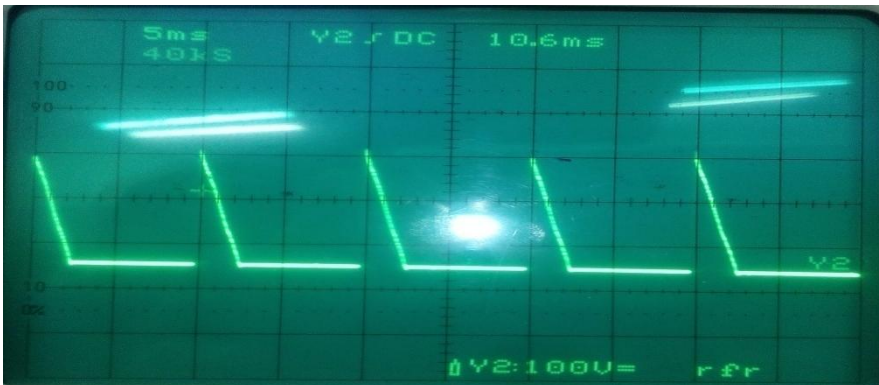
$A=72^\circ$



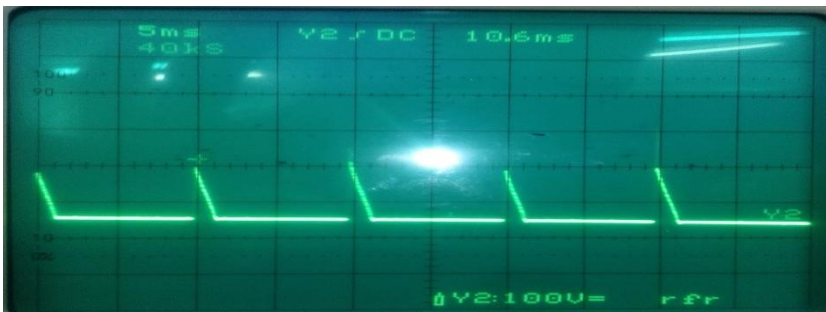
$A=90^\circ$



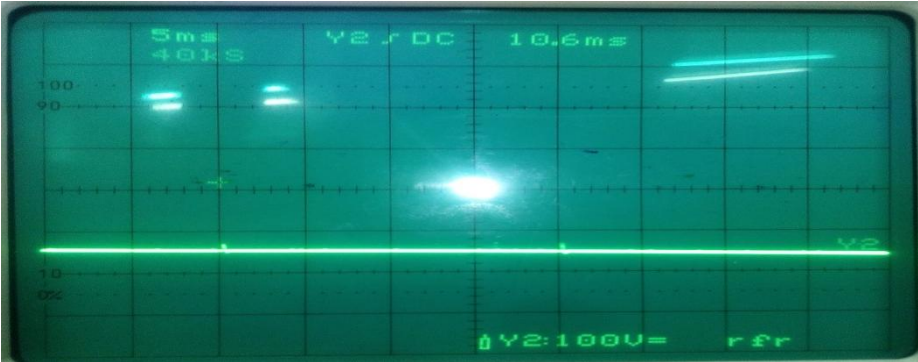
$A=126^\circ$



$A=154^\circ$



A = 180°



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1) Εργαστηριακές ασκήσεις ηλεκτρονικών ισχύος Π.Β. Μαλατέστας, Η.ΑΘ. Βυλλιώτης Εκδόσεις Τζιόλα
- 2) Ηλεκτρονική Albert Malvino David J. Bates Εκδόσεις 7<sup>η</sup> Τζιόλα
- 3) Ηλεκτρονικά Ισχύος Στέφανος Ν. Μανιάς Εκδόσεις Συμεών
- 4) Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρικής Κίνησης, Παντελής Β. Μαλατέστας – Ηρακλής Αθ. Βυλλιώτης, Εκδόσεις Τζιόλα
- 5) Βικιπαίδεια