



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

Ονομαστικό ρεύμα σφικκτήρα του δικτύου διανομής

Διπλωματική Εργασία

Σταθάκης Αλέξανδρος

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούνιος 2013

.....
Σταθάκης Αλέξανδρος

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

Copyright © Σταθάκης Αλέξανδρος , 2013

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.



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

Ονομαστικό ρεύμα σφικτήρα του δικτύου διανομής

Διπλωματική Εργασία

Σταθάκης Αλέξανδρος

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την2013

.....
Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος

.....
Ν.Ι Θεοδώρου

.....
Π.Δ. Μπούρκας

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2013

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Γ. Καραγιαννόπουλου.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Γ. Καραγιαννόπουλο για την διπλωματική εργασία που μου ανέθεσε και μου εμπιστεύτηκε. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τα μέλη της Τριμελούς Επιτροπής, Καθηγητή Ν. Θεοδώρου και τον Ομότιμο Καθηγητή Π. Μπούρκα για την στήριξη αυτής της προσπάθειας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στην Δρ. Αικατερίνη Πολυκράτη μέλος Ε.Ε.Δ.Ι.Π για την άμεση συμπαράσταση και την πολύτιμη βοήθεια που μου έδινε καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων της εργασίας καθώς και τις συμβουλές της για την εκπλήρωση της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την στήριξη τους σ' όλη την περίοδο των φοιτητικών μου σπουδών.

Σταθάκης Αλέξανδρος

Περίληψη

Η εργασία αυτή έχει ως σκοπό τη μελέτη και τον προσδιορισμό του ονομαστικού ρεύματος σφικτήρων αγωγών μέσης τάσης.

Μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας πάνω στους σφικτήρες και στους αγωγούς για διάφορες τιμές εντάσεων ρεύματος. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η επίδραση της θερμικής συμπεριφοράς του σφικτήρα ανάλογα με την τιμή του ρεύματος, προκειμένου να προσδιοριστεί η τελική ονομαστική τιμή του ρεύματος.

Πραγματοποιήθηκαν σειρές πειραματικών μετρήσεων για τρία είδη σφικτήρων με στόχο τον προσδιορισμό του ονομαστικού ρεύματος του καθενός.

Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της θερμοκρασίας σε οχτώ σημεία του κυκλώματος για διάφορες τιμές ρεύματος, μέχρι να προσδιοριστεί το ονομαστικό.

Στο πρώτο κεφάλαιο θα γίνει μια εισαγωγή στην οποία θα περιγραφεί το δίκτυο διανομής, οι σφικτήρες που μελετήθηκαν, οι αγωγοί και τα χαρακτηριστικά τους και επίσης μία σύντομη αναφορά για την δοκιμή υπερθέρμανσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα αναφερθεί ο σκοπός της εργασίας και η σημασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα γίνει λεπτομερής αναφορά στην πειραματική διαδικασία, στην ανάλυση της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε, καθώς επίσης αναφορά στα χαρακτηριστικά του κάθε σφικτήρα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα δοθούν σχηματικά όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε μορφή διαγραμμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο θα δοθούν σχόλια και συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Τέλος, υπάρχει και ένα παράρτημα με τους πίνακες των μετρήσεων που έχουν καταγραφεί στο διάστημα των πειραματικών μετρήσεων.

Λέξεις Κλειδιά: ονομαστικό ρεύμα, ηλεκτρικοί σύνδεσμοι, δοκιμή υπερθέρμανσης, αντίσταση επαφής, ηλεκτρικές επαφές

Abstract

The purpose of this paper is to study and define the nominal current of electric clamps for medium voltage power cables.

The effect of temperature on the clamps and the power cables was observed, for various values of currents.

Specifically, the influence of the thermal behavior of the clamp was observed according to the value of the current, in order to determine its final nominal value.

A series of experimental measurements for three types of clamps were conducted, in order to determine the nominal current of each one.

Specifically, measurements of temperature were conducted in eight points of the circuit for different values of current, in order to determine the nominal one.

In the first chapter, an introduction will be made, outlining the distribution network, the clamps that were studied, the power cables and their characteristics and a brief reference to the overheating test, as well.

In the second chapter, the purpose of this paper will be discussed, as well as the significance of the results obtained from the experimental measurements.

In the third chapter, there will be a detailed reference to the experimental procedure, the analysis of the device used, and also a reference to the characteristics of each clamp.

In the fourth chapter, all measurement results will be given schematically in chart form.

In the fifth chapter, comments and conclusions drawn from the results of the measurements will be given.

Finally there is an appendix with tables of the measurements that were recorded during the extend the experiment.

Keywords: nominal current, electric clamps, overheating test, contact resistance, electric contacts

Περιεχόμενα

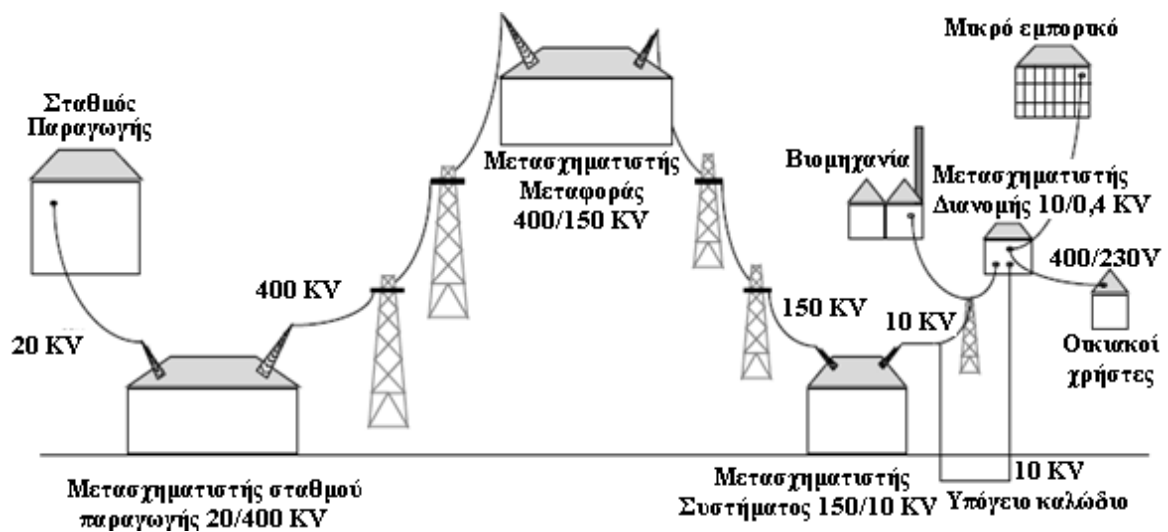
1. Εισαγωγή.....	11
1.1. Δίκτυο Διανομής	11
1.2. Μεταφορά και Διανομή της Ηλεκτρικής Ενέργειας	13
1.3. Αγωγοί.....	14
1.4. Σφικκτήρες επαφής.....	15
1.5. Αντίσταση διάβασης των ηλεκτρικών επαφών	16
1.5.1. Δύναμη σύσφιξης στις στατικές επαφές.....	16
1.5.2. Αντίσταση στένωσης και αντίσταση στρώματος επικαθίσεων	17
1.5.3. Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντίσταση στένωσης	20
1.5.4. Η πτώση τάσης σε μία επαφή σε σχέση με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται.....	21
1.5.5. Η αντίσταση διάβασης σε σχέση με την πτώση τάσης και τη διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην επαφή.....	23
1.5.6. Οξειδωση και επικαθίσεις στις ηλεκτρικές επαφές.....	26
1.5.7. Η επίδραση της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα στην οξειδωση των επαφών.....	28
1.5.8. Η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος στις επαφές.....	28
1.5.9. Οι επαφές σαν ένα μη γραμμικό σύστημα	33
1.5.10. Η ηλεκτρομονωτική και αγώγιμη συμπεριφορά των μικροδομών MIM, MOM και MGM μιας στατικής ηλεκτρικής επαφής.....	34
1.6. Δοκιμή υπερθέρμανσης.....	36
1.7. Διηλεκτρικές δοκιμές	37
1.8. Δοκιμή μηχανικής αντοχής	38
1.9. Δοκιμή υπό τριπολικό βραχυκύκλωμα	38
2. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	39
3. Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας	40
3.1. Πειραματική διάταξη	40
3.1.1. Αυτομετασχηματιστής.....	44
3.1.2. Μετασχηματιστής έντασης	45

3.1.3. Αγωγοί	46
3.1.4. Μετρητές θερμοκρασίας.....	46
3.2. Πειραματική Διαδικασία.....	49
4.Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	53
4.1. Μετρήσεις του 1 ^{ου} σφιγκτήρα	54
4.2. Μετρήσεις του 2 ^{ου} σφιγκτήρα	59
4.3. Μετρήσεις του 3 ^{ου} σφιγκτήρα	65
5. Συμπεράσματα και Σχόλια.....	69
5.1. Συμπεράσματα των μετρήσεων.....	69
5.2. Γενικά Συμπεράσματα.....	69
Βιβλιογραφία	71
Παράρτημα Α	72

1. Εισαγωγή

1.1. Δίκτυο Διανομής

Ως ηλεκτρικό δίκτυο εννοείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ηλεκτρικού δικτύου είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.



Σχήμα 1-1: Γενική δομή ενός τυπικού ηλεκτρικού δικτύου στην Ευρώπη.

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του δικτύου: την **παραγωγή**, τη **μεταφορά** και τη **διανομή**. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Η μεταφορά της σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης, γίνεται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσεως, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου. Τα σημεία αυτά είναι οι υποσταθμοί, από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης

τάσεως που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσεως 400 / 230 V.

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζεται η διαδικασία που απαιτείται για την μετατροπή μιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας συνήθως σε μηχανική και στην συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον καταναλωτή σήμερα προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, υδροηλεκτρικούς σταθμούς, πυρηνικούς σταθμούς και τα τελευταία χρόνια με μεγαλύτερη ένταση από σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με περισσότερο διαδεδομένες εφαρμογές τα αιολικά πάρκα και τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς.

Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας εννοείται το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από την έξοδο των σταθμών παραγωγής μέχρι τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης και απ' όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής. Επίσης, οι υποσταθμοί αυτοί τροφοδοτούν και τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης, οι οποίοι κατασκευάζουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού υψηλής σε μέση τάση και εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης, και είναι κυρίως μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 10 MW (εργοστάσια αλουμινίου, τσιμέντων, κλπ).

Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας εννοείται το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής φτάνουν μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας.

1.2. Μεταφορά και Διανομή της Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το τριφασικό Σύστημα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνεται, ανάλογα με την τιμή της τάσης σε τρεις βασικές περιοχές:

- Το δίκτυο χαμηλής τάσης (Χ.Τ) : τριφασικό δίκτυο 400 V , 50 Hz
και μονοφασικό 230 V , 50 Hz
- Το δίκτυο μέσης τάσης (Μ.Τ) : τριφασικό δίκτυο 20 kV ή 15 kV ή 6,6 kV, 50Hz
- Το δίκτυο υψηλής και υπερυψηλής τάσης 150kV, 400 kV

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 150 kV ή στα 400 kV), ώστε στη συνέχεια στα κέντρα διανομής υψηλής τάσης (ΚΥΤ) να διανεμηθεί σε γραμμές κυρίως των 20 kV (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 200 A. Τα εναέρια δίκτυα μεταφοράς και διανομής πλεονεκτούν έναντι των υπόγειων δικτύων λόγω του μικρού τους κόστους και της ταχύτερης αποκατάστασης των βλαβών τους.

1.3. Αγωγοί

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 πλειονότητα έναντι τού χαλκού.

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 όποια 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 στέρεα μεταξύ τους, αλλά ο αγωγός έχει ακόμη πολύ μεγαλύτερη ευκαμψία παρ' ότι θα είχε, εάν ήταν συμπαγής της αυτής διατομής.

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' αυτό τον τρόπο ο χρησιμοποιούμενος ευρύτατα αγωγός αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβα (ACSR, Aluminum conductor steel-reinforced), 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.

1.4. Σφικκτήρες επαφής

Οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι (μόνιμοι σύνδεσμοι και επαφές) αποτελούν βασικό τμήμα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

Ως ηλεκτρική επαφή ορίζεται μία λυόμενη σύνδεση δύο αγωγών η οποία έχει τη δυνατότητα να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Η παραπάνω λυόμενη σύνδεση αποτελείται από δύο μέρη, την κινητή και τη σταθερή επαφή. Ως ανοικτή επαφή θεωρείται όχι μόνο αυτή, που έχει τεθεί λόγω χειρισμού στη θέση εκτός, αλλά και εκείνη στην οποία τα δύο μέρη έχουν μονωθεί ηλεκτρικά λόγω ξένων επικαθίσεων (κυρίως σκόνη και οξείδια). Η δύναμη η οποία συγκρατεί τα δύο μέρη της επαφής μεταξύ τους καλείται δύναμη σύσφιξης των επαφών F .

Οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι μεταξύ των ρευματοφόρων μερών στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις διακρίνονται σε μόνιμους και λυόμενους. Μόνιμοι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι είναι αυτοί που τα δύο 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, κ.λ.π. Λυόμενοι σύνδεσμοι είναι αυτοί που μπορεί κανείς να χειρισθεί μέσω εξωτερικά εφαρμοζόμενης δύναμης. Οι λυόμενοι σύνδεσμοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τις στατικές ηλεκτρικές επαφές (stationary electrical contacts) και τις ηλεκτρικές επαφές που έχουν ισχύ διακοπής (switching electrical contacts).

Τις στατικές ηλεκτρικές επαφές, δηλαδή τις επαφές που δεν έχουν ισχύ διακοπής, μπορεί κανείς να τις χειρισθεί μόνο όταν το κύκλωμα έχει τεθεί εκτός τάσης, μέσω π.χ. ενός διακόπτη φορτίου ή ισχύος, ανάλογα με το είδος παροχής της τάσης.

Αντίθετα οι επαφές με ισχύ διακοπής χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητά τους να διακόπτουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, χωρίς να υφίστανται συνέπειες στη συμπεριφορά τους από το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται κατά το χειρισμό του φορτίου.

Τα μέταλλα από τα οποία κατασκευάζονται συνήθως οι στατικές ηλεκτρικές επαφές έχουν, για λόγους διευκόλυνσης της διάβασης του ρεύματος, μεγάλη ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.

1.5. Αντίσταση διάβασης των ηλεκτρικών επαφών

1.5.1. Δύναμη σύσφιξης στις στατικές επαφές

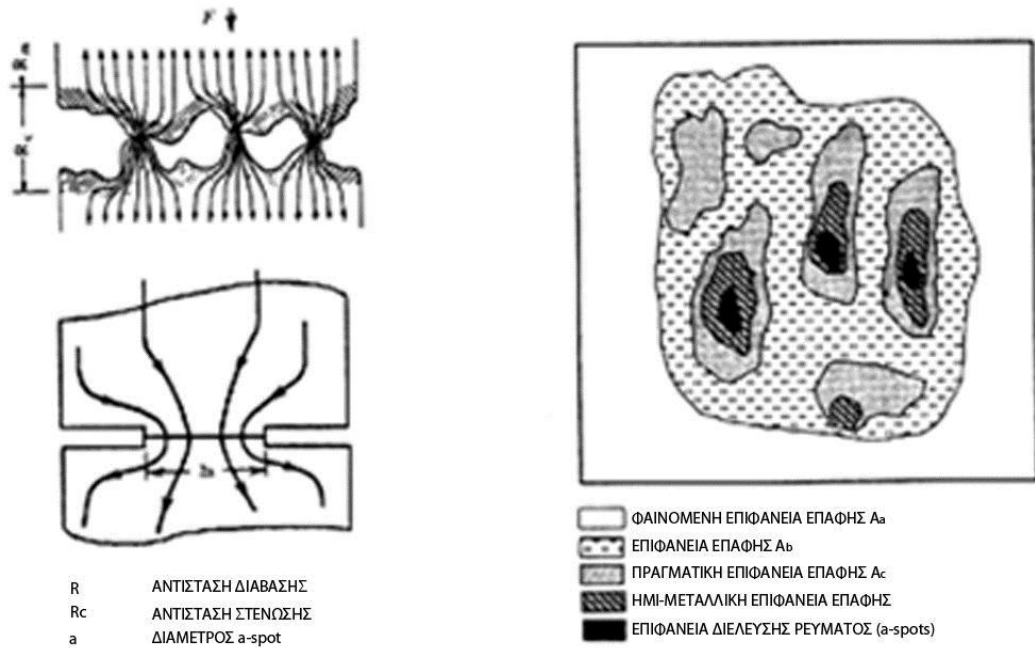
Από την επίδραση της δύναμης σύσφιξης δημιουργούνται παραμορφώσεις αποτέλεσμα των οποίων είναι η δημιουργία ορισμένων περιοχών πάνω στον λυόμενο σύνδεσμο, οι οποίες φέρουν το φορτίο σύσφιξης της επαφής, χωρίς αυτό να σημαίνει αναγκαστικά ότι μέσω αυτών των περιοχών γίνεται διέλευση του ρεύματος. Το σύνολο των περιοχών αυτών δίνει την **επιφάνεια σύσφιξης A_b** . Υπάρχει μια εμπειρική σχέση που συνδέει την δύναμη σύσφιξης F με την επιφάνεια σύσφιξης A_b η οποία είναι:

$$F = \xi \cdot H \cdot A_b \quad (1-1)$$

όπου H είναι η σκληρότητα της επαφής και ξ ένας συντελεστής αναλογίας που κυμαίνεται από 0.2 έως 1.

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** (true contact area) μία επαφής εννοείται 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 μία ηλεκτρική επαφή δημιουργείται η εντύπωση ότι τα δύο μέρη της εφάπτονται σε μία πολύ ευρύτερη επιφάνεια από το σύνολο των περιοχών επαφής A_b που προαναφέρθηκαν. Αυτή η μακροσκοπικά παρατηρούμενη επιφάνεια ονομάζεται **φαινόμενη επιφάνεια επαφής A_a** (apparent contact area) και είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από το σύνολο των επί μέρους επιφανειών πραγματικής επαφής A_c , οι οποίες έχουν την δυνατότητα να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα.

Γενικά ισχύει ότι $A_a > A_b > A_c$



Σχήμα 1-2: Κατανομή του ρεύματος σε μία πραγματική επιφάνεια.

1.5.2. Αντίσταση στένωσης και αντίσταση στρώματος επικαθίσεων

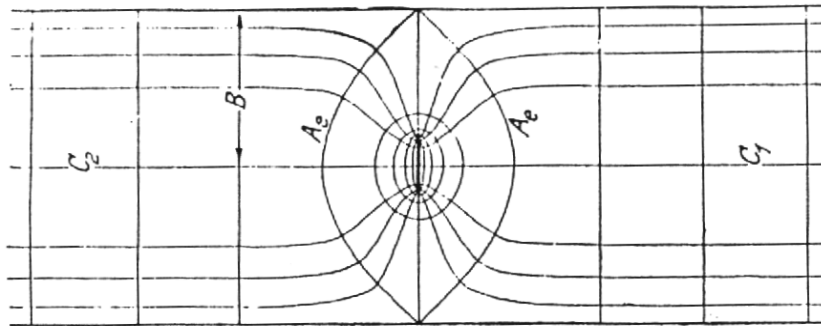
Η αντίσταση που παρουσιάζει μία επαφή κατά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος ονομάζεται **αντίσταση διάβασης**. Η αντίσταση διάβασης R περιλαμβάνει γενικά δύο όρους. Την **αντίσταση στένωσης** R_c , (constriction resistance) και **την αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων στις επαφές** R_f . Η αντίσταση 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 στη δυσκολία των ηλεκτρικών φορέων να διαπεράσουν το στρώμα αυτό.

Η αντίσταση στένωσης R_c για ένα μόνο σημείο (a-spot) έχει αποδειχθεί ότι δίνεται από την σχέση:

$$R_c = \frac{(\rho_1 + \rho_2)}{4a} \quad (1-2)$$

όπου ρ_1 και ρ_2 είναι οι ειδικές αντιστάσεις των μετάλλων που έρχονται σε επαφή, α είναι η ακτίνα της περιοχής επαφής μεταξύ των μετάλλων. Εάν τα δύο υλικά που έρχονται σε επαφή είναι τα ίδια τότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$R_c = \frac{\rho}{2\alpha} \quad (1-3)$$



Σχήμα 1-3: Γραμμές ροής ρεύματος και δημιουργία της αντίστασης στένωσης R_c .
C₂

Στο παραπάνω σχήμα 1-3 παρουσιάζονται οι γραμμές ροής του ηλεκτρικού ρεύματος και οι ισοδυναμικές επιφάνειες δύο κυλίνδρων, που άγουν ηλεκτρικό ρεύμα κατά την διεύθυνση του άξονα συμμετρίας τους. Θεωρούμε ότι η μόνη θέση στην οποία είναι δυνατό λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας να διέλθει το ρεύμα είναι η ελλειπτική επιφάνεια A_c που έχει ως διαστάσεις τους ημιάξονες α και β . Στην περίπτωση αυτή η αντίσταση στένωσης θα οφείλεται στην εξαναγκασμένη συμπύκνωση των γραμμών ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.

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 αντίσταση του σταθερή
- η θερμοκρασία ήταν σταθερή σε όλα τα σημεία της επιφάνειας επαφής A_c η οποία είναι ισοδυναμική επιφάνεια
- για τον υπολογισμό της αντίστασης μεταξύ διαδοχικών ισοδυναμικών επιφανειών ισχύει $\Delta\Phi=0$, όπου Φ το δυναμικό.

Κάνοντας χρήση του σχήματος 1-3 και των παραδοχών που αναφέρονται παραπάνω μπορεί να πραγματοποιηθεί μια σύντομη απόδειξη της σχέσης που έχει δοθεί προηγουμένως για την R_c .

Σύμφωνα με τους Kottler και Smythe η αντίσταση στένωσης δίνεται από την σχέση:

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{\mu} \frac{d\mu}{\sqrt{(\alpha^2 + \mu)(\beta^2 + \mu)\mu}} \quad (1-4)$$

όπου α και β οι ημιάξονες της έλλειψης σε cm, ρ η ειδική αντίσταση σε Ωcm και μ μια παράμετρος η οποία εξαρτάται από τον λόγο της επιφάνειας A_c προς την επιφάνεια A_α . Για $A_c \ll A_\alpha$ ισχύει $\mu \rightarrow \infty$.

Στην περίπτωση που η περίμετρος της A_c είναι περιφέρεια ακτίνας r τότε για την παραπάνω σχέση ισχύει $\alpha = \beta = r$ και επομένως η αντίσταση στένωσης είναι:

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{\mu} \frac{d\mu}{(r^2 + \mu)\sqrt{\mu}} = \frac{\rho}{2\pi} \arctan \frac{\sqrt{\mu}}{r} \quad (1-5)$$

Για $\mu = \infty$ η σχέση γίνεται $R_c = \frac{\rho}{2\alpha}$ όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

Οι παραπάνω υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί για μία μόνο επιφάνεια A_c σε ολόκληρη την φαινόμενη επιφάνεια A_α . Στην περίπτωση i αριθμού επιφανειών ισχύει η σχέση:

$$R_c = \sum_{i=1}^n R_{ci} = \frac{\rho}{2 \sum_{i=1}^n r_i} \quad (1-6)$$

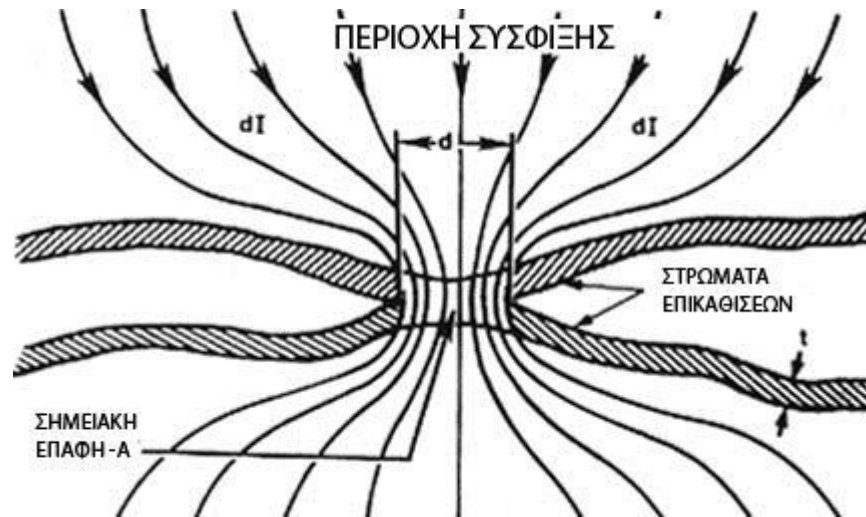
Πειραματικά αποτελέσματα από τους Holm και Stormer συμπίπτουν με τα υπολογιζόμενα από την σχέση (1-3). Έχει διαπιστωθεί επίσης ότι σε περίπτωση που η περίμετρος της A_c έχει σχήμα έλλειψης τότε η σχέση (1-3) εκφράζει με ικανοποιητική ακρίβεια την αντίσταση στένωσης και μπορεί να χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς με ακρίβεια περίπου $\pm 1,5\%$.

Επειδή τα μέταλλα δεν είναι τελείως καθαρά, η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος επηρεάζεται από στρώματα οξειδίων, θείου και άλλων ανόργανων στρωμάτων που πολύ συχνά συναντώνται στις επιφάνειες των μετάλλων. Η αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων στις επαφές R_f δίνεται από την προσεγγιστική σχέση:

$$R_f = \frac{\sigma}{na^2} \quad (1-7)$$

όπου σ είναι η ανά μονάδα επιφάνειας αντίσταση του υλικού.

Κύριος μηχανισμός της διέλευσης του ρεύματος αποτελεί το φαινόμενο σήραγγος. Στις περισσότερες εφαρμογές η συνεισφορά των λεπτών στρωμάτων στην συνολική αντίσταση μπορεί να μην είναι ιδιαίτερης σημασίας, αφού συνήθως τα σημεία (a-spot) από τα οποία διέρχεται το ρεύμα δημιουργούνται από μηχανική διάτρηση των στρωμάτων επιφανείας στην επαφή.



Σχήμα 1-4: Σχηματική παράσταση σημείων επαφής (a-spot) μεταξύ επιφανειών.

Από την προηγούμενη ανάλυση είναι φανερό ότι οι οδοί διέλευσης του ρεύματος είναι λιγότερες από αυτές που φυσιολογικά αναμένονται και για τον λόγο αυτό θα υπάρχει και μία περισσότερο ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος (βλέπε σχήμα 1-4).

1.5.3. Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντίσταση στένωσης

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 τη διαπερνά, τότε η τιμή της δίνεται από τη σχέση :

$$R_c(T) = R_c(T_0) \cdot (1 + \alpha_x(T - T_0)) \quad (1-8)$$

όπου $R_c(T_0)$ η τιμή της αντίστασης στένωσης σε θερμοκρασία T_0 , $R_c(T)$ η τιμή της αντίστασης στένωσης σε θερμοκρασία $T > T_0$ και α_x ο θερμικός συντελεστής μεταβολής της αντίστασης στένωσης. Θεωρητικοί υπολογισμοί επαληθεύουν τη σχέση (1-8) και προσδιορίζουν τον συντελεστή α_x ίσο προς τα 2/3 του θερμικού συντελεστή α του υλικού των επαφών. Έτσι η σχέση (1-8) γίνεται:

$$R_c(T) = R_c(T_0) \cdot \left(1 + \frac{2}{3} a(T - T_0) \right) \quad (1-9)$$

Οι σχέσεις (1-3) και (1-9) 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 (κατά τις προδιαγραφές) τιμές της πτώσης τάσης (π.χ. της τάξης των 55 mV για διακόπτες του δικτύου ΧΤ). Γι' αυτό μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η αντίσταση λόγω των ξένων επικαθίσεων σε μία επαφή έχει πρωτεύοντα ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της ολικής αντίστασης διάβασης.

1.5.4. Η πτώση τάσης σε μία επαφή σε σχέση με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται

Η θερμική και η ηλεκτρική ροή υπακούουν σε παρεμφερείς νόμους. Η θερμική ενέργεια ρέει σε συνάρτηση με τις θερμοκρασιακές διαφορές και αντίστοιχα το ηλεκτρικό ρεύμα σε συνάρτηση προς την διαφορά δυναμικού. Σε συμμετρικά συστήματα ηλεκτρικών επαφών, η θερμική ροή ακολουθεί τον ίδιο δρόμο με την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Ως εκ τούτου υπάρχει μία σχέση μεταξύ θερμοκρασιακής διαφοράς και διαφοράς δυναμικού. Η σχέση αυτή διερευνήθηκε κάτω από διάφορες παραδοχές, όπως π.χ. ότι ο αγωγός (που συνδέεται με την επαφή) είναι μονωμένος θερμικά και ηλεκτρικά σε όλο το μήκος του.

Για την διατύπωση μίας ενεργειακής σχέσης, που διέπει μία 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.
- 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 ισοτροπικό, δηλαδή ότι η ειδική αντίσταση ρ , και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ (thermal conductivity), εξαρτώνται μόνο από την θερμοκρασία. Σημαίνει επίσης ότι η επιφάνεια επαφής είναι ισοθερμική και ισοδυναμική (ταυτόχρονα 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 προς το άλλο.

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

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \cdot \lambda(T) dT = \frac{U^2}{8} \quad (1-10)$$

όπου ΔT η διαφορά της θερμοκρασίας των σημείων επαφής από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Εάν χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του γινομένου $\overline{\rho\lambda}$ τότε η σχέση (1-10) γίνεται:

$$\frac{U^2}{8} = \Delta T \cdot \overline{\rho\lambda} \quad (1-11)$$

ή

$$U = \sqrt{8 \cdot \Delta T \cdot \overline{\rho\lambda}} \quad (1-12)$$

Η σχέση (1-12) 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 (1-10) γίνεται:

$$\Delta T \cdot \overline{\rho\lambda} \leq U^2/8 \quad (1-13)$$

και

$$U \geq \sqrt{8 \cdot \Delta T \cdot \overline{\rho\lambda}} \quad (1-14)$$

Θεωρώντας το νόμο των Wiedemann – Franz κατά τον οποίο:

$$\rho(T) \cdot \lambda(T) = LT \quad (1-15)$$

όπου L σταθερά ανεξάρτητη από το μέταλλο ($L \cong 2.4 \cdot 10^{-8} [V/K]^2$), τότε η σχέση (1-10) γίνεται:

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \lambda(T) dT = \int_{T_0}^T LT \cdot dT = \frac{L}{2} (T^2 - T_0^2) \leq \frac{U^2}{8} \quad (1-16)$$

ή

$$U \geq 2\sqrt{L(T^2 - T_0^2)} \quad (1-17)$$

όπου T_0 η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

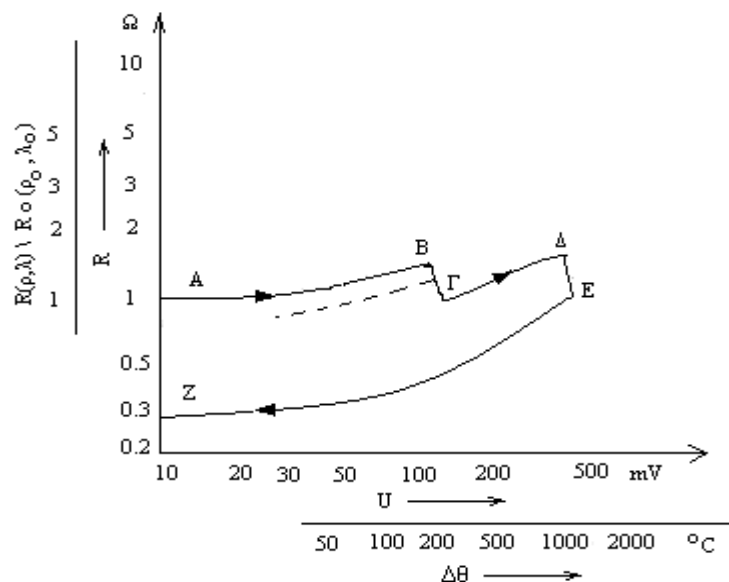
Οι σχέσεις (1-12), (1-14) και (1-17) παρέχουν την δυνατότητα του κατά προσέγγιση υπολογισμού της πτώσης τάσης σε επαφές χωρίς επικαθίσεις. Στις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής της πτώσης τάσης σε καινούργιες επαφές.

1.5.5. 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. Μία τέτοια καμπύλη δίνεται στο σχήμα 1-5 από όπου φαίνεται ότι οι συναρτήσεις $R=f(U)$ και $R=f(\Delta T)$ είναι αύξουσες στην περιοχή των πρακτικών εφαρμογών ($\Delta T < 50 \text{ }^\circ\text{C}$). Όπως φαίνεται στο σχήμα 1-5 οι χαρακτηριστικές αυτές σχεδιάζονται σε λογαριθμική κλίμακα. Στον άξονα των x δίνεται συνήθως η πτώση τάσης στην επαφή και ταυτόχρονα η διαφορά θερμοκρασίας (τα μεγέθη αυτά συνδέονται σύμφωνα με τη σχέση (1-14)). Στον άξονα των y δίνεται ο λόγος $R(\rho, \lambda)/R_0(\rho_0, \lambda_0)$, δηλαδή το πηλίκο της αντίστασης διάβασης R σε θερμοκρασία T (όπου η ειδική αντίσταση έχει την τιμή ρ και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας έχει την τιμή λ) προς την αντίσταση διάβασης R_0 σε θερμοκρασία χώρου T_0 (με ειδική αντίσταση ρ_0 και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ_0). Ο λόγος αυτός θα μπορούσε να γραφεί και ως $R(T)/R_0(T)$, όπως φαίνεται και στην σχέση (1-15).

Στη χαρακτηριστική του σχήματος 1-5 διακρίνονται οι 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 (1-9).



Σχήμα 1-5: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_c (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 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 $R=f(\Delta T)$ η επιφάνεια A_c φαίνεται ότι έχει σταθερή τιμή μετά την ανακρυστάλλωση και γι' αυτό η αντίσταση διάβασης αυξάνει σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Το τμήμα ΓΔ είναι πρακτικά παράλληλο προς το AB. 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 συγκόλλησής 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 E της χαρακτηριστικής μειωθεί η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, τότε η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη (τμήμα EZ). Το τμήμα EZ είναι πρακτικά παράλληλο προς το AB.

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. Πρακτικά η επιφάνεια A_c δεν έχει σταθερή τιμή γιατί η σκληρότητα των υλικών της επαφής μεταβάλλεται από τις αυξομειώσεις της θερμότητας 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 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 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 $R=f(\Delta T)$ του σχήματος 1-5 παρατηρείται ότι οι περιοχές τιμών της θερμοκρασίας και της πτώσης τάσης σε μία 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 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 δεν ισχύει και παρατηρείται εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στα αρχικά στάδια λειτουργίας τους, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία.

1.5.6. Οξείδωση και επικαθίσεις στις ηλεκτρικές επαφές

Οι επικαθίσεις σε μία 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 δύο κατηγορίες: σε χημικές ενώσεις (όπως π.χ. τα οξειδία του μετάλλου της επαφής) και σε διάφορα παρασιτικά στοιχεία (όπως η σκόνη, τα λιπαντικά και υδρατμοί). Η οξείδωση των μεταλλικών επαφών είναι ένας από τους σοβαρότερους μηχανισμούς που αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά τους. Στην περίπτωση του χαλκού έχει αποδειχθεί ότι η παρουσία του σε περιβάλλον με έντονες συνθήκες οξείδωσης μπορεί να προκαλέσει ραγδαία αύξηση της αντίστασης της επαφής σε μία σχετικά υψηλή τιμή μετά από ένα χρονικό διάστημα.

Τα οξειδία του χαλκού αναπτύσσονται από τη βάση του μετάλλου και συγκεκριμένα από τους 40 °C έως και τους 200 °C υπάρχει μια συνεχής ανάπτυξη του Cu_2O (υποξείδιο του χαλκού). Σημειώνεται ότι η ειδική αντίσταση του Cu_2O είναι 10^{10} $\mu\Omega\text{cm}$. Τα οξειδία του χαλκού είναι πιο μαλακά σε σχέση με τα οξειδία του αλουμινίου με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολη η διάτρησή τους από την εφαρμοζόμενη δύναμη.

Ο ψευδάργυρος (Zn) 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 αγώγιμες 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 οξείδωση. 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 οξείδωση της επιφάνειάς του

Το βολφράμιο (W) 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 (Pb) καθώς και οι καθαρές επαφές από χάλυβα.

Ο χρυσός (Au) δεν οξειδώνεται όπως είναι γνωστό στον αέρα. Προσβάλλεται όμως από το χλώριο στους 180°C περίπου και σχηματίζει υδατοδιαλυτό $AuCl_3$

(τριχλωριούχο χρυσό). Η μόνη επικαθίση 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 (Ag) οξειδώνεται σε Ag_2O (οξειδίο του αργύρου) σε θερμοκρασία χώρου, μόνο με την παρουσία του όζοντος. Το οξειδίο του αργύρου έχει χαμηλή σκληρότητα, αποχωρίζεται μηχανικά από το μέταλλο και αποσυντίθεται στους $200^\circ C$. Το παραπάνω οξειδίο δεν αυξάνει την αντίσταση διάβασης. Σε συνήθειες ατμοσφαιρικές συνθήκες ο άργυρος προσβάλλεται από ενώσεις του θείου και σχηματίζει ένα επιφανειακό ανθεκτικό στρώμα Ag_2S (θειούχος άργυρος) το οποίο δεν είναι προστατευτικό. Το στρώμα Ag_2S αυξάνεται αργά αλλά σταθερά γιατί η περιεκτικότητα γενικά του H_2S (υδρόθειο) στον αέρα είναι χαμηλή.

Με διακριτικό στοιχείο το πάχος διακρίνονται οι παρακάτω κατηγορίες επικαθίσεων :

- επικαθίσεις με πάχος λίγων ατόμων (όπως ένα στρώμα μίας 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

Ορισμένες χημικές ενώσεις στην επιφάνεια της επαφής αυξάνουν από 10 έως 100\AA 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.

1.5.7. 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 50\AA . 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 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 10\AA), που έχουν γίνει αναπόσπαστο μέρος της επιφάνειας της επαφής παρουσιάζουν στην πράξη μεγάλη αντίσταση και μπορούν να γίνουν αιτία αύξησης της αντίστασης διάβασης. Ο πολυμερισμός είναι πολύ διαδεδομένος στους υδρογονάνθρακες και έχει επισημανθεί ότι πάρα πολλά μονωτικά υλικά παράγουν ατμούς κατά τον πολυμερισμό τους. Τέλος όταν σε μία 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.

1.5.8. Η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος στις επαφές

Αν θεωρηθεί μία επαφή με επίπεδες επιφάνειες από το ίδιο μέταλλο και με απόσταση μεταξύ των δύο μερών της (λόγω των επικαθίσεων), τότε τα επίπεδα δυναμικού στην περιοχή της επαφής δίδονται στο σχήμα 1-6α. Τα επίπεδα Fermi των δυο μεταλλικών μερών της επαφής (E_f) συμπίπτουν, όταν δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ τους. Τα φράγματα δυναμικού στην επιφάνεια κάθε μέρους της επαφής επεκτείνονται στη μεταξύ τους απόσταση s και διαμορφώνουν το φράγμα δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Σε περίπτωση που η απόσταση s είναι αρκετά μεγάλη, η μέγιστη τιμή του ύψους του φράγματος δυναμικού ϕ_0 της επαφής ισούται με το έργο εξόδου Φ του μετάλλου. Όταν το πλάτος s είναι μικρό τότε τα φράγματα δυναμικού στην επιφάνεια των δύο μεταλλικών μερών της επαφής αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε μικρότερες τιμές με αποτέλεσμα η μέγιστη τιμή του φράγματος δυναμικού της επαφής να γίνεται μικρότερη από το έργο εξόδου Φ ($\phi_0 < \Phi$). Για ένα ηλεκτρόνιο μάζας m με ταχύτητα v_x , το οποίο πλησιάζει το φράγμα δυναμικού του σχήματος 1-6α ισχύει η ακόλουθη σχέση:

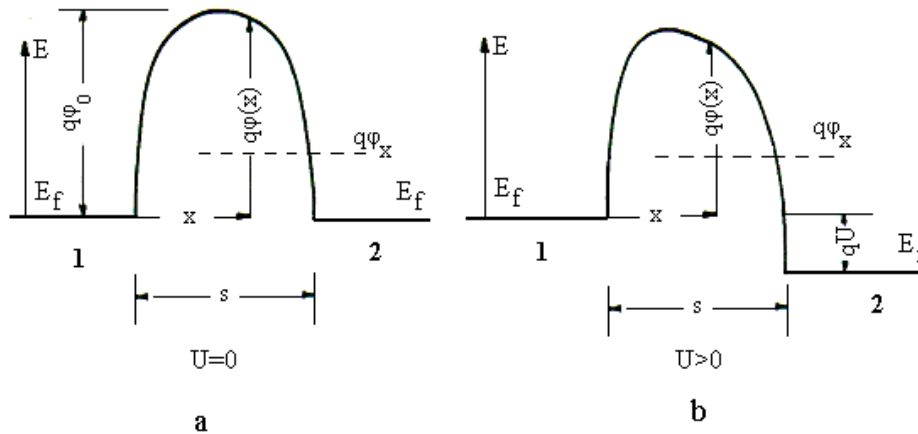
$$\frac{1}{2} m v_x^2 = q_e E_x \quad (1-18)$$

όπου E_x το δυναμικό του ηλεκτρονίου και q_e το φορτίο του. Σε περίπτωση που $E_x > \phi_0$ τότε το ηλεκτρόνιο θα βρεθεί στο άλλο μέρος της επαφής, όπου και θα αποδώσει το περίσσειμα της ενέργειάς του υπό μορφή ακτινοβολίας. Αυτό είναι γνωστό ως θερμιονική εκπομπή. Εάν το $E_x < \phi_0$ τότε κατά την κλασική φυσική ανακλάται το ηλεκτρόνιο πάνω στο φράγμα. Σύμφωνα όμως με την κβαντική θεωρία υπάρχει μία πιθανότητα το παραπάνω ηλεκτρόνιο να περάσει το φράγμα δυναμικού και να βρεθεί στο άλλο μέρος της επαφής. Αυτή η πιθανότητα εξαρτάται από έναν συντελεστή διάβασης $D(E_x)$ για τον οποίο ισχύει η σχέση :

$$D(E_x) = \exp \left[- \frac{4\pi}{h} \int_0^s \sqrt{2m(\phi(x) - E_x)} dx \right] \quad (1-19)$$

όπου h η σταθερά του Planck και $\phi(x)$ η συνάρτηση του φράγματος δυναμικού της επαφής.

Κατά την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος, που προαναφέρθηκε, τα ηλεκτρόνια περνάνε το φράγμα δυναμικού από δεξιά προς αριστερά τόσο συχνά όσο και προς την αντίθετη διεύθυνση με αποτέλεσμα να μην μπορεί να παρατηρηθεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Από τις δύο σχέσεις (1-18) και (1-19) φαίνεται ότι μόνον η ταχύτητα του ηλεκτρονίου v_x , που είναι κάθετη στο φράγμα δυναμικού, λαμβάνεται υπ' όψη στους υπολογισμούς του συντελεστή διάβασης $D(E_x)$ και επομένως και στον προσδιορισμό της πυκνότητας ρεύματος. Σε ένα καρτεσιανό σύστημα με συντεταγμένες x , y και z τα ηλεκτρόνια με υψηλές ταχύτητες v_y στη διεύθυνση y και v_z στη διεύθυνση z αλλά μικρή ταχύτητα v_x στη διεύθυνση x έχουν μικρή πιθανότητα να διαπεράσουν το φράγμα δυναμικού, αν και έχουν υψηλή συνολική ενέργεια.



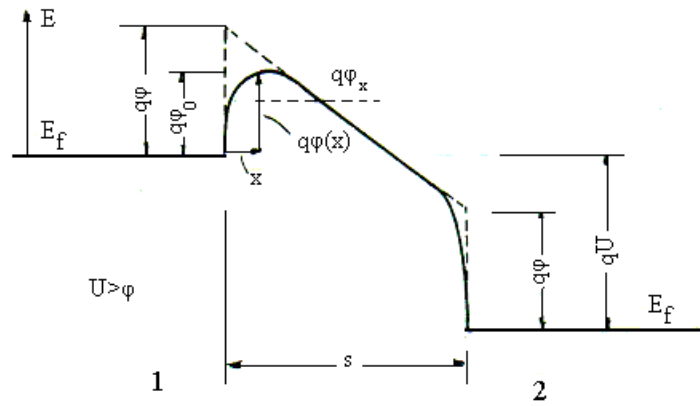
Σχήμα 1-6: Το φράγμα δυναμικού στο κενό s δύο επαφών (1 και 2) από το ίδιο υλικό.

- α: χωρίς την επιβολή διαφοράς δυναμικού
 β: με την επιβολή διαφοράς δυναμικού U

Στη βιβλιογραφία γίνεται διάκριση τριών περιπτώσεων εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος σε ένα σύστημα μέταλλο – μονωτή – μέταλλο (MIM) υπό την επίδραση συνεχούς τάσης.

- Η πρώτη περίπτωση αφορά πολύ μικρές τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης U σε σχέση με το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού $\phi_0 \gg U > 0$. Το φαινόμενο θεωρείται ότι είναι ωμικό (η πυκνότητα ρεύματος J είναι ανάλογη της τάσης U).
- Στη δεύτερη περίπτωση η τιμή της εφαρμοζόμενης συνεχούς τάσης είναι μεγαλύτερη από προηγουμένως και ισχύει ότι $\phi_0 > U$. Η πυκνότητα του ρεύματος J αυξάνει μη γραμμικά σε σχέση με την τιμή της τάσης U .
- Η τρίτη περίπτωση (γνωστή από την βιβλιογραφία ως εκπομπή πεδίου) αφορά μεγαλύτερες τιμές της τάσης από προηγουμένως, υπό την προϋπόθεση ότι ισχύει $U > U_0$.

Η πυκνότητα του ρεύματος J αυξάνει απότομα με την αύξηση της τάσης U στο σύστημα. Στο σχήμα 1-7 φαίνονται οι ενεργειακές στάθμες που αφορούν την περίπτωση αυτή. Παρατηρείται ότι το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού ϕ_0 είναι αρκετά μικρότερο από το έργο εξόδου Φ . Σε αυτή την περίπτωση τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μπορούν να μετακινούνται επάνω από φράγμα δυναμικού.



Σχήμα 1-7: Το φράγμα δυναμικού μεταξύ δύο όμοιων μεταλλικών ηλεκτροδίων που απέχουν μεταξύ τους κατά s , για $U > \Phi$ (1 και 2: τα δύο μέρη της επαφής).

Ως ειδική αντίσταση σήραγγος ρ_τ (tunnel resistivity) του παραπάνω συστήματος των δυο ηλεκτροδίων έχει οριστεί το πηλίκο :

$$\rho_\tau = \frac{U}{J} \quad (1-20)$$

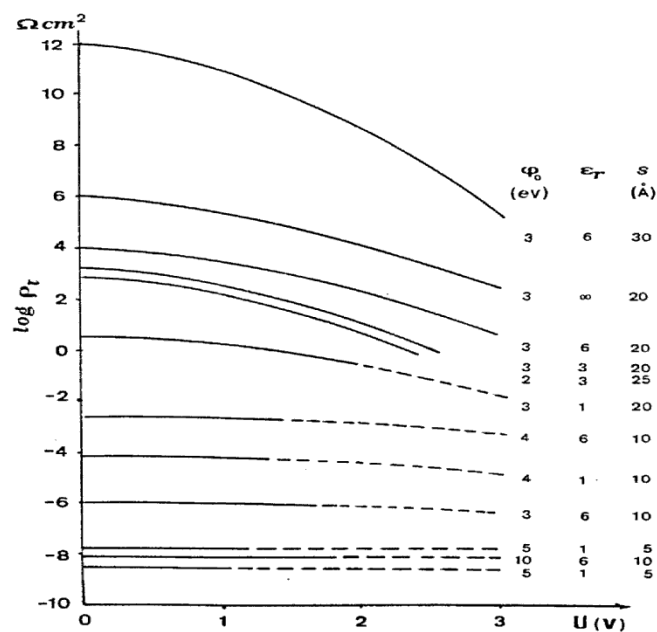
Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από το πάχος s , το έργο εξόδου Φ του μετάλλου των ηλεκτροδίων και την σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r , των επικαθίσεων. Η τιμή της ρ_τ εξαρτάται επίσης από την μορφή που έχει το φράγμα δυναμικού. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι πρόκειται για μία συνάρτηση της μορφής:

$$\rho_\tau = f(s, \Phi, U, \epsilon_r, \phi(x)) \quad (1-21)$$

Από τις σχέσεις (1-20) και (1-21) φαίνεται ότι για τον υπολογισμό της πυκνότητας ρεύματος J χρειάζεται να γίνει μια μαθηματική προσέγγιση για την συνάρτηση $\phi(x)$. Από τους ερευνητές, που ασχολήθηκαν με το θέμα, οι υπολογισμοί έγιναν με διάφορες παραδοχές. Κατά μία π.χ. προσέγγιση για μικρές τιμές του U και μεγάλο πάχος s θεωρείται η $\phi(x)$ ως τραπέζιο. Η προσέγγιση αυτή αν και αφορά χαμηλές θερμοκρασίες ($T=0$), δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και σε θερμοκρασίες χώρου. Σε μία άλλη προσεγγιστική μέθοδο θεωρείται η $\phi(x)$ ως παραβολή. Στην προσέγγιση αυτή λαμβάνεται υπ' όψη η επίδραση της θερμοκρασίας, ανάλογα προς την οποία προκαλείται αύξηση της ενεργειακής στάθμης σημαντικού αριθμού ηλεκτρονίων πάνω από την στάθμη Fermi, γεγονός που βοηθά να διαπεράσουν οι φορείς αυτοί το φράγμα δυναμικού. Η παραπάνω προσέγγιση ενδείκνυται για μικρά

πάχη s (τα μεγάλα πάχη επικαθίσεων δεν προσεγγίζονται ικανοποιητικά με παραβολή και είναι προτιμότερη η προσέγγιση τους με τραπέζιο).

Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης σήραγγος επιχειρήθηκε από πολλούς ερευνητές σε συνδυασμό με πειραματικά δεδομένα. Το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα δίνεται η ειδική αντίσταση σήραγγος ρ_r συναρτήσει της τάσης U για διαφορετικές τιμές του πάχους s , της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r και του φράγματος δυναμικού ϕ_0 . Τα σημεία στα οποία οι καμπύλες είναι διακεκομμένες έχουμε διάσπαση του μονωτικού στρώματος. Σημειώνεται ότι στον κατακόρυφο άξονα παριστάνεται η λογάριθμος της ειδικής αντίστασης σήραγγος και στον οριζόντιο η τάση.



Σχήμα 1-8: Η ειδική αντίσταση σήραγγος ρ_r σε μία επαφή σε σχέση με την πτώση τάσης U με παραμέτρους το πάχος s των επικαθίσεων, την σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r και το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού.

Το φαινόμενο σήραγγος σε μία επαφή σχετίζεται με τη διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης των επικαθίσεων R_f . Για μία π.χ. επαφή με μία μόνο επιφάνεια A_c ακτίνας r η αντίσταση διάβασης θεωρείται ότι δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{\rho}{2r} + \frac{\rho_r}{\pi r^2} \quad (1-22)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση σε Ωcm και ρ_r η ειδική αντίσταση σήραγγος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, που έχει οριστεί παραπάνω ως το πηλίκο της πτώσης τάσης U προς την πυκνότητα του ρεύματος J . Ο πρώτος όρος της εξίσωσης (1-22) δίνει την αντίσταση στένωσης και ο δεύτερος την αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων.

Ο επόμενος πίνακας δίνει για διάφορα υλικά επαφών την αντίσταση διάβασης σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Υλικό επαφών	Δύναμη σύσφιξης των επαφών F	Ειδική αντίσταση σύραγγος ρ_r	Αντίσταση στένωσης $R_c = \rho / 2r$	Αντίσταση επικαθίσεων $R_f = \rho_r / \pi r^2$	Ολική αντίσταση διάβασης R $10^{-4} \Omega$
Au-Au	35	$10^{-15} \Omega m^2$	3,94	1,86	5,8
Cu-Cu	35	4,6	7	1087	94,0
Ni-Ni	35	54	45	154	199,0

Πίνακας 1: Τιμές της αντίστασης διάβασης, της αντίστασης στένωσης και της αντίστασης των επικαθίσεων για διάφορα υλικά επαφών.

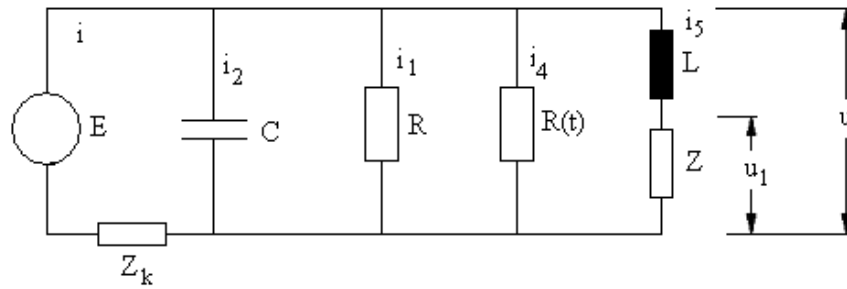
1.5.9. Οι επαφές σαν ένα μη γραμμικό σύστημα

Η μη γραμμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών επαφών έχει επεξηγηθεί ικανοποιητικά μέσω των παρακάτω μικροδομών:

- Τις μικροδομές MM (μέταλλο-μέταλλο)
- Τις μικροδομές MIM (μέταλλο-μονωτής-μέταλλο)
- Τις μικροδομές MOM (μέταλλο-οξείδιο μετάλλου-μέταλλο)
- Τις μικροδομές MGM (μέταλλο-μονωτικό περιβάλλον-μέταλλο)

Η κατανομή των παραπάνω μικροδομών είναι στατιστική. Η ροή του ρεύματος μέσω των μικροδομών MIM σχετίζεται, κατά την βιβλιογραφία με την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος. Οι μικροδομές MGM συμπεριφέρονται ως ηλεκτρομονωτική διάταξη.

Ένα ισοδύναμο κύκλωμα που ικανοποιεί τις παραπάνω προϋποθέσεις δίνεται στο παρακάτω σχήμα 1-9.



Σχήμα 1-9: Το προτεινόμενο ισοδύναμο κύκλωμα.

C : πυκνωτής που αποδίδει την χωρητική συμπεριφορά της επαφής, R : γραμμική αντίσταση στένωσης, Z : μη γραμμική αγωγιμότητα των επικαθίσεων, L : επαγωγή που αποδίδει την πιθανή επαγωγική συμπεριφορά επαφών, $R(t)$: αντίσταση που προσομοιώνει την εκδήλωση τοπικών τόξων, E : η πηγή, Z_k : το φορτίο

Οι τιμές C και R_1 εκφράζουν την ιδανική συμπεριφορά της επαφής (αντίσταση στένωσης και χωρητική συμπεριφορά). Για τιμές ρεύματος οι οποίες έχουν την ικανότητα να δημιουργήσουν ισχυρά τοπικά πεδία στις μικροδομές MIM, MOM και MGM στο κύκλωμα εισάγεται η μη γραμμική αγωγιμότητα Z , πιθανώς η επαγωγή L και η μη γραμμική αντίσταση $R(t)$ που προσομοιώνει την εκδήλωση τοπικών τόξων. Σε συνδυασμό αυτά τα στοιχεία μπορεί να είναι ένα απλό μη γραμμικό δυναμικό σύστημα το οποίο μπορεί να εμφανίσει αρνητική διαφορική αντίσταση (NDR) όπου όμως η τιμή του ρεύματος έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων.

1.5.10. Η ηλεκτρομονωτική και αγωγή συμπεριφορά των μικροδομών MIM, MOM και MGM μιας στατικής ηλεκτρικής επαφής

Η μη ροή ηλεκτρικών φορτίων στις μικροδομές MIM και MM (μίας στατικής επαφής εν λειτουργία) σημαίνει ότι αυτές έχουν ηλεκτρομονωτική συμπεριφορά, η οποία κατ' ουσίαν δημιουργεί ένα ηλεκτροστατικό πεδίο. Αυτό έχει παρασταθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1-9 με τη χωρητικότητα C . Η μελέτη της συμπεριφοράς της ανωτέρω χωρητικότητας για τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω αυτής σημαίνει αναίρεση της μονωτικής της ικανότητας, που αφορά, κατά τα γνωστά, την εξειδικευμένη περιοχή της ηλεκτρικής (ή διηλεκτρικής) συμπεριφοράς των μονώσεων. Σύμφωνα με την ανωτέρω βιβλιογραφία, η ροή ρεύματος μέσω της χωρητικότητας (του ισοδύναμου κυκλώματος του σχήματος 1-9 μπορεί να συμβεί με διάσπαση του διακένου ή εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.

Η μονωτική ή αγώγιμη συμπεριφορά των μικροδομών MIM θα πρέπει να ερμηνεύεται από τη σχετική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών. Σύμφωνα με την ανωτέρω βιβλιογραφία, από μακροσκοπική άποψη θεωρείται ότι τα αίτια αναίρεσης του ηλεκτροστατικού πεδίου (μερικές εκκενώσεις και διάσπαση) είναι κυρίως:

- οι απώλειες Joule
- οι δυνάμεις Coulomb
- οι μερικές εκκενώσεις
- η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

Στην πράξη βέβαια συνδυάζονται τα ανωτέρω αίτια και υποβοηθούνται από τις ειδικές συνθήκες που επικρατούν, όπως μορφή του ηλεκτρικού, περιβάλλον μέσο κ.λ.π., έτσι ώστε η αγώγιμη κατάσταση στον πυκνωτή C (βλέπε σχήμα 1-9) να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμα τους. Όμως οι τέσσερις ανωτέρω παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής δεν περιλαμβάνουν φαινόμενα που μπορεί κανείς να ακούσει ή να παρατηρήσει, το κυριότερο των οποίων είναι το μη ορατό φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Πληροφορίες για το εν λόγω φάσμα της ακτινοβολίας, αλλά και γενικότερα για όλο το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχουν δοθεί μέσω της κβαντικής φυσικής από μετρήσεις της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Τα βασικότερα συμπεράσματα από τη θεωρία αυτή είναι:

1. το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες
2. το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα)

Η μονωτική ή αγώγιμη συμπεριφορά των μικροδομών MOM μπορεί να επεξηγηθεί με τα προαναφερόμενα υπό την προϋπόθεση ότι τα οξειδία έχουν μονωτική συμπεριφορά. Σε περίπτωση ημιαγώγιμης συμπεριφοράς των οξειδίων θα πρέπει να ισχύουν για τη διέλευση του ρεύματος μέσω αυτών οι σχετικές θεωρίες περί ημιαγωγών (κυρίως το φαινόμενο tunnel).

Τέλος, η συμπεριφορά των μικροδομών MGM εξαρτάται από το μονωτικό περιβάλλον της επαφής. Έτσι, όταν πρόκειται π.χ. για περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα, θα πρέπει να ισχύουν, λόγω του πολύ μικρού διακένου, η θεωρία Townsend και ο νόμος του Paschen.

1.6. 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.: 10A, 200A, 400A κ.λ.π.). 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 θερμοκρασία 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.

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις σε συνθήκες κανονικής συνεχούς λειτουργίας των γυμνών αγωγών των εναερίων δικτύων ΜΤ, ώστε να μην προκαλείται μείωση της μηχανικής τους αντοχής, σύμφωνα με την οδηγία N_o 16 της Δ.Ε.Η, δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Α γ ω γ ο ι Cu		Α γ ω γ ο ι ACSR		
Ονομαστική διατομή (mm ²)	Μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση (A)	Ισοδύναμη διατομή χαλκού (mm ²)	Πραγματική διατομή Al/St (mm ²)	Μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση (A)
16	115	16	25/4	136
35	185	35	56/9	224
95	352	95	150/25	448

Πίνακας 2: Μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας για γυμνούς αγωγούς Μέσης τάσης σύμφωνα με την οδηγία Νο. 16 της Δ.Ε.Η

Οι τιμές του πίνακα έχουν προκύψει με τις εξής παραδοχές:

- Θερμοκρασία αέρα : 40 °C
- Μέγιστη θερμοκρασία αγωγού για Cu : 70 °C
- Μέγιστη θερμοκρασία αγωγού για ACSR : 80 °C
- Ταχύτητα αέρα : 0,6 m/sec

Πίνακας 2: Μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας σύμφωνα με την οδηγία Νο. 16 της Δ.Ε.Η

1.7.Διηλεκτρικές δοκιμές

Οι διηλεκτρικές δοκιμές στοχεύουν στην εξακρίβωση της ικανότητας μόνωσης. Η ονομαστική τάση (ή τάση σειράς) κάθε κατασκευής δεν μπορεί να είναι μία τυχαία τιμή, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγεγραμμένη διαβάθμιση των τάσεων, που είναι π.χ.: 0,4kV, 6,6 kV, 15 kV, 20 kV, 150 kV, κ.λ.π. Συνήθως γίνεται αναφορά, εκτός από την ονομαστική τάση (ή τάση σειράς), στη στάθμη μόνωσης της κατασκευής (μέγιστη τάση λειτουργίας), που είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση (π.χ.: για ονομαστική τάση 20 kV η στάθμη μόνωσης είναι 24 kV). Οι μετρήσεις, που γίνονται για τον έλεγχο της ικανότητας μόνωσης, αφορούν κυρίως τις μέγιστες λειτουργικές καταστάσεις της κατασκευής (κυρίως υπερτάσεις από κεραυνούς και χειρισμούς), από τις οποίες επιβεβαιώνεται η στάθμη μόνωσης.

1.8.Δοκιμή μηχανικής αντοχής

Η δοκιμή μηχανικής αντοχής αφορά βασικά την ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα των στατικών επαφών μετά από ένα μεγάλο αριθμό χειρισμών, ενώ παράλληλα ελέγχεται η στιβαρότητα της κατασκευής (ενδεχομένως παραμορφώσεις των επαφών ή τυχόν αποσυναρμολογήσεις ή ακατάλληλα ελατήρια κλπ). Ένας αποζεύκτης π.χ. 20 kV / 400A θα πρέπει να έχει μετά από 1000 πλήρεις κύκλους χειρισμών την ίδια ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα (400 A). Μετά το πέρας δηλαδή της δοκιμής αυτής, θα πρέπει να γίνει η δοκιμή υπερθέρμανσης.

1.9.Δοκιμή υπό τριπολικό βραχυκύκλωμα

Με τη δοκιμή σε τριπολικό βραχυκύκλωμα ελέγχεται η καταπόνηση μίας κατασκευής από τις μεγάλες δυνάμεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά το βραχυκύκλωμα. Η δοκιμή διαρκεί 1s, αρκετό δηλαδή χρόνο, ως προς εκείνον ενεργοποίησης των μέσων προστασίας του δικτύου. Κατά τη δοκιμή μετρώνται οι συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης, ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ βραχυκύκλωσης, που καθορίζεται από τη θέση της κατασκευής στο δίκτυο. Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής όταν, μετά το πέρας της, δεν έχουν αναιρεθεί η στάθμη μόνωσης και η ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα (δηλαδή, στη συνέχεια πραγματοποιούνται στο συγκεκριμένο δοκίμιο οι διηλεκτρικές δοκιμές και η δοκιμή υπερθέρμανσης).

2. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

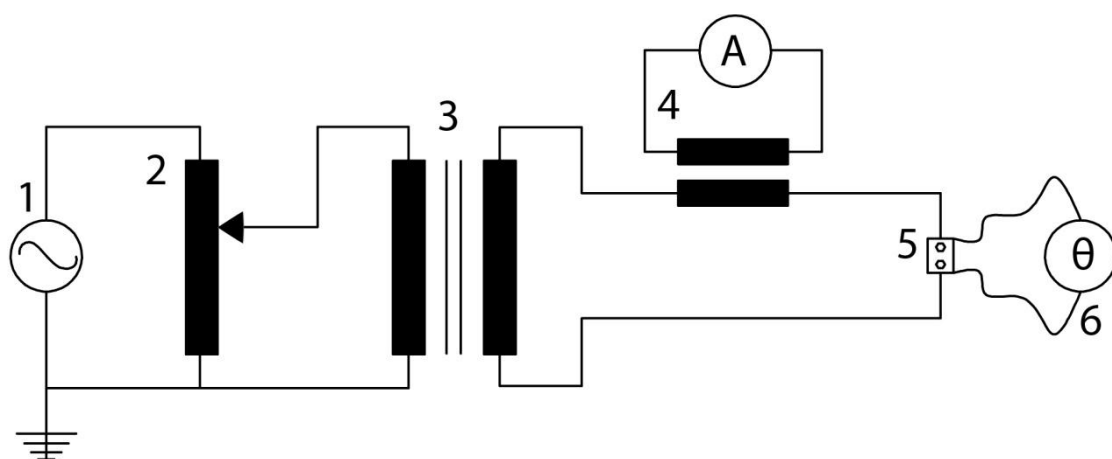
Σκοπός της διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη του ονομαστικού ρεύματος σφικτήρων του δικτύου διανομής Μέσης Τάσης (MT). Συγκεκριμένα υπό την καταπόνηση με εναλλασσόμενο ρεύμα πάνω στον στατικό ηλεκτρικό σύνδεσμο και με βάση τα αποτελέσματα της θερμικής συμπεριφοράς, προσδιορίζεται το ονομαστικό ρεύμα για τον τύπο του σφικτήρα που έχει τοποθετηθεί. Για τους σφικτήρες του δικτύου διανομής δεν έχει ορισθεί στις προδιαγραφές ονομαστικό ρεύμα. Επίσης, δεν γίνεται αναφορά σ' αυτό στους κανονισμούς του δημόσιου φορέα ηλεκτρικής ενέργειας.

Σκοπός λοιπόν, αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να ερευνήσει την ανάγκη προσδιορισμού ονομαστικού ρεύματος για τους σφικτήρες και να το προσδιορίσει για ορισμένους απ' αυτούς.

3. Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

3.1. Πειραματική διάταξη

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη του ονομαστικού ρεύματος σφικτήρων του δικτύου διανομής. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για το λόγο αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1:1: Πηγή τάσης, τάση δικτύου 230 V
2: Αυτομετασχηματιστής (VARIAC)
3: Μετασχηματιστής Έντασης
4: Επαγωγικό Αμπερόμετρο
5: Ηλεκτρικός Σύνδεσμος (δοκίμιο)
6: Ψηφιακό Θερμόμετρο

Παρακάτω αναλύονται οι σφικτήρες που μελετήθηκαν στην εργασία αυτή.

1^{ος} Σύνδεσμος

Ο πρώτος σύνδεσμος που μελετήθηκε, είναι ο **RIVIMETAL AI 50-70 GR-261-A**. Ο σύνδεσμος αυτός έχει δύο κοχλίες τύπου D.F.L 5.6 σχήμα 3-2. Επειδή ο σύνδεσμος αυτός δεν έχει εκτεθεί σε εξωτερικές συνθήκες, δεν υπάρχουν επικαθίσεις οξειδίων.



Σχήμα 3-2: Σύνδεσμος RIVIMETAL AI 50-70 GR-261-A που μετρήθηκε

2^{ος} Σύνδεσμος

Ο δεύτερος σύνδεσμος είναι ο **RIVIMETAL, AAAC 70 - ACSR 35, GR-261-A**. Είναι πιο μικρός από τον 1^ο σύνδεσμο με αποτέλεσμα κατά την σύνδεση του με τους αγωγούς να μην εφάπτονται τελείως οι πλάκες του συνδέσμου. Και αυτός ο σύνδεσμος έχει δύο κοχλίες τύπου VOT 4.6. Όπως ο 1^{ος} σύνδεσμος, έτσι και αυτός δεν έχει εκτεθεί σε εξωτερικές συνθήκες, δεν υπάρχουν επικαθίσεις οξειδίων.



Σχήμα 3-3: Σύνδεσμος RIVIMETAL, AAAC 70 - ACSR 35, GR-261-A που μετρήθηκε

3^{ος} Σύνδεσμος

Ο τρίτος και τελευταίος σύνδεσμος είναι ο **RIVIMENTAL GR261-A, ACSR-95, AAAC-185**. Αυτός ο σύνδεσμος είναι για διατομή 95mm², και επειδή δεν υπήρχε τέτοιος αγωγός διαθέσιμος στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε κομμάτι αγωγού από τον ACSR 35mm² χωρίς την χαλύβδινη ψυχή του και ενώθηκε πάνω στον αγωγό ACSR που ήταν συνδεδεμένος στον Μ/Σ, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη διάσταση προκειμένου να συνδεθεί ο σύνδεσμος. Ο σύνδεσμος αυτός έχει 3 κοχλίες τύπου D.F.L 5.6 σχήμα 3-4. Όπως και στους 2 προηγούμενους συνδέσμους έτσι και αυτός δεν έχει εκτεθεί σε εξωτερικές συνθήκες, δεν υπάρχουν επικαθίσεις οξειδίων.



Σχήμα 3-4: Σύνδεσμος RIVIMENTAL GR261-A, ACSR-95, AAAC-185 που μετρήθηκε

3.1.1. Αυτομετασχηματιστής

Ο αυτομετασχηματιστής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο (S-260-5 Yamabishi electric) σχήμα 3-5 και έχει τέσσερις ακροδέκτες. Στους δύο ακροδέκτες εισόδου συνδέεται η τάση του δικτύου 230V και στους δύο ακροδέκτες εξόδου συνδέονται εσωτερικά του μετασχηματιστή με το ένα άκρο του δευτερεύοντος τυλίγματος και την ενδιάμεση λήψη αντίστοιχα. Η ενδιάμεση λήψη ρυθμίζεται μέσω ποτενσιόμετρου. Με τον τρόπο αυτό η τάση στην έξοδο του αυτομετασχηματιστή μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ 0-230V.



Σχήμα 3-5: Ο αυτομετασχηματιστής

3.1.2. Μετασχηματιστής έντασης

Στην εργασία, χρησιμοποιήθηκε μετασχηματιστής ρεύματος για την προσομοίωση του ρεύματος του δικτύου μέσης τάσης. Ο Μ/Σ είναι μέγιστης ισχύς 1,5kVA, τάσης εξόδου $V_{out,max}=2,5V$.



Σχήμα 3-6: Μετασχηματιστής έντασης

3.1.3. Αγωγοί

Οι αγωγοί είναι πολύκλωνοι αγωγοί ACSR διατομή των 35mm^2 . Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, και οι δύο άκρες των αγωγού συνδέονται στον ακροδέκτη του μετασχηματιστή ώστε το διερχόμενο ρεύμα από τους αγωγούς να υποδιπλασιάζεται και να μην υπάρχει θερμοκρασιακή συνεισφορά από αυτούς στους μετρούμενους σφικτήρες. Επίσης αφαιρέθηκε η χαλύβδινη ψυχή από τους αγωγούς ACSR, διότι με την αύξηση του ρεύματος πέρα του ονομαστικού του αγωγού, η θερμοκρασία ήταν αρκετά υψηλή, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να προσδιοριστούν οι ονομαστικές τιμές των σφικτήρων.



Σχήμα 3-7: Σύνδεση αγωγών ACSR στον Μ/Σ

3.1.4. Μετρητές θερμοκρασίας

Τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση, ήταν τύπου σιδήρου-κωνσταντάνης. Η κωνσταντάνη είναι κράμα χαλκού και νικελίου. Η κωνσταντάνη έχει χαμηλό θερμικό συντελεστή αντίστασης και έτσι μπορεί να αξιοποιηθεί για την διερεύνηση του ονομαστικού ρεύματος. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το θερμοστοιχείο που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 3-8: Μετρητής Θερμοκρασίας

Ο κάθε μετρητής έδειχνε δύο θερμοκρασίες ταυτόχρονα. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις μετρητές για τα οχτώ σημεία.

Αξίζει να σημειωθεί, πως έχει γίνει βαθμονόμηση των τεσσάρων θερμοστοιχείων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα θερμόμετρο, προκειμένου να συγκριθούν οι αναλογικές με τις ψηφιακές τιμές θερμοκρασίας. Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με τις μετρήσεις που προέκυψαν με την βαθμονόμηση.

Αναλογικό	Ψηφιακό 1		Αναλογικό	Ψηφιακό 2		Αναλογικό	Ψηφιακό 3		Αναλογικό	Ψηφιακό 4	
	T1	T2		T1	T2		T1	T2		T1	T2
18,8	18,7	18,6	18,5	18,2	18,2	19	19	18,9	19	18,7	ΔΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ
28	28,6	28,2	29	29,1	29,1	29	28,9	29,3	28	28,7	
35	35,7	35,6	38	38,7	38,6	33,5	33,5	33,8	32,5	33,2	
42	43,5	43,4	46	47,4	47,4	37,5	38,2	38,2	37,5	38,6	
49,5	51,1	51,1	54,4	56,4	56,4	44	45	45	42,5	43,8	
55	57,7	57,7	60	62,8	62,7	49,7	50,9	50,9	46,5	48,3	
60,5	63,8	63,8	65	68,6	68,2	55,5	58	58,1	52	54,6	
65	68,3	68,3	69	73	73	61	64	64,2	57,4	60,4	
70	73,8	73,9				67	70,7	70,7	63	66,4	
						72	76,3	76	68	72	

Πίνακας 3: Βαθμονόμηση των θερμοστοιχείων

Προκειμένου να βρεθεί η πραγματική τιμή της θερμοκρασίας από τα ψηφιακά αποτελέσματα των μετρήσεων των συνδέσμων, έχει βρεθεί η αναλογία για την μετατροπή της ψηφιακής τιμής σε αναλογική. Από το excel έχει βρεθεί πως το **1,05** θεωρείται η κατάλληλη αναλογία για την μετατροπή.

3.2. Πειραματική Διαδικασία

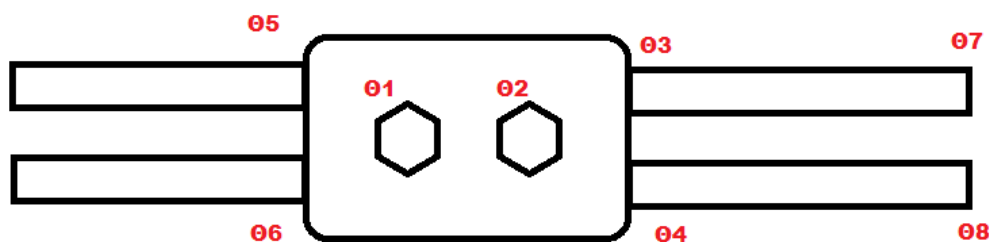
Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, στη δοκιμή υπερθέρμανσης, η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία για τους ACSR αγωγούς είναι 80 °C με θερμοκρασία αέρα 40 °C και ταχύτητα αέρα 0,6m/sec. Συνεπώς για τους αγωγούς ACSR η μέγιστη $\Delta\theta$ είναι 40 °C.

Για το λόγο αυτό η διερεύνηση του ονομαστικού ρεύματος των σφικκτήρων που μετρήθηκαν στην εργασία θα γίνει για $\Delta\theta=40$ °C .



Σχήμα 3-9: Σύνδεση σφικκτήρα με τους αγωγούς

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας, τοποθετήθηκαν αισθητήρες σε οχτώ σημεία της διάταξης όπως φαίνεται στο σχήμα 3-10.



Σχήμα 3-10: Αναπαράσταση σημείων Μετρήσεων

Θ1-Θ8: Οχτώ σημεία τοποθέτησης αισθητήρων για μέτρηση θερμοκρασίας

Τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες στα εξής σημεία όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:

1. Ο πρώτος στον κάτω κοχλία του συνδέσμου. (Θ1)
2. Ο δεύτερος στον πάνω κοχλία του συνδέσμου. (Θ2)
3. Ο τρίτος στο πάνω αριστερό εσωτερικό του συνδέσμου. (Θ3)
4. Ο τέταρτος στο πάνω δεξί εσωτερικό του συνδέσμου. (Θ4)
5. Ο πέμπτος στο κάτω αριστερό εσωτερικό του συνδέσμου. (Θ5)
6. Ο έκτος στο κάτω δεξί εσωτερικό του συνδέσμου. (Θ6)
7. Ο έβδομος στην πάνω ένωση του αγωγού με τον ακροδέκτη του Μ/Σ. (Θ7)
8. Και ο όγδοος στην πάνω ένωση του άλλου αγωγού με τον ακροδέκτη του Μ/Σ. (Θ8)

Τα σημαντικά σημεία για τον προσδιορισμό της διαφοράς θερμοκρασίας στους 40 °C ήταν τα Θ1,Θ2 στο κέντρο του σφιγκτήρα. Τα υπόλοιπα μετρήθηκαν για περαιτέρω διερεύνηση και σχολιασμό.

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, επειδή στην εργασία θα χρησιμοποιηθούν τιμές ρεύματος πέρα του ονομαστικού του αγωγού, θεωρήθηκε σωστό να απομακρυνθεί από τον αγωγό ASCR ο χάλυβας λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που εμφανιζόταν σε υψηλές τιμές ρεύματος.

Αρχικά διερευνάται η τάξη μεγέθους του ονομαστικού ρεύματος. Ρυθμίζεται με τη βοήθεια του μετασχηματιστή έντασης μία τιμή πάνω από το ονομαστικό του αγωγού και ελέγχεται η $\Delta\theta$ στα σημεία $\Theta 1$ και $\Theta 2$. Αν η διαφορά θερμοκρασίας ξεπέρανε τους $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ η δοκιμή διακοπτόταν και γινόταν νέα με μικρότερη τιμή. Αν ήταν πολύ χαμηλή η $\Delta\theta$, η τιμή ρεύματος ανέβαινε σταδιακά ώστε να επιτευχθεί σταθεροποίηση της $\Delta\theta$ στους $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Όπως ειπώθηκε και στην εισαγωγή 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 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε η αμπεροτσιμπίδα σχήμα 3-11 στον έναν αγωγό προκειμένου να μετρηθεί η ένταση του ρεύματος. Επειδή η μέτρηση με την αμπεροτσιμπίδα γινόταν επαγωγικά, αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση σφάλματος στις μετρήσεις. Κάθε στιγμή, εξεταζόταν η αμπεροτσιμπίδα ώστε να ρυθμίζεται η τιμή του ρεύματος που πρέπει.



Σχήμα 3-11: Αμπεροτσιμπίδα που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις

Οι τιμές της θερμοκρασίας σημειώνονταν:

- Κάθε **30** λεπτά για τον 1^ο σύνδεσμο.
- Κάθε **15** λεπτά για τον 2^ο και 3^ο σύνδεσμο

Οι σύνδεσμοι συνδέθηκαν στους αγωγούς με ένα ροπόκλειδο σχήμα 3-12. Η ροπή σύσφιξης επιλέχθηκε για τους 3 συνδέσμους στα 20 Nm ως πιο κατάλληλη βάση προηγούμενης διερεύνησης (διπλωματική εργασία [7]) σχετικά με την επίδραση της ροπής σύσφιξης στη θερμοκρασιακή συμπεριφορά των συνδέσμων.



Σχήμα 3-12: Ροπόκλειδο για τη ρύθμιση της ροπής σύσφιξης

Στη συνέχεια αφού συνδέθηκαν οι σύνδεσμοι στους αγωγούς, τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες στα οχτώ σημεία που αναφέρθηκαν προηγουμένως και φαίνονται και στο σχήμα 3-10. Από τα οχτώ σημεία, οι δύο (θ7,θ8) μετρήθηκαν άμεσα με το χέρι. Στους υπόλοιπους έξι, οι αισθητήρες ήταν σταθερά τοποθετημένοι.

Μετά την εύρεση του ονομαστικού ρεύματος του κάθε σφικτήρα, έγιναν μετρήσεις σε άλλους σφικτήρες ίδιου τύπου προκειμένου να επαληθευθούν αποτελέσματα

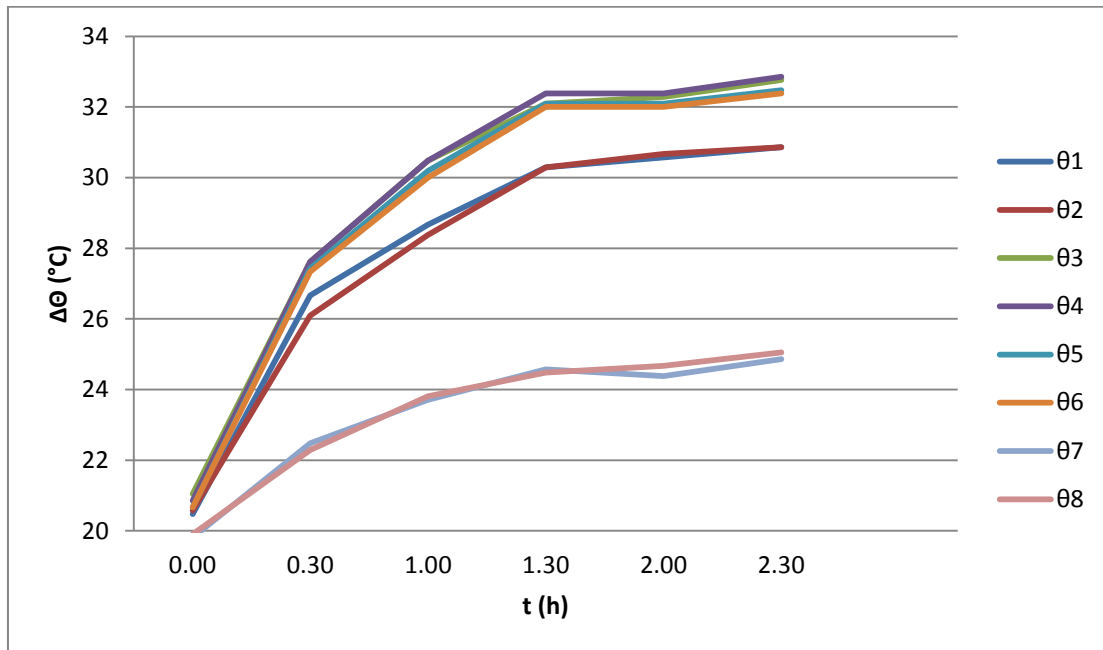
4.Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με την προηγούμενη πειραματική διαδικασία, προκύπτουν τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό με την μορφή διαγραμμάτων. Οι αναλυτικοί πίνακες των μετρήσεων δίνονται στο παράρτημα Α.

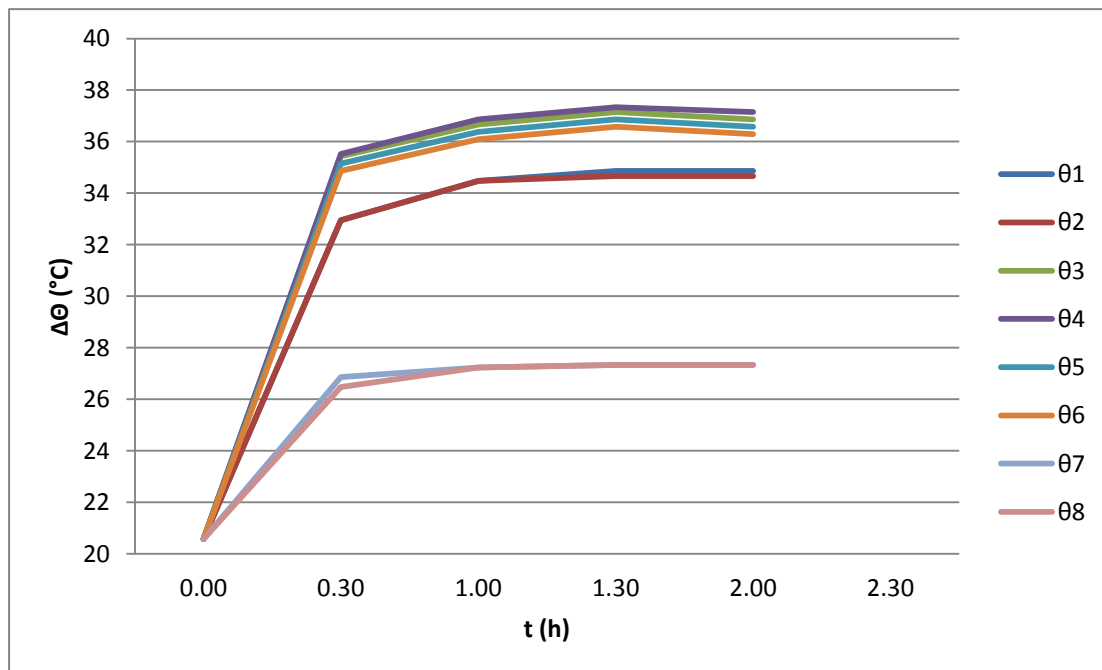
Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οχτώ γραφικές παραστάσεις που αντιστοιχούν στα 8 σημεία, τα οποία αναφέρονται στη θερμοκρασία, που έχουν προκύψει από τα ψηφιακά θερμόμετρα. Οι ψηφιακές τιμές έχουν μετατραπεί σε αναλογικές με βάση την αναλογία (1,05) που έχει προκύψει από την βαθμονόμηση.

- Τα διαγράμματα 4.1.1-4.1.9 είναι εκείνα του 1^{ου} σφιγκτήρα.
- Τα διαγράμματα 4.2.1-4.2.11 είναι εκείνα του 2^{ου} σφιγκτήρα.
- Τα διαγράμματα 4.3.1-4.3.7 είναι εκείνα του 3^{ου} σφιγκτήρα.

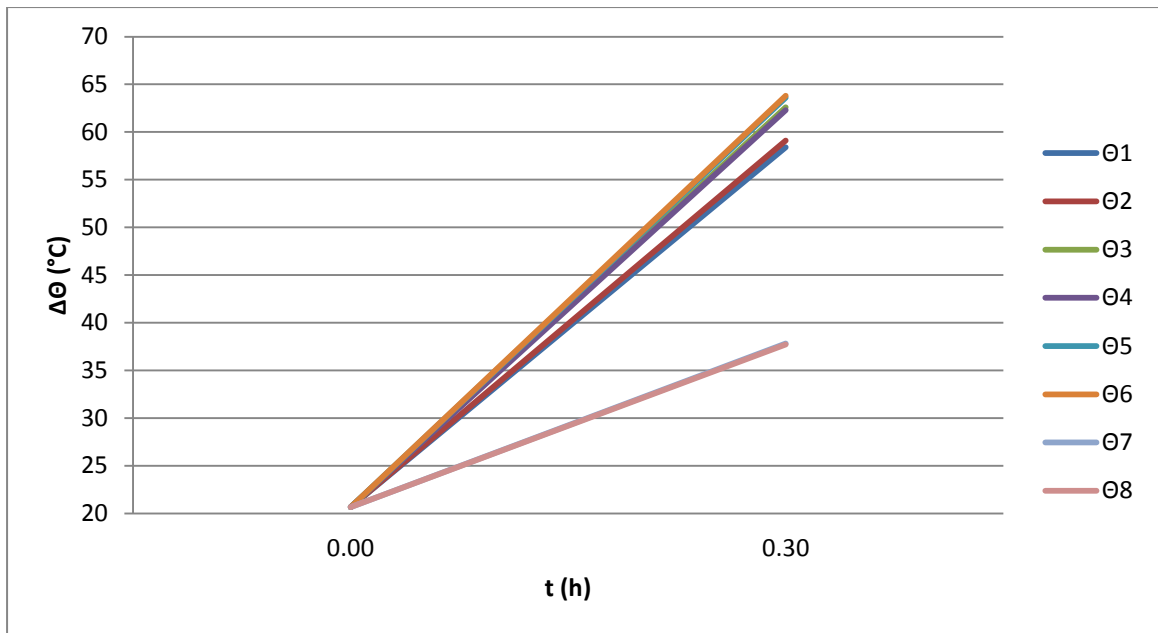
4.1. Μετρήσεις του 1^{ου} σφιγκτήρα



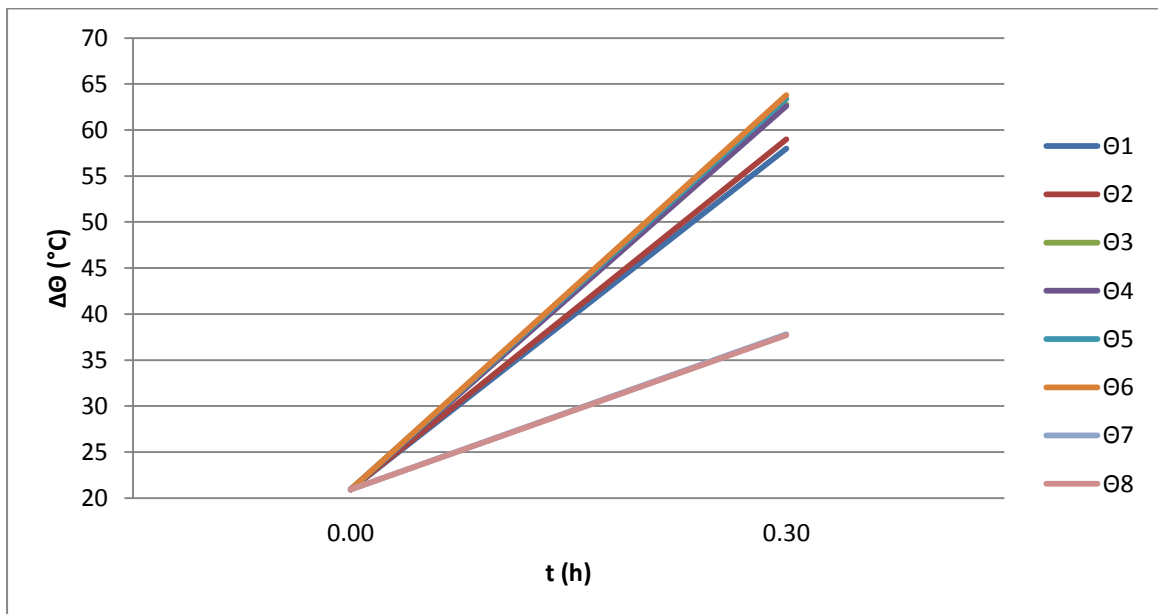
Σχήμα 4.1.1: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 150 A



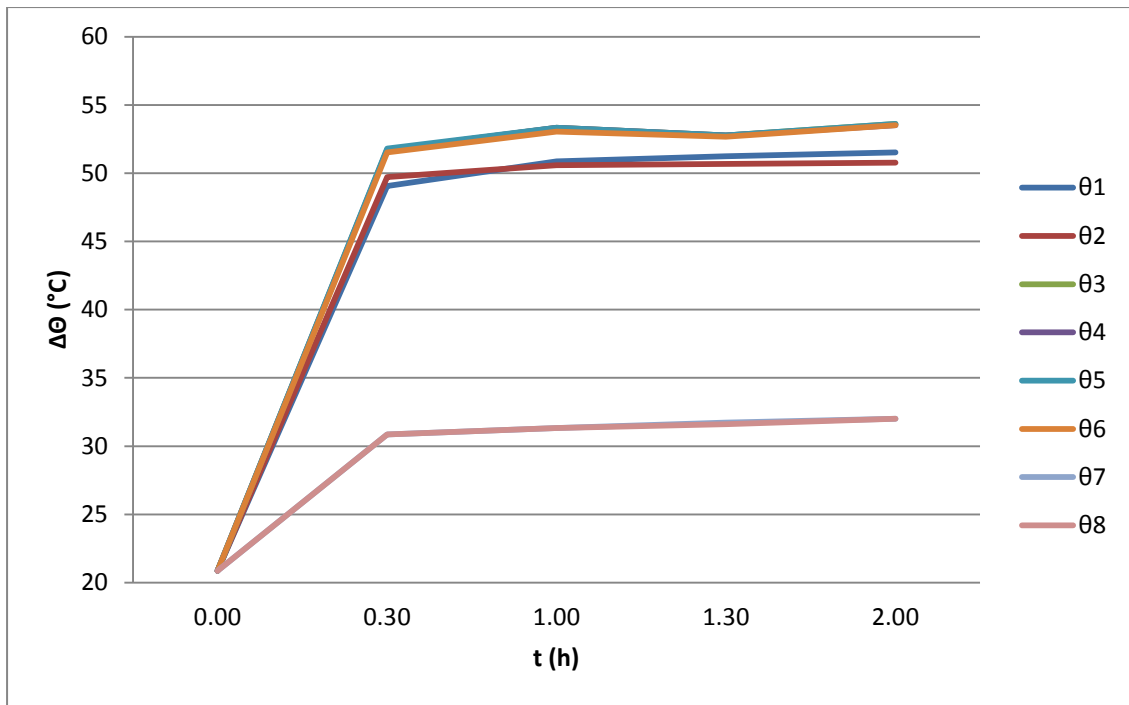
Σχήμα 4.1.2: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 175 A



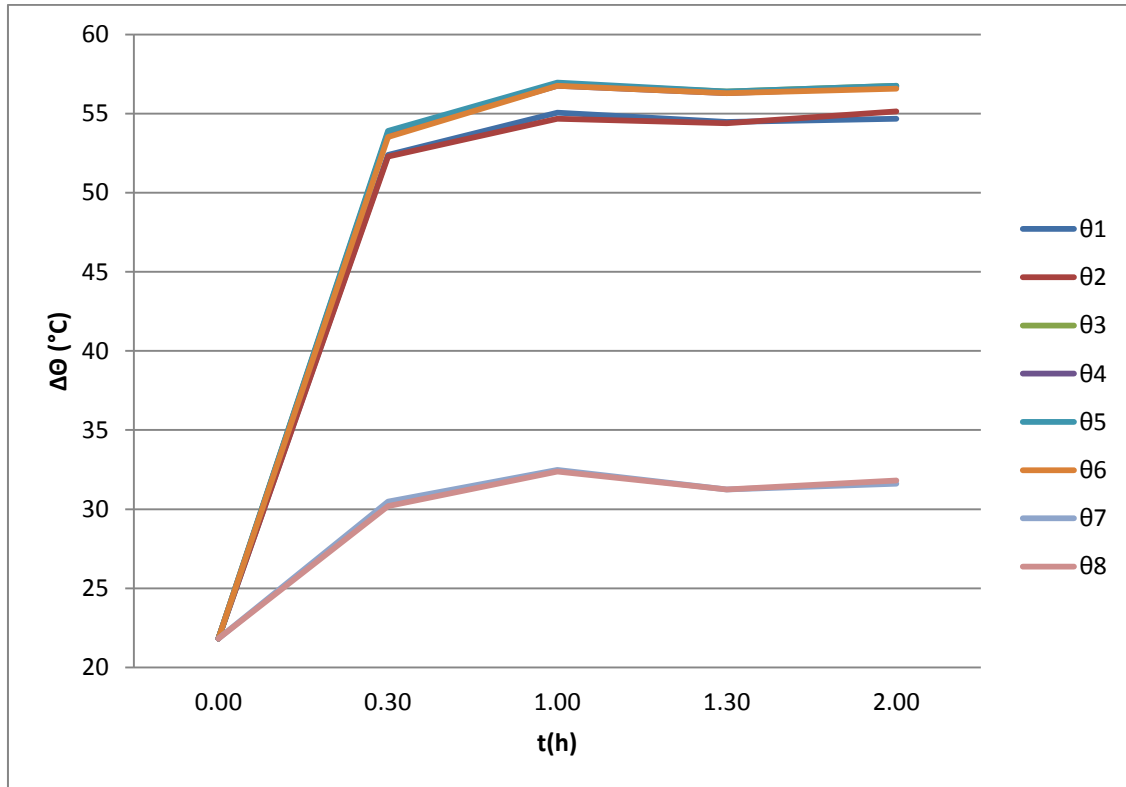
Σχήμα 4.1.3: Μέτρηση ΔΘ για ρεύμα 340 A



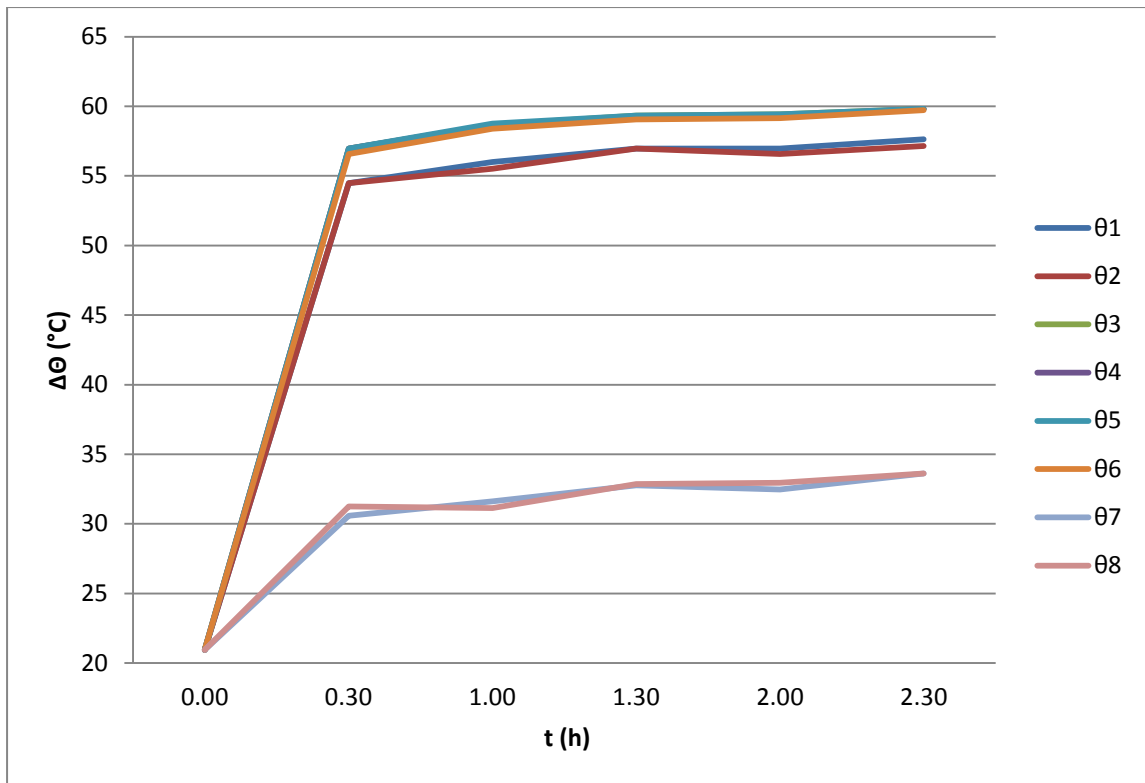
Σχήμα 4.1.4: Μέτρηση ΔΘ για ρεύμα 320 A



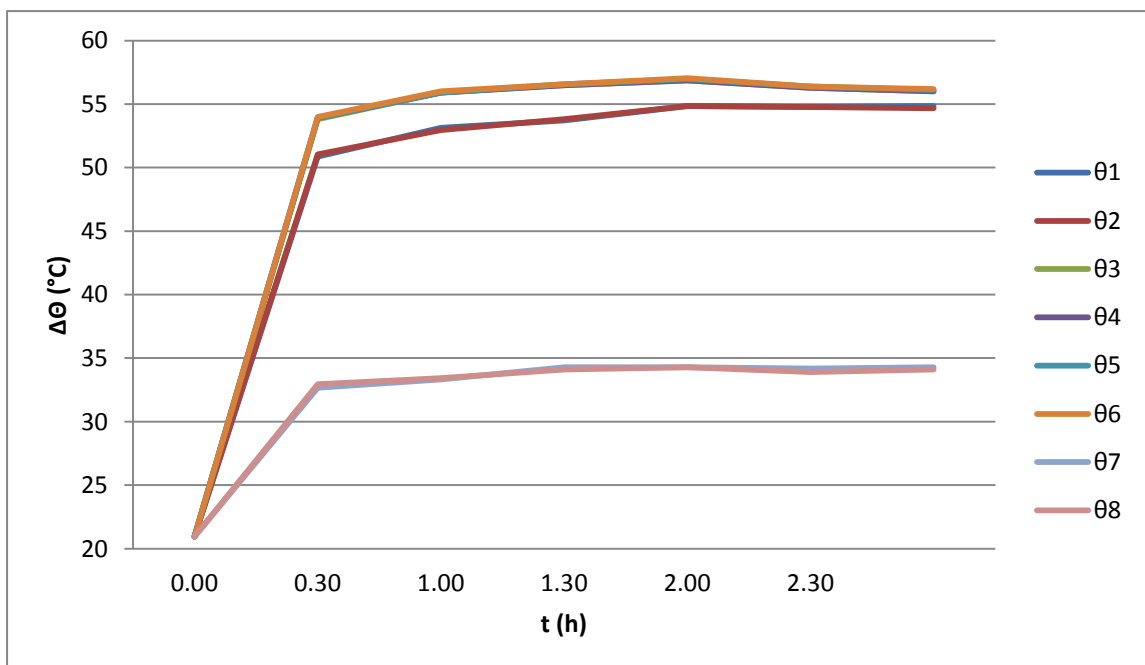
Σχήμα 4.1.5: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 290 A



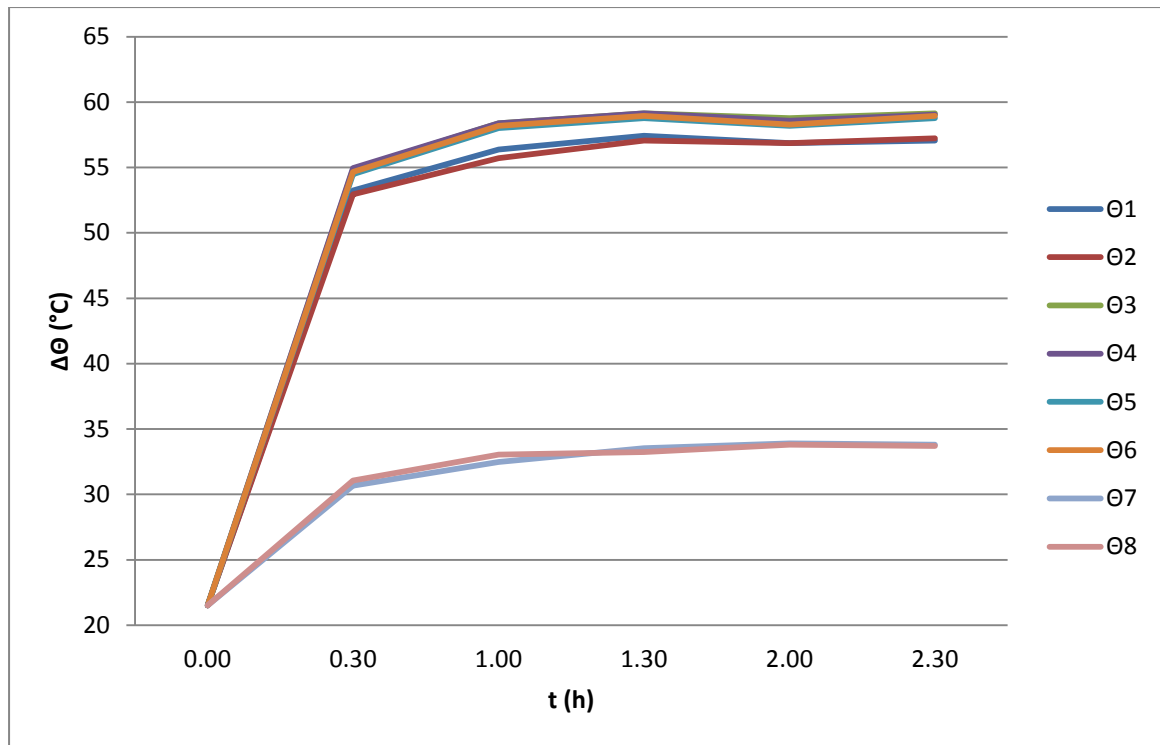
Σχήμα 4.1.6: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 300 A



Σχήμα 4.1.7: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 310 A

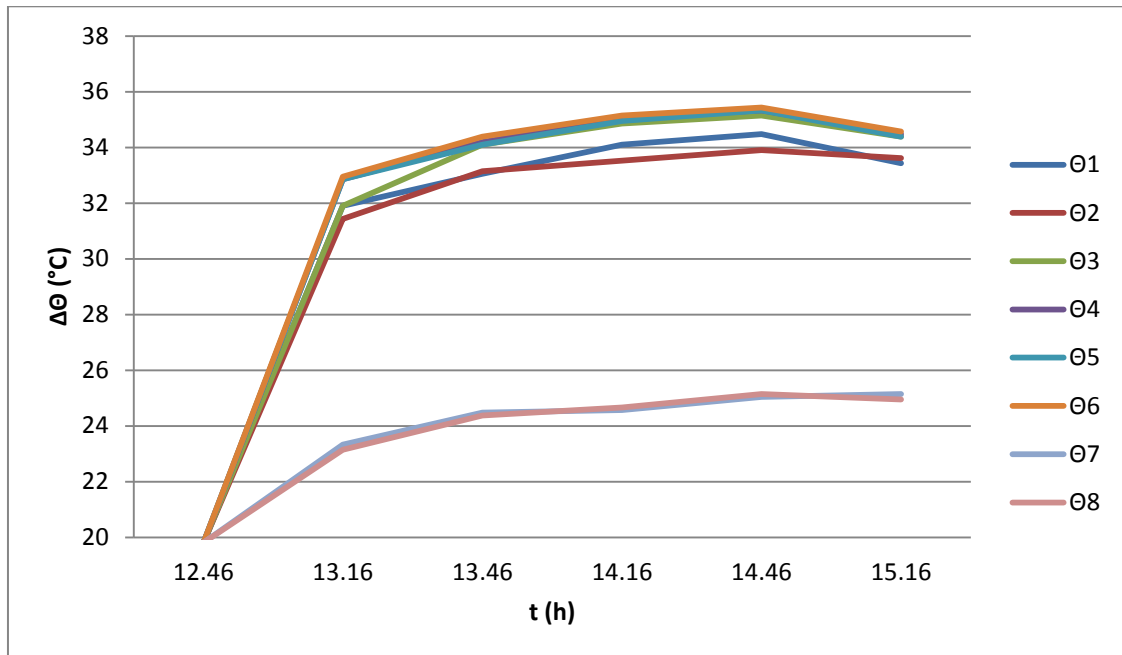


Σχήμα 4.1.8: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 310 A, 2^{ου} ίδιου συνδέσμου

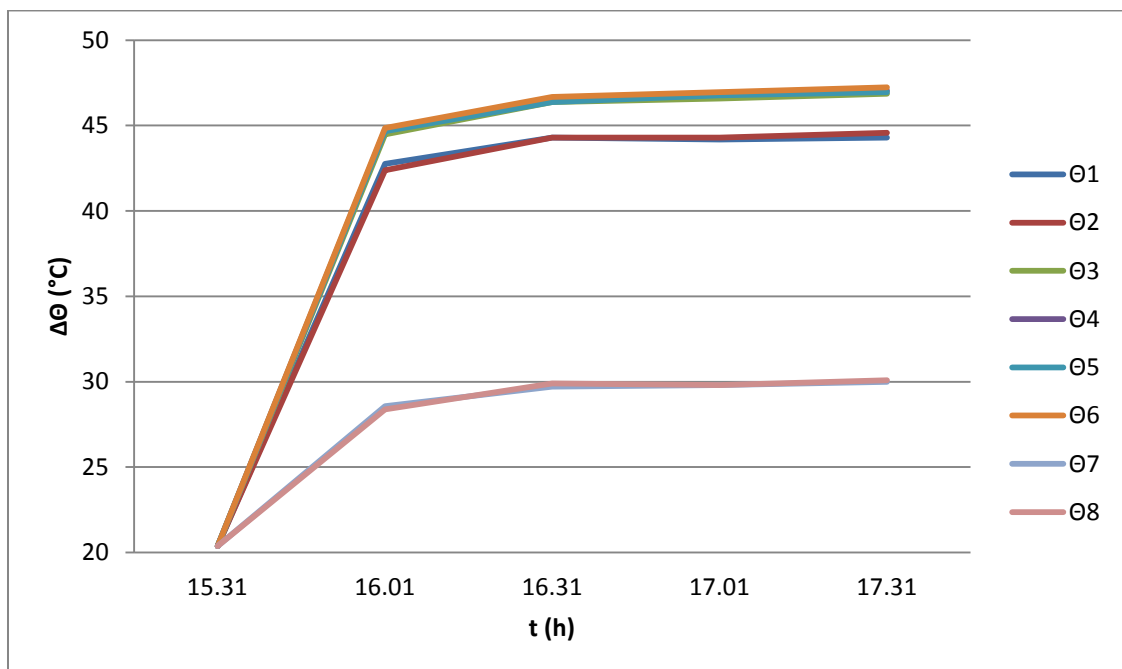


Σχήμα 4.1.9: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 310 A, 3^{ου} ίδιου συνδέσμου

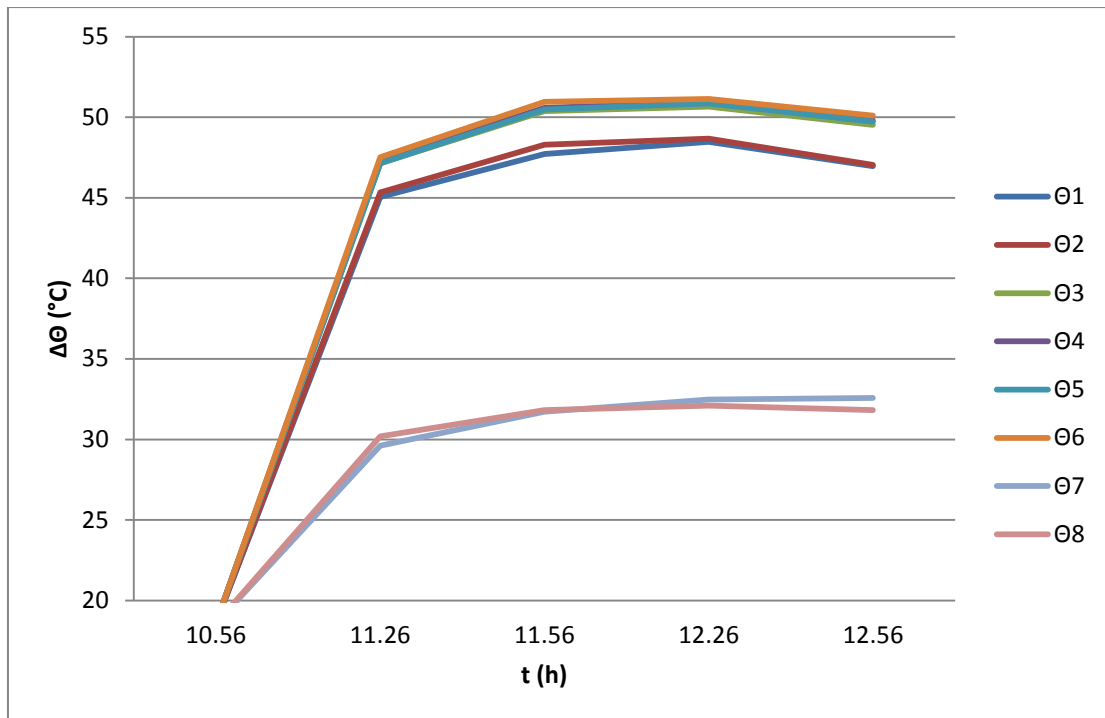
4.2. Μετρήσεις του 2^{ου} σφιγκτήρα



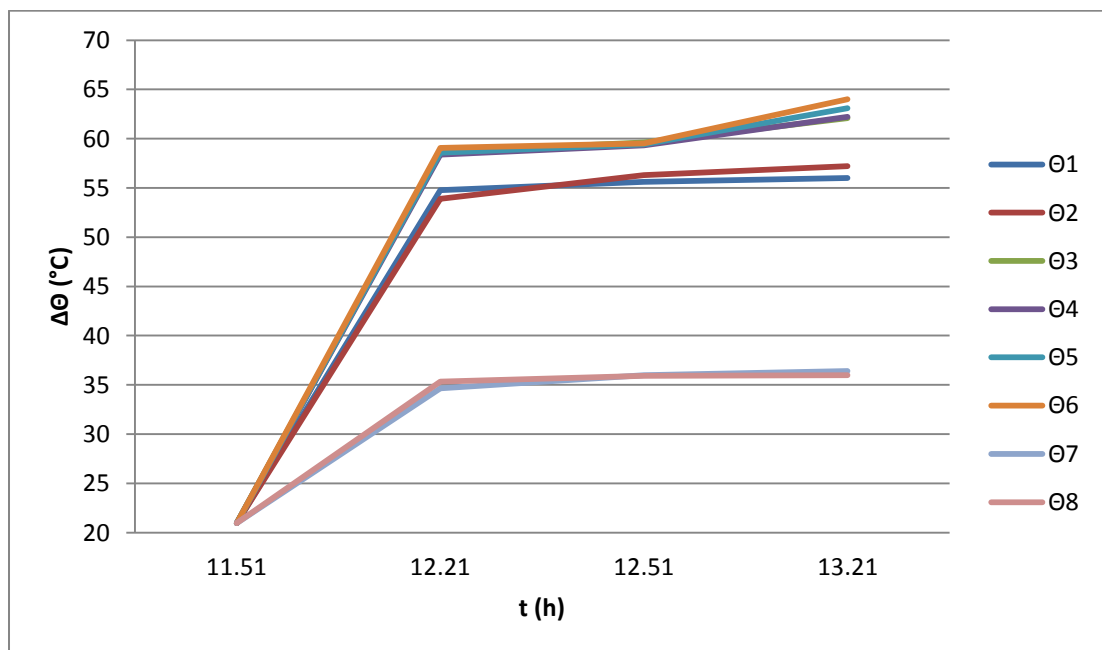
Σχήμα 4.2.1: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 220 A



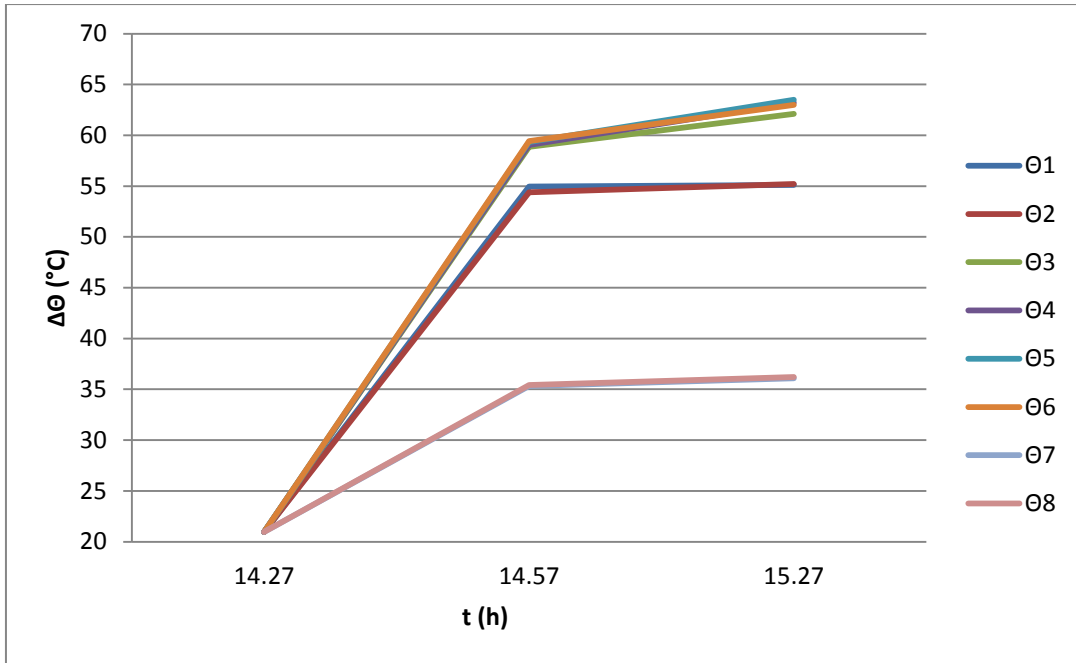
Σχήμα 4.2.2: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 290 A



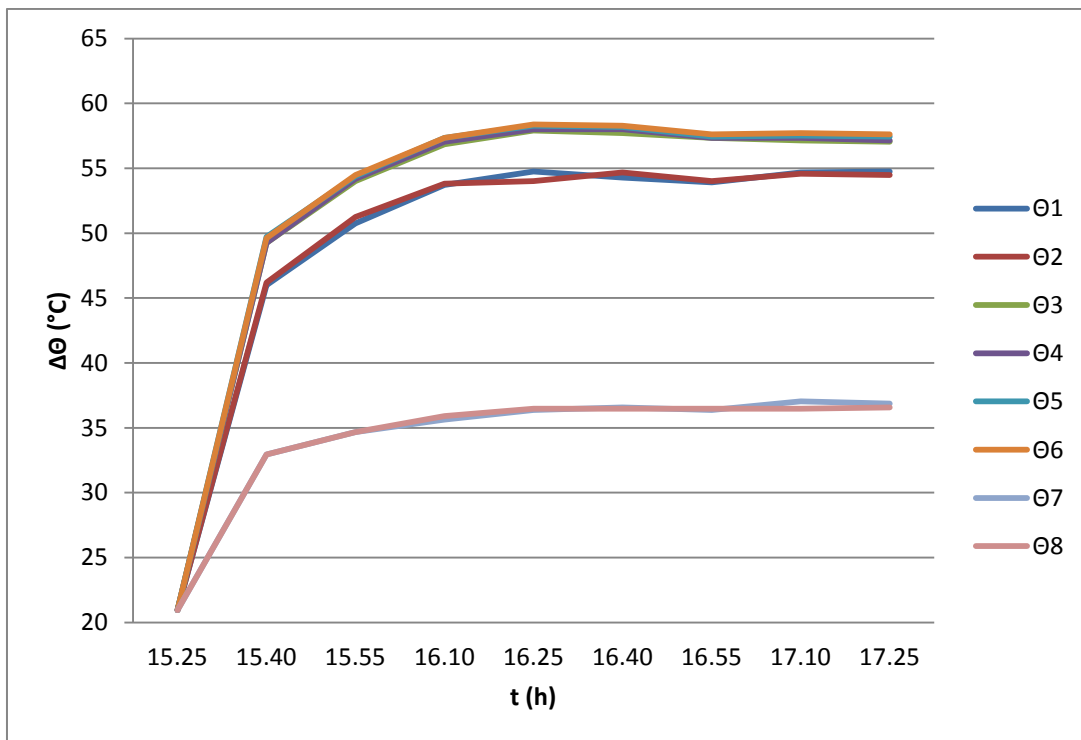
Σχήμα 4.2.3: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 310 A



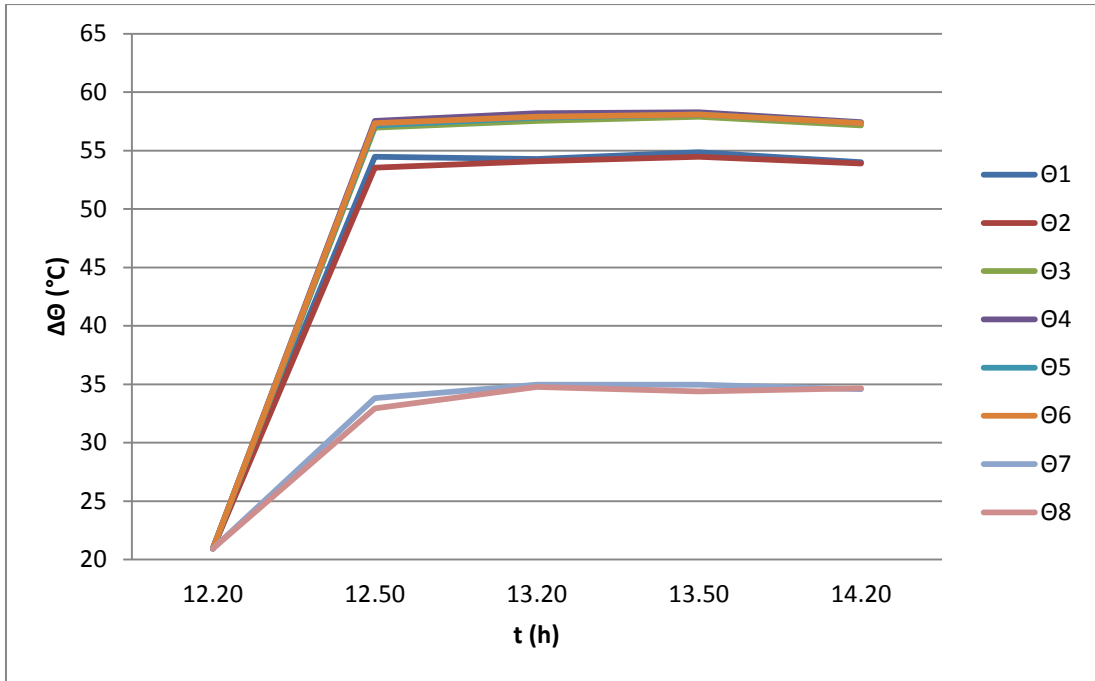
Σχήμα 4.2.4: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 350 A, ($>63,4^{\circ}\text{C}$)



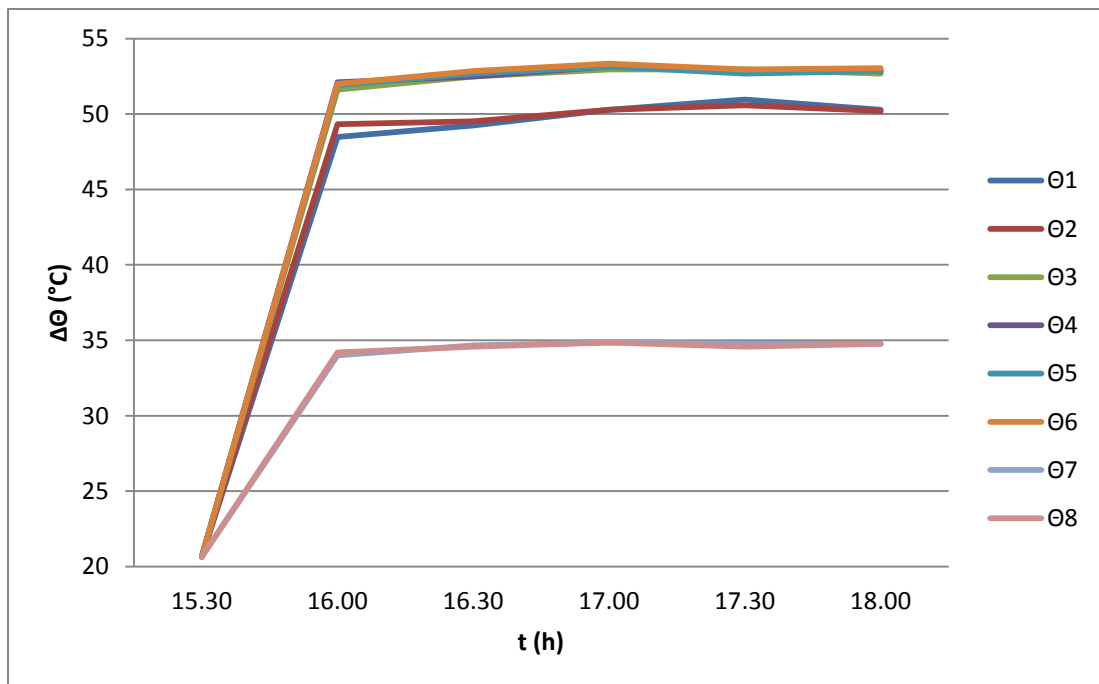
Σχήμα 4.2.5: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 340 A, ($>63,4^{\circ}\text{C}$)



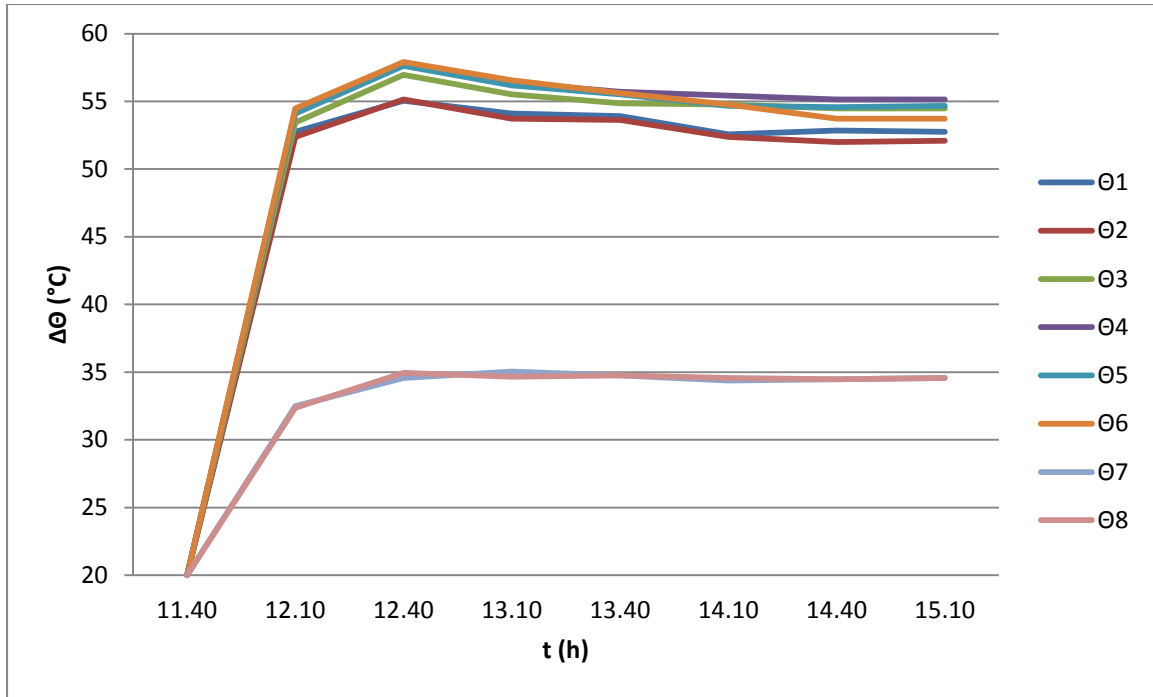
Σχήμα 4.2.6: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 320 A



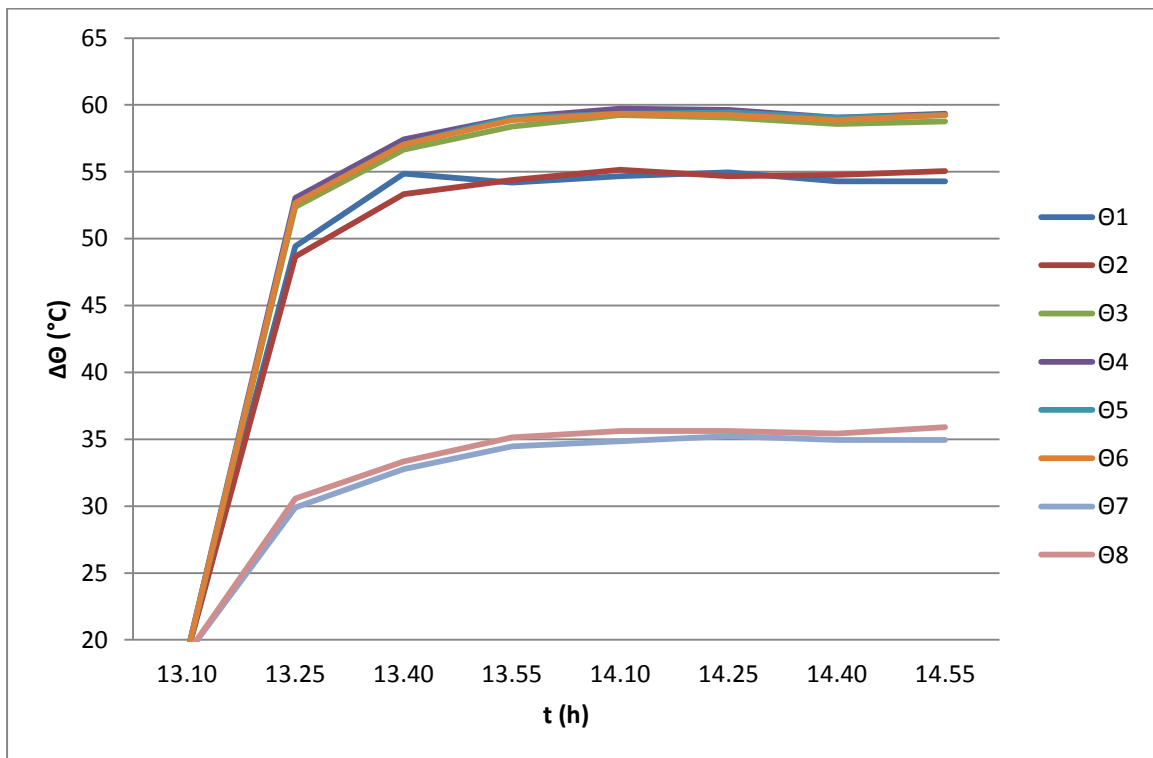
Σχήμα 4.2.7: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 320 A, 2^{ου} ίδιου συνδέσμου για επιβεβαίωση



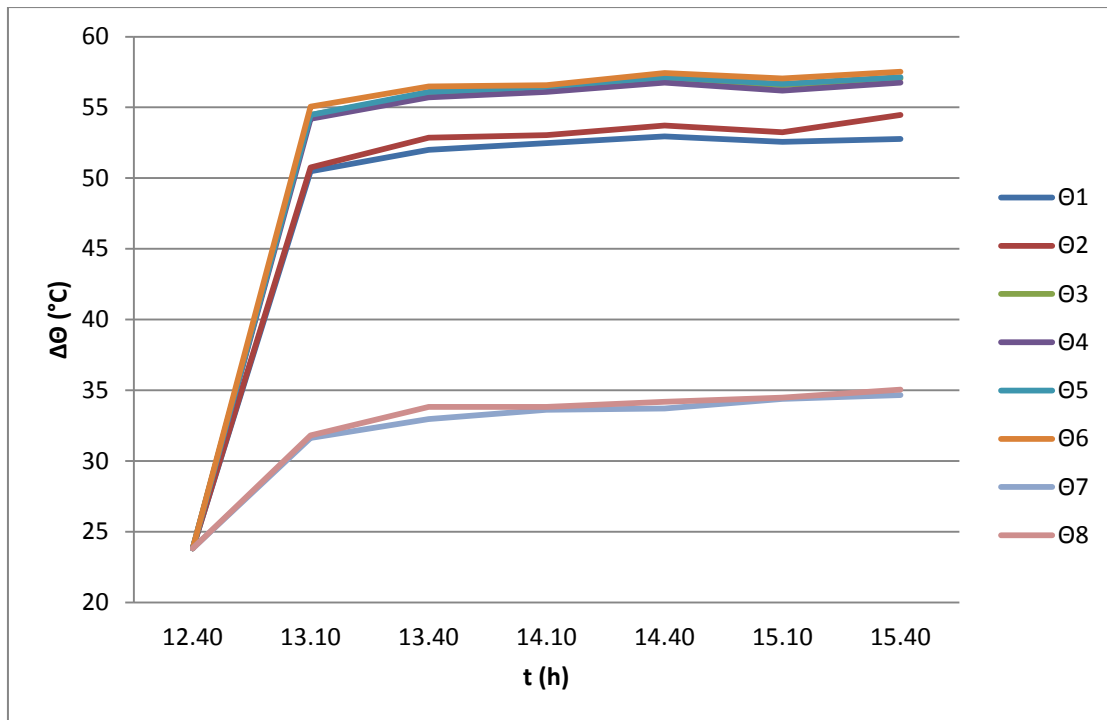
Σχήμα 4.2.8: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 320 A, 3^{ου} ίδιου συνδέσμου για επιβεβαίωση



Σχήμα 4.2.9: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 330 A, 3^{ου} ίδιου συνδέσμου 1^η επανάληψη

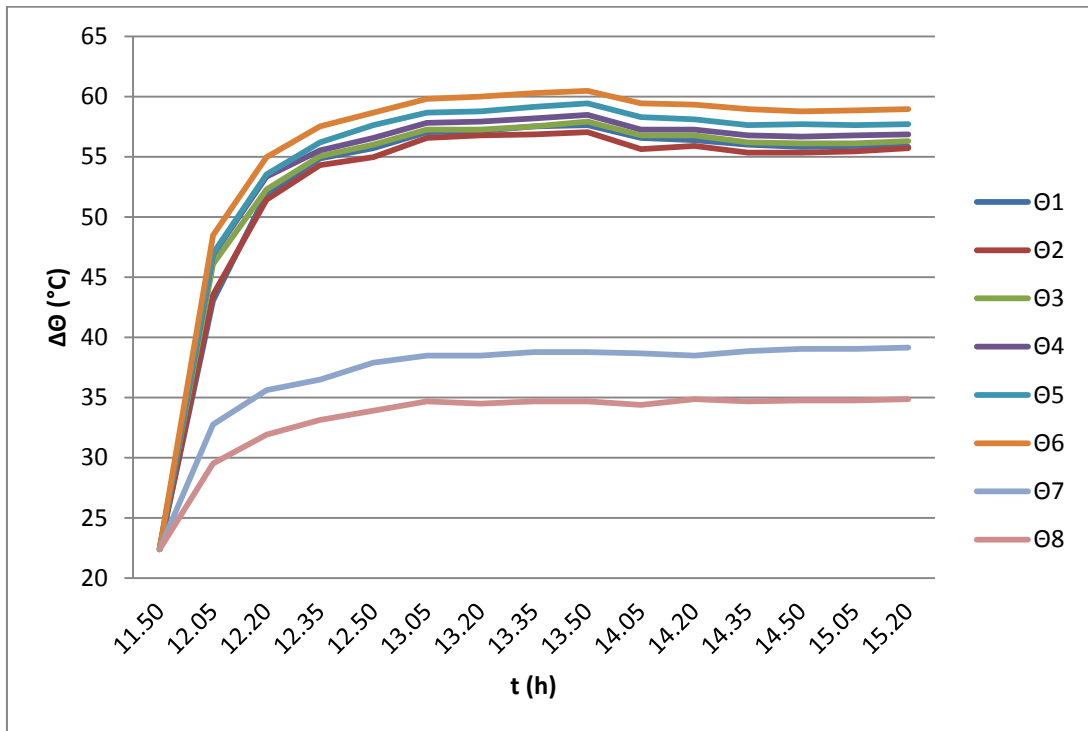


Σχήμα 4.2.10: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 340 A, 3^{ου} ίδιου συνδέσμου 2^η επανάληψη

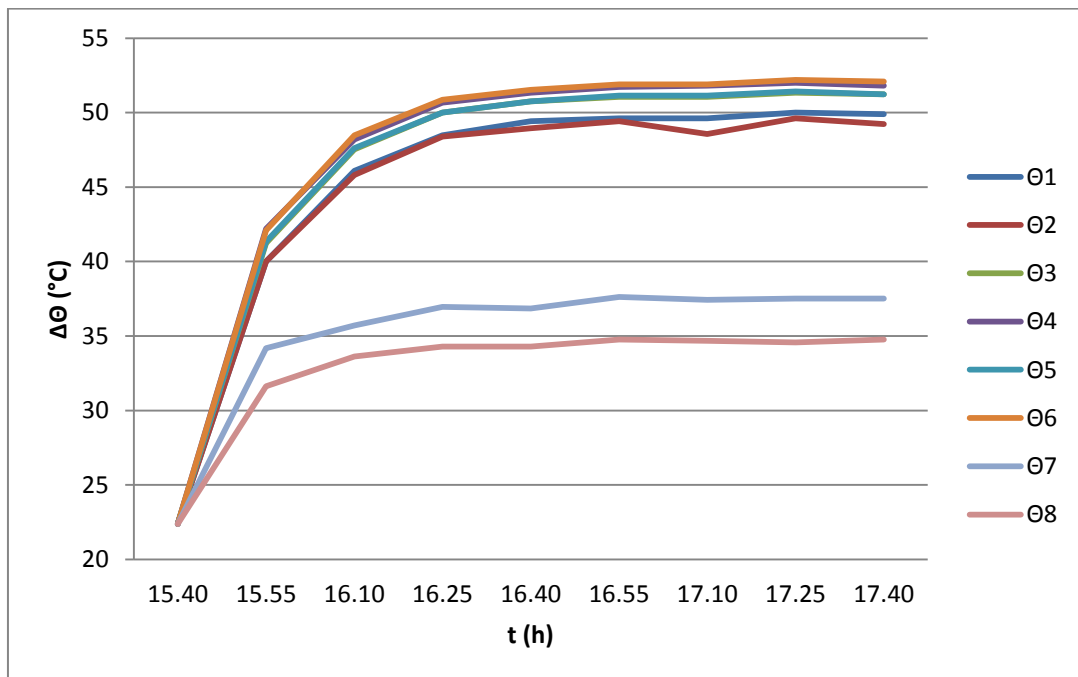


Σχήμα 4.2.11: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 340 A, 4^{ου} ίδιου συνδέσμου

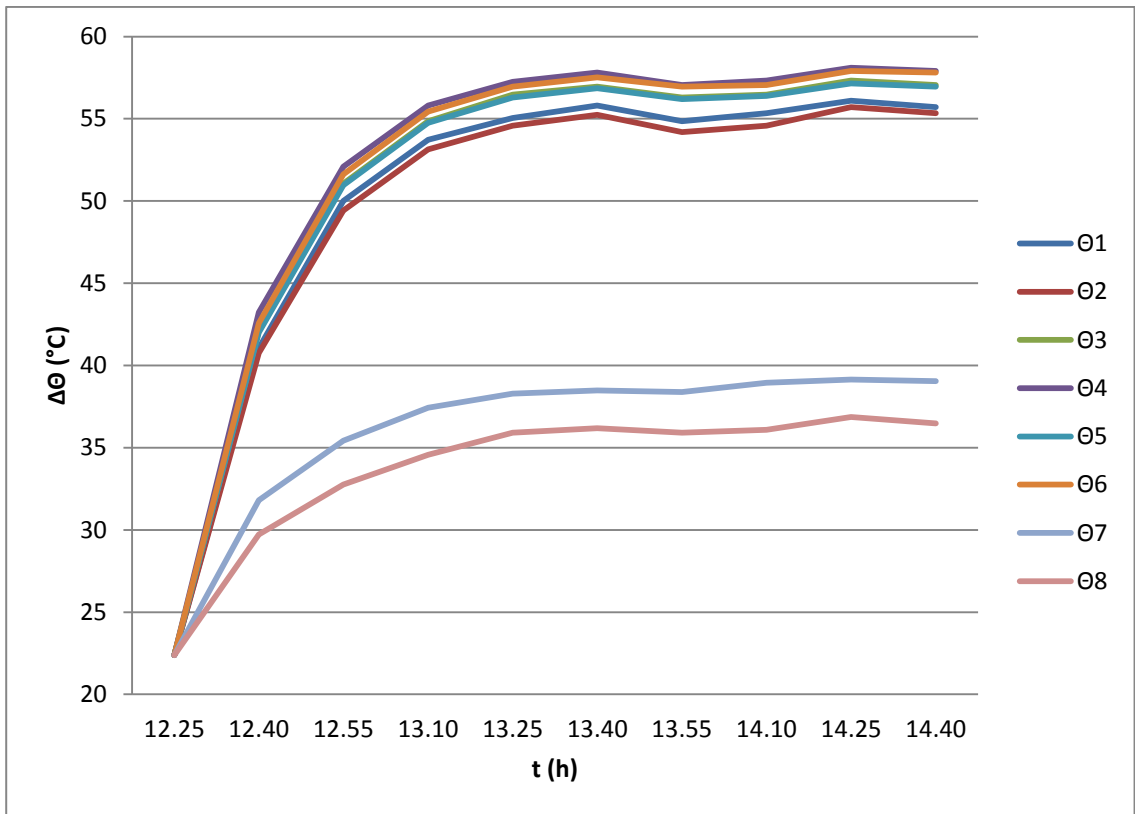
4.3. Μετρήσεις του 3ου σφικκτήρα



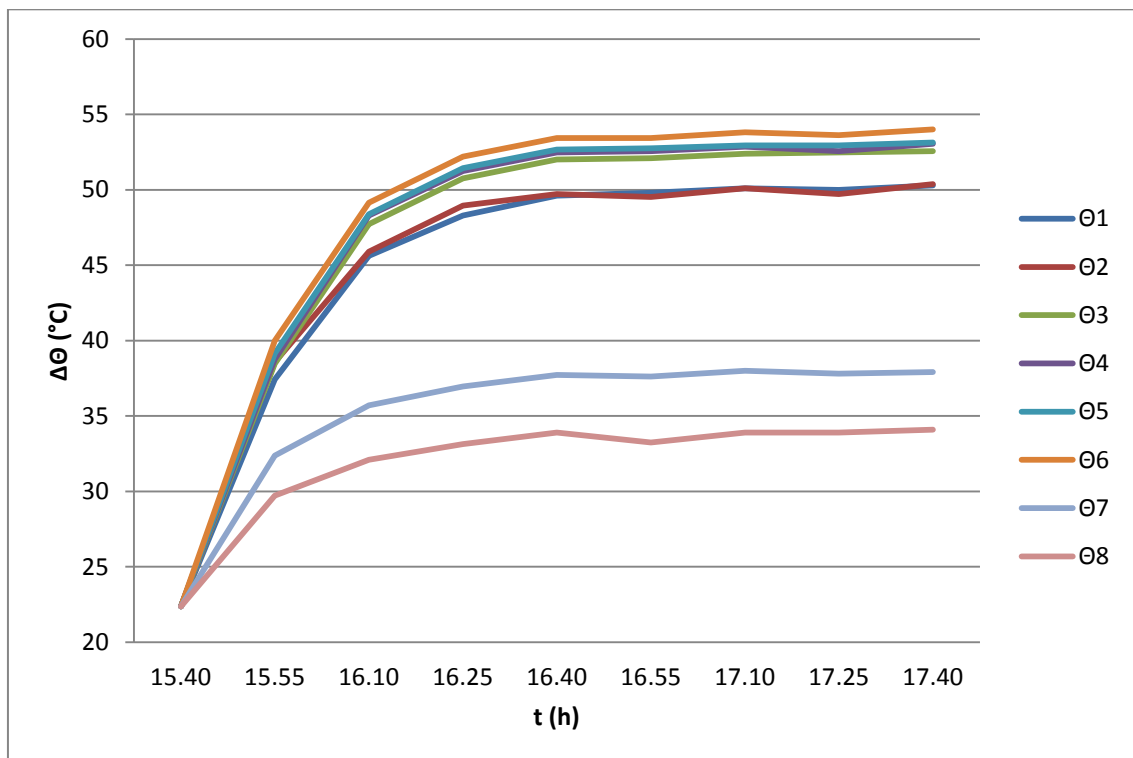
Σχήμα 4.3.1: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 400 A



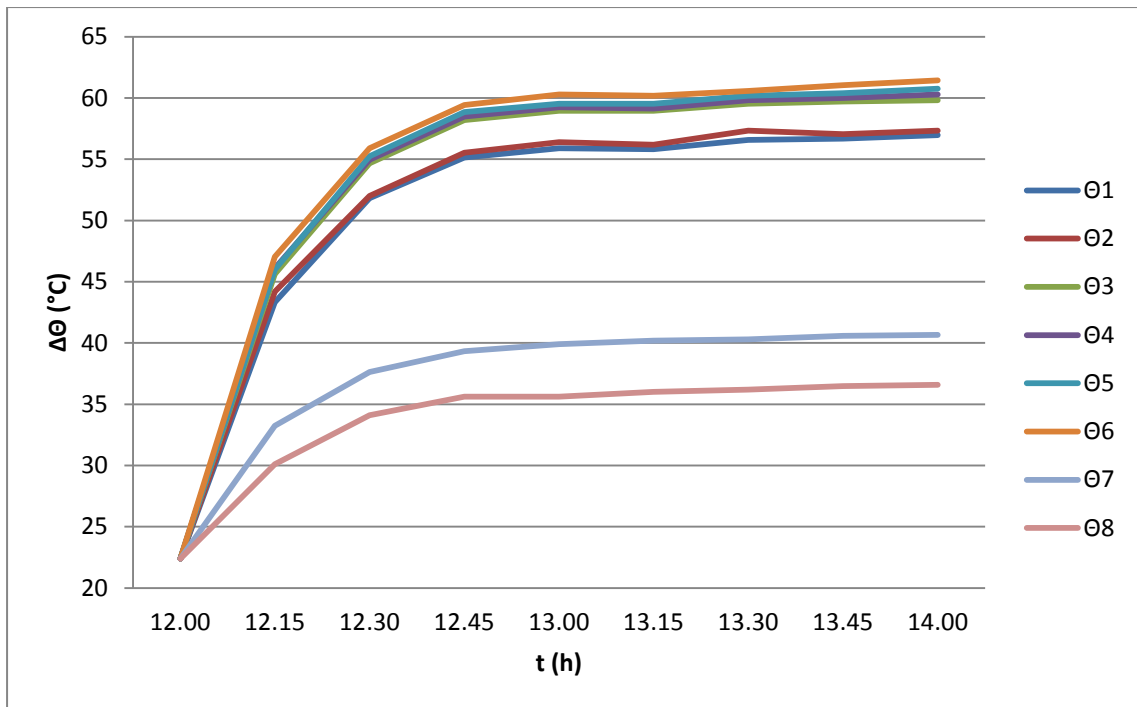
Σχήμα 4.3.2: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 400 A, 2^{ου} ίδιου συνδέσμου για επιβεβαίωση



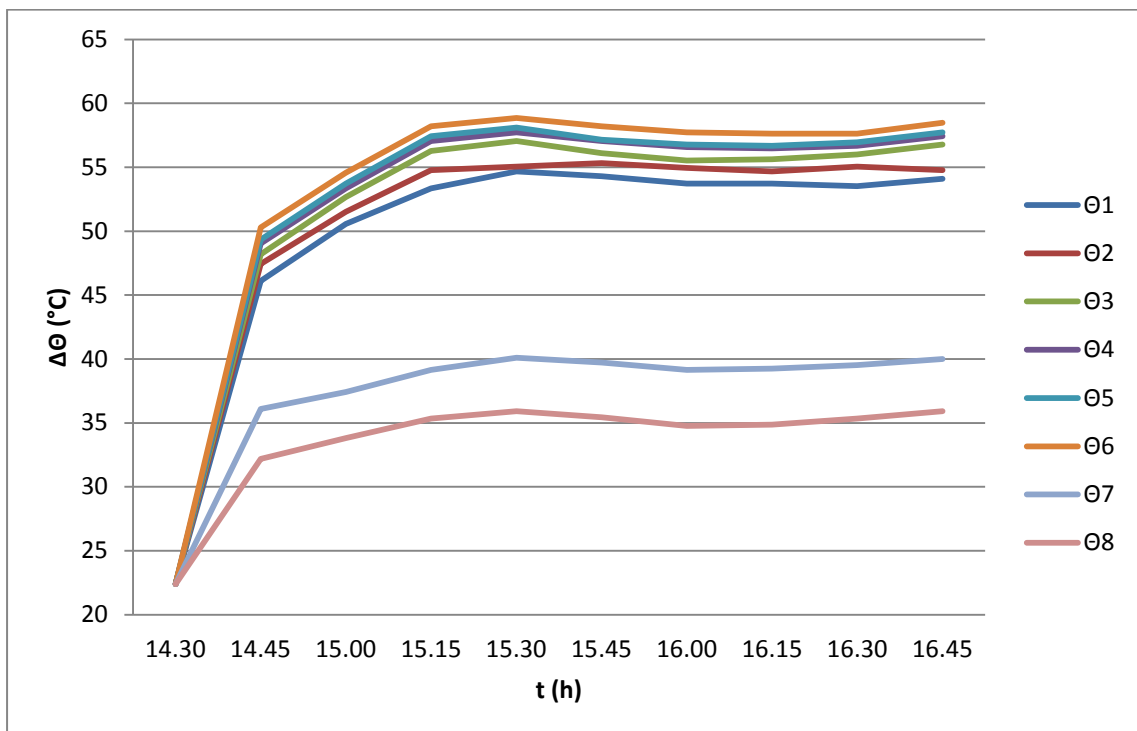
Σχήμα 4.3.3: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 420 A, 2^{ου} ίδιου συνδέσμου 1^η επανάληψη



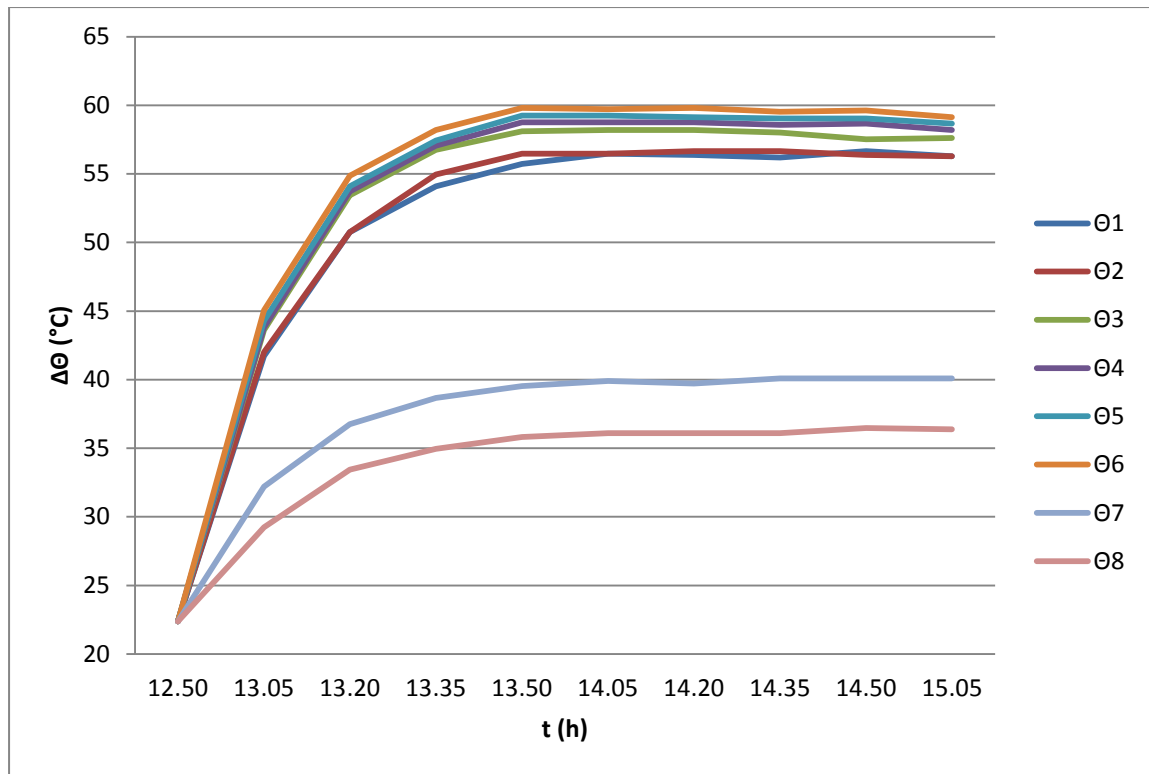
Σχήμα 4.3.4: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 400 A, 3^{ου} ίδιου συνδέσμου για επιβεβαίωση



Σχήμα 4.3.5: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 420 A, 3^{ου} ίδιου συνδέσμου 1^η επανάληψη, (>63,4°C)



Σχήμα 4.3.6: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 410 A, 3^{ου} ίδιου συνδέσμου 2^η επανάληψη



Σχήμα 4.3.7: Μέτρηση $\Delta\theta$ για ρεύμα 410 A, 3^{ου} ίδιου συνδέσμου για επιβεβαίωση

5. Συμπεράσματα και Σχόλια

5.1. Συμπεράσματα των μετρήσεων

Από τα διαγράμματα του προηγούμενου κεφαλαίου βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα για τον κάθε σφικτήρα:

1^{ος} Σφικτήρας

Τα 310 A είναι η ονομαστική τιμή του συνδέσμου. Εξετάστηκαν για επιβεβαίωση κι άλλοι δύο ίδιοι σφικτήρες με μικρές βέβαια αποκλίσεις στις τιμές θερμοκρασίας.

2^{ος} Σφικτήρας

Στον 2^ο σφικτήρα παρατηρείται ότι από τους τέσσερις ίδιους συνδέσμους, το ονομαστικό των δύο είναι 320 A και των άλλων δύο 340 A.

3^{ος} Σφικτήρας

Στον 3^ο σφικτήρα παρατηρείται ότι και οι τρεις ίδιοι σύνδεσμοι αυτού του τύπου έχουν διαφορετικό ονομαστικό ρεύμα. Ο ένας στα 400 A, ο δεύτερος στα 420 A και ο τρίτος στα 410 A.

5.2. Γενικά Συμπεράσματα

Παρατηρείται ότι το ονομαστικό όλων των σφικτήρων που μετρήθηκαν, είναι πολύ πάνω από τη μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση αγωγών. Έτσι οι σφικτήρες που χρησιμοποιούνται για το δίκτυο μέσης τάσης δεν καταπονούνται ακόμη και αν οι αγωγοί λειτουργούν υπό πλήρες φορτίο. Επομένως, μπορεί να θεωρηθούν ικανοποιητικοί στην λειτουργία τους και ίσως για αυτό το λόγο δεν έχει ορισθεί στις προδιαγραφές ονομαστικό ρεύμα γι' αυτούς. Βέβαια κατά τις μετρήσεις αυτής της διπλωματικής εργασίας η ροπή σύσφιξης διατηρήθηκε σταθερή στα 20 Nm, πράγμα που δεν είναι βέβαιο ότι συμβαίνει και στην πράξη αφού κι αυτό δεν καθορίζεται στις προδιαγραφές.

Από τις μετρήσεις που έγιναν φαίνεται ότι το ονομαστικό ρεύμα δεν είναι ίδιο για όλους τους σφικτήρες ίδιου τύπου. Το εύρος της διαφοράς, μάλιστα, μεταξύ ίδιων συνδέσμων μπορεί να φτάσει και το 10 % των τιμών του ονομαστικού ρεύματος. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι οι σύνδεσμοι δεν υπόκεινται σε δοκιμές υπερθέρμανσης κατά την παραγωγική διαδικασία αφού δεν υπάρχουν προδιαγραφές για το ονομαστικό ρεύμα τους. Έτσι επειδή υπάρχουν αυτές οι διαφορές, καλό θα

ήταν να καθοριστεί στις προδιαγραφές το ονομαστικό ρεύμα ώστε η συμπεριφορά ίδιου τύπου σφικτήρων να είναι σταθερή.

Επίσης στα σημεία ροπή σύσφιξης των αγωγών, δηλαδή μεταξύ αγωγού και συνδέσμου παρατηρείται πάντα μεγαλύτερη θερμοκρασία. Στα σημεία Θ3, Θ4, Θ5, Θ6 παρατηρήθηκε μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας. Οι μεταξύ τους αποκλίσεις ήταν πολύ μικρές και αυτό μπορεί να οφείλεται στην επαφή των αισθητήρων μεταξύ αγωγού-συνδέσμου και επίσης στις αλλαγές συνθηκών του περιβάλλοντος χώρου. Επιπρόσθετα ως παράγοντας σφάλματος θα μπορούσαν να θεωρηθούν τα ίδια τα ψηφιακά θερμοστοιχεία τα οποία αν και βαθμονομήθηκαν, περιείχαν κάποιο ποσοστό σφάλματος. Έτσι λοιπόν όλα τα παραπάνω επιβεβαιώνουν την θεωρία, όπου η μέγιστη θερμοκρασία κάθε επαφής εμφανίζεται στην περιοχή κοντά στην αντίσταση στένωσης.

Επίσης τα σημεία πάνω στον σφικτήρα (Θ1, Θ2) βρίσκονται κοντά στην αντίσταση στένωσης και έτσι επηρεάζονται με αποτέλεσμα να εμφανίζουν αυξημένη θερμοκρασία, αλλά λόγω του περιβάλλοντα αέρα ψύχονται και έτσι είναι λογικό να είναι λίγο χαμηλότερη η θερμοκρασία σε σχέση με τα σημεία σύσφιξης των αγωγών.

Βιβλιογραφία

1. Παπαδόπουλος Ζαχαρίας ' Εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας στους Μ/Σ Διανομής' Διπλωματική Εργασία Εκδόσεις Ε.Μ.Π 2006.
2. Π.Δ Μπούρκας ' Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων' Εκδόσεις Ε.Μ.Π
3. Χατζηαλεξάνδρου Μάριος 'Συνέπειες της αποκοπής αγωγού ΑΙ 50mm² που ηλεκτροδοτείται από υποσταθμό μέσης τάσης 250kVA και 400kVA' Διπλωματική εργασία Εκδόσεις Ε.Μ.Π 2009.
4. Πέτρος Κατωπόδης ' Μηχανική και Διηλεκτρική Αντοχή πυλώνων υψηλής και υπερυψηλής τάσης' Διπλωματική Εργασία Εκδόσεις Ε.Μ.Π 2006.
5. Νικολακοπούλου Αικατερίνη 'Μέτρηση αξιολόγησης Μόνιμων Ηλεκτρικών Συνδέσμων κυκλωμάτων Γειώσεων' Διπλωματική Εργασία Εκδόσεις Ε.Μ.Π 2005.
6. Κυριάκου Ν. Βασιλάκη ' Διερεύνηση της επίδρασης της ροπής σύσφιξης στην αξιοπιστία των στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων' Διπλωματική Εργασία Εκδόσεις Ε.Μ.Π
7. Καρατζάς-Πλιάκας Αντώνιος 'Θερμική καταπόνηση για διάφορες ροπές σύσφιξης σε σφικτήρα διατομής 35mm² εναέριου δικτύου μέσης τάσης' Διπλωματική Εργασία Εκδόσεις Ε.Μ.Π 2012.
8. Αικατερίνη Δ.Πολυκράτη 'Συμπεριφορά Στατικών Ηλεκτρικών Συνδέσμων υπό ταχέως μεταβαλλόμενες Ηλεκτρικές Καταπονήσεις' Διδακτορική Διατριβή Εκδόσεις Ε.Μ.Π 2005.

Παράρτημα Α

Στο παράρτημα αυτό βρίσκονται οι αναλυτικοί πίνακες των μετρήσεων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία.

1^{ος} σφιγκτήρας

RIVIMETAL AI 50-70 GR-261-A								
Δοκιμή στα 150 A								
	1-T1	1-T2	2-T2	2-T1	3-T1	3-T2	4-T1	4-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
0.00	21,5	21,6	22,1	21,9	21,7	21,7	20,8	20,9
0.30	28,0	27,4	29,0	29,0	28,8	28,7	23,6	23,4
1.00	30,1	29,8	32,0	32,0	31,7	31,5	24,9	25,0
1.30	31,8	31,8	33,7	34,0	33,7	33,6	25,8	25,7
2.00	32,1	32,2	33,9	34,0	33,7	33,6	25,6	25,9
2.30	32,4	32,4	34,4	34,5	34,1	34,0	26,1	26,3
Δοκιμή στα 175 A								
	1-T1	1-T2	2-T2	2-T1	3-T1	3-T2	4-T1	4-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
0.00	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6
0.30	34,6	34,6	37,2	37,3	36,9	36,6	28,2	27,8
1.00	36,2	36,2	38,5	38,7	38,2	37,9	28,6	28,6
1.30	36,6	36,4	39,0	39,2	38,7	38,4	28,7	28,7
2.00	36,6	36,4	38,7	39,0	38,4	38,1	28,7	28,7
Δοκιμή στα 340 A								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	4-T1	4-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
0.00	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7
0.30	Θερμοκρασίες πάνω από τις επιθυμητές.							

Δοκιμή στα 320 A								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	4-T1	4-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
0.00	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
0.30	θερμοκρασίες πάνω από τις επιθυμητές.							
Δοκιμή στα 290 A								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	4-T1	4-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
0.00	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9
0.30	51,5	52,2	54,3	54,3	54,4	54,1	32,4	32,4
1.00	53,4	53,1	56,0	56,0	56,0	55,7	32,9	32,9
1.30	53,8	53,2	55,4	55,4	55,4	55,3	33,3	33,2
2.00	54,1	53,3	56,3	56,2	56,3	56,2	33,6	33,6
2.30								
Δοκιμή στα 300 A								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	4-T1	4-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
0.00	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9
0.30	55,0	54,9	56,5	56,4	56,6	56,2	32,0	31,7
1.00	57,8	57,4	59,7	59,6	59,8	59,6	34,1	34,0
1.30	57,2	57,1	59,2	59,1	59,2	59,1	32,8	32,8
2.00	57,4	57,9	59,6	59,5	59,6	59,4	33,2	33,4

Δοκιμή στα 310 A								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	4-T1	4-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
11.56	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
12.26	57,2	57,2	59,8	59,8	59,8	59,4	32,1	32,8
12.56	58,8	58,3	61,6	61,6	61,7	61,3	33,2	32,7
13.26	59,8	59,8	62,3	62,2	62,3	62,0	34,4	34,5
13.56	59,8	59,4	62,4	62,3	62,4	62,1	34,1	34,6
14.26	60,5	60,0	62,8	62,8	62,8	62,7	35,3	35,3
Δοκιμή στα 310 A 2ου ίδιου συνδέσμου για επιβεβαίωση								
	1-T1	1-T2	3-T1	3-T2	2-T2	2-T1	4-T1	4-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
0.00	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
0.30	53,4	53,6	56,5	56,6	56,6	56,7	34,3	34,6
1.00	55,8	55,6	58,7	58,7	58,7	58,8	35,0	35,1
1.30	56,4	56,5	59,3	59,3	59,4	59,4	36,0	35,8
2.00	57,6	57,6	59,7	59,7	59,8	59,9	36,0	36,0
2.30	57,5	57,5	59,1	59,1	59,2	59,2	35,9	35,6
3.00	57,6	57,4	58,8	58,8	58,9	59,0	36,0	35,8
Δοκιμή στα 310 A 3ου ίδιου συνδέσμου για επιβεβαίωση								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	4-T1	4-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
12.49	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6
13.19	55,9	55,6	57,6	57,7	57,2	57,4	32,2	32,6
13.49	59,2	58,5	61,3	61,3	60,9	61,1	34,1	34,7
14.19	60,3	59,9	62,1	62,1	61,7	61,9	35,2	34,9
14.49	59,7	59,7	61,7	61,5	61,1	61,2	35,6	35,5
15.19	59,9	60,1	62,1	62,0	61,7	61,9	35,5	35,4

2^{ος} Σφικκτήρας

RIVIMETAL, AAAC 70 - ACSR 35, GR-261-A								
Δοκιμή στα 220 A								
	1-T1	1-T2	3-T1	3-T2	2-T1	2-T2	4-T1	4-T1
	01	02	03	04	05	06	07	08
12.46	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8
13.16	33,5	33	33,5	34,5	34,5	34,6	24,5	24,3
13.46	34,7	34,8	35,8	35,9	35,8	36,1	25,7	25,6
14.16	35,8	35,2	36,6	36,8	36,7	36,9	25,8	25,9
14.46	36,2	35,6	36,9	37,1	37,1	37,2	26,3	26,4
15.16	35,1	35,3	36,1	36,2	36,1	36,3	26,4	26,2
Δοκιμή στα 290 A								
	1-T1	1-T2	3-T1	3-T2	2-T1	2-T2	4-T1	4-T1
	01	02	03	04	05	06	07	08
15.31	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4
16.01	44,9	44,5	46,7	47	46,9	47,1	30	29,8
16.31	46,5	46,5	48,7	48,9	48,7	49	31,2	31,4
17.01	46,4	46,5	48,9	49,2	49,1	49,3	31,3	31,3
17.31	46,5	46,8	49,2	49,4	49,3	49,6	31,5	31,6
Δοκιμή στα 310 A								
	1-T1	1-T2	3-T1	3-T2	2-T1	2-T2	4-T1	4-T1
	01	02	03	04	05	06	07	08
10.56	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
11.26	47,3	47,6	49,5	49,7	49,5	49,9	31,1	31,7
11.56	50,1	50,7	52,9	53,1	53	53,5	33,3	33,4
12.26	50,9	51,1	53,2	53,5	53,4	53,7	34,1	33,7
12.56	49,3	49,4	52	52,3	52,2	52,6	34,2	33,4

Δοκιμή στα 350 A								
	1-T1	1-T2	3-T1	3-T2	2-T1	2-T2	4-T1	4-T1
	01	02	03	04	05	06	07	08
11.51	22	22	22	22	22	22	22	22
12.21	57,5	56,6	61,6	61,3	61,5	62	36,4	37,1
12.51	58,4	59,1	62,6	62,3	62,4	62,5	37,8	37,7
13.21	Θερμοκρασίες πάνω από τις επιθυμητές, >63,4ο C							
Δοκιμή στα 340 A								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	4-T1	4-T1
	01	02	03	04	05	06	07	08
14.27	22	22	22	22	22	22	22	22
14.57	57,7	57,1	61,8	62	62,3	62,4	37,1	37,2
15.27	Θερμοκρασίες πάνω από τις επιθυμητές, >63,4ο C							
Δοκιμή στα 320 A								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	3-T1	3-T1
	01	02	03	04	05	06	07	08
15.25	22	22	22	22	22	22	22	22
15.40	48,3	48,5	51,7	51,7	52,2	52,1	34,6	34,6
15.55	53,3	53,8	56,7	56,9	57,1	57,2	36,4	36,4
16.10	56,4	56,5	59,7	59,9	60,2	60,2	37,4	37,7
16.25	57,5	56,7	60,8	60,9	61,2	61,3	38,2	38,3
16.40	57	57,4	60,6	60,9	61,1	61,2	38,4	38,3
16.55	56,6	56,7	60,2	60,2	60,3	60,5	38,2	38,3
17.10	57,4	57,3	60	60,2	60,4	60,6	38,9	38,3
17.25	57,5	57,2	59,9	60	60,3	60,5	38,7	38,4

Δοκιμή στα 320 A 2ου ίδιου συνδέσμου για επιβεβαίωση								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	3-T1	3-T1
	01	02	03	04	05	06	07	08
12.20	22	22	22	22	22	22	22	22
12.50	57,2	56,2	59,8	60,4	60	60,2	35,5	34,6
13.20	57	56,8	60,4	61,1	60,7	60,8	36,7	36,5
13.50	57,6	57,2	60,8	61,2	61	61	36,7	36,1
14.20	56,7	56,6	60	60,3	60,2	60,2	36,3	36,4
Δοκιμή στα 320 A 3ου ίδιου συνδέσμου για επιβεβαίωση								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	3-T1	3-T1
	01	02	03	04	05	06	07	08
15.30	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7
16.00	50,9	51,8	54,2	54,7	54,5	54,6	35,7	35,9
16.30	51,7	52	55,1	55,1	55,3	55,5	36,4	36,3
17.00	52,8	52,8	55,6	55,8	55,8	56	36,6	36,6
17.30	53,5	53,1	55,6	55,5	55,3	55,6	36,5	36,3
18.00	52,8	52,7	55,3	55,5	55,5	55,7	36,5	36,5
Δοκιμή στα 320 A 3ου ίδιου συνδέσμου 1η επανάληψη								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	3-T1	3-T1
	01	02	03	04	05	06	07	08
11.40	21	21	21	21	21	21	21	21
12.10	55,4	55	56,1	57	56,8	57,2	34,1	34
12.40	57,8	57,9	59,8	60,7	60,5	60,8	36,3	36,7
13.10	56,8	56,4	58,3	59,2	59	59,4	36,8	36,4
13.40	56,6	56,3	57,6	58,5	58,3	58,4	36,5	36,5
14.10	55,2	55	57,5	58,2	57,4	57,5	36,1	36,3
14.40	55,5	54,6	57,2	57,9	57,3	56,4	36,2	36,2
15.10	55,4	54,7	57,2	57,9	57,4	56,4	36,3	36,3

Δοκιμή στα 340 A 3ου ίδιου συνδέσμου 2η επανάληψη								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	3-T1	3-T1
	01	02	03	04	05	06	07	08
13.10	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9
13.25	51,9	51,1	55	55,7	55,3	55,3	31,4	32,1
13.40	57,6	56	59,5	60,3	59,9	59,9	34,4	35
13.55	56,9	57,1	61,3	62	62	61,8	36,2	36,9
14.10	57,4	57,9	62,2	62,7	62,3	62,3	36,6	37,4
14.25	57,7	57,4	62	62,6	62,4	62,2	37	37,4
14.40	57	57,5	61,5	62	62	61,8	36,7	37,2
14.55	57	57,8	61,7	62,3	62,2	62,2	36,7	37,7
Δοκιμή στα 340 A 4ου ίδιου συνδέσμου για επιβεβαίωση								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	3-T1	3-T1
	01	02	03	04	05	06	07	08
12.40	25	25	25	25	25	25	25	25
13.10	53	53,3	57,2	56,9	57,2	57,8	33,2	33,4
13.40	54,6	55,5	58,8	58,5	58,9	59,3	34,6	35,5
14.10	55,1	55,7	59,3	58,9	59,3	59,4	35,3	35,5
14.40	55,6	56,4	59,8	59,6	60	60,3	35,4	35,9
15.10	55,2	55,9	59,4	59	59,5	59,9	36,1	36,2
15.40	55,4	57,2	59,9	59,6	60	60,4	36,4	36,8

3^{ος} Σφικκτήρας

RIVIMENTAL GR261-A, ACSR-95, AAAC-185								
Δοκιμή στα 400Α								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	3-T1	3-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
11.50	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
12.05	45,2	45,7	48,4	49,2	49,3	50,9	34,4	31
12.20	54,5	54	54,9	56	56,2	57,7	37,4	33,5
12.35	57,6	57	57,8	58,3	59	60,4	38,3	34,8
12.50	58,5	57,7	58,8	59,4	60,5	61,6	39,8	35,6
13.05	59,9	59,4	60,1	60,7	61,6	62,8	40,4	36,4
13.20	60	59,6	60,1	60,8	61,7	63	40,4	36,2
13.35	60,4	59,7	60,4	61,1	62,1	63,3	40,7	36,4
13.50	60,5	59,9	60,8	61,4	62,4	63,5	40,7	36,4
14.05	59,4	58,4	59,6	60,1	61,2	62,4	40,6	36,1
14.20	59,2	58,7	59,6	60,1	61	62,3	40,4	36,6
14.35	58,8	58,1	59	59,6	60,5	61,9	40,8	36,4
14.50	58,6	58,1	58,9	59,5	60,6	61,7	41	36,5
15.05	58,7	58,2	58,9	59,6	60,5	61,8	41	36,5
15.20	58,6	58,5	59,1	59,7	60,6	61,9	41,1	36,6
Δοκιμή στα 400 Α 2ου ίδιου συνδέσμου για επιβεβαίωση								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	3-T1	3-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
15.40	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
15.55	42	42	43,3	44,3	43,4	44,2	35,9	33,2
16.10	48,4	48,1	49,9	50,6	50	50,9	37,5	35,3
16.25	50,9	50,8	52,5	53,2	52,5	53,4	38,8	36
16.40	51,9	51,4	53,3	53,9	53,3	54,1	38,7	36
16.55	52,1	51,9	53,6	54,3	53,7	54,5	39,5	36,5
17.10	52,1	51	53,6	54,4	53,7	54,5	39,3	36,4
17.25	52,5	52,1	53,9	54,6	54	54,8	39,4	36,3
17.40	52,4	51,7	53,8	54,4	53,8	54,7	39,4	36,5

Δοκιμή στα 420 A 2ου ίδιου συνδέσμου 1η επανάληψη								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	3-T1	3-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
12.25	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
12.40	43,1	42,8	44,2	45,4	44,1	44,7	33,4	31,2
12.55	52,5	51,9	53,6	54,7	53,5	54,2	37,2	34,4
13.10	56,4	55,8	57,6	58,6	57,5	58,2	39,3	36,3
13.25	57,8	57,3	59,3	60,1	59,1	59,8	40,2	37,7
13.40	58,6	58	59,8	60,7	59,7	60,4	40,4	38
13.55	57,6	56,9	59,1	59,9	59	59,8	40,3	37,7
14.10	58,1	57,3	59,3	60,2	59,2	59,9	40,9	37,9
14.25	58,9	58,5	60,2	61	60	60,8	41,1	38,7
14.40	58,5	58,1	59,9	60,8	59,8	60,7	41	38,3
Δοκιμή στα 400 A 3ου ίδιου συνδέσμου για επιβεβαίωση								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	3-T1	3-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
15.40	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
15.55	39,3	40,5	40,4	40,7	41,1	42	34	31,2
16.10	47,9	48,2	50,1	50,7	50,8	51,6	37,5	33,7
16.25	50,7	51,4	53,3	53,8	54	54,8	38,8	34,8
16.40	52,1	52,2	54,6	55,1	55,3	56,1	39,6	35,6
16.55	52,3	52	54,7	55,2	55,4	56,1	39,5	34,9
17.10	52,6	52,6	55	55,5	55,6	56,5	39,9	35,6
17.25	52,5	52,2	55,1	55,2	55,6	56,3	39,7	35,6
17.40	52,8	52,9	55,2	55,7	55,8	56,7	39,8	35,8
Δοκιμή στα 420 A 3ου ίδιου συνδέσμου 1η επανάληψη								
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	3-T1	3-T1
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
12.00	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
12.15	45,5	46,4	47,9	48,4	48,3	49,4	34,9	31,6
12.30	54,4	54,6	57,4	57,7	58	58,7	39,5	35,8
12.45	57,9	58,3	61,1	61,4	61,8	62,4	41,3	37,4
13.00	58,7	59,2	61,9	62,2	62,5	63,3	41,9	37,4
13.15	58,6	59	61,9	62,1	62,5	63,2	42,2	37,8
13.30	59,4	60,2	62,5	62,8	63,2	63,6	42,3	38
13.45	59,5	59,9	62,7	63	63,4	64,1	42,6	38,3
14.00	59,8	60,2	62,8	63,3	63,8	64,5	42,7	38,4

Δοκιμή στα 410 A 3ου ίδιου συνδέσμου 2η επανάληψη									
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	3-T1	3-T1	
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8	
14.30	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
14.45	48,4	49,8	50,6	51,5	51,8	52,8	37,9	33,8	
15.00	53,1	54,1	55,3	56	56,4	57,3	39,3	35,5	
15.15	56	57,5	59,1	59,9	60,3	61,1	41,1	37,1	
15.30	57,4	57,8	59,9	60,6	61	61,8	42,1	37,7	
15.45	57	58,1	58,9	59,9	60	61,1	41,7	37,2	
16.00	56,4	57,7	58,3	59,4	59,6	60,6	41,1	36,5	
16.15	56,4	57,4	58,4	59,3	59,5	60,5	41,2	36,6	
16.30	56,2	57,8	58,8	59,5	59,8	60,5	41,5	37,1	
16.45	56,8	57,5	59,6	60,3	60,6	61,4	42	37,7	
Δοκιμή στα 410 A 4ου ίδιου συνδέσμου για επιβεβαίωση									
	1-T1	1-T2	2-T1	2-T2	3-T1	3-T2	3-T1	3-T1	
	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8	
12.50	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
13.05	43,8	44,1	45,8	46	46,5	47,3	33,8	30,7	
13.20	53,3	53,3	56,1	56,4	56,8	57,6	38,6	35,1	
13.35	56,8	57,7	59,6	59,9	60,3	61,1	40,6	36,7	
13.50	58,5	59,3	61	61,7	62,2	62,8	41,5	37,6	
14.05	59,3	59,3	61,1	61,7	62,2	62,7	41,9	37,9	
14.20	59,2	59,5	61,1	61,7	62,1	62,8	41,7	37,9	
14.35	59	59,5	60,9	61,5	62	62,5	42,1	37,9	
14.50	59,5	59,2	60,4	61,6	62	62,6	42,1	38,3	
15.05	59,1	59,1	60,5	61,1	61,6	62,1	42,1	38,2	