



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**Λαμπτήρες Τεχνολογίας Μαγνητικής Επαγωγής
Μια Κριτική Θεώρηση**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Κ. Καμπόλη

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Λαμπτήρες Τεχνολογίας Μαγνητικής Επαγωγής
Μια Κριτική Θεώρηση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Κ. Καμπόλη

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Κ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Α. Πολυκράτη
Ε.Δι.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015

.....

Μαρία Κ. Καμπόλη

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μαρία Κ. Καμπόλη, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights 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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη σημερινή εποχή, το κράτος, οι επιχειρήσεις και ο καθένας ατομικά παρουσιάζουν αυξημένο ενδιαφέρον σχετικά με τις μεθόδους εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας. Εξαιτίας του γεγονότος ότι ένα μεγάλο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται στο φωτισμό, οι επιστήμονες αναζητούν νέους ευφυείς τρόπους μείωσης της κατανάλωσης της ενέργειας σε αυτόν τον τομέα. Μια λύση για ενεργειακά αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον φωτισμό αποτελούν οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η λεπτομερής περιγραφή αυτών των λαμπτήρων.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, γίνεται μια εισαγωγή σε βασικές έννοιες φωτισμού, όπως η όραση, τα θεμελιώδη φωτομετρικά μεγέθη και άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη των συστημάτων φωτισμού. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στους λαμπτήρες άνευ ηλεκτροδίων, μια υποκατηγορία των οποίων αποτελούν και οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται περιληπτικά ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας.

Το τρίτο κεφάλαιο είναι εξ' ολοκλήρου αφιερωμένο στη λειτουργία, στα χαρακτηριστικά και τέλος στη φθορά των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τη βιβλιογραφική έρευνα.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο περιέχεται η βιβλιογραφία της διπλωματικής εργασίας.

Λέξεις Κλειδιά:

Λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, λαμπτήρες άνευ ηλεκτροδίων, λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής, λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής, μπάλλαστ, ρύθμιση στάθμης φωτισμού, φθορά λαμπτήρων επαγωγής, φωτεινή απόδοση

ABSTRACT

Nowadays, state, businesses and individuals present growing concern about electrical energy saving methods. Due to the fact that a large percentage of electrical energy is consumed in lighting, the scientists are searching for new efficient ways of saving energy from this sector. Magnetic induction lamps are an energy efficient and environmentally friendly solution. The object of this diploma thesis is the detailed description of these lamps.

An introduction to basic lighting concepts, like vision, fundamental photometric concepts and other characteristics of lighting systems is given in the first chapter. Then, a reference is made to electrodeless lamps, a subcategory of which are also magnetic induction lamps.

The scope of this diploma thesis is briefly described in the second chapter.

The third chapter is completely devoted to the operation, the characteristics and finally the failure of magnetic induction lamps.

The fourth chapter presents the conclusions from the bibliographic research.

Finally, the fifth chapter contains the bibliography of the diploma thesis.

Keywords:

Magnetic induction lamps, electrodeless lamps, internal induction lamps, external induction lamps, ballast, dimming, induction lamps failure, luminous efficacy

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κωνσταντίνο Καραγιαννόπουλο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου όταν μου ανέθεσε αυτή τη διπλωματική εργασία καθώς και για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την πολύτιμη καθοδήγησή του και τις υποδείξεις του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου για τη συμπαράσταση και τη στήριξη που μου προσφέρει σε κάθε μου προσπάθεια.

Αφιερώνεται στη μνήμη του πατέρα μου

Περιεχόμενα

1.....	13
Εισαγωγή.....	13
1.1 Εισαγωγή σε Βασικές Έννοιες Φωτισμού	13
1.1.1 Όραση	13
1.1.2 Θερμοκρασία και Ποιότητα Χρώματος Φωτεινής Πηγής	16
1.1.3 Θεμελιώδη Μεγέθη Φωτοτεχνίας	18
1.1.3.1 Στερεά Γωνία (Solid Angle).....	18
1.1.3.2 Φωτεινή Ροή (Luminous Flux)	19
1.1.3.3 Φωτεινή Ένταση (Luminous Intensity)	19
1.1.3.4 Ένταση Φωτισμού ή Φωτισμός Επιφανείας (Illuminance).....	20
1.1.3.5 Λαμπρότητα (Luminance)	21
1.1.3.6 Φωτεινότητα (Luminosity)	21
1.1.3.7 Ακτινοβολία (Beam).....	21
1.1.3.8 Θάμβωση (Glare).....	21
1.1.4 Άλλα Χαρακτηριστικά Μεγέθη Φωτιστικών Συστημάτων	22
1.1.4.1 Φωτεινή Απόδοση	22
1.1.4.2 Συντελεστής S/P.....	22
1.1.4.3 Συντελεστής Ισχύος.....	23
1.1.4.4 Συντελεστής Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης Τάσης και Ρεύματος (THD) 24	
1.2 Λαμπτήρες Άνευ Ηλεκτροδίων.....	25
1.2.1 Είδη Εκκενώσεων	26
1.2.1.1 Χωρητική Εκκένωση (E-Discharge)	26
1.2.1.2 Επαγωγική Εκκένωση (H-Discharge).....	28
1.2.1.3 Εκκένωση με Μικροκύματα (Microwave Discharge)	29
1.2.1.4 Εκκένωση με Οδεύοντα Κύματα (Traveling Wave Discharge).....	30
1.2.2 Είδη Λαμπτήρων Άνευ Ηλεκτροδίων	31
1.2.2.1 Λαμπτήρες Πλάσματος (Plasma Lamps)	31
1.2.2.2 Λαμπτήρες Μαγνητικής Επαγωγής (Magnetic Induction Lamps).....	33
2.....	35
Σκοπός.....	35

3.....	36
Λαμπτήρες Μαγνητικής Επαγωγής	36
3.1 Ιστορική Αναδρομή και Εμπορική Διάθεση των Λαμπτήρων.....	36
3.2 Εμπόδια στην Εμπορική Εκμετάλλευση των Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής	39
3.3 Αρχή Λειτουργίας Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής	42
3.4 Είδη Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής	43
3.4.1 Λαμπτήρες Εξωτερικής Επαγωγής (External Induction Lamps)	43
3.4.2 Λαμπτήρες Εσωτερικής Επαγωγής (Internal Induction Lamps)	45
3.4.3 Σύγκριση Λαμπτήρων Εσωτερικής και Εξωτερικής Επαγωγής.....	46
3.5 Χαρακτηριστικά Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής	48
3.5.1 Θερμοκρασία Χρώματος και Ποιότητα Χρώματος	48
3.5.2 Φασματική Κατανομή	48
3.5.3 Φωτεινή Ροή και Φωτεινή απόδοση	49
3.5.4 Απόδοση, Συντελεστής Ισχύος και THD συστήματος	50
3.5.5 Διάρκεια Ζωής.....	51
3.5.6 Αντοχή σε Ακραίες Θερμοκρασίες Εξωτερικού Περιβάλλοντος	52
3.5.7 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις.....	52
3.5.7.1 Μείωση Εκπομπών CO ₂	52
3.5.7.2 Χρήση Υδραργύρου	53
3.5.7.3 Ανακύκλωση	54
3.5.8 Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές.....	54
3.5.9 Κόστος Αγοράς Λαμπτήρων.....	55
3.6 Υλικά Λαμπτήρων Μαγνητικής επαγωγής.....	56
3.6.1 Αμάλαμα Υδραργύρου.....	56
3.6.2 Αέριο Πλήρωσης	58
3.6.3 Σύσταση της Λυχνίας και των Διαφόρων Επικαλύψεων	60
3.6.3.1 Λυχνία	60
3.6.3.2 Φώσφοροι.....	61
3.6.3.3 Άλλες Επικαλύψεις	64
3.7 Ballast Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής.....	65
3.7.1 Αναγκαιότητα και Λειτουργία των Ballast των Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής	65

3.7.2	Είδη Ballast.....	66
3.7.2.1	Ballast Υψηλών Συχνοτήτων (HF Ballast)	67
3.7.2.2	Ballast Χαμηλών Συχνοτήτων (LF Ballast)	67
3.7.2.2.1	Ballast με Συχνότητα Λειτουργίας κάτω των 100 KHz	68
3.7.2.3	Επιλογή του Κατάλληλου Ballast.....	71
3.7.3	Κύκλωμα Ballast Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής	73
3.7.4	Κυκλώματα Ελέγχου Ballast Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής.....	85
3.8	Dimming Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής	87
3.8.1	Έλεγχος της Συχνότητας Λειτουργίας του Αντιστροφέα.....	89
3.8.2	Έλεγχος της Τάσης Διαύλου	90
3.8.3	Έλεγχος του Κύκλου Λειτουργίας των Διακοπών του Αντιστροφέα (Duty Cycle)	93
3.8.4	Μεταβολή των Χαρακτηριστικών του Φίλτρου Εξόδου	95
3.9	Φθορά των Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής	97
3.9.1	Θραύση Λαμπτήρων	97
3.9.2	Διάλυση Πυρήνων.....	97
3.9.3	Εξάντληση Υδραργύρου	97
3.9.4	Αλλαγές στο Αέριο.....	98
3.9.5	Αλλοίωση Φωσφόρων.....	98
3.9.6	Η Γυάλινη Λυχνία	98
3.9.7	Τήξη Αμαλγάματος.....	98
3.9.8	Ρυπαντές.....	99
3.9.9	Υπερθέρμανση του Ballast	99
3.9.10	Υγρασία και Σκόνη	101
3.9.11	Συνεχές Αναβόσβημα	101
3.9.12	Επιπτώσεις της Τάσης	102
4	103
	Συμπεράσματα.....	103
5	106
	Βιβλιογραφία.....	106

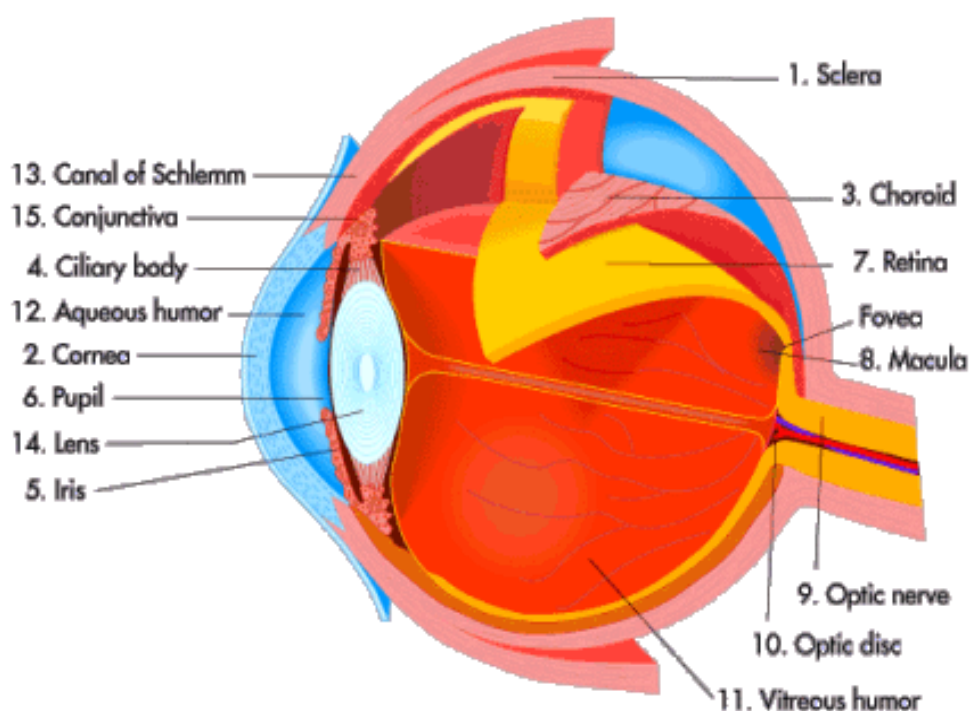
1

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή σε Βασικές Έννοιες Φωτισμού

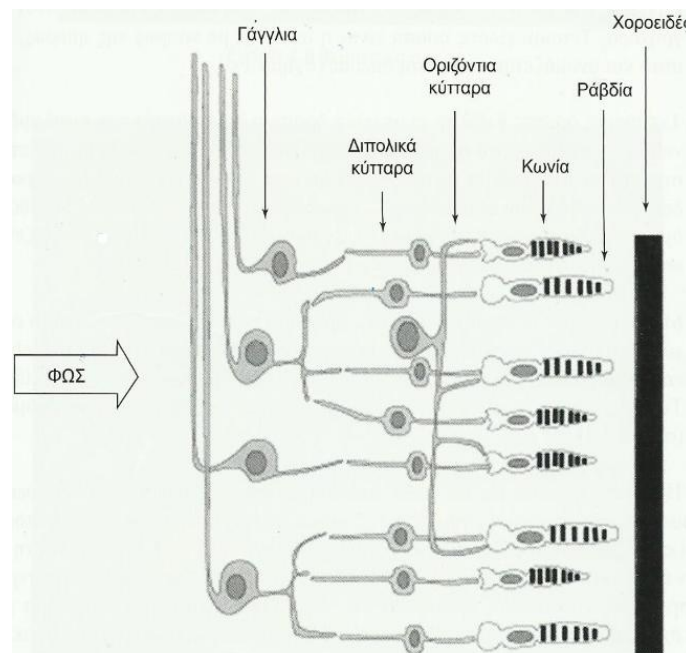
1.1.1 Όραση

Η ανθρώπινη όραση αποτελεί την ανώτερη αισθητηριακή αντίληψη του φωτός, των αντικειμένων και των χρωμάτων. Χάρη σε αυτήν την ικανότητα ο άνθρωπος έρχεται σε επαφή με τον έξω κόσμο και συνειδητοποιεί τη θέση του και την κίνησή του μέσα στο χώρο. Η όραση είναι μια εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία που ακόμα και σήμερα δεν είναι απόλυτα γνωστή. Περιλαμβάνει ακαριαία αλληλεπίδραση του ματιού και του εγκεφάλου μέσω ενός δικτύου νευρώνων και άλλων αντίστοιχων κυττάρων. Πιο αναλυτικά, οι φωτεινές ακτίνες όταν προσπέσουν στο μάτι, περνούν τα διαφανή στοιχεία του, τα οποία είναι ο κερατοειδής, το υδατοειδές υγρό και το υαλώδες σώμα, που ονομάζονται και διαθλαστικά μέσα και τέλος συγκεντρώνονται στον αμφιβληστροειδή. Οι ακτίνες αυτές ερεθίζουν τους φωτοανιχνευτές, προκαλώντας φωτοχημικές αντιδράσεις και βιοηλεκτρικές μεταβολές οι οποίες τελικά παράγουν ηλεκτρικά σήματα που μεταφέρονται με το οπτικό νεύρο στον εγκέφαλο. Στον ινιακό βολβό του εγκεφάλου τα σήματα αυτά κατά κάποιο τρόπο κωδικοποιούνται και ολοκληρώνεται η διαδικασία της όρασης. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται η φυσιολογία του ανθρώπινου οφθαλμού.



Σχήμα 1. Η φυσιολογία του ανθρώπινου οφθαλμού [76]

Οι φωτοανιχνευτές ή αλλιώς φωτοευαίσθητα κύτταρα είναι δύο κατηγοριών: τα κωνία και τα ραβδία. Έχουν παρόμοια κατασκευή αλλά είναι ευαίσθητα σε διαφορετικά επίπεδα φωτισμού, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.



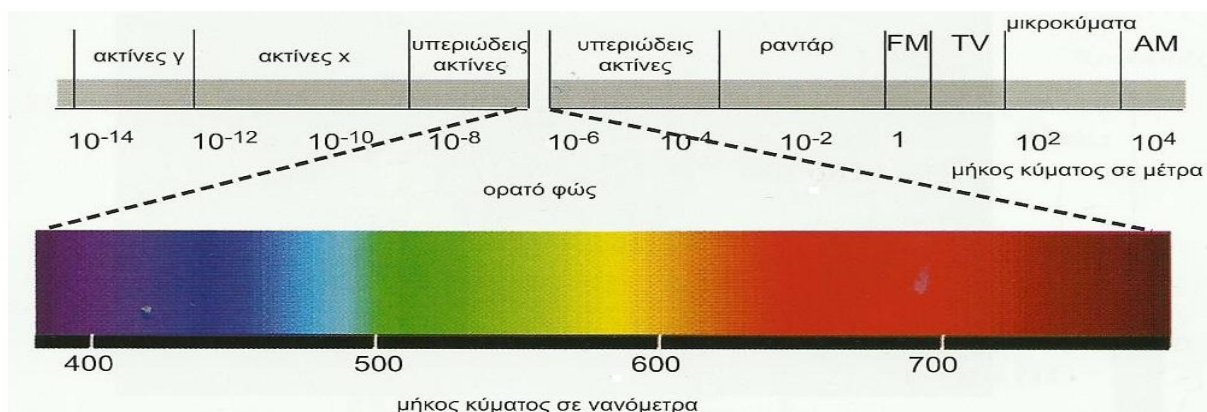
Σχήμα 2. Οι φωτοανιχνευτές [12]

Σε κάθε μάτι υπάρχουν περίπου επτά εκατομμύρια κωνία, πυκνά τοποθετημένα στην περιοχή της ωχράς κηλίδας στο κεντρικό σημείο του αμφιβληστροειδούς, τα οποία είναι ευαίσθητα σε υψηλά επίπεδα φωτός και είναι υπεύθυνα για την όραση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Απορροφώντας επιλεκτικά το φως το οποίο φτάνει σε αυτά, έχουν την ικανότητα να βελτιώνουν την ποιότητα της εικόνας και είναι υπεύθυνα για το μεγαλύτερο μέρος της οπτικής οξύτητας. Για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή οπτική οξύτητα είναι αναγκαίο η ένταση του φωτός να φτάνει πάνω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Τα κωνία είναι επίσης υπεύθυνα για την αντίληψη των χρωμάτων. Υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη κωνίων, καθένα από τα οποία είναι εξειδικευμένο να ανιχνεύει επιλεκτικά το μπλε, το πράσινο και το κόκκινο φως του φάσματος. Όταν η ένταση του φωτός είναι χαμηλή τα κωνία δεν διεγείρονται, μειώνοντας έτσι δραματικά την ικανότητα των ματιών να διακρίνουν τα χρώματα. Τότε ενεργοποιούνται τα ραβδία. Υπάρχουν περίπου εκατόν είκοσι εκατομμύρια ραβδία, κατανομημένα κυρίως στην περιοχή του αμφιβληστροειδούς χιτώνα, τα οποία περιέχουν τη χημική ουσία ροδοψίνη, η οποία είναι παράγωγο της βιταμίνης Α και είναι ευαίσθητη σε πολύ χαμηλά επίπεδα φωτός. Κατά τη διάρκεια της ημέρας που τα επίπεδα του φωτός είναι υψηλά η ροδοψίνη απενεργοποιείται προκαλώντας έτσι μια καθυστέρηση στην προσαρμογή των ματιών στο σκοτάδι μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την ευαισθησία τους σε χαμηλά επίπεδα φωτός. Τα κωνία και τα ραβδία αντιδρούν στο φως με βραδείες, κλιμακωτές αλλαγές του δυναμικού της μεμβράνης τους. Τα ραβδία αντιδρούν αργά έτσι ώστε φωτόνια που απορροφούνται σε χρονικό διάστημα 100 ms, να αθροίζονται. Αυτό επιτρέπει την ανίχνευση ακόμα και πολύ μικρών ποσοτήτων φωτός.

Η ύπαρξη στον ανθρώπινο οργανισμό των δύο διαφορετικών ανιχνευτών φωτός, των κωνίων και των ραβδίων, έχει ως αποτέλεσμα την πολυπλοκότητα του φαινομένου της όρασης και την εμφάνιση τριών διαφορετικών ειδών όρασης:

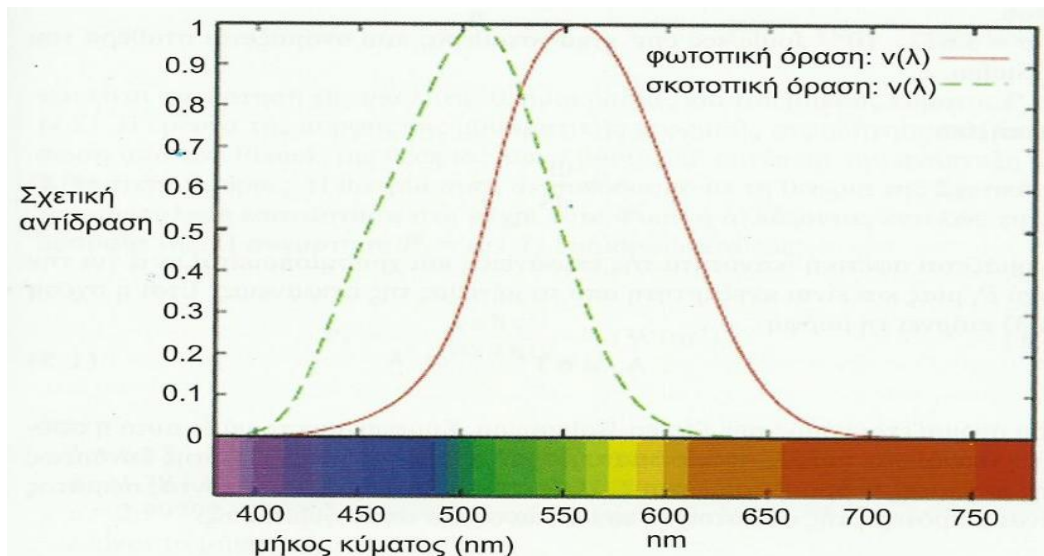
- Φωτοπική όραση: Κατά τη φωτοπική όραση η λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο οφθαλμός είναι σε υψηλά επίπεδα. Τα ενεργά στοιχεία σε αυτόν τον τύπο όρασης είναι κυρίως τα κωνία, τα οποία βρίσκονται σε μεγάλες συγκεντρώσεις στο κέντρο του αμφιβληστροειδούς, ενώ περιφερειακά μειώνονται γρήγορα. Τέτοιου είδους όραση είναι η συνήθης με το φως της ημέρας και για το λόγο αυτό ονομάζεται και όραση ημέρας.
- Σκοτοπική όραση: Κατά τη σκοτοπική όραση η λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο οφθαλμός είναι σε χαμηλά επίπεδα. Τα ενεργά στοιχεία στην περίπτωση αυτή είναι τα ραβδία, τα οποία λείπουν από το κέντρο του αμφιβληστροειδούς, ενώ υπάρχουν σε πολύ μεγάλες ποσότητες περιφερειακά. Τέτοιου είδους όραση επιτυγχάνεται τη νύχτα και για το λόγο αυτό ονομάζεται και όραση νύχτας.
- Μεσοπική όραση: Κατά τη μεσοπική όραση τα επίπεδα λαμπρότητας του φωτός είναι μεταξύ των δύο παραπάνω περιπτώσεων. Ενεργά στοιχεία είναι και τα ραβδία και τα κωνία, αλλά σε διαφορετικό βαθμό το κάθε είδος. Τυπική περίπτωση αυτής της όρασης είναι υπό το φωτισμό μικρών δρόμων.

Το ορατό φως είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που γίνεται αντιληπτή από τον ανθρώπινο οφθαλμό και εκτείνεται από τα 380 nm έως τα 780 nm, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3. Ωστόσο ο ανθρώπινος οφθαλμός δε διακρίνει με την ίδια ευκολία οποιαδήποτε ακτινοβολία του ορατού φάσματος, δηλαδή δεν παρουσιάζει μια αιφνιδιαστική αλλαγή ευαισθησίας στις οριακές θέσεις των 380 nm και 780 nm.



Σχήμα 3. Το φάσμα του ορατού φωτός [12]

Η ευαισθητοποίηση του ανθρώπινου οφθαλμού στο ορατό φως γίνεται σταδιακά και φτάνει τη μέγιστη τιμή της στο μήκος κύματος των 555 nm κατά την ημέρα και των 507 nm κατά τη νύχτα. Σύμφωνα, λοιπόν, με το σχήμα 4, γίνεται αντιληπτό ότι ο ανθρώπινος οφθαλμός εμφανίζει κατά την ημέρα, τη μέγιστη ευαισθησία του στο πρασινοκίτρινο χρώμα και την ελάχιστη στο μπλε και στο κόκκινο[12].



Σχήμα 4. Καμπύλες ευαισθησίας ανθρώπινου οφθαλμού [12]

1.1.2 Θερμοκρασία και Ποιότητα Χρώματος Φωτεινής Πηγής

Το χρώμα το οποίο σχετίζεται άμεσα με την όραση είναι μία ψυχοφυσιολογική αντίδραση αποτελούμενη από τη φυσική αντίδραση του ματιού και την αυτόματη ερμηνευτική αντίδραση του εγκεφάλου στα χαρακτηριστικά μήκη κύματος του φωτός πάνω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο λαμπρότητας. Σε χαμηλότερα επίπεδα λαμπρότητας το μάτι αντιλαμβάνεται τις διαφορές στη λαμπρότητα, αλλά δεν είναι σε θέση να διακρίνει τα χρώματα.

Η θερμοκρασία χρώματος μετριέται σε βαθμούς Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) και είναι το μέτρο για να περιγραφεί το χρώμα των φωτεινών πηγών. Εκφράζεται με την ισοδύναμη θερμοκρασία, στην οποία όταν βρεθεί το μέλαν σώμα θα παράγει φως του ίδιου χρώματος με την πηγή. Το μέλαν σώμα είναι ένα θεωρητικό μοντέλο, ένα σώμα που απορροφά όλες τις ακτινοβολίες, δεν ανακλά τίποτε και εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή ακτινοβολία σε όλα τα μήκη κύματος και σε όλες τις διευθύνσεις. Η έννοια της θερμοκρασίας χρώματος είναι εντελώς αντίθετη με αυτό που περιγράφεται ως ζεστό ή ψυχρό σώμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν ένα σώμα θερμαίνεται, το φως του μεταβάλλεται από κόκκινο σε πορτοκαλί, κίτρινο, άσπρο και τελικά μπλε καθώς βαίνει ολοένα προς το θερμότερο. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία χρώματος, τόσο ψυχρότερη είναι η απόδοση της φωτεινής πηγής[12]. Οι φωτεινές πηγές οι οποίες παρουσιάζουν χρωματική θερμοκρασία περίπου $3.000\text{ }^{\circ}\text{K}$ χαρακτηρίζονται ως θερμού λευκού φωτός, ενώ οι φωτεινές πηγές οι οποίες παρουσιάζουν χρωματική θερμοκρασία σχεδόν $6.500\text{ }^{\circ}\text{K}$ χαρακτηρίζονται ως λευκού φωτός ημέρας. Φωτεινές πηγές οι οποίες παρουσιάζουν χρωματική θερμοκρασία περίπου $4.000\text{ }^{\circ}\text{K}$ χαρακτηρίζονται ως ουδέτερες λευκές. Το φως της ημέρας προερχόμενο από την φωτοβόλο πηγή του Ήλιου παρουσιάζει χρωματική θερμοκρασία $20.000\text{ }^{\circ}\text{K}$ με διαυγή και κυανό ουρανό, η οποία μειώνεται έως $4.000\text{ }^{\circ}\text{K}$ κατά την δύση του. Επομένως, η

Θερμοκρασία χρώματος του φωτός της ημέρας δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του ήλιου και την ύπαρξη ή μη νεφώσεων στον ουρανό[11]. Η ψυχρή απόχρωση παράγει υψηλότερη ένταση φωτός από τη θερμή απόχρωση. Η θερμή εντύπωση προκύπτει από το πλούσιο σε ερυθρές ακτινοβολίες φως, ενώ η ψυχρή εντύπωση προκαλείται από το μεγάλο ποσοστό κυανής και κίτρινης ακτινοβολίας[12].

Η ποιότητα χρώματος μιας φωτεινής πηγής αποτελεί ένδειξη της ικανότητας ρεαλιστικής αναπαραγωγής του χρώματος ενός αντικειμένου. Σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού (CIE), η ποιότητα χρώματος μιας φωτεινής πηγής εκφράζεται από το δείκτη χρωματικής απόδοσης R_a ή CRI που παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 100[12]. Ο δείκτης χρωματικής απόδοσης της προτύπου πηγής λαμβάνεται ίσος με 100 και το άλλο ακραίο σημείο της κλίμακας ορίζεται ίσο με 50. Το σημείο αυτό παριστά το δείκτη χρωματικής αποδόσεως του πρότυπου λαμπτήρα φθορισμού Warm white Standard Color 3 της CIE. Η κλίμακα αυτή έχει επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε μια διάφορα πέντε μονάδων να έχει ως συνέπεια οριακά αντιληπτή διαφορά στην χρωματική απόδοση. Χρωματικές διαφορές οι οποίες προκύπτουν από φωτεινές πηγές με συντελεστή $R_a > 90$ δεν είναι δυνατό να γίνουν αντιληπτές υπό κανονικές συνθήκες[11]. Χαμηλές τιμές του δείκτη υποδεικνύουν κακή ποιότητα χρώματος, ενώ υψηλές τιμές καλή ποιότητα χρώματος. Οι λαμπτήρες κατατάσσονται σε κατηγορίες απόδοσης χρωμάτων σύμφωνα με την τιμή του δείκτη R_a , όπως φαίνεται στο σχήμα 5. Στις δραστηριότητες όπου απαιτείται υψηλή διακριτικότητα σε συνδυασμούς χρωμάτων, θα πρέπει να επιλέγονται λαμπτήρες με πολύ υψηλό δείκτη χρωματικής απόδοσης (1A), ενώ σε χώρους με συνήθεις δραστηριότητες αρκεί η χρησιμοποίηση λαμπτήρων κατηγορίας 1B ή 2[12].

Κατηγορία	R_a	Σπουδαιότητα
1A	90 ... 100	ακριβής συνδυασμός χρώματος
1B	80 ... 90	ακριβής αντίληψη χρώματος
2	60 ... 80	μέτρια ποιότητα χρώματος
3	40 ... 60	ακριβής ποιότητα χρώματος μικρής σπουδαιότητας
4	20 ... 40	ακριβής ποιότητα χρώματος άνευ σπουδαιότητας

Σχήμα 5. Κατηγορίες χρωματικής απόδοσης λαμπτήρων[12]

Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι δεν είναι δυνατό να γίνει σύγκριση μεταξύ δύο πηγών με κριτήριο το δείκτη χρωματικής απόδοσης, παρά μόνο για πηγές οι οποίες έχουν την ίδια θερμοκρασία χρώματος. Επομένως, ο δείκτης R_a έχει σχετική και όχι απόλυτη έννοια. Στο ανωτέρω συνηγορεί και το γεγονός ότι το μέλαν σώμα 3.000 °K ως πηγή αναφοράς έχει δείκτη R_a ίσο με 100, ενώ η ίδια τιμή αποδίδεται και στον δείκτη R_a πηγής αναφοράς ημέρας και θερμοκρασίας 7.500 °K. Είναι, επίσης, εμπειρικός γνωστό ότι οι προαναφερθείσες πηγές αποδίδουν τα χρώματα κατά τελείως διαφορετικό τρόπο. Αξίζει, ακόμη, να αναφερθεί ότι ο καθορισμός του δείκτη R_a πραγματοποιείται με τη λήψη του μέσου όρου των αποκλίσεων της απόδοσης των χρωμάτων των δειγμάτων, επομένως ο δείκτης δεν είναι δυνατό να αναφέρεται σε συγκεκριμένα χρώματα. Κατά συνέπεια, μία πηγή η οποία παρουσιάζει δείκτη χρωματικής απόδοσης $R_a = 85$, ο οποίος χαρακτηρίζεται

καλός, είναι δυνατό να παρουσιάζει σημαντική διαφορά από την πηγή αναφοράς στην απόδοση κάποιου χρώματος. Η μοναδική περίπτωση μια πηγή να θεωρηθεί ότι αποδίδει καλά όλα τα χρώματα είναι να παρουσιάζει τιμή του δείκτη R_a μεγαλύτερη του 95. Κατά συνέπεια, οι λαμπτήρες με δείκτη R_a της τάξεως του 80 εμφανίζουν αδύνατα σημεία στην απόδοση ορισμένων χρωμάτων[11].

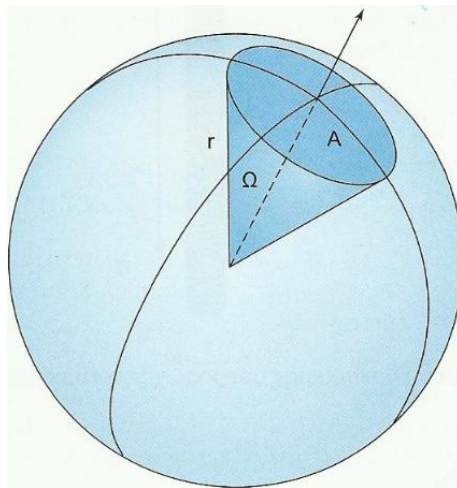
1.1.3 Θεμελιώδη Μεγέθη Φωτοτεχνίας

1.1.3.1 Στερεά Γωνία (Solid Angle)

Μια από τις βασικές έννοιες για την κατανόηση των φωτομετρικών μεγεθών και των μεταξύ τους σχέσεων είναι η έννοια της στερεάς γωνίας, η οποία έχει ως μονάδα μέτρησης το στερακτίνο (steradian ή sterad). Ένα στερακτίνο ορίζεται ως η στερεά γωνία Ω η οποία, έχοντας την κορυφή στο κέντρο μιας σφαίρας, αποκόπτει μια σφαιρική επιφάνεια εμβαδού A , ίση με το τετράγωνο της ακτίνας r της σφαίρας, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 6. Γενικά, μια στερεά γωνία Ω σε steradians δίνεται από τη σχέση:

$$\Omega = A/r^2$$

Το στερακτίνο είναι αδιάστατο μέγεθος εφόσον προκύπτει από το πηλίκο επιφάνειας προς επιφάνεια ($\text{sr}=\text{m}^2/\text{m}^2$).



Σχήμα 6. Στερεά γωνία [66]

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει μια στερεά γωνία είναι αυτή που προκύπτει αν στον ανωτέρω τύπο θεωρηθεί ότι η αποκοπώμενη επιφάνεια είναι ολόκληρη η επιφάνεια της σφαίρας. Έτσι, $\Omega_{max} = S_{max}/r^2 = 4 * \pi * r^2 / r^2 = 4 * \pi$. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι αν μια πηγή ακτινοβολίας εκπέμπει σε όλες τις κατευθύνσεις, έχει στερεά γωνία ίση με 4π στερακτίνα.

Τέλος, η επιφάνεια που αποκόπτει μια στερεά γωνία μπορεί να έχει οποιοδήποτε σχήμα και στην περίπτωση αυτή η στερεά γωνία προκύπτει ολοκληρώνοντας τα στοιχειώδη τμήματα της επιφάνειας[12].

1.1.3.2 Φωτεινή Ροή (Luminous Flux)

Η φωτεινή ροή Φ ορίζεται ως η φωτεινή ενέργεια, που είναι το κλάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας στη ζώνη φάσματος του ορατού φωτός η οποία γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι, που εκπέμπει μια σημειακή φωτεινή πηγή ανά μονάδα χρόνου. Η φωτεινή ροή μετριέται σε lumen (lm)[12]. Το μέγεθος αυτό ουσιαστικά αναπαριστά την φωτεινή ενέργεια την οποία εκπέμπει ένας λαμπτήρας υπό την κανονικοποίηση της φωτοπικής συνάρτησης ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού. Η φωτεινή ροή ορίζεται ως εξής[11]:

- Φωτοπική όραση:

$$\Phi = \kappa \int_{380}^{780} P(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

Όπου $\kappa = 680 \text{ lm/W}$ είναι η μέγιστη φασματική ευαισθησία για την φωτοπική όραση, $P(\lambda)$ η ισχύς ακτινοβολίας σε Watt και $V(\lambda)$ η φασματική ευαισθησία για την φωτοπική όραση.

- Σκοτοπική όραση:

$$\Phi' = \kappa' \int_{380}^{780} P(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda$$

Όπου $\kappa' = 1700 \text{ lm/W}$ είναι η μέγιστη φασματική ευαισθησία για την σκοτοπική όραση, $P(\lambda)$ η ισχύς ακτινοβολίας σε Watt και $V'(\lambda)$ η φασματική ευαισθησία για την σκοτοπική όραση[11].

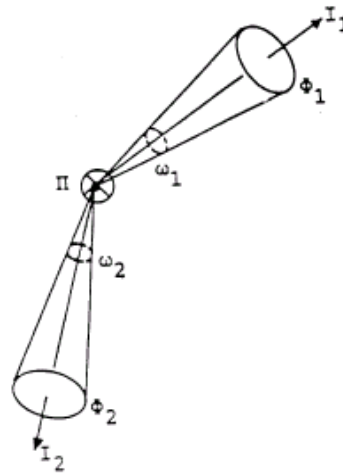
1.1.3.3 Φωτεινή Ένταση (Luminous Intensity)

Η φωτεινή ένταση είναι διανυσματικό μέγεθος που καθορίζει το ποσό της φωτεινής ροής Φ που εκπέμπεται από μια φωτεινή πηγή προς κάθε συγκεκριμένη κατεύθυνση του χώρου. Η φωτεινή ένταση I ορίζεται ως ο λόγος της στοιχειώδους φωτεινής ροής $d\Phi$ την οποία εκπέμπει μία φωτεινή πηγή μέσα σε μία στοιχειώδη στερεά γωνία $d\omega$ προς τη γωνία αυτή:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

Η μονάδα μέτρησης της φωτεινής έντασης ονομάζεται candela (cd), λαμβάνεται όταν μέσα σε στερεά γωνία 1 sr ακτινοβολεί φωτεινή ισχύς 1 lm και συνοδεύεται και από την κατεύθυνση παρατηρήσεως. Είναι εμφανές ότι η φωτεινή ένταση I και η φωτεινή ροή Φ

έχουν τις ίδιες διαστάσεις, καθώς το sr είναι αδιάστατο μέγεθος. Επομένως, η μονάδα cd έχει τις ίδιες διαστάσεις με τη μονάδα lm [11][12].



Σχήμα 7. Υπολογισμός φωτεινής έντασης [11]

1.1.3.4 Ένταση Φωτισμού ή Φωτισμός Επιφανείας (Illuminance)

Επειδή οι ιδιότητες μιας φωτεινής πηγής δεν μπορούν να καθορίσουν με ακρίβεια το αποτέλεσμα της, μιας και εξαρτώνται από τον τρόπο εγκατάστασης, θα πρέπει να υπάρξει κάποιο μέγεθος που να εκφράζει το αποτέλεσμα των φωτιστικών συστημάτων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η ένταση φωτισμού. Η ένταση φωτισμού E μιας επιφάνειας ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ροής που προσπίπτει κάθετα σε μια επιφάνεια, προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής. Αν θεωρηθεί στοιχειώδης επιφάνεια dS ενός αντικειμένου στην οποία πέφτει κάθετα στοιχειώδης ποσότητα φωτεινής ροής $d\Phi$, η ένταση φωτισμού δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

Η ένταση φωτισμού E δίδεται στο SI με την μονάδα lux :

$$lx = \frac{lm}{m^2}$$

Όλοι σχεδόν οι λαμπτήρες του εμπορίου δεν εκπέμπουν ομοιόμορφη φωτεινή ροή και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η επόμενη προσεγγιστική σχέση για οποιαδήποτε επιφάνεια S , η οποία δε φωτίζεται ομοιόμορφα:

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

Με Φ σταθερό σε κάθε στοιχειώδες τμήμα, η σχέση αυτή παρέχει την μέση ένταση φωτισμού σε οποιοδήποτε επιφάνεια S η οποία φωτίζεται ομοιόμορφα[11][12].

1.1.3.5 Λαμπρότητα (Luminance)

Αν παρατηρηθούν δύο φωτεινές πηγές (αυτόφωτες ή ετερόφωτες) που έχουν την ίδια φωτεινή ένταση, αλλά διαφορετικές διαστάσεις, δίνεται η εντύπωση ότι η πηγή με τη μικρότερη επιφάνεια είναι πιο φωτεινή από την άλλη. Η φωτεινή ένταση, λοιπόν, φαίνεται πως δεν επαρκεί για τη σύγκριση και την αξιολόγησή τους. Έτσι, απαιτείται η εισαγωγή ενός νέου μεγέθους που θα προσδιορίζει τη φωτεινότητα κάθε φωτεινής επιφάνειας. Η Λαμπρότητα L ορίζεται ως η ένταση I σε μια δεδομένη κατεύθυνση που διαιρείται με το εμβαδόν S της προβαλλόμενης επιφάνειας της πηγής, όπως φαίνεται από τον παρατηρητή και δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{I}{S}$$

Η μονάδα μέτρησης της λαμπρότητας είναι το cd/m^2 . Η λαμπρότητα είναι το μοναδικό βασικό φωτομετρικό μέγεθος το οποίο γίνεται αντιληπτό από τον ανθρώπινο οφθαλμό, χαρακτηρίζει την φωτεινότητα της επιφάνειας και είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανάκλασή της. Είναι διανυσματικό μέγεθος που μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του παρατηρητή[11][12].

1.1.3.6 Φωτεινότητα (Luminosity)

Είναι η οπτική αίσθηση που υποδεικνύει ότι μια περιοχή φαίνεται ότι εκπέμπει περισσότερο ή λιγότερο φως[72].

1.1.3.7 Ακτινοβολία (Beam)

Είναι το τμήμα της φωτεινής ροής που εκπέμπεται από μία πηγή φωτός, όταν αυτή περιέχεται σε μία στερεά γωνία. Η στερεά γωνία εκτείνεται ως το λειτουργικό κέντρο του φωτός της πηγής, συμπεριλαμβανομένης της μέγιστης έντασης[72].

1.1.3.8 Θάμβωση (Glare)

Η θάμβωση δημιουργείται όταν οι συνθήκες ορατότητας είναι τέτοιες ώστε να προκαλείται ενόχληση και μείωση της ικανότητας του παρατηρητή να διακρίνει αντικείμενα[72]. Είναι μια έννοια που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στον εσωτερικό φωτισμό, διότι μπορεί να προκαλέσει μεγάλα προβλήματα αν δε ληφθεί κάποια μέριμνα. Υπάρχουν δύο είδη θάμβωσης: η άμεση και η ανακλώμενη. Η άμεση θάμβωση προκαλείται όταν υπάρχει άμεση οπτική επαφή με τη φωτεινή πηγή και συνήθως λόγω μεγάλης αντίθεσης με το περιβάλλον. Η ανακλώμενη θάμβωση προκύπτει αν ο παρατηρητής βλέπει την ανάκλαση

μιας φωτεινής πηγής σε μια λεία και στυλπνή επιφάνεια, όπως π.χ. στις οθόνες των υπολογιστών, σε πλαστικοποιημένα έγγραφα, σε τζάμια ή καθρέφτες κλπ[12].

Αν τα επίπεδα της θάμβωσης είναι χαμηλά, τότε μπορεί να γίνει ανεκτή, ενώ όχι όταν είναι υψηλά. Ο διαχωρισμός είναι ποιοτικός και όχι ποσοτικός. Ωστόσο, η θάμβωση G είναι μετρήσιμο μέγεθος, γιατί μόνο έτσι θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη στις φωτομετρικές μελέτες. Μετριέται σε μια κλίμακα με έξι τιμές οι οποίες αντιστοιχούν σε έξι κλάσεις ποιότητας θάμβωσης κατά CIE, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8[12].

G	0,8	1,15	1,5	1,85	2,2	2,55
Κλάσεις ποιότητας	S	A	B	C	D	E

Σχήμα 8. Κλάσεις ποιότητας θάμβωσης[12]

1.1.4 Άλλα Χαρακτηριστικά Μεγέθη Φωτιστικών Συστημάτων

1.1.4.1 Φωτεινή Απόδοση

Φωτεινές πηγές όπως οι λαμπτήρες καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μετατρέπεται σε ακτινοβολία, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας είναι φωτεινή. Η φωτεινή απόδοση αναφέρεται και ως απόδοση ενεργειακής μετατροπής ή απλά απόδοση και είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την επιλογή ενός φωτιστικού συστήματος. Δίνεται από το λόγο της φωτεινής ροής Φ που εκπέμπει ο λαμπτήρας προς τη συνολική καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ $P_{\eta\lambda}$. Η φωτεινή απόδοση μετριέται σε lm/W και ο αντίστοιχος τύπος είναι ο εξής[11]:

$$n = \frac{\Phi}{P_{\eta\lambda}}$$

1.1.4.2 Συντελεστής S/P

Ο δείκτης S/P ή αναλογία σκοτοπικής/φωτοπικής ακτινοβολίας μιας πηγής, είναι το πηλίκο της φωτεινής ροής της ως προς τη σκοτοπική συνάρτηση ευαισθησίας $V'(\lambda)$, προς τη φωτεινή ροή ως προς τη φωτοπική συνάρτηση ευαισθησίας $V(\lambda)$. Η σχέση υπολογισμού του δείκτη S/P είναι:

$$S/P = \frac{\Phi_s}{\Phi_p} = \frac{K'_m \int_0^\infty P_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda}{K_m \int_0^\infty P_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda}$$

Όπου $K_m = 683 \text{ lm/W}$, $K'_m = 1699 \text{ lm/W}$ και $P_{e,\lambda}$ η ισχύς σε W, που εκπέμπει η πηγή σε ορισμένο μήκος κύματος λ [11].

Φωτεινές πηγές με το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας τους σε πολύ χαμηλά μήκη κύματος έχουν μεγαλύτερο συντελεστή S/P. Η φωτοπική συνάρτηση ευαισθησίας V(λ) αντιπροσωπεύει την απόκριση των κωνίων, που βρίσκονται πάνω στον άξονα του οφθαλμού σε υψηλά επίπεδα φωτός, ενώ η σκοτοπική συνάρτηση ευαισθησίας V'(λ) δείχνει την απόκριση των ραβδίων εκτός του άξονα του οφθαλμού σε χαμηλά επίπεδα φωτός. Στο μεσοπικό εύρος μεταξύ φωτοπικών και σκοτοπικών περιοχών, η απόκριση του ματιού εξαρτάται από το επίπεδο φωτεινότητας. Με τη μείωση του επιπέδου φωτεινότητας αυξάνεται η ευαισθησία του οφθαλμού στο μπλε, ενώ μειώνεται η ευαισθησία του στον κίτρινο και κόκκινο φωτισμό. Έτσι, κάτω από μεσοπικές συνθήκες οι φωτοπικοί λαμπτήρες που σχετίζονται με τη φωτοπική συνάρτηση ευαισθησίας V(λ) δε συσχετίζονται σωστά με την παραγόμενη οπτική αίσθηση[72][73].

Επιπλέον, ο δείκτης S/P είναι άμεσα συνδεδεμένος με τη θερμοκρασία χρώματος ενός λαμπτήρα και όσο αυτή αυξάνεται, αυξάνεται και ο δείκτης αυτός. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία χρώματος, τόσο πιο αριστερά μετατοπίζεται το φάσμα εκπομπής του, πιο κοντά στη σκοτοπική περιοχή. Οι πηγές με υψηλές θερμοκρασίες χρώματος παράγουν περισσότερο χρώμα σε ιώδεις ακτινοβολίες έχοντας ως αποτέλεσμα να διεγείρεται περισσότερο ο οφθαλμός[11][73].

Ο συντελεστής S/P είναι πολύ χρήσιμος στον προσδιορισμό της φωτεινής απόδοσης μιας πηγής, όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Η απόδοση που περιγράφηκε παραπάνω προκύπτει από μετρήσεις σε εργαστήρια και δε λαμβάνει υπόψη την ιδιόμορφη συμπεριφορά του ανθρώπινου ματιού, με αποτέλεσμα η μετρούμενη φωτεινή απόδοση να μην είναι η απόδοση που αντιλαμβάνεται ο ανθρώπινος οφθαλμός. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται τα VEL (Visual Effective Lumens), που είναι η φωτεινή ροή που παράγει μια πηγή, όπως αυτή μετριέται από εργαστηριακά όργανα, πολλαπλασιασμένη με το συντελεστή S/P. Κατά αυτόν τον τρόπο καθορίζεται η φωτεινή απόδοση μιας πηγής όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από τον άνθρωπο και εξηγείται το γεγονός ότι ορισμένοι τύποι λαμπτήρων φαίνονται λαμπρότεροι στο ανθρώπινο μάτι και προσφέρουν καλύτερη ποιότητα φωτός, παρά το γεγονός ότι βάσει εργαστηριακών μετρήσεων έχουν την ίδια απόδοση. Αυτό οφείλεται στο ότι οι μετρήσεις για την απόδοση μιας πηγής γίνονται εργαστηριακά μόνο με βάση τη φωτοπική όραση, αγνοώντας τη συσχέτιση φωτοπικής/σκοτοπικής όρασης και το δείκτη S/P[11][73].

1.1.4.3 Συντελεστής Ισχύος

Ο συντελεστής ισχύος (Power Factor - PF) ορίζεται ως το κλάσμα της ενεργού ισχύος προς τη φαινόμενη ισχύ και όταν δεν υπάρχουν αρμονικές συνιστώσες δίνεται από τον τύπο:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\phi_1)}{V_1 \cdot I} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos(\phi_1)$$

Η γωνία ϕ_1 στην παραπάνω σχέση είναι η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος. Στις ιδανικές περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν αρμονικές, ο συντελεστής ισχύος προσδιορίζεται από το είδος του φορτίου, δηλαδή από τη γωνία ϕ_1 . Το ιδανικό είναι ο συντελεστής ισχύος να είναι ίσος με τη μονάδα. Εκτός από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως που έχουν συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα αφού διαθέτουν μόνο ωμικά στοιχεία, όλα τα υπόλοιπα συστήματα έχουν συντελεστή ισχύος μικρότερο της μονάδας λόγω της ύπαρξης επαγωγικών και χωρητικών στοιχείων. Οι συσκευές με χαμηλό συντελεστή ισχύος αυξάνουν τις απώλειες στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και το ενεργειακό κόστος της συσκευής. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι αυτές οι συσκευές απαιτούν παροχή υψηλότερης φαινόμενης ισχύος από το δίκτυο για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών σε ενεργό ισχύ[11].

1.1.4.4 Συντελεστής Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης Τάσης και Ρεύματος (THD)

Ένας πολύ σημαντικός όρος που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην αξιολόγηση μιας φωτεινής πηγής είναι και ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης και του ρεύματος (THD). Τα επιμέρους εξαρτήματα των φωτιστικών συστημάτων παρουσιάζουν κατά τη λειτουργία τους ανώτερες αρμονικές συνιστώσες. Ως εκ τούτου, εμφανίζονται φαινόμενα συντονισμού και υπερφόρτωσης των καλωδίων που πρακτικά υλοποιούνται με την κατανάλωση ισχύος και τη μείωση του συντελεστή ισχύος. Ο συντελεστής ισχύος βάσει του συντελεστή ολικής αρμονικής παραμόρφωσης δίνεται από τη σχέση:

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \cdot \cos(\phi_1)$$

Ο συντελεστής THD δίνεται από τον τύπο:

$$THD = \frac{\sqrt{F^2 - F_1^2}}{F_1} = \frac{\sqrt{F_0^2 + \sum_{n=2}^{\infty} F_n^2}}{F_1}$$

Ποιοτικά ο αριθμητής αναφέρεται στην ενεργό ισχύ του σήματος χωρίς την επίδραση της θεμελιώδους συνιστώσας F_1 , ενώ ο παρονομαστής είναι η ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας. Η F_0 είναι η συνεχής συνιστώσα.

Τα συνιστώμενα όρια του THD για την τάση είναι 5% και για το ρεύμα 32%. Αν ξεπεραστούν αυτά τα όρια, θα αυξηθούν οι απώλειες ενέργειας με άμεση συνέπεια την αύξηση του ενεργειακού κόστους της εγκατάστασης. Ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης μπορεί να μειωθεί με τη προσθήκη ειδικών φίλτρων στο κύκλωμα τροφοδοσίας των λαμπτήρων[11][72].

1.2 Λαμπτήρες Άνευ Ηλεκτροδίων

Η πλειονότητα των λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται σήμερα, έχουν ένα κοινό σημείο και αυτό είναι η ύπαρξη μεταλλικών ηλεκτροδίων σφραγισμένων στο εσωτερικό της λυχνίας, ώστε υπό τις κατάλληλες συνθήκες να δημιουργηθεί ηλεκτρικό ρεύμα εντός αυτής, το οποίο στη συνέχεια θα οδηγήσει, μέσω κάποιων μηχανισμών, στην παραγωγή ορατού φωτός. Οι κύριοι λόγοι αστοχίας αυτών των λαμπτήρων, εκτός φυσικά από τη θραύση, σχετίζονται με την ύπαρξη των ηλεκτροδίων ή των νημάτων και περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

- Λόγω της διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος, τα άτομα του υλικού του νήματος εξαντλούνται με την πάροδο του χρόνου και αυτό έχει ως αποτέλεσμα κάποια στιγμή το νήμα να καταστραφεί.
- Το νήμα μπορεί, επίσης, να σπάσει εξαιτίας δονήσεων, ειδικά όταν η θερμοκρασία του βρίσκεται κοντά στο σημείο τήξης του και οπότε καθίσταται ακόμα πιο εύθραυστο.
- Εξαιτίας θερμικών καταπονήσεων, προκαλείται αστοχία στην σφράγιση της λυχνίας, στην περιοχή όπου τα ηλεκτρόδια εισέρχονται στα γυάλινα τοιχώματα του λαμπτήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εισρέουν ατμοσφαιρικά αέρια, τα οποία τον ρυπαίνουν και επηρεάζουν την επίδοσή του[1].

Οι λαμπτήρες άνευ ηλεκτροδίων (electrodeless lamps) είναι λαμπτήρες εκκένωσης αερίου, οι οποίοι δεν περιέχουν ηλεκτρόδια στο εσωτερικό τους για την πραγματοποίηση της ηλεκτρικής εκκένωσης και ως εκ τούτου δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα που σχετίζονται με την ύπαρξη αυτών. Για αυτό το λόγο, παρουσιάζουν έναντι άλλων λαμπτήρων τα εξής πλεονεκτήματα:

- Διαθέτουν εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, αφού δεν έχουν ηλεκτρόδια ή νήματα, που είναι ο κύριος παράγοντας βλάβης των συμβατικών πηγών φωτός[1][2][4].
- Δεν μπορούν εύκολα να εισρεύσουν αέρια στους λαμπτήρες αυτούς, διότι δεν υπάρχουν σημεία στα οποία να εισέρχονται ηλεκτρόδια, ώστε να υπάρχει πρόβλημα στην σφράγιση στην περιοχή αυτή[1].
- Είναι λαμπτήρες άμεσης έναυσης και επανέναυσης, καθώς δεν περιέχουν ηλεκτρόδια τα οποία θα πρέπει πρώτα να θερμανθούν για να παραχθεί φως και βρίσκουν εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου απαιτείται συχνό αναβόσβημα της πηγής[1][2][4].
- Η ύπαρξη ηλεκτροδίων θέτει περιορισμούς τόσο στην πίεση όσο και στη σύνθεση των αερίων πλήρωσης, δηλαδή των αερίων που περιέχονται στο δοχείο εκκένωσης, ώστε να μην αντιδρούν με τα μεταλλικά ηλεκτρόδια. Στους λαμπτήρες άνευ ηλεκτροδίων, όπου δεν υπάρχει τέτοιος κίνδυνος, η σύνθεση των αερίων και η πίεσή τους επιλέγονται ώστε ο λαμπτήρας να προσφέρει μέγιστη απόδοση[4].

- Τέλος, μπορεί να επιτευχθεί αποδοτικότερη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε ακτινοβολία με μία σχετικά μικρή σε μέγεθος πηγή, χωρίς να επηρεάζεται η διάρκεια ζωής της. Έτσι, η απουσία των ηλεκτροδίων προσφέρει μια πλειάδα διαφορετικών σχημάτων λαμπτήρων[2][4].

1.2.1 Είδη Εκκένωσης

Στους λαμπτήρες άνευ ηλεκτροδίων, η ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων (RF) μεταφέρεται στο εσωτερικό του λαμπτήρα μέσω ενός ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου και η εκκένωση πραγματοποιείται είτε μέσω ρευμάτων μετατόπισης (χωρητικών ρευμάτων) ή μέσω επαγωγικών ρευμάτων. Τον κύριο ρόλο σε αυτήν την τεχνολογία παίζει ο ιονισμός του αερίου πλήρωσης[2][3].

Υπάρχουν τέσσερις ξεχωριστοί τρόποι δημιουργίας ηλεκτρικής εκκένωσης, κατάλληλοι για λαμπτήρες άνευ ηλεκτροδίων και αντιστοιχούν στους διαφορετικούς τρόπους αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων με το πλάσμα. Τα είδη των εκκένωσης είναι: χωρητική εκκένωση, επαγωγική εκκένωση, εκκένωση με μικροκύματα και εκκένωση με οδεύοντα κύματα.

1.2.1.1 Χωρητική Εκκένωση (E-Discharge)

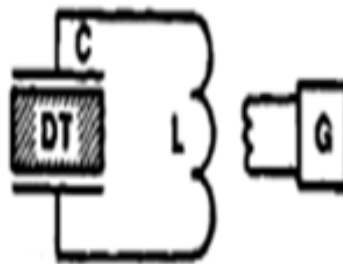
Αυτού του τύπου η εκκένωση λειτουργεί σε πίεση αερίου σημαντικά χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική και διεγείρεται από εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο E, με συχνότητα μικρότερη του 1GHz και μήκος κύματος πολύ μικρότερο από το μήκος της εκκένωσης [3][4][6].

Ο πιο απλός τρόπος δημιουργίας χωρητικής εκκένωσης είναι τοποθετώντας ένα δοχείο με αέριο μεταξύ των πλακών ενός πυκνωτή[4][5][6]. Εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση στα ηλεκτρόδια που είναι εξωτερικά του δοχείου εκκένωσης και το ηλεκτρικό πεδίο επιταχύνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία συγκρούονται με τα μόρια του αερίου και επιτυγχάνουν τον ιονισμό του. Μια ηλεκτροστατική σύζευξη δημιουργεί την εκκένωση και τα τοιχώματα του δοχείου δρουν ως εν σειρά χωρητικότητες του πλάσματος. Μόλις γίνει διάσπαση, το ρεύμα μετατόπισης διέρχεται μέσω των χωρητικότητων των τοιχωμάτων και της περιοχής απογύμνωσης φορέων (sheath) στα άκρα του πλάσματος, κοντά στην περιοχή των ηλεκτροδίων[3][4][5].

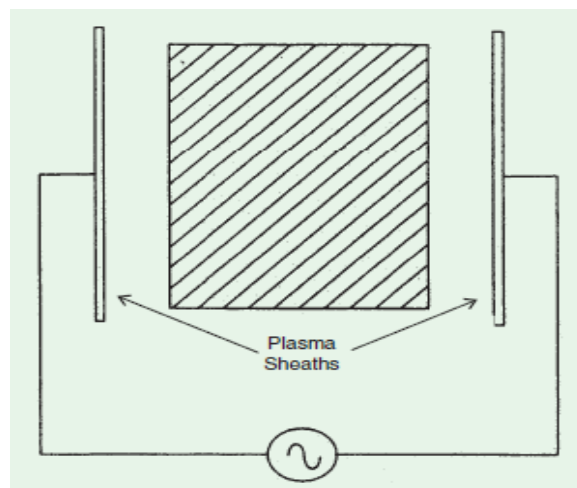
Λόγω εξάντλησης των ηλεκτρονίων, η σύνθετη αντίσταση της περιοχής απογύμνωσης είναι πολύ μεγαλύτερη από τη σύνθετη αντίσταση του πλάσματος. Μεγάλο μέρος της τάσης που εφαρμόζεται στο λαμπτήρα, εμφανίζεται σαν πτώση τάσης στην περιοχή απογύμνωσης, με αποτέλεσμα η σύνθετη αντίσταση της περιοχής αυτής να ελέγχει το ρεύμα εκκένωσης. Το ρεύμα εκκένωσης είναι ανάλογο της κυκλικής συχνότητας και για αυτό θα πρέπει η

συχνότητα λειτουργίας να μην είναι πολύ χαμηλή[4]. Έτσι, είναι δύσκολο να καταναλωθεί μεγάλο μέρος της ισχύος στην χωρητική εκκένωση, εκτός από τις υψηλές συχνότητες, όπου οι αντιδράσεις των χωρητικότητων μειώνονται. Επιπλέον, στις χαμηλές συχνότητες, η απόδοση μετατροπής είναι μικρή, λόγω των απωλειών ισχύος στις περιοχές απογύμνωσης που σχετίζονται με τα εξωτερικά ηλεκτρόδια[5]. Επίσης, μια αξιοσημείωτη συνεχής τάση αναπτύσσεται στην περιοχή απογύμνωσης και συντελεί στην επιτάχυνση των ιόντων του πλάσματος πάνω στα τοιχώματα του δοχείου. Αυτό έχει σημαντικές επιπτώσεις στο λαμπτήρα και περιορίζει την εφαρμογή της χωρητικής εκκένωσης για φωτισμό. Ακόμη, αν και είναι μια εξαιρετικά σταθερή εκκένωση και μπορεί να δημιουργηθεί σε διάφορα σχήματα, το κύκλωμα υψηλής συχνότητας που είναι απαραίτητο, δεν είναι αρκετά αποδοτικό και οικονομικό για να διευκολύνει την ανάπτυξη ενός εμπορεύσιμου λαμπτήρα που θα στηρίζεται σε αυτήν την τεχνολογία, τουλάχιστον όχι στο κοντινό μέλλον[4].

Τέλος, η χωρητική εκκένωση είναι σημαντική στο αρχικό στάδιο άλλων εκκενώσεων χωρίς ηλεκτρόδια[5].



Σχήμα 9. Κύκλωμα για την χωρητική εκκένωση: C ο πυκνωτής του κυκλώματος ταλάντωσης, DT το δοχείο εκκένωσης, L το επαγωγικό πηνίο και G η γεννήτρια [3]



Σχήμα 10. Αναπαράσταση της χωρητικής εκκένωσης [4]

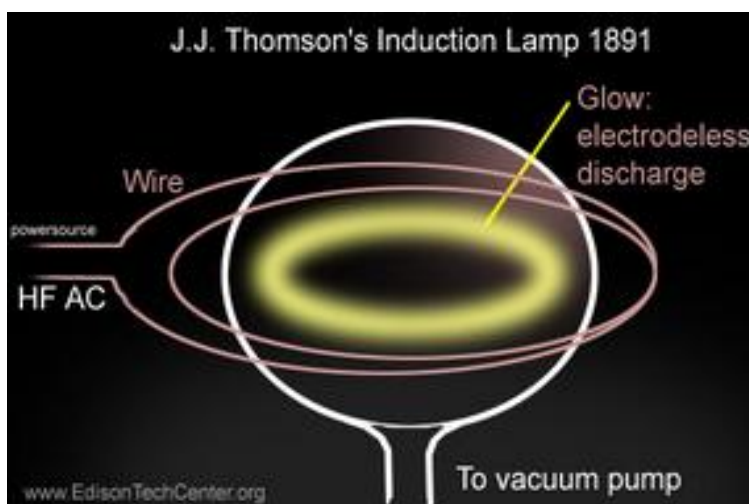
1.2.1.2 Επαγωγική Εκκένωση (H-Discharge)

Η επαγωγική εκκένωση λειτουργεί σε ένα μεγάλο εύρος πιέσεων αερίου και συχνοτήτων, με μήκος κύματος πολύ μεγαλύτερο από το μήκος της εκκένωσης[4].

Ένα επαγωγικό πηνίο, το οποίο μπορεί να βρίσκεται εντός ή εκτός της εκκένωσης, διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας, το οποίο μεταβάλλει τη μαγνητική ροή του και δημιουργεί γύρω του ένα ισχυρό εναλλασσόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο με τη σειρά του επάγει εναλλασσόμενο ρεύμα εντός του δοχείου εκκένωσης[4][5]. Το ρεύμα πλάσματος, λοιπόν, δημιουργεί ένα τύλιγμα μιας σπείρας που θεωρείται το δευτερεύον ενός μετασχηματιστή, ενώ το πρωτεύον είναι το επαγωγικό πηνίο διέγερσης[4][6]. Το ρεύμα του πλάσματος είναι κλειστό μέσα στο πλάσμα, χωρίς να δημιουργεί περιοχές απογύμνωσης φορέων. Το πεδίο θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυρό, ώστε να διατηρήσει την εκκένωση και να επιτευχθεί ισχυρή σύζευξη σε χαμηλές συχνότητες, όπου υπάρχουν τα οφέλη των μειωμένων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και των φθηνότερων ηλεκτρονικών[4][5][6].

Η χρησιμότητα της επαγωγικής εκκένωσης ως πηγή φωτός προσδιορίζεται από την απόδοση της μεταφερόμενης ισχύος $n = \frac{P_c}{P_c + P_p}$, όπου P_c η ισχύς που καταναλώνεται στο πηνίο και P_p η ισχύς του πλάσματος. Για ένα λαμπτήρα άνευ ηλεκτροδίων, η απόδοση θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του 90%, για να θεωρηθεί το ίδιο ή περισσότερο αποδοτικός από ένα λαμπτήρα με ηλεκτρόδια. Το n εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι το αέριο πλήρωσης, η πίεσή του, η τοπολογία και η γεωμετρία της εκκένωσης, η συχνότητα λειτουργίας και η κατασκευή του πηνίου διέγερσης. Επίσης, η ισχύς του λαμπτήρα έχει σημαντική επιρροή στην απόδοση, η οποία αυξάνεται με την αύξηση της ισχύος[4].

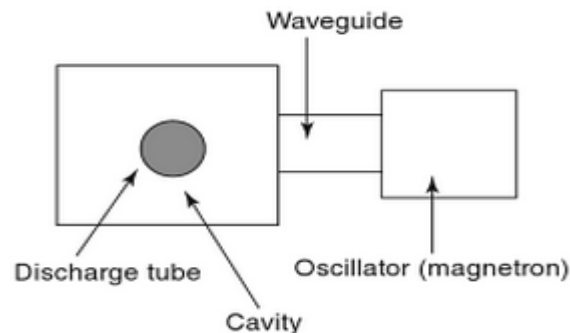
Επιπλέον, η επαγωγική εκκένωση ξεκινάει ως χωρητική και στη συνέχεια, εάν το πεδίο είναι επαρκές, γίνεται επαγωγική. Τέλος, να σημειωθεί ότι αφού πραγματοποιηθεί η μετάβαση από χωρητική σε επαγωγική εκκένωση, η ισχύς μπορεί να μεταβάλλεται σε ένα μεγάλο εύρος χωρίς να επιστρέψει στην αρχική της κατάσταση[5].



Σχήμα 11. Ο λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής του J. Thomson για τη μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων [7]

1.2.1.3 Εκκένωση με Μικροκύματα (Microwave Discharge)

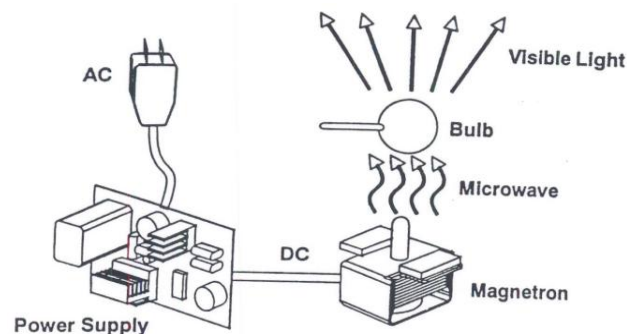
Σε αυτήν την εκκένωση το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος του πλάσματος και συνεπάγεται υψηλές συχνότητες λειτουργίας. Υπό αυτές τις συνθήκες, η εκκένωση διεγείρεται από το ηλεκτρικό πεδίο E και από το μαγνητικό πεδίο H [5][6]. Τα μικροκύματα συχνότητας 1 - 100 GHz παράγονται από ένα μαγνητρόνιο (magnetron) και οδηγούνται στην κοιλότητα μέσω ενός κυματοδηγού, όπως φαίνεται και στο σχήμα 12. Η λειτουργία είναι παρόμοια με αυτή των οικιακών φούρνων μικροκυμάτων[9].



Σχήμα 12. Παραγωγή εκκένωσης με μικροκύματα [9]

Σε μια εκκένωση με μικροκύματα είναι προφανής η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου. Όσο αυξάνεται η συχνότητα ή η ισχύς, το επιδερμικό βάθος μειώνεται όπως είναι αναμενόμενο. Η ισχύς στο πλάσμα συγκεντρώνεται πιο κοντά στο τοίχωμα, με τη θερμοκρασία τόξου να έχει μέγιστο κοντά στο τοίχωμα παρά στο κέντρο όπως συμβαίνει στα τόξα χαμηλών συχνοτήτων. Τέτοιες θερμοκρασιακές συμπεριφορές, επίσης, ευνοούν την παραγωγή ακτινοβολίας συντονισμού και μοριακής ακτινοβολίας[5].

Επειδή, οι συχνότητες στο εύρος των GHz δεν μπορούν να παραχθούν με ημιαγωγούς, καθώς οι διαθέσιμοι σε αυτές τις συχνότητες ημιαγωγοί δεν προσφέρουν αποδοτική και οικονομική παραγωγή ισχύος, απαιτείται για την τροφοδοσία λαμπτήρων ένα σύστημα με αρκετά μεγάλο όγκο, παρόμοιο με αυτό του σχήματος 13[5][9]. Έτσι, οι πηγές φωτισμού που βασίζουν τη λειτουργία τους στις εκκενώσεις με μικροκύματα περιορίζονται προς το παρόν σε εξειδικευμένες εφαρμογές υψηλής ισχύος και σε ερευνητικές δραστηριότητες[6].

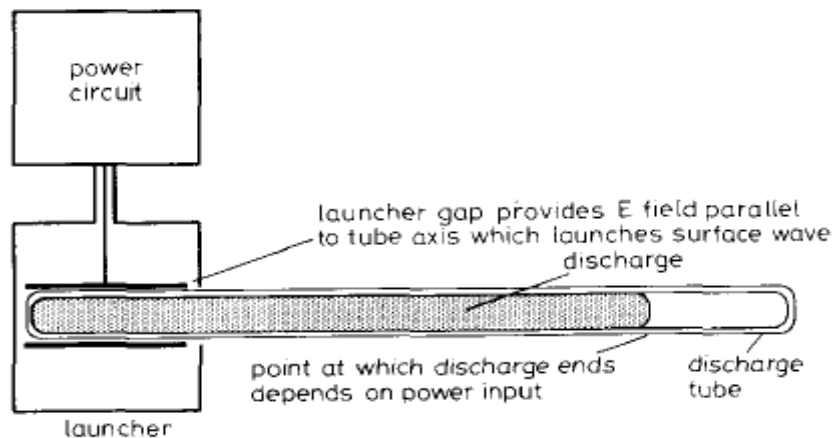


Σχήμα 13. Αναπαράσταση λειτουργίας λαμπτήρα με χρήση μικροκυμάτων [8]

1.2.1.4 Εκκένωση με Οδεύοντα Κύματα (Traveling Wave Discharge)

Το πλάσμα στην εκκένωση με οδεύοντα κύματα δημιουργείται από ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που ταξιδεύει μέσα σε έναν κυματοδηγό ή σε μία κατασκευή αργού κύματος (slow wave structure)[6][5].

Μια πολύ ενδιαφέρουσα μορφή αυτής της εκκένωσης, κατάλληλη για φωτισμό, είναι η εκκένωση με επιφανειακά κύματα (surface wave discharge - SWD), όπου η ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού κύματος δημιουργεί το πλάσμα, το οποίο είναι η δομή μέσα στην οποία διαδίδεται το κύμα. Υπάρχουν πολλοί τρόποι παραγωγής επιφανειακών κυμάτων, αλλά στις συχνότητες που χρησιμοποιούνται για φωτισμό, το surfatron είναι η καλύτερη επιλογή γιατί μπορεί να κατασκευαστεί ώστε να είναι πολύ μικρό και διακριτικό. Πρόκειται για μια συσκευή παραγωγής (launcher) επιφανειακών κυμάτων, η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 14[5].



Σχήμα 14. Συσκευή παραγωγής επιφανειακών κυμάτων [5]

Τα εξαρτήματα που απαιτούνται για τη σύνδεση της συσκευής με την τροφοδοσία μπορεί να είναι ξεχωριστοί πυκνωτές και επαγωγείς συνδεδεμένοι στη γεννήτρια. Το κύμα οδηγείται από το ηλεκτρικό πεδίο E στο κενό και η υπόλοιπη δομή εξυπηρετεί στην προστασία του κενού, μειώνοντας τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, που είναι δυνατό να μειωθούν περαιτέρω με την τοποθέτηση μερικών ή όλων των εξαρτημάτων μέσα στη συσκευή (launcher). Ένα θετικό στοιχείο των εκκενώσεων με επιφανειακά κύματα είναι ότι οι συνιστώσες των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων έξω από το πλάσμα είναι παροδικές, που σημαίνει ότι δεν μεταφέρουν ενέργεια και αυτό συμβάλλει στην μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών[5].

Ένα χαρακτηριστικό των εκκενώσεων με επιφανειακά κύματα είναι ότι το μήκος τους εξαρτάται από την ισχύ τους και αυτός είναι ένας τρόπος ρύθμισης της φωτεινής έντασης των λαμπτήρων, όπως συμβαίνει με το χαμήλωμα του φυτιλιού σε μια λάμπα κηροζίνης. Όμως, η ανομοιομορφία της εκκένωσης αποδείχτηκε μειονέκτημα της μεθόδου διότι οδηγεί σε ανομοιόμορφο φως. Μια επιπλέον δυσκολία είναι ότι η διαθεσιμότητα των

ηλεκτρονικών και του εύρους των συχνοτήτων για φωτισμό, απαιτούν εκκένωση ισχυρών συγκρούσεων (strong collision discharges)[6]. Άλλος ένας θεμελιώδης λόγος είναι ότι αν δεν υπάρχει επαρκής αριθμός συγκρούσεων ηλεκτρονίων - ατόμων ανά κύκλο, η συχνότητα των ανελαστικών συγκρούσεων που οδηγεί σε εκπομπή φωτός είναι μικρή, με αποτέλεσμα να υπάρχει ανάγκη για πηγές μεγάλες σε όγκο για την παραγωγή αποδεκτών επιπέδων φωτός, δηλαδή το ακριβώς αντίθετο από αυτό που απαιτείται στην αγορά[5].

Κάποια από τα προβλήματα ανομοιομορφίας του φωτός κατά μήκος της εκκένωσης με επιφανειακά κύματα μπορούν να αντιμετωπιστούν τυλίγοντας ένα ελικοειδές καλώδιο γύρω από το σωλήνα εκκένωσης ή παράγοντας κύματα και από τα δύο άκρα της εκκένωσης. Αυξάνοντας την ισχύ εκκένωσης, η εκκένωση φτάνει στο τέλος του σωλήνα, το επιφανειακό κύμα ανακλάται, με αποτέλεσμα η εκκένωση να ενισχύεται και να γίνεται πιο ομοιόμορφη. Στις υψηλές συχνότητες, αυτή η ανάκλαση οδηγεί στη δημιουργία στάσιμων κυμάτων. Σε αυτό το σημείο, η εκκένωση εμφανίζει μια καθαρά χωρητική συνιστώσα και μια φωτεινή λάμψη κοντά στο launcher. Περαιτέρω προσπάθειες για αύξηση της ισχύος έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των χωρητικών απωλειών ή άμεση θέρμανση της ίδιας της συσκευής[6].

1.2.2 Είδη Λαμπτήρων Άνευ Ηλεκτροδίων

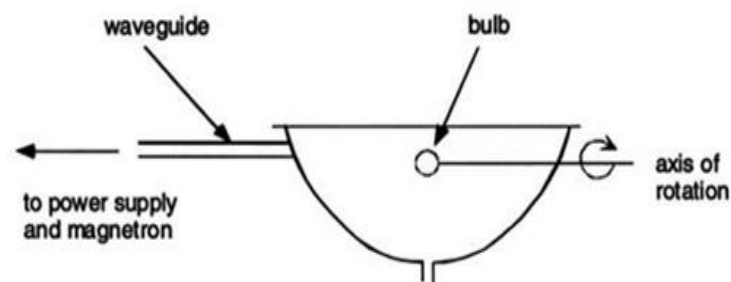
Από τις εκκενώσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, μόνο η εκκένωση με μικροκύματα και η επαγωγική εκκένωση εφαρμόστηκαν σε εμπορικά διαθέσιμες πηγές φωτός. Η εκκένωση με μικροκύματα αξιοποιήθηκε στη λειτουργία των λαμπτήρων πλάσματος και η επαγωγική εκκένωση αξιοποιήθηκε στους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής. Αυτά τα δύο είδη λαμπτήρων περιγράφονται στις επόμενες δύο ενότητες και μάλιστα οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εξετάζονται εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

1.2.2.1 Λαμπτήρες Πλάσματος (Plasma Lamps)

Οι λαμπτήρες πλάσματος είναι ένας τύπος λαμπτήρων εκκένωσης αερίου που παράγουν φως χρησιμοποιώντας ηλεκτροστατική επαγωγή, για να διεγείρουν το πλάσμα που βρίσκεται εντός διάφανης λυχνίας, μέσω ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων. Αυτοί οι λαμπτήρες συνήθως χρησιμοποιούν ένα ευγενές αέριο ή μίγμα αυτών και επιπλέον υλικά όπως μεταλλικά αλογονίδια, Νάτριο, Υδράργυρο ή Θείο. Στους σύγχρονους λαμπτήρες πλάσματος χρησιμοποιείται ένας κυματοδηγός για να στρέψει το ηλεκτρικό πεδίο προς το πλάσμα. Κατά τη λειτουργία, το αέριο ιονίζεται και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, επιταχυνόμενα από το ηλεκτρικό πεδίο, συγκρούονται με τα άτομα του αερίου και των μετάλλων. Κάποια ηλεκτρόνια από τα άτομα αυτά, διεγείρονται από αυτές τις συγκρούσεις και μεταβαίνουν σε υψηλότερη ενεργειακά κατάσταση. Όταν το ηλεκτρόνιο αυτό επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση, εκπέμπει ένα φωτόνιο με αποτέλεσμα τη

δημιουργία ορατού φωτός ή υπεριώδους ακτινοβολίας (UV), ανάλογα με τα υλικά που βρίσκονται μέσα στη λυχνία[2][11].

Ο πρώτος εμπορικά διαθέσιμος λαμπτήρας πλάσματος κατασκευάστηκε από την εταιρία Fusion UV και ήταν ένας λαμπτήρας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για τη σκλήρυνση πολυμερών και η λυχνία του περιείχε Αργό και Υδράργυρο σε αέρια κατάσταση. Αυτός ο λαμπτήρας οδήγησε στην ανάπτυξη του λαμπτήρα Θείου (sulfur lamp), ο οποίος περιέχει Αργό και Θείο που βομβαρδίζονται από μικροκύματα συχνότητας 2,4 GHz μέσω ενός κοίλου κυματοδηγού και απεικονίζεται στο σχήμα 15. Αυτός ο λαμπτήρας λειτουργεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και για αυτό πρέπει να περιστρέφεται για να μην καεί ή να χρησιμοποιείται ανεμιστήρας για την ψύξη του.[6]

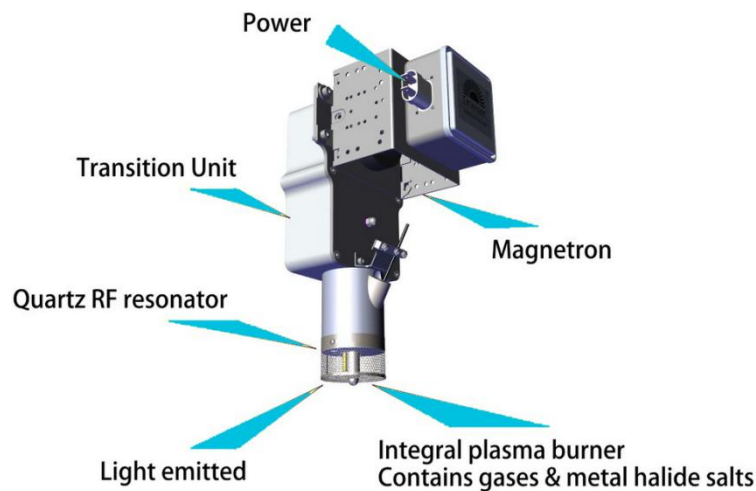


Σχήμα 15. Λαμπτήρας θείου Solar 1000 της Fusion Lighting [6]

Οι λαμπτήρες θείου, αν και είναι σχετικά αποδοτικοί, αντιμετωπίζουν ορισμένα προβλήματα όπως είναι η περιορισμένη διάρκεια ζωής, το μεγάλο μέγεθος, η αυξημένη θερμότητα που παράγουν και η υψηλή ζήτηση ισχύος. Στο παρελθόν, η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων πλάσματος περιοριζόταν από το μαγνητρόνιο που χρησιμοποιούταν για την παραγωγή των μικροκυμάτων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυκλώματα στερεάς κατάστασης για την παραγωγή ραδιοσυχνοτήτων, για να αυξήσουν τη διάρκεια ζωής, αλλά κοστίζουν πολύ ακριβότερα από τα μαγνητρόνια, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους μόνο σε εφαρμογές φωτισμού με μεγάλη αξία. Σχετικά πρόσφατα, έγιναν προσπάθειες από την εταιρία Dipolar, για να επιμηκυνθεί η διάρκεια ζωής των μαγνητρονίων στις 40.000 ώρες, καθιστώντας εφικτή τη δημιουργία λαμπτήρων πλάσματος χαμηλού κόστους. Το 2000, αναπτύχθηκε ένα σύστημα που συγκέντρωνε κύματα ραδιοσυχνοτήτων μέσα σε ένα διηλεκτρικό κυματοδηγό κατασκευασμένο από κεραμικό υλικό, που ενεργοποιούσε το πλάσμα που εξέπεμπε φως σε μια λυχνία τοποθετημένη στο εσωτερικό του. Αυτό το σύστημα, για πρώτη φορά, επέτρεψε τη δημιουργία ενός συμπαγούς και άνευ ηλεκτροδίων λαμπτήρα. Αυτή η εφεύρεση έγινε, μάλιστα, αντικείμενο διαμάχης μεταξύ διαφόρων κατασκευαστών. Η χρήση έντονα διηλεκτρικού κυματοδηγού επέτρεψε τη διατήρηση πλάσματος σε πολύ χαμηλότερη ισχύ έως και 100 Watt σε κάποιες περιπτώσεις. Επίσης, επέτρεψε τη χρήση υλικών, όπως αυτών στους συμβατικούς λαμπτήρες εκκένωσης αερίων, ώστε να μην είναι αναγκαία η περιστροφή της λυχνίας. Το μοναδικό πρόβλημα του κεραμικού κυματοδηγού ήταν ότι πολύ από το φως, που εκπεμπόταν από το πλάσμα,

παγιδευόταν μέσα σε αυτόν, όμως το 2009 η Ceravision παρουσίασε έναν διάφανο κυματοδηγό χαλαζία για να επιλύσει αυτό το θέμα[2].

Μια άλλη κατηγορία των λαμπτήρων πλάσματος αποτελούν οι λαμπτήρες πλάσματος υψηλής απόδοσης (High Efficiency Plasma - HEP), με αποδόσεις που μπορεί να ξεπερνούν και τα 90 lm/W[2]. Αυτοί οι λαμπτήρες χρησιμοποιούν ένα συντονιστή ραδιοσυχνοτήτων από χαλαζία, ένα δοχείο εκκένωσης, μια μονάδα μετάβασης και ένα μαγνητρόνιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 16. Στο δοχείο εκκένωσης περιέχονται άλατα μεταλλικών αλογονιδίων και ένα αδρανές αέριο. Η ενέργεια μικροκυμάτων μέσα στη λάμπα συντονίζεται και ιονίζει το αέριο, το οποίο συνδυάζει μεταλλικά αλογονίδια για να παραχθεί έντονα λευκό φως[7]. Οι λαμπτήρες αυτής της κατηγορίας είναι πιθανόν η πιο ενεργειακά αποδοτική πηγή φωτός για εξωτερικούς χώρους, για εμπορικές και βιομηχανικές περιοχές και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι συνδυάζουν πολύ υψηλή απόδοση και μικρό μέγεθος[2].



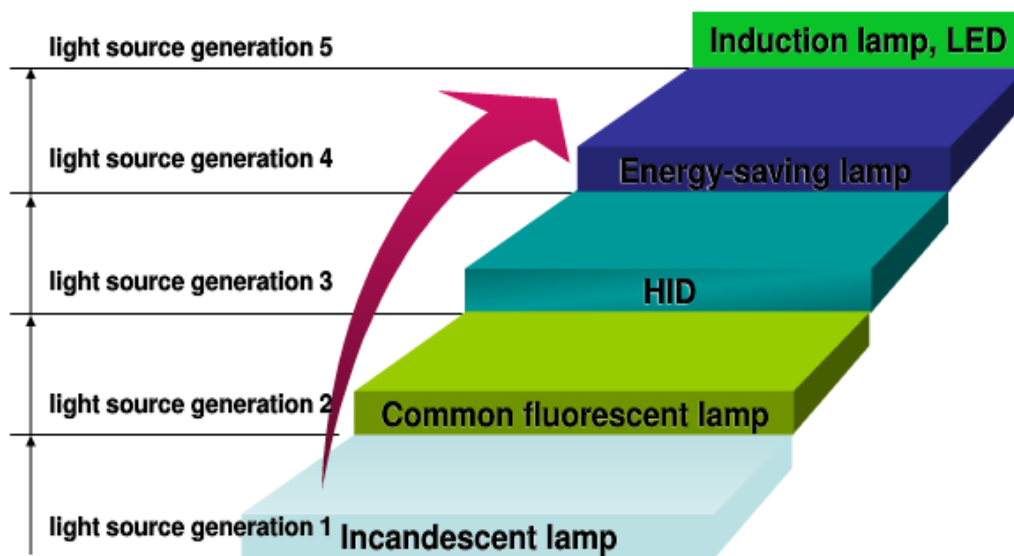
Σχήμα 16. Λειτουργία λαμπτήρα HEP της Ceravision [10]

1.2.2.2 Λαμπτήρες Μαγνητικής Επαγωγής (Magnetic Induction Lamps)

Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής στηρίζουν τη λειτουργία τους στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και στην εκκένωση αερίων. Παράγουν φως χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για να διεγείρουν τα σωματίδια Υδραργύρου, που είναι αναμειγμένα με κάποιο ευγενές αέριο ή μίγμα ευγενών αερίων. Ο Υδράργυρος εκπέμπει υπεριώδη ακτινοβολία και ο φώσφορος στο εσωτερικό της λυχνίας μετατρέπει την ενέργεια σε ορατό φως. Το φως παράγεται όπως και στους συμβατικούς λαμπτήρες φθορισμού με τη διαφορά ότι δεν υπάρχει ηλεκτρική σύνδεση που να εισέρχεται στη λυχνία και η ενέργεια μεταφέρεται μέσα από το γυάλινο περίβλημα μόνο μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής[2][7].

Μια γεννήτρια υψηλών συχνοτήτων παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο διαρρέει ένα επαγωγικό πηνίο και έτσι επάγεται ισχυρό εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Η ενέργεια μεταφέρεται στον Υδράργυρο με τον ίδιο τρόπο που δουλεύει ένας μετασχηματιστής, καθώς το μαγνητικό πεδίο επάγει εναλλασσόμενο ρεύμα στο εσωτερικό της λυχνίας. Ο αέριος Υδράργυρος θεωρείται ως το δευτερεύον του μετασχηματιστή και το επαγόμενο ρεύμα κυκλοφορεί μέσα στο αέριο, προκαλώντας επιτάχυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, τα οποία συγκρούονται με τα άτομα του Υδραργύρου και φέρνουν τα ηλεκτρόνια τους σε υψηλότερη ενεργειακά στάθμη. Τα ηλεκτρόνια αυτά, όταν επανέρχονται στη χαμηλότερη ενεργειακά κατάσταση, εκπέμπουν υπεριώδη ακτινοβολία. Η υπεριώδης ακτινοβολία προσκρούει στα τοιχώματα του λαμπτήρα, αλληλεπιδρά με τη σκόνη φωσφόρου που καλύπτει το λαμπτήρα εσωτερικά και μετατρέπεται σε ορατό φως[2][7][11].

Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής είναι μια τεχνολογία φωτισμού πέμπτης γενιάς και μέχρι πρόσφατα δεν είχαν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Το σημαντικό πλεονέκτημά τους είναι ο εξαιρετικά μεγάλος χρόνος ζωής συγκριτικά με τους υπόλοιπους τύπους λαμπτήρων. Επιπλέον, η απόδοσή τους βελτιώνεται συνεχώς, οπότε η χρήση τους στο μέλλον υπόσχεται σημαντικά οικονομικά οφέλη. Τα μειονεκτήματά τους είναι κυρίως το υψηλό κόστος κατασκευής και αγοράς και τα ζητήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του λαμπτήρα[12].



Σχήμα 17. Η 5^η γενιά λαμπτήρων, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής [13]

2

Σκοπός

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η περιγραφή και η βαθύτερη ανάλυση των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής για εφαρμογές γενικού φωτισμού. Για το σκοπό αυτό έγινε διεξοδική έρευνα και μελέτη των πιο καίριων και σύγχρονων επιστημονικών δημοσιεύσεων της ξένης, κυρίως, βιβλιογραφίας. Στη συνέχεια της εργασίας γίνεται μια λεπτομερής αναφορά στη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής.

Αρχικά, γίνεται μια ιστορική αναδρομή για τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής και στη συνέχεια αναλύονται οι λόγοι για τους οποίους η εμπορική αξιοποίηση της τεχνολογίας αυτής ξεκίνησε περίπου εκατό χρόνια μετά την ανακάλυψή της.

Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά η αρχή λειτουργίας και τα είδη των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής. Έπειτα, εξετάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των σύγχρονων λαμπτήρων επαγωγής που διατίθενται στην αγορά.

Έπειτα, γίνεται μια λεπτομερής αναφορά στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής και αφορούν το αμάλαμα, το αέριο πλήρωσης, το υλικό κατασκευής της γυάλινης λυχνίας, τους φωσφόρους και άλλες επικαλύψεις.

Συν τοις άλλοις, αναλύονται τα κυκλώματα τροφοδοσίας των λαμπτήρων επαγωγής, δηλαδή τα ballast, καθώς και τα κυκλώματα ελέγχου αυτών. Έπειτα, μελετώνται εκτενώς οι τέσσερις τρόποι διαβάθμισης του φωτισμού (dimming) των λαμπτήρων επαγωγής, αναφέροντας τα προτερήματα και τις αδυναμίες της κάθε μεθόδου.

Στην τελευταία ενότητα του τρίτου κεφαλαίου της διπλωματικής εργασίας περιγράφονται οι μηχανισμοί που ευθύνονται για τη φθορά των συστημάτων με λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής.

3

Λαμπτήρες Μαγνητικής Επαγωγής

3.1 Ιστορική Αναδρομή και Εμπορική Διάθεση των Λαμπτήρων

Το 1705, ο επιστήμονας Francis Hauksbee έδειξε ότι σε μια περιστρεφόμενη γυάλινη σφαίρα με εσωτερικό κενό, γεμισμένη με Υδράργυρο, έχοντας το χέρι του ενάντια στην περιστροφή της, το στατικό φορτίο που δημιουργήθηκε, προκάλεσε την εκπομπή φωτός, με τέτοια ένταση που αρκούσε για να διαβάσει κάποιος ένα έγγραφο[2].

Έπειτα το 1884, ο Johann Wilhelm Hittorf ανακάλυψε τις εκκενώσεις χωρίς εσωτερικά ηλεκτρόδια, οι οποίες στη συνέχεια μελετήθηκαν εξονυχιστικά από τον J. J. Thomson. Αυτοί οι δύο, θεωρούνται οι προπάτορες της τεχνολογίας των λαμπτήρων χωρίς ηλεκτρόδια[7].

Το 1891, ο Nikola Tesla παρουσίασε τον πρώτο λαμπτήρα άνευ ηλεκτροδίων στη Νέα Υόρκη. Ο λαμπτήρας τροφοδοτούταν από ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ραδιοσυχνοτήτων που επαγόταν από ένα μεγάλο "Tesla Coil". Ο Tesla εξέθεσε το λαμπτήρα στο κοινό, τον εξέλιξε περαιτέρω και προσπάθησε να κατοχυρώσει τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας, ώστε να τον εκμεταλλευθεί εμπορικά στο μέλλον. Παρ' όλα αυτά, αυτός ο λαμπτήρας δεν έφτασε ποτέ στα χέρια των καταναλωτών, καθώς υπήρχαν σοβαρά προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών[2][4][7].



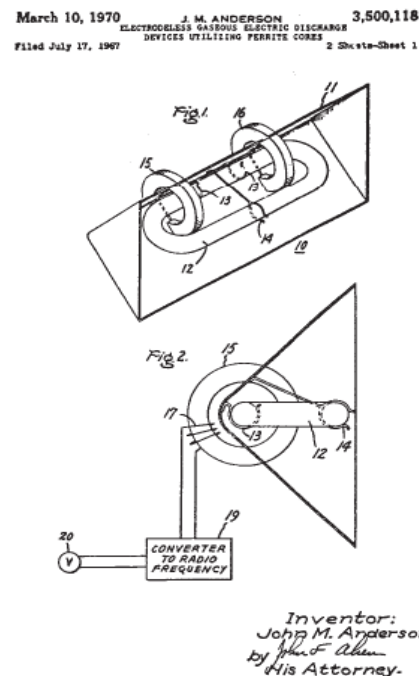
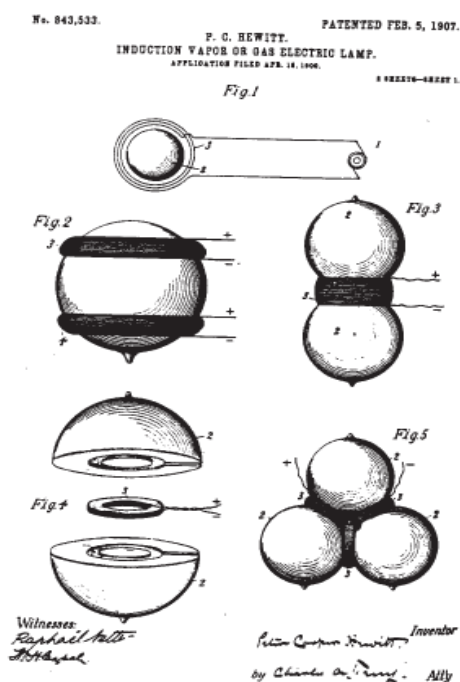
Σχήμα 18. Από την παρουσίαση του λαμπτήρα του Tesla στο Σικάγο, το 1893 [7]

Το 1904, ο Peter Cooper Hewitt ανέπτυξε ένα λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής που χρησιμοποιούσε Υδράργυρο σε αέρια κατάσταση και χαμηλή πίεση. Ασχολήθηκε με την ανάπτυξη λαμπτήρων επαγωγής, σε σχήμα σφαίρας ή διπλής σφαίρας και εξωτερικά επαγωγικά πηνία, τα οποία περιέβαλαν τη σφαίρα. Το πηνίο τροφοδοτούταν από μια μηχανική γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με συχνότητα στα 125 - 300 Hz, διότι τότε

δεν υπήρχαν ηλεκτρονικές γεννήτριες. Επίσης, κατασκεύασε και λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής[4][7].

Το 1936, οι Bethenod και Claude πρότειναν ένα λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής, με μια κοιλότητα επανεισαγωγής, μέσα στην οποία υπήρχε το πηνίο διέγερσης, με ή χωρίς πυρήνα φερρομαγνητικού υλικού. Η τοποθέτηση του πηνίου εσωτερικά, συνετέλεσε στο να μην καλύπτεται μέρος του παραγόμενου φωτός και στο να μειωθούν σημαντικά οι εκπομπές ραδιοσυχνοτήτων[4].

Το 1967, ο John Anderson, που εργαζόταν στη General Electric, αναπτύσσει τον πρώτο αξιόπιστο λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής, ο οποίος κινείται έξω από τα πειραματικά στάδια και πλέον διατίθεται εμπορικά[2][4][7].

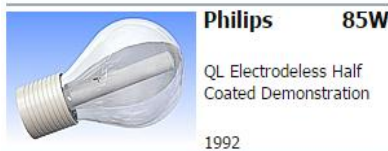


Σχήμα 19. Η πρώτη πατέντα του Hewitt [4] Σχήμα 20. Ο λαμπτήρας του Anderson [4]

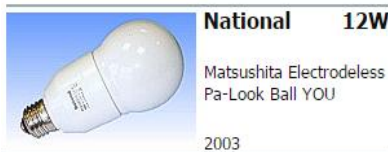
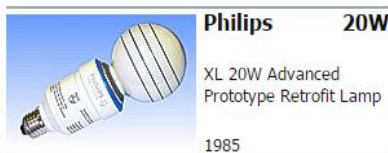
Το 1990, η Philips κατασκεύασε το λαμπτήρα επαγωγής QL που λειτουργούσε στα 2,65 MHz και τότε ξεκινά ουσιαστικά η εμπορική διάθεση των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής. Το 1992, η Matsushita διέθεσε στην αγορά το δικό της σύστημα φωτισμού μαγνητικής επαγωγής και το 1993 η Intersource Technologies κυκλοφόρησε το λαμπτήρα E-lamp που λειτουργούσε στα 13,6 MHz. Το 1994, η General Electric παρήγαγε το λαμπτήρα Genura, ο οποίος αποτελούσε υλοποίηση της πατέντας του John Anderson, διέθετε ενσωματωμένο ballast και λειτουργούσε στα 2,65 MHz. Το 1996, η Osram εισήλθε στην αγορά με το λαμπτήρα Endura, με συχνότητα λειτουργίας 250 KHz. Ο λαμπτήρας αυτός κυκλοφόρησε στις ΗΠΑ με την ονομασία Icetron. Το 1997, η PQL Lighting παρουσίασε στις ΗΠΑ το σύστημα φωτισμού επαγωγής Superior Life brand[2][7].

Το 2005, η Amko Solara στην Ταϊβάν, παρουσίασε τον πρώτο λαμπτήρα με δυνατότητα ρύθμισης της φωτεινής έντασης και ελέγχου μέσω διαδικτύου. Ο λαμπτήρας αυτός λειτουργεί στα 250 KHz. Το 2006, η Luxim εισήλθε στην αγορά με το λαμπτήρα-προβολέα LIFI και εξέλιξε περαιτέρω την τεχνολογία της με αποτέλεσμα να παράγει πλήθος φωτιστικών συστημάτων κατάλληλα για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους[2][7].

Remote Ballasted Lamps



Self Ballasted Lamps



Σχήμα 21. Παραδείγματα εμπορικών λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής [14]

3.2 Εμπόδια στην Εμπορική Εκμετάλλευση των Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής

Μετά την επίδειξη του πρώτου λαμπτήρα άνευ ηλεκτροδίων, που χρησιμοποιούσε τη μαγνητική επαγωγή για τη δημιουργία της ηλεκτρικής εκκένωσης, από τον Tesla, πολλές εταιρίες παγκοσμίως προσπάθησαν να εξελίσουν την τεχνολογία αυτή και να αναπτύξουν ένα λαμπτήρα αποδοτικό και εμπορικά βιώσιμο. Παρ' ότι αρκετοί κατασκευαστές λαμπτήρων δραστηριοποιήθηκαν προς αυτήν την κατεύθυνση, οι προσπάθειές τους δεν απέδωσαν καρπούς πριν τις αρχές της δεκαετίας του 1990, μετά από δεκαετίες έρευνας και ανάπτυξης. Έτσι, χρειάστηκε περίπου ένας αιώνας στη βιομηχανία για να μας συστήσει τους πρώτους λαμπτήρες γενικού σκοπού, που φάνηκε ότι θα έβρισκαν κάποια αποδοχή από το αγοραστικό κοινό. Οι λόγοι αυτής της τόσο μεγάλης καθυστέρησης θα περιγραφούν στη συνέχεια.

Πρώτα από όλα, ήταν ανεπαρκής η κατανόηση της φυσικής της εκκένωσης με ραδιοσυχνότητες και η σχέση της με τους λαμπτήρες επαγωγής ως σύστημα[4]. Επιπλέον, οι πρώτοι λαμπτήρες, που κυκλοφόρησαν στην αγορά και χρησιμοποιούσαν υψηλές συχνότητες για τη δημιουργία της εκκένωσης, προκαλούσαν σοβαρά προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Οι παρεμβολές αυτές εκδηλώνονταν ως θόρυβος σε παρακείμενα ραδιόφωνα, σε ασύρματους πομποδέκτες (walkie-talkies) και σε ευαίσθητο εργαστηριακό ή ιατρικό εξοπλισμό[1][5][15]. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι παλιότερα δεν υπήρχε μια έτοιμη τεχνολογία για την κατασκευή των λαμπτήρων επαγωγής και η μέχρι τότε τεχνολογία των γεννητριών που τροφοδοτούσαν τους λαμπτήρες, ήταν ανίκανη να προσφέρει το συνδυασμό υψηλής συχνότητας, χαμηλού κόστους και μεγάλης διάρκειας ζωής. Έτσι, η απουσία αποδοτικών, αξιόπιστων και οικονομικών ηλεκτρονικών για την παραγωγή ισχύος υψηλής συχνότητας, αποτέλεσε τροχοπέδη για την ευρεία διάθεση των πρώτων λαμπτήρων επαγωγής[4][5][16]. Ακόμη, χρειάστηκαν πολλά χρόνια για να εξελιχθεί και να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας[15]. Ένα άλλο πρόβλημα που αντιμετώπιζαν οι πρώτοι λαμπτήρες επαγωγής ήταν η μεγάλη φθορά των φωσφόρων, που κάλυπταν το εσωτερικό των λαμπτήρων, η οποία οφειλόταν στη μεγάλη φόρτιση των τοιχωμάτων τους και είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της φωτεινής τους ροής[5].

Με την πάροδο των ετών, μέσα από πλήθος μελετών και πειραμάτων, η βαθύτερη κατανόηση των θεμελιωδών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο ιονισμένο πλάσμα και η τεχνολογική εξέλιξη, οδήγησαν στη διάδοση των λαμπτήρων επαγωγής ως μια τεχνολογία πολλά υποσχόμενη στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας, με εφαρμογές έξω από τα εργαστήρια, σε γενικές χρήσεις φωτισμού, εσωτερικού και εξωτερικού χώρου. Έτσι, η σχετικά πρόσφατη πρόοδος στους ημιαγωγίμους διακόπτες ισχύος, που βοήθησε στην κατασκευή φθηνών και αξιόπιστων ηλεκτρονικών, οι ευφυείς τεχνικές θωράκισης για την αποφυγή των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και η χρήση σπάνιων γαιών για την

αντιμετώπιση της φθοράς των φωσφόρων, συνετέλεσαν στη διάθεση των πρώτων εμπορικά βιώσιμων λαμπτήρων επαγωγής, στις αρχές της δεκαετίας του 1990[4][5][15].

Παρ' ότι πρόκειται για μια ώριμη τεχνολογία και έχουν αντιμετωπιστεί πολλά από τα προβλήματα των πρώτων λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής, το ευρύ κοινό μπορεί να μη γνωρίζει καν την ύπαρξή τους. Ακόμα και εργολάβοι που ασχολούνται με το φωτισμό και εγκαταστάτες ηλεκτρολόγοι, δεν είναι εξοικειωμένοι με αυτά τα προϊόντα, παραμένουν επιφυλακτικοί απέναντι σε αυτήν την τεχνολογία και δεν την προτείνουν στους καταναλωτές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να μην προάγονται ως μια νέα εναλλακτική των συμβατικών λαμπτήρων φωτισμού και ακόμα και σήμερα να παραβλέπονται και να μη χρησιμοποιούνται ευρέως, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες LED, οι οποίοι προβάλλονται ως μια πηγή φωτισμού με υψηλή φωτεινή απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής[17][18].

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι, για τους οποίους τα συστήματα φωτισμού με επαγωγή, δεν είναι ιδιαίτερα δημοφιλή σήμερα, αρκετά χρόνια μετά την εμφάνισή τους. Το κόστος αποτελεί το κυριότερο μειονέκτημα των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής. Όταν επιλέγεται εξοπλισμός, θα πρέπει να υπάρχουν εναλλακτικές επιλογές και ανταγωνιστικές προσφορές. Όμως, κάθε κατασκευαστής αναπτύσσει το δικό του σύστημα με διαφορετική τεχνολογία, με αποτέλεσμα οι λαμπτήρες επαγωγής να είναι «ιδιοκτησία» του κάθε κατασκευαστή και οι διάφοροι τύποι να μην είναι εναλλάξιμοι μεταξύ τους, όπως συμβαίνει με τους υπόλοιπους συμβατικούς λαμπτήρες και αυτό περιορίζει τη διαθεσιμότητα και τη διανομή τους. Επίσης, ο αριθμός των εξειδικευμένων εμπόρων είναι περιορισμένος. Εφόσον, ο ανταγωνισμός είναι μικρός σε αυτό το πεδίο της τεχνολογίας, η ποιότητα των προϊόντων δεν αναβαθμίζεται και οι τιμές εξακολουθούν να είναι υψηλές. Το υψηλό αρχικό κόστος αυτών των λαμπτήρων οφείλεται και στο γεγονός ότι χρειάζονται υψηλής ποιότητας ηλεκτρονικά, για την κατασκευή της γεννήτριας υψηλών συχνοτήτων για την τροφοδοσία του λαμπτήρα, τα οποία κοστίζουν[18][19][22][24].

Οι Κατασκευαστές Πρωτότυπου Εξοπλισμού (Original Equipment Manufacturers-OEMs) αγοράζουν τα εξαρτήματα ενός συστήματος, τα συνθέτουν και τα διαθέτουν στην αγορά μαζί με κάποιες πρόσθετες υπηρεσίες, όπως είναι για παράδειγμα η παροχή εγγυήσεων, τεχνικής υποστήριξης, εγχειριδίων χρήσης κ.ά. Όμως, ωθούνται πολύ αργά προς την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων, καθώς δεν υπάρχει καθοριστικός παράγοντας για να επενδύσουν πόρους για το σχεδιασμό και την αγορά αυτών των προϊόντων. Ακόμη, οι κατασκευαστές και οι προμηθευτές δεν προωθούν δυναμικά τους λαμπτήρες επαγωγής. Αυτό συμβαίνει γιατί το οικονομικό όφελος για αυτούς δεν είναι ιδιαίτερα αυξημένο σε σχέση με τους συμβατικούς λαμπτήρες, αφού κύριο χαρακτηριστικό των λαμπτήρων επαγωγής είναι η εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής και άρα οι σαφώς λιγότερες αντικαταστάσεις[24].

Επιπλέον, υπάρχει απροθυμία για την αξιοποίηση αυτής της τεχνολογίας, διότι δεν έχουν γίνει τόσες πολλές δοκιμές και εφαρμογές για να προσδιοριστεί η βιωσιμότητα και η ακρίβεια των ισχυρισμών των κατασκευαστών. Έτσι, δύσκολα θα ρίσκαρε κανείς να κάνει

το χώρο του πεδίο δοκιμών και να εγκαταστήσει ένα καινοτόμο αλλά και ακριβό σύστημα, χωρίς πρώτα να έχει βεβαιωθεί για τα οφέλη που αυτό προσφέρει. Επίσης, αν και είναι λαμπτήρες εξοικονόμησης ενέργειας, δεν ενθαρρύνεται η χρήση τους με κάποια προγράμματα ανταμοιβής, όπως επιδοτήσεις ή εκπτώσεις από την εκάστοτε κρατική αρχή, όπως συνέβη για παράδειγμα με τα κλιματιστικά ή με άλλες συσκευές που θεωρούνται ενεργοβόρες[23][25].

Ο μοναδικός σχεδιασμός των λαμπτήρων επαγωγής, από την άλλη πλευρά, είναι ένα σημαντικό θέμα, διότι θα πρέπει να σχεδιαστούν νέα φωτιστικά που θα «φιλοξενήσουν» αυτούς τους λαμπτήρες, ώστε να γίνεται κατάλληλη διαχείριση της θερμότητας που παράγεται, για να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία τους και η μεγιστοποίηση της απόδοσης ολόκληρου του συστήματος. Μια άλλη επιλογή, είναι ο επανεξοπλισμός (retrofitting) των υπάρχοντων συστημάτων, ώστε να μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν σε αυτά οι λαμπτήρες επαγωγής. Όμως, αυτή είναι μια διαδικασία που δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε φωτιστικό και για κάθε λαμπτήρα επαγωγής και βέβαια σε πολλές περιπτώσεις είναι οικονομικά ασύμφορη[2][18][20].

Ένας επιπλέον παράγοντας που δυσχεραίνει την εμπορευματοποίηση αυτών των λαμπτήρων, είναι η περιορισμένη διαθεσιμότητά τους σε μεγάλες ισχείς. Επίσης, οι διαφορετικές τάσεις και η απουσία λαμπτήρων γενικού σκοπού για οικιακή χρήση, περιορίζουν τη χρήση των λαμπτήρων επαγωγής από σχεδιαστές και τελικούς καταναλωτές[24][21].

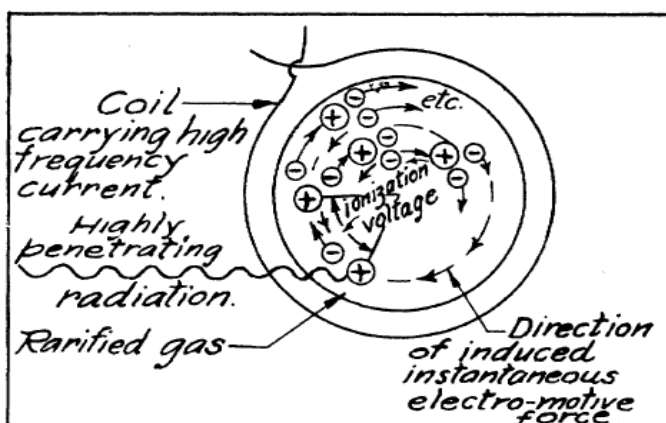
Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής παράγουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, λόγω της λειτουργίας της γεννήτριας των υψηλών συχνοτήτων, όπως αυτή των κινητών τηλεφώνων ή των ασύρματων δρομολογητών. Αυτή, λοιπόν, η ακτινοβολία είναι πιθανό να δημιουργήσει παρεμβολές σε ηλεκτρονικές συσκευές και τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η εγκατάστασή τους, ειδικά σε χώρους με ιατρικό εξοπλισμό ή άλλους υπολογιστές υψηλής ευαισθησίας. Βέβαια, όλοι οι λαμπτήρες που κυκλοφορούν στο εμπόριο συνοδεύονται από πιστοποιήσεις, σχετικές με το εύρος συχνοτήτων στο οποίο λειτουργούν. Παρ' όλα αυτά, η συμμόρφωση των κατασκευαστών με τα υπάρχοντα πρότυπα, δεν εξασφαλίζει ότι είναι αδύνατο να συμβούν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε μη ρυθμιζόμενες συχνότητες[1][2][18][19][20][21].

Το συμπέρασμα, λοιπόν, είναι ότι ακόμα και σήμερα, μετά από τόσα χρόνια μελετών και πρακτικών εφαρμογών οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, αν και έχουν πολλά να προσφέρουν, εξακολουθούν να αντιμετωπίζονται με δυσπιστία από σχεδιαστές και καταναλωτές, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

3.3 Αρχή Λειτουργίας Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής

Τα κυριότερα μέρη τα οποία αποτελούν ένα λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής είναι: η γεννήτρια υψηλών συχνοτήτων, το επαγωγικό πηνίο και η γυάλινη λάμπα. Η γεννήτρια ή αλλιώς ballast, όπως αναφέρεται στη ξένη βιβλιογραφία, περιέχει έναν ταλαντωτή, ο οποίος παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο τροφοδοτεί το πηνίο. Το πηνίο αποτελείται από ένα καλώδιο τυλιγμένο γύρω από πυρήνα φερρίτη και είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά της ενέργειας από τη γεννήτρια στο εσωτερικό του λαμπτήρα, όπου γίνεται η εκκένωση. Ο λαμπτήρας περιέχει Υδράργυρο σε μορφή αμαλγάματος και αέριο πλήρωσης, ενώ επικαλύπτεται εσωτερικά με σκόνη φωσφόρων, για τη μετατροπή της υπεριώδους ακτινοβολίας σε ορατή. Η γεννήτρια και το πηνίο μπορεί να συνδέονται μεταξύ τους με ομοαξονικό καλώδιο (remote ballast) και η γεννήτρια να είναι ξεχωριστή από το λαμπτήρα ή να βρίσκεται στη βάση του λαμπτήρα (integrated ballast). Επίσης, ανάλογα με το είδος του λαμπτήρα, το πηνίο μπορεί να βρίσκεται περιελιγμένο γύρω από το λαμπτήρα (λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής) ή να είναι τοποθετημένο σε μια κοιλότητα επανεισαγωγής, που μοιάζει με δοκιμαστικό σωλήνα, στο εσωτερικό του λαμπτήρα (λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής)[1][7][26].

Η λειτουργία των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής στηρίζεται στις θεωρίες της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και της εκκένωσης αερίων. Η γεννήτρια υψηλών συχνοτήτων παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο διαρρέει το επαγωγικό πηνίο και έτσι επάγεται ισχυρό εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό το μαγνητικό πεδίο, επάγει ένα στρεφόμενο ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο ευθύνεται για τον ιονισμό του αερίου στο εσωτερικό του λαμπτήρα, δηλαδή για τη δημιουργία πλάσματος. Έτσι, επάγεται εναλλασσόμενο ρεύμα στο εσωτερικό του λαμπτήρα, το οποίο ρέει μεταξύ των ατμών του αερίου και επιταχύνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, που συγκρούονται με τα άτομα του Υδραργύρου και φέρνουν τα ηλεκτρόνιά τους σε υψηλότερη ενεργειακά στάθμη. Τα ηλεκτρόνια αυτά, όταν επανέρχονται στη χαμηλότερη ενεργειακά κατάσταση, εκπέμπουν υπεριώδη ακτινοβολία. Η υπεριώδης ακτινοβολία προσκρούει στα τοιχώματα του λαμπτήρα, αλληλεπιδρά με τη σκόνη φωσφόρου που καλύπτει το λαμπτήρα εσωτερικά και μετατρέπεται σε ορατό φως[1][2][7][26].



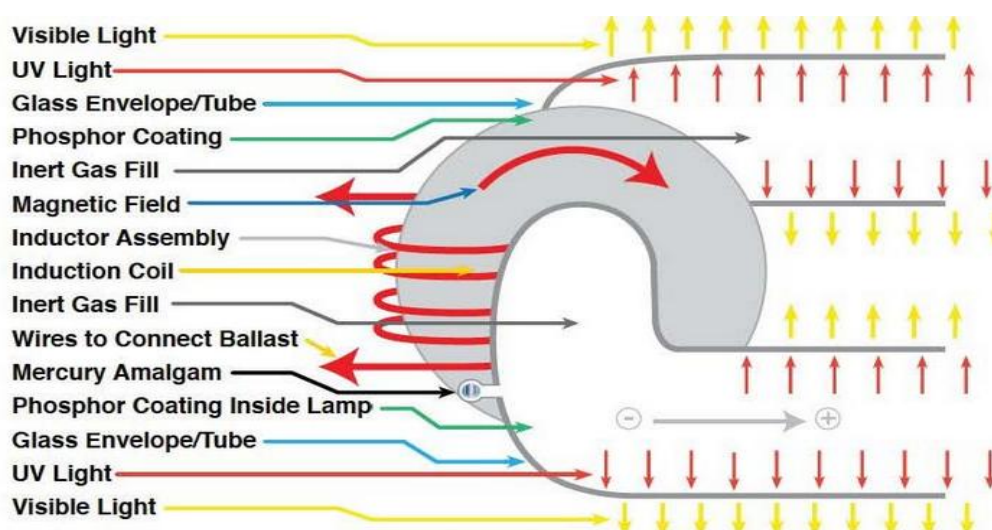
Σχήμα 22. Αρχή λειτουργίας Λαμπτήρων Μαγνητικής επαγωγής [26]

3.4 Είδη Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής

Ανάλογα με τη θέση του πηνίου, οι λαμπτήρες επαγωγής διακρίνονται στους λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής και στους λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής. Η λειτουργία τους περιγράφεται στη συνέχεια.

3.4.1 Λαμπτήρες Εξωτερικής Επαγωγής (External Induction Lamps)

Σε αυτούς τους λαμπτήρες, το πηνίο επαγωγής είναι τυλιγμένο γύρω από το λαμπτήρα. Ο πυρήνας φερριτή προσαρμόζεται περιμετρικά σε ένα ή περισσότερα σημεία του γυάλινου σωλήνα και γύρω από αυτόν τυλίγεται σπειροειδώς ένα καλώδιο από χαλκό. Ο επαγωγέας τοποθετείται στο εσωτερικό μιας θήκης και προκειμένου να μην έρθει σε άμεση επαφή με το γυαλί του λαμπτήρα, χρησιμοποιείται ένα μαλακό υλικό ή καουτσούκ μεταξύ αυτών. Η ενέργεια υψηλών συχνοτήτων που μεταφέρεται στο πηνίο από το ballast, μετατρέπεται το πηνίο σε ηλεκτρομαγνήτη, ο οποίος παράγει ισχυρό μαγνητικό πεδίο, το οποίο διαπερνά το γυαλί και διεγείρει το αμάλγαμα Υδραργύρου, που βρίσκεται σε μια μικρή κάψουλα στο εσωτερικό του σωλήνα. Η προτιμώμενη θέση για το αμάλγαμα είναι κοντά στον επαγωγέα, ώστε να διεγείρεται εύκολα ο Υδράργυρος από το μαγνητικό πεδίο. Είναι πιθανή η ύπαρξη δεύτερου αμαλγάματος, που αναφέρεται ως βοηθητικό και συμβάλλει στην αρχική φάση της εκκένωσης. Ο Υδράργυρος εξατμίζεται και διαχέεται σε ολόκληρο το σωλήνα. Ο αέριος Υδράργυρος παράγει υπεριώδη ακτινοβολία, η οποία μετατρέπεται σε ορατό φως μέσω των φωσφόρων. Το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας τύπος μετασχηματιστή, όπου ο επαγωγέας είναι το πρωτεύον τύλιγμα, ενώ τα διεγερμένα άτομα του Υδραργύρου στο εσωτερικό του λαμπτήρα, δημιουργούν ένα δευτερεύον τύλιγμα μιας σπείρας και με αυτόν τον τρόπο η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται μέσω των γυάλινων τοιχωμάτων και διεγείρει τα άτομα του Υδραργύρου. Ο συντελεστής σύζευξης του μετασχηματιστή υποτίθεται κοντά στη μονάδα, διότι όλο το μαγνητικό πεδίο περικλείει την εκκένωση [1][2][4][7].

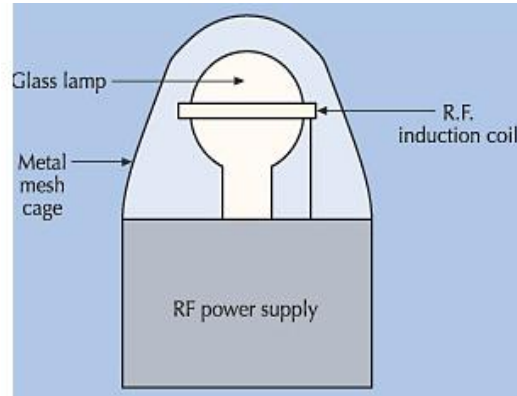


Σχήμα 23. Λειτουργία λαμπτήρα εξωτερικής επαγωγής[27]

Οι λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής έχουν στην πλειοψηφία τους τοροειδές σχήμα (σχήμα 24) και λειτουργούν σε χαμηλότερες συχνότητες από τους λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής. Βέβαια, έχουν κυκλοφορήσει και σε σφαιρικό σχήμα (σχήμα 25), που εξωτερικά μοιάζουν πολύ με τους κλασικούς λαμπτήρες πυρακτώσεως, αλλά λειτουργούν σε πολύ υψηλότερες συχνότητες από τους τοροειδείς λαμπτήρες και δεν είναι τόσο διαδεδομένοι.



Σχήμα 24. Τοροειδής λαμπτήρες [28]



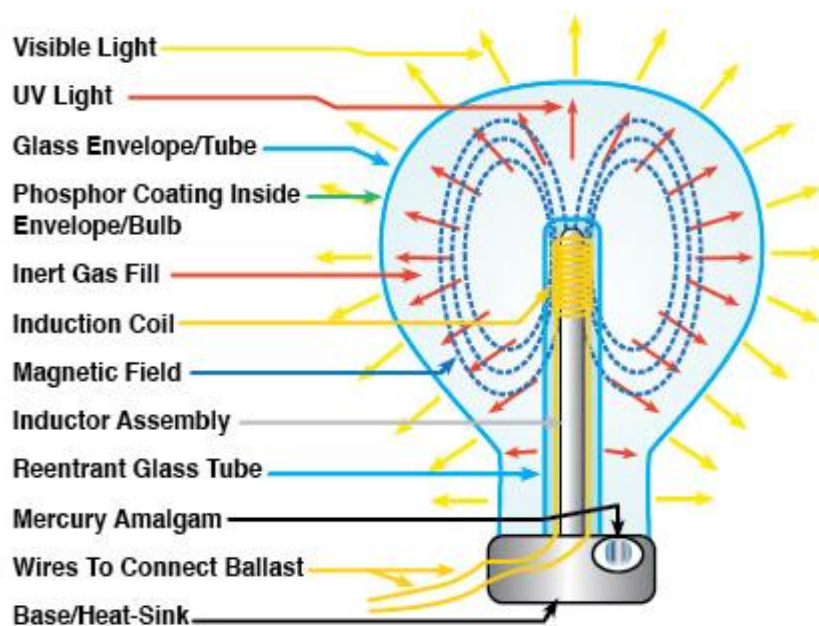
Σχήμα 25. Σφαιρικός λαμπτήρας[29]

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, υπάρχουν κάποιες κατευθυντήριες γραμμές για την επιλογή του κατάλληλου τύπου λαμπτήρα. Ακολουθώντας αυτές τις γραμμές, λοιπόν, οι λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής χρησιμοποιούνται όταν, πρώτα από όλα, υπάρχει επαρκής χώρος για να φιλοξενήσει έναν τέτοιο λαμπτήρα και συνήθως το μεγαλύτερο ballast που τον συνοδεύει. Επίσης, είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν την υπάρχουσα τεχνολογία φωτισμού, όταν είναι επιθυμητή μεγαλύτερη απόδοση (lm/W) αλλά και ταυτόχρονη εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό, πρακτικά, συμβαίνει όταν αντικαθιστούν λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης (HPS) ή μεταλλικών αλογονιδίων (MH) μεγαλύτερης ισχύος. Ακόμη, προτείνεται η χρήση τους, όταν απαιτείται εξαιρετικά μεγάλος χρόνος ζωής και αυτό συμβαίνει σε τοποθεσίες όπου η συντήρηση είναι δύσκολη και ακριβή, αφού η πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σχέση με τους λαμπτήρες που αντικαθιστούν, συμβάλλει στη μείωση των εξόδων αντικατάστασης και εργασίας. Επιπλέον, επειδή οι λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής παράγουν ελάχιστη θερμότητα, αποτελούν τη βέλτιστη λύση σε χώρους όπου οι συμβατικοί λαμπτήρες επιβαρύνουν το κόστος λειτουργίας με τη θερμότητα που εκπέμπουν, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στα ψυγεία. Τέλος, μπορούν να τοποθετηθούν σε φωτιστικά ανοικτού ή κλειστού τύπου, αρκεί να γίνεται κατάλληλη διαχείριση της θερμότητας των εξωτερικών πηνίων τους, ώστε να λειτουργούν εντός των ορίων θερμοκρασίας που έχουν τεθεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών[20][31].

3.4.2 Λαμπτήρες Εσωτερικής Επαγωγής (Internal Induction Lamps)

Αυτοί οι λαμπτήρες ήταν οι πρώτοι που κατασκευάστηκαν. Μοιάζουν εξωτερικά με τους συμβατικούς λαμπτήρες πυρακτώσεως και το ballast τους μπορεί να είναι είτε ξεχωριστό είτε ενσωματωμένο στο λαμπτήρα (σχήμα 27). Η γυάλινη λυχνία, η οποία είναι σφραγισμένη αεροστεγώς, διαθέτει μια κοιλότητα επανεισαγωγής (re-entrant cavity). Αυτή η κοιλότητα περιέχει κάποιο αδρανές αέριο, είναι επικαλυμμένη με φώσφορο και μέσα σε αυτή είναι τοποθετημένος ο επαγωγέας, που είναι ένα καλώδιο σπειροειδώς τυλιγμένο γύρω από μια ράβδο φερρίτη. Το πηνίο τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας από το ballast, παράγεται μαγνητικό πεδίο, το οποίο διεγείρει τα άτομα Υδραργύρου στο αμάλγαμα. Ο Υδράργυρος παράγει υπεριώδη ακτινοβολία, η οποία μετατρέπεται σε ορατό φως μέσω των φωσφόρων. Ένα κύκλωμα συντονιστή στο ballast, παράγει μια αρχικά υψηλή τάση στο πηνίο, προκειμένου να δημιουργηθεί η εκκένωση του αερίου και στη συνέχεια η τάση επανέρχεται στα κανονικά επίπεδα λειτουργίας. Θεωρείται και εδώ το μοντέλο του μετασχηματιστή, μόνο που ο συντελεστής σύζευξης μεταξύ του πηνίου και της εκκένωσης είναι σημαντικά μικρότερος της μονάδας, αφού μόνο ένα μέρος του μαγνητικού πεδίου περικλείει την εκκένωση[1][2][4][7].

Αξίζει να σημειωθεί ότι στους λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής, η μεταφορά της ενέργειας εντοπίζεται γύρω από το πηνίο και αυτό προκαλεί υπερθέρμανση, που περιορίζει την απόδοση του λαμπτήρα. Για αυτό το λόγο, θα πρέπει να γίνεται κατάλληλη διαχείριση της επιπλέον θερμότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με κάποιο σύστημα ψύξης, το οποίο στην πιο απλή του μορφή είναι μια μεταλλική ράβδος στο εσωτερικό του πυρήνα από φερρίτη, στερεωμένη σε μια φλάντζα στήριξης, η οποία συνδέεται με το μεταλλικό μέρος του φωτιστικού[30].



Σχήμα 26. Λειτουργία λαμπτήρα εσωτερικής επαγωγής[27]



Σχήμα 27. Λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής με ξεχωριστό ή ενσωματωμένο ballast [4]

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι λαμπτήρες εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής προτιμούνται όταν απαιτείται μια πηγή φωτός συμπαγούς ή βολβοειδούς σχήματος, όταν για παράδειγμα, ο χώρος είναι περιορισμένος ή για αισθητικούς λόγους όταν ο λαμπτήρας είναι ορατός. Επίσης, χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν τις υπάρχουσες τεχνολογίες, όταν απαιτείται αρκετά καλή απόδοση (lm/W) και ταυτόχρονη εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό, πρακτικά, συμβαίνει όταν αντικαθιστούν λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης (HPS) ή μεταλλικών αλογονιδίων (MH) μικρότερης ισχύος ή ακόμα και λαμπτήρες ατμών υδραργύρου (MV) που δεν είναι αποδοτικοί. Τέλος, οι λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής είναι φρόνιμο να χρησιμοποιούνται σε φωτιστικά ανοικτού τύπου ή όταν η κυκλοφορία του αέρα είναι επαρκής ή όταν γίνεται κατάλληλη διαχείριση της θερμότητας, ώστε να λειτουργούν εντός των ορίων θερμοκρασίας που έχουν τεθεί από τις προδιαγραφές των κατασκευαστών[20][31].

3.4.3 Σύγκριση Λαμπτήρων Εσωτερικής και Εξωτερικής Επαγωγής

Οι λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής είναι οι πρώτοι που κατασκευάστηκαν, είναι πιο διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται κυρίως σε εσωτερικούς χώρους. Από την άλλη πλευρά, οι λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών και η χρήση τους αυξάνεται διαρκώς. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εξωτερικούς χώρους, για παράδειγμα σε σήραγγες, στον οδοφωτισμό, σε χώρους στάθμευσης αλλά και σε εσωτερικούς χώρους, για παράδειγμα σε εργοστάσια ή αποθήκες, εμπορικά καταστήματα και γραφεία[7][31].

Η πρώτη και κυριότερη διαφορά μεταξύ των λαμπτήρων εσωτερικής επαγωγής και των λαμπτήρων εξωτερικής επαγωγής, είναι ότι οι πρώτοι έχουν το πηνίο στο εσωτερικό μίας κοιλότητας μέσα στο λαμπτήρα, ενώ οι δεύτεροι το έχουν τυλιγμένο εξωτερικά του λαμπτήρα. Οι εσωτερικής επαγωγής έχουν συνήθως σχήμα βολβοειδές ή σφαιρικό, είναι μικρότερου μεγέθους και χρησιμοποιούνται συνήθως όταν απαιτείται λαμπτήρας μικρού μεγέθους στα συνηθισμένα οικιακά φωτιστικά και μπορούν να τοποθετηθούν στα ντουί χωρίς να απαιτείται εξειδικευμένο σύστημα. Από την άλλη, οι λαμπτήρες εξωτερικής

επαγωγής είναι μεγαλύτερου μεγέθους και κυκλοφορούν σε διάφορα σχήματα, για παράδειγμα κυκλικό, ορθογώνιο, οβάλ κλπ. Εξαιτίας του μεγαλύτερου μεγέθους τους χρειάζονται εξειδικευμένα φωτιστικά για να τα φιλοξενήσουν ή μπορούν να τοποθετηθούν σε υπάρχοντα φωτιστικά, αν υπάρχει αρκετός χώρος για το λαμπτήρα και το ballast[20][31].

Επιπλέον, η θέση του πηνίου παίζει καθοριστικό ρόλο και στην παραγόμενη θερμότητα από τη λειτουργία του λαμπτήρα. Οι λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής λειτουργούν γενικότερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες και αυτό μειώνει αναπόφευκτα τη διάρκεια ζωής τους και τη φωτεινή απόδοση. Έτσι, έχουν διάρκεια ζωής περίπου 60.000 - 75.000 ώρες και απόδοση γύρω στα 60 - 80 lm/W, ενώ οι λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής, στους οποίους η θερμότητα είναι ευκολότερα διαχειρίσιμη, αφού τα πηνία τους είναι εξωτερικά του λαμπτήρα, έχουν διάρκεια 85.000 - 100.000 ώρες και απόδοση περίπου 75 - 90 lm/W. Επίσης, έχουν και διαφορετικές καμπύλες υποβάθμισης της φωτεινής ροής συναρτήσει του χρόνου, όπου οι λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής αντιμετωπίζουν μικρότερη πτώση των lumen. Στους λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη διαχείριση της επιπλέον θερμότητας που παράγεται και επηρεάζει τη λειτουργία του λαμπτήρα[1][7][30].

Τέλος, οι λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής λειτουργούν με ballast υψηλών ή χαμηλών συχνοτήτων, ανάλογα με της ανάγκες της εφαρμογής, ενώ οι λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής συνήθως με ballast χαμηλών συχνοτήτων για πιο σταθερό φως[18].

3.5 Χαρακτηριστικά Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής

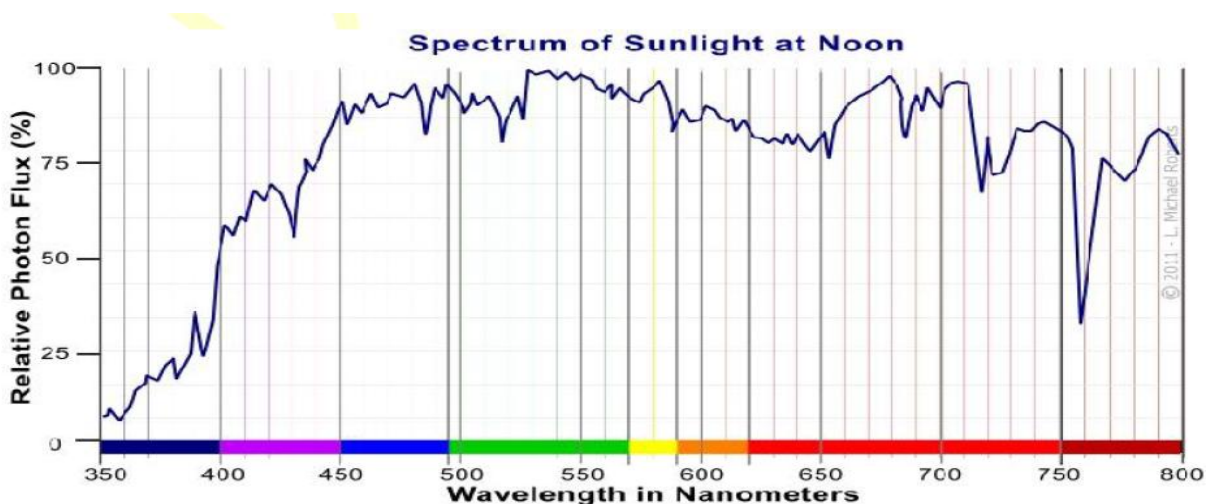
3.5.1 Θερμοκρασία Χρώματος και Ποιότητα Χρώματος

Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, ανάλογα με την επιλογή των φωσφόρων, διατίθενται σε ποικίλες θερμοκρασίες χρώματος προκειμένου να εξυπηρετήσουν κατάλληλα όλες τις ανάγκες φωτισμού. Στην αγορά, κυκλοφορούν λαμπτήρες με θερμοκρασία χρώματος από 2.700 °K που καλείται «θερμό λευκό», έως 6.500 °K το γνωστό ως «φως ημέρας». Οι κατασκευαστές στην πλειοψηφία τους, δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στην σκοτοπική όραση και για αυτό τα πιο ευρέως διαδεδομένα μοντέλα λαμπτήρων είναι αυτά με θερμοκρασία χρώματος 5.000 °K[1][31].

Η ποιότητα χρώματος μιας φωτεινής πηγής εκφράζεται από το δείκτη χρωματικής απόδοσης. Ο δείκτης R_a ή CRI των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής κυμαίνεται στο εύρος 80 – 85, που σημαίνει ότι η αναπαραγωγή των χρωμάτων είναι ακριβής[12][32].

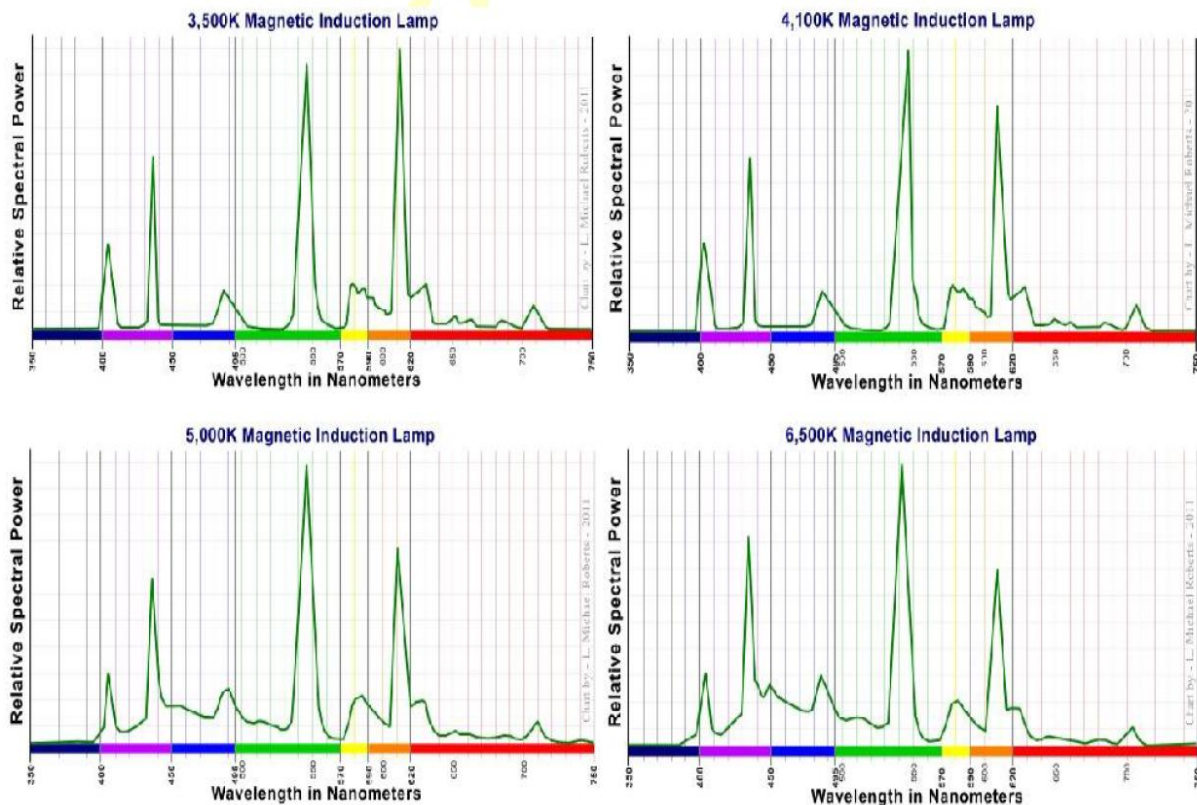
3.5.2 Φασματική Κατανομή

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η φασματική κατανομή της εξόδου των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής, που είναι η μέτρηση της ποσότητας φωτός για κάθε μήκος κύματος που παράγεται από αυτήν. Οι μετρήσεις οι οποίες λαμβάνονται με τη χρήση ειδικού οργάνου μπορούν να παρασταθούν γραφικά σε ένα διάγραμμα, το οποίο αντικατοπτρίζει τις τιμές έντασης φωτός σε σχέση με το μήκος κύματος. Η φασματική κατανομή του ηλιακού φωτός αποτελεί το μέτρο σύγκρισης για την αξιολόγηση των φασματικών κατανομών του φωτός, το οποίο παράγουν οι διάφοροι τύποι λαμπτήρων. Αν και η φασματική κατανομή του ηλιακού φωτός ποικίλει ανάλογα με την ώρα της ημέρας, τη γωνία του ηλίου και την ατμοσφαιρική μόλυνση, μια τυπική φασματική κατανομή του ηλιακού φωτός μεσημβρινής ώρας με αίθριο καιρό απεικονίζεται στο σχήμα 28.



Σχήμα 28. Φασματική κατανομή ηλιακού φωτός [73]

Η φασματική κατανομή των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής εξαρτάται επίσης από την εκάστοτε υλοποίηση και τη θερμοκρασία χρώματος την οποία παράγουν. Παρακάτω παρατίθενται προς σύγκριση οι φασματικές κατανομές του φωτός, που παράγεται από λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής με θερμοκρασίες χρώματος 3.500 °K, 4.100 °K, 5.000 °K και 6.500 °K (σχήμα 29)[11][72][73].



Σχήμα 29. Φασματική κατανομή φωτός λαμπτήρων επαγωγής [73]

3.5.3 Φωτεινή Ροή και Φωτεινή απόδοση

Η φωτεινή ροή των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής ποικίλει ανάλογα με το είδος, την ισχύ, το αέριο πλήρωσης, την εσωτερική πίεση και γενικότερα την υλοποίηση του λαμπτήρα. Σε σελίδες του διαδικτύου που εμπορεύονται λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, συναντήθηκαν τιμές της φωτεινής ροής έως 25.000 lumen[74].

Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές φωτεινής απόδοσης. Όσον αφορά τους λαμπτήρες εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής οι τιμές αυτές κυμαίνονται στα 60 – 80 lm/W, ενώ για τους λαμπτήρες εξωτερικής μαγνητικής επαγωγής η απόδοση είναι περίπου 75 - 90 lm/W. Βέβαια, η μέτρηση των φωτομετρικών μεγεθών διαφέρει ανάλογα με το σχεδιασμό του εκάστοτε συστήματος λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής. Παρατηρήθηκε, επίσης, ότι σε συνθήκες dimming οι τιμές της απόδοσης είναι ακόμα υψηλότερες[1][11][27][72].

Ο δείκτης S/P, δηλαδή η αναλογία σκοτοπικής/φωτοπικής ακτινοβολίας, συνδέεται άμεσα με τη θερμοκρασία χρώματος του λαμπτήρα. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία χρώματος που παράγει ένα φωτιστικό σώμα, τόσο αυξάνεται και ο δείκτης S/P. Αυτό συμβαίνει διότι όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία χρώματος, τόσο πιο αριστερά μετατοπισμένο είναι το φάσμα εκπομπής του, δηλαδή προς το πεδίο της σκοτοπικής όρασης[11][72]. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, σε λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής με θερμοκρασία χρώματος 3.500 °K ο λόγος S/P είναι 1,3, με θερμοκρασία χρώματος 4.100 °K είναι 1,62, με θερμοκρασία χρώματος 5.000 °K είναι 1,96 και για λαμπτήρες με θερμοκρασία χρώματος 6.500 °K είναι 2,22[73]. Οι μεγάλες τιμές του συντελεστή S/P εξηγούν το λόγο που οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής φαίνονται λαμπρότεροι στο ανθρώπινο μάτι και παρέχουν καλύτερη ποιότητα φωτός σε σχέση με άλλους λαμπτήρες που έχουν την ίδια έξοδο σε lumen. Χρησιμοποιώντας τον λόγο S/P μπορεί να προσδιοριστεί η απόδοση της φωτεινής πηγής, όπως γίνεται αντιληπτή από τον ανθρώπινο οφθαλμό, λαμβάνοντας υπόψη τα VEL. Έτσι, αν οι αποδόσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω πολλαπλασιαστούν με την τιμή 1,3 για τη χειρίστη απόδοση και με την τιμή 2,22 για τη βέλτιστη απόδοση, οι τιμές που προκύπτουν για λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής είναι 78 – 177,6 lm/W και για λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής 97,5 - 199,8 lm/W.

3.5.4 Απόδοση, Συντελεστής Ισχύος και THD συστήματος

Τα συστήματα λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές αποδόσεις που συνήθως ξεπερνούν το 85%. Αυτό συμβαίνει επειδή οι απώλειες ενέργειας στο ballast είναι πολύ περιορισμένες. Οι τόσο υψηλές τιμές απόδοσης οφείλονται στα ψηφιακά κυκλώματα ελέγχου της γεννήτριας υψηλών συχνοτήτων, τα οποία περιλαμβάνουν μικροεπεξεργαστές και άλλα συστήματα προηγμένης τεχνολογίας, που είναι υπεύθυνα για την ομαλή λειτουργία του λαμπτήρα και ρυθμίζουν την κατάστασή του με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια[1][32][45][73].

Ο συντελεστής ισχύος των ballast των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής χαρακτηρίζεται πολύ υψηλός. Μάλιστα, δεν είναι λίγες οι δημοσιεύσεις στις οποίες το ηλεκτρονικό ballast επιτυγχάνει τιμές συντελεστή ισχύος 0,98 με 0,99. Αυτές οι τόσο υψηλές τιμές οφείλονται στην ύπαρξη του σταδίου διόρθωσης συντελεστή ισχύος που περιλαμβάνουν όλα τα ballast των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής[11][27][36][45][73].

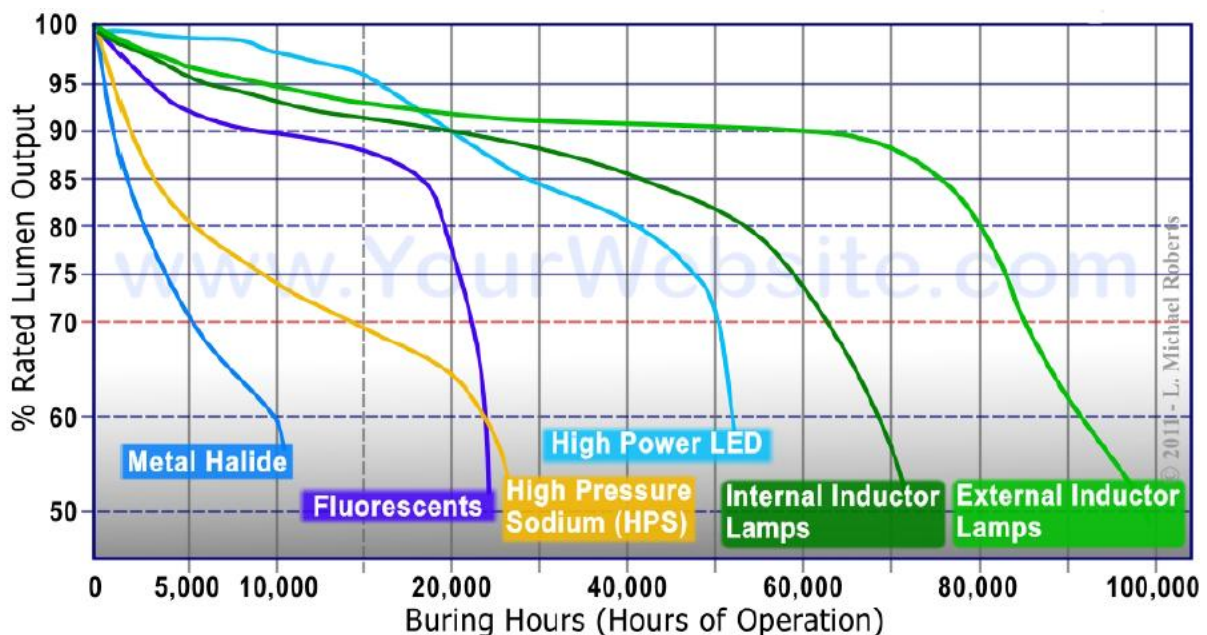
Εκτός του συντελεστή ισχύος, κατά την αξιολόγηση ενός συστήματος φωτισμού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης και του ρεύματος. Τα συνιστώμενα όρια της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης είναι μικρότερα του 5% και του ρεύματος είναι μικρότερα του 32%. Γενικά τα ballast των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής παρουσιάζουν χαμηλές τιμές THD, λόγω της ύπαρξης του φίλτρου ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στην είσοδο της τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα για το συντελεστή ολικής αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος είναι πολύ συνηθισμένες

τιμές 12% έως 17%, ενώ σε ballast που υλοποιήθηκε με μετατροπέα boost παρατηρήθηκε αρκετά υψηλή τιμή κοντά στο 28%[11][32][36][37][45][72].

3.5.5 Διάρκεια Ζωής

Η διάρκεια ζωής αποτελεί το μεγαλύτερο και γνωστότερο πλεονέκτημα των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής, καθώς ξεπερνά το χρόνο ζωής όλων των συμβατικών λαμπτήρων. Οι λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής έχουν διάρκεια ζωής 60.000 – 75.000 ώρες, ενώ οι λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής έχουν διάρκεια ζωής 85.000 – 100.000 ώρες. Για λαμπτήρες επαγωγής με ενσωματωμένο ballast η διάρκεια ζωής κυμαίνεται από 15.000 έως 50.000 ώρες. Η εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων επαγωγής οφείλεται στην απουσία ηλεκτροδίων στο εσωτερικό του λαμπτήρα, που είναι και ο κύριος λόγος αποτυχίας των υπόλοιπων πηγών φωτισμού που περιλαμβάνουν ηλεκτροδία[1][17].

Ένα σημαντικό στοιχείο, επίσης, για την αξιολόγηση του χρόνου ζωής του εκάστοτε συστήματος φωτισμού είναι η καμπύλη υποβάθμισης της φωτεινής ροής, η οποία προσομοιώνει τη φωτεινή ροή του λαμπτήρα με την πάροδο του χρόνου και παρουσιάζεται στο σχήμα 30 για διάφορους τύπους λαμπτήρων[11][72].



Σχήμα 30. Υποβάθμιση φωτεινής ροής διαφόρων λαμπτήρων [1]

Εκτός από τις περιπτώσεις που ο λαμπτήρας έχει υποστεί βλάβη, συνίσταται από τους ειδικούς η αντικατάστασή του όταν το φως που παράγει αντιστοιχεί στο 70% της μέγιστης φωτεινής ροής του. Αν και μια μείωση της φωτεινής ροής κατά 15% δε γίνεται αντιληπτή από τον ανθρώπινο οφθαλμό, μια μείωση 15% έως 30% γίνεται έντονα αισθητή. Το σημείο όπου η φωτεινή ροή υποβαθμίζεται κάτω από το 70% του μέγιστου προσδιορίζεται για τους λαμπτήρες εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής περίπου στις 60.000 – 70.000 ώρες, ενώ

για τους λαμπτήρες εξωτερικής μαγνητικής επαγωγής περίπου στις 80.000 – 90.000 ώρες. Αυτές οι τιμές, βέβαια, είναι πλασματικές, καθώς οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής άρχισαν να εφαρμόζονται αρκετά πρόσφατα και οι διάφορες εκτιμήσεις περιορίζονται σε δοκιμές υπό εργαστηριακές συνθήκες. Παρ' όλα αυτά, είναι προφανής η υπεροχή των λαμπτήρων επαγωγής όσον αφορά τη διάρκεια ζωής[1][17].

3.5.6 Αντοχή σε Ακραίες Θερμοκρασίες Εξωτερικού Περιβάλλοντος

Τα περισσότερα είδη λαμπτήρων και συστημάτων φωτισμού έχουν σχεδιαστεί για την άριστη λειτουργία τους σε περιβάλλον με θερμοκρασία 25 °C, όμως, στην πράξη σπάνια συναντώνται αυτές οι θερμοκρασιακές συνθήκες. Οι θερμοκρασίες στις οποίες είναι δυνατόν να λειτουργήσει και να είναι αποδοτικό ένα σύστημα φωτισμού είναι μια βασική παράμετρος επιλογής του κατάλληλου συστήματος, ειδικότερα σε συστήματα φωτισμού εξωτερικών χώρων, οι οποίοι είναι πιθανόν να είναι εκτίθενται σε ακραίες θερμοκρασίες. Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής μπορούν να λειτουργήσουν σε κατώτερες θερμοκρασίες από -35 °C έως -50 °C, ανάλογα με τον κατασκευαστή, ενώ παράλληλα ακόμα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος -40 °C διατηρούν το 85% της απόδοσης τους σε lumen. Η αντοχή σε αυτές τις ακραίες θερμοκρασίες οφείλεται στον σχεδιασμό και την τοποθέτηση του πηνίου στους λαμπτήρες. Όσον αφορά τις υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής περιορίζονται από την αντοχή των γεννητριών υψηλών συχνοτήτων και μπορούν να λειτουργήσουν κανονικά σε θερμοκρασίες έως 50 °C[11][53][72]. Η λειτουργία τους σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος άνω των 50 °C αν και είναι εφικτή, φέρει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του χρόνου ζωής τους[70].

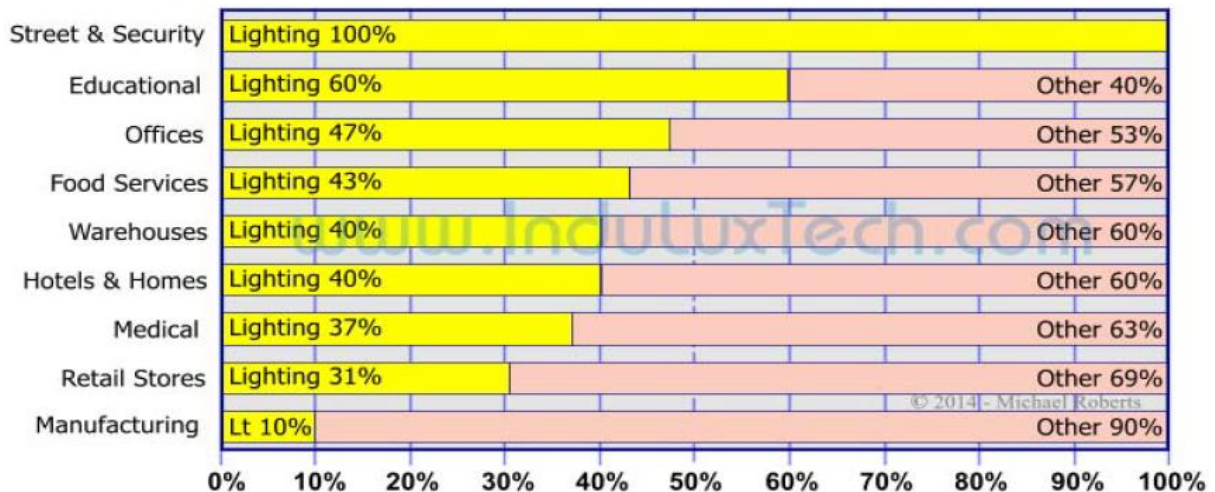
3.5.7 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Με την πάροδο του χρόνου, οι καταναλωτές αλλά και οι επιχειρήσεις αποκτούν όλο και μεγαλύτερη οικολογική συνείδηση και προσπαθούν να εφαρμόζουν φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες, καθώς το φαινόμενο της παγκόσμιας θέρμανσης και της κλιματικής αλλαγής έχουν ευαισθητοποιήσει περιβαλλοντικά την παγκόσμια κοινότητα. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τις οποίες μπορεί να επιφέρει η επιλογή ενός συστήματος φωτισμού σε σύγκριση με τις εναλλακτικές προς αυτό διαθέσιμες τεχνολογίες, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στους τομείς της μείωσης εκπομπών CO₂, της χρήσης Υδραργύρου και της ανακύκλωσης των πρώτων υλών[11][49][72].

3.5.7.1 Μείωση Εκπομπών CO₂

Η συνολική ποσότητα ενέργειας η οποία χρησιμοποιείται για φωτισμό αποτελεί το 13 - 15% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας παγκοσμίως. Είναι χαρακτηριστικό ότι για την

Ευρώπη και την Αμερική η ενέργεια η οποία καταναλώνεται για τον φωτισμό χώρων σε εγκαταστάσεις αποτελεί το 47% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας των εγκαταστάσεων αυτών, ενώ για τον τομέα της βαριάς βιομηχανίας το ποσοστό αυτό ανέρχεται σε 10%. Η κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα παρουσιάζεται στο σχήμα 31.



Σχήμα 31. Κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα [49]

Το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως προέρχεται από την χρήση ορυκτών καυσίμων, κυρίως άνθρακα και φυσικού αερίου με αποτέλεσμα να απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίες επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον και συντελούν στην διόγκωση του φαινομένου του θερμοκηπίου[11][49][72]. Επομένως, η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας για φωτισμό θα συνεισφέρει στη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, που προκαλούνται από την παραγωγή ενέργειας[1]. Οι λαμπτήρες επαγωγής παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές φωτεινής απόδοσης και αυτό συνεπάγεται χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και επομένως εκπομπή μικρότερων ποσοτήτων CO₂. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής μπορούν να εξοικονομήσουν ενέργεια 35% με 75%[17].

3.5.7.2 Χρήση Υδραργύρου

Ο Υδράργυρος είναι μια τοξική και μη διασπώμενη ουσία η οποία χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των συστημάτων φωτισμού. Για τις επιπτώσεις των λαμπτήρων ως προς την επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τη χρήση Υδραργύρου θα πρέπει να εξεταστεί ο τύπος του Υδραργύρου, δηλαδή αν είναι σε στερεά ή υγρή μορφή και η ποσότητα του Υδραργύρου που χρησιμοποιείται ανά ώρα λειτουργίας. Στους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής χρησιμοποιείται αμάλγαμα Υδραργύρου. Αυτή η στερεά μορφή Υδραργύρου αποτελεί πολύ μικρότερο κίνδυνο για το περιβάλλον, γιατί σε περίπτωση θραύσης του λαμπτήρα είναι δυνατό να συλλεχθεί με γάντια, χωρίς να απαιτείται αποκλεισμός του χώρου. Επίσης, το αμάλγαμα μπορεί να αφαιρεθεί μετά το τέλος ζωής του λαμπτήρα και να επαναχρησιμοποιηθεί και να ανακυκλωθούν τα υπόλοιπα υλικά. Τέλος, αναφορικά με την

ποσότητα Υδραργύρου, αξίζει να αναφερθεί ότι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής χρησιμοποιούν τη μικρότερη ποσότητα Υδραργύρου ανά ώρα λειτουργίας σε σχέση με τις συμβατικές πηγές φωτός που περιέχουν Υδράργυρο[48][49][73].

3.5.7.3 Ανακύκλωση

Πολλά από τα υλικά που συνθέτουν ένα λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής, όπως για παράδειγμα το γυαλί και τα μέταλλα μπορούν να ανακυκλωθούν. Οι λαμπτήρες επαγωγής αποτελούνται κυρίως από γυάλινα και μεταλλικά στοιχεία. Σε αυτούς τους λαμπτήρες ακόμα και το αμάλαμα μπορεί να αφαιρεθεί μετά το τέλος της χρήσης τους και να επαναχρησιμοποιηθεί. Επιπλέον, οι λαμπτήρες επαγωγής με την αξιοσημείωτη διάρκεια ζωής που μπορεί να φτάσει έως και τις 100.000 ώρες λειτουργίας, θα χρειαστεί να αντικατασταθούν πολλά χρόνια μετά την εγκατάστασή τους. Εφόσον, λοιπόν, απαιτείται μικρός αριθμός αντικαταστάσεων, υπάρχει μειωμένη απαίτηση σε πρώτες ύλες για το φωτισμό ενός χώρου για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Για αυτούς τους λόγους οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής είναι πάρα πολύ φιλικό προς το περιβάλλον [1][11][49][72].

3.5.8 Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές

Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής λειτουργούν στο εύρος των ραδιοσυχνοτήτων και για το λόγο αυτό θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερο βάρος στην καταστολή των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που μπορεί να προκαλέσει το φωτιστικό σύστημα σε άλλες παρακείμενες ηλεκτρικές συσκευές. Μάλιστα, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που προκαλούσαν τα πρώτα συστήματα φωτισμού με επαγωγή ήταν από τους βασικότερους λόγους που καθυστέρησε η εμπορική εκμετάλλευση αυτής της τεχνολογίας. Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές προκαλούνται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία τα οποία παράγονται από τα πηνία και τα κυκλώματα του συστήματος φωτισμού. Για την ελάττωση των παρεμβολών ραδιοσυχνοτήτων, τα ηλεκτρονικά κυκλώματα τοποθετούνται σε ειδικές θήκες που περιορίζουν την εξάπλωση των παρεμβολών, αλλά είναι αδύνατο να τοποθετηθεί και ο λαμπτήρας σε κάποια θήκη χωρίς να υπάρχει απώλεια φωτός. Έτσι, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής όφειλαν αρχικά να λειτουργούν στο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων ISM (Industrial, Scientific and Medical) στα 13,56 MHz, 27,12 MHz και 40,68 MHz, που δεν χρησιμοποιούνται για τις τηλεπικοινωνίες. Τα φάσματα αυτά έχουν πολύ στενό επιτρεπτό εύρος και για αυτό καθίσταται αναγκαίος ο ακριβής έλεγχος της γεννήτριας υψηλών συχνοτήτων[11].

Αργότερα, με τη δημοσίευση του προτύπου CISPR15 από τον οργανισμό IEC, που υιοθετήθηκε από πληθώρα χωρών, συμπεριλαμβανομένων και των κρατών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τέθηκαν χαλαρότερες απαιτήσεις για τη λειτουργία των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής στο εύρος συχνοτήτων 2,2 έως 3 MHz. Η αύξηση του επιτρεπτού

εύρους φάσματος συνετέλεσε στη μείωση της πολυπλοκότητας και του κόστους του ballast. Έτσι, ξεκίνησε δυναμικά η εμπορική διάθεση των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής με συχνότητα λειτουργίας στα 2,65 MHz[11].

Σήμερα, είναι πολύ διαδεδομένοι οι λαμπτήρες εξωτερικής μαγνητικής επαγωγής με συχνότητα οδήγησης στα 250 KHz. Επίσης, έχουν κάνει την εμφάνισή τους λαμπτήρες με συχνότητες λειτουργίας ακόμα και κάτω από τα 100 KHz. Οι χαμηλές συχνότητες λειτουργίας υιοθετήθηκαν γιατί διευκολύνουν το χειρισμό των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών[33][34]. Οι σύγχρονοι λαμπτήρες επαγωγής που διατίθενται στο εμπόριο, φέρουν όλες τις απαραίτητες πιστοποιήσεις και δεν προκαλούν περισσότερες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή ή ένα φούρνο μικροκυμάτων σε λειτουργία, ούτε επηρεάζουν τη λειτουργία κινητών τηλεφώνων ή πομποδεκτών σε ένα χώρο που φωταγωγείται από ένα τέτοιο σύστημα λαμπτήρων[1].

3.5.9 Κόστος Αγοράς Λαμπτήρων

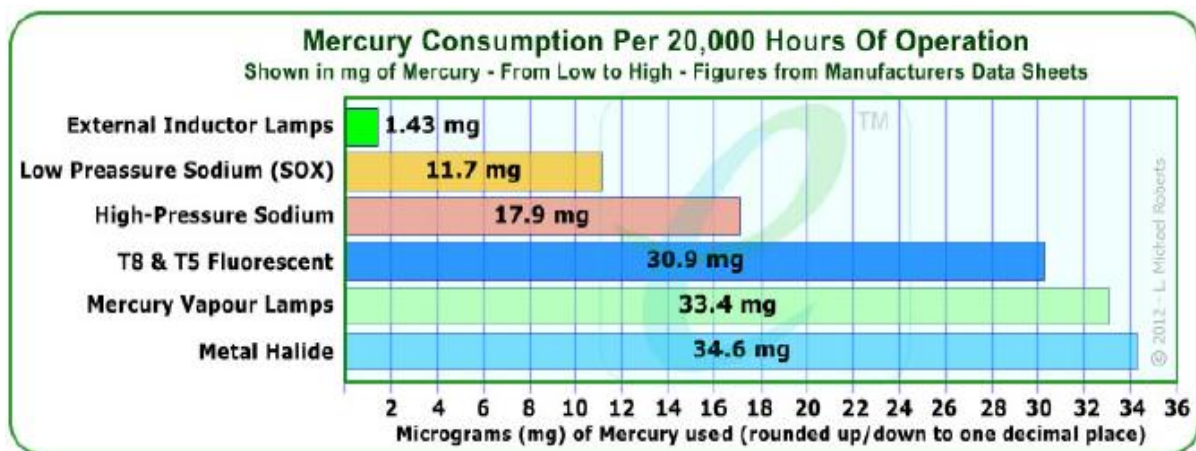
Από την έρευνα που έγινε σε ιστοσελίδες του διαδικτύου που εμπορεύονται λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής δεν προέκυψαν αρκετά σαφή συμπεράσματα για το πόσο θα κοστίσει η αγορά ενός τέτοιου λαμπτήρα, καθώς στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ήταν υποχρεωτική η ελάχιστη παραγγελία δέκα, εκατό ή χιλίων τεμαχίων, προκειμένου να αγοραστούν στις αναγραφόμενες τιμές. Παρ' όλα αυτά, θα αναφερθούν ενδεικτικά κάποιες τιμές. Για τους λαμπτήρες εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής με ενσωματωμένο ballast το κόστος αγοράς είναι 5 \$ έως 20 \$. Για λαμπτήρες εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής με ξεχωριστό ballast οι τιμές κυμαίνονται από 15 \$ έως 95 \$. Τέλος, για τους λαμπτήρες εξωτερικής μαγνητικής επαγωγής το κόστος ξεκινά από τα 20 \$ και καταλήγει στα 400 \$ [75].

Μπορεί οι τιμές αγοράς των λαμπτήρων να φαίνονται πολύ υψηλές, αλλά η απόσβεση της αρχικής επένδυσης θα γίνει εντός μερικών ετών, λόγω της τεράστιας εξοικονόμησης ενέργειας (της τάξεως του 35-75%), επομένως και χρημάτων που προσφέρουν τα συστήματα φωτισμού με λαμπτήρες επαγωγής. Επίσης, λόγω της εξαιρετικά μεγάλης διάρκειας ζωής που παρέχουν, τα κόστη συντήρησης μειώνονται στο ελάχιστο αφού η αντικατάσταση των λαμπτήρων γίνεται πολύ σπάνια[1][17].

3.6 Υλικά Λαμπτήρων Μαγνητικής επαγωγής

3.6.1 Αμάλγαμα Υδραργύρου

Ο Υδράργυρος (Hg) είναι ένα πτητικό μέταλλο, το οποίο ιονίζεται εύκολα και εκπέμπει μεγάλη ποσότητα φωτός σε διάφορα μήκη κύματος. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται στις περισσότερες πηγές τεχνητού φωτός. Το φάσμα του διαφέρει ανάλογα με την τεχνολογία του λαμπτήρα, δηλαδή τον τύπο λαμπτήρα, την ποσότητα Υδραργύρου, την πίεσή του, το αέριο πλήρωσης κ.ά. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής καταναλώνουν τη λιγότερη ποσότητα Υδραργύρου, από όλες τις άλλες πηγές φωτός που χρησιμοποιούν Υδράργυρο (σχήμα 32)[48][49].



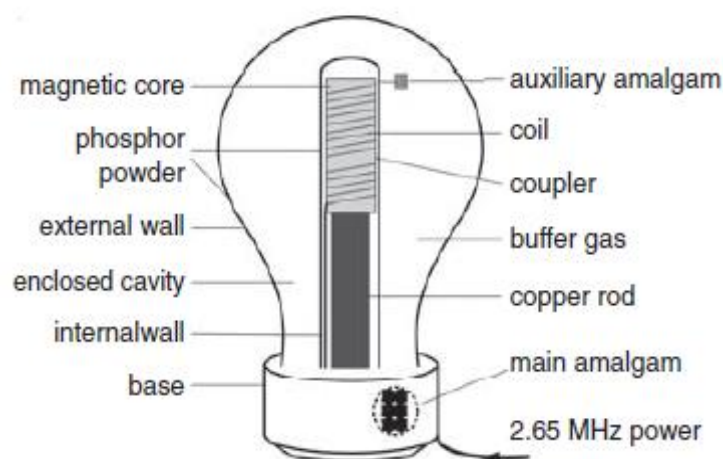
Σχήμα 32. Κατανάλωση Υδραργύρου διαφόρων λαμπτήρων [48]

Στους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, ο Υδράργυρος συνδυάζεται με άλλα μέταλλα, δημιουργώντας μια στερεά μορφή, η οποία ονομάζεται αμάλγαμα. Τα μέταλλα στο αμάλγαμα δεσμεύουν τον Υδράργυρο, ο οποίος απελευθερώνεται όταν αυτό θερμανθεί. Όταν ο λαμπτήρας κρυώσει, το μεγαλύτερο μέρος του Υδραργύρου επιστρέφει στο αμάλγαμα και συγκρατείται εκεί. Τα μέταλλα αυτά μπορεί να είναι το ΐνδιο (In) με περιεκτικότητα στο αμάλγαμα από 10% έως 98%, ο Κασσίτερος (Sn), το Βισμούθιο (Bi), ο Άργυρος (Ag) και ο Μόλυβδος (Pb)[42][48]. Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας, συνήθεις ενώσεις είναι η InAgHg με αναλογία 90/5/5 [56], 234 mg In/Bi με αναλογία 67/33 μαζί με 12 mg Hg[55], η InHg[30], η InSnHg[50] και η BiInHg[30][57] χωρίς γνωστές αναλογίες. Γενικά, είναι προτιμότερη η χρήση αμαλγάματος έναντι του υγρού Υδραργύρου, λόγω του γεγονότος ότι οι συγκεκριμένοι λαμπτήρες λειτουργούν σε σχετικά αυξημένες θερμοκρασίες[30][42]. Επίσης, εάν σπάσει ο λαμπτήρας, το αμάλγαμα αφαιρείται εύκολα και ο λαμπτήρας μπορεί να απορριφθεί χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος να μολυνθεί μια ολόκληρη περιοχή. Ακόμη, ο Υδράργυρος μπορεί να ανακτηθεί εύκολα και να επαναχρησιμοποιηθεί όταν ο λαμπτήρας σπάσει ή φτάσει στο τέλος της ζωής του[1].

Το αμάλγαμα είναι αυτό το οποίο παρέχει τα μόρια του Υδραργύρου, που είναι απαραίτητα για την έναρξη ηλεκτρικής εκκένωσης. Μετά την έναρξη του λαμπτήρα, μέσα

σε μερικά δευτερόλεπτα, το amalgama θερμαίνεται και τα μόρια του Υδραργύρου απελευθερώνονται στο εσωτερικό της λυχνίας. Η φωτεινή ροή που αποδίδει ο λαμπτήρας εξαρτάται από την πίεση των ατμών του Υδραργύρου. Η θερμοκρασία του amalgamatos προσδιορίζει την πίεση των ατμών του Υδραργύρου για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών περιβάλλοντος, ώστε να είναι σταθερό το φως που εκπέμπει ο λαμπτήρας. Υπάρχει, λοιπόν, άμεση σχέση μεταξύ της πίεσης του Υδραργύρου και των lumen που αποδίδει ο λαμπτήρας, καθώς και της πίεσης με την καταναλισκόμενη ισχύ[52][53]. Το amalgama είναι υπεύθυνο για τη σταθεροποίηση της πίεσης του Υδραργύρου σε ένα εύρος θερμοκρασιών περίπου 70 °C και με μέγιστη παρέκκλιση των lumen 15%. Οι διακυμάνσεις που μπορεί να εμφανίζονται στο φως, ανάλογα με τη θερμοκρασία του amalgamatos, εξαρτώνται κυρίως από τη θερμική μόνωση, το σχεδιασμό του ανακλαστήρα και του συστήματος ψύξης αν υπάρχει και του φωτιστικού που φιλοξενεί το λαμπτήρα[53]. Επιπλέον, η ισχύς στην οποία πραγματοποιείται η σβέση του τόξου, εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την πίεση του Υδραργύρου και επομένως από τη θερμοκρασία amalgamatos[50].

Το amalgama είναι τοποθετημένο σε τέτοιο σημείο και με τέτοιο προσανατολισμό, ώστε να μεγιστοποιείται η απορρόφηση της ηλεκτρικής ισχύος του ηλεκτρικού πεδίου και της εκκένωσης ώστε να θερμανθεί γρήγορα και να εξατμιστεί ο Υδράργυρος, για την ηλεκτρική διάσπαση του αερίου. Είναι πολύ συνηθισμένο, να υπάρχουν amalgamatos τουλάχιστον σε δύο σημεία μέσα στο λαμπτήρα, με το ένα να ονομάζεται κύριο και το άλλο βοηθητικό amalgama (σχήμα 33). Το κύριο amalgama, κοντά στη βάση, διατηρεί τη βέλτιστη πίεση των ατμών του Υδραργύρου κατά τη σταθερή κατάσταση λειτουργίας, ενώ το βοηθητικό, κοντά στην εκκένωση, συνεισφέρει στην ταχεία αύξηση της φωτεινής ροής κατά την έναρξη του λαμπτήρα[30][42][51][52][53][54][55]. Και τα δύο amalgamatos μπορεί να είναι κλεισμένα σε κάψουλα από γυαλί ή άλλο υλικό, ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η απώλεια Υδραργύρου κατά την κατασκευή του λαμπτήρα[42].



Σχήμα 33. Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής με κύριο και βοηθητικό amalgama [54]

Ο λαμπτήρας δεν αποδίδει ακαριαία το μέγιστο της φωτεινής ροής του, αλλά μετά από μερικά δευτερόλεπτα. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται από βαθμιαία αύξηση της

θερμοκρασίας μέσα στη λυχνία εκκένωσης. Παρ' όλα αυτά, αν δε γίνει κάτι για την επιτάχυνση αυτής της διαδικασίας, το φως θα αυξάνεται με πάρα πολύ αργό ρυθμό. Αυτό συμβαίνει διότι το κύριο αμάλαμα είναι τοποθετημένο σε ένα σημείο μακριά από την εκκένωση, συνήθως στη βάση του λαμπτήρα. Τότε, επιστρατεύεται το βοηθητικό αμάλαμα, που συνήθως βρίσκεται πολύ κοντά στην εκκένωση, ίσως και πάνω στο τοίχωμα της κοιλότητας επανεισαγωγής αν πρόκειται για λαμπτήρα εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής. Είναι πολύ πιθανό τα δύο αμαλάματα να διαφέρουν ως προς τη σύνθεσή τους. Το βοηθητικό αμάλαμα χρησιμεύει για την επιτάχυνση της διαδικασίας της έναυσης του λαμπτήρα και μπορεί να έχει υψηλότερο σημείο τήξης από το κύριο αμάλαμα. Μετά την έναρξη, το βοηθητικό αμάλαμα θερμαίνεται πολύ γρήγορα και αρχίζει να απελευθερώνει τα μόρια του Υδραργύρου. Μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα, η πίεση των ατμών Υδραργύρου είναι αρκετή, ώστε ο λαμπτήρας να αποκτήσει τη μέγιστη φωτεινή του ροή. Από αυτό το σημείο και μετά η θερμοκρασία των τοιχωμάτων του λαμπτήρα καθορίζει την πίεση των ατμών του Υδραργύρου. Η αυξανόμενη θερμοκρασία της λυχνίας εκκένωσης θερμαίνει το κύριο αμάλαμα το οποίο αρχίζει αργά να εξατμίζει τον Υδράργυρο. Το κύριο αμάλαμα έχει χαμηλότερο σημείο τήξης και επομένως υψηλότερη πίεση ατμών Υδραργύρου για μια δεδομένη θερμοκρασία από το βοηθητικό αμάλαμα, ώστε όταν σταθεροποιηθούν οι θερμικές συνθήκες, να είναι το κύριο αμάλαμα αυτό που θα ελέγχει την πίεση των ατμών του Υδραργύρου μέσα στο λαμπτήρα. Έτσι, το κύριο αμάλαμα διατηρεί τη βέλτιστη πίεση των ατμών του Υδραργύρου για τη μέγιστη αποδιδόμενη φωτεινή ροή, σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών περιβάλλοντος κατά τη σταθερή κατάσταση λειτουργίας και η σύνθεσή του θα πρέπει να είναι κατάλληλη για τη διεργασία αυτή[30][42][52].

Τέλος, όσον αφορά τη βέλτιστη τιμή της πίεσης των ατμών του Υδραργύρου μέσα στο λαμπτήρα, είναι ένα μέγεθος το οποίο ποικίλει ανάλογα με την ισχύ, το είδος του λαμπτήρα και τη σύνθεση του αμαλαμάματος. Συνήθως κυμαίνεται από 5 mTorr έως 7 mTorr[50][51][55][57].

3.6.2 Αέριο Πλήρωσης

Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, αφού δημιουργηθούν συνθήκες κενού στο εσωτερικό τους, γεμίζονται με κάποιο ευγενές αέριο ή μείγμα ευγενών αερίων. Το ευγενές αέριο ονομάζεται και ρυθμιστικό αέριο καθώς επιτελεί μια σειρά λειτουργιών. Για παράδειγμα, ελέγχει το ρυθμό της διπολικής διάχυσης, που αποκαθιστά την απαιτούμενη ισορροπία μεταξύ του ιονισμού των ατόμων του Υδραργύρου για τη διατήρηση της εκκένωσης και τη διέγερση του Υδραργύρου για την παραγωγή υπεριώδους ακτινοβολίας. Επίσης, λειτουργεί ως ρυθμιστής για τη μείωση του βομβαρδισμού της επικάλυψης φωσφόρου του λαμπτήρα με ιόντα και βοηθά στην έναυση του λαμπτήρα μειώνοντας την απαιτούμενη τάση για την έναρξη της εκκένωσης. Ακόμη, το ρυθμιστικό αέριο καθυστερεί την απώλεια ιόντων και για το λόγο αυτό υπάρχει στις περισσότερες πηγές τεχνητού φωτός[32].

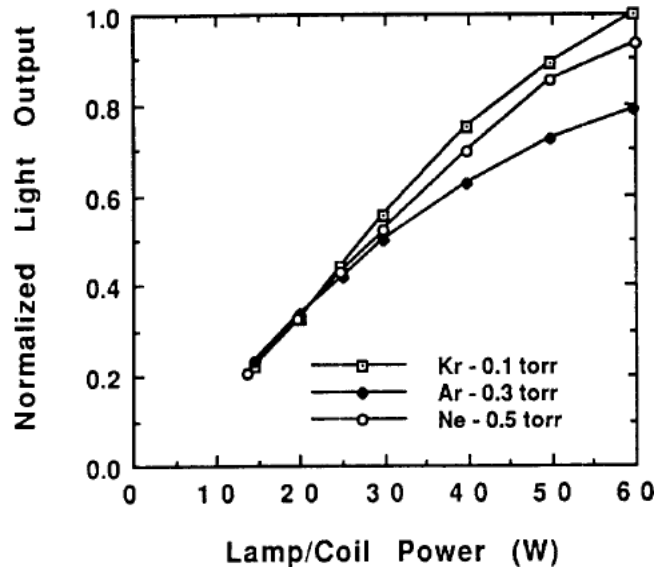
Η επίδοση του λαμπτήρα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μεταξύ των οποίων είναι ο τύπος και η πίεση του αερίου πλήρωσης[42]. Η επιλογή του αερίου και της πιέσεώς του θα πρέπει να βελτιστοποιείται για την ισχύ εκκένωσης και άλλα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος για ένα δεδομένο λαμπτήρα[52]. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα ευγενή αέρια που χρησιμοποιούνται στους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής είναι το Αργό (Ar), το Κρυπτό (Kr), το Νέο (Ne) και το Ξένο (Xe), ξεχωριστά ή σε μείγματα[42][55]. Για παράδειγμα στο λαμπτήρα εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής QL ισχύος 85 W της Philips χρησιμοποιείται Αργό[30][51]. Όμως, το αέριο περιέχει και μια μικρή δόση από ραδιενεργό Κρυπτό, το οποίο εκπέμπει ηλεκτρόνια με τη μορφή ακτινοβολίας-β και με τον τρόπο αυτό υπάρχουν αρκετά ελεύθερα ηλεκτρόνια για τη δημιουργία μιας αξιόπιστης εκκένωσης. Η ακτινοβολία μόλις που διαπερνά τα τοιχώματα του λαμπτήρα και είναι πολύ αδύναμη για να προκαλέσει προβλήματα σε οποιεσδήποτε συνθήκες[30].

Οι πιέσεις των αερίων είναι αρκετά χαμηλές και γενικά κυμαίνονται στα 100 mTorr έως 2.000 mTorr[42]. Προτείνεται, η πίεση του αερίου να είναι μικρότερη από 750 mTorr ώστε να είναι αποδοτική η παραγωγή υπεριώδους ακτινοβολίας από τον Υδράργυρο σε αυξημένες τιμές ρεύματος[52].

Αξίζει να αναφερθούμε στο σημείο αυτό, σε μερικούς εμπορικούς λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, παραθέτοντας στοιχεία σχετικά με τον τύπο και την πίεση αερίου που έχουν επιλέξει οι διάφοροι κατασκευαστές. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στο λαμπτήρα QL ισχύος 85 W της Philips, με συχνότητα λειτουργίας 2,65 MHz χρησιμοποιείται Αργό με πίεση περίπου 250-300 mTorr[4][51]. Για το λαμπτήρα εξωτερικής επαγωγής, σφαιρικού σχήματος, Everlight ισχύος 27 W, με συχνότητα 13,56 MHz της Matsushita επιλέχθηκε Νέο[4]. Οι κατασκευαστές του λαμπτήρα εσωτερικής επαγωγής με ενσωματωμένο ballast Genura της GE, με συχνότητα λειτουργίας 2,65 MHz και ισχύ 23 W, επέλεξαν αέριο Κρυπτό σε πίεση κάτω των 750 mTorr[4]. Ακόμη, στο λαμπτήρα εσωτερικής επαγωγής, ισχύος 150 W της Panasonic, το αέριο πλήρωσης ήταν Αργό με πίεση 174 mTorr[58]. Τέλος, στο λαμπτήρα εξωτερικής επαγωγής, τοροειδούς σχήματος, Endura της Osram με συχνότητα λειτουργίας 100 – 250 KHz και ισχύ 150 W, χρησιμοποιήθηκε Αργό ή Κρυπτό σε πίεση 300 mTorr περίπου[4].

Στη βιβλιογραφία, συναντάται μια μελέτη σχετικά με την επιλογή του κατάλληλου αερίου πλήρωσης και της αντίστοιχης πίεσης για λαμπτήρα εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής A23, βολβοειδούς σχήματος, χωρίς πυρήνα φερρίτη. Ο συγγραφέας πειραματίστηκε με πληθώρα τέτοιων λαμπτήρων, χρησιμοποιώντας Αργό, Κρυπτό, Νέο και Ξένο σε ισχείς 15 – 60 W, σε πιέσεις 100 – 1.000 mTorr, για θερμοκρασία αμαλγάματος περίπου 45 °C, την οποία προσδιόρισε ως βέλτιστη μετά από μια σειρά μετρήσεων της φωτεινής ροής των λαμπτήρων. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι σε ισχείς 30 – 60 W, παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση των lm και των lm/W, για μείωση της πίεσης του αερίου από το αρχικό σημείο των 500 mTorr στα 100 mTorr για το Κρυπτό. Αντιθέτως, στο ίδιο εύρος ισχύος οι λαμπτήρες που περιείχαν Νέο και Αργό, παρουσίασαν καλύτερες επιδόσεις σε υψηλότερες πιέσεις της

τάξεως των 300 - 500 mTorr. Συγκεκριμένα, το Νέο στα 500 mTorr έχει συγκρίσιμα αποτελέσματα με αυτά του Κρυπτού στα 100 mTorr, με τιμές μόλις 6% χαμηλότερες. Επομένως, αποτελεί μια καλή εναλλακτική για το Κρυπτό των 100 mTorr. Το Ξένο βρέθηκε ότι παρουσιάζει παρόμοια αποτελέσματα με αυτά του Νέου. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι για ισχείς 15 – 60 W, για το συγκεκριμένο τύπο λαμπτήρα, την καλύτερη επιλογή αποτελεί το Κρυπτό σε πίεση 100 mTorr, ακολουθεί το Νέο σε πίεση 500 mTorr και τέλος το Αργό σε πίεση 300 mTorr. Το σχετικό διάγραμμα απεικονίζεται στη συνέχεια (σχήμα 34) [55].



Σχήμα 34. Σύγκριση τύπου και πίεσης αερίου πλήρωσης [55]

3.6.3 Σύσταση της Λυχνίας και των Διαφόρων Επικαλύψεων

3.6.3.1 Λυχνία

Το γυάλινο μέρος του λαμπτήρα μπορεί να είναι κατασκευασμένο από γυαλί ή οποιοδήποτε άλλο υλικό κατάλληλο για φωτισμό. Το γυαλί είναι σε πάρα πολλές περιπτώσεις κάποιο μαλακό γυαλί, όπως το soda lime silica glass ή το borosilicate glass. Όμως, επειδή το μαλακό γυαλί δρα ως πηγή Νατρίου, που συνδέεται με τον Υδράργυρο και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σκούρων μαύρων ή γκριζών κηλίδων στην επιφάνεια του λαμπτήρα, προτείνεται η χρήση άλλου είδους γυαλιού, με χαμηλή περιεκτικότητα σε Νάτριο, που είναι πιο σκληρό και τα πιο συνηθισμένα αυτού του είδους είναι το pyrex και το nopex και χρησιμοποιούνται ευρέως στους τοροειδείς λαμπτήρες εξωτερικής μαγνητικής επαγωγής τύπου Endura[4][42][52].

3.6.3.2 Φώσφοροι

Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής επικαλύπτονται εσωτερικά με ένα μείγμα φωσφορίζουσων ουσιών, οι οποίες ονομάζονται φώσφοροι. Η υπεριώδης ακτινοβολία που παράγεται από τον Υδράργυρο, όταν φτάσει στα τοιχώματα του λαμπτήρα, απορροφάται από τους φωσφόρους και μετατρέπεται σε ορατό φως[1].

Η επίδοση του λαμπτήρα εξαρτάται προφανώς από το μείγμα, την ποιότητα, την πυκνότητα και το μέγεθος των σωματιδίων της επικάλυψης[42]. Οι φώσφοροι, γενικά, αποτελούνται από ανόργανα κρυσταλλικά υλικά, κυρίως οξειδία, που συνήθως είναι αδιαφανή στην αμιγή τους μορφή αλλά συνδυάζονται με άλλες ουσίες, ώστε να απορροφήσουν τα επιθυμητά μήκη κύματος του υπεριώδους φωτός και να εκπέμψουν ορατό φως. Αν και μερικά φυσικά μεταλλικά στοιχεία εμφανίζουν φθορισμό, οι περισσότερες χημικές ενώσεις χρειάζονται την προσθήκη μιας ουσίας που ονομάζεται ενεργοποιητής, η οποία ουσιαστικά προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά του φάσματος του φωτός. Υπάρχουν πάρα πολλές φωσφορίζουσες ουσίες που έχουν ανακαλυφθεί όλα αυτά τα χρόνια και το φάσμα εκπομπής τους ποικίλει από το υπέρυθρο έως το υπεριώδες φως μεγάλου μήκους. Κάποιες ουσίες, όπως οι Απατίτες (Apatite) και άλλα αλογονοφωσφορικά (halophosphates) υλικά, καλύπτουν σχεδόν όλο το φάσμα ορατού φωτός και επομένως παράγουν λευκό φως, αν χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα. Όμως, οι λαμπτήρες που διαθέτουν αυτού του είδους τους φωσφόρους, έχουν χαμηλό δείκτη χρωματικής απόδοσης R_a , δεν προσφέρουν και τόσο καλό φως, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται συνδυασμός φωσφόρων με διαφορετικά χαρακτηριστικά χρώματος, όταν απαιτείται ένας πάρα πολύ καλός δείκτης R_a [30][32].

Η ανακάλυψη των σπάνιων γαιών, με στενά φάσματα εκπομπής στο μπλε, το πράσινο και το κόκκινο, οδήγησε στην ανάπτυξη των τριφωσφόρων (tri-phosphors), με σαφώς αυξημένο R_a . Πρόκειται για μείγματα από τρεις φωσφορίζουσες σκόνες, που παράγουν φως το οποίο συμπίπτει με την ευαισθησία στο χρώμα των τριών δεκτών του αμφιβληστροειδούς. Βασίζονται συνήθως σε ιόντα Ευρώπιου (Eu), Ύτριου (Y), Στρόντιου (Sr) και Τέρβιου (Tb)[60]. Μεταβάλλοντας την αναλογία τους μπορεί να προκύψει οποιοδήποτε χρώμα. Τα τρία φάσματα εκπομπής είναι μοιρασμένα στο ορατό φάσμα με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται πολύ καλό R_a και υψηλή απόδοση φωτεινής ροής. Όμως, επειδή οι φώσφοροι στενού φάσματος είναι σχετικά ακριβοί, ο κύριος στόχος, προς το παρόν, είναι η αναζήτηση οικονομικών υποκατάστατων των σπάνιων γαιών[59]. Έτσι, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί μικρή ποσότητα τριφωσφόρων, τα τοιχώματα του λαμπτήρα επικαλύπτονται πρώτα με αλογονοφωσφορικά υλικά και στη συνέχεια με τους φωσφόρους στενού φάσματος. Επιπλέον, όταν απαιτείται ακόμα μεγαλύτερο R_a , χρησιμοποιείται συνδυασμός τεσσάρων ή πέντε φωσφόρων ευρέος φάσματος σε δύο στρώματα. Με τον τρόπο αυτό καλύπτεται όλο το ορατό φάσμα. Τα χαρακτηριστικά των πιο κοινών φωσφόρων παρουσιάζονται στο σχήμα 35[30][32][53].

Compound	Activator	Peak wavelength (nm).	Commercial name
Strontium aluminate	cerium	307	S-IC
Gadolinium lanthanum bismuth borate	-	312	SLBE
Barium disilicate	lead	349	BSP
Strontium barium magnesium silicate	lead	365	SMS
Strontium tetraborate	europium	368	SOE
Calcium tungstate	-	410	
Strontium pyrophosphate	europium	418	SPE
Barium magnesium aluminate	europium	447	BAM
Calcium halophosphate	antimony	482	Calcium Blue
Strontium aluminate	europium	488	SAE
Strontium halophosphate	antimony	490	Strontium Blue
Strontium halophosphate	antimony	502	Strontium Blue
Barium magnesium aluminate	europium & manganese	514	BAM Green
Zinc silicate	manganese	525	Willemite
Cerium terbium magnesium aluminate	-	541	CAT
Cerium gadolinium magnesium borate	terbium	542	CBT
Yttrium aluminate	cerium	563	YAG Ce
Calcium halophosphate	antimony & manganese	579-585	Apatite
Yttrium oxide	europium	610	YOX
Yttrium vanadate phosphate borate	europium	618	-
Cerium gadolinium terbium magnesium borate	manganese	623	CBTM
Strontium magnesium orthophosphate	tin	625	SPS
Magnesium fluorogermanate	manganese	655	-
Lithium pentaaluminate	iron	743	-

Σχήμα 35. Τα πιο γνωστά είδη φωσφόρων και τα χαρακτηριστικά τους [30]

Η επιλογή των φωσφόρων επηρεάζει το αντιληπτό χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάποιοι φώσφοροι εκπέμπουν κόκκινο, πράσινο και μπλε φως όταν διεγείρονται από την υπεριώδη ακτινοβολία στο εσωτερικό του λαμπτήρα. Αυτό επιτρέπει στους κατασκευαστές να διαθέτουν στην αγορά διάφορους τύπους λαμπτήρων με «θερμό λευκό», «ψυχρό λευκό» ή «φως ημέρας», αναμειγνύοντας τους φωσφόρους και μεταβάλλοντας τις αναλογίες κόκκινων, πράσινων και μπλε φωσφόρων. Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής είναι διαθέσιμοι σε θερμοκρασίες χρώματος από 2.700 °K έως 6.500 °K και διακρίνονται στις εξής κατηγορίες[31] :

- Λαμπτήρες θερμού λευκού (warm white) φωτός με θερμοκρασίες χρώματος από 2.600 °K έως 3.600 °K και χαμηλό λόγο S/P. Οι λαμπτήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται πιο θερμό φως και η υψηλή οπτική οξύτητα δεν είναι και τόσο σημαντική, όπως π.χ. υποδοχή ξενοδοχείων, εστιατόρια, καφετέριες, αίθρια, μπαλκόνια, τουαλέτες, διάδρομοι κ.ά.
- Λαμπτήρες κανονικού λευκού (true white) φωτός με θερμοκρασίες χρώματος από 4.000 °K έως 4.250 °K και μέτριο λόγο S/P. Οι λαμπτήρες αυτοί επιλέγονται όταν απαιτείται καλύτερη οπτική οξύτητα, αλλά το φως δεν πρέπει να είναι πολύ

λαμπερό ή ψυχρό. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε γραφεία, βιβλιοθήκες, αίθουσες συνεδριάσεων, σχολεία, δημόσιους αθλητικούς χώρους και γενικά όπου χρειάζεται καλή οπτική οξύτητα.

- Λαμπτήρες λαμπερού λευκού (bright white) φωτός με θερμοκρασίες χρώματος από 4.500 °K έως 5.250 °K και υψηλό λόγο S/P. Οι λαμπτήρες αυτοί χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται υψηλή οπτική οξύτητα και ακριβής απόδοση των χρωμάτων, ενώ αποτελούν τους καλύτερους αντικαταστάτες των λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων. Παραδείγματα εφαρμογής είναι: σχολικές αίθουσες, χώροι μελέτης, χώροι συσκευασίας, αρχιτεκτονικά γραφεία, συνεργεία, αποθήκες, κολυμβητήρια, γήπεδα, φωτισμοί πινακίδων, σήραγγες, υπόγειες διαβάσεις, οδοφωτισμός, αεροδρόμια, εμπορικά καταστήματα, υπόγειοι χώροι στάθμευσης κ.ά.
- Λαμπτήρες φωτός ημέρας (daylight) με θερμοκρασίες χρώματος από 5.800 °K έως 6.800 °K και ύψιστο λόγο S/P. Οι λαμπτήρες αυτοί επιλέγονται όταν απαιτείται υψηλή οπτική οξύτητα και πολύ ακριβής αναπαραγωγή των χρωμάτων ή μέγιστος δείκτης VEL για εξοικονόμηση ενέργειας. Συνήθως, χρησιμοποιούνται σε εκθέσεις αυτοκινήτων, σταθμούς τρένων και σε χώρους που περιγράφηκαν παραπάνω αλλά όταν είναι αναγκαίο πιο λαμπερό φως.

Όμως, η επιλογή της θερμοκρασίας χρώματος θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη της και το λόγο S/P των λαμπτήρων και την αύξηση των VEL που προκαλεί ο λόγος S/P. Γενικά, οι λαμπτήρες με υψηλότερη θερμοκρασία χρώματος έχουν υψηλότερους λόγους S/P, όπως φαίνεται παραπάνω, επομένως και υψηλότερα VEL και αποτελούν την καλύτερη επιλογή όταν τα επίπεδα φωτός πρέπει να είναι το ίδιο ή υψηλότερα από αυτά των λαμπτήρων που αντικαθιστούν[31].

Η απόδοση του λαμπτήρα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του επιχρίσματος φωσφόρων, δηλαδή από την πυκνότητα, την απαλότητα του στρώματος κ.ά. Ιδανικά, η επικάλυψη θα πρέπει να είναι αρκετά τραχιά ώστε να μεγιστοποιεί την υπεριώδη ακτινοβολία που μετατρέπεται σε ορατό φως, αλλά και όσο το δυνατόν πιο λεπτή για να μην απορροφήσει μεγάλο ποσοστό του ορατού φωτός[30].

Η έκθεση σε αυξημένες θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα συνεπάγεται την πτώση της απόδοσης των φωσφόρων με φυσικό επακόλουθο την απότομη πτώση στη διατήρηση της φωτεινής ροής. Βέβαια αυτό συμβαίνει πολύ αργότερα σε σχέση με τους συμβατικούς λαμπτήρες φθορισμού[31]. Άλλοι λόγοι για τους οποίους φθείρονται οι φώσφοροι είναι η φωτολυτική διάσπαση, ο βομβαρδισμός με ιόντα και οι χημικές αντιδράσεις με τον Υδράργυρο, το γυαλί και πιθανές αέριες προσμίξεις. Ο ρυθμός της φθοράς αυξάνει με την πυκνότητα ροής φωτονίων και ιόντων, με τη θερμοκρασία του λαμπτήρα και τον τύπο του φωσφόρου. Επιπλέον, αν η θερμοκρασία ψήσιματος κατά την κατασκευή είναι πολύ υψηλή, οι αντιδράσεις με τα αλκάλια του γυαλιού μπορεί να φθείρουν το φώσφορο[32].

3.6.3.3 Άλλες Επικαλύψεις

Εκτός από την επικάλυψη του φωσφόρου στο εσωτερικό του λαμπτήρα, χρησιμοποιούνται ευρέως και κάποια άλλα υλικά σε λεπτά στρώματα, για αυξημένη φωτεινή ροή και προστασία της λυχνίας. Τα στρώματα αυτά είναι απλωμένα στην επιφάνεια της λυχνίας, πριν να τοποθετηθεί το επίχρισμα φωσφόρων, μπορεί να είναι υλικά διάφανα ή ημιδιάφανα και επιπλέον βοηθούν στην προσθήκη του φωσφόρου πάνω στο γυαλί[42]. Υπάρχουν οι εξής κατηγορίες υλικών:

- Μπορεί να υπάρχει προστατευτικό στρώμα από Πυρίτιο (silica) ή κάποιο οξείδιο του Αργιλίου (alumina), με συνηθέστερο το Al_2O_3 . Το στρώμα αυτό χρησιμοποιείται προκειμένου να εμποδίσει τα ιόντα των αλκαλικών μετάλλων από το γυαλί να αναμειχθούν με τα ιόντα Υδραργύρου μέσα στο λαμπτήρα[61].
- Ακόμη, είναι πολύ συχνή η χρήση κάποιου αγώγιμου υλικού επικάλυψης, όπως ένα μεταλλικό φύλλο από κάποιο οξείδιο του Ίνδιου ή του Κασσίτερου, προκειμένου ο λαμπτήρας να εκκινήσει αξιόπιστα σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και να επιτευχθεί αύξηση της φωτεινής ροής την ώρα της έναυσης[30][52].
- Στους λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής με κοιλότητα επανεισαγωγής, το γυαλί μπορεί να επικαλυμμένο με κάποιο ανακλαστικό υλικό, όπως π.χ. το οξείδιο του Μαγνησίου (MgO), το οποίο βοηθά στη μείωση του φωτός που χάνεται στη μεριά της κοιλότητας και έτσι αυξάνει την απόδοση φωτεινής ροής του λαμπτήρα[42].
- Επίσης, οι λαμπτήρες με ενσωματωμένο ανακλαστήρα διαθέτουν αδιαφανή λευκή σκόνη, από κάποιο οξείδιο του Αργιλίου, όχι όμως σε όλη την επιφάνεια του λαμπτήρα, με αποτέλεσμα το φως να διαπερνά τα τοιχώματα του λαμπτήρα μόνο στα σημεία όπου υπάρχει απλή φωσφορίζουσα ουσία[30].

3.7 Ballast Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής

3.7.1 Αναγκαιότητα και Λειτουργία των Ballast των Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής

Χαρακτηριστικό των λαμπτήρων εκκένωσης αερίου και συνεπώς των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής αποτελεί η αρνητική χαρακτηριστική τάσης - ρεύματος. Κατά τη σταθερή κατάσταση λειτουργίας, η αρνητική διαφορική σύνθετη αντίσταση του αερίου έχει ως αποτέλεσμα όσο αυξάνεται το ηλεκτρικό ρεύμα που διαπερνά το λαμπτήρα, η τάση στα άκρα του να μειώνεται και η τάση που απαιτείται για τη διατήρηση της εκκένωσης να αυξάνει. Αυτή είναι μια εγγενώς ασταθής κατάσταση, όταν οδηγείται από μια πηγή σταθερής τάσης και θα επέτρεπε στο ρεύμα να αυξάνει ανεξέλεγκτα με τη μείωση της αντίστασης του αερίου, με συνέπεια κάποια στιγμή να καταστραφεί ο λαμπτήρας. Λόγω, λοιπόν, της αρνητικής διαφορικής αντίστασης, καθίσταται απαραίτητη για την ορθή λειτουργία του συστήματος, μια συσκευή περιορισμού του ηλεκτρικού ρεύματος, μιας και ο λαμπτήρας είναι ανίκανος να περιορίσει μόνος του την ισχύ του. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα, που παρέχει την απαραίτητη σύνθετη αντίσταση για την αποκατάσταση της ισορροπίας και τον περιορισμό του ηλεκτρικού ρεύματος, ονομάζεται ballast και στην περίπτωση των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής, πρόκειται για μια γεννήτρια υψηλών συχνοτήτων [32][37].

Η συσκευή αυτή εκτός από το να περιορίζει το ρεύμα, είναι υπεύθυνη και για τη δημιουργία ενός παλμού εκκίνησης, δηλαδή μιας υψηλής τάσης ανοιχτοκύκλωσης στο επαγωγικό πηνίο, ώστε να επιτευχθεί η αρχική διέγερση των ατόμων Υδραργύρου και να δημιουργηθεί το τόξο. Η τάση αυτή είναι πολύ υψηλότερη από την ονομαστική τάση λειτουργίας και μόλις επιτευχθεί η εκκένωση, επανέρχεται στα επίπεδα κανονικής λειτουργίας. Αξίζει να αναφερθεί ότι κατά την εκκίνησή τους, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής δεν αποδίδουν 100% της εξόδου τους, καθώς μεσολαβεί ένα μικρό χρονικό διάστημα για τη θέρμανση του αμαλάματος και την απελευθέρωση των ατόμων του Υδραργύρου μετά την εκκίνηση του λαμπτήρα. Κατά την έναυση εκπέμπουν 75% - 85% της φωτεινότητάς τους και εντός ενός με δύο λεπτών αποδίδουν τα μέγιστα[1].

Συνεπώς, τα ballast είναι απαραίτητος εξοπλισμός για τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής και εκτελούν δύο βασικές λειτουργίες, οι οποίες είναι:

- Εξασφάλιση της απαιτούμενης τάσης για την επίτευξη της εκκίνησης του λαμπτήρα, που είναι σαφώς μεγαλύτερη από την τάση του δικτύου[11][32].
- Περιορισμός και σταθεροποίηση του ρεύματος, μετά την επίτευξη της εκκίνησης, στην τιμή που απαιτείται για την τροφοδοσία του λαμπτήρα με τάση λειτουργίας κατά τη σταθερή κατάσταση λειτουργίας, με ελάχιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος και χωρίς καμία αρνητική επίδραση στη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα[11][32].

Το ballast μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα του δικτύου σε συνεχές με τη βοήθεια ενός ανορθωτή και στη συνέχεια μέσω ενός αντιστροφέα μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας, η οποία ποικίλει ανάλογα με τον κατασκευαστή. Το ρεύμα υψηλής συχνότητας διοχετεύεται στο επαγωγικό πηνίο, το οποίο είναι τυλιγμένο γύρω από τον πυρήνα φερριτή και δημιουργείται ισχυρό μαγνητικό πεδίο, το οποίο διεγείρει τα άτομα του Υδραργύρου στο εσωτερικό του λαμπτήρα. Τα ballast διαθέτουν κυκλώματα ελέγχου, τα οποία ρυθμίζουν τη συχνότητα και το ρεύμα το οποίο παρέχεται στο πηνίο για να διασφαλίζεται σταθερή λειτουργία του λαμπτήρα. Τα κυκλώματα αυτά είναι ελεγχόμενα από μικροεπεξεργαστές και επιτρέπουν στο ballast να έχει απόδοση της τάξεως του 95% - 98% και απώλειες ενέργειας μόλις 2% - 5%[1].

Εκτός αυτών, τα ballast θα πρέπει να επηρεάζουν ελάχιστα κοντινές ηλεκτρικές συσκευές, με ελάττωση ή εξάλειψη των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και περιορισμό των αρμονικών που προκαλούν διαταραχές στο δίκτυο. Επίσης, περιλαμβάνουν κυκλώματα τα οποία εξασφαλίζουν υψηλό συντελεστή ισχύος και διατήρηση της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος σε προκαθορισμένες τιμές, αντιμετωπίζοντας πιθανές μεταβολές του δικτύου. Ακόμη, παρέχουν πολύ μεγάλες δυνατότητες ελέγχου της φωτεινής ροής (dimming)[11].

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η λειτουργία του ballast απαιτεί την απορρόφηση ηλεκτρικής ισχύος και κατά συνέπεια η αποδοτικότητα του συστήματος που προκύπτει είναι τελικά μικρότερη από αυτήν η οποία βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στις απαιτήσεις ισχύος του λαμπτήρα. Τέλος, η ισχύς του ballast επιλέγεται ανάλογα με την ισχύ του λαμπτήρα που πρόκειται να οδηγήσει και ποτέ το ballast δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερης ισχύος από την ονομαστική ισχύ του λαμπτήρα, γιατί έτσι θα προκληθεί πρόωρη φθορά του[11].

3.7.2 Είδη Ballast

Οι πρώτοι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής που διατέθηκαν στην αγορά λειτουργούσαν σε συχνότητες 2,65 MHz και 13,6 MHz, προκειμένου να είναι συμβατοί με τα όρια για την αποφυγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών ραδιοσυχνοτήτων. Όμως, τα τελευταία χρόνια έχουν εισαχθεί στην αγορά λαμπτήρες με συχνότητα λειτουργίας γύρω στα 250 KHz. Επιπλέον, είναι σε εξέλιξη μελέτες και πειράματα για την ανάπτυξη λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής που λειτουργούν κάτω από τα 100 KHz[11].

Τα ballast, ανάλογα με το πόσο υψηλής συχνότητας είναι το ρεύμα με το οποίο τροφοδοτούν το επαγωγικό πηνίο, διακρίνονται σε ballast υψηλών (HF) και χαμηλών συχνοτήτων (LF).

3.7.2.1 Ballast Υψηλών Συχνοτήτων (HF Ballast)

Τα ballast υψηλών συχνοτήτων λειτουργούν σε συχνότητες 2,65 MHz και 13,6 MHz, αν και μπορεί να υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάλογα με τον κατασκευαστή.

Συνήθως είναι μικρότερα σε φυσικό μέγεθος και επειδή, γενικά, χρησιμοποιούν απλούστερα ηλεκτρονικά κυκλώματα, η κατασκευή τους είναι πιο απλή και πιο οικονομική. Λόγω των κοινών ηλεκτρονικών που χρησιμοποιούν, παρουσιάζουν καλούς συντελεστές ισχύος, όμως, επειδή και τα κυκλώματα ελέγχου που διαθέτουν είναι επίσης απλά, το φως μπορεί να έχει διακυμάνσεις με τις αυξομειώσεις της τάσεως εισόδου, αλλά και αυτό είναι κάτι που εξαρτάται από τον κατασκευαστή.

Τα ballast υψηλών συχνοτήτων λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες με αποτέλεσμα και οι λαμπτήρες να λειτουργούν σε αυξημένες θερμοκρασίες. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας δρα ιδιαίτερα αρνητικά στους λαμπτήρες επαγωγής, καθώς, είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που ευθύνεται για τη μείωση της διάρκειας ζωής τους και την πτώση της απόδοσής τους, αφού τα ηλεκτρονικά της γεννήτριας είναι πολύ ευαίσθητα με τη θερμοκρασία.

Τα ballast υψηλών συχνοτήτων και οι λαμπτήρες που τα χρησιμοποιούν είναι πιθανό να παράγουν παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων, γιατί οι υψηλές συχνότητες λειτουργίας τους τα τοποθετούν πιο κοντά στο εύρος των ραδιοσυχνοτήτων σε σχέση με τη χρήση άλλων συσκευών. Λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής και του απλούστερου σχεδιασμού τους, είναι πιο πιθανό για αυτά τα ballast ή το λαμπτήρα που οδηγούν, να έχουν «διαρροή» τέτοιων παρεμβολών. Επίσης, τα καλώδια μεταξύ του ballast και του λαμπτήρα λειτουργούν σαν κεραία, η οποία εκπέμπει παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων, οι οποίες ταξιδεύουν αρκετά μακριά, επειδή είναι υψηλής συχνότητας[31].

3.7.2.2 Ballast Χαμηλών Συχνοτήτων (LF Ballast)

Τα ballast χαμηλών συχνοτήτων λειτουργούν σε συχνότητες περίπου 250 KHz αν και πάλι μπορεί να υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάλογα με τον κατασκευαστή. Είναι μια τεχνολογία πιο ώριμη από αυτή των υψηλών συχνοτήτων, αλλά λιγότερο γνωστή.

Συνήθως είναι μεγαλύτερα σε φυσικό μέγεθος και επειδή, γενικά, χρησιμοποιούν πιο σύνθετα ηλεκτρονικά κυκλώματα, είναι πιο ακριβή η παραγωγή τους. Λόγω των κυκλωμάτων ελέγχου που διαθέτουν, που συνήθως είναι ελεγχόμενα από μικροεπεξεργαστές και ελέγχουν πολύ σωστά το σύστημα, παρατηρούνται ελάχιστες ή καθόλου διακυμάνσεις του φωτός με τις αυξομειώσεις της τάσεως εισόδου. Επίσης, παρουσιάζουν μεγάλους συντελεστές ισχύος.

Τα ballast χαμηλών συχνοτήτων λειτουργούν, γενικότερα, σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από τα ballast υψηλών συχνοτήτων και για αυτό το λόγο χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και βελτιωμένα χαρακτηριστικά διατήρησης της φωτεινής τους ροής.

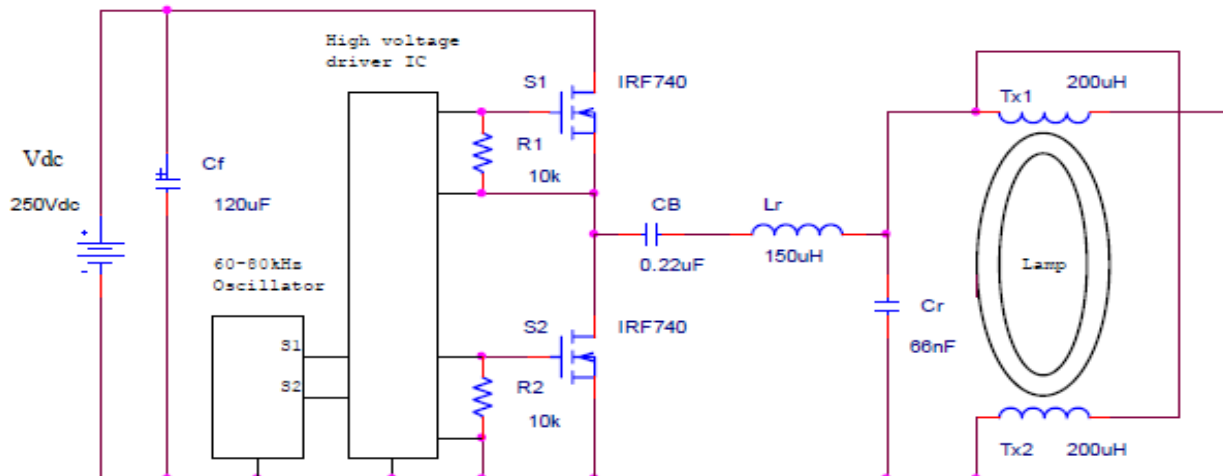
Αυτά τα ballast, συνήθως δεν παράγουν παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων γιατί η χαμηλή συχνότητα λειτουργίας τους τα τοποθετεί μακριά από το εύρος των ραδιοσυχνοτήτων. Λόγω του καλύτερου σχεδιασμού και της καλύτερης ποιότητας εξαρτημάτων που περιλαμβάνουν, είναι λιγότερο πιθανό να υπάρξει «διαρροή» παρεμβολών ραδιοσυχνοτήτων. Και σε αυτήν την περίπτωση, τα καλώδια μεταξύ του ballast και του λαμπτήρα λειτουργούν σαν κεραία που εκπέμπει ραδιοφωνικές παρεμβολές, που όμως δεν αποτελούν πρόβλημα καθώς λόγω της χαμηλής συχνότητας δεν ταξιδεύουν μακριά. Παρ' όλα αυτά, να αναφερθεί ότι είτε πρόκειται για ballast υψηλών ή χαμηλών συχνοτήτων, θα πρέπει τα ballast, τα πηνία και το φωτιστικό να γειώνονται πάντα για τη μείωση αυτών των παρεμβολών[31].

3.7.2.2.1 Ballast με Συχνότητα Λειτουργίας κάτω των 100 KHz

Ιδιαίτερης σημασίας χρήζουν τα ballast που έχουν κατασκευαστεί για την λειτουργία λαμπτήρων εξωτερικής επαγωγής, σε συχνότητα μικρότερη των 100 KHz. Τα συνήθη ballast που χρησιμοποιούνται ευρέως, λειτουργούν σε συχνότητες πολύ υψηλές, μεγαλύτερες των 200 KHz, μπορεί να παράγουν ποικίλα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και δεν είναι πάντα συμβατά με τα πρότυπα και τους κανόνες ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας για οικιακή χρήση. Έτσι, περιορίζονται κυρίως σε εφαρμογές φωτισμού εξωτερικών χώρων ή σε ειδικούς χώρους π.χ. γυμναστήρια, μακριά από τα ανθρώπινα σώματα[33]. Για το λόγο αυτό, έγιναν μελέτες πάνω σε ηλεκτρονικά ballast που θα οδηγούν λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής σε συχνότητες μικρότερες των 100 KHz και θα είναι κατάλληλα για οικιακή χρήση.

Η πρώτη μελέτη που πραγματοποιήθηκε [33], αφορά την κατασκευή ενός ballast ικανού να τροφοδοτήσει ένα λαμπτήρα εξωτερικής μαγνητικής επαγωγής ισχύος 150 W. Το κύκλωμα του ballast (σχήμα 36), αποτελείται από έναν αντιστροφέα ημιγέφυρας που οδηγεί το κύκλωμα συντονισμού, το οποίο περιλαμβάνει και το λαμπτήρα συνδεδεμένο παράλληλα με τον πυκνωτή συντονισμού. Το κύκλωμα ελέγχου αρχικά ταλαντώνεται με συχνότητα 80 KHz και στην σταθερή κατάσταση λειτουργίας με συχνότητα 60 KHz. Στη συνέχεια, το ολοκληρωμένο κύκλωμα υψηλής τάσης λαμβάνει τα σήματα ελέγχου για την οδήγηση των δύο MOSFET ισχύος της ημιγέφυρας. Επίσης, για τη διατήρηση σταθερής ισχύος στο τόξο, προτείνεται έλεγχος με ανάδραση ώστε να ρυθμίζεται η συχνότητα λειτουργίας και η φωτεινή ένταση του λαμπτήρα (dimming). Το εν λόγω σύστημα παρουσιάζει απόδοση 95% χωρίς να ληφθούν υπόψη τα πηνία επαγωγής, ενώ 85% αν συμπεριληφθούν και αυτά. Η μειωμένη συχνότητα λειτουργίας διευκολύνει το σχεδιασμό του φίλτρου ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, ώστε η λειτουργία του συστήματος να συμμορφώνεται

με τα πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και μάλιστα χωρίς να υποβαθμίζεται η φωτεινή ροή του λαμπτήρα. Επίσης, η μειωμένη συχνότητα λειτουργίας επιτρέπει τη χρήση μαλακών φερριτών με μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής στα 60 KHz, από αυτή που προσφέρουν τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα 250 KHz. Για παράδειγμα, το MnZn έχει μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής περίπου 0,45 T, έναντι του NiZn με 0,2 T. Έτσι, η χρήση του MnZn οδηγεί σε μείωση του μεγέθους των πυρήνων στα 60 KHz.

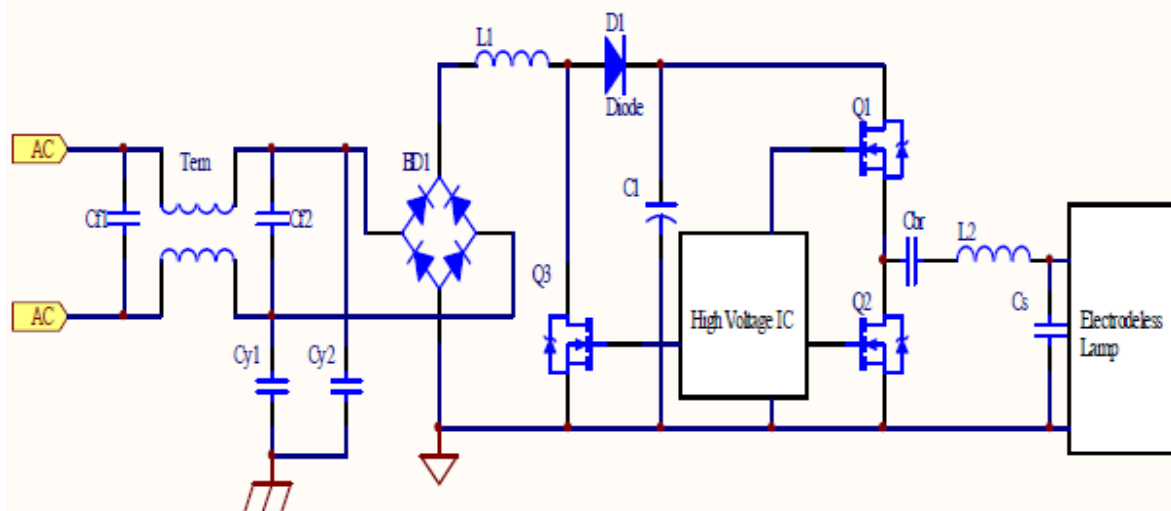


Σχήμα 36. Κύκλωμα ballast συνεχούς ρεύματος για λαμπτήρα 150 W στα 60 KHz [33]

Η σχετική δημοσίευση, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι για τη μείωση του μεγέθους των πυρήνων των μαγνητικών εξαρτημάτων και των διακοπτικών απωλειών των MOSFET ισχύος για χρήση λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής κάτω από τα 100 KHz, η βέλτιστη συχνότητα λειτουργίας είναι στα 60 - 75 KHz, ενώ για την έναυση περίπου στα 80 - 90 KHz[33].

Στη συνέχεια [34], σύμφωνα με το ballast που οδηγούσε λαμπτήρα εξωτερικής μαγνητικής επαγωγής ισχύος 150 W και συχνότητα λειτουργίας 210 KHz, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα νέο ballast για την οδήγηση λαμπτήρα ισχύος 40 W και συχνότητας 60 KHz, για χρήση σε εσωτερικούς χώρους. Θεωρήθηκε ότι μόνο λαμπτήρας χαμηλής ισχύος θα ήταν κατάλληλος για λειτουργία σε χαμηλές συχνότητες και με μειωμένες απώλειες πυρήνων των πηνίων, καθώς λαμπτήρες ισχύος άνω των 100 W δεν διατηρούν την ίδια φωτεινή απόδοση (lm/W) σε συχνότητες γύρω στα 60 KHz χωρίς ταυτόχρονη αύξηση του μεγέθους των πυρήνων τους. Το εν λόγω ηλεκτρονικό ballast (σχήμα 37), περιλαμβάνει ένα μετατροπέα boost, ως στάδιο διόρθωσης του συντελεστή ισχύος (PFC), που μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου σε συνεχή τάση πολύ υψηλής τιμής. Στη συνέχεια, υπάρχει ένας αντιστροφείας ημιγέφυρας που οδηγεί το κύκλωμα συντονισμού μαζί με το λαμπτήρα, όπως και στην παραπάνω περίπτωση. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ελέγχει τη λειτουργία του σταδίου διόρθωσης του συντελεστή ισχύος, ελέγχει την υψηλή τάση οδήγησης και την έναυση του λαμπτήρα και τον προστατεύει. Λειτουργεί το λαμπτήρα σε ένα εύρος συχνοτήτων 50 - 70 KHz, με κεντρική συχνότητα 60 KHz. Επειδή, η συχνότητα λειτουργίας είναι πιο κοντά σε αυτή των γραμμικών λαμπτήρων φθορίου, μπορεί να

χρησιμοποιηθεί το ίδιο ballast, προσαρμόζοντας απλά τον αριθμό των τυλιγμάτων στο πηνίο, ώστε το ρεύμα να γίνει το ίδιο. Ακόμη, μια σειρά πειραμάτων που έγινε σε λαμπτήρα ισχύος 150 W για συχνότητες 9 KHz έως 30 MHz, έδειξε ότι στα 60 KHz οι μετρήσεις των πεδίων είναι εντός των ορίων που θέτουν τα πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας για εσωτερικούς χώρους, τα οποία είναι κάπως ασαφή στις χαμηλές συχνότητες, ενώ στα 210 KHz που τα όρια είναι πιο αυστηρά, οι τιμές που παρουσιάζονται είναι υψηλές και δυσκολεύουν το φιλτράρισμα και τη θωράκιση για συμμόρφωση με τα πρότυπα, καθιστώντας απαγορευτική τη χρήση τους σε εσωτερικούς χώρους.



Σχήμα 37. Κύκλωμα ballast για λαμπτήρα 40 W στα 60 KHz [34]

Το ηλεκτρομαγνητικό φίλτρο στο ballast των 60 KHz αποτελείται από ένα στάδιο, ενώ αυτό των 210 KHz από δύο στάδια και για αυτό και το συνολικό κύκλωμα είναι μεγαλύτερο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 38, χωρίς να υπάρχουν άλλες αξιοσημείωτες διαφορές[34].



Σχήμα 38. Ballast λαμπτήρα 40 W σε συχνότητες 210 KHz και 60 KHz [34]

Κλείνοντας, η χαμηλή συχνότητα λειτουργίας, μειώνει τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, διευκολύνει το σχεδιασμό του φίλτρου, ώστε το σύστημα να είναι συμβατό με τα πρότυπα

ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας για εσωτερικούς χώρους και επιτρέπει τη χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων χαμηλής συχνότητας που απλοποιούν το σχεδιασμό και μειώνουν το κόστος του ballast. Τέλος, η συνολική απόδοση και η φωτεινή απόδοση (lm/W) είναι λίγο υψηλότερη από το σύστημα των 210 KHz (σχήμα 39)[34].

Efficacy Test		
<i>Test item</i>	<i>60KHz</i>	<i>210KHz</i>
Input power (W)	41	41
Ballast output(W)	36	35
Lamp lumen output(lm)	2602	2547
Ballast efficiency (%)	87.8	85.4
Lamp efficacy(lm/w)	72.3	72.8
Total efficacy(lm/w)	63.5	62.1

Σχήμα 39. Σύγκριση απόδοσης των ballast σε συχνότητες 60 KHz και 210 KHz [34]

Στην παρούσα φάση, τα συστήματα με λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω των 100 KHz βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο, όμως, η κατασκευή τους είναι εφικτή και αναμένεται ότι στο μέλλον αυτού του είδους τα συστήματα θα βρουν εφαρμογή και σε εσωτερικούς χώρους, γιατί τα οφέλη που προσφέρει η λειτουργία σε χαμηλές συχνότητες είναι πολλαπλά[33][34].

3.7.2.3 Επιλογή του Κατάλληλου Ballast

Ο εκάστοτε λαμπτήρας πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το κατάλληλο ballast, το οποίο θα πρέπει να είναι ικανό να παρέχει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά λειτουργίας, όπως αυτά έχουν καθοριστεί από διεθνή πρότυπα και από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ίδιου του λαμπτήρα. Ballast τα οποία δεν παρέχουν τις κατάλληλες ηλεκτρικές τιμές, είναι δυνατό να προκαλέσουν μείωση της διάρκειας ζωής ή/και της φωτεινής ροής των λαμπτήρων[11][31].

Γενικά, τα ballast χαμηλών συχνοτήτων προσφέρουν καλύτερες επιδόσεις, πιο σταθερό φως, υψηλότερους συντελεστές ισχύος και χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας από τα ballast υψηλών συχνοτήτων. Εάν είναι διαθέσιμο ένα ballast χαμηλών συχνοτήτων για το μοντέλο του λαμπτήρα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, αποτελεί και την καλύτερη επιλογή[31].

- Λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής

Οι λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής μπορούν να συνδυαστούν με ballast χαμηλών ή υψηλών συχνοτήτων, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

Επιλέγονται **ballast υψηλών συχνοτήτων** με λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής, όταν το μέγεθος του διαθέσιμου χώρου για το ballast είναι περιορισμένο και δεν θα χωρούσε ένα ballast υψηλής συχνότητας που είναι μεγαλύτερο και όταν η αυξημένη θερμοκρασία λειτουργίας δεν αποτελεί πρόβλημα, γιατί το φωτιστικό διαθέτει κατάλληλη διαχείριση θερμότητας. Ακόμη, χρησιμοποιούνται όταν δεν υπάρχει άλλη επιλογή, γιατί ο λαμπτήρας διατίθεται μόνο με ballast υψηλών συχνοτήτων, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με τις περισσότερες βιδωτές λάμπες με ενσωματωμένο ballast, που χρησιμοποιούν ballast υψηλών συχνοτήτων, για εξοικονόμηση χώρου και χρημάτων. Επίσης, συνηθίζεται η χρήση τους, όταν το κόστος αποτελεί σοβαρό ζήτημα γιατί είναι φθηνότερα από τα ballast χαμηλών συχνοτήτων, όταν οι διακυμάνσεις του φωτός με τις αλλαγές της τάσης δεν αποτελούν σοβαρό θέμα και όταν ένας χαμηλότερος συντελεστής ισχύος, σε σχέση με τα ballast χαμηλών συχνοτήτων, είναι αποδεκτός. Τέλος, οι λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής μπορούν να συνδυαστούν με ballast υψηλών συχνοτήτων όταν δεν υπάρχουν προβλήματα με παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων λόγω της θέσης των λαμπτήρων και των ballast, όταν τα φωτιστικά που χρησιμοποιούνται είναι γειωμένα και όταν έχει γίνει εκ των προτέρων έλεγχος για προβλήματα παρεμβολών.

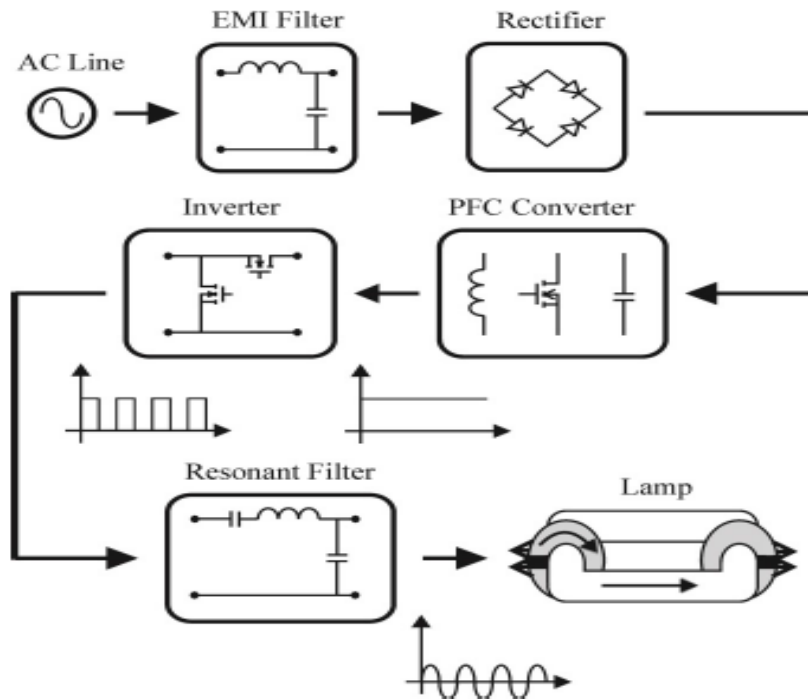
Αντιθέτως, χρησιμοποιούνται **ballast χαμηλών συχνοτήτων** με λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής, όταν χωράνε στο φωτιστικό και όταν απαιτούνται χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας για το ballast και το λαμπτήρα, για μακρά διάρκεια ζωής και αυξημένη διατήρηση της φωτεινής ροής. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται όταν το κόστος δεν αποτελεί πρόβλημα, καθώς οι αυξημένες επιδόσεις τους, ο μεγάλος συντελεστής ισχύος, ο καλύτερος έλεγχος του λαμπτήρα που επιτυγχάνεται με κυκλώματα μικροεπεξεργαστών και η σταθερότητα του φωτός, δικαιολογούν αυτήν την επιλογή. Επίσης, προτιμώνται όταν δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη διάρκεια ζωής, ώστε το ballast και ο λαμπτήρας αντικατάστασης να ξεπερνούν κατά πολύ σε επιδόσεις τα προηγούμενα συστήματα, ώστε να αποτελούν οικονομικά βιώσιμη επιλογή και με όσο το δυνατόν μικρότερο χρόνο απόσβεσης. Τέλος, οι λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής μπορούν να συνδυαστούν με ballast χαμηλών συχνοτήτων, όταν οι παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων αποτελούν σοβαρό ζήτημα λόγω της θέσης των λαμπτήρων και των ballast[31].

- Λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής

Σχεδόν όλοι οι λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής χρησιμοποιούν **ballast χαμηλών συχνοτήτων**, ώστε να προσφέρουν καλύτερες επιδόσεις και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Έτσι, δεν υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ των ballast υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων για αυτούς τους λαμπτήρες[31].

3.7.3 Κύκλωμα Ballast Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής

Ένα τυπικό ηλεκτρονικό ballast για την οδήγηση λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής αποτελείται από έναν αριθμό σταδίων, όπως φαίνεται στο σχήμα 40, για την ορθή λειτουργία του συστήματος. Τα στάδια αυτά είναι συνήθως: το φίλτρο ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, ο ανορθωτής, το στάδιο διόρθωσης του συντελεστή ισχύος (PFC), ο αντιστροφέας DC/AC και το κύκλωμα συντονισμού. Ο ρόλος κάθε σταδίου θα περιγραφεί αναλυτικά στη συνέχεια.



Σχήμα 40. Στάδια κυκλώματος ballast λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής[35]

- Φίλτρο ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI filter)

Αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως φίλτρο εισόδου ή φίλτρο γραμμής και η κύρια λειτουργία του είναι η καταστολή των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που μεταδίδονται είτε μέσω αγωγής ή μέσω ακτινοβολίας. Χρησιμοποιείται προκειμένου να εξλειφθούν οι αρμονικές υψηλών συχνοτήτων, που παράγονται από τη λειτουργία του μετατροπέα του σταδίου διόρθωσης του συντελεστή ισχύος και του αντιστροφέα, λόγω της υψηλής διακοπτικής τους συχνότητας[35][36]. Αυτές οι ανώτερες αρμονικές, όταν δεν υπάρχει το φίλτρο ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, προκαλούν μείωση του συντελεστή ισχύος του συστήματος, συμβάλλουν στην παραμόρφωση του ρεύματος εισόδου, προκαλούν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στο περιβάλλον του ballast και θόρυβο στο δίκτυο μεταφοράς. Επίσης, χρησιμοποιείται και για το φιλτράρισμα των αρμονικών από την AC τροφοδοσία προς το ballast. Συνήθως, για λόγους απλότητας και απόδοσης, προτείνεται ένα απλό LC παθητικό φίλτρο, το οποίο θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο ώστε να μην ενισχύει τις ανώτερες αρμονικές καθ' όλο το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας. Επίσης,

σχεδιάζεται ως ένα χαμηλοδιαβατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής κάτω από τη συχνότητα λειτουργίας του αντιστροφέα[37][42].

Η αναγκαιότητα του σταδίου αυτού εξαρτάται από τον τύπο του μετατροπέα του σταδίου PFC και τη μεθοδολογία σχεδίασης[36][37]. Αυτό σημαίνει ότι εάν ο μετατροπέας παρέχει αυξημένο συντελεστή ισχύος και μειωμένο συντελεστή ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD), όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τους μετατροπείς SEPIC και ζ uk, λειτουργεί από μόνος του ως μια μορφή φίλτρου του ρεύματος εισόδου[38][36]. Τότε, η παρουσία του ηλεκτρομαγνητικού φίλτρου δεν κρίνεται απαραίτητη. Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση του ζ uk αν η αυτεπαγωγή εισόδου του είναι μεγάλη, το ρεύμα γραμμής θα παρουσιάζει μόνο μια μικρή κυμάτωση υψηλής συχνότητας και θα απαιτεί ένα μικρό φίλτρο, το οποίο μπορεί και να παραληφθεί[36]. Αυτό συνεπάγεται μείωση των σταδίων, αύξηση της συνολικής απόδοσης και μείωση του κόστους του ballast.

- Ανορθωτής (Rectifier)

Συνήθως περιλαμβάνει μια γέφυρα διόδων, που ονομάζεται και ανορθωτής πλήρους κύματος, γιατί οι διόδοι άγουν ανά δύο σε κάθε ημιπερίοδο (αρνητική και θετική) του σήματος εισόδου. Είναι το πρώτο στάδιο της μετατροπής της εναλλασσόμενης τάσης (AC) της γραμμής σε παλμική συνεχή τάση (DC)[35][39].

- Διόρθωση του συντελεστή ισχύος (PFC stage)

Αρκετές χώρες θέτουν περιορισμούς στον συντελεστή ισχύος του ballast. Τα διεθνή πρότυπα επιβάλλουν στα ηλεκτρονικά ballast των λαμπτήρων φθορίου, μια υποκατηγορία των οποίων αποτελούν οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, να περιλαμβάνουν ένα στάδιο διόρθωσης του συντελεστή ισχύος, για ισχείς που ξεπερνούν ένα καθορισμένο επίπεδο. Αυτό το στάδιο θα πρέπει να ικανοποιεί τα πρότυπα, σχετικά με το περιεχόμενο των αρμονικών του ρεύματος από το δίκτυο και να διασφαλίζει ότι ικανοποιείται ο κανονισμός IEC 61000-3-2 class C. Πρόκειται για έναν κανονισμό ιδιαίτερα αυστηρό για ισχείς άνω των 25 W. Για το λόγο αυτό, τα ballast των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής πρέπει υποχρεωτικά να περιλαμβάνουν και ένα στάδιο διόρθωσης του συντελεστή ισχύος[36][37]. Η λειτουργία των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής σε υψηλές συχνότητες, καθιστά κρίσιμη την επιλογή των κατάλληλων ηλεκτρονικών μετατροπέων, ικανών για να εκκινήσουν και να οδηγήσουν τους λαμπτήρες σε τόσο υψηλές συχνότητες, ενώ ταυτόχρονα να εξασφαλίζουν υψηλές αποδόσεις, μειωμένες διακοπτικές απώλειες και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές[37].

Αυτό το στάδιο του ballast είναι ένας μετατροπέας DC/DC, ο οποίος φροντίζει για την ανόρθωση της τάσης στην επιθυμητή τιμή και για τη διατήρηση υψηλού συντελεστή ισχύος. Η τάση εξόδου του μετατροπέα, που είναι συνεχής (DC), ονομάζεται και τάση διαύλου (V_{bus}) και είναι η τάση εισόδου του επόμενου σταδίου, δηλαδή του

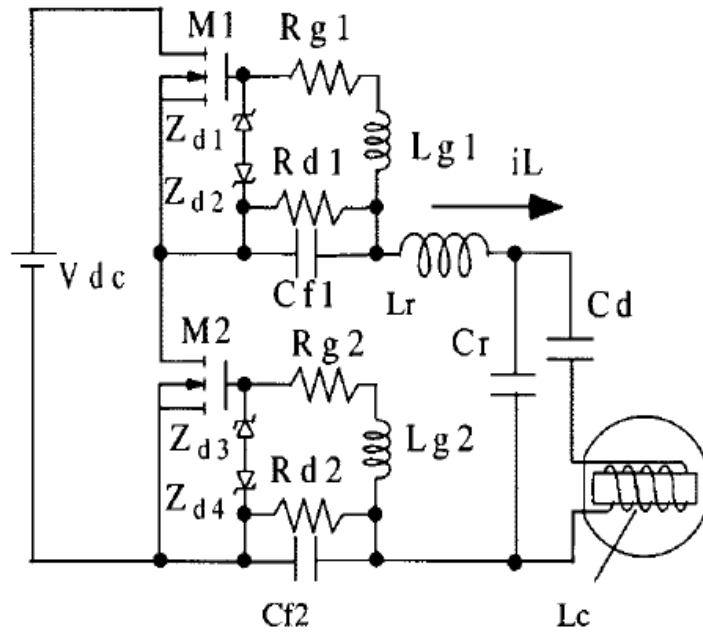
αντιστροφέα[37]. Αυτή η τάση μπορεί να είναι μεταβλητή, αν πρόκειται να γίνει ρύθμιση της φωτεινής ροής του λαμπτήρα (dimming).

Στις δημοσιεύσεις που μελετήθηκαν, θεωρείται ότι όλοι οι μετατροπείς λειτουργούν στην περιοχή της ασυνεχούς αγωγής (Discontinuous Conduction Mode, DCM), επειδή η ισχύς είναι μικρότερη των 300 W. Έτσι, οι μετατροπείς προσομοιώνονται ως αντιστάσεις στη γραμμή[35][36][41]. Επίσης, δεν είναι απαραίτητο να λειτουργούν στην ίδια συχνότητα με τον αντιστροφέα του επόμενου σταδίου, όταν δεν έχει γίνει ενοποίηση αυτών των δύο σταδίων[40]. Παραδείγματα μετατροπών από τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιούνται ως στάδια διόρθωσης του συντελεστή ισχύος αποτελούν οι SEPIC, Buck-Boost, Ćuk, Boost, Zeta και Flyback, που ανήκουν στην οικογένεια των στατικών μετατροπών[37]. Ειδικότερα για τους μετατροπείς SEPIC, Buck-Boost και Ćuk, προκύπτει ότι μπορούν να λειτουργήσουν ως μετατροπείς ανόρθωσης ή υποβιβασμού τάσης, ανάλογα με το duty cycle που τους επιβάλλεται και είναι ιδανικοί για χρήση ως στάδια διόρθωσης του συντελεστή ισχύος, καθώς παρέχουν υψηλό συντελεστή ισχύος στο σύστημα[35][36][41]. Επίσης, όλες οι τοπολογίες που εξετάστηκαν, ακόμα και στην χειρότερη περίπτωση των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος εισόδου, συμφωνούν με τους κανονισμούς του προτύπου IEC 61000-3-2 class C[37].

- Αντιστροφέας DC/AC (Inverter)

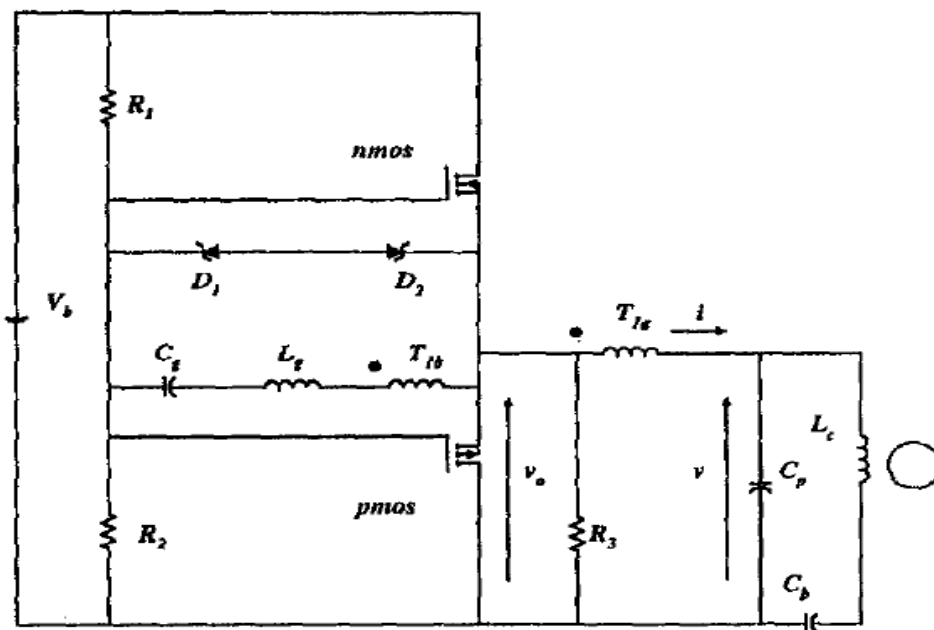
Το στάδιο αυτό τροφοδοτείται με τη συνεχή τάση διαύλου V_{bus} , που είναι και η τάση εξόδου του μετατροπέα του σταδίου διόρθωσης του συντελεστή ισχύος. Την τάση αυτή τη μετατρέπει σε εναλλασσόμενη τάση που έχει τη μορφή τετραγωνικού παλμού. Υλοποιείται με έναν αντιστροφέα Class D ημίσεως γέφυρας και ο τετραγωνικός παλμός εμφανίζεται στο σημείο όπου ενώνονται οι δύο διακόπτες της ημιγέφυρας, οι οποίοι άγουν εναλλάξ[35][39]. Ο αντιστροφέας επιβάλλει τη συχνότητα λειτουργίας του, δηλαδή λειτουργεί με διακοπτική συχνότητα ίδια με αυτή του λαμπτήρα που τροφοδοτεί και μάλιστα επιβάλλεται να είναι κοντά στη συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος συντονισμού[41].

Ένα λίγο διαφορετικό κύκλωμα, που υλοποιείται από έναν αντιστροφέα Class D ημίσεως γέφυρας με MOSFET, με πυκνωτές στην ανάδραση προτείνεται στο [43] και φαίνεται στο σχήμα 41. Οι πυκνωτές ανάδρασης είναι οι C_{f1} και C_{f2} και οι τάσεις αυτών εφαρμόζονται ως σήματα πύλης στα τρανζίστορ M_1 και M_2 , μέσω των αντιστάσεων L_{g1} , R_{g1} και L_{g2} , R_{g2} αντίστοιχα. Οι μεταβάσεις των τρανζίστορ γίνονται κατά το μηδενισμό της τάσης (Zero Voltage Switching - ZVS) και αυτό εγγυάται μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος και των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών τους. Στη συνέχεια, συνδέεται κανονικά το κύκλωμα συντονισμού[43].



Σχήμα 41. Class D αντιστροφέας με πυκνωτές ανάδρασης[43]

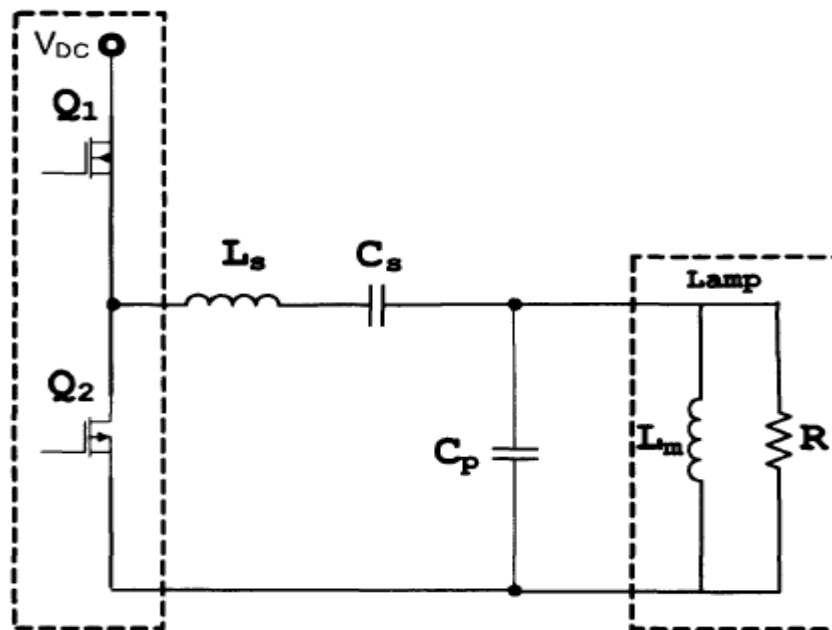
Μια άλλη υλοποίηση του σταδίου αυτού προτείνεται στο [15] και έχει τη μορφή του σχήματος 42. Πρόκειται για ένα ballast συμπληρωματικής συμμετρίας, όπως ονομάζεται από το συγγραφέα, που χρησιμοποιεί την τεχνική Frequency Shift Keying (FSK) για τον έλεγχο της φωτεινής ροής του λαμπτήρα. Τα σήματα ελέγχου του αντιστροφέα παράγονται από ένα μετασχηματιστή, που λειτουργεί τον αντιστροφέα στη βέλτιστη γωνία φάσης και καταναλώνει μόνο ένα μικρό κλάσμα της εισερχόμενης ισχύος[15].



Σχήμα 42. Κύκλωμα ballast με αντιστροφέα συμπληρωματικής συμμετρίας [15]

- Κύκλωμα συντονισμού (Resonant Circuit)

Το κύκλωμα αυτό παρεμβάλλεται μεταξύ του αντιστροφέα και του λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής και αναφέρεται πολύ συχνά και ως φίλτρο συντονισμού. Ο σχεδιασμός του θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη έναν αριθμό κριτηρίων για την ικανοποιητική λειτουργία του λαμπτήρα και γίνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά του. Συνήθως έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στο σχήμα 43 και επιτελεί μια σειρά λειτουργιών στο κύκλωμα του ballast. Το παρακάτω κύκλωμα είναι ένα LCC φίλτρο και αποτελείται από τα στοιχεία L_s , C_s και C_p [38][40].



Σχήμα 43. Κύκλωμα συντονισμού LCC [44]

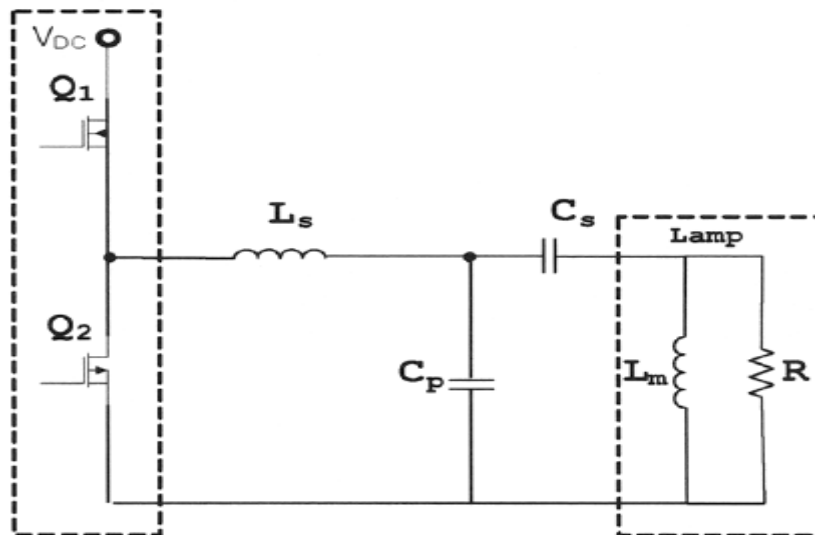
Για την έναρξη της εκκένωσης του λαμπτήρα είναι απαραίτητη η παραγωγή μιας πολύ υψηλής τάσης στα άκρα του, διότι πριν την εκκένωση έχει πολύ υψηλή αντίσταση και λειτουργεί ως ανοιχτοκύκλωμα. Αυτή η τάση επιτυγχάνεται με την παραγωγή μεγάλου κέρδους τάσης από το κύκλωμα συντονισμού, όταν αυτό λειτουργεί σαν ανοιχτοκύκλωμα κοντά στη συχνότητα συντονισμού. Για το λόγο αυτό, κατά την έναυση του λαμπτήρα, η διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα θα πρέπει να είναι κοντά στη συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, ώστε να παρέχεται επαρκές κέρδος τάσης για να εξασφαλιστεί η εκκένωση μέσα στη λυχνία[37][40][41][42].

Μετά την έναυση, η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του λαμπτήρα μειώνεται δραστικά λόγω του χαρακτηριστικού της αρνητικής αντίστασης της εκκένωσης και αν δεν περιοριζόταν με κάποιο μέσο, ο λαμπτήρας θα διαρρεόταν από ρεύμα πολύ υψηλής τιμής και αυτό θα οδηγούσε στην πρόωρη φθορά του. Το κύκλωμα συντονισμού περιορίζει και σταθεροποιεί τα επίπεδα του ρεύματος και της ισχύος σε ονομαστικές τιμές κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας[37][38][40][41][42].

Η κυματομορφή που έχει ως τάση εξόδου ο αντιστροφέας του προηγούμενου σταδίου είναι ένας τετραγωνικός παλμός, ο οποίος περιέχει και εναλλασσόμενη και συνεχή συνιστώσα. Αυτό που κάνει το κύκλωμα συντονισμού είναι να φιλτράρει την κυματομορφή του προηγούμενου σταδίου, ώστε να εξάγει ένα συμμετρικό, ημιτονοειδές κύμα στη θεμελιώδη συχνότητα του αντιστροφέα. Αυτό το τελευταίο βήμα είναι απαραίτητο για τη μείωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται από το πηνίο και τη λυχνία σε αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας οδήγησης του αντιστροφέα. Το φίλτρο συντονισμού ρυθμίζει την κυματομορφή της τάσης που παρέχεται στο λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής, ελαττώνοντας τις συνιστώσες υψηλότερης τάξης και επιτρέποντας τη διάβαση, κυρίως, της θεμελιώδους συνιστώσας. Η ποιότητα της κυματομορφής της τάσης που τροφοδοτεί το λαμπτήρα είναι πολύ σημαντική για τη διάρκεια της ζωής του[37][38][40][42][67]. Η τιμή της χωρητικότητας C_s , πρέπει να έχει επαρκή τιμή, ώστε να αφαιρέσει τη συνεχή συνιστώσα της τάσης που εφαρμόζεται στο φίλτρο συντονισμού. Η τιμή αυτή είναι συνήθως 10 – 20 φορές μεγαλύτερη από την τιμή της C_p , που ονομάζεται και πυκνωτής έναυσης και στην οποία συνδέεται ο λαμπτήρας στο φίλτρο LCC[41][45][62].

Ταυτόχρονα, το κύκλωμα συντονισμού μπορεί να εξασφαλίσει η αλλαγή κατάστασης των διακοπών να γίνεται κατά το μηδενισμό της τάσης, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι διακοπτικές απώλειες του αντιστροφέα. Όταν συμβαίνει αυτό, η γωνία μεταξύ τάσης και ρεύματος είναι επαγωγική στο LCC φίλτρο και σε αυτήν την κατάσταση, ο αντιστροφέας επιτυγχάνει soft switching και στους δύο διακόπτες του. Η τεχνική soft switching κάνει δυνατή όχι μόνο την αύξηση των διακοπτικών συχνοτήτων, αλλά ταυτόχρονα περιορίζει σημαντικά τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που παράγονται τόσο από το επαγωγικό πηνίο, όσο και από τον ίδιο τον αντιστροφέα, περιορίζοντας προβλήματα που εμφανίζονται στη λειτουργία γειτονικών συσκευών από ακτινοβολούμενες ή εξ επαγωγής ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές[37][38]. Το φίλτρο συνδυασμένο με το λαμπτήρα ονομάζεται φορτίο συντονισμού και η γωνία φάσης του επιλέγεται ώστε το ρεύμα να καθυστερεί σε σχέση με την τάση. Έτσι, ολόκληρο το φορτίο συντονισμού σχεδιάζεται ώστε να παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά, με τη συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος να είναι λίγο μικρότερη από τη διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα[35].

Μια άλλη υλοποίηση του κυκλώματος συντονισμού, που αναφέρεται στη βιβλιογραφία, είναι το φίλτρο LC-C που χρησιμοποιήθηκε για το ballast του λαμπτήρα εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής QL της Philips. Χρησιμοποιήθηκε γιατί η σύνθετη αντίσταση του καλωδίου που συνδέει το λαμπτήρα με το ballast, ανάλογα με το μήκος του επηρέαζε τη σωστή λειτουργία του συστήματος, καθώς η συχνότητα των 2,65 MHz είναι ιδιαίτερα υψηλή. Το LC-C φίλτρο περιλαμβάνει έναν πυκνωτή σε σειρά στο τέλος του, ώστε η χωρητικότητά του να αντισταθμίζει την επίδραση της σύνθετης αντίστασης της γραμμής. Το εν λόγω κύκλωμα απεικονίζεται στη συνέχεια[44].

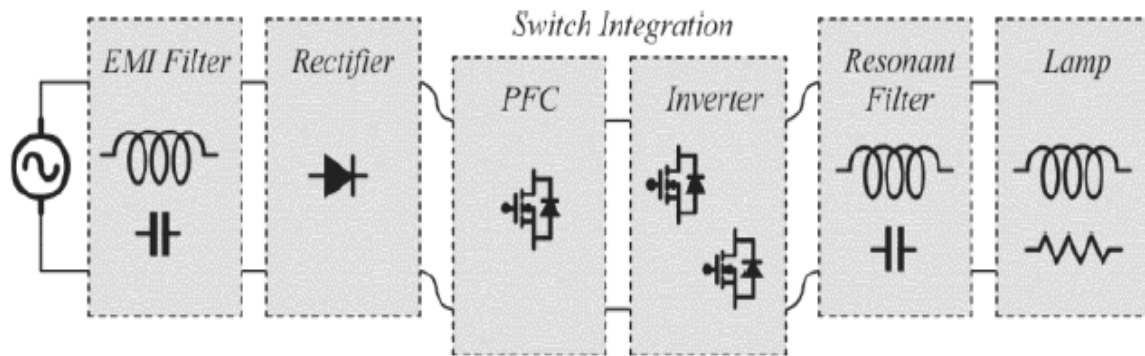


Σχήμα 44. Κύκλωμα συντονισμού LC-C [44]

Ο αντιστροφείας ημίσεως γέφυρας συνοδευόμενος από το κύκλωμα συντονισμού μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη υψηλής συχνότητας. Αναφέρεται στη βιβλιογραφία, εν συντομία, ως αντιστροφείας συντονισμού (resonant inverter), που τροφοδοτεί το λαμπτήρα και ρυθμίζει την ισχύ του. Για το λόγο αυτό, πολλές φορές συναντάται και με τον όρο «στάδιο ελέγχου ισχύος» (Power Control Stage).

- Ενοποίηση Σταδίων (Integration)

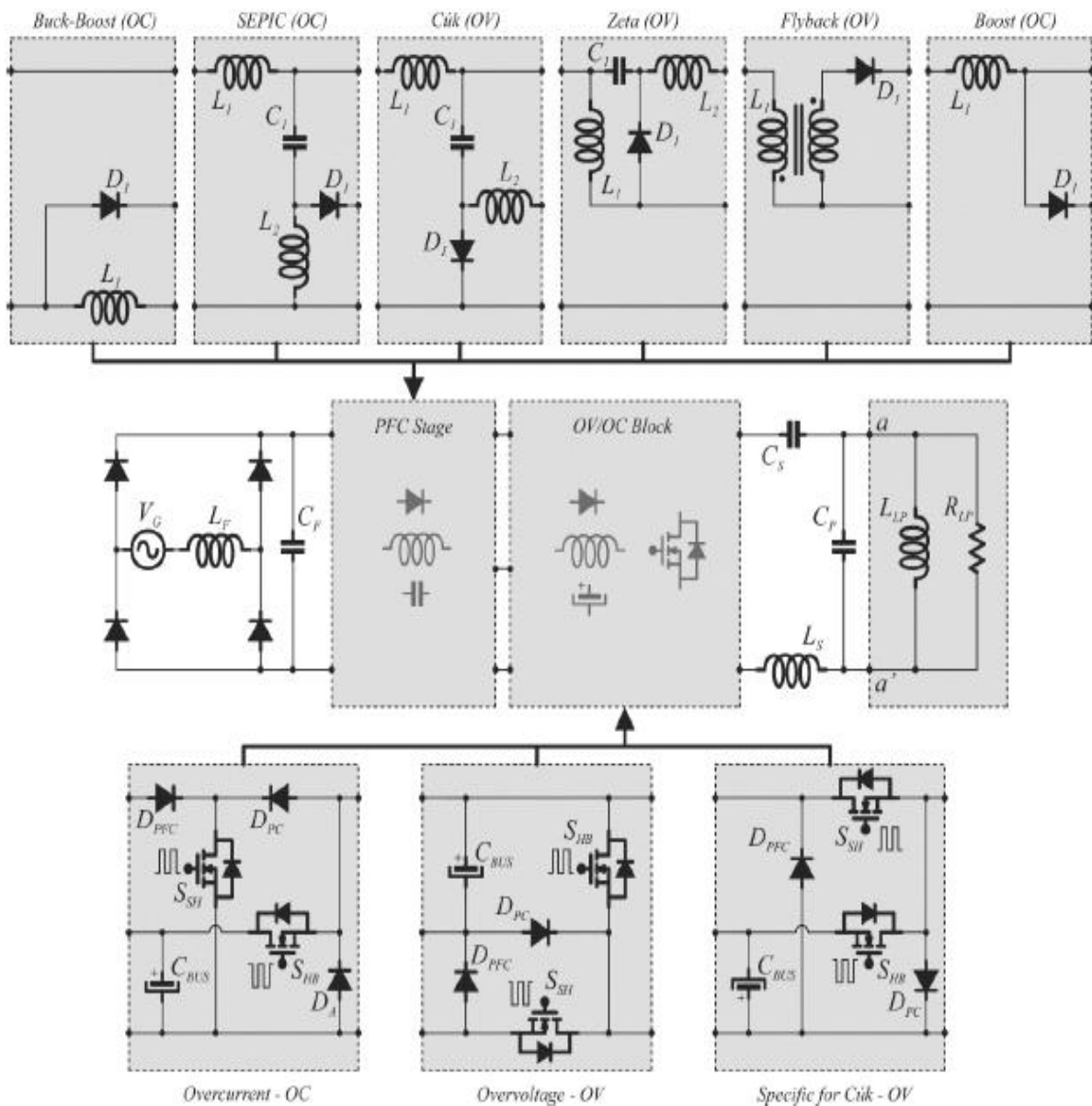
Όπως περιγράφηκε και παραπάνω, συνήθως, είναι απαραίτητα πέντε στάδια για την ορθή λειτουργία του συστήματος τροφοδοσίας ενός λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής. Όμως, ο αυξημένος αριθμός των σταδίων του ballast συνεπάγεται μια αρκετά περίπλοκη τοπολογία, αυξάνει το κόστος του συστήματος και υπονομεύει την αξιοπιστία του κυκλώματος. Η αφαίρεση ή/και ενοποίηση ορισμένων σταδίων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των εξαρτημάτων, καθιστώντας το σύστημα πιο ελκυστικό. Η τεχνική της ενοποίησης αφορά το συνδυασμό δύο ελεγχόμενων διακοπών σε ένα μόνο διακόπτη και έχει ως σκοπό τη μείωση του αριθμού των ενεργών ημιαγωγικών διακοπών, καθώς και την απλοποίηση των απαιτούμενων κυκλωμάτων οδήγησης και ελέγχου. Οι διακόπτες καταλαμβάνουν μια μεγάλη μερίδα του συνολικού κόστους ενός μετατροπέα ισχύος και είναι πολλές φορές υπεύθυνοι για την παρουσία σφαλμάτων στη λειτουργία των ηλεκτρονικών συστημάτων[35][36][38][45]. Βέβαια, το να μοιράζονται δύο στάδια τους ίδιους διακόπτες, προκαλεί την προσθήκη παθητικών ημιαγωγών, δηλαδή διόδων στην τοπολογία και σε κάποιες περιπτώσεις η ενοποίηση καθίσταται όχι και τόσο ωφέλιμη[37]. Παρ' όλα αυτά, ο μειωμένος αριθμός διακοπών, λόγω της ενοποίησης, μειώνει την πιθανότητα παρουσίας σφαλμάτων στο σύστημα. Έτσι, σε πάρα πολλές περιπτώσεις προτείνεται η ενοποίηση του μετατροπέα του σταδίου διόρθωσης του συντελεστή ισχύος με τον αντιστροφή (σχήμα 45).



Σχήμα 45. Block διάγραμμα ballast και στάδια προς ενοποίηση [37]

Τα δύο στάδια θα μοιραστούν έναν ελεγχόμενο διακόπτη και προκύπτει ένας ενοποιημένος μετατροπέας. Ο κύριος σκοπός είναι η απλούστευση του κυκλώματος, η μείωση του κόστους του ballast, καθώς και η παροχή των κατάλληλων συνθηκών για τη λειτουργία του λαμπτήρα, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζεται βέλτιστη άντληση ισχύος από το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος. Η διαδικασία της ενοποίησης βασίζεται στο συγχρονισμό μεταξύ των δύο σταδίων λειτουργίας, δηλαδή του μετατροπέα και του αντιστροφέα[35][38][41]. Αυτή η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί όταν οι διακόπτες προς ενοποίηση παρουσιάζουν ένα τουλάχιστον κοινό σημείο. Ένας περιοριστικός παράγοντας της ενοποίησης είναι ότι και τα δύο στάδια πρέπει να έχουν την ίδια διακοπτική συχνότητα ανάλογα με τις απαιτήσεις του λαμπτήρα και πρέπει να επιβάλλεται το ίδιο duty cycle στον κοινό διακόπτη[36][37]. Μετά την ενοποίηση κάθε στάδιο θα διατηρήσει τα δικά του χαρακτηριστικά, σαν να μην υπάρχουν κοινά μέρη του κυκλώματος. Επίσης, επειδή θεωρείται ότι όλοι οι μετατροπείς λειτουργούν στην περιοχή της ασυνεχούς αγωγής (Discontinuous Conduction Mode, DCM), προσομοιώνονται σαν ωμικές αντιστάσεις με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται υψηλός συντελεστής ισχύος και χαμηλός συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης, ώστε η ενέργεια να αντλείται από το δίκτυο κατά βέλτιστο τρόπο[35][36][41].

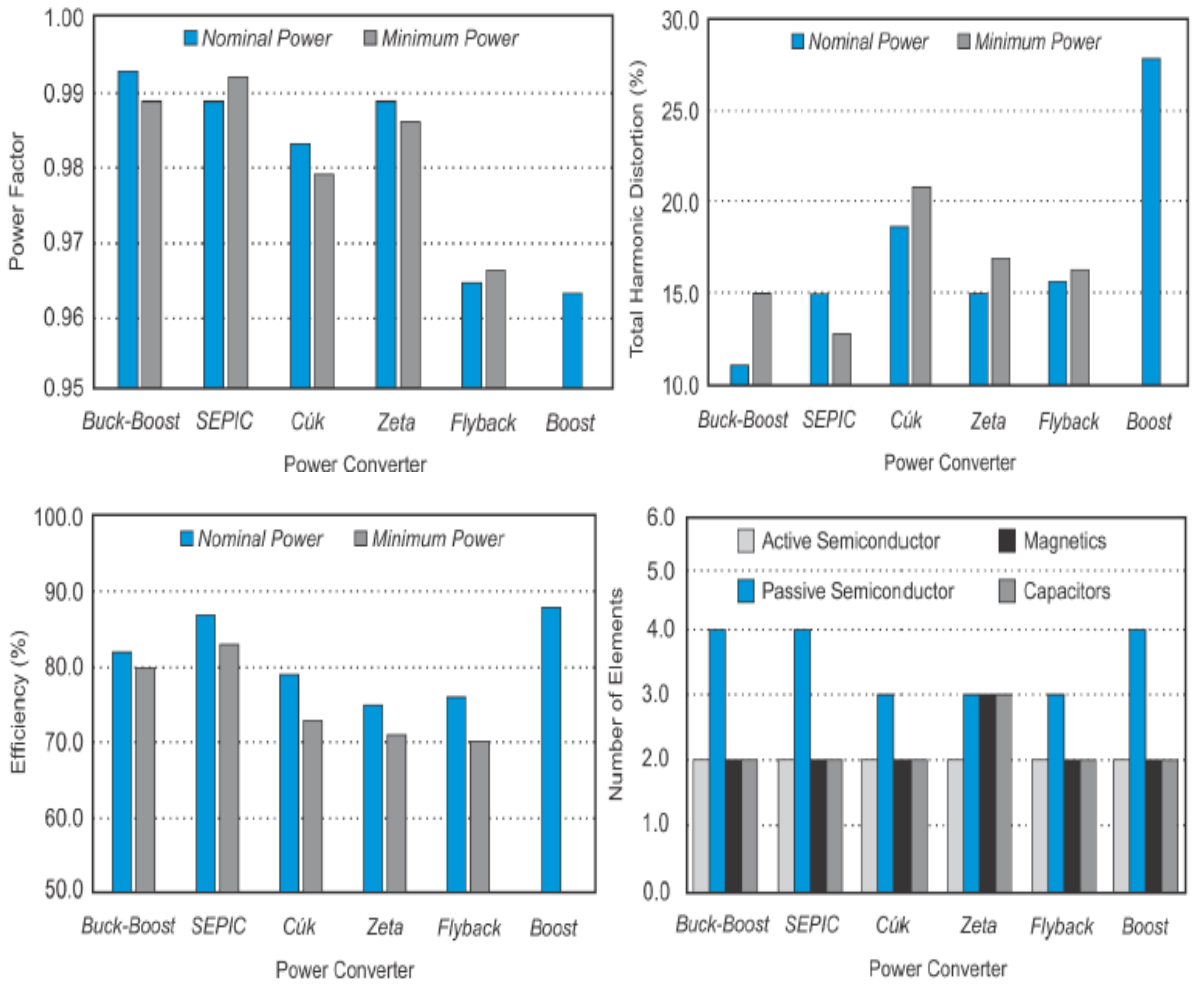
Ένα εγγενές χαρακτηριστικό της ενοποίησης είναι η καταπόνηση ρεύματος ή τάσης στην οποία επιβάλλεται ο κοινός διακόπτης. Ανάλογα με τον τύπο του μετατροπέα, ο κοινός διακόπτης θα παρουσιάσει χαρακτηριστικά υπερρεύματος (Overcurrent – OC) ή υπέρτασης (Overvoltage – OV). Διάφορες τοπολογίες με ενοποίηση σταδίων παρουσιάζονται στο σχήμα 46. Η βασική διαφορά αυτών των τοπολογιών είναι αν μετά την ενοποίηση ο κοινός διακόπτης υποβάλλεται σε υπερρεύμα ή υπέρταση. Οι μετατροπείς **Buck-Boost**, **SEPIC** και **Boost** παρουσιάζουν χαρακτηριστικά υπερρεύματος και ο κοινός διακόπτης υποβάλλεται στο άθροισμα των ρευμάτων των σταδίων διόρθωσης του συντελεστή ισχύος και του αντιστροφέα. Οι μετατροπείς **Zeta**, **Cúk** και **Flyback** παρουσιάζουν χαρακτηριστικά υπέρτασης και ο κοινός διακόπτης υποβάλλεται στο άθροισμα των τάσεων των δύο σταδίων. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητος ο κατάλληλος σχεδιασμός του κοινού διακόπτη ώστε να μπορεί να διαχειριστεί τις τιμές των τάσεων και των ρευμάτων στις οποίες υποβάλλεται[37].



Σχήμα 46. Τοπολογίες με ενοποίηση σταδίων [37]

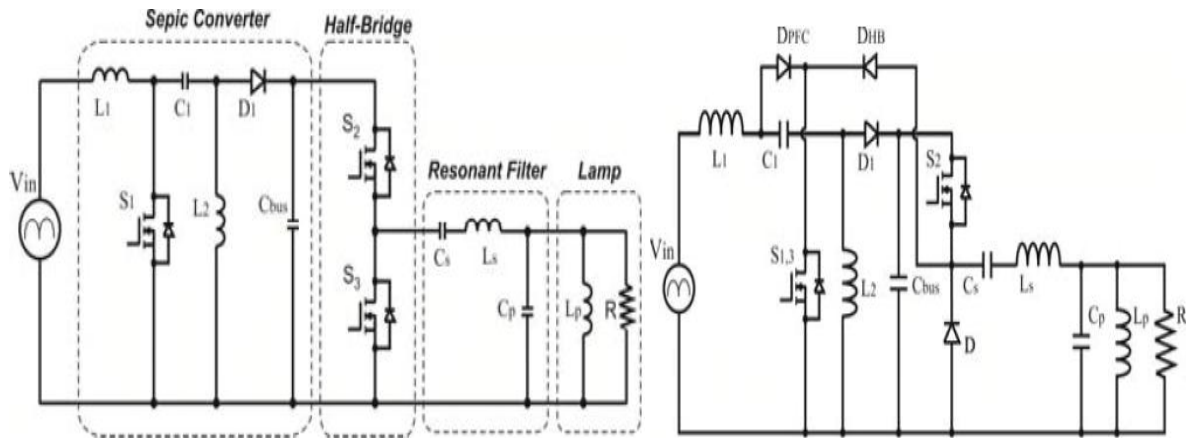
Συγκρίνοντας τις έξι τοπολογίες (σχήμα 47), προκύπτει ότι οι τοπολογίες με χαρακτηριστικά υπέρτασης παρουσίασαν μειωμένη απόδοση, σε σχέση με αυτές που παρουσίασαν χαρακτηριστικά υπερρεύματος και αυτό πιθανόν να οφείλεται στην αυξημένη τάση που εφαρμόζεται στον κοινό διακόπτη, η οποία σε συνδυασμό με την υψηλή διακοπτική συχνότητα, προκαλεί σημαντικές διακοπτικές απώλειες. Βέβαια, αυτό μπορεί να συμβεί και στις άλλες τοπολογίες[37].

Επιπλέον, παρατηρείται ότι ο μετατροπέας Boost παρουσιάζει τα χειρότερα αποτελέσματα από την άποψη του συντελεστή ισχύος και του συντελεστή ολικής αρμονικής παραμόρφωσης. Αυτό δικαιολογείται από την παρουσία της τρίτης τάξεως αρμονικής συνιστώσας, που είναι εγγενές χαρακτηριστικό αυτού του μετατροπέα, όταν λειτουργεί στην περιοχή ασυνεχούς αγωγής (DCM), με σταθερό duty cycle και σταθερή διακοπτική συχνότητα[37].



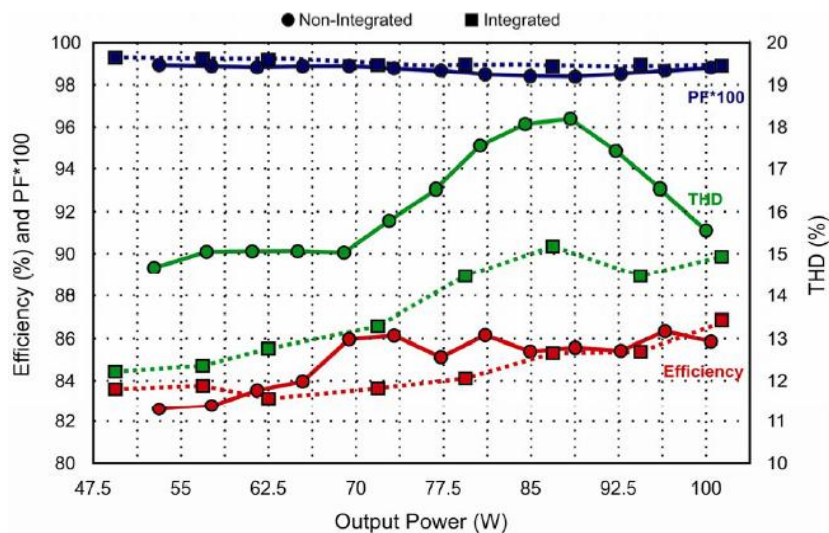
Σχήμα 47. Σύγκριση ενοποιημένων τοπολογιών [37]

Πιο αναλυτικά, για τον μετατροπέα **SEPIC**, η ενοποίηση λαμβάνει χώρα μεταξύ των διακοπών S_1 και S_3 και προκύπτει ο κοινός διακόπτης $S_{1,3}$ και οι δίοδοι D_{BB} και D_{HB} , για να αποτραπεί η κυκλοφορία ανεπιθύμητων ρευμάτων από το ένα στάδιο στο άλλο. Αυτή η ενοποίηση είναι γνωστή ως **τύπου T**. Τα κυκλώματα πριν και μετά την ενοποίηση φαίνονται στο σχήμα 48[38].



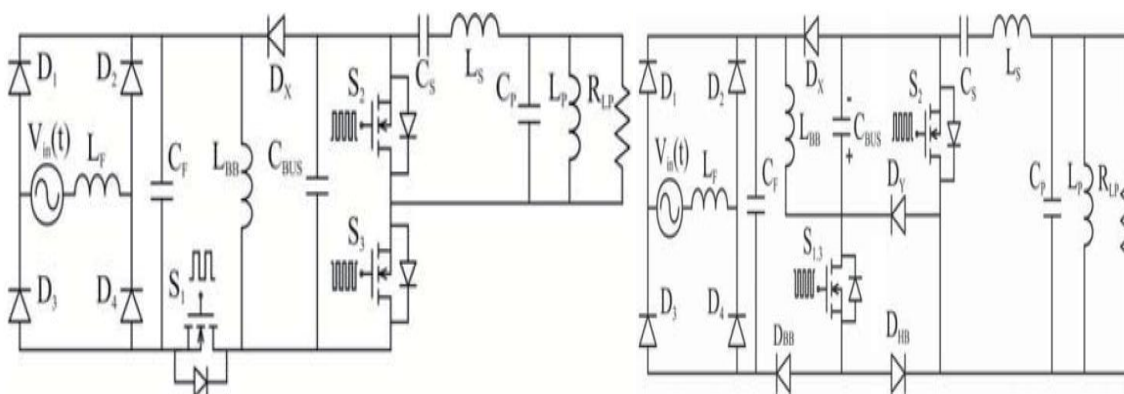
Σχήμα 48. Κύκλωμα με μετατροπέα SEPIC πριν και μετά την ενοποίηση των σταδίων [38]

Παρατηρώντας το διάγραμμα του σχήματος 49, εύκολα συμπεραίνει κανείς ότι δεν υπάρχει διαφορά στην απόδοση του κυκλώματος πριν και μετά την ενοποίηση και οι μικρές διαφορές στον συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης και το συντελεστή ισχύος οφείλονται στις διαφορετικές παρασιτικές χωρητικότητες, αφού ο σχεδιασμός των δύο κυκλωμάτων δεν είναι ο ίδιος[35]. Επομένως, η διαδικασία της ενοποίησης δεν επηρεάζει την απόδοση του συστήματος αν τα δύο στάδια λειτουργούν στην ίδια συχνότητα με πριν. Άρα, το αν θα γίνει ενοποίηση ή όχι εξαρτάται από το σχεδιαστή και τις προτεραιότητες που έχει θέσει για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Εάν τον ενδιαφέρει πρωτίστως η απόδοση του συστήματος, θα ήταν καλύτερα να μην επιλέξει την ενοποίηση. Εάν, όμως, τον απασχολεί η μείωση του κόστους και ο αριθμός των εξαρτημάτων, τότε θα επιλέξει να γίνει ενοποίηση των σταδίων διόρθωσης του συντελεστή ισχύος και του αντιστροφέα. Τέλος, εάν υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργεί ο μετατροπέας του PFC σε χαμηλότερη συχνότητα από τον αντιστροφέα, π.χ. στα 40 KHz τότε προτιμάται η μη ενοποιημένη τοπολογία.



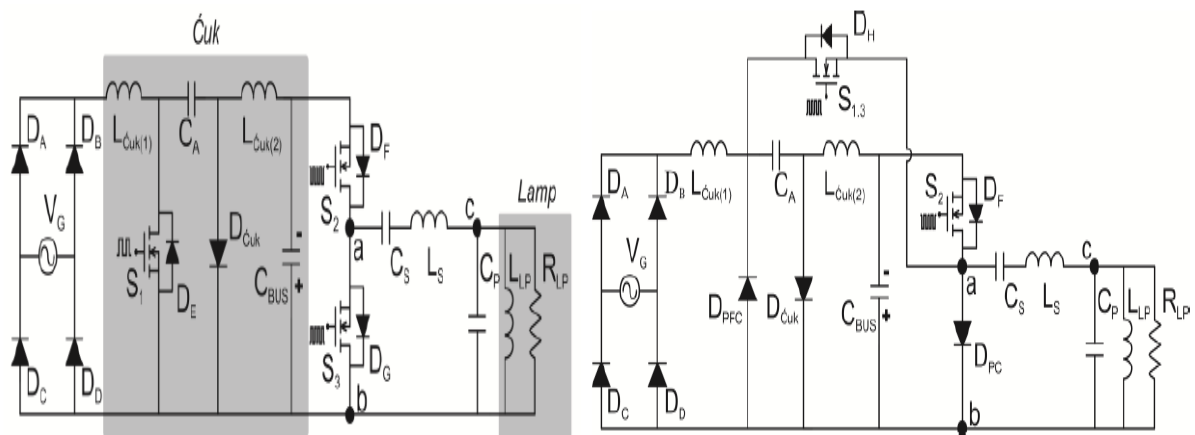
Σχήμα 49. Σύγκριση απόδοσης, THD και συντελεστή ισχύος πριν και μετά την ενοποίηση για τον SEPIC[35]

Ομοίως για τον μετατροπέα **Buck-Boost**, με τη διαφορά ότι αυτή η ενοποίηση είναι **τύπου I-T**. Τα κυκλώματα πριν και μετά την ενοποίηση παρατίθενται στη συνέχεια[41].



Σχήμα 50. Κύκλωμα με μετατροπέα Buck-Boost πριν και μετά την ενοποίηση σταδίων [41]

Ομοίως, για το μετατροπέα **Ćuk**, με τη διαφορά ότι αυτή η ενοποίηση είναι **τύπου Π**[36].



Σχήμα 51. Κύκλωμα με μετατροπέα **Ćuk** πριν και μετά την ενοποίηση των σταδίων [36]

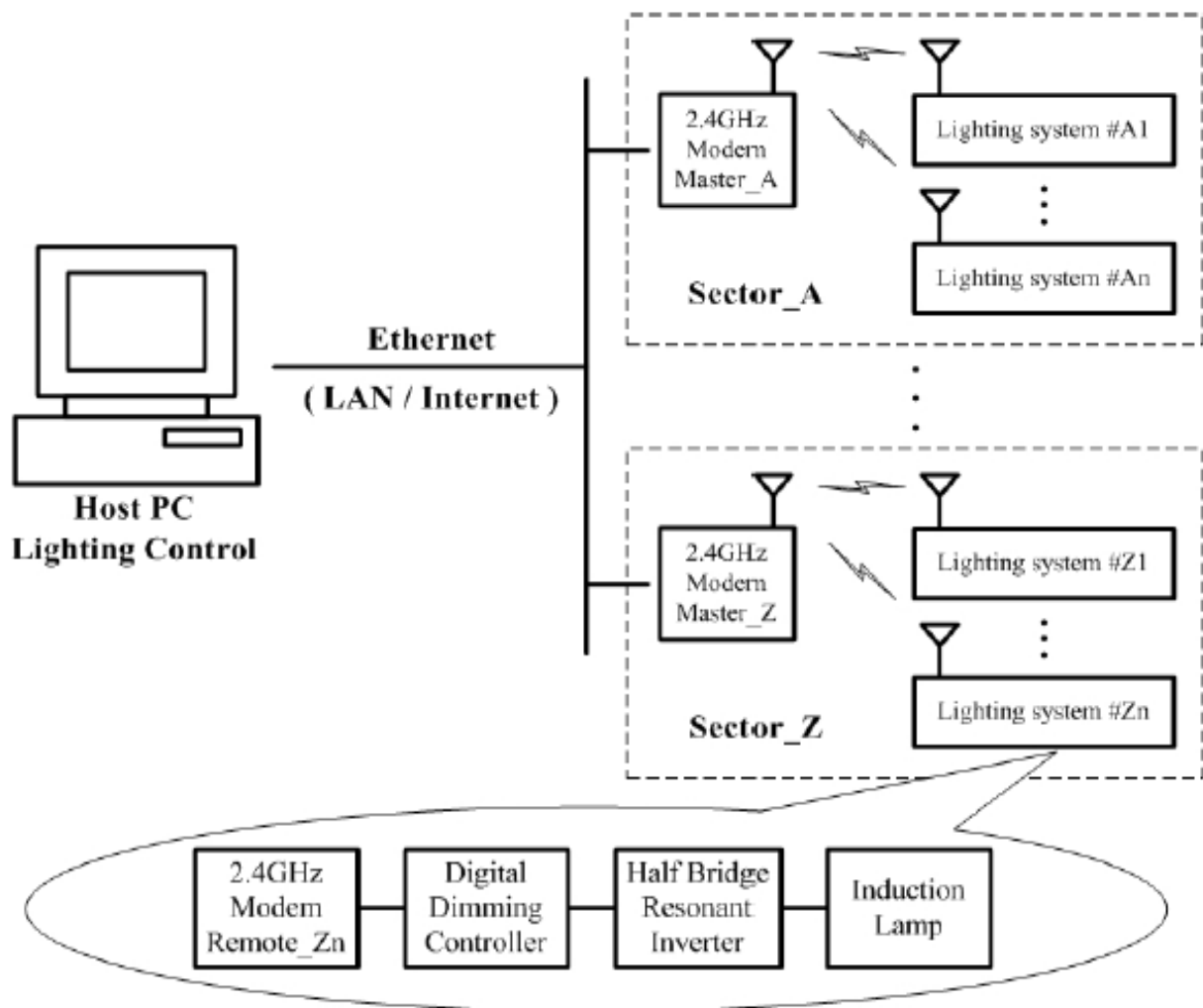
3.7.4 Κυκλώματα Ελέγχου Ballast Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής

Τα ballast των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής διαθέτουν κυκλώματα ελέγχου, που ρυθμίζουν τη συχνότητα και το ρεύμα που παρέχεται στο πηνίο, ώστε να διασφαλίζεται σταθερή λειτουργία του λαμπτήρα. Τα κυκλώματα αυτά, τις περισσότερες φορές, είναι ελεγχόμενα από μικροεπεξεργαστές και επιτρέπουν στα ballast να λειτουργούν με εξαιρετικά μεγάλες αποδόσεις και πάρα πολύ μικρές απώλειες[1]. Είναι πολύ συνηθισμένο να χρησιμοποιείται μια μονάδα μικροελεγκτή (microcontroller unit – MCU), η οποία είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο του ballast και την επικοινωνία με το διακομιστή. Επίσης, μια συσκευή EPLD, είναι υπεύθυνη για τη ρύθμιση της φωτεινότητας του λαμπτήρα (dimming). Το συνολικό σύστημα ελέγχεται από τον εξυπηρετητή ενσύρματα ή ασύρματα.

Ο μικροελεγκτής περιλαμβάνει μετατροπείς του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (analog to digital converters - ADCs) και δύο θύρες UART για τη σύνδεση με τον κεντρικό υπολογιστή που παρακολουθεί το σύστημα. Επιπλέον, υλοποιεί τον αλγόριθμο ελέγχου του ballast, ο οποίος χωρίζεται σε δύο κύρια μέρη: τον αλγόριθμο επεξεργασίας εντολών και τον αλγόριθμο συνεχούς ελέγχου της ισχύος του λαμπτήρα. Ο πρώτος αλγόριθμος ρυθμίζει τη λειτουργία του λαμπτήρα ανάλογα με την εντολή που λαμβάνει: αναμμένος ή σβηστός λαμπτήρας, επίπεδο dimming και παρούσα κατάσταση του λαμπτήρα. Η εντολή ελέγχου λαμβάνεται από τη σειριακή θύρα RS-232. Το ballast και ο εξυπηρετητής μπορεί να συνδέονται ενσύρματα κατευθείαν μέσω της θύρας RS - 232 ή ασύρματα με RF module που και πάλι χρησιμοποιεί τη θύρα RS - 232. Επειδή ο μικροελεγκτής διαθέτει δύο θύρες UART, μπορεί να χρησιμοποιεί ταυτόχρονα μεθόδους ενσύρματης και ασύρματης σύνδεσης. Ο δεύτερος αλγόριθμος είναι χρήσιμος, καθώς τα χαρακτηριστικά του λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής μεταβάλλονται καθ' όλη τη λειτουργία του. Έτσι, για να ανάβει συνεχώς ο λαμπτήρας θα πρέπει η εισερχόμενη ισχύς να είναι στα επιθυμητά επίπεδα, δηλαδή είναι απαραίτητο ο αντιστροφέας να ελέγχεται με μια μέθοδο συνεχούς ελέγχου της ισχύος. Αυτό γίνεται υπολογίζοντας την ισχύ του αντιστροφέα από τη μέτρηση των συνεχών τιμών του ρεύματος και της τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα. Οι τιμές αυτές μετατρέπονται περιοδικά σε ψηφιακές τιμές μέσω του μετατροπέα ADC που διαθέτει ο μικροελεγκτής και μεταφέρονται στον κεντρικό υπολογιστή παρακολούθησης. Για την απομάκρυνση μη αναμενόμενου θορύβου, ευρίσκεται ο μέσος όρος των τιμών αυτών και έπειτα πολλαπλασιάζονται για τον υπολογισμό της ισχύος του αντιστροφέα, η οποία συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή. Έτσι, αν η υπολογισμένη ισχύς του αντιστροφέα είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την επιθυμητή, γίνονται οι απαραίτητες ενέργειες για την αύξηση ή τη μείωσή της, ώστε να προκύψει τιμή ίση με την επιθυμητή[46][47].

Η συσκευή EPLD είναι ένα ψηφιακό κύκλωμα που ρυθμίζει επακριβώς τα επίπεδα φωτεινότητας του λαμπτήρα, παράγοντας το σήμα διαμόρφωσης του εύρους παλμών (Pulse Width Modulation - PWM) για τον έλεγχο της ισχύος και την προστασία του λαμπτήρα από σφάλματα. Έτσι, η παραγωγή του σήματος PWM είναι ανεξάρτητη από το κύκλωμα ελέγχου του ballast[46][47].

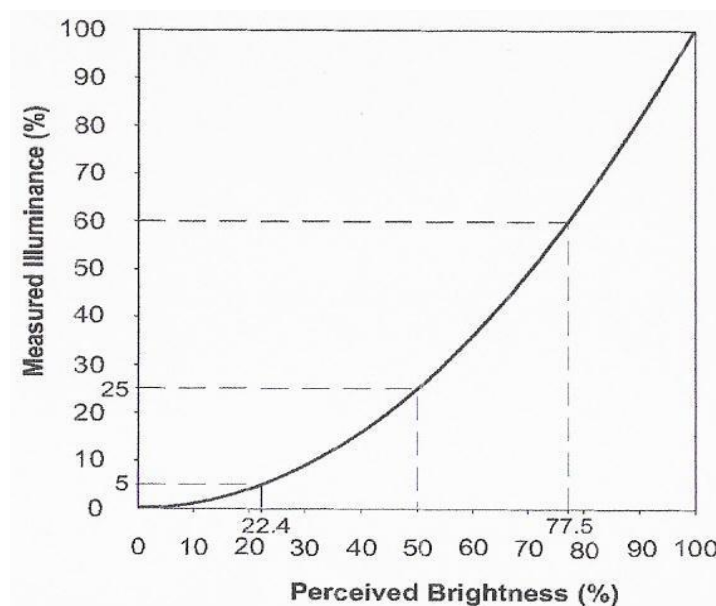
Λόγω της εξαιρετικά μεγάλης διάρκειας ζωής τους, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε περιοχές με δύσκολη πρόσβαση, όπως ψηλοτάβανα κτίρια, γέφυρες, σήραγγες κλπ. Αυτά τα φωτιστικά συστήματα χρειάζονται και συστήματα τηλεχειρισμού, διότι λειτουργούν σε πολύ υψηλές συχνότητες. Υπάρχει η δυνατότητα οι λαμπτήρες να ελέγχονται ο καθένας ξεχωριστά, όλοι μαζί ή ανά ομάδες. Έτσι, στη βιβλιογραφία προτείνονται είτε ενσύρματα ή ασύρματα συστήματα τηλεχειρισμού. Για την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ του ballast και του εξυπηρετητή, χρησιμοποιείται RF modem με συχνότητα λειτουργίας 2,4 GHz, το οποίο βέβαια έχει υψηλό κόστος σε σχέση με το κόστος του ballast. Η επικοινωνία με το σύστημα μπορεί να γίνει μέσω δικτύου Ethernet και ο έλεγχος να γίνει από ηλεκτρονικό υπολογιστή ή μέσω δικτύου κινητής τηλεφωνίας και ο έλεγχος να γίνει από κινητό τηλέφωνο ή PDA που θα διαθέτει την κατάλληλη εφαρμογή παρακολούθησης και ελέγχου του συστήματος. Ο τρόπος διαμόρφωσης ενός τέτοιου συστήματος απεικονίζεται παρακάτω[46][47].



Σχήμα 52. Έλεγχος συστήματος λαμπτήρων με τηλεχειρισμό [47]

3.8 Dimming Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής

Η ρύθμιση της φωτεινής ροής ενός λαμπτήρα ονομάζεται dimming και μπορεί να περιγραφεί ως ποσοστό του μέγιστου παραγόμενου φωτός στην κανονική λειτουργία του λαμπτήρα, της μετρούμενης φωτεινής ροής ανά μονάδα επιφάνειας, δηλαδή της έντασης φωτισμού και της λαμπρότητας, που χαρακτηρίζει τη φωτεινότητα της επιφάνειας έτσι όπως την αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής. Η ένταση φωτισμού που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι, μπορεί να χαρακτηριστεί από την προσαρμοστικότητά του όταν εκτίθεται σε διαφορετικές ποσότητες φωτός. Για παράδειγμα, ένας χώρος με ρυθμισμένη φωτεινή ροή στο 25% του μέγιστου παραγόμενου φωτός, μπορεί να γίνει αντιληπτός ως κατά το ήμισυ περίπου φωτεινός σε σύγκριση με τον ίδιο χώρο στο μέγιστο φωτισμό (σχήμα 53)[11][12].



Σχήμα 53. Σχέση μεταξύ της μετρούμενης έντασης φωτισμού (κάθετος άξονας) και της λαμπρότητας (οριζόντιος άξονας) [11]

Η ομαλή ρύθμιση της φωτεινής ισχύος είναι εξαιρετικά δημοφιλής στις σύγχρονες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Οι εφαρμογές που συναντώνται είναι πολλές, ιδιαίτερα σε χώρους που οι απαιτήσεις για σωστό φωτισμό είναι μεγάλες. Χαρακτηριστικά αναφέρονται χώροι γραφείων, εμπορικών κέντρων, ξενοδοχείων, κέντρων διασκέδασης, συνεδριακών εγκαταστάσεων, νοσοκομείων, μουσείων και πλήθους άλλων περιπτώσεων που απαιτείται καλός φωτισμός. Η ομαλή ρύθμιση της φωτεινής ισχύος σε συνδυασμό με τις ιδιαιτερότητες κάθε περίπτωσης συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση του χώρου όταν αυτή εμφανίζει μειωμένη κρισιμότητα, όπως συμβαίνει στα εμπορικά καταστήματα τις ώρες φόρτωσης και διεξαγωγής καθαρισμού, μπορούμε να μειώσουμε την ένταση φωτισμού ρυθμίζοντας την φωτεινή ροή. Περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας με την διαβάθμιση της φωτεινής ροής διαπιστώνονται και στον οδικό φωτισμό τις μεταμεσονύχτιες ώρες, οπότε η πυκνότητα της κυκλοφορίας των οχημάτων είναι

μειωμένη. Δεν πρέπει να αγνοηθούν και άλλα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την διαβάθμιση της φωτεινής ροής εκτός του άμεσου οφέλους από την μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, σε κέντρα διασκέδασης, όπου η ψυχαγωγία με τον κατάλληλο φωτισμό γίνεται περισσότερο ποιοτική, οι πελάτες είναι πιο ικανοποιημένοι με φυσικό επακόλουθο να αυξάνεται η απόδοση της επιχείρησης. Επίσης, σε εργασιακούς χώρους, ο σωστός φωτισμός δημιουργεί ευχάριστη ατμόσφαιρα, οπότε η εργασία γίνεται πιο παραγωγική, με αποτέλεσμα τα κέρδη της επιχείρησης να είναι αυξημένα. Η ρύθμιση της φωτεινής ροής είναι χρήσιμη σε θέσεις εργασίας με ηλεκτρονικούς υπολογιστές, διότι έτσι μειώνεται η λαμπρότητα των λαμπτήρων και περιορίζεται η θάμβωση, συμβάλλοντας έτσι στην καλύτερη αξιοποίηση του ανθρώπινου δυναμικού. Ακόμα και σε οικίες, η ρύθμιση της φωτεινής ροής σε χώρους όπως τα υπνοδωμάτια και το σαλόνι, δημιουργεί την κατάλληλη ατμόσφαιρα για χαλάρωση και ξεκούραση[66].

Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής είναι δυνατόν να παρέχουν δυνατότητες dimming με τη χρήση ballast ρυθμιζόμενης στάθμης φωτισμού (dimmable). Το παραγόμενο φως του λαμπτήρα μεταβάλλεται με τις μεταβολές της ισχύος του λαμπτήρα, που προκαλούν αλλαγές στις ηλεκτρικές παραμέτρους του. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι η αντίδραση της εκκένωσης είναι ελαφρώς θετική, δηλαδή επαγωγική στην ονομαστική ισχύ και καθώς μειώνεται η ισχύς, το πρόσημό της γίνεται θετικό, δηλαδή δείχνει βαθμιαία μια χωρητική συμπεριφορά[50]. Η ισχύς του λαμπτήρα μπορεί να μεταβληθεί μεταβάλλοντας το ρεύμα του. Υπάρχουν διαθέσιμα ballast που ισχυρίζονται ότι μειώνουν αξιόπιστα τη στάθμη φωτισμού έως 0,5% - 2,5% της πλήρους απόδοσης του φωτός[11]. Τα συστήματα φωτισμού με δυνατότητα dimming επιτρέπουν τη ρύθμιση της στάθμης του φωτισμού και συνήθως είναι πιο ακριβά από τα συμβατικά, χωρίς dimming. Το αυξημένο κόστος των ballast των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής με ρύθμιση της φωτεινής ροής οφείλεται στο γεγονός ότι είναι πολύπλοκος ο σχεδιασμός τους, αφού για κάθε επίπεδο ισχύος, ο λαμπτήρας παρουσιάζει και μια διαφορετική τιμή για την ισοδύναμη αντίσταση. Όμως, το επιπλέον κόστος αντισταθμίζεται από την εξοικονόμηση ενέργειας που προσφέρουν, καθώς η καταναλισκόμενη ενέργεια ενός τέτοιου ballast μειώνεται όσο μειώνεται η στάθμη φωτισμού[35][37][38]. Οι συσκευές ελέγχου αυτών των ballast περιλαμβάνουν αυτόματα και χειροκίνητα dimmers, φωτοαισθητήρες και συστήματα διαχείρισης ενέργειας που μειώνουν το φωτισμό κατά τη διάρκεια της νύχτας ή στις ώρες υψηλότερης ζήτησης[11].

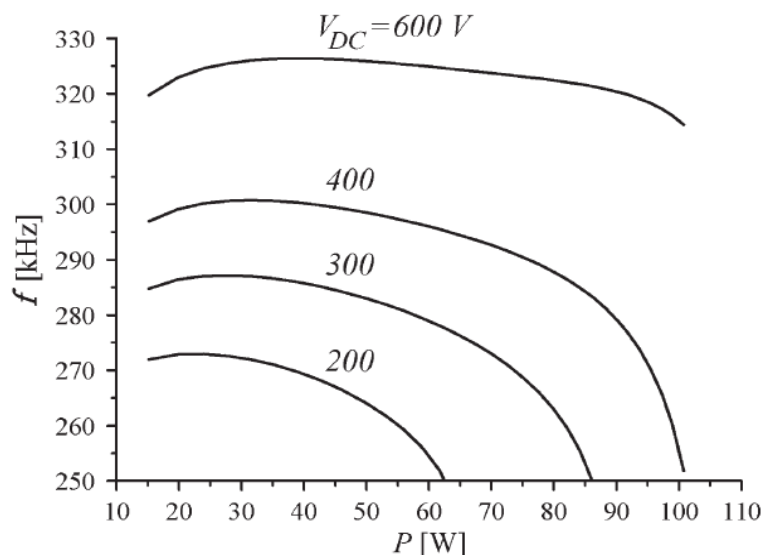
Το dimming των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μία από τις παρακάτω μεθόδους ή συνδυασμό αυτών:

- Έλεγχος της συχνότητας λειτουργίας του αντιστροφέα
- Έλεγχος της τάσης διαύλου
- Έλεγχος του κύκλου λειτουργίας των διακοπών του αντιστροφέα
- Μεταβολή των χαρακτηριστικών του φίλτρου εξόδου

3.8.1 Έλεγχος της Συχνότητας Λειτουργίας του Αντιστροφέα

Η ρύθμιση της φωτεινότητας του λαμπτήρα μεταβάλλοντας τη διακοπτική συχνότητα των διακοπών του αντιστροφέα αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο στη βιομηχανία. Είναι μια απλή μέθοδος, που ρυθμίζει τη συχνότητα λειτουργίας του λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής μακριά από τη συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος[38][42]. Η διακοπτική συχνότητα εκφράζεται ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών της εκκένωσης του λαμπτήρα, τα οποία είναι συναρτήσεις της ισχύος του και αυτό συνεπάγεται ότι και η συχνότητα εξαρτάται από την ισχύ του λαμπτήρα. Επομένως, όσο αυξάνεται η διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα, μειώνεται η ισχύς του λαμπτήρα και συνακόλουθα μειώνεται και η φωτεινή του ένταση[62]. Η εν λόγω μέθοδος εξοικονομεί έως και 50% ηλεκτρική ενέργεια και μπορεί να επιτευχθεί φωτεινή ροή έως και 1% της μέγιστης τιμής[38][37].

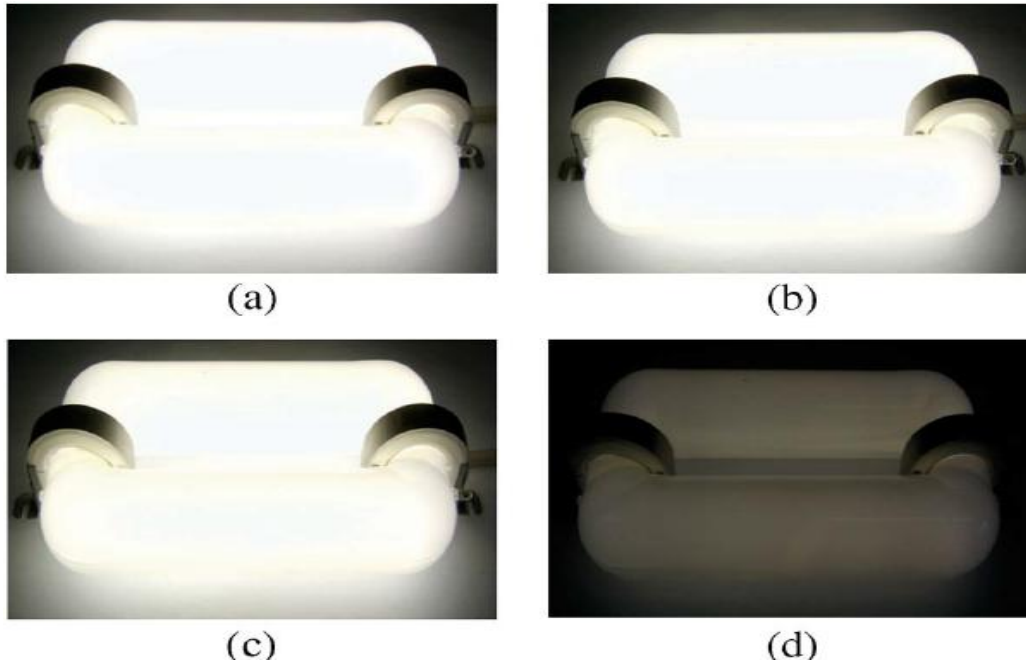
Όπως προκύπτει με απλή παρατήρηση του σχήματος 54, όπου φαίνεται η σχέση μεταξύ της διακοπτικής συχνότητας και της ισχύος του λαμπτήρα με παράμετρο την τάση διαύλου, είναι προφανές ότι η ισχύς επηρεάζεται πολύ λίγο από τις μεταβολές στη συχνότητα σε υψηλά επίπεδα ισχύος. Αντιθέτως, η ισχύς παρουσιάζει υψηλή ευαισθησία στις αλλαγές της συχνότητας σε χαμηλά επίπεδα ισχύος. Επομένως, ο έλεγχος της διακοπτικής συχνότητας δυσχεραίνει το γραμμικό έλεγχο της στάθμης φωτεινότητας του λαμπτήρα. Επίσης, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τάση διαύλου, τόσο πιο ευαίσθητη είναι η ισχύς στις μεταβολές της συχνότητας. Άρα, σε υψηλές τιμές της τάσης διαύλου είναι ακόμα πιο δύσκολο να επιτευχθεί γραμμικός έλεγχος της φωτεινότητας. Για να γίνει γραμμικό dimming με έλεγχο συχνότητας απαιτείται ιδιαίτερα πολύπλοκος μηχανισμός ελέγχου[62][64].



Σχήμα 54. Σχέση διακοπτικής συχνότητας και ισχύος του λαμπτήρα [62]

Εκτός από τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά που εμφανίζει η μέθοδος, υπάρχουν και άλλες δυσκολίες στην εφαρμογή της. Το εύρος του dimming περιορίζεται από το εύρος της διακοπτικής συχνότητας, που μπορεί να περιορίζεται από τους μαγνητικούς πυρήνες, τα

κυκλώματα ελέγχου πύλης των τρανζίστορ και τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου. Ακόμη, δεν είναι εύκολο το soft switching σε όλο το εύρος των συχνοτήτων και αυτό πιθανώς να προκαλέσει μεγάλη καταπόνηση στους ηλεκτρονικούς διακόπτες ισχύος, αύξηση των διακοπτικών απωλειών και μείωση της απόδοσης του συστήματος. Ένα ακόμη μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι έχει μειωμένη απόδοση σε μικρότερες τιμές ισχύος[62][64][65].



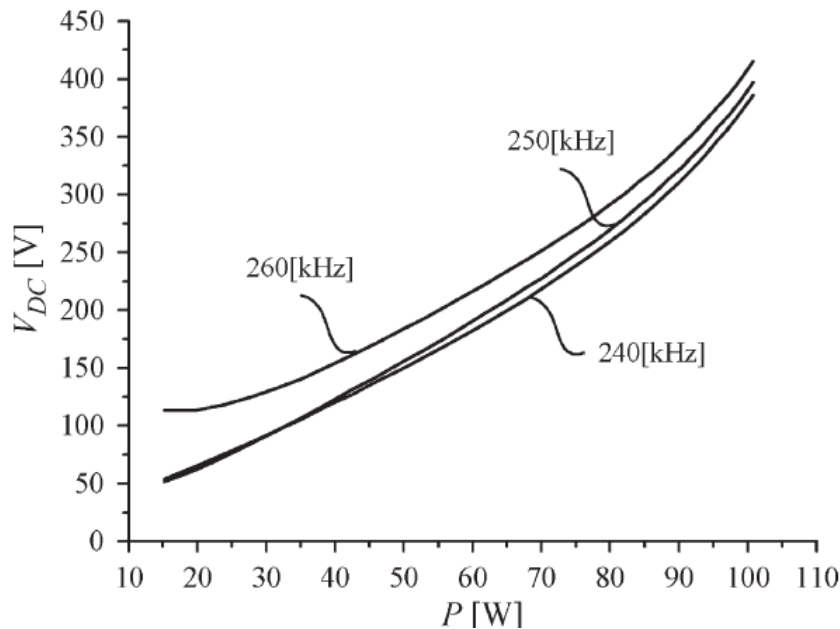
Σχήμα 55. Φωτογραφίες dimming λαμπτήρων επαγωγής με έλεγχο συχνότητας [62]

Μια άλλη μέθοδος, όπου η συχνότητα του αντιστροφέα μετατοπίζεται με διακριτό τρόπο είναι η διαμόρφωση μετατόπισης συχνότητας (Frequency Shift Keying – FSK). Όταν εφαρμόζεται ένας παλμός στην πύλη των διακοπών, η συχνότητα του ballast μετακινείται σε υψηλότερα επίπεδα, θέτοντας το κύκλωμα εκτός συντονισμού, προκαλώντας τη μείωση της τάσης του πηνίου επαγωγής. Πλέον, η τάση δεν επαρκεί για την εκκένωση και ο λαμπτήρας σβήνει, αλλά ο αντιστροφέας διατηρεί την ταλάντωσή του. Η επαναλαμβανόμενη ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του διακοπτικού δικτύου παράγει ένα μεταβαλλόμενο φως, το οποίο γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο ως μείωση της φωτεινής ροής του λαμπτήρα. Με αυτόν τον τρόπο, ελέγχονται η μέση ισχύς και η μέση φωτεινή ροή του λαμπτήρα[15][63].

3.8.2 Έλεγχος της Τάσης Διαύλου

Η φωτεινή ροή του λαμπτήρα μπορεί να μειωθεί μέχρι το σημείο όπου τελικά θα υπάρξει σβέση της εκκένωσης και η τροφοδοτούμενη ισχύς θα καταναλώνεται από τα πηνία, μέσω της μεταβολής της συνεχούς τάσης διαύλου V_{bus} , που είναι η τάση εξόδου του μετατροπέα του σταδίου διόρθωσης του συντελεστή ισχύος[51]. Είναι σχετικά πρόσφατη μέθοδος και μπορεί να εξασφαλίσει φωτεινή ροή έως και 1% της μέγιστης τιμής[50]. Για αυτή τη μέθοδο

dimming, η τάση διαύλου εκφράζεται ως συνάρτηση της ισχύος. Το σχήμα 56 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της τάσης διαύλου και της ισχύος, με παράμετρο τη διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα. Η σχέση αυτή έχει σχεδόν γραμμικά χαρακτηριστικά και καθώς αυξάνεται η τάση διαύλου, αυξάνεται και η ισχύς του λαμπτήρα. Η συγκεκριμένη μέθοδος θεωρείται κατάλληλη, όταν είναι επιθυμητή η γραμμική ρύθμιση της στάθμης φωτισμού[40][62].



Σχήμα 56. Σχέση τάσης διαύλου και ισχύος του λαμπτήρα [62]

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη μεταβολή της τάσης εξόδου του σταδίου διόρθωσης του συντελεστή ισχύος (PFC), το οποίο τροφοδοτεί το λαμπτήρα. Ο έλεγχος του σταδίου αυτού και η μεταβολή της τάσης εξόδου του ελέγχονται από ψηφιακό ελεγκτή, προκειμένου να ρυθμιστεί κατάλληλα η τάση και να διασφαλιστεί η σταθερότητα του συστήματος για διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Το duty cycle του μετατροπέα μεταβάλλεται με σκοπό τον έλεγχο της τάσης διαύλου, άρα και της ισχύος που τροφοδοτεί το λαμπτήρα. Εάν πρόκειται για τοπολογία με ενοποίηση των σταδίων του μετατροπέα και του αντιστροφέα, ελέγχεται το duty cycle του κοινού διακόπτη. Η ισχύς του μετατροπέα εξαρτάται άμεσα από το duty cycle που επιβάλλεται στο στάδιο PFC. Όσο μεγαλύτερη η ισχύς εισόδου, τόσο μεγαλύτερη και η ισχύς του λαμπτήρα, άρα και η τάση διαύλου. Η ελάχιστη ισχύς του λαμπτήρα προσδιορίζεται από την ελάχιστη τιμή του duty cycle (D) που μπορεί να επιτευχθεί, ώστε να διασφαλίζεται λειτουργία του μετατροπέα στην περιοχή ασυνεχούς αγωγής (DCM). Το όριο αυτό δίνεται από τη σχέση μεταξύ της μέγιστης τάσης εισόδου V_{pk} και της τάσης διαύλου V_{bus} , που πρέπει να ικανοποιούν την ανίσωση [35][36][45]:

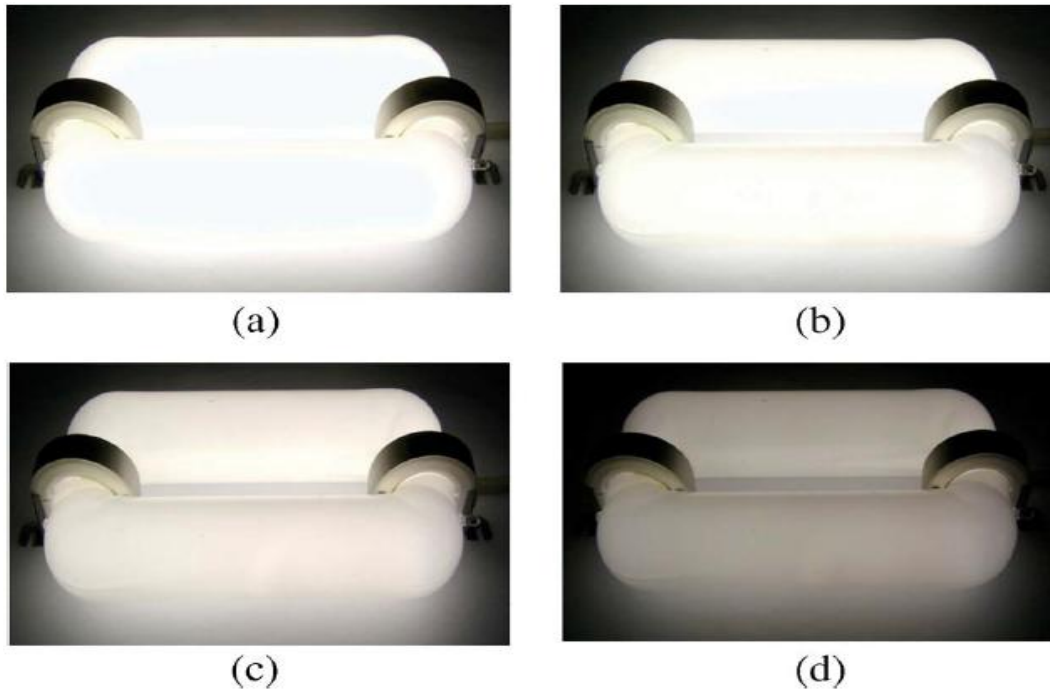
$$D < \frac{V_{bus}}{V_{bus} + V_{pk}}$$

Όσο μειώνεται το duty cycle, μειώνεται και η τάση διαύλου με τη μέγιστη τάση εισόδου να παραμένει σταθερή. Έτσι, υπάρχει μια ελάχιστη τιμή του duty cycle, για την οποία δεν ικανοποιείται η παραπάνω σχέση, γιατί ο μετατροπέας εισέρχεται στην περιοχή συνεχούς αγωγής (CCM), όπου αυξάνεται η παραμόρφωση του ρεύματος γραμμής και μειώνεται ο συντελεστής ισχύος[35][36][45].

Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι λόγω της συμπεριφοράς του σταδίου PFC, επιτυγχάνεται μια σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης διαύλου και της ισχύος του λαμπτήρα. Κατά αυτόν τον τρόπο, μπορεί να επιτευχθεί ομαλός και σχεδόν γραμμικός έλεγχος της ισχύος του λαμπτήρα, αφού το ρεύμα του λαμπτήρα είναι κατά προσέγγιση ανάλογο της τάσης διαύλου. Αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι μειώνοντας την ισχύ του λαμπτήρα, σημειώθηκαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές φωτεινής απόδοσης, που πιθανότατα οφείλονται στη χωρητική συμπεριφορά της εκκένωσης, η οποία βελτιώνει την απόδοση της μετατροπής της υπεριώδους ακτινοβολίας σε ορατό φως. Ακόμη, οι συνολικές απώλειες του ballast μειώνονται με τη μείωση της ισχύος. Επίσης, το χαρακτηριστικό της αλλαγής της κατάστασης των διακοπών κατά το μηδενισμό της τάσης (ZVS) διατηρείται σε μεγάλο εύρος της ισχύος του λαμπτήρα. Επομένως, ο έλεγχος της τάσης διαύλου παρέχει μεγάλη απόδοση σε όλο το εύρος του dimming και αποτελεί μια πολύ καλή λύση εξοικονόμησης ενέργειας. Ακόμη, το duty cycle του αντιστροφέα διατηρείται σταθερό κοντά στο 0,5 και η διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα διατηρείται επίσης σταθερή. Η σταθερή συχνότητα λειτουργίας διευκολύνει την καταστολή των προβλημάτων που σχετίζονται με τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και τον έλεγχο των διακοπών. Επίσης, η διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα μπορεί να επιλεγεί ώστε να είναι λίγο μεγαλύτερη από τη συχνότητα συντονισμού, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η άεργος ισχύς. Τέλος, η μέθοδος ελέγχου της τάσης διαύλου απαιτεί απλούστερο μηχανισμό ελέγχου σε σύγκριση με τη μέθοδο ελέγχου της διακοπτικής συχνότητας, αλλά κοστίζει περισσότερο [35][38][40][62][64].

Παρά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα του dimming με έλεγχο της τάσης διαύλου, εμφανίζονται και κάποιες αδυναμίες της μεθόδου. Η τάση διαύλου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει κατά πολύ τα 400 V, διότι τότε αυξάνεται το κόστος των ηλεκτρονικών της τοπολογίας. Έτσι, το απομένον εύρος της επιτρεπόμενης τάσης του μετατροπέα δεν είναι ιδιαίτερα ευρύ. Ένα ακόμα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι σε χαμηλά επίπεδα dimming, η τάση της εκκένωσης αυξάνει. Από την άλλη πλευρά, ο αντιστροφέας λειτουργεί σε αρκετά χαμηλότερη τάση και η διάφορα των δύο τάσεων καλύπτεται από το κύκλωμα συντονισμού, όπου και παρατηρείται αύξηση των απωλειών[65].

Στη συνέχεια, απεικονίζεται λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής που έχει υποστεί ρύθμιση της στάθμης φωτισμού μέσω του ελέγχου της τάσης διαύλου (σχήμα 57.).



Σχήμα 57. Φωτογραφίες dimming λαμπτήρων επαγωγής με έλεγχο τάσης διαύλου[62]

3.8.3 Έλεγχος του Κύκλου Λειτουργίας των Διακοπών του Αντιστροφέα (Duty Cycle)

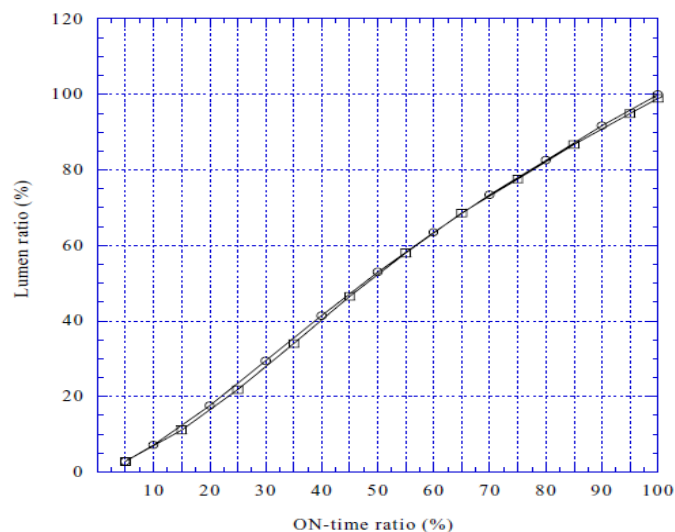
Η στάθμη φωτισμού ενός λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής μπορεί να ρυθμιστεί ελέγχοντας τον κύκλο λειτουργίας, δηλαδή το duty cycle των διακοπών του αντιστροφέα. Μεταβάλλοντας το duty cycle της ημιγέφυρας των τρανζίστορ, μεταβάλλεται το εύρος του τετραγωνικού παλμού της τάσης, που έχει ως έξοδο ο αντιστροφέας. Με τον τρόπο αυτό, μεταβάλλεται η ενεργός τιμή της κυματομορφής που παρέχεται στο κύκλωμα συντονισμού, ακολούθως και η ισχύς του λαμπτήρα. Ουσιαστικά, σε αυτή τη μέθοδο επαναλαμβάνονται συνεχώς άναμμα και σβήσιμο του λαμπτήρα, με συχνότητα πολύ μικρότερη από αυτή του ρεύματος, συνήθως το 1/10 αυτής, ώστε να μη γίνεται αισθητή φωτεινή πάλμωση (flicker) του λαμπτήρα και το duty cycle μεταβάλλεται ανάλογα με το επιθυμητό επίπεδο φωτεινότητας. Πιο αναλυτικά, διακόπτονται περιοδικά η τάση και το ρεύμα υψηλής συχνότητας που τροφοδοτεί το επαγωγικό πηνίο, προκειμένου να μειωθεί η ισχύς του. Οι διακόπτες του αντιστροφέα άγουν εναλλάξ, σύμφωνα με τα σήματα ελέγχου που λαμβάνουν από ένα εξωτερικό κύκλωμα, που χρησιμοποιεί ασύμμετρη διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM)[37][42].

Ο απλούστερος τρόπος είναι να μεταβάλλεται ο χρόνος λειτουργίας και των δύο διακοπών του αντιστροφέα με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή οι δύο διακόπτες να άγουν κατά ίσα χρονικά διαστήματα. Με αυτόν τον τρόπο ο αδρανής χρόνος (dead time) μεταβάλλεται πολύ και καθιστά αδύνατη την αλλαγή κατάστασης των διακοπών κατά το μηδενισμό της τάσης για όλες τις ρυθμίσεις του PWM[42][46]. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μη συμμετρική κυματομορφή του ρεύματος λαμπτήρα που λόγω της μη γραμμικής

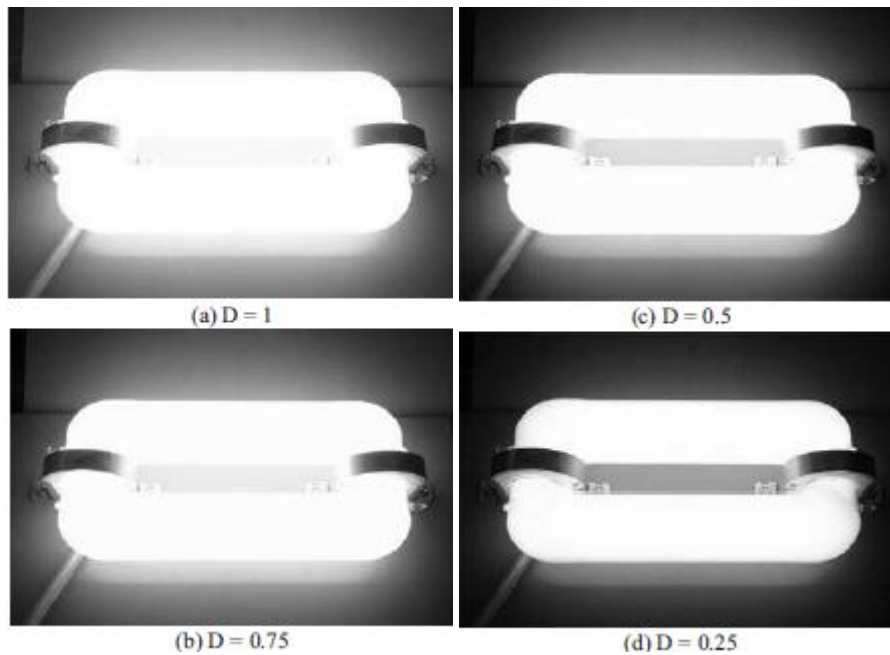
ηλεκτροφόρησης προκαλεί πρόωρη γήρανση του λαμπτήρα. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί μεταβάλλοντας το duty cycle των διακοπών με διαφορετικό τρόπο και εξηγείται στη συνέχεια, αλλά είναι μια μέθοδος πολύπλοκη και ακριβή και μπορεί να προκαλέσει μια μικρή φωτεινή πάλμωση. Ένα ακόμη μειονέκτημα, είναι ότι η διαμορφωμένη τετραγωνική κυματομορφή περιέχει ανώτερες αρμονικές συνιστώσες που προκαλούν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές[64][65][67][68].

Ένας άλλος τρόπος ελέγχου του κύκλου λειτουργίας των διακοπών είναι να μεταβάλλεται ο χρόνος αγωγής των διακοπών με διαφορετικό τρόπο, ελαχιστοποιώντας τις διακυμάνσεις του αδρανούς χρόνου και η μετάβαση κατά το μηδενισμό της τάσης να είναι εφικτή για διαφορετικές ρυθμίσεις του PWM. Το duty cycle των διακοπών του αντιστροφέα ελέγχεται από τις PWM περιόδους, T και T_s , όπου T είναι το άθροισμα των T_A και T_B . Ο λαμπτήρας οδηγείται από ένα σήμα PWM, που έχει duty cycle D_A κατά την περίοδο T_A και D_B κατά την περίοδο T_B . Το μέσο duty cycle του PWM αυτής της μεθόδου δίνεται από τη σχέση $D = \frac{D_A * T_A + D_B * T_B}{T} * 100\%$. Ο αλγόριθμος του dimming προκύπτει χρησιμοποιώντας συνήθως μια συσκευή EPLD, που παράγει το σήμα με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM), μεταβάλλοντας το μέσο duty cycle με ακρίβεια 1%, υπό την προϋπόθεση ότι $T = 10T_s$. Πρόκειται για μια μέθοδο που απαιτεί μια πολυπλοκότερη κυκλωματική δομή από τη συμβατική μέθοδο ελέγχου του duty cycle, αλλά μπορεί να ρυθμίσει με μεγάλη ακρίβεια το επιθυμητό επίπεδο dimming, λόγω των ψηφιακών κυκλωμάτων ελέγχου που περιλαμβάνει[46][47][68].

Χρησιμοποιώντας έλεγχο του κύκλου λειτουργίας, επιτυγχάνεται μεγάλη απόδοση του κυκλώματος λόγω της σταθερής συχνότητας λειτουργίας ακόμα και σε πολύ χαμηλά επίπεδα dimming. Επίσης, με αυτή τη μέθοδο η φωτεινότητα ελέγχεται πολύ καλά, το εύρος του dimming είναι μεγάλο και οι τιμές του συντελεστή ισχύος υψηλές. Από το σχήμα 58, προκύπτει ότι η φωτεινή ροή του λαμπτήρα είναι ανάλογη του χρόνου λειτουργίας των διακοπών του αντιστροφέα και δεν υπάρχει υστέρηση[38][67].



Σχήμα 58. Σχέση φωτεινής ροής και duty cycle [67]



Σχήμα 59. Φωτογραφίες dimming λαμπτήρων επαγωγής με έλεγχο duty cycle [68]

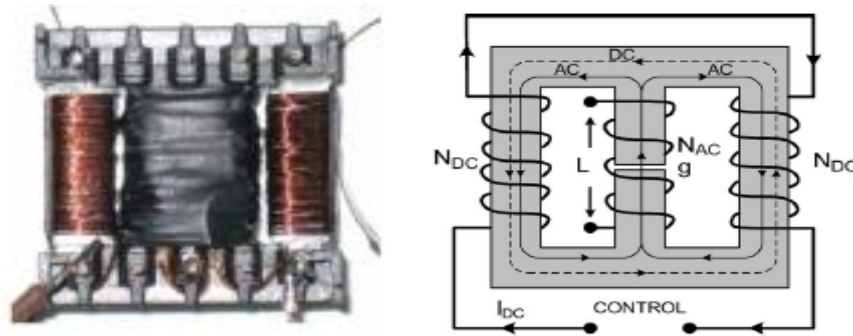
Μια αδυναμία της μεθόδου είναι ότι αν το duty cycle είναι πολύ μικρό και το ρεύμα του πηνίου γίνει ασυνεχές, δεν υφίστανται πλέον οι συνθήκες για αλλαγή κατάστασης των διακοπών κατά το μηδενισμό της τάσης και οι διακόπτες υποβάλλονται σε υψηλές καταπονήσεις, λόγω της μεγάλης αύξησης της τάσης διαύλου. Αυτή η ασυνεχής λειτουργία του ρεύματος μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη αξιοπιστία και αυξημένες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Η πρακτική ελάχιστη τιμή του duty cycle περιορίζει το εύρος dimming των λαμπτήρων. Για αυτό, η εν λόγω μέθοδος δε χρησιμοποιείται ευρέως σε εμπορεύσιμα ηλεκτρονικά ballast. Αντιθέτως, όταν αυξάνεται το duty cycle είναι πιθανό να χαθεί το soft switching των διακοπών. Επιπλέον, με τις μεταβολές στο duty cycle λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της μη γραμμικής ηλεκτροφόρησης, που συντελεί στη μείωση της διάρκειας ζωής του λαμπτήρα. Τέλος, να σημειωθεί ότι θα πρέπει να υπάρχει συμμόρφωση με τη δέσμευση σχετικά με τον συντελεστή κορυφής (crest factor) σύμφωνα με το πρότυπο ANSI Standard C82.11[38][64][68].

3.8.4 Μεταβολή των Χαρακτηριστικών του Φίλτρου Εξόδου

Σε αυτή τη μέθοδο dimming είναι απαραίτητη η αλλαγή των παραμέτρων του φίλτρου εξόδου, δηλαδή του φίλτρου συντονισμού του ballast. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται η συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος. Αυτή η προσέγγιση δεν είναι συνηθισμένη λόγω της πολυπλοκότητάς της[38].

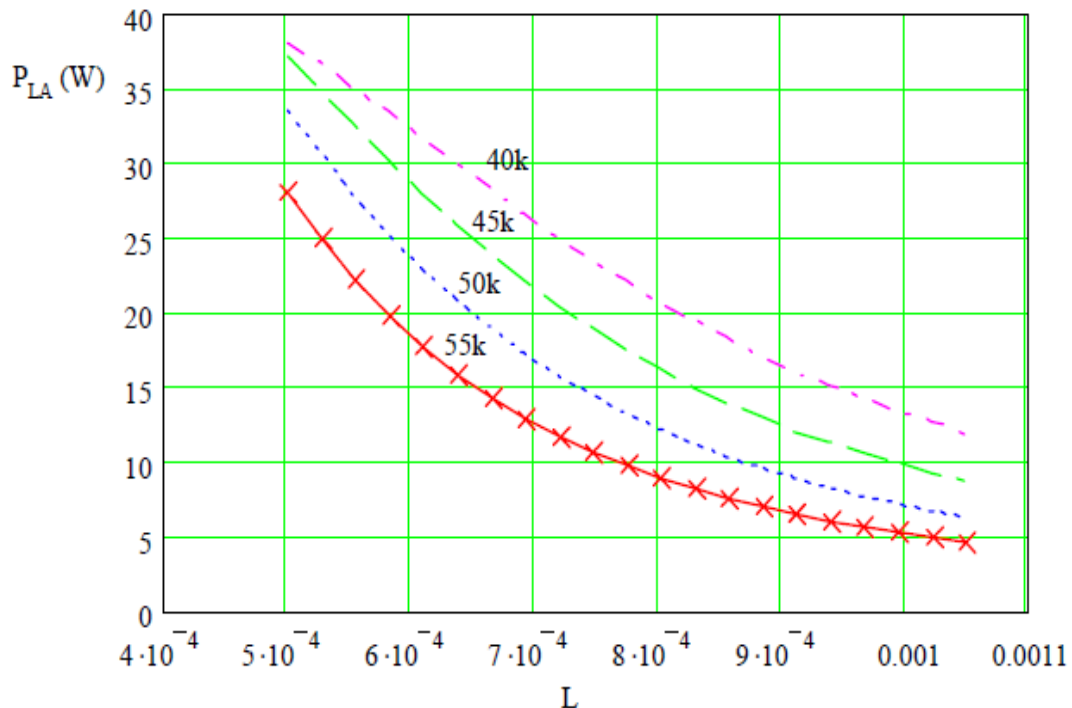
Το dimming επιτυγχάνεται μέσω της μεταβολής της τιμής της αυτεπαγωγής του κυκλώματος συντονισμού, μέσω μιας πηγής συνεχούς ρεύματος. Για τη μεταβλητή αυτεπαγωγή χρησιμοποιείται ένας πυρήνας σε σχήμα διπλού E (σχήμα 60.) Η αυτεπαγωγή

τοποθετείται στο μεσαίο πόδι του πυρήνα, το οποίο διαθέτει ένα διάκενο αέρα. Δύο άλλα τυλίγματα περιελίσσονται στα πλευρικά πόδια με αντίθετες πολικότητες. Μια πηγή συνεχούς ρεύματος, που τροφοδοτεί τα πλευρικά τυλίγματα, επιτρέπει την τροποποίηση της αυτεπαγωγής του κύριου τυλίγματος, διότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συνεχούς ρεύματος, τόσο μικρότερη είναι και η αυτεπαγωγή. Η πηγή συνεχούς ρεύματος ελέγχεται από ψηφιακό κύκλωμα μικροελεγκτή και το κύκλωμα συντονισμού αλλάζει ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής[68][69].



Σχήμα 60. Υλοποίηση της μεταβλητής αυτεπαγωγής [69]

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι διαθέτει μια πιο γραμμική καμπύλη dimming από αυτή της ρύθμισης της συχνότητας λειτουργίας του αντιστροφέα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 61, λειτουργεί με σταθερή συχνότητα, παρουσιάζει σχετικά καλή απόδοση, προσφέρει γαλβανική απομόνωση και η υλοποίησή της είναι αρκετά οικονομική[68].



Σχήμα 61. Ισχύς λαμπτήρα συναρτήσεως της αυτεπαγωγής [6]

3.9 Φθορά των Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής

Ένας λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής πρέπει να αντικαθίσταται προφανώς όταν δεν ανάβει πια ή όταν η φωτεινή ροή του υποχωρήσει κάτω από το 70% του μεγίστου[1]. Το αμυδρό φως που εκπέμπει ο λαμπτήρας κοντά στο τέλος της ζωής του οφείλεται συνήθως στη φθορά των φωσφόρων, στην εξάντληση του Υδραργύρου και σε άλλους λόγους που εξετάζονται στη συνέχεια. Παρ' όλα αυτά, συνήθως το πρώτο που αποτυγχάνει σε ένα λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής, δεν είναι ο ίδιος ο λαμπτήρας, αλλά τα ηλεκτρονικά της γεννήτριας υψηλών συχνοτήτων που τον τροφοδοτούν. Αν το ballast είναι ξεχωριστό αντικαθίσταται μόνο αυτό, ενώ στην περίπτωση που είναι ενσωματωμένο στο λαμπτήρα, αντικαθίσταται ολόκληρο το σύστημα. Οι διάφοροι μηχανισμοί που ευθύνονται για τη βλάβη του ballast αναλύονται, επίσης, παρακάτω.

3.9.1 Θραύση Λαμπτήρων

Προφανής λόγος είναι η θραύση του λαμπτήρα, καθώς η λυχνία του είναι κατασκευασμένη από γυαλί και συναφή υλικά, οπότε θεωρείται λογικό να είναι κατά κάποιο τρόπο εύθραυστος, όπως όλοι οι γυάλινοι λαμπτήρες. Αν ο λαμπτήρας σπάσει, δεν θα εκκινήσει και το ballast θα πρέπει να κλείσει για λόγους ασφαλείας και εξοικονόμησης ενέργειας[1][16].

3.9.2 Διάλυση Πυρήνων

Σε περίπτωση που οι πυρήνες των πηνίων διαλυθούν, η αυτεπαγωγή μαγνήτισης θα μειωθεί πολύ και τα τρανζίστορ ισχύος θα υπερθερμανθούν. Οπότε, καλό θα ήταν να κλείσει το ballast σε μια τέτοια κατάσταση. Βέβαια, το να καταστραφούν οι πυρήνες, που είναι κατασκευασμένοι από υλικά όπως ο φερρίτης, είναι κάτι εξαιρετικά σπάνιο, αλλά αποτελεί έναν πιθανό λόγο βλάβης του λαμπτήρα, για αυτό και αναφέρεται[16].

3.9.3 Εξάντληση Υδραργύρου

Μια αιτία για τη βλάβη των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής αποτελεί η εξάντληση του Υδραργύρου στο εσωτερικό της λυχνίας. Όταν τα ιόντα Υδραργύρου διεγείρονται και βομβαρδίζουν τους φωσφόρους, που εκπέμπουν ορατό φως, ένα μικρό ποσοστό αυτών, απορροφάται από την επικάλυψη φωσφόρων με την πάροδο των ετών. Έτσι, όταν μετά από πάρα πολλές ώρες λειτουργίας, εξαντληθεί ένα μεγάλο μέρος των ιόντων του Υδραργύρου στο εσωτερικό του λαμπτήρα, εκπέμπεται μόνο ένα αμυδρό φως και είναι απαραίτητη η αντικατάσταση του λαμπτήρα[1][27].

3.9.4 Αλλαγές στο Αέριο

Καθώς οι λαμπτήρες παλαιώνουν, το φως που παράγουν μειώνεται, όπως μειώνεται και η απόδοση ενεργειακής μετατροπής. Αυτό οφείλεται σε ποικίλους παράγοντες, όπως είναι η απορρόφηση των μορίων του ευγενούς αερίου από τη δομή του λαμπτήρα με την πάροδο του χρόνου και οι αλλαγές στην εσωτερική πίεση του αερίου[1].

3.9.5 Αλλοίωση Φωσφόρων

Η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων περιορίζεται κυρίως από την αλλοίωση των φωσφόρων. Η αποτελεσματικότητα της επικάλυψης φωσφόρων θα μειωθεί με την πάροδο του χρόνου, αλλά σίγουρα με πιο αργό ρυθμό σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές φωτός. Το επίχρισμα φωσφόρων αλλοιώνεται λόγω φωτολυτικής διάσπασης, βομβαρδισμού από ιόντα και χημικές αντιδράσεις με τον Υδράργυρο, το γυαλί της λυχνίας και τους αέριους ρυπαντές. Οι φώσφοροι φθείρονται, επίσης, λόγω της υψηλής φόρτισης των τοιχωμάτων του λαμπτήρα. Ο βαθμός της φθοράς εξαρτάται από την πυκνότητα ροής φωτονίων UV και ιόντων και τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων του λαμπτήρα, ανάλογα με το είδος της επικάλυψης. Ακόμη, αν κατά την κατασκευή της λυχνίας η θερμοκρασία ψήσιματος είναι πολύ υψηλή, οι αντιδράσεις με τα αλκάλια του γυαλιού μπορεί να αλλοιώσουν τους φωσφόρους. Τέλος, παρατεταμένη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες υποβαθμίζει την απόδοση του επιχρίσματος φωσφόρων, με αποτέλεσμα να παρατηρείται απότομη μείωση της φωτεινής ροής [5] [18][19][30][31][32].

3.9.6 Η Γυάλινη Λυχνία

Το μαλακό γυαλί δρα ως πηγή Νατρίου, που συνδέεται με τον Υδράργυρο και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σκούρων μαύρων ή γκριζών κηλίδων στην επιφάνεια της λυχνίας, που υποβαθμίζει την ποιότητα του φωτός που παράγει ο λαμπτήρας. Για το λόγο αυτό, προτείνεται η χρήση γυαλιού με χαμηλή περιεκτικότητα σε Νάτριο, που είναι πιο σκληρό, όπως το pyrex και το nonex.[53][55]

Ακόμη, η θερμοκρασία των γυάλινων τοιχωμάτων δεν θα πρέπει να ξεπερνά τους 170 °C, γιατί σε συνδυασμό με την εξωτερική ατμοσφαιρική πίεση μπορεί να προκληθούν κοίλες επιφάνειες, που αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά του λαμπτήρα.[53]

3.9.7 Τήξη Αμαλγάματος

Σε φωτιστικά συστήματα κλειστού τύπου, που μπορεί να χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, αναπτύσσονται ιδιαίτερα αυξημένες θερμοκρασίες στο εσωτερικό του λαμπτήρα. Έτσι, το αμάλγαμα θα μπορούσε να λιώσει και να τρέξει στο

εσωτερικό της λυχνίας. Για το λόγο αυτό, η θερμοκρασία του αμαλλάματος δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να ξεπερνά τους 105 °C[53].

3.9.8 Ρυπαντές

Ο λαμπτήρας δεν σταματά να λειτουργεί ξαφνικά. Απλά, με το πέρασμα του χρόνου μπορεί να υπάρξει κάποια αύξηση της τάσης του, λόγω ρυπαντών που εισέρχονται στο εσωτερικό της λυχνίας κυρίως κατά το στάδιο της κατασκευής του λαμπτήρα. Η αύξηση αυτή οδηγεί σε αύξηση της ισχύος που καλείται να διαχειριστεί ο λαμπτήρας. Έτσι, αν η αύξηση της ισχύος είναι μεγάλη, το ballast θα υπερθερμανθεί και η διάρκεια ζωής του θα μειωθεί. Προτείνεται η ύπαρξη κυκλώματος ελέγχου που θα αντιλαμβάνεται μια τέτοιου είδους κατάσταση, ώστε το ballast να κλείνει. Επιπλέον, η ύπαρξη ρυπαντών δημιουργεί προβλήματα στην έναυση του λαμπτήρα[16].

Οι πιο συνηθισμένοι ρυπαντές είναι το Άζωτο, το Υδρογόνο και οι υδρατμοί του ατμοσφαιρικού αέρα[71]. Η επίδοση των λαμπτήρων εκκένωσης αερίου, όπως είναι και οι λαμπτήρες επαγωγής, επηρεάζεται δυσμενώς από την παρουσία υδρατμών, οι οποίοι διασπώνται μέσα στην εκκένωση απελευθερώνοντας Υδρογόνο και Οξυγόνο. Το Υδρογόνο είναι το πιο επικίνδυνο στοιχείο, διότι ακόμα και σε μικρές ποσότητες μπορεί να αυξήσει σημαντικά την τάση έναυσης και επανέναυσης και γενικότερα να προκαλέσει προβλήματα στην εκκίνηση του λαμπτήρα. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται επειδή τα μόρια του Υδρογόνου αντιδρούν με τα άτομα του ιονισμένου αερίου, απάγοντας την ενέργεια που θα συνεισέφερε στην εκκένωση. Κατά αυτόν τον τρόπο, το Υδρογόνο και οι υδρατμοί παρέχουν επιπλέον διαύλους για κατανάλωση ενέργειας μέσω της σβέσης της ακτινοβολίας. Για να αντισταθμιστεί αυτή η κατανάλωση ενέργειας, είναι απαραίτητο να αυξηθεί η τάση για τη δημιουργία εκκένωσης και η τάση λειτουργίας. Σε ακραίες περιπτώσεις εμποδίζεται η εκκένωση. Επιπλέον, το Υδρογόνο προσβάλλει τους φωσφόρους και υποβαθμίζει την ποιότητά τους[32][71]. Παράλληλα, το Οξυγόνο αντιδρά με τον ατμό του Υδραργύρου, δημιουργώντας σκούρα στερεά οξείδια Υδραργύρου πάνω στην επικάλυψη των τοιχωμάτων[32]. Άλλοι ρυπαντές όπως το Άζωτο, το μονοξείδιο και το διοξείδιο του Άνθρακα έχουν παρόμοιες επιπτώσεις με το Υδρογόνο αλλά σε μικρότερο βαθμό[71].

3.9.9 Υπερθέρμανση του Ballast

Σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, η διάρκεια ζωής του λαμπτήρα και του ballast και η αποδιδόμενη φωτεινή ροή μπορεί να μειωθούν σημαντικά. Ο λαμπτήρας μπορεί να προσφέρει ικανοποιητικό φως, αλλά τα κυκλώματα ελέγχου είναι δυνατό να αποτύχουν πρόωρα[16]. Η διαχείριση της θερμότητας, που παράγεται από τη λειτουργία του ίδιου του λαμπτήρα και του ballast, είναι ιδιαίτερα σημαντική στο φωτισμό με επαγωγή, καθώς η

λειτουργία του εξοπλισμού σε υψηλές θερμοκρασίες συνδυαζόμενη με ακατάλληλη διαχείριση της θερμότητας, μπορεί να καταστρέψει το λαμπτήρα και το ballast ή απλά να μειώσει το χρόνο ζωής του συστήματος. Επιπλέον, λαμπτήρες οι οποίοι λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες, έχουν συνήθως μειωμένη διατήρηση της φωτεινής ροής με το χρόνο και μικρότερη φωτεινή απόδοση (lm/W). Παρατεταμένη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, ειδικά για τους λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής, προκαλεί βλάβη στη μόνωση των καλωδίων του πηνίου, οδηγώντας σε ενδεχόμενο βραχυκύκλωμα και καταστροφή του ballast[31]. Ακόμη, στους λαμπτήρες με ενσωματωμένο ballast οι θερμοκρασίες λειτουργίας είναι ιδιαίτερα αυξημένες[54]. Επιπλέον, εάν το φωτιστικό σύστημα έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να ανακλάται μεγάλη ποσότητα φωτός πίσω στο λαμπτήρα, θα αυξηθεί αναπόφευκτα η θερμοκρασία λειτουργίας[53]. Επίσης, όταν το φωτιστικό είναι κλειστού τύπου, ο λαμπτήρας θερμαίνει το περιβάλλον του ballast με επαγωγή, με αγωγή μέσω της πλαστικής βάσης και με ακτινοβολία. Εγκαταστάσεις με σποτάκια επιδεινώνουν το πρόβλημα της υπερθέρμανσης, διότι ο λαμπτήρας βρίσκεται τοποθετημένος ακριβώς κάτω από το ballast[15]. Κάποια συστήματα είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο που δεν ευνοείται η σωστή διαχείριση της θερμότητας, με αποτέλεσμα η γεννήτρια να υπερθερμαίνεται και το σύστημα να έχει διάρκεια ζωής μόλις 15.000 με 30.000 ώρες. Κατά συνέπεια, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής απαιτούν, στις περισσότερες περιπτώσεις, ειδικά φωτιστικά συστήματα, που θα τους παρέχουν κατάλληλη διαχείριση της θερμότητας[20].

Για τη βέλτιστη λειτουργία ενός συστήματος επαγωγής είναι απαραίτητο να παρακολουθούνται ορισμένα όρια θερμοκρασιών. Σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, υπάρχει περιορισμός ως προς το πόση θερμότητα μπορεί να διαχειριστεί η γεννήτρια υψηλών συχνοτήτων. Η γεννήτρια είναι ευαίσθητη στις υψηλές θερμοκρασίες, διότι είναι μια ηλεκτρονική συσκευή με κυκλώματα στερεάς κατάστασης που μπορεί να καταστραφούν πρόωρα, αν αυξηθεί πολύ η θερμοκρασία τους. Η μέγιστη θερμότητα που μπορεί να διαχειριστεί η γεννήτρια προσδιορίζει τη μέγιστη ανεκτή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η θερμότητα μπορεί κατά κάποιο τρόπο να απομακρυνθεί με κατάλληλο σχεδιασμό του φωτιστικού, παρ' όλα αυτά, θερμοκρασίες περιβάλλοντος άνω των 50 °C, οδηγούν κατά κανόνα σε σημαντική μείωση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής[26][30][53][70].

Ένα μεγάλο ποσοστό της ισχύος που τροφοδοτεί τους λαμπτήρες χάνεται ως θερμότητα, η οποία επηρεάζει τη θερμοκρασία του ballast. Τα ηλεκτρονικά ballast, στην πλειοψηφία τους δεν παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής σε πολύ αυξημένες θερμοκρασίες. Για να επιτευχθεί διάρκεια ζωής 60.000 - 100.000 ώρες, θα πρέπει η θερμοκρασία του κουτιού που περιέχει το ballast, να διατηρείται κάτω από τους 70 °C. Ο χρόνος ζωής των ηλεκτρονικών ballast εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη διάρκεια των εσωτερικών ηλεκτρολυτικών πυκνωτών, των οποίων η ζωή μειώνεται κατά το ήμισυ για κάθε αύξηση 10 °C πάνω από τη μέγιστη θερμοκρασία του κουτιού. Για θερμοκρασίες κάτω από αυτήν την τιμή, η διάρκεια ζωής του ballast αυξάνεται[16][53].

Σημαντικό ρόλο παίζει και η θερμοκρασία στη βάση του πηνίου, δηλαδή στη φλάντζα στερέωσης για τους λαμπτήρες εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής. Για το λαμπτήρα QL της Osram στα 55 W και 165 W, η θερμοκρασία της φλάντζας στερέωσης δεν θα πρέπει να ξεπερνά τους 100 °C, ενώ για το μοντέλο των 85 W τους 90 °C. Σε περίπτωση που ξεπεραστούν αυτές οι τιμές, το σύστημα θα οδηγηθεί σε απροσδιόριστη μείωση της διάρκειας ζωής και της φωτεινής ροής[53].

Ορισμένοι κατασκευαστές αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της υπερθέρμανσης με την προσθήκη μόνωσης και συστημάτων ψύξης. Για παράδειγμα, οι λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής λειτουργούν σε υψηλές εσωτερικές θερμοκρασίες και ψύχονται μέσω της μεταλλικής ράβδου στο εσωτερικό του πυρήνα του πηνίου που καταλήγει στη βάση του λαμπτήρα[53]. Επιπλέον, για την ψύξη του ballast, καλό θα ήταν αυτό να τοποθετηθεί στο φωτιστικό με μια θερμική επιφάνεια ή πάστα[16]. Επίσης, προτείνεται η γεννήτρια να μην εγκαθίσταται πολύ κοντά στη φλάντζα στερέωσης του επαγωγικού πηνίου. Μια ακόμη λύση είναι η χρήση διαφορετικών ψυκτών για το πηνίο και τη γεννήτρια. Βέβαια και το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα ψύξης επηρεάζει πάρα πολύ το τελικό αποτέλεσμα. Θα πρέπει να επιλέγονται υλικά με μεγάλη θερμική αγωγιμότητα και πυκνότητα. Συνήθως, ως πιο πρακτική επιλογή, χρησιμοποιείται το αλουμίνιο. Ακόμη, η χρήση μπογιάς με υψηλή θερμική εκπομπή στο ballast, στο σύστημα ψύξης και στο φωτιστικό θα βοηθήσει στη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του ballast. Τέλος, καλό θα ήταν να υπάρχει επαρκής κυκλοφορία αέρα στο φωτιστικό για περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας[53].

3.9.10 Υγρασία και Σκόνη

Η υγρασία είναι ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει τη λειτουργία ενός συστήματος με λαμπτήρες επαγωγής. Οι εν λόγω λαμπτήρες είναι ικανοί να διαχειριστούν τιμές της υγρασίας του αέρα έως 95%. Είναι αναγκαία η τοποθέτηση της γεννήτριας υψηλών συχνοτήτων σε τέτοια θέση, ώστε να αποφεύγεται επαφή του ballast και του πηνίου με το νερό, διότι κάτι τέτοιο θα τα κατέστρεφε ολοκληρωτικά[53].

Εκτός από τη θερμοκρασία και την υγρασία, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μη συγκεντρώνονται μεγάλες ποσότητες σκόνης στο εσωτερικό του ballast, γιατί είναι πιθανό να προξενηθεί βλάβη στο σύστημα[53].

3.9.11 Συνεχές Αναβόσθημα

Το συνεχές αναβόσθημα των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής μειώνει τη διάρκεια ζωής της γεννήτριας, καθώς είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν για συγκεκριμένο αριθμό κύκλων λειτουργίας. Αν ξεπεραστεί ο αριθμός αυτός, τότε η εγγύηση του συστήματος

παύει να ισχύει. Επομένως, αυτοί οι λαμπτήρες δεν είναι φρόνιμο να χρησιμοποιούνται ως flash ή προειδοποιητικά φώτα, που χρειάζεται να αναβοσβήνουν συνεχώς, γιατί θα φθαρούν πρόωρα[53].

3.9.12 Επιπτώσεις της Τάσης

Όταν η τάση δικτύου αποκλίνει από την κανονική της τιμή πάνω από τα ανεκτά όρια, για παράδειγμα πάνω από 10%, αναμένονται δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας για το σύστημα και την φωτεινή ροή[53].

Επίσης, αν εφαρμοστούν πολύ υψηλές τιμές τάσης, για παράδειγμα άνω των 350 V για μεγάλο χρονικό διάστημα, θα προξενηθεί σοβαρή βλάβη στο ballast[53].

Επίσης, επειδή η τάση που εφαρμόζεται στο επαγωγικό πηνίο φτάνει σε πολύ υψηλές τιμές, έχει ως αποτέλεσμα το πηνίο να έχει πολύ μεγαλύτερη τάση από το πλάσμα, που έχει σχεδόν μηδενική τάση. Αυτή η διαφορά δυναμικού μεταξύ του πηνίου και του πλάσματος προκαλεί μια σειρά από προβλήματα που μειώνουν το χρόνο ζωής του λαμπτήρα. Η τάση αυτή αποτελείται από την τάση στην περιοχή απογύμνωσης φορέων και από την τάση στα τοιχώματα της κοιλότητας. Η τάση στην περιοχή απογύμνωσης παράγει μια συνεχή τάση, η οποία επιταχύνει τα ιόντα από το πλάσμα προς τα τοιχώματα. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στα τοιχώματα και τα ιόντα Υδραργύρου βομβαρδίζουν τα τοιχώματα της κοιλότητας που είναι επικαλυμμένα με φωσφόρους και τους καταστρέφουν. Από την άλλη, η τάση στα τοιχώματα της κοιλότητας παράγει ρεύματα κατά μήκος των τοιχωμάτων, που οδηγούν στη μετάβαση ιόντων Νατρίου από το γυαλί στην επικάλυψη φωσφόρων και το πλάσμα. Η παρουσία ατόμων ή ιόντων Νατρίου στο πλάσμα είναι επιζήμια για το επίχρισμα διότι προκαλεί τη δημιουργία σκούρων κηλίδων που μειώνουν δραστικά τη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα[61].

4

Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, θα περιγραφούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν για τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής μετά από σχολαστική μελέτη της βιβλιογραφίας. Θα σταθώ, αρχικά, στα οφέλη που συνεπάγεται η αντικατάσταση συμβατικών λαμπτήρων με λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, με βάση όσο το δυνατόν πιο πρόσφατες μελέτες σχετικά με το θέμα. Στη συνέχεια, θα αναφερθώ στα τρωτά σημεία αυτής της νέας τεχνολογίας φωτισμού, στηριζόμενη σε πληθώρα επιστημονικών εργασιών και άρθρων από τη βιβλιογραφία.

Η εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής αποτελεί το γνωστότερο και ίσως το σπουδαιότερο προτέρημα των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής. Η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων επαγωγής, που αγγίζει έως και τις 100.000 ώρες λειτουργίας, οφείλεται στην απουσία εσωτερικών ηλεκτροδίων, που είναι και ο συνηθέστερος μηχανισμός αποτυχίας των συμβατικών λαμπτήρων φωτισμού με ηλεκτρόδια. Συνιστάται, γενικότερα, η αντικατάσταση των λαμπτήρων όταν φτάσουν να εκπέμπουν χαμηλότερα επίπεδα από το 70% της μέγιστης φωτεινής τους ροής. Στους λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής αυτό συμβαίνει περίπου στις 65.000 ώρες λειτουργίας, ενώ για τους λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής στις 85.000 ώρες. Επειδή, λοιπόν, οι αντικαταστάσεις των λαμπτήρων επαγωγής απαιτούνται πολύ σπάνια, προτείνεται η χρήση τους σε χώρους όπου η πρόσβαση είναι δύσκολη ή επικίνδυνη. Επίσης, χρησιμοποιούνται συχνά σε χώρους όπως εργοστάσια ή βιοτεχνίες, όπου θα πρέπει να σταματήσει η παραγωγική διαδικασία για να συντηρηθεί το σύστημα φωτισμού. Κατά τον τρόπο αυτό, προσφέρουν ευελιξία στην επιχείρηση και συμβάλλουν στη μείωση των εξόδων συντήρησης της εγκατάστασης. Ακόμη, λόγω των σπάνιων αντικαταστάσεων των λαμπτήρων επαγωγής, εκτός από την εξοικονόμηση χρημάτων, συμβάλλουν και στην εξοικονόμηση πρώτων υλών για την κατασκευή τους.

Επιπλέον, ένα μεγάλο προσόν των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής αποτελούν οι ιδιαίτερα μεγάλες φωτεινές αποδόσεις που προσφέρουν, που για τις μεγάλες ισχείς ανέρχονται έως και στα 90 lm/W και αναμένεται να αυξηθούν ακόμα περισσότερο, αφού ακόμα εκπονούνται μελέτες για την περαιτέρω βελτίωσή τους. Αν, μεταξύ άλλων, αναλογιστεί κανείς τις μεγάλες τιμές του δείκτη S/P και των VEL που εκπέμπονται, οι αποδόσεις αυτές αυξάνονται ακόμα περισσότερο. Ακόμη, οι λαμπτήρες επαγωγής εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες μπλε φωτός που διεγείρουν τον ανθρώπινο οφθαλμό και συνεπάγονται αυξημένη οπτική οξύτητα. Με αυτόν τον τρόπο, το φως των λαμπτήρων επαγωγής γίνεται αντιληπτό ως πιο λαμπρό από τον ανθρώπινο οφθαλμό. Έτσι, οι λαμπτήρες αυτοί προσφέρουν φως υψηλής ποιότητας, συμβάλλουν στη βελτίωση των συνθηκών εργασίας και ασφαλείας, ενώ καταναλώνοντας την ίδια ενέργεια με άλλους

λαμπτήρες παράγουν περισσότερο φως. Για το λόγο αυτό κρίνεται φρόνιμη η εγκατάσταση λαμπτήρων επαγωγής μικρότερης ισχύος από αυτούς που αντικαθιστούν. Κατά συνέπεια, οι λαμπτήρες αυτοί συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας, αφού για τα ίδια επίπεδα φωτισμού απαιτούν μικρότερες τιμές ηλεκτρικής ισχύος. Αυτή η εξοικονόμηση ενέργειας εκτός από την εξοικονόμηση χρημάτων για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, συνεπάγεται και μείωση των ορυκτών καυσίμων που απαιτούνται για την παραγωγή της, επομένως και μείωση των εκπομπών του CO₂. Συνεπώς, η χρήση των λαμπτήρων επαγωγής συμβάλλει και στην προστασία του περιβάλλοντος.

Μεταξύ άλλων, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα στις πάρα πολύ χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Μπορούν να λειτουργήσουν ακόμα και σε θερμοκρασίες από -35 °C έως -50 °C και αυτό τους καθιστά ιδανικές πηγές φωτισμού σε εξωτερικούς χώρους και στον φωτισμό οδών.

Τέλος, σήμερα είναι διαθέσιμα πολλά συστήματα φωτισμού με λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής που προσφέρουν δυνατότητα ρύθμισης της φωτεινότητας, με ακρίβεια έως και 1% της μέγιστης φωτεινής ροής. Ως εκ τούτου, ο φωτισμός ελέγχεται με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια, προκειμένου να εξυπηρετήσει της ανάγκες της εκάστοτε εγκατάστασης φωτισμού. Τα συστήματα αυτά συνδυάζονται πολύ επιτυχημένα με ανιχνευτές παρουσίας ή φωτοαισθητήρες, προκειμένου να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.

Αναφορικά με τις αδυναμίες των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής, θα μπορούσε να πει κανείς ότι το κόστος αγοράς τους αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την εγκατάσταση αυτών των συστημάτων. Βέβαια, εξαιτίας των αυξημένων ποσοστών εξοικονόμησης ενέργειας και των εξαιρετικά σπάνιων εργασιών συντήρησης, το κόστος της αρχικής επένδυσης αποσβένεται εντός των πρώτων ετών λειτουργίας του φωτιστικού συστήματος.

Συν τοις άλλοις, επειδή οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής λειτουργούν στο εύρος των ραδιοσυχνοτήτων, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη διαχείριση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, που είναι πιθανό να παραχθούν από τη λειτουργία των κυκλωμάτων των ballast, αλλά και από τον ίδιο το λαμπτήρα. Τα προβλήματα των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών περιορίζονται με τη χρήση ειδικών φίλτρων και κατάλληλης ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης, αλλά και με τη λειτουργία των λαμπτήρων σε αρκετά χαμηλές συχνότητες, ακόμα και κάτω από τα 100 KHz που σήμερα βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο. Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής που διατίθενται στο εμπόριο φέρουν όλες τις απαραίτητες πιστοποιήσεις, σύμφωνα με τις οποίες συμμορφώνονται με τα πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και κατά τη λειτουργία τους δεν παράγουν περισσότερες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από ένα φούρνο μικροκυμάτων ή έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Όμως, για παν ενδεχόμενο, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στο σχεδιασμό των συστημάτων που προορίζονται για εσωτερικούς χώρους και ειδικά για μέρη όπου συναντώνται υπολογιστές υψηλής ευαισθησίας και ευπαθής ιατρικός εξοπλισμός.

Παράλληλα, είναι γεγονός ότι οι λαμπτήρες επαγωγής, ειδικά οι λαμπτήρες εσωτερικής επαγωγής αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες κατά τη λειτουργία τους. Οι θερμοκρασίες αυτές σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και ένα φωτιστικό που δε διαθέτει κατάλληλη διαχείριση θερμότητας, μπορούν να αποβούν καταστροφικές για το ballast του λαμπτήρα. Το ballast είναι μια ευαίσθητη ηλεκτρονική συσκευή που επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες και αν υπερθερμανθεί μειώνεται σημαντικά η διάρκεια ζωής του. Συγκεκριμένα, αν η θερμοκρασία περιβάλλοντος ξεπεράσει τους 50 °C, τα αποτελέσματα θα είναι αμφίβολα για τη γεννήτρια υψηλών συχνοτήτων. Για το λόγο αυτό, προτείνεται η χρήση ειδικών φωτιστικών που διαθέτουν συστήματα ψύξης και επαρκή κυκλοφορία αέρα, ώστε να μην καταστραφεί πρόωρα το ballast λόγω υπερθέρμανσης.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής αποτελούν μια λύση οικονομικά βιώσιμη, φιλική προς το περιβάλλον και με εξαιρετικά μεγάλες αποδόσεις. Παρ' όλα αυτά, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός ο σχεδιασμός ολόκληρου του συστήματος, προκειμένου να αποφευχθούν σοβαρές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και πολύ αυξημένες θερμοκρασίες λειτουργίας.

5

Βιβλιογραφία

- [1] L. M. Roberts, How Magnetic Induction Lamps Work, Indulux Technologies Inc., 2014.
- [2] <http://en.wikipedia.org/>
- [3] <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/>
- [4] V. A. Godyak, Bright Idea: Radio-Frequency Light Sources, IEEE Industry Applications Magazine, IEEE, pp. 42-49, 2002.
- [5] D. O. Wharmby, Electrodeless lamps for lighting: a review, Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings, IEEE, vol. 140, no. 6, pp. 465-473, 1993.
- [6] G. G. Lister, Electrodeless Gas Discharges for Lighting, Advanced Technologies Based on Wave and Beam Generated Plasmas, NATO ASI Series, Springer Netherlands, vol. 67, pp. 65-96, 1990.
- [7] <http://www.edisontechcenter.org/InductionLamps.html>
- [8] http://www.controlledenvironments.org/Light1994Conf/5_10_MacLennan/MacLennan%20text.htm
- [9] S. Kobayashi, S. Mikoshiba, S. Lim, LCD Backlights, Wiley, 2009.
- [10] <http://www.ceravision.com/>
- [11] Σ. Ντάγγας, Συγκριτική ανάλυση των νέων τεχνολογιών φωτισμού εξοικονόμησης ενέργειας, Αθήνα, ΕΜΠ, 2014.
- [12] Φ. Τοπαλής, Λ. Οικονόμου, Σ. Κουρτέση, Φωτοτεχνία, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.
- [13] <http://wenku.baidu.com/>
- [14] <http://www.lamptech.co.uk/Electrodeless.htm#>
- [15] L.R. Nerone, A novel ballast for electrodeless fluorescent lamps, Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, IEEE, vol. 5, pp. 3330-3337, 2000.

- [16] J. N. Lester, B. M. Alexandrovich, Ballasting Electrodeless Fluorescent Lamps, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp. 89-99, 2000.
- [17] L. M. Roberts, Magnetic induction lights vs LED lights, Indulux Technologies Inc., 2014.
- [18] <http://inductionlighting.blogspot.gr/>
- [19] <http://www.rpi.edu/>
- [20] Econolux Induction Lighting Frequently Asked Questions (FAQ), Econolux, 2012.
- [21] I. Turiel , B. Atkinson, S. Boghosian, P. Chan, J. Jennings, J. Lutz, J. McMahon, S. Pickle, G. Rosenquist, Advanced technologies for residential appliance and lighting market transformation, Energy and Buildings, Elsevier, vol. 26, pp. 241-252, 1997.
- [22] M. Cole, T. Driscoll, The Lighting Revolution: If We Were Experts Before, We're Novices Now, IEEE Transactions on Industry Applications, IEEE, vol. 50, no. 2, pp. 1509-1520, 2014.
- [23] C. J. Colon Jr, Assessing the Economic and Environmental Impacts Associated with Current Street Lighting Technologies, Ohio, USA, 2010.
- [24] D. C. Lai, J. C. Lai, Renewed Interest in Induction Lamp Technology, IMSA Journal, 2004.
- [25] C. Goulding, J. Goldman, R. Kumar, EAct Aspects of Induction Lighting, Corporate Business Taxation Monthly, 2010.
- [26] T. E. Foulke, The Induction Lamp, a New Source of Visible and Ultra-Violet Radiation, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, IEEE, vol. 45, pp. 1242–1256, 1927.
- [27] <http://horse.fulham.com/product-systems/induction-systems/>
- [28] <http://www.nghubang.com/>
- [29] <http://ecmweb.com/content/rf-lighting-tunes-improved-illumination>
- [30] Fluorescent lamps, Correspondence Course, Lesson 9, Philips Lighting B.V., Netherlands, 1994.
- [31] Econolux Induction Lamp Technology Application Guidelines, Econolux, 2012.
- [32] G. G. Lister, J. E. Lawler, W. P. Lapatovich, V. A. Godyak, The physics of discharge lamps, Reviews of Modern Physics, The American Physical Society, vol.76, no. 2, pp. 541-598, 2004.

- [33] C.-S. Lin και W.-S. Chen, 60 kHz electronic ballast for electrodeless fluorescent lamp, IEEE International Conference on Industrial Technology, IEEE, pp. 1- 6, 2009.
- [34] C.-S. Lin, Low power 60 kHz electrodeless fluorescent lamp for indoor use, IPEC Conference Proceedings, IEEE, pp. 682-686, 2010.
- [35] M. E. Schlittler, J. Fraytag, A.R. Seidel, J.M. Alonso, R.N. do Prado, N.B. Chagas, M.F. da Silva, Comparison between integrated and non-integrated SEPIC half-bridge electronic ballasts for electrodeless fluorescent lamp applications, Power Electronics Conference (COBEP), IEEE, pp. 1201 – 1206, 2013.
- [36] M.F. da Silva, J. Fraytag, R. Marchesan, V.L. Rosa, M.A. Dalla Costa, J.M. Alonso, R.N. do Prado, A dimmable Ćuk half-bridge single-stage converter applied to electrodeless fluorescent lamps, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), IEEE, pp. DS1b.6-1 - DS1b.6-5, 2012.
- [37] J. Fraytag, M. E. Schlittler, M. A. Dalla Costa, J. Marcos Alonso, R. N. do Prado, M. F. da Silva, A Comparative Performance Investigation of Single-Stage Dimmable Electronic Ballasts for Electrodeless Fluorescent Lamps, IEEE Transactions on Power Electronics, IEEE, vol. 30, no. 4, pp. 2239-2252, 2014.
- [38] M. F. da Silva, J. Fraytag, N. B. Chagas, M. E. Schlittler, M. A. Dalla Costa, Rafael A. Pinto, A. R. Seidel, R. N. do Prado, Single-Stage High-Power-Factor Dimmable Lighting System for Electrodeless Fluorescent Lamp, 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), IEEE, pp. 390-395, 2011.
- [39] N. Mohan, T. A. Undeland, W. P. Robbins, μετάφραση: Ν. Ι. Μάργαρης, Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος, 3η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.
- [40] M. F. da Silva, J. de P. Lopes, N. B. Chagas, , A. R. Seidel, M. A. Dalla Costa, R. N. do Prado, High Power Factor Dimmable Lighting System For Electrodeless Fluorescent Lamp, 2010 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), IEEE, pp. 379 – 384, 2010.
- [41] M. F. da Silva, J. Fraytag, M. E. Schlittler, N. B. Chagas, T. Marchesan, M. A. Dalla Costa, A. R. Seidel, J. M. Alonso, R. N. do Prado, Analysis and Design of a High-Power-Factor Single-Stage Buck-Boost Half-Bridge Electronic Ballast for Electrodeless Fluorescent Lamps, IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, pp. 2958 – 2963, 2011.
- [42] J. R. Goscha, V. D. Roberts, W. P. Lapatovich, D. A. Goodman, D. Wentzel, T. Farkas, Fast Start Induction RF Fluorescent Lamp With Burst-Mode Dimming, Pub. No.: US 2014/0145595 A1, 2014.
- [43] H. Miyazaki, H. Shoji, Y. Namura, High-Frequency Class-D Converter Driving with Feedback Capacitors for Electrodeless Fluorescent, IEEE Transactions on Industry Applications, IEEE, vol.36, no. 4, pp. 1033-1038, 2000.

- [44] S.-B. Han, S. Park, E. Song, H.-G. Jeong, B.-M. Jung, Analysis of Effects of Inductance Component in Electrodeless Lamp on Ballast Performances, 7th International Conference on Power Electronics ICPE '07, IEEE, pp. 330-333, 2007.
- [45] M. F. da Silva, J. Fraytag, M. E. Schlittler, T. B. Marchesan, M. A. Dalla Costa,, J. M. Alonso, R. N. do Prado, Analysis and Design of a Single-Stage High-Power-Factor Dimmable Electronic Ballast for Electrodeless Fluorescent Lamp, IEEE Transactions on Industrial Electronics, IEEE, vol. 60, no. 8, pp. 3081-3091, 2013.
- [46] H. Kim, X.-C. Ma, H. Xu, H.-J. Kim, A Dimmable Electronic Ballast for Wired or Wireless Remote Control of Electrodeless Fluorescent Lamp Group Lighting Systems, International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2008, IEEE, pp. 2108-2112, 2008.
- [47] K. Cho, W. Oh, J. Yeon, D. Kim, H. Kim, Electronic Ballast of the Electrode-less Lamp for the Group Lighting System, International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2009, IEEE, pp. I-293 - I-296, 2009.
- [48] Mercury Usage In Commercial & Industrial Lighting, Econolux, 2012.
- [49] L. M. Roberts, Environmental Aspects of Magnetic Induction Lighting, Indulux Technologies Inc., 2011.
- [50] E. Statnic, V. Tanach, A new approach to the evaluation of the discharge parameters of the electrodeless fluorescent lamps, Plasma Sources Science and Technology, IOP Publishing Ltd, vol.13, pp. 515-521, 2004.
- [51] E. Statnic, V. Tanach, Investigation of the electrical discharge parameters in electrodeless inductive lamps with a re-entrant coupler and magnetic core, Plasma Sources Science and Technology, IOP Publishing Ltd, vol.15, no. 3, pp. 465-473, 2006.
- [52] J. W. Shaffer και V. A. Godyak, The Development of Low Frequency, High Output Electrodeless Fluorescent Lamps, Journal of the Illuminating Engineering Society, vol. 28, no. 1, pp. 142-148, 1999.
- [53] Philips QL Induction Lighting Systems Information for Original Equipment Manufacturers, Philips Lighting B.V, 2007.
- [54] M. Shao, S. Huang, W. Zhao, Novel matching networks for electrodeless lamp systems, Lighting Research and Technology, Sage, vol. 46, pp. 341-353, 2014.
- [55] F. Whimey, Measurements of Inductively-Coupled RF Fluorescent Lamp Lumen Properties, Conference Record of the 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE, vol. 3, pp. 1988 – 2002, 1994.

- [56] I. M. Ulanov, M. V. Isupov, A. Y. Litvintsev, Experimental study of transformer-coupled toroidal discharge in mercury vapour, *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing Ltd, vol. 40, no. 15, pp. 4561-4567, 2007.
- [57] Y. Liu, G. Zissis, Y. Chen, An axisymmetric 2D model on a high-frequency inductively coupled Ar–Hg discharge with a re-entry bulb, *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing Ltd, vol. 44, no. 30, 2011.
- [58] T. Yanai, Y. Sakamoto, M. Honda, K. Takahashi, M. Nakano, H. Kakehashi, H. Fukunaga, Magnetic Design for an Electrodeless Discharged Lamp, *IEEE Transactions on Magnetics*, IEEE, vol.48, no. 4, pp. 1505 – 1507, 2012.
- [59] A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gijbels, J. van der Mullen, Gas discharge plasmas and their applications, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, Elsevier, vol. 57, no. 4, pp. 609–658, 2002.
- [60] N.A. Smith, *The History of Lamps and Lighting, Optometry in Practice*, The College of Optometrists, vol. 4, pp.129 -136, 2003.
- [61] O. Popov, J. Maya, E. K. Shapiro, Electrodeless Fluorescent Lamp, Patent Number: 5 621 266, 1997.
- [62] T.-E. Jang, H.-J. Kim, H. Kim, Dimming Control Characteristics of Electrodeless Fluorescent Lamps, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, vol. 56, no. 1, pp.93-100, 2008.
- [63] L. R. Nerone, Electrodeless fluorescent lamp dimming system, Patent Number: EP 1 056 316 A2, 2000.
- [64] S. Y. R. Hui, L. M. Leung, H. S.-H. Chung, Y. K. Ho, An electronic ballast with wide dimming range, high PF and low EMI, *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, vol. 16, no. 4, pp. 465-472, 2001.
- [65] F. Raiser, Dim the lights. Problems with lamp current control using a PWM signal, *Industry Applications Magazine*, IEEE, vol. 8, no. 6, pp. 54-59, 2002.
- [66] Θ. Ι. Κοδέλλας, Μεταβολή των ηλεκτρικών και φωτοτεχνικών μεγεθών κατά τη ρύθμιση της φωτεινής ροής σε λαμπτήρες φθορισμού, Αθήνα, ΕΜΠ, 2004.
- [67] H. Kido, S. Makimura, S. Masumoto, A Study of Electronic Ballast for Electrodeless Fluorescent Lamps with Dimming Capabilities, *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting*, IEEE, vol. 2, pp. 889-894, 2001.
- [68] K.-M. Cho, W.-S. Oh, J.-E. Yeon, H.-J. Kim, A novel average burst-duty control method for the dimming of induction lamps, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2006*, IEEE, pp. 897-902, 2006.

- [69] J. M. Alonso, M. A. Dalla Costa, J. Cardesín, J. García, M. Rico-Secades, A New Control Method for Electronic Ballasts Based on Magnetic Regulators, Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2005, IEEE, vol. 3, pp. 1958-1964, 2005.
- [70] M. Cole, K. Martin, M. Walton, M. Throckmorton, Lighting in extreme temperature environments: The highs and the lows, PCIC Europe 2010 Conference Record, IEEE, pp. 1-8, 2010.
- [71] A. Gorazza, S. P. Giorgi, V. Massaro, Effect of impurities on discharge lamps and beneficial action of getters, International Conference on Plasma Science - Abstracts, ICOPS 2009, IEEE, 2009.
- [72] Δ. Αλαφογιάννης, Μια Σύγκριση Φωτιστικών Σωμάτων Μαγνητικής Επαγωγής Με Φωτιστικά Σώματα LED Σε Εφαρμογές Στον Οδοφωτισμό, Αθήνα, ΕΜΠ, 2014.
- [73] L. M. Roberts, The Science Behind Adattsi Magnetic Induction Lighting, Adattsi Ltd, 2012.
- [74] <http://www.industrialinductionlighting.com/>
- [75] <http://www.alibaba.com/>
- [76] <http://lams.slcsud.org/pages/teachers/coward/2k4/second/sloaneyweb/eye.htm>