



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

**Μετρήσεις Σε Στατικούς Ηλεκτρικούς Συνδέσμους Χάλκινων  
Αγωγών 16 και 35 mm<sup>2</sup>**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΚΟΛΙΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ**

**Επιβλέπων:** Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## Μετρήσεις Σε Στατικούς Ηλεκτρικούς Συνδέσμους Χάλκινων Αγωγών 16 και 35 mm<sup>2</sup>

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΚΟΛΙΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ**

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2011.

(Υπογραφή)

.....

Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Νικόλαος Ι. Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Περικλής Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 12/10/2011

.....

Κολιός Κ. Παναγιώτης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Κολιός Κ. Παναγιώτης, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω θερμές ευχαριστίες στους καθηγητές μου κ. Περικλή Μπούρκα και κ. Κωνσταντίνο Καραγιαννόπουλο για τον ζήλο τους στον τρόπο διδασκαλίας, την αμεσότητά τους προς τους φοιτητές και την μεταλαμπάδευση ουσιαστικών γνώσεων που μας έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Χαλεβίδη για την άριστη συνεργασία μας και τη συμπαράστασή του και βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια περάτωσης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. κ. Καίτη Πολυκράτη για την άριστη συνεργασία μας και την πολύτιμη βοήθειά της, καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Ευχαριστίες οφείλω επίσης και στον κ. Βασιλειάδη για τη διάθεση των συνδέσμων, προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις, που διεξήχθησαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αγάπη και τη στήριξη, που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια, στην προσπάθειά μου να επιτύχω τους στόχους μου και να υλοποιήσω τα όνειρα μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	10
1.1 Στατικές ηλεκτρικές επαφές.....	10
1.1.1 Εισαγωγή.....	10
1.1.2 Βασικοί όροι και έννοιες.....	11
1.1.3 Αντίσταση στένωσης και αντίσταση στρώματος επικαθίσεων.....	12
1.1.4 Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντίσταση στένωσης.....	16
1.1.5 Η πτώση τάσης σε μια επαφή σε σχέση με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται.....	17
1.1.6 Χαρακτηριστικές καμπύλες αντίστασης-πτώσης τάσης και αντίστασης – θερμοκρασίας.....	19
1.1.7 Οξείδωση και επικαθίσεις στις ηλεκτρικές επαφές.....	23
1.1.8 Επίδραση της υγρασίας.....	26
1.1.9 Το φαινόμενο σήραγγες στις επαφές.....	27
1.1.10 Το μοντέλο εξομάλυνσης της επιφάνειας των επαφών.....	34
1.1.11 Φαινόμενα μεταφοράς στις στατικές επαφές.....	35
1.1.12 Φαινόμενα διστάθειας.....	43
1.1.13 Ισοδύναμο κύκλωμα για τις ηλεκτρικές επαφές.....	45
1.1.14 Ηλεκτρομονωτική και αγώγιμη συμπεριφορά των μικροδομών μιας στατικής ηλεκτρικής επαφής.....	46

1.1.15	Οι διατάξεις μέτρησης και αξιολόγησης των ηλεκτρικών επαφών.....	47
1.1.16	Καταπονήσεις στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων υπό ταχέως μεταβαλλόμενα πεδία.....	49
2	ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	54
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	55
3.1	Κύκλωμα μέτρησης.....	55
3.2	Μηχανολογικά σχέδια των συνδέσμων.....	56
3.3	Περιγραφή διεξαγωγής των μετρήσεων.....	58
3.4	Αποτελέσματα των μετρήσεων.....	59
4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	73
4.1	Υπολογισμοί.....	73
4.2	Γραφικές παραστάσεις.....	77
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	86
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	88

## Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της αξιοπιστίας των στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων. Στα πλαίσια αυτά εξετάστηκε η συμπεριφορά των συνδέσμων όσον αφορά την αντίσταση διάβασης και την ανύψωση της θερμοκρασίας, κατά την μεταβολή της ροπής σύσφιξης τους. Ακόμα, υπολογίστηκε το ονομαστικό ρεύμα των συνδέσμων.

Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν σειρές μετρήσεων σε λυόμενους σταθερούς ηλεκτρικούς συνδέσμους. Καταγράφηκαν μεγέθη που σχετίζονται με την θερμική καταπόνηση των συνδέσμων, όπως η θερμοκρασία, η πτώση τάσης στην επαφή κτλ.

Το πρώτο τμήμα της εργασίας αυτής περιέχει το θεωρητικό υπόβαθρο για την καλύτερη κατανόηση των παρουσιαζόμενων μετρήσεων. Επίσης περιλαμβάνει τις σχέσεις που διέπουν την αύξηση της θερμοκρασίας, την ειδική αντίσταση, την ένταση και τη διαφορά δυναμικού. Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων, δίνονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των λυόμενων συνδέσμων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και το κύκλωμα της πειραματικής διάταξης. Η παρουσίαση των μετρήσεων γίνεται στο κεφάλαιο III. Στα επόμενα κεφάλαια και μετά την σχετική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της διαφοράς της θερμοκρασίας του δοκιμίου, του αγωγού καθώς και της διαφοράς δυναμικού. Περιέχονται ακόμα συγκριτικοί πίνακες για τις διάφορες περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Μετά από μία συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

**Λέξεις Κλειδιά:** Ηλεκτρικές επαφές, Στατικοί ηλεκτρικοί σύνδεσμοι, Ροπή σύσφιξης



## **Abstract**

The aim of this diploma thesis is to investigate the behaviour of the stationary electrical couplings, concerning the temperature rise and the crossing resistance under different tightening torques. The torque is applied on the contacts between the coupling and the conductor. Also the nominal current of the contacts is determined.

In order to examine the reasons which affect these phenomena, a number of experimental measurements on stationary electrical couplings is performed.

The first part of this work presents a theoretical background, necessary for a better understanding of the presented measurements. It includes the relations between the materials and temperature, crossing resistance, current, and the potential across the contacts. Before the measurements, the characteristics of the couplings and description of the circuit are given. The measurements are presented in Chapter III and analysed in further chapters. Additionally, figures have been drawn displaying the value of the couplings' and conductors' temperature rise, as well as the potential across the contacts as a function of time. Finally in the last chapter, all the results are compared and discussed and some useful conclusions are drawn.

**Keywords:** Stationary electrical contacts, Tightening torque

# 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## 1.1 ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΠΑΦΕΣ

### 1.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι αποτελούν βασικό τμήμα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Κάθε ηλεκτρική εγκατάσταση περιλαμβάνει ηλεκτρικούς συνδέσμους (κυρίως στους ηλεκτρικούς πίνακες και στα κυκλώματα των γειώσεων), η αξιοπιστία των οποίων είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εύρυθμη λειτουργία της.

Οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις διακρίνονται σε μόνιμους και λυόμενους. Μόνιμοι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι είναι αυτοί που τα δύο μέρη τους συνδέονται μεταξύ τους σταθερά μέσω κοχλιών. Τέτοιοι σύνδεσμοι είναι οι συνδέσεις των καλωδίων μέσω των ακροδεκτών τους, οι συνδέσεις μεταξύ των ζυγών, οι συνδέσεις σε κυκλώματα γειώσεων. Λυόμενοι σύνδεσμοι είναι αυτοί που μπορεί κανείς να χειρισθεί μέσω εξωτερικά εφαρμοζόμενης δύναμης, όπως οι επαφές των διακοπών γενικά καθώς και οι επαφές των ασφαλειοαποζευκτών.

Ο όρος ηλεκτρική επαφή σημαίνει μία σύνδεση μεταξύ δύο αγωγών, η οποία έχει ως σκοπό της την μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος. Τα τμήματα των αγωγών που συνδέονται ονομάζονται τμήματα της επαφής (contact members) ή απλούστερα επαφές (contacts). Συνήθως το τμήμα εκείνο της επαφής, το οποίο συνδέεται με τον θετικό πόλο της πηγής (εάν πρόκειται για συνεχές ρεύμα) ονομάζεται άνοδος και το άλλο τμήμα είναι η κάθοδος. Η δύναμη η οποία συγκρατεί τα δύο μέρη της επαφής μεταξύ τους καλείται δύναμη σύσφιξης των επαφών  $F$ .

Οι ηλεκτρικές επαφές διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις στατικές ηλεκτρικές επαφές (stationary electrical contacts) και τις ηλεκτρικές επαφές που έχουν ισχύ διακοπής (switching electrical contacts). Οι στατικές ηλεκτρικές επαφές, δηλαδή οι επαφές που δεν έχουν

ισχύ διακοπής, μπορεί κανείς να τις χειρισθεί μόνο όταν το κύκλωμα έχει τεθεί εκτός τάσης, μέσω π.χ. ενός διακόπτη φορτίου ή ισχύος, ανάλογα με το είδος παροχής της τάσης. Επαφές αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε βιομηχανικές εφαρμογές σαν αποζεύκτες, γειωτές και ασφαλειοθήκες. Αντίθετα οι επαφές με ισχύ διακοπής χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητά τους να διακόπτουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, χωρίς να υφίστανται συνέπειες στη συμπεριφορά τους από το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται κατά το χειρισμό του φορτίου.

Στη συνέχεια δίνεται μία σύντομη εισαγωγή για τις στατικές ηλεκτρικές επαφές χωρίς ισχύ διακοπής που αφορούν στην εργασία αυτή και καθορίζονται βασικές αρχές σχετικά με την αξιολόγηση τους. Εξετάζονται επίσης περιληπτικά τα φαινόμενα που εκδηλώνονται κατά τη λειτουργία των επαφών και δίνεται μία σύντομη ανασκόπηση των μέχρι σήμερα ερευνών σχετικά με το θέμα.

### 1.1.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ

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

Υπάρχει μια εμπειρική σχέση που συνδέει την δύναμη σύσφιξης  $F$  με την επιφάνεια σύσφιξης  $A_b$  η οποία είναι:

$$F = \xi \cdot H \cdot A_b \quad (1.1.2-1)$$

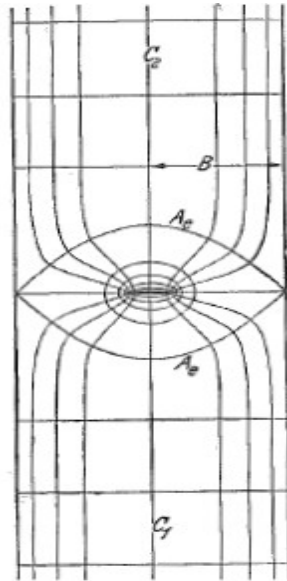
όπου  $H$  είναι η σκληρότητα της επαφής και  $\xi$  ένας συντελεστής αναλογίας που κυμαίνεται από 0.2 έως 1.

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

### 1.1.3 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΤΕΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΕΠΙΚΑΘΙΣΕΩΝ

Ο όρος αντίσταση διάβασης αφορά την αντίσταση που παρουσιάζει μία επαφή κατά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η αντίσταση διάβασης  $R$  (contact resistance) περιλαμβάνει γενικά δύο όρους. Την αντίσταση στένωσης  $R_c$  (constriction resistance) και την αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων στις επαφές  $R_f$  (film resistance). Η αντίσταση στένωσης  $R_c$ , είναι αποτέλεσμα της εξαναγκασμένης ροής του ηλεκτρικού ρεύματος από την επιφάνεια  $A_c$ . Η αντίσταση στένωσης περιλαμβάνει εξ ορισμού, την αντίσταση και στα δύο μέρη της επαφής. Η αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων οφείλεται στην δυσκολία των ηλεκτρικών φορέων να

διαπεράσουν το στρώμα αυτό.



Σχήμα 1.1.3-1: Γραμμές ροής ρεύματος και δημιουργία της αντίστασης στένωσης  $R_c$ .

Στο παραπάνω σχήμα (1.1.3-1) φαίνονται οι γραμμές ροής του ηλεκτρικού ρεύματος και οι ισοδυναμικές επιφάνειες δύο κυλίνδρων, ίδιου μετάλλου, που άγουν ηλεκτρικό ρεύμα κατά την διεύθυνση του άξονα συμμετρίας τους. Θεωρούμε ότι η μόνη θέση στην οποία είναι δυνατό λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας να διέλθει το ρεύμα είναι η ελλειπτική επιφάνεια  $A_c$  που έχει ως διαστάσεις τους ημιάξονες  $\alpha$  και  $\beta$ . Στην περίπτωση αυτή η αντίσταση στένωσης θα οφείλεται στην εξαναγκασμένη συμπύκνωση των γραμμών ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.

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

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

ισοδυναμική επιφάνεια

- για τον υπολογισμό της αντίστασης μεταξύ διαδοχικών ισοδυναμικών επιφανειών ισχύει  $\Delta\Phi=0$ , όπου  $\Phi$  το δυναμικό.

Κάνοντας χρήση του σχήματος (1.1.3-1) και των παραδοχών που αναφέρονται παραπάνω μπορεί να πραγματοποιηθεί μια σύντομη απόδειξη της σχέσης υπολογισμού της  $R_c$ :

$$R_c = \frac{\rho}{2a} \quad (1.1.3-1)$$

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

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^\mu \frac{d\mu}{\sqrt{(a^2 + \mu)(\beta^2 + \mu)}\mu} \quad (1.1.3-2)$$

όπου  $a$  και  $\beta$  οι ημιάξονες της έλλειψης σε cm,  $\rho$  η ειδική αντίσταση σε  $\Omega\text{cm}$  και  $\mu$  μια παράμετρος η οποία εξαρτάται από τον λόγο της επιφάνειας  $A_c$  προς την επιφάνεια  $A_\alpha$ . Για  $A_c \ll A_\alpha$  ισχύει  $\mu \rightarrow \infty$ .

Στην περίπτωση που η περίμετρος της  $A_c$  είναι περιφέρεια ακτίνας  $r$  τότε έχουμε στην παραπάνω σχέση  $a=\beta=r$  και επομένως η αντίσταση στένωσης είναι:

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^\mu \frac{d\mu}{(r^2 + \mu)\sqrt{\mu}} = \frac{\rho}{2\pi} \arctan \frac{\sqrt{\mu}}{r} \quad (1.1.3-3)$$

Για  $\mu = \infty$  η σχέση γίνεται  $R_c = \frac{\rho}{2a}$ .

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

$$R_c = \sum_{i=1}^n R_{ci} = \frac{\rho}{2 \sum_{i=1}^n r_i} \quad (1.1.3-4)$$

Πειραματικά αποτελέσματα από τους Holm και Stormer συμπίπτουν με τα υπολογιζόμενα από την σχέση (1.1.3-1). Έχει διαπιστωθεί επίσης ότι σε περίπτωση που η περίμετρος της  $A_c$  έχει

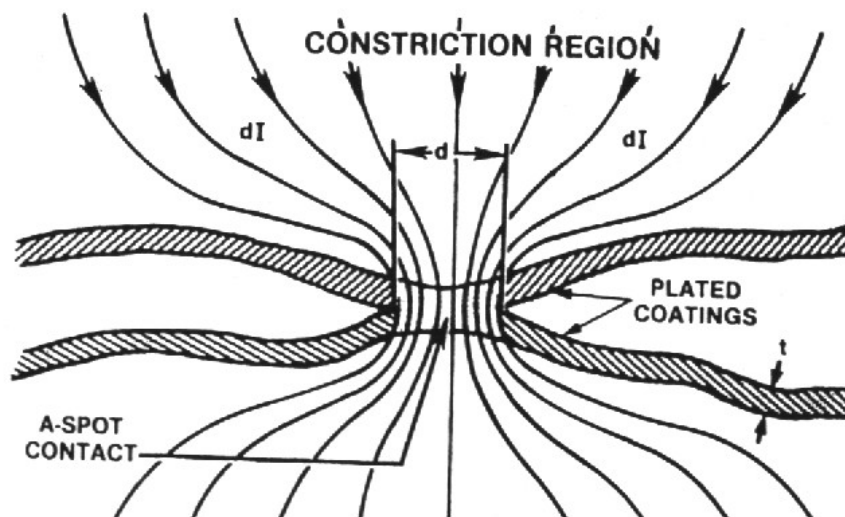
σχήμα έλλειψης τότε η σχέση (1.1.3-1) εκφράζει με ικανοποιητική ακρίβεια την αντίσταση στένωσης και μπορεί να χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς με ακρίβεια περίπου  $\pm 1,5\%$ .

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

$$R_f = \frac{\sigma}{na^2} \quad (1.1.3-5)$$

όπου  $\sigma$  είναι η ανά μονάδα επιφανείας αντίσταση του υλικού.

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



Σχήμα 1.1.3-2: Σχηματική παράσταση σημείων επαφής (a-spot) μεταξύ επιφανειών.

Από την προηγούμενη ανάλυση είναι φανερό ότι οι οδοί διέλευσης του ρεύματος είναι λιγότερες από αυτές που φυσιολογικά αναμένονται και για τον λόγο αυτό θα υπάρχει και μία περισσότερο ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος (βλέπε σχήμα 1.1.3-2).

#### 1.1.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΤΕΝΩΣΗΣ

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

$$R_c(T) = R_c(T_0) \cdot (1 + \alpha_x(T - T_0)) \quad (1.1.4-1)$$

όπου  $R_c(T_0)$  η τιμή της αντίστασης στένωσης σε θερμοκρασία  $T_0$ ,  $R_c(T)$  η τιμή της αντίστασης στένωσης σε θερμοκρασία  $T > T_0$  και  $\alpha_x$  ο θερμικός συντελεστής μεταβολής της αντίστασης στένωσης. Θεωρητικοί υπολογισμοί επαληθεύουν τη σχέση (1.1.4-1) και προσδιορίζουν τον συντελεστή  $\alpha_x$  ίσο προς τα 2/3 του θερμικού συντελεστή  $\alpha$  του υλικού των επαφών. Έτσι η σχέση (1.1.4-1) γίνεται:

$$R_c(T) = R_c(T_0) \cdot (1 + \frac{2}{3} \alpha(T - T_0)) \quad (1.1.4-2)$$

Οι σχέσεις (1.1.3-1 και (1.1.4-2) για τα συνήθη μέταλλα, που χρησιμοποιούνται στις επαφές, δίνουν τιμές της  $R_c$  οι οποίες είναι πολύ μικρές. Πειραματικά δεδομένα για συνήθεις επαφές των πρακτικών εφαρμογών δίνουν επίσης πολύ μικρές τιμές για την  $R_c$ , (της τάξης των  $2 \cdot 10^{-4} \Omega$ ). Οι τιμές αυτές της αντίστασης στένωσης δεν μπορούν να δικαιολογήσουν τις συνήθεις (κατά τις προδιαγραφές) τιμές της πτώσης τάσης (π.χ. της τάξης των 55 mV για διακόπτες του δικτύου ΧΤ). Γι' αυτό μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι η αντίσταση λόγω των ξένων επικαθίσεων σε μία επαφή έχει πρωτεύοντα ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της ολικής αντίστασης διάβασης.



### 1.1.5 Η ΠΤΩΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΜΙΑ ΕΠΑΦΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΣΣΕΤΑΙ

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

Για την διατύπωση μίας ενεργειακής σχέσης, που διέπει μία επαφή, έχουν γίνει οι παρακάτω παραδοχές:

- Σαν είσοδος του ηλεκτρικού ρεύματος νοείται η πραγματική επιφάνεια επαφής, και σαν έξοδος μία επιφάνεια αρκετά μακριά από την είσοδο ώστε η ροή σε αυτή να μην επηρεάζει την θερμική και ηλεκτρική ροή στο άμεσο περιβάλλον της επαφής.
- Το σύστημα των δύο μερών της ηλεκτρικής επαφής είναι συμμετρικό.

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

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

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \cdot \lambda(T) dt = \frac{U^2}{8} \quad (1.1.5-1)$$

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

Εάν χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του γινομένου  $\overline{\rho\lambda}$  τότε η σχέση (1.1.5-1) γίνεται:

$$\frac{U^2}{8} = \Delta T \cdot \overline{\rho\lambda} \quad (1.1.5-2)$$

ή

$$U = \sqrt{8 \cdot \Delta T \cdot \overline{\rho\lambda}} \quad (1.1.5-3)$$

Η σχέση (1.1.5-3) δίνει τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί σε επαφές λόγω της αντίστασης στένωσης για δεδομένη πτώση τάσης.

Σε περίπτωση, που μέρος της παραγόμενης θερμότητας, διαφεύγει προς το περιβάλλον μέσο (όπως συμβαίνει στην πράξη), τότε η σχέση (1.1.5-1) γίνεται:

$$\Delta T \cdot \overline{\rho\lambda} \leq \frac{U^2}{8} \quad (1.1.5-4)$$

και:

$$U \geq \sqrt{8 \cdot \Delta T \cdot \overline{\rho\lambda}} \quad (1.1.5-5)$$

Θεωρώντας το νόμο των Wiedemann – Franz κατά τον οποίο:

$$\rho(T) \cdot \lambda(T) = LT \quad (1.1.5-6)$$

όπου  $L$  σταθερά ανεξάρτητη από το μέταλλο  $L \approx 2.4 \cdot 10^{-8} [V/K]^2$ , τότε η σχέση (1.1.5-1) γίνεται:

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \lambda(T) dT = \int_{T_0}^T LT \cdot dt = \frac{L}{2} (T^2 - T_0^2) \leq \frac{U^2}{8} \quad (1.1.5-7)$$

ή

$$U \geq 2 \sqrt{L (T^2 - T_0^2)} \quad (1.1.5-8)$$

όπου  $T_0$  η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι σχέσεις (1.1.5-3), (1.1.5-5) και (1.1.5-8) παρέχουν την δυνατότητα του κατά προσέγγιση υπολογισμού της πτώσης τάσης σε επαφές χωρίς επικαθίσεις. Στις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής της πτώσης τάσης σε καινούργιες επαφές.

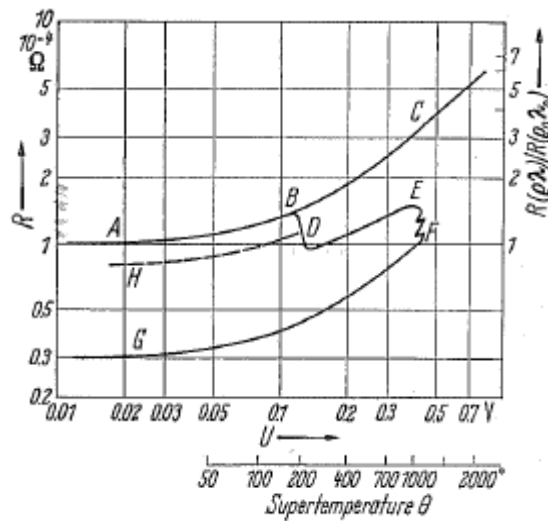
### 1.1.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ-ΠΤΩΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Στη βιβλιογραφία δίνονται διαγράμματα που αφορούν στην αντίσταση διάβασης σε συνάρτηση με την πτώση τάσης ή τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον λυόμενο σύνδεσμο, ανάλογα με τη δύναμη σύσφιξης και την τιμή του ρεύματος. Μία τέτοια καμπύλη δίνεται στο σχήμα (1.1.6-1) από όπου φαίνεται ότι οι συναρτήσεις  $R=f(U)$  και  $R=f(\Delta\theta)$  είναι αύξουσες στην περιοχή των πρακτικών εφαρμογών ( $\Delta\theta < 50$  °C). Όπως φαίνεται στο σχήμα (1.1.6-1) οι χαρακτηριστικές αυτές σχεδιάζονται σε λογαριθμική κλίμακα. Στον άξονα των  $y$  δίνεται συνήθως η πτώση τάσης στην επαφή και ταυτόχρονα η διαφορά θερμοκρασίας (τα μεγέθη αυτά συνδέονται σύμφωνα με τη σχέση (1.1.5-8). Στον άξονα των  $x$  δίνεται ο λόγος  $R(\rho,\lambda)/R_0(\rho_0,\lambda_0)$ , δηλαδή το πηλίκο της αντίστασης διάβασης  $R$  σε θερμοκρασία  $\theta$  (όπου η ειδική αντίσταση έχει την τιμή  $\rho$  και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας έχει την τιμή  $\lambda$ ) προς την αντίσταση διάβασης  $R_0$  σε θερμοκρασία χώρου  $\theta_0$  (με ειδική αντίσταση  $\rho_0$  και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda_0$ ). Ο λόγος αυτός θα μπορούσε να γραφεί και ως  $R(\theta)/R_0(\theta)$ .

Στη χαρακτηριστική του σχήματος (1.1.6-1) διακρίνονται οι περιοχές AB, BD, DE, EF και FG. Η σειρά των γραμμών αντικατοπτρίζει τη χρονική εξέλιξη της σχέσης.

Στο τμήμα AB η αντίσταση διάβασης αυξάνει με τη θερμοκρασία. Η αύξηση της αντίστασης

διάβασης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (1.1.4-1).



Σχήμα 1.1.6-1: Τυπική χαρακτηριστική  $R=f(U)$  ή  $R=f(\Delta\theta)$  για μια συμμετρική καινούργια επαφή από χαλκό με δύναμη σύσφιξης 100 gr. Γεωμετρία επαφής: κύλινδρος – κύλινδρος.

Στην περιοχή BD η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη. Η μείωση αυτή μπορεί να αιτιολογηθεί από την αύξηση της επιφάνειας  $A_c$  (προς την οποία η R είναι αντιστρόφως ανάλογη), λόγω μείωσης της σκληρότητας του υλικού από την ανακρυστάλλωση, που υφίσταται κατά την ανόπτηση. Όπως φαίνεται από το σχήμα (1.3), η περιοχή της θερμοκρασίας ανόπτησης (περιοχή BD) για τον χαλκό είναι από 190 °C έως 200 °C. Η περιοχή αυτή είναι για τον άργυρο 180 °C έως 185 °C.

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

Στο σημείο E της χαρακτηριστικής συμβαίνει η τήξη του υλικού (η θερμοκρασία τήξης του

χαλκού είναι 1083 °C). Η επιφάνεια  $A_c$  αυξάνει και υπάρχει μεταλλική συνέχεια μεταξύ των δύο μερών της επαφής, λόγω συγκόλλησης της. Η αύξηση της επιφάνειας  $A_c$  και η συγκόλληση των επαφών συνεπάγονται μείωση της αντίστασης διάβασης στην επαφή και αυτό φαίνεται στο τμήμα της καμπύλης EF.

Όταν από το σημείο F της χαρακτηριστικής μειωθεί η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, τότε η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη (τμήμα FG). Το τμήμα FG είναι πρακτικά παράλληλο προς το AB.

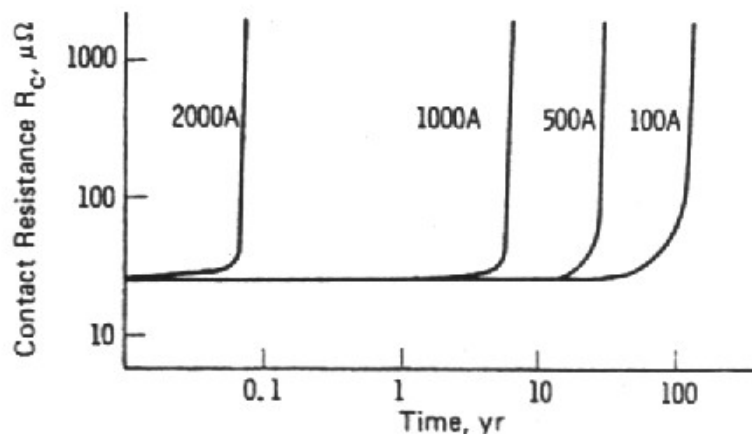
Το τμήμα AB της χαρακτηριστικής αποδίδει την ιδανική συμπεριφορά των επαφών (σταθερή επιφάνεια  $A_c$ ), τόσο κατά την αύξηση όσο και τη μείωση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος. Πρακτικά η επιφάνεια  $A_c$  δεν έχει σταθερή τιμή γιατί η σκληρότητα των υλικών της επαφής μεταβάλλεται από τις αυξομειώσεις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

Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις επαφών οι οποίες έχουν συγκολληθεί υπό την επίδραση υψηλής θερμοκρασίας, το τμήμα FG στο σχήμα (1.1.6-1) είναι το ίδιο, τόσο κατά την αύξηση όσο και τη μείωση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος (η επιφάνεια  $A_c$  μένει σταθερή λόγω της συγκόλλησης). Στις περιπτώσεις που η θερμοκρασία είναι μικρότερη από εκείνη του σημείου τήξης και βρίσκεται κοντά στη θερμοκρασία ανόπτησης, η χαρακτηριστική μπορεί να είναι η ίδια κατά την αύξηση ή μείωση της τιμής του ρεύματος, όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα (1.1.6-1) με διακεκομμένη γραμμή. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να εξηγηθεί από την ψυχρή συγκόλληση που συμβαίνει σε καινούργιες και καθαρές επαφές. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση οι επαφές πρέπει να θεωρούνται ότι έχουν σχεδόν κολλήσει αν και η θερμοκρασία τους δεν έχει φθάσει στο σημείο τήξης.

Από τη χαρακτηριστική  $R=f(U)$  ή  $R=f(\Delta\theta)$  του σχήματος (1.1.6-1) παρατηρείται ότι οι περιοχές

τιμών της θερμοκρασίας και της πτώσης τάσης σε μια επαφή, που συνεπάγονται ανακρυστάλλωση στα υλικά των επαφών (περιοχή BD), αποτελεί την έναρξη της αποσταθεροποίησης της επαφής. Πέρα από αυτή την περιοχή οι επαφές που λειτουργούν υπό ονομαστικό ρεύμα, πρέπει να θεωρούνται ότι έχουν ουσιαστικά καταστραφεί. Η θεωρία που διατυπώθηκε για τη χαρακτηριστική του σχήματος (1.1.6-1) αφορά καθαρές επαφές χωρίς αξιόλογο στρώμα επικαθίσεων σε αυτές. Σε περιπτώσεις που το στρώμα των επικαθίσεων έχει σημαντικό πάχος και καλύπτει μεγάλο ποσοστό της επιφάνειας  $A_c$  η χαρακτηριστική του σχήματος (1.1.6-1) δεν ισχύει και παρατηρείται εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στα αρχικά στάδια λειτουργίας τους, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία.

Η επίδραση του θερμικού αποτελέσματος στην αντίσταση της επαφής φαίνεται και στο επόμενο σχήμα (1.1.6-2) για διαφορετικές τιμές ρεύματος. Για αρκετά μεγάλες τιμές ρεύματος χρειάζεται μικρότερος χρόνος για την αύξηση της αντίστασης της επαφής.



Σχήμα 1.1.6-2: Μεταβολή της αντίστασης του συνδέσμου σε σχέση με τον χρόνο για διαφορετικές τιμές ρεύματος.

### 1.1.7 ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΚΑΘΙΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΠΑΦΕΣ

Με διακριτικό στοιχείο το πάχος μπορούμε να διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες επικαθίσεων :

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

Ορισμένες χημικές ενώσεις στην επιφάνεια της επαφής αυξάνουν από 10 έως 100Å και προστατεύουν με αυτόν τον τρόπο την επιφάνεια των μετάλλων της επαφής από την επίδραση του οξυγόνου της ατμόσφαιρας καθώς και από άλλα χημικά στοιχεία. Το ανοξειδωτο ασάλι και το αλουμίνιο έχουν εξαιρετικά προστατευτικά οξείδια και ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Τα οξείδια του χαλκού και του νικελίου δεν προστατεύουν αποτελεσματικά τα αντίστοιχα μέταλλα αλλά συνεχίζουν να αυξάνονται αργά μεν αλλά συνεχώς στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Οι επικαθίσεις σε μια ηλεκτρική επαφή είναι βασικότερη αιτία αύξησης της αντίστασης διάβασης και επομένως ο κύριος λόγος κακής λειτουργίας της. Μπορούμε να διακρίνουμε τις επικαθίσεις σύμφωνα με την σύνθεσή τους, σε δυο κατηγορίες:

- σε χημικές ενώσεις (όπως π.χ. τα οξείδια του μετάλλου της επαφής).
- σε διάφορα παρασιτικά στοιχεία (όπως η σκόνη, τα λιπαντικά και υδρατμοί).

Η οξείδωση των μεταλλικών επαφών είναι ένας από τους σοβαρότερους μηχανισμούς που αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά τους. Στην περίπτωση του χαλκού έχει αποδειχθεί ότι η παρουσία

του σε περιβάλλον με έντονες συνθήκες οξειδωσης μπορεί να προκαλέσει ραγδαία αύξηση της αντίστασης της επαφής σε μία σχετικά υψηλή τιμή μετά από ένα χρονικό διάστημα.

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

Ο ψευδάργυρος (Zn) καλύπτεται από ένα προστατευτικό στρώμα που δρα μονωτικά και έχει χαμηλή σκληρότητα. Κατά την επαφή των δύο μερών το προστατευτικό αυτό στρώμα αποχωρίζεται από την επιφάνειά του, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αγώγιμες περιοχές οι οποίες οξειδώνονται επίσης με τον χρόνο. Σε αυτή τη περίπτωση η αντίσταση διάβασης γίνεται μεγαλύτερη (και επομένως και η θερμοκρασία) και έτσι αυξάνει δευτερογενώς η οξείδωση. Ο ψευδάργυρος δεν είναι ιδανικό υλικό για επαφές και για τον πρόσθετο λόγο ότι δεν έχει ικανοποιητική σκληρότητα με αποτέλεσμα να αυξάνει η επιφάνεια  $A_c$ , υπό την επίδραση της δύναμης σύσφιξης και να μειώνεται αντίστοιχα η πίεση, πράγμα που βοηθάει στην οξείδωση της επιφάνειάς του

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

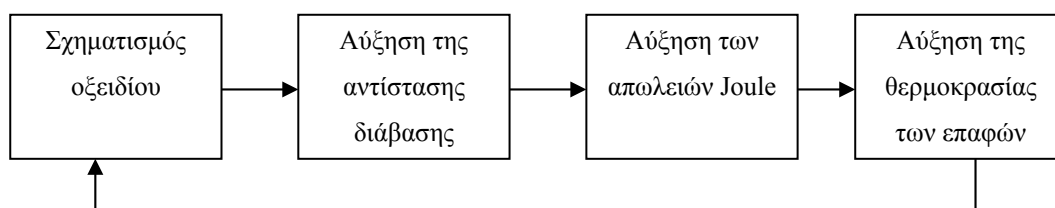


καθαρές επαφές από χάλυβα.

Ο χρυσός δεν οξειδώνεται όπως είναι γνωστό στον αέρα. Προσβάλλεται όμως από το χλώριο στους 180 °C περίπου και σχηματίζει υδατοδιαλυτό  $\text{AuCl}_3$ . Η μόνη επικάλυψη η οποία υπάρχει στην επιφάνεια επαφών από χρυσό είναι μία στοιβάδα ατόμων οξυγόνου (που υπάρχει και σε κάθε μέταλλο), η οποία όμως δεν αυξάνεται με το χρόνο και είναι διαπερατή στα ηλεκτρόνια λόγω του φαινομένου σήραγγος. Ο χρυσός είναι άριστο υλικό επαφών αλλά με απαγορευτικό κόστος.

Ο άργυρος οξειδώνεται σε  $\text{Ag}_2\text{O}$  σε θερμοκρασία χώρου, μόνο με την παρουσία του όζοντος. Το οξείδιο του αργύρου έχει χαμηλή σκληρότητα, αποχωρίζεται μηχανικά από το μέταλλο και αποσυντίθεται στους 200 °C. Το παραπάνω οξείδιο δεν αυξάνει την αντίσταση διάβασης. Σε συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες ο άργυρος προσβάλλεται από ενώσεις του θείου και σχηματίζει ένα επιφανειακό ανθεκτικό στρώμα  $\text{Ag}_2\text{S}$  το οποίο δεν είναι προστατευτικό. Το στρώμα  $\text{Ag}_2\text{S}$  αυξάνεται αργά αλλά σταθερά γιατί η περιεκτικότητα γενικά του  $\text{H}_2\text{S}$  στον αέρα είναι χαμηλή.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην δημιουργία οξειδίων και γενικά επικαθίσεων στις επαφές παρουσιάζει ενδιαφέρον δεδομένου ότι το φαινόμενο ανακυκλώνεται κατά την σειρά που απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα (1.1.7-1).



Σχήμα 1.1.7-1 : Απλοποιημένη παράσταση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη δημιουργία οξειδίων.

Μάλιστα το πάχος των οξειδίων του χαλκού που αναπτύσσεται σε μία επαφή μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$s^2 = 20^2 + t \cdot 10^{(14.9 - 5100/\theta)} \quad (1.1.7-1)$$

όπου  $s$  το πάχος σε Å,  $t$  ο χρόνος σε ώρες και  $\theta$  η θερμοκρασία σε Κ.

Έχει διαπιστωθεί επίσης ότι μέχρι τους 400 °C στην επιφάνεια του χαλκού δημιουργείται  $\text{Cu}_2\text{O}$  και σε υψηλότερες θερμοκρασίες  $\text{CuO}$ . Όταν τα παραπάνω οξείδια έχουν πάχος μεγαλύτερο από 100 Å τότε μειώνουν συνήθως ηλεκτρικά την επαφή.

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

$$s^2 = 5^2 + t \cdot 10^{(13.3 - 6000/\theta)} \quad (1.1.7-2)$$

### 1.1.8 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

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

Έχει διατυπωθεί επίσης η άποψη, ότι τα στρώματα του νερού και των στερεών λιπαντικών σε μία επαφή επηρεάζουν ελάχιστα την αντίσταση διάβασης γιατί ο κύριος όγκος τους απομακρύνεται με το κλείσιμο του λυόμενου συνδέσμου και μένουν μόνο απλές στοιβάδες

ατόμων, οι οποίες είναι αγώγιμες λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος. Στερεά κατάλοιπα όμως μαύρου χρώματος και μικρού πάχους (έως 10 Å), που έχουν γίνει αναπόσπαστο μέρος της επιφάνειας της επαφής παρουσιάζουν στην πράξη μεγάλη αντίσταση και μπορούν να γίνουν αιτία αύξησης της αντίστασης διάβασης. Μία ερμηνεία μπορεί να δοθεί από την μείωση των δυνατοτήτων απαγωγής θερμότητας, που έχουν γενικά οι επιφάνειες μαύρου χρώματος, συγκριτικά προς επιφάνειες με άλλη απόχρωση. Οι επικαθίσεις αυτές είναι συνήθως άμορφες οργανικές ουσίες μεγάλου μοριακού βάρους, που προέρχονται από οργανικούς ατμούς, οι οποίοι παράγονται στους οργανικούς μονωτές που χρησιμοποιούνται στη στήριξη των ηλεκτρικών επαφών.

Ο πολυμερισμός είναι πολύ διαδεδομένος στους υδρογονάνθρακες και έχει επισημανθεί ότι πάρα πολλά μονωτικά υλικά παράγουν ατμούς κατά τον πολυμερισμό τους. Ορισμένα υλικά επαφών όπως το Pd, Pt, Ru, και το Cr δρουν καταλυτικά για την εναπόθεση οργανικών ουσιών σε αυτά και άλλα όχι, όπως π.χ.: Cu, Fe, W, Ag και το Ni.

Τέλος όταν σε μια επαφή δημιουργούνται τοπικά μικρές ηλεκτρικές εκκενώσεις τότε τα οργανικά στρώματα, που προαναφέρθηκαν, απανθρακώνονται, με αποτέλεσμα από τα λεπτά στρώματα άνθρακα, να διευκολύνεται η εκδήλωση ηλεκτρικών εκκενώσεων μεγαλύτερης ενέργειας. Ο σχηματισμός γενικά των επικαθίσεων στις επαφές διέπεται από περίπλοκους μηχανισμούς, που δεν έχουν ερμηνευτεί πλήρως, παρά τις εκτεταμένες έρευνες.

### 1.1.9 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΗΡΑΓΓΟΣ ΣΤΙΣ ΕΠΑΦΕΣ

Λόγω του ότι είναι κύματα de Broglie, τα ηλεκτρόνια μπορούν να διεισδύσουν σε λεπτά στρώματα, κάτι που αντιτίθεται στις αρχές της κλασικής φυσικής. Αυτή η διαδικασία διείσδυσης σε πιθανά εμπόδια ονομάζεται φαινόμενο σήραγγος.

Αν θεωρήσουμε μια επαφή με επίπεδες επιφάνειες από το ίδιο μέταλλο και με απόσταση  $s$  μεταξύ των δυο μερών της (λόγω των επικαθίσεων), τότε τα επίπεδα δυναμικού στην περιοχή της επαφής δίδονται στο σχήμα (1.1.9-1α). Τα επίπεδα Fermi των δυο μεταλλικών μερών της επαφής ( $E_f$ ) συμπίπτουν, αφού δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ τους. Τα φράγματα δυναμικού στην επιφάνεια κάθε μέρους της επαφής επεκτείνονται στη μεταξύ τους απόσταση  $s$  και διαμορφώνουν το φράγμα δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Σε περίπτωση που η απόσταση  $s$  είναι αρκετά μεγάλη, η μέγιστη τιμή του ύψους του φράγματος δυναμικού  $\phi_0$  της επαφής ισούται με το έργο εξόδου  $\Phi$  του μετάλλου. Όταν το πλάτος  $s$  είναι μικρό τότε τα φράγματα δυναμικού στην επιφάνεια των δύο μεταλλικών μερών της επαφής αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε μικρότερες τιμές με αποτέλεσμα η μέγιστη τιμή του φράγματος δυναμικού της επαφής να γίνεται μικρότερη από το έργο εξόδου  $\Phi$  ( $\phi_0 < \Phi$ ). Για ένα ηλεκτρόνιο μάζας  $m$  με ταχύτητα  $v_x$ , το οποίο πλησιάζει το φράγμα δυναμικού του σχήματος (1.1.9-1α) ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{1}{2} m v_x^2 = q_e E_x \quad (1.1.9-1)$$

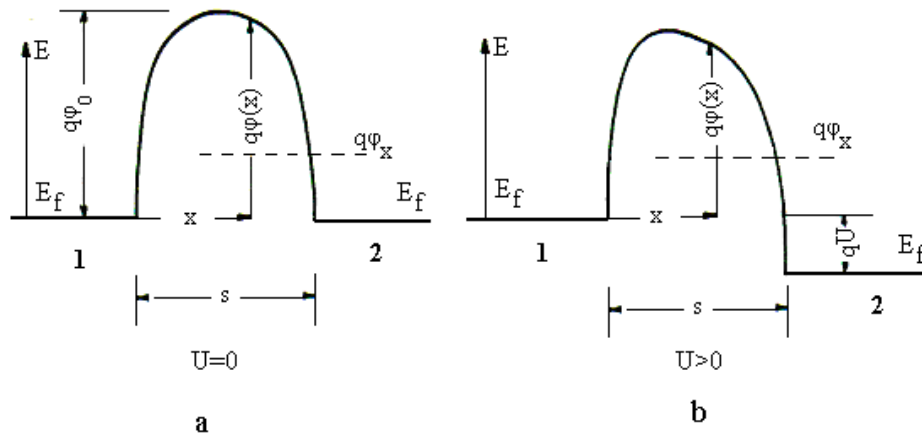
όπου  $E_x$  το δυναμικό του ηλεκτρονίου και  $q_e$  το φορτίο του.

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

$$D(E_x) = \exp\left[-\frac{4\pi}{h} \int_0^s \sqrt{2m(\Phi(x) - E_x)} dx\right] \quad (1.1.9-2)$$

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

Όταν το ηλεκτρόνιο διαπεράσει το φράγμα δυναμικού λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος, τότε δεν χάνει την ενέργεια του (όπως συμβαίνει στην θερμιονική εκπομπή), αλλά αυτή παραμένει αμετάβλητη γιατί η συχνότητα de Broglie είναι σταθερά. Η ενέργεια όμως, που πιθανώς του δόθηκε από το πεδίο αποδίδεται στην άνοδο. Κατά την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος, που προαναφέρθηκε, τα ηλεκτρόνια περνάνε το φράγμα δυναμικού από δεξιά προς αριστερά τόσο συχνά όσο και προς την αντίθετη διεύθυνση με αποτέλεσμα να μην μπορεί να παρατηρηθεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Σημειώνεται ότι η απόσταση  $s$  μεταξύ των δυο μερών της επαφής είναι συνήθως ένα λεπτό στρώμα οξειδίου του μετάλλου της επαφής. Αν μεταξύ των δύο μερών της επαφής του σχήματος (1.1.9-1α) υπάρχει μία διαφορά δυναμικού  $U$ , τότε όπως φαίνονται στο σχήμα (1.1.9-1b) οι στάθμες Fermi διαφοροποιούνται μεταξύ τους κατά  $U$ , με αποτέλεσμα μια ροή ηλεκτρικού ρεύματος από την επαφή με το υψηλό δυναμικό προς την επαφή με το χαμηλό δυναμικό. Αυτό συμβαίνει γιατί το ρεύμα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας, λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος, δεν είναι ίδιο κατά τις δύο διευθύνσεις με αποτέλεσμα η διαφορά του αριθμού των φορέων μεταξύ των δυο μερών της επαφής να μπορεί να μετρηθεί ως ηλεκτρικό ρεύμα. Από τις δύο σχέσεις (1.1.9-1) και (1.1.9-2) φαίνεται ότι μόνον η ταχύτητα του ηλεκτρονίου  $v_x$ , που είναι κάθετη στο φράγμα δυναμικού, λαμβάνεται υπ' όψη στους υπολογισμούς του συντελεστή διάβασης  $D(E_x)$  και επομένως και στον προσδιορισμό της πυκνότητας ρεύματος. Σε ένα καρτεσιανό σύστημα με συντεταγμένες  $x$ ,  $y$  και  $z$  τα ηλεκτρόνια με υψηλές ταχύτητες  $v_y$  στη διεύθυνση  $y$  και  $v_z$  στη διεύθυνση  $z$  αλλά μικρή ταχύτητα  $v_x$  στη διεύθυνση  $x$  έχουν μικρή πιθανότητα να διαπεράσουν το φράγμα δυναμικού, αν και έχουν υψηλή συνολική ενέργεια.



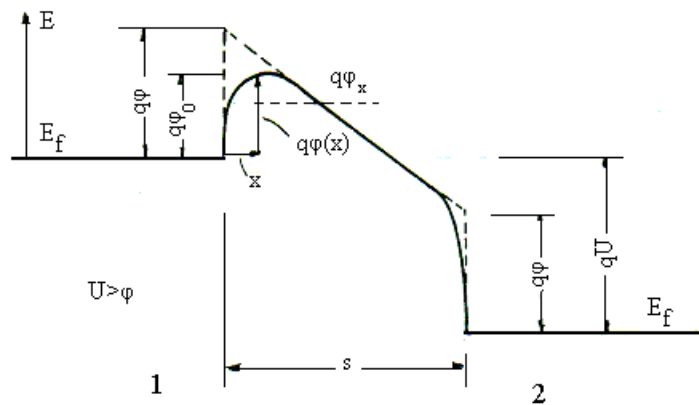
Σχήμα 1.1.9-1: Το φράγμα δυναμικού στο κενό  $s$  δύο επαφών (1 και 2) από το ίδιο υλικό.

- a) χωρίς την επιβολή διαφοράς δυναμικού
- b) με την επιβολή διαφοράς δυναμικού  $U$

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

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

πυκνότητα του ρεύματος  $J$  αυξάνει απότομα με την αύξηση της τάσης  $U$  στο σύστημα. Στο σχήμα (1.1.9-2) φαίνονται οι ενεργειακές στάθμες που αφορούν την περίπτωση αυτή. Παρατηρούμε ότι το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού  $\phi_0$  είναι αρκετά μικρότερο από το έργο εξόδου  $\Phi$ . Σε αυτή την περίπτωση τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μπορούν να μετακινούνται επάνω από φράγμα δυναμικού.



Σχήμα 1.1.9-2: Το φράγμα δυναμικού μεταξύ δύο όμοιων μεταλλικών ηλεκτροδίων που απέχουν μεταξύ τους κατά  $s$ , για  $U > \Phi$  (1 και 2: τα δύο μέρη της επαφής).

Ως ειδική αντίσταση σήραγγος  $\rho_\tau$  (tunnel resistivity) του παραπάνω συστήματος των δυο ηλεκτροδίων έχει οριστεί το πηλίκο :

$$\rho_\tau = \frac{U}{J} \quad (1.1.9-3)$$

Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από το πάχος  $s$ , το έργο εξόδου  $\Phi$  του μετάλλου των ηλεκτροδίων και την σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$  των επικαθίσεων. Η τιμή της  $\rho_\tau$  εξαρτάται επίσης από την μορφή που έχει το φράγμα δυναμικού. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι πρόκειται για μια συνάρτηση της μορφής:

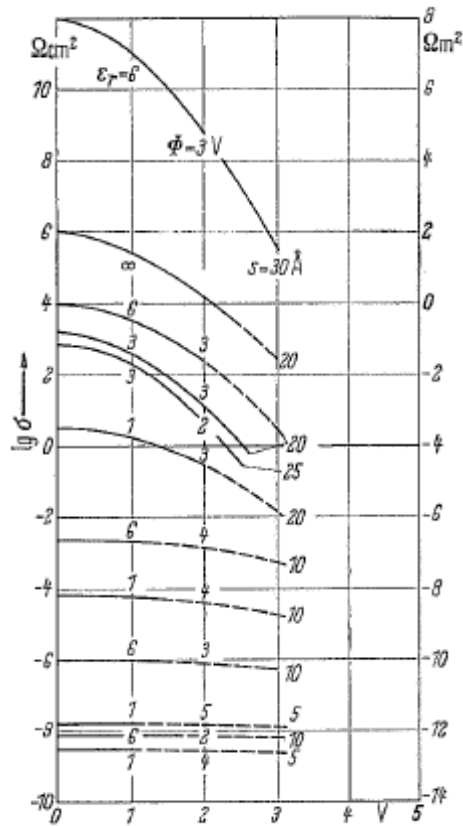
$$\rho_\tau = f(s, \Phi, U, \epsilon_r, \Phi(x)) \quad (1.1.9-4)$$

Από τις σχέσεις (1.1.9-3) και (1.1.9-4) φαίνεται ότι για τον υπολογισμό της πυκνότητας

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

Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης σήραγγος επιχειρήθηκε από πολλούς ερευνητές σε συνδυασμό με πειραματικά δεδομένα. Το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα δίνεται η ειδική αντίσταση σήραγγος  $\rho_{\tau}$  συναρτήσει της τάσης  $U$  για διαφορετικές τιμές του πάχους  $s$ , της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$  και του φράγματος δυναμικού  $\phi_0$ . Τα σημεία στα οποία οι καμπύλες είναι διακεκομμένες έχουμε διάσπαση του μονωτικού στρώματος. Σημειώνεται ότι στον κατακόρυφο άξονα παριστάνεται η λογάριθμος της ειδικής αντίστασης σήραγγος και στον οριζόντιο η τάση.





Σχήμα 1.1.9-3: Η ειδική αντίσταση σήραγγος  $\rho_s$  σε μία επαφή σε σχέση με την πτώση τάσης  $U$  με παραμέτρους το πάχος  $s$  των επικαθίσεων, την σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$ , και το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού.

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

$$R = \frac{\rho}{2\Gamma} + \frac{\rho_\tau}{\pi r^2} \quad (1.1.9-5)$$

όπου  $\rho$  η ειδική αντίσταση σε  $\Omega\text{cm}$  και  $\rho_\tau$  η ειδική αντίσταση σήραγγος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, που έχει οριστεί παραπάνω ως το πηλίκο της πτώσης τάσης  $U$  προς την πυκνότητα του ρεύματος  $J$ . Ο πρώτος όρος της εξίσωσης (1.1.9-5) δίνει την αντίσταση στένωσης και ο

δεύτερος την αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων.

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

Υλικό Επαφών	Φορτίο Επαφών P	Αντίσταση Επαφής		Αντίσταση Στένωσης		Αντίσταση Επικαθίσεων		Ειδική Αντίσταση Σύραγγος	
		$R_r$	$R_l$	$\rho_r/2\alpha_r$	$\rho_l/2\alpha_l$	$\sigma_r/\pi\alpha_r^2$	$\sigma_l/\pi\alpha_l^2$	$\sigma_r$	$\sigma_l$
	g	$10^{-4} \Omega$						$10^{-13} \Omega m^2$	
Au – Au	1,15	74	88	22; 20	0,32; 0,17	52; 54	88	4,6; 5,7	3,7; 8
Au – Au	11	14,2	14,4	7	0,08	7,2	14,3	6,1	5,8
Au – Au	35	5,8	1,8	3,94	0,045	1,86	1,75	5	2,3
Au – Au	400	1,44	0,73	1,16	0,014	0,28	0,72	8,6	10,6
Cu – Cu	35	94	610	7	0,45	87	610	4,6	23
Ni – Ni	35	199	305	45; 38	20	154; 163	285	54; 92	53

Πίνακας 1.1.9-1: Τιμές της αντίστασης διάβασης, της αντίστασης στένωσης και της αντίστασης των επικαθίσεων για διάφορα υλικά επαφών.

#### 1.1.10 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ ΕΠΑΦΩΝ

Οι επιφάνειες των καθαρών μεταλλικών επαφών υφίστανται διάφορες παραμορφώσεις κάτω από την επίδραση της ροπής σύσφιξης. Επίσης μία επιφάνεια τυχαίου σχήματος, από την οποία διέρχεται υψηλή πυκνότητα ρεύματος, θερμαίνεται και αλλάζει το σχήμα της προκειμένου να ελαχιστοποιήσει την συνολική της ελεύθερη ενέργεια. Η μετακίνηση του υλικού προκειμένου να γίνει η αλλαγή σχήματος μπορεί να γίνει με τήξη, εξάτμιση, διάχυση και ροή μάζας. Η σκληρότητα των μετάλλων εξαρτάται από την θερμοκρασία και τον χρόνο καταπόνησης. Πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι η αντίσταση στένωσης για καθαρές επαφές μειώνεται αργά με τον χρόνο λειτουργίας. Αυτή η μείωση αποδίδεται στην διεύρυνση της πραγματικής επιφάνειας επαφής λόγω της μείωσης της σκληρότητας σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η εξομάλυνση μιας επιφάνειας είναι ικανή για να γίνει η αιτία γήρανσης των ηλεκτρικών

επαφών, ειδικά στις επαφές που δεν έχουν ισχύ διακοπής και για τον λόγο αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις πρακτικές εφαρμογές. Μια καλή ηλεκτρική επαφή διασφαλίζεται με την τραχύτητα των επιφανειών, γιατί κατά την επαφή των δύο μερών οι ανωμαλίες της επιφάνειας υφίστανται ελαστική ή πλαστική παραμόρφωση. Ακόμα επέρχεται πρόσθετη παραμόρφωση μετά την παρέλευση ικανού χρόνου λειτουργίας λόγω της μηχανικής καταπόνησης των ηλεκτροχημικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στην ευρύτερη περιοχή της επαφής. Η διάχυση των επικαθίσεων επαυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας που μπορεί να προέρχεται από τον κακό αερισμό στην περιοχή της επαφής κατά την αυξημένη συμπίεση του λυόμενου συνδέσμου. Διαταραχές στην πραγματική επιφάνεια της επαφής μπορούν να μεταβάλλουν την αντίσταση διάβασης και συνεπώς την πτώση τάσης για μία σταθερή παροχή μεταφερόμενων φορτίων.

#### 1.1.11 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΙΣ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΠΑΦΕΣ

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

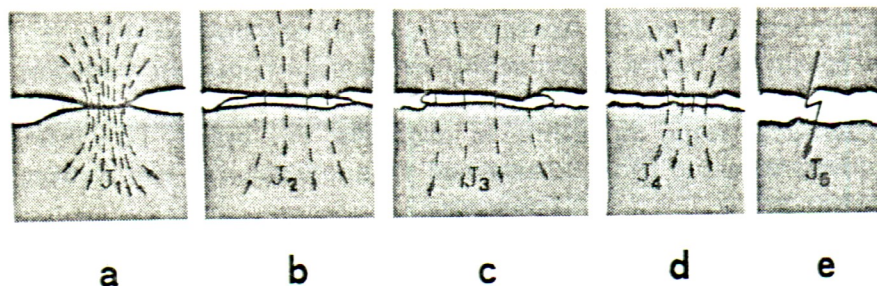
- Τις μικροδομές MM (μέταλλο-μέταλλο)
- Τις μικροδομές MIM (μέταλλο-μονωτής-μέταλλο)
- Τις μικροδομές MOM (μέταλλο-οξείδιο μετάλλου-μέταλλο)
- Τις μικροδομές MGM (μέταλλο-μονωτικό περιβάλλον-μέταλλο)

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

Οι φυσικές ερμηνείες που αφορούν τα προαναφερθέντα φαινόμενα σχετίζονται άμεσα με την μεταφορά των ηλεκτρικών φορέων μέσα από τις διάφορες περιοχές επαφής ( $A_c$ ), οι οποίες

διαπερνώνται από υψηλές πυκνότητες ρεύματος.

Με βασική αιτία την ανομοιομορφία στην επιφάνεια των επαφών (η οποία μπορεί να είναι μορφολογικής ή ηλεκτροχημικής φύσεως), το πεδίο μεταξύ των επαφών ενδέχεται να παρουσιάζει ανομοιογένειες. Έχει διαπιστωθεί ότι ένα μικρό μέρος της φαινόμενης επιφάνειας της επαφής  $A_a$  άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Οι γραμμές ροής του ηλεκτρικού ρεύματος υποχρεώνονται να διέλθουν πολύ κοντά ή μια στην άλλη ώστε να περάσουν από τις μικρές αγώγιμες περιοχές (οι οποίες απαρτίζουν την επιφάνεια  $A_c$ ) οι οποίες είναι στατιστικά κατανεμημένες στην επιφάνεια  $A_a$  και οι οποίες συχνά καλύπτονται από στρώμα επικαθίσεων. Το ηλεκτρικό πεδίο ποικίλλει στην περιοχή της επαφής αφού και οι δύο επιφάνειες διαπερνώνται επιλεκτικά από υψηλή πυκνότητα ρεύματος και σύμφωνα με τον νόμο του Ohm θα πρέπει να υπάρχει επιφανειακή πτώση τάσης μεταξύ των σημείων διάβασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Συνεπώς, η διαχωριστική επιφάνεια των δυο μεταλλικών μερών παύει να είναι ισοδυναμική. Εκτός τούτου, η παρουσία ακινήτων φορτίων ανά την επαφή (όπως: σταθερά, παγιδευμένα και φορτία ιόντων), εισάγει κατοπτρικά ηλεκτρικά φορτία τα οποία κατανέμονται σε ένα ορισμένο βάθος από την επιφάνεια. Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτουν μεταβολές δυναμικού στην επιφάνεια επαφής ακόμα και όταν δεν εφαρμοστεί εξωτερική τάση, ένα φαινόμενο παρόμοιο με αυτό της εξάντλησης-αναστροφής των ημιαγωγικών επιφανειών.



Σχήμα 1.1.11-1: Μακροσκοπική απεικόνιση δύο μεταλλικών ηλεκτρικών επαφών. Μπορούμε να παρατηρήσουμε τις ακόλουθες μικροδομές.

- a) Ιδεατή επαφή μέταλλο – μέταλλο (M – M).
- b) Μικροδομή μέταλλο – μονωτής – μέταλλο (MIM)
- c) Μικροδομή μέταλλο – οξείδιο – μέταλλο (MOM)
- d & e) Μέταλλο – περιβάλλον υγρό ή αέριο μονωτικό – μέταλλο (MGM).

Αυτές οι περιοχές μπορούν να γίνουν αγώνιμες πέραν μίας κρίσιμης τιμής του τοπικού ηλεκτρικού πεδίου.

$J_1, J_2, J_3, J_4, J_5$ : πυκνότητες ρεύματος.

Το σχήμα (1.1.11-1) παρουσιάζει μακροσκοπικά τα δύο μέρη μίας επαφής. Οι περιοχές M - M οι οποίες εφάπτονται ιδανικά χωρίς την παρεμβολή άλλου μέσου (a) είναι διανεμημένες τυχαία ανάμεσα σε περιοχές οι οποίες άγουν δια του φαινομένου σήραγγος (b) και (c). Οι περιοχές (b) και (c) ορίζονται από την στατιστική κατανομή της ανάπτυξης οξειδίων του μετάλλου στην περιοχή της επαφής και συμπεριφέρονται σαν λεπτά υμένα υλικών τα οποία πρέπει να τα διαπεράσουν τα ηλεκτρόνια προκειμένου να μεταφερθούν μέσα από την επαφή.

Οι περιοχές που άγουν δια του φαινομένου σήραγγος και έχουν πάχος της τάξης των  $50\text{\AA}$  ή και λιγότερο, αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως μικροδομές μέταλλο - οξείδιο - μέταλλο (MOM) ή μέταλλο - μονωτής - μέταλλο (MIM). Έχει παρατηρηθεί ότι οι επαφές των μετάλλων καλύπτονται αμέσως από λεπτό στρώμα οξειδίου (ή άλλων χημικών ενώσεων) πάχους  $10\div 50\text{\AA}$  μόλις έρθουν σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Όταν το πάχος του οξειδίου είναι μικρότερο από τα  $50\text{\AA}$  το φαινόμενο σήραγγος λαμβάνει χώρα ακόμα και για φαινομενικά μικρές τιμές πτώσης τάσης (εντός των προδιαγραφών, δηλαδή  $< 55\text{ mV}$ ) αφού το ηλεκτρικό πεδίο στις μικροδομές μπορεί να φτάσει μέχρι  $1\text{ MV/cm}$ . Αυτή η υψηλή τιμή πεδίου αναμένεται να αναπτύσσεται στις προαναφερθείσες μικροδομές των επαφών αφού σε πειραματικά αποτελέσματα κατά τη βιβλιογραφία παρατηρήθηκε ότι η πτώση τάσης κατά μήκος των επαφών ήταν της τάξης των  $50\text{ mV}$ . Αυτή η πτώση τάσης δημιουργεί πεδία της τάξης των  $0,1\text{ MV/cm}$  έως  $0,5\text{ MV/cm}$  ή και περισσότερο

(ανάλογα με το πάχος των επικαθίσεων) τα οποία έχουν την δυνατότητα να δημιουργήσουν ακόμη και συνθήκες εκπομπής πεδίου για τη μεταφορά των φορέων μεταξύ των συνδέσμων. Οι διάφορες θέσεις στην επαφή οι οποίες εγχέουν τα φορτία είναι τυχαία κατανεμημένες μέσα στην φαινόμενη περιοχή επαφής και ενεργοποιούνται μόλις το τοπικό πεδίο αναπτυχθεί σε τιμές 0,1 MV/cm περίπου. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι αν και η κλασική θεωρία εκπομπής πεδίου, όπως προτάθηκε από τους Fowler και Nordheim, προβλέπει πεδία της τάξεως των 40 MV/cm, στην πράξη τα απαιτούμενα εφαρμοζόμενα πεδία είναι σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία κατά πολύ μικρότερα. Αυτό έχει αποδοθεί σε ανομοιογένειες του πεδίου στην επιφάνεια των υλικών και την ύπαρξη παγιδευμένων φορτίων τα οποία δημιουργούν τοπικές συνθήκες επαύξησης του πεδίου.

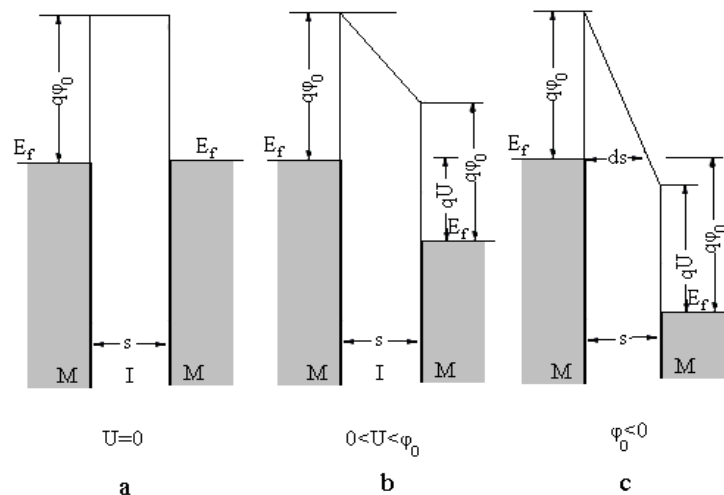
Καθώς η ροή του ρεύματος διαμέσου των επαφών αυξάνει, τα φαινόμενα της επιφανειακής σκέδασης αρχίζουν να κυριαρχούν μόλις η διάβαση του φορτίου διαμέσου των ωμικών κέντρων (spots) φτάσει στον κορεσμό. Τότε η διαφορά δυναμικού κατά μήκος των μικροδομών MIM, MOM και MGM αυξάνει ραγδαία. Για μεγαλύτερες τιμές από μια κρίσιμη τιμή πεδίου, περιοχές της επαφής οι οποίες έχουν ένα σημαντικό πάχος επικαθίσεων μπορούν και αυτές να άγουν. Επίσης περιοχές της επαφής οι οποίες δεν έχουν επικαθίσεις, αλλά χωρίζονται από διάκενο (στο οποίο έχει εισχωρήσει το υγρό ή αέριο μονωτικό μέσο που περιβάλλει την επαφή όπως αέρας, λάδι, SF<sub>6</sub>, κλπ) όπως φαίνεται στο σχήμα (1.1.11-1) (d) και (e) μπορούν επίσης να καταστούν αγώγιμες μόλις το πεδίο στα σημεία αυτά γίνει ικανό να εγχέει ηλεκτρόνια (εκπομπή πεδίου). Ιδεατά αυτές οι περιοχές θα έπρεπε να γίνουν ενεργές για τιμές της έντασης ρεύματος πέρα από το ονομαστικό ρεύμα της κάθε επαφής. Τον κύριο παράγοντα αποτελεί το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια αυτά (της εκπομπής πεδίου) αποδίδουν την επιπλέον ενέργεια τους μόλις προσκρούσουν στο θετικό ηλεκτρόδιο σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα ( $10^{-12}$  sec τυπικά). Τέτοια φαινόμενα αυξάνουν

έντονα τη θερμοκρασία των επαφών, ιονίζουν το διάκενο και αυξάνουν δραστικά την αγωγιμότητα, οδηγώντας στην ανεπιθύμητη δημιουργία τόξων.

Τα ηλεκτρόνια του φαινομένου σήραγγος μόλις μεταφερθούν στο άλλο μέρος του λυόμενου συνδέσμου αποδίδουν επιφανειακούς ρυθμούς ενεργειακών ταλαντώσεων που χαρακτηρίζονται από μη συγκεκριμένα ενεργειακά όρια. Οι ρυθμοί αυτοί με την παρουσία της επιφανειακής τραχύτητας μπορούν να μετατραπούν σε φωτόνιο. Η ενέργεια των φωτονίων εξαρτάται από την ενέργεια των ενεργειακών ταλαντώσεων που τα δημιούργησαν. Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποκτηθεί από ένα ηλεκτρόνιο που διαπερνά το φράγμα δυναμικού στο φαινόμενο σήραγγος ισοδυναμεί με το φορτίο του ηλεκτρονίου επί την διαφορά δυναμικού κατά μήκος του φράγματος (δηλαδή την τοπική πτώση τάσης μεταξύ των δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων). Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία, η πτώση τάσης στις μικροδομές που άγουν, έχει την ίδια τιμή με την συνολική πτώση τάσης κατά μήκος των επαφών όταν παρατηρούνται τα μη γραμμικά φαινόμενα και κατά την διάρκεια λειτουργίας της επαφής τα παραγόμενα φωτόνια έχουν μέση ενέργεια η οποία αντιστοιχεί στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αυτό συνεπάγεται φαινόμενα αυτοθέρμανσης (self heating) κατά την λειτουργία των επαφών. Πτώση τάσης μεγαλύτερη από αυτή που προαναφέρθηκε (σε περιπτώσεις λειτουργίας της επαφής εκτός των προδιαγραφών) συνεπάγεται κατά τη βιβλιογραφία εκπομπή ακτινοβολίας που επεκτείνεται μέχρι τις υπεριώδεις ακτίνες. Γενικά κάθε απόκλιση από τη γραμμικότητα έχει αποδοθεί στην επαύξηση του πεδίου και στην παράλληλη παρουσία των μικροδομών MIM, MOM και MGM οι οποίες μπορούν να καταστούν αγώγιμες πέραν της κατωφλικής πεδιακής τιμής, διαμορφώνοντας την ενεργό διατομή της επαφής,  $A_c$ , ανάλογα με την τοπική πεδιακή ένταση. Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζονται και φαινόμενα διαφοράς φάσεως τα οποία οφείλονται στην χωρητική φύση των μικροδομών που ενεργοποιήθηκαν.

Ειδικότερα η συμπεριφορά μιας μικροδομής MIM η οποία άγει πέρα από ένα κατώφλι εφαρμοζόμενου πεδίου, μπορεί να γίνει κατανοητή με την μελέτη του ενεργειακού διαγράμματος των επαπτόμενων περιοχών κατά τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Συμμετρική μικροδομή MIM κάτω από μηδενική διαφορά δυναμικού (Σχήμα 1.1.11-2α). Το σύστημα δεν άγει λόγω του μεγάλου πάχους  $s$  (Σχήμα 1.1.11-2b).
- Εφαρμογή μέτριας τιμής πεδίου. Το σύστημα δεν άγει ακόμα λόγω του μεγάλου πάχους  $s$  (Σχήμα 1.1.11-2c).
- Εφαρμογή υψηλού ηλεκτρικού πεδίου. Η μονωτική ικανότητα (πάχος  $s$ ) μεταξύ των ηλεκτροδίων έχει μειωθεί και η μικροδομή άγει (Σχήμα 1.1.11-2c).



Σχήμα 1.1.11-2: Διάγραμμα δυναμικής ενέργειας των ηλεκτρονίων για συμμετρική δομή MIM και για διαφορετικές τιμές δυναμικού. Το πάχος  $s$  δεν επιτρέπει το φαινόμενο σήραγγος για μικρή διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια.

(α)  $U=0$ . Η διαφορά δυναμικού είναι μηδενική. Η επαφή δεν άγει.

(β)  $0 < U < \phi_0$ . Δεν έχει επιτευχθεί η αναγκαία διαφορά δυναμικού για την εκδήλωση του φαινομένου.

Τυχόν ροή ρεύματος οφείλεται σε θερμιονική εκπομπή πάνω από το φράγμα δυναμικού.

(γ)  $\phi_0 < U$ . Η επαφή άγει δια του φαινομένου σήραγγος διότι το πάχος  $s$  έχει μειωθεί σε  $ds$ .

Η κλασική μαθηματική προσέγγιση για μία μεμονωμένη δομή MIM εξετάζει την πυκνότητα



του ρεύματος σήραγγος μέσα από ένα φράγμα δυναμικού με κλασσικά όρια  $x_1, x_2$  κατά μήκος του άξονα των  $x$ . Η πυκνότητα ρεύματος  $J$  για δύο αγώγιμες περιοχές (ηλεκτρόδια) που διαχωρίζονται από ένα λεπτό φράγμα δυναμικού περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση, η οποία ισχύει για  $0 < U < \Phi_0$ :

$$J = J_0 [\bar{\Phi} \cdot \exp(-A\sqrt{\bar{\Phi}}) - (\bar{\Phi} + U) \cdot \exp(-A\sqrt{\bar{\Phi} + U})] \quad (1.1.11-1)$$

όπου:  $J_0 = \frac{q^2}{2\pi h (ds^2)}$ ,  $A = \frac{4 \cdot \pi \cdot ds \cdot \sqrt{2mq}}{h}$  και  $h$  η σταθερά του Planck.

Οι παράγοντες οι οποίοι έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το πλάτος του φράγματος δυναμικού  $ds = x_2 - x_1$ , το μέσο ύψος του φράγματος πάνω από την στάθμη Fermi  $\phi$ , και ο τρόπος που τα παραπάνω μεγέθη αλλάζουν με την επιβολή ηλεκτρικού πεδίου. Στην περίπτωση του σχήματος (1.9α) όπου η διαφορά δυναμικού είναι μηδενική το σχετικά μεγάλο πάχος των επικαθίσεων απαγορεύει την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος.

Για μια πτώση τάσης μέσου μεγέθους κατά μήκος του φράγματος (διεύθυνση  $x$ ) ισχύει (σχήμα 1.1.11-2b):

$$0 < U < \Phi_0 \quad (1.1.11-2)$$

Εξακολουθούν να ισχύουν οι απαγορευτικές συνθήκες καθώς το μέσο ύψος του φράγματος δυναμικού έχει ελάχιστα μειωθεί, σύμφωνα με την σχέση :

$$\bar{\Phi} = \Phi_0 - \frac{U}{2} \quad (1.1.11-3)$$

Εάν υπάρξει ροή φορέων, αυτή έχει αποδοθεί μόνο σε θερμιονική εκπομπή πάνω από το φράγμα δυναμικού.

Όταν η διαφορά δυναμικού έχει πλέον αυξηθεί περισσότερο και ικανοποιείται η σχέση (σχήμα 1.1.11-2c):

$$U \geq \Phi_0 \quad (1.1.11-4)$$

το μέσο ύψος του φράγματος γίνεται:

$$\bar{\Phi} \leq \frac{\Phi_0}{2} \quad (1.1.11-5)$$

και το πλάτος του φράγματος δυναμικού έχει μειωθεί σημαντικά, και δίνεται από τη σχέση:

$$ds = s \cdot \frac{\Phi_0}{U} \quad (1.1.11-6)$$

Σύμφωνα με τα ανωτέρω όταν το φράγμα δυναμικού γίνει αρκετά λεπτό ώστε να επιτρέπει την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος η αντίσταση στη διάβαση των ηλεκτρονίων μειώνεται κατά αρκετές τάξεις μεγέθους οπότε το ρεύμα αυξάνεται δραστικά. Τελικά, όταν η πτώση τάσης κατά μήκος του φράγματος γίνει (όπου  $E_F$  είναι η ενέργεια Fermi) :

$$U > \Phi_0 + \frac{E_F}{q} \quad (1.1.11-7)$$

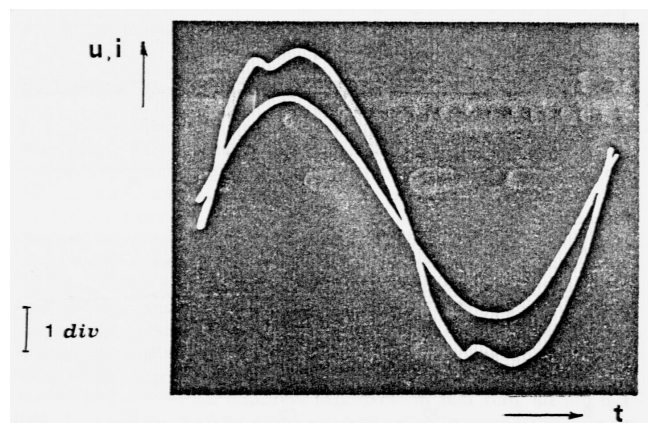
Η σχέση (1.1.11-7) τείνει στην γνωστή σχέση των Fowler – Nordheim. Πρόσφατες πειραματικές εργασίες, που αφορούν μικροδομές MOM απέδειξαν ότι η πτώση τάσης κατά μήκος του φράγματος δυναμικού προσδιορίζει κατά κύριο λόγο το χρώμα, του εκπεμπόμενου φωτός όταν η μικροδομή MOM άγει.

Ειδικά μία ηλεκτρική επαφή των πρακτικών εφαρμογών σύμφωνα με τη βιβλιογραφία παρουσιάζει περιοχές (spots) στις οποίες η αγωγή ρεύματος γίνεται δια του φαινομένου σήραγγος και οι οποίες είναι τυχαία κατανομημένες στη φαινόμενη επιφάνεια της επαφής. Οι μικροδομές MIM δημιουργούνται από τις επικαθίσεις στην μεταλλική επιφάνεια, οι οποίες επιφέρουν φράγματα δυναμικού, των οποίων το πάχος και το ύψος ποικίλει. Η επίδραση του μη ομοιόμορφου πάχους των διηλεκτρικών στρωμάτων των επαφών στην πυκνότητα του ρεύματος δια μέσου περιοχών που άγουν με το φαινόμενο σήραγγος, καθώς και άλλων που παρουσιάζουν χωρητικότητα, διερευνήθηκε θεωρητικά από τον Hurysch.

### 1.1.12 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΣΤΑΘΕΙΑΣ

Η αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου των μικροδομών μπορεί να μελετηθεί συστηματικά εξετάζοντας διαγράμματα ρεύματος-τάσης. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε καταγράφοντας τις χαρακτηριστικές χρόνου  $u(t)$  και  $i(t)$  σε επαφές διακοπών. Η απαλοιφή του χρόνου από τα προηγούμενα σήματα για μια περίοδο μπορεί να μας οδηγήσει σε ένα διάγραμμα ρεύματος-τάσης ( $i-u$ ). Το παλμογράφημα του σχήματος (1.1.12-1) αναφέρεται σε συνθήκες λειτουργίας με μη γραμμική συμπεριφορά επαφών. Μια σύγκρισή με τα παλμογραφήματα επαφών που παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

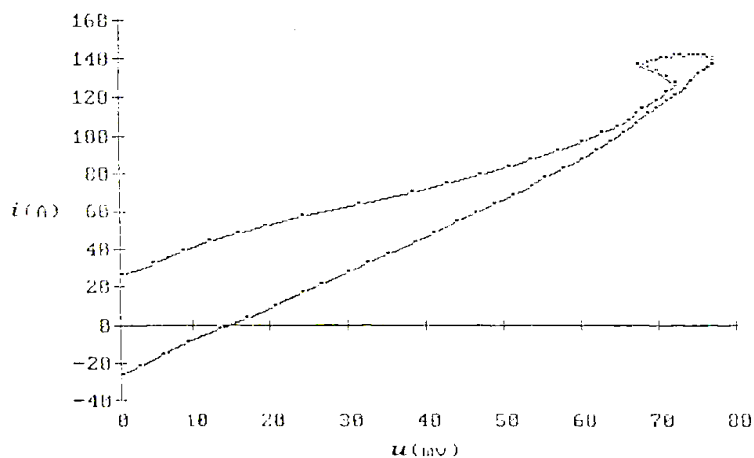
- Η διαφορά φάσεως μπορεί να αποδοθεί στην χωρητική σύζευξη των διαφόρων μικροδομών MIM, MOM και MOM οι οποίες ενεργοποιήθηκαν από το υψηλό ηλεκτρικό πεδίο.
- Οι μη γραμμικές χαρακτηριστικές  $i-u$ , σε επαφές διακοπών υπο υψηλό ηλεκτρικό πεδίο, μπορούν να αποδοθούν στην εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος, σε φαινόμενα νηματοειδούς κατανομής ρεύματος και στην ανάπτυξη διστάθειας κάτω από συνθήκες έντονης αυτοθέρμανσης.



Σχήμα 1.10: Τυπικό παλμογράφημα τάσης ρεύματος στις επαφές ενός αποζεύκτη 500V/100A με επάργυρες επαφές από χαλκό ο οποίος λειτουργεί υπό ονομαστικό ρεύμα 100A.

Κλίμακα τάσης 20mV/div, κλίμακα ρεύματος 60A/div, κλίμακα χρόνου 2ms/div.

Τα φαινόμενα που παρουσιάζονται στο σχήμα (1.1.12-1) οφείλονται σε μεταφορά φορέων (π.χ. φαινόμενο σήραγγος). Από την καμπύλη  $i$ - $u$  του σχήματος (1.1.12-2) θα μπορούσε να γίνει αντιληπτή η δράση της διστάθειας στις επαφές που λειτουργούν κάτω από συνθήκες υψηλής έγχυσης φορέων. Εκτιμάται ότι ο ρυθμός έγχυσης φορτίων είναι κατά πολύ μεγαλύτερος των 100 Cb/mm<sup>2</sup>. Το μέγεθος αυτό προκύπτει χρησιμοποιώντας τυπική τιμή ρεύματος 100 A και συνολικό εμβαδόν φαινόμενης επιφάνειας ( $A_a$ ) ίσο προς 1 mm<sup>2</sup>. Στην πράξη οι ρυθμοί έγχυσης είναι πολύ μεγαλύτεροι επειδή η ενεργός επιφάνεια είναι μικρότερη κατά μία τάξη μεγέθους.



Σχήμα 1.1.12-2: Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης του παραπάνω παλμογραφήματος για μία ημιπερίοδο λειτουργίας.

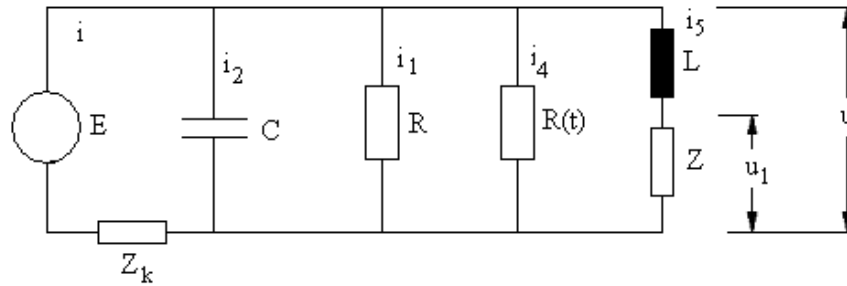
Με αιτία την χωρητική φύση τους, οι επαφές εμφανίζονται να έχουν αξιόλογη ροή ρεύματος υπό μηδενική τάση όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα (1.1.12-1). Για τον ίδιο λόγο στην χαρακτηριστική  $i$ - $u$ , τα φαινόμενα μη γραμμικής συμπεριφοράς δεν φαίνεται να αντιστρέφονται στον κλάδο του κατερχόμενου βρόχου πριν το σημείο μηδενικής τάσης. Από

πειραματικά δεδομένα η παραπάνω επαφή σε χαμηλές τιμές τάσης παρουσιάζει καθαρά ωμική συμπεριφορά και πέρα από μία οριακή τιμή τάσης, η ανάπτυξη της διστάθειας επιφέρει φαινόμενα υστέρησης.

Συνθήκες για να εμφανιστεί διστάθεια συναντώνται στην πράξη όσον αφορά τα μέταλλα σε όλες τις περιπτώσεις αλλαγής φάσης από μία κατάσταση υψηλής αγωγιμότητας σε κατάσταση χαμηλής αγωγιμότητας. Παραδείγματα είναι η υπεραγωγιμότητα, η τήξη και η εξάχνωση. Συστήματα με πολλαπλά σημεία ευστάθειας έχουν δυνατότητα να παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά όπως για παράδειγμα φαινόμενα υστέρησης, αρνητική διαφορική αντίσταση (NDR), άλματα δυναμικού.

#### 1.1.13 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΠΑΦΕΣ

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



Σχήμα 1.1.13-1: Το προτεινόμενο ισοδύναμο κύκλωμα.

$C$ : πυκνωτής που αποδίδει την χωρητική συμπεριφορά της επαφής,  $R$  : γραμμική αντίσταση στένωσης,

$Z$ : μη γραμμική αγωγιμότητα των επικαθίσεων

$L$ : επαγωγή που αποδίδει την πιθανή επαγωγική συμπεριφορά επαφών

$R(t)$  : αντίσταση που προσομοιώνει την εκδήλωση τοπικών τόξων,

$E$  : η πηγή

$Z_k$ : το φορτίο

#### 1.1.14 ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΓΩΓΙΜΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΩΝ ΜΙΑΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΠΑΦΗΣ

Η μη ροή ηλεκτρικών φορτίων στις μικροδομές ΜΙΜ και ΜΜ (μίας στατικής επαφής εν λειτουργία) σημαίνει ότι αυτές έχουν ηλεκτρομονωτική συμπεριφορά, η οποία κατ' ουσία δημιουργεί ένα ηλεκτροστατικό πεδίο. Αυτό έχει παρασταθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος (1.1.13-1) με τη χωρητικότητα  $C$ . Η μελέτη της συμπεριφοράς της ανωτέρω χωρητικότητας για τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω αυτής σημαίνει αναίρεση της μονωτικής της ικανότητας, που αφορά, κατά τα γνωστά, την εξειδικευμένη περιοχή της ηλεκτρικής (ή διηλεκτρικής) συμπεριφοράς των μονώσεων. Η ροή ρεύματος μέσω της χωρητικότητας (του ισοδύναμου κυκλώματος) μπορεί να συμβεί με διάσπαση του διακένου ή εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.

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

- 1) οι απώλειες Joule
- 2) οι δυνάμεις Coulomb
- 3) οι μερικές εκκενώσεις
- 4) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

Στην πράξη βέβαια συνδυάζονται τα ανωτέρω αίτια και υποβοηθούνται από τις ειδικές συνθήκες που επικρατούν, έτσι ώστε η αγώγιμη κατάσταση στον πυκνωτή C να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμα τους.

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

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

#### **1.1.15 ΟΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΠΑΦΩΝ**

Για την αξιολόγηση των στατικών ηλεκτρικών επαφών και τη διερεύνηση των φαινομένων που συμβαίνουν σε αυτές, γίνονται κυρίως μετρήσεις με εναλλασσόμενη τάση 230V/50Hz. Οι

μετρήσεις αφορούν βασικά:

- στο αρχικό στάδιο λειτουργίας των επαφών και ειδικότερα τη διαχρονική διερεύνηση της πτώσης τάσης και της αντίστασης διάβασης σε διάφορες τιμές της θερμοκρασίας υπό σταθερή τιμή ηλεκτρικού ρεύματος.
- στην κατάσταση θερμικής ισορροπίας των επαφών, για διάφορες τιμές του ρεύματος και ειδικότερα για την ενεργό τιμή της πτώσης τάσης στα πλαίσια μιας περιόδου λειτουργίας.

Η αξιοπιστία των ηλεκτρικών στατικών επαφών βασίζεται σε δοκιμές ποιοτικού ελέγχου ανάλογα με το ονομαστικό τους ρεύμα. Οι δοκιμές αυτές είναι οι ακόλουθες:

#### **1. Δοκιμή υπερθέρμανσης:**

Η δοκιμή υπερθέρμανσης αφορά την εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος μέχρι τα προγραμματισμένα όρια συντήρησης. Η δοκιμή διαρκεί συνήθως αρκετές ώρες και θεωρείται επιτυχής όταν η θερμοκρασία δεν υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο κατά τις προδιαγραφές όριο.

Η εξακρίβωση της ικανότητας σε ονομαστικό ρεύμα ενός στατικού ηλεκτρικού συνδέσμου βασίζεται, κυρίως, στη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας ως προς το περιβάλλον. Η τιμή της θερμοκρασίας θεωρείται ότι έχει σταθεροποιηθεί όταν μεταξύ δυο διαδοχικών μετρήσεων που απέχουν μεταξύ τους μια ώρα, η αύξηση της τιμής είναι μικρότερη από 1°C. Στην πράξη η τιμή αυτή είναι περίπου 55°C.

#### **2. Διηλεκτρικές δοκιμές διακοπών:**

Οι διηλεκτρικές δοκιμές στοχεύουν στην εξακρίβωση της ικανότητας μόνωσης. Η ονομαστική τάση και η στάθμη μόνωσης της κατασκευής είναι τα δυο πιο χαρακτηριστικά μεγέθη που ερευνώνται. Οι μετρήσεις που γίνονται για τον έλεγχο της ικανότητας μόνωσης, αφορούν κυρίως τις μέγιστες λειτουργικές καταστάσεις της κατασκευής, από τις οποίες επιβεβαιώνεται η στάθμη μόνωσης.



### 3. Δοκιμή μηχανικής αντοχής:

Η δοκιμή μηχανικής αντοχής αφορά την ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα των στατικών επαφών μετά από ένα μεγάλο αριθμό χειρισμών, ενώ παράλληλα ελέγχεται η στιβαρότητα της κατασκευής. Μετά το πέρας της δοκιμής αυτής, θα πρέπει να γίνεται η δοκιμή υπερθέρμανσης.

### 4. Δοκιμή υπό τριπολικό βραχυκύκλωμα:

Με τη δοκιμή σε τριπολικό βραχυκύκλωμα ελέγχεται η καταπόνηση μιας κατασκευής από τις μεγάλες δυνάμεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά το βραχυκύκλωμα. Η δοκιμή διαρκεί 1 s, και μετρώνται οι συνιστώσες του ρεύματος βραχυκυκλώσεως, ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ βραχυκυκλώσεως, που καθορίζεται από τη θέση της κατασκευής στο δίκτυο. Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής όταν, μετά το πέρας της δεν έχουν αναιρεθεί η στάθμη μόνωσης και η στάθμη μόνωσης.

## 1.1.16 ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΥΠΟ ΤΑΧΕΩΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΠΕΔΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα διερευνηθούν καταπονήσεις των στατικών ηλεκτρικών επαφών υπό δυο ταχέως μεταβαλλόμενα πεδία, το βραχυκύκλωμα και το κρουστικό ρεύμα κατά την πτώση των κεραυνών. Για το λόγο αυτό δίνονται βασικά στοιχεία για τις δυο καταπονήσεις που προαναφέρθηκαν.

### 1. Καταπόνηση υπό βραχυκύκλωμα:

Το βραχυκύκλωμα αποτελεί μια από τις πλέον δυσμενέστερες λειτουργίες που μπορούν να υποστούν τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Ως μεταβατικό φαινόμενο είναι ηλεκτρικής φύσεως και δυναμικής μορφής. Γενικά το βραχυκύκλωμα εμφανίζεται αρχικά ως ασύμμετρο και κατόπιν ως

συμμετρικό. Το ασύμμετρο τμήμα περιλαμβάνει το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sw}$ ) και το συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_g$ ), ενώ το συμμετρικό τμήμα αποτελείται από το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_d$ ). Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ( $I_s$ ) ονομάζεται κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης και ισχύει :

$$I_s = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{sw} \quad (1.1.16-1)$$

και

$$I_{sw} = \frac{1.1 U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{o\lambda}^2 + X_{o\lambda}^2}} \quad (1.1.16-2)$$

όπου:  $\kappa$  ένας συντελεστής  $\kappa = f(R_{o\lambda} + X_{o\lambda})$ ,  $U_N$  η ονομαστική τάση στη θέση βραχυκύκλωσης,  $R_{o\lambda}$  η ολική ωμική αντίσταση μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης και  $X_{o\lambda}$  η ολική επαγωγική αντίδραση μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης.

$$I_d = \mu_\sigma \cdot I_{sw} \quad (1.1.16-3)$$

όπου:  $\mu_d$  ένας συντελεστής  $\mu_d = f(I_{sw} / I_G)$ , με  $I_G$  το ονομαστικό ρεύμα της πηγής.

Η συνισταμένη των  $R_{o\lambda}$  και  $X_{o\lambda}$  στη σχέση (1.1.16-2) είναι η ολική σύνθετη αντίσταση ( $Z_{o\lambda}$ ) της διαδρομής βραχυκυκλώσεως:

$$Z_{o\lambda}^2 = R_{o\lambda}^2 + X_{o\lambda}^2 \quad (1.1.16-4)$$

Η μελέτη αντοχής σε τριφασικό βραχυκύκλωμα περιλαμβάνει:

- τον υπολογισμό της συνολικής αντίστασης ανά φάση, από τις επιμέρους αντιστάσεις των στοιχείων της εγκατάστασης μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης

- τον υπολογισμό των  $I_{sw}$ ,  $I_s$  και  $I_d$

- τον υπολογισμό του συμμετρικού ρεύματος διακοπής ( $I_\alpha$ ) και της ισχύος διακοπής ( $P_\alpha$ ).

Η απότομη αύξηση του ρεύματος κατά το βραχυκύκλωμα έχει σαν αποτέλεσμα την άσκηση σημαντικών δυνάμεων μεταξύ των ρευματοφόρων μερών. Η μηχανική καταπόνηση που

προκαλείται από τις δυνάμεις αυτές είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα για την κατασκευή των ηλεκτροτεχνικών εγκαταστάσεων.

Το βραχυκύκλωμα προκαλεί στους αγωγούς και τις επαφές μια επιπλέον θερμική καταπόνηση για την οποία έχει ιδιαίτερη σημασία η τιμή του διαρκούς ρεύματος βραχυκύκλωσης και ο χρόνος μέχρι τη διακοπή του βραχυκυκλώματος. Η αύξηση της θερμοκρασίας στους αγωγούς υπολογίζεται αναλυτικά από τα γραφήματα κατά το πρότυπο IEC 60865-1 και 2.

Μια εμπειρική σχέση που δίνει τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στους αγωγούς κατά το βραχυκύκλωμα είναι η παρακάτω:

$$\Delta\theta = \frac{k}{A^2} \cdot I_d^2 \left[ t + T \left( \frac{I_{SW}}{I_d} \right)^2 \right] \quad (1.1.16-5)$$

όπου:  $\Delta\theta$  η διαφορά θερμοκρασίας σε °C,  $I_d$  και  $I_{SW}$  σε A,  $k$  σταθερά υλικού,  $A$  η διατομή των αγωγών ή ζυγών σε mm<sup>2</sup>,  $t$  ο χρόνος σε s από την εμφάνιση μέχρι τη διακοπή του βραχυκυκλώματος,  $T$  ένας συντελεστής χρόνου.

## 2. Καταπόνηση υπό κεραυνικό κρουστικό ρεύμα

Το κρουστικό ρεύμα χαρακτηρίζεται κατά τους κανονισμούς (VDE, IEC κ.λ.π.) από τη διάρκεια μετώπου  $T_s$ , που είναι ο χρόνος που χρειάζεται το ρεύμα για να φθάσει το 90% της μέγιστης τιμής του  $I_{max}$  και τη διάρκεια ημίσεως εύρους της ουράς  $T_r$ , που είναι ο χρόνος κατά τον οποίο το ρεύμα επιστρέφει από το  $I_{max}$  στο 50% του  $I_{max}$ . Χαρακτηριστικά ακόμη του κεραυνικού ρεύματος είναι η μέγιστη τιμή  $I_{max}$  και η συνολική ενέργεια  $W/R$  που εκλύεται από αυτό.

Ο φυσικός κεραυνός προσομοιώνεται με κρουστική τάση 1,2/50 μs, έχει δηλαδή:  $T_s = 1,2$  μs και  $T_r = 50$  μs. Για τις εργαστηριακές ασκήσεις προσομοίωσης του κεραυνικού ρεύματος χρησιμοποιείται η 10/350 μs. Μια μαθηματική σχέση που προσομοιώνει το κεραυνικό ρεύμα είναι η ακόλουθη:

$$i(t) = \frac{I_{max}}{n} \cdot \frac{t^{10}}{T^{10} + t^{10}} \cdot e^{\frac{-t}{r}} \quad (1.1.16-6)$$

όπου  $I_{max}$  η κορυφή του κεραυνικού πλήγματος,  $n$  ο συντελεστής διόρθωσης κορυφής,  $T$  και  $r$  χρονικές σταθερές κορυφής και ουράς αντίστοιχα.

Πολύ συχνά το κεραυνικό πλήγμα προσομοιώνεται μαθηματικά και με διπλοεκθετική εξίσωση για ένα παλμό:

$$i(t) = A_n (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) + B (e^{\lambda_3 t} - e^{\lambda_4 t}) \quad (1.1.16-7)$$

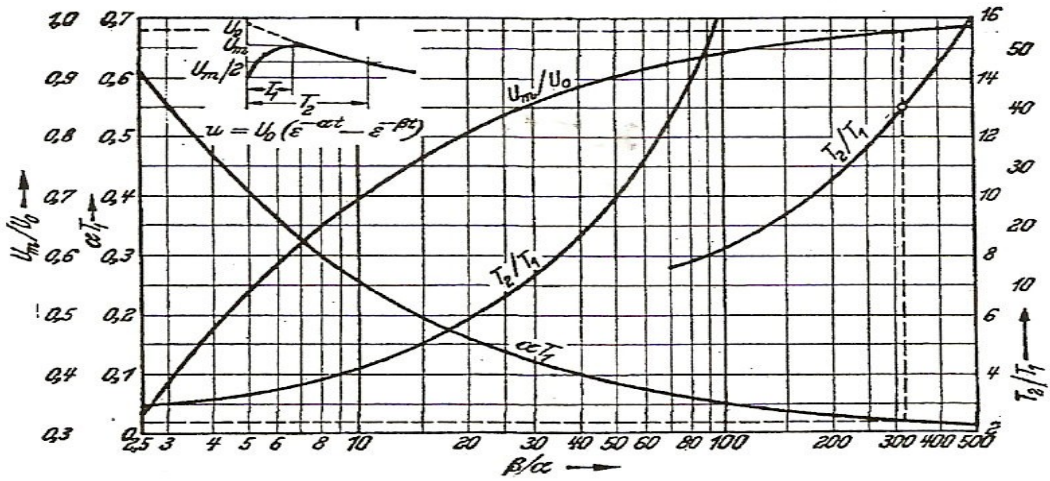
όπου  $A_n$  η μέγιστη τιμή του ρεύματος του πρώτου παλμού,  $B$  η μέγιστη τιμή του ρεύματος (κατά πολύ μικρότερη της  $A_n$ ) του παλμού που ακολουθεί τον πρώτο με χρονικό μεσοδιάστημα της τάξης των ms και  $\lambda_1, \lambda_2$  και  $\lambda_3, \lambda_4$  χρονικές σταθερές της κορυφής και της ουράς αντίστοιχα.

Στην πράξη το κεραυνικό ρεύμα προσομοιώνεται μόνο με το πρώτο μέρος της εξίσωσης (1.1.16-7). Έτσι η (1.1.16-7) γίνεται :

$$i(t) = \frac{I_{max}}{n} \cdot (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) \quad (1.1.16-8)$$

όπου η μέγιστη τιμή του ρεύματος  $A_n$  έχει αντικατασταθεί με το λόγο  $I_{max} / n$  για αντιστοιχία με τη σχέση (1.1.16-6).

Ένας τρόπος υπολογισμού των χρονικών συντελεστών  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  είναι μέσω διαγραμμάτων στη βιβλιογραφία. Ένα τέτοιο διάγραμμα δίνεται στο σχήμα (1.1.16-1) όπου ο λόγος  $T_2/T_1$  αντιστοιχεί στο λόγο  $T_s/T_r$  και  $\alpha$  και  $\beta$  στις χρονικές σταθερές  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  αντίστοιχα.



Σχήμα 1.1.16-1: Διάγραμμα για τον υπολογισμό των χρονικών σταθερών του κρουστικού ρεύματος όπου  $T_1$  ο χρόνος μετώπου και  $T_2$  ο χρόνος ημίσεως εύρους.

## 2. ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

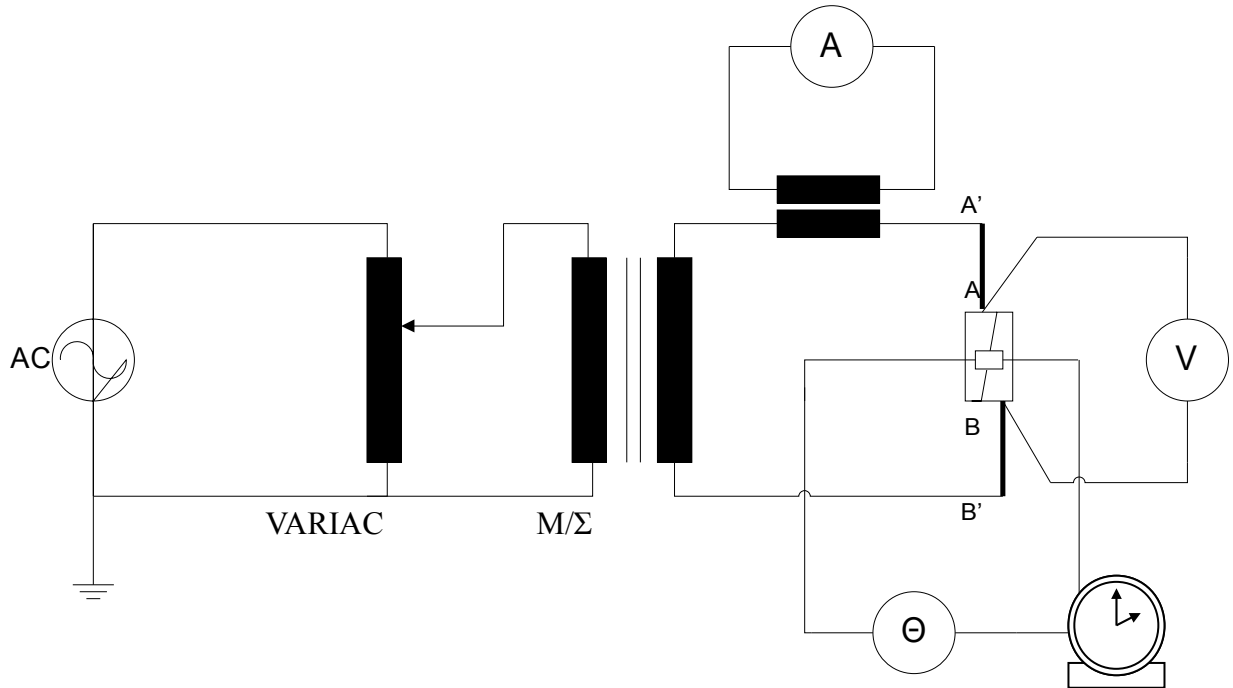
Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των μόνιμων ηλεκτρικών συνδέσμων υπό εναλλασσόμενη τάση και υπό την επίδραση διαφόρων τιμών ροπής σύσφιξης. Για να διερευνηθούν οι επιδράσεις αυτές, πραγματοποιήθηκαν σειρές πειραματικών μετρήσεων υπό διαφορετικές τιμές ροπής σύσφιξης, υπό ένταση ίση προς το ονομαστικό ρεύμα των αγωγών που χρησιμοποιήθηκαν, και εξετάστηκαν τα θερμικά αποτελέσματα καθώς και η προκαλούμενη πτώση τάσης στους συνδέσμους – δοκίμια.

Έτσι θα είναι δυνατή η εξαγωγή ενός συμπεράσματος, σχετικά με το πόσο κατάλληλος είναι ο κάθε σύνδεσμος για χρήση σε αγωγούς συγκεκριμένης διατομής.

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

#### 3.1 Διάταξη μέτρησης

Η διάταξη μέτρησης των δοκιμών είναι η παρακάτω :



Σχήμα 3.1-1: Η διάταξη μέτρησης

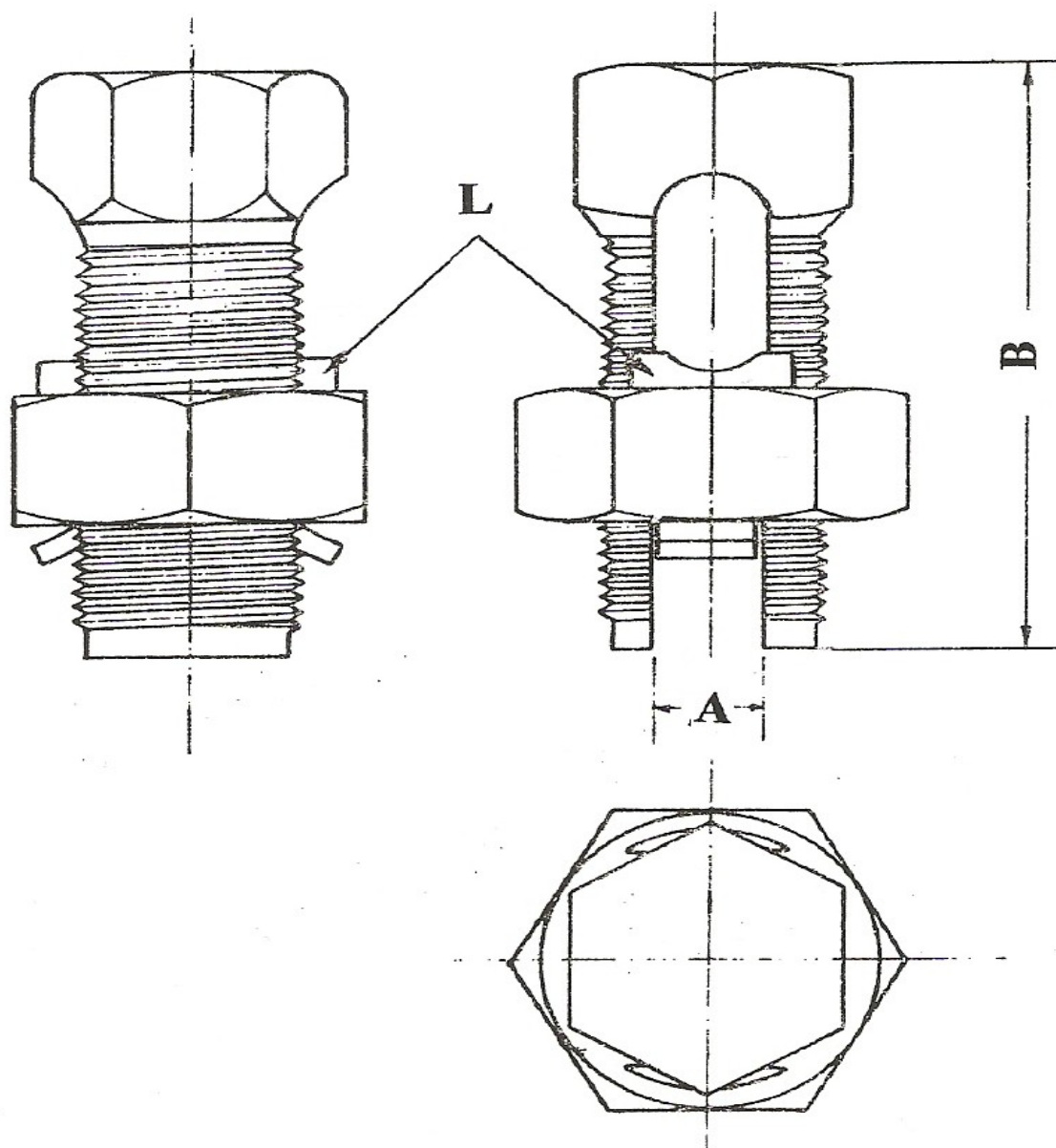
- 1) Οι γραμμές AA' και BB' αντιπροσωπεύουν τους αγωγούς στους οποίους συνδέεται το δοκίμιο
- 2) Το βολτόμετρο (V) μετράει την πτώση τάσης του δοκιμίου
- 3) Το θερμοστοιχείο (Θ) μετράει την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο δοκίμιο
- 4) Μονοφασικός μετασχηματιστής (M/Σ)
- 5) Αυτομετασχηματιστής (VARIAC)

Όλοι οι χειρισμοί γινότανε μέσω τράπεζας χειρισμών ενός μετασχηματιστή ρεύματος.

### 3.2 Μηχανολογικά σχέδια των συνδέσμων

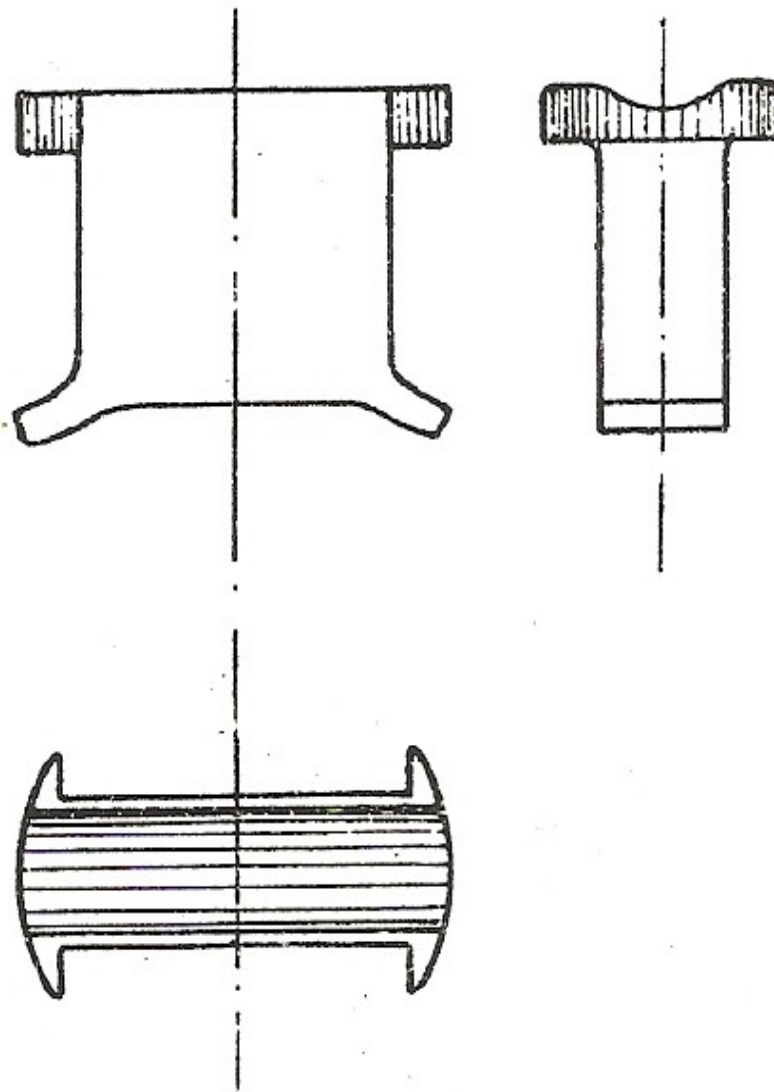
Παρακάτω παρουσιάζονται τα μηχανολογικά σχέδια των συνδέσμων που χρησιμοποιήθηκαν.

Στην ουσία, το σχέδιο είναι μόνο ένα, διότι οι δύο σύνδεσμοι είναι πανομοιότυποι, αν εξαιρεθούν οι διαστάσεις τους. Έτσι από το μηχανολογικό σχέδιο μπορούν αναλογικά να σχεδιαστούν και οι δύο σύνδεσμοι. Ακολουθούν τα μηχανολογικά σχέδια:



Σχήμα 3.2-1: Πρόσοψη, κάτοψη και πλάγια όψη του συνδέσμου





Σχήμα 3.2-2: Πρόσοψη, κάτοψη και πλάγια όψη του σφιγκτήρα του συνδέσμου

Ακολουθεί και ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις διαστάσεις (B x A x L mm) των δύο συνδέσμων που χρησιμοποιήθηκαν:

Σύνδεσμος	Διαστάσεις
Για αγωγούς 16 mm <sup>2</sup>	27,9 x 4,5 x 12,15 mm
Για αγωγούς 35 mm <sup>2</sup>	49,6 x 8 x 21,6 mm

Πίνακας 3.2-1: Διαστάσεις των δύο συνδέσμων που χρησιμοποιήθηκαν

### 3.3 Περιγραφή διεξαγωγής των μετρήσεων

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο λυόμενους συνδέσμους. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο σύνδεσμοι από επιψευδαργυρωμένο σίδηρο, κάθε ένας από τους οποίους χρησιμοποιείται για αγωγούς διαφορετικής διατομής από ότι ο άλλος σύνδεσμος, έτσι ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με το ρόλο που παίζει η δύναμη σύσφιξης στην αύξηση της θερμοκρασίας πάνω στον σύνδεσμο, αλλά και για να υπολογιστεί το ονομαστικό τους ρεύμα. Ο ένας σύνδεσμος χρησιμοποιείται για αγωγούς διατομής 16 mm<sup>2</sup> (δοκίμιο 1) και ο άλλος για αγωγούς διατομής 35 mm<sup>2</sup> (δοκίμιο 2).

Οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με τους κανονισμούς και λαμβάνοντας όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας. Μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε 15 λεπτά, η θερμοκρασία μετρήθηκε με θερμοστοιχεία Pt100 και η τάση με ψηφιακό βολτόμετρο.

Ο υπολογισμός του ονομαστικού ρεύματος γίνεται έμμεσα. Μέσω του μετασχηματιστή ρεύματος, τροφοδοτείται το κύκλωμά με το ονομαστικό ρεύμα του κάθε αγωγού. Έτσι, έχοντας ως δεδομένο αυτό το ρεύμα, υπολογίζεται έμμεσα το ονομαστικό ρεύμα του κάθε συνδέσμου.

Στη συνέχεια, στόχος ήταν να μελετηθεί η επίδραση της δύναμης σύσφιξης, αλλά και της πτώσης τάσης στη συμπεριφορά του κάθε συνδέσμου. Με δεδομένο το ρεύμα αξιολόγησης του αγωγού, διεξήχθησαν μετρήσεις για διαφορετικές τιμές της δύναμης σύσφιξης, προκειμένου να διαπιστωθεί πως επιδρά αυτή, τόσο στη διαμόρφωση του ονομαστικού ρεύματος του συνδέσμου, όσο και στην αντίσταση που αυτός εμφανίζει.

Η διαδικασία διεξαγωγής των μετρήσεων είναι η παρακάτω :

- 1) Σύνδεση του δοκιμίου στα σημεία A, B.
- 2) Τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης, έλεγχος αυτών, τήρηση μέτρων ασφαλείας και έναρξη της μέτρησης.

- 3) Διάφορες τιμές ροπής σύσφιξης εφαρμόζονται στο δοκίμιο. Κάθε μέτρηση διαρκεί 2 ώρες και είναι συνεχόμενη. Μεταξύ των μετρήσεων το δοκίμιο θα πρέπει να κρυώνει μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- 4) Κάθε δοκίμιο διαρρέεται από τιμή έντασης εναλλασσόμενου ρεύματος, ίση με την ονομαστική τιμή ρεύματος του αντίστοιχου αγωγού, που είναι ήδη γνωστή.
- 5) Οι μετρήσεις παίρνονται κάθε 15min.
- 6) Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τα 2 δοκίμια.

**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ:** Η τιμή  $\Delta\theta$  θεωρείται ότι έχει σταθεροποιηθεί όταν μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (που απέχουν μεταξύ τους μία ώρα) η αύξηση της τιμής είναι μικρότερη από 1 °C. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο δοκίμιο δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 55°C. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη τότε σταματάει η διαδικασία των μετρήσεων.

### 3.4 Αποτελέσματα των μετρήσεων

Για το πρώτο δοκίμιο (δοκίμιο 1), δηλαδή αυτό που είναι κατάλληλο για χάλκινους αγωγούς διατομής 16 mm<sup>2</sup>, εφαρμόστηκαν ροπές σύσφιξης τιμών: 5 Nm, 7 Nm, 10 Nm και 15 Nm αντίστοιχα. Το ονομαστικό ρεύμα του αγωγού ήταν ήδη γνωστό και ισούται με 104 A. Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε, ότι τοποθετήθηκαν από δύο θερμοστοιχεία, σε δυο διαφορετικά σημεία, σε κάθε έναν από τους δύο αγωγούς.

Με βάση τα προηγούμενα, καταγράφηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα για το δοκίμιο 1:

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)										
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	ΔΘ	1ος αγωγός σημείο 1	ΔΘ	2ος αγωγός σημείο 1	ΔΘ	1ος αγωγός σημείο 2	ΔΘ	2ος αγωγός σημείο 2	ΔΘ
0	25	25	0	25	0	25	0	25	0	25	0
15	25,1	68,6	43,5	57,1	32	56,1	31	67,4	42,3	67,1	42
30	25	70,6	45,6	59,9	34,9	59	34	69,5	44,5	68,8	43,8
45	25,1	71,7	46,6	61,4	36,3	62,7	37,6	70,6	45,5	70,1	45
60	25,1	71	45,9	61,6	36,5	64,4	39,3	69,8	44,7	69,4	44,3
75	25,1	71,2	46,1	61,3	36,2	68	42,9	69,6	44,5	69,4	44,3
90	25,1	74,4	49,3	57,9	32,8	65,3	40,2	72,7	47,6	72,6	47,5
105	25,1	73,5	48,4	59	33,9	69,4	44,3	71,9	46,8	72	46,9
120	25,2	74,1	48,9	57,8	32,6	69,4	44,2	72,4	47,2	72,7	47,5

Πίνακας 3.4-1: Μετρήσεις για το δοκίμιο 1 σε ροπή 5 Nm

Χρόνος t (min)	Πτώση Τάση V (mV)		
	Έξοδος Μετασχηματιστή	Σύνδεσμος	R (mΩ)
0	510	19	0,183
15	513	12	0,115
30	520	27	0,260
45	527	34	0,327
60	529	31	0,298
75	540	31	0,298
90	534	25	0,240
105	545	34	0,327
120	544	33	0,317

Πίνακας 3.4-2: Μετρήσεις για το δοκίμιο 1 σε ροπή 5 Nm

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)										
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	ΔΘ	1ος αγωγός σημείο 1	ΔΘ	2ος αγωγός σημείο 1	ΔΘ	1ος αγωγός σημείο 2	ΔΘ	2ος αγωγός σημείο 2	ΔΘ
0	26,3	26,3	0	26,3	0	26,3	0	26,3	0	26,3	0
15	26,6	68,1	41,5	72,8	46,2	54,5	27,9	66,9	40,3	69,3	42,7
30	26,7	70,4	43,7	75,9	49,2	57,4	30,7	69,1	42,4	71,5	44,8
45	26,8	69,9	43,1	77,8	51	58,7	31,9	68	41,2	71	44,2
60	26,8	70,4	43,6	78,3	51,5	58,5	31,7	68,4	41,6	71,5	44,7
75	26,8	69,9	43,1	78	51,2	58	31,2	68,2	41,4	71	44,2
90	26,9	70,4	43,5	78,4	51,5	58,4	31,5	68,8	41,9	71,5	44,6
105	27	70,1	43,1	78,4	51,4	58,6	31,6	68,2	41,2	71,2	44,2
120	27	70,2	43,2	80,1	53,1	59,3	32,3	68,9	41,9	71,4	44,4

Πίνακας 3.4-3: Μετρήσεις για το δοκίμιο 1 σε ροπή 7 Nm

Χρόνος t (min)	Πτώση Τάσης V (mV)			7 Nm
	Έξοδος Μετασχηματιστή	Σύνδεσμος	R (mΩ)	
0	532	5,6	<b>0,054</b>	
15	566	7,2	<b>0,069</b>	
30	579	7,7	<b>0,074</b>	
45	577	6,3	<b>0,061</b>	
60	576	6,1	<b>0,059</b>	
75	574	6,1	<b>0,059</b>	
90	575	5,6	<b>0,054</b>	
105	575	7,4	<b>0,071</b>	
120	573	7,2	<b>0,069</b>	

Πίνακας 3.4-4: Μετρήσεις για το δοκίμιο 1 σε ροπή 7 Nm

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)										10 Nm	
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	ΔΘ	1ος αγωγός σημείο 1	ΔΘ	2ος αγωγός σημείο 1	ΔΘ	1ος αγωγός σημείο 2	ΔΘ	2ος αγωγός σημείο 2		ΔΘ
0	26,7	26,7	<b>0</b>	26,7	<b>0</b>	26,7	<b>0</b>	26,7	<b>0</b>	26,7		<b>0</b>
15	26,9	67,9	<b>41</b>	65,5	<b>38,6</b>	65	<b>38,1</b>	66,9	<b>40</b>	67,6		<b>40,7</b>
30	26,9	70,5	<b>43,6</b>	68,5	<b>41,6</b>	65,6	<b>38,7</b>	69,7	<b>42,8</b>	70,2		<b>43,3</b>
45	27	71,4	<b>44,4</b>	70,4	<b>43,4</b>	65,2	<b>38,2</b>	70,9	<b>43,9</b>	71,2		<b>44,2</b>
60	27,1	70,8	<b>43,7</b>	70,7	<b>43,6</b>	65,2	<b>38,1</b>	70,2	<b>43,1</b>	70,6		<b>43,5</b>
75	27,1	70,4	<b>43,3</b>	70,9	<b>43,8</b>	64,9	<b>37,8</b>	70,1	<b>43</b>	70,4		<b>43,3</b>
90	27,2	71	<b>43,8</b>	71,4	<b>44,2</b>	64,5	<b>37,3</b>	70,6	<b>43,4</b>	70,9		<b>43,7</b>
105	27,2	71	<b>43,8</b>	71,2	<b>44</b>	64,3	<b>37,1</b>	70,8	<b>43,6</b>	71		<b>43,8</b>
120	27,4	70,8	<b>43,4</b>	71,3	<b>43,9</b>	63,4	<b>36</b>	70,5	<b>43,1</b>	70,7	<b>43,3</b>	

Πίνακας 3.4-5: Μετρήσεις για το δοκίμιο 1 σε ροπή 10 Nm

Χρόνος t (min)	Πτώση Τάσης V (mV)			10 Nm
	Έξοδος Μετασχηματιστή	Σύνδεσμος	R (mΩ)	
0	554	5,2	<b>0,050</b>	
15	571	5,7	<b>0,055</b>	
30	573	5,9	<b>0,057</b>	
45	584	4,2	<b>0,040</b>	
60	568	3,8	<b>0,037</b>	
75	573	6,4	<b>0,062</b>	
90	574	5,6	<b>0,054</b>	
105	577	6,2	<b>0,060</b>	
120	577	4,8	<b>0,046</b>	

Πίνακας 3.4-6: Μετρήσεις για το δοκίμιο 1 σε ροπή 10 Nm

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)										
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	ΔΘ	1ος αγωγός σημείο 1	ΔΘ	2ος αγωγός σημείο 1	ΔΘ	1ος αγωγός σημείο 2	ΔΘ	2ος αγωγός σημείο 2	ΔΘ
0	27,1	27,1	0	27,1	0	27,1	0	27,1	0	27,1	0
15	27,4	68,2	40,8	62,1	34,7	59	31,6	66,9	39,5	67,5	40,1
30	27,4	71	43,6	65,7	38,3	61	33,6	69,7	42,3	70,4	43
45	27,4	70,8	43,4	66,5	39,1	61,4	34	69,5	42,1	70,3	42,9
60	27,5	70,6	43,1	67,7	40,2	62	34,5	70	42,5	70,9	43,4
75	27,5	71,8	44,3	68,7	41,2	62,8	35,3	70,3	42,8	71,8	44,3
90	27,5	72,4	44,9	69,5	42	63,1	35,6	70,9	43,4	72,4	44,9
105	27,5	72,1	44,6	69,4	41,9	63	35,5	70,6	43,1	72	44,5
120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

15 Nm

Πίνακας 3.4-7: Μετρήσεις για το δοκίμιο 1 σε ροπή 15 Nm

Χρόνος t (min)	Πτώση Τάσης V (mV)		
	Έξοδος Μετασχηματιστή	Σύνδεσμος	R (mΩ)
0	525	6,5	0,063
15	560	6,3	0,061
30	563	6,2	0,060
45	569	7,2	0,069
60	581	7,5	0,072
75	581	7	0,067
90	582	5,6	0,054
105	582	7,9	0,076
120	-	-	-

15 Nm

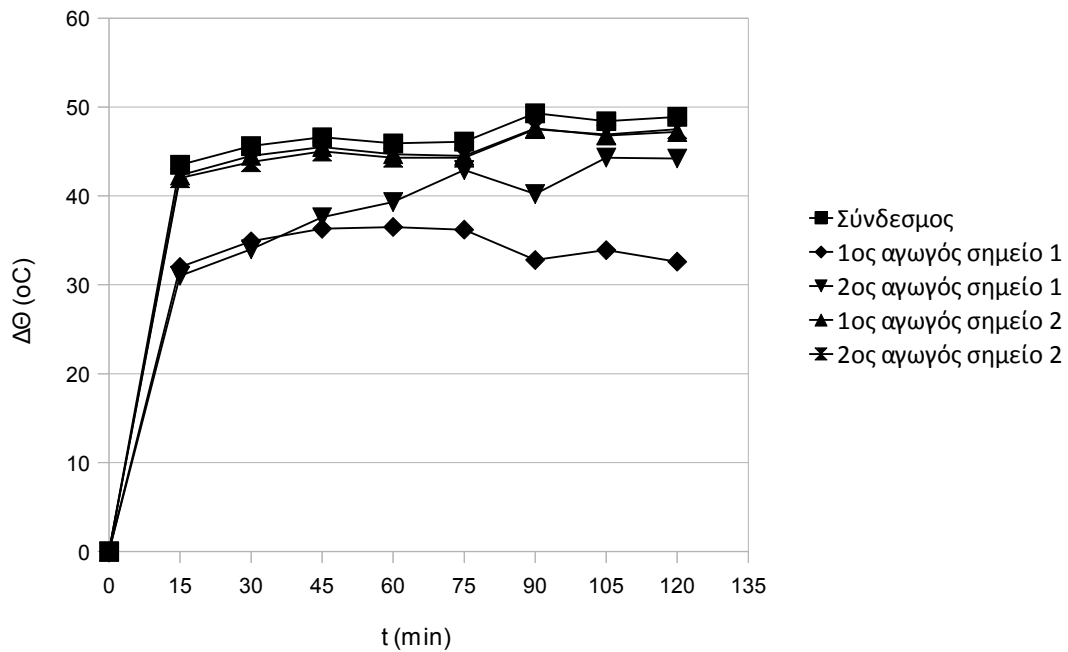
Πίνακας 3.4-8: Μετρήσεις για το δοκίμιο 1 σε ροπή 15 Nm

Όσον αφορά τις μετρήσεις στο δοκίμιο 1 για ροπή 15 Nm, η τελευταία μέτρηση δεν κατέστη δυνατό να γίνει, διότι λόγω υπερθέρμανσης της τράπεζας χειρισμών διακόπηκε η λειτουργία της για λόγους ασφαλείας.

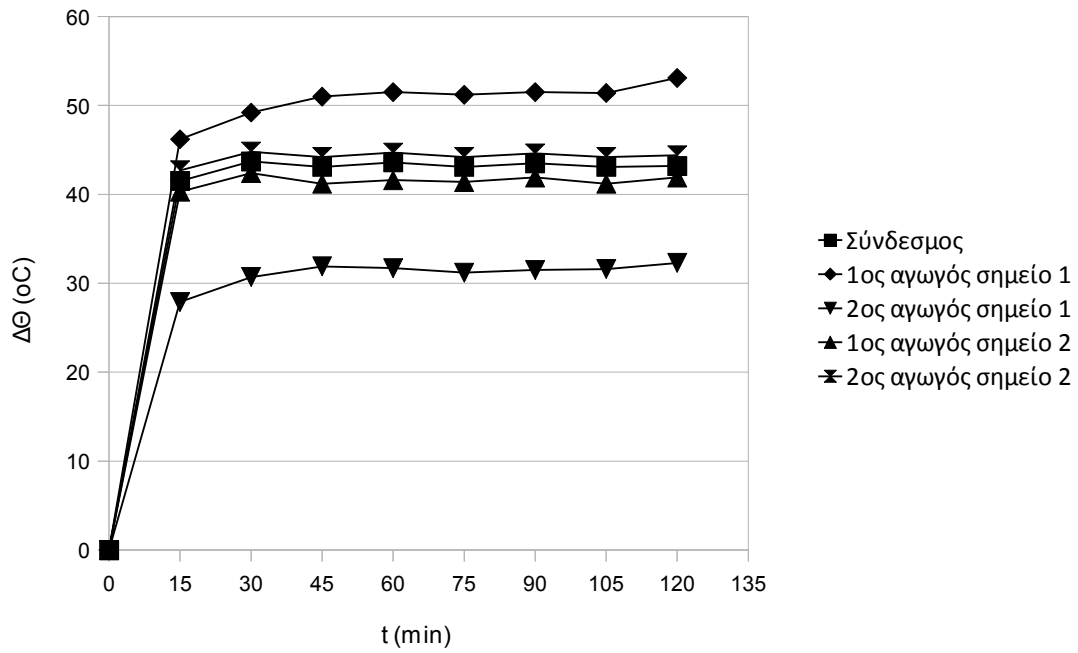
Από τους προηγούμενους πίνακες, προκύπτουν οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις για το δοκίμιο 1. Στην πρώτη παρουσιάζεται η διαφορά θερμοκρασίας του δοκιμίου και του αγωγού, για μια συγκεκριμένη τιμή της ροπής σύσφιξης. Στην δεύτερη παρουσιάζεται η μεταβολή της

διαφοράς θερμοκρασίας του ίδιου δοκιμίου, για όλες τις επιβαλλόμενες τιμές ροπής σύσφιξης. Στην τρίτη γραφική παράσταση παρουσιάζεται η διαφορά δυναμικού του ίδιου δοκιμίου, για όλες τις επιβαλλόμενες τιμές ροπής σύσφιξης.

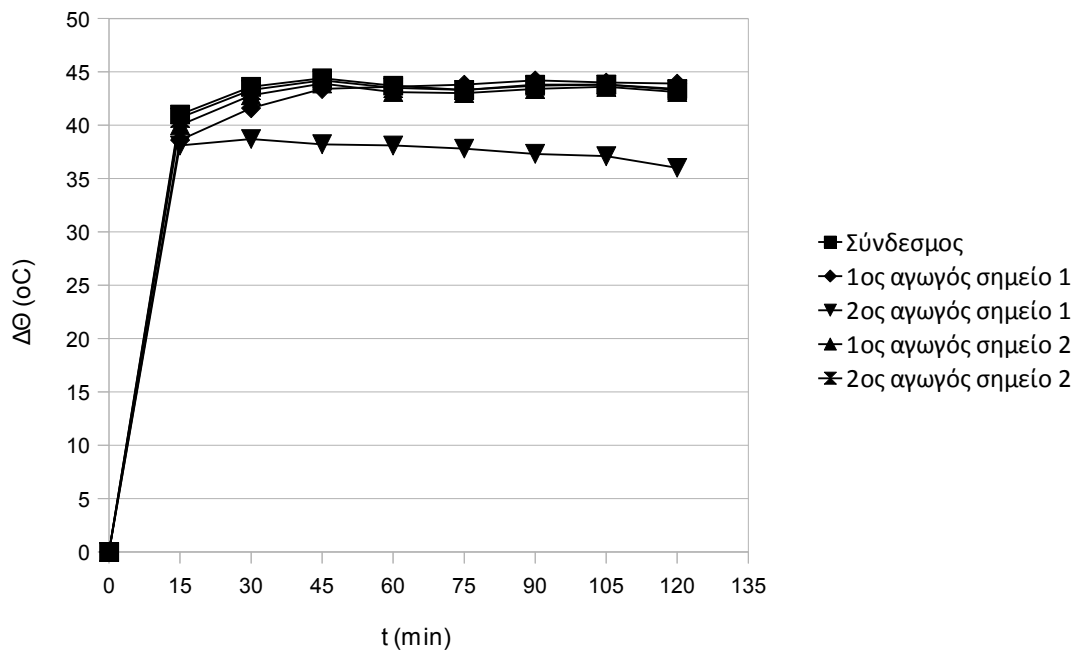
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις για το δοκίμιο 1:



Σχήμα 3.4-1: Διαφορά θερμοκρασίας προς το περιβάλλον στα διάφορα σημεία υπό ροπή 5 Nm, δοκίμιο 1

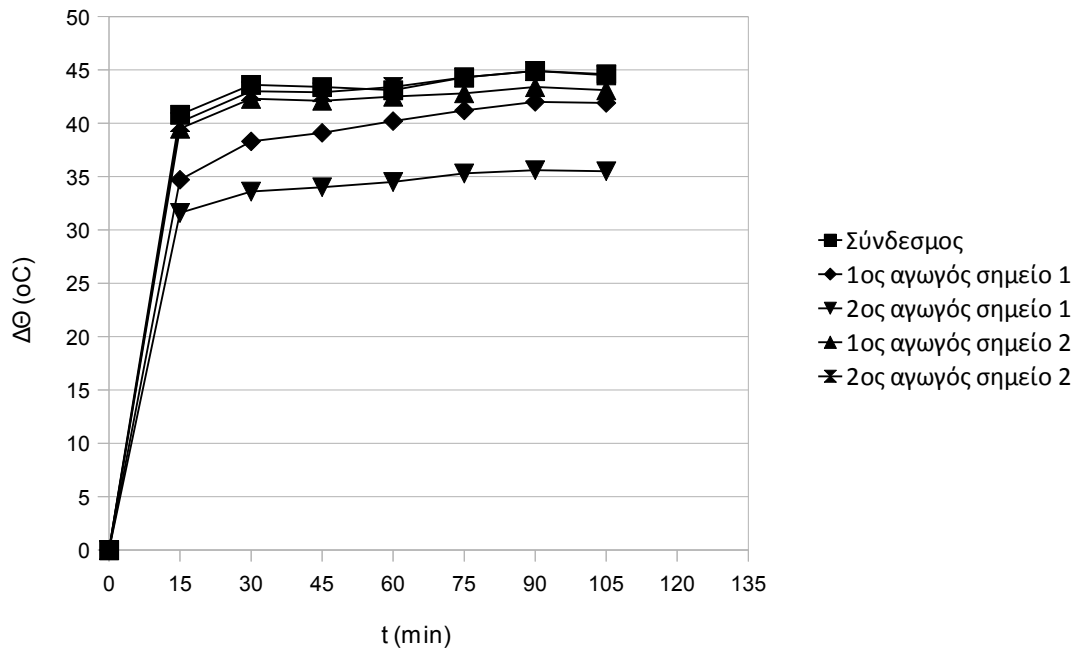


Σχήμα 3.4-2: Διαφορά θερμοκρασίας προς το περιβάλλον στα διάφορα σημεία υπό ροπή 7 Nm, δοκίμιο 1

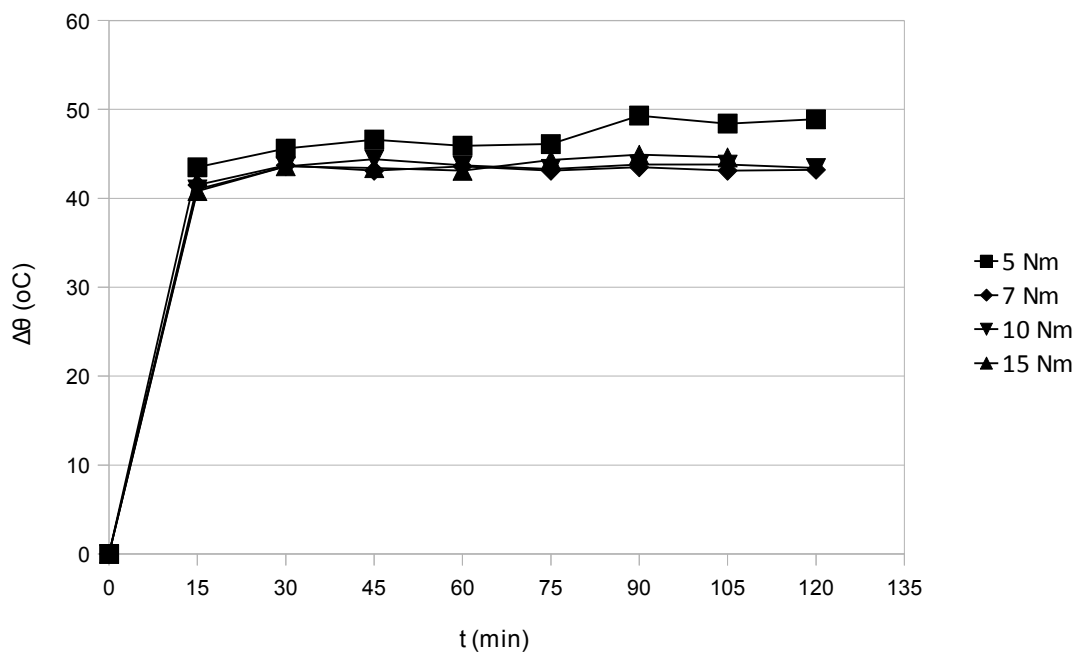


Σχήμα 3.4-3: Διαφορά θερμοκρασίας προς το περιβάλλον στα διάφορα σημεία υπό ροπή 10 Nm, δοκίμιο 1

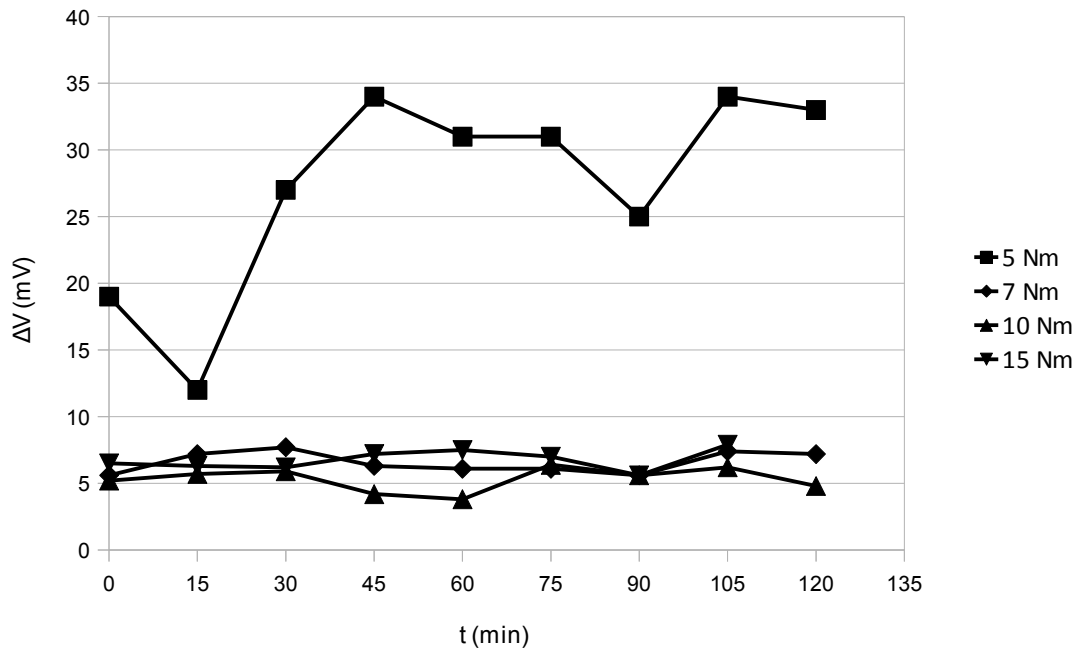




Σχήμα 3.4-4: Διαφορά θερμοκρασίας προς το περιβάλλον στα διάφορα σημεία υπό ροπή 15 Nm, δοκίμιο 1



Σχήμα 3.4-5: Διαφορά θερμοκρασίας προς το περιβάλλον στο δοκίμιο για διάφορες τιμές ροπής, δοκίμιο 1



Σχήμα 3.4-6: Πτώση τάσης στο δοκίμιο για διάφορες τιμές ροπής, δοκίμιο 1

Για το δεύτερο δοκίμιο (δοκίμιο 2), δηλαδή αυτό που είναι κατάλληλο για αγωγούς διατομής  $35 \text{ mm}^2$ , εφαρμόστηκαν ροπές σύσφιξης τιμών: 7 Nm, 10 Nm, 15 Nm και 20 Nm αντίστοιχα. Το ονομαστικό ρεύμα ήταν ήδη γνωστό και ισούται με 185 A. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί, ότι τοποθετήθηκαν τρία θερμοστοιχεία, σε τρία διαφορετικά σημεία, σε κάθε έναν από τους δύο αγωγούς. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο βρίσκεται σε απόσταση 2,5 cm από το σύνδεσμο, το δεύτερο σε απόσταση 10 cm και το τρίτο σε απόσταση 20 cm.

Με βάση τα προηγούμενα, καταγράφηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα για το δοκίμιο 2:

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)														7 Nm
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	ΔΘ	1ος Αγωγός						2ος Αγωγός					
				+20cm	ΔΘ	+10cm	ΔΘ	+2,5cm	ΔΘ	+20cm	ΔΘ	+10cm	ΔΘ	+2,5cm	
0	27,6	27,6	0	27,6	0	27,6	0	27,6	0	27,6	0	27,6	0	27,6	0
15	27,7	85,6	57,9	80,7	53	72,6	44,9	75,7	48	72	44,3	68,9	41,2	86	58,3
30	27,8	91,1	63,3	85,2	57,4	77,8	50	84,3	56,5	74,8	47	71	43,2	91,3	63,5
45	28	93	65	84,6	56,6	79,4	51,4	85	57	76,7	48,7	70,1	42,1	92,9	64,9
60	28,1	93	64,9	86,3	58,2	79,5	51,4	84,4	56,3	75,9	47,8	70,3	42,2	93,7	65,6
75	27,9	91,6	63,7	85,8	57,9	77	49,1	82,9	55	77,8	49,9	73,2	45,3	87,1	59,2
90	28	92,3	64,3	85,6	57,6	78,8	50,8	82,5	54,5	81,4	53,4	83,2	55,2	90,6	62,6
105	28	91,8	63,8	84,7	56,7	77,6	49,6	82,9	54,9	79,6	51,6	81,6	53,6	90,3	62,3
120	28,1	92,6	64,5	86,3	58,2	79,4	51,3	82,5	54,4	79,1	51	81,3	53,2	89,9	61,8

Πίνακας 3.4-9: Μετρήσεις για το δοκίμιο 2 σε ροπή 7 Nm

Χρόνος t (min)	Πτώση Τάσης V (mV)			7 Nm
	Έξοδος Μετασχηματιστή	Σύνδεσμος	R (mΩ)	
0	625	2,3	0,012	
15	683	4	0,022	
30	689	4,2	0,023	
45	687	2,2	0,012	
60	689	4,1	0,022	
75	689	3,7	0,020	
90	697	3,6	0,019	
105	691	3,4	0,018	
120	694	3,6	0,019	

Πίνακας 3.4-10: Μετρήσεις για το δοκίμιο 2 σε ροπή 7 Nm

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)														10 Nm
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	ΔΘ	1ος Αγωγός						2ος Αγωγός					
				+20cm	ΔΘ	+10cm	ΔΘ	+2,5cm	ΔΘ	+20cm	ΔΘ	+10cm	ΔΘ	+2,5cm	
0	28,1	28,1	0	28,1	0	28,1	0	28,1	0	28,1	0	28,1	0	28,1	0
15	28,4	82,5	54,1	84,8	56,4	84,8	56,4	72,4	44	81,5	53,1	79,6	51,2	84,3	55,9
30	28,4	90,1	61,7	90,1	61,7	88,1	59,7	85,6	57,2	86,6	58,2	88,1	59,7	90,9	62,5
45	28,6	92,2	63,6	91,9	63,3	89,6	61	87,5	58,9	88,1	59,5	89,6	61	92,9	64,3
60	28,7	91,9	63,2	91,4	62,7	89,7	61	86,8	58,1	88,2	59,5	83,7	55	92,4	63,7
75	28,7	90,3	61,6	91,2	62,5	90,5	61,8	86	57,3	88,1	59,4	82,3	53,6	91,5	62,8
90	28,7	90,9	62,2	90,9	62,2	90,9	62,2	86,4	57,7	88,7	60	82,8	54,1	92,2	63,5
105	28,8	90,6	61,8	90	61,2	91	62,2	86,5	57,7	88,4	59,6	82,4	53,6	92	63,2
120	28,8	91,3	62,5	91,3	62,5	91,7	62,9	86,7	57,9	88,9	60,1	84,3	55,5	92,9	64,1

Πίνακας 3.4-11: Μετρήσεις για το δοκίμιο 2 σε ροπή 10 Nm

	Πτώση Τάσης V (mV)			10 Nm
Χρόνος t (min)	Έξοδος Μετασχηματιστή	Σύνδεσμος	R (mΩ)	
0	644	6,6	<b>0,036</b>	
15	701	5,4	<b>0,029</b>	
30	708	4,9	<b>0,026</b>	
45	708	4,8	<b>0,026</b>	
60	711	4,7	<b>0,025</b>	
75	709	5	<b>0,027</b>	
90	710	6,6	<b>0,036</b>	
105	710	3,9	<b>0,021</b>	
120	713	4,3	<b>0,023</b>	

Πίνακας 3.4-12: Μετρήσεις για το δοκίμιο 2 σε ροπή 10 Nm

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)														15 Nm	
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	ΔΘ	1ος Αγωγός						2ος Αγωγός						
				+20cm	ΔΘ	+10cm	ΔΘ	+2,5cm	ΔΘ	+20cm	ΔΘ	+10cm	ΔΘ	+2,5cm		ΔΘ
0	27,1	27,1	0	27,1	0	27,1	0	27,1	0	27,1	0	27,1	0	27,1		0
15	27,4	75,8	48,4	77,8	50,4	77,5	50,1	74,4	47	82,4	55	74	46,6	70,2		42,8
30	27,5	85,3	57,8	83,7	56,2	82,7	55,2	82,4	54,9	86,9	59,4	79,3	51,8	77,8		50,3
45	27,5	86,1	58,6	84,8	57,3	83,7	56,2	82,5	55	86,7	59,2	80	52,5	78,7		51,2
60	27,6	86,9	59,3	85,3	57,7	84,3	56,7	83,6	56	88	60,4	80,7	53,1	79		51,4
75	27,6	86,9	59,3	84,6	57	83,1	55,5	83	55,4	87,5	59,9	80,2	52,6	78,2		50,6
90	27,6	87,1	59,5	85,5	57,9	84,8	57,2	83,7	56,1	87,3	59,7	80,1	52,5	78,2		50,6
105	27,6	86,3	58,7	84,4	56,8	83,8	56,2	82,4	54,8	87,4	59,8	80,4	52,8	78,2	50,6	
120	27,6	86,7	59,1	85,4	57,8	83,9	56,3	82,9	55,3	86,9	59,3	80,7	53,1	78,8	51,2	

Πίνακας 3.4-13: Μετρήσεις για το δοκίμιο 2 σε ροπή 15 Nm

	Πτώση Τάσης V (mV)			15 Nm
Χρόνος t (min)	Έξοδος Μετασχηματιστή	Σύνδεσμος	R (mΩ)	
0	637	3,6	<b>0,019</b>	
15	695	3,1	<b>0,017</b>	
30	701	3,4	<b>0,018</b>	
45	707	3,6	<b>0,019</b>	
60	709	4,1	<b>0,022</b>	
75	708	3,5	<b>0,019</b>	
90	705	3	<b>0,016</b>	
105	705	3	<b>0,016</b>	
120	703	4,3	<b>0,023</b>	

Πίνακας 3.4-14: Μετρήσεις για το δοκίμιο 2 σε ροπή 15 Nm

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)														20 Nm	
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	ΔΘ	1ος Αγωγός						2ος Αγωγός						
				+20cm	ΔΘ	+10cm	ΔΘ	+2,5cm	ΔΘ	+20cm	ΔΘ	+10cm	ΔΘ	+2,5cm		ΔΘ
0	26,4	26,4	0	26,4	0	26,4	0	26,4	0	26,4	0	26,4	0	26,4	0	
15	26,7	76,5	49,8	77,7	51	75,5	48,8	68,3	41,6	84,1	57,4	77,9	51,2	70,9	44,2	
30	26,8	84,7	57,9	82,5	55,7	81,1	54,3	76,8	50	90,1	63,3	84,3	57,5	77,6	50,8	
45	26,9	75,4	48,5	82,7	55,8	81,6	54,7	76,9	50	88	61,1	85	58,1	78,5	51,6	
60	27	86,2	59,2	82,9	55,9	82,6	55,6	74,8	47,8	88,8	61,8	85,3	58,3	79,2	52,2	
75	27	86,3	59,3	83,8	56,8	81,5	54,5	76,9	49,9	89,4	62,4	85,9	58,9	79,5	52,5	
90	27	85,8	58,8	83,7	56,7	80,3	53,3	73,3	46,3	89,1	62,1	85,2	58,2	78,9	51,9	
105	27,1	86,2	59,1	83,6	56,5	81,9	54,8	77,2	50,1	89,4	62,3	85,9	58,8	79,1	52	
120	27,1	86,3	59,2	84,1	57	80,8	53,7	74,7	47,6	89	61,9	86	58,9	79,4	52,3	

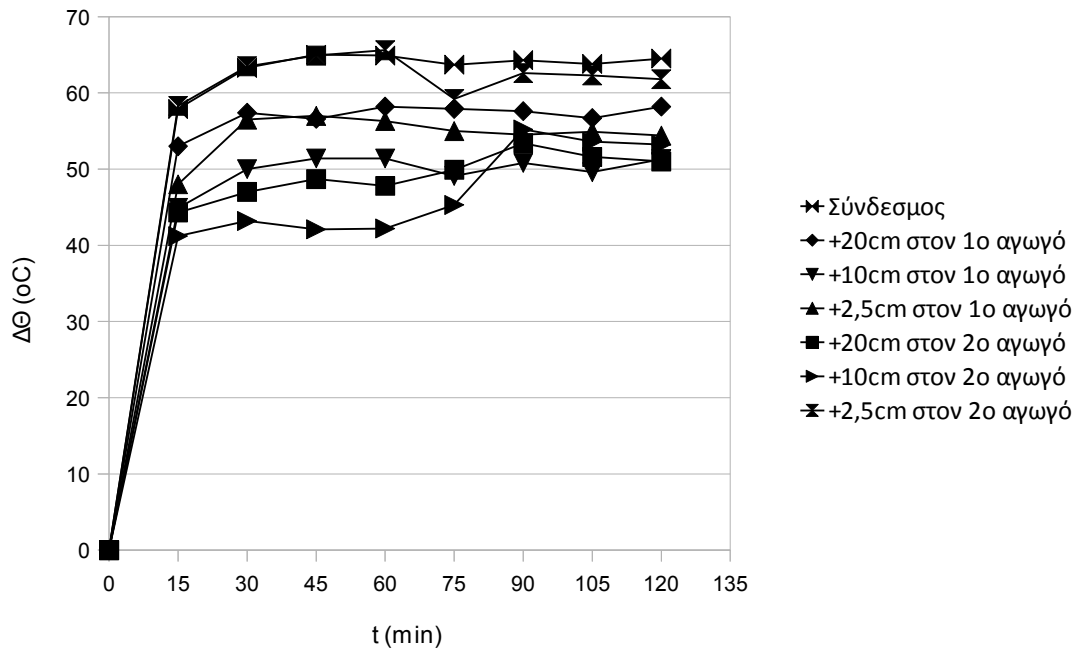
Πίνακας 3.4-15: Μετρήσεις για το δοκίμιο 2 σε ροπή 20 Nm

Χρόνος t (min)	Πτώση Τάσης V (mV)			20 Nm
	Έξοδος Μετασχηματιστή	Σύνδεσμος	R (mΩ)	
0	634	2,8	0,015	
15	687	4,5	0,024	
30	696	5,3	0,029	
45	704	3	0,016	
60	702	2,7	0,015	
75	703	3,3	0,018	
90	701	4,3	0,023	
105	705	2,7	0,015	
120	699	2,8	0,015	

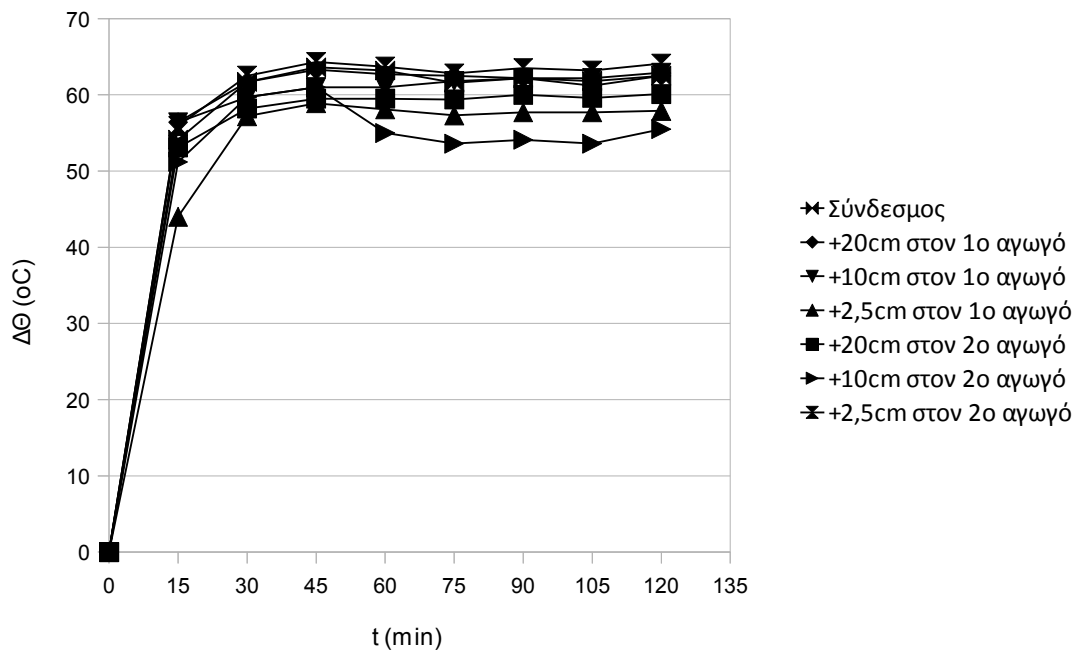
Πίνακας 3.4-16: Μετρήσεις για το δοκίμιο 2 σε ροπή 20 Nm

Από τους προηγούμενους πίνακες, προκύπτουν οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις για το δοκίμιο 2. Στην πρώτη παρουσιάζεται η διαφορά θερμοκρασίας του δοκιμίου και του αγωγού, για μια συγκεκριμένη τιμή της ροπής σύσφιξης. Στην δεύτερη παρουσιάζεται η μεταβολή της διαφοράς θερμοκρασίας του ίδιου δοκιμίου, για όλες τις επιβαλλόμενες τιμές ροπής σύσφιξης. Στην τρίτη γραφική παράσταση παρουσιάζεται η διαφορά δυναμικού του ίδιου δοκιμίου, για όλες τις επιβαλλόμενες τιμές ροπής σύσφιξης.

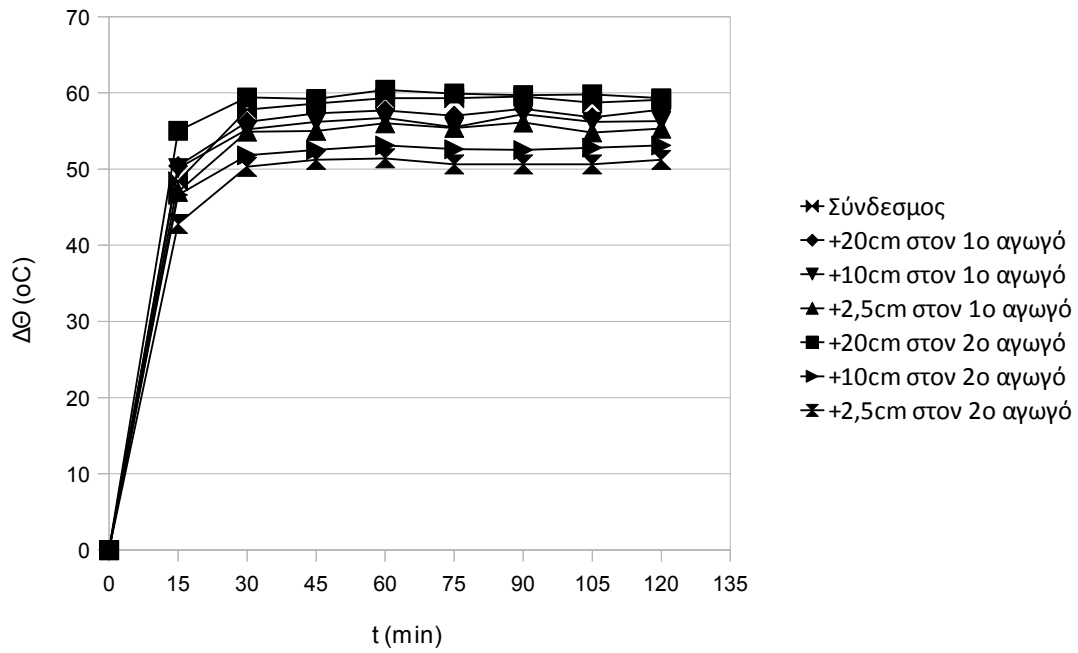
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις για το δοκίμιο 2:



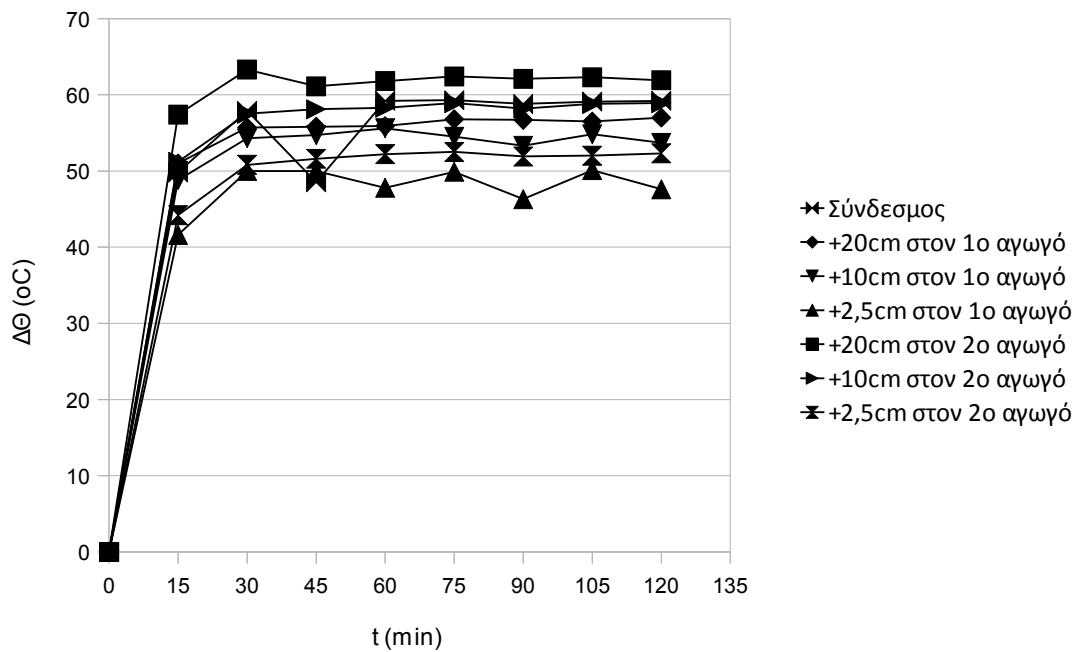
Σχήμα 3.4-10: Διαφορά θερμοκρασίας προς το περιβάλλον στα διάφορα σημεία υπό ροπή 7 Nm, δοκίμιο 2



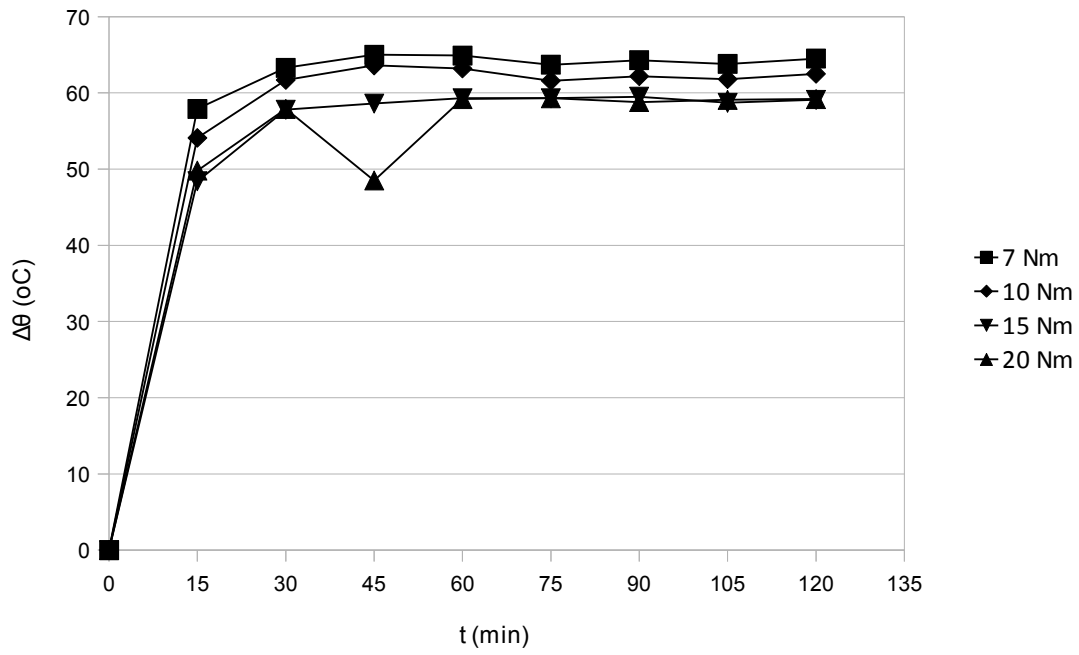
Σχήμα 3.4-11: Διαφορά θερμοκρασίας προς το περιβάλλον στα διάφορα σημεία υπό ροπή 10 Nm, δοκίμιο 2



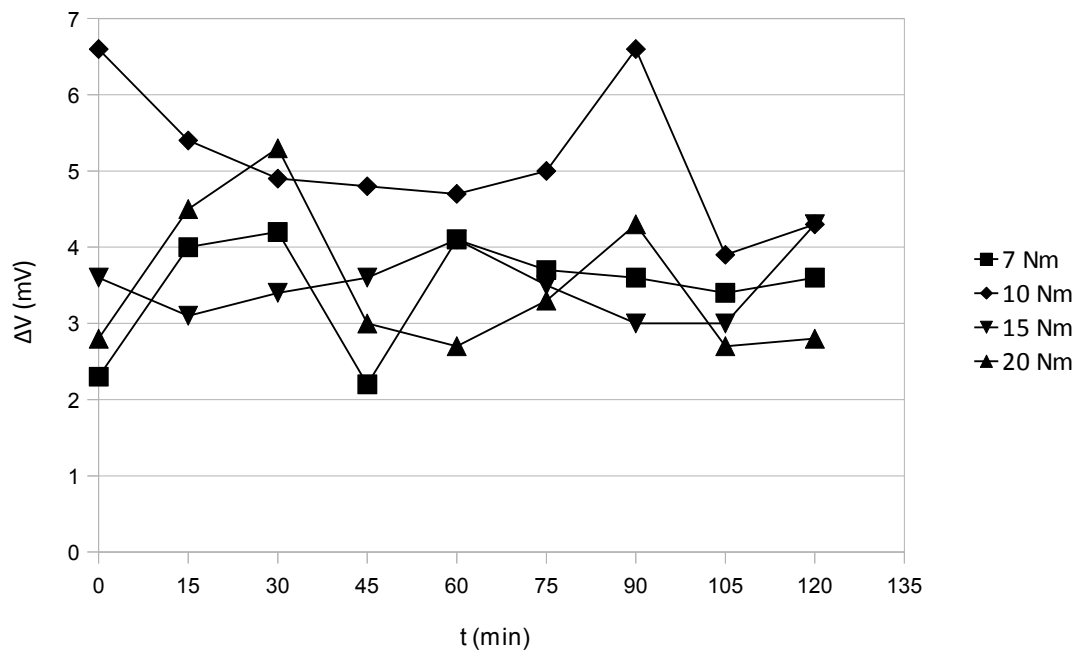
Σχήμα 3.4-12: Διαφορά θερμοκρασίας προς το περιβάλλον στα διάφορα σημεία υπό ροπή 15 Nm, δοκίμιο 2



Σχήμα 3.4-13: Διαφορά θερμοκρασίας προς το περιβάλλον στα διάφορα σημεία υπό ροπή 20 Nm, δοκίμιο 2



Σχήμα 3.4-14: Διαφορά θερμοκρασίας προς το περιβάλλον στο δοκίμιο για διάφορες τιμές ροπής, δοκίμιο 2



Σχήμα 3.4-15: Πτώση τάσης στο δοκίμιο για διάφορες τιμές ροπής, δοκίμιο 2



## 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 4.1 Υπολογισμοί

Από τις μετρήσεις βρέθηκε η αύξηση της θερμοκρασίας του δοκιμίου, η αύξηση της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του κάθε αγωγού και η αντίσταση διάβασης R. Η διαφορά θερμοκρασίας θεωρείται ότι σταθεροποιείται όταν μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων που απέχουν μεταξύ τους μια ώρα, η διαφορά θερμοκρασίας δεν είναι μεγαλύτερη από 1°C.

Η διαφορά θερμοκρασίας ορίζεται από τον τύπο:

$$\Delta\theta = \theta_{\text{δοκ}} - \theta_{\text{περ}} \quad (4.1-1)$$

και η διαφορά δυναμικού στα άκρα του δοκιμίου δίνεται από τον τύπο :

$$R = \frac{\Delta U}{I} \quad (4.1-2)$$

Ο υπολογισμός του ονομαστικού ρεύματος του κάθε συνδέσμου, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έγινε έμμεσα. Πιο συγκεκριμένα, αφού πρώτα έχει υπολογιστεί η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δοκιμίου και περιβάλλοντος, έπειτα θεωρείται ονομαστική διαφορά θερμοκρασίας ίση με 55 °C, σύμφωνα με τους κανονισμούς. Έτσι, υπολογίζουμε το ονομαστικό ρεύμα του συνδέσμου, μέσω του τύπου:

$$I_N = I \cdot \sqrt{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_N}} \quad (4.1-3)$$

όπου: I το ονομαστικό ρεύμα του αγωγού, Δθ η διαφορά θερμοκρασίας δοκιμίου - περιβάλλοντος και Δθ<sub>N</sub> η θεωρητική διαφορά θερμοκρασίας βάσει των κανονισμών ασφαλείας, δηλαδή 55 °C.

Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να έχει επέλθει σταθεροποίηση της διαφοράς θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει όταν μεταξύ δύο μετρήσεων, που απέχουν μεταξύ τους μία ώρα, δεν παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας, με τιμή μεγαλύτερη του 1 °C. Αν υπάρχουν παραπάνω από μια θερμοκρασίες, που παρατηρείται αυτό το φαινόμενο, τότε επιλέγουμε αυτή που η

διαφορά θερμοκρασίας πλησιάζει πιο πολύ στα όρια των προδιαγραφών, δηλαδή τους 55 °C, χωρίς όμως να τους ξεπερνάει.

Ωστόσο, θεωρήθηκε σωστό να γίνει υπολογισμός του ονομαστικού ρεύματος του συνδέσμου και για όριο ασφαλείας 40 °C, προκειμένου να παρατηρηθεί, θεωρητικά, η επίδραση της ροπής σύσφιξης.

Στους πίνακες που ακολουθούν το ονομαστικό ρεύμα και για τις δύο περιπτώσεις ονομαστικής διαφοράς θερμοκρασίας φαίνεται στην γκρι γραμμή.

Με βάση τα προηγούμενα, υπολογίστηκαν, για κάθε περίπτωση, τα ακόλουθα για το δοκίμιο 1, έχοντας ως δεδομένο το ονομαστικό ρεύμα του αγωγού διατομής των 16 mm<sup>2</sup>, το οποίο ισούται με 104 A:

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)					5 Nm
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	ΔΘ	I <sub>N</sub> για ΔΘ <sub>N</sub> =40 °C	I <sub>N</sub> για ΔΘ <sub>N</sub> =55 °C	
0	25	25	0	-	-	
15	25,1	68,6	43,5	99,73	116,94	
30	25	70,6	45,6	97,4	114,22	
45	25,1	71,7	46,6	96,35	112,99	
60	25,1	71	45,9	97,09	113,84	
75	25,1	71,2	46,1	96,88	113,6	
90	25,1	74,4	49,3	93,68	109,85	
105	25,1	73,5	48,4	94,55	110,86	
120	25,2	74,1	48,9	94,06	110,3	

Πίνακας 4.1-1: Υπολογισμοί ονομαστικού ρεύματος για το δοκίμιο 1 σε ροπή 5 Nm

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)					7 Nm
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	$\Delta\theta$	$I_N$ για $\Delta\theta_N=40\text{ }^\circ\text{C}$	$I_N$ για $\Delta\theta_N=55\text{ }^\circ\text{C}$	
0	26,3	26,3	0	-	-	
15	26,6	68,1	41,5	102,1	119,73	
30	26,7	70,4	43,7	99,5	116,67	
45	26,8	69,9	43,1	100,19	117,48	
60	26,8	70,4	43,6	99,61	116,81	
75	26,8	69,9	43,1	100,19	117,48	
90	26,9	70,4	43,5	99,73	116,94	
105	27	70,1	43,1	100,19	117,48	
120	27	70,2	43,2	100,07	117,35	

Πίνακας 4.1-2: Υπολογισμοί ονομαστικού ρεύματος για το δοκίμιο 1 σε ροπή 5 Nm

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)					10 Nm
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	$\Delta\theta$	$I_N$ για $\Delta\theta_N=40\text{ }^\circ\text{C}$	$I_N$ για $\Delta\theta_N=55\text{ }^\circ\text{C}$	
0	26,7	26,7	0	-	-	
15	26,9	67,9	41	102,72	120,45	
30	26,9	70,5	43,6	99,61	116,81	
45	27	71,4	44,4	98,71	115,75	
60	27,1	70,8	43,7	99,5	116,67	
75	27,1	70,4	43,3	99,96	117,21	
90	27,2	71	43,8	99,39	116,54	
105	27,2	71	43,8	99,39	116,54	
120	27,4	70,8	43,4	99,84	117,08	

Πίνακας 4.1-3: Υπολογισμοί ονομαστικού ρεύματος για το δοκίμιο 1 σε ροπή 10 Nm

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)					15 Nm
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	$\Delta\theta$	$I_N$ για $\Delta\theta_N=40\text{ }^\circ\text{C}$	$I_N$ για $\Delta\theta_N=55\text{ }^\circ\text{C}$	
0	27,1	27,1	0	-	-	
15	27,4	68,2	40,8	102,98	120,75	
30	27,4	71	43,6	99,61	116,81	
45	27,4	70,8	43,4	99,84	117,08	
60	27,5	70,6	43,1	100,19	117,48	
75	27,5	71,8	44,3	98,82	115,88	
90	27,5	72,4	44,9	98,16	115,1	
105	27,5	72,1	44,6	98,49	115,49	
120	-	-	-	-	-	

Πίνακας 4.1-4: Υπολογισμοί ονομαστικού ρεύματος για το δοκίμιο 1 σε ροπή 15 Nm

Με βάση τα προηγούμενα, υπολογίστηκαν, για κάθε περίπτωση, τα ακόλουθα για το δοκίμιο 2, έχοντας ως δεδομένο το ονομαστικό ρεύμα του αγωγού διατομής των 35 mm<sup>2</sup>, το οποίο ισούται με 185 A:

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)					7 Nm
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	ΔΘ	I <sub>N</sub> για ΔΘ <sub>N</sub> =40 °C	I <sub>N</sub> για ΔΘ <sub>N</sub> =55 °C	
0	27,6	27,6	0	-	-	
15	27,7	85,6	57,9	153,77	180,31	
30	27,8	91,1	63,3	147,06	172,45	
45	28	93	65	145,13	170,18	
60	28,1	93	64,9	145,24	170,31	
75	27,9	91,6	63,7	146,6	171,9	
90	28	92,3	64,3	145,91	171,1	
105	28	91,8	63,8	146,48	171,77	
120	28,1	92,6	64,5	145,69	170,83	

Πίνακας 4.1-5: Υπολογισμοί ονομαστικού ρεύματος για το δοκίμιο 2 σε ροπή 7 Nm

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)					10 Nm
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	ΔΘ	I <sub>N</sub> για ΔΘ <sub>N</sub> =40 °C	I <sub>N</sub> για ΔΘ <sub>N</sub> =55 °C	
0	28,1	28,1	0	-	-	
15	28,4	82,5	54,1	159,08	186,53	
30	28,4	90,1	61,7	148,96	174,67	
45	28,6	92,2	63,6	146,71	172,04	
60	28,7	91,9	63,2	147,18	172,58	
75	28,7	90,3	61,6	149,08	174,81	
90	28,7	90,9	62,2	148,36	173,96	
105	28,8	90,6	61,8	148,84	174,53	
120	28,8	91,3	62,5	148	173,55	

Πίνακας 4.1-6: Υπολογισμοί ονομαστικού ρεύματος για το δοκίμιο 2 σε ροπή 10 Nm

Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)					15 Nm
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	ΔΘ	I <sub>N</sub> για ΔΘ <sub>N</sub> =40 °C	I <sub>N</sub> για ΔΘ <sub>N</sub> =55 °C	
0	27,1	27,1	0	-	-	
15	27,4	75,8	48,4	168,18	197,21	
30	27,5	85,3	57,8	153,9	180,46	
45	27,5	86,1	58,6	152,85	179,23	
60	27,6	86,9	59,3	151,94	178,17	
75	27,6	86,9	59,3	151,94	178,17	
90	27,6	87,1	59,5	151,69	177,87	
105	27,6	86,3	58,7	152,72	179,07	
120	27,6	86,7	59,1	152,2	178,47	

Πίνακας 4.1-7: Υπολογισμοί ονομαστικού ρεύματος για το δοκίμιο 2 σε ροπή 15 Nm

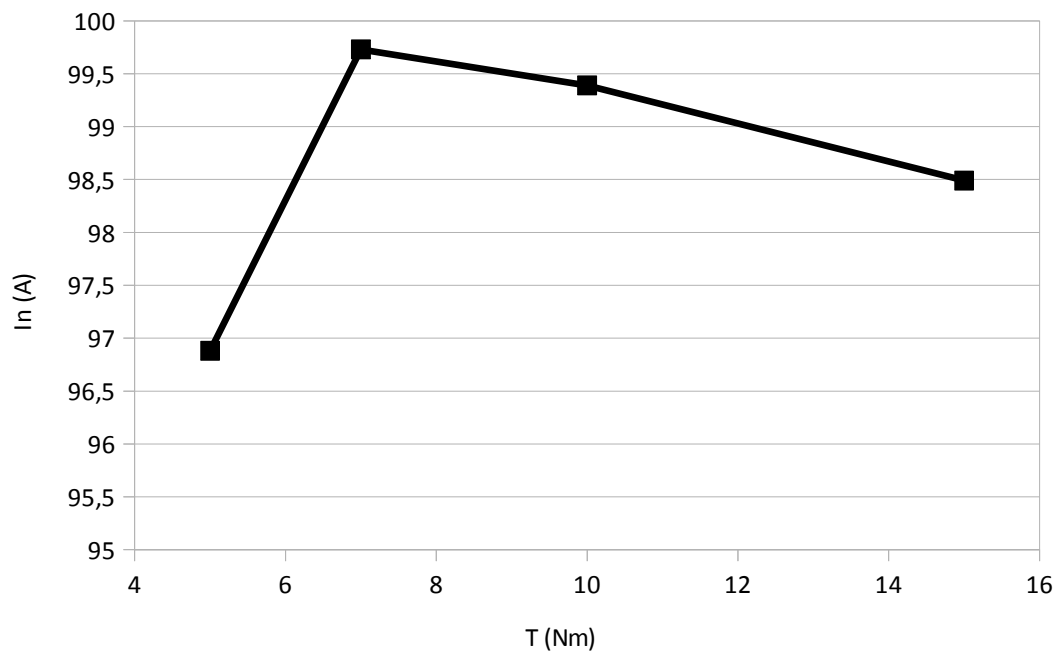
Χρόνος t (min)	Θερμοκρασία (°C)					20 Nm
	Περιβάλλον	Σύνδεσμος	ΔΘ	I <sub>N</sub> για ΔΘ <sub>N</sub> =40 °C	I <sub>N</sub> για ΔΘ <sub>N</sub> =55 °C	
0	26,4	26,4	0	-	-	
15	26,7	76,5	49,8	165,8	194,42	
30	26,8	84,7	57,9	153,77	180,31	
45	26,9	75,4	48,5	168,01	197,01	
60	27	86,2	59,2	152,07	178,32	
75	27	86,3	59,3	151,94	178,17	
90	27	85,8	58,8	152,59	178,92	
105	27,1	86,2	59,1	152,2	178,47	
120	27,1	86,3	59,2	152,07	178,32	

Πίνακας 4.1-8: Υπολογισμοί ονομαστικού ρεύματος για το δοκίμιο 2 σε ροπή 20 Nm

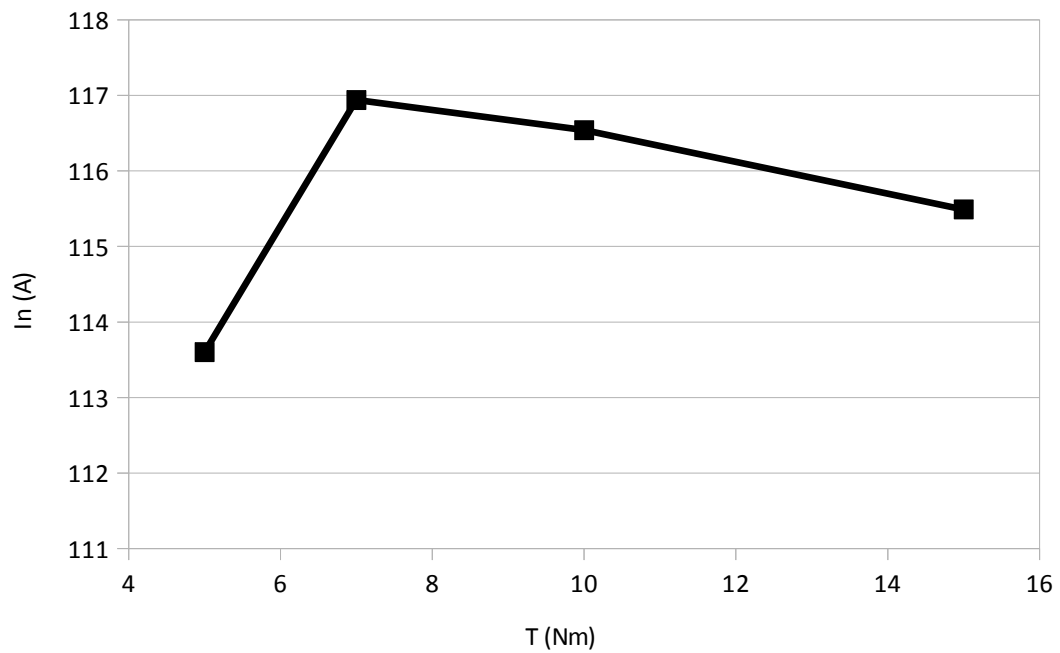
## 4.2 Γραφικές Παραστάσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις για το κάθε δοκίμιο. Στην πρώτη παρουσιάζεται το ονομαστικό ρεύμα του συνδέσμου, σε σχέση με τη ροπή σύσφιξης που εφαρμόζεται σε αυτόν. Τέλος, στην δεύτερη γραφική παράσταση παρουσιάζεται η αντίσταση του δοκιμίου για τις τιμές της ροπής σύσφιξης που εφαρμόστηκε.

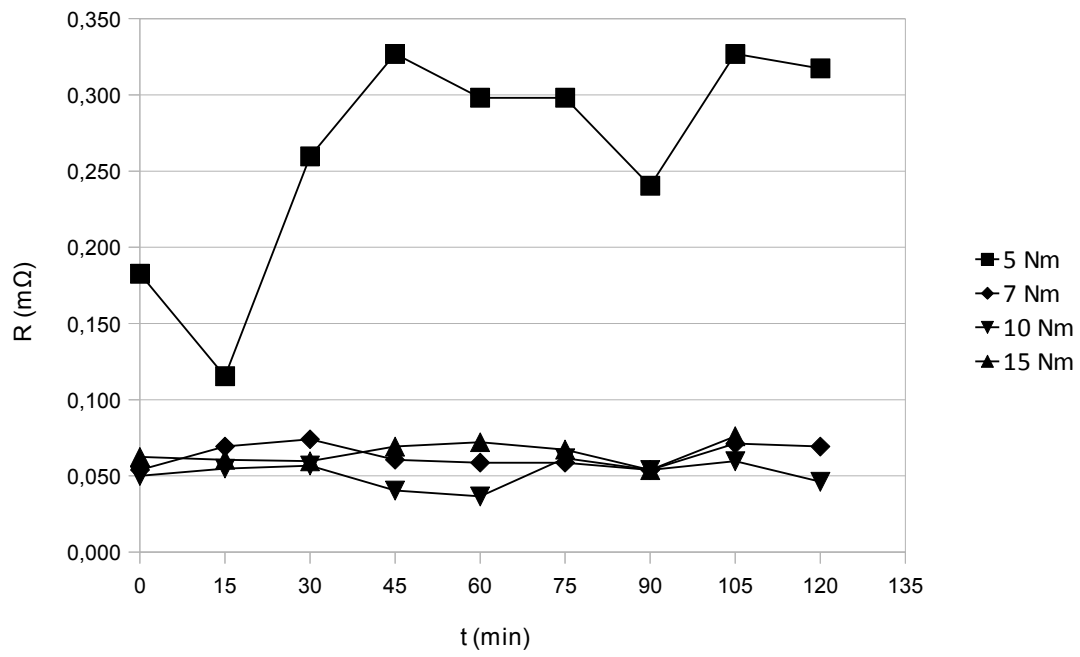
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις για το δοκίμιο 1:



Σχήμα 4.2-1: Ονομαστικό ρεύμα για  $\Delta\theta_N=40$  °C, δοκίμιο 1

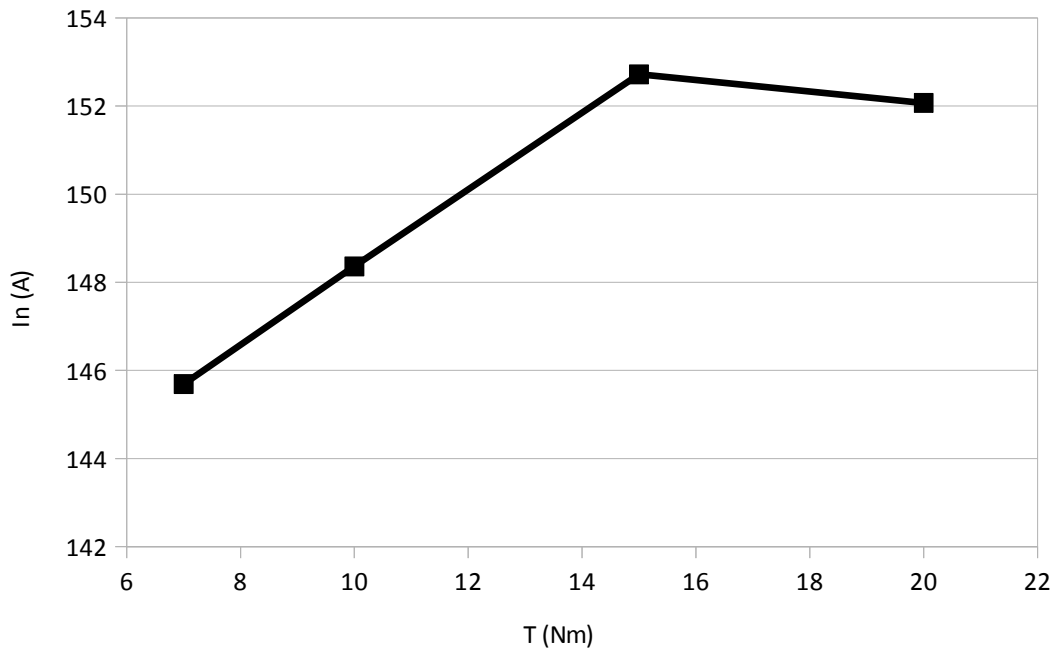


Σχήμα 4.2-2: Ονομαστικό ρεύμα για  $\Delta\theta_N=55$  °C, δοκίμιο 1

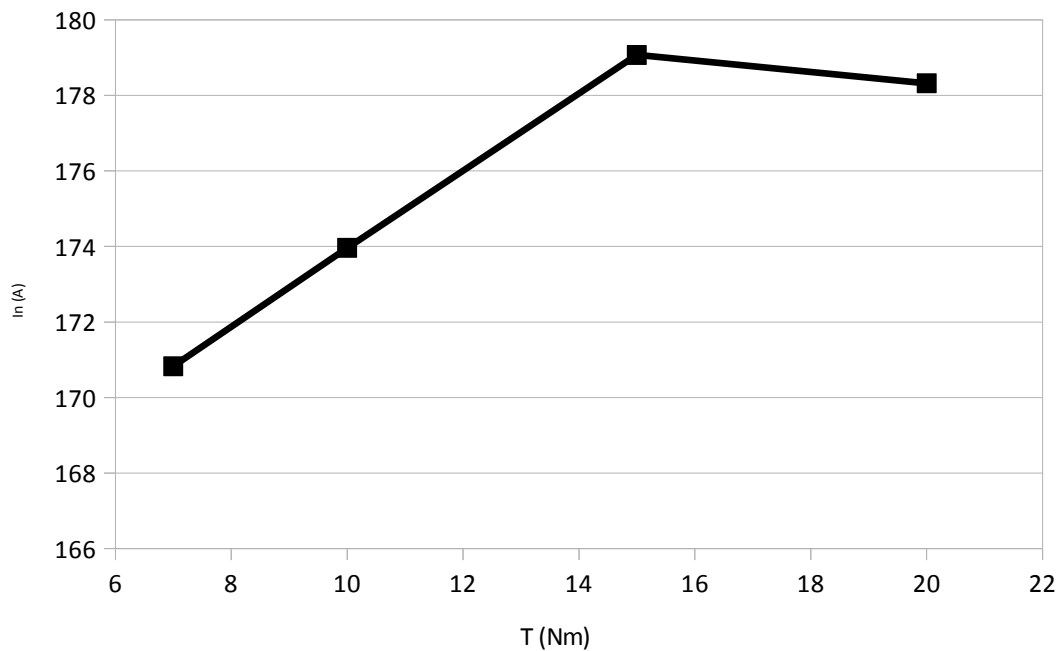


Σχήμα 4.2-3: Αντίσταση επαφής δοκιμίου για διάφορες τιμές ροπής, δοκίμιο 1

Ακολουθούν οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις για το δοκίμιο 2:

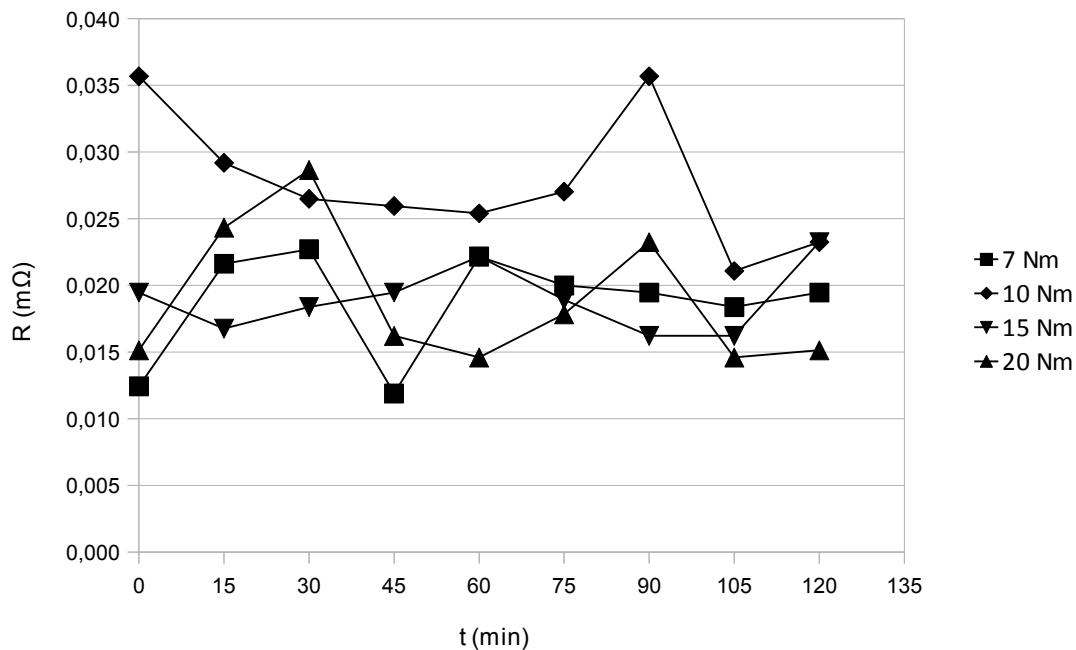


Σχήμα 4.2-4: Ονομαστικό ρεύμα για  $\Delta\theta_N=40$  °C, δοκίμιο 2



Σχήμα 4.2-5: Ονομαστικό ρεύμα για  $\Delta\theta_N=55$  °C, δοκίμιο 2





Σχήμα 4.2-6: Αντίσταση επαφής δοκιμίου για διάφορες τιμές ροπής, δοκίμιο 2

Από τις προηγούμενες γραφικές παραστάσεις, αλλά και από αυτές που παρατέθηκαν στο κεφάλαιο 3, παρατηρεί κανείς εύκολα, ότι η αύξηση της ροπής σύσφιξης του συνδέσμου, οδηγεί σε αύξηση του ονομαστικού ρεύματος του συνδέσμου. Επίσης, αύξηση της ροπής, οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας του συνδέσμου.

Από την διεξαγωγή των μετρήσεων διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασία στο δοκίμιο ήταν υψηλότερη από την αντίστοιχη του αγωγού για κάθε χρονική στιγμή και για σχεδόν όλες τις περιπτώσεις των μετρήσεων. Μικρή διαφοροποίηση παρουσιάζεται στις μετρήσεις που έγιναν με ροπή σύσφιξης 7 Nm στο δοκίμιο 1 και με ροπή σύσφιξης 20 Nm στο δοκίμιο 2, όπου οι θερμοκρασίες στον αγωγό είναι μεγαλύτερες από αυτές του δοκιμίου. Αυτό οφείλεται στο ότι η αντίσταση διάβασης του συνδέσμου ήταν σημαντικά υψηλότερη (ειδικά στις μικρές ροπές σύσφιξης).

Όσον αφορά την συνεισφορά του αγωγού στην τελική θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο δοκίμιο, παρατηρείται πως είναι σημαντική καθώς η θερμοκρασία σε αυτούς είναι αρκετά μεγάλη σε σύγκριση με τη συνολική. Από τις γραφικές παραστάσεις φαίνονται στους αγωγούς πολύ μεγαλύτερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας απ' ό τι στους συνδέσμους. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο επιδερμικό φαινόμενο στους αγωγούς, δηλαδή στη ροή του ρεύματος όχι σε όλη τη διάταξη του αγωγού, αλλά κυρίως στην επιφάνειά του, με αποτέλεσμα να αυξάνει η αντίστασή του και κατά συνέπεια να αυξάνει η θερμοκρασία.

Επίσης, φαίνεται στις γραφικές παραστάσεις, ότι κατά την σταθεροποίηση της διαφοράς της θερμοκρασίας δεν σχηματίζεται ευθεία γραμμή όπως θα αναμενόταν από τη θεωρία αλλά παρουσιάζει διακυμάνσεις και μάλιστα μερικές φορές η διαφορά ξεπερνάει τον 1 °C. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι οι εργαστηριακές συνθήκες δεν ήταν δυνατόν να διατηρηθούν σταθερές καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων, με αποτέλεσμα να μην είναι σταθερή και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Σχετικά με την επίδραση της δύναμης σύσφιξης παρατηρείται πως αυτή επηρεάζει αντιστρόφως ανάλογα τη θερμοκρασία του δοκιμίου. Μεγαλύτερη δύναμη σύσφιξης έχει σαν συνέπεια μικρότερη αντίσταση και η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας στους 55°C επιτυγχάνεται σε μεγαλύτερη τιμή ρεύματος. Το αντίθετο συμβαίνει σε περίπτωση μικρότερης δύναμης σύσφιξης. Υπάρχει, βέβαια, μια τιμή της δύναμης πέρα από την οποία, παρά την αύξηση της δύναμης, δεν παρατηρείται καμία σημαντική μεταβολή της θερμοκρασίας, παρά μόνο μια πολύ μικρή. Αυτό σημαίνει πως η αντίσταση διάβασης R δεν άλλαξε, παρόλο που αυξήθηκε η δύναμη σύσφιξης. Μια μεγαλύτερη αύξηση δεν βελτιώνει την αντίσταση διάβασης και παραμορφώνει τα υλικά άσκοπα.

Μπορεί επίσης να συναχθεί καθαρά, ότι με μεγαλύτερη ροπή σύσφιξης η πτώση τάσης που

παρουσιάζεται είναι συγκριτικά μικρότερη με τις άλλες περιπτώσεις. Αυτό οφείλεται στο ότι η μεγαλύτερη ροπή φέρνει σε καλύτερη επαφή τις επιφάνειες του συνδέσμου, μεγαλώνοντας έτσι την ενεργό επιφάνεια αγωγής του ρεύματος και μικραίνοντας την αντίσταση διάβασης.

Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται πάνω στα άκρα κάθε δοκιμίου φαίνεται ότι είναι σταθερή μετά από κάποια χρονική διάρκεια. Στην αρχή όμως του κάθε πειράματος υπάρχει μία μεταβολή – αυξομείωση στην τιμή της. Η τιμή της διαφοράς δυναμικού είναι αυτή που καθορίζει την τιμή της θερμοκρασίας και της αντίστασης. Αυτό φαίνεται πιο παραστατικά στο δοκίμιο 2.

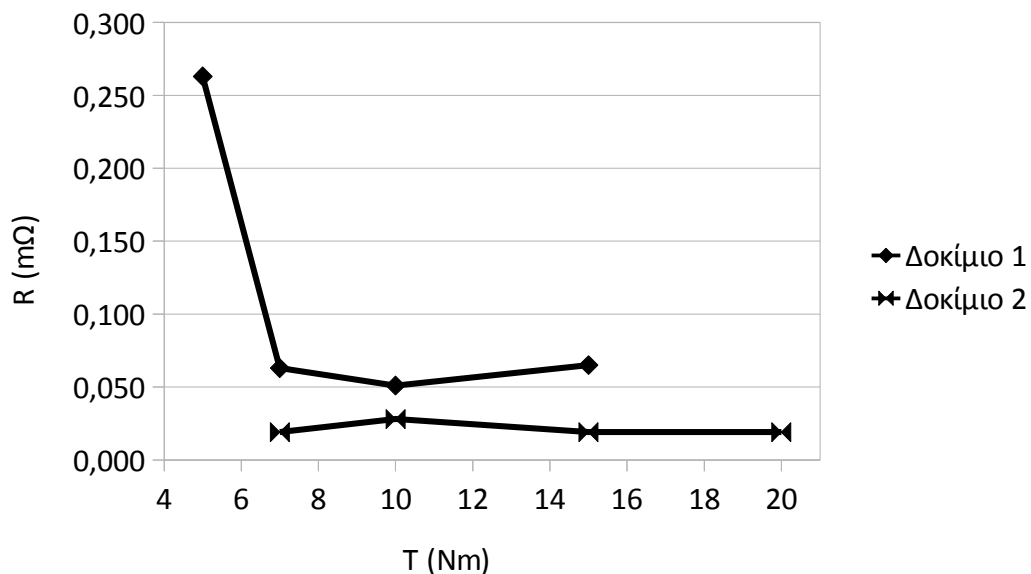
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών τιμών των δοκιμών κατά την επίδραση της δύναμης σύσφιξης στην συμπεριφορά του δοκιμίου. Η διάκριση των μετρήσεων γίνεται σε κάθε γραμμή με βάση την διαφορετική ροπή σύσφιξης κάθε φορά. Δεν χρησιμοποιήθηκαν ίδιες τιμές ροπής και για τα δύο δοκίμια. Για το δοκίμιο 1 χρησιμοποιήθηκαν ροπές οι οποίες ήταν 5, 7, 10 και 15 Nm αντίστοιχα, ενώ στο δοκίμιο 2 χρησιμοποιήθηκαν ροπές 7, 10, 15 και Nm αντίστοιχα.

	T (Nm)	I <sub>N</sub> (A), για Δθ <sub>N</sub> =40 °C	I <sub>N</sub> (A), για Δθ <sub>N</sub> =55 °C	Δθ (°C)		ΔV (mV)		R (mΩ)	
				max	average	max	average	max	average
Δοκίμιο 1	5	96,88	113,6	49,3	46,79	34	27,33	0,327	0,263
	7	99,73	116,94	43,7	43,1	7,7	6,58	0,074	0,063
	10	99,39	116,54	44,4	43,38	6,2	5,31	0,062	0,051
	15	98,49	115,49	44,9	43,53	7,9	6,78	0,076	0,065
Δοκίμιο 2	7	145,69	170,83	64,9	63,43	4,2	3,46	0,023	0,019
	10	148,36	173,96	63,6	61,34	6,6	5,13	0,036	0,028
	15	152,72	179,07	59,5	57,59	4,3	3,51	0,023	0,019
	20	152,07	178,32	59,2	56,48	5,3	3,49	0,029	0,019

Πίνακας 4.2-1: Συγκριτικά αποτελέσματα για τα δύο δοκίμια

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, αύξηση της ροπής σύσφιξης, οδηγεί σε αύξηση του ονομαστικού ρεύματος του συνδέσμου. Επίσης τόσο η πτώση τάσης, όσο και η αντίσταση του συνδέσμου μειώνονται. Ωστόσο αυτό δεν είναι και τόσο εμφανές από τον παραπάνω πίνακα, αλλά πιο εύκολα προκύπτει από τις γραφικές παραστάσεις που παρατήθενται πιο πάνω.

Ακολουθεί ένα διάγραμμα για τη μεταβολή της μέσης τιμής της αντίστασης, που προκύπτει από το μέσο όρο της αντίστασης επαφής, για όλους τους χρόνους, υπό μια συγκεκριμένη τιμή ροπής σύσφιξης, σε σχέση με τη ροπή:



Σχήμα 4.2-7: Συγκριτική μέση αντίσταση του συνδέσμου για τα δύο δοκίμια

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλεται η μέση τιμή της αντίστασης του συνδέσμου σε σχέση με τη ροπή σύσφιξης και για τα δύο δοκίμια. Όπως παρατηρεί κανείς, και στα δύο δοκίμια, αύξηση της ροπής σύσφιξης, οδηγεί σε μείωση της μέσης τιμής της αντίστασης. Μάλιστα, η αρχική τιμή της αντίστασης σε σχέση με την τελική, διαφέρουν κατά ένα πολύ σημαντικό βαθμό.

Σύμφωνα με το πρότυπο και τα δύο δοκίμια ικανοποιούν τις απαιτήσεις, δηλαδή δεν ξεπερνούν την τιμή του  $1\text{m}\Omega$  για την αντίσταση που εμφανίζουν. Εξαίρεση αποτελεί η πρώτη μέτρηση για το δοκίμιο 1, η οποία έγινε με άλλη διάταξη, καθώς δεν έγινε χρήση της τράπεζας χειρισμών, αλλά ο καθορισμός του ρεύματος γινόταν χειροκίνητα μέσω του Variac και πιθανώς να είναι αυτή η αιτία της μεγάλης διαφοράς στην τιμή της αντίστασης. Ωστόσο παρατηρείται ότι το δοκίμιο 1 έχει μικρότερη τιμή αντίστασης σε σχέση με το δοκίμιο 2.

## 5. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με όλα τα προαναφερθέντα, αλλά και με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν, συμπεραίνεται, ότι η ροπή σύσφιξης του συνδέσμου παίζει ένα τεράστιο ρόλο στον καθορισμό τόσο του ονομαστικού ρεύματος αυτού, όσο και στην θερμοκρασία του. Επίσης η ροπή σύσφιξης έχει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της πτώσης τάσης που θα εμφανιστεί στο σύνδεσμο, αλλά και στην αντίστασή του, καθώς η αύξηση της ροπής σύσφιξης μειώνει την αντίσταση διάβασης του δοκιμίου.

Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνει η ροπή σύσφιξης τόσο μειώνεται η θερμοκρασία στο σύνδεσμο και επομένως αυξάνεται το ονομαστικό ρεύμα του συνδέσμου. Αυτό όμως γίνεται μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή ροπής σύσφιξης, πέρα από την οποία τόσο η θερμοκρασία όσο και το ονομαστικό ρεύμα παραμένουν σχεδόν σταθερά. Επίσης παρατηρείται μείωση της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του συνδέσμου και επομένως και της αντίστασης που αυτός εμφανίζει. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα καλύτερη λειτουργία του συνδέσμου και μεγαλύτερη ασφάλεια για το σύστημά μας.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα έχει γίνει αντιληπτό, ότι η μειωμένη ροπή σύσφιξης στους λυόμενους συνδέσμους μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα, με σημαντικότερο αυτό της υπερθέρμανσης. Από αυτό είναι εμφανές ότι η τελική θερμοκρασία αποκατάστασης κάθε φορά είναι μικρότερη, όσο μεγαλύτερη είναι η ροπή. Ως απόλυτα μεγέθη προκύπτει ότι η τελική θερμοκρασία και η ροπή σύσφιξης είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα.

Η τιμή της αντίστασης διάβασης επηρεάζεται κυρίως από το είδος των υλικών, τη δύναμη σύσφιξης των επαφών και γενικά από τη γεωμετρία του λυομένου συνδέσμου, από την οποία εξαρτάται η απαγωγή της θερμότητας Joule. Πολύ μεγάλη σημασία για τη διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης διάβασης έχουν οι ξένες επικαθίσεις στους συνδέσμους, οι οποίες μπορεί να είναι

χημικές ενώσεις όπως οξείδια, οργανικές ουσίες, σκόνη κ.λ.π

Φαίνεται λοιπόν την σπουδαιότητα της ροπής σύσφιξης, αφού στην περίπτωση που παρουσιάζεται μεγάλη αντίσταση, θα παρουσιάζεται ως επακόλουθο έντονο φαινόμενο Joule και τελικά μεγάλη ανύψωση της θερμοκρασίας, πράγμα που γενικότερα δεν είναι επιθυμητό.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **R. Holm**: Electric Contacts, Theory and Applications - Εκδόσεις Springer
2. **Κυριάκος Βασιλάκης**: Διερεύνηση της επίδρασης της ροπής σύσφιξης στην αξιοπιστία των στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων – Διπλωματική εργασία, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π
3. **Κ. Θ. Δέρβος**: Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π
4. **Περικλής Δ. Μπούρκας**: Ασκήσεις Κτιριακών – Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων (Υποσταθμός μέσης τάσης, βραχυκύκλωμα – γειώσεις), Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π
5. **Περικλής Δ. Μπούρκας**: Εισαγωγή στο μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό σχέδιο, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π