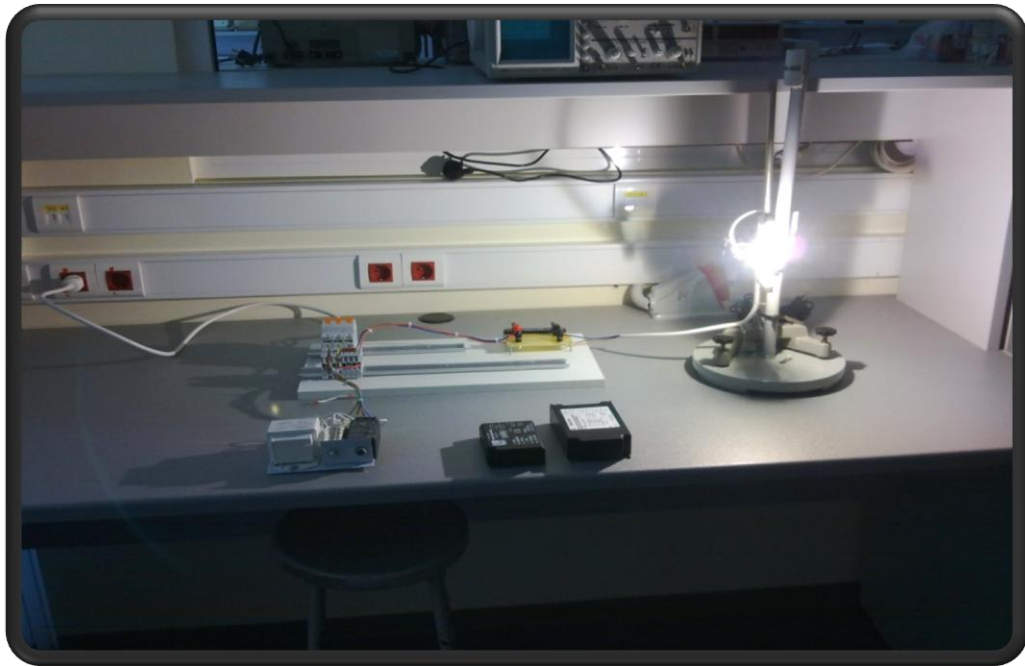




ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλεκτρονικό Σύστημα Δημιουργίας Διακοπών στην Τροφοδοσία Ηλεκτρικών Λαμπτήρων Υψηλής Πίεσης (HID Lamps)



Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Δρακάκης Εμμανουήλ

Σπουδαστής
Ολιάνος Μαρίνος

Ηράκλειο,
Απρίλιος 2012



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλεκτρονικό Σύστημα Δημιουργίας Διακοπών στην Τροφοδοσία Ηλεκτρικών Λαμπτήρων Υψηλής Πίεσης (HID Lamps)

Ολιάνος Μαρίνος

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Δρακάκης Εμμανουήλ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....
Δρ. Δρακάκης Εμμανουήλ
Αναπληρωτής Καθηγητής

.....
Δρ.-Μηχ. Σιδεράκης Κυριάκος
Καθηγητής Εφαρμογών

.....
Δρ. Κυμάκης Εμμανουήλ
Επίκουρος Καθηγητής

Ηράκλειο,
Απρίλιος 2012

.....
Ολιάνος Μαρίνος
Πτυχιούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε.

Copyright© Ολιάνος Μαρίνος.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

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

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

Οι εφαρμογές φωτισμού απορροφούν το 20% της Παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάθε χώρα η συνολική κατανάλωση για την ανάγκη του φωτισμού αγγίζει μέχρι και το 33%. Συγκεκριμένα για την βιομηχανία και τις οικίες (εργοστάσια, βιομηχανίες, εργαστήρια, αποθήκες, σπίτια) το ποσοστό κατανάλωσης ανέρχεται στο 15% ενώ στα κτίρια (γραφεία, ξενοδοχεία, πολυκαταστήματα, σχολεία, γυμναστήρια, νοσοκομεία) φτάνει μέχρι και το 50%. Χάριν Παγκόσμιας προσπάθειας για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, των απαιτήσεων για περισσότερη απόδοση, ασφάλεια, βελτίωση της άνεσης, της ποιότητας και βασιζόμενοι στην εξέλιξη της τεχνολογίας δημιουργούνται νέοι τύποι πηγών φωτισμού.

Στην παρούσα εργασία μελετώνται οι λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής έντασης (HID). Το θέμα αφορά στην δημιουργία τεχνητών διακοπών στην τροφοδοσία αυτών των λαμπτήρων με σκοπό την περαιτέρω ανάλυση και μελέτη των στοιχείων που βρίσκονται στο εσωτερικό τους από το Πανεπιστήμιο Κρήτης, την Σχολή Θετικών και Τεχνολογικών Επιστημών και το Τμήμα Φυσικής.

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Ισχύος του Τμήματος Ηλεκτρολογίας, της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης.

Για την εργασία η τροφοδοσία των λαμπτήρων (HID) γίνεται μέσω στραγγαλιστικών πηνίων. Στόχος είναι η δημιουργία διακοπής της διαφοράς δυναμικού στον λαμπτήρα χωρίς να προκληθεί σβέση του με την χρήση ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος (MOSFETs). Για να επιτευχθεί σωστή λειτουργία αναπτύχθηκε κατάλληλος κώδικας για την χρήση του μικροελεγκτή. Μελλοντική πρόταση καθίσταται ο έλεγχος των λαμπτήρων αυτών για εξυπνότερη χρήση και μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται οι βασικές αρχές φωτισμού και νόμοι της φυσικής για κατανόηση των κεφαλαίων που ακολουθούν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τους λαμπτήρες HID, τις διεργασίες που γίνονται στο εσωτερικό τους και για τα ηλεκτρομαγνητικά/ηλεκτρονικά ballast.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η κατασκευή ενός γραμμικού τροφοδοτικού το οποίο είναι απαραίτητο για την παροχή ενέργειας στον μικροελεγκτή, στο optocoupler και στον driver των MOSFET. Επίσης, παρουσιάζεται το κύκλωμα ελέγχου και το πρόγραμμα με βάση το οποίο οδηγούνται τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στο κύκλωμα ισχύος, αναλύεται η λειτουργία του, το πώς κατασκευάστηκε αλλά και η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα PSpice της Cadence OrCad.

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα παλμογραφήματα και τα οικονομοτεχνικά στοιχεία της εργασίας.

Το έκτο κεφάλαιο αφορά τα παραρτήματα και την βιβλιογραφία.

Ευχαριστίες

Σ' αυτό το σημείο θέλω να αποδώσω φόρο τιμής στους γονείς μου Νίκο και Δήμητρα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν, την ανιδιοτελή αγάπη και στήριξη τους ώστε να καταφέρω να ολοκληρώσω τις σπουδές μου επιτυχώς και φυσικά στην αδερφή μου Αναστασία για όλα τα προηγούμενα. Ειδικά, ευχαριστώ για την υπομονή και συμπαράσταση της την κοπέλα μου Στέλλα, για ιδιαίτερους λόγους την αδερφική μου φίλη Μαρία, για την βοήθειά τους τούς συναδέλφους και φίλους Χρήστο και Αντώνη, τον Γιώργο και την Χρύσα. Τέλος, θερμά ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δρακάκη Εμμανουήλ για την ευκαιρία που μου έδωσε να ερευνήσω σπουδαία πράγματα μέσω της πτυχιακής εργασίας και τον κ. Σιδεράκη Κυριάκο που στάθηκε αιτία κι αφορμή για ν' ανακαλύψω βαθύτερα την Ηλεκτρολογία, συνειδητοποιώντας παράλληλα πως θα την μελετάω μια ζωή.

Η εργασία είναι αφιερωμένη στον Σταύρο Βενέρη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1	
1.1 Βασικές αρχές φωτισμού	11
1.1.1 Φωτεινή ροή Φ.....	11
1.1.2 Φωτεινή ένταση I.....	11
1.1.3 Φωτισμός επιφάνειας E.....	11
1.1.4 Νόμος της φωτομετρίας.....	12
1.2 Φυσικά φαινόμενα στον φωτισμό	12
1.2.1 Γενικά.....	12
1.2.2 Σθένος.....	13
1.2.3 Ιονισμός.....	14
1.2.4 Διέγερση-Φθορισμός.....	14
1.3 Χρώματα	15
1.3.1 Γενικά.....	15
1.3.2 Ενεργειακή φασματική κατανομή.....	15
1.3.3 Θερμοκρασία χρώματος.....	15
1.3.4 Χρωματομετρικό τρίγωνο της C.I.E.....	16
Κεφάλαιο 2	
2.1 Λαμπτήρες εκκένωσης-Στραγγαλιστικά πηνία	19
2.1.1 Εισαγωγή.....	19
2.1.2 Βασικές έννοιες.....	19
2.2 Λαμπτήρες εκκένωσης	22
2.3 Ηλεκτρομαγνητικά στραγγαλιστικά πηνία	27
2.4 Τροφοδοσία λαμπτήρων εκκένωσης υψηλής έντασης	27
2.4.1 Γενικό μπλοκ διάγραμμα των ηλεκτρονικών ballast.....	27
2.5 Εφαρμογές	30
2.5.1 Φορητός φωτισμός.....	30
2.5.2 Φωτισμός έκτακτης ανάγκης.....	30
2.5.3 Φωτισμός στα Μέσα Μεταφοράς.....	33
2.5.4 Οικιακός και Βιομηχανικός φωτισμός.....	33
2.5.5 Φωτισμός με βάση τον μικροεπεξεργαστή.....	33
2.6 Μοντελοποίηση λαμπτήρα εκκένωσης	35
2.7 Ταξινόμηση τοπολογιών ηλεκτρονικού Ballast	35
2.7.1 Μη συντονισμένα Ballast.....	40
2.7.2 Συντονισμένα Ballast.....	41
2.8 Κατασκευαστικά-Σχεδιαστικά θέματα	44
Κεφάλαιο 3	
3.1 Κατασκευή Γραμμικού τροφοδοτικού	49

3.2 Γραμμικό τροφοδοτικό με δύο εξόδους +5V, +15V	49
3.2.1 Γενικά.....	49
3.2.2 Περιγραφή λειτουργίας κυκλώματος.....	50
3.2.3 Προσομοίωση.....	51
3.3 Κύκλωμα ελέγχου	52
3.3.1 Μικροελεγκτής AVR-Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM).....	52
3.3.1.1 Εισαγωγή.....	52
3.3.2 Μικροελεγκτής AVR.....	53
3.3.3 Μικροελεγκτής AVR ATmega16.....	54
3.3.4 Αναπτυξιακό κύκλωμα STK-200.....	55
3.3.5 Πρόγραμμα.....	55
3.3.5.1 Γλώσσα μηχανής.....	55
3.3.5.2 Γλώσσα Assembly.....	56
3.3.5.3 Γλώσσες υψηλού επιπέδου (Basic,C/C++,Java).....	56
3.3.6 Διαδικασία ροής προγράμματος.....	56
3.3.7 Λειτουργία Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM).....	56
3.3.8 Κώδικας.....	57
Κεφάλαιο 4	
4.1 Προηγούμενη κατασκευή	61
4.1.1 Γενικά.....	61
4.2 Αναλυτική περιγραφή	61
4.3 Ηλεκτρονικό κύκλωμα ισχύος	64
4.3.1 Εισαγωγή.....	64
4.4 Ημι-αγωγικά στοιχεία ισχύος	64
4.4.1 Γενικά.....	64
4.4.2 Μετατόπιση και Διάχυση.....	65
4.4.3 Έλεγχος φορτίου κατά την λειτουργία επαφής pn.....	66
4.4.4 Διάσπαση χιονοστιβάδας.....	66
4.5 Επιθυμητά χαρακτηριστικά των ελεγχόμενων διακοπών	67
4.6 MOSFET Ισχύος	69
4.6.1 Γενικά.....	69
4.6.2 Βασική κατασκευή.....	69
4.6.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V.....	70
4.6.4 Διακοπτικά χαρακτηριστικά.....	71
4.6.4.1 Κυκλωματικά μοντέλα του MOSFET.....	71
4.6.4.2 Κυματομορφές κατά την μετάβαση.....	72
4.6.5 Περιορισμοί λειτουργίας.....	74
4.6.5.1 Τάση διάσπασης.....	74
4.6.5.2 Απώλειες στην κατάσταση αγωγής.....	74
4.6.5.3 Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας.....	75
4.7 Πλακέτα Ισχύος	76

Κεφάλαιο 5	
5.1 Παλμογραφήματα.....	78
5.2 Υλικοτεχνικά στοιχεία.....	80
Κεφάλαιο 6	
6.1 Παράρτημα Α.....	83
6.2 Παράρτημα Β.....	85
6.3 Βιβλιογραφία.....	88

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στον Φωτισμό

1.1 Βασικές Αρχές Φωτισμού

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια αναφορά για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των λαμπτήρων που μελετάται στα επόμενα κεφάλαια, σχετικά με βασικές έννοιες, θεμελιώδη μεγέθη της φωτοτεχνίας καθώς και βασικές αρχές της φυσικής.

1.1.1 Φωτεινή Ροή Φ (Lm)

Φωτεινή ροή Φ είναι η φωτομετρικά σταθμισμένη μέση τιμή της φωτοβόλου ακτινοβολίας. Είναι δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που εκπέμπεται από πηγή σε ορατά μήκη κύματος. Ειδικότερα, η φωτεινή ροή υπολογίζεται αφού σταθμιστεί η φωτοβόλος ακτινοβολία σε κάθε μήκος κύματος με την συνάρτηση V_λ που προσδιορίζει την απόκριση του ανθρώπινου οφθαλμού σε διαφορετικά μήκη κύματος και επομένως αποτελεί ένα σταθμισμένο άθροισμα της ισχύος σε όλο το ορατό φάσμα.

Μονάδα μέτρησης της φωτεινής ροής είναι το Lumen (lm) το οποίο ορίζεται ως η φωτεινή ροή που εκπέμπεται από στερεά γωνία ενός sr (*steradian*) από σημειακή πηγή ομοιόμορφης έντασης μεγέθους μίας cd (*candela*).

1.1.2 Φωτεινή Ένταση I (Cd)

Η φωτεινή ένταση I προς μία κατεύθυνση παρατηρήσεως είναι ο λόγος της εξερχόμενης ροής $d\Phi$ από κάποια φωτεινή πηγή ή στοιχείο της φωτεινής πηγής ανά μονάδα στερεάς γωνίας $d\omega$, δηλαδή:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (1.1)$$

Μονάδα μέτρησης της φωτεινής έντασης είναι η Candela ($Cd=LmSr^{-1}$).

1.1.3 Ένταση Φωτισμού E (Lux)

Ως ένταση φωτισμού (ή φωτισμός επιφάνειας) ορίζεται ο λόγος της φωτεινής ροής Φ προς την επιφάνεια A που προσπίπτει κάθετα:

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (1.2)$$

Μονάδα μέτρησης της έντασης φωτισμού E στο Διεθνές Σύστημα (S.I.) είναι το $lumen/m^2$ που ονομάζεται Lux.

Σε αντίθεση με τα δύο προηγούμενα μεγέθη, η ένταση φωτισμού δεν αφορά την πηγή δηλαδή τον λαμπτήρα, αλλά την επιφάνεια στην οποία προσπίπτει το φως που παράγει.

1.1.4 Νόμος της Φωτομετρίας

Αν μία σημειακή πηγή εντάσεως I (Cd) βρίσκεται στο κέντρο σφαίρας ακτίνας r , τότε η συνολική φωτεινή ροή (Φ) θα πέφτει κάθετα πάνω στην σφαιρική επιφάνεια $4\pi r^2$ που βρίσκεται σε απόσταση r από την πηγή. Άρα ο φωτισμός E της επιφάνειας είναι:

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{2\pi I}{4\pi r^2} = \frac{I}{r^2} \quad (1.3)$$

Στην περίπτωση που η σημειακή πηγή φωτεινής έντασης I απέχει απόσταση r από επιφάνεια A και η φωτεινή ροή σχηματίζει γωνία β με την κάθετη διεύθυνση στην επιφάνεια, τότε ο φωτισμός της επιφάνειας είναι:

$$E = \frac{I}{r^2} * \cos\beta \quad (1.4)$$

Αρχή της φωτομετρίας:

Οι εντάσεις δύο φωτεινών πηγών που προκαλούν την ίδια φωτεινή ένταση σε μία επιφάνεια είναι ανάλογες προς τα τετράγωνα των αποστάσεων των πηγών από την επιφάνεια.

1.2 Φυσικά Φαινόμενα στον Φωτισμό

1.2.1 Γενικά

Η ύλη αποτελείται από μικρότατα σωματίδια, τα άτομα τα οποία αποτελούνται από έναν κεντρικό πυρήνα γύρω από τον οποίο περιστρέφονται σε ελλειπτικές τροχιές τα ηλεκτρόνια. Ο πυρήνας του ατόμου αποτελείται από τα πρωτόνια και τα νετρόνια. Τα ηλεκτρόνια φέρουν αρνητικό φορτίο ίσο με $e=1,602 * 10^{-19}$ Cb, ενώ τα πρωτόνια φέρουν ίσο φορτίο με τα ηλεκτρόνια αλλά θετικό.

Οι ελλειπτικές τροχιές στις οποίες περιστρέφονται τα ηλεκτρόνια γύρω από τον πυρήνα ονομάζονται στιβάδες.

Ένα άτομο που βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας έχει ίσο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων καλείται ως ηλεκτρικά ουδέτερο.

Κάθε μία από τις στιβάδες χαρακτηρίζεται από μία ορισμένη ενεργειακή κατάσταση. Η μετάβαση ενός ηλεκτρονίου από μια στιβάδα σε άλλη χωρίς εξωτερικό αίτιο είναι αδύνατη. Για να καταστεί αυτό δυνατό απαιτείται η προσφορά ενέργειας που είναι ίση με την

διαφορά ενέργεια μεταξύ των δύο στιβάδων. Η ενεργειακή συμπεριφορά του ατόμου ακολουθεί τους παρακάτω νόμους:

A. Νόμος Planck

Η ενέργεια που εκπέμπεται με μορφή ακτινοβολίας δεν εκπέμπεται συνεχώς και κατά οποιαδήποτε ποσότητα, αλλά ασυνεχώς και κατά ποσά που είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας στοιχειώδους ποσότητας που ονομάζεται κβάντα φωτός.

Κάθε φωτόνιο μονοχρωματικής ακτινοβολίας έχει ενέργεια ίση με:

$$E = h * V \quad (1.5)$$

Όπου, E: ενέργεια ενός φωτονίου.

h: σταθερά Planck = $6.625 * 10^{-27}$ erg.sec

V: συχνότητα ακτινοβολίας.

B. Νόμοι του Bohr

1. Περιστροφή των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα γίνεται πάνω σε ορισμένες επιτρεπόμενες τροχιές που ικανοποιούν την συνθήκη:

$$m * u * r = n * \frac{h}{2\pi} \quad (1.6)$$

Όπου, m: Μάζα ηλεκτρονίου.

u: ταχύτητα ηλεκτρονίου.

r: ακτίνα τροχιάς.

h: σταθερά Planck.

n: ακέραιος κβαντικός αριθμός.

2. Ενέργεια εκπέμπεται από ένα περιστρεφόμενο ηλεκτρόνιο μόνο όταν μεταπηδά από τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας σε τροχιά μικρότερης ενέργειας. Η εκπεμπόμενη ενέργεια ισούται με:

$$h * V = E_{\alpha\rho\chi} - E_{\tau\epsilon\lambda} \quad (1.7)$$

1.2.2 Σθένος

Τα περιστρεφόμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται στις τροχιές τους με δυνάμεις ηλεκτροστατικής φύσεως που προέρχονται από την έλξη των ετερόνυμων φορτίων μεταξύ ηλεκτρονίων και πρωτονίων. Οι δυνάμεις αυτές υπακούουν στον νόμο του Coulomb:

$$F = K * \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1.8)$$

Όπου, F : Δύναμη.

K : σταθερά μονάδων.

$Q_1=Q_2$: Φορτία ηλεκτρονίου και πρωτονίου.

r : απόσταση ηλεκτρονίου από πυρήνα.

Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται μακριά από τον πυρήνα έλκονται με μικρότερη δύναμη από εκείνα που βρίσκονται κοντά στον πυρήνα άρα μπορούν πιο εύκολα να αποσπαστούν. Τα ηλεκτρόνια που καθορίζουν την συμπεριφορά του ατόμου βρίσκονται στην εξωτερική στιβάδα και ονομάζονται ηλεκτρόνια σθένους ενώ ο αριθμός αυτών που λαμβάνει μέρος στις διάφορες χημικές αντιδράσεις ονομάζεται *σθένος*.

1.2.3 Ιονισμός

Όταν ένα ηλεκτρόνιο της εξωτερικής στιβάδας αποκτήσει ενέργεια τέτοια ώστε να μπορεί να υπερνικήσει τις ελκτικές δυνάμεις του πυρήνα τότε απομακρύνεται από το άτομο και γίνεται ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Έπειτα διαταράσσεται η ηλεκτρική ισορροπία του ατόμου λόγω έλλειψης ηλεκτρονίων, το άτομο εμφανίζεται θετικά φορτισμένο και ονομάζεται *ιόν* και το φαινόμενο *ιονισμός*. Η ενέργεια που απαιτείται για να γίνει ένα ηλεκτρόνιο ελεύθερο λέγεται *ενέργεια ιονισμού*.

Ανάλογα με τον τρόπο που προσφέρεται η ενέργεια ο ιονισμός διακρίνεται σε:

- Ιονισμός με απορρόφηση ακτινοβολίας, όπου η ενέργεια προσφέρεται στο ηλεκτρόνιο με την μορφή ακτινοβολίας που προσπίπτει στο άτομο.
- Ιονισμός με κρούση, όπου η ενέργεια προσφέρεται από ένα ταχύτατα κινούμενο σωματίδιο όταν συγκρούεται με άτομο. Πάνω σ' αυτό τον μηχανισμό στηρίζεται η αρχή λειτουργίας των λαμπτήρων εκκένωσης.

1.2.4. Διέγερση – Φθορισμός

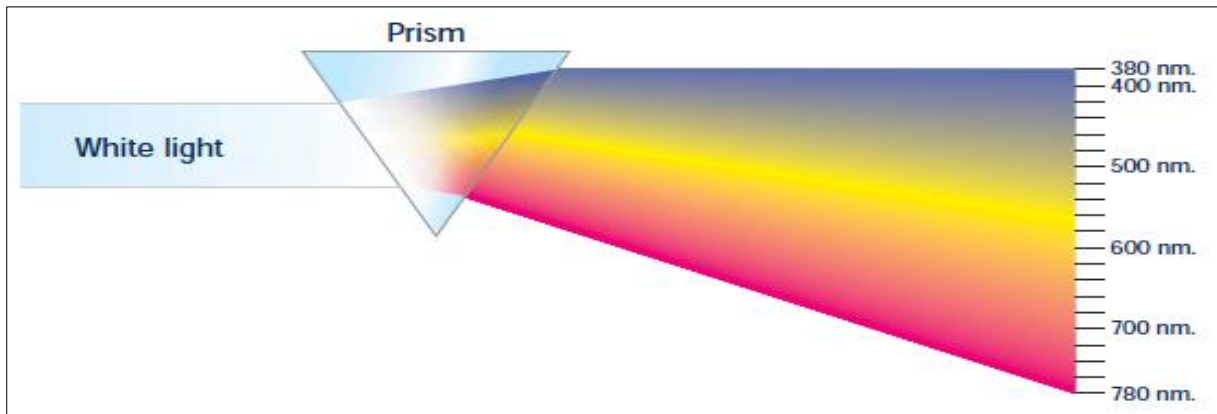
Αν σε ηλεκτρόνιο προσδοθεί ενέργεια κατάλληλης συχνότητας τότε την απορροφά και μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να ανυψωθεί από την θεμελιώδη στάθμη του σε άλλη υψηλότερης ενέργειας. Το άτομο σ' αυτή την κατάσταση είναι *ασταθές* ή βρίσκεται σε *διέγερση* και το έργο που χρειάζεται λέγεται *έργο* ή *ενέργεια διεγέρσεως*. Εάν φωτίσουμε με ακτινοβολία τέτοιας συχνότητας ώστε να μπορεί να απορροφηθεί από τα άτομα του αερίου, παρατηρείται ότι το αέριο εκπέμπει μία δευτερογενή ακτινοβολία που οφείλεται στη διέγερση των ατόμων του.

Η δευτερογενής αυτή ακτινοβολία ονομάζεται *φθορισμός* και περιέχει μήκη κύματος χαρακτηριστικά του αερίου.

1.3 Χρώματα

1.3.1 Γενικά

Το 1666 ο Isaac Newton ανέλυσε με την βοήθεια ενός πρίσματος το ηλιακό φως και απέδειξε ότι αποτελείται από ένα μείγμα ακτινοβολιών τις οποίες δεν μπόρεσε να διαχωρίσει παραπέρα και τις ονόμασε *απλά χρώματα* (μονοχρωματικές ακτινοβολίες).



Εικόνα 1. Ανάλυση λευκού φωτός υπό πρίσμα στα χρώματα του ορατού φάσματος.

Το φως μπαίνοντας σ' ένα μέσο πυκνότερο από τον αέρα επιβραδύνεται. Η επιβράδυνση αυτή που είναι μεγαλύτερη για το ιώδες και μικρότερη για το ερυθρό, είναι εκείνη που κάμπτει άνισα τις ακτίνες και ξεχωρίζει τα μήκη κύματος του φάσματος.

Κάθε μία από τις ακτινοβολίες του ορατού φάσματος, προσπίπτουσα στο ανθρώπινο μάτι προκαλεί διαφορετικό φωτοερέθισμα που ερμηνεύεται από τον άνθρωπο σαν χρώμα.

1.3.2 Ενεργειακή φασματική κατανομή

Η *ενεργειακή φασματική κατανομή* ως έννοια, αφορά στο σύνολο των μηκών κύματος ακτινοβολίας που περιλαμβάνει το φως μίας φωτεινής πηγής. Συγκεκριμένα, το ηλιακό φως περιέχει μεταξύ άλλων και όλο το φάσμα των μηκών κύματος ορατών ακτινοβολιών. Δεν ισχύει το ίδιο όμως και για τις τεχνητές πηγές φωτισμού όπως οι λαμπτήρες, των οποίων το φως ποικίλει σε χρωματική ακτινοβολία που περιέχει ανάλογα με την ενεργειακή φασματική κατανομή του.

1.3.3 Θερμοκρασία Χρώματος

Τον συνδυαστικό κρίκο ανάμεσα στα μεγάλα και μικρά μήκη κύματος πρόσθεσε ο Max Planck με την έννοια της εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας κατά ποσά (*quanta*). Το

μοντέλο που χρησιμοποίησε βασίζεται στην θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ των ηλεκτρομαγνητικών ταλαντωτών που αντιπροσωπεύουν τις ταλαντώσεις των δομικών λίθων, των τοιχωμάτων μιας κοιλότητας του σώματος και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τους στον χώρο της κοιλότητας. Το ιδανικό ή πρότυπο αυτό σώμα ονομάστηκε **μέλαν σώμα**. Έχει την ιδιότητα να εκπέμπει ακτινοβολία, με ορισμένη φασματική κατανομή, χαρακτηριστική της θερμοκρασίας του. Απορροφά πλήρως κάθε ακτινοβολία που προσπίπτει επάνω του, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος λ και την θερμοκρασία του ή τη θερμοκρασία του σώματος που την εκπέμπει.

Το φάσμα ακτινοβολίας του μέλανος σώματος παρουσιάζει τα επόμενα χαρακτηριστικά:

- a) Εμφανίζει ένα μέγιστο, το μέγεθος και η θέση του οποίου εξαρτώνται από την θερμοκρασία του. Δεξιά του μεγίστου η ένταση μειώνεται προς το μηδέν.
- b) Αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος οδηγεί σε αύξηση της έντασης σε όλα τα μήκη κύματος και του μεγίστου με ταυτόχρονη μετατόπισή του προς τα μικρότερα μήκη κύματος.

Θερμοκρασία χρώματος μιας φωτεινής πηγής είναι αυτή στην οποία, όταν βρεθεί το μέλαν σώμα τότε εκπέμπει φως ίδιας απόχρωσης με αυτό της πηγής. Μονάδα μέτρησης του μεγέθους δίνεται σε βαθμούς της απόλυτης κλίμακας Kelvin. Η θερμοκρασία χρώματος χρησιμοποιείται σαν έννοια για να δώσει την εντύπωση που δημιουργεί το φως που παράγει μία φωτεινή πηγή. Στον Πίνακα 1 εισάγονται οι έννοιες του θερμού, ψυχρού και μέσου (ουδέτερου – λευκού) φωτός σε συνδυασμό με τις θερμοκρασίες τους. Όσο αυξάνει η θερμοκρασία χρώματος τόσο το φως του λαμπτήρα γίνεται λευκότερο.

Χαρακτηρισμός Φωτός	Θερμοκρασία Χρώματος (K)
Θερμό (<i>Warm</i>)	<3.300
Μέσο – Ουδέτερο (<i>Intermediate</i>)	Από 3.300 έως 5.300
Ψυχρό (<i>Cold</i>)	>5.300

Πίνακας 1. Χαρακτηρισμός φωτός και Θερμοκρασία χρώματος.

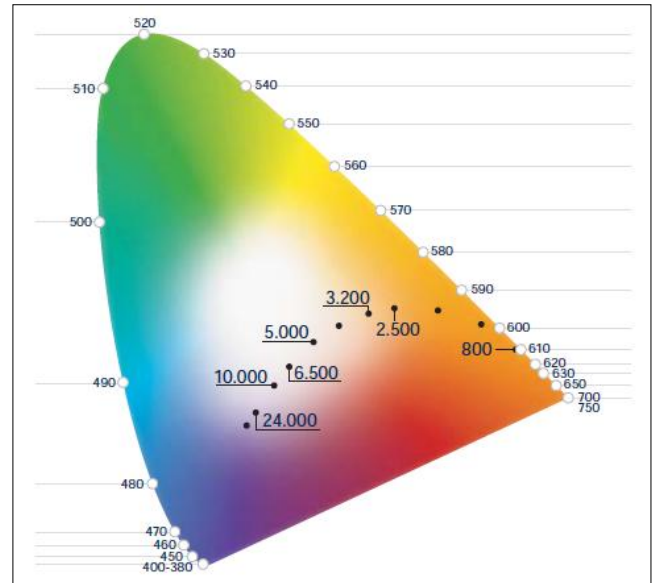
Στον καθορισμό του χρώματος ενός αντικειμένου συμμετέχουν δύο παράγοντες:

- i. Οι αντανακλαστικές ιδιότητες του υλικού.
- ii. Η φασματική κατανομή του φωτός της φωτεινής πηγής ή αλλιώς η χρωματική απόδοση της πηγής.

1.3.4 Χρωματομετρικό τρίγωνο της C.I.E

Η ανάμειξη τριών βασικών χρωμάτων σε διάφορες αναλογίες μας δίνει οποιοδήποτε χρώμα. Η απεικόνιση ενός χρώματος είναι δυνατή σε σύστημα τρισσορθογωνίων συντεταγμένων στον χώρο. Επειδή η απεικόνιση αυτή είναι δύσχρηστη αποφασίστηκε η

απεικόνιση των διάφορων χρωμάτων πάνω σ' ένα επίπεδο. Αυτό αποτελείται από ορθογώνιο τρίγωνο του οποίου οι κορυφές αντιστοιχούν στα τρία χρώματα *ερυθρό, πράσινο, κυανό*. Τα χρώματα αυτά λέγονται πρότυπα και δεν είναι δυνατό να αναπαραχθούν καθένα χωριστά. Στο κέντρο του τριγώνου απεικονίζεται το λευκό χρώμα, ενώ κατά μήκος της περιμέτρου του τριγώνου κάθε σημείο απεικονίζει χρώματα που προκύπτουν από ανάμειξη δύο χρωμάτων των κορυφών. Ο υπόλοιπος χώρος στο τρίγωνο απεικονίζει χρώματα που προκύπτουν από την ανάμειξη των τριών πρότυπων χρωμάτων.



Εικόνα 2. Χρωματικό τρίγωνο C.I.E

Κεφάλαιο 2

Λαμπτήρες εκκένωσης (H.I.D)
& Στραγγαλιστικά πηνία

2.1 Λαμπτήρες Εκκένωσης – Στραγγαλιστικά Πηνία

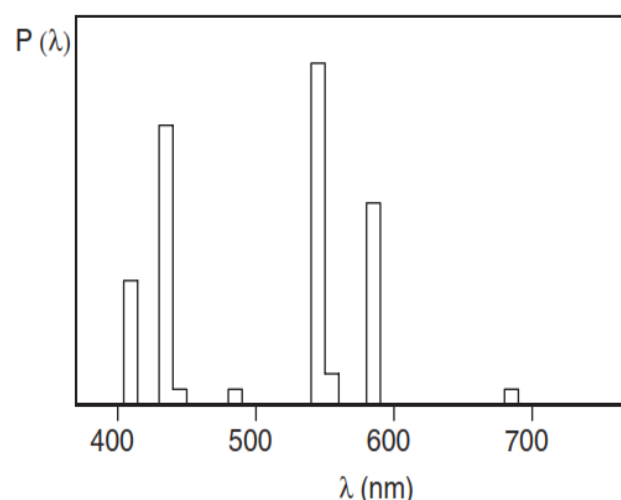
2.1.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στα ηλεκτρονικά στραγγαλιστικά πηνία που συνήθως καλούνται ξηρού τύπου στραγγαλιστικά πηνία και των οποίων η ισχύς μετατρέπεται ηλεκτρονικά και χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία λαμπτήρων εκκένωσης. Η νέα εποχή των ηλεκτρονικών στραγγαλιστικών πηνίων αρχίζει με την εισαγωγή των διπολικών τρανζίστορ ισχύος με χαμηλό χρόνο μετάβασης, επιτρέποντας την τροφοδοσία των λαμπτήρων χαμηλής πίεσης σε συχνότητες μερικών χιλιοκύκλων και αυξάνοντας την φωτεινή απόδοση των λαμπτήρων λειτουργώντας σε τέτοιες υψηλές συχνότητες. Αργότερα, τα ηλεκτρονικά στραγγαλιστικά πηνία έγιναν πιο δημοφιλή με την εμφάνιση των χαμηλού κόστους MOSFETs ισχύος, που τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους τα κάνουν πολύ ελκυστικά για την υλοποίηση ηλεκτρονικού τύπου στραγγαλιστικά πηνία. Τα κύρια πλεονεκτήματα από τα ηλεκτρομαγνητικά στραγγαλιστικά πηνία είναι η αύξηση της απόδοσης και του χρόνου ζωής των λαμπτήρων, η ελάττωση του μεγέθους και του βάρους των *ballasts* και η βελτίωση της ποιότητας του φωτός. Αυτό το κεφάλαιο δίνει μία γενική εικόνα των πιο σημαντικών θεμάτων αναφορικά με τα στραγγαλιστικά πηνία των λαμπτήρων εκκένωσης.

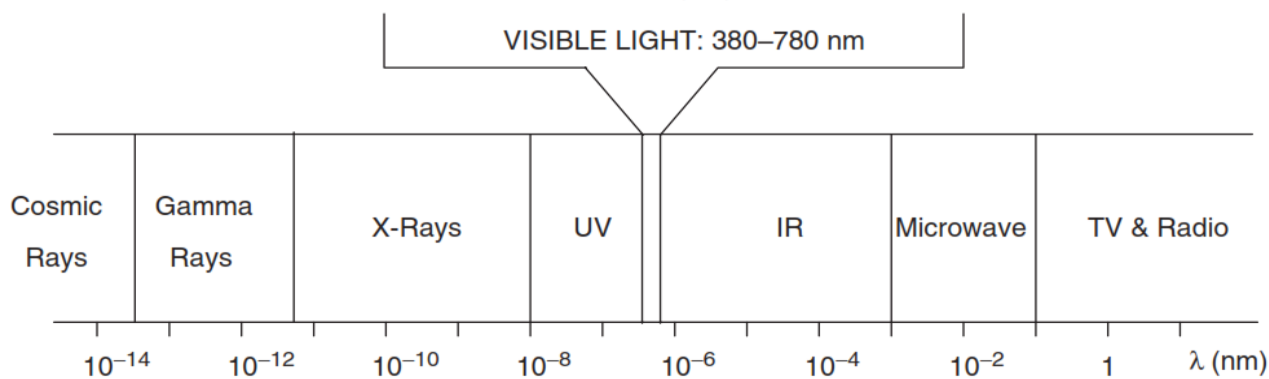
2.1.2 Βασικές Έννοιες

Οι λαμπτήρες εκκένωσης δημιουργούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που σημαίνει ότι το ηλεκτρικό ρεύμα περνά διαμέσου αέριας ή μεταλλικής εξάτμισης. Αυτή η ακτινοβολία είναι διαφορετική με την συνεχή ακτινοβολία που εκπέμπεται από νήματα πυράκτωσης. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται η ενεργειακή φασματική κατανομή ενός λαμπτήρα εκκένωσης, η οποία αποτελείται από έναν αριθμό διαχωρισμένων φασματικών γραμμών.

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2, μόνο η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκπέμπει στην ορατή περιοχή (380 – 780 nm), από το ενεργειακό φάσμα της ακτινοβολίας που είναι χρήσιμη για την προβολή του φωτός. Η συνολική ισχύς εκπέμπεται από την ηλεκτρική εκκένωση και μπορεί να επιτευχθεί με την ενίσχυση της φασματικής παραγωγής ενέργειας. Παρ' όλα αυτά δεν είναι μία κατάλληλη παράμετρος να μετρηθεί το ποσό της εκπομπής φωτός από λαμπτήρα εκκένωσης.



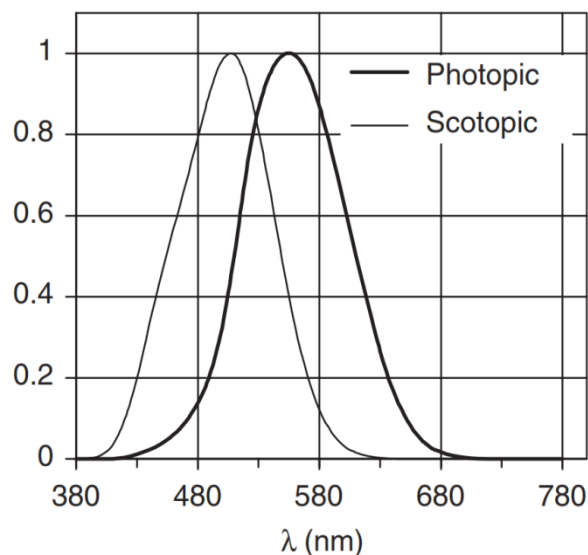
Εικόνα 1. Ενεργειακή φασματική κατανομή λαμπτήρα εκκένωσης.



Εικόνα 2. Ενεργειακό φάσμα ακτινοβολίας.

Το ανθρώπινο μάτι παρουσιάζει διαφορετικές αντιδράσεις σε διάφορους τύπους ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μαζί με την ορατή περιοχή. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3 υπάρχουν δύο καμπύλες απόκρισης. Πρώτα, η φωτοπική καμπύλη, συνήθως καλείται $V(\lambda)$,

κι είναι η χαρακτηριστική που χρησιμοποιείται για να εκπροσωπεί την συμπεριφορά του ανθρώπινου ματιού κάτω από φυσιολογικές συνθήκες επιπέδων φωτισμού ή της ημερήσιας όρασης. Δεύτερον, η σκοτοπική καμπύλη $V'(\lambda)$, είναι η απόκριση του ανθρώπινου ματιού για συνθήκες με χαμηλά επίπεδα φωτισμού, γνωστή ως νυχτερινή όραση. Η αιτία γι' αυτή την διαφορετική συμπεριφορά είναι φυσιολογική. Το ανθρώπινο μάτι αποτελείται από δύο τύπους φωτοϋποδοχών: τους ράβδους και τους κώνους. Οι ράβδοι είναι περισσότερο ευαίσθητοι σε χαμηλά επίπεδα φωτισμού από τους κώνους, αλλά



Εικόνα 3. Καμπύλες απόκρισης $V(\lambda)$ και $V'(\lambda)$.

δεν είναι ευαίσθητοι σε διαφορετικά φωτεινά χρώματα. Από την άλλη, οι κώνοι ανταποκρίνονται για φυσιολογική όραση χρωμάτων σε ψηλότερα επίπεδα φωτισμού. Φυσιολογικά, μόνο η φωτεινή λειτουργία λαμβάνεται υπόψιν στο σχεδιασμό φωτισμού και χρησιμεύει για να καλιμπράρει φωτομετρητές.

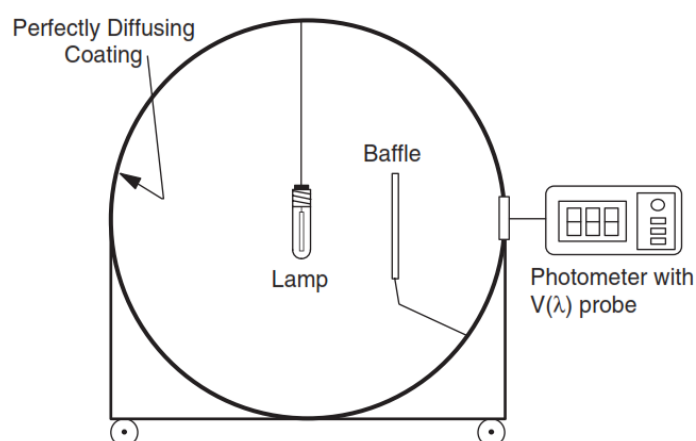
Από τότε που το ανθρώπινο μάτι αποκρίνεται με διαφορετικούς τρόπους σε διαφορετικά μήκη κύματος ή χρώματα, η ισχύς εξόδου ενός λαμπτήρα, που μετριέται σε Watts, δεν είναι πολύ εφαρμόσιμο μέγεθος στο να εκπροσωπεί το ποσό της φωτεινότητας. Έτσι, μια νέα μονάδα μεγέθους χρησιμοποιείται για να ενσωματώσει την απόκριση του ανθρώπινου ματιού, η οποία καλείται *lumen*. Το συνολικό φώς εξόδου από μία λάμπα μετριέται σε *lumens* και είναι γνωστή ως φωτεινή ροή ενός λαμπτήρα. Η φωτεινή ροή λαμβάνεται από την ενσωμάτωση της ισχύς ακτινοβολίας ως εξής:

$$\Phi = K_m \int_{380nm}^{780nm} P(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

Όπου,

K_m : εκπροσωπεί την μέγιστη φασματική απόδοση, η οποία είναι ισοδύναμη με 683 *lumens/watt* ($\lambda=555nm$) για την φωτεινή όραση και 1700 *lumens/watt* ($\lambda=507nm$) για την σκοτεινή όραση.

Οι πρότυπες φωτεινές και σκοτεινές λειτουργίες ορίστηκαν από την Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού (*International Commission on Illumination*)[CIE] το 1924 και το 1951, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της μέτρησης από την συνολική φωτεινή ροή είναι πολύ χρήσιμα για να γνωρίζουμε εάν ή όχι η λάμπα λειτουργεί κατάλληλα. Στο εργαστήριο, η μέτρηση από την συνολική φωτεινή ροή γίνεται μέσω μίας σφαίρας ολοκλήρωσης και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποκατάστασης. Η σφαίρα ολοκλήρωσης, γνωστό ως *Ulbricht* φωτόμετρο, είναι επιχρισμένο εσωτερικά μ' ένα τέλειο υλικό διάχυσης. Έτσι, η σφαίρα εκτελεί το ολοκλήρωμα στην Εξίσωση (2.1) και ο φωτισμός στην εσωτερική επιφάνεια είναι ανάλογη με την συνολική φωτεινή ροή. Τοποθετείται ένα φωτόμετρο με φίλτρο φωτεινής όρασης



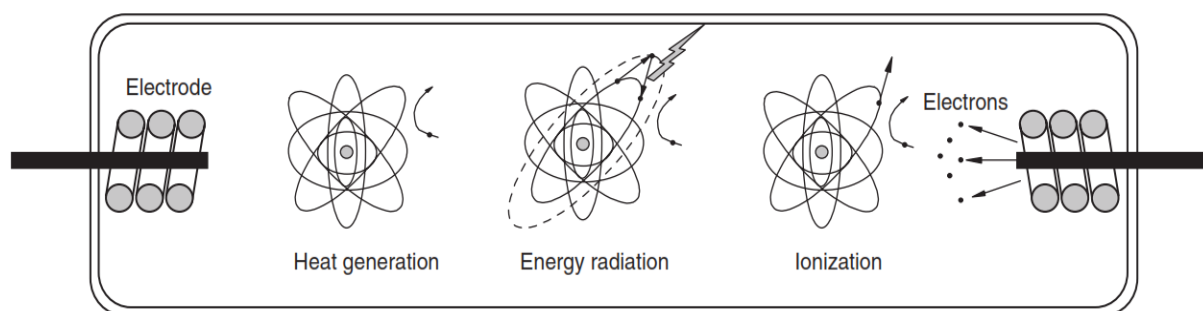
Εικόνα 4. Σφαίρα ολοκλήρωσης φωτόμετρο.

έτσι ώστε ο εσωτερικός φωτισμός να μπορεί να μετρηθεί και ένα διάφραγμα για να αποφευχθεί η απευθείας έκθεση στο φως του φωτόμετρο από την λάμπα. Η μέτρηση γίνεται σε δύο στάδια, το ένα με τον λαμπτήρα υπό δοκιμή σε μία θέση και το άλλο με πρότυπο λαμπτήρα του γνωστού συνόλου της φωτεινής ροής.

Από τις δύο μετρήσεις, η συνολική φωτεινή ροή της λάμπας υπό δοκιμή εξάγεται από την γραμμική σχέση. Η Εικόνα 4 απεικονίζει μία σφαίρα ολοκλήρωσης του φωτόμετρο. Μία σημαντική παράμετρος που σχετίζεται με την τροφοδοσία των λαμπτήρων εκκένωσης είναι η φωτεινή απόδοση. Αυτή ορίζεται ως το ποσοστό της συνολικής φωτεινής ροής του λαμπτήρα προς την συνολική ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνεται από την λάμπα, συνήθως εκφράζεται σε *lumens/watt*. Η φωτεινή απόδοση ενός λαμπτήρα εκκένωσης μπορεί να αυξηθεί με την κατάλληλη σχεδίαση ηλεκτρονικού στραγγαλιστικού πηνίου, η οποία οδηγεί τελικά στην εξοικονόμηση ενέργειας.

2.2 Λαμπτήρες Εκκένωσης HID

Οι λαμπτήρες εκκένωσης αποτελούνται από έναν σωλήνα εκκένωσης στο εσωτερικό του οποίου η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ο σωλήνας εκκένωσης είναι κατασκευασμένος από διαφανές ή ημιδιαφανές υλικό, με δύο ηλεκτρόδια σφραγισμένα που τοποθετούνται στις άκρες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Ο σωλήνας εκκένωσης είναι γεμάτος με ένα αδρανές αέριο και ένα μεταλλικό ατμό. Τα ηλεκτρόδια παράγουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει από την εκκένωση. Αυτά τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται με άτομα του αερίου, έχοντας και τα δύο ελαστικές και ανελαστικές συγκρούσεις που εξαρτώνται από την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων. Οι βασικές διεργασίες στο εσωτερικό του σωλήνα εκκένωσης φαίνονται στην Εικόνα 5, κι έχουν ως εξής:



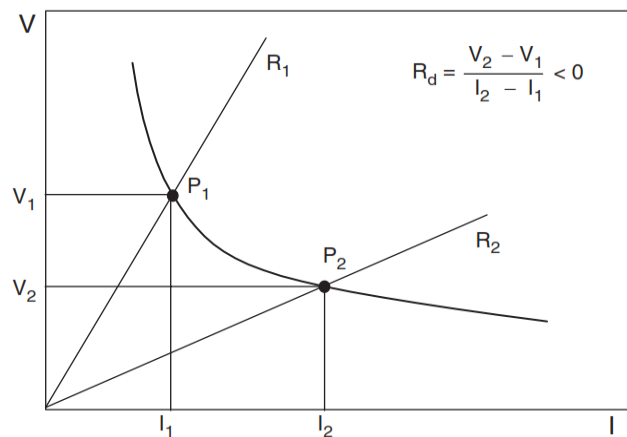
Εικόνα 5. Βασικές διεργασίες στο εσωτερικό του σωλήνα εκκένωσης ενός λαμπτήρα HID.

1. Παραγωγή θερμότητας. Όταν η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι χαμηλή, μία ελαστική σύγκρουση λαμβάνει χώρα και μόνο μία μικρή ποσότητα από την ενέργεια του ηλεκτρονίου μεταφέρεται στο άτομο του αερίου. Το αποτέλεσμα από αυτό τον τύπο της σύγκρουσης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του αερίου. Σ' αυτή την περίπτωση, η ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται για την παραγωγή απωλειών θερμότητας. Ωστόσο, αυτή είναι επίσης μία σημαντική διαδικασία επειδή η εκκένωση πρέπει να οριστεί σε μία βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας.

2. Διέγερση ατόμου αερίου. Μερικά ηλεκτρόνια μπορούν να έχουν υψηλή κινητική ενέργεια έτσι ώστε η ενέργεια που μεταφέρεται στην σύγκρουση χρησιμοποιείται για να στείλει ένα ηλεκτρόνιο από άτομο του αερίου σε υψηλότερη τροχιά. Αυτή η κατάσταση είναι ασταθής και το ηλεκτρόνιο τείνει να ανακτήσει το αρχικό επίπεδο τροχιάς του, τότε εκπέμπει την απορροφημένη ενέργεια με την μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αυτή χρησιμοποιείται για να παράγει άμεσα ορατό φως ή, σε άλλη περίπτωση, μια υπεριώδης ακτινοβολία παράγεται πρώτη και έπειτα μετασχηματίζεται σε ορατή ακτινοβολία με την βοήθεια μίας επίστρωσης φωσφόρου που υπάρχει στο εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα εκκένωσης.

3. Ιονισμός του ατόμου αερίου. Σε πολλές περιπτώσεις, τα ηλεκτρόνια έχουν αποκτήσει τέτοια υψηλή κινητική ενέργεια που κατά την διάρκεια της σύγκρουσής τους με το άτομο του αερίου, ένα από τα ηλεκτρόνια που ανήκει στο άτομο του αερίου απελευθερώνεται, με αποτέλεσμα ένα θετικά φορτισμένο ιόν κι ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Αυτό το απελευθερωμένο ηλεκτρόνιο μπορεί να παίξει τους ίδιους ρόλους με εκείνους που παράγεται από τα ηλεκτρόδια. Αυτή η διαδικασία είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά την διάρκεια τόσο της ανάφλεξης εκκένωσης όσο και της κανονικής λειτουργίας, επειδή τα ιονισμένα άτομα και τα ηλεκτρόνια κρίνονται αναγκαία για να διατηρηθεί το ηλεκτρικό ρεύμα διαμέσου του λαμπτήρα.

Ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων στην εκκένωση μπορεί να αυξηθεί ραγδαία λόγω του συνεχιζόμενου ιονισμού, παράγοντας απεριόριστο ρεύμα και τέλος ένα βραχυκύκλωμα. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 6, η οποία δείχνει πώς οι χαρακτηριστικές τάσης – ρεύματος παρουσιάζουν μία αρνητική απόκλιση αντίστασης.



Εικόνα 6. Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος.

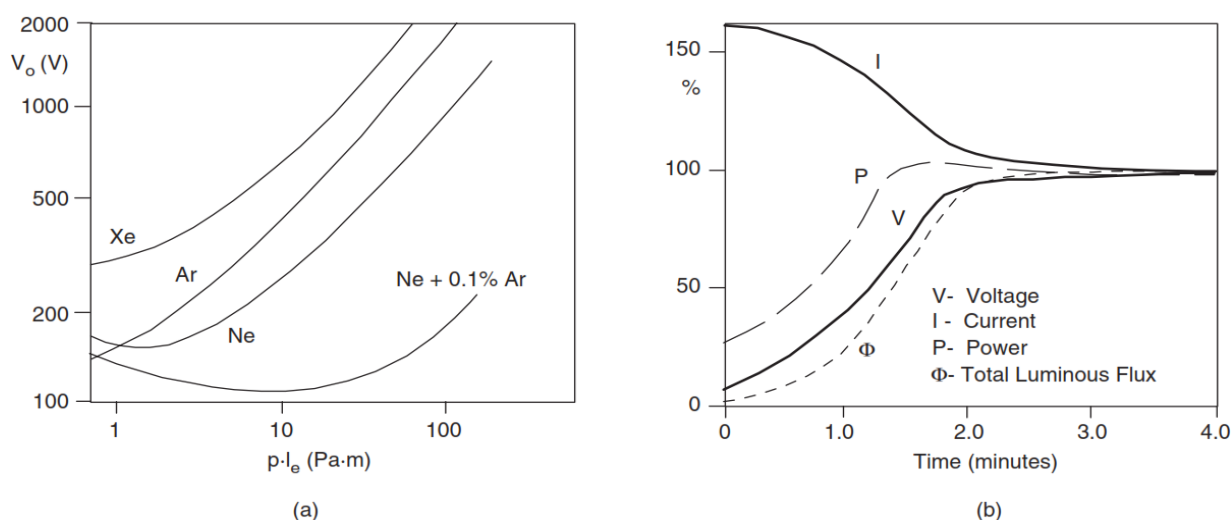
Ως εκ τούτου, προκειμένου να περιοριστεί το ρεύμα της εκκένωσης ένα βοηθητικό κύκλωμα τροφοδοσίας είναι υποχρεωτικό. Αυτό το κύκλωμα καλείται στραγγαλιστικό πηνίο (*ballast*).

Εστιάζοντας στους λαμπτήρες εκκένωσης, η διαδικασία της πλήρους σταθεροποίησης αποτελείται από δύο κύριες φάσεις:

1. Φάση Κατάρρευσης. Τα περισσότερα από τα αέρια είναι πολύ καλοί μονωτές και μία ηλεκτρική εκκένωση είναι πιθανή μόνο αν παρουσιάζεται επαρκής συγκέντρωση φορτισμένων σωματιδίων. Κανονικά μία υψηλή τάση χρησιμοποιείται για να παρέχει φορείς ηλεκτρισμού και για να προκαλέσει έναρξη λειτουργίας της εκκένωσης. Η ελάχιστη τάση που εφαρμόζεται για να προκληθεί η έναρξη λειτουργίας της εκκένωσης λέγεται τάση εκκίνησης. Η τάση εκκίνησης εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του αερίου, την πίεση του αερίου κι από την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η Εικόνα 7_(α) παρουσιάζει την τάση εκκίνησης σαν μία λειτουργία του προϊόντος πίεσης αερίου από την απόσταση των ηλεκτροδίων, για διαφορετικά αέρια. Αυτές οι λειτουργίες είναι γνωστές ως καμπύλες του *Paschen*. Συνήθως αδρανή βοηθητικά αέρια χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την τάση εκκίνησης. Ιδιαίτερως, υπάρχουν μερικά ειδικά αδρανή μείγματα αερίου, παρουσιάζοντας μία πολύ χαμηλή τάση εκκίνησης, τα οποία καλούνται μείγματα *Penning*. Αυτά τα μείγματα χρησιμοποιούνται πολύ συχνά ως αρχικό αέριο εκκίνησης. Στην Εικόνα 7_(α) φαίνεται ένα τυπικό μείγμα *penning* αποτελούμενο από νέον με ποσοστό 0.1% αργού αερίου.

2. Φάση Προθέρμανσης. Όταν η λάμπα αναφλέγεται, οι συγκρούσεις ανάμεσα στα ελεύθερα ηλεκτρόνια και άτομα δημιουργούν θέρμανση και η θερμοκρασία εκκένωσης αυξάνεται μέχρι να φτάσει στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Κατά την διάρκεια αυτής της φάσης, η θερμότητα χρησιμοποιείται για να εξατμιστούν τα άτομα του μετάλλου που υπάρχουν στον σωλήνα εκκένωσης και η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία θεωρείται ο χαρακτήρας των ατμών μετάλλου εκκένωσης αντί του αδρανούς αερίου εκκένωσης. Από την ηλεκτρική άποψη, η φάση προθέρμανσης της εκκένωσης δείχνει αρχικά χαμηλή τάση εκκένωσης και υψηλό ρεύμα εκκένωσης. Όσα περισσότερα άτομα μετάλλου εξατμίζονται, η τάση εκκένωσης αυξάνεται και το ρεύμα εκκένωσης μειώνεται. Τελικά, η ισορροπία επιτυγχάνεται στην σταθερή κατάσταση λειτουργίας με τις κανονικές τιμές της τάσεως και του ρεύματος αντίστοιχα. Ο χρόνος σταθεροποίησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό με τον τύπο του εκάστοτε λαμπτήρα. Ποικίλει από δευτερόλεπτα για λαμπτήρες φθορισμού σε λεπτά για λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής έντασης.

Η Εικόνα 7_(β) παρουσιάζει μερικές κυματομορφές από την φάση προθέρμανσης μέχρι και την σταθεροποίηση του λαμπτήρα εκκένωσης.



Εικόνα 7. α) Καμπύλες Paschen για αδρανή αέρια και β) Καμπύλες σταθεροποίησης λαμπτήρα εκκένωσης.

Τα βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στους λαμπτήρες για να δημιουργηθεί ακτινοβολία στο ορατό τμήμα του φάσματος είναι το νάτριο και ο υδράργυρος. Η πρώτη ακτινοβολία δημιουργείται απευθείας μέσα από το ορατό τμήμα του φάσματος, η τελευταία ακτινοβολία δημιουργείται κυρίως στην υπεριώδη περιοχή, αλλά αυτή η ακτινοβολία μπορεί εύκολα να μετασχηματιστεί σε ορατή ακτινοβολία μέσω ενός επιχρίσματος φωσφόρου στο εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα εκκένωσης. Εκτός των άλλων, ένα στοιχείο που χρησιμοποιείται ως μία πολύ σημαντική παράμετρος και που σχετίζεται με την αποτελεσματικότητα και τον ποσότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι η πίεση εκκένωσης. Για τα στοιχεία του νατρίου και υδραργύρου, υπάρχουν δύο τιμές πίεσης γύρω από τις οποίες η φωτεινή απόδοση του λαμπτήρα εκκένωσης είναι υψηλότερη. Η πρώτη επιτυγχάνεται σε αρκετά χαμηλές πιέσεις, γύρω στο 1 Pa, και η δεύτερη σε υψηλότερες

πιέσεις, γύρω στα 10^5 Pa=1at. Αυτός είναι ο λόγος που υπάρχουν δύο κύριοι τύποι λαμπτήρων εκκένωσης:

1. Χαμηλής πίεσης λαμπτήρες εκκένωσης. Αυτός ο τύπος λαμπτήρων λειτουργεί με πιέσεις γύρω στο 1 Pa και διαθέτει χαμηλή πυκνότητα ρεύματος στο εσωτερικό της εκκένωσης και χαμηλή ισχύ ανά μονάδα μήκους της εκκένωσης. Άρα, αυτοί οι λαμπτήρες παρουσιάζουν συνήθως ένα αρκετά μεγάλο όγκο εκκένωσης με χαμηλή ονομαστική ισχύ. Πιο αντιπροσωπευτικά παραδείγματα είναι οι χαμηλής πίεσης λαμπτήρες υδραργύρου, γνωστοί ως λαμπτήρες φθορισμού και οι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης.

2. Υψηλής πίεσης λαμπτήρες εκκένωσης. Η πίεση λειτουργίας σ' αυτό τον τύπο λαμπτήρων είναι γύρω στα 10^5 Pa και μεγαλύτερη, προκειμένου να επιτευχθεί σημαντική αύξηση της φωτεινής απόδοσης του λαμπτήρα εκκένωσης. Αυτές οι λάμπες παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα ρεύματος στην εκκένωση και υψηλό λόγο ισχύος ανά μήκος εκκένωσης, έτσι παρουσιάζουν πολύ μικρότερους σωλήνες εκκένωσης. Παραδείγματα αυτών των λαμπτήρων είναι οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης, λαμπτήρες υδραργύρου υψηλής πίεσης και λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων.

Τελικά, για να χαρακτηρίσει το φώς που παράγεται από έναν λαμπτήρα εκκένωσης, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε δύο σημαντικές έννοιες: την συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος (*Correlated Color Temperature*) και τον δείκτη απόδοσης χρωμάτων (*Color Rendering Index*).

Η **συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος** ορίζεται ως η θερμοκρασία του μέλανος σώματος η οποία αντιλαμβάνεται το χρώμα του οποίου περισσότερο μοιάζει σ' εκείνο του λαμπτήρα εκκένωσης. Το χρώμα ενός σώματος πυράκτωσης αλλάζει, καθώς η θερμοκρασία του αυξάνεται, από βαθύ κόκκινο σε πορτοκαλί, κίτρινο και τελικά λευκό. Έτσι, ένας ψυχρού λευκού λαμπτήρα φθορισμού έχει συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος γύρω στα 3500 Kelvin και εμφανίζεται σαν πηγή λευκού φωτός, ενώ μία λάμπα νατρίου υψηλής πίεσης παρουσιάζει συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος στα 2000 Kelvin και φαίνεται σαν κίτρινη.

Ο **δείκτης απόδοσης χρωμάτων** μίας φωτεινής πηγής είναι το αποτέλεσμα που η πηγή έχει με την εμφάνιση του χρώματος των στοιχείων κάτω από αυτό, σε σύγκριση με την εμφάνισή του κάτω από μία πηγή αναφοράς ίση με την συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος. Οι μετρήσεις δίνουν μία τιμή χαμηλότερη του 100 και όσο ψηλότερος είναι ο δείκτης απόδοσης χρωμάτων τόσο καλύτερη είναι η απόδοση των χρωμάτων. Για παράδειγμα, το φώς της ημέρας και οι λάμπες πυράκτωσης έχουν δείκτη απόδοσης χρωμάτων 100.

Για την σύνοψη της παρούσας εισαγωγής των λαμπτήρων εκκένωσης, θα δοθούν ορισμένες παρατηρήσεις σχετικά με τους πιο σημαντικούς τύπους των λαμπτήρων εκκένωσης. Ο Πίνακας 1 παρέχει κάποια επιπλέον στοιχεία με τις διαφορές των λαμπτήρων εκκένωσης για σύγκριση.

Lamp	Wattage (W)	Luminous efficacy (lm·W ⁻¹)	Life (h)	CCT (K)	CRI
Fluorescent	4–100	62	20,000	4200	62
Compact fluorescent	7–30	60–80	10,000	2700–5000	82
Low-pressure sodium	50–150	110–180	15,000	1800	<0
Mercury vapor	50–1000	40–70	24,000	4000–6000	15–50
Metal-halide	40–15,000	80–125	10,000	4000	65
HPS	35–1000	65–140	24,000	2000	22
HPS(Amalgam)	35–1000	45–85	10,000	2200	65

Πίνακας 1. Σύγκριση διάφορων λαμπτήρων εκκένωσης.

1. Λαμπτήρες φθορισμού. Αυτές οι λάμπες ανήκουν στην κατηγορία των λαμπτήρων εκκένωσης ατμών υδραργύρου χαμηλής πίεσης. Η εκκένωση δημιουργεί, δύο κύριες γραμμές στα 185 nm και 253.7 nm και άλλες δευτερεύουσες στο ορατό φάσμα. Η φθορίζουσα σκόνη στο εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα εκκένωσης μετατρέπει την υπεριώδη ακτινοβολία σε ορατή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα την ευρεία φασματική κατανομή και την καλή χρωματική απόδοση. Σ' αυτές τις λάμπες, η ιδανική πίεση ατμών υδραργύρου (η οποία δίνει την μέγιστη φωτεινή απόδοση) είναι 0.8 Pa. Για τις διαμέτρους σωλήνων που χρησιμοποιούνται συνήθως, αυτή η πίεση έχει φτάσει σε θερμοκρασία τοιχωμάτων τους 40°C, όχι περισσότερο από την χαρακτηριστική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η παραγόμενη θερμότητα στο εσωτερικό της λάμπας είναι επαρκής για την επίτευξη της απαιτούμενης θερμοκρασίας λειτουργίας χωρίς την χρήση εξωτερικής λυχνίας. Ωστόσο, η δομή αυτή προκαλεί μεγάλες διακυμάνσεις της φωτεινής ροής λαμπτήρα με την θερμοκρασία, το οποίο είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα των λαμπτήρων φθορισμού. Μία λύση γι' αυτό το πρόβλημα είναι η προσθήκη αμαλαγμάτων για την σταθεροποίηση του φωτός εξόδου. Αυτό χρησιμοποιείται ειδικά σε συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού.

2. Λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης. Αυτές οι λάμπες είναι η πιο αποτελεσματική πηγή φωτός. Ο λόγος είναι η σχεδόν μονοχρωματική ακτινοβολία που παράγουν, με δύο κύριες γραμμές στα 589 nm και 589.6 nm, πολύ κοντά στην μέγιστη ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού. Επομένως, η χρωματική απόδοση αυτών των λαμπτήρων είναι πολύ φτωχή, ωστόσο οι αντιθέσεις φαίνονται πιο καθαρά κάτω από αυτό το φως. Αυτή είναι η αιτία που χρησιμοποιούνται αυτές οι λάμπες σε καταστάσεις που η αναγνώριση αντικειμένων και καμπυλών είναι απαραίτητη για την ασφάλεια, όπως γέφυρες αυτοκινητόδρομου, τούνελ, διασταυρώσεις και ούτω κάθ' εξής. Η βέλτιστη πίεση για λαμπτήρες εκκένωσης νατρίου χαμηλής πίεσης είναι στα 0.4 Pa, επιτυγχάνεται σε κανονικούς σωλήνες εκκένωσης σε θερμοκρασία των 260°C. Μία εξωτερική λάμπα χρησιμοποιείται συνήθως για να επιτύχει και να διατηρήσει αυτή την θερμοκρασία.

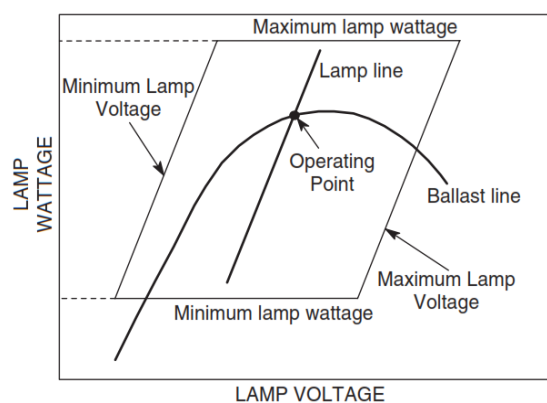
3. Λαμπτήρες ατμών υδραργύρου υψηλής πίεσης. Η αύξηση της πίεσης των ατμών υδραργύρου παράγει μία ακτινοβολία πλουσιότερη σε φασματικές γραμμές, κάποιες από αυτές είναι στο ορατό μέρος του φάσματος 405, 436, 546, και 577/579 nm. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της φωτεινής απόδοσης, φτάνοντας τις τιμές των 40 – 60 lumen·W⁻¹ σε πιέσεις 10⁵–

10^7 Pascal (1 – 100 at). Αυτές οι λάμπες λειτουργούν με ακόρεστους ατμούς υδραργύρου, πράγμα που σημαίνει ότι όλος ο υδράργυρος στον σωλήνα εκκένωσης έχει εξατμιστεί και ο αριθμός των ατόμων υδραργύρου ανά μονάδα όγκου παραμένει σταθερός. Έτσι, η λειτουργία αυτού του τύπου λαμπτήρων είναι λιγότερο ανεξάρτητη της θερμοκρασίας από τους περισσότερους λαμπτήρες εκκένωσης. Ένα μειονέκτημα από αυτές τις λάμπες είναι η έλλειψη φασματικών γραμμών σε μεγάλα μήκη κύματος (κόκκινο) του φάσματος, δείχνοντας έτσι χαμηλό δείκτη απόδοσης χρωμάτων. Μία αύξηση της απόδοσης των χρωμάτων μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη ενώσεων μεταλλικών αλογονιδίων μέσα στο σωλήνα εκκένωσης, προκειμένου να παράγουν ακτινοβολία σε όλο το ορατό φάσμα. Αυτές είναι γνωστές ως **λάμπες μεταλλικών αλογονιδίων**.

4. Λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης. Αυτή είναι μία πολύ δημοφιλής πηγή φωτός λόγω της υψηλής φωτεινής απόδοσής και μεγάλης διάρκειας ζωής της. Η αύξηση της πίεσης των ατμών νατρίου παράγει ένα διευρυμένο φάσμα, με καλή χρωματική απόδοση σε σύγκριση με τους λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης. Επίσης αυτό οδηγεί σε χαμηλότερη φωτεινή απόδοση αλλά εξακολουθεί να είναι ψηλότερα από τους άλλους λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής έντασης. Κάποιες από αυτές τις λάμπες ενσωματώνουν υδράργυρο με την μορφή συγχωνευμένου νατρίου για να αυξηθεί η ένταση του πεδίου εκκένωσης, μειώνοντας έτσι το ρεύμα εκκένωσης. Ένα χαμηλότερο ρεύμα λάμπας και μία ψηλότερη τάση λάμπας επιτρέπει την μείωση του μεγέθους και κόστους του στραγγαλιστικού πηνίου. Ωστόσο η προσθήκη αμαλγάματος νατρίου μειώνει έντονα την διάρκεια ζωής της λάμπας.

2.3 Ηλεκτρομαγνητικά Στραγγαλιστικά Πηνία

Τα ηλεκτρομαγνητικά ballasts χρησιμοποιούνται συνήθως για την σταθεροποίηση του απαιτούμενου σημείου λειτουργίας της λάμπας περιορίζοντας το ρεύμα εκκένωσης. Το σημείο λειτουργίας της λάμπας δίνεται από την τομή των χαρακτηριστικών λαμπτήρα και ballast αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8. Η γραμμή του ballast είναι η χαρακτηριστική η οποία δείχνει την διακύμανση της ισχύος του λαμπτήρα ως προς την τάση της λάμπας για μια σταθερή τάση γραμμής, και μπορεί να μετρηθεί κατά την διάρκεια της φάσης προθέρμανσης της. Η γραμμή της λάμπας είναι η χαρακτηριστική η οποία δίνει την διακύμανση της ισχύος της λάμπας ως συνάρτηση της τάσης λάμπας για διαφορετικές τάσεις, και μπορεί να μετρηθεί μεταβάλλοντας την τάση της γραμμής. Κάποιες λάμπες, όπως οι υψηλής πίεσης νατρίου παρουσιάζουν μεγάλη



Εικόνα 8. Χαρακτηριστικές Λαμπτήρα-Ballast.

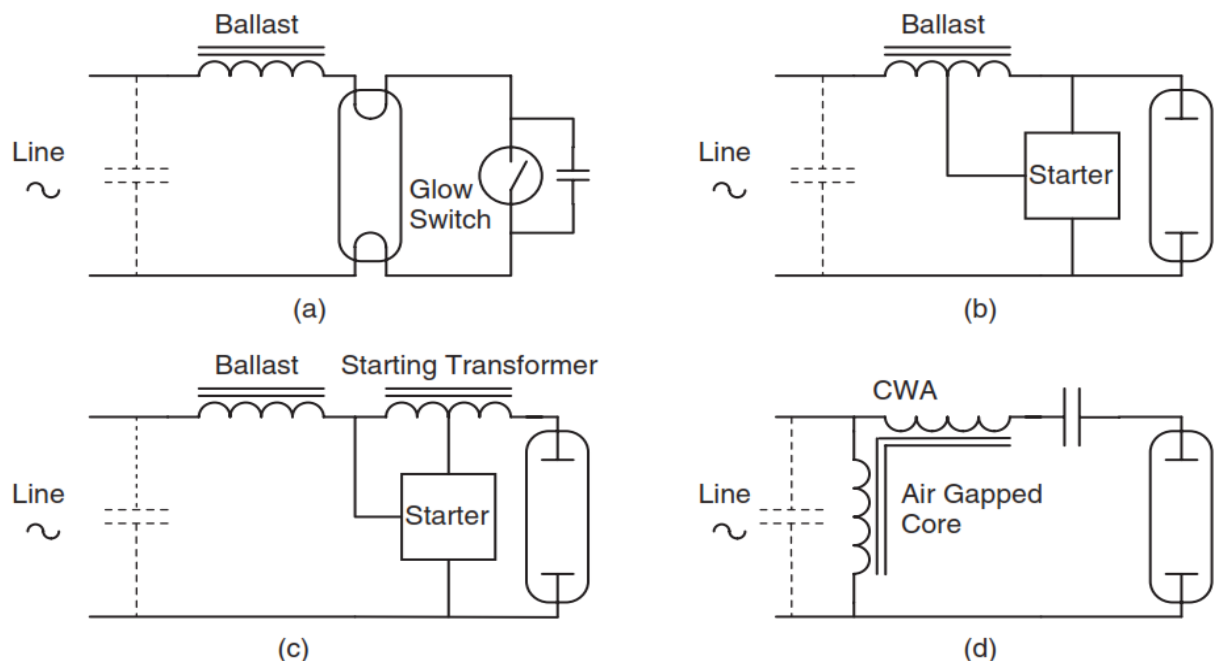
διακύμανση της τάσης της λάμπας με αλλαγές στην ισχύ της. Εξαιτίας αυτής της συμπεριφοράς, έχουν δημιουργηθεί τραπέζια τα οποία προσδιορίζουν την μέγιστη και ελάχιστη επιτρεπόμενη ισχύ λαμπτήρα έναντι της τάσης λάμπας για τον σκοπό της σχεδίασης ballast, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.

Η Εικόνα 9 παρουσιάζει βασικά ηλεκτρομαγνητικά ballast που χρησιμοποιούνται για τροφοδοσία χαμηλής και υψηλής πίεσης λαμπτήρες σε συχνότητες γραμμής (50 - 60 Hz). Η Εικόνα 9.α απεικονίζει το τυπικό κύκλωμα που χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει λαμπτήρες φθορισμού με ηλεκτρόδια προθέρμανσης, τα οποία βασικά χρησιμοποιούν μία επαγωγή σε σειρά για να περιορίσει το ρεύμα μέσω της εκκένωσης.

Αρχικά ο διακόπτης πυράκτωσης είναι κλειστός και το ρεύμα βραχυκύκλωσης διαρρέει το κύκλωμα, θερμαίνοντας τα ηλεκτρόδια. Ένα κλάσμα δευτερολέπτου αργότερα, ο διακόπτης πυράκτωσης είναι ανοιχτός και η ενέργεια που αποθηκεύεται στην επαγωγή του ballast προκαλεί μία αιχμή τάσης ανάμεσα στα ηλεκτρόδια της λάμπας γύρω στα 800 Volts, η οποία τελικά παράγει την κατάρρευση της λάμπας εκκένωσης. Μόλις ανάψει, η τάση της λάμπας είναι χαμηλότερη από την τάση της γραμμής και ο διακόπτης παραμένει ανοιχτός κατά την διάρκεια της κανονικής λειτουργίας της λάμπας.

Τυπικοί διακόπτες βασίζονται σε δύο διμεταλλικά ελάσματα μέσα σ' ένα μικρό σωλήνα γεμάτο με αδρανές αέριο. Ένας εξωτερικός πυκνωτής γύρω στα 10nF χρησιμοποιείται για να ενισχύσει την λειτουργία του διακόπτη και επίσης για την μείωση των ράδιο-παρεμβολών κατά την εκκίνηση του λαμπτήρα.

Τελικά, σ' αυτό τον τύπο των επαγωγικών ballasts ένας πυκνωτής τοποθετείται κατά μήκος της γραμμής εισόδου είναι υποχρεωτικό να επιτευχθεί μία λογική τιμή του συντελεστή ισχύος.



Εικόνα 9. Τυπικά ηλεκτρομαγνητικά ballast που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία λαμπτήρων εκκένωσης σε χαμηλή συχνότητα.

Οι τάσεις εκκίνησης των λαμπτήρων εκκένωσης υψηλής πίεσης είναι κανονικά υψηλότερες των λαμπτήρων εκκένωσης χαμηλής πίεσης και μπορούν να κυμαίνονται από 2500V για μια λάμπα σε θερμοκρασία δωματίου μέχρι τα 30 - 40kV για να ανάψει ξανά μία ζεστή λάμπα. Άρα, το απλό σύστημα ανάφλεξης που βασίζεται στον διακόπτη δεν ισχύει πλέον για αυτές τις λάμπες. Οι Εικόνες 9.b και c παρουσιάζουν δύο τυπικές ρυθμίσεις για την τροφοδοσία λαμπτήρων εκκένωσης υψηλής έντασης. Ένα πηνίο σε σειρά χρησιμοποιείται επίσης για να περιορίσει το ρεύμα στην λάμπα σε λειτουργία σταθερής κατάστασης αλλά οι αυτομετασχηματιστές χρησιμοποιούνται για την επίτευξη ψηλότερων αιχμών τάσης για την ανάφλεξη της λάμπας. Για υψηλότερες τάσεις γραμμής και μικρές αποστάσεις ανάμεσα στον εκκινητή (*starter*) και στην λάμπα, το επαγωγικό ballast μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μετασχηματιστής ανάφλεξης όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 9.b. Σε άλλες περιπτώσεις, ένας ξεχωριστός μετασχηματιστής ανάφλεξης απαιτείται για να παρέχει υψηλότερες αιχμές τάσης και για να αποφευχθεί το φαινόμενο της παρασιτικής χωρητικότητας των καλωδίων σύνδεσης, Εικόνα 9.c.

Το επαγωγικό ballast παρέχει μικρή ρύθμιση της ισχύος κατά τις μεταβολές της τάσης της γραμμής και επομένως συνίσταται μόνο σε αυτές τις εγκαταστάσεις με μικρές διακυμάνσεις της τάσης. Όταν μία καλή ρύθμιση της ισχύος είναι απαραίτητη το κύκλωμα που φαίνεται στην Εικόνα 9.d χρησιμοποιείται κανονικά. Το κύκλωμα αυτό ονομάζεται κοινώς ως σταθερής ισχύος αυτομετασχηματιστής και ενσωματώνει έναν πυκνωτή σε σειρά με την λάμπα για να περιορίσει το ρεύμα της. Σε σύγκριση με το επαγωγικό ballast, ο σταθερής ισχύος αυτομετασχηματιστής παρουσιάζει επίσης υψηλότερο συντελεστή ισχύος, χαμηλότερη τάση διάσπασης της γραμμής και χαμηλότερα ρεύματα εκκίνησης.

Το κύριο πλεονέκτημα των ηλεκτρομαγνητικών ballasts είναι η απλότητά τους, η οποία με την σειρά της παρέχει χαμηλό κόστος και υψηλή αξιοπιστία. Ωστόσο, από τότε που αυτοί λειτουργούν στις συχνότητες του δικτύου, τυπικά 50 – 60Hz, διαθέτουν μεγάλο μέγεθος και βάρος. Άλλα σημαντικά μειονεκτήματα των ηλεκτρομαγνητικών *ballasts* είναι αυτά που ακολουθούν:

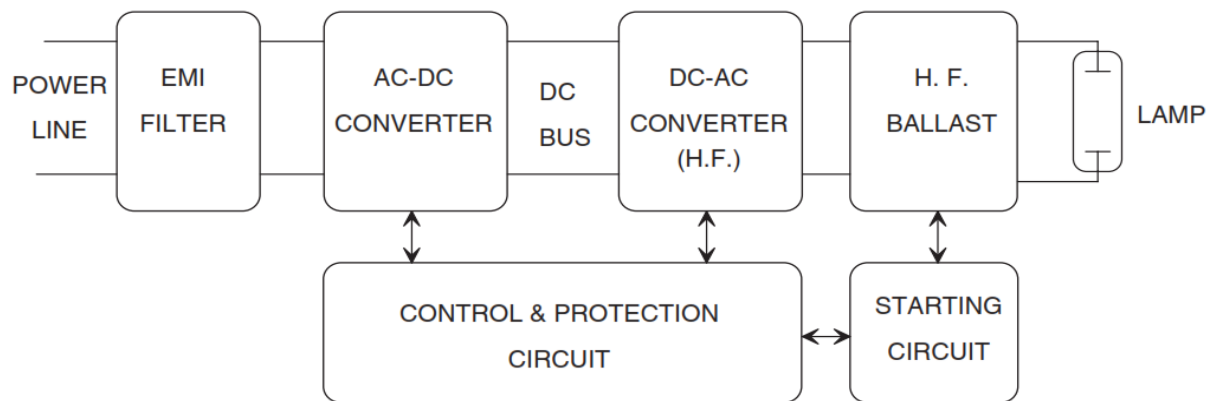
- Χαμηλή φωτεινότητα, ειδικά για εκείνα τα ballasts που χαρακτηρίζονται από καλή ρύθμιση ισχύος της λάμπας έναντι στην διακύμανση της τάσης δικτύου.
- Χαμηλή αξιοπιστία για ανάφλεξη και επανέναυση. Αν η αιχμή τάσης δεν είναι σε καλή χρονική στιγμή μέσα στην περίοδο του δικτύου η ανάφλεξη της λάμπας μπορεί να αποτύχει.
- Δυσκολία στον έλεγχο της φωτεινής ροής του λαμπτήρα.
- Το σημείο λειτουργίας της λάμπας αλλάζει κατά την διάρκεια γήρανσης της, έτσι μειώνεται η διάρκεια ζωής της λάμπας.
- Χαμηλός συντελεστής ισχύος και οι υψηλές αρμονικές. Μεγάλες χωρητικότητες απαιτούνται στη είσοδο του δικτύου για να αυξήσουν τον συντελεστή ισχύος.
- Το ρίσκο επιρεύματος κατά τον κορεσμό του ballast που προκαλείται από την διόρθωση της ισχύος μερικών λαμπτήρων εκκένωσης, ειδικά στο τέλος της διάρκειας ζωής τους.

- Ακανόνιστες αναλαμπές και στροβοσκοπικό φαινόμενο λόγω της χαμηλής συχνότητας του δικτύου. Η ενέργεια από την ακτινοβολία της λάμπας είναι συνάρτηση της στιγμιαίας ισχύος. Άρα, όταν τροφοδοτείται από μία εναλλασσόμενη γραμμή μία στιγμιαία διακύμανση.

2.4 Τροφοδοσία Λαμπτήρων Εκκένωσης Υψηλής Έντασης

2.4.1 Γενικό Μπλοκ Διάγραμμα των Ηλεκτρονικών Ballasts

Η Εικόνα 10 παρουσιάζει το γενικό μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού ηλεκτρονικού ballast. Τα κύρια στάδια είναι τα ακόλουθα:



Εικόνα 30. Διάγραμμα ροής τυπικού ηλεκτρονικού ballast.

- **Φίλτρο Ηλεκτρομαγνητικών Παρεμβολών (EMI filter).** Αυτό το φίλτρο είναι υποχρεωτικό για ηλεκτρονικό ballast εμπορίου. Συνήθως αποτελείται από συνδυασμό δύο επαγωγών και μιας χωρητικότητας. Το φίλτρο εισόδου χρησιμοποιείται για να εξαλείψει τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που δημιουργούνται από τα υψηλά στάδια συχνότητας των ballasts. Επίσης προστατεύει το ballast έναντι πιθανών μεταβάσεων της γραμμής του δικτύου.
- **Μετατροπέας Εναλλασσόμενου Ρεύματος σε Συνεχές (AC-DC converter).** Αυτό το στάδιο χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει μία συνεχή τάση από την εναλλασσόμενη του δικτύου. Κανονικά χρησιμοποιείται μία πλήρης γέφυρα ανόρθωσης με διόδους που ακολουθείται από ένα φίλτρο πυκνωτή. Ωστόσο, αυτός ο απλός ανορθωτής παρέχει χαμηλό συντελεστή ισχύος και μικρή ρύθμιση της τάσης. Προκειμένου να επιτευχθεί ένας υψηλός συντελεστής ισχύος και μία ρυθμιζόμενη τάση, ενεργοί μετατροπείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως ερμηνεύτηκε προηγουμένως σε αυτό το κεφάλαιο.

- **Αντιστροφέας και Ballast Υψηλής Συχνότητας (DC-AC inverter and high frequency ballast).** Αυτά τα στάδια χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν την λάμπα σε υψηλή συχνότητα. Ο αντιστροφέας δημιουργεί μία κυματομορφή υψηλής συχνότητας και το ballast χρησιμοποιείται για να περιορίσει το ρεύμα που διαρρέει την λάμπα εκκένωσης. Επαγωγές και χωρητικότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντίστοιχα, για να εκτελέσουν αυτή την λειτουργία, με το πλεονέκτημα του μικρού μεγέθους και χαμηλού βάρους, εξαιτίας της λειτουργίας τους σε υψηλές συχνότητες.
- **Κύκλωμα Εκκίνησης (Starting circuit).** Στα περισσότερα ηλεκτρονικά ballast, ειδικά εκείνα των λαμπτήρων εκκένωσης χαμηλής πίεσης, το ballast υψηλής συχνότητας χρησιμοποιείται για την ανάφλεξη της λάμπας και τον περιορισμό του ρεύματός της σε σταθερή κατάσταση. Άρα, δεν είναι απαραίτητο ένα επιπλέον κύκλωμα εκκίνησης. Εντούτοις όταν τροφοδοτούνται λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής πίεσης, οι τάσεις εκκίνησης είναι αρκετά ψηλότερες και χρειάζονται ξεχωριστά κυκλώματα ανάφλεξης, ειδικά αν επιδιώκεται μία θερμή επανάφλεξη.
- **Κύκλωμα Ελέγχου και Προστασίας.** Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει τον κύριο ταλαντωτή, σφάλμα ενισχυτών για να ρυθμίσουν το ρεύμα ή την ισχύ της λάμπας, προστασία υπέρτασης εξόδου, χρονικά για τον έλεγχο των χρόνων ανάφλεξης, προστασία υπερρεύματος, προστασία αποτυχίας έναυσης λάμπας κλπ. Μπορεί να ποικίλει από πολύ απλά κυκλώματα, όπως εκείνα που χρησιμοποιούνται στα αυτομεταβαλλόμενα ballasts, σε πολύ περίπλοκα, τα οποία κάποιες φορές περιλαμβάνουν έναν μικροεπεξεργαστή που βασίζεται στον έλεγχο του κυκλώματος.

Υπάρχουν αρκετά σημαντικά θέματα όταν σχεδιάζονται ηλεκτρονικά ballasts:

- **Συχνότητα Λειτουργίας.** Η συχνότητα λειτουργίας θα πρέπει να είναι υψηλή προκειμένου να επωφεληθεί το μικρότερο μέγεθος και βάρος από τα αντιδραστικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση της εκκένωσης. Συνήθως, η συχνότητα λειτουργίας πρέπει να είναι ψηλότερη από τα 20 kHz για να αποφευχθούν οι ακουστικές συχνότητες, οι οποίες μπορούν να παράγουν ενοχλητικούς θορύβους. Από την άλλη, μία ψηλότερη συχνότητα παράγει υψηλότερες απώλειες μεταγωγής και ένα πρακτικό όριο της συχνότητας μεταγωγής είναι γύρω στα 100 kHz όταν χρησιμοποιούνται για τις μεταβάσεις του MOSFET. Είναι επίσης σημαντικό για την αποφυγή συχνοτήτων στο εύρος των 30-40 kHz, επειδή αυτές οι συχνότητες χρησιμοποιούνται κανονικά στα τηλεχειριστήρια υπερύθρων και μπορούν να δημιουργήσουν κάποιου είδους παρεμβολές.
- **Κυματομορφή Ρεύματος Λαμπτήρα.** Προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη διάρκεια ζωής της λάμπας, είναι σημαντικό να οδηγηθεί με συμμετρικά εναλλασσόμενα ρεύματα, έτσι ώστε να αξιοποιηθούν και τα δύο ηλεκτρόδια της λάμπας εναλλάξ. Επίσης, μία άλλη σημαντική παράμετρος είναι *lamp current crest factor (CF)*, ο οποίος είναι ο λόγος της κορυφής της ενεργού τιμής του ρεύματος της λάμπας. Στην περίπτωση των ηλεκτρονικών ballasts, η κορυφαία τιμή της χαμηλής

συχνότητας που διαμορφώνεται στην ενεργό τιμή θα πρέπει να χρησιμοποιείται. Όσο υψηλότερη είναι η CF, τόσο χαμηλότερη είναι η διάρκεια ζωής του λαμπτήρα. Η ιδανική κατάσταση είναι η τροφοδοσία της λάμπας με μία ημιτονοειδή κυματομορφή. Συνήθως μία CF χαμηλότερη του 1.7 προτείνεται για να αποφευχθεί πρόωρη γήρανση της λάμπας.

- **Διαδικασία Εκκίνησης Λαμπτήρα.** Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα κατά την ανάπτυξη εμπορικά διαθέσιμων ηλεκτρονικών ballasts. Αυτός ο λόγος είναι ότι η διάρκεια ζωής του λαμπτήρα, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πόσο καλά εκτελείται η εκκίνηση της λάμπας ειδικά για θερμής καθόδου λαμπτήρων φθορισμού. Κατά την διεργασία της εκκίνησης, τα ηλεκτρόδια πρέπει να προθερμαίνονται σε θερμοκρασία εκπομπής, γύρω στους 800°C, και χωρίς υψηλή τάση θα πρέπει να εφαρμοστεί μέχρι η θερμοκρασία του να είναι αρκετά υψηλή, αποφεύγοντας έτσι την βλάβη επιμετάλλωσης. Όταν τα ηλεκτρόδια φθάσουν σε θερμοκρασία εκπομπής, η τάση εκκίνησης μπορεί να εφαρμοστεί για να αναφλέξει την λάμπα. Για λάμπες με ψυχρές καθόδους, η τάση εκκίνησης πρέπει να εφαρμόζεται ακαριαία για να προληφθεί η επιβλαβής εκκένωση αίγλης και ψεκασμού καθόδου. Σε οποιαδήποτε περίπτωση, η τάση εκκίνησης πρέπει να περιοριστεί στην ελάχιστη τιμή για την ανάφλεξη της λάμπας, μέχρι υψηλότερες τάσεις θα μπορούσαν να προσφέρουν ανεπιθύμητες συνθήκες έναυσης, η οποία θα μείωνε την διάρκεια ζωής της λάμπας.
- **Ηλεκτρονικός Έλεγχος για την Ρύθμιση της Έντασης της Λάμπας.** Είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό το οποίο επιτρέπει στο ballast τον έλεγχο της ισχύος της λάμπας και ως εκ τούτου τον φωτισμό εξόδου. Συνήθως η διακοπτική συχνότητα χρησιμοποιείται στα ξηρού τύπου ballasts σαν μία παράμετρος ελέγχου για να προσφέρουν την ικανότητα ελέγχου ρύθμισης. Παραλλαγές στην συχνότητα επηρεάζουν την αντίσταση του ballast υψηλής συχνότητας και επιτρέπουν να αλλάζει το ρεύμα της λάμπας. Για παράδειγμα αν μια αυτεπαγωγή χρησιμοποιείται σαν ballast υψηλής συχνότητας, μία αύξηση της συχνότητας αποφέρει αύξηση της αντίστασης του ρεύματος του ballast, άρα μειώνεται το ρεύμα στην λάμπα. Ο έλεγχος πρέπει να πραγματοποιείται ομαλά, αποφεύγοντας απότομες αλλαγές στην ισχύ της λάμπας όταν διέρχεται από το ένα επίπεδο στο άλλο. Σε μια ενδεχόμενη διακοπή ισχύος, η λάμπα θα πρέπει να ξεκινήσει ξανά στο μέγιστο επίπεδο φωτισμού και στην συνέχεια σιγά-σιγά να μειώσει στο απαιτούμενο επίπεδο εξόδου.
- **Ακουστικός Συντονισμός.** Οι λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής έντασης (HID) παρουσιάζουν μία ασταθή λειτουργία όταν αυτές τροφοδοτούνται σε υψηλή συχνότητα. Σε ορισμένες συχνότητες, το τόξο κυμαίνεται και γίνεται ασταθές, κάτι που μπορεί να παρατηρηθεί σαν ένα υψηλό τρεμόπαιγμα οφείλεται σε σημαντικές αλλαγές στην ισχύ της λάμπας και άρα στον φωτισμό. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την εξάρτηση της απόσβεσης των ακουστικών κυμάτων στην σύνθεση του πλάσματος και της πίεσης. Η αποφυγή του ακουστικού συντονισμού είναι υποχρεωτική για εφαρμογή σε ηλεκτρονικά ballasts εμπορίου. Αυτό μπορεί να γίνει επιλέγοντας την συχνότητα λειτουργίας σ' ένα φάσμα ελεύθερο ακουστικών συντονισμών, τυπικά

ανάμεσα στα 1kHz και πάνω από 100kHz. Άλλες μέθοδοι είναι η διαμόρφωση της συχνότητας, λειτουργία τετραγωνικού κύματος και ημιτονοειδές κύμα επάλληλα με την τρίτη αρμονική συχνότητα.

2.5 Εφαρμογές

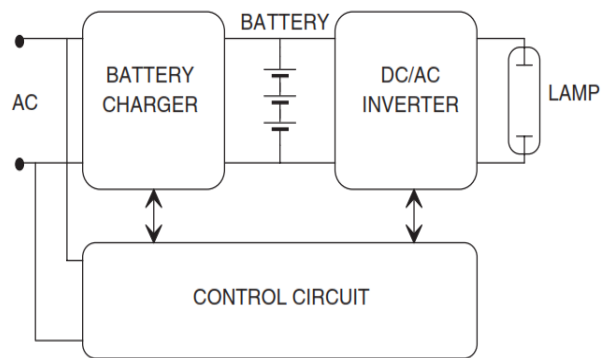
Τα ηλεκτρονικά *ballasts* χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές φωτισμού ως φορητός φωτισμός, έκτακτης ανάγκης, σε εφαρμογές αυτοκινήτων, οικιακός φωτισμός, βιομηχανικός φωτισμός και ούτω καθ' εξής. Παρέχουν μικρό όγκο και μέγεθος, καθιστώντας δυνατό να μειωθεί επίσης και το μέγεθος του φωτιστικού σώματος, το οποίο είναι μία νέα τάση στον σχεδιασμό φωτισμού.

2.5.1 Φορητός Φωτισμός

Σ' αυτή την εφαρμογή, μία μπαταρία χρησιμοποιείται σαν πηγή ισχύος και έπειτα μια χαμηλή τάση εισόδου είναι διαθέσιμη να τροφοδοτήσει την λάμπα. Παραδείγματα είναι οι φακοί και κρυφοί φωτισμοί των laptop. Τυπικές τάσεις εισόδου σ' αυτές τις εφαρμογές κυμαίνονται από 1.5 σε 48 Volts. Ωστόσο ένας μετατροπέας ανύψωσης (*boost converter*) είναι απαραίτητος για να τροφοδοτήσει την λάμπα, κι έπειτα τα ηλεκτρονικά ballast είναι η μόνη κατάλληλη λύση. Από τότε που ο μετατροπέας τροφοδοτείται από μια μπαταρία, η φωτεινότητα από το ballast θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η χρήση της ενέργειας της μπαταρίας, έτσι αυξάνεται ο χρόνος λειτουργίας του φορητού φωτισμού. Τυπικές τοπολογίες που χρησιμοποιούνται είναι η κλάση E αντιστροφέα και η push-pull συντονισμένου αντιστροφέα, αποκτώντας αποδόσεις άνω του 95%.

2.5.2 Φωτισμός Έκτακτης Ανάγκης

Τα φώτα έκτακτης ανάγκης χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ένα ελάχιστο φωτεινό επίπεδο σε περίπτωση που η κύρια τροφοδοσία αποκοπεί. Μπαταρίες χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας από τις κύριες τροφοδοσίες και να τροφοδοτήσουν τις λάμπες σε περίπτωση που η κύρια τροφοδοσία αποτύχει. Ένα τυπικό μπλοκ διάγραμμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 11. Ένας μετατροπέας εναλλασσομένου σε συνεχές χρησιμοποιείται σαν φορτιστής μπαταρίας για να αποθηκεύσει ενέργεια κατά την διάρκεια κανονικής λειτουργίας.



Εικόνα 11. Διάγραμμα ροής συστήματος φωτισμού έκτακτης ανάγκης.

Ένα κύκλωμα ελέγχου μετρά της τάση της γραμμής και ενεργοποιεί τον αντιστροφέα σε αποτυχία της τροφοδοσίας. Κανονικά ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας της μιας ώρας συνίσταται για το σύστημα σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης, έτσι η χρήση υψηλής απόδοσης ηλεκτρονικών ballasts είναι υποχρεωτικό να μειώσουν το μέγεθος της μπαταρίας και το κόστος. Τυπικές τοπολογίες που χρησιμοποιούνται

περιλαμβάνουν τους αντιστροφείς κλάσης E, push pull συντονισμένους αντιστροφείς, και γέφυρα ημίσεως κύματος συντονισμένων αντιστροφένων. Οι λάμπες φθορισμού χρησιμοποιούνται κυρίως στα έκτακτης ανάγκης ballasts, αλλά οι λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής έντασης όπως οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων ή οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης, χρησιμοποιούνται επίσης σε κάποιες ειδικές εφαρμογές.

2.5.3 Φωτισμός Μέσων Μεταφοράς

Τα ηλεκτρονικά ballasts χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μέσων μεταφοράς όπως είναι τα αυτοκίνητα, τα λεωφορεία, τα τραίνα και τα αεροσκάφη. Κανονικά μία χαμηλή συνεχής τάση είναι διαθέσιμη να τροφοδοτήσει τις λάμπες και έτσι αυτές οι εφαρμογές είναι παρόμοιες των φορητών και έκτακτης ανάγκης φωτιστικών όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Στα σύγχρονα αεροσκάφη, μία τάση των 120/208 Volts, 400 Hz, τριφασικό ηλεκτρικό σύστημα είναι επίσης διαθέσιμη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φωτισμό. Οι λαμπτήρες φθορισμού χρησιμοποιούνται τυπικά για εσωτερικό φωτισμό αυτοκινήτων, ενώ οι λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής έντασης προτιμώνται στον εξωτερικό φωτισμό για παράδειγμα στα φωτιστικά σώματα προβολών αυτοκινήτου.

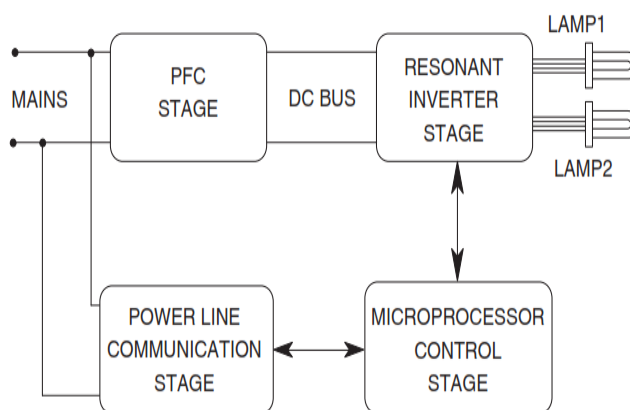
2.5.4 Οικιακός και Βιομηχανικός Φωτισμός

Τα ηλεκτρονικά ballasts, ειδικά για τους λαμπτήρες φθορισμού, χρησιμοποιούνται επίσης πολύ συχνά σε οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές. Η υψηλότερη απόδοση των λαμπτήρων φθορισμού παρέχεται σε υψηλή συχνότητα, προβάλλοντας μία ενδιαφέρουσα εξοικονόμηση ενέργειας σε σύγκριση με τις λάμπες πυρακτώσεως. Μια τυπική εφαρμογή είναι η χρήση συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού με ηλεκτρονικό ballast εσωτερικά στην βάση της λάμπας, η οποία μπορεί να αντικαταστήσει άμεσα με λαμπτήρα πυράκτωσης μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας τέσσερις ή πέντε φορές. Ένας αυτοταλαντώμενος αντιστροφέας ημίσεως γέφυρας χρησιμοποιείται τυπικά στην εξοικονόμηση ενέργειας λαμπτήρων, δεδομένου ότι επιτρέπεται να μειωθεί το μέγεθος και το κόστος. Η ισχύς αυτών των λαμπτήρων είναι κανονικά ανάμεσα στα 25 Watts. Άλλες εφαρμογές για μεγαλύτερες ισχύεις συμπεριλαμβάνουν περισσότερο αναπτυγμένα ballasts που βασίζονται

στο στάδιο της διόρθωσης του συντελεστή ισχύος από συντονισμένο αντιστροφέα. Λαμπτήρες φθορισμού θερμής καθόδου χρησιμοποιούνται κυρίως σ' αυτά τα ηλεκτρονικά ballasts. Επίσης, με την ανάπτυξη των σύγχρονων λαμπτήρων HID, όπως οι λάμπες νατρίου υψηλής πίεσης και μεταλλικών αλογονιδίων, (και οι δύο παρουσιάζουν καλή χρωματική απόδοση) παρατηρείται πως η χρήση τους γίνεται όλο και πιο συχνή στον οικιακό, εμπορικό και βιομηχανικό φωτισμό.

2.5.5 Φωτισμός με Βάση τον Μικροεπεξεργαστή

Η χρήση των μικροεπεξεργαστών σε συνδυασμό με τα ηλεκτρονικά ballasts είναι αρκετά ενδιαφέρουσα από την άποψη της εξοικονόμησης ενέργειας. Η συμπερίληψη των κυκλωμάτων μικροεπεξεργαστών επιτρέπει να ενσωματώσει στρατηγικές ελέγχου για ρύθμιση της έντασης φωτισμού, όπως ο προγραμματισμός, ο συντονισμός εργασιών, ημερήσιος φωτισμός, κλπ. Χρησιμοποιώντας αυτές τις στρατηγικές, η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να είναι τόσο υψηλή όσο με 35-40%. Άλλο πλεονέκτημα της χρήσης των μικροελεγκτών είναι η πιθανότητα να ανιχνευτεί αποτυχία της λάμπας ή κακή λειτουργία, έτσι αυξάνεται η αξιοπιστία και μειώνεται το κόστος συντήρησης της εγκατάστασης. Τα πιο προηγμένα ηλεκτρονικά ballasts μπορούν να συμπεριλάβουν ένα στάδιο επικοινωνίας που στέλνει και αποδέχεται πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του φωτισμού ή από μία κεντρική μονάδα ελέγχου. Σε μερικές περιπτώσεις, οι επικοινωνίες μπορούν να γίνουν μέσω της γραμμής ισχύος, μειώνοντας έτσι το κόστος εγκατάστασης. Η Εικόνα 12 παρουσιάζει το μπλοκ διάγραμμα ενός μικροεπεξεργαστή με βάση το ηλεκτρονικό ballast.

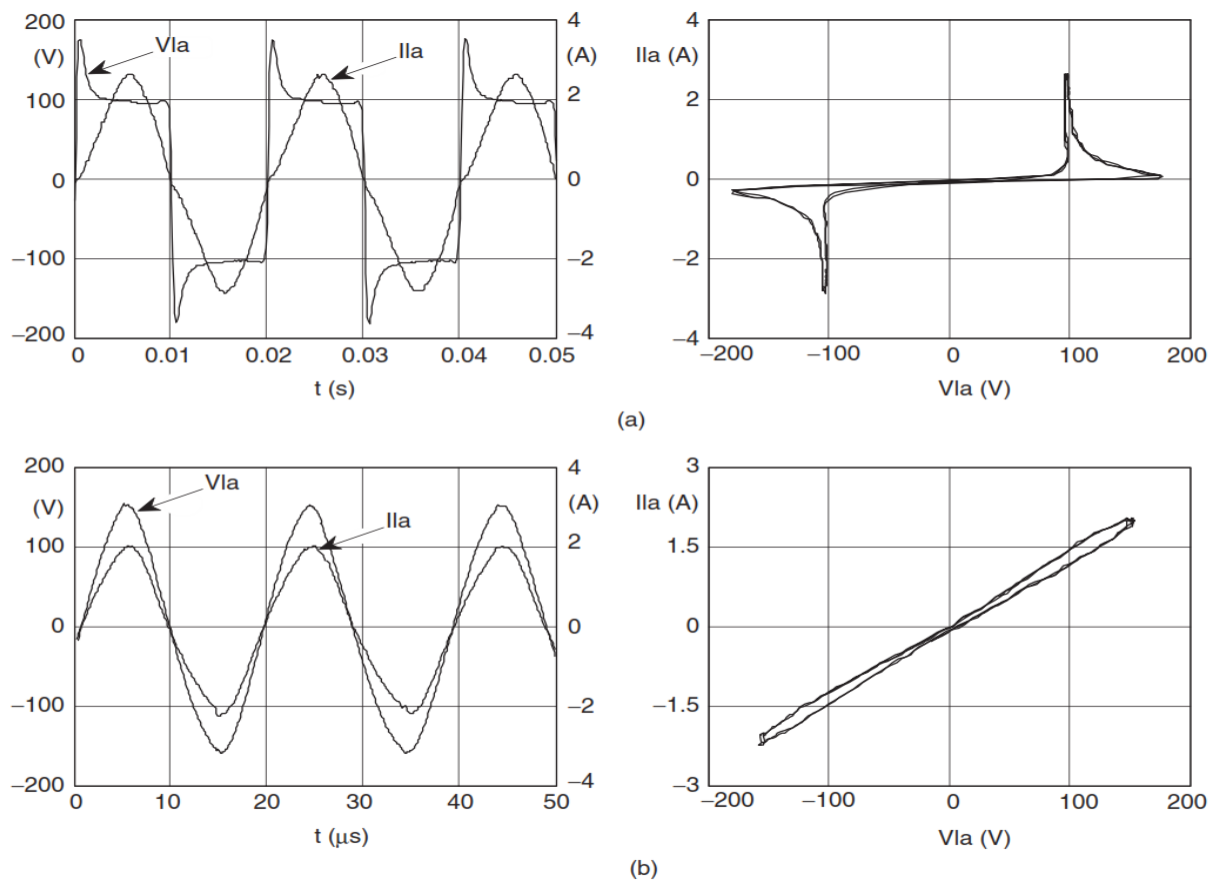


Εικόνα 12. Διάγραμμα ροής φωτισμού με βάση τον μικροεπεξεργαστή.

2.6 Μοντελοποίηση Λαμπτήρα Εκκένωσης

Η χαμηλή συχνότητα των αγωγών δεν αποτελεί επαρκή πηγή ενέργειας για την τροφοδότηση λαμπτήρων εκκένωσης. Σ' αυτές τις χαμηλές συχνότητες, τα ηλεκτρόνια και ιονισμένα άτομα έχουν αρκετό χρόνο να ανασυνδυάζονται σε κάθε αντιστροφή ρεύματος. Γι' αυτό τον λόγο, η εκκένωση θα πρέπει να αναφλέγεται ξανά δύο φορές σε κάθε περίοδο της γραμμής. Η Εικόνα 13.α απεικονίζει τις κυματομορφές του ρεύματος και της τάσης και η χαρακτηριστική I-V λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης ισχύος 150 Watts που λειτουργεί με

ένα επαγωγικό ballast στα 50 Hz. Όπως φαίνεται, η ακίδα τάσης της επανάφλεξης είναι κοντά στο 50% ψηλότερα από την κανονική τάση εκκένωσης, η οποία σταθεροποιείται στην υπόλοιπη ημιπερίοδο.

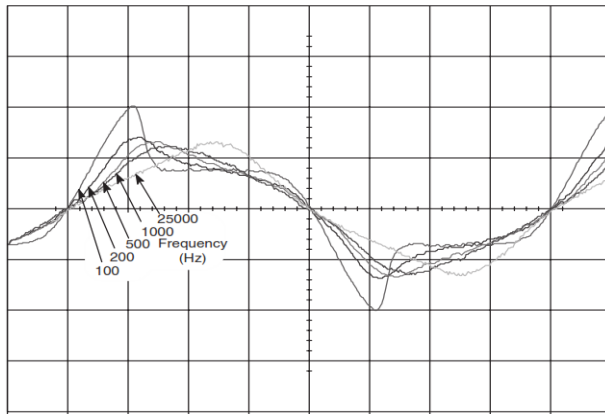


Εικόνα 13. Κυματομορφές και I-V χαρακτηριστικές λαμπτήρα υδραργύρου υψηλής πίεσης στα α) 50Hz και β) 50KHz.

Όταν οι λαμπτήρες λειτουργούν σε ψηλότερες συχνότητες (πάνω από 5kHz), ηλεκτρόνια και ιόντα δεν έχουν αρκετό χρόνο να ανασυνδυαστούν. Ωστόσο η πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι επαρκώς υψηλή σε κάθε αντιστροφή του ρεύματος και καμία εξωτερική ισχύς δεν χρειάζεται για να αναφλέξει ξανά την λάμπα. Το αποτέλεσμα είναι μια αύξηση της φωτεινής ροής σε σύγκριση με αυτό στις χαμηλές συχνότητες, που είναι ειδικά υψηλό για λαμπτήρες φθορισμού (10-15%).

Στην Εικόνα 13.β παρουσιάζονται οι κυματομορφές της λάμπας και οι I-V χαρακτηριστικές για την ίδια λάμπα (HPS 150W), όταν εφαρμόζεται στα 50 kHz. Φαίνεται πως οι ακίδες τάσης της επανάφλεξης εξαφανίζονται και η συμπεριφορά είναι σχεδόν ωμική.

Η Εικόνα 14 απεικονίζει πώς οι κυματομορφές της τάσης αλλάζουν σε μια λάμπα φθορισμού όταν αυξάνεται η συχνότητα τροφοδοσίας. Όπως φαίνεται, στην συχνότητα του 1 kHz, η τάση είναι ήδη σχεδόν ημιτονοειδής και η λάμπα παρουσιάζει ωμική συμπεριφορά.



Εικόνα 14. Κυματομορφές τάσης για 36W γραμμικό λαμπτήρα φθορισμού που τροφοδοτείται μέσω ballast στην ονομαστική ισχύ και σε διάφορες συχνότητες. (100V/div)

Ωστόσο, μία αντίσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην μοντελοποίηση της λάμπας σε υψηλές συχνότητες για τον σκοπό σχεδιασμού ballast. Επίσης, οι περισσότεροι κατασκευαστές λαμπτήρων παρέχουν μόνο δεδομένα λαμπτήρων για λειτουργία σε χαμηλές συχνότητες, όπου η λάμπα συμπεριφέρεται σαν μία πηγή τετραγωνικής τάσης. Ο Πίνακας 3 δείχνει ηλεκτρικά δεδομένα χαμηλής συχνότητας για διαφορετικούς λαμπτήρες εκκένωσης που παρέχουν από τον κατασκευαστή και τις τιμές μετρήσεων στην υψηλή συχνότητα

για τις ίδιες λάμπες. Όπως φαίνεται, ο συντελεστής ισχύος κοντά στην μονάδα επιτυγχάνεται σε υψηλή συχνότητα.

Η ισοδύναμη αντίσταση του λαμπτήρα σε υψηλές συχνότητες μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί από τα στοιχεία στην χαμηλή συχνότητα. Ισχύς λαμπτήρα σε οποιαδήποτε συχνότητα λειτουργίας μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P_{LA} = V_{LA} \cdot I_{LA} \cdot FP_{LA} \quad (2.2)$$

Όπου V_{LA} και I_{LA} είναι οι ενεργές τιμές τάσης και ρεύματος της λάμπας και FP_{LA} είναι ο συντελεστής ισχύος της λάμπας. Στις συχνότητες του δικτύου, ο συντελεστής ισχύος της λάμπας είναι χαμηλός (τυπικά 0.8), λόγω της υψηλής παραμόρφωσης στην κυματομορφή τάσης του λαμπτήρα. Ωστόσο, στις υψηλές συχνότητες ο συντελεστής ισχύος φτάνει σχεδόν την μονάδα. Τότε, η τάση και το ρεύμα στην υψηλή συχνότητα μπορεί να εκτιμηθεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{LA,hf} \cdot I_{LA,hf} = P_{LA} \quad (2.3)$$

Όπου P_{LA} είναι η ονομαστική ισχύς της λάμπας που παρέχεται από τον κατασκευαστή.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, οι λάμπες φθορισμού τείνουν να διατηρούν σχεδόν την ίδια ενεργό τιμή ρεύματος σε χαμηλή και υψηλή συχνότητα, ενώ οι λαμπτήρες υψηλής πίεσης τείνουν να διατηρούν σχεδόν την ίδια ενεργό τάση.

Lamp*	Manufacturer @ 50 Hz				Measured @ H.F.			
	V (Vrms)	I (Arms)	P (W)	PF	V (Vrms)	I (Arms)	P (W)	PF
Fluorescent (TLD-36 W)	103	0.44	36	0.79	83.2	0.46	36	0.94
Compact fluorescent (PLC-26 W)	105	0.31	26	0.80	82	0.32	26	0.99
Low-pressure sodium (SOX-55 W)	109	0.59	55	0.86	75	0.76	56	0.98
Mercury vapor (HPLN-125 W)	125	1.15	125	0.87	132	0.92	120	0.99
Metal-halide (MHN-TD-150 W)	90	1.80	150	0.93	92	1.63	146	0.97
High-pressure sodium (SON-T-150 W)	100	1.80	150	0.83	105	1.42	148	0.99

*Lamps aged for 100 h.

Πίνακας 2. Ηλεκτρικά δεδομένα για διαφορετικούς λαμπτήρες εκκένωσης.

Με βάση αυτές τις παραδοχές, η ισοδύναμη αντίσταση σε υψηλή συχνότητα εκτιμάται από τις τιμές της χαμηλής συχνότητας όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.

Οι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης δεν διατηρούν ούτε τάση ούτε ρεύμα, σταθερά σε

Lamp	$V_{LA,hf}$	$I_{LA,hf}$	$R_{LA,hf}$
Fluorescent lamps	$P_{LA}/I_{LA,hf}$	$I_{LA,hf}$	$P_{LA}/I_{LA,hf}^2$
High-pressure lamps	$V_{LA,hf}$	$P_{LA}/V_{LA,hf}$	$V_{LA,hf}^2/P_{LA}$

Πίνακας 3. Εκτιμώμενα ηλεκτρικά στοιχεία για λαμπτήρες εκκένωσης σε υψηλές συχνότητες.

υψηλές συχνότητες και επίσης αυτοί παρουσιάζουν μία ισοδύναμη αντίσταση που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την συχνότητα. Επομένως η ισοδύναμη αντίστασή τους μπορεί να επιτευχθεί μόνο από εργαστηριακές δοκιμές.

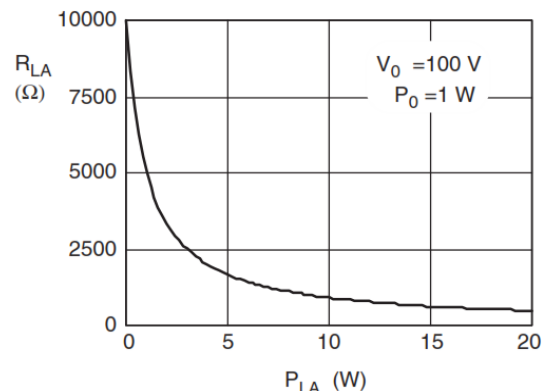
Σημειώστε ότι οι τιμές που δίνονται από τον Πίνακα 3 είναι μόνο μια προσέγγιση στην πραγματική τιμή, η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται από μετρήσεις στο εργαστήριο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πρώτο σημείο στο σχεδιασμό ηλεκτρονικού ballast, αλλά τελικά πρέπει να γίνουν προσαρμογές στο εργαστήριο.

Άλλο σημαντικό θέμα είναι ότι η ισοδύναμη αντίσταση της λάμπας που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την μεταφορά ισχύος στην λάμπα, το οποίο είναι ειδικά σημαντικό για τον σχεδιασμό ηλεκτρονικών ballast με χαρακτηριστική ρύθμιση. Η χαρακτηριστική αντίσταση της λάμπας ως προς την ισχύ της είναι διαφορετική για κάθε τύπο λαμπτήρα εκκένωσης και πρέπει να λαμβάνεται από εργαστηριακά τεστ. Μία από τις καλύτερες πιθανότητες για να προσαρμοστεί η αντίσταση της λάμπας ως προς την χαρακτηριστική ισχύος είναι η υπερβολική προσέγγιση. Για παράδειγμα οι Mader και Horn προτείνουν την ακόλουθη απλή προσέγγιση:

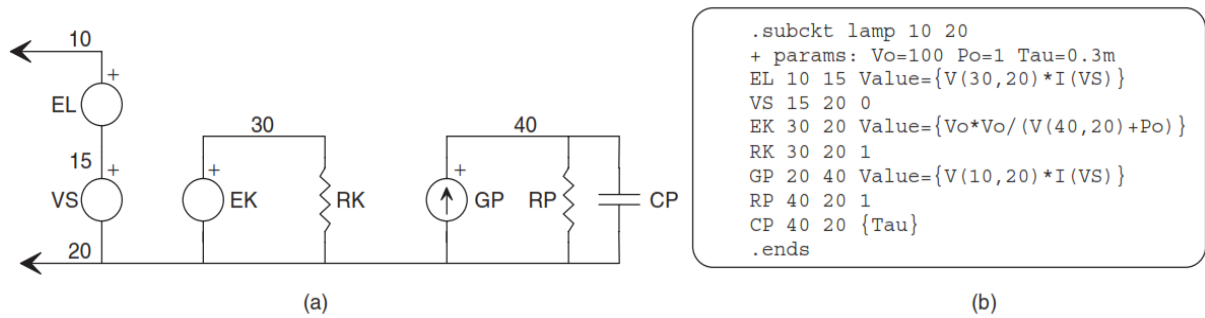
$$R_{LA}(P_{LA}) = \frac{V_0^2}{P_{LA} + P_0} \quad (2.4)$$

Όπου R_{LA} είναι η ισοδύναμη αντίσταση της λάμπας, P_{LA} είναι η μέση ισχύς της λάμπας και V_0 , P_0 είναι δύο παράμετροι που εξαρτώνται από την εκάστοτε λάμπα. Αυτή η χαρακτηριστική απεικονίζεται στην Εικόνα 15 για μια συγκεκριμένη λάμπα με $V_0 = 100V$ και $P_0 = 1W$. Αυτό το μοντέλο μπορεί πολύ εύκολα να εφαρμοστεί σε κύκλωμα προγραμμάτων προσομοίωσης, όπως είναι το SPICE. Η Εικόνα 16 παρουσιάζει το ηλεκτρικό κύκλωμα και η περιγραφή που χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την συμπεριφορά του λαμπτήρα στο πρόγραμμα προσομοίωσης SPICE.

Η τάση που ελέγχεται από πηγή τάσης E_L χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την ωμική συμπεριφορά του λαμπτήρα. Η πηγή τάσης V_S χρησιμοποιείται για να μετρήσει το ρεύμα της λάμπας έτσι ώστε η στιγμιαία και μέση τιμή του ρεύματος της λάμπας να μπορεί να υπολογιστεί· γι' αυτό τον λόγο η τιμή της τάσης της είναι ίση με μηδέν.



Εικόνα 15. Χαρακτηριστική R_{LA} - P_{LA} λαμπτήρα.

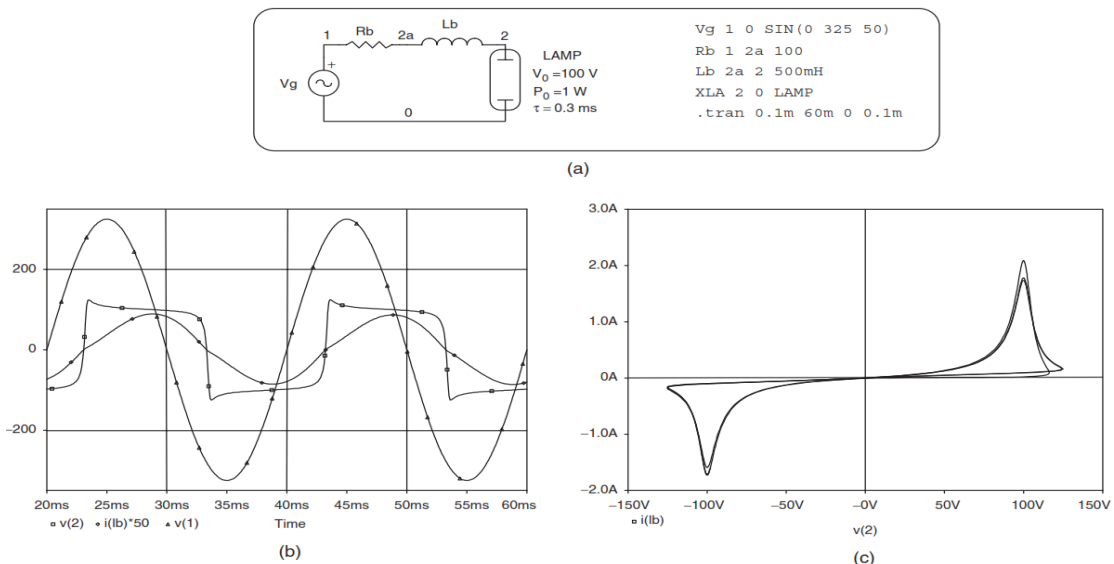


Εικόνα 16. α) Γραμμικό μοντέλο λαμπτήρα εκκένωσης των Mader-Horn και β) Περιγραφή μοντέλου στο SPICE.

Η GP είναι μία πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση που χρησιμοποιείται για να υπολογίσει την στιγμιαία ισχύ του λαμπτήρα, η οποία στην συνέχεια φιλτράρεται από τις RP και CP προκειμένου να επιτευχθεί η μέση ισχύς του λαμπτήρα. Τελικά, η υπερβολική σχέση ανάμεσα στην αντίσταση της λάμπας και την ισχύ, υλοποιείται μέσω της πηγής τάσης EK που ελέγχεται από τάση. Η σταθερά χρόνου $\tau = RP \cdot CP$ σχετίζεται με την σταθερά ιονισμού της εκκένωσης.

Η Εικόνα 17 απεικονίζει μερικά αποτελέσματα προσομοίωσης όταν η λάμπα εφαρμόζεται σε ημιτονοειδή πηγή τάσης και σταθεροποιείται με ένα επαγωγικό ballast.

Το μοντέλο των Mader-Horn επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υψηλές συχνότητες αποκτώντας μία ωμική συμπεριφορά για την λάμπα. Η ισοδύναμη αντίσταση της λάμπας σε υψηλές συχνότητες θα παρουσιάζουν επίσης μία υπερβολική διαφορά με την μέση ισχύ του λαμπτήρα και με την σταθερά χρόνου που δίνεται από τ . Το μοντέλο αυτό είναι χρήσιμο στην συνέχεια για την προσομοίωση ηλεκτρονικού ballast με χαρακτηριστικό τον έλεγχο ρύθμισης της έντασης.



Εικόνα 17. α) Προσομοίωση με ballast σε χαμηλή συχνότητα, β) κυματομορφές λειτουργίας και γ) Χαρακτηριστικές I-V λαμπτήρα.

Η μοντελοποίηση λαμπτήρα εκκενώσεως έχει γίνει σημαντικό ζήτημα, καθώς τα αποτελέσματά της, είναι πολύ χρήσιμα για την βελτιστοποίηση της απόδοσης των ηλεκτρονικών ballasts.

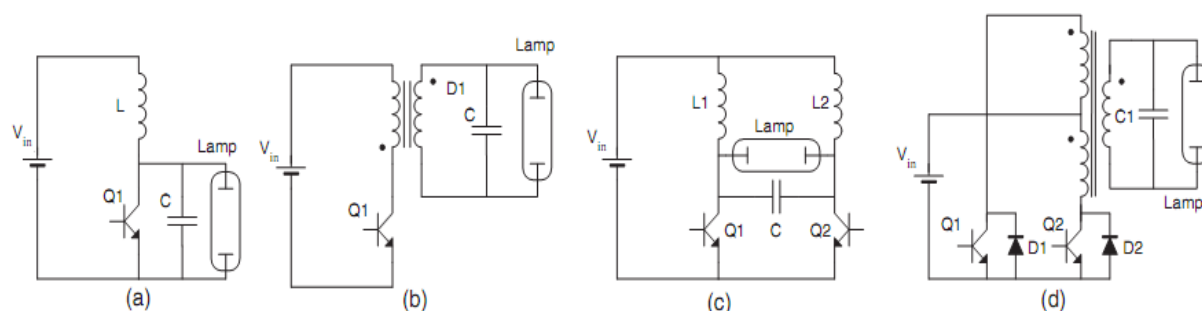
2.7 Ταξινόμηση Τοπολογιών Ηλεκτρονικού Στραγγαλιστικού Πηνίου

Τυπικά τοπολογίες που χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν τους λαμπτήρες εκκένωσης σε υψηλές συχνότητες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες ομάδες: μη συντονισμένα ballasts και συντονισμένα ballasts.

2.7.1 Μη Συντονισμένα Στραγγαλιστικά Πηνία

Αυτές οι τοπολογίες συνήθως πετυχαίνονται αφαιρώντας την δίοδο στους μετατροπείς συνεχούς ρεύματος σε συνεχές, προκειμένου να παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα στην λάμπα. Η τρέχουσα λειτουργία ελέγχου απασχολείται κανονικά με το να περιορίσει το ρεύμα στον λαμπτήρα εκκένωσης. Ο λαμπτήρας τροφοδοτείται με μια τετραγωνική κυματομορφή ρεύματος, η οποία παρουσιάζει ένα συνεχές επίπεδο σε μερικές περιπτώσεις. Μια χωρητικότητα μικρής τιμής χρησιμοποιείται για να αναφλέξει αρχικά τον λαμπτήρα, αλλά η επίδρασή της στην λειτουργία σταθερής κατάστασης μπορεί να αγνοηθεί.

Παραδείγματα των μη συντονισμένων ballasts παρουσιάζονται στην Εικόνα 18. Η Εικόνα 18.α απεικονίζει ballasts με βάση την ανύψωση (*Boost*) της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου και τον υποβιβασμό ανύψωσης (*Flyback*) της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου, αντίστοιχα. Άλλες τοπολογίες, οι οποίες μπορούν να τροφοδοτήσουν συμμετρικό εναλλασσόμενο ρεύμα διαμέσου του λαμπτήρα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 18.γ (*symmetric boost*) και στην 18.δ (*push-pull*).



Εικόνα 18. Ηλεκτρονικά Στραγγαλιστικά πηνία μη συντονισμένα.

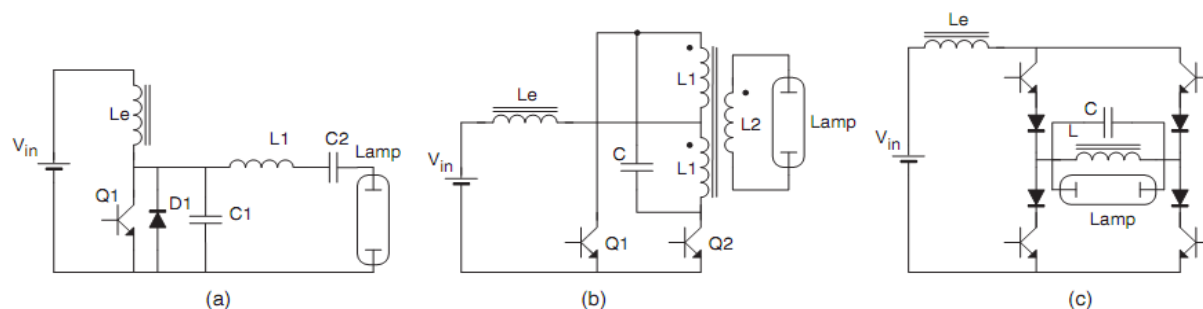
Αυτές οι τοπολογίες παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα όπως οι υψηλές αιχμές τάσης σε όλο τον διακόπτη, ο οποίος απαιτεί την χρήση τρανζίστορς υψηλής τάσης, και υψηλές απώλειες λόγω απότομων μεταγωγών, το οποίο δίνει χαμηλή αποδοτικότητα, ειδικά για μεγάλες ισχύεις. Άλλωστε, από την ιδανική κατάσταση ο λαμπτήρας τροφοδοτείται με ημιτονοειδές κύμα, αυτά τα κυκλώματα προκαλούν πρόωρη γήρανση της λάμπας. Για σύνοψη, τυπικές εφαρμογές από αυτές τις τοπολογίες είναι φορητός και έκτακτης ανάγκης εξοπλισμός, που η ισχύς της λάμπας είναι χαμηλή και ο αριθμός των αναφλέξεων κατά την διάρκεια της ζωής της δεν είναι πολύ υψηλός.

2.7.2 Συντονισμένα Στραγγαλιστικά Πηνία

Αυτά τα ballast χρησιμοποιούν ένα κύκλωμα που μπορεί να συντονιστεί σε μία ή περισσότερες συχνότητες για να τροφοδοτήσει την λάμπα. Τα συντονισμένο κύκλωμα φιλτράρει τις υψηλότερες αρμονικές, αποκτώντας έτσι μία ημιτονοειδή κυματομορφή ρεύματος μέσω της λάμπας. Τα συντονισμένα ballast μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

A. Τροφοδοσία Συντονισμένων Ballast με Ανάδραση Ρεύματος

Αυτά τα ballast τροφοδοτούνται με μία πηγή συνεχούς ρεύματος, συνήθως αποκτάται με την βοήθεια ενός πηνίου τσοκ σε σειρά με την συνεχή πηγή τάσης εισόδου. Το συνεχές ρεύμα μετασχηματίζεται σε μια εναλλασσόμενη τετραγωνική κυματομορφή από την διακοπτική ισχύ των τρανζίστορ. Τυπικές τοπολογίες αυτών των τύπων ballasts παρουσιάζονται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19. Τρεις τυπικοί συντονισμένοι αντιστροφείς ανάδρασης ρεύματος α) κλάσης E β) push-pull αντιστροφέας και γ) αντιστροφέας πλήρους γέφυρας.

Η τοπολογία που παρουσιάζεται στην Εικόνα 19.α αντιστοιχεί σε αντιστροφέα κλάσης E. Η αυτεπαγωγή L_e χρησιμοποιείται για να αποκτήσει ένα συνεχές ρεύμα εισόδου με χαμηλό κυματισμό (ρεύματος). Αυτό το ρεύμα τροφοδοτεί το κύκλωμα συντονισμού μέσω του διακόπτη τροφοδοσίας που σχηματίζεται από τα Q_1 - D_1 . Το κύκλωμα συντονισμού που χρησιμοποιείται σ' αυτή την τοπολογία μπορεί να διαφέρει από ένα ballast σε άλλο· το κύκλωμα που φαίνεται στην Εικόνα 19.α είναι εκείνο που χρησιμοποιείται κανονικά. Το κύριο πλεονέκτημα της τοπολογίας είναι ότι η μηδενική τάση μεταγωγής μπορεί να επιτευχθεί με τον διακόπτη τροφοδοσίας, έτσι μειώνονται οι διακοπτικές απώλειες και ώστε να καταστεί δυνατή η λειτουργία σε πολύ ψηλές συχνότητες, το οποίο μπορεί να φθάσει αρκετά MHz. Αυτό επιτρέπει την δραστική μείωση του μεγέθους και βάρους του ballast. Ωστόσο η προσαρμογή των παραμέτρων του κυκλώματος για την απόκτηση βέλτιστων αποτελεσμάτων λειτουργίας είναι αρκετά δύσκολο, ειδικά για μαζική παραγωγή. Άλλο σημαντικό μειονέκτημα είναι η υψηλή τάση στον διακόπτη, η οποία μπορεί να φθάσει τιμές τρεις φορές της συνεχούς τάσης εισόδου. Γι' αυτούς τους λόγους, οι κύριες εφαρμογές του κυκλώματος είναι η τροφοδοσία των ballasts από μπαταρία με χαμηλή τάση εισόδου και χαμηλή ισχύ, όπως χρησιμοποιούνται στον φωτισμό έκτακτης ανάγκης και τον φορητό εξοπλισμό. Το εύρος ισχύος αυτών των ballasts κυμαίνεται από τα 5 στα 30 Watts.

Άλλη τυπική τοπολογία σ' αυτή την ομάδα είναι η τροφοδοσία ρεύματος του αντιστροφέα push-pull που παρουσιάζεται στην Εικόνα 19.β. Σ' αυτό το κύκλωμα, μία είσοδος συνεχούς ρεύματος λαμβάνεται μέσω του διακόπτη αυτεπαγωγής Le. Τα τρανζίστορ λειτουργούν με 50% λόγο κατάτμησης, παρέχοντας έτσι μια τετραγωνική κυματομορφή ρεύματος, η οποία τροφοδοτεί το παράλληλο κύκλωμα συντονισμού που σχηματίζεται από την αμοιβαία επαγωγή του μετασχηματιστή και της χωρητικότητας C. Αυτό το κύκλωμα έχει το πλεονέκτημα να εκτελεί σχετικά εύκολα σε ταλαντωμένη διαμόρφωση, αποφεύγοντας την χρήση επιπλέον κυκλωμάτων ελέγχου και ως εκ τούτου μείωση του κόστους. Επίσης, η μηδενική διακοπτική τάση μπορεί να ληφθεί σε διακόπτες ισχύος. Ωστόσο, οι διακόπτες επίσης εμφανίζουν υψηλή ταλάντωση τάσης, γύρω στις τρεις φορές της συνεχούς τάσης εισόδου, γεγονός που καθιστά αυτή την τοπολογία ακατάλληλη για εφαρμογές δικτύου. Αυτό το κύκλωμα χρησιμοποιείται επίσης σε εφαρμογές που λειτουργούν με μπαταρία σε ρυθμιστικό ταλαντωτή. Το τυπικό εύρος ισχύος είναι 4 με 100 Watts.

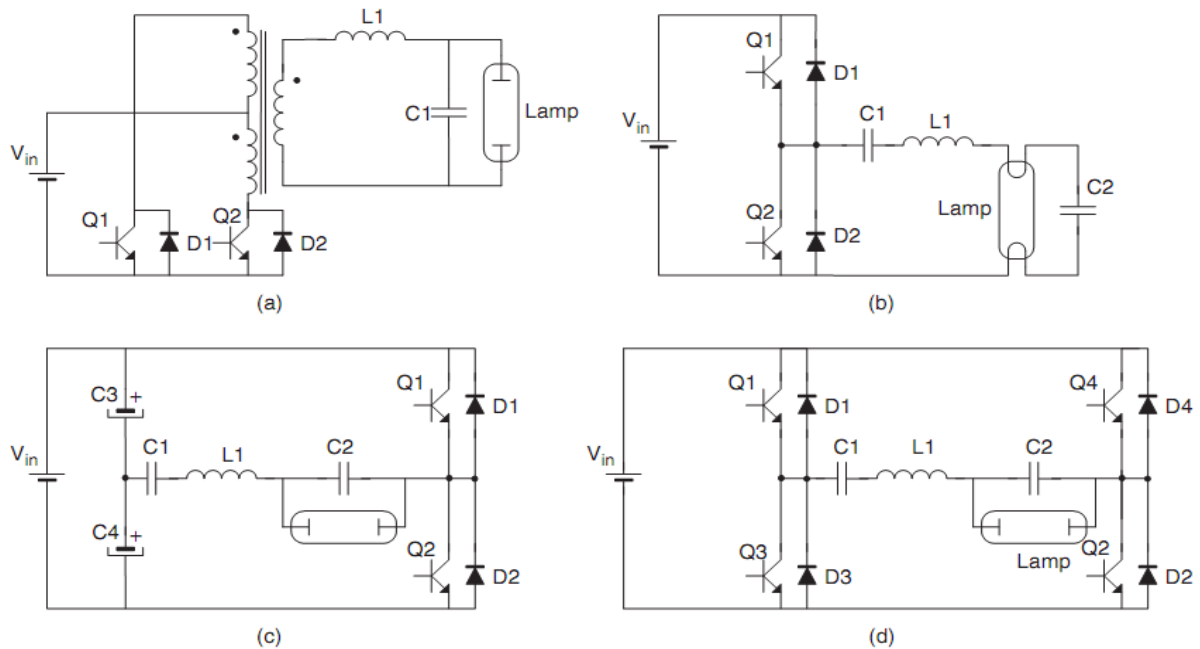
Τελικά, η Εικόνα 19.γ παρουσιάζει μία τροφοδοσία ρεύματος πλήρους γέφυρας συντονισμένου αντιστροφέα, για μεγαλύτερη ισχύ. Επίσης, αυτό το κύκλωμα επιτρέπει τον έλεγχο της ισχύος εξόδου σε σταθερή συχνότητα από διατάξεις μεταγωγής από το ίδιο ποδαράκι ταυτόχρονα, δημιουργώντας μία σχεδόν τετραγωνική κυματομορφή ρεύματος διαμέσου του κυκλώματος συντονισμού.

B. Τροφοδοσία Συντονισμένων Ballast με Ανάδραση Τάσης

Προς το παρόν, οι κατασκευαστές ηλεκτρονικών ballasts χρησιμοποιούν ως επί το πλείστον τροφοδοσία τάσης συντονισμένων ballasts, ειδικά για εφαρμογές που τροφοδοτούνται από το δίκτυο. Το κύκλωμα τροφοδοτείται από μία συνεχή πηγή τάσης, που συνήθως λαμβάνεται από την ανορθωμένη τάση δυο δικτύου. Μια τετραγωνική κυματομορφή τάσης στην συνέχεια λαμβάνεται μέσω μεταγωγής των τρανζίστορς με 50% λόγο κατάτμησης και χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία ενός συντονισμένου κυκλώματος σειράς. Αυτό το κύκλωμα συντονισμού φιλτράρει τις υψηλές αρμονικές και τροφοδοτεί την λάμπα με μια ημιτονοειδή κυματομορφή ρεύματος. Ένα πλεονέκτημα της τροφοδοσίας τάσεως συντονισμένου κυκλώματος σειράς είναι εκείνη η τάσης εκκίνησης μπορεί να ληφθεί εύκολα χωρίς την χρήση επιπλέον πυκνωτών ανάφλεξης για την λειτουργία κοντά στην συχνότητα του κυκλώματος συντονισμού. Η Εικόνα 20 δείχνει ηλεκτρικά διαγράμματα από τυπικά συντονισμένα ballasts τροφοδοσίας τάσης.

Η έκδοση τροφοδοσίας τάσης αντιστροφέα push-pull απεικονίζεται στην Εικόνα 20.α. Αυτός ο αντιστροφέας περιλαμβάνει έναν μετασχηματιστή, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανυψώσει ή να υποβιβάσει την τάση εισόδου προκειμένου να επιτευχθεί μία επαρκής ενεργός τιμή της τετραγωνικής κυματομορφής τάσης. Αυτό παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό αλλά επίσης αυξάνει το κόστος. Ένα μειονέκτημα είναι ότι η τάση στο τρανζίστορ είναι δύο φορές η τιμή της τάσης εισόδου, κάτι που μπορεί να είναι αρκετά υψηλό για εφαρμογές δικτύου. Άρα, αυτός ο αντιστροφέας χρησιμοποιείται κανονικά για εφαρμογές χαμηλής τάσης. Άλλο μειονέκτημα του

αντιστροφέα τροφοδοσίας τάσης είναι ότι οποιαδήποτε ασυμμετρία στις δύο κύριες περιελίξεις (διαφορετικός αριθμός σπειρών) ή στους χρόνους μεταγωγής των τρανζίστορ ισχύος θα παρέχει ένα ανεπιθύμητο συνεχές επίπεδο στην μαγνητική ροή του μετασχηματιστή, η οποία με την σειρά του θα μπορούσε να κάνει κορεσμένο τον πυρήνα ή να μειώσει την απόδοση που οφείλεται στην κυκλοφορία συνεχούς ρεύματος.



Εικόνα 20. Τυπικοί συντονισμένοι αντιστροφέες ανάδρασης τάσης α) push pull β-γ) ημίσεως γέφυρας και δ) πλήρους γέφυρας.

Η Εικόνα 20.β και 20.γ απεικονίζουν δύο πιθανές ρυθμίσεις για την τροφοδοσία τάσης συντονισμένου αντιστροφέα ημίσεως γέφυρας. Η πρώτη αναφέρεται σαν ασύμμετρη ημίσεως γέφυρας, και χρησιμοποιεί ένα από τους πυκνωτές του κυκλώματος συντονισμού (C_1 στην Εικόνα) να εμποδίσει το συνεχές επίπεδο τάσης από την τετραγωνική κυματομορφή που δημιουργήθηκε από την γέφυρα. Αυτό σημαίνει ότι ο πυκνωτής C_1 θα παρουσιάσει ένα συνεχές επίπεδο ίσο με την μισή συνεχή τάση εισόδου υπερβαίνοντας την εναλλασσόμενη τάση εισόδου. Ένας μετασχηματιστή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σ' αυτό τον αντιστροφέα για να ανυψώσει ή να υποβιβάσει την τάση εισόδου στο απαιτούμενο επίπεδο για κάθε εφαρμογή. Σ' αυτή την περίπτωση η χρήση των πυκνωτών σε σειρά αποτρέπει από κάθε συνεχές ρεύμα που κυκλοφορεί μέσω του πρωτεύοντος τυλίγματος, αποφεύγοντας έτσι τον κορεσμό του μετασχηματιστή. Αυτή η τοπολογία χρησιμοποιείται ευρέως από τους κατασκευαστές ballasts για να τροφοδοτήσουν λαμπτήρες φθορισμού, ειδικά για την έκδοση αυτοταλαντωτή που επιτρέπει την δραστική μείωση του κόστους. Όταν τροφοδοτούνται οι λαμπτήρες φθορισμού θερμής καθόδου, ο παράλληλος πυκνωτής C_2 συνήθως εφαρμόζεται ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 20.β, προκειμένου να παρασχεθεί ένα ρεύμα προθέρμανσης για τα ηλεκτρόδια και πετυχαίνεται μία ομαλή ανάφλεξη. Η Εικόνα 20.γ δείχνει άλλες εκδόσεις από τοπολογίες ημίσεως κύματος, χρησιμοποιώντας δύο συσσωρευμένους πυκνωτές για

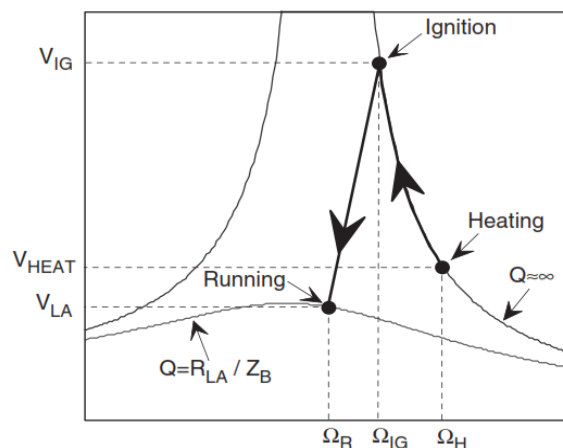
παροχή ενός κυμαινόμενου επιπέδου τάσης ίσο με την μισή τάση εισόδου. Σ' αυτή την περίπτωση, ο πυκνωτής C_1 δεν χρησιμοποιείται πλέον για να εμποδίσει μία συνεχή τάση, δείχνοντας έτσι χαμηλότερη ταλάντωση τάσης.

Τελικά, για μεγαλύτερο εύρος ισχύος (>200W) η τοπολογία με την γέφυρα πλήρους ανόρθωσης που παρουσιάζεται στην Εικόνα 20.δ, χρησιμοποιείται κανονικά. Το τρανζίστορ από κάθε γέφυρα ημίσεως κύματος λειτουργούν με λόγο κατάτμησης 50% και τα διακοπτικά σήματα είναι μετατοπισμένα κατά 180° . Έτσι, όταν οι διακόπτες Q1 και Q2 είναι ενεργοποιημένοι, άμεσα εφαρμόζεται η τάση V_{in} στο κύκλωμα συντονισμού, και όταν οι διακόπτες Q3 και Q4 είναι ενεργοποιημένοι η αντίστροφη τάση $-V_{in}$ επιτυγχάνεται σε όλο το συντονισμένο κύκλωμα. Ένα από τα πλεονεκτήματα του κυκλώματος είναι ότι τα διακοπτικά σήματα των δύο κλάδων μπορούν να μετατοπιστούν από τις γωνίες 0° και 180° , έτσι ελέγχεται η ενεργός τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στο κύκλωμα συντονισμού που κυμαίνεται από 0 έως την τάση εισόδου. Αυτό παρέχει μία πρόσθετη παράμετρο για τον έλεγχο της ισχύος εξόδου σε σταθερή συχνότητα, τα αποτελέσματα είναι χρήσιμα για την εφαρμογή ρυθμιστικών ballast.

2.8 Κατασκευαστικά-Σχεδιαστικά Θέματα

Η μεθοδολογία του σχεδιασμού ενός συντονισμένου αντιστροφέα για την τροφοδοσία λαμπτήρων εκκένωσης, μπορεί να είναι πολύ διαφορετική εξαρτώμενη από τον τύπο της λάμπας και τα χαρακτηριστικά της, από την τοπολογία του αντιστροφέα, από τους στόχους του σχεδιασμού κλπ. Μερικές κατευθυντήριες γραμμές, ειδικά εστιασμένες για να τροφοδοτούν λαμπτήρες φθορισμού με τροφοδοσία τάσης συντονισμένων αντιστροφέων παρουσιάζονται σ' αυτό το τμήμα για να απεικονιστεί η βασική μεθοδολογία του σχεδιασμού.

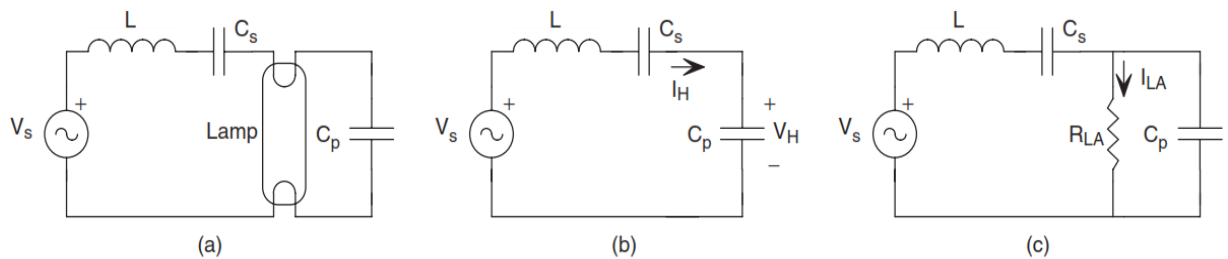
Μια τυπική διαδικασία εκκίνησης για έναν λαμπτήρα φθορισμού θερμής καθόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 21. Αρχικά τα ηλεκτρόδια από τις λάμπες ζεσταίνονται για την εκπομπή της θερμοκρασίας. Κατά την διάρκεια αυτής της φάσης, ο αντιστροφέας θα πρέπει να βεβαιώσει μια τάση εφαρμοσμένη στην λάμπα, όχι αρκετά υψηλή για να δημιουργήσει καταστροφή στην επιμετάλλωση στα ηλεκτρόδια της λάμπας, αποφεύγοντας έτσι την πρόωρη γήρανση της λάμπας. Με το που τα ηλεκτρόδια φθάσουν την εκπομπή της θερμοκρασίας, η λάμπα μπορεί να αναφλεχθεί, εφαρμόζοντας την απαραίτητη τάση εκκίνησης. Ακολουθώντας αυτή την διαδικασία μια ομαλή εκκίνηση επιτυγχάνεται



Εικόνα 21. Τυπική διαδικασία εκκίνησης λαμπτήρα εκκένωσης.

και εξασφαλίζεται η μεγάλη διάρκεια ζωής της λάμπας.

Η καλύτερη μέθοδος για να εκτελεστεί αυτή η ομαλή εκκίνηση είναι ο έλεγχος της εναλλαγής συχνότητας του αντιστροφέα, έτσι ώστε η τάση και το ρεύμα της λάμπας να είναι πάντα υπό έλεγχο. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας θέρμανσης, η συχνότητα λειτουργίας προσαρμόζεται σε μία τιμή πάνω από την κανονική συχνότητα του συντονισμένου κυκλώματος. Με αυτό τον τρόπο το θερμαινόμενο ρεύμα μπορεί να προσαρμόζεται στην απαραίτητη τιμή διατηρώντας την τάση της λάμπας αρκετά χαμηλότερη από την τάση εκκίνησης. Από τότε που τα MOSFETs ή τα διπολικά τρανζίστορ χρησιμοποιούνται, η λειτουργία πάνω από την κανονική συχνότητα είναι προτιμότερη, επειδή παρέχει μηδενισμό τάσης και η ύπαρξη αργών παρασιτικών διόδων μέσα σ' αυτά τα τρανζίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα η συχνότητα εναλλαγής μειώνεται μέχρι που η τάση εκκίνησης εξασφαλίζεται και τότε η λάμπα αναφλέγεται. Κανονικά, το τελικό σημείο λειτουργίας σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας ρυθμίζεται να είναι σε μία συχνότητα εναλλαγής (ίση με την κανονική συχνότητα) ιδιοσυχνότητα (natural frequency), έτσι ώστε να εξασφαλιστεί μια πολύ σταθερή λειτουργία για την λάμπα.



Εικόνα 22. α) Λαμπτήρας φθορισμού που τροφοδοτείται με κύκλωμα σειράς και παράλληλα β) ισodύναμο κύκλωμα κατά την θέρμανση και τον ιονισμό και γ) ισodύναμο κύκλωμα κανονικής λειτουργίας.

Η Εικόνα 22.α δείχνει μία λάμπα φθορισμού που τροφοδοτείται χρησιμοποιώντας ένα συντονισμού κύκλωμα σειράς και παράλληλα. Τα δεδομένα για τον σχεδιασμό είναι η θεμελιώδης τάση εισόδου V_s , η διακοπτική συχνότητα σε κανονική λειτουργία εκκένωσης (running) f_s , η τάση και το ρεύμα της λάμπας σε υψηλή συχνότητα: V_{LA} , I_{LA} , το θερμαινόμενο ρεύμα ηλεκτροδίου I_H , η μέγιστη τάση της λάμπας κατά την διαδικασία θέρμανσης: V_H και την τάση εκκίνησης της λάμπας: V_{IG} .

Το ισodύναμο κύκλωμα κατά την διάρκεια της φάσης θέρμανσης και ανάφλεξης απεικονίζεται στην Εικόνα 22.β. Το τρέχον ρεύμα σ' αυτό το κύκλωμα είναι το ρεύμα θέρμανσης των ηλεκτροδίων, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας $Q = \infty$ στην ισότητα 2.5:

$$I_H = \frac{V_s/Z_B}{\Omega - 1/\Omega} \quad (2.5)$$

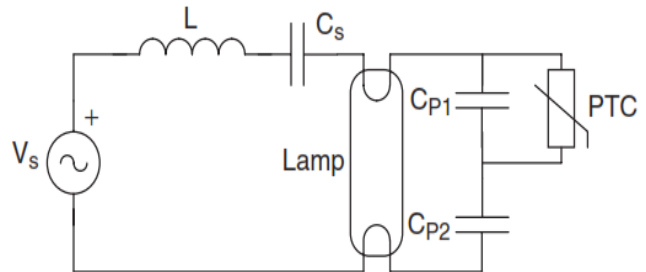
Όπου η αντίσταση των ηλεκτροδίων έχει παραληφθεί για απλότητα. Για ένα δεδομένο ρεύμα θέρμανσης I_H , η απαραίτητη διακοπτική συχνότητα εξασφαλίζεται από την ισότητα 2.6 όπως ακολουθεί:

$$\Omega_H = \frac{V_S}{2Z_B I_H} + \sqrt{1 + \left(\frac{V_S}{2Z_B I_H}\right)^2} \quad (2.6)$$

Όσον αφορά την τάση θέρμανσης, μπορεί να υπολογισθεί από την ισότητα 2.7 δίνοντας την ακόλουθη τιμή:

$$V_H = \frac{aV_S}{\Omega_H^2 - 1} \quad (2.7)$$

Από την στιγμή που αναφλέγεται η λάμπα το καινούργιο κύκλωμα λειτουργίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 22.γ. Κανονικά η διακοπτική συχνότητα και τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος μπορούν να εξασφαλιστούν θέτοντας $Q_{SP} = \infty$. Έτσι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το κύκλωμα συμπεριφέρεται σαν μία πηγή ρεύματος της ακόλουθης τιμής:



Εικόνα 23. Συντονισμένο κύκλωμα που χρησιμοποιεί αντίσταση PTC.

$$I_{LA} = \frac{V_S}{aZ_B} \quad (2.8)$$

Από αυτή την εξίσωση η αντίσταση χρειάζεται για να παρέχει ένα ρεύμα της λάμπας ίσο με I_{LA} που εξασφαλίζεται εύκολα:

$$Z_B = \frac{V_S}{aI_{LA}} \quad (2.9)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 2.5 - 2.9, η διαδικασία σχεδιασμού, μπορεί να εκτελεστεί ως εξής:

Βήμα 1 Σταθερή κατάσταση λειτουργίας. Επιλέγουμε μία τιμή για τον παράγοντα a , κανονικά μια τιμή 0,8-0,9 είναι επαρκής για τις περισσότερες εφαρμογές. Από την εξίσωση 2.9 υπολογίζεται η τιμή του Z_B για το συντονισμένο κύκλωμα. Αφότου η κανονική συχνότητα είναι ίση με την διακοπτική συχνότητα, τα αντιδραστικά στοιχεία του συντονισμένου κυκλώματος μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$L = \frac{Z_B}{2\pi f_S} \quad C_P = \frac{1}{2\pi f_S a Z_B} \quad C_S = \frac{1}{2\pi f_S (1-a) Z_B} \quad (2.10)$$

Βήμα 2 Φάση θέρμανσης. Από την εξίσωση 2.6 υπολογίζεται η διακοπτική συχνότητα για μια δεδομένη θέρμανση ρεύματος. Μετά υπολογίζεται η τιμή της τάσης θέρμανσης V_H από την εξίσωση 2.7.

Βήμα 3 Ελέγχεται αν η τάση θέρμανσης είναι χαμηλότερη από την μέγιστη τιμή που επιτρέπεται για να αποφευχθεί το ψέκασμα ηλεκτροδίων. Εάν η τάση είναι πολύ υψηλή, επιλέγουμε μία υψηλότερη τιμή του a και επαναλαμβάνουμε τα βήματα 1 και 2. Επίσης, η

μέγιστη συχνότητα θέρμανσης μπορεί να περιοριστεί για να αποφευχθεί η υπερβολική διακύμανση της συχνότητας. Όσο χαμηλότερο είναι το α , τόσο χαμηλότερη θα είναι η διακύμανση της συχνότητας από θέρμανση σε ανάφλεξη, αφότου τα χαρακτηριστικά της τάσης εξόδου είναι στενότερο. Η περιγραφή της διαδικασίας για να επιτευχθεί ομαλή ανάφλεξη απαιτεί την χρήση μιας τάσης ελεγχόμενου ταλαντωτή για να ελέγχει την διακοπτική συχνότητα. Αυτό μπορεί να αυξήσει το κόστος του ballast. Μια παρόμοια ομαλή ανάφλεξη μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας κύκλωμα συντονισμού όπως φαίνεται στην Εικόνα 23. Αυτό το κύκλωμα, πολύ συχνά χρησιμοποιείται σε ballast ταλάντωσης, όπου οι διακόπτες οδηγούνται από το ρεύμα συντονισμού χρησιμοποιώντας ένα μετασχηματιστή ρεύματος.

Στο κύκλωμα που φαίνεται στην Εικόνα 23 η αντίσταση PTC είναι αρχικά κρύα και ο πυκνωτής C_{p1} είναι στην ουσία βραχυκυκλωμένος από αυτήν. Το κύκλωμα συντονισμού κάτω από αυτές τις συνθήκες σχηματίζεται από το κύκλωμα L- C_s - C_{p2} , το οποίο μπορεί να σχεδιαστεί για να θερμάνει τα ηλεκτρόδια της λάμπας με μια τάση θέρμανσης αρκετά χαμηλή για να αποφευχθεί η κρύα ανάφλεξη της λάμπας. Αφού η αντίσταση PTC έχει επίσης θερμανθεί από το ρεύμα που κυκλοφορεί, μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα φτάνει το όριο της θερμοκρασίας και αποκόπτεται. Αυτή την στιγμή, η νέα διάταξη συντονισμού σχηματίζεται από τα L, C_s και την ισοδύναμη χωρητικότητα σειράς των C_{p1} και C_{p2} . Αυτό το κύκλωμα μπορεί να σχεδιαστεί για να παράγει την απαραίτητη τάση ανάφλεξης και να προμηθεύει την λάμπα σε κανονική λειτουργία εκκένωσης. Από την στιγμή που η λάμπα αναφλέγεται η PTC διατηρεί την υψηλή της αντίσταση αφού ο κυρίαρχος παράλληλος πυκνωτής σ' αυτή την φάση είναι ο C_{p1} (συνήθως $C_{p1} \ll C_{p2}$).

Κεφάλαιο 3

Τροφοδοσία,
Κύκλωμα Ελέγχου & Πρόγραμμα

3.1 Κατασκευή Γραμμικού Τροφοδοτικού

Τα γραμμικά τροφοδοτικά χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον στο παρελθόν, πριν κάνουν την εμφάνισή τους τα διακοπτικά τροφοδοτικά εξαιτίας, της εξέλιξης των ημιαγωγικών στοιχείων. Συγκριτικά, τα πρώτα είναι πολύ απλά κυκλώματα και στην συνέχεια ακολουθεί μία παρουσίαση όλων των στοιχείων για την κατασκευή ενός γραμμικού τροφοδοτικού. Σκοπός της κατασκευής είναι η τροφοδοσία του αναπτυξιακού κυκλώματος, των ortocoupler, του οδηγού των ημιαγωγικών στοιχείων και του συστήματος ψύξης του κυκλώματος ισχύος.

3.2 Γραμμικό Τροφοδοτικό με δύο εξόδους των +5 και +15 Volts

3.2.1 Γενικά

Αρχικά, για την κατασκευή ενός γραμμικού τροφοδοτικού χρειάζεται να γνωρίζουμε την επιθυμητή τάση εξόδου του και το μέγιστο απαιτούμενο ρεύμα φορτίου. Τα συνηθισμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα των τυποποιημένων σταθεροποιητών τάσης δίνουν σταθερή τάση εξόδου, ανεξάρτητα με τις μεταβολές της τάσης εισόδου, για φορτία έως 1A.

Μπορούμε εύκολα λοιπόν, να λάβουμε θετικές τάσεις από 5-24 Volts με αντίστοιχους σταθεροποιητές που υπάρχουν στο εμπόριο, αρκεί η τάση στην είσοδό τους να είναι μεγαλύτερη τουλάχιστον κατά 2,5 Volts από την ονομαστική τάση στην έξοδό τους. Η ενεργός τιμή της τάσης εισόδου στο δευτερεύον του μετασχηματιστή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη απαιτούμενη τάση εισόδου του σταθεροποιητή. Μετά την ανόρθωση υπάρχει σημαντική κυμάτωση και οι στιγμιαίες τιμές μπορεί να είναι αρκετά μικρότερες όταν το ρεύμα είναι υψηλό και οι πυκνωτές εξομάλυνσης μικροί.

Όπως γίνεται αντιληπτό από το κύκλωμα, η μέγιστη τιμή της συνεχούς τάσης στον πυκνωτή εξομάλυνσης αντιστοιχεί στην τιμή της κορυφής της εναλλασσόμενης τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή πλην την πτώση τάσης στις διόδους του ανορθωτή.

Όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα εξόδου, τόσο μεγαλύτερος πρέπει να είναι ο πυκνωτής, ενώ πρακτικά μπορούμε να πούμε ότι η τιμή του για φορτίο 1A πρέπει να είναι 2200 μ F. Βέβαια δεν πρέπει να αυξάνουμε την τιμή του συνεχώς διότι καταπονούμε με ανάστροφη τάση τις διόδους ανόρθωσης στην αρνητική ημιπερίοδο.

Η επιλογή κατάλληλου πυκνωτή δεν αφορά μόνο την χωρητικότητά του αλλά και την τάση του. Έτσι λοιπόν, η τάση αντοχής του πυκνωτή εξομάλυνσης πρέπει να είναι η μέγιστη τάση του μετασχηματιστή που είναι ίση με $V_{ac} \cdot \pi$ και αυξημένη κατά 25%. Προφανώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί πυκνωτής ακόμη μεγαλύτερης τάσης για λόγους ασφαλείας.

Η ικανότητα ρεύματος του μετασχηματιστή πρέπει να είναι να είναι 1,25 φορές τουλάχιστον το μέγιστο ρεύμα εξόδου του τροφοδοτικού. Η τάση του μετασχηματιστή δίνεται από τον κατασκευαστή στο ονομαστικό του φορτίο. Όσο μικρότερος είναι τόσο μεγαλύτερη είναι η εσωτερική του αντίσταση και τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά δυναμικού των τάσεων εξόδου που παρέχει όταν λειτουργεί σε ονομαστικό ή χωρίς φορτίο.

Για τον λόγο αυτό σταθεροποιημένα τροφοδοτικά εν κενώ μπορεί να δίνουν μεγαλύτερες τάσεις από τις προβλεπόμενες.

Για τον υπολογισμό των απωλειών ισχύος θέτουμε το γινόμενο της διαφοράς τάσης μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του σταθεροποιητή με το ρεύμα εξόδου. Για να αποφύγουμε την υπερθέρμανση του στοιχείου χρησιμοποιούμε κατάλληλες ψήκτρες αλουμινίου. Το ρεύμα ηρεμίας που διαρρέει τον κοινό ακροδέκτη του σταθεροποιητή δίνεται από τους κατασκευαστές και είναι στην τάξη των 4,5mA. Με την πρόσθεση μίας αντίστασης 1KΩ στον κοινό ακροδέκτη η τάση εξόδου στον σταθεροποιητή γίνεται:

Τέλος, με μία δίοδο αντί της αντίστασης μπορεί να αυξηθεί η τάση εξόδου κατά 0,5 Volt. Συνήθως, ο συντελεστής απόδοσης των γραμμικών τροφοδοτικών κυμαίνεται στην περιοχή των 30-60%. Επιπλέον, κατά τον σχεδιασμό αυτού του τύπου τροφοδοτικών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η διακύμανση της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου ($\pm 10\%$), ενώ θα πρέπει η επιθυμητή τάση εξόδου να έχει πάντα μικρότερη τιμή από την ελάχιστη τάση που εμφανίζεται στα άκρα του πυκνωτή εξομάλυνσης.

Κύριο πλεονέκτημα αυτών των τροφοδοτικών είναι η απλότητα του κυκλώματος με αποτέλεσμα το κόστος για μικρές ισχύς (<25W) να είναι χαμηλό. Ακόμη, επειδή δεν έχουμε διακοπτικά φαινόμενα, δεν εμφανίζονται ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που δημιουργούν προβλήματα στην λειτουργία άλλων συσκευών.

3.2.2 Περιγραφή Λειτουργίας Κυκλώματος

Το κύκλωμα πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με υπολογισμούς αλλά έγινε και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων με χρήση κατάλληλου προγράμματος προσομοίωσης (PSPICE). Κάποιες τιμές από τα στοιχεία είναι διαφορετικές από αυτές που υπολογίσθηκαν διότι διατίθονταν ήδη στον εργαστηριακό χώρο, χωρίς αυτό να προκαλέσει ανεπιθύμητες αλλαγές στην έξοδο. Το κύκλωμα τροφοδοτείται από το εναλλασσόμενο δίκτυο 230V, 50Hz. Προκειμένου να δοθεί μία τάση κατάλληλης τιμής για το τροφοδοτικό των +5V, +15V και για να επιτευχθεί γαλβανική απομόνωση ανάμεσα στο κύκλωμα τροφοδοσίας και στο δίκτυο χρησιμοποιούνται δύο μετασχηματιστές υποβιβασμού των 9V και 12V, αντίστοιχα.

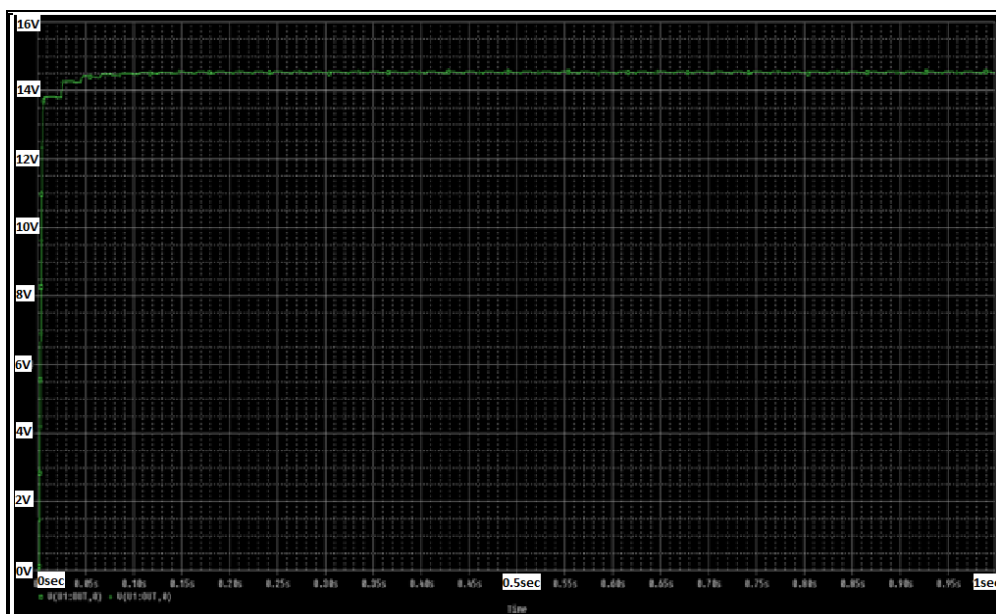
Στην συνέχεια, η τάση του δευτερεύοντος υποβάλλεται σε ανόρθωση με την χρήση μιας γέφυρας πλήρους ανόρθωσης και με την χρήση ενός ηλεκτρολυτικού πυκνωτή μεγάλης τιμής πραγματοποιείται εξομάλυνση.

Κατόπιν, συνδέεται με έναν σταθεροποιητή τάσης (LM7805 και LM7815) ο οποίος δίνει στην έξοδό του την επιθυμητή τάση. Εξαιτίας της μικρής επαγωγικής συμπεριφοράς αυτού του τύπου πυκνωτή και για την εξάλειψή της, απαιτείται η σύνδεση ακόμη ενός πυκνωτή χαμηλής τιμής, που έχει όμως διπλό ρόλο. Ο πρώτος μόλις αναφέρθηκε, ενώ ο δεύτερος είναι πως κάθε ολοκληρωμένος σταθεροποιητής περιλαμβάνει στην ανάδρασή του έναν ενισχυτή που έχει την τάση να ταλαντώνει. Γι' αυτό τον λόγο προστίθενται πυκνωτές αντιστάθμισης τόσο στην είσοδο, όσο και στην έξοδο του σταθεροποιητή, μεγαλύτεροι των 330nF και των 100nF, σε είσοδο και έξοδο αντίστοιχα. Συνήθως χρησιμοποιούνται πυκνωτές ταλαντίου ή επιπέδου φύλλου που παρουσιάζουν ασθενή επαγωγή για την είσοδο και κεραμικοί ή πολυεστερικοί για την έξοδο.

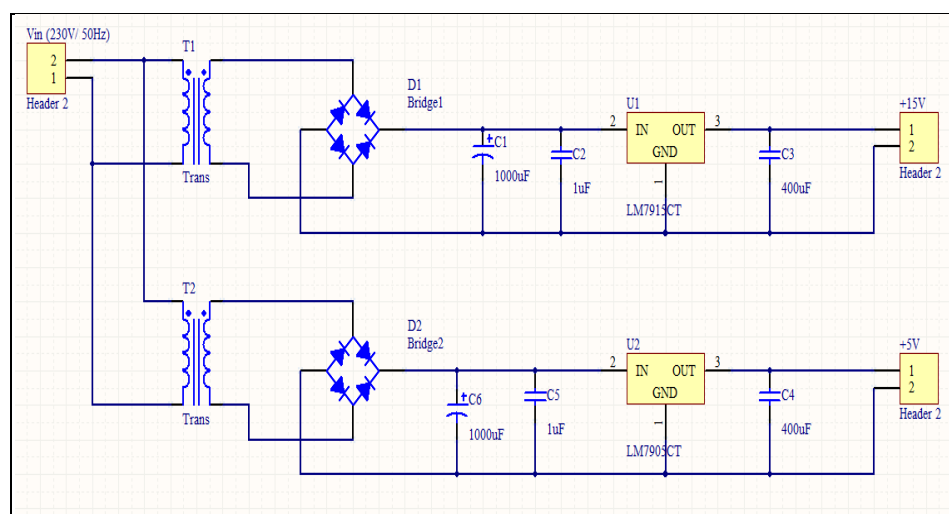
Τέλος στη έξοδο του σταθεροποιητή και μετά τον πυκνωτή αντιστάθμισης λαμβάνουμε την επιθυμητή τάση στις δύο εξόδους των +5V και +15V.

3.2.3 Προσομοίωση

Για επαλήθευση των αποτελεσμάτων από τους υπολογισμούς πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του κυκλώματος. Αρχικά, παραλήφθηκαν το δίκτυο τροφοδοσίας και οι μετασχηματιστές υποβιβασμού της τάσης. Στην θέση τους μπήκε εναλλασσόμενη τροφοδοσία με μέγιστες τάσεις κάθε φορά για τις δύο εξόδους του τροφοδοτικού, τα 12,7V και τα 16,9V αντίστοιχα, συχνότητας 50Hz. Στην συνέχεια, ακολουθεί το κύκλωμα που προαναφέρθηκε. Οι τιμές τάσης αλλά και η κυμάτωση της κατόπιν προσομοίωσης στην έξοδο του τροφοδοτικού παρουσιάζονται παρακάτω στην Εικόνα 1:



Εικόνα 4. Τιμές τάσης για την έξοδο dc τροφοδοτικού +15V.



Εικόνα 5. Σχηματικό κύκλωμα dc τροφοδοσίας +5V και +15V.

3.3 Κύκλωμα Ελέγχου

3.3.1 Μικροελεγκτής AVR – Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM)

3.3.1.1 Εισαγωγή

Κάθε συσκευή, μηχανήμα ή ηλεκτρονικό σύστημα χρειάζεται έλεγχο σωστής-αποδοτικής λειτουργίας, χειρισμό, ρύθμιση και παρακολούθηση. Προκειμένου να αξιοποιηθούν αυτές οι απαιτήσεις, κατασκευάζονται ολοκληρωμένα κυκλώματα από τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Μία από τις πρώτες εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκαν είναι στις ηλεκτρονικές αριθμομηχανές. Η κατηγορία στην οποία ανήκουν είναι τα Μικροϋπολογιστικά Συστήματα ενώ ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους διακρίνονται σε:

- Μικροεπεξεργαστές (*microprocessors*)
- Μικροελεγκτές (*microcontrollers*)
- Επεξεργαστές Σημάτων (*Digital Signal Processors*)
- Επεξεργαστές Γραφικών (*Graphics Processing Units*)

Προς αποσαφήνιση της διαφοράς των δύο πρώτων υποκατηγοριών έχουμε συνοπτικά τα εξής:

➤ Μικροεπεξεργαστές

Ονομάζονται οι Κεντρικές Μονάδες Επεξεργασίας. Η βασική προτεραιότητά τους είναι η υπολογιστική ισχύς εξελίσσοντας συνεχώς την Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (**CPU**), διαθέτουν ισχυρό και εκτεταμένο ρεπερτόριο εντολών ενώ βρίσκουν εφαρμογή στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές (PC).

➤ Μικροελεγκτές

Ονομάζονται τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που περιλαμβάνουν εκτός από τον μικροεπεξεργαστή, θύρες για είσοδο και έξοδο δεδομένων, μετατροπείς αναλογικών σημάτων σε ψηφιακή και αντίστροφα, χρονιστές και μνήμες. Η βασική τους προτεραιότητα είναι η αυτοτέλεια εξελίσσοντας την Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (**CPU**) και τους χρονιστές, αυξάνοντας τις μονάδες εισόδου/εξόδου, την αποθήκευση και την ταχύτητα της μνήμης. Το ρεπερτόριο εντολών είναι περιορισμένο διότι παρέχουν εξειδικευμένη χρήση και βρίσκουν εφαρμογή σε ενσωματωμένα συστήματα.

3.3.2 Μικροελεγκτής AVR

Ο μικροελεγκτής AVR περιέχει έναν πυρήνα (ΚΜΕ) επεξεργαστή (*Reduced Instruction Set Computer*) RISC ο οποίος έχει σχεδιαστεί με βάση την αρχιτεκτονική Harvard. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 3, στην αρχιτεκτονική Harvard υπάρχει διαφορετικός διάδρομος για την μεταφορά των δεδομένων (*data bus*) και διαφορετικός διάδρομος για την μεταφορά των εντολών (*instruction bus*).

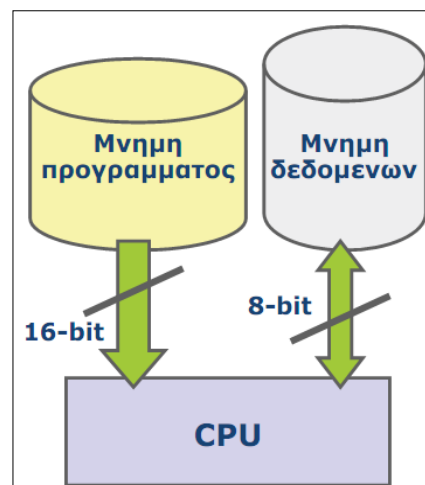
Η ύπαρξη δύο διαφορετικών μνημών, μνήμη δεδομένων (*data memory*) και μνήμη προγράμματος (*program memory*), καθιστά αυτή την αρχιτεκτονική αποδοτική, αφού μπορεί να εκτελείται κάποια εντολή και παράλληλα να εγγράφεται ή να διαβάζεται η μνήμη.

Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η εκτέλεση των περισσότερων εντολών σ' ένα μόνο κύκλο μηχανής.

Τα γενικά χαρακτηριστικά των μικροελεγκτών AVR είναι τα εξής:

- Οι μικροελεγκτές διαθέτουν ενσωματωμένη μνήμη flash με δυνατότητα προγραμματισμού εντός του συστήματος – **ISP** (**In System Programmable**) – ως μνήμη προγράμματος.
- Διαθέτουν 32 καταχωρητές εργασίας των 8 bit_s.
- Διαθέτουν ενσωματωμένη μνήμη δεδομένων που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση σταθερών τιμών και μεταβλητών.
- Διαθέτουν ενσωματωμένο προγραμματιζόμενο χρονιστή με μονάδα διαίρεσης συχνότητας (*prescaler*), προγραμματιζόμενο χρονιστή επιτήρησης (**Watch Dog Timer**).
- Τέσσερις παράλληλες θύρες και πληθώρα περιφερειακών, δυνατότητα για εσωτερικές και εξωτερικές διακοπές.
- Λειτουργία σε συχνότητες χρονισμού από 0 έως 10MHz.
- Εσωτερικό κύκλωμα που επανατοποθετεί το σύστημα κατά την εφαρμογή της τάσης τροφοδοσίας (**Power On Reset**).
- Λειτουργίες αποκοπής και ηρεμίας.

Οι περισσότεροι μικροελεγκτές συνήθως λειτουργούν με τάση 4,5-5,5 Volt, ενώ οι απαιτήσεις για ελαφριές και φορητές συσκευές οδηγούν στην τεχνολογική ανάπτυξη ώστε να τροφοδοτούνται με 3,3 Volt ή και λιγότερο. Μία σημαντική παράμετρος για τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται οι μικροελεγκτές είναι η κατανάλωση ενέργειας. Είναι ανάλογη της συχνότητας του ρολογιού του συστήματος του μικροελεγκτή $E = F_{CK}$, όπως επίσης και ανάλογη του τετραγώνου της τάσης τροφοδοσίας $E = V^2$.



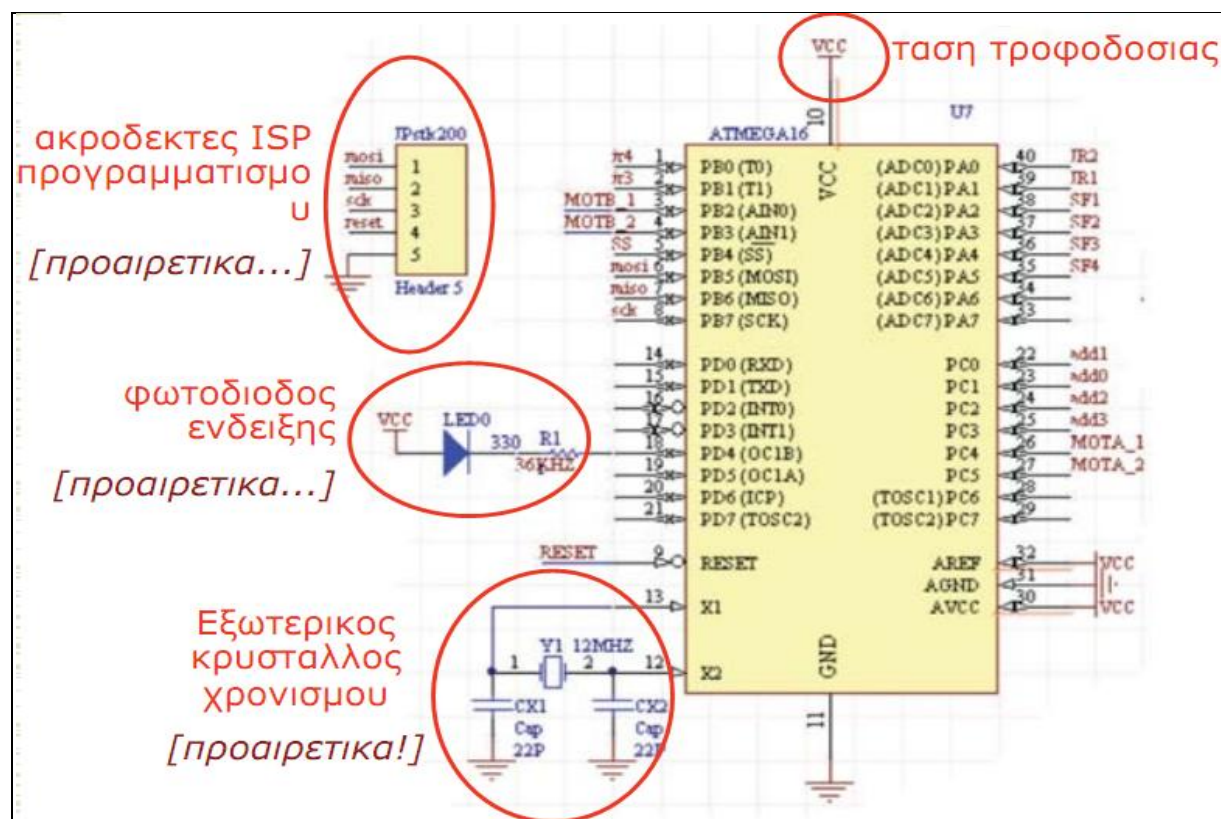
Εικόνα 3. Αρχιτεκτονική Harvard.

3.3.3 Μικροελεγκτής AVR ATmega16

Για τον σκοπό της εργασίας χρησιμοποιείται ο μικροελεγκτής ATmega16 της οικογένειας των AVR. Κατασκευάζεται από την εταιρεία ATMEL και τα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- ♦ 8-bit Μικροελεγκτής με αρχιτεκτονική RISC.
- ♦ 16 Kbytes μνήμης προγράμματος Flash.
- ♦ 512 bytes μνήμης EEPROM.
- ♦ 1 Kbyte μνήμης SRAM.
- ♦ 32 γραμμές ψηφιακών εισόδων/εξόδων.
- ♦ 2 x 8-bit χρονιστές, 1 x 16-bit χρονιστή.
- ♦ Μετατροπέας ADC 10-bit για έως 8 αναλογικές εισόδους.
- ♦ Μονάδα αναλογικού συγκριτή.
- ♦ Προγραμματιζόμενη μονάδα USART σύγχρονης/ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας.
- ♦ Υποστήριξη πρωτοκόλλων SPI,I2C.
- ♦ Χρονιστής επιτηρητής με ξεχωριστό ταλαντωτή.
- ♦ 6 συνολικά καταστάσεις λειτουργίας εξοικονόμησης ενέργειας.

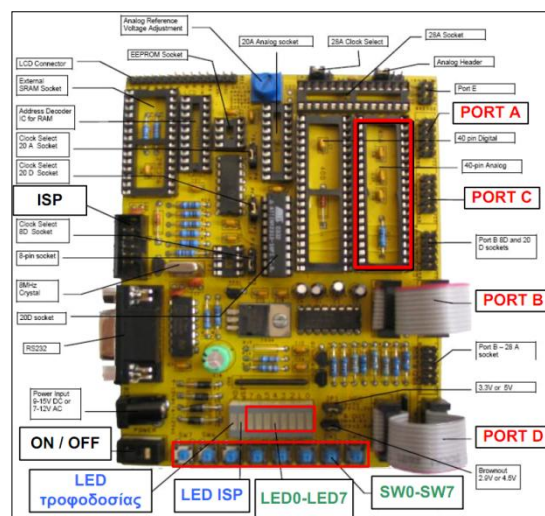
Το στοιχειώδες κύκλωμα υποστήριξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4. Στοιχειώδες κύκλωμα υποστήριξης.

3.3.4 Αναπτυξιακό Κύκλωμα STK-200

Τα βασικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αναπτυξιακού κυκλώματος είναι ότι υποστηρίζει μία ευρεία γκάμα από μικροελεγκτές της εταιρείας Atmel, έχει 6 πόρτες, 8 μπουτον, 8 LED, 2 LED απεικόνισης τροφοδοσίας και προγραμματισμού αντίστοιχα, διαθέτει κύκλωμα RS232, κύκλωμα Brownout, υποδοχή εξωτερικού ολοκληρωμένου μνήμης *Flash* και *EEPROM*, κρύσταλλο 8 MHz και ISP για προγραμματισμό μέσω θύρας USB ή της παράλληλης.



Εικόνα 5. Αναπτυξιακό κύκλωμα STK-200.

Κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας δημιουργήθηκε πλακέτα με αντίστοιχα χαρακτηριστικά του αναπτυξιακού κυκλώματος STK-200.

3.3.5 Πρόγραμμα

Η ανάπτυξη εφαρμογών με μικροελεγκτές είναι μια σύνθετη εργασία που απαιτεί εμπειρία και γνώση των εντολών και των δυνατοτήτων του εκάστοτε μικροελεγκτή. Αποτελείται από δύο τμήματα:

1. Η ανάπτυξη του hardware υποστήριξης για την λειτουργία του μικροελεγκτή και για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής.
2. Η ανάπτυξη του λογισμικού.

Για την κατασκευή του hardware οι κατασκευαστές παρέχουν αναπτυξιακά συστήματα προς όφελος του χρόνου. Πρόκειται για ολοκληρωμένες πλακέτες που παρέχουν όλα τα απαραίτητα κυκλώματα γενικής χρήσης και προγραμματισμού του μικροελεγκτή.

Για την ανάπτυξη του λογισμικού χρειάζεται ένα πρόγραμμα γραμμένο σε μία γλώσσα που θα είναι δυνατή η επικοινωνία. Ξεκινώντας αντίστροφα την διαδικασία η γλώσσα λέγεται γλώσσα μηχανής και εκτελείται απευθείας από την CPU. Επόμενο επίπεδο πολυπλοκότητας είναι η συμβολική γλώσσα (*Assembly*) για την οποία απαιτείται συμβολομεταφραστής και τέλος είναι οι γλώσσες υψηλού επιπέδου (*C/C++*, *Basic*, *Java*) που απαιτείται *Interpreter*, *Compiler* για την διεπαφή με τον χρήστη.

3.3.5.1 Γλώσσα Μηχανής

Ο προγραμματισμός σε γλώσσα μηχανής είναι σε πρωτογενές επίπεδο, δύσκολος και επιρρεπής σε λάθη ενώ δεν χρησιμοποιείται πλέον.

3.3.5.2 Γλώσσα Assembly

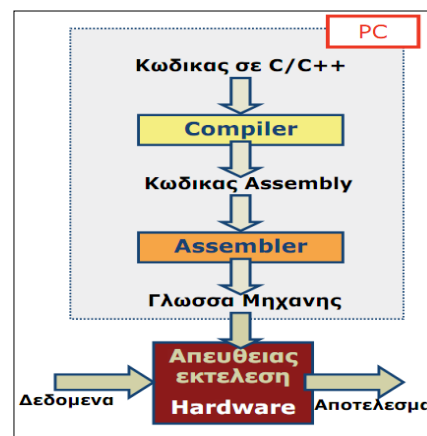
Εξαρτάται άμεσα από τον μικροϋπολογιστή και το σύνολο εντολών που παρέχει. Ο προγραμματισμός σ' αυτή την γλώσσα δίνει την δυνατότητα πλήρους ελέγχου του μικροϋπολογιστή, επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό του χρόνου εκτέλεσης του προγράμματος, το πρόγραμμα βελτιστοποιείται σε ταχύτητα, όμως παρουσιάζει δυσκολία στην εύκολη χρήση.

3.3.5.3 Γλώσσες Υψηλού Επιπέδου (Basic, C/C++, Java)

Οι γλώσσες υψηλού επιπέδου διευκολύνουν πολύ τον προγραμματισμό των μικροϋπολογιστών μειώνοντας τον χρόνο εξέλιξης του λογισμικού, απλοποιώντας την επέκταση του προγράμματος με νέες δυνατότητες, διευκολύνοντας την μεταφορά του προγράμματος σε άλλο μικροϋπολογιστή και αυξάνοντας την αναγνωσιμότητα του προγράμματος.

3.3.6 Διαδικασία Ροής Προγραμματισμού

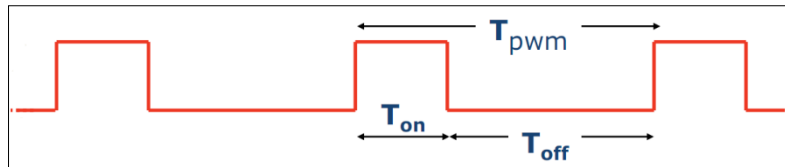
Η ανάπτυξη του πηγαίου κώδικα γίνεται στον Η/Υ, μεταφράζεται από τον *compiler* σε κώδικα εντολών *Assembly*, από τις οποίες ο *assembler* δημιουργεί το τελικό αρχείο σε γλώσσα μηχανής του μικροελεγκτή. Αυτό το αρχείο γίνεται *download* στο αναπτυξιακό σύστημα, οπότε και προγραμματίζεται η μνήμη *flash* του μικροελεγκτή με τις εντολές οι οποίες υλοποιούν τον αρχικό μας κώδικα. Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας που περιγράφηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Διαπλατφορμική ανάπτυξη.

3.3.7 Λειτουργία Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM)

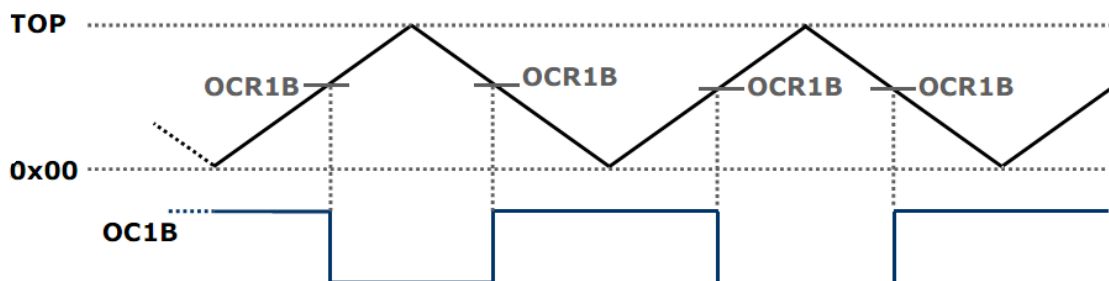
Για την δημιουργία τεχνητών διακοπών στην λειτουργία λαμπτήρα εκκένωσης υψηλής έντασης χρειάζεται να δημιουργηθούν κατάλληλοι παλμοί για την έναυση των στοιχείων στο κύκλωμα ισχύος. Η διαδικασία της παραγωγής σημάτων Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation) δίνει την δυνατότητα δημιουργίας περιοδικής μορφής παλμοσειράς που είναι ιδιαίτερα σημαντική για την υλοποίηση της εφαρμογής. Η υπολογιστική επιβάρυνση της CPU για την διαχείριση των παραγόμενων σημάτων PWM είναι ελάχιστη. Οι βασικές παράμετροι που προσδιορίζουν ένα τέτοιο σήμα είναι η συχνότητα της κυματομορφής $F_{pwm}=1/T_{pwm}$ και ο λόγος κατάτμησης (*duty cycle*) του PWM σήματος, το οποίο υπολογίζεται ως T_{on}/T_{pwm} και δίνεται σε ποσοστιαίες μονάδες.



Εικόνα 6. Παραγωγή σήματος PWM.

Η διαδικασία παραγωγής κυματομορφής PWM γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο. Παράγεται αρχικά μία τριγωνική κυματομορφή η οποία έχει δύο ανώτατα όρια τιμών που είναι το κάτω όριο (0x00) και το άνω όριο (TOP). Όταν η μέτρηση από τον χρονιστή φτάσει αυτές τις τιμές τότε στην έξοδο αλλάζει η κατάσταση της παραγόμενης παλμοσειράς ενεργοποιώντας το σχετικό *interrupt*. Στην περίπτωση που απαιτείται μία διαφορετική έξοδος, αλλάζοντας δηλαδή τον λόγο κατάτμησης, υπάρχει η δυνατότητα να ορίσουμε τιμές μέσω του (OCR1B), πριν τις ακραίες της τριγωνικής κυματομορφής, ώστε στην έξοδο να ληφθεί η επιθυμητή κυματομορφή. Υπάρχουν διαφορετικές λειτουργίες για την παραγωγή σημάτων PWM διαθέσιμες από τους χρονιστές όπως είναι:

- ✓ Κανονική λειτουργία (**N**ormal mode).
- ✓ Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών ορθής φάσης (**P**hase **C**orrect **P**WM mode).
- ✓ Μηδενισμού Ταύτισης Συγκριτή (**CTC**-Clear **T**imer on **C**ompare mode).
- ✓ Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών ταχείας λειτουργίας (**f**ast **P**WM mode).



Εικόνα 7. Παραγωγή παλμοσειράς με λειτουργία Phase Correct PWM mode.

3.3.8 Κώδικας

Για την ανάγκη οδήγησης της πύλης των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος (MOSFET) υλοποιήθηκε κατάλληλο λογισμικό. Οι απαιτήσεις του συστήματος είναι να οδηγούνται παλμοί έναυσης στις πύλες των δύο MOSFET, στο πρώτο MOSFET₁ κατά την θετική ημιπερίοδο και στο δεύτερο MOSFET₂ κατά την αρνητική ημιπερίοδο. Σε τέτοιες εφαρμογές κρίνεται απαραίτητο να γνωρίζουμε την διέλευση της τάσης του δικτύου από το μηδέν ώστε να επιλέγουμε σωστά την έναυση και σβέση των στοιχείων ισχύος σύμφωνα πάντα με την κυματομορφή. Έτσι, αναπτύχθηκε στον μικροελεγκτή πρόγραμμα αλλά και κύκλωμα για την διάγνωση διέλευσης του μηδενός (Zero Crossing Detector).

Το πρόγραμμα είναι το ακόλουθο:

```
#include <mega16.h>
unsigned char i=0;
```

```
interrupt [EXT_INT0] void ext_int0_isr(void)
{ i++;
  PORTB.0=~PORTB.0;}
```

```
void main (void)
{ DDRB=0xFF; PORTB=0xFF;
  DDRD=0x00; PORTD=0xFF;
  GIFR=0x40;
  GICR=0x40;
  MCUCR= 0x01;

  #asm ("sei")
  while(1);
}
```

Σε κάθε θετική ημιπερίοδο ο μικροελεγκτής επιστρέφει ένα παλμό που σηματοδοτείται με άσσο ενώ όταν βρίσκεται στην αρνητική ημιπερίοδο ο παλμός βρίσκεται στην κατάσταση του μηδενός. Με αυτό τον τρόπο γίνεται διάγνωση της διέλευσης του μηδενός εξυπηρετώντας την σωστή έναυση των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος.

Το κύριο πρόγραμμα είναι:

```
#include <mega16.h>
unsigned char i=0;
```

```
interrupt [TIM1_OVF] void timer1_ovf_isr(void)
{ i++;
  PORTB.0=~PORTB.0;}
```

```
void main (void)
{ DDRD=0xFF; PORTD=0xFF;
  TCNT1=0x0000;
  OCR1B=4098;
  TCCR1B=0x00 ;
  TIMSK=0x00 ;
  #asm ("sei")
```

```
while (1)
{ if (OCR1B==4998)
  {PORTD.3=1;
   TCCR1B=0x00;
   TCCR1B=0x01 ;
  if (OCR1B==4)
   {PORTD.3=0;
```

```
        TCCR1B=0x00;
        TCCR1B=0x01 ;    }
if (OCR1B==4997)
    {PORTD.3=1;
    TCCR1B=0x00;
    TCCR1B=0x01 ;}
if (OCR1B==10000)
    {PORTD.3=0;
    TCCR1B=0x00;
    TCCR1B=0x01 ;
    }
}
}
```

Όταν η τάση του δικτύου βρίσκεται στην θετική ημιπερίοδο και για χρόνο από 0° μέχρι 90° δεν παράγεται παλμός, για τις επόμενες 10° υπάρχει ενεργοποίηση του κατάλληλου interrupt και παράγεται παλμός ώστε να οδηγήσει το πρώτο στοιχείο. Από τις 100° μέχρι τις 360° όπου και ολοκληρώνεται η περίοδος δεν παράγεται άλλος παλμός.

Ένας δεύτερος παλμός εκτελεί την αντίστοιχη διαδικασία για την αρνητική όμως ημιπερίοδο όπου και οδηγεί τον δεύτερο ημιαγωγικό στοιχείο.

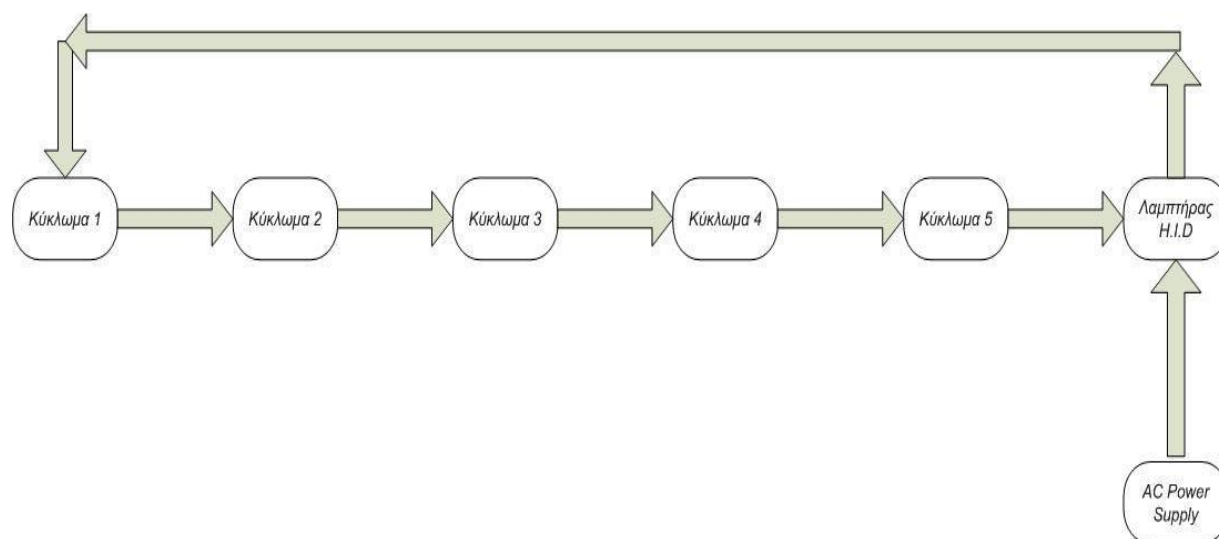
Κεφάλαιο 4

Κατασκευή Ηλεκτρονικού
Κυκλώματος Ισχύος
& Προσομοίωση με PSpICE

4.1 Προηγούμενη Κατασκευή

4.1.1 Γενικά

Το κύκλωμα αυτό κατασκευάστηκε με σκοπό να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ελεγχόμενων διαταραχών στην τάση λειτουργίας μίας λυχνίας αερίου. Συνοπτικά μπορούμε να παραστήσουμε το κύκλωμα όπως παρακάτω, Σχήμα 1:



Σχήμα 6. Διάγραμμα ροής προηγούμενης κατασκευής τεχνητών διακοπών λαμπτήρα εκκένωσης υψηλής έντασης

Το κύκλωμα ένα είναι ένας αποκωδικοποιητής του μηδενός (zero crossing detector) προκειμένου να συγχρονιστούν τα υπόλοιπα κυκλώματα με την αρχή κάθε ημιπεριόδου της τάσης τροφοδοσίας της λυχνίας.

Το κύκλωμα δύο είναι ένας μονοδονητής που διεγείρεται από τον παλμό εξόδου (trigger) του κυκλώματος ένα κι έχει σαν σκοπό την δημιουργία χρονικής καθυστέρησης από την αρχή της ημιπεριόδου μέχρι την εφαρμογή της διαταραχής.

Το κύκλωμα τρία είναι όμοιο λειτουργικά με το δύο κι έχει σαν σκοπό την παραγωγή και τον έλεγχο της διάρκειας της διαταραχής.

Το κύκλωμα πέντε είναι το κύκλωμα ισχύος που περιλαμβάνει την αρχή της διαταραχής στην λυχνία. Η τελική βαθμίδα έξι είναι η λυχνία που εξετάζεται.

4.2 Αναλυτική περιγραφή

Κύκλωμα 1

Το κύκλωμα ένα αρχίζει στον μετασχηματιστή ένα και τελειώνει στο τρανζίστορ δύο. Ο Μ/Σ 1 δέχεται την τάση τροφοδοσίας της λυχνίας Λ (αμέσως από το δευτερεύον του Μ/Σ 2

για αποφυγή παρασιτικών τάσεων) και κάνοντας απομόνωση την οδηγεί για πλήρη ανόρθωση στην γέφυρα ένα. Ο Μ/Σ 1 θα πρέπει να μην δημιουργεί αισθητή απόκλιση φάσης από τις 0° ή 180° μεταξύ πρωτεύοντος – δευτερεύοντος. Η απόκλιση αυτή διορθώνεται με τον πυκνωτή C_1 όταν είναι μικρή. Οι C_1 και C_2 απομονώνουν μέσω D_1 και D_2 τον παλμό trigger της θετικής ή αρνητικής ή και των δύο ημιπεριόδων προκειμένου να έχουμε αντίστοιχες διαταραχές. Αφού περιοριστεί ο παλμός από την R_1 D_1 διαφορίζεται από τα D_4 R_2 και διεγείρει το T_1 που ψαλιδίζει τα θετικά τμήματά του και αντιστρέφει ενισχυμένα τα αρνητικά. Το T_2 δίνει την απαιτούμενη από το IC1 τελική μορφή στον παλμό.

Κύκλωμα 2

Το κύκλωμα δύο αποτελείται από τον μονοδομητή IC1 που αφού δεχθεί τον παλμό trigger παράγει έναν τετραγωνικό παλμό διάρκειας ίσης με την επιθυμητή καθυστέρηση χρόνου. Η χρονική καθυστέρηση t_D μεταβάλλεται στο διάστημα $0 < t_D < 10\text{ms}$ για διαταραχή και στις δύο ημιπεριόδους και στο διάστημα $0 < t_D < 12\text{ms}$ για διαταραχή στην μία ημιπερίοδο. Ο χρόνος t_D καθορίζεται από την σχέση $t_D = 1,1 * P_1 * C_6$. Τα στοιχεία P_1 , C_6 πρέπει να είναι ακριβείας κι επιπλέον το P_1 να είναι πολύστροφο.

Κύκλωμα 3

Το κύκλωμα αυτό δέχεται τον διαφορισμένο από το C_7 R_{11} παλμό εξόδου του IC1 και δίδει στην έξοδό του τον παλμό που θα δημιουργήσει την διαταραχή. Ο διαιρέτης τάσης R_{10} , R_{11} δίνει στο trigger του IC2 την απαιτούμενη συνεχή συνιστώσα. Τα στοιχεία P_2 , C_{10} καθορίζουν την διάρκεια του παλμού διαταραχής t_D που παίρνει τιμές στο διάστημα $100 < t_D < 5$. Το P_2 πρέπει να είναι ακριβείας, πολύστροφο και ο C_{10} .

Ο ακροδέκτης 4 του IC2 δέχεται του zero crossing detector προκειμένου να μην μπορέσει να επιδράσει παλμός διαταραχής προηγούμενης περιόδου σε μία επόμενη, πρέπει δηλαδή να ισχύει $(t_d + t_D)_{\max} = 10\text{msec}$. Αυτό φυσικά ισχύει όταν έχουμε διαταραχή και στις δύο ημιπεριόδους. Ο πυκνωτής C_8 γειώνει τα παρασιτικά σήματα για να μην έχουμε ανεξέλεγκτη παραγωγή διαταραχών.

Κύκλωμα 4

Το κύκλωμα αυτό αποτελούμενο από τα T_3 , T_4 , T_5 , T_6 αναλαμβάνει την προενίσχυση του παλμού διαταραχής. Οι δίοδοι D_2 , D_3 αυξάνουν την περιοχή λειτουργίας του T_3 σε κατάσταση κόρου. Τα T_5 , T_6 άγουν συμπληρωματικά το ένα ως προς το άλλο εξασφαλίζοντας έναν παλμό με στάθμες $\pm 5\text{Volts}$ και ρεύμα περίπου $0,8\text{Amperes}$ προκειμένου να οδηγηθεί το τρανζίστορ ισχύος T_7 .

Κύκλωμα 5

Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από το T_7 και την γέφυρα Γ_2 , αναλαμβάνει δε να εφαρμόσει την διαταραχή στην λυχνία Λ. Το T_7 δέχεται μέσω της γέφυρας Γ_2 την πλήρως

ανορθωμένη τάση στα άκρα της L και οδηγείται στον κόρο κατά την διάρκεια της διαταραχής t_d προξενώντας μέσω της Γ_2 μία πτώση τάσης στα άκρα της L . Το βάθος της πτώσης τάσης καθορίζεται από τον συνδυασμό των ροοστατών P_3 και P_4 .

Οι δίοδοι D_6 , D_7 , D_8 αυξάνουν την περιοχή λειτουργίας του T_7 σε κατάσταση κόρου (μεγαλύτερο ρεύμα I_c). Ακόμα σε συνδυασμό με το L_1 μειώνουν τους χρόνους t_s και t_g του T_7 σε μεικτό (περίπτωσή μας) ή επαγωγικό φορτίο. Ο συνδυασμός C_{11} R_2 D_9 προστατεύει το T_7 από μεγάλες κλίσεις της τάσης V_{CE} κατά την διακοπή ή αποκατάσταση. Οι κλίσεις αυτές γίνονται εντονότερες από τις παρασιτικές ταλαντώσεις του κυκλώματος τροφοδοσίας της λυχνίας L .

Γενικότερα θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην ανεξαρτητοποίηση της συσκευής από την επίδραση των ταλαντώσεων αυτών τόσο κατά την λήψη του σήματος για την παραγωγή του trigger (χρήση ομοαξονικού καλωδίου) όσο και για την καταπόνηση του T_7 . Οι ταλαντώσεις αυτές όμως είναι φυσικό να δημιουργούνται από τις κατανεμημένες αυτεπαγωγές και χωρητικότητες του M/Σ 2, του P_4 και των καλωδιώσεων. Το πλάτος των ταλαντώσεων αυτών ($f=2-5\text{MHz}$) ελέγχεται με τον C_{12} και το κύκλωμα C_{11} R_{20} D_9 . Επειδή όμως η παρουσία των στοιχείων αυτών αυξάνει τους χρόνους t_r t_f κατά την διαταραχή θα πρέπει να επιλεγούν για να ικανοποιούν την βέλτιστη επιθυμητή λύση. Στις συνθήκες λειτουργίας της πειραματικής διάταξης (δεδομένα παρασιτικά L, C) του εργαστηρίου και για ρεύμα διαταραχής $5A$ μετρήθηκαν οι χρόνοι $t_r=50\text{nsec}$, $t_g=60\text{nsec}$

4.3 Ηλεκτρονικό Κύκλωμα Ισχύος

4.3.1 Εισαγωγή

Σ' αυτό κεφάλαιο αναλύεται η μελέτη για την κατασκευή του κυκλώματος ισχύος. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι λαμπτήρες *εκκένωσης υψηλής έντασης (H.I.D)* τροφοδοτούνται συνήθως με συχνότητες μεγαλύτερες από αυτή του δικτύου διανομής (50Hz).

Στην εργασία υλοποιείται λειτουργία με την συχνότητα του δικτύου. Επομένως δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθούν οποιεσδήποτε μετατροπές της τάσης εισόδου και της συχνότητας.

Σκοπός της κατασκευής είναι η δημιουργία τεχνητών διακοπών στην τάση λειτουργίας του λαμπτήρα. Για να επιτευχθεί αυτό, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν ημιαγωγικά στοιχεία πλήρους ελέγχου όπως είναι τα MOSFET και τα IGBT. Η επιλογή ανάμεσα στα δύο ημιαγωγικά στοιχεία έγκειται στην βασική διαφορά τους, η οποία είναι ο έλεγχός τους. Τα μεν MOSFET ελέγχονται από τάση και τα δε IGBT από ρεύμα. Για περισσότερη ευκολία οδηγούμαστε στην πρώτη επιλογή.

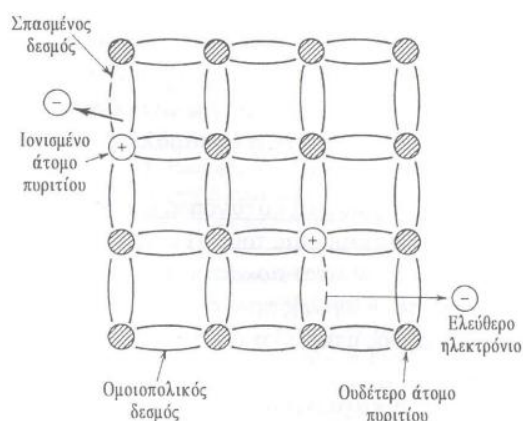
4.4 Ημι-αγωγικά Στοιχεία Ισχύος

4.4.1 Γενικά

Ένα υλικό που έχει πυκνότητα ελεύθερων φορέων μεταξύ της πυκνότητας ενός μονωτή ($10^{-15} \text{ mho-cm}^{-1}$) και της πυκνότητας ενός μετάλλου ($10^8\text{-}10^9 \text{ cm}^{-3}$) ονομάζεται *ημιαγωγός*. Εξαιτίας των διαφορετικών απαιτήσεων σε κάθε εφαρμογή μεταξύ των απωλειών στην κατάσταση αγωγιμότητας και των ταχυτήτων μετάβασης έχουν αναπτυχθεί διάφορα είδη τέτοιων στοιχείων.

Στα μέταλλα ή στους μονωτές η πυκνότητα των ελεύθερων φορέων είναι χαρακτηριστική αμετάβλητη σταθερά. Στους ημιαγωγούς μπορεί να μεταβληθεί είτε με την εισαγωγή προσμίξεων είτε με την εφαρμογή ηλεκτρικών πεδίων σε κατάλληλες ημιαγωγικές δομές. Η ικανότητα αυτή κάνει τους ημιαγωγούς μοναδικά και χρήσιμα υλικά για ηλεκτρικές εφαρμογές.

Ένας μονοκρυσταλλός ημιαγωγός αποτελείται από ένα πλέγμα ατόμων. Τα άτομα συνδέονται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς.

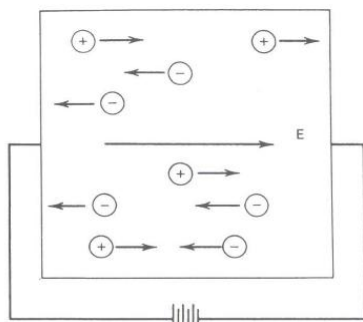


Εικόνα 7. Θερμικός ιονισμός και δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων σε πλέγμα πυριτίου.

Σε θερμοκρασίες πάνω από το απόλυτο μηδέν μερικοί από τους δεσμούς αυτούς διασπώνται εξαιτίας της θερμικής κίνησης. Η διεργασία αυτή ονομάζεται **θερμικός ιονισμός** και δημιουργεί ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο ενώ αφήνει πίσω της ένα σταθερό θετικό φορτίο. Σε μεταγενέστερες χρονικές στιγμές κάποιο άλλο ηλεκτρόνιο έλκεται από το θετικό φορτίο και παγιδεύεται στον δεσμό που διασπάστηκε, ωστόσο το άτομο απ' όπου προήλθε το ηλεκτρόνιο έχει αποκτήσει θετικό φορτίο με αποτέλεσμα την κίνηση αυτού του θετικού φορτίου το οποίο ονομάζεται οπή. Η πυκνότητα n_i σε θερμική ισορροπία των ηλεκτρονίων και των οπών σε καθαρό ημιαγωγό είναι:

$$n_i^2 = C \exp \frac{-qEg}{kT} \quad (4.1)$$

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα η πυκνότητα των φορέων μπορεί να μεταβληθεί με κατάλληλες προσμίξεις. Έτσι όταν ένας ημιαγωγός έχει περισσότερες ελεύθερες οπές που ονομάζονται φορείς πλειονότητας από ελεύθερα ηλεκτρόνια που ονομάζονται φορείς μειονότητας τότε ο ημιαγωγός είναι τύπου $-p$ με προσμίξεις δέκτη. Αντίθετα, όταν ένας ημιαγωγός έχει περισσότερα ηλεκτρόνια που ονομάζονται φορείς πλειονότητας και λιγότερες οπές που ονομάζονται φορείς μειονότητας τότε ο ημιαγωγός είναι τύπου $-n$ με προσμίξεις δέκτη.



Εικόνα 8. Μετατόπιση e^- και οπών υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου.

ηλεκτρονίων.

Η παρουσία προσμίξεων σε ημιαγωγό δεν επηρεάζει την ταχύτητα διάσπασης των ομοιοπολικών δεσμών λόγω του θερμικού ιονισμού, επομένως πρέπει να ισχύει ο νόμος δράσης των μαζών.

Ο μεγάλος χρόνος ζωής ελαχιστοποιεί τις απώλειες στην κατάσταση της αγωγιμότητας αλλά επιβραδύνει τους χρόνους μετάβασης. Ο κατασκευαστής χρησιμοποιεί δύο μεθόδους για τον έλεγχο του χρόνου ζωής και είναι α) η χρήση προσμίξεων χρυσού και β) η έκθεση σε ακτινοβολία

4.4.2 Μετατόπιση και Διάχυση

Η ροή ρεύματος σε ημιαγωγό είναι το άθροισμα της ολικής ροής των οπών κατά την φορά του ρεύματος και της ολικής ροής των ηλεκτρονίων κατά την αντίθετη φορά. Οι ελεύθεροι φορείς μετακινούνται με δύο μηχανισμούς, την μετατόπιση και την διάχυση.

Όταν σ' έναν ημιαγωγό εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο, οι ελεύθερες οπές επιταχύνονται από το πεδίο που αποκτούν μία συνιστώσα ταχύτητας παράλληλη προς το πεδίο, ενώ τα ηλεκτρόνια αποκτούν μία συνιστώσα ταχύτητας αντιπαράλληλη προς το πεδίο. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται **ταχύτητα μετατόπισης** και είναι ανάλογη προς την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Η συνιστώσα μετατόπισης του ρεύματος δίνεται από την σχέση:

$$J_{drift} = q\mu_n n E + q\mu_p p E \quad (4.2)$$

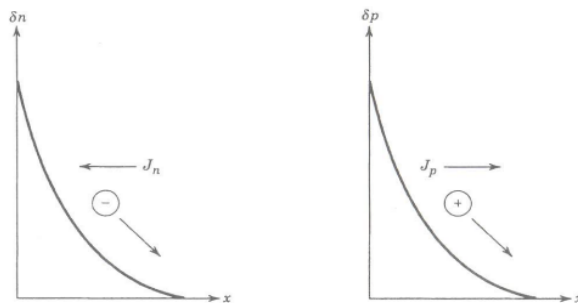
Όπου E είναι το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο, μ_n είναι η ευκινησία των ηλεκτρονίων, μ_p είναι η ευκινησία των οπών και q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου.

Αν υπάρχει μεταβολή της πυκνότητας των ελεύθερων φορέων στο χώρο, τότε θα υπάρξει κίνηση φορέων από περιοχές με μεγαλύτερη συγκέντρωση σε περιοχές με μικρότερη συγκέντρωση. Η κίνηση αυτή ονομάζεται **διάχυση** και οφείλεται στην τυχαία θερμική ταχύτητα που έχει κάθε ελεύθερος φορέας. Η κίνηση των φορέων με διάχυση δημιουργεί μια συνιστώσα πυκνότητας ρεύματος η οποία δίνεται από την σχέση:

$$J_{drift} = J_n + J_p = qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (4.3)$$

Όπου D_n είναι η σταθερά διάχυσης ηλεκτρονίων και D_p είναι η σταθερά διάχυσης των οπών.

Όταν μεταξύ των περιοχών p και n εφαρμοστεί εξωτερική τάση αυτή πέφτει στα άκρα της περιοχής των φορτίων χώρου εξαιτίας της μεγάλης αντίστασης του στρώματος εκκένωσης σε σχέση με το υπόλοιπο υλικό.



Εικόνα 9. Κίνηση φορέων και ροή ρεύματος με διάχυση.

Αν το δυναμικό που εφαρμόζεται είναι θετικό στην πλευρά p , τότε είναι αντίθετο προς το δυναμικό της επαφής και ελαττώνει το ύψος φράγματος δυναμικού που υπάρχει ανάμεσα στις δύο επαφές, οπότε η επαφή έχει ορθή πόλωση. Αντίστοιχα, όταν η τάση που εφαρμόζεται κάνει θετικότερη την

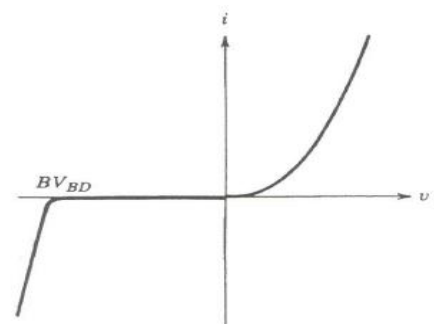
πλευρά n τότε η επαφή έχει ανάστροφη πόλωση και το ύψος του φράγματος δυναμικού αυξάνει.

4.4.3 Έλεγχος του Φορτίου Κατά την Λειτουργία Επαφής pn

Μία ανάστροφη πόλωση αυξάνει το φράγμα δυναμικού στην επαφή και το γεγονός αυτό προκαλεί ένα μικρό ρεύμα διαρροής, που ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα κορεσμού I_s . Το ρεύμα είναι ανεξάρτητο από το πλάτος της ανάστροφης τάσης και ενισχύεται από τα ηλεκτρόνια και τις οπές που δημιουργούνται θερμικά στο στρώμα φορτίων χώρου.

4.4.4 Διάσπαση Χιονοστιβάδας

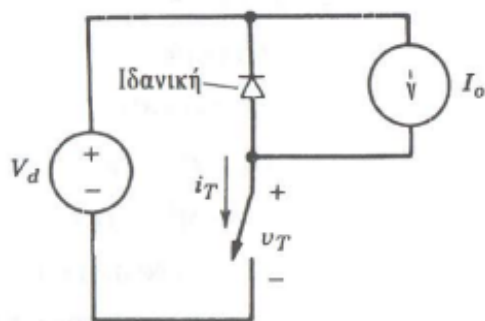
Η γρήγορη αύξηση του ρεύματος στην τάση ανάστροφης πόλωσης BV_{BD} που φαίνεται στην Εικόνα 5, ονομάζεται *ανάστροφη διάσπαση* ή *διάσπαση χιονοστιβάδας*. Η λειτουργία της διόδου σε κατάσταση διάσπασης πρέπει να αποφεύγεται, επειδή το γινόμενο μιας μεγάλης τάσης επί ένα μεγάλο ρεύμα οδηγεί σε υπερβολική κατανάλωση ισχύος, η οποία καταστρέφει το στοιχείο γρήγορα αν δεν ελαττωθεί. Η διάσπαση προκαλείται από ένα φυσικό φαινόμενο που ονομάζεται *ιονισμός πρόσκρουσης*.



Εικόνα 10. Χαρακτηριστική $i-v$ επαφής pn

4.5 Επιθυμητά Χαρακτηριστικά των Ελεγχόμενων Διακοπών

Αρκετά είδη ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος μπορούν να κλείνουν και να ανοίγουν με σήματα ελέγχου που εφαρμόζονται στον ακροδέκτη ελέγχου του στοιχείου και ονομάζονται πλήρως ελεγχόμενα. Προς διευκόλυνση παριστάνονται σαν ένας διακόπτης. Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός δεν ρέει καθόλου ρεύμα και όταν είναι κλειστός μπορεί να ρέει ρεύμα μόνο κατά την φορά του βέλους.



Εικόνα 11. Απλοποιημένο κύκλωμα μετάβασης.

Μία παράμετρος που πρέπει να εξεταστεί είναι η κατανάλωση ισχύος σε έναν ημιαγωγό. Για να καταστεί αυτό δυνατό, χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα που αποτελεί το μοντέλο. Η πηγή ρεύματος συνεχούς I_o προσεγγίζει το ρεύμα που στην πράξη θα έρρεε εξαιτίας της επαγωγικής αποθήκευσης ενέργειας. Η δίοδος θεωρείται ιδανική. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός όλο το ρεύμα διαρρέει τον διακόπτη και η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη. Όταν ο διακόπτης ανοίξει το ρεύμα περνάει από την δίοδο και στα άκρα του διακόπτη εφαρμόζεται μια τάση ίση προς την τάση εισόδου V_d . Η συχνότητα μετάβασης είναι $f_s = 1/T_s$ όπου T_s είναι η περίοδος μετάβασης. Κατά την μετάβαση έναυσης η αύξηση του ρεύματος αποτελείται από ένα σύντομο χρόνο καθυστέρησης (*delay time*) $t_{d(on)}$ και από τον χρόνο ανύψωσης του ρεύματος (*current rise time*) t_{ri} . Η δίοδος πολώνεται ανάστροφα μόνο όταν περάσει όλο το ρεύμα I_o από τον διακόπτη και η τάση να πέσει σε μία χαμηλή τιμή αγωγιμότητας (*on-state voltage*) V_{on} και με ένα χρόνο υποβιβασμού της τάσης (*voltage fall time*) t_{fv} . Η διάρκεια από την αποκοπή στην αγωγιμότητα είναι:

$$t_{c(on)} = t_{ri} + t_{fv} \quad (4.4)$$

Αντίστοιχα, η διάρκεια της μετάβασης από την αγωγιμότητα στην αποκοπή είναι:

$$t_{c(off)} = t_{rv} + t_{fi} \quad (4.5)$$

Η στιγμιαία κατανάλωση ισχύος $P_{(t)}$ δείχνει ότι υπάρχει μεγάλη στιγμιαία κατανάλωση ισχύος κατά την διάρκεια των μεταβάσεων έναυσης και σβέσης. Επειδή γίνονται f_s τέτοιες μεταβάσεις ανά δευτερόλεπτο, η μέση απώλεια ισχύος μετάβασης (*switching power loss*) P_s στον διακόπτη δίνεται προσεγγιστικά από τον τύπο:

$$P_s = \frac{1}{2} V_d I_o f_s (t_{c(on)} + t_{c(off)}) \quad (4.6)$$

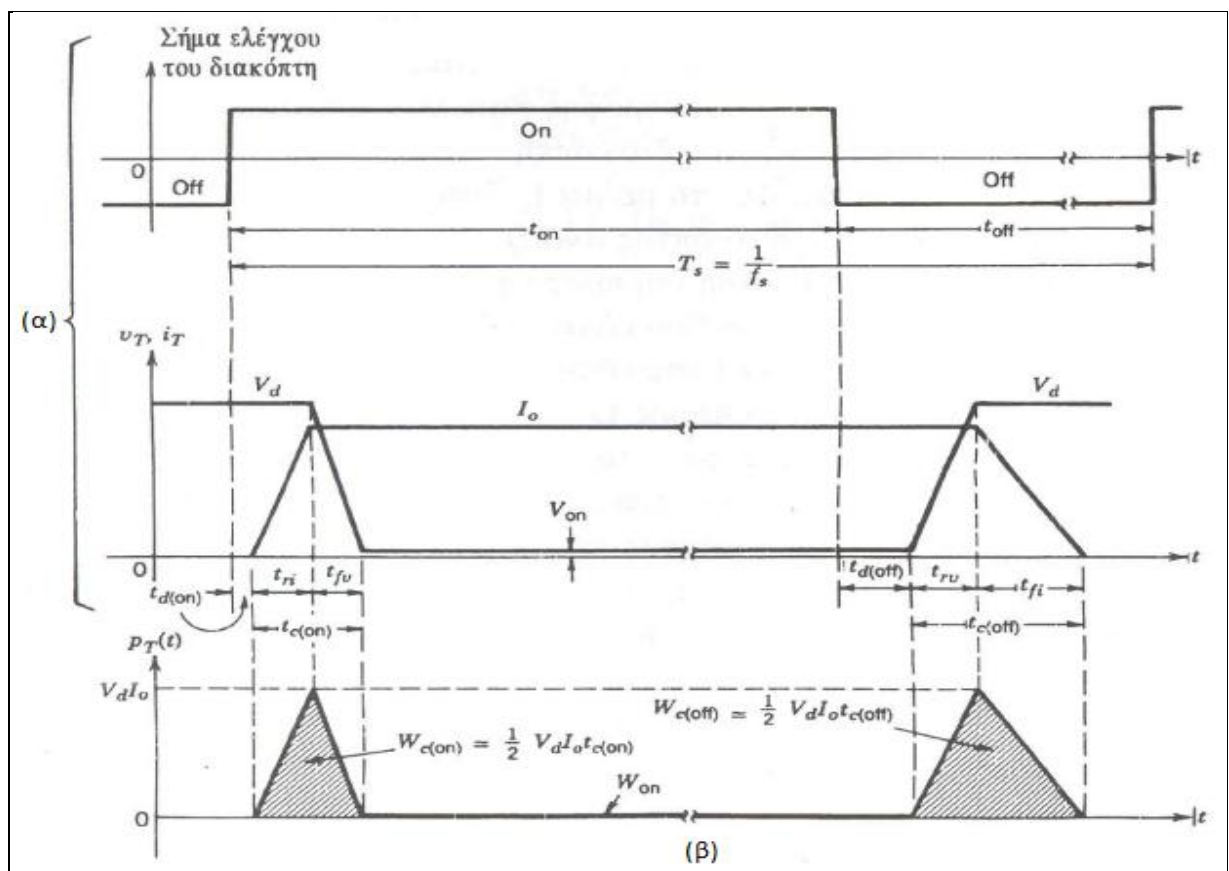
Αυτό είναι ένα σημαντικό αποτέλεσμα, διότι δείχνει ότι οι απώλειες ισχύος κατά την μετάβαση σ' ένα ημιαγωγικό στοιχείο μεταβάλλονται γραμμικά με την συχνότητα και τους χρόνους μετάβασης. Μια άλλη κύρια συνεισφορά του διακόπτη στις απώλειες ισχύος είναι

η μέση ισχύς που καταναλώνεται κατά την αγωγιμότητα P_{on} και δίνεται από τον παρακάτω τύπο που μεταβάλλεται ανάλογα με την τάση αγωγιμότητας V_{on} η οποία θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη:

$$P_{on} = \frac{t_{on}}{T_s} V_{on} I_o \quad (4.7)$$

Η ολική μέση απώλεια ισχύος P_T σ' ένα διακόπτη ισούται με το άθροισμα των P_s και P_{on} . Συνοπτικά τα επιθυμητά χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα:

1. Μικρό ρεύμα διαρροής στην κατάσταση αποκοπής.
2. Μικρή τάση αγωγιμότητας.
3. Μικροί χρόνοι έναυσης και σβέσης.
4. Μεγάλες τιμές ορθής και ανάστροφης τάσης αποκοπής.
5. Υψηλή ονομαστική τιμή ρεύματος αγωγιμότητας.
6. Αντίσταση αγωγιμότητας με θετικό θερμοκρασιακό συντελεστή.
7. Μικρή απαίτηση ισχύος ελέγχου για την μετάβαση του διακόπτη.
8. Δυνατότητα αντοχής της ονομαστικής τάσης και του ονομαστικού ρεύματος ταυτόχρονα κατά την μετάβαση.
9. Υψηλές ονομαστικές τιμές των dv/dt και di/dt .



Εικόνα 12. α) Κυματομορφές μετάβασης διακόπτη, β) Στιγμαία απώλεια ισχύος διακόπτη.

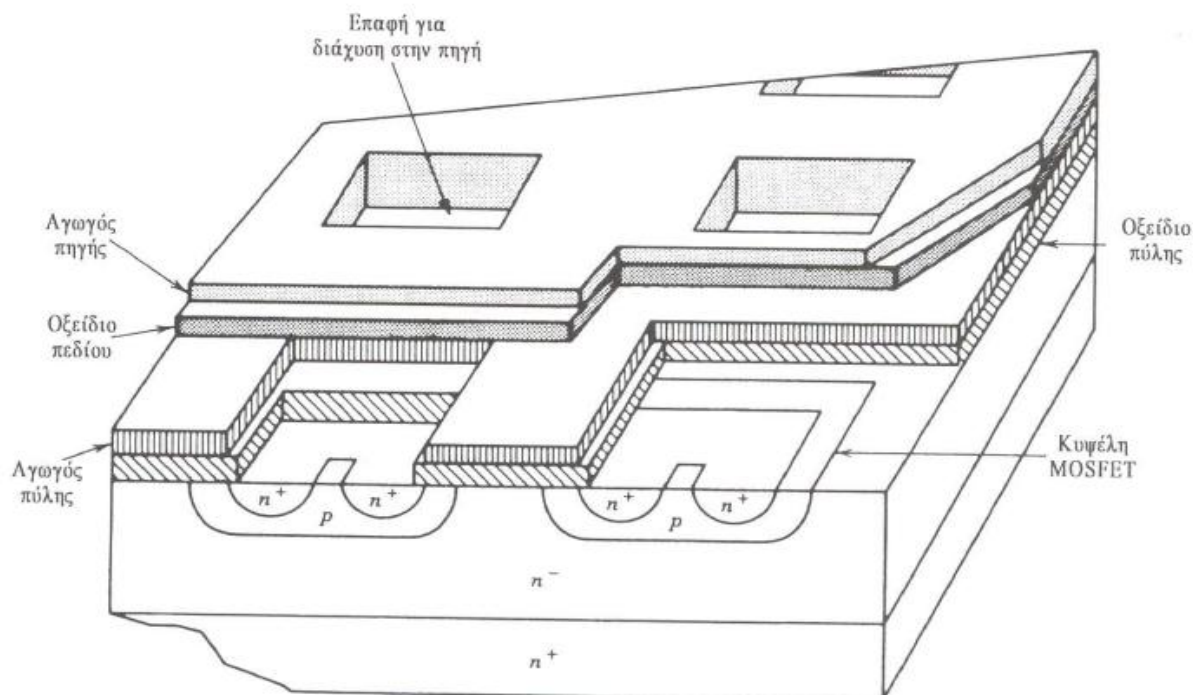
4.6 MOSFET Ισχύος

4.6.1 Γενικά

Το τρανζίστορ φαινομένου πεδίου με δομή μέταλλο-οξειδίο-ημιαγωγός (**Metal Oxide Semiconductor Effect Transistor- MOSFET**) έχει μεγάλη ικανότητα μεταφοράς ρεύματος και αποκοπής της τάσης στις καταστάσεις αγωγής και αποκοπής αντίστοιχα, το οποίο το χρήζει κατάλληλο για ηλεκτρονικές εφαρμογές ισχύος. Η χρήση του γίνεται από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που οι ταχύτητες μετάβασης πρέπει να είναι υψηλές. Στην συνέχεια αναφέρονται περιληπτικά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του στοιχείου αυτού.

4.6.2 Βασική Κατασκευή

Το MOSFET ισχύος έχει την κατακόρυφη δομή με τέσσερα στρώματα από προσμίξεις εναλλασσόμενου τύπου p και τύπου n για μια κυψέλη από τις πολλές παράλληλες κυψέλες που αποτελούν ένα πλήρες στοιχείο. Η δομή $n^+p\bar{n}^+$ ονομάζεται MOSFET καναλιού n λειτουργίας ενίσχυσης. Πραγματοποιείται και δομή με αντίθετη μορφή προσμίξεων καναλιού p.



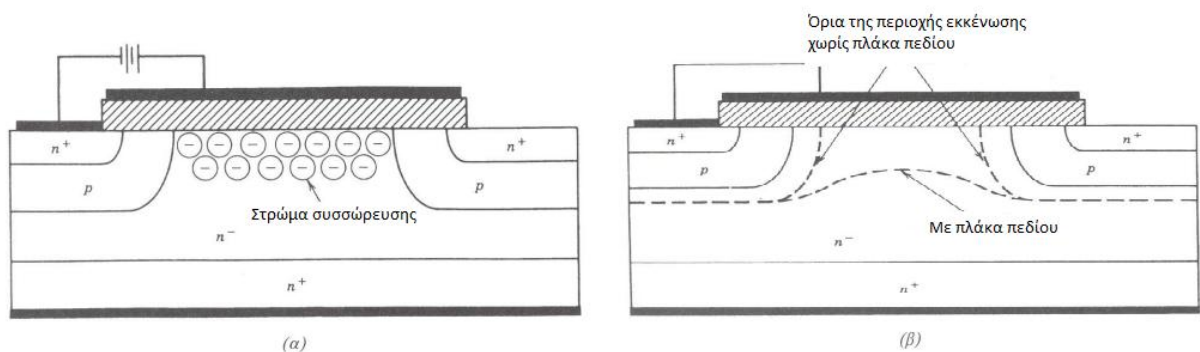
Εικόνα 13. Προοπτική άποψη ενός MOSFET ισχύος με κανάλι τύπου n.

Οι προσμίξεις στα δύο ακραία στρώματα ονομάζονται **πηγή** (*Source*) και **απαγωγός** ή **υποδοχή** (*Drain*) ενώ το μεσαίο στρώμα ονομάζεται **σώμα** ή **πύλη** (*Gate*) που είναι η περιοχή στην οποία δημιουργείται το κανάλι μεταξύ πηγής και απαγωγού.

Η εφαρμογή τάσης που πολώνει την πύλη θετικά σχετικά με την πηγή, μετατρέπει την επιφάνεια του πυριτίου που βρίσκεται κάτω από το οξείδιο στην περιοχή της πύλης σε στρώμα τύπου n , συνδέοντας την πηγή με τον απαγωγό επιτρέποντας την διέλευση μεγάλου ρεύματος. Τελειώνοντας αξίζει να επισημανθούν τρία κύρια σημεία για το MOSFET ισχύος.

Το πρώτο είναι ότι η πηγή κατασκευάζεται από πολλές μικρές περιοχές με μεγάλο πλάτος σε σχήμα πολυγώνου που επηρεάζει την αντίσταση αγωγιμότητας, οι οποίες συνδέονται παράλληλα και περιβάλλονται από την περιοχή πύλης. Ο σκοπός της αύξησης του λόγου πλάτους πύλης προς μήκος μεγιστοποιεί την απολαβή του στοιχείου.

Το δεύτερο σημείο αφορά την ύπαρξη ενός παρασιτικού BJT τύπου npr μεταξύ των επαφών πηγής και απαγωγού, όπου η περιοχή σώματος λειτουργεί ως βάση του παρασιτικού στοιχείου. Για την αποφυγή λειτουργίας του τρανζίστορ βραχυκυκλώνεται η περιοχή σώματος με την περιοχή πηγής με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας παρασιτικής διόδου μεταξύ απαγωγού και πηγής του MOSFET. Αυτή η διάδος χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μετατροπών μισή ή πλήρους γέφυρας.



Εικόνα 14. α) Δημιουργία στρώματος συσσώρευσης στην αγωγή, β) λειτουργία ως πλάκα πεδίου στην αποκοπή.

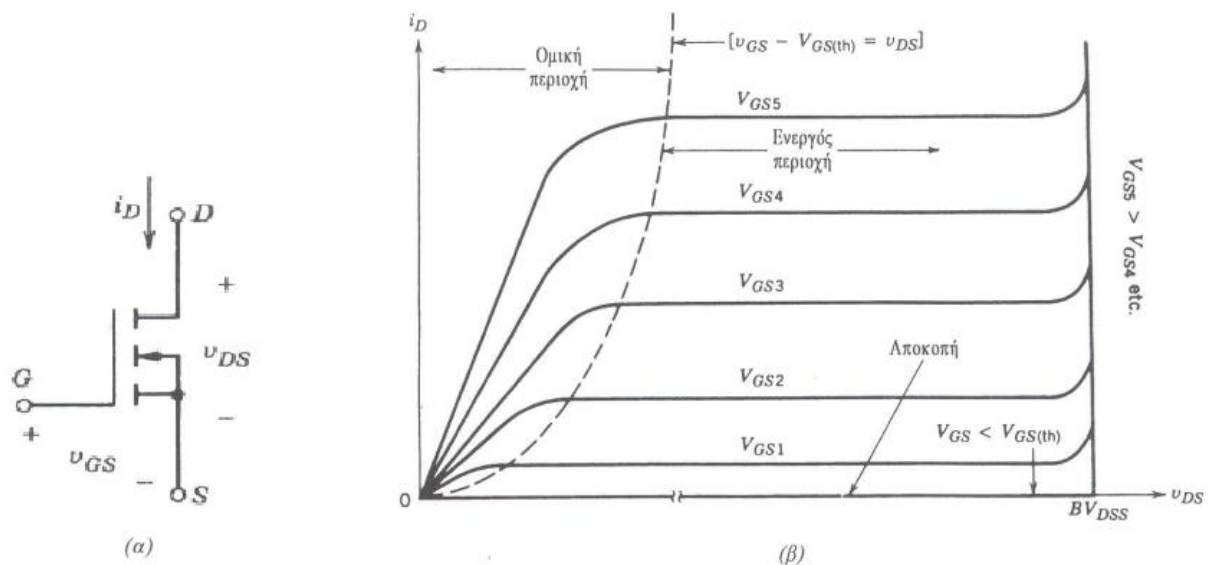
Το τρίτο σημείο είναι ότι υπάρχει η επικάλυψη της επιμετάλλωσης της πύλης κατά μήκος της περιοχής μετατόπισης για δύο σκοπούς:

- Τείνει να ενισχύει την αγωγιμότητα της περιοχής μετατόπισης στην διαχωριστική επιφάνεια $n^- - SiO_2$ με σχηματισμό στρώματος συσσώρευσης συνεισφέροντας στην ελαχιστοποίηση της αντίστασης αγωγιμότητας.
- Όταν το στοιχείο βρίσκεται εκτός λειτουργίας, η επιμετάλλωση λειτουργεί σαν πλάκα πεδίου η οποία δεν επιτρέπει στην επαφή απαγωγού-πύλης να γίνει πολύ μικρή διότι αυτό θα ελάττωνε την τάση διάσπασης του στοιχείου.

4.6.3 Χαρακτηριστικές Καμπύλες I-V

Όπως αναφέρθηκε το MOSFET είναι ένα στοιχείο με τρεις ακροδέκτες στο οποίο η είσοδος (πύλη) ελέγχει την ροή του ρεύματος μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου (πηγή) και (απαγωγός). Στην Εικόνα 10 φαίνονται α) το κυκλωματικό σύμβολο και β) οι

χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος απαγωγού συναρτήσει της τάσης απαγωγού-πηγής με παράμετρο την τάση πύλης-απαγωγού σε MOSFET με κανάλι τύπου n.



Εικόνα 15. α) Κυκλωματικό σύμβολο MOSFET n-channel, β) Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης σε MOSFET n-channel.

Το στοιχείο βρίσκεται σε αποκοπή όταν η τάση πύλης-πηγής είναι μικρότερη από την τάση κατωφλίου $V_{GS(th)}$. Επομένως είναι ανοιχτοκύκλωμα και διακόπτει την τάση τροφοδοσίας που εφαρμόζεται στο κύκλωμα. Άρα, η τάση διάσπασης απαγωγού-πηγής BV_{DSS} πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την εφαρμοζόμενη τάση για την αποφυγή διάσπασης χιονοστιβάδας και κατά συνέπεια μεγάλης κατανάλωσης ισχύος.

Όταν το MOSFET οδηγείται από μεγάλη τάση πύλης-πηγής, οδηγείται στην ωμική περιοχή που η τάση απαγωγού-πηγής $V_{DS(on)}$ είναι μικρή. Στην ενεργό περιοχή το ρεύμα του απαγωγού είναι ανεξάρτητο από την τάση απαγωγού-πηγής και εξαρτάται μόνο από την τάση πύλης-πηγής. Προσεγγιστικά η απαγωγή ρεύματος στην ενεργό περιοχή δίνεται από την σχέση:

$$i_D = K(V_{GS} - V_{GS(th)})^2 \quad (4.8)$$

Όπου το K είναι μια σταθερά που εξαρτάται από το σχήμα του στοιχείου.

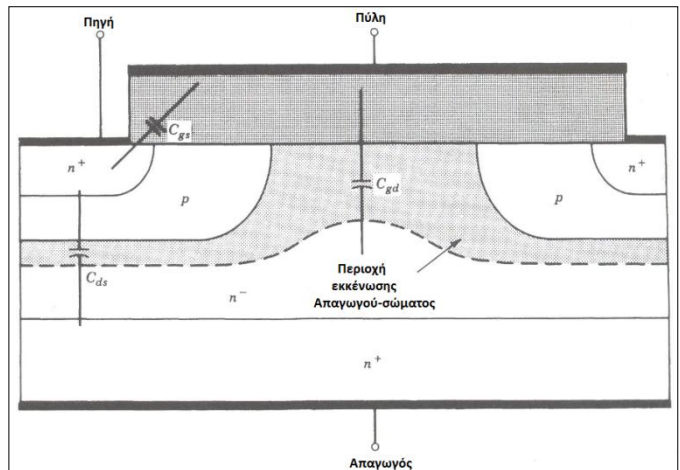
4.6.4 Διακοπτικά Χαρακτηριστικά

4.6.4.1 Κυκλωματικά Μοντέλα του MOSFET

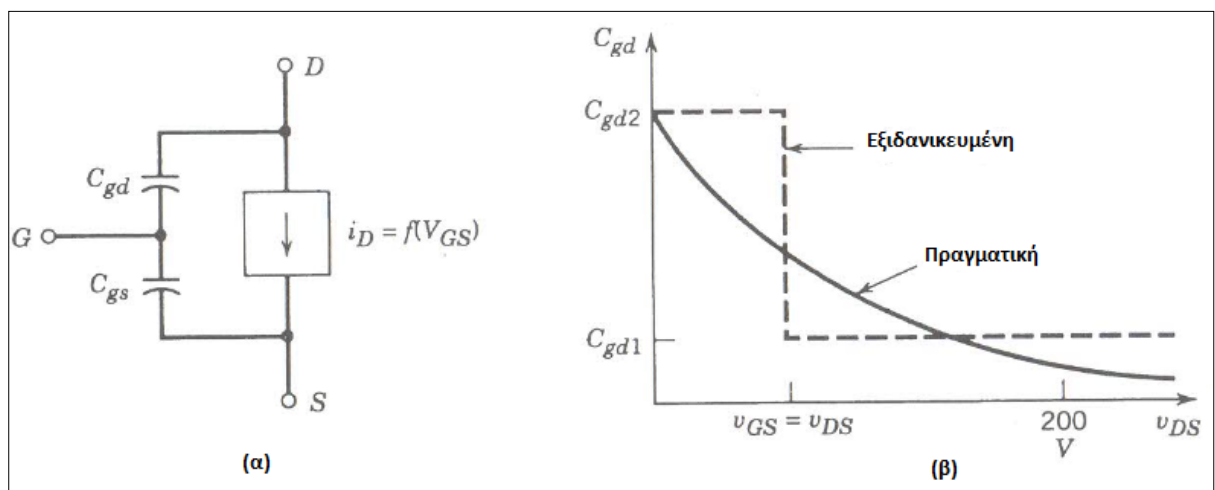
Τα MOSFET είναι από την φύση τους γρήγορα διότι δεν έχουν επιπλέον φορείς μειονότητας όπως άλλα στοιχεία, οι οποίοι φορείς θα έπρεπε να μετακινούνταν συνεχώς στις αλλαγές καταστάσεων αγωγής ή αποκοπής. Τα μόνα φορτία που πρέπει να μετακινηθούν είναι τα φορτία των παρασιτικών χωρητικότητων του στρώματος εκκένωσης, τα οποία φαίνονται στην Εικόνα 11. Οι χωρητικότητες αυτές αναπαρίστανται με ένα

ισοδύναμο κύκλωμα που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1 και ισχύει όταν το στοιχείο είναι σε κατάσταση αποκοπής ή στην ενεργό περιοχή.

Το ημιαγωγικό στοιχείο εισέρχεται στην ωμική περιοχή όταν η V_{DS} είναι ίση ή μικρότερη από την $V_{GS} - V_{GS(th)}$. Για την παράσταση των ωμικών απωλειών στην κατάσταση αγωγιμότητας, οι οποίες προέρχονται κυρίως από την περιοχή μετατόπισης του απαγωγού, στο ισοδύναμο κύκλωμα προστίθεται μια αντίσταση $r_{DS(on)}$. Οι χωρητικότητες C_{gs} και C_{gd} δεν είναι σταθερές, αλλά μεταβάλλονται με τις τάσεις στα άκρα τους, επειδή ένα τμήμα της χωρητικότητας προέρχεται από τα στρώματα εκκένωσης. Η μεταβολή της C_{gd} με την V_{DG} που φαίνεται στο Διάγραμμα 1 μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 10 μέχρι 100 φορές. Η μεταβολή της τιμής πραγματοποιείται όταν $V_{DS} = V_{GS}$ όπου το MOSFET εισέρχεται ή εξέρχεται από/στην ωμική περιοχή. Η χωρητικότητα πύλης-πηγής θεωρείται ότι είναι σταθερή.



Εικόνα 16. Στρώματα παρασιτικών χωρητικότητων.



Διάγραμμα 1. α) Ισοδύναμο κύκλωμα MOSFET για ανάλυση μεταβατικών φαινομένων και β) Μεταβολή χωρητικότητας πύλης-απαγωγού με την τάση απαγωγού-πηγής.

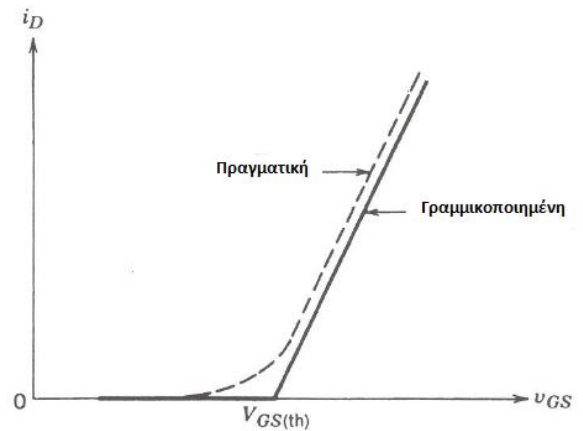
4.6.4.2 Κυματομορφές κατά την Μετάβαση

Για την κατανόηση της συμπεριφοράς του MOSFET, το οποίο τοποθετείται σ' έναν μετατροπέα dc-dc υποβιβασμού της τάσης θα εξεταστούν οι κυματομορφές κατά την κατάσταση αγωγιμότητας. Το επαγωγικό φορτίο παριστάνεται με πηγή συνεχούς ρεύματος I_o , το στοιχείο έχει αντικατασταθεί με το ισοδύναμο κύκλωμα του της ενεργού περιοχής. Η πύλη οδηγείται από μία ιδανική πηγή τάσης που συνδέεται εν σειρά μία αντίσταση πύλης. Κατά την διάρκεια του χρόνου καθυστέρησης της μετάβασης στην κατάσταση αγωγιμότητας $t_{d(on)}$, η τάση πύλης-πηγής V_{GS} ανεβαίνει από το μηδέν μέχρι την τάση κατωφλίου πύλης-πηγής $V_{GS(th)}$, εξαιτίας των ρευμάτων που ρέουν μέσα από τις χωρητικότητες C_{gs} και C_{gd} . Η ταχύτητα ανόδου της V_{GS} στην περιοχή αυτή είναι σχεδόν

γραμμική, αν και αποτελεί τμήμα της εκθετικής καμπύλης που φαίνεται με διακεκομμένη η οποία έχει σταθερά χρόνο.

$$\tau_1 = R_G(C_{gs} + C_{gd1}) \quad (4.9)$$

Στην συνεχόμενη αύξηση της τάσης πύλης-πηγής, το ρεύμα απαγωγού συνεχίζει να αυξάνει σύμφωνα με την γραμμικοποιημένη καμπύλη μεταφοράς της Εικόνας 12. Η τάση απαγωγή-πηγής παραμένει V_d για όσο χρόνο θα είναι $i_D < I_o$ και θα άγει η δίοδος ελεύθερης διέλευσης D_f . Από την στιγμή που το MOSFET άγει το ρεύμα για πλήρες φορτίο I_o , αλλά εξακολουθεί να βρίσκεται στην ενεργό περιοχή, η τάση πύλης-πηγής για μια στιγμή σταθεροποιείται στην V_{GS, I_o} η οποία είναι η τάση πύλης-πηγής από την καμπύλη μεταφοράς που χρειάζεται για να διατηρηθεί $i_D = I_o$. Όλο το ρεύμα στην πύλη i_G που δίνεται από την σχέση:



Εικόνα 17. Καμπύλη μεταφοράς.

$$i_G = \frac{V_{GG} - V_{GS, I_o}}{R_G} \quad (4.10)$$

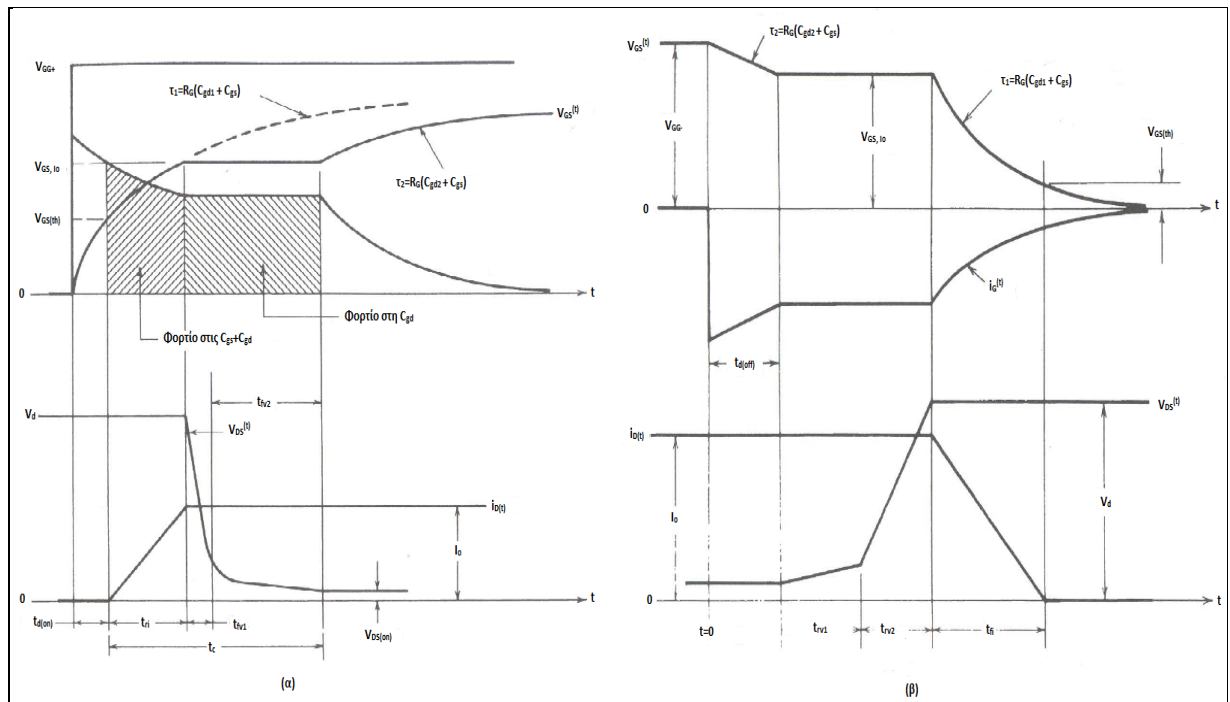
Διέρχεται μέσα από την C_{gd} . Αυτό αναγκάζει την τάση απαγωγού-πηγής να πέφτει με ταχύτητα:

$$\frac{dv_{DG}}{dt} = \frac{i_G}{C_{gd}} = \frac{V_{GG} - V_{GS, I_o}}{C_{gd} R_G} \quad (4.11)$$

Το πρώτο χρονικό διάστημα (t_{fv1}) ελάττωσης της V_{DS} αντιστοιχεί στην διάβαση μέσα από την ενεργό περιοχή όπου $C_{gd} = C_{gd1}$. Το δεύτερο χρονικό διάστημα αντιστοιχεί στην συμπλήρωση της μεταβατική κυματομορφής στην ωμική περιοχή όπου $C_{gd} = C_{gd2}$. Η τάση πύλης πύλης-πηγής αποσταθεροποιείται και συνεχίζει την εκθετική αύξηση από την στιγμή που η τάση απαγωγού-πηγής έχει την τιμή που αντιστοιχεί στην κατάσταση αγωγιμότητας $I_o r_{DS(on)}$.

Η αποκοπή του MOSFET γίνεται με την αντίστοιχα αντίθετη διαδοχή των γεγονότων κατά την μετάβαση στην κατάσταση αγωγιμότητας. Οι κυματομορφές παρουσιάζονται στην Εικόνα 13.

Οι πραγματικές τιμές των χρόνων μετάβασης ποικίλουν ανάλογα με το αν η τάση οδήγησης της πύλης τεθεί μηδέν ή γίνει αρνητική για την επιτάχυνση της μετάβασης. Τέλος, επειδή οι χωρητικότητες του στοιχείου δεν μεταβάλλονται με την θερμοκρασία της επαφής, οι απώλειες ισχύος κατά την μετάβαση του MOSFET είναι ανεξάρτητες από την θερμοκρασία της επαφής.



Εικόνα 18. α) Κυματομορφές τάσης-ρεύματος κατά την μετάβαση στην κατάσταση αγωγιμότητας και β) Κυματομορφές τάσης-ρεύματος κατά την μετάβαση στην κατάσταση αποκοπής.

4.6.5 Περιορισμοί Λειτουργίας

4.6.5.1 Τάση Διάσπασης

Τα MOSFET έχουν δύο μέγιστες τιμές τάσεις οι οποίες δεν πρέπει να ξεπεραστούν. Αυτές είναι η μέγιστη τάση πύλης-πηγής $V_{GS(max)}$ και η τάση διάσπασης μεταξύ απαγωγού-πηγής V_{DSS} . Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση πύλης-πηγής καθορίζεται από την απαίτηση ότι το οξειδίο πύλης δεν πρέπει να καταστραφεί από μεγάλα ηλεκτρικά πεδία που συνεπάγεται την μόνιμη βλάβη του στοιχείου.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση απαγωγού-πηγής είναι η μέγιστη τάση στην οποία μπορεί να αντέξει το MOSFET χωρίς διάσπαση χιονοστιβάδας της επαφής pn απαγωγού-σώματος.

4.6.5.2 Απώλειες στην Κατάσταση Αγωγής

Όταν το ημιαγωγικό στοιχείο μεταβαίνει από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγής και για όση χρονική διάρκεια παραμένει σ' αυτή την κατάσταση καταναλώνεται ισχύς στο MOSFET. Η στιγμιαία κατανάλωση δίνεται από την σχέση:

$$P_{on} = I_D^2 r_{DS(on)} \quad (4.12)$$

Η αντίσταση στην κατάσταση αγωγιμότητας έχει αρκετές συνιστώσες όπως οι οποίες συνεισφέρουν στην συνολική αντίσταση αγωγιμότητας. Η σημαντική πρόοδος που έχει επιτελεστεί στην ελάττωση των απωλειών αγωγιμότητας σε MOSFET χαμηλής τάσης έγκειται στην μείωση των διαδρομών ρεύματος σε περιοχές με μεγάλη αντίσταση. Όμως, σε ένα MOSFET μεγαλύτερης τάσης αποκοπής, οι απώλειες αγωγιμότητας είναι μεγάλες εξαιτίας της εξάρτησης της αντίστασης περιοχής μετατόπισης από την τάση διάσπασης. Η

αντίσταση αγωγιμότητας είναι ανάλογη της θερμοκρασίας επαφής, επομένως και η κατανάλωση κατά την αγωγή αυξάνει με την θερμοκρασία.

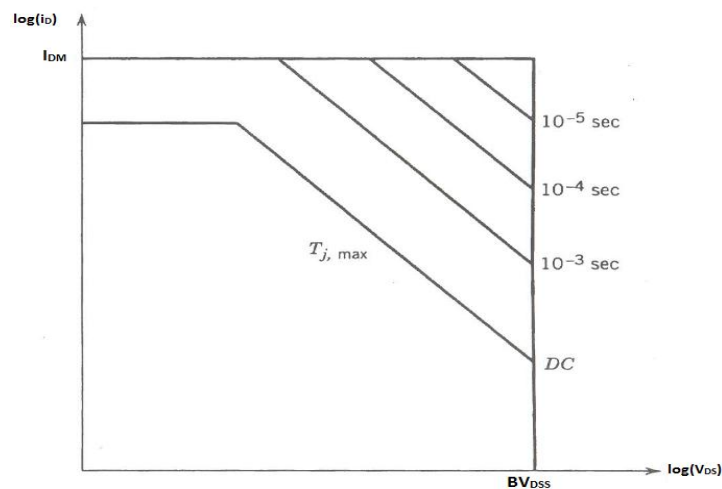
Δύο από τις συνιστώσες της αντίστασης που είναι η αντίσταση καναλιού και η αντίσταση στρώματος συσσώρευσης, επηρεάζονται από την πόλωση πύλης-πηγής. Όσο μεγαλύτερη η πόλωση τόσο ελαττώνονται οι αντιστάσεις. Το επιθυμητό είναι να γίνεται χρήση όσο το δυνατόν μεγαλύτερης τάσης οδήγησης της πύλης με συμμόρφωση στην τάση διάσπασης του οξειδίου πύλης.

4.6.5.3 Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας

Έχει πραγματοποιηθεί αναφορά για τους παράγοντες που καθορίζουν την περιοχή ασφαλούς λειτουργίας στις προηγούμενες ενότητες, όμως συνοπτικά έχουμε:

1. Το μέγιστο ρεύμα απαγωγού I_{Dmax} .
2. Η θερμοκρασία της εσωτερικής επαφής T_j .
3. Η τάση διάσπασης BV_{DSS} .

Δεν υπάρχει διαφορά στην περιοχή ασφαλούς λειτουργίας για ορθή και ανάστροφη πόλωση στο MOSFET όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (SOA).

4.7 Κύκλωμα Δημιουργίας Τεχνητών Διακοπών στην Λειτουργία Λαμπτήρων HID

4.7.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η κατασκευή της εργασίας που ως στόχο έχει την δημιουργία διακοπών στην τροφοδοσία ηλεκτρικών λαμπτήρων υψηλής πίεσης. Επίσης πραγματοποιείται περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος και προσομοίωση της όλης διαδικασίας.

4.7.2 Κατασκευή-Πλακέτα

Η πλακέτα ισχύος αποτελείται κυρίως από τα ημιαγωγικά στοιχεία MOSFET (STW9NK70Z), τον οδηγό της πύλης IR2213 και τα Optocoupler της TOSHIBA CNY17-2. Στην κατασκευή υπάρχουν υποδοχείς για την σύνδεση των στραγγαλιστικών πηνίων και για το φορτίο (HID Lamp) ώστε να κρίνεται ασφαλέστερη η πειραματική ηλεκτρονική διάταξη.

Εκτός από τα ηλεκτρονικά στοιχεία έχει συμπεριληφθεί ένα ζεύγος ψηκτρών από αλουμίνιο που χρειάζονται για την απαγωγή θερμότητας από τα MOSFET. Σε συνδυασμό με ανεμιστήρες επιτυγχάνεται καλύτερη ψύξη των στοιχείων αλλά και του συστήματος γενικότερα.

Προς αποφυγή προβλήματος επιρρεύματος έχει τοποθετηθεί στην πλακέτα μία γυάλινη ασφάλεια των 6A, τιμή χαμηλότερη από αυτή που αντέχουν τα πλήρως ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία.

4.7.4 Περιγραφή Λειτουργίας

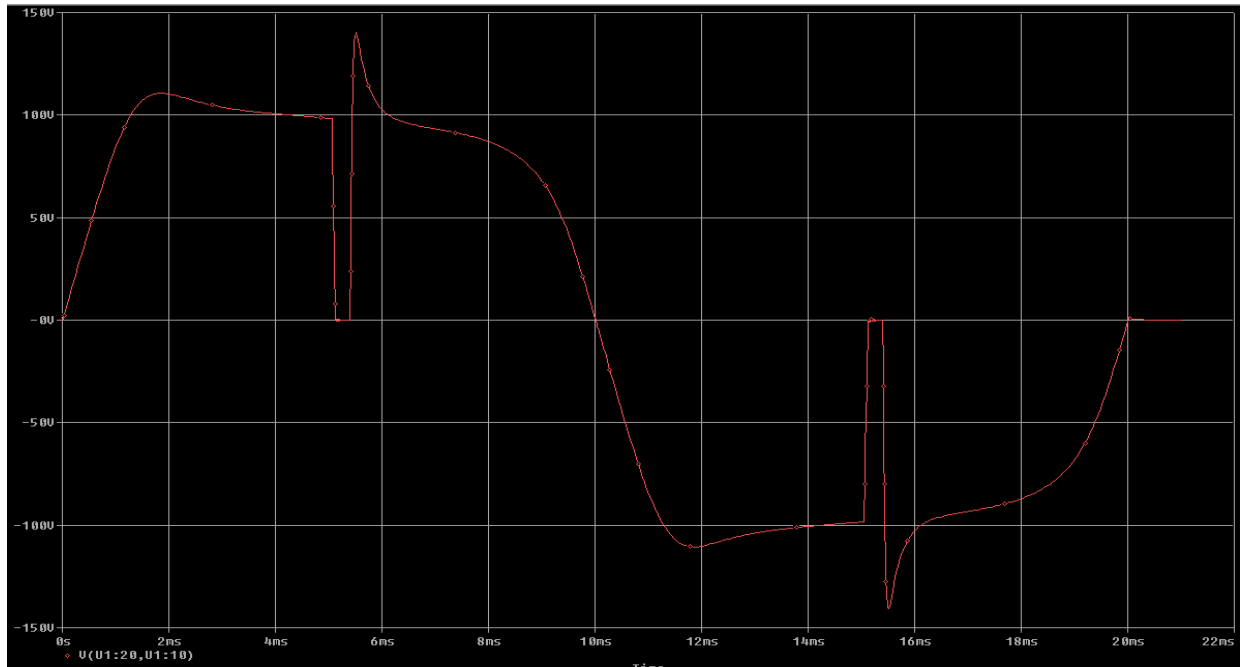
Το βασικότερο πλεονέκτημα στην λειτουργία της κατασκευής είναι η διάγνωση από τον μικροελεγκτή της διέλευσης τάσης του δικτύου από το μηδέν. Αρχικά τα βοηθητικά στοιχεία για την λειτουργία των MOSFET τροφοδοτούνται από το γραμμικό τροφοδοτικό. Όταν δοθεί κατάλληλος παλμός έναυσης και εφόσον το κύκλωμα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο τότε άγει το πρώτο στοιχείο MOSFET₁. Κατά την διάρκεια αγωγής του ο λαμπτήρας λειτουργεί κανονικά μέχρι να εισέλθει στην σταθερή κατάσταση λειτουργίας. Όταν ο παλμός διακόπτεται προκαλείται στην τάση τροφοδοσίας της λάμπας μία διακοπή με αποτέλεσμα στην θετική ημιπερίοδο να πραγματοποιείται μία διακοπή με χρόνο $t=60\text{nsec}$. Στο δεύτερο MOSFET γίνεται ροή ρεύματος μέσω της εσωτερικής διόδου zener του ημιαγωγικού στοιχείου. Κατά την αρνητική ημιπερίοδο άγει το δεύτερο MOSFET₂ και όταν πραγματοποιείται διακοπή στην λειτουργία του τότε και η λάμπα χάνει την διαφορά δυναμικού με αποτέλεσμα την απότομη διακοπή της σε χρόνο 60nsec . Αυτή η διαδικασία συνεχίζει να γίνεται περιοδικά και μέχρι ο χρήστης να μεταβάλλει τις εντολές των παλμών σε διαθέσιμες λειτουργίες.

Κεφάλαιο 5

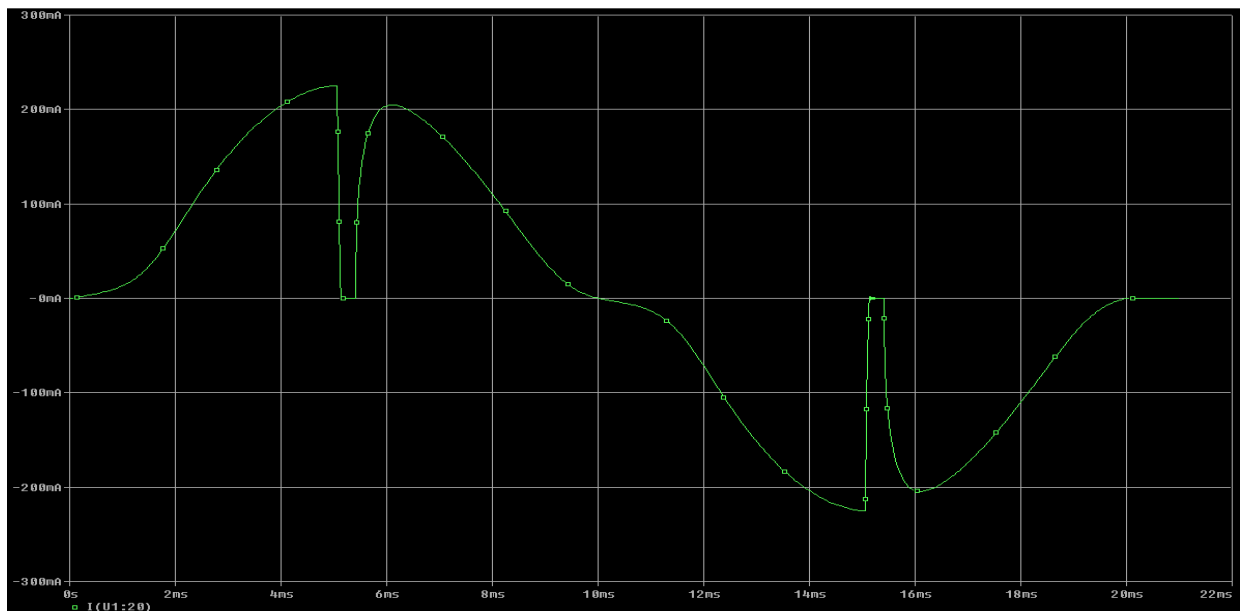
Αποτελέσματα & Στοιχεία

5.1 Παλμογραφήματα

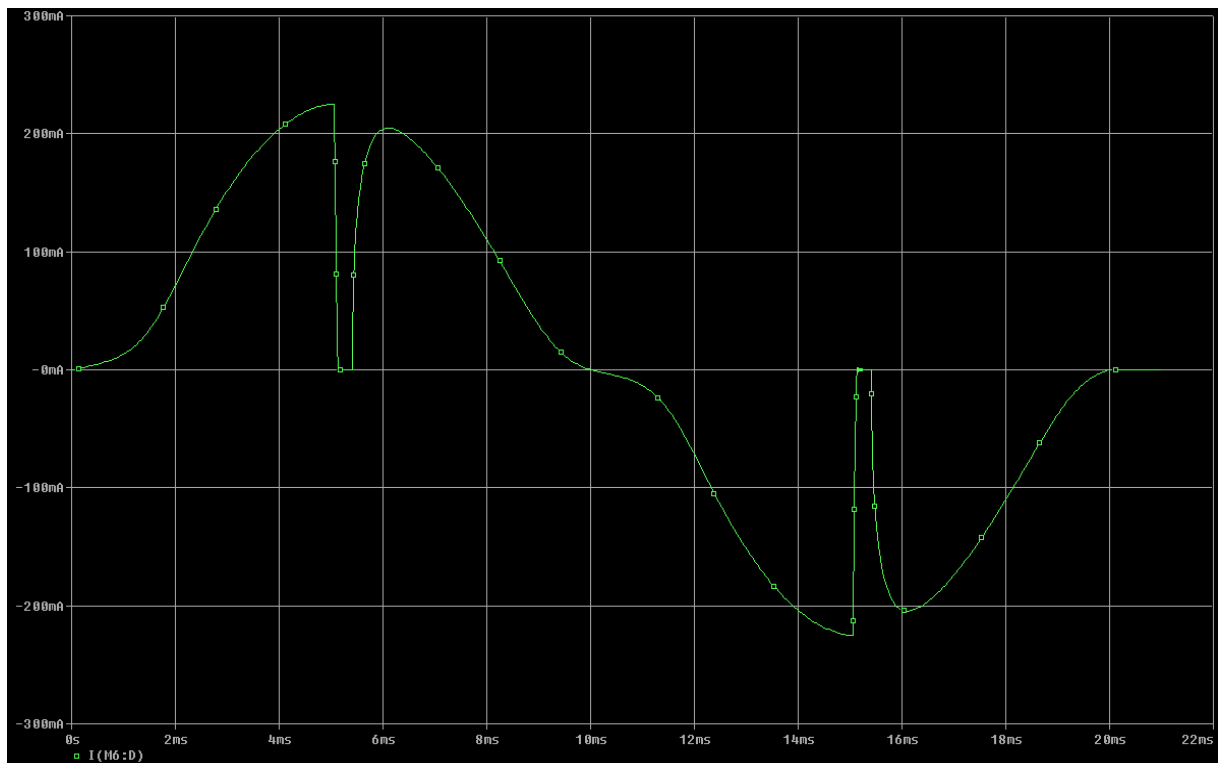
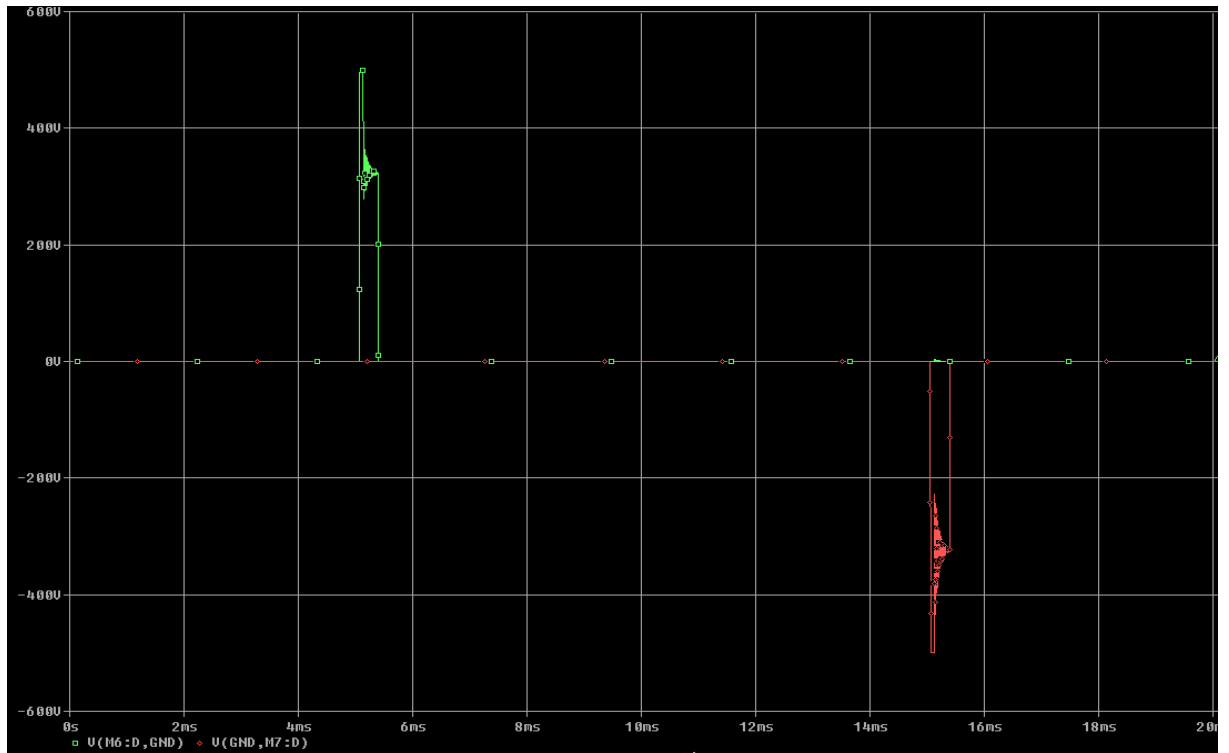
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η κυματομορφή τάσης της λάμπας HID.



Στην συνέχεια ακολουθεί το ρεύμα της λάμπας HID.



Στις επόμενες εικόνες απεικονίζονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος.



5.2 Υλικοτεχνικά Στοιχεία

Για την διάταξη της εργασίας δημιουργήθηκαν οι εξής κατασκευές:

- Ένα γραμμικό τροφοδοτικό με δύο εξόδους +5V και +15V.

Γραμμικό Τροφοδοτικό		
Υλικά	Τιμές μεγεθών	Τεμάχια
Μ/Σ1	230V/12V	1
Μ/Σ2	230V/9V	1
Γέφυρα ανόρθωσης		2
Κονέκτορες		4
Πυκνωτές		
Ηλεκτρολυτικοί	1000uF	2
Τανταλίου	1uF	2
Απλοί	400uF	2
Διακόπτης On/Off		1
Πλακέτα		1

- Ένα αναπτυξιακό κύκλωμα.

Αναπτυξιακό κύκλωμα		
Υλικά	Τιμές μεγεθών	Τεμάχια
Led	green	9
	yellow	1
LM 7805		1
Δίοδος	1N4001	1
C τύπου φακής	100nF	6
	10nF	1
Ηλεκτρολυτικοί	1000uF 25V	1
	0,1uF 16V	1
	0,1uF 25V	1
	25pF	2
Αντίσταση	470Ω/ 112W	10
	10ΚΩ/1W	1
Μπουτον		9
διακόπτης on/off		1

τζαμπεράκια		3
9-pin βύσμα για πλακέτα		1
Κρύσταλλος	8MHz	1
Max 232 + Βάση		1
Atmega16 + βάση		1
κλεμοσειρά		1
πλακέτα μονής όψης		1
καλωδιοταινία (2μ) 2 καλωδίων + βύσματα + αρσενικό		1
2/πλη πινοσειρά		1

- Ένα κύκλωμα ισχύος.

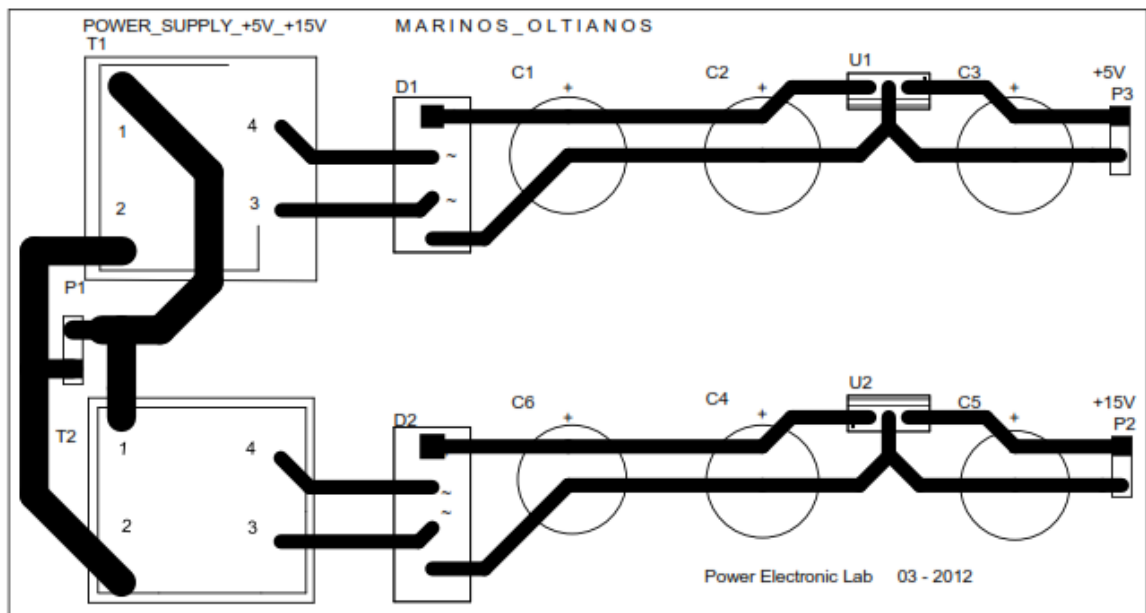
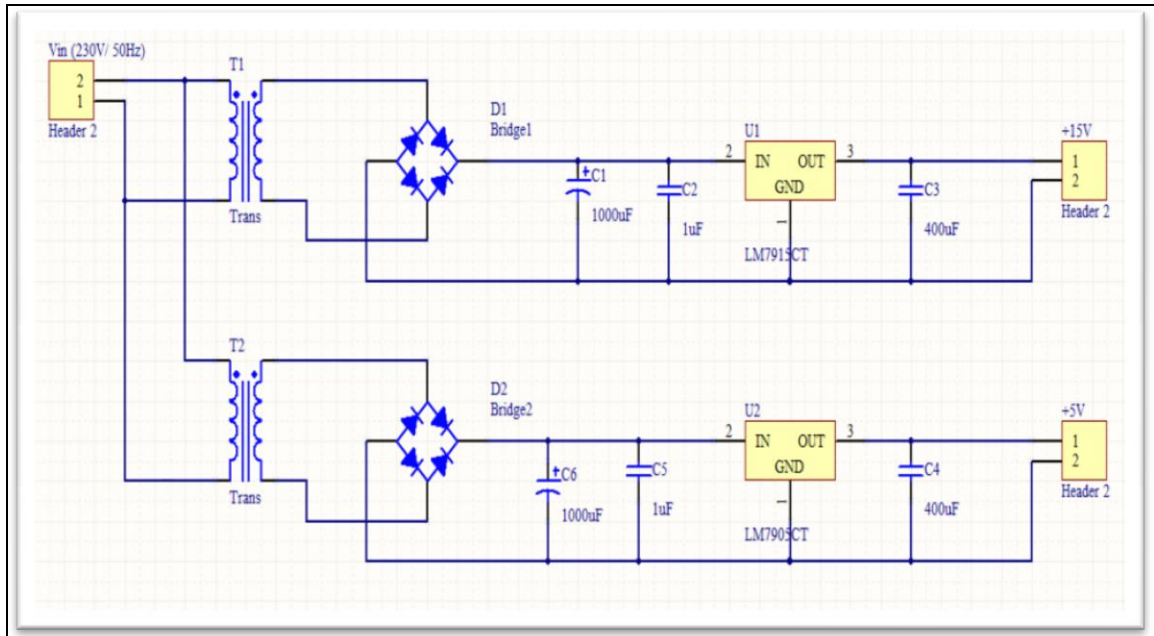
Κύκλωμα Ισχύος			
Υλικά	Τύπος	Τιμές μεγεθών	Τεμάχια
MOSFET		700V/ 7,5A	2
MOSFET Driver			1
Optocoupler			2
Ballast			
HID Lamps			
Κουτί διακλάδωσης			1
Ψύκτρες			2
Fans			2
θερμοαγωγίμη πάστα			1
Μίκα			2
Πυκνωτές			
Ηλεκτρολυτικοί		200uF	6
Αντίσταση		330Ω	2

Κεφάλαιο 6

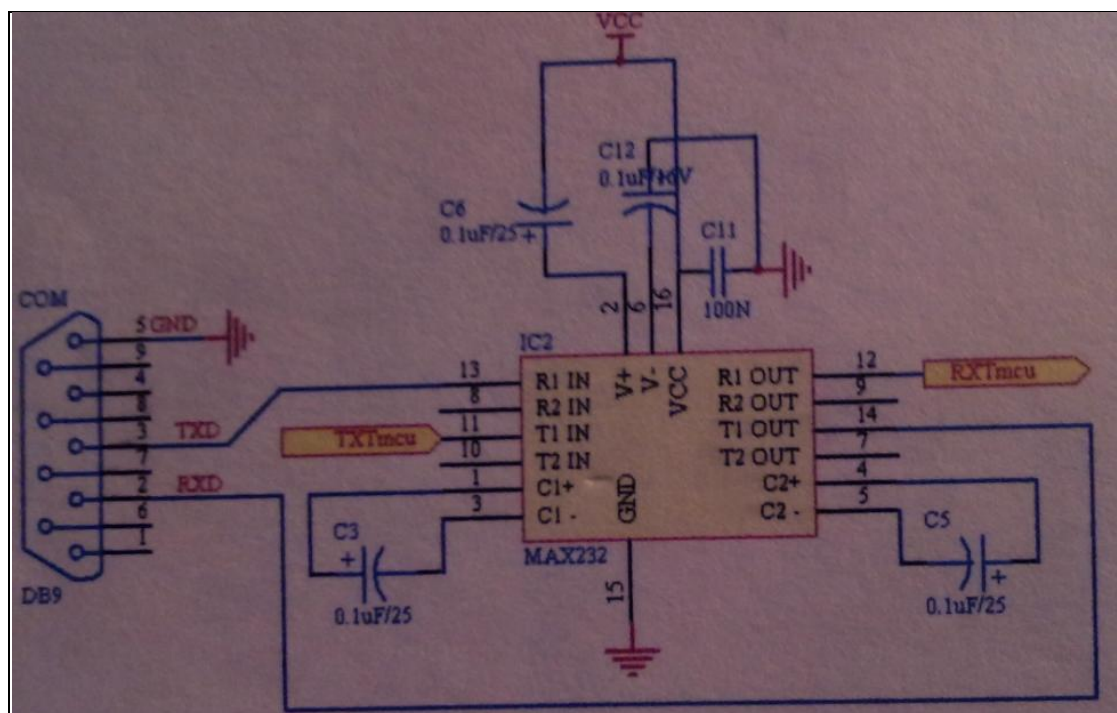
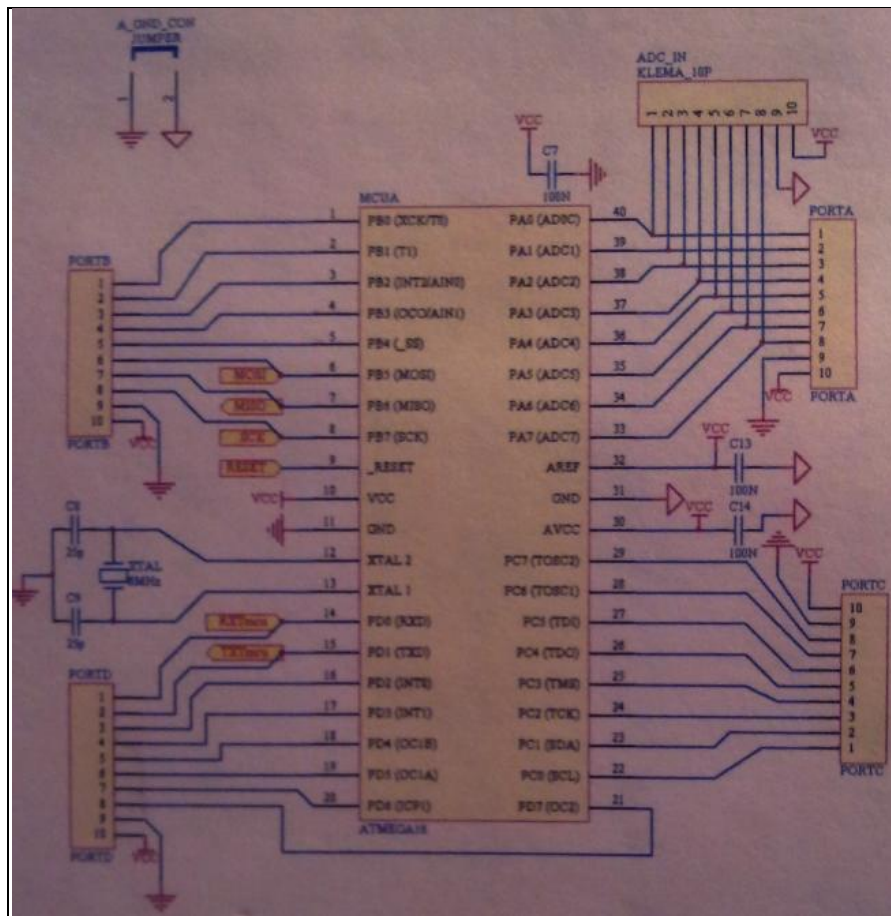
Παραρτήματα & Βιβλιογραφία

6.1 Παράρτημα Α

Για την κατασκευή του τροφοδοτικού παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα και το .pcb.

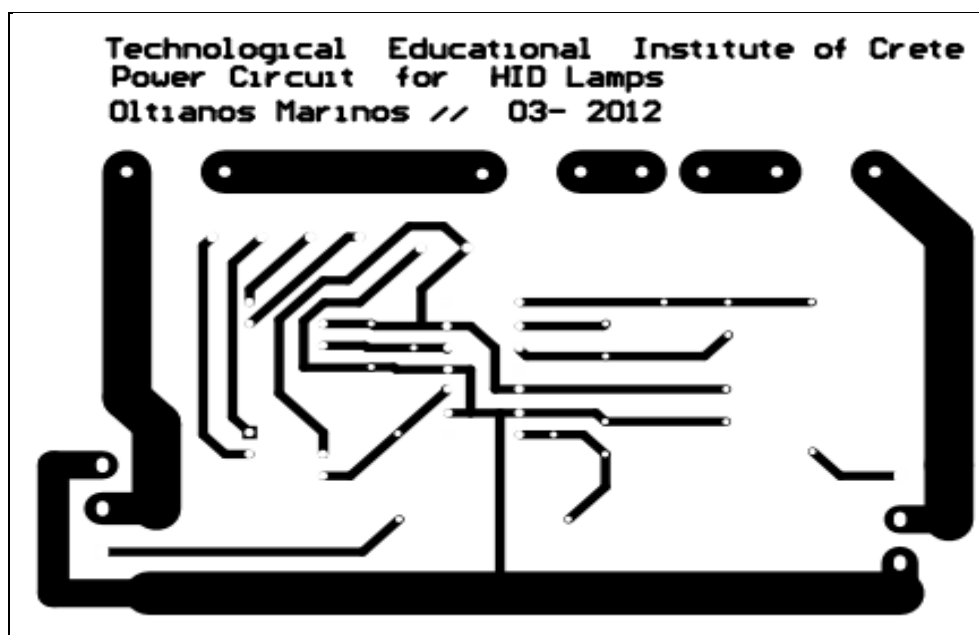
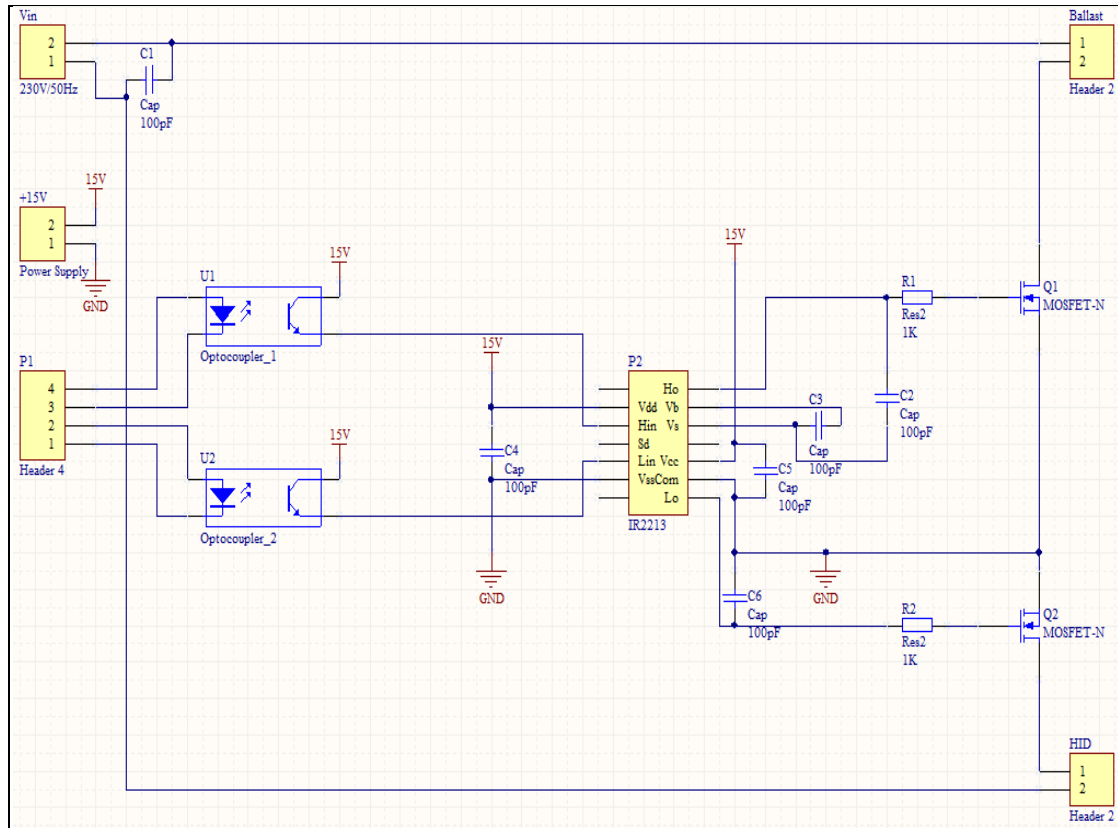


Για την κατασκευή του μικροελεγκτή παρουσιάζονται τα δεδομένα για τον AVRmega16 και το σχηματικό διάγραμμα.



6.2 Παράρτημα Β

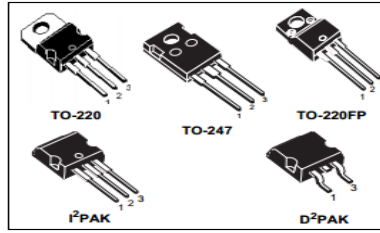
Για το κύκλωμα ισχύος παρατίθενται τα δεδομένα για τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν (**MOSFET**), ο οδηγός της πύλης (**MOSFET driver**), το optocoupler το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος καθώς και το .pcb.



ST **STP9NK70Z - STP9NK70ZFP**
STB9NK70Z - STB9NK70Z-1 - STW9NK70Z
N-CHANNEL 700V - 1Ω - 7.5A TO-220/FP/D²PAK/I²PAK/TO-247
Zener-Protected SuperMESH™ Power MOSFET

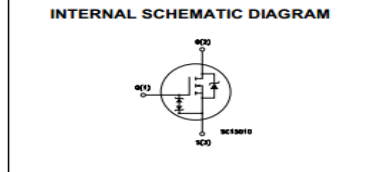
TYPE	V _{DS}	R _{DS(on)}	I _D	P _w
STP9NK70Z	700 V	< 1.2 Ω	7.5 A	115 W
STP9NK70ZFP	700 V	< 1.2 Ω	7.5 A	35 W
STB9NK70Z	700 V	< 1.2 Ω	7.5 A	115 W
STB9NK70Z-1	700 V	< 1.2 Ω	7.5 A	115 W
STW9NK70Z	700 V	< 1.2 Ω	7.5 A	156 W

- TYPICAL R_{DS(on)} = 1.0 Ω
- EXTREMELY HIGH dv/dt CAPABILITY
- IMPROVED ESD CAPABILITY
- 100% AVALANCHE RATED
- GATE CHARGE MINIMIZED
- VERY LOW INTRINSIC CAPACITANCES
- VERY GOOD MANUFACTURING REPEATABILITY



DESCRIPTION

The SuperMESH™ series is obtained through an extreme optimization of ST's well established strip-based PowerMESH™ layout. In addition to pushing on-resistance significantly down, special care is taken to ensure a very good dv/dt capability for the most demanding applications. Such series complements ST full range of high voltage MOSFETs including revolutionary MDmesh™ products.



APPLICATIONS

- HIGH CURRENT, HIGH SPEED SWITCHING
- IDEAL FOR OFF-LINE POWER SUPPLIES, ADAPTORS AND PFC

ORDERING INFORMATION

SALES TYPE	MARKING	PACKAGE	PACKAGING
STP9NK70Z	P9NK70Z	TO-220	TUBE
STP9NK70ZFP	P9NK70ZFP	TO-220FP	TUBE
STB9NK70Z	B9NK70Z	D ² PAK	TUBE (ONLY UNDER REQUEST)
STB9NK70ZT4	B9NK70Z	D ² PAK	TAPE & REEL
STB9NK70Z-1	B9NK70Z-1	I ² PAK	TUBE
STW9NK60Z	W9NK70Z	TO-247	TUBE

April 2002

1/14

International
IR Rectifier

Preliminary Data Sheet No. PD60030 rev.0

IR2213(S) & (PbF)

HIGH AND LOW SIDE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation Fully operational to +1200V Tolerant to negative transient voltage dv/dt immune
- Gate drive supply range from 12 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible
- Separate logic supply range from 3.3V to 20V Logic and power ground ±5V offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs
- Also available LEAD-FREE (PbF)

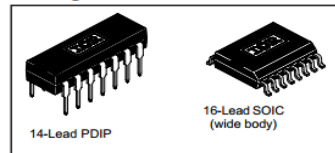
Product Summary

V_{OFFSET}	1200V max.
I_{O+/-}	1.7A / 2A
V_{OUT}	12 - 20V
t_{on/off} (typ.)	280 & 225 ns
Delay Matching	30 ns

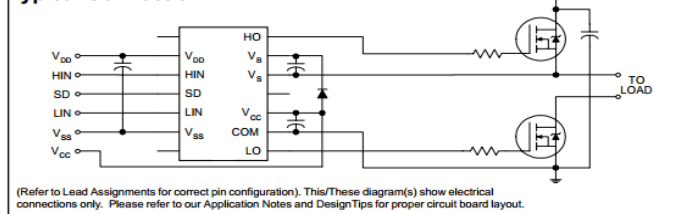
Description

The IR2213(S) is a high voltage, high speed power MOSFET and IGBT driver with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL outputs, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 1200 volts.

Packages



Typical Connection



www.irf.com

1

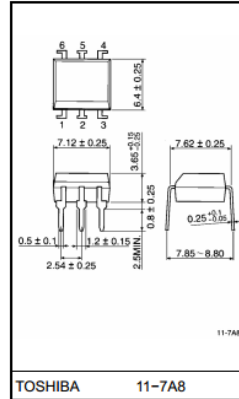
CNY17-2,CNY17-3,CNY17-4

- AC Line / Digital Logic Isolator
- Digital Logic / Digital Logic Isolator
- Telephone Line Receiver
- Twisted Pair Line Receiver
- High Frequency Power Supply Feedback Control
- Relay Contact Monitor

The TOSHIBA Corporation CNY17 consist of a gallium arsenide infrared emitting diode coupled with a silicon photo transistor in a dual in-line package.

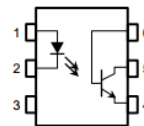
- Small package size and low cost
- Fast switching speeds: 5µs (typ.)
- High DC current transfer ratio: CTR(I_F = 10mA, V_{CE} = 5V)
 - CNY17-2: 63~125%
 - CNY17-3: 100~200%
 - CNY17-4: 160~320%
- High isolation resistance: 10¹¹Ω (typ.)
- High isolation voltage: 4400V (min.)

Unit in mm



Weight: 0.4 g

Pin Configuration



- 1 : Anode
- 2 : Cathode
- 3 : N.C.
- 4 : Emitter
- 5 : Collector
- 6 : Base

6.3 Βιβλιογραφία

1. Power Electronics Handbook. Second Edition Muhammad H. Rachid
2. Power Electronics Converters, Applications and Design, N.Mohan/T.Undelend/W.Robbins
3. Electronic Principles, Sixth Edition, Albert P. Malvino
4. Σημειώσεις Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Ισχύος, Δρ-Μηχ. Νικόλαος Πολύζος , 2010
5. Σχεδίαση και Ανάλυση Κυκλωμάτων με Η/Υ Δρ. Εμμ. Δρακάκης
6. SPICE...ένα μπαχαρικό για καλύτερο μαγείρεμα κυκλωμάτων, Αλκιβιάδης Χατζόπουλος, Σάμι Αμπού-Φάρχα, Γιώργος Μπόντζιος, Δημήτρης Κωνσταντίνου.
7. Ηλεκτρικές Πηγές Φωτισμού Δρ-Μηχ Κ.Γ. Σιδεράκης 2010
8. Μικροελεγκτές Διαλέξεις Θεωρίας Σφακιωτάκης Μιχάλης, 2011
9. Μικροελεγκτές Εργαστηρικές Ασκήσεις Μ.Σφακιωτάκης- Ι.Μηναδάκης, 2011
10. Συστήματα Μικροϋπολογιστών Τόμος 2: Μικροελεγκτές AVR και PIC, Κ. Πεκμεστζή
11. Εργαστήριο Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Κατασκευών Μηναδάκης Γιάννης, 2011
12. AVR182: Zero Crossing Detector ATMEL
13. A Spice Compatible Model of High Intensity Discharge Lamps, Moshe Shvartsas and Sam Ben-Yaakov
14. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3-5,2008 Harbin China, A Physics-Based Model for HID Lamps with Rectifying Effect. Wang Wei, ZHU Guo-dong, XU Dian-guo
15. IEEE Transactions on POWER ELECTRONICS, The Influence of the Startup Process of Small Metal-Halide (MH) Lamps Electronic Ballast Desing, WEI Yan, S.Y.Ron Hui
16. IEEE Transactions on POWER ELECTRONICS, A Discharge Lamp Model Based on Lamp Dynamic Conductance. Cecilio Blanco, Juan C. Anton, Arturo Robles, Francisco J.Ferrero
17. IEEE Transactions on Industry Applications, A Universal PSpice Model for HID Lamps, Wei Yan, S.Y.Ron Hui