



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Θερμικός Χαρακτηρισμός Στατικών Ηλεκτρικών Επαφών
με Χρήση Κάμερας Υπερύθρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Ηλέκτρας-Χαράς Χ. Γιασσά

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Θερμικός Χαρακτηρισμός Στατικών Ηλεκτρικών Επαφών με Χρήση Κάμερας Υπερύθρων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Ηλέκτρας-Χαράς Χ. Γιασά

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Ιουλίου 2012.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

.....

Κ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Π. Βασιλείου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Η. Αβαριτσιώτης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ηλέκτρα-Χαρά Χ. Γιασσά

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

Copyright © Ηλέκτρα-Χαρά Γιασσά, 2012.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αφορά στη θερμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών επαφών όταν διαρρέονται από εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Η συμπεριφορά αυτή μελετάται συναρτήσει της καταπόνησης της επαφής, της έντασης ρεύματος που την διαρρέει, της διατομής του καλωδίου τροφοδοσίας και του είδους του.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις ηλεκτρικές επαφές, τα φυσικά και ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά και την επίδραση των γνωρισμάτων αυτών στην ηλεκτρική συμπεριφορά των επαφών. Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται και ο σκοπός της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται το κύκλωμα μέτρησης που υλοποιήθηκε. Επίσης, περιγράφεται η διαδικασία μέτρησης που αφορά την εργασία αυτή και συγκεκριμένα είναι η μέτρηση, μέσω κάμερας υπερύθρων, των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται σε κλειστές ηλεκτρικές επαφές που έχουν υποστεί διαφορετικού βαθμού καταπόνηση για διάφορες τιμές έντασης ρεύματος και καλώδια τροφοδοσίας διαφορετικών διατομών και τύπων (μονόκλιωνα, πολύκλιωνα-εύκαμπτα).

Στο τρίτο κεφάλαιο δίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε συνοπτική μορφή πινάκων, σε διαγραμματική μορφή και παρατίθενται κάποια θερμογραφικά δεδομένα (εικόνες υπερύθρων). Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται χωρίς σχόλιο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια για τη θεωρητική διερεύνηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Τέλος, στο παράρτημα δίνεται αναλυτικά το σύνολο των αναλυτικών μετρήσεων θερμοκρασίας σε μορφή πινάκων. Ακολουθεί ο κατάλογος σχημάτων και εικόνων που περιλαμβάνονται στην εργασία καθώς και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

ABSTRACT

The title of this thesis is “Characterization of the Thermal Behaviour of Stationary Electric Contacts using Infrared Camera”.

This thesis concerns the thermal behaviour of electric contacts when ac current runs through them. The thermal behaviour is being examined regarding the wear of the electric contacts, the current intensity and the size and type of the cables used.

In the first section an introduction on electric contacts, their physical and electrical characteristics is given. At the end of this section the aim of this thesis is given.

The second section describes the measurement circuit and the measurement procedure which involves using a thermal camera (infrared camera). The measurements taken concern the temperature of the electric contacts as a function of the contact’s wear, the current intensity and the size and the type of the copper cable used (single-core, flexible).

The third section represents the results of the measurements in tables and diagrams and also includes a selection of infrared images.

The fourth section gives possible explanations regarding the results.

The Appendix, which encompasses all temperature measurements, as well as the table of figures and the references can all be found at the end of the thesis.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή

1.1 Κατηγορίες Ηλεκτρικών Επαφών	11
1.2 Υλικά επαφής	13
1.2.1 Χαλκός	13
1.2.2 Κράματα χαλκού	13
1.2.3 Μεταλλουργία κόνεως (powder metallurgy)	16
1.3 Φυσική στερεών επιφανειών	18
1.4 Υπολογισμός αντίστασης στένωσης	19
1.4.1 Αγωγήμη επιφάνεια που περιλαμβάνει κυκλικά α-σημεία	21
1.4.2 Αγωγήμη επιφάνεια που περιλαμβάνει μη κυκλικά και δακτυλιοειδή α-σημεία	24
1.4.3 Αγωγήμη επιφάνεια που περιλαμβάνει πολλαπλά σημεία επαφής	25
1.4.4 Η αντίσταση στένωσης για α-σημείο που καλύπτεται από στρώμα (film)	27
1.4.4.1 Λεπτά στρώματα που αναπτύσσονται στις επαφές	28
1.4.4.2 Αντίσταση στένωσης για α-σημείο που καλύπτεται από στρώμα	28
1.5 Επίδραση της συχνότητας σήματος στην αντίσταση στένωσης	30
1.6 Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντίσταση στένωσης	31
1.6.1 Γενικά	31
1.6.2 Διάψευση της κλασικής θεωρίας ηλεκτρικών επαφών	33

1.6.2.1	Πειραματική διερεύνηση	33
1.6.2.2	Μαθηματική θεμελίωση	34
1.6.2.3	Φαινόμενα συσσωμάτωσης σε α-σημεία	35
1.7	Θεωρία Θερμικής Αγωγής	36
1.7.1	Θερμότητα λόγω τριβής	36
1.7.2	Θερμότητα λόγω διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος	38
1.7.2.1	Επαφή χωρίς επιμολυντικά στρώματα	38
1.7.2.2	Επαφή με επιμολυντικά στρώματα	39
1.7.2.3	Πεδίο θερμοκρασίας για επαφή με στρώματα που επιτρέπουν φαινόμενο σήραγγος	40
1.8	Συμπεράσματα	41
1.9	Σκοπός της εργασίας	41
2. Τα κυκλώματα μέτρησης και η διαδικασία των μετρήσεων		
2.1	Κύκλωμα μέτρησης	43
2.2	Η διαδικασία των μετρήσεων και οι ηλεκτρικές επαφές που εξετάστηκαν	46
3. Αποτελέσματα των μετρήσεων		
3.1	Συνοπτικοί πίνακες παρουσίασης των αποτελεσμάτων	52
3.2	Καμπύλες θέρμανσης	56
3.2.1	Καμπύλες για καλώδια διατομής 6 mm ²	57
3.2.1.1	Καμπύλες για τη Φάση 1	57
3.2.1.2	Καμπύλες για τη Φάση 2	58
3.2.1.3	Καμπύλες για τον Τριφασικό	59
3.2.1.4	Καμπύλες για τον Διπολικό	60
3.2.2	Καμπύλες για καλώδια διατομής 10 mm ²	61
3.2.2.1	Καμπύλες για τη Φάση 1	61
3.2.2.2	Καμπύλες για τη Φάση 2	62
3.2.2.3	Καμπύλες για τον Τριφασικό	63
3.2.2.4	Καμπύλες για τον Διπολικό	64

3.3 Θερμογραφία	65
3.3.1 Δεδομένα για τον διακόπτη SIEMENS 5TE1 413 - Φάση 1	65
3.3.2 Δεδομένα για τον διακόπτη SIEMENS 5TE1 413 - Φάση 2	67
3.3.3 Δεδομένα για τον Διπολικό SIEMENS 5TE1 312	69
4. Θεωρητική διερεύνηση των αποτελεσμάτων	71
Παράρτημα	75
Αναλυτικές Μετρήσεις Θερμοκρασίας των Ηλεκτρικών Επαφών	77
Κατάλογος Σχημάτων και Εικόνων	105
Βιβλιογραφία	107

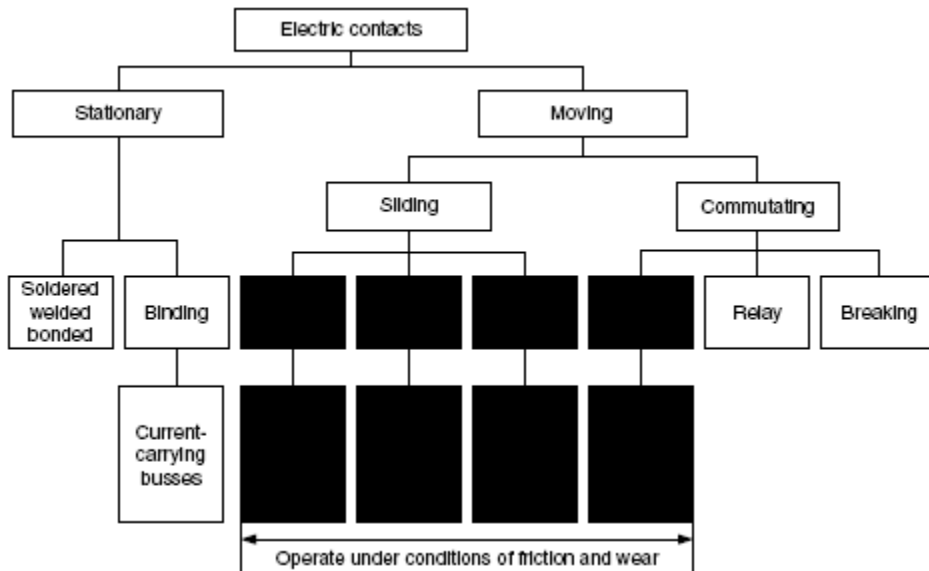
1. Εισαγωγή

Στη βιβλιογραφία ο όρος ηλεκτρική επαφή χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια λυόμενη σύνδεση μεταξύ δύο αγωγών, συνήθως στερεών, η οποία είναι κατάλληλη για τη μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος. Οι αγωγοί αυτοί ονομάζονται μέρη της επαφής ή απλά επαφές. Ο αγωγός από τον οποίο εισέρχεται το ρεύμα καλείται *κάθοδος*, ενώ ο αγωγός από τον οποίο εξέρχεται το ρεύμα καλείται *άνοδος*. Στη γενική περίπτωση που τα μέρη της επαφής διαχωρίζονται από ένα μονωτικό στρώμα, μιλάμε για μια *ανοιχτή επαφή*. [4, 19].

Οι ηλεκτρικές επαφές παρέχουν ηλεκτρική σύνδεση και ενίοτε επιτελούν επιπλέον λειτουργίες. Ο πρωταρχικός στόχος μιας ηλεκτρικής σύνδεσης είναι η ανεμπόδιστη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από τη διεπιφάνεια μεταξύ των μερών της επαφής. Για να επιτευχθεί αυτό, απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η καλή επαφή μεταξύ των μετάλλων των αγωγών. [4]

1.1 Κατηγορίες Ηλεκτρικών Επαφών

Οι ηλεκτρικές επαφές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση διάφορα κριτήρια : τη φύση τους, τη γεωμετρία της επιφάνειάς τους, την κινηματική τους, το σχεδιασμό και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, το φορτίο ρεύματος, τις εφαρμογές τους. Γενικά όμως, οι ηλεκτρικές επαφές διακρίνονται σε *στατικές* και *δυναμικές*. Παρακάτω δίνεται σχηματικά η ταξινόμησή τους βάσει της κινηματικής, της λειτουργίας και των τεχνικών χαρακτηριστικών τους [4]



Εικόνα 1.1 Κατηγορίες ηλεκτρικών επαφών

Στην περίπτωση των στατικών επαφών, τα μέρη της επαφής συνδέονται άκαμπτα ή ελαστικά στο στατικό κομμάτι της συσκευής και παρέχουν έναν μόνιμο σύνδεσμο. Οι στατικές επαφές διακρίνονται σε :

1. μη-διαχωρίσιμες ή ολομεταλλικές (μόνιμες συνδέσεις), οι οποίες εμφανίζουν μεγάλη μηχανική αντοχή και μικρή αντίσταση διάβασης
2. συσφιγμένες (*clamped*) , οι οποίες κατασκευάζονται με απευθείας μηχανική σύνδεση των επαφών με μπουλόνια, βίδες ή σφιγκτήρες. Το πλεονέκτημα των επαφών αυτών έγκειται στο ότι μπορούν να συναρμολογηθούν και να αποσυναρμολογηθούν χωρίς καταστροφή του συνδέσμου

Η διαφορά μεταξύ των μη-διαχωρίσιμων και συσφιγμένων ηλεκτρικών επαφών εντοπίζεται στην απουσία φυσικής διεπιφάνειας μεταξύ των αγωγών στις πρώτες. Από την άλλη, στις συσφιγμένες επαφές, η διεπιφάνεια καθορίζεται από την πίεση της επαφής και τη δυνατότητα του υλικού να υποστεί πλαστική παραμόρφωση. [4]

Στις δυναμικές επαφές τουλάχιστον το ένα μέρος της επαφής είναι δύσκαμπτα ή ελαστικά συνδεδεμένο με το κινούμενο κομμάτι της συσκευής. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

1. *commutating*, οι οποίες χειρίζονται περιοδικά το ηλεκτρικό κύκλωμα
2. *ολισθαίνουσες (sliding)*, στις οποίες τα τμήματα των αγωγών που βρίσκονται σε επαφή ολισθαίνουν μεταξύ τους χωρίς να διαχωρίζονται

Οι commutating επαφές περιλαμβάνουν δύο υποκατηγορίες, τις *διαχωρίσιμες* επαφές (ρευματοδότες και αυτόματους διακόπτες) και τις *διακοπτικές* (διακόπτες, ηλεκτρονόμοι, ρελέ). [4]

1.2 Υλικά επαφής

1.2.1 Χαλκός

Στο σημείο αυτό θα ήταν καλό να αναφερθούν κάποιες ιδιότητες και χαρακτηριστικά του χαλκού, καθώς αποτελεί ένα ιδιαίτερα διαδεδομένο υλικό για ηλεκτρικές εφαρμογές, το οποίο χρησιμοποιείται όχι μόνο σε ηλεκτρικές επαφές, αλλά και ως υλικό καλωδίων, τυλιγμάτων μετασχηματιστών κλπ.

Ο χαλκός είναι ένα μαλακό, εύπλαστο, ιδιαίτερα ελατό και όλκιμο μέταλλο. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή καλωδίων, φύλλων, σωλήνων, ακροκιβωτίων. Ο καθαρός χαλκός που υπάρχει στο εμπόριο παρουσιάζει ηλεκτρική αγωγιμότητα την οποία ξεπερνάει μόνο ο άργυρος. Αυτή η ιδιότητα, σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητά του σε ένα μεγάλο φάσμα μορφών, το χαμηλό του κόστος και τα μεγάλα αποθέματά του συγκριτικά με τα πολύτιμα μέταλλα καθιστούν το χαλκό μια προφανή επιλογή ως υλικού επαφών. Ο πιο κοινά χρησιμοποιούμενος χαλκός που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ισχύος είναι ο ETP ή C11000, που παράγονται με ηλεκτρολυτικό ραφινάρισμα του χαλκού. [4,7]

Ο χαλκός παρουσιάζει υψηλό σημείο τήξης (1083 °C), υψηλή θερμική αγωγιμότητα (397 W/m°C) και μεγάλη αντίσταση διάβρωσης. Είναι εύκολο να υποβληθεί σε επιχάλκωση ή συγκόλληση. Ωστόσο, ένα μειονέκτημά του είναι η τάση του να σχηματίζει βαρέα στρώματα οξειδίου σχετικά υψηλής αντίστασης, ειδικά όταν εκδηλώνεται ηλεκτρικό τόξο. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα προβληματικό για χαμηλές τιμές ρεύματος και τάσης και για μικρές δυνάμεις επαφής. Στην περίπτωση που οι επαφές παραμείνουν κλειστές για μεγάλο χρονικό διάστημα, μπορεί ενδεχομένως να προκύψει πλεονάζουσα παραγωγή οξειδίου, και, κατ' επέκταση, υπερθέρμανση, της οποίας συνήθως έπεται η ολική απώλεια επαφής. [7]

1.2.2 Κράματα χαλκού

Στο εμπόριο κυκλοφορεί μια πληθώρα κραμάτων χαλκού η οποία ικανοποιεί συγκεκριμένες κάθε φορά απαιτήσεις. Στη συνέχεια θα αναφερθούν από τα κράματα χαλκού τα πιο συνηθισμένα. [4,7]

➤ *Αργυρούχος Χαλκός*

Η προσθήκη μιας μικρής ποσότητας αργύρου (λιγότερο από 12 %) αυξάνει τη θερμοκρασία ανόπτησης του χαλκού χωρίς να μειώνει σημαντικά την

ηλεκτρική του αγωγιμότητα. Συνήθως από αυτό το κράμα κατασκευάζονται μετατροπείς ηλεκτρικού ρεύματος υψηλής απόδοσης.

Κράματα με περιεκτικότητα 2-8 % σε άργυρο, και ενίοτε με κάδμιο έως 1,5% χρησιμοποιούνται σε διακόπτες *αντι-συγκόλλησης* (anti-weld) φορτίου μετασχηματιστών.

➤ *Άργυρος-Χαλκός*

Τα κράματα αυτά παρουσιάζουν αυξημένη σκληρότητα. Χρησιμοποιούνται περισσότερο σε επαφές παρά για *υποστήριξη* (backing) επαφών και είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά σε *δυναμική συγκόλληση* (dynamic welding). Οι φυσικές του ιδιότητες κυμαίνονται ανάλογα με το ποσοστό του χαλκού στο κράμα και τη θερμική του επεξεργασία.

➤ *Χαλκός-Βηρύλλιο*

Είναι ένα θερμικά επεξεργάσιμο κράμα με ιδιαίτερα υψηλή σκληρότητα. Για περιεκτικότητα 1,7-1,9 % σε βηρύλλιο, το κράμα εμφανίζει, μετά από πλήρη θερμική επεξεργασία, δύναμη τάνυσης 1200 – 1400 N/mm^2 και ηλεκτρική αγωγιμότητα 25-30 % IACS, έναν συνδυασμό που δεν παρουσιάζει κανένα άλλο κράμα με συγκρίσιμες μηχανικές ιδιότητες.

Το κράμα αυτό χρησιμοποιείται για επαφές υψηλών ρευμάτων και τάσεων με μεγάλη συχνότητα λειτουργίας. Πιο συχνά, επειδή εμφανίζει καλές ιδιότητες ως ελατήριο, χρησιμοποιείται ως υλικό υποστήριξης επαφών.

➤ *Χαλκός-Κάδμιο*

Περιέχει κάδμιο σε ποσοστό έως 1 %, έχει χαμηλότερη αγωγιμότητα από το χαλκό (80-90 % IACS) αλλά μεγαλύτερη δύναμη τάνυσης. Λόγω του ότι έχει καλή μηχανική αντοχή και αντίσταση στη φθορά, ιδιότητες που διατηρεί σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από εκείνες του χαλκού, χρησιμοποιείται σε στήριξη επαφών όπου απαιτείται δύναμη σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία και σε καλώδια τρόλλεϋ.

➤ *Χαλκός-Χρώμιο*

Περιέχει έως 1% χρώμιο. Οι ιδιότητες του κράματος αναπτύσσονται μετά από θερμική επεξεργασία. Μετά από πλήρη θερμική επεξεργασία παρουσιάζει μεγαλύτερη δύναμη τάνυσης και ελαφρά μικρότερη αγωγιμότητα (80-85 % IACS) από το χαλκό. Μπορεί εύκολα να υποστεί επεξεργασία και να χρησιμοποιηθεί ως βάση επαφής, μαζί με άλλο υλικό, στην περίπτωση που απαιτείται δύναμη τάνυσης και σκληρότητα. Δεν χρησιμοποιείται σε επαφές διακοπών.

➤ *Χαλκός-Νικέλιο*

Η προσθήκη νικελίου στο χαλκό βελτιώνει τις μηχανικές του ιδιότητες και την αντίστασή του σε φθορά και οξείδωση. Τα κράματα αυτά είναι πολύ διαδεδομένα, αλλά περιέχουν μικρό ποσοστό νικελίου λόγω της μεγάλης επίδρασής του στην αγωγιμότητα - κράματα μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε χαλκό χρησιμοποιούνται σαν κράματα αντίστασης. Δεν χρησιμοποιούνται σε επαφές υψηλών ρευμάτων, αλλά σε επαφές ρελέ για μεσαίες εντάσεις ρεύματος, ορισμένες φορές με επικασιτερωμένη επιφάνεια.

➤ *Χαλκός-Νικέλιο-Ψευδάργυρος*

Περιέχει νικέλιο σε ποσοστό 10-12 % και είναι γνωστό ως 'νικελ-ασήμι' ή 'Γερμανικό ασήμι'. Το κράμα αυτό χρησιμοποιείται κυρίως σε ελατήρια και στήριξη επαφών. Η τάση του να δημιουργεί μονωτικά επιφανειακά στρώματα το καθιστά ακατάλληλο ως υλικό επαφών.

➤ *Χαλκός-Θείο*

Περιέχει θείο σε ποσοστό 0,3-0,6 % και διατηρεί υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (90-98 % IACS). Η προσθήκη θείου βελτιώνει την αντίστασή του σε δυναμική συγκόλληση και διάβρωση που οφείλεται σε τόξο ισχύος. Ωστόσο, κατά την εκδήλωση τόξου, δημιουργούνται ανεπιθύμητα θειούχα στρώματα.

➤ *Χαλκός-μόλυβδος*

Η περιεκτικότητα του κράματος σε μόλυβδο έως 10 % βεντιώνει την αντίσταση σε δυναμική συγκόλληση. Επαφές κατασκευασμένες από κράμα χαλκού-μόλυβδου χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλα υλικά, όπως άργυρο-γραφίτη, δημιουργώντας επαφές δύο διαφορετικών κραμάτων.

➤ *Χαλκός-Παλλάδιο*

Η αγωγιμότητα του κράματος αυτού είναι μόλις 4,9 % IACS. Ωστόσο, το κράμα με περιεκτικότητα 40 % σε χαλκό χρησιμοποιείται λόγω της σκληρότητάς του και της αντίστασής του σε φαινόμενα μεταφοράς μετάλλου και μηχανικής καταπόνησης.

➤ *Χαλκός-Χρυσός*

Η χρήση του κράματος αυτού σε επαφές ρελέ εξασφαλίζει την περιορισμένη μεταφορά μετάλλου. Λόγω όμως του υψηλού του κόστους περιορίζεται μόνο σε ρελέ και επαφές χαμηλού φορτίου.

➤ *Χαλκός-Άργυρος-Χρυσός*

Αυτά τα κράματα περιέχουν 60-70 % χρυσό με το υπόλοιπο 30-40 % να μοιράζεται μεταξύ του χρυσού και του αργύρου. Είναι ένα πολύ σκληρό κράμα, με αγωγιμότητα 12 % IACS, το οποίο χρησιμοποιείται σε ολισθαίνουσες επαφές (sliding contacts) μικρών φορτίων. Κράμα με περιεκτικότητα 10 % σε χαλκό χρησιμοποιείται σε συνδέσεις τυπωμένων κυκλωμάτων.

➤ *Χαλκός-Κασσίτερος*

Περιέχουν κασσίτερο σε ποσοστό έως 8 % σε κατεργασμένη μορφή και έως 21 % σε μορφή χυμένου κασσιτέρου. Είναι γνωστά ως 'φωσφορικοί μπρούντζοί', λόγω του ότι περιέχουν φωσφόρο σε ποσοστό 0,02-0,04 %. Τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται ως υλικό υποστήριξης της επαφής, σε διακόπτες και ρελέ. Ένα από αυτά τα κράματα, γνωστό ως 'μπρούντζος αγωγιμότητας' χρησιμοποιείται σε καλώδια τρόλλεϋ.

➤ *Χαλκός-Ζιρκόνιο*

Το κράμα αυτό περιέχει 0,1-0,15 % ζιρκόνιο, είναι θερμικά επεξεργάσιμο και διατηρεί καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (85-90 % IACS) με βελτιωμένη δύναμη τάνυσης και υψηλή αντίσταση σε μεγάλες θερμοκρασίες.

1.2.3 Μεταλλουργία κόνεως (powder metallurgy)

Ορισμένα μέταλλα, μεταλλικά οξείδια ή και αμέταλλα που διαθέτουν ορισμένα επιθυμητά χαρακτηριστικά αλλά χαμηλή αγωγιμότητα έχουν υψηλό σημείο τήξης και άρα δεν μπορούν να σχηματίσουν κράμα με χαλκό ώστε να βελτιώσουν αυτό το μειονέκτημά τους. Η μόνη δυνατή διαδικασία από την οποία μπορεί να προκύψει συνδυασμός τους με χαλκό είναι η μεταλλουργία κόνεως.

Η διαδικασία πραγματοποιείται ως εξής: ανακαμειγνύονται τα υλικά σε μορφή κόνεως, πιέζονται και πυροσυσσωματώνονται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από το χαμηλότερο σημείο τήξης των υλικών. Από την επεξεργασία αυτή μπορούν να προκύψουν ινώδεις ή ελασματοποιημένες δομές με ιδιότητες που εξαρτώνται από τη διεύθυνση των ινών. Μπορούν επίσης να κατασκευαστούν πολύ-στρωματικές επαφές, όπως για παράδειγμα, μια επαφή με μεγάλη περιεκτικότητα σε βολφράμιο στο άκρο του τόξου ισχύος (πυρίμαχο) και μεγάλη περιεκτικότητα σε άργυρο ή χαλκό στην περιοχή της επαφής (υψηλή αγωγιμότητα). [7]

➤ *Χαλκός-Βολφράμιο*

Τα πυροσυσσωματωμένα υλικά χαλκού-βολφραμίου περιέχουν χαλκό σε ποσοστό 20-70 %. Η μέθοδος κατασκευής εξαρτάται από το ποσοστό του υλικού σε βολφράμιο. Υλικά με χαμηλό περιεχόμενο σε χαλκό χρησιμοποιούνται σε υψηλά ρεύματα για βελτίωση της 'ζωής' της επαφής και της ικανότητας διακοπής. Για ποσοστό χαλκού γύρω στο 67 %, το υλικό φθείρεται ελαφρά λιγότερο από το χαλκό, αλλά αυτό συνοδεύεται από παραμόρφωση της επιφάνειας επαφής. Επιπλέον, η αντίσταση της επαφής αυξάνεται σημαντικά κατά την εκδήλωση του τόξου ισχύος.

➤ *Χαλκός-Μολυβδένιο*

Χρησιμοποιείται περιστασιακά στη θέση του χαλκού-βολφραμίου, αλλά δεν διαθέτει εξίσου καλές ιδιότητες.

➤ *Χαλκός-Αλούμινα*

Έχει καλή αντίσταση στο μαλάκωμα σε υψηλές θερμοκρασίες και καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα.

➤ *Χαλκός-Γραφίτης*

Περιέχει έως 70 % γραφίτη ανάλογα με την εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθεί. Όλα τα μίγματα χαλκού-γραφίτη έχουν μεγαλύτερη αγωγιμότητα και μικρότερη αντίσταση επαφής από τον ανόθευτο γραφίτη. Ωστόσο, η παρουσία γραφίτη μειώνει τις ηλεκτρικές απώλειες στην επαφή και μειώνει το ρυθμό φθοράς. Μίγματα χαμηλής περιεκτικότητας σε γραφίτη χρησιμοποιούνται για dc μηχανές χαμηλής τάσης με πολύ υψηλές πυκνότητες ρεύματος. Για χαμηλότερες πυκνότητες ρεύματος και καλύτερες συνθήκες ψύξης, χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες ποσότητες γραφίτη.

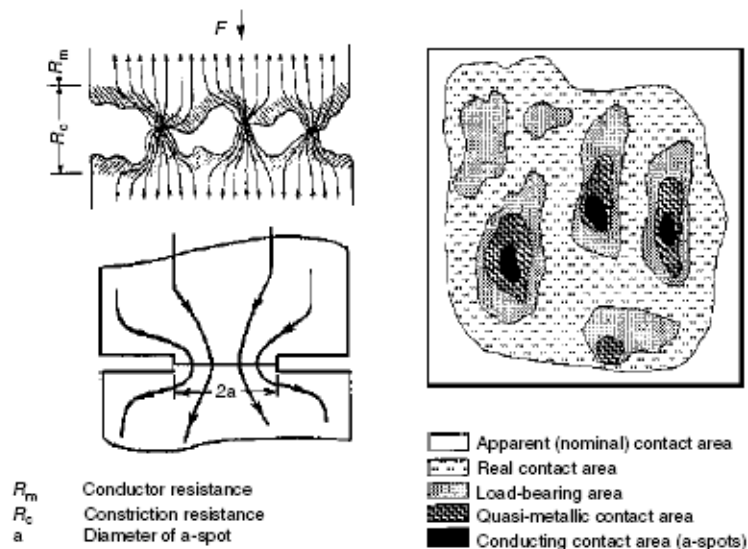
Εδώ να σημειώσουμε ότι στο πεδίο εφαρμογών που μας ενδιαφέρει στα πλαίσια της εργασίας, δηλαδή τους αυτόματους διακόπτες υπερέντασης χαμηλής τάσης, ως υλικό χρησιμοποιείται : στις επαφές τόξου *χαλκός-βολφράμιο*, *μολυβδένιο* και στις κλειστές επαφές *επαργυρωμένος χαλκός*, *χαλκός-άργυρος*, *άργυρος-νικέλιο*, *άργυρος-βολφράμιο*. Οι επαφές αυτές απαιτούν αντοχή σε διάβρωση και παραμόρφωση, μικρή αύξηση της θερμοκρασίας για τις κλειστές επαφές και περιορισμό των μεταλλικών ατμών.

1.3 Φυσική στερεών επιφανειών

Οι πραγματικές επιφάνειες δεν είναι λείες αλλά περιλαμβάνουν ανωμαλίες. Επαφή μεταξύ των μεταλλικών μερών επιτυγχάνεται μόνο τοπικά, όταν οι επιφανειακές ανωμαλίες των μετάλλων διαπερνούν το φυσικό οξειδίο και άλλα επιφανειακά επιμολυντικά στρώματα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται αγωγίμοι δρόμοι. Καθώς αυξάνεται η δύναμη που δέχονται τα μεταλλικά μέρη, και επειδή οι επιφάνειες δεν είναι απείρως σκληρές, αυξάνεται η επιφάνεια και ο αριθμός των σημείων επαφής σαν αποτέλεσμα της διάρρηξης του στρώματος οξειδίου και της εξαγωγής μετάλλου μέσα από αυτό. Το σύνολο αυτών των σημείων επαφής αποτελεί την *επιφάνεια φορτίου* A_b (load bearing area) [4,5,7,19]

Αυτά τα σημεία επαφής, τα οποία αποκαλούνται *α-σημεία* (α -spots), δημιουργούν μια πορώδη επιφάνεια την οποία μπορεί να διαπεράσει το οξυγόνο και άλλα διαβρωτικά αέρια. Αυτά αντιδρούν με τα εκτεθειμένα μεταλλικά μέρη και μειώνουν περαιτέρω την αγωγή επιφάνεια. Σταδιακά μπορούμε να οδηγηθούμε στην εξαφάνιση της ηλεκτρικής επαφής, παρόλο που η μηχανική επαφή μεταξύ των οξειδωμένων επιφανειών μπορεί να διατηρηθεί. [3,4,5]

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η σχέση μεταξύ της *φαινομενικής επιφάνειας επαφής* A_a (apparent contact area) και της *πραγματικής επιφάνειας επαφής* A_r (real contact area). [4]



Εικόνα 1.2 Δομή πραγματικών επιφανειών επαφής

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω σχήμα, η πραγματική επιφάνεια επαφής περιλαμβάνει τρεις περιοχές :

(1) *επαφή μετάλλου-μετάλλου* (το ρεύμα περνάει από τη διεπιφάνεια χωρίς να συναντήσει αντίσταση διάβασης)

(2) *ημι-αγώγιμες περιοχές* (περιοχές που καλύπτονται από λεπτά στρώματα και παρουσιάζουν αντίσταση μεγαλύτερη από εκείνη των επαφών μετάλλου-μετάλλου

(3) μη αγώγιμες περιοχές (καλύπτονται από παχέα στρώματα οξειδίων, σουλφιδίων και βολφραμιούχων ενώσεων (tungstenate)). [3,4,19]

Αν θεωρήσουμε ότι στην επιφάνεια της επαφής με σκληρότητα H ασκείται δύναμη φορτίου F_c , τότε η φαινομενική επιφάνεια επαφής συνδέεται με τα παραπάνω μεγέθη με βάση τη σχέση [4,19]

$$F_c = \xi H A_a \quad (1)$$

Στην παραπάνω έκφραση η σκληρότητα H του υλικού αποτελεί μέτρο της ικανότητάς του να αντισταθεί σε παραμόρφωση και ξ είναι ο παράγοντας πίεσης που εξαρτάται από το πόσο έχει παραμορφωθεί το υλικό και από τις ανωμαλίες που αυτό φέρει. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές θεωρείται ότι το ξ είναι ίσο με μονάδα. Γενικά η τιμή του ξ κυμαίνεται μεταξύ 0,2 και 1. [19]

Η σκληρότητα συνδέεται επίσης με το *yield stress* (δηλαδή την τιμή τάσης στην οποία το υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά) βάσει της σχέσης [4]

$$H = 3\sigma_y \quad (2)$$

1.4 Υπολογισμός αντίστασης στένωσης

Η ύπαρξη των α -σημείων σε μια διεπιφάνεια ηλεκτρικής επαφής επιδρά πολύ διαφορετικά στη ροή του ρεύματος από την ύπαρξη ενός μόνο σημείου επαφής. Τα α -σημεία περιορίζουν τη διέλευση του ρεύματος που περνάει από τη διεπιφάνεια, δημιουργούν επομένως μια ηλεκτρική αντίσταση γνωστή ως *αντίσταση στένωσης* (constriction resistance). Θεωρούμε ότι η επαφή σχηματίζεται μεταξύ δύο μεταλλικών κυλίνδρων. Αν U_{ab} η πτώση τάσης μεταξύ δύο σημείων a , b των αγωγών τα οποία βρίσκονται εκατέρωθεν της επαφής, τότε η αντίσταση μεταξύ των ισοδυναμικών επιφανειών που περιλαμβάνουν τα a , b δίνεται από τη σχέση

$$R_{ab} = \frac{U_{ab}}{I} \quad (3)$$

όπου I το ρεύμα που διαρρέει την επαφή. [19]

Αν τώρα ορίσουμε ως R_{ab}^0 την αντίσταση που θα είχαμε μεταξύ των σημείων a και b αν η επιφάνεια επαφής ήταν απόλυτα αγώγιμη και οι γραμμές ροής του ρεύματος ήταν απόλυτα ευθείες, τότε έχουμε την παρακάτω σχέσεις για την αντίσταση στένωσης [19]

$$R = R_{ab} - R_{ab}^0 \quad (4)$$

Οι περιοχές μεταξύ των σημείων επαφής στις οποίες οι γραμμές ροής του ρεύματος «καμπυλώνουν» ονομάζονται *περιοχές στένωσης* ή απλά *στενώσεις*. Στις περιοχές αυτές, η κλίση (gradient) του δυναμικού είναι σχετικά μεγάλη, ενώ έξω από αυτές είναι μικρή. Αυτό σημαίνει πως ο όρος R_{ab}^0 της σχέσης (4) μπορεί να παραλειφθεί. Στην περίπτωση αυτή μιλάμε για *μεγάλη στένωση* (long constriction). Ωστόσο, αν η απόσταση στην οποία εκτείνεται η στένωση είναι συγκρίσιμη με την ακτίνα a , η R_{ab}^0 δεν μπορεί να παραλειφθεί και μιλάμε για *βραχεία στένωση*. [19]

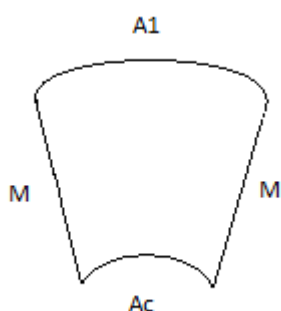
Στους επόμενους υπολογισμούς θα ασχοληθούμε μόνο με μεγάλες στενώσεις, δηλαδή με περιπτώσεις επαφών που η αγώγιμη επιφάνεια A_c είναι μικρή συγκριτικά με τις διαστάσεις των αγωγών που απαρτίζουν την επαφή.

Γενικά μιλώντας, η αντίσταση στένωσης αποτελεί συνάρτηση της ειδικής αντίστασης ρ του υλικού και των διαστάσεων και του σχήματος της αγώγιμης επιφάνειας. Στα πλαίσια της εργασίας θα ασχοληθούμε με αγώγιμες επιφάνειες κυκλικού ή μη-κυκλικού και δακτυλιοειδούς σχήματος ή αγώγιμες επιφάνειες που περιλαμβάνουν συνδυασμό ελλειπτικών και κυκλικών α-σημείων.

Για να προχωρήσουμε στους υπολογισμούς μας υποθέτουμε ότι η αγώγιμη επιφάνεια (*conducting area*) A_c είναι ισοδυναμική, κάτι το οποίο ισχύει, λόγω συμμετρίας, στην περίπτωση που τα μέρη της επαφής αποτελούνται από το ίδιο υλικό, έχουν δηλαδή την ίδια αντίσταση στένωσης.

Η μοντελοποίηση του προβλήματος συνίσταται στη θεώρηση μιας ισοδυναμικής επιφάνειας A_1 . Αναζητούμε την αντίσταση μεταξύ της επιφάνειας αυτής και της αγώγιμης επιφάνειας. Συνήθως θεωρούμε την επιφάνεια A_c ως πηγή ρεύματος και την επιφάνεια A_1 ως καταβόθρα, ενώ ο χώρος μεταξύ τους θεωρείται ότι δεν περιέχει πηγές ή καταβόθρες. Για την εύρεση της αντίστασης στένωσης σε κάθε περίπτωση ψάχνουμε λύση της εξίσωσης δυναμικού φ που ικανοποιεί, με κατάλληλες οριακές συνθήκες, τη *Λαπλασιανή εξίσωση* [1,19]

$$\Delta\varphi = 0 \quad (5)$$



Εικόνα 1.3 Οπτικοποίηση του ηλεκτροστατικού προβλήματος

Για να λύσουμε το πρόβλημα ρεύματος, μπορούμε να το ανάγουμε στο παρόμοιο ηλεκτροστατικό πρόβλημα χωρητικότητας, το οποίο είναι σχετικά πιο εύκολα οπτικοποιήσιμο.

Στο πρόβλημα χωρητικότητας θεωρούμε ότι οι A_c και A_1 είναι φορτισμένα αγώγιμα φύλλα με δυναμικό φ_c και φ_1 αντίστοιχα, τα οποία βρίσκονται σε έναν άπειρο χώρο απόλυτου κενού, έτσι ώστε το δυναμικό φ υπολογίζεται ανεξάρτητα από το όριο M. Για να αντιστοιχίσουμε το ηλεκτροστατικό πρόβλημα στο πρόβλημα ρεύματος πρέπει να ισχύει η συνθήκη $\left(\frac{d\varphi}{dn}\right)_M = 0$, όπου n

είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στο όριο M . Στο cgs σύστημα μονάδων (centimeter-gram-second), το επιφανειακό φορτίο στην A_c είναι

$$Q = \frac{1}{4\pi} \int_{A_c} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right| dA_c \quad (6)$$

Επίσης, η A_1 φέρει το ίδιο, αντίθετης όμως πολικότητας, φορτίο. Η χωρητικότητα βρίσκεται

$$C = \frac{Q}{|\varphi_c - \varphi_1|} \quad (7)$$

Στο πρόβλημα αντίστασης το η είναι το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια A_c , η πυκνότητα ρεύματος είναι $\frac{1}{\rho} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|$ και το ολικό ρεύμα είναι

$$I = \frac{1}{\rho} \int_{A_c} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right| dA_c \quad (8)$$

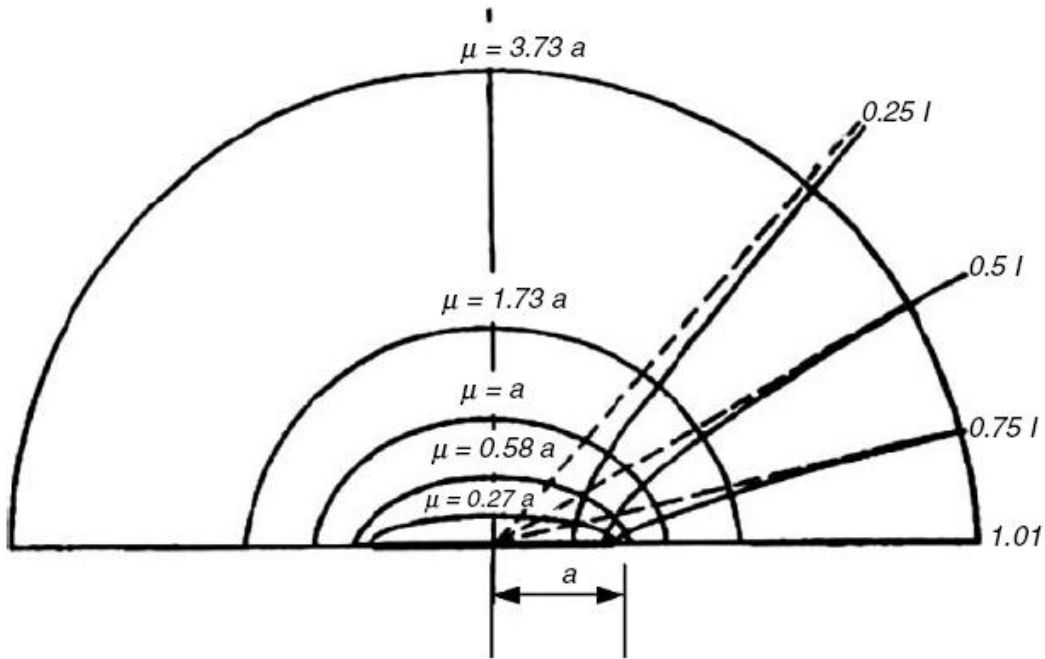
Συνδυάζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα των εξισώσεων (6)-(8) βρίσκουμε ότι η ζητούμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$R_{c1} = \frac{|\varphi_c - \varphi_1|}{I} = \frac{\rho}{4\pi C} \quad (9)$$

Στη συνέχεια διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις με βάση το σχήμα της αγώγιμης περιοχής A_c .

1.4.1 Αγωγή επιφάνεια που περιλαμβάνει κυκλικά α-σημεία

Η περίπτωση των κυκλικών α-σημείων είναι εκείνη που έχει μελετηθεί περισσότερο από όλες. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η μορφή των ισοδυναμικών επιφανειών και των γραμμών ροής ρεύματος που διαμορφώνονται στον αγωγό :



Εικόνα 1.4 Ισοδυναμικές επιφάνειες και γραμμές ηλεκτρικής ροής κοντά σε μια στένωση

Οι ισοδυναμικές επιφάνειες αποτελούν ελλείψεις οι οποίες περιγράφονται από την παραμετρική εξίσωση [4]

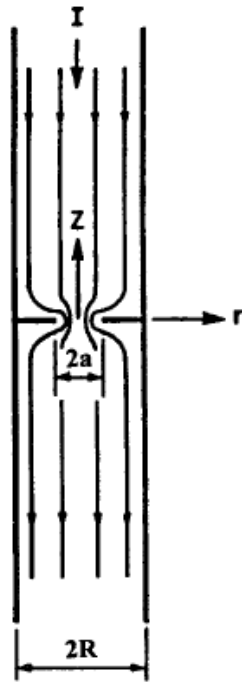
$$\frac{r^2}{\alpha^2 + \mu^2} + \frac{z^2}{\mu^2} = 1 \quad (10)$$

όπου μ παράμετρος και r, z οι κυλινδρικές συντεταγμένες. Η αντίσταση μεταξύ της ισοδυναμικής επιφάνειας με κατακόρυφο άξονα μήκους μ και της στένωσης δίνεται από τη σχέση [4]

$$R_\mu = \frac{\rho}{2\pi} \int \frac{d\mu}{\alpha^2 + \mu^2} = \frac{\rho}{2\pi\alpha} \tan^{-1} \frac{\mu}{\alpha} \quad (11)$$

Για πολύ μεγάλο μ , προκύπτει η *spreading resistance*, δηλαδή η αντίσταση στένωσης για κάθε μέρος της επαφής [4,5,13,19]

$$R_s = \frac{\rho}{4\alpha} \quad (12)$$



Αν οι αγωγοί που θεωρήσαμε παραπάνω είναι ακτίνας r , τότε η αντίσταση στένωσης ενός α -σημείου για μονομεταλλική επαφή προκύπτει από τη σχέση

$$R = \frac{\rho}{2\alpha} \left\{ 1 - 1,41581 \frac{\alpha}{r} + 0,06322 \left(\frac{\alpha}{r} \right)^2 + 0,15261 \left(\frac{\alpha}{r} \right)^3 + 0,19998 \left(\frac{\alpha}{r} \right)^4 \right\} \quad (13)$$

Αν $\alpha \ll r$, τότε η παραπάνω σχέση απλοποιείται στην αντίσταση της σχέσης (12)

Αν η επαφή απαρτίζεται από διαφορετικά μέταλλα, η αντίσταση αυτή υπολογίζεται από τη σχέση

$$R_s = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4\alpha} \quad (14)$$

Εικόνα 1.5 Ηλεκτρικά αγωγιμος κύλινδρος ακτίνας R με κυκλική στένωση ακτίνας α

όπου ρ_1, ρ_2 οι ειδική αντίσταση των δύο μετάλλων που απαρτίζουν την επαφή. [1,4,19]

Για μια επιφάνεια που σχηματίζεται από δύο χάλκινους αγωγούς, δηλαδή για $\rho = 1,75 * 10^{-8} \Omega m$ δίνεται ο παρακάτω πίνακας που παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ της ακτίνας των α -σημείων και της αντίστασης στένωσης [1,4]

ακτίνα α -σημείων (μm)	R (Ω)
0,01	0,88
0,1	$8,8 * 10^{-2}$
1	$8,8 * 10^{-3}$
10	$8,8 * 10^{-4}$

Πίνακας 1.1 Η αντίσταση στένωσης συναρτήσει της ακτίνας του α -σημείου

Παρατηρούμε ότι για ακτίνα 10 μm η αντίσταση στένωσης έχει πολύ μικρή τιμή. Έτσι, για παράδειγμα, από ένα α -σημείο αυτής της ακτίνας μπορεί να περάσει ρεύμα της τάξης των 50 A ζεσταίνοντας λίγο μόνο την επαφή. [1]

1.4.2 Αγώγιμη επιφάνεια που περιλαμβάνει μη κυκλικά και δακτυλιοειδή α-σημεία

Αποδεικνύεται ότι η spreading resistance που σχετίζεται με ένα α-σημείο ελλειπτικού σχήματος με ημιάξονες a, b δίνεται από τη σχέση [1,4]

$$R_s(a, b) = \frac{\rho}{4a_c} f(\gamma) \quad (15)$$

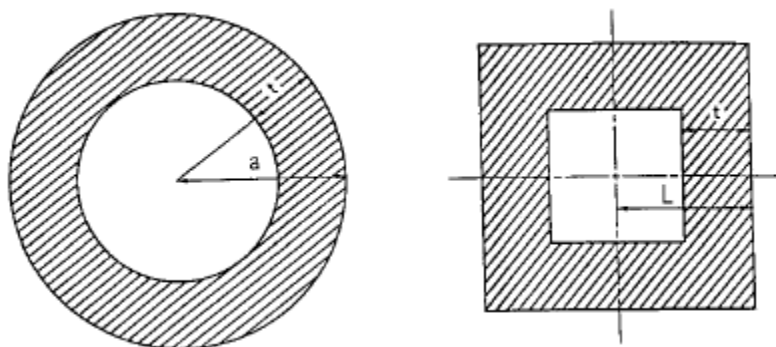
όπου $\gamma = \left(\frac{a}{b}\right)^{1/2}$, $f(\gamma)$ ο παράγοντας σχήματος (form factor) και a_c είναι η ακτίνα ενός α-σημείου με επιφάνεια ίση με την επιφάνεια του ελλειπτικού α-σημείου. Ο παράγοντας μορφής μειώνεται από την τιμή 1 στην τιμή 0 καθώς η τιμή του γ ξεκινάει από 1 και απειρίζεται, δηλαδή καθώς το α-σημείο επιμηκώνεται. Επομένως, η αντίσταση στένωσης μεταξύ δύο ημι-άπειρων αγωγών με ίδιες ειδικές αντιστάσεις είναι $2R_s(a, b)$. Για ορθογώνια α-σημεία προκύπτει εμπειρικά (Aichi και Tahara) ότι

$$R_s = \frac{k\rho}{S^{0,65}} \quad (16)$$

όπου S είναι το εμβαδόν της ορθογώνιας στένωσης όταν το γ παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 10. Η ποσότητα k είναι μια σταθερά που εξαρτάται από το πλάτος της στένωσης και κυμαίνεται από 0,36 έως περίπου 1 για τιμές πλάτους από 1 mm έως 10 mm και για S και ρ εκφρασμένα σε mm^2 και Ωm -mm αντίστοιχα. [1,4]

Η spreading resistance μιας τετράγωνης στένωσης με μήκος $2L$ δίνεται από τη σχέση

$$R_s = \frac{0,43\rho}{L} \quad (17)$$



Εικόνα 1.6 Τετράγωνες και κυκλικές δακτυλιοειδείς στενώσεις

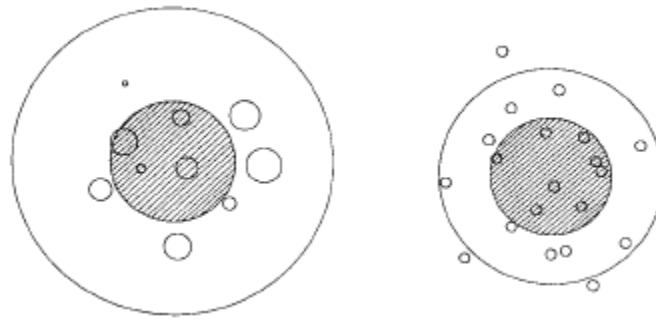
Για την περίπτωση κυκλικού-δακτυλιοειδούς ή τετράγωνου-δακτυλιοειδούς α-σημείου, η spreading resistance δίνεται από τη σχέση

$$R_s = R_o(F(\zeta))^{-1} \quad (18)$$

όπου $F(\zeta)$ ο παράγοντας μορφής αγωγιμότητας και $\zeta = \frac{t}{a}$ ή $\zeta = \frac{t}{L}$ για το κυκλικό και τετραγωνικό α-σημείο αντίστοιχα. [1]

Γενικά, από πειραματικά δεδομένα, προκύπτει ότι το σχήμα του α-σημείου επηρεάζει σημαντικά την τιμή της αντίστασης στένωσης. [1]

1.4.3 Αγωγή επιφάνεια που περιλαμβάνει πολλαπλά σημεία επαφής



Εικόνα 1.7 Κατανομή α-σημείων με αντίστοιχη ακτίνα ισοδύναμης απλής επαφής (σκιασμένη περιοχή) και ακτίνα Hollm (εξωτερική ακτίνα)

Αυτή η περίπτωση αποτελεί και το πιο χρήσιμο κομμάτι της μελέτης μας, καθώς οι πραγματικές ηλεκτρικές επαφές περιλαμβάνουν έναν αριθμό α-σημείων που εμπίπτουν και στις δύο κατηγορίες που εξετάσαμε πιο πάνω. Για απλότητα στους υπολογισμούς η συνολική αντίσταση στένωσης γενικά αντιμετωπίζεται σαν να απαρτίζεται από κυκλικά α-σημεία. Με καλή προσέγγιση (Greenwood) η συνολική αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$R = \rho \left(\frac{1}{2na'} + \frac{1}{2a} \right) \quad (19)$$

Στην παραπάνω σχέση $a' = \frac{\sum \alpha_i}{n}$ η μέση ακτίνα των α-σημείων πλήθους n και a η ακτίνα Hollm του εξωτερικού δακτυλίου με $a^{-1} = \frac{3\pi}{16n^2} \sum_{i \neq j} \sum_{i \neq j} \frac{1}{s_{ij}}$, όπου s_{ij} η απόσταση μεταξύ των α-σημείων.

Όπως είδαμε, το σχήμα της στένωσης επηρεάζει σημαντικά την τιμή της αντίστασης στένωσης. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται η αντίσταση στένωσης για στενώσεις ίδιου εμβαδού ($100 \mu m^2$) αλλά διαφορετικού σχήματος, για διεπιφάνεια χαλκού με $\rho = 1,75 * 10^{-8} \Omega m$.

Είδος στένωσης	Ακτίνα(μm)	Μήκος(μm)	Πλάτος(μm)	Πάχος δακτυλίου(μm)	Αντίσταση (mΩ)
Κυκλικός δίσκος	5,64				1,55
Τετράγωνο		10	10		3,04
Ορθογώνιο		50	2		0,43
Δακτύλιος	16,41			1	0,71

Πίνακας 1.2 Αντίσταση στένωσης για στενώσεις ίδιου εμβαδού και διαφόρων σχημάτων για επαφή χαλκού-χαλκού

Το σημαντικότερο και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο χαρακτηριστικό των ηλεκτρικών επαφών είναι η αντίσταση επαφής R_c . Αν και η τιμή της είναι πολύ μικρή συγκριτικά με τις τιμές των υπόλοιπων αντιστάσεων του κυκλώματος στο οποίο ανήκει η ηλεκτρική επαφή, αλλαγές στην τιμή της (λ.χ. εξαιτίας αλλαγών στην επιφάνεια πραγματικής επαφής, διαφοροποιήσεις στην πίεση που δέχεται η επαφή, ανομοιομορφία στα επιφανειακά στρώματα) μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλη αύξηση τάσης, δηλαδή σε δυσλειτουργία. [1,4,19]

Οι μεταλλικές επιφάνειες δεν είναι «καθαρές», αλλά μπορεί να καλύπτονται από λεπτά στρώματα οξειδίου, σουλφιδίων και άλλων ανόργανων ενώσεων. Επομένως, η συνολική αντίσταση που συναντά το ρεύμα κατά τη διέλευσή του προκύπτει από το άθροισμα της αντίστασης στένωσης και της αντίστασης που εισάγουν τα προαναφερθέντα στρώματα [3,4]

$$R_c = R_s + R_f \quad (20)$$

Η αντίσταση των διαφόρων στρωμάτων δίνεται από τη σχέση [4]

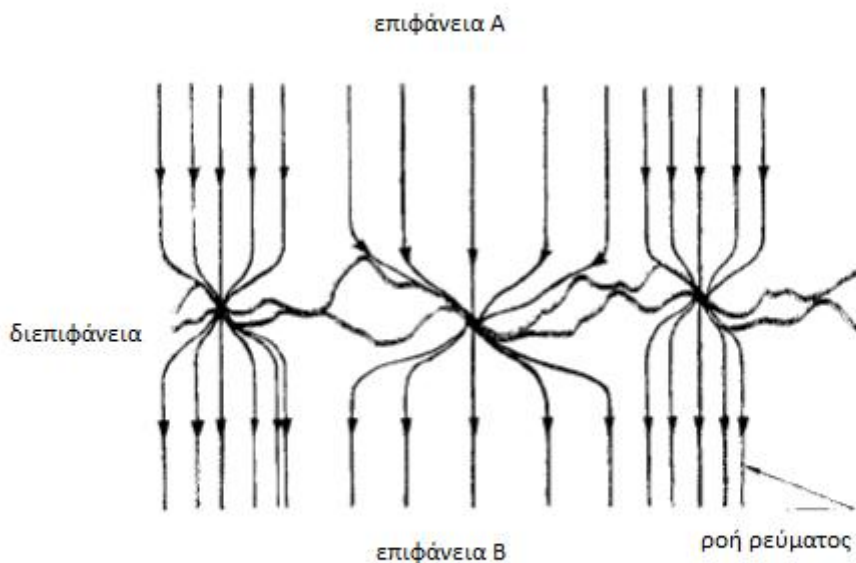
$$R_f = \sigma \alpha^2 \quad (21)$$

όπου σ είναι η αντίσταση ανά επιφάνεια του στρώματος.

Η διέλευση του ρεύματος μέσα από τα επιφανειακά στρώματα μπορεί να πραγματοποιηθεί με *φαινόμενο σήραγγος* ή με *fritting*. Εδώ όμως πρέπει να σημειωθεί ότι η επιφάνεια φορτίου καλύπτεται εν μέρει από μονωτικά στρώματα και επομένως μόνο ένα τμήμα της έχει *μεταλλική* ή *οιονεί μεταλλική* επαφή (ως οιονεί μεταλλική ορίζεται η επιφάνεια που καλύπτεται από λεπτό στρώμα, μέχρι 20 Å, το οποίο μπορούν να διαπεράσουν τα ηλεκτρόνια με το φαινόμενο σήραγγας). Επιπλέον, τα σημεία επαφής δημιουργούνται από μηχανική διάρρηξη των επιφανειακών στρωμάτων. Επομένως, η συνεισφορά της R_f είναι πολλές φορές πρακτικά αμελητέα. [4,19]

Όπως είδαμε, δεν είναι μικρή μόνο η επιφάνεια φορτίου A_b , αλλά και μόνο ένα κομμάτι της είναι ηλεκτρικά αγωγίμο. Αυτό αναγκάζει τις γραμμές ροής του

ρεύματος να «στριμωχτούν», προκαλώντας μια αύξηση της αντίστασης πέρα από τα όρια μιας απόλυτα αγωγίμης, λείας επιφάνειας επαφής. [19]



Εικόνα 1.8 Ηλεκτρική διεπιφάνεια

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε, χάριν ακρίβειας, ότι μπορεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, να ισχύει η σχέση $A_a = A_b = A_r$, όταν, για παράδειγμα, έρθουν σε επαφή δύο καθαροί μεταλλικοί κύλινδροι με διάμετρο μερικών mm και δεχτούν μεγάλο φορτίο, λ.χ. 50 Newton. [19]

1.4.4 Η αντίσταση στένωσης για α-σημείο που καλύπτεται από στρώμα (film)

Σε ένα οποιοδήποτε αντικείμενο, τα άτομα και τα μόρια που ανήκουν στην επιφάνεια έχουν λιγότερους γείτονες από εκείνα που βρίσκονται στο εσωτερικό. Το γεγονός αυτό έχει σημαντικές συνέπειες στη γεωμετρία και τη φυσική που χαρακτηρίζει την επιφάνεια. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων και των γειτόνων τους μεταβάλλονται, παραμορφώνοντας το πεδίο δύναμης το οποίο διαπερνά σε βάθος αρκετών διατομικών αποστάσεων. Με αυτό δεδομένο, εμφανίζεται πλεόνασμα ενέργειας ως προς την ενέργεια της επιφάνειας με αποτέλεσμα αυτή να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *προσρόφηση* (adsorption). Θεωρείται σκόπιμο στο σημείο αυτό να κάνουμε μια σύντομη αναφορά στα λεπτά στρώματα που αναπτύσσονται πάνω στις επαφές. [4]

1.4.4.1 Λεπτά στρώματα που αναπτύσσονται στις επαφές

Τα λεπτά στρώματα (thin films), κυρίως οι αποθέσεις οξυγόνου, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: *φυσικά προσροφημένα* (physisorbed) και *χημικά προσροφημένα* (chemisorbed). [4,19]

Τα φυσικά προσροφημένα σωματίδια (άτομα ή μόρια) συνδέονται με το μέταλλο με δυνάμεις *van der Waals* με ασθενείς δεσμούς της τάξης των 0,05 eV (γενικά με ενέργεια μικρότερη των 20 kJ/mol). Τα πολυατομικά αυτά στρώματα απομακρύνονται όταν η επαφή κλείνει, είναι αρκετά πτητικά και επομένως μπορούν να καθαριστούν σε θερμοκρασία δωματίου.

Τα χημικά προσροφημένα άτομα συνδέονται με ομοιοπολικούς ή ιοντικούς δεσμούς, ενέργειας 1 έως 8 eV (80-100 kJ/mol). Τα χημικά προσροφημένα στρώματα μπορούν να αντέξουν την τριβή κατά το κλείσιμο της επαφής και τις υψηλές θερμοκρασίες χωρίς να αποκολληθούν από τη μεταλλική επιφάνεια. Ωστόσο, επειδή δεν έχουν πάχος μεγαλύτερο των 10 Å, μπορούν εύκολα να διαπεραστούν από ηλεκτρόνια με το φαινόμενο σήραγγος. Να σημειωθεί ότι το φαινόμενο σήραγγος γίνεται αμελητέο για σχετικά μεγάλο φορτίο P.

Τα προσροφημένα στρώματα μπορεί να προκαλέσουν σκλήρυνση της επιφάνειας. Έτσι, η *προσροφητικότητα* (adsorptivity) της επιφάνειας παράγει ένα λεπτό στρώμα στο όριο με δομή και συμπεριφορά διαφορετική από εκείνη του επιφανειακού στρώματος του στερεού. Η δομή του στρώματος είναι αρκετά ιδιαίτερη. Τα επιφανειακά στρώματα μπορεί να διαπερνούν το ένα το άλλο μέσα από μικρορωγμές. [4]

Το στρώμα μπορεί να βρίσκεται σε παραπάνω από μία φυσικές καταστάσεις, από σχεδόν αέρια έως στερεά κρυσταλλική. Τόσο οι παράμετροι της πίεσης και της θερμοκρασίας, όσο και αλληλεπιδράσεις του με το στερεό αντικείμενο καθορίζουν τη φυσική του κατάσταση. Αναφορικά με τη μηχανική συμπεριφορά του, μπορεί να επιδεικνύει ιδιότητες *βισκοελαστικές* έως *απόλυτα ελαστικές*. [4]

1.4.4.2 Αντίσταση στένωσης για α-σημείο που καλύπτεται από στρώμα

Οι υπολογισμοί που είδαμε πιο πάνω πραγματοποιήθηκαν με την παραδοχή ότι η επιφάνεια επαφής είναι μεταλλική, με άλλα λόγια ότι δεν καλύπτεται από στρώμα. Εδώ θα εξετάσουμε την ειδική περίπτωση που το α-σημείο καλύπτεται ομοιόμορφα από ένα ομοιόμορφο στρώμα. Το στρώμα αυτό μεταβάλλει την κατανομή της πυκνότητας ρεύματος διαμορφώνοντας μια αντίσταση στένωσης διαφορετική από αυτήν που είδαμε παραπάνω.

Καταρχάς υποθέτουμε ότι η αντίσταση του στρώματος είναι πολύ μεγάλη συγκριτικά με την αντίσταση στένωσης του μετάλλου. Αυτό αυτομάτως σημαίνει ότι η διεπιφάνεια A μεταξύ του μετάλλου και του στρώματος δεν είναι πλέον μια

ισοδυναμική επιφάνεια από την πλευρά του μετάλλου. Ωστόσο, εξαιτίας της υψηλής αγωγιμότητας, όλες οι διαφορές δυναμικού κατά μήκος της διεπιφάνειας είναι αμελητέες σε σύγκριση με την κλίση (gradient) κάθετη στη διεπιφάνεια μέσα στο στρώμα. Επομένως, η πυκνότητα ρεύματος μέσα στο στρώμα είναι κατά προσέγγιση κατανομημένη όπως στην περίπτωση ισοδυναμικών ορίων μεταξύ στρώματος και μετάλλου. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή ρεύματος στο όριο και, επομένως, ομοιόμορφη κατανομή ηλεκτρικού φορτίου στην διεπιφάνεια A. Σε αυτό το σημείο θα χρησιμοποιήσουμε την αντιστοίχιση με το ηλεκτροστατικό πρόβλημα, το οποίο είδαμε προηγουμένως. [19]

Το ζητούμενο τώρα είναι να βρούμε τη χωρητικότητα C η οποία χρειάζεται για να υπολογίσουμε την αντίσταση στένωσης από τη σχέση (9). Θεωρούμε έναν μη αγωγίμο δίσκο επιφάνειας A και ακτίνας α , ο οποίος είναι ομοιόμορφα φορτισμένος, με πυκνότητα φορτίου σ . Η διαφορά δυναμικού μεταξύ του κέντρου του και του απείρου είναι τότε 2πσα ηλεκτροστατικές μονάδες. Επίσης, το ολικό φορτίο είναι $\pi\sigma\alpha^2$, επομένως η χωρητικότητα είναι $C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{\pi\sigma\alpha^2}{2\pi\sigma\alpha} = \frac{\alpha}{2}$ ηλεκτροστατικές μονάδες. Τώρα, από τη σχέση (9) βρίσκουμε ότι η αντίσταση στένωσης στο ένα μέλος της επαφής είναι

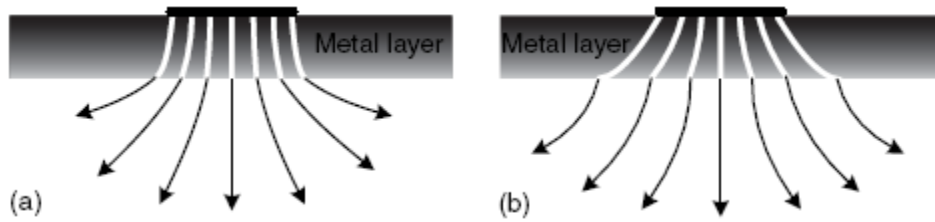
$$R_{cf} = \frac{\rho}{\pi\alpha} \quad (22)$$

Παρατηρούμε ότι η νέα αντίσταση είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την $\frac{\rho}{4\alpha}$ που ισχύει στην περίπτωση που δεν υπάρχει στρώμα. [13,19]

Θα πρέπει εδώ βέβαια αν πούμε ότι το στρώμα που καλύπτει την επιφάνεια επαφής μπορεί να είναι αγωγίμο. Σε αυτήν την περίπτωση, η επίδρασή του μπορεί να είναι θετική ή αρνητική ανάλογα με τη σχέση μεταξύ της ειδικής αντίστασης του στρώματος και του υποστρώματος. Η παρουσία του στρώματος μπορεί να μεταβάλλει την σκληρότητα και τη μηχανική αντίσταση της επαφής. Αν το στρώμα προέρχεται από διάχυση, μπορούν να δημιουργηθούν ενδομεταλλικά στοιχεία υψηλής αντίστασης τα οποία θα αυξήσουν την αντίσταση της επαφής. Αν το στρώμα προέρχεται από *επιμετάλλωση* (electroplating), η αντίσταση επαφής μειώνεται. Μείωση της αντίστασης μπορεί να προκύψει και από μείωση της σκληρότητας, μεγαλύτερη αγωγιμότητα του μετάλλου που χρησιμοποιείται στην επιμετάλλωση, παρεμπόδιση δημιουργίας μονωτικών στρωμάτων, διάβρωση, μείωση της μηχανικής καταπόνησης. Σε μονομεταλλικές επαφές χαλκού, λ.χ., χρησιμοποιείται συχνά επιχρυσωση. Ωστόσο, ακόμη και οι επιχρυσωμένες επαφές μπορούν να προσβληθούν από περιβαλλοντικούς παράγοντες αν το στρώμα χρυσού είναι λεπτό και πορώδες.[4]

Αν η ειδική αντίσταση του αγωγίμου στρώματος είναι μεγαλύτερη από εκείνη του υποστρώματος και η ακτίνα του α -σημείου είναι περίπου ίση με το πάχος του στρώματος, τότε το ηλεκτρικό ρεύμα 'απλώνεται' περισσότερο στο υπόστρωμα παρά στο στρώμα (βλ. Εικόνα 1.9). Η πτώση τάσης στη γειτονιά του α -σημείου είναι αμελητέα σε σχέση με την πτώση τάσης πάνω στο στρώμα. Επομένως, η διεπιφάνεια μετάλλου-στρώματος είναι σχεδόν ισοδυναμική, η πυκνότητα

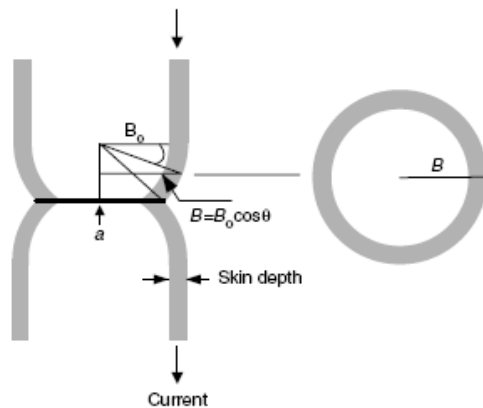
ρεύματος είναι ομοιόμορφη και η spreading resistance δίνεται από τη σχέση (12). [4]



Εικόνα 1.9 Κατανομή ρεύματος σε επιφανειακό μεταλλικό στρώμα με αγωγιμότητα (a) μικρότερη από το υπόστρωμα (b) μεγαλύτερη από το υπόστρωμα

1.5 Επίδραση της συχνότητας σήματος στην αντίσταση στένωσης

Η σχέση (12) που είδαμε προηγουμένως υπολογίστηκε με την προϋπόθεση ότι το ρεύμα που διαρρέει την επαφή είναι dc. Στην περίπτωση εναλλασσόμενου (ac) ρεύματος η κύρια διαφορά εντοπίζεται στο *επιδερμικό φαινόμενο* (skin effect), το οποίο περιορίζει την διείσδυση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στον αγωγό, σε ένα



Εικόνα 1.10 Επιδερμικό φαινόμενο

βάθος μερικές φορές μεγαλύτερο του βάθους ηλεκτρομαγνητικής διείσδυσης (electromagnetic penetration depth) δ , το οποίο δίνεται από τη σχέση

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}} \quad (23)$$

όπου f η συχνότητα του ac ρεύματος και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα

του κενού. Η διαφορά της αντίστασης στένωσης μεταξύ του ac και του dc οφείλεται πρακτικά στο ότι το ac ρεύμα, ειδικά σε υψηλές συχνότητες, συγκεντρώνεται κοντά στην επιφάνεια του αγωγού. Η απόκλιση συμβαίνει όταν το βάθος διείσδυσης είναι μικρότερο από τις χαρακτηριστικές διαστάσεις του αγωγού. Για μικρές συχνότητες, όπως η συχνότητα 50 Hz ή 60 Hz των ηλεκτρικών δικτύων χαμηλής τάσης σε Ευρώπη και Αμερική, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος της αντίστασης στένωσης για dc ρεύμα με την προϋπόθεση ότι $\frac{a}{\delta} < 0,1$. [4]

1.6 Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντίσταση στένωσης

1.6.1 Γενικά

Η διέλευση του ρεύματος από μια ηλεκτρική επαφή έχει σαν αποτέλεσμα τη θέρμανσή της. Μεγαλύτερη τιμή της αντίστασης επαφής έχει σαν αποτέλεσμα και μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας, πράγμα το οποίο μειώνει τη δυνατότητα των επαφών να άγουν μεγάλες τιμές ρεύματος και επιταχύνει τη διαδικασία οξείδωσης. Αν, προκειμένου να αυξηθεί η επιφάνεια επαφής και να μειωθεί η αύξηση της θερμοκρασίας αυξήσουμε την δύναμη που ασκείται στην επαφή, τότε θα έχουμε αυξημένη καταπόνηση της επαφής. Επίσης, για μεγαλύτερη δύναμη θα χρειαστεί ισχυρότερος μηχανισμός με συνέπεια την αύξηση του μεγέθους και του κόστους του διακόπτη. [7]

Άλλοι τρόποι μείωσης της αντίστασης επαφής περιλαμβάνουν είτε τη χρήση υλικών με καλή μεταλλική επαφή με μέτρια δύναμη επαφής (μαλακά μέταλλα όπως ο άργυρος και ο χαλκός) ή το σχεδιασμό των συστημάτων επαφής ώστε να παρουσιάζουν καθαριστική δράση όταν οι επαφές πλησιάζουν. [7]

Η εξασφάλιση χαμηλής αντίστασης επαφής είναι ιδιαίτερα σημαντική για συσκευές με επαφές που παραμένουν κλειστές για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να αναφερθούν κάποιες ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τις επαφές χαλκού, οι οποίες είναι και οι πλέον διαδεδομένες.

Οι επαφές χαλκού διαθέτουν το πλεονέκτημα ότι η λογική τιμή τους επιτρέπει το μεγαλύτερο μέγεθός τους, έτσι ώστε να μπορούν να δεχθούν μεγαλύτερες δυνάμεις επαφής και μεγαλύτερη καταπόνηση. Επιπλέον, παρουσιάζουν μικρή αύξηση θερμοκρασίας, λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητας και της καλής αγωγιμότητας. [7]

Αν και τα δύο μέρη της επαφής αποτελούνται από το ίδιο υλικό, η μέγιστη θερμοκρασία εντοπίζεται στην επιφάνεια της επαφής, ενώ σημεία που βρίσκονται μακριά από αυτήν χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αν θ η υπερθερμοκρασία στην επιφάνεια της επαφής πάνω από τον όγκο των μερών της επαφής και α ο θερμοκρασιακός συντελεστής της αντίστασης, η αντίσταση στένωσης, στην περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής θερμοκρασίας, θα αυξηθεί κατά έναν παράγοντα λίγο μικρότερο από $(1+\alpha\theta)$. Αν η κατανομή αυτή δεν είναι ομοιόμορφη και θ είναι η μέγιστη θερμοκρασία, τότε ο παράγοντας αύξησης της αντίστασης στένωσης γίνεται [19]

$$1 + \frac{2}{3}\alpha\theta \quad (24)$$

Ένας πρακτικός περιορισμός που ανακύπτει από την παραπάνω σχέση είναι ο τρόπος μέτρησης της θερμοκρασίας Θ . Μια πρώτη ιδέα θα ήταν η τοποθέτηση θερμοστοιχείων κοντά στην επαφή. Στην περίπτωση αυτή τα θερμοστοιχεία δεν θα μπορούσαν ποτέ να τοποθετηθούν αρκετά κοντά στην επιφάνεια της επαφής και το σφάλμα θα ήταν της ίδιας τάξης μεγέθους με τη ζητούμενη μέτρηση. [19]

Ένας έμμεσος τρόπος μέτρησης της Θ προκύπτει από το ότι η ροή θερμότητας πραγματοποιείται από τον ίδιο «δρόμο» με τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Ροή θερμότητας έχουμε όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας. Ανάλογα, ροή ηλεκτρικού ρεύματος έχουμε όταν υπάρχει διαφορά δυναμικού. Άρα, εξαιτίας αυτής της συμμετρίας, ενώ το περιβάλλον του αγωγού μονώνει ηλεκτρικά, αλλά όχι θερμικά, δεν μεταφέρεται θερμότητα από το ένα μέρος της επαφής στο άλλο. Με βάση αυτήν την παρατήρηση αποδεικνύεται ότι για μια μεταλλική επαφή σε θερμοδυναμική κατάσταση ισορροπίας ισχύει (σχέση φθ) [19]

$$\int_0^{\Theta} \rho \lambda d\theta = \frac{V^2}{8} \quad (25)$$

όπου $1/\rho$ η ηλεκτρική, λ η θερμική αγωγιμότητα και V η πτώση τάσης στην επαφή.

Στη συνέχεια δίνεται ένας πίνακας υπερθερμοκρασιών Θ (όταν το σώμα της επαφής βρίσκεται σε θερμοκρασία 20 °C) συναρτήσεως της τάσης V της επαφής, υπολογισμένα για το χαλκό. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι τα παρακάτω ισχύουν γενικά για τα μέταλλα επαφών, εξαιτίας του νόμου *Wiedemann-Franz*, σύμφωνα με τον οποίο το γινόμενο $\rho\lambda$ είναι σχεδόν ίδιο για τα διάφορα μέταλλα.

		μαλάκωμα		τήξη
V (Volt)	0,03	0,12	0,3	0,41
Θ (°C)	16	190	700	1063
$1 + \frac{2}{3}\alpha\Theta$	1,04	1,5	2,8	3,8

Πίνακας 1.3 Πίνακας υπερθερμοκρασιών και τάσης επαφής υπολογισμένος για επαφή χαλκού

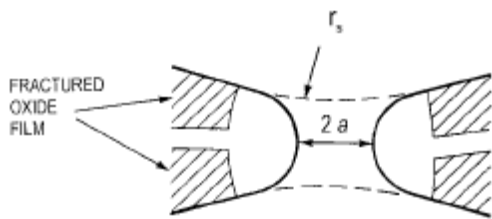
Από τα παραπάνω προκύπτει ένα ιδιαίτερα σημαντικό συμπέρασμα: η τάση μπορεί να μας πληροφορήσει για τον αν το μέταλλο έχει φτάσει στο σημείο τήξης. Το σημείο τήξης είναι ουσιαστικά η υψηλότερη θερμοκρασία για την οποία η επαφή είναι ακόμη στερεή και, επομένως, οποιαδήποτε προσπάθεια να αυξηθεί θα καταλήξει στη δημιουργία μεγαλύτερης επιφάνειας επαφής λόγω τήξης και συνακόλουθη πτώση της τάσης κάτω από την τάση τήξης. [19]

Ένα ζήτημα πρακτικής σημασίας είναι η αύξηση της επιφάνειας επαφής που πραγματοποιείται όταν το ρεύμα αυξάνει. Αυτό συμβαίνει διότι το μέταλλο μαλακώνει. Για να εξασφαλιστεί, επομένως, σταθερή επιφάνεια, οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας ξεκίνησαν με υψηλή τιμή ρεύματος και στη συνέχεια με χαμηλότερες τιμές.

1.6.2 Διάψευση της κλασικής θεωρίας ηλεκτρικών επαφών

1.6.2.1 Πειραματική διερεύνηση

Η εγκυρότητα της σχέσης μεταξύ τάσης και θερμοκρασίας ως συνάρτηση της μέσης διάστασης του α-σημείου έχει διερευνηθεί σε μονομεταλλικές επαφές αλουμινίου. Το πλεονέκτημα βάσει του οποίου επιλέχθηκε το μέταλλο αυτό έγκειται στο ότι η επιφάνεια επαφής του καλύπτεται από ένα στρώμα οξειδίου. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή η δημιουργία μικρών α-σημείων μέσω ρωγμών που σχηματίζονται στο στρώμα οξειδίου. Το πείραμα οργανώθηκε ως εξής: μια σειρά από ηλεκτρικά ζεύγη αλουμινίου γυαλίστηκαν σε οπτικά λεία ημισφαιρία. Η επιλογή της μορφής αυτής (ημισφαίριο) έγινε προκειμένου να δημιουργηθεί μια



Εικόνα 1.11 Σχηματικό διάγραμμα σημείου επαφής που δημιουργείται μεταξύ ρωγμών στο στρώμα οξειδίου του αλουμινίου

κυκλική επιφάνεια επαφής με εύκολα εντοπίσιμα α-σημεία (βλ. διπλανό σχήμα). Σε κάθε ζεύγος οι επιφάνειες επαφής καθαρίστηκαν από κάθε ίχνος οργανικής επιμόλυνσης. Ωστόσο, οι επιφάνειες οξειδώθηκαν ξανά σε θερμοκρασία δωματίου εξαιτίας της έκθεσής τους σε καθαρό αέριο οξυγόνο. Οι μέσες διαστάσεις του α-σημείου δεν

μπορούσαν να επηρεαστούν από το μέγεθος του μηχανικού φορτίου της επαφής και διέφεραν σημαντικά από το ένα ηλεκτρικό ζεύγος στο άλλο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με σταδιακή αύξηση του ρεύματος που διοχετεύονταν και ταυτόχρονη μέτρηση της θερμοκρασίας σε κάθε αύξησή του. Η θερμοκρασία του κυρίως όγκου (bulk) παρακολουθείτο συνεχώς. Μετά από κάθε αύξηση του ρεύματος, η θερμοκρασία T_m της επαφής υπολογιζόταν από μια αριθμητική λύση της εξίσωσης

$$\frac{R_c I}{\rho_c} = 2\chi(T_1, T_m) \quad (26)$$

όπου

$$\chi(T_1, T_m) = \int_{T_1}^{T_m} \left[2 \int_T^{T_m} \lambda \rho dT \right]^{-1/2} \lambda dT$$

και είναι γνωστά τα εξής: η ειδική αντίσταση ρ_c στη θερμοκρασία που μετράται, η θερμοκρασία T_1 του κυρίως όγκου στη θερμοδυναμική ισορροπία όταν περνάει το ρεύμα I και τα μεγέθη ρ και λ .

Η πτώση τάσης στην επαφή υπολογίζεται από τη σχέση

$$V = 2 \left(2 \int_{T_1}^{T_m} \lambda \rho dT \right)^{1/2} \quad (27)$$

Στη συνέχεια γινόταν αντικατάσταση της υπολογισθείσας τιμής της T_m στη σχέση (24), από την οποία υπολογιζόταν η πτώση τάσης. Από τη σύγκριση μεταξύ των θεωρητικά αναμενόμενων τιμών από την κλασική θεωρία και των τιμών που προέκυπταν πειραματικά έδειξε απόκλιση σε όλες τις περιπτώσεις που η μέση ακτίνα του α-σημείου ήταν μικρότερη των 30 nm, δηλαδή οποτεδήποτε ήταν της ίδιας ή μικρότερης τάξης από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των ηλεκτρονίων. [1]

1.6.2.2 Μαθηματική θεμελίωση

Η διάψευση της κλασικής θεωρίας βασίζεται στο ότι τα ηλεκτρόνια πραγματοποιούν βαλλιστική κίνηση καθώς διέρχονται μέσα από μικρά α-σημεία. Η κλασική θεωρία βασίζεται στο ότι το ρεύμα είναι συνεχές και ομαλά μεταβαλλόμενο. Πρακτικά όμως, σε μικροκλίμακα, η ροή του ρεύματος καθορίζεται από την άτακτη κίνηση των ηλεκτρονίων καθώς προσκρούουν στις ατέλειες του πλέγματος και σε άλλα εμπόδια του αγωγού και της διεπιφάνειας. [1]

Όπως έχει δειχθεί από διάφορες μελέτες, η ηλεκτρική αντίσταση ενός σημείου επαφής απαρτίζεται από μία επιπλέον συνιστώσα, την αντίσταση Knudsen, όταν το σημείο επαφής είναι αρκετά μικρό. Η επιπλέον συνιστώσα οφείλεται στη διάχυση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας από το όριο της στένωσης και είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν η ακτίνα στένωσης είναι μικρότερη από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των ηλεκτρονίων στο αγωγίμο μέσο. Η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι περίπου ίση με 10 nm για πολλά μέταλλα. Η αντίσταση επαφής που δημιουργείται δίνεται από τη σχέση

$$R = \frac{\rho}{2\alpha} \Gamma(K) + \frac{4\rho}{3\pi\alpha} K \quad (28)$$

όπου $K = \frac{l_{fp}}{\alpha}$ με l_{fp} τη μέση ελεύθερη διαδρομή και $\Gamma(K)$ μια συνάρτηση που λαμβάνει την τιμή 1 για μηδενικό K και μειώνεται αργά στην τιμή $\frac{9\pi^2}{128}$ για $K \ll 1$, αλλά αποκλίνει σημαντικά για $K \gg 1$. Στην παραπάνω έκφραση ο όρος $\frac{4\rho}{3\pi\alpha} K$ παριστάνει την αντίσταση Knudsen της επαφής. Επειδή η ειδική αντίσταση ρ είναι αντιστρόφως ανάλογη της μέσης ελεύθερης διαδρομής, η αντίσταση Knudsen είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας και παριστάνει την αντίσταση της στένωσης στην ροή ηλεκτρονίων που οφείλεται σε διάχυση. Επιπλέον, επειδή η αντίσταση αυτή προέρχεται από διάχυση στο όριο και όχι από την αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με το πλέγμα, δεν οδηγεί σε θέρμανση. Η αντίσταση που οδηγεί σε θέρμανση Joule με έναν τρόπο συνεπή ως προς τις υποθέσεις της κλασικής θεωρίας είναι μια ποσότητα της τάξης $R_c = \frac{4PK}{3\pi\alpha}$ όπως προκύπτει από την έκφραση (25) όπου R_c η αντίσταση στένωσης σε θερμοκρασίας δωματίου. Αν η αντίσταση αυτή είναι σημαντικά μικρότερη της R_c , όπως στην περίπτωση που το α είναι αρκετά μικρό, τότε η παραγωγή θερμότητας είναι πολύ μικρότερη από αυτήν που αναμένεται με βάση την κλασική θεωρία. Άρα, η θερμοκρασία επαφής και η πτώση τάσης που δίνονται από τις σχέσεις (23) και (24) αντίστοιχα είναι υπερ-εκτιμημένες. Στο

αλουμίνιο, λ.χ. η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι περίπου 10 nm και η επίδραση της αντίστασης Knudsen γίνεται σημαντική για α περίπου ίσο με 20 nm, κάτι το ποίο συμφωνεί και με τα πειραματικά αποτελέσματα. [1,4]

1.6.2.3 Φαινόμενα συσσωμάτωσης σε α -σημεία

Όπως δείξαμε παραπάνω, η κλασική θεωρία ηλεκτρικών επαφών παύει να ισχύει όταν τα α -σημεία είναι αρκετά μικρά. Πέρα τούτου όμως, μικρά α -σημεία χαρακτηρίζονται και από μοναδικές μηχανικές ιδιότητες. Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με μονομεταλλικές επαφές αλουμινίου σε συνθήκες πολύ υψηλού κενού δείχνουν ότι η αντίσταση της επαφής μειώνεται σταθερά με το χρόνο, δηλαδή με σταθερό μηχανικό φορτίο το α -σημείο αυξάνει. Η πτώση τάσης στα πειράματα αυτά ήταν της τάξης των μερικών mV, επομένως η αύξηση στην ακτίνα των α -σημείων δεν οφείλεται στο ότι η ηλεκτρική επιφάνεια θερμάνθηκε και μαλάκωσε. [1]

Τα πειραματικά δεδομένα μπορούν να ερμηνευθούν με βάση έναν μηχανισμό συσσωμάτωσης. Ο όρος συσσωμάτωση περιλαμβάνει κάθε μηχανισμό με τον οποίο ο 'λαιμός' της επαφής μεγαλώνει σαν αποτέλεσμα της μεταφοράς υλικού από τη άμεση 'γειονιά' της διεπιφάνειας προς την περιοχή της επαφής εξαιτίας κάποιας άγουσας δύναμης. Μακράν η σημαντικότερη δύναμη για μεταφορά μάζας στην περίπτωση της συμβατικής συσσωμάτωσης είναι εκείνη που προκαλείται από την επιφανειακή τάση (surface tension). Αν S' η επιφάνεια του 'λαιμού' τότε η ενέργεια επιφάνειας U του 'λαιμού' δίνεται από την έκφραση $\gamma S'$, όπου γ είναι η ενέργεια επιφάνειας του στερεού. Επειδή το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας μόνο όταν η U ελαχιστοποιείται, ο 'λαιμός' συνεχίζει να αυξάνεται έως ότου η επιφάνεια S' ελαχιστοποιηθεί. Η αξονική δύναμη που προκαλεί την αύξηση του λαιμού δίνεται επομένως από τη σχέση

$$F = -\frac{dU}{dr} \quad (29)$$

Εξαιτίας της δύναμης αυτής δημιουργείται μια μέση ακτινική τάση στην επιφάνεια του 'λαιμού' που, αν το α είναι κατά πολύ μικρότερο από τη μέση τοπική ακτίνα r_s της καμπύλης, δίνεται από την έκφραση

$$\sigma = \frac{3\gamma}{\alpha} \quad (30)$$

Η μεταφορά υλικού που απαιτείται για να τροφοδοτηθεί η αύξηση του 'λαιμού' μπορεί να πραγματοποιηθεί με συνδυασμό μηχανισμών όπως: επιφανειακή διάχυση (surface diffusion), διάχυση όγκου (volume diffusion), διάχυση ορίου-κόκκου (grain-boundary diffusion) και ερπυσμό. [1]

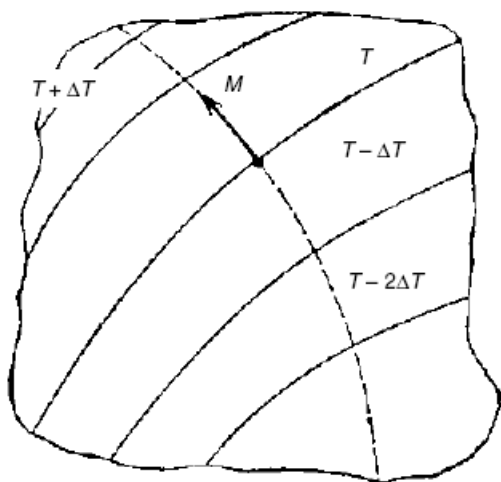
Ο ρυθμός ανάπτυξης του 'λαιμού' επιβραδύνεται από την παρουσία οξυγόνου: οι ρυθμοί ανάπτυξης των α-σημείων είναι μικρότεροι από εκείνους που παρατηρούνται στο κενό και οι καμπύλες ανάπτυξης φτάνουν σε 'πλάτωμα' σε σχετικά μικρό χρόνο. Η ανάπτυξη παρουσία αερίου οξυγόνου μπορεί να κατανοηθεί ποιοτικά με βάση το μοντέλο συσσωμάτωσης. Σύμφωνα με αυτό, ο 'λαιμός' της επαφής καλύπτεται από ένα επιφανειακό στρώμα οξειδίου με πάχος κάποιων nm. Έτσι, ο 'λαιμός' σκληραίνει, μειώνοντας τον ερπυσμό και ευθύνεται συνακόλουθα για το χαμηλό ρυθμό συσσωμάτωσης. [1]

Έχει σημασία να σημειώσουμε ότι ο ρυθμός συσσωμάτωσης σε διεπιφάνειες αλουμινίου αυξάνει ραγδαία με την αύξηση της θερμοκρασίας, ακόμη και παρουσία αερίου οξυγόνου. Μάλιστα, σε υψηλές θερμοκρασίες, δεν απαιτείται μικρή ακτίνα των α-σημείων για να έχουμε ταχύτατη αύξηση της επαφής.

Επίσης, η συσσωμάτωση είναι πιθανώς εν μέρει υπεύθυνη για την 'αυτο-θεραπεία' των ηλεκτρικών επαφών. Ωστόσο, είναι μάλλον απίθανο ότι διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μεταφορά μάζας σε επαφές στις οποίες συμβαίνει σε μεγάλη κλίμακα ψυχρή συγκόλληση (cold welding), καθώς στην περίπτωση αυτή τα α-σημεία είναι αρκετά μεγάλα. [1]

1.7 Θεωρία Θερμικής Αγωγής

1.7.1 Θερμότητα λόγω τριβής



Εικόνα 1.12 Ισοδυναμικές γραμμές πεδίου θερμοκρασίας

Σε κάθε σώμα στο οποίο διαδίδεται θερμοκρασία υπάρχουν επιφάνειες κάθε μία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από μια σταθερή θερμοκρασία. Οι επιφάνειες αυτές ονομάζονται ισοθερμικές (βλ. εικόνα 1.11). Ο συνδυασμός των επιφανειών κάθε δεδομένη στιγμή δίνει την κατανομή θερμοκρασίας στο σώμα, δηλαδή το πεδίο θερμοκρασίας. Το βασικό πρόβλημα της θεωρίας αγωγής

θερμότητας έγκειται στον προσδιορισμό αυτού του πεδίου. Βασική ιδιότητά του

αποτελεί το γεγονός ότι την ίδια στιγμή δεν μπορούν να υπάρχουν δύο διαφορετικές θερμοκρασίες στο ίδιο σημείο, δηλαδή δεν μπορούν να τέμνονται δύο ισοθερμικές επιφάνειες με διαφορετική θερμοκρασία. [4]

Το συντομότερο μονοπάτι για τη διάδοση θερμότητας είναι κατά μήκος του μοναδιαίου διανύσματος, κάθετου στην ισοδυναμική επιφάνεια που η πτώση θερμοκρασίας είναι μέγιστη. Η θερμότητα δεν διαδίδεται κατά μήκος των ισοδυναμικών επιφανειών. Το gradient θερμοκρασίας ορίζεται ως η διανυσματική παράγωγος της συνάρτησης θερμοκρασίας $T=T(x,y,z,t)$ ως προς το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα n :

$$\text{grad}T = n \frac{dT}{dn} \quad (31)$$

Στην περίπτωση που η παραπάνω έκφραση δεν μηδενίζεται, συμβαίνει μεταφορά θερμότητας, και μάλιστα σε κατεύθυνση αντίθετη του gradient. Η ροή θερμότητας ορίζεται ως θερμότητα ανά μονάδα χρόνου προς την κατεύθυνση της αυξανόμενης θερμοκρασίας και μετράται σε Watt (J/s). Η ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας κάθετη στην κατεύθυνση ροής συμβολίζεται με q , ονομάζεται ειδική ροή θερμότητας και μετράται σε W/m^2 ή $J/m^2.s$. Η ειδική ροή θερμότητας και το gradient της θερμοκρασίας συνδέονται με το Νόμο του Fourier

$$q = -\lambda \text{grad}T \quad (32)$$

όπου λ η θερμική αγωγιμότητα του αγωγού (σε W/mK).

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες, το τρισδιάστατο μη-στατικό πεδίο θερμοκρασίας περιγράφεται από τη διαφορική εξίσωση

$$\frac{dT}{dt} = a \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} \right) \quad (33)$$

από το οποίο απαλείφεται ο πρώτος και τρίτος όρος του δεξιού μέλους αν το πρόβλημα που εξετάζουμε είναι μονοδιάστατο. Το αντίστοιχο πρόβλημα σε κυλινδρικές συντεταγμένες περιγράφεται ως εξής

$$\frac{dT}{dt} = a \left(\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{d\varphi^2} \right) \quad (34)$$

Αν το σώμα περιέχει επίσης μια πηγή θερμότητας που παράγει ή απορροφά θερμότητα ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα όγκου Φ , δηλαδή με αποδοτικότητα Φ , τότε στο δεξιό μέλος της έκφρασης (34) πρέπει να προσθέσουμε τον όρο $\Phi/c\rho$. Για επαφή μεταξύ στερεών, η οριακή συνθήκη του προβλήματος είναι ότι οι επιφάνειες που έρχονται σε επαφή έχουν την ίδια θερμοκρασία (συνθήκη τετάρτου είδους). [4]

Μια σημαντική θεωρητική και πρακτική μοντελοποίηση αφορά τον υπολογισμό του πεδίου θερμοκρασίας που οφείλεται σε σημειακή πηγή θερμότητας. Αθροίζοντας τις λύσεις του πεδίου που προκύπτουν από τις εξισώσεις σημειακών πηγών βρίσκουμε το συνολικό πεδίο θερμοκρασίας. [4]

Το πεδίο θερμοκρασίας που οφείλεται σε μια *στιγμαιαία σημειακή πηγή* που απελευθερώνει θερμότητα Q σε μια πολύ μικρή επιφάνεια του ημιχώρου με αρχική θερμοκρασία T_0 δίνεται από τη σχέση

$$T = \frac{Q}{4\rho c(\pi\alpha t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{R^2}{4\alpha t}\right) \quad (35)$$

όπου R είναι η απόσταση μεταξύ του σημείου στο οποίο επιθυμούμε να προσδιορίσουμε τη θερμοκρασία και του σημείου στο οποίο 'δρα' η σημειακή πηγή. Παρατηρούμε ότι σύμφωνα με την παραπάνω σχέση η θερμοκρασία σε οποιαδήποτε σημείο αυξάνεται από το μηδέν μέχρι μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί.

Για μια *συνεχή σημειακή πηγή* που παράγει θερμότητα με ρυθμό q βρίσκεται ότι το πεδίο θερμοκρασίας στον ημιχώρο δίνεται από τη σχέση

$$\Delta T = \frac{q}{2\pi\lambda R} \operatorname{erfc}\left(\frac{R}{\sqrt{4\alpha t}}\right) \quad (36)$$

όπου $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$ η *συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος*. Από την σχέση αυτή εξαγάγουμε το συμπέρασμα ότι για χρόνο $t \gg \frac{R^2}{4\alpha}$ αναπτύσσεται δίπλα στην πηγή μόνιμη κατάσταση με θερμοκρασία $T = \frac{q}{2\pi\lambda R}$. [4]

1.7.2 Θερμότητα λόγω διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος

1.7.2.1 Επαφή χωρίς επιμολυντικά στρώματα

Σε αυτήν την περίπτωση η θερμότητα παράγεται σε μια μικρή περιοχή, την περιοχή στένωσης, η οποία είναι γειτονική στο σημείο της διεπιφάνειας με τη μέγιστη θερμοκρασία Q_m . Επειδή η μάζα που θερμαίνεται στην περιοχή στένωσης είναι αμελητέα, παρατηρείται ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας (σε $10^{-5} - 10^{-3} s$). Η αύξηση της θερμοκρασίας στην διεπιφάνεια δίνεται από την εξίσωση

$$V_c^2 = 8 \int_{T_0}^{T_m} z(T) \rho(T) dT \quad (37)$$

η οποία είναι γνωστή ως εξίσωση Kohlraush.

Η παραπάνω εξίσωση βασίζεται στην παραδοχή ότι τα όρια είναι θερμικά μονωμένα (δηλαδή αγνοείται η θερμική διάχυση στο όριο) και η θερμότητα Joule διαχέεται μόνο στο αγώγιμο μέσο. Ισχύει επίσης μόνο για σημεία αρκετά μεγάλης διαμέτρου (εκατοντάδων έως χιλιάδων μm). Για μικρότερη επιφάνεια η διάχυση θερμότητας σε γειτονικές μη αγώγιμες περιοχές οργανικών στρωμάτων ή

στρωμάτων οξειδίων δεν μπορεί να αγνοηθεί. Επίσης, αν αναλογιστούμε ότι η κλασική θεωρία δεν λαμβάνει υπόψη την αντίσταση Knudsen, η εξίσωση Kohlrash απέχει πολύ από την πραγματικότητα για μικρά σημεία.

Άλλη μία έλλειψη που εντοπίζεται στην παραπάνω σχέση αφορά το ότι δεν περιλαμβάνει την πιθανότητα της ανάπτυξης του σημείου επαφής όταν το ρεύμα αυξάνεται και η επαφή μαλακώνει. Για το λόγο αυτό είναι πιο βολικό να χρησιμοποιούμε την *παραμέτρο πυκνότητας ρεύματος* j . Στην περίπτωση ενός κυκλικού σημείου μονομεταλλικής επαφής ισχύει $j = \frac{I}{\pi a^2}$, $I = \frac{V_c}{R_s}$ όπου $R_s = \frac{\rho}{2a}$, επομένως

$$j = \frac{2V_c}{\pi \rho a} = \frac{4L \sqrt{T_m^2 - T_0^2}}{\pi \rho a} \quad (38)$$

Με βάση το μέγεθος αυτό μπορούμε να πούμε ότι η επιφάνεια της επαφής θερμαίνεται ραγδαία όταν η τιμή του j ξεπεράσει μια τιμή κατωφλίου j_{cr} , η οποία εξαρτάται από το είδος του μετάλλου (δηλαδή την τιμή του ρ) και το μέγεθος του σημείου επαφής (δηλαδή την ακτίνα a). [4]

1.7.2.2 Επαφή με επιμολυντικά στρώματα

Όπως είδαμε στη σχέση (20), όταν η επιφάνεια καλύπτεται από ένα συνεχές στρώμα, η αντίσταση της επαφής δίνεται από το άθροισμα της αντίστασης στένωσης και της αντίστασης του στρώματος. Εδώ δεν μπορεί να αγνοηθεί το φαινόμενο Joule, επομένως δεν μας αρκεί η εξίσωση Kohlrash για την εκτίμηση της θερμότητας που παράγει.

Ας υποθέσουμε ότι μεταξύ των μερών της επαφής παρεμβάλλεται ένα συνεχές στρώμα με ειδική αντίσταση R'_f , τότε η αντίσταση στένωσης δίνεται από τη σχέση $R_c = \frac{2g}{\pi a}$, δηλαδή

$$R_s = R_c + R_f = \frac{2\rho}{\pi a} + \frac{R'_f}{S} \quad (39)$$

όπου S η επιφάνεια του σημείου επαφής. Για επιφάνεια $S = \pi a^2$ που διαρρέεται από ρεύμα I η θερμότητα Joule δίνεται από τη σχέση

$$q_j = \frac{I^2 R_c}{S} = j^2 (2\alpha \rho + R'_f) \quad (40)$$

Άρα η αύξηση της θερμοκρασίας και η πυκνότητα ρεύματος δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις

$$Q_m = \frac{\pi \alpha j^2 (2\alpha\rho + R'_f)}{8z} \quad (41)$$

και

$$j = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{2Q_m z}{\alpha(2\alpha\rho + R'_f)}} \quad (42)$$

1.7.2.3 Πεδίο θερμοκρασίας για επαφή με στρώματα που επιτρέπουν φαινόμενο σήραγγος

Υποθέτουμε ότι το σημείο επαφής είναι κυκλικό, ακτίνας a και καλύπτεται από ένα συνεχές μονωτικό στρώμα πάχους h μικρότερου του 1 nm. Η αγωγιμότητα του σημείου επαφής καθορίζεται από την αντίσταση σήραγγος (tunnel resistance) και την αντίσταση στένωσης, οι οποίες βρίσκονται σε σειρά. Βρίσκουμε ότι η παραγόμενη θερμότητα δίνεται από τη σχέση

$$q_j = \frac{V_c^2}{R_c S} = \frac{V_c^2}{2\rho\alpha + R'_f} \quad (43)$$

Τώρα η άνοδος της θερμοκρασίας στην επαφή δίνεται από τη σχέση

$$Q_m = \frac{\pi V_c^2 \alpha}{8z(2\alpha\rho + R'_f)} = \frac{\pi h^2 \alpha}{8z(2\alpha\rho + R'_f)} E^2 \quad (44)$$

όπου E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Ακόμη και για πολύ λεπτά στρώματα τα σημεία επαφής αρχίζουν να θερμαίνονται μόνο για πολύ υψηλές τιμές έντασης ηλεκτρικού πεδίου. Από την παραπάνω σχέση παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του δοσμένου μετάλλου, τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση E που απαιτείται για να επιτευχθεί η επιθυμητή υπερθέρμανση Q_m . Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι λ.χ. ο χαλκός χρειάζεται μεγαλύτερη ένταση ηλεκτρικού πεδίου από το ασάλι για να εμφανίσει την ίδια άνοδο θερμοκρασίας για ίδιες τιμές της ακτίνας a και ίδιο πάχος στρώματος h . [4]

1.8 Συμπεράσματα

Θεωρείται σκόπιμο στο σημείο αυτό να συνοψίσουμε κάποια συμπεράσματα από τη θεωρητική μελέτη που πραγματοποιήσαμε. Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν αν διατυπωθούν ως εξής :

-Επειδή το ηλεκτρικό ρεύμα κατά τη διέλευσή του από τη διεπιφάνεια της επαφής περιορίζεται δραματικά σε ένα α-σημείο, η θερμοκρασία του α-σημείου μπορεί να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία στο κυρίως σώμα των μερών της επαφής. Η 'καθολική' παράμετρος που καθορίζει τη θερμοκρασία στα α-σημεία είναι η πτώση τάσης, όχι η ένταση του ρεύματος.

-Ροή μάζας μέσα από ένα α-σημείο μπορεί να συμβεί στη θερμοκρασία που το μέταλλο μαλακώνει (softening temperature) ή ακόμη και σε θερμοκρασία δωματίου όταν τα α-σημεία είναι αρκούντως μικρά και συμβαίνει συσσωμάτωση.

-Με καλή προσέγγιση, η πραγματική επιφάνεια επαφής εξαρτάται μόνο από το μηχανικό φορτίο και όχι από την ονομαστική επιφάνεια επαφής ή την μικροτοπογραφία της επιφάνειας.

1.9 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς των επαφών ηλεκτρικών διακοπών που έχουν υποστεί καταπόνηση και η σύγκριση της συμπεριφοράς αυτής με όμοιες επαφές διακόπτη που δεν έχει τεθεί ξανά σε λειτουργία. Η μελέτη επίσης περιλαμβάνει τη διερεύνηση της επίδρασης του είδους καλωδίου τροφοδοσίας στην απαγωγή της θερμότητας από τις επαφές.

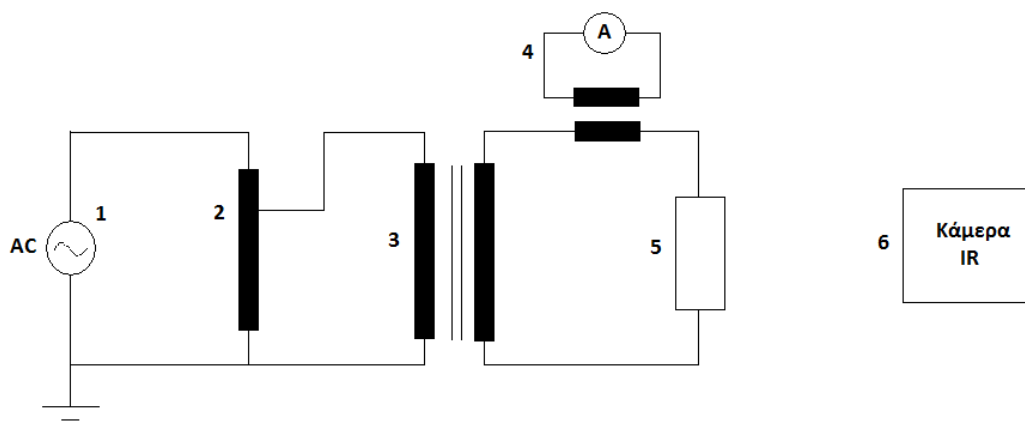
Οι ηλεκτρικές επαφές θα πρέπει να πληρούν ορισμένα κριτήρια : ηλεκτρικά, μηχανικά, χημικά και θερμικά. Από ηλεκτρικής άποψης, θα πρέπει να είναι αγώγιμες και να εμφανίζουν μικρή και σταθερή σύνθετη αντίσταση, ιδιαίτερα σε επαφές που προβλέπεται να μείνουν κλειστές για μεγάλο χρονικό διάστημα. Από μηχανικής πλευράς, οι επαφές πρέπει να είναι σταθερές και συμπαγείς. Τέλος, οι επαφές οφείλουν να είναι χημικά και θερμικά σταθερές.

2. Τα κυκλώματα μέτρησης και η διαδικασία των μετρήσεων

Στο τμήμα αυτό της εργασίας δίνεται το κύκλωμα μέτρησης και η διαδικασία των μετρήσεων που ακολουθήθηκε για όλες τις επαφές των διακοπών που εξετάστηκαν.

2.1 Κύκλωμα μέτρησης

Το κύκλωμα μέτρησης δίνεται στο ακόλουθο σχήμα :



Εικόνα 2.1 Κύκλωμα μέτρησης

1: Πηγή εναλλασσόμενης τάσης, 2: Αυτομετασχηματιστής, 3: Μετασχηματιστής χαμηλής τάσης,

4: Αμπερόμετρο, 5: Αυτόματος διακόπτης, 6: Θερμοκάμερα (Κάμερα υπερύθρων)



Εικόνα 2.2 Μετασχηματιστής 230/9 V

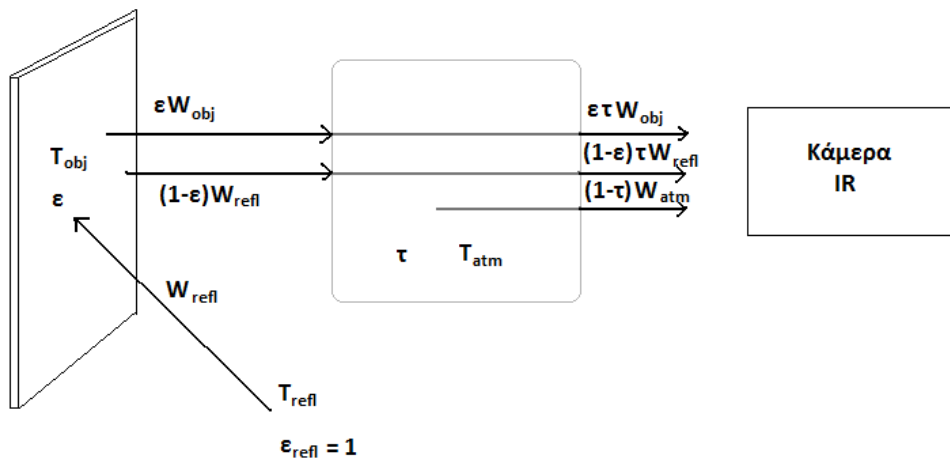
Για την τροφοδοσία του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο χαμηλής τάσης 230 V, 50 Hz του εργαστηρίου. Επίσης χρησιμοποιήθηκε αυτομετασχηματιστής της Superior Electric Co. και μετασχηματιστής ονομαστικής πραγματικής ισχύος 3 KW, με ονομαστικά μεγέθη πρωτεύοντος 230 V, 13 A και δευτερεύοντος 9 V, 333 A (βλ. Εικόνα 2.3). Για τη μέτρηση του ρεύματος χρησιμοποιήθηκε αμπερόμετρο της LEYBOLD-HERAUS με αμπεροτσιμπίδα (βλ. εικόνα 2.2). Οι διακόπτες που εξετάστηκαν συνδέονταν με τον μετασχηματιστή διαδοχικά με καλώδια μονόκλιωνα και πολύκλιωνα 6 mm^2 και 10 mm^2 .



Εικόνα 2.3 Αμπερόμετρο με αμπεροτσιμπίδα (αριστερά) και ο αυτομετασχηματιστής (δεξιά)

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να αναφερθούν κάποια στοιχεία σχετικά με τη θερμοκάμερα που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των επαφών. [10] Πρόκειται για τη θερμοκάμερα FLIR B620. Η κάμερα διαθέτει ακρίβεια $\pm 2\%$ της μετρούμενης τιμής. [10]

Όταν η θερμοκάμερα στρέφεται προς ένα αντικείμενο, δέχεται ακτινοβολία τόσο από το ίδιο το αντικείμενο όσο και από ανάκλαση πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου, οι οποίες μάλιστα εξασθενούν καθώς διέρχονται από την ατμόσφαιρα. Υπάρχει και μία επιπλέον συνιστώσα ακτινοβολίας που πρέπει να υπολογιστεί: η ακτινοβολία από την ίδια την ατμόσφαιρα (βλ. Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4 Αναπαράσταση της γενικής θερμογραφικής κατάστασης μετρήσεων

Έστω μια πηγή ακτινοβολίας ισχύος W , η οποία βρίσκεται σε μικρή απόσταση, αποτελεί μέλαν σώμα και βρίσκεται σε θερμοκρασία T_{source} . Η ακτινοβολία αυτή παράγει σήμα εξόδου κάμερας U_{source} , ανάλογο προς την είσοδο ισχύος, δηλαδή [10]

$$U_{source} = cW(T_{source}) \quad (45)$$

όπου c μια σταθερά.

Αν η πηγή ήταν τεφρό σώμα με συντελεστή εκπομπής ϵ , τότε η λαμβανόμενη ακτινοβολία θα ήταν ϵW_{source} .

Οι τρεις συνιστώσες της ακτινοβολίας περιγράφονται μαθηματικά ως εξής :

(1) *Εκπομπή από το αντικείμενο*

Είναι η ποσότητα $\varepsilon\tau W_{obj}$, όπου ε ο συντελεστής εκπομπής του αντικειμένου και τ ο συντελεστής διαπερατότητας της ατμόσφαιρας. Το αντικείμενο βρίσκεται σε θερμοκρασία T_{obj} .

(2) *Εκπομπή μέσω ανάκλασης από πηγή του περιβάλλοντος*

Περιγράφεται από την ποσότητα $(1 - \varepsilon)\tau W_{refl}$, όπου $(1-\varepsilon)$ ο συντελεστής ανάκλασης του αντικειμένου. Οι πηγές του περιβάλλοντος βρίσκονται σε θερμοκρασία T_{refl} .

(3) *Εκπομπή από την ατμόσφαιρα*

Δίνεται από την ποσότητα $(1 - \tau)W_{atm}$, όπου $(1-\tau)$ ο συντελεστής εκπομπής της ατμόσφαιρας, η οποία έχει θερμοκρασία T_{atm} .

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις, λαμβάνουμε για τη συνολική ακτινοβολία που δέχεται η θερμοκάμερα

$$W_{tot} = \varepsilon\tau W_{obj} + (1 - \varepsilon)W_{refl} + (1 - \tau)W_{atm} \quad (46)$$

Πολλαπλασιάζοντας κάθε όρο με τη σταθερά c έχουμε

$$U_{tot} = \varepsilon\tau U_{obj} + (1 - \varepsilon)U_{refl} + (1 - \tau)U_{atm} \quad (47)$$

Λύνοντας την παραπάνω ως προς U_{obj} λαμβάνουμε τελικά το μαθηματικό τύπο μετρήσεων που χρησιμοποιείται στη θερμοκάμερα FLIR

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon\tau} U_{tot} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} U_{refl} - \frac{1-\tau}{\varepsilon\tau} U_{atm} \quad (48)$$

Να σημειωθεί επίσης ότι ο χώρος του εργαστηρίου προφυλασσόταν από την ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές υπεριώδους ακτινοβολίας κατά τη λειτουργία της θερμοκάμερας. Για αυτό στην παραπάνω ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά της ηλιακής ακτινοβολίας.

Επομένως, οι παράμετροι της κάμερας που ρυθμίστηκαν είναι :

- ο συντελεστής εκπομπής, οποίος ρυθμίστηκε στην τιμή 0,93 που αντιστοιχεί στο υλικό του περιβλήματος των διακοπών (PVC)
- η απόσταση από την εξεταζόμενη επαφή, η οποία ρυθμίστηκε στα 0,5 m
- η υγρασία, η οποία ρυθμίστηκε στο 30 %

Με την κάμερα λήφθηκαν υπέρυθρες φωτογραφίες τύπου JPEG τόσο κατά τη διάρκεια της θέρμανσης των επαφών όσο και κατά τη διάρκεια της ψύξης.

2.2 Η διαδικασία των μετρήσεων και οι ηλεκτρικές επαφές που εξετάστηκαν

Στα πλαίσια της εργασίας μελετήθηκαν οι επαφές τριών ηλεκτρικών τριφασικών αυτόματων διακοπών. Στη συνέχεια δίνονται κάποια τεχνικά στοιχεία που τους αφορούν :

Στην εικόνα 2.5 δίνεται ο τριφασικός διακόπτης μοντέλου SIEMENS 5TE1 413 με ονομαστικά μεγέθη 40 A, 380 V. Πειραματικά εξετάστηκαν οι δύο από τις τρεις επαφές του διακόπτη, και συγκεκριμένα οι δύο 'εξωτερικές'. Δεν ήταν δυνατόν να μετρηθεί η θερμοκρασία της κεντρικής επαφής, καθώς δεν ήταν προσβάσιμη από τη θερμοκάμερα επειδή ακριβώς μεταξύ της κάμερας υπέρυθρων και της επαφής παρεμβάλλεται άλλη μία επαφή.

Στην Εικόνα 2.6 δίνεται ο διπολικός διακόπτης μοντέλου SIEMENS 5TE1 312 με ονομαστικά μεγέθη 25 A, 380 V. Σε αυτόν τον διακόπτη εξετάστηκε η μία μόνο επαφή, καθώς κατά την τροφοδοσία της δεύτερης δεν μπορούσε να διατηρηθεί σταθερή η ένταση του ρεύματος τροφοδοσίας.



Εικόνα 2.5 Τριφασικός διακόπτης
SIEMENS STE1 413



Εικόνα 2.6 Διπολικός διακόπτης
SIEMENS STE1 312

Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω διακόπτες ήταν καταπονημένοι και είχαν αφαιρεθεί από πίνακα χαμηλής τάσης λόγω δυσλειτουργίας. Η θερμοκρασία που αναπτύχθηκε στις επαφές τους εξετάστηκε για τιμές έντασης ρεύματος 1 A, 2 A, 5 A.

Στην Εικόνα 2.7 δίνεται ο διπολικός διακόπτης μοντέλου ABB E202 με ονομαστικά μεγέθη 45 A, 400 V. Εξετάστηκε η μία επαφή του για τιμές έντασης ρεύματος 2 A, 5 A και 10 A.



Εικόνα 2.7 Διπολικός διακόπτης ABB

Η διαδικασία των μετρήσεων περιλάμβανε τα εξής στάδια :

1. σύνδεση κάθε επαφής με το ηλεκτρικό κύκλωμα που περιγράφηκε παραπάνω με ένα ζεύγος καλωδίων από τα προς εξέταση (μονόκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm², πολύκλωνο καλώδιο διατομής mm², μονόκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm² και πολύκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²)
2. παροχή μιας τιμής ρεύματος, ξεκινώντας από τη μέγιστη δυνατή για κάθε επαφή
3. λήψη μέσω της κάμερας υπέρυθρων των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην επαφή ανά διαρκώς αυξανόμενα χρονικά διαστήματα
4. όταν η θερμοκρασία της επαφής σχεδόν σταθεροποιείτο ή όταν έφτανε σε ένα μέγιστο όριο (περίπου στους 80 ° C) διακόπταμε την τροφοδοσία και λαμβάναμε τη θερμοκρασία της επαφής ανά διαρκώς αυξανόμενα χρονικά διαστήματα
5. στη συνέχεια η επαφή συνδεόταν με διαφορετικό καλώδιο και επαναλαμβάνονταν τα βήματα 1 έως 4

Στη συνέχεια δίνονται σε ένα συγκεντρωτικό πίνακα τα στοιχεία των διακοπών που εξετάστηκαν :

Διακόπτης	Ονομαστικά μεγέθη	Πλήθος επαφών που εξετάστηκαν	Τιμή ρεύματος τροφοδοσίας (σε A)	Διατομή καλωδίων (σε mm ²)
SIEMENS 5TE1 413	40 A, 380 V	2	1, 2, 5	6, 10 (μονό-/πολύκλωνο)
SIEMENS 5TE1 312	25 A, 380 V	1	1, 2, 5	6, 10 (μονό-/πολύκλωνο)
ABB E202	45 A, 400 V	1	2, 5, 10	6, 10 (μονό-/πολύκλωνο)

Πίνακας 2.1 Στοιχεία των επαφών που εξετάστηκαν

3. Αποτελέσματα των μετρήσεων

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιήσουμε μια συνοπτική παρουσίαση, χωρίς κάποιο σχολιασμό, των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις μετρήσεις. Τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται σε πρώτο επίπεδο με βάση την ένταση του ρεύματος και σε δεύτερο επίπεδο με βάση το καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση των διακοπών. Οι μετρήσεις θερμοκρασίας δίνονται για τιμές χρόνου που αντιστοιχούν σε 0, 5, 10, 15 και 20 λεπτά μετά την έναρξη της τροφοδότησης με ρεύμα και στους ίδιους χρόνους μετά τη διακοπή της τροφοδότησης. Μετά από κάθε σειρά μετρήσεων δίνονται και τα σχετικά διαγράμματα, δηλαδή οι καμπύλες θέρμανσης και ψύξης που οπτικοποιούν τη συμπεριφορά κάθε δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου και του καλωδίου σύνδεσης.

Στην παράθεση των μετρηθεισών θερμοκρασιών κατά τη θέρμανση δεν δίνεται η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε, καθώς αυτή αποτελεί την αρχική θερμοκρασία κατά την ψύξη και άρα δίνεται στο κομμάτι του πίνακα που αφορά την ψύξη του δοκιμίου.

Να σημειωθεί ότι για τον διακόπτη ABB E202 δεν λήφθησαν μετρήσεις παρά μόνο για τιμές ρεύματος 2 A, 5 A και 10 A, καθώς σε χαμηλότερες τιμές (1 A) η αύξηση της θερμοκρασίας ήταν πρακτικά αμελητέα. Μάλιστα, επειδή για τιμή ρεύματος 2 A ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας ήταν πολύ μικρός (της τάξης του ενός °C σε 1 min) οι μετρήσεις αυτές δεν καταγράφονται και δεν λαμβάνονται υπόψη στη συνέχεια. Επίσης, δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για ρεύμα έντασης 10 A στα υπόλοιπα δείγματα λόγω της ραγδαίου ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας τους, ο οποίος παρατηρείται ακόμη και για ένταση ρεύματος 5 A.

3.1 Συνοπτικοί πίνακες παρουσίασης των αποτελεσμάτων

Ρεύμα τροφοδοσίας 1A

Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²

t (min)	θέρμανση				ψύξη			
	φάση1	φάση2	διπολ.	διπ.ABB	φάση1	φάση2	διπολ.	διπ.ABB
0	31	30,4	29,7	-	42,5	35	39,7	-
5	38,3	33	35,2	-	35,9	32,5	33,8	-
10	40,9	34,1	36,8	-	33,3	31,5	32,1	-
15	41,8	34,6	37,6	-	32,2	30,9	31,3	-
20	42,3	35	37,7	-	31,7	30,6	30,9	-

Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²

t (min)	θέρμανση				ψύξη			
	φάση1	φάση2	διπολ.	διπ.ABB.	φάση1	φάση2	διπολ.	διπ.ABB
0	30,4	28,1	30,1	-	49,4	35,7	35,9	-
5	43	31,7	33,6	-	37,4	32	32,3	-
10	47,2	33,4	34,8	-	33,5	30,4	31,3	-
15		34,2	35,5	-	32	29,7	30,7	-
20		34,6	35,9	-	31,2	29,3	30,5	-

Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²

t (min)	θέρμανση				ψύξη			
	φάση1	φάση2	διπολ.	διπ.ABB.	φάση1	φάση2	διπολ.	διπ.ABB
0	32,5	32	33,2	-	49,7	42	34,8	-
5	44,3	41,3	34,6	-	38,7	35,4	33,3	-
10	49,6	42	35	-	35,5	33,1		-
15				-	34,1	32,2		-
20				-	33,4			-

Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²

<i>t (min)</i>	θέρμανση				ψύξη			
	<i>φάση1</i>	<i>φάση2</i>	<i>διπολ.</i>	<i>διπ.ABB</i>	<i>φάση1</i>	<i>φάση2</i>	<i>διπολ.</i>	<i>διπ.ABB</i>
0	29,4	31,5	30,9	-	39,4	41	40,8	-
5	39,4	38,5	39	-	33,3	35,4	35,2	-
10	43,1	41	40,8	-	31,2	33,3	33,6	-
15				-	30,1	32,3	32,6	-
20				-	29,7	31,8	32,1	-

Ρεύμα τροφοδοσίας 2A

Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²

<i>t (min)</i>	θέρμανση				ψύξη			
	<i>φάση1</i>	<i>φάση2</i>	<i>διπολ.</i>	<i>διπ.ABB</i>	<i>φάση1</i>	<i>φάση2</i>	<i>διπολ.</i>	<i>διπ.ABB</i>
0	32,1	31,3	31,3	-	67,1	69,2	60,7	-
5	56,5	53,7	50,3	-	48,3	48,8	43,8	-
10	64	62,4	56,5	-	40,4	40,4	37,9	-
15	66	66,1	60,5	-	36,6	36,2	35,1	-
20	67,1	68		-	35,3	34,4	33,4	-

Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²

<i>t (min)</i>	θέρμανση				ψύξη			
	<i>φάση1</i>	<i>φάση2</i>	<i>διπολ.</i>	<i>διπ.ABB</i>	<i>φάση1</i>	<i>φάση2</i>	<i>διπολ.</i>	<i>διπ.ABB</i>
0	29,4	28,8	29,6	-	61,5	48	43,8	-
5	52,8	39,3	38,5	-	41,5	38,7	35,7	-
10	59,8	43,6	41	-	35,4	34,5	33,2	-
15	62,2	45,3	42,2	-	32,9	32,6	31,7	-
20		46	42,8	-	31,6	31,6	31	-

Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²

<i>t (min)</i>	θέρμανση				ψύξη			
	<i>φάση1</i>	<i>φάση2</i>	<i>διπολ.</i>	<i>διπ.ABB</i>	<i>φάση1</i>	<i>φάση2</i>	<i>διπολ.</i>	<i>διπ.ABB</i>
0	31,4	32	33,2	-	59,1	53	43,2	-
5	51,9	50,6	40,4	-	41,9	40,1	37,1	-
10	57,2	53	42,7	-	36,7	35,2	34,9	-
15	59,1			-	35,2	33,4	34	-
20				-	33,6	32,5	33,5	-

Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²

<i>t (min)</i>	θέρμανση				ψύξη			
	<i>φάση1</i>	<i>φάση2</i>	<i>διπολ.</i>	<i>διπ.ABB</i>	<i>φάση1</i>	<i>φάση2</i>	<i>διπολ.</i>	<i>διπ.ABB</i>
0	29	31	29,8	-	61,3	58,3	58,8	-
5	45,1	48	37,1	-	41,5	43,6	41,2	-
10	51,5	54,6	45,4	-	35	37,1	36,2	-
15	57,2	57,3	52,8	-	33,3	34,4	34	-
20	58,4	58,3	55,5	-	31,1	33	32,6	-

Ρεύμα τροφοδοσίας 5A**Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²**

<i>t (min)</i>	θέρμανση				ψύξη			
	<i>φάση1</i>	<i>φάση2</i>	<i>διπολ.</i>	<i>διπ.ABB</i>	<i>φάση1</i>	<i>φάση2</i>	<i>διπολ.</i>	<i>διπ.ABB</i>
0	32	31,4	31,3	26,6	80,7	80,7	80,1	46,2
5	67,8	79,7	79,2	36,4	50,2	52,3	45,7	35,8
10					40,1	41,2	38,1	31
15					36,4	36,7	35,2	28,7
20					34,6	34,5	33,5	27,5

Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²

t (min)	θέρμανση				ψύξη			
	φάση1	φάση2	διπολ.	διπ.ABB	φάση1	φάση2	διπολ.	διπ.ABB
0	29,1	30,2	30,1	25,5	81	80,7	80,3	44,6
5	67,8		67,7	35,2	45,7	50,8	48,9	35,3
10			76,9	40	36,2	39,2	40,2	30,5
15				42,2	32,6	34,7	36,2	28,3
20				43,4	31	32,5	34,2	26,9

Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²

t (min)	θέρμανση				ψύξη			
	φάση1	φάση2	διπολ.	διπ.ABB	φάση1	φάση2	διπολ.	διπ.ABB
0	31,6	31,4	32,9	25,1	80	80,9	80,3	48,2
5	71,1		72,2	38,5	50,6	48,8	50,4	37,5
10				44,3	40,2	38,7	41,6	32,1
15				46,4	36,3	34,9	37,7	29,8
20				47,3	34,4	33,5	35,9	28,5

Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²

t (min)	θέρμανση				ψύξη			
	φάση1	φάση2	διπολ.	διπ.ABB	φάση1	φάση2	διπολ.	διπ.ABB
0	29	29,4	29,7	25,5	80,1	80,7	80,1	40,8
5	70,1		69,8	33,9	47	48,6	47,7	32,4
10			78,1	37,8	37,5	38,1	39	28,6
15				39,8	33,7	34	35,1	26,8
20				40,8	31,8	32	33,6	25,8

Ρεύμα τροφοδοσίας 10Α

Οι όροι *μον.* και *πολ.* αντίστοιχα αναφέρονται σε μονόκλωνο και πολύκλωνο καλώδιο και ο αριθμός δίπλα (6 ή 10) στη διατομή του. Όπως σημειώθηκε και προηγούμενα, τα παρακάτω αποτελέσματα αναφέρονται στον διακόπτη της ABB.

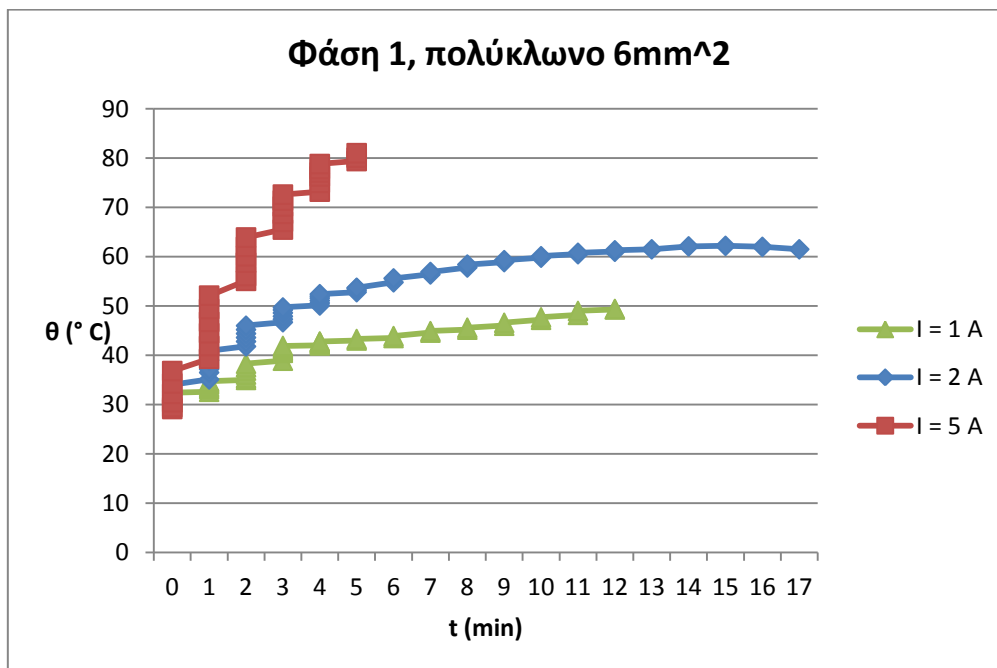
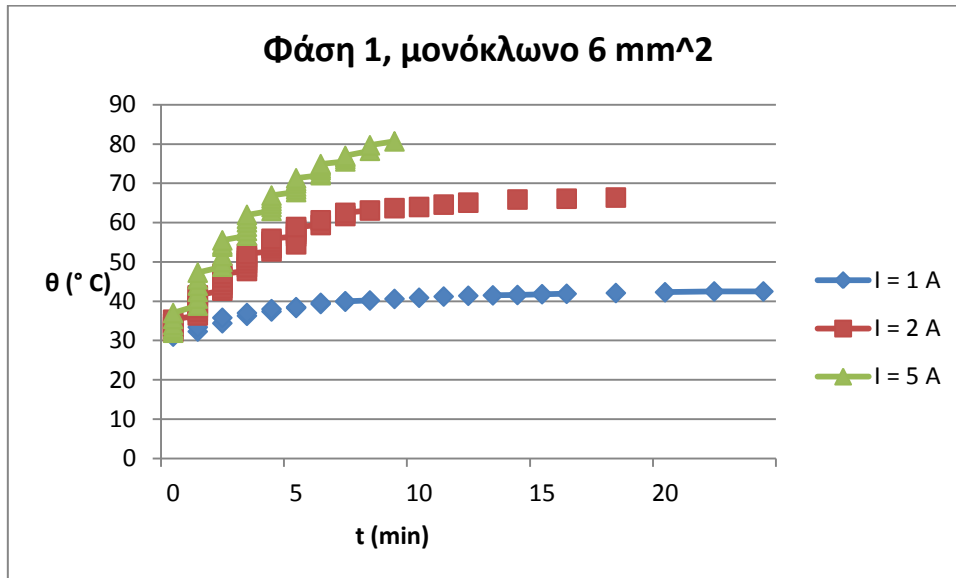
<i>t (min)</i>	θέρμανση				ψύξη			
	<i>μον.6</i>	<i>πολ.6</i>	<i>μον.10</i>	<i>πολ.10</i>	<i>μον.6</i>	<i>πολ.6</i>	<i>μον.10</i>	<i>πολ.10</i>
0	26	24,9	26,5	24,3	80	79,8	77,7	77,9
5	62,9	65,4	58	64,2	53,7	51,8	52,5	50,3
10	78,1	78,5	72,3	75,3	39,5	38,5	40,6	38,2
15			76,1	77,5	33,8	33	35	33
20			77,7	77,9	30,6	30	32,1	30

3.2 Καμπύλες θέρμανσης

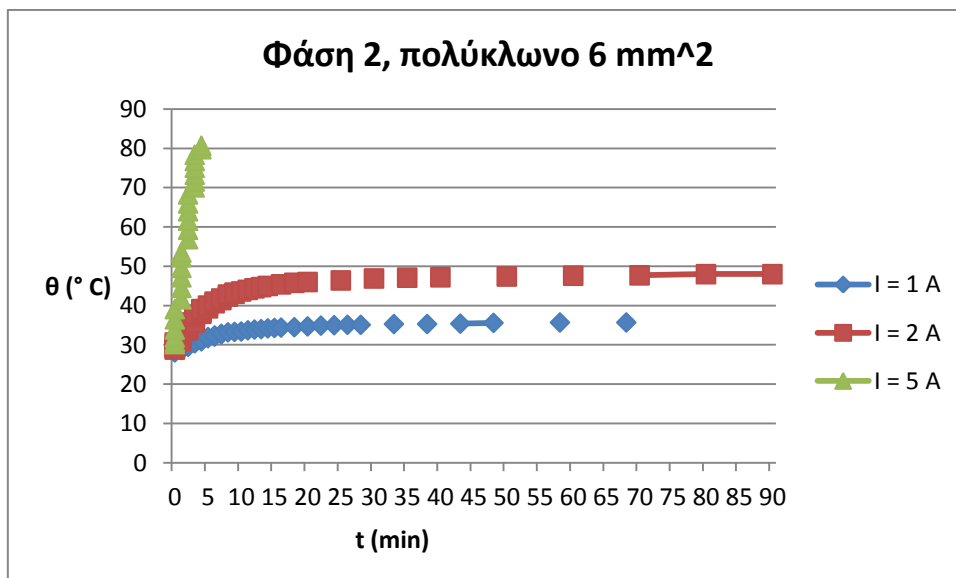
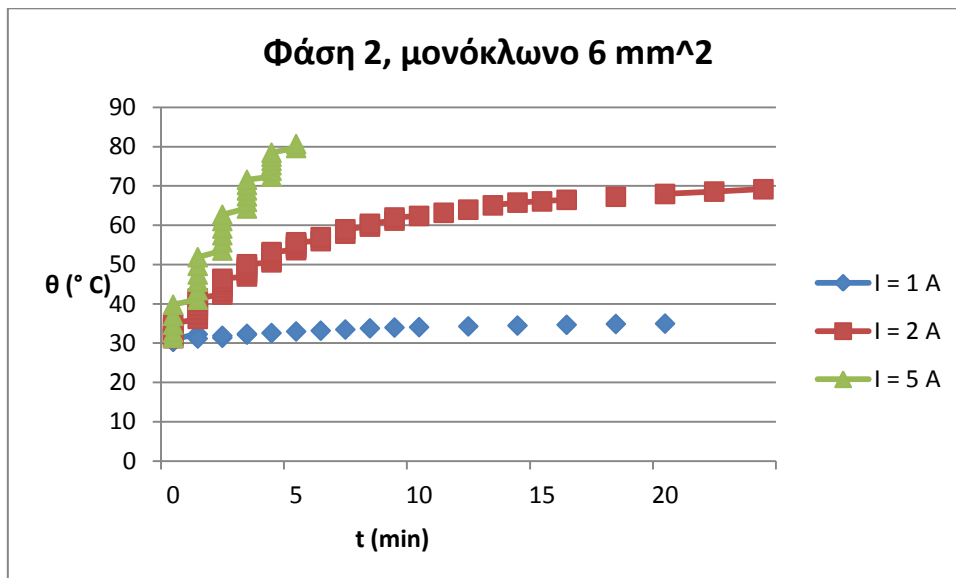
Στη συνέχεια δίνονται οι καμπύλες θέρμανσης για κάθε επαφή. Τα διαγράμματα έχουν προκύψει από τις αναλυτικές μετρήσεις που δίνονται στο παράρτημα. Κάθε διάγραμμα παρουσιάζει τη συμπεριφορά της επαφής συναρτήσει του χρόνου, για συγκεκριμένη τιμή έντασης ρεύματος και καλώδια ίδιας διατομής αλλά διαφορετικού τύπου (μονόκλωνο, πολύκλωνο). Τα διαγράμματα δεν ακολουθούνται από λεζάντες, καθώς ο τίτλος τους παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες.

3.2.1 Καμπύλες για καλώδια διατομής 6 mm²

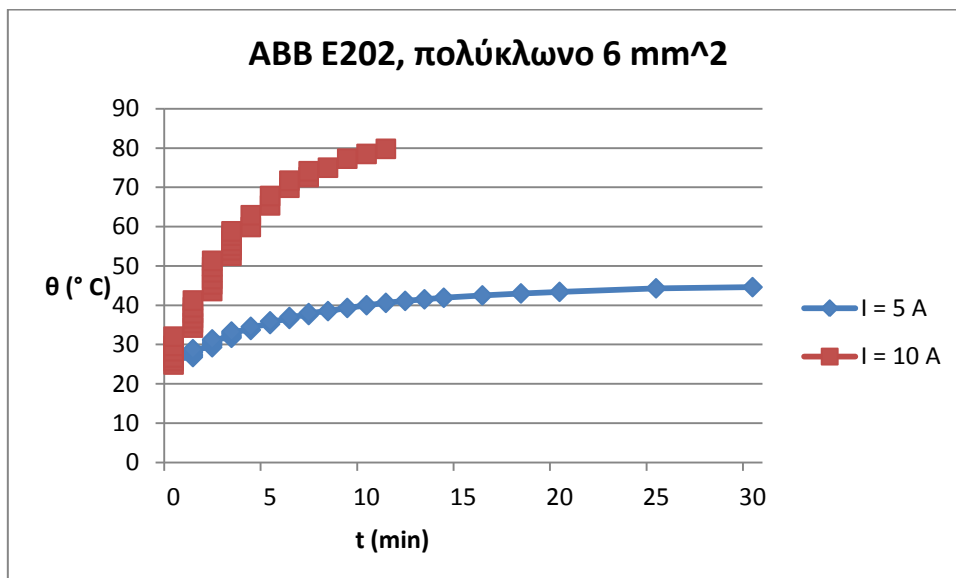
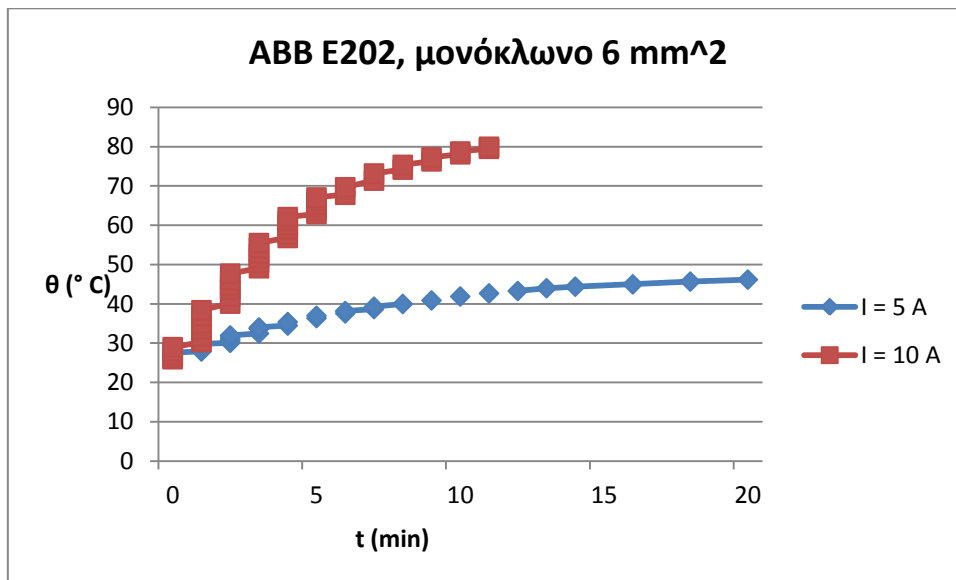
3.2.1.1 Καμπύλες για τον διακόπτη SIEMENS 5TE1 413 - Φάση 1



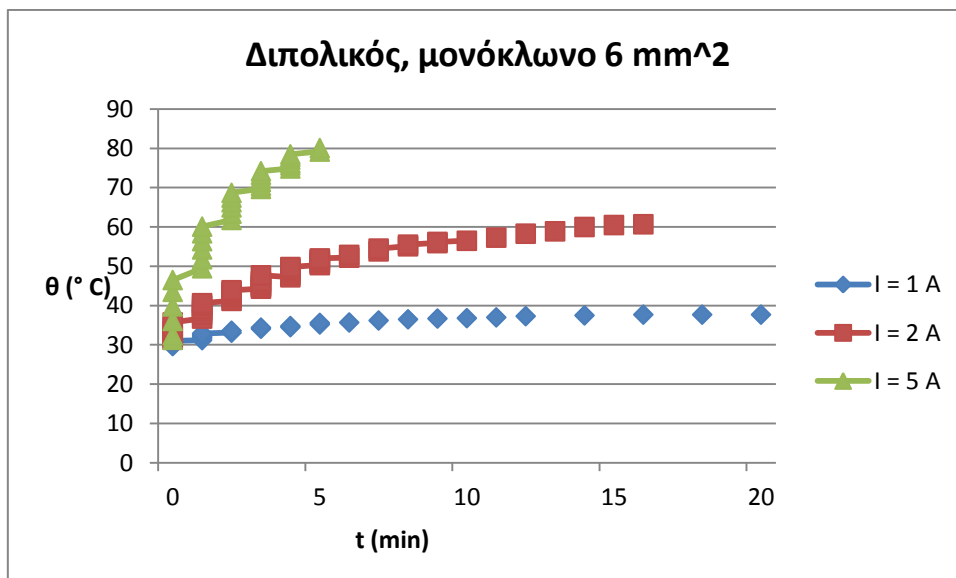
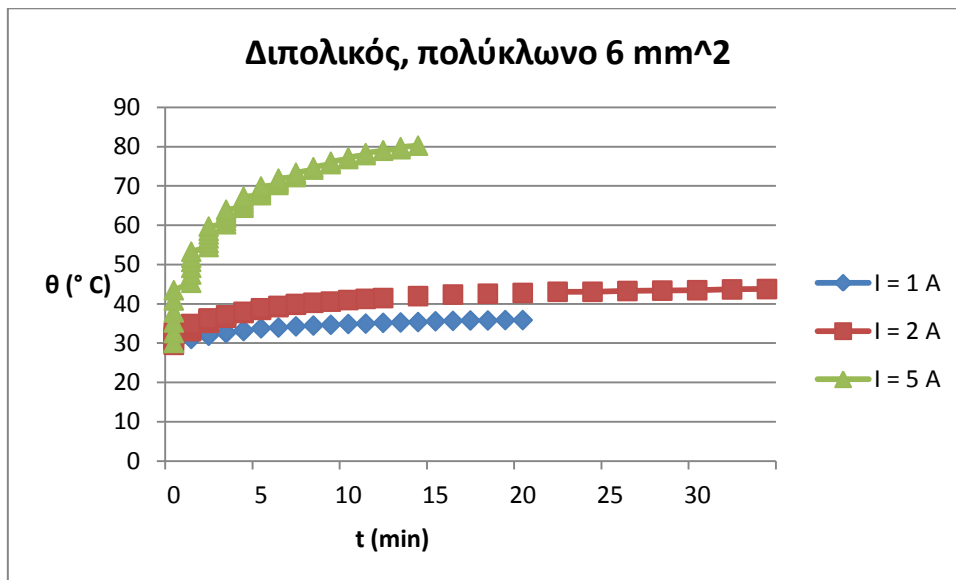
3.2.1.2 Καμπύλες για τον SIEMENS STE1 413 - Φάση 2



3.2.1.3 Καμπύλες για τον ABB E202

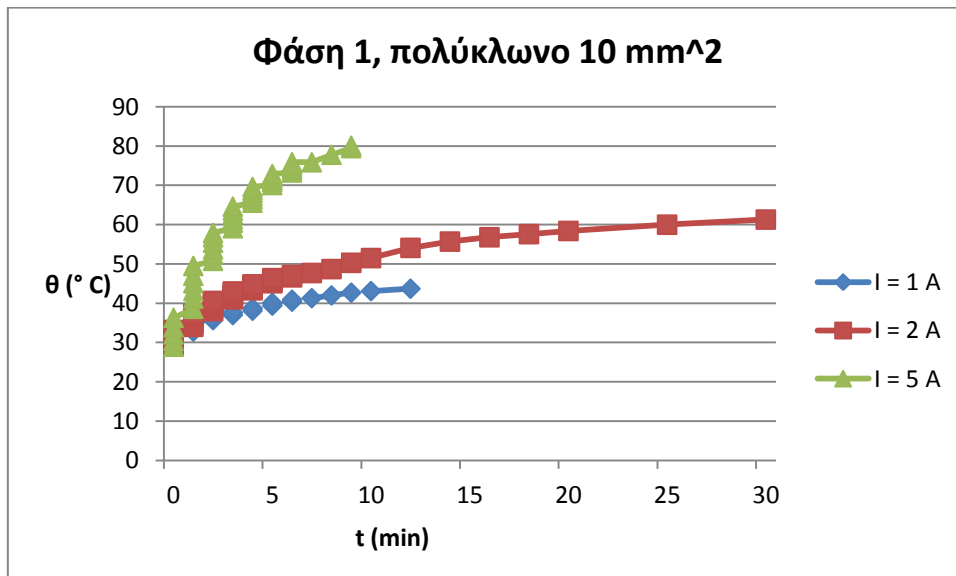
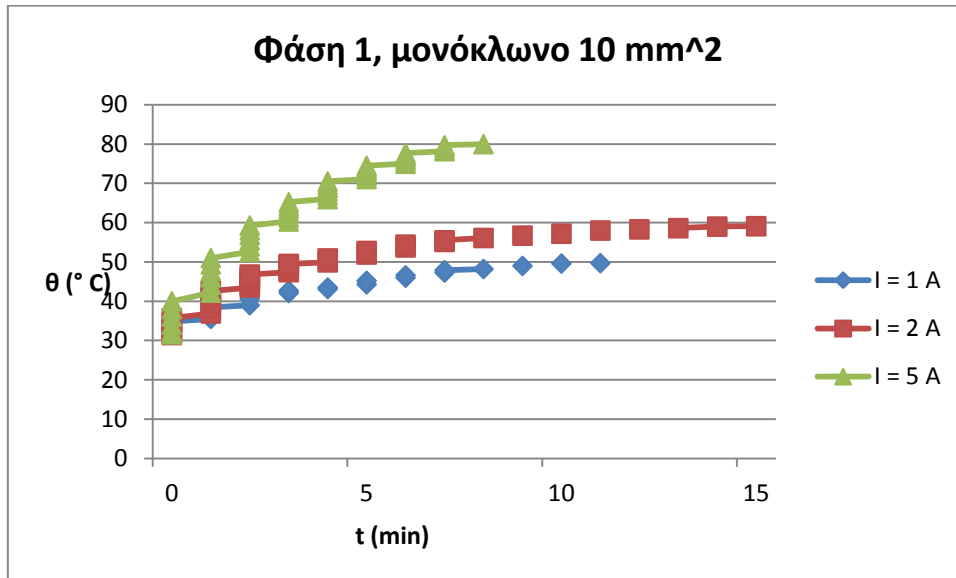


3.2.1.4 Καμπύλες για τον Διπολικό SIEMENS 5TE1 312

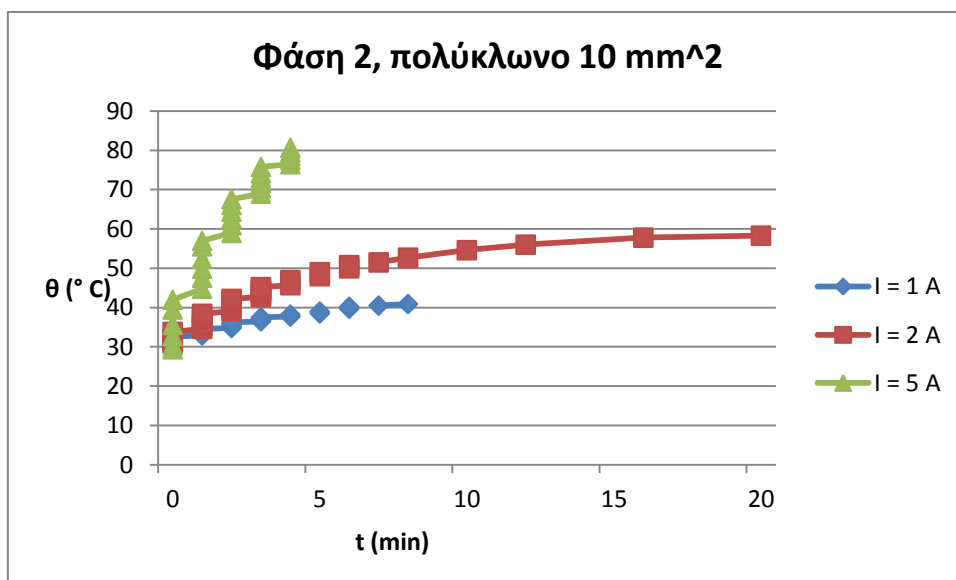
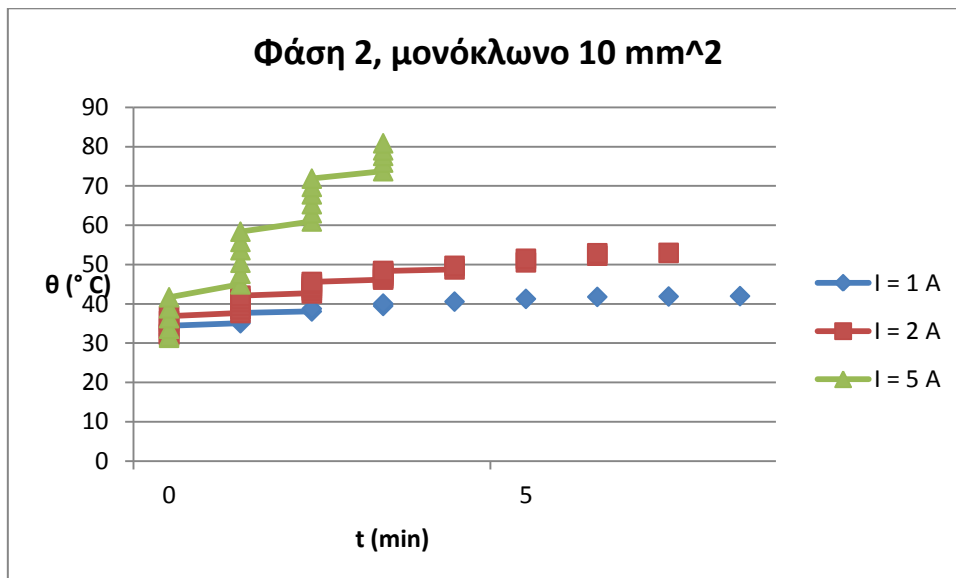


3.2.2 Καμπύλες για καλώδια διατομής 10 mm²

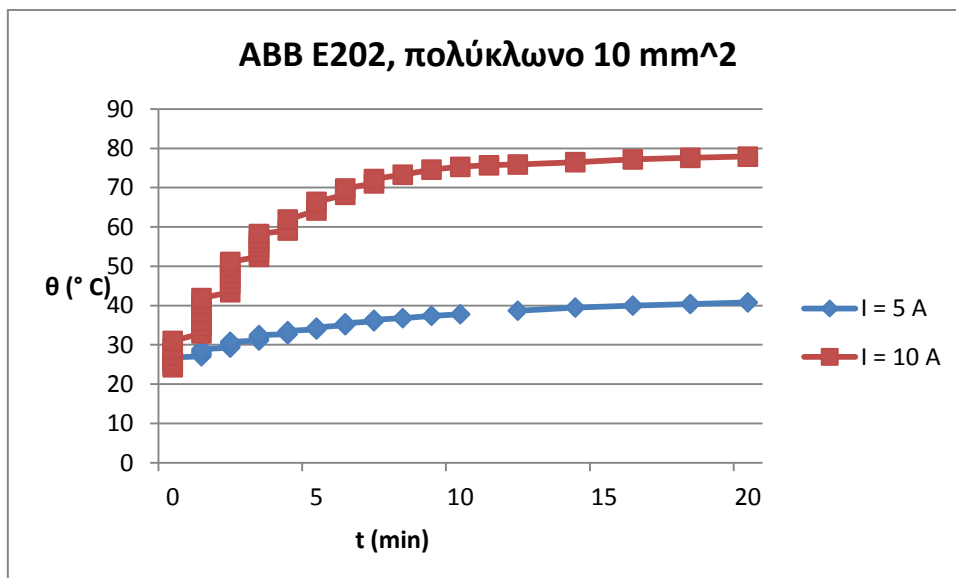
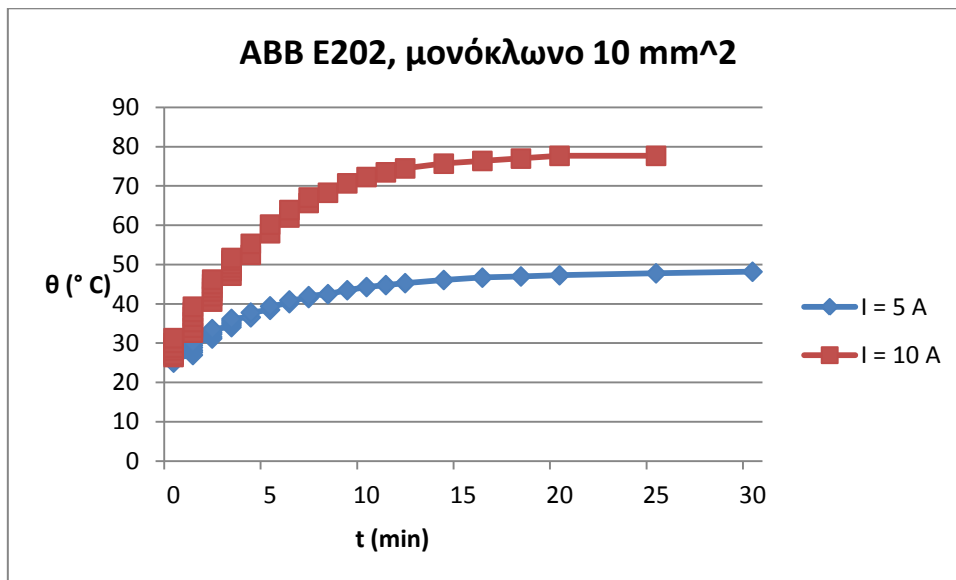
3.2.2.1 Καμπύλες για τον SIEMENS 5TE1 413 - Φάση 1



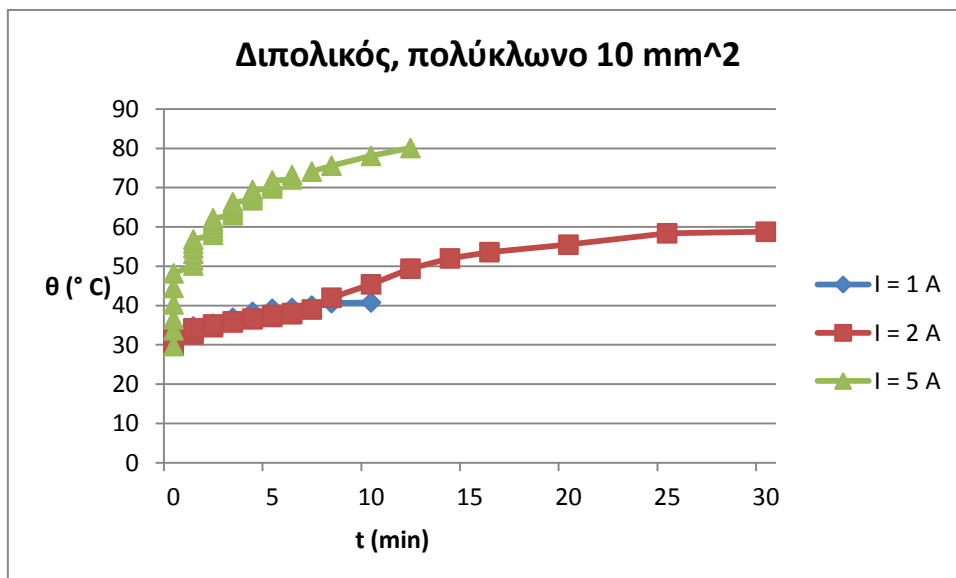
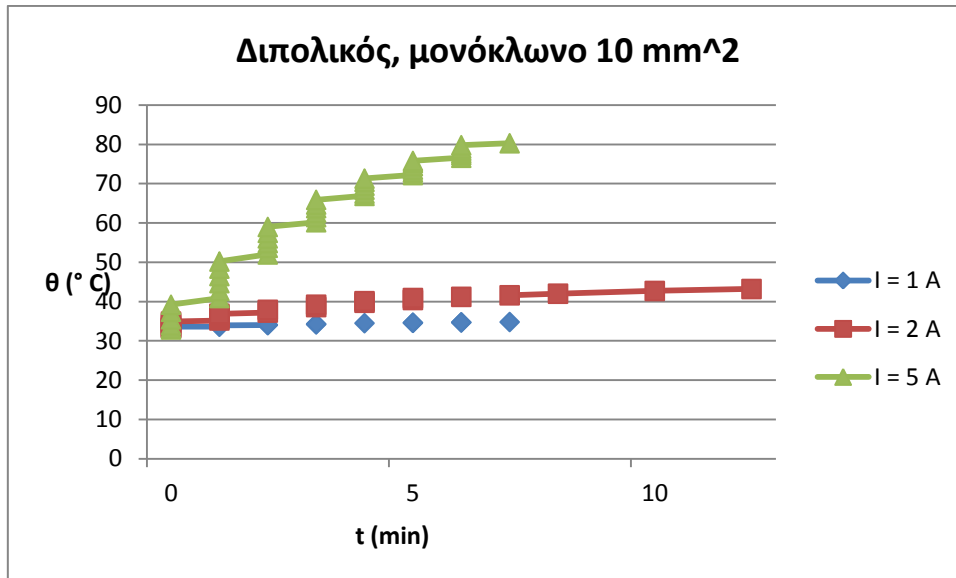
3.2.2.2 Καμπύλες για τον SIEMENS STE1 413 - Φάση 2



3.2.2.3 Καμπύλες για τον ABB E202



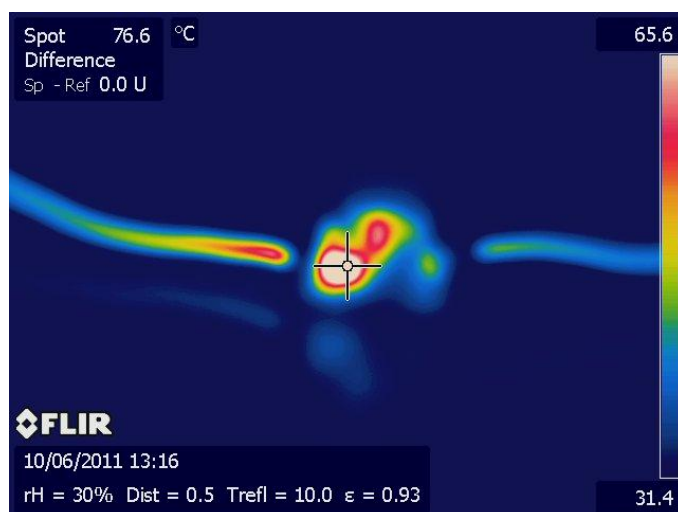
3.2.2.4 Καμπύλες για τον Διπολικό SIEMENS 5TE1 312



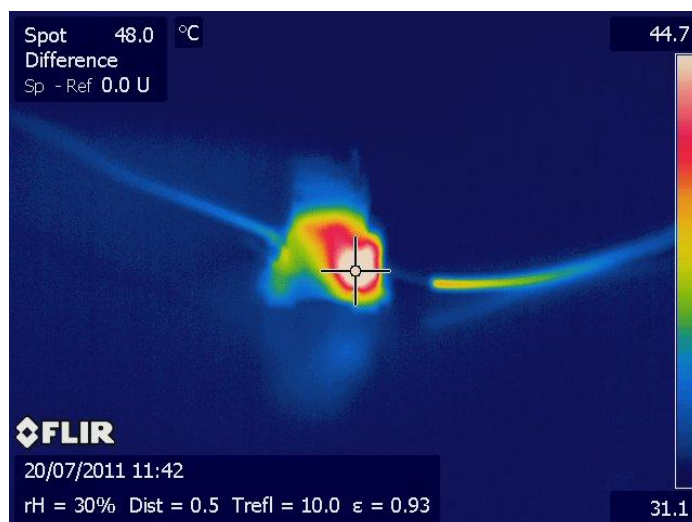
3.3 Θερμογραφία

Στο κομμάτι αυτό της εργασίας παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα της κάμερας υπερύθρων. Για κάθε μία περίπτωση (επαφής, τύπου και διατομής καλωδίου) δίνεται ενδεικτικά μία φωτογραφία υπερύθρων της θερμοκάμερας για μία τιμή έντασης ρεύματος.

3.3.1 Δεδομένα για τον διακόπτη SIEMENS 5TE1 413 - Φάση 1



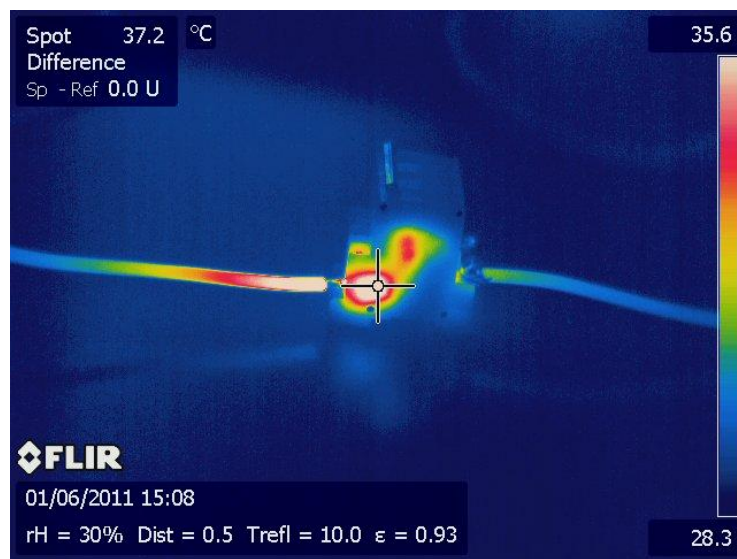
Εικόνα 3.1 Φάση 1, I=5A, μονόκλωνο 6 mm²



Εικόνα 3.2 Φάση 1, I=5A, μονόκλωνο 10 mm²

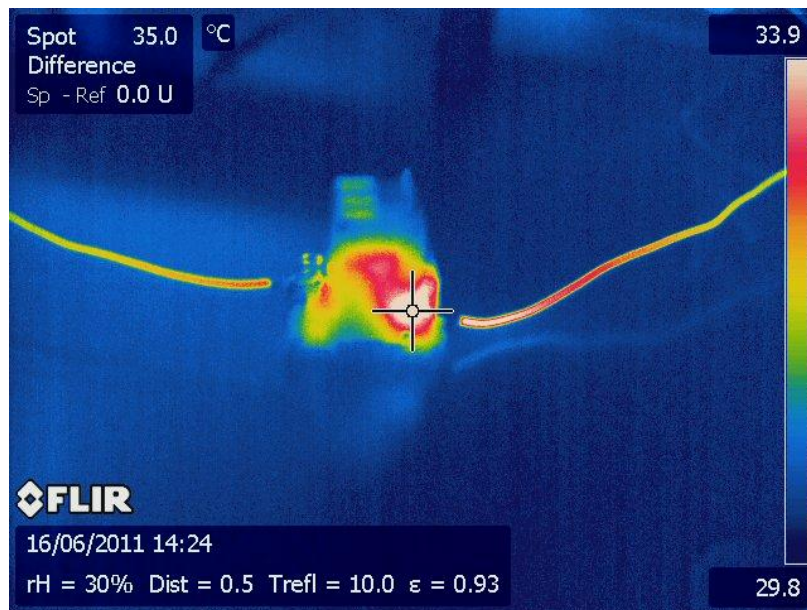


Εικόνα 3.3 Φάση 1, I=1A, πολύκλωνο 6 mm²

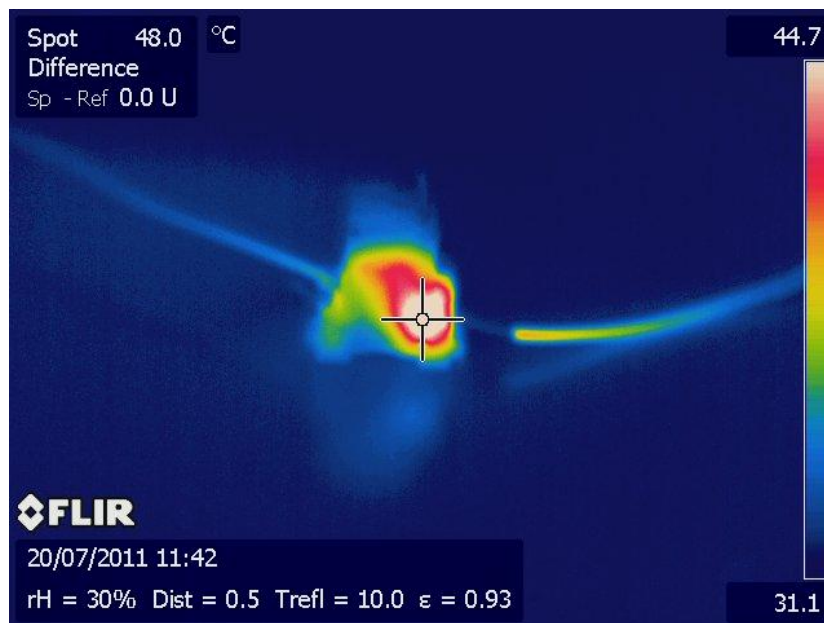


Εικόνα 3.4 Φάση 1, I=1A, πολύκλωνο 10 mm²

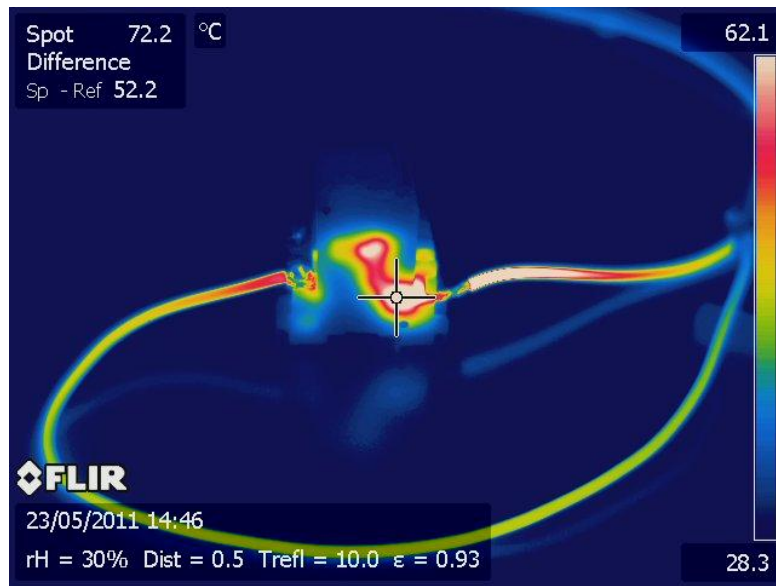
3.3.2 Δεδομένα για τον διακόπτη SIEMENS 5TE1 413 - Φάση 2



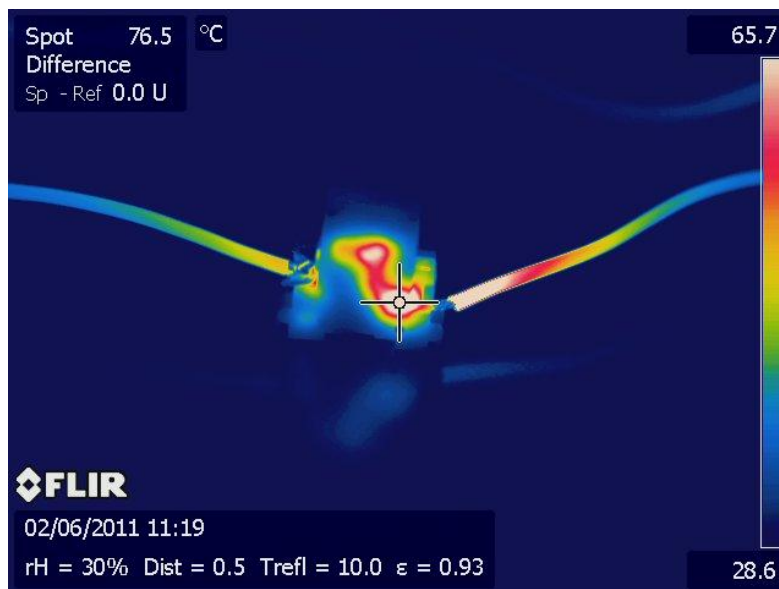
Εικόνα 3.5 Φάση 2, I=1A, μονόκλωνο 6 mm²



Εικόνα 3.6 Φάση 2, I=1A, μονόκλωνο 10 mm²

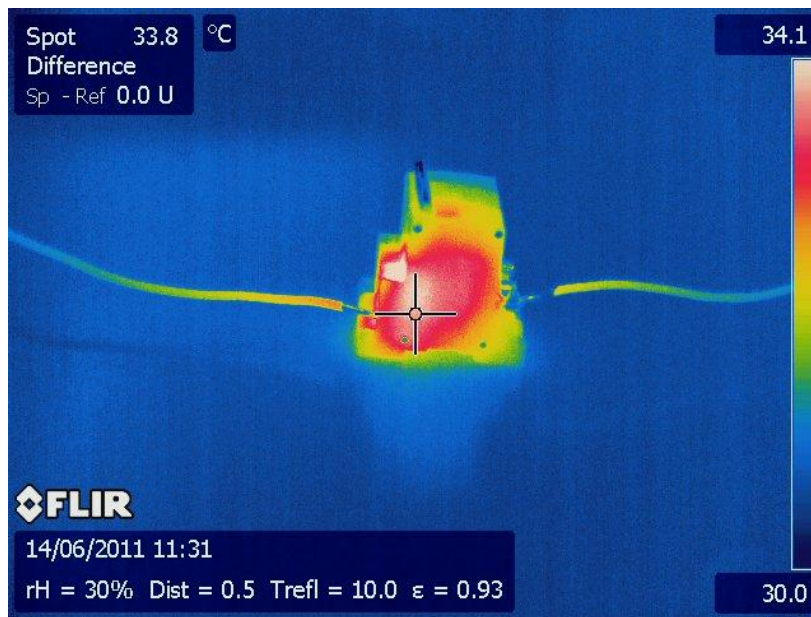


Εικόνα 3.7 Φάση 2, I=5A, πολύκλωνο 6 mm²

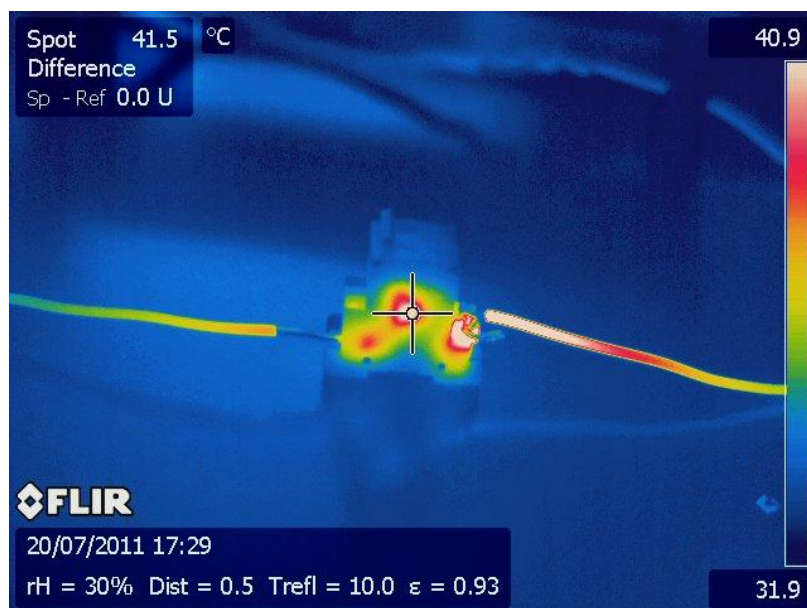


Εικόνα 3.8 Φάση 2, I=5A, πολύκλωνο 10 mm²

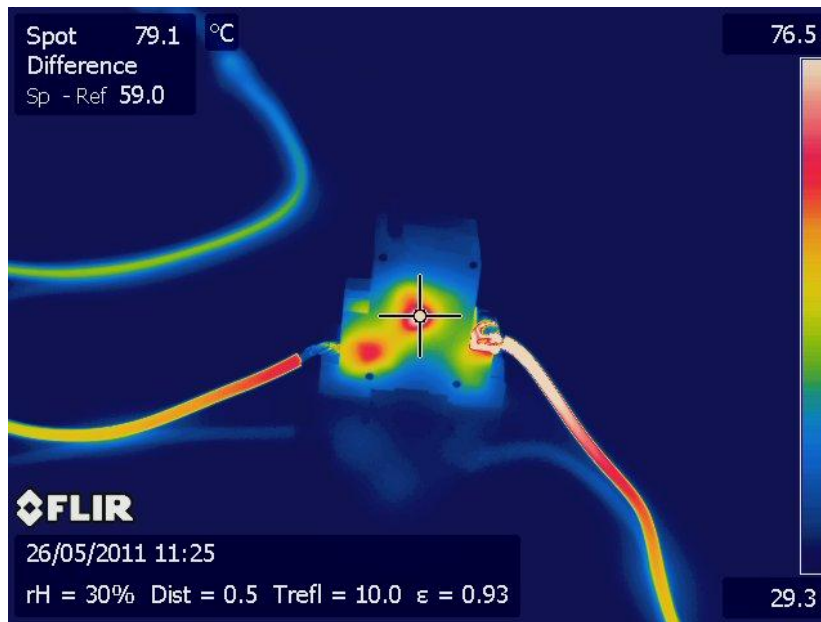
3.3.3 Δεδομένα για τον Διπολικό SIEMENS 5TE1 312



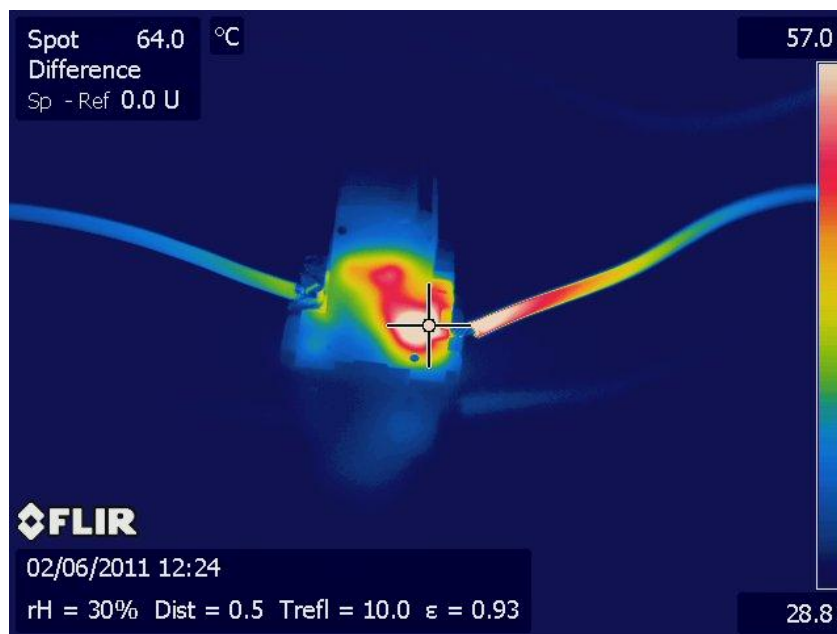
Εικόνα 3.9 Διπολικός, I=2A, μονόκλωνο 6 mm²



Εικόνα 3.10 Διπολικός, I=2A, μονόκλωνο 10 mm²



Εικόνα 3.11 Διπολικός, I=5A, πολύκλωνο 6 mm²



Εικόνα 3.12 Διπολικός, I=5A, πολύκλωνο 10 mm²

4. Θεωρητική διερεύνηση των αποτελεσμάτων

Στο σημείο αυτό θα προσπαθήσουμε να διερευνήσουμε θεωρητικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα μπορούμε άμεσα να επισημάνουμε τα εξής :

(1) Η αύξηση του ρεύματος τροφοδοσίας σε κάθε επαφή προκαλεί αύξηση του ρυθμού θέρμανσης του δοκιμίου, δηλαδή για μεγαλύτερη τιμή έντασης ρεύματος έχουμε μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας στον ίδιο χρόνο

(2) Η αύξηση θερμοκρασίας στους καταπονημένους διακόπτες είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αύξηση στον καινούριο διακόπτη

Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ στην επαφή του καινούριου διακόπτη για ρεύμα 10 A και για χρόνο 10 min είναι περίπου ίση με τη $\Delta\theta$ στις επαφές του τριφασικού όταν διαρρέονται από ρεύμα 5 A για χρόνο 5 min (δηλαδή ίδια $\Delta\theta$ για διπλάσια ένταση ρεύματος και διπλάσιο χρόνο τροφοδοσίας)

(3) Η μεγάλη καταπόνηση των χρησιμοποιημένων επαφών γίνεται φανερή από το γεγονός ότι παρατηρείται πολύ μεγάλη αύξηση θερμοκρασίας σε μικρό χρόνο για ένταση ρεύματος πολύ μικρότερη από την ονομαστική

Λόγου χάριν παρατηρήθηκε αύξηση θερμοκρασίας, σε επαφή του καταπονημένου τριφασικού διακόπτη, της τάξης των 50 °C σε χρόνο 5 min για ένταση ρεύματος 5 A. Το ονομαστικό ρεύμα του διακόπτη είναι 40 A.

(4) Κατά τη θέρμανση ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας επιβραδύνεται όσο η θερμοκρασία αυξάνεται. Επίσης, κατά την ψύξη των επαφών μειώνεται ο ρυθμός καθόδου της θερμοκρασίας όσο η θερμοκρασία μειώνεται.

(5) Συγκρίνοντας τις καμπύλες θέρμανσης για την ίδια επαφή, την ίδια ένταση ρεύματος και τον ίδιο τύπο καλωδίου (μονόκλωνο, πολύκλωνο) παρατηρούμε την

ανάπτυξη μεγαλύτερων θερμοκρασιών στον ίδιο χρόνο στην περίπτωση των μικρότερων διατομών (6 mm^2) έναντι των μεγαλύτερων διατομών (10 mm^2)

(6) Από τις συγκριτικές καμπύλες θερμοκρασίας-χρόνου για τις διάφορες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος παρατηρούμε ότι για ίδια διατομή καλωδίου παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση θερμοκρασίας στο μονόκλωνο παρά στο πολύκλωνο καλώδιο στην πλειοψηφία των μετρήσεων. Το ότι δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο αυτό στο σύνολο των μετρήσεων μπορεί να αποδοθεί στο ότι κατά τη σύνδεση του πολύκλωνου αγωγού με την επαφή δεν έγινε καλή ηλεκτρική επαφή όλων των χάλκινων συρματιδίων με την υποδοχή του διακόπτη με αποτέλεσμα την αύξηση των θερμικών απωλειών. Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώνεται από τα θερμογραφικά δεδομένα (εικόνες υπερύθρων) που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς στις εικόνες αυτές παρατηρείται αυξημένη θερμοκρασία (συγκρίσιμη με εκείνη που αναπτύσσεται σε αυτή καθαυτή την ηλεκτρική επαφή) του καλωδίου τροφοδοσίας στην περιοχή της σύνδεσής του με την υποδοχή της επαφής.

Στο σημείο αυτό πρέπει να διερευνήσουμε το αν τα αποτελέσματά μας μπορούν να ερμηνευθούν βάσει του *επιδερμικού φαινομένου*. Το φαινόμενο αυτό περιγράφει την τάση του ρεύματος υψηλής συχνότητας να συγκεντρώνεται (με μεγαλύτερη πυκνότητα) στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού αντί να ρέει ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια της διατομής του. Όσο μεγαλύτερη η συχνότητα του ρεύματος, τόσο εντονότερο είναι το επιδερμικό φαινόμενο. [11]

Για να εξετάσουμε αν στις περιπτώσεις των αγωγών που μελετήσαμε έχουμε επιδερμικό φαινόμενο πρέπει να συγκρίνουμε την ακτίνα κάθε αγωγού με το *βάθος επιδερμίδας* (skin depth) το οποίο εκφράζει την απόσταση, μετρημένη από την εξωτερική επιφάνεια του αγωγού, στην οποία υπάρχει πυκνότητα ρεύματος $J = \frac{J_0}{e}$

Για να εκδηλωθεί το επιδερμικό φαινόμενο αρκεί το βάθος αυτό να είναι μικρότερο (ή οριακά ίσο) με την ακτίνα του αγωγού. Το βάθος δ δίνεται από τη σχέση

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f \mu_r \mu_0}} \quad (49)$$

Στην παραπάνω σχέση το δ δίνεται σε m, ρ είναι η ειδική αντίσταση (σε $\Omega \cdot \text{m}$), f η συχνότητα σε Hz, μ_r η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού και $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ H} * \text{m}$ η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Για τον χαλκό η ειδική αντίσταση είναι $\rho_{Cu} = 1.673 * 10^{-8} \Omega \text{m}$ και η σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι ίση με τη μονάδα. Επομένως, για συχνότητα $f = 50 \text{ Hz}$, βρίσκουμε $\delta = 9,206 \text{ mm}$.

Τώρα θα υπολογίσουμε την ακτίνα του αγωγού με τη μεγαλύτερη διατομή. Αν βρούμε ότι δεν εκδηλώνεται επιδερμικό φαινόμενο, τότε δεν θα εκδηλώνεται ούτε στους αγωγούς μικρότερης διατομής. Από τη σχέση πr^2 που δίνει τη διατομή του αγωγού, όπου r η ακτίνα του, βρίσκουμε ότι το μονόκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm^2 έχει ακτίνα $r = 1,78 \text{ mm}$, ποσότητα πολύ μικρότερη του βάθους δ . Άρα, το επιδερμικό φαινόμενο δεν εκδηλώνεται.

Βέβαια, στην περίπτωση υψίσυχνου ρεύματος, λόγω ακριβώς του επιδερμικού φαινομένου τα πολύκλινα καλώδια παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερες απώλειες έναντι των μονόκλωνων, καθώς στα μονόκλινα το υψίσυχνο ρεύμα εμφανίζει μεγαλύτερη πυκνότητα κοντά στην επιφάνεια του αγωγού. Έτσι, μειώνεται η ενεργός διατομή του (και συνεπακόλουθα αυξάνεται η ισοδύναμη αντίσταση του αγωγού, άρα και οι απώλειες Joule).

Όπως επισημάναμε προηγουμένως, εκδηλώνεται μεγαλύτερη αύξηση θερμοκρασίας για μεγαλύτερη καταπόνηση των ηλεκτρικών επαφών, για μεγαλύτερη τιμή ρεύματος και για χρήση μονόκλωνου καλωδίου έναντι πολύκλωνου. Επίσης, παρατηρείται μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας στην περίπτωση χρήσης καλωδίου μεγαλύτερης διατομής σε όλες τις περιπτώσεις. Το φαινόμενο αυτό είναι απόλυτα αναμενόμενο, καθώς η αντίσταση του χάλκινου αγωγού είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατομής του όπως προκύπτει από την παρακάτω σχέση

$$R = \kappa \rho \frac{l}{S} \quad (50)$$

όπου R η αντίσταση του αγωγού, κ ο συντελεστής πλέξης των καλωδίων, ρ η ειδική αντίσταση του αγωγού και S η διατομή του. Επομένως, μικρότερη διατομή αγωγού επιφέρει μεγαλύτερες θερμικές απώλειες (απώλειες Joule).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Αναλυτικές Μετρήσεις Θερμοκρασίας των Ηλεκτρικών Επαφών

Μετρήσεις του τριφασικού διακόπτη, μοντέλου SIEMENS 5TE1 413, 40 A

Φάση 1

(1) Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²

Θέρμανση

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	31	32,1	32
0,1667		32,4	32,6
0,3334		32,8	33,1
0,5	31,3	33,5	34
0,6668		34,3	35,5
0,8335		35,3	37
1	32,3	36,4	38,9
1,1667		37,4	40,7
1,3334		38,3	42,4
1,5	33,4	39,4	44
1,6668		41,2	45,6
1,8335		41,5	47,3
2	34,4	42,7	48,8
2,1667		43,3	50
2,3334		44,2	51,6
2,5	35,8	45	53,9
2,6668		46,1	54,4
2,8335		47	55,5
3	36,3	47,7	56,7
3,1667		48,7	57,9
3,3334		49,7	59
3,5	37	50,4	60,1
3,6668		51,2	61

Ψύξη

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	42,5	67,1	80,7
0,1667	42,4	67	79,5
0,3334	42,2	66,9	78,4
0,5	41,9	66,2	77
0,6668	41,6	65,6	75,6
0,8335	41,2	64,9	74,2
1	40,9	64	72,9
1,1667	40,6	63,3	71,5
1,3334	40,3	62,5	70,1
1,5	40,1	61,8	68,8
1,6668	39,9	60,8	67,5
1,8335	39,6	60,1	66,3
2	39,3	59,3	65,1
2,1667		58,5	64
2,3334		57,7	62,9
2,5	38,5	56,9	61,9
2,6668		55,2	60,9
2,8335		54,6	59,9
3	37,9	54	58,9
3,5	37,3	52,5	56,2
4	36,8	51,3	53,9
5	35,9	48,3	50,2
6	35,1	45,9	47,2

3,8335		52,1	62
4	37,4	52,7	63
4,1667		53,5	64
4,3334		54,1	64,8
4,5	38	54,6	65,5
4,6668		55,2	66,2
4,8335		55,9	66,9
5	38,3	56,5	67,8
5,1667		57,1	68,5
5,3334		57,7	69,2
5,5	38,5	58,2	70
5,666729		54,5	70,6
5,833396		58,9	71,3
6	39,3	59,4	72,1
6,16673			72,6
6,333396			73,4
6,5	39,6	60,6	73,9
6,66673			74,5
6,833396			74,9
7	39,9	61,7	75,6
7,16673			76,2
7,333397			76,7
7,5	40	62,5	77
8	40,2	63,1	78,3
8,5			79,7
9	40,6	63,7	80,7
10	40,9	64	
11	41,2	64,6	
12	41,4	65,1	
13	41,5		
14	41,6	65,9	
15	41,8		
16	41,9	66,1	
18	42,1	66,4	
20	42,3	67,1	
22	42,5	67,1	
24	42,5		

7	34,5	44,2	44,8
8	34	42,7	43
9	33,7	41,5	41,4
10	33,3	40,4	40,1
12	32,7	38,8	38,1
14	32,4	37,5	36,9
16	32,1	36,7	36
18	31,8	35,9	35,1
20	31,7	35,3	34,6
25	31,4	34,4	33,5
30		33,7	33
35		33,4	32,7
40		32,9	32,4
45		32,7	32,1
50		32,6	32

(2) Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²**Θέρμανση**

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	30,4	29,4	29,1
0,1667	30,6	29,8	29,5
0,3334	31	30,9	30,5
0,5	31,5	31,8	32,2
0,6668	32	32,7	34,3
0,8335	32,4	34	36,8
1	32,6	35,1	39,3
1,1667	33,2	36,5	41,9
1,3334	33,6	37,2	44,5
1,5	34,1	39	46,8
1,6668	34,4	40	49,4
1,8335	34,7	40,9	52,1
2	35	41,8	55,1
2,1667	35,4	42,8	56,1
2,3334	36,1	43,6	58,8
2,5	36,9	44,4	60,1
2,6668	37,6	45,2	62
2,8335	38,3	46	63,9
3	38,9	46,7	65,5
3,1667	40,5	47,3	67,1
3,3334	40,9	47,9	68,7
3,5	41,1	48,6	70,2
3,6668	41,5	49,2	71,4
3,8335	41,9	49,7	72,6
4	42	50,1	73,2
4,1667	42,3	50,6	75
4,3334	42,4	51,1	76,3
4,5	42,6	51,6	77,1
4,6668	42,7	52	77,8
4,8335	42,8	52,4	78,8
5	43	52,8	79,4
5,1667		53,2	80,1
5,3334		53,6	81
5,5	43,3	53,7	
6	43,5	54,8	
6,5	43,9	55,6	
7	44,6	56,4	
7,5	44,9	56,9	
8	45,2	57,8	
8,5	45,6	58,4	
9	46	58,9	
9,5	46,6	59,3	
10	47,2	59,8	
10,5	47,7	60,1	

Ψύξη

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	49,4	61,5	81
0,1667	49,4	60,8	76,1
0,3334	49,2	60,4	74,6
0,5	48,9	59,7	73,1
0,6668	48,5	58,7	71,4
0,8335	47,8	57,7	69,3
1	47	56,8	68,2
1,1667	46,5	55,8	66,7
1,3334	45,9	54,9	65,2
1,5	45,2	53,8	64,1
1,6668	44,7	52,9	62,8
1,8335	44,1	52,1	61,6
2	43,6	51,3	60,4
2,1667	43	50,4	59,4
2,3334	42,6	49,9	58,1
2,5	42,2	48,9	57
2,6668	41,7	48,4	56
2,8335	41,3	47,6	55,1
3	40,9	47	54,2
3,1667	40,6	46,5	53,3
3,3334	40,2	46,1	52,5
3,5	39,8	45,4	51,6
3,6668	39,4	44,9	50,9
3,8335	39,1	44,4	50,2
4	38,9	44	49,4
4,1667		43,5	48,7
4,3334		43	48,1
4,5	38,1	42,6	47,4
4,6668		42,2	46,9
4,8335		41,9	46,3
5	37,4	41,5	45,7
5,1667	37		45,2
5,3334			44,8
5,5	36,6	40,6	44,3
6	36,2	39,7	42,8
6,5	35,6	39	41,8
7	35,3	38,3	40,7
7,5	34,9	37,7	39,7
8	34,6	37,2	38,8
8,5	34,2	36,7	38,1
9	33,9	36,3	37,3
9,5	33,7	35,9	36,8
10	33,5	35,4	36,2
10,5			35,8

11	48,2	60,5	
11,5	49	60,8	
12	49,3	61	
12,5	49,4	61,3	
13		61,5	
14		62,1	
15		62,2	
16		62	
17		61,5	

11	33,1	34,7	35,4
11,5			34,9
12	32,8	34,1	34,6
12,5			34,2
13	32,5	33,6	33,9
13,5			33,6
14	32,2	33,2	33,3
14,5			32,9
15	32	32,9	32,6
15,5			32,4
16	31,8	32,6	32,2
17		32,3	31,9
18	31,4	32,1	31,6
19			31,3
20	31,2	31,6	31
21			30,7
22	31	31,3	30,4
23			30,3
24	30,8	31,1	30,3
			30
			29,9
			29,8
			29,6
			29,5
			29,4
			29,4
			29,3
			29,2
			29,2
			29,1

(3) Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²**Θέρμανση**

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	32,5	31,4	31,6
0,1667	32,7	31,6	32,3
0,3334	33	32,4	34
0,5	33,5	33,5	36,1
0,6668	34,2	34,5	38
0,8335	34,8	35,7	40
1	35,5	36,9	42,2
1,1667	36,1	38,3	44,2
1,3334	36,7	39,6	46,1
1,5	37,3	40,8	47,7
1,6668	37,8	41,6	49,4
1,8335	38,4	42,6	51
2	39	43,5	52,6
2,1667		44,1	54
2,3334		44,9	55,5
2,5	40,6	45,6	56,9
2,6668		46,1	58,1
2,8335		46,8	59,3
3	42,1	47,4	60,3
3,1667		47,9	61,4
3,3334		48,5	62,5
3,5	42,7	48,9	63,5
3,6668		49,3	64,3
3,8335		49,5	65,2
4	43,1	49,9	66
4,1667			67
4,3334			68
4,5	43,5	50,9	68,9
4,6668			69,6
4,8335			70,5
5	44,3	51,9	71,1
5,1667			71,9
5,3334			72,8
5,5	45,2	52,8	73,4
5,666729			74
5,833396			74,5
6	46	53,7	75
6,16673			75,6
6,333396			76,2
6,5	46,6	54,4	76,8
6,66673			77,2
6,833396			77,7
7	47,3	55,1	78,2
7,16673			78,4

Ψύξη

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	49,7	59,1	80
0,1667	49,5	58,9	79,8
0,3334	49,2	58,3	79,3
0,5	48,8	57,6	78,8
0,6668	48,2	56,6	77,3
0,8335	47,7	55,9	75,9
1	47,1	55,1	74,5
1,1667	46,5	54,2	72,8
1,3334	46	53,3	71,5
1,5	45,4	52,6	70
1,6668	44,9	51,7	68,3
1,8335	44,5	50,9	66,7
2	44	50,2	65,6
2,1667		49,6	64,5
2,3334		49	63,4
2,5	42,7	48,4	62,4
2,6668		47,8	61,2
2,8335		47,2	60,2
3	41,7	46,8	59,4
3,5	40,8	45,2	56,7
4	40,1	44	54,4
5	38,7	41,9	50,6
6	37,7	40,4	47,5
7	37,1	39,2	45
8	36,4	38,1	43,2
9	35,8	37,3	41,6
10	35,5	36,7	40,2
12	34,8	35,6	38,3
14	34,3	34,9	36,8
16	34	34,3	35,9
18	33,6	34	35
20	33,4	33,6	34,4
25		33,1	33,5
30		32,8	32,8
35		32,6	32,4
40		32,5	32,1

7,333397			79,2
7,5	47,9	55,5	79,7
8	48,2	56,1	80
9	49	56,7	
10	49,6	57,2	
11	49,7	58	
12		58,3	
13		58,6	
14		59	
15		59,1	

(4) Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²**Θέρμανση**

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	29,4	29	29
0,1667	29,5	29,5	29
0,3334	30,1	30,5	30,4
0,5	30	31,3	32,1
0,6668	31,4	32,3	33,9
0,8335	32,1	33,2	36,3
1	32,8	34	38,6
1,1667	33,7	34,7	41,2
1,3334	34,1	35,5	43,1
1,5	34,8	36,1	45,1
1,6668	35,2	36,8	47
1,8335	35,4	37,3	49,5
2	35,7	38	50,8
2,1667		38,5	52,4
2,3334		39,1	53,7
2,5	36,3	39,6	55,4
2,6668		40,1	56,8
2,8335		40,6	57,9
3	37	41	59,1
3,1667		41,4	60,5
3,3334		41,8	61,4
3,5	37,6	42,2	62,6
3,6668		42,6	63,6
3,8335		43	64,6
4	38,1	43,3	65,6
4,1667		43,6	66,5
4,3334		44	67,3
4,5	38,7	44,3	68,1
4,6668		44,7	68,8
4,8335		44,8	69,6
5	39,4	45,1	70,1
5,1667		45,4	70,9
5,3334		45,7	71,3
5,5	40,1	45,9	71,8
5,666729		46,2	72,3
5,833396		46,4	72,9
6	40,4	46,6	73,3
6,16673			74
6,333396			74,4
6,5	40,9	47,2	75,1
6,66673			75,5
6,833396			75,9
7	41,3	47,7	75,9
8	42	48,7	77,8

Ψύξη

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	39,4	61,3	80,1
0,1667	39,4	61,3	79,9
0,3334	39,3	60,6	76,9
0,5	39	59,7	75,1
0,6668	38,8	58,7	73,5
0,8335	38,5	57,7	71,8
1	38,2	56,7	70,3
1,1667	37,9	55,7	68,6
1,3334	37,6	54,8	67
1,5	37,2	53,8	65,5
1,6668	37	52,9	63,9
1,8335	36,7	52,2	62,7
2	36,4	51,4	61,5
2,1667	36,1	50,7	60,3
2,3334	35,9	50	59,2
2,5	35,6	49,3	58,2
2,6668	35,2	48,5	57,2
2,8335	35,1	48	56,2
3	35	47,3	55,3
3,5	34,5	45,5	52,8
4	34,1	44	50,6
5	33,3	41,5	47
6	32,7	40,2	44,4
7	32,2	37,9	42,2
8	31,8	36,7	40,4
9	31,4	35,7	38,9
10	31,2	35	37,5
12	30,7	33,8	35,7
14	30,3	32,8	34,3
16	30	32	33,2
18	29,8	31,7	32,4
20	29,7	31,1	31,8
25	29,5	30,3	30,7
30	29,4	29,8	30
35		29,5	29,5
40		29,3	29,1
45		29,1	

9	42,7	50,3	79,5
9,5			80,1
10	43,1	51,5	
12	43,7	54,1	
14		55,7	
16		56,8	
18		57,6	
20		58,4	
25		60	
30		61,3	

Φάση 2

(1) Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²

Θέρμανση

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	30,4	31,3	31,4
0,1667	30,4	31,4	31,5
0,3334	30,7	32	32,7
0,5	30,8	32,9	34,7
0,6668	31	33,9	37
0,8335	31	34,9	39,8
1	32,3	36,2	41,1
1,1667		37,4	43,5
1,3334		38,5	45,7
1,5	31,2	39,5	47,5
1,6668		40,6	49,7
1,8335		41,4	51,9
2	31,4	42,4	53,6
2,1667		43,2	55,7
2,3334		44,1	57,5
2,5	31,9	45	59,2
2,6668		45,7	61,1
2,8335		46,4	62,7
3	32,2	47	64,3
3,1667		47,7	66
3,3334		48,3	67,4
3,5	32,4	48,9	68,9
3,6668		49,5	70,3
3,8335		50,1	71,6
4	32,6	50,6	72,4
4,1667		51,2	73,9
4,3334		51,7	75,3
4,5		52,3	76,4
4,6668		52,8	77,5
4,8335		53,2	78,5
5	33	53,7	79,7
5,1667		54,1	80,7
5,3334		54,5	
5,5		54,8	
5,666729		55,3	
5,833396		55,7	
6	33,2	56	
6,5		57	
7	33,5	57,9	
7,5		59	
8	33,8	59,7	
8,5		60,4	

Ψύξη

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	35	69,2	80,7
0,1667	34,9	69,1	79,6
0,3334	34,8	68,7	78,4
0,5	34,8	68,1	77,3
0,6668	34,8	67,1	76,2
0,8335	34,7	66,3	75
1	34,6	65,4	73,7
1,1667		64,6	72,6
1,3334		63,7	71,4
1,5	34,3	62,9	70,3
1,6668		61,9	69,2
1,8335		61,1	68
2	34	60,2	67
2,1667		59,3	65,9
2,3334		58,5	64,9
2,5	33,7	57,7	63,8
2,6668		57	63
2,8335		56,3	62
3	33,4	55,6	61,1
3,5	33,2	53,7	58,6
4	33	51,8	56,4
5	32,5	48,8	52,3
6	32,2	46,3	49,2
7	32	44,3	46,6
8	31,8	42,6	44,4
9	31,6	41,2	42,6
10	31,5	40	41,2
12	31,2	38,2	38,9
14	31	36,8	37,3
16	30,8	35,9	36,1
18	30,7	35,1	35,2
20	30,6	34,4	34,5
25		33,4	33,3
30		32,7	32,5
35		32,1	32
40		31,8	31,7
45		31,4	31,3

9	34	61,22	
9,5		62	
11		63,2	
12	34,3	64	
13		65,1	
14	34,5	65,8	
15		66,1	
16	34,7	66,5	
17	34,9	67,3	
18	34,9	67,3	
20	35	68	
22		68,6	
24		69,2	

(2) Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²**Θέρμανση**

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	28,1	28,8	30,2
0,1667	28,2	29	30,8
0,3334	28,3	29,3	31,9
0,5	28,3	29,6	33,9
0,6668	28,4	30	36,5
0,8335	28,5	30,6	39,1
1	28,7	30,9	41,6
1,1667		31,5	44,5
1,3334		31,9	47,2
1,5	29,2	32,3	49,6
1,6668		32,9	52,3
1,8335		33,4	53,5
2	29,5	33,7	56,9
2,1667		34,2	59,3
2,3334		34,6	61,6
2,5	30	35	64
2,6668		35,3	66
2,8335		35,7	68,3
3	30,4	36	70,1
3,1667		36,5	71,6
3,3334		35,7	73,3
3,5	30,6	37,1	75,1
3,6668		37,3	76,8
3,8335		37,7	78,4
4	30,9	37,9	79,8
4,1667		38,3	80,7
4,3334		38,6	
4,5	31,3	38,7	
4,6668		38,8	
4,8335		39,1	
5	31,7	39,3	
5,5	32	40	
6	32,1	40,6	
6,5	32,4	41	
7	32,7	41,4	
7,5	32,8	41,8	
8		42,3	
8,5	33,2	42,8	
9		43	
9,5	33,3	43,3	
10		43,6	
10,5	33,4		
11		44	
11,5	33,7		

Ψύξη

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	35,7	48	80,7
0,1667	35,5	48	79,4
0,3334	35,3	47,8	78,4
0,5	35,2	47,6	77,2
0,6668	35,1	47,3	76,1
0,8335	35	47	74,8
1	34,8	46,7	73,7
1,1667	34,6	46,3	72,5
1,3334	34,4	45,8	71,1
1,5	34,2	45,4	70
1,6668	34,1	45,1	68,8
1,8335	34	44,7	67,7
2	33,9	44,4	66,5
2,1667		44	65,3
2,3334		43,7	64,2
2,5	33,3	43,4	63,1
2,6668		42,7	62,1
2,8335		42,4	61
3	33	42	60
3,1667		41,6	59
3,3334		41,4	58,1
3,5	32,7	41	57,1
3,6668		40,7	56,4
3,8335		40,5	55,6
4	32,4	40,3	54,7
4,1667			53,9
4,3334			53,2
4,5	32,1	39,1	
4,6668			52
4,8335			51,4
5	32	38,7	50,8
5,1667			50,2
5,3334			49,6
5,5	31,8	37,4	48,9
5,666729			48,4
5,833396			47,9
6	31,5	37,1	47,4
6,16673			46,9
6,333396			46,4
6,5	31,1	36,9	46,4
6,66673			45,9
6,833396			45
7	31	36,5	44,7
7,16673			44,3

12		44,4	
12,5	33,9		
13		44,7	
13,5	34		
14		45	
14,5	34,2		
15,5	34,3		
16		45,4	
16,5	34,4		
18		45,8	
18,5	34,5		
20		46	
20,5	34,7		
22,5	34,9		
24,5	35		
25		46,4	
26,5	35,1		
28,5	35,1		
30		46,9	
33,5	35,3		
35		47,1	
38,5	35,3		
40		47,2	
43,5	35,4		
48,5	35,6		
50		47,4	
58,5	35,7		
60		47,6	
68,5	35,7		
70		47,7	
80		48	
90		48	

7,333397			43,9
7,5		36,1	43,5
7,66673			43,2
7,833397			42,8
8	30,8	35,7	42,5
8,16673			42,2
8,333397			41,8
8,5		35,5	41,5
8,66673			41,3
8,833397			41
9	30,6	35,2	40,7
9,5		34,8	39,9
10	30,4	34,5	39,2
10,5		34,3	38,5
11	30,3	34	38
11,5		33,8	37,4
12	30,1	33,6	36,9
12,5			36,5
13	29,9	33,2	36,1
13,5			35,7
14	29,8	32,9	35,4
14,5			35
15	29,7	32,6	34,7
15,5			34,4
16		32,4	34,1
16,5			33,9
17	29,5	32,1	
17,5			33,5
18		31,9	
18,5			33,1
19	29,3		
19,5			32,7
20		31,6	
20,5			32,4
21	29,2		
21,5			32,1
22		31,3	
22,5			31,9
23,5			31,7
24		31,2	
24,5			31,5
25,5			31,3
26	29	31	
26,5			31,1
27,5			31
28		30,8	
29,5			30,8
30		30,7	
31	28,9		
31,5			30,6

33,5			30,5
35		30,4	
35,5			30,3
36	28,8		
37,5			30,2
39,5			30,1
40		30,3	
45		30,2	
46	28,7		
50		30,2	
55		30,2	
56	28,8		

(3) Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²**Θέρμανση**

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	32	32	31,4
0,1667	32,2	32,2	31,7
0,3334	32,5	32,5	33,7
0,5	33,1	33,8	36,4
0,6668	33,7	35,7	38,9
0,8335	34,4	36,9	41,7
1	35,1	37,7	45
1,1667	35,7	38,7	47,7
1,3334	36,4	39,6	50,5
1,5	37	40,5	53,7
1,6668	37,4	41,3	55,8
1,8335	37,7	42,1	58,4
2	38,1	42,7	61
2,1667		43,4	63,1
2,3334		44	65,4
2,5	38,8	44,5	67,9
2,6668		45,1	69,8
2,8335		45,6	71,9
3	39,5	46,2	73,8
3,1667		46,6	76
3,3334		47,1	77,7
3,5	40,1	47,5	79,1
3,6668		48	80,9
3,8335		48,4	
4	40,6	48,8	
4,1667			
4,3334			
4,5		49,7	
4,6668			
4,8335			
5	41,3	50,6	
5,5		51,5	
6	41,8	52,3	
6,5		52,9	
7	41,9	53	
8	42		

Ψύξη

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	42	53	80,9
0,1667	41,9	52,8	80,8
0,3334	41,9	52,6	79,4
0,5	41,7	52,1	77,6
0,6668	41,3	51,6	76,1
0,8335	41	51	74,7
1	40,7	50,4	73,1
1,1667	40,4	49,8	71,6
1,3334	40,1	49,2	70
1,5	39,8	48,5	68,6
1,6668	39,5	48	67
1,8335	39,2	47,3	65,6
2	38,9	46,7	64,5
2,1667		46	63,2
2,3334		45,6	62
2,5	38,2	44,9	60,8
2,6668		44,6	59,8
2,8335		44,2	58,8
3	37,5	43,9	57,8
3,5	36,9	43,2	55,2
4	36,3	41,8	52,7
5	35,4	40,1	48,8
6	34,8	38,6	45,7
7	34,2	37,5	43,4
8	33,8	36,5	41,5
9		35,7	40
10	33,1	35,2	38,7
12	32,6	34,3	36,8
14	32,3	33,6	35,5
16	32,1	33,1	34,6
18		32,8	34
20		32,5	33,5
25		32	32,7
30			32,3

(4) Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²**Θέρμανση**

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	31,5	31	29,4
0,1667	31,5	31	30,4
0,3334	31,7	31,5	32,7
0,5	31,9	31,8	35,6
0,6668	32,2	32,1	39,5
0,8335	32,6	33,8	42
1	32,9	34,6	44,8
1,1667	33,2	35,4	47,6
1,3334	33,6	35,9	49,9
1,5	33,9	36,9	52,4
1,6668	34,2	37,6	55,6
1,8335	34,5	38,4	57
2	34,8	39,1	59
2,1667	35,1	39,7	61
2,3334	35,5	40,4	62,7
2,5	35,7	41	64,4
2,6668	36	41,5	66,1
2,8335	36,2	42,2	67,6
3	36,5	42,7	69
3,1667	36,7	43,2	70,4
3,3334	36,9	43,8	71,7
3,5	37,1	44,2	73
3,6668	37,3	44,7	74,2
3,8335	37,5	45,2	75,8
4	37,7	45,7	76,5
4,1667			77,6
4,3334			78,6
4,5	38,2	47	79,6
4,6668			80,7
5	38,5	48	
5,5	39	49	
6	39,7	50	
6,5	40,2	50,8	
7	40,5	51,5	
8	40,9	52,7	
10		54,6	
12		56	
16		57,8	
20		58,3	

Ψύξη

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	40,9	58,3	80,7
0,1667	40,9	58,3	79,1
0,3334	40,8	58,1	77,6
0,5	40,6	57,6	76
0,6668	40,4	57,2	74,4
0,8335	40,2	56,6	73,8
1	40,1	56	71,3
1,1667	39,8	55,4	69,8
1,3334	39,5	54,8	68,5
1,5	39,3	54	67,2
1,6668	39	53,4	65,8
1,8335	38,7	52,8	64,7
2	38,5	52	63,7
2,1667		51,4	62,5
2,3334		50,9	61,3
2,5	37,9	50,3	60,3
2,6668		49,8	59,3
2,8335		49,1	58,2
3	37,3	48,7	57,4
3,5	36,8	47,3	54,9
4	36,2	46	52,6
5	35,4	43,6	48,6
6	34,8	41,7	45,6
7	34,4	40,2	43,1
8	33,9	38,9	41,1
9	33,6	37,9	39,5
10	33,3	37,1	38,1
12	32,8	35,7	36
14	32,5	34,8	34,5
16	32,2	34	33,5
18	32	33,4	32,6
20	31,8	33	32
25	31,6	32,4	30,9
30		31,9	30,4
35		31,7	29,9
40		31,5	29,6
45			29,5

Μετρήσεις του διπολικού διακόπτη μοντέλου SIEMENS 5TE1 312, 25 A

(1) Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²

Θέρμανση

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	29,7	31,3	31,3
0,1667	29,8	31,6	32,4
0,3334	30,1	32,3	36,1
0,5	30,5	33,5	39,8
0,6668	30,7	34,6	43,5
0,8335	31	35,7	46,5
1	31,2	36,7	49,5
1,1667	31,7	37,7	51,8
1,3334	32	38,6	54,3
1,5	32,3	39,2	56,4
1,6668	32,6	40	58,4
1,8335	32,9	40,6	60,1
2	33,1	41,2	61,8
2,1667		41,9	63,4
2,3334		42,4	65
2,5	33,6	42,9	66,3
2,6668		43,4	67,5
2,8335		43,9	68,7
3	34,1	44,3	69,7
3,1667		44,7	70,5
3,3334		45	71,5
3,5	34,4	45,6	72,4
3,6668		46,2	73,3
3,8335		47,7	74,2
4	34,5	47,2	74,9
4,1667		47,8	75,7
4,3334		48,4	76,3
4,5	34,8	48,9	77,2
4,6668		49,4	77,9
4,8335		49,8	78,5
5	35,2	50,3	79,2
5,1667		50,6	80,1
5,3334		50,9	
5,5	35,6	51,3	
5,666729		51,7	
5,833396		52	
6	35,7	52,2	
6,5		52,9	
7	36,2	53,8	
7,5		54,5	
8	36,5	55,1	

Ψύξη

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	39,7	60,7	80,1
0,1667	39,4	60,5	78,1
0,3334	39	59,6	74,6
0,5	38,6	58,7	72,9
0,6668	38,1	57,8	70,2
0,8335	37,8	57	67,6
1	37,5	56,1	65,7
1,1667	37,1	55,3	63,8
1,3334	36,8	54,5	62,2
1,5	36,6	53,8	60,7
1,6668	36,4	53,1	59,5
1,8335	36,1	52,4	58,3
2	35,9	51,7	57,3
2,1667		51	56,3
2,3334		50,4	55,3
2,5	35,4	49,9	54,4
2,6668		49,4	53,4
2,8335		48,9	52,7
3	35	48,5	51,9
3,5	34,7	47,1	50
4	34,4	46	48,3
5	33,8	43,8	45,7
6	33,4	42,2	43,5
7	33,1	40,9	41,7
8	32,7	39,7	40,3
9	32,4	38,7	39,2
10	32,1	37,9	38,1
12	31,7	36,8	36,6
14	31,4	35,6	35,4
16	31,2	34,7	35,1
18	31	33,8	34,7
20	30,9	33,4	33,5
25	30,6	32,5	32,6
30	30,4	31,8	31,9
35	30,2	31,3	31,5
40	30,1		31,3

8,5		55,5	
9	36,7	55,9	
9,5		56,2	
10	36,8	56,5	
11	37	57,3	
12	37,3	58,3	
13		58,9	
14	37,5	60	
15		60,5	
16	37,7	60,7	
18	37,7		
20	37,7		

(2) Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²**Θέρμανση**

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	30,1	29,6	30,1
0,1667		29,9	32,6
0,3334		30,7	35,3
0,5	30,7	31,2	37,9
0,6668		31,7	40,9
0,8335		32,7	43,5
1	31,1	33,1	45,4
1,1667		33,6	47,5
1,3334		34	49,2
1,5	31,4	34,3	50,7
1,6668		34,6	51,8
1,8335		34,9	53,3
2	31,9	35,2	54,5
2,1667		35,5	55,5
2,3334		35,7	56,7
2,5	32,2	35,9	57,7
2,6668		36,2	58,6
2,8335		36,3	59,7
3	32,6	36,5	60,3
3,1667			61,1
3,3334			61,9
3,5	32,8	37,1	62,6
3,6668			63,3
3,8335			64
4	33,1	37,7	64,5
4,1667			65
4,3334			65,6
4,5	33,3	38	66,1
4,6668			66,7
4,8335			67,3
5		38,5	67,7
5,1667			68,2
5,3334			68,6
5,5	33,8	38,9	69
5,666729			69,5
5,833396			69,9
6		39,2	70,3
6,16673			70,7
6,333396			71
6,5	34	39,5	71,3
6,66673			71,6
6,833396			71,9
7		39,8	72,3
7,16673			72,7

Ψύξη

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	35,9	43,8	80,3
0,1667	35,8	43,6	78,7
0,3334	35,7	43,1	76,8
0,5	35,4	42,5	74,4
0,6668	35,2	42	72,4
0,8335	35	41,5	70,7
1	34,8	41,1	68,9
1,1667	34,6	40,7	67,2
1,3334	34,5	40,4	65,9
1,5	34,3	40	64,5
1,6668	34,2	39,6	63,2
1,8335	34	39,3	62,1
2	33,9	39	61,1
2,1667		38,7	60,1
2,3334		38,4	59
2,5	33,5	38,3	58,3
2,6668		38,1	57,4
2,8335		37,9	56,5
3	33,3	37,7	55,7
3,5	33	37,1	53,8
4	32,8	36,6	51,9
5	32,3	35,7	48,9
6	32,2	35	46,3
7	32	34,5	44,2
8	31,7	34	42,6
9	31,5	33,6	41,3
10	31,3	33,2	40,2
12	31,1	32,4	38,3
14	30,8	31,9	36,9
16	30,7	31,6	35,7
18	30,6	31,3	34,9
20	30,5	31	34,2
25	30,2	30,7	33
30	30,1	30,5	32,1
35		30,2	31,4
40		30,1	31
45			30,7
50			30,5
55			30,3
60			30,2
65			30,1

7,333397			73
7,5	34,3	40	73,4
8		40,3	74,2
8,5	34,5		74,8
9		40,6	75,6
9,5	34,7		76,2
10		41	76,9
10,5	34,9		77,3
11		41,3	77,9
11,5	35		78,4
12		41,5	79
12,5	35,2		79,1
13			79,4
13,5	35,3		79,9
14		42	80,3
14,5	35,4		
15,5	35,6		
16		42,4	
16,5	35,7		
17,5	35,8		
18		42,6	
18,5	35,8		
19,5	35,9		
20		42,8	
20,5	35,9		
22		43,1	
24		43,1	
26		43,3	
28		43,4	
30		43,5	
32		43,7	
34		43,8	

(3) Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²**Θέρμανση**

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	33,2	33,2	32,9
0,1667	33,3	33,3	33,2
0,3334	33,4	33,5	34
0,5	33,5	34	35,5
0,6668	33,5	34,5	37,4
0,8335	33,6	34,9	39,2
1	33,6	35,2	40,9
1,1667	33,7	35,6	42,7
1,3334	33,8	36	44,7
1,5	33,9	36,2	46,5
1,6668	33,9	36,5	48,4
1,8335	33,9	36,9	50,2
2	34	37,2	52
2,1667			53,7
2,3334			54,9
2,5	34,1	37,9	56,1
2,6668			57,5
2,8335			59
3	34,2	38,6	60,2
3,1667			61,5
3,3334			62,6
3,5	34,3	39,2	63,8
3,6668			64,7
3,8335			65,9
4	34,5	39,7	66,9
4,1667			67,5
4,3334			68,5
4,5		40,1	69,5
4,6668			70,5
4,8335			71,3
5	34,6	40,4	72,2
5,1667			72,9
5,3334			73,6
5,5	34,6	40,9	74,5
5,666729			75,3
5,833396			75,8
6	34,7	41,2	76,6
6,16673			77,3
6,333396			77,8
6,5	34,7		78,4
6,66673			79
6,833396			79,8
7	34,8	41,6	80,3
8		42	

Ψύξη

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	34,8	43,2	80,3
0,1667	34,7	43,1	80,2
0,3334	34,7	43	79,2
0,5	34,6	42,6	77,8
0,6668	34,5	42,3	76
0,8335	34,4	42,8	74,1
1	34,3	41,5	72,6
1,1667	34,2	41,2	71,3
1,3334	34,1	40,8	69,8
1,5	34,1	40,7	68,3
1,6668	34	40,3	67
1,8335	34	40,1	65,7
2	33,9	39,8	64,6
2,1667			63,3
2,3334			62,3
2,5	33,7	39,2	61,3
2,6668			60
2,8335			59,3
3	33,6	38,6	58,4
3,5	33,6	38,2	55,8
4	33,5	37,7	53,7
5	33,3	37,1	50,4
6	33,1	36,5	48,1
7		36	46,3
8		35,6	44,4
9		35,2	42,9
10		34,9	41,6
12		34,6	39,7
14		34,2	38,3
16		33,9	37,2
18		33,7	36,4
20		33,5	35,9
25			34,9
30			34,1
35			33,7
40			33,4

10		42,7	
12		43,2	

(3) Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²

Θέρμανση

Ψύξη

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	30,9	29,8	29,7
0,1667	31	29,9	33,7
0,3334	31,1	30,3	36,5
0,5	31,9	31,1	40,3
0,6668	32,2	31,7	44,5
0,8335	32,7	32,3	48,2
1	33,1	32,7	50,2
1,1667	33,5	33	51,5
1,3334	33,7	33,4	53,2
1,5	34,1	33,6	54,6
1,6668	34,5	33,9	55,8
1,8335	34,7	34,2	56,8
2	34,9	34,5	58
2,1667			58,9
2,3334			59,7
2,5	35,4	35,2	60,6
2,6668			61,4
2,8335			62,2
3	36	35,7	63
3,1667			63,6
3,3334			64,4
3,5	36,9	36	65
3,6668			65,6
3,8335			66,3
4	37,9	36,5	66,8
4,1667			67,4
4,3334			67,8
4,5	38,4	36,7	68,3
4,6668			68,9
4,8335			69,4
5	39	37,1	69,8
5,1667			70,4
5,3334			70,7
5,5	39,2	37,6	71,1
5,666729			71,5
5,833396			71,8
6	39,4	37,8	72,1

	I = 1 A	I = 2 A	I = 5 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)	θ (° C)
0	40,8	58,8	80,1
0,1667	40,6	58,4	79,1
0,3334	40,4	57,3	76,7
0,5	39,9	56,1	74
0,6668	39,6	54,7	71,3
0,8335	39,2	53,3	68,8
1	38,9	52,3	66,4
1,1667	38,5	51,1	64,8
1,3334	38,2	50,2	63
1,5	38	49,3	61,5
1,6668	37,7	48,6	60,1
1,8335	37,5	47,9	58,7
2	37,4	47,3	57,8
2,1667		46,6	56,8
2,3334		46,1	55,9
2,5	37	45,7	55
2,6668		45,3	54,2
2,8335		44,8	53,4
3	36,5	44,4	52,7
3,5	36,1	43,7	50,7
4	35,8	42,8	50,1
5	35,2	41,2	47,7
6	34,8	39,9	45,3
7	34,4	38,7	43,3
8	34	37,7	41,6
9		36,9	40,2
10	33,6	36,2	39
12	33,1	35,2	37
14	32,7	34,4	35,7
16	32,5	33,6	34,7
18	32,3	33,1	33,8
20	32,1	32,6	33,3
25	31,8	31,7	32,2
30	31,4	30,5	31,3
35	31,2	30,3	30,8
40			30,5
45			30,2

6,5		38,1	73,2	50			29,8
7	40	39	74,1				
8	40,6	42	75,6				
10	40,8	45,4	78,1				
12		49,4	80,1				
14		52					
16		53,6					
20		55,5					
25		58,4					

Τριφασικός διακόπτης ABB, E202, 45 A, 400 V

(1) Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²

Θέρμανση

	I = 5 A	I = 10 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)
0	26,6	26
0,1667	26,6	26
0,3334	26,6	26,5
0,5	26,9	27
0,6668	27,2	27,9
0,8335	27,6	29
1	27,9	30,3
1,1667	28,3	31,8
1,3334	28,8	33,6
1,5	29,2	35,1
1,6668	29,4	36,9
1,8335	29,8	38,4
2	30,1	40,1
2,1667	30,5	41,9
2,3334	30,9	43,6
2,5	31,3	44,7
2,6668	31,7	46
2,8335	32	47,7
3	32,5	49,1
3,1667	33,8	50,4
3,3334	33,8	51,7
3,5	33,8	52,9

Ψύξη

	I = 5 A	I = 10 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)
0	46,2	80
0,1667	45,5	80
0,3334	45,1	79,8
0,5	44,8	79,3
0,6668	44,6	78,5
0,8335	44,3	77,8
1	44	76,9
1,1667	43,7	76
1,3334	43,3	74,9
1,5	42,9	73,8
1,6668	42,7	72,7
1,8335	42,3	71,4
2	41,8	70,2
2,1667	41,5	69,2
2,3334	41,1	68,2
2,5	40,8	67,1
2,6668	40,4	66,1
2,8335	40	65
3	39,6	63,8
3,1667	39,2	62,9
3,3334	38,7	62
3,5	38,4	61

3,6668	33,8	54,3	3,6668	38,1	60,1
3,8335	34	55,5	3,8335	37,8	59,1
4	34,5	56,8	4	37,4	58,3
4,1667		57,8	4,5	36,5	55,9
4,3334		59	5	35,8	53,7
4,5	35,4	60,1	5,5	35,2	51,7
4,6668		61,2	6	34,8	49,3
4,8335		62,1	6,5	34,3	47,7
5	36,4	62,9	7	33,6	46,1
5,1667		63,7	7,5	33,1	44,8
5,3334		64,6	8	32,6	43,5
5,5	37	65,3	9	31,8	41,4
5,666729		66,2	10	31	39,5
5,833396		67,1	11	30,5	38
6	37,6	67,8	12	29,9	36,8
6,5	38,2	69,7	13	29,4	35,5
7	38,7	71,4	14	29	34,6
7,5	39,3	73,2	16	28,4	33
8	40	74,2	18	27,8	31,8
8,5		75,4	20	27,5	30,6
9	40,9	76,3	25	26,7	29
9,5		77,3	30		27,9
10	41,9	78,1	35		27
10,5		78,8	40		26,6
11	42,7	79,5			
11,5		80			
12	43,3				
13	44				
14	44,4				
16	45				
18	45,7				
20	46,2				

(2) Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 6 mm²

Θέρμανση

	I = 5 A	I = 10 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)
0	25,5	24,9
0,1667	25,5	25,8
0,3334	25,5	26,7
0,5	25,7	28,3
0,6668	26	29,7
0,8335	26,4	32
1	26,8	34,3
1,1667	27,2	35,5
1,3334	27,5	36,7
1,5	28	38
1,6668	28,3	39,5
1,8335	28,8	41,2
2	29,3	43,6
2,1667	29,8	45,3
2,3334	30,2	46,7
2,5	30,6	48,4
2,6668	31	49,8
2,8335	31,3	51,3
3	31,7	52,6
3,1667	32	54
3,3334	32,3	55,2
3,5	32,7	56,4
3,6668	33	57,7
3,8335	33,3	58,8
4	33,7	59,9
4,5	34,5	62,9
5	35,2	65,4
5,5	35,9	67,8
6	36,5	69,9
6,5	37	71,7
7	37,5	72,6
7,5	38	74,1
8	38,5	75
9	39,3	77,3
10	40	78,5
11	40,6	79,8
12	41,1	
13	41,5	
14	41,9	
16	42,5	
18	43	
20	43,4	
25	44,3	
30	44,6	

Ψύξη

	I = 5 A	I = 10 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)
0	44,6	79,8
0,1667	44,6	79,5
0,3334	44,4	78,6
0,5	44,2	78
0,6668	43,8	76,9
0,8335	43,5	75,9
1	43,1	74,8
1,1667	42,7	73,7
1,3334	42,4	72,5
1,5	42	71,3
1,6668	41,6	70,1
1,8335	41,2	69
2	40,8	67,9
2,1667	40,4	66,8
2,3334	40	65,6
2,5	39,7	64,6
2,6668	39,3	63,6
2,8335	39	62,6
3	38,6	61,7
3,1667	38,4	60,7
3,3334	38	59,8
3,5	37,7	58,8
3,6668	37,4	57,8
3,8335	37,1	57
4	36,9	56,2
4,5	36	53,9
5	35,3	51,8
5,5	34,7	49,8
6	34	48,2
6,5	33,4	46,5
7	32,9	45,2
7,5	32,4	43,9
8	31,9	42,6
9	31,1	40,3
10	30,5	38,5
11	29,9	37
12	29,5	35,8
13	29	34,8
14	28,6	33,8
16	28,1	32,2
18	27,5	31
20	26,9	30
25	26,6	28,2
30	26,2	27,3

35		26,5
40		25,9
45		25,5

(3) Μονόκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²

Θέρμανση

	I = 5 A	I = 10 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)
0	25,1	26,5
0,1667	25,2	27
0,3334	25,2	28,2
0,5	25,3	28,9
0,6668	25,5	30,1
0,8335	26,2	31,3
1	27	32,7
1,1667	27,7	34
1,3334	28,2	35,4
1,5	28,9	36,8
1,6668	29,5	38
1,8335	30,1	39,3
2	31,2	40,6
2,1667	31,6	42
2,3334	32,3	43,2
2,5	32,7	44,1
2,6668	33,2	45,1
2,8335	33,6	46,2
3	34,1	47,2
3,1667	34,6	48,4
3,3334	35	49,3
3,5	35,4	50,2
3,6668	35,8	51,1
3,8335	36,2	51,7
4	36,6	52,5
4,5	37,8	55,3
5	38,5	58
5,5	39,4	60,2
6	40,2	62
6,5	40,9	63,9
7	41,5	65,7
7,5	42	67,1
8	42,5	68,3
9	43,5	70,7
10	44,3	72,3

Ψύξη

	I = 5 A	I = 10 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)
0	48,2	77,7
0,1667	48,1	77,2
0,3334	47,9	76,7
0,5	47,7	76
0,6668	47,3	75,2
0,8335	47	74,2
1	46,5	73,2
1,1667	46,1	72,2
1,3334	45,6	71
1,5	45,1	70
1,6668	44,7	69
1,8335	44,2	68
2	43,8	66,9
2,1667	43,2	66
2,3334	42,9	65,1
2,5	42,5	64,1
2,6668	42,1	63,2
2,8335	41,8	62,4
3	41,4	61,4
3,1667	41	60,5
3,3334	40,7	59,6
3,5	40,3	58,8
3,6668	39,9	58
3,8335	39,6	57,3
4	39,3	56,6
4,5	38,4	54,3
5	37,5	52,5
5,5	36,7	50,8
6	36	49,1
6,5		47,6
7	33,9	46,5
7,5		45,3
8	33,9	44,2
9	32,9	42,3
10	32,1	40,6

11	44,8	73,5
12	45,3	74,5
14	46,1	75,7
16	46,7	76,4
18	47	77
20	47,3	77,7
25	47,8	77,7
30	48,2	

11		39
12	31	37,8
14	30,2	35,8
16	29,5	34,3
18	28,9	33,1
20	28,5	32,1
25	27,8	30,5
30	27	29,3
35		28,6
40		27,9

(4) Πολύκλωνο καλώδιο διατομής 10 mm²**Θέρμανση**

	I = 5 A	I = 10 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)
0	25,5	24,3
0,1667	25,6	25
0,3334	25,8	25,8
0,5	26	27,3
0,6668	26,3	29
0,8335	26,8	31
1	27,1	32,9
1,1667	27,5	34,8
1,3334	27,8	36,2
1,5	28,2	38,4
1,6668	28,5	40,3
1,8335	28,9	41,9
2	29,3	43,4
2,1667	29,6	45,5
2,3334	29,9	46,9
2,5	30,2	48,2
2,6668	30,5	49,8
2,8335	30,8	51,1
3	31,1	52,4
3,1667	31,5	53,7
3,3334	31,8	54,8
3,5	32	55,9
3,6668	32,2	57
3,8335	32,5	58,2
4	32,7	59,1
4,5	33,5	61,9
5	33,9	64,2
5,5	34,4	66,4
6	35	68,2
6,5	35,5	69,8
7	36	71,1
7,5	36,4	72,2
8	36,8	73,3
9	37,4	74,6
10	37,8	75,3
11		75,7
12	38,7	75,9
14	39,5	76,5
16	40	77,2
18	40,4	77,6
20	40,8	77,9

Ψύξη

	I = 5 A	I = 10 A
t (min)	θ (° C)	θ (° C)
0	40,8	77,9
0,1667	40,6	77,9
0,3334	40,2	77,2
0,5	39,8	76,2
0,6668	39,6	74,6
0,8335	39,2	73,7
1	38,8	72,6
1,1667	38,5	71,5
1,3334	38,1	70,2
1,5	37,7	69
1,6668	37,5	67,7
1,8335	37,1	66,6
2	36,8	65,4
2,1667	36,5	64,4
2,3334	36,2	63,3
2,5	35,9	62,3
2,6668	35,6	61,3
2,8335	35,3	60,4
3	35,1	59,5
3,1667	34,8	58,5
3,3334	34,5	57,7
3,5	34,3	56,7
3,6668	34	55,8
3,8335	33,9	55,2
4	33,6	54,3
4,5	32,8	52,4
5	32,4	50,3
5,5	31,9	48,5
6	31,4	47
6,5		45,5
7	30,5	44
7,5		42,9
8	29,9	41,9
9	29,2	39,9
10	28,6	38,2
12	27,8	35,5
14	27,1	33,8
16	26,6	32,1
18	26,3	31
20	25,8	30
25		28,1
30		26,9
35		26,1
40		25,5

Κατάλογος Σχημάτων και Εικόνων

1.1 Κατηγορίες ηλεκτρικών επαφών	12
1.2 Δομή πραγματικών επιφανειών επαφής	18
1.3 Οπτικοποίηση του ηλεκτροστατικού προβλήματος	20
1.4 Ισοδυναμικές επιφάνειες και γραμμές ηλεκτρικής ροής κοντά σε μια στένωση	22
1.5 Ηλεκτρικά αγώγιμος κύλινδρος ακτίνας R με κυκλική στένωση ακτίνας a	23
1.6 Τετράγωνες και κυκλικές δακτυλιοειδείς στενώσεις	24
1.7 Κατανομή α -σημείων με αντίστοιχη ακτίνα ισοδύναμης απλής επαφής (σκιασμένη περιοχή) και ακτίνα H_{01m} (εξωτερική ακτίνα)	25
1.8 Ηλεκτρική διεπιφάνεια	27
1.9 Κατανομή ρεύματος σε επιφανειακό μεταλλικό στρώμα με αγωγιμότητα (a) μικρότερη από το υπόστρωμα (b) μεγαλύτερη από το υπόστρωμα	30
1.10 Επιδερμικό φαινόμενο	30
1.11 Σχηματικό διάγραμμα σημείου επαφής που δημιουργείται μεταξύ ρωγμών στο στρώμα οξειδίου του αλουμινίου	33
1.12 Ισοδυναμικές γραμμές πεδίου θερμοκρασίας	36
2.1 Κύκλωμα μέτρησης 1: Πηγή εναλλασσόμενης τάσης 2: Αυτομετασχηματιστής 3: Μετασχηματιστής χαμηλής τάσης 4: Αμπερόμετρο 5: Αυτόματος διακόπτης 6: Θερμοκάμερα (Κάμερα υπερέυθρων)	43

2.2 Μετασχηματιστής 230/9 V	44
2.3 Αμπερόμετρο με αμπεροτσιμπίδα(αριστερά) και ο αυτομετασχηματιστής (δεξιά)	44
2.4 Αναπαράσταση της γενικής θερμογραφικής κατάστασης μετρήσεων ..	44
2.5 Τριφασικός διακόπτης SIEMENS	48
2.6 Διπολικός διακόπτης SIEMENS	48
2.7 Διπολικός διακόπτης ABB	48
3.1 Φάση 1, I=5A, μονόκλωνο 6 mm ²	65
3.2 Φάση 1, I=5A, μονόκλωνο 10 mm ²	65
3.3 Φάση 1, I=1A, πολύκλωνο 6 mm ²	66
3.4 Φάση 1, I=1A, πολύκλωνο 10 mm ²	66
3.5 Φάση 2, I=1A, μονόκλωνο 6 mm ²	67
3.6 Φάση 2, I=1A, μονόκλωνο 10 mm ²	67
3.7 Φάση 2, I=5A, πολύκλωνο 6 mm ²	68
3.8 Φάση 2, I=5A, πολύκλωνο 10 mm ²	68
3.9 Διπολικός, I=2A, μονόκλωνο 6 mm ²	69
3.10 Διπολικός, I=2A, μονόκλωνο 10 mm ²	69
3.11 Διπολικός, I=5A, πολύκλωνο 6 mm ²	70
3.12 Διπολικός, I=5A, πολύκλωνο 10 mm ²	70

Βιβλιογραφία

- [1] ROLAND S. TIMSIT, Electrical Contact Resistance : Properties of Stationary Interfaces, IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGY, VOL. 22, NO. 1, MARCH 1999
- [2] GEORGE J. ANDERS, Rating of electric power cables in unfavorable thermal environment
- [4] MILENKO BRAUNOVIC, VALERY V. KONCHITS, NIKOLAI K. MYSHKIN, Fundamentals of Electrical Contacts
- [5] M.D. BRYANT, Tribology Issues in Electrical Contacts
- [6] YOUNG WOO PARK, G. N. K. RAMESH BAPU, KANG YONG LEE, The influence of current load on fretting of electrical contacts,
- [7] Copper Development Association, Copper in Electrical Contacts-Technical Note 23, 1980
- [8] L. SANTANDREA, R. ANDLAUER, T. LEBLANC, J. -P. CHABRERIE, Contribution to the modeling of the heating phenomenon of electric contacts
- [9] H. -J. FECHT, J. W. MROSK, Electrical Contacts and Degradation Mechanisms
- [10] FLIR, Εγχειρίδιο χρήστη, FLIR 600 Series
- [11] DOUGLAS BROOKS, Skin Effect, ULTRACAD DESIGN, Inc.
- [12] M. BRAUNOVIC, V. V. IZMAILOV, M. V. NOVOSELOVA, A Model for Life Time Evaluation of Closed Electrical Contacts
- [13] GUNNAR NORBERG, SLAVKO DEJANOVIC, HJALMAR HESSELBOM, Contact Resistance of Thin Metal Film Contacts, IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES, VOL. 29, NO. 2, JUNE 2006
- [14] ROLAND S. TIMSIT, Electrical Conduction Through Small Contact Spots, IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES, VOL. 29, NO. 4, DECEMBER 2006

- [15] DONG-OOK KIM, HYANG-KON KIM, KIL-MOK SHONG, CHUNG-SEOG CHOI, The properties of oxidation growth and overheating by poor contact
- [16] BELLA H. CHUDNOVSKY, ALBERT LIVSHITZ, BORIS A. CHUDNOVSKY, Thermal Model of Electrical Contacts Based on Experimental Data
- [17] K. -T. HSIEH, S. SATAPATHY, M.-T. HSIEH, Effects of Pressure-Dependent Contact Resistivity on Contact Interfacial Conditions, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 45, NO. 1, JANUARY 2009
- [18] ROLAND S. TIMSIT, Constriction Resistance of Thin Film Contacts, IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES, VOL. 33, NO. 3, SEPTEMBER 2010
- [19] RAGNAR HOLM, Electric Contacts Theory and Applications, Springer, Fourth Edition
- [20] S. V. NAGENDER NAIDU, P. RAMA KAO, Monograph : Phase Diagram of Binary Tungsten Alloys, Indian Institute of Metals, Calcutta, 1991, pp.76-79
- [21] ABB SACE, Technical Catalogue, Low-voltage moulded-case circuit-breakers
- [22] GEORGE J. ANDERS, Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004
- [23] Siemens Switchboard and Protection Manual
- [24] Π. Δ. ΜΠΟΥΡΚΑΣ, Εισαγωγή στο Μηχανολογικό και Ηλεκτρολογικό Σχέδιο, Αθήνα 1999
- [25] HANS-PETER SCHMIDT, Efficient Simulation of Thermal and Electrical Behaviour of Industrial Cables, University of Applied Sciences Amberg-Weiden, Germany