



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Πειραματική διερεύνηση του φαινομένου της έναυσης
των λαμπτήρων φθορισμού και επίδραση των
παραμέτρων της στη διάρκεια ζωής τους**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Νικολάου Γ. Χονδράκη

Αθήνα, Απρίλιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ


Πειραματική διερεύνηση του φαινομένου της έναυσης
των λαμπτήρων φθορισμού και επίδραση των
παραμέτρων της στη διάρκεια ζωής τους

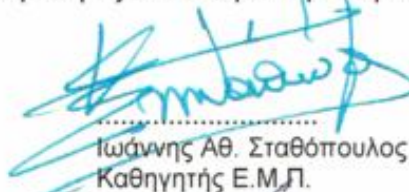
ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Νικολάου Γ. Χονδράκη


Συμβουλευτική Επιτροπή : Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Αντώνιος Κλαδάς

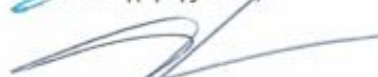
Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Ιουνίου 2012.


.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



.....
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Στέφανος Ν. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Γεώργιος Κορρές
Αναπληρωτής Καθηγητής
Ε.Μ.Π.


.....
Σταυρούλα Καβατζά
Λέκτορας Ε.Μ.Π.


.....
Αριστέιδας Ε. Τσαγκρασούλης
Επίκουρος Καθηγητής
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Αθήνα, Ιούνιος 2012

.....
Νικόλαος Γ. Χονδράκης

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ
Υποψήφιος Διδάκτωρ

Copyright © Νικόλαος Γ. Χονδράκης, 2012.
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 τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάζει την έρευνα που έγινε επί των σύγχρονων λαμπτήρων φθορισμού, για την επίδραση στο χρόνο ζωής τους, διαφόρων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, που επιβάλλονται σε αυτούς από τα ballast. Ένα μεγάλο δείγμα συστημάτων ετέθη σε λειτουργία και γίνονταν τακτικές μετρήσεις, ώστε να διερευνηθεί και η μεταβολή των χαρακτηριστικών αυτών κατά τη γήρανση των λαμπτήρων. Με ιδιαίτερο ενδιαφέρον μελετήθηκε η συμπεριφορά των ηλεκτροδίων κατά την έναυση και κατά τη λειτουργία των λαμπτήρων.

Τα συστήματα επιλέχθηκαν έτσι ώστε να καλύπτουν ευρύ φάσμα διαφορετικών λειτουργικών χαρακτηριστικών. Επίσης, οι τύποι των συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τέτοιοι που έδωσαν συγκρίσιμα μεταξύ τους αποτελέσματα. Για την επιλογή των συστημάτων και την οργάνωση των πειραματικών μετρήσεων ελήφθη υπ' όψιν η πλέον πρόσφατη διεθνής βιβλιογραφία.

Ανάλογα με τον τρόπο έναυσης των λαμπτήρων, επελέγησαν συστήματα με ballast άμεσης και γρήγορης έναυσης. Οι λαμπτήρες που επελέγησαν ήταν σωληνωτοί και συμπαγείς (χωρίς ενσωματωμένο ballast). Όσον αφορά στον χρόνο προθέρμανσης, χρησιμοποιήθηκαν ballast με μικρό, μέτριο και μεγάλο χρόνο προθέρμανσης και μελετήθηκε εκτενώς η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων τη στιγμή της έναυσης, με βάση την μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασής τους. Όλοι οι τύποι συστημάτων ετέθησαν σε λειτουργία υπό πέντε χρονικούς κύκλους λειτουργίας, γρήγορους και αργούς. Τα συστήματα λειτούργησαν με ποικιλία τιμών στα διάφορα χαρακτηριστικά τους, επιτρέποντας τη μελέτη της επίδρασης καθενός στη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων.

Η διατριβή αναπτύσσεται σε επτά κεφάλαια. Τα πρώτα έξι αναφέρονται στην πρακτική διεξαγωγής πειραμάτων σε συστήματα λαμπτήρων φθορισμού και στις διεξαχθείσες μετρήσεις, αποτελέσματα και συμπεράσματα. Το έβδομο συνοψίζει τα συμπεράσματα και προσδιορίζει το αντικείμενο σχετικών με το θέμα μελλοντικών ερευνών.

Οι κυριότεροι στόχοι και τα αποτελέσματα της εργασίας είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Ερευνήθηκε η επίδραση των χαρακτηριστικών που μελετήθηκαν στη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων.
- ✓ Έγινε συγκριτική μελέτη των διαφόρων τύπων συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν.
- ✓ Έγινε διερεύνηση της μεταβολής των διαφόρων χαρακτηριστικών με τη γήρανση των συστημάτων και έγινε πρόβλεψη του χρόνου ζωής των λαμπτήρων βάσει αυτών.
- ✓ Μελετήθηκε και δόθηκε μαθηματικό μοντέλο για τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του νήματος των ηλεκτροδίων με την αλλαγή της πίεσης του λαμπτήρα και της επιβαλλόμενης τάσης και συχνότητας.

Λέξεις-κλειδιά

Λαμπτήρες φθορισμού, ballast άμεσης έναυσης, ballast γρήγορης έναυσης, κύκλοι λειτουργίας, αντίσταση ηλεκτροδίου, θερμοκρασία ηλεκτροδίου, συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ηλεκτροδίου.

Abstract

This thesis presents a survey on modern fluorescent lighting and the effect on the lamp life of various electrical characteristics imposed upon the lamp by the ballast. A large sample of systems operated and regular measurements of these characteristics were carried out to investigate their change during the aging of the lamps. Of particular interest was the behavior of the electrodes at the starting and also during the operation of the lamp.

The systems were chosen to cover a wide range of different functional characteristics. Furthermore, the types used were such that could give comparable results. The selection of the systems and planning of the experimental measurements have taken into account the most recent international literature.

Depending on the mode of ignition of the lamp two types of ballast were selected: instant start ballasts and rapid or programmed start ballasts. The type of lamps selected were tubular T5 and compact (with non integrated ballast). The preheating time intervals of the ballast were selected to be fast, medium and long. It was studied extensively the temperature of the electrodes at the time of lamp starting, based on measuring the electrical resistance of the filament. All the systems operated in five different operating cycles, fast and slow. Based on these choices, the systems operated with a variety of values of their features, allowing the study of the effect of each characteristic on the lamp life.

The thesis unfolds in seven chapters. The first six chapters refer to the practice of the experiments on fluorescent lighting systems, the measurements, the results and the conclusions. The last chapter summarizes the findings and identifies the object on the subject for future investigation.

The main objectives and outcomes of this work are:

- ✓ The effect of the characteristics on the life of the bulbs was investigated.
- ✓ A comparative study of the incidence of the various characteristics on the lamp life was carried out.
- ✓ The change with the aging of the various characteristics of the systems was investigated and a prediction was made for the destruction of the bulbs.
- ✓ An experiment was carried out to study the heat transfer coefficient of the electrode filaments under various pressures, voltage and frequency values.

Keywords

Fluorescent lamps, instant start ballast, rapid start ballast, operating cycles, electrode resistance, electrode temperature, heat transfer coefficient of the electrode.

Ευχαριστίες

Το παρόν πόνημα είναι αποτέλεσμα μίας μεγάλης προσπάθειας που άρχισε πριν χρόνια και πέρασε από πολλές δυσκολίες μέχρι την ολοκλήρωσή του. Τα πειράματα και οι περισσότερες εργασίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο της Φωτοτεχνίας, πάντα υπό την καθοδήγηση του επιβλέποντος καθηγητή Φ.Β. Τοπαλή. Αν και λέγεται ότι στα δύσκολα είμαστε μόνοι, εγώ δε νιώθω ότι πέρασε αυτός ο καιρός με μοναξιά. Πάντα ήταν παρόντες στο εργαστήριο ή στο τηλέφωνο πολλοί συνεργάτες και φίλοι για να βοηθήσουν στα δύσκολα.

Κατ' αρχάς ήταν ο επιβλέπων καθηγητής, ακούραστος και πρόθυμος να λύσει κάθε πρόβλημα και να υποδείξει τρόπους ξεπεράσματος των εμποδίων. Πράγματι, δύο λέξεις ήταν αρκετές για να λύσουν τα χέρια μου και να έχω γόνιμη δουλειά για εβδομάδες. Μου ενέπνεε τη σιγουριά ότι εκείνος θα εύρισκε ή θα με οδηγούσε να βρω τη λύση σε κάθε πρόβλημα.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής καθηγητές κ.κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο και Αντώνιο Κλαδά, που με βοήθησαν με τις υποδείξεις τους και την επιστημονική τους καθοδήγηση. Οι πόρτες τους ήταν πάντα ανοικτές για απορίες μου και επίλυση επί μέρους θεμάτων.

Από τους συνεργάτες στο εργαστήριο θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα για τη συμπαράστασή της σε όλο το διάστημα της ενασχόλησής μου, την συνάδελφο Ιφιγένεια Κατέρη. Από τις πρώτες μέρες, σαν μαθητές, αρχίσαμε τη μελέτη βοηθώντας ο ένας τον άλλον. Οι ακάματοι εργάτες του εργαστηρίου, Δρ. Λάμπρος Δούλος και Κώστας Μπουρούσης με βοηθούσαν πάντα, περισσότερο ως φίλοι παρά ως συνεργάτες. Αυτό έχει ιδιαίτερη αξία, διότι ήξερα ότι ανά πάσα στιγμή μπορούσα να τους ενοχλήσω και εκείνοι με χαρά αλλά και ευθύνη θα συνέδραμαν τις προσπάθειές μου.

Ξεχωριστή μνεία θέλω να κάνω στις βοήθειες του Δρ. Γιάννη Γκόνου από την πρώτη μέρα που πέρασα την πόρτα των Υψηλών Τάσεων. Όχι μόνο για την προθυμία του, που μου δημιουργούσε ένα αίσθημα μεγάλης υποχρέωσης απέναντί του, αλλά και για το βαθύ επιστημονικό επίπεδο των υποδείξεών του.

Ευχαριστώ επίσης τον εξαιρετο επιστήμονα Δρ. Αντώνη Μπασιά, για την ανάγνωση και διόρθωση από επιστημονικής και φιλολογικής άποψης, των πολλών κειμένων της διατριβής και άρθρων που του έδωσα. Εξαιρετική ήταν η συνεισφορά στη διατριβή του λέκτορα Γεώργιου Τσεκούρα, στο τμήμα της μαθηματικής επεξεργασίας για την παραγωγή του μοντέλου υπολογισμού της ζωής των λαμπτήρων.

Στο τέλος άφησα, ως είθισται, τα μέλη της οικογένειάς μου, που εκτός από τις ευχαριστίες μου για τη συμπαράστασή τους, θέλω να εκφράσω και τη συγγνώμη μου για τις παραλήψεις μου προς αυτούς, όλο αυτό το διάστημα, αν και εκείνοι με διαβεβαιώνουν ότι ποτέ δεν το είδαν έτσι.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	13
Κεφάλαιο 1 Μηχανισμός παραγωγής φωτός σε λαμπτήρες φθορισμού	17
1.1. Εκκενώσεις σε λαμπτήρες φθορισμού	17
1.1.1. Παραγωγή φωτός με εκκένωση: έναυση - σταθεροποίηση	17
1.1.2. Ο ρόλος του αερίου	19
1.1.3. Διαστάσεις και απόδοση λαμπτήρων	21
1.1.4. Θερμοκρασία περιβάλλοντος και απόδοση λαμπτήρων	21
1.2. Η σημασία των ηλεκτροδίων στους λαμπτήρες	23
1.2.1. Η επικάλυψη των ηλεκτροδίων	23
1.2.2. Φαινόμενα στην περιοχή των ηλεκτροδίων	26
1.2.3. Ρεύμα καθόδου	28
1.2.4. Εκπομπή ηλεκτρονίων από την κάθοδο	30
1.3. Ηλεκτρικό σύστημα λαμπτήρων φθορισμού	31
1.3.1. Γενικά	31
1.3.2. Λειτουργία σε υψηλές συχνότητες	32
1.3.3. Χαρακτηριστικά έναρξης της εκκένωσης	34
1.3.4. Θερμή και ψυχρή έναυση	36
1.3.5. Λειτουργίες που εκτελούν τα ballast	37
1.3.6. Γήρανση των ballast	38
1.3.7. Ηλεκτρομαγνητικά ballast	39
1.3.8. Ηλεκτρονικά ballast	40
1.3.9. Εκκίνηση και λειτουργία με προγραμματισμένο ballast	42
1.3.10. Ρύθμιση φωτεινής ροής – dimming	43
1.4. Γήρανση λαμπτήρων φθορισμού	45
1.4.1. Αίτια εξάντλησης των λαμπτήρων	45
1.4.2. Παράγοντες που επιδρούν στη ζωή του λαμπτήρα	46
1.4.3. Αρχές επί των χαρακτηριστικών έναυσης και λειτουργίας των λαμπτήρων και των ballast	51
1.4.4. Διαγράμματα γήρανσης λαμπτήρων	53
1.4.5. Επίδραση του κύκλου λειτουργίας στη ζωή του λαμπτήρα	56
1.4.6. Μέθοδοι προσδιορισμού βέλτιστων τιμών των παραμέτρων της προθέρμανσης των ηλεκτροδίων	57
Κεφάλαιο 2 Φαινόμενα γήρανσης σε λαμπτήρες φθορισμού	59
2.1. Έρευνες στα συστήματα λαμπτήρων φθορισμού	59
2.2. Μελέτες ηλεκτρικών εκκενώσεων	60
2.3. Ηλεκτρικό κύκλωμα λαμπτήρων φθορισμού	63

2.4.	Μοντέλα για τα ηλεκτρόδια των λαμπτήρων	65
2.5.	Μοντελοποίηση λαμπτήρων φθορισμού	73
2.6.	Πειραματική διερεύνηση της έναυσης και λειτουργίας των συστημάτων με λαμπτήρες φθορισμού	76
2.7.	Έρευνα και μετρήσεις της ζωής των λαμπτήρων	85
2.8.	Αντικείμενο και στόχοι της διατριβής	92
2.8.1.	Θέση του προβλήματος	92
2.8.2.	Σκοπός και στόχοι της εργασίας	95
Κεφάλαιο 3 Πειραματική διάταξη και μετρήσεις		97
3.1.	Επιλογή συστημάτων και παραμέτρων λειτουργίας	97
3.2.	Κύκλοι λειτουργίας στους λαμπτήρες	98
3.3.	Συστήματα πειραμάτων	99
3.4.	Διαδικασία μετρήσεων	103
3.5.	Όργανα μετρήσεων	105
3.6.	Τρόπος μέτρησης των χαρακτηριστικών στα ballast άμεσης έναυσης	107
3.7.	Επεξεργασία μετρήσεων συστημάτων με ballast άμεσης έναυσης	109
3.8.	Μέτρηση χαρακτηριστικών των ballast με προθέρμανση	110
Κεφάλαιο 4 Πειραματική διερεύνηση των παραμέτρων γήρανσης σε λαμπτήρες άμεσης έναυσης		115
4.1.	Πειράματα μέτρησης της ζωής των λαμπτήρων	115
4.1.1.	Διεξαγωγή των πειραμάτων	115
4.1.2.	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των συστημάτων	116
4.2.	Μετρήσεις γήρανσης των συστημάτων	117
4.2.1.	Χρόνος ζωής λαμπτήρων	117
4.2.2.	Ανάλυση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	117
4.3.	Αποτελέσματα γήρανσης μεμονωμένων λαμπτήρων	121
4.3.1.	Αποτελέσματα λαμπτήρων T5	121
4.3.2.	Διερεύνηση των αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	123
4.3.3.	Αποτελέσματα συμπαγών λαμπτήρων	125
4.3.4.	Επεξεργασία αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	127
4.4.	Αποτελέσματα διαδοχικών μετρήσεων των χαρακτηριστικών κάθε συστήματος	130
4.5.	Ανάλυση της επίδρασης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των συστημάτων στη ζωή των λαμπτήρων	131
4.5.1.	Επίδραση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών έναυσης	131
4.5.2.	Επίδραση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών λειτουργίας	132
4.5.3.	Επίδραση της ισχύος του λαμπτήρα	134
4.6.	Μεταβολή χαρακτηριστικών κατά τη γήρανση	136
4.6.1.	Μεταβολή αντίστασης	136

4.6.2.	Μεταβολή συχνότητας, τάσης και ρεύματος λειτουργίας	136
4.7.	Οπτική επιθεώρηση των λαμπτήρων	138
4.8.	Στατιστικός έλεγχος χρόνου ζωής λαμπτήρων	143
4.9.	Συμπεράσματα	145
Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα συστημάτων με προθέρμανση πριν την έναυση		149
5.1.	Χαρακτηριστικά και οριοθέτηση της εξάντλησης των συστημάτων με προθέρμανση	149
5.2.	Πειραματικά αποτελέσματα με βάση τις μέσες τιμές των χαρακτηριστικών	151
5.3.	Στατιστικός έλεγχος χρόνου ζωής και χαρακτηριστικών των λαμπτήρων	159
5.3.1.	Έλεγχος χρόνου ζωής λαμπτήρων που οδηγούνται από ballast γρήγορης έναυσης	159
5.3.2.	Έλεγχος επίτευξης ονομαστικής τιμής ρεύματος των λαμπτήρων	160
5.3.3.	Σύγκριση χρόνου ζωής ίδιων λαμπτήρων που οδηγούνται από διαφορετικά ballast	161
5.3.4.	Έλεγχος θερμοκρασίας ηλεκτροδίου λαμπτήρων που οδηγούνται με ballast γρήγορης έναυσης	162
5.4	Επεξεργασία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	164
5.5.	Πειραματικά αποτελέσματα με βάση τη μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών έναυσης κατά τη γήρανση των συστημάτων	174
5.5.1.	Διερεύνηση της μεταβολής των χαρακτηριστικών σε όμοια συστήματα, ανεξαρτήτως κύκλου λειτουργίας	175
5.5.2.	Συμπεράσματα επί του συνόλου των συστημάτων	188
5.5.3.	Διερεύνηση αποτελεσμάτων με βάση τον κύκλο λειτουργίας	189
5.5.4.	Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις	194
5.6.	Υπολογιστική προσέγγιση	197
5.6.1.	Περιγραφή εξίσωσης υπολογισμού αναμενόμενης ζωής λαμπτήρων	197
5.6.2.	Εφαρμογή και έλεγχος της μεθόδου υπολογισμού της ζωής των λαμπτήρων	200
5.7.	Σύγκριση συστημάτων άμεσης έναυσης και συστημάτων με προθέρμανση	202
5.8.	Συγκριτικό πείραμα λαμπτήρων προθέρμανσης σε σύντομο κύκλο λειτουργίας	204
Κεφάλαιο 6 Επίδραση της πίεσης στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ηλεκτροδίου		207
6.1.	Επίδραση της πίεσης του αερίου του λαμπτήρα στη θερμοκρασία έναυσης	207
6.2.	Πειραματική διάταξη και διαδικασία μετρήσεων	208
6.3.	Θεωρητική προσέγγιση	210
6.4.	Θέρμανση ηλεκτροδίων υπό διάφορες συχνότητες	212
6.5.	Επίδραση της πίεσης και της τάσης στη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου.	214
6.6.	Διερεύνηση μεταβολής θερμοκρασίας ηλεκτροδίου κατά τη θέρμανση	219
6.7.	Μελέτη μεταβολής του ρεύματος υπό διάφορες πιέσεις	223

6.8.	Μελέτη μεταβολής του λόγου προθέρμανσης	224
6.9.	Μεταβολή της θερμοκρασίας ως συνάρτηση της πίεσης και συχνότητας τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου	226
6.10.	Επίδραση της πίεσης στο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας.	228
6.11.	Συμπεράσματα.	234
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα		237
7.1.	Συνοπτική έκθεση των τμημάτων της διατριβής	237
7.2.	Ανακεφαλαίωση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	238
7.2.1.	Συστήματα με ballast άμεσης έναυσης	239
7.2.2.	Συστήματα με ballast γρήγορης έναυσης	242
7.3.	Συμβολή της παρούσης διατριβής - προτάσεις για επέκταση της έρευνας	245
Βιβλιογραφία		249
Παραρτήματα		257
Π.1.	Πλήρης αποκατάσταση χαρακτηριστικών μετά την έναυση	257
Π.2.	Επίδραση της τάσης τροφοδοσίας στα χαρακτηριστικά έναυσης και λειτουργίας	258
Π.3.	Χρόνος απόκτησης θερμοκρασίας περιβάλλοντος νήματος λαμπτήρα	259
Π.4.	Μέτρηση ισχύος λαμπτήρα και ballast	259
Π.5.	Τάση στους ακροδέκτες τροφοδοσίας του λαμπτήρα	260
Π.6.	Μεταβολή συχνότητας κατά την προθέρμανση των ηλεκτροδίων	261
Π.7.	Μεταβολή της αντίστασης του ηλεκτροδίου κατά την προθέρμανση σε πραγματικό χρόνο	262
Π.8.	Χαρακτηριστικά κατά την έναυση	265
Π.9.	Μετάβαση από την αίγλη στο τόξο	270
Π.9.1.	Ballast μικρού χρόνου προθέρμανσης, λαμπτήρας CFL	270
Π.9.2.	Ballast μικρού χρόνου προθέρμανσης, λαμπτήρας T5	271
Π.9.3.	Ballast μεγάλου χρόνου προθέρμανσης, λαμπτήρας T5	271
Π.9.4.	Ballast μέτριου χρόνου προθέρμανσης, λαμπτήρας T5	272
Π.10.	Διακύμανση χαρακτηριστικών των συστημάτων	273
Π.11.	Πίνακες μετρήσεων χαρακτηριστικών συστημάτων άμεσης έναυσης	273
Δημοσιεύσεις		283

Εισαγωγή

Ο φωτισμός κατοικιών, γραφείων, κτιρίων γενικά, οδών και διαφόρων χώρων στις πόλεις αλλά και στην ύπαιθρο, αποτελεί σήμερα μεγάλο τμήμα της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας. Ανάλογα της χρήσης ενός κτιρίου ο φωτισμός μπορεί να αποτελεί το 10 έως 50 τοις εκατό της συνολικής κατανάλωσης σε ενέργεια. Και καθώς η κατανάλωση ενέργειας προερχόμενη από καύση υδρογονανθράκων συμβάλλει στην αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω φωτισμού είναι σημαντικές. Ο λόγος αυτός κάνει επιτακτική την ανάγκη για χρήση λαμπτήρων με μεγάλη απόδοση ώστε η εγκατεστημένη ισχύς των συστημάτων φωτισμού να είναι μικρή σε σχέση με την επιφάνεια του κτιρίου.

Η ευαισθησία των πολιτών σε ότι αφορά σε θέματα μόλυνσης του περιβάλλοντος αλλά και των κυβερνήσεων του Δυτικού κυρίως κόσμου, έχουν κάνει επιβεβλημένη την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση λαμπτήρων αυξημένης απόδοσης. Σε εσωτερικούς χώρους κάθε είδους η χρήση λαμπτήρων φθορισμού είναι πλέον κανόνας, αφού προσφέρουν από τέσσερις μέχρι και δέκα φορές περισσότερη φωτεινή ροή για την ίδια κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τους λαμπτήρες πυράκτωσης. Επί πλέον έχουν και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής κατά το ίδιο περίπου ποσοστό.

Οι λαμπτήρες φθορισμού εξελίσσονται διαρκώς και σήμερα οι πιο εξελιγμένες μορφές που κυκλοφορούν στο εμπόριο είναι ο σωληνωτός τύπος T5 και ο συμπαγής με διάφορες μορφές. Και οι δύο αυτοί τύποι χρησιμοποιούν ballast ηλεκτρονικού τύπου για να εκτελέσουν την έναυση αλλά και για να διατηρούν την εκκένωση κατά τη λειτουργία. Τα ηλεκτρονικά ballast είναι διαφόρων τύπων και ασφαλώς η ποιότητά τους έχει άμεση επίπτωση και στο κόστος που καλείται να πληρώσει ο καταναλωτής για την αγορά του. Η ποιότητα του ballast έγκειται κυρίως στη διάρκεια ζωής που προσφέρει σε ένα λαμπτήρα. Το αποτέλεσμα είναι η αγορά ενός τέτοιου συστήματος φωτισμού να έχει μεγάλο κόστος, συχνά αποτρεπτικό για τον αγοραστή. Για να έχει λοιπόν ανταποδοτικότητα ένα σύστημα με λαμπτήρα φθορισμού θα πρέπει εκτός από μεγάλη απόδοση να έχει και μεγάλη διάρκεια ζωής. Οι λαμπτήρες T5 και οι συμπαγείς παρέχουν και τα δύο αυτά πλεονεκτήματα. Όμως, όσο αυτά βελτιώνονται τόσο περισσότερο ανταγωνιστικοί θα είναι οι λαμπτήρες φθορισμού έναντι των λαμπτήρων πυράκτωσης.

Η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων φθορισμού αυξάνεται όσο ορισμένα χαρακτηριστικά του ballast βρίσκονται μεταξύ κάποιων τιμών που η έρευνα έχει αποδείξει ότι προκαλούν μικρότερη φθορά στο λαμπτήρα. Λόγω της απλής σε σχέση με το ballast κατασκευής των λαμπτήρων φθορισμού, οι φθορές που μειώνουν τη ζωή τους και προκαλούνται από το ballast αφορούν μόνο στα ηλεκτρόδιά τους. Γι' αυτό και οι μελέτες εστιάζονται σε αυτό το τμήμα του λαμπτήρα και στην έρευνα των χαρακτηριστικών του ballast που βλάπτουν το νήμα του λαμπτήρα. Οι βλάβες μπορεί να προέρχονται από τις επιπτώσεις είτε της έναρξης

της εκκένωσης είτε της λειτουργίας. Επομένως οι έρευνες επικεντρώνονται αφενός στο νήμα του λαμπτήρα και αφετέρου στο σχεδιασμό του ballast.

Με τις παραπάνω σκέψεις σχετικά με τη χρησιμότητα μιας εκ βάθους έρευνας για τη ζωή των λαμπτήρων φθορισμού, οδηγηθήκαμε στο σχεδιασμό της έρευνας των νεότερων τύπων λαμπτήρων φθορισμού οι οποίοι έχουν μελετηθεί λιγότερο. Η παρούσα διατριβή ασχολείται με την περιοχή του ηλεκτροδίου του λαμπτήρα και ερευνά τη συμπεριφορά του ballast ώστε να προκύπτει η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα. Η εκπόνηση της διατριβής και η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε στο Εργαστήριο Φωτοτεχνίας του Ε.Μ.Π. υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Φ. Β. Τοπαλή.

Για να κατανοηθεί πλήρως η ανάπτυξη της πειραματικής διαδικασίας και η επεξεργασία των μετρήσεων, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη της λειτουργίας των λαμπτήρων και των ballast που χρησιμοποιήθηκαν. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αυτό, ώστε να εκτεθούν οι διάφοροι παράγοντες που επιδρούν στη λειτουργία των συστημάτων φθορισμού, οι οποίοι παράγοντες θα επηρεάσουν τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων. Δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη θεωρία δημιουργίας και διατήρησης της εκκένωσης. Επίσης αναπτύσσονται διεξοδικά τα φαινόμενα στα ηλεκτρόδια και στο χώρο γύρω από αυτά, ώστε να αναδειχθεί η σημασία των πειραματικών αποτελεσμάτων της διατριβής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φαινόμενα γήρανσης στα συστήματα φθορισμού και η σχετική με το θέμα βιβλιογραφία και αρθρογραφία. Το κεφάλαιο περιλαμβάνει αρκετές ενότητες αφού το αντικείμενο της διατριβής είναι εκτενέστατο. Έτσι η επισκόπηση της βιβλιογραφίας περιλαμβάνει τις σπουδαιότερες έρευνες τις σχετικές με τους λαμπτήρες φθορισμού, τα φαινόμενα που συμβαίνουν σε αυτούς καθώς και το ηλεκτρικό κύκλωμα που απαιτούν για την εκπλήρωση της χρήσης τους. Αναφέρονται οι εργασίες που έχουν γίνει σε θέματα μοντελοποίησης των λαμπτήρων και των ηλεκτροδίων τους, τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί με αντικείμενο την έναυση του λαμπτήρα και όλες οι έρευνες με στόχο τη συσχέτιση της ζωής των λαμπτήρων φθορισμού όλων των τύπων, με τα χαρακτηριστικά έναυσης και λειτουργίας. Με βάση τις προηγηθείσες εργασίες εκτίθενται οι λόγοι που οδήγησαν στην παρούσα έρευνα, ο σκοπός, οι στόχοι που ετέθησαν, καθώς και η πρωτοτυπία που παρουσιάζει.

Το επόμενο κεφάλαιο (τρίτο) εκθέτει τις πειραματικές διατάξεις και τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών που έγιναν για την απόκτηση των αποτελεσμάτων εκείνων που θα οδηγήσουν στην εξαγωγή των αντιστοίχων συμπερασμάτων. Παρουσιάζονται τα όργανα μετρήσεων, αποδεικνύεται η αξιοπιστία των για το σκοπό που εξυπηρετούν και δικαιολογείται η χρήση των συστημάτων φωτισμού και η συγκεκριμένη ομαδοποίηση που έγινε. Τέθηκαν σε λειτουργία ποικίλα συστήματα με λαμπτήρες φθορισμού σε συνδυασμούς λειτουργίας ομοίων ballast με διαφορετικούς λαμπτήρες και το αντίστροφο. Κατ' αυτό τον

τρόπο εξήχθησαν συγκριτικά αποτελέσματα μεγάλης σπουδαιότητας και ασφαλούς εμπιστοσύνης.

Στο επόμενο κεφάλαιο (τέταρτο) εκτίθενται τα αποτελέσματα και η επεξεργασία τους για τα συστήματα που χρησιμοποιούν ballast άμεσης έναυσης. Αναφέρονται τα συμπεράσματα για την επίδραση στη ζωή των λαμπτήρων κάθε χαρακτηριστικού σχετικού με την έναυση και τη λειτουργία των συστημάτων. Ορισμένα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται στη διάρκεια της γήρανσης και μετά από επεξεργασία των μετρήσεων, αναφέρεται κατά πόσον αυτές οι μεταβολές μπορούν να οδηγήσουν στην πρόβλεψη της καταστροφής των συστημάτων. Αναφέρονται επίσης τα συμπεράσματα από την οπτική επιθεώρηση των λαμπτήρων, με γνώμονα την πεποίθηση ότι το μαύρισμα στην περιοχή των ηλεκτροδίων είναι οίονός για την επερχόμενη καταστροφή του λαμπτήρα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εκτίθενται και μελετώνται τα αποτελέσματα των συστημάτων με ballast που προθερμαίνουν τα ηλεκτρόδια πριν την εκκένωση. Τα συστήματα αυτά είναι πολυπληθέστερα των αναφερομένων στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επί πλέον τα ηλεκτρονικά ballast που χρησιμοποιούνται είναι εκείνα που προσφέρουν, κατά πολύ, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στους λαμπτήρες, επομένως συγκεντρώνουν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον της διατριβής. Με χρήση του υπάρχοντος εξοπλισμού του εργαστηρίου, αλλά και νέου που έγινε ιδιαίτερη προμήθεια για την εκπλήρωση των σκοπών της μελέτης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των διαφόρων παραμέτρων που υπεισέρχονται στη διαδικασία έναυσης και λειτουργίας του λαμπτήρα. Πραγματοποιήθηκε εκτεταμένος στατιστικός έλεγχος, ώστε να ερευνηθούν τα συστήματα ως προς την επίτευξη των στόχων του κατασκευαστή, αλλά και ως προς την αξιοπιστία των συμπερασμάτων της έρευνας. Βρέθηκε η σχέση των τιμών αυτών των παραμέτρων με τη ζωή που επέτυχαν οι λαμπτήρες. Με την κατάλληλη επεξεργασία έγινε μελέτη της μεταβολής των παραμέτρων αυτών και ποσοτικοποιήθηκε σε συνδυασμό με τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων.

Η σημασία της συμπεριφοράς του ηλεκτροδίου του λαμπτήρα είναι μείζονος σημασίας για την παρούσα έρευνα και αυτό οδήγησε σε ένα παράλληλο προς τη γήρανση των συστημάτων πείραμα. Κάποια ηλεκτρόδια από λαμπτήρες του τύπου που χρησιμοποιούνται στο πείραμα, ετέθησαν σε συνθήκες πίεσης και περιβάλλοντος, παρόμοιες με αυτές του λαμπτήρα και προσομοιώθηκε η προθέρμανσή τους. Η διαδικασία της προθέρμανσης είναι διαδικασία από τις κεντρικές της διατριβής αφού αφορά την έναυση του λαμπτήρα. Τα αποτελέσματα εκτίθενται στο έκτο κεφάλαιο, όπου υπολογίζεται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ηλεκτροδίου υπό διάφορες πιέσεις αερίου.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται ανακεφαλαίωση της διατριβής, παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των συστημάτων και η επίτευξη των στόχων που ετέθησαν. Αναδεικνύεται η συμβολή της διατριβής στην έρευνα για τη βελτίωση της λειτουργίας των ballast ώστε να προσφέρουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στους λαμπτήρες

φθορισμού. Τέλος προτείνεται η επέκταση της έρευνας στο αντικείμενο των λαμπτήρων φθορισμού και της λειτουργίας τους.

Για την ολοκλήρωση της συγγραφής προστίθεται η χρησιμοποιηθείσα βιβλιογραφία. Επί πλέον έχουν προστεθεί και τα αναγκαία παραρτήματα ώστε να είναι πληρέστερη η μελέτη κάποιων σημείων της διατριβής.

Κεφάλαιο 1

Μηχανισμός παραγωγής φωτός σε λαμπτήρες φθορισμού

1.1. Εκκενώσεις σε λαμπτήρες φθορισμού

1.1.1. Παραγωγή φωτός με εκκένωση: έναυση - σταθεροποίηση

Οι πρώτοι λαμπτήρες φωτισμού που χρησιμοποιήθηκαν, κατά τον 19^ο αιώνα, ήταν οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, που φυσικά υπάρχουν στην αγορά μέχρι σήμερα. Παράγουν φως μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμότητα, σύμφωνα με το φαινόμενο Joule. Οι λαμπτήρες φθορισμού που άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, έχουν τελείως διαφορετική αρχή λειτουργίας και χάρη σ' αυτήν έχουν καλύτερη απόδοση. Αυτό σημαίνει ότι μετατρέπουν σε φως την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν, σε μεγαλύτερο ποσοστό.

Οι λαμπτήρες φθορισμού διατίθενται στο εμπόριο σε διάφορα σχήματα και μεγέθη. Εξωτερικά είναι ένας γυάλινος σωλήνας ο οποίος στο εσωτερικό του έχει κάποιο μίγμα αερίων, συνήθως νέον και αργόν. Επίσης περιέχει και μια ελάχιστη ποσότητα υδραργύρου. Όλα τα περιεχόμενα βρίσκονται υπό χαμηλή πίεση, της τάξης του ενός Torr. Το εσωτερικό του σωλήνα καλύπτεται με μια φθορίζουσα ουσία, γι' αυτό και οι σωλήνες δεν είναι διαφανείς. Η ουσία αυτή έχει την ιδιότητα να μετατρέπει σε ορατή την προσπίπτουσα υπεριώδη ακτινοβολία, που παράγεται στο εσωτερικό του σωλήνα. Επίσης στο εσωτερικό και στα άκρα του σωλήνα υπάρχουν τα δυο ηλεκτρόδια, που αποτελούνται από λεπτό νήμα βολφραμίου καλυμμένου με οξειδία διαφόρων μετάλλων.

Για να τεθεί σε λειτουργία ένας λαμπτήρας φθορισμού, ενεργοποιείται ένα ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων, με εφαρμογή μιας σχετικά μεγάλης τάσης, μερικών εκατοντάδων Volt. Η τάση αυτή αναγκάζει το ηλεκτρικά φορτία που ήδη υπάρχουν στο σωλήνα ή δημιουργούνται λόγω της τάσης, να κατευθυνθούν προς τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια. Με την εφαρμογή της τάσης δημιουργείται ροή ηλεκτρονίων στο σωλήνα είτε επειδή θερμαίνονται τα ηλεκτρόδια και εκπέμπονται θερμοϊονικά ηλεκτρόνια, είτε επειδή προκύπτουν από την εφαρμογή της ιδιαίτερα υψηλής τάσης. Στην αρχή της εκκένωσης η ποσότητα των ηλεκτρονίων είναι πολύ μικρή. Αυξάνεται όμως, λόγω της θερμοκρασίας του σωλήνα που ανυψώνεται από την εφαρμοζόμενη τάση και της σύγκρουσης ηλεκτρονίων με τα άτομα των αερίων και των ατόμων υδραργύρου. Το αποτέλεσμα είναι η εξάτμιση μικρής ποσότητας του υδραργύρου. Ο υδράργυρος, ως αέριο πλέον, παίζει το σημαντικότερο ρόλο στην εκκένωση. Τα ηλεκτρόνια οδεύοντας προς την άνοδο συγκρούονται με άτομα του υδραργύρου και τα διεγείρουν, δηλαδή εκδιώκουν ένα ηλεκτρόνιο της εξωτερικής στοιβάδας σε μια εξωτερική τροχιά. Εκεί το εκδιωχθέν ηλεκτρόνιο θα παραμείνει ελάχιστο χρόνο και θα επιστρέψει στην αρχική του θέση εκπέμποντας ένα φωτόνιο. Ακριβώς εδώ γίνεται η μετατροπή σε ακτινοβολία της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου. Το φωτόνιο που εκπέμπεται από τον

υδράργυρο δεν έχει μήκος κύματος στο ορατό φάσμα, δηλαδή από 380 nm ως 780 nm αλλά έχει μήκος κύματος 253,7 nm. Σε αυτό το σημείο φαίνεται ο ρόλος της φθορίζουσας ουσίας στο εσωτερικό του σωλήνα. Το μίγμα θα απορροφήσει το φωτόνιο και θα το επανεκπέμψει με μεγαλύτερο μήκος κύματος, στο ορατό φάσμα στο περιβάλλον του σωλήνα. Οι ποικίλες φθορίζουσες ουσίες που χρησιμοποιούνται, ανάλογα με τη σύνθεσή τους εκπέμπουν τη νέα ακτινοβολία σε διάφορες επιθυμητές συχνότητες.

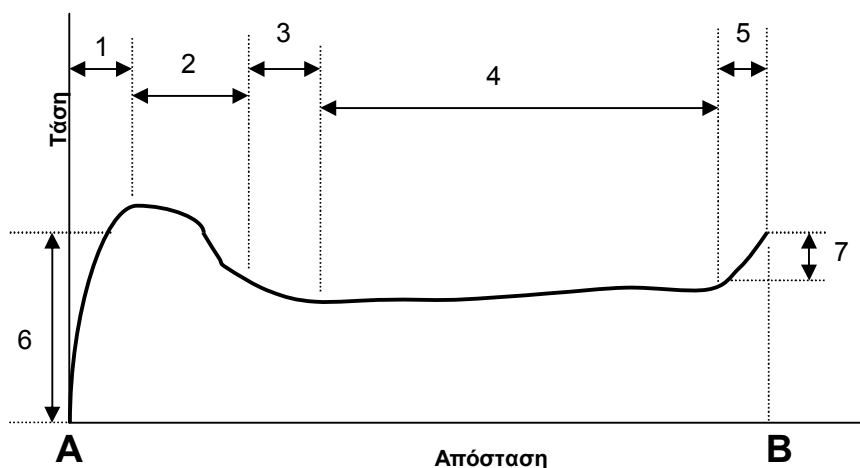
Η εκκένωση τόξου έχει το πρόβλημα του περιορισμού του ρεύματος του λαμπτήρα. Λόγω του τρόπου παραγωγής τους τα ηλεκτρόνια έχουν την τάση να αυξάνονται απεριόριστα με ταυτόχρονη πτώση της τάσης (αρνητική αντίσταση). Γι' αυτό λοιπόν χρειάζεται ένας μηχανισμός που θα περιορίζει το ρεύμα όταν τείνει να αυξηθεί υπερβολικά. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα ρυθμιστή ο οποίος μπορεί να είναι ένα απλό στραγγαλιστικό πηνίο ή να είναι ένα πολύπλοκο ηλεκτρονικό όργανο. Περιγραφικές ονομασίες που χρησιμοποιούνται στα ελληνικά είναι: ηλεκτρονικός εκκινητής, κύκλωμα οδήγησης, σύστημα έναυσης και διατήρησης εκκένωσης, εκκινητής λαμπτήρος, κύκλωμα ενεργοποίησης, κλπ. Στη αγγλική και διεθνή ορολογία του έχει δοθεί και στις δυο περιπτώσεις η ονομασία ballast. Επειδή στα ελληνικά δεν υπάρχει αντίστοιχη ονομασία, στη διατριβή θα ακολουθηθεί ο όρος αυτός.

Σήμερα οι σύγχρονοι λαμπτήρες φθορισμού, αλλά και γενικότερα όλοι οι λαμπτήρες εκκένωσης, αποτελούν ένα πολύπλοκο σύστημα που συγκεντρώνει πολλά στοιχεία νέων τεχνολογιών. Βέβαια η απόδοση τους έχει φθάσει σε επίπεδο που είναι από πέντε ως δέκα φορές καλύτερο από το αντίστοιχο των λαμπτήρων πυρακτώσεως, με άμεσο αποτέλεσμα την οικονομία ηλεκτρικής ενέργειας. Στη σύγχρονη κοινωνία η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται για φωτισμό σε οικίες και γραφεία είναι περίπου το 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Επομένως επιτυγχάνεται μεγάλη οικονομία αν αντικατασταθούν οι λαμπτήρες πυρακτώσεως με τους λαμπτήρες φθορισμού ή άλλους τύπους με καλύτερη απόδοση. Βέβαια η απόδοση είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη, αλλά το κόστος αγοράς ενός λαμπτήρα με το ηλεκτρονικό ballast είναι από δέκα ως τριάντα φορές υψηλότερο. Το ότι η αγορά ενός λαμπτήρα φθορισμού είναι συμφέρουσα οφείλεται στο βελτιωμένο χρόνο ζωής τους, που είναι από δέκα μέχρι είκοσι φορές αυξημένος. Υπολογίζεται ότι η τελική οικονομία σε χρήμα, για κόστος αγοράς και λειτουργίας, (εκτός από τα γενικότερα οφέλη από την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας) είναι περίπου 50% για τον καταναλωτή.

Σε ένα λαμπτήρα φθορισμού τα κυριότερα τμήματα είναι τα ηλεκτρόδια, το μίγμα στο εσωτερικό του και ο γυάλινος σωλήνας. Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει, θα φανεί ότι για την εύρυθμη λειτουργία του λαμπτήρα, αλλά και για να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση, είναι κάποιες κατασκευαστικές λεπτομέρειες που τον καθιστούν αρκετά πολύπλοκο και ένα αντικείμενο προχωρημένης τεχνολογίας.

Στο σχήμα 1.1 φαίνεται το δυναμικό κατά το μήκος του σωλήνα, όπου έχουν σημειωθεί οι πιο σημαντικές περιοχές που εμφανίζονται και θα αναλυθούν στα επόμενα. Πρέπει να

τονισθεί ότι οι συνθήκες που επικρατούν στην εκκένωση, καθορίζονται σαφώς από τη γεωμετρία των διαφόρων τμημάτων του λαμπτήρα και την περιεκτικότητα των αερίων και του υδραργύρου. Όμως και το ballast που χρησιμοποιείται έχει καθοριστικό ρόλο στα χαρακτηριστικά της εκκένωσης. Όλες οι παράμετροι της εκκένωσης τελικά είναι αλληλένδετες μεταξύ τους. Πρέπει να τονιστεί ότι ο στόχος δεν είναι μόνο η μεγαλύτερη απόδοση σε φωτεινή ροή του λαμπτήρα. Εκείνο που επιζητούν οι κατασκευαστές είναι ο συνδυασμός αυξημένης απόδοσης, μεγάλου χρόνου ζωής του λαμπτήρα και η γρήγορη επίτευξη της μέγιστης φωτεινής ροής.



Σχήμα 1.1. Μεταβολή της τάσης κατά μήκος ενός λαμπτήρα.

1. Κάψα καθόδου
 2. Αρνητική αίγλη
 3. Σκοτεινή περιοχή Faraday
 4. Θετική Στήλη (πλάσμα)
 5. Κάψα ανόδου
 6. Πτώση τάσης καθόδου
 7. Πτώση τάσης ανόδου
- A. Κάθοδος B. Άνοδος

Η αυξημένη απόδοση επιτυγχάνεται με την λειτουργία της εκκένωσης σε συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων της, όπως είναι η ένταση του ρεύματος λειτουργίας στο λαμπτήρα, η ακριβής περιεκτικότητα των αερίων και διαφόρων άλλων. Ο χρόνος ζωής του λαμπτήρα είναι ένα πολύπλοκο θέμα. Προς το παρόν ας αναφερθεί μόνο ότι εξαρτάται κυρίως από την αρχική τάση έναυσης και γενικά από τον τρόπο που γίνεται αυτή, από τον τρόπο και τα υλικά κατασκευής των ηλεκτροδίων, από τις διαστάσεις του λαμπτήρα κλπ. Αντίστοιχοι παράγοντες επηρεάζουν και τον χρόνο μέχρι να φθάσει ο λαμπτήρας στη μέγιστη απόδοσή του. Ο χρόνος αυτός σχετίζεται με την εμπορική επιτυχία του προϊόντος.

1.1.2. Ο ρόλος του αερίου

Κατά την εκκένωση είναι σημαντικό να διατηρείται η ταχύτητα των ηλεκτρονίων σταθερή και σε χαμηλές τιμές. Αυτό ρυθμίζεται με την ένταση του πεδίου μεταξύ των ηλεκτροδίων του λαμπτήρα, αλλά δεν είναι αρκετό. Είναι πολύ σπουδαίος ο ρόλος των αερίων στο σωλήνα. Το αέριο νέον επιβραδύνει τα ηλεκτρόνια και η ταχύτητά τους συγκρατείται στα επιθυμητά επίπεδα. Ας σημειωθεί ότι κατά τις ηλεκτρικές εκκενώσεις η ταχύτητα του

ηλεκτρονίου αναφέρεται ως θερμοκρασία. Οι συγκρούσεις που γίνονται μεταξύ ηλεκτρονίων και ατόμων νέον είναι ελαστικές και σε κάθε μία το ποσόν της ενέργειας που χάνεται είναι σχετικά μικρό. Επειδή όμως οι συγκρούσεις είναι πολλές σε αριθμό, υπάρχει ένα αρκετά σεβαστό ποσό ενέργειας που χάνεται.

Το ηλεκτρόνιο δεν χάνει αρκετή ενέργεια αν η σύγκρουση είναι ελαστική. Αν όμως η σύγκρουση καταλήξει σε διέγερση του ατόμου του αερίου νέον, τότε χάνεται αρκετή και αυτό είναι εις βάρος της απόδοσης του λαμπτήρα διότι δεν καταλήγει σε εκπομπή της κατάλληλης ακτινοβολίας. Αν η σύγκρουση γίνει με άτομο υδραργύρου και καταλήξει σε διέγερση αυτό είναι το επιθυμητό. Η επιλογή των αερίων γίνεται έτσι ώστε να μην υφίστανται ούτε ιονισμό ούτε διέγερση με τις συνήθεις θερμοκρασίες που έχουν τα ηλεκτρόνια. Η ενέργεια των ηλεκτρονίων πρέπει να πλησιάζει τα 5 eV αφού η ενέργεια για την πρώτη διέγερση του υδραργύρου είναι 4,86 eV (στιβάδα 6P1). Το αργόν έχει ως χαμηλότερη ενέργεια διέγερσης 11,55 eV και το νέον 16,62 eV. Τα 5 eV απέχουν σχετικά πολύ από αυτές τις τιμές και δεν θα γίνονται συχνές ενεργοβόρες διεγέρσεις των ατόμων των αερίων. Απέχει όμως αυτή η τιμή αρκετά και από την επόμενη στάθμη διέγερσης του υδραργύρου (σχεδόν 7 eV), αλλά και από την ενέργεια ιονισμού του, που είναι λίγο πάνω από τα 10 eV. Άρα, αν τα ηλεκτρόνια έχουν ενέργεια πολύ κοντά στα 4,86 eV θα προκαλούν διέγερση μόνο στα άτομα του υδραργύρου, που θα καταλήγει στην εκπομπή ακτινοβολίας με την κατάλληλη συχνότητα.

Πάντως, επειδή συμβαίνουν αρκετές επανασυνδέσεις ιόντων και ηλεκτρονίων, είναι επιθυμητός ο ιονισμός των ατόμων μέχρι ενός ορισμένου σημείου. Κατ' αυτό τον τρόπο θα παράγονται νέα ηλεκτρόνια που θα αντικαθιστούν τα χαμένα από τις επανασυνδέσεις και θα υπάρχει σταθερός αριθμός φορτισμένων σωματιδίων στο πλάσμα (σχήμα 1.1). Σε τούτο βοηθά η παρουσία του αερίου αργόν.

Με δεδομένη την γεωμετρία του σωλήνα και την πίεση του αερίου, ο ρυθμός που επανασυνδέονται ιόντα και ηλεκτρόνια, είτε στο πλάσμα είτε στα τοιχώματα του σωλήνα, είναι σταθερός και όχι σχετικά μεγάλος. Με τον ίδιο ρυθμό πρέπει να δημιουργούνται και τα αντίστοιχα ζεύγη ιόντος-ηλεκτρονίου για να αντικαθιστώνται τα απολεσθέντα ηλεκτρόνια. Για να γίνεται αυτό, είναι απόλυτα αναγκαίο, τα φαινόμενα που περιγράφηκαν να συμβαίνουν με συγκεκριμένους ρυθμούς. Έχει βρεθεί λοιπόν ότι το ποσοστό του αργόν στο μίγμα πρέπει να είναι 0,1% και το υπόλοιπο να είναι το νέον. Επίσης, ο υδράργυρος δεν δύναται να είναι σχετικά άφθονος, τόσο για την εύρυθμη λειτουργία, όσο και για λόγους οικονομίας και οικολογίας. Προστίθεται πάντα λίγη περισσότερη ποσότητα από τη θεωρητικά υπολογιζόμενη, επειδή στη φύση βρίσκεται σε πέντε ισότοπα και για την διέγερση ενός ατόμου το ηλεκτρόνιο πρέπει να έχει το ακριβές ποσόν ενέργειας.

Στη θετική στήλη (πλάσμα) τα ηλεκτρόνια κατανέμουν την ενέργειά τους ως εξής [1]:

- ✓ για ιονισμό 1%

- ✓ για ελαστικές συγκρούσεις 28%
- ✓ για διεγέρσεις που καταλήγουν σε μη χρήσιμες ακτινοβολίες 6%
- ✓ για διεγέρσεις υδραργύρου που καταλήγουν στη χρήσιμη UV ακτινοβολία 65%

Το μίγμα του υδραργύρου με τα αέρια νέον και αργόν στις συγκεκριμένες αναλογίες, υπό τις οποίες εμφανίζονται τα πιο πάνω περιγραφέντα φαινόμενα, ονομάζεται μίγμα Penning (Penning mixture) και είναι πολύ σπουδαίο για την λειτουργία των λαμπτήρων φθορισμού. Οι ιδιότητες ενός τέτοιου μίγματος στηρίζονται στις συγκεκριμένες τιμές των ενεργειακών σταθμών των ατόμων που το αποτελούν. Ο υδράργυρος σχηματίζει μίγματα Penning με τα αέρια ήλιον, νέον και αργόν, όχι όμως και με τα κρυπτόν και ξένον. Τα μίγματα Penning βοηθούν και στην έναυση του λαμπτήρα αφού με τη μεταβολή των αναλογιών των συστατικών του μίγματος μεταβάλλεται η σταθερά ιονισμού του υδραργύρου. Μάλιστα έχει παρατηρηθεί ότι με τις προαναφερθείσες αναλογίες επιτυγχάνεται μικρή τάση έναυσης στους λαμπτήρες φθορισμού σε θερμοκρασία δωματίου.

Το νέον είναι πολύ αποδοτικό σε σωλήνες με μεγάλο μήκος και χαμηλή πίεση (της τάξης του ενός Torr). Άρα αν για διάφορους λόγους (λειτουργικούς ή αποδόσεως) υπάρχει ανάγκη για μακρύ λαμπτήρα, το νέον είναι το προτιμητέο αέριο.

1.1.3. Διαστάσεις και απόδοση λαμπτήρων

Είναι γνωστό πως οι λαμπτήρες φθορισμού έχουν σχήμα μακρόστενο και ο σωλήνας στον οποίο παράγεται το φως είναι κυλινδρικός. Αυτή η μορφή δεν είναι τυχαία ή βολική αλλά είναι η πλέον κατάλληλη και αποδοτική. Η εξήγηση δίνεται αμέσως μετά. Η υπεριώδης ακτινοβολία παράγεται στη θετική στήλη. Όταν αλλάζει το μήκος του σωλήνα, στην ουσία αλλάζει το μήκος της θετικής στήλης, άρα και το παραγόμενο φως. Εφόσον ο λαμπτήρας φθορισμού εργάζεται σε χαμηλή πίεση είναι περιορισμένες οι διεγέρσεις των ατόμων του υδραργύρου (επειδή είναι λίγα) για την παραγωγή υπεριώδους ακτινοβολίας. Φυσικό είναι λοιπόν να έχει μεγάλο μέγεθος, ώστε με την ίδια πίεση να έχει μεγαλύτερο όγκο άρα και περισσότερα άτομα. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι μπορεί να αυξάνεται κατά βούλησιν.

Επίσης, η διάμετρος δεν είναι ορθόν, ούτε μεγάλη να είναι ούτε και μικρή. Θα πρέπει να έχει μια βέλτιστη τιμή, για δεδομένο φυσικά μήκος, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη απόδοση. Μάλιστα, σε γενικές γραμμές σε μεγάλα μήκη απαιτούνται πιο μεγάλες διαμέτροι. Οι συμπαγείς λαμπτήρες έχουν σχετικά μικρό μήκος αλλά και διάμετρο. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της αυξημένης θερμοκρασίας των ηλεκτρονίων, αυξάνεται η πίεση, ώστε να ελαττωθεί η μέση ελεύθερη διαδρομή και να μειωθεί η θερμοκρασία τους.

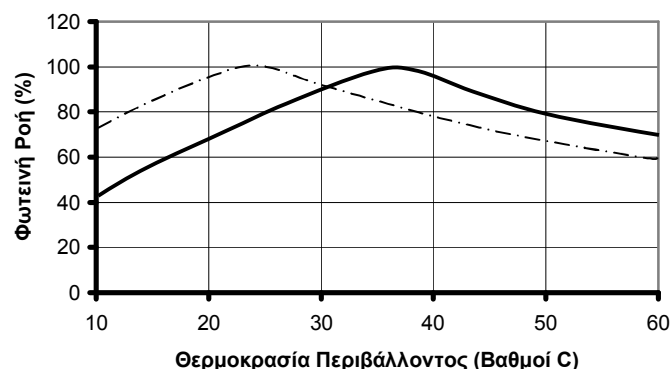
1.1.4. Θερμοκρασία περιβάλλοντος και απόδοση λαμπτήρων

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση ενός λαμπτήρα φθορισμού είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Για κάθε τύπο λαμπτήρα γενικά υπάρχει μια εξωτερική (ως προς τον λαμπτήρα) θερμοκρασία στην οποία παρουσιάζει τη μέγιστη απόδοση. Σε κοντινές

προς αυτήν θερμοκρασίες η μείωση είναι μικρή, αλλά αν το σύστημα τοποθετηθεί σε εξωτερικό χώρο, επειδή πάντα υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις ακόμα και στη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου, το αποτέλεσμα είναι ουσιώδους σημασίας. Γι' αυτό υπάρχουν ειδικοί λαμπτήρες εξωτερικών χώρων, αναλόγως μάλιστα και με τις συνήθειες συνθήκες που επικρατούν.

Όταν παρακάτω αναφέρεται η απόδοση, υπονοείται τόσο η ικανότητα μετατροπής της ηλεκτρικής ισχύος σε φωτεινή ροή (efficacy) όσο και η συνολική απόδοση του λαμπτήρα σε φωτεινή ροή.

Στο σχήμα 1.2 φαίνεται η μεταβολή της απόδοσης σε φωτεινή ροή δυο διαφορετικών λαμπτήρων. Ο λαμπτήρας με την έντονη γραμμή αποκτά τη μέγιστη φωτεινή ροή του στους 37 °C, ενώ ο άλλος στους 24 °C περίπου. Παρατηρείται ότι μεγαλύτερη μείωση στην απόδοση έχουν οι λαμπτήρες στις χαμηλές θερμοκρασίες απ' ότι στις υψηλότερες. Θεωρητικώς, η επί πλέον καταναλισκόμενη ενέργεια στις χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος που δεν μετατρέπεται σε φως χάνεται ως θερμότητα στο περιβάλλον, που μπορεί να ξεπεράσει και το 80% [2]. Από πειράματα που έχουν γίνει έχει αποδειχθεί ότι η χαμηλή θερμοκρασία μπορεί να οδηγήσει είτε στην καθυστέρηση της έναυσης του λαμπτήρα είτε και στην καταστροφή του [3].



Σχήμα 1.2. Φωτεινή ροή δύο διαφορετικών λαμπτήρων ανάλογα με την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλή, αντίστοιχα χαμηλή θα είναι και η θερμοκρασία στα τοιχώματα του λαμπτήρα. Όμως ο υδράργυρος, εφόσον δεν έχει εξατμιστεί, θα βρίσκεται στα τοιχώματα (λόγω βαρύτητας) και δεν θα είναι εύκολο να ανυψωθεί η θερμοκρασία του ώστε να εξατμιστεί σε μεγάλη ποσότητα και να βοηθήσει στη εκκένωση. Άρα στο μίγμα των αερίων θα υπάρχουν λίγα άτομα υδραργύρου με αποτέλεσμα την μειωμένη απόδοση σε φως. Το αντίθετο συμβαίνει όταν το περιβάλλον έχει μεγάλη θερμοκρασία. Όσο η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη τόσο τα άτομα του υδραργύρου θα εξατμίζονται και η απόδοση θα βελτιώνεται. Όταν ανέβει η θερμοκρασία αρκετά θα εξατμιστεί όλος ο υδράργυρος στο σωλήνα. Η ποσότητα του υδραργύρου στο σωλήνα όμως είναι πάντα μεγαλύτερη από την απαραίτητη κατά τη λειτουργία, γιατί με το χρόνο μένουν

ανενεργά κάποια άτομα και η περίσσεια εξασφαλίζει την επάρκεια μέχρι το τέλος της ζωής του λαμπτήρα. Εξατμιζόμενη λοιπόν όλη η ποσότητα του υδραργύρου οδηγεί στη απορρόφηση μέρους των φωτονίων που κατευθύνονται στα τοιχώματα. Και αν το άτομο δεν είναι διεγερμένο δεν υπάρχει πρόβλημα, διότι διεγείρεται από ένα φωτόνιο και επανεκπέμπει ένα νέο. Αν όμως το άτομο είναι ήδη διεγερμένο και δεν έχει προλάβει να εκπέμπει, θα απορροφήσει το φωτόνιο και μειώνεται διπλά η παρουσία χρήσιμων φωτονίων στο σωλήνα. Άρα για ένα δεδομένο τύπο λαμπτήρα υπάρχει μια θερμοκρασία περιβάλλοντος που οδηγεί στη μέγιστη φωτεινή ροή, η οποία στο σχήμα 1.2 αντιπροσωπεύει το 100% της απόδοσης.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια νέα τεχνολογία κατασκευής συμπαγών λαμπτήρων, που έχουν τη μέγιστη απόδοσή τους σε μια ευρεία περιοχή θερμοκρασιών. Πρόκειται για τους λαμπτήρες με αμάλγαμα (amalgam). Αυτό είναι ένα μίγμα του υδραργύρου (amalgam pellet) σε στερεά και όχι σε υγρή κατάσταση που τοποθετείται στο λαμπτήρα. Η κατάσταση αυτή του υδραργύρου επιτρέπει την εξάτμιση μιας ποσότητας υδραργύρου που εξαρτάται βασικά από την πίεση και επομένως από την εσωτερική θερμοκρασία στο λαμπτήρα και όχι από την εξωτερική. Επομένως, υπό ένα ευρύ πεδίο εξωτερικών θερμοκρασιών, η εξατμισμένη ποσότητα του υδραργύρου κατά τη λειτουργία είναι σταθερή. Το πλεονέκτημα είναι ότι η απόδοση δεν ελαττώνεται ιδιαίτερα, ούτε με τη μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας, αλλά ούτε με το πέρασμα του χρόνου. Τέτοιου είδους λαμπτήρες έχουν ελάχιστα μεταβλητή απόδοση σε εξωτερικές θερμοκρασίες από 0 °C μέχρι και 55 °C.

1.2. Η σημασία των ηλεκτροδίων στους λαμπτήρες

1.2.1. Η επικάλυψη των ηλεκτροδίων

Σε ένα λαμπτήρα το πιο σημαντικό και ενδιαφέρον τμήμα είναι τα ηλεκτρόδια, τα οποία βρίσκονται στα άκρα του και είναι όμοια, παρ' ότι ονομάζονται το ένα άνοδος και το άλλο κάθοδος. Εάν υπήρχε λαμπτήρας συνεχούς ρεύματος τότε θα ήταν διαφορετικά, διότι άλλες διαδικασίες θα γινόταν στο καθένα. Όμως στο εναλλασσόμενο ρεύμα δεν έχουν καμία διαφορά. Απλώς στα φαινόμενα που περιγράφονται είναι σαν αυτά να παρατηρούνται για μια στιγμή ή σαν να παρακολουθούνται πολύ αργά, οπότε ξεχωρίζει το ένα από το άλλο. Επομένως στο εξής όταν αναφέρεται η κάθοδος ή η άνοδος, θα εννοούνται και τα δυο ηλεκτρόδια, χωρίς διάκριση.

Στα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες, της τάξης των 1 000 °C, γι' αυτό πρέπει να είναι από υλικό το οποίο να έχει πολύ υψηλό σημείο τήξης. Έχει βρεθεί ότι η θερμοκρασία, ούτε κατά την έναυση ούτε κατά την λειτουργία, δεν ξεπερνά τους 1 700 °C. Πρέπει επίσης το υλικό να έχει σχετικά μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση. Απαιτείται ακόμα το υλικό του ηλεκτροδίου να έχει συντελεστή διαστολής σχεδόν ίδιο με του γυαλιού, ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί ο λαμπτήρας αεροστεγής και ανθεκτικός στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Πρέπει το ηλεκτρόδιο να διατηρεί ακαμψία με την ανύψωση της θερμοκρασίας, ώστε να μην κάμπτεται με την επίδραση της βαρύτητας ή την πίεση από τις

κρούσεις των σωματιδίων. Μια τελευταία ιδιότητα που χρειάζεται είναι το χαμηλό έργο ιονισμού για να μπορεί σχετικά εύκολα να εκπέμπει ηλεκτρόνια [4].

Το υλικό που βρέθηκε να έχει σε πολύ καλό βαθμό αυτές τις ιδιότητες, εκτός από την τελευταία, είναι το βολφράμιο (Tungsten, W). Από τότε που άρχισαν να κατασκευάζονται οι λαμπτήρες φθορισμού χρησιμοποιείται το βολφράμιο για την κατασκευή των ηλεκτροδίων, το οποίο άλλωστε ήταν γνωστό από τη χρήση του στους λαμπτήρες πυράκτωσης. Έχει σημείο τήξης 3 410 °C, σημείο βρασμού 5 900 °C, πυκνότητα 19,3 gr/cm³, ατομικό βάρος 183,85 και ατομικό αριθμό 74. Δημιουργεί κράματα με το χαλκό, το νικέλιο, το σίδηρο και το κοβάλτιο με βελτιωμένες ιδιότητες, κυρίως ως προς την αντοχή του.

Το μόνο μειονέκτημά του βολφραμίου σχετικά με τη χρήση του ως ηλεκτροδίου, είναι το υψηλό έργο ιονισμού του, που είναι 4,5 eV. Η τιμή αυτή δεν είναι βολική διότι δεν θα είναι εύκολη η απόσπαση ηλεκτρονίων από το ηλεκτρόδιο ώστε να δημιουργηθεί ρεύμα και να διατηρηθεί η εκκένωση. Το πρόβλημα αυτό υπερπηδάται με την επικάλυψη του βολφραμίου με οξειδία του βαρίου, του ασβεστίου και του στροντίου, που έχουν έργο ιονισμού περίπου 1 eV, επομένως θα είναι πολύ πιο εύκολη η απόσπαση ηλεκτρονίων από αυτά.

Τα οξειδία είναι από τα βασικότερα τμήματα του ηλεκτροδίου και είναι εκ των ων ουκ άνευ. Η κατασκευή είναι αρκετά πολύπλοκη και λεπτή. Το ηλεκτρόδιο έχει συνολικό μήκος από λίγα χιλιοστά μέχρι το πολύ δύο εκατοστά (ανάλογα με τον τύπο του λαμπτήρα) και θα πρέπει να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερα η ανάμιξη των υλικών σε αυτό το μικρό μήκος. Η πιο συνήθης μορφή ηλεκτροδίου που χρησιμοποιείται είναι ο τύπος της τριπλής έλικας. Ένα πολύ λεπτό νήμα βολφραμίου, με διάμετρο μικρότερη από 0,1 mm [5], τυλίγεται γύρω από ένα λίγο μεγαλύτερο ευθύ νήμα. Αυτό το σύρμα τυλίγεται ξανά σε ένα άλλο δευτερεύον σύρμα, το οποίο περιστρέφεται περί τον εαυτό του δημιουργώντας την τελική σπείρα που αποτελεί το ηλεκτρόδιο. Κατ' αρχάς όλο το υλικό της σπείρας είναι το βολφράμιο και στο τέλος γίνεται η επικάλυψη με τα οξειδία.

Τα ηλεκτρόνια στην κάθοδο εκπέμπονται κυρίως θερμονικά (δηλαδή λόγω της υψηλής θερμοκρασίας). Ένα μικρό ποσοστό εκπέμπεται επίσης από ιονισμό που προκαλείται με την πρόσκρουση των θετικών ιόντων σ' αυτήν. Τα ηλεκτρόδια συγκρατούνται στη θέση τους με δυο ανθεκτικά σιδηρονικελιούχα στηρίγματα. Το βολφράμιο έχει ενέργεια ιονισμού (work function) 4,5 eV, η οποία είναι σχετικά μεγάλη και για να συμβεί θερμονική εκπομπή ηλεκτρονίων η θερμοκρασία θα έπρεπε να ανέβει υπερβολικά, πράγμα που θα οδηγούσε πολύ σύντομα στην καταστροφή του ηλεκτροδίου. Για το λόγο αυτό το ηλεκτρόδιο βολφραμίου καλύπτεται με οξειδία του ασβεστίου (Ca), του βαρίου (Ba) και του στροντίου (Sr). Τα οξειδία αυτά έχουν ενέργεια ιονισμού μεταξύ 0,9 eV και 1,1 eV και με αυτές τις τιμές εκπέμπουν θερμονικά ηλεκτρόνια στους 900 °C περίπου. Αυτή η θερμοκρασία είναι σχετικά εύκολο να επιτευχθεί και δεν φθείρει σε μεγάλο βαθμό τα ηλεκτρόδια. Η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι μεταξύ των ορίων 700 °C και 1000 °C, ώστε

και η απαιτούμενη εκπομπή ηλεκτρονίων να εκπληρώνεται και να μην εξατμίζεται η επικάλυψη λόγω υπερβολικής θερμοκρασίας.

Η προαναφερθείσα περιοχή θερμοκρασίας των ηλεκτροδίων είναι δυνατόν να βοηθείται με ιδιαίτερο ηλεκτρικό κύκλωμα του ballast που παρέχει συνεχώς ρεύμα θέρμανσης στα ηλεκτρόδια, ιδιαίτερα κατά την έναυση. Όμως κατά τη λειτουργία αυτό προσθέτει επί πλέον κατανάλωση και μειώνει την απόδοση του συστήματος, γι' αυτό πολλοί κατασκευαστές το αποφεύγουν. Τα ηλεκτρόδια θερμαίνονται κυρίως κατά τη φάση που λειτουργούν ως άνοδοι καθόσον τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν πάνω τους μετατρέποντας την κινητική τους ενέργεια σε θερμότητα. Η παραγωγή θερμότητας από τα θετικά ιόντα (κατά την πρόσκρουσή τους στην κάθοδο) είναι σχετικά μικρή και εξαρτάται από τη συχνότητα που λειτουργεί ο λαμπτήρας. Στη συχνότητα του δικτύου (50 ή 60 Hz) η θερμότητα που αναπτύσσεται στο ηλεκτρόδιο κατά τη φάση της ανόδου είναι μέχρι και 6 φορές μεγαλύτερη από την παραγόμενη κατά τη φάση της καθόδου. Όταν όμως χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά ballast και η συχνότητα ανέρχεται σε μερικές δεκάδες χιλιάδες Hz, τότε η θερμότητα δεν είναι τόσο μεγάλη. Ο λόγος είναι ότι σε μεγάλες συχνότητες η πτώση τάσης καθόδου (η πτώση της τάσης ακριβώς μπροστά από την κάθοδο) είναι σχετικά μικρή και τα ηλεκτρόνια και ιόντα δεν αποκτούν μεγάλες ταχύτητες. Ως επακόλουθο, η παραγόμενη θερμότητα κατά την φάση της ανόδου είναι μόλις μιάμιση φορά μεγαλύτερη απ' ότι κατά την φάση της καθόδου.

Τα ηλεκτρόνια λοιπόν εκπέμπονται θερμιονικά από την κάθοδο και αμέσως βρίσκονται σε ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, λόγω της πτώσης τάσης της καθόδου. Στην περιοχή αυτή επιταχύνονται και προκαλούν ισχυρό ιονισμό στα άτομα του αερίου υδραργύρου, με αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό τους και στο τέλος της σκοτεινής περιοχής της καθόδου να επιτυγχάνεται σχεδόν η συνολική παραγωγή των ηλεκτρονίων του σωλήνα. Η απότομη αύξηση των ηλεκτρονίων και ταυτόχρονα των θετικών ιόντων οδηγεί στη συντήρηση της μεγάλης διαφοράς δυναμικού στην περιοχή.

Όταν πια τα ηλεκτρόνια απομακρυνθούν από την κάθοδο, το πεδίο έχει ελάχιστο βαθμό μεταβολής, επομένως δεν επιταχύνονται πλέον, ή τουλάχιστον όχι με γοργό ρυθμό και η περιοχή αυτή ονομάζεται θετική στήλη. Μάλιστα στη θετική στήλη μπορεί να θεωρηθεί ότι λόγω των συγκρούσεων που συμβαίνουν, κινούνται προς κάθε κατεύθυνση με ίση πιθανότητα (σχεδόν) και η κατανομή των ταχυτήτων V τους δίνεται από τον τύπο των Maxwell – Boltzmann [1]:

$$f(U) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{U}{kT} \right)^{1/2} e^{-U/kT} \quad (1.1)$$

όπου το U είναι ίσο με $Mv^2/2$, M είναι η μάζα του ηλεκτρονίου, v η ταχύτητα, k είναι η σταθερά του Boltzmann και T είναι σε γενικές περιπτώσεις μια παράμετρος σχετική με την κλίμακα και όταν το σύστημα είναι σε πλήρη θερμοδυναμική ισορροπία τότε T είναι η

θερμοκρασία. Στη συγκεκριμένη περίπτωση των λαμπτήρων φθορισμού που υπάρχει κατάσταση πλάσματος, T είναι η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων και συμβολίζεται ειδικά: T_e .

Εφόσον θεωρηθεί ότι έχει επέλθει κατάσταση ισορροπίας (κανονική λειτουργία) στο πλάσμα (θετική στήλη), η ένταση και η πυκνότητα του ρεύματος θα είναι σταθερή. Τότε θα υπάρχει παραγωγή ζευγών ηλεκτρονίου-ιόντος ακριβώς ίση με τον ρυθμό που επανασυνδέονται. Ο ρυθμός παραγωγής ζευγών ηλεκτρονίου-ιόντος είναι εκθετικά ανάλογος της θερμοκρασίας των ηλεκτρονίων T_e , διότι προφανώς όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία τόσο μεγαλύτερη και η ταχύτητα των ηλεκτρονίων, άρα και η ενέργειά τους και κατά συνέπεια και οι ιονισμοί που προκαλούν. Το συμπέρασμα είναι ότι σε μια εκκένωση που απαιτείται να έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, η θερμοκρασία T_e πρέπει να είναι σταθερή και αυτό ρυθμίζεται με την πίεση που επικρατεί στο σωλήνα και τη διάμετρο. Παράλληλα, με κάποιο τρόπο (βλέπε ballast) θα πρέπει και το πεδίο στο λαμπτήρα να είναι σταθερό και στη συγκεκριμένη τιμή που απαιτεί η εκκένωση. Αυτό σημαίνει ότι εάν τείνει να αυξηθεί το ρεύμα στο λαμπτήρα θα πρέπει να ελαττωθεί η τάση του.

1.2.2. Φαινόμενα στην περιοχή των ηλεκτροδίων

Όπως έχει ειπωθεί και σε προηγούμενη παράγραφο, η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων είναι πολύ σπουδαίος παράγοντας για τη συνολική διάρκεια της ζωής τους, άρα και του λαμπτήρα. Η θερμοκρασία έχει σημασία και στην έναυση αλλά και κατά τη λειτουργία. Μια θερμοκρασία από 700 °C ως 1000 °C διευκολύνει την εκπομπή των ηλεκτρονίων και εμποδίζει την καταστροφή του ηλεκτροδίου λόγω εκδίωξης της επικάλυψης (εκσφενδόνιση-sputtering) από τα προσπίπτοντα θετικά ιόντα. Η θερμοϊονική εκπομπή ηλεκτρονίων αυξάνεται με την θερμοκρασία, ενώ μειώνεται η εκσφενδόνιση. Το αντίθετο συμβαίνει όσο ελαττώνεται η θερμοκρασία. Γι' αυτό έχουν τεθεί τα πιο πάνω όρια στη θερμοκρασία. Τα όρια αυτά ισχύουν κατά την λειτουργία αλλά και κατά την έναρξη της εκκένωσης.

Κατά τη λειτουργία θα πρέπει προφανώς το ρεύμα στην κάθοδο να ισούται με το ρεύμα στην άνοδο. Το ρεύμα της ανόδου οφείλεται αποκλειστικά στα προσπίπτοντα ηλεκτρόνια, διότι δεν υπάρχουν αναχωρούντα θετικά ιόντα από αυτήν. Στην κάθοδο υπάρχουν και τα προσπίπτοντα θετικά ιόντα και τα θερμοϊονικά εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια (συν λίγα ακόμα φορτία λόγω εκσφενδόνισης). Το ρεύμα στην κάθοδο μεταφέρεται κατά 90% από τα ηλεκτρόνια και το υπόλοιπο 10% από τα ιόντα. Όσο όμως απομακρυνόμαστε από την κάθοδο τα ιόντα μειώνονται και το ρεύμα μεταφέρεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τα ηλεκτρόνια. Στην θετική στήλη θεωρείται ότι τα ηλεκτρόνια μεταφέρουν το 99,9% του ρεύματος. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι λέγοντας ρεύμα εννοείται ουσιαστικά η πυκνότητα ρεύματος και όχι η πυκνότητα φορτίου, η οποία δεν έχει σχέση με την ταχύτητα των σωματιδίων. Για παράδειγμα η πυκνότητα φορτίου στην θετική στήλη είναι ίση για τα θετικά και τα αρνητικά φορτία.

Από όλα αυτά φαίνονται οι διαφορετικές λειτουργίες που επιτελούνται στην άνοδο και στην κάθοδο. Τα ηλεκτρόνια φθάνουν στην άνοδο με κάποια ταχύτητα και αντίστοιχη κινητική ενέργεια, την οποία σπαταλούν για να σταματήσουν. Η μεγάλη ταχύτητά τους οφείλεται στην πτώση τάσης ανόδου, που είναι της τάξης των 5 V, η οποία είναι αρκετή μέσα στα λίγα δέκατα του χιλιοστού που αναπτύσσεται, να δώσει μεγάλες ταχύτητες στα μικροσκοπικά ηλεκτρόνια. Η πτώση τάσης βέβαια δημιουργείται από τα ίδια τα ηλεκτρόνια, που σαν νέφος πλησιάζουν την άνοδο και έχοντας αυτά αρνητικό φορτίο και η άνοδος θετικό, δημιουργούν την διαφορά δυναμικού.

Τα ηλεκτρόνια στην άνοδο έρχονται από το πλάσμα, στο οποίο η κατανομή των ταχυτήτων τους, καθώς και το προκύπτον ρεύμα, ακολουθεί την στατιστική κατανομή Maxwell [1]:

$$i_r = en_e \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m}} \cdot A \quad (1.2)$$

όπου: e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

n_e ο αριθμός των ηλεκτρονίων

k η σταθερά του Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/°K)

T_e η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων (αντίστοιχη της ταχύτητας)

m η μάζα του ηλεκτρονίου ($0,911 \cdot 10^{-30}$ kg)

A η επιφάνεια στην οποία προσπίπτουν

Το i_r εδώ δεν έχει μονάδα το Ampere αλλά Coulomb·(m/s)·m², που σημαίνει ότι εξαρτάται από το φορτίο που μεταφέρεται από τα ηλεκτρόνια, δηλαδή τον αριθμό τους n_e , την ταχύτητά τους, δηλαδή την T_e , και την επιφάνεια που θεωρείται ότι διαπερνούν, δηλαδή την επιφάνεια της ανόδου.

Εν ολίγοις, i_r είναι το ρεύμα που δίνει η θετική στήλη προς την άνοδο (random current). Το ρεύμα που θα καταλήξει στην άνοδο θα είναι ίσο με το ρεύμα της εκκένωσης. Αν το ρεύμα i_r είναι ίσο με το ρεύμα που απαιτεί η εκκένωση, i_d , δεν θα χρειάζεται καμιά πρόσθετη διαφορά δυναμικού για να αυξηθεί αυτό το ρεύμα και η πτώση τάσης ανόδου θα είναι μηδέν.

Αν όμως το ρεύμα που χρειάζεται για τη συντήρηση της εκκένωσης, i_d , είναι μεγαλύτερο από το i_r , τότε θα πρέπει να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και πλάσματος που θα αυξήσει το ρεύμα i_r από την θετική στήλη, σε i_d στην άνοδο. Θα ισχύει η σχέση:

$$i_d = i_r e^{\frac{-eV}{kT_e}} \quad (1.3)$$

όπου V είναι η διαφορά δυναμικού (θετική) που πρέπει να αναπτυχθεί ώστε να επιτευχθεί το απαραίτητο ρεύμα. Σε αυτή την περίπτωση η άνοδος είναι κανονικά φορτισμένη με θετικό φορτίο.

Αν το i_r είναι αρκετά μεγάλο και είναι μεγαλύτερο από το i_d , τότε η άνοδος θα πρέπει να φορτιστεί αρνητικά ώστε να μειώσει το ρεύμα που προέρχεται από το πλάσμα. Η διαφορά δυναμικού θα είναι τώρα αρνητική και θα δίνεται από την ίδια σχέση.

Από τη σχέση (1.3) λοιπόν φαίνεται πως αν η άνοδος είναι μεγάλη θα είναι μεγάλο και το ρεύμα i_r και δεν θα υπάρχει ανάγκη για μεγάλη πτώση τάσης. Άλλωστε από την επεξήγηση που δόθηκε στη ίδια σχέση, αν είναι μεγάλη η επιφάνεια δεν θα είναι ανάγκη να είναι μεγάλη η ταχύτητα για να δημιουργείται το ίδιο ρεύμα. Επομένως τα ηλεκτρόνια δεν θα έχουν μεγάλη ενέργεια για να τη χάσουν. Συνεπώς ενεργειακά σκεπτόμενοι, θα φαινόνταν ως προσφορότερη μία μεγάλη άνοδος.

Μεγάλη άνοδος όμως σημαίνει και μεγάλη κάθοδος στο εναλλασσόμενο ρεύμα που οδηγεί τους λαμπτήρες φθορισμού. Μια κάθοδος με μεγάλο όγκο έχει αρκετά μειονεκτήματα με πρώτο και σπουδαιότερο το ότι θα είναι δύσκολη και χρονοβόρα η θέρμανσή της, που είναι αναγκαία κατά την έναυση. Το ίδιο μειονέκτημα, αλλά σε μικρότερο βαθμό, θα υπάρχει και στην λειτουργία. Βέβαια, μια μεγάλη κάθοδος θα είχε μεγάλη διάρκεια ζωής, αφού μέχρι να καταναλωθεί όλο το υλικό της θα περνούσε και αρκετός χρόνος. Δεν θα άντεχε όμως σε μεγάλο αριθμό έναρξης εκκενώσεων γιατί κάθε μια θα διαρκούσε αρκετά δευτερόλεπτα και θα προκαλούσε μεγάλη φθορά.

Αν υποθεθεί ότι ο λαμπτήρας τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα αυτό θα γίνεται διαρκώς και το ρεύμα της ανόδου θα έχει μια πριονωτή μορφή γύρω από την μέση τιμή του. Η διαδικασία αυτή προκαλεί μια μικρή αύξηση στο ρεύμα χωρίς αντίστοιχη παραγωγή φωτός, άρα μια μείωση στην απόδοση του λαμπτήρα. Η συχνότητα της εναλλαγής της αύξησης και της μείωσης του ρεύματος είναι περίπου 1000 Hz. Αυτό σημαίνει ότι αν ο λαμπτήρας εργάζεται με συχνότητα μεγαλύτερη των 1000 Hz το φαινόμενο δεν θα παρουσιάζεται ή δεν θα είναι έντονο. Στα ηλεκτρομαγνητικά ballast, που η συχνότητα είναι 50 ή 60 Hz, λόγω της δράσης αυτής η παραγωγή φωτός είναι μικρότερη εξ αιτίας αυτού του φαινομένου.

Για να γίνει μια καλή και γρήγορη έναυση, το καλύτερο είναι ένα μικρό ηλεκτρόδιο. Στην έναυση αλλά και στη λειτουργία της καθόδου, τα ηλεκτρόνια δεν αναχωρούν από όλη την επιφάνειά της ταυτόχρονα. Σε φωτογραφίες ή φιλμ, που έχουν παραχθεί με μεγάλες ταχύτητες [6], φαίνεται το ονομαζόμενο «θερμό σημείο» (hot spot) πάνω στην κάθοδο, το οποίο και μετακινείται συνέχεια, ίσως επειδή τα ηλεκτρόνια ξεπηδούν από το ιδανικότερο σημείο. Αυτό συνήθως είναι κάποιο άκρο του ηλεκτροδίου στο οποίο συναθροίζονται τα περισσότερα από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια.

1.2.3. Ρεύμα καθόδου

Υπάρχουν δυο απόψεις για το πως επηρεάζει η πίεση και το είδος του αερίου τη φθορά της καθόδου η οποία προκύπτει εξ αιτίας των κρούσεων με τα θετικά ιόντα. Μια άποψη είναι ότι

αν ελαττωθεί η πίεση (π.χ. από 3 Torr στο 1 Torr), για δεδομένο ρεύμα λαμπτήρα, επειδή τα ιόντα θα έχουν λιγότερες συγκρούσεις θα φτάνουν στην κάθοδο με μεγαλύτερη ταχύτητα και θα προκαλούν περισσότερη φθορά. Το ίδιο αποτέλεσμα για τον ίδιο λόγο, θεωρεί η εν λόγω άποψη, ότι συμβαίνει αν το αέριο αντικατασταθεί με άλλο που είναι πιο ελαφρύ.

Η άλλη άποψη υποστηρίζει ότι η απόσταση στην οποία αναπτύσσεται η πτώση τάσης καθόδου (καθοδική κάψα - cathode sheath) είναι τόσο μικρή, που τα ιόντα δεν προλαβαίνουν να κάνουν σχεδόν καμία σύγκρουση [7] και στις δυο περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν. Επομένως, ούτε μία μικρή αλλαγή στην πίεση, ούτε η χρήση βαρύτερου αερίου, επηρεάζει την ταχύτητα πρόσκρουσης των ιόντων. Το πάχος της καθοδικής κάψας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S = \frac{2}{3} \left(\frac{\epsilon_0}{J_+} \right)^{1/2} \left(\frac{2e}{m_i} \right)^{1/4} \cdot V_k^{3/4} \quad (1.4)$$

όπου V_k είναι η πτώση τάσης καθόδου, m_i η μάζα του ιόντος, J_+ η πυκνότητα ρεύματος των ιόντων (A/m^2), ϵ_0 η διεισδυτικότητα σε ελεύθερο χώρο (permittivity of free space). Για πτώση τάσης καθόδου 10 V το πάχος αυτό είναι από 0,001 mm ως 0,1 mm για τις συνήθεις συνθήκες εκκενώσεων.

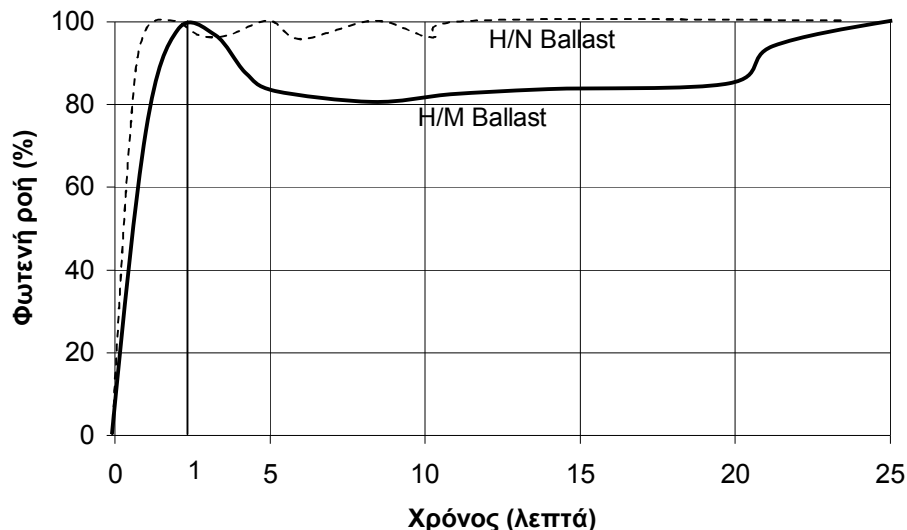
Στην έναυση του λαμπτήρα, η εκκένωση περνά από τη φάση της εκκένωσης αίγλης και τότε ακριβώς συμβαίνει μεγαλύτερη εκσφενδόνιση, διότι η πτώση τάσης καθόδου είναι περί τα 200 V. Τα θετικά ιόντα έχουν ρεύμα περίπου 50 mA/cm² και εκδιώκουν τα άτομα της επικάλυψης των οξειδίων με ρυθμό 0,1 άτομο ανά προσπίπτον ιόν. Πάντως με αυτές τις θεωρητικές και ασφαλώς υπερβολικές τιμές εκσφενδόνισης δεν εξηγείται η αυξημένη φθορά στα ηλεκτρόδια. Πρέπει δηλαδή να χάνεται υλικό και με άλλο τρόπο. Αυτό δείχνει πόσο περίπλοκο είναι το θέμα της φθοράς των ηλεκτροδίων ειδικά κατά την έναρξη της λειτουργίας του λαμπτήρα.

Με ελέγχους που έχουν γίνει σε κατεστραμμένους λαμπτήρες και συγκεκριμένα στα ηλεκτρόδιά τους, έχει βρεθεί ότι δεν έχουν εξαντλήσει σε όλες τις περιπτώσεις το σύνολο του υλικού της επικάλυψης. Η εξάντληση συχνά έχει προέλθει από τήξη του νήματος του βολφραμίου σε περιοχή που ήταν γυμνό, ενώ τριγύρω υπήρχε άφθονη επικάλυψη. Μια εξήγηση που δόθηκε για το γεγονός αυτό είναι ότι ένα άτομο της επικάλυψης που εκδιώκεται είναι δυνατόν, λόγω κάποιας πιθανής ελαστικής σύγκρουσής του, να επιστρέψει στο ηλεκτρόδιο και να επανατοποθετηθεί. Όμως η θέση στην οποία θα επιστρέψει θα είναι τυχαία και αυτό θα έχει σαν συνέπεια την αύξηση του έργου ιονισμού στην περιοχή. Είναι αποδεδειγμένο ότι μία ομαλή στρώση των οξειδίων μειώνει την απαιτούμενη ενέργεια για ιονισμό. Επιπροσθέτως η επικάλυψη των ατόμων αυτών μπορεί να γίνει πάνω στα οξείδια καθιστώντας τα ανενεργά αφού δεν θα βρίσκονται πλέον στην επιφάνεια.

1.2.4. Εκπομπή ηλεκτρονίων από την κάθοδο

Με τις ανακατατάξεις αυτές στα ηλεκτρόδια, η εκπομπή των ηλεκτρονίων γίνεται δύσκολη και για να επιτευχθεί η έναυση αυξάνεται αυθόρμητα από το σύστημα η πτώση τάσης καθόδου, ώστε να προσδοθεί μεγαλύτερη ενέργεια στα ιόντα και να είναι αποτελεσματικότερα. Άμεση συνέπεια αυτού, είναι η αυξημένη θερμοκρασία των ηλεκτροδίων κατά την έναυση του λαμπτήρα. Βέβαια αυτό πάλι οδηγεί σε μεγαλύτερη εκπομπή θερμιονικών ηλεκτρονίων, λόγω μεγάλης θερμοκρασίας της καθόδου, η οποία είναι δύσκολο να μειωθεί. Σε μετρήσεις που έχουν γίνει βρέθηκε ότι έρχονται σε κανονικά επίπεδα θερμοκρασίας τα ηλεκτρόδια αφού περάσουν δέκα πρώτα λεπτά έως μια ώρα από την έναυση. Αυτό σημαίνει ότι τότε σταθεροποιείται και η φωτεινή ροή του λαμπτήρα. Στο σχήμα 1.3 φαίνεται ο χρόνος που απαιτείται για σταθεροποίηση, σε λαμπτήρες συγκεκριμένου κατασκευαστή.

Όλα αυτά έχουν σχέση με τον τρόπο ιονισμού στην κάθοδο. Ακόμη δεν είναι γνωστή πλήρως η διαδικασία του φαινομένου. Υπάρχουν δυο βασικές απόψεις για την προέλευση των ηλεκτρονίων που αναχωρούν από τα ηλεκτρόδια. Η μια υποστηρίζει ότι τα ηλεκτρόνια προέρχονται από το ίδιο το βολφράμιο που φυσικά βρίσκεται κάτω από την επικάλυψη των οξειδίων. Βέβαια, το έργο ιονισμού του είναι 4,5 eV αλλά τα οξείδια έχει αποδειχθεί ότι βοηθούν στη μείωσή του σε περίπου 1 eV. Η άλλη θεωρεί ότι τα ηλεκτρόνια προέρχονται από τα άτομα του βαρίου της επικάλυψης.



Σχήμα 1.3. Φωτεινή ροή του ίδιου λαμπτήρα όταν οδηγείται από ηλεκτρομαγνητικό ή ηλεκτρονικό ballast, στην αρχή της λειτουργίας του, σε συνάρτηση με το χρόνο.

Αυτό που είναι σαφώς επιβεβαιωμένο είναι ότι στα μέταλλα συμβαίνει μείωση του έργου ιονισμού όταν πάνω στην επιφάνειά τους προστεθούν οξείδια των αλκαλικών γαιών.

Συγκεκριμένα αν επιφάνεια βολφραμίου καλυφθεί με μια λεπτή στρώση οξειδίου του βαρίου (monolayer of stoichiometric BaO) το έργο ιονισμού από 4,5 eV μειώνεται σε 2,1 eV. Αυτό γίνεται επειδή οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων των επιφανειακών ατόμων του βολφραμίου και του στρώματος του βαρίου δημιουργούν μια μετατόπιση του ηλεκτρικού φορτίου της περιοχής ανάμεσα στα δυο άτομα. Το αποτέλεσμα είναι να είναι πιο εύκολη η εξαγωγή του ηλεκτρονίου από την εξωτερική στιβάδα του βολφραμίου.

Όμως στα ηλεκτρόδια η επικάλυψη δεν είναι τόσο μικρή και δεν μπορεί να ειπωθεί με σιγουριά ότι το φαινόμενο είναι ίδιο με το προηγούμενο, παρ' ότι το αποτέλεσμα είναι το ίδιο. Σε φωτογραφίες του θερμού σημείου της καθόδου, φαίνεται σαν να προέρχεται το φως (δηλαδή τα ηλεκτρόνια) από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου και όχι από το εσωτερικό, δηλαδή από το βολφράμιο.

Η χημική σύνθεση του ηλεκτροδίου αλλάζει με το χρόνο στην επιφάνειά του. Το οξείδιο του βαρίου που βρίσκεται σε επαφή με το βολφράμιο αντιδρά και παράγονται άτομα βαρίου σύμφωνα με την αντίδραση: $6\text{BaO} + \text{W} \rightarrow \text{Ba}_3\text{WO}_6 + 3\text{Ba}$. Το Ba_3WO_6 (βολφραμικό βάριο) μένει στην περιοχή της αντίδρασης, ενώ το βάριο ως ελαφρύτερο μπορεί και διασκορπίζεται μέχρι και την επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Το βάριο της επιφάνειας του ηλεκτροδίου είναι που ιονίζεται και παράγει τα ηλεκτρόνια της καθόδου. Το Ba_3WO_6 επικάθεται πάνω στο βολφράμιο με αποτέλεσμα να εμποδίζει την αντίδραση. Αυτό είναι καλό για το ηλεκτρόδιο αφού του παρατείνει τη ζωή, διότι αν πολύ σύντομα όλο το οξείδιο μετατρεπόταν σε βάριο αυτό θα καταναλωνόταν σε λιγότερο από 1000 ώρες, όπως έχει υπολογιστεί.

Η καταστροφή του ηλεκτροδίου θα επέλθει όταν δεν παράγεται πλέον άλλο βάριο εξ αιτίας της κάλυψης της επιφάνειας του βολφραμίου με το Ba_3WO_6 , οπότε δεν θα είναι δυνατή η αντίδραση παραγωγής βαρίου. Τα ηλεκτρόδια, έχουν ένα μικρό κίνδυνο φθοράς από την δράση των αερίων του σωλήνα με την επικάλυψη. Πρακτικά δεν υπάρχει πρόβλημα από αυτό αλλά ο πραγματικός κίνδυνος προέρχεται από τις εκσφενδονίσεις και την εξάτμιση της επικάλυψης αν η πτώση τάσης καθόδου ή η θερμοκρασία, αντιστοίχως, αυξηθούν.

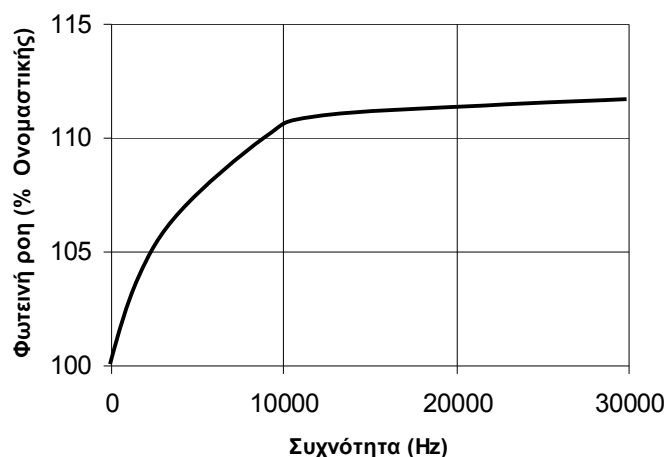
1.3. Ηλεκτρικό σύστημα λαμπτήρων φθορισμού

1.3.1. Γενικά

Η μέχρι τώρα θεωρητική προσέγγιση της λειτουργίας των λαμπτήρων φθορισμού, έτσι όπως παρουσιάστηκε, αφορούσε λειτουργία στο συνεχές ρεύμα. Προφανώς όταν λειτουργούν με τη συχνότητα του δικτύου (50 Hz στην Ευρώπη και 60 Hz στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής) ή με άλλη μεγαλύτερη που επιβάλλεται από το ballast, θα αλλάζει η πολικότητα στα ηλεκτρόδια. Όμως επειδή οι ταχύτητες των ηλεκτρονίων στο σωλήνα είναι πολύ μεγάλες, έχουν το χρόνο να κάνουν τη διαδρομή μεταξύ των ηλεκτροδίων σε συχνότητες μέχρι και 100 kHz. Γι' αυτό τα φαινόμενα που περιγράφηκαν ισχύουν και στο εναλλασσόμενο ρεύμα με μικρές διαφορές που δεν επηρεάζουν την ουσία και τη φυσική τους. Κάποιες από τις διαφορές που υπάρχουν οφείλονται στο ότι το ρεύμα πλέον δεν είναι

σταθερό, αλλά μεταβαλλόμενο. Επίσης προκύπτουν διαφορές λόγω της συχνότητας του ρεύματος, κυρίως στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων. Επίσης, τα θετικά ιόντα δεν είναι τόσο γρήγορα όσο τα ηλεκτρόνια και γι' αυτό το λόγο υπάρχουν κάποιες πρόσθετες διαφορές.

Σε γενικές γραμμές η εκκένωση στο συνεχές ρεύμα είναι ανταγωνιστική από πολλές απόψεις, όμως το όλο σύστημα μειονεκτεί ως προς την απόδοσή του (lm/W συστήματος). Ο λόγος είναι ότι ο μηχανισμός σταθεροποίησης του ρεύματος που θα χρησιμοποιηθεί στο συνεχές δεν μπορεί να είναι επαγωγικός ή χωρητικός (οπότε δεν θα είχε αρκετή κατανάλωση) αλλά θα χρησιμοποιεί αντίσταση και θα έχει μεγάλη παραγωγή θερμότητας εξ αιτίας του φαινομένου Joule. Αν υποθεθεί ότι πραγματοποιείται μια σωστή εκκένωση (100% φωτεινή ροή) στο συνεχές, στο σχήμα 1.4 φαίνεται πως αυξάνεται η φωτεινή ροή με την αύξηση της συχνότητας για εκκένωση με τα ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά [8]. Η φωτεινή ροή ενός λαμπτήρα αυξάνεται μέχρι και 12% όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας.



Σχήμα 1.4. Φωτεινή ροή λαμπτήρα ως προς τη συχνότητα λειτουργίας.

1.3.2. Λειτουργία σε υψηλές συχνότητες

Στην εκκένωση με το συνεχές ρεύμα είναι γνωστό ότι ο ρυθμός παραγωγής ζευγών ηλεκτρονίων και ιόντων (rate of production) είναι ίσος με το ρυθμό των επανασυνδέσεών τους (rate of loss) διότι με αυτό τον τρόπο διατηρείται σταθερή η πυκνότητά τους στο πλάσμα. Η εξίσωση που εκφράζει την ισορροπία είναι [1]:

$$v_i(T_e) = \left(\frac{2,4}{R} \right)^2 D_a \quad (1.5)$$

όπου v_i είναι η συχνότητα των ιονισμών και εξαρτάται από την θερμοκρασία των ηλεκτρονίων, ενώ το δεύτερο μέλος εκφράζει τις επανασυνδέσεις των φορτισμένων

σωματιδίων. R είναι η ακτίνα του σωλήνα και D_a ο συντελεστής αμφιπολικής διάχυσης (ambipolar diffusion coefficient).

Αμφιπολική διάχυση είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει στο πλάσμα, κατά το οποίο τα ηλεκτρόνια και τα βαρύτερα θετικά ιόντα έχουν την ίδια ταχύτητα, ενώ λόγω διαφορετικού βάρους τα ηλεκτρόνια θα έπρεπε να είναι πιο γρήγορα. Η εξίσωση των ταχυτήτων συμβαίνει διότι τα διαχεόμενα φορτισμένα σωματίδια παράγουν ένα ηλεκτρικό πεδίο που επιταχύνει τα ιόντα αλλά επιβραδύνει τα ηλεκτρόνια μέχρι να εξισωθούν οι ταχύτητές τους. Όταν συμβεί αυτό, ο ρυθμός που τα φορτία διαπερνούν τη μονάδα επιφανείας (συμβολίζεται Γ), είναι ανάλογος της μεταβολής της συγκέντρωσής τους (concentration gradient: dn/dx) και ισχύει

$$[9]: \Gamma = -D_a \frac{d_n}{d_x} \text{ όπου } D_a \text{ είναι ο συντελεστής αναλογίας.}$$

Στο εναλλασσόμενο ρεύμα η ισορροπία δεν μπορεί να ισχύει διότι μεταβάλλεται συνέχεια η ένταση του ρεύματος, με αποτέλεσμα την μεταβολή των πυκνοτήτων των φορτίων και η συχνότητα των ιονισμών εξαρτάται και από τον χρόνο: $v_i = v_i(T_e, t)$. Για να ληφθεί υπ' όψιν η μεταβολή του ρεύματος προστίθεται ο όρος: $\frac{1}{i} \frac{di}{dt}$ και συνάγεται με καλή προσέγγιση στις χαμηλές συχνότητες η σχέση [1]:

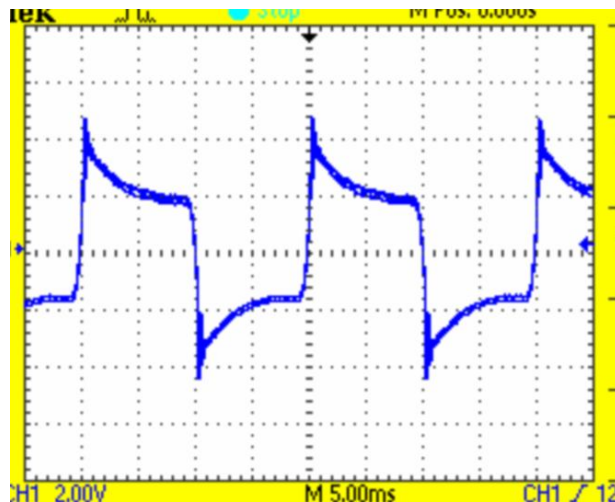
$$v_i(T_e, t) = \left(\frac{2,4}{R} \right)^2 D_a + \frac{1}{i} \frac{di}{dt} \quad (1.6)$$

Βάσει της τελευταίας εξίσωσης (1.6) η κυματομορφή του ρεύματος στον λαμπτήρα έχει τη μορφή μιας σχεδόν ημιτονοειδούς καμπύλης, η οποία τέμνει τον άξονα του χρόνου υπό μια σχετικά μεγάλη γωνία, ενώ σύμφωνα με την Εξ. 1.5 το ρεύμα θα μηδενιζόταν για λίγο χρόνο. Στο σχήμα 1.5 φαίνεται η μορφή που θα έχει η τάση σύμφωνα με την Εξ. 1.6 και για συχνότητες μέχρι και λίγο πάνω από τα 100 Hz. Όσο η συχνότητα του ρεύματος αυξάνεται, τόσο η καμπύλη της τάσης μοιάζει περισσότερο με την ημιτονοειδή.

Στο συνεχές ρεύμα η ένταση μένει σταθερή, επομένως και η πυκνότητά του, επομένως, η εκκένωση ελέγχεται πλήρως και μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση. Αντιθέτως, σε εκκενώσεις με εναλλασσόμενο ρεύμα η τιμή της έντασής του αλλάζει διαρκώς και οι βέλτιστες συνθήκες δεν είναι δυνατόν να διατηρούνται σταθερές.

Στην περίπτωση που η συχνότητα είναι υψηλή τα ηλεκτρόδια και τα διάφορα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά αλλάζουν πολικότητα, όμως η πυκνότητα του ρεύματος μένει σχεδόν σταθερή. Αυτό οφείλεται στη μικρή διάρκεια της μιας ημιπεριόδου κατά την οποία τα ηλεκτρόνια δεν έχουν το χρόνο να κάνουν τον δικό τους κύκλο. Επειδή η πυκνότητα των ηλεκτρονίων μένει σχεδόν σταθερή, η εκκένωση συμπεριφέρεται, κατά τη διάρκεια της ημιπεριόδου, σαν ωμική αντίσταση με την τάση στα άκρα του λαμπτήρα και το ρεύμα

σχεδόν σε φάση και ταυτόχρονα ημιτονοειδή. Θεωρητικά, στις υψηλές συχνότητες η εκκένωση συμπεριφέρεται σαν να ήταν το ρεύμα συνεχές και με αντίστοιχο ρεύμα την ενεργό τιμή του [8].



Σχήμα 1.5. Κυματομορφή τάσης (100 V/div) λαμπτήρα T8 που οδηγείται από ηλεκτρομαγνητικό ballast σε συχνότητα 50 Hz. Χρόνος: 5 ms/div.

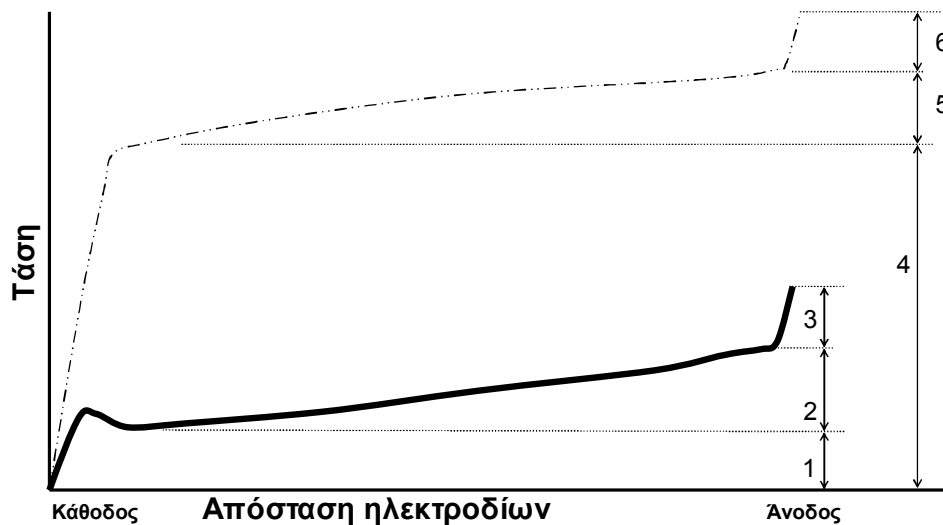
1.3.3. Χαρακτηριστικά έναρξης της εκκένωσης

Σε άλλη παράγραφο σημειώθηκε ότι για συγκεκριμένες συνθήκες της εκκένωσης, εάν αυξηθεί το ρεύμα θα αυξηθεί και η φωτεινή ροή, όμως όχι κατ' ανάγκην και η απόδοση του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι πάντα σωστό να αυξάνεται το ρεύμα για να παράγεται περισσότερο φως, αφού αυξάνεται δυσανάλογα η κατανάλωση. Η αύξηση της φωτεινής ροής του λαμπτήρα πρέπει να συνδυάζεται με σταθερότητα στην απόδοση ή και αύξηση. Έχει διαπιστωθεί ότι για να αυξηθεί η απόδοση θα πρέπει η αύξηση του ρεύματος να συνοδεύεται με αύξηση της ισχύος του λαμπτήρα. Σε αυτή την περίπτωση όμως η ενέργεια που απαιτείται για να κρατηθούν τα ηλεκτρόδια στην βέλτιστη θερμοκρασία θα μειωθεί, άρα και η ποσοστιαία κατανάλωση ενέργειας, πράγμα που έρχεται σε αντίφαση με την αναγκαία αύξηση της ισχύος. Το θέμα είναι πολύπλοκο και σε γενικές γραμμές είναι δύσκολο να υπάρξει υψηλή απόδοση με μεγάλα ρεύματα.

Οι δυνατότητες που υπάρχουν σήμερα για βελτίωση της απόδοσης, με διαφοροποιήσεις στη διαδικασία της λειτουργίας, είναι λίγες. Για συγκεκριμένα μεγέθη σωλήνων έχουν βρεθεί οι βασικές βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας (δηλαδή το μήκος, η διάμετρος, το ρεύμα, η πίεση και η αναλογία στο μίγμα), το ιδανικό ballast που απαιτείται και διάφορες άλλες κατασκευαστικές κυρίως λεπτομέρειες. Σήμερα πιστεύεται ότι οι λαμπτήρες φθορισμού έχουν φτάσει στο μέγιστο της δυνατής απόδοσής τους με την υπάρχουσα τεχνολογία και είναι περί τα 100 lumen/Watt. Αυτό δεν σημαίνει ότι και όλοι οι κυκλοφορούντες λαμπτήρες επιτυγχάνουν αυτή την απόδοση, διότι υπεισέρχεται και ο παράγοντας του κόστους. Για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη απόδοση πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολύ καλά και ακριβά υλικά, ειδικά σε ό,τι αφορά στο ballast, πράγμα που αυξάνει το κόστος.

Η έρευνα επομένως σήμερα δεν στρέφεται τόσο στη τελειοποίηση των συνθηκών λειτουργίας για καλύτερη απόδοση, αλλά σε άλλες περιοχές ενδιαφέροντος του συστήματος. Τέτοιες είναι η ποιότητα του φωτός, οι διαταραχές που προκαλούνται στα γειτονικά ηλεκτρικά κυκλώματα, οι συνθήκες έναρξης της εκκένωσης και άλλα. Όσον αφορά στην έναρξη της εκκένωσης, γίνονται προσπάθειες να μειωθούν οι φθορές που υφίσταται ο λαμπτήρας και συγκεκριμένα τα ηλεκτρόδια. Το ζητούμενο είναι η αύξηση του χρόνου ζωής ενός λαμπτήρα.

Στο σχήμα 1.6 απεικονίζονται οι επί μέρους τάσεις, ως συνάρτηση της απόστασης των ηλεκτροδίων, σε δυο περιπτώσεις: α) με θερμή κάθοδο (συνεχής γραμμή) και β) με ψυχρή κάθοδο (διακεκομμένη γραμμή) [1]. Κάθε εκκένωση έχει συνολική τάση που είναι το άθροισμα των τριών τάσεων στα τρία κύρια τμήματά της: στην κάθοδο (σημεία 1 και 4 αντίστοιχα), στην θετική στήλη (2 και 5) και στην άνοδο (3 και 6). Επειδή θεωρείται ότι οι δυο εκκενώσεις έχουν το ίδιο ρεύμα, ίδια γεωμετρία σωλήνων και ίδια αέρια και πίεση, θα έχουν ίδιες τάσεις στην θετική στήλη και στην άνοδο. Στην ψυχρή κάθοδο η διαφορά δυναμικού είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι στη θερμή κατά την διαφορά των αντίστοιχων τάσεων στην κάθοδο ($V_4 - V_1$). Αυτή θα είναι και η διαφορά στην συνολική τάση των εκκενώσεων.



Σχήμα 1.6. Η τάση στο λαμπτήρα σε σχέση με την απόσταση από την κάθοδο ως την άνοδο.

Στην ψυχρή εκκίνηση (διακεκομμένη γραμμή) η τάση είναι μεγαλύτερη λόγω μεγάλης πτώσης τάσης καθόδου.

Στην πράξη η κάθοδος μένει ελάχιστο χρόνο ψυχρή διότι θερμαίνεται από την πτώση των ιόντων πάνω της. Όταν βέβαια θερμανθεί, τα ιόντα δεν θα προσφέρουν αρκετή θερμότητα σε σχέση με τα προσπίπτοντα ηλεκτρόνια κατά την φάση που το ηλεκτρόδιο είναι άνοδος.

Υπάρχουν δυο βασικά είδη λαμπτήρων φθορισμού όσον αφορά τον τρόπο που γίνεται η έναυση: α) προθέρμανση της καθόδου και μετά εφαρμογή της τάσης και β) εφαρμογή της τάσης σε ψυχρή κάθοδο. Προφανώς όταν επιχειρηθεί να γίνει η εκκένωση με ψυχρή κάθοδο

η τάση θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλότερη απ' ότι όταν έχει θερμανθεί προηγουμένως. Στην δεύτερη περίπτωση η έναυση του λαμπτήρα καθυστερεί διότι μέχρι να γίνει η ανύψωση της θερμοκρασίας απαιτείται ένα χρονικό διάστημα από μερικά δέκατα του δευτερολέπτου μέχρι και ένα δευτερόλεπτο, ενώ στην πρώτη η έναυση είναι άμεση. Στην πράξη εφαρμόζονται για την έναρξη της εκκένωσης και οι δυο τρόποι με πολλές παραλλαγές. Οι διαφορές υπάρχουν για δυο κυρίως λόγους: πρώτος είναι το κόστος κατασκευής και δεύτερος είναι ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος φωτισμού και κυρίως αν γίνονται συχνές εναύσεις του λαμπτήρα ή όχι.

Η τάση έναυσης, δηλαδή η μέγιστη τάση που πρέπει να εφαρμοστεί στον λαμπτήρα για να προκύψει αυτοσυντηρούμενη εκκένωση, επηρεάζεται και από την περιεκτικότητα του αερίου μίγματος στα διάφορα αέρια καθώς επίσης και από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Στην έναυση ένας άλλος παράγοντας που έχει σημασία είναι η τοποθέτηση του λαμπτήρα, δηλαδή αν ο είναι σε οριζόντια θέση ή όχι. Η στήριξή του επηρεάζει τη θέση της σταγόνας υδραργύρου σ' αυτόν και την ευκολία ή δυσκολία στην εξάτμισή της.

1.3.4. Θερμή και ψυχρή έναυση

Έχει αναφερθεί ότι για την έναυση ενός λαμπτήρα φθορισμού υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι: με θέρμανση των ηλεκτροδίων και χωρίς θέρμανση. Τη διαδικασία της έναυσης αναλαμβάνει να εκτελέσει το ballast, που εκτός από την τάση που θα εφαρμόσει στον λαμπτήρα θα ελέγχει και το ρεύμα ώστε να βρίσκεται στην επιθυμητή τιμή. Στην ελληνική βιβλιογραφία δεν υπάρχει για το ballast κάποιος γενικά αποδεκτός όρος για την ονομασία του. Τα ηλεκτρομαγνητικά ballast συχνά αναφέρονται ως στραγγαλιστικά πηνία εξ αιτίας του εξαρτήματος που φέρουν. Τα ηλεκτρονικά ballast αναφέρονται γενικώς ως ηλεκτρονικές διατάξεις έναυσης λαμπτήρων εκκενώσεως, αλλά και απλά ως μετασχηματιστές.

Εάν η κάθοδος προθερμαίνεται, το ballast είναι εκείνο που θα δώσει το αναγκαίο ρεύμα για τη θέρμανση. Ανάλογα με τον τρόπο εκκίνησης υπάρχουν τριών ειδών ballast:

- ✓ Έναυση με προγραμματισμό (programmed start)
- ✓ Γρήγορη έναυση (rapid start)
- ✓ Άμεση έναυση (instant start)

Στην περίπτωση που γίνεται γρήγορη έναυση, το ballast περιλαμβάνει και μηχανισμό ο οποίος λειτουργεί έτσι ώστε το ballast να δίνει ρεύμα στα ηλεκτρόδια για να προθερμαίνονται και όταν θερμανθούν δημιουργείται η εκκένωση.

Τα συστήματα με προγραμματισμένη έναυση έχουν ιδιαίτερο ηλεκτρικό κύκλωμα που παρέχει ρεύμα για τη θέρμανση των ηλεκτροδίων για προκαθορισμένο χρόνο. Η προθέρμανση είναι ο αναγκαία για το λαμπτήρα και ο χρόνος της κυμαίνεται από 0,5 έως 1,5 δευτερόλεπτα. Ο στόχος είναι να ανέβει η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων τουλάχιστον στους 700 °C, οπότε και θα προκύπτει η ελάχιστη τάση εκκένωσης με τις λιγότερες φθορές στα

ηλεκτρόδια. Όταν ο λαμπτήρας τεθεί σε λειτουργία υπάρχει η δυνατότητα σε κάποια από αυτά τα συστήματα να διακόπτουν (σύστημα cut-off), για λόγους οικονομίας, την παροχή του ρεύματος θέρμανσης ενώ άλλα την συνεχίζουν. Το σύστημα αυτό είναι το πιο εμπορικό σήμερα, παρ' ότι κοστίζει περισσότερο, διότι δίνει λαμπτήρες με αυξημένο χρόνο ζωής.

Το σύστημα με την άμεση έναυση δίνει κατ' ευθείαν μια τάση μεγέθους αρκετών εκατοντάδων Volt που είναι ικανή να προκαλέσει την εκκένωση. Φυσικά και εδώ, αλλά και στα υπόλοιπα συστήματα, η τάση της εκκένωσης δεν διατηρείται κατά τη λειτουργία, αλλά ελαττώνεται στην τιμή που είναι υπολογισμένο να εργάζεται το σύστημα. Θα αναλυθεί τώρα λίγο περισσότερο η λειτουργία των διαφόρων ballast για να γίνουν κατανοητά τα φαινόμενα στο σύστημα των λαμπτήρων φθορισμού.

1.3.5. Λειτουργίες που εκτελούν τα ballast

Ο λαμπτήρας φθορισμού, όπως και όλοι οι λαμπτήρες εκκένωσης αερίων, δεν μπορούν να λειτουργήσουν απ' ευθείας με το ρεύμα του δικτύου, αλλά χρειάζονται ένα συνεχή έλεγχο στη λειτουργία τους, ο οποίος επιτυγχάνεται ασφαλώς με το ballast. Οι βασικές λειτουργίες που εκτελεί ένα ballast είναι οι εξής:

- ✓ Περιορίζει και σταθεροποιεί το ρεύμα που αναπτύσσεται λόγω της αρνητικής αντίστασης που παρουσιάζει ο λαμπτήρας.
- ✓ Εξασφαλίζει την διατήρηση της εκκένωσης παρ' ότι σε κάθε περίοδο δυο φορές η τάση και το ρεύμα μηδενίζονται.
- ✓ Παρέχει την απαιτούμενη μεγάλη τάση για την έναυση του λαμπτήρα.

Τις λειτουργίες αυτές εκτελούσαν τα ballast από τότε που παρουσιάστηκαν οι λαμπτήρες φθορισμού. Σήμερα όμως οι απαιτήσεις είναι αυστηρές και είναι αναγκαία η χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας για μια σειρά από λειτουργίες που και αυξημένη απόδοση παρέχουν στο σύστημα φωτισμού και συντελούν στο να επηρεάζονται ελάχιστα κοντινές ηλεκτρονικές συσκευές και το ίδιο το δίκτυο από εισαγωγή αρμονικών [10]. Γι' αυτό επιπροσθέτως τα ballast σήμερα εκτελούν τις παρακάτω λειτουργίες:

- ✓ Παρέχουν το απαραίτητο ρεύμα για την θέρμανση των ηλεκτροδίων κατά την έναυση με σκοπό την αύξηση της ζωής των λαμπτήρων.
- ✓ Εξασφαλίζουν ένα υψηλό συντελεστή ισχύος.
- ✓ Περιορίζουν την εισαγωγή αρμονικών που προκαλούν διαταραχές στο δίκτυο.
- ✓ Ελαττώνουν ή εξουδετερώνουν τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που πιθανώς θα είχε το σύστημα φωτισμού προς άλλες συσκευές.
- ✓ Περιορίζουν τα ρεύματα βραχυκυκλώματος (short – circuit current) στα ηλεκτρόδια κατά την έναυση για να μην φθείρονται.
- ✓ Θέτουν το κύκλωμα εκτός λειτουργίας όταν δεν επιτυγχάνεται η έναυση για οποιοδήποτε λόγο.

- ✓ Διατηρούν την τάση, το ρεύμα και την ισχύ σε προκαθορισμένες τιμές παρά τις μεταβολές στο δίκτυο.

Υπάρχουν και κάποια άλλα χαρακτηριστικά τα οποία φροντίζουν οι κατασκευαστές να είναι σε υψηλό επίπεδο, ώστε να είναι πιο εμπορικές οι συσκευές τους. Τέτοια είναι: το μέγεθος, κάποιος πιθανός θόρυβος, μεγάλος χρόνος ζωής, μικρή κατανάλωση ενέργειας κλπ. Πολλά ballast θέτουν το κύκλωμα εκτός λειτουργίας όταν παρά το ότι έχει γίνει η έναυση, η θερμοκρασία σε ένα ηλεκτρόδιο είναι αυξημένη. Αυτό γίνεται για προστασία από υπερθέρμανση και ονομάζεται τεχνολογία EOLL (End Of Lamp Life). Όλα αυτά τα πρωτεύοντα αλλά και σχεδόν όλα τα δευτερεύοντα χαρακτηριστικά είναι δυνατόν να βρίσκονται στις δυο μεγάλες κατηγορίες ballast που υπάρχουν: τα ηλεκτρομαγνητικά και τα ηλεκτρονικά.

1.3.6. Γήρανση των ballast

Ο υπολογισμός της διάρκειας ζωής του ballast είναι ένα δύσκολο έργο. Ο λόγος είναι ότι εξαρτάται από την ποιότητα, και επομένως τη συνολική διάρκεια ζωής, όλων των εξαρτημάτων που το απαρτίζουν. Επιπροσθέτως επιδρούν στη ζωή του μεγέθη όπως η επιβαλλόμενη τάση, η ένταση του ρεύματος και η θερμοκρασία. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η ποιότητα των συγκολλήσεων, οι οποίες, αναλόγως διαφόρων συνθηκών όπως η θερμοκρασία, αντέχουν μέχρι ενός περιορισμένου αριθμού εναύσεων.

Οι κατασκευάστριες εταιρίες πριν προωθήσουν τα ballast στην αγορά τα ελέγχουν θέτοντάς τα σε λειτουργία για περίπου 100 ώρες (burn-in period), αποσύροντας αυτά που δεν λειτουργούν σωστά ή καταστρέφονται. Έχει παρατηρηθεί ότι τα ελαττωματικά εξαρτήματα εμφανίζουν το πρόβλημά τους συνήθως στις πρώτες ώρες λειτουργίας τους. Με αυτή την τακτική μειώνεται η πιθανότητα να αγοράσει ο καταναλωτής ένα ελαττωματικό ballast.

Για τον προσδιορισμό της ζωής των ballast χρησιμοποιείται ο όρος: μέσος χρόνος αστοχίας (mean time between failures) και αναφέρεται στο χρόνο ζωής των επί μέρους εξαρτημάτων του ballast. Ο ρυθμός καταστροφής των ballast (failure rate) ορίζεται αν διαιρεθεί η μονάδα με τον μέσο χρόνο διακοπής και αφορά μια συγκεκριμένη θερμοκρασία η οποία αναγράφεται πάνω στο ballast. Ένας άλλος όρος που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ζωής των ballast είναι ο σταθερός ρυθμός αστοχίας (constant failure rate lifetime) και δείχνει τον αριθμό των ωρών που το 10% μιας μεγάλης ομάδας ballast έχει καταστραφεί. Οι περισσότεροι κατασκευαστές δίνουν για τα ballast ένα σταθερό ρυθμό καταστροφής τις 50000 ώρες, σε θερμοκρασία 65 °C. Ο αριθμός αυτός διπλασιάζεται αν η θερμοκρασία γίνει 55 °C ενώ υποδιπλασιάζεται αν η θερμοκρασία του ballast είναι 75 °C.

Η θερμοκρασία επιδρά στη ζωή των ballast κύρια διότι όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μειώνεται η ζωή των πυκνωτών, ειδικά των καταλυτικών, αλλά και των συγκολλήσεων. Είναι σημαντικό το γεγονός ότι τα υγιή ballast μετά από τη λειτουργία τους σύμφωνα με την ονομαστική τους ζωή, αρχίζουν και καταστρέφονται ομαδικά. Η αιτία είναι ο συγκεκριμένος

χρόνος ζωής των πυκνωτών και των συγκολλήσεων. Ειδικά οι συγκολλήσεις έχουν αντοχή για ένα αριθμό εναύσεων ο οποίος συνήθως είναι 2 500 με 3 000 όταν η θερμοκρασία του ballast κυμαίνεται μεταξύ -20 και 100 °C, δηλαδή υπάρχει μια θερμοκρασιακή διακύμανση 120 °C. Αν αυτή η διακύμανση $\Delta\Theta$ στην πράξη μειωθεί θα αυξηθεί η ζωή των συγκολλήσεων. Για τον αναμενόμενο αριθμό εναύσεων (N_{ev}) προτείνεται η σχέση:

$$N_{ev} = 2500 \cdot \left(\frac{120}{\Delta\Theta} \right)^2 \quad (1.7)$$

Σύμφωνα με τη σχέση αυτή αν η θερμοκρασιακή διακύμανση είναι μικρή, της τάξης των 20 °C οι εναύσεις θα είναι περίπου 90000, ικανοποιητικός αριθμός.

1.3.7. Ηλεκτρομαγνητικά ballast

Τα πρώτα ballast που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πολύ απλά και χωρίς ιδιαίτερες ποιοτικές απαιτήσεις. Εάν επρόκειτο για χρήση σε συνεχές ρεύμα ήταν μια απλή αντίσταση σε σειρά με το λαμπτήρα. Η εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα του συστήματος ήταν διπλάσια από την απαιτούμενη από το λαμπτήρα. Άρα η αντίσταση κατανάλωνε το 50% της συνολικής ενέργειας. Στο εναλλασσόμενο ρεύμα χρησιμοποιείται ένα πηνίο για να σταθεροποιεί την εκκένωση. Ο πυκνωτής δεν είναι εύχρηστος διότι δίνει στο λαμπτήρα μεγάλες κορυφές ρεύματος σε κάθε ημιπερίοδο και αυτό μειώνει την απόδοση, συν το ότι επιβαρύνει με αρμονικές το δίκτυο [11].

Το ballast που χρησιμοποιήθηκε ευρέως και μέχρι σήμερα, είναι το επαγωγικό, που αποτελείται από ένα πηνίο με τον πυρήνα του. Είναι σε σειρά με το λαμπτήρα και κατά την έναυση του παρέχει την απαιτούμενη τάση. Κατά τη λειτουργία σταθεροποιεί την εκκένωση. Οι σπείρες του και η συνολική του αντίσταση είναι υπολογισμένα ώστε να παρέχουν τις επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας του λαμπτήρα. Κάθε λαμπτήρας εργάζεται σωστά μόνο με το ballast που είναι κατασκευασμένο γι' αυτόν. Όλοι οι λαμπτήρες που χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά ballast εργάζονται στη συχνότητα του δικτύου σε αντίθεση με εκείνους που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ballast που έχουν τη συχνότητα που καθορίζει το ίδιο το ballast.

Για να δοθεί στο λαμπτήρα η μεγάλη τάση κατά την έναυση δεν αρκεί μόνο το ballast. Υπάρχει και ένας πρόσθετος χωριστός μηχανισμός που ονομάζεται εκκινητής (starter). Ο εκκινητής όταν παρέχεται κατά την έναυση ρεύμα στο κύκλωμα, δεν αφήνει να εκτελεσθεί η εκκένωση. Όμως το ρεύμα που περνά από τα ηλεκτρόδια τα θερμαίνει και την κατάλληλη στιγμή, όταν ανοίξει ο εκκινητής, το ρεύμα παύει να διέρχεται απ' αυτά. Τότε το πηνίο, λόγω αυτεπαγωγής, εφαρμόζει μια μεγάλη τάση στα άκρα του λαμπτήρα. Όντας θερμά τα ηλεκτρόδια είναι εύκολο να πραγματοποιήσουν την έναυση.

1.3.8. Ηλεκτρονικά ballast

Τα ηλεκτρονικά ballast είναι πιο πολύπλοκοι μηχανισμοί από τα ηλεκτρομαγνητικά. Το επίπεδο απόδοσης τους, από κάθε άποψη, επιτυγχάνει τις υψηλότερες προδιαγραφές. Βέβαια το κόστος ενός καλού ballast είναι πολλαπλάσιο. Όμως υπάρχουν και φθηνότερες λύσεις. Ένας λαμπτήρας συμπαγής, με πιο απλό ηλεκτρονικό ballast, μπορεί να κοστίζει πολύ λιγότερο. Το κύριο χαρακτηριστικό του ηλεκτρονικού ballast είναι ότι μετατρέπει τη συχνότητα του ρεύματος δικτύου από 50 ή 60 Hz σε μερικές δεκάδες kHz και με αυτή τη συχνότητα τροφοδοτεί τον λαμπτήρα. Μάλιστα τα προηγμένης τεχνολογίας δίνουν άλλη συχνότητα στην έναυση και άλλη στη λειτουργία ώστε να επιτύχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στο λαμπτήρα, λόγω καλύτερης έναυσης.

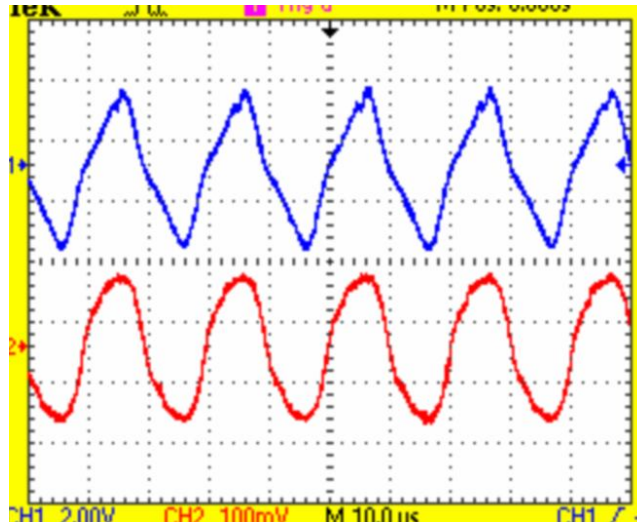
Το ηλεκτρονικό ballast περιλαμβάνει μερικά τμήματα από τα οποία διέρχεται το ρεύμα υφιστάμενο μετατροπές και φιλτραρίσματα, ώστε να φθάσει στον λαμπτήρα ένας περιοδικός παλμός που θα συντηρεί την εκκένωση με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Τα τμήματα ενός τέτοιου ballast χαρακτηρίζουν την τοπολογία του (block diagram).

Τα πλεονεκτήματα των ηλεκτρονικών ballast έναντι των ηλεκτρομαγνητικών μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- ✓ Αυξάνουν την απόδοση του λαμπτήρα μέχρι και 10% και το οφείλουν αποκλειστικά στην υψηλή συχνότητα.
- ✓ Δεν έχει διακύμανση το φως τους (flickering). Στους λαμπτήρες που οδηγούνται από ηλεκτρομαγνητικό ballast, κάθε φορά που μηδενίζεται το ρεύμα, μηδενίζεται και η εκπομπή φωτός. Αυτό γίνεται σε κάθε περίοδο δυο φορές, άρα στη συχνότητα των 50 Hz συμβαίνει 100 φορές το δευτερόλεπτο. Το μάτι το αντιλαμβάνεται ως τρεμούλιασμα στο φως, έστω και λίγο. Στα ηλεκτρονικά ballast το ρεύμα μηδενίζεται αρκετές χιλιάδες φορές το δευτερόλεπτο και το φαινόμενο δεν παρατηρείται. Βέβαια το ρεύμα έχει μια διαμόρφωση των 50 Hz από το δίκτυο και δημιουργείται μια ανεπαίσθητη διακύμανση στο φως, γι αυτό και περιλαμβάνουν ένα φίλτρο για τη μείωση του φαινομένου.
- ✓ Δεν έχουν τον χαρακτηριστικό βόμβο που έχουν τα ηλεκτρομαγνητικά ballast και οφείλεται στα χαλύβδινα φύλλα του πυρήνα τους.
- ✓ Τα ηλεκτρονικά έχουν λιγότερη κατανάλωση. Για παράδειγμα εάν ένα ηλεκτρομαγνητικό καταναλώνει 13 W, το αντίστοιχο ηλεκτρονικό θα απαιτεί μόνο 4,5 W, που σημαίνει συνολική μείωση του συστήματος φωτισμού περί το 20% εάν ο λαμπτήρας είναι ισχύος 30 W.
- ✓ Αυξάνουν τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων, κυρίως διότι ελέγχεται καλύτερα η έναυση, ώστε να προκαλεί λιγότερες φθορές στα ηλεκτρόδια.

- ✓ Δίνουν περισσότερες δυνατότητες για εναλλακτικές λειτουργίες των λαμπτήρων, όπως ρύθμιση της φωτεινής ροής μέσω αισθητήρα ή άλλου τρόπου, διακοπή λειτουργίας σε περίπτωση εξάντλησης ενός λαμπτήρα, κλπ.
- ✓ Για τις ίδιες λειτουργίες είναι πιο ελαφριά και με μικρότερο όγκο.

Ένας λαμπτήρας που οδηγείται από ένα ηλεκτρονικό ballast με συχνότητα μερικών δεκάδων χιλιάδων Hz, έχει συμπεριφορά μιας αντίστασης [12]. Η τάση και το ρεύμα ακολουθούν μια καμπύλη που μοιάζει πολύ στη ημιτονοειδή [13] όπως άλλωστε δείχνει και το παλμογράφημα του σχήματος 1.7. Για το λόγο αυτό στα ηλεκτρονικά ballast δεν χρειάζεται κάθε φορά που μηδενίζεται το ρεύμα να υπάρχει μια σχετικά μεγάλη τάση για την επανέναρξη της εκκένωσης. Αυτό συμβαίνει στα ηλεκτρομαγνητικά ballast όπου το ρεύμα όταν μηδενίζεται καθυστερεί λίγο μέχρι να αρχίσει να αυξάνεται. Επομένως επηρεάζεται και η απόδοση του λαμπτήρα αλλά και η διάρκεια ζωής των ηλεκτροδίων



Σχήμα 1.7. Κυματομορφή τάσης (άνω ίχνος, 100 V/div) και ρεύματος (κάτω ίχνος, 200 mA/div) σε λαμπτήρα οδηγούμενο από ηλεκτρονικό ballast. Χρόνος: 10 μ s/div.

Ουσιαστικά το ηλεκτρονικό ballast είναι ένας μετασχηματιστής AC/AC, αφού μετατρέπει τη χαμηλή συχνότητα του δικτύου σε υψηλή. Αρχικά περιλαμβάνει ένα ανορθωτή AC/DC, που συνήθως αποτελείται από τέσσερις διόδους και ένα bulk capacitor, εάν είναι επιθυμητή μια φθηνή λύση με χαμηλό συντελεστή ισχύος και μεγάλη ολική αρμονική παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion-THD). Τα βελτιωμένα ballast περιλαμβάνουν διορθωτή του συντελεστή ισχύος (Power Factor Correction) [13].

Μετά τον ανορθωτή υπάρχει ένας μετατροπέας συνεχούς σε εναλλασσόμενο DC/AC. Είναι ένα σύνθετο ηλεκτρονικό όργανο που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο με τετραγωνικό παλμό, ο οποίος εφαρμόζεται στα άκρα του λαμπτήρα. Ανάλογα με την ποιότητα του ballast, είναι δυνατόν να περιλαμβάνει μία ή περισσότερες μονάδες ελέγχου διαφόρων λειτουργιών.

Για να θεωρηθεί ότι ένα ballast έχει σωστή κατασκευή ώστε να οδηγεί ένα λαμπτήρα

φθορισμού, πρέπει να ελεγχθούν τα εξής σημεία [14]:

- ✓ μέθοδος έναυσης
- ✓ ballast factor
- ✓ συντελεστής ισχύος και ολική αρμονική παραμόρφωση
- ✓ συμβατότητα λαμπτήρα - ballast
- ✓ ρεύμα εισροής (inrush current)
- ✓ αξιοπιστία του ballast (ballast reliability)

Κατά τη λειτουργία του συστήματος το ballast πρέπει να εξασφαλίζει στο λαμπτήρα τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του, τα οποία είναι τα εξής:

- ✓ Ονομαστική τιμή ρεύματος λειτουργίας
- ✓ Ονομαστική τιμή τάσης λειτουργίας
- ✓ Ονομαστική τιμή ισχύος
- ✓ Χρόνος προθέρμανσης ηλεκτροδίων
- ✓ Τάση έναυσης της εκκένωσης
- ✓ Λόγος προθέρμανσης R_h/R_c (preheat ratio)

Το R_h είναι η αντίσταση του ηλεκτροδίου στο τέλος της προθέρμανσης και ακριβώς πριν την εφαρμογή της τάσης έναυσης για να αρχίσει η εκκένωση. Είναι δηλαδή η αντίσταση κατά τη χρονική στιγμή που ο λαμπτήρας περνά από το στάδιο αίγλης στο στάδιο τόξου. Το R_c είναι η αντίσταση του ψυχρού ηλεκτροδίου πριν αρχίσει η διαδικασία της έναυσης. Επομένως ο λόγος προθέρμανσης είναι ένας δείκτης για τη θερμοκρασία των ηλεκτροδίων κατά την έναυση.

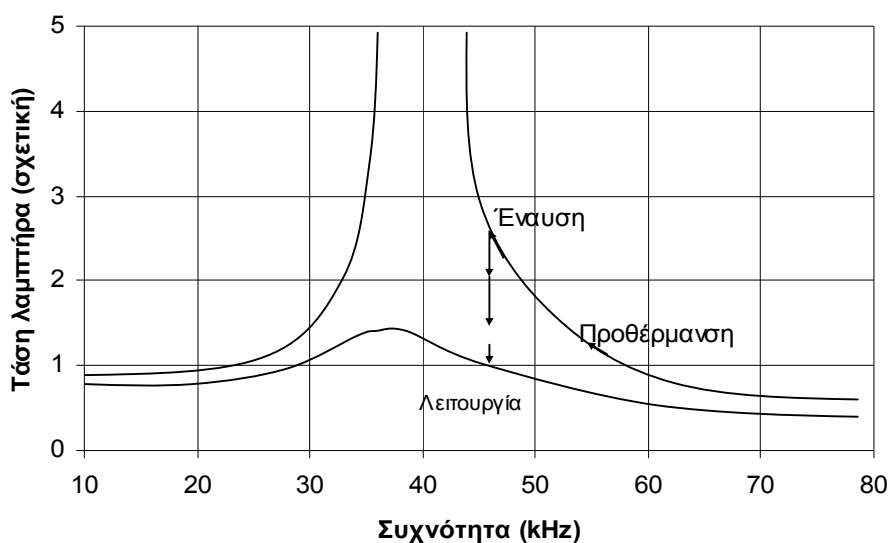
Ο λόγος R_h/R_c οφείλει να βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων, εφόσον και η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων κατά την έναυση πρέπει να είναι σε γενικές γραμμές από 700 °C μέχρι 1000 °C. Το ηλεκτρονικό ballast ελέγχοντας τις τιμές χρόνου, ρεύματος και την τάση προθέρμανσης, καθορίζει το κλάσμα R_h/R_c . Στην πράξη ο λόγος προθέρμανσης εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά του λαμπτήρα. Η σπουδαιότητα αυτού του κλάσματος είναι μεγάλη, γιατί έχει σχέση με τη γήρανση του λαμπτήρα. Γενικά η τιμή του πρέπει να είναι μεταξύ 4 και 6,5, αλλά ακόμη δεν έχει ερευνηθεί σε βάθος το θέμα για να βρεθεί η βέλτιστη τιμή, ώστε βάσει αυτής να κατασκευάζονται τα ballast.

1.3.9. Εκκίνηση και λειτουργία με προγραμματισμένο ballast

Το ballast περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο, εκτός των άλλων, ελέγχει την συχνότητα που τροφοδοτείται ο λαμπτήρας. Η συχνότητα λειτουργίας είναι συνήθως αρκετά μικρότερη από τη συχνότητα που γίνεται η έναυση, (κατά 20% ή περισσότερο) για λόγους προστασίας των ηλεκτροδίων. Επίσης η μονάδα αυτή πρέπει να δώσει αυτομάτως την τάση εκκένωσης με συγκεκριμένη τιμή σε μια προκαθορισμένη χρονική στιγμή. Αρχικά τα ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται με μια μικρή τάση, με ένα μικρό ρεύμα και με μεγάλη

συχνότητα για χρονικό διάστημα από μισό δευτερόλεπτο έως δυο. Ο χρόνος αυτός είναι υπολογισμένος ώστε να φθάσουν τα ηλεκτρόδια στην επιθυμητή θερμοκρασία θερμοιονικής εκπομπής για να γίνει η εκκένωση.

Μόλις ολοκληρωθεί η θέρμανση των ηλεκτροδίων, η συχνότητα ελαττώνεται μέχρι τη συχνότητα συντονισμού του συστήματος και η τάση του λαμπτήρα αυξάνεται στην τιμή της έναυσης. Η έναυση επιτυγχάνεται και η τάση μειώνεται μέχρι την τάση λειτουργίας, ενώ η συχνότητα μένει σχεδόν ίδια με την συχνότητα στη έναυση. Η έναυση του λαμπτήρα γίνεται άμεσα χωρίς αναλαμπές. Στο σχήμα 1.8 φαίνονται οι αλλαγές στην εφαρμοζόμενη από το ballast συχνότητα αλλά και τάση [13].



Σχήμα 1.8. Διαδικασίες που εκτελεί ένα προγραμματισμένο ballast μέχρι την επίτευξη της εκκένωσης και μεταβολές τάσης και συχνότητας του λαμπτήρα.

1.3.10. Ρύθμιση φωτεινής ροής - dimming

Η ρύθμιση της φωτεινής ροής (dimming) ενός λαμπτήρα είναι πολύ σημαντική για την οικονομία. Με τη μείωση της φωτεινής ροής πρέπει και η διάρκεια ζωής του λαμπτήρα να μην μειώνεται και η ισχύς του συστήματος να ελαττώνεται αντιστοίχως.

Στους λαμπτήρες φθορισμού το dimming διεκπεραιώνεται με μηχανισμό, ο οποίος μέσω του ballast μειώνει το ρεύμα στο λαμπτήρα, με αποτέλεσμα να παράγεται λιγότερο φως. Επειδή η μείωση του ρεύματος αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά της εκκένωσης, για να μην μειωθεί η ζωή του λαμπτήρα, το ballast αναλαμβάνει και πρόσθετες διαδικασίες.

Όταν μειωθεί το ρεύμα στο λαμπτήρα δεν υπάρχει μεγάλη ροή ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων να μειώνεται. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα ισχυρή εκσφενδόνιση με συνέπεια τη φθορά των ηλεκτροδίων. Το αντίδοτο για το φαινόμενο αυτό είναι η παροχή ρεύματος στα ηλεκτρόδια που θα αυξήσει όσο χρειάζεται την θερμοιονική εκπομπή ηλεκτρονίων, αφού θα κρατά την θερμοκρασία τους στα σωστά όρια των 700 °C ως

1000 °C. Επίσης, λόγω της αρνητικής αντίστασης που παρουσιάζει ως γνωστόν ο λαμπτήρας, αφού μειώνεται το ρεύμα, για να διατηρηθεί η εκκένωση, θα πρέπει να αυξηθεί και η τάση στα άκρα του λαμπτήρα.

Για να έχει το σύστημα τη δυνατότητα να ελέγχει την παροχή τάσης στο λαμπτήρα και στα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι εφοδιασμένο το ballast με τους αντίστοιχους ακροδέκτες, όπως φυσικά και ο λαμπτήρας. Άρα ο λαμπτήρας θα έχει δύο ακροδέκτες σε κάθε ηλεκτρόδιο και το ballast θα είναι προγραμματιζόμενου τύπου (programmed start). Βέβαια υπάρχουν και ballast άμεσης έναυσης που πραγματοποιούν dimming, μειώνοντας όμως αρκετά τη ζωή των λαμπτήρων.

Το σύστημα ελέγχου της ρύθμισης της φωτεινής ροής είναι ένα κύκλωμα (control circuit) είτε χαμηλής είτε υψηλής τάσης. Ένα σύστημα με κύκλωμα χαμηλής τάσης περιλαμβάνει ένα φωτοαισθητήρα που ανάλογα με το φωτισμό που δέχεται δίνει εντολή στο ballast να κάνει το σχετικό dimming. Ένα τέτοιο σύστημα συνδέει το ballast με το κύκλωμα ελέγχου, με δύο καλώδια που διαρρέονται από συνεχές ρεύμα (VDC) και η τάση είναι από 0 μέχρι 10 V. Εάν το σύστημα της ρύθμισης είναι υψηλής τάσης τότε μάλλον δουλεύει χειροκίνητα και το κύκλωμα ελέγχου λειτουργεί και ως διακόπτης.

Η μέθοδος με την οποία το ballast επιτυγχάνει το dimming είναι είτε η αναλογική είτε η ψηφιακή.

Η πιο συνήθης αναλογική είναι η 0-10 VDC. Το dimming επιτυγχάνεται με ρύθμιση του πλάτους του ρεύματος του λαμπτήρα και μείωση της ισχύος του. Όσο μειώνεται η ισχύς τόσο αυξάνεται η τάση του λαμπτήρα ώστε να διατηρηθεί η εκκένωση. Εκτός από την μέθοδο 0-10 VDC υπάρχει και η αναλογική μέθοδος με έλεγχο φάσης δύο καλωδίων ή τριών καλωδίων και χωρίς καλώδια, με υπέρυθρες ακτίνες.

Στο ψηφιακό dimming το κύκλωμα ελέγχου αποθηκεύει τις εντολές του ballast, λαμβάνει σήματα ελέγχου και στέλνει στο ballast την κατάσταση του συστήματος. Η πιο γνωστή ψηφιακή μέθοδος είναι το σύστημα DALI (Digital Addressable Lighting Interface) που στην ουσία είναι το επίσημο ευρωπαϊκό πρωτόκολλο που ακολουθούν τα ballast, για να μπορούν να εναλλάσσονται στις εγκαταστάσεις χωρίς πρόβλημα, ανεξάρτητα από τον κατασκευαστή.

Το σύστημα DALI όταν εφαρμόζεται ελέγχει λίγα είτε πολλά ballast, όλα μαζί είτε κατά ομάδες. Συνήθως χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του φωτισμού σε ολόκληρα κτίρια. Πλεονεκτεί έναντι του αναλογικού τρόπου dimming, διότι σε μεγάλες εγκαταστάσεις έχει την ικανότητα ο χρήστης να ελέγχει ακόμα και κάθε ballast χωριστά.

Ο έλεγχος του φωτισμού με dimming και κύκλωμα ελέγχου συνήθως γίνεται με τους κάτωθι τρόπους:

- ✓ Χειροκίνητα, οπότε το κύκλωμα ελέγχου αντικαθιστά τον διακόπτη.
- ✓ Με χρονικό προγραμματισμό της ρύθμισης της φωτεινής ροής.

- ✓ Με φωτοαισθητήρα που εκμεταλλεύεται το φυσικό φωτισμό του χώρου.
- ✓ Με αισθητήρα κίνησης που έχει δύο επίπεδα λειτουργίας: μέγιστο όταν υπάρχουν άτομα στο χώρο και μείωση του φωτισμού όταν περάσει κάποιο διάστημα χωρίς να ανιχνευθεί κίνηση.

Σε γενικές γραμμές, σε περιοχές που φωτίζονται με ηλεκτρικό φως (και δεν λαμβάνεται υπόψη ο φυσικός φωτισμός) οι τρόποι ρύθμισης του φωτισμού είναι τρεις [15]:

- ✓ Με διακόπτη (switch-dimming), όπου μέσω διακόπτου ελέγχονται ένας ή περισσότεροι λαμπτήρες ενός φωτιστικού. Εδώ φυσικά δεν γίνονται αλλαγές στο εσωτερικό των λαμπτήρων.
- ✓ Βηματική ρύθμιση (step-dimming), όπου ρυθμίζεται η ισχύς σε όλους ταυτόχρονα τους λαμπτήρες με προκαθορισμένες τιμές.
- ✓ Συνεχής ρύθμιση (continuous-dimming). Είναι ο προηγούμενος τρόπος αλλά με δυνατότητα αλλαγής της ισχύος συνεχώς.

Η περιοχή ρύθμισης του φωτισμού (dimming range) είναι από το 100% της φωτεινής ροής του λαμπτήρα μέχρι και μόλις το 1%. Τα πολύ χαμηλά ποσοστά (μεγάλη μείωση φωτισμού) συνήθως είναι για αρχιτεκτονικά εφέ ή για οπτικοακουστικές ανάγκες. Πρακτικά σε χώρους που υπάρχουν άνθρωποι και ο φωτισμός ελέγχεται με φωτοαισθητήρα, μείωση κάτω του 20% δεν απαιτείται. Για πολύ χαμηλά επίπεδα dimming το ballast είναι απαραίτητος ηλεκτρονικό. Τα ηλεκτρομαγνητικά επιτυγχάνουν μείωση του φωτισμού μέχρι περίπου 50%.

1.4. Γήρανση λαμπτήρων φθορισμού

1.4.1. Αίτια εξάντλησης των λαμπτήρων

Σύμφωνα με όσα έχουν ήδη εκτεθεί, έχει γίνει φανερό ότι ο σκοπός πλέον των κατασκευαστών και ερευνητών όσον αφορά στους λαμπτήρες, είναι να προσδιορίσουν εκείνα τα χαρακτηριστικά που θα τους δώσουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Έχει γίνει κατανοητό ότι η επιτυχία αυτού του σκοπού δεν μπορεί παρά να συνδέεται με την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά του ballast που οδηγεί το λαμπτήρα. Ασφαλώς οι συντελεστές της αύξησης της ζωής πρέπει να μην μειώνουν άλλα επιθυμητά χαρακτηριστικά του συστήματος. Τέτοια είναι η ποιότητα και σταθερότητα του εκπεμπόμενου φωτός. Ένα άλλο, πολύ σημαντικό σήμερα, είναι η απόδοση του συστήματος, που μετράται σε φωτεινή ροή που δίνει ο λαμπτήρας ανά μονάδα παρεχομένης ηλεκτρικής ισχύος (Lumen/Watt). Και το τελευταίο από τα κύρια είναι επίδραση των αρμονικών στο δίκτυο.

Συνήθως η ζωή του λαμπτήρα φθορισμού φθάνει στο τέλος της όταν υποστεί θραύση ένα από τα δυο ηλεκτρόδια. Το ηλεκτρόδιο θα σπάσει όταν λειώσει από υπερθέρμανση. Επειδή όμως η θερμοκρασία που λειώνει το βολφράμιο από το οποίο αποτελείται το ηλεκτρόδιο, είναι περίπου 3410 °C, αυτό είναι δύσκολο. Συνήθως πρώτα εξαντλείται η επικάλυψη των οξειδίων των αλκαλικών γαιών. Μετά από αυτό για να διατηρηθεί η εκκένωση αυξάνεται

πολύ η θερμοκρασία και το αποτέλεσμα είναι η τήξη του ηλεκτροδίου. Δεν είναι πάντως απαραίτητο να εξαντληθεί όλη η επικάλυψη [16].

Καταστροφή των ηλεκτροδίων είναι δυνατόν να προκληθεί και όταν επέλθει στο σωλήνα έλλειψη υδραργύρου. Αν η ποσότητα του υδραργύρου που τοποθετήθηκε αρχικά στο λαμπτήρα είναι κοντά στην ελάχιστη, ίσως εξαντληθεί πριν φθαρούν εντελώς τα ηλεκτρόδια. Επίσης συχνά ο σωλήνας χάνει τη στεγανότητά του από ράγισμα λόγω εκσφενδόνισης υλικού της καθόδου.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια τάση να μειώνεται η ποσότητα του υδραργύρου στους λαμπτήρες φθορισμού, τόσο για περιβαλλοντικούς λόγους, όσο και για λειτουργικούς. Αυτό όμως ενέχει τον κίνδυνο να μην υπάρχει αρκετή ποσότητα προς το τέλος της ζωής του λαμπτήρα και να καταστραφεί άδοξα. Η ποσότητα του υδραργύρου μειώνεται στο σωλήνα κατά τη λειτουργία, διότι κάποια άτομα εκσφενδονίζονται και προσκολλώνται στα τοιχώματα και άλλα αντιδρούν με το περιεχόμενο οπότε παύουν πλέον να παίζουν το ρόλο τους. Σήμερα ένας λαμπτήρας T12 περιέχει στην αρχή περίπου 11 mg υδραργύρου, ενώ πριν από 20 χρόνια η ποσότητα πλησίαζε τα 50 mg. Λαμπτήρες T8 ή T5 περιέχουν 4 ως 5 mg, όση και οι συμπαγείς.

1.4.2. Παράγοντες που επιδρούν στη ζωή του λαμπτήρα

Η ζωή του λαμπτήρα κατά τη λειτουργία του επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες και παραμέτρους. Παρακάτω αναφέρονται οι πιο σημαντικοί από αυτούς τους παράγοντες [17].

Συχνότητα λειτουργίας

Ένας σημαντικός παράγοντας είναι η συχνότητα λειτουργίας. Κατ' αρχάς επιδρά στη θερμοκρασία των ηλεκτροδίων, άρα και στην ποσότητα της επικάλυψης που εξατμίζεται. Έχει ειπωθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι η θέρμανση των ηλεκτροδίων γίνεται κατά την φάση που λειτουργούν ως άνοδοι. Αν αυξηθεί η συχνότητα, ο χρόνος αυτής της λειτουργίας θα μειωθεί, υπό την έννοια ότι δεν θα έχει το χρόνο να ανέβει αρκετά η θερμοκρασία.

Επιδρά όμως και στην πτώση τάσης καθόδου, αφού την μειώνει. Είναι γνωστό ότι η πτώση τάσης καθόδου αυξάνει την εκσφενδόνιση. Η μείωση της πτώσης τάσης καθόδου γίνεται πάλι εξ αιτίας του λίγου χρόνου που διαρκεί η κάθε ημιπερίοδος. Τα θετικά ιόντα που βρίσκονται μπροστά στην κάθοδο όταν αυτή γίνει άνοδος, για πολύ λίγο, δεν θα έχουν το χρόνο να μετακινηθούν πολύ. Μερικά ηλεκτρόνια επίσης κατά τη φάση της ανόδου θα μετακινηθούν προς το ηλεκτρόδιο, αφού θα έλκονται από την άνοδο, με αποτέλεσμα να μειωθεί αρκετά η πτώση τάσης ανόδου έως και να μηδενιστεί. Ως γνωστόν όμως η μικρή πτώση τάσης ανόδου ελαττώνει τη μετατροπή της ενέργειας των ηλεκτρονίων σε θερμότητα.

Ένα άλλο φαινόμενο στο οποίο επιδρά η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας έχει σχέση με το θερμό σημείο της καθόδου. Το θερμό σημείο (hot spot) της καθόδου κατά τη φάση της ανόδου έλκει τα ηλεκτρόνια περισσότερο από τα υπόλοιπα σημεία του ηλεκτροδίου και

υπερθερμαίνεται τοπικά. Αυτό συμβαίνει γιατί ούτως ή άλλως μπροστά από το θερμό σημείο ήταν συγκεντρωμένα τα πιο πολλά ηλεκτρόνια, οπότε ευκολότερα θα επιστρέψουν. Έτσι γίνεται πιο εύκολη η εκπομπή ηλεκτρονίων από την κάθοδο. Όλα αυτά οδηγούν σε αύξηση της απόδοσης του λαμπτήρα αλλά και σε αύξηση της ζωής του.

Συχνότητα εναύσεων

Καθοριστικό ρόλο στο χρόνο ζωής των λαμπτήρων φθορισμού έχει η συχνότητα εναύσεων, ιδιαίτερα στα ballast άμεσης έναυσης. Αιτία είναι η ένταση της εκσφενδόνισης τη στιγμή που εφαρμόζεται η τάση εκκένωσης, η οποία είναι μεγαλύτερη όταν η έναυση είναι ψυχρή. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται σύστημα έναυσης με προθέρμανση, η συχνότητα εναύσεων είναι ήσσονος σημασίας.

Για το λόγο αυτό συνιστάται η χρήση του πρώτου είδους ballast σε περιπτώσεις που ο λαμπτήρας λειτουργεί αρκετές ώρες συνέχεια, ενώ του δεύτερου στην αντίθετη περίπτωση. Εν πάση περιπτώσει, σε κάθε έναυση μειώνεται η ζωή του λαμπτήρα, αλλά αν το χρησιμοποιούμενο ballast είναι με προθέρμανση, αυτή η μείωση είναι πολύ μικρή.

Θερμοκρασία ηλεκτροδίων

Για την σπουδαιότητα της θερμοκρασίας των ηλεκτροδίων έχουν ήδη ειπωθεί πολλά και έχει γίνει κατανοητό ότι για κάθε σύστημα ballast – λαμπτήρα υπάρχει μια βέλτιστη που θα δώσει τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Προς το τέλος της ζωής του λαμπτήρα η θερμοκρασία ούτως ή άλλως αυξάνεται, γεγονός που οφείλεται στην μείωση της επικάλυψης. Η μείωση αυτή οδηγεί σε αύξηση της πτώσης τάσης καθόδου και σε αντίστοιχη αύξηση του ρεύματος που διαρρέει τα ηλεκτρόδια [18]. Αυτό φυσικά επιταχύνει την καταστροφή του λαμπτήρα.

Ποσότητα υδραργύρου

Η ποσότητα του υδραργύρου επηρεάζει τη ζωή του λαμπτήρα και πρέπει να είναι η ενδεδειγμένη. Αν περιέχει λιγότερη ποσότητα, τότε ο λαμπτήρας αν και αρχικά λειτουργεί σωστά, μετά από μερικές χιλιάδες ώρες λειτουργίας δεν παρέχει την προσδοκώμενη φωτεινή ροή ελλείψει ατόμων υδραργύρου. Τελικά θα καταστραφεί πριν φθάσει στον ονομαστικό χρόνο της ζωής του. Αν περιέχει υπερβολική ποσότητα υδραργύρου, η απόδοσή του είναι μειωμένη εξ αρχής.

Κύκλος λειτουργίας

Αναφέρθηκε στην συχνότητα εναύσεων, της παρούσης παραγράφου, ότι ένας λαμπτήρας με συχνές εναύσεις έχει μειωμένη διάρκεια ζωής. Για το λόγο αυτό, ο υπολογισμός του ονομαστικού χρόνου ζωής των λαμπτήρων προσδιορίζεται βάσει της λειτουργίας τους σε καθορισμένο, από τους οργανισμούς τυποποίησης, κύκλο λειτουργίας.

Γίνονται πειράματα για την εύρεση της επίδραση του κύκλου λειτουργίας στο χρόνο ζωής των λαμπτήρων. Σε αυτά, οι χρόνοι των κύκλων μεταβάλλονται και ανάλογα με την τιμή τους προκύπτουν οι γρήγοροι και οι αργοί κύκλοι. Κατά τους γρήγορους γίνονται συχνές

εναύσεις ενώ κατά τους αργούς συμβαίνει το αντίθετο. Στα πειράματα, χρόνοι λειτουργίας μεγαλύτεροι από τρεις ώρες δεν χρησιμοποιούνται.

Παράγων κορυφής ρεύματος (Current crest factor)

Κατά τη λειτουργία του λαμπτήρα η κυματομορφή του ρεύματος επηρεάζει τη ζωή του και ο παράγων με τον οποίο μετράται η μικρή ή η μεγάλη επίδραση είναι ο παράγων κορυφής ρεύματος (Current Crest Factor-CCF). Ο CCF ορίζεται ως το πηλίκο της τιμής της κορυφής του ρεύματος προς την μέση τιμή του. Ο παράγων αυτός δείχνει την παραμόρφωση της κυματομορφής του ρεύματος και συγκεκριμένα εκείνη που οφείλεται σε υψηλές κορυφές. Κυματομορφές ρεύματος με μεγάλες κορυφές, προκαλούν μεγάλες φθορές στα ηλεκτρόδια, διότι δείχνουν ότι στιγμιαία υπάρχει από το λαμπτήρα απαίτηση για υπερβολικό ρεύμα. Για να γίνει αυτό, αυξάνεται η πτώση τάσης καθόδου, με αποτέλεσμα υπερβολική εκσφενδόνιση (sputtering). Αποδεκτές τιμές αυτού του παράγοντα είναι κάτω από 1,7. Αν και ο περιορισμός ισχύει για όλα τα ballast, ηλεκτρονικά και ηλεκτρομαγνητικά, για τα δεύτερα είναι πιο αυστηρός.

Ρεύμα λειτουργίας λαμπτήρα

Η τιμή του ρεύματος της εκκένωσης στην ουσία καθορίζει τον αριθμό των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο. Επομένως επηρεάζουν και τη θερμοκρασία της, που θα πρέπει να είναι όσο γίνεται πιο κοντά στην συνιστώμενη από τον κατασκευαστή. Κάθε απόκλιση από αυτήν μειώνει τη ζωή του λαμπτήρα αφού μεταβάλλει την εξάτμιση της επικάλυψης του ηλεκτροδίου και την εκσφενδόνιση.

Dimming

Το dimming γίνεται για λόγους οικονομίας, αλλά πρέπει να λαμβάνονται όλα τα αναγκαία μέτρα ώστε να μην μειώνεται η ζωή του λαμπτήρα, γιατί το αποτέλεσμα θα είναι αντίθετο από το επιθυμητό. Συνήθως το dimming επιτυγχάνεται με μείωση του ρεύματος της εκκένωσης και ταυτόχρονη θέρμανση των ηλεκτροδίων ώστε να μην μειωθεί η θερμοκρασία τους κάτω από τα επιτρεπτά όρια. Δίνεται σημασία επίσης στην επανέναρξη της εκκένωσης, η οποία όταν γίνεται στο επίπεδο του dimming, προϋποθέτει πρόσθετη προθέρμανση των ηλεκτροδίων από το ballast. Εάν δεν γίνεται προθέρμανση, η μείωση του χρόνου ζωής του λαμπτήρα είναι δραματική [19].

Πτώση τάσης καθόδου

Ακριβώς μπροστά από την κάθοδο, η συγκέντρωση φορτίων κατά την λειτουργία δημιουργεί την πτώση τάσης καθόδου. Είναι γνωστό ότι όταν είναι σχετικά μεγάλη αυξάνεται η εκσφενδόνιση (sputtering). Όταν όμως η πτώση τάσης καθόδου είναι μικρή, εμφανίζεται υπερβολική εξάτμιση. Άρα ο ρόλος της πτώσης τάσης καθόδου στη ζωή του λαμπτήρα είναι σπουδαίος. Αναλόγως του συγκεκριμένου τύπου λαμπτήρα, η τιμή της ποικίλει αλλά πρέπει να βρίσκεται πλησίον των 12 V. Το θέμα δεν έχει ακόμα ερευνηθεί δεόντως.

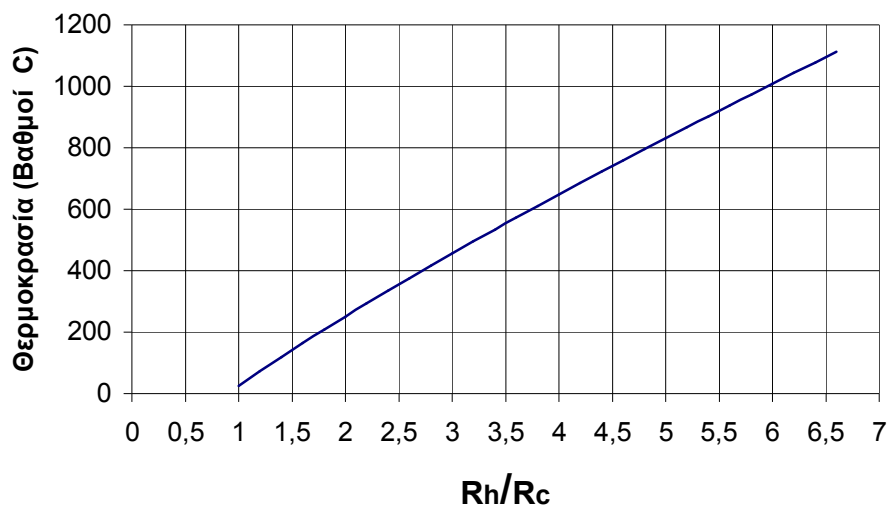
Πρόσθετη τάση προθέρμανσης ηλεκτροδίων

Η προθέρμανση των ηλεκτροδίων, στα συστήματα με ηλεκτρονικό ballast, γίνεται με εφαρμογή μιας μικρής τάσης σε ένα χωριστό κύκλωμα των ηλεκτροδίων. Ένας από τους παράγοντες που καθορίζουν την ποσότητα της θερμότητας που αποδίδεται στα ηλεκτρόδια είναι ο λόγος προθέρμανσης. Ο παράγοντας αυτός ρυθμίζεται ουσιαστικά με το χρόνο της προθέρμανσης και με την τιμή της πρόσθετης τάσης προθέρμανσης των ηλεκτροδίων.

Ο λόγος R_h/R_c ουσιαστικά προσδιορίζει τη θερμοκρασία των ηλεκτροδίων και η σχέση μετατροπής είναι:

$$T_h = T_c \cdot \left(\frac{R_h}{R_c} \right)^{0,814} \quad (1.8)$$

Εάν θεωρηθεί ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι: $T_c=298\text{K}$ ($25\text{ }^\circ\text{C}$), στο σχήμα 1.9 φαίνεται ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του θερμού ηλεκτροδίου T_h βάσει αυτής της σχέσης. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η σχέση είναι σχεδόν γραμμική.



Σχήμα 1.9. Θερμοκρασία ηλεκτροδίου ως συνάρτηση του λόγου R_h/R_c .

Χρόνος προθέρμανσης ηλεκτροδίων

Σύμφωνα με τα αναφερθέντα ακριβώς πριν, φαίνεται η επίδραση του χρόνου της προθέρμανσης, που είναι προκαθορισμένη από το χρησιμοποιούμενο ballast και γι' αυτό πρέπει, το ballast, να είναι κατάλληλο για τον λαμπτήρα με τον οποίο συνεργάζεται.

Συντελεστής Ballast (Ballast factor - BF)

Ο συντελεστής ballast είναι ένα μέγεθος που αφορά το σύστημα ballast-λαμπτήρα και δείχνει την ικανότητα του ballast να παράγει φως με ένα συγκεκριμένο λαμπτήρα. Είναι το κλάσμα της φωτεινής ροής του συστήματος προς τη φωτεινή ροή του ίδιου λαμπτήρα με ένα πρότυπο

ballast. Εννοείται ότι στις δυο περιπτώσεις τα συστήματα εργάζονται υπό τις ίδιες συνθήκες δικτύου και περιβάλλοντος. Συνήθως ο BF είναι μικρότερος από τη μονάδα. Όταν το υπό εξέταση ballast έχει άριστα χαρακτηριστικά (ποιοτικώς καλύτερο από το πρότυπο ballast), ο BF είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα.

Ρεύμα αίγλης (glow current)

Ρεύμα αίγλης είναι το ρεύμα που αναπτύσσεται μεταξύ των ηλεκτροδίων κατά τη διάρκεια της προθέρμανσης. Είναι σημαντικό να έχει χαμηλή τιμή, διότι μεγάλο ρεύμα αίγλης προκαλεί εκσφενδόνιση (sputtering). Αυτό συμβαίνει διότι ως γνωστόν όταν το ρεύμα μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι μικρό, η εκκένωση που δημιουργείται έχει την τάση να το αυξήσει. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της πτώσης τάσης καθόδου, επομένως και της εκσφενδόνισης. Τα προγραμματιζόμενα ballast (programmed start), είτε μηδενίζουν το ρεύμα αίγλης, είτε το μειώνουν δραστικά και αυτό αυξάνει τη ζωή του λαμπτήρα.

Θερμοκρασία περιβάλλοντος

Είναι γνωστό ότι οι λαμπτήρες φθορισμού έχουν μια βέλτιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, στην οποία έχουν τη μέγιστη απόδοση. Αν το περιβάλλον είναι πολύ θερμό ή πολύ ψυχρό, αλλάζει η πίεση του υδραργύρου και επομένως μεταβάλλεται η ποσότητα που βρίσκεται υπό μορφή αερίου. Το αποτέλεσμα είναι να αλλάζει το ρεύμα και η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Όλα αυτά επιδρούν στην τιμή της πτώσης τάσης καθόδου, μετακινώντας την από την σωστή τιμή, με συνέπεια τη μείωση της ζωής του λαμπτήρα. Ιδιαίτερα δυσμενείς είναι οι χαμηλές θερμοκρασίες. Σε ψυχρό περιβάλλον δεν εξατμίζεται επαρκής ποσότητα υδραργύρου, με αποτέλεσμα να γίνονται συνεχείς προσπάθειες έναυσης με συνέπεια τη φθορά των ηλεκτροδίων. Περισσότερα έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 1.1.4.

Διαφορά ονομαστικών τιμών από τις πραγματικές

Τα ballast πρέπει να τροφοδοτούν το λαμπτήρα με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που απαιτεί ο κατασκευαστής, ώστε ο λαμπτήρας να αποδώσει τα μέγιστα. Θεωρητικά οι λαμπτήρες πρέπει να έχουν τις ίδιες διαστάσεις και χαρακτηριστικά ώστε να υπάρχει εναλλαξιμότητα. Αυτό δεν είναι πάντα εφικτό στα χαρακτηριστικά, αφού στην πράξη υπάρχουν συχνά μικρές διαφορές. Το ίδιο συμβαίνει και με τα ballast. Έχει παρατηρηθεί ballast και λαμπτήρας του ίδιου κατασκευαστή, να μην έχουν τις τιμές των χαρακτηριστικών που αναγράφονται. Τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να συμβαδίζουν σε λαμπτήρα και σε ballast είναι η συχνότητα, η τάση, η ισχύς και το ρεύμα λειτουργίας. Βέβαια αυτά είναι αλληλένδετα και η συχνότητα που επιβάλλει το ballast καθορίζει και τα άλλα τρία.

Εν ολίγοις, σχεδόν τα πάντα που σχετίζονται με το σύστημα ballast – λαμπτήρας επιδρούν στη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα. Γι' αυτό πρέπει να επιλέγονται σωστά αυτά τα δυο εξαρτήματα και συγκεκριμένα το ballast να έχει τα χαρακτηριστικά που απαιτεί ο λαμπτήρας.

1.4.3. Αρχές επί των χαρακτηριστικών έναυσης και λειτουργίας των λαμπτήρων και των ballast

Με στόχο την καλύτερη απόδοση (lm/W) των συστημάτων φωτισμού και την ελαχιστοποίηση των ηλεκτρικών παρεμβολών (αρμονικές - συντελεστής ισχύος) στο δίκτυο, οι εθνικοί και διεθνείς οργανισμοί τυποποίησης και ελέγχου, έχουν θέσει κάποιους περιορισμούς στα χαρακτηριστικά των λαμπτήρων κατά την έναυση και τη λειτουργία τους. Οι πιο γνωστοί και έγκυροι οργανισμοί είναι:

- ✓ IESNA Illuminating Engineering Society of North America
- ✓ ANSI American National Standards Institute
- ✓ CIE Commission Internationale de l'Éclairage
- ✓ IEC International Electrotechnical Commission
- ✓ CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization

Στην Ευρώπη οι περιορισμοί τίθενται από τα πρότυπα: EN - European Norm. Τα κράτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι υποχρεωμένα να ακολουθούν τα πρότυπα αυτά. Έτσι και στην Ελλάδα, ο Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ), για ό,τι έχει σχέση με συστήματα λαμπτήρων φθορισμού ακολουθεί τα πρότυπα της Ευρωπαϊκής Ένωσης με χαρακτηριστική ονομασία: CEI – IEC-αριθμός-έτος ή EN-αριθμός-έτος.

Οι περιορισμοί οι οποίοι τίθενται για τα χαρακτηριστικά των συστημάτων φωτισμού είναι λεπτομερείς και πάντα αφορούν τιμές συγκεκριμένου συστήματος ballast – λαμπτήρα, αφού ο σκοπός είναι η καλύτερη συνεργασία τους. Αυτό σημαίνει ότι σε πολλά χαρακτηριστικά οι τιμές είναι διαφορετικές αφού εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως π.χ. τις διαστάσεις των λαμπτήρων, τον αριθμό των λαμπτήρων που οδηγεί το ballast κλπ. Υπάρχουν όμως και πολλά χαρακτηριστικά για τα οποία οι κατασκευαστές δεν υποχρεώνονται να ακολουθούν κάποιους περιορισμούς. Είναι εκείνα τα οποία δεν έχουν ερευνηθεί πλήρως, ώστε η επιστημονική κοινότητα να έχει πειστεί για τις βέλτιστες τιμές τους.

Οι κυριότεροι περιορισμοί στα συστήματα με rapid start ballast (αλλά και στα υπόλοιπα) που δίνει η IESNA στα πρότυπα LM-9-99 και LM-66-00 [20, 21], αφορούν στα επόμενα χαρακτηριστικά:

A) Έναυση

- ✓ Χρόνος προθέρμανσης (Electrode preheat time): ελάχιστος χρόνος προθέρμανσης είναι τα 500ms, ενώ δεν τίθεται μέγιστο όριο. Σημειώνεται εδώ ότι για τα ballast άμεσης έναυσης τίθεται μέγιστο χρονικό όριο για την έναυση ο χρόνος των 100ms.
- ✓ Ρεύμα αίγλης (Glow current): η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή είναι τα 25mA ενώ φυσικά δεν υπάρχει κάτω όριο.
- ✓ Λόγος προθέρμανσης (Preheat ratio): δεν υπάρχει αυστηρός περιορισμός λόγω έλλειψης έρευνας στο θέμα, αλλά συστήνεται να είναι στην περιοχή μεταξύ 4

και 6,5.

B) Λειτουργία

- ✓ Παράγων κορυφής ρεύματος (CCF): αφορά το ρεύμα του λαμπτήρα και ενώ δεν υπάρχει κάτω όριο δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 1,7.
- ✓ Ρεύμα λαμπτήρα: το ρεύμα στο λαμπτήρα δεν πρέπει να υπερβαίνει το 107,5% της ονομαστικής τιμής του (τιμή κατασκευαστή). Δεν υπάρχει περιορισμός για το κάτω όριο.
- ✓ Συντελεστής ballast : ανώτερη τιμή δεν υπάρχει ενώ η κατώτερη είναι 0,85.
- ✓ Ολική αρμονική παραμόρφωση (THD): έχει σχέση με την ποιότητα ισχύος του συστήματος. Ως μέγιστο όριο τίθεται για ένα μεμονωμένο σύστημα φωτισμού η τιμή 32% από την ANSI, ενώ από την IEC το όριο είναι 33,8%. Πολλά ινστιτούτα φωτισμού συστήνουν και αρκετοί κατασκευαστές διορθώνουν τις συσκευές τους ώστε φθάνουν το 5%.

Στην αγορά, τα συστήματα ballast – λαμπτήρα που κυκλοφορούν, ποτέ δεν είναι σίγουρο ότι πληρούν τους περιορισμούς αυτούς. Οι βασικοί λόγοι είναι δύο: πρώτον διότι οι κατασκευαστές των συσκευών αυτών συχνά δεν καταφέρνουν να τηρήσουν τα όρια και δεύτερον διότι το ζευγάρι που επιλέχθηκε δεν είναι το ιδανικό. Επομένως όταν διεξάγεται ένα πείραμα, θα πρέπει τα όρια να τηρούνται, και αυτό να ελέγχεται αυστηρά. Ειδικά σε πειράματα που ερευνάται η γήρανση, η απόδοση, η συμβατότητα μεταξύ εξαρτημάτων κλπ, η τήρηση των συστάσεων των αρχών τυποποίησης είναι αυστηρή.

Στα πειράματα σχετικά με το χρόνο ζωής των λαμπτήρων φθορισμού και τα χαρακτηριστικά τους, μετρώνται πολλές παράμετροι κατά την έναυση. Οι ορισμοί για τους χρόνους που χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις, δίνονται από την ANSI C82.11-93 [22] για τα rapid start ballast. Στο σχήμα 1.10 δίνονται οι χρονικές στιγμές που μετρώνται χαρακτηριστικά, όπως ο χρόνος προθέρμανσης, το ρεύμα αίγλης λαμπτήρα, η τάση προθέρμανσης ηλεκτροδίου, κλπ. Στο σχήμα αυτό οι ορισμοί των χρονικών στιγμών που σημειώνονται είναι οι εξής:

t_0 : χρόνος που κλείνει ο διακόπτης για να ενεργοποιηθεί ο λαμπτήρας.

t_1 : στιγμή που εμφανίζεται η τάση προθέρμανσης.

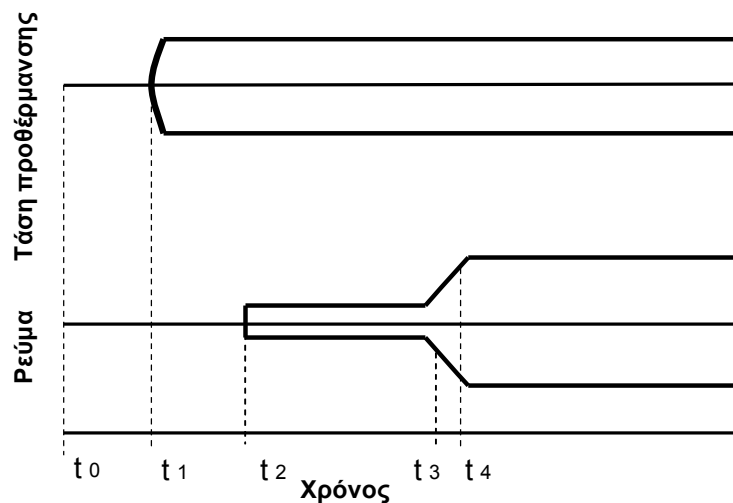
t_2 : στιγμή που εμφανίζεται το ρεύμα αίγλης και βρίσκεται οπουδήποτε μεταξύ t_1 και t_3 .

t_3 : χρόνος κατά τον οποίο το ρεύμα αίγλης φθάνει το 10% του ρεύματος τη στιγμή t_4 , άρα το 9% του ρεύματος λειτουργίας.

t_4 : χρόνος κατά τον οποίο το ρεύμα αίγλης φθάνει το 90% του ρεύματος λειτουργίας (όλες οι τιμές είναι rms).

Χρόνος προθέρμανσης ορίζεται το χρονικό διάστημα μεταξύ t_2 και t_3 .

Ρεύμα αίγλης είναι το ρεύμα εκκένωσης του λαμπτήρα κατά την προθέρμανση.



Σχήμα 1.10. Τάση ηλεκτροδίου και ρεύμα λαμπτήρα. Καθορισμός διαφόρων χαρακτηριστικών χρόνων.

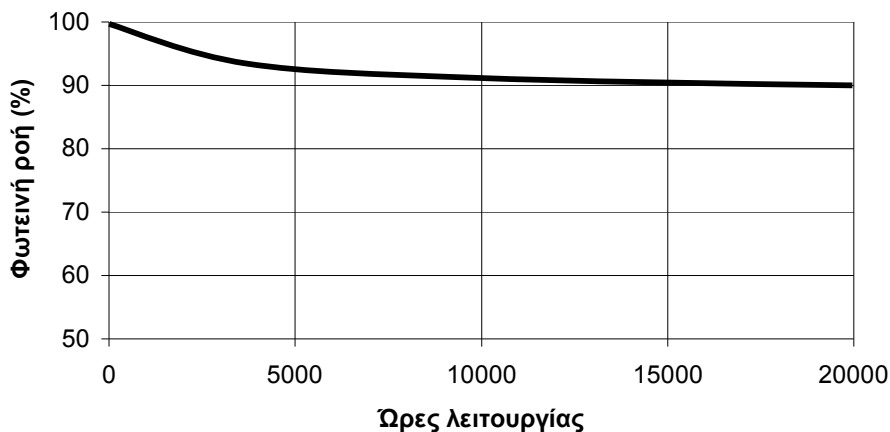
Μία εκτενής ανάλυση των χρόνων και των χρονικών στιγμών που μετρώνται κατά τα πειράματα βρίσκεται στην εργασία των Ji και Davis [23].

1.4.4. Διαγράμματα γήρανσης λαμπτήρων

Ο κατασκευαστής ενός λαμπτήρα δίνει στη συσκευασία τον ονομαστικό χρόνο ζωής του λαμπτήρα. Είναι ο χρόνος, σε ώρες, που αναμένεται ο λαμπτήρας να λειτουργεί σωστά. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι θα ανάβει, έστω και με μειωμένη απόδοση. Είναι γνωστό ότι στους λαμπτήρες φθορισμού με την πάροδο του χρόνου μειώνεται η απόδοσή τους. Σε γενικές γραμμές ακολουθούν την καμπύλη του σχήμα 1.11 [24]. Φυσικά από λαμπτήρα σε λαμπτήρα, ακόμη και του ίδιου τύπου, υπάρχει απόκλιση. Η συγκεκριμένη καμπύλη αφορά λαμπτήρα άριστης ποιότητας, ενώ έχουν παρατηρηθεί τιμές μείωσης της φωτεινής ροής και κάτω του 80%. Η μείωση της φωτεινής ροής οφείλεται σε αλλοίωση των χαρακτηριστικών του λαμπτήρα λόγω μεταβολής των συστατικών του αερίου και των ηλεκτροδίων. Σε πρόσφατους καταλόγους κατασκευαστών [25] δίνεται εκτός από το χρόνο ζωής του λαμπτήρα και καμπύλη της μορφής του σχήματος 1.11. Σε αυτήν φαίνεται η μείωση της φωτεινής ροής των λαμπτήρων σε σχέση με τη γήρανσή τους.

Για να προσδιοριστεί από τον κατασκευαστή ο χρόνος ζωής του λαμπτήρα, ακολουθείται μια πολύπλοκη διαδικασία [26, 27]. Κατ' αρχάς χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός λαμπτήρων (συνήθως 500, ανάλογα με τα πρότυπα που ακολουθούνται), που λειτουργούν σε ένα καλά αεριζόμενο περιβάλλον, σχεδόν σταθερής θερμοκρασίας. Οι λαμπτήρες δεν λειτουργούν συνεχώς, αλλά υπό ένα συγκεκριμένο κύκλο λειτουργίας. Σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα κάθε κύκλος διαρκεί τρεις ώρες εντός των οποίων ο λαμπτήρας είναι δυο ώρες και σαράντα πέντε λεπτά σε λειτουργία και δεκαπέντε λεπτά εκτός λειτουργίας (σβέση) [28]. Κατά τα πρότυπα των Ηνωμένων Πολιτειών ο κύκλος είναι διαφορετικός και ο

λαμπτήρας είναι τρεις ώρες σε λειτουργία και είκοσι λεπτά εκτός. Όταν καταστραφεί το 50% εξ αυτών, τότε μετράται ο συνολικός χρόνος που ήταν σε λειτουργία και αυτός είναι ο ονομαστικός χρόνος ζωής του συγκεκριμένου τύπου λαμπτήρων. Όσο καλύτερη είναι η ποιότητα των λαμπτήρων, τόσο περισσότεροι θα εξαντλούνται κοντά στην περιοχή του ονομαστικού χρόνου ζωής.

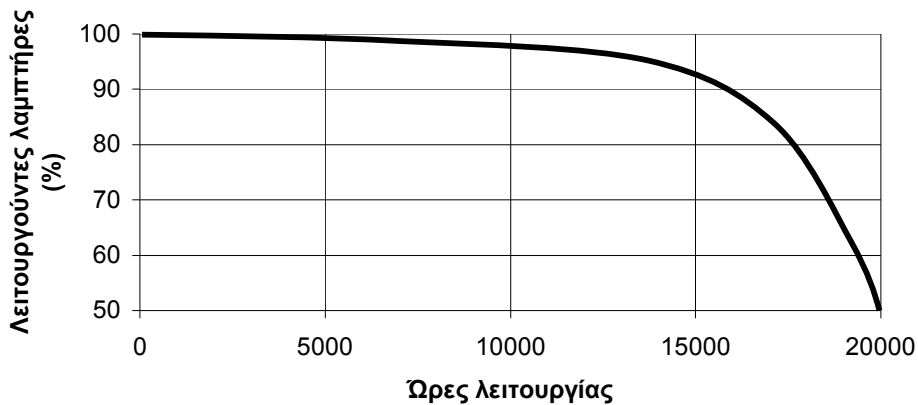


Σχήμα 1.11. Πτώση της φωτεινής ροής με το χρόνο λειτουργίας ενός λαμπτήρα.

Το σχήμα 1.12 [24] είναι ενδεικτικό μιας καμπύλης ζωής λαμπτήρων και φαίνεται ο αριθμός των λαμπτήρων που λειτουργούν, ως ποσοστό του αρχικά συνολικού αριθμού, συναρτήσει του χρόνου που πέρασε. Οι λαμπτήρες του σχήματος έχουν ονομαστικό χρόνο ζωής 20 000 ώρες, αφού ο χρόνος ζωής αντιστοιχεί στο 50% των λαμπτήρων και προέρχονται από ένα συγκεκριμένο κατασκευαστή.

Στα ερευνητικά εργαστήρια δεν γίνονται μετρήσεις για να προσδιοριστεί ο ονομαστικός χρόνος ζωής των λαμπτήρων φθορισμού, λόγω του ότι αυτό γίνεται στα εργοστάσια παραγωγής. Στα πειράματα που διεξάγονται μετρώνται κάποια χαρακτηριστικά των συστημάτων. Όσον αφορά στο χρόνο ζωής των λαμπτήρων, προσδιορίζεται συσχετιζόμενος με την διαφορετικότητα των χαρακτηριστικών του ballast και του λαμπτήρα. Γι αυτό και οι περιορισμοί που αναφέρονται αμέσως μετά δεν τηρούνται αυστηρά. Σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα, ο αριθμός των λαμπτήρων που απαιτούνται σε κάθε ομάδα για να ερευνηθεί ένα χαρακτηριστικό, είναι 20 [28]. Πρακτικά στις εργασίες πολλών ερευνητών ο αριθμός των συστημάτων που λειτουργούν είναι πολύ μικρότερος από τα 20 για οικονομικούς κυρίως λόγους. Η θερμοκρασία του εργαστηρίου πρέπει να είναι 25 ± 1 °C και η μέγιστη σχετική υγρασία 65% [29]. Η τάση που τροφοδοτεί το σύστημα πρέπει να είναι σταθερή και να μην μεταβάλλεται περισσότερο από $\pm 0,5\%$. Πριν την έναρξη των πειραμάτων πρέπει να γίνεται μια γήρανση εκατό ωρών στους λαμπτήρες [30 - 32]. Η γήρανση γίνεται με έναυση των συστημάτων στον καθιερωμένο κύκλο λειτουργίας.

Στα πειράματα που γίνονται στα εργαστήρια, οι καμπύλες χρόνου ζωής δεν είναι τόσο ομαλές όσο στο σχήμα 1.12 και αυτό οφείλεται στον μικρό αριθμό λαμπτήρων που χρησιμοποιείται. Παρ' όλο που ο αριθμός των είκοσι λαμπτήρων μπορεί να θεωρηθεί μικρός, το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό, αν σκεφθεί κάποιος ότι ένα ποιοτικό και επώνυμο σύστημα ηλεκτρονικού rapid start ballast – λαμπτήρα έχει κόστος από πενήντα ευρώ και πάνω.



Σχήμα 1.12. Καμπύλη που δείχνει το ποσοστό των λειτουργούντων λαμπτήρων στη διάρκεια πειράματος για τον καθορισμό της ονομαστικής ζωής τους.

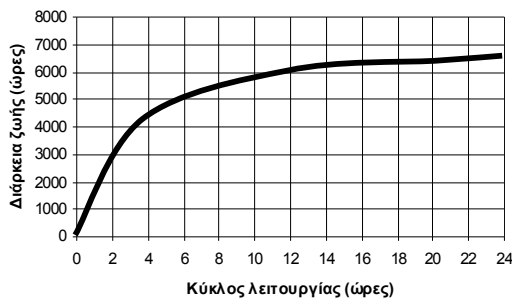
Πολλοί ερευνητές, στα πειράματα προσδιορισμού του χρόνου ζωής, εκτός από τον όρο “median life” (μεσαία ζωή) χρησιμοποιούν τον όρο “mean life” (μέση ζωή). Η μεσαία ζωή προσδιορίζει την ονομαστική τιμή του χρόνου ζωής του λαμπτήρα, ενώ η μέση ζωή καθορίζει τη μέση τιμή του χρόνου ζωής όλων των λαμπτήρων, οι οποίοι ανήκουν στη συγκεκριμένη ομάδα του πειράματος. Αυτά τα νούμερα δεν συμπίπτουν πάντα.

Έχει διαπιστωθεί ότι όσο μικρότερος είναι ο κύκλος λειτουργίας, τόσο μικρότερη είναι και η ζωή του λαμπτήρα (επειδή κυρίως γίνονται περισσότερες εναύσεις στον ίδιο χρόνο). Δεν έχει προσδιοριστεί όμως μια σχέση που να συνδέει αυτά τα δύο μεγέθη με αναμφισβήτητο τρόπο. Άλλωστε για κάθε είδους λαμπτήρα αυτή η σχέση θα είναι διαφορετική, αφού έχει και διαφορετική συμπεριφορά. Πολύ σημαντικό ρόλο φυσικά θα έχει και το χρησιμοποιούμενο ballast. Αυτός είναι και ο λόγος που τα τελευταία χρόνια έχει επικρατήσει ο όρος «σύστημα ballast – λαμπτήρα», αντί των μεμονωμένων λέξεων.

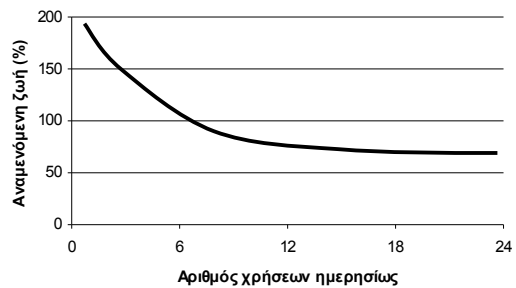
Στο σχήμα 1.13 φαίνεται μια καμπύλη που προέκυψε από πειράματα των Vorlander και Raddin με τους λαμπτήρες φθορισμού που υπήρχαν το 1950 και 1954. Θα γίνει δεκτή μόνο ως ενδεικτική, αφού μέχρι σήμερα δεν υπάρχει κάτι αντίστοιχο, έστω και για ένα συγκεκριμένο σύστημα στη βιβλιογραφία.

Σε μια σχετική αναφορά της General Electric Lighting [33] δίνεται μια ενδιαφέρουσα καμπύλη για τα instant start ballast και την αναμενόμενη ζωή τους, ανάλογα με το πόσες φορές χρησιμοποιούνται κάθε μέρα. Από το διάγραμμα στο σχήμα 1.14 φαίνεται καθαρά ότι

όσο συχνότερα λειτουργούν τόσο πιο μικρή θα είναι η ζωή του λαμπτήρα.



Σχήμα 1.13. Διάρκεια ζωής λαμπτήρων ανάλογα με την διάρκεια του κύκλου λειτουργίας.



Σχήμα 1.14. Αναμενόμενη ζωή λαμπτήρα που οδηγείται με instant start ballast ως ποσοστό της ονομαστικής του ζωής, ανάλογα με τον αριθμό χρήσεων ανά ημέρα.

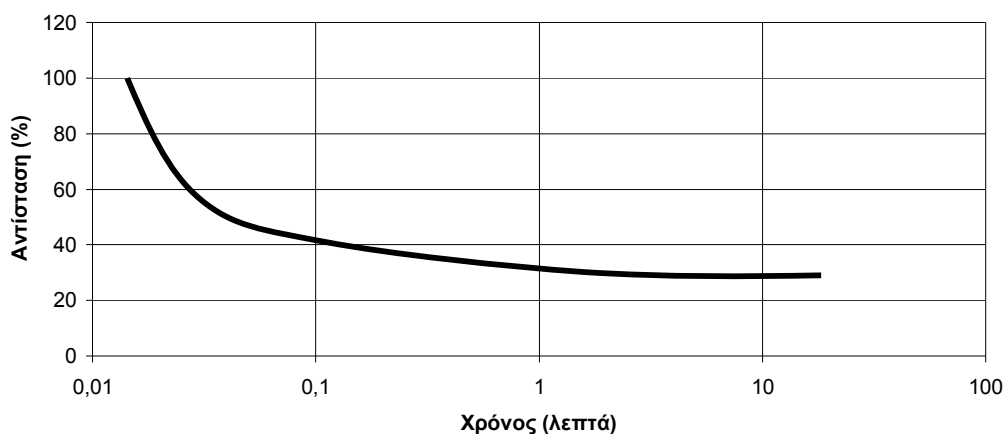
1.4.5. Επίδραση του κύκλου λειτουργίας στη ζωή του λαμπτήρα

Οι ερευνητές, στα πανεπιστημιακά εργαστήρια, κάνουν πειράματα διερευνώντας τα χαρακτηριστικά των λαμπτήρων και πόσο αυτά επηρεάζουν τη ζωή τους. Οι λαμπτήρες λειτουργούν υπό διάφορους κύκλους λειτουργίας. Το διάστημα που ο λαμπτήρας μένει εκτός λειτουργίας στον κύκλο, είναι συνήθως περισσότερο από δέκα λεπτά. Αυτό γίνεται επειδή τόσοσ είναι ο ελάχιστος αποδεκτός χρόνος για να προλάβει το ηλεκτροδίο να ψυχθεί και να θεωρηθεί ότι γίνεται η επόμενη έναυση σχεδόν ανεξάρτητα από την προηγούμενη. Στην πραγματικότητα ο χρόνος που απαιτείται για να ψυχθεί πλήρως, είναι της τάξης της μίας ημέρας, εξαρτώμενος από τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τα ακριβή υλικά της κατασκευής. Όμως αυτό δεν κρίνεται απαραίτητο στα πειράματα λόγω του ότι η περαιτέρω ψύξη δεν βελτιώνει ιδιαίτερα την αξιοπιστία τους.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας των ηλεκτροδίων είναι πολύ δύσκολο έργο και γι' αυτό συνήθως γίνεται με έμμεσο τρόπο. Αντί της θερμοκρασίας μετράται η αντίσταση. Από την μετρούμενη τιμή γίνεται εκτίμηση της θερμοκρασίας (εξίσωση 1.8), διότι ο άμεσος προσδιορισμός της είναι δύσκολος. Αλλά και η σχέση που συνδέει την τιμή της αντίστασης με την αντίστοιχη θερμοκρασία δεν είναι σαφώς προσδιορισμένη, εφόσον εξαρτάται από τα συγκεκριμένα υλικά κατασκευής του ηλεκτροδίου και τη μορφή του. Η μεταβολή της αντίστασης του ηλεκτροδίου ενός λαμπτήρα F32T8, ως ποσοστό της μέγιστης (θερμής) αντίστασης, απεικονίζεται στο σχήμα 1.15 [34].

Από τις πειραματικές έρευνες και τις δημοσιεύσεις, προκύπτει ότι δεν υπάρχει κάποιος συνιστώμενος για μετρήσεις, γρήγορος κύκλος λειτουργίας. Όσοι ερευνητές πειραματίζονται έχουν μια ενδόμυχη ελπίδα ότι θα βρουν τη σχέση που συνδέει το χρόνο ζωής του γρήγορου κύκλου με τον ονομαστικό χρόνο ζωής του λαμπτήρα. Έτσι έχουν γίνει έρευνες με σύντομους κύκλους διαρκείας από δέκα λεπτά μέχρι και δέκα δευτερόλεπτα. Τα

αποτελέσματα που προκύπτουν, τις περισσότερες φορές, είναι αναξιόπιστα. Επί παραδείγματι, στα ίδια συστήματα ο χρόνος ζωής των λαμπτήρων είναι μεγαλύτερος σε ένα γρήγορο κύκλο από τη ζωή σε ένα πιο αργό κύκλο. Μπορεί να φαίνεται περίεργο, όμως υπάρχει εξήγηση. Εάν τα συστήματα έχουν μια μικρή διαφορά στη λειτουργία τους, το αποτέλεσμα ενδέχεται να είναι τελείως διαφορετικό από το αναμενόμενο.



Σχήμα 1.15. Πτώση της αντίστασης ηλεκτροδίου από τη στιγμή που θα σβήσει ο λαμπτήρας. Ουσιαστικά η καμπύλη δείχνει και την πτώση της θερμοκρασίας.

1.4.6. Μέθοδοι προσδιορισμού βέλτιστων τιμών των παραμέτρων της προθέρμανσης των ηλεκτροδίων

Σε γενικές γραμμές οι κατασκευαστές των λαμπτήρων γνωρίζουν το χρόνο που είναι αναγκαίος για την προθέρμανση των ηλεκτροδίων, καθώς επίσης και την τάση και το ρεύμα που πρέπει να τροφοδοτεί τα ηλεκτρόδια. Όμως δε γνωρίζουν τη βέλτιστη τιμή αυτών των μεγεθών. Για τον προσδιορισμό της κατάλληλης τιμής της τάσης ή του ρεύματος έχουν αναπτυχθεί οι κάτωθι τεχνικές [35]:

- ✓ Τροφοδοτείται μια ομάδα λαμπτήρων με ποικίλες εντάσεις ρεύματος ή τάσης στην έναρξη και αναμένονται ώσπου να καταστραφούν, οπότε μετράται απευθείας ο χρόνος ζωής τους και έτσι γίνονται γνωστά τα βέλτιστα μεγέθη. Αυτή η μέθοδος είναι αξιόπιστη αλλά δύσκολα εφαρμόσιμη διότι πρέπει να γίνουν μετρήσεις για κάθε διαφορετικό σύστημα ballast-λαμπτήρα και ο αριθμός τους είναι τεράστιος. Εξάλλου απαιτεί πολύ χρόνο και χώρο για να λειτουργήσουν όλες οι ομάδες συστημάτων που θα μετρηθούν. Ο χρόνος είναι πολύς διότι οι λαμπτήρες φθορισμού έχουν διάρκεια ζωής από 10 000 μέχρι 30000 ώρες.
- ✓ Γίνεται απ' ευθείας μέτρηση της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου υπό διάφορες όπως και πριν συνθήκες, με οπτική πυρομετρία (optical pyrometry). Ως μέθοδος

θεωρείται πολύ ακριβής, επειδή μετράται άμεσα η θερμοκρασία. Όμως, δεν υπάρχει σε όλο το μήκος του ηλεκτροδίου η ίδια θερμοκρασία, λόγω της ύπαρξης του θερμού σημείου (hot spot). Επίσης, για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις πρέπει το πυρόμετρο να έχει οπτική επαφή με το ηλεκτρόδιο χωρίς την παρεμβολή της φθορίζουσας ουσίας. Επομένως οι λαμπτήρες που θα δοκιμαστούν, πρέπει να παραγγελθούν στον κατασκευαστή ώστε να κατασκευάσει διαφανείς λαμπτήρες. Επομένως, και αυτή η μέθοδος εμπεριέχει αρκετές δυσκολίες.

- ✓ Μετράται η ποσότητα του βαρίου των ηλεκτροδίων σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, κατά τα οποία τα ηλεκτρόδια διαρρέονται με διάφορες τιμές ρεύματος. Οι τεχνικές αυτές στηρίζονται στην ακτινοβολία που ούτως ή άλλως εκπέμπει το βάριο και ανιχνεύεται με φασματόμετρο. Και σ' αυτή την περίπτωση οι λαμπτήρες πρέπει να τύχουν ειδικής επεξεργασίας από τον κατασκευαστή, πράγμα δύσκολο. Ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν είναι σίγουρο ότι το βάριο που ανιχνεύεται προέρχεται από εξάτμιση της επικάλυψης ή από εκσφενδόνιση. Άρα δεν μπορεί να προσδιορισθεί αν το πρόβλημα προέρχεται από την υψηλή ή την χαμηλή θερμοκρασία. Τέλος, εκτός από την μείωση του βαρίου στα ηλεκτρόδια, δυσκολία προκαλεί και η επανατοποθέτησή του σε αυτά. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί αύξηση στο έργο ιονισμού και αυτό δεν δύναται να συνυπολογισθεί με τη μέθοδο.
- ✓ Μετράται η πτώση τάσης της καθόδου σε ποικίλες συνθήκες λειτουργίας. Η μέθοδος αυτή είναι έμμεση και έχουν αναπτυχθεί τρεις τρόποι για την πραγματοποίησή της:
 - ✓ Μέτρηση της πτώσης τάσης καθόδου με το Langmuir probe. Απαιτούνται ειδικά κατασκευασμένοι λαμπτήρες.
 - ✓ Μέτρηση με χωρητική σύζευξη. Μια μεταλλική ταινία τυλίγεται στην περιοχή του ηλεκτροδίου και μετράται η τάση ανάμεσα σε αυτήν και στο ηλεκτρόδιο, που είναι η ζητούμενη πτώση τάσης καθόδου. Η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε συμπαγείς λαμπτήρες καθώς επίσης και εκεί που δύναται να υπάρξουν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
 - ✓ Μέτρηση της τάσης του λαμπτήρα. Στη μέθοδο αυτή πρέπει να διατηρείται σταθερή η πίεση του αερίου μέσα στο λαμπτήρα. Εφαρμόζεται σχετικά εύκολα σε συμπαγείς λαμπτήρες, αλλά δύσκολα σε σωληνωτούς.

Κεφάλαιο 2

Φαινόμενα γήρανσης σε λαμπτήρες φθορισμού

2.1. Έρευνες στα συστήματα λαμπτήρων φθορισμού

Υπάρχει μια πληθώρα συγγραμμάτων για θέματα φωτισμού και πιο συγκεκριμένα για τα συστήματα φωτισμού με λαμπτήρες φθορισμού. Ο λόγος είναι ότι τα συστήματα αυτά πλέον έχουν διαδοθεί τα μέγιστα και αποτελούν τον τρόπο φωτισμού που έχει επικρατήσει σε οικίες και καταστήματα. Οι λαμπτήρες πυράκτωσης ήταν μέχρι πρότινος ο επικρατέστερος τρόπος γενικού φωτισμού. Όμως λόγοι εξοικονόμησης ενέργειας και αύξησης της διάρκειας ζωής των συστημάτων φωτισμού, οδήγησαν στην ταχέως επεκτεινόμενη αντικατάστασή των με συστήματα φθορισμού. Τα συστήματα αυτά ενδέχεται να έχουν μεγαλύτερο κόστος αγοράς, αλλά αυτό αντισταθμίζεται από την σαφώς μικρότερη κατανάλωση (για την ίδια φωτεινή ροή) και τον αυξημένο χρόνο που δύνανται να λειτουργούν.

Υπάρχουν άφθονα άρθρα στο αντικείμενο των συστημάτων φθορισμού, όμως δεν υπάρχει ικανός αριθμός βιβλίων που να περιγράφουν με σαφήνεια και σε βάθος τη δομή και τη λειτουργία των συστημάτων. Επομένως για την ενημέρωση πάνω στο θέμα χρησιμοποιήθηκε κυρίως η βιβλιογραφία με βάση την αρθρογραφία στον διεθνή εξειδικευμένο γραπτό και ηλεκτρονικό περιοδικό τύπο. Σημαντική ενημέρωση παρέχει η έκδοση ολιγοσέλιδων ή και μακροσκελών φυλλαδίων ή και βιβλίων διαφόρων εταιριών κατασκευής των συστημάτων. Επί πλέον βοήθεια παρέχουν εκδόσεις διαφόρων ερευνητικών κέντρων και οργανισμών που ενημερώνουν την επιστημονική κοινότητα για τις εξελίξεις σε θέματα φωτισμού. Η γενική πάντως εντύπωση είναι ότι οι κατασκευαστές λαμπτήρων και ballast δεν ενημερώνουν με τις απαραίτητες λεπτομέρειες τους ερευνητές για τα προϊόντα τους.

Όσον αφορά στα θέματα που ενδιαφέρουν την παρούσα διατριβή, εκτός της γενικής βιβλιογραφίας, έχουν βοηθήσει άρθρα ερευνητών που ασχολούνται με τη δομή και λειτουργία των ballast. Το ballast, όπως και ο λαμπτήρας, είναι σημαντικό τμήμα του συστήματος φωτισμού. Όσο καλός και να είναι ένας λαμπτήρας, όταν οδηγείται από ένα μέτριο ballast έχει μειωμένη ζωή ακόμα και κατά 80%. Μπορεί το θέμα και η διαδικασία της παρούσης διατριβής να μην απαιτούσαν την αναλυτική διερεύνηση των εξαρτημάτων των ballast, όμως οι επί μέρους λειτουργίες τους είχαν σημαντική επίδραση στη μελέτη των λαμπτήρων. Γι' αυτό το λόγο έγινε εκτεταμένη έρευνα της τοπολογίας και της λειτουργίας τους.

Η συμπεριφορά και η μοντελοποίηση των ηλεκτροδίων κατά τη λειτουργία των λαμπτήρων ήταν επίσης σημαντική για πληρέστερη πειραματική διερεύνηση. Τα ηλεκτρόδια είναι εκείνα που καθορίζουν στις πιο πολλές περιπτώσεις την εξάντληση του λαμπτήρα. Μάλιστα, μας ενδιαφέρει η συμπεριφορά τους και οι επιδράσεις που δέχονται, ιδιαίτερα κατά την έναυση

του λαμπτήρα, διότι τότε προκαλούνται συνήθως οι μεγαλύτερες φθορές σε αυτά. Έτσι ήταν πολύτιμη σχεδόν κάθε εργασία με αντικείμενο την έρευνα στα ηλεκτρόδια και τα φαινόμενα στο περιβάλλον τους κατά την έναυση και κατά τη λειτουργία. Ερευνήθηκαν παράγοντες όπως η πτώση τάσης καθόδου, η εξάτμιση και ο εκσφενδονισμός της επικάλυψης, η θερμοκρασία, το θερμό σημείο και πολλά άλλα, ώστε να δικαιολογηθεί σε βάθος κάθε καταστροφή ενός λαμπτήρα. Δεν είναι πάντα εύκολο να βρεθεί η αιτία που την προκαλεί.

Επίσης πολύ σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν άρθρα με αντικείμενο τη λειτουργία των λαμπτήρων και τη συμπεριφορά τους, αναλόγως των συνθηκών που επικρατούν κατά την έναυση και κατά τη λειτουργία τους. Τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα και στις μετρήσεις της παρούσης εργασίας ήταν διαφόρων χαρακτηριστικών. Διέφεραν στα ballast που τα οδηγούσαν, στη συχνότητα που εργαζόταν, στον τύπο του λαμπτήρα, στο χρόνο που ήταν σε λειτουργία και σε άλλα. Επομένως, η βιβλιογραφική έρευνα για τη λειτουργία τους έπρεπε να είναι εκτενής. Γι' αυτό το λόγο εδώ παρουσιάζονται έρευνες με θέμα τη συμπεριφορά των λαμπτήρων σε διάφορες συνθήκες καθώς και τα ποικίλα μοντέλα που διαφοροποιούν τις παραμέτρους που πιθανώς επηρεάζουν τη ζωή τους.

Τέλος, η διεθνής αρθρογραφία η σχετική με τη γήρανση των συστημάτων ήταν οδηγός στην οργάνωση και στη διαδικασία μετρήσεων των πειραμάτων που διεξήχθησαν. Δυστυχώς όμως δεν είναι αρκετά μεγάλη, λόγω των αντικειμενικών δυσκολιών που αντιμετωπίζουν τέτοιου είδους πειράματα. Έχουν δημοσιευθεί βέβαια έρευνες με πειράματα γήρανσης σε λιγιστούς πειραματικούς λαμπτήρες, αλλά δεν είναι αξιόπιστα. Υπάρχουν λίγοι ερευνητές σε αυτό το θέμα, αφού μια τέτοιου είδους έρευνα απαιτεί ένα μεγάλο πλήθος συστημάτων, τα οποία θα λειτουργούν υπό ποικίλες συνθήκες, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα που λαμβάνουν υπ' όψιν πολλούς παράγοντες.

2.2. Μελέτες ηλεκτρικών εκκενώσεων

Η λειτουργία των λαμπτήρων φθορισμού στηρίζεται στην ηλεκτρική εκκένωση σε χαμηλή πίεση και από χρόνια υπάρχει άφθονη βιβλιογραφία που πραγματεύεται το θέμα αυτό. Θα επικεντρωθεί όμως η προσοχή μας στις δημοσιεύσεις που έχουν μια σχετικά αναλυτική περιγραφή των εκκενώσεων ειδικά σε λαμπτήρες.

Ο Howatson (1965) [9] κάνει μια πολύ καλή και περιεκτική περιγραφή των εκκενώσεων των αερίων υπό διάφορες πιέσεις. Αρχικά αναπτύσσει την κινητική θεωρία των αερίων στην οποία και στηρίζεται η ερμηνεία των εκκενώσεων, ειδικώς σε πιέσεις πολύ κάτω της ατμοσφαιρικής. Ξεκινώντας από την δομή του μορίου περιγράφει τα διάφορα είδη των συγκρούσεων (ελαστικές, μη ελαστικές) που λαμβάνουν χώρα στη θετική στήλη των λαμπτήρων κατά τη λειτουργία τους. Ακολούθως, δίνει μια αναλυτική περιγραφή για το μηχανισμό εκπομπής ηλεκτρονίων στα ηλεκτρόδια καθώς και στο πλάσμα που αναπτύσσεται εντός του σωλήνα ενός λαμπτήρα. Στα κεφάλαια του βιβλίου που ακολουθούν, παρατίθενται όλα εκείνα που απαιτούνται για την πλήρη θεωρητική στήριξη των φαινομένων που

συμβαίνουν στο εσωτερικό των λαμπτήρων. Τέλος, δίνει περιγραφή του τρόπου μέτρησης και επεξεργασίας φαινομένων σχετικών με το πλάσμα στους λαμπτήρες.

Ο Llewellyn-Jones (1956) [36] δημοσίευσε μια πραγματεία για τον ιονισμό των αερίων υπό διάφορες πιέσεις. Με σαφήνεια αναπτύσσει τη θεωρία για την κίνηση και τις συγκρούσεις των φορτισμένων σωματιδίων, φαινόμενα που διέπουν τη λειτουργία των λαμπτήρων φθορισμού, αλλά και άλλων τύπων λαμπτήρων. Φαινόμενα όπως η εκσφενδόνιση (sputtering) και η εξάτμιση (evaporation) που κυριαρχούν στα ηλεκτρόδια των λαμπτήρων περιγράφονται αναλυτικά. Δίνεται έμφαση στα φαινόμενα που συμβαίνουν αναλόγως της διαμέτρου και της πίεσης των λαμπτήρων. Επεξηγείται ο ρόλος των αερίων στο λαμπτήρα. Αναλύεται η επίδραση του μοριακού τους βάρους και του έργου ιονισμού τους, στοιχεία ιδιαίτερα πολύτιμα για την εξήγηση της λειτουργίας των λαμπτήρων. Δίνει μεγάλη σημασία στην στιγμή της έναυσης (breakdown) των λαμπτήρων και γενικότερα της εκκένωσης, παρέχοντας αρκετές πληροφορίες χρήσιμες για την κατανόηση των φαινομένων που ενδιαφέρουν την παρούσα διατριβή.

Αναλόγου ενδιαφέροντος και σημασίας είναι ένα σχετικό βιβλίο του Raizer (1991) [37]. Παρουσιάζει με σαφήνεια τις εξισώσεις που διέπουν τη συμπεριφορά των αερίων ως συνεχές μέσον κατά την εκκένωση και τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο πλάσμα. Επίσης περιγράφει την παραγωγή φορτισμένων σωματιδίων σε συνθήκες χαμηλής πίεσης που επικρατούν στους λαμπτήρες. Ένα άλλο φαινόμενο σημαντικό στους λαμπτήρες φθορισμού είναι η ανάπτυξη ρεύματος αίγλης πριν την επίτευξη της εκκένωσης. Στο εν λόγω σύγγραμμα δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη του ρεύματος αίγλης. Αναπτύσσονται οι αστάθειες που προκαλεί σε μια εκκένωση και οι συνέπειές τους.

Η αναφορά περί των λαμπτήρων εκκένωσης στο πλαίσιο μιας ανασκόπησης της μοντέρνας φυσικής των Lister, Lawler, Lapatovich, Godyak (2004) [11] είναι μείζονος σημασίας για τους ασχολούμενους με τους λαμπτήρες και την μοντελοποίησή τους. Ειδικά για τους λαμπτήρες φθορισμού εστιάζουν στη σημασία των διαστάσεων που έχουν για λειτουργικούς λόγους, αλλά και στην ενεργειακή κατανομή των ηλεκτρονίων στην εκκένωση, που είναι σημαντικός παράγοντας παραγωγής φωτεινής ροής. Συνοψίζουν τη σημασία και τις λειτουργίες του ευγενούς αερίου στο λαμπτήρα και περιγράφουν το φαινόμενο της καταφόρησης (cataphoresis) που υποχρεώνει την λειτουργία των λαμπτήρων εκκένωσης σε εναλλασσόμενο και όχι σε συνεχές ρεύμα. Όσον αφορά στη μοντελοποίηση των λαμπτήρων φθορισμού αναφέρουν τα συμπεράσματα αξιολογών επιστημόνων πάνω σε αυτό το αντικείμενο μνημονεύοντας το απαύγασμα των εργασιών τους.

Το βιβλίο με τις περισσότερες (δικαίως) αναφορές στο αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα διατριβή είναι του Waymouth [1], που αν και εκδόθηκε το 1971 δεν λείπει από τη βιβλιογραφία σχεδόν κανενός (ακόμα και σημερινού) άρθρου επί του θέματος των λαμπτήρων. Οι λαμπτήρες φθορισμού και ό,τι σχετίζεται με αυτούς έχουν εξέχουσα θέση

στο σύγγραμμα. Άλλωστε το 50% της ύλης αφορά μόνον αυτούς. Η μεγάλη αξία του έργου είναι ότι το περιεχόμενό του στηρίζεται κυρίως σε πρωτότυπες εργασίες και μετρήσεις του συγγραφέα και λιγότερο σε άλλων. Αρχικά πραγματεύεται τη φυσική των εκκενώσεων σε χαμηλές πιέσεις και επικεντρώνει το ενδιαφέρον του στις παραμέτρους που είναι σημαντικές για την επίτευξη ικανής παραγωγής φωτεινής ροής στους λαμπτήρες. Με απλά λόγια, εξισώσεις, διαγράμματα και συγκεκριμένες αριθμητικές παραστάσεις υπογραμμίζει την επίδραση του μήκους και της διαμέτρου του σωλήνα στην παραγωγή φωτός. Παρομοίως, παρουσιάζονται αριθμητικά στοιχεία για την απόδοση των λαμπτήρων αναλόγως της πίεσης των αερίων του σωλήνα, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και του ρεύματος της εκκένωσης.

Στη συνέχεια κάνει λεπτομερείς περιγραφές της έναρξης της εκκένωσης αναλόγως των συνθηκών που επικρατούν μέσα στο σωλήνα αλλά και της επιβαλλόμενης τάσης. Δίνει με σαφέστατο τρόπο τις ιδιότητες της θετικής στήλης, αλλά και της πτώσης τάσης αναλόγως της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου. Προτείνει επίσης διάφορα ηλεκτρικά κυκλώματα για την έναρξη και τη λειτουργία των λαμπτήρων.

Σημαντικότερη θέση στο σύγγραμμα κατέχει η αναφορά στα ηλεκτρόδια. Περιγράφει τον ρόλο της επικάλυψης και προτείνει χημικές διεργασίες που θεωρεί ότι συμβαίνουν με αποτέλεσμα αυτή να εξαντλείται. Διαφωνεί με άλλες απόψεις, θεωρώντας ότι το οξείδιο του βαρίου αντιδρά με το βολφράμιο του νήματος, σχηματίζει βολφραμικό βάριο παραμένοντας στο ηλεκτρόδιο και με αυτό τον τρόπο παρατείνει τη ζωή του λαμπτήρα. Για τα ηλεκτρόδια προτείνει σύστημα πέντε εξισώσεων που περιγράφουν την θερμή κάθοδο κατά την εκκένωση. Επιβεβαίωσε την ισχύ τους με μετρήσεις και με βάση τους υπολογισμούς περιγράφει τη συμπεριφορά του ηλεκτροδίου.

Αφιερώνει επίσης ένα κεφάλαιο στη μαθηματική περιγραφή της θετικής στήλης των λαμπτήρων φθορισμού. Η ανάλυση αυτή υποδεικνύει την επίδραση των ευγενών αερίων στη θερμοκρασία των ηλεκτρονίων των ευρισκομένων στο πλάσμα, σε σχέση με την κινητικότητά τους (mobility). Υπολογίζεται ακόμα η θερμοκρασία και η πυκνότητα ηλεκτρονίων αναλόγως της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της θεωρίας με τα πειραματικά αποτελέσματα όσον αφορά στην απόδοση του λαμπτήρα σε σχέση με την θερμοκρασία των τοιχωμάτων του σωλήνα και σε σχέση με το ρεύμα εκκένωσης σε λαμπτήρες T8, T12 και T17. Φαίνεται ότι υπάρχει μια πολύ καλή συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τη θεωρία.

Τέλος και γι' αυτά που αφορούν στους λαμπτήρες φθορισμού περιγράφει διάφορα είδη ballast που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την οδήγησή τους. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ballast δίνει διαγράμματα για την τάση και το ρεύμα του λαμπτήρα και κάνει πρόβλεψη από το σχήμα της κυματομορφής για την επίδραση που αυτό θα έχει στη ζωή του λαμπτήρα.

Το σύγγραμμα των Meyer, Nienhuis (1988) [38] που έχει εκδοθεί από την Philips είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τους ασχολούμενους με τα συστήματα φωτισμού. Πραγματεύεται αποκλειστικά τις εκκενώσεις τις σχετιζόμενες με τους λαμπτήρες. Αφού περιγράφει τις γενικές αρχές των εκκενώσεων, συγκεντρώνει το ενδιαφέρον του σε πρακτικά θέματα λειτουργίας λαμπτήρων, όπως γήρανση και παράγοντες που επηρεάζουν τη ζωή τους. Αναφέρει αποτελέσματα από την ακτινοβολία, την υψηλή συχνότητα λειτουργίας όπως και οπτικές και ακουστικές επιδράσεις στο χώρο που βρίσκονται. Στο κεφάλαιο για τους λαμπτήρες φθορισμού με λίγα λόγια ασχολείται με ό,τι σχετίζεται με αυτούς δίνοντας χρήσιμες πληροφορίες που δύσκολα βρίσκονται ακόμα και σε εξειδικευμένα άρθρα. Συγκεκριμένα παρουσιάζει διάγραμμα με την καμπύλη για την αύξηση της ζωής του λαμπτήρα ανάλογα με την πίεση στο σωλήνα. Σε άλλο διάγραμμα παρουσιάζει την τάση που πρέπει να εφαρμοστεί κατά την έναυση μεταξύ των ηλεκτροδίων, ως συνάρτηση της τιμής του ρεύματος στο ηλεκτρόδιο αλλά και της θερμοκρασίας που έχει επιτευχθεί σε αυτό. Δίνει επίσης ένα διάγραμμα με συγκεκριμένες τιμές για τον παράγοντα κορυφής ρεύματος και πόσο αυτός επηρεάζει (ως ποσοστό) τη ζωή του λαμπτήρα. Σε άλλο σημείο εξηγεί τους λόγους που τα ηλεκτρόδια έχουν συγκεκριμένα σχήματα αναλόγως του τρόπου έναυσης και συνθηκών λειτουργίας του συστήματος.

Μία άλλη έκδοση της Philips (1971) [39], που έχει επιμεληθεί ο Elenbaas αφορά αποκλειστικά στους λαμπτήρες φθορισμού. Περιέχει θέματα σχετικά με τις εκκενώσεις, το σχεδιασμό, κατασκευή, χαρακτηριστικά, τύπους, ballast και dimming των λαμπτήρων αυτών. Δίνει εξαιρετικές πληροφορίες με σχεδιαγράμματα και σχήματα και για τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων αλλά και για τα ballast.

Ακόμα ένα βιβλίο (ηλεκτρονικό), που έχει εκδώσει η Philips (2004) [8], δίνει μεγαλύτερη σημασία στην ηλεκτρονική οδήγηση των λαμπτήρων φθορισμού. Όσον αφορά στους λαμπτήρες δίνει διαγράμματα για την επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου στο μέγεθος της τάσης έναυσης. Σημαντικά είναι επίσης τα διαγράμματα για την προσδοκώμενη ζωή (life expectancy) διαφόρων τύπων λαμπτήρων καθώς και για την απομείωση της φωτεινής ροής (lumen maintenance) ανάλογα με τον τύπο λαμπτήρα και το ballast. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι πληροφορίες που δίνονται για την τοπολογία των ballast και τον τρόπο που επιτελούν κάποιες λειτουργίες τους.

2.3. Ηλεκτρικό κύκλωμα των λαμπτήρων φθορισμού

Ο τρόπος της έναυσης και της λειτουργίας του λαμπτήρα, καθορίζεται από το ballast που τον οδηγεί. Ειδικά τα ηλεκτρονικά ballast, με τα οποία ασχολείται η παρούσα διατριβή, ρυθμίζουν και την παραμικρή λεπτομέρεια, από την έναυση μέχρι την εξάντλησή τους. Όλα τα εξαρτήματα τοποθετούνται γύρω από το ολοκληρωμένο κύκλωμα που περιέχει τον προγραμματισμό με τις επί μέρους οδηγίες. Όμως ο κάθε κατασκευαστής ανάλογα με το σενάριο που θέλει να ακολουθεί το προϊόν του για την οδήγηση του λαμπτήρα και ανάλογα

με το κόστος με το οποίο θέλει να το διαθέτει στην αγορά, χρησιμοποιεί ακριβά ή φθηνά εξαρτήματα και λίγα ή περισσότερα από αυτά.

Εκτός από τους κατασκευαστές που σχεδιάζουν ballast υπάρχουν και διάφοροι ερευνητές που ασχολούνται με το θέμα, ώστε να προωθήσουν σχέδια που θα υλοποιούνται με μικρό κόστος και ταυτόχρονα θα έχουν ικανοποιητική απόδοση. Τα γραφεία με πατέντες για το αντικείμενο αυτό, βρίθουν από σχέδια και ιδέες. Όμως τα ηλεκτρονικά ballast που κυκλοφορούν από τους μεγάλους κατασκευαστές συστημάτων φωτισμού ποτέ δεν περιέχουν και τα σχέδια της τοπολογίας τους. Γι αυτό, αν θέλει κάποιος να γνωρίσει την τοπολογία τους, θα πρέπει να τα βάλει σε λειτουργία με τον ή τους λαμπτήρες και να μετρήσει με τα κατάλληλα όργανα τα διάφορα χαρακτηριστικά τους. Μπορούν να μετρηθούν χαρακτηριστικά των διαφόρων τμημάτων της συνδεσμολογίας τους εάν ανοιχθεί το κουτί που τα περιέχει. Ας σημειωθεί εδώ ότι ενώ υπάρχει πληθώρα συγγραμμάτων για τα ballast, για τους λαμπτήρες δεν υπάρχει κάποια πρόταση. Μόνο οι κατασκευαστές προτείνουν και θέτουν στην αγορά νέες ιδέες για λαμπτήρες.

Θα αναφερθούν παρακάτω κάποια άρθρα ή περιγραφές από αναγνωρισμένους συγγραφείς ή αξιόπιστες εταιρίες, με τις πληροφορίες που δίνουν για την περιγραφή ή την κατασκευή ενός ballast. Αρχικά, θεωρείται ότι είναι πολύ σημαντικά τα βοηθήματα της International Rectifier [40, 41] διότι δίνουν αναλυτική περιγραφή για την κατασκευή ενός ballast, βάσει της οποίας όμως μπορεί κάποιος να καταλάβει σε βάθος τη λειτουργία ενός τέτοιου οργάνου. Εκτός αυτού αναφέρονται οι αλλαγές που απαιτούνται σε διάφορα εξαρτήματά του για να γίνουν μεταβολές στα χαρακτηριστικά λειτουργίας ή έναυσης του λαμπτήρα, όπως τα:

- ✓ Λόγος προθέρμανσης (R_H/R_C)
- ✓ Χρόνος προθέρμανσης
- ✓ Τάση έναυσης μεταξύ των ηλεκτροδίων του λαμπτήρα
- ✓ Ισχύς λειτουργίας του λαμπτήρα
- ✓ Τάση ή ρεύμα λειτουργίας του λαμπτήρα

Παρατίθενται τρόποι για τη μέτρηση των ως άνω χαρακτηριστικών και κυματομορφές από παλμογράφο για διάφορες τιμές των ανωτέρω χαρακτηριστικών. Ανάλογης αξίας και ενδιαφέροντος είναι και πολλές άλλες εκδόσεις της ίδιας εταιρίας, αλλά δεν θα αναφερθούν εδώ.

Ο Ben-Yaakov (2008) [42] περιγράφει την σχεδίαση ενός ballast με πολύ καλά χαρακτηριστικά ώστε να έχει μια μακρά ζωή ο λαμπτήρας. Το προτεινόμενο ballast στηρίζεται σε ένα μετατροπέα πολλών επιπέδων συντονισμού (multiresonant converter) και η σχεδίαση είναι τέτοια που παρέχει στο λαμπτήρα σταθερή τάση λειτουργίας. Σε λειτουργία τεσσάρων αντιτύπων του προτεινόμενου ballast, οι λαμπτήρες είχαν πετύχει περισσότερα από 36500 ανάμματα και δεν είχαν δείξει σημάδια μαυρίσματος στα άκρα.

Σε μία άλλη σχεδίαση ballast του Ribarich (2001) [43] προτείνεται μία απλή σχετικά κατασκευή με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο Yeο (1999) [44] προτείνει ένα κύκλωμα για ballast λαμπτήρων φθορισμού που προφυλάσσει το λαμπτήρα όταν πλησιάζει το τέλος της ζωής του από επανειλημμένες προσπάθειες να ανάψει. Πολλά ballast στην αγορά έχουν ένα αντίστοιχο μηχανισμό ανίχνευσης του τέλους της ζωής του λαμπτήρα. Ο λόγος είναι ότι αν για κάποιο λόγο ο λαμπτήρας δεν μπορεί να εκπληρώσει ικανοποιητική εκκένωση, καταναλώνει αρκετή ενέργεια. Για να μη συμβεί αυτό, υπάρχει σύστημα ανίχνευσης της καταναλισκόμενης ενέργειας και όταν είναι αυξημένη ή δεν παράγεται φως, διακόπτεται η λειτουργία του ballast. Στο συγκεκριμένο άρθρο έχει σχεδιαστεί ένας εκκινήτης που ελέγχει την έναυση στα ηλεκτρόδια και αν χρειαστεί προθερμαίνει τα ηλεκτρόδια πριν την έναυση.

Ένα ballast ειδικά σχεδιασμένο για να εργάζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες παρουσιάζεται από τους Wu, Chen, Wu (2001) [45]. Περιλαμβάνει κυκλώματα προθέρμανσης με αυτεπαγωγική σύζευξη και κυκλώματα ελέγχου της θερμοκρασίας των ηλεκτροδίων. Με ένα απλό RC κύκλωμα ελέγχει την θερμοκρασία των ηλεκτροδίων και τη ρυθμίζει ώστε πάντα να έχουν την κατάλληλη θερμοιλική εκπομπή. Ένα υβριδικό ballast έχουν σχεδιάσει οι Garbowicz, Jug (1996) [46]. Τέτοιου είδους ballast σταματούν την θέρμανση των ηλεκτροδίων μετά την έναρξη της εκκένωσης ώστε να ελαττώνουν την κατανάλωση του συστήματος κατά 2 έως 3 Watt. Ταυτόχρονα μειώνουν τον παράγοντα κορυφής ρεύματος τροφοδοτώντας τον λαμπτήρα με σχεδόν τετραγωνική κυματομορφή. Σε μετρήσεις ζωής που έγιναν, βρέθηκε ότι με τα συγκεκριμένα ballast, οι λαμπτήρες φθορισμού πέτυχαν τον ονομαστικό χρόνο ζωής τους ή ακόμα και περισσότερο.

Δύο χρήσιμα βιβλία για την κατανόηση της λειτουργίας των ballast που χρησιμοποιούνται στους λαμπτήρες είναι των Pressman (1998) [47] και Rashid (2001) [48]. Δίνονται σχεδιαγράμματα με τις τοπολογίες όλων των ειδών ballast και λεπτομερώς παρουσιάζονται τα κυκλώματα εντός αυτών που δίδουν και εκτελούν τις εντολές που απαιτούνται κατά την έναυση και τη λειτουργία των συστημάτων.

2.4. Μοντέλα για τα ηλεκτρόδια των λαμπτήρων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται έρευνες που έχουν γίνει σε ηλεκτρόδια λαμπτήρων φθορισμού, ώστε να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν κατά την έναυση ή τη λειτουργία τους. Ο σκοπός είναι να διαγνωσθούν οι αιτίες που οδηγούν στη φθορά τους, ώστε αντιμετωπιζόμενες, να αυξήσουν τη διάρκεια της ζωής τους άρα και των λαμπτήρων στους οποίους βρίσκονται.

Όλοι παραδέχονται τη σπουδαιότητα της θερμοκρασίας των ηλεκτροδίων κατά τη λειτουργία των λαμπτήρων φθορισμού, αλλά ιδιαίτερα κατά την έναυση. Μια σημαντική εργασία έχει κάνει ο Mortimer (1998) [49], με αυτό ακριβώς το θέμα. Φυσικά, όπως οι περισσότεροι, δεν χρησιμοποιεί πυρόμετρο ή υπέρυθρες για τις μετρήσεις του, αλλά γίνεται εκτίμηση της θερμοκρασίας με μέτρηση της αντίστασης. Αυτή η μέτρηση δεν γίνεται με άμεσο τρόπο.

Γίνεται καταγραφή της τάσης στα άκρα του ηλεκτροδίου και ταυτόχρονα του ρεύματος που το διαρρέει και με τη διαίρεσή τους προκύπτει ανά πάσα στιγμή η αντίσταση.

Τα πυρόμετρα είναι συσκευές δύσκολες στη χρήση και ευαίσθητες. Ένας άλλος λόγος που δεν χρησιμοποιούνται στα πειράματα με τους λαμπτήρες φθορισμού είναι ότι απαιτούν μια μεγάλη προεργασία στους λαμπτήρες, που γίνεται μόνο από τα εργοστάσια κατασκευής τους κατά παραγγελία [50]. Ακόμα είναι αδύνατον να μετρηθεί η θερμοκρασία σε όλο το μήκος του ηλεκτροδίου την ίδια στιγμή, διότι η μέτρηση του οργάνου γίνεται για μια μικρή περιοχή του, μεγέθους 0,5 mm περίπου. Ένας πρόσθετος λόγος που κάνει σχετικά αναξιόπιστη τη χρήση τους στις υψηλές συχνότητες, είναι η αργή απόκρισή τους στις γρήγορες μεταβολές της θερμοκρασίας. Επομένως όλοι καταφεύγουν στον υπολογισμό της αντίστασης, που αν γίνει σωστά θεωρείται ασφαλής τρόπος για την εκτίμηση της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου.

Όπως όλοι οι ερευνητές του είδους, ο Mortimer χρησιμοποιεί την εξίσωση (1.8), η οποία εδώ αναφέρεται ότι έχει χρησιμοποιηθεί από την OSRAM σε μετρήσεις. Κατόπιν προτάθηκε (από την OSRAM) στην IEC και μετά την αποδέχτηκε και η ANSI. Επί χρόνια γίνονται συζητήσεις για την ακρίβεια αυτής της σχέσης, διότι προϋποθέτει σταθερή ειδική αντίσταση της επικάλυψης του ηλεκτροδίου. Η σχέση ισχύει για συγκεκριμένα ηλεκτρόδια βολφραμίου με επικάλυψη οξειδίων και γίνεται δεκτή μέχρι σήμερα για όλα τα ηλεκτρόδια, αφού δεν έχουν γίνει άλλες μετρήσεις.

Στο άρθρο που παρουσιάζει αναφέρει κατ' αρχάς ότι τα ballast που κάνουν προθέρμανση ηλεκτροδίων, το επιτυγχάνουν έχοντας σταθερή στο νήμα την τάση ή το ρεύμα. Με αυτές τις μεθόδους, ο υπολογισμός της θερμοκρασίας προθέρμανσης φαίνεται να είναι απλός. Όμως δεν επιτυγχάνονται ίδιες τιμές στο χρόνο, στην τάση και στο ρεύμα όταν το ballast εργάζεται με όλους τους λαμπτήρες με τους οποίους έχει συμβατότητα. Επίσης τα τελευταίου τύπου ηλεκτρονικά ballast δεν ακολουθούν μία από αυτές τις μεθόδους. Επομένως χρειάζεται ένας τρόπος υπολογισμού της θερμοκρασίας και αυτό διαπραγματεύεται το άρθρο.

Παρουσιάζει διαγράμματα που δείχνουν τον τρόπο μεταβολής της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου στη διάρκεια της προθέρμανσης, όταν μεταβάλλεται η συχνότητα ή η τάση του. Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν ηλεκτρόδιο σχήματος ράβδου (stick filament) ή τριπλής περιστροφής (triple-coil design). Η τάση που εφαρμόζεται κατά την προθέρμανση σε κάθε ηλεκτρόδιο είναι σταθερή. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι σε περίπου ένα ή δύο δευτερόλεπτα έχει επιτευχθεί σχεδόν πλήρως η μέγιστη θερμοκρασία.

Σε άλλα διαγράμματα παρουσιάζει τη μεταβολή κάποιων χαρακτηριστικών όταν γίνεται προθέρμανση με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- ✓ Με βηματική μεταβολή της τάσης προθέρμανσης (stepped-voltage excitation). Αρχικά εφαρμόζεται τάση 2,2 V για σχεδόν 0,9 δευτερόλεπτα και κατόπιν 3,6 V.

- ✓ Με σταθερή ένταση ρεύματος 0,4 A.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που έγιναν, αναφέρει ο συγγραφέας ότι οι συνιστώμενες τιμές (από τον αμερικάνικο οργανισμό τυποποίησης) για το χρόνο προθέρμανσης (0,5 s) και την αντίστοιχη τάση (3,6 V) κρίνονται ανεπαρκείς να δώσουν στα ηλεκτρόδια την κατάλληλη θερμοκρασία. Το συμπέρασμά του είναι ότι χρειάζεται μια πιο σίγουρη τεχνική που θα επιτρέπει την πλήρη προθέρμανση των ηλεκτροδίων. Προτείνει μάλιστα ένα κύκλωμα που πιστεύει ότι θα αποδώσει την απαραίτητη θερμότητα για θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων πριν την κανονική εκκένωση στο λαμπτήρα.

Έχει ήδη φανεί πόσο σημαντικό ρόλο έχει η τιμή της πτώσης τάσης καθόδου όχι μόνο στη διαδικασία της λειτουργίας του λαμπτήρα αλλά και στην επίδραση που έχει στη συνολική διάρκεια ζωής του. Εάν η τιμή της τάσης αυτής είναι πολύ μεγάλη, συμβαίνει εκσφενδόνιση, που μειώνει και ταυτόχρονα αναδιατάσσεται το υλικό που καλύπτει το βολφράμιο των ηλεκτροδίων, με τελική συνέπεια την ελάττωση της ζωής του λαμπτήρα.

Η επίτευξη των κατάλληλων θερμοκρασιών των ηλεκτροδίων σε όλο το φάσμα λειτουργίας (έναρξη, λειτουργία, dimming), απαιτεί το σύστημα ballast-λαμπτήρα να μπορεί να τροφοδοτεί, όταν χρειάζεται, με πρόσθετη τάση (ή αντίστοιχα ρεύμα) τα ηλεκτρόδια ώστε να τους προσδίδει την επιθυμητή θερμοκρασία. Δυστυχώς ακόμα δεν έχει αναπτυχθεί κάποιο σύστημα με θερμοστάτη που να κάνει αυτή τη ρύθμιση και θα πρέπει με πειράματα οι κατασκευαστές να βρουν πότε αυτό απαιτείται και έτσι να προγραμματιστούν τα ballast για να κάνουν την ανάλογη τροφοδότηση. Σήμερα τα πιο προηγμένα ballast, καθορίζουν τη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου, λαμβάνοντας υπ' όψιν το χρόνο που διαρκεί η προθέρμανση. Αυτό επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της τάσης και του ρεύματος του ηλεκτροδίου, μέσω του ολοκληρωμένου κυκλώματος που περιλαμβάνουν. Όλα αυτά γίνονται με ηλεκτρονικά και μη εξαρτήματα συγκεκριμένων μεγεθών μέσα στο ballast. Παρ' όλ' αυτά, ίδιου τύπου ballast, είναι δυνατόν να μην παρέχουν ακριβώς ίδιες συνθήκες προθέρμανσης. Έχουν παρατηρηθεί επίσης, στο ίδιο ballast, μικρές διαφορές στη διαδικασία της προθέρμανσης, που διαφοροποιούν την τελική θερμοκρασία από έναυση σε έναυση στον ίδιο λαμπτήρα.

Ένα ενδιαφέρον άρθρο για τις λεπτομέρειες στις διαδικασίες που συμβαίνουν στα ηλεκτρόδια κατά τη λειτουργία του λαμπτήρα δίνει ο Soules (1989) [51]. Το άρθρο αφορά στα ηλεκτρόδια τύπου ράβδου και δίνεται ένα μοντέλο για τη συμπεριφορά τους κατά τη λειτουργία και συγκεκριμένα το θερμοκρασιακό τους προφίλ. Τα ηλεκτρόδια είναι καλυμμένα κατά τα κεντρικά δύο τρίτα τους με οξειδία του βαρίου, στροντίου και ασβεστίου. Κατά τη λειτουργία η θερμοκρασία δεν είναι ίδια σε όλο το μήκος του ηλεκτροδίου, κύρια λόγω της ύπαρξης του θερμού σημείου, που άλλοτε βρίσκεται πάνω στην επικάλυψη και άλλοτε στα άκρα που είναι το γυμνό βολφράμιο.

Οι υποθέσεις που γίνονται για την ανάπτυξη του μοντέλου είναι οι εξής: η θερμοκρασία θεωρείται ίδια κατά την ακτίνα του ηλεκτροδίου. Άρα το μοντέλο θεωρείται μονοδιάστατο.

Ακτινικά το ηλεκτρόδιο θεωρείται ομογενές, αν και αποτελείται από διάφορα συστατικά. Υπάρχουν κατά μήκος του ηλεκτροδίου τρεις διαφορετικές ομογενείς περιοχές: η κεντρική που αποτελείται από το βολφράμιο με την επικάλυψη, τα άκρα της όπου υπάρχουν δυο μικρά τμήματα με γυμνό βολφράμιο και στα άκρα αυτών τα χαλύβδινα στηρίγματα του ηλεκτροδίου.

Με βάση αυτά κατασκευάζεται ένα μοντέλο που έχει δύο κύριους άξονες στην ανάλυσή του. Ο ένας είναι ο σχετικός με την κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου στο ηλεκτρόδιο, όπου λαμβάνεται υπόψη το ρεύμα που οφείλεται στη ροή των ηλεκτρονίων και των θετικών ιόντων μέσα σε αυτό. Ο άλλος άξονας της ανάλυσης, αφορά στη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και στη μεταφορά της θερμότητας σε αυτό. Και στις δύο περιπτώσεις αναφέρονται οι εξισώσεις στις οποίες καταλήγει το μοντέλο.

Το προφίλ της θερμοκρασίας κατά μήκος του ηλεκτροδίου είναι διαφορετικό στην περίπτωση που το ηλεκτρόδιο θερμαίνεται, από την περίπτωση που δεν του παρέχεται πρόσθετη τάση. Το ρεύμα που χρησιμοποιείται είναι συνεχές. Φαίνεται ότι, αφενός η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη, αφ' εταίρου ότι με μεγαλύτερη τάση αυξάνεται η τιμή της θερμοκρασίας.

Εάν το ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα η κορυφή της καμπύλης της θερμοκρασίας δεν είναι στο μέσον αλλά στο ένα άκρο. Σύμφωνα με το μοντέλο που αναπτύσσεται στο άρθρο, καθώς και με τις τιμές που μετρήθηκαν με πυρόμετρο, παρουσιάζεται διάγραμμα όπου φαίνεται ότι η συμφωνία δεν είναι πολύ καλή. Το πιο σημαντικό συμπέρασμα του άρθρου είναι η πρόβλεψη του μοντέλου αλλά και η επιβεβαίωση του θερμού σημείου στο ηλεκτρόδιο.

Ο Misono (2001) [52], εξετάζει την επίδραση της συχνότητας λειτουργίας του λαμπτήρα στην ποσότητα του βαρίου που καταναλώνεται στα ηλεκτρόδια. Το συμπέρασμα είναι ότι η αύξηση της συχνότητας επιφέρει αύξηση στην πυκνότητα του πλάσματος και ταυτόχρονη μείωση στο θερμό σημείο του ηλεκτροδίου. Το τελευταίο γεγονός προκαλεί αύξηση της πτώσης τάσης καθόδου με συνέπεια την αύξηση του φαινομένου της εκσφενδόνισης. Στην εργασία περιγράφεται μια μέθοδος για την ανίχνευση φασματικών γραμμών του βαρίου στη γειτονιά του ηλεκτροδίου για την εκτίμηση της ποσότητας που χάνεται. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εφαρμόστηκε για χαμηλές σχετικά συχνότητες: 6 Hz, 60 Hz και 600 Hz. Όμως οι τιμές των μετρούμενων μεγεθών ήταν ενδεικτικές. Η θερμοκρασία του θερμού σημείου στα 600 Hz ήταν 100 °C χαμηλότερη από την αντίστοιχη θερμοκρασία στα 60 Hz. Ταυτοχρόνως η εκπομπή ατόμων βαρίου που ανιχνεύτηκε ήταν εμφανώς μεγαλύτερη στα 600 Hz. Με τη μέθοδο που παρουσιάζεται μετράται επίσης και η θερμοκρασία και πυκνότητα των ηλεκτρονίων στην περιοχή των ηλεκτροδίων. Το συμπέρασμα της έρευνας είναι ότι είναι επιτακτική η ανάγκη πρόσθετης θέρμανσης των ηλεκτροδίων, όταν ο λαμπτήρας λειτουργεί σε υψηλές συχνότητες.

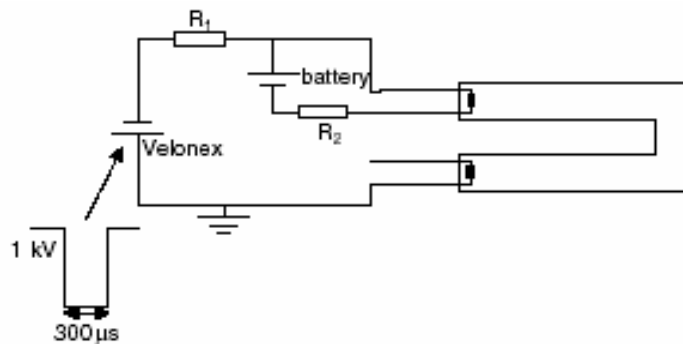
Σε ένα ενδιαφέρον άρθρο του van den Hoek (2002) [6], εξετάζεται με τον πιο σύγχρονο τρόπο από πλευράς τεχνολογικών μέσων, η εξάντληση της επικάλυψης των ηλεκτροδίων. Με φωτογραφική μέθοδο μελετάται η φύση της έναυσης. Με ανίχνευση του ραδιενεργού βαρίου υπολογίζεται η απώλεια της επικάλυψης στην έναυση, όταν η εκκένωση είναι στη φάση της αίγλης ή στη φάση του τόξου, σε λαμπτήρες που εργάζονται στη συχνότητα των 50 Hz. Τονίζεται ότι κάθε προσπάθεια για μέτρηση είναι δύσκολη, διότι το φαινόμενο έχει μόνο εν μέρει εξηγηθεί και δεν είναι γνωστές όλες οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκειά του.

Στους λαμπτήρες φθορισμού με ηλεκτρομαγνητικό ballast υπάρχει ο εκκινητής (starter), ο οποίος κάνει την προθέρμανση στα ηλεκτρόδια. Αν η θερμοκρασία δεν έχει φθάσει τους 1000 K η εκκένωση δεν επιτυγχάνεται και ο εκκινητής θερμαίνει περισσότερο τα ηλεκτρόδια. Αυτό όμως δημιουργεί μια διαδικασία μεταξύ των ηλεκτροδίων που τα φθείρει, διότι ο εφαρμοζόμενος παλμός τάσης που αποτυγχάνει, δημιουργεί έντονη εκσφενδόνιση. Μάλιστα γίνονται αρκετές επαναλήψεις εφαρμογής του παλμού, μέχρι τα ηλεκτρόδια να φθάσουν σε θερμοκρασία ικανοποιητικής θερμοϊονικής εκπομπής ηλεκτρονίων, που θα συνδράμει στην εκκένωση. Αυτό ακριβώς είναι το θέμα που ερευνά το άρθρο.

Για να γίνει η μελέτη του φαινομένου, χρησιμοποιείται συσκευή προσομοίωσης του παλμού που εφαρμόζεται και η δράση του στα ηλεκτρόδια. Μια γεννήτρια παλμών (Velonex) εφαρμόζει ένα παλμό 1 kV εύρους 300 μs στο ένα ηλεκτρόδιο. Την προθέρμανση του ηλεκτροδίου κάνει μια μπαταρία και η ρύθμιση της θερμοκρασίας γίνεται με μια ρυθμιζόμενη αντίσταση R_2 . Η αντίσταση R_1 περιορίζει το ρεύμα μετά την εφαρμογή του παλμού. Με την μεταβολή των αντιστάσεων R_1 και R_2 επιτυγχάνεται η προσομοίωση της έναυσης του λαμπτήρα. Η θερμοκρασία της καθόδου εκφράζεται από το κλάσμα των αντιστάσεων της καθόδου R_h/R_c (σχήμα 2.1.).

Από τις μετρήσεις που έγιναν επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι αν η προθέρμανση των ηλεκτροδίων είναι μικρή ή δεν γίνεται καθόλου, εμφανίζεται ένα μικρό ρεύμα μεταξύ τους, με τιμή μικρότερη των 100 mA. Η αντίστοιχη τάση είναι μέχρι 400 V και οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές μιας ανώμαλης εκκένωσης αίγλης (abnormal glow-discharge mode). Όταν η προθέρμανση είναι ικανή ($R_h/R_c > 4$) το ρεύμα είναι μεγαλύτερο (περίπου 140 mA), η αντίστοιχη τάση μέχρι 100 V και μεταξύ των ηλεκτροδίων εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά μίας μετάβασης από την αίγλη σε τόξο (glow-to-arc transition) που καταλήγει σε ένα μικρό τόξο (contracted arc) ή μιας αχνής εκκένωσης τόξου (vapour-arc mode).

Εκείνο που διαπιστώθηκε είναι ότι η επικρατούσα κατάσταση στην έναυση εξαρτάται από την στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά τη χρονική στιγμή που ο διακόπτης (εκκινητής) ανοίγει. Αν το ρεύμα είναι κοντά στο μηδέν η κατάσταση στην εκκένωση είναι τύπου αίγλης, αν όμως είναι κοντά στη μέγιστη τιμή του, η εκκένωση είναι τύπου αχνού τόξου.



Σχήμα 2.1. Διάταξη για επιβολή του τετραγωνικού παλμού στο λαμπτήρα [6].

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τον προσδιορισμό της εξάντλησης της επικάλυψης, που έχει βέβαια και τα μειονεκτήματά του ο καθένας. Επειδή η επικάλυψη που φεύγει από τα ηλεκτρόδια επικάθεται στο εσωτερικό των τοιχωμάτων του σωλήνα, ένας τρόπος είναι να αναλυθεί χημικώς και να βρεθεί η σύστασή της. Φυσικά αυτό θα γίνει με καταστροφή του λαμπτήρα. Μη καταστροφικές μέθοδοι στηρίζονται στη μέτρηση του φάσματος του ουδέτερου βαρίου και των ιόντων του. Αυτή η μέθοδος απαιτεί μια πρόσφορη θεωρία για την κατανομή του βαρίου στο χώρο κοντά στην κάθοδο. Η φασματοσκοπία με laser είναι ένας καλός τρόπος για την μέτρηση του βαρίου που χάνεται σε σύντομες χρονικές περιόδους (δεν συνιστάται για μετρήσεις σε λαμπτήρες που εργάζονται χιλιάδες ώρες). Η φασματοσκοπία μάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί αλλά όχι με ιδιαίτερα καλά αποτελέσματα σε εμπορικούς λαμπτήρες. Μια μέθοδος που ανιχνεύει τον ραδιενεργό υδράργυρο ^{203}Hg βοηθά στον έμμεσο προσδιορισμό της ποσότητας του βαρίου. Οι ραδιοχημικές ιδιότητες του ^{133}Ba κάνουν τις μεθόδους που το ανιχνεύουν κατάλληλες για τον προσδιορισμό του.

Για την μελέτη των φαινομένων χρησιμοποιήθηκαν ειδικά κατασκευασμένοι λαμπτήρες από τη Philips, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της ποσότητας του ^{133}Ba που διαφεύγει. Έγιναν ορισμένες εναύσεις τύπου αίγλης και άλλες τύπου αχνού τόξου, ρυθμίζοντας τον εκκινητή, ώστε να ανοίγει όταν το ρεύμα είναι μηδενικό και όταν είναι μέγιστο αντιστοίχως. Σε κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις μετρήθηκε η ποσότητα του βαρίου που έφυγε από το ηλεκτρόδιο. Η διαπίστωση ήταν ότι περισσότερο βάριο χανόταν στην περίπτωση που η έναυση ήταν τύπου τόξου. Μάλιστα όσο παλιότερος ο λαμπτήρας τόσο περισσότερο βάριο εκσφενδονιζόταν στα τοιχώματα. Στην περίπτωση που η έναυση ρυθμιζόταν, ώστε να είναι τύπου αίγλης, βρέθηκε ότι αφενός το βάριο ήταν λίγο, αφ' εταίρου η ποσότητα που χανόταν κάθε φορά ήταν σταθερή και ανεξάρτητη από τα ανάμματα που είχαν προηγηθεί.

Σύμφωνα με έρευνες του Hadrath (2005) [53], όταν ο λαμπτήρας εκκινεί και οδηγείται από ballast άμεσης έναυσης η αρχή της εκπομπής ηλεκτρονίων γίνεται από ένα σημείο του ηλεκτροδίου που είναι γυμνό από επικάλυψη. Άρα η έναυση αρχίζει από τα άκρα του, στα οποία στηρίζεται. Το ότι η αρχική εκπομπή ηλεκτρονίων δεν γίνεται από την περιοχή του ηλεκτροδίου που έχει την επικάλυψη, οφείλεται στο ότι η έναυση γίνεται σε κατάσταση αίγλης, που το ρεύμα είναι μικρό και η θερμοκρασία χαμηλή [54]. Σε αυτές τις συνθήκες η

επικάλυψη των οξειδίων είναι μονωτής αλλά και υπό χαμηλή θερμοκρασία τα οξείδια δεν μειώνουν την ενέργεια ιονισμού του βολφραμίου. Σε μια γενικότερη θεώρηση της κατασκευής και των ιδιοτήτων των ηλεκτροδίων ο Chittka [4] φτάνει στο ίδιο συμπέρασμα μετά από μετρήσεις.

Ο Szuba (1991) [55] προτείνει μια μέθοδο για το θερμοκρασιακό προφίλ των ηλεκτροδίων των λαμπτήρων φθορισμού. Με επίλυση μαθηματικών εξισώσεων υπολογίζεται θεωρητικά η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου κατά τη λειτουργία. Σύμφωνα με το μοντέλο η επιφανειακή θερμοκρασία του ηλεκτροδίου είναι συνάρτηση της κυματομορφής του ρεύματος και της συχνότητάς του. Ο Watanabe (1995) [56] παρουσιάζει μία εργασία με παρεμφερές θέμα. Με χρήση πυρομέτρου μετρήθηκε η θερμοκρασία της καθόδου ενός λαμπτήρα φθορισμού όταν λειτουργούσε υπό διάφορες συχνότητες. Ένα άλλο ενδιαφέρον της συγκεκριμένης έρευνας ήταν η διερεύνηση του μηχανισμού θέρμανσης του θερμού σημείου της καθόδου. Η κατανομή θερμοκρασιών στο ηλεκτρόδιο κατά τη λειτουργία δείχνει ότι η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη στο ένα άκρο και είναι τόσο πιο κοντά στο γυμνό τμήμα του νήματος όσο μικρότερη είναι η συχνότητα. Ένα άλλο μοντέλο παρουσιάζει ο Mishra (2004) [57] για τον υπολογισμό και την διερεύνηση του έργου ιονισμού των οξειδίων επικάλυξης του νήματος βολφραμίου των λαμπτήρων εκκένωσης χαμηλής πίεσης. Το μοντέλο εξηγεί τη μείωση του έργου ιονισμού με βάση τις αντιδράσεις που γίνονται μεταξύ του βαρίου και του υποκειμένου βολφραμίου, που προκαλούν την θερμιονική εκπομπή.

Ο Bhattacharya (1989) [58] προτείνει μια τεχνική, με μία συσκευή ανίχνευσης χρωματικών παλμών λέιζερ (pulsed dye laser), που μετρά το ιονισμένο βάριο στη γειτονιά του ηλεκτροδίου κατά τη λειτουργία λαμπτήρων χαμηλής πίεσης. Η ποσότητα του στοιχείου αυτού που εκσφενδονίζεται είναι και μία μέτρηση της φθοράς των ηλεκτροδίων. Το συμπέρασμα των μετρήσεων είναι ότι, όταν το ηλεκτρόδιο λειτουργεί ως άνοδος, το εκπεμπόμενο βάριο είναι πολύ περισσότερο από την περίπτωση που λειτουργεί ως κάθοδος. Βέβαια αυτό είναι αναμενόμενο διότι ως γνωστόν κατά την λειτουργία του ηλεκτροδίου ως άνοδος, η θερμοκρασία του είναι υψηλότερη με αποτέλεσμα να φθείρονται πιο πολύ τα ηλεκτρόδια. Ο Almanstotter (1999) [59] εξετάζει την ηλεκτρονική δομή του οξειδίου του βαρίου και του βολφραμίου στο ηλεκτρόδιο. Από την δομή που διαπιστώνουν ότι έχει ο δεσμός μεταξύ τους, προκαλείται η ελάττωση του έργου ιονισμού του ηλεκτροδίου (λόγω δηλαδή της επενέργειας της επικάλυξης). Υποστηρίζεται πως τελικά από την παρουσία του οξειδίου του βαρίου προκαλείται μείωση του έργου ιονισμού του ίδιου του βολφραμίου, λόγω προσρόφησης βαρίου και οξυγόνου.

Ο Wakabayashi (2007) [60] παρουσιάζει ένα μοντέλο του ηλεκτροδίου κατά την προθέρμανση του, σε λαμπτήρα φθορισμού. Η επιτυχία του μοντέλου έγκειται στο ότι προβλέπει το λόγο προθέρμανσης, όταν προκαθορίζεται το ρεύμα που διαρρέει το ηλεκτρόδιο και ο χρόνος προθέρμανσης. Ένα τέτοιο μοντέλο επιτρέπει το σχεδιασμό των ballast χωρίς την ανάγκη πολλών και δύσκολων μετρήσεων για τον καθορισμό του λόγου

προθέρμανσης. Ο ίδιος δημοσιεύει, (2007) [61], μια μεθοδολογία για τη ρύθμιση κάποιων παραμέτρων της προθέρμανσης και της λειτουργίας των λαμπτήρων φθορισμού. Η ρύθμιση δίνει τις βέλτιστες συνθήκες που απαιτούνται για την άψογη λειτουργία των ηλεκτροδίων. Σύμφωνα με τους συγγραφείς ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά εξαρτήματα του ballast αντικαθίστανται ή ρυθμίζονται, ώστε να δώσουν στα ηλεκτρόδια τα χαρακτηριστικά που θα αποδώσουν στο λαμπτήρα αυξημένη διάρκεια ζωής. Επομένως η εργασία είναι χρήσιμη για τους σχεδιαστές των ballast.

Ένα λίαν ενδιαφέρον άρθρο είναι του Giacobbe, (2004) [62], που αναφέρεται στη μεταφορά θερμότητας από σώματα που μοιάζουν με το ηλεκτρόδιο. Είναι αξιόλογη εργασία διότι στη μελέτη των ηλεκτροδίων και ιδιαίτερα κατά την προθέρμανση έχει μεγάλη σημασία ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του ηλεκτροδίου σε υψηλές θερμοκρασίες. Η μελέτη είναι σε πιέσεις περίπου ίσες με την ατμοσφαιρική, όμως μας έδωσε έναυσμα για μελέτη πραγματικών ηλεκτροδίων σε χαμηλές πιέσεις, που περιγράφεται σε άλλο κεφάλαιο της διατριβής. Στο εν λόγω άρθρο ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μετράται σε περιβάλλον δύο αερίων (ήλιον και αργόν) και σε μίγματα αυτών. Η τιμή του εξαρτάται βασικά από το μέσο μοριακό βάρος του μίγματος. Το συμπέρασμα που συνάγεται είναι ότι όσο πιο βαρύ είναι το αέριο τόσο πιο αργά ψύχεται το δοκίμιο. Μία διαφορά, σε σχέση με το θέμα της παρούσης διατριβής είναι ότι ο Giacobbe μετρά το συντελεστή κατά την ψύξη, ενώ στην λειτουργία των λαμπτήρων ενδιαφέρει η μεταφορά θερμότητας του ηλεκτροδίου κατά τη θέρμανσή του.

Παρόμοιου ενδιαφέροντος άρθρο είναι του Chen (1997) [63]. Εδώ η μελέτη αφορά χαμηλές πιέσεις αερίου, με αριθμούς Knudsen μεγαλύτερους από τη μονάδα. Σε τέτοιες συνθήκες ο συγγραφέας υποστηρίζει ότι η ροή θερμότητας γύρω από ένα νήμα αυξάνεται με τη θερμοκρασία αλλά και την πίεση. Ειδικά όσον αφορά στην πίεση πολλά εγχειρίδια φυσικής αναφέρουν ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι ανεξάρτητος της πίεσης.

Σε μελέτη του Rogonί (1996) [64], περιγράφονται διάφορες ιδιότητες νήματος βολφραμίου σε υψηλές θερμοκρασίες που πάρθηκαν με θερμοδομετρία παλμών θέρμανσης (pulse heating calorimetry). Οι ιδιότητες που μετρήθηκαν και ενδιαφέρουν την παρούσα διατριβή είναι η ειδική θερμότητα και η ειδική αντίσταση του βολφραμίου.

Οι Dorleijn, Goud (2002) [65] έκαναν μια απλή αλλά περιεκτική μελέτη για τα χαρακτηριστικά που πρέπει να καθιερωθούν από τους οργανισμούς τυποποίησης ώστε να περιλαμβάνονται οι σύγχρονες τάσεις σχεδιασμού των ηλεκτροδίων. Όντως, στη βιβλιογραφία ενώ υπάρχουν οδηγίες για τις τιμές διαφόρων χαρακτηριστικών κατά τη προθέρμανση των ηλεκτροδίων, αυτές αφορούν στους λαμπτήρες T8 ή T12 και δεν περιλαμβάνονται οι συμπαγείς και οι T5. Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι επειδή υπάρχει διαφορά στην τάση των δικτύων Αμερικής και Ευρώπης, τα εφαρμοζόμενα σενάρια από το ballast κατά την προθέρμανση είναι διαφορετικά. Παρά ταύτα, τα χαρακτηριστικά των

ηλεκτροδίων δεν πρέπει να διαφέρουν. Παραθέτουν λοιπόν για τα δύο διαφορετικά σενάρια προθέρμανσης (σταθερής τάσης ή σταθερού ρεύματος ηλεκτροδίου) την θεωρητική επεξεργασία βάσει της οποίας προτείνονται οι νέες απαιτήσεις έναυσης από την IEC στο πρότυπο IEC 60901. Στον πίνακα περιέχονται αρκετοί τύποι λαμπτήρων, αλλά εξακολουθούν να μην υπάρχουν δεκάδες άλλοι, οι οποίοι μάλιστα χρησιμοποιούνται ευρέως.

2.5. Μοντελοποίηση λαμπτήρων φθορισμού

Υπάρχουν αρκετές μελέτες που κάνουν κυκλωματική μοντελοποίηση των λαμπτήρων φθορισμού. Η παρούσα διατριβή δεν πραγματεύεται αυτό το θέμα, και γι' αυτό δεν αναφέρονται πολλά για τέτοιου είδους μοντέλα αλλά τα συγγράμματα που ακολουθούν είναι σχετικά με έρευνες που προτείνουν μοντέλα για τις διεργασίες στους λαμπτήρες.

Ο Hilscher (2002) [35] περιγράφει μια διάταξη που χρησιμοποιείται για να μετρηθεί η πτώση τάσης καθόδου με μέτρηση απλώς της τάσης στα άκρα του λαμπτήρα. Η τάση του λαμπτήρα είναι το άθροισμα τριών επί μέρους τάσεων: της πτώσης τάσης καθόδου, της τάσης στην θετική στήλη και την πτώση τάσης στην άνοδο. Η τάση στη θετική στήλη σε ένα δεδομένο σωλήνα εξαρτάται μόνο από την πίεση σε αυτόν και από το ρεύμα. Αν αυτά τα δύο μένουν σταθερά, μπορούν να διαφοροποιούνται τα άλλα χαρακτηριστικά χωρίς να μεταβάλλεται η τάση στη θετική στήλη. Η πίεση εξαρτάται από τη θερμοκρασία και για να διατηρηθεί σταθερή, ένας συμπαγής λαμπτήρας τοποθετήθηκε σε λάδι σιλικόνης σταθερής θερμοκρασίας. Για να διατηρείται και το ρεύμα του λαμπτήρα σταθερό ο λαμπτήρας τροφοδοτείται με τετραγωνικό παλμό συχνότητας 25 kHz. Αυτός προέρχεται από ένα μετατροπέα DC-AC που τον τροφοδοτεί με σταθερό DC ρεύμα ένα τροφοδοτικό. Το πειραματικό σύστημα δηλαδή δεν χρησιμοποιεί ένα κανονικό ballast που αντιστοιχεί στο λαμπτήρα.

Με αυτό το σύστημα επιτυγχάνεται σταθερή πτώση τάσης στη θετική στήλη. Επί πλέον είναι γνωστό ότι σε συχνότητες μεγαλύτερες από 1 kHz η πτώση τάσης ανόδου είναι πολύ μικρή και μπορεί να αγνοηθεί. Άρα μετρώντας την τάση του λαμπτήρα σε διάφορες τιμές ρεύματος ηλεκτροδίου αυτή θα μεταβάλλεται όπως και η πτώση τάσης καθόδου. Ταυτοχρόνως παρέχεται στα ηλεκτρόδια ρεύμα ελεγχόμενο από ένα μετατροπέα DC-AC. Με την διάταξη αυτή ερευνώνται οι τιμές του ρεύματος λαμπτήρα και ηλεκτροδίων που δίνουν τη βέλτιστη τιμή πτώσης τάσης καθόδου..

Την προθέρμανση των ηλεκτροδίων κατά την έναυση διαπραγματεύονται και οι Hsieh, Lin (1999) [66]. Προτείνεται ένα σενάριο προθέρμανσης αλλά και ένα μαθηματικό μοντέλο για το λαμπτήρα πριν και μετά την έναυση. Παρόμοιο θέμα πραγματεύονται και οι Myojo, Okuno (1996) [67]. Σε λαμπτήρα με προθέρμανση σταθερού ρεύματος καταγράφεται η ενεργειακή κατανάλωση στο ηλεκτρόδιο και προτείνεται η βελτίωση των προτύπων. Οι ίδιοι συγγραφείς και ο Waki (2000) [68] επιδιώκουν τον προσδιορισμό της χρονικής στιγμής που αρχίζει η έναυση, με καταγραφή της έναρξης της θερμοϊονικής εκπομπής, που γίνεται με τρεις

διαφορετικούς τρόπους. Πρώτον, γίνεται έναυση και καταγραφή σε παλμογράφο διαφόρων χαρακτηριστικών μεταξύ των οποίων και η τάση στα άκρα του ηλεκτροδίου. Η έναυση θεωρείται ότι επιτυγχάνεται κατά τη στιγμή που παρατηρείται στην τάση μια βηματική αλλαγή (step-wise decrease in lamp voltage). Δεύτερον, με προσδιορισμό της μεταβολής της τάσης του λαμπτήρα, λόγω μείωσης της πτώσης τάσης καθόδου από ψυχρή σε θερμή. Τρίτον, με μέτρηση της δυναμικής τιμής του λόγου προθέρμανσης των ηλεκτροδίων: R_h/R_c , που όταν φτάσει την τιμή 4 θεωρούν ότι έχει αρχίσει η θερμοϊονική εκπομπή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας προτείνονται οι απαιτήσεις της προθέρμανσης, ώστε να επιτυγχάνεται η αναμενόμενη ζωή του λαμπτήρα.

Ο Haverlag (2002) [16], προτείνει ένα μοντέλο ροής για την εκκένωση αίγλης στην έναυση με ballast άμεσης έναυσης σε συνδυασμό με ένα μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου για τη μεταφορά θερμότητας στο ηλεκτρόδιο. Το μοντέλο παρουσιάζει τη συγκέντρωση της εκκένωσης αίγλης σε πολύ μικρή περιοχή του ηλεκτροδίου το οποίο και εξηγεί την συχνά πρόωγη θραύση του ηλεκτροδίου, πριν την εξάντληση της επικάλυψης των οξειδίων. Σύμφωνα με το μοντέλο, ακριβώς πριν τη μετάβαση από την αίγλη στην εκκένωση (glow to arc transition), η θερμοϊονική εκπομπή ηλεκτρονίων υφίσταται μια περιορισμένου χώρου συγκέντρωση στο ηλεκτρόδιο που έχει σαν αποτέλεσμα τη θραύση του μετά από μερικές χιλιάδες εναύσεις. Συγκεκριμένα, η πυκνότητα ρεύματος μειώνεται μέχρι μηδενισμού της στο κέντρο του ηλεκτροδίου και μεταφέρεται στα άκρα του, ενώ αρχικά εκεί δεν υπήρχε εκπομπή ηλεκτρονίων.

Ένα άλλο θέμα σχετικό με τις διεργασίες στους λαμπτήρες είναι το dimming, το οποίο επιτυγχάνεται με μείωση του ρεύματος του λαμπτήρα και η ρύθμιση αυτή γίνεται από το ballast. Υπάρχουν τρεις βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό [69].

- ✓ Μεταβολή της τάσης λειτουργίας του αναστροφέα (inverter)
- ✓ Μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας του αναστροφέα
- ✓ Μεταβολή του πλάτους του παλμού του σήματος εξόδου του αναστροφέα

Εάν γίνει προσπάθεια να ανάψει ένας λαμπτήρας ενώ ο μηχανισμός του dimming είναι σε θέση χαμηλής ισχύος, το ρεύμα που παρέχει το ballast θα είναι σαφώς λιγότερο από το απαιτούμενο. Αυτό θα έχει σαν συνέπεια να καθυστερήσει η έναυση. Στο χρόνο αυτό όμως συμβαίνει εκκένωση αίγλης και υπάρχει έντονη εκσφενδόνιση που βλάπτει τα ηλεκτρόδια. Αν μάλιστα το dimming ήταν και κάτω από το 20% η προσπάθεια για την έναυση του λαμπτήρα μπορεί να αποβεί καταστροφική για τα ηλεκτρόδια. Το συμπέρασμα από πειράματα που έχουν γίνει στα εργαστήρια της LRC [19] είναι ότι μειώνεται αισθητά η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων που εργάζονται συνεχώς με μικρότερη ένταση ρεύματος από την ονομαστική τους. Τα πειράματα έγιναν με λαμπτήρες που λειτουργούσαν συνεχώς και τα ballast ήταν άμεσης έναυσης.

Ο Tetri (2001) [70], έχει ερευνήσει την επίδραση της θέρμανσης των ηλεκτροδίων κατά το dimming στη ζωή των λαμπτήρων φθορισμού. Υποστηρίζει ότι με τη σωστή θέρμανση οι λαμπτήρες θα φθάσουν τον ονομαστικό χρόνο ζωής τους ακόμη και όταν το dimming γίνεται με βάση το φυσικό φωτισμό. Από τα αποτελέσματα φαίνεται πόσο επιτακτική είναι η ανάγκη για επί πλέον θέρμανση των ηλεκτροδίων κατά το dimming, μηχανισμό βέβαια που όλα τα σύγχρονα ballast διαθέτουν.

Ο Shiga (2003) [71] μελετά την περίπτωση κατασκευής λαμπτήρα φθορισμού με ξένο, χωρίς χρήση υδραργύρου, και αποδεικνύεται ότι είναι εφικτό με αρκετή αποδοτικότητα παραγωγής ακτινοβολίας VUV. Το μοντέλο δεν αναφέρεται σε λαμπτήρες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κανονικό φωτισμό, αλλά σε φωτισμό μικροσυσκευών, δείχνει όμως ότι υπάρχει η ιδέα της αντικατάστασης του υδραργύρου που προκαλεί προβλήματα διότι δεν είναι εύκολη η ανακύκλωση των λαμπτήρων.

Οι Mader, Horn (1992) [72], παρουσιάζουν ένα δυναμικό μαθηματικό μοντέλο που προσομοιάζει τη λειτουργία ενός λαμπτήρα φθορισμού υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η συμβολή του άρθρου είναι σημαντική διότι μπορεί να βοηθήσει στην κατασκευή αξιόπιστων ballast. Παρουσιάζεται ένα μοντέλο, που ονομάζεται κυβικό. Σύμφωνα με αυτό, κατά τη λειτουργία, υπάρχει μία πολύ καλή σύμπτωση μετρήσεων και υπολογισμών, σε ποικιλία συχνοτήτων και ισχύων του λαμπτήρα. Ένα άλλο μοντέλο προτείνεται από τον Ribarich (1998) [73], για λαμπτήρα ο οποίος λειτουργεί σε υψηλές συχνότητες. Μία ανάλυση των κυματομορφών του λαμπτήρα γίνεται με χρήση του μοντέλου, που δείχνει ότι μια ελλειπτική μορφή ρεύματος στο λαμπτήρα είναι η βέλτιστη. Η μη γραμμική αντίσταση του λαμπτήρα κατά τη λειτουργία με χρήση της εξίσωσης: $v=ki^2$ δείχνει ότι η παραβολή ταιριάζει καλύτερα στις υψηλές συχνότητες. Ακόμα ένα μοντέλο λαμπτήρα παρουσιάζουν ο Yen (2005) [74]. Σε αυτό η συμπεριφορά του λαμπτήρα κατά τη λειτουργία μοντελοποιείται με μία αντίσταση που είναι συνάρτηση της ισχύος και της θερμοκρασίας. Οι εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο παράγονται από μετρήσεις σε λαμπτήρες. Και αυτή η εργασία βοηθά στην σχεδίαση ηλεκτρονικών ballast.

Ο Cervi (2002) [75] παρουσιάζει ένα κύκλωμα που εξομοιώνει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός λαμπτήρα φθορισμού όταν αυτός λειτουργεί σε υψηλές συχνότητες. Το μοντέλο είναι εκθετικό και η αντίσταση του λαμπτήρα δίνεται ως συνάρτηση της ισχύος του. Ασφαλώς η αντίσταση που παρουσιάζει ο λαμπτήρας είναι μεγαλύτερη στις χαμηλές ισχύς. Οι ερευνητές προτείνουν δύο εκθετικές συναρτήσεις ανάλογα με την προσέγγιση που απαιτείται και είναι οι εξής:

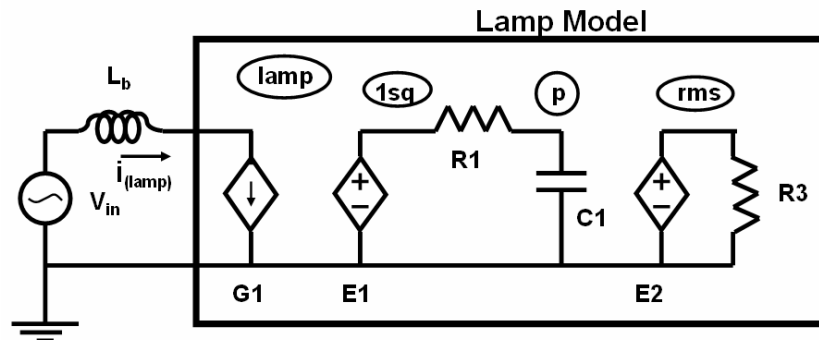
$$R_L(P_L) = 7869 \cdot e^{-0,087P} \quad (2.1)$$

$$R_L(P_L) = 3198 \cdot e^{-0,059P} + 16000 \cdot e^{-0,0351P} \quad (2.2)$$

Η προσέγγιση είναι καλή αλλά εξαρτάται από το μέγεθος της ισχύος. Σε γενικές γραμμές

πάντως ο προσομοίωση δίνει καλές τιμές όταν αυτές συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Ο Ben-Yaakon (2002) [76] προτείνει ένα μοντέλο λαμπτήρα φθορισμού υψηλών συχνοτήτων (σχήμα 2.2) που προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα SPICE. Η προσέγγιση δεν ήταν πολύ καλή επειδή το μοντέλο ήταν απλοποιημένο με την υπόθεση ότι η αντίσταση του λαμπτήρα είναι γραμμική. Αντίστοιχο μοντέλο του λαμπτήρα παρουσιάζεται και στην εργασία του Mukai (1996) [77], αλλά και σε πολλές άλλες εργασίες.



Σχήμα 2.2. Μοντέλο λαμπτήρα του S. Ben-Yaakon [76].

Μια λεπτομερέστατη θεωρητική και μαθηματική θεώρηση για τη μοντελοποίηση των λαμπτήρων φθορισμού έχει κάνει ο Lister (1992) [78]. Η εργασία αφορά στη μοντελοποίηση των λαμπτήρων χαμηλής πίεσης και περιέχει την ανάλυση μέσω της φυσικής επιστήμης ώστε να γεφυρωθούν διαφορετικά επιστημονικά πεδία με κοινό ενδιαφέρον τις εκκενώσεις.

2.6. Πειραματική διερεύνηση της έναυσης και λειτουργίας των συστημάτων με λαμπτήρες φθορισμού

Η λειτουργία των συστημάτων φθορισμού έχει γίνει αντικείμενο πλείστων ερευνών από ανεξάρτητους ερευνητές και φυσικά τους ίδιους τους κατασκευαστές. Αυτό που ερευνάται είναι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συστήματος, όταν αλλάζουν οι συνθήκες λειτουργίας, όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι μεταβολές της τάσης του δικτύου, αλλά και εσωτερικές παράμετροι του ballast. Οποιοδήποτε χαρακτηριστικό από αυτά μπορεί να έχει επίδραση στη ζωή του λαμπτήρα. Το ζητούμενο είναι πιο επιδρά θετικά και ποιο όχι, ώστε να βελτιωθεί και οι λαμπτήρες να είναι αποδοτικότεροι. Επί πλέον, να έχουν χαμηλό κόστος, ώστε να είναι ανταγωνιστικοί έναντι των λαμπτήρων πυράκτωσης, οι οποίοι είναι συγκριτικά φθηνότεροι.

Υπάρχουν σε γενικές γραμμές δύο ειδών πειράματα για τον έλεγχο της λειτουργίας των λαμπτήρων και των παραμέτρων που ενδιαφέρουν. Στη μία περίπτωση γίνεται έλεγχος στη λειτουργία ενός μόνο λαμπτήρα και με μεταβολή ενός χαρακτηριστικού, μετρώνται ή υπολογίζονται κάποια άλλα των οποίων η επίδραση στη ζωή του λαμπτήρα είναι γνωστή. Με τον τρόπο αυτό εξάγεται συμπέρασμα για την επιρροή του χαρακτηριστικού στη ζωή του

λαμπτήρα. Στην άλλη περίπτωση πειραμάτων τίθενται σε λειτουργία μερικές ομάδες λαμπτήρων και κάθε ομάδα έχει διαφορετική τιμή στο χαρακτηριστικό που ελέγχεται. Όταν σταματήσει η λειτουργία των λαμπτήρων λόγω καταστροφής τους, μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα από το χρόνο ζωής της κάθε ομάδας, για την επίδραση του χαρακτηριστικού. Φυσικά η δεύτερη περίπτωση, ενώ είναι ασφαλέστερη ως προς την αξιοπιστία των συμπερασμάτων, είναι περισσότερο χρονοβόρα και με μεγαλύτερο κόστος. Σε αυτή την περίπτωση, έχει προφανώς μεγάλη σημασία ο αριθμός των συστημάτων κάθε ομάδας. Παρακάτω θα παρουσιαστούν μερικές από τις πιο ενδιαφέρουσες μελέτες στο θέμα.

Ο Hammer είναι από αυτούς που έχουν μελετήσει τους λαμπτήρες φθορισμού εκτεταμένα και έχει δημοσιεύσει πλήθος εργασιών [79 – 86] που έχουν χρησιμεύσει στις έρευνες πολλών άλλων ερευνητών. Το έτος 1997 παρουσιάζει μία μέθοδο μέτρησης [86], παρόμοια με αυτήν της παρούσης διατριβής, για τη μέτρηση του λόγου προθέρμανσης (και κατά συνέπεια της θερμοκρασίας) των ηλεκτροδίων στα συστήματα με προθέρμανση. Για τον προσδιορισμό της στιγμής επίτευξης της εκκένωσης χρησιμοποιεί φωτοστοιχείο ανίχνευσης του φωτός. Οι μετρήσεις αυτών των χαρακτηριστικών είναι σημαντικές για την επιτυχία του συνδυασμού λαμπτήρα – ballast (lamp – ballast compatibility). Η ανάλυση των αποτελεσμάτων και των παλμογραφημάτων που κατέγραψε αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τέτοιου είδους πειράματα.

Ο Hammer (1985) [79] εξετάζει διάφορα χαρακτηριστικά και τις επιδράσεις τους στη συμπεριφορά του λαμπτήρα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η αναφορά για την μεταβολή των τριχρωματικών αριθμών και της κατανάλωσης σε λαμπτήρες όταν υποβάλλονται σε dimming. Υπάρχει μια βέλτιστη θερμοκρασία του σωλήνα του λαμπτήρα που η απόδοση (Lumen/Watt) είναι η μέγιστη και αυτή είναι διαφορετική σε κάθε επίπεδο dimming. Το ενδιαφέρον είναι ότι σε dimming κάτω του 50% η απόδοση αυξάνει όσο μεγαλώνει η θερμοκρασία. Βεβαίως η απόδοση μειώνεται πολύ μετά από μείωση της φωτεινής ροής κάτω του 75%.

Έχουν γραφεί και άλλες ενδιαφέρουσες εργασίες που αφορούν στη μελέτη των λαμπτήρων σε κατάσταση dimming. Οι εργασίες αυτές παρέχουν επίσης πληροφορίες και για συνθήκες κανονικής λειτουργίας των λαμπτήρων φθορισμού. Η εργασία του Hadrath (2007) [87] ερευνά την φθορά των ηλεκτροδίων που πραγματοποιείται με μέτρηση της ποσότητας βαρίου που χάνεται κατά τη λειτουργία υπό dimming.

Ο Hammer (1997) [82] έχει κάνει μετρήσεις σε σωληνωτούς λαμπτήρες T5 και σε συμπαγείς κατά τη λειτουργία μεταβάλλοντας διαδοχικά το ρεύμα των λαμπτήρων και τη συχνότητα. Ο συγγραφέας ανέπτυξε ένα καινούριο ballast, ώστε να μπορεί να μεταβάλλει κατά το δοκούν διάφορα χαρακτηριστικά. Μέτρησε διάφορα χαρακτηριστικά όταν ο λαμπτήρας διαρρέεται από διαφορετικό ρεύμα. Αυτά ήταν: η τάση στα άκρα του, η κατανάλωση, η ακριβής συχνότητα, οι αποδόσεις, ο παράγων κορυφής ρεύματος, η ολική αρμονική παραμόρφωση και οι τριχρωματικοί αριθμοί. Αντίστοιχες παραμέτρους μετρούσε όταν μετέβαλε την

συχνότητα. Το πιο ενδιαφέρον συμπέρασμα από τις μετρήσεις είναι ότι σε υψηλές συχνότητες η απόδοση του λαμπτήρα δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα, αρκεί η συχνότητα να παραμένει υψηλή (20 kHz έως 100 kHz).

Σε άλλη εργασία του ο Hammer (1995) [83] μετρά την πτώση τάση καθόδου σε λαμπτήρες με ηλεκτρομαγνητικό ballast. Με σταδιακή αύξηση της τάσης θέρμανσης των ηλεκτροδίων από 0 μέχρι 5 V, μειώνεται η πτώση τάσης από 14 V στα 11,3 V αντιστοίχως. Εκτιμά ότι η πτώση τάσης των 14 V οδηγεί σε πιθανή μείωση της ζωής του λαμπτήρα κατά 25%. Αυτός είναι και ο λόγος που σε λαμπτήρες με ballast άμεσης έναυσης, ο ονομαστικός χρόνος ζωής τους, που δίνουν πολλοί κατασκευαστές είναι μειωμένος με αυτό το ποσοστό, σε σχέση με το χρόνο ζωής που δίνουν στον ίδιο λαμπτήρα όταν οδηγείται από ballast που κάνει προθέρμανση. Την ίδια άποψη για τη μείωση της ζωής του λαμπτήρα έχει και σε άρθρο του ο Verderber (1989) [88].

Στα ballast χαμηλής συχνότητας συστήνει πτώση τάσης καθόδου από 11 ως 14,5 V, ενώ για τις υψηλές συχνότητες αντίστοιχες τιμές από 7 ως 10 V. Είναι ενδεικτική η σημασία στην έναυση, του λόγου προθέρμανσης R_h/R_c , από την τιμή του οποίου καθορίζεται και η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων. Σε πίνακα του ίδιου άρθρου του Hammer φαίνεται ότι ο ίδιος λαμπτήρας με ηλεκτρονικό ballast που έχει υψηλό παράγοντα κορυφής ρεύματος (CCF από 1,66 ως 2,3) παρουσιάζει μεγάλη πτώση τάσης καθόδου (αντίστοιχα 12 ως 17,8 V), άρα μειωμένη διάρκεια ζωής. Βρέθηκε επίσης ότι ο εν λόγω παράγοντας μειώνεται με τη θερμοκρασία στα ηλεκτρομαγνητικά ballast (από 2,20 ως 1,86). Μικρότερες τιμές έχει στις θερμοκρασίες 30 °C – 40 °C, ανάλογα με το φωτιστικό που είναι τοποθετημένος ο λαμπτήρας. Στα ηλεκτρονικά ballast η θερμοκρασία δεν μεταβάλλει τόσο έντονα τις κορυφές του ρεύματος (CCF από 1,60 ως 1,68).

Ο Hammer (1989) [84], παραθέτει κυματομορφές από την έναυση αλλά και τη λειτουργία λαμπτήρων με ηλεκτρομαγνητικά και με ηλεκτρονικά ballast. Με τρία διαφορετικά ηλεκτρομαγνητικά ballast που έχουν προθέρμανση κατέγραψε ότι από τη στιγμή που εφαρμόζεται η τάση εκκένωσης περνούν 50 ms περίπου για να περάσει από την εκκένωση αίγλης στο πλήρες τόξο και ακόμη 300 ms περίπου για να σταθεροποιηθεί η τάση στην εκκένωση τόξου. Το σημαντικό είναι ότι σε αυτό το σύστημα υπάρχει ελάχιστο ρεύμα αίγλης (0,009 ή 0,010 A). Αντιθέτως τρία ηλεκτρονικά ballast με τα οποία πειραματίστηκε ο συγγραφέας, έδωσαν ρεύμα αίγλης από 0,015 ως 0,045 A, που είναι σχετικά υψηλό. Ένα άλλο ενδιαφέρον που παρουσιάζει το άρθρο είναι οι κυματομορφές της πτώσης τάσης καθόδου και ανόδου σε ηλεκτρομαγνητικό και σε ηλεκτρονικό ballast. Φαίνεται καθαρά η παλινδρόμηση που γίνεται στην άνοδο των πρώτων, που ως γνωστόν έχει ως συνέπεια την αύξηση της κατανάλωσης, σε αντίθεση με την μορφή στα ηλεκτρονικά που είναι ομαλότερη, παρ' ότι και εκεί φαίνονται κάποιες κορυφές. Ακόμα, οι τιμές των τάσεων αυτών είναι μεγαλύτερες στα ηλεκτρομαγνητικά ballast (15 – 17 V) σε σχέση με τα ηλεκτρονικά (7 – 12,5 V).

Σημαντικό ρόλο έχει στη διαδικασία της έναυσης η απόσταση του λαμπτήρα από τη (μεταλλική) βάση στην οποία στηρίζεται (starting-aid distance). Οι οργανισμοί τυποποίησης (ANSI) θέτουν ως μέγιστο όριο την μισή ίντσα (~13 χιλιοστά). Σε εργασία του Hammer (1990) [80], φαίνεται ότι για την ίδια θερμοκρασία περιβάλλοντος όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση αυτή, τόσο αυξάνεται η τάση που απαιτείται για την έναυση. Επίσης για την ίδια απόσταση, η τάση έναυσης αυξάνεται με την θερμοκρασία.

Σε μια μελέτη του ο Hammer (1998) [81], μετέβαλε την τάση σε διάφορα συστήματα και μετρούσε την μεταβολή στο ρεύμα, την ισχύ, τον συντελεστή ισχύος, την φωτεινή ροή και την απόδοση. Όμοια αποτελέσματα πήρε από διαφορετικά συστήματα. Από πίνακα που παραθέτει φαίνεται η αύξηση του ρεύματος με την τάση. Δυστυχώς ο Hammer δεν μετρήσε την τάση του λαμπτήρα. Πάντως να τονιστεί ότι η μεταβολή στην τάση του λαμπτήρα δεν είναι ανάλογη με αυτήν του δικτύου. Μάλιστα επειδή το ρεύμα αυξάνεται η τάση στο λαμπτήρα θα μειώνεται (αρνητική αντίσταση). Γίνεται σαφές ότι με την αύξηση της τάσης (αύξηση 22,2%) μπορεί να αυξηθεί η φωτεινή ροή (από 0,84 σε 1,05 αύξηση 25%) με μικρή πτώση της απόδοσης. Το ότι η πτώση της απόδοσης είναι μικρή οφείλεται στη συγκρατημένη μεταβολή του ρεύματος (αύξηση 4%).

Σε ένα ενδιαφέρον άρθρο του ο Hammer (1989) [85], κατέγραψε τις μεταβολές διαφόρων χαρακτηριστικών των λαμπτήρων ως προς την θερμοκρασία περιβάλλοντος όταν αυτή μεταβάλλεται από 4 °C μέχρι 49 °C. Το συμπέρασμα είναι ότι οι λαμπτήρες μικρής διαμέτρου (T5) έχουν καλύτερη απόδοση σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τους λαμπτήρες μεγαλύτερης διαμέτρου (T8, T12). Επίσης κατέγραψε το γνωστό, ότι οι χαμηλές θερμοκρασίες είναι εκείνες που επηρεάζουν δυσμενέστερα την απόδοση. Για παράδειγμα, σε λαμπτήρα T8 η μέγιστη απόδοση στους 32 °C είναι 84,7 lumen/Watt. Στους 15 °C η μέγιστη απόδοση είναι 76,4 lumen/Watt, δηλαδή προκύπτει μείωση κατά 10%. Στη θερμοκρασία των 49 °C (διαφορά πάλι 17 °C, αλλά προς τα άνω) η απόδοση είναι 80,8 lumen/Watt, δηλαδή η μείωση είναι μόνο 5%.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, ένα από τα πιο αξιόλογα ινστιτούτα που ασχολούνται με το φωτισμό, το Lighting Research Center έχει μελετήσει τα ballast που διακόπτουν την θέρμανση των ηλεκτροδίων αφού πλέον έχει επιτευχθεί η εκκένωση στο λαμπτήρα (1993) [89] (cathode-disconnect ballast, heater-cutout ballast, cathode-cutout ballast, filament-cutout ballast και hybrid ballast). Αυτά τα ballast εξοικονομούν ισχύ της τάξης των 2W ανά λαμπτήρα. Ταυτόχρονα όμως μειώνεται η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων και αυτό αυξάνει την εκσφενδόνιση. Ένα rapid-start energy-efficient μαγνητικό ballast, παρέχει για την προθέρμανση 3,5 V και η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο ηλεκτρόδιο στη λειτουργία είναι 1100 °C. Εάν σταματήσει η παροχή της επί πλέον τάσης στο ηλεκτρόδιο η θερμοκρασία του θα μειωθεί στους χαμηλά επικίνδυνους 600 °C. Παρόμοιες τιμές δίνουν και τα ηλεκτρονικά ballast που έχουν το ίδιο σύστημα.

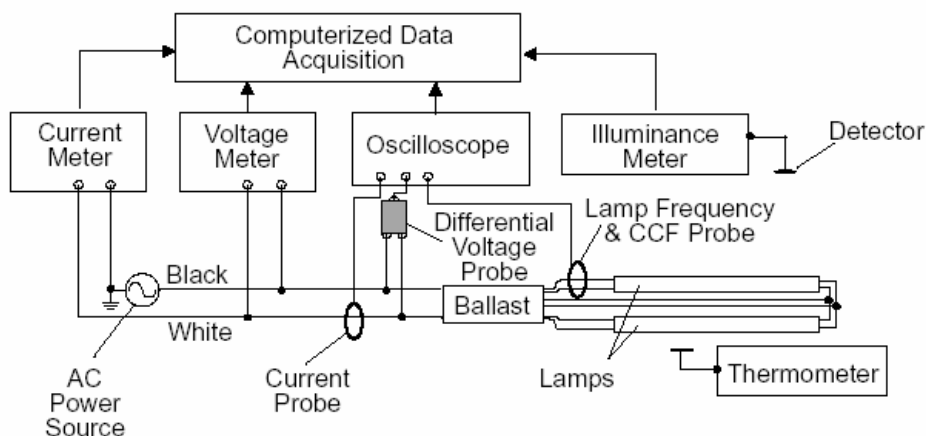
Ένα άλλο σύστημα που υπάρχει και εκτελεί τον τερματισμό της θέρμανσης στα ηλεκτρομαγνητικά ballast είναι το ονομαζόμενο cathode-disconnect lamp, στο οποίο ο μηχανισμός που κάνει την εργασία αυτή είναι στο λαμπτήρα και όχι στο ballast. Αυτό γίνεται με ένα διμεταλλικό διακόπτη που βρίσκεται στο εσωτερικό του λαμπτήρα μέσα σε μια γυάλινη κάψουλα και διακόπτει το κύκλωμα των ηλεκτροδίων μετά την έναυση. Ένα μειονέκτημα που έχουν είναι ότι αν εξαντληθεί ο λαμπτήρας απαιτείται η διέλευση ενός λεπτού για να μπορέσει να επαναλειτουργήσει.

Η ANSI συστήνει, για την προθέρμανση των ηλεκτροδίων, μία ελάχιστη και μία μέγιστη τάση. Οι κατασκευαστές των ballast υποστηρίζουν ότι εάν η θέρμανση σταματά κατά τη λειτουργία, η μέγιστη τάση μπορεί να αυξηθεί λίγο για να διευκολυνθεί η έναυση χωρίς να μειώνεται η ζωή του λαμπτήρα.

Οι πειραματικές διατάξεις που εγκαθίστανται στα εργαστήρια για μετρήσεις σε λαμπτήρες φθορισμού, σχετικές με τη γήρανσή τους, πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να μετρούν διάφορα χαρακτηριστικά τους. Μερικά από αυτά είναι: η τάση στο λαμπτήρα και το ρεύμα του, η τάση και το ρεύμα των ηλεκτροδίων, ένταση φωτισμού σε κάποιο σημείο και άλλα. Μια από τις πειραματικές διατάξεις του LRC για τέτοιες μετρήσεις φαίνεται στο σχήμα 2.3 (1999) [15]. Η διάταξη αυτή συνδέεται με παλμογράφο για την καταγραφή των χαρακτηριστικών που μας ενδιαφέρουν.

Ένα άλλο θέμα που σχετίζεται με τους λαμπτήρες φθορισμού είναι η βλάβη που προκαλούν στην ποιότητα ισχύος του συστήματος. Η χαμηλή ποιότητα ισχύος προκαλεί σπατάλη ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και διαταραχές στο σύστημα διανομής και στις συσκευές που τροφοδοτούνται από αυτό. Στα συστήματα φωτισμού προκαλεί μείωση της διάρκειας ζωής τους, εκτός από την μειωμένη ποιότητα του φωτός που αποδίδουν. Μια συσκευή λέγεται ότι έχει χαμηλή ποιότητα ισχύος εφόσον μεταβάλει την ημιτονοειδή μορφή της τάσης και/ή τη διαφορά φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσης. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως σπανίως μειώνουν την ποιότητα ισχύος, ενώ οι λαμπτήρες που χρησιμοποιούν ballast το κάνουν και σε μεγάλο βαθμό εάν δεν υπάρξει πρόβλεψη βελτίωσης. Η μείωση που προκαλούν οι λαμπτήρες εκκένωσης οφείλεται κυρίως στο ότι το ρεύμα τους αυξάνει απότομα κατά την διάρκεια της εκκένωσης (λόγω της φύσης του φαινομένου). Το αποτέλεσμα είναι η κυματομορφή να παίρνει μια τριγωνική μορφή.

Οι κατασκευαστές είναι υποχρεωμένοι πλέον στις προηγμένες χώρες να τοποθετούν φίλτρα στα ballast ώστε να επιτυγχάνουν καλή ποιότητα ισχύος. Ειδικά τα μαγνητικά ballast προκαλούν μία υστέρηση στη φάση του ρεύματος ως προς την τάση. Ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα που προκαλούν οι λαμπτήρες είναι η εισαγωγή αρμονικών. Οι περιττές αρμονικές είναι εκείνες που προκαλούν τα περισσότερα προβλήματα διότι οι κορυφές και οι κοιλίες τους συμπίπτουν. Σε μία ενδιαφέρουσα μελέτη του Kalinowsky (1989) [90] ερευνάται η ολική αρμονική παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion, THD).



Σχήμα 2.3. Διάταξη οργάνων για την καταγραφή των χαρακτηριστικών κατά την έναυση και τη λειτουργία ενός λαμπτήρα [15].

Ένα άλλο μέγεθος που σχετίζεται με την ποιότητα ισχύος των λαμπτήρων φθορισμού είναι η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (Electromagnetic interference, EMI). Αυτή συμβαίνει όταν ηλεκτρομαγνητικά σήματα αναμειγνύονται με τα σήματα που μας ενδιαφέρουν και μεταδίδονται είτε μέσω του αέρα είτε από τις καλωδιώσεις. Οι λαμπτήρες παράγουν EMI και σύμφωνα με τους κανονισμούς πρέπει να την μειώνουν, ώστε να μην υπερβαίνει κάποιο όριο.

Έχει ενδιαφέρον να συγκριθούν οι μετρήσεις που έγιναν στα εργαστήρια της National Research, για ορισμένα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, με αυτά που δίνουν οι κατασκευαστές. Σε μερικές περιπτώσεις οι τιμές διαφέρουν τόσο πολύ που απορεί κανείς για το που τελικά βρίσκεται η αλήθεια. Δυστυχώς το ερώτημα δεν είναι ρητορικό, αλλά θέλει να αναδείξει το πρόβλημα των μετρήσεων αυτού του είδους.

Σε μια ακόμα αναφορά της National Research τονίζεται η ανάγκη έρευνας για το βέλτιστο λόγο προθέρμανσης R_h/R_c (1998) [32]. Στην αγορά των συστημάτων φωτισμού υπάρχουν πολλά συστήματα που δεν φτάνουν το συνιστώμενο όριο 4,25 που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία 700 °C.

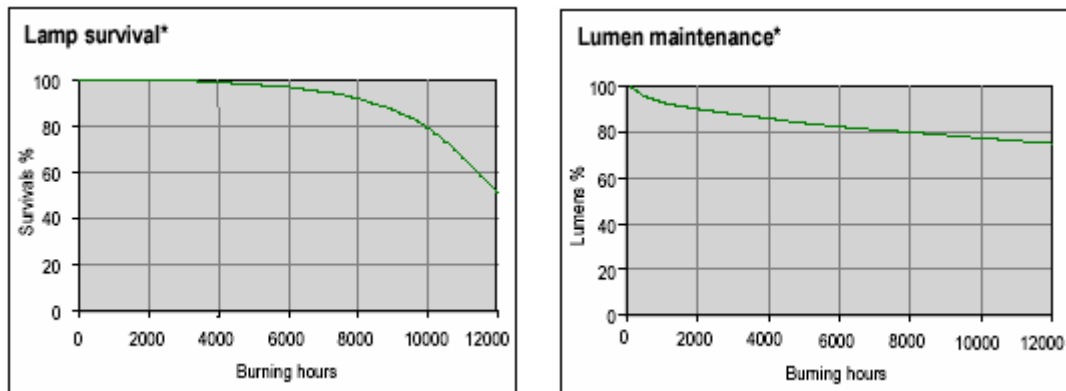
Το συμπέρασμα είναι ότι ένα σύστημα με rapid start ballast χάνει τα πλεονεκτήματα που έχει λόγω της προθέρμανσης εάν δεν επιτυγχάνει υψηλό R_h/R_c . Ίσως μάλιστα να προκαλεί και κακό, αφού για τα instant start ballast οι κατασκευαστές των λαμπτήρων ως γνωστόν δίνουν μόνο 25% μείωση στη ζωή του λαμπτήρα, ενώ στα πειράματα που περιγράφονται, η μείωση είναι μεγαλύτερη από 60%.

Έχει ενδιαφέρον μια αναφορά της General Electric Lighting, (2001) [24], για ένα συμπαγή λαμπτήρα φθορισμού ισχύος 70 W, για τον οποίο αναφέρονται διάφορα στοιχεία σχετικά με την έναυση και τη λειτουργία του. Ο λαμπτήρας έχει σύστημα προθέρμανσης και λειτουργεί ικανοποιητικά σε όλες τις θέσεις προσανατολισμού του κάλυκά του. Το γεγονός αυτό έχει σημασία, διότι συχνά σε λαμπτήρες φθορισμού όταν δεν τοποθετηθούν στην κατάλληλη

κατεύθυνση η έναυση καθυστερεί. Αυτό συμβαίνει διότι ο ψυχρός υδραργύρος που περιέχουν, δεν θερμαίνεται εύκολα ώστε να εξατμιστεί. Δίνεται ονομαστικός χρόνος ζωής (στον καθιερωμένο ευρωπαϊκό κύκλο) 12 000 ώρες και σε γρήγορο κύκλο λειτουργίας (30 δευτερόλεπτα σε λειτουργία, 4,5 λεπτά εκτός λειτουργίας) επιτυγχάνει περισσότερους από 20 000 κύκλους. Ο συγκεκριμένος γρήγορος κύκλος φαίνεται ότι έχει καθιερωθεί από την General Electric, διότι χρησιμοποιείται σε πρόσφατες μετρήσεις πολύ συχνά, κυρίως για μέτρηση κύκλων και όχι ωρών.

Δίνονται επίσης στοιχεία που δεν τα δίνουν άλλοι κατασκευαστές. Το ρεύμα προθέρμανσης είναι 0,42 A για δύο δευτερόλεπτα και αντίστοιχη μέγιστη τάση έναυσης 710 V. Η αντίσταση των ηλεκτροδίων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 2,71 Ω ενώ τη στιγμή που τελειώνει η προθέρμανση είναι σχεδόν 13 Ω, αφού ο λόγος προθέρμανσης δίνεται ίσος με 4,75. Δίνονται και άλλα πολλά χαρακτηριστικά, όμως θα αναφερθούν μόνο τα διαγράμματα που είναι σχετικά με τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων. Στο σχήμα 2.4 φαίνονται τα διαγράμματα των επιζησάντων λαμπτήρων και φωτεινής ροής ως προς το χρόνο.

Θεωρητικά, όσο πιο απότομα κατέρχεται η καμπύλη όταν πλησιάζει προς το 50% (σχήμα 2.4α), τόσο πιο αξιόπιστοι είναι οι λαμπτήρες. Εδώ φαίνεται ότι στις 10 000 ώρες έχουν καταστραφεί 20% από τους λαμπτήρες. Στο σχήμα 2.4β φαίνεται το μειονέκτημα των συμπαγών λαμπτήρων, δηλαδή, η σχετικά μεγάλη μείωση της φωτεινής ροής τους με το χρόνο.



(α)

(β)

Σχήμα 2.4. α) καμπύλη εξάντλησης λαμπτήρων ανάλογα με το χρόνο που λειτουργούσαν. β) μείωση της φωτεινής ροής ανάλογα με το χρόνο που λειτουργούσαν οι λαμπτήρες [24].

Στη μελέτη των Yasuda, Kando, (2007) [91], γίνονται μετρήσεις σε συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού με αμάλαμα, που περικλείονται σε θάλαμο για να προσομοιάζουν στους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Αυτοί οι λαμπτήρες έχουν μία ιδιαιτερότητα, καθώς στο θάλαμο αναπτύσσονται σχετικά μεγάλες θερμοκρασίες. Εξετάζεται η συμπεριφορά του υδραργύρου του λαμπτήρα υπό αυτές τις συνθήκες. Βρέθηκε ότι η σύνθεση του αμαλάματος και η θέση του στο λαμπτήρα έχει σημασία τόσο ως προς τα αποδιδόμενα φωτομετρικά χαρακτηριστικά του φωτός όσο και ως προς το χρόνο παροχής πλήρους φωτεινής ροής.

Έχουν αναφερθεί διάφορα άρθρα με τις έρευνες που έγιναν για τη μέτρηση της πτώσης τάσης καθόδου στους λαμπτήρες φθορισμού. Ακόμα μία σημαντική εργασία είναι του Nachtrieb (2005) [92], που χρησιμοποιείται μία χωρητική τεχνική (capacitive technique) για τη μέτρησή της σε χαμηλές αλλά και σε υψηλές συχνότητες. Η γνώση της πτώσης τάσης καθόδου σε συνδυασμό με τη μέτρηση της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου είναι χρήσιμα για τον προσδιορισμό της θέρμανσης που απαιτείται στο νήμα κατά την περίπτωση που ο λαμπτήρας εργάζεται σε κατάσταση μειωμένης φωτεινής ροής. Επί πλέον οι μετρήσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καλύτερο σχεδιασμό ενός ballast. Ο συγγραφέας θεωρεί ότι με τις βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν, βάσει των μετρήσεων, η ζωή ενός λαμπτήρα T12 μπορεί να αυξηθεί πέραν των 30000 ωρών. Μια σημαντική παρατήρηση που γίνεται είναι ότι η πτώση τάσης καθόδου αυξάνεται με την γήρανση των λαμπτήρων.

Ο Misono (1992) [93] κάνει ένα ενδελεχή έλεγχο της επίδρασης της πτώσης τάσης καθόδου στους λαμπτήρες φθορισμού στηριζόμενος και σε θεωρητική ανάλυση και σε πειραματικά αποτελέσματα. Διαπιστώθηκε για τους λαμπτήρες με χαμηλή ένταση ρεύματος που χρησιμοποίησε, ότι όταν η πτώση τάσης καθόδου είναι μικρότερη από 14 V ο λαμπτήρας θα επιτύχει την ονομαστική του ζωή. Το πιο ενδιαφέρον όμως συμπέρασμα είναι ότι προκύπτει μείωση της πτώσης τάσης καθόδου με αύξηση της πίεσης του αερίου στο σωλήνα αλλά και μείωση της επιφάνειας του ηλεκτροδίου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το διάγραμμα που παραθέτει με τις διάφορες τιμές της θερμοκρασίας λαμπρότητας (brightness temperature) όταν αλλάζει η ενεργειακή πυκνότητα του ηλεκτροδίου (energy density), την οποία ο συγγραφέας ορίζει σαν την ηλεκτρική ενέργεια που αποδίδεται στο ηλεκτρόδιο. Ουσιαστικά αυτό το διάγραμμα δείχνει την θερμοκρασία δύο ηλεκτροδίων, όταν ο λαμπτήρας έχει διαδοχικά τρεις διαφορετικές πιέσεις αερίου αργόν στο εσωτερικό του. Το συμπέρασμα είναι ότι όσο αυξάνεται η πίεση τόσο ελαττώνεται η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου, αποτέλεσμα που κατέγραψε και δική μας πειραματική εργασία που παρατίθεται σε άλλο κεφάλαιο της παρούσης διατριβής.

Επίσης ο Hadrath (2007) [94], παρουσιάζει μετρήσεις της πτώσης τάσης καθόδου και ανόδου σε λαμπτήρες, υπό διάφορες τιμές ρευμάτων λειτουργίας. Οι μετρήσεις προσομοιώνουν τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας ενός λαμπτήρα και γίνονται με την τεχνική της κινητής ανόδου (movable anode technique).

Το ενδιαφέρον φαινόμενο της καταφόρησης εξετάζει ο Nagai (2002) [95]. Το φαινόμενο αυτό που επιδρά στη φθορά των ηλεκτροδίων αναπτύσσεται διεξοδικά και αποδίδεται σε αυτό η βαρύτητα που του αναλογεί. Τονίζεται ότι είναι εντονότερο σε χαμηλές θερμοκρασίες και κατά την έναυση και στη λειτουργία, ακόμα και σε λαμπτήρες που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες.

Ο Collins (1994) [3] παρουσιάζει μία εκτενή έρευνα για τη συμπεριφορά διαφόρων τύπων συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού σε ποικιλία θερμοκρασιών περιβάλλοντος. Η ποσότητα

των λαμπτήρων που χρησιμοποιήσε στις μετρήσεις ήταν τρεις ανά τύπο, έχοντας 13 διαφορετικούς τύπους, τους οποίους υπέβαλαν σε μετρήσεις σε εξ διαφορετικές θερμοκρασίες (από 45 °C έως -18 °C). Οι μετρήσεις που έγιναν αφορούσαν ηλεκτρικές και φωτομετρικές παραμέτρους της έναυσης αλλά και της λειτουργίας. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, το σημαντικότερο συμπέρασμα της μελέτης ήταν ότι με τη μείωση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος επέρχεται μεγάλη μείωση της φωτεινής ροής και αύξηση του χρόνου αποκατάστασης της ισορροπίας της φωτεινότητας του λαμπτήρα.

Ο Graovac (2005) [96], προτείνει τρεις τρόπους για τη βελτίωση της απόδοσης των λαμπτήρων φθορισμού άμεσης έναυσης (ψυχρής καθόδου, cold cathode) σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας (-10 °C) περιβάλλοντος. Μία λύση που προτείνεται είναι η θέρμανσης εξωτερικώς του λαμπτήρα στα άκρα, αντί της αντικατάστασης του αερίου μίγματος του σωλήνα. Χρησιμοποιείται το υπολογιστικό πρόγραμμα ροής ρευστών PHOENICS για τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού προφίλ γύρω από το λαμπτήρα κατά την έναυση, ώστε να προσδιοριστεί το εκάστοτε σημείο με τη χαμηλότερη θερμοκρασία. Με τη χρήση των αποτελεσμάτων, έγιναν πειράματα για το βέλτιστο τρόπο θέρμανσης του σωλήνα, ώστε να δίνεται η πιο γρήγορη αποκατάσταση της εκπομπής της φωτεινής ροής.

Σε άρθρο των Myojo, Fukumasa (2003) [18] προτείνεται ένα κύκλωμα που μπορεί να τοποθετηθεί στο ballast και ανιχνεύει την εξάντληση του λαμπτήρα, ώστε να τον αποσυνδέει από το σύστημα έναυσης και να μην σπαταλάται άσκοπα ενέργεια. Στο άρθρο κατ' αρχάς αναπτύσσεται με διεξοδικό τρόπο το φαινόμενο του τέλους της ζωής των λαμπτήρων (end of lamp life, EOLL). Η εφαρμογή της ιδέας των συγγραφέων απαιτεί το σπάσιμο του ενός ηλεκτροδίου, οπότε το κύκλωμα ανιχνεύει την ανύψωση της θερμοκρασίας στη βάση στήριξης του νήματος. Βέβαια πολλοί κατασκευαστές ballast έχουν επινοήσει μέθοδο ανίχνευσης οποιασδήποτε αύξησης της ισχύος της συσκευής, ώστε να διακόπτεται η λειτουργία του λαμπτήρα, προτού φτάσει στην θραύση του νήματος. Η ιδέα αυτή όμως δεν έχει βρει εφαρμογή σε όλα τα ballast της αγοράς, λόγω κόστους.

Παρεμφερές θέμα πραγματεύεται ο Lester (2002) [12], όπου και τονίζεται η σπουδαιότητα της εφαρμογής του μηχανισμού για τη διακοπή της προσπάθειας του λαμπτήρα να τεθεί σε λειτουργία όταν αυτό δεν είναι εφικτό, ιδιαίτερα στους λαμπτήρες μικρής διαμέτρου, T4 και T5. Εξηγείται ότι αν σε λαμπτήρα αυξηθεί η πτώση τάσης καθόδου το αποτέλεσμα είναι να αυξηθεί η ισχύς του λαμπτήρα λόγω αυξημένης κατανάλωσης στην κάθοδο. Επινοήθηκε ένα κύκλωμα που ανιχνεύει την θραύση του νήματος. Στηρίζεται στην ανίχνευση μιας συνεχούς τάσης που εμφανίζεται επί πλέον της μεταβολής της εναλλασσόμενης τάσης του λαμπτήρα. Μόλις γίνει αυτό, το κύκλωμα επιβάλλει τη διακοπή της παροχής ρεύματος στο λαμπτήρα μέσα σε ελάχιστα δευτερόλεπτα.

Μια μελέτη για την επίδραση του παράγοντα κορυφής ρεύματος στη ζωή των λαμπτήρων έχει γίνει από τον Kaiser (2006) [97]. Αποδεικνύεται η φθορά των ηλεκτροδίων του

λαμπτήρα, όταν το ρεύμα, που τον τροφοδοτεί, έχει κορυφές στην κυματομορφή του. Οι μελετητές, με μία γεννήτρια παλμών και ένα ενισχυτή ισχύος, μετέβαλαν την κυματομορφή του ρεύματος του λαμπτήρα, ώστε να λειτουργεί υπό διάφορους παράγοντες κορυφής ρεύματος. Ο λαμπτήρας ήταν ακάλυπτος στο εσωτερικό του, ώστε με ένα φασματόμετρο οπτικών ινών να καταγράφεται η ποσότητα βαρίου που εκπέμπεται στη γειτονιά του ηλεκτροδίου στη συχνότητα 455,4 nm. Οι μετρήσεις απέδειξαν ότι, όταν ο CCF έχει τιμή 2,5 τότε η ποσότητα του βαρίου που εκπέμπεται από το ηλεκτρόδιο αυξάνεται κατά 150% από εκείνη που εκπέμπεται όταν η κυματομορφή είναι ημιτονοειδής, στη συχνότητα λειτουργίας των 60 Hz. Στη συχνότητα των 25 kHz και για CCF ίσο με 1,64 η αύξηση της ποσότητας του εκπεμπόμενου βαρίου ήταν 29%. Ταυτοχρόνως μετριόταν και η πτώση τάσης καθόδου, όπου και διαπιστώθηκε ότι αυξάνεται από 13,44 V όταν ο CCF είναι 1,41 σε 14,80 V όταν ο CCF είναι 2,46.

Ο συγγραφέας της εργασίας έχει δημοσιεύσει (2008) [98] άρθρο στο οποίο παρουσιάζονται τα σενάρια έναυσης διαφόρων ballast άμεσης και γρήγορης έναυσης. Γίνεται πρόβλεψη της επίδρασης του κάθε είδους έναυσης επί της ζωής του αντίστοιχου λαμπτήρα. Τα συστήματα με τα οποία έγιναν τα πειράματα δείχνουν πολύ καλά χαρακτηριστικά και εντός των ορίων που τίθενται από τους οργανισμούς τυποποίησης. Επισημαίνεται, παρ' όλ' αυτά, η δυσκολία επίτευξης ταυτόσημων χαρακτηριστικών διαφορετικών συστημάτων του ίδιου τύπου.

2.7. Έρευνα και μετρήσεις της ζωής των λαμπτήρων

Η γήρανση των συστημάτων φθορισμού είναι το κεντρικό θέμα της παρούσης διατριβής, επομένως πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην αρθρογραφία με αυτό το αντικείμενο. Δεν είναι εκτενής, λόγω διαφόρων τεχνικών και οικονομικών δυσκολιών που ήδη έχουν αναφερθεί. Ούτε και οι διεξαχθείσες μετρήσεις είναι ενδελεχείς ως προς το ποιοι παράγοντες και πως επιδρούν στη συνολική διάρκεια ζωής. Για τις εργασίες που αναφέρονται κατωτέρω παρατίθενται, εκτός των άλλων, και οι αριθμοί των δειγμάτων που λειτούργησαν, καθώς και οι κύκλοι λειτουργίας, αφού τα θέματα αυτά αφορούν ουσιαστικώς την παρούσα διατριβή.

Ο Davis έκανε πειράματα (1999) [99] χρησιμοποιώντας συμπαγείς λαμπτήρες, θέτοντάς τους σε λειτουργία υπό διάφορους κύκλους. Το κοινό χαρακτηριστικό όλων ήταν ότι ετίθεντο εκτός λειτουργίας για πέντε λεπτά. Η προσπάθεια ήταν να προσομοιωθούν οι κύκλοι με την οικιακή λειτουργία των λαμπτήρων, στην οποία θεωρείται ότι γίνονται συχνές εναύσεις των λαμπτήρων. Λειτουργούσαν αντιστοίχως για πέντε λεπτά, δεκαπέντε λεπτά, μία ώρα και τρεις ώρες. Μια ομάδα επίσης τέθηκε σε λειτουργία με τον καθιερωμένο κύκλο της Αμερικής, δηλαδή τρεις ώρες σε λειτουργία – είκοσι λεπτά εκτός, για να συγκριθούν τα αποτελέσματα και αν είναι δυνατόν να εξαχθεί συμπέρασμα για τη σχέση αυτού του κύκλου με τους υπόλοιπους.

Σε κάθε κύκλο χρησιμοποίησε έντεκα ομάδες λαμπτήρων από οκτώ ή τέσσερις λαμπτήρες η κάθε μία. Συνολικά χρησιμοποίησε 352 λαμπτήρες. Τα οκτώ ή τέσσερα συστήματα κάθε

ομάδας περιείχαν ακριβώς το ίδιο ballast και λαμπτήρα. Οι έντεκα ομάδες όμως διέφεραν μεταξύ τους στα ballast που χρησιμοποιούσαν. Επίσης μερικές ομάδες είχαν διαφορετικού τύπου λαμπτήρες από τις υπόλοιπες ομάδες, ενώ άλλες είχαν ίδιου τύπου. Φυσικά, ballast και λαμπτήρες ήταν διαφόρων κατασκευαστών.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μετρούνταν διάφορα χαρακτηριστικά κάθε συστήματος. Από κάθε ομάδα η μέτρηση γινόταν σε ένα λαμπτήρα. Τα χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν ήταν: χρόνος έναυσης (starting time), ρεύμα προθέρμανσης καθόδου (cathode preheat current), τάση έναυσης λαμπτήρα (lamp starting voltage), ρεύμα λειτουργίας λαμπτήρα (lamp operating current) και ο παράγων κορυφής ρεύματος. Οι χρόνοι έναυσης που βρέθηκαν ήταν όλοι ικανοποιητικοί, αφού ήταν πάνω από το όριο των 0,5 δευτερολέπτων, εκτός από τις δύο ομάδες με τα ballast άμεσης έναυσης. Σε όλες, εκτός από δύο ομάδες, ο παράγων κορυφής ρεύματος ήταν μεγαλύτερος του ορίου 1,7.

Από τους χρόνους ζωής των λαμπτήρων που καταγράφηκαν φαίνεται η μεγάλη επίδραση του χρόνου που μένουν σε λειτουργία οι λαμπτήρες. Όσο περισσότερο χρόνο λειτουργούν τόσο μεγαλύτερη διάρκεια ζωής έχουν.

Ένα από τα συμπεράσματα των πειραμάτων είναι ότι οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται με όμοια συστήματα. Η σύγκριση, αν είναι δυνατόν, να γίνεται για προϊόντα της ίδιας σειράς του ίδιου κατασκευαστή. Οι περιορισμοί αυτοί είναι καλό να τηρούνται, διότι μια μικρή διαφορά σε ίδια προϊόντα άλλης φίρμας, είναι πιθανόν να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα. Παρ' όλ' αυτά, το τυπικό των διαδικασιών υποχρεώνει τους ερευνητές να πειραματίζονται με διάφορα προϊόντα. Ένα άλλο συμπέρασμα των μετρήσεων είναι ότι τα αποτελέσματα με τον καθιερωμένο κύκλο, σε κάποιες περιπτώσεις αποκλίνουν υπερβολικά από τις ονομαστικές τιμές που δίνει ο κατασκευαστής του προϊόντος. Είναι πιθανό η αιτία γι' αυτές τις μεγάλες διαφορές να είναι το μικρό δείγμα που είχε ο ερευνητής σε κάθε ομάδα.

Σε ανάλογο άρθρο του Davis (1996) [100], γίνεται περιγραφή πειραμάτων με σύντομους κύκλους λειτουργίας. Δύο από αυτούς είχαν χρόνο λειτουργίας 40 δευτερόλεπτα και αντίστοιχους χρόνους σβέσης τα 20 δευτερόλεπτα και τα πέντε λεπτά. Δύο άλλοι κύκλοι είχαν χρόνο λειτουργίας τα πέντε λεπτά και ήσαν εκτός ίδιους χρόνους με τους προηγούμενους. Ένας πέμπτος κύκλος ήταν ο καθιερωμένος στην Αμερική. Η έρευνα αφορούσε στον προσδιορισμό της επίδρασης του κύκλου λειτουργίας του λαμπτήρα στη ζωή του και στον αριθμό των εναύσεων που αυτός θα επιτύχει μέχρι την εξάντλησή του. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δύο ειδών λαμπτήρες: οι σωληνωτοί και οι συμπαγείς με χωριστό ballast. Τα ballast και στις δύο περιπτώσεις λαμπτήρων ήταν και μαγνητικά και ηλεκτρονικά. Κάθε ομάδα με ένα συνδυασμό λαμπτήρα – ballast περιείχε οκτώ ίδια συστήματα. Υπήρχαν δέκα διαφορετικές ομάδες.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων διαπιστώθηκε ότι οι σύντομοι κύκλοι λειτουργίας με μικρούς χρόνους σβέσης των συστημάτων, φθείρουν λιγότερο τα ηλεκτρόδια. Αυτό

δικαιολογείται από τους συγγραφείς ως εξής: η έναυση γίνεται με σχετικά υψηλή θερμοκρασία, αφού τα ηλεκτρόδια δεν προλαβαίνουν να ψυχθούν, επομένως η βλάβη είναι μικρότερη. Διαπιστώθηκε λοιπόν ότι οι κύκλοι που διέκοπταν τη λειτουργία επί είκοσι δευτερόλεπτα έδιναν περισσότερους συνολικά κύκλους. Μετρώντας την αντίσταση των ηλεκτροδίων από τη στιγμή που παύει να λειτουργεί ο λαμπτήρας και για πέντε λεπτά υπολογίζεται η αντίστοιχη πτώση της θερμοκρασίας τους. Οι σωληνωτοί, λόγω καλύτερου εξαερισμού, ψύχονται πιο γρήγορα από τους συμπαγείς.

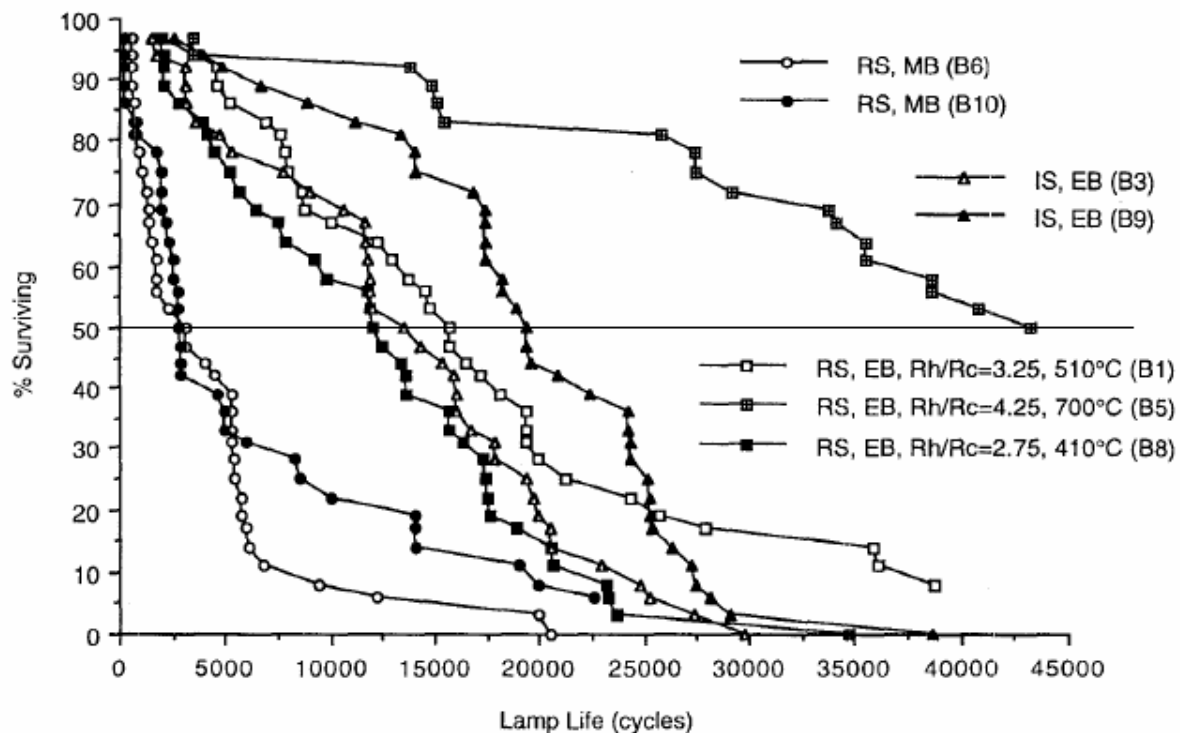
Σε άλλο άρθρο του ίδιου συγγραφέα (1999) [34] τονίζεται ότι ο σκοπός της έρευνας είναι να βρεθεί η επίδραση των παραμέτρων του ballast, κατά τη γήρανση των λαμπτήρων τους οποίους οδηγεί. Δεν κρύβουν οι συγγραφείς ότι απώτερος σκοπός τους είναι η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής του λαμπτήρα βάσει των χαρακτηριστικών του χρησιμοποιούμενου ballast. Τονίζεται στην εισαγωγή η έλλειψη προηγούμενων αναφορών πάνω στο θέμα και πολύ περισσότερο κάποιων ισχυρών κριτηρίων. Υπάρχουν φυσικά οι περιορισμοί των αρχών τυποποίησης σε κάποια χαρακτηριστικά, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι η τήρησή τους δίνει και τα καλύτερα αποτελέσματα. Άλλωστε η εισαγωγή νέων προϊόντων στην αγορά απαιτεί μια συνεχή ανανέωση των κριτηρίων.

Το δείγμα των συστημάτων ballast - λαμπτήρα που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρκετά μεγάλο, γι' αυτό και θεωρείται αξιόπιστο το όλο πείραμα και τα αποτελέσματά του έχουν χρησιμοποιηθεί σε άφθονα άρθρα.

Σε μία δημοσίευση της NLRIP (2005) [54], παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από μακροχρόνιες μετρήσεις σε 400 συμπαγείς λαμπτήρες πέντε διαφορετικών κατασκευαστών με παρόμοιες καταναλώσεις και χαρακτηριστικά. Σε πείραμα με διάφορες συνθήκες μετρήθηκαν ηλεκτρικά και φωτομετρικά χαρακτηριστικά των συστημάτων. Οι συνθήκες λειτουργίας των λαμπτήρων είχαν σχέση με την θέση των λαμπτήρων: οριζόντιοι, η βάση προς τα πάνω, η βάση προς τα κάτω και ο λαμπτήρας σε κλειστό φωτιστικό. Το αναμενόμενο θα ήταν οι κλειστοί λαμπτήρες να έχουν μικρότερη συνολική διάρκεια ζωής, όμως αυτό συνέβη μόνο στους δύο από τους πέντε κατασκευαστές. Οι λαμπτήρες των τριών άλλων κατασκευαστών που λειτουργούσαν σε κλειστό φωτιστικό δεν ξεχώρισαν στο χρόνο ζωής από τις άλλες τοποθετήσεις. Όλες οι ομάδες πέτυχαν το χρόνο ζωής που έθετε ο κατασκευαστής εκτός από μια ομάδα που ήταν σε κλειστό φωτιστικό. Το γενικό συμπέρασμα των μετρήσεων είναι ότι η θέση δεν επηρεάζει το χρόνο ζωής των συμπαγών λαμπτήρων.

Η κορωνίδα του άρθρου είναι το διάγραμμα που προέκυψε από τις μετρήσεις και φαίνεται στο σχήμα 2.5. Στον κατακόρυφο άξονα είναι ο συντελεστής επιβίωσης λαμπτήρων. Είναι φανερό το μειονέκτημα των ηλεκτρομαγνητικών ballast έναντι των ηλεκτρονικών όσον αφορά τη συνολική διάρκεια της ζωής τους. Πάντως τα ηλεκτρονικά ballast άμεσης έναυσης εκτιμήθηκαν ως αξιόλογα, αφού έχουν συγκρίσιμη διάρκεια ζωής με τα rapid start.

Στο άρθρο δίνεται μεγάλη έμφαση στο αν ο λαμπτήρας βρίσκεται πρώτος στη σειρά των δύο λαμπτήρων που έχει κάθε ballast. Αποδεικνύεται ότι η σειρά δεν έχει σημασία, εκτός και εάν επηρεάζει την προθέρμανση του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 2.5. Μέτρηση ζωής λαμπτήρων. Τα σημεία των γραμμών δείχνουν τη χρονική στιγμή που επήλθε η εξάντληση κάθε λαμπτήρα [54].

Το άρθρο καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο δρόμος είναι μακρύς μέχρι να προσδιοριστεί μια αξιόπιστη σχέση μεταξύ των γρήγορων κύκλων λειτουργίας και του καθιερωμένου, ώστε να μειωθεί ο χρόνος των πειραμάτων.

Μια σημαντική σειρά πειραμάτων του Narendran (2000) [101] αφορά στην πρόβλεψη της ζωής των λαμπτήρων που εργάζονται με ballast άμεσης έναυσης σε γρήγορους κύκλους. Ασχολείται με τα ηλεκτρονικά ballast άμεσης έναυσης διότι κατέχουν στην αγορά μεγάλο ποσοστό όταν χρησιμοποιούνται σε σωληνωτούς λαμπτήρες. Η επιτυχία που έχουν οφείλεται κυρίως στο χαμηλό κόστος αγοράς και τη γρήγορη έναυση που πετυχαίνουν. Από την αρχή ακόμη της αναφοράς των ερευνητών τονίζεται η αποτυχία της συσχέτισης της μετρούμενης ζωής των λαμπτήρων με κάποιο γρήγορο κύκλο λειτουργίας και αυτής που μετράται με τον καθιερωμένο κύκλο. Αναγνωρίζεται επίσης η σημασία των παραμέτρων της έναυσης, πέραν αυτών της λειτουργίας, για τη συνολική διάρκεια της ζωής του λαμπτήρα.

Το άρθρο στηρίζεται και ερευνά μια απλή ιδέα τριών λογικών υποθέσεων:

- ✓ Σε κάθε έναυση δαπανάται μια σταθερή ποσότητα της επικάλυψης των ηλεκτροδίων (sputtering). Επιπροσθέτως κατά την έναυση δεν συμβαίνει εξάτμιση της επικάλυψης.
- ✓ Η ποσότητα της επικάλυψης που δαπανάται κατά τη λειτουργία λόγω εξάτμισης (evaporation) είναι ανάλογη του χρόνου λειτουργίας. Κατά τη λειτουργία δεν συμβαίνει εκσφενδόνιση.
- ✓ Το ηλεκτρόδιο καταστρέφεται όταν εξαντληθεί όλη η επικάλυψη με αυτούς τους δύο τρόπους (πράγμα που δεν συμβαίνει πάντα).

Με βάση αυτές τις υποθέσεις θα ισχύει η σχέση:

$$L = N_s \cdot a + N_h \cdot \beta \quad (2.3)$$

L: το ποσοστό της επικάλυψης που έχει καταναλωθεί (όταν L=1 θα καταστραφεί το ηλεκτρόδιο)

N_s : αριθμός εναύσεων

N_h : ώρες λειτουργίας

a: ποσότητα της επικάλυψης, ως ποσοστό της συνολικής, που χάνεται σε κάθε έναυση

β : ποσότητα της επικάλυψης, ως ποσοστό της συνολικής, που χάνεται κάθε ώρα λειτουργίας

Τα αποτελέσματα έχουν αρκετές αποκλίσεις μεταξύ τους, αλλά σε γενικές γραμμές συμπεραίνονται τα εξής: σε κάθε έναυση δαπανάται από $4 \cdot 10^{-5}$ ως $11,5 \cdot 10^{-5}$ τοις εκατό της επικάλυψης. Σε κάθε ώρα λειτουργίας καταναλώνεται από $2,2 \cdot 10^{-5}$ ως $4,4 \cdot 10^{-5}$ τοις εκατό από την επικάλυψη. Μια παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι αν ένα σύστημα από τα μετρηθέντα έχει μεγάλη εκσφενδόνιση, δεν σημαίνει κατ' ανάγκη ότι θα έχει και μεγάλη εξάτμιση (evaporation).

Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων που γίνεται, βρίσκεται ότι υπάρχει μια καλή συσχέτιση του χρόνου ζωής των λαμπτήρων με δύο παραμέτρους: του χρόνου έναυσης και της τάσης εκκένωσης. Οι συγγραφείς βρήκαν ότι η χρονική ολοκλήρωση της τάσης έναυσης κατά το χρόνο που διαρκεί η έναυση, δίνει μεγάλη τιμή συσχέτισης. Το ολοκλήρωμα της τάσης δίνεται από τον τύπο:

$$\int_0^{start} V dt \quad (2.4)$$

Διαπιστώθηκε δηλαδή ότι η παράμετρος αυτή συσχετίζεται καλύτερα με το χρόνο ζωής του λαμπτήρα, από την αντίστοιχη τιμή για την τάση ή το ρεύμα έναυσης.

Ως συνέχεια των προηγούμενων πειραμάτων και για την επαλήθευσή τους, διεξήχθησαν από το Lighting Research Center, νέα πειράματα που περιγράφονται σε μεταγενέστερο άρθρο (2002) [102]. Έγιναν μετρήσεις σε λαμπτήρες που τους οδηγούσαν ballast άμεσης έναυσης,

με ποικιλία στους χρόνους των κύκλων λειτουργίας. Μια ομάδα λαμπτήρων ήταν σε λειτουργία συνέχεια, ενώ μια άλλη λειτουργούσε με τον καθιερωμένο κύκλο λειτουργίας (3 ώρες/20 λεπτά). Αυτοί ήταν οι αργοί κύκλοι. Υπήρχε ένας μέσος διάρκειας: 1 ώρα/20 λεπτά και ένας σύντομος: 5 λεπτά/20 λεπτά.

Δυστυχώς διαπιστώθηκε ότι το ολοκλήρωμα της τάσης, ενώ στις πρώτες μετρήσεις είχε δώσει ενθαρρυντικά αποτελέσματα, στα νέα πειράματα δεν είχε ανάλογη επιτυχία. Ειδικά στον γρήγορο κύκλο, η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού του εν λόγω ολοκληρώματος και του χρόνου ζωής των λαμπτήρων, ήταν μόλις 0,30. Η αποτυχία στο σημείο αυτό είναι σημαντική, διότι ακριβώς στους σύντομους κύκλους εστιάζεται η έρευνα, ώστε να υπολογίζεται η συνολική διάρκεια ζωής των λαμπτήρων σε λιγότερο χρόνο. Πρέπει να σημειωθεί ότι μέχρι την έκδοση του άρθρου, δεν είχαν καεί πολλοί λαμπτήρες από τους πιο αργούς κύκλους λειτουργίας και δεν μπορούσε να βγει κάποιο συμπέρασμα γι' αυτούς.

Μια ανησυχία που διαπνέει τους συγγραφείς είναι η διαπίστωση της μεγάλης απόκλισης στο χρόνο ζωής ακόμη και στα ακριβώς ίδια συστήματα λαμπτήρα-ballast. Για παράδειγμα παρατηρούνται συχνά στην ίδια ομάδα λαμπτήρες να καταστρέφονται στις 5000 εναύσεις ενώ ο μέσος αριθμός εναύσεων να είναι 15 000. Τέτοιου είδους διαπιστώσεις κάνουν ακόμα πιο επιτακτική την σε βάθος έρευνα της λειτουργίας των λαμπτήρων και της σχέσης της με τη συνολική διάρκεια της ζωής τους.

Μια περισσότερο προχωρημένη μελέτη επιχειρείται από τον Rosillo (2009) [103], για να επιτύχει πρόβλεψη της διάρκειας ζωής ενός λαμπτήρα φθορισμού. Εδώ λαμβάνονται υπ' όψιν και άλλοι παράγοντες, όπως το χρονικό ολοκλήρωμα του ρεύματος αίγλης κατά την προθέρμανση και η τάση λειτουργίας του λαμπτήρα σε σχέση με την προτεινόμενη τάση από τον κατασκευαστή. Βέβαια ο πρώτος από τους δύο προαναφερθέντες παράγοντες πρακτικά είναι δύσκολο να μετρηθεί στο μοντέλο τους διότι τα συστήματα που χρησιμοποίησαν για να πειραματιστούν είχαν μία χαοτική συμπεριφορά και δεν μπορούσε να προσδιοριστεί η ακριβής χρονική στιγμή της μετάβασης από την αίγλη στο τόξο. Τα συστήματα με τα οποία πειραματίστηκαν ήταν προσαρμοσμένα για χρήση σε μέρη που η ηλεκτροδότηση γίνεται μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα ballast τροφοδοτούνταν με τάση 12 V DC. Αυτό δεν αλλάζει τη λειτουργία των λαμπτήρων, αφού αυτή εξαρτάται αποκλειστικά από την τάση και το ρεύμα που παρέχει το ballast. Αυτά ήταν αντίστοιχα με αυτά που τροφοδοτούν όλους τους κοινούς λαμπτήρες. Ο παράγοντας πρόβλεψης είναι ο LT/LT_0 , ο οποίος δείχνει το λόγο της ζωής που προβλέπεται από το μοντέλο για το λαμπτήρα (LT), προς τη ζωή που δίνει ο κατασκευαστής (LT_0). Το μοντέλο χρησιμοποιεί τη σχέση (2.5) στην οποία $V_{lampnom}$ είναι η ονομαστική τάση του λαμπτήρα, V_{lamp} η μετρηθείσα τάση και I_{glow} το ρεύμα αίγλης.

$$\frac{LT}{LT_0} = \frac{1}{1 + k_0 \int I_{glow} dt + k_1 \left(\frac{V_{lamp}}{V_{lampnom}} \right) + k_2 \left(\frac{V_{lamp}}{V_{lampnom}} \right)^2 + k_3} \quad (2.5)$$

Το ολοκλήρωμα του ρεύματος αίγλης, ο παράγοντας $V_{lamp}/V_{lampnom}$ και ο $(V_{lamp}/V_{lampnom})^2$ θεωρούνται ανεξάρτητες μεταβλητές ενώ οι συντελεστές k_0 , k_1 , k_2 και k_3 είναι σταθερές που εξαρτώνται όμως από το εκάστοτε σύστημα λαμπτήρα - ballast που εξετάζεται. Αυτό είναι και το μειονέκτημα του μοντέλου: είναι προσαρμοσμένο στα συστήματα του πειράματος και δεν είναι σίγουρο ότι θα έχει καλή προσέγγιση αποτελεσμάτων και σε άλλους συνδυασμούς λαμπτήρων - ballast.

Ο Rosillo σε μια προγενέστερη εργασία του (2004) [104], είχε μελετήσει πάλι συστήματα ballast-λαμπτήρα που κατασκευάζονται για να τοποθετηθούν σε εγκαταστάσεις με φωτοβολταϊκά συστήματα. Χρησιμοποίησε σε ένα πείραμα μέτρησης ζωής λαμπτήρων φθορισμού, 14 διαφορετικά συστήματα φωτισμού για τις μετρήσεις του. Η μελέτη του επικεντρώθηκε στην επίδραση του παράγοντα κορυφής ρεύματος (CCF) στη ζωή των λαμπτήρων και διαπίστωσε ότι η τιμή του αποτελεί μια πολύ καλή ένδειξη για τη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα. Ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι σε τέτοιου είδους τεστ, δεν πρέπει οι κύκλοι λειτουργίας να είναι πολύ μικροί, διότι οδηγούν σε ανακριβή αποτελέσματα. Οι χρόνοι που προτείνονται είναι μεγαλύτεροι από τα πέντε πρώτα λεπτά.

Ο Alling (1993) [105] έκανε μετρήσεις σε λαμπτήρες φθορισμού μέχρι να καταστραφούν χρησιμοποιώντας πολύ γρήγορους κύκλους λειτουργίας (stress cycle test). Κάθε κύκλος διαρκούσε μόλις οκτώ δευτερόλεπτα, αφού οι λαμπτήρες λειτουργούσαν για τέσσερα δευτερόλεπτα και για άλλα τέσσερα ήταν εκτός λειτουργίας. Βέβαια αποδείχθηκε ότι τέτοιοι γρήγοροι κύκλοι δεν οδηγούν σε ασφαλή συμπεράσματα. Παράλληλα λειτουργούσαν και συστήματα σύμφωνα με τον καθιερωμένο κύκλο στην Αμερική. Τα ballast που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ηλεκτρονικά άμεσης έναυσης και λίγα ηλεκτρομαγνητικά.

Στην εργασία αυτή η διάρκεια ζωής των συστημάτων κατά την λειτουργία με τον καθιερωμένο κύκλο ήταν περί τις 6 με 9 χιλιάδες ώρες. Στη λειτουργία με τον πολύ γρήγορο κύκλο η διάρκεια ζωής ήταν λίγες ώρες. Ένα ενδιαφέρον στοιχείο που συνάγεται είναι ότι με τον γρήγορο κύκλο οι εναύσεις που επέτυχε κάθε τύπος λαμπτήρα ήταν περίπου τριπλάσιες από εκείνες που επέτύγχανε με τον καθιερωμένο κύκλο. Στον καθιερωμένο ήταν κατά μέσο όρο 2 500 εναύσεις, ενώ με τον γρήγορο περισσότερες από 7 000.

Στους λαμπτήρες με τους οποίους πειραματιζόταν, έκανε και μετρήσεις σε τακτά χρονικά διαστήματα στη φωτεινή ροή και διαπίστωσε μεγάλη μείωση με την πάροδο του χρόνου. Οι μετρήσεις της φωτεινής ροής έγιναν στους λαμπτήρες υπό τον καθιερωμένο κύκλο λειτουργίας. Προς το τέλος της ζωής των λαμπτήρων η μείωση έφτασε στο 25%. Συμπερασματικά, αυτό το άρθρο είναι ενδεικτικό των δυσκολιών που συναντά κανείς σε αυτό το πεδίο έρευνας.

Η επίδραση των προγραμματισμένων ballast στη ζωή των λαμπτήρων φθορισμού εξετάζεται από τον dos Santos (2005) [106]. Ο συγγραφέας προτείνει ένα ballast που είναι τύπου programmed start για να βελτιωθεί η διάρκεια ζωής ενός λαμπτήρα 28W/T5. Αφού το

κατασκεύασε έκανε τεστ ζωής σε λίγους λαμπτήρες με αυτό αλλά και με άλλα δύο που δεν παρείχαν προθέρμανση. Οι λαμπτήρες ήταν σε λειτουργία για 30 δευτερόλεπτα και εκτός στον ένα κύκλο για 30 δευτερόλεπτα, και στον άλλο για 4,5 λεπτά. Οι κύκλοι λειτουργίας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σχετικά γρήγοροι, για να παραχθούν τα αποτελέσματα σύντομα. Επομένως, παρά το ότι αυτά δεν είναι και τόσο αξιόπιστα, είναι αντιπροσωπευτικά και συνάδουν με άλλων ερευνητών.

2.8. Αντικείμενο και στόχοι της διατριβής

2.8.1. Θέση του προβλήματος

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρθηκαν άρθρα και συγγράμματα που μελετούν όλους τους παράγοντες που άπτονται του θέματος της γήρανσης των λαμπτήρων φθορισμού. Έγινε αναφορά στη βιβλιογραφία που σχετίζεται με τη διαδικασία της παραγωγής φωτός, από τη δημιουργία του αρχικού ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων μέχρι τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας στο λαμπτήρα. Κρίθηκε επίσης απαραίτητο να συμπεριληφθούν οι δημοσιεύσεις οι σχετικές με το ηλεκτρικό κύκλωμα τροφοδοσίας των λαμπτήρων. Αναφέρθηκαν εργασίες που αφορούσαν στα ηλεκτρόδια, τα οποία είναι από τα πιο σημαντικά και ενδιαφέροντα τμήματα του λαμπτήρα. Φάνηκε ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων η εξάντληση ενός λαμπτήρα σχετίζεται με τη φθορά ενός εκ των ηλεκτροδίων ή και των δύο.

Από τα εκτεθέντα επί της βιβλιογραφίας του θέματος της διατριβής, αναδεικνύεται η εγγενής δυσκολία που παρουσιάζει το εγχείρημα της πρόβλεψης της ζωής των λαμπτήρων φθορισμού.

Κατ' αρχάς υπάρχει έλλειψη αρθρογραφίας, ειδικά στο τμήμα που αφορά στα πειράματα με εμπορικά συστήματα φωτισμού. Σε τέτοια πραγματικά συστήματα μπορούν μεν να καταγραφούν τιμές των χαρακτηριστικών, δεν υπάρχει όμως η δυνατότητα μεταβολής τους. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν συστήματα από το εμπόριο. Οι πειραματικές ομάδες που δημιουργήθηκαν αποτελούνται από ακριβώς ίδιους τύπους λαμπτήρων και ballast. Όμως υπάρχουν μεταξύ τους διαφορές στα χαρακτηριστικά. Ασφαλώς, αυτές δεν είναι μεγάλες. Εξ αντικειμένου λοιπόν, το εύρος των συμπερασμάτων της διατριβής περιορίζεται, αφού στηρίζεται μόνο στα χαρακτηριστικά που έχουν τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν. Παράλληλα όμως, ισχυροποιείται η αξιοπιστία τους, αφού προέρχονται από μετρήσεις πραγματικών συστημάτων.

Τα άρθρα που υπάρχουν στην σημερινή βιβλιογραφία αναφέρονται σε συγκεκριμένα συστήματα, τα οποία πολύ πιθανόν να θεωρούνται ελαφρώς πεπαλαιωμένα αφού έχει παρέλθει αρκετός χρόνος από τη στιγμή της προμήθειάς τους από τους ερευνητές. Έχουν μεσολαβήσει τα πειράματα γήρανσης (που είναι μακροχρόνια) και η δημοσίευση των αποτελεσμάτων. Για τα συγκεκριμένα συστήματα που μελετήθηκαν στην παρούσα διατριβή, δεν έχουν δημοσιευθεί (ούτε και μέχρι σήμερα) μετρήσεις, αφού όταν αγοράστηκαν ήταν τα πιο σύγχρονα της αγοράς στο είδος τους.

Ένα άλλο πρόβλημα, που παρουσιάζεται κατά την ερμηνεία διαφόρων φαινομένων ή αποτελεσμάτων, είναι ότι συχνά η εξήγηση που μπορεί να δοθεί δεν μπορεί να είναι μονοσήμαντη. Αυτό οφείλεται στη μη γνώση ορισμένων τιμών των χαρακτηριστικών των ballast και των λαμπτήρων. Για παράδειγμα, ο κατασκευαστής του ballast δεν δίνει τον τρόπο πυροδότησης της τάσης έναυσης του λαμπτήρα ή ο κατασκευαστής του λαμπτήρα δεν δίνει την ακριβή ποσότητα υδραργύρου σ' αυτόν. Το αποτέλεσμα είναι να αποδίδεται η ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε διάφορες πιθανές εξηγήσεις και όχι σε μία.

Έχοντας υπ' όψιν τις προαναφερθείσες εργασίες, παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα σημεία της εργασίας και οι αντίστοιχες δυσκολίες.

Για τον καθορισμό των χρόνων των κύκλων λειτουργίας υπήρξε μεγάλος προβληματισμός, αφού δεν είχαν υπάρξει μέχρι τις αρχές του έτους 2006, που οργανώθηκαν τα πειράματα, δημοσιεύσεις σε αντίστοιχες μετρήσεις με λαμπτήρες φθορισμού T5. Γι' αυτό δεν μπορούσε να προβλεφθεί ο αριθμός των έναυσεων που θα επιτύγχαναν οι λαμπτήρες με τα διάφορα ballast που τους οδηγούσαν. Το αποτέλεσμα ήταν οι λαμπτήρες στους γρήγορους κύκλους με ballast άμεσης έναυσης να καταστρέφονται πολύ σύντομα (σε διάστημα λίγων μηνών), ενώ στους ίδιους κύκλους με ballast προθέρμανσης, μετά την παρέλευση πολλών ετών.

Ένας άλλος παράγοντας που έχει σημασία για τα φαινόμενα της έναυσης και της λειτουργίας των λαμπτήρων, είναι ο χρόνος που το σύστημα μένει εκτός λειτουργίας, κατά τον οποίο ο λαμπτήρας τείνει να αποκτήσει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έχει αποδειχθεί πως για να αποκτήσουν τα ηλεκτρόδια ακριβώς την ίδια θερμοκρασία με το περιβάλλον, απαιτείται περισσότερο από ένα εικοσιτετράωρο [91]. Όμως, πρακτικά δεν θεωρείται απαραίτητο να υπάρχει τόση μεγάλη αναμονή [34, 100], αφού τα ηλεκτρόδια των σωληνωτών λαμπτήρων ανακτούν το 99% της τιμής της ηλεκτρικής αντίστασης τους σε πέντε λεπτά, ενώ οι συμπαγείς σε αυτό το χρόνο το 93% [100].

Επίσης, σε σχέση με τους κύκλους λειτουργίας, υπάρχει μία διχογνωμία για τους ελάχιστους χρόνους που θα πρέπει να τίθενται σε λειτουργία οι λαμπτήρες, αλλά και εκτός λειτουργίας. Από τις δημοσιεύσεις φαίνεται ότι χρόνοι λειτουργίας κάτω των 10 λεπτών πρέπει να αποφεύγονται όταν γίνονται μετρήσεις χαρακτηριστικών. Όμως δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που οι ερευνητές χρησιμοποιούν χρόνους ακόμα και λίγων δευτερολέπτων όταν θέλουν να ανιχνεύσουν μία πιθανή σχέση μεταξύ της ζωής των λαμπτήρων και του κύκλου λειτουργίας. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με τους χρόνους που προτείνονται για το διάστημα που πρέπει να τίθενται εκτός λειτουργίας οι λαμπτήρες. Σε όλα, ανεξαιρέτως, τα άρθρα υπάρχει ως συμπέρασμα ότι υπάρχει δυσκολία όσον αφορά στην επίτευξη του στόχου της πρόβλεψης της ζωής του λαμπτήρα, ανεξαρτήτως του κύκλου λειτουργίας.

Ένας άλλος προβληματισμός πριν την έναρξη των πειραμάτων ήταν η επιλογή του πλήθους των λαμπτήρων κάθε ομάδας. Αφ' ενός υπήρχε το θέμα του κόστους, αφ' ετέρου έπρεπε να χρησιμοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι για να αυξηθεί η αξιοπιστία των

αποτελεσμάτων. Ο αριθμός που επελέγη ήταν συνδυασμός και των δύο αυτών παραγόντων. Όπως αναφέρθηκε στην αρθρογραφία, πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν τέσσερα έως οκτώ όμοια συστήματα ανά ομάδα, αριθμοί που υιοθετήθηκαν και στην παρούσα μελέτη.

Είναι πολύ σημαντικό να έχουμε στατιστικά αποτελέσματα για το χρόνο ζωής των συστημάτων φωτισμού, κυρίως σε περιπτώσεις που οι λαμπτήρες λειτουργούν υπό διάφορους κύκλους λειτουργίας, οι οποίοι συνήθως ανταποκρίνονται και στον ρεαλιστικό τρόπο λειτουργίας των συστημάτων. Και τούτο γιατί οι περισσότερες έρευνες αφορούν θεωρητικά μοντέλα και εκτιμήσεις του χρόνου ζωής και όχι άμεσες μετρήσεις. Οι κυριότεροι λόγοι που δεν γίνονται μετρήσεις σε πραγματικά συστήματα για την άντληση αποτελεσμάτων είναι οι εξής:

- ✓ Το κόστος των συστημάτων είναι αρκετό, διότι απαιτούνται δεκάδες τέτοια για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα.
- ✓ Απαιτείται υπερβολικός χρόνος για τα πειράματα, μέχρι να τεθούν εκτός λειτουργίας τα συστήματα, λόγω φθοράς.
- ✓ Είναι δύσκολο να διατεθεί ένας μεγάλος χώρος για την τοποθέτηση και λειτουργία των συστημάτων επί σειρά ετών. Ειδικά σε χώρο εργαστηρίων φωτισμού είναι ακόμα πιο δύσκολο αφού στα εργαστήρια αυτά πολύ συχνά χρειάζεται σκότος για να γίνονται οι τρέχουσες μετρήσεις.

Επί πλέον, σε πραγματικά συστήματα δεν μπορεί ο ερευνητής να μεταβάλλει κάποιο από τα χαρακτηριστικά, ώστε να διερευνήσει το αποτέλεσμα που προκύπτει από την αλλαγή αυτή. Επομένως, εξετάζει μόνο την περιοχή τιμών που τυχαίνει να έχουν τα χαρακτηριστικά των συστημάτων που έχει προμηθευτεί. Το αποτέλεσμα είναι να μην έχει ένα ευρύ πεδίο τιμών για την εξαγωγή των συμπερασμάτων, πεδίο που τυχόν θα είχε εάν χρησιμοποιούσε μία ιδιοκατασκευή. Όμως ένα μοντέλο δεν παρέχει ασφαλή αποτελέσματα αφού μπορεί να ομοιάζει αλλά δεν αντικαθιστά τα πραγματικά συστήματα. Αυτό σημαίνει ότι στα πειράματα για τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων φωτισμού πρέπει να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερα συστήματα. Για την αξιοπιστία λοιπόν των συμπερασμάτων είναι προτιμότερη η χρήση λαμπτήρων και ballast από την αγορά.

Έχοντας υπ' όψιν όλους αυτούς τους προβληματισμούς, αλλά και άλλους που προέκυψαν κατά την πορεία των προκαταρκτικών πειραμάτων, έγινε η επιλογή των συστημάτων όπως αυτά περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο. Επελέγησαν οι κύκλοι λειτουργίας που κρίθηκε ότι θα συμβάλλουν στους στόχους της διατριβής. Επίσης οργανώθηκε η διαδικασία των μετρήσεων επιλεγμένων χαρακτηριστικών, που ήταν απαραίτητα για την πρόβλεψη της ζωής των λαμπτήρων.

Οι προαναφερθέντες λόγοι δείχνουν τις αντικειμενικές δυσκολίες της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε.

Στο χρόνο της διδακτορικής διατριβής τα συστήματα έχουν το χρόνο να φθαρούν ώστε να εξαχθούν τα αναμενόμενα συμπεράσματα. Επομένως το πρόβλημα του χρόνου και της διάρκειας της πειραματικής διαδικασίας έχει λυθεί, σχεδόν εξ' ολοκλήρου. Τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις είναι από τα πιο εμπορικά της αγοράς, γνωστότατων εταιριών και χρησιμοποιούνται σε καταστήματα, γραφεία, δημόσια κτήρια και προσφάτως σε κατοικίες.

2.8.2. Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Ένας από τους κύριους σκοπούς της εργασίας που παρουσιάζεται, είναι να μελετηθεί η επίδραση του κύκλου λειτουργίας, στη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων φθορισμού· να βρεθεί δηλαδή ένα μοντέλο γήρανσης των συστημάτων. Το μοντέλο αυτό θα προσδιορίζει την αναμενόμενη ζωή του λαμπτήρα σε σχέση με το χρόνο που είναι εν λειτουργία σε κάθε κύκλο. Οι παράμετροι του μοντέλου θα είναι τα διάφορα χαρακτηριστικά που επιδρούν στη ζωή του λαμπτήρα. Θα μελετηθεί επομένως η επίδραση των χαρακτηριστικών αυτών στη ζωή του λαμπτήρα. Η εκπλήρωση του προαναφερθέντος στόχου θα έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση των συστημάτων φωτισμού καθώς και την καλύτερη και ορθολογικότερη χρήση των λαμπτήρων φθορισμού από τους καταναλωτές.

Το ίδιο επιδιώκεται και από πλείστους ερευνητές που εκτελούν ίδιου τύπου πειράματα με στόχο να βρουν ένα σύντομο τρόπο υπολογισμού της ζωής των συστημάτων, λαμπτήρων και ballast. Υποχρεώνονται όμως να μειώσουν υπερβολικά το χρόνο που ο λαμπτήρας τίθεται εκτός λειτουργίας μεταξύ δύο εναύσεων, με όλα τα προβλήματα που συνεπάγεται αυτό, και ήδη έχουν εκτεθεί σε προηγούμενες παραγράφους. Στην παρούσα εργασία, ο χρόνος που τα συστήματα ήταν εκτός λειτουργίας, ήταν ο ενδεδειγμένος και ικανός για την αποδεκτή ψύξη του λαμπτήρα. Γι' αυτό το λόγο οι χρόνοι ζωής που επέτυχαν οι λαμπτήρες ήταν αρκούντως μεγάλοι. Επομένως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, οι κύκλοι αυτοί, για τη μείωση του χρόνου των πειραμάτων για εκτίμηση της ζωής του λαμπτήρα.

Σπουδαίας σημασίας για την επιζητούμενη μοντελοποίηση είναι ο προσδιορισμός εκείνων των τιμών των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του συστήματος, που βελτιώνουν το χρόνο της ζωής του λαμπτήρα. Τα χαρακτηριστικά που ελέγχονται είναι ηλεκτρικά και καθορίζονται από τα επί μέρους ηλεκτρονικά εξαρτήματα του ballast. Επομένως, ο προσδιορισμός των κατάλληλων τιμών τους θα βοηθήσει στον καλύτερο σχεδιασμό του ballast ώστε να επιτύχει μεγαλύτερη ζωή ο λαμπτήρας.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο σημαντικότερος παράγων ενός μοντέλου γήρανσης του λαμπτήρα είναι η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων κατά τη μετάβαση από την αίγλη στο τόξο, δηλαδή στην έναυση του λαμπτήρα. Αυτός είναι ο λόγος που δόθηκε μεγάλη σημασία στις διαδικασίες που συμβαίνουν κατά την έναυση. Η εν λόγω θερμοκρασία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και τη συμπεριφορά του ηλεκτροδίου, εξ ου και η επισταμένη έρευνα σε ό,τι σχετίζεται με αυτό. Τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν απέδιδαν ποικιλία θερμοκρασιών

ηλεκτροδίου. Οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν όταν συνδυαστούν με το χρόνο ζωής των λαμπτήρων, μπορούν να υποδείξουν την κατάλληλη θερμοκρασία για τη βέλτιστη απόδοση στη ζωή του λαμπτήρα.

Άλλες παράμετροι του μοντέλου είναι το ρεύμα αίγλης, ο χρόνος προθέρμανσης των ηλεκτροδίων, το ρεύμα και η τάση λειτουργίας καθώς και ο παράγων κορυφής ρεύματος. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά μετρήθηκαν στις διαδοχικές μετρήσεις που έγιναν και εκτιμήθηκε το βάρος της συμμετοχής τους στο μοντέλο υπολογισμού.

Επίσης σημαντικές είναι και οι παρατηρήσεις και ο εντοπισμός της αιτίας της καταστροφής ενός λαμπτήρα με επιθεώρηση των ηλεκτροδίων και της επιφάνειας του λαμπτήρα. Διότι ασφαλώς, όταν εντοπισθεί το αίτιο της εξάντλησης του λαμπτήρα θα αντιμετωπισθεί καλύτερα η κατασκευή ή η λειτουργία του με στόχο τη βελτίωσή του.

Ένας άλλος σκοπός της εργασίας ήταν να μελετηθεί η μεταβολή των χαρακτηριστικών που καταγράφονταν κατά τη γήρανση των λαμπτήρων. Κάποια από αυτά ήταν εξαρτώμενα από το μηχανισμό του ballast και άλλα από το λαμπτήρα. Η μεταβολή τους είναι πολύ πιθανόν να οδηγεί στην αστοχία του συστήματος. Επομένως η μελέτη τους θα βοηθήσει στην καλύτερη κατασκευή ballast και λαμπτήρων. Επί πλέον, με επεξεργασία της διαφοροποίησης αυτών των χαρακτηριστικών με το χρόνο, θα ήταν δυνατόν να προβλεφθεί και η εξάντληση του λαμπτήρα. Γενικώς, η πρόβλεψη σε οποιοδήποτε σύστημα που εξελίσσεται και γηράσκει, είναι επιστημονικά χρήσιμη, αφού βοηθά στην κατανόηση των λειτουργιών που σχετίζονται με τη ζωή του.

Για την επίτευξη των σκοπών αυτών οργανώθηκαν τα συστήματα και οι μετρήσεις των αντίστοιχων χαρακτηριστικών με τον πιο πρόσφορο τρόπο και σύμφωνα με τις γνώσεις που έχουν αποκτηθεί από τις έρευνες άλλων επιστημόνων οι οποίες είναι δημοσιευμένες στην διεθνή αρθρογραφία.

Κεφάλαιο 3

Πειραματική διάταξη και μετρήσεις

3.1. Επιλογή συστημάτων και παραμέτρων λειτουργίας

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, έχει σημαντική επίδραση στο συνολικό χρόνο ζωής ενός λαμπτήρα φθορισμού ο ρυθμός των εναύσεων, δηλαδή ο αριθμός των εναύσεων που πραγματοποιούνται σε μια μέρα. Επίσης, έχουν γίνει διεθνώς πολλά πειράματα, με στόχο την εκτίμηση του χρόνου ζωής κάθε τύπου λαμπτήρα. Επειδή τα πειράματα είναι μακροχρόνια, γίνεται προσπάθεια ώστε να βρεθεί ένας τρόπος, ώστε να εξοικονομείται χρόνος. Γι' αυτό έχουν γίνει μετρήσεις σε συστήματα με χρόνο έναυσης και αντιστοίχου διακοπής από λίγα δευτερόλεπτα μέχρι μερικά λεπτά [100, 105]. Όμως τα αποτελέσματα δεν ήταν ενθαρρυντικά και δεν απέδωσαν αποτελέσματα πέρα από κάθε αμφισβήτηση. Οι μετρήσεις έδειξαν μια μεγάλη διασπορά των χρόνων ζωής για όμοια συστήματα που δεν επέτρεπε την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος. Ίσως αυτό συμβαίνει διότι τα φαινόμενα της λειτουργίας και της έναυσης των λαμπτήρων δεν είναι ντετερμινιστικά [9, 11, 36, 37]. Αυτό σημαίνει ότι κατευθύνονται από συμβάντα μικροσκοπικώς τυχαία, με συνέπεια να χρειάζεται περισσότερη μαθηματική επεξεργασία. Αυτό δεν έχει γίνει ως σήμερα σε επίπεδο προσδιορισμού των νόμων που τα διέπουν.

Ο Hammer ισχυρίζεται [84] ότι όταν ο λαμπτήρας λειτουργεί για λίγο (λιγότερο από δέκα λεπτά της ώρας) τα άτομα και τα μόρια των ηλεκτροδίων δεν έχουν το χρόνο να κατανεμηθούν ομοιόμορφα στην επιφάνεια του νήματος. Επομένως, σε μία τέτοια περίπτωση, κάθε έναυση δεν έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με τις προηγούμενες. Αυτό, αν ισχύει, θα έχει ως συνέπεια να είναι δύσκολος ο καθορισμός κανόνων για την φθορά των ηλεκτροδίων κατά την έναυση, αφού δεν θα υπάρχει ομοιομορφία στα πειράματα, όταν ο χρόνος λειτουργίας είναι μικρός.

Για την επιλογή των συστημάτων από το εμπόριο τέθηκε ένα βασικό κριτήριο. Ο χρόνος προθέρμανσης των συστημάτων με ballast που εκτελούν προθέρμανση, να γίνεται σε ένα ευρύ χρονικό πεδίο. Ο προτεινόμενος από τα πρότυπα χρόνος προθέρμανσης, (XII, από το ώρα και στο εξής στους πίνακες) όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι μεταξύ 500 και 1500 ms. Έτσι επελέγησαν συστήματα με μικρό χρόνο προθέρμανσης (περί τα 500 ms), με μέτριο (800 ms) και με μεγάλο (1500 ms). Με δεδομένους τους χρόνους προθέρμανσης έγινε η επιλογή των συστημάτων (άμεσης και γρήγορης έναυσης), ώστε τα αποτελέσματα των πειραμάτων να αποδώσουν τα πλέον αξιόπιστα συμπεράσματα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στα πειράματα που διεξήχθησαν επελέγη ο χρόνος των δεκαπέντε λεπτών ως επαρκής για την επαναφορά των ηλεκτροδίων των λαμπτήρων στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, πριν την επόμενη έναυση. Άλλωστε ο χρόνος αυτός είναι και ο

καθιερωμένος από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN) και τον Ελληνικό Οργανισμό Τυποποίησης (ΕΛΟΤ) ως χρόνος παύσης των συστημάτων φωτισμού πριν την επόμενη έναυση, κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων γήρανσης λαμπτήρων φθορισμού [28, 31, 107, 108, 109]. Κατά την IESNA ο χρόνος που απαιτείται να μένει σβηστός ο λαμπτήρας μέχρι την επόμενη έναυση στον καθιερωμένο κύκλο λειτουργίας είναι τα είκοσι λεπτά.

Το μεγαλύτερο μέρος του κόστους των διατάξεων και των απαραίτητων εξαρτημάτων για τη λειτουργία τους ανέλαβε το εργαστήριο Φωτοτεχνίας. Ένα μεγάλο μέρος των διατάξεων ήταν δωρεάν προσφορά της εταιρίας Philips την οποία και ευχαριστούμε. Οι υπόλοιπες διατάξεις αγοράστηκαν σε χαμηλές τιμές μετά από προσωπική μας επικοινωνία με τις εταιρίες Osram και Tridonic τις οποίες επίσης ευχαριστούμε. Μερικά από τα αναγκαία επιστημονικά όργανα και συσκευές προϋπήρχαν στο εργαστήριο και άλλα αγοράστηκαν για τον συγκεκριμένο σκοπό της διατριβής.

Ο χώρος τοποθέτησης των διατάξεων ήταν σε μια θέση του εργαστηρίου, ώστε να μην παρεμποδίζονται οι δραστηριότητες των εργασιών σε αυτό. Με βαριές μαύρες κουρτίνες υπήρχε η δυνατότητα απομόνωσης του τμήματος των συστημάτων φωτισμού από το υπόλοιπο εργαστήριο, για τυχόν εκτέλεση φωτομετρικών μετρήσεων. Τόσο ο αερισμός των πειραματικών συστημάτων όσο και η κατά το δυνατόν σταθερή θερμοκρασία του χώρου τους, εξασφαλίστηκε με την ύπαρξη κλιματιστικού μηχανήματος στο χώρο.

3.2 Κύκλοι λειτουργίας στους λαμπτήρες

Ο καθιερωμένος κύκλος λειτουργίας σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα κατά τις μετρήσεις της διάρκειας ζωής των λαμπτήρων φθορισμού, είναι τρεις ώρες. Από αυτές ο λαμπτήρας λειτουργεί δύο ώρες και σαράντα πέντε λεπτά ενώ δεκαπέντε λεπτά μένει εκτός λειτουργίας. Σύμφωνα με τα πρότυπα της Αμερικής ο λαμπτήρας λειτουργεί τρεις ώρες και είκοσι λεπτά μένει εκτός λειτουργίας [20, 21, 26, 27, 29, 30]. Οι μετρήσεις με τους καθιερωμένους κύκλους λειτουργίας δίνουν τον ονομαστικό χρόνο ζωής (rated lamp life) των λαμπτήρων φθορισμού. Κάθε άλλη μέτρηση με διαφορετικούς χρόνους είναι προσωπική επιλογή του ερευνητή και είναι εκείνος υπεύθυνος για την διερεύνηση των αποτελεσμάτων που θα εξαγάγει. Και ασφαλώς τον ονομαστικό χρόνο ζωής ενός τύπου λαμπτήρα τον δίνει ο κατασκευαστής αφού απαιτούνται 500 ίδια συστήματα από τα οποία θα προκύψει ο χρόνος ζωής όταν θα έχει καεί το 50% των λαμπτήρων.

Στα πειράματα υπολογισμού και μελέτης της ζωής των λαμπτήρων φθορισμού υπό διάφορους κύκλους λειτουργίας, πάντα μία ομάδα από αυτούς λειτουργεί με τον καθιερωμένο κύκλο, για να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης. Επομένως και στην παρούσα διατριβή ένας κύκλος που επελέγη ήταν ο καθιερωμένος Ευρωπαϊκός κύκλος εναύσεων. Επιπροσθέτως επιλέχθηκαν και άλλοι τέσσερις κύκλοι. Το σύνολο των κύκλων φαίνεται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1. Κύκλοι λειτουργίας

Όνομα κύκλου	Χρόνος λειτουργίας	Χρόνος σβέσης
A (165' on)	2 ώρες & 45 λεπτά	15 λεπτά
B (45' on)	45 λεπτά	15 λεπτά
Γ (5' on)	5 λεπτά	15 λεπτά
Δ (1' on)	1 λεπτό	15 λεπτά
E (20" on)	20 δευτερόλεπτα	15 λεπτά

Οι χρόνοι που οι λαμπτήρες ήταν σε λειτουργία επιλέχθηκαν έτσι ώστε να έχουν σχετικά μεγάλη χρονική απόσταση μεταξύ τους, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σε ένα ευρύ χρονικό πεδίο και τον αποκλεισμό συμπτωματικών μετρήσεων. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων κατ' αυτόν τον τρόπο οδηγεί σε ασφαλή συμπεράσματα, αφού εκτείνονται σε ένα μεγάλο φάσμα χρονικών συνδυασμών λειτουργίας των λαμπτήρων σε ένα σπίτι ή ένα γραφείο [110].

3.3. Συστήματα πειραμάτων

Τα συστήματα φωτισμού που χρησιμοποιήθηκαν κατά το πείραμα δίνονται στον πίνακα 3.2. Όλα τα συστήματα χωρίστηκαν σε πέντε ακριβώς όμοιες ομάδες με ίσο αριθμό λαμπτήρων και ballast η κάθε μία. Εξαίρεση αποτέλεσαν οι ομάδες B (45' on) και Δ (1' on) των συμπαγών λαμπτήρων άμεσης έναυσης. Σε αυτές χρησιμοποιήθηκαν οκτώ λαμπτήρες αντί τεσσάρων, με τα ίδια ballast. Αφού είχαν καταστραφεί οι πρώτοι λαμπτήρες τοποθετήθηκε ίσος αριθμός νέων για να υπάρχει μεγαλύτερο δείγμα.

Πίνακας 3.2. Συστήματα λαμπτήρων-ballast του πειράματος (αριθμός και συνδυασμοί).

α/α	Λαμπτήρας			Ballast		
	Τύπος	Εταιρία	Ποσότητα (τεμ.)	Τύπος (ΧΠ: Χρόνος Προθέρμανσης)	Εταιρία	Ποσότητα (τεμ.)
1	TL5 HE 14W (σωληνωτός)	Philips	20	HF-P 1 14-35 TL 5 HE (μικρού ΧΠ ηλεκτροδίων)	Philips	20
2	TL5 HE 14W (σωληνωτός)	Philips	20	HF-MatchboxBLUE 114 SH/SP TL/TL5/PL (άμεση έναυση)	Philips	20
3	PL-C 18W 4p (συμπαγής)	Philips	20	HF-P 118 PL-T/C (μικρού ΧΠ ηλεκτροδίων)	Philips	20
4	PL-C 18W 4p (συμπαγής)	Philips	28	HF MatchboxRED 118 SH/SP PL-C/PL-T (άμεση έναυση)	Philips	20
5	FH 14W (σωληνωτός)	Osram	40	QT-FH 2x14-35 (μέτριου ΧΠ ηλεκτροδίων)	Osram	20
6	FH 14W (σωληνωτός)	Osram	40	PC 2/14-21-28-35 T5 PRO lp (μεγάλου ΧΠ ηλεκτροδίων)	Tridonic	20

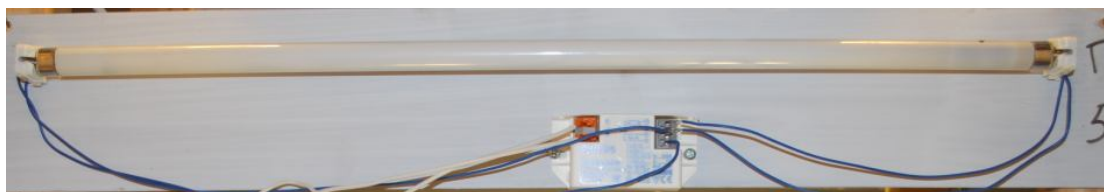
Από τον πίνακα 3.2 φαίνεται ότι χρησιμοποιήθηκαν 168 λαμπτήρες και 120 ballast. Από τις σειρές 1 και 2 φαίνεται ότι οι ίδιοι λαμπτήρες TL5 HE 14W τύπου σωλήνα, χρησιμοποιούνται με τα ballast HF-P 1 14-35 TL 5 HE που χρησιμοποιούν προθέρμανση

κατά την έναυση καθώς και με τα HF Matchbox BLUE 114 που είναι άμεσης έναυσης. Έτσι τα αποτελέσματα θα μας οδηγήσουν σε συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των ίδιων λαμπτήρων στα δυο αυτά είδη ballast. Με την ίδια λογική επιλέχθηκαν και τα υπόλοιπα συστήματα. Οι συμπαγείς λαμπτήρες PL-C 18W 4p λειτούργησαν με τα γρήγορης έναυσης ballast HF-P 118 PL-T/C καθώς και με τα άμεσης έναυσης HF Matchbox HF-M 118 PLC/PLT SH. Τέλος, οι σωληνωτοί λαμπτήρες FH 14W δούλεψαν με δυο διαφορετικά είδη ballast, τα οποία χρησιμοποιούν προθέρμανση στην έναυση. Έχουν όμως σημαντικές διαφορές στις λεπτομέρειες της διαδικασίας έναυσης. Οι μισοί λαμπτήρες δούλεψαν με τα ballast QT-FH 2x14-35 και οι άλλοι μισοί με τα PC 2/14-21-28-35 T5 PRO Ip.

Στα σχήματα 3.1 έως 3.6 παρουσιάζονται φωτογραφίες όλων των συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν, με τη σειρά που καταγράφονται στον πίνακα 3.2. Στις φωτογραφίες φαίνεται ο τρόπος που τοποθετήθηκαν στις βάσεις στήριξης και η συνδεσμολογία τους.



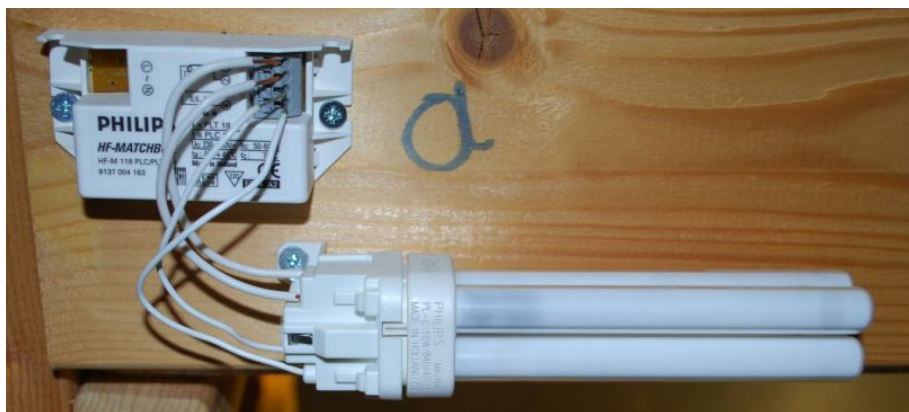
Σχήμα 3.1. Λαμπτήρας και ballast της εταιρίας Philips (α/α 1 στον πίνακα 3.2)



Σχήμα 3.2. Λαμπτήρας και ballast της εταιρίας Philips (α/α 2 στον πίνακα 3.2)



Σχήμα 3.3. Λαμπτήρας και ballast της εταιρίας Philips (α/α 3 στον πίνακα 3.2)



Σχήμα 3.4. Λαμπτήρας και ballast της εταιρίας Philips (α/α 4 στον πίνακα 3.2)



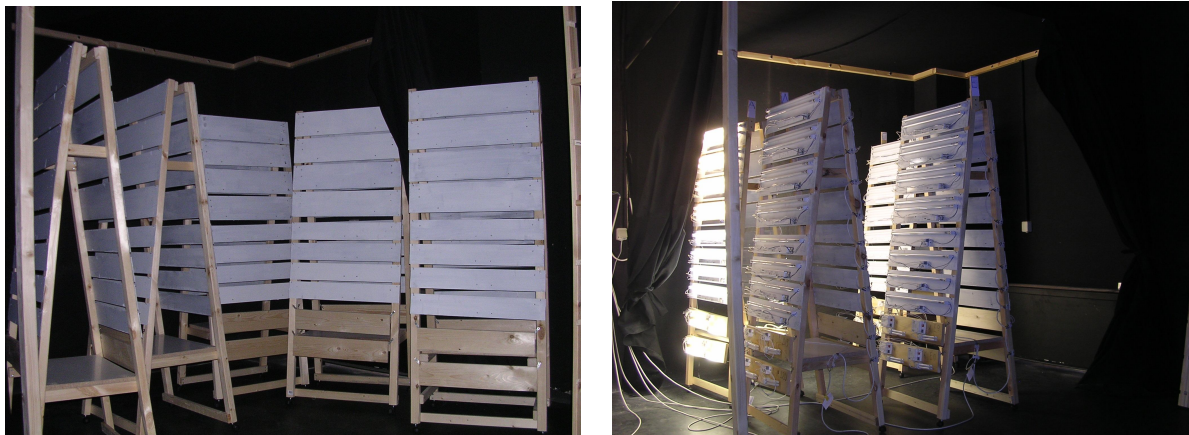
Σχήμα 3.5. Λαμπτήρες της εταιρίας Osram και ballast της εταιρίας Osram (α/α 5 στον πίνακα 3.2)



Σχήμα 3.6. Λαμπτήρες της εταιρίας Osram και ballast της εταιρίας Tridonic (α/α 6 στον πίνακα 3.2)

Κατασκευάστηκαν πέντε όμοια ξύλινα πλαίσια σε σχήμα Λ, πάνω στα οποία τοποθετήθηκαν τα συστήματα και στις δύο πλευρές. Για τα συστήματα 1, 2, 3 και 4 (σύμφωνα με τον πίνακα 3.2) κάθε ballast οδηγούσε και ένα λαμπτήρα, ενώ στα συστήματα 5 και 6 κάθε ballast οδηγούσε δύο λαμπτήρες. Τα συστήματα με σωληνωτούς λαμπτήρες (1, 2, 5 και 6) τοποθετήθηκαν σε παραλληλόγραμμες βάσεις από λαμαρίνα μήκους 60 εκατοστών και πλάτους 15 εκατοστών για τα διπλά συστήματα και 10 εκατοστών και τα μονά. Τα άλλα συστήματα με τους συμπαγείς λαμπτήρες, τοποθετήθηκαν ανά δύο σε ξύλινα πλαίσια διαστάσεων 60x10 εκατοστά. Στο σχήμα 3.7 φαίνονται τα πλαίσια στήριξης σε δύο φωτογραφίες, πριν και μετά την τοποθέτηση των συστημάτων. Στο σχήμα 3.8 φαίνεται το

διάγραμμα ενός πλαισίου με τον τρόπο διάταξης των συστημάτων πάνω σε αυτό.



Σχήμα 3.7. Φωτογραφίες των πλαισίων πριν και μετά την τοποθέτηση των συστημάτων φωτισμού.

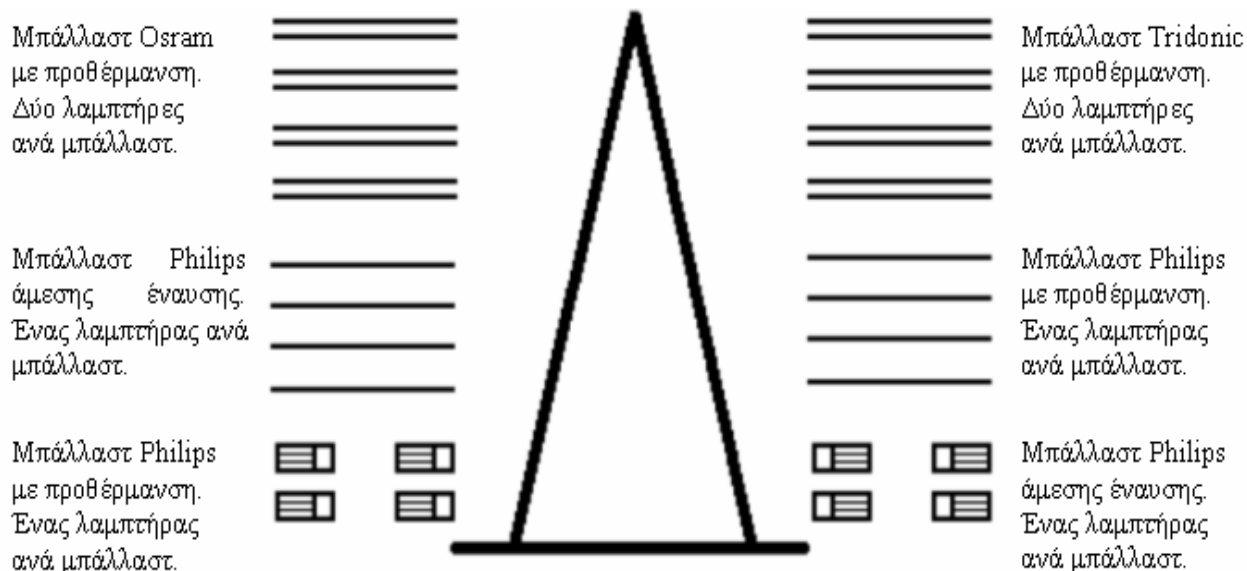
Σε κάθε πλαίσιο (στο οποίο αντιστοιχούσε και ένας από τους κύκλους λειτουργίας), όπως και σε κάθε ballast και λαμπτήρα, δόθηκε μία ονομασία. Στα πλαίσια οι ονομασίες ήταν Α, Β, Γ, Δ και Ε, όπως φαίνονται και στον πίνακα 3.1. Κάθε πλαίσιο περιελάμβανε 24 ballast (σχήμα 3.8). Οι ονομασίες που δόθηκαν ήταν οι εξής:

- ✓ Τα 4 ballast Osram είχαν τους κωδικούς 1, 2, 3 και 4 και οι αντίστοιχοι λαμπτήρες: 1α, 1β, 2α, 2β, 3α, 3β, 4α και 4β.
- ✓ Τα 4 ballast Philips με άμεση έναυση, όπως και κάθε λαμπτήρας T5, είχαν τους κωδικούς 5, 6, 7 και 8.
- ✓ Τα 4 ballast Philips με προθέρμανση, όπως και κάθε συμπαγής λαμπτήρας είχαν τους κωδικούς 9α, 9β, 10α και 10β.
- ✓ Τα 4 ballast Tridonic είχαν τους κωδικούς 11, 12, 13 και 14 και οι αντίστοιχοι λαμπτήρες: 11α, 11β, 12α, 12β, 13α, 13β, 14α και 14β.
- ✓ Τα 4 ballast Philips με προθέρμανση, όπως και κάθε λαμπτήρας T5, είχαν τους κωδικούς 15, 16, 17 και 18.
- ✓ Τα 4 ballast Philips με άμεση έναυση, όπως και κάθε συμπαγής λαμπτήρας είχαν τους κωδικούς 19α, 19β, 20α και 20β.

Με αυτή την κωδικοποίηση ο προσδιορισμός ενός λαμπτήρα γινόταν με αναφορά του γράμματος πλαισίου στο οποίο ανήκε και δίπλα τον κωδικό του λαμπτήρα.

Τα συστήματα κάθε πλαισίου είχαν τη δική τους χωριστή ηλεκτρική τροφοδοσία με ένα καλώδιο NYM 3x1,5 mm². Την προγραμματισμένη παροχή ρεύματος έκανε ένας ηλεκτρονικός χρονοδιακόπτης Crouzet Millenium II+ SA 20 S 24VDC Logic Controller με 12 PNP εισόδους και 8 relays εξόδους. Ο προγραμματισμός έγινε με το πρόγραμμα Crouzet Logic Software M2. Σύμφωνα με τον προγραμματισμό της συσκευής, που έγινε στο εργαστήριο, κάθε πλαίσιο με τα αντίστοιχα συστήματα, ετροφοδοτείτο από αυτήν μέσω ενός ρελέ, για την χρονική διάρκεια που αντιστοιχούσε στην ομάδα των συστημάτων του

πλαisiού. Στην οθόνη της συσκευής καταγραφόταν οι ώρες που οι λαμπτήρες ήταν αναμμένοι καθώς και ο αριθμός των κύκλων που είχαν εκτελεστεί ως την ώρα της παρατήρησης. Σε περίπτωση διακοπής ρεύματος η συσκευή κρατούσε στη μνήμη τις τιμές χρόνου και εναύσεων.



Σχήμα 3.8. Διάταξη συστημάτων στα πλαίσια.

Πριν αρχίσουν οι μετρήσεις της πειραματικής διαδικασίας, όλοι οι λαμπτήρες, ανεξαρτήτως ομάδας, λειτούργησαν 100 ώρες με τον καθιερωμένο κύκλο λειτουργίας, όπως επιβάλλεται [26, 99, 101, 110].

3.4. Διαδικασία μετρήσεων

Οι προγραμματισμένες εργασίες περιελάμβαναν τακτικές μετρήσεις διαφόρων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των λαμπτήρων και των ballast. Οι μετρήσεις ήταν διαφορετικές στα συστήματα με προθέρμανση από εκείνες στα συστήματα άμεσης έναυσης. Οι μετρήσεις γίνονταν σε όλα τα συστήματα, ιδιαιτέρως στο καθένα. Επομένως για κάθε λαμπτήρα και ballast υπάρχουν διαθέσιμα τα χαρακτηριστικά του. Αυτό είναι μια καινοτομία της παρούσας εργασίας, αφού σε όλη την βιβλιογραφία δεν υπάρχει αναφορά για μετρήσεις των χαρακτηριστικών σε όλα τα υπό εξέταση συστήματα. Σε άλλες έρευνες γίνεται συνήθως μέτρηση σε ένα μόνο αντιπροσωπευτικό δείγμα και αυτή είναι μία και μοναδική, δηλαδή δεν ελέγχονται τα μετρούμενα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για τυχόν μεταβολή τους στην πορεία της γήρανσης των συστημάτων.

Για την οργάνωση και τη διαδικασία των πειραμάτων ελήφθησαν υπ' όψιν οι εγκεκριμένες μέθοδοι και οδηγίες της IESNA [20, 21, 26, 27, 29, 30] και του ΕΛΟΤ [28, 31, 107, 108, 109]. Πολύ χρήσιμα υπήρξαν και τα ενημερωτικά φυλλάδια [10, 14, 15, 17, 19, 32, 89, 111] που δείχνουν πως γίνονται οι μετρήσεις στα εργαστήρια του Lighting Research Center. Τα φυλλάδια αυτά παρέχουν και αποτελέσματα μετρήσεων ζωής λαμπτήρων φθορισμού, που

υπήρξαν οδηγός για τις παρούσες μετρήσεις και μέτρο σύγκρισης. Η General Electric έχει εκδώσει επίσης φυλλάδια [24, 33] με χρήσιμες πληροφορίες που ενδιαφέρουν γενικά τους λαμπτήρες φθορισμού αλλά και συγκεκριμένα τα συστήματα της εταιρίας. Πραγματικά δίνει πολύτιμα στοιχεία που μόνο σε εξειδικευμένα άρθρα βρίσκονται, όσον αφορά στα κατασκευαστικά στοιχεία των λαμπτήρων και τα χαρακτηριστικά που δίνουν τα ballast σε αυτούς.

Σε όλους τους λαμπτήρες των συστημάτων με προθέρμανση γινόντουσαν οι κάτωθι τακτικές (προγραμματισμένες εκ των προτέρων) μετρήσεις:

- ✓ Μέτρηση αντιστάσεων των ηλεκτροδίων των λαμπτήρων.
- ✓ Χρόνος προθέρμανσης.
- ✓ Τάση προθέρμανσης στα άκρα του ηλεκτροδίου με τη σφραγίδα του κατασκευαστή, κατά τη στιγμή της έναυσης .
- ✓ Ρεύμα προθέρμανσης που διέρρεε την αντίσταση που ήταν στην πλευρά με τη σφραγίδα του κατασκευαστή, κατά τη στιγμή της έναυσης.
- ✓ Ρεύμα αίγλης κατά τη διάρκεια της προθέρμανσης.
- ✓ Τάση στα άκρα του ηλεκτροδίου με τη σφραγίδα του κατασκευαστή, κατά τη λειτουργία.
- ✓ Ρεύμα στα άκρα του ηλεκτροδίου με τη σφραγίδα του κατασκευαστή, κατά τη λειτουργία.
- ✓ Τάση λαμπτήρα κατά τη λειτουργία.
- ✓ Ρεύμα λαμπτήρα κατά τη λειτουργία.
- ✓ Συχνότητα λειτουργίας

Στα συστήματα άμεσης έναυσης γινόντουσαν αντιστοίχως οι παρακάτω μετρήσεις;

- ✓ Μέτρηση αντιστάσεων των ηλεκτροδίων των λαμπτήρων.
- ✓ Χρόνος για την έναυση του λαμπτήρα.
- ✓ Τάση λαμπτήρα μέχρι να ανάψει.
- ✓ Ρεύμα λαμπτήρα μέχρι να ανάψει.
- ✓ Τάση λαμπτήρα κατά τη λειτουργία.
- ✓ Ρεύμα λαμπτήρα κατά τη λειτουργία.
- ✓ Συχνότητα λειτουργίας

Τα συστήματα ελεγχόταν σχεδόν καθημερινά για τυχόν κατεστραμμένους λαμπτήρες ή ballast. Σύμφωνα με τα πρότυπα, πρέπει να γίνεται έλεγχος στους λαμπτήρες ανάλογα με το χρόνο ζωής τους. Έτσι σύμφωνα με την IESNA [26] ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών ελέγχων δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το 0,5% της ονομαστικής ζωής του λαμπτήρα.

Όταν διακοπτόταν ξαφνικά η λειτουργία ενός λαμπτήρα υπήρχαν γενικώς δύο περιπτώσεις: είτε ο λαμπτήρας να έχει καταστραφεί, είτε το ballast. Κατ' αρχάς ελεγχόταν το ballast και αν το πρόβλημα ήταν σε αυτό, γινόταν αντικατάστασή του με άλλο που να έχει όσο το

δυνατόν παρόμοια χαρακτηριστικά με το κατεστραμμένο. Αν είχε το πρόβλημα ο λαμπτήρας ελεγχόταν οι ηλεκτρικές αντιστάσεις των ηλεκτροδίων του. Υπήρχαν ξανά δύο περιπτώσεις: α) το ένα από τα δύο ηλεκτρόδια να εμφανίζει άπειρη ηλεκτρική αντίσταση, οπότε ήταν φυσικό να θεωρηθεί ο λαμπτήρας κατεστραμμένος και β) το ένα από τα δύο ηλεκτρόδια να εμφανίζει είτε αύξηση είτε μείωση στην τιμή της ηλεκτρικής του αντίστασης, κατά 2 ως 10 τοις εκατό, με αποτέλεσμα να μην ανάβει ο λαμπτήρας. Σε αυτή τη δεύτερη περίπτωση το ballast διαθέτει μηχανισμό (shut down circuitry) [12, 18] που διακόπτει τη λειτουργία του λαμπτήρα μέχρι να αντικατασταθεί με νέο, για να μην καταναλώνει μεγαλύτερο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας και να μην υπερθερμαίνεται το περιβάλλον του ηλεκτροδίου. Στη συνέχεια της διατριβής υπάρχουν πίνακες που δίνουν στοιχεία για τις αιτίες που οδηγούσαν ένα σύστημα στην καταστροφή.

Η συχνότητα των προγραμματισμένων μετρήσεων των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών εξαρτιόταν από το είδος του ballast και από τον κύκλο λειτουργίας. Για τα ballast άμεσης έναυσης οι μετρήσεις γίνονταν πολύ πυκνά (ανά 500 κύκλους περίπου) γιατί ήταν γνωστό ότι η ζωή των λαμπτήρων με αυτά είναι πολύ σύντομη και ο σκοπός ήταν να γίνουν σχετικά πολλές μετρήσεις. Για τα ballast με προθέρμανση οι μετρήσεις γίνονταν ανά 45 ως 120 ημέρες αφού οι λαμπτήρες είχαν ζωή που θα επέτρεπε περισσότερες από 20 μετρήσεις.

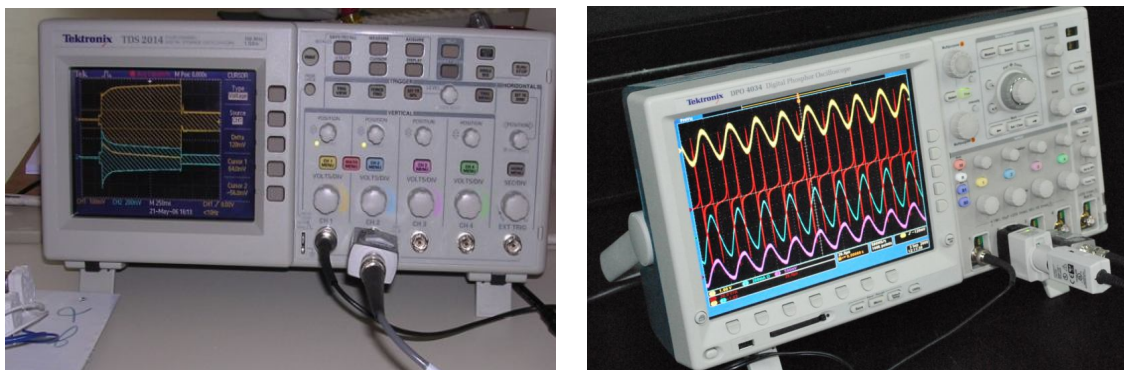
Για να γίνει η διαδικασία της μέτρησης, το πλαίσιο με τους λαμπτήρες της ομάδας αφαιρούνταν από την παροχή ρεύματος και οδηγούνταν στο χώρο μετρήσεων του εργαστηρίου. Κατά την αφαίρεση του πλαισίου, διακόπτονταν από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή οι μετρήσεις της αντίστοιχης ομάδας. Τα συστήματα έμεναν τουλάχιστο μια ώρα εκτός λειτουργίας, μέχρι να αποκτήσουν τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, που ήταν 23 ± 3 °C. Την τιμή αυτή είχε και η θερμοκρασία στο χώρο που εξελισσόταν το πείραμα.

3.5. Όργανα μετρήσεων

Η πρώτη μέτρηση των συστημάτων έγινε αμέσως μετά τη γήρανση των εκατό ωρών. Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις σε όλη τη διάρκεια της εργασίας ήταν τα παρακάτω:

- ✓ Για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης των ηλεκτροδίων των λαμπτήρων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκε το πολύμετρο TTI 1604 digital multimeter.
- ✓ Για την καταγραφή της έναυσης των λαμπτήρων χρησιμοποιήθηκε ο ψηφιακός παλμογράφος τεσσάρων καναλιών Tektronix TDS 2014 με τα κάτωθι χαρακτηριστικά: μήκος καταγραφής (record length): 2500 λήψεις σε κάθε κανάλι, μέγιστος αριθμός δειγματοληψίας: 1 GS/s, εύρος ζώνης συχνοτήτων: 100 MHz, κατακόρυφη ανάλυση: 8 bits, επίπεδο τάσης εξωτερικής εισόδου trigger: 1.6 V, ευαισθησία: 2 mV/div έως 5 V/div, μέγιστη τάση εισόδου: 300 VRMS, εμπέδηση εισόδου: 1 MΩ (με απόκλιση 2%) παράλληλα με πυκνωτή 20

- pF (± 3 pF). Από το παλμογράφημα καταγραφόταν στην οθόνη, με τους κέρσορες, μετριόντουσαν ο χρόνος της έναυσης και η τάση με το ρεύμα.
- ✓ Για την καταγραφή των τάσεων χρησιμοποιήθηκε ο διαφορικός ακροδέκτης τάσης (high voltage differential probe) Tektronix P5200 με τα παρακάτω χαρακτηριστικά: Χρόνος ανύψωσης: ≤ 14 ns, εύρος ζώνης συχνοτήτων: 25 MHz, μέγιστη τάση εισόδου: ± 1.3 kV (DC + κορυφή AC) με κλίμακα 1/500 και ± 130 V (DC + κορυφή AC) με κλίμακα 1/50, ακρίβεια: $\pm 3\%$ (20 – 30 °C), εμπέδηση εισόδου: 8 M Ω , 3.5 pF μεταξύ των εισόδων και 4 M Ω , 7 pF μεταξύ της κάθε εισόδου και της γείωσης, μετατόπιση της συνεχούς συνιστώσας της τάσης εξόδου: $\pm 0,5$ mV.
 - ✓ Για την καταγραφή του ρεύματος χρησιμοποιήθηκε ο ακροδέκτης ρεύματος (current probe) Tektronix P 6021 AC, με τα εξής χαρακτηριστικά: Χρόνος ανύψωσης: ≤ 5.8 ns, καθυστέρηση σήματος: περίπου 9 ns, κλίμακες: 2 mA/mV, 10 mA/mV, εύρος ζώνης συχνοτήτων: 450 Hz – 60 MHz, με κλίμακα 2 mA/mV και 120 Hz – 60 MHz, με κλίμακα 10 mA/mV, μέγιστο πλάτος ρεύματος εισόδου: α) 5 A, με κλίμακα 2 mA/mV και συχνοτήτες 1.2 kHz – 5 MHz και β) 15 A, με κλίμακα 10 mA/mV και συχνοτήτες 300 Hz – 5 MHz, μέγιστο παλμικό ρεύμα: 250 A, με μέγιστη ενεργό τιμή 5 A.
 - ✓ Για μετρήσεις του ρεύματος στα ballast άμεσης έναυσης όπου το ρεύμα ήταν πολύ μεγαλύτερης έντασης, ή για μετρήσεις που ήταν απαραίτητη η καταγραφή και της συνιστώσας συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιήθηκε το πιο εξελιγμένο Tektronix TCP202 Current Probe με τα παρακάτω χαρακτηριστικά: Ακρίβεια DC $\pm 3\%$ ($\pm 1\%$ από 50 mA μέχρι 5 A και $\pm 2\%$ από 5 A μέχρι 15 A), χρόνος ανύψωσης: ≤ 7 ns, εύρος ζώνης συχνοτήτων: DC – 50 MHz, μέγιστο πλάτος ρεύματος εισόδου DC και χαμηλής συχνότητας: α) 15 A (DC και κορυφή AC) και β) 50 A (με εύρος παλμού ≤ 10 μ s), μέγιστη τάση σε καλώδιο χωρίς μόνωση: 300 V (DC + κορυφή AC), περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας +5 ως +50 °C. Για χρήση του συγκεκριμένου ακροδέκτη με τον παλμογράφο DPO 4034 συνδεόταν με τον προσαρμογέα (adapter) TPA-BNC από την Tektronix.
 - ✓ Εκτός από τον προαναφερθέντα παλμογράφο χρησιμοποιήθηκε και ο νεότερος Tektronix DPO 4034: Μήκος καταγραφής (record length): 10.000.000 λήψεις σε όλα τα κανάλια, μέγιστος αριθμός δειγματοληψίας: 2,5 GS/s, εύρος ζώνης συχνοτήτων: 350 MHz, κανάλια: 4, κατακόρυφη ανάλυση: 8 bits, ευαισθησία εισόδου: στο 1 M Ω : 1 mV/div έως 10 V/div και στα 50 Ω : 1 mV/div έως 1 V/div, μέγιστη τάση εισόδου: 250 VRMS (με κορυφή $\leq \pm 400$ V) στο 1 M Ω και 5 VRMS (με κορυφή $\leq \pm 20$ V) στα 50 Ω , εμπέδηση εισόδου: 1 M Ω ή 50 Ω (με απόκλιση 1%).



Σχήμα 3.9. Παλμογράφοι που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα: Tektronix TDS 2014 (αριστερά), Tektronix DPO 4034 (δεξιά).

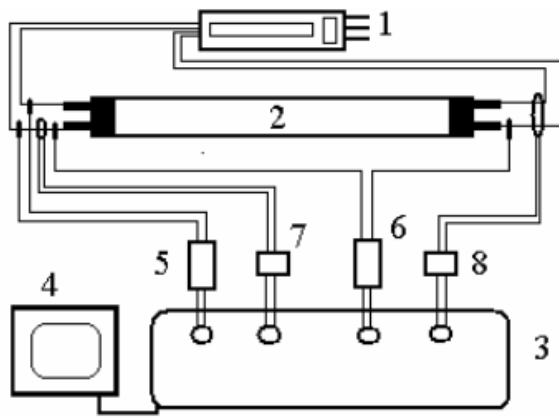
Ο παλμογράφος DPO 4034 έδινε λεπτομερείς καταγραφές και διάφορα στοιχεία των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος κατά την έναυση. Παρείχε επίσης τη δυνατότητα για την μαθηματική επεξεργασία τους. Ο TDS 2014 παρείχε ευκρινέστερα παλμογραφήματα, όταν δεν ήταν απαραίτητες λεπτομερείς μετρήσεις. Ήταν πιο εύχρηστος στη διαδικασία των μετρήσεων που δεν απαιτούντο λεπτομέρειες των κυματομορφών. Στο σχήμα 3.9 φαίνεται αριστερά ο παλμογράφος Tektronix TDS 2014 ενώ έχει κάνει μια καταγραφή και δεξιά ο παλμογράφος Tektronix DPO 4034.

3.6. Τρόπος μέτρησης των χαρακτηριστικών στα ballast άμεσης έναυσης

Τα δύο είδη ballast άμεσης έναυσης ήταν κατασκευασμένα από την ίδια εταιρία Philips. Τα HF Matchbox BLUE 114 χρησιμοποιήθηκαν για τους λαμπτήρες T5 (14 Watt) και τα HF Matchbox HF-M 118 PLC/PLT SH για τους συμπαγείς λαμπτήρες (18 Watt). Αν και στην αγορά δεν είναι καθόλου οικονομικά σε σχέση με άλλα, η κατασκευή τους είναι απλή. Εκτός από το κοινό τους χαρακτηριστικό της άμεσης έναυσης (instant start ballast) είναι και τα δύο τύπου ημιγέφυρας με αυτοκορεσμό (half bridge, self saturation).

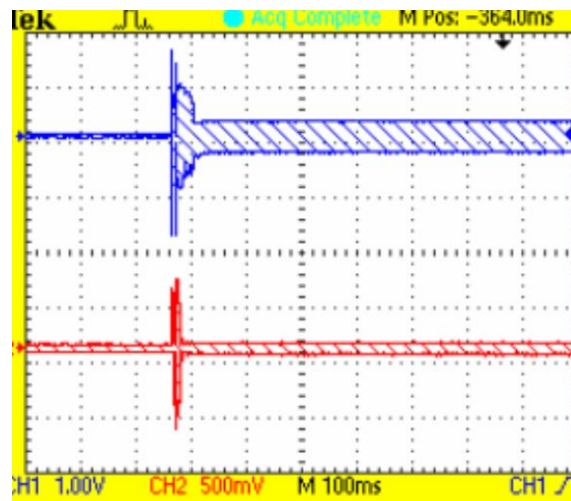
Στα ηλεκτρονικά ballast άμεσης έναυσης, ουσιαστικά ισχύουν μόνο δύο περιορισμοί: α) ο χρόνος έναυσης πρέπει να είναι μικρότερος από 100 ms και β) ο παράγων κορυφής ρεύματος (current crest factor, CCF) κατά τη λειτουργία να είναι μικρότερος από 1,7. Και οι δύο αυτοί παράγοντες ικανοποιήθηκαν, κατά μέσον όρο, από όλα τα ballast. Σε ελάχιστες μεμονωμένες μετρήσεις ο χρόνος έναυσης ήταν λίγο πάνω από τα 100 ms, αλλά σύμφωνα με τη βιβλιογραφία αυτό δεν είναι λόγος απόρριψης της συσκευής. Στο σχήμα 3.10 φαίνεται η συνδεσμολογία σύμφωνα με την οποία γινόταν οι μετρήσεις.

Στο σχήμα 3.11 φαίνεται ένα παλμογράφημα με τον παλμογράφο TDS 2014. Το ανώτερο ίχνος αφορά την τάση έναυσης ενώ το κατώτερο το αντίστοιχο ρεύμα. Αφορά ένα τυχαίο λαμπτήρα CFL σε μία μάλλον άσχημη έναυση.



- 1 Μπάλλαστ
- 2 Λαμπτήρας
- 3 Παλμογράφος
- 4 Ηλεκτρονικός υπολογιστής
- 5 Ακροδέκτης διαφορικής τάσης για μέτρηση τάσης ηλεκτροδίου
- 6 Ακροδέκτης διαφορικής τάσης για μέτρηση τάσης λαμπτήρα
- 7 Ακροδέκτης ρεύματος για μέτρηση ρεύματος ηλεκτροδίου
- 8 Ακροδέκτης ρεύματος για μέτρηση ρεύματος λαμπτήρα

Σχήμα 3.10. Συνδεσμολογία παλμογράφου, ακροδεκτών και συστημάτων κατά τις μετρήσεις



Σχήμα 3.11. Τάση λαμπτήρα (άνω ίχνος, 500 V/div) και ρεύμα (κάτω ίχνος, 1 A/div) ως προς το χρόνο (100 ms/div) κατά την έναυση με ballast άμεσης έναυσης σε σωληνωτό λαμπτήρα.

Για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών έναυσης της έρευνας καταγραφόταν η έναυση σε ένα τέτοιου είδους παλμογράφημα και από αυτό με τους κέρσορες μετρούνταν τα χαρακτηριστικά. Για να γίνει η καταγραφή αυτού του γεγονότος (capturing a single shot signal) με τον παλμογράφο ακολουθούνταν η εξής διαδικασία:

- ✓ Ο παλμογράφος ρυθμιζόταν σε απόκτηση ανίχνευσης κορυφής (acquire: peak detect).
- ✓ Η ενεργοποίησή του (καταγραφή) γινόταν αν η τάση (κανάλι 1) ξεπερνούσε κατά τι την μηδενική τιμή. Αυτό ρυθμιζόταν με τον αντίστοιχο δείκτη (marker) στη θέση πυροδότησης (edge or pulse width trigger level).
- ✓ Από προεργασία που είχε γίνει, ήταν γνωστή η διάρκεια του φαινομένου και ετίθετο ο χρόνος καταγραφής 500, 1000 ή 2500 ms (main time base setting). Εάν αναμενόταν το φαινόμενο να έχει μικρή διάρκεια, ήταν προτιμότερο να έχει τεθεί μικρός χρόνος καταγραφής ώστε να αποκτηθούν περισσότερες λεπτομέρειες του φαινομένου. Όμως για τον ίδιο τύπο λαμπτήρα όλες οι

μετρήσεις γίνονταν υπό την ίδια κλίμακα, μέχρι το τέλος της ζωής του, για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα.

- ✓ Ο παλμογράφος έμπαινε σε κατάσταση αναμονής με το πάτημα του αντίστοιχου κουμπιού (single seq button). Με το διακόπτη γινόταν η τροφοδοσία του συστήματος και άρχιζε η διαδικασία της έναυσης. Ταυτόχρονα ο παλμογράφος ενεργοποιούνταν και έκανε την καταγραφή.
- ✓ Από την εικόνα του παλμογραφήματος μετρούνταν ο χρόνος από την έναρξη του φαινομένου μέχρι την αρχή της εκκένωσης, με χρήση των δυο χρονικών δρομέων (cursors) του παλμογράφου. Η χρονική στιγμή της έναρξης της εκκένωσης είναι εμφανής από την καταγραφή, διότι τότε αίφνης εμφανίζεται το ρεύμα και η τάση του λαμπτήρα.
- ✓ Με τους δρομείς τάσης μετρούνταν τόσο η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση κορυφή προς κορυφή (voltage peak to peak) όσο και το αντίστοιχο ρεύμα του λαμπτήρα. Σε αυτές τις περιπτώσεις η τάση και το ρεύμα μεταξύ των ηλεκτροδίων του λαμπτήρα δεν έχουν ομαλή μορφή και οι ενεργείς τιμές των μεγεθών αυτών δεν είναι πρόσφορες για μελέτη.

Για την καταγραφή της τάσης και του ρεύματος του λαμπτήρα κατά τη λειτουργία (steady state operation) γινόταν οι εξής εργασίες:

- ✓ προθέρμανση του λαμπτήρα με άναμμα για περισσότερο από 15 λεπτά, οπότε και παρατηρούνταν σταθερότητα στις τιμές των προς μέτρηση μεγεθών.
- ✓ Ο παλμογράφος ετίθετο στη θέση απόκτησης μέσου όρου (acquire: average).
- ✓ Με το πάτημα του κουμπιού αυτόματης ρύθμισης (auto set) ο παλμογράφος έκανε την καταγραφή της κυματομορφής σε πραγματικό χρόνο.
- ✓ Κατόπιν μετριόταν η ενεργός τιμή της τάσης και του ρεύματος του λαμπτήρα, καθώς και η κορυφή προς κορυφή του ρεύματος για να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του παράγοντα κορυφής ρεύματος. Τις μετρήσεις αυτές έκανε ο παλμογράφος στη θέση “measure”. Οι καταγραφές γινόταν πάντα στην ίδια κλίμακα χρόνου (10 $\mu\text{s}/\text{div}$) ώστε να υπάρχει ομοιομορφία στα αποτελέσματα. Είναι γνωστό ότι αλλάζοντας την κλίμακα ενός παλμογράφου είναι πιθανό να αλλάξουν και οι τιμές στις ενδείξεις του οργάνου.

3.7. Επεξεργασία μετρήσεων συστημάτων με ballast άμεσης έναυσης

Όπως ειπώθηκε και στα προηγούμενα, με τα όργανα του εργαστηρίου γινόταν οι μετρήσεις των διαφόρων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών που αφορούσαν στα ballast και στους λαμπτήρες. Οι τιμές των μετρούμενων μεγεθών καταγραφόταν σε λογιστικά φύλλα (excel) για να γίνει η περαιτέρω επεξεργασία τους. Αρχικά γινόταν μετατροπή της αντίστασης των ηλεκτροδίων σε αντίσταση αναφοράς 25 °C με χρήση της σχέσης:

$$R_{25} = \frac{R_{\theta}}{1 + 0,0043 \cdot (\theta - 25)} \quad (3.1)$$

Η σχέση (3.1) είναι η γνωστή σχέση από την ηλεκτροτεχνία που δίνει την αντίσταση ενός αγωγού σε μια θερμοκρασία, όταν είναι γνωστή η αντίσταση σε μια άλλη παραπλήσια θερμοκρασία. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μετριόταν κατά τη διαδικασία των μετρήσεων η R_{θ} (θερμοκρασία εργαστηρίου θ) και υπολογιζόταν βάσει της σχέσης (3.1) η R_{25} στους 25 °C. Ο θερμικός συντελεστής της ηλεκτρικής αντίστασης του ηλεκτροδίου για περιοχή θερμοκρασιών δωματίου (300 K) δίνεται από τη διεθνή βιβλιογραφία ίσος με 0,0043 °C⁻¹. Η τιμή αφορά ηλεκτρόδιο που είναι κατασκευασμένο από σπείρες νήματος βολφραμίου, καλυμμένες με οξειδία βαρίου, ασβεστίου και στροντίου.

Για την εκτίμηση του συντελεστού κορυφής ρεύματος απλά γινόταν διαίρεση της μετρούμενης τιμής ρεύματος λειτουργίας κορυφής προς κορυφή με το διπλάσιο της ενεργού τιμής του, όπως αυτά δινόταν από τον παλμογράφο. Γινόταν έλεγχος για τυχούσα μεταβολή του, ιδιαίτερα προς τιμές πέραν του 1,7.

Οι τιμές της αντίστασης στους 25 °C ελέγχθηκαν ως προς τη μεταβολή τους με τη γήρανση των λαμπτήρων, στο τέλος των πειραμάτων. Αυτό έγινε ώστε να βρεθεί τυχούσα σχέση στο ρυθμό της φθοράς των ηλεκτροδίων και της ζωής του λαμπτήρα. Και τα υπόλοιπα μετρούμενα μεγέθη ελέγχθηκαν για τυχούσες μεταβολές με το χρόνο. Οι έλεγχοι έγιναν με το λογισμικό των λογιστικών φύλλων excel. Ο έλεγχος αυτός γινόταν για κάθε λαμπτήρα χωριστά. Για αντικειμενικότερη εκτίμηση ελεγχόταν ο συντελεστής προσδιορισμού, R^2 , αν ήταν κοντά στη μονάδα.

Εκτός του ελέγχου με κριτήριο τον χρόνο λειτουργίας, γινόταν και έλεγχοι με βάση άλλα μεγέθη που ήταν δεδομένη η μεταβολή τους και θα αναλυθούν στο αντίστοιχο κεφάλαιο, όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

3.8. Μέτρηση χαρακτηριστικών των ballast με προθέρμανση

Σε γενικές γραμμές υπάρχουν δυο τύποι ηλεκτρονικών ballast με προθέρμανση. Όσον αφορά στις ονομασίες τους αυτές διαφέρουν μεταξύ των συγγραφέων, διότι γίνεται μία σύγχυση μεταξύ των λέξεων θερμός (warm), γρήγορος (rapid), προγραμματισμένος (programmed), προθέρμανση (preheat), υβριδικός (hybrid) και άλλων ακόμα. Εμείς μπορούμε να υιοθετήσουμε στη διατριβή αυτή τους τύπους rapid, και programmed ορίζοντάς τους ως εξής:

- ✓ Ballast τύπου γρήγορης έναυσης (rapid start type): το ballast τροφοδοτεί κάθε ηλεκτρόδιο χωριστά με ρεύμα για την προθέρμανσή τους. Ταυτόχρονα εφαρμόζει μεταξύ τους μία τάση (200 – 300 V), ώστε όταν τα ηλεκτρόδια αποκτήσουν την κατάλληλη θερμοκρασία να γίνει η εκκένωση αυτομάτως και να ανάψει ο λαμπτήρας. Το χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν έχουν σταθερό

χρόνο προθέρμανσης, αλλά αυτός εξαρτάται από τη θερμοκρασία των ηλεκτροδίων.

- ✓ Ballast προγραμματισμένης έναυσης (programmed start type): τα ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται με ρεύμα και προθερμαίνονται. Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα στο ballast δίνει μετά την έναρξη του φαινομένου, σε προκαθορισμένο χρόνο μία τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων ικανή να επιτύχει την ολοκλήρωση της εκκένωσης. Στον τύπο αυτό η εφαρμοζόμενη για την εκκένωση τάση είναι αρκετά μικρότερη από την εφαρμοζόμενη στον προηγούμενο τύπο.

Σύμφωνα με τον πίνακα 3.2 χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά ballast που προθερμαίνουν τα ηλεκτρόδια και είναι τα εξής:

1. HF-P 1 14-35 TL 5 HE της Philips. Προγραμματισμένη έναυση.
2. HF-P 118 PL-T/C της Philips. Προγραμματισμένη έναυση.
3. QT-FH 2x14-35 της Osram. Γρήγορη έναυση.
4. PC 2/14-21-28-35 T5 PRO lp της Tridonic. Προγραμματισμένη έναυση.

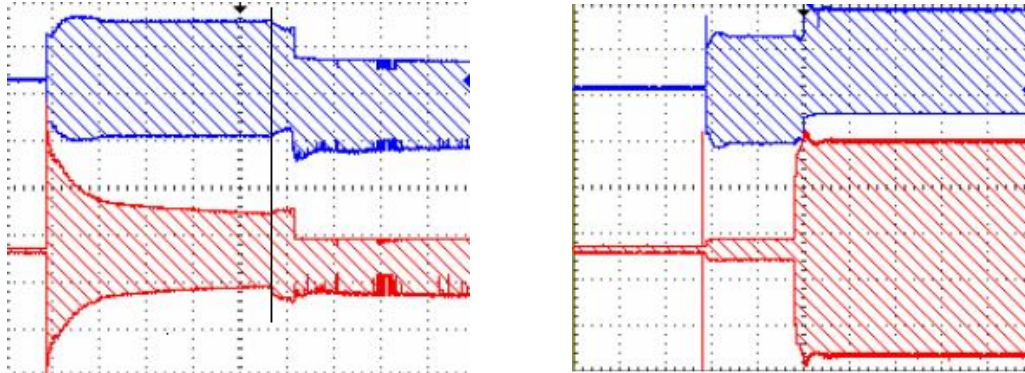
Ο διαχωρισμός των ballast σε αυτούς τους δύο τύπους, επιβεβαιώθηκε και με τη χρήση παλμογράφου. Τα ballast προγραμματισμένης έναυσης είχαν σταθερό χρόνο έναυσης ανεξάρτητα από το αν αυτή γινόταν σε ψυχρό ή θερμό λαμπτήρα. Τα ballast γρήγορης έναυσης εκκινούσαν γρηγορότερα το λαμπτήρα όταν ήταν θερμός.

Για να γίνουν οι μετρήσεις που έχουν προαναφερθεί, χρησιμοποιήθηκαν οι παλμογράφοι και τα όργανα που ήδη έχουμε περιγράψει. Η διαδικασία ήταν παρόμοια με εκείνη των ballast άμεσης έναυσης. Στις επόμενες εικόνες φαίνονται οι απεικονίσεις των κυματομορφών κατά την προθέρμανση των τεσσάρων ballast που χρησιμοποιήθηκαν, σε αντιπροσωπευτικές λήψεις κυματομορφών.

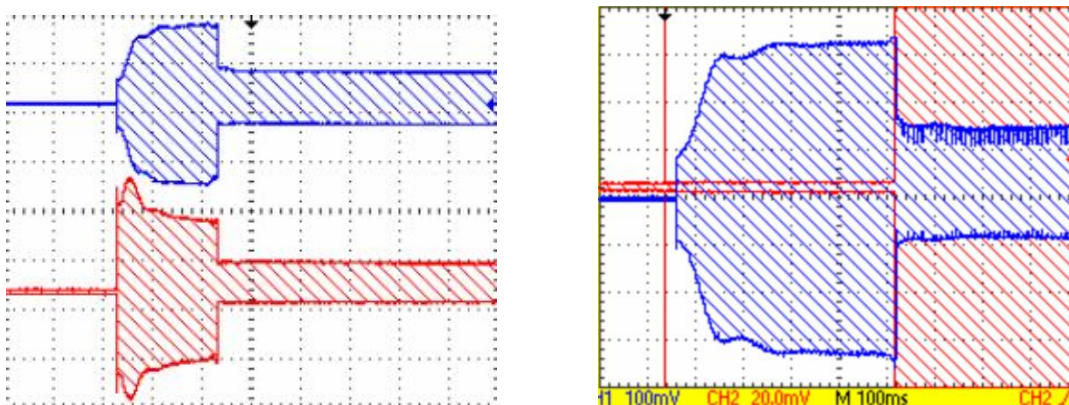
Στο σχήμα 3.12 φαίνονται οι κυματομορφές τάσης (άνω ίχνος) και ρεύματος (κάτω ίχνος) για το HF-P 1 14-35 TL 5 HE της Philips. Η μαύρη γραμμή στην αριστερή εικόνα δείχνει το τέλος της προθέρμανσης, πράγμα που γίνεται αντιληπτό από το παλμογράφημα δεξιά. Το σχήμα αυτό δείχνει ταυτόχρονα με την τάση προθέρμανσης του ηλεκτροδίου στο επάνω τμήμα του, και το ρεύμα μεταξύ των ηλεκτροδίων στο κάτω μέρος. Κατά την προθέρμανση το ρεύμα αυτό είναι το ρεύμα αίγλης, ενώ τη χρονική στιγμή κατά την οποία γίνεται η απότομη αύξηση, είναι η στιγμή που αρχίζει η εκκένωση και πλέον το ρεύμα είναι το ρεύμα του λαμπτήρα.

Στο σχήμα 3.13 φαίνονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος του ηλεκτροδίου ενός συμπαγούς λαμπτήρα HF-P 118 PL-T/C της Philips. Εδώ είναι ευκολότερη η διάκριση της χρονικής στιγμής τέλους της προθέρμανσης (όμως πάντα επιβεβαιώνεται με τη χρήση του αντίστοιχου ακροδέκτη μέτρησης ρεύματος). Το παλμογράφημα δεξιά δείχνει το ρεύμα αίγλης κατά τη διαδικασία της προθέρμανσης, που φαίνεται ότι είναι ελάχιστο.

Το ballast QT-FH 2x14-35 της Osram οδηγεί δύο λαμπτήρες, οι οποίοι προθερμαίνονται με σχετικώς διαφορετικό τρόπο, όπως δείχνουν οι κυματομορφές του σχήματος 3.14. Επιτυγχάνουν όμως την ίδια περίπου θερμοκρασία ηλεκτροδίων και οι δύο λαμπτήρες. Δεν συμβαίνει το ίδιο και με το ballast PC 2/14-21-28-35 T5 PRO Ip της Tridonic, που ενώ οι κυματομορφές είναι σχεδόν ίδιες ως προς τη μορφή, δεν έχουν το ίδιο θερμοκτικό αποτέλεσμα στα ηλεκτρόδια. Το σχήμα 3.15 δείχνει τις κυματομορφές.

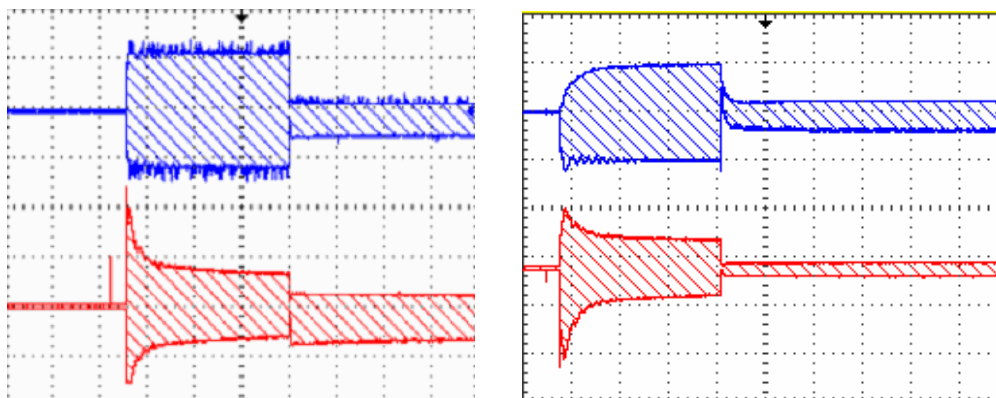


Σχήμα 3.12. Ballast HF-P 1 14-35 TL 5 HE της Philips. Αριστερά: τάση προθέρμανσης ηλεκτροδίου (10 Vp-p/div) και αντίστοιχο ρεύμα ($1000 \text{ mA}_{p-p/div}$) ως προς το χρόνο (100 ms/div). Δεξιά: τάση προθέρμανσης ηλεκτροδίου (10 Vp-p/div) και αντίστοιχο ρεύμα λαμπτήρα ($100 \text{ mA}_{p-p/div}$) ως προς το χρόνο (250 ms/div).

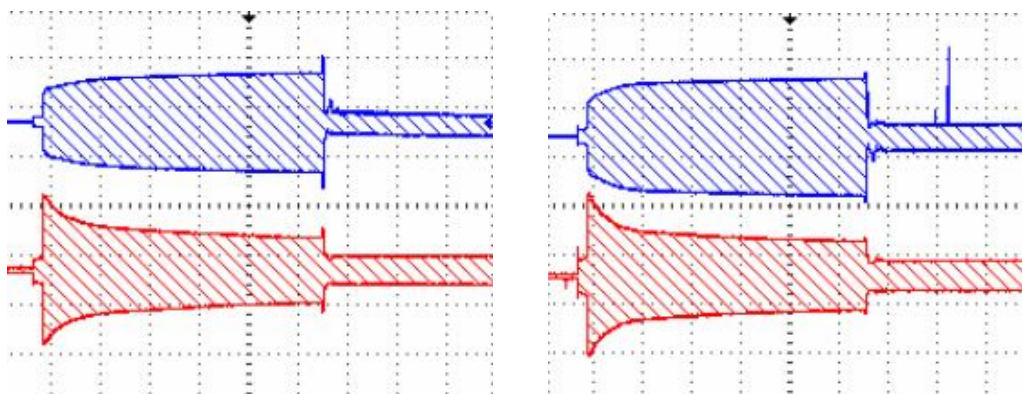


Σχήμα 3.13. Ballast HF-P 118 PL-T/C της Philips. Αριστερά: τάση προθέρμανσης ηλεκτροδίου (10 Vp-p/div) και αντίστοιχο ρεύμα ($400 \text{ mA}_{p-p/div}$) ως προς το χρόνο (250 ms/div). Δεξιά: τάση προθέρμανσης ηλεκτροδίου (5 Vp-p/div) και αντίστοιχο ρεύμα λαμπτήρα (αίγλης) ($50 \text{ mA}_{p-p/div}$) ως προς το χρόνο (100 ms/div).

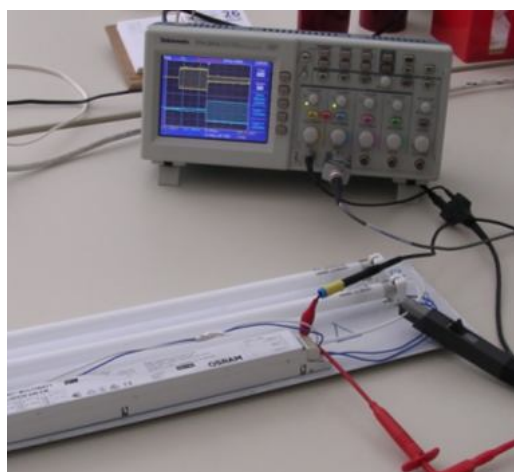
Και στα ballast με προθέρμανση η καταγραφή της έναυσης γινόταν με ρύθμιση του παλμογράφου σε απόκτηση ανίχνευσης κορυφής. Ο χρόνος που ετίθετο για την καταγραφή ήταν 2,5 δευτερόλεπτα (250 ms/div) για τα ballast των Osram και Tridonic και ένα δευτερόλεπτο (100 ms/div) για τα δύο της Philips. Τα Osram είχαν μέτριο χρόνο προθέρμανσης περί τα 800 ms και τα Tridonic μεγάλο σχετικά χρόνο προθέρμανσης, περί τα 1470 ms εξ ου και ο χρόνος των 2,5 δευτερολέπτων. Ενώ τα ballast της Philips προθέρμαιναν σε περίπου μισό δευτερόλεπτο, οπότε και ο χρόνος καταγραφής ήταν ο ανάλογος.



Σχήμα 3.14. Ballast QT-FH 2x14-35 της Osram. Τάση προθέρμανσης ηλεκτροδίου (10 Vp-p/div) και αντίστοιχο ρεύμα ($400 \text{ mA}_{p-p}/\text{div}$) ως προς το χρόνο (250 ms/div). Αριστερά ο λαμπτήρας που συνδέεται με τους ακροδέκτες 3-4-5-6 και δεξιά με τους 1-2-3-4.



Σχήμα 3.15. Ballast PC 2/14-21-28-35 T5 PRO Ip της Tridonic. Τάση προθέρμανσης ηλεκτροδίου (10 Vp-p/div) και αντίστοιχο ρεύμα ($400 \text{ mA}_{p-p}/\text{div}$) ως προς το χρόνο (250 ms/div). Αριστερά ο λαμπτήρας που συνδέεται με τους ακροδέκτες 13-14-15-16 και δεξιά με τους 9-10-11-12.



Σχήμα 3.16. Μέτρηση με τον παλμογράφο Tektronix TDS 2014 συστήματος διπλού λαμπτήρα με ballast προθέρμανσης.

Κατά την έναυση, στα ballast με προθέρμανση, μετριόταν η τάση και το ρεύμα του ενός εκ των δύο ηλεκτροδίων. Μετά την καταγραφή του παλμογράφου, η μέτρηση των

χαρακτηριστικών γινόταν με τον δρομέα, με τον ίδιο τρόπο όπως και στα ballast άμεσης έναυσης. Η μέτρηση γινόταν στο ηλεκτρόδιο προς το μέρος που υπήρχε η σφραγίδα του κατασκευαστή. Ήταν εκείνο που είχε τα πιο κοντά καλώδια για τη σύνδεση του λαμπτήρα με το ballast. Κάθε λαμπτήρας συνδέεται με το ballast μέσω δύο καλωδίων ανά ηλεκτρόδιο, εκ των οποίων τα δύο που συνδέονται με το ένα άκρο επιτρέπεται να έχουν μεγαλύτερο μήκος από τα άλλα δύο. Το ballast αναγράφει ποιοι ακροδέκτες πρέπει να συνδέονται με τα καλώδια μικρού και μεγάλου μήκους, καθώς και το επιτρεπόμενο μήκος.

Η συνδεσμολογία για την καταγραφή της τάσης της καθόδου κατά την προθέρμανση και ταυτόχρονα του ρεύματος αίγλης φαίνονται στο σχήμα 3.16. Με παρόμοιο τρόπο και συνδεσμολογίες γίνονται οι μετρήσεις και στα άλλα εργαστήρια, όταν οι ερευνητές έχουν τους ίδιους στόχους [17, 23, 35, 49, 86]

Κεφάλαιο 4

Πειραματική διερεύνηση των παραμέτρων γήρανσης σε λαμπτήρες άμεσης έναυσης

4.1. Πειράματα μέτρησης της ζωής των λαμπτήρων

4.1.1. Διεξαγωγή των πειραμάτων

Είναι γνωστό ότι τα συστήματα λαμπτήρων φθορισμού με ballast άμεσης έναυσης έχουν μικρότερο χρόνο ζωής από τα αντίστοιχα συστήματα που εκκινούν την εκκένωση με προθέρμανση των ηλεκτροδίων. Ο λόγος είναι ότι κατά την στιγμή της έναρξης της εκκένωσης, τα ηλεκτρόδια είναι ψυχρά με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη καθοδική πτώση τάσης που προκαλεί εκσφενδόνιση της επικάλυψης των ηλεκτροδίων. Αυτό έγινε φανερό στις ομάδες των συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν, καθόσον τα αποτελέσματα του χρόνου ζωής τους απείχαν κατά πολύ από τα αντίστοιχα των συστημάτων με προθέρμανση. Οι κατασκευαστές των συστημάτων υποστηρίζουν ότι η μείωση του χρόνου ζωής είναι 25%, αλλά στα πειράματα που διεξήχθησαν η μείωση ήταν πολύ μεγαλύτερη.

Είναι γεγονός ότι υπάρχουν αρκετές έρευνες σε λαμπτήρες φθορισμού T8 και T12, όμως ελάχιστα έχουν δημοσιευθεί για λαμπτήρες T5, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στα παρόντα πειράματα. Επίσης έχουν δει το φως της δημοσιότητας εργασίες με συμπαγείς λαμπτήρες, όχι όμως τόσο πολλές για συστήματα με χωριστό ballast αλλά με ενσωματωμένο (screw base compact fluorescent lamps). Ο κύριος λόγος της έλλειψης πειραμάτων είναι ο μεγάλος χρόνος που απαιτούν, το κόστος τους αλλά και ότι οι λαμπτήρες T5 έχουν κυκλοφορήσει στην αγορά πιο πρόσφατα από τους T8 και T12.

Στους πίνακες 3.1 και 3.2 έχει δοθεί η κατανομή των συστημάτων κατά τα πειράματα σε ομάδες και σε ποσότητα λαμπτήρων. Με τη χρήση των οργάνων του εργαστηρίου γινόνταν μετρήσεις κατά τακτά χρονικά διαστήματα για ανίχνευση τυχόν μεταβολής κάποιου χαρακτηριστικού του λαμπτήρα ή του ballast. Οι μετρήσεις γινόνταν κάθε 500 εναύσεις των συστημάτων ή συχνότερα στους αργούς κύκλους. Ας σημειωθεί ότι για οκτώ λαμπτήρες (τέσσερις στην ομάδα Β και άλλους τέσσερις στην ομάδα Δ) δεν έγιναν μετρήσεις αλλά απλώς καταγράφηκε ο χρόνος ζωής τους.

Συνοψίζουμε ξανά τα χαρακτηριστικά που μετριόνταν ή υπολογίζονταν σε κάθε μέτρηση: ρεύμα εισροής κατά την έναυση (inrush current), τάση έναυσης (starting voltage), χρόνος έναυσης (starting time), ρεύμα λειτουργίας λαμπτήρα (rms), ρεύμα λειτουργίας λαμπτήρα κορυφή προς κορυφή (peak to peak, p-p), παράγων κορυφής ρεύματος (current crest factor) υπολογιζόταν από τα προηγούμενα δύο, τάση λειτουργίας λαμπτήρα (rms), συχνότητα λειτουργίας και αντιστάσεις των δύο ηλεκτροδίων (κατόπιν γινόνταν υπολογισμός της

αντίστασης στους 25 °C).

Πριν καταγραφούν τα χαρακτηριστικά της έναυσης και μετρηθούν οι αντιστάσεις, τα συστήματα έμεναν για μία τουλάχιστον ώρα εκτός λειτουργίας σε θερμοκρασία εργαστηρίου. Οι μετρήσεις κατά τη λειτουργία γινόταν αφού ο λαμπτήρας λειτουργούσε για αρκετό χρόνο ώστε να σταθεροποιηθούν τα χαρακτηριστικά που μετριόνταν. Για να είναι συγκρίσιμες όλες οι τιμές που καταγράφηκαν, ο παλμογράφος ήταν πάντα στην ίδια κλίμακα.

Για να θεωρηθεί ένας λαμπτήρας κατεστραμμένος έπρεπε το ένα τουλάχιστον από τα ηλεκτρόδιά του να κοπεί. Στους λειτουργούντες με ballast που προθέρμαιναν τα ηλεκτρόδια λαμπτήρες, υπήρχαν πολλές περιπτώσεις κατά τις οποίες ενώ και τα δύο ηλεκτρόδια ήταν άθραυστα ο λαμπτήρας δεν λειτουργούσε. Στις περιπτώσεις αυτές το ballast δεν εκτελούσε την λειτουργία ελέγχοντας υψηλότερη της κανονικής κατανάλωσης. Στα συστήματα με άμεση έναυση δεν υπήρχε παρόμοιος μηχανισμός ελέγχου και ο λαμπτήρας που δεν λειτουργούσε είχε το ένα τουλάχιστον ηλεκτρόδιο κομμένο. Ας σημειωθεί ότι παρατηρήθηκαν περιπτώσεις όπου ο λαμπτήρας λειτουργούσε κανονικά με το ένα ηλεκτρόδιο κομμένο. Οι ποικίλες περιπτώσεις που καταγράφηκαν και η εξήγησή τους εκτίθενται στην παράγραφο 4.7.

4.1.2. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των συστημάτων

Οι λαμπτήρες που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα είχαν χαρακτηριστικά ορισμένα από τα οποία ενδιαφέρουν την πειραματική διαδικασία και φαίνονται στον πίνακα 4.1. Είναι τα χαρακτηριστικά που δίνει ο κατασκευαστής σε πίνακες των προϊόντων [112]. Ο ονομαστικός χρόνος ζωής που δίνει ο κατασκευαστής για τον κάθε λαμπτήρα αφορά σε λειτουργία με ballast προθέρμανσης. Στον συμπαγή λαμπτήρα δίνει και χρόνο για ballast άμεσης έναυσης, που στον πίνακα έχει τεθεί σε παρένθεση. Αντιστοίχως τα χαρακτηριστικά των ballast που ενδιαφέρουν την πειραματική διαδικασία φαίνονται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.1. Χαρακτηριστικά λαμπτήρων κατασκευαστή

Χαρακτηριστικό Λαμπτήρας	Τάση (V)	Ρεύμα (A)	Ονομαστική ισχύς (W)	Φωτεινή ροή (lm)	Απόδοση (lm/W)	Ονομαστικός χρόνος ζωής (ώρες)
TL5 HE14W/830	83	0,170	14	1200	96	24000
PL-C 18W/830/4P	80	0,210	18	1200	63	13000 (7000)

Πίνακας 4.2. Χαρακτηριστικά ballast κατασκευαστή

Χαρακτηριστικό Ballast	Ισχύς συστήματος (W)	Κατανάλωση ballast (W)	Συντελεστής ισχύος	Συχνότητα λειτουργίας (kHz)	Ρεύμα λαμπτήρα (mA)
HF-MatchboxBLUE 114 SH/SP TL/TL5/PL	14,4	2,1	0,63	<30	154
HF MatchboxRED 118 SH/SP PL-C/PL-T	17,8	1,6	0,62	<30	211

4.2. Μετρήσεις γήρανσης των συστημάτων

4.2.1. Χρόνος ζωής λαμπτήρων

Για τη συνολική διάρκεια ζωής των λαμπτήρων χρησιμοποιούνται δύο όροι που μοιάζουν αλλά δεν είναι ταυτόσημοι. Ο πλέον χρησιμοποιούμενος εξ αυτών είναι η μεσαία ζωή του λαμπτήρα (median life) αλλά συχνά γίνεται χρήση και της μέσης ζωή του λαμπτήρα (mean life). Όταν μετράται η διάρκεια ζωής μιας ομάδας λαμπτήρων η μέση ζωή είναι ο μέσος όρος της διάρκειας ζωής του συνόλου των λαμπτήρων. Η μεσαία ζωή είναι ο χρόνος που δείχνει τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων μετά την καταστροφή του 50% ακριβώς του συνόλου αυτών. Στην τελευταία περίπτωση το δείγμα πρέπει να είναι σχετικά μεγάλο για να αποδίδεται με πιο αντιπροσωπευτικό τρόπο ο χρόνος ζωής των λαμπτήρων. Ο πίνακας 4.3 δείχνει τη μέση ζωή ανά ομάδα των λαμπτήρων ενώ ο πίνακας 4.4 τη μεσαία ζωή.

Πίνακας 4.3. Μέση ζωή λαμπτήρων

Ομάδα	Κύκλος λειτουργίας		T5		CFL	
	On	Off	Κύκλοι	Ώρες	Κύκλοι	Ώρες
A	165'	15'	2712	7441	2497	6840
B	45'	15'	4949	3746	2695	2029
Γ	5'	15'	3855	323	1995	167
Δ	1'	15'	4717	79	1808	30
E	20"	15'	3594	20	1980	11

Η συνολική διάρκεια ζωής στους πίνακες δίνεται σε αριθμό ωρών, όπως είναι και το συνηθισμένο, αλλά και σε αριθμό κύκλων λειτουργίας (δηλαδή εναύσεων) που κάθε λαμπτήρας έκανε μέχρι να καταστραφεί. Ο αριθμός των εναύσεων είναι σημαντικός διότι αποκαλύπτει την επίδραση κάθε έναυσης στη ζωή του λαμπτήρα. Πράγματι, όπως δείχνει η μελέτη των αποτελεσμάτων, σε συστήματα που λειτουργούν με κύκλους μικρής χρονικής διάρκειας, είναι πολύ χρήσιμος ο όρος των κύκλων για τον προσδιορισμό της ζωής.

Πίνακας 4.4. Μεσαία ζωή λαμπτήρων

Ομάδα	Κύκλος λειτουργίας		T5		CFL	
	On	Off	Κύκλοι	Ώρες	Κύκλοι	Ώρες
A	165'	15'	2557	7008	2782	7625
B	45'	15'	4928	3734	2596	1949
Γ	5'	15'	3950	330	1990	166
Δ	1'	15'	4785	81	1898	32
E	20"	15'	3358	19	1800	10

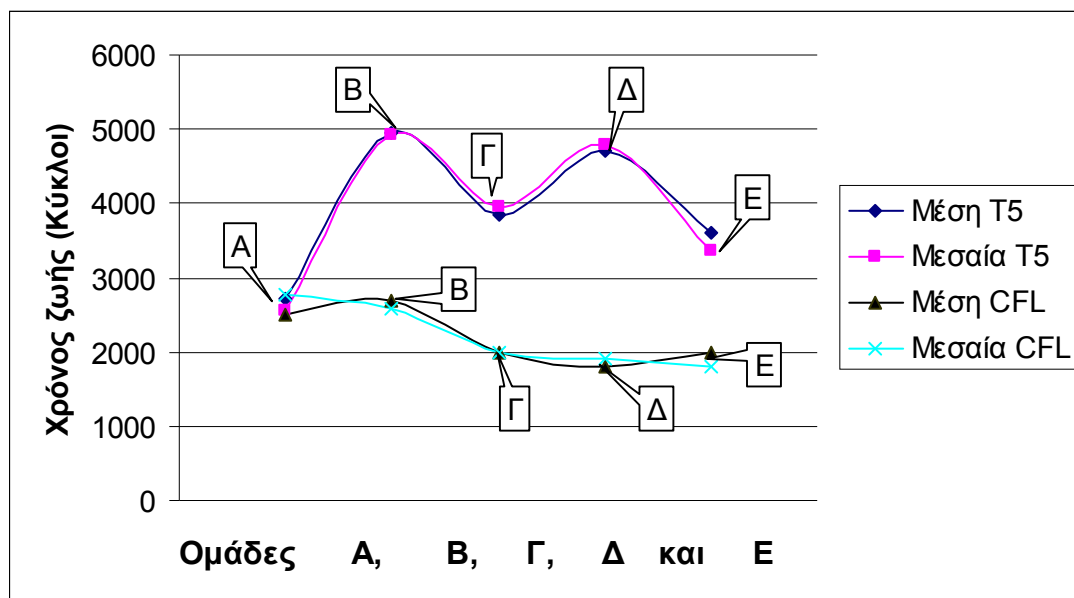
4.2.2. Ανάλυση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Με μία πρώτη ματιά φαίνεται μία αξιοσημείωτη ομοιότητα στα αποτελέσματα που παρουσιάζουν οι δύο πίνακες. Πράγματι η μέση ζωή και η μεσαία είναι σχεδόν ίδιες (η μέγιστη απόκλιση είναι 10,3%), όπως δείχνει το σχήμα 4.1 με παραστατικό τρόπο. Αυτό

σημαίνει ότι τα συστήματα λειτούργησαν ομαλά και δεν υπήρξαν συχνές περιπτώσεις ξαφνικής εξάντλησης των λαμπτήρων.

Η ζωή των συστημάτων ήταν ιδιαίτερα μικρή συγκρινόμενη με τη ζωή των αντίστοιχων συστημάτων με προθέρμανση, αλλά και με συστήματα άλλων κατασκευαστών. Οι πωλητές των συστημάτων και ο κατασκευαστής προτείνουν τους συνδυασμούς ballast-λαμπτήρα που χρησιμοποιήθηκαν ως τους ενδεδειγμένους, επομένως υπήρχε συμβατότητα μεταξύ τους. Η ονομαστική ζωή που δίνει ο κατασκευαστής για τους λαμπτήρες T5 που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 24 000 ώρες και για τους συμπαγείς 13 000 ώρες. Βέβαια αυτή η ζωή αναφέρεται για συστήματα που λειτουργούν στον καθιερωμένο κύκλο λειτουργίας και με ballast που προσφέρει προθέρμανση. Για τους συμπαγείς ο κατασκευαστής δίνει χρόνο ζωής 7 000 ώρες όταν οδηγούνται με ballast άμεσης έναυσης. Από τους πίνακες με τα αποτελέσματα φαίνεται ότι προφανώς οι λαμπτήρες δεν ανταποκρίθηκαν στα δεδομένα του κατασκευαστή, ειδικά στους κύκλους που η λειτουργία διαρκούσε λιγότερο από δύο ώρες και 45 λεπτά. Μόνο οι συμπαγείς στον καθιερωμένο κύκλο λειτουργίας σχεδόν επέτυχαν το χρόνο ζωής του κατασκευαστή (6840 ώρες έναντι 7000 ωρών).

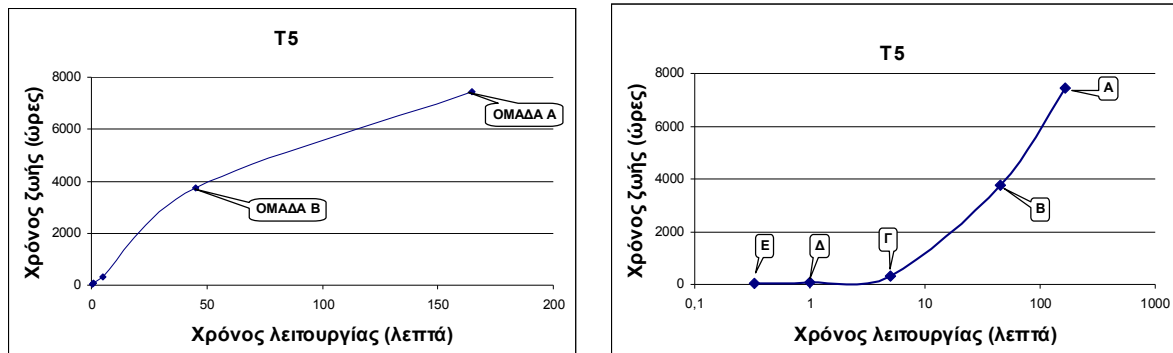
Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η καμπύλη του χρόνου ζωής των λαμπτήρων T5. Στον οριζόντιο άξονα έχει τοποθετηθεί ο χρόνος που λειτουργούσε το σύστημα σε κάθε κύκλο λειτουργίας και στον κατακόρυφο ο χρόνος ζωής κάθε ομάδας ανά κύκλο. Το αντίστοιχο διάγραμμα για τους συμπαγείς λαμπτήρες είναι στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.1. Σύγκριση μέσης και μεσαίας ζωής λαμπτήρων.

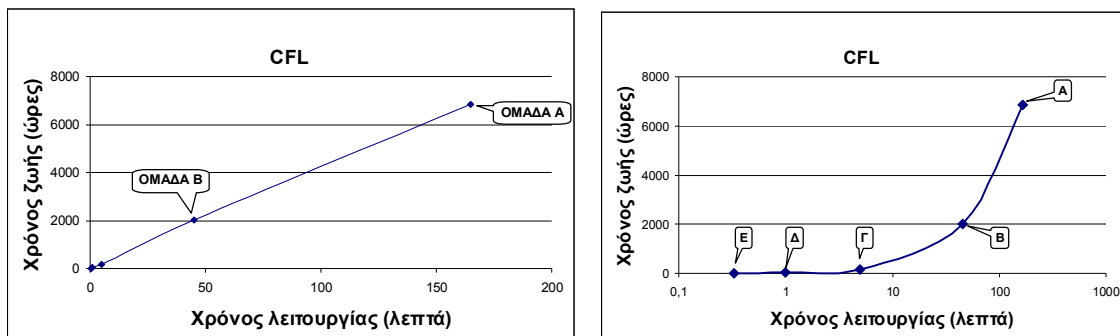
Στα διαγράμματα με την αναλογική κλίμακα (στην αριστερή πλευρά των σχημάτων) είναι σημειωμένες οι ομάδες A (165' on) και B (45' on), οι οποίες είναι εύκολα διακριτές, και όχι οι Γ, Δ και Ε των οποίων τα σημεία είναι πολύ κοντά στην αρχή των αξόνων και συγχέονται. Ο λόγος αυτής της συμπίεσής τους είναι ότι αφενός ο χρόνος του κύκλου λειτουργίας τους ήταν

σχετικά μικρός και αφετέρου ότι δεν επέτυχαν μεγάλο χρόνο ζωής. Τα διαγράμματα στη δεξιά πλευρά των σχημάτων δίνονται με το χρόνο λειτουργίας σε λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 4.2. Καμπύλη χρόνου ζωής λαμπτήρων T5.

Οι καμπύλες που εμφανίζονται στα σχήματα 4.2 και 4.3 δείχνουν ότι η εξάντληση των λαμπτήρων καθυστερεί όταν ο κύκλος λειτουργίας είναι πιο μεγάλος. Ιδιαίτερως, είναι εμφανής η δυσμενής επίδραση των σύντομων κύκλων, φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί και από άλλους συγγραφείς [97, 99, 105, 110]. Τέτοιου είδους καμπύλες έχουν στόχο την πρόβλεψη της ζωής του λαμπτήρα αναλόγως του κύκλου λειτουργίας. Όμως η δυσκολία έγκειται στο ότι οι διάφορες καμπύλες που έχουν προκύψει από τα πειράματα δεν είναι ταυτόσημες για τα ποικίλα είδη των λαμπτήρων, που σημαίνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο πρόβλεψης της ζωής μόνο για κάθε τύπο λαμπτήρα χωριστά.



Σχήμα 4.3. Καμπύλη χρόνου ζωής συμπαγών λαμπτήρων.

Τα προαναφερθέντα διαγράμματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις της παρούσης εργασίας αποδεικνύουν τη δυσκολία αυτή. Ενώ ομοιάζουν δεν ακολουθούν τις ίδιες κλίσεις σε όλο το μήκος τους. Επί παραδείγματι, η ζωή των συμπαγών λαμπτήρων ακολουθεί σχεδόν γραμμική μεταβολή, αναλόγως του χρόνου λειτουργίας του λαμπτήρα. Οι σωληνωτοί όμως λαμπτήρες επιδεικνύουν μία καλύτερη συμπεριφορά στους σύντομους κύκλους, αφού επιτυγχάνουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής.

Μία άλλη σημαντική παρατήρηση συνάγεται από τον πίνακα 4.4. Αναμενόταν, οι ομάδες με

τους σύντομους κύκλους λειτουργίας να επιτύχουν περισσότερες έναυσεις, λόγω αυξημένης φθοράς των ηλεκτροδίων σχετιζόμενης με το χρόνο της συνολικής τους λειτουργίας. Όμως το γεγονός αυτό δεν παρατηρήθηκε. Ο αριθμός των έναυσεων που επέτυχαν οι λαμπτήρες, φαίνεται ότι είναι σχεδόν ανεξάρτητος του κύκλου λειτουργίας.

Στο [101] οι συγγραφείς κάνουν μία προσπάθεια να υπολογίσουν την φθορά των ηλεκτροδίων στις καταστάσεις έναυσης και λειτουργίας. Υποθέτουν ότι σε κάθε έναυση καταναλίσκεται μια συγκεκριμένη ποσότητα επικάλυψης από τα οξειδία των ηλεκτροδίων. Επίσης σε κάθε ώρα λειτουργίας δαπανάται μια άλλη ποσότητα επικάλυψης. Με μετρήσεις που έγιναν σε διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας υπολογίστηκαν αυτές οι ποσότητες ως ποσοστό της συνολικής επικάλυψης. Έχοντας στην παρούσα διατριβή αντίστοιχες μετρήσεις γίνεται μια προσπάθεια προσδιορισμού της φθοράς των ηλεκτροδίων στηριζόμενη στις ίδιες υποθέσεις και στη σχέση 2.3.

Υποτίθεται ότι ο λαμπτήρας θεωρείται κατεστραμμένος όταν όλη η επικάλυψη φύγει από το ηλεκτρόδιο. Αυτό αν και πολύ συχνά ισχύει δεν είναι και αναγκαία συνθήκη για να εξαντληθεί ένας λαμπτήρας [16]. Ο σκοπός είναι να υπολογιστούν οι τιμές των συντελεστών α και β στη σχέση 2.3. Γι αυτό χρειάζονται δύο εξισώσεις με διαφορετικές μεταβλητές N_s και N_h , οι οποίες βρίσκονται αν γίνουν δύο μετρήσεις χρόνου ζωής με διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας.

Με τις μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στους πίνακες 4.3 και 4.4 μπορούν θεωρητικά να υπολογιστούν οι συντελεστές για αρκετά ζεύγη κύκλων. Αν ληφθούν υπ' όψιν οι ομάδες Α (165' on) και Γ (5' on) των λαμπτήρων T5 (πίνακας 4.4) τότε από τη σχέση (2.3) υπολογίζεται ότι το ποσοστό της επικάλυψης που χάνεται σε κάθε έναυση είναι $4,34 \cdot 10^{-5} \%$, ενώ για κάθε ώρα λειτουργίας χάνεται ποσοστό $2,50 \cdot 10^{-5} \%$. Από αυτή την εφαρμογή φαίνεται ότι σε κάθε έναυση χάνεται σχεδόν διπλάσια ποσότητα επικάλυψης από όσο σε μία ώρα λειτουργίας. Όμως αυτός ο τρόπος υπολογισμού, παρότι σε μερικούς συνδυασμούς δίνει αποδεκτά αποτελέσματα, αν και όχι όμοιες τιμές, σε άλλους συνδυασμούς ομάδων τα αποτελέσματα δεν είναι αποδεκτά. Επομένως δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί ο προαναφερθείς κανόνας.

Και στην προαναφερθείσα εργασία οι συγγραφείς καταλήγουν σε παρόμοιο συμπέρασμα. Ο λόγος είναι ότι στους σύντομους κύκλους, όπως έχει ήδη ειπωθεί, τα φαινόμενα έναυσης και λειτουργίας στην περιοχή των ηλεκτροδίων, δεν είναι ντετερμινιστικά. Επί πλέον είναι συχνό το φαινόμενο της εξάντλησης του λαμπτήρα πριν χαθεί όλη η επικάλυψη του ηλεκτροδίου. Αυτό επιβεβαιώθηκε και στα παρόντα πειράματα, διότι μετά από θραύση μερικών σωλήνων βρέθηκαν όντως κομμένα ηλεκτρόδια να έχουν στην επιφάνειά τους αρκετό εναπομείναν ποσόν από την επικάλυψη.

4.3. Αποτελέσματα γήρανσης μεμονωμένων λαμπτήρων

4.3.1. Αποτελέσματα λαμπτήρων T5

Η πειραματική διαδικασία που περιγράφηκε στο τρίτο κεφάλαιο επαναλήφθηκε σε όλα τα συστήματα φωτισμού που λειτούργησαν με ballast άμεσης έναυσης. Τα μετρούμενα χαρακτηριστικά, τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν και η διαδικασία των μετρήσεων αναφέρθηκαν στις παραγράφους 3.4, 3.5 και 3.6 αντίστοιχως.

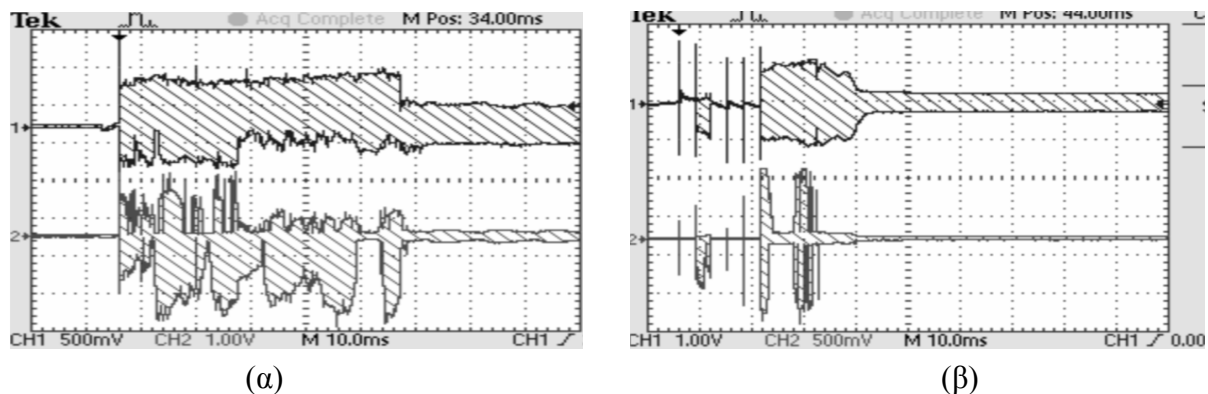
Στον πίνακα 4.5 δίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν και αφορούν την έναυση και τη λειτουργία των συστημάτων με τους σωληνωτούς λαμπτήρες. Για κάθε χαρακτηριστικό πραγματοποιήθηκε μία σειρά μετρήσεων κατά τη γήρανση. Στους επόμενους πίνακες παρατίθεται ο μέσος όρος των τιμών αυτών. Για την περίοδο της έναυσης καταγράφηκε η ένταση του ρεύματος και της τάσης και στους πίνακες δίνονται οι τιμές των κορυφών των μεγεθών αυτών. Όσον αφορά στο χρόνο ζωής, αυτός δίνεται σε αριθμό ωρών και κύκλων για κάθε λαμπτήρα χωριστά.

Πίνακας 4.5. Χαρακτηριστικά συστημάτων T5 για καθένα χωριστά.

Ομάδα (T5)	Δείγμα	Χρόνος ζωής (ώρες)	Χρόνος ζωής (κύκλοι)	Περίοδος έναυσης			Περίοδος λειτουργίας		
				Ρεύμα (A p-p)	Τάση (V p-p)	Χρόνος (ms)	Συχνότητα (kHz)	Τάση (V rms)	Ρεύμα (mA rms)
Α (165' on)	5	8513	3105	10,2	1596	35	30,79	87,7	141
	6	7008	2557	9,0	1683	31	31,66	88,9	137
	7	7581	2766	10,4	1673	42	30,37	89,6	139
	8	6662	2421	7,5	1676	30	30,83	87,9	138
Β (45' on)	5	4167	5501	9,9	1649	17	30,75	89,2	144
	6	3734	4928	8,1	1626	16	30,55	89,1	141
	7	4254	5617	9,8	1651	17	30,97	88,7	138
	8	2829	3750	7,9	1671	31	30,97	89,4	141
Γ (5' on)	5	333	3982	11,4	1660	40	30,78	87,4	144
	6	215	2572	9,0	1580	37	29,51	87,4	150
	7	412	4916	12,4	1591	37	30,75	87,9	141
	8	330	3950	10,3	1549	34	29,27	86,6	148
Δ (1' on)	5	83	4952	13,7	1626	44	31,14	88,3	142
	6	81	4785	12,6	1639	50	30,78	88,7	143
	7	66	3910	13,0	1633	45	30,30	87,8	143
	8	88	5219	11,3	1607	34	30,10	87,7	143
Ε (20" on)	5	19	3358	10,2	1644	62	29,24	85,9	140
	6	23	4171	14,4	1627	45	30,43	87,5	145
	7	20	3587	12,9	1597	47	30,31	86,9	147
	8	18	3258	13,1	1616	57	30,51	88,7	144

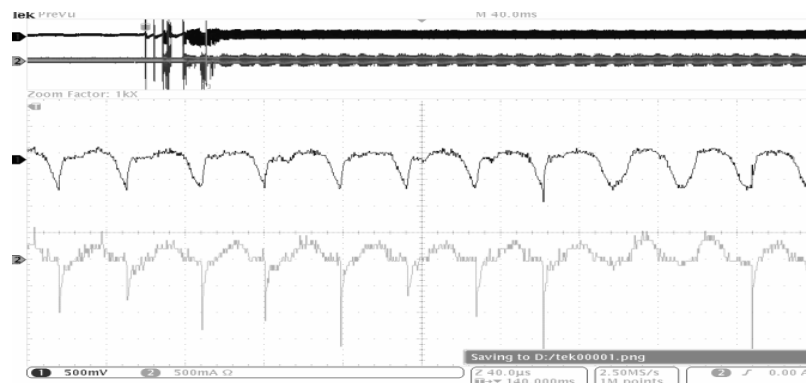
Κεφάλαιο 4: Πειραματική διερεύνηση των παραμέτρων γήρανσης σε λαμπτήρες άμεσης έναυσης

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται δυο από τις πλέον συνήθεις εναύσεις των συστημάτων του πειράματος. Η έναυση (α) έχει χρόνο έναυσης 52 ms και η (β) 34 ms, επομένως και τα δυο συστήματα ικανοποιούν το όριο των 100 ms. Πολύ συχνά η τάση και το ρεύμα κατά την έναυση δεν μειώνονται ταυτόχρονα τη στιγμή που αρχίζει η κανονική λειτουργία του λαμπτήρα και υπάρχει δίλημμα για το χρόνο που πρέπει να θεωρηθεί ως χρόνος έναυσης: ο χρόνος που προσδιορίζεται από την τάση ή από το ρεύμα; Και στα δυο παλμογραφήματα του σχήματος 4.4 συμβαίνει αυτή η μικρή σύγχυση. Ο χρόνος ο οποίος θεωρείται εδώ είναι ο χρόνος του ρεύματος, αφού όταν πάψει το ρεύμα αίγλης και αποκατασταθεί το ζητούμενο ρεύμα εκκένωσης δεν προκαλείται πλέον ιδιαίτερη βλάβη στα νήματα των ηλεκτροδίων ασχέτως αν η τάση εξακολουθεί για λίγα ms να είναι μεγάλη. Άλλοι ερευνητές θεωρούν ως χρόνο έναυσης τον μεγαλύτερο από τους δύο [101]. Η αναμενόμενη ζωή των λαμπτήρων αυτών δεν θα επηρεάζεται από το χρόνο έναυσης, αφού είναι αρκετά χαμηλότερος από το όριο των 100 ms.



Σχήμα 4.4. Κυματομορφές τάσης (άνω ίχνη, 500V/div) και ρεύματος (κάτω ίχνη, (α) 1 A/div και (β) 2 A/div) δύο τυπικών συστημάτων. Χρόνος: 10 ms/div

Στο σχήμα 4.5 φαίνονται οι κυματομορφές τάσης (άνω) και ρεύματος (κάτω) ενός συστήματος με λαμπτήρα T5 κατά την εκκίνηση και λίγα ms πριν την επίτευξη της εκκένωσης.



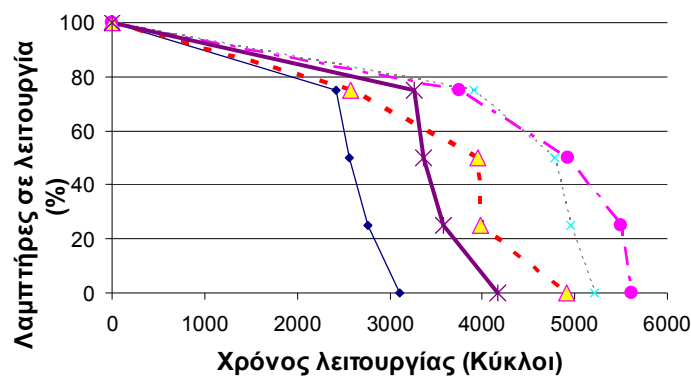
Σχήμα 4.5. Κυματομορφές τάσης (250 V/div) και ρεύματος (0,5 A/div) σε λαμπτήρα T5 λίγο πριν επιτευχθεί η εκκένωση.

Η πλήρης καταγραφή της διαδικασίας απεικονίζεται στο επάνω μέρος του παλμογραφήματος και είχε διάρκεια 1,4 s. Με τον παλμογράφο Tektronix DPO 4034 και χρησιμοποιώντας μήκος καταγραφής (record length) 1Μ έγινε μεγέθυνση της κυματομορφής της τάσης και του ρεύματος κατά τη διάρκεια της έναυσης για χρονικό διάστημα 400 μ s. Οι κυματομορφές δείχνουν ότι έχει γίνει μια εμφανώς κακή έναυση για τη ζωή του λαμπτήρα. Οι κορυφές του ρεύματος είναι ιδιαίτερα αιχμηρές και δίνουν ένα μεγάλο παράγοντα κορυφής ρεύματος, που ως γνωστόν φθείρει υπερβολικά τα ηλεκτρόδια.

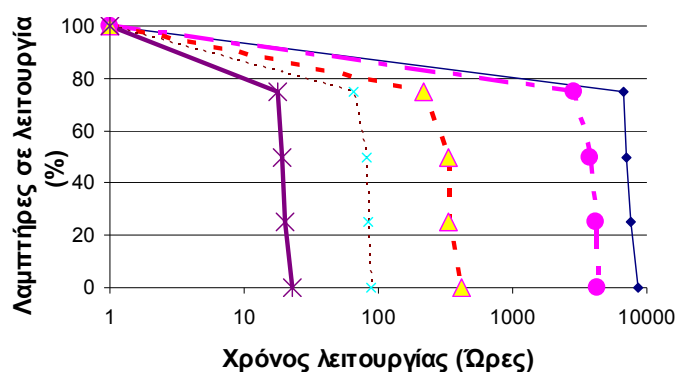
4.3.2. Διερεύνηση των αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Στη διεθνή βιβλιογραφία, τα αποτελέσματα των πειραμάτων ζωής των λαμπτήρων, παρουσιάζονται σε διαγράμματα όπου στον οριζόντιο άξονα τοποθετείται ο χρόνος σε ώρες ή σε αριθμό εναύσεων και στον κατακόρυφο το ποσοστό των εναπομεινάντων σε λειτουργία λαμπτήρων (π.χ. σχήμα 2.5). Στα διαγράμματα αυτά εμφανίζεται η χρονική στιγμή της καταστροφής κάθε λαμπτήρα του πειράματος.

Στα σχήματα 4.6 και 4.7 παρουσιάζεται διαγραμματικά ο χρόνος ζωής των λαμπτήρων T5. Το πρώτο σχήμα παρουσιάζει τη ζωή των λαμπτήρων σε κύκλους και το δεύτερο σε ώρες.



Σχήμα 4.6. Χρόνος ζωής λαμπτήρων T5. Ποσοστό λειτουργούντων λαμπτήρων ως προς το χρόνο σε κύκλους.



Σχήμα 4.7. Χρόνος ζωής λαμπτήρων T5. Ποσοστό λειτουργούντων λαμπτήρων ως προς το χρόνο σε ώρες. Λογαριθμική κλίμακα.

Από τα διαγράμματα είναι εμφανές ότι στους σύντομους κύκλους λειτουργίας, όταν ο χρόνος ζωής δίνεται σε κύκλους, οι καμπύλες συγχέονται και δε δείχνουν ένα σαφή διαχωρισμό, όπως στους κύκλους A και B ή στα διαγράμματα με το χρόνο ζωής σε ώρες. Επομένως, το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι στους σύντομους κύκλους λειτουργίας (Γ, Δ και Ε) τα αποτελέσματα όταν δίνονται σε αριθμό εναύσεων δε φαίνονται αξιόπιστα. Ο λόγος έχει αναφερθεί, αν και όχι μετά από συγκεκριμένες μετρήσεις, από τον Hammer, [84], ο οποίος αναφέρει ότι τα ηλεκτρόδια χρειάζονται τουλάχιστον δέκα λεπτά να λειτουργήσουν ώστε η επικάλυψή τους να τοποθετηθεί ομαλά πάνω στα νήματα. Έτσι όταν ο λαμπτήρας επαναλειτουργήσει, η έναυση γίνεται με όμοιο και κανονικό τρόπο. Σε άλλη εργασία, [113], οι συγγραφείς ισχυρίζονται ότι ο χρόνος έναυσης για τους λαμπτήρες με ballast άμεσης έναυσης εξαρτάται από το χρόνο που οι λαμπτήρες είναι εκτός λειτουργίας. Στην παρούσα μελέτη δεν παρατηρήθηκε κάτι αντίστοιχο. Όμως, παρά τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι κύκλοι στους οποίους η λειτουργία είναι κάτω των δέκα λεπτών, έχουν ήδη αναφερθεί πολλές εργασίες που τους χρησιμοποιούν.

Οι καμπύλες για τις ομάδες A (165' on) και B (45' on), που έχουν αργούς κύκλους λειτουργίας, επιδεικνύουν μια ομαλή συμπεριφορά. Οι λαμπτήρες της ομάδας A (165' on) πέτυχαν λιγότερους μεν κύκλους, αλλά περισσότερες ώρες λειτουργίας, σε σύγκριση με τους λαμπτήρες της ομάδας B (45' on).

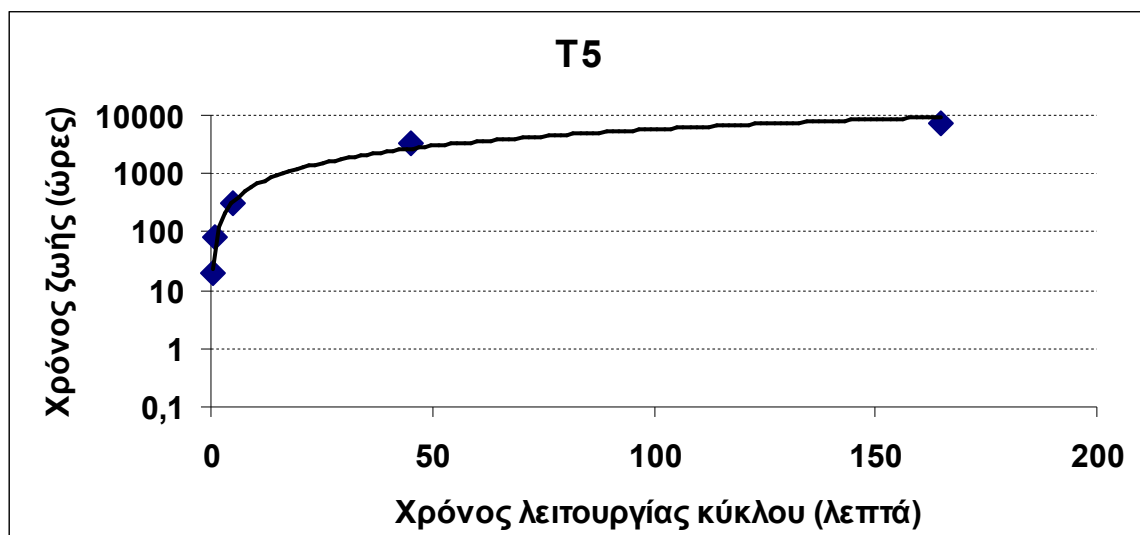
Στο σχήμα 4.7 δίνεται η ζωή των λαμπτήρων σε ώρες ενώ ο χρόνος λειτουργίας του κάθε κύκλου είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Οι καμπύλες φαίνονται ότι είναι πολύ ομαλές και συνάδουν με αποτελέσματα άλλων ερευνητών [19, 34, 99, 100]. Αυτό οφείλεται στο ότι η ζωή των λαμπτήρων σε κύκλους είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, με αποτέλεσμα οι διαφορές στη ζωή τους σε ώρες να είναι περισσότερο έντονες και στο διάγραμμα η εμφάνισή τους να είναι περισσότερο διακριτή. Ισχύει δηλαδή η πρόταση: όσο συντομότερος ο κύκλος λειτουργίας τόσο μικρότερη η ζωή του λαμπτήρα σε ώρες.

Ένα ζήτημα που τίθεται σε αυτού του είδους τις έρευνες, όπως έχει ήδη διατυπωθεί, είναι η εύρεση μιας σχέσης που να συνδέει το χρόνο λειτουργίας του κύκλου με τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων. Για την εκπλήρωση αυτού του σκοπού οι μέσοι όροι ζωής των λαμπτήρων κάθε κύκλου υπολογίστηκαν και έγινε το αντίστοιχο διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα 4.8. Στον οριζόντιο άξονα έχει τεθεί ο χρόνος λειτουργίας του λαμπτήρα σε κάθε έναυση, σε λεπτά της ώρας. Τα σημεία του διαγράμματος ακολουθούν αρκετά πιστά την καμπύλη με την εξίσωση:

$$L = 68,442 \cdot t^{0,9628} \quad (4.1)$$

Στην εξίσωση (4.1), L είναι ο αναμενόμενος χρόνος ζωής του λαμπτήρα (σε ώρες), όταν σε κάθε έναυση του κύκλου που εκτελεί μένει εν λειτουργία επί χρόνο t (σε πρώτα λεπτά).

Ασφαλώς η εξίσωση (4.1) αναφέρεται αποκλειστικά στο συγκεκριμένο είδος συστημάτων φωτισμού και ισχύει για την χρονική περιοχή κύκλων λειτουργίας που διεξήχθησαν τα πειράματα. Η καμπύλη παλινδρόμησης ακολουθεί τα σημεία του διαγράμματος με συντελεστή προσδιορισμού ίσο με $R^2=0,9933$. Η μορφή της καμπύλης επιλέχθηκε ώστε να παρέχει ρεαλιστική περιγραφή της μεταβολής του αναμενόμενου χρόνου ζωής των λαμπτήρων σε σχέση με το χρόνο του κύκλου λειτουργίας. Αναφερόμενοι σε αυτό, ο συντελεστής 68,442 απεικονίζει τον αριθμό των ωρών ζωής που θα έχει ο λαμπτήρας εάν τεθεί σε ένα γρήγορο κύκλο λειτουργίας με λειτουργία του λαμπτήρα ένα πρώτο λεπτό, πράγμα που διαπιστώθηκε άλλωστε και στα παρόντα πειράματα. Ο εκθέτης του χρόνου t είναι πλησίον της μονάδας, που σημαίνει ότι η εξίσωση δείχνει μία σχεδόν γραμμική μεταβολή των παραμέτρων της εξίσωσης.



Σχήμα 4.8. Διάρκεια ζωής των λαμπτήρων T5 σε σχέση με το χρόνο του κύκλου λειτουργίας.

Στην πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε δοκιμάστηκαν 20 λαμπτήρες T5 με ballast άμεσης έναυσης, σε ένα μεγάλο εύρος κύκλων λειτουργίας. Όλοι οι λαμπτήρες πέτυχαν αριθμό εναύσεων μεταξύ 2421 και 5617 και μέση ζωή 3965 κύκλους. Ο αριθμός των συστημάτων και το εύρος των χρόνων στους κύκλους λειτουργίας, που οι λαμπτήρες λειτούργησαν, είναι ικανά ώστε να οδηγήσουν στο ασφαλές συμπέρασμα ότι και κάθε άλλος σωληνωτός λαμπτήρας έχει μεγάλη πιθανότητα να επιτύχει αριθμό εναύσεων μέσα στα ανωτέρω όρια του δείγματος. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός των εναύσεων στους λαμπτήρες που λειτουργούν με ballast άμεσης έναυσης είναι περιορισμένος και ανεξάρτητος του κύκλου λειτουργίας, ειδικώς όταν είναι σύντομος.

4.3.3. Αποτελέσματα συμπαγών λαμπτήρων

Στον πίνακα 4.6 δίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των συμπαγών λαμπτήρων. Οι τιμές του πίνακα είναι οι μέσες τιμές των

Κεφάλαιο 4: Πειραματική διερεύνηση των παραμέτρων γήρανσης σε λαμπτήρες άμεσης έναυσης

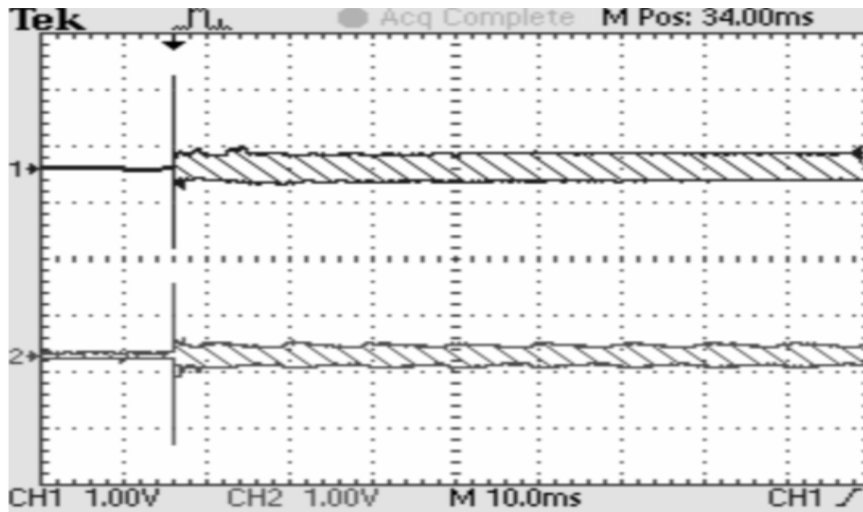
διαδοχικών μετρήσεων.

Πίνακας 4.6. Χαρακτηριστικά συστημάτων συμπαγών λαμπτήρων, για καθένα χωριστά.

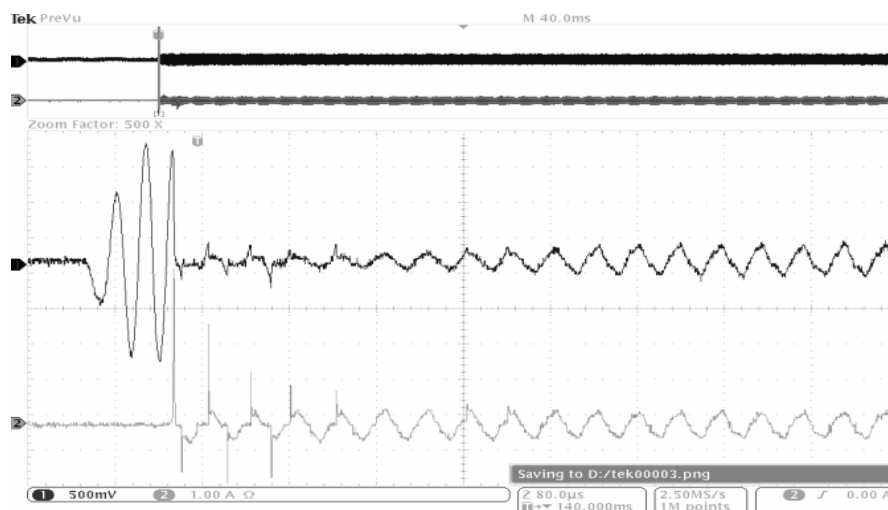
Ομάδα (CFL)	Δείγμα	Χρόνος ζωής (ώρες)	Χρόνος ζωής (κύκλοι)	Περίοδος έναυσης			Περίοδος λειτουργίας		
				Ρεύμα (A p-p)	Τάση (V p-p)	Χρόνος (ms)	Συχνότητα (kHz)	Τάση (V rms)	Ρεύμα (mA rms)
Α (165' on)	19α	7625	2782	16,1	1508	34	28,27	81,4	197
	19β	3927	1439	19,7	1538	82	28,25	82,0	194
	20α	7668	2797	16,9	1450	29	28,13	80,9	189
	20β	8141	2968	15,0	1475	34	28,01	81,0	192
Β (45' on)	19α	1975	2617	22,1	1504	48	28,02	80,9	193
	19β	1691	2241	21,1	1515	47	27,94	80,1	194
	20α	1727	2288	19,3	1510	95	27,99	79,3	189
	20β	3280	2475	21,0	1553	63	28,30	80,3	190
Γ (5' on)	19α	163	1950	22,3	1567	57	27,81	73,3	178
	19β	169	2026	19,5	1513	20	27,80	72,0	180
	20α	166	1990	19,3	1560	37	27,49	71,0	181
	20β	168	2014	19,7	1540	53	27,50	71,3	182
Δ (1' on)	19α	32	1898	24,6	1540	70	27,75	72,0	187
	19β	23	1367	23,2	1440	30	27,74	72,8	183
	20α	33	1988	19,3	1550	35	28,35	80,0	183
	20β	20	1229	23,0	1455	30	27,80	70,5	185
Ε (20" on)	19α	11	1924	18,3	1533	37	27,72	72,7	185
	19β	14	2447	25,0	1545	45	27,64	72,6	184
	20α	10	1800	19,3	1553	100	27,70	73,0	188
	20β	10	1750	22,3	1593	53	27,70	75,0	182

Στο Σχήμα 4.9 εικονίζεται η χαρακτηριστική έναυση ενός συστήματος όπου η εκκένωση επετεύχθη ταχύτατα σε χρόνο μικρότερο του ενός ms. Μια τέτοια έναυση σε σύστημα άμεσης έναυσης θεωρείται τέλεια διότι ο λαμπτήρας εκκινεί χωρίς καμία καθυστέρηση, οπότε δεν υπάρχει ο χρόνος για την ανάπτυξη ρευμάτων αίγλης που προκαλούν έντονη εκσφενδόνιση της επικάλυψης των ηλεκτροδίων, με συνέπεια την γρήγορη φθορά τους και την εξάντληση του λαμπτήρα.

Στο Σχήμα 4.10 φαίνονται οι κυματομορφές τάσης (άνω) και ρεύματος (κάτω) ενός συστήματος με συμπαγή λαμπτήρα. Το παλμογράφημα περιλαμβάνει όλη τη διαδικασία της έναυσης, η οποία διήρκεσε λιγότερο από 1ms. Η καταγραφή έγινε με τον παλμογράφο Tektronix DPO 4034, με μήκος καταγραφής 1Μ και μεγέθυνση της κυματομορφής για χρονικό διάστημα 0,8 ms.



Σχήμα 4.9. Κυματομορφή τάσης (άνω, 500V/div) και ρεύματος (κάτω, 4 A/div) μιας τέλεις έναυσης. Χρόνος: 10 ms/div.



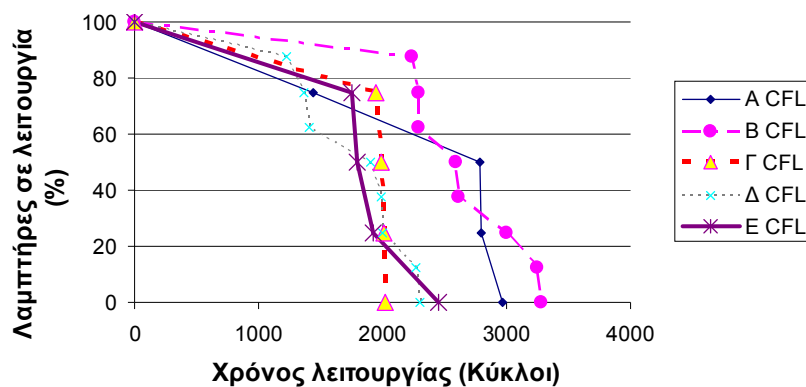
Σχήμα 4.10. Κυματομορφές τάσης και ρεύματος σε λαμπτήρα CFL κατά την έναυση (τάση: 250 V/div, ρεύμα: 1 A/div).

4.3.4. Επεξεργασία αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

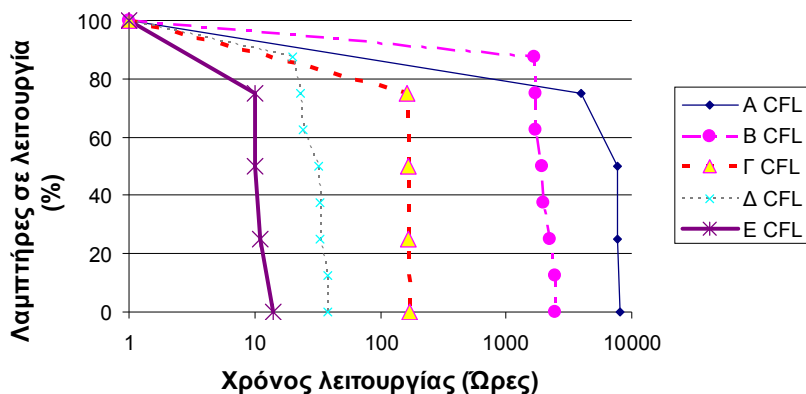
Στα σχήματα 4.11 και 4.12 απεικονίζονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα του χρόνου ζωής των συμπαγών λαμπτήρων σε αριθμό κύκλων και ωρών αντιστοίχως.

Η ζωή των συμπαγών λαμπτήρων αποδείχθηκε μικρότερη από εκείνη των σωληνωτών, πράγμα που επιβεβαιώνει τα δεδομένα των κατασκευαστών για την ονομαστική ζωή τους. Βέβαια ο κατασκευαστής των συμπαγών δίνει χρόνο στους συμπαγείς ζωής 7 000 ώρες για χρήση ballast άμεσης έναυσης, που σημαίνει ότι πράγματι τα ballast επέτυχαν τα στόχο τους. Ενώ πρόκειται για τον ίδιο κατασκευαστή, δεν δίνει αντίστοιχο χρόνο για τους λαμπτήρες

T5. Επομένως το ότι πέτυχαν μόνο το 28,5% της ονομαστικής ζωής (που είναι για τον κύκλο των τριών ωρών και με ballast με προθέρμανση), δείχνει την αρνητική επίδραση του είδους του ballast. Αρκετοί λαμπτήρες (3) της A (165' on) ομάδας των συμπαγών πέτυχαν περισσότερους κύκλους από αρκετούς εκ των λαμπτήρων της B (45' on) ομάδας, πράγμα μη αναμενόμενο, αφού θεωρείται (τουλάχιστον σε αργούς κύκλους) ότι όσο πιο αργός είναι ο κύκλος τόσο λιγότερες οι εναύσεις που πετυχαίνει ο λαμπτήρας. Και γενικώς, οι αργοί κύκλοι πέτυχαν σαφώς περισσότερους κύκλους σε σχέση με τους γρήγορους. Το γεγονός αυτό ενισχύει το συμπέρασμα της παρούσης μελέτης, ότι οι γρήγοροι κύκλοι δεν αποδίδουν σαφή εικόνα της γήρανσης των συστημάτων άμεσης έναυσης.



Σχήμα 4.11. Χρόνος ζωής λαμπτήρων CFL. Ποσοστό λειτουργούντων λαμπτήρων ως προς το χρόνο σε κύκλους.



Σχήμα 4.12. Χρόνος ζωής λαμπτήρων CFL. Ποσοστό λειτουργούντων λαμπτήρων ως προς το χρόνο σε ώρες. Λογαριθμική κλίμακα.

Στις μετρήσεις λειτούργησαν 28 συμπαγείς λαμπτήρες με ballast άμεσης έναυσης, σε όλο σχεδόν το χρονικό εύρος κύκλων λειτουργίας. Οι λαμπτήρες πέτυχαν αριθμό εναύσεων μεταξύ 1 229 και 3280 με μέση ζωή 2 140 κύκλους, κατά πολύ μικρότερο από τον αριθμό εναύσεων (3 965) των λαμπτήρων T5. Ο μικρός χρόνος ζωής των συμπαγών λαμπτήρων καθιστά ακόμα πιο δύσκολη (σε σχέση με τους T5) την ποσοτικοποίηση και την εύρεση κανόνων αυτού του χρόνου, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους διάφορους κύκλους. Άλλοι

ερευνητές οι οποίοι έχουν πειραματιστεί με λαμπτήρες φθορισμού σε γρήγορους κύκλους έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι δεν αποτελούν πρόσφορο τρόπο εκτίμησης της ζωής των λαμπτήρων [105, 110].

Στο σχήμα 4.11 φαίνεται ότι ο πρώτος λαμπτήρας της ομάδας A (A19β - 165' on) καταστράφηκε πολύ νωρίτερα από τους υπόλοιπους της ίδιας ομάδας. Από τη μέτρηση των χαρακτηριστικών του συστήματος, όπως καταγράφονται στον πίνακα 4.6, ο λαμπτήρας είχε σχετικά μεγάλο χρόνο έναυσης (82 ms), ρεύμα εισροής (19,7 A) και τάση έναυσης (1538 V). Ο μέσος όρος των τιμών των χαρακτηριστικών αυτών στους υπόλοιπους λαμπτήρες της ίδιας ομάδας ήταν αντίστοιχα: 32 ms, 16 A και 1480 V. Δηλαδή αρκετά μικρότερες τιμές. Και τα τρία αυτά χαρακτηριστικά μειώνουν το χρόνο ζωής των λαμπτήρων όταν είναι μεγάλες οι τιμές τους.

Κυματομορφές όπως των σχημάτων 4.9 και 4.10, δείχνουν ότι η διάρκεια της έναυσης ήταν ελάχιστη. Ένα τέτοιο σενάριο είναι ιδανικό και προβλέπει ασφαλώς μια μεγάλη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα. Όμως τέτοιες εναύσεις δεν υπήρξαν πολλές και το κυριότερο, η επίτευξη μίας τέτοιας έναυσης δεν εξασφαλίζει ότι και οι επόμενες του ίδιου συστήματος θα είναι εξ ίσου καλές. Στην πραγματικότητα, χρόνοι έναυσης μικρότεροι των 10 ms επιτεύχθηκαν ελάχιστες φορές. Ο χρόνος έναυσης δεν ήταν σε κάθε σύστημα σταθερός σε όλη τη ζωή του λαμπτήρα. Παρόμοιες παρατηρήσεις έχουν γίνει και από άλλους ερευνητές [16, 101]. Επιπροσθέτως, δεν βρέθηκε καμία συσχέτιση του χρόνου έναυσης με κάποια άλλη παράμετρο, όπως για παράδειγμα τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

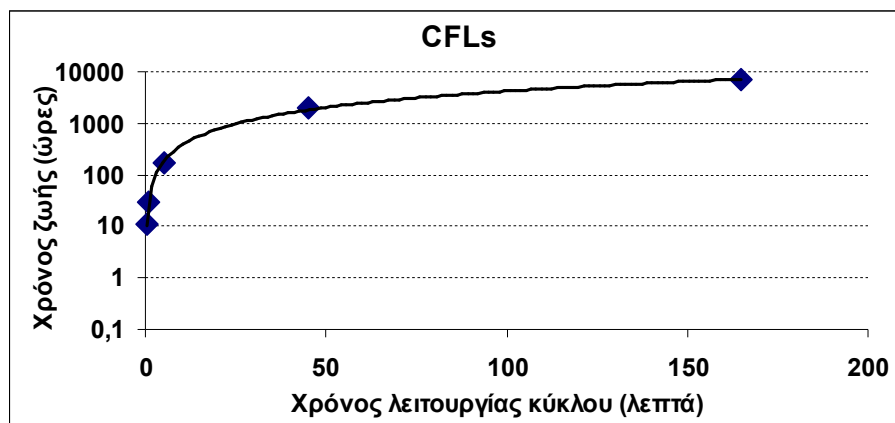
Το σχήμα 4.13 είναι ανάλογο του σχήματος 4.8 και αφορά τα αποτελέσματα της διάρκειας ζωής των συμπαγών λαμπτήρων. Ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις και από την γραμμική παλινδρόμησης που περιγράφει καλύτερα τα αποτελέσματα προκύπτει η εξίσωση:

$$L = 32,448 \cdot t^{1,0568} \quad (4.2)$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2=0,999$ και η εξίσωση αν και καλύπτει μόνο το συγκεκριμένο πείραμα έχει πολλές ομοιότητες με εκείνη που προέκυψε για τους λαμπτήρες T5 (εξίσωση 4.1). Ο συντελεστής 32,448 πάλι αφορά στη ζωή των λαμπτήρων όταν αυτοί λειτουργούν σε γρήγορους κύκλους με λειτουργία του λαμπτήρα για ένα πρώτο λεπτό και είναι συμβατός με τα αποτελέσματα του πειράματος. Ο εκθέτης του t είναι κοντά στην τιμή του εκθέτη της εξίσωσης (4.1). Και στους συμπαγείς λαμπτήρες ο εκθέτης αυτός είναι πλησίον της μονάδας, επομένως αναμένεται η ζωή του λαμπτήρα να αυξάνεται αναλόγως του χρόνου του κύκλου λειτουργίας. Το ότι στους συμπαγείς είναι μεγαλύτερος κατά τι από τη μονάδα και από τον αντίστοιχο των T5 σημαίνει ότι θα επιτύχουν καλύτερους χρόνους ζωής. Όμως αυτό δε συμβαίνει εξ αιτίας του μικρότερου συντελεστή του t , που μειώνει περίπου στο ήμισυ τη ζωή τους. Ανάλογη εξίσωση βρέθηκε ότι ισχύει και στους συμπαγείς

λαμπτήρες που οδηγούνταν με ballast που παρείχαν προθέρμανση. Η διαφορά μεταξύ του συντελεστή και του εκθέτη του t οφείλεται στο ότι περιγράφουν διαφορετική συμπεριφορά λαμπτήρων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κανένα από τα ballast (συμπαγών και T5 λαμπτήρων) δεν καταστράφηκε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Τα ballast έχουν ορισμένη συνολική διάρκεια ζωής σε χρόνο αλλά και σε αριθμό εναύσεων, αναλόγως διαφόρων παραγόντων, όπως έχει εκτεθεί στην παράγραφο 1.3.6. Στα πειράματα με ballast άμεσης έναυσης αυτά λειτούργησαν για μικρό αριθμό ωρών, επέτυχαν λίγες σχετικά εναύσεις και οι συνθήκες θερμοκρασίας ήταν ευνοϊκότερες. Επομένως όλοι οι παράγοντες που επιδρούν στο χρόνο της λειτουργίας τους υπήρξαν κατάλληλοι και γι' αυτό δεν υπήρξαν απώλειες, όπως παρατηρήθηκαν στα ballast με προθέρμανση, όπου ορισμένα καταστράφηκαν λόγω των πολλών εναύσεών τους.



Σχήμα 4.13. Διάρκεια ζωής των συμπαγών λαμπτήρων σε σχέση με το χρόνο του κύκλου λειτουργίας.

4.4. Αποτελέσματα διαδοχικών μετρήσεων των χαρακτηριστικών κάθε συστήματος

Ο προσδιορισμός χαρακτηριστικών που επιδρούν στη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων είναι πολύ σημαντικός. Θα βοηθήσει στη βελτίωση αυτών των χαρακτηριστικών, η οποία θα οδηγήσει στην αύξηση της ζωής των λαμπτήρων. Για να προσδιοριστούν και να υπολογιστεί και ο βαθμός επίδρασής τους, έγιναν διαδοχικές μετρήσεις σε διάφορα από αυτά κατά τη γήρανση των λαμπτήρων. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι πάντα εύκολος ο καθορισμός της επίδρασης με χρήση των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις. Ένας λόγος είναι ότι πρέπει οι διαφορές των τιμών μεταξύ τους να είναι σημαντικές ώστε να οδηγήσουν σε ασφαλή συμπεράσματα, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι δεν υπήρχαν μεγάλες διαφορές στη ζωή των λαμπτήρων.

Δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική μεταβολή αυτών των χαρακτηριστικών κατά τη διάρκεια του πειράματος, η οποία θα οδηγούσε σε πρόωρη πρόβλεψη του συνολικού χρόνου ζωής των

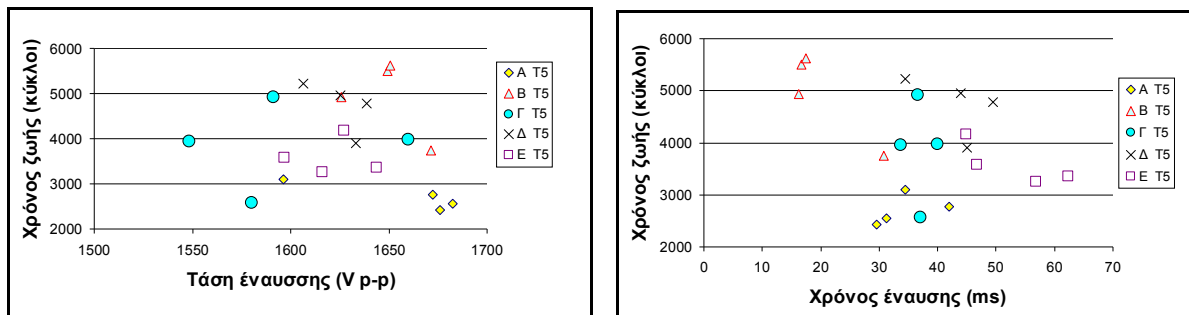
λαμπτήρων. Οι μετρήσεις που έγιναν για κάθε λαμπτήρα ήταν από τρεις έως δέκα ανάλογα με την ομάδα και με το χρόνο ζωής του λαμπτήρα. Στους πίνακες του παραρτήματος Π.11, παρατίθενται οι διαδοχικές μετρήσεις που έγιναν για κάθε λαμπτήρα από τους οποίους προέκυψαν και οι προηγούμενοι πίνακες και τα διαγράμματα.

4.5. Ανάλυση της επίδρασης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των συστημάτων στη ζωή των λαμπτήρων

4.5.1. Επίδραση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών έναυσης

Μία από τις επιδιώξεις αυτής της εργασίας ήταν να βρεθεί ποιοι παράμετροι επιδρούν στη ζωή των λαμπτήρων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι παράγοντες που επιδρούν περισσότερο είναι ο χρόνος έναυσης και η τάση κατά τη στιγμή της έναυσης [1, 23, 84, 101]. Στους πίνακες 4.5 και 4.6 παρουσιάζεται η διάρκεια ζωής κάθε λαμπτήρα χωριστά, καθώς επίσης και οι μέσες τιμές των διαδοχικών μετρήσεων από κάθε χαρακτηριστικό που μετριόνταν. Επιπροσθέτως, φαίνεται και ο υπολογισθείς παράγων κορυφής ρεύματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι η τάση του λαμπτήρα έχει τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς μέτρησης, αφού υπάρχουν δύο ζεύγη ακροδεκτών. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ αυτών των τιμών είναι 3%. Για να υπάρχει μια ενιαία ακολουθία μετρήσεων, σε όλους τους λαμπτήρες μετριόταν η τάση σε όλα τα συστήματα στους ίδιους ακροδέκτες κάθε φορά.

Στα σχήματα 4.14 και 4.15 δίνεται παραστατικά η τάση και ο χρόνος έναυσης ως προς τη συνολική διάρκεια ζωής των λαμπτήρων T5 και των συμπαγών, όπως αυτή βρέθηκε με τον υπολογισμό του μέσου όρου των μετρήσεων για κάθε σύστημα χωριστά.

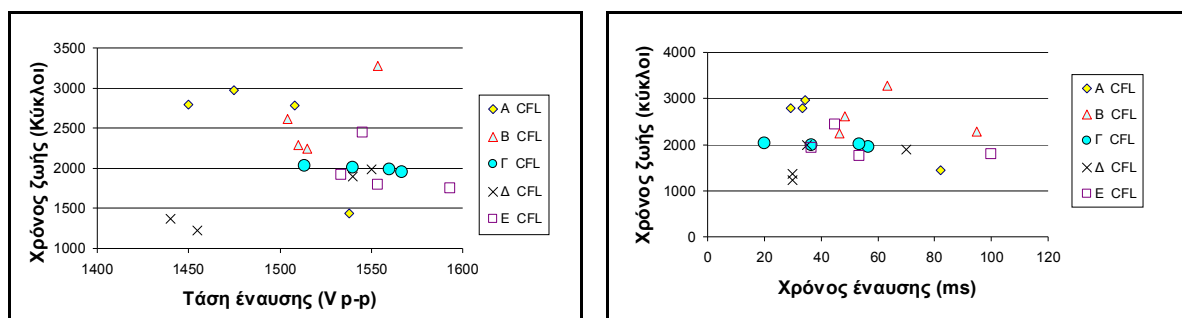


Σχήμα 4.14. Διάρκεια ζωής κάθε λαμπτήρα T5 σε σχέση με την τάση έναυσης και με το χρόνο έναυσης.

Ειπώθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο ότι, όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος από τη στιγμή που εφαρμόζεται η τάση στα ηλεκτρόδια μέχρι την επίτευξη της εκκένωσης, τόσο μικρότερος αναμένεται ο χρόνος ζωής, αφού τόσο περισσότερο διαρκεί η εκσφενδόνιση της επικάλυψης των ηλεκτροδίων. Οι ομάδες B (45' on), Δ (1' on) και E (20" on) για τους T5 λαμπτήρες και της ομάδας A των συμπαγών δείχνουν ότι ακολουθούν τον κανόνα αυτόν. Παρομοίως, η μεγάλη τάση κατά την έναυση στους λαμπτήρες T5 των ομάδων A (165' on) και Δ (1' on) και των συμπαγών στις ομάδες A (165' on) και E (20" on) φαίνεται να επιδρά

αρνητικά στη ζωή των λαμπτήρων, όπως φαίνεται από τα σχήματα 4.14 και 4.15.

Από τα ίδια σχήματα όμως, για τις υπόλοιπες ομάδες, φαίνεται πως αυτά τα χαρακτηριστικά είτε δεν επιδρούν στη ζωή των λαμπτήρων είτε η επίδρασή τους να είναι αντίστροφη προς τα αναμενόμενα [π.χ. ομάδα A (165' on) για τον χρόνο έναυσης στους λαμπτήρες T5, και Δ (1' on) για το χρόνο και την τάση στους συμπαγείς]. Η επαλήθευση των κανόνων αυτών επομένως μπορεί να γίνει μερικώς αποδεκτή. Η μη σαφής επιβεβαίωση οφείλεται στο μικρό δείγμα συστημάτων κάθε ομάδας και δεν μπορούν να εξαχθούν γενικευμένα συμπεράσματα που να συνδέουν, με μαθηματικό τρόπο, κάποιο από τα χαρακτηριστικά με το χρόνο ζωής των λαμπτήρων. Επιδρούν επίσης ταυτόχρονα άλλοι παράγοντες με μεγαλύτερη βαρύτητα, επηρεάζοντας το χρόνο ζωής.



Σχήμα 4.15. Διάρκεια ζωής κάθε λαμπτήρα CFL σε σχέση με την τάση έναυσης και με το χρόνο έναυσης.

Η εξήγηση για τις εξαιρέσεις του κανόνα αυτού που παρατηρήθηκαν, είναι ότι ο χρόνος έναυσης είναι σχετικά μικρός σε όλους σχεδόν τους λαμπτήρες (σπανιότατα σε κάποια μέτρηση υπερέβη το όριο των 100 ms) και έτσι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί καταλλήλως ως μέτρο σύγκρισης. Το ίδιο ισχύει και για την τάση έναυσης που σε όλα τα συστήματα έχει πολύ μικρό εύρος τιμών, που σπάνια ξεπερνά τα 100 V. Σε άλλη έρευνα [101] που φάνηκε επίδραση της τάσης έναυσης στη ζωή του λαμπτήρα το εύρος της διαφοράς ήταν περί τα 1000 V.

Εκτός από το χρόνο και την τάση έναυσης, εξετάστηκε και το ρεύμα έναυσης, για τυχόν επίδραση στη ζωή των λαμπτήρων αλλά δεν βρέθηκε κάποια ικανοποιητική συσχέτιση. Από τις παρατηρήσεις των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι, σε γενικές γραμμές, τάση έναυσης μικρότερη των 1650 V, ρεύμα έναυσης μικρότερο από 10 A και χρόνος έναυσης μικρότερος από 50 ms, δίνουν μεγαλύτερη ζωή στο λαμπτήρα.

4.5.2. Επίδραση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών λειτουργίας

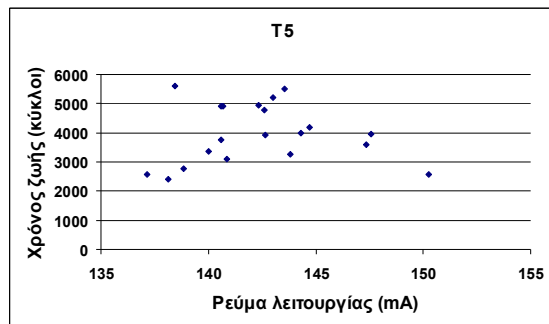
Οι λαμπτήρες πρέπει να λειτουργούν στις τιμές ρεύματος και τάσης λειτουργίας που δίνονται από τον κατασκευαστή, ώστε να αποδώσουν τα μέγιστα, όσον αφορά στο συνολικό χρόνο της ζωής τους. Ο κατασκευαστής δίνει για τους λαμπτήρες T5 ονομαστική τιμή ρεύματος 170 mA, τιμή που απέχει αρκετά από το ρεύμα που μετρήθηκε σε όλους τους λαμπτήρες και ήταν μεταξύ 137 mA και 150 mA. Ούτε και την ονομαστική τιμή της τάσης των 83 V, που

έπρεπε να έχει στα άκρα ο λαμπτήρας, επέτυχε το ballast. Η τάση στους λαμπτήρες T5 ήταν περισσότερο από 86 V μέχρι και 90 V. Αντίστοιχες διαφορές υπάρχουν και στις τιμές των συμπαγών λαμπτήρων. Η ονομαστική τιμή ρεύματος είναι 210 mA, αλλά μετρήθηκε τιμή από 178 mA έως 197 mA. Η ονομαστική τιμή τάσης ήταν 80 V και στα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές ήταν μεταξύ 70 V και 82 V. Συνοπτικά οι διαφορές αυτές φαίνονται στον πίνακα 4.7.

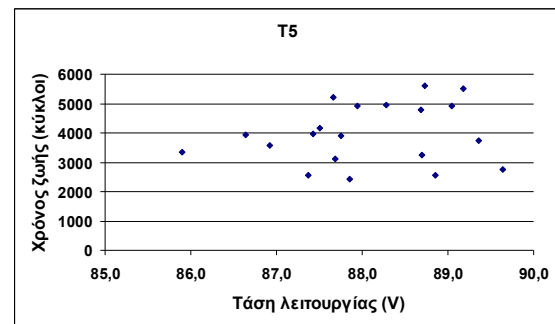
Πίνακας 4.7. Συνιστώμενα και μετρούμενα χαρακτηριστικά λαμπτήρων.

Λαμπτήρας	Χαρακτηριστικό	Συνιστώμενη τιμή	Μετρούμενη τιμή	Διαφορά (%)
T5	Τάση (V)	83	86 - 90	3,6 - 8,4
	Ρεύμα (mA)	170	137 - 150	11,8 - 19,4
CFL	Τάση (V)	80	70 - 82	2,5 - 12,5
	Ρεύμα (mA)	210	178 - 197	6,2 - 15,2

Βάσει των μετρήσεων που έγιναν, τα διαγράμματα των σχημάτων 4.13 έως 4.16 παρουσιάζουν τη ζωή των λαμπτήρων ως προς την τάση ή το ρεύμα λειτουργίας τους. Στο σχήμα 4.16 και για τους λαμπτήρες T5 φαίνεται ότι η συνολική διάρκεια της ζωής τους είναι ανεξάρτητη του ρεύματος, αφού για ίδιες τιμές ρεύματος η ζωή διαρκεί από τον ελάχιστο έως το μέγιστο αριθμό κύκλων. Στους συμπαγείς λαμπτήρες (σχήμα 4.18) φαίνεται μία μικρή αύξηση της ζωής των λαμπτήρων, όσο το ρεύμα αυξάνει προς την ονομαστική του τιμή, από την οποία όμως απέχει σε ποσοστό από 6,2% έως και 15,2%. Στο σχήμα έχει σχεδιαστεί η ευθεία γραμμικής απόκλισης.



Σχήμα 4.16. Ζωή των λαμπτήρων T5 σε σχέση με το ρεύμα λειτουργίας του λαμπτήρα (ονομαστική τιμή 170 mA).



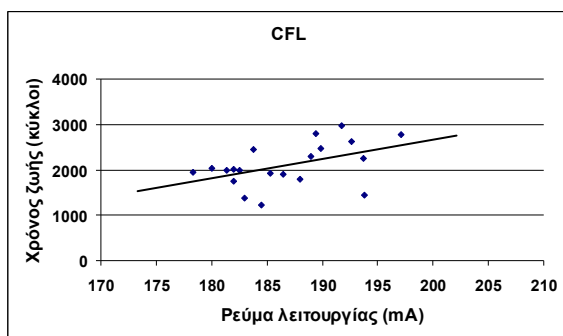
Σχήμα 4.17. Ζωή των λαμπτήρων T5 σε σχέση με την τάση λειτουργίας του λαμπτήρα (ονομαστική τιμή 83 V).

Στην τάση λειτουργίας των σωληνωτών λαμπτήρων δεν παρατηρείται κάποια συστηματική μεταβολή της ζωής των λαμπτήρων όταν η τάση παίρνει διάφορες τιμές. Οι τιμές της τάσης δε μεταβάλλονται σε μεγάλη περιοχή. Η ζωή των λαμπτήρων όμως, έχει μεγάλη σχετικώς διακύμανση που οφείλεται σε άλλους παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά της έναυσης και ο κύκλος λειτουργίας. Τα ballast των συμπαγών λαμπτήρων που δίνουν τάση πιο κοντά στην ονομαστική επέτυχαν περισσότερες εναύσεις (σχήμα 4.19), από τα άλλα με τη μικρότερη τάση. Όμως και πάλι οι ώρες λειτουργίας τους απείχαν αρκετά από τον ονομαστικό χρόνο

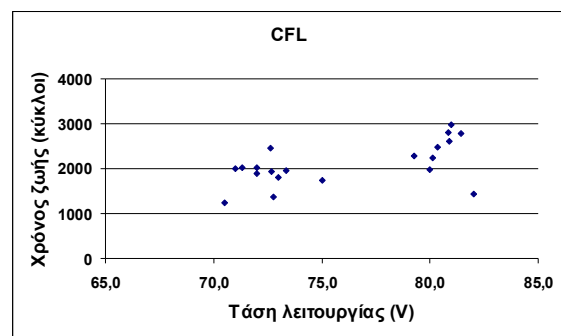
ζωής του κατασκευαστή.

Όπως έχει διατυπωθεί ξανά, οι λαμπτήρες και τα ballast που χρησιμοποιήθηκαν είχαν συμβατότητα σύμφωνα με τον κατασκευαστή [112] και δεν θα έπρεπε να παρουσιάζουν αυτές τις διαφορές οι μετρούμενες τιμές με τις ονομαστικές. Τα αντίστοιχα συστήματα που παρείχαν προθέρμανση στα ηλεκτρόδια πριν την έναυση, είχαν τιμές τάσης και ρεύματος κοντά στις ονομαστικές των λαμπτήρων.

Ενδεχομένως λοιπόν οι μεγάλες αποκλείσεις των καταγραφέντων τιμών της τάσης και του ρεύματος του λαμπτήρα από τις ονομαστικές, να είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το χρόνο ζωής των λαμπτήρων. Ασφαλώς και δεν υπάρχει αμφιβολία ότι επιδρούν [103,104]. Με χρήση των αποτελεσμάτων που παρατίθενται, δεν μπορεί να γίνει σύγκριση και εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων. Ο λόγος είναι ότι δεν υπήρξαν αποκλείσεις στις τιμές των παραμέτρων στα δείγματα. Επίσης, τα δείγματα δεν ήταν τόσο πολλά, ώστε να βοηθούν μία συγκριτική μελέτη.



Σχήμα 4.18. Ζωή των λαμπτήρων CFL σε σχέση με το ρεύμα λειτουργίας του λαμπτήρα (ονομαστική τιμή 210 mA).



Σχήμα 4.19. Ζωή των λαμπτήρων CFL σε σχέση με την τάση λειτουργίας του λαμπτήρα (ονομαστική τιμή 80 V).

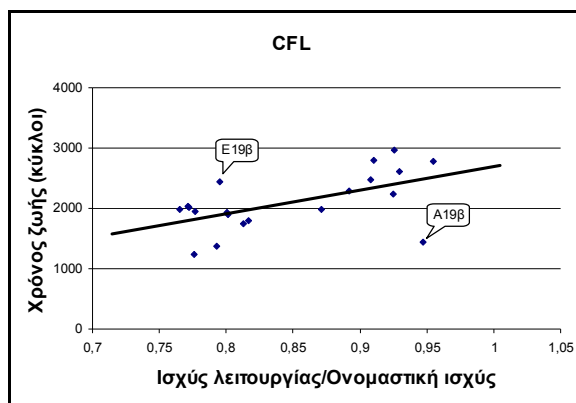
Εκτός των ανωτέρω παραγόντων, των οποίων η επίδραση αναλύθηκε, εξετάστηκε και η επίδραση της συχνότητας λειτουργίας, καθώς και του παράγοντος κορυφής ρεύματος. Ο παράγον κορυφής ρεύματος στους T5 λαμπτήρες μεταβλήθηκε μεταξύ 1,33 και 1,36, ενώ στους συμπαγείς μεταξύ 1,40 και 1,54. Δε βρέθηκε απολύτως καμία συσχέτιση των τιμών τους με τη ζωή των αντίστοιχων λαμπτήρων. Από τα εκτεθέντα αποτελέσματα είναι εμφανές ότι και αυτών των παραγόντων οι τιμές δε μεταβαλλόταν σε μεγάλο εύρος. Αποτέλεσμα αυτού είναι να μην παρουσιάζει ιδιαίτερη κλίση η ευθεία γραμμικής απόκλισης στα διαγράμματα αυτών των παραμέτρων σε σχέση με το χρόνο ζωής των λαμπτήρων.

4.5.3. Επίδραση της ισχύος του λαμπτήρα

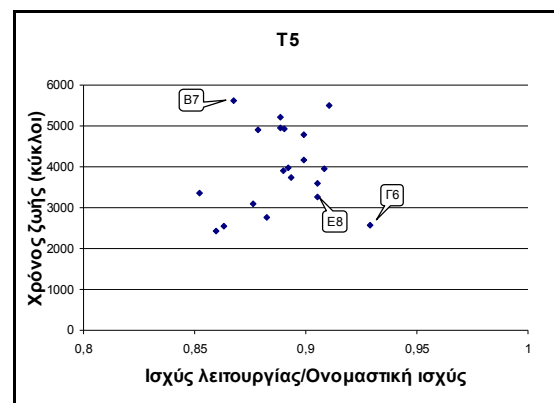
Μία άλλη συσχέτιση που βρέθηκε ήταν μεταξύ της ζωής των λαμπτήρων και της ισχύος τους. Η συσχέτιση αυτή αφορούσε κυρίως τους συμπαγείς λαμπτήρες και όχι τόσο τους σωληνωτούς στους οποίους δεν βρέθηκε ισχυρή συσχέτιση. Το σχήμα 4.20 παρουσιάζει την επίδραση της ισχύος του λαμπτήρα στη ζωή των συμπαγών λαμπτήρων. Ως ισχύς έχει τεθεί ο

λόγος της πραγματικής ισχύος λειτουργίας προς την ισχύ που δίνεται από τον κατασκευαστή. Είναι εμφανές ότι, όσο περισσότερο ο λαμπτήρας προσεγγίζει την ονομαστική ισχύ του, τόσο μεγαλύτερος χρόνος ζωής επιτυγχάνεται. Στο σχήμα 4.21 παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα για τους σωληνωτούς λαμπτήρες, όπου φαίνεται ότι δεν υπάρχει κάποια σχέση της ισχύος του λαμπτήρα με τη ζωή του. Η καλή συσχέτιση στους συμπαγείς λαμπτήρες ίσως οφείλεται στο ότι έχουμε ένα μεγάλο εύρος τιμών για την ισχύ (ο λόγος κυμαίνεται χονδρικώς μεταξύ 0,75 και 0,95) σε αντίθεση με το μικρό εύρος στους σωληνωτούς (0,85 έως 0,93). Η διακύμανση των τιμών στους συμπαγείς δίνει τη δυνατότητα στο δείγμα των λαμπτήρων να εμφανίσει την επίδραση της ισχύος στη ζωή τους.

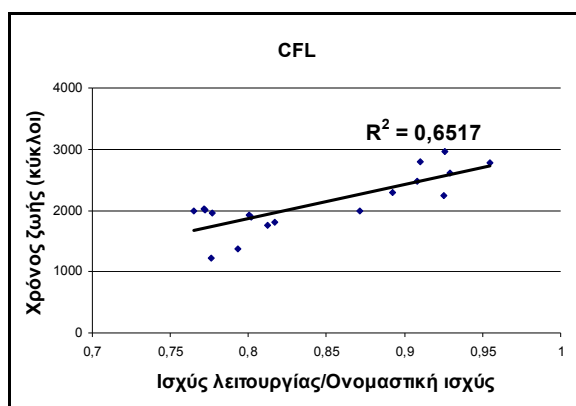
Αν αφαιρεθούν από τα διαγράμματα ορισμένοι λαμπτήρες, που μπορούν να θεωρηθούν ελαττωματικοί, η γραμμική συσχέτιση των μεταβλητών γίνεται αρκετά καλή, ακόμα και στους σωληνωτούς. Από τους συμπαγείς λαμπτήρες έχουν αφαιρεθεί οι A19β (165' on) και E19β (20" on), ενώ από τους T5 οι B7 (45' on), Γ6 (5' on) και E8 (20" on). Στο σχήμα 4.22 φαίνονται τα νέα διαγράμματα με τον βελτιωμένο συντελεστή προσδιορισμού.



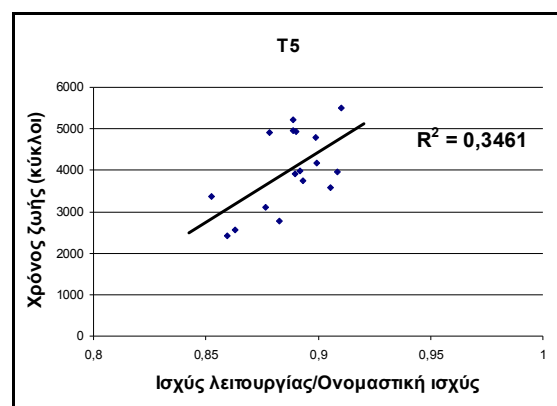
Σχήμα 4.20. Ζωή των λαμπτήρων CFL σε σχέση με την πραγματική ισχύ λειτουργίας του λαμπτήρα.



Σχήμα 4.21. Ζωή των λαμπτήρων T5 σε σχέση με την πραγματική ισχύ λειτουργίας του λαμπτήρα.



Σχήμα 4.22. Ζωή των λαμπτήρων CFL και T5 σε σχέση με την πραγματική ισχύ λειτουργίας του λαμπτήρα, αφού έχουν αφαιρεθεί οι λαμπτήρες με ακραίες συμπεριφορές.



4.6. Μεταβολή χαρακτηριστικών κατά τη γήρανση

4.6.1. Μεταβολή αντίστασης

Ιδιαίτερο βάρος δόθηκε στη μεταβολή που πιθανώς θα επερχόταν κατά τη γήρανση στην ηλεκτρική αντίσταση των νημάτων των λαμπτήρων. Η επικάλυψη των ηλεκτροδίων με τα οξειδία υφίσταται μεταβολές κατά την λειτουργία τους. Εξ αιτίας αυτού του γεγονότος, άλλωστε, υπάρχει και το μαύρισμα των άκρων των λαμπτήρων, μετά από εύλογο χρονικό διάστημα λειτουργίας. Τα οξειδία αυτά είναι ημιαγωγοί και στις συνθήκες έναυσης και λειτουργίας των λαμπτήρων δρουν ως μονωτές. Επομένως, παρά την εκσφενδόνιση και την εξάτμισή τους δεν θα προέλθει εξ αιτίας τους κάποια μεταβολή στην αντίσταση του ηλεκτροδίου. Αναμενόταν όμως διάβρωση του ίδιου του νήματος του βολφραμίου οπότε και θα εμφανιζόταν αλλαγή στην αντίσταση του ηλεκτροδίου.

Πράγματι, μια μικρή μεταβολή παρατηρήθηκε λίγο πριν το τέλος της ζωής του λαμπτήρα, όχι όμως σε όλους. Συγκεκριμένα, μια μικρή αύξηση μέχρι 2,3% διαπιστώθηκε στην τελευταία μέτρηση πριν το κάψιμο πολλών λαμπτήρων. Στον Πίνακα 4.8 έχει υπολογιστεί η μέση αντίσταση για κάθε ομάδα λαμπτήρων, σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων μέχρι να καταστραφούν. Αυτό αφορά και στα δύο νήματα κάθε λαμπτήρα (ονομάζονται R_{c1} και R_{c2}). Η μέση αυτή τιμή στη συνέχεια συγκρίνεται με την τελευταία τιμή που μετρήθηκε στους λαμπτήρες πριν καταστραφούν. Για τους λαμπτήρες τύπου T5 η αντίσταση στην πλευρά της σφραγίδας είναι η R_{c1} και R_{c2} είναι η άλλη.

Πίνακας 4.8. Μέση και τελευταία τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης των δυο νημάτων των λαμπτήρων.

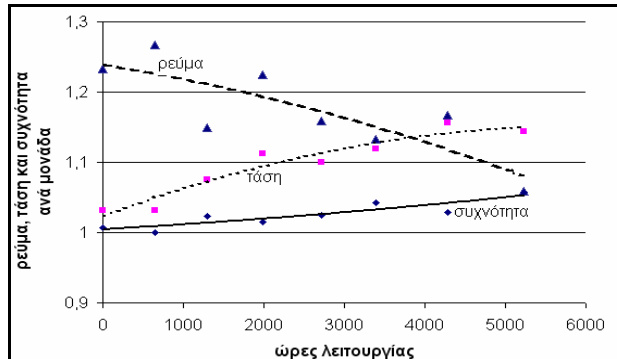
Ομάδα	Μέση R_{c1}	Τελευταία R_{c1}	Διαφορά (%)	Μέση R_{c2}	Τελευταία R_{c2}	Διαφορά (%)
A-T5 (165' on)	8,26	8,33	0,8	8,33	8,43	1,2
B-T5 (45' on)	8,20	8,23	0,4	8,28	8,35	0,8
Γ-T5 (5' on)	8,38	8,38	0,0	8,48	8,49	0,1
Δ-T5 (1' on)	8,24	8,28	0,5	8,54	8,55	0,1
E-T5 (20" on)	8,20	8,20	0,0	8,40	8,34	-0,7
A-CFL (165' on)	5,73	5,81	1,4	5,81	5,90	1,5
B-CFL (45' on)	5,91	5,99	1,4	5,86	5,82	-0,7
Γ-CFL (5' on)	6,11	6,23	2,0	5,98	5,95	-0,5
Δ-CFL (1' on)	6,01	6,11	1,7	5,96	6,00	0,7
E-CFL (20" on)	6,10	6,24	2,3	5,95	5,98	0,5

4.6.2. Μεταβολή συχνότητας, τάσης και ρεύματος λειτουργίας

Οι μετρήσεις έδειξαν ότι, κατά τη λειτουργία των συστημάτων υπήρξε μια σταδιακή αύξηση στην συχνότητα λειτουργίας πολλών λαμπτήρων. Συγχρόνως υπήρξε μία συνεπακόλουθη αύξηση στην τάση λειτουργίας του λαμπτήρα και μια μείωση στο ρεύμα του. Αυτές οι τρεις

παράμετροι είχαν σχετικά καλή γραμμική μεταβολή σε σχέση με τη ζωή των λαμπτήρων, ειδικά στα συστήματα στους αργούς κύκλους λειτουργίας, δηλαδή στις ομάδες A (165' on) και B (45' on) και ιδιαίτερα στα συστήματα με σωληνωτούς λαμπτήρες. Στο σχήμα 4.23 φαίνεται η μεταβολή αυτών των παραμέτρων στις διαδοχικές μετρήσεις που έγιναν κατά τις ώρες που λειτουργούσε ο λαμπτήρας. Το σχήμα αναφέρεται σε ένα τυπικό αντιπροσωπευτικό σύστημα από την ομάδα A1 (165' on) με λαμπτήρα T5. Πολυωνυμικές καμπύλες έχουν χρησιμοποιηθεί για να δείξουν την τάση των τιμών.

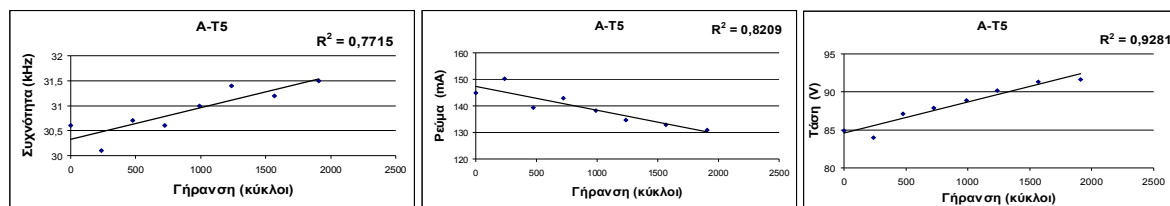
Οι συμπαγείς λαμπτήρες δεν λειτούργησαν αρκετά ώστε να γίνουν πολλές μετρήσεις των χαρακτηριστικών τους. Πράγματι, για τα συστήματα των ομάδων Γ (5' on), Δ (1' on) και Ε (20" on) μόνο τρεις ή τέσσερις μετρήσεις έγιναν. Γι αυτό το λόγο τα αποτελέσματά τους δεν είναι ιδιαίτερος αξιόπιστα. Οι σωληνωτοί λαμπτήρες πέτυχαν τουλάχιστον εξ μετρήσεις των χαρακτηριστικών τους. Και σε αυτούς τα συστήματα των ομάδων Γ (5' on), Δ (1' on) και Ε (20" on) δεν έδειξαν αξιοπρόσεκτη γραμμική μεταβολή των τιμών των χαρακτηριστικών τους. Μόνο οι ομάδες Α (165' on) και Β (45' on) των σωληνωτών λαμπτήρων και η ομάδα Α (165' on) των συμπαγών έδωσαν ενδιαφέρουσες μεταβολές στα χαρακτηριστικά λειτουργίας που εξετάζονται. Έγινε μαθηματική επεξεργασία αυτών με MS Excel. Κάθε χαρακτηριστικό συσχετίστηκε με το χρόνο λειτουργίας του λαμπτήρα και υπολογίστηκε ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) για κάθε ομάδα με ίδια συστήματα [114].



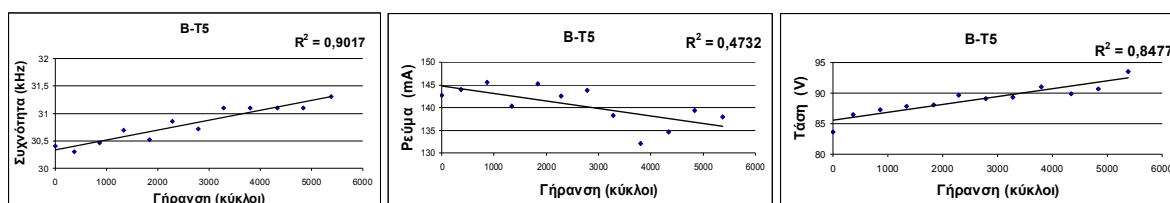
Σχήμα 4.23. Μεταβολή της συχνότητας, τάσης και του ρεύματος του λαμπτήρα σε διαδοχικές μετρήσεις σε σχέση με το χρόνο ζωής του λαμπτήρα. A1. Μονάδες: συχνότητα: x 30 kHz, τάση: x 80 V, ρεύμα: x 120 mA.

Στα σχήματα 4.24, 4.25 και 4.26 φαίνονται τα γραφήματα με τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών του προαναφερθέντος πίνακα. Τα σημεία που σημειώνονται είναι οι μέσες τιμές από κάθε μέτρηση των συστημάτων μίας ομάδας. Η ζωή των λαμπτήρων έχει τεθεί σε κύκλους και τα σημεία των γραφημάτων υποδεικνύουν τον αριθμό των κύκλων τη χρονική στιγμή της μέτρησης. Για κάθε σημείο η τιμή της μετρούμενης παραμέτρου υπολογίστηκε από το μέσο όρο των τιμών για τα συστήματα που ήταν εν λειτουργία κατά τη μέτρηση.

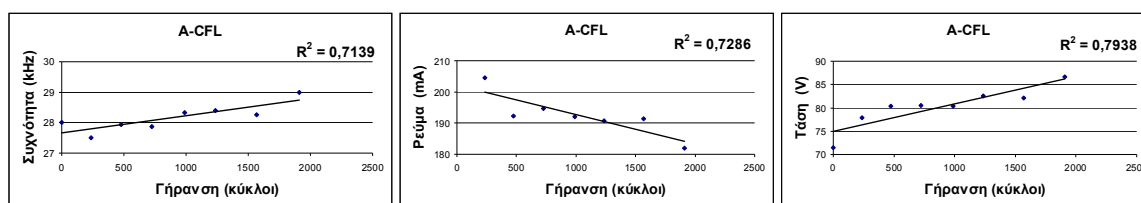
Κεφάλαιο 4: Πειραματική διερεύνηση των παραμέτρων γήρανσης σε λαμπτήρες άμεσης έναυσης



Σχήμα 4.24. Μεταβολή της συχνότητας, του ρεύματος και της τάσης λειτουργίας στους λαμπτήρες της ομάδας A-T5 (165' on).



Σχήμα 4.25. Μεταβολή της συχνότητας, του ρεύματος και της τάσης λειτουργίας στους λαμπτήρες της ομάδας B-T5 (45' on).



Σχήμα 4.26. Μεταβολή της συχνότητας, του ρεύματος και της τάσης λειτουργίας στους λαμπτήρες της ομάδας A-CFL (165' on).

Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζεται ο συντελεστής προσδιορισμού στις τρεις ομάδες που επιτεύχθηκαν αξιόλογες τιμές. Τα αποτελέσματα δείχνουν την ποιότητα των μεταβολών που περιγράφηκαν νωρίτερα. Η μεταβολή των παραμέτρων αποδίδεται στη γήρανση των συστημάτων. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που οι ομάδες μικρών κύκλων δεν έδωσαν αξιόπιστα αποτελέσματα: δεν πέτυχαν μεγάλο χρόνο ζωής. Οι ομάδες που δεν αναφέρονται στον πίνακα είχαν τον συντελεστή R^2 σε ένα τουλάχιστον χαρακτηριστικό κάτω του 0,5.

Πίνακας 4.9. Συντελεστής προσδιορισμού R^2 για συχνότητα, τάση και ρεύμα λαμπτήρα.

Ομάδα	Συχνότητα	Τάση	Ρεύμα
A - T5 (165' on)	0,772	0,928	0,821
B - T5 (45' on)	0,902	0,848	0,473
A - CFL (165' on)	0,714	0,794	0,729

4.7. Οπτική επιθεώρηση των λαμπτήρων

Όταν καταστράφηκαν οι λαμπτήρες έγιναν διάφορες οπτικές παρατηρήσεις που αφορούσαν στην ένταση του μαυρίσματος των σωλήνων και την κατάσταση των ηλεκτροδίων τους.

Οι λαμπτήρες επιθεωρήθηκαν και καταγράφηκε η ένταση του μαυρίσματος στα άκρα τους. Η εκτίμηση ήταν καθαρά υποκειμενική, δείχνει όμως το μέγεθος της εκσφενδόνισης του υλικού

επικάλυψης των ηλεκτροδίων, που έχει σαν αποτέλεσμα και την τελική καταστροφή τους. Άλλωστε στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει κάποιος αντικειμενικός προσδιορισμός του μεγέθους του μαυρίσματος. Στον πίνακα 4.10 φαίνονται τα αποτελέσματα. Από τον πίνακα φαίνεται ότι όλοι ανεξαιρέτως οι λαμπτήρες είχαν υποστεί από λίγο έως πολύ μαύρισμα στο ένα τουλάχιστον από τα άκρα τους.

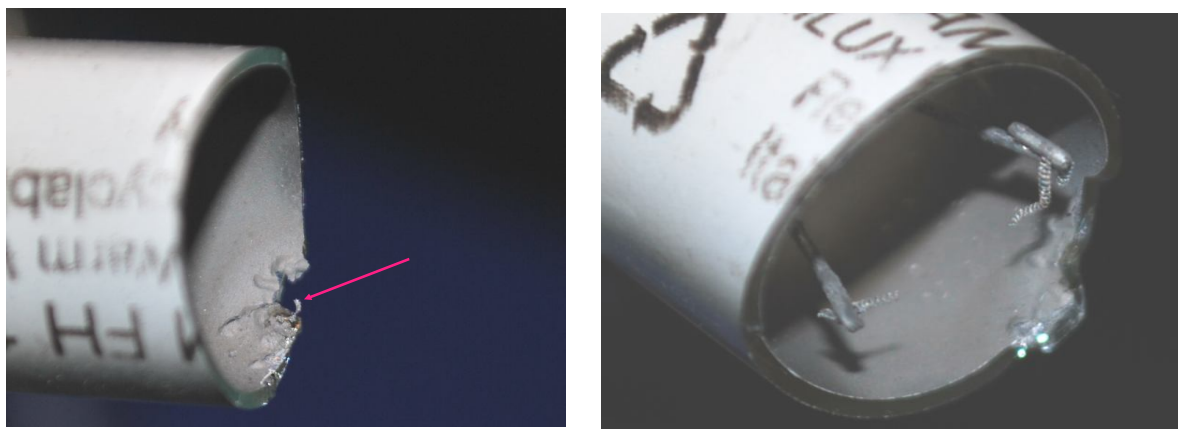
Πίνακας 4.10. Ένταση μαυρίσματος στα άκρα των λαμπτήρων και κομμένα ηλεκτρόδια

Κύκλος	Λαμπτήρες T5				Λαμπτήρες CFL			
	Δείγμα	Άκρο με σφραγίδα	Άκρο χωρίς σφραγίδα	Κομμένο ηλεκτρόδιο	Δείγμα	Άκρο 1	Άκρο 2	Κομμένο ηλεκτρόδιο
Α (165' on)	5	καθόλου	αρκετά	όχι σφραγίδα	19α	λίγο	αρκετά	2
	6	αρκετά	καθόλου	σφραγίδα	19β	λίγο	αρκετά	2
	7	λίγο	καθόλου	σφραγίδα	20α	λίγο	αρκετά	2
	8	αρκετά	λίγο	σφραγίδα	20β	λίγο	αρκετά	2
Β (45' on)	5	αρκετά	λίγο	σφραγίδα	19α	αρκετά	λίγο	1
	6	αρκετά	αρκετά	σφραγίδα	19β	αρκετά	λίγο	1
	7	αρκετά	λίγο	σφραγίδα	20α	λίγο	αρκετά	2
	8	αρκετά	λίγο	σφραγίδα	20β	λίγο	λίγο	1
Γ (5' on)	5	αρκετά	καθόλου	όχι σφραγίδα	19α	αρκετά	λίγο	2
	6	λίγο	λίγο	κανένα	19β	λίγο	λίγο	1
	7	αρκετά	λίγο	σφραγίδα	20α	αρκετά	λίγο	1
	8	αρκετά	λίγο	όχι σφραγίδα	20β	αρκετά	λίγο	1
Δ (1' on)	5	αρκετά	καθόλου	σφραγίδα	19α	λίγο	αρκετά	1
	6	αρκετά	αρκετά	και τα δύο	19β	λίγο	λίγο	1
	7	λίγο	λίγο	όχι σφραγίδα	20α	αρκετά	λίγο	1
	8	λίγο	λίγο	σφραγίδα	20β	αρκετά	λίγο	1
Ε (20" on)	5	λίγο	λίγο	και τα δύο	19α	αρκετά	λίγο	1
	6	αρκετά	λίγο	σφραγίδα	19β	αρκετά	λίγο	1
	7	λίγο	λίγο	σφραγίδα	20α	αρκετά	λίγο	1
	8	λίγο	αρκετά	όχι σφραγίδα	20β	αρκετά	λίγο	1

Κάθε φορά που καταστρεφόταν ένας λαμπτήρας ελεγχόταν η αιτία της εξάντλησης. Εκτός από το ballast, ελεγχόταν εάν κάποιο από τα δύο ηλεκτρόδια είχε υποστεί θραύση. Στον πίνακα 4.10 δίνονται επίσης τα αποτελέσματα αυτού του ελέγχου. Στους λαμπτήρες T5 αναφέρεται αν ήταν σπασμένο το ηλεκτρόδιο προς τη μεριά της σφραγίδας ή το άλλο. Στους συμπαγείς δεν υπάρχει η σφραγίδα πάνω στο σωλήνα, οπότε ο προσδιορισμός του ενός ή του άλλου ηλεκτροδίου έγινε διαφορετικά. Ο λαμπτήρας τέθηκε σε όρθια θέση (η βάση του προς τα κάτω) και όταν κοιτάμε τη σφραγίδα που βρίσκεται στη βάση του, το ηλεκτρόδιο που προσδιορίζεται από τις ακίδες που βρίσκονται προς τα δεξιά ονομάστηκε 1, ενώ το εξ αριστερών ονομάστηκε 2. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη λειτουργία τους όλοι οι

λαμπτήρες ήταν τοποθετημένοι ομοιόμορφα, δηλαδή πάντα στον ίδιο ακροδέκτη του ballast ήταν συνδεδεμένη ή ίδια ακίδα του λαμπτήρα.

Σε όλους τους λαμπτήρες, εκτός από τον Γ6 (5' on) είχε σπάσει τουλάχιστον το ένα ηλεκτρόδιο. Στον Γ6 ο λαμπτήρας δεν λειτουργούσε και τα ηλεκτρόδια δεν εμφάνιζαν κάποια βλάβη. Η πιθανή αιτία της αστοχίας είναι η εξάντληση του περιεχομένου στο λαμπτήρα υδραργύρου. Η ποσότητα υδραργύρου στους λαμπτήρες είναι ελάχιστη και υπολογισμένη ώστε να μην εξαντληθεί πριν την φυσιολογική φθορά των ηλεκτροδίων. Κατά τη λειτουργία, άτομα υδραργύρου εκσφενδονίζονται μαζί με την επικάλυψη και προσκολλώνται στα τοιχώματα και έτσι μειώνεται η ποσότητα στο σωλήνα με αποτέλεσμα, αν μειωθεί αρκετά ο υδράργυρος, να μην είναι εφικτή από το σημείο αυτό και μετά η επίτευξη της εκκένωσης στο σωλήνα. Άλλο ενδεχόμενο είναι η είσοδος αέρα στο σωλήνα (και ταυτόχρονη διαφυγή του αερίου του σωλήνα) λόγω μείωσης της στεγανότητας των συνδέσεων των βάσεων των λαμπτήρων ή ακόμα και ανεπαίσθητο ράγισμα του σωλήνα λόγω θερμοκρασιακών διαφορών ή εκσφενδόνισης τμήματος του ηλεκτροδίου στο τοίχωμα. Στην αριστερή φωτογραφία του σχήματος 4.27 φαίνεται (με το βέλος) ένα κομμάτι από ηλεκτρόδιο κολλημένο στο εσωτερικό τοίχωμα ενός λαμπτήρα T5, που προκάλεσε τη θραύση του λαμπτήρα. Στην φωτογραφία στα δεξιά φαίνεται το εναπομείναν ηλεκτρόδιο στο άλλο τμήμα του λαμπτήρα.

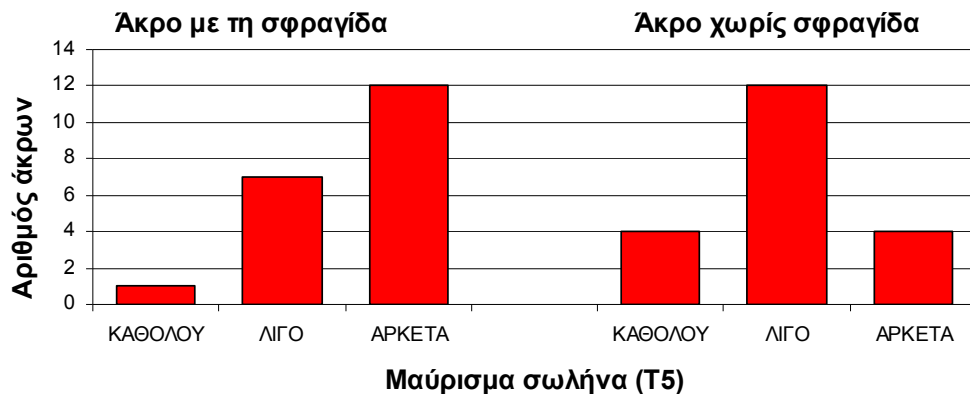


Σχήμα 4.27. Τα δύο τμήματα του λαμπτήρα που κόπηκε από εκσφενδόνιση τμήματος του ηλεκτροδίου.

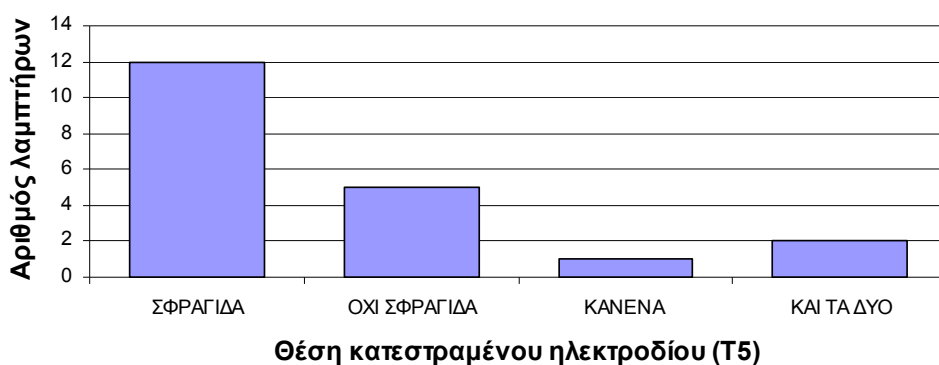
Μία ακόμα παρατήρηση είναι ότι σε δύο περιπτώσεις ήταν κατεστραμμένα (κομμένα) και τα δύο ηλεκτρόδια. Δεν ήταν σπάνιο κατά το πείραμα να έχει σπάσει το ένα ηλεκτρόδιο και ο λαμπτήρας να λειτουργεί. Η λειτουργία συνεχιζόταν μέχρι να σπάσει και το άλλο ηλεκτρόδιο, αφού δεν μπορούσε να γίνει αντιληπτό μέχρι να γίνει έλεγχος των αντιστάσεων ή της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος. Ένας λαμπτήρας δύναται να λειτουργεί με το ένα ηλεκτρόδιο κομμένο. Αυτό συμβαίνει όταν η μεγαλύτερη ποσότητα της επικάλυψης του ηλεκτροδίου ήταν άθικτη. Σε αυτή την περίπτωση το νήμα μπορεί και πραγματοποιεί την εκκένωση μέχρι, είτε να κοπεί και το άλλο ηλεκτρόδιο, είτε να εξαντληθεί όλη η επικάλυψη. Επειδή οι μετρήσεις γινόταν τακτικότερα, διαπιστώθηκε ότι από τη στιγμή που

καταστρεφόταν το ένα ηλεκτρόδιο ήταν ζήτημα ωρών λειτουργίας του λαμπτήρα είτε να καταστραφεί και το άλλο, είτε το συνηθέστερο, να αδυνατεί ο λαμπτήρας να επιτύχει την έναυση. Παρατηρείται από τον πίνακα 4.10 επίσης ότι στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων το κομμένο ηλεκτρόδιο ήταν από τη μεριά που ήταν το πιο έντονο μαύρισμα, πράγμα αναμενόμενο.

Στα σχήματα 4.28 έως 4.30 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα του πίνακα 4.10 για τους λαμπτήρες T5, παρέχοντας την καλύτερη εποπτεία τους. Έτσι στο σχήμα 4.28 φαίνεται ένα διάγραμμα με το άθροισμα των λαμπτήρων T5 που είχαν αρκετό, λίγο ή καθόλου μαύρισμα στο κάθε άκρο χωριστά. Παρατηρήθηκε ότι συνήθως το άκρο με τη σφραγίδα παρουσίαζε περισσότερο μαύρισμα σε σχέση με το άλλο άκρο.



Σχήμα 4.28. Εκτίμηση μαυρίσματος κάθε άκρου στους λαμπτήρες T5.



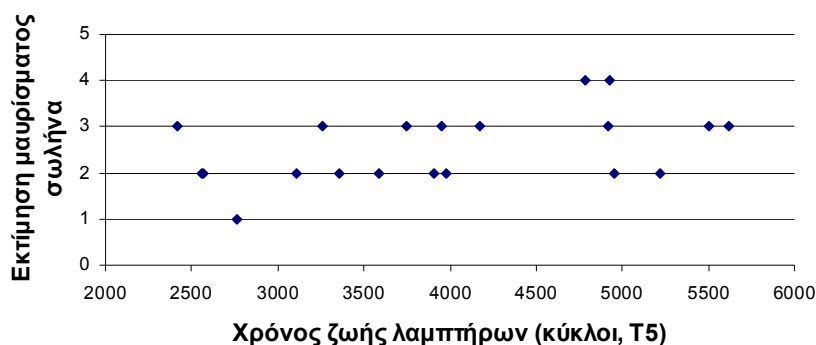
Σχήμα 4.29. Αριθμός λαμπτήρων T5 ανάλογα με τη θέση του καμένου ηλεκτροδίου.

Στο σχήμα 4.29 φαίνονται οι θέσεις του καμένου ηλεκτροδίου, αν δηλαδή είναι προς τη μεριά της σφραγίδας ή όχι. Στο σχήμα 4.30 φαίνεται η εκτίμηση συνολικά του μαυρίσματος σε κάθε σωλήνα. Αυτή έγινε αντικαθιστώντας το «αρκετό» μαύρισμα κάθε άκρου με δύο μονάδες μέτρησης, το «λίγο» με μία μονάδα και το «καθόλου» με μηδέν μονάδες. Για κάθε

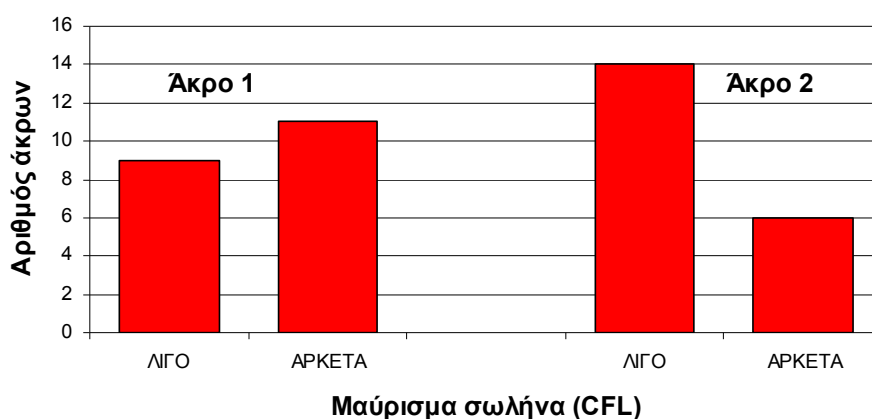
Κεφάλαιο 4: Πειραματική διερεύνηση των παραμέτρων γήρανσης σε λαμπτήρες άμεσης έναυσης

λαμπτήρα T5 προστέθηκαν οι μονάδες και από τα δύο άκρα, ώστε να γίνει η συνολική εκτίμηση. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι, οι λαμπτήρες που πραγματοποίησαν περισσότερες εναύσεις, δείχνουν μια τάση για περισσότερο μαύρισμα. Αυτό δείχνει ότι το μαύρισμα των άκρων του σωλήνα οφείλεται κυρίως στον αριθμό των εναύσεων, και όχι στις ώρες λειτουργίας.

Στο σχήμα 4.31 φαίνεται συγκεντρωτικά η εκτίμηση της έντασης του μαυρίσματος στους συμπαγείς λαμπτήρες. Σε σύγκριση με το σχήμα 4.28 που αφορά στους λαμπτήρες T5, το μαύρισμα στους συμπαγείς έχει λιγότερη ένταση. Αυτό ήταν αναμενόμενο αφού η ένταση του μαυρίσματος εξαρτάται από τον αριθμό των εναύσεων. Ο τύπος αυτός των λαμπτήρων είχε μικρότερο χρόνο ζωής σε σχέση με τους σωληνωτούς λαμπτήρες, επομένως και λιγότερες εναύσεις. Όμως στους συμπαγείς λαμπτήρες έχουμε μαύρισμα και στις γωνίες των καμπυλών του σωλήνα, με αποτέλεσμα το υλικό που το προκαλεί να διασκορπίζεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Αυτό το ενδεχόμενο δεν ήταν δυνατόν να ληφθεί υπ' όψιν.



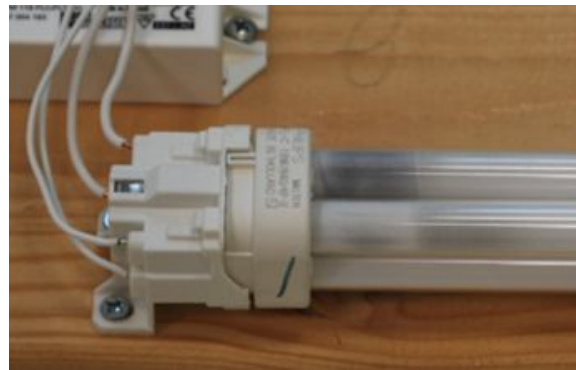
Σχήμα 4.30. Εκτίμηση μαυρίσματος σωλήνα ανάλογα με τους κύκλους λειτουργίας του.



Σχήμα 4.31. Εκτίμηση μαυρίσματος κάθε άκρου στους λαμπτήρες CFL.

Μετά το πείραμα, με τη θραύση ορισμένων λαμπτήρων, διαπιστώθηκε η κατάσταση των ηλεκτροδίων όσον αφορά στην ποσότητα της επικάλυψης που είχε εναπομείνει σε αυτά. Δεν

έγινε σε ιδιαίτερα μεγάλη έκταση η θραύση των λαμπτήρων για λόγους προστασίας του περιβάλλοντος από τη διαρροή του υδραργύρου. Επιπροσθέτως διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρχε και ιδιαίτερος λόγος γι' αυτό, αφού δεν φάνηκε κάποια συστηματική συσχέτιση της ποσότητας αυτής με τη συνολική διάρκεια ζωής του λαμπτήρα. Σε όλους τους λαμπτήρες που ελέγχθηκαν, εκτός από έναν, το ένα τουλάχιστον από τα δύο ηλεκτρόδια είχε γυμνωθεί εντελώς από την επικάλυψη, ενώ στο άλλο είτε είχε μείνει λίγη είτε είχε και αυτό γυμνωθεί πλήρως. Στο σχήμα 4.32 φαίνεται το ηλεκτρόδιο ενός λαμπτήρα που έχει σπάσει, με όλη την επικάλυψη να έχει διαφύγει, καθώς επίσης και μια άλλη φωτογραφία που εμφανίζει τα μαυρισμένα άκρα ενός συμπαγούς λαμπτήρα.



Σχήμα 4.32. Σπασμένος σωληνωτός λαμπτήρας και το ηλεκτρόδιο (αριστερά). Μαύρισμα συμπαγούς λαμπτήρα (δεξιά)

4.8. Στατιστικός έλεγχος χρόνου ζωής λαμπτήρων

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει, με βάση τα αποτελέσματα για τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων που μελετήθηκαν, ένας στατιστικός έλεγχος που θα δείξει κατά πόσον οι λαμπτήρες επέτυχαν χρόνο ζωής στατιστικά ικανό του ονομαστικού. Ο έλεγχος για την επίτευξη του ονομαστικού ή όχι χρόνου ζωής των λαμπτήρων θα γίνει για την ομάδα Α, διότι στις υπόλοιπες ομάδες ο μικρότερος χρόνος λειτουργίας μειώνει το χρόνο ζωής σε σχεδόν απροσδιόριστο βαθμό. Ασφαλώς έχει γίνει μία πρόβλεψη σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στις παραγράφους 4.3.2 και 4.3.4, όμως εδώ θα γίνει έλεγχος επί του χρόνου ζωής που δίνεται από τον κατασκευαστή.

α) Λαμπτήρες T5

Ο ονομαστικός χρόνος ζωής των λαμπτήρων T5 μικρού χρόνου έναυσης είναι 24000, αλλά ο έλεγχος θα γίνει στο 75% αυτού δηλαδή στις 18000 ώρες. Ο ονομαστικός χρόνος των 24000 ωρών είναι για λειτουργία με ballast που προθερμαίνει τα ηλεκτρόδια πριν την εκκένωση. Ο κατασκευαστής δεν παρέχει χρόνο για λειτουργία με ballast άμεσης έναυσης, γι' αυτό θα θεωρηθεί ως χρόνος ζωής το 75% αυτού ($\mu=18000$ ώρες) που είναι γενικά μία αποδεκτή μείωση της ζωής των λαμπτήρων.

Από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων συνάγεται ότι ο μέσος χρόνος ζωής

αυτής της ομάδας των τεσσάρων λαμπτήρων ($n=4$) είναι $\bar{x}=7441$ ώρες και η τυπική απόκλιση του δείγματος $s=700$ ώρες. Για μικρά δείγματα ($n<30$) εφαρμόζεται η κατανομή t του Student. Η μεταβλητή t δίνεται από τη σχέση (4.3) [115, 116]:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (4.3)$$

και προκύπτει $t = -30,2$. Θα υπολογισθεί ένα 95% διάστημα εμπιστοσύνης για τον χρόνο ζωής των λαμπτήρων. Τίθενται οι εξής υποθέσεις:

- ✓ μηδενική υπόθεση $H_0: \bar{x}=18000$ ώρες
- ✓ εναλλακτική $H_1: \bar{x} \neq 18000$ ώρες

Για το διάστημα εμπιστοσύνης που επελέγη η στατιστική μεταβλητή t βρίσκεται από τον αντίστοιχο πίνακα ίση με 3,182 που είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη που βρέθηκε από τη σχέση (4.3). Επομένως η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται, δηλαδή ο χρόνος ζωής των 18000 ωρών δε γίνεται δεκτός για το δείγμα στο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

β) Λαμπτήρες CFL

Για τους συμπαγείς λαμπτήρες ο κατασκευαστής δίνει διάρκεια ζωής 13000 ώρες όταν το ballast κάνει προθέρμανση των ηλεκτροδίων και 7000 ώρες όταν χρησιμοποιείται ballast άμεσης έναυσης. Εδώ επομένως θα πρέπει να γίνει έλεγχος για την αποδοχή ή όχι για το δείγμα του πειράματος του χρόνου ζωής των 7000 ωρών. Τα στατιστικά δεδομένα από τα προαναφερθέντα αποτελέσματα είναι: $n=4$, $\bar{x}=6840$ ώρες, $s=1694$ ώρες. Επιλέγονται:

- ✓ μηδενική υπόθεση $H_0: \bar{x}=7000$ ώρες
- ✓ εναλλακτική $H_1: \bar{x} \neq 7000$ ώρες

Εφαρμόζεται η κατανομή t του Student και προκύπτει $t = -0,189$. Επιλέγοντας διάστημα εμπιστοσύνης 95% προκύπτει στατιστική μεταβλητή t ίση με 3,182. Επομένως η εναλλακτική υπόθεση απορρίπτεται και ο χρόνος ζωής των 7000 ωρών γίνεται δεκτός για το δείγμα στο επιλεγμένο επίπεδο εμπιστοσύνης.

Παρατήρηση: στους σωληνωτούς λαμπτήρες της πρώτης περίπτωσης θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι ο ονομαστικός χρόνος ζωής μειώνεται αναλόγως με τη μείωση των συμπαγών (και όχι μόνο 25%). Στους συμπαγείς ο κατασκευαστής (σημειώνεται ότι είναι ο ίδιος) δίνει το χρόνο των 7000 ωρών για λειτουργία με ballast άμεσης έναυσης, δηλαδή μείωση κατά 7/13. Επομένως αντί ο χρόνος των 24000 ωρών να μειωθεί στις 18000, να θεωρηθεί ότι ο χρόνος ζωής είναι τα 7/13 των 24000 ωρών, επομένως ότι είναι 12923 ώρες. Ακόμα όμως και αυτός ο μειωμένος χρόνος ζωής δεν γίνεται δεκτός στο 95% επίπεδο εμπιστοσύνης αφού δίνει $t = -21,223$ που απέχει πολύ από την τιμή της στατιστικής μεταβλητής 3,182.

4.9. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των μετρήσεων διαφόρων χαρακτηριστικών και της ζωής λαμπτήρων φθορισμού τύπου T5 και συμπαγών, όταν αυτοί οδηγούνταν με ballast άμεσης έναυσης σε πέντε κύκλους λειτουργίας. Οι λαμπτήρες αυτοί δεν πέτυχαν μεγάλο χρόνο ζωής (ειδικώς οι σωληνωτοί) σε σχέση με τους αντίστοιχους λαμπτήρες που οδηγούνταν από ballast που παρείχαν προθέρμανση των ηλεκτροδίων. Επομένως επιβεβαιώθηκε η αδυναμία αυτού του τύπου των ballast να οδηγήσουν τους λαμπτήρες ώστε να επιτύχουν την ονομαστική ζωή τους. Μάλιστα, έδωσαν χρόνους συχνά πολύ μικρότερους από την μείωση 25% που ισχυρίζονται ορισμένοι κατασκευαστές ότι υφίστανται οι λαμπτήρες όταν οδηγούνται με τέτοιου τύπου ballast.

Για να γίνει μία σύγκριση στις διάρκειες ζωής που πέτυχαν οι λαμπτήρες με ballast άμεσης έναυσης και στους λαμπτήρες με ballast με προθέρμανση, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν μόνον η ομάδα A (165' on), που ο κύκλος λειτουργίας ήταν αργός και ο αριθμός των εναύσεων ήταν λιγότερο σημαντικός ως προς την επίδραση που είχε στη ζωή των λαμπτήρων. Παρ' όλ' αυτά θα συγκριθεί και η ομάδα B (45' on), κυρίως για να φανεί η δυσμενής επίδραση της έναυσης στους λαμπτήρες άμεσης έναυσης. Στις υπόλοιπες ομάδες τα αποτελέσματα είναι ακόμη δυσμενέστερα εις βάρος των λαμπτήρων αυτών.

Στον πίνακα 4.11 φαίνονται τα συγκριτικά αποτελέσματα. Οι τιμές για το χρόνο ζωής δίνονται σε κύκλους, ως μέσοι όροι των τιμών της ομάδας. Στην ομάδα A (165' on) η μείωση της ζωής ήταν 54% στους λαμπτήρες T5 ενώ στους αντίστοιχους λαμπτήρες της ομάδας B (45' on) η μείωση της ζωής αυξήθηκε στο 72%. Για τους συμπαγείς λαμπτήρες τα αντίστοιχα ποσοστά ήταν 23% και 75%. Από τον πίνακα αυτόν φαίνεται ότι στον αργό κύκλο λειτουργίας η επίδραση του είδους του ballast ήταν μικρότερη στους συμπαγείς λαμπτήρες από ότι στους σωληνωτούς. Αξίζει να σημειωθεί ότι επειδή γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ λαμπτήρων που λειτουργούν στους ίδιους κύκλους λειτουργίας, δεν έχει διαφορά αν ο χρόνος της ζωής τεθεί σε κύκλους ή σε ώρες. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τους λαμπτήρες με προθέρμανση έχουν παρθεί από το πέμπτο κεφάλαιο. Μία εκτενέστερη συγκριτική μελέτη για τα δύο αυτά είδη λαμπτήρων δίνεται στην παράγραφο 5.7.

Πίνακας 4.11. Μέσος χρόνος ζωής (κύκλοι) λαμπτήρων και αντίστοιχη μείωση της ζωής τους

Είδος λαμπτήρα	Ομάδα A (165' on)			Ομάδα B (45' on)		
	Προθέρμανση (κύκλοι)	Άμεση έναυση (κύκλοι)	Μείωση ζωής (%)	Προθέρμανση (κύκλοι)	Άμεση έναυση (κύκλοι)	Μείωση ζωής (%)
Λαμπτήρες T5	5884	2712	54	17855	4949	72
Λαμπτήρες CFL	3236	2497	23	10795	2695	75

Τα αποτελέσματα που εκτέθηκαν αποδεικνύουν ότι, όταν ο κύκλος λειτουργίας είναι σύντομος, η ζωή του λαμπτήρα θα πρέπει να υπολογίζεται σε κύκλους και όχι σε ώρες. Όταν

οι κύκλοι λειτουργίας είναι αργοί, ο πλέον κατάλληλος τρόπος καθορισμού της ζωής είναι η μέτρηση με τις ώρες λειτουργίας. Αποδεικνύεται όμως, ότι οι γρήγοροι κύκλοι λειτουργίας δεν προσφέρονται ως κριτήριο προσδιορισμού της ζωής των λαμπτήρων φθορισμού T5. Παρόμοια συμπεράσματα έχουν εξαχθεί και από άλλους ερευνητές για λαμπτήρες T8 και βιδωτούς συμπαγείς. Επομένως, είναι σωστή η άποψη ότι, η έναυση είναι ένα μη ντετερμινιστικό φαινόμενο και η ποσοτική του ανάλυση δεν υπόκειται σε απλούς κανόνες μέτρησης εναύσεων και ωρών λειτουργίας.

Ορισμένοι ερευνητές έχουν υποστηρίξει την άποψη ότι, όταν ο λαμπτήρας ανάβει λιγότερο χρόνο θα πετύχει αντιστοίχως περισσότερες εναύσεις. Με άλλα λόγια, ότι μια περίπου σταθερή ποσότητα της επικάλυψης του νήματος χάνεται σε κάθε έναυση και μια άλλη ποσότητα σε κάθε ώρα λειτουργίας. Αυτό αποδείχθηκε αναληθές από τα αποτελέσματα που εκτέθηκαν. Οι υπολογισμοί που έγιναν, βάσει των αποτελεσμάτων της παραγράφου 4.2.2, απέδειξαν ότι τα αποτελέσματα δεν προσφέρονται για εξαγωγή αδιαμφισβήτητων συμπερασμάτων. Ήταν σαφές ότι κάθε έναυση προκαλεί μείωση της ζωής του λαμπτήρα κατά πολύ περισσότερο από μία ώρα λειτουργίας. Το ακριβές ποσοστό της μείωσης είναι αδύνατον να προσδιοριστεί όπως φάνηκε από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, διότι δεν είναι σταθερό. Η μόνη εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι ότι κάθε έναυση καταστρέφει ένα μικρό ποσοστό επικάλυψης, αλλά η επόμενη προκαλεί καταστροφή διαφορετικής ποσότητας.

Ένα γενικώς αποδεκτό συμπέρασμα είναι ότι ο χρόνος έναυσης και η τάση έναυσης σχετίζονται με το χρόνο ζωής του λαμπτήρα. Δεν αμφισβητείται η ισχύς της πρότασης αυτής και οι μετρήσεις έδειξαν ότι ισχύει. Σε ορισμένες ομάδες (8 από τις 20 συνολικά) βρέθηκε συσχέτιση των παραγόντων αυτών, όπως εκτέθηκε στην παράγραφο 4.5.1. Στις περισσότερες από τις υπόλοιπες ομάδες φαίνεται ότι δεν υπάρχει ισχυρή συσχέτιση. Σε γενικές γραμμές τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν δεν είχαν μεγάλες διαφορές στις τιμές αυτών των χαρακτηριστικών αλλά, παρά το γεγονός αυτό, μπορεί να αποδοθεί σε αυτά η διαφορά στους χρόνους ζωής.

Με περαιτέρω διερεύνηση των μετρήσεων φάνηκε αύξηση της ζωής των λαμπτήρων όσο η ισχύς λειτουργίας τους πλησίαζε την ονομαστική τιμή της. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κανένα από τα συστήματα οι λαμπτήρες δεν έφτασαν την ονομαστική τους ισχύ. Μάλιστα στα περισσότερα ήταν κάτω από το 90% της επιδιωκόμενης σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Αποδεικνύεται επομένως ότι για να αποδώσει ένας λαμπτήρας τη μέγιστη δυνατή συνολική διάρκεια της ζωής του, πρέπει να λειτουργεί στην ονομαστική ισχύ του.

Βέβαια για να λειτουργήσει στη ονομαστική του ισχύ ένας λαμπτήρας θα πρέπει η τάση και το ρεύμα λειτουργίας να βρίσκονται πλησιέστερα στις προτεινόμενες από τον κατασκευαστή τιμές. Οι λαμπτήρες T5 δε λειτούργησαν πλησίον της ονομαστικής τιμής, ούτε του ρεύματος, ούτε της τάσης, (σχήματα 4.16 και 4.17) με συνέπεια, ούτε και η ισχύς να είναι πλησίον της ονομαστικής της τιμής. Μάλιστα η αποτυχία επ' αυτού στους λαμπτήρες T5 ήταν τέτοια που

δεν ήταν ιδιαίτερα εμφανής κάποια τάση των λαμπτήρων να αυξήσουν τη ζωή τους όσο η ισχύς τους ήταν πιο κοντά στην ονομαστική της τιμή. Στους συμπαγείς όμως λαμπτήρες που οι τιμές ρεύματος και τάσης ήταν πλησιέστερα στις ονομαστικές (σχήματα 4.18 και 4.19), φάνηκε ότι η ζωή τους αυξανόταν όσο η ισχύς τους πλησίαζε στη ονομαστική τιμή της.

Κατά τη γήρανση των λαμπτήρων γινόταν μετρήσεις κάποιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους με σκοπό τη διερεύνηση πιθανής μεταβολής τους. Οι μεταβολές που βρέθηκαν ήταν ασήμαντες άρα δεν υπάρχει τρόπος πρόβλεψης του χρόνου ζωής του λαμπτήρα με βάση τις μετρηθείσες παραμέτρους. Τρεις ομάδες έδειξαν μια συστηματική αύξηση στη συχνότητα και στην τάση λειτουργίας τους, ενώ είχαν μείωση στο ρεύμα λειτουργίας. Στα υπόλοιπα χαρακτηριστικά δεν σημειώθηκαν τακτικές μεταβολές. Η μεταβολή των χαρακτηριστικών ήταν θέμα καθαρά γήρανσης των λαμπτήρων και προφανούς μείωσης της φωτεινής τους απόδοσης, σύμφωνα με τους καταλόγους των κατασκευαστών.

Έγινε αισθητή μια μικρή αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης του νήματος και στα δύο ηλεκτρόδια, λίγο πριν καταστραφεί ο λαμπτήρας. Οι περισσότεροι λαμπτήρες στην τελευταία μέτρηση πριν την εξάντλησή τους, όπως φαίνεται από τον πίνακα 4.8, είχαν αυξημένη ηλεκτρική αντίσταση και στα δύο ηλεκτρόδια, μέχρι του ποσοστού 2,3% σε σχέση με τη μέση ως τότε αντίστασή τους.

Η ένταση του μαυρίσματος στα άκρα του λαμπτήρα μας δείχνει αν το τέλος του πλησιάζει ή όχι. Όμως είναι μια ποσότητα που ως τώρα δεν έχει προταθεί κάποιος αντικειμενικός τρόπος μέτρησης και επί πλέον οι λαμπτήρες δεν έχουν όλοι το ίδιο μαύρισμα στο τέλος της ζωής τους. Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι εύκολο να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο για επερχόμενη εξάντληση του λαμπτήρα.

Τελικά το συμπέρασμα είναι ότι σε μετρήσεις τέτοιου είδους με σύντομους κύκλους λειτουργίας, πρέπει να λαμβάνεται πολύ σοβαρά υπ' όψιν ο αριθμός των κύκλων ενώ ο χρόνος ζωής σε ώρες αποκτά δευτερεύουσα σημασία. Η αιτία είναι ότι η επίδραση του ρυθμού διακοπής της λειτουργίας στη ζωή του λαμπτήρα, είναι σημαντικότερη από την επίδραση του χρόνου λειτουργίας. Γι' αυτό τα ballast άμεσης έναυσης είναι καταλληλότερα για ελάχιστα διακοπόμενη λειτουργία.

Με την ποικιλία των κύκλων λειτουργίας που χρησιμοποιήθηκαν αποδεικνύεται ότι οι λαμπτήρες που εργάζονται με ballast άμεσης έναυσης πετυχαίνουν ένα συγκεκριμένο μικρό αριθμό εναύσεων που κατά το μάλλον ή ήττον είναι ανεξάρτητος από τον κύκλο λειτουργίας.

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα συστημάτων με προθέρμανση πριν την έναυση

5.1. Χαρακτηριστικά και οριοθέτηση της εξάντλησης των συστημάτων με προθέρμανση

Τα συστήματα που παρείχαν προθέρμανση στα ηλεκτρόδια πριν την επίτευξη της εκκένωσης επέτυχαν διάρκεια ζωής πολύ μεγαλύτερη από εκείνα με άμεση έναυση. Η αιτία είναι η υψηλή θερμοκρασία των νημάτων ακριβώς πριν την έναρξη της εκκένωσης, που εξασφαλίζει μείωση της εκσφενδόνισης του υλικού της επικάλυψης. Σε κάθε σύστημα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του έγινε ικανός αριθμός μετρήσεων των ηλεκτρικών του χαρακτηριστικών, όπως έχει περιγραφεί στην παράγραφο 3.4. Ο σκοπός αυτών των διαδοχικών μετρήσεων ήταν η έρευνα για την ύπαρξη κάποιας συστηματικής μεταβολής κάποιου ή κάποιων από αυτά τα χαρακτηριστικά. Η μέτρηση της ζωής των λαμπτήρων στους διάφορους κύκλους λειτουργίας θα δώσει, μετά από τη σχετική επεξεργασία, χρήσιμα στοιχεία για την επίδραση της συχνότητας εναύσεων στα συγκεκριμένα συστήματα. Τέλος θα ερευνηθεί η επίδραση στη ζωή των λαμπτήρων της τιμής κάθε χαρακτηριστικού από τα μετρούμενα, ιδιαιτέρως της θερμοκρασίας των ηλεκτροδίων και του ρεύματος αίγλης.

Οι αντιστάσεις των νημάτων των λαμπτήρων μετριόνταν πριν από κάθε μέτρηση, αφού τα συστήματα έμεναν τουλάχιστον μία ώρα στο εργαστήριο ώστε να αποκτήσουν τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο παλμογράφος που κατέγραφε την έναυση και τη λειτουργία, ήταν σε όλες τις μετρήσεις στις ίδιες κλίμακες ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα.

Οι λαμπτήρες του πειράματος ήταν τριών διαφορετικών τύπων, όπως φαίνονται στον πίνακα 5.1. Τα ballast ήταν τεσσάρων τύπων και φαίνονται στον πίνακα 5.2. Από αυτά οι δύο τύποι της Philips οδηγούσαν από ένα λαμπτήρα το καθένα με μικρό χρόνο προθέρμανσης. Τα δύο ballast της Osram και της Tridonic οδηγούσαν από δύο λαμπτήρες το καθένα με μέτριο και μεγάλο χρόνο προθέρμανσης (XII) αντιστοίχως.

Ένας λαμπτήρας θεωρείται εξαντλημένος όταν δεν επιτυγχάνει την έναυση. Εκτός όμως από αυτή την περίπτωση εθεωρείτο ένας λαμπτήρας κατεστραμμένος και τότε που δεν εργαζόταν πλέον στη σωστή συχνότητα, αν και φαινομενικά λειτουργούσε κανονικά. Σε μια τέτοια περίπτωση, αναμφίβολα η ζωή του πλέον ήταν περιορισμένη, αλλά το χειρότερο ήταν ότι επηρέαζε αρνητικά και τη ζωή του άλλου λαμπτήρα στα συστήματα με δύο λαμπτήρες. Επομένως εάν με την παρατήρηση φάνηκε μικρότερη φωτεινή ροή, ή κατά τη διάρκεια της τρέχουσας μέτρησης καταγράφηκε αλλαγή στη συχνότητα λειτουργίας, αφαιρέθηκε ο λαμπτήρας με το πρόβλημα και τοποθετήθηκε στη θέση του άλλος, ώστε να μετρηθεί απρόσκοπτα η ζωή του δεύτερου λαμπτήρα του συστήματος.

Στον πίνακα 5.1 φαίνονται τα χαρακτηριστικά που δίνουν οι κατασκευαστές για τους

λαμπτήρες που χρησιμοποιήθηκαν και στον πίνακα 5.2 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των κατασκευαστών των ballast.

Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά του λαμπτήρα

Λαμπτήρας	Τάση (V)	Ρεύμα (A)	Ονομαστική ισχύς (W)	Φωτεινή ροή (lm)	Απόδοση (lm/W)	Ονομαστική ζωή (ώρες)
T5 FH 14W HE	86	0,165	14	1200	96	24000
TL5 HE14W/830	83	0,170	14	1200	96	24000
PL-C 18W/830/4P	80	0,210	18	1200	63	13000

Πίνακας 5.2. Χαρακτηριστικά των ballast

Ballast	Ισχύς συστήματος (W)	Κατανάλωση (W)	Συντελεστής ισχύος	Συχνότητα λειτουργίας (kHz)	Ρεύμα συστήματος (mA)	Ισχύς λαμπτήρα (W)
Philips HF-P 1 14-35 TL5 HE	18	2,6	0,91	50	80	15
Philips HF-P 118 PL-T/C	18	1,5	0,93	48	93	16,5
Osram QT-FH 2x14-35	31		0,94	45-50	150	14
Tridonic PC 2/14-21-28-35 T5 PRO lp	31		0,97	>40	129 ως 140*	14

* ανάλογα με την τάση του δικτύου

Ένα άλλο θέμα που τέθηκε ήταν ο καθορισμός της εξάντλησης ενός λαμπτήρα ο οποίος εξακολουθεί να λειτουργεί για χρόνο πολύ πέραν του χρόνου που δίνει ο κατασκευαστής ή του πρακτικά λειτουργικού σκοπού του. Για το όριο σχετικά με το χρόνο λειτουργίας των συστημάτων ισχύει ότι οι λαμπτήρες που λειτουργούν πέραν του 20% της διάρκειας ζωής που δίνει ο κατασκευαστής, θεωρούνται ότι επέτυχαν το προσδοκώμενο όριο ζωής τους. Αυτή η παραδοχή ισχύει για τους λαμπτήρες που λειτουργούν στους αργούς κύκλους. Στην παρούσα εργασία ορισμένοι λαμπτήρες υπερέβησαν το όριο του 20%, όμως στην μελέτη που ακολουθεί συμπεριελήφθησαν όλοι οι λαμπτήρες των αργών κύκλων.

Για τους λαμπτήρες στους γρήγορους κύκλους το όριο που τέθηκε δεν ήταν σύμφωνα με το χρόνο λειτουργίας τους αλλά με τις εναύσεις που επέτυχαν. Οι κατασκευαστές των λαμπτήρων που χρησιμοποιήθηκαν δεν δίνουν αριθμό εναύσεων. Από τους καταλόγους διάφορων κατασκευαστών διαπιστώθηκε ότι 100000 εναύσεις είναι ένας ικανοποιητικός αριθμός για συστήματα με γρήγορους κύκλους λειτουργίας. Έτσι, για τους λαμπτήρες στους πολύ γρήγορους κύκλους Δ και Ε που λειτουργούσαν περίπου 1,5 και 0,5 ώρες αντιστοίχως την κάθε ημέρα, θεωρήθηκε ότι έχουν φθάσει σε ικανοποιητικό όριο ζωής αν υπερβούν κατά 50% τις προαναφερθείσες εναύσεις. Ετέθη επομένως ως όριο ο αριθμός των 150000 κύκλων.

Πρακτικά, ένα τέτοιο σύστημα αν πραγματοποιεί 50 εναύσεις ημερησίως θα λειτουργεί καθημερινά για περισσότερα από οκτώ χρόνια. Για τους λαμπτήρες της ομάδας Γ με 6 ώρες λειτουργίας ανά ημέρα, όπου ο κύκλος λειτουργίας είναι μεταξύ γρήγορου και αργού, το όριο ετέθη στην υπέρβαση κατά 25% του αποδεκτού αριθμού 100000 εναύσεων, δηλαδή στις 125000 εναύσεις. Επίσης, τα όρια των εναύσεων κρίθηκαν σκόπιμα, αφού πρακτικά είναι δύσκολο η χρήση ενός λαμπτήρα να απαιτήσει μεγαλύτερο αριθμό εναύσεων.

Σύμφωνα με το ανωτέρω σκεπτικό καταρτίζεται ο πίνακας 5.3, στον οποίο φαίνονται τα προαναφερθέντα όρια (οι ώρες και οι κύκλοι που αντιστοιχούν σε αυτά) αναλόγως του κύκλου λειτουργίας. Από τους 120 λαμπτήρες που τέθηκαν σε λειτουργία στις αρχές του 2006, οι μισοί περίπου καταστράφηκαν πριν φθάσουν τα όρια που τέθηκαν.

Πίνακας 5.3. Όρια διάρκειας ζωής λαμπτήρων.

Είδος λαμπτήρα	T5 ή CFL		
	Γ (5' on)	Δ (1' on)	Ε (20" on)
Κύκλος λειτουργίας	10417	2500	833
Αριθμός ωρών	125000	150000	150000
Αριθμός κύκλων			

5.2. Πειραματικά αποτελέσματα με βάση τις μέσες τιμές των χαρακτηριστικών

Σύμφωνα με όσα έχουν εκτεθεί ανωτέρω και σύμφωνα με τις μετρήσεις για την καταστροφή των λαμπτήρων, καταρτίστηκαν οι πίνακες 5.4 έως 5.7 με τη διάρκεια ζωής κάθε λαμπτήρα χωριστά, για τα συστήματα με προθέρμανση. Στους πίνακες φαίνονται και οι τιμές ορισμένων από τα χαρακτηριστικά που μετρούνταν. Οι τιμές αυτές είναι οι μέσες τιμές του συνόλου των μετρήσεων για κάθε χαρακτηριστικό. Τα χαρακτηριστικά που έχουν τοποθετηθεί στον πίνακα είναι εκείνα που είτε έδειξαν κάποιο ενδιαφέρον στοιχείο για μελέτη είτε αυτά που χρήζουν έρευνας σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία. Μετρούνταν και μερικά άλλα χαρακτηριστικά, αλλά από την επεξεργασία που έχει γίνει φάνηκε ότι δεν σχετίζονται με την έρευνα μας.

Οι πίνακες είναι διαμορφωμένοι έτσι ώστε καθένας να περιέχει τις τιμές όλων των κύκλων λειτουργίας αλλά μόνο για τα συστήματα με ακριβώς ίδιο λαμπτήρα και ballast. Έτσι για κάθε μία από τις τέσσερις ομάδες συστημάτων έχουν γίνει δύο πίνακες: ένας για τα χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν και ένας για τα χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν με βάση τα προηγούμενα. Οι αντιστάσεις R_{c1} , R_{c2} είναι στους 25 °C, με χρήση της εξίσωσης 3.1. Το ρεύμα αίγλης I_{GI} είναι σε τιμές RMS.

Τα χαρακτηριστικά που δεν μετρώνται απ' ευθείας, αλλά υπολογίστηκαν βάσει των μετρήσεων και τοποθετήθηκαν στον δεύτερο από τους δύο πίνακες κάθε ομάδας, ήταν τα εξής:

- ✓ Ο λόγος προθέρμανσης.
- ✓ Η τιμή της αντίστασης του ηλεκτροδίου κατά τη στιγμή της μετάβασης από την

αίγλη στο τόξο.

- ✓ Η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου τη στιγμή της έναυσης.
- ✓ Ο λόγος του ρεύματος λειτουργίας του λαμπτήρα προς την ονομαστική τιμή που δίνει ο κατασκευαστής.
- ✓ Ο παράγων κορυφής ρεύματος.

Για τα τρία πρώτα από τα χαρακτηριστικά έχει γίνει ήδη μνεία στα προηγούμενα. Το τέταρτο χαρακτηριστικό έχει ιδιαίτερη σημασία σύμφωνα με την πρόσφατη βιβλιογραφία [117, 118]. Οι λαμπτήρες ασφαλώς πρέπει να λειτουργούν όσο το δυνατόν πλησιέστερα στις τιμές ρεύματος λειτουργίας που προτείνει ο κατασκευαστής. Ο παράγων κορυφής ρεύματος είναι επίσης σημαντικός. Στα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλος και το εύρος τιμών του ήταν μικρό, οπότε η επίδρασή του αποδείχτηκε μικρή. Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα η τιμή του πρέπει να βρίσκεται κάτω του 1,70. Στα συστήματα που έγιναν τα παρόντα πειράματα όλες οι τιμές ήταν περί το 1,40.

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο των πειραμάτων ήταν ότι σε κάθε ομάδα συστημάτων δεν υπήρχαν μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές που παρουσίασε κάθε ένα από τα χαρακτηριστικά. Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων ακολουθεί σχολιασμός και εξαγωγή συμπερασμάτων για τις ομάδες στις οποίες όλοι οι λαμπτήρες καταστράφηκαν. Για τις υπόλοιπες ομάδες όπου είτε οι λαμπτήρες υπερέβησαν τα όρια που τέθηκαν χωρίς να καταστραφούν, είτε εξαντλήθηκαν λίγοι από αυτούς λόγω αστοχίας των υλικών, έγινε μόνο σύγκριση με τις υπόλοιπες ομάδες.

Αν και πολλά από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συστημάτων κυμαινόταν στην ίδια περιοχή τιμών, υπήρχαν και διαφορές. Σημαντική διαφοροποίηση υπήρχε στο χρόνο, στην τάση και στο ρεύμα ηλεκτροδίου κατά την προθέρμανση. Μικρές διαφορές υπήρχαν στην τιμή των αντιστάσεων των ηλεκτροδίων, στη συχνότητα λειτουργίας και στη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου κατά τη μετάβαση από την αίγλη στο τόξο. Οι διακυμάνσεις των χαρακτηριστικών μεταξύ των συστημάτων αλλά και μεταξύ των συστημάτων του ίδιου κατασκευαστή οφείλονταν στο σενάριο λειτουργίας κάθε ballast, στην τοπολογία που χρησιμοποιεί κάθε κατασκευαστής αλλά και σε κατασκευαστικές διαφορές σε όμοια προϊόντα.

Πίνακας 5.4α. Μέσοι όροι μετρηθέντων χαρακτηριστικών συστημάτων μέτρου XII.

Λαμπτήρας	t (ms)	I_{GI} (mA)	V_{p-p} (V)	I_{p-p} (mA)	R_{c1} (Ω)	R_{c2} (Ω)	f (kHz)	I_{lamp} (mA)
A1 α	798	20	23,57	495	9,38	9,14	45,53	173
A1 β	799	18	21,34	435	10,21	9,44	45,55	176
A2 α	798	14	24,11	487	10,25	9,16	46,11	171
A2 β	800	10	21,57	477	10,29	9,38	46,14	174
A3 α	817	19	22,83	502	9,95	9,55	45,70	171
A3 β	821	14	20,53	469	10,08	9,76	45,70	175
A4 α	802	20	24,67	494	10,60	9,87	45,36	170
A4 β	771	14	20,74	488	10,05	10,02	45,36	174
B1 α	819	19	24,28	516	9,96	10,18	44,87	172
B1 β	816	8	21,47	468	10,00	10,13	44,91	175
B2 α	806	18	23,80	533	9,93	9,53	45,82	172
B2 β	808	8	21,32	467	9,87	9,42	45,85	176
B3 α	798	29	23,52	523	9,82	10,22	45,20	170
B3 β	797	14	21,35	465	10,30	9,71	45,21	173
B4 α	822	19	23,42	528	9,27	9,44	44,52	172
B4 β	820	7	21,88	457	10,03	9,91	44,54	175
Γ 1 α	806	18	23,72	529	10,34	10,11	44,54	171
Γ 1 β	807	13	22,09	487	10,12	9,95	45,57	174
Γ 2 α	830	22	23,29	498	10,38	9,27	44,82	170
Γ 2 β	828	10	22,07	481	10,00	9,60	44,83	173
Γ 3 α	822	18	23,53	519	10,50	9,59	45,23	171
Γ 3 β	823	12	22,19	502	9,59	9,64	45,26	174
Γ 4 α	832	21	23,71	517	10,31	9,37	45,51	171
Γ 4 β	832	14	22,08	498	9,78	9,79	45,52	175
Δ 1 α	841	21	24,07	557	9,28	9,60	45,00	173
Δ 1 β	839	11	24,11	501	10,08	9,62	44,97	176
Δ 2 α	818	22	24,15	507	10,49	9,83	45,15	172
Δ 2 β	818	13	20,07	461	9,64	9,39	45,17	176
Δ 3 α	834	22	23,80	523	9,75	10,00	44,81	170
Δ 3 β	836	11	20,02	496	9,00	9,79	44,79	173
Δ 4 α	806	18	23,11	533	9,98	9,29	45,05	173
Δ 4 β	805	11	20,87	484	9,11	9,52	45,07	176
E1 α	804	11	23,60	546	9,55	9,60	46,63	170
E1 β	801	9	21,36	417	10,73	9,69	46,82	173
E2 α	841	19	23,36	519	10,07	9,68	46,10	173
E2 β	839	9	21,37	486	9,48	8,98	46,11	177
E3 α	838	21	24,27	504	9,96	8,93	45,41	172
E3 β	837	14	21,72	477	9,37	9,57	45,44	175
E4 α	837	22	23,16	519	9,73	9,72	46,57	172
E4 β	838	8	21,20	462	9,79	9,40	46,61	175

Πίνακας 5.4β. Μέσοι όροι υπολογισθέντων χαρακτηριστικών συστημάτων μέτριου ΧΠ.

Λαμπτήρας	Χρόνος ζωής (ώρες)	R_h/R_c	R_h (Ω)	T ($^{\circ}\text{C}$)	I/I_{NOM}	CCF
A1α	27463	5,08	47,62	845	1,05	1,38
A1β	21542	4,81	49,16	798	1,06	1,39
A2α	27908	4,83	49,52	801	1,04	1,37
A2β	18231	4,40	45,28	723	1,06	1,38
A3α	21631	4,58	45,55	755	1,04	1,37
A3β	5426	4,35	43,81	713	1,06	1,37
A4α	24995	4,72	49,99	780	1,03	1,38
A4β	24929	4,41	44,31	724	1,05	1,37
B1α	24121	4,72	47,03	782	1,04	1,39
B1β	22492	4,59	45,87	757	1,06	1,39
B2α	24085	4,50	44,72	741	1,04	1,39
B2β	23599	4,63	45,64	764	1,06	1,39
B3α	23349	4,58	45,01	756	1,03	1,38
B3β	18247	4,46	45,91	733	1,05	1,39
B4α	16365	4,79	44,39	793	1,04	1,38
B4β	21533	4,78	47,99	793	1,06	1,38
Γ1α	10417	4,33	44,83	710	1,04	1,37
Γ1β	10417	4,48	45,35	737	1,06	1,38
Γ2α	10417	4,51	46,77	742	1,03	1,36
Γ2β	10417	4,58	45,86	756	1,05	1,38
Γ3α	10417	4,32	45,37	708	1,03	1,36
Γ3β	10417	4,61	44,23	761	1,06	1,37
Γ4α	10417	4,46	45,92	733	1,04	1,38
Γ4β	10417	4,54	44,41	749	1,06	1,38
Δ1α	2500	4,66	43,24	770	1,05	1,39
Δ1β	2500	4,78	48,14	791	1,06	1,39
Δ2α	2500	4,54	47,66	749	1,04	1,38
Δ2β	2500	4,51	43,53	743	1,06	1,39
Δ3α	270	4,67	45,52	771	1,03	1,37
Δ3β	381	4,49	40,41	739	1,05	1,38
Δ4α	2500	4,35	43,40	713	1,05	1,39
Δ4β	2500	4,74	43,12	784	1,07	1,39
E1α	833	4,53	43,22	746	1,03	1,39
E1β	149	4,78	51,28	792	1,05	1,40
E2α	833	4,47	45,06	736	1,05	1,40
E2β	833	4,64	44,02	767	1,07	1,40
E3α	833	4,83	48,15	801	1,04	1,39
E3β	833	4,86	45,52	806	1,06	1,39
E4α	833	4,58	44,62	756	1,04	1,39
E4β	833	4,69	45,93	776	1,06	1,39

Πίνακας 5.5α. Μέσοι όροι μετρηθέντων χαρακτηριστικών συστημάτων μεγάλου ΧΠ.

Λαμπτήρας	t (ms)	I_{GI} (mA)	V_{p-p} (V)	I_{p-p} (mA)	R_{c1} (Ω)	R_{c2} (Ω)	f (kHz)	I_{lamp} (mA)
A11α	1471	11	20,35	549	9,25	9,22	44,59	166
A11β	1470	11	25,28	550	10,39	9,75	44,59	166
A12α	1476	9	22,04	528	10,47	10,05	46,82	168
A12β	1475	10	24,46	554	10,23	9,52	46,78	168
A13α	1478	9	20,48	520	10,31	8,86	47,49	164
A13β	1479	11	22,51	576	9,21	8,70	47,51	164
A14α	1479	14	20,98	520	10,32	8,92	47,41	166
A14β	1481	7	23,16	535	10,43	9,36	47,38	166
B11α	1471	19	21,57	542	10,10	10,14	46,88	169
B11β	1470	8	23,34	577	9,59	10,31	46,93	168
B12α	1474	16	21,11	498	10,69	9,71	46,58	166
B12β	1476	16	23,46	557	10,11	10,11	46,54	167
B13α	1478	16	21,04	525	10,61	9,35	45,57	170
B13β	1478	11	24,83	570	9,63	9,38	45,56	170
B14α	1465	11	19,19	570	9,19	9,56	46,22	168
B14β	1466	11	24,51	574	9,29	9,41	46,14	169
Γ11α	1468	6	21,88	529	10,41	9,90	47,53	166
Γ11β	1467	7	25,11	554	10,31	9,50	47,48	166
Γ12α	1476	7	21,98	537	10,39	9,82	46,78	166
Γ12β	1476	6	25,21	576	9,76	9,76	46,76	166
Γ13α	1465	10	19,79	522	10,57	9,36	45,97	168
Γ13β	1463	13	23,80	534	10,31	9,46	45,90	168
Γ14α	1481	8	20,71	530	10,73	9,56	47,25	165
Γ14β	1480	14	23,56	533	10,38	9,82	47,26	166
Δ11α	1476	9	21,19	531	10,06	9,40	46,32	160
Δ11β	1472	7	25,97	566	9,85	9,53	47,12	166
Δ12α	1469	9	20,04	534	10,52	9,77	46,06	169
Δ12β	1463	8	23,77	584	9,25	9,64	46,20	168
Δ13α	1470	11	20,52	547	9,90	9,54	46,91	169
Δ13β	1468	10	24,09	562	10,03	9,69	46,89	169
Δ14α	1482	9	21,04	533	10,30	9,45	46,71	170
Δ14β	1482	11	22,96	566	9,85	9,33	46,78	170
E11α	1472	10	20,30	535	9,30	9,03	46,85	168
E11β	1473	8	23,83	567	9,63	9,73	46,83	168
E12α	1483	9	21,54	571	9,52	10,17	46,06	171
E12β	1483	7	25,35	565	9,78	9,37	46,05	171
E13α	1473	11	19,99	531	9,44	9,65	47,77	163
E13β	1473	9	23,29	548	10,05	9,87	47,80	163
E14α	1475	7	20,42	526	10,16	9,46	46,85	168
E14β	1474	10	23,27	550	9,82	9,13	45,84	168

Πίνακας 5.5β. Μέσοι όροι υπολογισθέντων χαρακτηριστικών συστημάτων μεγάλου ΧΠ.

Λαμπτήρας	Χρόνος ζωής (ώρες)	R_h/R_c	R_h (Ω)	T ($^{\circ}\text{C}$)	I/I _{NOM}	CCF
A11α	26012	4,01	37,10	650	1,00	1,38
A11β	19040	4,43	45,99	727	1,01	1,37
A12α	21609	3,99	41,73	646	1,02	1,37
A12β	19992	4,32	44,19	708	1,02	1,37
A13α	23324	3,82	39,37	614	0,99	1,37
A13β	25727	4,24	39,08	693	0,99	1,36
A14α	21020	3,92	40,41	633	1,01	1,36
A14β	24314	4,15	43,32	676	1,01	1,36
B11α	32695	3,94	39,80	638	1,02	1,37
B11β	30417	4,22	40,44	688	1,02	1,36
B12α	22977	3,97	42,41	642	1,01	1,37
B12β	27627	4,16	42,10	679	1,01	1,38
B13α	20600	3,78	40,12	607	1,03	1,38
B13β	22367	4,53	43,61	746	1,03	1,38
B14α	28948	3,67	33,70	585	1,02	1,37
B14β	29072	4,60	42,74	759	1,02	1,37
Γ11α	10417	3,97	41,35	643	1,01	1,36
Γ11β	10417	4,40	45,34	722	1,00	1,36
Γ12α	10417	3,94	40,94	637	1,00	1,36
Γ12β	10417	4,48	43,76	738	1,00	1,36
Γ13α	1064	3,59	37,94	570	1,02	1,37
Γ13β	10417	4,32	44,58	708	1,02	1,37
Γ14α	2466	3,65	39,16	582	1,00	1,36
Γ14β	10417	4,26	44,18	696	1,00	1,36
Δ11α	338	3,97	39,95	643	0,97	1,36
Δ11β	2500	4,66	45,86	769	1,00	1,36
Δ12α	338	3,57	37,57	566	1,02	1,37
Δ12β	2500	4,40	40,66	719	1,02	1,37
Δ13α	741	3,79	37,57	609	1,02	1,37
Δ13β	2500	4,28	42,89	700	1,02	1,38
Δ14α	2139	3,84	39,51	617	1,03	1,37
Δ14β	511	4,12	40,59	670	1,03	1,37
E11α	833	4,08	37,95	663	1,02	1,38
E11β	833	4,36	42,02	713	1,02	1,38
E12α	833	3,96	37,71	641	1,03	1,39
E12β	833	4,59	44,87	756	1,03	1,38
E13α	238	3,99	37,69	646	0,99	1,36
E13β	833	4,23	42,48	690	0,99	1,37
E14α	833	3,82	38,85	615	1,02	1,38
E14β	833	4,31	42,34	706	1,02	1,38

Πίνακας 5.6α. Μέσοι όροι μετρηθέντων χαρακτηριστικών συστημάτων μικρού ΧΠ και λαμπτήρα T5.

Λαμπτήρας	t (ms)	I_{GI} (mA)	V_{p-p} (V)	I_{p-p} (mA)	R_{c1} (Ω)	R_{c2} (Ω)	f (kHz)	I_{lamp} (mA)
A15	485	16	24,22	580	8,20	8,30	49,89	166
A16	485	17	24,34	575	8,06	8,27	49,08	168
A17	489	14	24,27	581	8,01	8,48	49,57	166
A18	489	14	24,05	579	8,30	8,16	49,95	166
B16	484	7	24,12	575	8,14	8,18	48,49	169
B17	484	10	24,40	585	7,89	8,36	50,35	164
B18	482	14	24,50	585	8,05	7,86	49,06	169
Γ15	485	9	24,28	607	8,07	8,28	49,66	166
Γ16	479	10	24,34	596	8,12	8,14	49,75	165
Γ17	483	10	24,30	590	8,02	8,24	48,84	170
Γ18	474	11	24,22	600	8,23	8,18	49,86	165
Δ15	479	11	24,24	600	8,45	8,06	49,50	167
Δ16	480	11	24,45	600	8,03	8,26	49,44	168
Δ17	468	12	24,04	664	8,03	8,28	49,44	168
Δ18	469	11	24,34	619	8,02	8,30	50,05	164
E15	467	11	24,35	599	8,38	8,26	50,17	165
E16	470	11	24,29	625	7,76	8,58	49,33	168
E17	480	14	24,49	618	7,83	8,15	49,28	169
E18	474	6	24,29	619	7,82	8,29	49,16	169

Πίνακας 5.6β. Μέσοι όροι υπολογισθέντων χαρακτηριστικών συστημάτων μικρού ΧΠ και λαμπτήρα T5.

Λαμπτήρας	Χρόνος ζωής (ώρες)	R_h/R_c	R_h (Ω)	T ($^{\circ}$ C)	I/I_{NOM}	CCF
A15	14349	5,11	41,88	851	0,97	1,36
A16	11572	5,28	42,45	880	0,99	1,37
A17	17575	5,23	41,86	873	0,98	1,36
A18	20976	5,01	41,55	832	0,98	1,35
B16	14672	5,17	42,06	862	1,00	1,37
B17	8427	5,30	41,79	885	0,96	1,36
B18	17299	5,21	41,93	869	0,99	1,36
Γ15	10417	4,95	39,96	823	0,98	1,37
Γ16	10417	4,89	39,66	810	0,97	1,37
Γ17	10417	4,91	39,39	810	1,00	1,37
Γ18	10417	4,59	37,78	748	0,97	1,36
Δ15	2500	4,41	37,24	715	0,98	1,36
Δ16	2500	4,77	38,29	782	0,99	1,37
Δ17	2500	4,16	33,44	670	0,99	1,37
Δ18	2500	4,54	36,36	739	0,97	1,36
E15	833	4,55	38,10	744	0,97	1,36
E16	833	4,70	36,47	772	0,99	1,37
E17	833	4,72	36,95	774	0,99	1,37
E18	833	4,75	37,14	781	0,99	1,38

Πίνακας 5.7α. Μέσοι όροι μετρηθέντων χαρακτηριστικών συστημάτων μικρού ΧΠ, λαμπτήρας CFL.

Λαμπτήρας	t (ms)	I_{GI} (mA)	V_{p-p} (V)	I_{p-p} (mA)	R_{c1} (Ω)	R_{c2} (Ω)	f (kHz)	I_{lamp} (mA)
A9α	466	4	33,51	1052	6,00	5,75	47,93	208
A9β	471	11	32,78	1179	5,71	5,91	48,12	207
A10α	479	3	32,94	1110	5,76	5,74	47,83	208
A10β	477	4	32,82	1098	5,80	5,86	48,29	208
B9α	471	7	33,57	1057	5,97	5,83	48,69	206
B9β	481	7	32,88	1084	5,68	5,80	48,21	206
B10α	465	5	33,62	1073	5,68	5,76	47,68	206
B10β	472	5	31,85	1122	5,78	5,77	47,50	212
Γ9α	475	4	33,04	1084	5,86	5,80	47,97	209
Γ9β	477	3	33,08	1079	5,73	5,69	47,97	206
Γ10α	476	5	33,39	1071	5,90	5,75	47,42	211
Γ10β	481	6	32,99	1074	5,85	5,78	47,46	209
Δ9α	468	4	32,09	1163	5,79	5,81	48,27	207
Δ9β	462	7	32,94	1097	5,63	5,79	47,64	211
Δ10α	464	4	31,94	1198	5,67	5,83	47,50	213
Δ10β	470	6	33,11	1096	5,70	5,77	47,66	211
E9α	462	5	32,91	1127	5,72	5,72	47,65	209
E9β	468	5	32,87	1130	5,72	5,69	48,20	210
E10α	466	4	32,24	1183	5,59	5,82	46,84	215
E10β	466	4	31,57	1189	5,96	5,72	47,23	210

Πίνακας 5.7β. Μέσοι όροι υπολογισθέντων χαρακτηριστικών συστημάτων μικρού ΧΠ, λαμπτήρας CFL.

Λαμπτήρας	Χρόνος ζωής (ώρες)	R_h/R_c	R_h (Ω)	T ($^{\circ}$ C)	I/I_{NOM}	CCF
A9α	8384	5,32	31,88	889	0,99	1,42
A9β	8091	4,88	27,84	809	0,99	1,43
A10α	8227	5,17	29,76	862	0,99	1,43
A10β	10820	5,16	29,89	860	0,99	1,43
B9α	8894	5,32	31,77	889	0,98	1,42
B9β	9021	5,35	30,37	894	0,98	1,42
B10α	7059	5,53	31,40	925	0,98	1,43
B10β	7600	4,93	28,46	818	1,01	1,43
Γ9α	8461	5,22	30,59	871	1,00	1,43
Γ9β	8610	5,37	30,75	897	0,98	1,43
Γ10α	6552	5,30	31,30	886	1,00	1,44
Γ10β	7055	5,26	30,77	878	1,00	1,42
Δ9α	2500	4,78	27,64	791	0,99	1,42
Δ9β	2500	5,34	30,04	892	1,00	1,43
Δ10α	2500	4,71	26,68	779	1,02	1,44
Δ10β	2500	5,31	30,29	887	1,00	1,43
E9α	833	5,11	29,22	852	0,99	1,44
E9β	833	5,09	29,11	848	1,00	1,44
E10α	833	4,87	27,24	809	1,02	1,44
E10β	833	4,46	26,55	733	1,00	1,43

5.3. Στατιστικός έλεγχος χρόνου ζωής και χαρακτηριστικών των λαμπτήρων

5.3.1. Έλεγχος χρόνου ζωής λαμπτήρων που οδηγούνται από ballast γρήγορης έναυσης

Για τα ballast που εκτελούν προθέρμανση των ηλεκτροδίων διεξάγεται αρχικά παρόμοιος έλεγχος, για την επίτευξη του ονομαστικού χρόνου ζωής, με τον έλεγχο των συστημάτων με άμεση έναυση της παραγράφου 4.8. Ο έλεγχος γίνεται σύμφωνα με την κατανομή t του Student για μικρά δείγματα και μόνο στον καθιερωμένο κύκλο λειτουργίας, για τον οποίο ισχύει ο δεδομένος χρόνος ζωής του κατασκευαστή. Σε αυτή την κατηγορία λαμπτήρων υπάγονται οι λαμπτήρες T5 που οδηγούνται από ballast μικρού, μέτριου και μεγάλου χρόνου προθέρμανσης, καθώς και οι συμπαγείς λαμπτήρες που οδηγούνται από τα ballast με μικρό χρόνο προθέρμανσης.

Από τα αποτελέσματα για τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων υπολογίζονται οι τιμές της μέσης ζωής κάθε ομάδας (\bar{x}) και της τυπικής απόκλισης (s). Ο έλεγχος γίνεται για το 95% επίπεδο εμπιστοσύνης. Ως μηδενική υπόθεση σε όλες τις ομάδες τίθεται η επίτευξη του ονομαστικού χρόνου ζωής και ως εναλλακτική υπόθεση η μη επίτευξη αυτού. Από τους υπολογισμούς συντάσσεται ο πίνακας 5.8, στον οποίο φαίνονται τα δεδομένα, οι υποθέσεις και τα συμπεράσματα.

Πίνακας 5.8. Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου χρόνου ζωής λαμπτήρων με προθέρμανση.

Λαμπτήρας - ballast	T5 μικρού ΧΠ		T5 μέτριου ΧΠ	T5 μεγάλου ΧΠ	CFL μικρού ΧΠ	
Ονομαστικός χρόνος ζωής	24000		24000	24000	13000	
n	4		8	8	4	
\bar{x} (ώρες)	16118		21516	22630	8880	
s (ώρες)	3518		7267	2614	1125	
H ₀	$\bar{x}=24000$		$\bar{x}=24000$	$\bar{x}=24000$	$\bar{x}=13000$	
H ₁	$\bar{x}\neq 24000$		$\bar{x}\neq 24000$	$\bar{x}\neq 24000$	$\bar{x}\neq 13000$	
t	-4,480		-0,967	-1,483	-7,326	
t _{0,025}	3,182	-	2,365	2,365	3,182	-
t _{0,010}	-	4,541	-	-	-	4,541
Έλεγχος - Συμπέρασμα	t > t _{0,025} H ₀ απορρ.	t < t _{0,010} H ₀ δεκτή	t < t _{0,025} H ₀ δεκτή	t < t _{0,025} H ₀ δεκτή	t > t _{0,025} H ₀ απορρ.	t > t _{0,010} H ₀ απορρ.

Τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στον πίνακα 5.8 δείχνουν ότι οι λαμπτήρες με μικρό χρόνο προθέρμανσης δεν πέτυχαν τον ονομαστικό χρόνο ζωής τους στο διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Αν το διάστημα εμπιστοσύνης αυξηθεί στο 98% οι σωληνωτοί

λαμπτήρες (αλλά όχι οι συμπαγείς) είναι εντός του αποδεκτού ορίου. Οι λαμπτήρες με ballast μέτριου και μεγάλου χρόνου προθέρμανσης, σε αυτό το διάστημα εμπιστοσύνης εκτιμάται ότι με πιθανότητα (εμπιστοσύνη) 95% θα επιτύχουν τον ονομαστικό χρόνο ζωής τους. Με άλλα λόγια, ο μέσος χρόνος ζωής του δείγματος συμπίπτει με τον ονομαστικό για το 95% επίπεδο σημαντικότητας.

5.3.2. Έλεγχος επίτευξης ονομαστικής τιμής ρεύματος των λαμπτήρων

Στην παρούσα παράγραφο θα ελεγχθεί σε 95% επίπεδο εμπιστοσύνης η επίτευξη ή όχι από τους λαμπτήρες κάθε ομάδας χωριστά της ονομαστικής τιμής του ρεύματος λειτουργίας. Τα δεδομένα του ελέγχου είναι η ονομαστική τιμή του ρεύματος για κάθε λαμπτήρα, ο αριθμός των λαμπτήρων, οι μέση τιμή του ρεύματος λειτουργίας και η μέση απόκλιση. Στον πίνακα 5.9 φαίνονται τα δεδομένα και τα αποτελέσματα. Για τις ομάδες με λιγότερους από 30 λαμπτήρες έγινε έλεγχος με την κατανομή t του Student, ενώ για τις άλλες εφαρμόζεται η διερεύνηση των διαστημάτων εμπιστοσύνης για μεγάλα δείγματα με εξέταση του παράγοντα αξιοπιστίας $Z_{\alpha/2}$.

Πίνακας 5.9. Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου του ρεύματος λειτουργίας των λαμπτήρων με προθέρμανση.

Λαμπτήρας - ballast	T5 μικρού ΧΠ	T5 μέτριου ΧΠ	T5 μεγάλου ΧΠ	CFL μικρού ΧΠ
Ονομαστική τιμή ρεύματος λειτουργίας (mA)	170	165	165	210
n	19	40	40	20
\bar{x} (mA)	166,9	173,1	167,2	209,1
s (mA)	1,87	2,02	2,33	2,53
H_0	$\bar{x}=170$	$\bar{x}=165$	$\bar{x}=165$	$\bar{x}=210$
H_1	$\bar{x}\neq 170$	$\bar{x}\neq 165$	$\bar{x}\neq 165$	$\bar{x}\neq 210$
t	-7,12	-	-	-1,59
$t_{0,025}$	2,101	-	-	2,093
z	-	25,32	5,90	-
$Z_{0,025}$	-	1,96	1,96	-
Έλεγχος - Συμπέρασμα	$ t > t_{0,025}$ H_0 απορρ.	$ Z > Z_{0,025}$ H_0 απορρ.	$ Z > Z_{0,025}$ H_0 απορρ.	$ t < t_{0,025}$ H_0 δεκτή

Ο έλεγχος γίνεται σε όλους τους λαμπτήρες κάθε είδους και όχι μόνο σε εκείνους που έχουν εξαντληθεί, διότι η τιμή του ρεύματος λειτουργίας δεν μεταβάλλεται πολύ με τη γήρανση του λαμπτήρα. Οι τιμές που πέτυχαν οι λαμπτήρες απείχαν από τις ονομαστικές, αλλά όχι τόσο όσο στους λαμπτήρες που οδηγούνταν από ballast άμεσης έναυσης. Εκείνοι δεν επέτυχαν σχετικώς ικανοποιητικούς χρόνους ζωής και αυτό έχει αποδοθεί ήδη στην μη επίτευξη από

αυτούς των ονομαστικών τιμών του ρεύματος, όπως και της τάσης. Αυτός είναι ο λόγος που δε έγινε όμοιος έλεγχος σε εκείνους στην αντίστοιχη παράγραφο.

Από τον πίνακα 5.9 γίνεται φανερό ότι και τα ballast με προθέρμανση δεν επιτυγχάνουν να οδηγήσουν τους λαμπτήρες με την ονομαστική τιμή του ρεύματος λειτουργίας σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο εμπιστοσύνης, όπως είναι το 95%. Μόνο τα ballast για τους συμπαγείς λαμπτήρες μικρού χρόνου προθέρμανσης το έχουν καταφέρει. Βέβαια, σε τέτοιου είδους στατιστική ανάλυση σημαντικός παράγοντας είναι η τιμή της τυπικής απόκλισης του δείγματος. Σε όλα τα δείγματα ήταν σχετικά μικρή και επειδή (σχέση 4.3) βρίσκεται στον παρονομαστή το αποτέλεσμα είναι οι στατιστικές t και z να έχουν μεγάλες τιμές, οπότε βρίσκονται εκτός των ορίων των διαστημάτων εμπιστοσύνης. Αυτό σημαίνει ότι αν και δεν υπάρχει μεγάλη διασπορά τιμών, η μέση τιμή του ρεύματος λειτουργίας απέχει από την ονομαστική τιμή που έπρεπε να έχει.

5.3.3. Σύγκριση χρόνου ζωής ίδιων λαμπτήρων που οδηγούνται από διαφορετικά ballast

Τα ballast μέτριου και μεγάλου χρόνου προθέρμανσης οδηγούν ίδιου τύπου λαμπτήρες. Θα γίνει έλεγχος στην ομάδα A, κατά πόσον τα δύο αυτά ballast αποδίδουν στατιστικά την ίδια διάρκεια ζωής στους λαμπτήρες που οδηγούν. Θα γίνει δίπλευρος έλεγχος με μηδενική υπόθεση $H_0: \mu_1 - \mu_2 = \mu_{10} - \mu_{20}$ και εναλλακτική την $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq \mu_{10} - \mu_{20}$ στο επίπεδο σημαντικότητας 0,05 (εμπιστοσύνη 95%) όπου μ_1 και μ_2 οι μέσοι η διαφορά των οποίων ελέγχεται και $\mu_{10} = \mu_{20} = 24000$ ώρες. Το κάθε δείγμα επί των οποίων πραγματοποιείται ο έλεγχος έχει πληθυσμό $n_1 = n_2 = 8$. Ο δείκτης 1 αναφέρεται στους λαμπτήρες που οδηγούνται από ballast μέτριου χρόνου προθέρμανσης και ο δείκτης 2 σε εκείνους που οδηγούνται από ballast μεγάλου χρόνου προθέρμανσης. Από τα αποτελέσματα για τους χρόνους ζωής που έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 5.2 προκύπτουν μέσοι χρόνοι ζωής των δύο δειγμάτων: $\bar{x}_1 = 21516$ ώρες και $\bar{x}_2 = 22630$ ώρες. Οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις είναι: $s_1 = 7267$ ώρες και $s_2 = 2614$ ώρες. Για μικρά δείγματα (με πληθυσμούς μικρότερους από 30) για να βρεθεί η στατιστική τιμή t , εφαρμόζεται η σχέση (5.1), [115]:

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_{10} - \mu_{20})}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (5.1)$$

Από τη σχέση αυτή βρίσκεται: $t = 0,408$. Από τον πίνακα της κατανομής t του Student και για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και για 14 βαθμούς ελευθερίας ($n_1 + n_2 - 2 = 14$) παίρνουμε: $t_{0,025} = 2,145 > t = 0,408$. Αυτό σημαίνει ότι σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 γίνεται δεκτή η μηδενική υπόθεση, επομένως τα δύο ballast δίνουν σχεδόν ίδιο χρόνο ζωής στους λαμπτήρες.

Ο ίδιος έλεγχος γίνεται και στους λαμπτήρες T5 της Philips που οδηγούνται από τα ballast γρήγορης (χρησιμοποιείται ο δείκτης 1 γι' αυτά) και άμεσης έναυσης (χρησιμοποιείται ο δείκτης 2 γι' αυτά) για την ομάδα A. Στην περίπτωση αυτή τίθεται $\mu_1 = 24000$ ώρες και $\mu_2 = 18000$ ώρες και η μηδενική υπόθεση είναι $H_0: \mu_1 - \mu_2 = \mu_{10} - \mu_{20}$ και εναλλακτική την $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq \mu_{10} - \mu_{20}$, δηλαδή ελέγχεται αν η διαφορά των μέσων επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα. Οι μέσοι χρόνοι ζωής των δύο δειγμάτων βρέθηκαν: $\bar{x}_1 = 16118$ ώρες και $\bar{x}_2 = 7441$ ώρες. Οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις είναι: $s_1 = 3518$ ώρες και $s_2 = 701$ ώρες. Με χρήση της ίδιας μεθόδου βρίσκεται το στατιστικό t ίσο με 1,493 και για 6 βαθμούς ελευθερίας ($n_1 + n_2 - 2 = 4 + 4 - 2 = 6$) βρίσκουμε ότι στο επίπεδο εμπιστοσύνης του 95% ($t_{0,025} = 2,447$) οι δύο μέσοι όροι ζωής γίνεται δεκτό ότι συμπίπτουν. Επομένως γίνεται δεκτή η μηδενική υπόθεση για τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων σχετικά με τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων αυτών.

Αντίστοιχος στατιστικός έλεγχος πραγματοποιείται και για το ζεύγος των συμπαγών λαμπτήρων μικρού χρόνου προθέρμανσης. Προκύπτει στατιστικό $t = -1,947$ που υποδεικνύει ότι η μηδενική υπόθεση γίνεται δεκτή στο επίπεδο σημαντικότητας 0,05 (αφού $t_{0,025} = 2,447$). Επομένως τα πειραματικά αποτελέσματα για το χρόνο ζωής, των λαμπτήρων αυτών, είναι αποδεκτά.

5.3.4. Έλεγχος θερμοκρασίας ηλεκτροδίου λαμπτήρων που οδηγούνται με ballast γρήγορης έναυσης

Οι κατασκευαστές λαμπτήρων και ballast δεν δίνουν προτεινόμενες τιμές για τη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου ακριβώς πριν την πραγματοποίηση της εκκένωσης. Στην παρούσα εργασία αυτή η θερμοκρασία μετρήθηκε για κάθε λαμπτήρα. Σε τούτη την παράγραφο θα γίνει έλεγχος σχετικός με την απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας για κάθε σύστημα ανεξαρτήτως κύκλου λειτουργίας, αφού αυτός δεν επηρεάζει την εξεταζόμενη παράμετρο. Ο έλεγχος θα γίνει για το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της τυπικής απόκλισης της θερμοκρασίας. Θα βρεθεί δηλαδή μία περιοχή θερμοκρασιών όπου θα βρίσκεται η θερμοκρασιακή απόκλιση ενός τυχαίου δείγματος με πιθανότητα 95%.

Αρχικά θα εξετασθεί η ομάδα των λαμπτήρων που οδηγούνται με ballast μέτριου χρόνου προθέρμανσης. Θα χρησιμοποιηθεί η σχέση για μεγάλους πληθυσμούς δειγμάτων ($n \geq 30$) αφού το δείγμα που θα εξετασθεί αποτελείται από 40 λαμπτήρες. Επομένως το ζητούμενο διάστημα εμπιστοσύνης θα είναι το:

$$\left(\frac{s}{1 + \frac{z_{0,025}}{\sqrt{2 \cdot n}}}, \frac{s}{1 - \frac{z_{0,025}}{\sqrt{2 \cdot n}}} \right) \quad (5.2)$$

όπου s είναι η τυπική απόκλιση του δείγματος πλήθους $n=40$. Από τους πίνακες της παραγράφου 5.2 για τη θερμοκρασία βρίσκεται η τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας ίση με $30,42$ °C. Από τους πίνακες της τυπικής κανονικής κατανομής και για το 95% διάστημα εμπιστοσύνης παίρνουμε την τυποποιημένη τιμή $z_{0,025}=1,96$. Η λύση του μαθηματικού τύπου (5.2) δίνει για την τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας το διάστημα: $(24,95, 38,95)$ °C. Επομένως, αν ληφθεί υπ' όψιν ότι η μέση θερμοκρασία του δείγματος είναι $761,53$ °C τότε, με πιθανότητα 95%, η θερμοκρασία τα τυχαίου δείγματος λαμπτήρων θα έχει απόκλιση από $24,95$ έως $38,95$ °C από τη μέση θερμοκρασία του δείγματος.

Για να γίνει ο έλεγχος τα λαμπτήρες με μικρό χρόνο προθέρμανσης, επειδή το δείγμα είναι μικρό ($n < 30$), θα χρησιμοποιηθεί η δειγματοληπτική κατανομή χ^2 (κατανομή χι τετράγωνο) οπότε το 95% διάστημα εμπιστοσύνης για την τυπική απόκλιση θα είναι το:

$$\left(\sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{0,025}^2}}, \sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{0,975}^2}} \right) \quad (5.3)$$

Οι τιμές για τα $\chi_{0,025}^2$ και $\chi_{0,975}^2$ βρίσκονται από τον αντίστοιχο πίνακα και εξαρτώνται από τα βαθμούς ελευθερίας $(n-1)$ του δείγματος. Για το σύνολο των ομάδων των λαμπτήρων και με βάση τα προαναφερθέντα, καταρτίζεται ο πίνακας 5.10.

Πίνακας 5.10. Διαστήματα εμπιστοσύνης για την τυπική απόκλιση των θερμοκρασιών.

Λαμπτήρας ballast	T5 μικρού ΧΠ	T5 μέτριου ΧΠ	T5 μεγάλου ΧΠ	CFL μικρού ΧΠ
n	19	40	40	20
Μέση θερμοκρασία δείγματος (°C)	836,83	761,53	667,75	853,45
$z_{0,025}$	-	1,96	1,96	-
$\chi_{0,025}^2$	8,231	-	-	8,907
$\chi_{0,975}^2$	31,526	-	-	32,852
s (°C)	-	30,42	53,89	-
s^2 (°C ²)	1393,39	-	-	2372,47
Διάστημα εμπιστοσύνης τυπικής απόκλισης (°C)	(28,39, 54,53)	(24,95, 38,95)	(44,20, 69,01)	(37,04, 71,14)

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι κάθε ομάδα είχε μικρές διαφορές ως προς τις θερμοκρασίες των λαμπτήρων, αφού τα διαστήματα εμπιστοσύνης δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους.

5.4. Επεξεργασία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

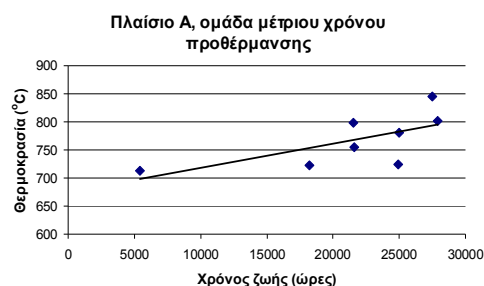
Σύμφωνα με τα εκτεθέντα πειραματικά αποτελέσματα έγινε στατιστική επεξεργασία τους, ώστε να εξαχθούν εκείνα τα συμπεράσματα που θα οδηγήσουν στις ενδεδειγμένες τιμές των παραμέτρων που θα έχουν ως αποτέλεσμα, όταν εφαρμοστούν, την βελτίωση των συστημάτων. Η επεξεργασία έγινε ανά ομάδα καθενός πλαισίου χωριστά.

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν ο χρόνος προθέρμανσης, η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου, το ρεύμα αίγλης, το ρεύμα λειτουργίας και ο παράγων κορυφής ρεύματος. Τα άλλα χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν ή υπολογίσθηκαν, αλλά δεν αναφέρονται στην επεξεργασία, είτε βρέθηκε ότι δε σχετίζονται με τη ζωή των λαμπτήρων, είτε συνδέονται άμεσα με κάποιο από εκείνα που ερευνήθηκαν και η αναφορά τους θα ήταν περιττή.

Σε κάθε ομάδα που εξετάζεται παρακάτω δίνεται διάγραμμα μόνο εφόσον το αναφερόμενο χαρακτηριστικό εμφανίζει στη συγκεκριμένη ομάδα ενδιαφέρουσα συσχέτιση με το χρόνο ζωής του λαμπτήρα. Το ότι δεν αποδίδουν πάντα το ίδιο αποτέλεσμα τα συστήματα, οφείλεται στον μικρό αριθμό λαμπτήρων κάθε ομάδας, αλλά κυρίως στην επίδραση πολλών παραγόντων ταυτόχρονα. Επομένως δεν είναι καθόλου εύκολο να συμπίπτουν τα συμπεράσματα για την ίδια παράμετρο μεταξύ διαφορετικών ομάδων. Όμως στις επόμενες παραγράφους καταγράφονται οι παρατηρήσεις ανά ομάδα και στο τέλος θα εξαχθούν συνολικές εκτιμήσεις για κάθε παράγοντα.

Πλαίσιο A, ομάδα με μέτριο χρόνο προθέρμανσης

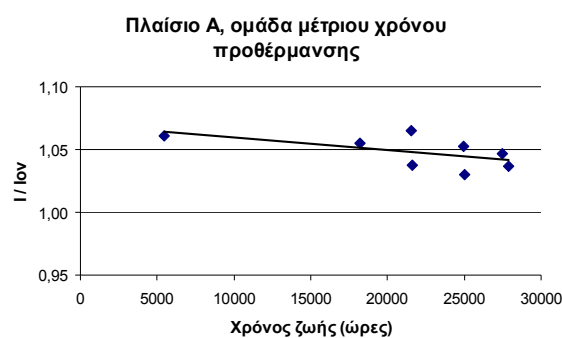
Οι λαμπτήρες της ομάδας επέτυχαν μέσο χρόνο ζωής (23814 ώρες) σχεδόν ίσο με εκείνο του κατασκευαστή, αν εξαιρεθεί ο λαμπτήρας A3β που λόγω τυχαίου ελαττώματος εξαντλήθηκε πολύ νωρίς. Αν ληφθεί υπόψη και ο εν λόγω λαμπτήρας ο μέσος χρόνος ζωής της ομάδας ελαττώνεται στις 21 516 ώρες. Στα συστήματα της ομάδας A παρατηρείται εμφανώς αύξηση της ζωής των λαμπτήρων εκείνων που τα ηλεκτρόδιά των αποκτούσαν σχετικώς μεγάλη θερμοκρασία (πέραν των 800 °C) κατά την έναυση. Οι θερμοκρασίες αυτές ήταν από 713 °C μέχρι 845 °C. Οι θερμοκρασίες ήταν όλες μέσα στα όρια που έχουν τεθεί από την ως τώρα έρευνα των σωληνωτών λαμπτήρων. Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η διασπορά των σημείων, που είναι σχετικώς μεγάλη, αλλά παρ' όλ' αυτά φαίνεται ότι υπάρχει η προαναφερθείσα τάση των συστημάτων.



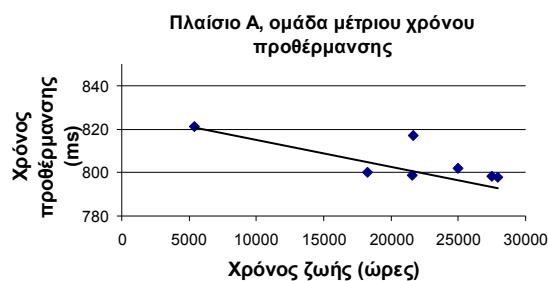
Σχήμα 5.1. Επίδραση της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου στη ζωή του λαμπτήρα.

Αντίστοιχο συμπέρασμα συνάγεται και για την επίδραση του ρεύματος του λαμπτήρα στη λειτουργία. Το ρεύμα που συστήνει ο κατασκευαστής είναι 165 mA, ενώ το ρεύμα που διαρρέει τους λαμπτήρες με αυτό τον τύπο ballast είναι λίγο μεγαλύτερο: 170 ως 176 mA. Σύμφωνα με τις μετρήσεις, οι μεγάλες τιμές επέδρασαν αρνητικά στους λαμπτήρες της ομάδας A. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 5.2. Ο μεγάλος χρόνος προθέρμανσης επίσης επηρεάζει αρνητικά τη ζωή του λαμπτήρα. Χρόνοι κοντά και κάτω των 800 ms απέδωσαν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (σχήμα 5.3).

Πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι οι τιμές των παραμέτρων που μελετήθηκαν δεν είχαν μεγάλη διακύμανση. Κινούνταν δηλαδή σε ένα μικρό εύρος τιμών. Επομένως θα πρέπει να συνδυαστούν τα αποτελέσματα πολλών ομάδων για να συναχθούν ασφαλή συμπεράσματα.



Σχήμα 5.2. Επίδραση του ρεύματος λειτουργίας στη ζωή του λαμπτήρα.

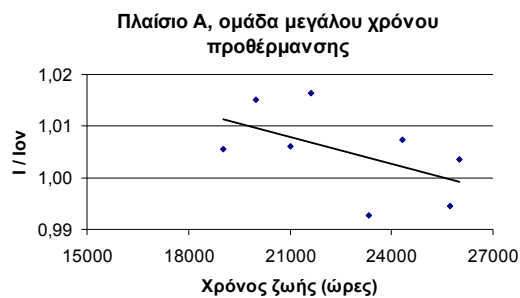


Σχήμα 5.3. Επίδραση του χρόνου προθέρμανσης στη ζωή του λαμπτήρα.

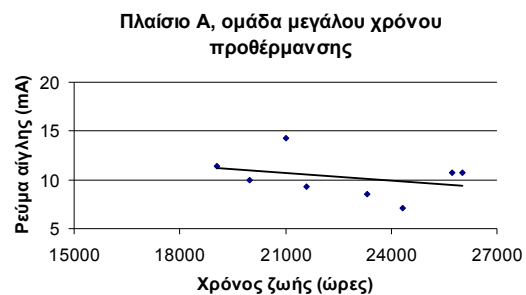
Πλαίσιο A, ομάδα με μεγάλο χρόνο προθέρμανσης

Τα συστήματα σχεδόν επέτυχαν σε μέσο όρο την ονομαστική διάρκεια ζωής που δίνει ο κατασκευαστής των λαμπτήρων (22 630 ώρες έναντι 24 000 ωρών του κατασκευαστή). Στην έναυση όμως οι λαμπτήρες δεν μπόρεσαν να αποκτήσουν ικανοποιητική θερμοκρασία και οι μέσες τιμές που είχε καθένας ήταν μεταξύ 614 °C και 727 °C. Οι λαμπτήρες ακολούθησαν σχετικώς καλά τον κανόνα της αυξημένης ζωής όταν είναι μεγαλύτερη η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου, αν εξαιρεθεί ο λαμπτήρας A11α, ο οποίος αν και είχε θερμοκρασία μόλις 650 °C επέτυχε χρόνο ζωής 26 012 ώρες. Παρατηρήθηκε ότι τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που επιδρούν στη ζωή του είχαν πολύ καλές τιμές.

Η τιμή του ρεύματος λειτουργίας των λαμπτήρων ήταν πολύ κοντά στη συνιστώμενη και στο σχήμα 5.4 φαίνεται η σχέση που είχε με την αντίστοιχη ζωή που πέτυχε ο λαμπτήρας. Το ρεύμα αίγλης φαίνεται πως επιδρά στους λαμπτήρες στο σχήμα 5.5 όπου αν και με χαμηλές τιμές σε όλους τους λαμπτήρες, είναι προφανές ότι οι μεγάλες τιμές μειώνουν τη διάρκεια ζωής.



Σχήμα 5.4. Επίδραση του ρεύματος λειτουργίας στη ζωή του λαμπτήρα.



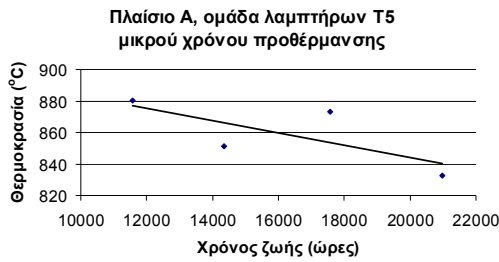
Σχήμα 5.5. Επίδραση του ρεύματος αίγλης στη ζωή του λαμπτήρα.

Πλαίσιο Α, ομάδα σωληνωτών λαμπτήρων με μικρό χρόνο προθέρμανσης

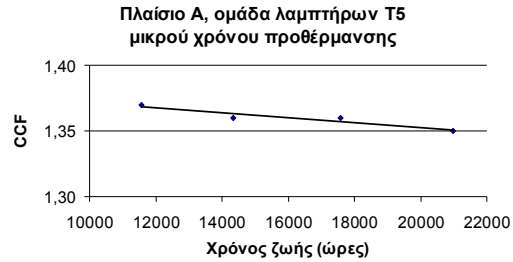
Οι λαμπτήρες της ομάδας αυτής σε μέσο όρο ζωής (16 118 ώρες) δεν επέτυχαν περισσότερο από το 70% της αναφερόμενης από τον κατασκευαστή. Και όμως δεν υπήρξε κάποια ανωμαλία στη λειτουργία τους αλλά ούτε και αιφνίδια καταστροφή λαμπτήρα. Οι χρόνοι ζωής ήταν μεταξύ 11 572 και 20 976 ωρών. Δεν επέτυχε δηλαδή κάποιος λαμπτήρας ζωή πολύ κοντά στην ονομαστική των 24000 ωρών. Η αποδιδόμενη αιτία είναι ο μικρός χρόνος προθέρμανσης που επιβάλλει το ballast. Από την ANSI συστήνεται αυτός ο χρόνος να είναι μεγαλύτερος από 0,5 δευτερόλεπτα. Αυτός ο τύπος ballast της Philips όμως επιβάλλει χρόνο μικρότερο από αυτόν. Συγκεκριμένα οι χρόνοι στους τέσσερις λαμπτήρες ήταν μεταξύ 485 και 489 ms.

Αν και το δείγμα της ομάδας είναι μικρό, παρατηρήθηκε αύξηση της ζωής των λαμπτήρων όσο η θερμοκρασία του νήματος ήταν χαμηλότερη· φαινόμενο αντιτιθέμενο στις θεωρητικές απαιτήσεις αλλά και τα πειραματικά αποτελέσματα σε άλλα είδη λαμπτήρων φθορισμού. Το γεγονός, λόγω του μικρού δείγματος, ενδέχεται να είναι τυχαίο και είναι πολύ πιθανό να συμβαίνει επειδή οι θερμοκρασίες που επέτυχαν τα νήματα στα συστήματα αυτά με μικρό ΧΠ της Philips, ήταν σχετικά υψηλές: μεταξύ 832 και 880 °C. Παρατηρούμε δηλαδή ότι θερμοκρασίες άνω των 850 °C ενδέχεται να προκαλούν βλάβη στο λαμπτήρα, για τα συγκεκριμένα συστήματα.

Στο σχήμα 5.6 είναι το διάγραμμα που δείχνει την επίδραση της θερμοκρασίας στη ζωή των λαμπτήρων, ενώ στο σχήμα 5.7 φαίνεται η αντίστοιχη επίδραση του παράγοντα κορυφής ρεύματος.

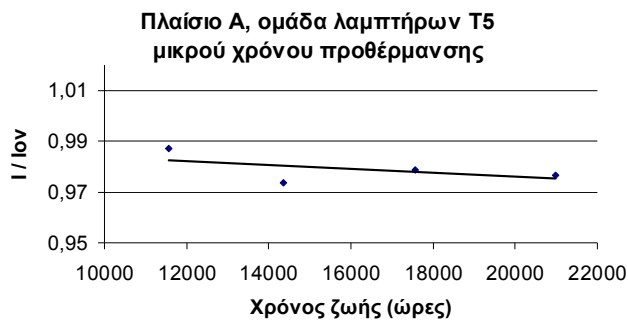


Σχήμα 5.6. Επίδραση της θερμοκρασίας στη ζωή του λαμπτήρα.



Σχήμα 5.7. Επίδραση του παράγοντα κορυφής ρεύματος στη ζωή του λαμπτήρα.

Το ρεύμα λειτουργίας ήταν λίγο μικρότερο από το συνιστώμενο από τον κατασκευαστή (170 mA). Παρατηρήθηκε ότι όσο μικρότερο ήταν το ρεύμα τόσο αυξημένη ήταν η ζωή του λαμπτήρα (σχήμα 5.8). Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αν το ρεύμα είναι μικρότερο από το συνιστώμενο αυτό ωφελεί παρά βλάπτει τον λαμπτήρα.



Σχήμα 5.8. Επίδραση του ρεύματος λειτουργίας στη ζωή του λαμπτήρα.

Πλαίσιο Α, ομάδα συμπαγών λαμπτήρων με μικρό χρόνο προθέρμανσης

Στην ομάδα αυτή κανένας λαμπτήρας δεν επέτυχε την ονομαστική ζωή των 13000 ωρών. Η μέση ζωή τους ήταν 8880 ώρες. Τα χαρακτηριστικά των λαμπτήρων ήταν αρκετά καλά ώστε να μη δικαιολογούν αυτό το αποτέλεσμα. Η θερμοκρασία ηλεκτροδίου σε καθένα ήταν μεταξύ 809 και 889 °C. Ο παράγων κορυφής ρεύματος όχι περισσότερο από 1,44 και το ρεύμα λειτουργίας 2 ή 3 mA λιγότερα από την ονομαστική τιμή του κατασκευαστή (210 mA). Το ρεύμα αίγλης στους τρεις λαμπτήρες ήταν 3 και 4 mA ενώ στον τέταρτο 11 mA. Η τιμή στον τελευταίο λαμπτήρα είναι γενικώς ικανοποιητική και μέσα στα συνιστώμενα όρια. Θεωρείται μάλλον σύμπτωση το ότι αυτό ήταν το σύστημα με τη μικρότερη διάρκεια ζωής.

Σε αυτά τα συστήματα, όπως και στα άλλα του ίδιου κατασκευαστή που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, ο χρόνος προθέρμανσης ήταν μικρότερος από το όριο των 500 ms που συνιστάται. Οι χρόνοι ήταν μεταξύ 466 και 479 ms. Επομένως σε αυτό αποδίδεται η μειωμένη διάρκεια ζωής. Ο κατασκευαστής θέλοντας να ικανοποιήσει την εμπορικότητα του προϊόντος, μείωσε το χρόνο αναμονής μέχρι να λειτουργήσει ο λαμπτήρας, ελαττώνοντας όμως αρκετά τη διάρκεια ζωής του.

Πλαίσιο Β, ομάδα με μέτριο χρόνο προθέρμανσης

Οι λαμπτήρες επέτυχαν μέσους όρους διάρκειας ζωής κοντά στην ονομαστική τιμή τους, αν και ο κύκλος λειτουργίας τους είναι μικρότερος του καθιερωμένου και θα αναμενόταν ακόμα μικρότερος χρόνος ζωής. Δύο λαμπτήρες υπερέβησαν την ονομαστική τους ζωή όταν ο μέσος όρος της ομάδας ήταν 21724 ώρες. Σε όλα τα συστήματα οι τιμές των χαρακτηριστικών ήταν εντός των φυσιολογικών τιμών, δηλαδή χωρίς ακραίες περιπτώσεις. Ο επιτευχθείς χρόνος ζωής των λαμπτήρων δεν μπορεί να συνδεθεί με την τιμή κάποιου χαρακτηριστικού, αφού οι μετρηθείσες παράμετροι δεν είχαν μεγάλη διακύμανση στις τιμές τους.

Οι θερμοκρασία του ηλεκτροδίου ήταν μεταξύ 733 και 793 °C και η ευθεία γραμμή παλινδρόμησης είναι σχεδόν οριζόντια που σημαίνει ότι η διάρκεια ζωής είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία, για το συγκεκριμένο εύρος τιμών. Το ρεύμα λειτουργίας ήταν 5 έως 10 mA μεγαλύτερο από την συνιστώμενη τιμή (με μικρή διακύμανση) και δεν παρουσίασε κάποια ιδιαίτερη συσχέτιση με τη ζωή του λαμπτήρα. Το ρεύμα αίγλης είχε σχετικώς μεγάλη διακύμανση τιμών: 7 έως 29 mA. Η ευθεία γραμμή παλινδρόμησης ήταν σχεδόν οριζόντια, άρα δεν φαίνεται να επιδρά στη ζωή των λαμπτήρων το χαρακτηριστικό αυτό. Μάλιστα, ο λαμπτήρας με τιμή 29 mA επέτυχε ζωή 23 349 ώρες, πολύ κοντά στην ονομαστική του κατασκευαστή. Όμως ο συγκεκριμένος λαμπτήρας είχε ρεύμα λειτουργίας πιο κοντά στην συνιστώμενη από όλους τους λαμπτήρες της ομάδας. Επίσης και τα άλλα χαρακτηριστικά λειτουργίας και έναυσης ήταν αρκετά καλά. Επομένως αυτή η μικρή υπέρβαση στην τιμή του ρεύματος αίγλης δεν προκάλεσε ιδιαίτερη βλάβη σε αυτόν.

Πλαίσιο Β, ομάδα με μεγάλο χρόνο προθέρμανσης

Στην ομάδα αυτή, όπου πέντε λαμπτήρες πέρασαν τον ονομαστικό χρόνο ζωής ενώ τρεις εξαντλήθηκαν νωρίτερα, παρατηρούνται σχετικώς καλά χαρακτηριστικά, όπως αναμενόταν. Η μέση διάρκεια ζωής των λαμπτήρων της ομάδας έχει υπερβεί κατά πολύ την ονομαστική διάρκεια ζωής των λαμπτήρων. Η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου μόνο σε δύο λαμπτήρες υπερέβη το όριο των 700 °C (λαμπτήρες B13β και B14β). Στους υπόλοιπους η θερμοκρασία ήταν μεταξύ 585 και 689 °C. Πρέπει να τονισθεί ότι ο λαμπτήρας με θερμοκρασία 585 °C υπερέβη τον ονομαστικό χρόνο ζωής. Άρα το όριο των 700 °C δεν είναι τόσο σημαντικό όταν οι άλλοι παράγοντες, οι οποίοι έχουν αναφερθεί ήδη, έχουν ευνοϊκές τιμές.

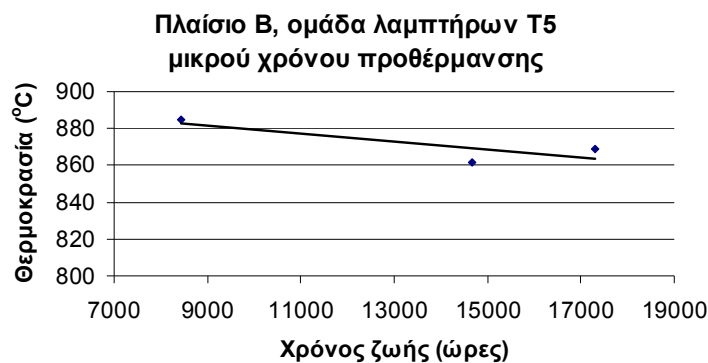
Και στους οκτώ λαμπτήρες της ομάδας το ρεύμα αίγλης ήταν χαμηλό, με τιμές μεταξύ 8 και 19 mA, δηλαδή ευνοϊκές για μεγάλη διάρκεια ζωής. Το ρεύμα λειτουργίας υπερέβαινε το συνιστώμενο των 165 mA κατά πολύ λίγο με τιμές από 166 έως 170 mA. Οι δύο λαμπτήρες με το μεγαλύτερο ρεύμα (170 mA) καταστράφηκαν και μάλιστα ήταν οι πρώτοι. Αυτό είναι ενδεικτικό ότι μεγαλύτερο ρεύμα λειτουργίας από το συνιστώμενο προκαλεί μεγαλύτερες βλάβες στο λαμπτήρα. Λόγω των καλών χαρακτηριστικών των λαμπτήρων δεν προκύπτει κάποια ιδιαίτερα καλή συσχέτιση κάποιου από αυτά και του χρόνου ζωής, εκτός από του

ρεύματος λειτουργίας όπου φαίνεται ότι οι λαμπτήρες που λειτουργούν κοντά στην τιμή του κατασκευαστή έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής.

Πλαίσιο Β, ομάδα σωληνωτών λαμπτήρων με μικρό χρόνο προθέρμανσης

Στην ομάδα αυτή από τους αρχικά τέσσερις λαμπτήρες που τέθηκαν σε λειτουργία τα αποτελέσματα αφορούν μόνο τους τρεις από αυτούς αφού στον τέταρτο λαμπτήρα καταστράφηκαν δύο ballast και δεν θα ληφθεί υπόψη στη μελέτη μας. Ο μέσος όρος ζωής των λαμπτήρων της ομάδας ήταν περί το 56% της ονομαστικής. Το ότι ο κύκλος λειτουργίας ήταν πιο γρήγορος από τον καθιερωμένο δεν δικαιολογεί τόσο μικρό χρόνο ζωής. Οι συνθήκες έναυσης και λειτουργίας ήταν αρκετά καλές. Η θερμοκρασία ηλεκτροδίου ήταν μεταξύ 862 και 885 °C, το ρεύμα αίγλης μεταξύ 7 και 14 mA και το ρεύμα λειτουργίας λίγο χαμηλότερο από το συνιστώμενο των 170 mA (164, 169 και 169 mA). Και ο παράγων κορυφής ρεύματος ήταν χαμηλός (1,36 και 1,37).

Παρά το μικρό πλήθος του δείγματος της ομάδας δίνεται ενδεικτικά το διάγραμμα για τη σχέση της θερμοκρασίας ηλεκτροδίου (σχήμα 5.9) με τη ζωή των τριών λαμπτήρων. Είναι εμφανής η επίδραση σύμφωνα με τις παρατηρήσεις που έγιναν και στις προηγούμενες ομάδες: οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες επιδρούν αρνητικά στη ζωή.



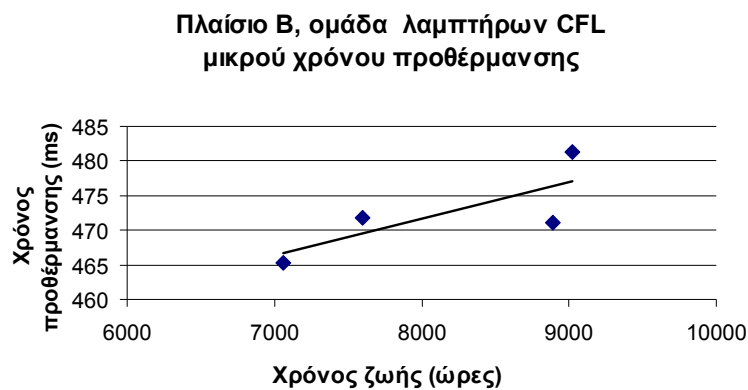
Σχήμα 5.9. Επίδραση της θερμοκρασίας στη ζωή του λαμπτήρα.

Πλαίσιο Β, ομάδα συμπαγών λαμπτήρων με μικρό χρόνο προθέρμανσης

Οι τέσσερις συμπαγείς λαμπτήρες της ομάδας αυτής επέδειξαν μία ομοιομορφία στην επίτευξη της διάρκειας ζωής τους. Με μέσο όρο ζωής της ομάδας τις 8 144 ώρες η διακύμανση ήταν από 7 059 έως 9 021 ώρες. Βέβαια σε σύγκριση με τις 13 000 ώρες του κατασκευαστή, ακόμα και σε ένα σχετικά σύντομο κύκλο λειτουργίας, ο χρόνος αυτός είναι μικρός. Όπως ειπώθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου ο χρόνος προθέρμανσης ήταν μικρότερος από τα 500 ms και αυτός είναι ο μόνος λόγος που οι λαμπτήρες του τύπου αυτού δεν επιτυγχάνουν την ονομαστική διάρκεια ζωής τους, αφού τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους είναι αρκετά καλά. Στο σχήμα 5.10 φαίνεται η δυσμενής επίδραση του μικρού χρόνου στη ζωή του λαμπτήρα.

Το ρεύμα αίγλης σε όλους τους λαμπτήρες ήταν ελάχιστο (4 ή 5 ms) και το ρεύμα λειτουργίας πολύ κοντά στην συνιστώμενη τιμή των 210 mA. Στους τρεις λαμπτήρες ήταν 206 mA και στον τέταρτο 212 mA. Παρατηρήθηκε ότι οι λαμπτήρες με τι μικρή τιμή ρεύματος λειτουργίας επέτυχαν καλύτερη ζωή από τον λαμπτήρα με την μεγαλύτερη τιμή, γεγονός που συμφωνεί με το συμπέρασμα που διατυπώθηκε και νωρίτερα στο κείμενο, ότι δηλαδή μικρότερο ρεύμα από το συνιστώμενο αυξάνει τη ζωή του λαμπτήρα. Ο παράγων κορυφής ρεύματος ήταν σχετικά χαμηλός και παρ' ότι δεν υπήρχε μεγάλη διακύμανση στις τιμές, οι δύο λαμπτήρες με μικρότερη τιμή επέτυχαν καλύτερη διάρκεια ζωής.

Η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου είχε αρκετά υψηλές τιμές και στους τέσσερις λαμπτήρες (μεταξύ 818 και 925 °C). Οι λαμπτήρες με τις ακραίες τιμές επέτυχαν, τη μικρότερη ζωή που σημαίνει ότι, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των άλλων ομάδων, συνάγεται το συμπέρασμα ότι θερμοκρασίες κοντά στους 850 °C επιδρούν θετικά στη ζωή των λαμπτήρων.

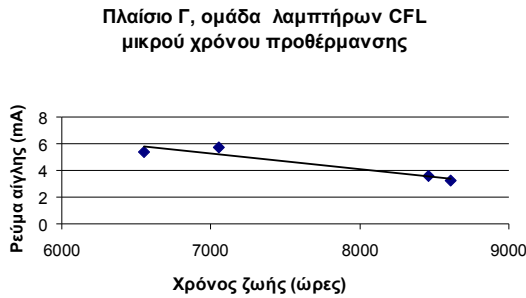


Σχήμα 5.10. Επίδραση του χρόνου προθέρμανσης στη ζωή του λαμπτήρα.

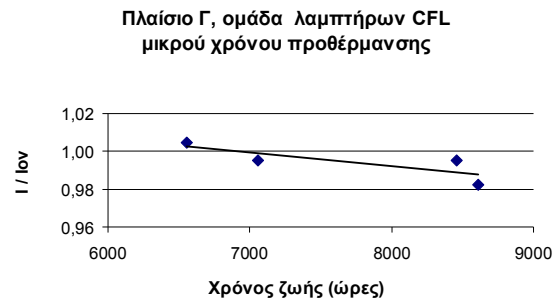
Πλαίσιο Γ, ομάδα συμπαγών λαμπτήρων με μικρό χρόνο προθέρμανσης

Ο χρόνος ζωής των λαμπτήρων της ομάδας αυτής ήταν αρκετά καλός (7670 ώρες) αν ληφθεί υπόψη η ταχύτητα του κύκλου λειτουργίας. Επέτυχαν σχεδόν το 80% της ζωής του ίδιου τύπου λαμπτήρων με τον καθιερωμένο Ευρωπαϊκό κύκλο των τριών ωρών. Όπως σε όλους τους συμπαγείς λαμπτήρες του πειράματος, το ρεύμα αίγλης ήταν ιδιαίτερα χαμηλό, μεταξύ 3 και 6 mA. Στο σχήμα 5.11 φαίνεται η καλή επίδραση των χαμηλών τιμών αυτού στη ζωή των λαμπτήρων. Το ρεύμα λειτουργίας ήταν σχεδόν ίδιο με το συνιστώμενο και με αυξημένη ζωή για τους λαμπτήρες που είχαν μικρότερη τιμή, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.12. Ο παράγων κορυφής ρεύματος ήταν μεταξύ 1,42 και 1,44, χωρίς να διαφαίνεται κάποια ισχυρή συσχέτισή του με τη ζωή του λαμπτήρα.

Όσον αφορά στη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου πριν την έναυση, δεν επέδειξε μεγάλη διακύμανση τιμών (871 έως 897 °C) με αποτέλεσμα να είναι απρόσφορη η οποιαδήποτε παρατήρηση επί της επίδρασης στη ζωή του λαμπτήρα του χαρακτηριστικού αυτού. Οι τιμές αυτές, αν και υψηλές, είναι εντός των αποδεκτών ορίων.



Σχήμα 5.11. Επίδραση του ρεύματος αίγλης στη ζωή του λαμπτήρα.



Σχήμα 5.12. Επίδραση του ρεύματος λειτουργίας στη ζωή του λαμπτήρα.

Συμπεράσματα

Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων και την έκθεση των πινάκων και διαγραμμάτων, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που αφορούν τις διάφορες ομάδες των συστημάτων.

Είναι γεγονός ότι ο χρόνος προθέρμανσης των συστημάτων που ήταν μικρότερος από μισό δευτερόλεπτο, μείωσε τη ζωή των λαμπτήρων κατά περίπου 33% (στον καθιερωμένο κύκλο λειτουργίας) ανεξάρτητα με το αν το σύστημα ήταν σωληνωτού ή συμπαγούς λαμπτήρα. Επομένως παρά τους ισχυρισμούς των κατασκευαστών ότι δεν υπάρχει μείωση, αυτή υπάρχει και είναι μεγάλη. Αυτό σημαίνει ότι ο αγοραστής θα έχει ένα προϊόν μειωμένης διάρκειας, εφόσον επιθυμεί γρήγορη πλήρη έναυση του συστήματος.

Σε γενικές γραμμές η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου πριν την έναυση επηρέασε τη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα και φάνηκε ότι η βέλτιστη θερμοκρασία ήταν στην περιοχή 800 και 850 °C. Υπήρξαν περιπτώσεις που η ζωή των λαμπτήρων αυξάνονταν όσο αυξανόταν η θερμοκρασία, αλλά και άλλες ομάδες στις οποίες η ζωή αυξάνονταν με τη μείωση της θερμοκρασίας προθέρμανσης. Οι τελευταίες περιπτώσεις όμως ήταν όταν η θερμοκρασία ήταν σχετικά υψηλή και έτσι συμπεραίνεται ότι η ιδιαίτερος μεγάλη θερμοκρασία (αν και χαμηλότερη των 1000 °C) δεν είναι πάντα υπέρ της μακροβιότητας του λαμπτήρα.

Το ρεύμα λειτουργίας έδειξε μία ισχυρή συσχέτιση με τη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι εάν το ρεύμα είναι υψηλότερο του συνιστώμενου, τότε η διάρκεια ζωής μειώνεται. Η μείωση είναι μικρότερη όσο αυτό πλησιάζει στην ονομαστική τιμή του. Συγκεκριμένα, τιμή έως και 5% μεγαλύτερη της ονομαστικής δεν επιδρά σημαντικά στη ζωή του λαμπτήρα. Όταν η τιμή του ρεύματος είναι χαμηλότερη του συνιστώμενου τότε η ζωή του λαμπτήρα βελτιώνεται με την περαιτέρω μείωσή του. Με συνδυασμό των δύο περιπτώσεων συνάγεται το συμπέρασμα ότι όσο μικρότερο το ρεύμα τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ζωή του λαμπτήρα. Βέβαια όταν ο λαμπτήρας διαρρέεται από λιγότερο ρεύμα, θα αποδίδει και μικρότερη φωτεινή ροή. Ασφαλώς μείωση του ρεύματος περί το 3 % που υπήρξε στα πειράματα δεν καταλήγει σε σημαντική μείωση της φωτεινής ροής για τον ανθρώπινο οφθαλμό, όμως είναι μειονέκτημα του συστήματος όταν δεν αποδίδεται η ονομαστική τιμή της φωτεινής ροής. Στην πειραματική διαδικασία δεν υπήρξε μέτρηση της

φωτεινής ροής καθόσον αυτό δεν ήταν στους σκοπούς της διατριβής.

Ο παράγων κορυφής ρεύματος είναι γνωστό ότι είναι πολύ σημαντικός για την σωστή λειτουργία του λαμπτήρα και έχει μεγάλη επίδραση στη ζωή του. Στα πειράματα που διεξήχθησαν η τιμή σε όλες τις περιπτώσεις ήταν πολύ χαμηλή και στις περισσότερες ομάδες δεν παρατηρήθηκε μεγάλη διακύμανση τιμών. Όμως στις τρεις περιπτώσεις που υπήρξε συσχέτιση του χαρακτηριστικού αυτού με τη ζωή του λαμπτήρα, ήταν η αναμενόμενη, δηλαδή μειωμένη τιμή του CCF, μικρότερη από 1,37, αύξησε τη ζωή του λαμπτήρα.

Το ρεύμα αίγλης όταν είναι μεγάλο, αφενός επιδρά αρνητικά στη ζωή του λαμπτήρα αφού κατά την έναυση προκαλεί βλάβη στα ηλεκτρόδια και αφετέρου δεν δίνει αξιόπιστη θερμοκρασία ηλεκτροδίου κατά τη μέτρηση. Όλες οι ομάδες είχαν σχετικά μικρό ρεύμα αίγλης και εντός του ορίου των 25 mA, εκτός από τον λαμπτήρα Β3α με τιμή 28,6 mA, που όμως τελικά δεν μείωσε ιδιαίτερα τη διάρκεια της ζωής του. Μία τιμή μικρότερη των 15 mA φαίνεται ότι αυξάνει τη ζωή του λαμπτήρα. Οι συμπαγείς λαμπτήρες αν και είχαν ελάχιστο ρεύμα αίγλης, δεν τους βοήθησε να πετύχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Λόγω της μικρής διακύμανσης τιμών που υπήρξε δεν παρατηρήθηκαν ιδιαίτερες συσχετίσεις με τη ζωή του λαμπτήρα. Στις δύο περιπτώσεις που αυτό παρατηρήθηκε φάνηκε ότι όντως η μικρή τιμή του ρεύματος αίγλης αυξάνει τη ζωή του λαμπτήρα.

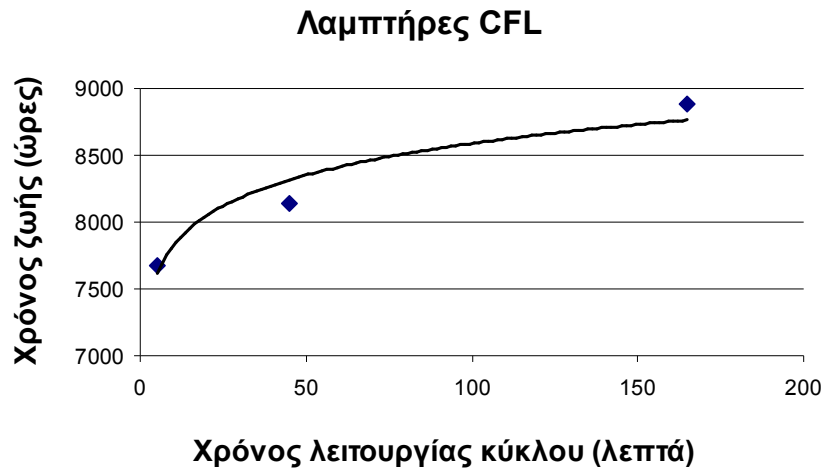
Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας για την επίτευξη της ονομαστικής ζωής του λαμπτήρα που μελετήθηκε στην παρούσα μελέτη είναι ο κύκλος λειτουργίας. Λόγω της υπέρβασης του ορίου εναύσεων που τέθηκε, δεν έχουμε αποτελέσματα για τους κύκλους Δ και Ε ενώ για τον κύκλο Γ υπάρχει μέτρηση μόνο για τους συμπαγείς λαμπτήρες. Για τις ομάδες των συμπαγών η επίτευξη διάρκειας ζωής στους κύκλους Α, Β και Γ ήταν αντιστοίχως 68%, 63% και 59%. Οι τιμές αυτές δείχνουν ότι η ζωή του λαμπτήρα φθίνει όσο συχνότερα γίνεται έναυση.

Στο σχήμα 5.13 φαίνεται διάγραμμα όπου στον κατακόρυφο άξονα είναι η μέση ζωή που πέτυχαν οι λαμπτήρες κάθε ομάδας, ενώ στον οριζόντιο είναι ο χρόνος που λειτουργούσε ο λαμπτήρας μετά από κάθε έναυση. Η καμπύλη συσχέτισης που ακολουθεί τα τρία σημεία του διαγράμματος είναι εκείνη που ταιριάζει καλύτερα και ταυτόχρονα έχει και φυσική σημασία. Έχει συντελεστή προσδιορισμού (R^2) ίσο με 0,9381 και εξίσωση:

$$L = 7132 \cdot t^{0,0404} \quad (5.4)$$

όπου L είναι η αναμενόμενη ζωή του λαμπτήρα και t ο χρόνος λειτουργίας (σε πρώτα λεπτά) σε κάθε έναυση. Δείχνει προφανώς ότι όσο πιο γρήγορος είναι ο κύκλος λειτουργίας, τόσο μικρότερη η ζωή του συμπαγούς λαμπτήρα. Όμως απεικονίζει και τα αποτελέσματα του πειράματος αφού ως χρόνο ζωής δίνει τις 9 568 ώρες (για 24ωρη λειτουργία). Εάν η λειτουργία είναι αδιάκοπη η σχέση (5.4) δίνει χρόνο ζωής περίπου 12 310 ώρες (τότε $L = t$). Οι τιμές αυτές είναι ρεαλιστικές, αφού όπως ειπώθηκε οι λαμπτήρες αυτοί δεν είναι σε θέση να επιτύχουν την ονομαστική διάρκεια ζωής τους. Για t ίσο με τα 20 δευτερόλεπτα (κύκλος

Ε) δίνει ζωή 6 822 ώρες. Η τιμή αυτή πρακτικά δεν ελέγχεται, λόγω του μεγάλου χρόνου αναμονής (περίπου 36 έτη) αλλά και το ballast θα καταστραφεί εξ αιτίας του μεγάλου αριθμού εναύσεων. Όμως ο χρόνος αυτός είναι λογικός αφού το πείραμα απέδειξε ότι η έναυση έχει ελάχιστη επίδραση στη ζωή των λαμπτήρων T5 σε αντίθεση με την επίδραση που έχει στους λαμπτήρες T8 [34, 99, 101]. Παρεμπιπτόντως αναφέρεται ότι στα τρία σημεία του διαγράμματος στο σχήμα 5.13 προσαρμόζεται άριστα πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού αλλά στερείται φυσικής σημασίας και γι' αυτό απορρίπτεται.



Σχήμα 5.13. Επίδραση του κύκλου λειτουργίας στη διάρκεια ζωής των συμπαγών λαμπτήρων.

Ανάλογες εξισώσεις αναφέρθηκε στο τέταρτο κεφάλαιο ότι περιγράφουν και τους λαμπτήρες που λειτούργησαν με ballast άμεσης έναυσης (εξισώσεις 4.1 και 4.2). Όμως οι συντελεστές του χρόνου t ήταν πολύ μικρότεροι και οι εκθέτες μεγαλύτεροι αφού περιγράφουν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά συστημάτων. Μία γενική εξίσωση μπορεί να περιγράψει εν γένει τα συστήματα αυτού του είδους και θα έχει τη μορφή:

$$L = A \cdot t^a \quad (5.5)$$

Η εξίσωση αυτή δεν περιλαμβάνει ως ανεξάρτητες μεταβλητές τις διάφορες παραμέτρους που επιδρούν στη ζωή του λαμπτήρα. Αυτές οι παράμετροι εμπεριέχονται στις σταθερές A και a , χωρίς όμως η τιμή τους να τις προσδιορίζει. Ο συντελεστής A δείχνει αριθμητικά τη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα όταν λειτουργεί σε πολύ σύντομο κύκλο (διάρκεια λειτουργίας ανά έναυση περίπου ένα πρώτο λεπτό). Μεγάλες τιμές του εκθέτη a (πέριξ της μονάδας) δείχνουν ότι ένας γρήγορος κύκλος λειτουργίας επηρεάζει σημαντικά τη ζωή που θα επιτύχει ο λαμπτήρας. Ενώ όσο μικρότερος είναι (πλησίον του μηδενός) τόσο η διακοπτόμενη λειτουργία δεν επηρεάζει τη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα.

Για τις άλλες ομάδες συστημάτων δεν μπορεί να γίνει παρόμοια ανάλυση λόγω της ύπαρξης μόνο δύο στοιχείων δείγματος και οποιοδήποτε συμπέρασμα θα ήταν επισφαλές. Αξίζει όμως

να σημειωθεί η παρατήρηση ότι στα συστήματα με λαμπτήρες Osram και στις δύο περιπτώσεις (με ballast μέτριου και μεγάλου ΧΠ) η ζωή στον ταχύτερο κύκλο ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη από εκείνη του κύκλου Α. Αυτό ασφαλώς είναι τυχαίο και δείχνει ότι σε λαμπτήρες με μεγάλη ονομαστική ζωή ο χρόνος του κύκλου λειτουργίας δεν είναι τόσο σημαντικός όταν δεν είναι ιδιαίτερος μικρός. Για τα συστήματα με μικρό ΧΠ της Philips με λαμπτήρες T5 υπάρχει μια αξιόλογη μείωση στο χρόνο ζωής των συστημάτων του Β κύκλου σε σχέση με εκείνα του Α (56% έναντι 67% ως ποσοστό της ονομαστικής ζωής), αλλά, όπως ειπώθηκε, με δύο μόνο δείγματα δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα, πέρα από την επιβεβαίωση των όσων έχουν ήδη διατυπωθεί.

Είναι πολύ δύσκολο να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα, που να αφορούν όλα τα συστήματα. Ο λόγος είναι ότι κάθε σύστημα είναι ιδιαίτερο και μόνο για εκείνα που περιλαμβάνουν ballast και λαμπτήρα ακριβώς ίδια μπορεί να γίνει συγκριτική μελέτη. Στις προηγούμενες παραγράφους συγκεντρώθηκαν τα αποτελέσματα, ώστε παρ' όλ' αυτά να αποδοθούν συμπεράσματα που να αφορούν το σύνολο των λαμπτήρων φθορισμού.

5.5. Πειραματικά αποτελέσματα με βάση τη μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών έναυσης κατά τη γήρανση των συστημάτων

Στη βιβλιογραφία υπάρχει σχετικά μικρός αριθμός δημοσιευμένων ερευνών (έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης) για τη ζωή των λαμπτήρων φθορισμού. Σε ορισμένες από αυτές τις έρευνες, έγιναν μετρήσεις χαρακτηριστικών των συστημάτων ώστε να προσδιοριστεί με ποιο τρόπο αυτά επιδρούν στη ζωή τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μέτρηση των χαρακτηριστικών έγινε άπαξ, πριν αρχίσει η γήρανση των συστημάτων. Θεωρήθηκε δηλαδή ως δεδομένο ότι δεν υπάρχει μεταβολή σε αυτά. Στην παρούσα έρευνα αυτό ήταν ένα από τα ζητούμενα: η επίδραση δηλαδή της γήρανσης των συστημάτων στις τιμές των χαρακτηριστικών τα οποία επιδρούν στη ζωή των λαμπτήρων. Επομένως, τυχούσα μεταβολή τους θα μεταβάλλει τη διάρκεια ζωής του αντίστοιχου λαμπτήρα.

Στις μετρήσεις των χαρακτηριστικών, που γίνονταν κατά τη γήρανση των συστημάτων, έγινε επεξεργασία για τον έλεγχο πιθανής μεταβολής τους. Κατά τις μετρήσεις ενός μεγέθους ενός συστήματος, είναι φυσικό και αναπόφευκτο να υπάρχουν διαφοροποιήσεις. Αυτές οφείλονται στη διαφορετικότητα των συνθηκών των μετρήσεων. Οι συνθήκες αυτές έχουν σχέση με τις περιβαλλοντικές μικρές μεταβολές αλλά και με τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά όργανα. Σαφώς κατά την πειραματική διαδικασία γινόταν προσπάθεια ώστε οι συνθήκες να είναι σταθερές, αλλά οι τιμές των μετρήσεων (του ίδιου μεγέθους) έχουν πάντα μικρές διαφορές. Η θερμοκρασία του εργαστηρίου ήταν στα αποδεκτά πειραματικά όρια: 23 ± 3 °C. Οι κλίμακες των οργάνων ήταν σε όλες τις μετρήσεις ίδιες, όπως απαιτείται σε διαδοχικές μετρήσεις, όπου πρόκειται να υπάρξει σύγκριση αποτελεσμάτων. Μάλιστα, η εκάστοτε

κλίμακα του οργάνου ήταν εκείνη που έδινε την περισσότερο σαφή ένδειξη, και εφαρμοζόταν σε όλη την ομάδα των συστημάτων που γινόταν η μέτρηση.

Έχοντας πληθώρα μετρήσεων για κάθε ένα σύστημα, αρχικά έγινε ένας έλεγχος των μετρήσεων. Ορισμένα από τα μετρηθέντα χαρακτηριστικά βρέθηκε ότι δεν παρουσιάζουν κάποια αξιόλογη μεταβολή συν τω χρόνω και ως εκ τούτου δεν έγινε περαιτέρω επεξεργασία για τυχούσα συσχέτισή τους με τη γήρανση των συστημάτων. Τα σχετικώς αμετάβλητα μεγέθη ήσαν ο χρόνος προθέρμανσης, το ρεύμα αίγλης και τα χαρακτηριστικά που μετρούνταν κατά τη λειτουργία των συστημάτων. Έτσι κρίθηκε σκόπιμο οι παράγοντες αυτοί να αξιολογηθούν μόνο ως προς την επίδρασή τους στην διάρκεια ζωής του συστήματος, πράγμα που έγινε στην παράγραφο 5.4.

Τα χαρακτηριστικά εκείνα που παρουσιάζουν αξιόλογη και κατά το μάλλον ή ήττον συστηματική μεταβολή, ήταν η τάση και το ρεύμα κατά την έναυση του λαμπτήρα και οι ηλεκτρικές αντιστάσεις των ηλεκτροδίων των λαμπτήρων. Ακολούθως παρουσιάζεται η καταγραφή αυτών των μεταβολών που κρίθηκαν ως αξιόλογες και η στατιστική ανάλυση εκείνη που θα οδηγήσει στα ορθά στατιστικά συμπεράσματα. Δείγμα της ανάλυσης αποτελεί το σύνολο του πληθυσμού των συστημάτων που επιλέχθηκαν για τα πειράματα. Ως βασική συνεχής μεταβλητή θεωρείται ο χρόνος λειτουργίας του λαμπτήρα ή σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου κρίνεται σκόπιμο, ο αριθμός των κύκλων λειτουργίας. Διακριτές μεταβλητές είναι τα μεγέθη που μετρήθηκαν και εκείνα που υπολογίσθηκαν με βάση τα μετρηθέντα, δηλαδή η θερμή αντίσταση, ο λόγος προθέρμανσης και η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου.

5.5.1. Διερεύνηση της μεταβολής των χαρακτηριστικών σε όμοια συστήματα, ανεξαρτήτως κύκλου λειτουργίας

Σε ορισμένα συστήματα έγιναν περισσότερες από πενήντα διαδοχικές μετρήσεις κατά τη γήρανση. Η καταχώρηση τόσο μεγάλου αριθμού αποτελεσμάτων σε διαγράμματα δεν δίνει ομαλοποιημένες καμπύλες. Για την ομαλοποίηση (smoothing) της θέσης των σημείων των διαγραμμάτων, αλλά και την εξομάλυνση των σφαλμάτων των μετρήσεων, στα διαγράμματα τοποθετήθηκαν οι μέσοι όροι των τιμών ανά πέντε ή και λιγότερων διαδοχικών μετρήσεων. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα η διερεύνηση να γίνει σε λίγα σημεία των καμπυλών, αλλά ομαλότερα κατανοημένα. Η χρήση της μεθόδου αυτής και όχι της συνηθέστερης των κινητών μέσων όρων, η οποία χρησιμοποιείται στη στατιστική ανάλυση, έγινε ακριβώς για να υπάρχουν κατά την επεξεργασία λιγότερες τιμές. Έγιναν δοκιμές με χρήση των κινητών μέσων αλλά δεν έδωσαν πρόσφορα αποτελέσματα, αφού δεν μειώνουν τον αριθμό των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία.

Τα χαρακτηριστικά που σημείωσαν σε πολλές περιπτώσεις αξιοπρόσεκτες μεταβολές και ετέθησαν σε επεξεργασία ήταν τρία: η τάση και το ρεύμα του ηλεκτροδίου τη στιγμή που αρχίζει η εκκένωση και η αντίστοιχη ηλεκτρική του αντίσταση. Αυτά όμως τα

χαρακτηριστικά επηρεάζουν άμεσα το λόγο προθέρμανσης και τη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου στην έναυση. Για καλύτερη εποπτεία των μεταβολών των χαρακτηριστικών που προαναφέρθηκαν, στους πίνακες που ακολουθούν έχει δοθεί ο λόγος του μέσου όρου των τελευταίων μετρήσεων προς το μέσο όρο των πρώτων μετρήσεων. Επομένως, ο αριθμός δείχνει τη μεταβολή της μετρούμενης παραμέτρου, ως ποσοστό επί της αρχικής τιμής της.

Επειδή η τιμή του χαρακτηριστικού μπορεί να μην προέρχεται από μία ομαλή μεταβολή του με το χρόνο, σε άλλους πίνακες έχουν δοθεί οι αντίστοιχοι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης. Με αυτό τον τρόπο ελέγχεται η διασπορά των μετρήσεων. Συντελεστές που πλησιάζουν τη μονάδα δείχνουν μία καλή γραμμική συσχέτιση, άρα μία συστηματική αύξηση ή μείωση της ελεγχόμενης μεταβλητής. Επίσης, σε ένα ακόμα πίνακα έχουν δοθεί συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα, ώστε να γίνει φανερός ο διαχωρισμός στη μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των λαμπτήρων οι οποίοι υπερέβησαν και εκείνων που δεν ξεπέρασαν τα όρια που εξ αρχής τέθηκαν.

Η παράθεση των αποτελεσμάτων έγινε αρχικά σε τέσσερις ομάδες, όπου τα συστήματα ήταν ακριβώς ίδια (των ίδιων κατασκευαστών), ανεξάρτητα από τον κύκλο λειτουργίας τους. Επομένως κάθε ομάδα περιλαμβάνει λαμπτήρες και ballast από τις ίδιες εταιρίες κατασκευής και είναι συστήματα και από τους πέντε κύκλους λειτουργίας. Έτσι η σύγκριση γίνεται μεταξύ ακριβώς ίδιων συστημάτων. Στη συνέχεια έγινε ανάλυση των αποτελεσμάτων και σε ομάδες ίδιων κύκλων λειτουργίας. Στους πίνακες που ακολουθούν δίνεται η διάρκεια ζωής που επέτυχαν οι λαμπτήρες, με τη διευκρίνιση ότι αν ο λαμπτήρας υπερέβη το όριο τότε καταγράφεται η τιμή του ορίου. Επομένως οι λαμπτήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: α) στους εξαντλημένους πριν φθάσουν το όριο που τέθηκε και β) σε εκείνους που το υπερέβησαν.

Συστήματα με μέτριο χρόνο προθέρμανσης

Στα συστήματα αυτά όλοι οι λαμπτήρες των ομάδων Α και Β έχουν εξαντληθεί, ενώ από τις υπόλοιπες ομάδες εξαντλήθηκαν μόνο οι τρεις λαμπτήρες από το σύνολο των 24. Οι υπόλοιποι, των ομάδων Γ, Δ και Ε, ξεπέρασαν τα όρια κύκλων λειτουργίας που ετέθησαν. Επειδή η καταστροφή των τριών λαμπτήρων που προαναφέρθηκαν, έγινε πολύ νωρίς στην πορεία της εξεταζόμενης γήρανσης, είναι σίγουρο ότι οφείλεται σε ελάττωμα του ballast (στην περίπτωση της Δ ομάδας όπου καταστράφηκαν και οι δύο λαμπτήρες του ίδιου ballast) ή του λαμπτήρα (στο λαμπτήρα της ομάδας Ε, αφού ο άλλος λαμπτήρας που οδηγείται από το ίδιο ballast έχει υπερβεί το όριο λειτουργίας).

Στον πίνακα 5.11 φαίνεται κατ' αρχάς η επιτευχθείσα ζωή σε ώρες κάθε λαμπτήρα. Για τους λαμπτήρες που ξεπέρασαν τα όρια που έχουν τεθεί, έχει δοθεί ως χρόνος ζωής τους το αντίστοιχο όριο. Κατόπιν παρατίθενται τα χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν και εκείνα που υπολογίσθηκαν, ως ποσοστό της τελικής (ή πιο πρόσφατης τιμής για τους λαμπτήρες που πέρασαν τα όρια) προς την αρχική τιμή. Στον πίνακα 5.12 δίνονται οι αντίστοιχοι

συντελεστές γραμμικής συσχέτισης για τις διαδοχικές μετρηθείσες τιμές. Οι λαμπτήρες που έχουν εξαντληθεί ξεχωρίζουν από τους υπολοίπους, έχοντας τον αριθμό των ωρών λειτουργίας τους με έντονη γραφή. Στους πίνακες το σύμβολο R_{c1} αντιστοιχεί στην αντίσταση του λαμπτήρα στην οποία έγιναν οι μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος που παρατίθενται στους πίνακες. Αντιστοίχως R_h είναι η θερμή αντίσταση του ίδιου ηλεκτροδίου ενώ R_{c2} είναι η αντίσταση του έτερου ηλεκτροδίου του λαμπτήρα.

Από τους πίνακες 5.11 και 5.12 εξάγονται ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα. Φαίνεται ότι υπάρχει μία διαφοροποίηση σε ορισμένες παραμέτρους του πίνακα 5.11, εξαρτώμενη από το εάν έχει εξαντληθεί ή όχι ο λαμπτήρας. Για πληρέστερη κατανόηση αυτού του συμπεράσματος έχει συνταχθεί ο πίνακας 5.13. Σε αυτόν έχει δοθεί ο αριθμός των λαμπτήρων που επέτυχαν λόγο του μέσου όρου των τιμών των παραμέτρων μεγαλύτερο από τη μονάδα. Επίσης έχει γίνει διαχωρισμός μεταξύ των λαμπτήρων που πέρασαν τα όρια που τέθηκαν και των υπολοίπων. Στις δύο πρώτες σειρές του πίνακα δίνεται ο αριθμός των λαμπτήρων που επέτυχαν λόγο μεγαλύτερο της μονάδας. Στις δύο επόμενες σειρές δίνεται ο μέσος όρος του ποσοστού της αύξησης ή της μείωσης του χαρακτηριστικού. Στη δεύτερη στήλη και σε παρένθεση δίνεται ο αριθμός των λαμπτήρων που εξαντλήθηκαν ή υπερέβησαν το όριο που τέθηκε.

Φαίνεται ότι στην μεγάλη πλειοψηφία των συστημάτων η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου αυξήθηκε, ιδιαίτερα στους λαμπτήρες που έχουν εξαντληθεί πριν φθάσουν στο όριο των εναύσεων που τέθηκε. Επειδή τα τρία χαρακτηριστικά: θερμοκρασία ηλεκτροδίου, λόγος προθέρμανσης και θερμή αντίσταση συνδέονται στενά, η μεταβολή του ενός είναι πάντα προς την ίδια κατεύθυνση μεταβολής των άλλων. Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, ουσιαστικώς εξαρτώνται από τη θερμή αντίσταση του ηλεκτροδίου και κατ' επέκταση από την τάση και το ρεύμα του ηλεκτροδίου πριν την εκκένωση. Από τον πίνακα φαίνεται ότι ενώ η τάση λίγο ως πολύ μένει σταθερή η τιμή του ρεύματος υφίσταται μία μείωση με την πάροδο του χρόνου. Η μείωση μάλιστα είναι υπερδιπλάσια όταν οι λαμπτήρες είναι εξαντλημένοι σε σχέση με τη μείωση στους λαμπτήρες που πέρασαν τα όρια χωρίς να καταστραφούν. Επομένως συμπεραίνουμε ότι οι λαμπτήρες καταστρέφονται όταν αρχίσει να μειώνεται αρκετά το ρεύμα κατά την προθέρμανση των ηλεκτροδίων.

Πίνακας 5.11. Ballast μέτριου ΧΠ-λαμπτήρας T5. Λόγος του μέσου όρου των τελευταίων μετρήσεων προς των αντίστοιχο λόγο των πρώτων μετρήσεων των χαρακτηριστικών.

Λαμπτήρας	Χρόνος ζώης (ώρες)	Τάση ηλεκτρ.	Ρεύμα ηλεκτρ.	R _{c1}	R _{c2}	R _h	Λόγος προθ. (R _h /R _c)	Θερμοκρ. Ηλεκτρ.
A1α	27463	0,991	0,963	1,002	0,999	1,029	1,027	1,029
A1β	21542	1,002	0,942	1,008	1,001	1,063	1,054	1,059
A2α	27908	0,967	0,970	1,015	0,982	0,996	0,982	0,980
A2β	18231	0,972	0,940	1,005	0,988	1,036	1,032	1,036
A3α	21631	0,984	0,936	1,005	0,998	1,051	1,046	1,051
A3β	5426	1,011	0,940	0,996	1,004	1,077	1,081	1,092
A4α	24995	0,997	0,900	1,003	0,985	1,109	1,106	1,117
A4β	24929	1,021	0,905	1,001	0,982	1,128	1,127	1,143
B1α	24121	0,988	0,879	1,015	0,994	1,124	1,108	1,118
B1β	22492	1,007	0,931	1,003	0,994	1,081	1,078	1,086
B2α	24085	0,987	0,889	1,016	0,998	1,112	1,094	1,105
B2β	23599	1,015	0,960	1,010	1,079	1,057	1,046	1,051
B3α	23349	1,020	0,884	1,017	1,007	1,154	1,134	1,148
B3β	18247	0,999	0,940	1,011	0,998	1,062	1,051	1,057
B4α	16365	0,979	0,892	1,004	0,995	1,097	1,093	1,102
B4β	21533	1,018	0,913	1,003	0,999	1,116	1,112	1,123
Γ1α	10417	0,996	0,964	1,004	0,999	1,033	1,029	1,033
Γ1β	10417	1,005	0,980	1,000	1,002	1,025	1,025	1,028
Γ2α	10417	0,997	0,930	1,001	1,004	1,071	1,070	1,079
Γ2β	10417	1,008	0,966	0,997	1,000	1,044	1,047	1,052
Γ3α	10417	1,005	0,975	0,995	0,990	1,030	1,034	1,039
Γ3β	10417	0,998	0,990	0,999	1,000	1,007	1,008	1,009
Γ4α	10417	1,003	0,956	0,999	0,995	1,049	1,050	1,056
Γ4β	10417	1,010	0,947	0,996	1,009	1,066	1,071	1,079
Δ1α	2500	0,988	0,986	1,002	0,990	1,000	0,998	0,998
Δ1β	2500	1,007	0,964	1,008	0,997	1,044	1,035	1,038
Δ2α	2500	0,989	0,942	1,039	0,989	1,048	1,006	1,007
Δ2β	2500	1,004	0,990	1,009	1,006	1,014	1,005	1,005
Δ3α	270	0,981	0,979	1,030	0,988	1,003	0,973	0,971
Δ3β	381	1,112	1,086	1,002	1,016	1,024	1,022	1,024
Δ4α	2500	0,973	0,968	0,995	0,997	1,005	1,011	1,012
Δ4β	2500	1,005	0,978	1,007	0,996	1,027	1,020	1,022
E1α	833	0,949	1,015	1,001	0,981	0,935	0,934	0,927
E1β	149	0,979	0,973	1,038	1,000	1,006	0,969	0,967
E2α	833	0,961	0,973	0,997	0,999	0,988	0,991	0,990
E2β	833	1,000	1,000	0,989	0,983	1,000	1,011	1,012
E3α	833	0,941	0,971	0,994	0,992	0,968	0,973	0,971
E3β	833	0,987	0,993	0,990	0,994	0,993	1,003	1,003
E4α	833	0,980	0,980	0,983	0,992	1,000	1,016	1,018
E4β	833	0,984	0,982	0,997	0,986	1,003	1,005	1,006

Πίνακας 5.12. Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης στα συστήματα με ballast μέτριου ΧΠ και λαμπτήρα T5.

Λαμπτήρας	Χρόνος ζώης (ώρες)	Τάση ηλεκτρ.	Ρεύμα ηλεκτρ.	R _{c1}	R _{c2}	R _h	Λόγος προθ. (R _h /R _c)	Θερμοκρ. Ηλεκτρ.
A1α	27463	-0,737	-0,735	0,122	-0,387	0,637	0,714	0,714
A1β	21542	0,297	-0,836	0,389	-0,319	0,923	0,960	0,960
A2α	27908	-0,902	-0,491	0,663	-0,775	-0,269	-0,519	-0,518
A2β	18231	-0,498	-0,924	0,608	-0,955	0,944	0,898	0,898
A3α	21631	-0,346	-0,687	0,606	-0,415	0,803	0,785	0,784
A3β	5426	0,886	-0,924	-0,724	0,989	0,968	0,959	0,959
A4α	24995	-0,342	-0,934	0,300	-0,908	0,921	0,918	0,919
A4β	24929	0,836	-0,975	0,486	-0,960	0,985	0,984	0,984
B1α	24121	-0,162	-0,924	0,951	-0,878	0,929	0,909	0,910
B1β	22492	0,531	-0,892	0,877	-0,524	0,954	0,942	0,943
B2α	24085	-0,666	-0,960	0,900	-0,930	0,955	0,912	0,913
B2β	23599	0,687	-0,883	0,972	0,677	0,946	0,897	0,898
B3α	23349	0,882	-0,983	0,985	0,776	0,977	0,970	0,970
B3β	18247	0,275	-0,943	0,968	-0,647	0,935	0,903	0,903
B4α	16365	-0,735	-0,976	0,565	-0,267	0,939	0,928	0,928
B4β	21533	0,796	-0,955	0,414	-0,084	0,963	0,968	0,968
Γ1α	10417	-0,343	-0,848	0,354	0,350	0,908	0,894	0,894
Γ1β	10417	0,586	-0,718	0,364	0,394	0,846	0,787	0,787
Γ2α	10417	0,417	-0,882	0,304	0,490	0,963	0,932	0,932
Γ2β	10417	0,436	-0,860	0,015	0,163	0,861	0,834	0,834
Γ3α	10417	0,452	-0,723	-0,221	-0,326	0,837	0,854	0,854
Γ3β	10417	0,477	-0,068	-0,022	0,111	0,407	0,375	0,375
Γ4α	10417	0,641	-0,878	0,078	-0,484	0,876	0,893	0,892
Γ4β	10417	0,788	-0,825	-0,147	0,766	0,927	0,916	0,915
Δ1α	2500	0,036	-0,026	0,025	-0,300	0,028	0,026	0,028
Δ1β	2500	0,273	-0,589	0,225	-0,276	0,773	0,790	0,790
Δ2α	2500	-0,241	-0,613	0,355	-0,341	0,654	0,426	0,428
Δ2β	2500	0,437	-0,234	0,398	0,247	0,475	0,369	0,368
Δ3α	270	-0,490	-0,251	0,857	-0,743	-0,113	-0,560	-0,559
Δ3β	381	0,831	0,893	0,441	0,782	0,636	0,627	0,630
Δ4α	2500	-0,283	-0,376	-0,510	-0,242	0,254	0,451	0,453
Δ4β	2500	0,267	-0,477	0,559	-0,249	0,714	0,571	0,571
E1α	833	-0,430	0,628	0,129	-0,780	-0,744	-0,722	-0,723
E1β	149	-0,650	-0,859	0,852	0,160	0,525	-0,496	-0,497
E2α	833	-0,249	0,033	-0,111	-0,013	-0,414	-0,332	-0,330
E2β	833	-0,184	0,001	-0,185	-0,532	-0,122	-0,010	-0,010
E3α	833	-0,269	-0,089	-0,074	-0,413	-0,424	-0,397	-0,395
E3β	833	0,020	0,179	-0,601	-0,232	-0,231	0,045	0,046
E4α	833	-0,571	-0,048	-0,285	-0,432	-0,362	-0,140	-0,139
E4β	833	-0,387	-0,587	-0,062	-0,328	0,189	0,203	0,204

Πίνακας 5.13. Μεταβολή χαρακτηριστικών στα συστήματα με ballast μέτρου ΧΠ και λαμπτήρα T5. Σύνολο λαμπτήρων: 40.

	Λαμπτήρες	Τάση ηλεκτρ.	Ρεύμα ηλεκτρ.	R_{c1}	R_{c2}	R_h	Λόγος προθ. (R_h/R_c)	Θερμ. Ηλεκτρ.
Αριθμός λαμπτήρων που παρουσίασαν αύξηση τιμών των χαρακτηριστικών	Κάτω του ορίου (19)	8	1	18	5	18	16	16
	Πέραν του ορίου (21)	9	2	9	5	15	17	17
Ποσοστό αύξησης των τιμών των χαρακτηριστικών (%)	Κάτω του ορίου	0,17	-6,21	0,98	0,04	6,98	5,97	6,62
	Πέραν του ορίου	-1,01	-2,62	0,01	-0,48	1,66	1,64	1,84
Αριθμός λαμπτήρων με συντελεστή συσχέτισης >0,7	Κάτω του ορίου (19)	5	15*	8	3	14	15	15
	Πέραν του ορίου (21)	1	7*	0	1	9	8	8

* Επειδή υπάρχει μείωση στο ρεύμα, ο συντελεστής συσχέτισης που ελήφθη υπόψη ήταν <-0,7.

Η τιμή του ρεύματος προθέρμανσης των ηλεκτροδίων εξαρτάται από δύο παράγοντες: από την επιβαλλόμενη τάση του ballast και από την τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης του ηλεκτροδίου. Βρέθηκε όμως ότι η τάση ουσιαστικά δεν μεταβάλλεται, άρα η μείωση του ρεύματος οφείλεται στη μεταβολή της αντίστασης. Η αντίσταση αλλάζει είτε λόγω μεταβολής της σύστασης του αερίου (δηλαδή της πίεσης) εντός του λαμπτήρα, είτε λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου λόγω αλλαγής της μορφής του (φθορά). Το αέριο στο λαμπτήρα μεταβάλλεται, αφού μέρος του περιεχομένου υδραργύρου καταστρέφεται με την πάροδο του χρόνου, μη λαμβάνοντας μέρος στη διαδικασία της εκκένωσης. Επίσης είναι πιθανόν να εισέρχεται ελάχιστη ποσότητα αέρα εξ αιτίας μη αεροστεγούς σφραγίσματος των άκρων του λαμπτήρα. Σε μία τέτοια περίπτωση θα επέλθει αύξηση της πίεσης των αερίων του σωλήνα και σύμφωνα με μελέτη μας που περιγράφεται αναλυτικά στο έκτο κεφάλαιο, το αποτέλεσμα θα είναι η μείωση της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου. Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι σε περίπτωση εισόδου του αέρα στο σωλήνα, το αποτέλεσμα θα είναι η οξειδωση του νήματος με συνέπεια την αύξηση της αντίστασής του (επομένως λιγότερο ρεύμα και κατά συνέπεια μικρότερη θερμοκρασία). Αφού όμως παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας, η μείωση του ρεύματος θα επέρχεται λόγω αλλαγής της μορφής του ηλεκτροδίου ή μείωσης της πίεσης του αερίου.

Από το σκεπτικό που προηγήθηκε γίνεται σαφές ότι η αύξηση της θερμοκρασίας R_h του ηλεκτροδίου είναι συνέπεια της αύξησης της ηλεκτρικής αντίστασης του ηλεκτροδίου, είτε αυτή προέρχεται από τη φθορά του ηλεκτροδίου είτε από μείωση της πίεσης των αερίων του σωλήνα. Σύμφωνα με τον πίνακα 5.13 υπάρχει τέτοια αύξηση σχεδόν σε όλα τα ηλεκτρόδια. Η αύξηση αυτή μπορεί να ερμηνευτεί ως εξής: Λόγω της γήρανσης του λαμπτήρα υπάρχει εκσφενδόνιση και εξάτμιση της επικάλυψης των ηλεκτροδίων. Επομένως, συν τω χρόνω, η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον των νημάτων μειώνεται, με συνέπεια

την αύξηση της θερμοκρασίας τους. Άρα, κατά τη μετάβαση από την αίγλη στο τόξο, τα ηλεκτρόδια λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασίας θα εμφανίζουν μεγαλύτερη αντίσταση και μικρότερη τιμή στο ρεύμα που τα διαρρέει.

Για να εξεταστεί αν η αύξηση ή η μείωση των χαρακτηριστικών που παρατηρήθηκε ήταν τυχαία ή συστηματική, ελέγχεται ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης. Ο συντελεστής αναφέρεται στην ευθεία γραμμή παλινδρόμησης των μέσων όρων των τιμών των χαρακτηριστικών, όπως αυτά έχουν καταχωρηθεί σύμφωνα με τα προαναφερθέντα. Από τον πίνακα 5.12 έχουν μετρηθεί οι συντελεστές που είναι μεγαλύτεροι από 0,7 (που σημαίνει σχετικώς ισχυρή συσχέτιση) και το πλήθος τους έχει μεταφερθεί στις δύο τελευταίες σειρές του πίνακα 5.13. Φαίνεται ότι οι περισσότεροι λαμπτήρες που δεν πέρασαν το όριο (εξαντλημένοι) έχουν συντελεστή μεγαλύτερο του 0,7 και ως εκ τούτου συμπεραίνεται ότι η μεταβολή των χαρακτηριστικών δεν έγινε τυχαία, αλλά υπόκειται σε συστηματική αλλαγή. Επιπροσθέτως, επειδή δεν παρατηρείται αντίστοιχου μεγέθους μεταβολή των χαρακτηριστικών στους περισσότερους από τους λαμπτήρες που υπερέβησαν τα τεθέντα όρια για τις εναύσεις, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η διάρκεια ζωής τους θα υπερβεί κατά πολύ τις τιμές των ορίων.

Συστήματα με μεγάλο χρόνο προθέρμανσης

Σε αυτά τα συστήματα όλοι οι λαμπτήρες της ομάδας Α και της Β καταστράφηκαν, όμως από τις υπόλοιπες ομάδες υπάρχουν πολλοί λαμπτήρες που έχουν υπερβεί το όριο του αριθμού των κύκλων. Συγκεκριμένα, από την ομάδα Γ καταστράφηκαν οι δύο, από την Δ οι πέντε και από την Ε ένας. Από τους λαμπτήρες των ομάδων Γ, Δ και Ε που εξαντλήθηκαν, όλοι πλην ενός, καταστράφηκαν πολύ σύντομα και οι λόγοι ασφαλώς θα είναι οι ίδιοι που αναφέρθηκαν και στα συστήματα της προηγούμενης παραγράφου. Ακολουθούν οι πίνακες με τα αποτελέσματα κατά τον τρόπο που εκτέθηκαν και στα συστήματα των προηγούμενων ομάδων.

Από τους πίνακες 5.14 και 5.15 φαίνεται ότι και σε αυτές τις ομάδες επέρχονται μεταβολές στα χαρακτηριστικά των συστημάτων όσο αυτά γηράσκουν. Γι' αυτό και οι μεταβολές είναι πιο έντονες στα συστήματα που έχουν εξαντληθεί πριν φθάσουν το όριο που τέθηκε.

Από τις τιμές που παρατίθενται στους πίνακες 5.14 και 5.15 και τη σχετική επεξεργασία, κατασκευάζεται ο πίνακας 5.16, ο οποίος είναι αντίστοιχος του 5.13. Άξιο παρατήρησης είναι ότι και σε αυτά τα συστήματα οι λαμπτήρες που δεν πέρασαν τα όρια των κύκλων ήταν 24 και οι λαμπτήρες που τα πέρασαν ήταν 16. Εδώ έχουν εξαντληθεί οι περισσότεροι λαμπτήρες της ομάδας Δ πριν το όριο των εναύσεων.

Πίνακας 5.14. Ballast μεγάλου ΧΠ-λαμπτήρας T5. Λόγος του μέσου όρου των τελευταίων μετρήσεων προς των αντίστοιχο λόγο των πρώτων μετρήσεων των χαρακτηριστικών.

Λαμπτήρας	Χρόνος ζώης (ώρες)	Τάση ηλεκτρ.	Ρεύμα ηλεκτρ.	R _{c1}	R _{c2}	R _h	Λόγος προθ. (R _h /R _c)	Θερμοκρ. Ηλεκτρ.
A11α	26012	1,004	0,958	1,006	1,012	1,048	1,042	1,049
A11β	19040	1,000	0,970	1,007	1,001	1,030	1,024	1,027
A12α	21609	0,995	0,964	1,009	0,999	1,033	1,024	1,028
A12β	19992	1,003	0,968	0,973	1,022	1,036	1,067	1,075
A13α	23324	0,996	0,944	0,997	1,015	1,056	1,059	1,069
A13β	25727	1,013	0,976	1,013	1,002	1,037	1,023	1,027
A14α	21020	1,000	0,968	1,010	0,998	1,033	1,022	1,026
A14β	24314	1,011	0,972	0,995	0,987	1,040	1,045	1,052
B11α	32695	1,002	0,951	1,010	0,999	1,053	1,042	1,049
B11β	30417	1,014	0,967	1,011	1,003	1,048	1,038	1,043
B12α	22977	1,010	0,958	1,007	0,999	1,054	1,046	1,054
B12β	27627	1,006	0,972	1,006	0,999	1,034	1,028	1,032
B13α	20600	0,994	0,948	1,015	0,999	1,047	1,030	1,036
B13β	22367	0,995	0,947	1,005	1,006	1,050	1,044	1,049
B14α	28948	1,009	0,950	1,014	1,008	1,063	1,048	1,058
B14β	29072	0,978	0,985	1,011	1,004	0,993	0,982	0,980
Γ11α	10417	0,937	0,891	0,998	0,990	1,053	1,055	1,064
Γ11β	10417	0,994	0,951	0,999	0,996	1,045	1,046	1,052
Γ12α	10417	0,978	0,909	1,027	0,997	1,076	1,047	1,055
Γ12β	10417	0,994	0,984	0,991	0,991	1,010	1,020	1,022
Γ13α	1064	0,970	0,935	1,033	0,987	1,040	1,006	1,007
Γ13β	10417	1,006	0,977	0,996	0,997	1,029	1,033	1,038
Γ14α	2466	1,048	0,903	1,023	0,987	1,161	1,135	1,164
Γ14β	10417	0,985	0,950	1,000	0,993	1,039	1,039	1,044
Δ11α	338	0,997	0,982	1,021	1,002	1,015	0,995	0,994
Δ11β	2500	0,997	0,975	0,994	0,995	1,022	1,028	1,031
Δ12α	338	1,016	0,905	1,020	1,049	1,123	1,100	1,122
Δ12β	2500	0,995	0,954	1,003	1,001	1,043	1,040	1,045
Δ13α	741	1,024	0,939	1,033	1,006	1,091	1,056	1,067
Δ13β	2500	0,965	0,952	1,003	1,001	1,013	1,010	1,012
Δ14α	2139	1,006	0,969	1,028	1,000	1,037	1,008	1,010
Δ14β	511	1,004	0,972	1,015	1,005	1,032	1,017	1,019
E11α	833	1,005	1,002	1,002	1,000	1,003	1,000	1,001
E11β	833	0,998	1,008	1,002	1,001	0,991	0,989	0,988
E12α	833	0,992	0,985	0,986	0,991	1,006	1,020	1,023
E12β	833	0,991	1,008	1,002	1,001	0,983	0,981	0,979
E13α	238	1,006	0,954	1,024	0,997	1,055	1,030	1,035
E13β	833	1,012	0,959	0,999	0,998	1,055	1,056	1,064
E14α	833	1,009	0,998	0,990	0,999	1,010	1,021	1,025
E14β	833	1,011	0,975	0,995	0,988	1,037	1,042	1,048

Πίνακας 5.15. Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης στα συστήματα με ballast μεγάλου ΧΠ και λαμπτήρα T5.

Λαμπτήρας	Χρόνος ζώης (ώρες)	Τάση ηλεκτρ.	Ρεύμα ηλεκτρ.	R _{c1}	R _{c2}	R _h	Λόγος προθ. (R _h /R _c)	Θερμοκρ. Ηλεκτρ.
A11α	26012	0,306	-0,901	0,578	0,724	0,880	0,908	0,908
A11β	19040	-0,955	-0,926	-0,587	-0,925	-0,083	0,091	0,093
A12α	21609	-0,293	-0,932	0,708	-0,555	0,877	0,829	0,830
A12β	19992	0,453	-0,921	-0,569	0,762	0,842	0,947	0,948
A13α	23324	0,123	-0,950	0,105	0,813	0,878	0,769	0,769
A13β	25727	0,945	-0,351	0,786	0,286	0,610	0,460	0,462
A14α	21020	0,387	-0,813	0,884	-0,450	0,802	0,704	0,704
A14β	24314	0,602	-0,282	-0,574	-0,363	0,421	0,491	0,491
B11α	32695	-0,196	-0,865	-0,078	-0,426	0,671	0,717	0,718
B11β	30417	0,652	-0,901	0,951	0,301	0,860	0,810	0,809
B12α	22977	0,492	-0,943	0,663	-0,299	0,910	0,916	0,917
B12β	27627	0,147	-0,831	0,946	-0,427	0,875	0,855	0,855
B13α	20600	-0,862	-0,960	0,960	-0,509	0,940	0,888	0,891
B13β	22367	-0,015	-0,823	0,601	0,690	0,797	0,692	0,692
B14α	28948	0,937	-0,829	0,966	0,988	0,873	0,807	0,807
B14β	29072	-0,855	-0,229	0,958	0,977	-0,545	-0,748	-0,749
Γ11α	10417	-0,333	-0,810	0,220	-0,242	0,913	0,918	0,917
Γ11β	10417	0,166	-0,906	0,169	-0,137	0,913	0,904	0,904
Γ12α	10417	0,035	-0,906	0,817	0,010	0,943	0,910	0,909
Γ12β	10417	0,166	-0,590	-0,323	-0,370	0,538	0,570	0,570
Γ13α	1064	-0,751	-0,940	0,980	-0,881	0,999	0,607	0,618
Γ13β	10417	0,320	-0,422	-0,061	0,388	0,404	0,412	0,412
Γ14α	2466	0,958	-0,972	0,853	-0,335	0,968	0,912	0,911
Γ14β	10417	0,166	-0,592	0,265	-0,138	0,687	0,663	0,662
Δ11α	338	-0,110	-0,582	0,767	0,544	0,487	-0,160	-0,160
Δ11β	2500	-0,021	-0,221	-0,342	-0,300	0,231	0,321	0,321
Δ12α	338	0,735	-0,996	0,985	0,889	0,985	0,976	0,976
Δ12β	2500	-0,361	-0,485	0,013	-0,069	0,245	0,265	0,265
Δ13α	741	0,900	-0,898	0,928	0,495	0,906	0,811	0,811
Δ13β	2500	-0,773	-0,649	0,023	-0,078	0,099	0,096	0,096
Δ14α	2139	0,300	-0,768	0,734	-0,132	0,760	0,399	0,400
Δ14β	511	-0,035	-0,657	0,905	0,664	0,711	0,238	0,240
E11α	833	-0,349	0,484	-0,128	-0,114	-0,515	-0,443	-0,443
E11β	833	-0,563	0,233	0,038	0,120	-0,539	-0,586	-0,585
E12α	833	-0,521	-0,180	-0,302	-0,316	-0,178	-0,033	-0,031
E12β	833	-0,610	0,233	0,038	0,120	-0,581	-0,630	-0,629
E13α	238	0,386	-0,794	0,847	0,308	0,727	0,298	0,298
E13β	833	0,689	-0,713	0,157	0,041	0,815	0,770	0,769
E14α	833	0,094	-0,112	-0,222	-0,143	0,170	0,252	0,251
E14β	833	0,452	-0,433	-0,039	-0,577	0,562	0,545	0,545

Πίνακας 5.16. Μεταβολή χαρακτηριστικών στα συστήματα με ballast μεγάλου ΧΠ και λαμπτήρα T5. Σύνολο λαμπτήρων: 40.

	Λαμπτήρες	Τάση ηλεκτρ.	Ρεύμα ηλεκτρ.	R _{c1}	R _{c2}	R _h	Λόγος προθ. (R _h /R _c)	Θερμ. Ηλεκτρ.
Αριθμός λαμπτήρων που παρουσίασαν αύξηση τιμών των χαρακτηριστικών	Κάτω του ορίου (24)	16	0	21	13	23	22	22
	Πέραν του ορίου (16)	5	3	6	4	14	14	14
Ποσοστό αύξησης των τιμών των χαρακτηριστικών (%)	Κάτω του ορίου	0,43	-4,35	1,20	0,36	5,04	3,80	4,47
	Πέραν του ορίου	-0,82	-3,26	0,09	-0,04	2,60	2,69	3,07
Αριθμός λαμπτήρων με συντελεστή συσχέτισης >0,7	Κάτω του ορίου (24)	5	19*	16	6	18	14	14
	Πέραν του ορίου (16)	0	4*	1	0	4	4	4

* Επειδή υπάρχει μείωση στο ρεύμα, ο συντελεστής συσχέτισης που ελήφθη υπόψη ήταν <-0,7.

Και σε αυτή την ομάδα συστημάτων, σχεδόν σε όλους τους λαμπτήρες που δεν πέρασαν το όριο, η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου αυξήθηκε, καθώς και ο λόγος προθέρμανσης και η θερμική αντίσταση. Όσον αφορά στην τάση του ηλεκτροδίου κατά την προθέρμανση, σε αυτούς έχει μικρή αύξηση και σε εκείνους που πέρασαν το όριο μικρή μείωση. Όμως είναι τόσο μικρά τα ποσοστά που μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερή. Παρόμοιο συμπέρασμα είχε εξαχθεί και στην προηγούμενη ομάδα, η οποία όπως και η παρούσα εξεταζόμενη εμφάνισε έντονη μείωση του ρεύματος προθέρμανσης. Στην παρούσα ομάδα η μείωση δεν είναι τόσο μεγάλη διότι υπήρχαν σχετικά πολλοί λαμπτήρες που καταστράφηκαν λόγω αστοχίας πολύ ενωρίς. Για τον ίδιο λόγο και οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης δεν είναι τόσο μεγάλοι όσο στην προηγούμενη ομάδα, ούτε και το ποσοστό μεταβολής των χαρακτηριστικών.

Συστήματα σωληνωτών λαμπτήρων με μικρό χρόνο προθέρμανσης

Στα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την ομάδα, υπερέβησαν τα όρια όλοι οι λαμπτήρες των ομάδων Γ, Δ και Ε. Στην ομάδα Α όλοι οι λαμπτήρες καταστράφηκαν, όπως και στην ομάδα Β, εκτός από τον λαμπτήρα B15 ο οποίος για κάποιο άγνωστο λόγο προκαλεί την καταστροφή των ballast που τοποθετούνται για να τον οδηγήσουν. Συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν διαδοχικά δύο ballast τα οποία καταστράφηκαν αφού λειτούργησαν για περίπου 500 ώρες το καθένα. Κατόπιν αυτού ο λαμπτήρας δε λαμβάνεται υπόψη στην έρευνα. Οι πίνακες 5.17, 5.18 και 5.19 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα κατά τον τρόπο που εκτέθηκαν και για τις προηγούμενες ομάδες. Υπάρχει αύξηση στις μετρούμενες τιμές των χαρακτηριστικών των σχετικών με την θερμοκρασία του ηλεκτροδίου. Η αύξηση είναι εντονότερη στους λαμπτήρες οι οποίοι εξαντλήθηκαν πριν φθάσουν τα όρια που τέθηκαν.

Πίνακας 5.17. Ballast μικρού ΧΠ-λαμπτήρας T5. Λόγος του μέσου όρου των τελευταίων μετρήσεων προς των αντίστοιχο λόγο των πρώτων μετρήσεων των χαρακτηριστικών.

Λαμπτήρας	Χρόνος ζώης (ώρες)	Τάση ηλεκτρ.	Ρεύμα ηλεκτρ.	R_{c1}	R_{c2}	R_h	Λόγος προθ. (R_h/R_c)	Θερμοκρ. Ηλεκτρ.
A15	14349	1,004	0,904	0,981	0,987	1,109	1,130	1,140
A16	11572	1,014	0,922	0,983	0,991	1,100	1,119	1,127
A17	17575	0,987	0,948	0,984	0,985	1,040	1,057	1,061
A18	20976	0,971	0,924	0,989	0,992	1,051	1,062	1,067
B16	14672	0,986	0,907	0,994	0,997	1,086	1,093	1,100
B17	8427	1,003	0,902	0,991	0,989	1,112	1,122	1,131
B18	17299	1,007	0,902	0,982	0,990	1,114	1,135	1,146
Γ15	10417	1,010	0,985	0,988	0,987	1,025	1,037	1,040
Γ16	10417	0,997	0,924	0,980	0,987	1,078	1,100	1,108
Γ17	10417	0,988	0,931	0,983	0,984	1,060	1,079	1,084
Γ18	10417	0,982	0,882	0,983	0,977	1,114	1,133	1,145
Δ15	2500	0,978	0,980	0,996	1,002	0,998	1,001	1,001
Δ16	2500	0,991	0,970	0,997	0,996	1,022	1,025	1,027
Δ17	2500	0,980	0,991	0,993	0,994	0,989	0,996	0,995
Δ18	2500	0,970	0,984	1,001	0,991	0,985	0,985	0,983
E15	833	0,987	0,988	1,004	0,996	0,998	0,994	0,994
E16	833	0,989	0,911	0,991	0,994	1,060	1,069	1,078
E17	833	1,009	1,002	0,992	0,995	1,008	1,016	1,017
E18	833	0,985	0,994	0,993	0,994	0,991	0,998	0,998

Πίνακας 5.18. Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης στα συστήματα μικρού ΧΠ με λαμπτήρα T5.

Λαμπτήρας	Χρόνος ζώης (ώρες)	Τάση ηλεκτρ.	Ρεύμα ηλεκτρ.	R_{c1}	R_{c2}	R_h	Λόγος προθ. (R_h/R_c)	Θερμοκρ. Ηλεκτρ.
A15	14349	0,725	-0,994	-0,987	-0,963	0,998	1,000	1,000
A16	11572	0,950	-0,927	-0,995	-0,976	0,936	0,951	0,950
A17	17575	-0,987	-0,973	-0,968	-0,977	0,966	0,987	0,987
A18	20976	-0,896	-0,969	-0,779	-0,746	0,886	0,894	0,893
B16	14672	-0,866	-0,991	-0,964	-0,967	0,989	0,988	0,988
B17	8427	0,427	-0,941	-0,973	-0,974	0,934	0,939	0,938
B18	17299	-0,109	-0,976	-0,944	0,362	0,947	0,968	0,967
Γ15	10417	0,034	-0,719	-0,610	-0,468	0,777	0,797	0,796
Γ16	10417	-0,584	-0,971	-0,725	-0,497	0,970	0,976	0,976
Γ17	10417	-0,636	-0,957	-0,540	-0,577	0,962	0,970	0,970
Γ18	10417	-0,940	-0,980	-0,758	-0,712	0,967	0,967	0,967
Δ15	2500	-0,764	-0,580	-0,054	0,075	-0,017	0,012	0,012
Δ16	2500	-0,651	-0,589	-0,124	-0,264	0,441	0,492	0,493
Δ17	2500	-0,077	-0,497	-0,188	-0,308	0,044	0,060	0,061
Δ18	2500	-0,851	-0,631	-0,009	-0,447	-0,390	-0,353	-0,352
E15	833	-0,676	-0,121	0,177	-0,156	-0,339	-0,487	-0,486
E16	833	-0,464	-0,432	-0,465	-0,368	0,383	0,428	0,428
E17	833	0,509	0,234	-0,123	-0,126	-0,006	0,052	0,053
E18	833	-0,650	-0,650	-0,204	-0,110	0,189	0,314	0,315

Πίνακας 5.19. Μεταβολή χαρακτηριστικών στα συστήματα μικρού ΧΠ με λαμπτήρα T5. Σύνολο λαμπτήρων: 20.

	Λαμπτήρες	Τάση ηλεκτρ.	Ρεύμα ηλεκτρ.	R _{c1}	R _{c2}	R _h	Λόγος προθ. (R _h /R _c)	Θερμ. Ηλεκτρ.
Αριθμός λαμπτήρων που παρουσίασαν αύξηση τιμών των χαρακτηριστικών	Κάτω του ορίου (7)	4	0	0	0	7	7	7
	Πέραν του ορίου (12)	2	1	2	1	7	8	8
Ποσοστό αύξησης των τιμών των χαρακτηριστικών (%)	Κάτω του ορίου	-0,41	-8,45	-1,37	-1,00	8,75	10,26	11,02
	Πέραν του ορίου	-1,11	-3,81	-0,82	-0,85	2,73	3,61	3,92
Αριθμός λαμπτήρων με συντελεστή συσχέτισης >0,7	Κάτω του ορίου (7)	2	7*	0	0	7	7	7
	Πέραν του ορίου (12)	0	4*	0	0	4	4	4

* Επειδή υπάρχει μείωση στο ρεύμα, ο συντελεστής συσχέτισης που ελήφθη υπόψη ήταν <-0,7.

Από τον πίνακα 5.19 φαίνεται ότι και οι επτά λαμπτήρες που εξαντλήθηκαν εντός του ορίου των 26 400 ωρών, παρουσίασαν αύξηση στη θερμή αντίσταση, στο λόγο προθέρμανσης και στην θερμοκρασία του ηλεκτροδίου. Παρομοίως όλοι αυτοί οι λαμπτήρες παρουσίασαν μείωση του ρεύματος του ηλεκτροδίου. Και από τα συστήματα που ξεπέρασαν τα όρια των εναύσεων, αρκετά παρουσίασαν αύξηση των χαρακτηριστικών αυτών. Το ποσοστό της αύξησής τους ήταν περίπου τρεις φορές μικρότερο από εκείνο των λαμπτήρων που καταστράφηκαν πριν φθάσουν στα όρια. Επομένως η διάρκεια της ζωής τους αναμένεται κατά πολύ μεγαλύτερη από τα όρια που τέθηκαν για τις εναύσεις.

Επίσης, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι όλοι οι λαμπτήρες που δεν πέρασαν το όριο επέδειξαν συστηματική αύξηση των χαρακτηριστικών αυτών με συντελεστή συσχέτισης ανώτερο του 0,886. Και η μείωση του ρεύματος ακολούθησε ευθεία γραμμή παλινδρόμησης με συντελεστή συσχέτισης μεγαλύτερο από -0,9 σε όλους τους εξαντλημένους πριν φθάσουν το όριο λαμπτήρες. Εδώ βέβαια αξίζει να αναφερθεί ότι οι λαμπτήρες που καταστράφηκαν δεν έφθασαν την ονομαστική τους ζωή (24000 ώρες).

Συστήματα συμπαγών λαμπτήρων με μικρό χρόνο προθέρμανσης

Στα συστήματα με ballast μικρού ΧΠ και λαμπτήρα CFL της Philips, όλοι οι λαμπτήρες των ομάδων Α, Β και Γ εξαντλήθηκαν πριν φθάσουν τα όρια που τέθηκαν (125000 εναύσεις για την ομάδα Γ), ενώ από τις ομάδες Δ και Ε κανένας εντός των ορίων που τέθηκαν. Στους χρόνους ζωής των λαμπτήρων που εξαντλήθηκαν δεν σημειώθηκαν ακραίες τιμές, όπως σε κάποια από τα προαναφερθέντα συστήματα και έτσι τα αποτελέσματα που έδωσαν αποτελούν ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα στο σύνολό τους. Στους πίνακες 5.20 και 5.21

παρατηρείται ξανά η τακτική μεταβολή όλων των χαρακτηριστικών που έχουν ήδη αναφερθεί. Η διαφορά στο παρόν σύνολο είναι ότι οι μεταβολές των χαρακτηριστικών, όπως αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 5.22, δεν είναι τόσο έντονες μεταξύ των εξαντληθέντων και εκείνων που υπερέβησαν τα όρια. Εξακολουθούν βέβαια οι εξαντληθέντες λαμπτήρες να επιδεικνύουν μεγαλύτερο ποσοστό μεταβολής των χαρακτηριστικών τους. Η ένδειξη αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα συστήματα των ομάδων Δ και Ε θα υπερβούν πολύ λίγο το όριο των 150000 εναύσεων.

Πίνακας 5.20. Ballast μικρού ΧΠ-λαμπτήρας CFL. Λόγος του μέσου όρου των τελευταίων μετρήσεων προς των αντίστοιχο λόγο των πρώτων μετρήσεων των χαρακτηριστικών.

Λαμπτήρας	Χρόνος ζωής (ώρες)	Τάση ηλεκτρ.	Ρεύμα ηλεκτρ.	R _{c1}	R _{c2}	R _h	Λόγος προθ. (R _h /R _c)	Θερμοκρ. Ηλεκτρ.
A9α	8384	1,013	0,974	0,996	0,999	1,039	1,043	1,046
A9β	8091	1,031	0,953	1,010	1,019	1,082	1,071	1,077
A10α	8227	1,042	0,939	1,025	1,013	1,109	1,082	1,089
A10β	10820	1,014	0,959	0,995	1,006	1,057	1,063	1,068
B9α	8894	1,023	0,955	1,016	1,036	1,071	1,053	1,057
B9β	9021	1,014	0,955	1,004	1,004	1,061	1,058	1,061
B10α	7059	1,015	0,954	1,001	1,007	1,064	1,063	1,066
B10β	7600	1,025	0,966	1,010	1,008	1,061	1,050	1,055
Γ9α	8461	1,039	0,823	0,997	1,001	1,262	1,266	1,284
Γ9β	8610	1,041	0,845	0,999	1,011	1,231	1,232	1,246
Γ10α	6552	1,031	0,841	1,040	1,006	1,226	1,180	1,193
Γ10β	7055	1,026	0,870	1,004	0,993	1,180	1,175	1,187
Δ9α	2500	1,003	0,942	1,013	1,004	1,065	1,051	1,057
Δ9β	2500	1,006	0,910	0,998	0,998	1,105	1,107	1,114
Δ10α	2500	1,019	0,957	1,000	1,044	1,064	1,065	1,071
Δ10β	2500	1,037	0,852	1,003	0,983	1,217	1,213	1,227
Ε9α	833	1,016	0,911	0,992	0,990	1,115	1,124	1,134
Ε9β	833	1,010	0,976	0,990	0,976	1,034	1,045	1,048
Ε10α	833	1,010	0,953	0,987	1,050	1,059	1,073	1,080
Ε10β	833	1,016	0,959	1,034	0,997	1,060	1,026	1,028

Στον πίνακα 5.22, επειδή οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης που προέκυψαν ήταν σχετικώς υψηλοί, η σύγκριση μεταξύ των λαμπτήρων που πέρασαν το όριο και σε εκείνους που δεν το πέρασαν έγινε για την τιμή του συντελεστή 0,9 (για το ρεύμα -0,9), ώστε να φανεί περισσότερο η σημασία των συμπερασμάτων.

Πίνακας 5.21. Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης στα συστήματα μικρού ΧΠ με λαμπτήρα CFL.

Λαμπτήρας	Χρόνος ζώης (ώρες)	Τάση ηλεκτρ.	Ρεύμα ηλεκτρ.	R _{c1}	R _{c2}	R _h	Λόγος προθ. (R _h /R _c)	Θερμοκρ. Ηλεκτρ.
A9α	8384	0,647	-0,962	-0,595	-0,248	0,989	1,000	1,000
A9β	8091	0,750	-0,995	0,799	1,000	0,966	0,922	0,922
A10α	8227	0,793	-0,908	0,940	0,982	0,864	0,751	0,753
A10β	10820	0,723	-1,000	-0,669	0,437	0,973	0,995	0,994
B9α	8894	0,718	-0,996	0,945	0,997	0,975	0,982	0,982
B9β	9021	0,689	-0,995	0,996	0,963	0,992	0,992	0,992
B10α	7059	0,573	-0,956	0,157	0,637	0,868	0,829	0,829
B10β	7600	0,967	-0,528	0,937	0,946	0,788	0,757	0,757
Γ9α	8461	0,938	-0,975	0,011	0,470	0,980	0,978	0,978
Γ9β	8610	0,770	-0,963	0,471	0,775	0,974	0,967	0,967
Γ10α	6552	0,726	-0,948	0,954	0,590	0,942	0,913	0,912
Γ10β	7055	0,793	-0,984	0,623	0,149	0,986	0,979	0,978
Δ9α	2500	0,461	-0,808	0,660	0,665	0,834	0,722	0,722
Δ9β	2500	-0,101	-0,933	0,379	0,190	0,867	0,849	0,848
Δ10α	2500	0,547	-0,891	0,244	0,978	0,877	0,845	0,844
Δ10β	2500	0,866	-0,951	0,450	-0,710	0,952	0,944	0,943
E9α	833	0,711	-0,978	-0,387	-0,519	0,964	0,951	0,950
E9β	833	0,038	-0,577	-0,492	-0,722	0,431	0,459	0,461
E10α	833	0,152	-0,907	-0,336	0,948	0,864	0,817	0,816
E10β	833	0,803	-0,647	0,748	0,146	0,828	0,404	0,404

Πίνακας 5.22. Μεταβολή χαρακτηριστικών στα συστήματα μικρού ΧΠ με λαμπτήρα CFL. Σύνολο λαμπτήρων: 20.

	Λαμπτήρες	Τάση ηλεκτρ.	Ρεύμα ηλεκτρ.	R _{c1}	R _{c2}	R _h	Λόγος προθ. (R _h /R _c)	Θερμ. Ηλεκτρ.
Αριθμός λαμπτήρων που παρουσίασαν αύξηση τιμών των χαρακτηριστικών	Κάτω του ορίου (12)	12	0	8	10	12	12	12
	Πέραν του ορίου (8)	8	0	3	3	8	8	8
Ποσοστό αύξησης των τιμών των χαρακτηριστικών (%)	Κάτω του ορίου	2,62	-8,05	0,80	0,86	12,03	11,13	11,91
	Πέραν του ορίου	1,48	-6,72	0,20	0,54	8,99	8,79	9,50
Αριθμός λαμπτήρων με συντελεστή συσχέτισης >0,7	Κάτω του ορίου (12)	2	11*	5	5	9	9	9
	Πέραν του ορίου (8)	0	4*	0	2	2	2	2

* Επειδή υπάρχει μείωση στο ρεύμα, ο συντελεστής συσχέτισης που ελήφθη υπόψη ήταν <-0,9.

5.5.2. Συμπεράσματα επί του συνόλου των συστημάτων

Για να γίνει έρευνα επί του συνόλου των συστημάτων κατασκευάστηκε ο πίνακας 5.23, που αποτελεί άθροιση των αποτελεσμάτων των πινάκων 5.13, 5.16, 5.19 και 5.22, με τη διαφορά ότι ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι παντού μεγαλύτερος του 0,7 (ή μικρότερος

του -0,7 για το ρεύμα). Γενικώς τα συμπεράσματα από όλα τα συστήματα είναι όμοια με τα επί μέρους των τεσσάρων συνόλων που προηγήθηκαν. Φαίνεται δηλαδή ότι στη μεγάλη πλειοψηφία των συστημάτων που καταστράφηκαν πριν φθάσουν τα όρια που τέθηκαν υπήρξε αύξηση στη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου, σίγουρα λόγω της μείωσης του ρεύματος. Η αντίσταση του θερμού ηλεκτροδίου ήταν αυξημένη στους 60 από το σύνολο των 62 λαμπτήρων που εξαντλήθηκαν ενώ η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου ήταν στις τελευταίες μετρήσεις μεγαλύτερη στους 57 από αυτούς τους λαμπτήρες.

Η μεταβολή στα χαρακτηριστικά ήταν τακτική και όχι τυχαία. Συγκεκριμένα ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου στους λαμπτήρες που καταστράφηκαν πριν φθάσουν στο όριο που τέθηκε ήταν στο 77% εξ αυτών μεγαλύτερος από 0,7. Η μείωση του ρεύματος ήταν μειωμένη στο 84% από αυτούς και ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης ήταν μικρότερος του -0,7. Ίσως ακόμα πιο αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το ποσοστό αύξησης των χαρακτηριστικών ήταν διπλάσιο στους εξαντλημένους λαμπτήρες και βέβαια η μείωση στην τιμή του ρεύματος επίσης ήταν διπλάσια από την μείωση στους υπόλοιπους λαμπτήρες που υπερέβησαν τα όρια που τέθηκαν. Από την παρουσίαση των μεταβολών σε διαγράμματα φαίνεται ότι ακολουθούν μία ευθεία γραμμή παλινδρόμησης. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα συστήματα που υπερέβησαν τα όρια, αναμένεται να έχουν διάρκεια ζωής περίπου διπλάσια των τιμών αυτών. Βέβαια έχει σημασία σε ποια ομάδα ανήκει το καθένα από αυτά για μία πιο συγκεκριμένη πρόβλεψη του χρόνου ζωής τους. Στην ανάλυση που έγινε κατά ομάδες στις προηγούμενες παραγράφους έχει γίνει η απαιτούμενη αναφορά.

Πίνακας 5.23. Μεταβολή χαρακτηριστικών στο σύνολο των συστημάτων.

	Λαμπτήρες	Τάση ηλεκτρ.	Ρεύμα ηλεκτρ.	Rc1	Rc2	Rh	Λόγος προθ. (R _h /R _c)	Θερμ. Ηλεκτρ.
Αριθμός λαμπτήρων που παρουσίασαν αύξηση τιμών των χαρακτηριστικών	Κάτω του ορίου (62)	40	1	47	28	60	57	57
	Πέραν του ορίου (57)	24	6	20	13	44	47	47
Ποσοστό αύξησης των τιμών των χαρακτηριστικών (%)	Κάτω του ορίου	0,72	-6,32	0,74	0,20	7,72	6,95	7,66
	Πέραν του ορίου	-0,56	-3,62	-0,07	-0,34	3,23	3,30	3,66
Αριθμός λαμπτήρων με συντελεστή συσχέτισης >0,7	Κάτω του ορίου (62)	21	52*	30	15	51	48	48
	Πέραν του ορίου (57)	4	17*	2	3	24	22	22

* Επειδή υπάρχει μείωση στο ρεύμα, ο συντελεστής συσχέτισης που ελήφθη υπόψη ήταν <-0,7.

5.5.3. Διερεύνηση αποτελεσμάτων με βάση τον κύκλο λειτουργίας

Στις προηγούμενες παραγράφους τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν κατά ομάδες με όμοια

συστήματα, ασχέτως του κύκλου λειτουργίας τους. Για να γίνει διάκριση των αποτελεσμάτων αλλά και των συμπερασμάτων, με έμφαση στον κύκλο λειτουργίας που ακολουθούν τα συστήματα, γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων ανά κύκλο λειτουργίας. Και στην παρούσα ανάλυση οι τιμές των χαρακτηριστικών δίνονται κατά τον τρόπο που έχει περιγραφεί στην διερεύνηση που προηγήθηκε. Πρέπει να γίνει σαφές ότι για τις ομάδες με σύντομους κύκλους λειτουργίας, Γ, Δ και Ε, τα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά αφού δεν καταστράφηκαν πολλά από τα συστήματα αυτά, αλλά πέρασαν το όριο των εναύσεων. Επίσης στους πίνακες που ακολουθούν δεν έγινε αναφορά σε όλα τα χαρακτηριστικά. Αφαιρέθηκαν εκείνα που οι τιμές τους είναι εξαρτημένες από εκείνα που παρατίθενται ή η παράθεσή τους δε διαφοροποιεί τα συμπεράσματα. Έτσι οι πίνακες περιέχουν μόνο το ρεύμα, την αντίσταση και τη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου κατά τη στιγμή της έναυσης.

Στον πίνακα 5.24 φαίνονται τα ποσοστά της μεταβολής των χαρακτηριστικών αυτών κατανομημένα ανά ομάδα και σε δύο στήλες. Μία στήλη για τους λαμπτήρες που πέρασαν τα όρια και μία άλλη για εκείνους που δεν τα υπερέβησαν. Στην πρώτη στήλη του πίνακα, δίπλα στο όνομα της ομάδας και σε παρένθεση φαίνεται ο αριθμός αυτών που δεν πέρασαν τα όρια και ο αριθμός εκείνων που τα πέρασαν αντίστοιχα. Στις ομάδες Α και Β όλοι οι λαμπτήρες έχουν εξαντληθεί.

Πίνακας 5.24. Μέσος όρος του ποσοστού μεταβολής των τιμών των χαρακτηριστικών (%)

Ομάδα	Ρεύμα ηλεκτροδίου		Αντίσταση ηλεκτροδίου		Θερμοκρασία ηλεκτροδίου	
	Κάτω του ορίου λαμπτήρες	Πέραν του ορίου λαμπτήρες	Κάτω του ορίου λαμπτήρες	Πέραν του ορίου λαμπτήρες	Κάτω του ορίου λαμπτήρες	Πέραν του ορίου λαμπτήρες
A (24-0)	-5,26		0,03		6,39	
B (24-0)	-7,32		0,59		8,58	
Γ (6-18)	-13,06	-5,04	1,60	-0,36	18,03	5,70
Δ (7-17)	-2,40	-4,14	2,14	0,36	2,97	3,81
Ε (2-22)	-3,64	-2,08	3,11	-0,41	0,05	1,97

Στην ομάδα Γ, που εξαντλήθηκαν πριν φθάσουν το όριο 6 λαμπτήρες από τους 24, η μείωση του ρεύματος και η αύξηση της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου είναι υπερδιπλάσια σε αυτούς. Πρέπει να σημειωθεί ότι από τους εξ λαμπτήρες της ομάδας, οι τέσσερις (τύπου CFL) σημείωσαν αρκετά καλό χρόνο ζωής, πολύ κοντά στο χρόνο που πέτυχαν οι λαμπτήρες του ίδιου τύπου στους κύκλους Α και Β. Κάτι παρόμοιο δεν συνέβη στην ομάδα Δ, όπου παρ' ότι καταστράφηκαν νωρίς αρκετοί λαμπτήρες (7 εκ των 24) οι τιμές των χαρακτηριστικών του πίνακα 5.24 δεν ακολουθούν την τακτική μεταβολή που αναμενόταν. Όμως στην ομάδα αυτή, οι εξ από τους επτά κατεστραμμένους λαμπτήρες, σταμάτησαν να λειτουργούν πολύ νωρίς, μάλλον λόγω αστοχίας των υλικών τους. Δηλαδή δεν εξαντλήθηκαν

λόγω γήρανσης οπότε και θα παρουσίαζαν τα χαρακτηριστικά που είδαμε στους άλλους λαμπτήρες. Επίσης δεν πρέπει να γίνεται λόγος για τα αποτελέσματα του κύκλου λειτουργίας E, αφού μόνο δύο λαμπτήρες καταστράφηκαν πριν πετύχουν 150000 εναύσεις.

Ένα συμπέρασμα που συνάγεται από τις τιμές του πίνακα 5.24 είναι ότι η μεταβολή στο ρεύμα και στη θερμοκρασία στα οποία αναφέρεται, αυξάνουν όσο πιο σύντομος είναι ο κύκλος λειτουργίας. Αυτό βέβαια συμβαίνει αν ληφθούν υπόψη μόνο οι τρεις πρώτοι κύκλοι λειτουργίας, όπου οι περισσότεροι λαμπτήρες εξαντλήθηκαν λόγω γήρανσης και όχι λόγω κάποιου τυχαίου συμβάντος. Από την ομάδα Γ που πέρασαν τα όρια οι περισσότεροι, φαίνεται από τα μέχρι στιγμής αποτελέσματα ότι το ποσοστό είναι μεγαλύτερο από αυτό των ομάδων A και B.

Υπάρχει μία μικρή αύξηση στην αντίσταση του ηλεκτροδίου, όπως αυτή μετράται πριν την έναρξη του πειράματος της έναυσης. Η αύξηση στην αντίσταση δεν μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη αφού ως γνωστόν λόγω της ύπαρξης της λειτουργίας EOLL των ballast δεν επιτρέπονται μεγάλες μεταβολές σε αυτήν. Αν και το μέγεθός της είναι μικρό δεν ομοιάζει και ως συμπτωματικό. Επομένως η μείωση στην τιμή του ρεύματος του ηλεκτροδίου αποδίδεται εν μέρει στη γήρανση των εξαρτημάτων του ballast και εν μέρει στη μεταβολή του νήματος.

Από τα εκτεθέντα αποτελέσματα γίνεται φανερό ότι και ανά κύκλο λειτουργίας ισχύει η μεταβολή των χαρακτηριστικών με την πάροδο του χρόνου για τους εξαντλημένους πριν φθάσουν το όριο που τέθηκε λαμπτήρες. Για να φανεί αν αυτή η μεταβολή είναι τακτική κατασκευάστηκε ο πίνακας 5.25, ο οποίος παρουσιάζει τον αριθμό των λαμπτήρων με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης μεγαλύτερο του 0,7.

Πίνακας 5.25. Αριθμός λαμπτήρων με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης μικρότερο από -0,7 για το ρεύμα ηλεκτροδίου και μεγαλύτερο από 0,7 για τη θερμοκρασία του.

Ομάδα	Ρεύμα ηλεκτροδίου		Θερμοκρασία ηλεκτροδίου	
	Κάτω του ορίου λαμπτήρες	Πέραν του ορίου λαμπτήρες	Κάτω του ορίου λαμπτήρες	Πέραν του ορίου λαμπτήρες
A (24-0)	20		20	
B (24-0)	21		21	
Γ (6-18)	6	10	5	14
Δ (7-17)	3	4	2	5
E (2-22)	2	3	0	3

Βλέπουμε ότι στους κύκλους λειτουργίας A, B και Γ ο συντελεστής συσχέτισης είναι στην μεγάλη πλειοψηφία των συστημάτων καλύτερος από -0,7 ή 0,7, άρα η μεταβολή του ρεύματος και της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου είναι συστηματική και χωρίς ιδιαίτερα μεγάλη διασπορά τιμών. Για τους λαμπτήρες των κύκλων Δ και E ειπώθηκε ήδη ότι είναι δύσκολο να γίνει εξαγωγή συμπερασμάτων, λόγω της καταστροφής των λαμπτήρων πολύ

ενωρίς.

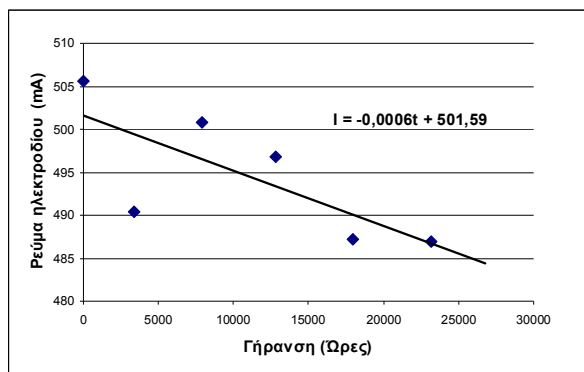
Στο σχήμα 5.14 φαίνεται ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα διαγράμματος των μετρήσεων του ρεύματος κατά την έναυση στο λαμπτήρα A1α. Η εξίσωση της ευθείας παλινδρόμησης που περιγράφει τη μεταβολή του ρεύματος I συναρτήσει του χρόνου t που έγινε η μέτρηση φαίνεται στο διάγραμμα.

Γενικώς οι εξισώσεις των ευθειών που περιγράφουν καλύτερα την παλινδρόμηση των σημείων των μετρήσεων του ρεύματος έχουν ασφαλώς τη μορφή:

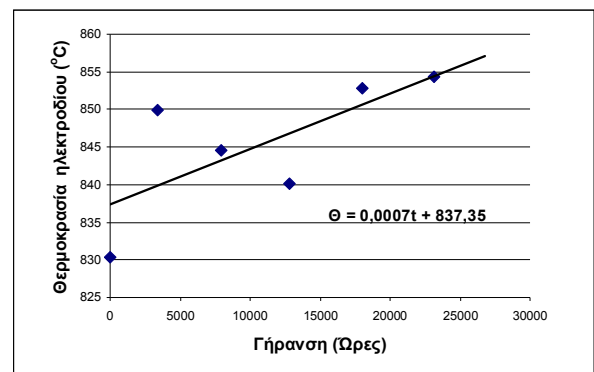
$$I = A \cdot t + I_0 \quad (5.6)$$

Στην εξίσωση αυτή η τιμή του ρεύματος δίνεται σε mA και είναι η τιμή που κατέγραψε ο παλμογράφος και μετρήθηκε από κορυφή σε κορυφή της κυματομορφής. Το I_0 είναι η σταθερά της εξίσωσης που θα πλησιάζει την τιμή του ρεύματος κατά την πρώτη μέτρηση (όταν $t=0$). Η σταθερά A εκφράζει τη κλίση της ευθείας και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ένας πολύ μικρός αρνητικός αριθμός. Αρνητικός είναι διότι το ρεύμα μειώνεται με το χρόνο και πολύ μικρός διότι η μείωση είναι μικρή. Το σενάριο λειτουργίας του ballast είναι αυτό που καθορίζει την τιμή του I_0 , αφού οι λαμπτήρες κάθε τύπου και κατασκευαστή έχουν σχεδόν ίδια τιμή ηλεκτρικής αντίστασης του ηλεκτροδίου.

Το αντίστοιχο διάγραμμα που αφορά τον υπολογισμό της θερμοκρασίας Θ του ίδιου ηλεκτροδίου κατά την έναυση είναι στο σχήμα 5.15.



Σχήμα 5.14. Μεταβολή του ρεύματος του ηλεκτροδίου του λαμπτήρα A1α, κατά το τέλος της προθέρμανσης σε σχέση με τη γήρανση του λαμπτήρα.



Σχήμα 5.15. Μεταβολή της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου του λαμπτήρα A1α, κατά το τέλος της προθέρμανσης σε σχέση με τη γήρανση του λαμπτήρα.

Για τη θερμοκρασία η εξίσωση που περιγράφει τη ευθεία παλινδρόμησης στη γενική περίπτωση θα έχει τη μορφή:

$$\Theta = B \cdot t + \Theta_0 \quad (5.7)$$

Στην εξίσωση 5.7 η σταθερά Θ_0 απεικονίζει τη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου κατά την πρώτη μέτρηση, ενώ ο συντελεστής B θα είναι ένας μικρός θετικός αριθμός. Η θερμοκρασία στη σχέση αυτή δίνεται σε βαθμούς Κελσίου.

Τα ballast που οδηγούν δύο λαμπτήρες παρέχουν παραπλήσιο ρεύμα στα νήματα των δύο λαμπτήρων αλλά όχι ακριβώς το ίδιο. Κυρίως αυτό εξαρτάται από την τάση που εφαρμόζονται στα άκρα του, αλλά και τις διαφορές στην αντίσταση του νήματος. Όλα τα ballast που χρησιμοποιήθηκαν ακολουθούσαν το σενάριο παροχής σταθερής τάσης στα ηλεκτρόδια, που όμως είναι διαφορετική σε κάθε λαμπτήρα. Αυτό σημαίνει ότι ένα ballast που οδηγεί δύο λαμπτήρες παρέχει άλλη τάση στο ηλεκτρόδιο του ενός λαμπτήρα και άλλη τάση στο ηλεκτρόδιο του άλλου. Και η τάση αυτή από ballast σε ballast έχει μικροδιαφορές.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, θα πρέπει να υπάρχουν διαφορετικές εξισώσεις για τη μεταβολή του ρεύματος αφού η τιμή του I_0 αλλάζει ανάλογα με το ballast αλλά και με τη θέση του λαμπτήρα σε αυτό αν οδηγεί δύο λαμπτήρες. Σε γενικές γραμμές από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψε ότι η τιμή του A είναι στην περιοχή του 0,005, που σημαίνει μείωση του ρεύματος κατά περίπου 5 mA για κάθε 1000 ώρες λειτουργίας.

Για τη μεταβολή της θερμοκρασίας ισχύουν αντίστοιχες παρατηρήσεις. Οι τιμές που βρέθηκαν για το συντελεστή B δίνουν μεταβολή της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου κατά 5 περίπου βαθμούς Κελσίου ανά 1000 ώρες λειτουργίας.

Η μείωση του ρεύματος είναι αντίστοιχη με την αύξηση της θερμοκρασίας (συντελεστές A και B των εξισώσεων 3 και 4) κυρίως στις περιπτώσεις που ο λαμπτήρας δεν είχε πρόωρη καταστροφή. Αυτό δεν είναι τυχαίο, αφού το ρεύμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου. Μάλιστα αν ληφθεί υπόψη η γνωστή σχέση (1.8) μεταξύ θερμοκρασίας ηλεκτροδίου και αντίστασής του καθώς και ότι:

$$R_h = \frac{V_h}{I_h} \quad (5.8)$$

προκύπτει η σχέση:

$$T_h \cdot I_h^{0,814} = T_c \cdot \left(\frac{V_h}{R_c} \right)^{0,814} \quad (5.9)$$

Από τη σχέση (5.9) φαίνεται ότι το γινόμενο: $T_h \cdot I_h^{0,814}$ είναι περίπου σταθερό αφού έχει ειπωθεί ότι δεν παρατηρήθηκαν ιδιαίτερες μεταβολές στην τάση του θερμού ηλεκτροδίου ούτε και στην ψυχρή αντίστασή του, όπου η μεταβολή ήταν ελάχιστη. Αν παρατηρήσουμε ότι η δύναμη που υψώνεται το ρεύμα I_h είναι πλησίον της μονάδας, μπορούμε να δικαιολογήσουμε τα παρόμοια ποσοστά αύξησης και μείωσης θερμοκρασίας και ρεύματος αντιστοίχως. Επειδή συχνά παρατηρήθηκε να απέχουν τα ποσοστά των μεταβολών, αυτό οφειλόταν σε μεταβολές των χαρακτηριστικών (τάση θερμού και αντίσταση ψυχρού

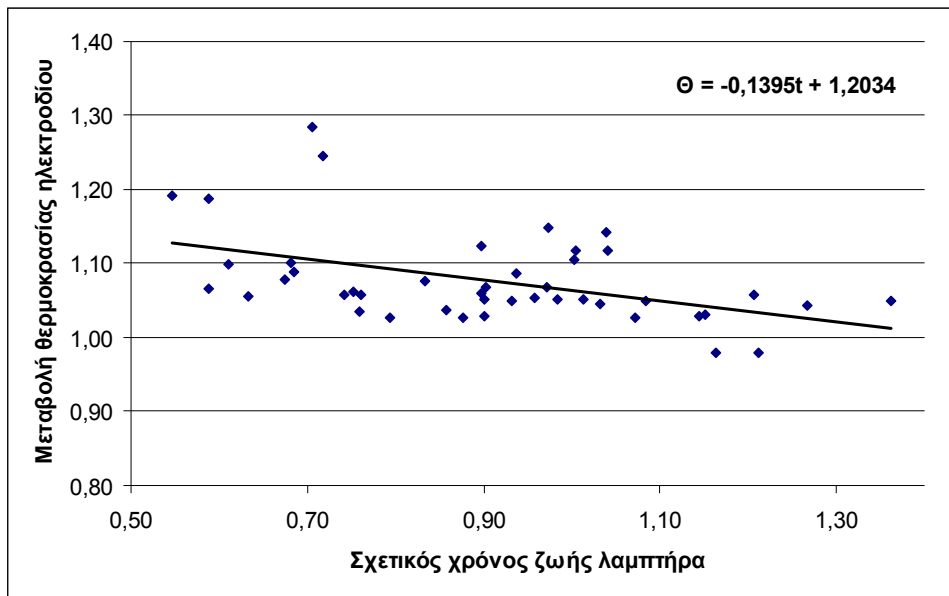
ηλεκτροδίου) που θεωρήθηκαν ως σταθερά.

5.5.4. Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Στις μετρήσεις που περιγράφηκαν σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν 120 λαμπτήρες φθορισμού, εκ των οποίων οι 20 ήταν συμπαγείς 18 W και οι 100 ήταν σωληνωτοί T5 14 W. Όλοι οδηγούνται από ηλεκτρονικά ballast με προθέρμανση. Από το σύνολο των λαμπτήρων οι 80 ήταν ανά δύο σε ένα ballast και οι υπόλοιποι οδηγούνται ο καθένας από το δικό του ballast. Στη βιβλιογραφία σε παρόμοιες έρευνες καταγράφονται οι τιμές των χαρακτηριστικών πριν την έναρξη των πειραμάτων και μελετάται η επίδραση των τιμών τους στη ζωή των λαμπτήρων. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν καθ' όλη τη διάρκεια της γήρανσης, σε ορισμένα χαρακτηριστικά, με σκοπό την έρευνα της μεταβολής τους κατά τη γήρανση των συστημάτων. Επί πλέον μελετάται και η σχέση της μεταβολής, καθώς και των τιμών των χαρακτηριστικών, στη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων. Επομένως με την παρούσα έρευνα γίνεται προσπάθεια να καλυφθεί το κενό αυτό στη μελέτη των λαμπτήρων φθορισμού.

Από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, όπως παρουσιάστηκαν στους πίνακες που προηγήθηκαν, προκύπτει το συμπέρασμα ότι υπάρχουν μεταβολές στο ρεύμα του ηλεκτροδίου κατά την προθέρμανση όπως επίσης και στη θερμοκρασία του, ακριβώς πριν την έναρξη της εκκένωσης. Οι μεταβολές παρατηρήθηκαν στη μεγάλη πλειοψηφία των συστημάτων και φαίνεται ότι αυτές επηρεάζουν τη ζωή του λαμπτήρα.

Το σχήμα 5.16 περιγράφει αυτό το συμπέρασμα. Παρουσιάζει την αύξηση της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου σε σχέση με το χρόνο ζωής του λαμπτήρα. Ο χρόνος ζωής έχει δοθεί ως το πηλίκο της επιτευχθείσας ζωής προς την ονομαστική ζωή του λαμπτήρα. Η αύξηση της θερμοκρασίας δίνεται όπως παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο, δηλαδή ως το πηλίκο του μέσου όρου των τελευταίων μετρήσεων προς το μέσο όρο των πρώτων. Από το διάγραμμα έχουν αφαιρεθεί οι λαμπτήρες που πέτυχαν ζωή μικρότερη από το 50% της ονομαστικής τους, ως κατεστραμμένοι λόγω αστοχίας των υλικών. Συνολικά εμφανίζονται τα σημεία για 45 λαμπτήρες, οι οποίοι προέρχονται από τις ομάδες κύκλων λειτουργίας Α, Β και Γ. Οι λαμπτήρες των ομάδων Δ και Ε καταστράφηκαν πολύ σύντομα και γι' αυτό δεν περιλαμβάνονται. Το διάγραμμα διασποράς των σημείων δείχνει ότι λαμπτήρες στους οποίους συμβαίνει μεγάλη αύξηση στη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου, δεν πετυχαίνουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Έχει χαραχθεί η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης και φαίνεται και η εξίσωσή της. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης δεν είναι ικανοποιητικά ισχυρός, όμως η τάση του δείγματος δεν μπορεί να αμφισβητηθεί.



Σχήμα 5.16. Μεταβολή της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου του λαμπτήρα σε σχέση με τη διάρκεια της ζωής του για τους λαμπτήρες που έχουν εξαντληθεί πριν φθάσουν τα όρια που τέθηκαν.

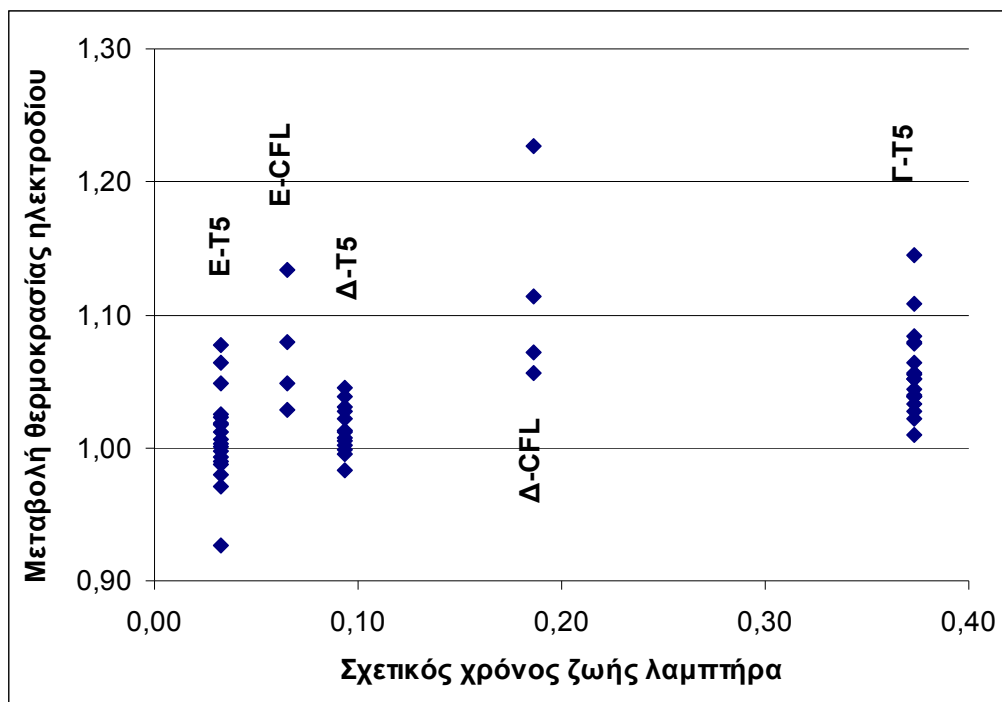
Η αύξηση της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου με το χρόνο, ασφαλώς οφείλεται στη μείωση της επικάλυψης του ηλεκτροδίου με τη γήρανση του λαμπτήρα. Τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι όσο εντονότερη είναι η μείωση του ρεύματος τόσο πιο σύντομα επέρχεται η καταστροφή του λαμπτήρα. Επομένως η μείωση του ρεύματος προθέρμανσης ή ισοδύναμα η αύξηση στη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου είναι μία ένδειξη ότι ο λαμπτήρας θα εξαντληθεί σύντομα. Επίσης εδείχθη ότι η μείωση του ρεύματος οφείλεται στην αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής αντίστασης του ηλεκτροδίου που είναι συνέπεια της φθοράς του, καθώς και στη γήρανση του ballast. Σχεδόν στο σύνολο των λαμπτήρων που εξαντλήθηκαν, η αντίσταση του νήματος (κατά τη στιγμή της έναυσης) είχε αυξηθεί σε σχέση με την τιμή που είχε κατά την έναρξη των πειραμάτων. Η αύξηση της αντίστασης οφείλεται στην μείωση της επικάλυψης του νήματος που συμβαίνει λόγω της γήρανσης του λαμπτήρα. Αυτό έχει ως συνέπεια την μείωση της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας του νήματος με το περιβάλλον του, επομένως την αύξηση της θερμοκρασίας του [119].

Οι λαμπτήρες που υπερέβησαν τα όρια που τέθηκαν είναι 57 και το σχήμα 5.17 είναι ανάλογο του 5.16 για τους λαμπτήρες αυτούς. Φαίνεται ότι τα σημεία είναι ομαδοποιημένα στο χρόνο αφού ως χρόνος ζωής έχει τεθεί για όλους ο σχετικός χρόνος που αντιστοιχεί στα όρια που τέθηκαν. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι οι λαμπτήρες με τη μικρότερη διάρκεια λειτουργίας (κύκλοι Ε, Δ και Γ με αύξουσα σειρά) έχουν και τη μικρότερη μεταβολή στη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου. Επιβεβαιώνεται δηλαδή το συμπέρασμα ότι οι λαμπτήρες καταστρέφονται όσο περισσότερο μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά τους.

Στις προηγούμενες παραγράφους τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν την σημαντική επίδραση του κύκλου λειτουργίας στη μεταβολή των χαρακτηριστικών. Εδώ, από μία άλλη

οπτική γωνία μελέτης καταλήγουμε στο ίδιο συμπέρασμα. Στο σχήμα 5.17 φαίνεται η επίδραση του αριθμού των εναύσεων στη μεταβολή της θερμοκρασίας, άρα και στη μεταβολή των υπόλοιπων χαρακτηριστικών. Η επίδραση είναι μικρή αλλά εμφανής στα αποτελέσματα.

Η ερμηνεία μπορεί να δοθεί έμμεσα με το εξής σκεπτικό: Στο διάγραμμα, το πρώτο κάθετο σμήνος σημείων αφορά τα συστήματα με λαμπτήρες T5 που ανήκουν στον κύκλο λειτουργίας E (πολλές εναύσεις, μικρός χρόνος λειτουργίας). Το δεύτερο σμήνος, που αποτελείται από τέσσερα σημεία είναι για τους συμπαγείς λαμπτήρες της ίδιας ομάδας, οι οποίοι όμως έχουν μικρότερη ονομαστική ζωή, άρα αν και σε απόλυτο χρόνο λειτούργησαν το ίδιο με τους T5 σε σχετικό χρόνο έχουν λειτουργήσει περισσότερο. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι τα σημεία που αντιστοιχούν στους συμπαγείς έχουν μεταφερθεί πιο ψηλά, επομένως αν είχαμε τα σημεία για σχετικό χρόνο ίσο με αυτό των λαμπτήρων T5, τότε θα φαινόταν ότι έχουν υποστεί μικρότερη μεταβολή. Επομένως ο κύκλος λειτουργίας των συγκεκριμένων συστημάτων επηρεάζει τις μεταβολές των εξεταζόμενων χαρακτηριστικών.



Σχήμα 5.17. Μεταβολή της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου του λαμπτήρα σε σχέση με τη διάρκεια της ζωής του για τους λαμπτήρες που υπερέβησαν το όριο που τέθηκε.

Με αυτές τις παρατηρήσεις αποδεικνύεται ότι και ο κύκλος λειτουργίας μεταβάλλει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του λαμπτήρα. Συγκεκριμένα, αποδείχτηκε ότι στους σύντομους κύκλους λειτουργίας οι μεταβολές του ρεύματος και της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου είναι μεγαλύτερες, άρα θα επέλθει και η καταστροφή του λαμπτήρα συντομότερα. Επίσης είναι σημαντικό ότι οι μεταβολές στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν τακτικές και όχι τυχαίες, όπως έδειξαν οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης.

Εκτός από τη φθορά του νήματος και η μεταβολή των χαρακτηριστικών του ballast είναι σημαντική αιτία καταστροφής των λαμπτήρων. Επομένως, αν ληφθεί πρόνοια από τους κατασκευαστές, ώστε τα εξαρτήματα του ballast να μη γηράσκουν σύντομα, αυτό θα επεκτείνει τη ζωή των λαμπτήρων φθορισμού. Γενικώς όμως σε αυτό το μέρος των πειραμάτων παρατηρήθηκαν πολλές καταστροφές λαμπτήρων αρκετά ενωρίς. Και μάλιστα οι περισσότερες συνέβησαν στους λαμπτήρες με σύντομους κύκλους λειτουργίας. Ταυτόχρονα όμως φάνηκε ότι σε μεγάλο ποσοστό, αυτών των ομάδων οι λαμπτήρες, δύνανται να λειτουργούν μετά από δεκάδες χιλιάδες ανάματα. Επομένως τα νέα ηλεκτρονικά ballast έλυσαν σε μεγάλο βαθμό το πρόβλημα του αριθμού των εναύσεων που επιτυγχάνει κάθε λαμπτήρας, όμως υπάρχουν περιθώρια περαιτέρω βελτίωσης, όπως έδειξε η παρούσα ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα στους αργούς κύκλους.

5.6. Υπολογιστική προσέγγιση

5.6.1. Περιγραφή εξίσωσης υπολογισμού αναμενόμενης ζωής λαμπτήρων

Η ζωή ενός λαμπτήρα φθορισμού που εργάζεται με προθέρμανση ηλεκτροδίων κατά την έναυση, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Σύμφωνα με την παρούσα μελέτη, οι καταγεγραμμένοι και μελετηθέντες παράγοντες, στο πλαίσιο της διατριβής, που επιδρούν στη ζωή του λαμπτήρα είναι συγκεκριμένοι και είναι οι εξής:

- ✓ Θερμοκρασία ηλεκτροδίου κατά την έναυση
- ✓ Μέγεθος ρεύματος αίγλης
- ✓ Διαφορά ρεύματος λειτουργίας από το συνιστώμενο
- ✓ Συχνότητα εναύσεων
- ✓ Παράγων κορυφής ρεύματος
- ✓ Θερμοκρασία περιβάλλοντος

Υπάρχουν βέβαια και άλλοι παράγοντες που επιδρούν στη ζωή του λαμπτήρα, και οι οποίοι είναι είτε πέραν των ορίων της παρούσης διατριβής, είτε δεν είναι πειραματικά μετρήσιμοι: ο ρόλος τους είναι καθοριστικός στην εξέλιξη της ζωής του λαμπτήρα, αλλά δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί αν ένας από αυτούς τελικά ήταν η αιτία της καταστροφής του. Ως παράδειγμα μπορεί να δοθεί η ποσότητα υδραργύρου μέσα στο σωλήνα: στους λαμπτήρες τοποθετείται μια ποσότητα περίπου 5 mg, η οποία με το χρόνο μειώνεται. Ο υδράργυρος έχει τη σημαντικότερη συμμετοχή στη λειτουργία του λαμπτήρα και αν μειωθεί αρκετά η ποσότητά του, ο λαμπτήρας θα πάψει να λειτουργεί, έστω και αν όλοι οι άλλοι παράγοντες είναι ιδανικοί για τη λειτουργία του. Όμως δεν θα γίνει γνωστό με σιγουριά αν φταίει η έλλειψη υδραργύρου, γιατί είναι πιθανόν η αιτία να είναι άλλη, όπως για παράδειγμα, η εισροή αέρα λόγω κακής στεγανοποίησης του σωλήνα, ή ίσως ένα προβληματικό ηλεκτρόδιο εκ κατασκευής.

Στην παρούσα διατριβή εξετάζονται οι συγκεκριμένοι μετρήσιμοι παράγοντες που

αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά το πείραμα δεν είχε σημαντική επίδραση διότι αφ' ενός ήταν σε συγκεκριμένα περιορισμένα όρια, αφ' ετέρου ήταν ίδια για όλα τα συστήματα. Γενικότερα όταν στις μετρήσεις ένα μέγεθος δεν εμφανίζεται με αξιόλογη διαφορά στα συστήματα, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συγκριτικός παράγοντας για να αξιολογηθεί η επίδρασή του. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί και ο παράγων κορυφής ρεύματος, ο οποίος είχε μικρό εύρος τιμών (από 1,35 έως 1,40) με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αποτελεί εργαλείο χειρισμού στην υπολογιστική προσέγγιση που επιχειρείται.

Απομένουν επομένως οι τέσσερις πρώτοι παράγοντες που αναφέρονται ανωτέρω. Σε αυτούς δεν συμπεριλαμβάνεται η διαφορά της τάσης λειτουργίας του λαμπτήρα από την συνιστώμενη από τον κατασκευαστή, καθόσον έχοντας συμπεριλάβει το ρεύμα λειτουργίας θα ήταν πλεονασμός να προστεθεί και η τάση. Ο λόγος είναι ότι όταν αλλάζει η τάση αλλάζει αντιστοίχως και το ρεύμα. Συγκεκριμένα όταν το ρεύμα είναι μεγαλύτερο από το κανονικό θα είναι μικρότερη η τάση, ώστε να διατηρείται περίπου σταθερή η ισχύς που αποδίδει ο λαμπτήρας. Ένας άλλος σημαντικός λόγος που δεν περιλαμβάνεται η τάση του λαμπτήρα στην έρευνά μας, είναι ότι για να μετρηθεί υπάρχουν τέσσερις εναλλακτικές συνδέσεις των τεσσάρων ακροδεκτών, οι οποίες δίνουν και διαφορετικές τιμές τάσης. Ενδεικτικά αναφέρονται για ένα τυχαίο σύστημα (το B13β) οι τιμές: 85,5 V, 88 V, 86,5 V, 88 V. Η απόκλιση μεταξύ αυτών των τιμών είναι σχετικώς μεγάλη και δεν κρίθηκε σκόπιμη η μέτρηση του χαρακτηριστικού αυτού. Στο σύστημα αυτό η τιμή του ρεύματος του λαμπτήρα ήταν 171 mA.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τέσσερις παράγοντες δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Παραδείγματος χάριν, το ρεύμα αίγλης επιδρά περισσότερο στις ομάδες με τη μεγαλύτερη συχνότητα εναύσεων, διότι επηρεάζει τη ζωή του λαμπτήρα μόνο στην έναυση αθροιστικά. Επομένως όσο συχνότερα ανάβει το σύστημα, τόσο μεγαλύτερη φθορά θα προξενεί το ρεύμα αίγλης στα ηλεκτρόδια. Παρόμοια επίδραση έχει και η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων κατά την έναυση. Αντιθέτως, το ρεύμα του λαμπτήρα αν είναι διαφορετικό από το συνιστώμενο από τον κατασκευαστή, αυτό επιδρά όσο περισσότερο χρόνο ανάβει ο λαμπτήρας και είναι ανεξάρτητο των εναύσεων.

Μετά από τη μελέτη των αποτελεσμάτων, φάνηκε ότι επειδή οι μεταβλητές που επιδρούν στην διάρκεια ζωής του λαμπτήρα είναι τέσσερις, η εύρεση ενός μαθηματικού μοντέλου απαιτεί μαθηματική επεξεργασία υψηλού επιπέδου. Ως προσφορότερη μέθοδος κρίθηκε μία τροποποιημένη μορφή πολλαπλής παλινδρόμησης με βάρη και συνεχείς, παραγωγίσιμες, μη γραμμικές συναρτήσεις. Ως μεταβλητές εισόδου του μοντέλου τίθενται οι προαναφερθέντες τέσσερις παράγοντες. Η μέθοδος εξετάζει την συνεργασία των μεταβλητών με το παλινδρομικό μοντέλο. Οι παράμετροι του μοντέλου θα είναι οι συντελεστές μιας εξίσωσης

που θα υπολογίζει την αναμενόμενη ζωή ενός λαμπτήρα. Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται όπως αυτή περιγράφεται στις εργασίες [120, 121].

Κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου προέκυψαν διαφορετικές εξισώσεις για κάθε ομάδα συστημάτων. Αυτό είχε σαν συνέπεια να μην υπεισέλθει ως μεταβλητή ο κύκλος λειτουργίας. Η μέθοδος έδειξε ότι δίνει ισχυρότερα αποτελέσματα στις ομάδες με οκτώ λαμπτήρες, δηλαδή τις ομάδες A και B με ballast μέτριου και μεγάλου χρόνου προθέρμανσης. Στις ομάδες αυτές χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία και τα οκτώ δείγματα ή αφαιρέθηκε ένα εξ αυτών με την πιο ακραία συμπεριφορά ως προς το αποτέλεσμα της ζωής του λαμπτήρα, σε σχέση με τις τιμές των εξεταζόμενων παραμέτρων. Στις εξισώσεις που προέκυψαν έγιναν μικρές αλλαγές των παραμέτρων ώστε οι εξισώσεις να έχουν ομοιομορφία, απλούστερη μορφή και στρογγυλοποιημένες παραμέτρους.

Οι μαθηματικές σχέσεις που προέκυψαν και εκφράζουν την αναμενόμενη ζωή (L) ενός λαμπτήρα θα έχουν τη μορφή της εξίσωσης:

$$L = A - \alpha \cdot L_1 - \beta \cdot L_2 - \gamma \cdot L_3 \quad (5.10)$$

- ✓ L η αναμενόμενη ζωή του λαμπτήρα σε ώρες
- ✓ A, α, β, γ παράμετροι που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου
- ✓ $L_1 = f(T)$ συνάρτηση της θερμοκρασίας (T) των ηλεκτροδίων κατά την έναυση
- ✓ $L_2 = f(I_{GL})$ συνάρτηση του ρεύματος αίγλης (I_{GL})
- ✓ $L_3 = f(I/I_{NOM})$ συνάρτηση του λόγου του ρεύματος λειτουργίας (I) προς το συνιστώμενο ρεύμα (I_{NOM})

Σύμφωνα με τη σχέση (5.10), η αναμενόμενη ζωή του λαμπτήρα προκύπτει από την αφαίρεση τριών όρων από την παράμετρο A . Ως τιμή της παραμέτρου A σε όλες τις περιπτώσεις προέκυψε ένας σταθερός αριθμός μεταξύ 227000 και 237000. Οι συναρτήσεις L_1 , L_2 και L_3 έχουν τέτοια μορφή ώστε προκύπτει μεγαλύτερη ζωή λαμπτήρα όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη, το ρεύμα αίγλης είναι μικρότερο και το ρεύμα λειτουργίας επίσης μικρότερο.

Στον πίνακα 5.26α φαίνονται οι εξισώσεις που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις ομάδες λαμπτήρων. Ο χρόνος ζωής προκύπτει σε ώρες. Η θερμοκρασία τίθεται στην κλίμακα Kelvin και το ρεύμα αίγλης σε mA. Είναι φανερό από τη μορφή των εξισώσεων ότι η θερμοκρασία επιδρά περισσότερο στα συστήματα με μέτριο χρόνο προθέρμανσης. Μία άλλη παρατήρηση που συνάγεται είναι ότι στην ομάδα B με ballast μέτριου χρόνου προθέρμανσης το ρεύμα αίγλης δεν μεταβάλλει τόσο πολύ την ζωή του λαμπτήρα όσο στις άλλες τρεις ομάδες.

Πίνακας 5.26α. Εξισώσεις που προέκυψαν με την εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης.

Σύστημα	Εξίσωση (Αναλυτικό μοντέλο)
Ομάδα Α, μέτριος χρόνος προθέρμανσης	$L = 235000 - \frac{13 \cdot 10^7}{T} - 0,036 \cdot I_{GL}^4 - 7 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{I}{I_{NOM}} \right)^4$
Ομάδα Β, μέτριος χρόνος προθέρμανσης	$L = 237000 - \frac{13 \cdot 10^7}{T} - 360 \cdot I_{GL} - 7 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{I}{I_{NOM}} \right)^4$
Ομάδα Α, μεγάλος χρόνος προθέρμανσης	$L = 227000 - \frac{52 \cdot 10^4}{\sqrt[5]{T}} - 0,036 \cdot I_{GL}^4 - 7 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{I}{I_{NOM}} \right)^4$
Ομάδα Β, μεγάλος χρόνος προθέρμανσης	$L = 235000 - \frac{52 \cdot 10^4}{\sqrt[5]{T}} - 0,036 \cdot I_{GL}^4 - 7 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{I}{I_{NOM}} \right)^4$

Προς απλοποίηση των εξισώσεων του πίνακα 5.26α γίνονται οι κάτωθι σκέψεις. Ο παράγοντας I/I_{NOM} είναι πλησίον της μονάδας σε κάθε λαμπτήρα, με αποτέλεσμα η τιμή του όρου στον οποίο περιέχεται να μην έχει μεγάλες μεταβολές. Μπορεί, λοιπόν, σε κάθε ομάδα ο όρος $L_3 = f(I/I_{NOM})$ να αντικατασταθεί από ένα σταθερό αριθμό που θα είναι η μέση τιμή των ακραίων τιμών που δύναται να λάβει. Από τους πίνακες 5.4β και 5.5β λαμβάνονται οι τιμές ώστε να τροποποιηθούν οι εξισώσεις του πίνακα 5.26α σε εκείνες που δίνονται στον πίνακα 5.26β, και αποτελούν ένα προσεγγιστικό μοντέλο.

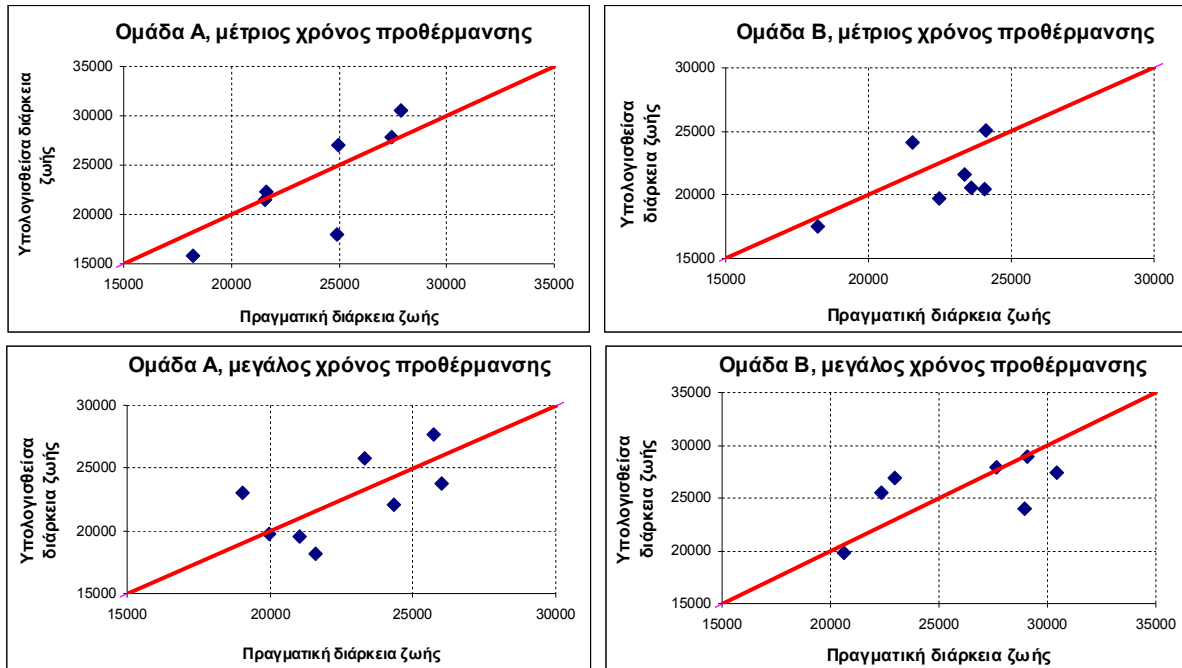
Πίνακας 5.26β. Εξισώσεις που προέκυψαν με την εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης, με αριθμητική προσέγγιση του όρου L_3 .

Σύστημα	Εξίσωση (Προσεγγιστικό μοντέλο)
Ομάδα Α, μέτριος χρόνος προθέρμανσης	$L = 151000 - \frac{13 \cdot 10^7}{T} - 0,036 \cdot I_{GL}^4$
Ομάδα Β, μέτριος χρόνος προθέρμανσης	$L = 153000 - \frac{13 \cdot 10^7}{T} - 360 \cdot I_{GL}$
Ομάδα Α, μεγάλος χρόνος προθέρμανσης	$L = 155000 - \frac{52 \cdot 10^4}{\sqrt[5]{T}} - 0,036 \cdot I_{GL}^4$
Ομάδα Β, μεγάλος χρόνος προθέρμανσης	$L = 159000 - \frac{52 \cdot 10^4}{\sqrt[5]{T}} - 0,036 \cdot I_{GL}^4$

5.6.2. Εφαρμογή και έλεγχος της μεθόδου υπολογισμού της ζωής των λαμπτήρων

Θα ελεγχθεί η ισχύς των εξισώσεων του πίνακα 5.26α στα αποτελέσματα για τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων που απέδωσε η πειραματική διαδικασία της παρούσης εργασίας. Με χρήση των στοιχείων που παρέχουν οι πίνακες 5.4β και 5.5β υπολογίζεται η θεωρητική

διάρκεια ζωής που προκύπτει με χρήση των εξισώσεων. Κατόπιν αυτού, κατασκευάζονται τα διαγράμματα του σχήματος 5.18. Σε αυτά παρουσιάζονται τα σημεία που προκύπτουν από τις εξισώσεις ως προς την πειραματικώς μετρηθείσα διάρκεια ζωής. Στα διαγράμματα έχει τοποθετηθεί και η διαγώνιος, πάνω στην οποία εάν ευρίσκονταν τα σημεία, η συμφωνία πειράματος και εξισώσεων θα ήταν τέλεια.



Σχήμα 5.18. Επιτευχθείσα και υπολογιζόμενη ζωή των λαμπτήρων.

Ο συντελεστής συσχέτισης (r) σε κάθε ομάδα μεταξύ των υπολογισθεισών και πειραματικών τιμών δίνεται στον πίνακα 5.27. Παρατηρείται ότι, η τιμή του για την ομάδα Α με μέτριο χρόνο προθέρμανσης, είναι πολύ καλή.

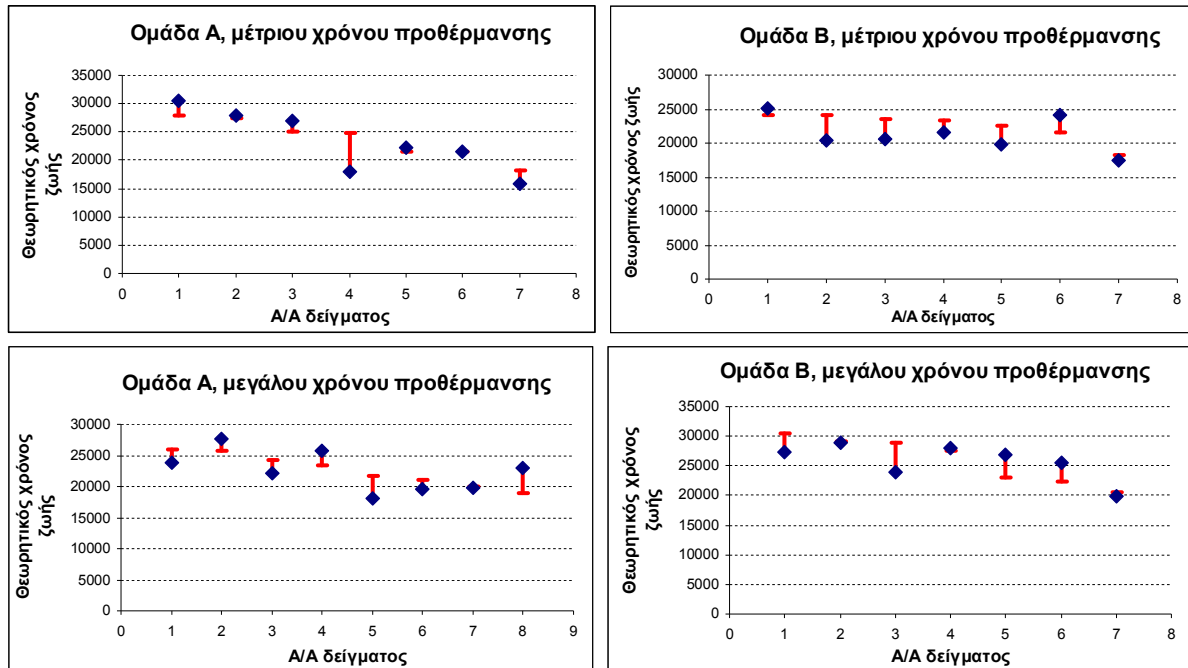
Σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 η σχέση μεταξύ των μέσων των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων βάσει των εξισώσεων βρέθηκε σημαντική. Ο έλεγχος γίνεται με χρήση της κατανομής t του Student για μικρά δείγματα. Συνοπτικά τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.27. Στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% όλοι οι μέσοι των ομάδων που εξετάζονται δίνουν σημαντικώς αποδεκτά αποτελέσματα.

Πίνακας 5.27. Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου μέσου ομάδων των λαμπτήρων που καταστράφηκαν

Ομάδα λαμπτήρων	Αριθμός δειγμάτων	Συντελεστής συσχέτισης	$t_{0,025}$	t	Έλεγχος μέσων
Ομάδα Α, μέτριος ΧΠ	7	0,816	2,179	0,209	δεκτός
Ομάδα Β, μέτριος ΧΠ	7	0,540	2,179	0,950	δεκτός
Ομάδα Α, μεγάλος ΧΠ	8	0,610	2,145	0,111	δεκτός
Ομάδα Β, μεγάλος ΧΠ	7	0,622	2,179	0,116	δεκτός

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.19 δείχνουν με παραστατικό τρόπο το

σφάλμα των τιμών που προέρχονται από την εξίσωση. Οι ρόμβοι παριστάνουν τα σημεία που παράγονται από τις εξισώσεις και οι μπάρες το σφάλμα.



Σχήμα 5.19. Θεωρητικά υπολογισθείς χρόνος ζωής λαμπτήρων και το σφάλμα ως προς τον πραγματικό χρόνο ζωής.

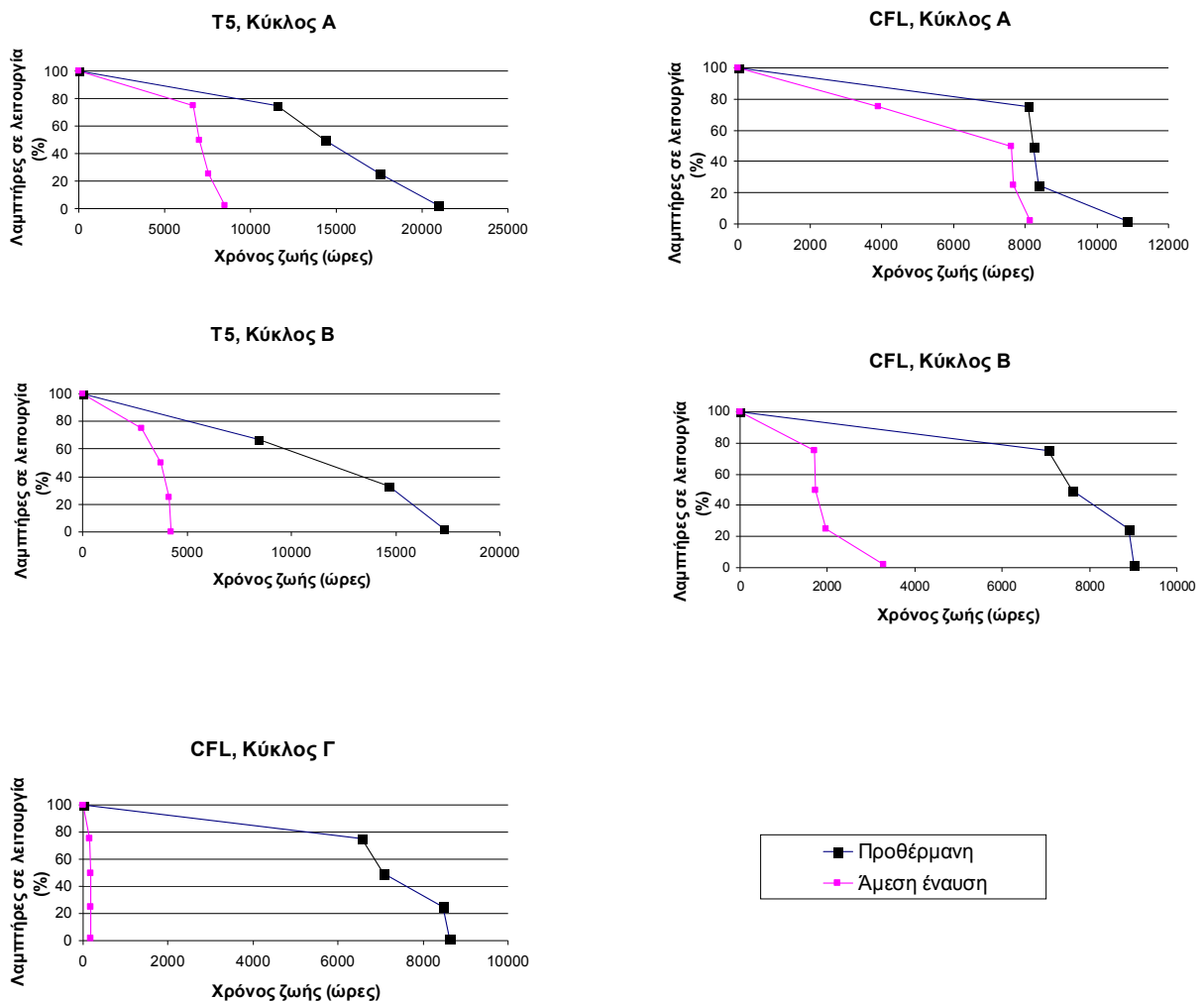
5.7. Σύγκριση συστημάτων άμεσης έναυσης και συστημάτων με προθέρμανση

Τα συστήματα με γρήγορη έναυση, σαφώς επέτυχαν ικανοποιητική διάρκεια ζωής. Στο σχήμα 5.20 παρουσιάζεται το ποσοστό των λειτουργούντων λαμπτήρων (από το σύνολο που τελικά καταστράφηκαν) σε σχέση με τη ζωή κάθε λαμπτήρα εξ αυτών. Στην κατακόρυφη στήλη δηλαδή εμφανίζεται ο συντελεστής επιβίωσης των λαμπτήρων. Ως χρόνος ζωής έχει δοθεί ο σχετικός ανάλογα με τον ονομαστικό χρόνο ζωής κάθε λαμπτήρα.



Σχήμα 5.20. Διάγραμμα καταστροφής λαμπτήρων.

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι όχι μόνο στη συχνά διακοπτόμενη λειτουργία αλλά και στην συνεχή, η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων είναι μεγαλύτερη στους λαμπτήρες που προθερμαίνονται τα ηλεκτρόδιά τους σε σχέση με τους λαμπτήρες που οδηγούνται από ballast άμεσης έναυσης. Στην παρούσα έρευνα οι λαμπτήρες T5 και οι συμπαγείς της Philips οδηγούνταν και με τα δύο είδη των ballast. Επομένως έχει ενδιαφέρον να γίνει μία σύγκριση των αποτελεσμάτων που απέδωσαν. Στο σχήμα 5.21 δίνονται τα διαγράμματα για τις ομάδες των συστημάτων αυτών ανά κύκλο λειτουργίας. Κάθε διάγραμμα περιέχει τα αποτελέσματα για τα συστήματα με άμεση και με γρήγορη έναυση. Στα διαγράμματα περιελήφθησαν μόνο οι ομάδες στις οποίες όλοι οι λαμπτήρες καταστράφηκαν πριν φθάσουν τα όρια που τέθηκαν.



Σχήμα 5.21. Διαγράμματα διάρκειας ζωής λαμπτήρων με τους δύο τύπους ballast.

Τα διαγράμματα είναι πολύ παραστατικά αφού δείχνουν τη δυσμενή επίδραση της άμεσης έναυσης στη ζωή των λαμπτήρων. Είναι πολύ έντονη η διαφορά που υπάρχει στο χρόνο λειτουργίας που παρέχουν στους λαμπτήρες από κύκλο σε κύκλο οι δύο τύποι ballast. Αυτό φαίνεται ιδιαίτερα στους συμπαγείς λαμπτήρες όπου υπάρχουν τρεις ομάδες. Στην Α ομάδα η

διαφορά είναι μικρή σε σχέση με την ομάδα Β. Στην δε ομάδα Γ η απόσταση των γραμμών είναι ιδιαίτερα μεγάλη.

5.8. Συγκριτικό πείραμα λαμπτήρων προθέρμανσης σε σύντομο κύκλο λειτουργίας

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, για πολλά είδη λαμπτήρων φθορισμού, ο χρόνος διάρκειας του κύκλου λειτουργίας έχει σημαντική επίδραση στη ζωή του λαμπτήρα, πράγμα που όπως διαπιστώθηκε στην παρούσα εργασία δεν ισχύει σε μεγάλο βαθμό για τους λαμπτήρες T5 που λειτουργούν με προθέρμανση. Βρέθηκε ότι οι σύντομοι κύκλοι τελικά επιτυγχάνουν σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής λαμπτήρα, διότι η επίδραση της έναυσης στο λαμπτήρα είναι μηδαμινή.

Πρόσφατα η Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων εξέδωσε τον Κανονισμό (ΕΚ) υπ' αριθμ. 244/2009, όπου συνιστά κύκλο λειτουργίας 1' έναυση (λειτουργία) και 3' σβέση (εκτός λειτουργίας – ψύξη) για δοκιμή του πλήθους των εναύσεων. Με χρήση αυτού του κύκλου λειτουργίας καθορίζεται αν ο λαμπτήρας πληροί τον χρόνο ζωής του κατασκευαστή ή όχι.

Στα παρουσιασθέντα πειράματα υπήρξε η ομάδα Δ στην οποία ο χρόνος λειτουργίας ήταν 1' αλλά ο χρόνος ψύξης του συστήματος ήταν πάντα 15 πρώτα λεπτά. Με αφορμή τον ανωτέρω κανονισμό, έγινε ένα πείραμα, αντίστοιχο της ομάδας Δ, αλλά με χρόνο σβέσης 3'. Ο κύκλος λειτουργίας δηλαδή ήταν ο συνιστώμενος των τεσσάρων λεπτών (1' on - 3' off). Αγοράστηκαν νέοι λαμπτήρες T5 14W της Osram του τύπου που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα της διατριβής που περιγράφηκαν. Τέθηκαν σε λειτουργία με τα ballast μέτριου και μεγάλου χρόνου προθέρμανσης της Osram και της Tridonic αντιστοίχως. Σκοπός ήταν να ελεγχθεί η υπόθεση ότι οι σύντομοι χρόνοι σβέσης των λαμπτήρων στον κύκλο λειτουργίας επηρεάζουν αρνητικά τη ζωή του λαμπτήρα.

Τα συστήματα λειτούργησαν στο χώρο που βρισκόταν και τα προηγούμενα συστήματα του πειράματος. Οι πειραματικές συνθήκες επομένως ήταν ίδιες με εκείνες. Μετρήσεις των διαφόρων χαρακτηριστικών έγιναν δύο μόνο φορές (μία στην αρχή και μία στις 80000 εναύσεις) με τον τρόπο και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε και στην κυρίως ερευνητική εργασία. Ο σκοπός αυτών των μετρήσεων ήταν ο προσδιορισμός της επίδρασης των παραμέτρων αυτών στην περίπτωση που παρουσιαζόταν ικανός αριθμός καταστροφής λαμπτήρων.

Οι 8 από τους λαμπτήρες T5 λειτούργησαν ανά δύο με το ballast Osram και οι άλλοι 8 με το ballast της Tridonic. Για τους δέκα μήνες που λειτούργησαν οι λαμπτήρες επέτυχαν περισσότερες από 110000 εναύσεις και μόνο ένας καταστράφηκε στις 57233 εναύσεις.

Ο μεγάλος αριθμός εναύσεων που επετεύχθη αποδεικνύει ότι τα συγκεκριμένα συστήματα ουσιαστικά δεν επηρεάζονται από τον μικρό χρόνο έναυσης και σβέσης όταν αυτός είναι της

τάξης του ενός πρώτου λεπτού. Αυτό σημαίνει ότι είναι σωστό το συμπέρασμα της παρούσης μελέτης ότι οι κύκλοι με μικρό χρόνο λειτουργίας στα συστήματα με προθέρμανση που χρησιμοποιήθηκαν, δεν ενδείκνυνται για υπολογισμό της ζωής του λαμπτήρα. Παρόμοια συμπεράσματα έχουν εξαχθεί και από τις εργασίες του Rosillo [103, 117, 118] για τον μη αξιόπιστο προσδιορισμό του χρόνου ζωής των λαμπτήρων φθορισμού στους κύκλους με μικρό χρόνο λειτουργίας, στα συστήματα που ερευνήθηκαν βεβαίως.

Κεφάλαιο 6

Επίδραση της πίεσης στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ηλεκτροδίου

6.1. Επίδραση της πίεσης του αερίου του λαμπτήρα στη θερμοκρασία έναυσης

Έχει ήδη αναφερθεί η σημασία της πίεσης των αερίων στους σωλήνες των λαμπτήρων φθορισμού. Εκείνο που δεν είναι ευρύτερα γνωστό, ακόμα και στην διεθνή βιβλιογραφία, είναι το πόσο και πως επηρεάζει η πίεση τη διαδικασία της έναυσης, ιδιαίτερα στα συστήματα με προθέρμανση των ηλεκτροδίων. Για την έναυση έχει σπουδαία σημασία η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου κατά τη στιγμή που επιτυγχάνεται η εκκένωση μεταξύ των άκρων του λαμπτήρα. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται διερεύνηση του φαινομένου της μετάδοσης θερμότητας του θερμού ηλεκτροδίου ενός λαμπτήρα φθορισμού T5 προς το περιβάλλον αδρανούς αερίου. Το φαινόμενο αυτό έχει καθοριστική σημασία για την τιμή της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου. Το μέγεθος που μελετήθηκε ιδιαίτερος ήταν ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με μεταφορά, ο οποίος έχει άμεση επίδραση στη θερμοκρασία του νήματος, όπως έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια.

Αφορμή για την παρούσα έρευνα, μέσα στο πλαίσιο της διατριβής, έδωσε η παρατήρηση της συμπεριφοράς ενός από τους λαμπτήρες του πειράματος. Συγκεκριμένα ο λαμπτήρας με κωδικό όνομα Δ17, σωληνωτός T5 της Philips, που οδηγούνταν από το αντίστοιχο ballast με προθέρμανση των ηλεκτροδίων, παρουσίαζε μια αξιοσημείωτη διαφορά στο ρεύμα ακριβώς πριν την επίτευξη της εκκένωσης, σε σχέση με τους άλλους όμοιους λαμπτήρες. Αυτό ήταν περί τα 0,66 A(p-p) ενώ στα υπόλοιπα συστήματα δεν ξεπερνούσε τα 0,61 A(p-p). Ήταν μη αναμενόμενη τιμή διότι η σύγκριση γινόταν σε συστήματα με ίδια εφαρμοζόμενη τάση και την ίδια αντίσταση ηλεκτροδίου.

Για να αποκλεισθεί η περίπτωση να οφείλεται η διαφορά των δύο τιμών στο ballast, ο λαμπτήρας ελέγχθηκε σε άλλο ballast με ακριβώς ίδια χαρακτηριστικά έναυσης και ο λαμπτήρας εμφάνισε ακριβώς την ίδια συμπεριφορά. Επίσης στο ballast του λαμπτήρα Δ17 τοποθετήθηκε άλλος λαμπτήρας του ίδιου τύπου και με παρόμοια αντίσταση ηλεκτροδίου και το ρεύμα που μετρήθηκε ήταν αυτό που αναμενόταν, δηλαδή 0,61 A(p-p). Άρα η αιτία δεν είχε σχέση με το ηλεκτρόδιο, αλλά με το αέριο στο εσωτερικό του λαμπτήρα, αφού κανένας άλλος λαμπτήρας του ίδιου τύπου και χαρακτηριστικών δεν παρουσίασε τέτοιες διαφορές. Το ενδεχόμενο διαφορετικής σύστασης του περιεχομένου αερίου αποκλείστηκε. Επίσης αποκλείστηκε η περίπτωση να οφείλεται η διαφορά στην τιμή του ρεύματος σε διαφορετική ποσότητα υδραργύρου που περιέχει ο λαμπτήρας, αφού το υλικό αυτό δεν επηρεάζει την προθέρμανση, αλλά μόνο τη λειτουργία του συστήματος. Η εξήγηση που

δόθηκε ήταν ότι για κάποιο λόγο η πίεση στο εσωτερικό ήταν λίγο μεγαλύτερη από την κανονική. Η μεγάλη πίεση θα είχε σαν συνέπεια την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας από το ηλεκτρόδιο (αντίσταση), λόγω περισσότερων συγκρούσεων των μορίων του αερίου. Αφού η απαγωγή θερμότητας είναι καλύτερη, θα είναι μικρότερη και η θερμοκρασία που επιτυγχάνει η επιβολή της τάσης. Επομένως η ηλεκτρική αντίσταση του νήματος θα είναι μικρότερη και κατά συνέπεια το ρεύμα θα είναι μεγαλύτερο.

Η παρατήρηση αυτή και το ότι το φαινόμενο οφείλεται στη διαφορά πίεσης του αερίου, οδήγησε σε μια σειρά πειραμάτων για τη μελέτη της συμπεριφοράς του ηλεκτροδίου κατά την έναυση υπό διάφορες πιέσεις αερίου. Ο συγκεκριμένος παράγοντας που μελετήθηκε ήταν ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με μεταφορά, του νήματος προς περιβάλλοντα διαφόρων πιέσεων των αερίων. Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει αντίστοιχη μελέτη για την συμπεριφορά ηλεκτροδίου στην περιοχή χαμηλών πιέσεων

6.2. Πειραματική διάταξη και διαδικασία μετρήσεων

Τα τελευταία χρόνια μια καλύτερη κατανόηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας σε νήματα και ίνες που βρίσκονται σε αέρια υψηλής θερμοκρασίας ή σε πλάσμα, έχει αναγνωριστεί ως ένα πεδίο σημαντικής έρευνας [64]. Όμως, σχεδόν όλες οι πειραματικές έρευνες αναφέρονται σε ρέοντα αέρια περί ένα νήμα ή μία ίνα που βρίσκεται σε ένα μικρό σχετικά σωλήνα εφοδιασμένο με σύστημα ψύξης. Το νήμα, κατά την πειραματική διαδικασία, υφίσταται μια θερμική αλλαγή και εξετάζεται ο ρυθμός ψύξης ή θέρμανσής του. Στα πειράματα, το αέριο που περιρρέει το νήμα, έχει τη μορφή ρεύματος, διότι με αυτό τον τρόπο διατηρείται σχεδόν σταθερή η θερμοκρασία του δείγματος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνουν τιμές των μετρούμενων μεγεθών, τα οποία αφορούν αποκλειστικά τις συνθήκες του πειράματος που περιγράφουν.

Στο παρόν πείραμα μελετήθηκε η μετάδοση θερμότητας νήματος, που χρησιμοποιείται στους λαμπτήρες φθορισμού, σε περιβάλλον στατικής ατμόσφαιρας, με την προκύπτουσα φυσική κυκλοφορία του περιβάλλοντος αερίου. Έγινε δηλαδή μια προσομοίωση της λειτουργίας του ηλεκτροδίου του λαμπτήρα κατά την προθέρμανση. Σε αυτή τη διαδικασία το ηλεκτρόδιο αποκτά μια θερμοκρασία πολύ σημαντική για τη ζωή του λαμπτήρα και η οποία εξαρτάται από το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του αερίου στο σωλήνα. Το φαινόμενο περιγράφεται από τις συνθήκες μετάδοσης θερμότητας με φυσική κυκλοφορία και η χρονική εξέλιξη του εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα του νήματος, την θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ηλεκτρική αντίσταση του ηλεκτροδίου.

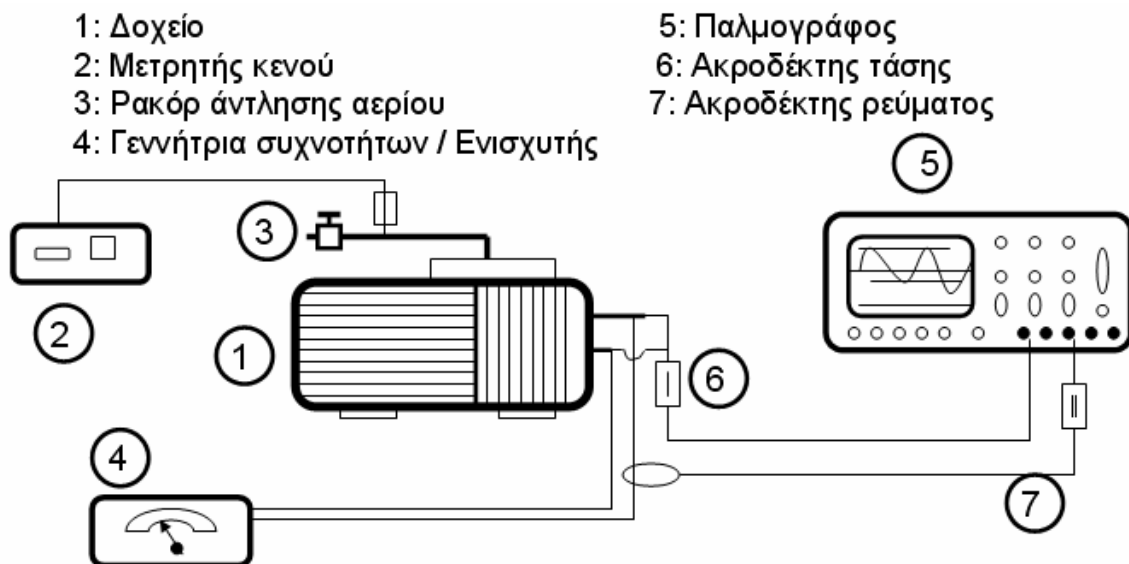
Οι λαμπτήρες φθορισμού περιέχουν στο εσωτερικό του σωλήνα μίγμα ευγενών αερίων, κυρίως όμως νέον. Η διάμετρος των μορίων του είναι πολύ μικρότερη από την μέση ελεύθερη διαδρομή τους σε πίεση ενός περίπου mbar. Το νέον έχει ακτίνα Van der Waals 0,154 nm, ενώ η μέση ελεύθερη διαδρομή του είναι περί τα 10^5 nm σε πίεση που είναι στο σωλήνα των λαμπτήρων. Ακόμα και σε ατμοσφαιρική πίεση η ελεύθερη διαδρομή των

μορίων είναι περί τα 100 nm, άρα πολύ μεγαλύτερη από την διάμετρο. Η μέση ελεύθερη διαδρομή υπολογίζεται από την σχέση [122]:

$$l = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot P} \quad (6.1)$$

όπου k είναι η σταθερά Boltzmann ίση με $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K, T είναι η θερμοκρασία (K), d είναι η διάμετρος των μορίων του αερίου και P η πίεση σε Pa.

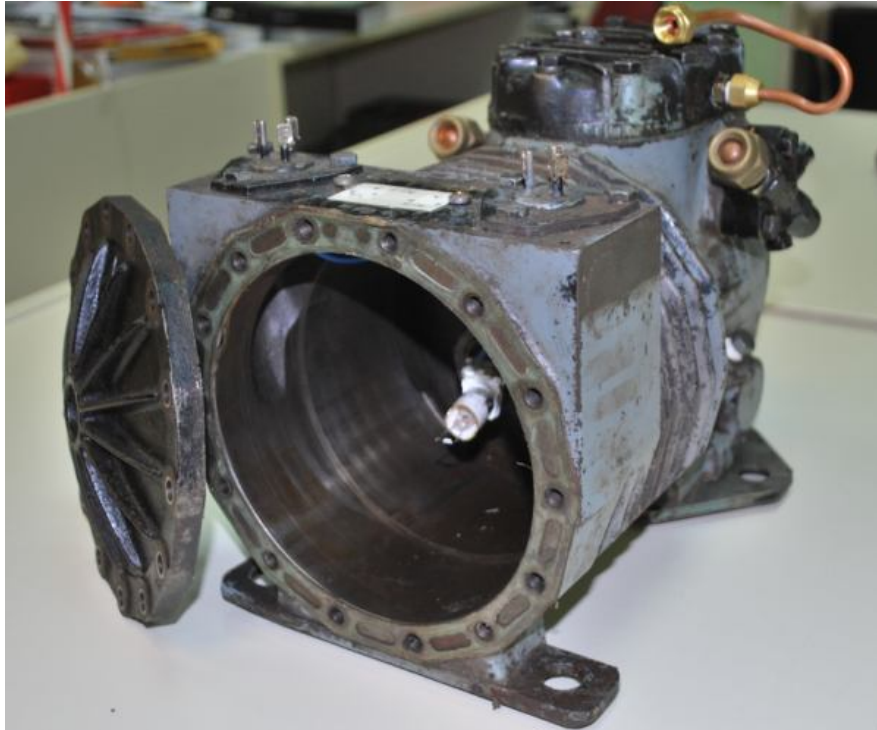
Στο σχήμα 6.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Αφαιρέθηκαν τρία ηλεκτρόδια από λαμπτήρες, τα οποία τοποθετήθηκαν σε αεροστεγή τριφασικό συμπιεστή επαγγελματικού ψυγείου ημίκλειστου τύπου. Από τη συσκευή αφαιρέθηκαν τα ηλεκτρικά εξαρτήματα από το εσωτερικό του και στους έξι ακροδέκτες του εσωτερικού του τοποθετήθηκαν τα τρία ηλεκτρόδια. Κατόπιν ο συμπιεστής σφραγίστηκε ξανά. Η συσκευή αυτή εξασφαλίζει πλήρη στεγανότητα του θαλάμου, ιδιαίτερα για τις ηλεκτρικές συνδέσεις. Η εσωτερική διάμετρος του χώρου με τα ηλεκτρόδια ήταν 162 mm ενώ η εξωτερική 200 mm. Το αντίστοιχο εσωτερικό μήκος ήταν 175 mm συν το ηλεκτρομηχανικό τμήμα του οργάνου. Στο σχήμα 6.2 φαίνεται μία φωτογραφία από το εσωτερικό του θαλάμου με το ένα από τα ηλεκτρόδια στη θέση των πειραμάτων. Τα νήματα μέσα στη συσκευή ήταν ελεύθερα για την ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον τους, το οποίο ήταν σχετικά μεγάλο σε όγκο και η χυτοσίδηρη κατασκευή του δοχείου εξασφάλιζε καλή μετάδοση θερμότητας με το περιβάλλον, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί η θερμοκρασία σταθερή κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 6.1. Συσκευές και η διάταξή τους

Τα δύο από τα ηλεκτρόδια ήταν σχεδόν ίδια σε ηλεκτρική αντίσταση, και προέρχονταν από λαμπτήρα T5 - 14 Watt, ενώ το τρίτο προερχόταν από λαμπτήρα T5 - 24 Watt. Αρχικά τα νήματα θερμάνθηκαν για αρκετά λεπτά σε ατμόσφαιρα αζώτου σε θερμοκρασία 500 °C για να μειωθούν οι εσωτερικές τάσεις τους. Το ένα από τα τρία νήματα χρησιμοποιήθηκε στις

μετρήσεις, ενώ με τα άλλα γίνονταν ενίοτε παράλληλες μετρήσεις κυρίως για επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν 23 ± 3 °C.



Σχήμα 6.2. Συσκευή μετρήσεων με ένα ηλεκτρόδιο στη θέση των πειραμάτων.

Έγιναν μετρήσεις με τροφοδοσία των νημάτων με συνεχή αλλά και με εναλλασσόμενη τάση. Τη συνεχή τάση έδινε το τροφοδοτικό ρυθμιζόμενης τάσης Heinzinger TN 30 – 600, ενώ την ημιτονοειδή τάση η γεννήτρια συχνοτήτων Thurlby Thandar Instruments TGA 1241 η οποία ενισχυόταν από ένα ενισχυτή, ιδιοκατασκευή συνεργάτη του εργαστηρίου. Για τη δημιουργία κενού στο θάλαμο χρησιμοποιήθηκε μία κοινή εργαστηριακή αντλία κενού. Τη μέτρηση της πίεσης στο εσωτερικό της συσκευής μετρούσε η συσκευή μέτρησης κενού TIF 9450D. Η συσκευή μετρά την πίεση σε Micron (M), όπου 1 kMicron (kM) ισούται με ένα Torr. Οι ακροδέκτες ρεύματος και τάσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτοί όπως και στα υπόλοιπα πειράματα της διατριβής, ενώ παράλληλα ο παλμογράφος Tektronix DPO4034 κατέγραφε και επεξεργαζόταν την τάση και το ρεύμα του νήματος. Έγιναν μετρήσεις με άζωτο και με ήλιον. Στις κύριες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το άζωτο, αλλά σε πολύ χαμηλές πιέσεις, για το επίπεδο του πειράματος, έγιναν μετρήσεις και με ήλιον. Το ήλιον δεν χρησιμοποιήθηκε σε μεγάλες πιέσεις διότι ο μετρητής κενού για αέρια εκτός του αζώτου δεν δίνει αξιόπιστες μετρήσεις σε πίεση μεγαλύτερη από 10 kM.

6.3. Θεωρητική προσέγγιση

Αρχικά έγιναν πειράματα με άζωτο. Για να εξασφαλιστεί ότι η συσκευή θα περιείχε καθαρό άζωτο χωρίς ίχνος αέρα, πρώτα έγινε άντληση του αέρα με την αντλία κενού και το δοχείο

πληρώθηκε με άζωτο. Κατόπιν αντλήθηκε ξανά το άζωτο και πληρώθηκε το δοχείο με άζωτο και πάλι. Η διαδικασία επαναλήφθηκε άλλη μια φορά και πλέον η συσκευή περιείχε άζωτο με τη λιγότερη δυνατή ποσότητα αέρα. Μετά την τελευταία άντληση η συσκευή έμεινε για ένα εικοσιτετράωρο σε πίεση 1 kM ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν εισρέει αέρας στο θάλαμο.

Η τάση εφαρμοζόταν στο ηλεκτρόδιο μέσω των ακροδεκτών της συσκευής που υπήρχαν για την τροφοδοσία της με ρεύμα όταν λειτουργούσε ως συμπιεστής ψυκτικής εγκατάστασης. Από τα ίδια σημεία γινόταν η σύνδεση των ακροδεκτών ρεύματος και τάσης, ώστε ο παλμογράφος να κάνει τις καταγραφές. Η κάθε καταγραφή γινόταν για ένα προκαθορισμένο χρόνο όπου ο παλμογράφος κατέγραφε την τάση και το ρεύμα στο νήμα μέσα στη συσκευή. Ο αντίστοιχος λόγος προθέρμανσης και η θερμοκρασία υπολογιζόταν με εφαρμογή του νόμου του Ωμ και της γνωστής σχέσης (1.8) αντίστοιχα. Όμως, επιβεβαίωση της υπολογιζόμενης από αυτή τη σχέση θερμοκρασίας, γινόταν και με χρήση πινάκων που δίνουν την ειδική αντίσταση (ρ) του βολφραμίου σε συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Η ειδική αντίσταση του βολφραμίου στους 300 K είναι 5,65 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$. Εάν μετρηθεί η αντίσταση του νήματος στους 300 K, τότε από τη γνωστή σχέση:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (6.2)$$

υπολογίζεται ο παράγων σχήματος (l/S) του ηλεκτροδίου (shape factor) που θεωρείται σταθερός. Επομένως όταν θερμανθεί το νήμα, η αντίστασή του θα μεταβληθεί σε R_h η οποία υπολογίζεται με βάση την τάση και το ρεύμα που μετρά ο παλμογράφος. Από τη σχέση (6.2) υπολογίζεται εύκολα η νέα ειδική αντίσταση ρ_h . Με χρήση του πίνακα ειδικών αντιστάσεων – θερμοκρασιών του βολφραμίου και με δεδομένη την ρ_h βρίσκεται η θερμοκρασία του νήματος.

Ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της θερμοκρασίας είναι η σχέση [62]:

$$T = 109,7 + 37,49 \cdot \rho - 0,06552 \cdot \rho^2 \quad (6.3)$$

Η οποία δίνει καλά αποτελέσματα σε περιοχές που ενδιαφέρουν τα πειράματα, δηλαδή μεταξύ 800 K και 1000 K.

Στα πειράματα οι τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης ήταν τέτοιες ώστε η θερμοκρασία του νήματος να μην υπερβαίνει τους 1000 K, και να μην κινδυνεύει με θραύση. Οι τάσεις που εφαρμόζονταν στο νήμα ήταν περίπου 2 V, 4 V, 6 V και 8 V κατά την τροφοδοσία με συνεχές και με εναλλασσόμενο ρεύμα. Οι τιμές δεν ήταν σταθερές, διότι άλλαζαν τη στιγμή της εφαρμογής της τάσης στην αντίσταση, ιδιαιτέρως, όταν η συχνότητα ήταν μεγάλη. Εκτός από την συνεχή τάση εφαρμοζόταν και εναλλασσόμενη με τις συχνότητες: 50 Hz, 10 kHz and 50 kHz. Ο παλμογράφος ήταν ρυθμισμένος να καταγράφει επί 10 δευτερόλεπτα από την έναρξη της θέρμανσης και υπολογιζόταν με μέτρηση τάσης και ρεύματος ο λόγος R_h/R_c στο πρώτο και στο ένατο δευτερόλεπτο από την εφαρμογή της τάσης. Ο υπολογισμός για το πρώτο δευτερόλεπτο γινόταν για να έχουμε προσομοίωση της προθέρμανσης των

ηλεκτροδίων στους λαμπτήρες και για το ένατο για να έχουμε τη θερμοκρασία του νήματος όταν το φαινόμενο σταθεροποιούνταν.

Στις υψηλές συχνότητες συχνά, ανάλογα με τις συνθήκες, υπάρχει το φαινόμενο του επιδερμικού φαινομένου. Όμως το νήμα του ηλεκτροδίου είναι τόσο λεπτό που δεν αντιμετωπίζει τέτοιο πρόβλημα. Στο βολφράμιο το βάθος διείσδυσης σε συχνότητα 50 kHz στους 1000 K είναι περίπου 0,2 mm. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα ήταν τύπου τριπλής περιέλιξης και η διάμετρος στο πρωτεύον νήμα μεταφοράς ρεύματος ήταν 0,07mm, επομένως το επιδερμικό φαινόμενο δεν έχει αξιόλογη επίδραση για να ληφθεί υπ' όψιν.

Η διάμετρος της δεύτερης περιέλιξης, που κατ' ουσίαν συμμετέχει στη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας λόγω της επικάλυψης που έχει με τα οξειδία [51], μετρήθηκε με μικρόμετρο και βρέθηκε 0,45 mm. Είναι γνωστό ότι η αύξηση στην αντίσταση σε εναλλασσόμενο ρεύμα είναι υπολογισμένη με ακρίβεια μόνο σε ένα ευθύ μονωμένο αγωγό. Για νήματα όπως τα ηλεκτρόδια των λαμπτήρων φθορισμού η αντίσταση επηρεάζεται από το φαινόμενο προσέγγισης (proximity effect). Επίσης οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο νήμα κατά την τροφοδοσία του περιπλέκει το επιδερμικό φαινόμενο, αφού η ειδική αντίσταση είναι εξαρτώμενη της θερμοκρασίας [123]. Όσο αυξάνεται η ειδική αντίσταση τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος διείσδυσης, αλλά και η αντίσταση αυξάνεται με τη θερμοκρασία του αγωγού. Η αυτεπαγωγή του νήματος επίσης περιπλέκει περαιτέρω τη θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου, αφού αυτή εξαρτάται από την μαγνητική διαπερατότητα (permeability) του βολφραμίου που με τη σειρά της επιδρά στο βάθος διείσδυσης. Όμως η αυτεπαγωγή διαφόρων νημάτων που χρησιμοποιούνται στους λαμπτήρες μετρήθηκε και βρέθηκε ασήμαντη (σχεδόν μη μετρήσιμη) σε θερμοκρασία δωματίου. Κατόπιν όλων αυτών των υποθέσεων το επιδερμικό φαινόμενο και η αυτεπαγωγή των νημάτων δε λαμβάνονται υπ' όψιν.

6.4. Θέρμανση ηλεκτροδίων υπό διάφορες συχνότητες

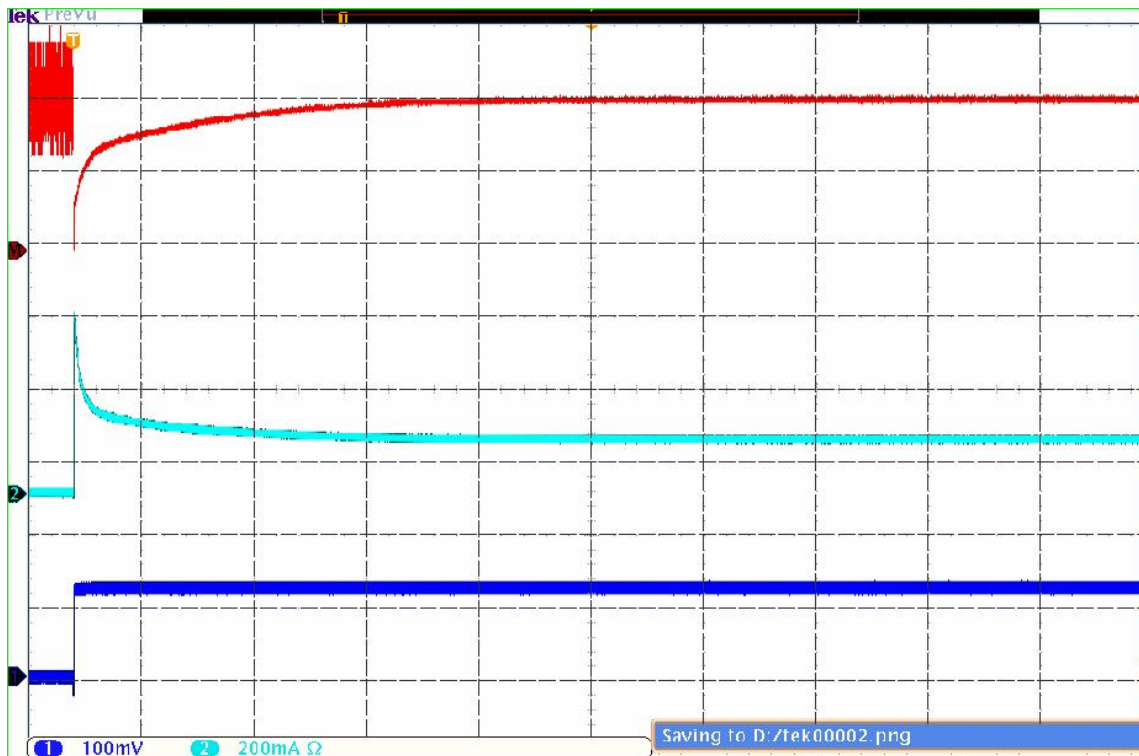
Στα τρία ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις δόθηκαν οι ονομασίες 1/14W, 2/14W και 1/24W με αντίστοιχες ηλεκτρικές αντιστάσεις: 9,72 Ω, 9,10 Ω και 2,51 Ω στους 25 °C. Στις αντιστάσεις γίνονταν τακτικές μετρήσεις της τιμής τους κατά την πορεία των πειραμάτων για έλεγχο πιθανής μεταβολής τους, λόγω των αναπτυσσομένων τάσεων, όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή [124].

Με την αντλία κενού αφαιρούνταν το άζωτο μέχρι η πίεση στο δοχείο να έλθει στην επιθυμητή τιμή. Με το τροφοδοτικό συνεχούς τάσης ή τον ενισχυτή εναλλασσόμενης εφαρμοζόταν η τάση στα άκρα του νήματος. Μετά την εφαρμογή της εκάστοτε τάσης η μέτρηση γινόταν για χρόνο 10 δευτερολέπτων στη συγκεκριμένη πίεση. Ο παλμογράφος έκανε την καταγραφή και με τους δείκτες θέσεως μετρούνταν το ρεύμα και η τάση στο

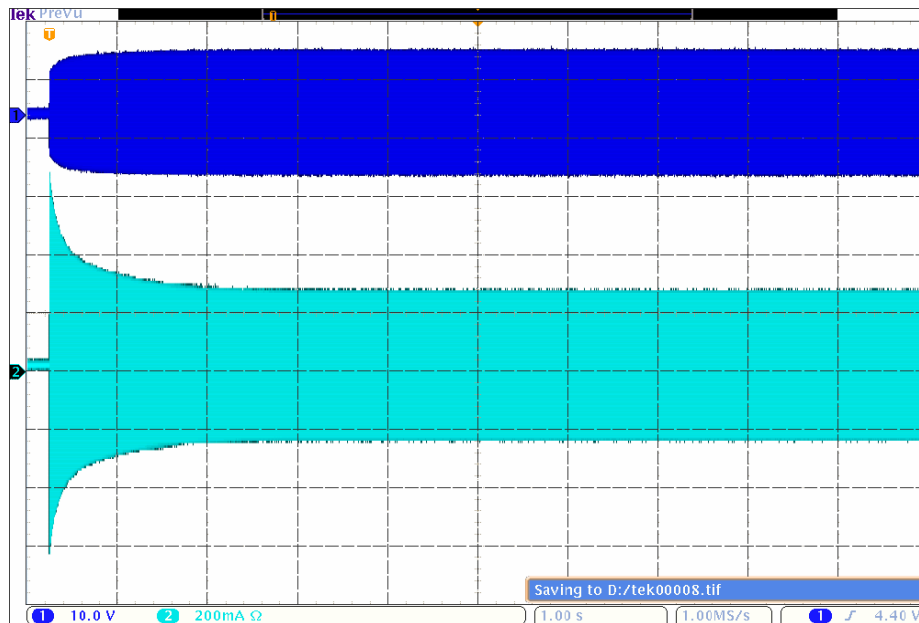
πρώτο και στο ένατο δευτερόλεπτο. Κατόπιν υπολογιζόταν η θερμή αντίσταση, ο λόγος προθέρμανσης και η αντίστοιχη θερμοκρασία.

Οι καταγραφές του παλμογράφου, όταν εφαρμοζόταν συνεχής τάση, είχαν τη μορφή του σχήματος 6.3 όπου φαίνεται μια καταγραφή για DC τάση 6 V. Η διάρκεια του φαινομένου που παρίσταται στο παλμογράφημα ήταν 10 δευτερόλεπτα. Η τάση φαίνεται στο κάτω ίχνος. Το ρεύμα είναι στο μέσον και φαίνεται ότι θέλει χρόνο μερικών δευτερολέπτων μέχρι να σταθεροποιηθεί. Το επάνω ίχνος είναι η αντίσταση σε πραγματικό χρόνο, όπως αυτή προέκυψε από την μαθηματική επεξεργασία του παλμογράφου. Η καμπύλη αυτή απεικονίζει σαφέστατα και το λόγο προθέρμανσης, αλλά και την θερμοκρασιακή μεταβολή του νήματος. Είναι προφανές ότι σε χρόνο 10 περίπου δευτερολέπτων το ρεύμα και η θερμοκρασία έχουν κατά το μάλλον ή ήττον σταθεροποιηθεί.

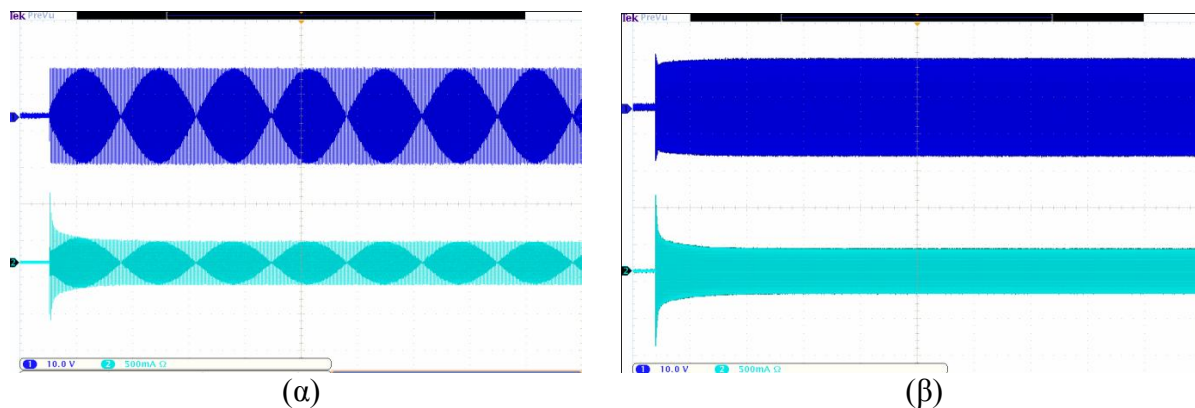
Το σχήμα 6.4 παρουσιάζει μία αντίστοιχη καταγραφή με τη διαφορά ότι η συχνότητα της τάσης είναι 50 kHz. Αξίζει να προσεχθεί η τάση (πάνω ίχνος) στην αρχή της εφαρμογής της. Για τα πρώτα δύο ή τρία δευτερόλεπτα είναι μικρότερη από την τελική της τιμή και μετά σταθεροποιείται. Αυτό οφείλεται στην υψηλή συχνότητα. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε στις συχνότητες 10 kHz και 50 kHz. Είναι γνωστό ότι οι υψηλές συχνότητες προκαλούν πτώση τάσεως. Αυτός είναι και ο λόγος που η τελική τιμή της τάσης ήταν λίγο μικρότερη από την εφαρμοζόμενη σε κενό φορτίο. Στο σχήμα 6.5 φαίνονται οι καταγραφές του παλμογράφου στις συχνότητες 50 Hz και 10 kHz αντιστοίχως.



Σχήμα 6.3 Δείγμα 1/14W, μέτρηση 10 δευτερολέπτων (1 s/div), πίεση 8,5 kM και DC τάση. Το επάνω ίχνος αφορά την αντίσταση σε πραγματικό χρόνο, το μεσαίο το ρεύμα (200 mA/div) και το κάτω την DC τάση 6V (5 V/div).



Σχήμα 6.4. Παλμογράφημα του δείγματος 1/14W για 10 δευτερόλεπτα σε πίεση 8,5 kM και 50 kHz. Το επάνω ίχνος είναι για την τάση 7,2Vrms (10 V/div) και το κάτω για το ρεύμα (200 mA/div). Χρόνος: (1 s/div).



Σχήμα 6.5. Παλμογράφημα του δείγματος 1/14W για 10 δευτερόλεπτα σε πίεση 2,3 kM και συχνότητα 50 Hz (α) και 10 kHz (β). Το επάνω ίχνος είναι για την τάση 9 Vrms (10 V/div) και το κάτω για το ρεύμα (500 mA/div). Χρόνος: (1 s/div).

6.5. Επίδραση της πίεσης και της τάσης στη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου.

Ακολουθώντας την περιγραφείσα μεθοδολογία, έγιναν μετρήσεις των απαιτούμενων χαρακτηριστικών (τάση και ρεύμα ηλεκτροδίου) και με τις προαναφερθείσες σχέσεις, υπολογίστηκε η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου υπό την αντίστοιχη τάση και υπό την πίεση του θαλάμου. Οι πίνακες 6.1 - 6.8 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των υπολογισμών για το πρώτο δευτερόλεπτο μετά την επιβολή της τάσης (οι τέσσερις πρώτοι) και για το ένατο (οι πίνακες 6.5 – 6.8). Η μέτρηση της τάσης και του ρεύματος έγινε μέσω των δεικτών θέσης του παλμογράφου, επί των καταγραφών, όπως στα σχήματα 6.3 – 6.5, ένα και εννέα δευτερόλεπτα μετά την έναρξη της θέρμανσης. Κάθε πίνακας αφορά μία

συγκεκριμένη συχνότητα τάσης που επιβλήθηκε στο δείγμα 1/14W. Στους πίνακες αυτούς δίνονται επίσης και κάποια άλλα στοιχεία. Δίνεται η θερμή αντίσταση του ηλεκτροδίου καθώς και η ειδική αντίσταση του ηλεκτροδίου που αντιστοιχεί στη δεδομένη θερμή αντίσταση. Το τελευταίο αυτό μέγεθος προσδιορίζεται από τη σχέση (6.2) με γνωστή τη θερμή αντίσταση και με σταθερή τιμή του παράγοντα σχήματος (l/S). Η τιμή αυτή είναι $1,72 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-1}$, όπως προκύπτει από τη χρήση της εξίσωσης (6.2) για τη θερμοκρασία 300 K, στην οποία η αντίσταση του ηλεκτροδίου είναι 9,72 Ω και η ειδική αντίσταση 5,65 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$. Η σχέση (6.3) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του θερμού ηλεκτροδίου (που παρατίθεται στην προτελευταία στήλη των πινάκων) ως ένας εναλλακτικός τρόπος, ο οποίος επιβεβαιώνει τις τιμές που δίνονται από τη σχέση (1.8). Η τελευταία στήλη των πινάκων δίνει το ποσοστό της διαφοράς μεταξύ των τιμών των θερμοκρασιών των υπολογιζόμενων με τις δύο διαφορετικές σχέσεις. Οι διαφορές μεταξύ των δύο τύπων υπολογισμού είναι στην περιοχή του 1% για θερμοκρασίες πέραν των 750 K και ιδιαίτερα χαμηλές κοντά στους 1000 K επιβεβαιώνοντας, ότι η σχέση (6.3), έχει καλύτερη εφαρμογή σε αυτή την περιοχή θερμοκρασιών. Για θερμοκρασίες ηλεκτροδίου μέχρι 400 K η διαφορά δεν υπερβαίνει το 3,6% και για μεγαλύτερες από 400 K ποτέ δεν υπερέβη το 2%.

Πίνακας 6.1. Θερμοκρασίες ηλεκτροδίου κατά το τέλος του πρώτου δευτερολέπτου της θέρμανσης με συνεχή τάση υπό διάφορες πιέσεις.

DC							
1 s	Τάση (V)	Ρεύμα (mA)	Θερμή αντίσταση (Ω)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 1) (K)	Ειδική αντίσταση ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 6.3) (K)	Διαφορά θερμοκρασιών (%)
1,7 kM	2,08	142	14,6	419	9	424	1,3
	4	172	23,3	610	14	605	-0,9
	6,16	190	32,4	800	19	793	-0,8
	8,08	202	40,0	949	23	946	-0,3
3,5 kM	2,02	143	14,1	407	8	413	1,6
	3,98	176	22,6	597	13	591	-0,9
	6,12	196	31,2	776	18	769	-0,9
	8,23	208	39,6	941	23	937	-0,3
8,5 kM	2,07	148	14,0	403	8	410	1,7
	4,02	184	21,8	580	13	575	-0,8
	6,15	199	30,9	769	18	762	-0,9
	8,09	211	38,3	917	22	913	-0,4
71,4 kM	2,05	147	13,9	402	8	409	1,7
	4,03	184	21,9	581	13	576	-0,8
	6,09	203	30,0	751	17	744	-1,0
	8,19	217	37,7	905	22	901	-0,5
760 kM	2	152	13,2	384	8	393	2,3
	4	193	20,7	556	12	552	-0,7
	6,1	213	28,6	723	17	716	-1,0
	8,05	223	36,1	873	21	868	-0,6

Κεφάλαιο 6: Επίδραση της πίεσης στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ηλεκτροδίου

Πίνακας 6.2. Θερμοκρασίες ηλεκτροδίου κατά το τέλος του πρώτου δευτερολέπτου της θέρμανσης με τάση 50 Hz υπό διάφορες πιέσεις.

50 Hz							
1 s	Τάση (V)	Ρεύμα (mA)	Θερμή αντίσταση (Ω)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 1) (K)	Ειδική αντίσταση ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 6.3) (K)	Διαφορά θερμοκρασιών (%)
1,7 kM	2,16	128	16,9	470	10	471	0,2
	4,29	158	27,2	692	16	685	-1,0
	6,71	178	37,7	904	22	900	-0,5
	8,34	188	44,4	1032	26	1033	0,1
3,5 kM	2,25	136	16,5	463	10	464	0,4
	4,19	165	25,4	656	15	649	-1,0
	6,22	180	34,6	842	20	836	-0,7
	8,23	192	42,9	1004	25	1003	-0,1
8,5 kM	2,22	136	16,3	458	9	460	0,5
	4,28	171	25,0	648	15	641	-1,0
	6,66	186	35,8	867	21	862	-0,6
	8,26	195	42,4	994	25	993	-0,1
71,4 kM	2,11	139	15,2	431	9	435	1,0
	4,11	172	23,9	624	14	618	-1,0
	6,01	187	32,1	794	19	787	-0,9
	7,95	201	39,6	940	23	937	-0,3
760 kM	1,95	132	14,8	422	9	427	1,2
	3,9	170	22,9	604	13	598	-0,9
	5,88	190	30,9	770	18	763	-0,9
	7,86	207	38,0	910	22	905	-0,5

Πίνακας 6.3. Θερμοκρασίες ηλεκτροδίου κατά το τέλος του πρώτου δευτερολέπτου της θέρμανσης με τάση 10 kHz υπό διάφορες πιέσεις.

10 kHz							
1 s	Τάση (V)	Ρεύμα (mA)	Θερμή αντίσταση (Ω)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 1) (K)	Ειδική αντίσταση ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 6.3) (K)	Διαφορά θερμοκρασιών (%)
1,7 kM	1,99	129	15,4	437	9	441	0,9
	3,68	161	22,9	602	13	596	-0,9
	5,88	177	33,2	816	19	809	-0,8
	7,32	189	38,7	924	23	921	-0,4
3,5 kM	2,41	144	16,7	467	10	468	0,3
	4,43	174	25,5	657	15	650	-1,0
	6,09	186	32,7	806	19	800	-0,8
	6,92	193	35,9	868	21	863	-0,6
8,5 kM	1,87	134	14,0	403	8	410	1,7
	3,52	170	20,7	555	12	552	-0,7
	5,4	191	28,3	715	16	708	-1,0
	7,62	203	37,5	901	22	897	-0,5
71,4 kM	1,68	127	13,2	386	8	394	2,2
	3,27	169	19,3	525	11	523	-0,4
	5,22	191	27,3	696	16	689	-1,0
	7,26	203	35,8	866	21	861	-0,6
760 kM	1,5	118	12,7	373	7	383	2,7
	2,99	166	18,0	496	10	495	-0,1
	4,71	192	24,5	637	14	631	-1,0
	6,5	207	31,4	779	18	772	-0,9
	8,44	219	38,5	921	22	917	-0,4

Κεφάλαιο 6: Επίδραση της πίεσης στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ηλεκτροδίου

Πίνακας 6.4. Θερμοκρασίες ηλεκτροδίου κατά το τέλος του πρώτου δευτερολέπτου της θέρμανσης με τάση 50 kHz υπό διάφορες πιέσεις.

50 kHz							
1 s	Τάση (V)	Ρεύμα (mA)	Θερμική αντίσταση (Ω)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 1) (K)	Ειδική αντίσταση ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 6.3) (K)	Διαφορά θερμοκρασιών (%)
1,7 kM	1,63	121	13,5	391	8	399	2,0
	3,51	160	21,9	582	13	577	-0,8
	5,38	179	30,1	752	17	745	-1,0
	6,89	189	36,5	880	21	875	-0,6
3,5 kM	1,35	110	12,3	363	7	374	3,1
	3,21	159	20,2	544	12	541	-0,6
	5,04	182	27,7	703	16	696	-1,0
	7,36	199	37,0	890	22	886	-0,5
8,5 kM	1,32	112	11,8	351	7	364	3,6
	3,06	163	18,8	513	11	511	-0,3
	5,11	190	26,9	687	16	680	-1,0
	7,01	201	34,9	849	20	843	-0,7
71,4 kM	1,61	126	12,8	375	7	385	2,6
	3,15	168	18,8	512	11	511	-0,3
	5,2	193	26,9	688	16	681	-1,0
	7	205	34,1	834	20	828	-0,7
760 kM	1,44	115	12,5	369	7	379	2,8
	2,85	164	17,4	481	10	482	0,1
	4,52	191	23,7	619	14	613	-0,9
	6,13	204	30,0	752	17	745	-1,0
	7,71	216	35,7	865	21	859	-0,6

Πίνακας 6.5. Θερμοκρασίες ηλεκτροδίου κατά το τέλος του ένατου δευτερολέπτου της θέρμανσης με συνεχή τάση υπό διάφορες πιέσεις.

DC							
9 s	Τάση (V)	Ρεύμα (mA)	Θερμική αντίσταση (Ω)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 1) (K)	Ειδική αντίσταση ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 6.3) (K)	Διαφορά θερμοκρασιών (%)
1,7 kM	2,08	114	18,2	501	11	500	-0,2
	4,01	142	28,2	715	16	708	-1,0
	6,16	164	37,6	902	22	897	-0,5
	8,08	180	44,9	1042	26	1043	0,1
3,5 kM	2,03	117	17,4	481	10	481	0,1
	3,98	148	26,9	687	16	680	-1,0
	6,13	170	36,1	872	21	867	-0,6
	8,23	188	43,8	1021	25	1021	0,0
8,5 kM	2,07	121	17,1	475	10	476	0,2
	4,03	154	26,2	672	15	665	-1,0
	6,16	176	35,0	851	20	845	-0,7
	8,1	194	41,8	983	24	981	-0,2
71,4 kM	2,05	123	16,7	465	10	467	0,3
	4,04	159	25,4	656	15	649	-1,0
	6,1	181	33,7	825	20	819	-0,8
	8,19	203	40,3	956	23	953	-0,3
760 kM	2	129	15,5	439	9	442	0,8
	4	168	23,8	622	14	616	-1,0
	6,1	191	31,9	790	19	783	-0,9
	8,05	209	38,5	920	22	916	-0,4

Κεφάλαιο 6: Επίδραση της πίεσης στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ηλεκτροδίου

Πίνακας 6.6. Θερμοκρασίες ηλεκτροδίου κατά το τέλος του ένατου δευτερολέπτου της θέρμανσης με τάση 50 Hz υπό διάφορες πιέσεις.

50 Hz							
9 s	Τάση (V)	Ρεύμα (mA)	Θερμή αντίσταση (Ω)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 1) (K)	Ειδική αντίσταση ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 6.3) (K)	Διαφορά θερμοκρασιών (%)
1,7 kM	2,17	101	21,5	572	12	568	-0,8
	4,3	130	33,1	813	19	806	-0,8
	6,71	154	43,6	1017	25	1017	0,0
	8,35	167	50,0	1138	29	1144	0,5
3,5 kM	2,24	107	20,9	560	12	556	-0,7
	4,17	134	31,1	774	18	767	-0,9
	6,2	155	40,0	949	23	946	-0,3
	8,24	173	47,6	1094	28	1098	0,3
8,5 kM	2,2	109	20,2	544	12	541	-0,6
	4,29	141	30,4	759	18	752	-0,9
	6,66	166	40,1	951	23	949	-0,3
	8,26	179	46,1	1066	27	1068	0,2
71,4 kM	2,1	113	18,6	508	11	507	-0,3
	4,08	143	28,5	721	17	714	-1,0
	6,03	167	36,1	873	21	868	-0,6
	7,99	186	43,0	1006	25	1005	-0,1
760 kM	1,95	112	17,4	482	10	482	0,1
	3,93	150	26,2	672	15	666	-1,0
	5,94	175	33,9	830	20	824	-0,7
	7,88	194	40,6	961	24	959	-0,2

Πίνακας 6.7. Θερμοκρασίες ηλεκτροδίου κατά το τέλος του ένατου δευτερολέπτου της θέρμανσης με τάση 10 kHz υπό διάφορες πιέσεις.

10 kHz							
9 s	Τάση (V)	Ρεύμα (mA)	Θερμή αντίσταση (Ω)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 1) (K)	Ειδική αντίσταση ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 6.3) (K)	Διαφορά θερμοκρασιών (%)
1,7 kM	2,12	104	20,4	548	12	545	-0,6
	3,9	129	30,2	756	18	748	-0,9
	6,17	154	40,1	950	23	947	-0,3
	7,54	166	45,4	1052	26	1054	0,2
3,5 kM	2,66	117	22,7	599	13	594	-0,9
	4,67	144	32,4	800	19	793	-0,8
	6,35	161	39,4	938	23	935	-0,3
	7,18	169	42,5	997	25	996	-0,1
8,5 kM	2,03	103	19,7	533	11	531	-0,5
	3,75	137	27,4	697	16	690	-1,0
	5,58	160	34,9	849	20	843	-0,7
	7,87	180	43,7	1020	25	1020	0,0
71,4 kM	1,84	109	16,9	470	10	471	0,2
	3,47	139	25,0	647	15	640	-1,0
	5,42	164	33,0	812	19	806	-0,8
	7,42	183	40,5	959	24	957	-0,3
760 kM	1,6	104	15,4	436	9	440	0,9
	3,17	143	22,2	587	13	582	-0,8
	4,91	168	29,2	735	17	728	-1,0
	6,71	188	35,7	865	21	859	-0,6
	8,61	206	41,8	983	24	982	-0,1

Πίνακας 6.8. Θερμοκρασίες ηλεκτροδίου κατά το τέλος του ένατου δευτερολέπτου της θέρμανσης με τάση 50 kHz υπό διάφορες πιέσεις.

50 kHz							
9 s	Τάση (V)	Ρεύμα (mA)	Θερμή αντίσταση (Ω)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 1) (K)	Ειδική αντίσταση (μΩ·cm)	Θερμοκρασία (βάσει εξ. 6.3) (K)	Διαφορά θερμοκρασιών (%)
1,7 kM	1,74	98	17,8	490	10	490	0,0
	3,83	130	29,5	740	17	733	-1,0
	5,63	149	37,8	906	22	902	-0,5
	7,1	163	43,6	1017	25	1017	0,0
3,5 kM	1,49	94	15,9	447	9	450	0,7
	3,48	131	26,6	680	15	673	-1,0
	5,35	153	35,0	851	20	845	-0,7
	7,55	172	43,9	1024	26	1024	0,0
8,5 kM	1,44	96	15,0	427	9	432	1,1
	3,35	132	25,4	655	15	649	-1,0
	5,3	157	33,8	827	20	820	-0,8
	7,3	177	41,2	973	24	971	-0,2
71,4 kM	1,67	104	16,1	451	9	454	0,6
	3,42	139	24,6	639	14	633	-1,0
	5,45	165	33,0	812	19	805	-0,8
	7,19	183	39,3	935	23	932	-0,4
760 kM	1,54	102	15,1	429	9	434	1,0
	3,07	141	21,8	578	13	574	-0,8
	4,71	166	28,4	718	16	710	-1,0
	6,31	185	34,1	834	20	827	-0,7
	7,82	200	39,1	932	23	928	-0,4

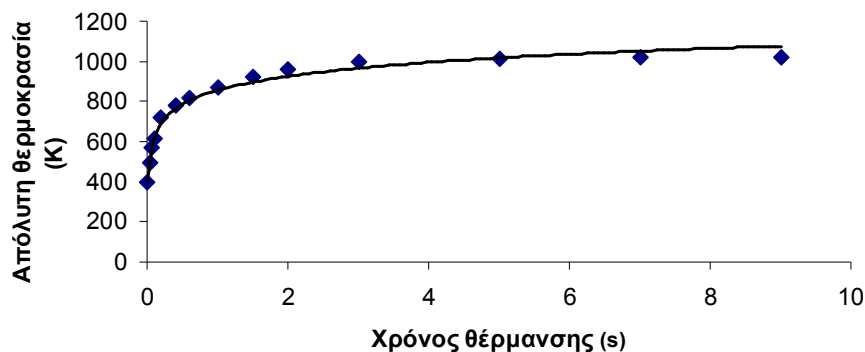
Με βάση αυτές τις μετρήσεις ακολουθεί η ανάλυση του φαινομένου που διερευνά το παρόν κεφάλαιο.

6.6. Διερεύνηση μεταβολής θερμοκρασίας ηλεκτροδίου κατά τη θέρμανση

Από την μελέτη των παλμογραφημάτων που παρουσιάστηκαν συνάγεται το συμπέρασμα ότι ο χρόνος για την σταθεροποίηση του φαινομένου, είναι λίγα δευτερόλεπτα. Για την καλύτερη διερεύνηση του φαινομένου της χρονικής σταθεροποίησης της θερμικής ισορροπίας του ηλεκτροδίου έγινε με τον παλμογράφο μέτρηση τάσης και ρεύματος ενός εκ των νημάτων, κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και υπολογίστηκε η αντίστοιχη θερμή αντίσταση. Με χρήση της εξίσωσης (1.8) υπολογίστηκε η θερμοκρασία του νήματος ως προς το χρόνο, για το δείγμα 2/14W όταν η πίεση ήταν 3,5 kM και η τάση 6 V, συνεχής. Τα ρομβοειδή σημεία του σχήματος 6.5 αντιπροσωπεύουν τη θερμοκρασία σε διάφορες χρονικές στιγμές και η καμπύλη την καλύτερη λογαριθμική προσαρμογή. Σε αυτή την καμπύλη ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) είναι 0,9816 που δείχνει μια καλή προσέγγιση με αντίστοιχη λογαριθμική εξίσωση:

$$T = 100,46 \cdot \ln(t) + 855,41 \quad (6.4)$$

Ασφαλώς η εξίσωση (6.4) ισχύει μόνο για τις συγκεκριμένες συνθήκες τάσης και πίεσης.



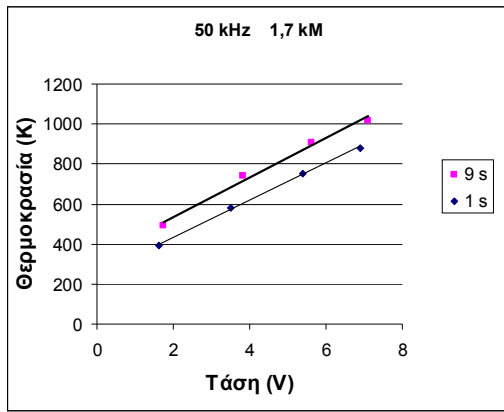
Σχήμα 6.6 Καμπύλη θέρμανσης ηλεκτροδίου 2/14W υπό 3,5 kM, τάση DC 6 V.

Στο σχήμα 6.7 φαίνεται ακόμα ένα ενδιαφέρον σημείο των μετρήσεων. Στα διαγράμματα παρουσιάζεται η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου κατά τη θέρμανσή του, σε διάφορες τάσεις σε δύο χρόνους: στο πρώτο δευτερόλεπτο και στο ένατο. Οι τιμές προέρχονται από τις μετρήσεις στους πίνακες της προηγούμενης παραγράφου και αφορούν τη συχνότητα 50 kHz, στην οποία συνήθως λειτουργούν οι λαμπτήρες φθορισμού με ηλεκτρονικό ballast. Το άνω ίχνος είναι στο ένατο δευτερόλεπτο της θέρμανσης και το κάτω στο πρώτο.

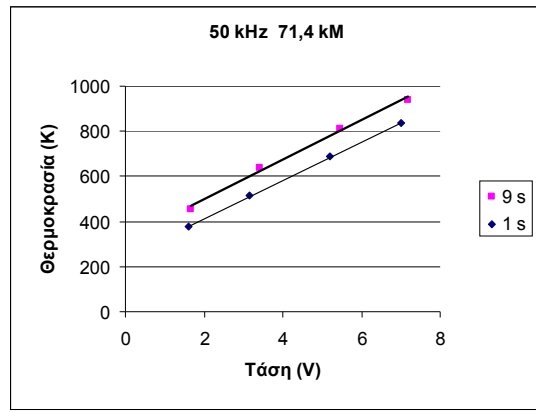
Από τη μελέτη των πινάκων που προαναφέρθηκαν, στη συχνότητα 50 kHz υπολογίζεται ότι η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη κατά 68 K έως 136 K, όταν αυτή έχει σταθεροποιηθεί (9^ο δευτερόλεπτο), σε σχέση με το πρώτο δευτερόλεπτο από την έναρξη της θέρμανσης. Από τα σχήματα 6.3, 6.4 και 6.5 φάνηκε ότι αρχικά η θερμοκρασία έχει μια γρήγορη αύξηση. Πάντως στους λαμπτήρες φθορισμού δεν θα πρέπει να γίνεται προθέρμανση επί μακρόν χρόνο, ώστε να αναπτυχθεί μεγάλη θερμοκρασία στα ηλεκτρόδια, διότι κατά την προθέρμανση αναπτύσσεται και ρεύμα αίγλης που φθείρει τα ηλεκτρόδια. Ούτε όμως και μεγάλη τάση για να συντομευτεί η προθέρμανσή τους, διότι και πάλι λόγω αυτής της μεγάλης τάσης, τα ηλεκτρόδια φθείρονται.

Στα διαγράμματα του σχήματος 6.7 έχουν χαραχθεί οι ευθείες παλινδρόμησης (best fit curves – regression lines) και στους πίνακες φαίνονται οι αντίστοιχοι συντελεστές προσδιορισμού (R^2). Είναι σημαντικό ότι στην περιοχή θερμοκρασιών των μετρήσεων τα σημεία βρίσκονται σχεδόν σε ευθεία με συντελεστές προσδιορισμού όχι μικρότερους από 0,987. Επίσης στους πίνακες φαίνονται και οι εξισώσεις που αντιστοιχούν στις ευθείες παλινδρόμησης, οι οποίες είναι σχεδόν παράλληλες ανά δύο, αν κριθούν από το συντελεστή της τάσης και έχουν προκύψει από το λογισμικό πρόγραμμα excel. Μάλιστα, αν περιοριστεί η διερεύνηση στους λαμπτήρες φθορισμού, δηλαδή στις χαμηλές πιέσεις των μετρήσεων, φαίνεται πως για κάθε επί πλέον Volt που επιβάλλεται στο ηλεκτρόδιο του λαμπτήρα, η θερμοκρασία του αυξάνεται κατά περίπου 90 K. Η θερμοκρασία των 90 K προκύπτει από το συντελεστή της τάσης στις εξισώσεις στο πρώτο δευτερόλεπτο. Αυτή η παρατήρηση είναι σημαντική για τους κατασκευαστές συστημάτων φθορισμού, διότι προσδιορίζει την θερμοκρασία του ηλεκτροδίου κατά την προθέρμανση. Όταν όμως το αέριο θα είναι διαφορετικό, διαφορετική θα είναι και η θερμοκρασιακή διαφορά.

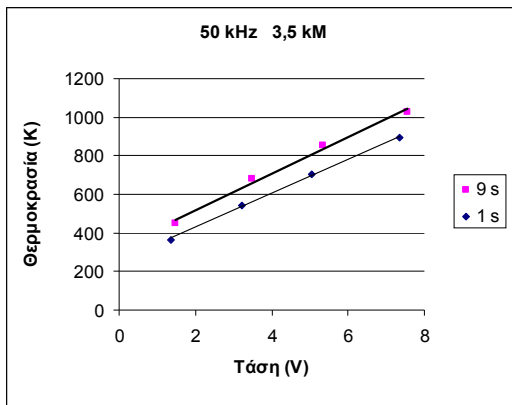
Κεφάλαιο 6: Επίδραση της πίεσης στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ηλεκτροδίου



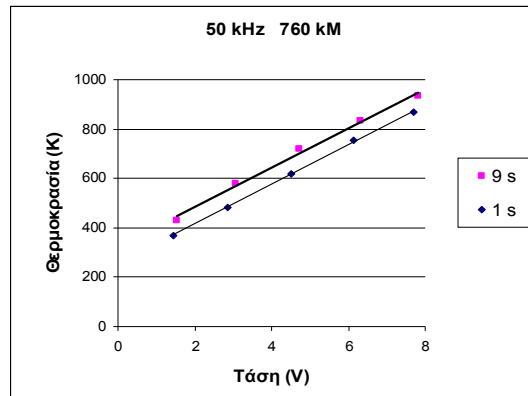
1,7 kM		
Χρόνος	Θερμοκρασία (K)	R ²
9 ^ο s	98,661·V+338,14	0,9900
1 ^ο s	92,994·V+247,61	0,9985



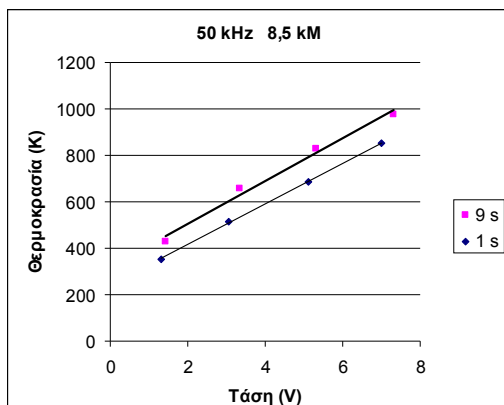
71,4 kM		
Χρόνος	Θερμοκρασία (K)	R ²
9 ^ο s	87,512·V+322,68	0,9924
1 ^ο s	85,398·V+241,21	0,9996



3,5 kM		
Χρόνος	Θερμοκρασία (K)	R ²
9 ^ο s	94,784·V+328,01	0,9910
1 ^ο s	87,679·V+254,38	0,9980



760 kM		
Χρόνος	Θερμοκρασία (K)	R ²
9 ^ο s	79,868·V+324,65	0,9936
1 ^ο s	79,963·V+255,97	0,9994

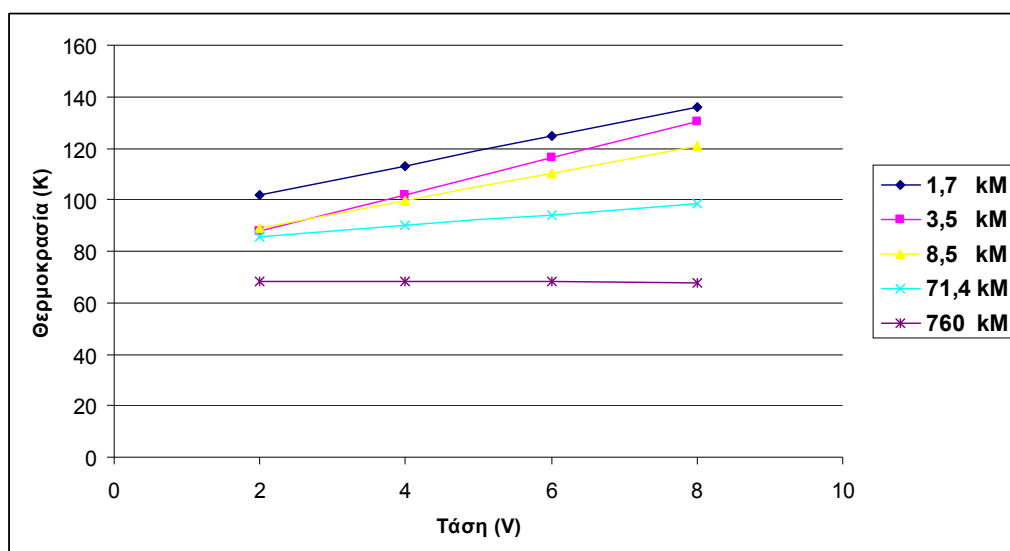


8,5 kM		
Χρόνος	Θερμοκρασία (K)	R ²
9 ^ο s	92,661·V+318,79	0,9874
1 ^ο s	87,317·V+240,64	0,9996

Σχήμα 6.7 Θερμοκρασία ηλεκτροδίου κατά τη μεταβολή της τάσης στο πρώτο και στο ένατο δευτερόλεπτο της θέρμανσης σε συχνότητα 50 kHz σε διάφορες πιέσεις.

Αν χρησιμοποιηθούν υφιστάμενες έρευνες για το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας των αερίων αναλόγως του μοριακού βάρους τους [62], είναι εύκολο να βρεθεί η θερμοκρασιακή διαφορά που αντιστοιχεί στο μίγμα που περιέχει ο λαμπτήρας, εφ' όσον χρησιμοποιηθεί το ανωτέρω αποτέλεσμα με τη χρήση αζώτου.

Στο σχήμα 6.8 φαίνεται ένα περισσότερο ενημερωτικό διάγραμμα της διαφοράς των θερμοκρασιών του ηλεκτροδίου, μεταξύ του ένατου δευτερολέπτου, που θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας, και του πρώτου δευτερολέπτου, στη συχνότητα των 50 kHz. Συγκεκριμένα κάθε καμπύλη του διαγράμματος (είναι σχεδόν ευθείες και έχουν σχεδιαστεί απλώς για να ενώσουν τα σημεία) έχει προκύψει από την διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ ένατου και πρώτου δευτερολέπτου για τις τάσεις: 2 V, 4 V, 6 V και 8 V, για μια δεδομένη πίεση του αζώτου στο θάλαμο. Οι διαφορές αυτές βρέθηκαν θεωρώντας τις ευθείες του σχήματος 6.7 για τις διάφορες τάσεις και με χρήση των εξισώσεών τους, όπως αυτές φαίνονται στα διαγράμματα.



Σχήμα 6.8. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ένατου και πρώτου δευτερολέπτου της θέρμανσης του ηλεκτροδίου για διάφορες πιέσεις.

Από το διάγραμμα φαίνεται σαφώς, ότι οι διαφορές είναι μεγαλύτερες στις μικρότερες πιέσεις. Ο λόγος είναι ότι:

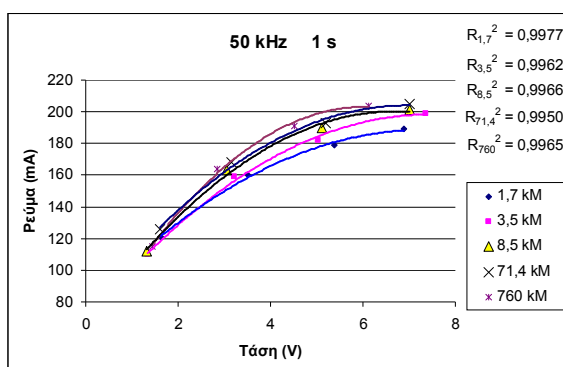
- ✓ Με τη θέρμανση σε υψηλότερες πιέσεις η απαγωγή της θερμότητας από το ηλεκτρόδιο γίνεται ταχύτερα και κατ' αυτόν τον τρόπο οι διαφορές αμβλύνονται.
- ✓ Σε υψηλές πιέσεις οι θερμοκρασίες είναι μικρότερες.

Αν θεωρηθεί ότι οι λαμπτήρες φθορισμού T5 εργάζονται σε πιέσεις μεταξύ 1 και 10 kM και με τάση προθέρμανσης περίπου 8 V, τότε η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας σταθεροποίησης και εκείνης της έναυσής τους, φαίνεται από το διάγραμμα ότι θα είναι λίγο μεγαλύτερη από 120 K.

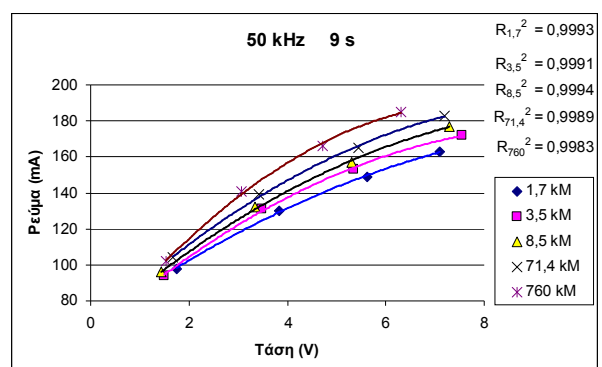
6.7. Μελέτη μεταβολής του ρεύματος υπό διάφορες πιέσεις

Η μεταφορά θερμότητας από ένα σώμα προς το περιβάλλον του, είναι φυσικό να εξαρτάται από την πίεση που επικρατεί γύρω από αυτό. Συχνά όμως στη βιβλιογραφία ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας θεωρείται ανεξάρτητος της πίεσης [125 - 127]. Αυτό δικαιολογείται από την αύξηση της ταχύτητας και της μέσης ελεύθερης διαδρομής των μορίων του αερίου, όταν μειώνεται η πίεση, που έχει ως αποτέλεσμα το κάθε μόριο να αποσπά περισσότερη θερμότητα αντισταθμίζοντας τον μικρότερο αριθμό και έτσι μένει αμετάβλητος ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας. Επίσης, η μη μεταβολή στη μετάδοση της θερμότητας, αναφέρεται ότι συμβαίνει σε ειδικές συνθήκες, όπως στα αέρια που θεωρούνται ως ιδανικά ή όταν η μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων του αερίου είναι συγκρίσιμη με την κύρια διάσταση του δείγματος. Η παρούσα έρευνα απέδειξε ότι η πίεση επιφέρει σημαντική μεταβολή στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, καθόσον έγινε χρήση αερίων που στις συνθήκες του πειράματος απείχαν πολύ από τη συμπεριφορά των ιδανικών αερίων. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εκτός από το άζωτο χρησιμοποιήθηκε και ήλιον, αλλά και αέρας, για χαμηλές θερμοκρασίες και τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν για όλα τα αέρια.

Για την μελέτη του φαινομένου, κατ' αρχάς διερευνήθηκε η επίδραση της πίεσης στην ένταση του ρεύματος, που διαρρέει το νήμα που τοποθετήθηκε στο θάλαμο των πειραμάτων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν κυρίως τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν στους πίνακες 6.1 – 6.8, τα οποία προέκυψαν από μία σειρά μετρήσεων με σχετικώς σταθερή τάση ποικίλων συχνοτήτων υπό διάφορες πιέσεις. Από τους πίνακες αυτούς, είναι εύκολο να κατασκευαστούν διαγράμματα τάσης-ρεύματος για τις επιλεγμένες πιέσεις και συχνότητες. Ενδεικτικά παρατίθενται τα σχήματα 6.9 και 6.10 για τη συχνότητα των 50 kHz που συνηθίζεται στους λαμπτήρες φθορισμού. Το σχήμα 6.9 αφορά τις τιμές των μετρήσεων στο τέλος του πρώτου δευτερολέπτου της θέρμανσης του ηλεκτροδίου 1/14W και το σχήμα 6.10 στο τέλος του ενάτου δευτερολέπτου.



Σχήμα 6.9. Μεταβολή του ρεύματος του ηλεκτροδίου με την τάση και την πίεση στο δείγμα 1/14W κατά το πρώτο δευτερόλεπτο της θέρμανσης. Συχνότητα 50 kHz.



Σχήμα 6.10. Μεταβολή του ρεύματος του ηλεκτροδίου με την τάση και την πίεση στο δείγμα 1/14W κατά το ένατο δευτερόλεπτο της θέρμανσης. Συχνότητα 50 kHz.

Κάθε καμπύλη των διαγραμμάτων αφορά και διαφορετική πίεση. Μετρήσεις έγιναν σε πέντε διαφορετικές πιέσεις αζώτου: 1,7 kM, 3,5 kM, 8,5 kM, 71,4 kM και σε μία ατμόσφαιρα (760 kM). Οι τιμές αφορούν στο δείγμα 1/14W, όμως τα συμπεράσματα επιβεβαιώθηκαν με αντίστοιχες μετρήσεις και στα υπόλοιπα δείγματα, τα οποία έδωσαν τιμές που ακολουθούν παρόμοιες καμπύλες. Οι καμπύλες που τοποθετήθηκαν στα διαγράμματα είναι οι παραβολές παλινδρόμησης που αντιστοιχούν στα σημεία του διαγράμματος και συντελεστές προσδιορισμού δίνονται στο σχήμα. Από τις τιμές τους φαίνεται, ότι τα σημεία ακολουθούν με πολύ δυνατή συσχέτιση (very strong correlation) παραβολικές εξισώσεις.

Η τάση που εφαρμοζόταν είχε βήμα περίπου 2 V, οπότε υπήρχαν τέσσερις μετρήσεις σε κάθε πίεση. Το ρεύμα μετρήθηκε από την καταγραφή του παλμογράφου. Επειδή υπήρχε κίνδυνος καταστροφής του ηλεκτροδίου από υπερβολική θερμοκρασία, γι αυτό η τάση που εφαρμόστηκε δεν ήταν μεγαλύτερη από τα 9 V, στην οποία η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου ήταν περίπου 1000 K.

Είναι εμφανές από τις καμπύλες των σχημάτων, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση, τόσο περισσότερο είναι και το ρεύμα που διαρρέει το νήμα για την ίδια τάση. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση, τόσο περισσότερα μόρια αζώτου υπάρχουν στο δοχείο. Αυτό βοηθά στην καλύτερη μεταφορά θερμότητας από το νήμα στο περιβάλλον αφού περισσότερα σωματίδια προσπίπτουν σε αυτό. Επομένως η θερμοκρασία θα είναι μικρότερη και το ρεύμα που ρέει στο νήμα μεγαλύτερο.

Οι παραβολές στα σχήματα φαίνεται πως έχουν ένα κοινό σημείο εκκίνησης, που προφανώς θα είναι το σημείο τομής των αξόνων (0,0) και αντιστοιχεί στην περίπτωση που δεν υφίσταται τάση στα άκρα του ηλεκτροδίου. Επίσης φαίνεται ότι, ιδιαιτέρως κατά το πρώτο δευτερόλεπτο της προθέρμανσης, η αύξηση της τάσης πέραν της τιμής των 8 Volt, δεν προκαλεί ανάλογη αύξηση στο ρεύμα του ηλεκτροδίου. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας του νήματος που περιορίζει το ρεύμα. Αν χρησιμοποιηθεί ο νόμος του Ωμ και η σχέση (1.8) τότε για θερμοκρασία $T_c=300$ K και αντίσταση R_c του ηλεκτροδίου 1/14W ίση με 9,72 Ω, το ρεύμα που διαρρέει το νήμα θα δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{V \cdot 1104}{9,72 \cdot T_h^{1,22}} \quad (6.5)$$

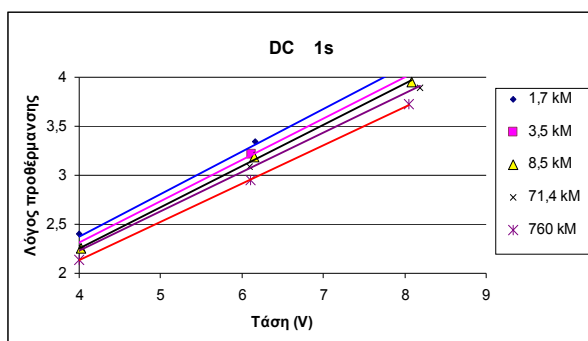
Από τη σχέση αυτή για την ίδια τάση φαίνεται, ότι το ρεύμα θα είναι, προφανώς, μικρότερο για μεγαλύτερες θερμοκρασίες αλλά η μείωση του είναι αντιστρόφως εκθετική με τη θερμοκρασία. Το αποτέλεσμα είναι ότι μικρή αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει μεγάλη μείωση στο ρεύμα με αποτέλεσμα, για ένα δεδομένο ηλεκτρόδιο, το ρεύμα να είναι σχετικώς περιορισμένο.

6.8. Μελέτη μεταβολής του λόγου προθέρμανσης

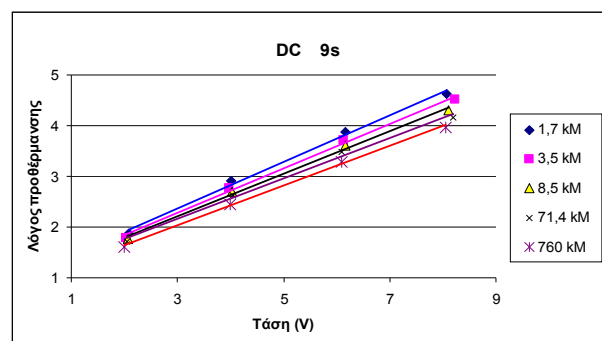
Στη συνέχεια μελετήθηκε η μεταβολή της αντίστασης του ηλεκτροδίου κατά τη θέρμανσή του. Πιο συγκεκριμένα, επειδή στους λαμπτήρες φθορισμού έχει σημασία ο λόγος

προθέρμανσης, υπολογίστηκε η μεταβολή του κλάσματος R_H/R_c . Στα σχήματα 6.11 και 6.12 φαίνεται η μεταβολή του στο πρώτο και στο ένατο δευτερόλεπτο αντίστοιχα, όταν αλλάζει η πίεση και το ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται με συνεχή τάση. Παρόμοια ήταν και τα διαγράμματα που προέκυπταν στην τροφοδοσία του νήματος με τις επιλεγμένες εναλλασσόμενες τάσεις. Το πείραμα διεξήχθη με σταδιακή μείωση της πίεσης και εφαρμόζοντας διάφορες τάσεις σε κάθε μία από αυτές. Προφανώς για σταθερή τιμή της τάσης, σε χαμηλότερη πίεση ο λόγος προθέρμανσης θα είναι μεγαλύτερος αφού, όπως ειπώθηκε και νωρίτερα, σε μικρές πιέσεις η μετάδοση θερμότητας είναι μικρότερη, άρα αυξάνεται περισσότερο η θερμοκρασία και επομένως και η αντίσταση.

Στα σχήματα 6.11 και 6.12 έχουν χαραχθεί οι ευθείες παλινδρόμησης των σημείων που προσδιορίζουν οι μετρήσεις. Το σχήμα 6.11 έχει περιοριστεί σε μία μικρή περιοχή, ώστε οι γραμμές να είναι περισσότερο ευδιάκριτες. Όμως και από τα δύο σχήματα, γίνεται σαφές, ότι υπό μεγαλύτερες πιέσεις η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου είναι μικρότερη. Μάλιστα η σχέση που συνδέει την τάση με τον λόγο προθέρμανσης είναι με μεγάλη προσέγγιση γραμμική. Ο πίνακας 6.9 δείχνει τις εξισώσεις των ευθειών παλινδρόμησης και των αντίστοιχων συντελεστών παλινδρόμησης για τις διάφορες πιέσεις στο πρώτο και στο ένατο δευτερόλεπτο της προθέρμανσης. Από τη σύγκριση των σταθερών όρων στις εξισώσεις φαίνεται ότι, κατά το ένατο δευτερόλεπτο της προθέρμανσης, το φαινόμενο έχει σταθεροποιηθεί στις χαμηλές πιέσεις, αφού η τιμή του είναι πολύ κοντά στη μονάδα. Σε υψηλότερες πιέσεις, το ότι ο σταθερός όρος έχει τιμή λίγο μικρότερη της μονάδας δείχνει ότι, το φαινόμενο μεταφοράς της θερμότητας τείνει να σταθεροποιηθεί αλλά αυτό δεν έχει επιτευχθεί ακόμη. Τιμή του σταθερού όρου ίση με τη μονάδα φανερώνει ότι, όταν η τάση μηδενιστεί, ο λόγος προθέρμανσης είναι μονάδα, πράγμα αναμενόμενο αφού το νήμα δεν διαρρέεται από ρεύμα. Κατά το πρώτο δευτερόλεπτο ο σταθερός όρος έχει τιμή πολύ μικρότερη της μονάδας, αφού το φαινόμενο της θέρμανσης είναι σε εξέλιξη.



Σχήμα 6.11 Δείγμα 1/14W. Λόγος προθέρμανσης ένα δευτερόλεπτο μετά την εφαρμογή της τάσης υπό διάφορες συνεχείς τάσεις και πιέσεις.

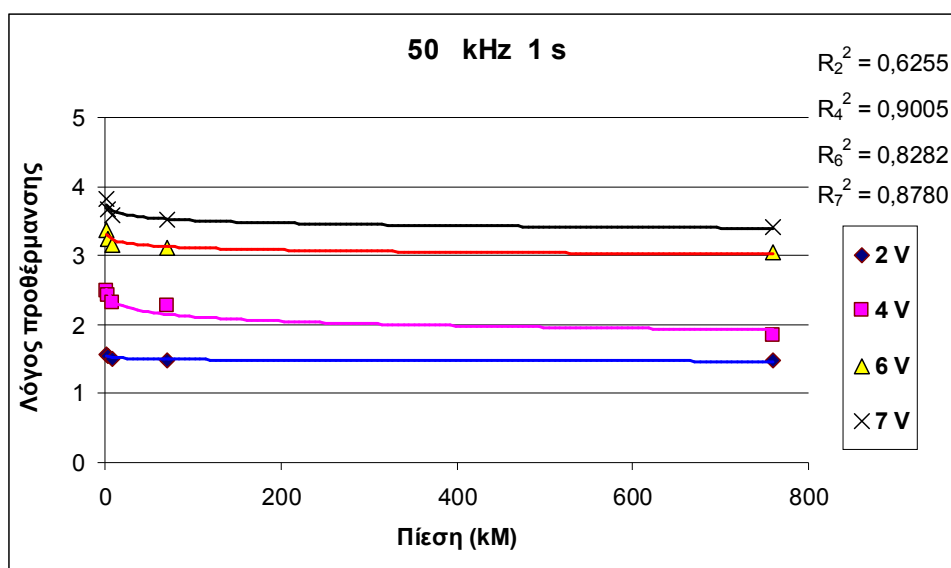


Σχήμα 6.12 Δείγμα 1/14W. Λόγος προθέρμανσης εννέα δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή της τάσης υπό διάφορες συνεχείς τάσεις και πιέσεις.

Πίνακας 6.9. Εξισώσεις ευθειών παλινδρόμησης και συντελεστές

Πίεση	Πρώτο δευτερόλεπτο		Ένατο δευτερόλεπτο	
	Εξίσωση	Συντελεστής προσδιορισμού	Εξίσωση	Συντελεστής προσδιορισμού
1,7	0,4358V+0,6295	0,9993	0,4566V+1,0024	0,9956
3,5	0,4214V+0,6275	0,9996	0,4390V+0,9624	0,9951
8,5	0,4194V+0,5764	0,9996	0,4221V+0,9451	0,9994
71,4	0,4000V+0,6337	0,9996	0,3990V+0,9598	0,9949
760	0,3906V+0,5739	1,0000	0,3930V+0,8494	0,9980

Το σχήμα 6.13 παρουσιάζει ακόμα ένα ενδιαφέρον (εποπτικά) διάγραμμα που αντικατοπτρίζει την εξάρτηση της θερμής αντίστασης του νήματος από την πίεση. Τα σημεία αφορούν ακέραιες τιμές τάσης (που προέκυψαν με γραμμική παρεμβολή) στα 50 kHz στο τέλος του πρώτου δευτερολέπτου θέρμανσης.



Σχήμα 6.13 Οι καμπύλες παριστούν το λόγο προθέρμανσης ως προς την πίεση υπό διάφορες τάσεις. Δείγμα 1/14W, συχνότητα 50 kHz.

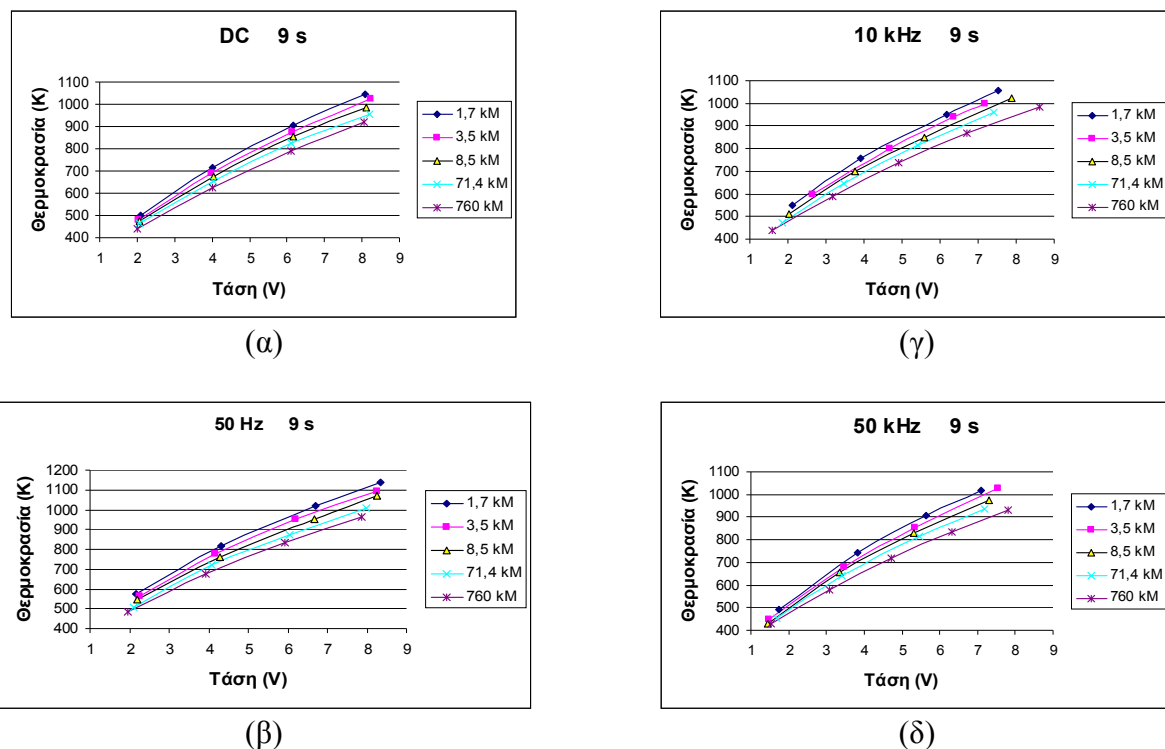
Είναι εμφανές ότι ο λόγος προθέρμανσης αυξάνεται με τη μείωση της πίεσης, ειδικώς στις υψηλές τάσεις. Οι καμπύλες που έχουν σχεδιαστεί είναι οι λογαριθμικές που βρέθηκε ότι ταιριάζουν περισσότερο και ακολουθούν καλύτερα τα σημεία των μετρήσεων. Στο σχήμα φαίνονται και οι συντελεστές προσδιορισμού, που είναι σχετικώς καλύτεροι στις μεγάλες τάσεις όπου τα αποτελέσματα είναι πιο αξιόπιστα, αφού περιγράφουν καλύτερα το φαινόμενο της θέρμανσης.

6.9. Μεταβολή της θερμοκρασίας ως συνάρτηση της πίεσης και συχνότητας τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου

Στα διαγράμματα 6.14α, 6.14β, 6.14γ και 6.14δ παρουσιάζονται τέσσερις διαφορετικές ομάδες καμπυλών που αφορούν συνεχείς και εναλλασσόμενες τάσεις. Με εφαρμογή της γνωστής σχέσης $T_h = T_c \cdot (R_h/R_c)^{0,814}$, από τις υπολογισθείσες θερμές αντιστάσεις

υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες θερμοκρασίες του ηλεκτροδίου. Τα διαγράμματα δείχνουν τη θερμοκρασία, όταν εφαρμοζόταν διάφορες τάσεις και στο δοχείο εναλλασσόταν η πίεση. Όλα τα διαγράμματα είναι με υπολογισμούς στο ένατο δευτερόλεπτο της προθέρμανσης, δηλαδή αντιπροσωπεύουν τη μόνιμη κατάσταση. Το καθαρό συμπέρασμα είναι ότι η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου εξαρτάται ισχυρά από την πίεση στο δοχείο. Πυκνότερες ατμόσφαιρες αφαιρούν περισσότερη θερμότητα από το νήμα καταλήγοντας σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Κάθε μέτρηση είχε χρονική διαφορά από την επόμενη τουλάχιστον δεκαπέντε λεπτά, ώστε το νήμα να έχει το χρόνο να ψυχθεί. Αυτός ο χρόνος έχει ήδη ειπωθεί, ότι ενώ δεν είναι αρκετός, είναι αποδεκτός για την αποκατάσταση της θερμοκρασίας της αντίστασης.

Στα διαγράμματα του σχήματος 6.14 οι καμπύλες που είναι χαραγμένες ακολουθούν τα σημεία των μετρήσεων για λόγους απλότητας. Στον πίνακα 6.10 δίνονται οι εξισώσεις των ευθειών και παραβολών παλινδρόμησης καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές.



Σχήμα 6.14 Εξάρτηση της θερμοκρασίας από την πίεση σε διάφορες συχνότητες.

Από τη μελέτη του πίνακα φαίνεται ότι, όταν τα σημεία ακολουθούν παραβολές, οι συντελεστές προσδιορισμού είναι μεγαλύτεροι από 0,999. Στις ευθείες παλινδρόμησης και πάλι ο συντελεστής είναι στην περιοχή του 0,987. Παρατηρείται ότι οι καμπύλες σε όλα τα διαγράμματα συγκλίνουν στη θερμοκρασία των 300 K, για μηδενική τιμή τάσης, που είναι μία ένδειξη για την ορθότητα των μετρήσεων. Αυτό το συμπέρασμα εξήχθη και από την μελέτη των εξισώσεων των ευθειών και παραβολών παλινδρόμησης που δίνουν τη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου από την εφαρμοζόμενη τάση. Όταν δηλαδή, η τάση είναι μηδενική, οι εξισώσεις δίνουν θερμοκρασία περίπου 300 K, καθότι ο σταθερός όρος των

εξισώσεων έχει κατά προσέγγιση αυτή την τιμή.

Πίνακας 6.10. Εξισώσεις ευθειών και παραβολών παλινδρόμησης με τους αντίστοιχους συντελεστές για τη θερμοκρασία μετά από 9 δευτερόλεπτα θέρμανσης του ηλεκτροδίου.

Πίεση	Εξίσωση ευθείας	R ²	Εξίσωση παραβολής	R ²
DC				
1,7	90,017 V + 333,70	0,9920	-4,6114 V ² + 136,86 V + 238,13	0,9999
3,5	87,085 V + 323,06	0,9925	-4,1411 V ² + 129,63 V + 236,10	1,0000
8,5	84,303 V + 317,39	0,9931	-3,9886 V ² + 124,86 V + 234,68	1,0000
71,4	80,150 V + 318,40	0,9913	-4,1014 V ² + 122,19 V + 232,18	0,9999
760	79,792 V + 291,97	0,9954	-3,0632 V ² + 110,56 V + 230,39	1,0000
50 Hz				
1,7	91,236 V + 395,51	0,9916	-4,7954 V ² + 141,56 V + 289,99	0,9997
3,5	88,721 V + 383,09	0,9903	-4,9055 V ² + 140,18 V + 272,74	0,9999
8,5	85,963 V + 371,41	0,9940	-3,8929 V ² + 126,59 V + 286,15	0,9998
71,4	83,954 V + 354,32	0,9884	-5,0661 V ² + 135,06 V + 249,81	0,9995
760	80,661 V + 340,40	0,9937	-3,6343 V ² + 116,37 V + 270,49	0,9999
10 kHz				
1,7	92,492 V + 371,75	0,9916	-5,7308 V ² + 147,79 V + 263,20	0,9996
3,5	88,376 V + 373,99	0,9955	-4,7728 V ² + 135,05 V + 274,67	1,0000
8,5	86,728 V + 353,12	0,9922	-4,2104 V ² + 128,68 V + 268,53	0,9995
71,4	87,223 V + 327,57	0,9928	-4,4720 V ² + 128,78 V + 250,67	0,9998
760	78,088 V + 332,02	0,9927	-3,2514 V ² + 111,30 V + 267,33	1,0000
50 kHz				
1,7	98,661 V + 338,14	0,9900	-6,2692 V ² + 153,71 V + 242,70	1,0000
3,5	94,784 V + 328,01	0,9910	-4,8244 V ² + 138,52 V + 253,19	0,9998
8,5	92,661 V + 318,79	0,9874	-5,9009 V ² + 144,29 V + 234,01	0,9996
71,4	87,512 V + 322,68	0,9924	-4,8228 V ² + 130,24 V + 248,90	0,9999
760	79,868 V + 324,65	0,9936	-3,4842 V ² + 112,47 V + 265,79	1,0000

6.10 Επίδραση της πίεσης στο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας.

Όταν το νήμα βολφραμίου θερμανθεί και επέλθει θερμική ισορροπία, χάνει θερμότητα με κάτωθι τρόπους:

- ✓ Κατ' αρχάς έχει απώλεια θερμότητας μέσω των χαλύβδινων στηριγμάτων του.
- ✓ Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας υπάρχει θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας.
- ✓ Λόγω ακτινοβολίας, που θεωρείται σημαντική απώλεια ειδικώς στις υψηλές θερμοκρασίες.
- ✓ Η απώλεια που οφείλεται στη μεταφορά θερμότητας από το ηλεκτρόδιο στο αέριο που το περιβάλλει. Στη θεώρηση που γίνεται στα επόμενα λαμβάνεται υπ'

όψιν αυτού του είδους η απώλεια και η ακτινοβολία αφού οι άλλες απώλειες θεωρούνται συγκριτικά αμελητέες.

Όταν τα μόρια αζώτου συγκρούονται με το νήμα ανταλλάσσουν ενέργεια, της οποίας το μέγεθος εξαρτάται από το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας (h_0). Ο συντελεστής αυτός είναι ένας συνδυασμός μεταφοράς και αγωγής από το νήμα στο αέριο. Τα άτομα του αερίου του δοχείου που προσπίπτουν στο ηλεκτρόδιο έχουν μια μέση ενέργεια που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία περιβάλλοντός τους T_c . Αν η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου είναι T_h , το μόριο του αερίου μετά την πρόσκρουση θα έχει θερμοκρασία μεταξύ T_c και T_h . Θεωρούμε ότι το μόριο σχεδόν αμέσως μετά την απομάκρυνσή του από το νήμα θα επαναποκτήσει την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_c , λόγω του μεγάλου μεγέθους του δοχείου σε σχέση με το νήμα. Εξ αιτίας της μεταλλικής σύστασης του δοχείου, που προσδίδει σ' αυτό μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, θεωρείται ότι η θερμοκρασία του δεν μεταβάλλεται στο χρόνο των δέκα δευτερολέπτων της μέτρησης.

Η εξίσωση (6.6) εκφράζει τις συνολικές απώλειες θερμότητας στη μονάδα του χρόνου του νήματος προς το περιβάλλον (δηλαδή με μεταφορά και ακτινοβολία) κατά τη θερμική ισορροπία.

$$N = h_0 \cdot A \cdot (T_h - T_c) + \varepsilon \cdot k \cdot A \cdot (T_h^4 - T_c^4) \quad (6.6)$$

όπου N είναι η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο ηλεκτρόδιο, A είναι η επιφάνεια του ηλεκτροδίου από όπου γίνεται η ανταλλαγή θερμότητας, ε είναι η εκπεμπτικότητα (emissivity) του θερμού νήματος και k είναι η σταθερά Stefan – Boltzmann.

Η εκπεμπτικότητα είναι ένας διορθωτικός τελεστής που λαμβάνει υπ' όψιν ότι δεν υπάρχει ιδανικό μέλαν σώμα (όπου $\varepsilon=1$) και εξαρτάται από τη θερμοκρασία του νήματος και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Ο συντελεστής h_0 εξαρτάται επίσης από τη θερμοκρασία και άλλους παράγοντες σχετικούς με την πειραματική συσκευή και τις συνθήκες του πειράματος. Για την απλοποίηση της μελέτης θεωρείται ένας συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας h που εμπεριέχει και την ακτινοβολούμενη ενέργεια [62] και είναι ο συντελεστής που ουσιαστικά προσδιορίζει το πείραμα. Επομένως η σχέση (6.6) απλοποιείται στην:

$$N = h \cdot A \cdot (T_h - T_c) \quad (6.7)$$

Στα επόμενα θα γίνει ο ισολογισμός ενέργειας στην μόνιμη κατάσταση, που θα οδηγήσει στον υπολογισμό με έναν απλό τρόπο του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h . Προφανώς η ισχύς N δίνεται από τη σχέση $N = V \cdot I$ (rms τιμές). Η τάση και το ρεύμα του ηλεκτροδίου βρίσκονται πειραματικά και έτσι υπολογίζεται η ισχύς. Η επιφάνεια συναλλαγής A βρίσκεται αν γνωρίζουμε τη διάμετρο D και το μήκος L του ηλεκτροδίου. Η διάμετρος μετρήθηκε 0,45 mm και το μήκος 28 mm στο ηλεκτρόδιο που όπως ειπώθηκε είναι τριπλής περιέλιξης. Η επιφάνεια συναλλαγής θα υπολογισθεί από τη σχέση:

$$A = L \cdot \pi \cdot D \quad (6.8)$$

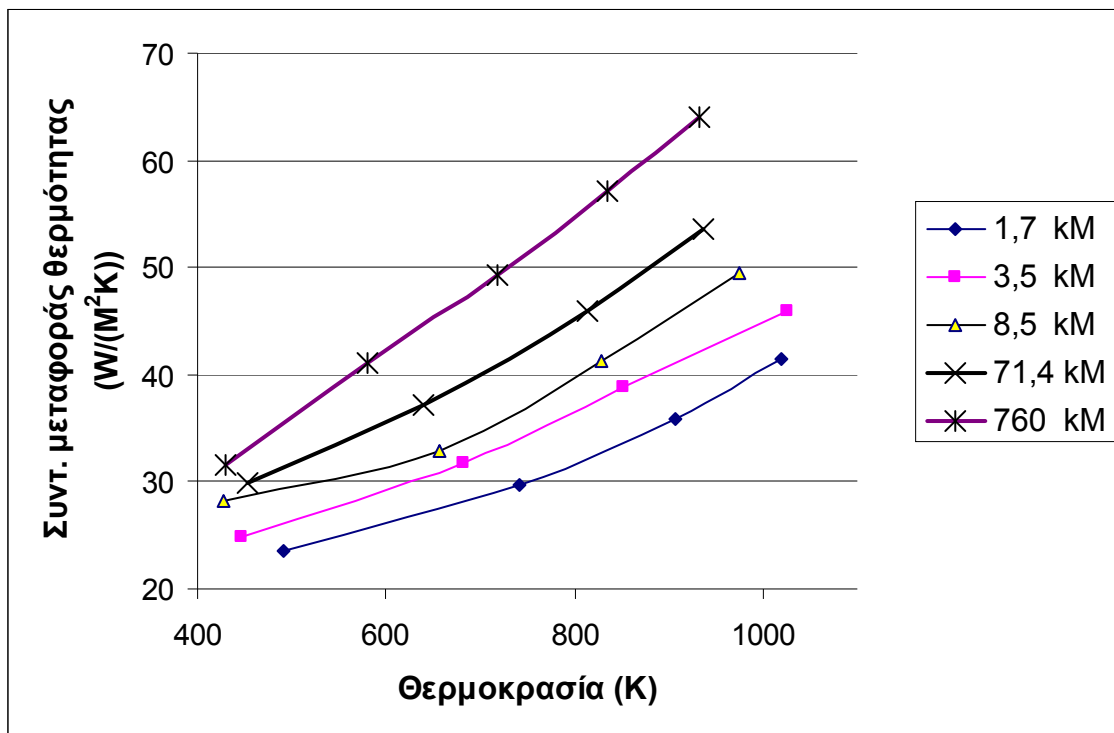
Το μήκος L θεωρείται σταθερό παρά τη θέρμανση, διότι ο συντελεστής θερμικής διαστολής

του βολφραμίου είναι πολύ μικρός [128].

Με συνδυασμό των σχέσεων (6.7) και (6.8) ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας θα δίνεται από τη σχέση:

$$h = \frac{V \cdot I}{L \cdot \pi \cdot D \cdot (T_h - T_c)} \quad (6.9)$$

Από τη σχέση (6.9) μπορεί να προσδιοριστεί ο h για διάφορες θερμοκρασίες του ηλεκτροδίου. Στο σχήμα 6.15 φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας ως προς τη θερμοκρασία, στις πιέσεις του αερίου στις οποίες έγιναν οι μετρήσεις, στη συχνότητα 50 kHz, μετά την επίτευξη της θερμικής ισορροπίας, δηλαδή μετά από εννέα δευτερόλεπτα θέρμανσης. Εννοείται ότι οι τιμές του συντελεστή ισχύουν μόνο για το συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο. Είναι όμως ενδεικτικές για τα ηλεκτρόδια αυτού του τύπου. Στο διάγραμμα οι καμπύλες σχεδιάστηκαν έτσι ώστε απλώς να ακολουθούν τα σημεία των μετρήσεων.



Σχήμα 6.15 Μεταβολή του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του δείγματος 1/14W με τη μεταβολή της θερμοκρασίας σε συχνότητα 50 kHz, εννέα δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή της τάσης.

Η προηγούμενη ανάλυση στηρίχθηκε στις ιδιότητες του συνεχούς μοντέλου (continuum molecule regime) και όχι του στατιστικού μοντέλου, αφού ο αριθμός Knudsen για το άζωτο στις συνθήκες του πειράματος ήταν πολύ μικρότερος της μονάδας. Συγκεκριμένα ήταν μεταξύ 10^{-4} (στην ατμοσφαιρική πίεση και σε θερμοκρασία 300 K) και $3 \cdot 10^{-7}$ (σε πίεση 1 kM στους 1000 K) [63]. Η μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων του αζώτου υπολογίστηκε βάσει της μοριακής διαμέτρου του: 300 pm (ισούται με $3 \cdot 10^{-10}$ m). Ως χαρακτηριστικό μήκος

(representative physical length scale) έγινε αποδεκτό το 1 mm, που είναι σχετικό με την τάξη μεγέθους του νήματος.

Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h βρέθηκε ορισμένες φορές σχετικά μικρός λόγω των χαμηλών πιέσεων και της αραιής ατμόσφαιρας στο περιβάλλον του νήματος. Αυτές όμως είναι οι συνθήκες στους λαμπτήρες φθορισμού. Όπως αναμενόταν, βρέθηκε ότι ο συντελεστής ήταν μικρότερος σε μικρότερες πιέσεις και σε μικρότερες θερμοκρασίες. Ας σημειωθεί ότι ο συντελεστής h στο διάγραμμα έχει μονάδες $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

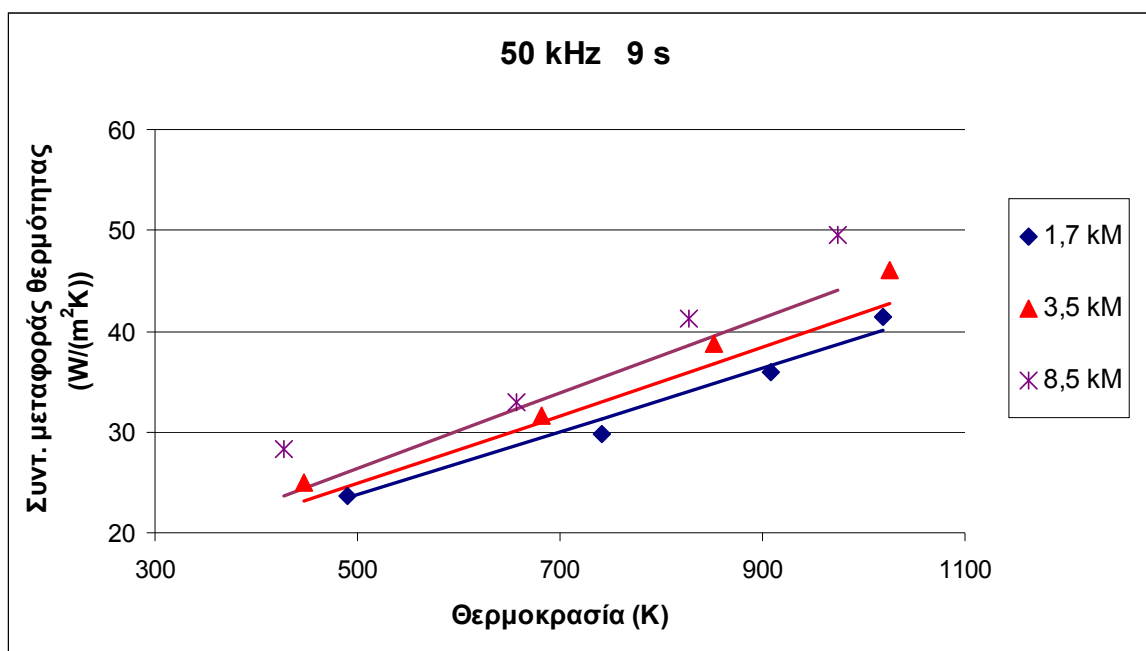
Στα επόμενα γίνεται μία στατιστική και μαθηματική ανάλυση ώστε να δοθεί μία μαθηματική σχέση που θα προβλέπει το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του ηλεκτροδίου υπό διάφορες θερμοκρασίες. Το σχήμα 6.16 παρουσιάζει ξανά τα σημεία των μετρήσεων για τις χαμηλές πιέσεις 1,7, 3,5 και 8,5 kM, στις οποίες εργάζονται οι λαμπτήρες φθορισμού. Ασφαλώς ο h είναι μία συνάρτηση της θερμοκρασίας T και της πίεσης P . Εάν αναζητηθεί μία απλή εξίσωση η οποία θα περιγράφει τη σχέση αυτών των τριών μεγεθών, θα πρέπει να είναι γραμμική ως προς τη θερμοκρασία T και επομένως θα έχει τη μορφή:

$$h = A(P) \cdot T + B \cdot (P) \quad (6.10)$$

Οι συντελεστές A και B είναι μεταβλητές που εξαρτώνται από την πίεση, δοθείσης της συχνότητας. Στη σχέση (6.10) ο συντελεστής h έχει μονάδες $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, η θερμοκρασία T δίνεται σε K και η πίεση P σε kM. Επειδή το κύριο ενδιαφέρον της παρούσης εργασίας είναι οι λαμπτήρες φθορισμού οι οποίοι εργάζονται σε περιοχές πιέσεων πιο κοντά στην 1,7 kM, οι συντελεστές επιλέχθηκαν έτσι που να ταιριάζουν περισσότερο στην πίεση αυτή. Μετά από ανάλυση των ευθειών παλινδρόμησης των σημείων του διαγράμματος, η εξίσωση που εκφράζει καλύτερα τις ομάδες των σημείων είναι η:

$$h = 0,03 \cdot T \cdot P^{0,1} + 7,9 \cdot e^{-0,001P} \quad (6.11)$$

Τα σημεία για κάθε πίεση στο σχήμα 6.16, δείχνουν μία πολύ δυνατή συσχέτιση και οι αντίστοιχοι συντελεστές προσδιορισμού (R^2) φαίνονται στον πίνακα 6.11. Ο έλεγχος της σημαντικότητας όμως της ευρεθείσης εξίσωσης με τις αντίστοιχες μετρήσεις εκφράζεται από το συντελεστή t , που βρέθηκε με έλεγχο t -test και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 6.11. Τα αποτελέσματα του ελέγχου δείχνουν ότι η εξίσωση (6.11) είναι στατιστικά ισχυρή στο επίπεδο σημαντικότητας 0,05. Για την πίεση 1,7 kM η τιμή του συντελεστή t είναι αρκούντως υψηλή, στην πίεση 8,5 kM είναι ακριβώς στο όριο του επιπέδου σημαντικότητας, ενώ στην πίεση 3,5 kM είναι λίγο πάνω από το όριο. Στο σχήμα 6.16 δεν έχουν χαραχθεί οι ευθείες παλινδρόμησης, αλλά οι γραμμές βάσει της εξίσωσης (6.11), που αντιπροσωπεύει μια γενική σχέση που περιγράφει τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας. Με την περιγραφείσα ανάλυση όλες οι ομάδες των μετρήσεων ακολουθούν μία μοναδική εξίσωση.



Σχήμα 6.16. Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας σε χαμηλές πιέσεις μέσω της εξίσωσης (6.11).

Πίνακας 6.11. Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης.

Πίεση (kM)	R ²	t-value
1,7	0,9772	0,0016
3,5	0,9914	0,0716
8,5	0,9523	0,0500

Η σχέση (6.11) δείχνει ότι ο συντελεστής h είναι γραμμικά εξαρτώμενος από τη θερμοκρασία, όταν η πίεση είναι σταθερή. Στις πολύ χαμηλές πιέσεις που εφαρμόζονται στους λαμπτήρες φθορισμού, το τμήμα $7,9 \cdot e^{-0,001P}$ ισούται σχεδόν με 7,9 και το $P^{0,1}$ είναι σχεδόν μονάδα, οπότε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μπορεί να υπολογίζεται από τη σχέση:

$$h = 0,03 \cdot T + 7,9 \quad (6.12)$$

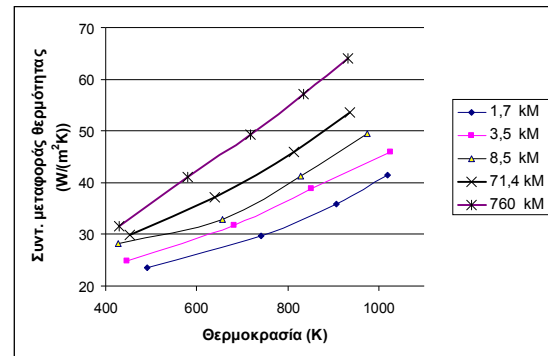
Αξίζει να σημειωθεί, ότι η σχέση (6.11) ισχύει για τις συνθήκες του πειράματος και έχει ως μονάδες τις προαναφερθείσες, ενώ η (6.12) ισχύει για τους λαμπτήρες φθορισμού. Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα που συνάγεται από την (6.12) είναι ότι επειδή ισχύει για πολύ χαμηλές πιέσεις, το αέριο γύρω από το ηλεκτρόδιο θα είναι πολύ αραιό και η μεταφορά θερμότητας από το ηλεκτρόδιο στο αέριο θα είναι ελαχίστη. Επίσης ελαχίστη θα είναι η απώλεια θερμότητας από το ηλεκτρόδιο προς τα στηρίγματά του με αγωγιμότητα, όταν το φαινόμενο έχει σταθεροποιηθεί. Συνεπώς η (6.12) θα εκφράζει κατά προσέγγιση τη διάδοση της θερμότητας με ακτινοβολία, ιδιαίτερα, όταν το ηλεκτρόδιο έχει μεγάλη θερμοκρασία.

Η προηγηθείσα μέθοδος στηρίχθηκε στην αναζήτηση μίας και μοναδικής σχέσης που να συνδέει τα προς έρευνα μεγέθη. Όμως μία καλύτερη προσέγγιση γίνεται με την εύρεση

ιδιαιτέρων εξισώσεων για κάθε πίεση. Η μορφή που βρέθηκε ότι ταιριάζει περισσότερο στην κατανομή των σημείων ήταν η εξίσωση δευτέρου βαθμού. Στο σχήμα 6.17 φαίνονται τα σημεία που έχουν προαναφερθεί και οι αντίστοιχες παραβολές παλινδρόμησης που αντιστοιχούν σε αυτά. Στον πίνακα 6.12 δίνονται οι εξισώσεις για τον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με τους συντελεστές προσδιορισμού των σημείων του διαγράμματος.

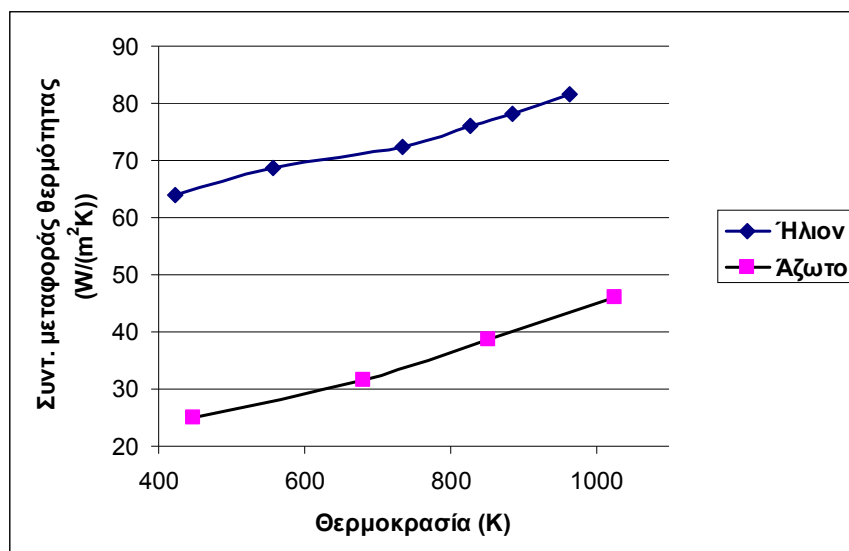
Πίνακας 6.12. Εξισώσεις ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και συντελεστές προσδιορισμού

Πίεση (kM)	Εξίσωση	R ²
1,7	$0,000030 T^2 - 0,0169 T + 23,863$	0,9998
3,5	$0,000020 T^2 + 0,0098 T + 16,775$	0,9992
8,5	$0,000050 T^2 - 0,0343 T + 33,166$	0,9983
71,4	$0,000040 T^2 - 0,0011 T + 23,111$	1,0000
760	$0,000009 T^2 - 0,0513 T + 7,8378$	0,9996



Σχήμα 6.17. Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αναλόγως της πίεσης και οι αντίστοιχες γραμμές παλινδρόμησης των βέλτιστων παραβολικών καμπυλών.

Μια άλλη σειρά μετρήσεων έγινε σε πίεση 3,5 kM και συχνότητα 50 kHz, αλλά αντί του αζώτου στο δοχείο είχε τοποθετηθεί ήλιον. Ο νέος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας υπολογίσθηκε, σύμφωνα με τα προηγούμενα και το αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 6.18 εν παραλλήλω με τις αντίστοιχες τιμές για το άζωτο, υπό τις ίδιες συνθήκες. Επιβεβαιώνεται ότι, όσο πιο ελαφρύ είναι το αέριο, τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας. Επιπλέον επαληθεύτηκε το αποτέλεσμα της εργασίας [62] κατά την οποία έγινε σύγκριση του συντελεστή μεταξύ των αερίων ήλιου (μοριακό βάρος 4 gr/mol) και αργού (μοριακό βάρος 40 gr/mol), καθώς και των ενδιάμεσων μειγμάτων. Στην παρούσα εργασία το μοριακό βάρος του αζώτου είναι 28 gr/mol και ο συντελεστής του ήταν σε ενδιάμεση τιμή, τηρώντας τις πειραματικές αναλογίες. Δεν μπορεί να γίνει πλήρης σύγκριση των τιμών από τα δύο πειράματα, διότι στο [62] η τιμή του συντελεστή δεν δίνεται για μία συγκεκριμένη θερμοκρασία (είναι στην περιοχή 750 K μέχρι 915 K). Επί πλέον δεν είναι ίδιες οι πειραματικές συνθήκες, ειδικά η πίεση. Παρ' όλα αυτά, αν θεωρηθεί ο h στη θερμοκρασία των 830 K, στη εργασία [6] ο λόγος του h στο ήλιον με μοριακό βάρος 4 προς μείγμα με μοριακό βάρος 28 είναι 2,7. Στα αποτελέσματα που εκτέθηκαν στην παρούσα παράγραφο, στους 830 K ο λόγος των τιμών του h με τα ίδια μοριακά βάρη βρίσκεται ίσος με 2,05. Αν και φαίνεται ότι οι τιμές 2,7 και 2,05 απέχουν αρκετά, δοθέντος ότι προέρχονται από διαφορετικά και ευπαθή σε λάθη πειράματα, ουσιαστικά οι δύο τιμές έχουν καλή σχέση. Θα μπορούσε να ειπωθεί μάλιστα ότι, αν ήταν πιο κοντά, θα ήταν μία υπερβολική σύμπτωση.



Σχήμα 6.18. Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ως προς τη θερμοκρασία για το άζωτο και το ήλιον σε πίεση 3,5 kM και συχνότητα 50 kHz εννέα δευτερόλεπτα μετά την έναρξη της θέρμανσης.

6.11. Συμπεράσματα.

Με τη μέθοδο που περιγράφηκε γίνεται η μέτρηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας των ηλεκτροδίων των λαμπτήρων φθορισμού T5 σε χαμηλές πιέσεις αζώτου. Αποδείχτηκε ότι αυτός μεταβάλλεται με την πίεση και συγκεκριμένα αυξάνεται με αυτήν, υπό την ίδια θερμοκρασία. Η αλλαγή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με την πίεση έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των συνθηκών έναυσης των λαμπτήρων φθορισμού που προθερμαίνουν τα ηλεκτρόδια πριν τη επίτευξη της εκκένωσης. Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων χρησιμεύουν στον έλεγχο της πίεσης στους λαμπτήρες χωρίς την καταστροφή τους.

Με τα πειράματα αυτά κατανοήθηκε καλύτερα η μεταφορά θερμότητας στα ηλεκτρόδια των λαμπτήρων, σε διάφορες συνθήκες θερμοκρασιών, πίεσης και είδος αερίου. Έγινε σαφές ότι η πίεση στους σωλήνες των λαμπτήρων επιδρά στη θερμοκρασία των ηλεκτροδίων άρα και στη ζωή των λαμπτήρων. Βρέθηκε ότι στις πιέσεις που εργάζονται οι λαμπτήρες φθορισμού T5 για κάθε Volt που αυξάνεται η τάση προθέρμανσης του ηλεκτροδίου η θερμοκρασία του αυξάνει κατά 90 K, όταν το αέριο είναι το άζωτο. Σε συνδυασμό με άλλες εργασίες, η τιμή της θερμοκρασίας που βρέθηκε, μπορεί να τροποποιηθεί και να βρεθεί η τιμή της, όταν το αέριο είναι διαφορετικό.

Οι μετρήσεις που έγιναν έδειξαν ότι, κατά τη θέρμανση του ηλεκτροδίου, υπάρχει μια απότομη αύξηση της θερμοκρασίας του στα πρώτα δύο δευτερόλεπτα (σχήμα 6.6). Μετά την παρέλευση πέντε περίπου δευτερολέπτων η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου σχεδόν σταθεροποιείται. Σύμφωνα με τον πίνακα 6.9 η σταθεροποίηση του φαινομένου επέρχεται

γρηγορότερα στις χαμηλές πιέσεις. Βρέθηκε ακόμα ότι, η σχέση της μεταβολής του λόγου προθέρμανσης με την τάση, είναι με καλή προσέγγιση γραμμική.

Από τη μελέτη της μεταβολής του ρεύματος του ηλεκτροδίου κατά την προθέρμανση βρέθηκε ότι αυτή ακολουθεί παραβολική γραμμή όσο αυξάνεται η τάση, μέχρι την ολοκλήρωση της θέρμανσης. Μάλιστα από τις καμπύλες των σχημάτων 6.9 και 6.10 φαίνεται ότι από την τάση των 8 Volt, περαιτέρω αύξηση της τάσης δεν προκαλεί σημαντική αύξηση του ρεύματος στο ηλεκτρόδιο.

Με τη μέθοδο που ακολουθήθηκε προσδιορίστηκε ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας σε ένα στοιχείο, όπως το ηλεκτρόδιο, με τεράστιο όγκο εφαρμογών. Και μάλιστα ο προσδιορισμός αυτός είναι υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η μέθοδος θα βοηθήσει τους κατασκευαστές ηλεκτροδίων και λαμπτήρων στην καλύτερη κατανόηση των σχετικών με τους λαμπτήρες φαινομένων ώστε ο σχεδιασμός τους να βελτιωθεί.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

7.1. Συνοπτική έκθεση των τμημάτων της διατριβής

Η εργασία παρουσιάζει τα πειράματα και την έρευνα που έγινε στους συντελεστές που καθορίζουν την μακροβιότητα των λαμπτήρων φθορισμού, με οδήγηση ηλεκτρονικού ballast. Οι λαμπτήρες ήταν δύο τύπων: σωληνωτοί T5 και συμπαγείς με ανεξάρτητο ballast. Τα ballast που οδηγούσαν τους λαμπτήρες ήταν από τους πλέον σύγχρονους τύπους, που κυκλοφορούν στην αγορά: τύπου άμεσης έναυσης και τύπου προθέρμανσης των ηλεκτροδίων. Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονες μέθοδοι που ακολουθούνται διεθνώς. Παρόμοια πειράματα έχουν δημοσιευθεί μέχρι και λίαν προσφάτως στα επιστημονικά περιοδικά τα σχετικά με το φωτισμό και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που τον συνοδεύουν. Στο σχεδιασμό της έρευνας που διεξήχθη δόθηκε σημασία, ώστε να μην είναι επανάληψη των ήδη δημοσιευμένων εργασιών. Βασική επιδίωξη της έρευνας ήταν να περιέχει πρωτοτυπία που θα φέρει καινούρια αποτελέσματα, ώστε να συμπληρωθεί το κενό στη βιβλιογραφία.

Έχοντας υπ' όψιν αυτό, χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα λαμπτήρες, οι οποίοι δεν έχουν ερευνηθεί σε μεγάλη έκταση. Ακόμα και σήμερα, δεν έχει δημοσιευθεί πειραματική εργασία με μεγάλο αριθμό συστημάτων αυτού του είδους. Υπάρχουν δημοσιεύσεις για τη μελέτη μεμονωμένων συστημάτων. Επίσης, οι λιγοστές αυτές έρευνες για τη μέτρηση της ζωής των μεμονωμένων λαμπτήρων T5 ή των συμπαγών, ασχολούνται αποκλειστικά με τη μέτρηση της διάρκειας ζωής τους υπό διάφορους κύκλους, οι οποίοι πάντα είναι από τους χαρακτηριζόμενους ως γρήγορους. Σε αυτούς, ο χρόνος λειτουργίας σε κάθε κύκλο διαρκεί λίγα δευτερόλεπτα. Όταν ο κύκλος είναι τόσο σύντομος η διάρκεια ζωής του λαμπτήρα είναι ελάχιστη και ο χρόνος του πειράματος μικρός.

Η αξιοπιστία των πειραμάτων αυξάνεται όταν χρησιμοποιείται μεγάλο δείγμα και όταν η πειραματική οργάνωση προσομοιάζει στην πραγματική χρήση των συστημάτων. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά, που εκλείπουν από την βιβλιογραφία για τους συγκεκριμένους λαμπτήρες, επιδιώχτηκε να καλύψει η παρούσα εργασία. Επελέγησαν κύκλοι λειτουργίας γρήγοροι και αργοί. Καλύπτεται επομένως όλο το φάσμα πραγματικής λειτουργίας. Επί πλέον, τα πειράματα είναι στο πλαίσιο των πειραματικών ερευνών του είδους, που έχουν γίνει σε άλλα είδη λαμπτήρων.

Για την επίτευξη των σκοπών της εργασίας οργανώθηκε η πειραματική διαδικασία, της οποίας οι σημαντικότερες ενότητες είναι οι εξής:

- ✓ Επιλογή των κατάλληλων προς έρευνα συστημάτων, των κύκλων λειτουργίας τους και των απαραίτητων μετρήσεων που θα εκπληρώσουν τους σκοπούς της

έρευνας.

- ✓ Εγκατάσταση των συστημάτων στο χώρο του εργαστηρίου, ώστε να μην εμποδίζουν τις άλλες δραστηριότητες, αλλά και χωρίς να διαταράσσονται οι συνθήκες λειτουργίας των συστημάτων. Ταυτοχρόνως, οι συνθήκες περιβάλλοντος των συστημάτων να είναι οι απαιτούμενες και εντός των ορίων που καθορίζονται από τα εγχώρια και διεθνή πρότυπα.
- ✓ Μετρήσεις των χαρακτηριστικών που έχουν επιλεγεί με τα προσήκοντα και διακριβωμένα όργανα και με τρόπο που να μη διαταράσσει την πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων.
- ✓ Επεξεργασία των μετρήσεων ώστε να μελετηθεί η σημασία των αποτελεσμάτων και να εξαχθεί μοντέλο για τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων.
- ✓ Εύρεση της σύνδεσης των τιμών των χαρακτηριστικών με τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων.
- ✓ Η έρευνα των μεταβολών των χαρακτηριστικών με το χρόνο λόγω της γήρανσης των ballast ή των λαμπτήρων.
- ✓ Μελέτη της συμπεριφοράς των ηλεκτροδίων κατά την προθέρμανσή τους με προσομοίωση σε συσκευή και με όργανα που αναπτύχθηκαν στο εργαστήριο.

Τα πειράματα που διενεργήθηκαν αντιπροσώπευαν πραγματική χρήση των συστημάτων φωτισμού σε κτίρια. Αφετέρου ήταν εντός των κανονισμών των οργανισμών τυποποίησης και καθορισμού των κανόνων διεξαγωγής και συνθηκών των πειραμάτων.

7.2. Ανακεφαλαίωση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Τα συστήματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με το είδος του ballast που χρησιμοποιούν. Υπάρχουν οι λαμπτήρες που οδηγούνται από ballast άμεσης έναυσης και εκείνοι των οποίων το ballast προθερμαίνει τα ηλεκτρόδια του λαμπτήρα πριν την έναρξη της εκκένωσης. Για να γίνει σύγκριση παρόμοιων συστημάτων ακολουθήθηκε η επιλογή των συστημάτων με το παρακάτω σκεπτικό:

- 1) Επελέγησαν δύο τύποι λαμπτήρων: ένας σωληνωτός T5 και ένας τύπος συμπαγούς χωρίς ενσωματωμένο ballast. Κάθε τύπος εξ αυτών οδηγούνταν από δύο διαφορετικά ballast: ένα άμεσης έναυσης και ένα με προθέρμανση. Με αυτή την επιλογή προέκυψαν αποτελέσματα άμεσα συγκρίσιμα μεταξύ των, για την επίδραση στη ζωή και στη συμπεριφορά των δύο τύπων ballast στον ίδιο τύπο λαμπτήρα.
- 2) Με το ίδιο σκεπτικό επελέγησαν και τα υπόλοιπα δύο είδη συστημάτων, με τη διαφορά ότι επρόκειτο για διαφορετικά ballast που όμως και τα δύο εκκινούν με προθέρμανση τον ίδιο ακριβώς τύπο λαμπτήρα.
- 3) Η επιλογή των ballast γρήγορης έναυσης έγινε με βάση το χρόνο προθέρμανσης και χρησιμοποιήθηκαν ballast με μικρό, μέτριο και μεγάλο χρόνο.

Αρχικά ετέθησαν περιορισμοί για τη ζωή των λαμπτήρων, ώστε για τις περιπτώσεις των σύντομων κύκλων να υπάρχει ένα ανεκτό και αποδεκτό όριο εναύσεων. Έτσι εκτός από τις περιπτώσεις που καταστρεφόταν ένας λαμπτήρας, θα εθεωρείτο εξαντλημένος εφόσον αριθμούσε εναύσεις που πρακτικά είναι αδύνατον να απαιτηθούν κατά την χρήση του. Τα όρια του αριθμού των εναύσεων που τέθηκαν για την ομάδα Γ (5' on) ήταν 125000 και για τις ομάδες Δ (1' on) και Ε (20" on) ήταν 150 000 εναύσεις.

7.2.1. Συστήματα με ballast άμεσης έναυσης

Σύμφωνα με τους κατασκευαστές (όχι των συγκεκριμένων συστημάτων αλλά γενικώς), τα ballast άμεσης έναυσης μειώνουν κατά 25% τη ζωή του λαμπτήρα, λόγω της μεγάλης τάσης που εφαρμόζουν για να αρχίσει η εκκένωση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στον κύκλο λειτουργίας των τριών ωρών της παρούσης εργασίας οι λαμπτήρες T5 πέτυχαν ποσοστό λιγότερο από το 30% της ονομαστικής ζωής και οι συμπαγείς λίγο περισσότερο από το 50%. Ο κατασκευαστής των συμπαγών λαμπτήρων δίδει όντως διάρκεια ζωής γι' αυτούς 7000 αντί των 13 000 ωρών που δίδει για λειτουργία με ballast προθέρμανσης. Επομένως η μείωση της ζωής των λαμπτήρων απεδείχθη μεγαλύτερη από εκείνη που δίνουν οι κατασκευαστές. Για τους πιο σύντομους κύκλους, η ζωή των λαμπτήρων μειώθηκε σε ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό, ιδιαιτέρως των συμπαγών λαμπτήρων.

Αυτό που απέδειξε η έρευνα στο πλαίσιο της διατριβής, ήταν ότι στα συστήματα με άμεση έναυση, κυρίαρχο ρόλο στη διάρκεια της ζωής των λαμπτήρων έχει ο αριθμός των εναύσεων. Ο λόγος είναι η μεγάλη ποσότητα επικάλυψης των ηλεκτροδίων που σπαταλείται σε κάθε έναυση. Για να χαθεί η ίδια ποσότητα, αν και φάνηκε ότι δεν είναι σταθερή, πρέπει ο λαμπτήρας να λειτουργεί αρκετές ώρες. Η διάρκεια ζωής σε κύκλους δηλαδή, είναι ανεξάρτητη του ρυθμού λειτουργίας του συστήματος, διότι ο λαμπτήρας θα καταστραφεί όταν συμπληρώσει περί τις 5000 εναύσεις (τύπος T5) ή τις 3000 (τύπος CFL). Αυτό σημαίνει ότι τέτοιου είδους συστήματα επιτυγχάνουν μακροβιότητα εφόσον χρησιμοποιούνται εκεί που δεν είναι απαραίτητη η συχνή εναλλαγή του φωτισμού. Επομένως, είναι πιο κατάλληλα σε γραφεία ή σε χώρους υποδοχής. Εν κατακλείδι, τα συστήματα που μελετήθηκαν επιτυγχάνουν αριθμό εναύσεων ανεξάρτητο από τον κύκλο λειτουργίας τους.

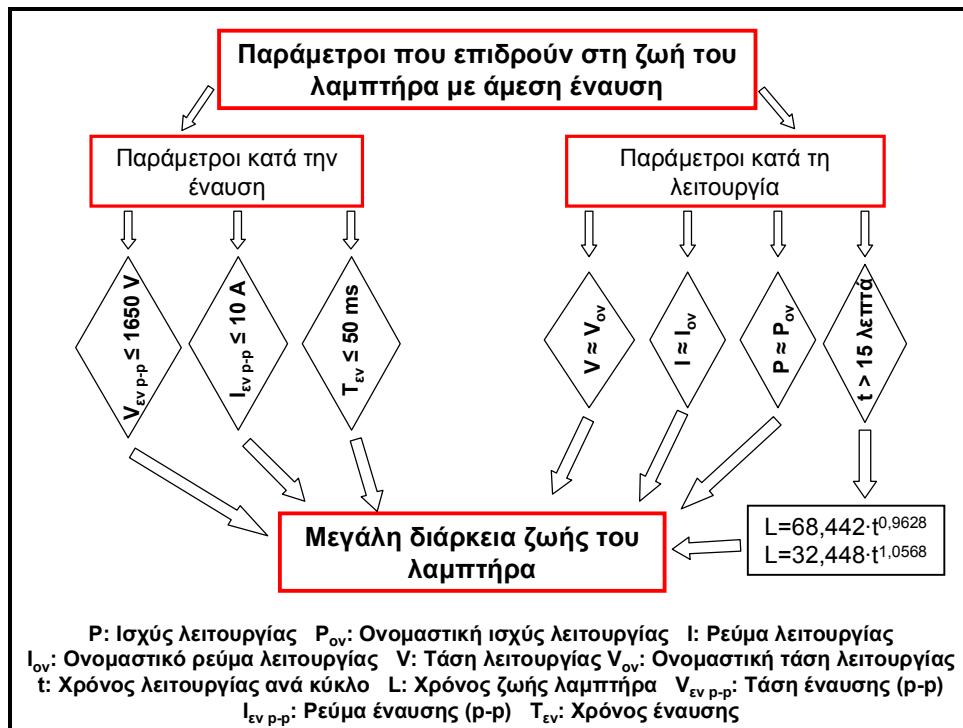
Η έρευνα για την αναμενόμενη ζωή του λαμπτήρα (L) συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας του σε κάθε έναυση (t) έδειξε ότι μία σχέση της μορφής $L = A \cdot t^a$ δίνει καλά αποτελέσματα. Ο συντελεστής A και ο εκθέτης a εξαρτώνται από τον τύπο του λαμπτήρα και το ballast που τον οδηγεί. Ο συντελεστής A δείχνει τις ώρες λειτουργίας που θα πετύχει ο λαμπτήρας, όταν ο κύκλος είναι πολύ σύντομος. Ο εκθέτης a έχει σχέση με την διαφορά μεταξύ της διάρκειας ζωής του λαμπτήρα σε σύντομο και σε αργό κύκλο. Τα συμπεράσματα αυτά ισχύουν και στα ballast προθέρμανσης.

Για τα συστήματα άμεσης έναυσης, βρέθηκε συσχέτιση των τιμών του χρόνου, του ρεύματος και της τάσης έναυσης, με την ζωή των λαμπτήρων. Και τα τρία αυτά μεγέθη απεδείχθη ότι

πρέπει, κατά την έναυση, να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές, για να μην προκαλούν φθορά στα ηλεκτρόδια. Το συμπέρασμα προέκυψε από τις τιμές σε μεγάλο πλήθος λαμπτήρων, αλλά το εύρος τιμών των παραμέτρων αυτών μεταξύ των συστημάτων ήταν μικρό. Αυτό είχε σαν συνέπεια να μην είναι δυνατή μία αριθμητική εκτίμηση για την επίδραση των συγκεκριμένων παραμέτρων.

Κατόπιν αυτών των αποτελεσμάτων και την επεξεργασία τους, αποδείχτηκε η σπουδαιότητα των συνθηκών έναυσης στα ballast άμεσης έναυσης, αφού ο αριθμός των εκκινήσεων κάθε λαμπτήρα είναι καθοριστικός για τη διάρκεια της ζωής του. Επομένως εκεί θα πρέπει να στραφεί η βελτίωση των ballast αυτού του είδους από τους κατασκευαστές. Τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την έναυση είναι κυρίως το ρεύμα, η τάση και ο χρόνος, των οποίων οι τιμές πρέπει να είναι κατά το δυνατόν μικρές.

Στο σχήμα 7.1 το διάγραμμα ροής απεικονίζει συνοπτικά τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας που αφορούν τους λαμπτήρες που οδηγούνται από ballast άμεσης έναυσης.



Σχήμα 7.1. Διάγραμμα ροής λαμπτήρων με άμεση έναυση για βελτιστοποίηση της διάρκειας της ζωής τους.

Πολλά από τα συστήματα άμεσης έναυσης έδειξαν μια συστηματική μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της λειτουργίας τους. Συγκεκριμένα, στη λειτουργία μειωνόταν σταδιακά το ρεύμα εκκένωσης του λαμπτήρα, ενώ αυξανόταν η συχνότητά του και η αντίστοιχη τάση. Επίσης, στους περισσότερους λαμπτήρες, ενώ δεν παρατηρήθηκε μεταβολή στην αντίσταση των ηλεκτροδίων κατά τη γήρανση, κατά την τελευταία μέτρηση πριν την εξάντλησή τους η αντίσταση μετρήθηκε μεγαλύτερη μέχρι και 2,3%. Αυτό οφείλεται στη μείωση της επικάλυψης, που έχει σαν συνέπεια τη φθορά του νήματος βολφραμίου. Η έρευνα

έδειξε ότι δεν μπορεί να εκτιμηθεί η κατανάλωση της επικάλυψης των ηλεκτροδίων σε κάθε έναυση αλλά ούτε και στη μονάδα χρόνου λειτουργίας. Δηλαδή η φθορά των ηλεκτροδίων δεν μπορεί να ποσοτικοποιηθεί. Αυτό οφείλεται κυρίως στην καταστροφή πολλών λαμπτήρων πριν την εξάντληση όλου του μίγματος, που καλύπτει τα νήματα.

Στα συστήματα άμεσης έναυσης οι λαμπτήρες απέδιδαν λιγότερο από το 90% της ονομαστικής τους ισχύος. Μπορεί επομένως να αποδοθεί και σε αυτό η μη επίτευξη της επιθυμητής ζωής των λαμπτήρων. Συγκεκριμένα, στους συμπαγείς βρέθηκε σημαντική συσχέτιση της διάρκειας ζωής και της ισχύος του λαμπτήρα. Όταν η ισχύς έτεινε προς την ονομαστική ισχύ, η ζωή του λαμπτήρα βρέθηκε ότι ήταν αυξημένη.

Στους κατεστραμμένους λαμπτήρες έγινε μέτρηση των αντιστάσεων των ηλεκτροδίων και οπτική επιθεώρησή τους. Για τους σωληνωτούς λαμπτήρες βρέθηκε ότι η θραύση των περισσότερων νημάτων ήταν από τη μεριά της σφραγίδας και ασφαλώς από την ίδια πλευρά υπήρχε και το εντονότερο μαύρισμα. Η ένταση του μαυρίσματος είναι μία σίγουρη ένδειξη για την επερχόμενη ή μη καταστροφή του λαμπτήρα.

Η έρευνα συστημάτων φωτισμού πρέπει να περιορίζεται σε συστήματα με όμοιους λαμπτήρες και ballast και τα προκύπτοντα συμπεράσματα αφορούν αποκλειστικά αυτό το είδος. Σε αυτά τα πειράματα δεν είναι πρόσφορη μία μελέτη που να αφορά όλα τα είδη των συστημάτων, λόγω των έντονων και μη συσχετιζόμενων διαφορών που παρουσιάζουν. Για το λόγο αυτό τα συμπεράσματα που εξετέθησαν, αφορούν κάθε ομάδα χωριστά.

Για τα ηλεκτρονικά ballast άμεσης έναυσης, σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 7.1 και την έρευνα που πραγματοποιήθηκε, τα μεγέθη που πρέπει να βελτιωθούν ώστε οι λαμπτήρες να αποδώσουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής είναι:

- ✓ Κατά την έναυση, πρέπει να μειωθεί η τάση, το ρεύμα και ο χρόνος. Αυτά τα μεγέθη είναι αλληλεξαρτούμενα. Επηρεάζονται κυρίως από τη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου και την πίεση του αερίου. Επειδή η πίεση του αερίου στο λαμπτήρα είναι καθορισμένη, αφού συμβάλλει ουσιαστικά στη λειτουργία της εκκένωσης, δεν μπορεί να προταθεί η μεταβολή της. Επομένως για τη βελτίωση αυτού του τύπου των συστημάτων πρέπει να εφαρμοστεί κάποιου είδους προθέρμανση των ηλεκτροδίων. Πρακτικά αυτό έχει γίνει στα τελευταίου τύπου ballast άμεσης έναυσης, τα οποία προθερμαίνουν για χρόνο μικρότερο από 300 ms τα ηλεκτρόδια, διατηρώντας την ίδια προσωνυμία. Τα ballast που προέκυψαν είναι πιο πολύπλοκα και η έναρξη της εκκένωσης καθυστερεί, όμως οι κατασκευαστές δίνουν βελτιωμένη διάρκεια ζωής.
- ✓ Κατά τη λειτουργία, θα πρέπει το ballast να αποδώσει στον λαμπτήρα τις ονομαστικές τιμές ρεύματος, ισχύος και τάσης. Αυτό θα γίνει με αλλαγή του ολοκληρωμένου κυκλώματος που χρησιμοποιείται από το μπάλλαστ και των εξαρτημάτων ρύθμισης που φέρει.

7.2.2. Συστήματα με ballast γρήγορης έναυσης

Τα ballast με προθέρμανση που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ήταν τεσσάρων τύπων. Οι δύο τύποι είχαν αντιστοιχώς μεγάλο και μέτριο χρόνο προθέρμανσης, ενώ οι δύο άλλοι (για σωληνωτούς και συμπαγείς λαμπτήρες) είχαν μικρό χρόνο προθέρμανσης. Η απόδοσή τους, όσον αφορά στη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων που οδηγούσαν, ήταν παραπλήσια της αναμενόμενης, σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

Από τους εκτεθέντες πίνακες που περιέχουν τα αποτελέσματα για τους χρόνους ζωής των λαμπτήρων, φαίνεται ότι εκείνοι με μέτριο και μεγάλο χρόνο προθέρμανσης επέτυχαν χρόνους αντίστοιχους των ονομαστικών. Οι λαμπτήρες με μικρό χρόνο προθέρμανσης, στους αργούς κύκλους είχαν μειωμένο χρόνο ζωής. Ένας σημαντικός λόγος που οι λαμπτήρες αυτοί (σωληνωτοί και συμπαγείς) δεν επέτυχαν τον χρόνο ζωής που δίνει ο κατασκευαστής ήταν ο μικρός χρόνος προθέρμανσης. Αποδείχθηκε ότι δεν αρκεί η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων και οι άλλες παράμετροι να είναι στα όρια που έχουν τεθεί, αλλά πρέπει και ο χρόνος προθέρμανσης να μην είναι κάτω του ορίου των 500 ms.

Η βέλτιστη θερμοκρασία ηλεκτροδίων βρέθηκε μεταξύ 800 °C και 850 °C. Λόγω της σημαντικής ταυτόχρονης επίδρασης και άλλων παραμέτρων, η ανωτέρω περιοχή τιμών δεν είναι αυστηρά περιορισμένη, αλλά ενδείκνυται ως η καλύτερη.

Από τις μετρήσεις που διεξήχθησαν, φάνηκε ότι το ρεύμα λειτουργίας επηρεάζει την ζωή του λαμπτήρα. Ακόμα και μικρές αποκλίσεις από την προτεινόμενη από τον κατασκευαστή τιμή, επηρεάζουν το χρόνο ζωής των λαμπτήρων. Μεγαλύτερες τιμές από την προτεινόμενη, μειώνουν την ζωή του λαμπτήρα, ενώ μικρότερες την βελτιώνουν, αν και ελαττώνουν την εκπεμπόμενη φωτεινή ροή.

Η τιμές του παράγοντα κορυφής ρεύματος ήταν πολύ χαμηλές (περί το 1,40) με θετικότατη επίδραση στη ζωή του λαμπτήρα. Οι καταγραφείσες τιμές αν και είχαν μικρό εύρος, φάνηκε ότι η ζωή του λαμπτήρα αυξάνεται με τη μείωσή του. Παρόμοιο συμπέρασμα συνάγεται και για την επίδραση του ρεύματος αίγλης. Σχεδόν όλα τα συστήματα ήταν εντός των ορίων και από τη σύγκριση που έγινε φάνηκε ότι μικρές τιμές του ρεύματος αίγλης βελτιώνουν σημαντικά τη ζωή των λαμπτήρων.

Τα συστήματα με προθέρμανση έδειξαν ορισμένες συστηματικές μεταβολές κατά τη γήρανση των λαμπτήρων, σε κάποια χαρακτηριστικά που εμφανίζονται στην προθέρμανση των ηλεκτροδίων. Ειδικώς, η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου, ακριβώς πριν την επίτευξη της εκκένωσης, επέδειξε μια σταθερή αύξηση στους περισσότερους λαμπτήρες αυτού του είδους. Αποδείχτηκε ότι η μεταβολή στη θερμοκρασία οφείλεται στη μείωση του ρεύματος που παρέχει το ballast κατά την προθέρμανση των ηλεκτροδίων. Η μείωση ήταν συστηματική και όχι συμπτωματική, αφού βρέθηκε από τις διαδοχικές μετρήσεις, ότι οι τιμές ακολουθούν μία

ευθεία γραμμή παλινδρόμησης, που τις περισσότερες φορές έχει συντελεστή συσχέτισης πολύ κοντά στη μονάδα. Τα αποτελέσματα κατά τη μετάβαση από την αίγλη στο τόξο, αποδίδονται στη μείωση της ποσότητας της επικάλυψης του ηλεκτροδίου, που συνεπάγεται την μικρότερη απαγωγή θερμότητας από αυτό, με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας του.

Για τους κατεστραμμένους λαμπτήρες η μείωση στην τιμή του ρεύματος, στο τέλος της προθέρμανσης, είχε σχέση με τον κύκλο λειτουργίας. Συγκεκριμένα, όσο πιο γρήγορος ήταν ο κύκλος τόσο μεγαλύτερο ήταν το μέγεθος της τιμής της μείωσης. Επομένως η μεταβολή στο ρεύμα προθέρμανσης οφείλεται και στην παλαιώση του ballast, που προέρχεται όχι τόσο από το χρόνο λειτουργίας του αλλά από τον αριθμό των εναύσεων που εκτελεί. Στο πέμπτο κεφάλαιο εδείχθη ότι η μείωση στο ρεύμα οφειλόταν, επίσης, και στη μεταβολή της αντίστασης του νήματος του λαμπτήρα. Κατόπιν αυτών των παρατηρήσεων, συνιστάται στους κατασκευαστές των ballast να δοθεί προσοχή στα εξαρτήματα του οργάνου που ρυθμίζουν την τιμή του ρεύματος προθέρμανσης (ή πιθανώς και σε άλλες παραμέτρους που το επηρεάζουν), ώστε να διατηρούν τις αρχικές τους ρυθμίσεις. Για την κατασκευή του λαμπτήρα πρέπει να δίνεται προσοχή στην κατασκευή του ηλεκτροδίου ώστε η συγκρότησή του να μη μεταβάλλεται εξ αιτίας των πολλών εναύσεων.

Με δεδομένο τον μέσο όρο των μεταβολών στα χαρακτηριστικά όπως αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 5.24 μπορεί να γίνει μία πρόβλεψη για την υπολειπόμενη διάρκεια ζωής των συστημάτων. Η καταστροφή του λαμπτήρα αναμένεται όταν η τιμή του συγκεκριμένου χαρακτηριστικού φθάσει την τιμή που καταγράφει ο πίνακας, στους λαμπτήρες που δεν πέτυχαν τα όρια των κύκλων που τέθηκαν. Φυσικά πρέπει να γίνει η αντίστοιχη μέτρηση του χαρακτηριστικού. Βάσει αυτής, μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος ζωής που απομένει στο λαμπτήρα, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η μεταβολή είναι γραμμική.

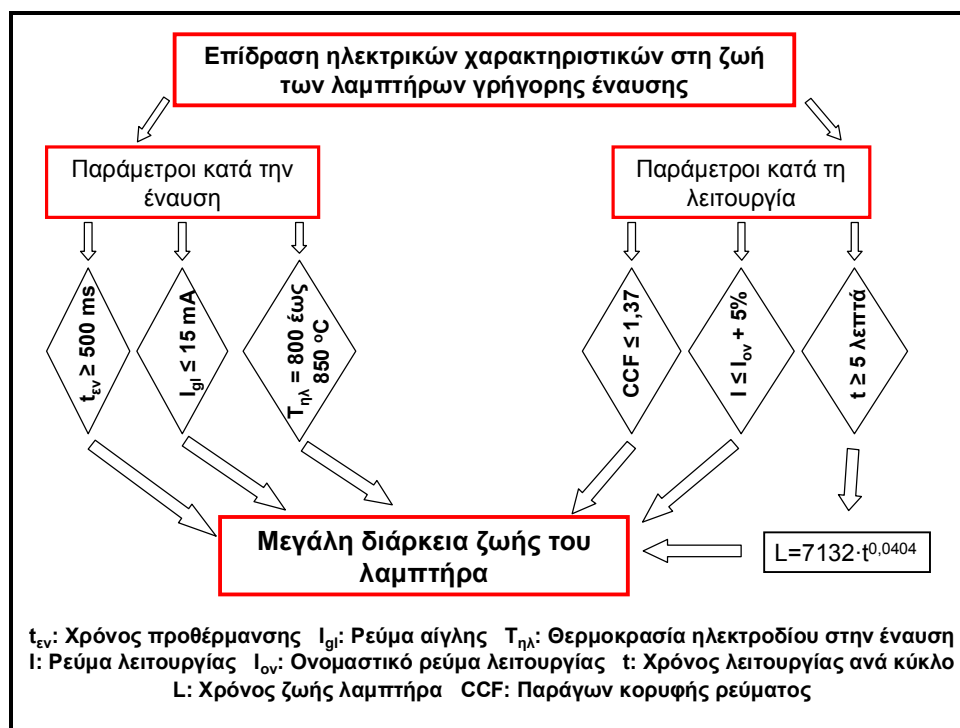
Αξίζει να τονιστεί ότι και στα συστήματα με προθέρμανση ο αριθμός των εναύσεων παίζει σημαντικό ρόλο στη μεταβολή των χαρακτηριστικών του ballast, όπως προκύπτει από τον πίνακα 5.24. Στους γρήγορους κύκλους η μεταβολή είναι μεγαλύτερη. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός των εναύσεων συμβάλλει πολύ περισσότερο από τις ώρες λειτουργίας στην αλλαγή τους. Όμως στους γρήγορους κύκλους ο αριθμός των εναύσεων, μέχρι την καταστροφή του λαμπτήρα, είναι τόσο μεγάλος, ώστε είναι πέραν των ρεαλιστικά πιθανών.

Όπως στα ballast άμεσης έναυσης, έτσι και σε εκείνα με προθέρμανση, αποδεικνύεται ότι οι σύντομοι κύκλοι λειτουργίας δεν αποδίδουν αξιόπιστο χρόνο ζωής στο λαμπτήρα. Όμως στα τελευταία, η επίδραση δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού η μείωση της ζωής δεν είναι τόσο έντονη. Το συγκριτικό πείραμα με κύκλο λειτουργίας 4 λεπτών απέδειξε ότι τα συστήματα που ερευνήθηκαν είναι ικανά να επιτύχουν πολύ πάνω από 100 000 εναύσεις ακόμα και όταν ο χρόνος έναυσης και σβέσης είναι μικρός. Από το συγκεκριμένο πείραμα, το πιο σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι οι γρήγοροι κύκλοι δεν παρέχουν μεγάλη μείωση στην πειραματική διαδικασία μέτρησης της ζωής των λαμπτήρων, λόγω του μεγάλου αριθμού εναύσεων που

επιτυγχάνονται.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων και την επεξεργασία τους, προέκυψαν οι σχέσεις του πίνακα 5.26 οι οποίες δίνουν με καλή προσέγγιση για τα συστήματα που ελέγχθηκαν, τον αναμενόμενο χρόνο ζωής. Οι εξισώσεις αυτές λαμβάνουν υπ' όψιν τους σημαντικότερους παράγοντες που επιδρούν στη ζωή των λαμπτήρων με προθέρμανση και είναι οι: θερμοκρασία προθέρμανσης ηλεκτροδίου, ρεύμα αίγλης, ρεύμα λειτουργίας και κύκλος λειτουργίας.

Στο διάγραμμα ροής του σχήματος 7.2 φαίνονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της εργασίας, για τις τιμές των παραμέτρων που θα έχουν ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη δυνατή ζωή των λαμπτήρων. Τα συμπεράσματα αυτά και η διαδικασία που προέκυψαν περιγράφονται στο πέμπτο κεφάλαιο.



Σχήμα 7.2. Διάγραμμα ροής λαμπτήρων με γρήγορη έναυση για βελτιστοποίηση της διάρκειας της ζωής τους.

Στα πειράματα μέτρησης του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του νήματος των λαμπτήρων φθορισμού, έγινε προσομοίωση της συμπεριφοράς του ηλεκτροδίου κατά την προθέρμανσή του, στους λαμπτήρες με ballast γρήγορης έναυσης. Αποδείχτηκε ότι η πίεση επηρεάζει σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας από το ηλεκτρόδιο προς το περιβάλλον του, άρα επηρεάζεται και η θερμοκρασία του. Η μελέτη που έγινε στο θέμα αυτό αποτελεί ένα οδηγό εκτίμησης της πίεσης στους λαμπτήρες, που μπορεί να βοηθήσει στον καθορισμό του σεναρίου προθέρμανσης των ballast, ώστε να είναι το καλύτερο δυνατόν για το λαμπτήρα και το συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο.

Με τη μελέτη αυτή προσδιορίστηκε η σχέση με την οποία η τάση στο ηλεκτρόδιο συνδέεται με τη μεταφορά θερμότητας του νήματος επομένως και τη θερμοκρασία του. Φάνηκε ότι στις υψηλές συχνότητες, τάσεις πέραν των οκτώ Volt στο νήμα, δεν αυξάνουν περαιτέρω σημαντικά τη θερμοκρασία του. Το ηλεκτρόδιο αποκτά τη θερμοκρασία υπό την οποία ισορροπεί με το περιβάλλον του σε λιγότερο από πέντε δευτερόλεπτα. Στα πρώτα δύο δευτερόλεπτα της θέρμανσής του, ουσιαστικά έχει αποκτήσει τη θερμοκρασία που απαιτείται στους λαμπτήρες φθορισμού.

Για τα ηλεκτρονικά ballast που προθερμαίνουν τα ηλεκτρόδια την στιγμή της έναρξης της εκκένωσης, οι προτάσεις βελτίωσης της διάρκειας ζωής του λαμπτήρα, σχετίζονται αποκλειστικά με το ολοκληρωμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα του ballast και των εξαρτημάτων ρύθμισης που χρησιμοποιεί.

- ✓ Κατά την προθέρμανση, το ολοκληρωμένο πρέπει να ταλαντώνεται σε κατάλληλη συχνότητα, τέτοια ώστε η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων να μην προκαλέσει έναυση του λαμπτήρα πριν την επιθυμητή στιγμή, και το ρεύμα αίγλης να έχει χαμηλή τιμή. Η αύξηση της θερμοκρασίας του ηλεκτροδίου, στις περιπτώσεις που είναι χαμηλότερη των 800°C, μπορεί να γίνει με χρήση και ρύθμιση ενός τρανζίστορ τύπου MOSFET το οποίο θα ανοίγει σε διαφορετικούς χρόνους. Ο χρόνος προθέρμανσης εξαρτάται από το εάν το ballast είναι προγραμματιζόμενου τύπου ή γρήγορης έναυσης. Εάν είναι προγραμματιζόμενου τύπου αυτό μπορεί να γίνει με ρύθμιση του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Εάν είναι γρήγορης έναυσης μπορεί να γίνει με ρύθμιση της έναυσης όταν η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου αποκτήσει την επιθυμητή τιμή.
- ✓ Κατά τη λειτουργία, ο παράγων κορυφής ρεύματος βελτιώνεται με προσθήκη κατάλληλου φίλτρου στο ballast. Οι ονομαστικές τιμές των χαρακτηριστικών του λαμπτήρα επιτυγχάνονται με ρύθμιση της συχνότητας λειτουργίας (μέσω του ολοκληρωμένου) και με αλλαγές σε ένα πηνίο και ένα πυκνωτή του ballast, ακριβώς πριν το λαμπτήρα.

7.3. Συμβολή της παρούσης διατριβής - προτάσεις για επέκταση της έρευνας

Τα αποτελέσματα που εξετέθησαν στην προηγούμενη παράγραφο 7.2, απεικονίζουν και τα συμπεράσματα της μελέτης στους λαμπτήρες και στα ballast που τους οδηγούν. Τα αναφερόμενα αποτελέσματα, σε σχέση με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, αποτελούν καινοτομία όχι μόνο για το είδος των συστημάτων που μελετήθηκε αλλά και για το σύνολο των συστημάτων φωτισμού με λαμπτήρες φθορισμού.

Η παρούσα διατριβή καλύπτει ένα κενό στη μελέτη των λαμπτήρων φθορισμού T5 και των συμπαγών με χωριστό ballast. Οι λαμπτήρες T5 την τελευταία δεκαετία τείνουν να

αντικαταστήσουν τους T8, διότι έχουν καλύτερη απόδοση (lm/W) και η διάρκεια ζωής που επιτυγχάνουν είναι μεγαλύτερη. Και οι συμπαγείς χωρίς ενσωματωμένο ballast, όλο και περισσότερο τοποθετούνται αντί των σωληνωτών, αφού έχουν μικρότερες διαστάσεις, ενώ αποδίδουν εξ ίσου καλά. Σε σχέση με τους βιδωτούς έχουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Οι λόγοι που δεν έχουν γίνει μελέτες σε πραγματικά δείγματα έχουν αναφερθεί επανειλημμένως και συνοπτικά είναι το κόστος και ο χρόνος που απαιτούν. Οι μόνες δημοσιευμένες μελέτες του είδους έχουν γίνει για συστήματα που τροφοδοτούνται από ηλεκτρική ενέργεια παρεχόμενη από φωτοβολταϊκά συστήματα. Η έλλειψη παρόμοιων μελετών αναδεικνύει την σπουδαιότητα της παρούσης εργασίας.

Πρώτη φορά παρουσιάζεται μελέτη όπου συντονισμένα να τίθενται σε λειτουργία ίδιοι λαμπτήρες με διαφορετικά ballast. Στις παλιότερες μελέτες με πολλά δείγματα, που αφορούσαν σωληνωτούς λαμπτήρες T8 και βιδωτούς συμπαγείς, η συγκριτική μελέτη γινόταν μεταξύ ανόμοιων συστημάτων και μόνο περιστασιακά μεταξύ ιδίων. Στην παρούσα διατριβή, λόγω της συγκεκριμένης επιλογής των συστημάτων, με τον έλεγχο των χαρακτηριστικών των λαμπτήρων προσδιορίζεται σαφέστερα η αιτία για κάθε αποτέλεσμα που εμφανίζεται.

Αντιστοίχως, γίνεται μελέτη της επίδρασης διαφορετικού είδους ballast (άμεσης και με προθέρμανση στην έναυση) στους ίδιους λαμπτήρες, θέμα που παρουσιάζεται για πρώτη φορά σε σύγχρονους τύπους λαμπτήρων.

Η μελέτη των χαρακτηριστικών των λαμπτήρων και των ballast με διαδοχικές μετρήσεις, από την έναρξη της λειτουργίας των συστημάτων μέχρι την εξάντλησή τους, αποτελεί μία άλλη καινοτομία της παρούσης εργασίας. Στην αρθρογραφία η μέτρηση κάθε χαρακτηριστικού γινόταν μόνο κατά την έναρξη του πειράματος και εθεωρείτο δεδομένη η σταθερότητά του. Η παρουσιαζόμενη έρευνα απέδειξε ότι υπάρχουν σημαντικές μεταβολές, οι οποίες δεν πρέπει να παραβλέπονται σε μία μελέτη. Εκτός αυτού, η μέτρηση των μεταβολών αυτών δίνει τη δυνατότητα πρόβλεψης της επερχόμενης καταστροφής του λαμπτήρα.

Μία ιδιαίτερης σημασίας παράμετρος της παρούσης μελέτης είναι τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται στους λαμπτήρες φθορισμού. Μετρήθηκαν σε αυτά μικρές μεταβολές κατά τη λειτουργία των λαμπτήρων. Σε ξεχωριστό πείραμα μελετήθηκε η συμπεριφορά τους όταν θερμαίνονται υπό διάφορες πιέσεις και συχνότητες της εφαρμοζόμενης τάσης. Τέτοιου είδους ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται ευρέως σε λαμπτήρες κάθε είδους. Δεν έχει όμως δημοσιευθεί έρευνα για τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, ανάλογα με την τάση που επιβάλλεται σε αυτά και την πίεση του θαλάμου στον οποίο βρίσκονται. Επομένως τα συμπεράσματα του κεφαλαίου 6, θα είναι χρήσιμα όχι μόνο στη μελέτη των ηλεκτροδίων αλλά και στην κατασκευή τους για χρήση σε λαμπτήρες. Οι μετρήσεις συχνότητας και πίεσης θα αποτελέσουν χρήσιμο οδηγό για το σχεδιασμό του σεναρίου προθέρμανσης των ballast.

Η έρευνα που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε υπό ένα δεδομένο οικονομικό και χρονικό πλαίσιο. Όμως τα αποτελέσματα είναι αναμφισβήτητα και είναι

πέραν κάθε αμφιβολίας ότι οποιοσδήποτε αριθμός δειγμάτων θα κατέληγε στα ίδια συμπεράσματα. Το πλεονέκτημα ενός μεγαλύτερου αριθμού συστημάτων προς μελέτη, θα ήταν το μεγάλο εύρος στις τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών που επιδρούν στη ζωή του λαμπτήρα. Αυτό θα συνέβαλε θετικά σε μία μελλοντική έρευνα.

Κατά την παρούσα πειραματική διαδικασία καταγράφηκαν πλείστες τιμές από πλήθος παραμέτρων που μετρούνταν. Με περαιτέρω επεξεργασία υπό ένα λογισμικό πακέτο ανάλυσης δεδομένων θα δώσει πιθανώς περισσότερο αξιόπιστες προβλέψεις για τη ζωή των λαμπτήρων. Για παράδειγμα, η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου πολύ πιθανόν να απέδιδε ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα πρέπει να δοθεί στους συμπαγείς λαμπτήρες, οι οποίοι δεν πέτυχαν τον προσδοκώμενο χρόνο ζωής. Με αυξημένο αριθμό δειγμάτων σε κάθε κύκλο λειτουργίας, θα προσδιοριστεί αν ο μικρός χρόνος προθέρμανσης, ή κάποιος άλλος παράγοντας, είναι η κύρια αιτία μη επίτευξης της ονομαστικής τους ζωής.

Σε μία μελλοντική έρευνα, θα ήταν χρήσιμο να ερευνηθεί και η μεταβολή της φωτεινής ροής. Ιδιαίτερα να μελετηθεί στους κύκλους εκτός του καθιερωμένου, διότι γι' αυτόν οι κατασκευαστές δίνουν στοιχεία. Είναι ωφέλιμο να γνωρίζουμε την απόδοση των συστημάτων, διότι αν αυτή μειώνεται αρκετά στην πορεία του χρόνου δεν έχει ιδιαίτερη αξία η μακροβιότητα του λαμπτήρα.

Η παρούσα εργασία απέδειξε ότι οι γρήγοροι κύκλοι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις διάφορες δημοσιευμένες έρευνες, εν μέρει είναι περιττοί. Στα μεν συστήματα με άμεση έναυση, διότι φάνηκε ότι η ζωή του λαμπτήρα εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των εναύσεων και όχι τόσο από το ρυθμό τους. Στα δε συστήματα με προθέρμανση, διότι τα ballast εκκινούν τον λαμπτήρα χωρίς να προκαλούν καμία σοβαρή βλάβη στα ηλεκτρόδια. Οι διαπιστώσεις αυτές θα επιφέρουν μεγάλη οικονομία σε παρόμοια πειράματα, αφού θα απαιτούνται λιγότερα δείγματα.

Τέλος, θα είχε ενδιαφέρον μία έρευνα που θα εκτιμούσε με έναν αντικειμενικό τρόπο το μαύρισμα των λαμπτήρων, αφού με τις μετρήσεις που έγιναν στα συστήματα άμεσης έναυσης φάνηκε ότι είναι ένας καλός παράγοντας πρόβλεψης της καταστροφής του λαμπτήρα. Βέβαια, η καταστροφή του λαμπτήρα δεν προϋποθέτει την εξάντληση όλης της επικάλυψης. Παρατηρήθηκε όμως, ότι λίγο πολύ, όλοι οι κατεστραμμένοι λαμπτήρες είχαν την ίδια ένταση μαυρίσματος.

Ο σκοπός της παρούσης εργασίας ήταν να μελετηθεί η έναυση και λειτουργία των λαμπτήρων φθορισμού και να καθοριστούν με σαφήνεια οι παράγοντες που επιδρούν στη ζωή τους. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι, ως ένα μεγάλο βαθμό, ο στόχος επετεύχθη και η εργασία μπορεί να αποτελέσει βοήθημα στους κατασκευαστές των ballast και των λαμπτήρων φθορισμού. Όμως, περαιτέρω μελέτη απαιτείται η οποία θα οδηγήσει στη

βελτίωση των συστημάτων φωτισμού.

Βιβλιογραφία

- 1 J. F. Waymouth, “Electric Discharge Lamps”, Cambridge, MA. MIT Press, 1971.
- 2 K. Nishimura, L. Yajima, K. Yuasa, “A novel Cold cathode Fluorescent Lamp with an Adiabatic Layer”, The Illuminating Engineering Institute of Japan, J. Light & Vis. Env. Vol. 26, No. 3, pp. 1-8, 2002.
- 3 B. I. Collins, S. J. Treado, M. J. Ouellette, “Performance of Compact Fluorescent Lamps at Different Ambient Temperatures”, Journal of the Illuminating Engineering Society, Vol. 23, No. 2, pp. 72-85, Summer 2001.
- 4 U. Chittka, P. Postma, W. Schlager, “Electrodes for Gas Discharge Lamps”, Elsevier, Applied Surface Science, pp. 302-310, 1997.
- 5 M. A. Cayless, “The Emission from Cathodes in Low Pressure Discharges”, British Journal of Applied Physics, Vol. 8, pp. 331-336, August 1957.
- 6 W. J. van den Hoek, T. L. G. Thijssen, A. J. H. Van der Heijden, B. Buijsse, M. Haverlag, “Emitter Depletion Studies on Electrodes of 50 Hz Mercury/Noble Gas Discharge Lamps During Ignition”, Journal of Physics D: Applied Physics 35, pp. 1716-1726, 2002.
- 7 S. E. Coe, J. A. Stocks, A. J. Tambini, “An Investigation of the Cathode Region of a Fluorescent Lamp”, Journal of Physics D: Applied Physics 26, pp. 1203-1210, 1993.
- 8 Philips, “Application Guide to Fluorescent Lamp Control Gear”, <http://www.lighting.philips.com>, 2004.
- 9 A. M. Howatson, “An Introduction to Gas Discharges”, Pergamon Press LTD, 1965.
- 10 National Lighting Product Information Program, “Power Quality”, Lighting Answers, Vol. 2, No. 2, February 1995.
- 11 G. G. Lister, J. E. Lawler, W. P. Lapatovich, V. A. Godyak, “The Physics of Discharge Lamps”, Reviews of Modern Physics, Vol. 76, April 2004.
- 12 J. N. Lester, “Fluorescent Lamps End-of-Life Shutdown Sense Methods”, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp. 78-85, Summer 2002.
- 13 J. Zhou, “Electronic Ballasts for Fluorescent Lamps”, Center for Power Electronics Systems, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia, May 2003, Revised Summer 2004.
- 14 National Lighting Product Information Program, “Guide to Specifying High-Frequency Electronic Ballasts”, November 1996.
- 15 National Lighting Product Information Program, “Dimming Electronic Ballasts”, Specifier Reports, Vol. 7, No. 3, October 1999.
- 16 M. Haverlag, A. Kraus, J. Sorman, J. Heuvelmans, A. Geven, L. Kaldenhoven, G. Heijne, “High-Frequency Cold Ignition of Fluorescent Lamps”, Journal of Physics D: Applied Physics 35, pp. 1695-1701, 2002.
- 17 National Lighting Product Information Program, “Electronic Ballasts”, Specifier Reports, Vol. 8, No. 1, May 2000.

- 18 M. Myojo, O. Fukumasa, “Phenomenon of End of Life in a Fluorescent Lamp and By-Investigation of Alkali Metal Adsorption system”, The Illuminating Engineering Institute of Japan, J. Light & Vis. Env. Vol. 27, No. 2, pp. 61-69, 2003.
- 19 Lighting Research Center, “Reducing Barriers to Use of High Efficiency Lighting Systems”, Tasks 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, pp. 14-74, 2003.
- 20 IESNA “Approved Method for the Electrical and Photometric Measurements of Fluorescent Lamps”, LM-9-99, IESNA 1999.
- 21 IESNA “Approved Method for the Electrical and Photometric Measurements of Single-Ended Compact Fluorescent Lamps”, LM-66-00, IESNA 2000.
- 22 ANSI C82.11-1993, “High-Frequency Fluorescent Lamp Ballasts”, 1993.
- 23 Y. Ji, R. Davis, “Starting Performance of High-Frequency Electronic Ballasts for Four-Foot Fluorescent Lamps”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 1, pp. 234-238, January/February 1997.
- 24 GE Lighting, “Biax Q/E 70W with Amalgam”, General Electric Company 2001.
- 25 Philips, “Lamps and gear catalogue 2005/2006”, Koninklijke Philips Electronics N. V. 2005.
- 26 IESNA “Approved Method for Life Testing of Fluorescent Lamps”, LM-40-01, IESNA 2001.
- 27 IESNA “Approved Method for Life Testing of Compact Fluorescent Lamps”, LM-65-01, IESNA 2001.
- 28 ΕΛΟΤ, EN 50285, «Ενεργειακή Απόδοση Ηλεκτρικών Λαμπτήρων για Οικιακή Χρήση – Μέθοδοι Μετρήσεων», 1999.
- 29 IESNA “Laboratory or Field Thermal Measurements of Fluorescent Lamps and Ballasts in Luminaires”, LM-62-1991, IESNA 1991.
- 30 IESNA “Guide to Lamp Seasoning”, LM-54-99, IESNA 1999.
- 31 ΕΛΟΤ EN 60901, «Λαμπτήρες Φθορισμού με ένα Κάλυκα – Προδιαγραφές Απόδοσης», 2004.
- 32 National Lighting Product Information Program, “Guide to Selecting Frequently Switched T8 Fluorescent Lamp-Ballast Systems”, April 1998.
- 33 General Electric Lighting, “Polylux XL Triphosphor Fluorescent Lamps”, General Electric Company, 2001.
- 34 Y. Ji, R. Davis, C. O’Rourke, E. W. M. Chui, “Compatibility Testing of Fluorescent Lamp and Ballast Systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 6, pp. 1271-1276, November/December 1999.
- 35 A. Hilscher, “Determination of the Cathode Fall Voltage in Fluorescent Lamps by Measuring of the Operating Voltage”, Journal of Physics D: Applied Physics 35, pp. 1701-1715, 2002.
- 36 F. Llewellyn-Jones, “Ionization and Breakdown in Gases”, Methuen & Co LTD 1956.
- 37 Y. P. Raizer, “Gas Discharge Physics”, Berlin: Springer, 1991.
- 38 C. Meyer and H. Nienhuis, “Discharge lamps”, Eindhoven, The Netherlands: Philips

-
- Technical Library, 1988.
- 39 W. Elenbaas, “Fluorescent lamps”, 2nd edition, Philips Technical Library, London, England: Macmillan, 1971.
- 40 International Rectifier, Cecilia Contenti, Application Note AN-1065, “Procedures to design 120VAC CFL solutions with the IR2520D”.
- 41 International Rectifier, Application Note AN-1056, 13W Integrated CFL using IR53H420.
- 42 Sam Ben-Yaakov, Moshe Shvartsas, Gregory Ivensky, “HF Multiresonant Electronic Ballast for Fluorescent Lamps with Constant Filament Preheat Voltage”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, No. 1, pp. 61-67, January/February 2008.
- 43 Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich, “A New Procedure for High-Frequency Electronic Ballast Design”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, pp. 262-267, January/February 2001.
- 44 In-Seon Yeo, Dong-Ho Lee, Sang-Bin Song, “A Simple Electronic Starter Capable of End-Of-Life Protection for Fluorescent Lamps” Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999. APEC '99, Volume 1, pp. 473-479, 1999.
- 45 T.-F. Wu, C.-C. Chen, J.-N. Wu, “An electronic ballast with inductively coupled preheating circuits”, Industry Application Conference, Volume 1, pp. 517-523, 2001.
- 46 G. D. Garbowicz, B. R. Jug, “Hybrid Ballasts III-Life Test Results and System Performance Data”, Journal of the Illuminating Engineering Society, Summer 1996, pp. 3-13.
- 47 A. Pressman, “Switching Power Supply Design”, New York, USA, 2nd edition, McGraw-Hill, 1998.
- 48 M. H. Rashid, “Power Electronics Handbook”, London, UK, Academic Press, 2001.
- 49 G. W. Mortimer, “Real-Time Measurement of Dynamic Filament Resistance”, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp. 22-28, Winter 1998.
- 50 L. Dabringhausen, D. Nandelstädt, J. Luhmann, J. Mentel, “Determination of HID Electrode Falls in a Model Lamp I: Pyrometric Measurements”, Journal of Physics D: Applied Physics 35, pp. 1621-1630, 2002.
- 51 T. F. Soules, J. H. Ingold, A. K. Bhattacharya, R. H. Springer, “Thermal Model of the Fluorescent Lamp Electrode”, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp. 81-92, Summer 1989.
- 52 K. Misono, M. Kando, J. T. Verdeyen, “Effect of Operating Frequency of Fluorescent Lamp on Barium Sputtering from Electrode”, The Illuminating Engineering Institute of Japan, Journal of Light and Visual Environment, Vol. 25, No. 2, pp. 1-9, 2001.
- 53 S. Hadrath, J. Ehlbeck, G. Lieder, F. Sigeneger, “Determination of Absolute Population Densities of Eroded Tungsten in Hollow Cathode Lamps and Fluorescent Lamps by Laser-Induced Fluorescence”, Journal of Physics D: Applied Physics 38, pp. 3285-3295, 2005.
- 54 National Lighting Product Information Program, “Screwbase compact fluorescent lamp products”, Specifier Reports supplements, Vol. 7, No. 1, July 2005.
-

- 55 Stefan Szuba, "Phase-Resolved Thermal Modelling of a Fluorescent Lamp Electrode as a Function of Current Waveshape and frequency", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 3, pp. 459-470, May/June 1991.
- 56 Y. Watanabe, "Dependency of Cathode Temperature on Operation Frequencies in Fluorescent Lamps", Journal of the Illuminating Engineering Society, Winter 1995, pp. 48-57, 1995.
- 57 K. C. Mishra, R. Garner, P. C. Schmidt, "Model of work function of tungsten cathodes with barium", Journal of Applied Physics, Volume 95, Number 6, March 2004, pp. 3069-3080, 2004.
- 58 A. K. Bhattacharya, "Measurement of barium ion density in the vicinity of fluorescent lamp electrodes", Journal of Applied Physics, Volume 65, Number 12, June 1989, pp. 4603-4607, 1989.
- 59 J. Almanstotter, T. Fries, B. Eberhard, "Electronic structure of fluorescent lamp cathode surfaces: BaO/W(001)", Journal of Applied Physics, Volume 86, Number 1, July 1999, pp. 325-328, 1999.
- 60 F. T. Wakabayashi, C. S. Ferreira, M. A. Gomes de Brito, C. A. Canesin "Model for Electrodes' Filaments of Hot Cathode Fluorescent Lamps, During Preheating With Constant rms Current" IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 3, pp. 719-726, May 2007.
- 61 F. T. Wakabayashi, M. A. Gomes de Brito, C. S. Ferreira, C. A. Canesin, "Setting the Preheating and Steady-State Operation of Electronic Ballasts, Considering Electrodes of Hot-Cathode Fluorescent Lamps" IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 3, pp. 899-911, May 2007.
- 62 F. W. Giacobbe, "Determination of gaseous heat transfer coefficients at elevated temperatures", Applied Thermal Engineering 25 (2005), pp. 205-225.
- 63 Xi Chen, "Heat transfer to a metallic wire exposed to a plasma flow for great Knudsen numbers", J. Phys. 30 (1997), pp. 1885-1892.
- 64 N. Lj. Perović, K. D. Maglić G. S. Vuković, "Thermophysical properties of tungsten electrodes by subsecond pulse calorimetry", International Journal of Thermophysics, vol. 17, No 5, 1996 pp. 1047-1055.
- 65 J. W. F. Dorleijn, L. H. Goud, "Standardization of the static resistances of fluorescent lamp cathodes and new data for preheating", Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting, Conference Record Volume 1, pp. 665-672, 2002.
- 66 G. C. Hsieh, C. H. Lin, "Modeling and Estimating of the Fluorescent Lamp and Its Pre-heating Control", The Illuminating Engineering Institute of Japan, Journal of Light and Visual Environment, Vol. 23, No. 1, pp. 1-9, 1999.
- 67 M. Myojo, I. Okuno "Thermionic emission characteristics on current-controlled preheating of fluorescent lamp cathodes", Journal of Light and Visual Environment, Vol. 20, pp. 7-14, 1996.
- 68 M. Myojo, A. Waki, I. Okuno, "Preheating characteristics of a fluorescent lamp cathode (II)", Journal of Light and Visual Environment, Vol. 24, No 1, pp. 7-14, 2000.
- 69 F. Raiser, "Dim the Lights", IEEE Industry Application Magazine, pp. 54-59,

- Nov/Dec 2002.
- 70 E. Tetri, “Effect of Cathode Heating on Lamp Life in Dimming Use”, Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE, Vol. 2, pp. 895 – 900, 30 Sept.-4 Oct. 2001.
- 71 T. Shiga, L. C. Pitchford, J. P. Boeuf, S. Mikoshiba, “Study of efficacy in a mercury-free flat discharge fluorescent lamp using a zero dimensional positive column model”, Journal of Physics D: Applied Physics, 36, pp.512-521, 2003.
- 72 U. Mader, P. Horn, A. G. Knobel, “A dynamic model for the electrical characteristics of fluorescent lamps”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1992, Volume 2, pp. 1928-1934, 1992.
- 73 Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich, “A New High-Frequency Fluorescent Lamp Model”, Industry Applications Conference, IEEE 1998, Vol. 3, October 1998, pp. 2094-2098, 1998.
- 74 H. C. Yen, Z. J. Huang, K. H. Lee, “Fluorescent Lamp Model for High-Frequency Electronic Ballasts”, Power Electronics and Drives Systems, Volume 2, Nov. 2005, pp. 1184-1189, 2005.
- 75 M. Cervi, A. Seidel, F. Bisogno, R. do Prado, “Fluorescent Lamp model based on the equivalent resistance variation”, Industry Applications Conference, IEEE 2002, Vol. 1, October 2002, pp. 680-684, 2002.
- 76 S. Ben-Yaakov, M. Shvartsas, S. Glozman, “Statics and dynamic of fluorescent lamps operating at high frequency: modelling and simulation”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 6, pp. 1486-1492, Nov./Dec. 2002.
- 77 B. Mukai, N. Nagaoka, A. Ametani, I. Fujita, “Modeling method of fluorescent lamp using statistical analysis method”, Journal of Light and Visual Environment, Vol. 20, No 1, pp. 25-32, 1996.
- 78 G. G. Lister, “Low-pressure gas discharge modelling”, Journal of Physics D: Applied Physics, 25, pp. 1649–1680, 1992.
- 79 E. E. Hammer, Terry K. McGowan, “Characteristics of Various F40 Fluorescent Systems at 60 Hz and High Frequency”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21, No. 1, pp. 11-16, January/February 1985.
- 80 E. E. Hammer, “Starting Voltage Characteristics of 40-W Biaxial Fluorescent Lamps”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 3, pp. 498-502, May/June 1990.
- 81 E. E. Hammer, “Effects of Changing Line Voltage with Various Fluorescent Systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 4, pp. 692-699, July/August 1988.
- 82 E. E. Hammer, “High Frequency Reference Circuit for CFL/Linear Fluorescent Lamps”, Journal of the Illuminating Engineering Society pp. 69-76, Summer 1997.
- 83 E. E. Hammer, “Cathode Fall Voltage Relationship with Fluorescent Lamps”, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp. 116-122, Winter 1995.
- 84 E. E. Hammer, “Comparative Starting Operating Characteristics of Typical F40 Systems”, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp.63-69, Winter 1989.

- 85 E. E. Hammer, “Effects of Ambient Temperature on the Performance of Bent Tube Fluorescent Lamps”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 2, pp. 216-223, March/April 1989.
- 86 E. E. Hammer, “Photocell Enhanced Technique for Measuring Starting Electrode Temperatures of Fluorescent Lamps”, IEEE Industry Application Society, Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, pp. 2313-2333, October 5-9, 1997.
- 87 S. Hadrath, M. Beck, R. C. Garner, G. Lieder, J. Ehibeck, “Determination of absolute Ba densities during dimming operation of fluorescent lamps by laser-induced fluorescence measurements”, Journal of Physics D: Applied Physics 40, pp. 163-167, 2007.
- 88 R. R. Verderber, O. C. Morse, F. M. Rubinstein, “Performance of Electronic Ballast and Controls with 34- and 40-Watt F40 Fluorescent Lamps”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 6, pp. 1049-1059, November/December 1989.
- 89 National Lighting Product Information Program, “Cathode Disconnect Ballasts”, Specifier Reports, Vol. 2, No. 1, June 1993.
- 90 S. A. Kalinowsky, J. J. Martello, “Electrical and illumination characteristics of energy-saving fluorescent lighting as a function of the potential”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 2, pp. 208-215, March/April 1989.
- 91 T. Yasuda, M. Kando, “Improvement of the luminous run-up characteristics in ballast-integrated compact fluorescent lamps covered with outer globes”, Leukos, Vol. 4, No. 1, July 2007, pp. 57-70.
- 92 R. Nachtrieb, F. Khan, J. F. Waymouth, , “Cathode Fall Measurements in Fluorescent Lamps”, Journal of Physics D: Applied Physics 38, pp. 3226-3236, 2005.
- 93 K. J. Misono “The cathode fall voltage of low current fluorescent lamps”, Journal of Light and Visual Environment, Vol.16, No 2, pp. 53–60, 1992.
- 94 S. Hadrath, R. C. Garner, G. H. Lieder, J. Ehlbeck “Time resolved measurement of cathode fall in high frequency fluorescent lamps” Journal of Physics D: Applied Physics 40, pp. 6975–6981, 2007.
- 95 H. Nagai, K. Honda, N. Hashimoto, “Cataphoresis phenomenon of fluorescent lamps with HF electronic ballasts”, Journal of Light and Visual Environment, Vol. 26, No 2, pp. 53–60, 2002.
- 96 M. Graovac, F. P. Dawson, M. Fila, D. E. Cormack, “Fluorescent lamp cold starting improvement”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 2, pp. 544-550, March/April. 2005.
- 97 W. Kaiser, R. P. Marques, A. F. Correa, “Impact of Current Crest Factor at High and Low Frequency Operation on Fluorescent Lamp Electrodes”, Industry Application Conference (2006), V, 1, pp. 236-241, 2006.
- 98 N.G. Chondrakis, F.V. Topalis, “Starting characteristics of fluorescent tubes and compact fluorescent lamps operating with electronic ballasts”, Elsevier, Measurement, 42 (2009) pp. 78-86.
- 99 Y. Ji, R. Davis, W. Chen, “An Investigation of the Effect of Operating Cycles on the Life of Compact Fluorescent Lamps”, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp. 57-62, Summer 1999.

-
- 100 R. Davis, Y. Ji, W. Chen, “Rapid – Cycle Testing for Fluorescent Lamps- What do the Results Mean ? ”, IESNA Annual Conference, Paper #30, pp. 461-481, 1996.
- 101 N. Narendran, T. Yin, C. O’Rourke, A. Bierman, N. Maliyagoda, “A Lamp Life Predictor for Frequently Switched Instant-Start Fluorescent Systems”, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp. 189-197, Summer 2000.
- 102 A. Bierman, C. O’Rourke, L. Deng, N. Narendran, “Testing a Lamp Life Predictor for Instant-Start Fluorescent Systems”, IESNA Annual Conference Lighting Updates, Paper #57, pp. 141-156, 2002.
- 103 F. G. Rosillo, N. M. Chivelet, “Lifetime prediction of fluorescent lamps used in photovoltaic systems”, Lighting Research and Technology, 2009; 41: 183–197.
- 104 Felix Garcia Rosillo, “Lifetime evaluation of DC-supplied electronic ballasts with fluorescent lamps for photovoltaic applications”, Renewable Energy 29, pp. 961–974, 2004.
- 105 W. R. Alling, “Preserving Lamp Life Using a Low Cost Electronic Ballast with Compact Fluorescent Lamps, a New Approach”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1993., Conference Record of the 1993, 2-8 Oct. 1993 pp. 2247 – 2253, Vol. 3, IEEE, 1993.
- 106 A.S. dos Santos, M. Toss, F. S. D. Reis, R. Tonkoski, “The influence of programmed start ballast in T5 fluorescent lamp lifetime”, Industrial Electronics Society, IECON 2005, Nov. 2005.
- 107 ΕΛΟΤ EN 60969, «Λαμπτήρες με Ενσωματωμένη Στραγγαλιστική Διάταξη για Γενικό Φωτισμό – Απαιτήσεις Λειτουργίας», 2001.
- 108 ΕΛΟΤ EN 60081, «Λαμπτήρες Φθορισμού με δύο Κάλυκες – Προδιαγραφές επίδοσης», 2005.
- 109 ΕΛΟΤ EN 60921, «Στραγγαλιστικές Διατάξεις για Σωληνωτούς Λαμπτήρες Φθορισμού – Γενικές Απαιτήσεις και Απαιτήσεις Ασφαλείας», 2004.
- 110 C. O’Rourke, M. G. Figueiro, “Long-Term Performance of Screwbase Compact Fluorescent Lamps”, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp. 30-39, Summer 2001.
- 111 National Lighting Product Information Program, “T5FT Lamps and Ballasts”, Lighting Answers, Vol. 3, No. 1, April 1996.
- 112 Philips, “Lamps and Gear Catalogue 2005/2006”, Koninklijke Philips Electronics N.V. 2005.
- 113 Takeo Yasuda, Hidenori Itou, “Starting time-lag estimation of electronic compact fluorescent lamps”, Journal of Light and Visual Environment, Vol. 23, No 2, pp. 16-22, 1999.
- 114 N.G. Chondrakis, F.V. Topalis, “Influence of Cold Starting on the Life of T5 Fluorescent Tubes and CFLs”, IEEE Xplore, Industrial Electronics, 2009, IECON ’09, 35th Annual conference of IEEE.
- 115 Ι. Μ. Ρασσιάς, “Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστικής”, Συμμετρία, Αθήνα 2003.
- 116 J. Crawshaw, J. Chambers, “A Concise Course in A-Level Statistics” Stanley Thornes, UK, 1995.

- 117 F. G. Rosillo, N Martin and MA Egidio, “Comparison of conventional and accelerated lifetime testing of fluorescent lamps”, *Lighting Res. Technol.* 2009; 0: 1–17.
- 118 F. G. Rosillo, N Martin and MA Egidio, “Prediction of fluorescent lamp lifetime with accelerated testing”, *Lighting Res. Technol.* 2010; 0: 1–12.
- 119 N.G. Chondrakis, F.V. Topalis, “Influence of ballast starting method and operation cycle on the life of T5 fluorescent tubes and CFLs”, *Lighting Research and Technology*, 2011 (Online).
- 120 D. Kourkoutas, G. Georgopoulos, A. Maragos, I. Apostolakis, G. Tsekouras, Irene S. Karanasiou, D. Papakonstantinou, E. Iliakis, M. Moschos: “Relationship between Central Corneal Thickness and HRTII topographic parameters, in Glaucoma Patients, by using a new non-linear multivariable model”, *Clinical Ophthalmology*, 2009, Issue 3, pp. 313-323.
- 121 G. J. Tsekouras, E. N. Dialynas, N.D. Hatziargyriou, S. Kavatza: “A non-linear multivariable regression model for midterm energy forecasting of power systems”, *Electrical Power Systems Research*, Vol. 77, Issue 12, October 2007, pp. 1560-15.
- 122 Μαθήματα Φυσικής του Πανεπιστημίου του Berkeley, “Στατιστική Φυσική”, Εργαστήρια Φυσικής Ε. Μ. Π., 1978.
- 123 B. C. Sales and M. B. Maple, “Low-frequency electrical resistance of iron, cobalt and nickel in the vicinity of their Curie temperatures”, *Applied Physics A* 31, 1983, pp. 115-117.
- 124 N.G. Chondrakis, F.V. Topalis, “Evaluation of heat transfer coefficient of tungsten filaments at low pressures and high temperatures”, *Applied Thermal Engineering* Volume 31, Issues 2-3, February 2011, pp. 258-267.
- 125 C. V. Madhusudana, “Thermal Contact Conductance”, Springer, 1996, pp. 53.
- 126 G. Nellis, S. Klein, “Heat Transfer”, Cambridge University Press, 2009.
- 127 Y. A. Cengel, A. J. Ghajar, “Heat and mass transfer”, McGraw-Hill, fourth edition, 2009, pp. 20, 399.
- 128 L. S. Dubrovinsky, S. K. Saxena, “Thermal expansion of periclase (MgO) and tungsten (W) to melting temperatures”, *Phys. Chem. Minerals* (1997) 24, pp. 547-550.

Παραρτήματα

Π.1. Πλήρης αποκατάσταση χαρακτηριστικών μετά την έναυση

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, για να γίνουν μετρήσεις σε χαρακτηριστικά λαμπτήρων φθορισμού κατά τη λειτουργία, πρέπει το σύστημα να λειτουργήσει για τουλάχιστον μία ώρα. Σε αυτό το χρόνο αποκαθίστανται πλήρως οι συνθήκες και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος. Όμως, ο χρόνος αυτός απαιτείται για μετρήσεις που έχουν σχέση με την παραγωγή φωτός από το λαμπτήρα. Επειδή στην παρούσα εργασία οι μετρήσεις αφορούσαν μόνο ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, διερευνήθηκε ο χρόνος που απαιτείται για τη σταθεροποίησή τους. Ο χρόνος αυτός αν και βρέθηκε ότι ήταν της τάξης των δεκαπέντε λεπτών, οι μετρήσεις γίνονταν αφού το σύστημα λειτουργούσε περίπου μία ώρα.

Για να φανεί η επίδραση του χρόνου για την απόκτηση των τελικών τιμών των χαρακτηριστικών που μετρούνταν έγινε καταγραφή τους για χρονικό διάστημα μίας ώρας σε ένα σύστημα. Στα άκρα του λαμπτήρα συνδέθηκαν οι ακροδέκτες των οργάνων μέτρησης τάσης και ρεύματος, συνδεδεμένα με τον παλμογράφο και έγινε καταγραφή των τιμών ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Ο πίνακας Π1 δίνει τις τιμές της συχνότητας, της τάσης και του ρεύματος λειτουργίας.

Πίνακας Π.1. Μεταβολή ηλεκτρικών χαρακτηριστικών λαμπτήρα μέχρι την σταθεροποίησή τους.

Χρόνος (λεπτά)	Συχνότητα (kHz)	Τάση (V rms)	Ρεύμα (mA rms)
0	45,96	80,0	171,0
1	45,87	80,5	172,6
2	45,84	80,0	173,0
3	45,87	79,5	173,0
4	45,79	79,0	172,8
5	45,79	79,5	173,0
7	45,87	80,5	172,0
10	45,87	81,0	172,4
16	45,87	80,5	171,2
20	45,79	80,5	172,0
40	45,87	81,0	172,0
60	45,87	80,5	171,2

Από τις τιμές του πίνακα φαίνεται ότι υπάρχει σταθεροποίηση των τιμών μετά από περίπου δέκα λεπτά. Παρατηρείται όμως μία μικρή παλινδρόμηση γύρω από κάποια τιμή σε όλα τα χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν. Επομένως τα χαρακτηριστικά λειτουργίας στα συστήματα που μελετήθηκαν σταθεροποιούνται σε λιγότερο από δεκαπέντε λεπτά.

Π.2. Επίδραση της τάσης τροφοδοσίας στα χαρακτηριστικά έναυσης και λειτουργίας

Είναι γνωστό ότι η τάση τροφοδοσίας των συστημάτων φωτισμού που χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά ballast, επηρεάζει τη λειτουργία του λαμπτήρα. Όμως τα ηλεκτρονικά ballast διαθέτουν μηχανισμό σταθεροποίησης της τάσης, ώστε η τροφοδοσία του λαμπτήρα να μην διαφοροποιείται με αλλαγές στη τάση του δικτύου. Στο εργαστήριο έγινε έλεγχος, ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση της μεταβολής της τάσης του δικτύου τόσο στα χαρακτηριστικά που μετρούνταν στην έναυση όσο και στη λειτουργία. Έγινε σε συστήματα που επιλέχθηκαν τυχαία και ήταν ίδιου τύπου με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν στη διατριβή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα Π.2. Αφορούν ένα σύστημα με λαμπτήρα T5 (Osram) και ballast μεγάλου ΧΠ (Tridonic).

Πίνακας Π.2. Τιμές των χαρακτηριστικών έναυσης και λειτουργίας όταν μεταβάλλεται η τάση τροφοδοσίας.

Τάση τροφοδοσίας (V rms)	Συχνότητα (kHz)	Τάση λειτουργίας (V rms)	Ρεύμα λειτουργίας (mA rms)	Τάση ηλεκτροδίου (V p-p)	Ρεύμα ηλεκτροδίου (mA p-p)
230	46,82	84,5	167,0	22,6	552
225	46,73	84,5	167,0	22,8	552
220	46,73	84,0	166,0	22,8	552
215	46,82	84,0	167,0	22,8	552
210	46,82	84,5	166,0	22,8	552
205	46,73	84,0	167,0	23,0	548
200	46,82	84,0	167,0	22,8	552
190	46,82	84,0	166,0	22,8	552
180	46,82	83,5	165,4	22,8	552
170	46,73	84,0	166,0	23,0	548
160	46,73	84,0	165,6	23,0	556
150	46,73	83,5	165,4	23,0	552
140	46,64	82,5	166,0	22,8	552

Για τον πειραματικό έλεγχο των συστημάτων, η τάση τροφοδοσίας του ballast έγινε μέσω αυτομετασχηματιστή. Για τον έλεγχο των χαρακτηριστικών στην κατάσταση λειτουργίας ο λαμπτήρας λειτούργησε για αρκετό χρόνο ώστε τα χαρακτηριστικά του να έχουν αποκατασταθεί, ο δε ρεοστάτης παρείχε τάση 230 V. Οι ακροδέκτες του ballast ήταν συνδεδεμένοι με τον παλμογράφο και κατέγραφαν την τάση, το ρεύμα και τη συχνότητα λειτουργίας του λαμπτήρα. Έγιναν διαδοχικές μετρήσεις με τροφοδοσία του ballast υπό διάφορες τάσεις. Η τάση μειωνόταν διαρκώς, μέχρι να πάψει η λειτουργία του λαμπτήρα, λόγω της χαμηλής τιμής της τάσης. Με τις μετρήσεις αυτές, έγινε έλεγχος της μεταβολής των χαρακτηριστικών λειτουργίας σε ένα ευρύ φάσμα διακυμάνσεων της τάσης του δικτύου.

Σε μία άλλη σειρά μετρήσεων, έγινε παρόμοιος έλεγχος για την τάση και το ρεύμα του ηλεκτροδίου κατά την έναυση. Η τάση τροφοδοσίας ήταν ίδια με τις μετρήσεις στην κατάσταση λειτουργίας του λαμπτήρα. Στον έλεγχο αυτό το σύστημα έμενε για αρκετό χρόνο εκτός λειτουργίας ώστε να αποκατασταθεί η θερμική ισορροπία με το περιβάλλον.

Από τον πίνακα που παρατίθεται, επιβεβαιώνεται ότι οι μεταβολές του δικτύου, που είναι ασφαλώς μικρότερες από αυτές που δοκιμάστηκαν στο πείραμα, δεν επηρεάζουν ούτε την έναυση αλλά ούτε και την λειτουργία του λαμπτήρα. Για τιμές τάσης τροφοδοσίας κάτω από 138 V, ο λαμπτήρας δεν λειτουργούσε. Έγιναν παρόμοιοι έλεγχοι και στα υπόλοιπα συστήματα και τα αποτελέσματα παρείχαν παρόμοια συμπεράσματα. Υπήρχαν μόνο μικρές διαφοροποιήσεις ως προς την τιμή της τάσης που σταματούσε η λειτουργία του συστήματος.

Βεβαίως τα πειράματα που έγιναν δεν αποτελούν πλήρη έλεγχο, αφού δεν έγιναν υπό τα καθιερωμένα πρότυπα και κανονισμούς, όμως για το πεδίο έρευνας της διατριβής επιβεβαίωσαν ότι οι διακυμάνσεις του δικτύου δεν αποτελούν πρόβλημα για τη λειτουργία των συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

Π.3. Χρόνος απόκτησης θερμοκρασίας περιβάλλοντος νήματος λαμπτήρα

Πριν την έναρξη της διαδικασίας των μετρήσεων του πειραματικού μέρους της διατριβής, τα συστήματα έπρεπε να αποκτήσουν τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό, πριν γίνει η μέτρηση των αντιστάσεων και των υπόλοιπων χαρακτηριστικών, τα συστήματα έμεναν εκτός λειτουργίας, τουλάχιστον μία ώρα. Ο χρόνος αυτός κρίνεται ως αρκετός για τους σκοπούς του πειράματος. Για να αποκτηθεί μία πληρέστερη εικόνα της συμπεριφοράς του νήματος κατά την ψύξη του, έγινε μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασής του επί μία ώρα, αφού είχε λειτουργήσει προηγουμένως ο λαμπτήρας για ικανό χρονικό διάστημα, ώστε το νήμα να βρεθεί στη θερμοκρασία λειτουργίας. Στον πίνακα Π.3 φαίνονται οι τιμές που καταγράφηκαν. Οι τιμές του πίνακα αφορούν ένα νήμα με αντίσταση 9,60 Ω σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C. Σε αυτή τη θερμοκρασία έγινε και το πείραμα.

Πίνακας Π.3. Μεταβολή της αντίστασης του νήματος κατά την ψύξη του στους 25 °C.

Χρόνος (λεπτά)	0,5	1	2	3	4	5	7	10	15	30	60
Αντίσταση (Ω)	10,44	10,32	10,04	9,88	9,80	9,76	9,69	9,64	9,63	9,62	9,61

Όπως φαίνεται στον πίνακα Π.3 η τιμή της αντίστασης αποκαθίσταται σχεδόν πλήρως σε μία ώρα. Όμως, σε χρόνο δέκα πρώτων λεπτών, η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης (που δείχνει την απόκτηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για το ηλεκτρόδιο) έχει πλησιάσει την αρχική σε ποσοστό μεγαλύτερο από 99%. Διαφορές της τάξης του 1% σε αντίσταση 10 Ω περίπου αντιστοιχούν σε διαφορά θερμοκρασίας 1 °C, σύμφωνα με τη σχέση 1.8. Η τιμή αυτή είναι πλήρως ικανοποιητική για την ακρίβεια των θερμοκρασιών στα πειράματα, που είναι της τάξης των 800 °C.

Π.4. Μέτρηση ισχύος λαμπτήρα και ballast

Οι κατασκευαστές των λαμπτήρων και των ballast, μεταξύ των άλλων τεχνικών χαρακτηριστικών που δίνουν γι' αυτά, παρέχουν και τις καταναλώσεις, δηλαδή την ισχύ τους. Στον έλεγχο των συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, έγινε έλεγχος με

μέτρηση των ισχύων τους. Ασφαλώς η ισχύς λαμπτήρα του κατασκευαστή αποδίδεται εφόσον λειτουργεί με το ballast αναφοράς. Η κατανάλωση του ballast δεν διαφοροποιείται, αφού οι λαμπτήρες που οδηγεί είναι δεδομένοι, άρα για την ονομαστική ισχύ του λαμπτήρα το ballast θα πρέπει να καταναλώνει την τιμή που αναγράφει.

Οι λαμπτήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν απόλυτα συμβατοί με τις απαιτήσεις των ballast, επομένως αναμένεται να αποδίδουν τόσο όσο αναγράφεται στα τεχνικά τους χαρακτηριστικά. Για τις μετρήσεις της ισχύος του λαμπτήρα χρησιμοποιήθηκε ο παλμογράφος, ο οποίος κατέγραφε την τάση και το ρεύμα του. Με εσωτερική μαθηματική επεξεργασία, έδινε τη μέση ή πραγματική ισχύ του λαμπτήρα. Για την μέτρηση της ισχύος του ballast μετρούνταν η ισχύς του συστήματος με το βαττόμετρο και με αφαίρεση της ισχύος του λαμπτήρα προέκυπτε η ισχύς του ballast. Με μετρήσεις κατά τη λειτουργία όλων των συστημάτων κατασκευάστηκε ο πίνακας Π.4.

Πίνακας Π.4. Ισχύς λαμπτήρων και ballast.

Ballast	Λαμπτήρας	Ισχύς λαμπτήρα (W)	Ισχύς συστήματος (W)	Ισχύς ballast (W)	Συντελεστής ισχύος συστήματος (ballast)
Philips	CFL	17,17 (18)	19,60	2,43	0,96 (0,91)
Philips	T5	13,83 (14)	17,60	3,77	0,96 (0,93)
Osram	T5 1	14,20 (14)	32,50	4,05	0,93 (0,94)
	T5 2	14,25 (14)			
Tridonic	T5 1	14,23 (14)	34,55	5,82	0,96 (0,97)
	T5 2	14,50 (14)			

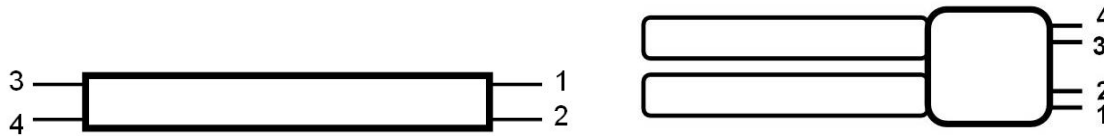
Στον πίνακα Π.4 έχει προστεθεί και ο συντελεστής ισχύος, όπως αυτός προκύπτει από τις τιμές ρεύματος και τάσης που κατέγραψε το βαττόμετρο. Επίσης εκτός από τις τιμές που μετρήθηκαν και καταγράφονται, έχουν προστεθεί σε παρένθεση και η ονομαστική ισχύς κάθε τύπου λαμπτήρα και ο συντελεστής ισχύος που δίνει ο κατασκευαστής του ballast. Οι τιμές του πίνακα δείχνουν ότι η ισχύς κάθε λαμπτήρα δεν απείχε πολύ από τις ονομαστικές τιμές τους. Βέβαια, οι ονομαστικές τιμές πολλές φορές είναι ενδεικτικές. Άλλωστε, σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ballast, όπως φαίνονται στον πίνακα 5.2, αυτά οδηγούν τους λαμπτήρες με ισχύ που δεν είναι πάντα η ονομαστική των λαμπτήρων.

Ένα αξιοσημείωτο συμπέρασμα που εξάγεται από τις τιμές του πίνακα Π.4, είναι ότι τα ballast έχουν μεγάλες απώλειες. Ως ποσοστό επί της ισχύος του συστήματος, σύμφωνα με τον πίνακα και τη σειρά που εμφανίζονται σε αυτόν, είναι: 12,4 - 21,4 - 12,5 - 16,8. Έγιναν μετρήσεις και σε άλλα συστήματα, με λαμπτήρες μεγαλύτερης ισχύος και το ποσοστό ήταν περί το 15% σε όλα.

Π.5. Τάση στους ακροδέκτες τροφοδοσίας του λαμπτήρα

Το ρεύμα του λαμπτήρα κατά τη λειτουργία, μετρούμενο με τους ακροδέκτες ρεύματος, είναι ίδιο, ασχέτως εάν μετρηθεί από το ένα ή το άλλο άκρο του λαμπτήρα. Για την τάση δε συμβαίνει το ίδιο. Οι δύο ακροδέκτες τάσης κατά τη διάρκεια της μέτρησης, δύναται να

συνδεθούν με τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς στους ακροδέκτες του λαμπτήρα και οι αντίστοιχες τάσεις να καταγραφούν από τον παλμογράφο.



Σχήμα Π.1. Σχηματική παράσταση λαμπτήρα T5 και συμπαγούς.

Στο σχήμα Π.1 φαίνονται τα σχήματα δύο λαμπτήρων (ενός σωληνωτού κι ενός συμπαγούς). Έγιναν μετρήσεις σε διάφορους λαμπτήρες από εκείνους που χρησιμοποιούνται στα πειράματα, εδώ όμως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον σωληνωτό και τον συμπαγή της εταιρίας Philips. Στον πίνακα Π.5 φαίνονται τα αποτελέσματα για την τιμή της τάσης του λαμπτήρα σε όλους τους συνδυασμούς σύνδεσης των ακροδεκτών.

Πίνακας Π.5. Τάση λαμπτήρα (V rms) στους διάφορους συνδυασμούς σύνδεσης για τη μέτρηση.

Ballast	Σύνδεση ακροδεκτών			
	1-3	1-4	2-3	2-4
Philips HF-P 118 PL-T/C (με συμπαγή λαμπτήρα)	80,5	79,0	79,0	78,0
Philips HF-P 1 14-35 TL5 HE (με σωληνωτό λαμπτήρα)	87,5	86,5	86,5	85,5

Από τον πίνακα φαίνονται οι μικρές διαφορές που υπάρχουν στις μετρήσεις μεταξύ των συνδυασμών των ακροδεκτών.

Π.6. Μεταβολή συχνότητας κατά την προθέρμανση των ηλεκτροδίων

Στο πλαίσιο της μελέτης της έναυσης έγιναν διάφορες μετρήσεις, μεταξύ των οποίων και η καταγραφή της συχνότητας και της αντίστοιχης τάσης ηλεκτροδίου κατά τη διάρκεια της προθέρμανσης. Για να γίνει αυτό, πρώτα καταγράφονταν οι κυματομορφές με τον παλμογράφο. Κατόπιν με μετρήσεις επί των κυματομορφών και επεξεργασία με το λογισμικό του παλμογράφου, σε διάφορες χρονικές στιγμές της διαδικασίας της προθέρμανσης, καταστρώθηκε ο πίνακας Π6. Στον πίνακα έχει τοποθετηθεί ο χρόνος της μέτρησης, η συχνότητα με την οποία ένα ballast Tridonic τροφοδοτούσε το ηλεκτρόδιο ενός λαμπτήρα Osram, καθώς και η αντίστοιχη τιμή της ενεργού τάσης στα άκρα του ηλεκτροδίου.

Οι τιμές του πίνακα αρχίζουν από τη στιγμή που το ηλεκτρόδιο δέχεται την τάση και σταματούν στο τέλος της προθέρμανσης. Όταν τελειώσει η προθέρμανση το ηλεκτρόδιο δεν τροφοδοτείται πλέον από το κύκλωμα που του παρείχε μέχρι εκείνη τη στιγμή την τάση, επομένως η συχνότητα και η τάση που πιθανόν μετρηθούν δεν έχουν κάποια πραγματική έννοια.

Πίνακας Π.6. Μεταβολή της συχνότητας και της τάσης του ηλεκτροδίου ενός λαμπτήρα κατά την προθέρμανση.

Χρόνος (ms)	Συχνότητα (kHz)	Τάση (V)
0,0	155,00	0,88
8,0	128,60	0,93
28,0	124,40	0,98
33,0	110,10	1,06
44,0	116,80	1,14
53,6	112,20	1,92
53,8	116,00	2,45
55,2	89,76	5,10
106,6	88,20	6,25
156,2	88,35	7,05
695,0	90,65	8,45
1262,0	89,47	8,60
1435,0	88,47	8,80
1448,6	89,12	8,55
1451,6	88,17	8,75
1452,0	88,91	8,75
1454,6	89,63	8,70
1458,4	88,58	9,05
1460,0	81,52	9,40
1461,2	77,35	9,65
1463,4	71,73	9,75
1465,4	67,82	9,85
1466,6	66,01	9,95

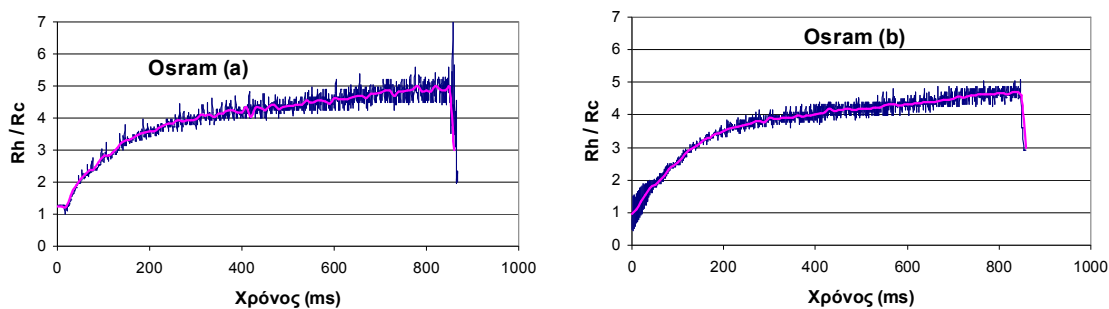
Από τις τιμές που καταγράφηκαν γίνεται αντιληπτό ότι αρχικά εφαρμόζεται μικρή τάση στο ηλεκτρόδιο. Στα ηλεκτρονικά ballast η τιμή της τάσης εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη συχνότητα. Γι' αυτό και στο διάστημα που η συχνότητα είναι υψηλή η τάση μένει σε χαμηλά επίπεδα. Μετά την πάροδο περίπου 55 χιλιοστών του δευτερολέπτου η συχνότητα μειώνεται στην τιμή των 88 έως 90 kHz και η τάση μένει σχεδόν σταθερή (περί τα 8 V) στο μεγαλύτερο διάστημα της προθέρμανσης. Προς το τέλος της διαδικασίας η συχνότητα μειώνεται κι άλλο με αποτέλεσμα η τάση να αυξηθεί περαιτέρω.

Το σενάριο του ballast μεγάλου ΧΠ (Tridonic) που περιγράφηκε, ακολουθούν γενικώς τα ηλεκτρονικά ballast που παρέχουν προθέρμανση στα ηλεκτρόδια. Οι διαφορές που πιθανώς υπάρχουν, είναι στην έναρξη και στο τέλος της προθέρμανσης. Άλλα ballast έχουν έναρξη και λήξη της προθέρμανσης με υψηλή τάση και άλλα με χαμηλή.

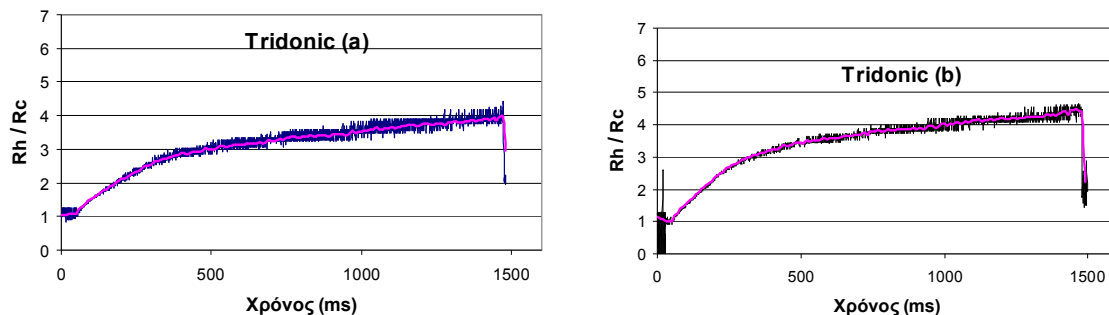
Π.7. Μεταβολή της αντίστασης του ηλεκτροδίου κατά την προθέρμανση σε πραγματικό χρόνο

Κατά την προθέρμανση των ηλεκτροδίων στα συστήματα γρήγορης ή προγραμματισμένης έναυσης, η εφαρμοζόμενη τάση ή ρεύμα στα ηλεκτρόδια θερμαίνει σταδιακά τα νήματα. Μερικοί ερευνητές [86, 98] θεωρούν ενδιαφέρονσα τη μελέτη του φαινομένου, όταν ερευνούν τη συμπεριφορά αυτού του είδους των συστημάτων. Έτσι, στο πλαίσιο της παρούσης μελέτης, έγινε μία δειγματοληπτική καταγραφή του φαινομένου και παρήχθησαν τα διαγράμματα των σχημάτων Π.2 – Π.5.

Στα διαγράμματα, έχει τοποθετηθεί στον κατακόρυφο άξονα ο λόγος προθέρμανσης αντί της ίδιας της αντίστασης. Αντιπροσωπεύει καλύτερα το φαινόμενο και μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ διαφορετικών λαμπτήρων. Το κάθε ένα από τα έξι πρώτα διαγράμματα αφορά και ένα από τους λαμπτήρες που λειτουργούσαν με ballast προθέρμανσης. Για το ballast μέτριου ΧΠ της Osram που οδηγούσε δύο λαμπτήρες δίνονται δύο διαγράμματα, ένα για κάθε ένα από τους λαμπτήρες, διότι παρουσίαζαν κάποιες διαφορές. Το ίδιο ισχύει και για το ballast μεγάλου ΧΠ της Tridonic για το οποίο δίνονται πάλι δύο διαγράμματα. Για τα δύο ballast μικρού ΧΠ της Philips δίνονται από ένα διάγραμμα. Στο σχήμα Π.5 δίνονται και οι έξι καμπύλες μαζί ώστε να γίνει σύγκριση αυτών. Κάθε ένα από τα διαγράμματα αφορά και ένα τυχαίο δείγμα λαμπτήρα για το οποίο έγινε η καταγραφή.

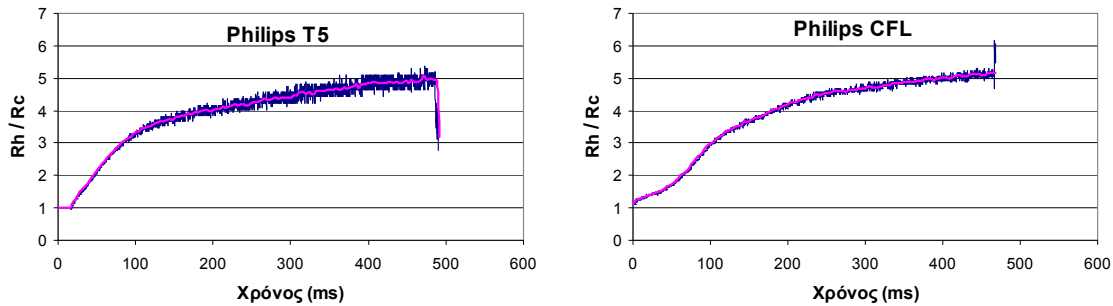


Σχήμα Π.2. Μεταβολή κατά την προθέρμανση της αντίστασης των ηλεκτροδίων των λαμπτήρων T5 που οδηγούνται με ballast μέτριου ΧΠ (Osram).



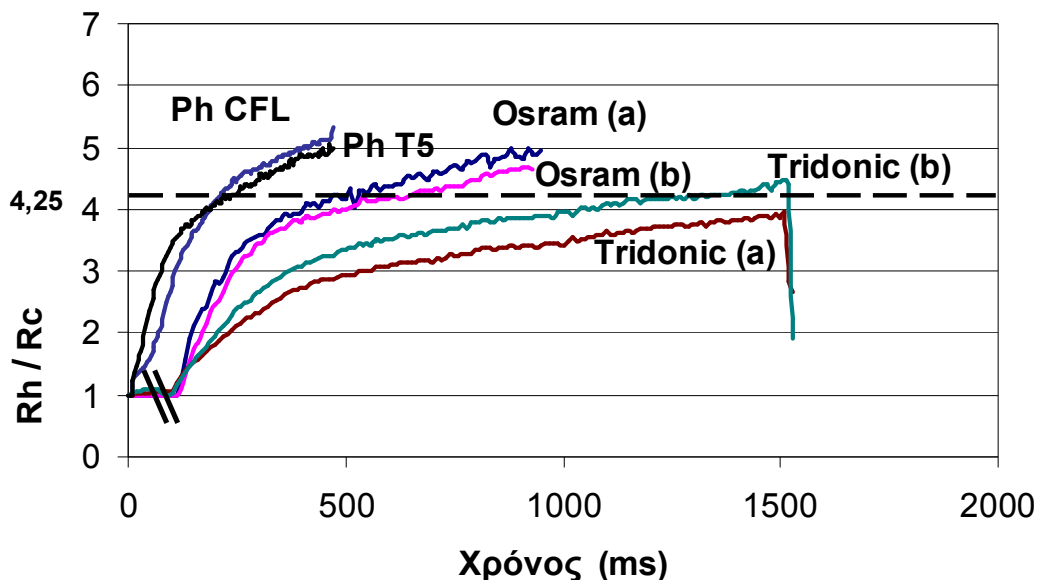
Σχήμα Π.3. Μεταβολή κατά την προθέρμανση της αντίστασης των ηλεκτροδίων των λαμπτήρων T5 που οδηγούνται με ballast μεγάλου ΧΠ (Tridonic).

Για τη δημιουργία των διαγραμμάτων έγινε καταγραφή της προθέρμανσης κάθε ηλεκτροδίου με τον παλμογράφο Tektronix TDS 2014. Το όργανο αυτό κάνει καταγραφή με μήκος 2500 (record length), δηλαδή καταγράφει 2500 σημεία του φαινομένου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση κρατά στη μνήμη του 2500 τιμές τάσεως και ίδιο αριθμό τιμών ρεύματος για το χρόνο της προθέρμανσης. Από τις τιμές τάσης και ρεύματος βρίσκεται η αντίσταση (νόμος του Ωμ) σε πραγματικό χρόνο καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου και από αυτήν ο λόγος προθέρμανσης. Επειδή η καμπύλες είναι συγκεχυμένες έγινε ομαλοποίησή τους με τον μέσο όρο των τιμών ανά δέκα.



Σχήμα Π.4. Μεταβολή κατά την προθέρμανση της αντίστασης των ηλεκτροδίων των λαμπτήρων T5 και CFL που οδηγούνται με ballast μικρού ΧΠ (Philips).

Στο σχήμα Π.5 παρουσιάζονται όλες μαζί οι ομαλοποιημένες καμπύλες για να φανούν οι διαφορές. Για να υπάρχει μεγαλύτερη ευκρίνεια οι καμπύλες που αφορούν τους λαμπτήρες με ballast Osram και Tridonic έχουν μετατοπιστεί κατά 100 ms δεξιότερα στον άξονα του χρόνου.



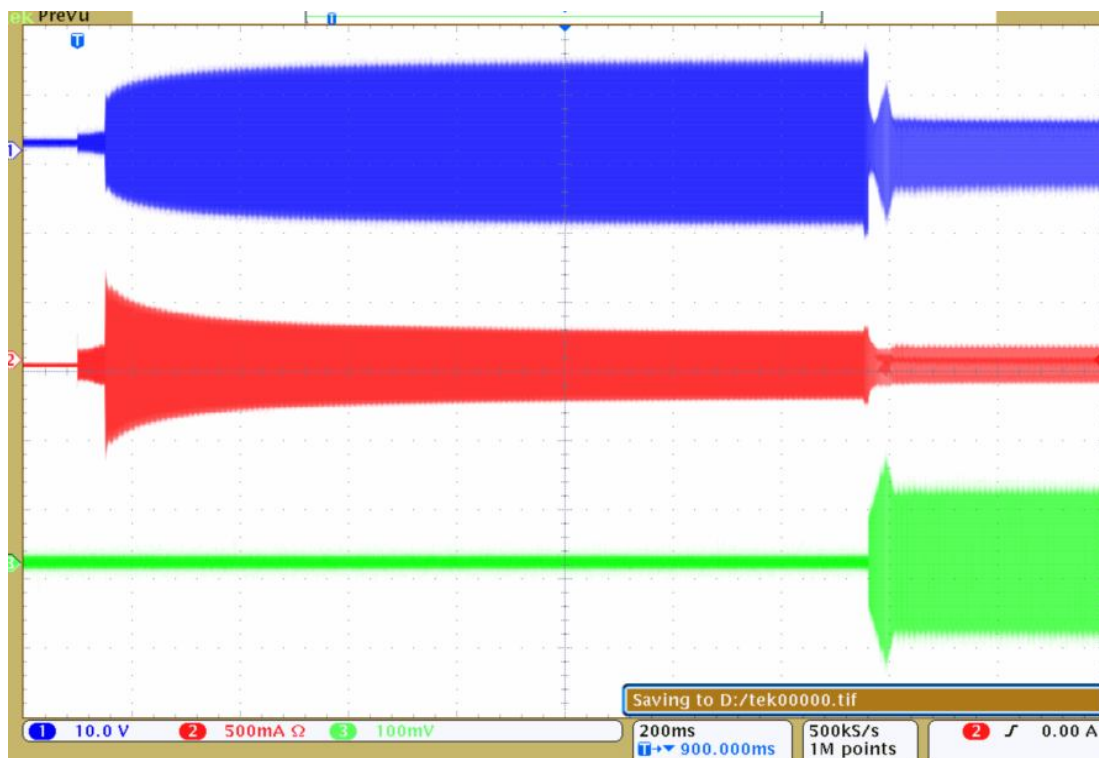
Σχήμα Π.5. Μεταβολή κατά την προθέρμανση της αντίστασης των ηλεκτροδίων όλων των λαμπτήρων συγκεντρωτικά.

Από τα διαγράμματα, αλλά και από τις μετρήσεις που έχουν δοθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, φαίνεται ότι για να επιτύχουν τον επιθυμητό λόγο προθέρμανσης (μεγαλύτερο του 4,25) τα ballast, επιβάλλουν στα νήματα τέτοια τάση ώστε σε συνδυασμό και με την αντίσταση του κρύου ηλεκτροδίου να επιτευχθεί ο λόγος προθέρμανσης. Στις μετρήσεις που έγιναν και παρουσιάζονται στα διαγράμματα φαίνεται ότι το ballast της Tridonic δεν καταφέρνει να επιτύχει λόγο προθέρμανσης 4,25 στον λαμπτήρα (α). Αυτό βέβαια δεν οφείλεται στον μικρό χρόνο προθέρμανσης αλλά στην μικρή τάση που επιβάλλει σε αυτόν.

Π.8. Χαρακτηριστικά κατά την έναυση

Σε γενικές γραμμές, κατά την έναυση το ballast τροφοδοτεί τα ηλεκτρόδια με τάση και ρεύμα με σκοπό την προθέρμανση τους, ώστε τη στιγμή της εκκένωσης να προκληθεί η όσο το δυνατόν λιγότερη βλάβη στην επικάλυψή τους. Κάθε κατασκευαστής οργανώνει τις διαδοχικές λειτουργίες του ballast, στο περιορισμένο χρονικό διάστημα της προθέρμανσης, ανάλογα με το σενάριο που έχει επιλέξει. Στα επόμενα θα εκτεθούν τα χαρακτηριστικά αυτής της τροφοδοσίας σε ένα σύστημα με ballast μεγάλου ΧΠ (Tridonic) και λαμπτήρα T5 (Osram). Το ballast τροφοδοτεί δύο λαμπτήρες. Οι μετρήσεις έγιναν στο λαμπτήρα με αριθμούς αγωγών τροφοδοσίας των δύο ηλεκτροδίων 9, 10, 11 και 12.

Στο σχήμα Π.6 φαίνεται ένα παλμογράφημα που κατέγραψε χρόνο δύο δευτερολέπτων. Περιλαμβάνει την καταγραφή της τάσης προθέρμανσης του ηλεκτροδίου, το αντίστοιχο ρεύμα που το διαρρέει και τέλος το ρεύμα αίγλης του λαμπτήρα. Αμέσως μετά την επίτευξη της εκκένωσης, έχουν καταγραφεί οι κυματομορφές των μεγεθών αυτών για λίγο χρόνο. Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε γι' αυτή την καταγραφή, όπως και για τις αμέσως επόμενες, ήταν ο Tektronix DPO 4034. Η καταγραφή του σχήματος Π6, έχει αναλυθεί από τον παλμογράφο και έχουν προκύψει τα επόμενα σχήματα. Αυτά περιλαμβάνουν λεπτομέρειες όλης της διαδικασίας, οι οποίες αναφέρονται διεξοδικά.

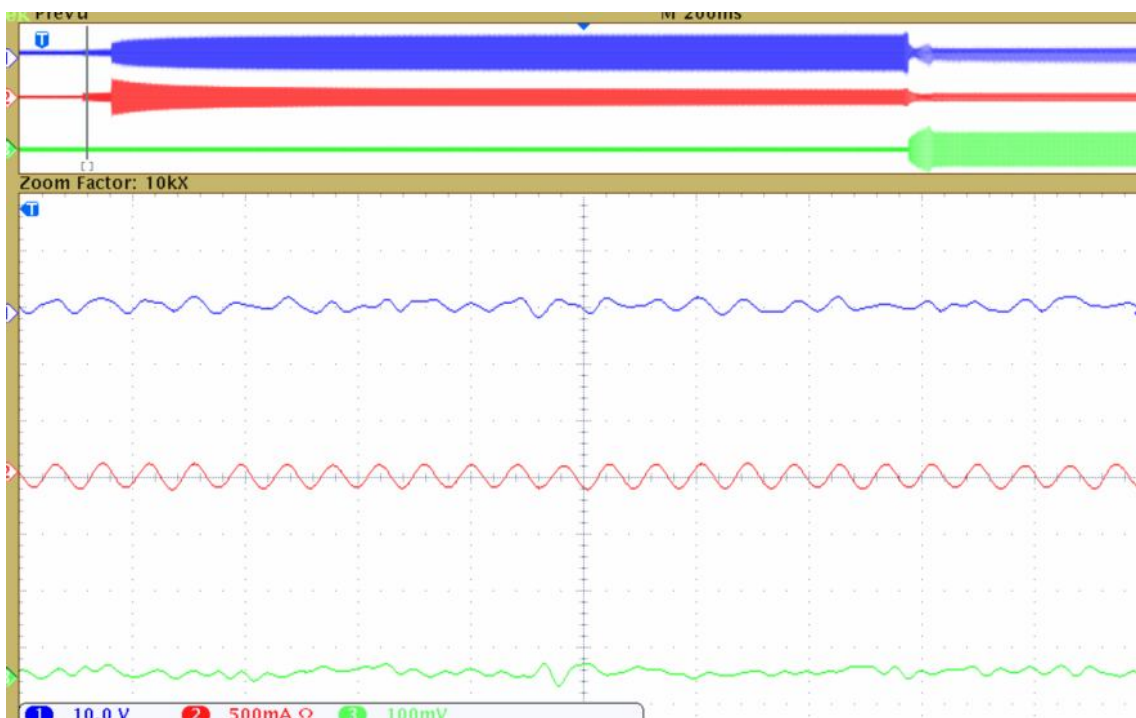


Σχήμα Π.6. Τάση ηλεκτροδίου (άνω), ρεύμα ηλεκτροδίου (μέσον) και ρεύμα αίγλης και εκκένωσης (κάτω) κατά την προθέρμανση των ηλεκτροδίων. Κλίμακες: χρόνος 200ms/div, τάση ηλεκτροδίου 10V/div, ρεύμα ηλεκτροδίου 500mA/div και ρεύμα εκκένωσης 100mA/div.

Στο σχήμα Π.7 παρουσιάζεται λεπτομέρεια του παλμογραφήματος Π6. Στο επάνω μέρος

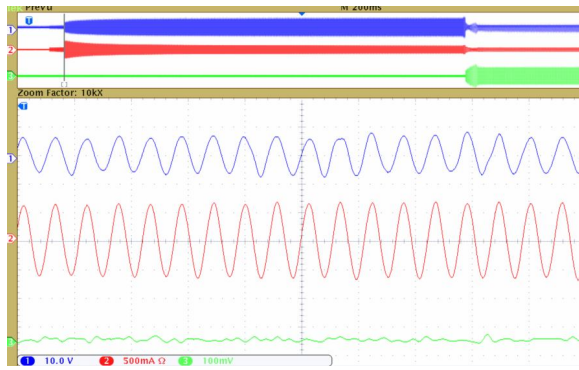
φαίνεται όλη η καταγραφή του φαινομένου. Στο κυρίως σχήμα φαίνονται οι κυματομορφές των τριών προαναφερθέντων χαρακτηριστικών. Αυτές καταγράφηκαν 12 ms μετά την αρχή της έναυσης. Η τάση που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια καθορίζεται από το σενάριο που ακολουθεί το ballast. Οι συγκεκριμένες τιμές της εξαρτώνται από τη συχνότητα που παράγει το ολοκληρωμένο κύκλωμα που είναι τοποθετημένο στο ballast. Στην αρχή, η εφαρμοζόμενη συχνότητα είναι περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερη της συχνότητας λειτουργίας. Ο λόγος είναι ότι αρχικά πρέπει να εφαρμοστεί μια μικρή τάση ώστε να αποφευχθεί στρες στα ηλεκτρόδια. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα τόσο μικρότερη η τάση [72]. Η χρονική περίοδος που είναι καταγεγραμμένη στο παλμογράφημα εμφανίζει μια σχεδόν ακανόνιστη κυματομορφή τάσης αλλά μια καλή ημιτονοειδή στο ρεύμα. Η συχνότητα και οι τιμές της τάσης και του ρεύματος έχουν τοποθετηθεί στη λεζάντα του σχήματος. Το ρεύμα αίγλης είναι ασήμαντο κατά την προθέρμανση.

Οι τιμές που αναφέρθηκαν πριν, όπως και αυτές που θα ακολουθήσουν, έχουν υπολογιστεί από τον παλμογράφο. Στα επόμενα σχήματα, που αναπαριστούν το ίδιο φαινόμενο, η κλίμακα της κεντρικής εικόνας είναι ίδια σε όλα: χρόνος 20 $\mu\text{s}/\text{div}$, τάση ηλεκτροδίου 10V/div, ρεύμα ηλεκτροδίου 500mA/div και ρεύμα εκκένωσης 100mA/div. Στο επάνω μέρος των παλμογραφημάτων όπου υπάρχει η συνολική καταγραφή της προθέρμανσης, με μία κάθετη γραμμή σε αυτήν προσδιορίζεται η χρονική στιγμή που έχει μεγεθυνθεί στο κεντρικό μέρος.

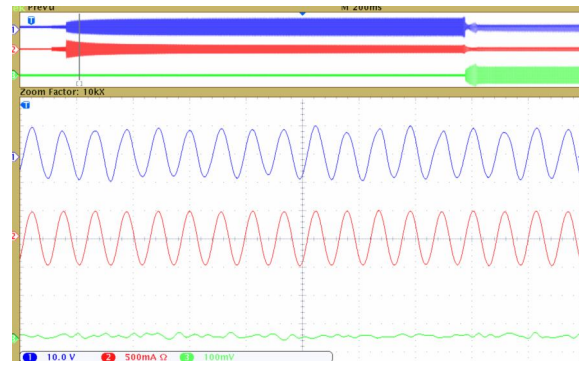


Σχήμα Π.7. Χρόνος: 12 ms, συχνότητα: 121,2 kHz, τάση: 1,3 V (rms), ρεύμα: 86 mA (rms).

Το σχήμα Π.8 παριστάνει τη στιγμή που η αρχική μικρή τάση προθέρμανσης των ηλεκτροδίων αυξάνεται. Αυτό επιτυγχάνεται με μείωση της συχνότητας από 121,2 kHz στην τιμή των 89,2 kHz. Συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι η αύξηση της τάσης και του ρεύματος στα ηλεκτρόδια. Το ρεύμα αίγλης εξακολουθεί να είναι ασήμαντο.



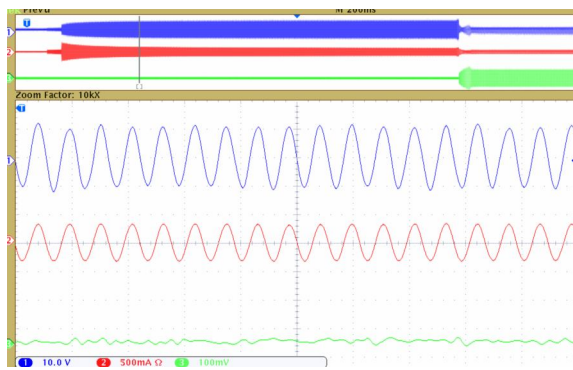
Σχήμα Π.8. Χρόνος: 50 ms, συχνότητα: 89,2 kHz, τάση: 4,6 V (rms), ρεύμα: 454 mA (rms).



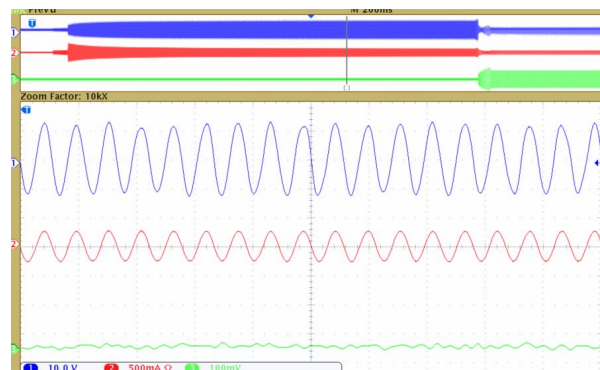
Σχήμα Π.9. Χρόνος: 99 ms, συχνότητα: 90,3 kHz, τάση: 6 V (rms), ρεύμα: 338 mA (rms).

Εν συνεχεία, η τάση έχει μια ανοδική πορεία, όπως συμβαίνει στις υψηλές συχνότητες παρά την σταθερή τιμή της συχνότητας για την τροφοδοσία του λαμπτήρα. Το ρεύμα στα ηλεκτρόδια μειώνεται, λόγω της αύξησης της ηλεκτρικής αντίστασης, που είναι αποτέλεσμα της θέρμανσης των νημάτων. Αυτό φαίνεται στο σχήμα Π.9, όπου η συχνότητα είναι σχεδόν ίδια με την προηγούμενη, όμως η τάση παρουσιάζει μικρή αύξηση και το ρεύμα μειώθηκε αντιστοίχως.

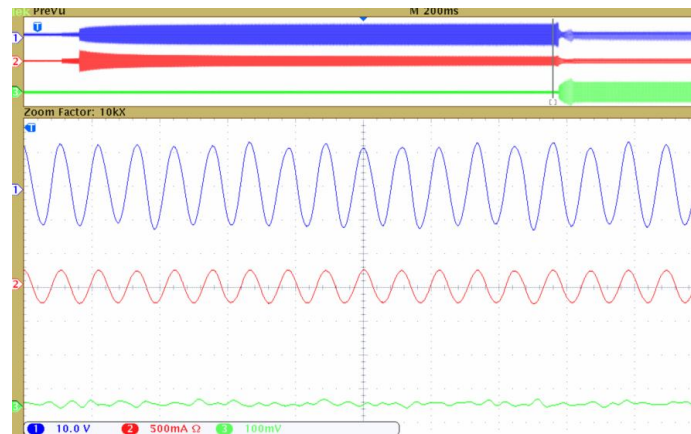
Τα τρία σχήματα, Π.10, Π.11 και Π.12 που ακολουθούν, δείχνουν τις αντίστοιχες κυματομορφές ενόσω διαρκεί η προθέρμανση. Σημειώνονται οι τιμές των χαρακτηριστικών που μετριόνταν. Η τάση προς το τέλος σταθεροποιείται ενώ το ρεύμα συνεχίζει να μειώνεται αφού η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου χρειάζεται 5 με 10 δευτερόλεπτα για να σταθεροποιηθεί.



Σχήμα Π.10. Χρόνος: 327 ms, συχνότητα: 89,3 kHz, τάση: 7,7 V (rms), ρεύμα: 230 mA (rms).

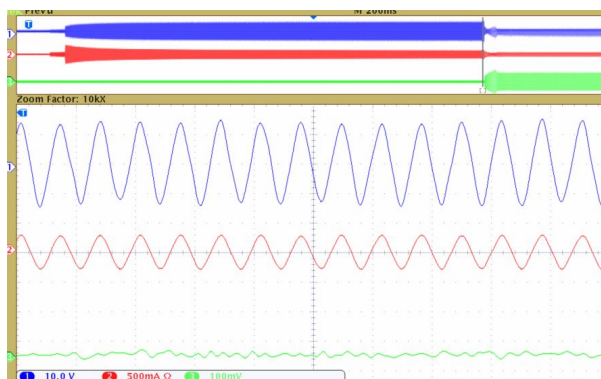


Σχήμα Π.11. Χρόνος: 1006 ms, συχνότητα: 89,9 kHz, τάση: 8,6 V (rms), ρεύμα: 188 mA (rms).

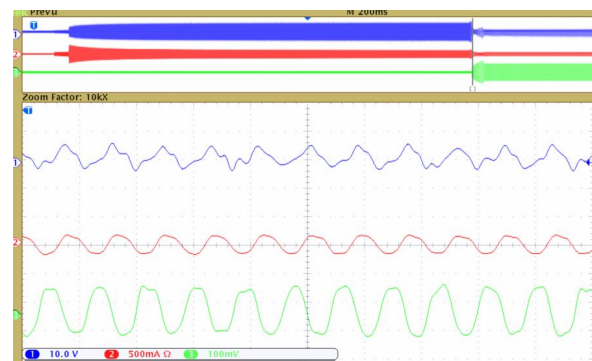


Σχήμα Π.12. Χρόνος: 1452 ms, συχνότητα: 89,3 kHz, τάση: 8,6 V (rms), ρεύμα: 177 mA (rms).

Στα επόμενα δύο σχήματα Π.13 και Π.14 φαίνεται το σενάριο που παράγει την έναυση. Ξαφνικά η συχνότητα μειώνεται με αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης και του ρεύματος στα ηλεκτρόδια. Αυτό δεν σημαίνει κατ' ανάγκην ότι αυξάνεται και η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου αφού άλλωστε το φαινόμενο διαρκεί ελάχιστα. Από τις τιμές τάσης και ρεύματος των σχημάτων Π.13 και Π.14 φαίνεται ότι η αντίσταση είναι 48,6 Ω και 46 Ω αντίστοιχα. Φαίνεται δηλαδή ότι η θερμοκρασία μειώνεται. Όμως, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές είναι ενδεικτικές, ειδικά σε αυτή τη χρονική στιγμή. Ο λόγος είναι ότι αρχίζει και αυξάνεται το ρεύμα αίγλης, μετατρέπόμενο σε ρεύμα τόξου. Είναι γνωστό ότι, ο υπολογισμός της αντίστασης του θερμού ηλεκτροδίου είναι δυνατός μόνο εφόσον το ρεύμα μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι ασήμαντο, διότι τότε μετατρέπεται όλη η ηλεκτρική ενέργεια σε θερμότητα στο ηλεκτρόδιο. Σε αντίθετη περίπτωση, ένα μέρος της μεταφέρεται στο χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η αντίσταση του συγκεκριμένου ηλεκτροδίου στους 25 °C είναι 9,4 Ω.



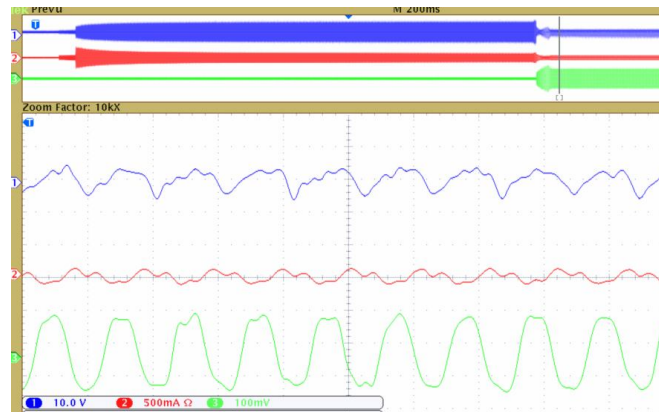
Σχήμα Π.13. Χρόνος: 1460 ms, συχνότητα: 74,3 kHz, τάση: 9,1 V (rms), ρεύμα: 198 mA (rms).



Σχήμα Π.14. Χρόνος: 1473 ms, συχνότητα: 58,2 kHz, τάση: 2,7 V (rms), ρεύμα: 128 mA (rms), ρεύμα εκκένωσης: 116 mA (rms).

Στο σχήμα Π.15 φαίνονται οι αντίστοιχες κυματομορφές λίγο μετά την επίτευξη της εκκένωσης. Για την τάση και το ρεύμα του ηλεκτροδίου δεν έχει νόημα η μορφή τους διότι κατά την εκκένωση οι τιμές τους δεν προσδιορίζουν με βεβαιότητα κάποιο χαρακτηριστικό.

Οι μετρήσεις έδειξαν, άλλωστε, μεγάλες διαφορές στις τιμές του ρεύματος. Στο συγκεκριμένο λαμπτήρα, τα δύο ζεύγη καλωδίων που τροφοδοτούν τα δύο ηλεκτρόδια κατά τη λειτουργία έχουν τις εξής τιμές ρεύματος: σύνδεση ηλεκτροδίου προς το μέρος της στάμπας του λαμπτήρα: 120 mA και 83 mA. Σύνδεση ηλεκτροδίου προς την μεριά που δεν έχει στάμπα: 72 mA και 127 mA (τιμές rms).



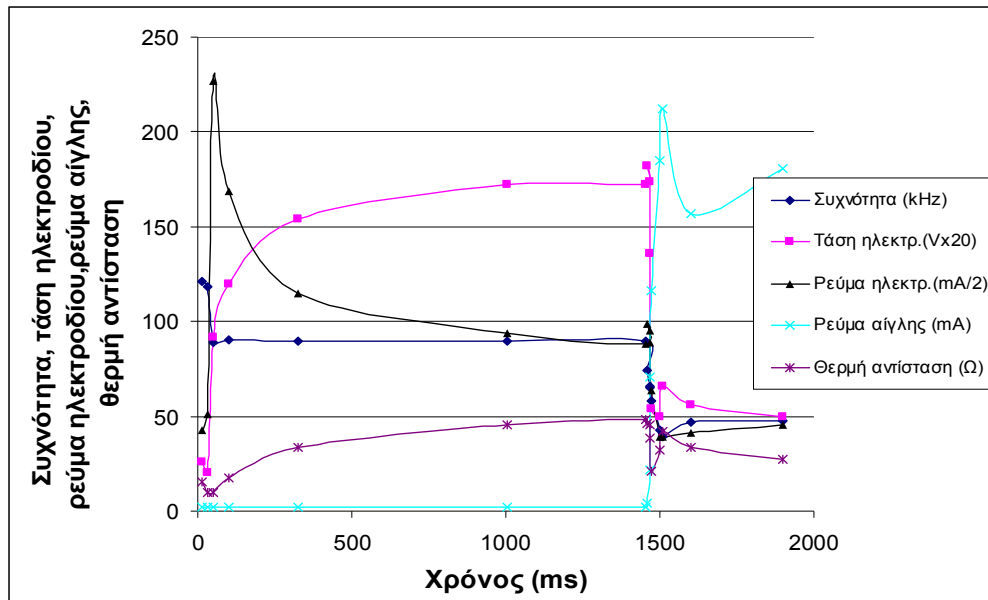
Σχήμα Π.15. Χρόνος: 1600 ms, συχνότητα: 47,2 kHz, τάση: 2,8 V (rms), ρεύμα: 83 mA (rms), ρεύμα εκκένωσης: 158 mA (rms).

Στον πίνακα Π.7 παρουσιάζονται οι τιμές των χαρακτηριστικών που προαναφέρθηκαν αλλά για περισσότερες διαδοχικές μετρήσεις που έγιναν κατά την έναυση και λίγο μετά. Στην πρώτη στήλη φαίνεται και ο χρόνος από τη στιγμή που άρχισε η προθέρμανση. Η διαδικασία της προθέρμανσης διαρκεί 1470 ms και οι τιμές μετά από αυτό το χρόνο δείχνουν μια μικρή αύξηση του φωτός (ρεύμα εκκένωσης) για 25 ms περίπου που κατόπιν επανέρχεται σε σταθερές τιμές. Οι τιμές της τελευταίας σειράς του πίνακα δεν αντιπροσωπεύουν την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Απαιτούνται τουλάχιστον δέκα λεπτά για να σταθεροποιηθεί η εκκένωση. Τότε το ρεύμα εκκένωσης του λαμπτήρα είναι 160 mA. Η θερμή αντίσταση στην τελευταία στήλη υπολογίσθηκε κατά τα γνωστά από το νόμο του Ωμ.

Πίνακας Π.7. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ηλεκτροδίου κατά την προθέρμανσή του.

Χρόνος (ms)	Συχνότητα (kHz)	Τάση ηλεκτροδίου (V, rms)	Ρεύμα ηλεκτροδίου (mA, rms)	Ρεύμα εκκένωσης (mA, rms)	Θερμή αντίσταση (Ω)
12	121,2	1,3	86	2	15,2
31	118,4	1,0	102	2	9,8
50	89,2	4,6	454	2	10,1
99	90,3	6,0	338	2	17,8
327	89,3	7,7	230	2	33,5
1006	89,9	8,6	188	2	45,7
1452	89,3	8,6	177	2	48,6
1460	74,3	9,1	198	4	46,0
1468	65,7	8,7	191	22	45,5
1470	65,2	6,8	178	71	38,2
1473	58,2	2,7	128	116	21,1
1500	42,5	2,5	78	185	32,1
1510	39,2	3,3	79	212	41,8
1600	47,2	2,8	83	157	33,7
1900	47,9	2,5	91	181	27,5

Οι τιμές του πίνακα Π.7 έχουν αποδοθεί στο διάγραμμα του σχήματος Π.16. Με παραστατικό τρόπο φαίνονται οι μεταβολές των χαρακτηριστικών, όπως αυτές περιγράφηκαν στο κείμενο. Για καλύτερη απεικόνιση η τάση και το ρεύμα του ηλεκτροδίου είναι σε διαφορετική κλίμακα, όπως δίνεται στο υπόμνημα του διαγράμματος.



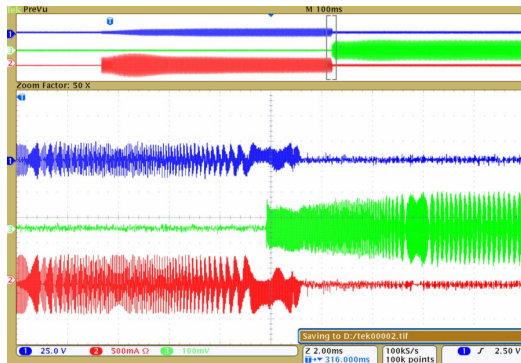
Σχήμα Π.16. Μεταβολή μεγεθών κατά την προθέρμανση.

Π.9. Μετάβαση από την αίγλη στο τόξο

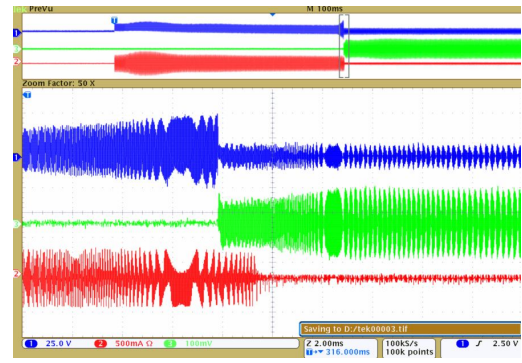
Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν και στις εικόνες θα παρουσιαστούν τα λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου κατά τα οποία διαρκεί η μετάβαση από την αίγλη στο τόξο, στα διάφορα ballast που οδηγούν με προθέρμανση τους λαμπτήρες των πειραμάτων. Η καταγραφή έγινε με τον παλμογράφο Tektronix DPO 4034.

Π.9.1. Ballast μικρού χρόνου προθέρμανσης, λαμπτήρας CFL

Στην κεντρική εικόνα του σχήματος Π17 φαίνονται οι κυματομορφές της τάσης (επάνω) και του ρεύματος (κάτω) που προθερμαίνουν τα ηλεκτρόδια. Στο μέσον είναι η κυματομορφή του ρεύματος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων και περιλαμβάνει το μικρό ρεύμα αίγλης και το ρεύμα εκκένωσης. Από τη εικόνα αυτή φαίνεται ότι η εκκένωση έχει αρχίσει περίπου 1,5 ms πριν σταματήσει η προθέρμανση των ηλεκτροδίων. Το ballast είναι προγραμματιζόμενου τύπου και η τάση που θα επιφέρει την εκκένωση έχει προγραμματιστεί να επιβληθεί λίγο πριν σταματήσει η προθέρμανση των ηλεκτροδίων. Αυτό διαπιστώνεται από το σχήμα Π18 όπου φαίνεται το ίδιο σενάριο αλλά η τάση του ηλεκτροδίου έχει αντικατασταθεί με την τάση στα άκρα του λαμπτήρα.



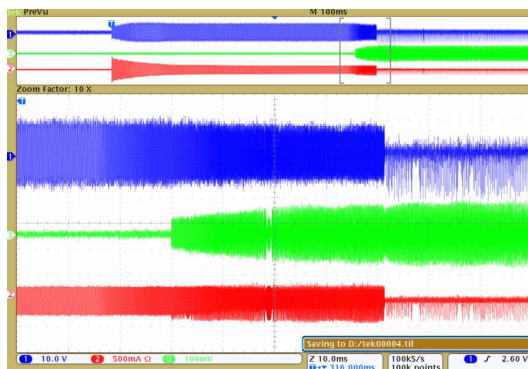
Σχήμα Π.17. Κυματομορφές τάσης ηλεκτροδίου (άνω), ρεύματος ηλεκτροδίου (κάτω) και ρεύματος αίγλης και εκκένωσης (μέσον) κατά την προθέρμανση των ηλεκτροδίων. Κλίμακες: χρόνος 2 ms/div, τάση ηλεκτροδίου 25 V/div, ρεύμα ηλεκτροδίου 500 mA/div και ρεύμα εκκένωσης 100 mA/div.



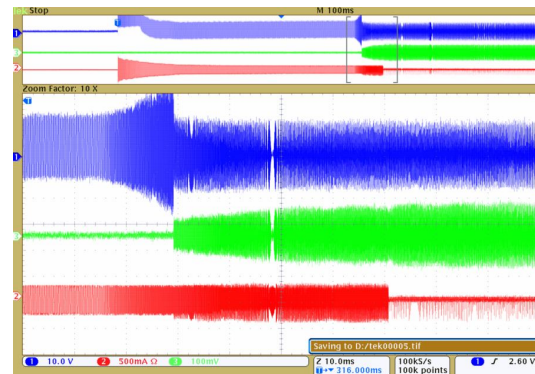
Σχήμα Π.18. Κυματομορφές τάσης λαμπτήρα (άνω), ρεύματος ηλεκτροδίου (κάτω) και ρεύματος αίγλης και εκκένωσης (μέσον) κατά την προθέρμανση των ηλεκτροδίων. Κλίμακες: χρόνος 2 ms/div, τάση λαμπτήρα 250 V/div, ρεύμα ηλεκτροδίου 500 mA/div και ρεύμα εκκένωσης 100 mA/div.

Π.9.2. Ballast μικρού χρόνου προθέρμανσης, λαμπτήρας T5

Στο σχήμα Π.19 παρουσιάζει τα αντίστοιχα με τα προηγούμενα παλμογραφήματα για τον λαμπτήρα T5 που οδηγούνται από το ballast μικρού ΧΠ (Philips). Το σενάριο έναυσης του συγκεκριμένου συστήματος ανάβει τον λαμπτήρα σε 472 ms, ενώ τα ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται με τάση για ακόμη 42 ms. Ποιοτικά δηλαδή το σύστημα ακολουθεί το ίδιο σενάριο, αλλά διαφέρει ως προς τους χρόνους προγραμματισμού προθέρμανσης και έναυσης.



(α)



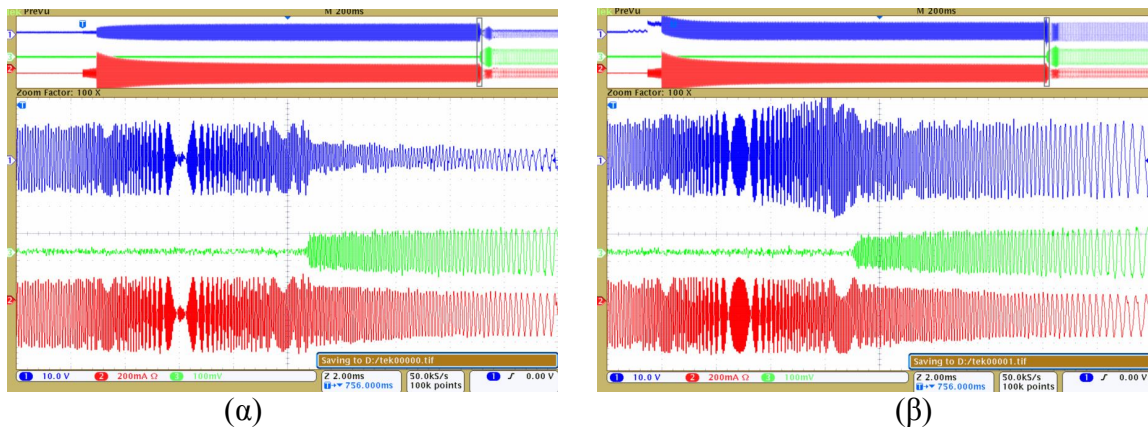
(β)

Σχήμα Π.19. Κυματομορφές (α):τάσης ηλεκτροδίου (άνω), ρεύματος ηλεκτροδίου (κάτω) και ρεύματος αίγλης και εκκένωσης (μέσον) κατά την προθέρμανση των ηλεκτροδίων και (β): τάσης λαμπτήρα (άνω), ρεύματος ηλεκτροδίου (κάτω) και ρεύματος αίγλης και εκκένωσης (μέσον). Κλίμακες: χρόνος 10ms/div, τάση ηλεκτροδίου 10V/div, τάση λαμπτήρα 100V/div, ρεύμα ηλεκτροδίου 500mA/div και ρεύμα εκκένωσης 100mA/div.

Π.9.3. Ballast μεγάλου χρόνου προθέρμανσης, λαμπτήρας T5

Στο σχήμα Π.20 φαίνονται τα αντίστοιχα παλμογραφήματα για το φαινόμενο της έναυσης που αφορούν στο λαμπτήρα Osram που οδηγείται από το ballast της Tridonic με μεγάλο ΧΠ.

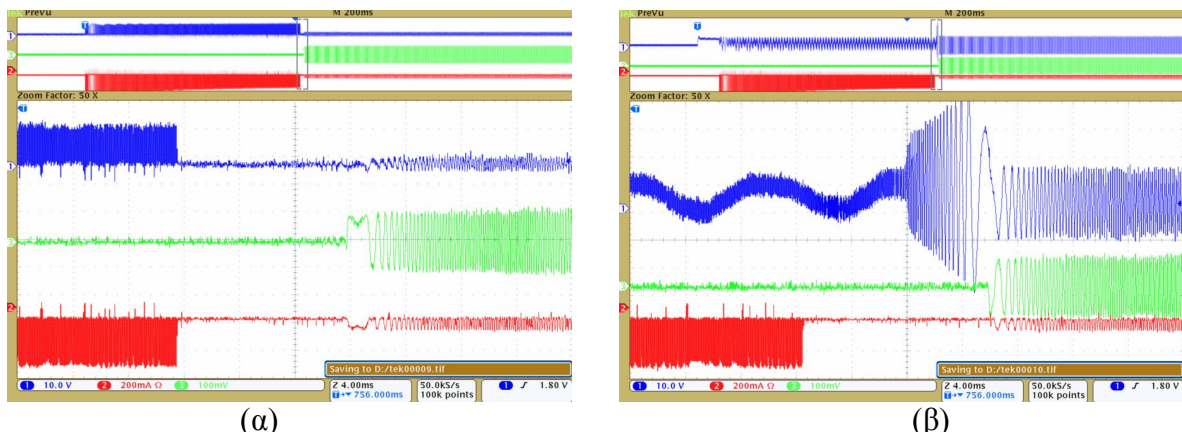
Το σύστημα αυτό καταφέρνει με την έναρξη της εκκένωσης να παύει και η εφαρμογή της τάσης στα ηλεκτροδία, όπως αυτό φαίνεται από τις δύο εικόνες.



Σχήμα Π.20. Κυματομορφές (α):τάσης ηλεκτροδίου (άνω), ρεύματος ηλεκτροδίου (κάτω) και ρεύματος αίγλης και εκκένωσης (μέσον) κατά την προθέρμανση των ηλεκτροδίων και (β): τάσης λαμπτήρα (άνω), ρεύματος ηλεκτροδίου (κάτω) και ρεύματος αίγλης και εκκένωσης (μέσον). Κλίμακες: χρόνος 2ms/div, τάση ηλεκτροδίου 10V/div, τάση λαμπτήρα 100V/div, ρεύμα ηλεκτροδίου 200mA/div και ρεύμα εκκένωσης 100mA/div.

Π.9.4. Ballast μέτρου χρόνου προθέρμανσης, λαμπτήρας T5

Στο συγκεκριμένο σύστημα με τους δύο λαμπτήρες, το σενάριο έναυσης των δύο λαμπτήρων ήταν σχεδόν ίδιο. Διέφερε λίγο ως προς την μορφή της κυματομορφής της τάσης και του ρεύματος προθέρμανσης (σχήμα 3.14). Στο σχήμα Π.21 παρατίθενται τα παλμογραφήματα που αφορούν τον ένα εκ των δύο λαμπτήρων. Από αυτά φαίνεται ότι η προθέρμανση των ηλεκτροδίων σταματά πριν την έναυση του λαμπτήρα και μάλιστα ο χρόνος που μεσολαβεί είναι της τάξης των 15 ms.



Σχήμα Π.21. Κυματομορφές (α):τάσης ηλεκτροδίου (άνω), ρεύματος ηλεκτροδίου (κάτω) και ρεύματος αίγλης και εκκένωσης (μέσον) κατά την προθέρμανση των ηλεκτροδίων και (β): τάσης λαμπτήρα (άνω), ρεύματος ηλεκτροδίου (κάτω) και ρεύματος αίγλης και εκκένωσης (μέσον). Κλίμακες: χρόνος 4ms/div, τάση ηλεκτροδίου 10V/div, τάση λαμπτήρα 100V/div, ρεύμα ηλεκτροδίου 200mA/div και ρεύμα εκκένωσης 100mA/div.

Π.10. Διακύμανση χαρακτηριστικών των συστημάτων

Οι λαμπτήρες και τα ballast των διαφόρων κατασκευαστών, που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, είχαν παρόμοια χαρακτηριστικά αφού επιτελούν την ίδια λειτουργία. Όμως υπήρχαν κάποιες διαφοροποιήσεις που φαίνονται στον πίνακα Π.8. Στον πίνακα έχουν τοποθετηθεί και οι περιοχές διακύμανσης των χαρακτηριστικών των συστημάτων που αφορούν τα συστήματα του ίδιου κατασκευαστή. Θεωρητικά θα έπρεπε οι τιμές αυτές να είναι ακριβώς ίδιες, αφού αφορούν ακριβώς τον ίδιο τύπο λαμπτήρα και ballast. Επί πλέον, στον πίνακα έχουν τοποθετηθεί και τιμές χαρακτηριστικών που υπολογίσθηκαν κατόπιν των μετρήσεων που έγιναν. Η ονομασία των συστημάτων στον πίνακα Π.8 είναι σύμφωνα με τον πίνακα 3.2.

Πίνακας Π.8. Διακύμανση των χαρακτηριστικών των διαφόρων συστημάτων

Σύστημα	Ηλεκτρόδιο		Ηλεκτρόδιο κατά τη μετάβαση από την αίγλη στο τόξο			Κατάσταση λειτουργίας		
	Αντίσταση (Ω)	Χρόνος Προθέρμανσης (ms)	Τάση (V p-p)	Ρεύμα (mA p-p)	Θερμοκρασία (K)	Συχνότητα (kHz)	Ρεύμα (mA)	CCF
1	7,3-8,5	475-490	24,2-24,4	600-625	800-830	48,7-50,0	164-170	1,35-1,39
3	5,6-6,0	465-485	32,0-33,6	1060-1200	760-870	47,5-48,5	200-210	1,40-1,44
5	9,0-10,5	800-830	21,3-24,0	470-530	730-770	44,5-46,0	170-176	1,35-1,40
6	9,0-10,5	1470-1490	19,0-25,0	530-580	600-760	46,0-47,5	167-171	1,35-1,40

Π.11. Πίνακες μετρήσεων χαρακτηριστικών συστημάτων άμεσης έναυσης

Στους επόμενους πίνακες δίνονται οι διαδοχικές μετρήσεις που έγιναν στους λαμπτήρες που οδηγούνταν από ballast άμεσης έναυσης. Οι τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης των ηλεκτροδίων που μετρήθηκαν μετατράπηκαν σε τιμές υπό θερμοκρασία 25 °C, ώστε να είναι άμεση η σύγκριση των τιμών αυτών. Η τιμή του παράγοντα κορυφής ρεύματος υπολογίστηκε από τις τιμές του ρεύματος που μετρήθηκαν με τον παλμογράφο

Πίνακας Π.9. Επεξήγηση συμβόλων των πινάκων

1	Αύξων αριθμός μέτρησης	a/a
2	Αριθμός ωρών	Ώρες
3	Αριθμός κύκλων	Κύκλοι
4	Ρεύμα έναυσης	$I_{\text{έν.}}$ (A p-p)
5	Τάση έναυσης	$V_{\text{έν.}}$ (V p-p)
6	Χρόνος έναυσης	$T_{\text{έν.}}$ (ms)
7	Αντίσταση ηλεκτροδίου στο άκρο με τη σφραγίδα στους 25 °C	R_{c1} (Ω)
8	Αντίσταση ηλεκτροδίου στο άκρο χωρίς σφραγίδα στους 25 °C	R_{c2} (Ω)
9	Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη μέτρηση	θ (°C)
10	Συχνότητα λειτουργίας λαμπτήρα	f (kHz)
11	Τάση λαμπτήρα	$V_{\text{λαμπ}}$ (V rms)
12	Ρεύμα λειτουργίας λαμπτήρα	$I_{\text{λαμπ}}$ (A rms)
13	Παράγων κορυφής ρεύματος	CCF

Παραρτήματα

Πίνακας Π.10. Σύστημα A5 (T5), (165' on), χρόνος ζωής: 8513 ώρες, 3105 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{év.}	V _{év.}	t _{év.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	6,0	1600	40	8,39	8,52	21,0	30,50	82,5	148	1,35
2	649	237	6,0	1600	50	8,36	8,22	23,0	30,01	82,5	152	1,32
3	1302	476	7,0	1680	30	8,30	8,14	27,0	30,71	86,0	138	1,39
4	1986	724	11,2	1640	40	8,26	8,10	26,0	30,45	89,0	147	1,33
5	2714	989	13,4	1570	56	8,31	8,13	25,0	30,75	88,0	139	1,38
6	3388	1235	10,2	1560	60	8,34	8,16	22,0	31,29	89,5	136	1,35
7	4279	1567	11,0	1650	60	8,34	8,16	22,0	30,86	92,5	140	1,31
8	5225	1909	9,9	1650	48	8,30	8,16	20,0	31,73	91,5	127	1,35
9	6127	2237	12,6	1420	70	8,42	8,29	18,5				
10	6986	2549	11,6	1600	30	8,31	8,16	23,5	31,49	92,0	129	1,35
11	7913	2888	12,4	1660	22	8,24	8,14	28,0	31,37	87,5	133	1,38

Πίνακας Π.11. Σύστημα A6 (T5), (165' on), χρόνος ζωής: 7008 ώρες, 2557 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{év.}	V _{év.}	t _{év.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	9,0	1700	25	8,36	8,67	21,0	31,20	84,5	143	1,37
2	649	237	9,0	1700	50	8,35	8,34	23,0	30,67	83,5	150	1,33
3	1302	476	10,2	1560	60	8,30	8,28	27,0	31,57	87,0	136	1,35
4	1986	724	8,2	1600	60	8,26	8,26	26,0	31,17	88,0	144	1,36
5	2714	989	7,8	1720	60	8,30	8,28	25,0	31,69	90,0	137	1,37
6	3388	1235	9,0	1640	40	8,32	8,30	22,0	32,22	91,0	132	1,36
7	4279	1567	9,2	1780	50	8,32	8,30	22,0	32,05	90,0	128	1,38
8	5225	1909	4,3	1730	12	8,28	8,30	20,0	32,22	92,5	133	1,34
9	6127	2237	14,6	1730	40	8,38	8,41	18,5				
10	6986	2549	10,6	1740	25	8,26	8,32	23,5	32,51	93,5	125	1,36

Πίνακας Π.12. Σύστημα A7 (T5), (165' on), χρόνος ζωής: 7581 ώρες, 2766 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{év.}	V _{év.}	t _{év.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	8,0	1760	20	8,26	9,03	21,0	30,30	89,0	144	1,33
2	649	237	8,4	1600	50	8,26	8,73	23,0	29,60	85,0	149	1,34
3	1302	476	8,2	1580	46	8,20	8,62	27,0	30,19	90,0	141	1,30
4	1986	724	10,0	1640	44	8,18	8,58	26,0	30,27	88,5	141	1,36
5	2714	989	11,4	1740	50	8,16	8,61	25,0	30,67	89,5	136	1,35
6	3388	1235	7,8	1760	40	8,20	8,67	22,0	30,71	90,0	137	1,31
7	4279	1567	10	1620	40	8,20	8,65	22,0	30,34	92,5	137	1,34
8	5225	1909	11,8	1780	60	8,22	8,65	20,0	30,83	92,0	131	1,36
9	6127	2237	15,8	1660	60	8,26	8,76	18,5				
10	6986	2549	13,4	1500	50	8,16	8,68	23,5	30,75	93,0	125	1,38

Πίνακας Π.13. Σύστημα A8 (T5), (165' on), χρόνος ζωής: 6662 ώρες, 2421 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{év.}	V _{év.}	t _{év.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	5,0	1780	10	8,24	8,52	21,0	30,75	83,5	145	1,32
2	649	237	5,4	1660	30	8,25	8,22	23,0	30,08	85,0	150	1,33
3	1302	476	8,0	1620	64	8,17	8,14	27,0	30,49	85,5	142	1,35
4	1986	724	6,4	1640	44	8,14	8,12	26,0	30,31	86,0	140	1,36
5	2714	989	9,6	1640	60	8,16	8,14	25,0	30,83	88,0	141	1,36
6	3388	1235	8,4	1620	40	8,22	8,17	22,0	31,41	90,0	134	1,34
7	4279	1567	8,6	1700	44	8,18	8,16	22,0	31,41	90,0	127	1,39
8	5225	1909	7,0	1780	32	8,18	8,18	20,0	31,25	90,5	133	1,35
9	6127	2237	6,5	1750	40	8,26	8,26	18,5				

Πίνακας Π.14. Σύστημα Β5 (Τ5), (45' on), χρόνος ζωής: 4167 ώρες, 5501 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{év.}	V _{év.}	t _{év.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	10,0	1740	50	8,37	8,79	24,0	30,20	82,5	144	1,39
2	283	371	11,8	1580	44	8,33	8,69	23,0	30,40	87,0	147	1,33
3	653	864	7,4	1540	30	8,08	8,38	26,0	30,16	87,5	146	1,37
4	1011	1338	7,4	1580	30	8,04	8,38	27,0	30,56	86,5	143	1,34
5	1386	1836	11,4	1600	60	8,11	8,44	24,0	30,53	88,0	148	1,35
6	1727	2288	7,4	1720	60	8,05	8,40	26,0	30,83	90,5	145	1,32
7	2102	2785	5,8	1720	28	7,98	8,37	25,0	30,60	89,0	150	1,36
8	2475	3280	6,0	1800	30	7,98	8,38	27,0	30,90	89,5	145	1,35
9	2865	3799	12,4	1620	20	8,02	8,42	24,0	30,79	89,0	138	1,33
10	3290	4339	10,6	1700	36	8,03	8,44	23,0	31,02	90,5	137	1,37
11	3667	4838	15,0	1620	40	8,00	8,40	25,0	31,00	90,0	145	1,32
12	4076	5380	14,2	1660	40	8,10	8,47	20,0	31,45	93,5	135	1,36

Πίνακας Π.15. Σύστημα Β6 (Τ5), (45' on), χρόνος ζωής: 3734 ώρες, 4928 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{év.}	V _{év.}	t _{év.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	4,0	1680	30	8,44	8,39	24,0	30,05	85,0	146	1,34
2	283	371	4,6	1620	28	8,46	8,33	23,0	30,16	85,0	143	1,34
3	653	864	8,8	1580	40	8,14	8,02	26,0	30,38	87,5	146	1,37
4	1011	1338	9,6	1580	40	8,14	8,00	27,0	30,27	86,5	143	1,34
5	1386	1836	3,6	1560	76	8,18	8,04	24,0	30,23	89,0	143	1,34
6	1727	2288	6,2	1580	32	8,14	8,02	26,0	30,67	91,0	139	1,32
7	2102	2785	5,2	1620	20	8,09	7,98	25,0	30,49	89,5	140	1,34
8	2475	3280	7,0	1680	16	8,15	7,98	27,0	30,86	90,5	135	1,36
9	2865	3799	14,2	1640	28	8,14	8,04	24,0	30,60	91,0	142	1,44
10	3290	4339	9,8	1620	28	8,20	8,06	23,0	30,94	88,5	135	1,33
11	3667	4838	12,4	1780	30	8,22	8,07	25,0	30,90	92,0	140	1,34

Πίνακας Π.16. Σύστημα Β7 (Τ5), (45' on), χρόνος ζωής: 4254 ώρες, 5617 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{év.}	V _{év.}	t _{év.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	8,0	1600	10	8,59	8,54	24,0	30,40	84,0	141	1,39
2	283	371	8,2	1520	36	8,63	8,58	23,0	30,10	87,0	145	1,35
3	653	864	9,8	1620	40	8,34	8,25	26,0	30,38	84,5	147	1,36
4	1011	1338	7,4	1620	60	8,32	8,24	27,0	30,64	88,0	140	1,34
5	1386	1836	9,6	1640	40	8,36	8,28	24,0	30,56	85,0	144	1,33
6	1727	2288	7,2	1620	32	8,28	8,24	26,0	30,79	87,0	145	1,32
7	2102	2785	6,7	1760	40	8,27	8,22	25,0	30,67	88,0	144	1,36
8	2475	3280	8,6	1600	10	8,28	8,29	27,0	31,25	89,5	136	1,35
9	2865	3799	16,4	1740	60	8,30	8,36	24,0	32,30	93,0	116	1,45
10	3290	4339	8,4	1500	20	8,36	8,38	23,0	31,33	90,5	132	1,36
11	3667	4838	12,0	1740	40	8,31	8,41	25,0	31,45	90,0	133	1,35
12	4076	5380	13,2	1800	1	8,43	8,58	20,0	31,17	93,5	141	1,36

Πίνακας Π.17. Σύστημα Β8 (Τ5), (45' on), χρόνος ζωής: 2829 ώρες, 3750 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{év.}	V _{év.}	t _{év.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	7,0	1600	10	8,44	8,54	24,0	30,50	83,0	140	1,40
2	283	371	6,6	1660	42	8,48	8,53	23,0	30,42	87,0	141	1,36
3	653	864	5,8	1620	30	8,16	8,24	26,0	30,94	89,5	143	1,31
4	1011	1338	7,4	1620	84	8,14	8,24	27,0	31,29	90,5	135	1,33
5	1386	1836	6,8	1660	36	8,20	8,26	24,0	30,71	90,5	146	1,37
6	1727	2288	7,8	1700	30	8,15	8,25	26,0	31,09	90,0	141	1,36
7	2102	2785	10,0	1720	40	8,12	8,22	25,0	31,06	90,0	141	1,36
8	2475	3280	10,8	1720	48	8,16	8,26	27,0	31,25	88,0	137	1,40

Παραρτήματα

Πίνακας Π.18. Σύστημα Γ5 (T5), (5' on), χρόνος ζωής: 333 ώρες, 3982 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	9,0	1600	16	8,74	8,74	23,0	30,54	82,5	148	1,35
2	58	690	10,0	1580	32	8,52	8,62	27,0	31,00	87,5	143	1,34
3	87	1040	11,0	1640	32	8,65	8,84	23,0	30,08	82,0	143	1,34
4	133	1594	12,6	1700	50	8,38	8,54	23,0	30,75	88,0	147	1,33
5	169	2026	11,6	1620	36	8,44	8,60	23,0	30,80	88,0	146	1,34
6	215	2572	10,6	1700	40	8,36	8,56	26,0	30,75	87,5	150	1,36
7	250	2995	12,0	1720	60	8,40	8,61	26,0	30,86	89,0	139	1,35
8	292	3485	12,2	1660	60	8,41	8,73	25,0	31,21	90,0	142	1,35

Πίνακας Π.19. Σύστημα Γ6 (T5), (5' on), χρόνος ζωής: 215 ώρες, 2572 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	10,0	1600	50	8,74	8,63	23,0	30,6	83,5	144	1,39
2	58	690	9,0	1580	32	8,57	8,47	27,0	29,3	69,0	120	1,70
3	87	1040	8,8	1640	36	8,69	8,60	23,0	29,4	86,0	150	1,33
4	133	1594	8,4	1540	50	8,45	8,37	23,0	29,6	87,0	152	1,34
5	169	2026	9,6	1560	30	8,50	8,40	23,0	29,8	89,5	149	1,32

Πίνακας Π.20. Σύστημα Γ7 (T5), (5' on), χρόνος ζωής: 412 ώρες, 4916 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	10,0	1580	28	8,43	8,69	23,0	30,30	84,5	145	1,35
2	58	690	11,0	1580	32	8,22	8,54	27,0	30,80	89,0	138	1,32
3	87	1040	12,4	1560	32	8,36	8,69	23,0	30,50	86,0	140	1,34
4	133	1594	11,6	1580	68	8,10	8,43	23,0	30,56	86,5	144	1,33
5	169	2026	11,6	1580	48	8,13	8,48	23,0	30,83	90,0	141	1,30
6	215	2572	10,4	1560	60	8,08	8,43	26,0	30,53	89,5	145	1,32
7	250	2995	13,8	1600	60	8,08	8,44	26,0	30,83	87,0	141	1,36
8	292	3485	11,6	1560	60	8,10	8,42	25,0	30,90	88,0	139	1,32
9	333	3982	15,6	1680	60	8,18	8,46	26,0	30,98	87,5	138	1,33
10	375	4483	13,4	1620	60	8,30	8,48	27,0	30,83	88,0	140	1,34

Πίνακας Π.21. Σύστημα Γ8 (T5), (5' on), χρόνος ζωής: 330 ώρες, 3950 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	11,0	1560	12	8,58	8,48	23,0	29,00	85,5	157	1,40
2	58	690	13,0	1560	40	8,34	8,37	27,0	29,20	85,0	147	1,36
3	87	1040	11,4	1540	36	8,53	8,48	23,0	29,10	86,0	145	1,35
4	133	1594	9,8	1540	50	8,28	8,30	23,0	29,20	85,0	150	1,33
5	169	2026	9,6	1580	20	8,32	8,35	23,0	29,21	86,5	149	1,34
6	215	2572	7,6	1560	50	8,29	8,30	26,0	29,04	84,5	151	1,35
7	250	2995	10,2	1540	40	8,28	8,32	26,0	29,41	87,5	149	1,34
8	292	3485	10,0	1520	40	8,32	8,34	25,0	29,76	92,0	142	1,32

Πίνακας Π.22. Σύστημα Δ5 (T5), (1' on), χρόνος ζωής: 83 ώρες, 4952 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	11,0	1600	40	8,34	8,69	24,0	31,00	83,5	140	1,36
2	14	860	15,6	1620	40	8,27	8,62	27,0	30,80	85,5	144	1,36
3	23	1370	14,4	1680	44	8,40	8,79	23,0	31,10	85,5	143	1,34
4	33	1988	14,2	1640	30	8,16	8,50	23,0	31,09	90,5	144	1,33
5	41	2425	12,2	1520	40	8,10	8,48	23,0	31,13	88,5	144	1,33
6	50	2946	10,4	1560	40	8,17	8,52	24,0	31,37	90,5	141	1,36
7	57	3380	15,6	1600	50	8,14	8,51	26,0	31,13	89,0	148	1,35
8	66	3910	13,6	1680	70	8,16	8,44	27,0	30,98	87,0	136	1,35
9	75	4432	13,2	1660	50	8,25	8,48	25,0	31,33	91,5	142	1,35
10	81	4785	14,4	1670	52	8,39	8,52	25,0	31,29	86,5	139	1,38

Πίνακας Π.23. Σύστημα Δ6 (T5), (1' on), χρόνος ζωής: 81 ώρες, 4785 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	10,4	1600	30	8,44	8,67	24,0	30,90	87,0	137	1,37
2	14	860	12,2	1620	24	8,32	8,60	27,0	30,80	86,5	144	1,33
3	23	1370	13,2	1620	28	8,48	8,79	23,0	30,60	87,5	143	1,34
4	33	1988	14,8	1740	50	8,22	8,50	23,0	30,71	90,0	145	1,32
5	41	2425	14,6	1670	24	8,24	8,46	23,0	31,08	88,0	142	1,35
6	50	2946	13,4	1740	60	8,30	8,52	24,0	31,13	91,0	140	1,34
7	57	3380	7,0	1600	50	8,26	8,48	26,0	30,64	87,5	150	1,36
8	66	3910	10,2	1560	110	8,24	8,46	27,0	30,09	88,0	140	1,37
9	75	4432	15,4	1560	50	8,33	8,58	25,0	31,17	91,0	137	1,34

Πίνακας Π.24. Σύστημα Δ7, (1' on), χρόνος ζωής: 66 ώρες, 3910 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	13,0	1600	20	8,49	8,54	24,0	30,3	86,0	143	1,33
2	14	860	13,6	1600	36	8,32	8,42	27,0	30,1	87,0	147	1,33
3	23	1370	10,6	1640	40	8,48	8,58	23,0	30,16	86,0	139	1,38
4	33	1988	13,2	1700	60	8,34	8,22	23,0	30,67	92,5	139	1,35
5	41	2425	14,2	1660	44	8,18	8,32	23,0	30,16	86,5	139	1,38
6	50	2946	14,0	1600	40	8,24	8,39	24,0	30,67	88,0	141	1,36
7	57	3380	12,2	1600	50	8,25	8,38	26,0	30,05	86,5	151	1,35

Πίνακας Π.25. Σύστημα Δ8 (T5), (1' on), χρόνος ζωής: 88 ώρες, 5219 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	12,0	1620	70	8,24	8,74	24,0	30,00	85,0	141	1,37
2	14	860	16,4	1680	44	8,12	8,71	27,0	30,00	86,5	145	1,32
3	23	1370	5,4	1560	16	8,25	8,94	23,0	30,10	87,5	142	1,35
4	33	1988	12,8	1660	60	8,02	8,69	23,0	30,01	87,5	142	1,35
5	41	2425	11,0	1620	40	7,98	8,63	23,0	29,94	88,5	146	1,32
6	50	2946	11,8	1600	40	7,99	8,64	24,0	30,41	91,5	141	1,30
7	57	3380	9,8	1600	40	8,03	8,63	26,0	29,98	85,5	151	1,35
8	66	3910	13,2	1560	30	8,00	8,60	27,0	30,23	86,5	141	1,36
9	75	4432	12,0	1580	40	8,10	8,65	25,0	29,98	88,5	139	1,35
10	81	4785	9,4	1600	30	8,16	8,70	25,0	30,23	87,0	140	1,37

Πίνακας Π.26. Σύστημα E5 (T5), (20" on), χρόνος ζωής: 19 ώρες, 3358 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	10,0	1720	20	8,13	8,41	26,0	29,10	84,0	153	1,33
2	4	800	13,0	1780	28	8,12	8,37	27,0	29,34	65,0	120	1,67
3	8	1370	12,6	1580	44	8,16	8,47	21,0	29,42	88,0	145	1,32
4	11	1920	7,0	1640	80	7,96	8,24	23,0	28,91	83,0	140	1,43
5	14	2450	12,8	1580	70	7,96	8,31	23,0	29,24	87,5	146	1,37
6	17	3000	4,8	1640	90	8,03	8,34	25,0	29,38	86,0	149	1,37

Πίνακας Π.27. Σύστημα E6 (T5), (20" on), χρόνος ζωής: 23 ώρες, 4171 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	11,0	1500	20	8,16	8,46	26,0	30,31	85,0	146	1,34
2	4	800	12,0	1490	24	8,12	8,47	27,0	30,62	87,0	143	1,34
3	8	1370	15,6	1660	60	8,19	8,55	21,0	30,60	89,0	139	1,35
4	11	1920	12,4	1560	40	7,96	8,30	23,0	30,38	87,5	144	1,33
5	14	2450	14,6	1640	40	7,99	8,30	23,0	30,43	89,0	145	1,32
6	17	3000	13,6	1620	40	8,01	8,30	25,0	30,49	87,0	143	1,37
7	19	3445	13,2	1600	60	7,99	8,27	26,0	30,19	85,5	150	1,36
8	22	3984	14,8	1820	50	8,14	8,26	26,0	30,30	87,5	149	1,34

Παραρτήματα

Πίνακας Π.28. Σύστημα Ε7 (T5), (20" on), χρόνος ζωής: 20 ώρες, 3587 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	11,0	1560	30	8,36	8,51	26,0	30,32	80,0	142	1,38
2	4	800	14,0	1580	30	8,37	8,47	27,0	30,24	86,0	148	1,35
3	8	1370	12,0	1620	50	8,41	8,62	21,0	30,61	89,0	144	1,33
4	11	1920	13,4	1600	40	8,18	8,35	23,0	30,45	89,5	146	1,32
5	14	2450	12,2	1620	30	8,27	8,33	23,0	30,12	86,0	147	1,36
6	17	3000	11,2	1560	60	8,26	8,36	25,0	30,23	84,5	147	1,36
7	19	3445	13,8	1600	70	8,30	8,33	26,0	30,27	86,5	152	1,34

Πίνακας Π.29. Σύστημα Ε8 (T5), (20" on), χρόνος ζωής: 18 ώρες, 3258 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	11,0	1620	10	8,46	8,46	26,0	30,41	83,0	144	1,33
2	4	800	12,0	1620	40	8,47	8,52	27,0	30,72	89,0	141	1,33
3	8	1370	15,4	1580	40	8,57	8,60	21,0	30,44	88,0	144	1,33
4	11	1920	13,2	1640	60	8,30	8,36	23,0	30,45	89,5	145	1,32
5	14	2450	13,2	1620	74	8,34	8,42	23,0	30,45	87,5	144	1,33
6	17	3000	11,0	1620	70	8,32	8,44	25,0	30,56	89,5	145	1,32

Πίνακας Π.30. Σύστημα Α19α (CFL), (165' on), χρόνος ζωής: 7625 ώρες, 2782 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	10,4	1580	30	6,32	6,12	21,0	28,00	73,0	166	1,45
2	649	237	15,0	1560	50	5,84	5,76	23,0	27,50	80,0	211	1,40
3	1302	476	12,2	1520	14	5,86	5,73	27,0	27,96	79,5	198	1,41
4	1986	724	18,4	1500	90	5,85	5,70	26,0	28,09	80,0	200	1,42
5	2714	989	23,6	1580	50	5,87	5,72	25,0	28,38	81,5	198	1,39
6	3388	1235	9,2	1480	28	5,99	5,82	22,0	28,44	79,5	197	1,42
7	4279	1567	22,4	1460	32	5,95	5,80	22,0	28,44	83,0	190	1,39
8	5225	1909	8,0	1500	1	5,94	5,80	20,0	29,10	86,5	186	1,39
9	6127	2237	20,0	1460	34	6,00	5,89	18,5				
10	6986	2549	12,7	1470	4	5,90	5,80	23,5	29,07	85,0	182	1,40

Πίνακας Π.31. Σύστημα Α19β (CFL), (165' on), χρόνος ζωής: 3927 ώρες, 1439 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	12,0	1520	30	8,36	6,17	21,0	28,02	73,0	180	1,50
2	649	237	17,0	1560	120	8,35	5,86	23,0	28,05	80,5	200	1,40
3	1302	476	20,4	1560	140	8,30	5,84	27,0	28,12	81,0	191	1,38
4	1986	724	19,0	1490	60	8,26	5,82	26,0	28,03	83,0	197	1,40
5	2714	989	21,2	1500	50	8,30	5,82	25,0	28,54	79,5	193	1,43
6	3388	1235	20,8	1580	64	8,32	5,89	22,0	28,57	86,0	188	1,38

Πίνακας Π.32. Σύστημα Α20α (CFL), (165' on), χρόνος ζωής: 7668 ώρες, 2797 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	18,0	1500	40	5,95	6,12	21,0	28,04	71,0	158	1,39
2	649	237	10,6	1420	12	5,70	5,72	23,0	27,32	75,5	202	1,41
3	1302	476	18,0	1460	80	5,68	5,72	27,0	27,90	80,5	189	1,40
4	1986	724	12,6	1500	10	5,63	5,71	26,0	27,62	78,0	192	1,40
5	2714	989	14,8	1540	40	5,63	5,73	25,0	28,22	79,5	187	1,41
6	3388	1235	21,2	1460	26	5,69	5,79	22,0	28,41	84,0	186	1,40
7	4279	1567	13,6	1420	28	5,71	5,83	22,0	28,31	81,5	191	1,42
8	5225	1909	21,4	1520	40	5,70	5,81	20,0	29,14	87,0	179	1,39
9	6127	2237	23,0	1280	50	5,83	5,89	18,5				
10	6986	2549	18,8	1490	40	5,73	5,90	23,5	29,14	85,5	177	1,39

Πίνακας Π.33. Σύστημα A20β (CFL), (165' on), χρόνος ζωής: 8141 ώρες, 2968 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	10,8	1480	30	5,78	6,12	21,0	28,02	69,0	187	1,50
2	649	237	10,2	1480	12	5,62	5,80	23,0	27,17	75,5	205	1,40
3	1302	476	9,2	1440	14	5,61	5,78	27,0	27,81	80,5	191	1,38
4	1986	724	15,8	1460	4	5,57	5,71	26,0	27,81	81,0	190	1,41
5	2714	989	15,2	1440	60	5,58	5,75	25,0	28,15	81,0	190	1,41
6	3388	1235	15,6	1420	8	5,63	5,83	22,0	28,15	80,5	192	1,42
7	4279	1567	22,0	1560	116	5,66	5,87	22,0	28,06	82,0	193	1,41
8	5225	1909	8,6	1480	1	5,66	5,86	20,0	28,90	86,5	181	1,37
9	6127	2237	23,0	1520	60	5,75	5,94	18,5				
10	6986	2549	22,2	1500	50	5,67	5,88	23,5	28,74	85,0	180	1,38
11	7313	2888	22,0	1520	152	5,72	5,87	28,0	28,51	81,0	186	1,40

Πίνακας Π.34. Σύστημα B19α (CFL), (45' on), χρόνος ζωής: 1975 ώρες, 2617 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	20,0	1510	15	5,93	5,98	24,0	27,81	72,0	182	1,48
2	283	371	18,8	1440	60	5,99	6,08	23,0	27,86	75,0	180	1,49
3	653	864	20,0	1540	80	5,75	5,82	26,0	27,87	82,5	200	1,40
4	1011	1338	28,8	1460	50	5,78	5,85	27,0	28,12	82,0	188	1,38
5	1386	1836	22,4	1600	24	5,91	5,87	24,0	27,62	81,0	200	1,44
6	1727	2288	20,4	1480	68	6,12	5,89	26,0	28,64	84,0	195	1,39

Πίνακας Π.35. Σύστημα B19β (CFL), (45' on), χρόνος ζωής: 1691 ώρες, 2241 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	16,0	1500	24	6,21	6,11	24,0	28,22	70,0	180	1,56
2	283	371	15,6	1480	72	6,16	6,16	23,0	27,47	72,0	186	1,48
3	653	864	22,8	1540	80	5,99	5,90	26,0	27,92	81,5	204	1,41
4	1011	1338	22,0	1580	40	6,02	5,92	27,0	28,25	83,5	190	1,39
5	1386	1836	24,0	1460	24	6,12	5,89	24,0	28,15	83,5	195	1,42

Πίνακας Π.36. Σύστημα B20α (CFL), (45' on), χρόνος ζωής: 1727 ώρες, 2288 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	20,4	1520	30	5,91	6,01	24,0	28,20	70,0	177	1,51
2	283	371	21,2	1520	120	5,91	6,06	23,0	27,71	72,0	180	1,49
3	653	864	15,4	1480	90	5,67	5,82	26,0	28,06	81,5	195	1,39
4	1011	1338	19,2	1440	60	5,73	5,82	27,0	28,38	83,5	185	1,38
5	1386	1836	21,2	1600	150	5,83	5,83	24,0	27,81	80,0	196	1,43

Πίνακας Π.37. Σύστημα B20β (CFL), (45' on), χρόνος ζωής: 3280 ώρες, 2475 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	20,4	1510	30	5,98	5,83	24,0	28,05	70,0	176	1,53
2	283	371	22,6	1540	116	6,06	5,88	23,0	27,78	72,0	182	1,49
3	653	864	20,4	1500	140	5,77	5,64	26,0	28,38	82,5	193	1,39
4	1011	1338	20,4	1540	80	5,80	5,66	27,0	28,54	82,5	185	1,38
5	1386	1836	20,8	1500	20	5,83	5,63	24,0	28,06	80,5	195	1,46
6	1727	2288	21,2	1680	56	5,80	5,64	26,0	28,54	83,5	191	1,40
7	2102	2785	20,6	1560	4	5,89	5,66	25,0	28,51	81,0	193	1,43

Παραρτήματα

Πίνακας Π.38. Σύστημα Γ19α (CFL), (5' on), χρόνος ζωής: 163 ώρες, 1950 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	20,0	1560	4	6,06	6,06	23,0	27,61	70,0	187	1,50
2	58	690	21,4	1520	70	5,94	6,04	27,0	27,92	75,0	180	1,53
3	87	1040	18,4	1580	60	6,11	6,11	23,0	27,90	72,5	178	1,55
4	133	1594	25,6	1600	80	6,18	6,28	23,0	27,62	72,5	177	1,54

Πίνακας Π.39. Σύστημα Γ19β (CFL), (5' on), χρόνος ζωής: 169 ώρες, 2026 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	15,2	1510	24	6,16	5,96	23,0	27,75	70,0	185	1,50
2	58	690	14,4	1500	28	6,04	5,79	27,0	28,02	74,0	183	1,50
3	87	1040	16,8	1540	36	6,16	5,91	23,0	27,72	71,0	180	1,53
4	133	1594	17,2	1500	10	6,29	5,71	23,0	27,69	71,0	177	1,56

Πίνακας Π.40. Σύστημα Γ20α (CFL), (5' on), χρόνος ζωής: 166 ώρες, 1990 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	20,4	1540	4	6,16	6,06	23,0	27,57	67,5	184	1,55
2	58	690	16,4	1560	52	5,99	5,89	27,0	27,82	73,0	182	1,52
3	87	1040	20,2	1580	40	6,11	6,01	23,0	27,25	70,0	181	1,54
4	133	1594	21,2	1540	30	6,24	5,82	23,0	27,47	70,0	181	1,52

Πίνακας Π.41. Σύστημα Γ20β (CFL), (5' on), χρόνος ζωής: 168 ώρες, 2014 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	15,6	1510	50	5,99	6,16	23,0	27,61	70,0	186	1,45
2	58	690	22,0	1500	48	5,92	6,02	27,0	27,72	72,0	177	1,55
3	87	1040	18,4	1600	72	6,11	6,14	23,0	27,44	70,0	185	1,51
4	133	1594	18,8	1520	60	6,19	5,98	23,0	27,41	72,0	184	1,50

Πίνακας Π.42. Σύστημα Δ19α (CFL), (1' on), χρόνος ζωής: 32 ώρες, 1898 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	20,2	1530	40	5,93	5,93	24,0	27,85	71,0	183	1,48
2	14	860	27,6	1560	76	5,84	5,84	27,0	27,82	72,0	190	1,49
3	23	1370	21,6	1520	74	6,26	5,91	23,0	27,72	72,0	183	1,53

Πίνακας Π.43. Σύστημα Δ19β (CFL), (1' on), χρόνος ζωής: 23 ώρες, 1367 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	21,2	1600	40	5,98	5,93	24,0	27,67	72,0	181	1,50
2	14	860	25,2	1580	20	5,94	5,84	27,0	27,82	73,5	185	1,46

Πίνακας Π.44. Σύστημα Δ20α (CFL), (1' on), χρόνος ζωής: 33 ώρες, 1988 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	20,8	1510	60	5,93	5,93	24,0	28,32	70,5	176	1,53
2	14	860	27,6	1520	48	5,84	5,89	27,0	28,31	80,0	193	1,39
3	23	1370	11,0	1580	40	6,26	6,16	23,0	28,40	80,0	172	1,51

Πίνακας Π.45. Σύστημα Δ20β (CFL), (1' on), χρόνος ζωής: 20 ώρες, 1229 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	20,8	1500	30	5,93	6,03	24,0	27,73	67,0	185	1,51
2	14	860	25,2	1460	32	5,84	6,09	27,0	27,92	74,0	184	1,47

Πίνακας Π.46. Σύστημα E19α (CFL), (20" on), χρόνος ζωής: 11 ώρες, 1924 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	20,4	1540	40	5,97	5,87	26,0	27,62	67,0	179	1,54
2	4	800	19,6	1560	36	6,34	5,84	27,0	28,02	80,0	194	1,42
3	8	1370	14,6	1520	44	6,32	5,94	21,0	27,55	71,0	183	1,53

Πίνακας Π.47. Σύστημα E19β (CFL), (20" on), χρόνος ζωής: 14 ώρες, 2447 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	20,4	1020	70	5,92	5,92	26,0	27,67	70,0	188	1,44
2	4	800	25,2	1600	60	5,94	5,94	27,0	27,62	70,0	180	1,52
3	8	1370	26,8	1520	56	6,17	6,02	21,0	27,62	75,0	183	1,49
4	11	1920	27,6	1540	24	6,08	5,79	23,0	27,71	75,5	184	1,48

Πίνακας Π.48. Σύστημα E20α (CFL), (20" on), χρόνος ζωής: 10 ώρες, 1800 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	10,2	1540	100	5,87	5,82	26,0	27,52	70,0	192	1,46
2	4	800	16,4	1600	200	5,94	5,89	27,0	27,91	75,0	187	1,50
3	8	1370	10,0	1520	56	6,17	6,00	21,0	27,74	74,0	185	1,47

Πίνακας Π.49. Σύστημα E20β (CFL), (20" on), χρόνος ζωής: 10 ώρες, 1750 κύκλοι

α/α	Ωρες	Κύκλοι	I _{έν.}	V _{έν.}	t _{έν.}	R _{c1}	R _{c2}	Θ	f	V _{λαμπ}	I _{λαμπ}	CCF
1	0	0	21,2	1560	40	6,02	6,02	26,0	27,72	79,0	182	1,52
2	4	800	20,8	1700	80	6,06	6,09	27,0	27,72	72,0	180	1,54
3	8	1370	24,8	1540	56	6,37	6,17	21,0	27,72	74,0	184	1,49

Δημοσιεύσεις

Κατά τη διάρκεια της παρούσης διατριβής εκπονήθηκαν οι παρακάτω μελέτες και δημοσιεύθηκαν σε διεθνή περιοδικά ή σε πρακτικά συνεδρίων:

Επιστημονικά περιοδικά

1. N. G. Chondrakis, F.V. Topalis, “Starting characteristics of fluorescent tubes and compact fluorescent lamps operating with electronic ballasts”, Elsevier, Measurement, 42 (2009) pp. 78-86.
2. N. G. Chondrakis, F.V. Topalis, “Evaluation of heat transfer coefficient of tungsten filaments at low pressures and high temperatures”, Applied Thermal Engineering Volume 31, Issues 2-3, February 2011, pp. 258-267.
3. N. G. Chondrakis, F.V. Topalis, “Influence of ballast starting method and operation cycle on the life of T5 fluorescent tubes and CFLs”, Lighting Research and Technology, 2011 (υπό εκτύπωση).

Πρακτικά συνεδρίων

1. N.G. Chondrakis, I.D. Kateri, G.A. Vokas, F.V. Topalis, “Energy saving by utilization of daylight in school buildings”, Proceedings of Iluminat 2003, Cluj – Napoca, Romania, 8 – 9 May 2003.
2. N.G. Chondrakis, I.D. Kateri, F.V. Topalis, “A pilot study for the determination of the energy saving potential in a typical school building by utilization of daylighting”, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Vol. 3, pp. 1323 – 1328, July 2004.
3. N.G. Chondrakis, I.D. Kateri, G.A. Vokas, F.V. Topalis, E.N. Dialynas, “Benefits of Installed Wind Farms in Greece”, 4th Mediterranean IEE Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (Med Power 2004), Lemesos, Cyprus, 15 – 17 November 2004.
4. N. G. Chondrakis, L. T. Doulos, F. V. Topalis “Starting characteristics and steady state operation of dimming electronic ballasts”, Proceedings of the 11th European Lighting Conference Lux Europa, Istanbul, 9-11 September 2009.
5. N. G. Chondrakis, F.V. Topalis, “Influence of Cold Starting on the Life of T5 Fluorescent Tubes and CFLs”, IEEE Xplore, Industrial Electronics, 2009, IECON '09, 35th Annual conference of IEEE.