



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Επίδραση της θερμότητας με αγωγή, ακτινοβολία και  
μεταφορά στη διηλεκτρική αντοχή των μονωτήρων  
πορσελάνης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γερασιμοπούλου Α. Ελένη

**Επιβλέπων:** Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Επίδραση της θερμότητας με αγωγή, ακτινοβολία και  
μεταφορά στη διηλεκτρική αντοχή των μονωτήρων  
πορσελάνης**

**Επιβλέπων:** Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2014.

.....  
Καραγιαννόπουλος  
Κωνσταντίνος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Μπούρκας Περικλής  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Θεοδώρου Νικόλαος  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

.....  
Copyright © Γερασιμοπούλου Ελένη 2014

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

Copyright © Γερασιμοπούλου Ελένη 2014

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.

## Πρόλογος

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Πρόκειται για μια μελέτη υπερθέρμανσης ηλεκτρικού κυκλώματος παροχής μέσης τάσης βασισμένη τόσο σε πειραματικές μετρήσεις όσο και σε θεωρητικούς υπολογισμούς.

Επιβλέπων της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ο καθηγητής κ. Κ. Καραγιαννόπουλος, στον οποίο θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου για τις πολύτιμες συμβολές του, την άψογη καθοδήγησή του και το άριστο κλίμα συνεργασίας. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω επίσης στον ομότιμο καθηγητή κ. Π. Μπούρκα που με στήριξε δια φωτίζοντας τις απορίες μου.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους του Εργαστηρίου για τη συνεργασία και τις άριστες σχέσεις που αναπτύξαμε και ιδιαίτερα τους Δρ. Αικατερίνη Πολυκράτη και Κωνσταντίνο Χαλεβίδη για τη συνεισφορά τους προς την εκπόνηση αυτής εδώ της διπλωματικής εργασίας.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τις συνέπειες της θερμικής καταπόνησης ενός τμήματος του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας τόσο πειραματικές μετρήσεις όσο και θεωρητικούς υπολογισμούς.

Στο κεφάλαιο 1 δίνεται εν περιλήψει το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο κατανόησης της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των δοκιμών ποιοτικού ελέγχου σε ηλεκτροτεχνικές κατασκευές υψηλών τάσεων καθώς επίσης αναλύονται οι πιθανοί τρόποι μετάδοσης της θερμότητας με αγωγή, μεταφορά και ακτινοβολία. Ακολουθούν οι ιδιότητες της πορσελάνης ως ηλεκτρομονωτικό υλικό και τέλος παρουσιάζονται τα ακροκιβώτια πορσελάνης μέσης τάσης.

Στο κεφάλαιο 2 δίνεται ο σκοπός της εργασίας, ο οποίος είναι η δοκιμή υπερθέρμανσης αεροδιακόπτη μέσης τάσης καθώς και ο υπολογισμός των θερμικών συνεπειών που έχει η έκθεση ένας μονωτήρα πορσελάνης σε περιβάλλον πυρκαγιάς.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος της εργασίας, η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο εργαστήριο.

Στο κεφάλαιο 4 αναπτύσσεται το μοντέλο φωτιάς, βάση του οποίου, έγιναν οι θεωρητικοί υπολογισμοί αύξησης της θερμοκρασίας του ακροκιβωτίου πορσελάνης.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης και δίνεται απάντηση στο ερώτημα εάν και κατά πόσο είναι δυνατή η εκδήλωση πυρκαγιάς λόγω υπερθέρμανσης εναέριων γραμμών διανομής μέσης τάσης.

## Λέξεις κλειδιά

Μετάδοση θερμότητας, Ακροκιβώτια, Πορσελάνη, Θερμική καταπόνηση δικτύου διανομής, Μοντέλο φωτιάς

## **Abstract**

The present dissertation examines the effects caused by a thermal stress on a portion of the electricity distribution network, using both experimental measurements as well as theoretical calculations.

Chapter 1 presents briefly the required theoretical background, which is necessary for the comprehension of the study. Specifically, the chapter refers to a short presentation of the quality control testing at high voltages in electrical engineering constructions. In addition is included the analysis of all the possible ways regarding heat transfer by conduction, radiation and convection, followed up by the presentation of the characteristics of porcelain as an electrically insulating material as well as the porcelain bushings of medium voltage.

The purpose of the aforementioned study is being presented in chapter 2, which is the overheating testing of a medium voltage air-insulated switchgear as well as the recording of thermal effects caused by the exposure of a porcelain insulator in an environment surrounded by fire.

Chapter 3 refers to the experimental and practical part of the study generally, the experimental process and also the results of the calculations being conducted in the laboratory.

The fire model, according to which all the theoretical calculations of the temperature increase were made, is presented in chapter 4.

The final conclusions are made in chapter 5 where there is an answer to the question of how possible is the event of fire due to the overheating of the overhead distribution lines of medium voltage.

## **Keywords**

Heat transfer, Bushings, Porcelain, Distribution network thermal stress, Fire model

## Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	4
Περίληψη .....	5
Abstract.....	6
1. Εισαγωγή.....	8
1.1. Δοκιμές ποιοτικού ελέγχου σε ηλεκτροτεχνικές κατασκευές υψηλών τάσεων.....	8
1.2. Η θερμοχημική διάτρηση.....	10
1.3. Μετάδοση της θερμότητας με αγωγή, μεταφορά (συναγωγή) και ακτινοβολία .....	11
1.3.1. Η μετάδοση της θερμότητας με αγωγή.....	11
1.3.2. Η μετάδοση της θερμότητας με μεταφορά.....	11
1.3.3. Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.....	12
1.4. Η πορσελάνη ως ηλεκτρομονωτικό υλικό .....	16
1.4.1. Ιδιότητες της ηλεκτρικής πορσελάνης.....	16
1.5. Ακροκιβώτια 20 kV .....	25
1.5.1. Ονομαστικές τιμές ακροκιβωτίων .....	25
1.5.2. Συνθήκες λειτουργίας.....	32
1.5.3. Δοκιμές τύπου.....	34
1.5.4. Δοκιμές σειράς.....	44
2. Σκοπός της εργασίας.....	52
3. Πειραματικό μέρος.....	53
3.1. Το κύκλωμα μέτρησης .....	53
3.2. Η διαδικασία των μετρήσεων.....	55
3.3. Δοκιμή υπερθέρμανσης – χαλαρές συνδέσεις.....	57
3.4. Δοκιμή υπερθέρμανσης – σφιγμένες συνδέσεις.....	60
3.5. Αποτελέσματα των μετρήσεων .....	63
3.5.1. Θερμοκρασιακή ανύψωση της διάταξης για μικρή δύναμη σύσφιξης των επαφών.....	64
3.5.2. Θερμοκρασιακή ανύψωση της διάταξης για μεγάλη δύναμη σύσφιξης των επαφών.....	66
3.6. Μέτρηση θερμικής καταπόνησης της διάταξης κατά το βραχυκύκλωμα.....	68
4. Θεωρητικοί υπολογισμοί .....	70
4.1. Μοντέλο φωτιάς .....	70
4.2. Υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας στο ακροκιβώτιο .....	72
4.3. Πίνακες αύξησης θερμοκρασίας του ακροκιβωτίου όταν η ταχύτητα της φωτιάς γίνεται από $v_w=9$ m/s σε $v_w=18$ m/s, σε σχέση με τον χρόνο.....	73
5. Συμπεράσματα.....	74
Βιβλιογραφία .....	75

# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Δοκιμές ποιοτικού ελέγχου σε ηλεκτροτεχνικές κατασκευές υψηλών τάσεων

Για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας μιας ηλεκτροτεχνικής κατασκευής κάθε κατασκευή πρέπει να δοκιμαστεί σε λειτουργικές συνθήκες πριν τη διάθεση της σε χρήση. Οι λειτουργικές συνθήκες αντιστοιχούν στις μελλοντικές μέγιστες καταπονήσεις στο δίκτυο.

Οι δοκιμές λαμβάνουν χώρα στο τελευταίο στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας και καθορίζονται από τους διάφορους κανονισμούς (VDE, IEC κλπ), διακρίνονται δε σε δοκιμές τύπου και σε δοκιμές σειράς.

Οι δοκιμές τύπου πραγματοποιούνται σε ένα δείγμα των προϊόντων, έτοιμων προς χρήση, ενώ οι δοκιμές σειράς σε όλα ανεξαρτήτως τα τεμάχια. Όταν μια συσκευή δεν ανταπεξέλθει πλήρως σε κάποια από τις δοκιμές τύπου και σειράς τότε αυτή κρίνεται ακατάλληλη και πρέπει να επισκευαστεί. Αυτό επιφέρει ζημιά στον κατασκευαστή. Γι' αυτό το λόγο επιβάλλεται έλεγχος της ποιότητας των πρώτων υλών καθώς και των διαφόρων φάσεων παραγωγής. Οι δοκιμές πρώτων υλών είναι συνήθως δειγματοληπτικοί έλεγχοι και οι δοκιμές παραγωγής είναι μετρήσεις που ελέγχουν την ποιότητα στις διάφορες φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας, οπότε ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες για σφάλματα στο τελικό στάδιο κατασκευής.

Οι δοκιμές τύπου δεν είναι ίδιες για κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή αλλά εξαρτώνται από το είδος της. Για παράδειγμα άλλες δοκιμές τύπου προβλέπονται για έναν μετασχηματιστή και άλλες για ένα καλώδιο, αποζεύκτη και ούτω καθεξής. Επιπλέον οι δοκιμές τύπου εξαρτώνται από τις συνθήκες λειτουργίας που πρόκειται να αντιμετωπίσει η κατασκευή στο δίκτυο.

Οι δοκιμές τύπου καλούνται να δώσουν απάντηση στα εξής ερωτήματα, για κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή:

- Ποιό είναι το ονομαστικό ρεύμα της κατασκευής
- Ποιά είναι η ονομαστική τάση λειτουργίας της
- Τί απαιτήσεις μηχανικής αντοχής πρέπει να έχει
- Αντέχει η κατασκευή το βραχυκύκλωμα έως ότου γίνει διακοπή του από τα μέσα προστασίας του δικτύου
- Ποιές είναι οι ειδικές απαιτήσεις που θα χαρακτηρίζουν τη λειτουργία της κατασκευής

Με βάση αυτές τις ερωτήσεις καθορίζονται οι εξής δοκιμές τύπου, οι οποίες περιλαμβάνονται στους διάφορους κανονισμούς:



1. Δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας)
2. Διηλεκτρικές δοκιμές
3. Δοκιμή μηχανικής αντοχής
4. Δοκιμή βραχυκύκλωσης

Απάντηση στην τελευταία ερώτηση δίνουν οι «ειδικές δοκιμές» που περιλαμβάνονται αναλυτικά στους κανονισμούς ανάλογα με την περίπτωση. Για παράδειγμα η μέτρηση των απωλειών ενός μετασχηματιστή και ο έλεγχος της ποιότητας βαφής ενός πίνακα εξωτερικού χώρου αποτελούν ειδικές δοκιμές, γιατί αναφέρονται σε συγκεκριμένες ειδικές απαιτήσεις που καθορίζονται από το είδος και τη χρήση της κατασκευής.

Η δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας) αφορά την εξακρίβωση του μέγιστου ρεύματος συνεχούς λειτουργίας, το οποίο ονομάζεται ονομαστικό ρεύμα. Η τιμή αυτού του ρεύματος δεν μπορεί να είναι τυχαία, αλλά πρέπει να ανταποκρίνεται σε προδιαγεγραμμένες τιμές ρεύματος (10 A, 200 A, 400 A κλπ). Η δοκιμή διαρκεί συνήθως αρκετές ώρες. Στους μετασχηματιστές ελαίου είναι της τάξης των 24 ωρών και θεωρείται ότι είναι επιτυχής, όταν η θερμοκρασία δεν υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο όριο κατά τις προδιαγραφές (κατά VDE 0670, για χαλκό εντός μονωτικού ελαίου η μέγιστη θερμοκρασία είναι 80 °C και η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας, ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, 40 °C).

Οι διηλεκτρικές δοκιμές σκοπό έχουν τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής μιας ηλεκτροτεχνικής κατασκευής, ώστε αυτή να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που καθορίζονται από τη στάθμη μόνωσης του δικτύου, τις υπερτάσεις χειρισμών και τις ειδικές συνθήκες στο περιβάλλον (κεραυνοί). Η ονομαστική τάση (ή τάση σειράς) κάθε κατασκευής δεν μπορεί να είναι μια τυχαία τιμή, αλλά πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγεγραμμένη διαβάθμιση των τάσεων του δικτύου (6,6 kV, 15 kV, 20 kV, 150 kV κλπ). Συνήθως γίνεται αναφορά, εκτός από την ονομαστική τάση, στη στάθμη μόνωσης της κατασκευής (μέγιστη τάση λειτουργίας), που είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση (π.χ. για ονομαστική τάση 20 kV η στάθμη μόνωσης είναι 24 kV).

Η δοκιμή μηχανικής αντοχής αφορά κυρίως την ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα των επαφών των διακοπών μετά από ένα μεγάλο αριθμό χειρισμών, ενώ παράλληλα ελέγχεται η στιβαρότητα της κατασκευής (τυχών παραμορφώσεις των επαφών, αποσυναρμολογήσεις, ακατάλληλα ελατήρια κλπ).

Η δοκιμή σε τριπολικό βραχυκύκλωμα ελέγχει την καταπόνηση μιας κατασκευής από τις μεγάλες δυνάμεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά το βραχυκύκλωμα. Η δοκιμή αυτή διαρκεί 1 sec, αρκετό χρόνο σε σχέση με τον χρόνο ενεργοποίησης των μέσων προστασίας του δικτύου. Κατά τη δοκιμή μετρώνται οι συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης, ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ βραχυκύκλωσης, που καθορίζεται από τη θέση της κατασκευής στο δίκτυο. Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής όταν, μετά το πέρας της, δεν έχουν αναιρεθεί η στάθμη μόνωσης και η ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα. Αυτό σημαίνει πως στο συγκεκριμένο δοκίμιο, οι

διηλεκτρικές δοκιμές καθώς και η δοκιμή υπερθέρμανσης ακολουθούν τη δοκιμή σε τριπολικό βραχυκύκλωμα.

## 1.2. Η θερμοχημική διάτρηση

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη. Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορούμε να υποθέσουμε πως οι δεσμοί των μορίων εξασθενούν και επομένως η ενέργεια εξόδου των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από το πλέγμα των μορίων είναι μικρότερη.

Η διάτρηση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος του στερεού μονωτικού μέσου, ονομάζεται θερμοχημική. Έχει διαπιστωθεί ύστερα από πειράματα, ότι μετά από μία ορισμένη τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης.

Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής και δίνεται από τη σχέση:

$$U_a = \sqrt{a \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma_0}} \quad (1.2.-1)$$

όπου  $a$  είναι σταθερά του υλικού και εξαρτάται από την μορφή της τάσης. Η σταθερά  $a$  έχει την τιμή 2,83 για καταπόνηση με συνεχή τάση, ενώ για εναλλασσόμενη τάση είναι 1,88.

Η θερμική τάση ανατροπής αποτελεί το κριτήριο για το τεχνοοικονομικό πάχος των στερεών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές. Η τιμή είναι για τα περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz, της τάξης του 1 MV.

Πρόσφατες έρευνες σε στερεά μονωτικά υλικά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο του στερεού μονωτικού ενισχύει τις μερικές εκκενώσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται, λόγω της θερμότητας του περιβάλλοντος, σε μικρότερες τιμές της τάσης απ' ό,τι σε κανονική θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός δια κρούσεως σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου απ' ό,τι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C.

### 1.3. Μετάδοση της θερμότητας με αγωγή, μεταφορά (συναγωγή) και ακτινοβολία

Η θερμότητα είναι μορφή ενέργειας που μεταφέρεται από ένα σύστημα σε ένα άλλο λόγω της ύπαρξης θερμοκρασιακής διαφοράς. Η μεταφορά θερμότητας γίνεται πάντα από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σύστημα, εωσότου τα δυο συστήματα να αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία.

Η θερμότητα μπορεί να μεταδοθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Με αγωγή, μεταφορά (συναγωγή) και με ακτινοβολία.

#### 1.3.1. Η μετάδοση της θερμότητας με αγωγή

Η μετάδοση της θερμότητας με αγωγή μπορεί να γίνει σε στερεά σε υγρά και σε αέρια. Στα υγρά και στα αέρια, η μετάδοση οφείλεται στις συγκρούσεις και στη διάδοση των μορίων λόγω της τυχαίας κίνησης τους. Στα στερεά αποδίδεται στις ταλαντώσεις των μορίων μέσα στο πλέγμα τους και στην ενέργεια που μεταφέρεται από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Ο ρυθμός μετάδοσης της θερμότητας με αγωγή, μέσω μιας επιφάνειας  $A$ , δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta x} \quad (1.3.1.-1)$$

όπου  $\Delta\theta$  είναι η θερμοκρασιακή διαφορά και  $\Delta x$  το πάχος της επιφάνειας. Η σταθερά  $k$  αντιπροσωπεύει τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Εάν το  $\Delta x$  τείνει στο μηδέν η παραπάνω σχέση προσαρμόζεται και γίνεται:

$$Q_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad \text{‘Νόμος θερμικής αγωγιμότητας κατά Fourier’} \quad (1.3.1.-2)$$

#### 1.3.2. Η μετάδοση της θερμότητας με μεταφορά

Η μετάδοση της θερμότητας με μεταφορά (συναγωγή) αφορά τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ της επιφάνειας ενός στερεού και του αερίου ή υγρού που κινείται και συμπεριλαμβάνει συνδυασμό επιδράσεων αγωγής αλλά και κίνησης των ρευστών. Όσο πιο γρήγορα κινείται το ρευστό, τόσο μεγαλύτερη είναι η μετάδοση με συναγωγή. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κίνηση του ρευστού, τότε η μετάδοση γίνεται απλά με αγωγή.

Όταν το ρευστό βρίσκεται σε ηρεμία έχουμε ελεύθερη μεταφορά (natural convection) και η κίνηση του είναι αποτέλεσμα δυνάμεων άνωσης που δημιουργούνται

λόγω διαφοράς πυκνότητας η οποία οφείλεται στην αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας του. Όταν το ρευστό έχει κάποια ταχύτητα συμβαίνει εξαναγκασμένη μεταφορά (forced convection). Στην εξαναγκασμένη μεταφορά ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας είναι μεγαλύτερος από ότι στην ελεύθερη μεταφορά λόγω αύξησης του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας  $h$ . Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{cond} = -h \cdot A \cdot \Delta\theta \quad \text{‘ Νόμος ψύξης του Newton’} \quad (1.3.2.-1)$$

όπου η σταθερά  $h$  είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή,  $A$  είναι η επιφάνεια του σώματος που συμμετέχει στη διαδικασία της συναγωγής και  $\Delta\theta$  είναι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του ρευστού στην επιφάνεια του σώματος και του ρευστού σε απόσταση τέτοια από το σώμα, ώστε να μην επηρεάζεται από τη θερμότητα του σώματος.

### 1.3.3. Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία αφορά τη μεταφορά ενέργειας που εκπέμπεται από την ύλη με μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ή με φωτόνια λόγω των αλλαγών στις ηλεκτρονιακές στοιβάδες των ατόμων ή μορίων. Σε αντίθεση με την αγωγή και συναγωγή, η ακτινοβολία δεν χρειάζεται την ύπαρξη κάποιου υλικού να μεσολαβήσει. Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία είναι η ταχύτερη αφού μεταδίδεται με την ταχύτητα του φωτός και συμβαίνει και στο κενό. Όλα τα σώματα που έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία σε όλο τον όγκο τους, ανεξάρτητα από τη φυσική τους κατάσταση. Όμως η θερμική ακτινοβολία για τα στερεά που είναι αδιαφανή (π.χ. τα μέταλλα) θεωρείται ότι είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει μόνο στην επιφάνεια τους αφού η εκπεμπόμενη από το εσωτερικό ακτινοβολία δεν μπορεί ποτέ να φτάσει έξω από την επιφάνεια του σώματος. Ο μέγιστος ρυθμός ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός σώματος απόλυτης θερμοκρασίας  $\theta$  δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \cdot A \cdot \theta^4 \quad \text{‘ Νόμος Stefan-Boltzmann’} \quad (1.3.3.-1)$$

όπου  $\sigma$  είναι η σταθερά του Stefan-Boltzmann και είναι ίση με  $5,67 \text{ W/m}^2\text{K}$  και  $A$  είναι η επιφάνεια η οποία εκπέμπει. Η ιδεατή επιφάνεια που εκπέμπει ακτινοβολία στο μέγιστο βαθμό, καλείται μέλαν σώμα. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια πραγματική επιφάνεια είναι μικρότερη από αυτή του μέλανος σώματος στις ίδιες θερμοκρασίες και δίνεται από τη σχέση:

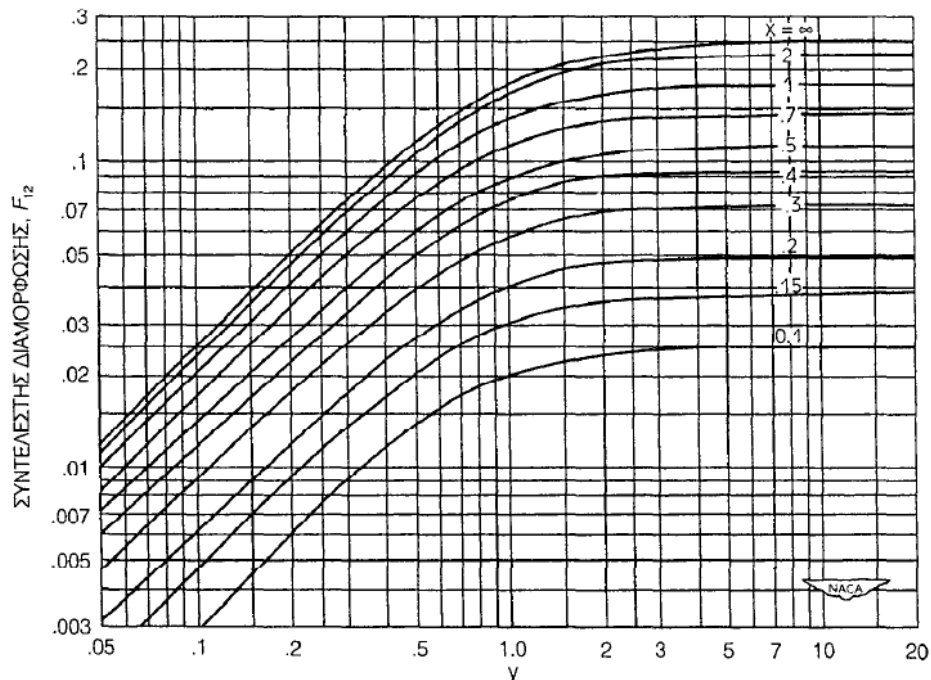
$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \theta^4 \quad (1.3.3-2)$$

όπου  $\varepsilon$  είναι ο συντελεστής εκπομπής που παίρνει τιμές από 0 έως 1 και δηλώνει το κατά πόσο ένα σώμα πλησιάζει το μέλαν σώμα για το οποίο το  $\varepsilon$  είναι ίσο με τη μονάδα. Σε περιπτώσεις φλογών το  $\varepsilon$  εξαρτάται από το πάχος τους. Ο συντελεστής εκπομπής για τις φλόγες δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = 1 - e^{-kl} \quad (1.3.3-3)$$

Στην παραπάνω σχέση  $k$  είναι ο συντελεστής απορροφητικότητας και  $l$  το πάχος της φλόγας. Ο συντελεστής απορροφητικότητας είναι μια ιδιότητα της φλόγας που καθορίζει πόσο εύκολα η ακτινοβολία θα διαπεράσει τη φλόγα. Για συνήθεις φλόγες το  $\varepsilon$  θα είναι σχεδόν 1. Σε πολύ μεγάλες φλόγες η αιθάλη μπορεί να κρύψει κατά κάποιον τρόπο τη φλόγα μειώνοντας την ακτινοβολο ροή θερμότητας προς το περιβάλλον της.

Εκτός από τον συντελεστή εκπομπής, υπάρχει και ο συντελεστής διαμόρφωσης  $F_{12}$  ο οποίος αντιπροσωπεύει το κλάσμα των ακτίνων που μπορούν να ιδωθούν από ένα στόχο, ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση  $c$  από τη φλόγα. Στην περίπτωση της φλόγας και του σώματος-στόχου που δέχεται ακτινοβολία σε απόσταση  $c$ , η τιμή του  $F_{12}$  υπολογίζεται με βάση το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 1.3.3-1: Ο συντελεστής διαμόρφωσης σε περίπτωση ενός σώματος στόχου σε απόσταση  $c$  από μία φλόγα

$x$ : ο λόγος του ύψους της φλόγας προς την απόστασή της από το σώμα

$y$ : ο λόγος του πλάτους της φλόγας προς την απόστασή της από το σώμα

Ο συντελεστής διαμόρφωσης εξαρτάται από την απόσταση  $c$ , το μέγεθος της φλόγας καθώς και από τον προσανατολισμό της φλόγας και του στόχου.

Η θερμική ροή  $q''$  που δέχεται ένα αντικείμενο από μια φλόγα είναι:

$$q'' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \theta^4 \cdot F_{12} \quad (1.3.3.-4)$$

Σε περιπτώσεις μικρών φωτιών για την πρόβλεψη της ροής ακτινοβολίας θερμότητας ενός προσπίπτοντος αντικειμένου σε μια φωτιά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η εμπειρική σχέση:

$$Q_{rf(dx)} = \frac{X_r \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (1.3.3.-5)$$

Παρατηρούμε πως η θερμότητα που λαμβάνει ένα σώμα σε απόσταση από μια θερμή πηγή είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης.

Στην παραπάνω σχέση,  $Q$  είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας καύσεως της φωτιάς σε kW και  $X_r$  είναι το κλάσμα της ακτινοβολούμενης ενέργειας σχετικά με την απελευθερωμένη ενέργεια και παίρνει τιμές από 20% έως 40% για περιπτώσεις ξύλου. Η εξίσωση είναι έγκυρη όταν το πλάτος  $D$  της φλεγόμενης επιφάνειας είναι μικρό συγκριτικά με την απόσταση ανάμεσα στο στόχο και στη φωτιά ( $R/D > 2$ ).

Η παρακάτω σχέση χρησιμοποιείται για να υπολογίσει την εξάπλωση της φλόγας σε πυρκαγιές σε επίπεδο έδαφος.

$$v = \frac{k(1 + v_w)}{p_b} \quad \text{'Thomas 1971'} \quad (1.3.3.-6)$$

όπου  $v$  είναι η ταχύτητα της εξάπλωσης της φλόγας (κινηματικό ιξώδες) (m/s),  $v_w$  είναι η ταχύτητα ανέμου (m/s),  $p_b$  είναι η φαινόμενη πυκνότητα του καυσίμου ( $\text{kg/m}^3$ ) και  $k$  είναι ίσο με 0.07 για πυρκαγιά και με 0.05 για ξύλο ( $\text{kg/m}^3$ ).

Σε πυρκαγιές, εκτός από το συνολικό ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας από την πηγή  $Q$  (kW) ορίζουμε επίσης τη θερμική ένταση του μετώπου της φωτιάς, γνωστή και ως ένταση Byram. Στη πράξη η εξίσωση που χρησιμοποιείται για μέτωπο φωτιάς έως 7 m είναι:

$$I = 273 \cdot (h)^{2.17} \quad \text{'Byram 1959'} \quad (1.3.3.-7)$$

όπου  $I$  (kW/m) ισοδυναμεί με τη ροή θερμότητας ανά μονάδα μήκους του μετώπου της φωτιάς και  $h$  είναι το ύψος της φλόγας (m).

Όταν ένα σώμα με συντελεστή εκπομπής  $\varepsilon$  και επιφάνεια  $A$  σε απόλυτη θερμοκρασία  $\theta$  περικλείεται από ένα ρευστό που βρίσκεται σε απόλυτη θερμοκρασία  $\theta_\infty$  τότε η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (\theta^4 - \theta_\infty^4) \quad (1.3.3.-8)$$

Η σχέση για  $\theta \neq \theta_\infty$ , μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$Q_{rad} = -h_r \cdot A \cdot (\theta - \theta_\infty) \quad (1.3.3.-9)$$

όπου ο συντελεστής  $h_r$  δίνεται από τη σχέση:

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{\theta^4 - \theta_\infty^4}{\theta - \theta_\infty} \quad (1.3.3.-10)$$

Αν συνυπάρχει και αγωγή ή συναγωγή με την ακτινοβολία, τότε η μετάδοση θερμότητας δίνεται από τον τύπο:

$$Q_{rad} = -h_{comp} \cdot A \cdot (\theta - \theta_\infty) \quad (1.3.3.-11)$$

όπου ο συντελεστής  $h_{comp}$  είναι ο συνδυασμένος συντελεστής θερμικής μεταφοράς και λαμβάνει υπόψη του όλα τα φαινόμενα που συμμετέχουν στη μετάδοση της θερμότητας.

Στην ύπαρξη της συναγωγής η ακτινοβολία παίζει σημαντικό ρόλο σε περιπτώσεις που υπάρχει ελεύθερη μεταφορά ενώ σε περιπτώσεις εξαναγκασμένης μεταφοράς θεωρείται αμελητέα, ειδικότερα σε περιπτώσεις σωμάτων με μικρό συντελεστή εκπομπής.

Σε μια πυρκαγιά, η εξάπλωση της φωτιάς επηρεάζεται από την μεταφορά και την ακτινοβολία θερμότητας.

## 1.4. Η πορσελάνη ως ηλεκτρομονωτικό υλικό

Η πορσελάνη ή αλλιώς πυριτικό άλας του αργιλίου και του καλίου ( $4K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$ ), σχηματίζεται από συσσωμάτωση μειγμάτων αργιλίου, χαλαζία και αστρίου (κάλιο-αλουμινο πυρίτιο). Η πορσελάνη υψηλού μηχανικού και διηλεκτρικού βαθμού σχηματίζεται από οξειδία αλουμινίου, οξειδία βαρίου και αργιλίου.

Η πορσελάνη είναι χημικά αδρανής και έχει ικανοποιητικές διηλεκτρικές ιδιότητες για εφαρμογές σε συχνότητες ισχύος, όπου χρησιμοποιείται ευρέως. Οι μηχανικές ιδιότητες και η αντοχή σε θερμική καταπόνηση είναι χαμηλές. Η πορσελάνη που έχει υποβληθεί σε διαδικασία εφύαλωσης χρησιμοποιείται εκτενώς για μόνωση σε γραμμές μεταφοράς, διακόπτες κυκλώματος και σπινθηριστές. Στη χαμηλή τάση χρησιμοποιείται σε διακόπτες, ακροκιβώτια, τμήματα ασφαλειών και βάσεις ρευματοδοτών.

### 1.4.1. Ιδιότητες της ηλεκτρικής πορσελάνης

#### 1.4.4.1. Καθοριστικοί παράγοντες

Οι ιδιότητες ενός τεμαχίου ηλεκτρικής πορσελάνης καθορίζονται από τις διαδικασίες που ακολουθήθηκαν κατά τη βιομηχανική κατασκευή και δεν είναι εύκολο να προβλεφθούν. Τα περισσότερα δοκίμια πορσελάνης δημιουργούνται από το πρόσμιγμα σωματιδίων διαφόρων μεγεθών, κρυστάλλων και πόρων. Αυτό το προϊόν σύντηξης συγκρατείται από μια άμορφη δομή (υαλώδης πλέγμα) η οποία χαρακτηρίζεται από ένα επιφανειακό περίβλημα διαφορετικής δομής στην υάλωση. Οι βασικές χημικές και φυσικές ιδιότητες των κεραμικών υλικών καθορίζονται από τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καθώς και τον κύκλο πυράκτωσης που απαιτείται για την σύντηξη των συστατικών προσδίδοντας συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σε δευτερογενείς λεπτομέρειες που επηρεάζονται από την πολυπλοκότητα της βιομηχανικής επεξεργασίας.

Τα σημαντικότερα βήματα στην ένυδρη κατασκευαστική διαδικασία είναι η ανάμιξη αργιλίου και ορυκτών στο νερό, αφαίρεση του νερού, διαμόρφωση του σχήματος, εφύαλωση και πυράκτωση και επαναπυράκτωση αν οι επιθυμητές ιδιότητες δεν επιτευχθούν με την πρώτη προσπάθεια. Καθένα από τα παραπάνω βήματα επιβάλλει και ορισμένους περιορισμούς.

Ας θεωρήσουμε μια βασική ιδιότητα, την πλαστικότητα. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής το ένυδρο υλικό θα πρέπει να αντέχει σε σημαντική παραμόρφωση, να ρέει ικανοποιητικά μέσα σε πολύπλοκες μήτρες κατά τη διαδικασία της χύτευσης, να συγκρατεί το σχήμα του κατά την ξήρανση, να υποβάλλεται σε μηχανολογική κατεργασία (τόρνευση ή κοπή με φρέζα). Η πλαστικότητα είναι απαραίτητη σε αυτές τις διαδικασίες και διασφαλίζεται από μια μεγάλη αναλογία μικρών σωματιδίων στο μίγμα του υλικού (Πίνακας 1.4-1). Αντίθετα, μια πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε σωματίδια μικρών διαστάσεων αποτελεί ανεπιθύμητο παράγοντα κατά το στάδιο της πλήρους



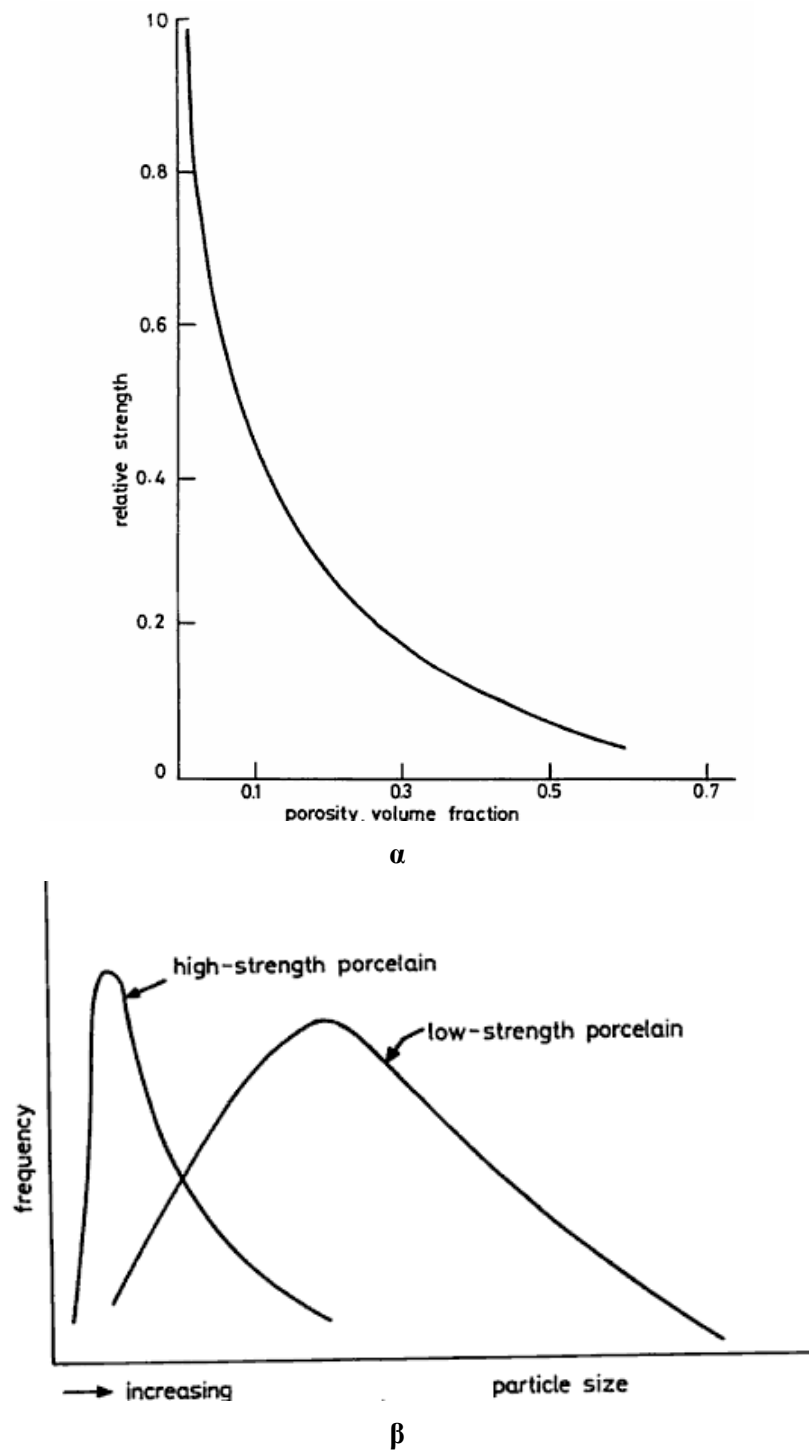
ύγρυνσης (ή δημιουργίας πολτού) δεδομένου ότι αυξάνει τον απαιτούμενο χρόνο συμπίεσης φίλτρου κατά την αφύγρυνση, όταν δηλαδή ο πολτός μετατρέπεται σε μια ημι-συμπαγή μάζα ή πλάκα. Επομένως η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων στο τελικό προϊόν, η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις φυσικές ιδιότητες, ιδιαίτερα τις μηχανικές, δεν είναι αποκλειστικά θέμα επιλογής των υλικών αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από τις κατασκευαστικές τεχνικές. Ο σχεδιαστής υιοθετεί αυστηρά την κατασκευαστική πορεία που οδηγεί σε παραγωγή προϊόντων χαμηλού κόστους και όχι αυτή που ενδεχομένως θα επιθυμούσε προκειμένου να επιτύχει την παραγωγή ενός ιδανικού προϊόντος.

Ένας άλλος παράγοντας που καθορίζει τις ιδιότητες της πορσελάνης είναι η συστολή. Καθώς το νερό σταδιακά αφαιρείται συμβαίνουν μεγάλες αλλαγές στις διαστάσεις πριν πυρακτωθεί το δοκίμιο. Η ξήρανση επομένως πρέπει να γίνει προσεκτικά ώστε να αποφευχθούν οι εσωτερικές ρωγμές, ιδιαίτερα στα μεγάλα τεμάχια. Ένα μη πυρακτωμένο δοκίμιο που μπαίνει στην κάμινο μπορεί να περιέχει ανοιχτούς πόρους σε ποσοστό 35%, αλλά αυτή η αναλογία συνήθως μειώνεται σε 7% ή λιγότερο κατά τη διάρκεια της πυράκτωσης. Καθώς αυξάνει η πυκνότητα του τεμαχίου, αλλάζουν σημαντικά οι διαστάσεις σε ποσοστό 3% ή περισσότερο. Οι αλλαγές αυτές συνοδεύονται από χημική αφύγρυνση, χημικές αντιδράσεις, κρυσταλλοποίηση σε υαλώδεις δομές, επίτηξη και ανάμιξη της υάλωσης με το υπόστρωμα.

Οι τελικές ιδιότητες εξαρτώνται από τη μικροσκοπική δομή στο εσωτερικό του κύριου τμήματος και την μακροσκοπική συμπίεση που δημιουργείται κατά τη θερμική κατεργασία στο στρώμα της εξωτερικής υάλωσης από τις διαφοροποιήσεις των θερμικών ιδιοτήτων στην επιφάνεια του υλικού. Έχει διαπιστωθεί ότι η κατανομή του μεγέθους των πόρων και των σωματιδίων, όπως επίσης και η παρουσία ή απουσία μικρορογμών, καθορίζουν σημαντικά την μηχανική απόδοση και την διηλεκτρική αντοχή (Σχήμα 1.4-1). Γενικά, όσο μικρότεροι είναι οι πόροι, οι κρύσταλλοι και τα ιζηματικά σωματίδια στο τελικό κύριο τμήμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η μηχανική αντοχή του. Επίσης γενικά, η αντικατάσταση του χαλαζία από άργιλο βελτιώνει την αντοχή, μειώνοντας τις εσωτερικές θερμικές διαφορές ανάμεσα στα ιζηματικά σωματίδια και το υαλώδες πλέγμα.

Υλικό (μm)	< 0.05	0.1	0.25	0.5	0.75	1.0	2.0	> 2
Καολιντικός πηλός (σε κλίμακα%)	20	23	38	12	7	0	0	0
Καολίνη (σε κλίμακα%)	0	0	5	8	21	21	66	-
Πυριτικό κυρίως τμήμα (σε κλίμακα%)	7	7	9	7	4	3	11	52

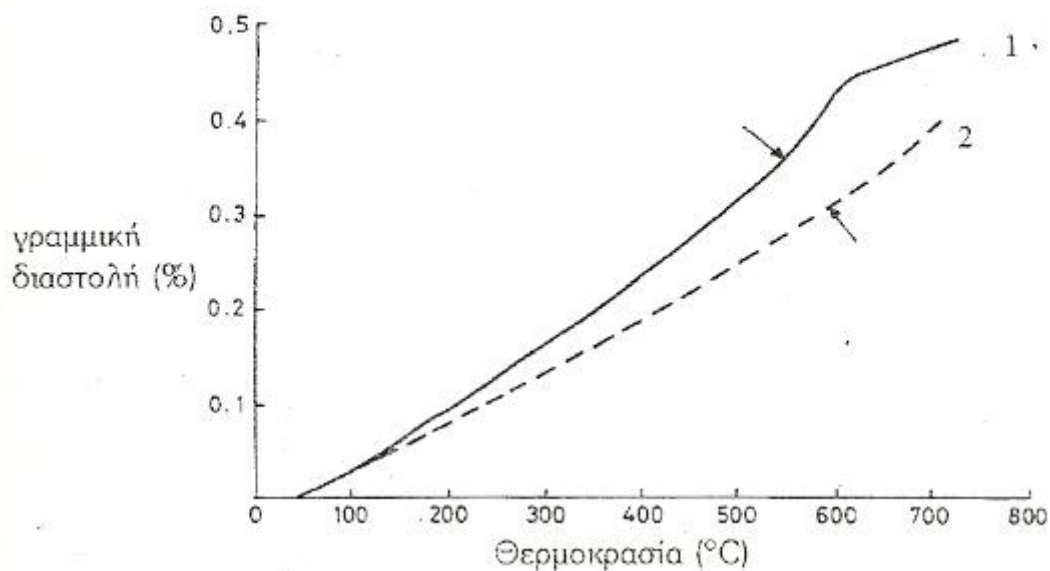
Πίνακας 1.4-1: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων σε πηλούς και κύρια τμήματα



Σχήμα 1.4-1: Επίδραση των πόρων και του μεγέθους των σωματιδίων στην αντοχή  
 α. Επίδραση του πορώδους στην αντοχή σε θραύση. Οι μικρότεροι πόροι έχουν σαν αποτέλεσμα υψηλότερη αντοχή.  
 β. Κατανομές του μεγέθους σωματιδίων σε πορσελάνες υψηλής και χαμηλής αντοχής.

Επειδή τα ελαττώματα της επιφάνειας είναι περισσότερο επικίνδυνα, από ότι τα εσωτερικά, στη δημιουργία μικρορωγμών, η σκόπιμη αύξηση της διασταλτικότητας του

κυρίου τμήματος, με την ενσωμάτωση ορισμένων κρυσταλλικών μορφών πυριτικών αλάτων, χρησιμοποιείται ενίοτε για να τονιστούν τα χαρακτηριστικά της υάλωσης, ενισχύοντας την μακροσκοπική επιφανειακή αντοχή (Σχήμα 1.4.-2).



Σχήμα 1.4-2: Διασταλτικότητα κύριου τμήματος και υάλωσης

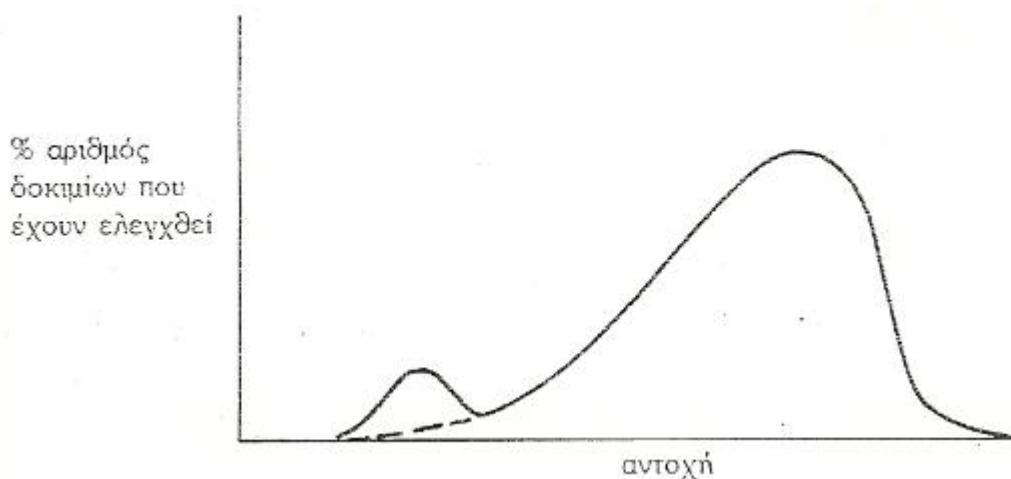
Όταν η υάλωση έχει ψυχθεί, η συστολή του κύριου τμήματος την θέτει υπό θλίψη. Η τελική τάση της υάλωσης είναι δυνατόν να υπερβεί την τιμή των 90 mpa.

1. κυρίως τμήμα
2. υάλωση

#### 1.4.4.2. Μηχανικές ιδιότητες

Η διασφάλιση των μηχανικών ιδιοτήτων της αντιπροσωπευτικής ηλεκτρικής πορσελάνης (Πίνακας 1.4-2) απαιτεί προσεκτική κατασκευαστική διαδικασία.

Εξαιτίας της εύθραυστης φύσης του υλικού, η προφανής αντοχή σε εφελκυσμό δεν κατανέμεται ομοιόμορφα, αλλά ακολουθεί μια παραμορφωμένη χαρακτηριστική 'Weibull' (Σχήμα 1.4-3).



Σχήμα 1.4-3: Παραμορφωμένη κατανομή αντοχής κεραμικών δοκιμίων. Η μικρή αιχμή αντιπροσωπεύει τα ελαττωματικά δοκίμια. Η παραμόρφωση είναι θεμελιώδης και προκύπτει από την στατιστική εξάρτηση της αντοχής στην τάση και τον όγκο που έχει ελεγχθεί.

Οι πρακτικές επιπτώσεις έγκεινται στο γεγονός ότι η μηχανική αντοχή, όπως μετριέται από τη θραύση όμοιων κυλινδρικών ράβδων διαφορετικών τύπων πορσελάνης, αποτελούν αναξιόπιστες ενδείξεις για τη συγκριτική αντοχή των τελικών κατασκευών, ενώ οι παράγοντες που καθορίζουν την ασφάλεια, βασιζόμενοι στην απόκριση κανονικών κατανομών αποδεικνύονται αρκετά ικανοποιητικοί.

Η αστοχία στον εφελκυσμό αποτελεί γενικά δυσάρεστο γεγονός για τον χρήστη του μονωτήρα. Για τον λόγο αυτό αποτελεί αποδεκτή παγκόσμια τακτική να δοκιμάζεται κάθε μονωτικό δοκίμιο σε μια προσυμφωνημένη τιμή οριακού φορτίου, και έτσι να απορρίπτονται τα τεμάχια που αστοχούν. Ακόμα και στα σχέδια κελύφους - πείρου, που δεν διατρέχουν τον κίνδυνο αστοχίας από εφελκυσμό, ορισμένοι κατασκευαστές σχεδιάζουν την πορσελάνη ώστε οι ανεκτές κατανομές φορτίων να είναι συγκρίσιμες με εκείνες των μεταλλικών εξαρτημάτων. Με τον τρόπο αυτό, οι στοιχειώδεις αυτοί σύνδεσμοι εμφανίζουν περιορισμένες πιθανότητες αστοχίας δεδομένου ότι εμφανίζουν ιδιότητες μεταλλικές, ελάσσιμες και έχουν ιδιότητες που εμποδίζουν τις ρωγμές.

Ιδιότητα	Πυριτική πορσελάνη		Αργιλική πορσελάνη		Σκληρυνμένο γυαλί
Πυκνότητα όγκου	2,26-2,42		2,60-3,25		2,30-2,60
Πραγματική πυκνότητα, χωρίς πόρους	2,42-2,50		2,78-3,47		-
Υαλώδη (U) / Μη υαλώδης πορσελάνη (G)	U	G	U	G	-
Αντοχή σε κάμψη (Μρα)	42-90	56-120	100-140	120-170	200-250
Αντοχή σε εφελκυσμό (Μρα)	21-42	28-56	50-70	60-80	100-120
Αντοχή σε θλίψη (Μρα)	280-450	380-690	400-600	500-700	700
Ενέργεια κρούσης (J)	2,0-3,0		2,5-4,0		5,0-6,0
Ελαστικότητα, εφελκυσμός (Gra)	55-80		80-120		60-70
Διασταλτικότητα (20-100°C) ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{K}$ )	3,5-5,5		4,6-6,0		8,0-9,5
Θερμική αγωγιμότητα ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$ )	1,0-2,5		2,0-25,0		0,5-0,9
Ειδική θερμότητα (20 - 100°C) ( $\text{J}/\text{g}^{\circ}\text{K}$ )	0,46-0,72		0,11-0,13		0,5-0,67

Πίνακας 1.4-2: Μηχανικές ιδιότητες πυριτικής πορσελάνης, αργιλικής πορσελάνης και γυαλιού

#### 1.4.4.3. Ηλεκτρικές ιδιότητες

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες οι οποίες χαρακτηρίζουν την ηλεκτρική πορσελάνη (Πίνακας 1.4-3) που προορίζεται για την κατασκευή των μονωτήρων είναι η διηλεκτρική αντοχή, η διηλεκτρική σταθερά, η εφαπτομένη απωλειών, η ειδική αντίσταση όγκου και η θερμοκρασία  $T_e$  (δηλαδή, η απαιτούμενη ελάχιστη θερμοκρασία σε βαθμούς C, για να εκδηλωθεί αντίσταση όγκου ίση με  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ ). Επειδή οι διαστάσεις των κατασκευών συνήθως καθορίζονται από τις μηχανικές και θερμικές απαιτήσεις, οι ηλεκτρικές ιδιότητες σε πολύ λίγες περιπτώσεις αποδεικνύονται καθοριστικές για την εύρυθμη λειτουργία του μονωτήρα. Για παράδειγμα, το πάχος ενός

δισκοειδούς μονωτήρα πορσελάνης στην κορυφή είναι συνήθως περίπου 20 mm, και υφίσταται AC πεδιακές καταπονήσεις που μόλις φθάνουν το 1,5 kV/mm. Τονίζεται ότι οι συνήθεις ηλεκτρικές πορσελάνες έχουν διηλεκτρική αντοχή η οποία είναι τουλάχιστον 5 φορές ισχυρότερη. Επομένως, η δοκιμή της ηλεκτρικής καταπόνησης γίνεται στην παραγωγή των δοκιμίων προκειμένου να ανιχνευθούν πόροι, ελαττώματα ή ρωγμές στο υλικό που ίσως πρακτικά μειώνουν την μηχανική αντοχή του μονωτήρα αλλά δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστούν με οπτικούς ελέγχους. Είναι συνήθης πρακτική να δοκιμάζονται οι δισκοειδείς μονωτήρες σε τάσεις τόσο υψηλές ώστε να δημιουργείται κατά διαστήματα εξωτερικός σπινθήρας 80 kV και άνω και να εφαρμόζονται εξίσου σημαντικές τάσεις ακτινικά μέσα από τα τοιχώματα στόλων με κοιλότητα, ιδιαίτερα όταν αυτά χρησιμοποιούνται σαν κοιλότητες δημιουργίας συμπίεσης σε ένα ενοποιημένο σύστημα διακοπών ισχύος.

Το πεδίο διάσπασης με χρήση κρουστικών τάσεων είναι άμεσα συνδεδεμένο με την ποιότητα της κατασκευής εξαιτίας των κεραυνικών παλμών που επάγονται σε γραμμές μεταφοράς (κατά την πτώση κεραυνών) και σε μικρότερο βαθμό από τους μεταβατικούς παλμούς ρεύματος που εισάγονται από τη χρήση των διακοπών στα δίκτυα. Μια ταχύτατα αυξανόμενη παροδική πεδιακή ένταση μπορεί στιγμιαία να υπερβεί την τάση διάσπασης της πορσελάνης, είτε μέσα στην κεφαλή ενός δισκοειδούς μονωτήρα είτε ανάμεσα στα μεταλλικά τμήματα ενός μονωτήρα στήριξης. Η διάσπαση πρακτικά συμβαίνει για πολύ μικρό χρονικό διάστημα που δεν επιτρέπει την ανάπτυξη εξωτερικού τόξου. Στην περίπτωση όμως αυτή δημιουργείται μια πιθανή διαδρομή για επακόλουθη διαπέραση από υγρασία και άλλους επιφανειακούς ρύπους δημιουργώντας αίτια μηχανικής ρωγμής, χωρίς να υφίσταται και εξωτερική οπτική ένδειξη. Μετρήσεις που έχουν γίνει το 1941 έχουν τεκμηριώσει την ανεπαρκή απόδοση της πορσελάνης, σε σχέση με τα άλλα συνήθη διηλεκτρικά, και επίσης τον σημαντικό ρόλο που διαδραματίζουν οι επιφανειακές ατέλειες.

Ιδιότητα	Μονάδα μέτρησης	Πυριτική πορσελάνη	Αργιλική πορσελάνη	Σκληρυνμένο γυαλί
Διηλεκτρική σταθερά •50 - 60Hz, 20 °C •1MHz, 20 °C	-	5.0 - 6.5 4.8 - 5.6	6.0 - 7.5 5.0 - 6.5	7.3 - 7.5 7.1 - 7.5
Εφαπτομένη απωλειών •50 - 60 Hz, 20 °C •1 MHz, 20 °C	(x10 <sup>-3</sup> )	10.0 - 25.0 5.0 - 12.0	12.0 - 30.0 5.0 - 12.0	15.0 - 60.0 5.0 - 12.0
Διηλεκτρική αντοχή •50-60 Hz, 20 °C	kV/mm	10.0 - 20.0	10.0 - 20.0	>250
Διηλεκτρική αντοχή •1/5μs	kV/mm	40.0 - 50.0	40.0 - 50.0	170.0 - 220.0
ρ = ειδική αντίσταση όγκου	Ω·cm	10 <sup>13</sup> 10 <sup>6</sup>	10 <sup>12</sup> 10 <sup>11</sup>	10 <sup>12</sup> 10 <sup>5</sup> - 10 <sup>6</sup>
Te = θερμοκρασία για ρ = 10 <sup>6</sup> Ω·cm	°C	280 - 340	830 - 1070	270 - 400

Πίνακας 1.4-3: Ηλεκτρικές ιδιότητες της πυριτικής πορσελάνης, της αργιλικής πορσελάνης και του γυαλιού

Οι παρατηρούμενες τιμές της πεδιακής έντασης διάσπασης, της διηλεκτρικής σταθεράς, της εφαπτομένης απωλειών, της ειδικής αντίστασης όγκου και οι μεταβολές αυτών των μεγεθών με τη θερμοκρασία, βρίσκονται σε πλήρη αρμονία με το προτεινόμενο μοντέλο ενός καλώδους πλέγματος, που περιλαμβάνει σχετικά ευκίνητα ιόντα, και συγκρατείται από μια αδρανή δομή κόκκων, κρυστάλλων και πόρων. Ένα δοκίμιο κατασκευασμένο αποκλειστικά από γυαλί θα χαρακτηρίζετε από υψηλότερη διηλεκτρική αντοχή αφού η κατανομή της εσωτερικής πεδιακής έντασης δεν θα μεταβάλλεται από τις ασυνέχειες της διηλεκτρικής σταθεράς των διεπιφανειών (γυαλί/πυρίτιο/αέρα: 75/4.2/1.0). Η διηλεκτρική σταθερά μειώνεται αριθμητικά λόγω των προσμίξεων και μεταλλικών ενθέσεων, από 7.5 σε 6.0. Τόσο η εφαπτομένη απωλειών όσο η ηλεκτρική αγωγιμότητα της πορσελάνης εξαρτάται σημαντικά από την κινητικότητα που εμφανίζουν τα ιόντα μέσα στο υαλώδες πλέγμα. Επειδή η κινητικότητα των ιόντων αυξάνει δραστικά με τη θερμοκρασία, η θερμοκρασιακή άνοδος αναμένεται ότι θα αυξήσει και τις δυο ποσότητες, ενώ η αντικατάσταση των ιόντων νατρίου από τα μεγαλύτερα και λιγότερο ευκίνητα ιόντα, π.χ. καλίου, τείνει να μειώσει τον συντελεστή απωλειών και την αγωγιμότητα αυξάνοντας τη διηλεκτρική αντοχή του μέσου.

Οι πρακτικές επιπτώσεις της κίνησης των ιόντων μέσα σε υαλώδες πλέγμα καταδεικνύονται κυρίως με την αστοχία δοκιμίων που καταπονούνται με τάσεις DC, η οποία είναι πολύ συχνότερη και εντονότερη σε σχέση με τις παρατηρούμενες αστοχίες των ίδιων δοκιμίων όταν καταπονούνται με τάσεις AC. Η αλλαγή στις διαστάσεις των ιόντων, ιδιαίτερα των ιόντων Na, που παρατηρείται στις εκκενώσεις που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή των ηλεκτροδίων εισάγει τοπικά μηχανικές καταπονήσεις, με

αποτέλεσμα την διάδοση εσωτερικής μικρορωγμής η οποία ευνοείται από ηλεκτροστατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στις διεπιφάνειες των ενθέσεων.

Είναι σαφές ότι η ταχεία αύξηση της αγωγιμότητας και η σημαντική ελάττωση της πεδιακής έντασης διάσπασης, που παρατηρούνται όταν η θερμοκρασία των δοκιμίων ξεπεράσει τους 100 °C πρέπει να αποκλείσουν την πορσελάνη από εφαρμογές που περιλαμβάνουν διατάξεις ηλεκτροστατικής εξουδετέρωσης ιόντων (λόγω της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας). Πληροφοριακά αναφέρεται ότι οι διατάξεις ηλεκτροστατικής εξουδετέρωσης ιόντων περιλαμβάνουν συνδυασμούς ηλεκτροδίων υψηλής πεδιακής έντασης και μια γειωμένη πλάκα συλλέκτη πάνω στην οποία εναποτίθενται τα σωματίδια σκόνης τα οποία φέρουν στο σύνολο τους ιοντικά φορτία. Τυπικές τιμές των εφαρμοζόμενων τάσεων είναι από 50-100 kV DC και σε ορισμένες κατασκευές υπερτίθενται βραχείς παλμοί. Περιοδικές μηχανικές κρούσεις στα ηλεκτρόδια και τον συλλέκτη, απελευθερώνουν τα παγιδευμένα σωματίδια. Η θερμή ατμόσφαιρα που περιβάλλει το σύστημα των ηλεκτροδίων συνήθως εμπεριέχει υδρατμούς, οξειδία του άνθρακα και θείου, άζωτο και οξειδία του αζώτου, όζον και τέφρα με διαστάσεις κόκκων < 1 mm. Η γνωστή σχέση ανάμεσα στην ηλεκτρική και μηχανική αντοχή και το γεγονός ότι η διηλεκτρική αντοχή επηρεάζεται από τις μηχανικές καταπονήσεις, όταν εξετάζονται συνδυαστικά, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αξιοπιστία των μονωτήρων πορσελάνης που καταπονούνται λειτουργικά τόσο μηχανικά όσο και ηλεκτρικά, είναι πρακτικά μικρότερη από την αναμενόμενη.



## 1.5. Ακροκιβώτια 20 kV

Τα ακροκιβώτια χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές συσκευές, μηχανήματα, μετασχηματιστές, διακόπτες και εγκαταστάσεις 3φασικών συστημάτων εναλλασσόμενης τάσης, πρόκειται για συσκευές που επιτρέπουν σε έναν ή περισσότερους αγωγούς να περάσουν μέσα από ένα χώρισμα και μονώνει τους αγωγούς από αυτές.

### 1.5.1. Ονομαστικές τιμές ακροκιβωτίων

#### 1.5.1.1. Πρότυπες τιμές της μέγιστης τάσης εξοπλισμού ( $U_m$ )

Μέγιστη τάση εξοπλισμού  $U_m$  ονομάζεται η μέγιστη μέση τιμή της φασικής τάσης για την οποία έχει σχεδιασθεί ο εξοπλισμός όσον αφορά τη μόνωση του.

Οι τιμές της **μέγιστης τάσης εξοπλισμού**  $U_m$  ενός ακροκιβωτίου σε kV επιλέγονται από τις παρακάτω:

3,6-7,2-12-17,5-24-36-52-72,5-100-123-145-170-245-300-362-420-525-550-765-800.

#### 1.5.1.2. Πρότυπες τιμές του ονομαστικού ρεύματος ( $I_r$ )

Ονομαστικό ρεύμα είναι η μέγιστη μέση τιμή του ρεύματος που το ακροκιβώτιο μπορεί να φέρει συνεχώς χωρίς να υπερβεί τα όρια αύξησης της θερμοκρασίας.

Οι τιμές του **ονομαστικού ρεύματος**  $I_r$  ενός ακροκιβωτίου σε A, επιλέγονται από τις παρακάτω:

100-250-315-400-500-630-800-1000-1250-1600-2000-3150-4000-5000-6300-8000-10000-12500-16000-20000-25000-31500-40000.

#### 1.5.1.3. Πρότυπες τιμές του ονομαστικού θερμικού ρεύματος μικρής διάρκειας ( $I_{th}$ )

Ονομαστικό θερμικό ρεύμα μικρής διάρκειας ονομάζεται η μέση τιμή ενός συμμετρικού ρεύματος το οποίο στο ακροκιβώτιο αντέχει θερμικά για την ονομαστική διάρκεια ( $t_{th}$ ) αμέσως μετά από συνεχή λειτουργία σε ονομαστικό ρεύμα για μέγιστες θερμοκρασίες του ατμοσφαιρικού αέρα.

Η τιμή του **ονομαστικού θερμικού ρεύματος μικρής διάρκειας**  $I_{th}$  πρέπει να είναι 25 φορές της τιμής του  $I_r$ , όπου  $t_{th} = 1$  s. Για ακροκιβώτια με  $I_r$  ίσο ή μεγαλύτερο από 4000 A, το ρεύμα  $I_{th}$  πρέπει να είναι 100 kA.

Για ακροκιβώτια μετασχηματιστή, το  $t_{th}$  πρέπει να είναι 2 s, εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά.

Για  $t_{th} > 1$  s, η σχέση μεταξύ του ρεύματος και του χρόνου είναι η ακόλουθη:

$$I_{th}^2 \times t_{th} = \text{σταθερά} \quad (1.5.1.3.-1)$$

#### 1.5.1.4. Πρότυπες τιμές ονομαστικού δυναμικού ρεύματος ( $I_d$ )

Ονομαστικό δυναμικό ρεύμα ονομάζεται η μέγιστη τιμή ενός ρεύματος το οποίο το ακροκιβώτιο αντέχει μηχανικά.

Οι τιμές του **ονομαστικού δυναμικού ρεύματος**  $I_d$  πρέπει να έχουν πλάτος πρώτης κορυφής 2,5 φορές την τιμή του ρεύματος  $I_{th}$ .

Σε μερικές περιπτώσεις, τιμές μεγαλύτερες από 2,5 φορές την τιμή του ρεύματος  $I_{th}$  πρέπει απαραίτητα να είναι σύμφωνες με τα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή. Ο κατασκευαστής του μετασχηματιστή πρέπει να ορίζει τέτοιες απαιτήσεις στις πληροφορίες παραγγελίας του ακροκιβωτίου.

#### 1.5.1.5. Ελάχιστες τιμές αντοχής φορτίου στήριξης

Τα ακροκιβώτια πρέπει να αντέχουν το φορτίο στήριξης όπως δίνεται στον Πίνακα 1.5-1. Το επίπεδο I επικρατεί, εκτός εάν ο αγοραστής καθορίσει βαρύ φορτίο, επιπέδου II.

#### 1.5.1.6. Γωνία τοποθέτησης

Όλα τα ακροκιβώτια πρέπει να είναι σχεδιασμένα για τοποθέτηση σε οποιαδήποτε γωνία κλίσης, χωρίς αυτή να υπερβαίνει τις 30° από την κάθετο. Οποιαδήποτε άλλη γωνία τοποθέτησης είναι θέμα συμφωνίας μεταξύ αγοραστή και προμηθευτή.

Ένα ακροκιβώτιο που λειτουργεί σε γωνία μεγαλύτερη ή ίση των 30 ° από την κάθετο θεωρείται κατακόρυφο ακροκιβώτιο. Ένα ακροκιβώτιο το οποίο λειτουργεί σε γωνία μεγαλύτερη ή ίση των 70° από την κάθετο θεωρείται οριζόντιο ακροκιβώτιο. Ένα ακροκιβώτιο το οποίο λειτουργεί σε οποιαδήποτε άλλη γωνία θεωρείται κεκλιμένο.

<b>Μέγιστη τάση εξοπλισμού</b> $U_m$ kV	<b>Ονομαστικό ρεύμα</b> A							
	≤800	1000 1600		2000 2500		≥3150		
	<b>Φορτίο στήριξης λειτουργίας</b> N							
	<b>Ακροκιβώτια τοποθετημένα σε γωνία ≤ 30 ° από την κάθετο</b>							
	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>I</b>	<b>II</b>
≤36	500	500	625	625	1000	1000	1575	1575
52	500	800	625	800	1000	1250	1575	1575
72,5 - 100	500	1000	625	1000	1000	1575	2000	2000
123 -145	625	1575	800	1575	1250	2000	2000	2000
170 - 245	625	2000	800	2000	1250	2500	2000	2500
≥300	1250	2000	1250	2000	1575	2500	2500	2500
	<b>Φορτίο στήριξης δοκμής</b> N							
	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>I</b>	<b>II</b>
≤36	1000	1000	1250	1250	2000	2000	3150	3150
52	1000	1600	1250	1600	2000	2500	3150	3150
72,5 - 100	1000	2000	1250	2000	2000	3150	4000	4000
123 -145	1250	3150	1600	3150	2500	4000	4000	4000
170 - 245	1250	4000	1600	4000	2500	5000	4000	5000
≥300	2500	4000	2500	4000	3150	5000	5000	5000

Πίνακας 1.5-1: Ελάχιστες τιμές αντοχής φορτίου στήριξης

#### 1.5.1.7. Ελάχιστο ονομαστικό μήκος ερπυσμού

Το μήκος ερπυσμού για κεραμικά μονωτικά ακροκιβώτια προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$d_{cs} (mm/kV) \times U_m (kV) \times k_D \quad (1.5.1.7.-1)$$

όπου  $d_{cs}$  είναι το ελάχιστο ονομαστικό ειδικό μήκος ερπυσμού, οι τιμές του οποίου για τα διάφορα επίπεδα ρύπανσης είναι:

I	ελαφρύ:	16 mm/kV
II	μεσαίο:	20 mm/kV

III            υψηλό:            25 mm/kV

$k_D$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης και εξαρτάται από τη μέση διάμετρο του μονωτήρα, οι τάξεις του οποίου είναι:

Για διάμετρο:

< 300 mm	$k_D = 1,0$
300 mm έως 500 mm	$k_D = 1,1$
> 500 mm	$k_D = 1,2$

Ο παράγοντας  $D_m$  προσδιορίζεται από το πρότυπο IEC 60815.

#### 1.5.1.8. Όρια και αύξηση θερμοκρασίας

Τα όρια θερμοκρασίας των μεταλλικών μερών σε επαφή με μονωτικά υλικά, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, έχουν ως ακολούθως:

- 105 °C για χαρτί εμποτισμένο με λάδι: Κατηγορία A
- 120 °C για χαρτί εμποτισμένο με ρητίνη και χαρτί με πλέγμα ρητίνης: Κατηγορία E
- 130 °C για μεμβράνη εμποτισμένη με αέριο: Κατηγορία B

Η αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από τη μέγιστη ημερήσια σημαίνει πως η θερμοκρασία περιβάλλοντος (30 °C) του θερμότερου σημείου δεν πρέπει να υπερβαίνει τις τιμές που δίνονται στον Πίνακα 1.5-2. Στην περίπτωση άλλων μονωτικών υλικών, τα θερμοκρασιακά όρια πρέπει να αναφέρονται από τον προμηθευτή.

Για ακροδέκτες ακροκιβωτίων και συνδέσεις, η θερμοκρασιακή αύξηση ομοίως δίνεται στον Πίνακα 1.5-2. Ακροκιβώτια τα οποία χρησιμοποιούνται σαν αναπόσπαστο κομμάτι μιας συσκευής, όπως διακόπτης ή μετασχηματιστής, πρέπει να ακολουθούν τις θερμικές απαιτήσεις της εκάστοτε αναφερθείσας σχετικής συσκευής.

Για συνδέσμους, σε επαφή με μεταλλικά μέρη, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην αντοχή των υλικών αυτών στην αύξηση της θερμοκρασίας.

Περιγραφή του κατασκευαστικού στοιχείου		Μέγιστη θερμοκρασιακή αύξηση K	Μέγιστη Θερμοκρασία °C
Επαφές με ελατήριο	<b>Χαλκός και κράματα χαλκού, χωρίς επικάλυψη</b>		
	σε αέρα	45	75
	σε SF <sub>6</sub>	60	90
	σε έλαιο	50	80
	Επικάλυψη κασσίτερου σε αέρα, SF <sub>6</sub> ή έλαιο	60	90
	<b>Επάργυρο/επινικελωμένο</b>		
	σε αέρα ή SF <sub>6</sub>	75	105
σε έλαιο	60	90	
Βιδωτές επαφές	<b>Χαλκός, αλουμίνιο και τα κράματα τους, χωρίς επικάλυψη</b>		
	σε αέρα	60	90
	σε SF <sub>6</sub>	75	105
	σε έλαιο	70	100
	<b>Επικάλυψη κασσίτερου</b>		
	σε αέρα ή SF <sub>6</sub>	75	105
	σε έλαιο	70	100
	<b>Επάργυρο/επινικελωμένο</b>		
	σε αέρα ή SF <sub>6</sub>	85	115
σε έλαιο	70	100	
Τερματικά που συνδέονται με εξωτερικούς αγωγούς με βίδες ή κοιλίες	<b>Χαλκός, αλουμίνιο και τα κράματα τους</b>		
	χωρίς επικάλυψη	60	90
	επικάλυψη κασσίτερου	75	105
	επάργυρο ή επινικελωμένο	75	105
Μεταλλικά μέρη σε επαφή με	<b>Τάξη Μόνωσης</b>		
	A (OIP)	75	105
	E (RBP και RIP)	90	120
	B (GIF)	100	130
	SF <sub>6</sub>		*καθορίζεται από τον προμηθευτή
Έλαιο			

Πίνακας 1.5-2: Μέγιστες τιμές θερμοκρασίας και άνοδος της θερμοκρασίας πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος

### 1.5.1.9. Πρότυπα επίπεδα μόνωσης

Οι πρότυπες τιμές του επιπέδου μόνωσης ενός ακροκιβωτίου με  $U_m < 300$  kV επιλέγονται από τον Πίνακα 1.5-3.

Οι πρότυπες τιμές του επιπέδου μόνωσης ενός ακροκιβωτίου με  $U_m \geq 300$  kV επιλέγονται από τον Πίνακα 1.5-4.

Μέγιστη τάση εξοπλισμού $U_m$ kV (r.m.s. τιμή)	Κεραυνική κρουστική τάση αντοχής σε ξηρές συνθήκες (BIL) kV (τιμή κορυφής)	Τάση αντοχής συχνότητας ισχύος σε ξηρές και υγρές συνθήκες kV (r.m.s. τιμή)
3,6	40	10
7,2	60	20
12	75	28
17,5	95	38
24	125	50
36	170	70
52	250	95
72,5	325	140
100	380	150
	450	185
123	450	185
	550	230
145	450	185
	550	230
	650	275
170	550	230
	650	275
	750	325
245	650	275
	750	325
	850	360
	950	395
	1050	460

Πίνακας 1.5-3: Πρότυπα επίπεδα μόνωσης για μέγιστη τάση εξοπλισμού  $U_m < 300$  kV

Μέγιστη τάση εξοπλισμού $U_m$ kV (r.m.s. τιμή)	Μεταβατική κρουστική τάση αντοχής σε ξηρές και υγρές συνθήκες (SIL) kV (τιμή κορυφής)	Κεραυνική κρουστική τάση αντοχής σε ξηρές συνθήκες kV (τιμή κορυφής)
300	750	850
		950
300/420	850	950
		1050
362/420	950	1050
		1175
420/550	1050	1175
		1300
		1425
550	1175	1300
		1425
		1550
800	1300	1425
		1550
		1800
	1425	1550
		1800
		2100
	1550	1800
		1950
		2400

Πίνακας 1.5-4: Πρότυπα επίπεδα μόνωσης για μέγιστη τάση εξοπλισμού  $U_m \geq 300$  kV

## 1.5.2. Συνθήκες λειτουργίας

### 1.5.2.1. Προσωρινές υπερφορτίσεις

Η μέγιστη φασική τάση ενός συστήματος μπορεί να ξεπεράσει το  $U_m/\sqrt{3}$ . Για διάρκεια υπερφόρτισης που δεν ξεπερνά τις 8 ώρες σε ένα 24ωρο, και για την οποία η συνολική διάρκεια δεν ξεπερνά τις 125 ώρες το χρόνο, τα ακροκιβώτια πρέπει να μπορούν να λειτουργούν σε φασική τάση:

- $U_m$  για ακροκιβώτια με  $U_m \leq 170$  kV
- $0,8 \cdot U_m$  για ακροκιβώτια με  $U_m > 170$  kV

Για συστήματα στα οποία μπορούν να προκύψουν πολλές υπερφορτίσεις, συστήνεται να επιλέγεται ακροκιβώτιο με μεγαλύτερη  $U_m$ .

### 1.5.2.2. Υψόμετρο εγκατάστασης

Παρόλο που το επίπεδο μόνωσης αναφέρεται στο επίπεδο της στάθμης της θάλασσας, τα ακροκιβώτια είναι κατάλληλα για λειτουργία σε οποιοδήποτε υψόμετρο το οποίο δεν ξεπερνά τα 1000 m. Προκειμένου να επιβεβαιώσουμε πως οι εξωτερικές τάσεις αντοχής ενός ακροκιβωτίου είναι επαρκείς σε υψόμετρα που ξεπερνούν τα 1000 m, το μήκος υπερπήδησης που απαιτείται πρέπει να αυξάνεται καταλλήλως. Δεν είναι απαραίτητο να ρυθμίζεται το ακτινικό πάχος μόνωσης ή ο καθαρισμός του εμβαπτισμένου άκρου. Η αντοχή στη διάτρηση και η τάση υπερπήδησης στο μέσο εμβαπτισμού ενός ακροκιβωτίου δεν επηρεάζονται από το υψόμετρο.

Λόγω των ορίων της αντοχής διάτρησης και της τάσης βραχυκύκλωσης στο μέσο εμβαπτισμού δεν είναι πάντοτε δυνατός ο έλεγχος της επάρκειας του αυξημένου μήκους υπερπήδησης από πραγματικές δοκιμές σε οποιοδήποτε ύψος χαμηλότερο από αυτό της λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση ο προμηθευτής καλείται να αποδείξει την καταλληλότητα του ακροκιβωτίου, από την αύξηση του μήκους υπερπήδησης. Γενικά πρέπει να εφαρμόζεται αύξηση 1% του μήκους υπερπήδησης από τη στάθμη της θάλασσας για κάθε 100 m αύξησης πάνω από τα 1000 m έως κατ' ανώτατο όριο 3000 m πάνω από τη στάθμη της θάλασσας.

Για παράδειγμα για υψόμετρο εγκατάστασης 2800 m, υπολογίζουμε αύξηση μήκους υπερπήδησης:

$$1\% \times \frac{2800m - 1000m}{100m} = 18\%$$

Για υψόμετρα πάνω από 3000 m από το επίπεδο της θάλασσας, οι συντελεστές διόρθωσης συμφωνούνται μεταξύ αγοραστή και προμηθευτή.



### 1.5.2.3. Θερμοκρασία περιβάλλοντος και μέσων βύθισης

Τα ακροκιβώτια πρέπει να είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν σε θερμοκρασίες που δεν υπερβαίνουν τα όρια που δίνονται στον Πίνακα 1.5-5. Προσοχή πρέπει να δοθεί στις συνθήκες λειτουργίας πλήρως εμβαπτισμένων ακροκιβωτίων και ακροκιβωτίων που λειτουργούν σε μονωμένα με αέρα κανάλια. Συγκέντρωση υγρασίας στην επιφάνεια του εσωτερικού μέρους του ακροκιβωτίου πρέπει να προληφθεί, εν ανάγκη με θέρμανση ή αερισμό.

Θέμα	Θερμοκρασία °C
<b>Περιβάλλον αέρας:</b>	
- μέγιστη	40
- μέση μέγιστη ημερήσια (ανοιχτός αέρας)	30
- μέση μέγιστη ημερήσια (μονωμένοι από τον αέρα αγωγοί)	70
- μέση μέγιστη ετήσια	20
- ελάχιστη	
• Εσωτερικού χώρου Κατηγορία 1	-5
Κατηγορία 2	-25
Κατηγορία 3	-40
• Εξωτερικού χώρου Κατηγορία 1	-25
Κατηγορία 2	-40
Κατηγορία 3	-60
<b>Έλαιο σε μετασχηματιστές:</b>	
- μέγιστη	
• για κανονικό φορτίο	100
• για εφεδρεία	115
- μέση μέγιστη ημερήσια	90

Πίνακας 1.5-5: Θερμοκρασία περιβάλλοντος και μέσων βύθισης

### 1.5.3. Δοκιμές τύπου

Η αλληλουχία ή ο δυνατός συνδυασμός των δοκιμών αυτών είναι στην προαίρεση του προμηθευτή, εκτός από τις δοκιμές αντοχής στην κρουστική τάση οι οποίες πρέπει να γίνονται πριν από τις δοκιμές αντοχής τάσης συχνότητας ισχύος σε ξηρές συνθήκες. Πριν και μετά τις δοκιμές τύπου, πρέπει να διενεργούνται μετρήσεις του συντελεστή διηλεκτρικών απωλειών, χωρητικότητας, καθώς και της ποσότητας μερικών εκκενώσεων με σκοπό να ελέγχεται πιθανή πρόκληση βλάβης.

#### 1.5.3.1. Δοκιμή αντοχής τάσης συχνότητας ισχύος σε ξηρές ή υγρές συνθήκες

Η δοκιμή σε ξηρές συνθήκες εφαρμόζεται σε όλα τα ακροκιβώτια τα οποία δεν υποβάλλονται σε δοκιμές σειράς. Η δοκιμή σε υγρές συνθήκες εφαρμόζεται σε όλα τα υπαίθρια ακροκιβώτια, για τα οποία  $U_m < 300$  kV.

Το μέγεθος της τάσης δοκιμής δίνεται στον Πίνακα 1.5-3. Η διάρκεια της δοκιμής πρέπει να είναι 60 s, ανεξάρτητα από τη συχνότητα.

Τα ακροκιβώτια θεωρείται ότι πέρασαν τη δοκιμή εάν δεν συμβεί υπερπήδηση ή διάτρηση. Εάν υπάρξει διάτρηση, το ακροκιβώτιο θεωρείται ότι απέτυχε στη δοκιμή. Για ακροκιβώτια διαβαθμισμένης χωρητικότητας θεωρείται πως έχει συμβεί διάτρηση εάν η μετρούμενη χωρητικότητα μετά τη δοκιμή είναι μεγαλύτερη από την μετρούμενη χωρητικότητα πριν τη δοκιμή, κατά την χωρητικότητα ενός επιπέδου. Εάν συμβεί υπερπήδηση η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί μια φορά ακόμα. Εάν κατά τη διάρκεια της επανάληψης της δοκιμής δεν συμβεί υπερπήδηση ή διάτρηση, τα ακροκιβώτια θεωρείται πως πέρασαν με επιτυχία τη δοκιμή.

#### 1.5.3.2. Δοκιμή αντοχής κεραυνικής κρουστικής τάσης σε ξηρές συνθήκες (BIL)

Η δοκιμή εφαρμόζεται σε όλα τα είδη ακροκιβωτίων. Το μέγεθος της τάσης δοκιμής δίνεται στους Πίνακες 1.5-3 ή 1.5-4. Το ακροκιβώτιο υποβάλλεται διαδοχικά σε:

- 15 πλήρεις κεραυνικούς παλμούς θετικής πολικότητας, ακολουθούμενους από
- 15 πλήρεις κεραυνικούς παλμούς αρνητικής πολικότητας τυπικού κεραυνικού παλμού 1,2/50μs.

Ακροκιβώτια για μετασχηματιστές τάσης με  $U_m \geq 123$  kV πρέπει να υποβάλλονται διαδοχικά σε:

- 15 πλήρεις κεραυνικούς παλμούς θετικής πολικότητας, ακολουθούμενους από
- 1 πλήρη κεραυνικό παλμό αρνητικής πολικότητας, ακολουθούμενο από
- 5 αποκομμένους κεραυνικούς παλμούς αρνητικής πολικότητας και από
- 14 πλήρεις κεραυνικούς παλμούς αρνητικής πολικότητας.

Ο χρόνος έναυσης στη συσκευή αποκοπής πρέπει να είναι μεταξύ 2  $\mu\text{s}$  και 6  $\mu\text{s}$ . Το μέγιστο επίπεδο τάσης πρέπει να είναι 115% της τιμής του πλήρους κύματος. Είναι επιτρεπτό να εφαρμόζονται κάποιοι παλμοί πριν την εφαρμογή των παλμών δοκιμής. Το χρονικό διάστημα μεταξύ των διαδοχικών εφαρμογών της τάσης πρέπει να είναι αρκετό ώστε να αποφεύγονται επιπτώσεις από προηγούμενες εφαρμογές τάσης.

Στην περίπτωση των ακροκιβωτίων για διακόπτη με μόνωση αερίου, ειδικές απαιτήσεις δοκιμών για αποκομμένη κεραυνική δοκιμή πρέπει να συμφωνηθούν μεταξύ αγοραστή και προμηθευτή ώστε να καλυφθεί η συμπεριφορά του ακροκιβωτίου όσον αφορά τις πολύ γρήγορες μεταβατικές υπερτάσεις. Καταγραφή των τάσεων πρέπει να γίνεται για κάθε παλμό.

Τα ακροκιβώτια θεωρείται ότι πέρασαν τη δοκιμή εάν:

- δεν συμβεί διάτρηση σε κάποια από τις πολικότητες και
- ο αριθμός των υπερπηδήσεων στο αέρα δεν ξεπερνά τα δύο για κάθε σειρά από τους 15 παλμούς.

Εκτός εάν πρόκειται για ακροκιβώτια μετασχηματιστών για τα οποία δεν επιτρέπονται:

- υπερπήδηση στο άκρο του ελαίου
- περισσότερες από δυο υπερπηδήσεις στον αέρα σε θετική πολικότητα και
- υπερπήδηση στον αέρα σε αρνητική πολικότητα.

#### **1.5.3.3. Δοκιμή αντοχής μεταβατικής κρουστικής τάσης σε ξηρές ή υγρές συνθήκες (SIL)**

Η δοκιμή αυτή εφαρμόζεται σε όλα τα ακροκιβώτια με  $U_m$  ίση ή μεγαλύτερη από 300 kV. Η δοκιμή σε ξηρές συνθήκες είναι εφαρμόσιμη σε εσωτερικούς χώρους, εσωτερικά εμβαπτισμένα και πλήρως εμβαπτισμένα ακροκιβώτια. Η δοκιμή σε υγρές συνθήκες είναι εφαρμόσιμη σε υπαίθρια ακροκιβώτια. Όταν γίνεται μια δοκιμή σε υγρές συνθήκες, μια δοκιμή σε ξηρές συνθήκες δεν είναι απαραίτητη.

Για να προσομοιώσουμε τις συνθήκες λειτουργίας, το ακροκιβώτιο πρέπει να τοποθετηθεί σε ένα γειωμένο επίπεδο, το οποίο να εκτείνεται ακτινικά από το άξονα του ακροκιβωτίου το λιγότερο  $0,4L$  προς κάθε κατεύθυνση, όπου  $L$ , το μήκος υπερπήδησης του ακροκιβωτίου, σε ξηρές συνθήκες. Η σύνδεση με την υψηλή τάση πρέπει να επεκταθεί σε ευθεία γραμμή από τον άξονα του ακροκιβωτίου σε σημείο  $0,4L$  πάνω από την κορυφή του ακροκιβωτίου. Στην περίπτωση ακροκιβωτίων όπου το ένα άκρο είναι εμβαπτισμένο, οι λεπτομέρειες της εμβάπτισης είναι θέμα συμφωνίας μεταξύ προμηθευτή και κατασκευαστή.

Το μέγεθος της τάσης δοκιμής δίνεται στον Πίνακα 1.5-3. Το ακροκιβώτιο πρέπει να υποβληθεί σε:

- 15 παλμούς θετικής πολικότητας, ακολουθούμενους από
- 15 παλμούς αρνητικής πολικότητας ενός τυπικού μεταβατικού κρουστικού παλμού 250/2500  $\mu\text{s}$ .

Είναι επιτρεπτό να εφαρμόζονται κάποιοι παλμοί πριν την εφαρμογή των παλμών δοκιμής. Το χρονικό διάστημα μεταξύ των διαδοχικών εφαρμογών της τάσης πρέπει να είναι αρκετό ώστε να αποφεύγονται επιπτώσεις από προηγούμενες εφαρμογές τάσης. Καταγραφή των τάσεων πρέπει να γίνεται για κάθε παλμό.

Τα ακροκιβώτια θεωρείται ότι πέρασαν τη δοκιμή εάν:

- δε συμβεί διάτρηση σε κάποια από τις πολικότητες και
- ο αριθμός των υπερπήδησεων στο αέρα, σε οποιαδήποτε πολικότητα, δεν ξεπερνά τους 2 για κάθε σειρά από τους 15 παλμούς.

Εκτός εάν πρόκειται για ακροκιβώτια μετασχηματιστών για τα οποία δεν επιτρέπονται :

- υπερπήδηση στο άκρο του ελαίου
- περισσότερες από δυο υπερπήδησεις στον αέρα σε θετική πολικότητα και
- υπερπήδηση στον αέρα σε αρνητική πολικότητα.

#### 1.5.3.4. Δοκιμή θερμικής σταθερότητας

Η δοκιμή εφαρμόζεται σε όλα τα μερικώς ή πλήρως εμβαπτισμένα ακροκιβώτια. Η κύρια μόνωση αυτών των ακροκιβωτίων αποτελείται από ένα οργανικό υλικό και προορίζεται για συσκευές πλήρεις με ένα μονωτικό μέσο, η θερμοκρασία λειτουργίας των συσκευών αυτών είναι  $\geq 60$  °C και  $U_m > 300$  kV για ακροκιβώτια εμποτισμένα με λάδι και ρητίνη, ή  $U_m \geq 145$  kV για άλλους τύπους ακροκιβωτίων. Η δοκιμή μπορεί ωστόσο να παραληφθεί εάν μπορεί να αποδειχθεί, βάσει αποτελεσμάτων συγκριτικών δοκιμών ή υπολογισμών, ότι η θερμική σταθερότητα του ακροκιβωτίου είναι βέβαιη.

Τα άκρα των ακροκιβωτίων, τα οποία προορίζονται για εμβάπτιση σε έλαιο ή άλλο υγρό μονωτικό μέσο, πρέπει να εμβαπτιστούν σε έλαιο. Η θερμοκρασία του ελαίου πρέπει να διατηρείται στη θερμοκρασία λειτουργίας του ακροκιβωτίου  $\pm 2$  K, εκτός από ακροκιβώτια μετασχηματιστή όπου η θερμοκρασία του ελαίου πρέπει να είναι  $90$  °C  $\pm 2$  °C. Αυτή η θερμοκρασία πρέπει να μετράται από θερμομέτρα, βυθισμένα στο έλαιο 3 cm κάτω από την επιφάνεια, και περίπου 30 cm από το ακροκιβώτιο.

Τα άκρα των ακροκιβωτίων, τα οποία προορίζονται για εμβάπτιση σε αέριο μονωτικό μέσο εκτός του αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση, πρέπει να εμβαπτίζονται κατάλληλα σε μονωτικό αέριο με ελάχιστη πίεση. Το αέριο πρέπει να παραμένει σε θερμοκρασία όπως συμφωνείται μεταξύ αγοραστή και προμηθευτή.

Οι απώλειες του αγωγού αντίστοιχες με το  $I_r$  πρέπει να προσομοιώνονται από κατάλληλα μέσα. Μία μέθοδος είναι να τυλίξουμε ένα μονωμένο καλώδιο με αντίσταση γύρω από τον εικονικό αγωγό και να το τροφοδοτήσουμε με μια κατάλληλη παροχή. Η αντίσταση του καλωδίου και το ρεύμα πρέπει να προσαρμόζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγονται οι ίδιες απώλειες με τον τελευταίο αγωγό. Η τάση δοκιμής πρέπει να είναι:

- $U_m$  για ακροκιβώτια με  $U_m \leq 170$  kV

- $0,8 \cdot U_m$  για ακροκιβώτια με  $U_m < 170$  kV

Η δοκιμή δεν πρέπει να ξεκινήσει έως ότου επιτευχθεί θερμική ισορροπία μεταξύ του ελαίου και του ακροκιβωτίου. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ο συντελεστής διηλεκτρικών απωλειών πρέπει να μετράται συχνά και η θερμοκρασία περιβάλλοντος πρέπει να καταγράφεται σε κάθε μέτρηση.

Το ακροκιβώτιο έχει φθάσει σε θερμική ισορροπία όταν ο συντελεστής διηλεκτρικών απωλειών του δεν δείχνει καμία σημαντική αυξητική τάση σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, για περίοδο 5 ωρών. Το ακροκιβώτιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή εάν φθάσει σε θερμική ισορροπία και στη συνέχεια περάσει δοκιμές διηλεκτρικής αντοχής χωρίς σημαντική αλλαγή από τα προηγούμενα αποτελέσματα.

### 1.5.3.5. Δοκιμή αύξησης θερμοκρασίας

Η δοκιμή εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους ακροκιβωτίων, εξαιρουμένων ακροκιβωτίων μονωμένων με υγρό, εκτός εάν μπορεί να αποδειχθεί με έναν υπολογισμό βασισμένο σε συγκριτικές δοκιμές όπου πληρούνται τα καθορισμένα όρια θερμοκρασίας.

Ακροκιβώτια, ένα ή και τα δύο άκρα των οποίων προορίζονται να εμβαπτιστούν σε έλαιο ή άλλο υγρό μονωτικό μέσο, πρέπει κατάλληλα να εμβαπτιστούν σε έλαιο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, εκτός από ακροκιβώτια μετασχηματιστή, όπου το έλαιο πρέπει να παραμένει σε θερμοκρασία  $60 \text{ K} \pm 2 \text{ K}$  πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σε κάποιες εφαρμογές (π.χ. μετασχηματιστής γεννήτριας), η θερμοκρασία συχνά περιορίζεται σε τιμές χαμηλότερες από τα τυπικά όρια. Κατόπιν συμφωνίας μεταξύ κατασκευαστή και αγοραστή, η θερμοκρασία του ελαίου μπορεί να μειωθεί ώστε να αντικατοπτρίσει την πραγματική θερμοκρασία του μετασχηματιστή.

Ακροκιβώτια με αγωγό στον κεντρικό σωλήνα πρέπει να συναρμολογούνται με έναν κατάλληλο αγωγό, η διατομή του οποίου πρέπει να προσαρμόζεται με το  $I_r$ . Όταν το έλαιο του μετασχηματιστή επικοινωνεί με τον κεντρικό σωλήνα του ακροκιβωτίου, η στάθμη του ελαίου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1/3 του ύψους του εξωτερικού μέρους.

Τα άκρα των ακροκιβωτίων, τα οποία πρόκειται να εμβαπτιστούν σε αέριο μονωτικό μέσο εκτός από τον αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση, πρέπει κανονικά να εμβαπτιστούν κατάλληλα σε μονωμένη κατασκευή με αέριο σε ελάχιστη θερμοκρασία, το αέριο θα πρέπει να βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη της δοκιμής. Ακροκιβώτια μονωμένα με αέριο πρέπει να βρίσκονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη της δοκιμής.

Για ακροκιβώτια μετασχηματιστή τα οποία λειτουργούν σε μονωμένα από τον αέρα κυκλώματα, η πλευρά του αέρα πρέπει να περικλείεται σε κατάλληλο θάλαμο. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ο αέρας στο θάλαμο πρέπει να έχει θερμοκρασία  $40 \text{ K} \pm 2 \text{ K}$  πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, είτε μέσω αυτόνομης θέρμανσης είτε έμμεσα.

Ένας κατάλληλος αριθμός θερμοστοιχείων ή άλλων συσκευών μέτρησης πρέπει, όσο είναι δυνατό, να τοποθετηθεί κατά μήκος του αγωγού του ακροκιβωτίου, του κεντρικού σωλήνα και των άλλων μερών που φέρουν ρεύμα, τόσο της φλάντζας και των άλλων συσκευών στερέωσης, ώστε να καθοριστεί το θερμότερο σημείο των μεταλλικών μερών του ακροκιβωτίου σε επαφή με μονωτικά υλικά με σχετική ακρίβεια.

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος πρέπει να μετράται με θερμόμετρα, με χρονική υστέρηση, τοποθετημένα γύρω από το ακροκιβώτιο σε μεσαίο ύψος και σε απόσταση 1 ή 2 m από αυτό. Ένας ικανοποιητικός βαθμός χρονικής υστέρησης εξασφαλίζεται τοποθετώντας τα θερμόμετρα σε δοχεία γεμάτα με λάδι με όγκο περίπου 0,5 l.

Η θερμοκρασία του ελαίου ή του αερίου πρέπει να μετράται από θερμόμετρα τοποθετημένα σε απόσταση 30 cm από το άκρο του ακροκιβωτίου και στην περίπτωση ελαίου 3 cm πάνω από την επιφάνεια του ελαίου.

Η δοκιμή πρέπει να εκπονείται για  $I_r \pm 2\%$  σε ονομαστική συχνότητα και όλα τα μέρη του ακροκιβωτίου να βρίσκονται ουσιαστικά σε δυναμικό γης. Εάν η συχνότητα της δοκιμής διαφέρει από την ονομαστική συχνότητα, το ρεύμα μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία στις απώλειες.

Προσωρινές εξωτερικές συνδέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για αυτή τη δοκιμή πρέπει να είναι τέτοιων διαστάσεων ώστε να μην ενοχλούν υπερβολικά τη ψύξη του ακροκιβωτίου μετά τη δοκιμή. Αυτές οι συνθήκες υποτίθεται ότι πληρούνται εάν η θερμοκρασιακή αύξηση από το άκρο του ακροκιβωτίου σε ένα σημείο 0,5 m κατά μήκος της σύνδεσης δεν υπερβαίνει τους 2 K.

Η δοκιμή πρέπει να συνεχιστεί έως ότου η θερμοκρασιακή αύξηση σταθεροποιηθεί. Αυτό θεωρείται πως επιτυγχάνεται εάν η θερμοκρασία δεν διαφέρει περισσότερο από  $\pm 2$  K κατά τη διάρκεια 2 ωρών.

Για να αποφύγουμε καταστροφή της μόνωσης στην περίπτωση ακροκιβωτίων με αγωγό ενσωματωμένο στο μονωτικό υλικό, η θερμοκρασία του θερμότερου σημείου πρέπει, σε συμφωνία μεταξύ αγοραστή και προμηθευτή, να προσδιορίζεται ακολούθως:

Η μέγιστη θερμοκρασία αγωγού  $\theta_M$  δίνεται από τις εξισώσεις (1.5.3.5.-1) και (1.5.3.5.-2):

$$\theta_M = \frac{\left[ 3 \left( \frac{R_C}{R_A} \times \frac{1}{a} + \theta_A \right) - \frac{3}{\alpha} - \theta_1 - \theta_2 \right]^2 - [\theta_1 \times \theta_2]}{3 \left[ 2 \left( \frac{R_C}{R_A} \times \frac{1}{a} + \theta_A \right) - \frac{2}{a} - \theta_1 - \theta_2 \right]} \quad (1.5.3.5.-1)$$

$$M = \left[ 3 \left( \frac{R_C}{R_A} \times \frac{1}{a} + \theta_A \right) - \frac{3}{\alpha} - \theta_1 - \theta_2 \right] - \theta_M \quad (1.5.3.5.-2)$$

Εάν το αποτέλεσμα  $M$  της δεύτερης εξίσωσης είναι θετικό, η υψηλότερη θερμοκρασία του αγωγού είναι  $\theta_M$  και βρίσκεται σε κάθε σημείο του αγωγού μεταξύ των δύο άκρων. Εάν το αποτέλεσμα  $M$  είναι αρνητικό ή μηδέν, η υψηλότερη θερμοκρασία του αγωγού είναι ίση με  $\theta_2$ .

Το σημείο του αγωγού με την μεγαλύτερη θερμοκρασία βρίσκεται σε απόσταση  $L_M$  από το ψυχρότερο άκρο.

$$L_M = \frac{L}{1 \pm \sqrt{\frac{\theta_M - \theta_2}{\theta_M - \theta_1}}} \quad (1.5.3.5.-3)$$

όπου:

$\alpha$  είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής της αντίστασης στην οποία μετράται η αντίσταση του αγωγού  $R_A$

$\theta_1$  είναι η μετρούμενη θερμοκρασία στο ψυχρότερο άκρο του αγωγού, σε °C

$\theta_2$  είναι η μετρούμενη θερμοκρασία στο θερμότερο άκρο του αγωγού, σε °C

$\theta_A$  είναι η ενιαία θερμοκρασία αναφοράς του αγωγού, σε °C

$\theta_M$  είναι η μέγιστη θερμοκρασία του αγωγού, σε °C

$L$  είναι το μήκος του αγωγού

$L_M$  είναι η απόσταση του ψυχρότερου άκρου του αγωγού από το σημείο με την υψηλότερη θερμοκρασία

$R_A$  είναι η αντίσταση μεταξύ των άκρων του αγωγού σε ενιαία θερμοκρασία  $\theta_A$

$R_C$  είναι η αντίσταση του αγωγού με  $I_r$  μετά από σταθεροποίηση της θερμοκρασίας.

Το ακροκιβώτιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή εάν τα επιτρεπτά όρια θερμοκρασίας είναι σε συμφωνία με όσα αναφέρονται στο Κεφάλαιο 1.5.1.8. και εάν δεν υπάρξει βλάβη.

### 1.5.3.6. Επαλήθευση αντοχής σε θερμικό ρεύμα μικρής διάρκειας

Ο έλεγχος είναι εφαρμόσιμος σε όλους τους τύπους ακροκιβωτίων. Η ικανότητα των ακροκιβωτίων να αντιστέκονται στις πρότυπες τιμές του  $I_{th}$  πρέπει να αποδεικνύεται από τον ακόλουθο υπολογισμό:

$$\theta_1 = \theta_o + \alpha \frac{I_{th}^2}{S_t \times S_e} \times t_{th} \quad (1.5.3.6.-1)$$

όπου:

$\theta_f$  είναι η τελική θερμοκρασία του αγωγού, σε °C

$\theta_o$  είναι η θερμοκρασία του αγωγού, σε °C, υπό συνθήκες λειτουργίας με  $I_r$  σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 40 °C

$\alpha$  είναι 0.8 (K/s)/(kA/cm<sup>2</sup>)<sup>2</sup> για χαλκό, 1.8 (K/s)/(kA/cm<sup>2</sup>)<sup>2</sup> για αλουμίνιο

$t_{th}$  είναι η ονομαστική διάρκεια όπως καθορίζεται, σε sec

$I_{th}$  είναι η πρότυπη τιμή όπως καθορίζεται παρακάτω, σε kA

$S_e$  είναι η ισοδύναμη διατομή, σε cm<sup>2</sup>, λαμβάνοντας υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο

$S_t$  είναι η συνολική διατομή, σε cm<sup>2</sup> που αντιστοιχεί σε  $I_r$ .

Για διαφορετικά υλικά η τιμή του  $\alpha$  προέρχεται από τον παρακάτω τύπο:

$$a = \frac{\rho}{c \times \delta} \quad (1.5.3.6.-2)$$

όπου:

$\rho$  είναι η ειδική αντίσταση του αγωγού, σε μΩ·cm

$c$  είναι η ειδική θερμότητα του αγωγού, σε J/(g·K)

$\delta$  είναι η πυκνότητα του αγωγού, σε g/cm<sup>3</sup>.

Οι τιμές των  $\rho$ ,  $c$  και  $\delta$ , οι οποίες χρησιμοποιούνται στον τύπο είναι σωστές σε μια μέση θερμοκρασία των 160 °C.

Σε κυκλικούς αγωγούς διαμέτρου  $D$  (cm), η ισοδύναμη διατομή πρέπει να λαμβάνει υπόψη της το επιδερμικό φαινόμενο. Το επιδερμικό φαινόμενο προσδιορίζεται θεωρώντας ένα βάθος διείσδυσης  $d$  του ρεύματος, το οποίο προέρχεται από τον παρακάτω τύπο:

$$d = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{\rho \times 10^3}{f}} \text{ cm} \quad (1.5.3.6.-3)$$



όπου:

$f$  είναι η ονομαστική συχνότητα, σε Hz.

$\Omega_s$  εκ τούτου:

$$S_e = \pi \cdot d \cdot (D - d) \quad (1.5.3.6.-4)$$

Το ακροκιβώτιο θεωρείται πως είναι ικανό να αντέχει την πρότυπη τιμή του  $I_{th}$  εάν η θερμοκρασία  $\theta_f$  δεν υπερβαίνει τους 180 °C. Εάν η υπολογισμένη θερμοκρασία υπερβαίνει αυτό το όριο, η ικανότητα του ακροκιβωτίου να αντέχει την πρότυπη τιμή του  $I_{th}$  πρέπει να αποδειχθεί με δοκιμή. Η δοκιμή πρέπει να διεξαχθεί ως ακολούθως:

- το ακροκιβώτιο μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε θέση
- ρεύμα το λιγότερο της τάξης της ονομαστικής τιμής του  $I_{th}$  και διάρκειας  $t_{th}$  πρέπει να περάσει τον αγωγό, η διατομή του οποίου πρέπει να είναι σύμφωνη με το ονομαστικό ρεύμα  $I_r$ .

Πριν τη δοκιμή, το ακροκιβώτιο πρέπει να φέρει ρεύμα το οποίο να παράγει την ίδια σταθερή θερμοκρασία στον αγωγό, όπως το ονομαστικό ρεύμα σε μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Το ακροκιβώτιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή εάν δεν υπάρχουν ορατές αποδείξεις φθοράς και εάν αντέξει επανάληψη όλων των δοκιμών σειράς χωρίς σημαντική αλλαγή από την προηγούμενη του κατάσταση.

#### 1.5.3.7. Δοκιμή αντοχής σε φορτίο στήριξης

Η δοκιμή είναι εφαρμόσιμη στην πλευρά του αέρα των ακροκιβωτίων. Οι τιμές της δοκιμής πρέπει να είναι σε συμφωνία με τον Πίνακα 1.5-1. Οι τιμές δοκιμής αντοχής σε φορτίο στήριξης πρέπει να περιορίζονται σε:

300 N για  $I_r \leq 800A$

1000 N για  $I_r > 800A$

Το ακροκιβώτιο πρέπει να είναι πλήρως συναρμολογημένο και εάν είναι εφαρμόσιμο, πλήρες με το μονωτικό μέσο που ορίζεται. Εκτός εάν αναφέρεται διαφορετικά, το ακροκιβώτιο πρέπει να τοποθετείται κάθετα και η φλάντζα του σταθερά στερεωμένη σε κατάλληλη συσκευή.

Πίεση ίση με 1 bar  $\pm$  0,1 bar πάνω από τη μέγιστη πίεση λειτουργίας πρέπει να εφαρμόζεται στο εσωτερικό του ακροκιβωτίου και επίσης στο εσωτερικό του κεντρικού

σωλήνα στην περίπτωση ακροκιβωτίου με κοίλο στέλεχος με κοινή φλάντζα στον ακροδέκτη που πρόκειται να δοκιμαστεί.

Για ακροκιβώτια με εσωτερικούς φυσητήρες η πίεση πρέπει να καθορίζεται από τον προμηθευτή.

Το φορτίο πρέπει να εφαρμόζεται κάθετα στον άξονα του ακροκιβωτίου στο μέσον του άκρου για 60 s. Το φορτίο πρέπει να είναι σε τέτοια κατεύθυνση ώστε να προκαλείται η μέγιστη πίεση στα κρίσιμα σημεία του ακροκιβωτίου σε κανονική λειτουργία.

Για ακροκιβώτια με περισσότερα από ένα άκρα στο αέρα είναι αρκετό να εφαρμόζεται το φορτίο στο ένα άκρο μόνο.

Για ακροκιβώτια τοίχου η δοκιμή φορτίου πρέπει να εφαρμόζεται σε κάθε άκρο του ακροκιβωτίου χωριστά.

Το ακροκιβώτιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή εάν δεν υπάρξουν φθορές (παραμόρφωση, ρήξη ή διαρροή) και εάν αντέξει επανάληψη όλων των δοκιμών σειράς χωρίς σημαντική αλλαγή από τα προηγούμενα αποτελέσματα.

#### **1.5.3.8. Δοκιμή στεγανότητας σε ακροκιβώτια με πλήρωση υγρού, με πλήρωση κάποιας χημικής ένωσης και ακροκιβώτια με υγρό μονωτικό μέσο**

Αυτή η δοκιμή είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα ακροκιβώτια με πλήρωση υγρού, με πλήρωση κάποιας χημικής ένωσης και ακροκιβώτια με υγρό μονωτικό, εκτός από εκείνα τα ακροκιβώτια όπου το ιξώδες είναι μεγαλύτερο των  $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  σε  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Το ακροκιβώτιο πρέπει να είναι πλήρως συναρμολογημένο όπως σε κανονική λειτουργία, πλήρες με το μονωτικό μέσο που ορίζεται και τοποθετημένο σε κατάλληλα θερμαινόμενο θάλαμο, όπου η θερμοκρασία διατηρείται στους  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  για 12 h. Για ακροκιβώτια όπου αυτό δεν είναι δυνατόν θα πρέπει να συμφωνούνται εναλλακτικοί τρόποι μεταξύ αγοραστή και προμηθευτή.

Ελάχιστη πίεση ίση με  $1 \text{ bar} \pm 0,1 \text{ bar}$ , πάνω από τη μέγιστη πίεση λειτουργίας, πρέπει να εφαρμόζεται στο εσωτερικό του ακροκιβωτίου καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

Το ακροκιβώτιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή εάν δεν υπάρξει διαρροή.

#### **1.5.3.9. Δοκιμή εσωτερικής πίεσης σε ακροκιβώτια με πλήρωση αερίου, εμποτισμένα με αέριο και ακροκιβώτια με αέριο μονωτικό μέσο**

Αυτή η δοκιμή είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα ακροκιβώτια με πλήρωση αερίου, εμποτισμένα με αέριο και ακροκιβώτια με αέριο μονωτικό μέσο, όπου ο μονωμένος θάλαμος είναι από κεραμικό ή συνθετικό υλικό και προορίζεται για χρήση σε μόνιμη πίεση  $> 0,5 \text{ bar}$ , έχοντας εσωτερικό όγκο  $\geq 11 (1000 \text{ cm}^3)$ .

Η μέθοδος εκπονείται στον μονωμένο θάλαμο σύμφωνα με το IEC 61462 ή το IEC 62155 όπου αυτό είναι κατάλληλο. Ο μονωμένος θάλαμος πρέπει να είναι εξοπλισμένος με συσκευές και εξαρτήματα συγκράτησης ιδανικά για την προβλεπόμενη δοκιμή και με πρόσθετες βαλβίδες και μετρητές πίεσης για τη δοκιμή. Ο μονωτήρας πρέπει να είναι πλήρης με κατάλληλο μέσο. Η πίεση πρέπει να αυξάνει σταθερά χωρίς να δημιουργείτε κάποια απότομη μεταβολή.

Το ακροκιβώτιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή εάν δεν υπάρχουν ρωγμές, τόσο στο κεραμικό όσο και στο συνθετικό μέρος αλλά και στα εξαρτήματα. Όπου δεν υπάρχουν τα παραπάνω, η δοκιμή θεωρείται επιτυχής και αν ακόμα τα εξαρτήματα έχουν υποστεί πίεση πέραν του σημείου διαρροής τους.

#### **1.5.3.10. Δοκιμή εξωτερικής πίεσης σε μερικώς ή πλήρως εμβαπτισμένα σε αέριο ακροκιβώτια**

Η δοκιμή είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα ακροκιβώτια εμβαπτισμένα σε αέριο, τα οποία προορίζονται για χρήση σε μόνιμη πίεση  $> 0,5$  bar. Η δοκιμή εκπονείται πριν τη δοκιμή στεγανότητας. Το ακροκιβώτιο πρέπει να είναι συναρμολογημένο όσο απαιτείται για τη δοκιμή αλλά δεν θα πρέπει να υπάρχει κάποια εσωτερική πίεση. Το άκρο προς εμβάπτιση πρέπει να τοποθετηθεί σε μια δεξαμενή όπως για κανονική λειτουργία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η δεξαμενή πρέπει να είναι πλήρης με κατάλληλο υγρό. Πίεση τρεις φορές της μέγιστης εξωτερικής πίεσης λειτουργίας πρέπει να εφαρμοστεί για 1 min.

Το ακροκιβώτιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή εάν δεν υπάρξει μηχανική φθορά (π.χ. παραμόρφωση, ρήξη).

#### **1.5.3.11. Επαλήθευση των διαστάσεων**

Η επαλήθευση είναι εφαρμόσιμη σε όλους τους τύπους ακροκιβωτίων. Οι διαστάσεις του ακροκιβωτίου υπό δοκιμή πρέπει να είναι σε συμφωνία με τα σχετικά σχεδιαγράμματα, ιδιαίτερα σε σχέση με διαστάσεις όπου ισχύουν ειδικές αντοχές και λεπτομέρειες που επηρεάζουν την εναλλαξιμότητα.

#### 1.5.4. Δοκιμές σειράς

Η σειρά και ο πιθανός συνδυασμός αυτών των δοκιμών είναι στην διακριτική ευχέρεια του προμηθευτή, εκτός εάν οι δοκιμές σειράς περιλαμβάνουν δοκιμές αντοχής σε παλμούς τάσης, οι οποίες πρέπει να πραγματοποιούνται πριν τις δοκιμές αντοχής τάσης συχνότητας ισχύος σε ξηρές συνθήκες. Πριν και μετά τις διηλεκτρικές δοκιμές σειράς πρέπει να διεξάγονται μετρήσεις του συντελεστή διηλεκτρικών απωλειών ( $\tan\delta$ ) και της χωρητικότητας, ούτως ώστε να εξακριβώνεται πιθανή εκδήλωση φθοράς. Οι μετρήσεις της ποσότητας των μερικών εκκενώσεων πρέπει να γίνονται πριν τη μέτρηση του συντελεστή  $\tan\delta$ .

##### 1.5.4.1. Μετρήσεις του συντελεστή διηλεκτρικών απωλειών ( $\tan\delta$ ) και χωρητικότητας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

Οι μετρήσεις αυτές είναι εφαρμόσιμες μόνο σε ακροκιβώτια διαβαθμισμένης χωρητικότητας. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ο αγωγός του ακροκιβωτίου δεν πρέπει να διαρρέεται από ρεύμα. Οι μετρήσεις πρέπει να διεξάγονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μεταξύ 10 έως 40 °C μέσω γέφυρας Schering ή άλλου παρόμοιου εξοπλισμού, το λιγότερο σε :

- $1,05 U_m/\sqrt{3}$  για ακροκιβώτια με  $U_m \leq 36$  kV
- $1,05 U_m/\sqrt{3}$  και  $U_m$  για ακροκιβώτια με  $U_m \geq 52$  kV

Οι μετρήσεις δεν πρέπει να γίνονται σε τάση η οποία υπερβαίνει την τάση αντοχής συχνότητας ισχύος σε ξηρές συνθήκες.

Μια μέτρηση του συντελεστή  $\tan\delta$  και της χωρητικότητας σε τάση μεταξύ 2 kV και 20 kV πρέπει να διεξάγεται ως αναφορά τιμής για μετρήσεις οι οποίες διεξάγονται αργότερα, όταν το ακροκιβώτιο είναι σε λειτουργία. Οι μέγιστες αποδεκτές τιμές του συντελεστή  $\tan\delta$  καθώς και η αύξηση του με τάση δίνονται στον Πίνακα 1.5-6. Εάν οι τιμές δεν είναι αποδεκτές επιτρέπεται αναμονή μιας ώρας πριν επαναληφθεί η δοκιμή. Η πραγματική θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της μέτρησης πρέπει να δηλώνεται στην αναφορά της δοκιμής.

Τύποι μόνωσης ακροκιβωτίου	Μέγιστη τιμή tanδ	
	Τιμή για $1,05 U_m/\sqrt{3}$	Αύξηση μεταξύ $1,05 U_m/\sqrt{3}$ και $U_m^a$
Χαρτί εμποτισμένο σε λάδι	0,007	0,001
Χαρτί εμποτισμένο σε ρυτίνη	0,007	0,001
Χαρτί με πλέγμα ρητίνης	0,015	0,004
Μεμβράνη εμποτισμένη με αέριο	0,005	0,001
Αέριο	0,005	0,001
Χυτή η μορφοποιημένη ρητίνη	0,015	0,004
Συνδυασμένος		<sup>β</sup>
Άλλος		<sup>β</sup>
<sup>α</sup> Μη εφαρμόσιμη σε ακροκιβώτα όπου $U_m \leq 36\text{kV}$		
<sup>β</sup> Ο προμηθευτής πρέπει να υποδεικνύει τις τιμές		

Πίνακας 1.5-6: Μέγιστες τιμές tanδ και αύξηση του tanδ

#### 1.5.4.2. Δοκιμή αντοχής σε κεραυνική κρουστική τάση σε ξηρές συνθήκες (BIL)

Η δοκιμή αυτή ως δοκιμή σειράς είναι εφαρμόσιμη μόνο σε ακροκιβώτια μετασχηματιστών με επίπεδο κεραυνικού παλμού  $\geq 850 \text{ kVp}$ . Πρέπει να εφαρμοστούν:

- 5 πλήρεις κεραυνικοί παλμοί αρνητικής πολικότητας ή με συμβατική συμφωνία
- 3 πλήρεις κεραυνικοί παλμοί αρνητικής πολικότητας και
- 2 αποκομμένοι κεραυνικοί παλμοί αρνητικής πολικότητας.

Ισχύουν οι συνθήκες και τα κριτήρια της αντίστοιχης δοκιμής τύπου όπως αυτά αναφέρονται στην Παράγραφο 1.5.3.2.

#### 1.5.4.3. Δοκιμή αντοχής τάσης συχνότητας ισχύος σε ξηρές συνθήκες

Η δοκιμή είναι εφαρμόσιμη σε όλους τους τύπους ακροκιβωτίων. Για ακροκιβώτια με μόνωση αερίου, τα οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως αναπόσπαστο κομμάτι κάποιας συσκευής, μονωμένης με αέριο, όπου το αέριο περιεχόμενο είναι κοινό με εκείνο του ακροκιβωτίου, η δοκιμή πρέπει να είναι μόνο δοκιμή τύπου, υπό την προϋπόθεση ότι το μονωμένο περίβλημα του ακροκιβωτίου έχει γίνει αντικείμενο επαρκούς ηλεκτρικής δοκιμής (π.χ. δοκιμή τοιχώματος της πορσελάνης) πριν τη συναρμολόγηση.

Η δοκιμή πρέπει να γίνει ή να επαναληφθεί μετά από κάθε δοκιμή αντοχής κρουστικής τάσης, εάν απαιτείται σε μια σειρά δοκιμών. Το μέγεθος της τάσης δοκιμής δίνεται στους Πίνακες 1.5-3 και 1.5-7.

Ακροκιβώτια για μετασχηματιστές πρέπει να υπόκεινται σε δοκιμές το λιγότερο 10% πάνω από το επαγόμενο και/ή εφαρμοσθέν επίπεδο τάσης δοκιμής του μετασχηματιστή. Το επίπεδο αυτό δεν πρέπει να είναι χαμηλότερο από τις τιμές των Πινάκων 1.5-3 και 1.5-7. Εάν η πληροφορία επιπέδου δοκιμής του μετασχηματιστή δεν παρέχεται από τον αγοραστή, το επίπεδο δοκιμής για το ακροκιβώτιο πρέπει να είναι σε συμφωνία με του Πίνακες 1.5-3 και 1.5-7. Η διάρκεια της δοκιμής πρέπει να είναι 60 s ανεξάρτητα από την συχνότητα.

Το ακροκιβώτιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή εάν δεν προκύψουν υπερπήδηση ή διάτρηση. Εάν προκύψει διάτρηση το ακροκιβώτιο θεωρείται πως έχει αποτύχει στη δοκιμή. Για ακροκιβώτια διαβαθμισμένης χωρητικότητας υποτίθεται πως έχει προκληθεί διάτρηση εάν η μετρούμενη χωρητικότητα μετά τη δοκιμή ξεπερνά τη χωρητικότητα ενός επιπέδου. Εάν προκύψει υπερπήδηση, η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί μια φορά ακόμη. Εάν κατά τη διάρκεια της επανάληψης δεν προκύψουν υπερπήδηση ή διάτρηση το ακροκιβώτιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή.

Τάση αντοχής σε ξηρή κεραμική κρουστική τάση kV (τιμή κορυφής)	Τάση αντοχής ξηρής συχνότητας kV (μέση τιμή)
850	360
950	395
1050	460
1175	510
1300	570
1425	630
1550	680
1800	790
1950	830
2100	880
2400	975
Σημείωση: Εφίσταται προσοχή σε ειδικές απαιτήσεις για ακροκιβώτια μετασχηματιστών σχετικά με τάση αντοχής συχνότητας ισχύος σε ξηρές συνθήκες .	

Πίνακας 1.5-7: Δοκιμή αντοχής τάσης συχνότητας ισχύος σε ξηρές συνθήκες για μέγιστες τάσεις εξοπλισμού  $\geq 300$  kV

#### 1.5.4.4. Μετρήσεις ποσότητας μερικών εκκενώσεων

Η μέτρηση πρέπει να διεξάγεται σε όλους τους τύπους ακροκιβωτίων, εκτός από τα ακροκιβώτια στα οποία η κύρια μόνωση αποτελείται από αέριο, κεραμικό, γυαλί ή άλλο ανόργανο υλικό, και για τα οποία αυτή η δοκιμή πρέπει να είναι μόνο δοκιμή τύπου, υπό την προϋπόθεση ότι το μονωμένο περίβλημα του ακροκιβωτίου έχει γίνει αντικείμενο επαρκούς ηλεκτρικής δοκιμής (π.χ. δοκιμή τοιχώματος της πορσελάνης) πριν τη συναρμολόγηση.

Εκτός εάν δηλώνεται διαφορετικά, τα στοιχεία του κυκλώματος δοκιμής πρέπει να είναι τέτοιου θορύβου και ευαισθησίας στο μετρούμενο κύκλωμα ώστε η ποσότητα των μερικών εκκενώσεων να είναι 5 pC ή ίση με το 20% της ποσότητας των μερικών εκκενώσεων που πρόκειται να ανιχνευθούν.

Η μέτρηση πρέπει να γίνεται μετά την δοκιμή αντοχής τάσης συχνότητας ισχύος σε ξηρές συνθήκες στις τιμές που δίνονται στον Πίνακα 1.5-8, κατά τη διάρκεια της μείωσης της τάσης από το επίπεδο της τάσης δοκιμής συχνότητας ισχύος σε ξηρές συνθήκες, ανάλογα με τις εγκαταστάσεις δοκιμής, το επίπεδο τάσης μπορεί να μειωθεί σε  $2U_m/\sqrt{3}$  ύστερα από συμφωνία μεταξύ κατασκευαστή και αγοραστή.

Η μέγιστη αποδεκτή τιμή των μερικών εκκενώσεων, σύμφωνα με τον τύπο του ακροκιβωτίου μετά την τελευταία διηλεκτρική δοκιμή, ακολουθεί τον Πίνακα 1.5-8. Όταν οι μετρούμενες τιμές μερικών εκκενώσεων είναι μεγαλύτερες από αυτές που υποδεικνύονται στον Πίνακα 1.5-8, ο προμηθευτής μπορεί να επεκτείνει την δοκιμή πέραν της μίας ώρας, για να ελέγξει εάν οι τιμές επιστρέφουν στα αποδεκτά όρια. Εάν οι μερικές εκκενώσεις στο τέλος της δοκιμής είναι μεταξύ των ορίων, το ακροκιβώτιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή.

Οι μετρήσεις της ποσότητας των μερικών εκκενώσεων ακολουθούν τις διηλεκτρικές δοκιμές. Προηγούνται μόνο για πληροφοριακούς λόγους.

Τύποι μόνωσης ακροκιβωτίου	Μέγιστο επίπεδο μερικών εκκενώσεων (pC)		
	Um <sup>a</sup>	1,5 Um/ $\sqrt{3}$ <sup>b</sup>	1,05 Um/ $\sqrt{3}$
Χαρτί εμποτισμένο σε λάδι	10	10	5
Χαρτί εμποτισμένο σε ρητίνη	10	10	5
Χαρτί που οριοθετείται με ρητίνη <sup>γ</sup>	-	250	100
-με μεταλλικές στρώσεις	ο	ο	300
Μεμβράνη εμποτισμένη με αέριο	10	10	5
Αέριο	-	10	5
Χυτή η μορφοποιημένη ρητίνη	-	10	5
Συνδυασμένος		ο	
Άλλος		ο	
<sup>a</sup> Εφαρμόσιμο μόνο σε ακροκιβώτια μετασχηματιστή.			
<sup>b</sup> Για ακροκιβώτια διακόπτη, οι ποσότητες των εκκενώσεων μπορούν να μετρηθούν σε χαμηλότερες τάσεις, βασιζόμενοι σε συμφωνία μεταξύ αγοραστή και προμηθευτή.			
<sup>γ</sup> Για ακροκιβώτια με μόνωση από χαρτί που οριοθετείται με ρητίνη για χρήση σε μετασχηματιστές ισχύος, χαμηλότερες ποσότητες εκκενώσεων μπορούν να συμφωνηθούν μεταξύ αγοραστή και προμηθευτή.			
<sup>δ</sup> Οι μέγιστες αποδεκτές τιμές ποσότητας εκκενώσεων είναι θέμα συμφωνίας μεταξύ αγοραστή και προμηθευτή.			

Πίνακας 1.5-8: Μέγιστες τιμές ποσότητας μερικών εκκενώσεων

#### 1.5.4.5. Δοκιμές μόνωσης συνδέσεων

Οι παρακάτω τιμές με αναφορά τη γη πρέπει να εφαρμόζονται σε όλες τις συνδέσεις:

- δοκιμή σύνδεσης μετρήσεων, το λιγότερο 2 kV
- δοκιμή σύνδεσης αισθητήρα τάσης, δύο φορές την ονομαστική τάση του αισθητήρα τάσης, αλλά τουλάχιστον 20 kV.

Η διάρκεια της δοκιμής είναι 60 s, ανεξάρτητα από τη συχνότητα. Μετά τη δοκιμή πρέπει να μετρηθούν το λιγότερο για 1 kV ο συντελεστής tanδ και η χωρητικότητα προς γη.

Η σύνδεση θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή εάν δεν προκύψει υπερπήδηση ή διάτρηση.



#### **1.5.4.6. Δοκιμή εσωτερικής πίεσης σε ακροκιβώτια με πλήρωση αερίου, εμποτισμένα με αέριο και μονωμένα με αέριο**

Η δοκιμή είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα ακροκιβώτια με πλήρωση αερίου, καθώς και τα εμποτισμένα και μονωμένα με αέριο ακροκιβώτια.

Το ακροκιβώτιο, πλήρες όπως για κανονική λειτουργία, πρέπει να είναι γεμάτο με αέριο σύμφωνα με την επιλογή του προμηθευτή. Πίεση της τάξης του 1,5 φορές της μέγιστης πίεσης λειτουργίας  $\pm 0,1$  bar πρέπει να παράγεται στο εσωτερικό του ακροκιβωτίου και να διατηρείται για 15 min σε θερμοκρασία δωματίου.

Στην περίπτωση ακροκιβωτίου όπου το μονωμένο περίβλημα κατασκευάζεται από κεραμικό ή συνθετικό υλικό και προορίζεται να λειτουργεί υπό πίεση, το μη συναρμολογημένο μονωτικό περίβλημα πρέπει προηγουμένως να έχει υποστεί δοκιμές σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62155 ή το IEC 61462, κατάλληλα. Τα υπόλοιπα εξαρτήματα πρέπει να υποστούν δοκιμές σύμφωνα με τα κατάλληλα πρότυπα.

Το ακροκιβώτιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή εάν δεν υπάρξει μηχανική φθορά (π.χ. παραμόρφωση, ρήξη).

#### **1.5.4.7. Δοκιμή στεγανότητας σε ακροκιβώτια με πλήρωση υγρού, με πλήρωση κάποιας χημικής ένωσης και ακροκιβώτια μονωμένα με υγρό**

Η δοκιμή είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα ακροκιβώτια με υγρό περιεχόμενο ή χημική ένωση και μονωμένα με υγρό ακροκιβώτια, εκτός από εκείνα τα ακροκιβώτια στα οποία το υγρό περιεχόμενο έχει ιξώδες  $\geq 5 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s σε 20 °C.

Το ακροκιβώτιο πρέπει να είναι συναρμολογημένο όπως για κανονική λειτουργία, γεμάτο με το υγρό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όχι μικρότερη από 10 °C, εκτός από τα ακροκιβώτια για μετασχηματιστές, τα οποία πρέπει να περιέχουν υγρό με μέγιστη θερμοκρασία 60 °C. Πίεση της τάξης του 1 bar  $\pm 0,1$  bar πάνω από τη μέγιστη πίεση λειτουργίας πρέπει να επικρατεί στο εσωτερικό του ακροκιβωτίου, όσο αυτό είναι δυνατό, και να διατηρείται το λιγότερο για 12 ώρες. Για ακροκιβώτια με εσωτερικούς φυσητήρες η πίεση πρέπει να ορίζεται από τον προμηθευτή.

Το ακροκιβώτιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή εάν δεν υπάρξει διαρροή. Είναι σκόπιμο να διενεργηθεί προκαταρκτική δοκιμή στεγανότητας σε εξαρτήματα για τα οποία η δοκιμή θεωρείται χρήσιμη. Ειδική θεώρηση είναι απαραίτητη για ακροκιβώτια για τα οποία ένα ή δυο εκ των άκρων τους προορίζονται για βύθιση σε αέριο μέσο.

#### **1.5.4.8. Δοκιμή στεγανότητας σε ακροκιβώτια με πλήρωση αερίου, μονωμένα με αέριο και εμποτισμένα με αέριο**

Η δοκιμή είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα ακροκιβώτια με πλήρωση αερίου, μονωμένα με αέριο και εμποτισμένα με αέριο ακροκιβώτια. Για ακροκιβώτια μονωμένα με αέριο, τα οποία προορίζονται να αποτελέσουν αναπόσπαστο κομμάτι μονωμένου από

τον αέρα εξοπλισμού και του οποίου η συναρμολόγηση πρόκειται να γίνει επί τόπου, επιτρέπεται να αντικαθίσταται η δοκιμή στεγανότητας στο συναρμολογημένο ακροκιβώτιο από μια δοκιμή στεγανότητας σε κάθε εξάρτημα συμπληρωμένη από μια δοκιμή στεγανότητας σε κάθε διάταξη στεγανοποίησης. Η διάταξη στεγανοποίησης πρέπει να συμφωνείται μεταξύ αγοραστή και προμηθευτή.

Τα ακροκιβώτια πρέπει να συναρμολογούνται όπως σε κανονική λειτουργία και να περιέχουν αέριο σε μέγιστη πίεση λειτουργίας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το ακροκιβώτιο πρέπει να εσωκλείεται σε περίβλημα όπως για παράδειγμα μια πλαστική τσάντα. Η συγκέντρωση του αερίου στον αέρα μέσα στο περίβλημα πρέπει να μετράται δυο φορές σε χρονικό διάστημα  $\geq 2$  ωρών.

Εναλλακτικές μέθοδοι ανίχνευσης διαρροής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συμφωνία μεταξύ αγοραστή και προμηθευτή. Είναι σκόπιμο να διενεργηθεί προκαταρκτική δοκιμή στεγανότητας σε εξαρτήματα για τα οποία η δοκιμή θεωρείται χρήσιμη.

Το ακροκιβώτιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή εάν η υπολογιζόμενη διαφυγή αέρα είναι ίση ή μικρότερη από το 0,5% ανά έτος του ισοδύναμου ποσού του αερίου το οποίο περιέχεται μέσα στο ακροκιβώτιο.

#### **1.5.4.9. Δοκιμή στεγανότητας στη φλάντζα ή σε άλλη διάταξη στερέωσης**

Η δοκιμή είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα μερικώς ή πλήρως εμβαπτισμένα ακροκιβώτια τα οποία προορίζονται να χρησιμοποιηθούν ως αναπόσπαστο κομμάτι μιας συσκευής όπως διακόπτης ή μετασχηματιστές, όπου τα ακροκιβώτια συμβάλουν στη στεγανοποίηση της πλήρους συσκευής.

Η δοκιμή πρέπει να είναι δοκιμή τύπου μόνο στην περίπτωση ακροκιβωτίων με συνδέσμους των οποίων η τελική τοποθέτηση δεν γίνεται από τον προμηθευτή.

Η δοκιμή μπορεί να παραληφθεί για ακροκιβώτια μετασχηματιστή εξοπλισμένα με ένα μέρος μεταλλικής φλάντζας, υπό την προϋπόθεση ότι η φλάντζα έχει γίνει αντικείμενο προκαταρκτικής δοκιμής στεγανότητας και το ακροκιβώτιο έχει περάσει τη δοκιμή σύμφωνα με την Παράγραφο 1.5.3.8 ή τη δοκιμή σειράς σύμφωνα με την Παράγραφο 1.5.4.7 ή το άκρο που πρόκειται να εμβαπτιστεί δεν περιλαμβάνει κάποιον σύνδεσμο.

Το ακροκιβώτιο θα πρέπει να συναρμολογηθεί τουλάχιστον στο βαθμό που απαιτείται για τη δοκιμή. Το άκρο για εμβάπτιση πρέπει να τοποθετηθεί σε μια δεξαμενή όπως σε κανονική λειτουργία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Για ακροκιβώτια εμβαπτισμένα σε λάδι, η δεξαμενή πρέπει να είναι γεμάτη αέρα ή κάποιο κατάλληλο αέριο σε πίεση ανάλογη των  $1,5 \text{ bar} \pm 0,1 \text{ bar}$  και να διατηρείται σε αυτή για 15 min ή με έλαιο σε πίεση ανάλογη των  $1 \text{ bar} \pm 0,1 \text{ bar}$  η οποία να διατηρείται για 12 h.

Για ακροκιβώτια εμβαπτισμένα σε αέριο η δεξαμενή πρέπει να είναι γεμάτη με αέριο σε μέγιστη πίεση λειτουργίας, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το εξωτερικό

κομμάτι του ακροκιβωτίου πρέπει να περικλείεται σε περίβλημα όπου αυτό απαιτείται. Ακροκιβώτια τα οποία περιέχουν υγρό πρέπει να παραμένουν άδεια και να έχουν ένα άνοιγμα για ελεύθερη κυκλοφορία αέρα εντός του περιβλήματος. Η συγκέντρωση αερίου στον αέρα μέσα στο περίβλημα πρέπει να μετράται δυο φορές σε διάστημα ίσο ή μεγαλύτερο των δυο ωρών.

Ένα ακροκιβώτιο εμβαπτισμένο σε έλαιο θεωρείται πως πέρασε τη δοκιμή εάν δεν υπάρχει διαρροή ανιχνεύσιμη με οπτική επιθεώρηση. Ακροκιβώτια εμβαπτισμένα σε αέριο θεωρούνται πως πέρασαν τη δοκιμή, εάν:

- για όλα τα μέρη του ακροκιβωτίου όπου το διαρρέον αέριο διαφεύγει κατευθείαν στο περιβάλλον, το υπολογιζόμενο συνολικό διαφεύγον αέριο είναι ίσο ή μικρότερο από το 0,5% ανά έτος, του ποσού του αερίου το οποίο περιέχεται σε παρακείμενο θάλαμο διακόπτη
- για όλα τα μέρη ενός ακροκιβωτίου με υγρό περιεχόμενο, ιδιαίτερα για μονωμένα από υγρό ακροκιβώτια και για ακροκιβώτια ελαιο-εμβαπτισμένου χάρτου, όπου το διαρρέον αέριο διαπερνά στο εσωτερικό του ακροκιβωτίου, ο υπολογιζόμενος ρυθμός συνολικής διαρροής είναι ίσος ή μικρότερος από  $0,05 \text{ Pa} \times \text{cm}^3/\text{s} \times l$  ( $5 \times 10^{-7} \text{ bar} \times \text{cm}^3/\text{s} \times l$ ) όπου  $l$  είναι η ποσότητα του υγρού στο εσωτερικό του ακροκιβωτίου, σε λίτρα
- για όλα τα μέρη του ακροκιβωτίου, το άλλο άκρο του οποίου σχεδιάζεται για μετασχηματιστή, όπου το διαρρέον αέριο διεισδύει απευθείας στον μετασχηματιστή, ο υπολογιζόμενος ρυθμός συνολικής διαρροής είναι ίσος ή μικρότερος από  $10 \text{ Pa} \times \text{cm}^3/\text{s}$  ( $10^{-4} \text{ bar} \times \text{cm}^3/\text{s}$ ).

#### **1.5.4.10. Οπτική επιθεώρηση και έλεγχος διαστάσεων**

Η επιθεώρηση εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους ακροκιβωτίων και πρέπει να υποβάλλονται σε αυτή ολοκληρωμένα ακροκιβώτια πριν τη διάθεση στον καταναλωτή. Η οπτική επιθεώρηση πρέπει να γίνεται σε κάθε ακροκιβώτιο. Δεν επιτρέπονται ατέλειες στην επιφάνεια, οι οποίες θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ικανοποιητική απόδοση σε λειτουργία. Οι διαστάσεις εξαρτημάτων για συναρμολόγηση και διασύνδεση πρέπει να είναι σύμφωνα με το σχετικά σχέδια και ελέγχονται δειγματοληπτικά.

## 2. Σκοπός της εργασίας

Όταν εκδηλώνεται μία πυρκαγιά στην ύπαιθρο υπάρχει σχεδόν πάντοτε πλησίον της μία γραμμή της εταιρείας ηλεκτρισμού. Αυτό είναι φυσικό, αφού σχεδόν σε κάθε δρόμο αλλά και γενικότερα σχεδόν παντού σε καλλιεργήσιμες και μη εκτάσεις υπάρχουν δίκτυα. Γεννάται συνεπώς το εύλογο ερώτημα κατά πόσο μία γραμμή διανομής μέσης τάσης μπορεί να υπήρξε η αιτία της πυρκαγιάς ή αν η πυρκαγιά προήλθε από άλλη αιτία και προκάλεσε ζημιές και στο δίκτυο ηλεκτρισμού. Για την απάντηση στο παραπάνω ερώτημα θα πρέπει να εξεταστούν οι θερμικές συνέπειες που μπορεί να έχουν ανεπιθύμητες καταστάσεις λειτουργίας των εναέριων γραμμών διανομής όπως είναι το βραχυκύκλωμα και η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής τους. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των συνεπειών της θερμικής καταπόνησης ενός τμήματος του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Η θερμική καταπόνηση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό ρεύμα που τα διαρρέει και το φαινόμενο Joule. Σε μια πυρκαγιά, η εξάπλωση της φωτιάς επηρεάζεται από την μεταφορά και την ακτινοβολία θερμότητας. Η μεταφορά της θερμότητας επιτρέπει στη φωτιά να εξαπλωθεί από το χαμηλό επίπεδο (π.χ. γρασίδι) στο υψηλό επίπεδο (π.χ. κλαδιά, κορυφή δέντρου). Έπειτα, η ακτινοβολία θερμότητας γίνεται κυρίαρχη σαν η βασική μέθοδος εξάπλωσης της θερμότητας, όσον η φωτιά συνεχίζει να εξελίσσεται.

Για την εξυπηρέτηση του σκοπού της διπλωματικής εργασίας αρχικά υποβάλλεται σε δοκιμή υπερθέρμανσης αεροδιακόπτης μέσης τάσης, στη συνέχεια υιοθετώντας ένα μοντέλο φωτιάς και με τη βοήθεια θεωρητικών υπολογισμών, μελετάται η συμπεριφορά των μονωτήρων πορσελάνης σε περιβάλλον πυρκαγιάς. Η πορσελάνη είναι γνωστή για την υψηλή διηλεκτρική αντοχή της και χρησιμοποιείται ευρέως σαν μονωτικό υλικό σε γραμμές μέσης τάσης. Συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιηθεί ένα μονοπολικό ακροκιβώτιο πορσελάνης επί στύλου και θα μελετηθεί η συμπεριφορά του καθώς εκτίθεται στο συγκεκριμένο περιβάλλον φωτιάς.

### 3. Πειραματικό μέρος

#### 3.1. Το κύκλωμα μέτρησης

Η διάταξη του αεροδιακόπτη παρασχέθηκε από το κατασκευαστικό τμήμα της Δ.Ε.Η Ελευσίνιας. Η διάταξη αυτή συνδέθηκε με μετασχηματιστή ρεύματος στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων και έγιναν τα πειράματα. Το κύκλωμα μέτρησης που ακολουθεί, ανταποκρίνεται πλήρως στις απαιτήσεις των κανονισμών για τη δοκιμή υπερθέρμανσης και απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 3.1-1: Το κύκλωμα μέτρησης περιλαμβάνει τη διάταξη του αεροδιακόπτη και το μετασχηματιστή ρεύματος.



Εικόνα 3.1-2: Κύκλωμα μέτρησης 6 θερμών σημείων

Σημείο 1: αγωγός AAAC 185 mm<sup>2</sup>

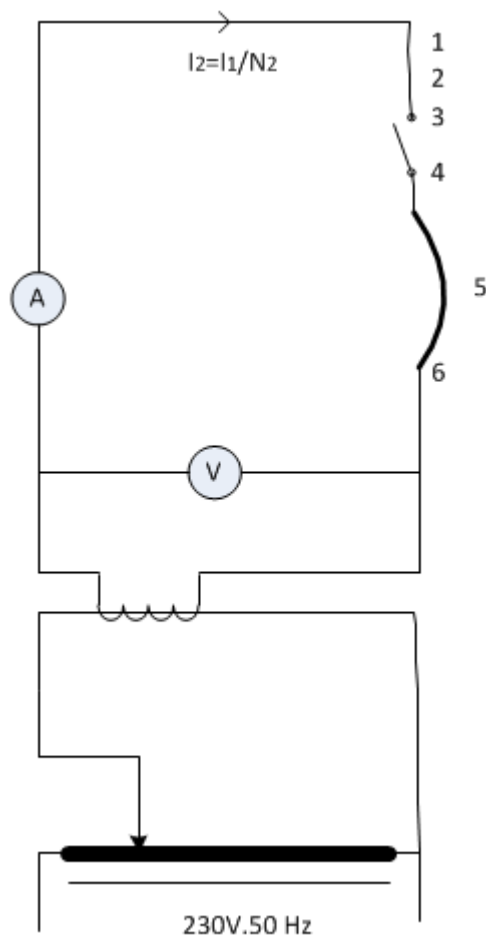
Σημείο 2: σύνδεσμος AAAC 185 mm<sup>2</sup> με αγωγό Cu 70 mm<sup>2</sup>

Σημείο 3: επαφή εισόδου του αποζεύκτη

Σημείο 4: επαφή εξόδου του αποζεύκτη

Σημείο 5: έλασμα αεροδιακόπτη

Σημείο 6: σύνδεσμος αεροδιακόπτη με AAAC 185 mm<sup>2</sup>



Σχήμα 3.1-1: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα μέτρησης. Σημεία μέτρησης 1÷6.

### 3.2. Η διαδικασία των μετρήσεων

Η διαδικασία για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, η οποία περιγράφεται στη συνέχεια, είναι ακριβώς η ίδια και για όλες τις περιπτώσεις μέτρησης. Διαφέρει μόνο ως προς την επιβαλλόμενη τιμή του ρεύματος και ως προς τη δύναμη σύσφιξης των λυόμενων συνδέσμων, που εφαρμόζονται σε κάθε μέτρηση.

Θέλοντας να αποσαφηνιστεί αν είναι δυνατή η δημιουργία τηγμάτων μετάλλου, υπεύθυνων για την εκδήλωση πυρκαγιάς σε συνθήκες υπερθέρμανσης της διάταξης, επιλέγονται κατάλληλα 6 ‘θερμά’ σημεία. Βασικό κριτήριο για την επιλογή είναι το γεγονός πως, όταν η θερμοκρασία είναι αυξημένη, ο λυόμενος ηλεκτρικός σύνδεσμος έχει μεγάλη αντίσταση και ενδέχεται να προκαλέσει σφάλματα λειτουργίας λόγω κακής επαφής ή λιώσιμο αυτής. Επομένως τα σημεία επαφών των διαφόρων μερών της διάταξης αποτελούν “θερμά” σημεία. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται για δύο διαφορετικές περιπτώσεις δύναμης σύσφιξης των επαφών. Στη μεν πρώτη περίπτωση οι ηλεκτρικές επαφές της διάταξης είναι κακές, αφήνοντας τους συνδέσμους απλώς να

ακουμπούν μεταξύ τους, στη δεύτερη περίπτωση οι ηλεκτρικές επαφές είναι καλά σφικμένες μεταξύ τους.

Αρχικά, η διάταξη συνδέεται στον μετασχηματιστή ρεύματος και μέσω της γεννήτριας διοχετεύεται εναλλασσόμενο ρεύμα σε αυτή. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται για φορτίο εργοστασίου 1800 kVA, με μέγιστο ρεύμα φορτίου:

$$I_{\max} = \frac{P}{1,73 \cdot U} = \frac{1800}{1,73 \cdot 20} = 52 \text{ A}$$

Η δοκιμή υπερθέρμανσης πραγματοποιείται για το μέγιστο ρεύμα φορτίου  $I_{\max}$ , για ρεύμα προσαυξημένο κατά 30% του μεγίστου ρεύματος φορτίου ( $I = 1,3 \cdot I_{\max} = 68 \text{ A}$ ) καθώς επίσης και για ρεύμα 160 A.

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται επτά θερμοστοιχεία Pt100, τα έξι εκ των οποίων, τοποθετούνται στα 6 “θερμά” σημεία, το έβδομο θερμοστοιχείο τοποθετείται σε απόσταση από τη διάταξη με σκοπό να μετράται η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η διάρκεια των μετρήσεων ανέρχεται σε δύο ώρες. Μετρήσεις λαμβάνονται και καταγράφονται κάθε δέκα λεπτά (10 min). Με τη συμπλήρωση του δίωρου ή την αποκατάσταση της θερμικής ισορροπίας, η μέτρηση σταματά και η διάταξη αφήνεται χωρίς επιβολή ρεύματος ούτως ώστε να επανέλθει στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όταν γίνει αυτό, τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται για νέα δύναμη σύσφιξης των επαφών ή νέο διαρρέον ρεύμα της διάταξης.

Οι αναλυτικοί πίνακες με τις μετρήσεις, που ελήφθησαν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων, παρατίθενται παρακάτω.



### 3.3. Δοκιμή υπερθέρμανσης – χαλαρές συνδέσεις

Σε πρώτο στάδιο μετρήθηκε η αύξηση της θερμοκρασίας των θερμών σημείων, στην περίπτωση χαλαρών συσφίξεων των επαφών. Σε περιπτώσεις κακών ηλεκτρικών επαφών με μεγάλη αντίσταση, η πτώση τάσης των επαφών αυξάνει με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία του λυόμενου συνδέσμου.

Ωρα [min]	$\theta_{\chi}$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\theta_6$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_6$ [°C]
0	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	19,4	20,9	20,4	20,5	20,7	20,4	20,3	1,5	1,0	1,1	1,3	1,0	0,9
20	19,5	21,0	20,4	20,6	20,9	20,4	20,4	1,5	0,9	1,1	1,4	0,9	0,9
30	19,5	21,1	20,4	20,8	21,0	20,6	20,5	1,6	0,9	1,3	1,5	1,1	1,0
40	19,5	21,2	20,6	20,9	21,1	20,6	20,6	1,7	1,1	1,4	1,6	1,1	1,1
50	19,5	21,3	20,6	21,0	21,2	20,8	20,7	1,8	1,1	1,5	1,7	1,3	1,2
60	19,5	21,3	20,8	21,0	21,3	20,8	20,8	1,8	1,3	1,5	1,8	1,3	1,3
70	19,6	21,4	20,7	21,2	21,4	20,9	20,9	1,8	1,1	1,6	1,8	1,3	1,3
80	19,7	21,4	20,8	21,1	21,4	21,0	20,9	1,7	1,1	1,4	1,7	1,3	1,2
90	19,7	21,4	20,8	21,2	21,4	20,9	20,9	1,7	1,1	1,5	1,7	1,2	1,2
100	19,7	21,5	20,9	21,1	21,5	20,9	20,9	1,8	1,2	1,4	1,8	1,2	1,2
110	19,7	21,5	21,0	21,3	21,6	20,9	20,9	1,8	1,3	1,6	1,9	1,2	1,2
120	19,8	21,6	20,9	21,4	21,7	21,0	21,0	1,8	1,1	1,6	1,9	1,2	1,2
130	19,8	21,6	21,0	21,4	21,7	21,0	21,0	1,8	1,2	1,6	1,9	1,2	1,2

Πίνακας 3.3.1: Μετρήσεις στα θερμά στοιχεία 1, 2, 3, 4, 5, 6 (βλ. σχήμα 3.1-1 και 3.2-2) υπό ρεύμα 52 A, 50 Hz.

$\theta_{\chi}$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία αγωγού AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$\theta_2$ : θερμοκρασία συνδέσμου AAAC 185 mm<sup>2</sup> με αγωγό Cu 70 mm<sup>2</sup>

$\theta_3$ : θερμοκρασία στην επαφή εισόδου του αποζεύκτη

$\theta_4$ : θερμοκρασία στην επαφή εξόδου του αποζεύκτη

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο έλασμα του αεροδιακόπτη

$\theta_6$ : θερμοκρασία συνδέσμου αεροδιακόπτη με AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$$\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_3 = \theta_3 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_4 = \theta_4 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_5 = \theta_5 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_6 = \theta_6 - \theta_{\chi}$$

Ωρα [min]	$\theta_{\chi}$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\theta_6$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_6$ [°C]
0	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	21,8	22,6	22,4	23,0	23,9	22,6	22,8	0,8	0,6	1,2	2,1	0,8	1,0
20	21,9	22,7	22,6	23,5	24,4	22,9	23,0	0,8	0,7	1,6	2,5	1,0	1,1
30	22,0	22,8	22,9	23,8	24,6	23,1	23,1	0,8	0,9	1,8	2,6	1,1	1,1
40	22,1	23,0	23,1	24,1	24,9	23,3	23,3	0,9	1,0	2,0	2,8	1,2	1,2
50	22,2	23,1	23,3	24,2	25,0	23,4	23,3	0,9	1,1	2,0	2,8	1,2	1,1
60	22,3	23,2	23,5	24,4	25,1	23,5	23,3	0,9	1,2	2,1	2,8	1,2	1,0
70	22,4	23,2	23,5	24,4	25,2	23,5	23,5	0,8	1,1	2,0	2,8	1,1	1,1
80	22,4	23,2	23,6	24,5	25,2	23,5	23,3	0,8	1,2	3,1	2,8	1,1	0,9
90	22,4	23,2	23,5	24,5	25,2	23,5	23,3	0,8	1,1	3,1	2,8	1,1	0,9

Πίνακας 3.3.2: Μετρήσεις στα θερμά στοιχεία 1, 2, 3, 4, 5, 6 (βλ. σχήμα 3.1-1 και 3.2-2) υπό ρεύμα 68 A, 50 Hz.

$\theta_{\chi}$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία αγωγού AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$\theta_2$ : θερμοκρασία συνδέσμου AAAC 185 mm<sup>2</sup> με αγωγό Cu 70 mm<sup>2</sup>

$\theta_3$ : θερμοκρασία στην επαφή εισόδου του αποζεύκτη

$\theta_4$ : θερμοκρασία στην επαφή εξόδου του αποζεύκτη

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο έλασμα του αεροδιακόπτη

$\theta_6$ : θερμοκρασία συνδέσμου αεροδιακόπτη με AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$$\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_3 = \theta_3 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_4 = \theta_4 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_5 = \theta_5 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_6 = \theta_6 - \theta_{\chi}$$

Ωρα [min]	$\theta_{\chi}$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\theta_6$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_6$ [°C]
0	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	21,7	25,4	25,6	28,5	31,7	25,5	25,5	3,8	4,0	6,9	10,1	3,9	3,9
20	21,7	26,6	27,1	30,5	33,5	26,8	26,6	4,9	5,4	8,8	11,8	5,1	4,9
30	21,7	27,8	28,7	32,3	35,3	28,1	27,7	6,1	7,0	10,6	13,6	6,4	6,0
40	21,7	28,5	29,7	33,2	35,9	28,6	28,2	6,8	8,0	11,5	14,2	6,9	6,5
50	21,7	29,0	30,3	33,7	36,4	29,1	28,7	7,3	8,6	12,0	14,7	7,4	7,0
60	21,8	29,5	30,8	34,2	36,7	29,2	29,0	7,7	9,0	12,4	14,9	7,4	7,2
70	21,7	29,5	31,0	34,2	36,7	29,2	29,1	7,8	9,3	12,5	15,0	7,5	7,4
80	21,7	29,8	31,0	34,3	36,7	29,3	29,1	8,1	9,3	12,6	15,0	7,6	7,4
90	21,7	29,8	31,1	34,4	36,7	29,1	29,2	8,1	9,4	12,7	15,0	7,4	7,5
100	21,7	29,9	31,1	34,3	36,6	29,2	29,1	8,2	9,4	12,6	14,9	7,5	7,4
110	21,7	30,0	31,2	34,3	36,6	29,1	29,1	8,3	9,5	12,6	14,9	7,4	7,4
120	21,7	29,8	31,2	34,4	36,7	29,2	29,0	8,1	9,5	12,7	15,0	7,5	7,3

Πίνακας 3.3.3: Μετρήσεις στα θερμά στοιχεία 1, 2, 3, 4, 5, 6 (βλ. σχήμα 3.1-1 και 3.2-2) υπό ρεύμα 160 A, 50 Hz.

$\theta_{\chi}$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία αγωγού AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$\theta_2$ : θερμοκρασία συνδέσμου AAAC 185 mm<sup>2</sup> με αγωγό Cu 70 mm<sup>2</sup>

$\theta_3$ : θερμοκρασία στην επαφή εισόδου του αποζεύκτη

$\theta_4$ : θερμοκρασία στην επαφή εξόδου του αποζεύκτη

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο έλασμα του αεροδιακόπτη

$\theta_6$ : θερμοκρασία συνδέσμου αεροδιακόπτη με AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$$\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_3 = \theta_3 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_4 = \theta_4 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_5 = \theta_5 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_6 = \theta_6 - \theta_{\chi}$$

### 3.4. Δοκιμή υπερθέρμανσης – σφιγμένες συνδέσεις

Στο στάδιο αυτό συσφίξαμε τις επαφές μεταξύ τους ώστε να επιτύχουμε μικρή αντίσταση.

Ώρα [min]	$\theta_{\chi}$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\theta_6$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_6$ [°C]
0	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	19,8	19,8	19,9	20,7	22,4	20,6	20,0	0,0	0,1	0,9	2,6	0,8	0,2
20	19,8	20,0	20,1	21,2	23,0	21,0	20,1	0,2	0,3	1,4	3,2	1,2	0,3
30	19,8	20,2	20,4	21,6	23,5	21,4	20,3	0,4	0,6	1,8	3,7	1,6	0,5
40	19,8	20,4	20,7	21,9	23,7	21,6	20,5	0,6	0,9	2,1	3,9	1,8	0,7
50	19,8	20,6	20,9	22,1	23,9	21,8	20,6	0,8	1,1	2,3	4,1	2,0	0,8
60	19,8	20,7	21,0	22,2	24,0	21,9	20,7	0,9	1,2	2,4	4,2	2,1	0,9
70	19,9	20,8	21,0	22,4	23,9	22,0	20,7	0,9	1,1	2,5	4,0	2,1	0,8
80	19,9	20,8	21,1	22,3	23,9	21,9	20,7	0,9	1,2	2,4	4,0	2,0	0,8
90	19,9	20,9	21,2	22,3	23,9	22,0	20,8	1,0	1,3	2,4	4,0	2,1	0,9

Πίνακας 3.4.1: Μετρήσεις στα θερμά στοιχεία 1, 2, 3, 4, 5, 6 (βλ. σχήμα 3.1-1 και 3.2-2) υπό ρεύμα 52 A, 50 Hz.

$\theta_{\chi}$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία αγωγού AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$\theta_2$ : θερμοκρασία συνδέσμου AAAC 185 mm<sup>2</sup> με αγωγό Cu 70 mm<sup>2</sup>

$\theta_3$ : θερμοκρασία στην επαφή εισόδου του αποζεύκτη

$\theta_4$ : θερμοκρασία στην επαφή εξόδου του αποζεύκτη

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο έλασμα του αεροδιακόπτη

$\theta_6$ : θερμοκρασία συνδέσμου αεροδιακόπτη με AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$$\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_3 = \theta_3 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_4 = \theta_4 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_5 = \theta_5 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_6 = \theta_6 - \theta_{\chi}$$

Ωρα [min]	$\theta_{\chi}$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\theta_6$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_6$ [°C]
0	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	20,3	22,9	23,0	23,2	24,2	22,5	22,3	2,6	2,7	2,9	3,9	2,2	2,0
20	20,3	22,8	22,8	23,1	24,1	22,5	22,2	2,5	2,5	2,8	3,8	2,2	1,9
30	20,3	22,6	22,7	23,1	24,0	22,5	22,2	2,3	2,4	2,8	3,7	2,2	1,9
40	20,3	22,4	22,5	23,0	23,9	22,4	22,1	2,1	2,2	2,7	3,6	2,1	1,8
50	20,3	22,3	22,5	23,0	23,9	22,4	22,1	2,0	2,2	2,7	3,6	2,1	1,8
60	20,3	22,4	22,5	22,9	23,6	22,3	22,0	2,1	2,2	2,6	3,3	2,0	1,7
70	20,4	22,3	22,4	22,9	23,6	22,3	22,0	1,9	2,0	2,5	3,2	1,9	1,6
80	20,4	22,2	22,4	22,9	23,6	22,3	22,2	1,8	2,0	2,5	3,2	1,9	1,8
90	20,4	22,2	22,4	22,8	23,6	22,3	22,0	1,8	2,0	2,4	3,2	1,9	1,6
100	20,4	22,2	22,3	22,8	23,7	22,4	22,1	1,8	1,9	2,4	3,3	2,0	1,7
110	20,4	22,2	22,4	22,9	23,7	22,4	22,1	1,8	2,0	2,5	3,3	2,0	1,7

Πίνακας 3.4.2: Μετρήσεις στα θερμά στοιχεία 1, 2, 3, 4, 5, 6 (βλ. σχήμα 3.1-1 και 3.2-2) υπό ρεύμα 68 A, 50 Hz.

$\theta_{\chi}$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία αγωγού AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$\theta_2$ : θερμοκρασία συνδέσμου AAAC 185 mm<sup>2</sup> με αγωγό Cu 70 mm<sup>2</sup>

$\theta_3$ : θερμοκρασία στην επαφή εισόδου του αποζεύκτη

$\theta_4$ : θερμοκρασία στην επαφή εξόδου του αποζεύκτη

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο έλασμα του αεροδιακόπτη

$\theta_6$ : θερμοκρασία συνδέσμου αεροδιακόπτη με AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$$\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_3 = \theta_3 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_4 = \theta_4 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_5 = \theta_5 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_6 = \theta_6 - \theta_{\chi}$$

Ωρα [min]	$\theta_{\chi}$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\theta_6$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_6$ [°C]
0	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	20,2	22,5	22,0	23,1	28,4	22,9	22,5	2,3	1,8	2,9	8,2	2,7	2,3
20	20,2	23,7	23,7	25,2	33,2	23,7	23,7	3,5	3,5	5,0	13,0	3,5	3,5
30	20,3	24,9	25,4	27,3	34,4	24,8	24,9	4,6	5,1	7,0	14,1	4,5	4,6
40	20,3	25,8	26,4	28,6	35,1	25,5	25,8	5,5	6,1	8,3	14,8	5,2	5,5
50	20,3	26,5	27,3	29,2	35,7	25,6	26,5	6,2	7,0	8,9	15,4	5,3	6,2
60	20,3	27,3	28,0	29,8	36,0	26,6	27,3	7,0	7,7	9,5	15,7	6,3	7,0
70	20,3	27,4	28,2	30,1	36,0	26,8	27,4	7,1	7,9	9,8	15,7	6,5	7,1
80	20,3	27,7	28,4	30,2	36,2	26,8	27,7	7,4	8,1	9,9	15,9	6,5	7,4
90	20,4	27,6	28,5	30,3	36,2	27,0	27,6	7,2	8,1	9,9	15,8	6,6	7,2
100	20,4	28,1	28,9	30,6	36,4	27,0	28,1	7,7	8,5	10,2	16,0	6,6	7,7
110	20,4	28,2	29,0	30,6	36,3	27,0	28,2	7,8	8,6	10,2	15,9	6,6	7,8
120	20,4	28,3	29,1	30,6	37,4	26,9	28,3	7,9	8,7	10,2	17,0	6,5	7,9
130	20,4	28,2	29,1	30,7	37,4	26,9	28,2	7,8	8,7	10,3	17,0	6,5	7,8

Πίνακας 3.4.3: Μετρήσεις στα θερμά στοιχεία 1, 2, 3, 4, 5, 6 (βλ. σχήμα 3.1-1 και 3.2-2) υπό ρεύμα 160 A, 50 Hz.

$\theta_{\chi}$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία αγωγού AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$\theta_2$ : θερμοκρασία συνδέσμου AAAC 185 mm<sup>2</sup> με αγωγό Cu 70 mm<sup>2</sup>

$\theta_3$ : θερμοκρασία στην επαφή εισόδου του αποζεύκτη

$\theta_4$ : θερμοκρασία στην επαφή εξόδου του αποζεύκτη

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο έλασμα του αεροδιακόπτη

$\theta_6$ : θερμοκρασία συνδέσμου αεροδιακόπτη με AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$$\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_3 = \theta_3 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_4 = \theta_4 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_5 = \theta_5 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_6 = \theta_6 - \theta_{\chi}$$

### 3.5. Αποτελέσματα των μετρήσεων

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων απεικονίζονται ιδανικά μέσω των γραφημάτων ανύψωσης της θερμοκρασίας της διάταξης, συναρτήσεως του χρόνου.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, οι οποίες διεξήχθησαν σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.2. Για κάθε περίπτωση δύναμης σύσφιξης των επαφών και ρεύματος επιβολής, δίνονται οι γραφικές παραστάσεις της διαφοράς θερμοκρασίας των θερμών σημείων της διάταξης.

Η διαφορά θερμοκρασίας των θερμών σημείων ορίζεται από τη σχέση:

$$\Delta\Theta_{1-6} = \Theta_{1-6} - \Theta_{\chi} \quad (3.5.-1)$$

όπου οι θερμοκρασίες  $\Theta_{1-6}$  προκύπτουν από τους πίνακες μετρήσεων στα διάφορα στάδια του πειράματος αντίστοιχα και  $\Theta_{\chi}$  είναι η θερμοκρασία στον εργαστηριακό χώρο.

Η αντίσταση που παρουσιάζει μια επαφή κατά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος ονομάζεται αντίσταση διάβασης. Η τιμή της αντίστασης διάβασης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R = \Delta U / I_M \quad (3.5.-2)$$

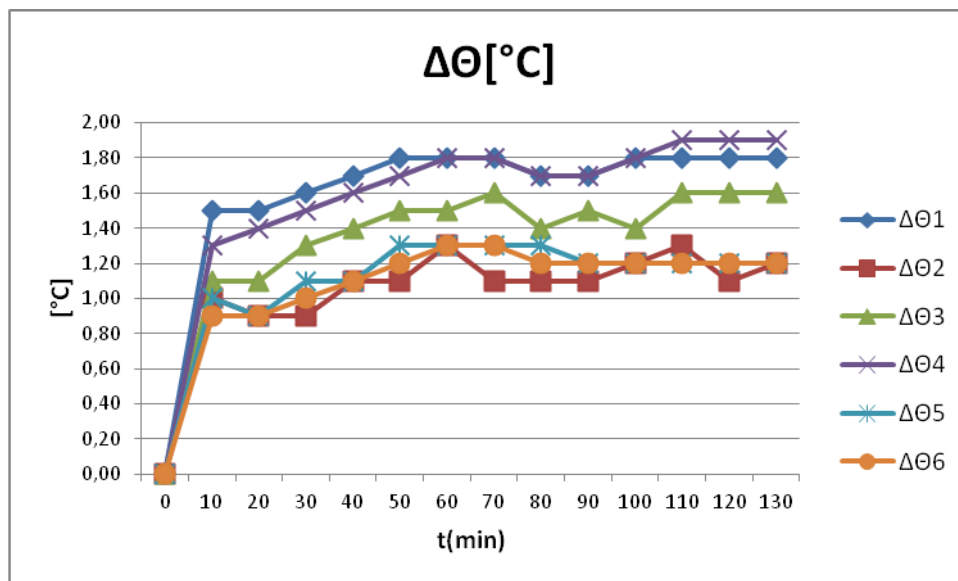
όπου  $\Delta U$  είναι η πτώση τάσης και  $I$  το ρεύμα που διαρρέει τη διάταξη.

Συνδέσεις	I(A)	Αντίσταση διάβασης R(mΩ)
Χαλαρές	52	3,71
	68	2,99
	160	3,04
Σφιγμένες	52	3,42
	68	2,74
	160	2,90

Πίνακας 3.5.1: Αντίσταση διάβασης R(mΩ) επαφών κυκλώματος μέτρησης

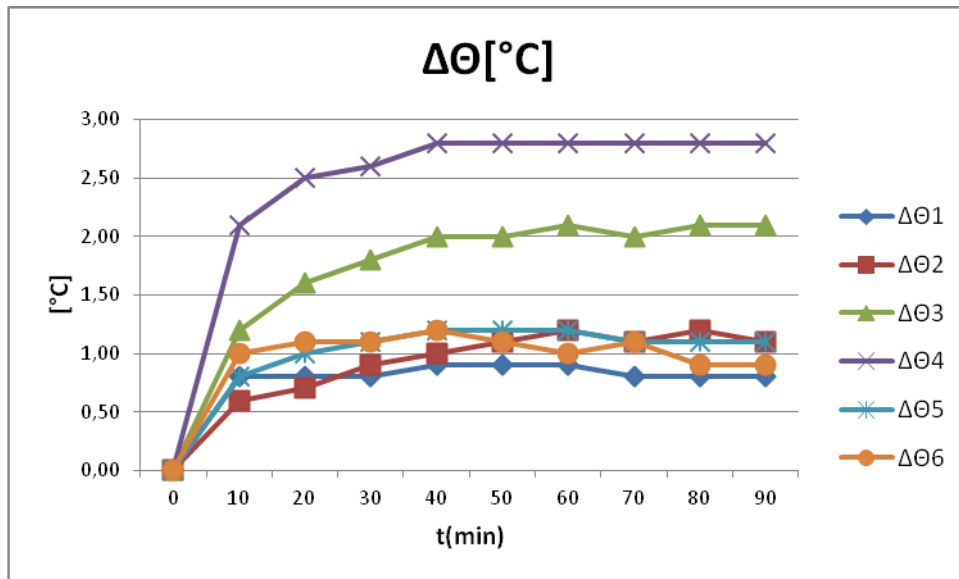
### 3.5.1. Θερμοκρασιακή ανύψωση της διάταξης για μικρή δύναμη σύσφιγξης των επαφών

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις που αφορούν στη θερμοκρασιακή ανύψωση των “θερμών σημείων” του κυκλώματος μέτρησης σε σχέση με το χρόνο, για τις διάφορες τιμές ρεύματος.

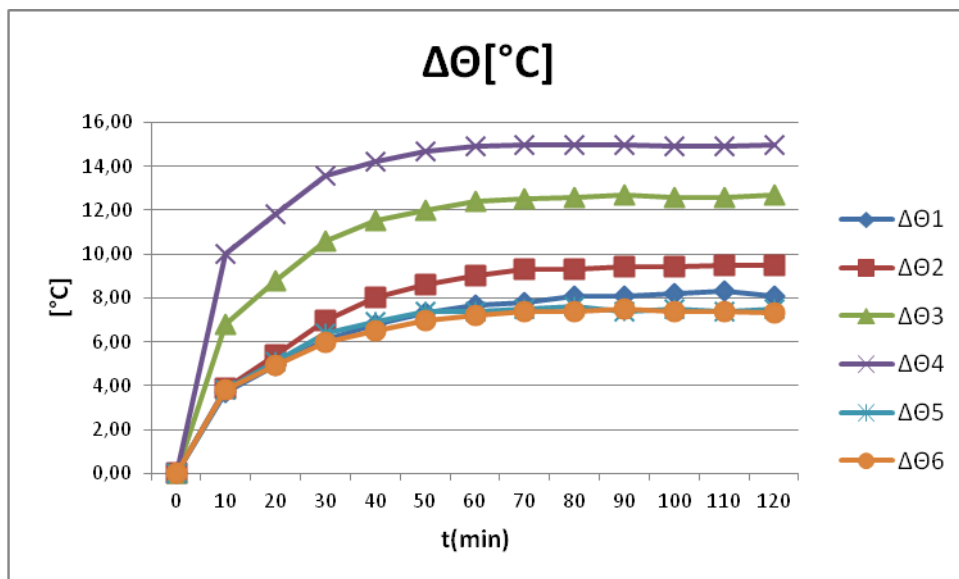


Σχήμα 3.5.1-1: Χαρακτηριστική  $\Delta\Theta = f(t, \Theta_1 - \Theta_6, R)$  για ρεύμα φορτίου 52 A όπου:  
 $t$  = η σχετική ώρα μέτρησης καθώς εξελίσσεται η δοκιμή υπερθέρμανσης  
 $\Theta_1 - \Theta_6$  = οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα θερμά σημεία 1 έως 6 κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης  
 $R = 3,71 \text{ m}\Omega$





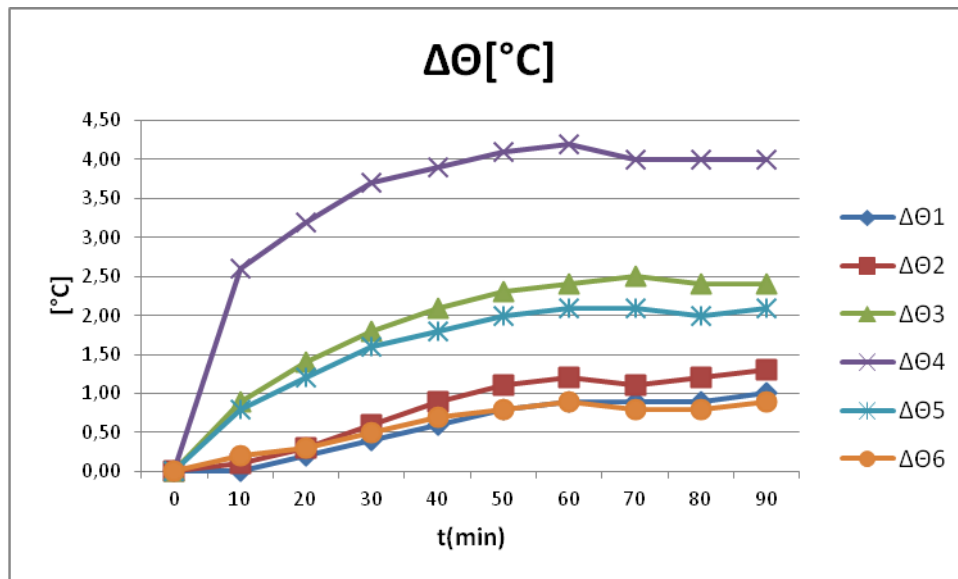
Σχήμα 3.5.1-2: Χαρακτηριστική  $\Delta\Theta = f(t, \Theta_1 - \Theta_6, R)$  για ρεύμα φορτίου 68 A όπου:  
 $t$  = η σχετική ώρα μέτρησης καθώς εξελίσσεται η δοκιμή υπερθέρμανσης  
 $\Theta_1 - \Theta_6$  = οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα θερμά σημεία 1 έως 6 κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης  
 $R = 2,99 \text{ m}\Omega$



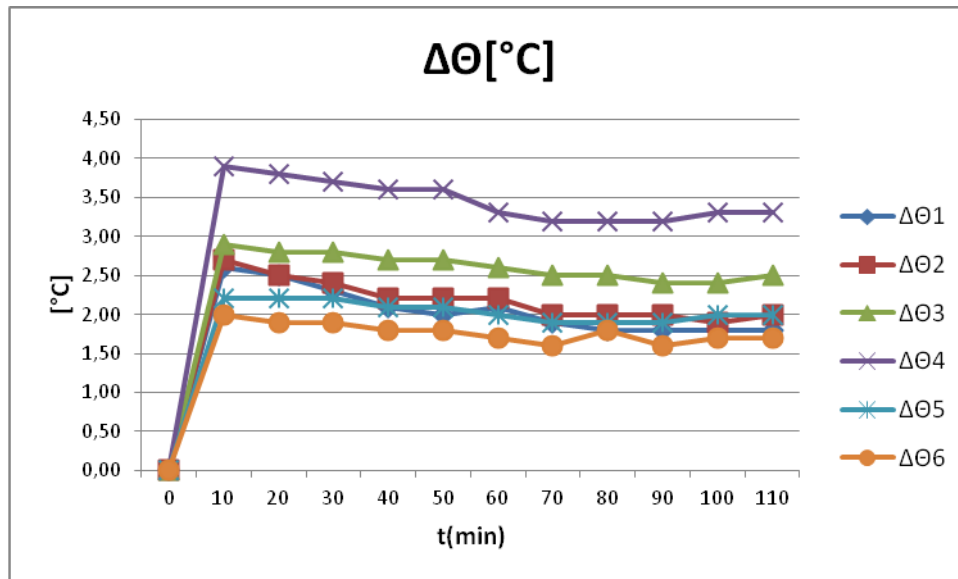
Σχήμα 3.5.1-3: Χαρακτηριστική  $\Delta\Theta = f(t, \Theta_1 - \Theta_6, R)$  για ρεύμα φορτίου 160 A όπου:  
 $t$  = η σχετική ώρα μέτρησης καθώς εξελίσσεται η δοκιμή υπερθέρμανσης  
 $\Theta_1 - \Theta_6$  = οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα θερμά σημεία 1 έως 6 κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης  
 $R = 3,04 \text{ m}\Omega$

### 3.5.2. Θερμοκρασιακή ανύψωση της διάταξης για μεγάλη δύναμη σύσφιγξης των επαφών

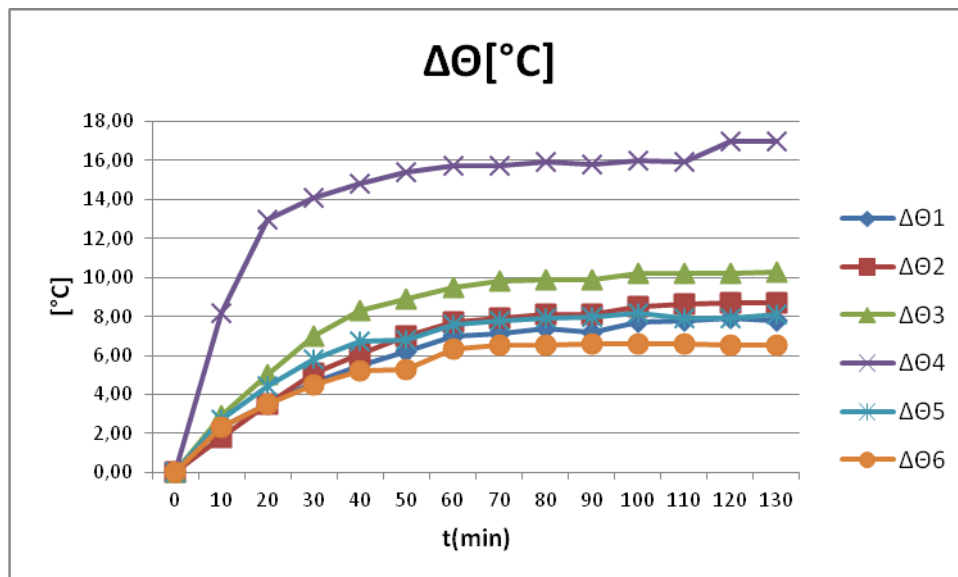
Στη συνέχεια απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις που αφορούν στη θερμοκρασιακή ανύψωση των “θερμών σημείων” του κυκλώματος μέτρησης σε σχέση με το χρόνο, για τις διάφορες τιμές ρεύματος.



Σχήμα 3.5.2-1: Χαρακτηριστική  $\Delta\Theta = f(t, \Theta_1 - \Theta_6, R)$  για ρεύμα φορτίου 52 A όπου:  
 $t$  = η σχετική ώρα μέτρησης καθώς εξελίσσεται η δοκιμή υπερθέρμανσης  
 $\Theta_1 - \Theta_6$  = οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα θερμά σημεία 1 έως 6 κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης  
 $R = 3,42 \text{ m}\Omega$



Σχήμα 3.5.2-2: Χαρακτηριστική  $\Delta\Theta = f(t, \Theta_1 - \Theta_6, R)$  για ρεύμα φορτίου 68 A όπου:  
 $t$  = η σχετική ώρα μέτρησης καθώς εξελίσσεται η δοκιμή υπερθέρμανσης  
 $\Theta_1 - \Theta_6$  = οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα θερμά σημεία 1 έως 6 κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης  
 $R = 2,74 \text{ m}\Omega$



Σχήμα 3.5.2-3: Χαρακτηριστική  $\Delta\Theta = f(t, \Theta_1 - \Theta_6, R)$  για ρεύμα φορτίου 160 A όπου:  
 $t$  = η σχετική ώρα μέτρησης καθώς εξελίσσεται η δοκιμή υπερθέρμανσης  
 $\Theta_1 - \Theta_6$  = οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα θερμά σημεία 1 έως 6 κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης  
 $R = 2,90 \text{ m}\Omega$

### 3.6. Μέτρηση θερμικής καταπόνησης της διάταξης κατά το βραχυκύκλωμα

Εξετάζουμε τη θερμική συνέπεια του βραχυκυκλώματος στη διάταξη για δυο διαφορετικές περιπτώσεις. Στη μεν πρώτη περίπτωση δεν χρησιμοποιούμε Διακόπτη Αυτόματης Επαναφοράς (ΔΑΕ), στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούμε ΔΑΕ.

Οι διακόπτες αυτόματης επαναφοράς χρησιμοποιούνται ευρέως στη μέση τάση και λειτουργούν συνήθως σε τρεις κύκλους. Όταν συμβεί ένα σφάλμα σε μία γραμμή κορμού (π.χ. βραχυκύκλωμα λόγω πτώσης ενός κλαδιού στη γραμμή) τότε ο ΔΑΕ θα διακόψει αυτομάτως την ηλεκτροδότηση της συγκεκριμένης γραμμής και θα τεθεί αμέσως αυτομάτως στη θέση εντός για να ηλεκτροδοτηθεί η γραμμή και αν υπάρχει ακόμα το σφάλμα θα γίνει και πάλι αυτόματη διακοπή και ακολούθως αυτόματη εκ νέου ηλεκτροδότηση. Αν και κατά την δεύτερη αυτή αυτόματη προσπάθεια του διακόπτη συνεχίζει να υπάρχει το σφάλμα, θα γίνει και μία τρίτη αυτόματη «διακοπή-εκ νέου ηλεκτροδότηση» και μόνο αν εξακολουθεί να υπάρχει το σφάλμα θα συμβεί πλέον οριστική διακοπή ρεύματος της εν λόγω γραμμής κορμού.

Είναι προφανές ότι η προαναφερθείσα σε τρεις κύκλους λειτουργία των ΔΑΕ αποσκοπεί, σε περιπτώσεις εμφάνισης παροδικών σφαλμάτων, τόσο στην προσπάθεια για απρόσκοπτη ηλεκτροδότηση μίας μεγάλης περιοχής, όσο και στην αποφυγή άσκοπων μετακινήσεων συνεργείων.

$\theta_{\chi}$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\theta_6$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_6$ [°C]
20,0	20,1	20,3	20,7	20,7	20,4	20,2	0,1	0,3	0,7	0,7	0,4	0,2
20,0	20,2	20,3	20,7	20,8	20,5	20,2	0,2	0,3	0,7	0,8	0,5	0,2

Πίνακας 3.6-1: Μετρήσεις στα θερμά στοιχεία 1, 2, 3, 4, 5, 6 (βλ. σχήμα 3.1-1 και 3.2-2) υπό ρεύμα 160 A, 50 Hz, χωρίς ΔΑΕ.

$\theta_{\chi}$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία αγωγού AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$\theta_2$ : θερμοκρασία συνδέσμου AAAC 185 mm<sup>2</sup> με αγωγό Cu 70 mm<sup>2</sup>

$\theta_3$ : θερμοκρασία στην επαφή εισόδου του αποζεύκτη

$\theta_4$ : θερμοκρασία στην επαφή εξόδου του αποζεύκτη

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο έλασμα του αεροδιακόπτη

$\theta_6$ : θερμοκρασία συνδέσμου αεροδιακόπτη με AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$$\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_3 = \theta_3 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_4 = \theta_4 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_5 = \theta_5 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_6 = \theta_6 - \theta_{\chi}$$

$\theta_{\chi}$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\theta_6$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_6$ [°C]
20,0	20,5	20,3	21,0	21,6	20,9	20,5	0,5	0,3	1,0	1,6	0,9	0,5
20,0	20,7	20,6	21,0	22,2	20,9	20,7	0,7	0,6	1,0	2,2	0,9	0,7

Πίνακας 3.6-2: Μετρήσεις στα θερμά στοιχεία 1, 2, 3, 4, 5, 6 (βλ. σχήμα 3.1-1 και 3.2-2) υπό ρεύμα 160 A, 50 Hz, με ΔΑΕ.

$\theta_{\chi}$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία αγωγού AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$\theta_2$ : θερμοκρασία συνδέσμου AAAC 185 mm<sup>2</sup> με αγωγό Cu 70 mm<sup>2</sup>

$\theta_3$ : θερμοκρασία στην επαφή εισόδου του αποζεύκτη

$\theta_4$ : θερμοκρασία στην επαφή εξόδου του αποζεύκτη

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο έλασμα του αεροδιακόπτη

$\theta_6$ : θερμοκρασία συνδέσμου αεροδιακόπτη με AAAC 185 mm<sup>2</sup>

$$\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_3 = \theta_3 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_4 = \theta_4 - \theta_{\chi}$$

$$\Delta\theta_5 = \theta_5 - \theta_{\chi}$$

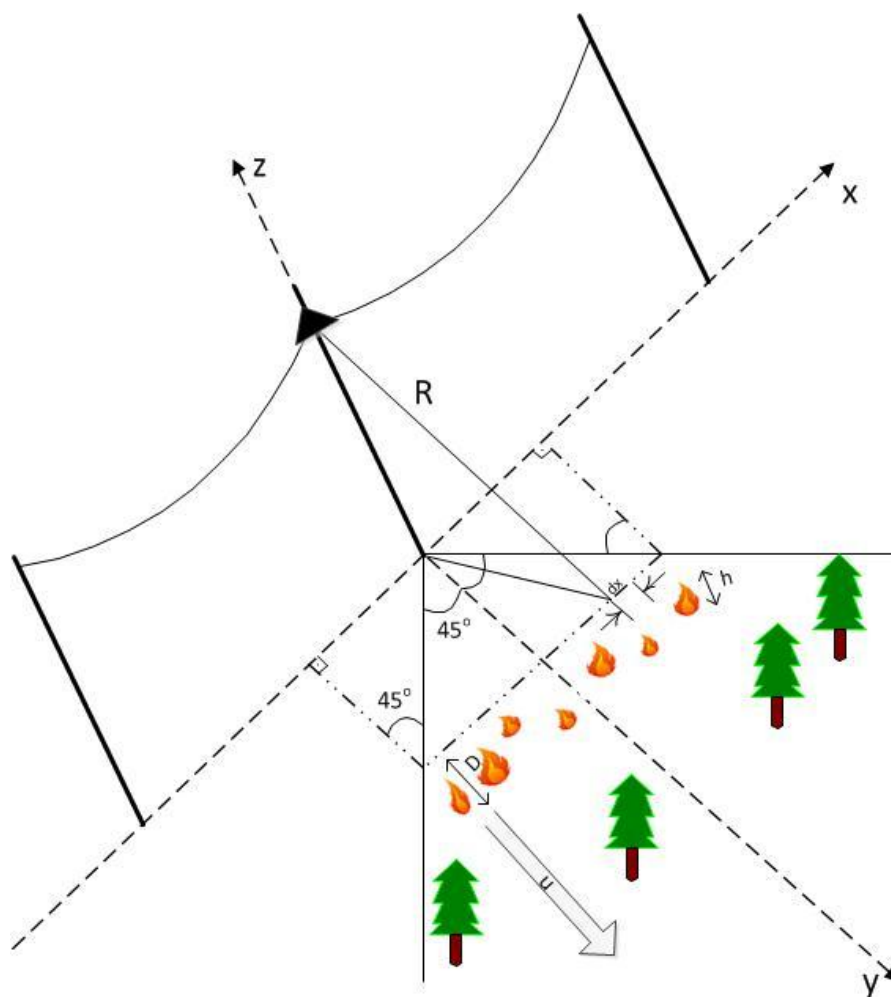
$$\Delta\theta_6 = \theta_6 - \theta_{\chi}$$

## 4. Θεωρητικοί υπολογισμοί

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι μετάδοσης θερμότητας: με αγωγή, με μεταφορά μέσω του αέρα, και με ακτινοβολία. Οι δυο τελευταίες προερχόμενες από το υπέρθερμο περιβάλλον συμβάλλουν κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς στην θερμική καταπόνηση των εναέριων γραμμών διανομής.

### 4.1. Μοντέλο φωτιάς

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται μια πυρκαγιά πλάτους  $D$  και ύψους  $h$ , κινούμενη παράλληλα ( $\alpha = 0^\circ$ ) με μια γραμμή διανομής μέσης τάσης με μονοπολικό ακροκιβώτιο πορσελάνης σε ύψος  $z$ .



Σχήμα 4.1-1: Σχηματική παρουσίαση του μοντέλου φωτιάς στην οποία εκτίθεται το μονοπολικό ακροκιβώτιο πορσελάνης.

Ένα στοιχειώδες μήκος  $dx$  στο μέτωπο της φωτιάς ακτινοβολεί θερμότητα στο ακροκιβώτιο, η οποία είναι:

$$Q_{rf(dx)} = \frac{X_r \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot R^2} = \frac{X_r \cdot I \cdot \cos a \cdot dx}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (4.1.-1)$$

όπου:

$$R^2 = z^2 + y^2 + x^2 \quad (4.1.-2)$$

Τότε:

$$Q_{rf} = \frac{X_r \cdot I \cdot dx}{4 \cdot \pi \cdot (z^2 + y^2 + x^2)} \quad (4.1.-3)$$

Προβάλλοντας το μέτωπο της φωτιάς πάνω στον άξονα  $x$  μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της συνολικής ροής ακτινοβολίας θερμότητας στο ακροκιβώτιο:

$$Q_{rf} = \frac{X_r \cdot I}{4 \cdot \pi} \int_{-x_0}^{+x_0} \frac{dx}{z^2 + y^2 + x^2} \quad (4.1.-4)$$

Από το μικρό ισοσκελές τρίγωνο που σχηματίζεται, συμπεραίνουμε πως σε κάθε χρονική στιγμή η απόσταση  $y$  που έχει διανύσει το μέτωπο της φωτιάς ισούται με την προβολή του μετώπου στον άξονα  $x$ , δηλαδή με  $x_0$ . Η απόσταση  $y$  είναι ίση με το γινόμενο της ταχύτητας της φωτιάς  $u$  (m/sec) επί το χρόνο  $t$  (sec). Επομένως:

$$Q_{rf} = \frac{X_r \cdot I}{4 \cdot \pi} \int_{-ut}^{+ut} \frac{dx}{x^2 + (u \cdot t)^2 + z^2} \quad (4.1.-5)$$

Το παραπάνω ολοκλήρωμα είναι της μορφής:

$$Q_{rf} = \int_{-b}^{+b} \frac{a}{x^2 + c^2} dx \quad (4.1.-6)$$

Η λύση του παραπάνω ολοκληρώματος δίνεται από τον τύπο:

$$Q_{rf} = \frac{a}{c} \left( \arctan\left(\frac{\beta}{\psi}\right) - \arctan\left(-\frac{\beta}{\psi}\right) \right) \quad (4.1.-7)$$

Εξετάζεται η κίνηση της πυρκαγιάς η οποία απομακρύνεται από τον στύλο με ταχύτητα  $u$  (m/sec). Η ακτινοβολία θερμότητας  $W_r$  καθώς η πυρκαγιά έχει διανύσει απόσταση  $l$  από το στύλο είναι:

$$W_r = \int_0^{l/u} Q_{rf} dt \quad (4.1.-8)$$

Σύμφωνα με το μοντέλο φωτιάς που υιοθετείται στην παρούσα διπλωματική, η φωτιά δεν κινείται κάτω από τη γραμμή διανομής μέσης τάσης αλλά ξεκινάει από την περιοχή αυτή και με τη βοήθεια του ανέμου εξαπλώνεται αποκρινόμενη από το στύλο. Επομένως δεν χρειάζεται να υπολογιστεί θερμότητα μεταφοράς  $W_c$ .

## 4.2. Υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας στο ακροκιβώτιο

Η κατάσταση ισορροπίας θερμότητας του ακροκιβωτίου, κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς, εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$C \cdot m \cdot \Delta\theta = W \cdot A \quad (4.2.-1)$$

Χρησιμοποιείται η ακόλουθη σημειογραφία:

$C$  η θερμοχωρητικότητα της πορσελάνης (kJ/kg K)

$m$  η μάζα της πορσελάνης (kg)

$A$  η επιφάνεια ( $m^2$ )

Επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας του ακροκιβωτίου είναι:

$$\Delta\theta = \frac{W \cdot A}{C \cdot m} \quad (4.2.-2)$$

όπου  $W = W_c + W_r$ . Σύμφωνα με την Παράγραφο 4.1. η θερμότητα από μεταφορά είναι αμελητέα, καθώς η φωτιά εξαπλώνεται αποκρινόμενη από τον στύλο, επομένως  $W = W_r$ .

Σύμφωνα με τη Σχέση (4.1.-8) η συνολική θερμότητα του ακροκιβωτίου δίνεται από τον τύπο:

$$W_r = Q_{rf} \cdot \left( \frac{l}{u} \right) \quad (4.2.-3)$$



**4.3. Πίνακες αύξησης θερμοκρασίας του ακροκιβωτίου όταν η ταχύτητα της φωτιάς γίνεται από  $v_w=9$  m/s σε  $v_w=18$  m/s, σε σχέση με τον χρόνο**

t(sec)	$\Delta\theta(^{\circ}\text{C})$
60	-116,4
70	-62,8
80	-2,7
90	63,1
100	134,1
110	209,4
120	288,3
130	370,3
140	454,7
150	540,8
160	628,1
170	716,1
180	804,3
190	892,3
200	979,6
210	1066,1
220	1151,4
230	1235,2
240	1317,4

Πίνακας 4.3-1: Η αύξηση της θερμοκρασίας του ακροκιβωτίου για  $v_w = 9$  m/s.

t(sec)	$\Delta\theta(^{\circ}\text{C})$
60	-2,8
70	78,7
80	164,4
90	252,2
100	340,2
110	427,2
120	512,0
130	593,7
140	671,9
150	746,2
160	816,4
170	882,4
180	944,4
190	1002,3
200	1056,3
210	1106,7
220	1153,6
230	1197,3
240	1237,9

Πίνακας 5.3-2: Η αύξηση της θερμοκρασίας του ακροκιβωτίου για  $v_w = 18$  m/s.

## 5. Συμπεράσματα

Η διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων που περιγράφηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, είναι αρκετά απλή, εύκολα υλοποιήσιμη και προσιτή σε κάθε εργαστήριο που διαθέτει το στοιχειώδη ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Έτσι, προτείνεται ως μία εναλλακτική μέθοδος αξιολόγησης εναέριων γραμμών διανομής μέσης τάσης, στα στάδια του ποιοτικού ελέγχου όπου δεν διατίθενται οι απαραίτητες ειδικές διατάξεις για το σκοπό αυτό.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για δύο διαφορετικές περιπτώσεις συνδέσεων ως προς τη δύναμη σύσφιξης τους, για λόγους σύγκρισης και αξιολόγησης της διάταξης σε δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων, που αντιπροσωπεύονται από τις μέγιστες και μέσες τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας στα θερμά σημεία 1-6, για κάθε περίπτωση αντίστασης διάβασης και για κάθε ρεύμα δοκιμής.

Συνδέσεις	I(A)	$\Delta\theta_1$ [°C]		$\Delta\theta_2$ [°C]		$\Delta\theta_3$ [°C]		$\Delta\theta_4$ [°C]		$\Delta\theta_5$ [°C]		$\Delta\theta_6$ [°C]	
		max	aver	max	aver	max	aver	max	aver	max	aver	max	aver
Χαλαρές	52	1,80	1,59	1,30	1,03	1,60	1,33	1,90	1,57	1,30	1,09	1,30	1,06
	68	0,90	0,75	1,20	0,89	2,10	1,69	2,80	2,4	1,20	0,98	1,20	0,94
	160	8,30	6,55	9,50	7,56	12,70	10,60	15,00	13,00	7,60	6,30	7,50	6,14
Σφιγμένες	52	1,00	0,57	1,30	0,78	2,50	1,82	4,20	3,37	2,10	1,57	0,90	0,59
	68	2,60	1,89	2,70	2,01	2,90	2,40	3,90	3,18	2,20	1,88	2,00	1,63
	160	7,90	5,86	8,70	6,41	10,30	8,01	17,00	13,89	8,20	6,41	6,60	5,21

Πίνακας 5-1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης της διάταξης αεροδιακόπτη μέσης τάσης

Όσον αφορά τα θεωρητικά αποτελέσματα για την αύξηση της θερμοκρασίας του ακροκιβωτίου, η  $\Delta\theta$  αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση που διανύει η πυρκαγιά απομακρυνόμενη από το στύλο, γιατί ο διαθέσιμος χρόνος για τη μετάδοση θερμότητας είναι μεγαλύτερος.

Όταν η ταχύτητα του ανέμου διπλασιάζεται ( $v_w=18$  m/s, 8 μποφόρ) παρατηρείται σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας  $\Delta\theta$  γιατί η ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς αυξάνεται επομένως αυξάνεται και θερμότητα ακτινοβολίας  $W_r$ .

Σχετικά με τη μέτρηση της θερμικής καταπόνησης της διάταξης κατά το βραχυκύκλωμα, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο Διακόπτης Αυτόματης Επαναφοράς (ΔΑΕ), παρατηρούνται μικρότερες διαφορές θερμοκρασίας στα θερμά σημεία 1-6, αυτό είναι απόλυτα φυσιολογικό εάν συνυπολογίσει κανείς το γεγονός πως η διακοπή της ηλεκτροδότησης σε κάθε κύκλο λειτουργίας των ΔΑΕ συμβαίνει πάντοτε σε κλάσμα του δευτερολέπτου (π.χ. 0,15 s , 0,35 s , κ.λπ.). Στην πράξη αυτό σημαίνει πως δεν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χρόνος για την εκδήλωση αξιολογικών θερμικών φαινομένων οπότε δεν προκαλείται υπερθέρμανση της γραμμής πάνω από τα ανεκτά όρια, πολύ δε περισσότερο δεν δημιουργούνται τήγματα μετάλλου από τους αγωγούς.

## Βιβλιογραφία

- [1] Π. Δ. Μπούρκας, Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος, 'Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά', Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003.
- [2] Ε. Γ. Ψαρρός, 'Υπαίθριες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης σε περιβάλλον πυρκαγιών', Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009.
- [3] W. Tillar Shugg 'Handbook of electrical and electronic insulating materials', IEEE Press, 2nd Edition.
- [4] J. S. T. Looms, 'Insulators for high voltages', Power Engineering Series 7.
- [5] Κ. Θ. Δέρβος, 'Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων', Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997.
- [6] 'Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V', International Standard IEC 60137 2003, 5th Edition.
- [7] E. I. Koufakis, P. T. Tsarabaris, J. S. Katsanis, C. G. Karagiannopoulos and P. D. Bourkas, 'A Wildfire Model for the estimation of the Temperature Rise of an Overhead Line Conductor', IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 15, No2, pp. 1077-1082, April 2010.