



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

**Θερμική Συμπεριφορά Ηλεκτρικών Συνδέσμων Σε Υπαίθριο  
Υποσταθμό 20kV / 400V, 75 KVA Με Μοναδικό Φορτίο Μια  
Τριφασική Αντλία Δικτύου Άρδευσης**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Νικόλαος Παντελάκης

Θεοφάνης Κακουδάκης

**Επιβλέπων :** Καραγιαννόπουλος Κωνσταντίνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2011



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

**Θερμική Συμπεριφορά Ηλεκτρικών Συνδέσμων Σε Υπαίθριο  
Υποσταθμό 20kV / 400V, 75 KVA Με Μοναδικό Φορτίο Μια  
Τριφασική Αντλία Δικτύου Άρδευσης**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Νικόλαος Παντελάκης

Θεοφάνης Κακουδάκης

**Επιβλέπων :** Καραγιαννόπουλος Κωνσταντίνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2011

.....

Μπούρκας

Περικλής

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Καραγιαννόπουλος

Κωνσταντίνος

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Θεοδώρου

Νικόλαος

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2011

.....

Copyright © Παντελάκης Νικόλαος, Κακουδάκης Θεοφάνης, 2011

Διπλωματούχοι Ηλεκτρολόγοι Μηχανικοί και Μηχανικοί Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Παντελάκης Νικόλαος, Κακουδάκης Θεοφάνης, 2011

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.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς υπαίθριου υποσταθμού 20 kV/400 V, 75 kVA με μοναδικό φορτίο μία τριφασική αντλία δικτύου άρδευσης.

Στο κεφάλαιο 1, για την καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη των αποτελεσμάτων της εργασίας αυτής, γίνεται μία εισαγωγή στα εναέρια δίκτυα διανομής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Γίνεται επίσης σύντομη αναφορά στους αγωγούς των δικτύων διανομής καθώς και στη θερμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών συνδέσμων.

Σκοπός της εργασίας ο οποίος καθορίζεται στο δεύτερο κεφάλαιο είναι η πειραματική διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς υπαίθριων σταθμών διανομής μέσης προς χαμηλή τάση και η εξακρίβωση της ύπαρξης ή μη προϋποθέσεων εκδήλωσης πυρκαγιών.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται το κύκλωμα των πειραματικών μετρήσεων καθώς επίσης και τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο δίνονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων σε αναλυτικούς πίνακες και διαγράμματα.

Ακολούθως πραγματοποιούνται θεωρητικοί υπολογισμοί για την θερμική συμπεριφορά ενός υπαίθριου σταθμού μέσης προς χαμηλή τάση με κριτήριο τους 55°C για το ονομαστικό ρεύμα του κατά περίπτωση εξοπλισμού (κεφάλαιο 5).

Τα σχόλια επί των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων που προαναφέρθηκαν αλλά και η σύγκριση αυτών δίνονται στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Μπορεί να υποθεθεί ότι η πρόκληση πυρκαγιάς από την λειτουργία ενός τέτοιου υπαίθριου υποσταθμού διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι απίθανη αφού η αύξηση θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στους αγωγούς, τους σφικτήρες αλλά και τις επαφές και τους συνδέσμους των ασφαλειοαποζευκτών είναι αμελητέα και δεν μπορεί να προκαλέσει τήγματα.

Τέλος δίνεται περιληπτικά στο 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο η συνεισφορά της εργασίας αυτής στην έρευνα και τις πρακτικές εφαρμογές καθώς και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.



## **ABSTRACT**

The present diploma thesis explores the thermal behavior of a sub-station 20 kV/400 V, 75 kVA, with a single load a three-phase irrigation pump.

The first chapter constitutes an introduction of the overhead networks of distribution and transmission of the electric power, necessary for a better understanding about the presentable measurements. It also presents a short report on the conductors used for network distribution and the thermal behavior of electrical couplings.

The aim of this thesis, which is outlined in the second chapter, is the experimental investigation of thermal behavior of outdoor distribution sub-stations medium to low voltage, and the verification of the existence conditions for a fire breakout.

In the third chapter, it is outlined the circuit of the experimental measurements and the measuring instruments that were used, while the fourth chapter gives the results of experimental measurements in detailed tables and charts.

Subsequently, theoretical calculation where carried out for the thermal behavior of an outdoor distribution sub-station medium to low voltage using as thermal critical point 55°C for the nominal current of the equipment (chapter 5).

The commentary pertaining to the results of the experiments and the theoretical findings mentioned earlier and their comparison are given in the sixth chapter. It can be assumed that the operation of such an outdoor sub-station that distributes electrical power is unlikely to cause a firestorm since the increase in the temperature that develops in the conductors, junction clamps and in the contacts and connectors of the circuit breakers is negligible and cannot cause melts.

Finally the eight chapter presents the contribution of this thesis to further research and practical applications, as well as the bibliography cited.



## Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	6
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1 Η ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	10
1.1.1 Το εναέριο δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.....	11
1.2 ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΣ ΜΤ/ΧΤ.....	15
1.2.1 Εναέριοι υποσταθμοί.....	15
1.2.2 Επίγειοι υποσταθμοί.....	17
1.3 Η ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΥΠΑΙΘΡΙΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	19
1.4 ΟΙ ΑΓΩΓΟΙ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	20
1.4.1 Μορφή αγωγών.....	24
1.4.2 Αγωγοί από χαλκό.....	26
1.4.3 Αγωγοί από αλουμίνιο.....	27
1.4.4 Αγωγοί από αλουμίνιο-χάλυβα (ACSR).....	27
1.5 ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ.....	28
1.5.1 Θερμικές καταπονήσεις ηλεκτρικών συνδέσμων-ορισμοί.....	28
1.5.2 Η πτώση τάσης σε μια επαφή σε σχέση με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται ..	33
1.5.3 Η αντίσταση διάβασης σε σχέση με την πτώση τάσης και τη διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην επαφή.....	35
1.5.4 Οξειδία σε επαφές διακοπών και η σημασία της θερμοκρασίας στην αύξηση του πάχους τους.....	37
1.5.5 Η επίδραση της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα στην οξείδωση των επαφών.....	41
1.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	42
1.6.1 Δοκιμή υπερθέρμανσης.....	44
2 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	45
3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	46
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	46
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	46
3.2.1 Χαρακτηριστικά υλικών και στοιχείων της πειραματικής διάταξης.....	48
3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	51
3.3.1 Ανάλυση δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία...51	
4 ΠΙΝΑΚΕΣ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	58



5 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΑΙΘΡΙΟΥ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥ .....	90
5.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΑΙΘΡΙΟΥ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥ ΜΕΣΗΣ ΠΡΟΣ ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΣΗ.....	90
5.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΠΑΙΘΡΙΟΥ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥ.....	91
5.2.1 Πιθανότητα εκδήλωσης τηγμάτων στους αγωγούς του υποσταθμού .....	92
5.2.2 Πιθανότητα δημιουργίας τηγμάτων στην περίπτωση που σε έναν αγωγό διασύνδεσης έχει συμβεί αποκοπή 6 κλώνων από τους 7.....	93
5.2.3 Εκδήλωση τηγμάτων στους αγωγούς λόγω διακυμάνσεων της τάσης.....	93
5.2.4 Υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του υποσταθμού .....	94
5.2.5 Πιθανότητα εκδήλωσης τηγμάτων σε σφικτήρες αγωγών και επαφές-συνδέσμους ασφαλειαποζευκτών .....	95
6 ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	98
7 ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	103

# **1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να διακριθούν στους σταθμούς παραγωγής και στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Κατά τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας συμβαίνουν αναπόφευκτα σφάλματα, τα οποία εμποδίζουν την ομαλή λειτουργία του δικτύου.

Τα σφάλματα μπορούν να χωριστούν σε αυτά που εκδηλώνονται λόγω ακραίων περιβαλλοντικών φαινομένων (κεραυνοπληξία, χιονοπτώσεις, ανεμοθύελλες, κτλ.) και άλλων απρόσμενων τυχαίων παραγόντων και σε εκείνα που οφείλονται σε ηλεκτρικά και διηλεκτρικά φαινόμενα, όπως διαρροή, βραχυκύκλωμα, σπινθηρισμοί, τόξα, διάσπαση κτλ. Τα σφάλματα που οφείλονται σε αυτά τα φαινόμενα μπορούν τις περισσότερες φορές να προβλεφθούν και να αντιμετωπιστούν εγκαίρως ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι συνέπειες σε βάρος της λειτουργίας του δικτύου. Ένας από τους πιο σημαντικούς τρόπους αντιμετώπισης των φαινομένων αυτών είναι η αναζήτηση πληροφοριών για τις περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη μελέτη ενός δικτύου (σωστές αποστάσεις μόνωσης, κατάλληλα υλικά, σωστές αποστάσεις μεταξύ στύλων, κ.α.). Εξίσου σημαντική είναι η συντήρηση του δικτύου προς αποφυγή των σφαλμάτων, η οποία πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τον Κανονισμό Εγκατάστασης και Συντήρησης Υπαιθρίων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΚΕΣΥΓΗΕ) και τις σχετικές οδηγίες που αφορούν τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στις παρακάτω παραγράφους γίνεται μία σύντομη αναφορά στο εναέριο δίκτυο μεταφοράς και διανομής και δίνονται πληροφορίες για τα φαινόμενα που συναντώνται στο περιβάλλον του.

## **1.1 Η ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

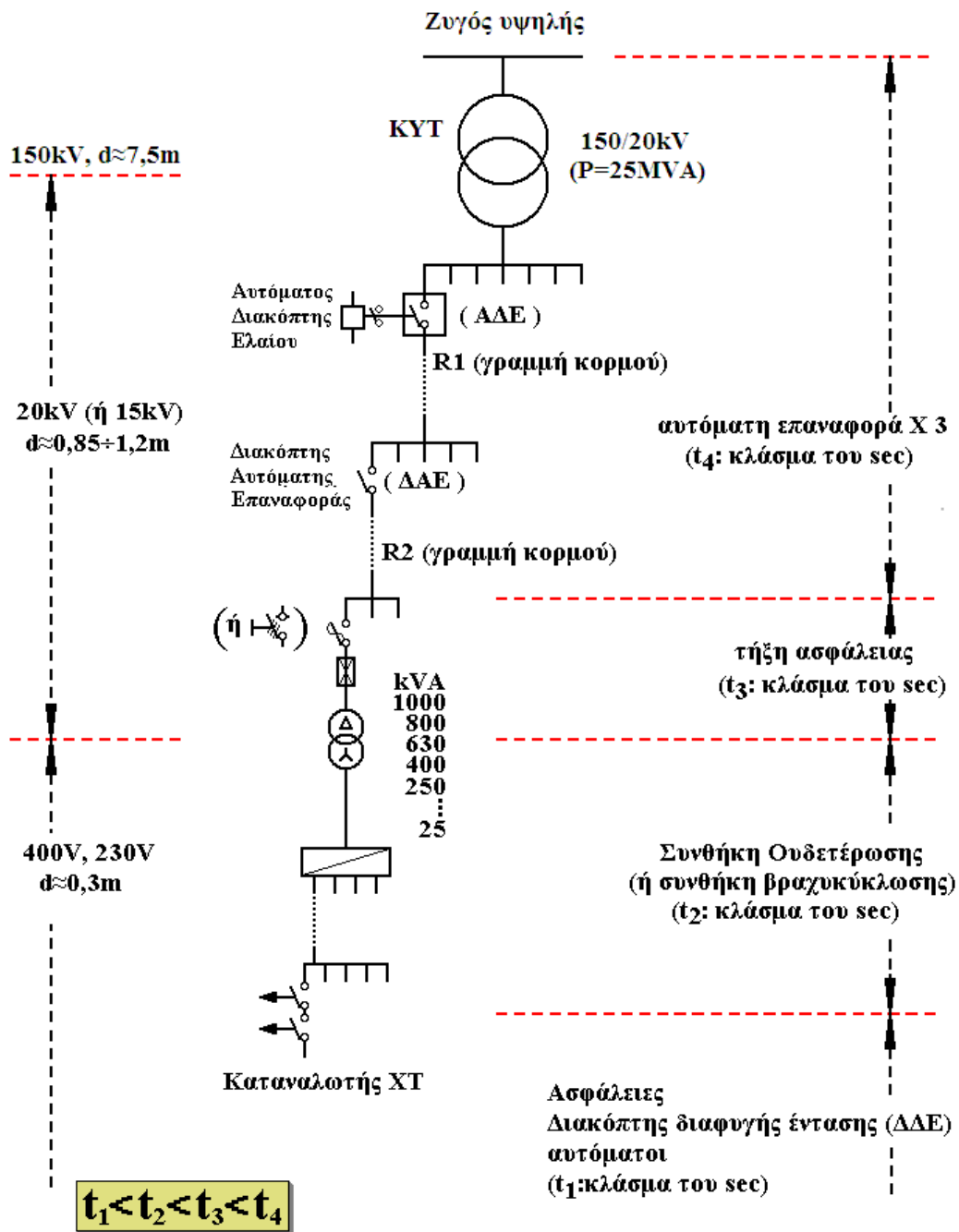
Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις εύκολα και με μικρές απώλειες. Αυτό οφείλεται στους μετασχηματιστές μεταφοράς, με τους οποίους ανυψώνεται αρχικά η τάση (πχ. Στα 150Kv και στα 400Kv), ώστε στη συνέχεια στα κέντρα διανομής υψηλής τάσης (ΚΥΤ) να διανεμηθεί σε γραμμές κυρίως των 20Kv (ή 15 Kv) απ' όπου ακολούθως ηλεκτροδοτούνται οι μετασχηματιστές διανομής για να υποβιβαστεί η

τάση στα 400V/230V και να διανεμηθεί μέσω γραμμών στους καταναλωτές χαμηλής τάσης. Εκτός των καταναλωτών χαμηλής τάσης υπάρχουν και καταναλωτές μέσης τάσης όταν τα φορτία τους ανά φάση είναι μεγαλύτερα από 200A. Τα εναέρια δίκτυα μεταφοράς και διανομής πλεονεκτούν έναντι των υπογείων δικτύων λόγω του μικρού τους κόστους .

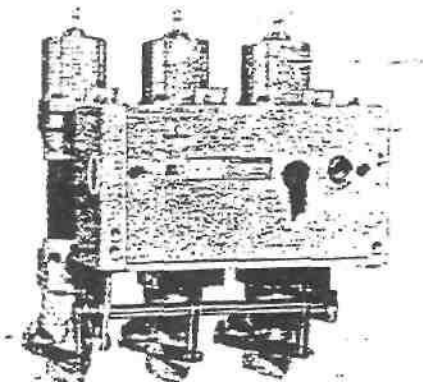
### **1.1.1 Το εναέριο δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας**

Τα εναέρια δίκτυα μέσης τάσης (MT) του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από μεγάλο πλήθος στοιχείων και έχουν κατά κανόνα δενδροειδή μορφή. Στο σχήμα 1.1.1-1 δίνεται απλοποιημένα ένα παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με αυτό, από το μετασχηματιστή υψηλής τάσης (150 kV/20 kV, 25 MVA) του Κέντρου Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ) αναχωρούν μέσω αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ –βλ. σχήμα 1.1.1-2) διάφορες γραμμές μέσης τάσης (20 kV), που η καθεμία αφορά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ευρύτερη περιοχή. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται «γραμμές κορμού» και κατασκευάζονται με αγωγούς μεγάλης διατομής, συνήθως 95mm<sup>2</sup> ισοδύναμου χαλκού, ενώ συμβολίζονται στα σχέδια με το γράμμα R και ένα αριθμό (π.χ. R 23). Καθεμία από τις παραπάνω γραμμές διακλαδίζεται σε ορισμένες γραμμές, που αφορούν την ηλεκτροδότηση (τμημάτων της ευρύτερης περιοχής) μέσω διακοπών αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ), οι οποίες ονομάζονται επίσης γραμμές κορμού.

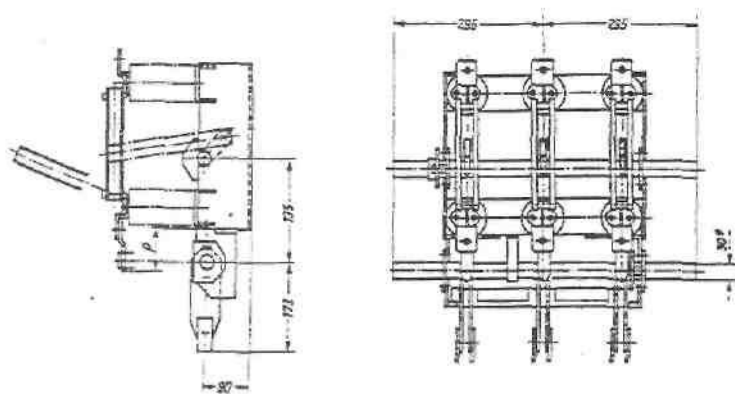
Δεδομένου ότι τα δίκτυα διανομής λειτουργούν ακτινικά η προστασία τους είναι δυνατή με απλές διατάξεις διαβαθμισμένες κατάλληλα. Κατά μήκος του δικτύου διανομής μέσης τάσης εγκαθίστανται μέσα ζεύξεως όπως αποζεύκτες (Σχήμα 1.1.1-3) και διακόπτες φορτίου και μέσα προστασίας όπως διακόπτες ισχύος (ΑΔΕ), διακόπτες απομονώσεως (Sectionalizers) και ασφάλειες. Τα μέσα ζεύξεως χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση ή απομόνωση των τμημάτων του δικτύου (π.χ. σε περιπτώσεις πυρκαγιών, εργασιών συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών). Τα μέσα προστασίας χρησιμοποιούνται για την αυτόματη απομόνωση τμημάτων του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος. Λόγω του ότι τα εναέρια δίκτυα μέσης τάσης είναι εκτεθειμένα, η συχνότητα εμφάνισης σφαλμάτων είναι αυξημένη. Αξιοσημείωτο είναι ότι σε ποσοστό που υπερβαίνει το 80% του συνόλου, τα σφάλματα είναι παροδικά.



**Σχήμα 1.1.1-1:** Απλοποιημένο παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας



**Σχήμα 1.1.1-2:** Αυτόματος διακόπτης ελαίου



**Σχήμα 1.1.1-3:** Τριπολικός αποζεύκτης μέσης τάσης με γείωση

Όταν συμβεί ένα σφάλμα σε μία γραμμή κορμού (π.χ. βραχυκύκλωμα λόγω πτώσης ενός κλαδιού στη γραμμή), τότε ο διακόπτης προστασίας (ΑΔΕ ή 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 ηλεκτροδότησης» 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 ΑΔΕ και των ΔΑΕ αποσκοπεί, σε περιπτώσεις εμφάνισης παροδικών σφαλμάτων, τόσο στην προσπάθεια για απρόσκοπτη ηλεκτροδότηση μίας μεγάλης

περιοχής, όσο και στην αποφυγή άσκοπων μετακινήσεων συνεργείων. Σημειώνεται ότι η διακοπή της ηλεκτροδότησης σε κάθε κύκλο λειτουργίας των ΑΔΕ και των ΔΑΕ συμβαίνει πάντοτε σε κλάσμα του δευτερολέπτου (σχεδόν ακαριαία διακοπή, π.χ.: 0,15 sec, 0,35 sec, κλπ.), που στην πράξη σημαίνει πως δεν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χρόνος για την εκδήλωση αξιόλογων θερμικών φαινομένων (δεν προκαλείται υπερθέρμανση της γραμμής πάνω από τα ανεκτά όρια, πολύ δε περισσότερο δεν δημιουργούνται τήγματα μετάλλου από τους αγωγούς).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1.1-1, οι γραμμές κορμού μέσω των ΔΑΕ διακλαδίζονται με την σειρά τους σε διάφορες γραμμές που καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού της μέσης τάσης σε χαμηλή τάση (20 kV/400V, 230 V). Οι υποσταθμοί αυτοί διακρίνονται σε υπαίθριους επί σύλων ισχύος μέχρι 400 kVA και σε εσωτερικού χώρου (συνήθως σε υπόγεια πολυκατοικιών) μεγαλύτερης ισχύος από 400 kVA. Στους υπαίθριους υποσταθμούς η γραμμή μέσης τάσης ηλεκτροδοτεί τον μετασχηματιστή μέσω μονοπολικών ασφαλειοαποζευκτών ή τριπολικών αποζευκτών (βλ. σχήμα 1.1.1-1), ενώ στους υποσταθμούς εσωτερικού χώρου η ηλεκτροδότηση του μετασχηματιστή γίνεται μέσω συγκροτήματος πινάκων. Σημειώνεται ότι για λόγους διασύνδεσης ή απομόνωσης γραμμών (σε περιπτώσεις π.χ. πυρκαγιών, εργασιών συντήρησης και εργασιών αποκατάστασης βλαβών) υπάρχουν στις γραμμές μέσης τάσης μονοπολικοί ασφαλειοαποζεύκτες και τριπολικοί αποζεύκτες μη εντασσόμενοι σε υπαίθριους υποσταθμούς.

Η παροχή χαμηλής τάσης (400 V, 230 V) σε πελάτες χαμηλής τάσης γίνεται μέσω γραμμών χαμηλής τάσης (από γυμνούς αγωγούς αλουμινίου ή συνεστραμμένα καλώδια) που ξεκινούν από τον πίνακα χαμηλής τάσης (ασφαλειοκιβώτιο) του υποσταθμού (σχήμα 1.1.1-1). Τα συνεστραμμένα καλώδια αποτελούν την σύγχρονη εξέλιξη των γραμμών διανομής χαμηλής τάσης.

Η παροχή μέσης τάσης σε καταναλωτές αφορά απορροφημένες εντάσεις ρεύματος άνω των 200Α ανά φάση, όπως συμβαίνει συνήθως σε βιομηχανίες, νοσοκομεία άνω των 100 κλινών, μεγάλα ξενοδοχεία, κτήρια ΑΕΙ, κλπ..

Τα σφάλματα του δικτύου διανομής οδηγούν στην μη κανονική λειτουργία του και οφείλονται κατά κύριο λόγο στην απώλεια μόνωσης, η οποία οδηγεί σε βραχυκύκλωμα. Το βραχυκύκλωμα, λόγω των υπερεντάσεων που δημιουργεί, καταπονεί δυναμικά και θερμικά τα στοιχεία του δικτύου και γενικότερα τις ηλεκτροτεχνικές κατασκευές, με αποτέλεσμα να προκαλούνται ακόμα και μόνιμες βλάβες του υλικού. Η δυσμενέστερη κατάσταση λειτουργίας θεωρείται ότι είναι το τριφασικό βραχυκύκλωμα λόγω των μεγάλων ρευμάτων

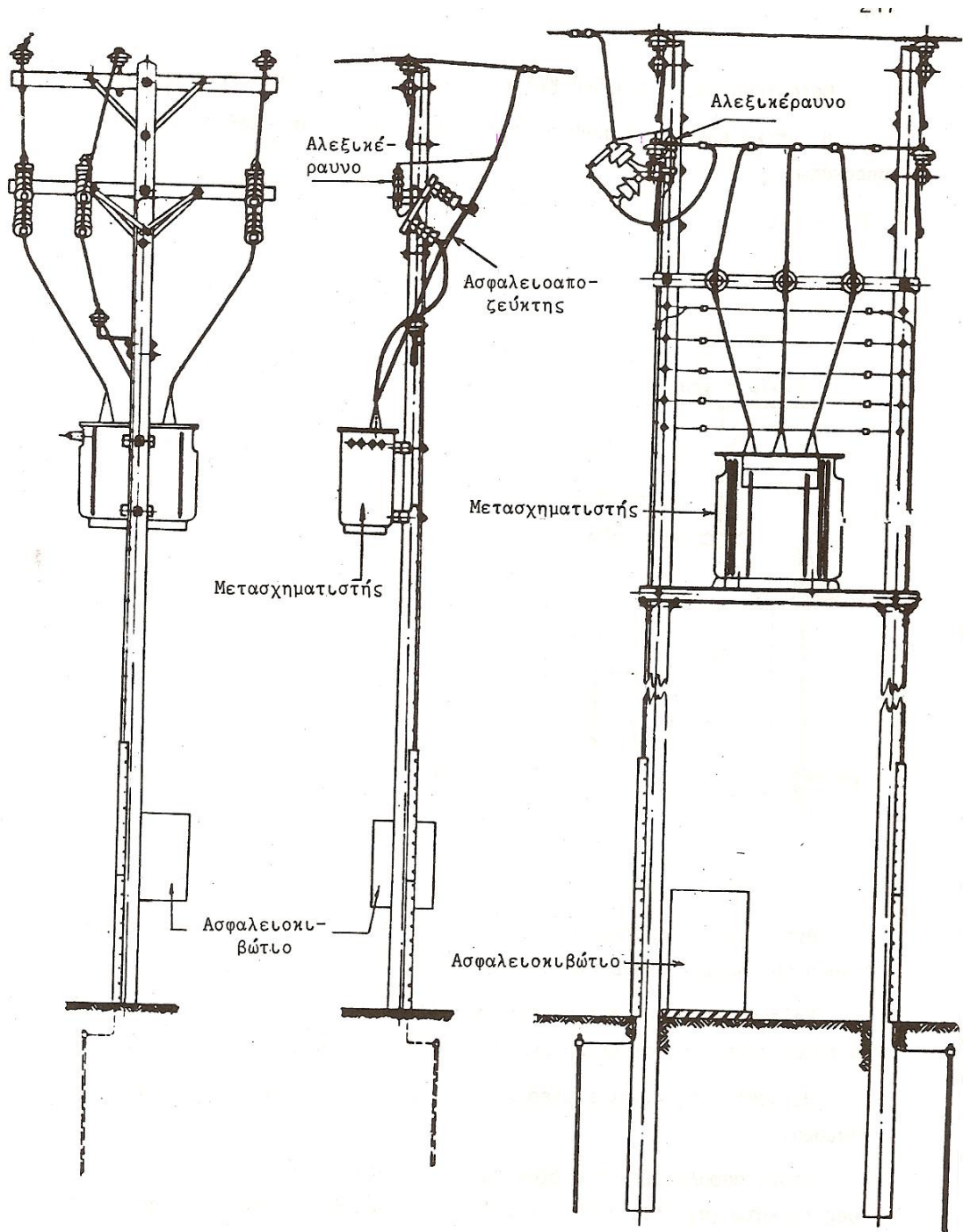
βραχυκυκλώσεως που δημιουργούνται. Εκτός από το βραχυκύκλωμα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει και η διηλεκτρική συμπεριφορά του εξοπλισμού μέσης και χαμηλής τάσης μίας εγκατάστασης διανομής, όπως: η αδυναμία εκδήλωσης σπινθηρισμών στους μονωτήρες μέσης τάσης, οι σωστές αποστάσεις μόνωσης κλπ.

## **1.2 ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΣ ΜΤ/ΧΤ**

Υποσταθμός γενικά ονομάζεται η ηλεκτρική εγκατάσταση στην οποία γίνεται η μετατροπή, η κατανομή και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Υ/Σ διανομής μετασχηματίζουν τη ΜΤ σε ΧΤ, δηλαδή τα 20 kV σε 400/230 V και διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές. Διακρίνονται σε εναέριους, επίγειους και υπόγειους. Οι εναέριοι έχουν μικρότερο κόστος, κατασκευάζονται όπου είναι δυνατή η εναέρια κατασκευή και όταν η ισχύς τους δεν υπερβαίνει κάποια ορισμένη τιμή. Οι επίγειοι κατασκευάζονται είτε σαν υπαίθριοι, είτε σαν κλειστού τύπου και είναι μεγάλης ισχύος. Οι υπόγειοι κατασκευάζονται όπου δεν υπάρχει αρκετός χώρος για να γίνουν επίγειοι.

### **1.2.1 Εναέριοι υποσταθμοί**

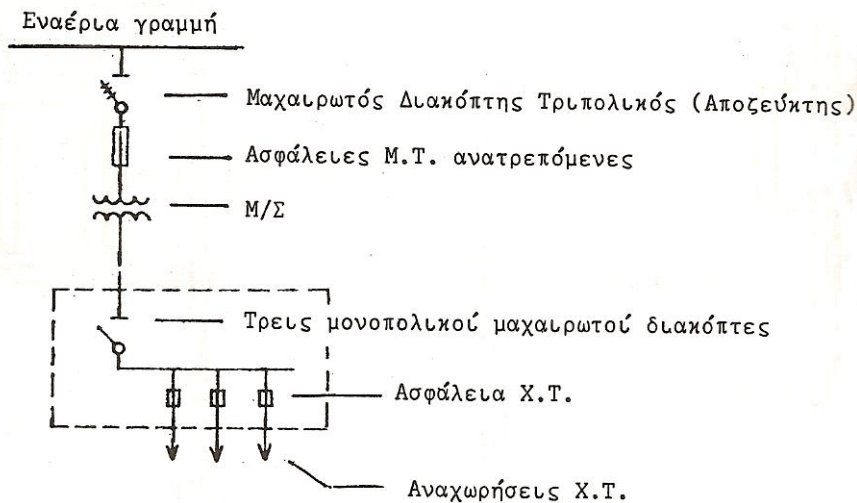
Η κατασκευή τους εξαρτάται από την ισχύ του μετασχηματιστή. Μετασχηματιστές ισχύος μέχρι και 50 KVA τοποθετούνται πάνω σε ένα στύλο(Σχήμα 1.2.1-1,1.2.1-2). Από 75 μέχρι 400 KVA οι μετασχηματιστές τοποθετούνται σε εξέδρα που στερεώνεται μεταξύ δύο στύλων. Οι μετασχηματιστές άνω των 500 KVA τοποθετούνται στο έδαφος. Αυτοί οι τύποι των Υ/Σ φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα.



**Σχήμα 1.2.1-1:** Εναέριοι υποσταθμοί διανομής



Η τυπική συνδεσμολογία των εναέριων Υ/Σ είναι η ακόλουθη:



**Σχήμα 1.2.1-2:** Τυπική συνδεσμολογία εναέριων Υ/Σ

Στους εναέριους Υ/Σ τοποθετούνται και καθοδικά αλεξικέραυνα. Το αλεξικέραυνο είναι μια ειδική συσκευή που έχει την εμφάνιση συνηθισμένου μονωτήρα πορσελάνης. Ο ένας του ακροδέκτης συνδέεται στον αγωγό της φάσης και ο άλλος στη γη. Χρειάζεται ένα αλεξικέραυνο για κάθε φάση.

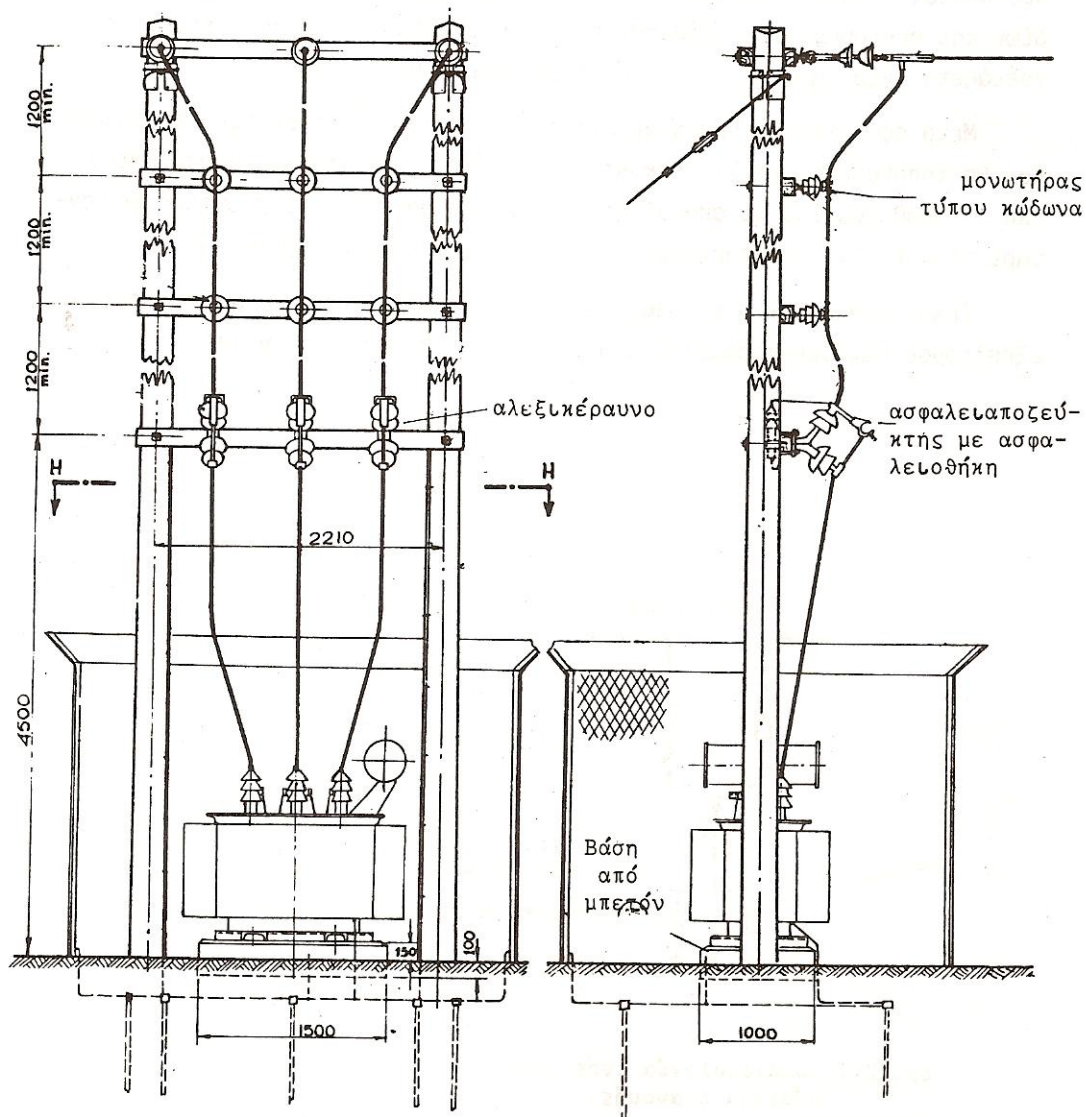
Τα αλεξικέραυνα συνδέονται εγκάρσια στις φάσεις. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας της γραμμής, ενώ χρειάζεται μικρή αντίσταση κατά την εμφάνιση υπερτάσεων (κεραυνικών ή χειρισμών). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μείωση των απωλειών κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, και ο περιορισμός των υπερτάσεων. Για να επιτευχθεί αυτό, για την κατασκευή των καθοδικών αλεξικέραυνων χρησιμοποιούνται μεταβλητές αντιστάσεις, οι οποίες μπορούν να είναι διάκενα, βαρύστορ κτλ.

### 1.2.2 Επίγειοι υποσταθμοί

Οι επίγειοι Υ/Σ διακρίνονται σε υπαίθριους και εσωτερικού χώρου και κατασκευάζονται για ισχύεις μεγαλύτερες από 500 KVA.

Οι εναέριοι Υ/Σ καθώς και οι υπαίθριοι αποτελούν ουσιαστικά τμήμα του εναέριου δικτύου. Οι σύλολι τους εξοπλίζονται κανονικά και μετά μπαίνει πρόσθετα ο απαραίτητος εξοπλισμός.

Ένας τυπικός υπαίθριος Υ/Σ έχει τη διάταξη του ακόλουθου σχήματος:



**Σχήμα 1.2.2-1:** Υπαίθριος επίγειος Υ/Σ

Στους κλειστούς Υ/Σ όμως τα πράγματα είναι διαφορετικά. Αρχικά κατασκευάζεται και διαμορφώνεται η οικοδομή σύμφωνα με τον κτηριοδομικό κανονισμό, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του Υ/Σ (κανάλια καλωδίων, αερισμός κτλ). Στη συνέχεια, γνωρίζοντας το συγκεκριμένο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό που θα εγκατασταθεί, τοποθετούνται οι απαραίτητες σιδηροκατασκευές, πάνω στις οποίες μοντάρονται τα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα. Τέλος, εγκαθίσταται και συναρμολογείται ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός.

### **1.3 Η ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΥΠΑΙΘΡΙΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Η διάρκεια ζωής των υπαίθριων εγκαταστάσεων διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται βασικά από εκείνη των μετασχηματιστών διανομής, των μονωτήρων, των αγωγών και των στύλων που στη συντριπτική πλειονότητά τους είναι ξύλινοι.

Η φυσιολογική γήρανση των μονώσεων συμβαίνει κάτω από τιμές της πεδιακής έντασης όπου η καταπόνηση μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι κυρίως θερμική. Θερμική καταπόνηση από τις απώλειες Joule υφίστανται τα ηλεκτρομονωτικά υλικά όλων των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών, ιδιαίτερα όταν συμβαίνει κακή απαγωγή θερμότητας. Η εικόνα που παρουσιάζει μία θερμικά καταπονημένη μόνωση από στερεά μονωτικά είναι η απανθράκωση και τήξη τους στην περιοχή όπου οι απώλειες Joule είναι ιδιαίτερα αυξημένες.

Η διάρκεια ζωής στην πλειονότητα των μετασχηματιστών διανομής είναι της τάξεως των 50 ετών, δεδομένου ότι η θερμοκρασία λειτουργίας τους δεν υπερβαίνει συνήθως τους 80°C.

Σε ότι αφορά τους αγωγούς (τόσο στη μέση τάση όσο και στη χαμηλή) στην από αλουμίνιο επιφάνειά τους σχηματίζεται με την πάροδο του χρόνου αλουμίνα (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) που σε περιοχές μακριά από τη θάλασσα τους προστατεύει, γιατί είναι μονωτικό με μεγάλη διηλεκτρική αντοχή σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Γι' αυτό η διάρκεια ζωής των γυμνών αγωγών στις γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης είναι τουλάχιστον 50 έτη, όπως εξάλλου προκύπτει και από την αποκτηθείσα εμπειρία στα δίκτυα.

Τέλος, οι ξύλινοι στύλοι (που κυρίως χρησιμοποιούνται στα εναέρια δίκτυα) προέρχονται από κορμούς κωνοφόρων δένδρων, που επιδέχονται επεξεργασία με ειδικά υγρά (κρεόζωτο), ώστε να μην υφίστανται διάβρωση εντός του εδάφους από διάφορα παράσιτα. Από τις πρακτικές εφαρμογές προκύπτει ότι η διάρκεια ζωής των στύλων αυτών συμβαδίζει συνήθως με εκείνη των υπόλοιπων στοιχείων του δικτύου, που προαναφέρθηκαν, πολύ δε περισσότερο όταν πρόκειται για τσιμεντένιους ή σιδερένιους στύλους.

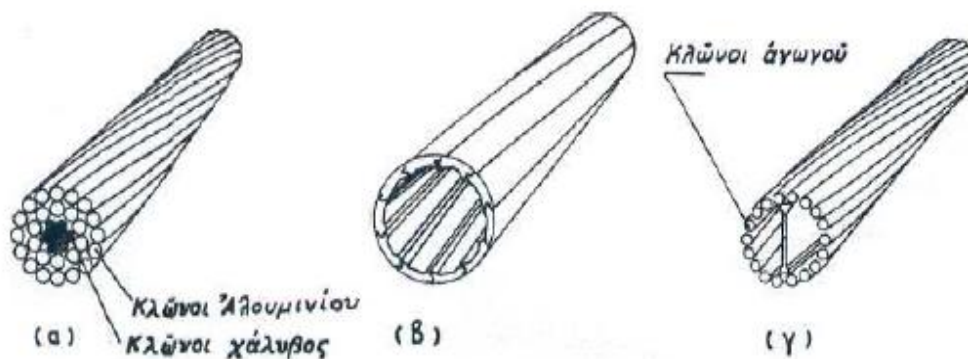
## 1.4 ΟΙ ΑΓΩΓΟΙ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Τα κύρια υλικά των αγωγών των εναέριων γραμμών είναι ο χαλκός και το αλουμίνιο. Ο χαλκός έχει υψηλή αγωγιμότητα και όταν είναι σκληρής ολκήσεως, εμφανίζει μεγάλη μηχανική αντοχή. Βασικό τεχνικό μειονέκτημα του είναι το βάρος του. Το αλουμίνιο είναι κατώτερο του χαλκού σε αγωγιμότητα και αντοχή, αλλά είναι πολύ ελαφρότερο από τον χαλκό και συνδυαζόμενο με χάλυβα, για απόκτηση της απαιτούμενης μηχανικής αντοχής είναι δυνατόν να συναγωνισθεί αποτελεσματικά το χαλκό. Κατά τα τελευταία χρόνια λόγω μεγαλύτερου κόστους, αλλά και επειδή πολλές φορές δεν ήταν εύκολα διαθέσιμος ο χαλκός, η χρήση του αλουμινίου ως αγωγού έχει επεκταθεί πολύ σε βάρος του χαλκού. Στις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας ειδικότερα το αλουμίνιο χρησιμοποιείται ήδη σε συντριπτική πλειοψηφία έναντι τού χαλκού. Στις γραμμές μεταφοράς του ελληνικού συστήματος χρησιμοποιούνται αποκλειστικά αγωγοί αλουμινίου. Οι αγωγοί των γραμμών, στα μεγέθη τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως στις γραμμές μεταφοράς, δεν είναι συμπαγείς, αλλά αποτελούνται από πλήθος συνεστραμμένων κλώνων, για λόγους ευκαμψίας. Στη συνήθη τυποποίηση ένας κεντρικός κλώνος περιβάλλεται από αριθμό διαδοχικών στρωμάτων, κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από πολλούς όμοιους κλώνους, τα διαδοχικά δε στρώματα των κλώνων είναι εναλλάξ συνεστραμμένα κατ' αντίθετες φορές. Κατ' αυτό τον τρόπο στον πλήρη αγωγό οι κλώνοι συγκρατούνται στερεά μεταξύ τους, αλλά ο αγωγός έχει ακόμη πολύ μεγαλύτερη ευκαμψία από αυτήν που θα είχε, εάν ήταν συμπαγής της αυτής διατομής.

Όπως αναφέρθηκε ήδη προηγουμένως το αλουμίνιο δεν χρησιμοποιείται μόνο του σαν αγωγός των εναέριων γραμμών μεταφοράς, λόγω μικρής μηχανικής αντοχής. Η τεχνική των συνεστραμμένων κλώνων διευκολύνει την ενσωμάτωση μέσα στον αγωγό αλουμινίου συρμάτων χάλυβα, τα οποία προσδίδουν σ' αυτόν την απαιτούμενη μηχανική αντοχή. Προκύπτει κατ' αυτόν τον τρόπο ο χρησιμοποιούμενος ευρύτατα αγωγός αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (ACSR), ο οποίος στο κέντρο έχει τους κλώνους από χάλυβα και επάνω από αυτούς τους κλώνους του αλουμινίου. Οι κλώνοι χάλυβα, εάν είναι περισσότεροι του ενός είναι διατεταγμένοι σε στρώματα τα οποία αποτελούν τον πυρήνα ή ψυχή τού αγωγού πάνω στην οποία είναι διατεταγμένα τα στρώματα των κλώνων αλουμινίου (σχήμα 1.4-1<sup>α</sup>).

Η επιλογή σε κάθε περίπτωση της κατάλληλης συνθέσεως του αγωγού βασίζεται στις μηχανικές και ηλεκτρικές απαιτήσεις της γραμμής. Πολύ διαδεδομένη είναι η αμερικανική τυποποίηση των αγωγών ACSR, η οποία προβλέπει εκτεταμένη περιοχή

διατομών. Στις ελληνικές γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται οι εξής τρεις διατομές αγωγών ACSR: 336 MCM ( $170 \text{ mm}^2$ ), 636 MCM ( $322 \text{ mm}^2$ ) και 954 MCM ( $483 \text{ mm}^2$ ). Η πρώτη χρησιμοποιείται στις γραμμές 66 KV και στις ελαφρές γραμμές 150 KV, η δεύτερη στις βαριές γραμμές 150 KV και η Τρίτη στις γραμμές 400 KV. Οι τιμές των διατομών, οι οποίες χαρακτηρίζουν τους αγωγούς ACSR είναι οι τιμές των διατομών του αλουμινίου των αγωγών. Οι αντίστοιχες διατομές του χάλυβα των αγωγών όπως και η ακριβής σύνθεση των αγωγών, καθώς το πλήθος η διάμετρος των κλώνων αλουμινίου και χάλυβα δίνονται σε σχετικούς πίνακες των αγωγών ACSR.



**Σχήμα 1.4-1:** Αγωγοί γραμμών μεταφοράς (α) τυπικός αγωγός αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβα (ACSR)(β) κοίλος αγωγός χαλκού (γ) κοίλος αγωγός χαλκού με διαμήκη αγώγιμη δοκό

Κατά τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται και αγωγοί από κράματα αλουμινίου με άλλα μέταλλα, όπως το μαγνήσιο και πυρίτιο. Οι αγωγοί αυτοί έχουν αυξημένη μηχανική αντοχή, ώστε να ικανοποιούν τις μηχανικές απαιτήσεις των γραμμών χωρίς ενίσχυση από χάλυβα, ενώ διατηρούν αγωγιμότητα παραπλήσια εκείνης του αλουμινίου. Πλεονέκτημα των αγωγών από κράματα αλουμινίου είναι η ομοιογένεια του υλικού τους, λόγω της οποίας αποφεύγονται και ορισμένα προβλήματα ηλεκτρολυτικής διαβρώσεως, τα οποία εμφανίζει πολλές φορές η συνύπαρξη δύο διαφορετικών μετάλλων, όπως το αλουμίνιο και ο χάλυβας στους αγωγούς ACSR, όπως και η απλούστευση των συνδέσεων και τερματισμών. Η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού χρησιμοποιεί αγωγούς κραμάτων αλουμινίου στις γραμμές μέσης τάσεως αυτής.

Λόγω των υψηλών τάσεων λειτουργίας των γραμμών μεταφοράς η ένταση του ηλεκτροστατικού πεδίου πάνω στην επιφάνεια του αγωγού είναι ισχυρή και είναι σε θέση να προκαλέσει διάσπαση του αέρα γύρω από αυτόν. Η διάσπαση αυτή, η οποία είναι γνωστή ως στεμματοειδής εκκένωση "Corona" συνοδεύεται από θόρυβο ο οποίος μοιάζει

με τριγμό και ο οποίος είναι αισθητός πολλές φορές κοντά στις γραμμές μεταφοράς ή υποσταθμούς υψηλής τάσεως. Η εκκένωση Corona έχει ως αποτέλεσμα απώλεια ενέργειας και αποτελεί πηγή ταλαντώσεων υψηλής συχνότητας, οι οποίες παρενοχλούν παρακείμενες εγκαταστάσεις ή συσκευές τηλεπικοινωνιών και ειδικότερα τις ραδιοφωνικές. Ως εκ τούτου πρέπει το φαινόμενο Corona να αποφεύγεται ή να ελαχιστοποιείται. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος μείωσης της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου, προς μείωση του φαινομένου Corona είναι η αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας όλων των εκτεθειμένων αγωγίων επιφανειών, δεδομένου ότι για ορισμένη τάση το πεδίο εξαρτάται σημαντικά από τη γεωμετρία των αγωγών.

Στην περίπτωση γραμμών μεταφοράς αυτό επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση αγωγών με μεγαλύτερες διατομές και για κάθε επίπεδο τάσεως λειτουργίας βρίσκεται η κατά προσέγγιση ελάχιστη διατομή προς αποφυγή του φαινομένου Corona. Στις μικρότερες τάσεις λειτουργίας το απαιτούμενο από τη μηχανική αντοχή ή την ικανότητα φορτίσεως μέγεθος του αγωγού υπερβαίνει σχεδόν πάντοτε την ελάχιστη αυτή διατομή. Για τις υψηλότερες όμως τάσεις, τις μεγαλύτερες περίπου από 110 KV, η ελάχιστη διατομή καθορίζεται συχνά από τους περιορισμούς του φαινομένου Corona σε τιμή μεγαλύτερη από εκείνη την οποία θα απαιτούσαν οι άλλες συνθήκες.

Οι αγωγοί ACSR, οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη διάμετρο για δεδομένη αντοχή και αγωγιμότητα από τους αντίστοιχους αγωγούς χαλκού, πλεονεκτούν έναντι των τελευταίων από απόψεως εμφανίσεως του φαινομένου Corona. Προς αντιμετώπιση του φαινομένου Corona στους αγωγούς χαλκού αναπτύχθηκαν οι καλούμενοι “κοίλοι αγωγοί” χαλκού οι οποίοι έχουν αυξημένη διάμετρο για ορισμένη αγωγιμότητα και αντοχή. Αυτοί αποτελούνται από κυκλικούς ή πεπλατυσμένους κλώνους διατεταγμένους στην περιφέρεια κύκλου του οποίου το εσωτερικό μένει κενό, προσδίδοντας στους αγωγούς σωληνωτή δομή.

Ορισμένοι κοίλοι αγωγοί φέρουν στο εσωτερικό τους διαμήκη συνεστραμμένη δοκό μορφής I (σχήμα 1.4-1β, 1.4-1γ). Οποσδήποτε η αντιμετώπιση των προβλημάτων του φαινομένου Corona στις εξαιρετικά υψηλές τάσεις μεταφοράς με αύξηση της διαμέτρου των αγωγών δεν είναι συμφέρουσα και για τον λόγο αυτόν εφαρμόζεται κατά κανόνα η πλεονεκτικότερη τεχνική των πολλαπλών αγωγών ανά φάση. Αυτή συνίσταται στον εξοπλισμό κάθε φάσεως της γραμμής με δύο, τρεις, τέσσερις ή και περισσότερους αγωγούς με κατάλληλο διάστημα μεταξύ τους, το άθροισμα των διατομών των οποίων αποτελεί την ολική διατομή του πολλαπλού αγωγού. Η χρησιμοποίηση πολλών αγωγών ανά φάση έχει ως αποτέλεσμα μία σοβαρή μείωση της επιφανειακής εντάσεως του ηλεκτρικού

πεδίου καθενός από τους αγωγούς αυτούς και αντίστοιχη μείωση του φαινομένου Corona και των συνεπειών του. Η μείωση της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου οφείλεται γενικώς στην αύξηση της φαινόμενης διαμέτρου των αγωγών. Στις γραμμές 150 KV του ελληνικού συστήματος μεταφοράς χρησιμοποιούνται απλοί αγωγοί, ενώ στις γραμμές 400 KV δύο αγωγοί ανά φάση, ο καθένας διατομής  $954 \text{ MCM} = 483 \text{ mm}^2$  (διατομή πολλαπλού αγωγού φάσεως  $2 \times 954 \text{ MCM} = 2 \times 483 \text{ mm}^2$ ).

Οι αγωγοί γης οι οποίοι δεν διαρρέονται από ρεύμα, υπό κανονικές συνθήκες είναι συνήθως χαλύβδινοι και αποτελούνται από συνεστραμμένους κλώνους. Οι αγωγοί γης διαρρέονται από ρεύματα βιομηχανικής συχνότητας κατά τη διάρκεια μονοφασικών ή διφασικών προς γη βραχυκυκλωμάτων και από κρουστικά ρεύματα, όταν πληγούν από κεραυνό. Έν τούτοις η διάρκεια των ρευμάτων αυτών είναι τόσο μικρή ώστε η ικανότητα φορτίσεως των χαλύβδινων αγωγών να επαρκεί για τα ρεύματα αυτά. Εάν όμως για οποιοδήποτε λόγο απαιτούνται αυξημένες αγωγιμότητες αγωγών γης, τότε είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν αγωγοί αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβος.

Στις ελληνικές γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι αγωγοί γης διαμέτρου 9,4 mm στις γραμμές 150KV, και 12,6 mm στις γραμμές 400KV.

Σημειώνεται ότι η μονάδα μετρήσεως διατομής CM (Circular Mil) ισούται προς  $1/1.273.000$  της τετρ. Ίντσας, δηλαδή προς  $5,067 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ . Συνήθως χρησιμοποιείται το πολλαπλάσιο αυτού,  $\text{MCM} = 1000 \text{ CM}$ .

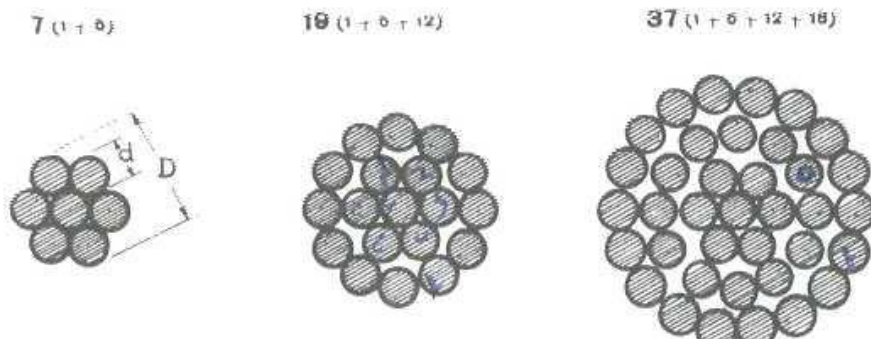
Συνήθως, στον χαρακτηρισμό των αγωγών ACSR ή αλουμινίου, δίνεται και η ισοδύναμη διατομή χαλκού. Αυτή είναι η διατομή που θα είχε ένας αγωγός ίσης αντίστασης, αν κατασκευαζόταν από χαλκό. Οι ωμικές αντιστάσεις των πολύκλωνων αγωγών προκύπτουν από την ονομαστική διατομή τους. Η αγωγιμότητα που πρέπει να ληφθεί στους υπολογισμούς είναι διαφορετική απ' ότι η αγωγιμότητα του καθαρού υλικού. Η μηχανική επεξεργασία και η συστρόφή των αγωγών αυξάνουν την αντίσταση του αγωγού.

### 1.4.1 Μορφή αγωγών

Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται όπως αναφέραμε και προηγουμένως είναι χωρίς μόνωση και κατασκευάζονται από χαλκό, αλουμίνιο ή αλουμίνιο-χάλυβα (ACSR). Σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται αγωγοί από άλλα υλικά και κράματα π.χ. από γαλβανισμένο χάλυβα, φωσφορούχο ορείχαλκο κλπ.

Οι αγωγοί κατασκευάζονται μονόκλωνοι ή πολύκλωνοι. Στα εναέρια δίκτυα σπάνια χρησιμοποιούνται μονόκλωνοι αγωγοί, γιατί έχουν πολύ μικρότερη μηχανική αντοχή από τους πολύκλωνους. Επίσης οι μονόκλωνοι είναι δύσκαμπτοι. Η διατομή των μονόκλωνων αγωγών είναι μέχρι  $16\text{mm}^2$ .

Οι πολύκλωνοι αγωγοί έχουν τη μορφή του παρακάτω σχήματος



**Σχήμα 1.4.1-1** : Γυμνοί πολύκλωνοι αγωγοί αποτελούμενοι από 7, 19 και 37 κλώνους

Οι αγωγοί χαλκού και αλουμινίου, αποτελούνται από κλώνους της ίδιας διατομής. Γύρω από ένα κεντρικό αγωγό περιελίσσονται οι υπόλοιποι σε στρώσεις και οι αγωγοί παίρνουν τη μορφή των συρματόσχοινων. Οι αριθμοί των κλώνων είναι 7, 19, 37, 6 κλπ



Αν  $\kappa$  είναι ο αριθμός των κλώνων και  $\eta$  είναι ο αριθμός των στρώσεων γύρω από τον κεντρικό αγωγό τότε:

$$\kappa = 1+3^n(\eta+1) \quad [1.4.1-1]$$

Π.χ. αν  $\eta=2$  τότε:  $\kappa = 1+3 \times 2(2 + 1) = 1 + 18 = 19$  δηλαδή ο αγωγός αποτελείται από 19 κλώνους.

Αν κάθε κλώνος έχει διάμετρο  $d$  τότε ο αγωγός έχει διάμετρο  $D$ :

$$D = 4(2^n+1) \quad [1.4.1-2]$$

Π.χ. αν  $\eta=2$  (αγωγός με 19 κλώνους) τότε έχουμε:

$$D = d(2 \times 2 + 1) = 5d$$

Δηλαδή αν  $d=2\text{mm}$  τότε  $D = 5 \times 2 = 10\text{mm}$

Η διατομή του αγωγού δεν μπορεί να βρεθεί με τον τύπο:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \quad [1.4.1-3]$$

γιατί μεταξύ των αγωγών υπάρχουν διάκενα. Πρώτα υπολογίζουμε τη διατομή κάθε σύρματος (κλώνου):

$$s = \frac{\pi d^2}{4} \quad [1.4.1-4]$$

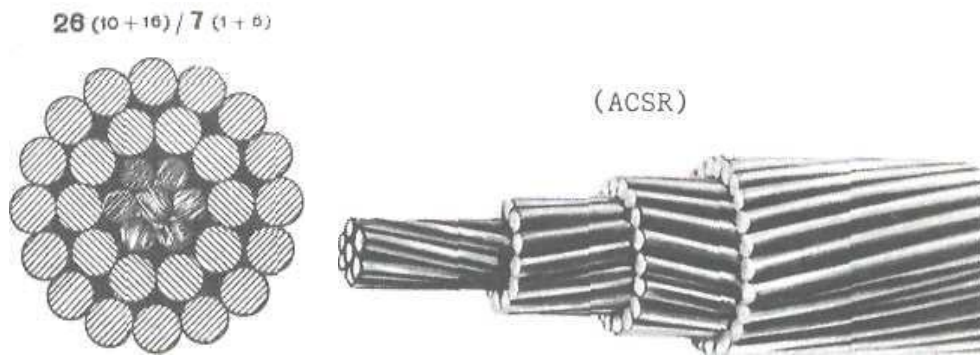
Και για το παράδειγμα μας έχουμε :

$$s = \frac{\pi 2^2}{4} = 3,14\text{mm}^2$$

Κατόπιν βρίσκουμε την συνολική διατομή:

$$S = \kappa s = 19s = 59,66\text{mm}^2$$

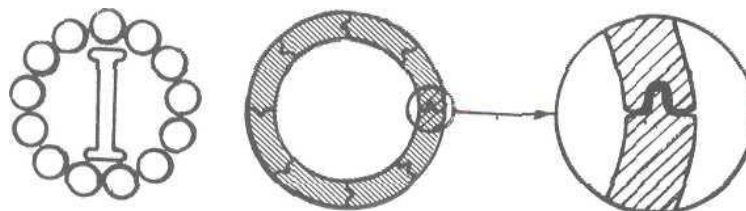
Οι αγωγοί αλουμινίου-χάλυβα ACSR έχουν τη μορφή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 1.4.1-2:** Μορφή αγωγών Αλουμινίου-Χάλυβα (ACSR)

Οι παραπάνω τύποι δεν μπορούν να εφαρμοστούν στους αγωγούς αυτούς γιατί η διάμετρος των χαλύβδινων συρμάτων είναι διαφορετική από την διατομή των συρμάτων αλουμινίου.

Σε γραμμές μεταφοράς πολύ υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται αγωγοί με ειδική διατομή.



**Σχήμα 1.4.1-3:** Αγωγοί ειδικών διατομών για γραμμές μεταφοράς πολύ υψηλής τάσης

## 1.4.2 Αγωγοί από χαλκό

Ο χαλκός έχει μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα και καλή μηχανική αντοχή. Η αγωγιμότητα του μειώνεται όταν έχει ξένες προσμίξεις. Επίσης μειώνεται λίγο η αγωγιμότητα του όταν κατεργαστεί εν ψυχρώ. Αυτό όμως του δίνει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή. Ένα άλλο πλεονέκτημα του είναι ότι δεν διαβρώνεται εύκολα και γι' αυτό χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε δίκτυα που είναι κοντά στη θάλασσα. Σήμερα, επειδή το αλουμίνιο έχει μικρότερο κόστος αντικαθιστά το χαλκό στους αγωγούς των εναέριων δικτύων.

### 1.4.3 Αγωγοί από αλουμίνιο

Το αλουμίνιο έχει εν συγκρίσει με τον χαλκό τα πλεονεκτήματα:

1. Είναι τρεις φορές ελαφρύτερο και
2. Είναι πιο φθηνό.

Τα μειονεκτήματα είναι.:

1. Έχει το ½ της μηχανικής αντοχής του χαλκού.
2. Έχει το 60% περίπου της αγωγιμότητας του χαλκού.

Έτσι ένας αγώνας αλουμινίου με ισοδύναμη διατομή με αγωγό από χαλκό έχει το ½ του βάρους του και διάμετρο μεγαλύτερη 1,6 φορές (60% μεγαλύτερη).

Τα παραπάνω μας δείχνουν ότι ο αγωγός από αλουμίνιο δέχεται μεγαλύτερες επιφορτίσεις από τον άνεμο και τον πάγο λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας του, αλλά συγχρόνως περιορίζονται σ' αυτόν οι απώλειες από το φαινόμενο Corona .

Το αλουμίνιο με κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες οξειδώνεται (σκουριάζει) επιφανειακά. Το στρώμα της οξείδωσης είναι πολύ λεπτό και προστατεύει τον αγωγό από την παραπέρα οξείδωση. Κοντά στη θάλασσα όμως (σε απόσταση μέχρι 1 Km περίπου) διαβρώνεται από το αλάτι που περιέχεται στον αέρα, σε βάθος μέχρι 3mm.

Οι αγωγοί αλουμινίου χρησιμοποιούνται κυρίως στις γραμμές χαμηλής τάσης και μακριά από τη θάλασσα. Στις γραμμές μέσης, υψηλής και υπερύψηλης τάσης δεν χρησιμοποιούνται γιατί έχουν μικρή μηχανική αντοχή. (Οι πυλώνες απέχουν πολύ μεταξύ τους και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις στους αγωγούς είναι πολύ μεγάλες).

### 1.4.4 Αγωγοί από αλουμίνιο-χάλυβα (ACSR)

Το μειονέκτημα των αγωγών αλουμινίου αντιμετωπίζεται με επιτυχία με τους αγωγούς ACSR. Αυτοί έχουν ψυχή από κλώνους με γαλβανισμένο χάλυβα, όπως φαίνεται και στο σχήμα (1.4.1-2) . Ο χάλυβας αναλαμβάνει τη μηχανική αντοχή και το αλουμίνιο την ηλεκτροδότηση. Το ρεύμα οδεύει κυρίως μέσα από το αλουμίνιο, δηλαδή το ρεύμα μέσα από το χάλυβα είναι αμελητέο.

Οι αγωγοί ACSR έχουν περίπου 50% μεγαλύτερη αντοχή από τους αγωγούς χαλκού και είναι 20% ελαφρύτεροι για ισοδύναμη διατομή με το χαλκό. Χρησιμοποιούνται στις γραμμές υψηλής τάσης και μέσης τάσης γιατί μπορεί να γίνει μεγαλύτερο άνοιγμα μεταξύ των θέσεων στήριξης (πυλώνων ή στηλών). Επίσης είναι, πιο φθηνοί και παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες λόγω του φαινομένου Corona.

Οι αγωγοί ACSR χαρακτηρίζονται κατά DIN ως εξής: Al/St = διατομή του Al/ διατομή του St. (π.χ. Al/St 185/32 σημαίνει αγωγός με 185 mm<sup>2</sup> Al και 32 mm<sup>2</sup> St). Σε σύνθετους αγωγούς η σχέση διατομών Al/St είναι συνήθως ίση με 6, ενώ σε μεγάλες διατομές μπορεί να φτάσει και το 20. Οι πολύκλωνοι ACSR αγωγοί αποτελούνται από 1 έως 3 στρώματα χαλύβδινων συρμάτων και 1 έως 3 στρώματα συρμάτων αλουμινίου. Τα σύρματα είναι συνεστραμμένα και μάλιστα η διεύθυνση συστρόφής είναι αντίθετη σε δυο γειτονικά στρώματα, πράγμα που εξασφαλίζει μια καλή συνοχή του συρματοσχοινού.

Συνήθως, στον χαρακτηρισμό των αγωγών ACSR ή αλουμινίου, δίνεται και η ισοδύναμη διατομή χαλκού. Αυτή είναι η διατομή που θα είχε ένας αγωγός ίσης αντίστασης, αν κατασκευαζόταν από χαλκό. Οι ωμικές αντιστάσεις των πολύκλωνων αγωγών προκύπτουν από την ονομαστική διατομή τους. Η αγωγιμότητα που πρέπει να ληφθεί στους υπολογισμούς είναι διαφορετική απ' ότι η αγωγιμότητα του καθαρού υλικού. Η μηχανική επεξεργασία και η συστρόφη των αγωγών αυξάνουν την αντίσταση του αγωγού.

## **1.5 ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ**

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται και αναλύεται η θερμική συμπεριφορά των στατικών ηλεκτρικών επαφών μόνιμων και λυόμενων ηλεκτρικών συνδέσμων καθώς και συνδυασμών αυτών, συμπεριλαμβανομένων και των αγωγών τροφοδοσίας υπό την επίδραση συνεχούς ρεύματος. Γίνεται επίσης μια σύντομη αναφορά σε φαινόμενα που εκδηλώνονται κατά την λειτουργία των επαφών.

### **1.5.1 Θερμικές καταπονήσεις ηλεκτρικών συνδέσμων-ορισμοί**

Οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι μεταξύ ρευματοφόρων αγωγών στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις διακρίνονται σε μόνιμους και λυόμενους.

Μόνιμοι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι είναι αυτοί που τα δύο αγώγιμα μέρη τους συνδέονται μεταξύ τους σταθερά μέσω κοχλιών. Τέτοιοι σύνδεσμοι είναι οι συνδέσεις των καλωδίων μέσω των ακροδεκτών τους, οι συνδέσεις μεταξύ των ζυγών, οι συνδέσεις σε κυκλώματα γειώσεων σε συστήματα αντικεραυνικής προστασίας κλπ.

Λυόμενοι σύνδεσμοι είναι αυτοί που μπορεί κανείς να χειρισθεί μέσω εξωτερικά εφαρμοζόμενης δύναμης. Οι λυόμενοι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι ή οι ηλεκτρικές επαφές διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- τις στατικές ηλεκτρικές επαφές (stationary electrical contacts) (είναι εκείνες που δεν έχουν ισχύ διακοπής, δηλαδή που μπορούν να χειρίζονται μόνο όταν το κύκλωμα έχει τεθεί εκτός τάσης μέσω ενός διακόπτη) όπως οι επαφές ενός αποζεύκτη ή ενός γειωτή
- και τις ηλεκτρικές επαφές που έχουν ισχύ διακοπής, χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητά τους να διακόπτουν την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, χωρίς να υφίστανται συνέπειες στη συμπεριφορά τους από το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται κατά το χειρισμό του φορτίου, όπως συμβαίνει με τις επαφές των διακοπών ισχύος και διακοπών φορτίου.

### **Οι στατικές ηλεκτρικές επαφές**

Ως ηλεκτρική επαφή ορίζεται μια λυόμενη σύνδεση δύο αγωγών η οποία έχει την δυνατότητα να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Η παραπάνω λυόμενη σύνδεση αποτελείται από δύο μέρη την κινητή επαφή και την σταθερή. Η δύναμη η οποία συγκρατεί τα δύο μέρη της επαφής μεταξύ τους καλείται δύναμη σύσφιξης των επαφών  $F$ .

Τα μέταλλα από τα οποία κατασκευάζονται συνήθως οι επαφές έχουν για λόγους διευκόλυνσης της διάβασης του ρεύματος, μεγάλη ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Για τον λόγο αυτό η σκληρότητα των μετάλλων αυτών δεν είναι μεγάλη και υπό την επίδραση των δυνάμεων σύσφιξης μπορούν να παραμορφωθούν ελαστικά και πλαστικά στις περιοχές που εφάπτονται υπό την επίδραση της δύναμης σύσφιξης. Αποτέλεσμα της συμπίεσης των δύο μερών είναι η δημιουργία ορισμένων περιοχών πάνω στον λυόμενο σύνδεσμο, οι οποίες φέρουν το φορτίο σύσφιξης της επαφής, χωρίς αυτό να σημαίνει αναγκαστικά ότι μέσω αυτών των περιοχών γίνεται διέλευση του ρεύματος. Το σύνολο των περιοχών αυτών δίνει την επιφάνεια σύσφιξης  $Ab$ . Η κατανομή των παραπάνω περιοχών είναι στατιστική και εξαρτάται κυρίως από το είδος των υλικών και την τραχύτητα των επιφανειών.

Ως πραγματική επιφάνεια  $A_c$  μιας επαφής ορίζεται η επιφάνεια μέσω της οποίας γίνεται τελικά η διέλευση του ρεύματος από το ένα μέρος της επαφής στο άλλο. Η επιφάνεια αυτή είναι λόγω των ξένων επικαθίσεων στις επαφές (κυρίως οξειδία μετάλλων και σκόνη) μικρότερη από την  $A_b$ . Όταν παρατηρεί κανείς μια ηλεκτρική επαφή νομίζει ότι τα δύο μέρη εφάπτονται σε μια πολύ ευρύτερη επιφάνεια από το σύνολο των περιοχών επαφής  $A_b$  που προαναφέρθηκαν. Αυτή η μακροσκοπικά παρατηρούμενη επιφάνεια ονομάζεται φαινόμενη επιφάνεια επαφής  $A_a$  και είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από το σύνολο των επιμέρους επιφανειών πραγματικής επαφής  $A_c$  οι οποίες έχουν την δυνατότητα να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα.

Γενικά ισχύει:  $A_c < A_b < A_a$

Ο όρος αντίσταση διάβασης αφορά την ηλεκτρική αντίσταση που παρουσιάζει μια επαφή κατά την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η αντίσταση διάβασης  $R$  περιλαμβάνει γενικά δύο όρους:

- την αντίσταση στένωσης  $R_c$  και
- την αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων στις επαφές  $R_f$

Η αντίσταση στένωσης  $R_c$ , είναι αποτέλεσμα της εξαναγκασμένης ροής του ηλεκτρικού ρεύματος από το ένα μέρος της επαφής στο άλλο. Η αντίσταση στένωσης περιλαμβάνει εξ ορισμού, την αντίσταση και στα δύο μέρη της επαφής. Η αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων οφείλεται στην δυσκολία των ηλεκτρικών φορέων να διαπεράσουν το στρώμα αυτό.

Η κατασκευή των ηλεκτρικών στατικών επαφών στην πράξη βασίζεται συνήθως στην κατασκευή ενός δοκιμίου, μέσω του οποίου επιδιώκεται η μείωση της αντίστασης διάβασης έτσι ώστε κατά την λειτουργία των επαφών αυτών υπό ονομαστικό ρεύμα να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των δοκιμών υπερθέρμανσης, και αντοχής στο ρεύμα βραχυκύκλωσης.

Η τιμή της αντίστασης διάβασης επηρεάζεται κυρίως από το είδος των υλικών, την δύναμη σύσφιξης των επαφών και γενικά από την γεωμετρία του λυόμενου συνδέσμου, από την οποία εξαρτάται η απαγωγή της θερμότητας Joule. Πολύ μεγάλη σημασία για την διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης διάβασης έχουν οι ξένες επικαθίσεις σε αυτές, οι οποίες μπορεί να είναι χημικές ενώσεις όπως οξείδια, οργανικές ουσίες, σκόνη κλπ.

Όλες οι προσπάθειες υπολογισμού της  $R_c$  οι οποίες έχουν επιχειρηθεί έγιναν κάτω από τις ακόλουθες παραδοχές:

- Το υλικό των επαφών ήταν το ίδιο και για τα δύο μέρη της επαφής
- Το υλικό ήταν ιστροπικό και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του σταθερή
- Η θερμοκρασία είναι σταθερή σε όλα τα σημεία της επιφάνειας επαφής  $A_c$  η οποία είναι ισοδυναμική επιφάνεια

Για την αντίσταση διάβασης σε μια στατική ηλεκτρική επαφή δε μπορεί να διατυπωθεί μια γενική μαθηματική σχέση υπολογισμού, γιατί τα φαινόμενα που εκδηλώνονται, κατά την διέλευση του ονομαστικού ρεύματος, δεν εξαρτώνται από το είδος του αγωγού και την διατομή των δύο μερών του λυόμενου συνδέσμου (σταθερό και κινητό μέρος) αλλά και από :

- Την δυνατότητα αερισμού, που παρέχεται από την κατασκευή, για την απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας στην επαφή
- Την δύναμη σύσφιξης των δύο μερών της επαφής,  $F$ , η οποία δεν πρέπει να προκαλεί παραμόρφωση ή άλλες βλάβες στο σύστημα του λυόμενου συνδέσμου
- Το ποσοστό επικάλυψης της επαφής από ξένες επικαθίσεις (κυρίως οξειδία μετάλλων και σκόνη), λόγω των οποίων εκδηλώνονται μη γραμμικά φαινόμενα στην επαφή, τα οποία επηρεάζουν σημαντικά με την πάροδο του χρόνου την αντίσταση διάβασης.

Σε ένα δεδομένο σύστημα επαφής, μια αύξηση της δύναμης σύσφιξης  $F$  συνεπάγεται αύξηση της επιφάνειας σύσφιξης ( $A_b$ ) με άμεση συνέπεια την μείωση της αντίστασης διάβασης, λόγω της αύξησης της πραγματικής επιφάνειας επαφής ( $A_c$ ). Η θεωρητική προσέγγιση του συσχετισμού της δύναμης σύσφιξης με την αντίσταση διάβασης μιας επαφής δεν είναι απόλυτα ικανοποιητική. Οι σχέσεις οι οποίες έχουν προταθεί είναι εμπειρικές και δίνουν μόνο την τάξη μεγέθους της αντίστασης διάβασης σαν συνάρτηση της δύναμης σύσφιξης των επαφών. Αυτό οφείλεται κυρίως στο διαφορετικό πάχος και είδος των επικαθίσεων στις διάφορες περιοχές επαφής, αλλά και στην τυχαία κατανομή τους στην επιφάνεια σύσφιξης. Φαίνεται ότι η επιφάνεια σύσφιξης ( $A_b$ ) διαφέρει σημαντικά από την πραγματική επιφάνεια ( $A_c$ ) γιατί ένα μέρος της επιφάνειας σύσφιξης καλύπτεται από επικαθίσεις των οποίων το πάχος μπορεί να είναι στην πράξη μεγαλύτερο από  $50 \text{ \AA}$ . Κατά συνέπεια αυτές οι περιοχές δεν είναι αγώγιμες. Αυτό δημιουργεί δυσκολίες

στο να διατυπωθεί μια μαθηματική σχέση μεταξύ της δύναμης σύσφιξης και της αντίστασης διάβασης σε μια επαφή. Γενικά όμως, η ολική αντίσταση της επαφής είναι αντιστρόφως ανάλογη της δύναμης σύσφιξης και της αντίστασης διάβασης σε μια επαφή, παρά την ύπαρξη επικαθίσεων.

Η ακόλουθη σχέση δίνει την αντίσταση στένωσης  $R_c$  για επιφάνεια  $A_c$  κυκλικής διατομής σε συνάρτηση με την ειδική αντίσταση του υλικού  $\rho$  και την ακτίνα  $r$

$$R_c = \frac{\rho}{2r} \quad [1.5.1-1]$$

Ένας παράγοντας που επηρεάζει την τιμή της αντίστασης  $R_c$  είναι η θερμοκρασία. Όταν η αντίσταση στένωσης μιας επαφής θερμανθεί από το ηλεκτρικό ρεύμα που την διαπερνά, τότε η τιμή της δίνεται από την σχέση

$$R_c(T) = R_c(T_0)[1 + a_x(T - T_0)] \quad [1.5.1-2]$$

όπου  $T_0$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $T > T_0$  και  $a_x$  ο θερμικός συντελεστής μεταβολής της αντίστασης στένωσης.

Θεωρητικοί υπολογισμοί επαληθεύουν την σχέση [1.5.1-2] και προσδιορίζουν τον συντελεστή  $a_x$  ίσο προς τα 2/3 του θερμικού συντελεστή  $\alpha$  του υλικού των επαφών.

Έτσι η σχέση [1.5.1-2] γίνεται:

$$R_c(T) = R_c(T_0)\left[1 + \frac{2}{3}(T - T_0)\right] \quad [1.5.1-3]$$

Οι σχέσεις [1.5.1-2] και [1.5.1-3] για τα συνήθη μέταλλα, που χρησιμοποιούνται στις επαφές, δίνουν τιμές της  $R_c$  οι οποίες είναι πολύ μικρές. Πειραματικά δεδομένα για συνήθεις επαφές των πρακτικών εφαρμογών δίνουν επίσης πολύ μικρές τιμές για την  $R_c$ , (της τάξης των  $2 \cdot 10^{-4} \Omega$ ). Οι τιμές αυτές της αντίστασης στένωσης δεν μπορούν να δικαιολογήσουν τις συνήθεις τιμές της πτώσης τάσης. Γι' αυτό μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η αντίσταση λόγω των ξένων επικαθίσεων σε μια επαφή έχει πρωτεύοντα ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της ολικής αντίστασης διάβασης.



### 1.5.2 Η πτώση τάσης σε μια επαφή σε σχέση με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται

Η θερμική και ηλεκτρική ροή υπακούουν σε διαφορετικούς νόμους. Η θερμική ενέργεια που ρέει σε συνάρτηση με τις θερμοκρασιακές μεταβολές και αντίστοιχα το ηλεκτρικό ρεύμα σε συνάρτηση προς την διαφορά δυναμικού. Σε συμμετρικά συστήματα ηλεκτρικών επαφών, η θερμική ροή ακολουθεί την ίδια διεύθυνση με την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Ως εκ τούτου υπάρχει μια θερμοκρασιακή διαφορά και διαφορά δυναμικού. Η σχέση αυτή διερευνήθηκε κάτω από διάφορες παραδοχές, όπως π.χ. οι προδιαγραφές που αναφέρθηκαν για τον υπολογισμό της αντίστασης στένωσης και επιπλέον ότι ο αγωγός που συνδέεται με την επαφή είναι μονωμένος θερμικά και ηλεκτρικά σε όλο το μήκος του.

Για την διατύπωση μιας ενεργειακής σχέσης, που διέπει μια επαφή, έχουν γίνει οι παρακάτω παραδοχές:

- Σαν είσοδος του ηλεκτρικού ρεύματος νοείται η πραγματική επιφάνεια επαφής, και σαν έξοδος μία επιφάνεια αρκετά μακριά από την είσοδο ώστε η ροή σε αυτή να μην επηρεάζει την θερμική και ηλεκτρική ροή στο άμεσο περιβάλλον της επαφής. Θεωρείται δηλαδή ότι λαμβάνει χώρα διάδοση θερμότητας μόνο δια αγωγής και κατά μήκος των αγωγών σύνδεσης και ότι δεν υπάρχουν θερμικές απώλειες στο άμεσο περιβάλλον της επαφής διά συναγωγής και ακτινοβολίας.
- Το σύστημα των δύο μερών της ηλεκτρικής επαφής είναι συμμετρικό.

Η δεύτερη παραδοχή σημαίνει ότι τα δύο μέρη της επαφής είναι από το ίδιο υλικό το οποίο είναι ιστροπικό, δηλαδή ότι η ειδική αντίσταση  $\rho$  και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda_\theta$ , εξαρτάται από την θερμοκρασία. Σημαίνει επίσης ότι η επιφάνεια της επαφής είναι ισοθερμική και ισοδυναμική (ταυτόχρονα και για τα δύο μέρη της επαφής), και ότι αυτή έχει την υψηλότερη θερμοκρασία του συστήματος λόγω συμμετρίας του οποίου δεν συμβαίνει ροή της θερμότητας από το ένα μέρος της επαφής στο άλλο.

Κάτω από αυτές τις παραδοχές ως συνάρτηση μεταξύ θερμοκρασίας  $T$  και τάσης  $U$ , για μία συμμετρική αντίσταση στένωσης, έχει προταθεί η σχέση :

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \lambda_\theta(T) dT = \frac{U^2}{8} \quad [1.5.2-1]$$

όπου  $\Delta T$  η διαφορά της θερμοκρασίας των σημείων επαφής από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Εάν χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του γινομένου  $\overline{\rho\lambda_\theta}$  τότε η σχέση [1.5.2-1] γίνεται:

$$\overline{\rho\lambda_\theta} \cdot \Delta T = U^2/8 \quad [1.5.2-2]$$

ή

$$U = \sqrt{8 \cdot \overline{\rho\lambda_\theta} \cdot \Delta T} \quad [1.5.2-3]$$

Η σχέση [1.5.2-3] δίνει τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί σε επαφές λόγω της αντίστασης στένωσης για δεδομένη πτώση τάσης.

Σε περίπτωση, που μέρος της παραγόμενης θερμότητας, διαφεύγει προς το περιβάλλον μέσο (όπως συμβαίνει στην πράξη), τότε η σχέση [1.5.2-1] γίνεται:

$$\overline{\rho\lambda_\theta} \cdot \Delta T \leq U^2/8 \quad [1.5.2-4]$$

και

$$U \geq \sqrt{8 \cdot \overline{\rho\lambda_\theta} \cdot \Delta T} \quad [1.5.2-5]$$

Θεωρώντας το νόμο των Wiedemann – Franz – Lorenz, κατά τον οποίο:

$$\rho(T)\lambda_\theta(T) = LT \quad [1.5.2-6]$$

όπου  $L$  σταθερά ανεξάρτητη από το μέταλλο  $L \cong 2,4 \cdot 10^{-8} \text{ V}/^\circ\text{K}^2$ , τότε η σχέση [1.5.2-1] γίνεται:

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T)\lambda_\theta(T)dT = \int_{T_0}^T LTdT = \frac{L}{2} T^2 - T_0^2 \leq \frac{U^2}{8} \quad [1.5.2-7]$$

ή

$$U \geq 2\sqrt{L T^2 - T_0^2} \quad [1.5.2-8]$$

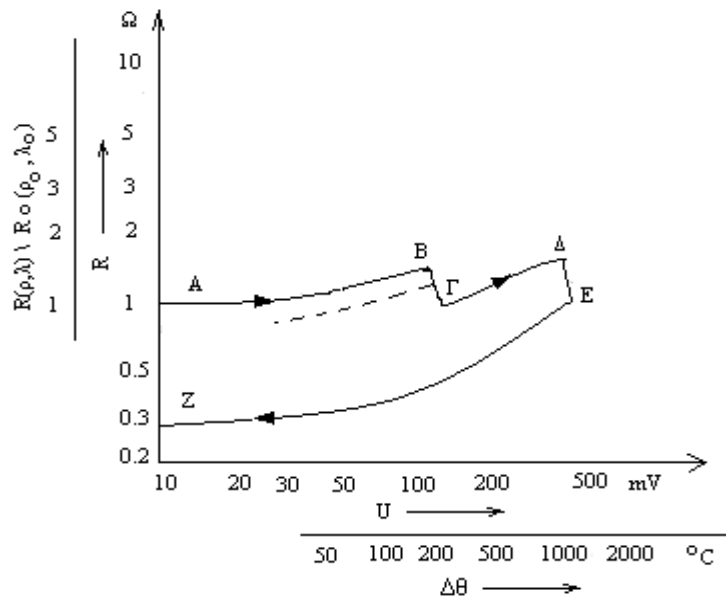
όπου  $T_0$  η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι σχέσεις [1.5.2-3] , [1.5.2-5] και [1.5.2-8] παρέχουν την δυνατότητα του κατά προσέγγιση υπολογισμού της πτώσης τάσης σε επαφές χωρίς επικαθίσεις. Στις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής της πτώσης τάσης σε καινούργιες επαφές.

### **1.5.3 Η αντίσταση διάβασης σε σχέση με την πτώση τάσης και τη διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην επαφή**

Στη βιβλιογραφία δίνονται διαγράμματα που αφορούν στην αντίσταση διάβασης σε συνάρτηση με την πτώση τάσης ή τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον λυόμενο σύνδεσμο, ανάλογα με τη δύναμη σύσφιξης και την τιμή του ρεύματος. Ένα παράδειγμα δίνεται στο σχήμα (1.5.3-1), από όπου φαίνεται ότι οι συναρτήσεις  $R=f(U)$  και  $R=f(\Delta\theta)$  είναι αύξουσες στην περιοχή των πρακτικών εφαρμογών ( $\Delta\theta < 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Όπως φαίνεται στο σχήμα (1.5.3-1) οι χαρακτηριστικές αυτές σχεδιάζονται σε λογαριθμική κλίμακα. Στον άξονα των  $y$  δίνεται συνήθως η πτώση τάσης στην επαφή και ταυτόχρονα η διαφορά θερμοκρασίας (τα μεγέθη αυτά συνδέονται σύμφωνα με τη σχέση [1.5.2-3]. Στον άξονα των  $x$  δίνεται επίσης ο λόγος  $R(\rho, \lambda)/R_0(\rho_0, \lambda_0)$ , δηλαδή το πηλίκο της αντίστασης διάβασης  $R$  σε θερμοκρασία  $\vartheta$  (όπου η ειδική αντίσταση έχει την τιμή  $\rho$  και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας έχει την τιμή  $\lambda$ ) προς την αντίσταση διάβασης  $R_0$  σε θερμοκρασία χώρου  $\vartheta_0$  (με ειδική αντίσταση  $\rho_0$  και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda_0$ ). Ο λόγος αυτός θα μπορούσε να γραφεί και ως  $R(\vartheta)/R_0(\vartheta)$  (βλέπε σχέση [1.5.2-6]).

Στη χαρακτηριστική του (1.5.3-1) διακρίνει κανείς τις περιοχές AB, ΒΓ, ΓΔ, ΔΕ και ΕΖ. Η σειρά των γραμμάτων αντικατοπτρίζει τη χρονική εξέλιξη της σχέσης. Στο τμήμα AB η αντίσταση διάβασης αυξάνει με τη θερμοκρασία. Η αύξηση της αντίστασης διάβασης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση [1.5.1-2].



**Σχήμα 1.5.3-1:** Τυπική χαρακτηριστική  $R=f(U)$  ή  $R=f(\Delta\theta)$  για μια συμμετρική καινούργια επαφή από χαλκό με δύναμη σύσφιξης 100 gr. Γεωμετρία επαφής: κύλινδρος – κύλινδρος

Στην περιοχή ΒΓ η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη. Η μείωση αυτή μπορεί να αιτιολογηθεί από την αύξηση της επιφάνειας  $A_0$  (προς την οποία η  $R$  είναι αντιστρόφως ανάλογη), λόγω μείωσης της σκληρότητας του υλικού από την ανακρυστάλλωση, που υφίσταται κατά την ανόπτηση. Όπως φαίνεται από το σχήμα (1.5.3-1) η περιοχή της θερμοκρασίας ανόπτησης (περιοχή ΒΓ) για τον χαλκό είναι από 190°C έως 200°C. Η περιοχή αυτή είναι για τον άργυρο 180° C έως 185° C.

Στο τμήμα ΓΔ της χαρακτηριστικής  $R=f(\Delta\theta)$  η επιφάνεια  $A_c$  φαίνεται ότι έχει σταθερή τιμή μετά την ανακρυστάλλωση και γι' αυτό η αντίσταση διάβασης αυξάνει σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Η ΓΔ είναι πρακτικά παράλληλη προς την ΑΒ. Σε αρκετά υλικά επαφών η παραπάνω αύξηση είναι σύντομη ή δεν υπάρχει, γιατί συνεχίζεται η ανακρυστάλλωση με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Στο σημείο Δ της χαρακτηριστικής συμβαίνει η τήξη του υλικού (η θερμοκρασία τήξης του χαλκού είναι 1083°C). Η επιφάνεια  $A_c$  αυξάνει και υπάρχει μεταλλική συνέχεια μεταξύ των δύο μερών της επαφής, λόγω συγκόλλησης της. Η αύξηση της επιφάνειας  $A_c$  και η συγκόλληση των επαφών συνεπάγονται μείωση της αντίστασης διάβασης στην επαφή και αυτό φαίνεται στο τμήμα της καμπύλης ΔΕ. Όταν από το σημείο Ε της χαρακτηριστικής μειωθεί η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, τότε η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη (τμήμα ΕΖ). Η ΕΖ είναι πρακτικά παράλληλη προς την ΑΒ.

Το τμήμα AB της χαρακτηριστικής αποδίδει την ιδανική συμπεριφορά των επαφών (σταθερή επιφάνεια  $A_c$ ), τόσο κατά την αύξηση όσο και τη μείωση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος. Στην πράξη όμως η επιφάνεια  $A_c$  δεν έχει σταθερή τιμή γιατί η σκληρότητα των υλικών της επαφής μεταβάλλεται από τις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας που παράγεται, σε συνδυασμό με τις θλιπτικές τάσεις.

Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις επαφών οι οποίες έχουν συγκολληθεί υπό την επίδραση υψηλής θερμοκρασίας, το τμήμα EZ στο σχήμα (1.5.3-1) είναι το ίδιο, τόσο κατά την αύξηση όσο και τη μείωση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος (η επιφάνεια  $A_c$  μένει σταθερή λόγω της συγκόλλησης). Στις περιπτώσεις που η θερμοκρασία είναι μικρότερη από εκείνη του σημείου τήξης και βρίσκεται κοντά στη θερμοκρασία ανόπτησης, η χαρακτηριστική μπορεί να είναι η ίδια κατά την αύξηση ή μείωση της τιμής του ρεύματος, όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα (1.5.3-1) με διακεκομμένη γραμμή. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να εξηγηθεί από την ψυχρή συγκόλληση που συμβαίνει σε καινούργιες και καθαρές επαφές. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση οι επαφές πρέπει να θεωρούνται ότι έχουν σχεδόν κολλήσει αν και η θερμοκρασία τους δεν έχει φθάσει στο σημείο τήξης.

Από τη χαρακτηριστική  $R = f(U)$  ή  $R = f(\Delta\theta)$  του σχήματος (1.5.3-1) παρατηρείται ότι οι περιοχές τιμών της θερμοκρασίας και της πτώσης τάσης σε μια επαφή, που συνεπάγονται ανακρυστάλλωση στα υλικά των επαφών (περιοχή ΒΓ), αποτελεί την έναρξη της αποσταθεροποίησης της επαφής. Πέρα από αυτή την περιοχή οι επαφές που λειτουργούν υπό ονομαστικό ρεύμα, πρέπει να θεωρούνται ότι έχουν ουσιαστικά καταστραφεί. Η θεωρία που διατυπώθηκε για τη χαρακτηριστική του σχήματος (1.5.3-1) αφορά καθαρές επαφές χωρίς αξιόλογο στρώμα επικαθίσεων σε αυτές. Σε περιπτώσεις που το στρώμα των επικαθίσεων έχει σημαντικό πάχος και καλύπτει μεγάλο ποσοστό της επιφάνειας  $A_c$  η χαρακτηριστική του σχήματος (1.5.3-1) δεν ισχύει και παρατηρείται εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στα αρχικά στάδια λειτουργίας τους, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία.

#### **1.5.4 Οξείδια σε επαφές διακοπών και η σημασία της θερμοκρασίας στην αύξηση του πάχους τους.**

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, οι επικαθίσεις σε μια ηλεκτρική επαφή είναι βασικότερη αιτία αύξησης της αντίστασης διάβασης και επομένως ο κύριος λόγος κακής λειτουργίας της. Μπορούμε να διακρίνουμε τις επικαθίσεις σύμφωνα με την σύνθεσή τους,

σε δυο κατηγορίες: σε χημικές ενώσεις (όπως π.χ. τα οξείδια του μετάλλου της επαφής) και σε διάφορα παρασιτικά στοιχεία (όπως η σκόνη, τα λιπαντικά και υδρατμοί). Με διακριτικό στοιχείο το πάχος μπορούμε να διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες επικαθίσεων :

- επικαθίσεις με πάχος λίγων ατόμων (όπως ένα στρώμα μιας ή δύο στοιβάδων μορίων νερού)
- προστατευτικές επικαθίσεις, που είναι χημικές ενώσεις, και οι οποίες δεν αυξάνονται όταν αποκτήσουν ένα μικρό πάχος. Οι επικαθίσεις αυτές θεωρείται ότι προστατεύουν την επιφάνεια της επαφής
- επικαθίσεις, που είναι χημικές ενώσεις, στις οποίες συμμετέχει το μέταλλο της επαφής, των οποίων το πάχος αυξάνει με το χρόνο

Για τις επικαθίσεις με πάχος λίγων ατόμων γίνεται διάκριση, σε αυτές που τα άτομα τους ενώνονται με το μέταλλο της επαφής μέσω δυνάμεων Van der Waals και δεσμούς της τάξης των 0,05eV και εκείνες που ενώνονται με ελεύθερους δεσμούς ατόμων της επιφάνειας του μετάλλου με ενέργεια από 1eV έως 8eV. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στις χημικές ενώσεις που σχηματίζονται στην επιφάνεια των μετάλλων, που χρησιμοποιούνται στις επαφές.

Ορισμένες χημικές ενώσεις στην επιφάνεια της επαφής αυξάνουν από 10 έως 100Å και προστατεύουν με αυτόν τον τρόπο την επιφάνεια των μετάλλων της επαφής από την επίδραση του οξυγόνου της ατμόσφαιρας καθώς και από άλλα χημικά στοιχεία. Το ανοξειδωτο ατσάλι και το αλουμίνιο έχουν εξαιρετικά προστατευτικά οξείδια και ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Τα οξείδια του χαλκού και του νικελίου δεν προστατεύουν αποτελεσματικά τα αντίστοιχα μέταλλα αλλά συνεχίζουν να αυξάνονται αργά μεν αλλά συνεχώς στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ειδικά στο Ni το NiO σε ξηρή ατμόσφαιρα με σχετική υγρασία μικρότερη του 25% είναι προστατευτικό της επιφάνειας του μετάλλου αυτού, αλλά σε υγρή ατμόσφαιρα η οξείδωση προχωράει με αξιόλογο ρυθμό ιδίως όταν υπάρχει σκόνη. Το NiO είναι σκληρό όπως το νικέλιο και σπάνια αποκολλάται από την επιφάνεια της επαφής με τους χειρισμούς. Έχει επίσης μονωτικές ιδιότητες παρά τον αργό σχηματισμό του.

Ο ψευδάργυρος καλύπτεται από ένα προστατευτικό στρώμα που δρα μονωτικά και έχει χαμηλή σκληρότητα. Κατά την επαφή των δύο μερών το προστατευτικό αυτό στρώμα αποχωρίζεται από την επιφάνειά του, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αγωγίμες περιοχές οι οποίες οξειδώνονται επίσης με τον χρόνο. Σε αυτή τη περίπτωση η αντίσταση

διάβασης γίνεται μεγαλύτερη (και επομένως και η θερμοκρασία) και έτσι αυξάνει δευτερογενώς η οξειδωση. Ο ψευδάργυρος δεν είναι ιδανικό υλικό για επαφές και για τον πρόσθετο λόγο ότι δεν έχει ικανοποιητική σκληρότητα με αποτέλεσμα να αυξάνει η επιφάνεια  $A_c$ , υπό την επίδραση της δύναμης σύσφιξης και να μειώνεται αντίστοιχα η πίεση, πράγμα που βοηθάει στην οξειδωση της επιφάνειάς του.

Ο μπρούντζος είναι ένα γενικώς αποδεκτό υλικό επαφών σε χαμηλές θερμοκρασίες. Εμφανίζει παρεμφερή συμπεριφορά με τον χαλκό, με τη διαφορά ότι τα οξείδια του, που αυξάνουν με σταθερό ρυθμό, δεν αποτελούν προστατευτικό στρώμα, όπως συμβαίνει με το οξείδιο του χαλκού.

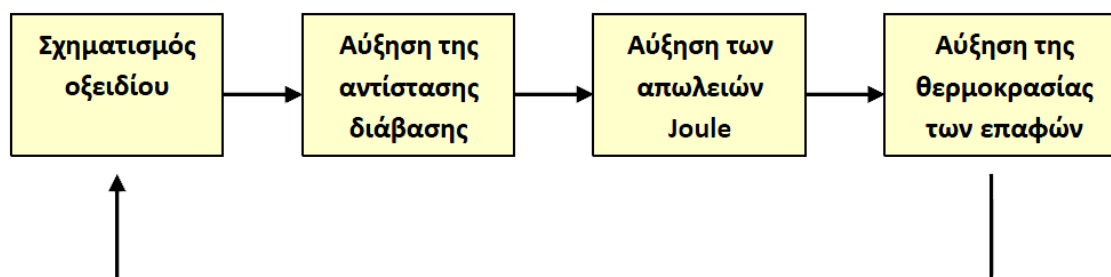
Το βολφράμιο καλύπτεται από ένα στρώμα οξειδίου το οποίο δεν μπορεί να θεωρηθεί ως προστατευτικό. Σε θερμοκρασία χώρου αυτό το οξείδιο παραμένει στο πάχος των περίπου 50Å. Έχει διατυπωθεί η άποψη ότι μεγάλο ποσοστό αυτού του οξειδίου καταστρέφεται κατά την επαφή των δύο μερών, με αποτέλεσμα η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος να γίνεται στις περιοχές όπου έχει αποκολληθεί το οξείδιο. Η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος σε περιοχές της επαφής, όπου δεν έχουν αποκολληθεί τα λεπτά στρώματα του οξειδίου, έχει αποδοθεί στην εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος. Παρεμφερή συμπεριφορά παρουσιάζει και το μολυβδαίνιο καθώς και οι καθαρές επαφές από χάλυβα.

Ο χρυσός δεν οξειδώνεται όπως είναι γνωστό στον αέρα. Προσβάλλεται όμως από το χλώριο στους 180°C περίπου και σχηματίζει υδατοδιαλυτό  $AuCl_3$ . Η μόνη επικάλυψη η οποία υπάρχει στην επιφάνεια επαφών από χρυσό είναι μία στοιβάδα ατόμων οξυγόνου (που υπάρχει και σε κάθε μέταλλο), η οποία όμως δεν αυξάνεται με το χρόνο και είναι διαπερατή στα ηλεκτρόνια λόγω του φαινομένου σήραγγος. Ο χρυσός είναι άριστο υλικό επαφών αλλά με απαγορευτικό κόστος.

Ο άργυρος οξειδώνεται σε  $Ag_2O$  σε θερμοκρασία χώρου, μόνο με την παρουσία του όζοντος. Το οξείδιο του αργύρου έχει χαμηλή σκληρότητα, αποχωρίζεται μηχανικά από το μέταλλο και αποσυντίθεται στους 200°C. Το παραπάνω οξείδιο δεν αυξάνει την αντίσταση διάβασης. Σε συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες ο άργυρος προσβάλλεται από ενώσεις του θείου και σχηματίζει ένα επιφανειακό ανθεκτικό στρώμα  $Ag_2S$  το οποίο δεν είναι προστατευτικό. Το στρώμα  $Ag_2S$  αυξάνεται αργά αλλά σταθερά γιατί η περιεκτικότητα γενικά του  $H_2S$  στον αέρα είναι χαμηλή. Περιεκτικότητα σε  $H_2S$  μεγαλύτερη από 1/10<sup>-9</sup> στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι καταστροφική για τις επαφές. Η ρύπανση γενικά του

ατμοσφαιρικού αέρα, σε περιοχές με έντονη βιομηχανική δραστηριότητα, καταστρέφει τις επαφές από άργυρο. Η ειδική αντίσταση του  $\text{Ag}_2\text{S}$  κυμαίνεται από  $105 \Omega\text{m}$  έως  $1010 \Omega\text{m}$  ανάλογα με την κρυσταλλική δομή του. Αυτή είναι περίπου και η ειδική αντίσταση του οξειδίου του χαλκού. Ορατά στρώματα του σουλφιδίου δρούν πρακτικά σαν μονωτές για τις επαφές. Δεδομένου ότι ο άργυρος είναι άριστο υλικό επαφών, έχει διερευνηθεί σε βάθος η προσβολή του σε  $\text{Ag}_2\text{S}$  και έχουν προταθεί διάφορα κράματα για πρακτικές εφαρμογές καθώς και η δυνατότητα επιχρυσώσής του για μικροεπαφές.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην δημιουργία οξειδίων και γενικά επικαθίσεων στις επαφές παρουσιάζει ενδιαφέρον δεδομένου ότι το φαινόμενο ανακυκλώνεται κατά την σειρά που απεικονίζεται στο σχήμα (1.5.4-1). Ως παράδειγμα εξετάζονται παρακάτω επαφές από Cu ή Ni.



**Σχήμα 1.5.4-1:** Απλοποιημένη παράσταση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη δημιουργία οξειδίων.

Όσον αφορά τον χαλκό, ο Ronnquist διερεύνησε το πάχος του  $\text{Cu}_2\text{O}$  και  $\text{CuO}$ , σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας, και του χρόνου, και διατύπωσε την σχέση:

$$s^2 = 20^2 + t \cdot 10^{14,9-5100/T} \quad [1.5.4-1]$$

όπου  $s$  το πάχος σε  $\text{\AA}$ ,  $t$  ο χρόνος σε ώρες και  $T$  η θερμοκρασία σε  $^\circ\text{K}$ . Έχει διαπιστωθεί επίσης ότι μέχρι τους  $400^\circ\text{C}$  στην επιφάνεια του χαλκού δημιουργείται  $\text{Cu}_2\text{O}$  και σε υψηλότερες θερμοκρασίες  $\text{CuO}$ . Όταν τα παραπάνω οξειδία έχουν πάχος μεγαλύτερο από  $100\text{\AA}$  τότε μειώνουν συνήθως ηλεκτρικά την επαφή.

Παρεμφερής σχέση ισχύει για το πάχος  $\text{NiO}$  το οποίο σχηματίζεται σε θερμοκρασίες από  $200^\circ\text{C}$  έως  $600^\circ\text{C}$ :



$$s^2 = 5^2 + t \cdot 10^{13,3-6000/T} \quad [1.5.4-2]$$

όπου  $s$  το πάχος σε Å,  $t$  ο χρόνος σε ώρες και  $T$  η θερμοκρασία σε °K.

### 1.5.5 Η επίδραση της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα στην οξείδωση των επαφών.

Το πάχος του στρώματος της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα εξαρτάται από την τραχύτητα των επιφανειών της επαφής. Στον άργυρο, αυτό το στρώμα θεωρείται ότι είναι μικρότερο από 50Å. Στρώματα νερού του πάχους αυτού δεν αντέχουν την πίεση των δύο μερών της επαφής και γι' αυτό διατάσσονται περιφερειακά στην επιφάνεια  $A_c$  και στα πιθανά κενά που υπάρχουν. Έχει υποστηριχθεί ότι λεπτά στρώματα νερού, ανάμεσα σε μεταλλικές επιφάνειες αφ' ενός και οξείδια και άνθρακας αφ' ετέρου μπορούν να δημιουργήσουν τοπικά ηλεκτρικά στοιχεία, τα οποία με ηλεκτροχημική δράση οξειδώνουν τις επαφές. Αυτή η διεργασία χρειάζεται μικρότερο χρόνο από την οξείδωση της επαφής στον ατμοσφαιρικό αέρα. Για να συμβεί όμως αυτό απαιτούνται μεγάλες ποσότητες υγρασίας (πάνω από 70%) και λεπτά ασυνεχή στρώματα νερού (που μπορούν με ιόντα να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα), ή υγροσκοπικά τεμάχια σκόνης.

Έχει διατυπωθεί επίσης η άποψη, ότι τα στρώματα του νερού και των στερεών λιπαντικών σε μία επαφή επηρεάζουν ελάχιστα την αντίσταση διάβασης γιατί ο κύριος όγκος τους απομακρύνεται με το κλείσιμο του λυόμενου συνδέσμου και μένουν μόνο απλές στοιβάδες ατόμων, οι οποίες είναι αγωγίμες λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος. Στερεά κατάλοιπα όμως μαύρου χρώματος και μικρού πάχους (έως 10Å), που έχουν γίνει αναπόσπαστο μέρος της επιφάνειας της επαφής παρουσιάζουν στην πράξη μεγάλη αντίσταση και μπορούν να γίνουν αιτία αύξησης της αντίστασης διάβασης. Μία ερμηνεία μπορεί να δοθεί από την μείωση των δυνατοτήτων απαγωγής θερμότητας, που έχουν γενικά οι επιφάνειες μαύρου χρώματος, συγκριτικά προς επιφάνειες με άλλη απόχρωση. Οι επικαθίσεις αυτές είναι συνήθως άμορφες οργανικές ουσίες μεγάλου μοριακού βάρους, που προέρχονται από οργανικούς ατμούς, οι οποίοι παράγονται στους οργανικούς μονωτές που χρησιμοποιούνται στη στήριξη των ηλεκτρικών επαφών. Ο πολυμερισμός είναι πολύ διαδεδομένος στους υδρογονάνθρακες και έχει επισημανθεί ότι πάρα πολλά μονωτικά υλικά παράγουν ατμούς κατά τον πολυμερισμό τους. Ορισμένα υλικά επαφών όπως το Pd, Pt, Ru, Mo και το Cr δρουν καταλυτικά για την εναπόθεση οργανικών ουσιών σε αυτά και

άλλα. Όχι, όπως π.χ.: Cu, Fe, W, Ag και το Ni. Τέλος όταν σε μια επαφή δημιουργούνται τοπικά μικρές ηλεκτρικές εκκενώσεις τότε τα οργανικά στρώματα, που προαναφέρθηκαν, απανθρακώνονται, με αποτέλεσμα από τα λεπτά στρώματα άνθρακα, να διευκολύνεται η εκδήλωση ηλεκτρικών εκκενώσεων μεγαλύτερης ενέργειας.

Ο σχηματισμός γενικά των επικαθίσεων στις επαφές διέπεται από περίπλοκους μηχανισμούς, που δεν έχουν ερμηνευτεί πλήρως, παρά τις εκτεταμένες έρευνες.

## **1.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΩΝ**

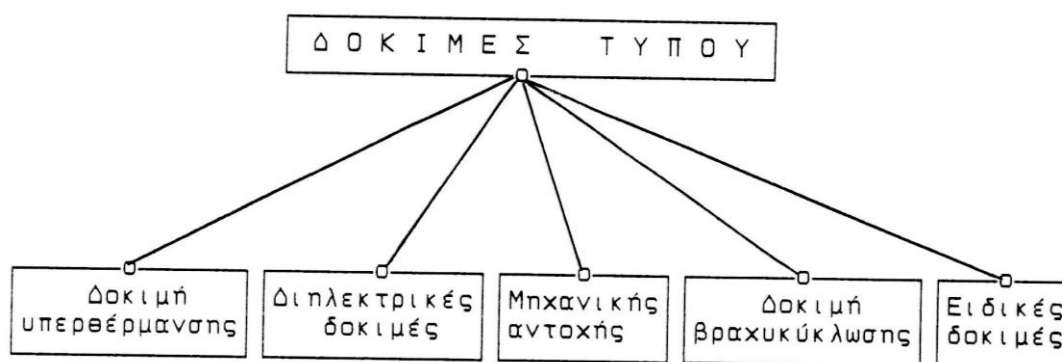
Βασική προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων ενός κτιρίου είναι να έχει δοκιμαστεί τόσο ο εξοπλισμός τους (καλώδια, διακόπτες, ασφάλειες, κ.λ.π) όσο και οι ηλεκτρικές συσκευές που ηλεκτροδοτεί η εγκατάσταση (ηλεκτρική κουζίνα, ψυγείο, τηλεόραση, στερεοφωνικό, κλπ.), πριν διατεθεί προς χρήση και μάλιστα σε λειτουργικές συνθήκες που αντιστοιχούν στις μελλοντικές μέγιστες καταπονήσεις στην πράξη. Οι δοκιμές αυτές, που συνήθως αποτελούν τη τελευταία φάση της παραγωγικής διαδικασίας, προβλέπονται στους κανονισμούς (VDE, IEC, EN, κλπ) και διακρίνονται στις δοκιμές τύπου και στις δοκιμές σειράς .

Οι δοκιμές τύπου γίνονται σε περιορισμένο αριθμό των παραχθέντων και έτοιμων προς διάθεση προϊόντων (π.χ. για παραγωγή διακοπτών 400 V/100 A, σε ένα μόνο τυχαίο δείγμα), ενώ οι δοκιμές σειράς πραγματοποιούνται σε όλα ανεξαιρέτως τα τεμάχια .

Οι δοκιμές τύπου δεν είναι ίδιες για κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή, αλλά εξαρτώνται από το είδος της (πίνακας, καλώδιο, αποζεύκτης, ασφάλεια, ρελαί, κλπ), τα ονομαστικά στοιχεία (τάση, ρεύμα, κ.λ.π) και τις συνθήκες λειτουργίας που πρόκειται να αντιμετωπίσει αυτή κατά περίπτωση στην εγκατάσταση (π.χ. για αποζεύκτες εξωτερικού χώρου προβλέπεται ως δοκιμή τύπου η εξακρίβωση της ικανότητας μόνωσης υπό βροχή, ενώ για αποζεύκτες εσωτερικού χώρου δεν έχει νόημα ο έλεγχος αυτός, κ.λ.π). Για την κατανόηση των δοκιμών τύπου, που προβλέπονται στους διάφορους κανονισμούς, έχουν παρασταθεί στο σχήμα (1.6-1) συγκεντρωτικά οι κατηγορίες τους, οι οποίες πραγματοποιούνται όταν έχουν νόημα για την υπό έλεγχο κατασκευή (σε ένα μονωτήρα π.χ. δεν έχει νόημα η δοκιμή βραχυκύκλωσης, οι δοκιμές μηχανικής αντοχής αφορούν τις επαφές διακοπτών κ.λ.π). Το σκεπτικό για την κατάταξη και διεξαγωγή των δοκιμών κατά το

σχήμα (1.6-1) προήλθε από την ανάγκη να δοθεί μία αξιόπιστη απάντηση στις εξής βασικές ερωτήσεις για κάθε κατασκευή :

- 1) Μέχρι ποιο ρεύμα μπορεί να εργάζεται μία κατασκευή (ονομαστικό ρεύμα);
- 2) Ποια είναι η τάση λειτουργίας της (ονομαστική τάση);
- 3) Τι απαιτήσεις μηχανικής αντοχής πρέπει να έχει;
- 4) Αντέχει η συσκευή το βραχυκύκλωμα μέχρι να γίνει διακοπή του από τα μέσα προστασίας του δικτύου;
- 5) Ποιες είναι οι ειδικές απαιτήσεις που θα χαρακτηρίζουν τη λειτουργία της;



**Σχήμα 1.6-1:** Κατηγορίες των δοκιμών τύπου.

Οι απαντήσεις στους παραπάνω προβληματισμούς δίνονται με τη διεξαγωγή συγκεκριμένων δοκιμών τύπου που περιλαμβάνονται στους διάφορους κανονισμούς και είναι αντίστοιχα για τις τέσσερις πρώτες ερωτήσεις :

- 1) Η δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης θερμοκρασίας).
- 2) Οι διηλεκτρικές δοκιμές.
- 3) Η δοκιμή μηχανικής αντοχής.
- 4) Η δοκιμή βραχυκύκλωσης.

Σε ότι αφορά την τελευταία ερώτηση οι δοκιμές, που χαρακτηρίστηκαν ως «ειδικές», περιλαμβάνονται επίσης αναλυτικά στους κανονισμούς, ανάλογα με την περίπτωση. Έτσι, η μέτρηση π.χ. των απωλειών ενός μετασχηματιστή, ο έλεγχος της

ποιότητας βαφής ενός πίνακα εξωτερικού χώρου κλπ, αποτελούν, κατά το παραπάνω σκεπτικό, ειδικές δοκιμές, γιατί αναφέρονται σε συγκεκριμένες ειδικές απαιτήσεις που καθορίζονται από το είδος και τη χρήση της κατασκευής

### 1.6.1 Δοκιμή υπερθέρμανσης

Η δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας) αφορά την εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος (μέγιστο ρεύμα συνεχούς λειτουργίας) μίας κατασκευής μέχρι τα προγραμματισμένα όρια συντήρησης. Η τιμή αυτή δεν μπορεί να είναι τυχαία, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται σε προδιαγεγραμμένες τιμές ρεύματος (π.χ.: 10<sup>A</sup>, 200<sup>A</sup>, 400<sup>A</sup> κλπ.). Η δοκιμή διαρκεί συνήθως αρκετές ώρες. Στους μετασχηματιστές π.χ. ελαίου του δικτύου διανομής είναι της τάξης των 24 ωρών και θεωρείται ότι είναι επιτυχής, όταν η θερμοκρασία δεν υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο κατά τις προδιαγραφές όριο (για χαλκό εντός μονωτικού ελαίου η μέγιστη θερμοκρασίας είναι κατά VDE 0670 80°C και η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας, ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, 40°C).

Η εξακρίβωση της ικανότητας σε ονομαστικό ρεύμα ενός στατικού ηλεκτρικού συνδέσμου βασίζεται κυρίως, κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης, στη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας  $\Delta\theta$  ως προς το περιβάλλον, που αναπτύσσεται σε αυτόν. Η τιμή  $\Delta\theta$  θεωρείται ότι έχει σταθεροποιηθεί όταν μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων, που απέχουν μεταξύ τους μία ώρα, η αύξηση της τιμής είναι μικρότερη από 1°C. Στην πράξη συμβαίνει αυτό συνήθως για  $\Delta\theta$  περίπου 55°C. Η τιμή του ρεύματος, κατά την οποία επιτυγχάνεται η ανωτέρω σταθεροποίηση της θερμοκρασίας, ονομάζεται ονομαστικό ρεύμα  $I_N$  της επαφής.

## **2 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς υπαίθριων σταθμών διανομής μέσης προς χαμηλή τάση, όπου συχνά προκύπτει το ερώτημα από μη ειδικούς της ύπαρξης ή μη προϋποθέσεων εκδήλωσης πυρκαγιών. Επειδή τα ονομαστικά ρεύματα διακοπτών, αγωγών, σφικτήρων κ.τ.λ. είναι πολύ μεγαλύτερα από το ρεύμα λειτουργίας των επιμέρους γραμμών, αναμένεται να καταδειχθεί ότι τα θερμικά φαινόμενα που προαναφέρθηκαν δεν εγκυμονούν κινδύνους για το περιβάλλον.

## **3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ**

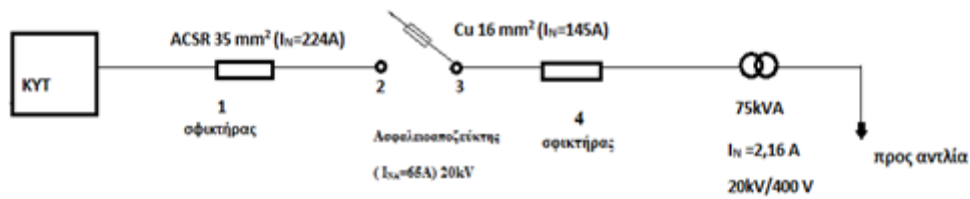
### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε καθώς και η χρησιμοποιούμενη πειραματική διάταξη. Δίνονται τα βασικά τμήματα του κυκλώματος μέτρησης και αξιολόγησης ηλεκτρικών επαφών μαζί με σχηματική κυκλωματική αναπαράσταση. Περιγράφονται ακόμα τα όργανα μέτρησης με την βοήθεια των οποίων έγιναν όλες οι μετρήσεις που περιλαμβάνονται στην εργασία αυτή.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε δοκιμή υπερθέρμανσης σε κύκλωμα το οποίο προσομοίωνε διάταξη υπαίθριου υποσταθμού ΜΤ/ΧΤ 20 kV/400V 75 kVA . Για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του υποσταθμού μελετήθηκε η θερμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών συνδέσμων διεξάγοντας δοκιμή ποιοτικού ελέγχου, ώστε να προσδιοριστεί η πιθανότητα δημιουργίας τηγμάτων στους ηλεκτρικούς συνδέσμους των αγωγών και συνεπώς η περίπτωση πρόκλησης πυρκαγιάς στον ευρύτερο χώρο του υποσταθμού.

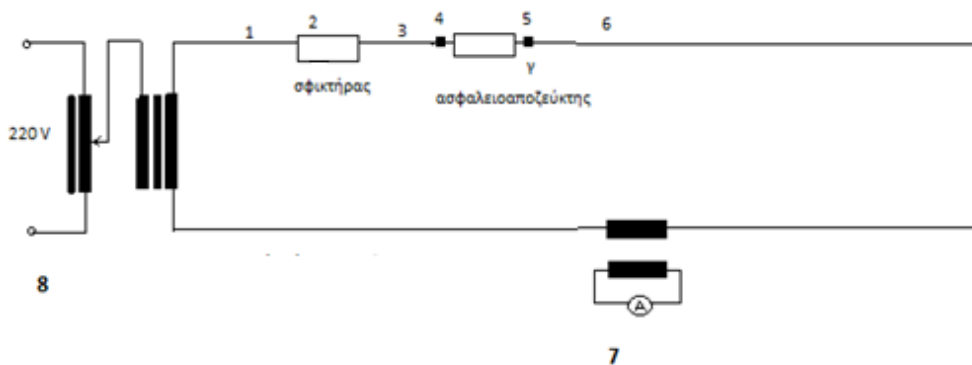
### **3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ**

Το απλοποιημένο μονογραμμικό σχέδιο του κυκλώματος από το ΚΥΤ μέχρι το φορτίο χαμηλής τάσης συμπεριλαμβανομένων των αγωγών και τον μετασχηματιστή του υπαίθριου υποσταθμού διανομής, που προσομοιώθηκε στην πειραματική διαδικασία, παρατίθεται στο παρακάτω σχέδιο (3.2-1) .



**Σχήμα 3.2-1 :** Απλοποιημένο μονογραμμικό σχέδιο κυκλώματος για προσομοίωση σε πειραματική διάταξη στο εργαστήριο

Στο επόμενο σχήμα (3.2-2) δίνεται το κύκλωμα μέτρησης για τον προσδιορισμό του θερμικού ελέγχου των ηλεκτρικών επαφών, όπως αυτό προέκυψε από την προσομοίωση του μονογραμμικού σχεδίου του υποσταθμού ( σχήμα 3.2-1) στην πειραματική διάταξη στο εργαστήριο. Διευκρινίζεται ότι το κύκλωμα αυτό ανταποκρίνεται πλήρως στις απαιτήσεις των κανονισμών για τη δοκιμή υπερθέρμανσης.



**Σχήμα 3.2-2 :** Κύκλωμα μέτρησης για θερμικό έλεγχο των ηλεκτρικών επαφών κατά την πειραματική διάταξη . Στο σχήμα τα σημεία : 1: Καλώδιο ACSR 2: Σφικτήρας 3: Αγωγός χαλκού 4: Πρώτη επαφή ασφαλειοαποζεύκτη 5: Δεύτερη επαφή ασφαλειοαποζεύκτη 6: Αγωγός χαλκού 7: Αμπεροτσιμπίδα 8: Αυτομετασχηματιστής- μετασχηματιστής ρεύματος

Για την δημιουργία της πειραματικής διάταξης, η οποία θα έπρεπε να αντιπροσωπεύει επαρκώς το μονογραμμικό σχέδιο του υπαίθριου υποσταθμού (σχήμα 3.2-1), χρησιμοποιήθηκε ένας μετασχηματιστής του εργαστηρίου με τον οποίο προσομοιώθηκε το ρεύμα του δικτύου Μέσης Τάσης (σχήμα 3.2-2). Στη συνέχεια για την κατασκευή του κυκλώματος συνδέθηκε καλώδιο ACSR από τη μία επαφή του μετασχηματιστή μέχρι έναν σφικτήρα στον οποίο συνδέθηκε και ένας αγωγός χαλκού. Ο συγκεκριμένος αγωγός τοποθετήθηκε στον πρώτο ακροδέκτη ασφαλειοαποζεύκτη 35 A με γέφυρα μεταξύ των επαφών του, ενώ ο άλλος ακροδέκτης συνδέθηκε σε δεύτερο αγωγό χαλκού μέχρι την άλλη επαφή του μετασχηματιστή ώστε να κλείσει το κύκλωμα (σχήμα 3.2-2) όπως ακριβώς περιγράφεται στο μονογραμμικό σχέδιο (3.2-1). Για τον προσδιορισμό της εναλλασσόμενης τάσης στον μετασχηματιστή χρησιμοποιήθηκε πολύμετρο, ενώ συνδέθηκε στο κύκλωμα και μία αμπεροτσιμπίδα για την μέτρηση του ρεύματος με τρόπο επαγωγικό και όχι άμεσο επί του κυκλώματος, πράγμα που θα είχε και ως αποτέλεσμα την εισαγωγή σοβαρού σφάλματος (σχήμα 3.2-2). Όσον αφορά την μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν 3 θερμοστοιχεία σιδήρου – κωνσταντάνης των οποίων οι αισθητήρες τους συνδέθηκαν σε διάφορα σημεία του κυκλώματος που είναι πιο πιθανή η σοβαρή αύξηση της θερμοκρασίας. Τα θερμά σημεία που επιλέχθηκαν και μετρήθηκαν σε όλες τις δοκιμές ήταν το σημείο επαφής αγωγού ACSR και σφικτήρα, επαφές αγωγού χαλκού-σφικτήρα, αγωγού χαλκού – ασφαλειοαποζεύκτη και θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ αναλόγως την δοκιμή που πραγματοποιούνταν καθορίστηκαν και επιπλέον θερμά σημεία από τα αρχικά.

### **3.2.1 Χαρακτηριστικά υλικών και στοιχείων της πειραματικής διάταξης**

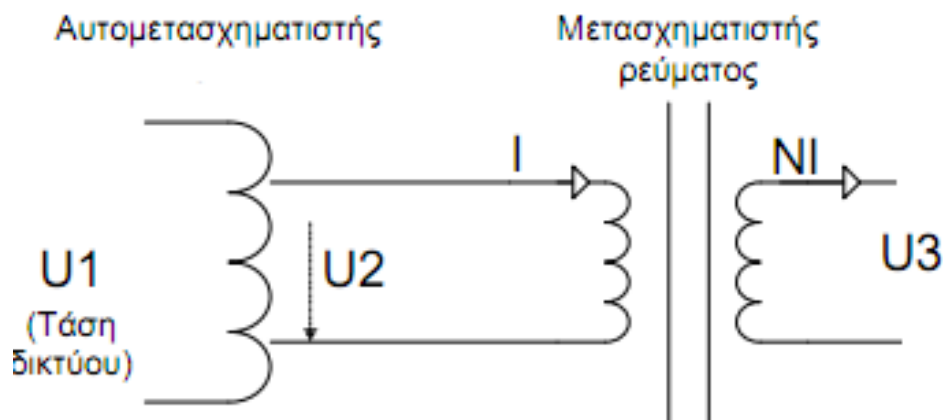
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του πειραματικού κυκλώματος μετρήσεων [σχήμα (3.2-2)] είναι :

1. Αγωγός ACSR 35 mm<sup>2</sup> μήκους 1 m με ακροδέκτη για βίδα M12 για να βιδωθεί στον μετασχηματιστή έντασης.
2. Σφικτήρας για να συνδεθούν μεταξύ τους οι δύο αγωγοί ACSR/Cu
3. Αγωγός Cu 16 mm<sup>2</sup> μήκους 1 m με ακροδέκτη για να βιδωθεί στον ασφαλειοαποζεύκτη



4. Βίδα ροδέλα παξιμάδι για να βιδωθεί ο ένας αγωγός Cu 16 mm<sup>2</sup> στον ασφαλειοαποζεύκτη
5. Αγωγός Cu 16 mm<sup>2</sup> μήκους 1 m με ακροδέκτη για βίδα M12 για να βιδωθεί στον μετασχηματιστή έντασης.
6. Ασφαλειοαποζεύκτης με γέφυρα μεταξύ των επαφών του από Cu 16 mm<sup>2</sup>

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω στο εκτός από τα συγκεκριμένα υλικά για την κατασκευή της διάταξης χρησιμοποιήθηκαν και τα παρακάτω βασικά στοιχεία :



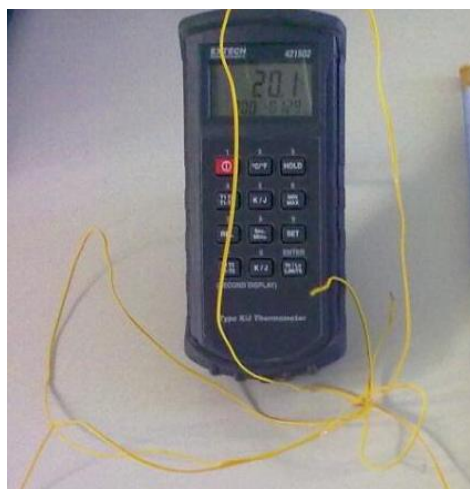
**Σχήμα 3.2.1-1:** Απλοποιημένο σχέδιο Αυτομετασχηματιστή- Μετασχηματιστή ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διάταξη για προσομοίωση του ρεύματος δικτύου Μέσης Τάσης

Για την προσομοίωση του ρεύματος δικτύου Μέσης τάσης στην πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε μετασχηματιστής ρεύματος του εργαστηρίου μέγιστης ισχύς 1,5 kVA ,  $V_{εξ\ max} = 2,5\ V$ ,  $I_{εξ\ max} = 400A$  σε συνδυασμό με αυτομετασχηματιστή όπως φαίνεται στο σχήμα (3.2.1-1). Το δίκτυο ( η τάση  $U_1$  είναι η τάση δικτύου) τροφοδοτεί τον αυτομετασχηματιστή, ο οποίος ρυθμίζει μέσω της τάσης  $U_2$  το ρεύμα  $I$  στην έξοδο του μετασχηματιστή ρεύματος.

Έτσι μετρώντας την τάση του αυτομετασχηματιστή μέσω του πολυμέτρου και ρυθμίζοντάς την, τροφοδοτούνταν το κύκλωμα της διάταξης προσομοίωσης του

υπαίθριου υποσταθμού, με τις επιθυμητές τιμές ρεύματος για τις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας που προσομοιώθηκαν.

Το είδος θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην μέτρηση της θερμοκρασίας στα θερμά σημεία κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης, προαναφέρει, ήταν θερμοστοιχεία τύπου σιδήρου – κοσταντάνης. Η κοσταντάνη αποτελεί κράμα χαλκού και νικελίου βλ σχήμα (3.2.1-2, 3.2.1-3). Ο συγκεκριμένος τύπος θερμοστοιχείου χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές.



**Σχήμα 3.2.1-2 :** Θερμοστοιχείο τύπου σιδήρου - κοσταντάνης

Υλικό	Κωδικοί καλωδίων επέκτασης	HEΔ στους 100°C (mV)	Περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας (°C)
+Fe/-CuNi	+Κίτρινο/-Μπλε	5.268	0~+850

**Σχήμα 3.2.1-3:** Πίνακας χαρακτηριστικών θερμοστοιχείου τύπου σιδήρου- κοσταντάνης

### **3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

Κατά την πειραματική διαδικασία στο πειραματικό μοντέλο πραγματοποιήθηκε δοκιμή υπερθέρμανσης για τον θερμικό έλεγχο της διάταξης σε έντεκα διαφορετικές δοκιμές, οι οποίες προσομοίωναν διαφορετικές καταστάσεις δυσμενής και κανονικής λειτουργίας του υποσταθμού και των αγωγών μέσης τάσης και διασύνδεσης.

Σε κάθε περίπτωση κατά την διαδικασία διεκπεραίωσης των δοκιμών τοποθετήθηκαν στη διάταξη θερμοστοιχεία σε 4 ή 5 σημεία, αναλόγως την περίπτωση, για την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν ανά 10 λεπτά σε διάστημα μίας ώρας. Η δοκιμή θεωρούνταν επιτυχής όταν, για κάθε μετρούμενο θερμό σημείο στη διάταξη, μετά το πέρας μίας ώρας η μεταβολή της θερμοκρασίας του μέσα στην ώρα ήταν το πολύ 1°C. Επίσης, κριτήριο της επιτυχίας των δοκιμών ήταν και το γεγονός ότι η θερμοκρασία των επαφών δεν έπρεπε να υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο κατά τις προδιαγραφές όριο, που είναι της τάξεως 50÷60 °C ως προς την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις δοκιμών θερμικού ελέγχου της διάταξης.

#### **3.3.1 Ανάλυση δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία**

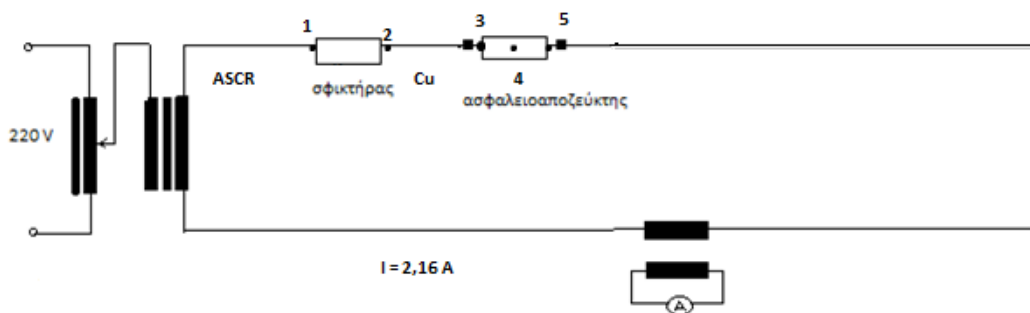
Όπως προαναφέρθηκε το πειραματικό μοντέλο εξετάστηκε σε έντεκα διαφορετικές περιπτώσεις, η καθμία από τις οποίες πραγματοποιήθηκε για να προσομοιώσει τόσο την ονομαστική κατάσταση λειτουργίας της διάταξης, όσο και δυσμενείς καταστάσεις που μπορούν να προκύψουν κατά την λειτουργία ενός υπαίθριου υποσταθμού. Με αυτόν τον τρόπο έγινε δυνατή η μέτρηση των θερμοκρασιών που αναπτύσσουν τα θερμά σημεία σε όλο το φάσμα των περιπτώσεων λειτουργίας του υποσταθμού.

Αναλυτικότερα:

Στην δοκιμή 1 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα θερμά σημεία 1, 2, 3 και 4 [βλ σχήμα (3.3.1-1)] υπό το μέγιστο ρεύμα του υποσταθμού [βλ σχήμα(3.2-1)], δηλαδή υπό το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή 75kVA στη μέση τάση 20 kV το οποίο είναι 2,16 A και προκύπτει από :

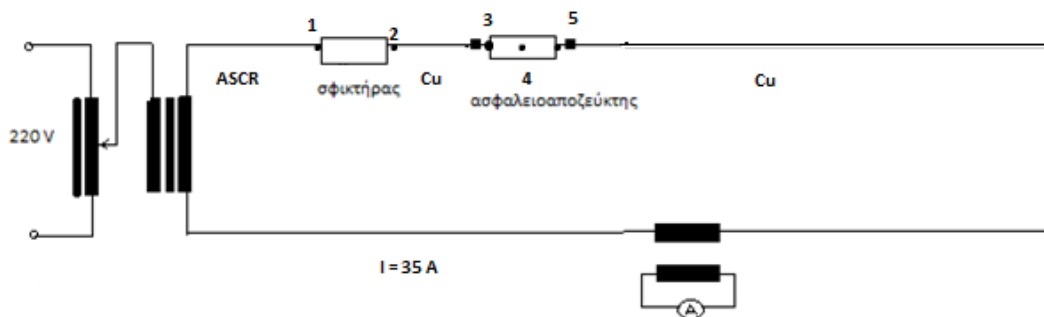
$$I_{\text{rmax}} = P_N / (1,73 \cdot U_N) = 75 / (1,73 \cdot 20) \approx 2,16 \text{ A} \quad [3.3.1-1]$$

Για την λήψη των παραπάνω μετρήσεων στο εργαστηριακό μοντέλο με την λειτουργία του αυτομετασχηματιστή προέκυψε αντίστοιχη τιμή ρεύματος και πραγματοποιήθηκε δοκιμή υπερθέρμανσης για τα αντίστοιχα θερμά σημεία.



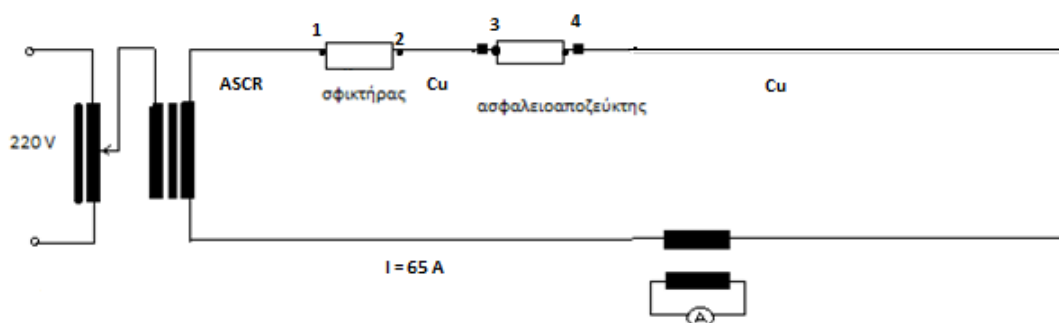
**Σχήμα 3.3.1-1:** Κύκλωμα μετρήσεων στα θερμά σημεία 1, 2, 3, 4, 5 δοκιμής 1 υπό ρεύμα 2,16 A. Θερμό σημείο 1: στον ASCR, Θερμό σημείο 2: Στον χαλκό στο ίδιο σημείο, Θερμό σημείο 3: Πρώτη επαφή χαλκού και ασφαλειοαποζεύκτη, Θερμό σημείο 4: Ανάμεσα σε επαφή ασφάλειας και ασφαλειοαποζεύκτη, Θερμό σημείο 5: Δεύτερη επαφή ασφαλειοαποζεύκτη και χαλκού.

Στην δεύτερη δοκιμή έγιναν μετρήσεις στα θερμά σημεία 1, 2, 3, 4 και 5 [βλ σχήμα 3.3.1-2] υπό το ονομαστικό ρεύμα του τηκτού της ασφάλειας του ασφαλειοαποζεύκτη. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ασφάλεια  $I_{NA} = 35 \text{ A}$ .



**Σχήμα 3.3.1-2:** Κύκλωμα μετρήσεων στα θερμά σημεία 1, 2, 3, 4, 5 δοκιμής 2 υπό ρεύμα 35 A. Θερμό σημείο 1: στον ASCR, Θερμό σημείο 2: Στον χαλκό στο ίδιο σημείο, Θερμό σημείο 3: Πρώτη επαφή χαλκού και ασφαλειοαποζεύκτη, Θερμό σημείο 4: Ανάμεσα σε επαφή ασφάλειας και ασφαλειοαποζεύκτη, Θερμό σημείο 5: Δεύτερη επαφή ασφαλειοαποζεύκτη και χαλκού.

Στην τρίτη δοκιμή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα θερμά σημεία 1, 2, 3, και 4 [βλ σχήμα (3.3.1-3)] υπό το μέγιστο ρεύμα τηκτού ασφάλειας  $I_{NA} = 65$  A αυτή τη φορά στον ασφαλειοαποζεύκτη.



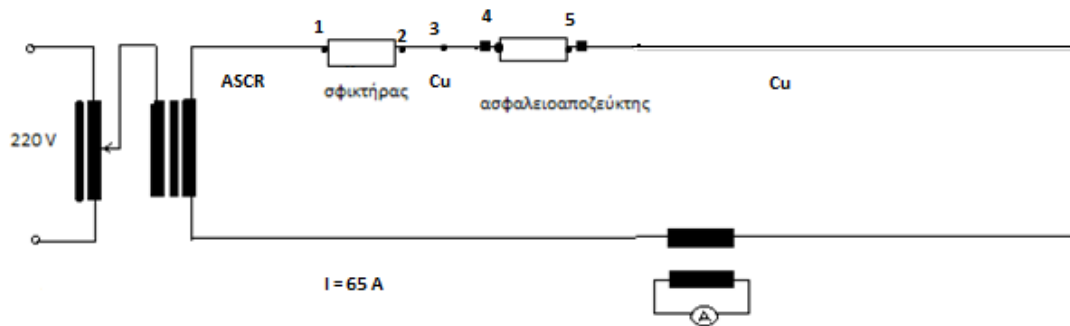
**Σχήμα 3.3.1-3:** Κύκλωμα μετρήσεων στα θερμά σημεία 1, 2, 3, 4 δοκιμής 3 υπό ρεύμα 65 A. Θερμό σημείο 1: στον ASCR, Θερμό σημείο 2: Στον χαλκό στο ίδιο σημείο, Θερμό σημείο 3: Πρώτη επαφή χαλκού και ασφαλειοαποζεύκτη, Θερμό σημείο 4: Δεύτερη επαφή ασφαλειοαποζεύκτη και χαλκού.

Στην τέταρτη δοκιμή προσομοιώθηκε η περίπτωση στην οποία για κάποιο λόγο στον υποσταθμό κοπεί 1 κλώνος του αγωγού χαλκού υπό την λειτουργία του υποσταθμού με μέγιστο ρεύμα λειτουργίας  $I_{\text{rmax}} \approx 2,16\text{A}$ , ώστε να αναδειχθεί η επιρροή μιας τέτοιας κατάστασης στην θερμική συμπεριφορά των αγωγών και των επαφών. Στο πειραματικό μοντέλο μετρήθηκε η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα θερμά σημεία 1, 2, 3, 4 και 5 [βλ σχήμα (3.3.1-4)].



**Σχήμα 3.3.1-4:** Κύκλωμα μετρήσεων στα θερμά σημεία 1, 2, 3, 4, 5 δοκιμής 4, 6, 7, 8, 9 υπό ρεύμα 2,16 A με κομμένους 1, 2, 3, 4, 5 κλώνους στον αγωγό χαλκού αντίστοιχα στο σημείο 3. Θερμό σημείο 1: στον ASCR, Θερμό σημείο 2: Στον χαλκό στο ίδιο σημείο, Θερμό σημείο 3: Σημείο στο χαλκό με κομμένους κλώνους, Θερμό σημείο 4: Πρώτη επαφή χαλκού και ασφαλειοαποζεύκτη, Θερμό σημείο 5: Δεύτερη επαφή ασφαλειοαποζεύκτη και χαλκού.

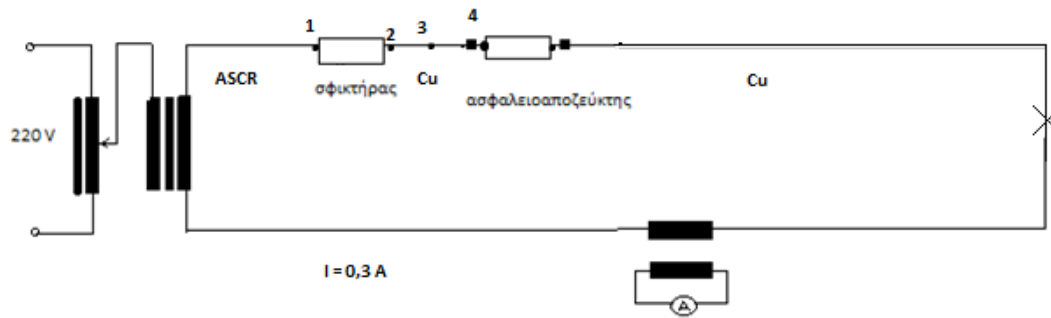
Η πέμπτη δοκιμή έλαβε μέρος ομοίως με την προηγούμενη δοκιμή με την διαφορά ότι οι μετρήσεις στα θερμά σημεία [βλ σχήμα(3.3.1-5)] πραγματοποιήθηκαν υπό το ονομαστικό ρεύμα του ασφαλειοαποζεύκτη  $I_{\text{NA}}=65\text{ A}$ .



**Σχήμα 3.3.1- 5:** Κύκλωμα μετρήσεων στα θερμά σημεία 1, 2, 3, 4, 5 δοκιμής 5 υπό ρεύμα 2,16 A με κομμένο 1 κλώνο στον αγωγό χαλκού στο σημείο 3. Θερμό σημείο 1: στον ASCR, Θερμό σημείο 2: Στον χαλκό στο ίδιο σημείο, Θερμό σημείο 3: Σημείο στο χαλκό με κομμένους κλώνους, Θερμό σημείο 4: Πρώτη επαφή χαλκού και ασφαλειοαποζεύκτη, Θερμό σημείο 5: Δεύτερη επαφή ασφαλειοαποζεύκτη και χαλκού.

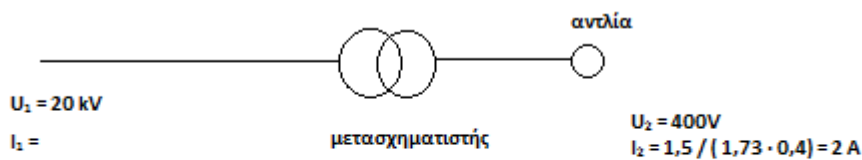
Οι δοκιμές 6, 7, 8, 9, πραγματοποιήθηκαν ομοίως με την δοκιμή 4 [βλ σχήμα(3.3.1-4)], με 2, 3, 4, και 5 κομμένους κλώνους του αγωγού χαλκού αντίστοιχα υπό τη λειτουργία με μέγιστο ρεύμα  $I_{\Gamma_{\max}} \approx 2,16$  A.

Στην δέκατη δοκιμή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα θερμά σημεία 1, 2, 3, και 4 [βλ σχήμα (3.3.1- 6)] με 6 κομμένους κλώνους ενώ παράλληλα το πείραμα προσομοίωσε την λειτουργία του υποσταθμού υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας στην μέση τάση όταν είναι συνδεδεμένος με φορτίο αντλίας μονοφασικό 1,5 kW στην χαμηλή τάση, ώστε να εξεταστεί η θερμική συμπεριφορά των επαφών σε δυσμενή κατάσταση λειτουργίας και υπό φορτίο στη χαμηλή τάση.



**Σχήμα 3.3.1-6:** Κύκλωμα μετρήσεων στα θερμά σημεία 1, 2, 3, 4, δοκιμής 10 υπό ρεύμα 0,3 A με φορτίο αντλίας 1,5 kW στην χαμηλή τάση με κομμένους 6 κλώνους στον αγωγό χαλκού στο σημείο 3. Θερμό σημείο 1: στον ASCR, Θερμό σημείο 2: Στον χαλκό στο ίδιο σημείο, Θερμό σημείο 3: Σημείο στο χαλκό με κομμένους κλώνους, Θερμό σημείο 4: Πρώτη επαφή χαλκού και ασφαλειοαποξεύκτη.

Το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας στη μέση τάση υπό το φορτίο αντλίας υπολογίσθηκε ως εξής:



**Σχήμα 3.3.1-7 :** Απλοποιημένο κύκλωμα μετασχηματιστή και αντλίας για τον υπολογισμό του μέγιστου ρεύματος λειτουργίας στη μέση τάση υπό φορτίο αντλίας 1,5 kW μονοφασικό στη χαμηλή τάση.

$U_1 \cdot I_1 \approx U_2 \cdot I_2 \rightarrow I_1 = I_2 \cdot (U_2 / U_1) = 2 \cdot (400 / 20000) = 40 \text{ mA}$  [σχήμα(3.3.1-7)] είναι το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας στη μέση τάση για τον υποσταθμό. Στην πειραματική διαδικασία όμως ο μετασχηματιστής που χρησιμοποιήθηκε για να προσημειώνει το ρεύμα στη μέση τάση είχε ως ελάχιστη τιμή ρεύματος τα 0,3 A. Έτσι οι μετρήσεις στα θερμά σημεία υπό το φορτίο αντλίας έγιναν στα 0,3 A όμως τα αποτελέσματα σε αυτό το μέγεθος ρεύματος



υπερκαλύπτουν και την περίπτωση του ρεύματος στα 40 mA που είναι αισθητά μικρότερη τιμή ρεύματος.

Στην τελευταία δοκιμή που πραγματοποιήθηκε γίνανε μετρήσεις στα θερμά σημεία 1, 2, 3, και 4 [βλ σχήμα(3.3.1- 6)] υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας στη μέση τάση υπό το φορτίο της αντλίας όπως και στην προηγούμενη δοκιμή ( $I = 0,3 \text{ A}$ ) με τη διαφορά ότι το πείραμα διεξήχθη με χαλαρούς συνδέσμους. Οι σύνδεσμοι που χαλαρώθηκαν ήταν ο σφικτήρας μεταξύ καλωδίου ACSR και αγωγού χαλκού και οι σύνδεσμοι του ασφαλειοαποζεύκτη με τους αγωγούς.

## 4 ΠΙΝΑΚΕΣ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι επόμενοι πίνακες αφορούν τις πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Οι πίνακες 1 έως 11 περιέχουν τις πειραματικές μετρήσεις που αφορούν τις 11 δοκιμές και περιλαμβάνουν μετρήσεις ανά 10 λεπτά μέχρι την ολοκλήρωση της δοκιμής υπερθέρμανσης. Στις στήλες των πινάκων περιλαμβάνονται τα εξής μεγέθη: Η θερμοκρασία στα θερμά σημεία εξέτασης ( $\theta_1$  έως  $\theta_5$ ), η θερμοκρασία περιβάλλοντος  $\theta_x$ , η διαφορά θερμοκρασίας θερμού σημείου - περιβάλλοντος ( $\Delta\theta_1$  έως  $\Delta\theta_5$ ) και επιπλέον υπάρχει η αντίστοιχη στήλη για το χρόνο  $t$  μετρούμενο ανά λεπτά. Μετά από κάθε πίνακα μετρήσεων της κάθε πειραματικής δοκιμής, παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα μεταβολής της  $\Delta\theta$  για κάθε μετρούμενο θερμό σημείο σε σχέση με τον χρόνο  $t$  κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης.

t[min]	$\theta_x$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]
0	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	0	0	0	0	0
10	20,6	20,7	20,7	20,8	20,9	20,7	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1
20	20,6	20,7	20,7	20,8	20,9	20,7	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1
30	20,6	20,7	20,7	20,8	20,8	20,6	0,1	0,1	0,2	0,2	0
40	20,6	20,6	20,6	20,7	20,8	20,6	0	0	0,1	0,2	0
50	20,6	20,6	20,6	20,7	20,8	20,6	0	0	0,1	0,2	0
60	20,6	20,6	20,6	20,7	20,8	20,6	0	0	0,1	0,2	0
70	20,6	20,6	20,6	20,7	20,8	20,6	0	0	0,1	0,2	0

**Πίνακας 4-1 :** Μετρήσεις στα θερμά σημεία 1-5 Δοκιμής 1(βλ .σχήμα 3.3.1-1) υπό το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή στη μέση τάση  $I_N=2,16A$ .

t: χρόνος

$\theta_x$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με ACSR

$\theta_2$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με χαλκό

$\theta_3$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 3 (επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

$\theta_4$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 4 (ανάμεσα σε επαφή ασφάλειας και ασφαλειοαποζεύκτη)

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 5 (δεύτερη επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

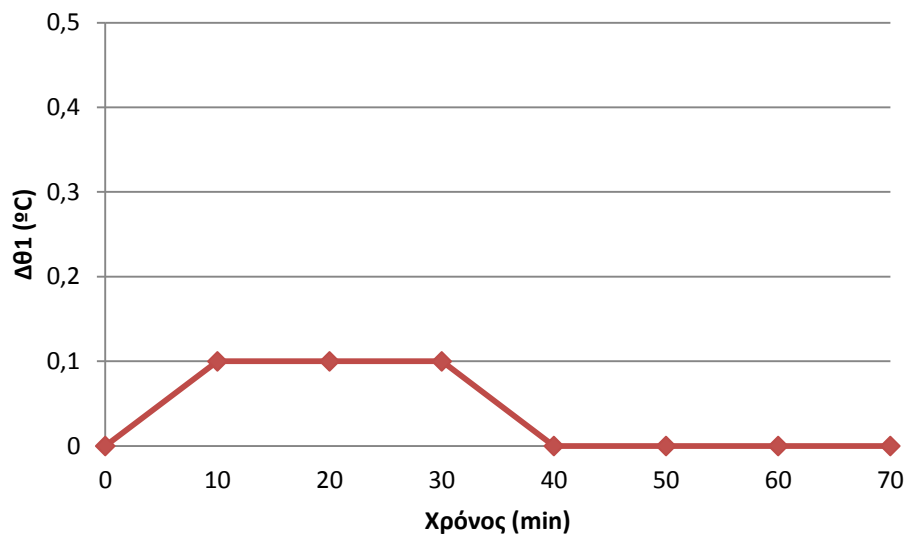
$\Delta\theta_1$ :  $\theta_1 - \theta_x$

$\Delta\theta_2$ :  $\theta_2 - \theta_x$

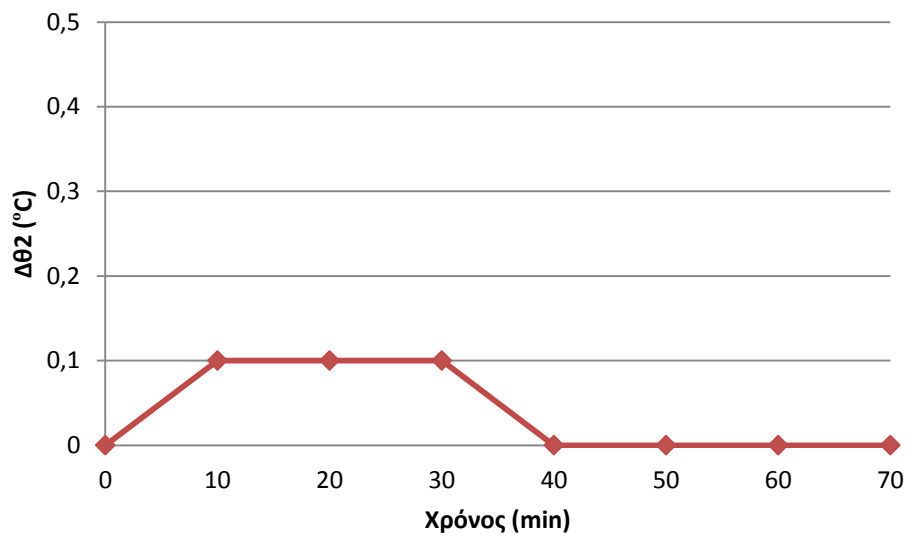
$\Delta\theta_3$ :  $\theta_3 - \theta_x$

$\Delta\theta_4$ :  $\theta_4 - \theta_x$

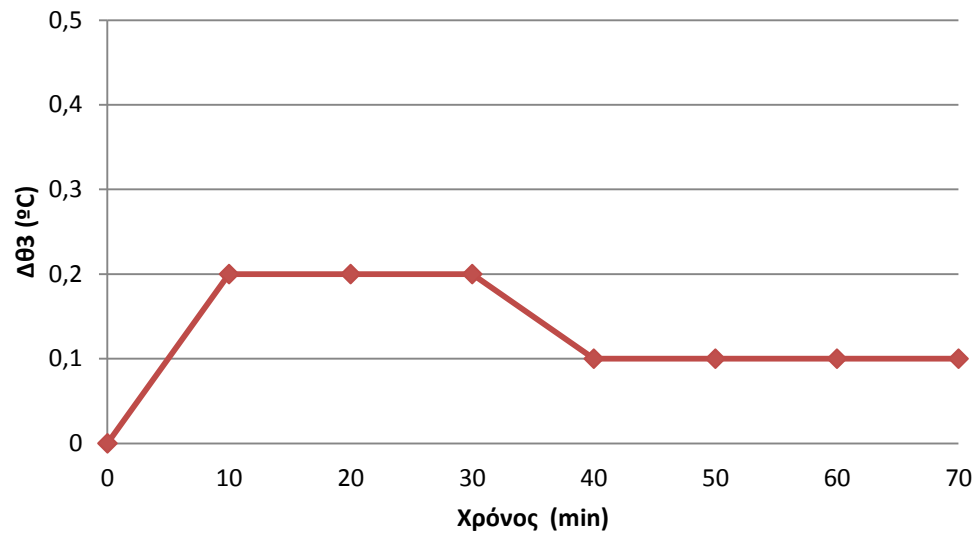
$\Delta\theta_5$ :  $\theta_5 - \theta_x$



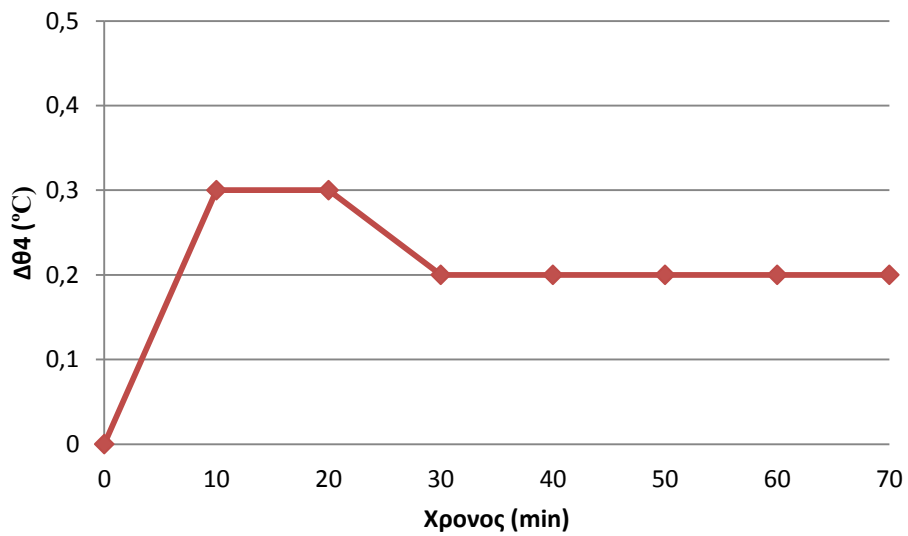
**Σχήμα 4-1:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_1$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A.



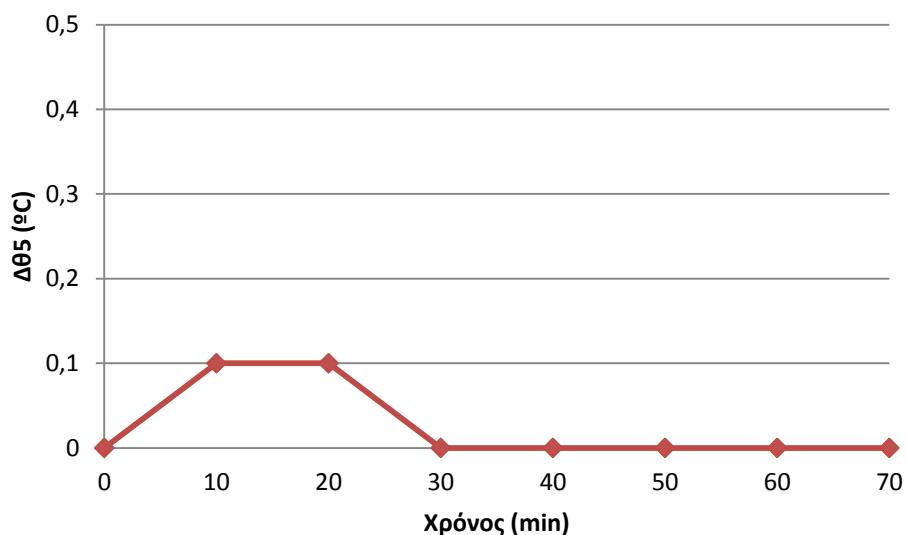
**Σχήμα 4-2 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_2$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16A.



**Σχήμα 4-3 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_3$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A



**Σχήμα 4-4 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_4$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A.



**Σχήμα 4-5 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_5$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A.

t[min]	$\theta_x$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]
0	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	0	0	0	0	0
10	22,5	23,8	23,9	24,9	27	23,7	1,3	1,4	2,4	4,5	1,2
20	22,5	24,5	24,5	25,6	27,9	24,2	2	2	3,1	5,4	1,7
30	22,6	24,8	24,9	25,9	28,4	24,5	2,2	2,3	3,3	5,8	1,9
40	22,6	24,9	24,9	26	28,4	24,7	2,3	2,3	3,4	5,8	2,1
50	22,6	24,9	24,9	26	28,6	24,7	2,3	2,3	3,4	6	2,1
60	22,7	24,9	24,9	26,2	28,7	24,9	2,2	2,2	3,5	6	2,2
70	22,6	24,9	24,9	26,2	28,7	24,9	2,3	2,3	3,6	6,1	2,3
80	22,6	24,9	24,9	26,2	28,7	25	2,3	2,3	3,6	6,1	2,4

**Πίνακας 4-2 :** Μετρήσεις στα θερμά σημεία 1-5 Δοκιμής 2 (βλ. σχήμα 3.3.1-2.) υπό το ονομαστικό ρεύμα του τηκτού της ασφάλειας μας  $I_{NA}=35$  A.

t: χρόνος

$\theta_x$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με ACSR

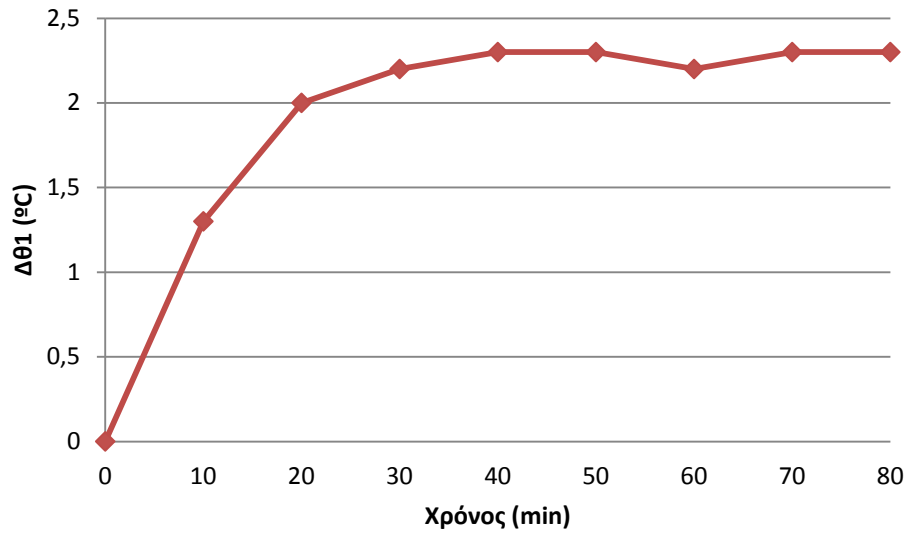
$\theta_2$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με χαλκό

$\theta_3$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 3 (επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

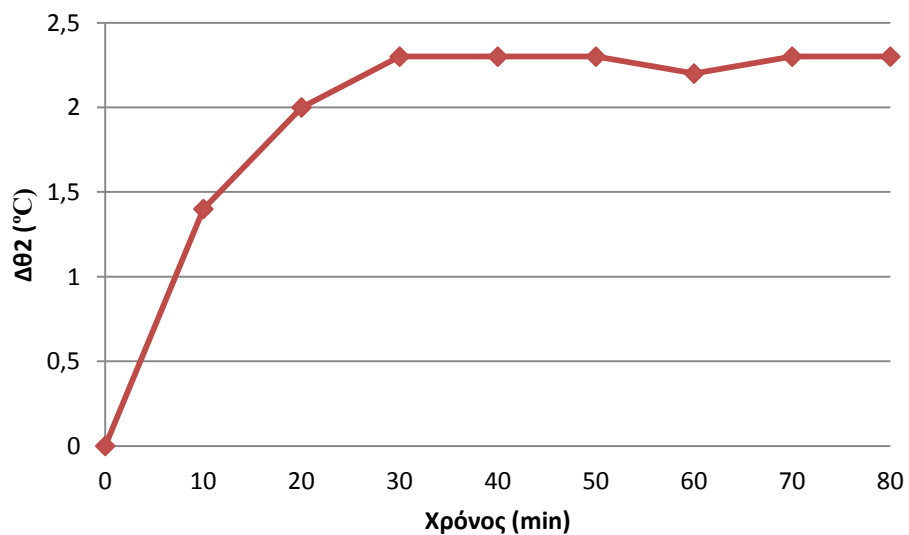
$\theta_4$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 4 (ανάμεσα σε επαφή ασφάλειας και ασφαλειοαποζεύκτη)

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 5 (δεύτερη επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

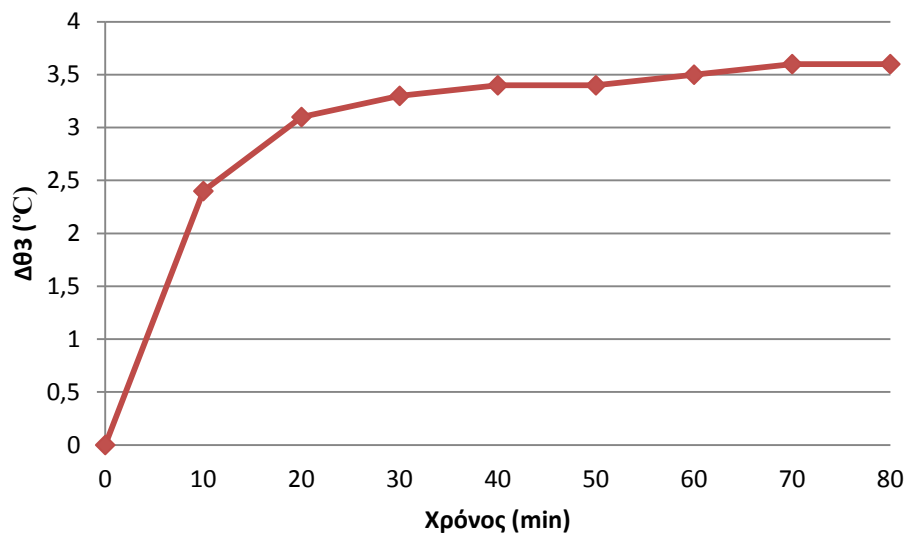
$\Delta\theta_1: \theta_1 - \theta_x$   
 $\Delta\theta_2: \theta_2 - \theta_x$   
 $\Delta\theta_3: \theta_3 - \theta_x$   
 $\Delta\theta_4: \theta_4 - \theta_x$   
 $\Delta\theta_5: \theta_5 - \theta_x$



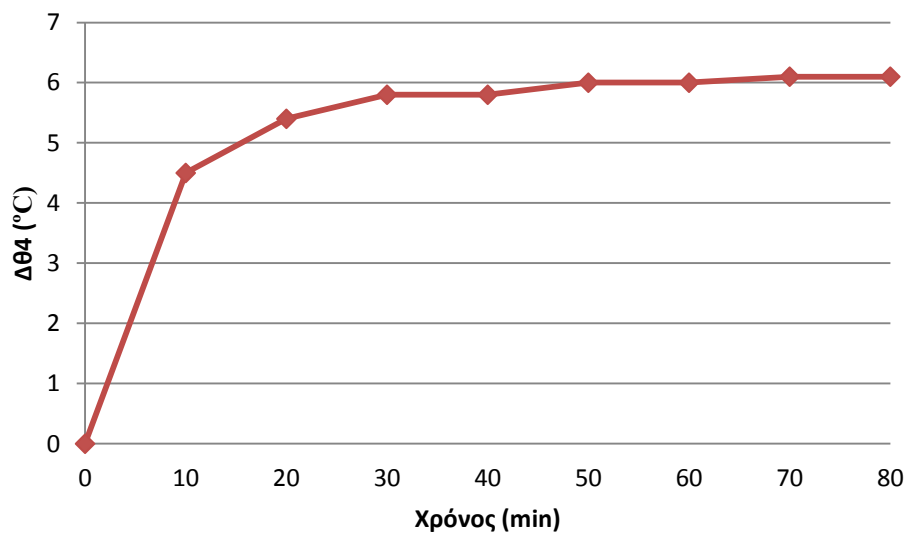
**Σχήμα 4-6 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_1$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 35 Α.



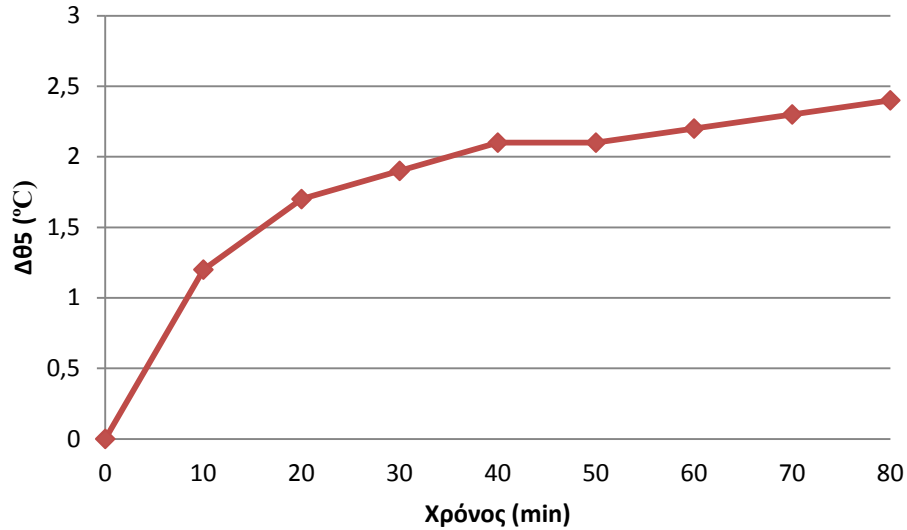
**Σχήμα 4-7 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_2$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 35 Α.



**Σχήμα 4-8 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_3$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 35 Α.



**Σχήμα 4-9 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_4$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 35 Α.



**Σχήμα 4-10 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_5$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 35 A.

t[min]	$\theta_x$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]
0	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	0	0	0	0
10	22,7	28,3	28,5	28,7	28,5	5,6	5,8	6	5,8
20	22,6	30,6	30,6	29,5	29,3	8	8	6,9	6,7
30	22,7	31,6	31,7	29,8	29,6	8,9	9	7,1	6,9
40	22,7	32,1	32,1	29,9	29,8	9,4	9,4	7,2	7,1
50	22,7	32,3	32,3	30	29,9	9,6	9,6	7,3	7,2
60	22,7	32,4	32,4	30	29,9	9,7	9,7	7,3	7,2
70	22,7	32,5	32,4	30	30	9,8	9,7	7,3	7,3
80	22,8	32,4	32,4	30	30	9,6	9,6	7,2	7,2
90	22,8	32,5	32,5	30	30	9,7	9,7	7,2	7,2

**Πίνακας 4-3 :** Μετρήσεις στα θερμά σημεία 1-4 Δοκιμής 3 (βλ. σχήμα 3.3.1-3) υπό το ονομαστικό ρεύμα του τηκτού της ασφάλειας μας  $I_{NA}=65$  A.

t: χρόνος

$\theta_x$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με ACSR

$\theta_2$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με χαλκό

$\theta_3$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 3 (επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

$\theta_4$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 4 (δεύτερη επαφή χαλκού με

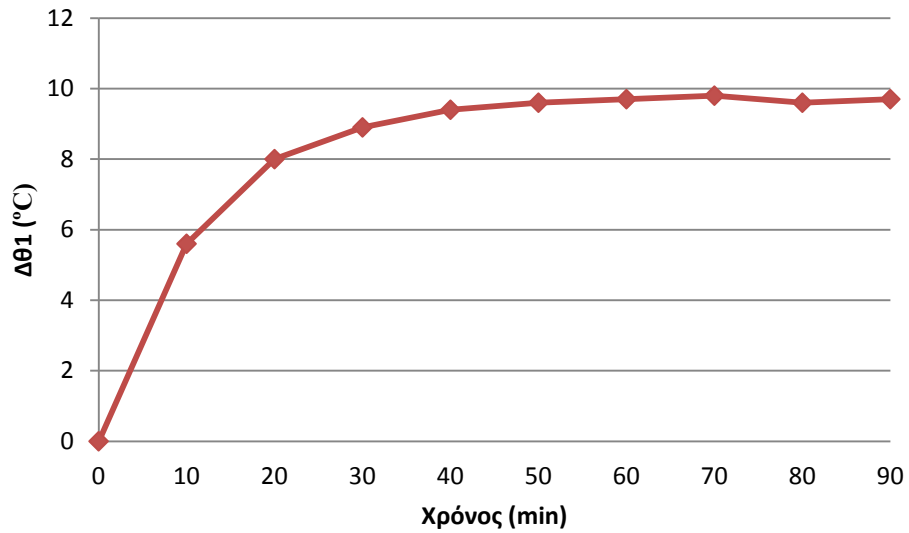
ασφαλειοαποζεύκτη)

$\Delta\theta_1$ :  $\theta_1 - \theta_x$

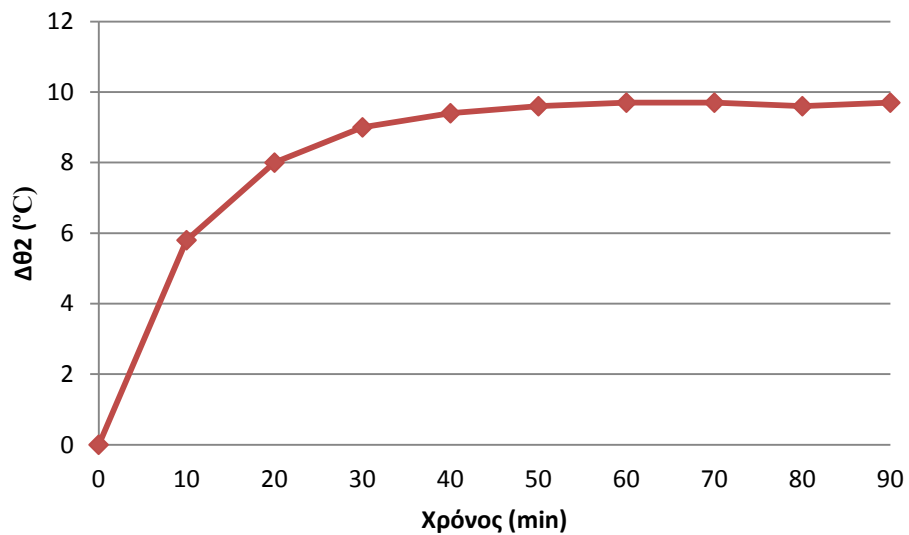
$\Delta\theta_2$ :  $\theta_2 - \theta_x$



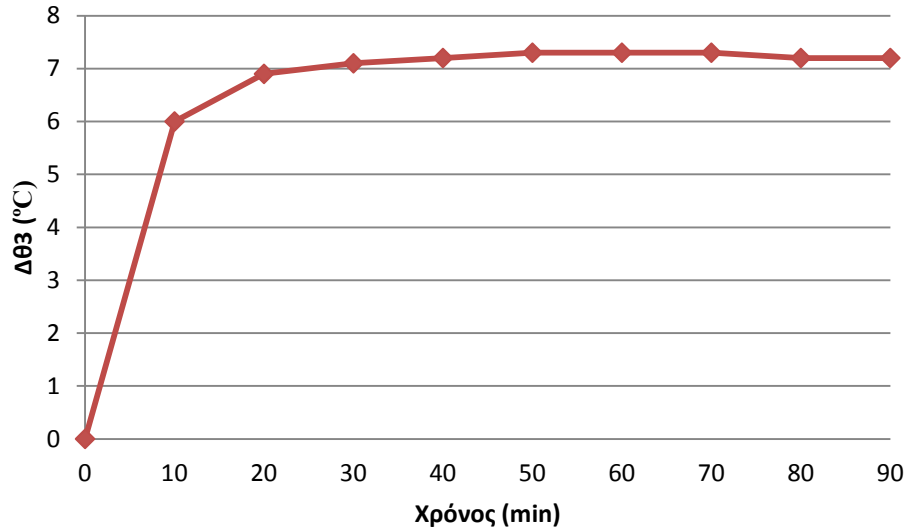
$\Delta\theta_3: \theta_3 - \theta_x$   
 $\Delta\theta_4: \theta_4 - \theta_x$



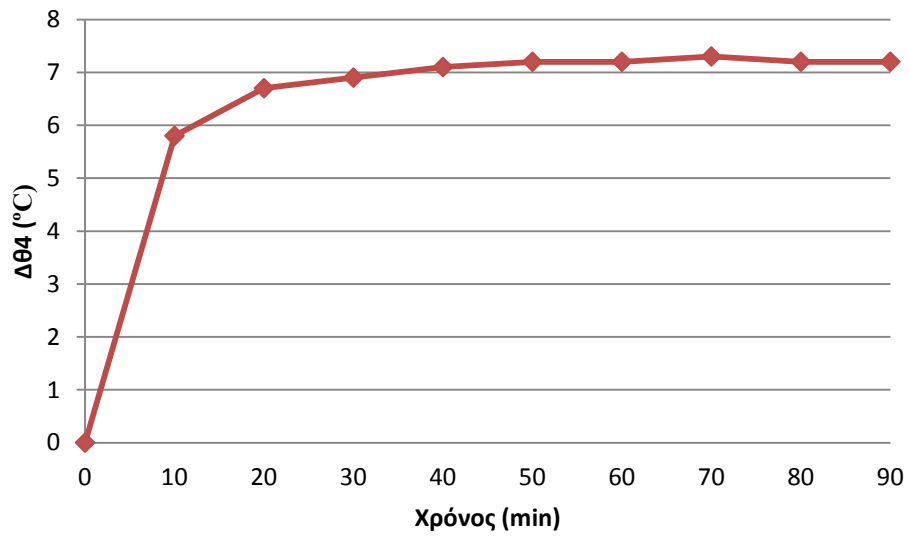
**Σχήμα 4-11:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_1$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 65 A.



**Σχήμα 4-12:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_2$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 65 A.



**Σχήμα 4-13 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_3$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 65 A.



**Σχήμα 4-14 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_4$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 65 A.

t[min]	$\theta_x$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]
0	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	0	0	0	0	0
10	22,4	22,5	22,5	22,5	22,6	22,5	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
20	22,4	22,5	22,5	22,4	22,6	22,6	0,1	0,1	0	0,2	0,2
30	22,4	22,4	22,4	22,4	22,6	22,6	0	0	0	0,2	0,2
40	22,4	22,4	22,4	22,4	22,6	22,6	0	0	0	0,2	0,2
50	22,4	22,4	22,4	22,4	22,6	22,6	0	0	0	0,2	0,2
60	22,4	22,4	22,4	22,4	22,6	22,6	0	0	0	0,2	0,2

**Πίνακας 4-4 :** Μετρήσεις στα θερμά σημεία 1-5 Δοκιμής 4 ( βλ. σχήμα 3.3.1-4 ) υπό το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή στη μέση τάση  $I_N=2,16A$ , με 1 κομμένο κλώνο.

t: χρόνος

$\theta_x$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με ACSR

$\theta_2$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με χαλκό

$\theta_3$ : θερμοκρασία στο κομμένο αγωγό

$\theta_4$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 4 (επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 5 (δεύτερη επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

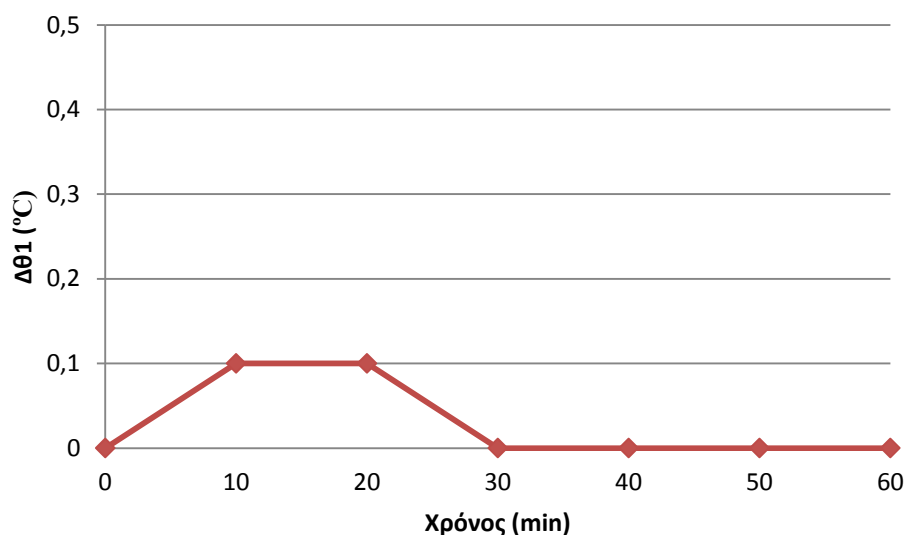
$\Delta\theta_1$ :  $\theta_1 - \theta_x$

$\Delta\theta_2$ :  $\theta_2 - \theta_x$

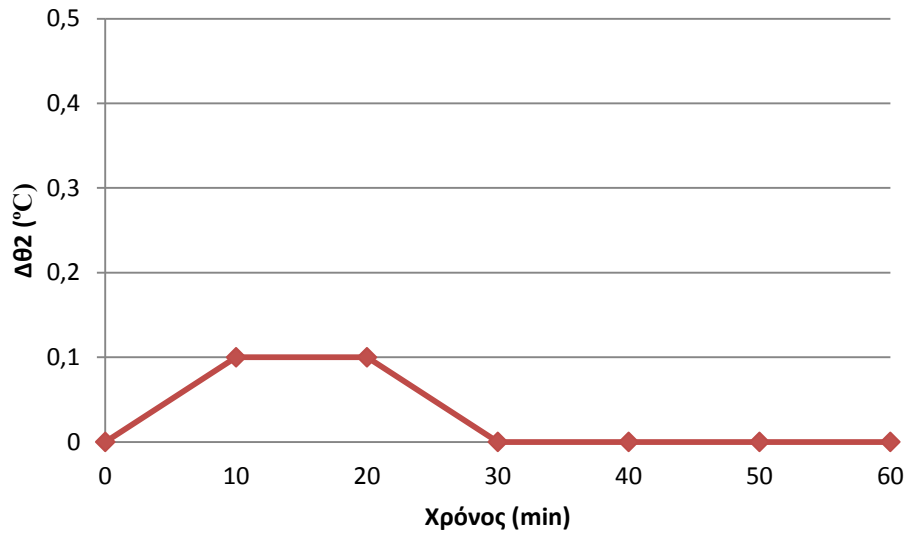
$\Delta\theta_3$ :  $\theta_3 - \theta_x$

$\Delta\theta_4$ :  $\theta_4 - \theta_x$

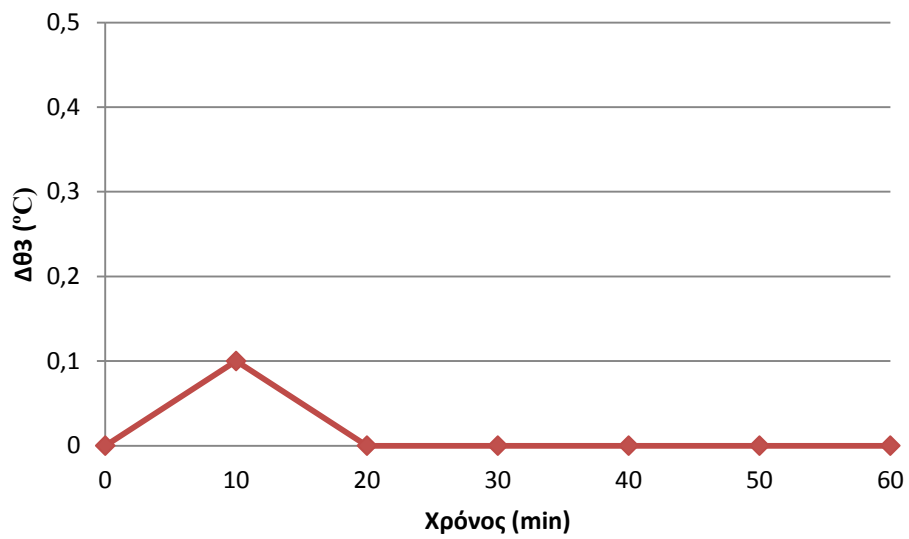
$\Delta\theta_5$ :  $\theta_5 - \theta_x$



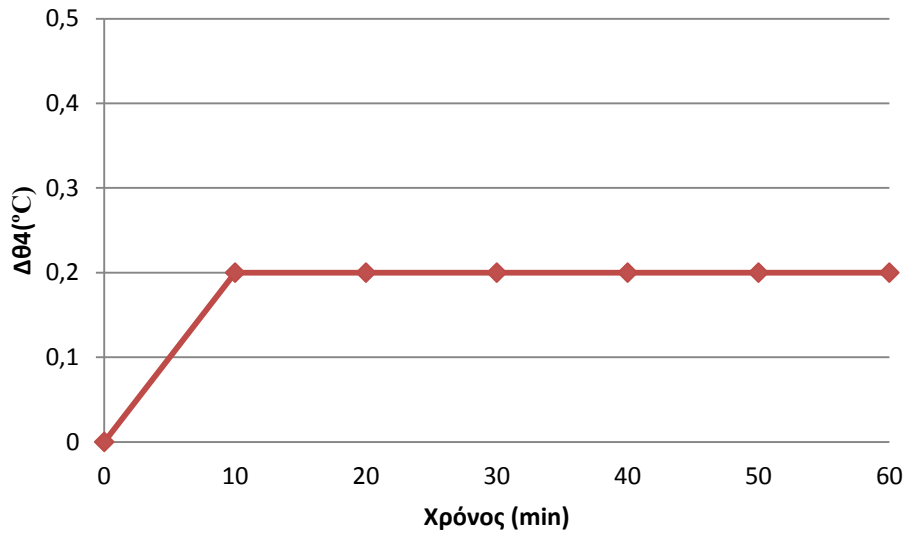
**Σχήμα 4-15 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_1$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 1 κομμένο κλώνο.



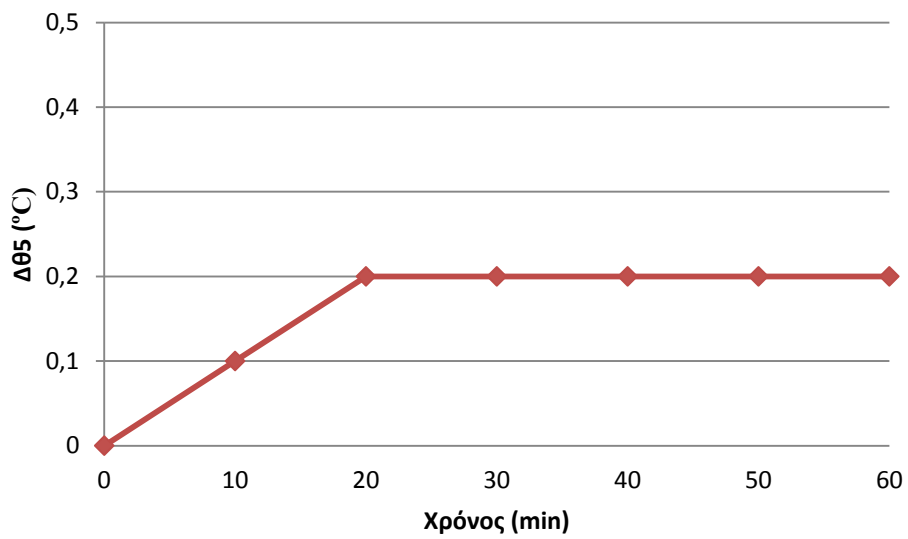
**Σχήμα 4-16 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_2$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 1 κομμένο κλώνο.



**Σχήμα 4-17 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_3$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 1 κομμένο κλώνο.



**Σχήμα 4-18 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_4$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 1 κομμένο κλώνο.



**Σχήμα 4-19 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_5$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 1 κομμένο κλώνο.

t[min]	$\theta_x$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]
0	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	0	0	0	0	0
10	22,4	27,8	28,2	35,6	26,8	27,6	5,4	5,8	13,2	4,4	5,2
20	22,5	30,3	30,6	36,7	28	28,7	7,8	8,1	14,2	5,5	6,2
30	22,5	31,3	31,6	36,7	28,2	28,8	8,8	9,1	14,2	5,7	6,3
40	22,4	31,5	31,8	36,6	28,3	29,1	9,1	9,4	14,2	5,9	6,7
50	22,4	31,7	31,9	36,6	28,4	29,3	9,3	9,5	14,2	6	6,9
60	22,4	31,8	31,9	36,5	28,5	29,3	9,4	9,5	14,1	6,1	6,9
70	22,5	32	32,2	36,7	28,6	29,3	9,5	9,7	14,2	6,1	6,8
80	22,5	31,9	32	36,5	28,5	29,4	9,4	9,5	14	6	6,9

**Πίνακας 4-5 :** Μετρήσεις στα θερμά σημεία 1-5 Δοκιμής 5 (βλ. σχήμα 3.3.1-5) υπό το ονομαστικό ρεύμα του τηκτού της ασφάλειας μας  $I_{NA}=65 \text{ A}$ , με 1 κομμένο κλώνο.

t: χρόνος

$\theta_x$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με ACSR

$\theta_2$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με χαλκό

$\theta_3$ : θερμοκρασία στο κομμένο αγωγό

$\theta_4$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 4 (επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 5 (δεύτερη επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

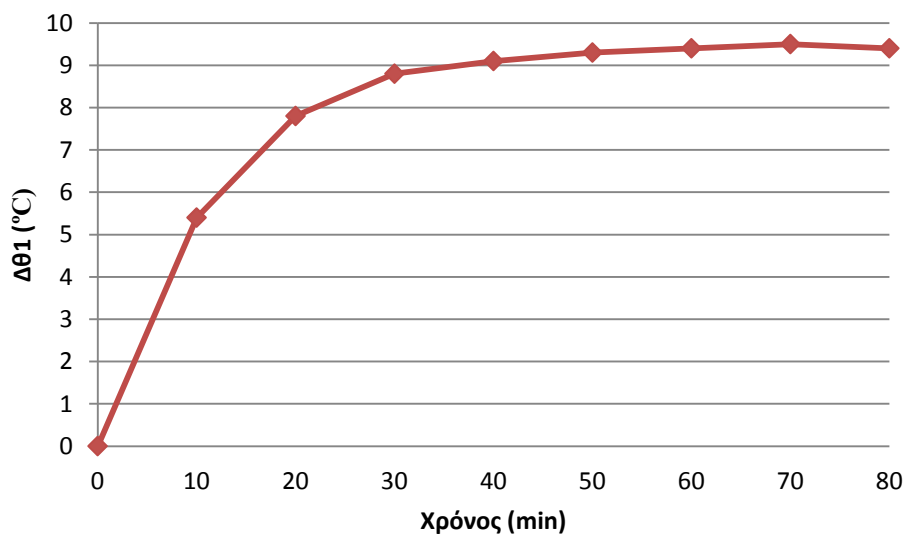
$\Delta\theta_1$ :  $\theta_1 - \theta_x$

$\Delta\theta_2$ :  $\theta_2 - \theta_x$

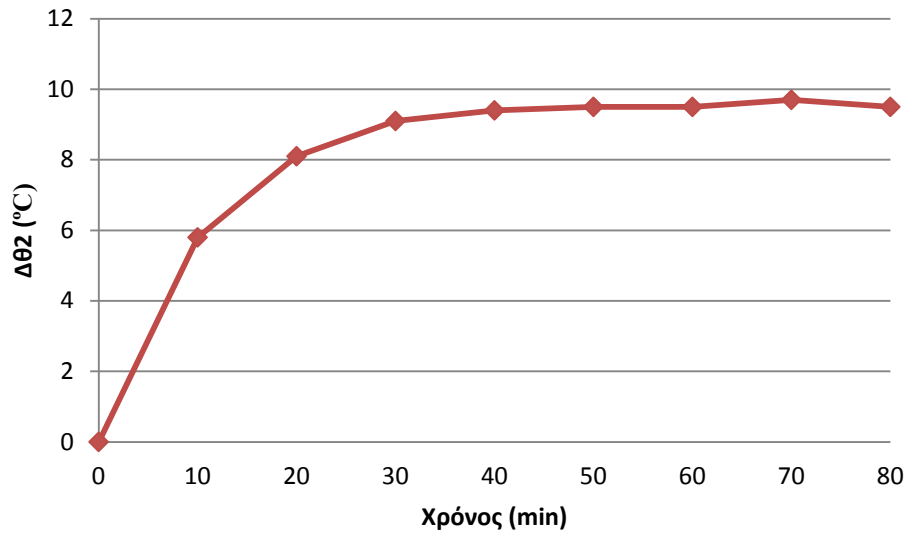
$\Delta\theta_3$ :  $\theta_3 - \theta_x$

$\Delta\theta_4$ :  $\theta_4 - \theta_x$

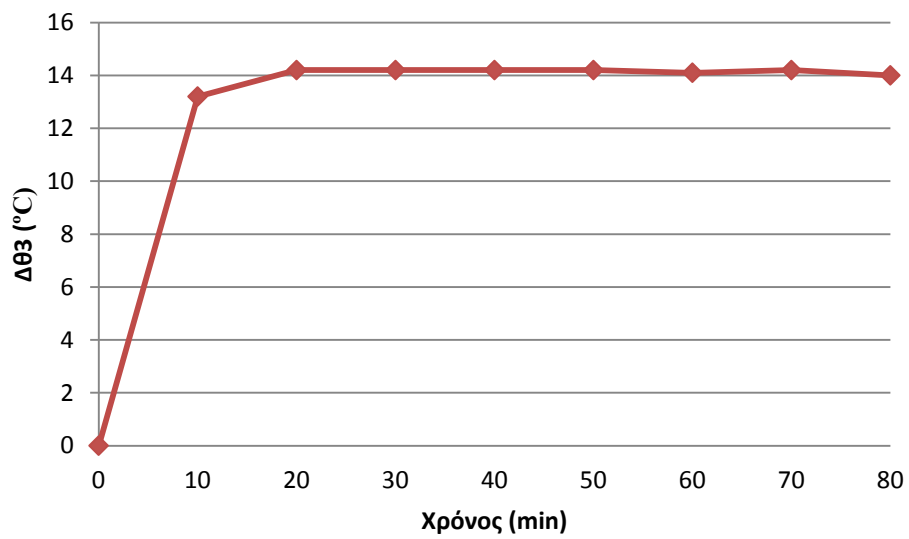
$\Delta\theta_5$ :  $\theta_5 - \theta_x$



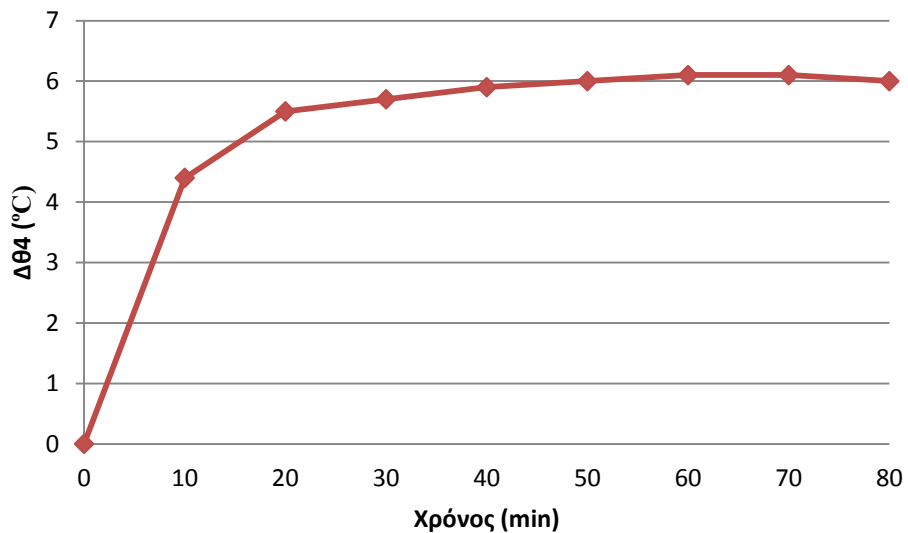
**Σχήμα 4-20:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_1$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 65 A, με 1 κομμένο κλώνο.



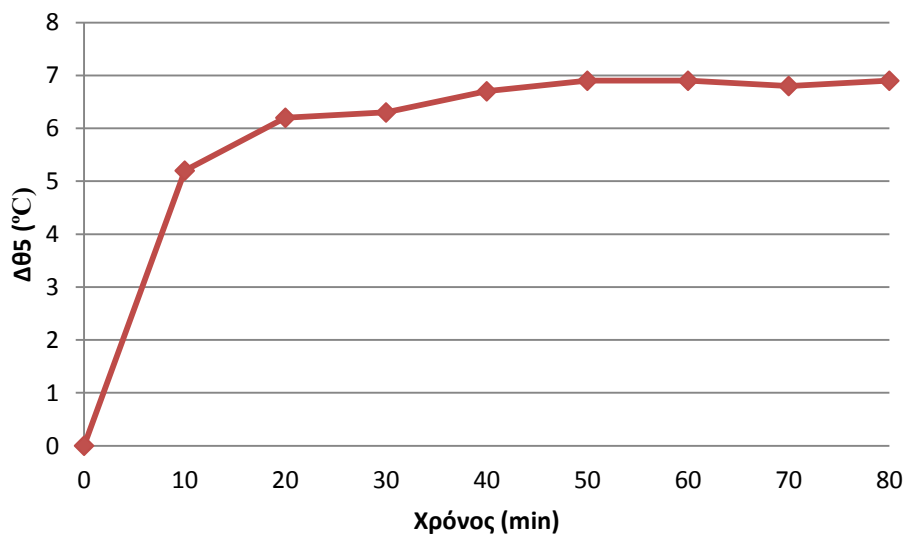
**Σχήμα 4-21 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_2$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 65 A, με 1 κομμένο κλώνο.



**Σχήμα 4-22 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_3$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 65 A, με 1 κομμένο κλώνο.



**Σχήμα 4-23 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_4$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 65 A, με 1 κομμένο κλώνο.



**Σχήμα 4-24 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_5$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 65 A, με 1 κομμένο κλώνο.



t[min]	$\theta_x$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]
0	21	21	21	21	21	21	0	0	0	0	0
10	20,9	21	21	21	21,1	21	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
20	20,9	20,9	20,9	21	21,1	21	0	0	0,1	0,2	0,1
30	20,9	20,9	20,9	21	21,1	21	0	0	0,1	0,2	0,1
40	21,1	21,1	21,1	21,1	21,2	21,1	0	0	0	0,1	0
50	21,1	21,1	21,1	21,1	21,2	21,1	0	0	0	0,1	0
60	21	21	21	21	21,1	21	0	0	0	0,1	0

**Πίνακας 4-6 :** Μετρήσεις στα θερμά σημεία 1-5 Δοκιμής 6 (βλ .σχήμα 3.3.1-4) υπό το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή στη μέση τάση  $I_N=2,16A$ , με 2 κομμένους κλώνους.

t: χρόνος

$\theta_x$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με ACSR

$\theta_2$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με χαλκό

$\theta_3$ : θερμοκρασία στο σημείο των κομμένων αγωγών

$\theta_4$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 4 (επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 5 (δεύτερη επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

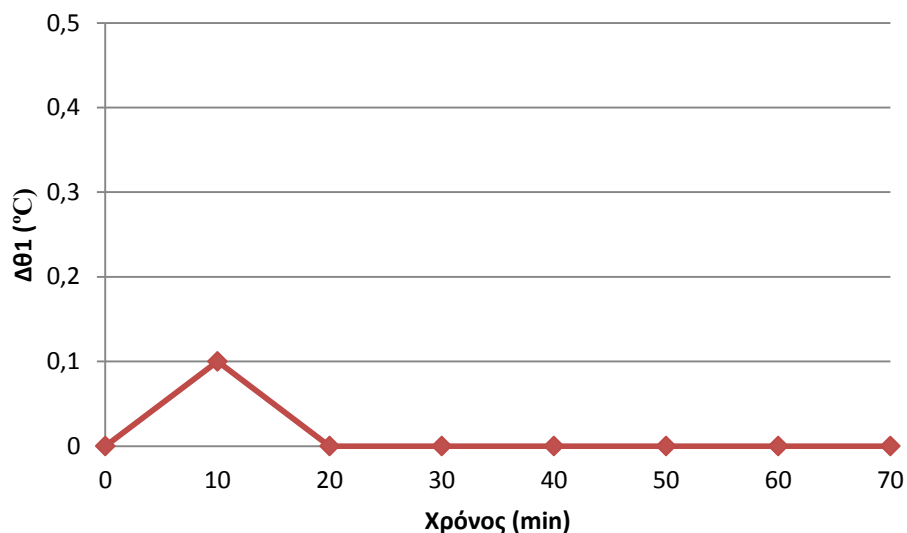
$\Delta\theta_1$ :  $\theta_1 - \theta_x$

$\Delta\theta_2$ :  $\theta_2 - \theta_x$

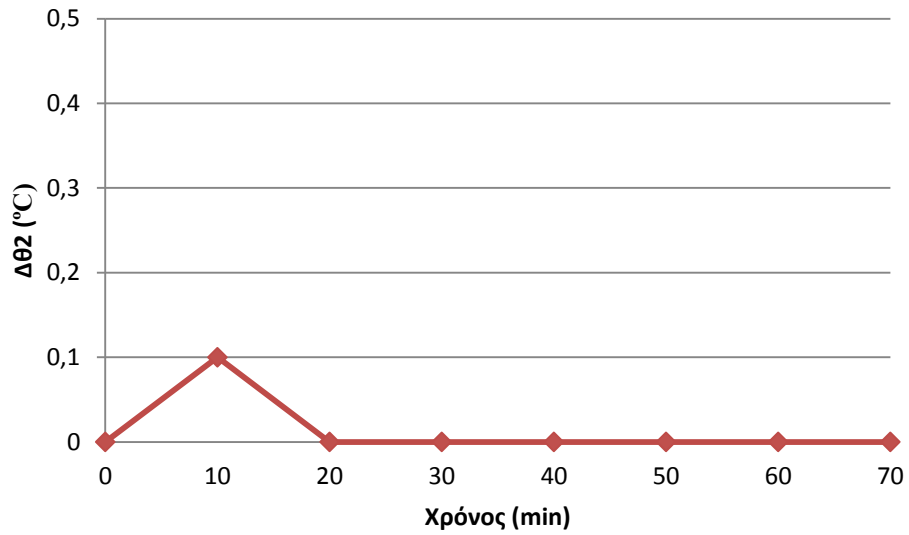
$\Delta\theta_3$ :  $\theta_3 - \theta_x$

$\Delta\theta_4$ :  $\theta_4 - \theta_x$

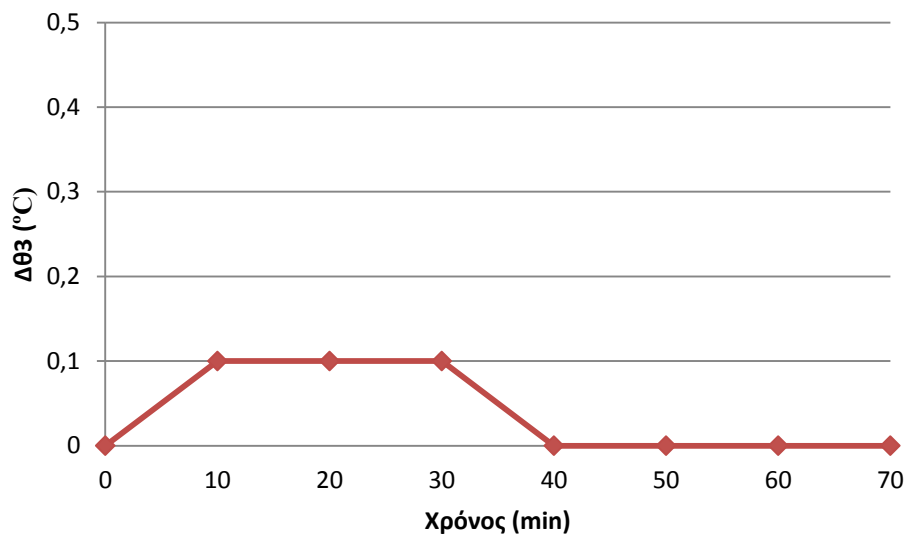
$\Delta\theta_5$ :  $\theta_5 - \theta_x$



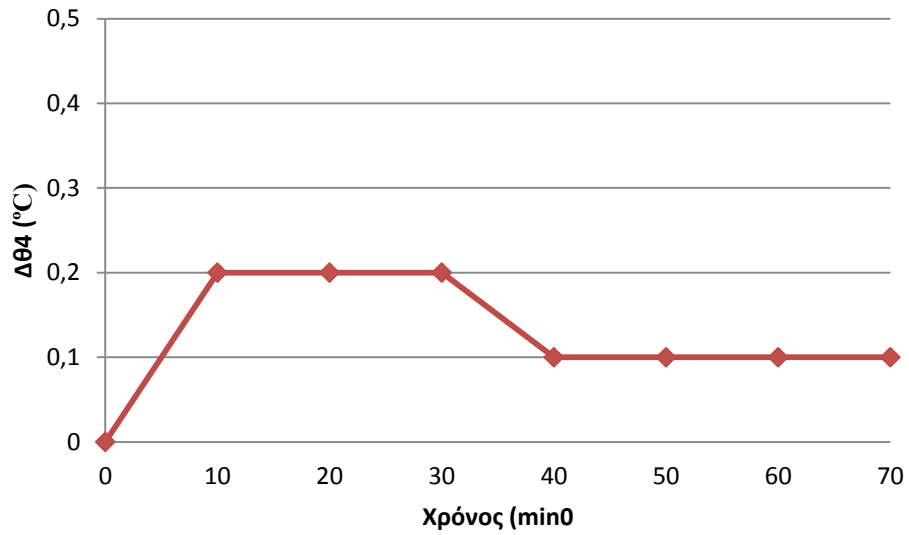
**Σχήμα 4-25:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_1$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 2 κομμένους κλώνους.



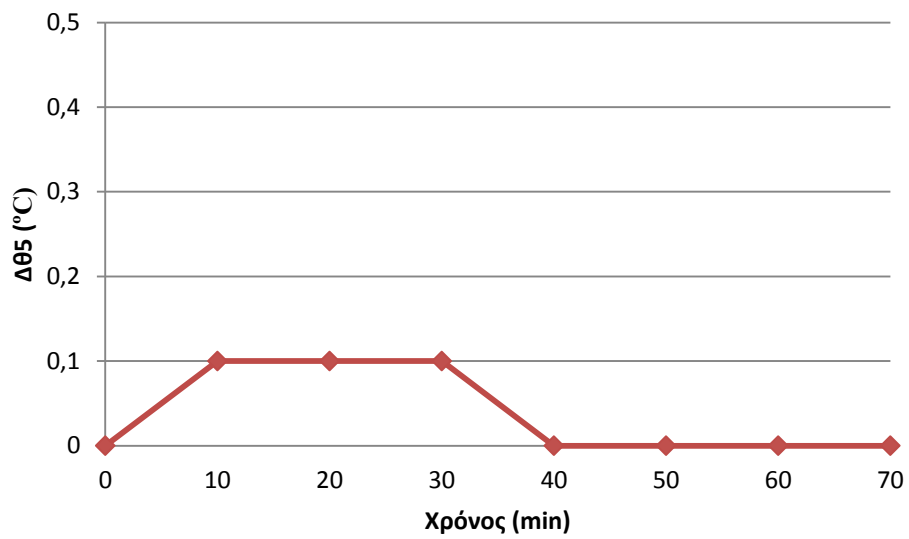
**Σχήμα 4-26 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_2$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 2 κομμένους κλώνους.



**Σχήμα 4-27 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_3$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 2 κομμένους κλώνους.



**Σχήμα 4-28 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_4$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 2 κομμένους κλώνους.



**Σχήμα 4-29 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_5$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 2 κομμένους κλώνους.

t[min]	$\theta_x$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]
0	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	0	0	0	0	0
10	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	0	0	0	0	0
20	21	21	21	21,1	21,1	21,1	0	0	0,1	0,1	0,1
30	21	21	21	21,1	21,2	21,1	0	0	0,1	0,2	0,1
40	21	21	21	21,1	21,2	21,1	0	0	0,1	0,2	0,1
50	21	21	21	21,1	21,2	21,1	0	0	0,1	0,2	0,1
60	21	21	21	21,1	21,2	21,1	0	0	0,1	0,2	0,1

**Πίνακας 4-7 :** Μετρήσεις στα θερμά σημεία 1-5 Δοκιμής 7 (βλ. σχήμα 3.3.1-4) υπό το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή στη μέση τάση  $I_N=2,16A$ , με 3 κομμένους κλώνους.

t: χρόνος

$\theta_x$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με ACSR

$\theta_2$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με χαλκό

$\theta_3$ : θερμοκρασία στο σημείο των κομμένων αγωγών

$\theta_4$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 4 (επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 5 (δεύτερη επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

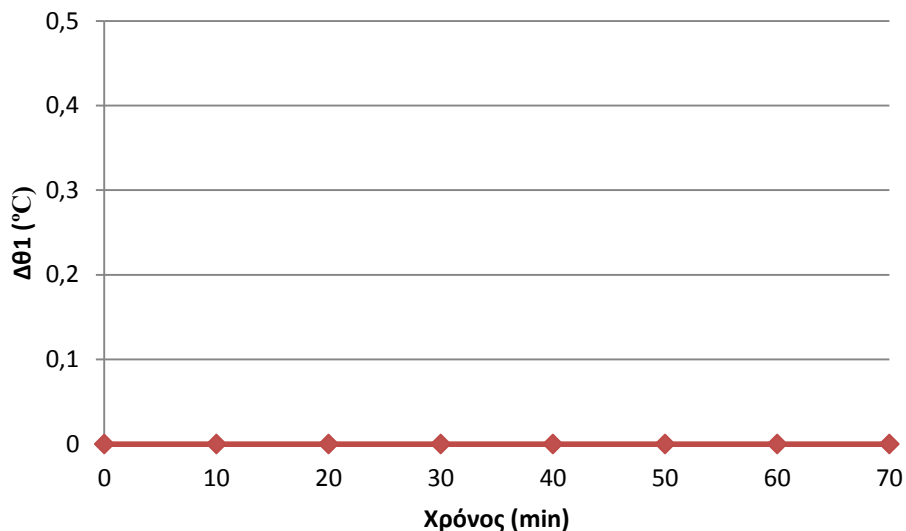
$\Delta\theta_1$ :  $\theta_1 - \theta_x$

$\Delta\theta_2$ :  $\theta_2 - \theta_x$

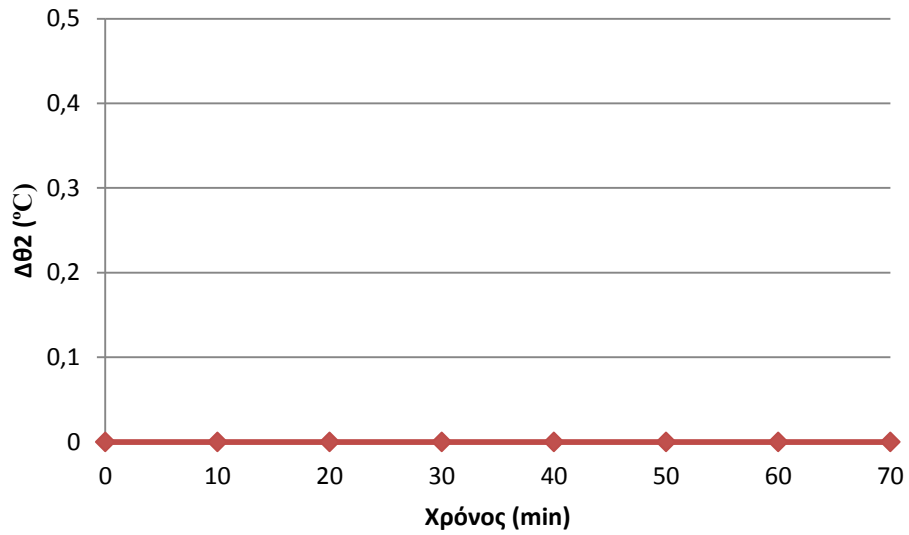
$\Delta\theta_3$ :  $\theta_3 - \theta_x$

$\Delta\theta_4$ :  $\theta_4 - \theta_x$

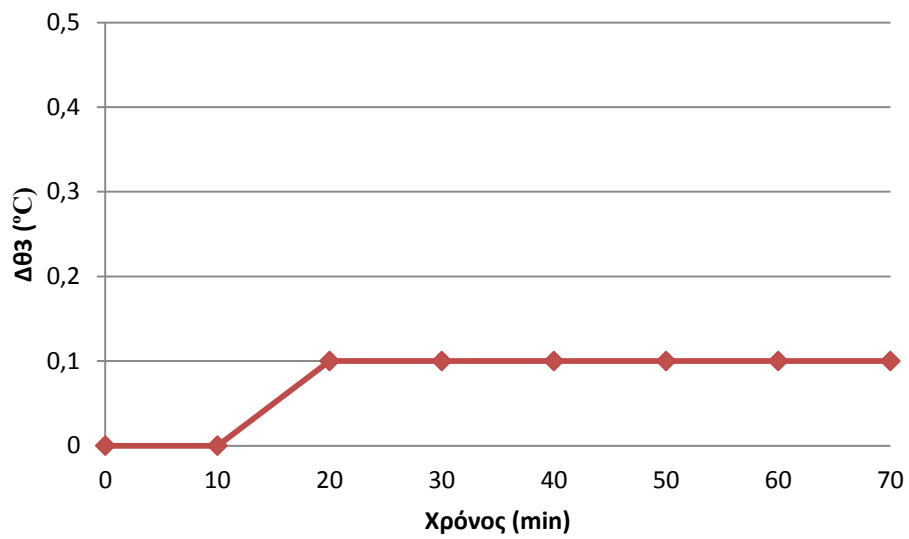
$\Delta\theta_5$ :  $\theta_5 - \theta_x$



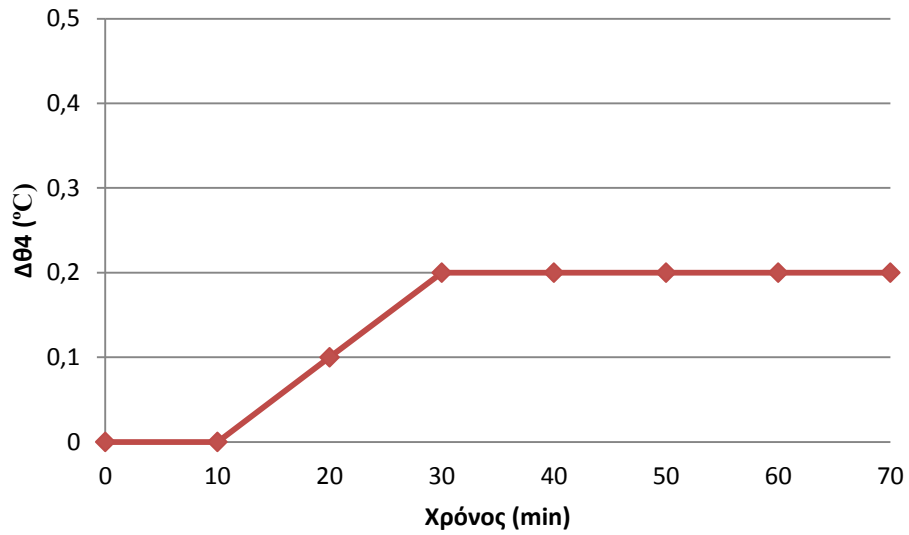
**Σχήμα 4-30 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_1$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 3 κομμένους κλώνους.



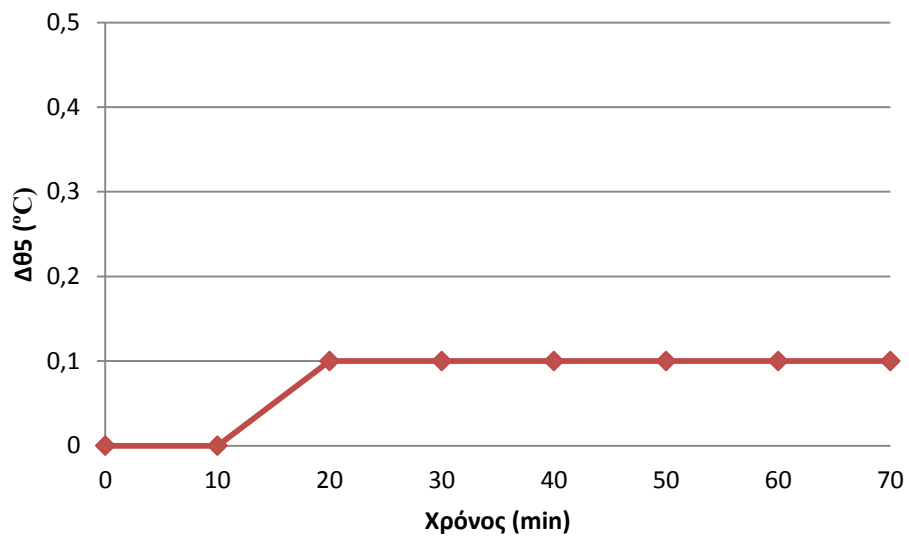
**Σχήμα 4-31 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_2$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 3 κομμένους κλώνους.



**Σχήμα 4-32 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_3$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 3 κομμένους κλώνους.



**Σχήμα 4-33 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_4$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 3 κομμένους κλώνους.



**Σχήμα 4-34 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_5$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 3 κομμένους κλώνους.

t[min]	$\theta_x$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]
0	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	0	0	0	0	0
10	22,9	23,1	23,1	23,1	23,1	23	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
20	22,9	23,1	23,1	23,1	23,1	23	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
30	22,9	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
40	22,9	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
50	22,9	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
60	22,9	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

**Πίνακας 4-8 :** Μετρήσεις στα θερμά σημεία 1-5 Δοκιμής 8 (βλ. σχήμα 3.3.1-4) υπό το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή στη μέση τάση  $I_N=2,16A$ , με 4 κομμένους κλώνους.

t: χρόνος

$\theta_x$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με ACSR

$\theta_2$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με χαλκό

$\theta_3$ : θερμοκρασία στο σημείο των κομμένων αγωγών

$\theta_4$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 4 (επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 5 (δεύτερη επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

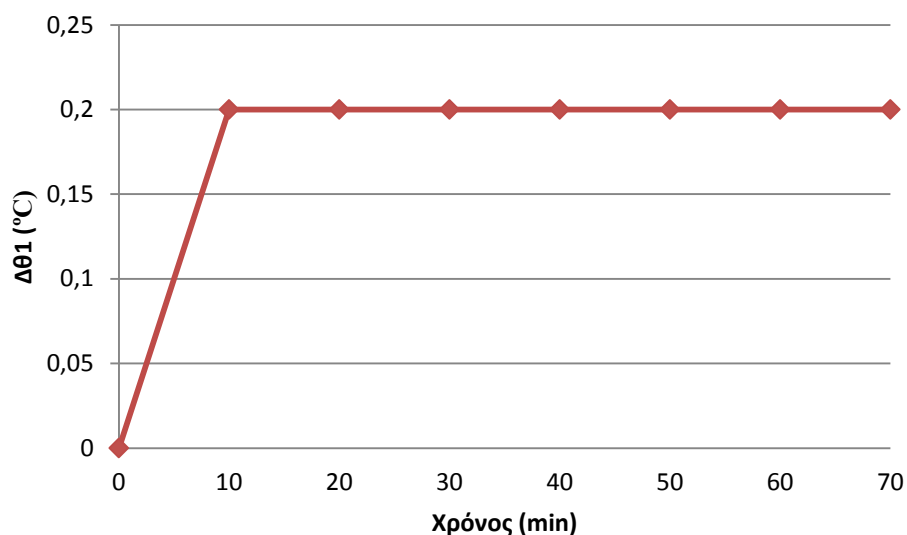
$\Delta\theta_1$ :  $\theta_1 - \theta_x$

$\Delta\theta_2$ :  $\theta_2 - \theta_x$

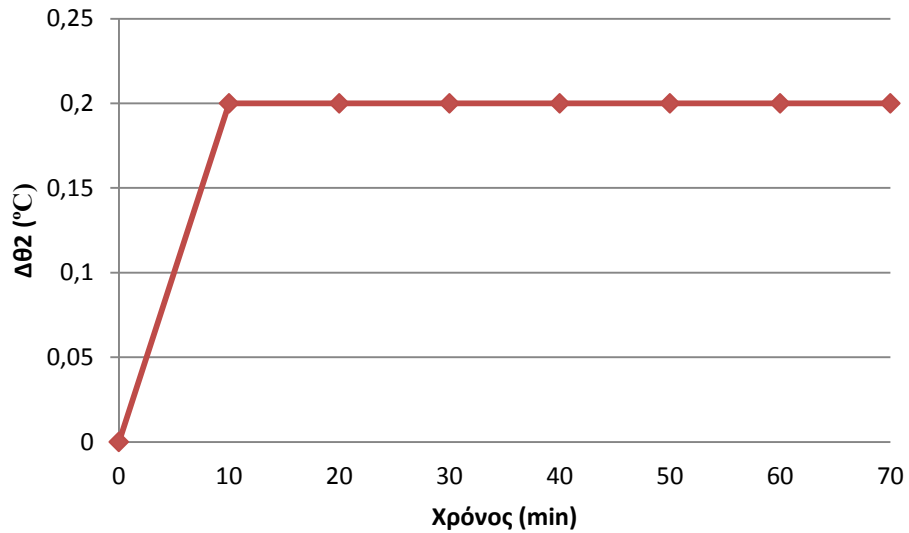
$\Delta\theta_3$ :  $\theta_3 - \theta_x$

$\Delta\theta_4$ :  $\theta_4 - \theta_x$

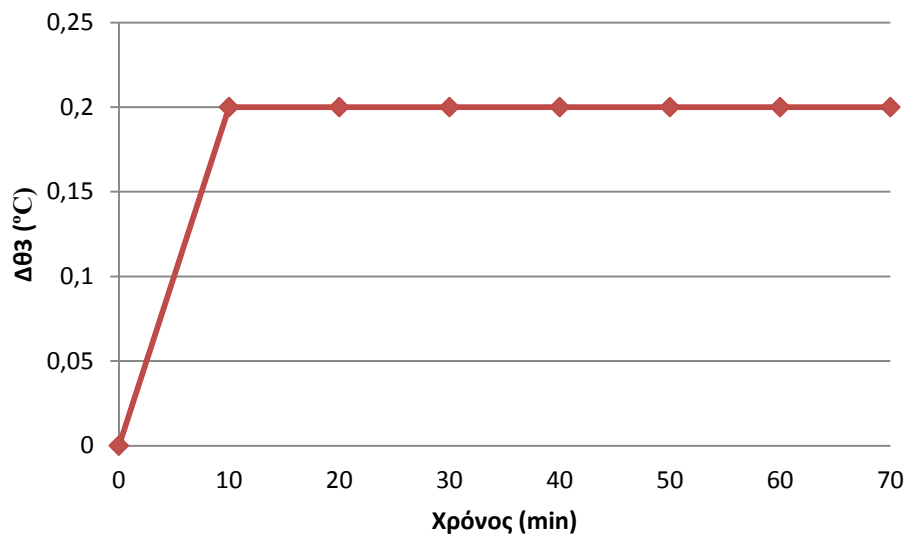
$\Delta\theta_5$ :  $\theta_5 - \theta_x$



**Σχήμα 4-35 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_1$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 4 κομμένους κλώνους.

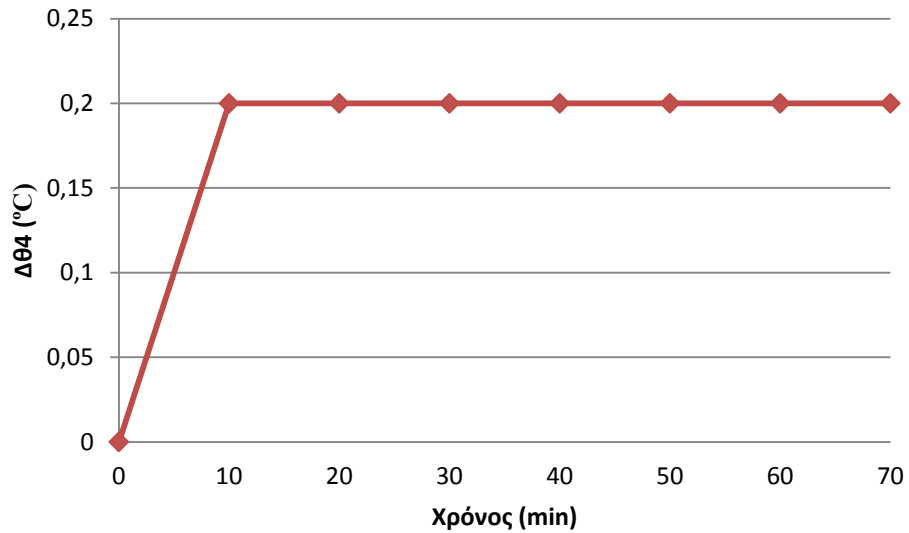


**Σχήμα 4-36:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_2$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 4 κομμένους κλώνους.

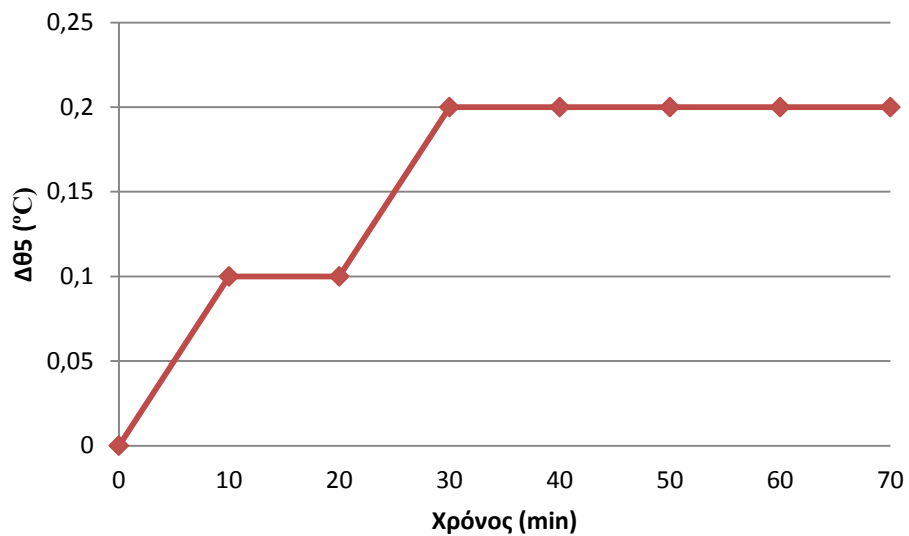


**Σχήμα 4-37:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_3$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 4 κομμένους κλώνους.





**Σχήμα 4-38 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_4$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 4 κομμένους κλώνους.



**Σχήμα 4-39 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_5$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 4 κομμένους κλώνους.

t[min]	$\theta_x$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\theta_5$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_5$ [°C]
0	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	0	0	0	0	0
10	23	23,2	23,2	23,2	23,2	23	0,2	0,2	0,2	0,2	0
20	23	23,2	23,1	23,2	23,2	23	0,2	0,1	0,2	0,2	0
30	23	23,2	23,2	23,2	23,2	23	0,2	0,2	0,2	0,2	0
40	23	23,2	23,2	23,2	23,2	23	0,2	0,2	0,2	0,2	0
50	23,1	23,2	23,2	23,2	23,2	23,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0
60	23,1	23,2	23,2	23,2	23,2	23,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0

**Πίνακας 4-9 :** Μετρήσεις στα θερμά σημεία 1-5 Δοκιμής 9 (βλ .σχήμα 3.3.1-4) υπό το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή στη μέση τάση  $I_N=2,16A$ , με 5 κομμένους κλώνους.

t: χρόνος

$\theta_x$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με ACSR

$\theta_2$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με χαλκό

$\theta_3$ : θερμοκρασία στο σημείο των κομμένων αγωγών

$\theta_4$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 4 (επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

$\theta_5$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 5 (δεύτερη επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

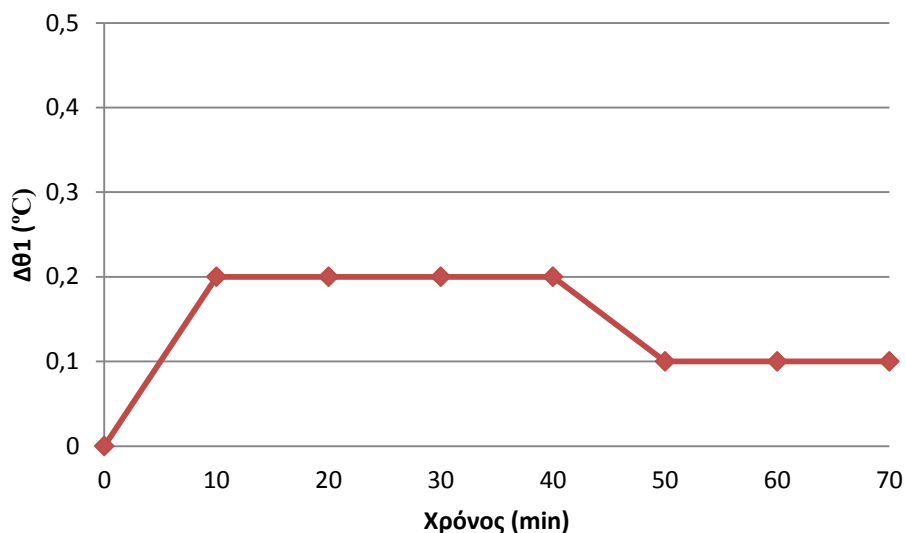
$\Delta\theta_1$ :  $\theta_1 - \theta_x$

$\Delta\theta_2$ :  $\theta_2 - \theta_x$

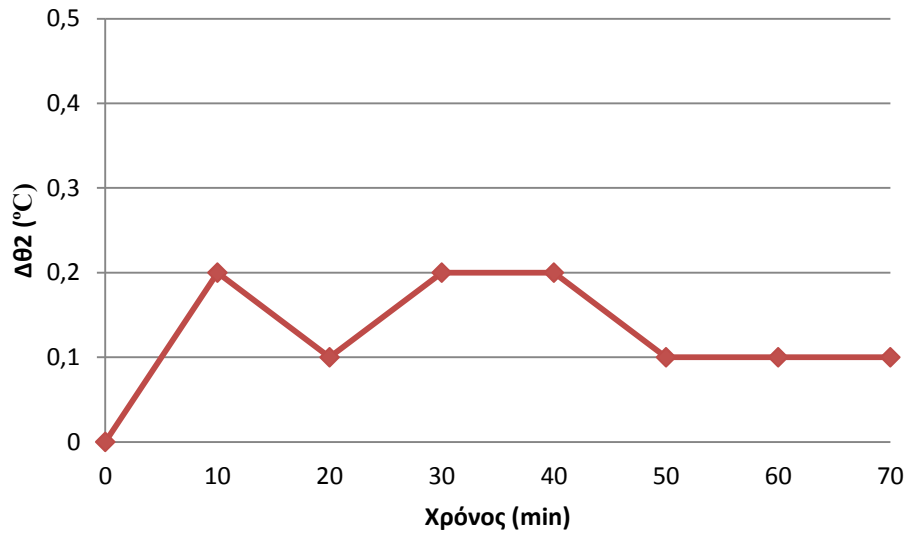
$\Delta\theta_3$ :  $\theta_3 - \theta_x$

$\Delta\theta_4$ :  $\theta_4 - \theta_x$

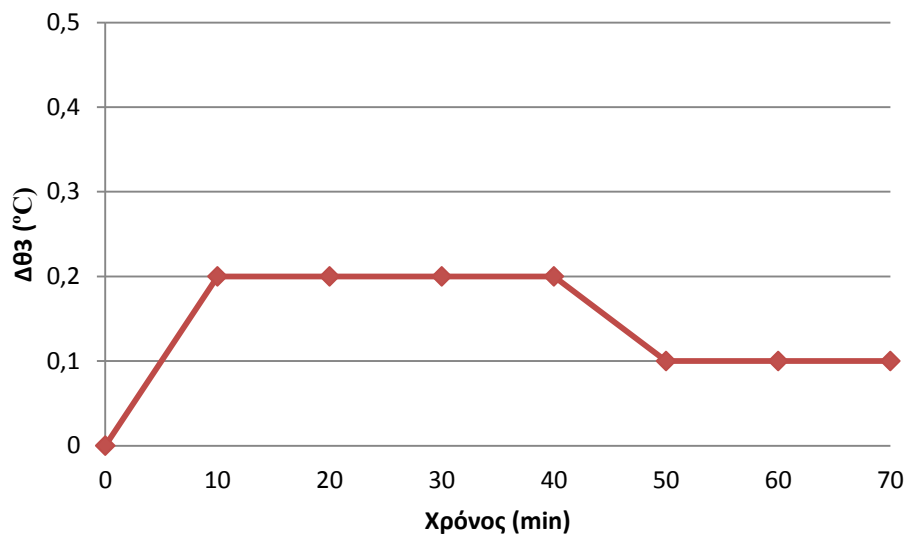
$\Delta\theta_5$ :  $\theta_5 - \theta_x$



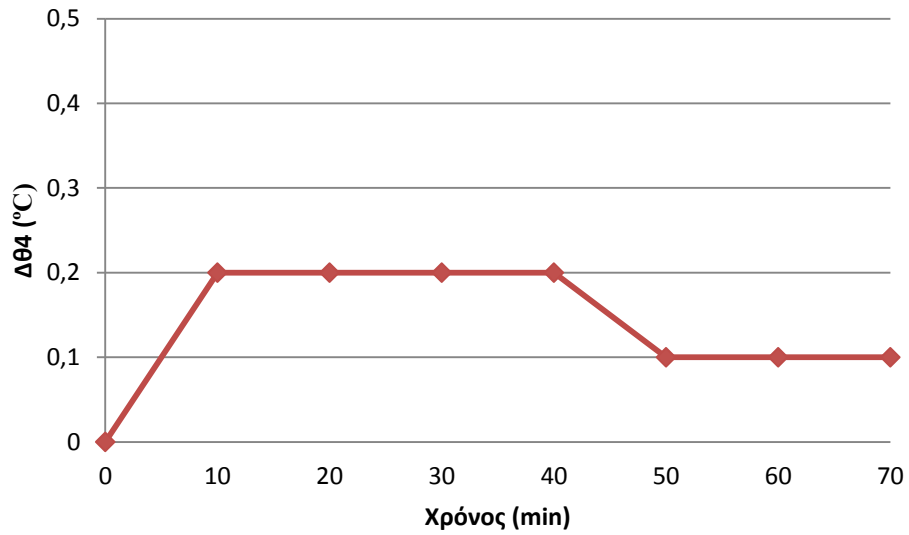
**Σχήμα 4-40 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_1$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 5 κομμένους κλώνους.



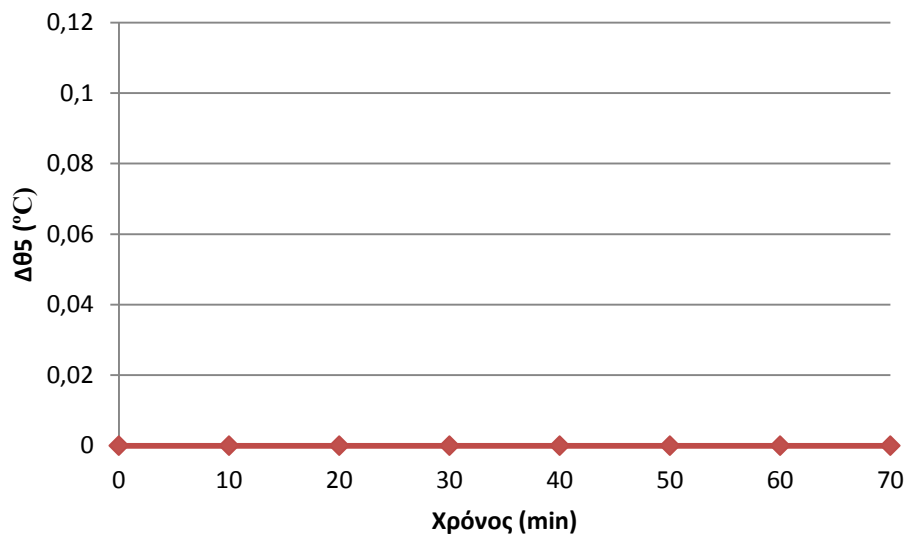
**Σχήμα 4-41 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_2$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 5 κομμένους κλώνους.



**Σχήμα 4-42 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_3$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 5 κομμένους κλώνους.



**Σχήμα 4-43 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_4$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 5 κομμένους κλώνους.



**Σχήμα 4-44 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_5$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 2,16 A, με 5 κομμένους κλώνους.

t[min]	$\theta_x$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]
0	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	0	0	0	0
10	23,5	23,7	23,7	23,5	23,5	0,2	0,2	0	0
20	23,5	23,7	23,7	23,5	23,5	0,2	0,2	0	0
30	23,5	23,7	23,7	23,5	23,5	0,2	0,2	0	0
40	23,5	23,7	23,7	23,5	23,5	0,2	0,2	0	0
50	23,5	23,7	23,7	23,5	23,5	0,2	0,2	0	0
60	23,5	23,7	23,7	23,5	23,5	0,2	0,2	0	0

**Πίνακας 4-10:** Μετρήσεις στα θερμά σημεία 1-4 Δοκιμής 10(βλ. σχήμα 3.3.1-6) υπό μέγιστο ρεύμα λειτουργίας με φορτίο της τριφασική αντλία των 1,5kW,  $I=0,3$  A, με 6 κομμένους κλώνους.

t: χρόνος

$\theta_x$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με ACSR

$\theta_2$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με χαλκό

$\theta_3$ : θερμοκρασία στο σημείο των κομμένων αγωγών

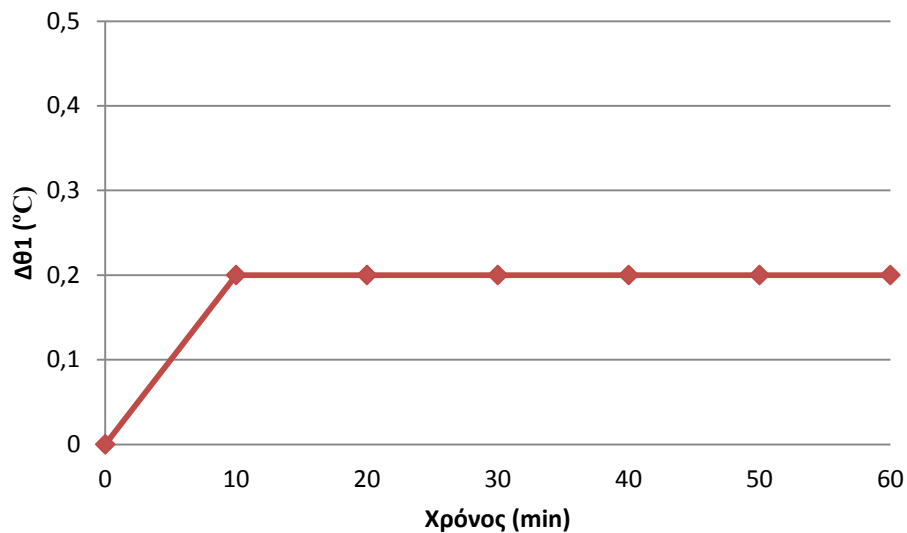
$\theta_4$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 4 (επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

$\Delta\theta_1$ :  $\theta_1 - \theta_x$

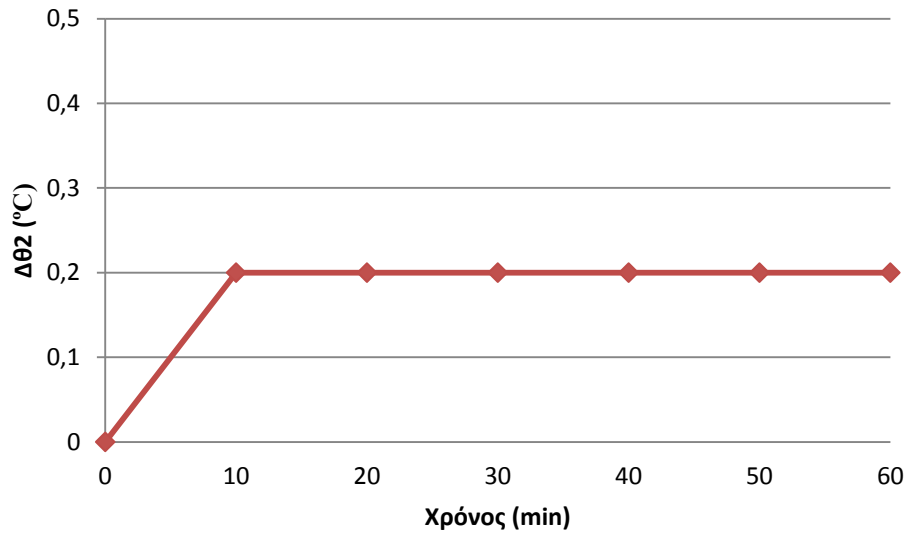
$\Delta\theta_2$ :  $\theta_2 - \theta_x$

$\Delta\theta_3$ :  $\theta_3 - \theta_x$

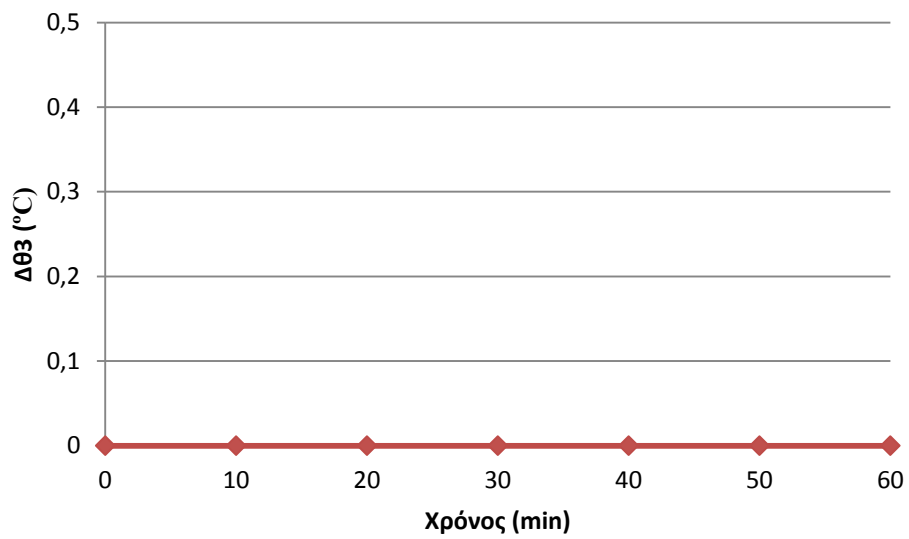
$\Delta\theta_4$ :  $\theta_4 - \theta_x$



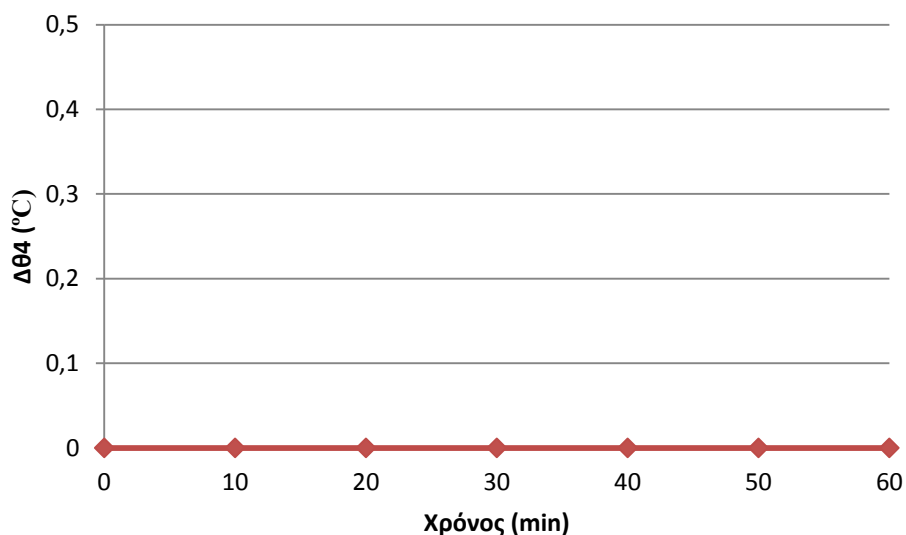
**Σχήμα 4-45:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_1$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 0,3 A, με 6 κομμένους κλώνους.



**Σχήμα 4-46:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_2$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 0,3 A, με 6 κομμένους κλώνους.



**Σχήμα 4-47:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_3$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 0,3 A, με 6 κομμένους κλώνους.



**Σχήμα 4-48 :** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_3$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 0,3 A, με 6 κομμένους κλώνους.

t[min]	$\theta_x$ [°C]	$\theta_1$ [°C]	$\theta_2$ [°C]	$\theta_3$ [°C]	$\theta_4$ [°C]	$\Delta\theta_1$ [°C]	$\Delta\theta_2$ [°C]	$\Delta\theta_3$ [°C]	$\Delta\theta_4$ [°C]
0	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	0	0	0	0
10	23,6	23,9	23,8	23,7	23,7	0,3	0,2	0,1	0,1
20	23,6	23,9	23,8	23,7	23,7	0,3	0,2	0,1	0,1
30	23,6	23,9	23,8	23,7	23,7	0,3	0,2	0,1	0,1
40	23,6	23,8	23,8	23,7	23,7	0,2	0,2	0,1	0,1
50	23,6	23,8	23,8	23,7	23,7	0,2	0,2	0,1	0,1
60	23,6	23,8	23,9	23,8	23,7	0,2	0,3	0,2	0,1

**Πίνακας 4-11 :** Μετρήσεις στα θερμά σημεία 1-4 Δοκιμής 11(βλ. σχήμα 3.3.1-6) υπό μέγιστο ρεύμα λειτουργίας με φορτίο τριφασική αντλία των 1,5kW,  $I=0,3$  A, με 6 κομμένους κλώνους και χαλαρούς συνδέσμους.

t: χρόνος

$\theta_x$ : θερμοκρασία χώρου

$\theta_1$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με ACSR

$\theta_2$ : θερμοκρασία σφικτήρα επαφή με χαλκό

$\theta_3$ : θερμοκρασία στο σημείο των κομμένων αγωγών

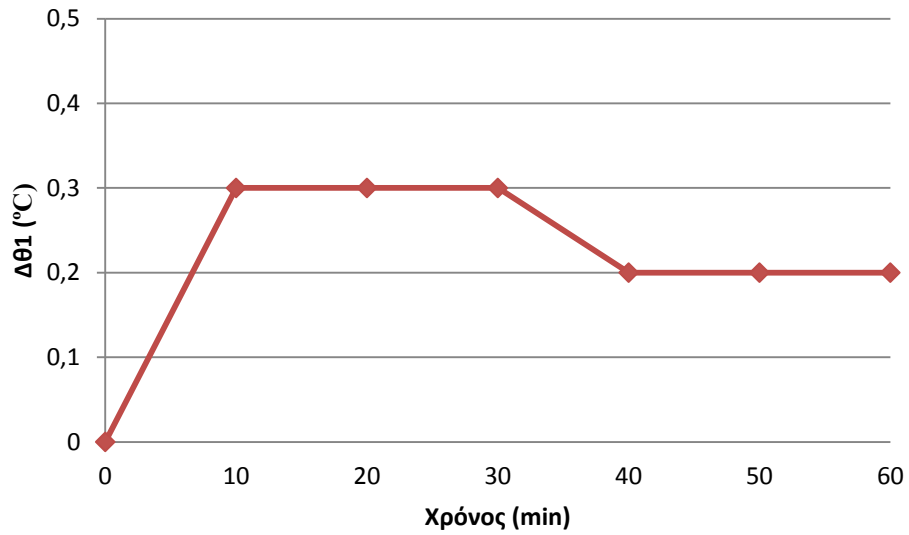
$\theta_4$ : θερμοκρασία στο θερμό σημείο 4 (επαφή χαλκού με ασφαλειοαποζεύκτη)

$\Delta\theta_1$ :  $\theta_1 - \theta_x$

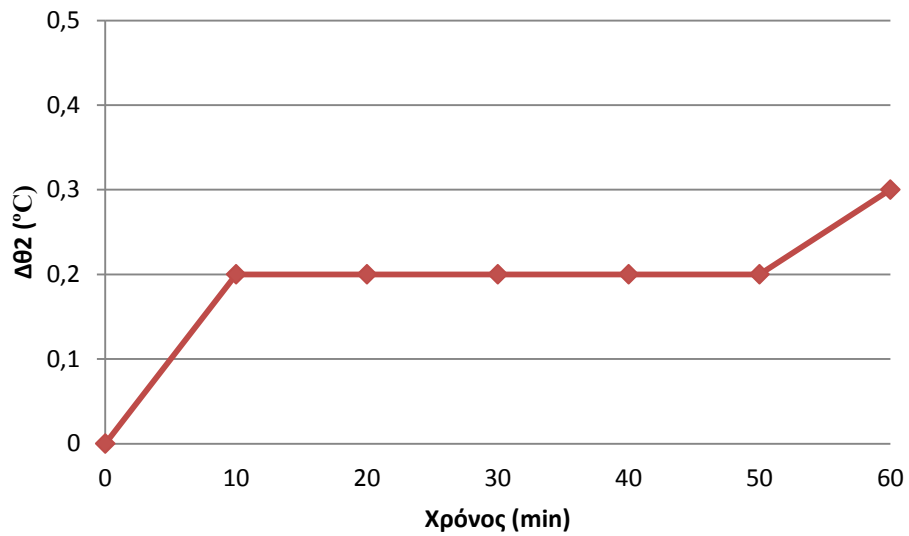
$\Delta\theta_2$ :  $\theta_2 - \theta_x$

$\Delta\theta_3$ :  $\theta_3 - \theta_x$

$\Delta\theta_4$ :  $\theta_4 - \theta_x$

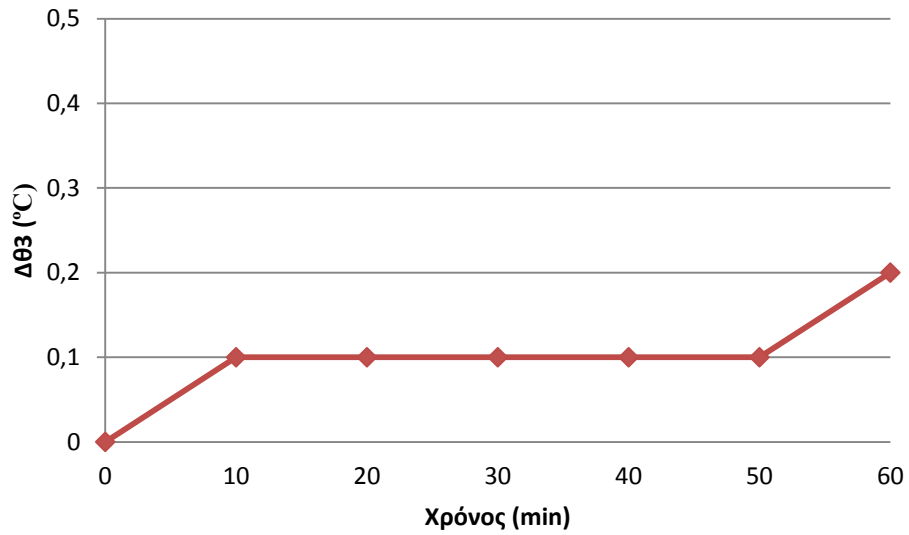


**Σχήμα 4-49:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_1$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 0,3 A, με 6 κομμένους κλώνους και χαλαρούς συνδέσμους.

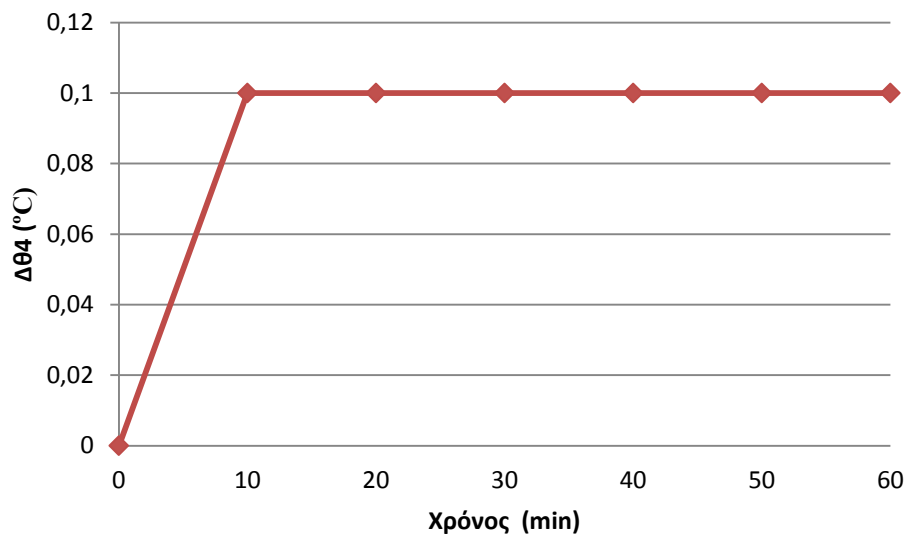


**Σχήμα 4-50:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_2$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 0,3 A, με 6 κομμένους κλώνους και χαλαρούς συνδέσμους.





**Σχήμα 4-51:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_3$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 0,3 A, με 6 κομμένους κλώνους και χαλαρούς συνδέσμους.



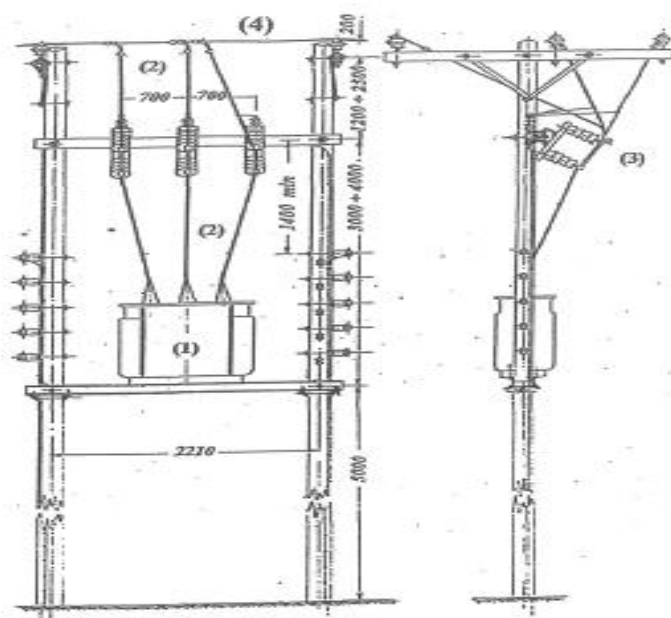
**Σχήμα 4-52:** Καμπύλη μεταβολής της  $\Delta\theta_4$  ως προς το χρόνο με εφαρμοζόμενο ρεύμα λειτουργίας 0,3 A, με 6 κομμένους κλώνους και χαλαρούς συνδέσμους.

## 5 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΑΙΘΡΙΟΥ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται θεωρητικά η θερμική συμπεριφορά ενός θεωρητικού μοντέλου υπαίθριου υποσταθμού μέσης προς χαμηλή τάση κατά την λειτουργία του υπό συνθήκες κανονικής και δυσμενής λειτουργίας. Εξετάζεται σε θεωρητικό επίπεδο αν υπάρχει πιθανότητα να αναπτυχθούν θερμοκρασίες, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν τήγματα στους αγωγούς ή στις επαφές τους, πράγμα το οποίο θα εγκυμονούσε κινδύνους για την πρόκληση πυρκαγιάς στο περιβάλλον του υποσταθμού.

### **5.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΑΙΘΡΙΟΥ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥ ΜΕΣΗΣ ΠΡΟΣ ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΣΗ**

Στη συνέχεια δίνονται τα στοιχεία και το σχήμα (5.1-1) του υπαίθριου υποσταθμού που θα εξεταστεί θεωρητικά. Τέτοιοι υποσταθμοί συναντούνται συχνά στο ελληνικό δίκτυο ηλεκτροδότησης και πολλές φορές βρίσκονται σε σημεία με πυκνή βλάστηση.



**Σχήμα 5.1-1:** Απλοποιημένο σχέδιο υπαίθριου υποσταθμού μέσης προς χαμηλή τάση (1): Μετασχηματιστής 75kVA, 20 kV/400 V, 230 V. (2): Αγωγοί διασύνδεσης (τύπου Cu 16 mm<sup>2</sup>). (3): Μονοπολικοί ασφαλειοαποζεύκτες με τηκτά 3A κατάλληλοι για τηκτά μέχρι 65A. (4): Αγωγοί μέσης τάσης ( τύπου ACSR 35 mm<sup>2</sup>).

- Γραμμή ACSR 35 mm<sup>2</sup>, I<sub>N</sub>=224 A.
- Δίστηλος τυποποιημένος υποσταθμός 20 kV/400 V, 75 kVA, που λειτουργεί περίπου 20 χρόνια σε περιβάλλον χωρίς ρύπανση.
- Αγωγοί διασύνδεσης του υποσταθμού : Cu 16 mm<sup>2</sup>, I<sub>N</sub>=145 A.
- Μονοπολικοί ασφαλειοαποζεύκτες με τηκτά 3 A (κατάλληλοι για τηκτά μέχρι 65 A).
- Το φορτίο του εν λόγω υποσταθμού είναι μόνο μια τριφασική αντλία 1,5 kW ενός δικτύου άρδευσης (οι υπόλοιπες παροχές ρεύματος στην περιοχή είναι ανενεργές μετά από αίτημα των καταναλωτών).

## 5.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΠΑΙΘΡΙΟΥ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥ

Στο θεωρητικό μοντέλο του υποσταθμού βασικός άξονας αξιολόγησης και έρευνας είναι η θερμική συμπεριφορά και γενικότερα οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε τέτοιους υποσταθμούς, σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας, ώστε να γίνει έλεγχος της επικινδυνότητας τους για το φυσικό περιβάλλον. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε μέσω θεωρητικών υπολογισμών η πιθανότητα εκδήλωσης τηγμάτων στους αγωγούς του υποσταθμού κατά την λειτουργία του με μέγιστο ρεύμα υπό ονομαστική τάση, ενώ παράλληλα ερευνήθηκε και η πιθανότητα δημιουργίας τηγμάτων στην περίπτωση που σε έναν αγωγό διασύνδεσης έχει συμβεί, από σκάγια κυνηγετικών όπλων, αποκοπή 6 κλώνων από τους 7. Επίσης, σημαντικό στοιχείο που χρήζει θεωρητικής προσέγγισης είναι και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους αγωγούς λόγω διακυμάνσεων της τάσης στον υποσταθμό. Ερευνήθηκε ακόμα, το ενδεχόμενο να εκδηλωθούν τήγματα σε σφικτήρες αγωγών και επαφές-συνδέσμους ασφαλειοαποζευκτών, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε και θεωρητική εκτίμηση της υπολειπόμενης διάρκειας ζωής του υποσταθμού σε σχέση με τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται, δεδομένου ότι (λόγω της εικοσαετούς λειτουργίας του) υπάρχουν έντονα ίχνη οξείδωσης σε αγωγούς, συνδέσμους και επαφές.

### 5.2.1 Πιθανότητα εκδήλωσης τηγμάτων στους αγωγούς του υποσταθμού

Για να εξεταστεί στο θεωρητικό μοντέλο η πιθανότητα εκδήλωσης τηγμάτων στους αγωγούς του υποσταθμού θεωρήθηκε λειτουργία σε μέγιστο ρεύμα υπό ονομαστική τάση, δηλ  $U_N=20$  kV. Ισχύει ότι  $I_{\Gamma_{\max}}=P_N/(1,73 \cdot U_N)$  όπου  $P_N$  και  $U_N$  ονομαστική ισχύς και τάση αντίστοιχα. Άρα έχουμε  $I_{\Gamma_{\max}}=75/(1,73 \cdot 20) \approx 2,16$  A.

Ισχύει ότι η ηλεκτρική ισχύς δίνεται από τον τύπο :

$$P_{\eta\lambda} = I_{\Gamma_{\max}}^2 \cdot R \quad [5.2.1-1]$$

όπου R το φορτίο της γραμμής ανά φάση. Η θερμική ισχύς δίνεται από τον τύπο :

$$P_{\theta} = \kappa \cdot A \cdot \Delta\theta \quad [5.2.1-2]$$

όπου A διατομή του αγωγού  $\Delta\theta$  διαφορά θερμοκρασίας και  $\kappa$  σταθερά.

Αν θεωρηθεί η δυσμενέστερη περίπτωση όπου ολόκληρη η ηλεκτρική ισχύς μετατρέπεται σε θερμική πάνω στους αγωγούς, από [5.2.1-1] και [5.2.1-2] προκύπτει η σχέση:

$$I_{\Gamma_{\max}}^2 \cdot R = \kappa \cdot A \cdot \Delta\theta \quad [5.2.1-3].$$

Είναι γνωστό ότι ονομαστικό ρεύμα αγωγού έχουμε για  $\Delta\theta=55^\circ\text{C}$ . Άρα η [5.2.1-3] γίνεται :  
 $I_N^2 \cdot R = \kappa \cdot A \cdot \Delta\theta_N \quad [5.2.1-4].$

Διαιρώντας τις σχέσεις [5.2.1-3] και [5.2.1-4] προκύπτει η σχέση :

$$\Delta\theta = \Delta\theta_N (I_{\Gamma_{\max}}/I_N)^2 \quad [5.2.1-5]$$

Για αγωγό ACSR 35 mm<sup>2</sup> με  $\Delta\theta_N=55$  °C,  $I_{\Gamma_{\max}}=2,16$  A και  $I_N=224$  A αντικαθιστώντας στην [5.2.1-5] έχουμε  $\Delta\theta=55(2,16/224)^2 \approx 0,0051$  °C. Ισχύει όμως ότι η τήξη του Al γίνεται στους 660 °C άρα η τιμή αυτή είναι απολύτως ακίνδυνη. Επίσης για αγωγό Cu 16 mm<sup>2</sup> με  $\Delta\theta_N=55^\circ\text{C}$ ,  $I_{\Gamma_{\max}}=2,16\text{A}$  και  $I_N=145\text{A}$  αντικαθιστώντας πάλι στην [5.2.1-5] έχουμε  $\Delta\theta=55(2,16/145)^2 \approx 0,0122$  °C. Ισχύει όμως ότι η τήξη του Cu γίνεται στους 1080 °C, άρα η τιμή αυτή είναι πάλι απολύτως ακίνδυνη.

### 5.2.2 Πιθανότητα δημιουργίας τηγμάτων στην περίπτωση που σε έναν αγωγό διασύνδεσης έχει συμβεί αποκοπή 6 κλώνων από τους 7

Για να εξεταστεί η συγκεκριμένη πιθανότητα υπολογίστηκε το ονομαστικό ρεύμα κάθε κλώνου χωριστά για τον αγωγό Cu, δηλ  $I_{NK}=I_N/7 = 145/7 \approx 20,7$  A. Θεωρήθηκε όπως και στην πρώτη περίπτωση λειτουργία μέγιστου ρεύματος του υποσταθμού υπό ονομαστική τάση, δηλ  $I_{Γmax} \approx 2,16$  A.

Για ένα κλώνο αγωγού Cu 16 mm<sup>2</sup> έχουμε  $\Delta\theta_N=55$  °C,  $I_{Γmax}=2,16$  A και  $I_{NK}=20,7$  A. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην [5.2.1-5] προκύπτει  $\Delta\theta=\Delta\theta_N(I_{Γmax}/I_{NK})^2 = 55(2,16/20,7)^2=0,6$  °C. Είναι γνωστό όμως ότι η τήξη του Cu γίνεται στους 1080 °C, άρα η τιμή αυτή είναι απολύτως ακίνδυνη.

Στο συγκεκριμένο σημείο παρατίθενται θεωρητικοί υπολογισμοί που αφορούν κάποιες από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία. Εκτός από την περίπτωση με 6 κομμένους κλώνους που υπολογίστηκε παραπάνω, εξετάστηκε και η περίπτωση με 5 κομμένους κλώνους υπό μέγιστο ρεύμα λειτουργίας 2,16A όπου  $\Delta\theta=\Delta\theta_N(I_{Γmax}/I_{NK})^2=55(2,16/41,4)^2=0,1497$  °C και το  $I_{NK} = 2 I_N / 7 = 41,4$  A. Τέλος, με βάση τον τύπο [5.2.1-5] υπολογίστηκε και η κατάσταση με 6 κομμένους κλώνους και ρεύμα 0,3 A, λόγω φορτίου αντλίας μονοφασικό 1,5 kW στην χαμηλή τάση, και προέκυψε ότι  $\Delta\theta=\Delta\theta_N(I_r/I_{NK})^2=55(0,3/20,7)^2= 0,012$  °C. Και σε αυτές τις περιπτώσεις η αύξηση της  $\Delta\theta$  είναι αμελητέα και απίθανη για την εκδήλωση τηγμάτων στους αγωγούς του υποσταθμού.

### 5.2.3 Εκδήλωση τηγμάτων στους αγωγούς λόγω διακυμάνσεων της τάσης

Στο συγκεκριμένη παράγραφο εξετάστηκε η συμπεριφορά της θερμοκρασίας στους αγωγούς ACSR και χαλκού στην περίπτωση να πραγματοποιηθεί στον υπαίθριο υποσταθμό βύθιση τάσης ή υπέρταση.

Αν και κατά την λειτουργία των υποσταθμών οι διακυμάνσεις της τάσης δεν υπερβαίνουν το 10%, στο θεωρητικό μοντέλο του υποσταθμού θεωρήθηκε ότι η βύθιση τάσης είναι 25% έτσι ώστε τα θεωρητικά αποτελέσματα για την θερμοκρασία και την δημιουργία τηγμάτων να προκύψουν από μια κατάσταση πιο δυσμενή από την φυσιολογική τιμή της βύθισης τάσης σε υποσταθμούς.

Έτσι σε περίπτωση βύθισης τάσης κατά 25% η τάση λειτουργίας στον υποσταθμό είναι πλέον  $U=15$  kV. Το ρεύμα των γραμμών προέκυψε για αυτή την τάση  $I_f=P_N/(1,73 \cdot U) = 75/(1,73 \cdot 15) \approx 2,89$  A. Χρησιμοποιώντας και σε αυτήν την περίπτωση τον τύπο [5.2.1-5] που αποδείχθηκε στην παράγραφο 5.2.1 δηλαδή  $\Delta\theta=\Delta\theta_N (I_f/I_N)^2$  προέκυψε για την αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών ότι για τον αγωγό ACSR 35 mm<sup>2</sup> με  $\Delta\theta_N=55$  °C,  $I_f=2,89$  A και  $I_N=224$  A από την σχέση [5.2.1-5]  $\Delta\theta=55(2,89/224)^2 \approx 0,0091$ °C, ενώ για τον αγωγό Cu 16 mm<sup>2</sup> με  $\Delta\theta_N=55$ °C,  $I_f=2,89$ A και  $I_N=145$ A αντικαθιστώντας στην σχέση [5.2.1-5]  $\Delta\theta=55(2,89/145)^2 \approx 0,021$ °C.

Τα παραπάνω αποτελέσματα για την αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών σε περίπτωση βύθισης τάσης, γνωρίζοντας ότι η τήξη Al είναι στους 660°C και ότι η τήξη Cu είναι στους 1080°C, χαρακτηρίζονται ως ακίνδυνα και αμελητέα για την δημιουργία τηγμάτων και συνεπώς πρόκληση πυρκαγιάς στο ευρύτερο περιβάλλον.

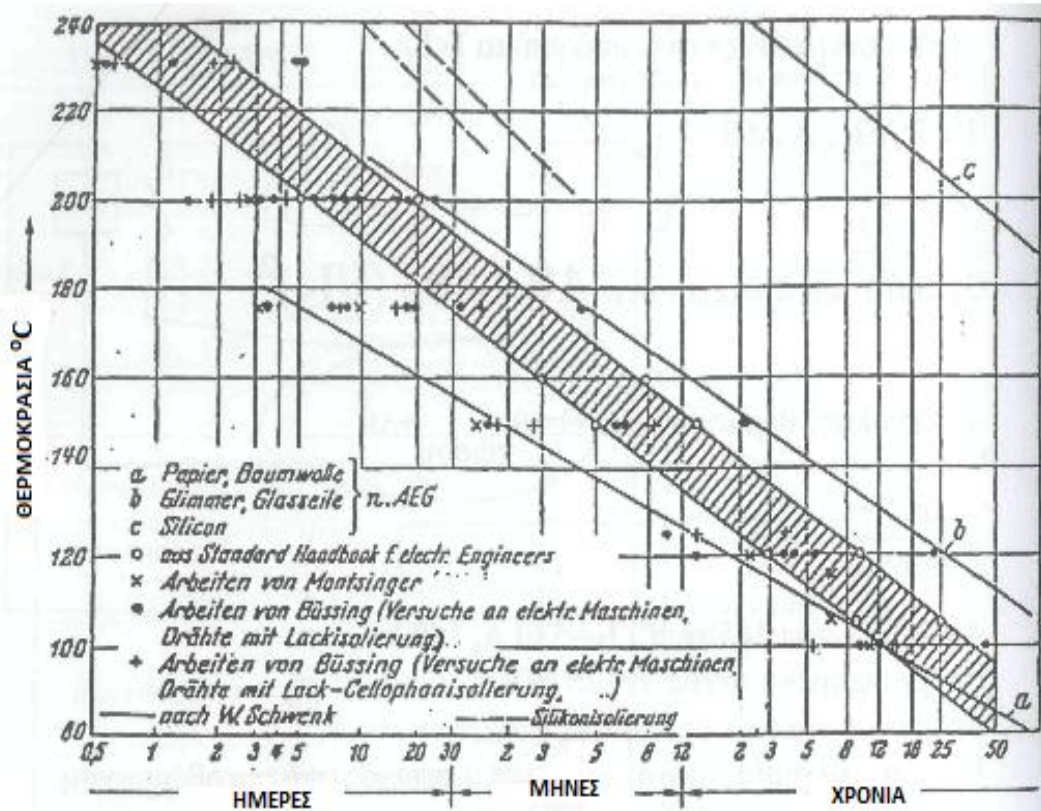
Στην περίπτωση της υπέρτασης θεωρήθηκε ομοίως με την βύθιση ότι το ποσοστό υπέρτασης είναι 25% και επομένως η τάση λειτουργίας του υποσταθμού είναι  $U=25$ kV. Με την συγκεκριμένη τιμή τάσης το ρεύμα θα είναι  $I_f=P_N/(1,73 \cdot U) = 75/(1,73 \cdot 25) \approx 1,73$ A. Η τιμή του ρεύματος λειτουργίας που προέκυψε για τους αγωγούς είναι μικρότερη από την προηγούμενη έχοντας βύθιση τάσης, οπότε και η αυξήσεις  $\Delta\theta$  για τους αγωγούς από την σχέση [5.2.1-5] προέκυψαν και αυτές μικρότερες. Άρα και σε αυτήν την περίπτωση η ελάχιστη αύξηση της θερμοκρασίας για τους αγωγούς δεν εγκυμονεί κινδύνους για το περιβάλλον.

#### 5.2.4 Υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του υποσταθμού

Ένα βασικό ζήτημα κατά την λειτουργία του υποσταθμού είναι αν οι αυξήσεις στην θερμοκρασία στους αγωγούς του και τις επαφές σε συνδυασμό με τα έντονα ίχνη οξείδωσης που παρατηρούνται, λόγω της εικοσαετούς λειτουργίας του, επηρεάζουν την υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του υποσταθμού.

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 5.2.4-1) η απειροελάχιστη αύξηση της τιμής της θερμοκρασίας, όπως υπολογίσθηκε από τα θεωρητικά αποτελέσματα και τις πειραματικές μετρήσεις, δεν επηρεάζει την υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του υποσταθμού η οποία και θα είναι άνω των 60 ετών. Επιπλέον, οι οξειδώσεις δεν ασκούν σημαντική επιρροή ούτε στην αύξηση της θερμοκρασίας ούτε στην υπολειπόμενα έτη

λειτουργίας του υποσταθμού. Αυτό συμβαίνει διότι αφενός οι οξειδώσεις αφορούν το επιφανειακό φιλμ των αγωγών και αφετέρου δεν υπάρχουν οξειδώσεις στις θέσεις σύσφιξης, τόσο λόγω των εξασκούμενων δυνάμεων (ειδικά στους σφικτήρες η σύσφιξη γίνεται στην πλαστική περιοχή των μετάλλων), όσο και επειδή δεν υπάρχει ρύπανση πάνω στον υπαίθριο υποσταθμό.



**Σχήμα 5.2.4 -1:** Διάγραμμα υπολειπόμενης ζωής υλικών ( ημέρες, μήνες, χρόνια) σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας τους.

### 5.2.5 Πιθανότητα εκδήλωσης τηγμάτων σε σφικτήρες αγωγών και επαφές-συνδέσμους ασφαλειοαποζευκτών

Εκτός από τους αγωγούς ACSR και τους αγωγούς χαλκού θα πρέπει στο θεωρητικό μοντέλο του υποσταθμού να εξεταστεί η άνοδος της τιμής της θερμοκρασίας  $\Delta\theta$ , και συνεπώς η εκδήλωση τηγμάτων, τόσο στους σφικτήρες αγωγών όσο και στις επαφές – συνδέσμους ασφαλειοαποζευκτών.

Αρχικά για τους σφικτήρες, οι οποίοι αποτελούν και επαφές χαλκού, η αύξηση της τάσης σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας τους δίνεται από τη σχέση :

$$\Delta U = 7,44 \cdot 10^{-3} \Delta \theta^{0,5} \quad [ \text{ Η τιμή } \Delta U \text{ σε V και η τιμή της } \Delta \theta \text{ σε } ^\circ\text{C} ] \quad [5.2.5-1]$$

και για ονομαστικά μεγέθη  $\Delta U_N = 7,44 \cdot 10^{-3} \Delta \theta_N^{0,5}$  όπου  $\Delta \theta_N = 55 \text{ } ^\circ\text{C}$  αφού από κατασκευαστή εκεί θα έχουμε το ονομαστικό ρεύμα του σφικτήρα.

Έτσι  $\Delta U_N = 7,44 \cdot 10^{-3} \Delta \theta_N^{0,5} = 7,44 \cdot 10^{-3} \cdot 55^{0,5} \approx 55 \text{ mV}$  και το ονομαστικό ρεύμα του σφικτήρα είναι  $I_N = 145 \text{ A}$ . Έχοντας τα συγκεκριμένα μεγέθη μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση του σφικτήρα  $R = \Delta U_N / I_N = 55 \cdot 10^{-3} / 145 \approx 0,379 \cdot 10^{-3} \Omega = 0,379 \text{ m}\Omega$

Όμως η συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάστηκε είναι η λειτουργία του υποσταθμού με ονομαστικά τάση  $U_N = 20 \text{ kV}$  υπό μέγιστο ρεύμα λειτουργίας δηλαδή:

$I_{\text{rmax}} = P_N / (1,73 \cdot U) = 75 / (1,73 \cdot 20) \approx 2,16 \text{ A}$  και η αύξηση της τάσης στον σφικτήρα για το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας είναι  $\Delta U = R \cdot I_{\text{rmax}} = 0,379 \cdot 10^{-3} \cdot 2,16 \approx 0,82 \text{ mV}$ .

Το όριο για την αύξηση τάσης στον χαλκό, και συνεπώς στον σφικτήρα, πέρα του οποίου έχουμε τήξη είναι  $\Delta U_{\text{τήξης}} \approx 0,43 \text{ V}$ . Είναι προφανές ότι  $\Delta U = 0,82 \text{ mV} \ll \Delta U_{\text{τήξης}} \approx 0,43 \text{ V}$  και επομένως δεν υπάρχει πιθανότητα για τήξη του σφικτήρα και συνεπώς την εκδήλωση τηγμάτων. Επομένως η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στους σφικτήρες για αυτήν την κατάσταση λειτουργίας είναι  $\Delta \theta = \Delta U^2 \cdot 10^6 / 7,44^2 = 0,82^2 \cdot 10^6 / 7,44^2 \approx 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Η συγκεκριμένη τιμή πρέπει να συμπίπτει με την υπολογιζόμενη από την σχέση  $\Delta \theta = \Delta \theta_N (I_{\text{rmax}} / I_N)^2$ . Πράγματι: από [5.2.1-5]  $\Delta \theta = 55 (2,16 / 145)^2 = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$  όπως ακριβώς και στην παράγραφο 5.2.1. Συνεπώς αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας είναι αμελητέα μπροστά στα όρια τήξης του χαλκού και δεν υπάρχει πιθανότητα για την εκδήλωση τηγμάτων στους σφικτήρες του υπαίθριου υποσταθμού.

Στη συνέχεια με ανάλογο τρόπο εξετάστηκαν οι επαφές και οι σύνδεσμοι των ασφαλειοαποζευκτών.

Στο θεωρητικό μοντέλο του υποσταθμού θεωρήθηκε τηκτό ασφάλεια έως  $65 \text{ A}$  επομένως το ονομαστικό ρεύμα για τον ασφαλειοαποζεύκτη ήταν  $I_N = 65 \text{ A}$ . Όπως υπολογίσθηκε και προηγουμένως για τους σφικτήρες για  $\Delta \theta_N = 55 \text{ } ^\circ\text{C}$  όπου θα έχουμε τα ονομαστικά μεγέθη  $\Delta U_N = 7,44 \cdot 10^{-3} \Delta \theta_N^{0,5} = 7,44 \cdot 10^{-3} \cdot 55^{0,5} \approx 55 \text{ mV}$  [5.2.5-1] και συνεπώς η αντίσταση για τους συνδέσμους του ασφαλειοαποζεύκτη είναι



$R = \Delta U_N / I = 55 \cdot 10^{-3} / 65 \approx 0,846 \text{ m}\Omega$ . Όμως εξετάστηκε και εδώ η περίπτωση λειτουργίας με ονομαστική τάση και μέγιστο ρεύμα λειτουργίας δηλαδή :

$I_{\Gamma_{\max}} = P_N / (1,73 \cdot U) = 75 / (1,73 \cdot 20) \approx 2,16 \text{ A}$ . Έτσι η αύξηση τάσης πάνω στις επαφές και τους συνδέσμους του ασφαλειοαποξεύκτη είναι  $\Delta U = R \cdot I_{\Gamma_{\max}} = 0,846 \cdot 10^{-3} \cdot 2,16 \approx 1,83 \text{ mV}$

Αν συγκριθεί αυτή η αύξηση τάσης με το όριο τάσης για τήξη στον χαλκό, όπως και προηγουμένως για τους σφικτήρες, προέκυψε ότι  $\Delta U = 1,83 \text{ mV} \ll \Delta U_{\text{τήξης}} \approx 0,43 \text{ V}$  και επομένως δεν τίθεται θέμα για εκδήλωση τηγμάτων πάνω στις επαφές και τους συνδέσμους του ασφαλειοαποξεύκτη. Η μέγιστη δυνατή θερμοκρασία που αναπτύχθηκε είναι  $\Delta \theta = \Delta U^2 \cdot 10^6 / 7,44^2 = 1,83^2 \cdot 10^6 / 7,44^2 \approx 0,06 \text{ }^\circ\text{C}$ . Η συγκεκριμένη τιμή πρέπει να συμπίπτει με την υπολογιζόμενη από την σχέση  $\Delta \theta = \Delta \theta_N (I_{\Gamma_{\max}} / I_N)^2$ . Πράγματι:  $\Delta \theta = 55 (2,16 / 65)^2 = 0,06 \text{ }^\circ\text{C}$ . Εξετάστηκε επίσης θεωρητικά και η περίπτωση αντί για ασφαλειοαποξεύκτη 65A να έχει το θεωρητικό μοντέλο ασφαλειοαποξεύκτη 35A και προέκυψε πάλι θεωρητικά από την σχέση  $\Delta \theta = \Delta \theta_N (I_{\Gamma_{\max}} / I_N)^2$  ότι  $\Delta \theta = 55 (2,16 / 35)^2 = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Και στην περίπτωση των επαφών και των συνδέσμων των ασφαλειοαποξευκτών η αύξηση της τιμής της θερμοκρασίας λόγω της λειτουργίας του υποσταθμού υπό ονομαστική τάση είναι αμελητέα και δεν εγκυμονεί κινδύνους για την εκδήλωση τηγμάτων που θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως αιτίες πυρκαγιάς για το ευρύτερο περιβάλλον του υποσταθμού.

## **6 ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων στους πίνακες (4-1 έως 4-11) και των παραπάνω θεωρητικών υπολογισμών υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση. Οι ελάχιστες διαφορετικές θεωρητικές τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας ( $\Delta\theta$ ) από τις πειραματικές μπορούν να αποδοθούν στο γεγονός ότι οι αισθητήρες θερμοκρασίας, κατά την διάρκεια του πειράματος, τοποθετήθηκαν σε σημεία επαφής αγωγών – σφικτήρα και αγωγών – ασφαλειοαποζεύκτη και όχι στους αγωγούς αυτούς καθαυτούς ή μόνο στους σφικτήρες. Κάτι τέτοιο όμως δεν επηρεάζει τα πειραματικά αποτελέσματα, γιατί οι μετρήσεις προέκυψαν για την συνολική  $\Delta\theta$  στα σημεία επαφής, η οποία και είναι σε κάποιες περιπτώσεις ελάχιστα μεγαλύτερη απ' ό,τι μόνο στους αγωγούς ή στον σφικτήρα λόγω της μεταξύ τους επαφής. Επιπλέον στους θεωρητικούς υπολογισμούς υπάρχει ακρίβεια μέχρι και τέταρτο δεκαδικό ψηφίο, ενώ στις πειραματικές μετρήσεις το όργανο μέτρησης είχε ακρίβεια πρώτου δεκαδικού ψηφίου.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση λειτουργίας του υποσταθμού με μέγιστο ρεύμα ( $I_{\text{Γmax}} = 2,16 \text{ A}$ ) υπό ονομαστική τάση ( $U_N = 20 \text{ kV}$ ) φαίνεται στους θεωρητικούς υπολογισμούς της παραγράφου 5.2.1 ότι οι τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας  $\Delta\theta$  για αγωγό ACSR  $35 \text{ mm}^2$  και αγωγό χαλκού  $16 \text{ mm}^2$  είναι σχεδόν μηδενικές. Επίσης από τους υπολογισμούς της παραγράφου 5.2.5 προέκυψε ότι οι τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας των σφικτήρων ήταν και πάλι σχεδόν μηδενικές, οι τιμές για τις επαφές και τους συνδέσμους του ασφαλειοαποζεύκτη προέκυψαν  $0,06 \text{ }^\circ\text{C}$ , ενώ και για ασφαλειοαποζεύκτη 35A αποδείχθηκε πάλι θεωρητικά από την παράγραφο 5.2.5 ότι  $\Delta\theta=0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Τα συγκεκριμένα θεωρητικά αποτελέσματα επιβεβαιώνονται και από τα αποτελέσματα της 1<sup>ης</sup> δοκιμής υπερθέρμανσης στον πίνακα (4-1) και διαγράμματα (4-1 έως 4-5), όπου οι μετρήσεις στο σημείο 1 (επαφή ACSR με σφικτήρα) και στο σημείο 2 (επαφή Cu με σφικτήρα) είναι μηδενικές, ενώ στο σημείο 4 (επαφή ασφάλειας με ασφαλειοαποζεύκτη) η  $\Delta\theta$  μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής είναι  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  χρησιμοποιώντας ασφαλειοαποζεύκτη 35A, ενώ ταυτόχρονα η πειραματική μέτρηση και για ασφαλειοαποζεύκτη 65 A θα αποδείξει ότι η τιμή  $\Delta\theta$  για επαφή ασφάλειας ασφαλειοαποζεύκτη είναι και μηδενική και προσεγγίζει ικανοποιητικά την θεωρητική.

Η δεύτερη κατάσταση λειτουργίας του υποσταθμού που εξετάστηκε είναι η λειτουργία του με κομμένους κλώνους χαλκού. Στο θεωρητικό μοντέλο, όπως

αποδεικνύεται και από την 5.2.2 για την περίπτωση με 6 κομμένους κλώνους και υπό μέγιστο ρεύμα λειτουργίας, η τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας  $\Delta\theta$  στο σημείο που έχουν κοπεί οι κλώνοι, το οποίο αναμένεται να είναι και το θερμότερο πάνω στον αγωγό χαλκού, προέκυψε πάλι σχεδόν μηδενική ( $\Delta\theta = 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Στην πειραματική διαδικασία δεν εξετάστηκε η συγκεκριμένη περίπτωση. Εξετάστηκαν ωστόσο οι περιπτώσεις με 5 κομμένους κλώνους υπό μέγιστο ρεύμα λειτουργίας και με 6 κομμένους κλώνους σε λειτουργία με φορτίο αντλίας 1,5 kW και ρεύμα 0,3 A (βλ πίνακες (4-9) και(4-10) αντίστοιχα). Για την κατάσταση με 5 κομμένους κλώνους και μέγιστο ρεύμα στον πίνακα (4-9) η τιμή της  $\Delta\theta$  για το θερμό σημείο 3 (σημείο με κομμένους κλώνους χαλκού) είναι 0,1  $^\circ\text{C}$ , ενώ για τα υπόλοιπα θερμο σημεία που αφορούν τους αγωγούς και τις επαφές οι τιμές της  $\Delta\theta$  είναι σχεδόν μηδενικές μετά το πέρας της δοκιμής, όπως αναμενόταν, αφού υπόκειντε στην προηγούμενη περίπτωση που εξετάστηκε (παράγραφοι 5.2.1 – 5.2.5). Παρόμοια πειραματικά αποτελέσματα προκύπτουν και για την κατάσταση λειτουργίας με 6 κομμένους κλώνους και ρεύμα λειτουργίας  $I_r = 0,3 \text{ A}$  όπως φαίνεται και στον πίνακα (4-10) όπου στο σημείο 3 η  $\Delta\theta$  είναι μηδενική. Τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα απόδεικνύονται και στο θεωρητικό μοντέλο με βάση τους υπολογισμούς στην παράγραφο 5.2.2. Έτσι, για 5 κομμένους κλώνους και ρεύμα 2,16 A προκύπτει  $\Delta\theta = 0,1497 \text{ }^\circ\text{C}$ . Για 6 κομμένους κλώνους και ρεύμα 0,3 A προκύπτει  $\Delta\theta = 0,012 \text{ }^\circ\text{C}$ . Τέλος, σε πειραματικό επίπεδο γίνανε μετρήσεις στα θερμά σημεία για 1, 2, 3, 4 κομμένους κλώνους με μέγιστο ρεύμα λειτουργίας όπου πάλι οι τιμές της  $\Delta\theta$  για όλα τα θερμο σημεία ήταν σχεδόν μηδενικές με  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  απόκλιση λόγω σφάλματος οργάνου, οι οποίες όμως δεν εξετάστηκαν σε θεωρητικό επίπεδο, αφού υπερκαλύπτονται από την περίπτωση με 6 κομμένους κλώνους και μέγιστο ρεύμα λειτουργίας, η οποία είναι και η δυσμενέστερη.

Στις δοκιμές 2, 3, 5 εξετάστηκαν οι περιπτώσεις λειτουργίας του υπαίθριου υποσταθμού με ρεύμα 35 A, 65 A και 65 A με ένα κομμένο κλώνο αντίστοιχα. Οι τιμές της  $\Delta\theta$  που πρόεκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις δεν είναι μηδενικές αλλά παρ'όλα αυτά αρκετά μακριά από τα όρια για την δημιουργία τηγμάτων των αγωγών ACSR και Cu και των σφικτήρων (βλ πίνακες (4-2, 4-3 και 4-5)). Οι συγκεκριμένες πειραματικές τιμές είναι ικανοποιητικά κοντά και στις θεωρητικές τιμές που προκύπτουν αν στον τύπο  $\Delta\theta = \Delta\theta_N (I_{NA}/I_N)^2$  αντικατασταθεί το  $I_{NA}$  με 35 και 65 A αντίστοιχα. Για παράδειγμα στη περίπτωση με ένα κομμένο κλώνο υπό  $I_{NA} = 65 \text{ A}$  η τιμή της  $\Delta\theta$  για το σημείο στο χαλκό με τον κομμένο κλώνο προκύπτει  $\Delta\theta = \Delta\theta_N (I_{NA}/I_{NK})^2 = 55(65/124,3)^2 = 15,01 \text{ }^\circ\text{C}$  όπου το  $I_{NK} = 6 I_N / 7 = 124,3 \text{ A}$ . Από τον πίνακα (4-5) της δοκιμής 5 παρατηρείται ότι στο τέλος της η τιμή  $\Delta\theta$  για το θερμό σημείο 3 είναι ικανοποιητικά κοντά στην θεωρητική τιμή.

Η τελευταία δόκιμη αφορούσε την λειτουργία του υποσταθμού με χαλάρους τους συνδέσμους στους σφικτήρες και τις επαφές υπό φορτίο με ρεύμα λειτουργίας 0,3 A και 6 κομμένου κλώνους στον αγωγό χαλκού. Και σε αυτήν την περίπτωση οι τιμές της  $\Delta\theta$  για όλα τα σημεία που μετρήθηκαν πίνακας (4-11) είναι σχεδόν μηδενικές με μια πολύ μικρή αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας λόγω της χαλαρότητας των συνδέσμων και των επαφών.

Συμπερασματικά, η ικανοποιητική ταύτιση των πειραματικών μετρήσεων και των αποτελεσμάτων των θεωρητικών υπολογισμών αποδεικνύει ότι για έναν υπαιθριο υποσταθμό διανομής σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας του οι τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στους αγωγούς και τις επαφές του είναι πολύ μικρές και τις περισσότερες φορές μηδενικές και πολύ μακριά από τα όρια τήξης των αγωγών, των σφικτήρων και των συνδέσμων του. Ακόμα και στις περιπτώσεις με κομμένους αγωγούς λόγω φθοράς ή στην ακραία περίπτωση λειτουργίας με το ονομαστικό ρεύμα του ασφαλειοαποζεύκτη οι αυξήσεις της θερμοκρασίας είναι αδύνατον να προκαλέσουν την δημιουργία τηγμάτων. Αυτό έρχεται ως απάντηση στο ερώτημα της ύπαρξης ή μη προϋποθέσεων εκδήλωσης πυρκαγιών λόγω της θερμικής συμπεριφοράς των υπαίθριων υποσταθμών. Όπως αποδείχθηκε τα θερμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την λειτουργία των υποσταθμών δεν εγκυμονούν κινδύνους για το ευρύτερο φυσικό περιβάλλον γύρω από τους υπαίθριους υποσταθμούς.

## **7 ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

Η παρούσα εργασία είναι δυνατόν να συμβάλει στην έρευνα και τις πρακτικές εφαρμογές αφού διερευνήθηκε η θερμική συμπεριφορά υπαίθριων σταθμών διανομής μέσης προς χαμηλή τάση και η ύπαρξη ή μη προϋποθέσεων εκδήλωσης πυρκαγιών από πιθανά τήγματα προερχόμενα από τον υποσταθμό. Συγκεκριμένα:

- 1) Πραγματοποιήθηκαν πειράματα για την θερμική συμπεριφορά του υποσταθμού σε διάφορες δυσμενείς ή μη καταστάσεις λειτουργίας του, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάστηκαν σε αναλυτικούς πίνακες και διαγράμματα. Πειράματα έγιναν για κανονική λειτουργία του υποσταθμού με μέγιστο ρεύμα λειτουργίας, για λειτουργία του υποσταθμού με 1, 2, 3, 4, 5 και 6 κομμένους κλώνους του αγωγού χαλκού, για λειτουργία υπό το μέγιστο ρεύμα τηκτού ασφάλειας (με ασφάλειες 35 και 65 A), για λειτουργία υπό μέγιστο ρεύμα λειτουργίας με φορτίο τριφασική αντλία 1,5 kW και για την ίδια λειτουργία με χαλαρούς όμως όλους τους συνδέσμους και τις επαφές. Σε όλα αυτά τα πειράματα φαίνεται από τους πίνακες και τα διαγράμματα ότι οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι πολύ μικρές και άρα δεν υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας τηγμάτων και εκδήλωσης πυρκαγιάς.
- 2) Πραγματοποιήθηκαν θεωρητικοί υπολογισμοί που αφορούσαν την θερμική συμπεριφορά ενός υπαίθριου σταθμού διανομής μέσης προς χαμηλή τάση, από τους οποίους επίσης φάνηκε ότι οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε ένα τέτοιο υποσταθμό είναι πολύ μικρές και άρα δεν υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας τηγμάτων και εκδήλωσης πυρκαγιάς.
- 3) Συγκρίνοντας τα πειραματικά με τα θεωρητικά αποτελέσματα προέκυψε ικανοποιητική ταύτιση. Αποδείχθηκε λοιπόν, ότι η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στους θεωρητικούς υπολογισμούς είναι απολύτως σωστή. Η εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της θερμικής συμπεριφοράς σε κάποιο σημείο του δικτύου, αν είναι γνωστό το ρεύμα λειτουργίας του, ή αλλιώς, αν είναι γνωστή η θερμοκρασία σε κάποιο σημείο του δικτύου (μετρούμενη π.χ. με κάποια θερμοκάμερα) είναι δυνατόν να υπολογιστεί το ρεύμα εκείνης της στιγμής (σχέση [5.2.1-5]).

- 4) Παρουσιάστηκε πειραματική μεθοδολογία η οποία μπορεί να βοηθήσει σε περιπτώσεις έρευνας εκδήλωσης πυρκαγιάς σε περιβάλλον υπαίθριων σταθμών διανομής τάσης, ώστε να αποδειχθεί η ύπαρξη ή μη ευθύνης του υποσταθμού

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] ΦΕΚ 608/Β/6.10.1967, 'Περί εγκρίσεως Κανονισμών δια την εγκατάστασιν και συντήρησιν Υπαιθρίων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας', 1967
- [2] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ)., 'Κώδικας Διαχείρισης Δικτύου' Αθήνα, 2008
- [3] Παπαδόπουλος Μ.Π., Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος Ι, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1994
- [4] Μπούρκας Π.Δ., Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος, Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και Υλικά, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2003.
- [5] Μπούρκας Π.Δ., Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004
- [6] ΠΟΛΥΚΡΑΤΗ Α. Συμπεριφορά στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων υπό ταχέως μεταβαλλόμενες ηλεκτρικές καταπονήσεις. PhD thesis, ΕΜΠ, ΣΗΜΜΥ, 2005.
- [7] Τσανάκας Κ.Δ., Συμμετρικές Συνιστώσες και Ανάλυση Σφαλμάτων στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ξάνθη 1985
- [8] Δίκτυα – σταθμοί – παραγωγή – μεταφορά – διανομή ηλεκτρικής ενέργειας – Φ. Δημόπουλου – Π. Τσαραμιάδη
- [9] Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων – Ι. Σταθόπουλου
- [10] Lesch G., Lehrbuch der Hochspannungstechnik, Berlin-Gottingen-Heidelberg, 1959
- [11] Μπούρκας Π., 'Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων, Εκδόσεις', ΕΜΠ, 1996
- [12] Κουφάκης Ε , 'Μία προσέγγιση της διάρκειας ζωής εξοπλισμού των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας με παράδειγμα τους μετασχηματιστές διανομής', Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 2008
- [13] AEG, 'Hilfsbuch fur elektrische Licht und Kraft-Anlagen', Verlag W. Girardet, Essen, 1957
- [14] Philippow E., Taschenbuch Elektrotechnik, Band II, Grundlagen, VEB Verlag Technik, Berlin 1966.

- [15] Π. Δ. Μπούρκας, «Ασκήσεις Βιομηχανικών και Κτιριακών Εγκαταστάσεων», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2008
- [16] Α. Α. Τσακόπουλος, «Μεταφορά και Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας», Αθήνα 1973.
- [17] Φ. Ι. Δημόπουλος, Π. Τσαραμιάδης, «Δίκτυα Σταθμοί», Εκδόσεις Ήβος.
- [18] S. A. Nasar, F. C. Trutt, «Electric Power Systems», CRC Press.
- [19] ΨΑΡΡΟΣ Ε., Υπαίθριες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης σε περιβάλλον πυρκαγιών, διδακτορική διατριβή
- [20] DIESELHORST H. uber das problem eines elektrisch erwarmten leiters. Ann. Phys. 1, 1900.
- [21] SMYTHE W.R. Static and dynamic electricity. McGraw-Hill, Singapore, 1939.
- [22] EVANS V.R., MILEY H.A. An introduction to metalic corrosion. Arnold and Co, London, 1948.
- [23] RONNAUIST A. The oxidation of copper. J. Instit. Metals, 1962.
- [24] HOLM R. The electric tunnel effect across this insulator films in contacts. J. Appl. Phys, 1951 .
- [25] GREENWOOD J.A., WILLIAMSON J.P.B. Electrical conduction in solids II. Theory of temperture-dependent conductors. Proc. Roy. Soc. 1958.
- [26] HERMANCE H.W., EGAN T.F. Organic deposits on precious metal contacts. Bell Syst. Techn., 1958.
- [27] FISCHER J.C., GIAEVER I. Tunneling through this insulating layers. J. Appl. Phys., 1961.
- [28] VDE. VDE 0660 Regeln fur Schaltgerate, 1962
- [29] HOLM R. Temperature and stresses in a cylindrical conductor with an alternating current. Journal of Applied Physics, 1978.
- [30] KARAGIANNOPOULOS C.G., BOURKAS P.D., DERVOS C., Measurements on contacts of no load switches using currents and clamping spring force values. International Sysposium on Applied Modeling ans Simulation, 1990.



- [31] ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ Κ.Γ. Μη γραμμικά φαινόμενα σε στατικές ηλεκτρικές επαφές. PhD thesis, ΕΜΠ, ΣΗΜΜΥ, 1992.
- [32] BOURKAS P.D., KARAGIANNΟΠΟΥΛΟΣ C.G., DΕRVOS C., KAGARAKIS C.A., Current instabilities across oxidized metal contacts operating under charge injection rates. International Journal of Power and Energy Systems 14, 1994.
- [33] FILIPPAKOY M.P., KARAGIANNΟΠΟΥΛΟΣ C.G., BOURKAS P.D., The interfacial layer as an evaluation criterion of electrical contacts. IEE Proceedings, Science, Measurements and Technology 143, 1996.
- [34] KARAGIANNΟΠΟΥΛΟΣ C.G., PSOMOPOULOS C.S., BOURKAS P.D. A Theoretic and Experimental Investigation in Stationary Electric Contacts. Ins. of Phys. Pub., Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering 9, 2001.
- [35] Gers J.M., Holmes E.J., Protection of Electricity Distribution Networks, 2nd Edition, IEE Power & Energy Series 47