



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ**  
**ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ**  
**ΕΞΥΠΝΟΥ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΑ**

**ΣΙΕΜΠΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, ΑΜ: 6595**  
**ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ, ΑΜ: 6626**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΡ.ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΓΕΩΡΓΑΚΑΣ**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εργασία αυτή έχει ως στόχο τη μελέτη και την κατασκευή ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος για την τροφοδοσία ενός έξυπνου θερμοσίφωνα. Πιο συγκεκριμένα μιας μη ελεγχόμενης ανορθωτικής γέφυρας με τρανζίστορ IGBT στην DC πλευρά. Η παλμοδότηση και ο έλεγχος του μετατροπέα πραγματοποιείται με την βοήθεια ενός μικροελεγκτή DSP. Η μελέτη εστίασε σε στόχους όπως την εμβάθυνση της γνώσης σχετικά με τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος και την τοπολογία αυτών. Ο προγραμματισμός του DSP πραγματοποιήθηκε μέσω της ταχείας προτυποποίησης με την βοήθεια του προγράμματος - MatlabSimulink στο οποίο δεν χρειάζεται να γραφτεί κώδικας διότι ο προγραμματισμός γίνεται μέσω έτοιμων «blocks».

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κύριο Κωνσταντίνο Πέτρου που κατασκεύασε την πλακέτα ισχύος, τον εποπτεύοντα καθηγητή Δρ. Κωνσταντίνο Γεωργάκα καθώς και της οικογένειες μας για την στήριξη κατά τη διάρκεια των σπουδών μας. Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφιερώνεται στην μνήμη του πιο πιστού μας φίλου Ηλία.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας περιλαμβάνεται η μελέτη και η κατασκευή ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκε μια ανορθωτική μονοφασική ημieleγχόμενη διάταξη η οποία έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτεί όλων των τύπων τα φορτία (παθητικό ωμικό, παθητικό ωμικό με πηνίο εξομάλυνσης και ηλεκτρική μηχανή). Ο μετατροπέας αυτός θα χρησιμοποιηθεί μελλοντικά στην τροφοδοσία ηλεκτρικού θερμοσίφωνα έτσι ώστε να πραγματοποιεί έλεγχο της ισχύος του και της ποιότητας της τάσης μικροδικτύου. Για το λόγο αυτό στις δοκιμές του μετατροπέα η παλμοδότηση πραγματοποιήθηκε με τον μικροελεγκτή dspro οποίος περιλαμβάνεται στο τελικό κύκλωμα του μετατροπέα. Αυτός είναι ένας μικροελεγκτής με μεγάλες δυνατότητες, δηλαδή πληθώρα εισόδων – εξόδων , PWMmodules κ.λ.π. κι επίσης μεγάλη επεξεργαστική ισχύ. Κατασκευάστηκε πλακέτα η οποία περιέχει τα απαραίτητα κυκλώματα για την λειτουργία ισχύος και παλμοδότησης των ημιαγωγικών διακοπτικών στοιχείων ισχύος (IGBT`s). Μετά την κατασκευή πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του μετατροπέα βάσει της θεωρητικής προσέγγισης.

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρονικών Ισχύος & Βιομηχανικών Ηλεκτρονικών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και στο εργαστήριο Συστημάτων Ισχύος , Ανανεώσιμης και Κατανεμημένης Παραγωγής του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	iii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	ix
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	ix
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος .....	1
1.2 Είδος φορτίου .....	2
1.3 Παλμοδότηση .....	2
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ.....	4
2.1 Τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος <sup>[3]</sup> .....	4
2.2 Επιθυμητά χαρακτηριστικά ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος <sup>[3]</sup> .....	5
2.3 IGBT <sup>[3]</sup> .....	5
2.3.1 Εφαρμογές των IGBT <sup>[3]</sup> .....	10
2.4 Δίοδοι ισχύος <sup>[3]</sup> .....	10
2.4.1 Εφαρμογές των διόδων ισχύος <sup>[3]</sup> .....	12
2.4.2 Κατηγοριοποίηση των διόδων ισχύος <sup>[3]</sup> .....	12
2.5 Πυκνωτής <sup>[4]</sup> .....	14
2.5.1 Ορισμός <sup>[4]</sup> .....	14
2.5.2 Μονάδα μέτρησης του πυκνωτή <sup>[4]</sup> .....	14
2.5.3 Εφαρμογές πυκνωτή <sup>[4]</sup> .....	14
2.5.4 Συνδεσμολογία πυκνωτών <sup>[4]</sup> .....	15
2.5.5 Συμπεριφορά πυκνωτή στο συνεχές και στο εναλλασσόμενο <sup>[4]</sup> .....	16

2.5.6	Πυκνωτής σύζευξης <sup>[4]</sup> .....	17
2.5.7	Πυκνωτής εξομάλυνσης <sup>[4]</sup> .....	18
2.5.8	Οι πιο κοινοί τύποι πυκνωτών στη πράξη <sup>[4]</sup> .....	20
2.6	Ανορθωτικές διατάξεις – Τροφοδοτικά <sup>[5]</sup> .....	22
2.6.1	Γενικά <sup>[5]</sup> .....	22
2.6.2	Τύποι ανορθωτικών διατάξεων <sup>[5]</sup> .....	25
2.6.3	Εξομάλυνση και φίλτρα <sup>[5]</sup> .....	32
2.6.4	Φίλτρο L-C <sup>[5]</sup> .....	33
2.7	Ψηφιακή επεξεργασία σήματος <sup>[6]</sup> .....	34
2.7.1	Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό <sup>[6]</sup> .....	36
2.8	Επεξεργαστές ψηφιακού σήματος (DSP) <sup>[7]</sup> .....	38
2.9	PWM διαμόρφωση <sup>[2]</sup> .....	40
2.10	Τεχνική παλμοδότησης PWM – PulseWidthModulation (διαμόρφωση εύρους παλμών). <sup>[2]</sup> .....	41
2.11	ΟΨηφιακός επεξεργαστής σήματος (DSP) .....	42
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Ο ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΙΣΧΥΟΣΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	43
3.1	Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος .....	43
3.2	Είδος φορτίου .....	46
3.3	Παλμοδότηση <sup>[10]</sup> .....	47
3.3.1	Μονοπαλμική διαμόρφωση PWM <sup>[10]</sup> .....	47
3.3.2	Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμού (SPWM) <sup>[10]</sup> .....	48
3.3.3	Προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης <sup>[10]</sup> .....	49
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	50
4.1	Εξομοίωση .....	50
4.2	Συστήματα προσομοίωσης .....	50

4.2.1	Κυρίως σύστημα προγράμματος .....	50
4.2.2	Υποσύστημα ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος.....	51
4.2.3	Υποσύστημα υπολογισμού της ενεργού τιμής της τάσης.	52
4.2.4	Υποσύστημα ανάγνωσης της ηλεκτρικής συχνότητας	53
4.2.5	Υποσύστημα ελέγχου τάσης.....	56
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ .....	60
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΠΡΑΓΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	73
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	75

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1	Σύντομη ιστορική αναδρομή <sup>[3]</sup> .....	4
Εικόνα 2-2	Κυκλωματικά σύμβολα ενός MOSFET Ισχύος <sup>31</sup> .....	6
Εικόνα 2-3	Δομή ενός IGBT <sup>[3]</sup> .....	7
Εικόνα 2-4	Ισοδύναμο κύκλωμα ενός IGBT <sup>[3]</sup> .....	7
Εικόνα 2-5	Τυπική στατική χαρακτηριστική ενός IGBT <sup>[3]</sup> .....	9
Εικόνα 2-6	Δομή μιας διόδου ισχύος <sup>[3]</sup> .....	11
Εικόνα 2-7	Τυπική στατική χαρακτηριστική διόδου ισχύος (αριστερά) και Ιδανική στατική χαρακτηριστική διόδου ισχύος (δεξιά) <sup>[3]</sup> .....	11
Εικόνα 2-8	Κυκλωματικό σύμβολο μιας διόδου <sup>[3]</sup> .....	12
Εικόνα 2-9	Το φαινόμενο της ανάστροφης ανάκτησης <sup>[3]</sup> .....	13
Εικόνα 2-10	Πυκνωτές Μίκας <sup>[4]</sup> .....	20

Εικόνα 2-11	Κεραμικός πύκνωτής <sup>[4]</sup> .....	21
Εικόνα 2-12	Πυκνωτής αέρα <sup>[4]</sup> .....	21
Εικόνα 2-13	Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής <sup>[4]</sup> .....	22
Εικόνα 2-14	Οι βαθμίδες από τις οποίες αποτελείται ένα τροφοδοτικό. <sup>[5]</sup> .....	23
Εικόνα 2-15	Κυμάτωση στην τάση εξόδου της ανορθωτικής διάταξης <sup>[5]</sup> .....	24
Εικόνα 2-16	Βασικό κύκλωμα της απλής ανόρθωσης <sup>[5]</sup> .....	26
Εικόνα 2-17	Βασικό κύκλωμα ανορθωτικής διάταξης πλήρους κύματος με ΜΣ με μεσαία λήψη <sup>[5]</sup> .....	29
Εικόνα 2-18	Βασικό κύκλωμα ανορθωτικής διάταξης πλήρους κύματος με γέφυρα <sup>[5]</sup> .....	32
Εικόνα 2-19	Ανορθωτική διάταξη με φίλτρο για περαιτέρω μείωση της κυμάτωσης <sup>[5]</sup> .....	32
Εικόνα 2-20	Αν μεγαλώσει το ρεύμα που τραβάει το φορτίο εκφορτίζεται πιο γρήγορα ο πυκνωτής και μεγαλώνει η κυμάτωση <sup>[5]</sup> .....	33
Εικόνα 2-21	Φίλτρο εξομάλυνσης με Πηνίο και Πυκνωτή <sup>[5]</sup> .....	34
Εικόνα 2-22	Βασικά τμήματα ενός μετατροπέα αναλογικού–σε–ψηφιακό <sup>[6]</sup> .....	36
Εικόνα 2-23	Δειγματοληψία αναλογικού σήματος <sup>[6]</sup> .....	37
Εικόνα 2-24	Κβάντιση και κωδικοποίηση αναλογικού σήματος <sup>[6]</sup> . .....	38
Εικόνα 2-25	DSP σε μια συσκευή αναπαραγωγής ήχου MP3 <sup>[7]</sup> .39	
Εικόνα 5-1	(α) Η ανορθωτική γέφυρα πλήρους ανόρθωσης με τη χρήση τεσσάρων διόδων και (β) το IGBT στην έξοδο της γέφυρας (φαίνεται λίγο και η δίοδος ελεύθερης διέλευσης). .....	60
Εικόνα 5-2	Η πλακέτα ισχύος με το κύκλωμα παλμοδότησης και τους αισθητήρες AC τάσης και ρεύματος. ....	61

Εικόνα 5-3	Η πειραματική διάταξη .....	62
Εικόνα 5-4	Παλμογράφηση τάσης συλλέκτη-εκπομπού IGBT για λόγο κατάρτησης 3/4 .....	62
Εικόνα 5-5	Τάση συλλέκτη – εκπομπού IGBT για λόγο κατάρτησης 3/4. Στην παρούσα φάση δεν υπάρχει πυκνωτής στην είσοδο της ανορθωτικής γέφυρας με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανεπιθύμητες αιχμές της τάσης στα άκρα του IGBT κατά τη σβέση.....	63
Εικόνα 5-6	Παλμογράφηση τάσης συλλέκτη-εκπομπού IGBT για λόγο κατάρτησης 1/2 .....	64
Εικόνα 5-7	Τάση συλλέκτη – εκπομπού IGBT για λόγο κατάρτησης 1/2 με μεγέθυνση της κλίμακας του χρόνου. ....	64
Εικόνα 5-8	Δοκιμή με τροφοδοτικό DC.....	65
Εικόνα 5-9	Τάση συλλέκτη – εκπομπού του IGBT (μπλε) και τάση ανόδου καθόδου της διόδου (κίτρινο) για τάση εισόδου 100 V. Duty cycle 1/4 .....	66
Εικόνα 5-10	Τάση συλλέκτη – εκπομπού του IGBT και τάση ανόδου καθόδου της διόδου για τάση εισόδου 200 V. Dutycycle 1/4. ....	66
Εικόνα 5-11	Το τροφοδοτικό DC τάσης για τάση εισόδου 200 V .....	67
Εικόνα 5-12	Τάση συλλέκτη – εκπομπού του IGBT και τάση ανόδου καθόδου της διόδου για τάση εισόδου 309 V. Dutycycle 1/4. ....	67
Εικόνα 5-13	Το τροφοδοτικό DC τάσης για τάση εισόδου 309V	68
Εικόνα 5-14	Η πειραματική διάταξη με AC τροφοδοτικό (140 Vrms). ....	69
Εικόνα 5-15	Μεγέθυνση της εικόνας του σχήματος 5-14 η οποία παρουσιάζει την τάση IGBT (κίτρινο) και την τάση της διόδου ελεύθερης διέλευσης (μπλε). ....	69



Εικόνα 5-16	Μεγέθυνση της εικόνας του σχήματος 5-15 .....	70
Εικόνα 5-17	Μεγέθυνση της κλίμακας του χρόνου του σχήματος 5-16. ....	70
Εικόνα 5-18	Τάση εισόδου 235 Vrms και ρεύμα 1,66 A για φορτίο 100Ω .....	71
Εικόνα 5-19	Μεγεθυμένη η εικόνα του σχήματος 5-18.....	72

## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

Διάγραμμα 3-1	Γενική δομή συστήματος με μετατροπείς ισχύος . .....	45
Διάγραμμα 3-2	Παραδείγματα πηγών ισχύος και φορτίων .....	46

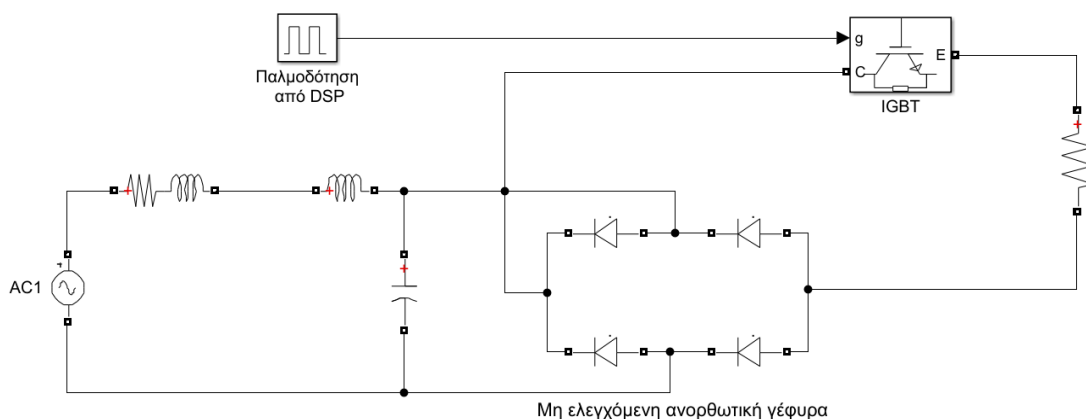
## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

Σχήμα 2-1	Το σύμβολο του πυκνωτή .....	14
Σχήμα 2-2	Εν σειρά συνδεσμολογία .....	15
Σχήμα 2-3	Συνδεσμολογία εν παραλλήλω .....	15
Σχήμα 2-4	Συμβολισμός μεταβλητού πυκνωτή .....	16
Σχήμα 2-5	Πυκνωτής σύζευξης .....	18
Σχήμα 2-6	Κύκλωμα με πυκνωτή εξομάλυνσης παράλληλα στην έξοδο του φορτίου .....	19
Σχήμα 2-7	Εξομαλυμένη έξοδος με τη βοήθεια πυκνωτή.....	20
Σχήμα 2-8	Δημιουργία παλμών στην PWM για DC συνιστώσα α) 0,5 και β) 0,8. ....	41
Σχήμα 3-1	Η τοπολογία της ανορθωτικής διάταξης .....	43

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας κατασκευάστηκε ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος κατάλληλος για την τροφοδοσία ηλεκτρικού θερμοσίφωνα. Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από μια μονοφασική μη ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα στην έξοδο της οποίας είναι τοποθετημένο ένα τρανζίστορ IGBT. Ο έλεγχος της τάσης στην DC πλευρά πραγματοποιείται με την κατάλληλη παλμοδότηση του IGBT από έναν μικροελεγκτή DSP. Η τοπολογία του μετατροπέα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 1-1 Η τοπολογία της ανορθωτικής διάταξης σε περιβάλλον Simulink/Matlab**

Όπως φαίνεται από το σχήμα η ανορθωτική διάταξη αποτελείται από τέσσερις διόδους. Στην είσοδο τροφοδοτείται από ένα AC δίκτυο τάσης  $V_0=230 \times \sqrt{2}V$ , 50Hz. Η τάση αυτή ανορθώνεται από μία γέφυρα μη ελεγχόμενη, η οποία συνδέεται σε σειρά με ένα τρανζίστορ ισχύος IGBT. Με την παλμοδότηση του IGBT ελέγχεται η ισχύς του φορτίου και συγχρόνως είναι δυνατόν, με την κατάλληλη παλμοδότηση να βελτιωθεί η ποιότητα ισχύος. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτρονικών διακοπικών στοιχείων ισχύος τα οποία μας παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου και τα οποία παρουσιάζουν κάποιες διαφορές. Όσον αφορά την τοποθέτηση θυρίστορ αντί του διπολικού τρανζίστορ μονωμένης πύλης IGBT θα αντιμετωπίζαμε πρόβλημα τόσο με τη σβέση του θυρίστορ όσο

και με τη διακοπτική συχνότητα. Ησβέση του θυρίστορ επέρχεται με τη φυσική μείωση του ρεύματος κάτω από μια οριακή τιμή (ρεύμα συγκράτησης) ή πολικότητα της ανόδου να γίνει αρνητική σε σχέση με της καθόδου. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ανάστροφης τάσης<sup>[1]</sup>. Στην περίπτωση μας με την χρησιμοποίηση του τρανζίστορ ισχύος αντί του θυρίστορ δεν χρειαζόμαστε κύκλωμα σβέσης, καθώς η σβέση ελέγχεται από το κύκλωμα παλμοδότησης. Επίσης, είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος εξαναγκασμένης σβέσης που λειτουργεί σε υψηλή διακοπτική συχνότητα. Τέλος, άλλα κριτήρια επιλογής ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος αποτελούν, η τιμή της ισχύος, οι διακοπτικές απώλειες, η τάση συλλέκτη εκπομπού, κ.α.

## 1.2 Είδος φορτίου

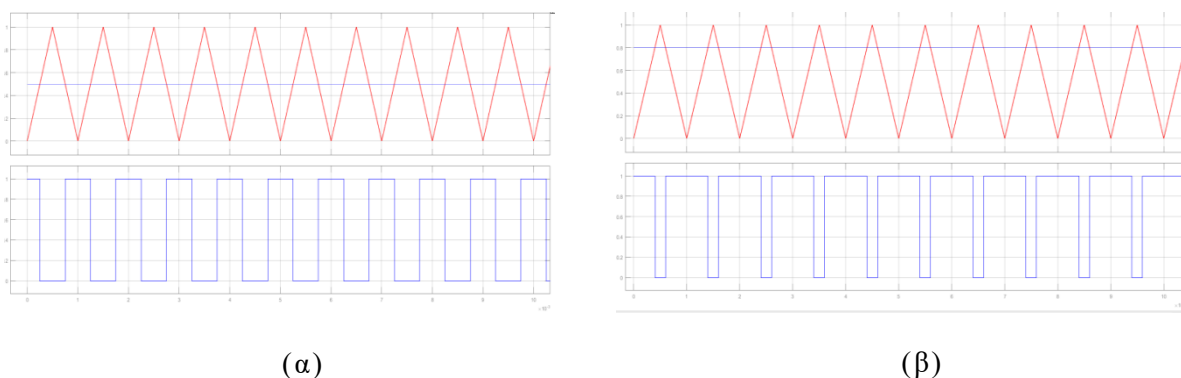
Ως φορτίο χρησιμοποιείται μια ωμική αντίσταση της τάξης των 4 kW παρόμοια με την αντίσταση ενός ηλεκτρικού θεμοσίφωνα. Αυτό σε ένα δίκτυο διανομής έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα του φορτίου να επηρεάζει την τάση του δικτύου. Έτσι, αυξάνοντας το ρεύμα του φορτίου μειώνεται η τάση του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό επεμβαίνοντας στο φορτίο την κατάλληλη χρονική στιγμή με την κατάλληλη τιμή ισχύος, επιτυγχάνεται η επιθυμητή τάση δικτύου. Επίσης, εισάγοντας ανώτερες αρμονικές στο ρεύμα, εισάγονται ανώτερες αρμονικές στην τάση του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να βελτιωθεί η ποιότητα της τάσης δικτύου.

Η λειτουργία του μετατροπέα δοκιμάστηκε θεωρητικά μέσω εξομοίωσης, ύστερα κατασκευάστηκε και τέλος δοκιμάστηκε εργαστηριακά η λειτουργία του.

## 1.3 Παλμοδότηση

Η παλμοδότηση που χρησιμοποιείται είναι τύπου PWM. Η εργασία αυτή έχει στόχο την κατασκευή και λειτουργία του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος και την απόδειξη ότι μέσω του μετατροπέα αυτού μπορεί να επηρεαστεί η τάση του δικτύου. Δηλαδή, δεν πραγματεύεται τον έλεγχο και την κατάλληλη τεχνική παλμοδότησης για την ποιότητα της τάσης. Όμως, η τεχνική παλμοδότησης που χρησιμοποιείται είναι ίδιου τύπου και συχνότητας με αυτή που θα χρησιμοποιηθεί στο μέλλον. Αυτή είναι η PWM με συχνότητα στην

περιοχή των 10 kHz. Οι παλμοί λαμβάνονται από τον μικροελεγκτή DSP και το duty cycle μεταβάλλεται προγραμματιστικά και ποσοστιαία. Έτσι, με μικρό duty cycle λαμβάνουμε μικρό ρεύμα και μικρή πτώση τάσης. Σ' αυτή την παλμοδότηση οι παλμοί λαμβάνονται από τη σύγκριση ενός τριγωνικού σήματος κάποιας συχνότητας με ένα DC σήμα. Από τη σύγκριση αυτή λαμβάνονται παλμοί σταθερού πλάτους και συχνότητας ίσης με του τριγωνικού σήματος. Το πλάτος του DC σήματος μεταβάλλεται από μηδέν ως το πλάτος του τριγωνικού σήματος, αυξομειώνοντας το πλάτος των παλμών<sup>[2]</sup>. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, στόχος της εργασίας αυτής είναι η κατασκευή του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Συγκεκριμένα η κατασκευή και η δοκιμή λειτουργίας του. Ως παράδειγμα αναφέρεται η μείωση των υπερτάσεων που συνήθως εμφανίζονται κατά τη διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα και δεν του επιτρέπουν να λειτουργήσει σωστά. Για λόγους όπως ο παραπάνω η λειτουργία του μετατροπέα δοκιμάστηκε θεωρητικά μέσω εξομοίωσης, ύστερα κατασκευάστηκε και τέλος δοκιμάστηκε εργαστηριακά. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διαδικασία δημιουργίας της παλμοδότησης Pulsewidth modulation, με τη σύγκριση ενός τριγωνικού σήματος και μιας σταθερής τάσης (DC).



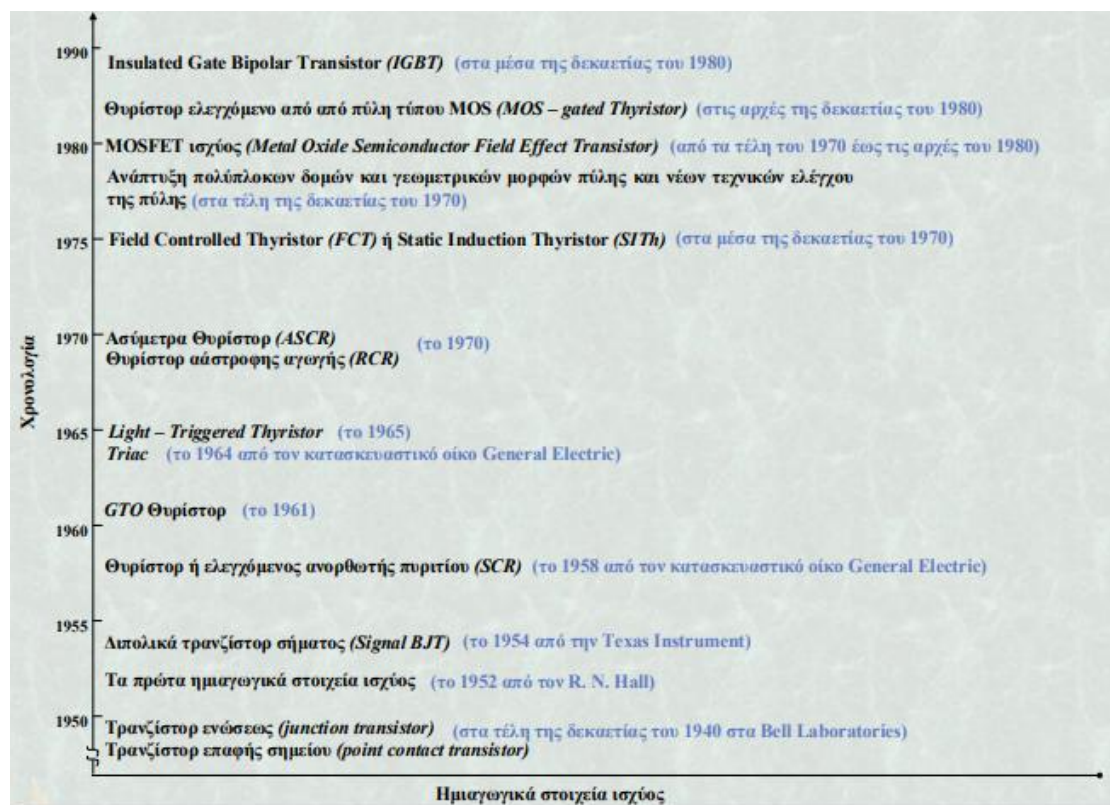
**Σχήμα 1-2 Δημιουργία παλμών στην PWM για DC συνιστώσα α) 0,5 και β) 0,8.[2]**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

### 2.1 Τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος<sup>[3]</sup>

Τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο για κάθε ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος. Παράγοντες που καθορίζουν τις εξελίξεις στον τομέα των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος:

- Η μείωση του κόστους παραγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος.
- Η βελτίωση των χαρακτηριστικών και η αύξηση των δυνατοτήτων και της απόδοσης των ήδη γνωστών στοιχείων ισχύος (δίοδοι, θυρίστορ, GTO, BJT, MOSFET κλπ).
- Η εισαγωγή νέων στοιχείων ισχύος (IGBT, SIT, SITh, MCT κλπ) με εξαιρετικές επιδόσεις και σχετικά χαμηλό κόστος.



Εικόνα 2-1 Σύντομη ιστορική αναδρομή<sup>[3]</sup>

## 2.2 Επιθυμητά χαρακτηριστικά ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος<sup>[3]</sup>

Η δομή των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους είναι πολυπλοκότερα από αυτά των αντίστοιχων στοιχείων χαμηλής ισχύος. Τα ιδιαίτερα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, που απαιτείται να διαθέτουν τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος, είναι:

- Οι υψηλές τάσεις διάσπασης
- Η ικανότητα διέλευσης υψηλών τιμών ρεύματος
- Οι μικρές πτώσεις τάσης σε κατάσταση αγωγής
- Οι χαμηλές αντιστάσεις αγωγής
- Οι μικρές τιμές του ρεύματος διαρροής
- Οι μικροί διακοπτικοί χρόνοι κατά την έναυση και τη σβέση

Στα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά θα πρέπει να προστεθούν:

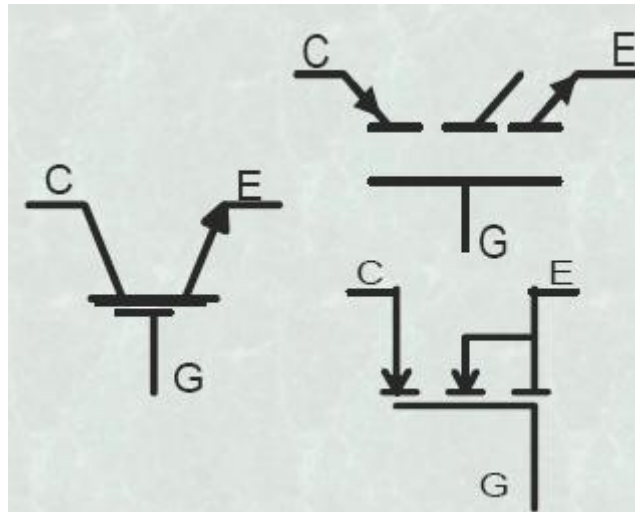
- η ικανότητα αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες και ακτινοβολίες
- οι χαμηλές απαιτήσεις ισχύος στο κύκλωμα ελέγχου (για τα ελεγχόμενα στοιχεία ισχύος)
- ο υψηλός μέσος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών καταστροφών του στοιχείου (MTBF Mean Time Between Failures), που επιδρά στην αξιοπιστία της συσκευής
- και το χαμηλότερο δυνατό κόστος

Στην πράξη δεν υπάρχει στοιχείο που να διαθέτει ταυτόχρονα όλες τις παραπάνω δυνατότητες. Γίνεται κατάλληλη επιλογή του στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με την εφαρμογή. Δηλαδή, τις επιθυμητές προδιαγραφές, την απόδοση, τον όγκο και το βάρος της συσκευής, το κόστος, τη διαθεσιμότητα των στοιχείων κλπ

## 2.3 IGBT<sup>[3]</sup>

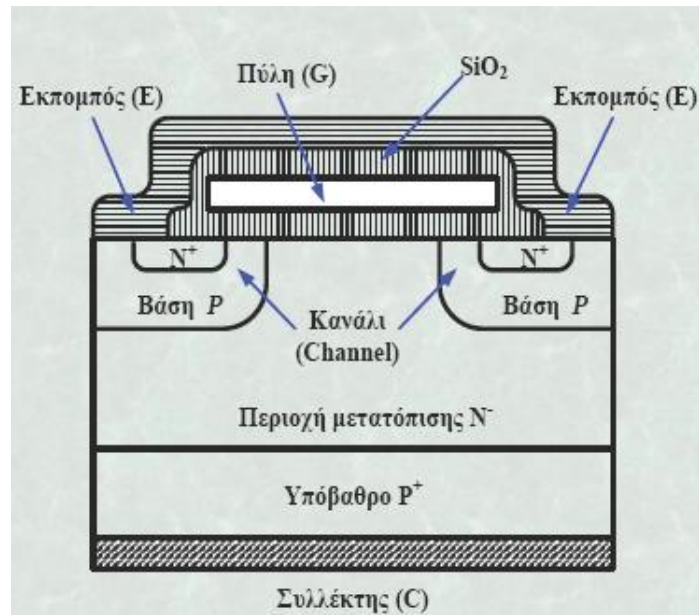
Το διπολικό τρανζίστορ ισχύος με απομονωμένη πύλη (InsulatedGateBipolarTransistor, IGBT), συνδυάζει τα χαρακτηριστικά ενός MOSFET και ενός BJT Ισχύος. Έχει τρεις ακροδέκτες: το συλλέκτη (collector), τον εκπομπό (emitter) και την πύλη (gate) Η δομή του είναι παρόμοια με αυτή του MOSFET ισχύος. Διαφορά στη δομή: η περιοχή του

υποστρώματος N<sup>+</sup> , που έρχεται σε επαφή με τον ακροδέκτη του συλλέκτη, έχει αντικατασταθεί από μια στρώση P<sup>+</sup>. Παρουσιάζει υψηλή εμπέδηση εισόδου, όπως το MOSFET ισχύος, αλλά τα χαρακτηριστικά αγωγής του μοιάζουν με αυτά ενός BJT ισχύος.



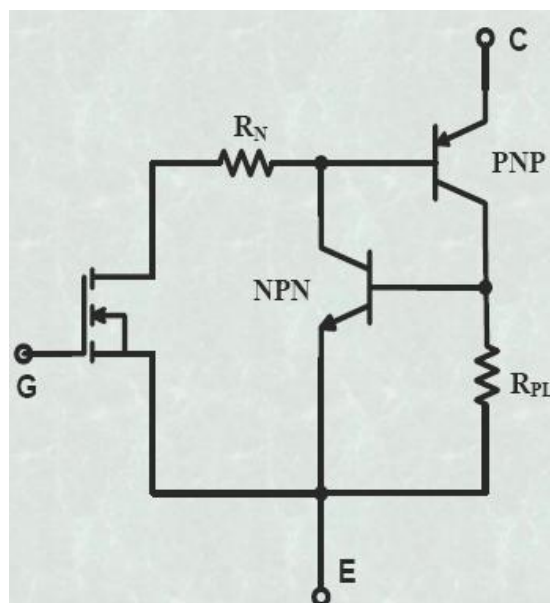
**Εικόνα 2-2 Κυκλωματικά σύμβολα ενός MOSFET Ισχύος<sup>31</sup>**

Όταν η πύλη πολωθεί θετικά σε σχέση με τον εκπομπό, επάγεται ένα κανάλι τύπου-N στην επιφάνεια της περιοχής βάσης. Το κανάλι αυτό πολώνει ορθά την επαφή βάσης-εκπομπού του PNP τρανζίστορ και το καθιστά αγώγιμο. Δημιουργείται λοιπόν μια σύνδεση μεταξύ της περιοχής του εκπομπού N<sup>+</sup> και της περιοχής μετατόπισης Nόπως και στα MOSFET ισχύος. Η θετική πόλωση του συλλέκτη προκαλεί έγχυση μεγάλου αριθμού φορέων μειονότητας από την περιοχή του υποστρώματος P<sup>+</sup> προς την περιοχή μετατόπισης N-, διαμορφώνοντας την αγωγιμότητάς της. Η πτώση τάσης κατά την αγωγή είναι πολύ μικρότερη από αυτή ενός MOSFET ισχύος.



**Εικόνα 2-3 Δομή ενός IGBT<sup>[3]</sup>**

Η αντικατάσταση του υποστρώματος  $N^+$ , ενός MOSFET ισχύος, από μια στρώση  $P^+$ , οδηγεί σε μια δομή τεσσάρων στρώσεων  $P^+NPN^+$ , παρόμοια με αυτή ενός thyristor. Όταν το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση  $R_{PL}$  (Εικόνα 2-4) ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή, προκαλείται σκανδαλισμός του thyristor, οπότε δημιουργείται μια μόνιμη αγωγή ρεύματος μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού του στοιχείου και χάνεται ο έλεγχος του από την πύλη. Η  $R_{PL}$  εκφράζει την εγκάρσια αντίσταση της περιοχής βάσης  $P$ .



**Εικόνα 2-4 Ισοδύναμο κύκλωμα ενός IGBT<sup>[3]</sup>**



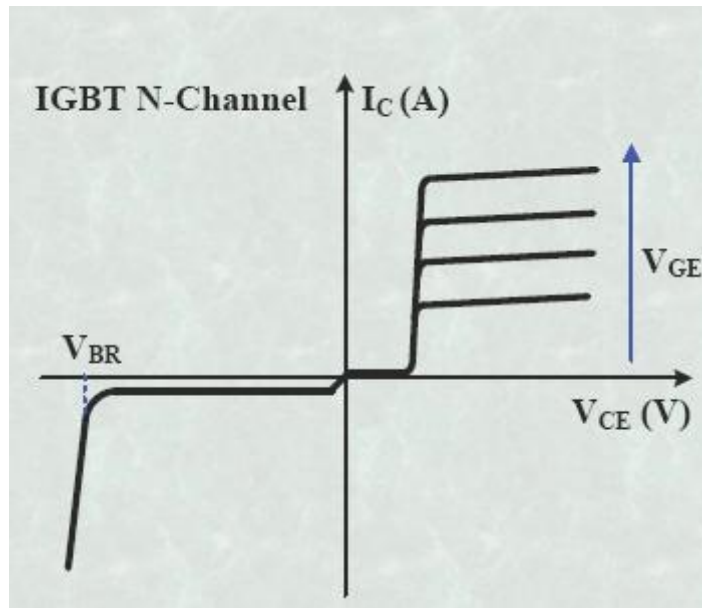
Η απενεργοποίηση του προαναφερθέντος θυρίστορ μπορεί να επιτευχθεί ως εξής:

- με μείωση του μεγέθους του εκπομπού
- με τη μεταβολή της γεωμετρικής μορφής και δομής της περιοχής του εκπομπού και την εφαρμογή πολυπλοκότερων γεωμετρικών μορφών
- με την εισαγωγή μιας περιοχής υψηλής νόθευσης  $P^+$  , στο κέντρο κάθε κυψέλης MOSFET, ώστε να μειωθεί η εγκάρσια αντίσταση της περιοχής βάσης  $P$ .

Η επικάλυψη της επιφάνειας της περιοχής βάσης  $P$  με την επιμετάλλωση του εκπομπού συνεισφέρει στο σκοπό αυτό. Επειδή το IGBT έχει ουσιαστικά τέσσερις ημιαγωγικές στρώσεις είναι ικανό να αποκόπτει συμμετρικά τόσο θετικές όσο και αρνητικές τάσεις (συμμετρικά IGBT). Η εισαγωγή μιας στρώσης υψηλής νόθευσης  $N^+$  , μεταξύ υποστρώματος  $P^+$  και της περιοχής μετατόπισης  $N^-$  , μειώνει την ικανότητα αποκοπής ανάστροφης τάσης (ασύμμετρα IGBT).

Η ροή ρεύματος οφείλεται στη ροή φορέων μειονότητας, οι οποίοι, κατά τη σβέση, επανασυνδέονται εντός της περιοχής μετατόπισης. Οι χρόνοι μετάβασης είναι μεγαλύτεροι από αυτούς των MOSFET ισχύος. Κατά τη σβέση παρατηρείται στην κυματομορφή του ρεύματος μια “ουρά”, παρόμοια με αυτή των BJT ισχύος. Σημαντική μείωση του χρόνου σβέσης επιτυγχάνεται ως εξής:

- με χρήση ειδικών τεχνικών ελέγχου του χρόνου ζωής των φορέων μειονότητας κατά τη διαδικασία κατασκευής του στοιχείου
- με εισαγωγή μιας στρώσης υψηλής νόθευσης  $N^+$  , μεταξύ του υποστρώματος  $P^+$  και της περιοχής μετατόπισης  $N^-$  .



**Εικόνα 2-5**Τυπική στατική χαρακτηριστική ενός IGBT<sup>[3]</sup>

Η αντίσταση αγωγής των IGBT μεταβάλλεται αργά με την τάση διάσπασης (λόγω της διαμόρφωσης της περιοχής μετατόπισης), οπότε δίνεται η δυνατότητα κατασκευής τέτοιων στοιχείων ισχύος με υψηλές αντοχές σε τάση. Για τιμές ρευμάτων που δεν απέχουν πολύ από τις ονομαστικές τιμές, η πτώση τάσης σε κατάσταση αγωγής αυξάνεται όσο αυξάνει η θερμοκρασία του πλακιδίου. Έτσι ο παραλληλισμός των IGBT πραγματοποιείται χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα μιας και δεν υπάρχει διαφορά στην τάση τους, οπότε δεν παρουσιάζονται εσωτερικά ρεύματα μεταξύ τους, λόγω διαφοράς δυναμικού. Για τιμές ρευμάτων που είναι πολύ μικρότερες από το ονομαστικό ρεύμα, η πτώση τάσης μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Ο πυκνωτής εισόδου των IGBT και ο λόγος των τιμών του πυκνωτή πύλης-εκπομπού προς τον πυκνωτή πύλης-συλλέκτη έχουν τιμές χαμηλότερες από αυτές των MOSFET ισχύος, με αποτέλεσμα το φαινόμενο Miller να μην είναι τόσο έντονο στα στοιχεία αυτά

Τα IGBT δεν εμφανίζουν το φαινόμενο δεύτερης κατάρρευσης και η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας τους είναι παρόμοια με αυτή των MOSFET ισχύος. Σε σχέση με τα BJT και τα MOSFET ισχύος, το IGBT προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές μέσης ισχύος και μέσης συχνότητας.

Τα IGBT χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, όπως μετατροπείς, όταν οι απαιτήσεις της συσκευής μεταγωγής δεν καλύπτονται πλήρως από τα διπολικά transistors ισχύος και τα MOSFET ισχύος. Υπάρχουν διαθέσιμα διπολικά transistors υψηλού ρεύματος και υψηλής τάσης, αλλά οι ταχύτητες μεταγωγής τους είναι αργές, ενώ τα MOSFET ισχύος μπορεί να έχουν υψηλότερες ταχύτητες μεταγωγής, αλλά οι συσκευές υψηλής τάσης και υψηλού ρεύματος είναι ακριβές και δύσκολο να επιτευχθούν. Αυτοί ήταν οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί IGBT στην παρούσα κατασκευή.

### 2.3.1 Εφαρμογές των IGBT<sup>[3]</sup>

Τα IGBT μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

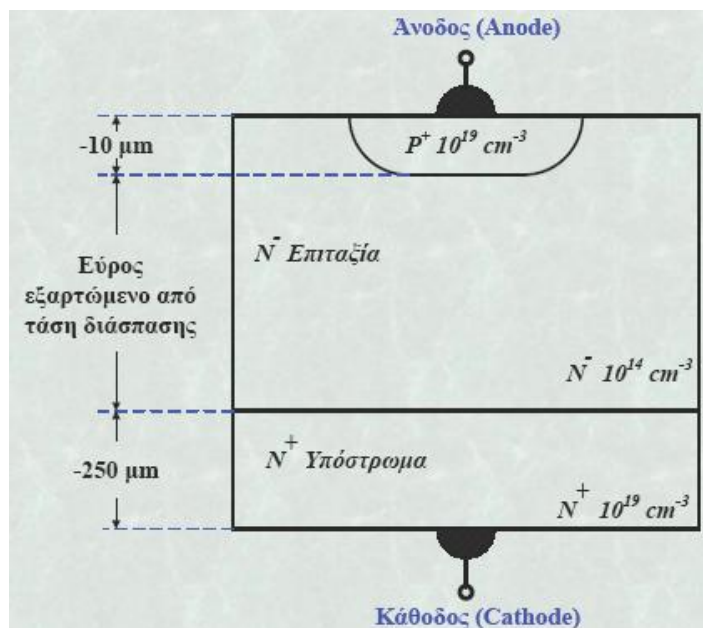
- ως διακόπτες ισχύος
- ως γραμμικοί ενισχυτές

Συνήθεις εφαρμογές τους είναι οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή και οι αντιστροφείς.

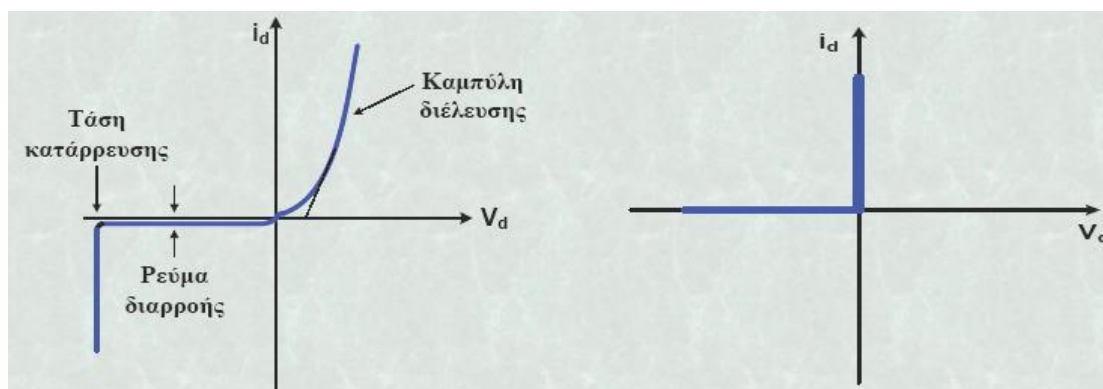
### 2.4 Δίοδοι ισχύος<sup>[3]</sup>

Η δίοδος είναι ένα μη ελεγχόμενο διακοπτικό στοιχείο. Η συμπεριφορά της εξαρτάται αποκλειστικά από την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της ή το ρεύμα που τη διαρρέει. Συνήθως, η δίοδος ισχύος κατασκευάζεται με βάση το πυρίτιο. Αποτελείται:

- από δύο ημιαγωγούς τύπου P+ και N+ , με υψηλό ποσοστό προσμίξεων
- από μια περιοχή τύπου N- , με χαμηλό ποσοστό προσμίξεων (επιταξία), η οποία βρίσκεται μεταξύ των δύο προαναφερθέντων ημιαγωγών

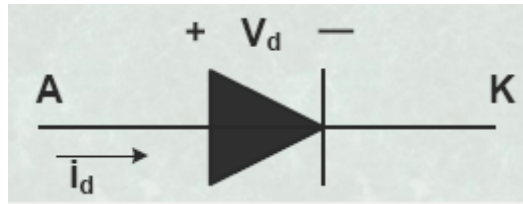


Εικόνα 2-6 Δομή μιας διόδου ισχύος<sup>[3]</sup>



Εικόνα 2-7 Τυπική στατική χαρακτηριστική διόδου ισχύος (αριστερά) και Ιδανική στατική χαρακτηριστική διόδου ισχύος (δεξιά)<sup>[3]</sup>

Η ημιαγωγική επαφή επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος προς μία κατεύθυνση. Άρα, η διόδος είναι ένας μη ελεγχόμενος ανορθωτής και για το λόγο αυτό αναφέρεται συχνά με αυτήν την ονομασία.



**Εικόνα 2-8 Κυκλωματικό σύμβολο μιας διόδου <sup>[3]</sup>**

### 2.4.1 Εφαρμογές των διόδων ισχύος<sup>[3]</sup>

- για ανόρθωση, σε διαφορετικές τοπολογίες ανορθωτικών διατάξεων
- ως δίοδοι ελεύθερης διέλευσης, όταν συνδέονται παράλληλα με το φορτίο, αλλά με ανάστροφη πολικότητα: για τη δημιουργία κυκλωματικού βρόχου ροής του ρεύματος, όταν διακόπτεται η αγωγή του/των ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος
- στα κυκλώματα προστασίας (snubbers) των ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος:
  - σε κυκλώματα προστασίας από υπερτάσεις ή υπερρεύματα
  - σε κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης ή της σβέσης ενός ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος.

### 2.4.2 Κατηγοριοποίηση των διόδων ισχύος<sup>[3]</sup>

Όταν η δίοδος ισχύος πολωθεί ορθά (έναυση-αγωγή) συμπεριφέρεται ως ιδανικός διακόπτης. Κατά τη σβέση της όμως παρουσιάζεται το φαινόμενο της ανάστροφης ανάκτησης (reverse recovery effect). Ανάλογα με την κλίση του ανάστροφου ρεύματος οι δίοδοι διακρίνονται σε:

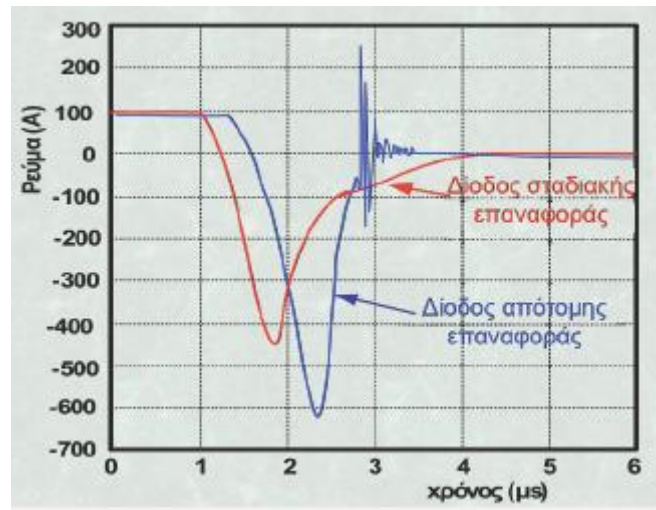
- Διόδους απότομης επαναφοράς (snap recovery diodes)

Αυτή η δίοδος παρέχει μέγιστη ταχύτητα μεταγωγής σε χαμηλή συχνότητα, επομένως χρησιμοποιείται και ως διακόπτης ελεγχόμενης φόρτισης, για παράδειγμα στη φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για τη Μέθοδο Φόρτισης 3 (MODE 3) που είναι ελεγχόμενη μέθοδος φόρτισης με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), προκειμένου να επιτυγχάνεται ρύθμιση της ισχύος φόρτισης και/ή διάγνωση σφαλμάτων Αυτή η δίοδος έχει την ικανότητα να παράγει

πολύ έντονους παλμούς. Χρησιμοποιείται κυρίως για διαμόρφωση παλμών υψηλής ταχύτητας, πολλαπλασιαστές συχνότητας και γεννήτριες υψηλής συχνότητας.

- Διόδους σταδιακής επαναφοράς (soft recovery diodes)

Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές απλής ανόρθωσης



**Εικόνα 2-9 Το φαινόμενο της ανάστροφης ανάκτησης<sup>[3]</sup>**

Ανάλογα με τη χρήση τους, οι διόδοι διακρίνονται σε

- Ανορθωτικές Δίοδοι (rectifier or line-frequency diodes): Παρουσιάζουν: υψηλές τιμές ονομαστικού ρεύματος διέλευσης και τάσης διάσπασης. Χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανόρθωση της τάσης του δικτύου.
- Δίοδοι ταχείας ή υπερταχείας ανάκτησης (fast or ultra fast recovery diodes): Παρουσιάζουν: χαμηλούς χρόνους ανάστροφης ανάκτησης. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε κυκλώματα που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες.
- Δίοδοι Schottky: Παρουσιάζουν πολύ μικρή πτώση τάσης κατά την αγωγή, χαμηλούς χρόνους έναυσης και σβέσης αλλά και μικρή τιμή τάσης διάσπασης.<sup>[3]</sup>

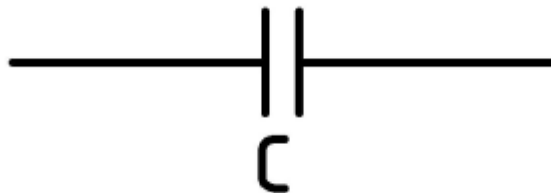
## 2.5 Πυκνωτής<sup>[4]</sup>

### 2.5.1 Ορισμός<sup>[4]</sup>

Πυκνωτής ονομάζεται ένα ηλεκτρολογικό παθητικό στοιχείο το οποίο δεν καταναλώνει ενέργεια, αλλά την αποθηκεύει. Αυτή η ενέργεια αποθηκεύεται υπό τη μορφή ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς του, άρα δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο. Το φαινόμενο να αποθηκεύεται ηλεκτρική ενέργεια υπό την μορφή ηλεκτρικού φορτίου άρα κατ' επέκταση ηλεκτρικού πεδίου, σε ένα παθητικό στοιχείο ονομάζεται χωρητικότητα. Η βασική αρχή κατασκευής ενός πυκνωτή είναι η εξής: Δυο αγώγιμες πλάκες σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους, όπου ενδιάμεσα σε αυτές τις δυο πλάκες υπάρχει ένα διηλεκτρικό υλικό (ένας τύπος μονωτή).

### 2.5.2 Μονάδα μέτρησης του πυκνωτή<sup>[4]</sup>

Μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι το Farad, το οποίο συμβολίζεται με το κεφάλαιο λατινικό γράμμα F. Η χωρητικότητα (F) είναι ίση με  $1F=1C/1V$ . Δηλαδή ένα Farad είναι ίσο με αποθηκευμένο ηλεκτρικό φορτίο στους οπλισμούς του πυκνωτή ενός Coulomb, όταν οι οπλισμοί του πυκνωτή έχουν διαφορά δυναμικού ενός Volt.



Σχήμα 2-1 Το σύμβολο του πυκνωτή<sup>[4]</sup>

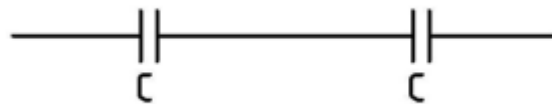
### 2.5.3 Εφαρμογές πυκνωτή<sup>[4]</sup>

Οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται με σκοπό να αποθηκεύσουν ενέργεια υπό την μορφή ηλεκτρικού πεδίου και κάποια χρονική στιγμή να την αποδώσουν πίσω στο εκάστοτε κύκλωμα. Πιο απλά κάποια χρονική στιγμή οι πυκνωτές φορτίζονται από κάποια πηγή, και έπειτα όταν απαιτηθεί αυτοί εκφορτίζονται προσδίδοντας στο κύκλωμα την ενέργεια που αποθήκευσαν. Δηλαδή,

φορτίζονται άρα αυξάνεται η τάση στα άκρα τους, και όταν εκφορτίζονται μειώνεται η τάση τους. Το ηλεκτρικό φορτίο οπου έχει αποθηκεύσει ο πυκνωτής στους οπλισμούς του αρχίζει να καταρρέει για να διατηρήσει την τάση στα άκρα του πυκνωτή την ίδια, δηλαδή ο πυκνωτής αντιστέκεται στις μεταβολές της τάσης.

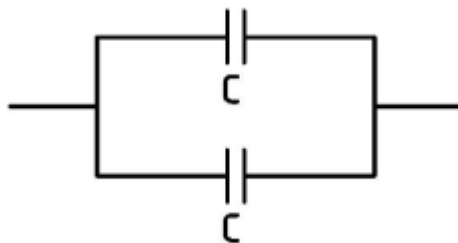
Θα συναντήσουμε πυκνωτές σε κυκλώματα οπου θέλουμε να κρατήσουμε σταθερή τη τάση χωρίς μεταβολές, η σε εφαρμογές οπου θέλουμε να συζεύξουμε σήματα μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα σε κυκλώματα εξομάλυνσης τάσης, σε κυκλώματα χρονισμού (διάρκεια χρόνου φόρτισης του πυκνωτή), σε φίλτρα, σε ταλαντωτικά κυκλώματα, σε ενισχυτές, σε βαθμίδες σύζευξης σημάτων, και σε άλλες πολλές εφαρμογές.

#### 2.5.4 Συνδεσμολογία πυκνωτών<sup>[4]</sup>



**Σχήμα 2-2** Εν σειρά συνδεσμολογία<sup>[4]</sup>

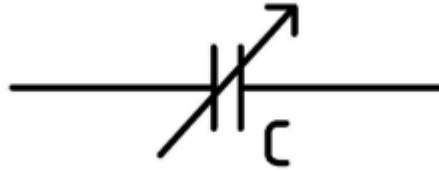
Δυο ή παραπάνω πυκνωτές μπορούν να συνδεθούν είτε εν σειρά είτε παράλληλα. Αν συνδεθούν σε σειρά τότε η συνολική χωρητικότητα γίνεται μικρότερη της μικρότερης χωρητικότητας, αλλά αυξάνεται η μέγιστη τάση οπου μπορεί να δεχτεί στα άκρα της η συνδεσμολογία.



**Σχήμα 2-3** Συνδεσμολογία εν παραλλήλω<sup>[4]</sup>



Εάν οι πυκνωτές συνδεθούν παράλληλα η συνολική χωρητικότητα είναι το άθροισμα των επιμέρους χωρητικοτήτων, δηλαδή αυξάνεται η χωρητικότητα. Αρά εν σειρά μειώνεται και παράλληλα αυξάνεται η συνολική χωρητικότητα.



**Σχήμα 2-4 Συμβολισμός μεταβλητού πυκνωτή<sup>[4]</sup>**

Επίσης υπάρχουν και μεταβλητοί πυκνωτές οπού η χωρητικότητα τους μεταβάλλεται μέσω ενός δρομέα, όπως είναι και στις αντιστάσεις (ποτενσιόμετρο).

### **2.5.5 Συμπεριφορά πυκνωτή στο συνεχές και στο εναλλασσόμενο<sup>[4]</sup>**

Ο πυκνωτής στο DC συμπεριφέρεται ως ανοικτοκύκλωμα (δηλαδή σαν ένας ανοιχτός διακόπτης), άρα δεν έχουμε ροή ρεύματος μέσω αυτού (μετά το πέρας του μεταβατικού). Ενώ στο AC έχουμε μια διαρκή ροή ρεύματος μέσω αυτού, καθώς μονίμως φορτίζεται και εκφορτίζεται. Οπού για σταθερή τάση καθώς χωρητικότητα και συχνότητα έχει μια σταθερή τιμή το ρεύμα αυτό(ενεργός τιμή, και όχι στιγμιαία). Άρα αντιστέκεται στην ροή του ρεύματος. Ο λόγος τάσης και ρεύματος ονομάζεται χωρητική αντίδραση. Η χωρητική αντίδραση είναι κάτι σαν αντίσταση και μετριέται σε Ω (έχει να κάνει με την αντίσταση στην ροή του ρεύματος μέσω του πυκνωτή λόγω της μεταβολής του ηλεκτρικού του πεδίου). Αν κάποιος θέλει να πει απλά τι διαφορά έχει αντίσταση με την χωρητική αντίδραση, είναι πως και τα δυο αφενός αντιστέκονται στην ροή του ρεύματος αλλά το ένα οφείλεται σε αντιστάτη (αντίσταση), και το άλλο σε πυκνωτή (χωρητικότητα, άρα χωρητική αντίδραση).

Όσον αφορά την χωρητική αντίδραση του πυκνωτή  $X_c$ , είναι αντίστροφος ανάλογη της συχνότητας και της χωρητικότητας, δηλαδή

$$X_c = 1 / (2\pi f C)$$

Οπού :

$X_c$  είναι η χωρητική αντίδραση που παρουσιάζει ο πυκνωτής ( $\Omega$ )

$C$  είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή (F)

$f$  είναι η συχνότητα (Hz)

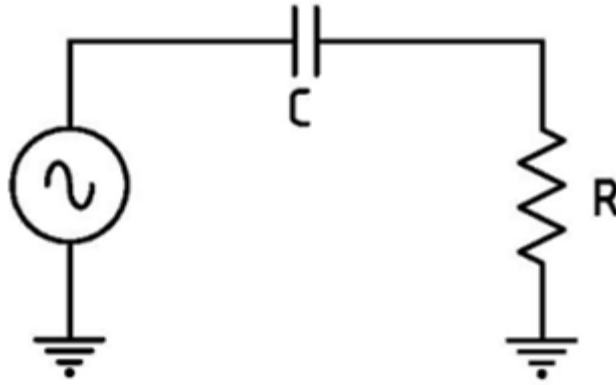
Άρα για σταθερή χωρητικότητα αν αυξήσουμε την συχνότητα θα μειωθεί η αντίδραση και αντίστοιχα. Επιπλέον ισχύει και ο νομός του Ohm, και έχει την εξής μορφή:

$$X_c = V/I \text{ ή } V = I \cdot X_c \text{ ή } I = V/X_c$$

### 2.5.6 Πυκνωτής σύζευξης<sup>[4]</sup>

Αρκετές φορές σε βαθμίδες προενίσχυσης σήματος θα συναντήσουμε ένα ενισχυτή με BJT transistor. Συνήθως είναι ενισχυτές κοινού εκπέμπου και έχουν πόλωση με διαιρέτη τάσης, εκεί στην βάση θα συναντήσουμε έναν πυκνωτή στην είσοδο του ενισχυτή. Αυτός ο πυκνωτής ονομάζεται πυκνωτής σύζευξης, και έχει σκοπό να κάνει σύζευξη του AC σήματος που πάει για ενίσχυση με την DC τάση που έχει ο ενισχυτής στη βάση και πρέπει να είναι σταθερή. επίσης, ένας πολύ σημαντικός λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούμε πυκνωτές για την σύζευξη σημάτων είναι ότι αν υπάρξει κάποιο εξωτερικό DC σήμα και πάει στην εισόδου του ενισχυτή, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να αλλάξει η πόλωση του transistor, να παραμορφωθεί το σήμα εξόδου καθώς και κίνδυνος να καταστραφεί η πηγή του AC σήματος.

Έτσι, για την επιλογή του πυκνωτή σύζευξης θα πρέπει να τηρήσουμε ένα κανόνα, όπου λέει πως κάλος πυκνωτής σύζευξης είναι αυτός όπου στην χαμηλότερη συχνότητα του σήματος εισόδου θα πρέπει να παρουσιάζει μικρότερη αντίδραση από την αντίσταση εισόδου του ενισχυτή (η είσοδος του ενισχυτή, καθώς και όλος ο ενισχυτής με BJT Transistor απλοποιείται με βάσει διαφορά μοντέλα και παραδοχές όπου έχουμε κάνει και μπορούμε να τον προσομοιώσουμε με αντίσταση, όσο πιο μεγάλη είναι η αντίσταση εισόδου τόσο το καλύτερο διότι δεν θα έχουμε πτώση τάσης του σήματος σε αλλά σημεία όπως, η αντίσταση εξόδου της AC πηγής σήματος, στη γραμμή μεταφοράς και στο πυκνωτή σύζευξης). Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει στην χαμηλότερη συχνότητα να είναι δέκα φορές μικρότερη η αντίδραση από την αντίσταση εισόδου  $X_c < 0,1R$ .



Σχήμα 2-5 Πυκνωτής σύζευξης<sup>[4]</sup>

Ακολουθεί ένα παράδειγμα στο οποίο αντιμετωπίζουμε πρόβλημα σχεδίασης, και πρέπει να επιλέξουμε χωρητικότητα για τον πυκνωτή σύζευξης.

Υποθέτουμε ότι έχουμε έναν ενισχυτή με αντίσταση εισόδου  $R_{in} = 4k\Omega$ , και το σήμα προς ενίσχυση κυμαίνεται μεταξύ 330Hz και 4000Hz. Άρα βάσει τον κανόνα που αναφέραμε προηγουμένως θα πρέπει στη συχνότητα 330Hz να έχει ο πυκνωτής αντίδραση μικρότερη των 400 Ω.

$$X_C < 400\Omega @ 330Hz.$$

Από τον τύπο της χωρητικής αντίδρασης, λύνουμε ως προς C :

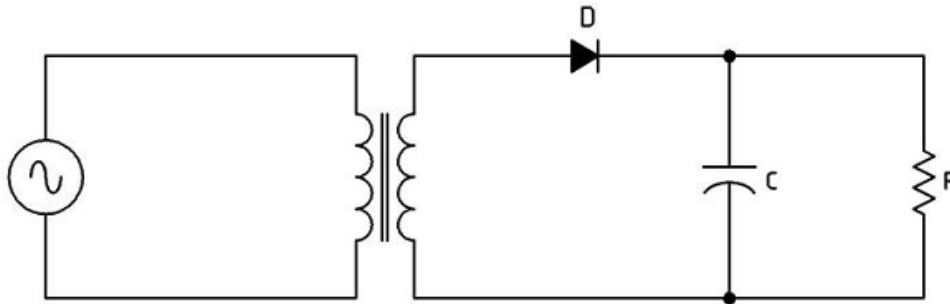
$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \Rightarrow C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 330 \cdot 400} = 1.26\mu F$$

Άρα θέλουμε έναν πυκνωτή με χωρητικότητα τουλάχιστον 1,26μF. Συνήθως χρησιμοποιούνται ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές σε αυτές τις εφαρμογές.

### 2.5.7 Πυκνωτής εξομάλυνσης<sup>[4]</sup>

Ας υποθέσουμε ξανά πως έχουμε ένα πρόβλημα σχεδίασης. Έχουμε κάνει υποβιβασμό τάσης με έναν μετασχηματιστή υποβιβασμού και μια δίοδο για ανόρθωση ημικύματος ώστε να μετατρέψουμε το AC σε DC, και θέλουμε να κάνουμε εξομάλυνση της τάσης, δηλαδή να την κάνουμε όσο πιο πολύ σταθερή στο χρόνο (κυμάτωση). Όταν προσθέσουμε έναν πυκνωτή αυτός θα φορτίζεται κατά την χρονική διάρκεια οπότε η τάση αυξάνεται (αποθηκεύει ενέργεια) και θα εκφορτίζεται στο κύκλωμα προσπαθώντας να κρατήσει

σταθερή τη τάση το χρονικό διάστημα οπού τάση από μέγιστη αρχίζει και μειώνεται μέχρι και την στιγμή οπού θα αρχίσει να αυξάνεται πάλι, πιο συγκεκριμένα όταν ξαναγίνει μεγαλύτερη από την οπού θα έχει ο πυκνωτής.



**Σχήμα 2-6 Κύκλωμα με πυκνωτή εξομάλυνσης παράλληλα στην έξοδο του φορτίου<sup>[4]</sup>**

Όσον αφορά το πρόβλημα, έχουμε DC τάση 10V και το φορτίο οπού θα τροφοδοτήσουμε είναι 400Ω. Ας υπολογίσουμε τον απαιτούμενο πυκνωτή, ώστε να έχουμε κυμάτωση μικρότερη από 150mVpp ( $V_r < 150mV_{pp}$ )

$$I = \frac{V}{R} = \frac{10}{400} = 0.025A \text{ ή } 25mA$$

Το φορτίο θα απορρόφα ρεύμα 25mA.

$$V_r = \frac{I}{f \cdot C}$$

για να βρούμε την απαιτούμενη χωρητικότητα η σχέση γίνεται ως εξής

$$C = \frac{I}{f \cdot V_r}$$

Οπού :

C είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή

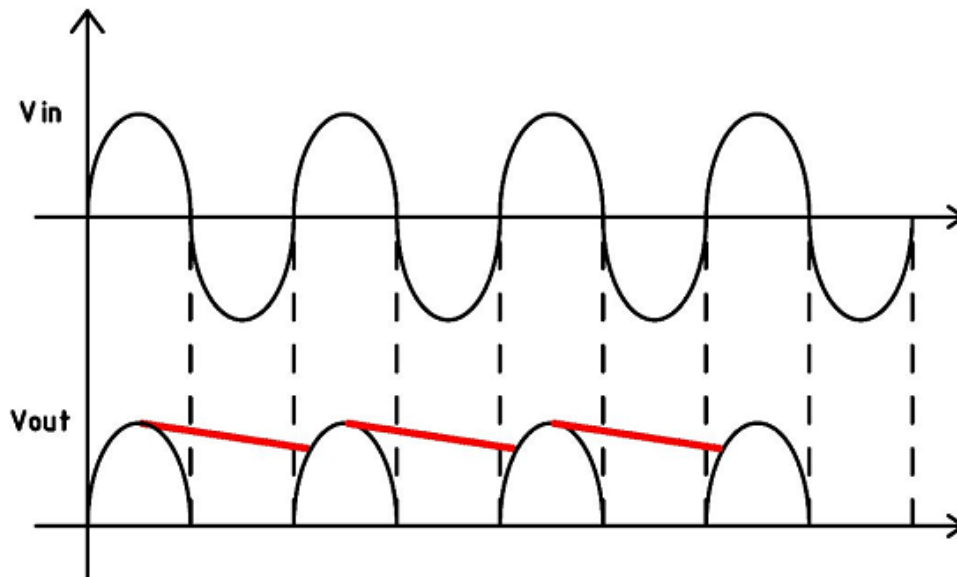
I είναι το ρεύμα οπού απορρόφα το φορτίο

f είναι η συχνότητα

$V_T$  είναι η κυμάτωση τάσης σε  $V_{pp}$

$$C = 0,025 / 50 * 0,150 = 3.333 \mu\text{F}$$

Αρά χρειαζόμαστε έναν πυκνωτή με χωρητικότητα τουλάχιστον  $3.333 \mu\text{F}$ , μπορούμε κάλλιστα να επιλέξουμε και έναν  $4.700 \mu\text{F}$  που είναι και τυποποιημένη τιμή. Ο πυκνωτής αυτός θα είναι ηλεκτρολυτικός.



Σχήμα 2-7 Εξομαλυμένη έξοδος με τη βοήθεια πυκνωτή<sup>[4]</sup>

### 2.5.8 Οι πιο κοινοί τύποι πυκνωτών στη πράξη<sup>[4]</sup>

Στην πράξη θα συναντήσουμε διάφορους τύπους πυκνωτή όπως:

- Πυκνωτές μίκας (χρησιμοποιούνται σε υψηλές συχνότητες)



Εικόνα 2-10 Πυκνωτές Μίκας<sup>[4]</sup>

- Κεραμικοί πυκνωτές (χρησιμοποιούνται σε υψηλές συχνότητες, καθώς και σε κυκλώματα χρονισμού)



**Εικόνα 2-11 Κεραμικός πυκνωτής<sup>[4]</sup>**

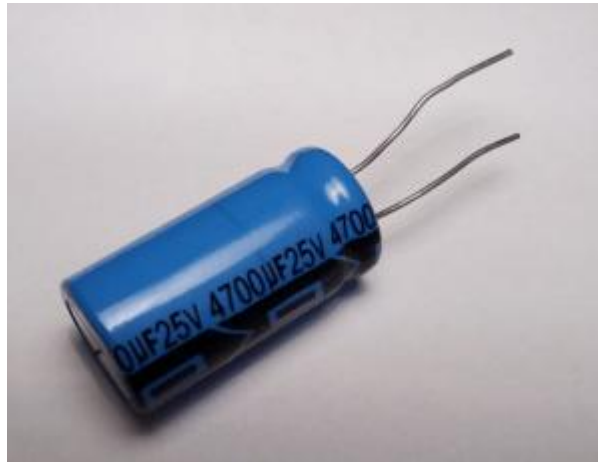
- Πυκνωτές αέρα (μικρά trimmer πυκνωτή ή μεγάλοι αερόφυλλοι, antenna tuner, και εφαρμογές υψηλής συχνότητας)



**Εικόνα 2-12 Πυκνωτής αέρα<sup>[4]</sup>**

- Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές σε εφαρμογές όπου υπάρχει απαίτηση μεγάλης χωρητικότητας, και χαμηλές συχνότητες. Επίσης να σημειωθεί πως οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές έχουν πολικότητα, δηλαδή το ένα άκρο είναι το θετικό και το άλλο το αρνητικό. Το αρνητικό είναι πιο μικρό σε μήκος. Επίσης στην πλευρά όπου είναι το αρνητικό πάνω στον πυκνωτή

υπάρχουν κάποια βέλη τα οποία υποδεικνύουν πως πρόκειται για τον αρνητικό ακροδέκτη.



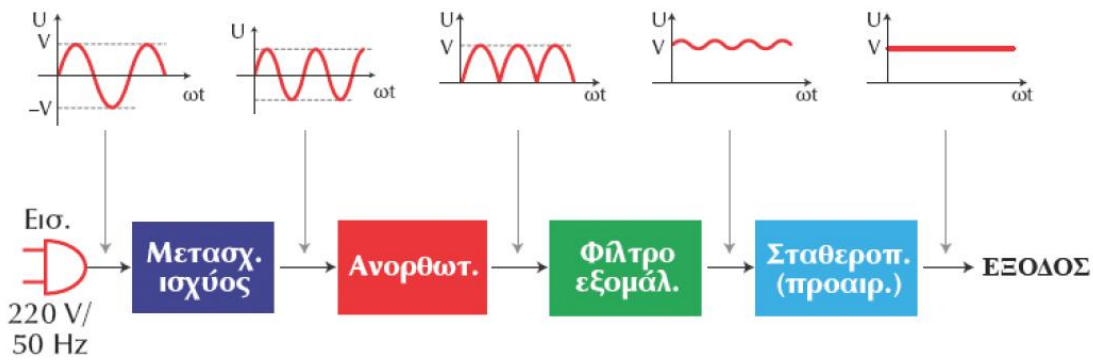
**Εικόνα 2-13 Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής<sup>[4]</sup>**

## **2.6 Ανορθωτικές διατάξεις – Τροφοδοτικά<sup>[5]</sup>**

### **2.6.1 Γενικά<sup>[5]</sup>**

Σήμερα η ηλεκτρική ενέργεια συνήθως για λόγους πρακτικούς και οικονομικούς προσφέρεται από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) με τη μορφή εναλλασσόμενης τάσης (230 Volts AC). Για να τροφοδοτηθούν μια σειρά από ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές διατάξεις (ενισχυτές, ταλαντωτές, συγκριτές, τηλεόραση, υπολογιστές και άλλα) και στην περίπτωση της δικής μας κατασκευής η ωμική αντίσταση χρειάζεται 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. Στην Εικόνα 2-14 δίνεται μια σχηματική απεικόνιση των επιμέρους βαθμίδων από τις οποίες αποτελείται ένα τροφοδοτικό.



**Εικόνα 2-14 Οι βαθμίδες από τις οποίες αποτελείται ένα τροφοδοτικό.<sup>[5]</sup>**

1) Ο Μετασχηματιστής μεταφέρει από το εναλλασσόμενο δίκτυο της ΔΕΗ την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια παρέχοντας γαλβανική απομόνωση από αυτό. Ταυτόχρονα παρέχει την κατάλληλη εναλλασσόμενη τάση στο Δευτερεύον του ώστε στην Έξοδο της Τροφοδοτικής Διάταξης να έχουμε την επιθυμητή DC Τάση.

Γαλβανική απομόνωση μεταξύ δύο «ηλεκτρικών διατάξεων» ονομάζεται η μη ύπαρξη ηλεκτρικού δρόμου ανάμεσα τους (άπειρη αντίσταση). Αυτό είναι κάτι πολύ απαραίτητο στις Τροφοδοτικές διατάξεις γιατί αυξάνει τον βαθμό ασφαλείας (από θέμα ηλεκτροπληξίας) όσον αφορά τους χρήστες της ηλεκτρονικής συσκευής που τροφοδοτεί η Τροφοδοτική Διάταξη.

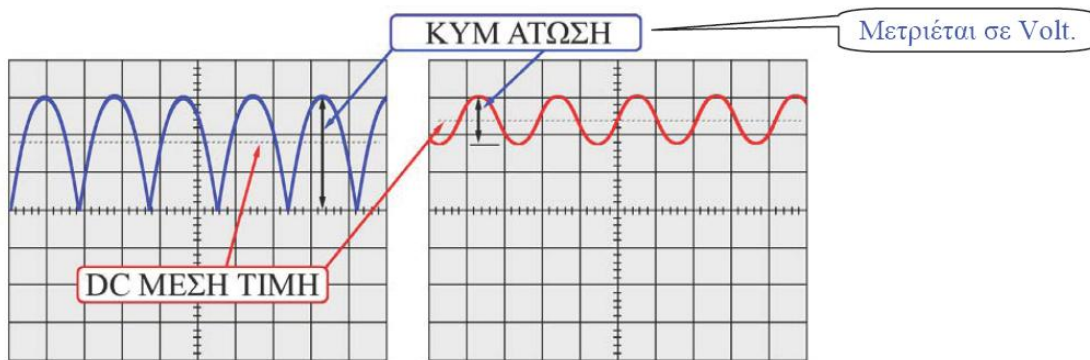
2) Το κύκλωμα Ανόρθωσης εμπεριέχει Διόδους και μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση που εμφανίζεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, σε τάση μιας πολικότητας. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας χρήση της βασικής ιδιότητα των διόδων που είναι ότι επιτρέπουν την διέλευση του ρεύματος μέσα τους μόνο κατά την μία πολικότητα. Σήμερα στα κυκλώματα Ανόρθωσης των τροφοδοτικών χαμηλής ισχύος χρησιμοποιούνται δίοδοι ημιαγωγοί οι οποίοι ονομάζονται και ανορθωτές.

3) Φίλτρο

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-15 η συνεχής τάση στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης δεν έχει σταθερή τιμή. Παρουσιάζει μια διακύμανση (κυμάτωση) γύρω από μια συγκεκριμένη τιμή (την 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)



**Εικόνα 2-15** Κυμάτωση στην τάση εξόδου της ανορθωτικής διάταξης<sup>[5]</sup>

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 περιοριστούν οι AC συνιστώσες της Ανορθωτικής Διάταξης (ώστε να μείνει όσο το δυνατόν μόνο η DC Μέση τιμή), τοποθετούνται 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 (βλέπε Εικόνα 2-14). 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 Δαπανηρότερα 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.

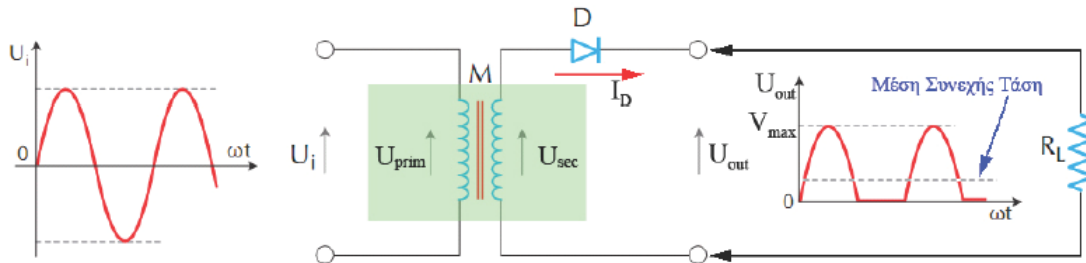
## 2.6.2 Τύποι ανορθωτικών διατάξεων<sup>[5]</sup>

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., όπως στην περίπτωση της δικής μας κατασκευής

### 2.6.2.1 Ανορθωτική διάταξη μισού κύματος (Απλή ανόρθωση)<sup>[5]</sup>

Το βασικό κύκλωμα της **απλής ανόρθωσης** (ή ημιανόρθωσης) φαίνεται στην Εικόνα 2-16



**Εικόνα 2-16** Βασικό κύκλωμα της απλής ανόρθωσης<sup>[5]</sup>

Η ημιανόρθωση είναι η απλούστερη ανορθωτική διάταξη (μια δίοδος) με την οποία μπορούμε να παράγουμε **DC** τάση από **AC** είσοδο. Στην παρούσα κατασκευή χρησιμοποιήθηκε αυτό το είδος της ανόρθωσης. Η λειτουργία της είναι η εξής:

Στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση πλάτους  $U_i$  και στο δευτερεύον τύλιγμα του επάγεται τάση  $U_{sec}$ . Συνήθως η εφαρμοζόμενη εναλλασσόμενη τάση εισόδου προέρχεται από το δίκτυο της ΔΕΗ οπότε το πλάτος της είναι  $U_i = U_{rms} \times 2 = 230 \times 2$  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

$$\frac{U_{1os}}{U_{2os}} = \frac{N_1}{N_2}$$

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

$$P_{\text{εξόδου max}} = V_{\text{DC εξόδου}} \cdot I_{\text{DC εξόδου max}}$$

Κατά την εμφάνιση τώρα της θετικής ημιπεριόδου της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, η άνοδος της διόδου D γίνεται πιο θετική από την κάθοδο της και έτσι η διάδος 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  $R_L$  και η εμφάνιση τάσης στα όρια του (του φορτίου).

Κατά την εμφάνιση της αρνητικής ημιπεριόδου της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, η άνοδος της διόδου γίνεται αρνητική ως προς την κάθοδο της και έτσι η διάδος 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  $R_L$  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.

Η Μέση Συνεχής Τάση (ή DC τάση) στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης θα είναι:

$$V_{DC \text{ (Μέση)}} = \frac{V_{\max}}{\pi} = \frac{U_{\text{sec max}} - 0.7}{\pi}$$

η **rms** τάση εξόδου θα είναι:

$$V_{\text{rms (εξόδου)}} = \frac{V_{\max}}{2} = \frac{U_{\text{sec max}} - 0.7}{2}$$

Τέλος ένα άλλο χρήσιμο στοιχείο σε μια ανορθωτική διάταξη είναι η ενεργός αντίσταση ορθής φοράς της ανορθωτικής διόδου που χαρακτηρίζεται ως  $r_f$ . Ουσιαστικά είναι η αντίσταση που παρουσιάζει η διάδος κατά την αγωγή. Για μια ιδανική διάοδο αυτή η αντίσταση είναι ίση με  $0\Omega$  (τέλεια αγωγή). Για μια

όμωςπραγματική δίοδο η ενεργός αντίσταση ορθής φοράς δεν είναι ούτε  $0\Omega$  ούτε σταθερή, αλλά εξαρτάται από το στιγμιαίο ρεύμα  $I_D$  της διόδου. Η τιμή της ενεργού αντίστασης ορθής φοράς της διόδου μας πληροφορεί για το ποσό της θερμότητας (ισχύς) που αναπτύσσεται πάνω στη δίοδο κατά την διάρκειας της αγωγής.

Αν θεωρήσουμε μια προσεγγιστική μέση τιμή της  $r_f$  τότε η ισχύς απωλειών της διόδου θα είναι προσεγγιστικά:

$$P_{a,D} \approx \frac{V_D^2}{r_f} = \frac{0.7^2}{r_f} = \frac{0.5}{r_f}$$

Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι για να επιλέξουμε την κατάλληλη δίοδο για μια ανορθωτική διάταξη πρέπει να γνωρίζουμε τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

- Μέγιστη τιμή του ρεύματος της διόδου  $I_D$
- Μέγιστη τιμή της ανάστροφης τάσης της διόδου  $V_D$
- Μέγιστη τιμή της εκλυόμενης ισχύος πάνω στην δίοδο

Γνωρίζοντας της παραπάνω ποσότητες ανατρέχουμε στα Data Sheet (φυλλάδια τεχνικών χαρακτηριστικών) των κατασκευαστριών εταιρειών και επιλέγουμε την κατάλληλη δίοδο.

Συνοψίζοντας τα κύρια πλεονεκτήματα της ημιανορθωτικής διάταξης είναι το χαμηλό κόστος και η απλότητα της κατασκευής. Στα μειονεκτήματα είναι η σχετικά μικρή τιμή της DC τάσης εξόδου και η μεγάλη κυμάτωση αυτής, που στην πλειοψηφία των περιπτώσεων απαιτεί καλό φιλτράρισμα (ποιοδαπανηρό φίλτρο).

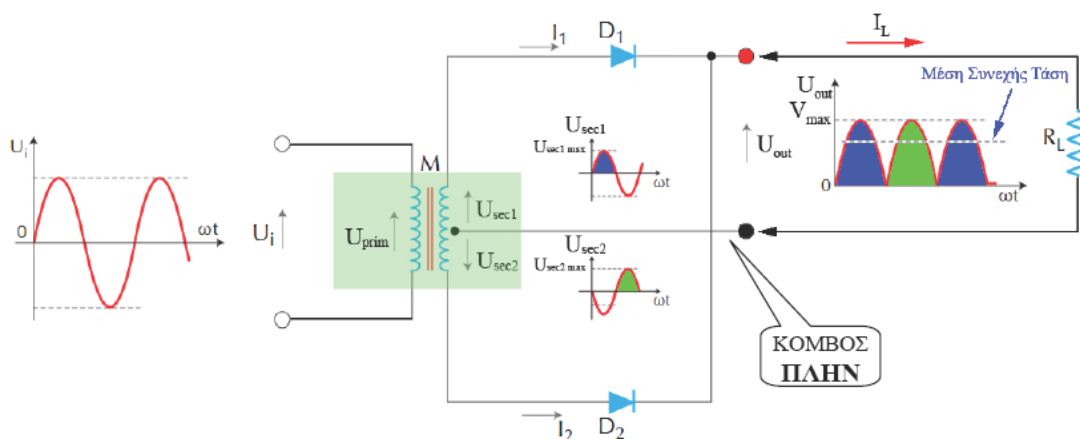
### **2.6.2.2 Ανορθωτική διάταξη πλήρους κύματος<sup>[5]</sup>**

#### **A. Ανόρθωση με διόδους και μετασχηματιστή με μεσαία λήψη (Διπλή Ανόρθωση)**

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. Χρησιμοποιώντας

μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και δυο διόδους, ή χρησιμοποιώντας απλό μετασχηματιστή και ανορθωτική διάταξη γέφυρας (τέσσερις διόδους).

Το κύκλωμα της Εικόνας 2-17 κάνει πλήρη ανόρθωση χρησιμοποιώντας μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και δυο διόδους. Η χρήση μετασχηματιστή Μ με δύο όμοια δευτερεύοντα ( $U_{sec1}=U_{sec2}$ ) και η προσθήκη μιας επιπλέον διόδου (σε σχέση με την απλή ανόρθωση) επιτρέπει την διέλευση ρεύματος προς το φορτίο και κατά τις δύο ημιπεριόδους 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 ημιπερίοδο το ρεύμα προς το φορτίο RL διέρχεται μέσω του ενός δευτερεύοντος και της διόδου  $D_1$  ενώ κατά την άλλη ημιπερίοδο το ρεύμα διέρχεται μέσω του άλλου δευτερεύοντος και της διόδου  $D_2$ . Δηλαδή το ολικό ρεύμα του φορτίου  $I_L$  είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο ρευμάτων  $I_1$  και  $I_2$ .



**Εικόνα 2-17 Βασικό κύκλωμα ανορθωτικής διάταξης πλήρους κύματος με ΜΣ με μεσαία λήψη<sup>[5]</sup>**

Η **Μέση Συνεχής Τάση** (ή DC τάση) στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης Διπλής Ανόρθωσης θα είναι:

$$V_{DC (Μέση)} = \frac{2V_{max}}{\pi} = \frac{2(U_{sec1\ max} - 0.7)}{\pi}$$

Ηrms τάση εξόδου θα είναι:

$$V_{\text{rms (εξόδου)}} = \frac{V_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = \frac{U_{\text{sec max}} - 0.7}{\sqrt{2}}$$

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 δίοδοι (σε σχέση με την απλή ανόρθωση).

## B. Ανόρθωση με Γέφυρα

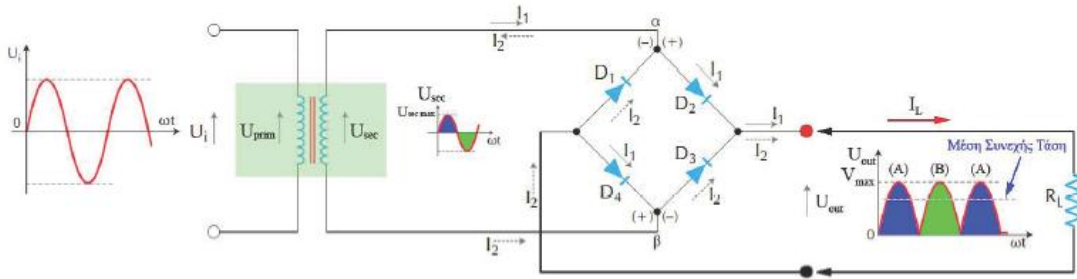
Η Ανορθωτική Διάταξη Γέφυρας (Εικόνα 2-18) μοιάζει σε αρκετά σημεία με την Διπλή Ανόρθωση που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα. Έχει την ίδια συχνότητα κυμάτωσης με αυτή και την ίδια DC τάση εξόδου. Τα δυο κυκλώματα διαφέρουν ως προς τον αριθμό των διόδων (τέσσερις για ανορθωτική διάταξη γέφυρας και δυο για την διπλή ανόρθωση). Επιπλέον μια ακόμα βασική διαφορά τους είναι ότι για την ανορθωτική διάταξη γέφυρας χρησιμοποιούμε απλό μετασχηματιστή ( $N_1/N_2$ ) ενώ για την διπλή ανόρθωση χρησιμοποιούμε μετασχηματιστή με μεσαία λήψη ( $N_1/2xN_2$ ).

Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 2-18 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:

Όταν η τάση στο κόμβο α είναι θετική ως προς τον κόμβο β, δηλαδή κατά την πρώτη ημιπερίοδο του σήματος εισόδου, άγουν οι διόδοι  $D_2$  και  $D_4$ , αφού οι άνοδοι τους είναι θετικά πολωμένες ως προς την κάθοδο τους και το ρεύμα  $I_1$  ακολουθεί το δρόμο που δείχνεται στην Εικόνα 2-18 (δηλαδή από το δευτερεύον του μετασχηματιστή μέσω του κόμβου α, της διόδου  $D_2$ , του φορτίου  $RL$ , της διόδου  $D_4$  και τέλος του κόμβου β, ξαναγυρνά στον μετασχηματιστή). Η κυματομορφή της τάσης εξόδου κατά αυτή την διαδρομή του ρεύματος απεικονίζεται στην Εικόνα 2-18 σαν (Α) – μπλε χρώμα.

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 διόδοι  $D_1$  και  $D_3$ , αφού οι άνοδοί τους είναι τώρα πιο θετικές από τις αντίστοιχες καθόδους. Το ρεύμα  $I_2$  ακολουθεί το δρόμο από το δευτερεύον του μετασχηματιστή στον κόμβο β, μέσω της διόδου  $D_3$  στο φορτίο  $RL$ , και στη συνέχεια μέσω της διόδου  $D_1$  και του κόμβου α επιστρέφει στο μετασχηματιστή. Η κυματομορφή της τάσης εξόδου κατά αυτή την διαδρομή του ρεύματος απεικονίζεται στην Εικόνα 2-18 σαν (Β) – πράσινο χρώμα. Το ολικό ρεύμα εξόδου  $I_L$  είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο ρευμάτων  $I_1$  και  $I_2$ .





**Εικόνα 2-18 Βασικό κύκλωμα ανορθωτικής διάταξης πλήρους κύματος με γέφυρα<sup>[5]</sup>**

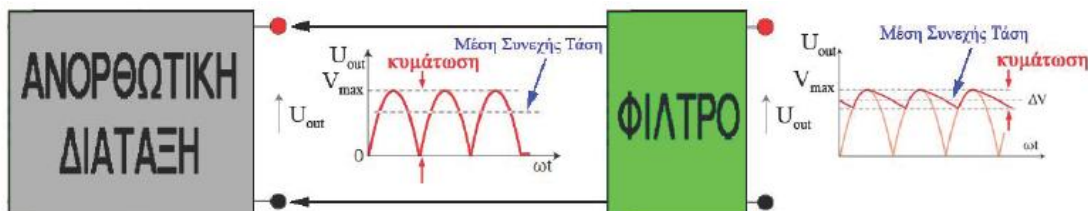
Η **Μέση Συνεχής Τάση** (ή DC τάση) στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης Γέφυρας θα είναι (όπως και στην διπλή ανόρθωση):

$$V_{DC \text{ (Μέση)}} = \frac{2V_{\max}}{\pi} = \frac{2(U_{\text{sec max}} - 1.4)}{\pi} \quad \text{και} \quad V_{\text{rms (εξόδου)}} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{U_{\text{sec max}} - 1.4}{\sqrt{2}}$$

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.

### 2.6.3 Εξομάλυνση και φίλτρα<sup>[5]</sup>

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 (βλέπε Εικόνα 2-19) ειδικά κυκλώματα που ονομάζονται φίλτρα και υλοποιούνται κυρίως με παθητικά στοιχεία (πυκνωτές και πηνία).



**Εικόνα 2-19 Ανορθωτική διάταξη με φίλτρο για περαιτέρω μείωση της κυμάτωσης<sup>[5]</sup>**

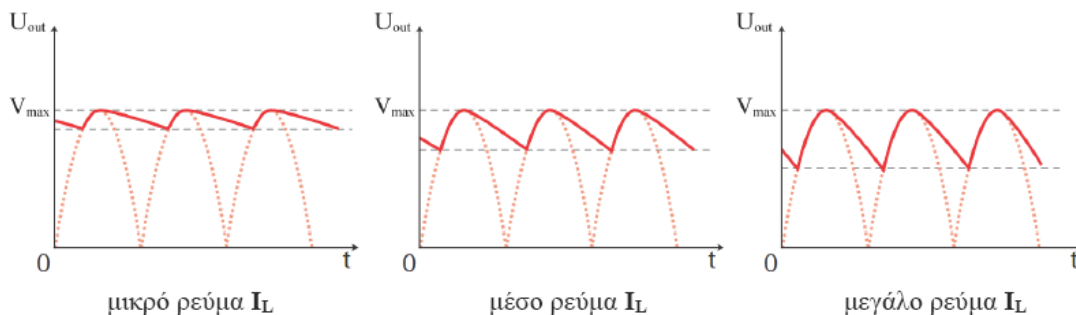
Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 2-19 στη γενική περίπτωση η εξομάλυνση δε είναι πλήρης με αποτέλεσμα η τελική τάση  $U_{out}$  να εμφανίζει μια μικρή περιοδική διακύμανση ονομάζεται **κυμάτωση**. Το εύρος  $\Delta V$  της κυμάτωσης (σε Volt) αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό μιας τροφοδοτικής διάταξης.

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

$$r = \frac{AC \text{ συνιστώσες της τάσης εξόδου}}{DC \text{ Μέση τιμή της τάσης εξόδου}} = \frac{\Delta V}{DC \text{ Μέση τιμή της τάσης εξόδου}}$$

#### 2.6.4 Φίλτρο L-C<sup>[5]</sup>

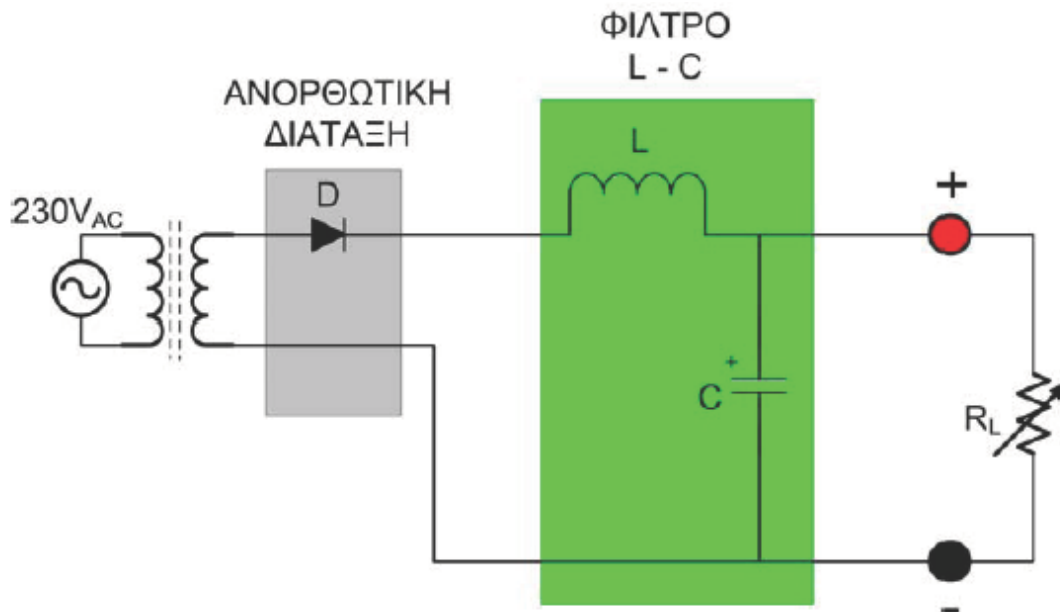
Η κυμάτωση μιας ανορθωτικής διάταξης με φίλτρο πυκνωτή εξαρτάται από το ρεύμα φορτίου  $I_L$ . Δηλαδή αν μεγαλώσει το ρεύμα που τραβάει το φορτίο εκφορτίζεται πιο γρήγορα ο πυκνωτής και μεγαλώνει η κυμάτωση (Εικόνα 2-20).



**Εικόνα 2-20** Αν μεγαλώσει το ρεύμα που τραβάει το φορτίο εκφορτίζεται πιο γρήγορα ο πυκνωτής και μεγαλώνει η κυμάτωση<sup>[5]</sup>

Για να μειώσουμε το παραπάνω φαινόμενο κάνουμε χρήση του φίλτρου εξομάλυνσης με Πηνίο και Πυκνωτή (Εικόνα 2-21). Το πηνίο L που ονομάζεται και τσοκ λειτουργεί σαν δεξαμενή ρεύματος και ουσιαστικά αντιτίθεται σε κάθε «γρήγορη..» μεταβολή του ρεύματος φορτίου. Δηλαδή κατά κάποιο τρόπο το πηνίο L « αποθηκεύει » ρεύμα μέσα του και το ξανά αποδίδει όταν το ρεύμα φορτίου τείνει να μειωθεί (κάτι ανάλογο με τον

πυκνωτή που λειτουργεί σαν δεξαμενή τάσης). Έτσι το ρεύμα φορτίου (το διερχόμενο μέσω του πηνίου) τείνει να διατηρηθεί σταθερό.



**Εικόνα 2-21 Φίλτρο εξομάλυνσης με Πηνίο και Πυκνωτή<sup>[5]</sup>**

Η χρησιμότητα του πηνίου L φαίνεται και αν υπολογίσουμε την επαγωγική αντίσταση του  $X_L$  στη συχνότητα κυμάτωσης. Για πλήρη ανόρθωση στην οποία η συχνότητα της κυμάτωσης είναι  $f=2 \cdot 50=100\text{Hz}$ , έχουμε για ένα πηνίο των 30H:  $X_L = 2 \pi f L = 2\pi 100 \cdot 30 \approx 30\text{K}\Omega$

Συγκριτικά με αυτή την τιμή η ωμική (DC) αντίσταση του πηνίου που είναι της τάξης μερικών 10-δων  $\Omega$ , είναι πολύ μικρή. Άρα το πηνίο L θα παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση στις AC συνιστώσες του ρεύματος (δηλαδή στην κυμάτωση) και πολύ μικρή αντίσταση για το ωφέλιμο DC ρεύμα. Συνεπώς σύμφωνα με την AC συνιστώσες της τάσης εξόδου = DC Μέση τιμή της τάσης εξόδου  $r$ , η κυμάτωση  $r$  θα είναι πολύ μικρότερη.

## 2.7 Ψηφιακή επεξεργασία σήματος<sup>[6]</sup>

Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος ασχολείται με την ψηφιακή αναπαράσταση των σημάτων και την ανάλυση, τροποποίηση και εξαγωγή πληροφοριών από αυτά, με τη βοήθεια ψηφιακών επεξεργαστών. Χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε πολλές περιοχές εφαρμογών όπου παραδοσιακά χρησιμοποιούνταν αναλογικές μορφές επεξεργασίας, αλλά και σε νέες

εφαρμογές στις οποίες οι αναλογικές μέθοδοι είναι δύσκολο ή και αδύνατον να χρησιμοποιηθούν. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η ψηφιακή επεξεργασία σήματος.

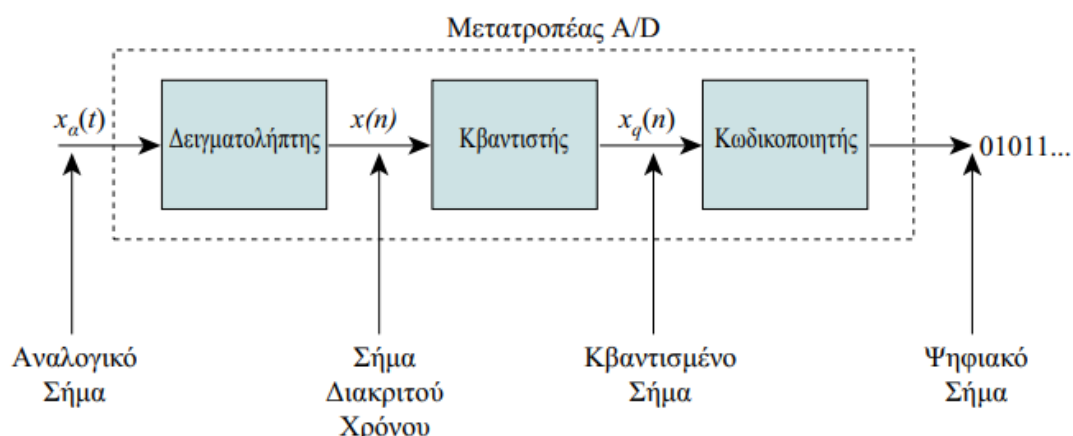
Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους θα προτιμούσαμε την ψηφιακή επεξεργασία ενός σήματος έναντι της αναλογικής. Κατά πρώτιστο λόγο, ένα ψηφιακό προγραμματιζόμενο σύστημα παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία στην τροποποίηση των πράξεων ψηφιακής επεξεργασίας με μια απλή μετατροπή του προγράμματος. Μια τέτοια τροποποίηση ενός αναλογικού συστήματος συνεπάγεται την επανασχεδίαση του κυκλώματος και συνεπακόλουθο έλεγχο και επιβεβαίωση (testing and verification) της ορθής λειτουργίας του.

Η ακρίβεια (accuracy) παίζει επίσης πολύ σπουδαίο ρόλο. Η ανοχή των στοιχείων των αναλογικών κυκλωμάτων καθιστά δύσκολο τον προσδιορισμό της ακρίβειας ενός αναλογικού συστήματος επεξεργασίας. Στην περίπτωση ενός ψηφιακού συστήματος, ο έλεγχος της πιστότητας των προδιαγραφών είναι πολύ πιο εύκολος. Τα ψηφιακά σήματα αποθηκεύονται σε μαγνητικά ή οπτικά μέσα (λ.χ. μαγνητικούς ή οπτικούς δίσκους, ταινίες, κ.ά.) χωρίς υποβάθμιση της πιστότητάς τους, πέραν αυτής που υπεισήλθε στη διαδικασία μετατροπής τους από αναλογικά σε ψηφιακά. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα μεταφοράς και επεξεργασίας τέτοιων σημάτων σε μη πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα εφαρμογής πιο περίπλοκων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος. Συνήθως η υλοποίηση μαθηματικών πράξεων μεγάλης ακρίβειας είναι δύσκολο να γίνει σε σήματα τα οποία βρίσκονται σε αναλογική μορφή, πράγμα όμως που είναι συνηθισμένο και εύκολο να γίνει σε ένα ψηφιακό σήμα το οποίο επεξεργαζόμαστε με έναν υπολογιστή και με κατάλληλο λογισμικό. Σε πολλές περιπτώσεις, η ψηφιακή επεξεργασία ενός σήματος έχει χαμηλότερο κόστος από την αντίστοιχη αναλογική. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στο ότι το υλικό (hardware) σήμερα είναι φθηνότερο είτε στην ευελιξία που παρέχεται λόγω της ψηφιακής υλοποίησης. Αποτέλεσμα των πλεονεκτημάτων της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος είναι η διαρκώς αυξανόμενη χρήση της σε όλο και περισσότερους τομείς εφαρμογών, όπως στην επεξεργασία ομιλίας, στη μετάδοση σήματος σε τηλεφωνικά κανάλια, στη σεισμολογία, στη γεωφυσική, στην ιατρική, στην εξερεύνηση του διαστήματος, στη μετεωρολογία, κ.ά. Φυσικά, η ψηφιακή επεξεργασία

σήματος έχει και τα όριά της, τα οποία οφείλονται στους περιορισμούς που τίθενται στην ταχύτητα λειτουργίας των μετατροπέων αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, καθώς και στους ίδιους τους ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος. Έτσι, σήματα με εξαιρετικά μεγάλο εύρος συχνοτήτων, για παράδειγμα, σήματα με εύρος συχνοτήτων της τάξεως των 100 MHz, υφίστανται επεξεργασία ακόμα και σήμερα με αναλογικές μεθόδους.

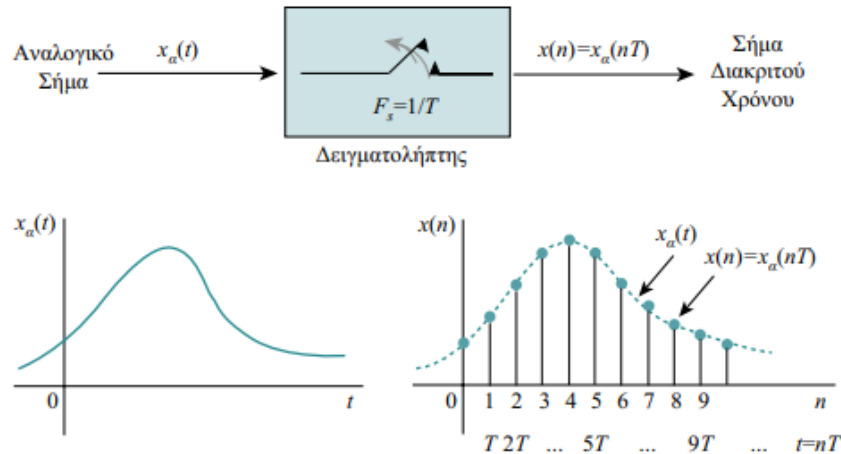
### 2.7.1 Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό<sup>[6]</sup>

Τα περισσότερα σήματα που παρουσιάζουν πρακτικό ενδιαφέρον, όπως για παράδειγμα η ομιλία, τα βιολογικά σήματα, τα σεισμικά σήματα, κ.ά., είναι αναλογικά. Για να επεξεργαστούμε αναλογικά σήματα με ψηφιακά μέσα, απαιτείται η μετατροπή αυτών σε ψηφιακή μορφή, δηλαδή η μετατροπή τους σε μία ακολουθία αριθμών πεπερασμένης ακρίβειας. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται μετατροπή αναλογικού-σε-ψηφιακό (analog-to-digital conversion, A/D) και τα αντίστοιχα κυκλώματα ονομάζονται «μετατροπείς αναλογικού-σε-ψηφιακό» (analog-to-digital converters, ADCs). Η αντίστροφη διαδικασία της μετατροπής ενός ψηφιακού σήματος σε αναλογικό είναι γνωστή ως μετατροπή ψηφιακού-σε-αναλογικό (digital-to-analog conversion, D/A) και γίνεται με τη βοήθεια κυκλωμάτων τα οποία ονομάζονται μετατροπείς «ψηφιακού-σε-αναλογικό» (digital-to-analog converters, DACs). Η διαδικασία της μετατροπής ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό γίνεται σε τρία στάδια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-22



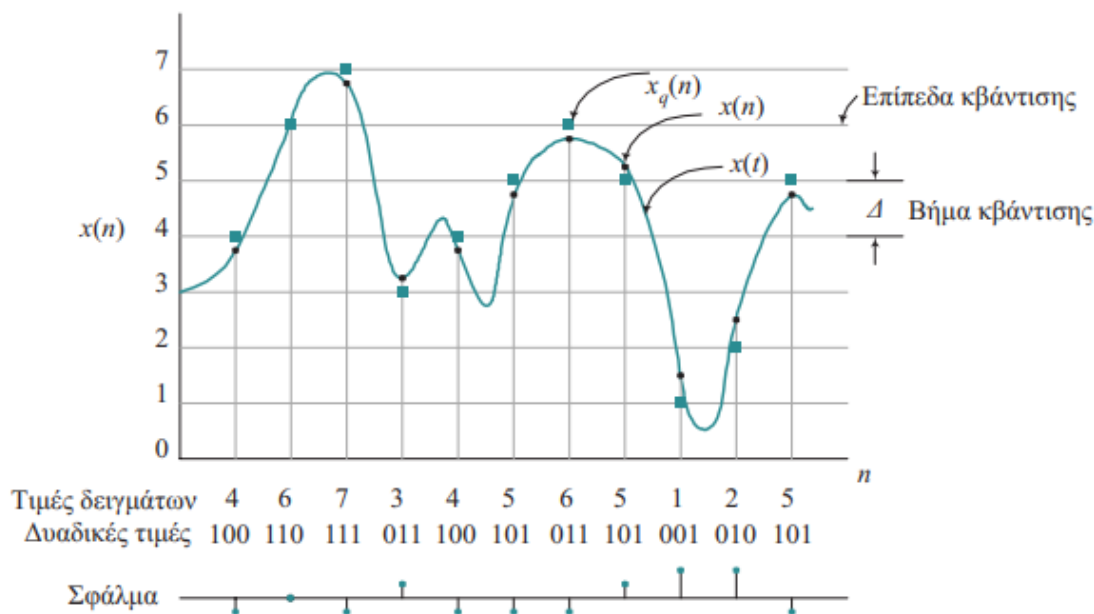
**Εικόνα 2-22 Βασικά τμήματα ενός μετατροπέα αναλογικού-σε-ψηφιακό<sup>[6]</sup>**

1. Δειγματοληψία (sampling): Αυτή είναι η διαδικασία μετατροπής ενός σήματος συνεχούς χρόνου σε σήμα διακριτού χρόνου, παίρνοντας δείγματα του σήματος συνεχούς χρόνου σε διακριτές στιγμές του χρόνου. Έτσι, αν  $x_a(t)$  είναι η είσοδος στο δειγματολήπτη, τότε η έξοδος αυτού είναι  $x_a(nT) \equiv x(n)$ , όπου  $T$  η περίοδος δειγματοληψίας.



**Εικόνα 2-23 Δειγματοληψία αναλογικού σήματος<sup>[6]</sup>**

2. Κβάντιση (quantisation): Πρόκειται για τη διαδικασία μετατροπής ενός σήματος διακριτού χρόνου συνεχών τιμών σε σήμα διακριτού χρόνου διακριτών τιμών (ψηφιακό). Το κάθε δείγμα του σήματος αντιπροσωπεύεται από μία τιμή η οποία επιλέγεται από ένα πεπερασμένο σύνολο πιθανών τιμών. Η διαφορά μεταξύ του αρχικού μη κβαντισμένου δείγματος  $x(n)$  και της κβαντισμένης εξόδου  $x_q(n)$  αποτελεί το λεγόμενο σφάλμα κβάντισης.
3. Κωδικοποίηση (coding): Κατά τη διαδικασία της κωδικοποίησης, κάθε διακριτή τιμή  $x_q(n)$  αντιπροσωπεύεται από έναν αριθμό αποτελούμενο από  $b$ -bits.



**Εικόνα 2-24 Κβάντιση και κωδικοποίηση αναλογικού σήματος<sup>[6]</sup>**

## 2.8 Επεξεργαστές ψηφιακού σήματος (DSP)<sup>[7]</sup>

Οι επεξεργαστές ψηφιακού σήματος (DSP) λαμβάνουν σήματα πραγματικού κόσμου όπως φωνή, ήχο, βίντεο, θερμοκρασία, πίεση ή θέση που έχουν ψηφιοποιηθεί και στη συνέχεια τα χειρίζονται με μαθηματικό τρόπο. Ένα DSP έχει σχεδιαστεί για την εκτέλεση μαθηματικών συναρτήσεων όπως "πρόσθεση", "αφαίρεση", "πολλαπλασιασμός" και "διαίρεση" πολύ γρήγορα.

Στην περίπτωση της δικής μας εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο DSPeZdsp™ F28335 του οποίου τα χαρακτηριστικά αναλύονται στην παράγραφο 2.11, προκειμένου να παράγει τα σήματα παλμοδότησης για το IGBT.

Τα σήματα πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία έτσι ώστε οι πληροφορίες που περιέχουν να μπορούν να εμφανιστούν, να αναλυθούν ή να μετατραπούν σε άλλο τύπο σήματος που μπορεί να είναι χρήσιμο. Στον πραγματικό κόσμο, τα αναλογικά κυκλώματα ανιχνεύουν σήματα όπως ήχο, φως, θερμοκρασία ή πίεση και τα χειρίζονται. Στη συνέχεια, μετατροπείς όπως ένας μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό λαμβάνουν το πραγματικό σήμα και το μετατρέπουν στην ψηφιακή μορφή των 1 και 0. Από εδώ και μετά, το DSP αναλαμβάνει τη λήψη των ψηφιοποιημένων πληροφοριών και την επεξεργασία τους. Στη

συνέχεια τροφοδοτεί τις ψηφιοποιημένες πληροφορίες για χρήση στον πραγματικό κόσμο. Αυτό το κάνει με έναν από τους δύο τρόπους, είτε ψηφιακά είτε σε αναλογική μορφή, περνώντας από έναν μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό. Όλα αυτά συμβαίνουν σε πολύ υψηλές ταχύτητες.

Για να επεξηγηθεί αυτή η ιδέα, το παρακάτω διάγραμμα δείχνει πώς χρησιμοποιείται ένα DSP σε μια συσκευή αναπαραγωγής ήχου MP3. Κατά τη φάση της εγγραφής, ο αναλογικός ήχος εισάγεται μέσω ενός δέκτη ή άλλης πηγής. Αυτό το αναλογικό σήμα στη συνέχεια μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα από έναν μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό και περνά στο DSP. Το DSP εκτελεί την κωδικοποίηση MP3 και αποθηκεύει το αρχείο στη μνήμη. Κατά τη φάση της αναπαραγωγής, το αρχείο λαμβάνεται από τη μνήμη, αποκωδικοποιείται από το DSP και στη συνέχεια μετατρέπεται ξανά σε αναλογικό σήμα μέσω του μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό, ώστε να μπορεί να εξέρχεται μέσω του συστήματος ηχείων. Σε ένα πιο περίπλοκο παράδειγμα, το DSP θα εκτελούσε άλλες λειτουργίες όπως έλεγχο έντασης ήχου, εξισορρόπηση και διεπαφή χρήστη.



**Εικόνα 2-25** DSP σε μια συσκευή αναπαραγωγής ήχου MP3<sup>[7]</sup>

Οι πληροφορίες ενός DSP μπορούν να χρησιμοποιηθούν από έναν υπολογιστή για τον έλεγχο θεμάτων όπως η ασφάλεια, το τηλέφωνο, τα συστήματα οικιακού κινηματογράφου και η συμπίεση βίντεο. Τα σήματα μπορούν να συμπιέζονται έτσι ώστε να μπορούν να μεταδίδονται γρήγορα και πιο αποτελεσματικά από το ένα μέρος στο άλλο (π.χ. η τηλεδιάσκεψη μπορεί να μεταδώσει ομιλία και βίντεο μέσω τηλεφωνικών γραμμών). Τα σήματα μπορούν επίσης να βελτιωθούν ή να τροποποιηθούν για τη βελτίωση της ποιότητάς τους ή την παροχή πληροφοριών που δεν γίνονται αντιληπτές από



τον άνθρωπο (π.χ. ακύρωση ηχούς για κινητά τηλέφωνα ή ιατρικές εικόνες βελτιωμένες με υπολογιστή). Αν και τα σήματα του πραγματικού κόσμου μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία στην αναλογική τους μορφή, η ψηφιακή επεξεργασία σημάτων παρέχει τα πλεονεκτήματα της υψηλής ταχύτητας και ακρίβειας.

## 2.9 PWM διαμόρφωση<sup>[2]</sup>

Οι αντιστροφείς που λειτουργούν σε χαμηλή συχνότητα (π.χ. τα ημιαγωγικά τους στοιχεία ανάβουν και σβήνουν μία φορά κάθε περίοδο της τάσης εξόδου) εξάγουν, συνήθως, κακή ποιότητα ρεύματος και τάσης με αποτέλεσμα να επιδρούν αρνητικά στα ηλεκτρομηχανικά μεγέθη των καταναλωτών ή του δικτύου (στην περίπτωση που ο αντιστροφέας τροφοδοτεί το δίκτυο με ισχύ).

Στην προσπάθεια για βελτίωση της ποιότητας του ρεύματος εξόδου στους αντιστροφείς χαμηλής συχνότητας χρησιμοποιούνταν τεράστια και ακριβά φίλτρα τα οποία πολλές φορές δημιουργούσαν νέα προβλήματα (ταλαντώσεις, υποαρμονικές, αύξηση απωλειών κ.α.).

Στις σύγχρονες εφαρμογές είναι αναγκαία η δυνατότητα μεταβολής της τάσης αλλά και της συχνότητας εξόδου του αντιστροφέα και μάλιστα ανεξάρτητα. Ένα κλασικό παράδειγμα είναι ο έλεγχος τάσης-συχνότητας (V/f) ασύγχρονης μηχανής βραχυκυκλωμένου δρομέα. Αυτό είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί με τους αντιστροφείς χαμηλής συχνότητας.

Για τους παραπάνω λόγους (ποιότητα τάσης-ρεύματος και έλεγχος V/f) δημιουργήθηκε η ανάγκη για τη χρησιμοποίηση αντιστροφέων υψηλής συχνότητας. Σε αυτούς, τα ημιαγωγικά στοιχεία αναβοσβήνουν πολλές φορές σε μια περίοδο της τάσης φορτίου (ή δικτύου). Τέτοιοι αντιστροφείς μπορούν να υλοποιηθούν σήμερα, καθώς κατασκευάστηκαν ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος εξαναγκασμένης σβέσης που λειτουργούν σε υψηλή διακοπτική συχνότητα (π.χ. IGBT, MOSFET κ.α.). Για την παλμοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων των αντιστροφέων αυτών χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές παλμοδότησης. Οι επικρατέστερες αυτών είναι η PWM, η sPWM και η HCC.

PWM – PulseWidthModulation (διαμόρφωση εύρους παλμών).

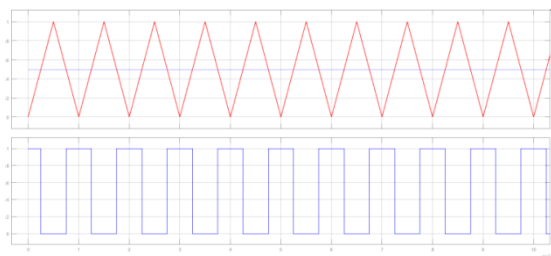
sPWM- sinusoidalPulseWidthModulation (ημιτονοειδή διαμόρφωση εύρους παλμών).

HCC – Hysteresis Current Control (έλεγχοςβρόχουστέρησης).

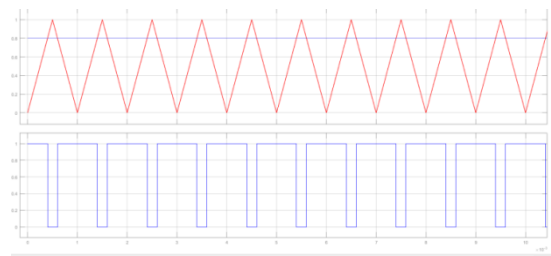
Φυσικά υπάρχουν πολλές ακόμη τεχνικές παλμοδότησης ευρέως χρησιμοποιούμενες ανάλογα με την εφαρμογή. Όμως οι τρεις προαναφερόμενες είναι χαρακτηριστικές τεχνικές πάνω στις οποίες βασίζονται πολλές από τις υπόλοιπες που δεν αναφέρονται εδώ. Στην παρούσα διάλεξη θα αναλυθούν κυρίως οι δύο πρώτες.

## 2.10 Τεχνική παλμοδότησης PWM – PulseWidthModulation (διαμόρφωση εύρους παλμών).<sup>[2]</sup>

Σ' αυτή την παλμοδότηση οι παλμοί λαμβάνονται από τη σύγκριση ενός τριγωνικού σήματος κάποιας συχνότητας με ένα DC σήμα (Σχήμα 2-8). Από τη σύγκριση αυτή λαμβάνονται παλμοί σταθερού πλάτους και συχνότητας ίσης με του τριγωνικού σήματος. Το πλάτος του DC σήματος μεταβάλλεται από μηδέν ως το πλάτος του τριγωνικού σήματος αυξομειώνοντας το πλάτος των παλμών.



(α)



(β)

**Σχήμα 2-8 Δημιουργία παλμών στην PWM για DC συνιστώσα α) 0,5 και β) 0,8.<sup>[2]</sup>**

## 2.11 ΟΨηφιακός επεξεργαστής σήματος (DSP)

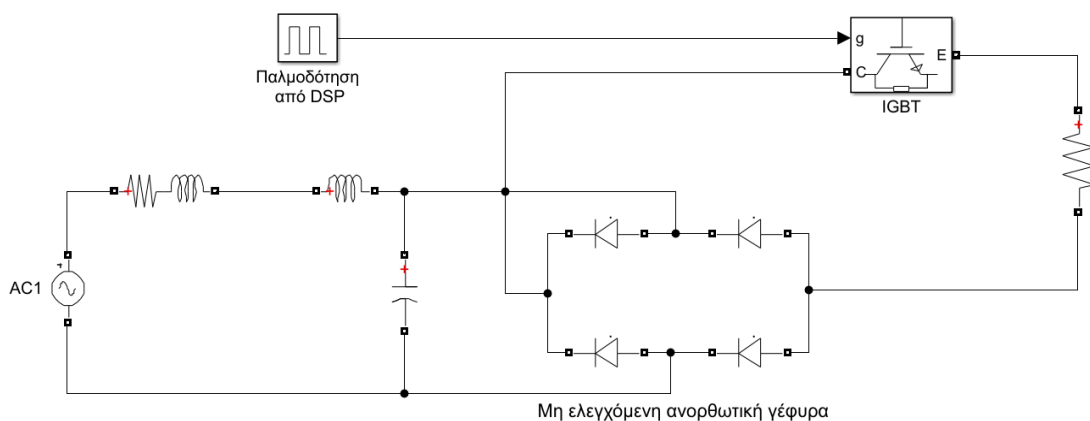
Το eZdsp™ F28335 έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Ελεγκτής ψηφιακού σήματος TMS320F28335
- Ταχύτητα λειτουργίας 150 Mhz.
- Σε μονάδα κινητού σημείου 32-bit
- RAMon-chip 68Kbyte
- Flash μνήμη 512K byte on-chip
- Μνήμη SRAM 256K byte off-chip
- Σε μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (A / D) τσιπ 12 bit με 16 κανάλια εισόδου
- Ρολόι εισόδου 30 MHz.
- Ενσωματωμένη σύνδεση RS-232 με πρόγραμμα οδήγησης γραμμής
- Ενσωματωμένη διεπαφή CAN 2.0 με πρόγραμμα οδήγησης γραμμής και υποδοχή
- Σύνδεση πολλαπλής επέκτασης (αναλογικός, I / O)
- Ενσωματωμένος ελεγκτής USBJTAG
- Λειτουργία μόνο 5 volt με τον παρεχόμενο μετασχηματιστή AC
- Ενσωματωμένη σύνδεση εξομοίωσης IEEE 1149.1 JTAG

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Ο ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

### 3.1 Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας κατασκευάστηκε ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος κατάλληλος για την τροφοδοσία ηλεκτρικού θερμοσίφωνα. Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από μια μονοφασική μη-ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα στην έξοδο της οποίας είναι τοποθετημένο ένα τρανζίστορ IGBT. Ο έλεγχος της τάσης στην DC πλευρά πραγματοποιείται με την κατάλληλη παλμοδότηση του IGBT από έναν μικροελεγκτή DSP. Η τοπολογία του μετατροπέα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 3-1 Η τοπολογία της ανορθωτικής διάταξης σε περιβάλλον Simulink/Matlab**

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3-1 η ανορθωτική διάταξη αποτελείται από τέσσερις διόδους. Στην είσοδο τροφοδοτείται από ένα AC δίκτυο πλάτους  $V_o=230 \times \sqrt{2}V$ , 50Hz. Η τάση αυτή ανορθώνεται από μία γέφυρα μη ελεγχόμενη η οποία συνδέεται σε σειρά με ένα τρανζίστορ ισχύος IGBT. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία ανορθωτική διάταξη υποβιβασμού τάσης φορτίου. Με την παλμοδότηση του IGBT ελέγχεται η ισχύς του φορτίου (δηλαδή εν προκειμένω, της ηλεκτρικής αντίστασης του θερμοσίφωνα) και

συγχρόνως είναι δυνατόν, με την κατάλληλη παλμοδότηση να βελτιωθεί η ποιότητα ισχύος.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτρονικών διακοπτικών στοιχείων ισχύος (Thyristor, IGBT, GTO, MOSFET, ισχύος, δίοδοι) οι οποίοι μας παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου της ποιότητας της ισχύος και τα οποία παρουσιάζουν κάποιες διαφορές. Τυπικά σύμβολα στοιχείων είναι:

A = Άνοδος (Anode)	C = Συλλέκτης (Collector)
K = Κάθοδος (Kathode)	B = Βάση (Base.)
G = Πύλη (Gate)	E = Εκπομπός (Emitter)

Τα κριτήρια επιλογής ενός συγκεκριμένου διακοπτικού στοιχείου είναι τα παρακάτω:

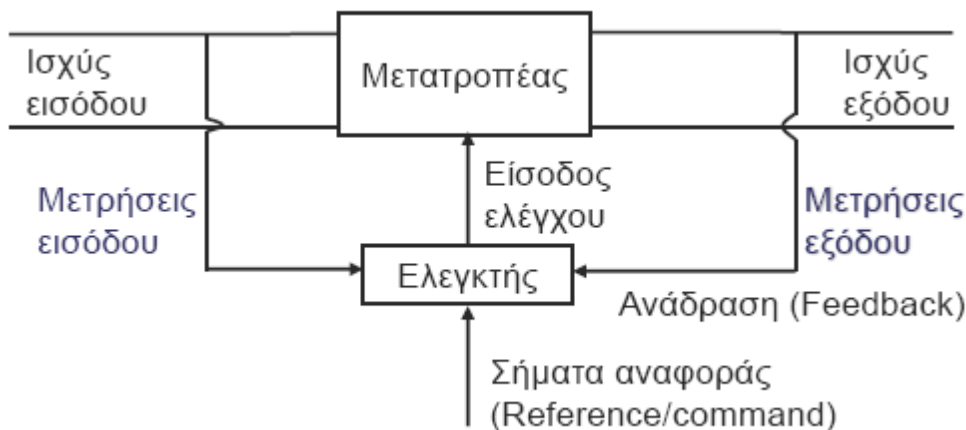
- Τάση και αντίσταση αγωγιμότητας καθορίζουν τις απώλειες αγωγιμότητας
- Οι χρόνοι μετάβασης καθορίζουν τις απώλειες μετάβασης □
- Οι ονομαστικές τάσεις και ρεύματα καθορίζουν την ικανότητα διαχείρισης ισχύος
- Η ισχύς στο κύκλωμα ελέγχου καθορίζει την ευκολία έλεγχου
- Ο θερμοκρασιακός συντελεστής της αντίστασης αγωγιμότητας καθορίζει την ευκολία παραλληλισμού
- Κόστος

Επίσης υπάρχουν διάφοροι τύποι μετατροπέων ισχύος ανάλογα με την είσοδο και την έξοδό τους<sup>[8]</sup>

Πίνακας 3-1

Τύποι μετατροπέων με ηλεκτρονικά ισχύος [...]<sup>[9]</sup>

<div style="text-align: center;">                     Ισχύς εξόδου                      /                      Ισχύς εισόδου                 </div>	DC	AC
AC	Μετατροπείς AC σε DC ή Ανορθωτές (Rectifiers)	Μετατροπείς AC σε AC ή <i>Με σταθερή συχνότητα:</i> AC ρυθμιστές <i>Με μεταβλητή συχνότητα:</i> Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters)
DC	Μετατροπείς DC σε DC ή Ψαλιδιστές (Choppers)	Μετατροπείς DC σε AC ή Αντιστροφείς (Inverters)

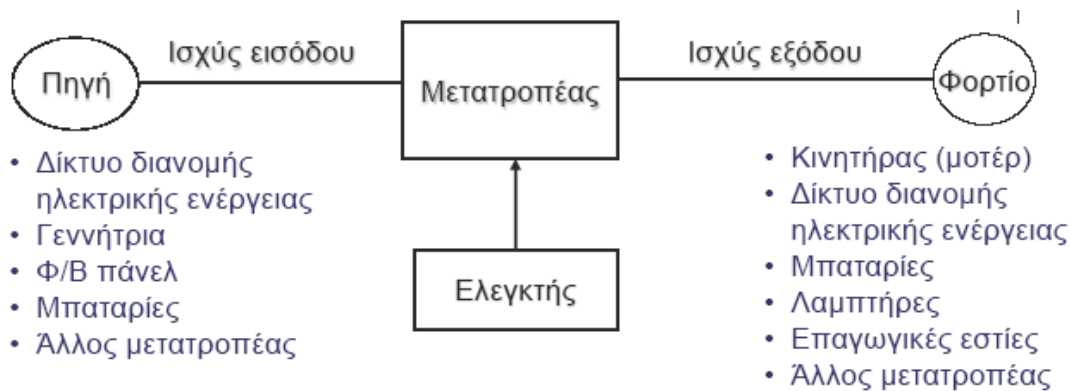


Διάγραμμα 3-1

Γενική δομή συστήματος με μετατροπείς ισχύος<sup>[9]</sup>

Ο μετατροπέας περιλαμβάνει κυκλώματα για μετρήσεις τάσεων-ρευμάτων. Ο ελεγκτής περιλαμβάνει διεπαφές για υποδοχή σημάτων αναφοράς και των μετρήσεων εισόδου/εξόδου.

Ο μετατροπέας καθορίζει την ποιότητα ισχύος. Η ισχύς (δηλαδή η μορφή τάσης- ρεύματος) που παρέχεται στα φορτία πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις τους<sup>[9]</sup>



**Διάγραμμα 3-2 Παραδείγματα πηγών ισχύος και φορτίων<sup>[9]</sup>**

Στη συγκεκριμένη κατασκευή δεν τοποθετήθηκε θυρίστορ αλλά διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης IGBT διότι, θα αντιμετωπίζαμε πρόβλημα με τη σβέση του θυρίστορ, η οποία επέρχεται είτε με την μείωση του ρεύματος κάτω από μια οριακή τιμή (ρεύμα συγκράτησης) είτε με το να γίνει πολικότητα της ανόδου αρνητική σε σχέση με την κάθοδο εφαρμόζοντας ανάστροφη τάση. Στην περίπτωση μας με την χρησιμοποίηση του τρανζίστορ ισχύος αντί του θυρίστορ δεν χρειαζόμαστε κύκλωμα σβέσης καθώς η σβέση ελέγχεται από το κύκλωμα παλμοδότησης. Ωστόσο είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος εξαναγκασμένης σβέσης που λειτουργεί σε υψηλή διακοπτική συχνότητα. Τέλος, άλλα κριτήρια επιλογής ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος αποτελούν, η τιμή της ισχύος, οι διακοπτικές απώλειες, η τάση συλλέκτη εκπομπού, κ.α.

### 3.2 Είδος φορτίου

Ως φορτίο χρησιμοποιείται μια ωμική αντίσταση ισχύος 4 kW παρόμοια με την αντίσταση ενός ηλεκτρικού θεμοσίφωνα. Το ρεύμα ενός τέτοιου φορτίου επηρεάζει σε στενά όρια την τάση του δικτύου λόγω της εμπέδησης του δικτύου διανομής. Έτσι, αυξάνοντας το ρεύμα του φορτίου μειώνεται η τάση του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό επεμβαίνοντας στο φορτίο την κατάλληλη χρονική στιγμή με την κατάλληλη τιμή ισχύος, επιτυγχάνεται η επιθυμητή τάση δικτύου. Επίσης, εισάγοντας ανώτερες αρμονικές στο ρεύμα, εισάγονται ανώτερες αρμονικές στην τάση και στο ρεύμα του δικτύου που εξουδετερώνουν τις υπάρχουσες αρμονικές. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να

βελτιωθεί η ποιότητα της τάσης δικτύου. Τοποθετώντας πλήθος τέτοιων φορτίων, μπορούμε να ελέγξουμε την τάση και το ρεύμα σε ευρεία κλίμακα.

Η λειτουργία του μετατροπέα δοκιμάστηκε θεωρητικά μέσω εξομοίωσης, ύστερα κατασκευάστηκε και τέλος δοκιμάστηκε εργαστηριακά η λειτουργία του.

### 3.3 Παλμοδότηση<sup>[10]</sup>

Η διαμόρφωση παλμών γίνεται για να επιτευχθεί αφενός έλεγχος της τάσης και αφετέρου καλύτερη προσέγγιση της αμιγώς ημιτονοειδούς μορφής και άρα μείωση των αρμονικών. Οι βασικές κατηγορίες τεχνικών διαμόρφωσης παλμών είναι:

- (1) μονοπαλμική διαμόρφωση εύρους παλμού (single PWM)
- (2) πολυπαλμική διαμόρφωση εύρους παλμού (multiple PWM)
- (3) ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμού (SPWM)
- (4) τροποποιημένη ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμού (modified SPWM ή MSPWM)
- (5) προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης

Η βασική λογική είναι η εξής: χρησιμοποιείται ένα σήμα αναφοράς  $A_r$  (reference) (ορθογώνιο ή ημιτονοειδές) και ένα φέρον σήμα  $A_c$  (carrier) (τριγωνικό) (όπως φαίνεται στα επόμενα σχήματα). Ορίζεται προφανώς η συχνότητα  $f_r$  του σήματος αναφοράς και η συχνότητα  $f_c$  του φέροντος σήματος. Τα δύο σήματα συγκρίνονται και ανάλογα με το αποτέλεσμα παράγεται ή δεν παράγεται παλμός. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν διαφορετικές λογικές παραγωγής παλμού ακόμα και για τον ίδιο τύπο διαμόρφωσης.<sup>[10]</sup> Παρακάτω αναλύονται τρεις από τις παραπάνω τεχνικές διαμόρφωσης παλμών

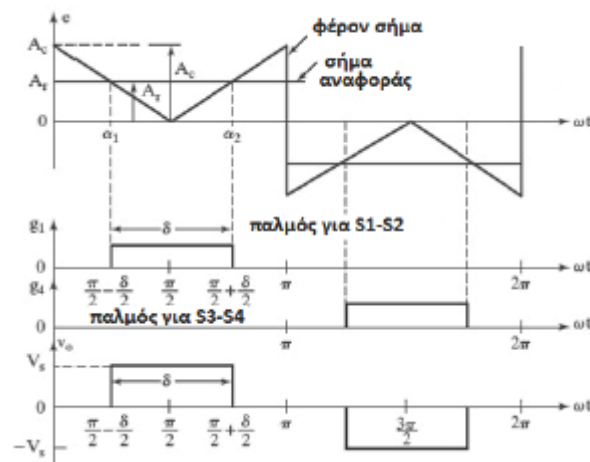
#### 3.3.1 Μονοπαλμική διαμόρφωση PWM<sup>[10]</sup>

Με τον όρο μονοπαλμική PWM περιγράφεται η τεχνική με την οποία παράγεται μόνο ένας παλμός ανά περίοδο για κάθε διακόπτη και ένα παράδειγμα παρατίθεται στην Εικόνα 6.6. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα παλμός για τα S1-S2 (συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας) παράγεται όταν (και



για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μεγαλύτερο από το θετικό φέρον σήμα, ενώ παλμός για τα S3-S4

παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μικρότερο από το αρνητικό φέρον σήμα.



**Σχήμα 3-2 Μονοπαλμική PWM διαμόρφωση[10]**

### 3.3.2 Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμού (SPWM)<sup>[10]</sup>

Στην ημιτονοειδή PWM αντί να έχουν όλοι οι παλμοί το ίδιο εύρος (όπως στην μονοπαλμική και στην πολυπαλμική), το εύρος κάθε παλμού μεταβάλλεται ανάλογα με το πλάτος ενός ημιτονοειδούς σήματος. Το σήμα αναφοράς είναι ένα ημίτονο της ίδιας συχνότητας με την επιθυμητή συχνότητα εξόδου. Η συχνότητα  $f_r$  του σήματος αναφοράς καθορίζει την συχνότητα εξόδου και το πλάτος του καθορίζει την RMS τιμή της τάσης εξόδου. Οι αρμονικές ωθούνται προς υψηλές συχνότητες (γύρω από την συχνότητα του φέροντος).

Ορίζονται:

(1) ο δείκτης διαμόρφωσης πλάτους (amplitude modulation index):  $m_a = \frac{A_r}{A_c}$

(προφανώς εδώ με  $A_r$  και  $A_c$  εννοούνται τα πλάτη του σήματος αναφοράς και του φέροντος, αντίστοιχα)

(2) ο δείκτης διαμόρφωσης συχνότητας (frequency modulation index):  $m_f = \frac{f_c}{f_r}$

### 3.3.3 Προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης[10]

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τεχνικές όπως η τραπεζοειδής όπου το σήμα αναφοράς είναι τραπέζιο, η κλιμακωτή όπου το σήμα αναφοράς είναι ένα κλιμακωτό κύμα, η βηματική όπου το σήμα αναφοράς αποτελείται από βηματικά μέρη, η έγχυση αρμονικών όπου το σήμα αναφοράς παράγεται με έγχυση συγκεκριμένων αρμονικών και η διαμόρφωση δέλτα όπου ένα τριγωνικό σήμα ταλαντώνεται εντός ορισμένου παραθύρου, γύρω από το ημιτονοειδές σήμα αναφοράς.

Η παλμοδότηση που χρησιμοποιείται στον μετατροπέα της πτυχιακής εργασίας είναι τύπου PWM. Η εργασία αυτή έχει στόχο την κατασκευή και λειτουργία του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος και την απόδειξη ότι μέσω του μετατροπέα αυτού μπορεί να επηρεαστεί η τάση του δικτύου. Δηλαδή, δεν πραγματεύεται τον έλεγχο και την κατάλληλη τεχνική παλμοδότησης για την ποιότητα της τάσης. Όμως, η τεχνική παλμοδότησης που χρησιμοποιείται είναι ίδιου τύπου και συχνότητας με αυτή που θα χρησιμοποιηθεί στο μέλλον. Αυτή είναι η PWM με συχνότητα στην περιοχή των 10 kHz. Οι παλμοί λαμβάνονται από τον μικροελεγκτή DSP και το duty cycle μεταβάλλεται προγραμματιστικά και ποσοστιαία. Έτσι, με μικρό duty cycle λαμβάνουμε μικρό ρεύμα και μικρή πτώση τάσης. Σ' αυτή την παλμοδότηση οι παλμοί λαμβάνονται από τη σύγκριση ενός τριγωνικού σήματος κάποιας συχνότητας με ένα DC σήμα. Από τη σύγκριση αυτή λαμβάνονται παλμοί σταθερού πλάτους και συχνότητας ίσης με του τριγωνικού σήματος. Το πλάτος του DC σήματος μεταβάλλεται από μηδέν ως το πλάτος του τριγωνικού σήματος αυξομειώνοντας το πλάτος των παλμών

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, στόχος της εργασίας αυτής είναι η κατασκευή του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Συγκεκριμένα δοκιμάζεται η κατασκευή και η λειτουργία του. Ένα παράδειγμα δοκιμής και προσαρμογής του κυκλώματος είναι η μείωση των υπερτάσεων που συνήθως εμφανίζονται κατά τη διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα και δεν του επιτρέπουν να λειτουργήσει σωστά. Για λόγους όπως ο παραπάνω, η λειτουργία του μετατροπέα δοκιμάστηκε θεωρητικά μέσω εξομοίωσης, ύστερα κατασκευάστηκε και τέλος δοκιμάστηκε εργαστηριακά.

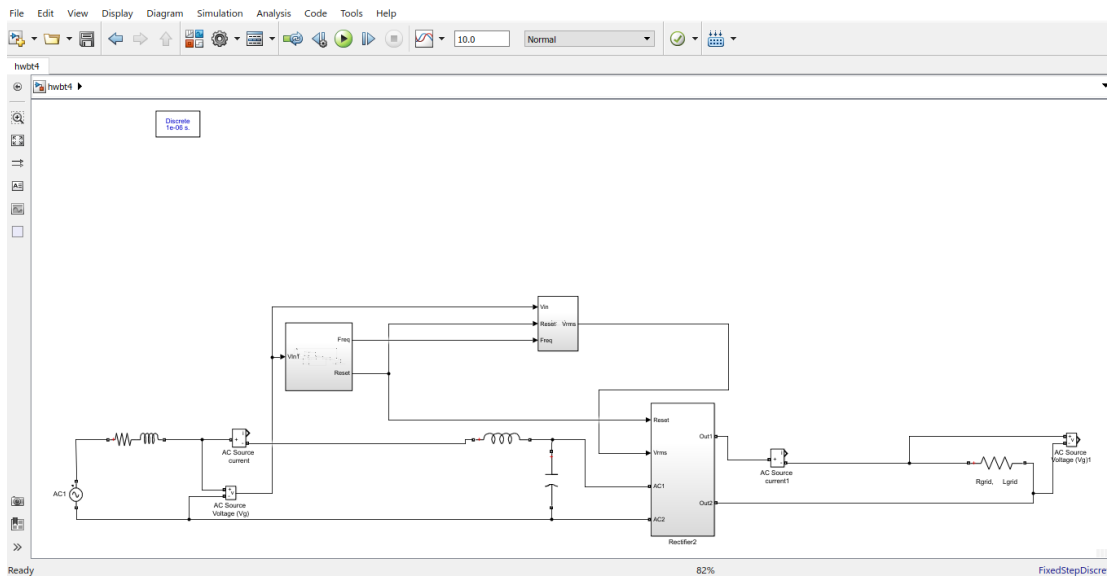
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 Εξομοίωση

Για τη θεωρητική μελέτη και τη δοκιμή της λειτουργίας του συστήματος πραγματοποιήθηκε εξομοίωση μέσω του προγράμματος Simulink του Matlab το οποίο μας παρείχε πληθώρα δυνατοτήτων κι επιλογών ώστε να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στο πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιούνται διαγράμματα ‘blocks’ στη δομή του προγράμματος μέσω των οποίων δίνεται η δυνατότητα εύκολης μεταβολής του συστήματος εξομοίωσης για δοκιμή και επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων. Στη συνέχεια με μικρές αλλαγές στο περιβάλλον εξομοίωσης, αντικαθιστώντας κάποια blocks μπορούμε να προγραμματίσουμε τον επεξεργαστή που παλμοδοτεί και ελέγχει τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος. Παρακάτω αναλύονται τα επιμέρους συστήματα του εξομοιωμένου μετατροπέα.

### 4.2 Συστήματα προσομοίωσης

#### 4.2.1 Κυρίως σύστημα προγράμματος

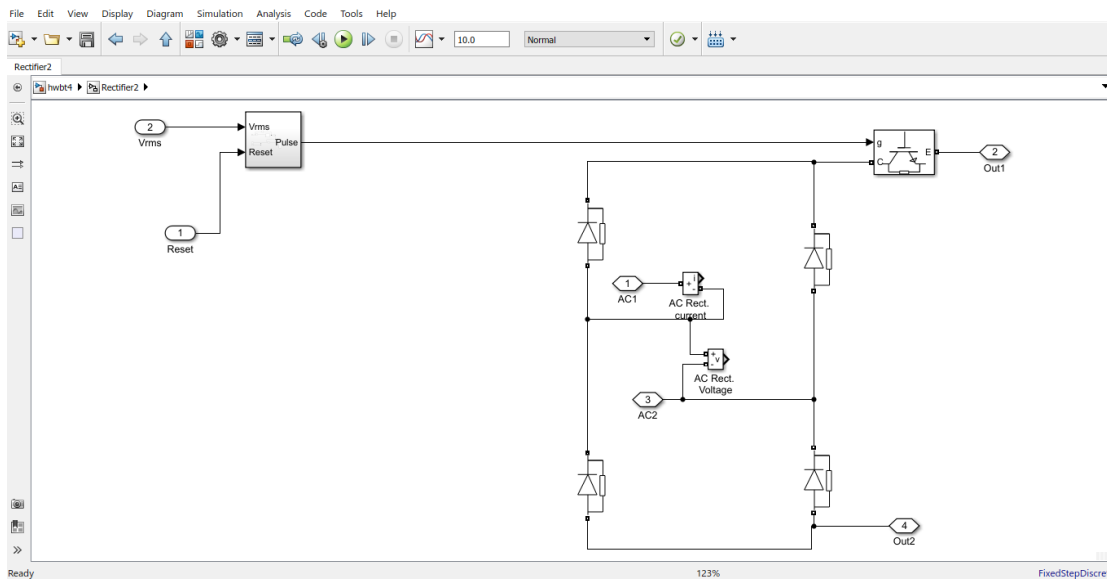


Σχήμα 4-1 Κυρίως σύστημα προγράμματος

Στο παραπάνω Σχήμα 4-1 αρχικά τοποθετήσαμε την πηγή τάσης πλάτους  $V_0=230 \times \sqrt{2} V$  και την εμπέδηση γραμμής μέσης τάσης

$z = 1 + j0,0001 \Omega$  , όπου  $R=1\Omega$  και  $X=0,0001\Omega$  δύο αισθητήρες (τάσης και ρεύματος εισόδου), κατωδιαβατό φίλτρο (εν σειρά πηνίο με συντελεστή αυτεπαγωγής 1mH και παράλληλα πυκνωτής χωρητικότητας 5μF) το υποσύστημα το οποίο είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό της ενεργού τιμής της τάσης, το υποσύστημα ανάγνωσης της συχνότητας, όπως και το υποσύστημα ανόρθωσης της τάσης και παλμοδότησης του τρανζίστορ IGBT και την τροφοδότηση του ωμικού φορτίου.

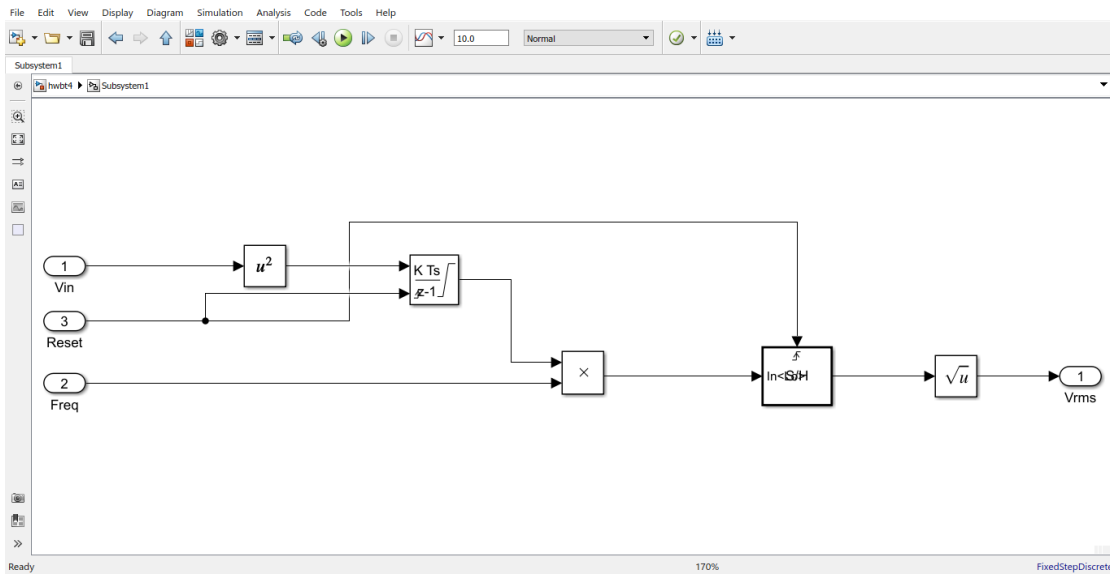
#### 4.2.2 Υποσύστημα ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος.



**Σχήμα 4-2** Υποσύστημα ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος

Στο παραπάνω Σχήμα 4-2 φαίνεται το υποσύστημα της παλμοδότησης του IGBT καθώς και η ανόρθωση της τάσης από συνδεσμολογία γέφυρας πλήρους ανόρθωσης. Από την έξοδο της γέφυρας λαμβάνεται συνεχής τάση η οποία θα τροφοδοτήσει το φορτίο μας, δηλαδή τον έξυπνο ηλεκτρικό θερμοσίφωνα.

### 4.2.3 Υποσύστημα υπολογισμού της ενεργού τιμής της τάσης.

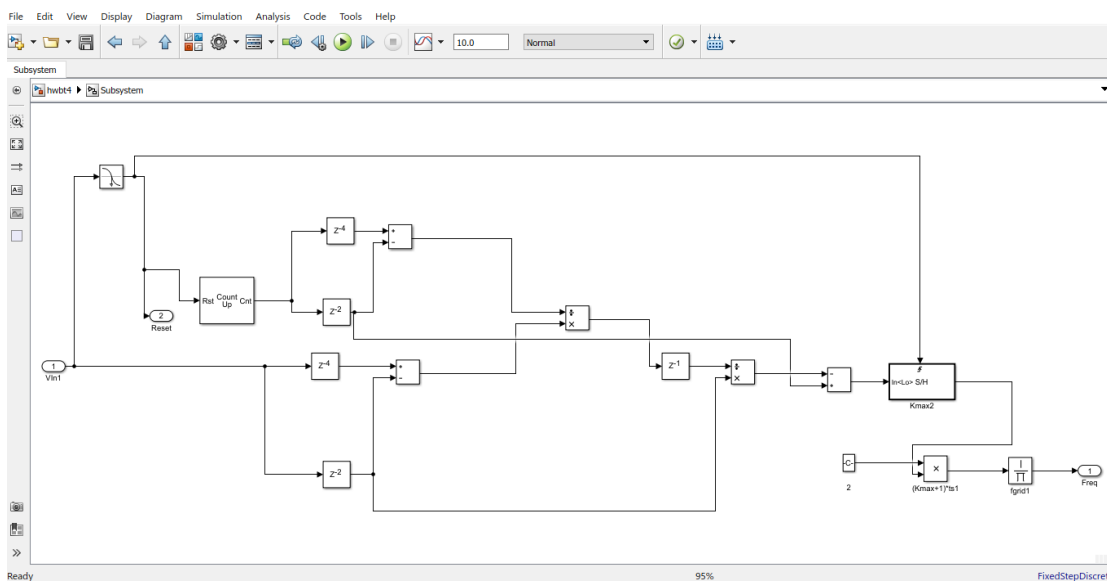


**Σχήμα 4-3** Υποσύστημα υπολογισμού της ενεργού τιμής της τάσης

Στο παραπάνω Σχήμα 4-3 φαίνεται το υποσύστημα στο οποίο σαν είσοδο έχουμε την συχνότητα, το reset και την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου.

Γνωρίζοντας ότι:  $V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (V_0)^2 * \sin^2(\omega t) d\omega t}$  επιλέξαμε τα απαιτούμενα blocks για τον υπολογισμό της ενεργού τιμής της τάσης. Αρχικά δίνουμε σαν είσοδο την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου και παίρνουμε το τετράγωνο της τάσης. Το σήμα του τετραγώνου μαζί με το σήμα reset μπαίνουν σαν είσοδοι σε έναν ολοκληρωτή. Μέσα στον ολοκληρωτή υπάρχει ένα hit crossing block του οποίου η λειτουργία έχει ως εξής: όταν το ημίτονο εναλλάσσει τις τιμές του από θετικές σε αρνητικές τη χρονική στιγμή που τέμνει τον άξονα X'X της τάσης, δίνει παλμό. Το σήμα εξόδου του ολοκληρωτή πολλαπλασιάζεται με τη συχνότητα ( $f = \frac{1}{T}$ ) κι οδηγείται στο sample and hold block το οποίο όταν δεχθεί σήμα στην θύρα ενεργοποίησης, βγάζει στην έξοδο την τιμή της εισόδου μέχρι να δεχθεί εκ νέου σήμα στην θύρα ενεργοποίησης. Τέλος, το σήμα εξόδου του sample and hold block οδηγείται σαν είσοδος στην τελευταία μονάδα, την τετραγωνική ρίζα ώστε να υπολογιστεί η ενεργός τιμή της τάσης.

## 4.2.4 Υποσύστημα ανάγνωσης της ηλεκτρικής συχνότητας



**Σχήμα 4-4** Υποσύστημα ανάγνωσης της ηλεκτρικής συχνότητας

Στο παραπάνω Σχήμα 4-4) φαίνεται το υποσύστημα ανάγνωσης της συχνότητας τροφοδοσίας. Σε αυτό το σημείο οφείλουμε να προσθέσουμε το γεγονός του ότι για να γίνει ακριβής υπολογισμός της ηλεκτρικής συχνότητας του δικτύου τροφοδοσίας, λόγω του ότι δεν είναι στην πραγματικότητα ακριβώς ίση με 50 Hz, ένας από τους κατάλληλους τρόπους είναι η εφαρμογή του εργαλείου υπολογισμού της γραμμικής παρεμβολής. Η γραμμική παρεμβολή είναι μια διαδικασία που επιτρέπει να συναγάγεται μια τιμή μεταξύ δύο καλά καθορισμένων τιμών, οι οποίες μπορούν να είναι σε έναν πίνακα ή σε ένα γραμμικό γράφημα. Για παράδειγμα, εάν είναι γνωστό ότι 3 λίτρα γάλα αξίζουν 4€ και 5 λίτρα αξίζει 7€, για να υπολογιστεί η αξία 4 λίτρων γάλακτος, χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή για να προσδιοριστεί η ενδιάμεση τιμή. Η γραμμική παρεμβολή χρησιμοποιείται διότι στην πράξη οι τιμές που λαμβάνονται είναι διακριτές στο χρόνο και δεν εφάπτεται ποτέ ακριβώς στο μηδέν. Αρα δε «διαβάζουμε» ποτέ την τιμή μηδενισμού που είναι και η ζητούμενη.

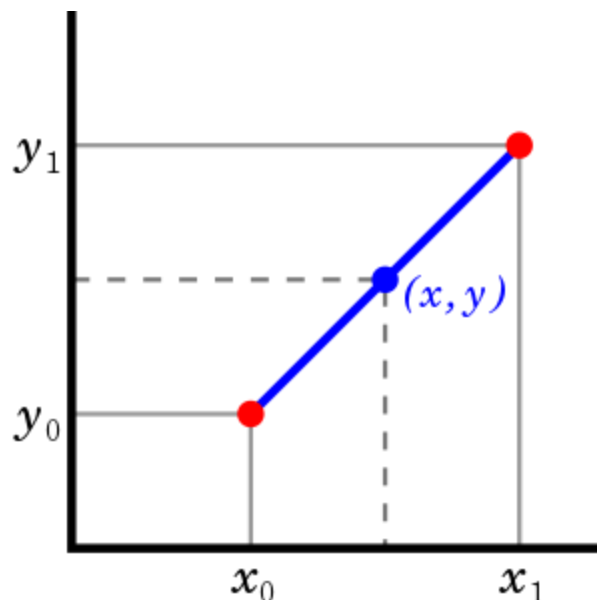
Εάν τα δύο γνωστά σημεία δίνονται από τις συντεταγμένες  $(x_0, y_0)$  και  $(x_1, y_1)$ , η γραμμική παρεμβολή είναι η ευθεία γραμμή μεταξύ αυτών των

σημείων. Για μια τιμή  $x$  στο διάστημα  $(x_0, x_1)$ , η τιμή  $y$  κατά μήκος της ευθείας γραμμής δίνεται από την εξίσωση των κλίσεων

$$\frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}$$

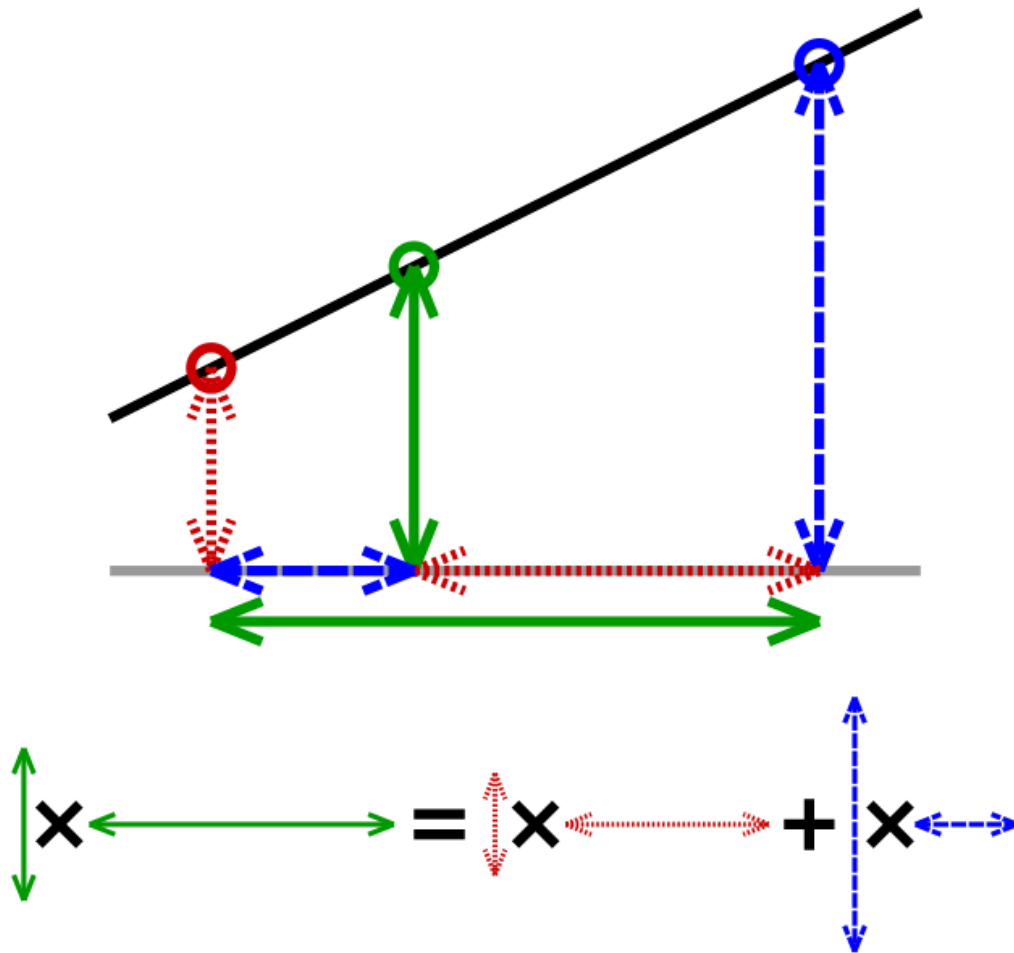
Για να είναι μια παρεμβολή γραμμική, είναι απαραίτητο το πολυώνυμο παρεμβολής να είναι βαθμού ένα ( $n = 1$ ), έτσι ώστε να προσαρμόζεται στις τιμές του  $x_0$  και  $x_1$ . Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς  $y$  παίρνουμε

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = \frac{y_0(x_1 - x) + y_1(x - x_0)}{x_1 - x_0}$$



**Σχήμα 4-5** Γραφικός προσδιορισμός συντεταγμένων με τη βοήθεια της γραμμικής παρεμβολής<sup>[11]</sup>

Στη γεωμετρική απεικόνιση του σχήματος 4-6, η τιμή στον πράσινο κύκλο πολλαπλασιαζόμενη με την οριζόντια απόσταση μεταξύ του κόκκινου και του μπλε κύκλου είναι ίση με το άθροισμα της τιμής στον κόκκινο κύκλο πολλαπλασιαζόμενο με την οριζόντια απόσταση μεταξύ του πράσινου και του μπλε κύκλου και η τιμή στο ο μπλε κύκλος πολλαπλασιασμένος με την οριζόντια απόσταση μεταξύ του πράσινου και του κόκκινου κύκλου.

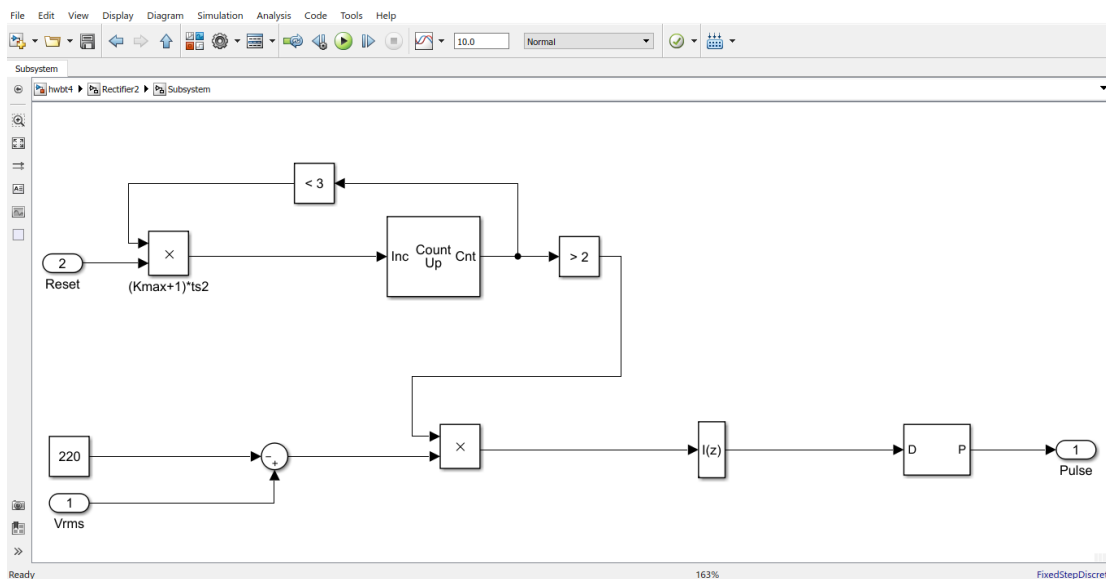


Σχήμα 4-6 Γεωμετρική απεικόνιση της γραμμικής παρεμβολής<sup>[11]</sup>

Το υποσύστημα στο οποίο αναφερόμαστε αποτελείται από ένα hit crossing σε σειρά ένας counter και σε σειρά ένα sample and hold το οποίο όταν ενεργοποιείται δίνει reset στην είσοδο του counter. Στη συνέχεια προστίθεται στο σήμα η σταθερά 1 και πολλαπλασιάζεται με το sample time (= 0.00001) ώστε να πάρουμε τον αντίστροφο αριθμό (συχνότητα). Έπειτα πολλαπλασιάζεται με τον σταθερό αριθμό  $10^{-6}$  ώστε να πάρουμε τη συχνότητα τροφοδοσίας και ως αποτέλεσμα λαμβάνουμε στην έξοδο συχνότητα με ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων.



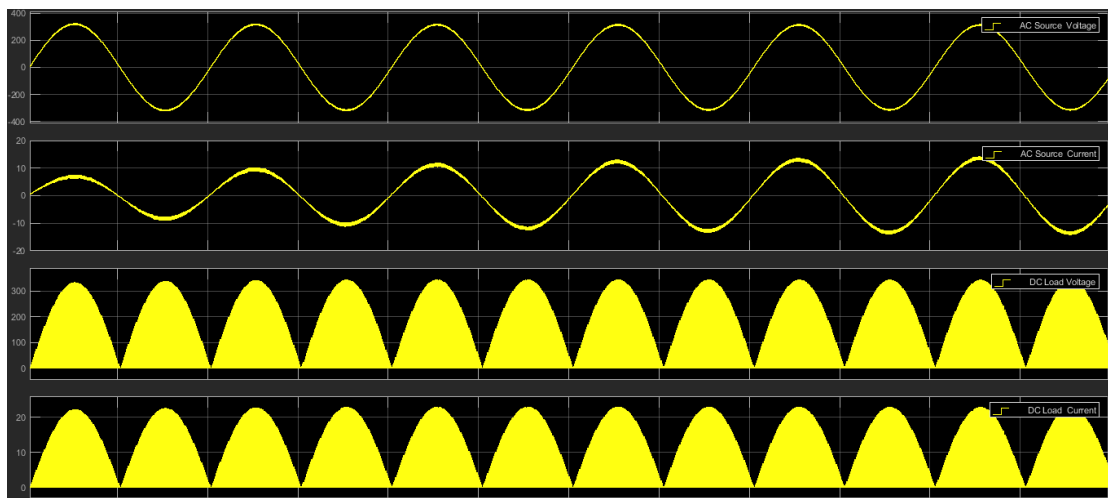
## 4.2.5 Υποσύστημα ελέγχου τάσης



Σχήμα 4-7 Υποσύστημα ελέγχου τάσης

Στην ουσία περιγράφεται ένας PI έλεγχος. Στο παραπάνω Σχήμα 4-7) η υπολογισμένη ενεργός τιμή της τάσης εισάγεται στον συγκριτή και συγκρίνεται με την σταθερή τιμή των 220V (αναφορά). Έπειτα, το σήμα οδηγείται στην είσοδο του block πολλαπλασιασμού με δεύτερο παράγοντα μια καθυστέρηση και η έξοδος του πολλαπλασιαστή εισάγεται στην είσοδο του υποσυστήματος ελέγχου I (integral). Η έξοδος του υποσυστήματος ελέγχου εισάγεται στο Duty Cycle της παλμοδότησης PWM. Καθώς το φορτίο διαρρέεται από ρεύμα εμφανίζεται πτώση τάσης στα άκρα του με συνέπεια η τάση δικτύου να μειώνεται ως μία τιμή. Όταν αυτή η τιμή πέσει κάτω από τα 220V τότε ο συγκριτής βγάζει στην έξοδο μείον με αποτέλεσμα στην είσοδο του block PWM να εμφανίζεται μείον άρα, να διακόπτει την τροφοδοσία του φορτίου. Έτσι, η τάση δικτύου αυξάνεται ξανά πάνω από τα 220V με αποτέλεσμα ο συγκριτής να βγάζει θετική έξοδο. Λόγω της γρήγορης απόκρισης του ολοκληρωτή μας παρουσιάστηκε η ανάγκη δημιουργίας μιας καθυστέρησης του συστήματος. Με τη χρήση ενός μετρητή και την τροποποίηση δύο συγκριτών επιτεύχθηκε η απαραίτητη καθυστέρηση ώστε ο ελεγκτής να αρχίζει να μετράει μετά από τρεις διαδοχικούς μηδενισμούς της τάσης εισόδου.

Στο Σχήμα 4-8 παρατηρούμε στο κανάλι 1 την εναλλασσόμενη τάση εισόδου με πλάτος θεωρητικά ίσο με  $V_0 = 230 \times \sqrt{2} = 325V$  και συχνότητα ίση με 50Hz. Λόγω του ρεύματος που απορροφά το ωμικό φορτίο που συνδέεται στην έξοδο υπάρχει πτώση τάσης στην τάση δικτύου. Για το μέγιστο ρεύμα η μέγιστη πτώση τάσης έχει υπολογιστεί ότι είναι 10V. Στο κανάλι 2 παρατηρούμε το εναλλασσόμενο ρεύμα εισόδου πλάτους  $I_0 = 15A$  και συχνότητας ίση με 50Hz. Στο κανάλι 3 παρατηρούμε την ανορθωμένη τάση του φορτίου που συνδέεται στην έξοδο του μετατροπέα. Το πλάτος είναι ίσο με  $V_0 = 220 \times \sqrt{2} = 311.12V$ . Η μέση τιμή της τάσης όπως υπολογίστηκε είναι ίση 198.07 V ενώ η ενεργός τιμή ίση με 220 V. Λόγω της ύπαρξης μη γραμμικού φορτίου εισάγονται στο σύστημα αρμονικές οι οποίες αποτελούν τις AC συνιστώσες κι έτσι το σήμα μας αποτελείται από μια DC συνιστώσα και από το άθροισμα άπειρων ημιτόνων διαφορετικών συχνοτήτων. Οι AC συνιστώσες όπως υπολογίστηκαν έχουν την τιμή  $V_{AC} = 95$ . Στο κανάλι 4 παρατηρούμε το ανορθωμένο ρεύμα φορτίου πλάτους  $I_0 = 23.48A$ .

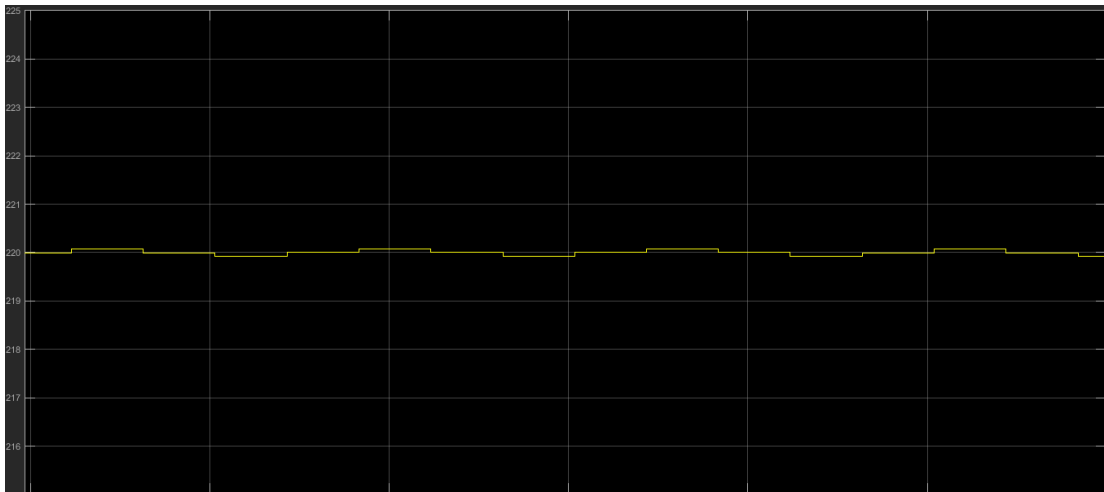


**Σχήμα 4-8 Τάση και ρεύμα εισόδου (εναλλασσόμενα) και τάση και ρεύμα εξόδου (ανορθωμένα) του μετατροπέα**

Η διακοπτική λειτουργία των ποικίλων ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος (μη γραμμικά φορτία) έχει σαν αποτέλεσμα την απορρόφηση από τα AC συστήματα παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας (AC δίκτυα) μη ημιτονοειδών ρευμάτων. Η ηλεκτρική ισχύς μεταφέρεται στα φορτία μόνο με τη θεμελιώδη συχνότητα λειτουργίας των δικτύων 50 Hz. Τα μη γραμμικά φορτία

μετατρέπουν ένα μέρος της απορροφούμενης ισχύος σε ισχύ μεγαλύτερων συχνοτήτων, την οποία επιστρέφουν πίσω στο δίκτυο, λειτουργώντας σαν γεννήτριες αρμονικών. Τα μη γραμμικά φορτία απορροφώντας μη ημιτονοειδή ρεύματα προκαλούν πολλά και σημαντικά προβλήματα όπως: Παραμόρφωση της εναλλασσόμενης ημιτονοειδούς τάσης δικτύου. Το δίκτυο τροφοδοσίας της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να εξομοιωθεί με το ισοδύναμο κατά Thevenin. Ένα φορτίο τραβώντας ένα ρεύμα  $I$  θα προκαλέσει μία πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση της πηγής  $R+jX$ , με αποτέλεσμα η τάση  $V$  να διαφέρει από την τάση τροφοδοσίας  $V\sin(\omega t)$  [2].

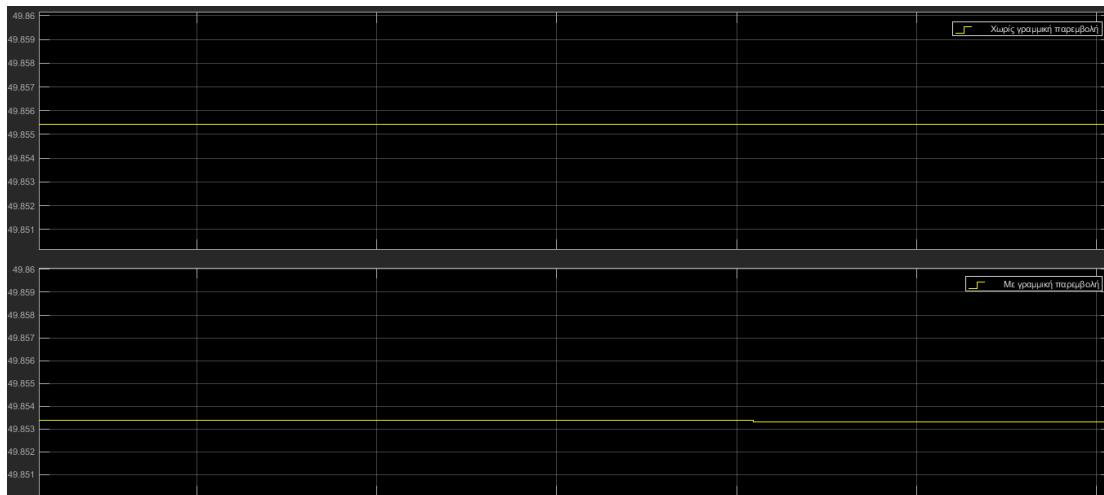
Στο Σχήμα 4-9 **Σφάλμα! Αγνώστη παράμετρος αλλαγής.** παρατηρούμε την RMS τιμή της τάσης εισόδου η οποία είναι ίση με 230V διότι καθώς υπάρχει ροή ρεύματος στο φορτίο δημιουργείται πτώση τάσης στην είσοδο. Επίσης, το σήμα αυτό οδηγείται στον συγκριτή του συστήματος ελέγχου παλμοδότησης και όταν η πτώση τάσης είναι μεγαλύτερη του 220V, ο ελεγκτής διακόπτει την τροφοδοσία του φορτίου με αποτέλεσμα η RMS τιμή της τάσης εισόδου να ανεβαίνει και ο ελεγκτής πλέον να δίνει σήμα ρυθμίζοντας του DutyCycle της παλμοδότησης PWM και το φορτίο να τροφοδοτείται.



**Σχήμα 4-9**      **RMSτιμή της τάσης εισόδου**

Στο Σχήμα 4-10 φαίνεται στο κανάλι 1 η συχνότητα εισόδου χωρίς τη χρήση της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής και στο κανάλι 2 παρατηρούμε την συχνότητα του δικτύου η οποία υπολογίζεται με μεγάλη ακρίβεια λόγω της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής. Πλέον είναι ορατή η απόκλιση της

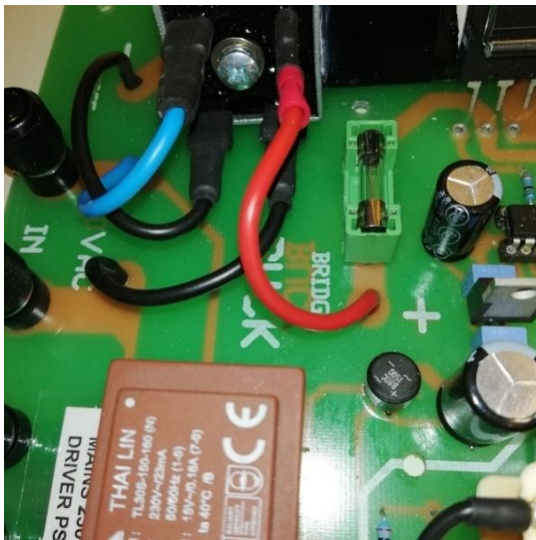
συχνότητας χωρίς την χρήση γραμμικής παρεμβολής από τη συχνότητα τροφοδοσίας. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η χρήση της γραμμικής παρεμβολής είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της συχνότητας όταν οι συνθήκες απαιτούν μεγάλη ακρίβεια.



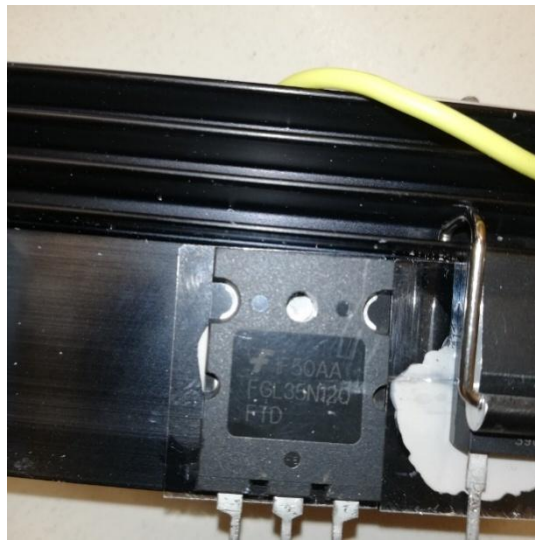
**Σχήμα 4-10** Κανάλι 1: συχνότητα εισόδου χωρίς τη χρήση της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής. Κανάλι 2: συχνότητα του δικτύου η οποία υπολογίζεται με μεγάλη ακρίβεια λόγω της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα κατασκευαστικά μέρη του μετατροπέα και παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παλμογραφήματα που καταδεικνύουν τη λειτουργία του

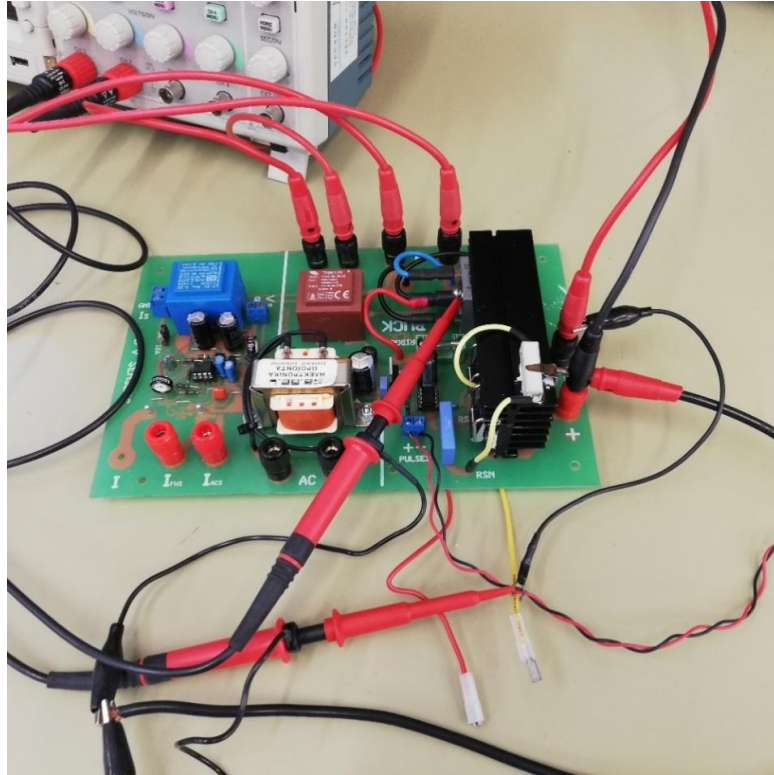


(α)



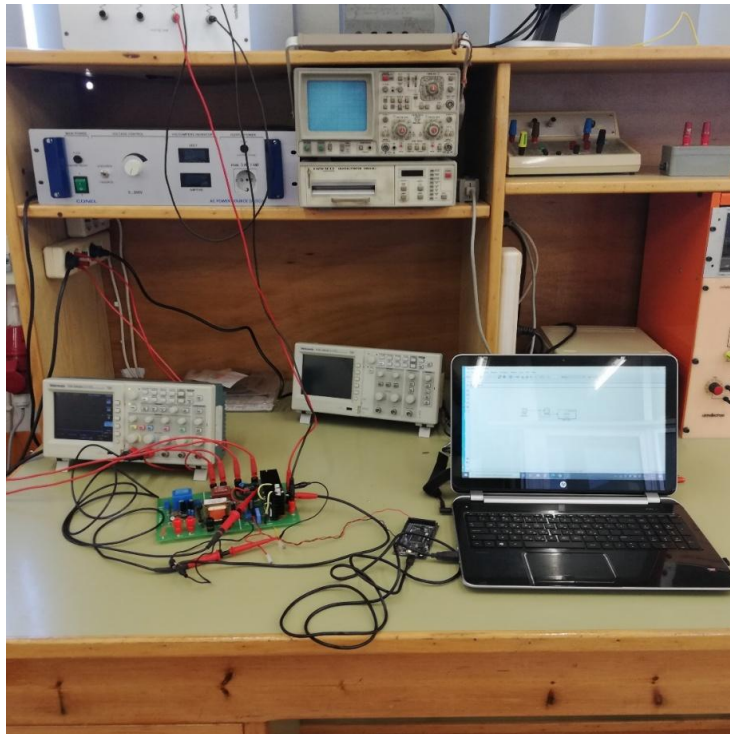
(β)

**Εικόνα 5-1** (α) Η ανορθωτική γέφυρα πλήρους ανόρθωσης με τη χρήση τεσσάρων διόδων και (β) το IGBT στην έξοδο της γέφυρας (φαίνεται λίγο και η δίοδος ελεύθερης διέλευσης).



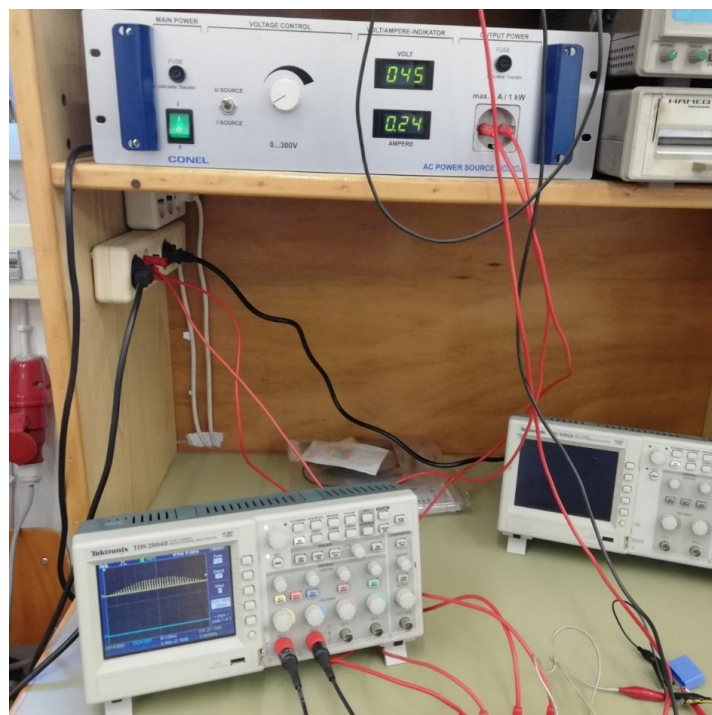
**Εικόνα 5-2** Η πλακέτα ισχύος με το κύκλωμα παλμοδότησης και τους αισθητήρες AC τάσης και ρεύματος.

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εικόνα, δειγματοληπούμε τάση συλλέκτη – εκπομπού του IGBT και τάση ανόδου καθόδου της διόδου.

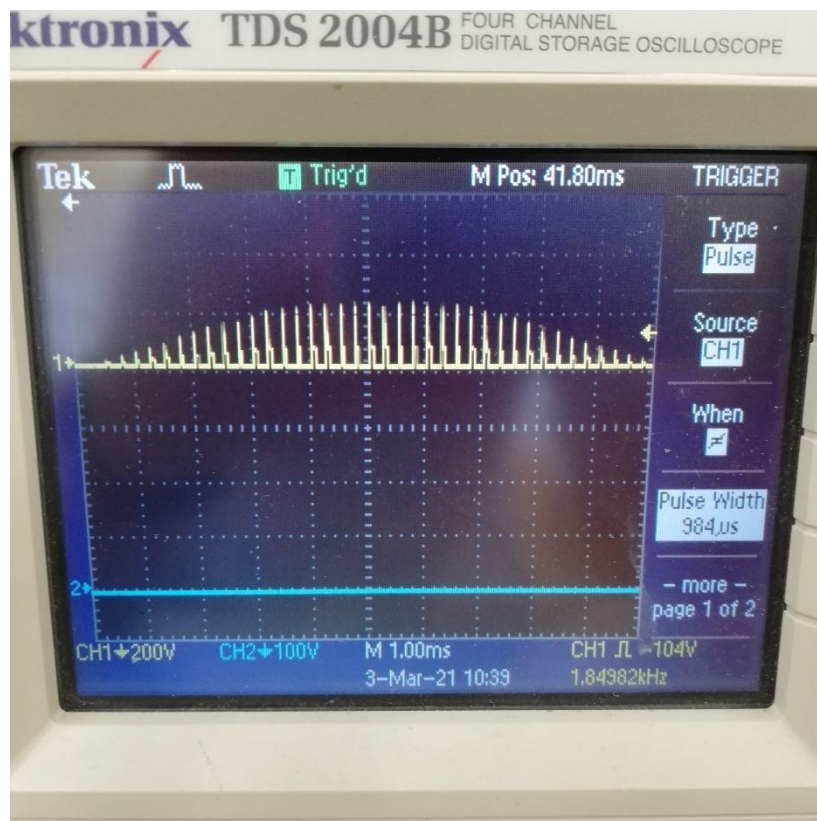


**Εικόνα 5-3 Η πειραματική διάταξη**

Ολόκληρη η πειραματική διάταξη αποτελείται από το μετατροπέα , την αντίσταση και τον παλμογράφο

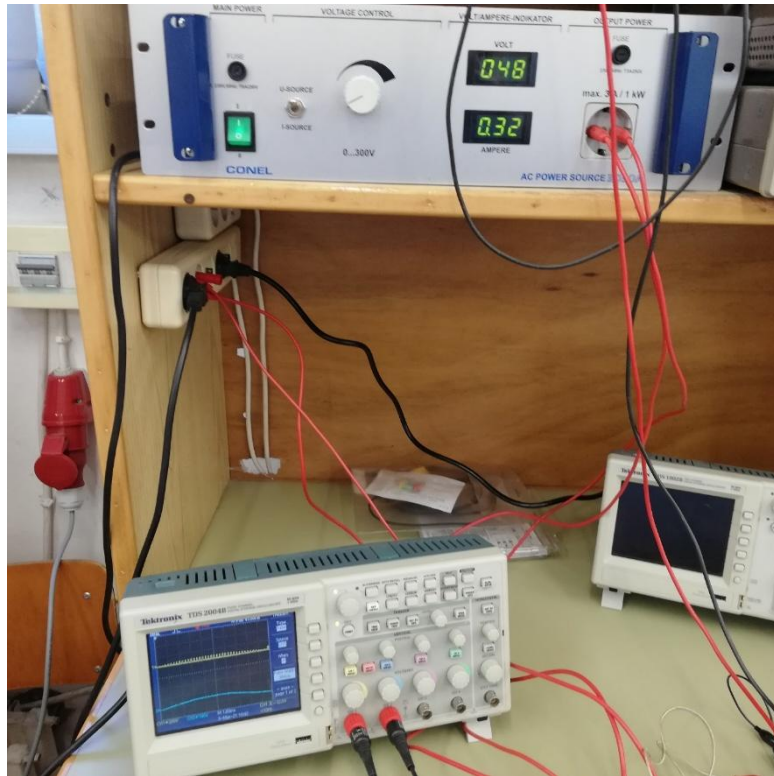


**Εικόνα 5-4 Παλμογράφηση τάσης συλλέκτη-εκπομπού IGBT για λόγο κατάτμησης 3/4**

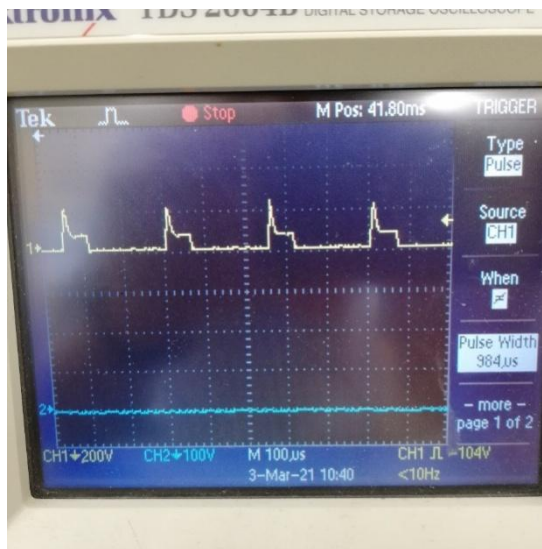
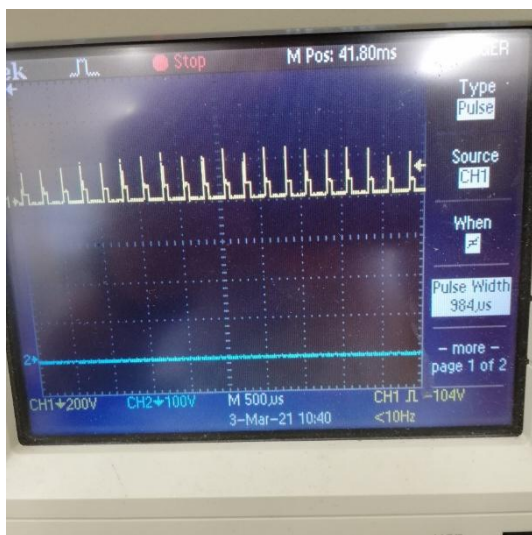


**Εικόνα 5-5** Τάση συλλέκτη – εκπομπού IGBT για λόγο κατάτμησης 3/4. Στην παρούσα φάση δεν υπάρχει πυκνωτής στην είσοδο της ανορθωτικής γέφυρας με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανεπιθύμητες αιχμές της τάσης στα άκρα του IGBT κατά τη σβέση.





**Εικόνα 5-6 Παλμογράφηση τάσης συλλέκτη-εκπομπού IGBT για λόγο κατάτμησης 1/2**

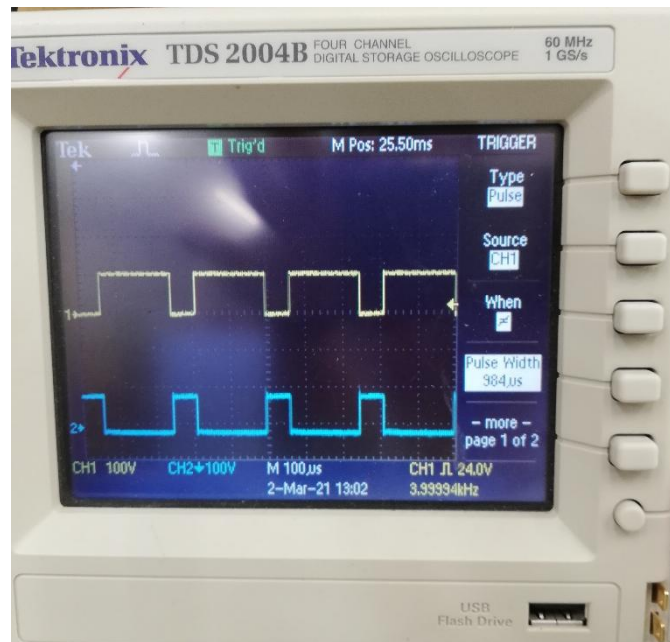


**Εικόνα 5-7 Τάση συλλέκτη – εκπομπού IGBT για λόγο κατάτμησης 1/2 με μεγέθυνση της κλίμακας του χρόνου.**

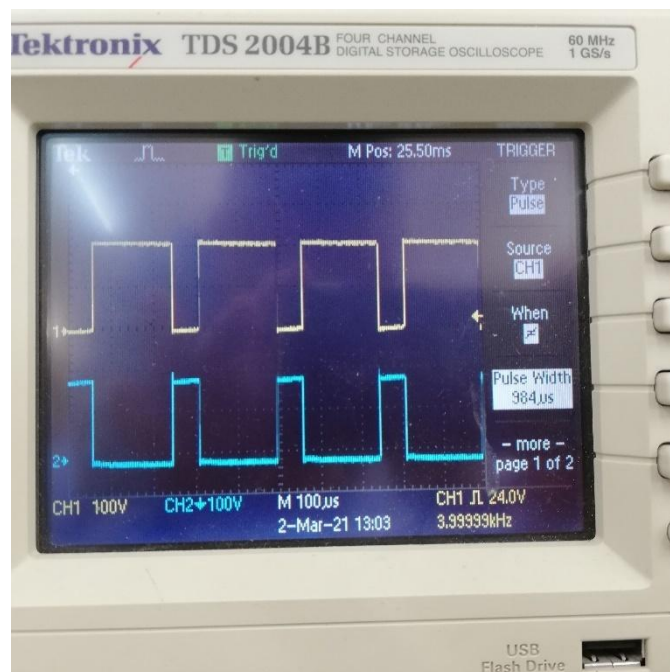


**Εικόνα 5-8 Δοκιμή με τροφοδοτικό DC**

Πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές με τροφοδοτικό DC καθώς είχε υψηλότερες τιμές τάσης και ρεύματος. Επίσης, ήταν ευκολότερος ο συγχρονισμός.



**Εικόνα 5-9** Τάση συλλέκτη – εκπομπού του IGBT (μπλε) και τάση ανόδου καθόδου της διόδου (κίτρινο) για τάση εισόδου 100 V. Duty cycle 1/4

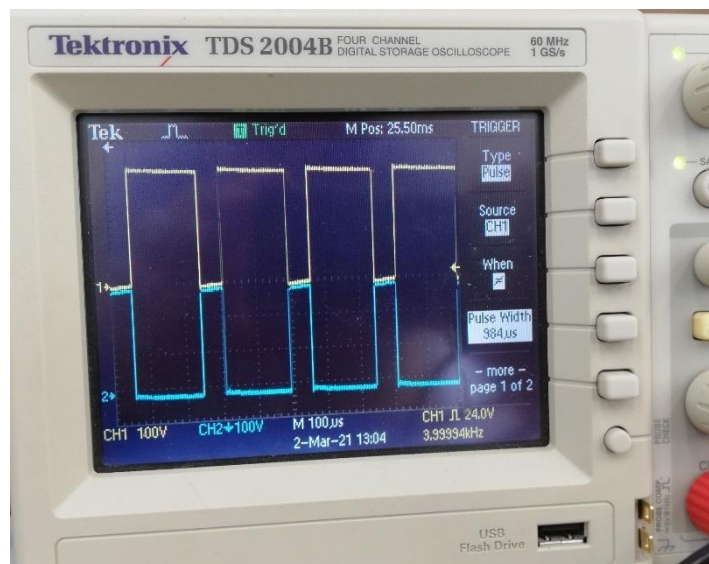


**Εικόνα 5-10** Τάση συλλέκτη – εκπομπού του IGBT και τάση ανόδου καθόδου της διόδου για τάση εισόδου 200 V. Dutycycle 1/4.

Όπως φαίνεται στις δύο παραπάνω εικόνες, δεν υπάρχουν σημαντικές υπερτάσεις καθώς στην είσοδο υπάρχει DC τροφοδοτικό με πυκνωτή και μηδενική επαγωγή.



**Εικόνα 5-11 Το τροφοδοτικό DC τάσης για τάση εισόδου 200 V**



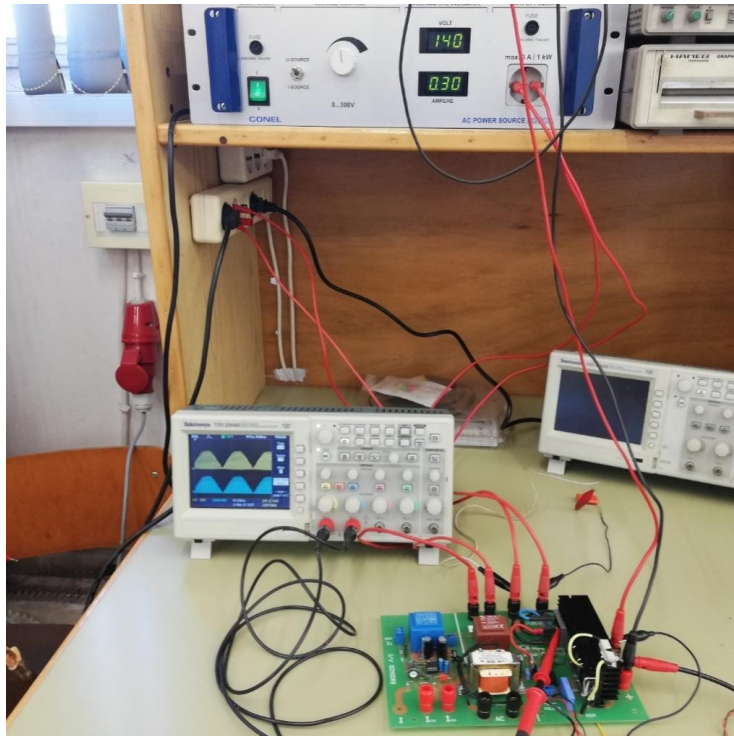
**Εικόνα 5-12 Τάση συλλέκτη – εκπομπού του IGBT και τάση ανόδου καθόδου της διόδου για τάση εισόδου 309 V. Dutycycle 1/4.**



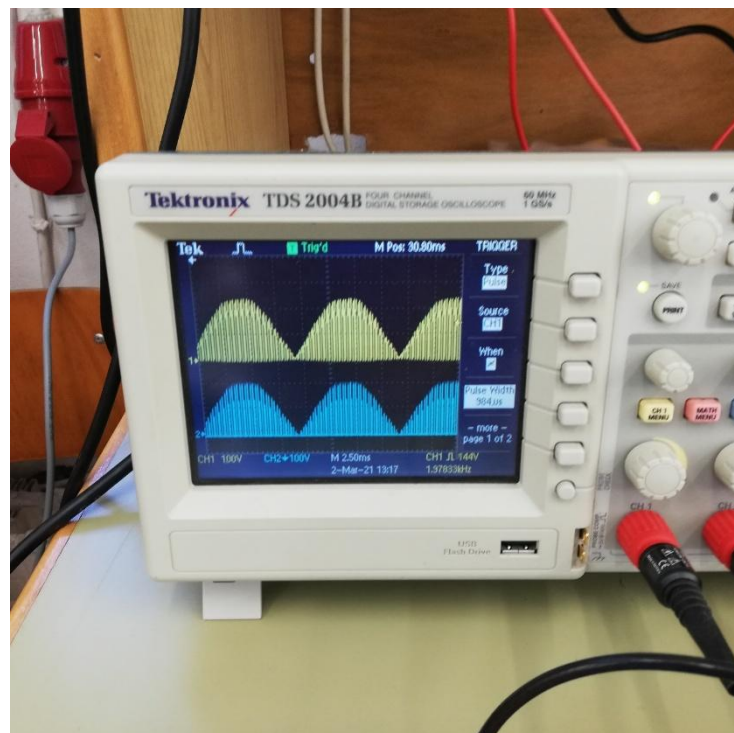
**Εικόνα 5-13 Το τροφοδοτικό DC τάσης για τάση εισόδου 309V**

Η Τάση εσόδου 309V είναι η μέγιστη τάση του DC τροφοδοτικού

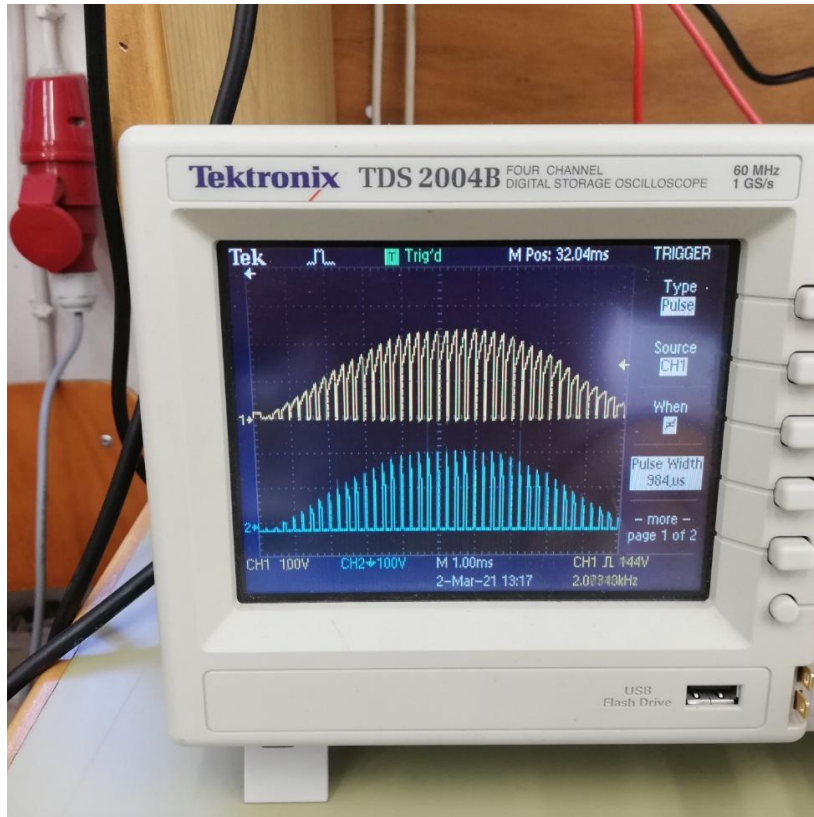
Στη συνέχεια παρουσιάζονται παλμογραφήματα που ελήφθησαν με AC τροφοδοτικό. Στην περίπτωση αυτή τοποθετήθηκε παράλληλα στο IGBT snubber για τη μείωση των υπερτάσεων οι οποίες είναι πολύ επικίνδυνες για την καταστροφή του ημιαγωγικού στοιχείου. Κατά τη σβέση του IGBT, συγκεντρώνεται ένα πλήθος φορέων στα άκρα του κατά τον χρόνο  $t_d$  καθυστέρησης αποκοπής. Εάν υπάρχουν και αυτεπαγωγές στο κύκλωμα και το ρεύμα μεταβάλλεται γρήγορα, τότε η τάση εξ'επαγωγής προστίθεται στην τάση που δημιουργείται από τη συγκέντρωση των φορέων και μπορεί να υπερβεί την κρίσιμη τάσης αποκοπής. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο αδρανειακής συσσώρευσης και για την αποφυγή του χρειάζεται ένα ειδικό κύκλωμα προστασίας το οποίο αποτελείται από μία αντίσταση και έναν πυκνωτή και ονομάζεται snubber. Το snubber περιορίζει την απότομη αύξηση της τάσης στα άκρα του IGBT, εμποδίζοντας έτσι την ακούσια έναυσή του. Ο περιορισμός της αύξησης της τάσης επιτυγχάνεται με περιορισμό του ρυθμού αύξησης της τάσης ( $dV/dt$ ) στα άκρα του IGBT. Η τιμή της αντίστασης πρέπει να είναι τέτοια, ώστε το ρεύμα εκφόρτισης του πυκνωτή κατά την έναυση του IGBT να μην ξεπερνά το επιτρεπτό όριο του ρεύματος διέλευσης του IGBT. Από τις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται ότι πλέον δεν υπάρχουν υπερτάσεις



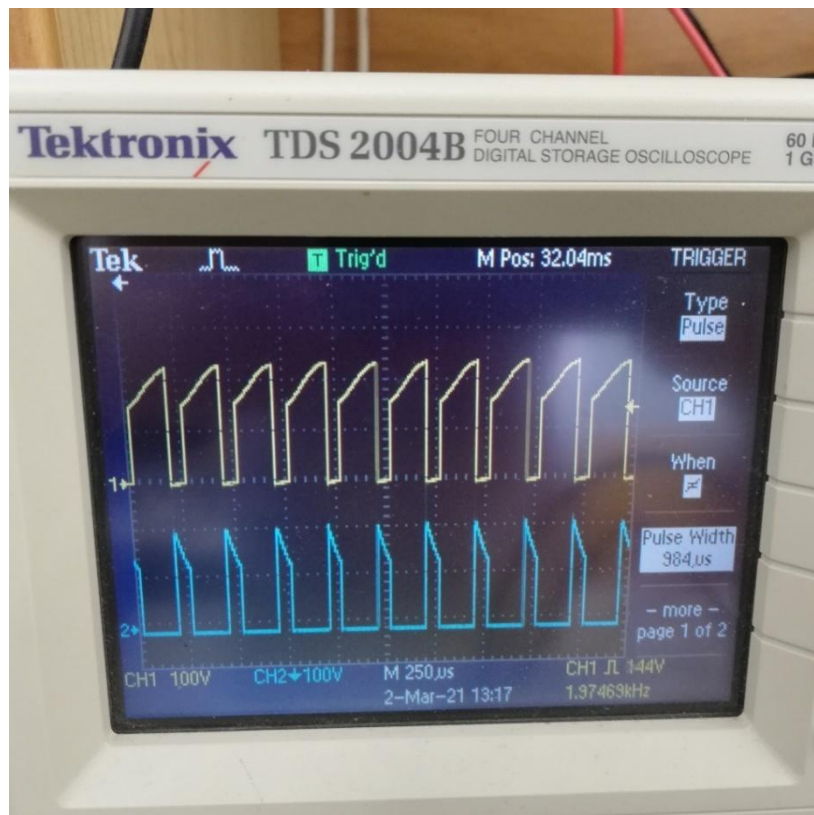
Εικόνα 5-14 Η πειραματική διάταξη με AC τροφοδοτικό (140 Vrms).



Εικόνα 5-15 Μεγέθυνση της εικόνας του σχήματος 5-14 η οποία παρουσιάζει την τάση IGBT (κίτρινο) και την τάση της διόδου ελεύθερης διέλευσης (μπλε).

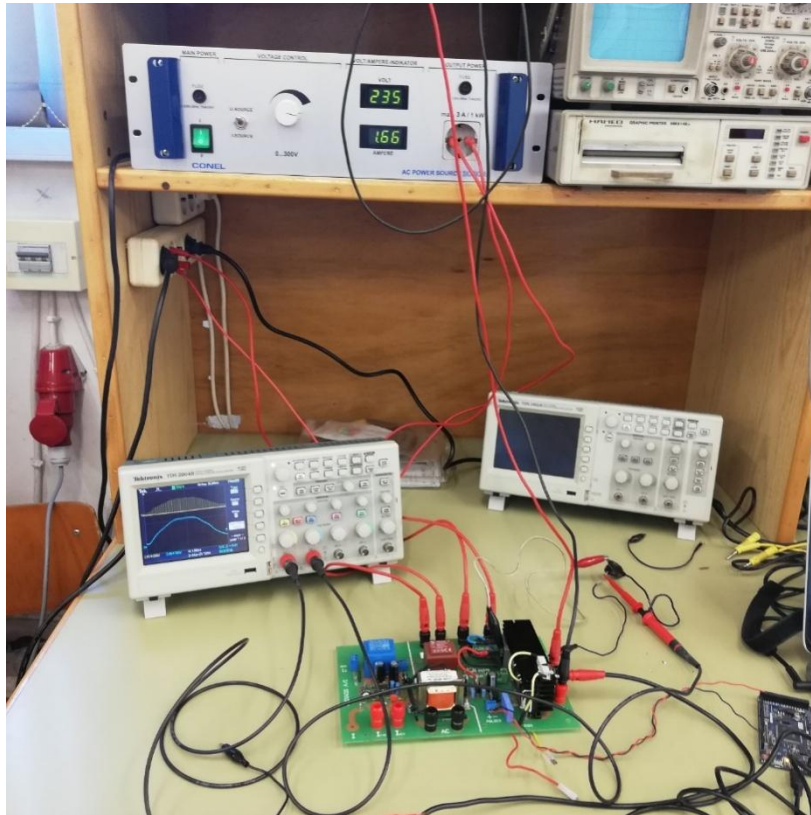


Εικόνα 5-16 Μεγέθυνση της εικόνας του σχήματος 5-15



Εικόνα 5-17 Μεγέθυνση της κλίμακας του χρόνου του σχήματος 5-16.

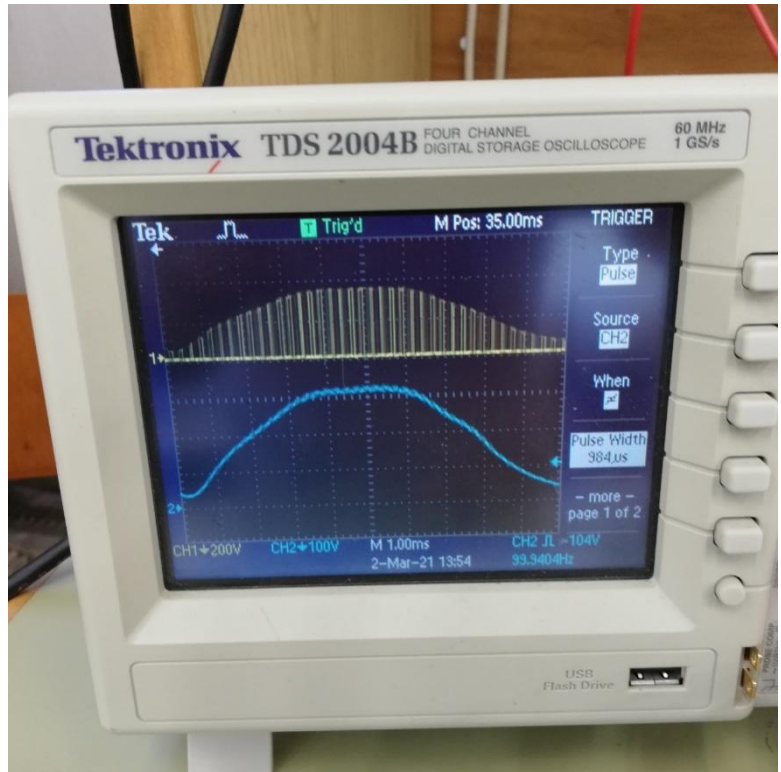
Η τάση του IGBT αυξάνεται σταδιακά καθώς φορτίζεται με κάποια χρονική σταθερά ο πυκνωτής του κυκλώματος προστασίας (R-C). Οι υπερτάσεις πλέον δεν υπάρχουν και η τάση στο IGBT λαμβάνει σχετικά χαμηλή τιμή.



**Εικόνα 5-18 Τάση εισόδου 235 Vrms και ρεύμα 1,66 A για φορτίο 100Ω**

Παρατηρούμε στην μπλε κυματομορφή την τάση εξόδου της ανορθωτικής γέφυρας και στην κίτρινη την τάση φορτίου. Η τάση εξόδου της γέφυρας είναι παραμορφωμένη διότι, το AC τροφοδοτικό έχει μεγάλη σύνθετη αντίσταση και επηρεάζεται από το φορτίο. Επίσης, φαίνεται ότι η τάση του φορτίου είναι διακοπτόμενη. Αυτό όμως δεν επηρεάζει αρνητικά καθώς το φορτίο είναι παθητικό και ωμικό.





**Εικόνα 5-19** Μεγεθυμένη η εικόνα του σχήματος 5-18.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΠΡΑΓΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος αποτελούταν από την ανορθωτική γέφυρα των τεσσάρων διόδων κι από ένα τρανζίστορ IGBT στην DC πλευρά όπως προαναφέραμε. Ο σκοπός ήταν ο έλεγχος της ισχύος φορτίου, αλλά και της ποιότητας της τάσης μικροδικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου το οποίο αναλύθηκε διεξοδικά. Πιο συγκεκριμένα, όταν η τάση ξεπερνάει την επιθυμητή τιμή παλμοδοτείται το IGBT και μπαίνει σε αγωγή έτσι ώστε λόγω της πτώσης τάσης η τάση δικτύου σταθεροποιείται στην επιθυμητή τιμή. Έτσι πραγματοποιήθηκε η εξομοίωση της παραπάνω διαδικασίας μέσω του προγράμματος Matlab/Simulink επιτυγχάνοντας έτσι ακριβή προσομοίωση. Όσο κατασκευαζόταν η πλακέτα ταυτόχρονα γινόταν ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή DSP της κατηγορίας TI DELFINO C 2000 fx 28335. Κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης πραγματοποιήσαμε διάφορες τεχνικές για την μέτρηση της συχνότητας. Μία από αυτές τις τεχνικές ήταν η άμεση μέτρηση της συχνότητας αντιστρέφοντας την περίοδο του σήματος (ανακριβής), μια άλλη όπως αναφέραμε ήταν η χρήση της γραμμικής παρεμβολής η οποία μας οδήγησε σε μεγάλη ακρίβεια και είναι ένα αξιόπιστο εργαλείο. Λόγω της κυμάτωσης του ρεύματος στην είσοδο του μετατροπέα χρησιμοποιήσαμε φίλτρο L-C για τον περιορισμό της. Συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης έγινε δοκιμή για την μείωση της κυμάτωσης μέσω φίλτρου πυκνωτή, στην πραγματικότητα δημιουργούνται άλλα προβλήματα όπως έχουμε ήδη αναλύσει και έτσι τοποθετήσαμε μια επαγωγή για το περιορισμό του παραπάνω φαινομένου, δηλαδή ένα φίλτρο L-C.

Όταν ολοκληρώθηκαν οι δύο διαδικασίες δηλαδή ο προγραμματισμός του DSP και η κατασκευή της πλακέτας, περάσαμε στην διαδικασία των μετρήσεων. Αρχικά, συνδέσαμε τον μετατροπέα και τροφοδοτήσαμε μια ωμική αντίσταση και συνδέσαμε τον παλμογράφο, παίρνοντας μετρήσεις της τάσης συλλέκτη εκπομπού για διάφορες τιμές του λόγου κατάτμησης χωρίς την χρήση του πυκνωτή στην είσοδο έχοντας ως αποτέλεσμα κάποιες αιχμές της τάσης στα άκρα του IGBT. Στη συνέχεια τροφοδοτήσαμε το φορτίο με πηγή DC τροφοδοσίας καθώς ήταν ευκολότερος ο συγχρονισμός. Παρατηρήσαμε ότι με αυτό το τροφοδοτικό δεν είχαμε σημαντικό πρόβλημα υπερτάσεων επάνω στο

IGBT καθώς στην είσοδο είχαμε μόνο πυκνωτή και μηδενική επαγωγή. Έπειτα πήραμε ταυτόχρονη μέτρηση της τάσης συλλέκτη εκπομπού και της τάσης ανόδου καθόδου της διόδου για διάφορες τιμές της τάσης εισόδου με σταθερό λόγο κατάτμησης. Μετά από αυτές τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε AC τροφοδοτικό. Λόγω της ύπαρξης επαγωγιμότητας στη γραμμή εμφανίσθηκαν υπερτάσεις στο IGBT. Για το λόγο αυτό τοποθετήσαμε παράλληλα στο IGBT snubber για την προστασία του ημιαγωγικού στοιχείου λόγω σημαντικών υπερτάσεων. Έπειτα πήραμε μετρήσεις της τάσης IGBT και της τάσης της διόδου ελεύθερης διέλευσης. Παρατηρήσαμε ότι η τάση του IGBT λαμβάνει σχετικά χαμηλή τιμή και δεν υπάρχουν πλέον υπερτάσεις. Έτσι, παραδόθηκε ένας λειτουργικός ηλεκτρονικός μεταροπέας ισχύος, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί σε προτότυπο “έξυπνο” θερμοσίφωνα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Κωσταντίνος Γεωργάκας «Ηλεκτρονικά Ισχύος Ι» Διαφάνεια διαλέξεων Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου:

<https://eclass.uop.gr/modules/document/file.php/1398/PWM%20%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%86%CE%B5%CE%AF%CF%82.docx>

[2] Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα Σημειώσεις εργαστηριακών ασκήσεων: <https://eclass.uop.gr/modules/document/file.php/1400/%CE%91%CE%A1%CE%9C%CE%9F%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%A3.pdf>

[3] <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/EE894/%CE%94%CE%B9%CE%B1%CE%BB%CE%AD%CE%BE%CE%B5%CE%B9%CF%82/1%CE%B7%20%CE%98%CE%B5%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1.pdf>

[4] <https://rfnews.gr/%CF%84%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CE%BF-%CF%80%CF%85%CE%BA%CE%BD%CF%89%CF%84%CE%AE%CF%82/>

[5] Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ – ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.-  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΑΙΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΙ

[6] [http://www.eln.teilam.gr/sites/default/files/Digital\\_signal\\_processing\\_EAP\\_Skodras.pdf](http://www.eln.teilam.gr/sites/default/files/Digital_signal_processing_EAP_Skodras.pdf)

[7] <https://www.analog.com/en/design-center/landing-pages/001/beginners-guide-to-dsp.html>

[8]

<https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/EE132/%CE%A3%CE%97%CE%9C%CE%95%CE%99%CE%A9%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3%20%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%A9%CE%9D%20%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%A9%CE%9D%20%CE%97%CE%9B%CE%95%CE%9A%CE%A4%CE%A1%CE%9F%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D%20%CE%99%CE%A3%CE%A7%CE%A5%CE%9F%CE%A3.pdf>

[9]

<https://eclass.hmu.gr/modules/document/index.php?course=ECE113&download=/5dc3fe2bYFpE/5ddb99a52TJ2/5dde9642gnBo.pdf>

[10]

[http://repository.edulll.gr/edulll/retrieve/11102/2423\\_1\\_3\\_%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1\\_%CE%A3%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82.pdf](http://repository.edulll.gr/edulll/retrieve/11102/2423_1_3_%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1_%CE%A3%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82.pdf)

[11] [https://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_interpolation](https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_interpolation)