



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

Διερεύνηση των φαινομένων σε συνδέσμους εναέριων
αγωγών Μέσης Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μίχος Άλκης
Παναγόπουλος Σπυρίδων

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2016



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

**Διερεύνηση των φαινομένων σε συνδέσμους εναέριων
αγωγών Μέσης Τάσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μίχος Άλκης
Παναγόπουλος Σπυρίδων

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Ιουλίου 2016

.....

Κ.Γ.Καραγιαννόπουλος
Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Π.Θ.Τσαραμπάρης
Λέκτορας ΕΜΠ

.....

Α.Δ.Πολυκράτη
Ε.ΔΙ.Π. ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2016

.....

Μίχος Άλκης

.....

Παναγόπουλος Σπυρίδων

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

Copyright © Μίχος Άλκης, Παναγόπουλος Σπυρίδων, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων, της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Κ. Καραγιανόπουλο για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ. Π. Τσαραμπάρη, Λέκτορα ΕΜΠ και κ. Α. Πολυκράτη, Ε.Δι.Π. ΕΜΠ. Θερμές ευχαριστίες οφείλουμε στην κ. Πολυκράτη, για την πολύτιμη βοήθειά της σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής, καθώς επίσης και στον κ. Τετράδη, μέλος του Κ.Δ.Ε.Π. της Δ.Ε.Η. για τις πολύ χρήσιμες πληροφορίες που μας έδωσε. Τέλος, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Αθανασιάδη για τις γνώσεις και την υπομονή που προσέφερε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, για την δημιουργία αυτής της διπλωματικής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία θεωρητική εισαγωγή στην οποία περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών επαφών και πιο συγκεκριμένα των στατικών ηλεκτρικών επαφών. Αναλυτικότερα περιγράφονται η αντίσταση στένωσης ως όρος, η δύναμη σύσφιξης, οι επικαθίσεις στην επιφάνεια των ηλεκτρικών επαφών και γενικότερα οι παράγοντες που επιδρούν στις ηλεκτρικές επαφές. Επίσης γίνεται αναφορά στις διατάξεις μέτρησης και αξιολόγησης των στατικών ηλεκτρικών επαφών. Τέλος, παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε πριν την δημιουργία αυτής της διπλωματικής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται ο σκοπός της εργασίας και η σημασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία, η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, καθώς επίσης και τα μέρη τα οποία την αποτελούν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων, σχολιάζονται και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν απ' αυτά.

Τέλος, στο παράρτημα δίνονται οι αναλυτικοί πίνακες των μετρήσεων όπως αυτοί προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία.

Λέξεις κλειδιά: ηλεκτρικοί σύνδεσμοι, ηλεκτρικές επαφές, δοκιμή υπερθέρμανσης, αντίσταση επαφής, αντίσταση στένωσης

ABSTRACT

The first chapter is a theoretical introduction, where the electrical contacts and all their main characteristics are analyzed. An in depth analysis of the electrical contacts, the constriction resistance, the surficial oxides and of all the contaminants and factors which affect electrical contacts, is also included. In addition, methods to measure and evaluate electrical contacts are mentioned. In the end, the bibliography review is presented which had conducted before the creation of this thesis.

In the second chapter, the purpose of the thesis is presented, as well as the importance of the experiment results.

In the third chapter, the experiment procedure is explained and the measurement circuit, with its components is presented.

In the fourth chapter, are given the charts with the results of the measurements.

In the fifth chapter, is given a summary of the results, with the comments and the conclusions that occur.

In the end, the tables containing the results of the experiment are presented in the appendix.

Keywords: bolted connectors, electrical contacts, overheating test, contact resistance, constriction resistance

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή

1.1. Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	13
1.2. Το εναέριο δίκτυο διανομής Μέσης Τάσης	13
1.3. Οι αγωγοί του δικτύου Διανομής	15
1.3.1. Αγωγοί από Χαλκό	16
1.3.2. Αγωγοί από Αλουμίνιο	16
1.3.3. Αγωγοί από Αλουμίνιο - Χάλυβα (ACSR)	16
1.4. Ηλεκτρικοί σύνδεσμοι	17
1.4.1. Η δύναμη σύσφιξης στις στατικές ηλεκτρικές επαφές	18
1.4.2. Πραγματική Επιφάνεια Επαφής	18
1.4.3. A-spots	19
1.4.4. Φορτίο επαφής	19
1.5. Αντίσταση στένωσης και αντίσταση στρώματος επικαθίσεων	20
1.6. Θερμοκρασία ενός ηλεκτρικά θερμαινόμενου a-spot	25
1.6.1. Σχέση Τάσης-Θερμοκρασίας	25
1.6.2. Η σχέση Τάσης-Θερμοκρασίας με εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία ειδική ηλεκτρική αντίσταση και θερμική αγωγιμότητα	26
1.6.3. Ο Νόμος Wiedemann-Franz	27
1.6.4. Η πτώση τάσης σε μία επαφή σε σχέση με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται	28
1.6.5. Χαρακτηριστική καμπύλη αντίστασης διάβασης-πτώσης τάσης και διαφοράς θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην επαφή	30
1.7. Οξειδία σε επαφές διακοπών και η σημασία της θερμοκρασίας στην αύξηση του πάχους τους	31
1.8. Γαλβανική διάβρωση	33
1.9. Επίδραση της υγρασίας	34
1.10. Η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος	35
1.11. Οι διατάξεις μέτρησης και αξιολόγησης των στατικών ηλεκτρικών επαφών	38
1.11.1. Η δοκιμή υπερθέρμανσης	38
1.11.2. Διηλεκτρικές δοκιμές διακοπών	39
1.11.3. Δοκιμή μηχανικής αντοχής	39
1.11.4. Δοκιμή υπό τριπολικό βραχυκύκλωμα	39

1.12.	Ανασκόπηση βιβλιογραφίας	39
2.	Σκοπός της εργασίας	44
3.	Κύκλωμα και διαδικασία μετρήσεων	45
3.1.	Αυτομετασχηματιστής	48
3.2.	Μετασχηματιστής Έντασης	49
3.3.	Οι αγωγοί	50
3.4.	Αισθητήρες θερμοκρασίας	50
3.5.	Καταγραφικό αισθητήρων θερμοκρασίας	51
3.6.	Θάλαμος περιβαλλοντικών δοκιμών	52
3.7.	Αμπερόμετρο	52
3.8.	Παλμογράφος	53
3.9.	Ροπόκλειδο	54
3.10.	Διάταξη θαλάμου	55
4.	Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας	56
4.1.1.	Μετρήσεις για τον πρώτο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένο στα 20Nm	57
4.1.2.	Μετρήσεις για τον πρώτο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένο στα 15Nm	59
4.2.1.	Μετρήσεις για τον δεύτερο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένο στα 20Nm.	61
4.2.2.	Μετρήσεις για το δεύτερο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένο στα 15Nm	63
4.3.1.	Μετρήσεις για τον πρώτο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 20Nm.	65
4.3.2.	Μετρήσεις για τον πρώτο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 15Nm.	67
4.4.1.	Μετρήσεις για το δεύτερο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 20Nm.	69
4.4.2.	Μετρήσεις για το δεύτερο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 20Nm.	71
5.	Σχόλια – Συμπεράσματα	73
5.1	Σχέση διερχόμενου ρεύματος και εμφανιζόμενης πτώσης τάσης συνδέσμου	73
5.2	Σχέση διερχόμενου ρεύματος και εμφανιζόμενης αντίστασης συνδέσμου	73
5.3	Σχέση διερχόμενου ρεύματος και παραγόμενης θερμοκρασίας συνδέσμου	74

5.4 Ρόλος συνθηκών περιβάλλοντος και ροπής σύσφιξης στη συμπεριφορά των συνδέσμων μέσης τάσης	75
Βιβλιογραφία	76
Παράρτημα	77

1. Εισαγωγή

1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός Σ.Η.Ε. είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να διακριθούν σε επιμέρους υποσυστήματα: το σύστημα παραγωγής (Generation Subsystem), τα δίκτυα μεταφοράς (Transmission and Subtransmission Subsystem) και διανομής (Distribution Subsystem) και οι ζυγοί των φορτίων (Utilization Subsystem).

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζεται η διαδικασία ηλεκτρομηχανικής μετατροπής μίας πρωτογενούς μορφής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στο σύστημα παραγωγής ανήκουν επίσης οι μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης για τη σύνδεση στο δίκτυο μεταφοράς.

Το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από γραμμές μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσης (στο ελληνικό δίκτυο 400kV, 150kV και 66kV), οι οποίες μπορεί να είναι εναέριες, υπόγειες είτε υποβρύχιες. Στο δίκτυο διανομής η ενέργεια μεταφέρεται από τους υποσταθμούς διανομής στις περιοχές κατανάλωσης και από εκεί διανέμεται στους καταναλωτές. Οι καταναλωτές χωρίζονται σε βιομηχανικούς καταναλωτές (μέσης τάσης 15 και 20 kV), εμπορικούς και οικιακούς (χαμηλής τάσης 400V).

1.2 Το εναέριο δίκτυο διανομής Μέσης Τάσης

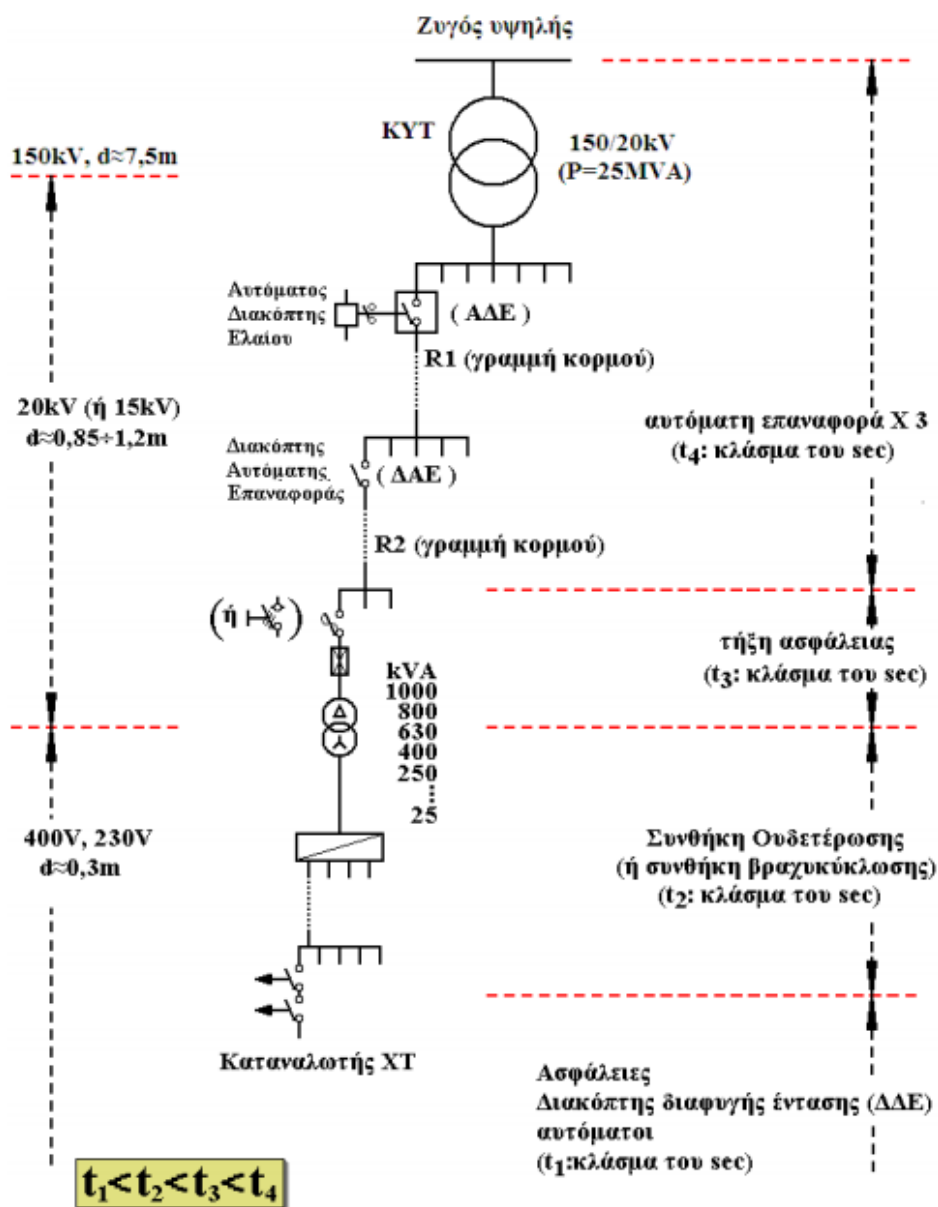
Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης. Τα δίκτυα διανομής είναι τριφασικά και φτάνουν μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας. Μετά το μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, η οποία περιλαμβάνει το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης.

Διακρίνονται δύο βαθμίδες διανομής, η διανομή μέσης τάσης ή αλλιώς πρωτεύουσα διανομή, και η διανομή χαμηλής τάσης ή αλλιώς δευτερεύουσα διανομή. Τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης τροφοδοτούνται από τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, από υψηλή σε μέση, και τροφοδοτούν τους υποσταθμούς διανομής και τους καταναλωτές μέσης τάσης.

Τα εναέρια δίκτυα μέσης τάσης του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από μεγάλο πλήθος στοιχείων και έχουν κατά κανόνα δενδροειδή μορφή. Στο σχήμα 1.2-1 φαίνεται απλοποιημένα ένα παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με αυτό, από το μετασχηματιστή υψηλής τάσης (150kV/20kV, 25MVA) του Κέντρου Υψηλής Τάσης (KYT) αναχωρούν μέσω αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ) διάφορες γραμμές μέσης τάσης (20kV), που η καθεμία αφορά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ευρύτερη περιοχή. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται γραμμές κορμού και

κατασκευάζονται με αγωγούς μεγάλης διατομής, συνήθως 95mm^2 ισοδύναμου χαλκού, ενώ συμβολίζονται στα σχέδια με το γράμμα R και ένα αριθμό (π.χ. R 23). Κάθε μία από τις παραπάνω γραμμές διακλαδίζεται σε ορισμένες γραμμές, που αφορούν την ηλεκτροδότηση τμημάτων της ευρύτερης περιοχής μέσω διακοπών αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ), οι οποίες ονομάζονται επίσης γραμμές κορμού.

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



Σχήμα 1.2-1: Απλοποιημένο παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας

Όταν συμβεί ένα σφάλμα σε μία γραμμή κορμού (π.χ. βραχυκύκλωμα λόγω πτώσης ενός κλαδιού στη γραμμή), τότε ο διακόπτης προστασίας (ΑΔΕ ή ο ΔΑΕ) θα διακόψει αυτομάτως στη θέση εντός για να ηλεκτροδοτηθεί η γραμμή και αν υπάρχει ακόμα το σφάλμα θα γίνει και πάλι αυτόματη διακοπή και ακολούθως αυτόματη εκ νέου ηλεκτροδότηση. Αν και κατά τη δεύτερη αυτή αυτόματη προσπάθεια του διακόπτη συνεχίζει να υπάρχει το σφάλμα θα γίνει και μία τρίτη αυτόματη διακοπή - εκ νέου ηλεκτροδότηση και μόνο αν εξακολουθεί να υπάρχει το σφάλμα θα συμβεί πλέον οριστική διακοπή ρεύματος της εν λόγω γραμμής κορμού. Είναι προφανές ότι η προαναφερθείσα σε τρεις κύκλους λειτουργία των ΑΔΕ και των ΔΑΕ αποσκοπεί, σε περιπτώσεις εμφάνισης παροδικών σφαλμάτων, τόσο στην προσπάθεια για απρόσκοπτη ηλεκτροδότηση μίας μεγάλης περιοχής, όσο και στην αποφυγή άσκοπων μετακινήσεων συνεργείων. Σημειώνεται ότι η διακοπή της ηλεκτροδότησης σε κάθε κύκλο λειτουργίας των ΑΔΕ και των ΔΑΕ συμβαίνει πάντοτε σε κλάσματα δευτερολέπτου (π.χ. 0,15, 0,35 δευτερόλεπτα), που στην πράξη σημαίνει πως δεν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χρόνος για την εκδήλωση αξιόλογων θερμικών φαινομένων (δεν προκαλείται υπερθέρμανση της γραμμής πάνω από τα ανεκτά όρια, πολύ δε περισσότερο δεν δημιουργούνται τήγματα μετάλλου από τους αγωγούς).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2-1, οι γραμμές κορμού μέσω των ΔΑΕ διακλαδίζονται με τη σειρά τους σε χαμηλή τάση (20kV/400V, 230V). Οι υποσταθμοί αυτοί διακρίνονται σε υπαίθριους επί στύλων ισχύος μέχρι 400kVA και σε εσωτερικού χώρου (συνήθως σε υπόγεια πολυκατοικιών) μεγαλύτερης ισχύος από 400kVA. Στους υπαίθριους υποσταθμούς η γραμμή μέσης τάσης ηλεκτροδοτεί τον μετασχηματιστή μέσω μονοπολικών ασφαλειοαποζευκτών ή τριπολικών αποζευκτών, ενώ στους υποσταθμούς εσωτερικού χώρου η ηλεκτροδότηση του μετασχηματιστή γίνεται μέσω συγκροτήματος πινάκων. Σημειώνεται ότι για λόγους διασύνδεσης ή απομόνωσης γραμμών υπάρχουν στις γραμμές μέσης τάσης μονοπολικοί ασφαλειοαποζεύκτες και τριπολικοί αποζεύκτες μη εντασσόμενοι σε υπαίθριους υποσταθμούς.

Η παροχή χαμηλής τάσης (400V, 230V) σε πελάτες χαμηλής τάσης γίνεται μέσω γραμμής χαμηλής τάσης (από γυμνούς αγωγούς αλουμινίου ή συνεστραμμένα καλώδια) που ξεκινούν από τον πίνακα χαμηλής τάσης (ασφαλειοκιβώτιο) του υποσταθμού (σχήμα 1.2-1). Τα συνεστραμμένα καλώδια αποτελούν την σύγχρονη εξέλιξη των γραμμών διανομής χαμηλής τάσης.

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

1.3 Οι αγωγοί του δικτύου διανομής

Οι αγωγοί πρέπει να αντέχουν στη μηχανική και στη θερμική καταπόνηση και στην περίπτωση της μέσης τάσης να μην προκαλούν απώλειες Κορώννα (δηλαδή ηλεκτρική διάσπαση του αέρα περί τον αγωγό). Σαν αγωγοί χρησιμοποιούνται πολύκλινα συρματόσχοινα, για λόγους ευκαμψίας. Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται είναι χωρίς μόνωση και κατασκευάζονται από χαλκό (Cu), αλουμίνιο (Al) ή αλουμίνιο-χάλυβα (ACSR). Σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται αγωγοί από άλλα υλικά και κράματα (π.χ. από γαλβανισμένο χάλυβα, φωσφορούχο ορείχαλκο κλπ.). Στη χαμηλή τάση εκσυγχρονίζονται πλέον τα δίκτυα μέσω συνεστραμμένων καλωδίων.

Οι αγωγοί κατασκευάζονται μονόκλωνοι ή πολύκλωνοι. Στα εναέρια δίκτυα δεν χρησιμοποιούνται μονόκλωνοι αγωγοί, γιατί έχουν πολύ μικρότερη μηχανική αντοχή από

τους πολύκλωνους. Επίσης οι μονόκλωνοι είναι δύσκαμπτοι και η διατομή τους είναι μέχρι 16 mm^2 . Οι αγωγοί χαλκού και αλουμινίου αποτελούνται από κλώνους της ίδιας διατομής ανά διατομή αγωγού και παίρνουν τη μορφή των συρματόσχοινων. Οι αριθμοί των κλώνων είναι κυρίως 7, 19, 37, 61 κλπ.

1.3.1 Αγωγοί από χαλκό

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

1.3.2 Αγωγοί από αλουμίνιο

Το αλουμίνιο είναι τρεις φορές ελαφρύτερο από τον χαλκό και έχει και μικρότερο κόστος, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω. Μειονεκτεί όμως στο γεγονός ότι έχει το 60% περίπου της αγωγιμότητας του χαλκού, καθώς και μόνο το 50% της μηχανικής αντοχής του.

Έτσι ένας αγωγός αλουμινίου με ισοδύναμη διατομή με αγωγό από χαλκό έχει το μισό του βάρος και διάμετρο μεγαλύτερη κατά 1,6 φορές (60% μεγαλύτερη). Τα παραπάνω δείχνουν ότι ο αγωγός από αλουμίνιο δέχεται μεγαλύτερες επιφορτίσεις από τον άνεμο και τον πάγο λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειάς του.

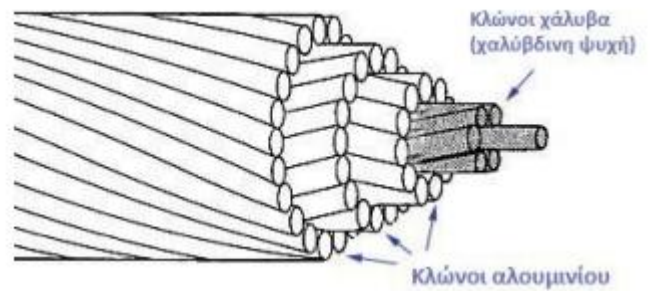
Το αλουμίνιο με κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες οξειδώνεται (σκουριάζει) επιφανειακά. Το στρώμα της οξείδωσης είναι πολύ λεπτό και προστατεύει τον αγωγό από την παραπέρα οξείδωση. Κοντά στη θάλασσα όμως (σε απόσταση μέχρι 1 km περίπου) διαβρώνεται από το αλάτι που περιέχεται στον αέρα, σε βάθος μέχρι 3 mm. Οι αγωγοί αλουμινίου χρησιμοποιούνται κυρίως στις γραμμές χαμηλής τάσης και μακριά από τη θάλασσα. Στις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης δεν χρησιμοποιούνται γιατί έχουν μικρή μηχανική αντοχή (οι πυλώνες απέχουν πολύ μεταξύ τους και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις στους αγωγούς είναι πολύ μεγάλες).

1.3.3 Αγωγοί από Αλουμίνιο – Χάλυβα (ACSR)

Το μειονέκτημα των αγωγών αλουμινίου αντιμετωπίζεται με επιτυχία με τους αγωγούς ACSR (Aluminum conductor steel-reinforced cable). Αυτοί έχουν ψυχή από κλώνους με γαλβανισμένο χάλυβα, όπως φαίνεται και στα σχήματα 1.1.3-1, 1.1.3-2. Ο χάλυβας αναλαμβάνει τη μηχανική αντοχή και το αλουμίνιο την ηλεκτροδότηση. Το ρεύμα οδεύει κυρίως μέσα από το αλουμίνιο, δηλαδή το ρεύμα μέσα από το χάλυβα είναι αμελητέο.



Σχήμα 1.1.3-1: Αγωγός ACSR



Σχήμα 1.1.3-2: Αγωγός ACSR

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

Οι αγωγοί ACSR χαρακτηρίζονται κατά DIN ως εξής: Al/St = διατομή του Al/ διατομή του St. (π.χ. Al/St 185/32 σημαίνει αγωγός με 185 mm² Al και 32 mm² St). Σε σύνθετους αγωγούς η σχέση διατομών Al/St είναι συνήθως ίση με 6, ενώ σε μεγάλες διατομές μπορεί να φτάσει και το 20. Οι πολύκλωνοι ACSR αγωγοί αποτελούνται από 1 έως 3 στρώματα χαλύβδινων συρμάτων και 1 έως 3 στρώματα συρμάτων αλουμινίου. Τα σύρματα είναι συνεστραμμένα και μάλιστα η διεύθυνση συστροφής είναι αντίθετη σε δύο γειτονικά στρώματα, πράγμα που εξασφαλίζει μία καλή συνοχή του συρματοσχοινού.

1.4 Ηλεκτρικοί σύνδεσμοι

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

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

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

- τις στατικές ηλεκτρικές επαφές (stationary electrical contacts) : είναι οι επαφές που δεν έχουν ισχύ διακοπής, μπορούν δηλαδή να χειρίζονται μόνο όταν το κύκλωμα έχει τεθεί εκτός τάσης μέσω ενός διακόπτη) όπως οι επαφές ενός αποζεύκτη ή ενός γειωτή.

- και τις ηλεκτρικές επαφές που έχουν ισχύ διακοπής, χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητά τους να διακόπτουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, χωρίς να υφίστανται συνέπειες στη συμπεριφορά τους από το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται κατά το χειρισμό του φορτίου, όπως συμβαίνει με τις επαφές των διακοπών ισχύος και των διακοπών φορτίου.

1.4.1 Η δύναμη σύσφιξης στις στατικές ηλεκτρικές επαφές

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

Τα μέταλλα από τα οποία κατασκευάζονται συνήθως οι επαφές έχουν, για λόγους διευκόλυνσης της διάβασης του ρεύματος, μεγάλη ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Για το λόγο αυτό η σκληρότητα των μετάλλων 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 . Η κατανομή των παραπάνω περιοχών είναι στατιστική και εξαρτάται κυρίως από το είδος των υλικών και την τραχύτητα των επιφανειών.

Υπάρχει μία εμπειρική σχέση που συνδέει την δύναμη σύσφιξης με την επιφάνεια σύσφιξης η οποία είναι:

$$F = \xi \cdot H \cdot A_b \quad (1.4.1-1)$$

όπου είναι η σκληρότητα της επαφής και ένας συντελεστής αναλογίας που κυμαίνεται από 0,2 έως 1.

1.4.2 Πραγματική Επιφάνεια Επαφής

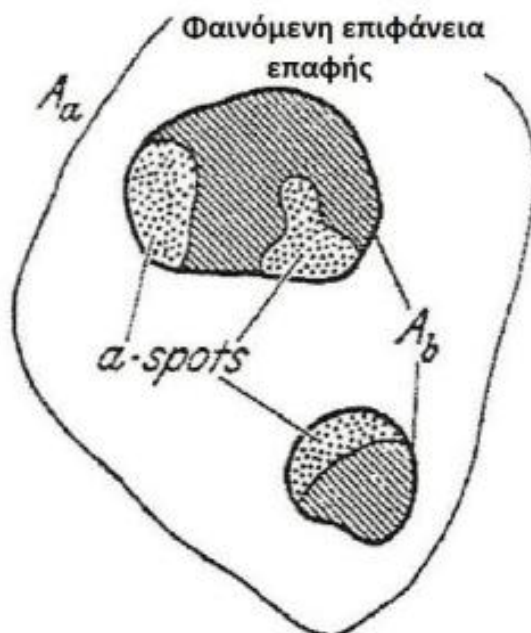
Ως πραγματική επιφάνεια (true contact area) μίας επαφής A_c εννοούμε την επιφάνεια μέσω της οποίας γίνεται τελικά η διέλευση του ρεύματος από το ένα μέρος της επαφής στο άλλο.

Η επιφάνεια αυτή είναι, λόγω των ξένων επικαθίσεων στις επαφές (κυρίως οξείδια μετάλλων και σκόνη), μικρότερη από την A_b . Όταν παρατηρεί κανείς μία ηλεκτρική επαφή έχει την εντύπωση ότι τα δύο μέρη της εφάπτονται σε μία πολύ ευρύτερη επιφάνεια από το σύνολο των περιοχών επαφής που αποτελούν την A_b . 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, οι οποίες έχουν την δυνατότητα να άγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Γενικά ισχύει:

$$A_a > A_b > A_c \quad (2)$$

1.4.3 A-spots

Στην τριβολογία, τα A-spots είναι μικροσκοπικές περιοχές στις επιφάνειες επαφής των στερεών σωμάτων μέσω των οποίων το ηλεκτρικό ρεύμα είναι ικανό να διαρρέεται υπό την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού (σχήμα 1.2.3-1). Αγωγή ρεύματος συμβαίνει στις περιοχές που βρίσκονται εντός των ορίων τραχύτητας των επαφών, σε μεμονωμένες αγώγιμες περιοχές ή σε συμπλέγματα των αγώγιμων περιοχών. Ο όρος αυτός συνδέεται με το έργο του Ragnar Holm στα μέσα του 20ου αιώνα. Τα a-spots δεν είναι ισοδύναμα με εξογκώματα.



Σχήμα 1.4.3-1: Φαινόμενη επιφάνεια επαφής A_a , φέρουσα το φορτίο επιφάνεια A_b , που περιέχουν μονωτικά σημεία (σκιασμένο μέρος) και άγοντα σημεία ή a-spots (τελείες)

Το σχήμα 1.4.3-1 απεικονίζει διαφορετικά είδη επιφανειών επαφής. Διευκρινίζεται ότι η επιφάνεια που περιλαμβάνει όλα τα a-spots αποτελεί την A_c . Οι αναλογίες μεταξύ αυτών των επιφανειών διαφοροποιούνται, και μπορεί να προκύψει ότι $A_a = A_b = A_c$. Για παράδειγμα, αν δύο κύλινδροι από καθαρό μέταλλο, των οποίων η διάμετρος είναι μερικά χιλιοστά, έρθουν κάθετα σε επαφή υπό ένα επαρκές φορτίο, η πλαστική παραμόρφωση θα οδηγήσει σε μία φέρουσα το φορτίο περιοχή A_b που είναι συγχρόνως και η περιοχή που άγει.

1.4.4 Φορτίο Επαφής

Η δύναμη η οποία κρατάει τα μέρη της επαφής συνδεδεμένα είναι το μηχανικό φορτίο ή απλά το φορτίο, P . Αν θεωρητικώς τα μέρη της επαφής ήταν απεριόριστως σκληρά, τότε καμία δύναμη δε θα μπορούσε να τα φέρει σε επαφή μεταξύ τους σε περισσότερα από τρία σημεία. Εφόσον, όμως, τα πραγματικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις επαφές μπορούν να παραμορφωθούν, τα σημεία μεγεθύνονται σε μικρές περιοχές, ενώ ταυτόχρονα νέα σημεία επαφής μπορεί να εμφανιστούν. Το σύνολο των περιοχών ή των σημείων αυτών είναι η περιοχή που φέρει το φορτίο, A_b , πάνω στην οποία η πίεση p , είναι πεπερασμένη. Η περιοχή A_b μπορεί να σχηματιστεί μόνο με ελαστική παραμόρφωση. Όμως λόγω της ανομοιογένειας, τα μέρη της επαφής, παρόλο που ονομαστικά-ιδανικά

είναι επίπεδα, στην πραγματικότητα έρχονται σε επαφή σε περιοχές που παράγονται πλαστικά.

Η σχέση μεταξύ της φέρουσας το φορτίο επιφάνειας A_b , του φορτίου της επαφής και της μέσης πίεσης, \bar{p} , είναι:

$$P = \bar{p} \cdot A_b \quad (1.4.4-1)$$

Η κατά τόπους πίεση, διαφέρει από σημείο σε σημείο καθώς κάποια σημεία δέχονται πλαστική παραμόρφωση ενώ άλλα δέχονται ελαστική. Σε πολλές περιπτώσεις, ωστόσο, ολόκληρη η περιοχή συμπεριφέρεται πλαστικά. Τότε, η μέση πίεση προσεγγίζει τη σκληρότητα.

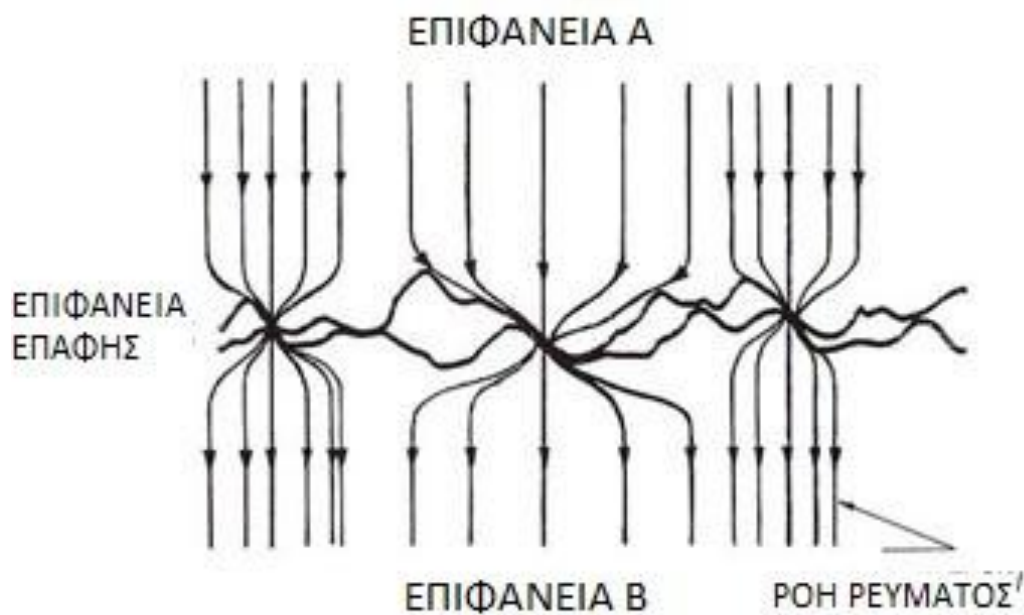
Από την οπτική της αγωγιμότητας ρεύματος, η φέρουσα το φορτίο περιοχή αποτελείται από τρία διαφορετικά μέρη:

- Τμήματα με μεταλλική επαφή. Το ρεύμα περνά μέσα από αυτά χωρίς αισθητή μεταβολή αντίστασης στη διασύνδεση, όπως συμβαίνει μεταξύ διαφορετικών κρυσταλλινών σε ένα συμπαγές μέταλλο.
- Ημι-μεταλλικά σημεία. Αυτά είναι περιοχές καλυμμένες με κάποιο στρώμα επαρκώς λεπτό έτσι ώστε να είναι εύκολα διαπερατό από το ρεύμα μέσω του φαινομένου σήραγγος, ανεξαρτήτως της ειδικής αντίστασης του υλικού του στρώματος.
- Περιοχές καλυμμένες από σχετικά παχιά στρώματα, ειδικά όσον αφορά ορατά θαμπά στρώματα (οξειδία, σουλφίδια κλπ.). Κατά κανόνα οι περιοχές αυτές δεν άγουν και είναι πρακτικά μονωμένες.

1.5 Αντίσταση στένωσης και αντίσταση στρώματος επικαθίσεων

Η έκφραση «αντίσταση επαφής» χρησιμοποιείται συχνά. Αυτός ο όρος επινοήθηκε σε μία εποχή όταν υπήρχε η πεποίθηση ότι η μεταλλική επιφάνεια της επαφής, ευθυνόταν για την παρατηρούμενη αντίσταση. Στην πραγματικότητα, αυτό που μετράται ως αντίσταση επαφής, είναι η αντίσταση στένωσης, κάτι το οποίο είναι συνέπεια του περιορισμού της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από μικρά αγωγίμα σημεία.

Φυσικά, η στένωση διευρύνεται ως όρος και στα δύο μέρη της επαφής. Όλες οι στερεές επιφάνειες είναι τραχιές σε μικροσκοπική κλίμακα. Η επιφανειακή αυτή μικροτραχύτητα αποτελείται από κορυφές και κοιλάδες των οποίων το σχήμα, οι διακυμάνσεις σε ύψος και τα λοιπά γεωμετρικά χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τη διαδικασία διαμόρφωσης της επιφάνειας. Γι' αυτό και η επαφή μεταξύ δύο μηχανικών μερών συμβαίνει σε διακριτά σημεία τα οποία παράγονται από τη μηχανική επαφή των εξογκωμάτων των δύο επιφανειών, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.5-1.



Σχήμα 1.5-1: Σχηματικό διάγραμμα μίας ηλεκτρικής διεπαφής

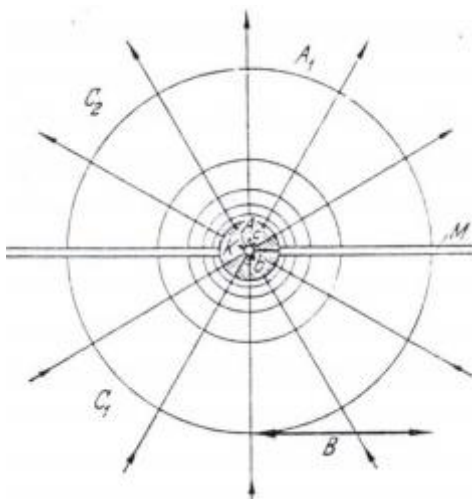
Επομένως, για όλα τα στερεά υλικά, η περιοχή της πραγματικής επαφής είναι ένα μικρό μόνο κλάσμα της ονομαστικής περιοχής επαφής, για ένα ευρύ φάσμα φορτίων. Η μέθοδος παραμόρφωσης των εξογκωμάτων της επαφής είναι είτε ελαστική είτε πλαστική ή μίγμα πλαστικής - ελαστικής ανάλογα με τις τοπικές μηχανικές δυνάμεις που ασκούνται. Σε μία μαζική ηλεκτρική διασύνδεση όπου τα στοιχεία σύζευξης είναι μέταλλα, οι επιφάνειες επαφής καλύπτονται συχνά από κάποιο οξειδίο ή από άλλα μονωτικά στρώματα. Γενικότερα, η διασύνδεση γίνεται ηλεκτρικά αγώγιμη μόνο όταν παράγονται μέταλλο-προς-μέταλλο σημεία επαφής, όπου τα μονωτικά στρώματα στις επιφανειακές ανωμαλίες έχουν υποστεί ρήξη. Σε μία τυπική μαζική ηλεκτρική ζεύξη, η περιοχή αυτή της ηλεκτρικής επαφής είναι, επομένως, μικρότερη από την επαφή πραγματικής μηχανικής επαφής.

Σε μία ηλεκτρική ζεύξη, οι γραμμές του ηλεκτρικού ρεύματος στρεβλώνονται αυξανόμενα όσο πλησιάζουν στη διασύνδεση της επαφής και οι γραμμές ροής συσσωρεύονται για να περάσουν μέσα από τα διακριτά σημεία επαφής ή a-spots όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5-1. Η στένωση του ηλεκτρικού ρεύματος στα a-spots μειώνει την επιφάνεια και την ποσότητα του υλικού που πραγματικά άγει και ως λογικό επακόλουθο αυξάνει την ηλεκτρική αντίσταση. Αυτή η αύξηση της αντίστασης ορίζεται ως αντίσταση στένωσης της διασύνδεσης.

Συχνά, η παρουσία στρωμάτων ρύπων σχετικά μεγάλης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης στις επιφάνειες επαφής αυξάνει την αντίσταση των a-spots πέραν της τιμής της αντίστασης στένωσης. Η συνολική αντίσταση διασύνδεσης που προκαλείται από τη στένωση και από την αντίσταση των στρωμάτων καθορίζει την αντίσταση επαφής της σύνδεσης.

Το κυριότερο μέρος της αντίστασης στένωσης εντοπίζεται στις άμεσα γειτονικές περιοχές των μικρών αγώγιμων σημείων. Τα σημεία μέτρησης της τάσης της επαφής θα είναι, επομένως, πάντα σε μακροσκοπικές αποστάσεις από την επιφάνεια της επαφής. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτή η απόσταση καλύπτει τη συνολική εμβέλεια στην οποία οι

γραμμές της ροής ρεύματος παρεκκλίνουν του ιδανικού ευθέος «μονοπατιού» εξαιτίας της στένωσης. Γι' αυτό το λόγο, η μέτρηση της αντίστασης δεν καταδεικνύει άμεσα αν η μετρούμενη αντίσταση είναι απαραίτητως τοποθετημένη εντός της επιφάνειας επαφής, ή αν, λίγο πολύ, έχει το χαρακτήρα μίας αντίστασης στένωσης. Πρέπει να δειχθεί ότι η αντίσταση στένωσης μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει της αγώγιμης περιοχής της επαφής, και όταν η μετρούμενη αντίσταση είναι μεγαλύτερη από την υπολογιζόμενη, για μία γνωστή περιοχή, συμπεραίνεται ότι η περιοχή αυτή είναι καλυμμένη με ένα στρώμα που παράγει μία επιπρόσθετη αντίσταση. Συμβατικά η έκφραση «αντίσταση επαφής» διατηρείται ανεξάρτητα από το αν υπάρχει απλά μία καθαρή αντίστασης στένωσης, ή αν ένα επιπλέον στρώμα συμβάλλει επίσης στην αντίσταση της αγώγιμης περιοχής.



Σχήμα 1.5-2: Μοντέλο που απεικονίζει μία στένωση ρεύματος με σφαιρική συμμετρία. Η αντίσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ισοδυναμικών επιφανειών είναι το 1/6 της αντίστασης στένωσης σε ένα μέρος της επαφής

Απεικονίζεται η αντίσταση στένωσης με έναν υπολογισμό υπό απλοποιημένες συνθήκες: Θεωρείται μία κυκλική επιφάνεια επαφής, με ίδιο υλικό στα δύο μέρη της και τέλεια συμμετρία, δηλαδή χωρίς διαταραχές από θερμοηλεκτρικές επιδράσεις. Τα μέρη της επαφής θεωρούνται ημι-άπειρα. Ακόμα και με αυτές τις υποθέσεις, ο ακριβής υπολογισμός είναι περιστασιακός. Παρά ταύτα, χρησιμοποιώντας το φανταστικό μοντέλο που εικονίζεται στο σχήμα 1.5-2, το πραγματικό σχήμα των γραμμών της ροής προσεγγίζεται με ένα πολύ απλούστερο υπολογισμό.

Στο μοντέλο η επιφάνεια της επαφής έχει αντικατασταθεί από μία σφαίρα, K, άπειρης αγωγιμότητας, της οποίας η ακτίνα, b, επιλέγεται ελαφρώς μικρότερη της ακτίνας, a, της κυκλικής περιοχής. Οι γραμμές της ροής του ρεύματος αρχίζουν ακτινικά και κατανέμονται συμμετρικά γύρω από τη σφαίρα K, έτσι ώστε να σχηματίσουν τις ισοδυναμικές επιφάνειες σαν ημισφαίρια ομόκεντρα της K.

Η αντίσταση dR μεταξύ των ημισφαιρίων με ακτίνες r και r+dr είναι:

$$dR = \frac{\rho dr}{2\pi r^2} \quad (1.5-1)$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση του υλικού της επαφής.

Στη συνέχεια γίνεται ολοκλήρωση στο ημισφαίριο το οποίο διέρχεται από το σημείο όπου το δυναμικό αξιοποιείται για τη μέτρηση της τάσης της επαφής. Η ακτίνα, B , του ημισφαιρίου αυτού θα είναι μεγαλύτερη από την b . Τα πιο απομακρυσμένα μέρη συνεισφέρουν ελάχιστα στο ολοκλήρωμα. Μπορεί, λοιπόν, κάλλιστα να επιλεγθεί το άπειρο σαν το άνω όριο και να ληφθεί η αντίσταση στένωσης σε ένα από τα μέρη της επαφής.

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \int_b^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho}{2\pi b} \quad (1.5-2)$$

Η συνολική αντίσταση στένωσης R είναι διπλάσια σε μέγεθος, γι' αυτό:

$$R = \frac{\rho}{\pi b} \quad (1.5-3)$$

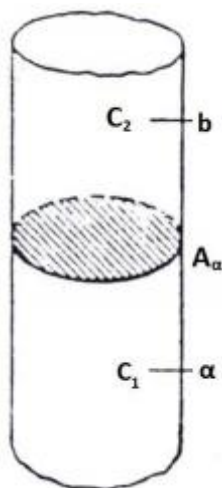
Η εξίσωση (1.5-3) βασίζεται στο τεχνητό μοντέλο (Σχήμα 1.5-2) και γι' αυτό το λόγο είναι απλά προσεγγιστική. Η σωστή τιμή της αντιστάσεως μίας επίπεδης επαφής με ακτίνα a είναι:

$$R = \frac{\rho}{2a} \quad (1.5-4)$$

Γίνεται αντιληπτό ότι οι σχέσεις (1.5-3) και (1.5-4) ορίζουν το ίδιο αποτέλεσμα αν:

$$2a = \pi b \quad (1.5-5)$$

Στο σχήμα 1.5-3, οι κύλινδροι C_1 και C_2 είναι τα μέρη της επαφής. Τοποθετούνται ο ένας πάνω στον άλλο, η βάση $A_{\alpha 1}$ απέναντι στην $A_{\alpha 2}$, σχηματίζοντας έτσι τη φαινόμενη επιφάνεια επαφής A_α . Αρχικά, υποτίθεται ότι οι επιφάνειες $A_{\alpha 1}$ και $A_{\alpha 2}$ είναι καθαρά μεταλλικές αλλά, λόγω της ανομοιογένειάς τους, έχουν επαφή μόνο σε ένα μικρό μέρος της A_α που ονομάζεται A_c . Εξαιτίας της ροής του ρεύματος η οποία περνάει μέσα από τη στένωση A_c , εμφανίζεται μία αντίσταση στένωσης.



Σχήμα 1.5-3: Η φαινόμενη επιφάνεια επαφής A_α είναι η κοινή βάση των κυλίνδρων οι οποίοι έχουν πραγματική επαφή μόνο σ' ένα τμήμα της A_α

Η τάση μπορεί να μετρηθεί ανάμεσα στα σημεία και όταν ένα ρεύμα περνά μέσα από την επαφή. Επομένως η αντίσταση μεταξύ των ισοδυναμικών επιφανειών που περιέχουν τα και αντίστοιχα είναι:

$$R_{ab} = \frac{U_{ab}}{I}$$

Ας θεωρηθεί ένας στερεός κύλινδρος παρόμοιος με αυτόν του μοντέλου εκτός του ότι η συνολική περιοχή A_a είναι τέλεια αγωγίμη έτσι ώστε οι γραμμές του ρεύματος να ρέουν ευθεία μέσω αυτής. Σε αυτή την περίπτωση αν η αντίσταση μεταξύ των ισοδυναμικών επιφανειών που περιέχουν τα σημεία a και b , είναι ίδια όπως στο παραπάνω μοντέλο R_{ab}^0 , τότε εξ ορισμού, η αντίσταση στένωσης και η τάση στένωσης είναι:

$$\begin{aligned} R &= R_{ab} - R_{ab}^0 \\ U &= RI \end{aligned} \quad (1.5-6)$$

Στην περίπτωση μίας καθαρής μεταλλικής επαφής, δηλαδή χωρίς στρώματα επικαθίσεων στην επαφή, η αντίσταση επαφής R , είναι απλά μία αντίσταση στένωσης. Αν έχουμε παρουσία επιπρόσθετων στρωμάτων και τα δύο μέρη έχουν διαφορετικά μέταλλα, η αντίσταση επαφής R , είναι το άθροισμα των αντιστάσεων στένωσης R_1 και R_2 των δύο μελών αντίστοιχα και της αντίστασης του στρώματος R_f .

$$R = R_1 + R_2 + R_f \quad (1.5-7)$$

Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό, η αντίσταση επαφής δεν είναι μία αντίσταση μετάβασης, αλλά μία επιπλέον αντίσταση στο κύριο μέρος των μελών της επαφής, που προκαλείται από τη στενότητα των γραμμών του ρεύματος που περνάνε μέσα από τα a-spots. Σ' αυτήν την αντίσταση προστίθεται και η αντίσταση του στρώματος που καλύπτει τα a-spots αυτά. Τα R_1 και R_2 είναι τάξης μεγέθους $\frac{\rho_1}{n_a}$ και $\frac{\rho_2}{n_a}$, όπου είναι μία μέση γραμμική διάσταση των a-spots, είναι ο αριθμός τους ρ_1 και ρ_2 , οι ειδικές αντιστάσεις των μελών C_1 και C_2 .

Η αντίστοιχη έκφραση για την είναι:

$$R_f = \frac{\sigma}{A_c} \quad (1.5-8)$$

στην περίπτωση ενός αγωγίμου φιλμ ομοιόμορφα διανεμημένου πάνω στην αγωγίμη περιοχή A_c , όπου σ η αντίσταση ανά τετραγωνικό εκατοστό του φιλμ. Με το σ να ποικίλλει κατά μήκος του στρώματος ισχύει:

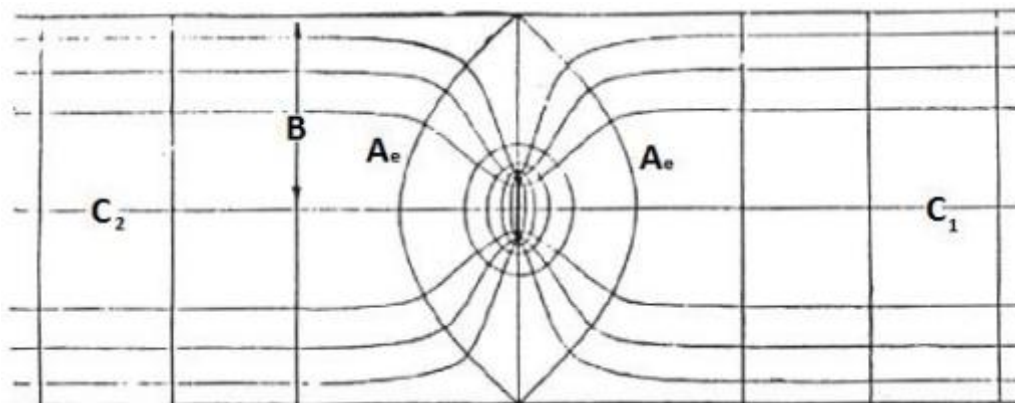
$$\frac{1}{R_f} = \int \frac{dA_c}{\sigma} \quad (1.5-9)$$

Με ρ την ειδική αντίσταση του υλικού του φιλμ και s το πάχος του ισχύει:

$$\sigma = \rho_f \cdot s \quad (1.5-10)$$

Οι περιοχές αυτές εντός των μελών C_1 και C_2 (σχ. 1.5-4) όπου, εξαιτίας του μικρού μεγέθους των σημείων επαφής, οι γραμμές της ροής του ρεύματος παρεκκλίνουν αισθητά της ευθείας πορείας τους, ονομάζονται περιοχές στένωσης ή απλά στενώσεις. Εντός των περιοχών στένωσης, το βαθμωτό δυναμικό είναι σχετικά μεγάλο αλλά σχετικά μικρό εκτός της στένωσης. Με άλλα λόγια, η αντίσταση R_{ab}^0 στην εξίσωση (1.5-6) είναι σχετικά μικρή,

πολλές φορές και αμελητέα συγκρινόμενη με την R_{ab} . Σαν αποτέλεσμα, δεν είναι απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης των σημείων μέτρησης a και b .



Σχήμα 1.5-4: Γραμμές της ροής ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες μίας αντίστασης στένωσης

Το σχήμα 1.5-4 δείχνει το σύστημα των ισοδυναμικών επιφανειών και των γραμμών ροής του ρεύματος όταν και τα δύο μέρη αποτελούνται από το ίδιο μέταλλο, και η A_c αντιπροσωπεύει ένα ενιαίο κυκλικό a -spot στη μέση του A_a . Στην πράξη η στένωση μπορεί να θεωρηθεί περιορισμένη από ορισμένες επιφάνειες στο μεγαλύτερο μέρος των μελών, όπως για παράδειγμα η A_e στο σχήμα. Τέτοιες επιφάνειες ονομάζονται ακραίες επιφάνειες. Σύμφωνα με το σχήμα, η απόσταση του A_e από το a -spot είναι της ίδιας τάξεως μέγεθος όπως και η ακτίνα r του κυλίνδρου.

1.6 Θερμοκρασία ενός ηλεκτρικά θερμαινόμενου a – spot

Ο ορισμός της αντίστασης στένωσης ως $\frac{\rho}{2a}$ είναι έγκυρος, όσο το ηλεκτρικό ρεύμα που περνά μέσα από τη στένωση είναι επαρκώς μικρό ώστε κάθε φαινόμενο παραγωγής θερμότητας πάνω στην αντίσταση στένωσης να είναι αμελητέο. Υπό αυτές τις συνθήκες, η πτώση τάσης κατά μήκος της στένωσης που παράγεται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα I μπορεί να δοθεί απλά ως $\frac{\rho I}{2a}$. Όταν, όμως, παράγεται θερμότητα αξιόλογου μεγέθους σε Joule εντός της στένωσης, ο «συνωστισμός» των γραμμών του ρεύματος μέσα από το a -spot παράγει ένα θερμικό βαθμωτό φυσιολογικό ως προς τη στένωση. Το φαινόμενο αυτό περιπλέκει τη σχέση μεταξύ πτώσης τάσης κατά μήκος της επαφής, ηλεκτρικού ρεύματος και της διάστασης του a -spot.

Με το πέρασμα ενός ηλεκτρικού ρεύματος, η θερμοκρασία ενός a -spot αυξάνει πολύ γρήγορα σε ένα σημείο σχεδόν-ισορροπίας.

1.6.1 Σχέση Τάσης-Θερμοκρασίας

Η συμβατική αντιμετώπιση των ηλεκτρικά θερμαινόμενων επαφών σε θερμική ισορροπία υποθέτει ότι οι εξωτερικές επιφάνειες των αγωγών είναι θερμικά μονωμένες από το εξωτερικό περιβάλλον. Η θερμότητα που παράγεται μέσα σε ένα a -spot μπορεί, επομένως, να διαχέεται μόνο με αγωγή μέσω των μελών της επαφής. Αποδεικνύεται, λοιπόν, ότι οι γραμμές του ηλεκτρικού και του θερμικού ρεύματος ακολουθούν την ίδια διαδρομή, και ως εκ τούτου το ηλεκτρικό δυναμικό και οι ισοθερμικές επιφάνειες στο εσωτερικό των αγωγών συμπίπτουν. Αυτή η μοναδική σχέση μεταξύ των ροών του

ηλεκτρικού και του θερμικού ρεύματος οδήγησε τον Kohlrausch να διαφορίσει την ακόλουθη σχέση μεταξύ της πτώσης τάσης V κατά μήκος της επαφής και της μέγιστης θερμοκρασίας T_m στη περιοχή διασύνδεσης της επαφής:

$$V = \sqrt{2 \int_{T_1}^{T_m} \lambda_1 \rho_1 dT} + \sqrt{2 \int_{T_2}^{T_m} \lambda_2 \rho_2 dT} \quad (1.6.1-1)$$

όπου λ και ρ είναι αντίστοιχα η θερμική αγωγιμότητα και η ηλεκτρική ειδική αντίσταση των αγωγών, οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στους δύο αγωγούς που έρχονται σε επαφή και οι T_1 και T_2 αναφέρονται στις θερμοκρασίες των μελών που έρχονται σε επαφή.

Οι ποσότητες λ και ρ γενικά μεταβάλλονται ανάλογα με τη θερμοκρασία. Δεδομένου του ότι οι γραμμές ροής του ηλεκτρικού ρεύματος συνωστίζονται περισσότερο στο a-spot, η μέγιστη θερμοκρασία T_m εμφανίζεται είτε μέσα στα όρια του a-spot είτε στο άμεσο περιβάλλον του. Για μία μονομεταλλική επαφή όπου $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ και $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, η T_m εμφανίζεται ακριβώς στο a-spot και η σχέση καταλήγει:

$$V = 2 \sqrt{2 \int_{T_1}^{T_m} \lambda \rho dT} \quad (1.6.1-2)$$

Πάνω από ένα φάσμα θερμοκρασιών όπου οι ποσότητες λ και ρ εξαρτώνται λίγο πλέον από τη θερμοκρασία, η εξίσωση (1.6.1-2) αποδίδει τη γνωστή μορφή της σχέσης τάσης-θερμοκρασίας ($V-T$) για μονομεταλλικές ηλεκτρικές επαφές:

$$(T_m - T_1) = \frac{V^2}{8\lambda\rho} \quad (1.6.1-3)$$

Η ποσότητα $(T_m - T_1)$ στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (1.6.1-3) ορίζεται ως υπερθερμοκρασία επαφής, δηλαδή ως η απόκλιση της θερμοκρασίας του a-spot από τη θερμοκρασία του συνολικού συνδέσμου.

1.6.2 Η σχέση Τάσης-Θερμοκρασίας με εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία ειδική ηλεκτρική αντίσταση και θερμική αγωγιμότητα

Συχνά, η εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τη θερμοκρασία μπορεί να εκφραστεί ως $\lambda = \lambda_0(1 - \beta T)$ και $\rho = \rho_0(1 + \alpha T)$ αντίστοιχα, πάνω από ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, όπου ο δείκτης 0 αναφέρεται στην τιμή στους 0°C και τα β και α είναι οι θερμοκρασιακές συνιστώσες της θερμικής αγωγιμότητας και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμική αγωγιμότητα των μετάλλων μειώνεται, αυξανόμενης της θερμοκρασίας ενώ αντίστοιχα η ειδική ηλεκτρική αυξάνεται. Λαμβάνοντας λοιπόν αυτά υπόψιν, οι σχέσεις που δείχνουν την εξάρτηση των λ και ρ από τη θερμοκρασία παράγει την ακόλουθη σχέση $V-T$ από τη σχέση (1.6.1-1):

$$V^2 = 8\lambda_0\rho_0 \left\{ (T_m - T_1) + (\alpha - \beta) \frac{(T_m^2 - T_1^2)}{2} - \alpha\beta \frac{(T_m^3 - T_1^3)}{3} \right\} \quad (1.6.2-1)$$

1.6.3 Ο Νόμος Wiedemann-Franz

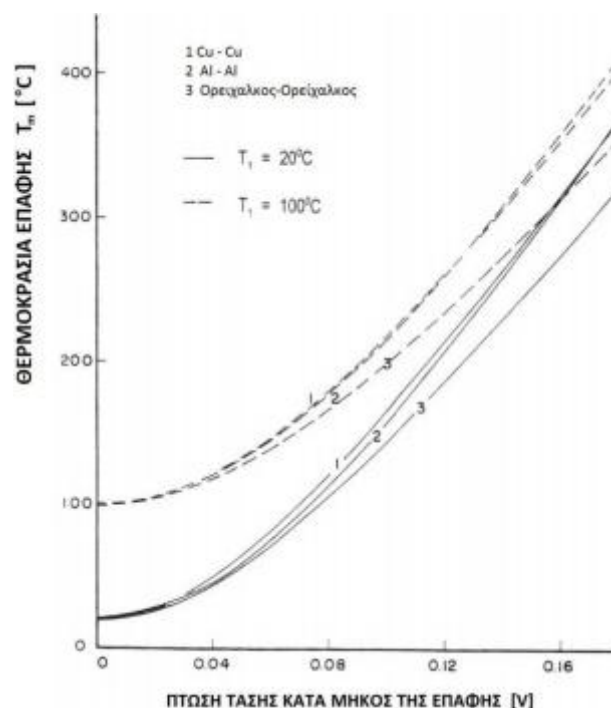
Η εξίσωση (1.6.2-1) είναι μία ακριβής απεικόνιση της σχέσης V-T, που ισχύει για ολόκληρο το φάσμα θερμοκρασιών στο οποίο η ειδική αντίσταση και η θερμική αγωγιμότητα μεταβάλλονται γραμμικά με τη θερμοκρασία. Για τους σκοπούς, όμως, ενός μηχανικού η σχέση αυτή είναι δύσκολο να διαχειριστεί.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι όλες οι καμπύλες στο σχήμα 1.3.3-1 που σχετίζονται με την ίδια θερμοκρασία συνολικού αγωγού βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη. Μπορεί να επιβεβαιωθεί, ακόμα, ότι οι V-T καμπύλες που αντιστοιχούν σε πολλά μέταλλα πέφτουν επίσης πολύ κοντά στις καμπύλες αυτές. Αυτή η εκπληκτική παρατήρηση οφείλεται, εν μέρει, στον νόμο Wiedemann-Franz, ο οποίος δηλώνει ότι οι αναλογίες της θερμικής αγωγιμότητας και της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης με την θερμοκρασία είναι τέτοιες ώστε τα λ και ρ σχετίζονται με τη σχέση:

$$\lambda\rho = LT \quad (1.6.3-1)$$

όπου L είναι η σταθερά Lorentz ($2,45 \times 10^{-8} V^2 K^{-2}$) και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία.

Παρόλο που αυτή η σχέση παρέχει μία λογική περιγραφή των ιδιοτήτων της θερμικής και ηλεκτρικής μεταφοράς στα μέταλλα σ' ένα μεγάλο φάσμα θερμοκρασιών για τις συνηθισμένες ηλεκτρικές επαφές, δεν είναι καθολικά έγκυρη.



Σχήμα 1.6.3-1: Σχέση Τάσης-Θερμοκρασίας για ηλεκτρικές επαφές χαλκού-χαλκού, αλουμινίου-αλουμινίου και ορείχαλκου-ορείχαλκου για θερμοκρασίες T_1 20°C και 100°C

Αν η σχέση (1.6.3-1) ισχύει, τότε η εξίσωση (1.6.1-2) αμέσως δίνει την αυστηρά έγκυρη V-T σχέση:

$$V^2 = 4L(T_m^2 - T_1^2) \quad (1.6.3-2)$$

η οποία είναι ανεξάρτητη από τα υλικά της επαφής.

Η εξίσωση (1.6.3-2) μπορεί να απλοποιηθεί στη μορφή της εξίσωσης (1.6.1-3) με μαθηματικό επαναπροσδιορισμό και ανακατάταξη των όρων. Ορίζοντας ως $(T_m + T_1)/2$ τη μέση θερμοκρασία T_{avg} μέσα στην επαφή, η αποτίμηση της σχέσης (1.6.3- 1) συναρτήσει της T_{avg} αποδίδει:

$$\lambda_{avg}\rho_{avg} = \frac{L(T_m+T_1)}{2} \quad (1.6.3-3)$$

Όμως,

$$(T_m^2 - T_1^2) = (T_m - T_1) \times (T_m + T_1) = (T_m - T_1)2 \frac{\lambda_{avg}\rho_{avg}}{L} \quad (1.6.3-4)$$

Αντικαθιστώντας αυτή την έκφραση στην (1.3.3-2), προκύπτει:

$$(T_m - T_1) = \frac{V^2}{8\lambda_{avg}\rho_{avg}} \quad (1.6.3-5)$$

και η σχέση V-T (1.6.1-3) ανακτάται με τις φυσικές παραμέτρους λ και ρ που αποτιμήθηκαν στη μέση θερμοκρασία του συνδέσμου.

Επειδή η εξίσωση (1.6.3-2) είναι ανεξάρτητη των ειδικών ιδιοτήτων θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υλικών της επαφής, εφαρμόζεται εξίσου καλά και σε μονομεταλλικές και σε διμεταλλικές επαφές, αρκεί και τα δύο υλικά τις επαφής να εμπίπτουν στον νόμο Wiedemann-Franz. Η εγκυρότητα του νόμου Wiedemann-Franz δεν εξασφαλίζει απαραίτητα ότι η μέγιστη θερμοκρασία επαφής εμφανίζεται στο σημείο της φυσικής διεπαφής.

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

Η θερμική και ηλεκτρική ροή υπακούουν σε παρεμφερείς νόμους. Η θερμική ενέργεια ρέει σε συνάρτηση με τις θερμοκρασιακές διαφορές και αντίστοιχα το ηλεκτρικό ρεύμα σε συνάρτηση προς τη διαφορά δυναμικού. Σε συμμετρικά συστήματα ηλεκτρικών επαφών, η θερμική ροή ακολουθεί την ίδια διεύθυνση με τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Ως εκ τούτου υπάρχει μία σχέση μεταξύ θερμοκρασιακής διαφοράς και διαφοράς δυναμικού.

Για τη 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 επιφάνειας αρκετά μακριά από την είσοδο ώστε η ροή σε αυτή να μην επηρεάζει τη 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 ιστροπικό, δηλαδή ότι η ειδική αντίσταση ρ , και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ , εξαρτώνται μόνο από τη 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, το οποίο καθώς είναι συμμετρικό δεν έχουμε ροή 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:

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T)\lambda(T)dT = \frac{U^2}{8} \quad (1.6.4-1)$$

όπου ΔT η διαφορά της θερμοκρασίας των σημείων επαφής από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Εάν χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του γινομένου $\overline{\rho\lambda}$ τότε η σχέση (1.6.4-1) γίνεται:

$$\overline{\rho\lambda} \cdot \Delta T = \frac{U^2}{8} \quad (1.6.4-2)$$

ή

$$U = \sqrt{8\overline{\rho\lambda} \cdot \Delta T} \quad (1.6.4-3)$$

Η σχέση (1.6.4-3) 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 (1.6.4-1) γίνεται:

$$\overline{\rho\lambda} \cdot \Delta T \leq \frac{U^2}{8} \quad (1.6.4-4)$$

και

$$U \geq \sqrt{8 \cdot \overline{\rho\lambda} \cdot \Delta T} \quad (1.6.4-5)$$

Θεωρώντας το νόμο των Wiedemann-Franz-Lorenz, έχουμε :

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T)\lambda(T)dT = \int_{T_0}^T LTdT = \frac{L}{2}(T^2 - T_0^2) \leq \frac{U^2}{8} \quad (1.6.4-6)$$

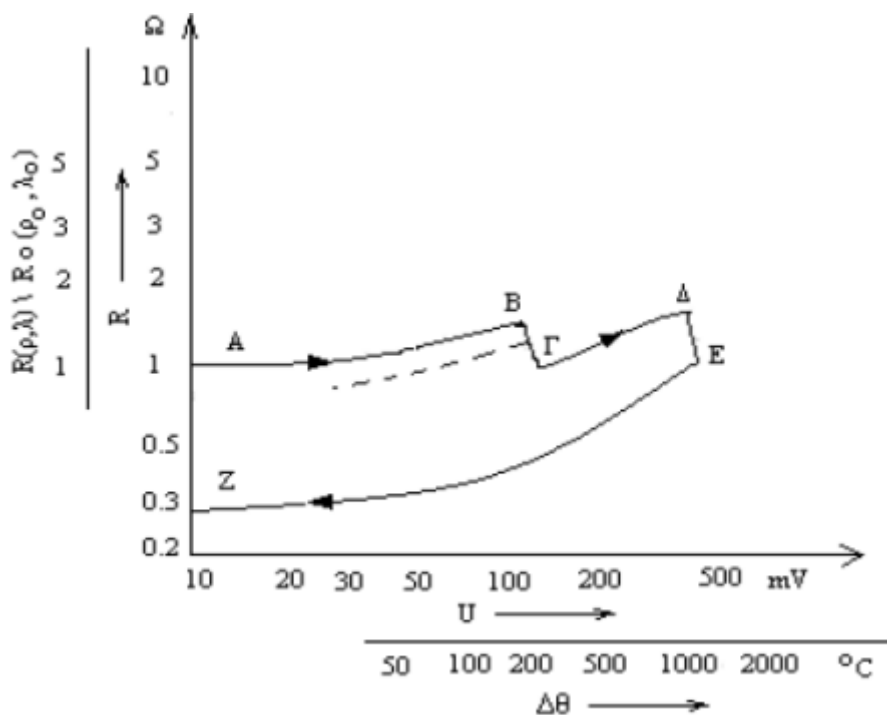
ή

$$U \geq 2\sqrt{L(T^2 - T_0^2)} \quad (1.6.4-7)$$

με T_0 τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

1.6.5 Χαρακτηριστική καμπύλη αντίστασης διάβασης-πτώσης τάσης και διαφοράς θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην επαφή

Ένα παράδειγμα διαγράμματος, που αφορά την αντίσταση διάβασης σε συνάρτηση με την πτώση τάσης ή τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο λυόμενο σύνδεσμο, ανάλογα με τη δύναμη σύσφιξης και την τιμή του ρεύματος δίνεται στο σχήμα (1.6.5-1). Εκεί φαίνεται ότι οι συναρτήσεις $R = f(U)$ και $R = f(\Delta T)$ είναι αύξουσες στην περιοχή των πρακτικών εφαρμογών ($\Delta T < 50^\circ\text{C}$). Η κλίμακα που σχεδιάζονται οι χαρακτηριστικές αυτές είναι λογαριθμική. Στον άξονα των x δίνεται συνήθως η πτώση τάσης στην επαφή και ταυτόχρονα η διαφορά θερμοκρασίας (τα μεγέθη αυτά συνδέονται με τη σχέση (1.6.4-5)). Στον άξονα των y δίνεται επίσης ο λόγος $R(\rho, \lambda) / R_0(\rho_0, \lambda_0)$ δηλαδή το πηλίκο της αντίστασης διάβασης R σε θερμοκρασία T (όπου η ειδική αντίσταση έχει την τιμή ρ και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας έχει την τιμή λ) προς την αντίσταση διάβασης R_0 σε θερμοκρασία χώρου T_0 (με ειδική αντίσταση ρ_0 και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ_0)



Σχήμα 1.6.5-1: Τυπική χαρακτηριστική $R=f(U)$ ή $R=f(\Delta\theta)$ για μία συμμετρική καινούργια επαφή από χαλκό με δύναμη σύσφιξης 100gr. Γεωμετρία επαφής: κύλινδρος – κύλινδρος.

Στη χαρακτηριστική του σχήματος (1.6.5-1) διακρίνει κανείς τις περιοχές (AB, ΒΓ, ΓΔ, ΔΕ και ΕΖ).

Στο τμήμα AB η αντίσταση διάβασης αυξάνει με τη θερμοκρασία. Η αύξηση της αντίστασης διάβασης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$R_c(T) \approx R_c(T_0) \left(1 + \frac{2}{3} a(T - T_0) \right) \quad (1.6.5-1)$$

Στην περιοχή ΒΓ η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη. Η μείωση αυτή μπορεί να αιτιολογηθεί από την αύξηση της επιφανείας A_c (προς την οποία η R είναι αντιστρόφως ανάλογη), λόγω μείωσης της σκληρότητας του υλικού από την αποκρυστάλλωση, που

υφίσταται κατά την ανόπτηση. Όπως φαίνεται από το σχήμα 1.6.5-1 η περιοχή της θερμοκρασίας ανόπτησης για χαλκό είναι από 190 °C έως 200 °C. Η περιοχή αυτή για τον άργυρο είναι 180 °C έως 185 °C.

Στο τμήμα ΓΔ της χαρακτηριστικής $R = f(\Delta T)$ η επιφάνεια A_c φαίνεται ότι έχει σταθερή τιμή μετά την ανακρυστάλλωση και γι' αυτό η αντίσταση διάβασης αυξάνει σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Η ΓΔ είναι πρακτικά παράλληλη προς την ΑΒ. Σε αρκετά υλικά επαφών η παραπάνω αύξηση είναι σύντομη ή δεν υπάρχει, γιατί συνεχίζεται η ανακρυστάλλωση με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Στο σημείο Δ της χαρακτηριστικής συμβαίνει η τήξη του υλικού (η θερμοκρασία τήξης του χαλκού είναι 1083 °C). Η επιφάνεια A_c αυξάνει και υπάρχει μεταλλική συνέχεια μεταξύ των δύο μερών της επαφής, λόγω συγκόλλησής της. Η αύξηση της επιφάνειας A_c και η συγκόλληση των επαφών συνεπάγονται μείωση της αντίστασης διάβασης στην επαφή και αυτό φαίνεται στο τμήμα της καμπύλης ΔΕ.

Όταν από το σημείο Ε της χαρακτηριστική μειωθεί η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, τότε η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη (τμήμα ΕΖ). Η ΕΖ είναι πρακτικά παράλληλη προς την ΑΒ.

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

Από τη χαρακτηριστική $R = f(U)$ ή $R = f(\Delta T)$ μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι περιοχές τιμών της θερμοκρασίας και της πτώσης τάσης σε μία επαφή, που συνεπάγονται ανακρυστάλλωση στα υλικά των επαφών (περιοχή ΒΓ), αποτελεί την έναρξη της αποσταθεροποίησης της επαφής. Πέρα από αυτή την περιοχή οι επαφές που λειτουργούν υπό ονομαστικό ρεύμα, πρέπει να θεωρούνται ότι έχουν ουσιαστικά καταστραφεί. Η θεωρία που διατυπώθηκε για τη χαρακτηριστική του σχήματος 1.6.5-1 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 αυτή δεν ισχύει και παρατηρείται εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στα αρχικά στάδια λειτουργίας τους, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία.

1.7 Οξειδία σε επαφές διακοπών και η σημασία της θερμοκρασίας στην αύξηση του πάχους τους

Η οξείδωση των μέταλλο-προς-μέταλλο επαφών εντός των ορίων της διεπαφής θεωρείται ως ο πιο σοβαρός μηχανισμός αποσύνθεσης που βλάπτει τους μηχανικούς συνδέσμους. Στην περίπτωση του χαλκού έχει αποδειχθεί ότι παρουσία οξυγονούχων ατμοσφαιρών η συνεχής οξείδωση των μεταλλικών επαφών μπορεί να προκαλέσει ταχεία αύξηση στην αντίσταση της επαφής σε μία υψηλή τιμή ακόμα κι αν η τιμή αυτή κρατήθηκε χαμηλά για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα.

Οι επικαθίσεις σε μία ηλεκτρική επαφή είναι αιτία αύξησης της αντίστασης διάβασης και επομένως ο κύριος λόγος κακής λειτουργίας της. Οι επικαθίσεις, ανάλογα με τη σύνθεσή τους, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: σε χημικές ενώσεις (όπως π.χ. τα οξείδια

μετάλλου της επαφής) και σε διάφορα παρασιτικά στοιχεία (όπως σκόνη, τα λιπαντικά και υδρατμοί). Ανάλογα με το πάχος τους οι επικαθίσεις διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

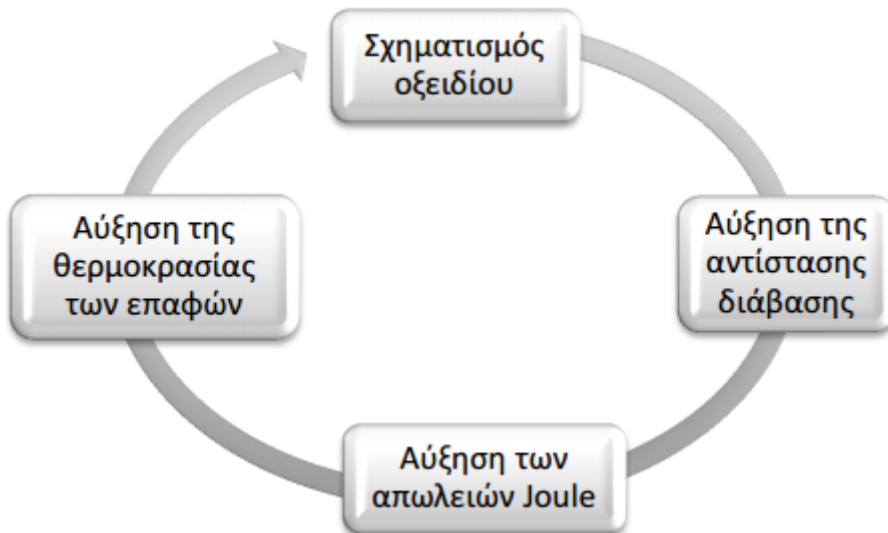
- επικαθίσεις με πάχος λίγων ατόμων (όπως ένα στρώμα μίας ή δύο στοιβάδων μορίων νερού).
- προστατευτικές επικαθίσεις, που είναι χημικές ενώσεις, και οι οποίες δεν αυξάνονται όταν αποκτήσουν ένα μικρό πάχος. Οι επικαθίσεις αυτές θεωρείται ότι προστατεύουν την επιφάνεια της επαφής.
- επικαθίσεις που είναι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

Για τις επικαθίσεις με πάχος λίγων ατόμων γίνεται διάκριση, σε αυτές που τα άτομά τους ενώνονται με το μέταλλο της επαφής μέσω δυνάμεων Van der Waals και δεσμούς της τάξης των 0,05 eV και εκείνες που ενώνονται με ελεύθερους δεσμούς ατόμων της επιφάνειας του μετάλλου με ενέργεια από 1 eV έως 8 eV.

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

Στην περίπτωση των επαφών αλουμινίου, η οξείδωση θεωρείται γενικά ως ένας λιγότερο πιθανός μηχανισμός αποδόμησης καθώς η ανάπτυξη οξειδίου είναι αυτοπεριοριζόμενη, φτάνοντας το οριακό πάχος των 10 nm μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό το πάχος είναι κατά πολύ μικρότερο από τη διάμετρο των σημείων επαφής, τα οποία θεωρείται ότι είναι πολύ μεγαλύτερα των 10 nm για τραχείες επιφάνειες. Το οξείδιο αλουμινίου διαμορφώνεται ως ένα διπλό στρώμα όταν η γυμνή επιφάνεια του αλουμινίου εκτίθεται στην οξυγονούχα ατμόσφαιρα. Αυτό το διπλό στρώμα αποτελείται από ένα πολύ λεπτό, μη πορώδες, εσωτερικό στρώμα φραγμού δίπλα στο μέταλλο και ένα παχύτερο, λίγο πολύ πορώδες εξωτερικό στρώμα πάνω από αυτό. Το στρώμα φραγμού, το οποίο είναι εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία φτάνει στο μέγιστο πάχος του μέσα σε λίγα ms, ενώ το εξωτερικό μεγαλύτερο μέρος του στρώματος αναπτύσσεται βραδύτερα και εξαρτάται από τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στη δημιουργία οξειδίων και γενικά επικαθίσεων στις επαφές παρουσιάζει ενδιαφέρον δεδομένου ότι το φαινόμενο ανακυκλώνεται κατά τη σειρά που απεικονίζεται στο σχήμα 1.7-1.



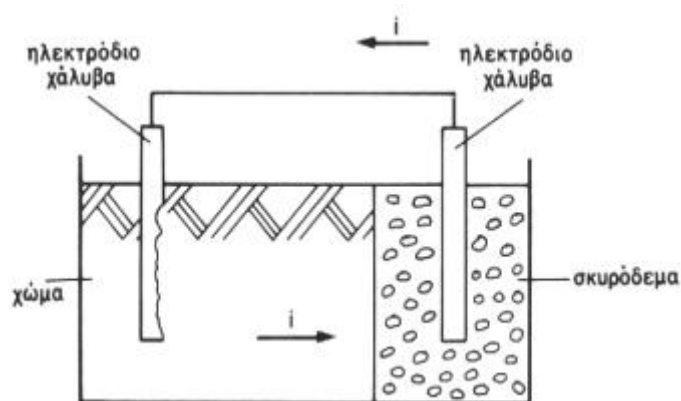
Σχήμα 1.7-1: Απλοποιημένη παράσταση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη δημιουργία οξειδίων

1.8 Γαλβανική διάβρωση

Σε διμεταλλικές επαφές που αποτελούνται από διαφορετικά μέταλλα εμφανίζεται το φαινόμενο της γαλβανικής διάβρωσης ως ένας μηχανισμός υποβάθμισης της ποιότητας και της αξιοπιστίας της επαφής. Η διάβρωση που μπορεί να υποστεί ένα σύνδεσμος είναι δύο ειδών: ιδιοδιάβρωση και ηλεκτροχημική διάβρωση επαφής.

Ιδιοδιάβρωση συμβαίνει όταν ένα μέταλλο βρίσκεται μόνο του στο έδαφος. Το περιβάλλον μπορεί να αντιδράσει με το υλικό και να προκαλέσει βαθμιαία χημική διάβρωση, η οποία θα εξαρτάται από τον αερισμό του χώματος, την υγρασία του και τον βαθμό pH.

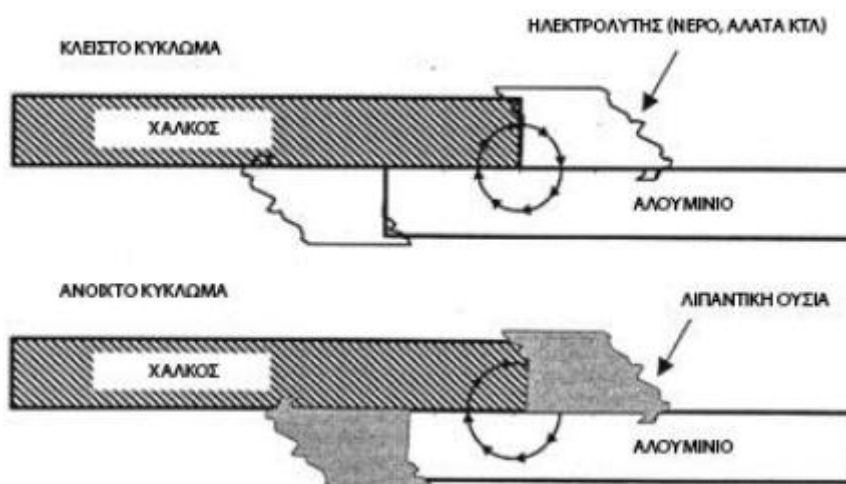
Διάβρωση επαφής συμβαίνει όταν δύο μέταλλα είναι ενταφιασμένα ή όχι και ενώνονται μεταξύ τους. Κάθε μέταλλο αναπτύσσει ένα ηλεκτροχημικό δυναμικό, δηλαδή μία τάση μεταξύ αυτού και της άπειρης γης. Το δυναμικό αυτό εξαρτάται από το μέταλλο και το περιβάλλον έδαφος. Αν ενωθούν δύο μέταλλα και υπάρχει διαφορά στην ηλεκτροχημική τους τάση, τότε ρέει ένα ρεύμα ιόντων από το αρνητικό στο θετικό ηλεκτρόδιο. Έτσι αφαιρείται υλικό από το ηλεκτραρνητικότερο μέταλλο. Σημειώνεται ότι ροή ιόντων μπορεί να υπάρξει και μεταξύ ίδιων μετάλλων που βρίσκονται σε διαφορετικό περιβάλλον π.χ. χάλυβας σε χώμα και χάλυβας σε σκυρόδεμα.



Σχήμα 1.8-1: Ηλεκτροχημική διάβρωση μετάλλων σε διαφορετικό περιβάλλον

Στην περίπτωση συνδέσεων από αλουμίνιο και χαλκό, το αλουμίνιο διαβρώνεται και εναποτίθεται στον χαλκό με την μορφή σύνθετων οξειδίων. Η παραπάνω διαδικασία θα συνεχίζεται έως του σημείου που παρעυρίσκεται ηλεκτρολύτης ή έως όλα τα προϊόντα της διάβρωσης του αλουμινίου καλύψουν ολόκληρη την επιφάνεια του χαλκού. Η τελική επίδραση της διάβρωσης στην επαφή αλουμινίου και χαλκού συντελείται τελικά με δύο τρόπους που είναι είτε η δραστική μείωση της περιοχής επαφής που προκαλεί ηλεκτρική δυσλειτουργία είτε η μηχανική αστοχία λόγω της εκτεταμένης διάβρωσης. Οι παράγοντες που καθορίζουν τον βαθμό του φαινομένου είναι αρκετοί και σύνθετοι αλλά ο πλέον σημαντικός είναι η υγρασία, η οποία αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο.

Στο Σχήμα 1.8-2 φαίνεται ότι ένας απλός τρόπος για να σταματήσει η αποδόμηση της επαφής είναι η ύπαρξη λιπαντικού ή γράσου στην διεπιφάνεια των υλικών η οποία τελικά οδηγεί σε ανοικτοκύκλωμα. Στην αντίθετη περίπτωση η ύπαρξη ηλεκτρολύτη (π.χ. κοντά σε θαλάσσιο περιβάλλον) οδηγεί σε διάβρωση της επαφής αφού αντιστοιχεί σε κλειστό κύκλωμα.



Σχήμα 1.8-2: Περίπτωση γαλβανικής διάβρωσης σε επαφή χαλκού-αλουμινίου (περιπτώσεις ανοικτού και κλειστού κυκλώματος)

1.9 Επίδραση της υγρασίας

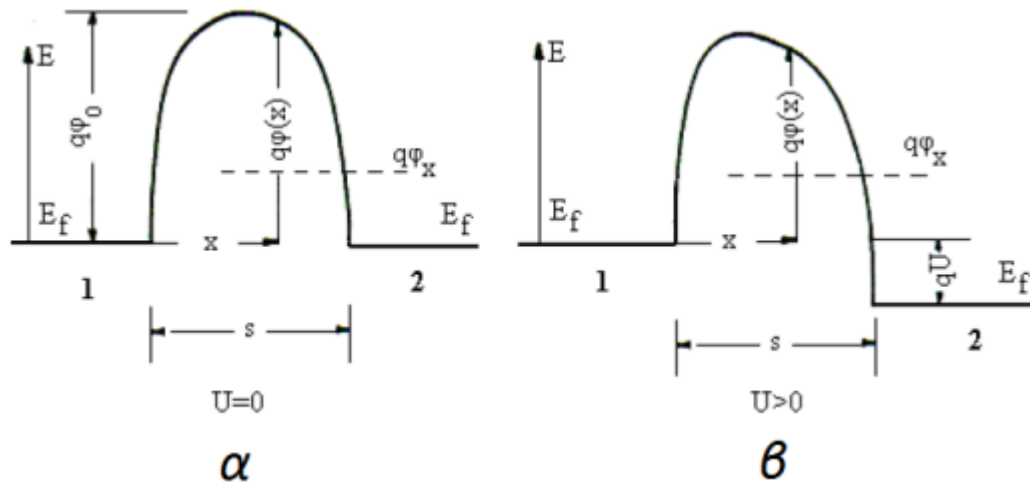
Το πάχος του στρώματος της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα εξαρτάται από την τραχύτητα των επιφανειών της επαφής. Στον άργυρο, αυτό το στρώμα θεωρείται ότι είναι μικρότερο από 50 Å. Στρώματα νερού του πάχους αυτού δεν αντέχουν την πίεση των δύο μερών της επαφής και γι' αυτό διατάσσονται περιφερειακά 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 ασυνεγή στρώματα νερού (που μπορούν με ιόντα να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα), ή υγροσκοπικά τεμάχια σκόνης. Είναι ένα θέμα το οποίο θα γίνει προσπάθεια να εξακριβωθεί σε αυτή τη διπλωματική εργασία εφόσον δίνεται η δυνατότητα μεταβολής των συνθηκών υγρασίας των συνδέσμων με την χρήση του θαλάμου περιβαλλοντικών δοκιμών που θα παρουσιαστεί στο 3^ο κεφάλαιο.

Βέβαια έχει διατυπωθεί η άποψη, ότι τα στρώματα του νερού και των στερεών λιπαντικών σε μία επαφή επηρεάζουν ελάχιστα την αντίσταση διάβασης γιατί ο κύριος όγκος τους απομακρύνεται με το κλείσιμο του λυόμενου συνδέσμου και μένουν μόνο απλές στοιβάδες ατόμων, οι οποίες είναι αγωγίμες λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος. Στερεά κατάλοιπα όμως μαύρου χρώματος και μικρού πάχους (έως 10 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 παλλάδιο (Pd), ο λευκόχρυσος (Pt), το ρουθίνιο (Ru) και το χρώμιο (Cr) δρουν καταλυτικά για την εναπόθεση οργανικών ουσιών σε αυτά και άλλα όχι, όπως π.χ. ο χαλκός (Cu), ο σίδηρος (Fe), το βολφράμιο (W), ο άργυρος (Ag) και το νικέλιο (Ni). Τέλος όταν σε μία επαφή δημιουργούνται τοπικά μικρές ηλεκτρικές εκκενώσεις τότε τα οργανικά στρώματα, που προαναφέρθηκαν, απανθρακώνονται, με αποτέλεσμα από τα λεπτά στρώματα άνθρακα, να διευκολύνεται η εκδήλωση ηλεκτρικών εκκενώσεων μεγαλύτερης ενέργειας. Ο σχηματισμός γενικά των επικαθίσεων στις επαφές διέπεται από περίπλοκους μηχανισμούς, που δεν έχουν ερμηνευτεί πλήρως, παρά τις εκτεταμένες έρευνες.

1.10 Η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος

Σύμφωνα με την κλασική φυσική, επικαθίσεις πάχους λίγων Angstrom μονώνουν ηλεκτρικά τα δύο μέρη μίας επαφής. Αντίθετα όμως κατά την κβαντική θεώρηση τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μπορούν να περάσουν λεπτά στρώματα μονωτικών υλικών ως κύματα De Broglie. Αυτή η δυνατότητα, που έχουν τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας να μπορούν να διαπεράσουν φράγματα δυναμικού τα οποία έχουν εισαχθεί από ένα λεπτό στρώμα μονωτικού υλικού, ονομάζεται φαινόμενο σήραγγος. Οι Sommerfeld και Bethe έκαναν πρώτοι μία θεωρητική προσέγγιση του θέματος για μερικά mV πτώσης τάσης στα ηλεκτρόδια. Αργότερα, ο R. Holm επεξέτεινε τη θεωρία αυτή για μεγαλύτερες τιμές της πτώσης τάσης από προηγουμένως. Η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το πάχος s του μονωτικού στρώματος μεταξύ δύο ηλεκτροδίων και από την τιμή του φράγματος δυναμικού που εισάγει το παραπάνω λεπτό μονωτικό στρώμα. Αυτά τα δύο μεγέθη δεν είναι ποτέ ακριβώς γνωστά και οι υπολογισμοί που έχουν γίνει, έχουν γίνει με απλουστευτικές παραδοχές. Σημασία σε μία επαφή φαίνεται ότι έχει η πυκνότητα ρεύματος, που συνεπάγεται η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος σε αυτή.

Αν θεωρηθεί μία επαφή με επίπεδες επιφάνειες από το ίδιο μέταλλο και με απόσταση s μεταξύ των μερών της (λόγω των επικαθίσεων), τότε τα επίπεδα δυναμικού στην περιοχή της επαφής δίδονται στο σχήμα 1.10-1.



Σχήμα 1.10-1: Το φράγμα δυναμικού σε ένα κενό s δύο επαφών από το ίδιο υλικό 1 και 2 τα δύο μέρη της επαφής: (α) χωρίς την επιβολή διαφοράς δυναμικού (β) με την επιβολή διαφοράς δυναμικού U

Τα επίπεδα Fermi των δύο μεταλλικών μερών της επαφής (E_f) συμπίπτουν, όταν δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ τους. Τα φράγματα δυναμικού στην επιφάνεια κάθε μέρους της επαφής επεκτείνονται στη μεταξύ τους απόσταση s και διαμορφώνουν το φράγμα δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Σε περίπτωση που η απόσταση s είναι αρκετά μεγάλη, η μέγιστη τιμή του ύψους του φράγματος δυναμικού ϕ_0 της επαφής ισούται με το έργο εξόδου Φ του μετάλλου (οι μονάδες μέτρησης των οποίων δίνονται συνήθως σε eV ή σε V). Όταν το πλάτος s είναι μικρό τότε τα φράγματα δυναμικού στην επιφάνεια των δύο μεταλλικών μερών της επαφής αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε μικρότερες τιμές με αποτέλεσμα η μέγιστη τιμή του φράγματος δυναμικού της επαφής να γίνεται μικρότερη από το έργο εξόδου Φ ($\phi_0 < \Phi$). Για ένα ηλεκτρόνιο μάζας m με ταχύτητα u_0 το οποίο πλησιάζει στο φράγμα δυναμικού του σχήματος 1.9-1α ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{1}{2} m u_x^2 = e \varphi_x \quad (1.10-1)$$

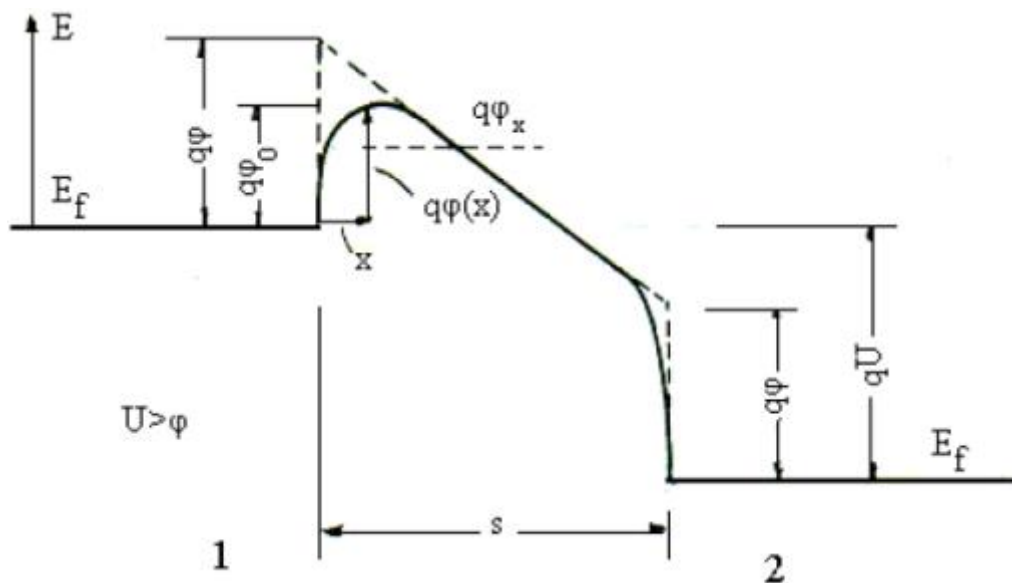
όπου φ_x το δυναμικό του ηλεκτρονίου και e το φορτίο του.

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

$$D(\varphi_x) = \exp\left[\frac{-4\pi}{h} \int_0^s \sqrt{2m[\varphi(x) - \varphi_x]} dx\right] \quad (1.10-2)$$

όπου h η σταθερά του Planck και $\varphi(x)$ η συνάρτηση του φράγματος δυναμικού της επαφής. Η παραπάνω σχέση βασίζεται στην κατά προσέγγιση λύση της εξίσωσης Schrödinger, όπως αυτή έγινε από τους Brillouin-Wentzel-Kramer.

Όταν το ηλεκτρόνιο διαπεράσει το φράγμα δυναμικού λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος, τότε δεν χάνει την ενέργειά του (όπως συμβαίνει στη θερμιοική 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. Αν μεταξύ των δύο μερών του σχήματος 1.10-1α υπάρχει μία διαφορά δυναμικού U , τότε όπως φαίνονται στο σχήμα 1.10-1β οι στάθμες Fermi διαφοροποιούνται μεταξύ τους κατά U , με αποτέλεσμα μία 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 ίσο και κατά τις δύο διευθύνσεις με αποτέλεσμα η διαφορά του αριθμού των φορέων μεταξύ των δύο μερών της επαφής να μπορεί να μετρηθεί ως ηλεκτρικό ρεύμα. Από τις σχέσεις (1.10-1) και (1.10-2) φαίνεται ότι μόνο η ταχύτητα του ηλεκτρονίου u_x , που είναι κάθετη στο φράγμα δυναμικού, λαμβάνεται υπ' όψιν στους υπολογισμούς του συντελεστή διάβασης $D(\varphi_x)$ και επομένως και στον προσδιορισμό της πυκνότητας ρεύματος. Σε ένα καρτεσιανό σύστημα με συντεταγμένες x , y και z τα ηλεκτρόνια με υψηλές ταχύτητες u_y στη διεύθυνση y και u_z στη διεύθυνση z αλλά μικρή ταχύτητα u_x στη διεύθυνση x έχουν μικρή πιθανότητα να διαπεράσουν το φράγμα δυναμικού, αν και έχουν υψηλή συνολική ενέργεια.



Σχήμα 1.10-2: 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)

Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις 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 σε σχέση με το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού $\phi_0 \gg U > 0$. Το φαινόμενο θεωρείται ότι είναι ωμικό.

- 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 (εκπομπή πεδίου) αφορά μεγαλύτερες τιμές της τάσης από προηγουμένως, υπό την προϋπόθεση ότι ισχύει $U > U_0$. Η πυκνότητα του ρεύματος J αυξάνει ραγδαία με την αύξηση της τάσης U στο σύστημα.

Στο σχήμα 1.10-2 φαίνονται οι ενεργειακές στάθμες που αφορούν την περίπτωση αυτή. Παρατηρείται ότι το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού ϕ_0 είναι αρκετά μικρότερο από το έργο εξόδου Φ . Σε αυτήν την περίπτωση τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μπορούν να μετακινούνται επάνω από το φράγμα δυναμικού.

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

$$\rho_T = \frac{U}{J} \quad (1.10-3)$$

Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από το πάχος s , από το έργο εξόδου Φ του μετάλλου των ηλεκτροδίων και τη σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r , των επικαθίσεων. Η τιμή ρ_T εξαρτάται επίσης από τη μορφή που έχει το φράγμα δυναμικού. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ισχύει γενικά:

$$\rho_T = f(S, \Phi, U, \epsilon_r, \varphi(x)) \quad (1.10-4)$$

1.11 Οι διατάξεις μέτρησης και αξιολόγησης των στατικών ηλεκτρικών επαφών

Η αξιοπιστία των στατικών ηλεκτρικών επαφών βασίζεται σε δοκιμές ποιοτικού ελέγχου, ανάλογα με το ονομαστικό τους ρεύμα. Το προαναφερθέν μέγεθος είναι τυποποιημένο και αντικατοπτρίζει τη δοκιμή ανύψωσης της θερμοκρασίας (ή δοκιμή υπερθέρμανσης).

1.11.1 Η δοκιμή υπερθέρμανσης

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

Η εξακρίβωση της ικανότητας σε ονομαστικό ρεύμα ενός αγωγού βασίζεται κυρίως, κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης, στη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$ ως προς το περιβάλλον, που αναπτύσσεται σε αυτόν. Η τιμή $\Delta\theta$ θεωρείται ότι έχει σταθεροποιηθεί όταν μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων, που απέχουν μεταξύ τους μία ώρα, η αύξηση της

τιμής είναι μικρότερη από 1°C. Η τιμή του ρεύματος, κατά την οποία επιτυγχάνεται η ανωτέρω σταθεροποίηση της θερμοκρασίας, ονομάζεται ονομαστικό ρεύμα I_N της επαφής.

1.11.2 Διηλεκτρικές δοκιμές διακοπών

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

1.11.3 Δοκιμή μηχανικής αντοχής

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

1.11.4 Δοκιμή υπό τριπολικό βραχυκύκλωμα

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

1.12 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Έρευνα για συνδέσμους τύπου κοχλία για αγωγούς αλουμινίου

Σε αυτή την έρευνα εξετάστηκαν δεκαέξι διαφορετικοί σύνδεσμοι τύπου κοχλία για αγωγούς αλουμινίου διαμέτρων 50 mm και 240 mm, προκειμένου να εντοπιστούν και να αποσαφηνιστούν οι συσχετίσεις μεταξύ της ποιότητας του συνδέσμου και τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού τους, το υλικό χρήσης, τις διαδικασίες συναρμολόγησης, τη διαμόρφωση και τον αριθμό μπουλονιών και άλλες σχετικές παράμετροι. Η ποιότητα αξιολογήθηκε με βάση τις μετρήσεις της αντίστασης μετά από δοκιμή βραχυκυκλώματος και κατά τη διάρκεια θερμικών κύκλων, όπως ορίζεται από το πρότυπο IEC 61238 - 1. Η ροπή σύσφιξης των κοχλιών μετρήθηκε κατά τη συναρμολόγηση του συνδέσμου, και υπολογίστηκαν οι προκύπτουσες αξονικές δυνάμεις συμπίεσης (φορτίο επαφής). Μια

πολύ ισχυρή συσχέτιση παρατηρήθηκε μεταξύ του φορτίου επαφής και την ποιότητα του συνδέσμου: Μεγάλες δυνάμεις δίνουν συνδέσεις με χαμηλές και σταθερές τιμές αντίστασης. Οι διάφορες άλλες παράμετροι σχεδιασμού βρέθηκαν να έχουν σημαντικά λιγότερη ή σε μερικές περιπτώσεις σχεδόν καμία αξιοσημείωτη επίδραση στα αποτελέσματα των ηλεκτρικών δοκιμών.

[Bolted Connectors for Stranded Aluminum Power Conductors]

[Magne Runde, Niklas Magnusson, Atle Lenes]

Ανάλυση αστοχίας σε συνδέσμους τύπου κοχλία

Οι σύνδεσμοι ισχύος τύπου κοχλία (Bolt-type power connectors) χρησιμοποιούνται ευρέως στην Κίνα λόγω της απλής δομής τους και του χαμηλού κόστους. Ωστόσο, αυτή η έρευνα δείχνει ότι αυτό το είδος συνδέσμων ισχύος χρειάζεται συνεχή συντήρηση και συχνή αντικατάσταση. Αναφέρεται ότι, αναλύοντας συνδέσμους από διαφορετικές πόλεις της Κίνας και από περιοχές που εμφάνισαν αστοχία, μετρήθηκε υψηλή αντίσταση στο σώμα των συνδέσμων, που σημαίνει ξεκάθαρα ότι σημειώθηκε υψηλή θερμοκρασία σε κάθε σύνδεσμο. Οι βίδες, σχεδόν στο 45% των συνδέσμων δοκιμών εμφάνισαν χαλάρωση, η οποία προκάλεσε χαμηλό φορτίο επαφής. Ήταν σκουριασμένες και επισημαίνουν ότι τα καλώδια θα μπορούσαν να είχαν πετρώσει στα αυλάκια των συνδέσμων. Σοβαρή ποσότητα ρύπων και διαβρωτική ταινία κάλυπτε την επιφάνεια στο αυλάκι, πράγμα που προκάλεσε αύξηση της θερμοκρασίας και ενίσχυσε τη χαλάρωση του συνδέσμου. Σχεδόν το 58% των δειγμάτων είχαν προφανή τήξη ή εμφάνιση συγκόλλησης, ορισμένοι από αυτούς είχαν καεί, γιατί προφανώς υπήρχαν κενά μεταξύ των συρμάτων και των συνδέσμων. Ως συμπέρασμα αναφέρουν ότι, η δομή των συνδέσμων ισχύος τύπου κοχλία μπορεί δύσκολα να αντέξει το σκληρό περιβάλλον της Κίνας.

[FAILURE ANALYSIS ON BOLT-TYPE POWER CONNECTORS APPLICATION]

[Guo-Ping, Luo Jian-Guo Lu, Ji-Gao Zhang]

Ταυτόχρονη επίδραση των μικρο-κινήσεων λόγω χαλαρώματος του συνδέσμου και της διάβρωσης αυτών για τύπου κοχλία σύνδεσμο ισχύος

Σε αυτή την έρευνα αναφέρεται ότι μέσα από εξέταση συνδέσμων ισχύος τύπου κοχλία που έχουν αποτύχει και εφαρμόζονται στην Κίνα, έχει βρεθεί ότι η αστοχία αυτών οφείλεται στη σοβαρή μόλυνση και χαμηλό φορτίο επαφής. Περαιτέρω μελέτες δείχνουν ότι η διάβρωση επιδεινώνει σημαντικά την απόδοση της σύνδεσης. Προφανώς αυτό το οποίο συμβαίνει είναι ηλεκτροχημική διάβρωση και τα παχιά και λευκά παράγωγά της είναι εμφανή μεταξύ του συνδέσμου αλουμινίου και της επίπεδης χαλύβδινης ροδέλας. Βρέθηκαν επίσης ρωγμές μεταξύ παξιμαδιού και της ροδέλας. Η διάβρωση όχι μόνο μειώνει την μηχανική αντοχή, αλλά επίσης μειώνει την πραγματική επιφάνεια επαφής που φέρει το φορτίο. Εν τω μεταξύ, αρκετές ροδέλες και σύνδεσμοι εμφάνισαν ρωγμές στη θέση μέγιστης σύσφιξης, οι οποίες αποδεικνύουν τη διάβρωση λόγω καταπόνησης. Αυτό το είδος διάβρωσης μπορεί να αναπτυχθεί πολύ σύντομα μετά από μια περίοδο λανθάνουσας κατάστασης και γρήγορα μπορεί να προκαλέσει την απώλεια της δύναμης επαφής. Ως εκ τούτου, είναι πολύ πιο επικίνδυνο από άλλα είδη διάβρωσης.

Μείωση της δύναμης σύσφιξης προκαλεί πιο εύκολα τη δημιουργία μικρο-κινήσεων στις επιφάνειες επαφής. Ανάλυση δείχνει ότι υπάρχουν διαφορετικά είδη μικρο-κινήσεων που εμφανίζονται στις διεπαφές και περίπου το ένα τρίτο των δειγμάτων εμφανίζουν εμφανή ίχνη. Μια σκούρα ταινία συσσωρεύεται από τις επικαθίσεις του αζώτου και της

σκόνης στην επιφάνεια επαφής. Κατά συνέπεια, η αντίσταση στη σύνδεση αυξάνεται φανερά, η θερμοκρασία του σώματος του συνδέσμου αυξάνεται και αυτή και η διάβρωση επιταχύνεται. Αυτός ο φαύλος κύκλος μπορεί να προκαλέσει τελικά την αποτυχία των συνδέσμων. Ως εκ τούτου, απαιτούνται τα κατάλληλα μέτρα προστασίας σε δυσμενές περιβάλλον. Ορισμένες συσκευές ανίχνευσης επιφάνειας όπως η SEM (scanning electronic microscope-σάρωση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου), η EDS (energy dispersive spectroscopy-φασματοσκόπιο διασποράς ενέργειας) και η XPS (X-ray photoelectron spectroscopy - φασματοσκόπιο φωτοηλεκτρονίων ακτίνων Χ) χρησιμοποιούνται για να παρατηρήσουν τη μορφολογία των ηλεκτρικών διεπαφών και για να αναλύσουν τις ενώσεις σχηματισμού των προϊόντων διάβρωσης. Επίσης γίνεται μεταλλογραφική εξέταση για τον ίδιο σκοπό αλλά και για την εξακρίβωση της μεταλλουργικής δομής.

[COMBINATION EFFECT OF FRETTING AND CORROSION ON BOLT-TYPE POWER CONNECTORS]

[Guo-Ping Luo Liang-Jun Xu Ji-Gao Zhang]

Έρευνα για τους παράγοντες σύσφιξης που επηρεάζουν την αντίσταση επαφής

Σε αυτή την έρευνα, μελετήθηκε η σύσφιξη των συνδέσμων Μέσης Τάσης που μπορεί να επηρεάσει την αντίσταση επαφής του καλωδίου μέσης τάσης σε εργαστηριακά πειράματα. Ένα καλό πρεσάρισμα είναι σημαντικό προκειμένου να επιτευχθεί μια πολύ καλή αντίσταση επαφής για σύνδεσμο (κάτω από 50μΩ). Εκτός από αυτό, μια χαμηλή αντίσταση επαφής μεταξύ καλωδίων μπορεί να μειώσει τις πιθανότητες δημιουργίας των hotspots (σημεία που αναπτύσσουν αυξημένη θερμοκρασία) που συνήθως προκαλούνται από υπερθέρμανση στο κοινό καλώδιο. Οι περισσότερες από τις περιπτώσεις αστοχίας καλωδίων προκλήθηκαν από αστοχία των συνδέσμων. Ως εκ τούτου, μια καλύτερη σύσφιξη ή μέθοδος σύνδεσης είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί μια καλή επαφή σε κάθε σύνδεση καλωδίων. Σε αυτή την έρευνα μελετήθηκαν ορισμένοι παράγοντες πρεσάρισματος οι οποίοι είναι:

- Φορτίο επαφής,
- Αριθμός των αυλακώσεων,
- Θέση των αυλακώσεων
- Σχήμα των αυλακώσεων.

Είκοσι οκτώ διαφορετικές διαμορφώσεις σε συνδέσμους συμπίεσης και σε συνδέσμους τύπου κοχλία για αγωγούς αλουμινίου 240mm² εξετάστηκαν προκειμένου να εντοπιστούν και να αποσαφηνιστούν οι συσχετίσεις μεταξύ των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών, της εφαρμοζόμενης πίεσης, του αριθμού των αυλακώσεων και άλλες πιθανές παραμέτρους για την ποιότητα της σύνδεσης. Η ποιότητα αξιολογείται με βάση τη μέτρηση αντίστασης επαφής και την αντοχή σε εφελκυσμό μετά από την προετοιμασία του δείγματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν η διαμόρφωση του συνδέσμου και ο αριθμός των αυλακώσεων συμβάλλουν στην αύξηση της αντίστασης επαφής. Έδειξαν επίσης ότι η βαθιά οδοντωτή πτύχωση είναι καλύτερη από την εξαγωνική για συνδέσμους καλωδίων αλουμινίου 240mm².

[STUDY OF CABLE CRIMPING FACTORS AFFECTING CONTACT RESISTANCE OF MEDIUM VOLTAGE CABLE FERRULE AND LUG]

[Mohd Ruzlin M.M. Huzainie Shafi A.H. Ahmad Basri A.G.]

Η επίδραση και η υποβάθμιση των συνδέσμων ισχύος σε ένα δυσμενές περιβάλλον

Αυτή η εργασία αναφέρεται σε μία έρευνα που αφορά τις επιδράσεις του παραθαλάσσιου περιβάλλοντος στην απόδοση των συνδέσμων ισχύος τύπου κοχλία (bolted connectors), συμπίεσης (compression connectors), και τύπου σφήνας (fire-wedged connectors). Αυτοί οι τύποι συνδέσμων είναι αντιπροσωπευτικοί των τριών μεγάλων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά συστήματα διανομής σε όλο τον κόσμο. Ο χώρος δοκιμών βρισκόταν στην παραθαλάσσια ζώνη, στην Παραλία Daytona στη Φλόριδα. Τα δείγματα δοκιμής αποτελούνταν από αγωγούς αλουμινίου και χαλκού που ενώνονταν μεταξύ τους μέσω ενός συνδέσμου. Η έρευνα περιγράφει την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των διαφόρων τύπων συνδέσμων όταν εκτίθενται στο σκληρό θαλάσσιο περιβάλλον. Η εξέταση των αποτυχημένων συνδέσμων αποκάλυψε ότι η αποτυχία και στους τρεις τύπους, τελικά, οφείλεται στη γαλβανική διάβρωση στο σημείο που γίνεται η επαφή του αγωγού με τους συνδέσμους. Οι σύνδεσμοι τύπου κοχλία απέτυχαν σχετικά αργά. Το ποσοστό αποτυχίας των συνδέσμων τύπου σφήνας ήταν το χαμηλότερο, ενώ ήταν το μεγαλύτερο στους συνδέσμους συμπίεσης.

[ENVIRONMENTAL DEGRADATION OF UTILITY POWER CONNECTORS IN A HARSH ENVIRONMENT]

[B.W. Callen, B. Johnson, P. King and R.S. Timsit]

Ενεργειακές απώλειες σε συνδέσμους ισχύος

Η έρευνα αυτή εξετάζει τις υπηρεσίες και την απόδοση των συνδέσμων τύπου κοχλία (bolted connectors), συμπίεσης (compressed connectors) και τύπου σφήνας (fire-wedged-connectors) που χρησιμοποιούνται στα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανώτερη απόδοση των συνδέσμων τύπου σφήνας επισημαίνονται. Τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής ανάλυσης της εξοικονόμησης ενέργειας δείχνουν ότι το κόστος της απώλειας ενέργειας που προέκυψε για ένα χρονικό διάστημα 20 ετών, λόγω της υποβαθμισμένης σύνδεσης των συνδέσμων τύπου κοχλία και συμπίεσης μπορεί να υπερβαίνει το κόστος της απώλειας ενέργειας των συνδέσμων τύπου σφήνας για εκατοντάδες δολάρια (US \$) ανά σύνδεσμο.

[ENERGY LOSSES IN POWER TAP-CONNECTORS]

[R.S. Timsit and J.D. Sprecher]

Δοκιμή χάλκινων και αλουμινένιων συνδέσμων κάτω από συνθήκες γήρανσης

Πτυχωτοί και μηχανικοί σύνδεσμοι τύπου κοχλία χρησιμοποιούνται ευρέως για τον τερματισμό και τη σύνδεση ηλεκτρικών καλωδίων ισχύος για όλες τις μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτοί οι σύνδεσμοι, αν και απλοί και φθηνοί, μπορεί να είναι ο αδύναμος κρίκος σε ένα σύστημα, και η αστοχία ενός συνδέσμου είναι συχνά η αιτία μιας μακράς και δαπανηρής διακοπής.

Η δοκιμή που σχεδιάστηκε σε αυτήν την έρευνα συνδύασε την κυκλική εφαρμογή μιας θερμής ομίχλης άλατος, θερμού και ξηρού αέρα και ξέπλυμα με ψυχρό νερό, με περιοδική τροφοδότηση από υψηλά ρεύματα. Δοκιμάστηκε μια σειρά από χάλκινους συνδέσμους με χάλκινο αγωγό και συνδέσμους από αλουμίνιο με αγωγό από κράμα αλουμινίου και χαλκού. Οι μετρήσεις της αντίστασης των συνδέσμων γίνονταν περιοδικά μέσα από στις δοκιμές ομίχλης άλατος καθώς και πριν και μετά από κάθε τροφοδότηση υψηλού ρεύματος. Το κριτήριο επιτυχίας ή αποτυχίας βασίστηκε στην άνοδο της αντίστασης.

[Test Program of Copper and Aluminum Electrical Connectors under Ageing
Conditions Common to Renewable Energy Systems]
[Vern Buchholz, Ron Frank]

Δοκιμαστικά τεστ σε συνδέσμους ισχύος και η επιρροή τους

Σε αυτή την έρευνα εξετάστηκε υπό διαφορετικές παραμέτρους δοκιμών η επίδραση των χαρακτηριστικών γήρανσης των συνδέσμων ισχύος αλουμινίου-χαλκού τύπου κοχλία. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι: Κύκλοι υψηλών ρευμάτων, βραχυκυκλώματα, τύπος ρεύματος (AC / DC) και το επίπεδο της θερμοκρασίας σε σχέση με το ρεύμα. Επιπλέον, μελετήθηκε η επίδραση του φορτίου επαφής στη συμπεριφορά γήρανσης. Από αυτό το έργο βγήκε συμπέρασμα ότι όλοι οι υπό μελέτη παράμετροι επηρεάζουν σημαντικά τη διαδικασία της γήρανσης.

[TESTING OF POWER CONNECTORS - INFLUENCE OF TESTING PARAMETERS]
[Ake Gberg, Karl-Erik Olsson, Ake Bohlin]

2. Σκοπός

Στην εργασία αυτή θα διερευνηθεί ο ρόλος της θερμοκρασίας και υγρασίας του περιβάλλοντος στην επαφή των αγωγών ACSR μέσης τάσης με τον σύνδεσμο υπό διαφορετικά ρεύματα διέλευσης και υπό διαφορετικές ροπές σύσφιξης των κοχλιών των συνδέσμων.

Οι στατικοί ηλεκτρικοί σύνδεσμοι μέσης τάσης χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση αγωγών ACSR και λειτουργούν εκτεθειμένοι μόνιμα στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Σαν αποτέλεσμα είναι πιθανό λόγω μεταβολών θερμοκρασίας, υγρασίας καθώς και ανεπαρκούς ροπής σύσφιξης να παρουσιάσουν πτώση τάσεως στα άκρα τους καθώς διαρρέονται από το ρεύμα των αγωγών. Αυτό θα οδηγήσει και σε αύξηση της θερμοκρασίας του συνδέσμου.

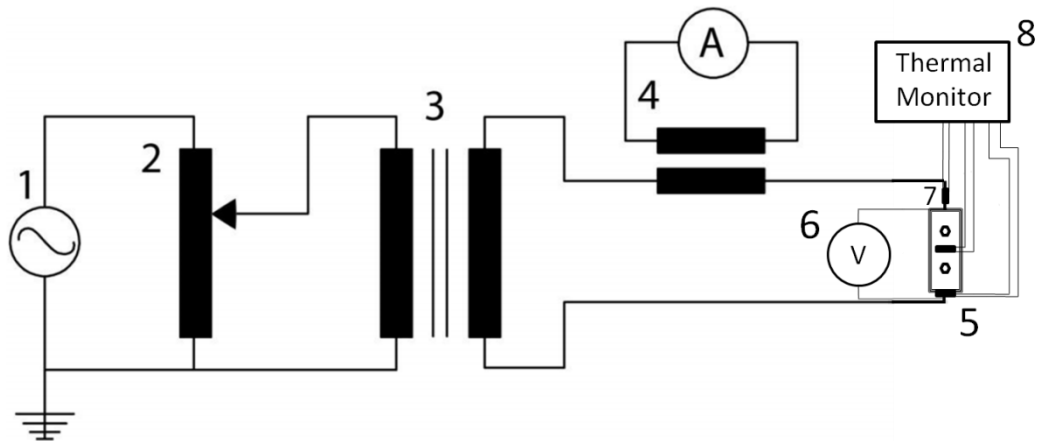
Είναι γνωστό πως σε αυτήν την περίπτωση η επιπλέον θερμοκρασία είναι πιθανό να οδηγήσει το σύνδεσμο σε χαλάρωση. Αυτό με τη σειρά του θα προκαλέσει μεγαλύτερη πτώση τάσης και θερμοκρασία, με αποτέλεσμα ένα κύκλο που πιθανόν να οδηγήσει σε βλάβη.

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή υπάρχει επιστημονικό ενδιαφέρον για αυτούς τους συνδέσμους και έχουν γίνει αρκετές εργασίες που τους μελετούν. Όμως μέχρι τώρα, δεν έχει διερευνηθεί ο ρόλος των περιβαλλοντικών συνθηκών σε αυτούς.

Σκοπός λοιπόν της εργασίας αυτής είναι να μελετήσει την θερμική καταπόνηση συνδέσμων ACSR μέσης τάσης σε διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος, οι οποίες μένουν σταθερές χρησιμοποιώντας θάλαμο περιβαλλοντικών δοκιμών.

3. Κύκλωμα και διαδικασία μετρήσεων

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή η καταπόνηση του συνδέσμου προέρχεται από το ρεύμα του τον διαρρέει. Επομένως για λόγους ασφαλείας η τάση διατηρήθηκε σε χαμηλά επίπεδα, όχι πάνω από 2,5 V. Στο σχήμα 3 – 1 παρουσιάζεται σχηματικά η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των συνδέσμων.



Σχήμα 3 – 1:

1. Πηγή τάσης, τάση δικτύου 230 V
2. Αυτομετασχηματιστής (Variac)
3. Μετασχηματιστής Έντασης
4. Επαγωγικό Αμπερόμετρο
5. Ηλεκτρικός Σύνδεσμος (δοκίμιο)
6. Παλμογράφος (βολτόμετρο)
7. Αισθητήρες Θερμοκρασίας (Pt-100)
8. Καταγραφικό Αισθητήρων

Ένας αυτομετασχηματιστής τροφοδοτείται από το δίκτυο χαμηλής τάσης και χρησιμοποιείται για τον υποβιβασμό της τάσης δικτύου. Ο αυτομετασχηματιστής επιβάλλει από 0 V έως 230 V στην είσοδο του μετασχηματιστή έντασης. Έτσι η ένταση του ρεύματος στην έξοδο του, ελέγχεται από την ενδιάμεση λήψη του αυτομετασχηματιστή υποβιβασμού. Στην έξοδο του μετασχηματιστή έντασης συνδέθηκαν αγωγοί, οι οποίοι στη συνέχεια συνδέθηκαν μεταξύ τους μέσω του δοκιμίου προς μέτρηση.

Χρησιμοποιήθηκε ένα επαγωγικό αμπερόμετρο (αμπεροτσιμπίδα) για τον έλεγχο του ρεύματος εξόδου του μετασχηματιστή έντασης. Ένας παλμογράφος χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση και μέτρηση της ενεργού τιμής της τάσης του συνδέσμου. Η θερμοκρασία του συνδέσμου ελεγχόταν καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος με ένα σύστημα τριών αισθητήρων θερμοκρασίας και ενός καταγραφικού αισθητήρων.

Ο χρόνος αναμονής για κάθε μέτρηση ορίστηκε έτσι ώστε να σταθεροποιηθεί η διαφορά θερμοκρασίας του συνδέσμου από το περιβάλλον του. Η σταθεροποίηση ορίζεται, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, για τη δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας), που αφορά βέβαια στην εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος. Η διαφορά θερμοκρασίας $\Delta\theta$ του συνδέσμου ως προς το περιβάλλον, θεωρείται ότι έχει σταθεροποιηθεί όταν μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων, που απέχουν μεταξύ τους μία ώρα, η αύξηση της τιμής είναι μικρότερη από ένα βαθμό Κελσίου.

Κατά την διάρκεια του πειράματος η αντίσταση του δοκιμίου και των αγωγών άλλαζε λόγω αλλαγής της θερμοκρασίας τους. Για να διατηρηθεί το ρεύμα σταθερό ελεγχόταν η τάση τροφοδοσίας του μετασχηματιστή έντασης μέσω του αυτομετασχηματιστή υποβιβασμού.

Ο σύνδεσμος τοποθετήθηκε σε ειδικό θάλαμο περιβαλλοντικών δοκιμών. Ο θάλαμος δίνει την δυνατότητα προσομοίωσης, των επιθυμητών από τον χρήστη, συνθηκών υγρασίας και θερμοκρασίας.

Κάθε μέτρηση λήφθηκε δύο φορές. Η επανάληψη πραγματοποιήθηκε διαταράσσοντας τις συνθήκες περιβάλλοντος, ανοίγοντας την πόρτα του θαλάμου και αναμένοντας εκ νέου να επέλθει ισορροπία.

Επιλέχθηκαν τρεις περιβαλλοντικές συνθήκες για να δοκιμαστεί ο προς μελέτη σύνδεσμος. Μία φυσιολογική - μέση στους 20 βαθμούς Κελσίου σε συνδυασμό με 50% σχετική υγρασία. Αυτή θα χρησιμοποιηθεί σαν αναφορά για σύγκριση με άλλες δύο ακραίες. Μία σε έντονα θερμό και υγρό περιβάλλον στους 80 βαθμούς Κελσίου σε συνδυασμό με 60% σχετική υγρασία, και μία σε ψυχρό κλίμα στους -20 βαθμούς Κελσίου. Στα πολύ ψυχρά κλίματα η σχετική υγρασία δεν έχει πρακτική αξία μιας και απειροελάχιστη μεταβολή της απόλυτης υγρασίας συνεπάγεται τεράστια μεταβολή της σχετικής υγρασίας. Με αποτέλεσμα να μην είναι ούτε διαχειρίσιμη από τον θάλαμο, ούτε να αλλάζει πρακτικά την ποσότητα της απόλυτης υγρασίας σε αυτόν.

Τα δοκίμια που μελετήθηκαν είναι τα εξής:

- 1) Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16 (σχήμα 3 – 2).

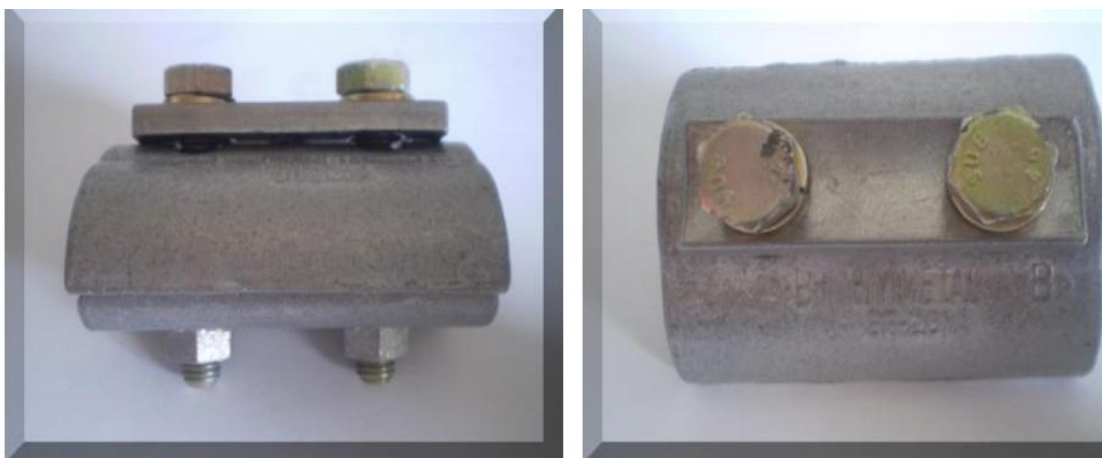
Ο σύνδεσμος χρησιμοποιείται για να συνδέσει έναν αγωγό διατομής 35 mm² με έναν 16 mm²



Σχήμα 3–2: Σύνδεσμος αγωγών ACSR,
Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16

2) Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50 (σχήμα 3 – 3).

Ο σύνδεσμος χρησιμοποιείται για να συνδέσει έναν αγωγό διατομής 95 mm² με αγωγούς από 16 mm² έως 50 mm².



Σχήμα 3-3: Σύνδεσμος αγωγών ACSR,
Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50

Οι δύο τύποι συνδέσμων είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο και είναι όμοιας διάταξης ως προς την τοποθέτηση των αγωγών και την σχεδίαση των κοχλιών σύσφιξης.

Απεικονίζονται σε σύγκριση στα σχήματα 3-4 και 3-5.



Σχήμα 3-4: Σύνδεσμοι: α) Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16
β) Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50



Σχήμα 3 – 5: Σύνδεσμοι α) Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16
β) Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50

Μετρήθηκαν δύο σύνδεσμοι (δοκίμια) για κάθε τύπο.

Το ρεύμα καταπόνησης των συνδέσμων επιλέχτηκε στα 100 A, 200 A και 300 A. Η επιλογή βασίστηκε στις τιμές των ονομαστικών ρευμάτων των αγωγών που συνδέουν οι σύνδεσμοι και των ονομαστικών ρευμάτων των συνδέσμων, όπως αυτά έχουν υπολογιστεί σε προηγούμενες διπλωματικές εργασίες .

Το ονομαστικό ρεύμα των αγωγών ACSR διατομής 16 mm² είναι 136 A. Το ονομαστικό ρεύμα του συνδέσμου Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50 έχει βρεθεί από δοκιμή υπερθέρμανσης σε προηγούμενη διπλωματική εργασία στα 380 A.

Η ροπή σύσφιξης των κοχλιών των συνδέσμων ορίστηκε στα 20 Nm, σύμφωνα με τις προδιαγραφές βάση της διατομής του κοχλία. Ακόμα θεωρήθηκε ενδιαφέρον να ελεγχθεί η συμπεριφορά των συνδέσμων στις επιλεγμένες συνθήκες για μια μικρότερη ροπή σύσφιξης στα 15 Nm, όπου ο σύνδεσμος θα ήταν χαλαρός.

Στη συνέχεια δίνονται αναλυτικά τα όργανα, τα εξαρτήματα καθώς και λεπτομέρειες για την υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας.

3.1 Αυτομετασχηματιστής

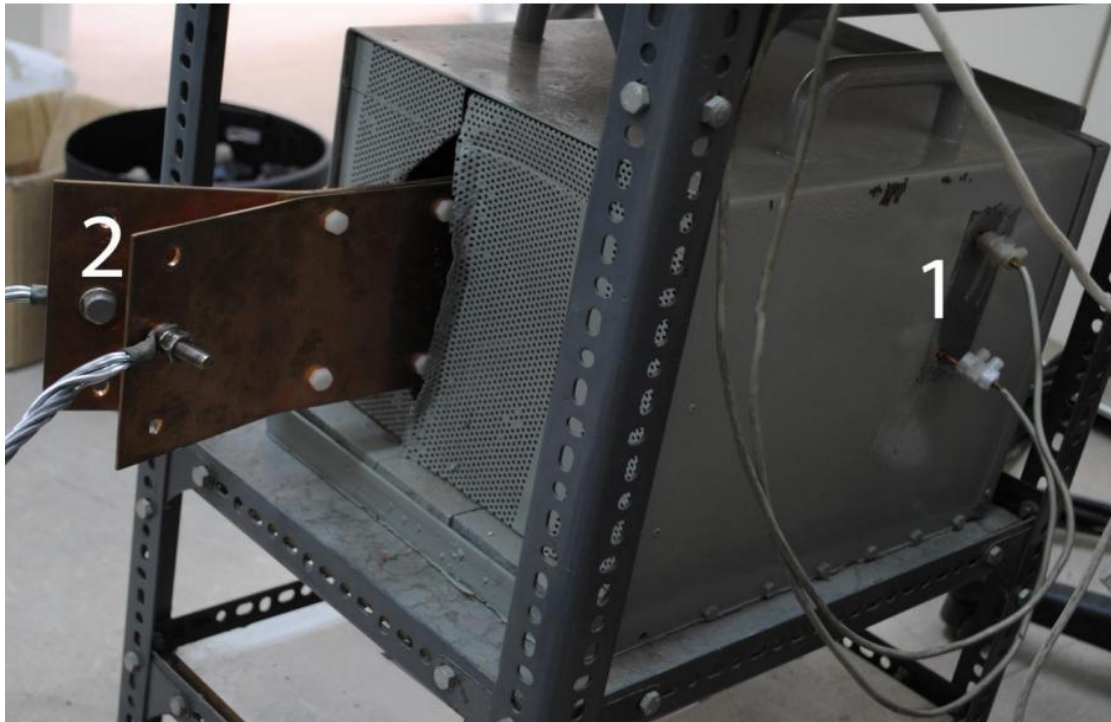
Ο αυτομετασχηματιστής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο S-260-5 (Yamabishi Electric) (σχήμα 3.1-1) και έχει τέσσερις ακροδέκτες. Στους δύο ακροδέκτες εισόδου συνδέεται η τάση του δικτύου 230 V και στους δύο ακροδέκτες εξόδου συνδέονται εσωτερικά του μετασχηματιστή με το ένα άκρο του δευτερεύοντος τυλίγματος και την ενδιάμεση λήψη αντίστοιχα. Η ενδιάμεση λήψη ρυθμίζεται μέσω ποτενσιόμετρου. Με τον τρόπο αυτό η τάση στην έξοδο του αυτομετασχηματιστή μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ 0 - 230 V.



Σχήμα 3.1-1: Αυτομετασχηματιστής ενδιάμεσης λήψης (Variac)

3.2 Μετασχηματιστής έντασης

Χρησιμοποιήθηκε μετασχηματιστής ρεύματος (σχήμα 3.2-1) για την προσομοίωση του δικτύου μέσης τάσης. Ο Μ/Σ είναι μέγιστης ισχύος 1,5 kVA, τάσης εξόδου $V_{out,max}=2,5$ V. Αποτελεί ιδιοκατασκευή του εργαστηρίου.



Σχήμα 3.2-1: Μετασχηματιστής Έντασης
1. Ακροδέκτες εισόδου Μ/Σ
2. Ακροδέκτες εξόδου Μ/Σ

3.3 Οι αγωγοί

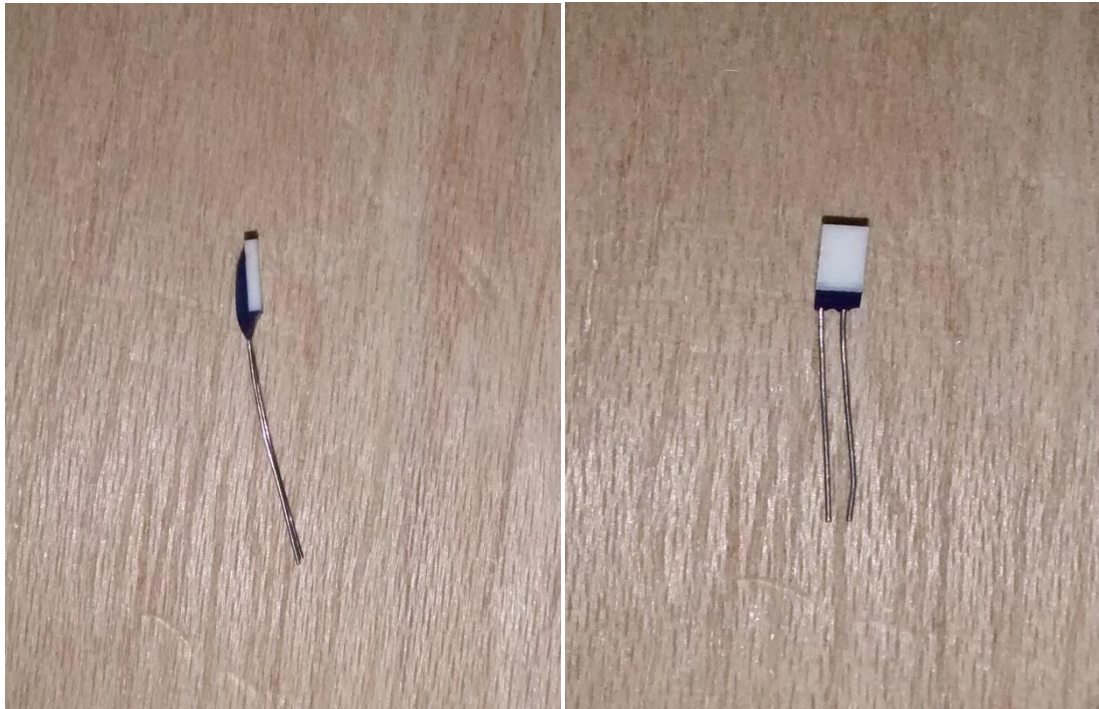
Οι αγωγοί (σχήμα 3 – 8) της διάταξης είναι πολύκλωνοι αγωγοί ASCR, από τους οποίους έχει αφαιρεθεί η χαλύβδινη ψυχή. Η αφαίρεση αυτή κρίθηκε απαραίτητη λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που εμφάνιζε ο χάλυβας στις υψηλές τιμές ρευμάτων που έχουν οριστεί για τη διεξαγωγή του πειράματος. Αυτή η αύξηση θερμοκρασίας θα επηρέαζε τις μετρήσεις των δοκιμίων, λόγω μεταφοράς θερμότητας. Οι αγωγοί συνδέονται στις πλάκες εξόδου του μετασχηματιστή έντασης και είναι διπλοί όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3-1. Έτσι το ρεύμα που διέρρεε κάθε αγωγό μειώθηκε στο μισό. Ως αποτέλεσμα μειώθηκε περαιτέρω η παραγόμενη θερμότητα από τους αγωγούς. Στην μεριά του δοκιμίου τα ζεύγη συνεστράφησαν σε ένα, για να τοποθετηθεί ο σύνδεσμος και αφαιρέθηκε κατάλληλος αριθμός κλώνων ώστε να δημιουργηθεί το κατάλληλο, για τον κάθε σύνδεσμο, πάχος αγωγού.



Σχήμα 3.3-1: 1. Πρώτος αγωγός για τον ένα πόλο εξόδου
2. Δεύτερος αγωγός για τον ένα πόλο εξόδου
3. Πρώτος αγωγός για τον δεύτερο πόλο εξόδου
4. Δεύτερος αγωγός για τον δεύτερο πόλο εξόδου
5. Σύνδεσμος για τη σύνδεση των αγωγών τις πλάκες του Μ/Σ έντασης

3.4 Αισθητήρες θερμοκρασίας

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν τρεις αισθητήρες PT100 (σχήμα 3.4-1). Είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι για μετρήσεις θερμοκρασίας. Η μέτρηση γίνεται μέσω παρακολούθησης της αντίστασης του στοιχείου, καθώς η αντίσταση αλλάζει με την θερμοκρασία. Στους 0 βαθμούς Κελσίου ο αισθητήρας παρουσιάζει 100 Ω αντίσταση, από όπου πήρε και το όνομά του. Ο πρώτος τοποθετήθηκε στο πάνω μέρος του συνδέσμου μεταξύ των κοχλιών σύσφιξης, ο δεύτερος στην πλαϊνή μεριά του συνδέσμου μεταξύ των αγωγών και ο τρίτος στον αγωγό σε απόσταση 5 εκατοστών από την άκρη του συνδέσμου.



Σχήμα 3.4-1: Αισθητήρας Θερμοκρασίας PT-100

3.5 Καταγραφικό αισθητήρων θερμοκρασίας

Η παρακολούθηση της αντίστασης των τριών αισθητήρων πραγματοποιείται από το καταγραφικό BRAINCHILD VR18 Paperless Recorder (σχήμα 3.5-1). Το καταγραφικό εν συνεχεία μετατρέπει τις τιμές αντίστασης σε βαθμούς Κελσίου σύμφωνα με τις προδιαγραφές του αισθητήρα PT-100.

Για την άμεση απεικόνιση των θερμοκρασιών των αισθητήρων χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Bar Graph Mode από το μενού του BRAINCHILD VR18 Paperless Recorder.



Σχήμα 3.5-1: Καταγραφικό αισθητήρων θερμοκρασίας

3.6 Θάλαμος περιβαλλοντικών δοκιμών

Για την προσομοίωση των επιλεγμένων συνθηκών υγρασίας και θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε ο θάλαμος περιβαλλοντικών δοκιμών Memmert CTC 256 (σχήμα 3.6-1). Στον εσωτερικό του χώρο τοποθετήθηκε η διάταξη του συνδέσμου. Ο σύνδεσμος σφίχτηκε στην επιλεγμένη ροπή, οι αγωγοί και οι αισθητήρες θερμοκρασίας τοποθετήθηκαν στις θέσεις που προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 3-6-1: Θάλαμος προσομοίωσης θερμοκρασίας και υγρασίας περιβάλλοντος Memmert CTC 256

3.7 Αμπερόμετρο

Χρησιμοποιήθηκε το Amprobe AD105A (σχήμα 3 – 12), επαγωγικό αμπερόμετρο που μετράει μέσω του μαγνητικού πεδίου του ρεύματος, χωρίς να εμπλέκεται ηλεκτρικά στο κύκλωμα.



Σχήμα 3.7-1: Αμπεροτσιμπίδα (επαγωγικό αμπερόμετρο) που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ρεύματος στους αγωγούς

1. Ψηφιακή οθόνη: 3 ¼ ψηφίων LCD)
2. Λουρί καρπού (εμποδίζει την ολίσθηση από το χέρι)
3. ON/OFF
4. Hz: Αυτό το πλήκτρο επιλέγει τη λειτουργία της συχνότητας
5. Πλήκτρο DCA zero: Αντισταθμίζει τον παραμένοντα μαγνητισμό
6. Πλήκτρο DC/AC: Επιλογή μεταξύ AC και DC ρεύματος
7. Μοχλός ανοίγματος τσιμπίδας
8. Πλήκτρο Peak Hold: Κρατά τη μέγιστη μετρούμενη τιμή
9. Τσιμπίδα: Σχεδιασμένη να λαμβάνει το ρεύμα που περνάει μέσα από τον αγωγό

3.8 Παλμογράφος

Για την μέτρηση της εμφανιζόμενης τάσης στα άκρα του συνδέσμου κατά την τροφοδότηση του με τις προκαθορισμένες τιμές ρεύματος χρησιμοποιήθηκε ο ψηφιακός παλμογράφος Tektronix TBS 1052B-EDU (σχήμα 3 – 13).



Σχήμα 3.8-1: Ψηφιακός παλμογράφος, χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της εμφανιζόμενης τάσης στον σύνδεσμο

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η χρήση ψηφιακού παλμογράφου κρίθηκε απαραίτητη. Η αιτία ήταν η έλλειψη ακρίβειας στις μετρήσεις του αναλογικού παλμογράφου. Λόγο του ισχυρού μαγνητικού πεδίου του ρεύματος του μετασχηματιστή έντασης τα ηλεκτρόνια στον καθοδικό σωλήνα του αναλογικού παλμογράφου εκτρέπονταν της πορείας τους σε τυχαίες τροχιές. Αποτέλεσμα ήταν ασαφείς ενδείξεις στον παλμογράφο.

3.9 Ροπόκλειδο

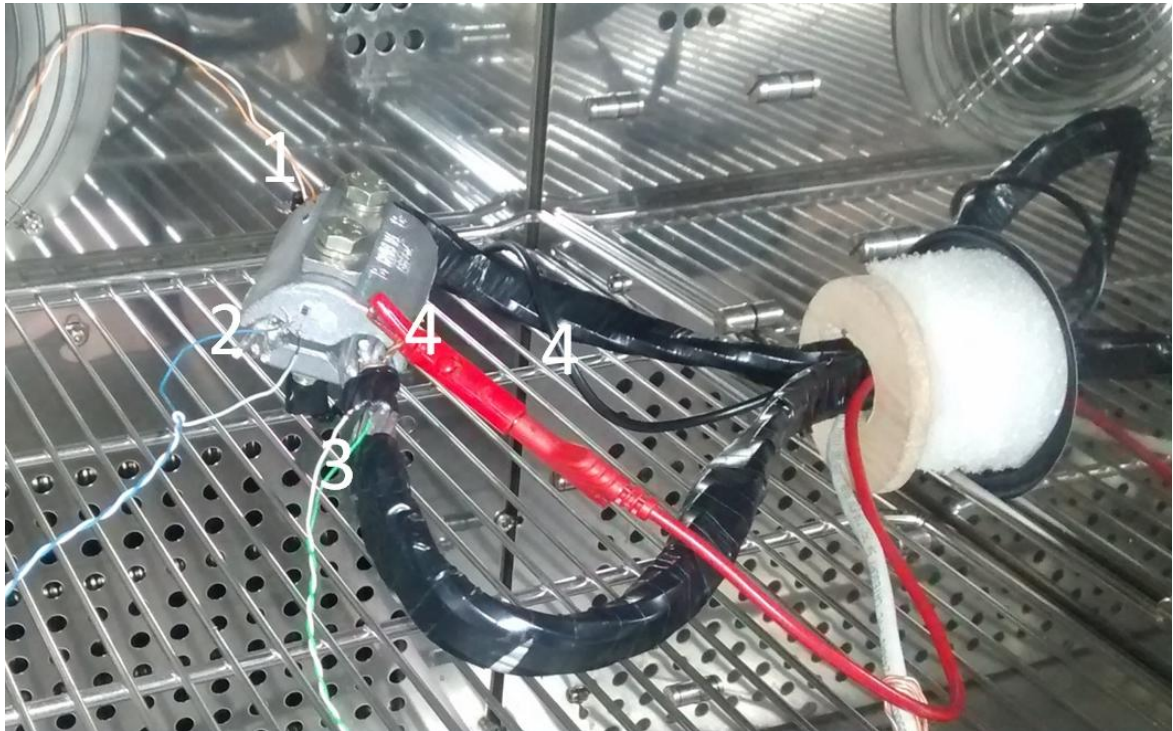
Για τη σύσφιξη των συνδέσμων χρησιμοποιήθηκε ροπόκλειδο Britool (σχήμα 3 – 14), ώστε να εφαρμοστούν οι προκαθορισμένες ροπές σύσφιξης στους κοχλίες των συνδέσμων.



Σχήμα 3.9-1: Ροπόκλειδο για την ρύθμιση της ροπής σύσφιξης

3.10 Διάταξη θαλάμου

Στο σχήμα 3.10-1 απεικονίζεται η διάταξη που βρίσκεται μέσα στον θάλαμο περιβαλλοντικών δοκιμών. Παρατηρείται ο σύνδεσμος με τους αγωγούς, τα κροκοδειλάκια (2) και οι τρεις αισθητήρες θερμοκρασίας. Στους αγωγούς χρησιμοποιήθηκε μονωτική ταινία για να αποτραπεί το βραχυκύκλωμα στα σημεία που έρχονταν σε επαφή. Τα κροκοδειλάκια (2) χρησιμοποιήθηκαν για μέτρηση της τάσης του συνδέσμου στον παλμογράφο και οι τρεις αισθητήρες θερμοκρασίας για την παρακολούθηση της διάταξης.



Σχήμα 3.10-1: Το δοκίμιο τοποθετημένο στον χώρο του θαλάμου περιβαλλοντικών δοκιμών.

- 1) Πρώτος αισθητήρας θερμοκρασίας μεταξύ κοχλιών σύσφιξης
- 2) Δεύτερος αισθητήρας θερμοκρασίας μεταξύ των αγωγών
- 3) Τρίτος αισθητήρας θερμοκρασίας τοποθετημένος στον αγωγό
- 4) Κροκοδειλάκια για μέτρηση τάσης στον παλμογράφο

4. Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν σύμφωνα με την πειραματική διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.

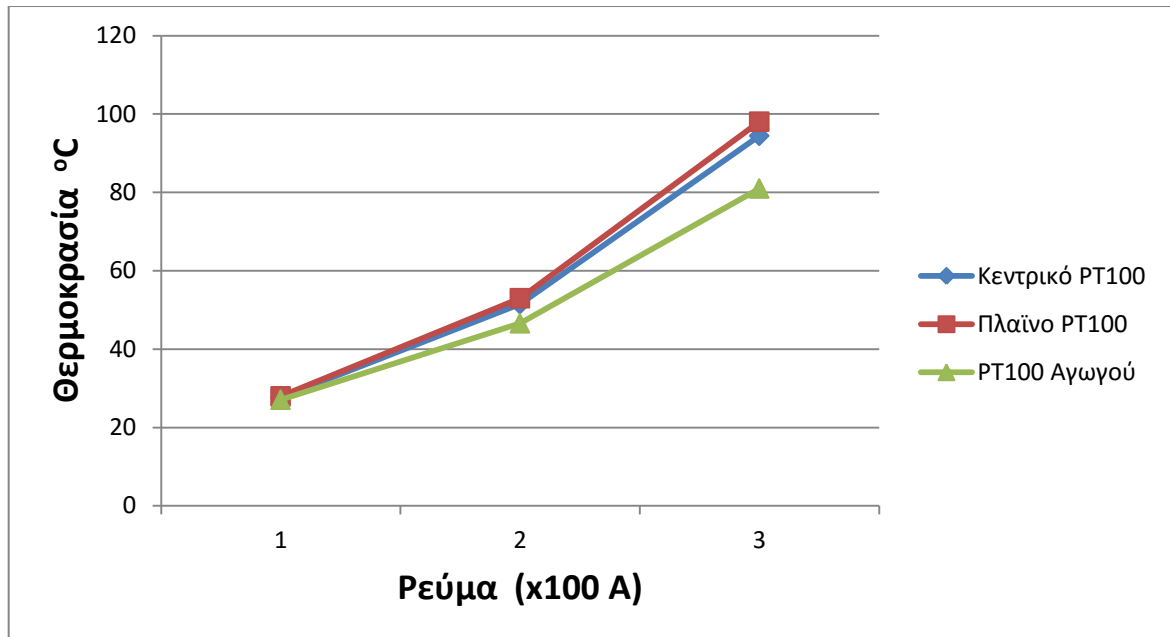
Τα αποτελέσματα δίνονται σε μορφή διαγραμμάτων για την ευκολότερη διεξαγωγή συμπερασμάτων. Οι αναλυτικές μετρήσεις δίνονται σε μορφή πίνακα στο παράρτημα Α.

Οι τιμές που παρουσιάζονται στα διαγράμματα είναι ο μέσος όρος των δύο τιμών που λήφθηκαν, από επανάληψη της κάθε μέτρησης όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.

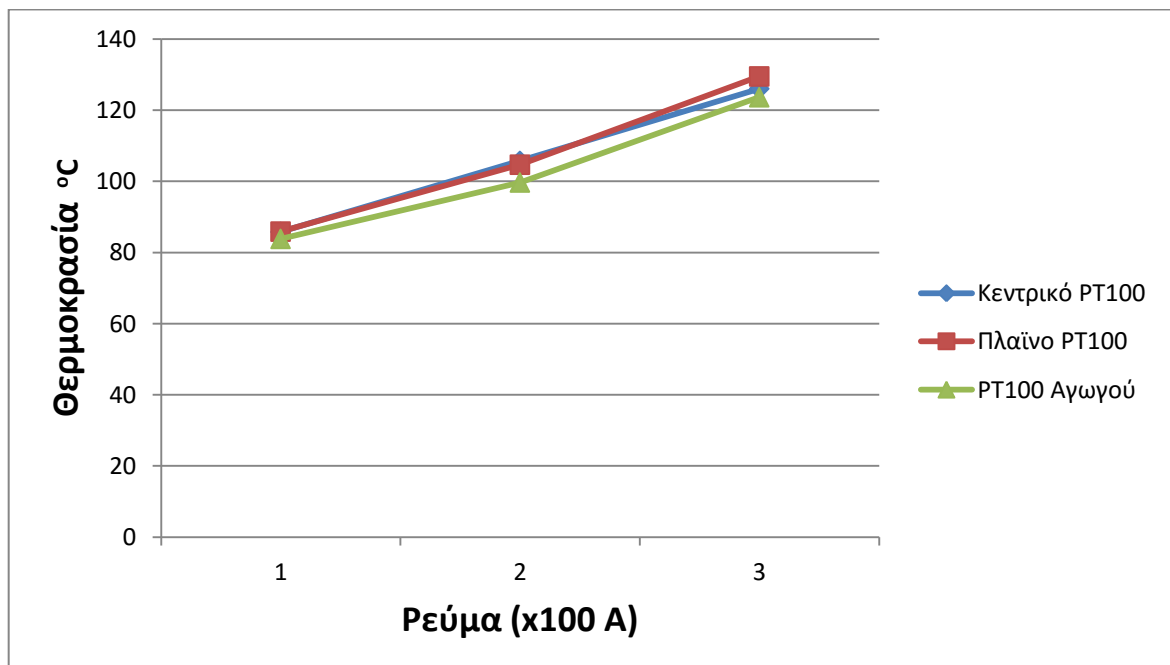
Παρακάτω δίνονται:

- 1) τα διαγράμματα θερμοκρασίας των αισθητήρων PT100 που ήταν τοποθετημένοι στην διάταξη συναρτήσεως του ρεύματος.
- 2) η πτώση τάσης πάνω στον κάθε σύνδεσμο συναρτήσεως του ρεύματος
 - Τα διαγράμματα 4.1.1-1 έως 4.1.2-4 αφορούν τον πρώτο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16
 - Τα διαγράμματα 4.2.1-1 έως 4.2.2-4 αφορούν τον δεύτερο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16
 - Τα διαγράμματα 4.3.1-1 έως 4.3.2-4 αφορούν τον πρώτο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50
 - Τα διαγράμματα 4.4.1-1 έως 4.4.2-4 αφορούν τον δεύτερο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50

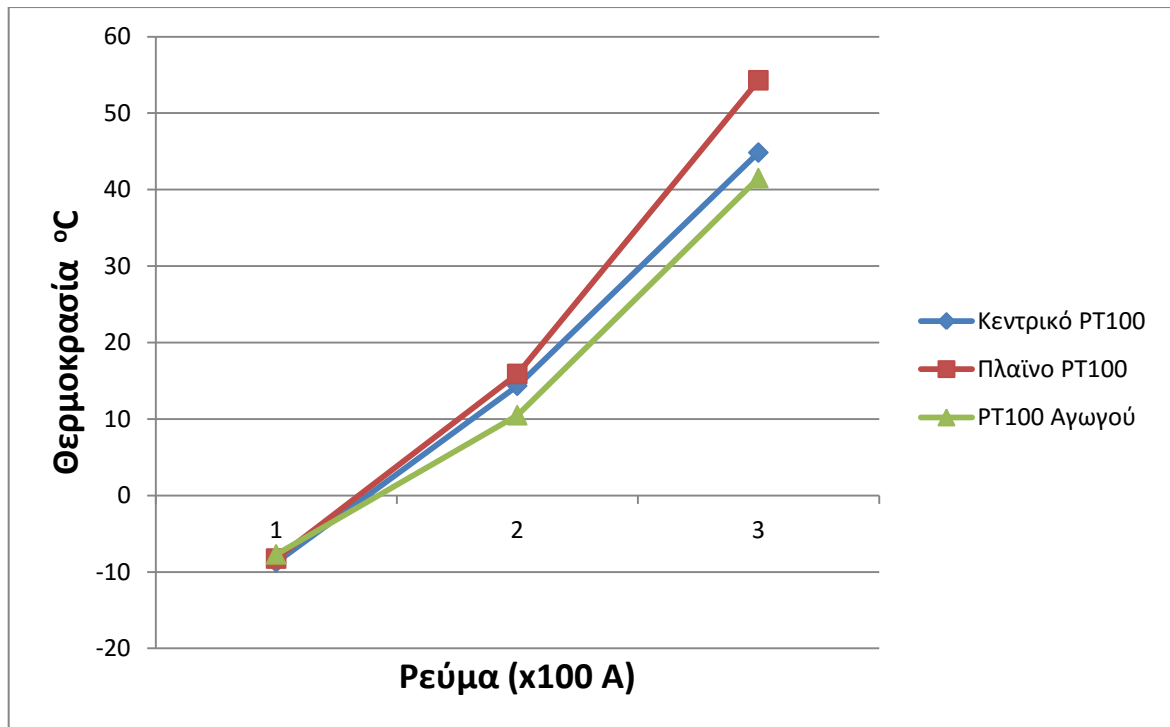
4.1.1 Μετρήσεις για τον πρώτο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφικμένο στα 20Nm.



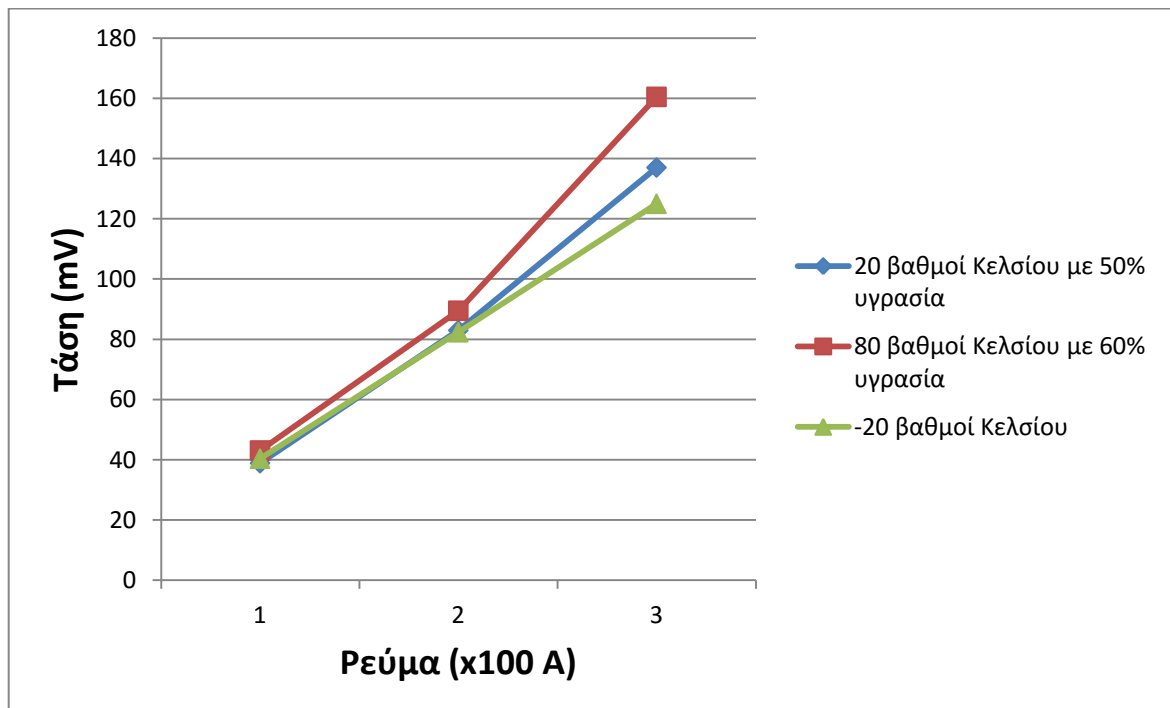
Σχήμα 4.1.1–1: Θερμοκρασίες αισθητήρων του πρώτου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφικμένο στα 20 Nm με συνθήκες θαλάμου 20 βαθμούς Κελσίου και 50% υγρασία για τις τρεις τιμές ρεύματος



Σχήμα 4.1.1–2: Θερμοκρασίες αισθητήρων του πρώτου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφικμένο στα 20 Nm με συνθήκες θαλάμου 80 βαθμούς Κελσίου και 60% υγρασία για τις τρεις τιμές ρεύματος

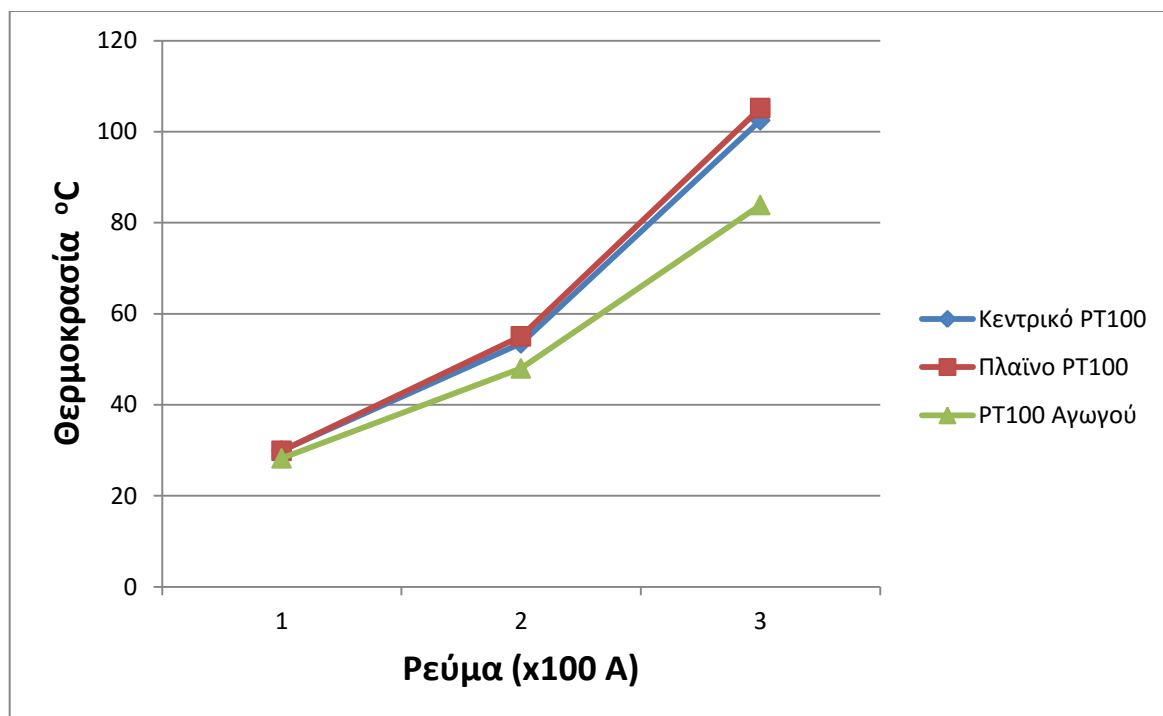


Σχήμα 4.1.1-3: Θερμοκρασίες αισθητήρων του πρώτου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένο στα 20 Nm με συνθήκες θαλάμου -20 βαθμούς Κελσίου για τις τρεις τιμές ρεύματος

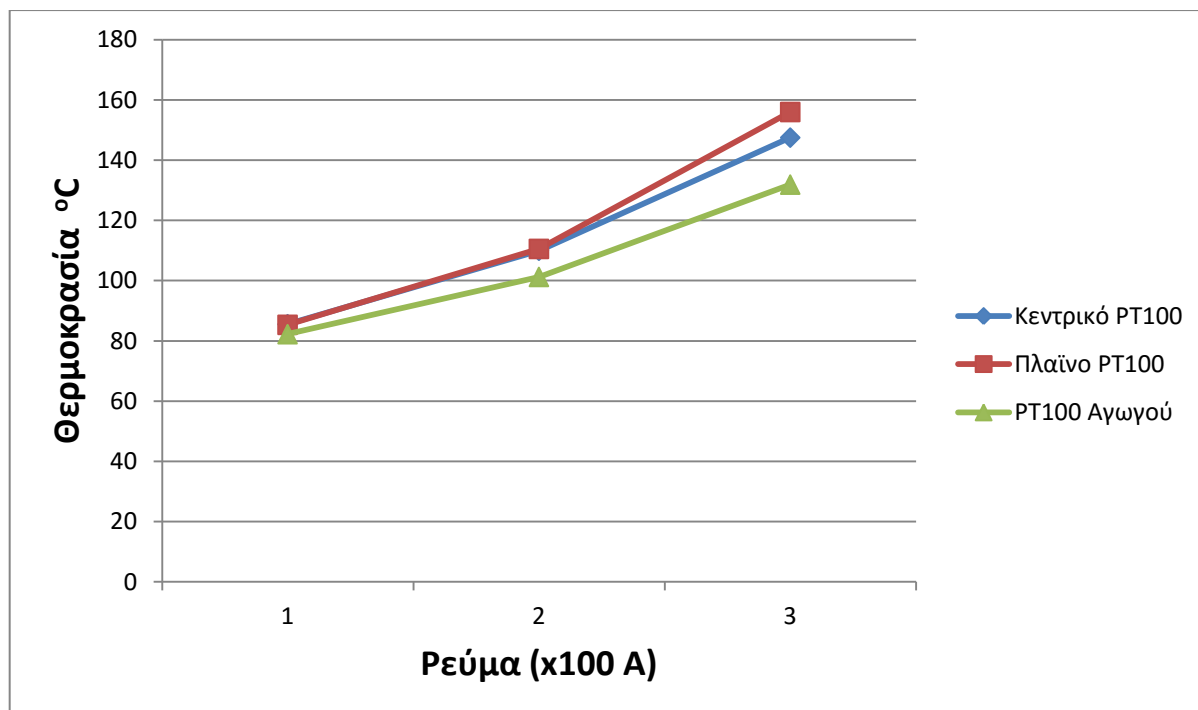


Σχήμα 4.1.1-4: Τάση του πρώτου συνδέσμου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένο στα 20 Nm, στις τρεις περιβαλλοντικές συνθήκες για τις τρεις τιμές ρεύματος

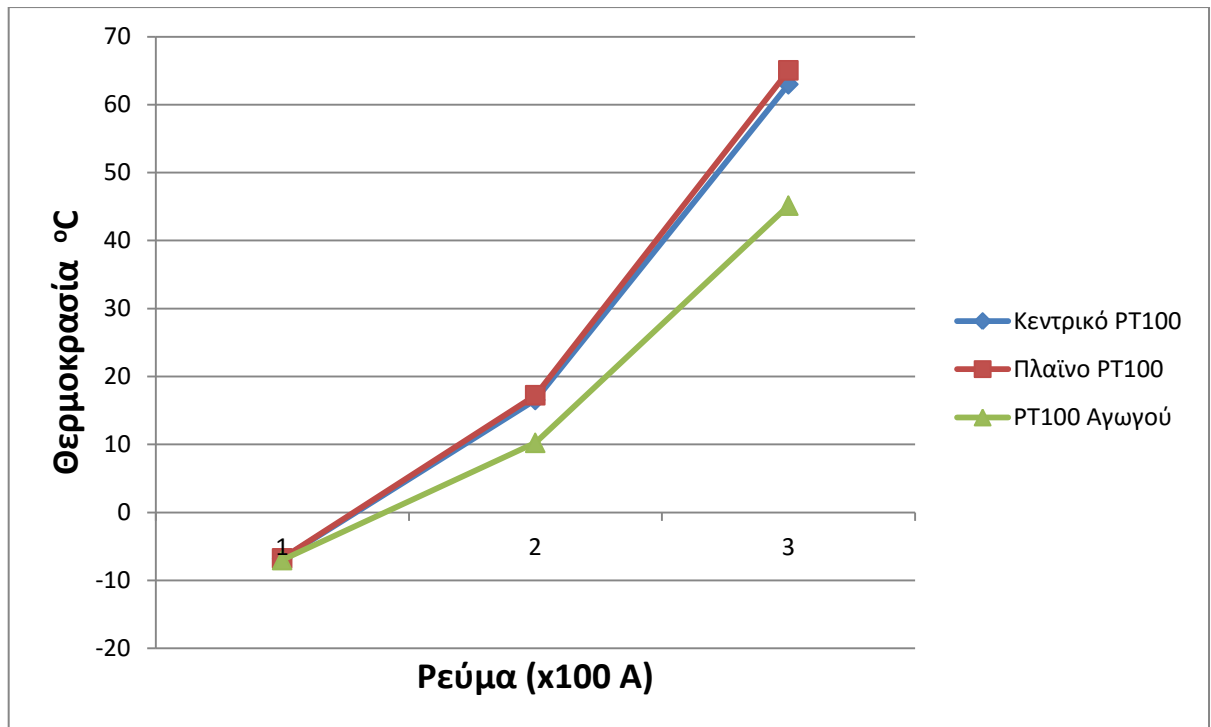
4.1.2 Μετρήσεις για τον πρώτο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφικμένο στα 15Nm.



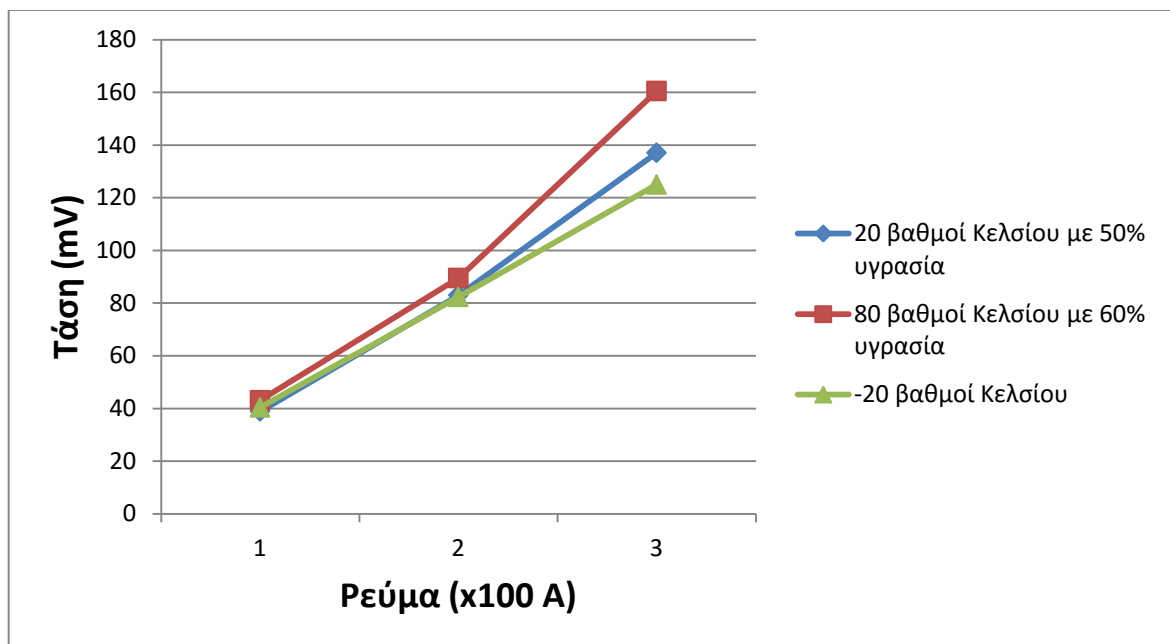
Σχήμα 4.1.2-1: Θερμοκρασίες αισθητήρων του πρώτου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφικμένο στα 15 Nm με συνθήκες θαλάμου 20 °C / 50% για τις τρεις τιμές ρεύματος



Σχήμα 4.1.2-2: Θερμοκρασίες αισθητήρων του πρώτου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφικμένο στα 15 Nm με συνθήκες θαλάμου 80 °C / 60% για τις τρεις τιμές ρεύματος

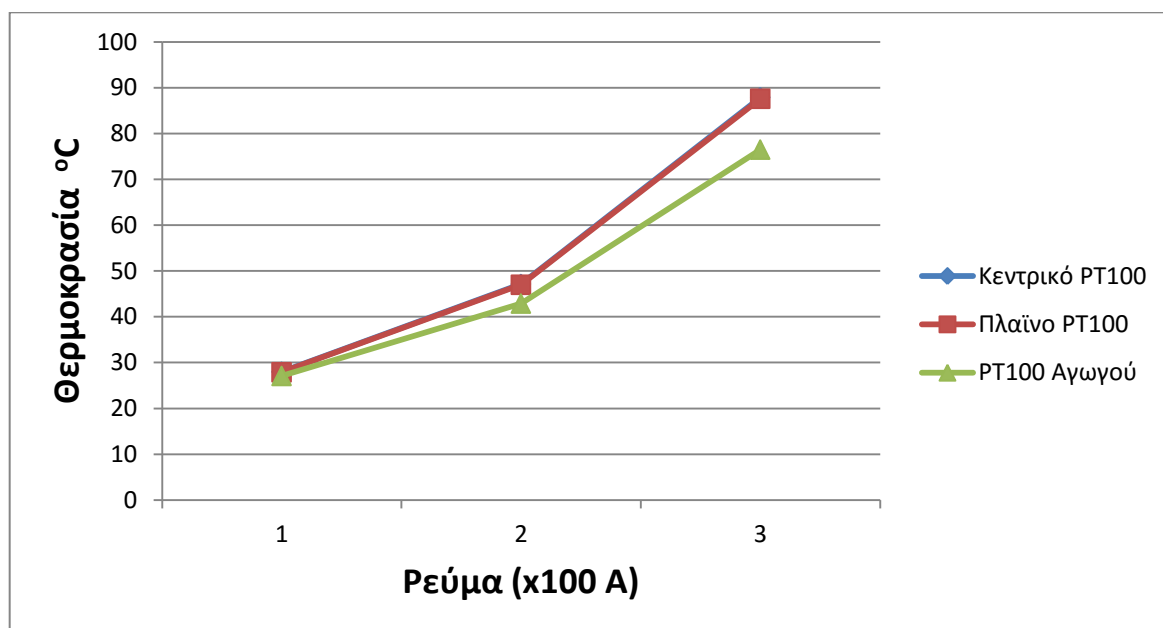


Σχήμα 4.1.2-3: Θερμοκρασίες αισθητήρων του πρώτου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένο στα 15 Nm με συνθήκες θαλάμου -20 °C για τις τρεις τιμές ρεύματος

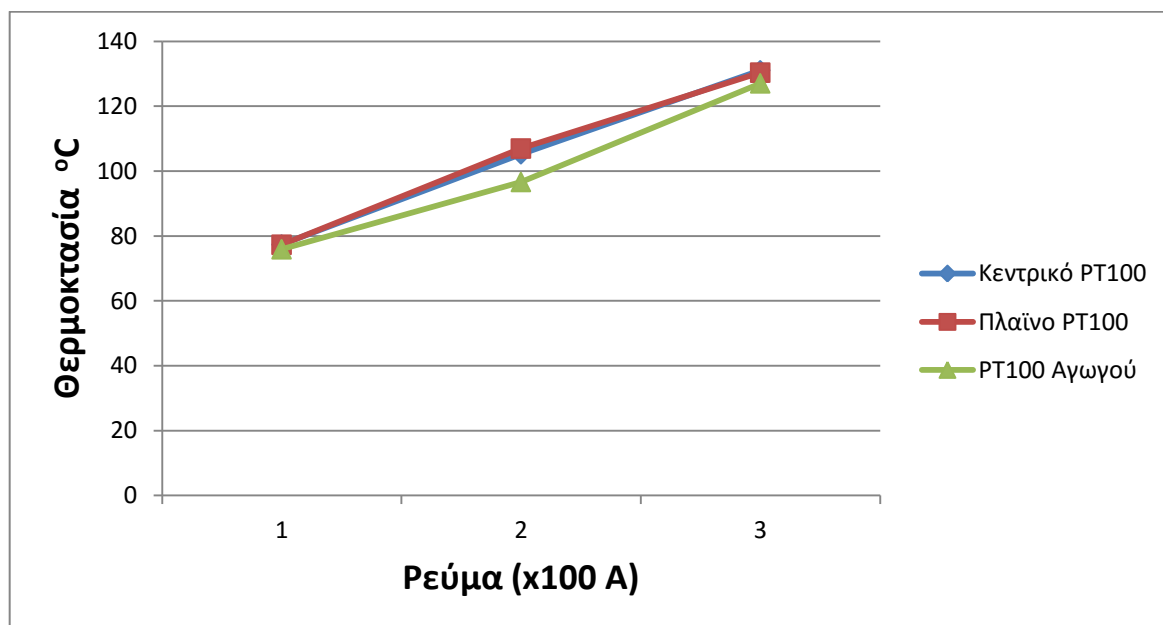


Σχήμα 4.1.2-4: Τάση του πρώτου συνδέσμου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένου στα 15 Nm, στις τρεις περιβαλλοντικές συνθήκες για τις τρεις τιμές ρεύματος

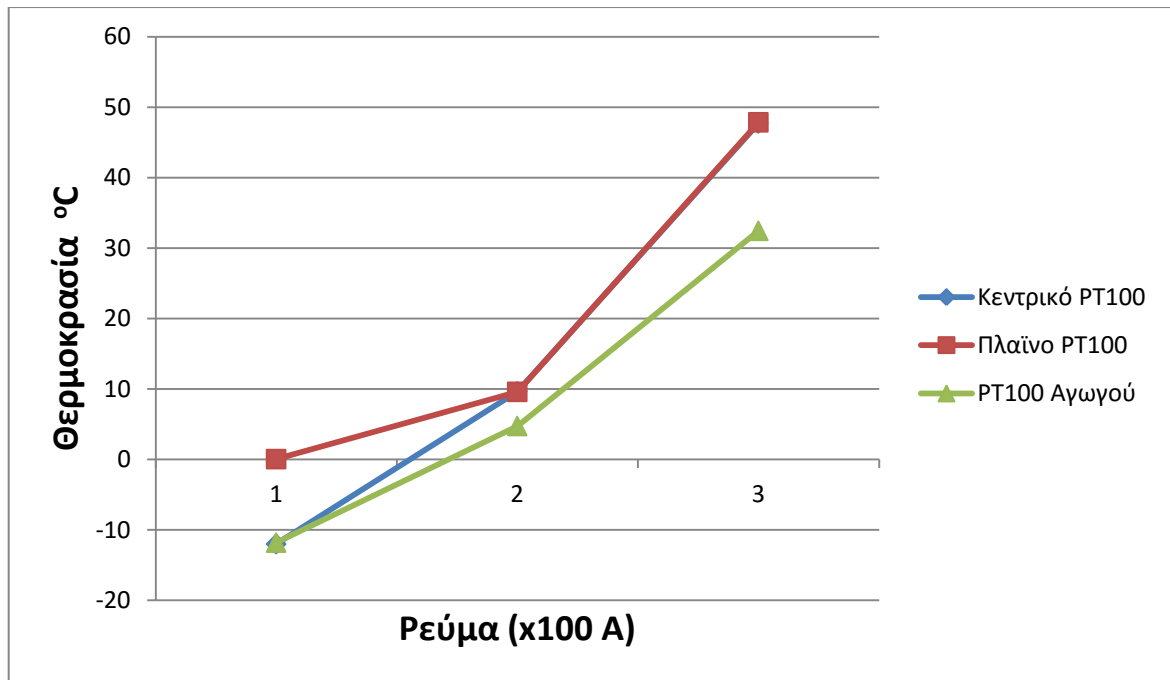
4.2.1 Μετρήσεις για τον δεύτερο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφικμένο στα 20Nm.



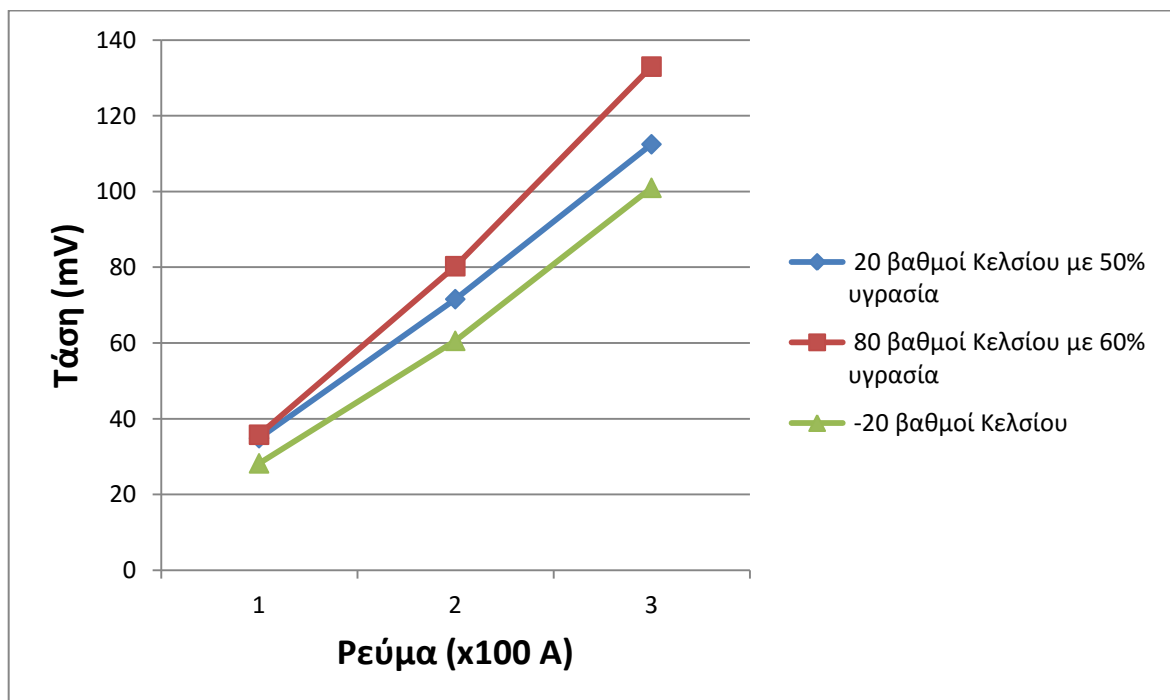
Σχήμα 4.2.1-1: Θερμοκρασίες αισθητήρων του δεύτερου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφικμένο στα 20 Nm με συνθήκες θαλάμου 20 °C / 50% για τις τρεις τιμές ρεύματος



Σχήμα 4.2.1-2: Θερμοκρασίες αισθητήρων του δεύτερου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφικμένο στα 20 Nm με συνθήκες θαλάμου 80 °C / 60% για τις τρεις τιμές ρεύματος

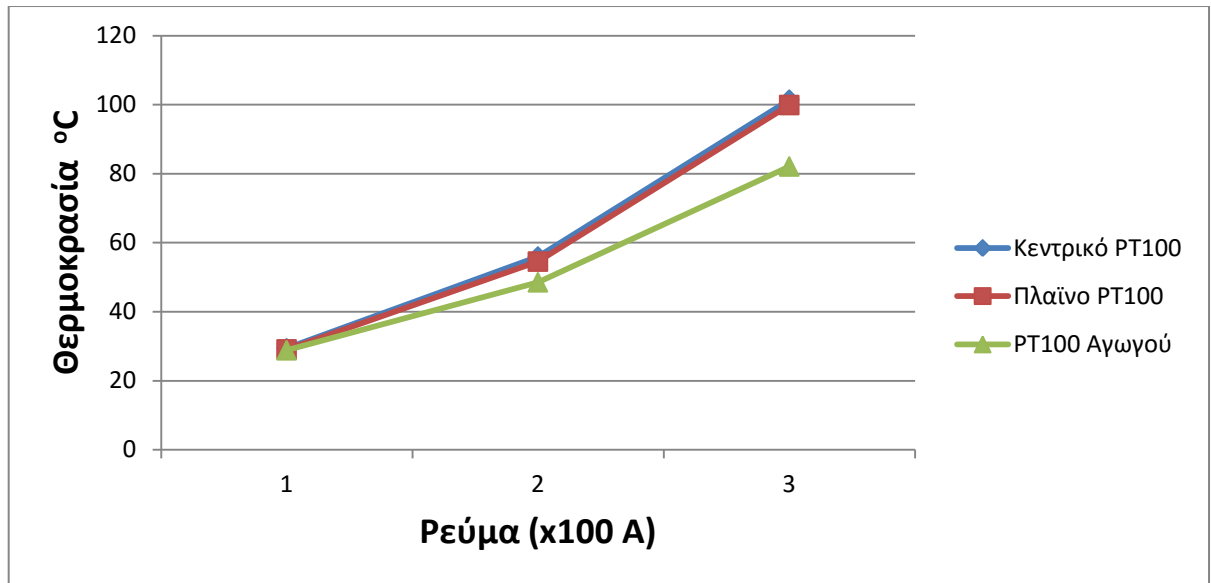


Σχήμα 4.2.1-3: Θερμοκρασίες αισθητήρων του δεύτερου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένο στα 20 Nm με συνθήκες θαλάμου -20 °C για τις τρεις τιμές ρεύματος

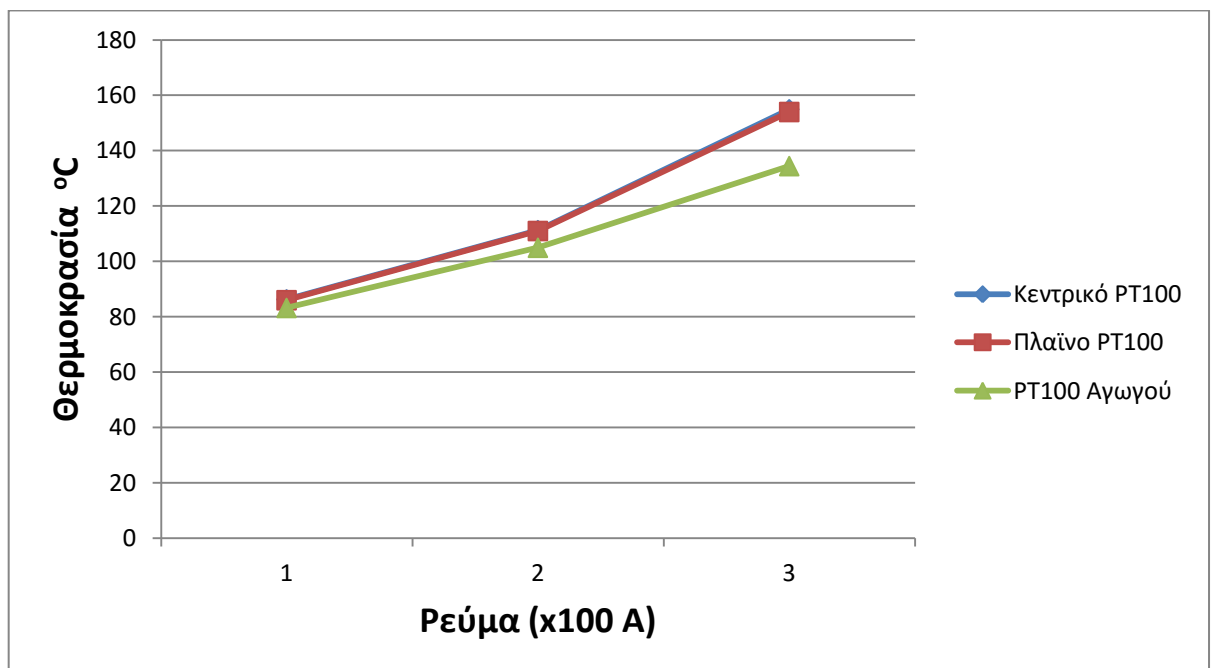


Σχήμα 4.2.1-4: Τάση του δεύτερου συνδέσμου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένου στα 20 Nm, στις τρεις περιβαλλοντικές συνθήκες για τις τρεις τιμές ρεύματος

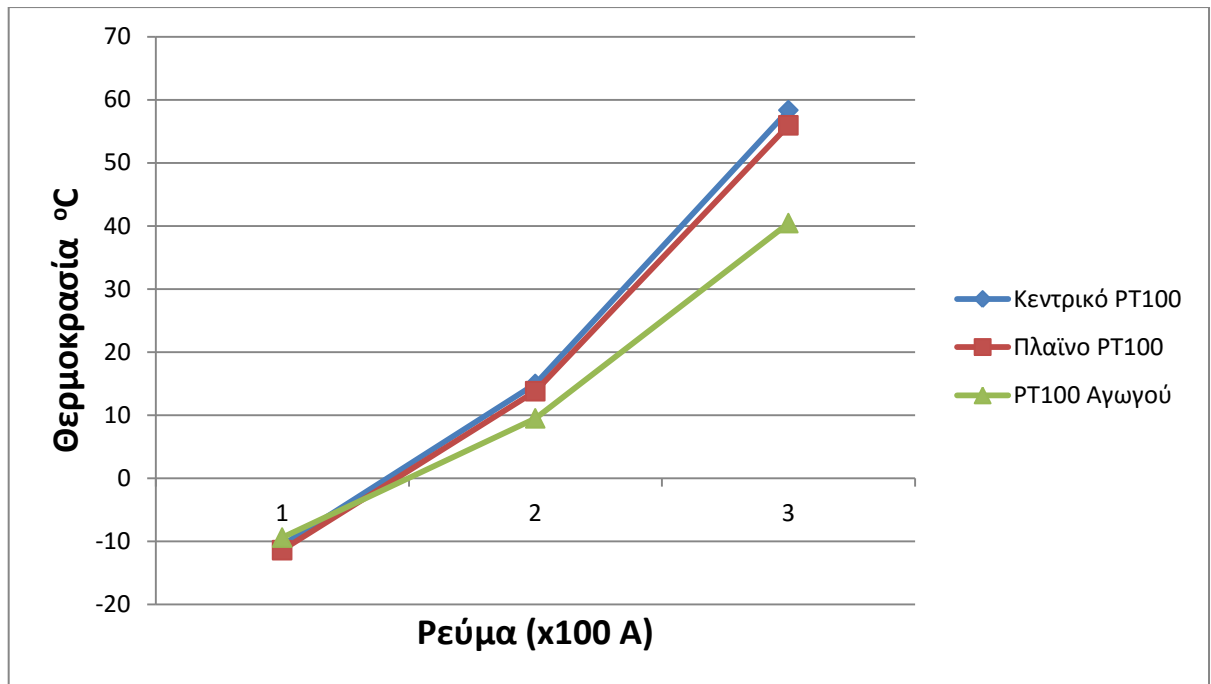
4.2.2 Μετρήσεις για τον δεύτερο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένο στα 15Nm.



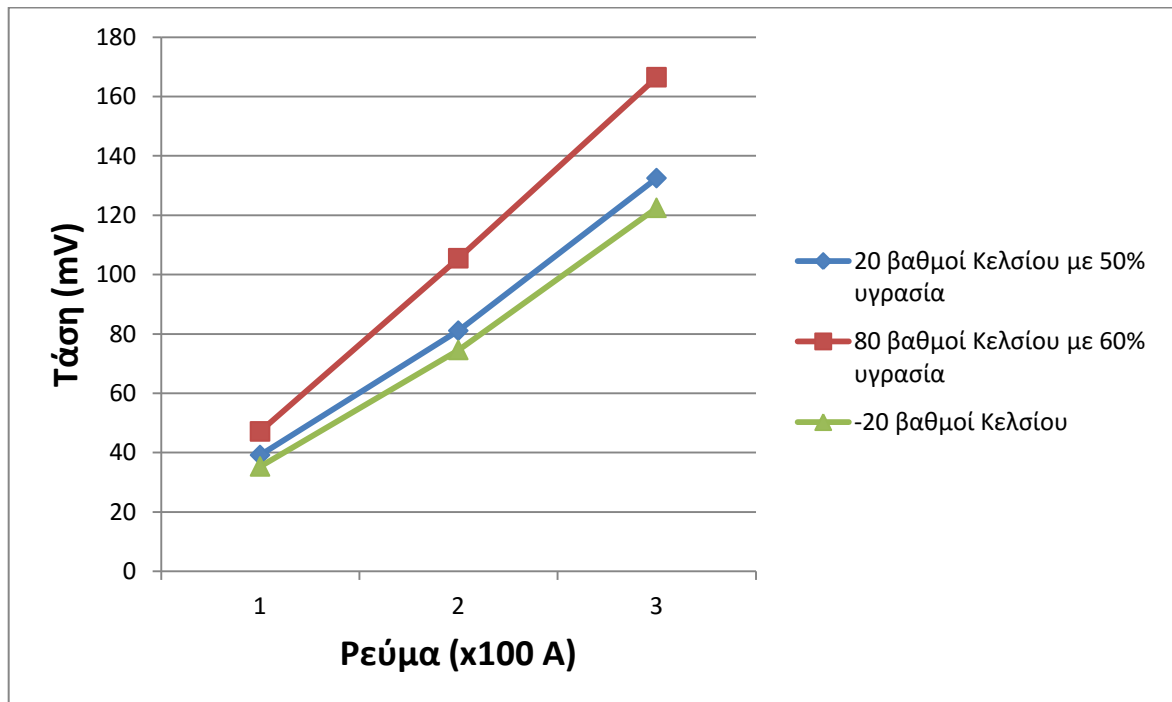
Σχήμα 4.2.2-1: Θερμοκρασίες αισθητήρων του δεύτερου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένο στα 15 Nm με συνθήκες θαλάμου 20 °C / 50% για τις τρεις τιμές ρεύματος



Σχήμα 4.2.2-2: Θερμοκρασίες αισθητήρων του δεύτερου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένο στα 15 Nm και με συνθήκες θαλάμου 80 °C / 60% για τις τρεις τιμές ρεύματος

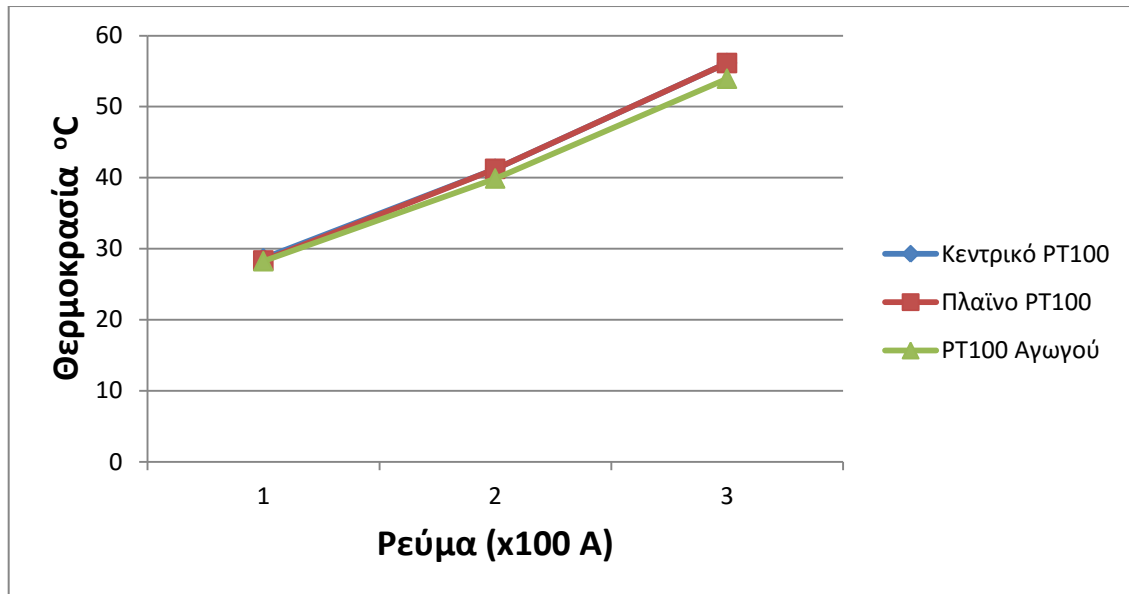


Σχήμα 4.2.2-3: Θερμοκρασίες αισθητήρων του δεύτερου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένο στα 15 Nm με συνθήκες θαλάμου -20 °C για τις τρεις τιμές ρεύματος

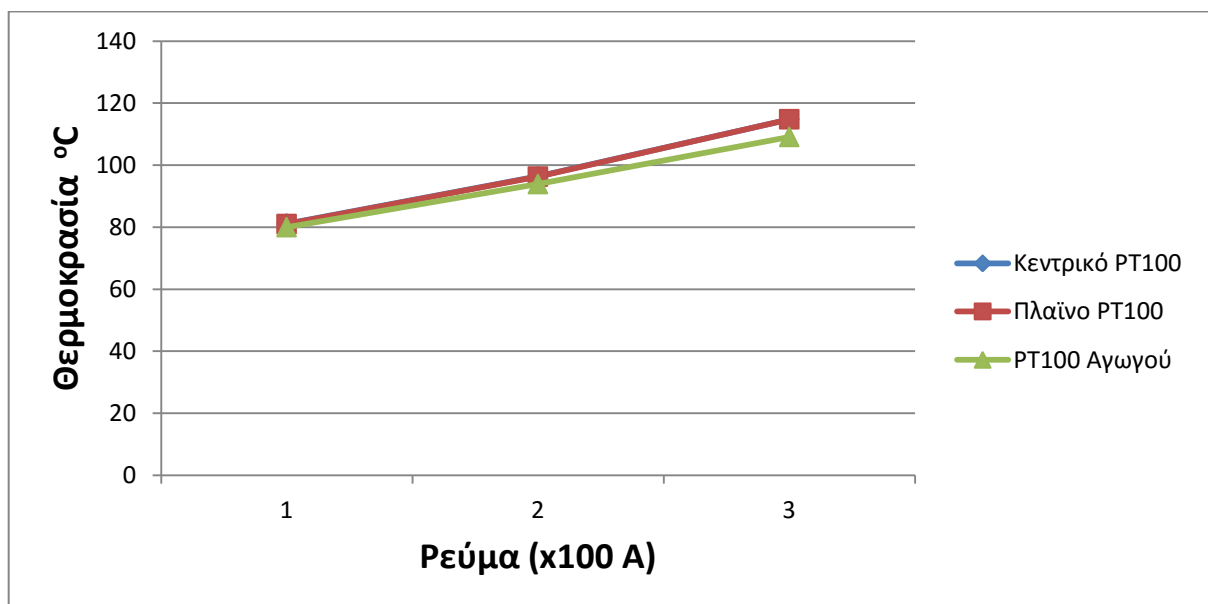


Σχήμα 4.2.2-4: Τάση του δεύτερου συνδέσμου Rivimetal GR-261A AAAC AL 35 – 16 σφιγμένου στα 15 Nm, στις τρεις περιβαλλοντικές συνθήκες για τις τρεις τιμές ρεύματος

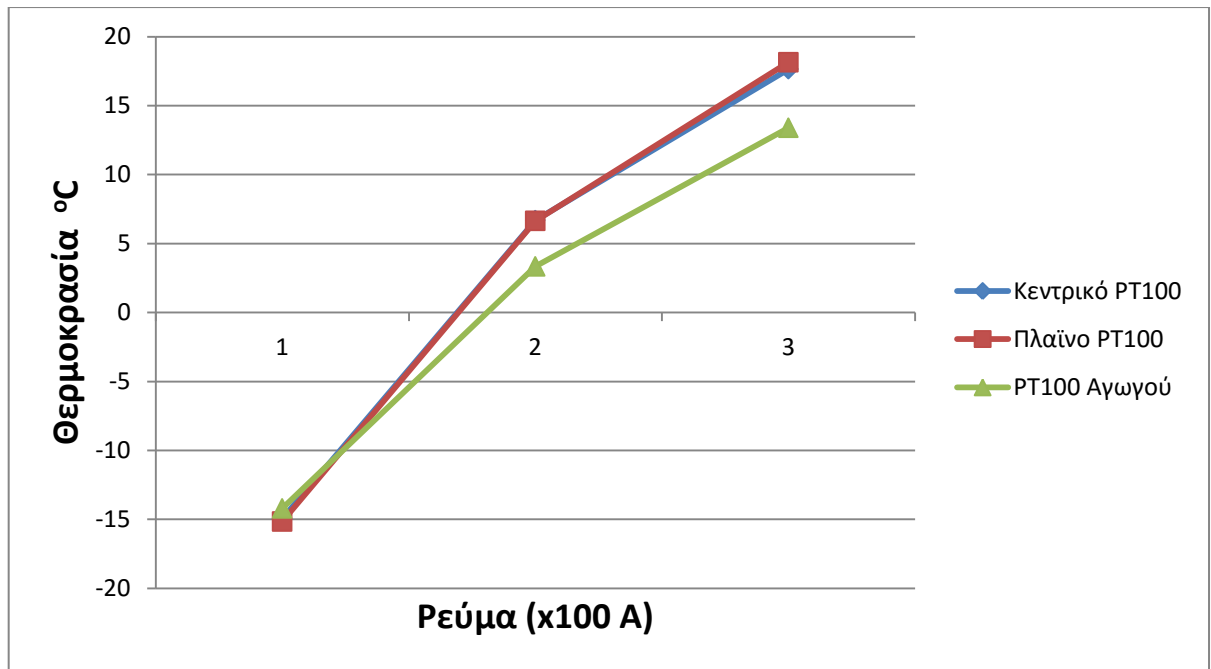
4.3.1 Μετρήσεις για τον πρώτο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφικμένο στα 20Nm.



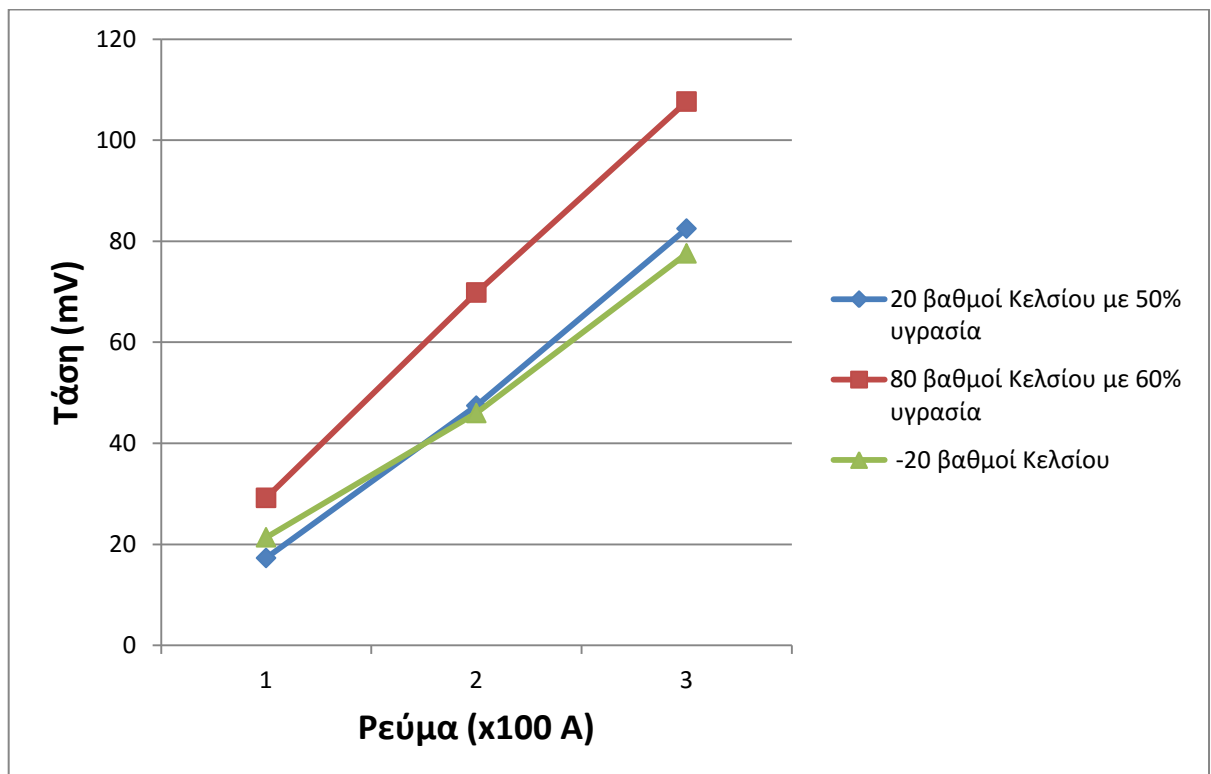
Σχήμα 4.3.1-1: Θερμοκρασίες αισθητήρων του πρώτου Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφικμένο στα 20 Nm με συνθήκες θαλάμου 20 °C / 50% για τις τρεις τιμές ρεύματος



Σχήμα 4.3.1-2: Θερμοκρασίες αισθητήρων του πρώτου Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφικμένο στα 20 Nm με συνθήκες θαλάμου 80 °C / 60% για τις τρεις τιμές ρεύματος

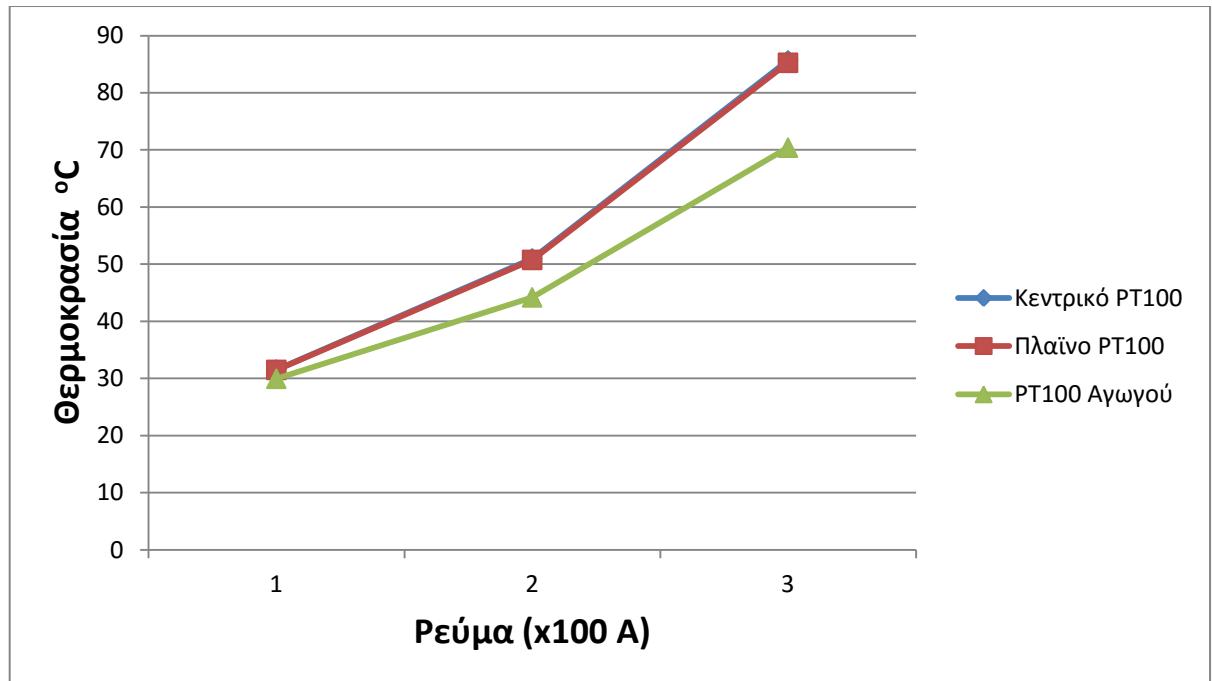


Σχήμα 4.3.1-3: Θερμοκρασίες αισθητήρων του πρώτου Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 20 Nm με συνθήκες θαλάμου -20 °C για τις τρεις τιμές ρεύματος

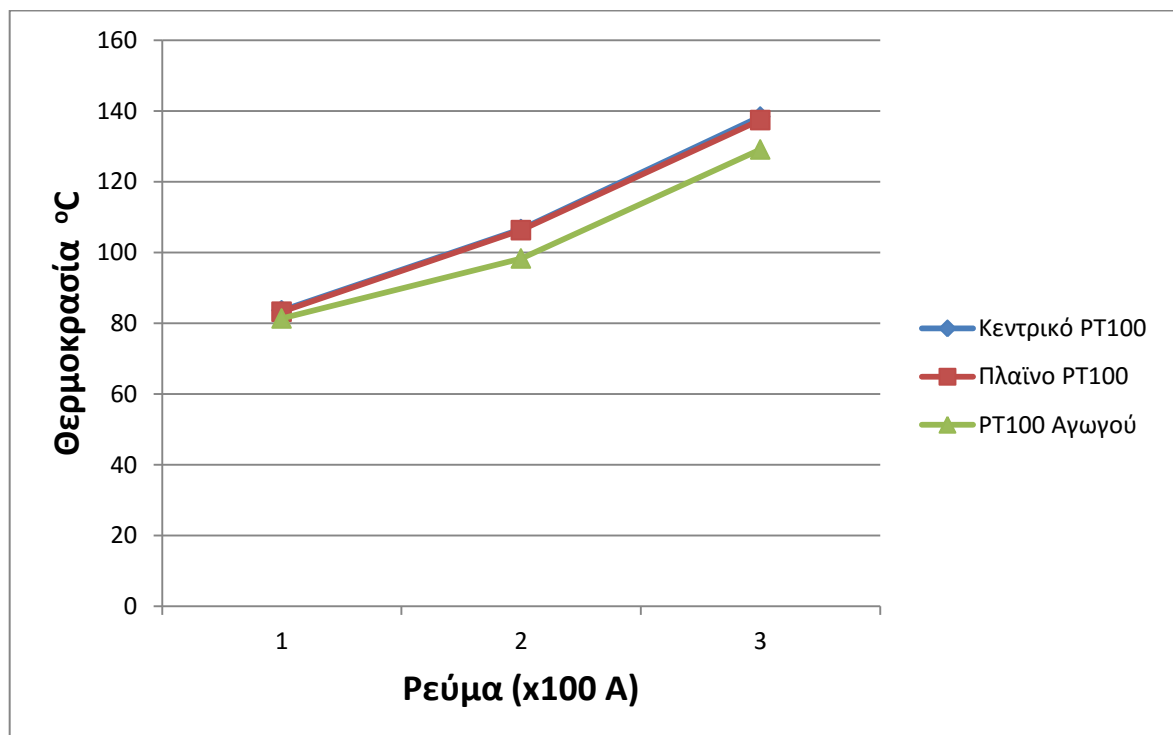


Σχήμα 4.3.1-4: Τάση του πρώτου συνδέσμου Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένου στα 20 Nm, στις τρεις περιβαλλοντικές συνθήκες για τις τρεις τιμές ρεύματος

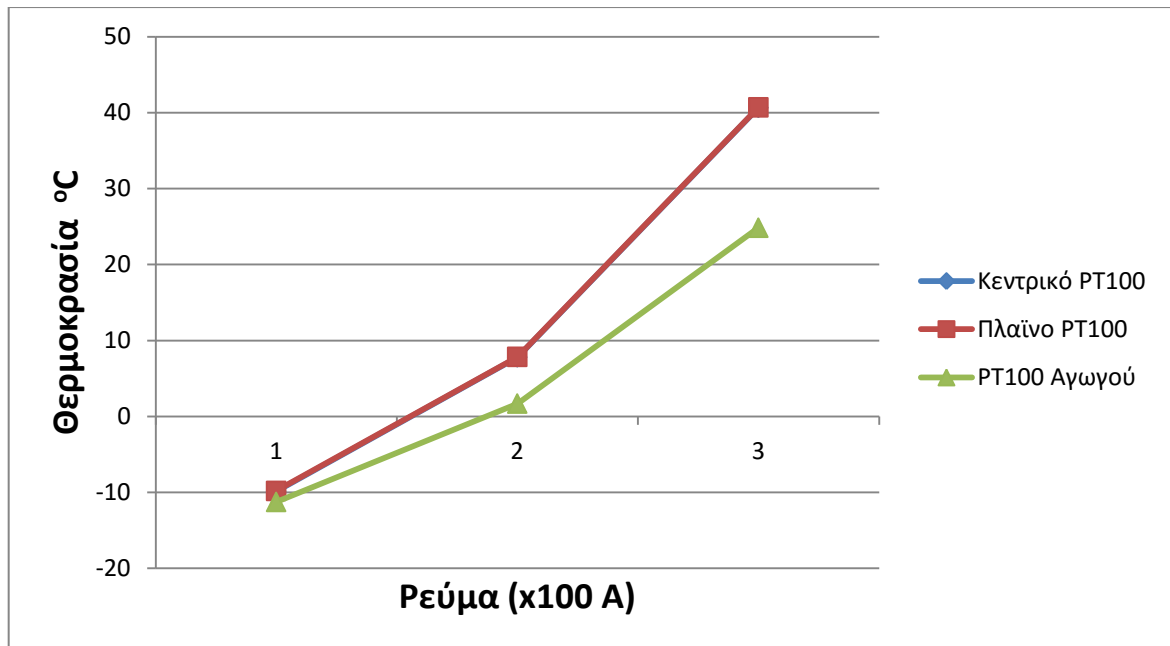
4.3.2 Μετρήσεις για τον πρώτο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 15Nm.



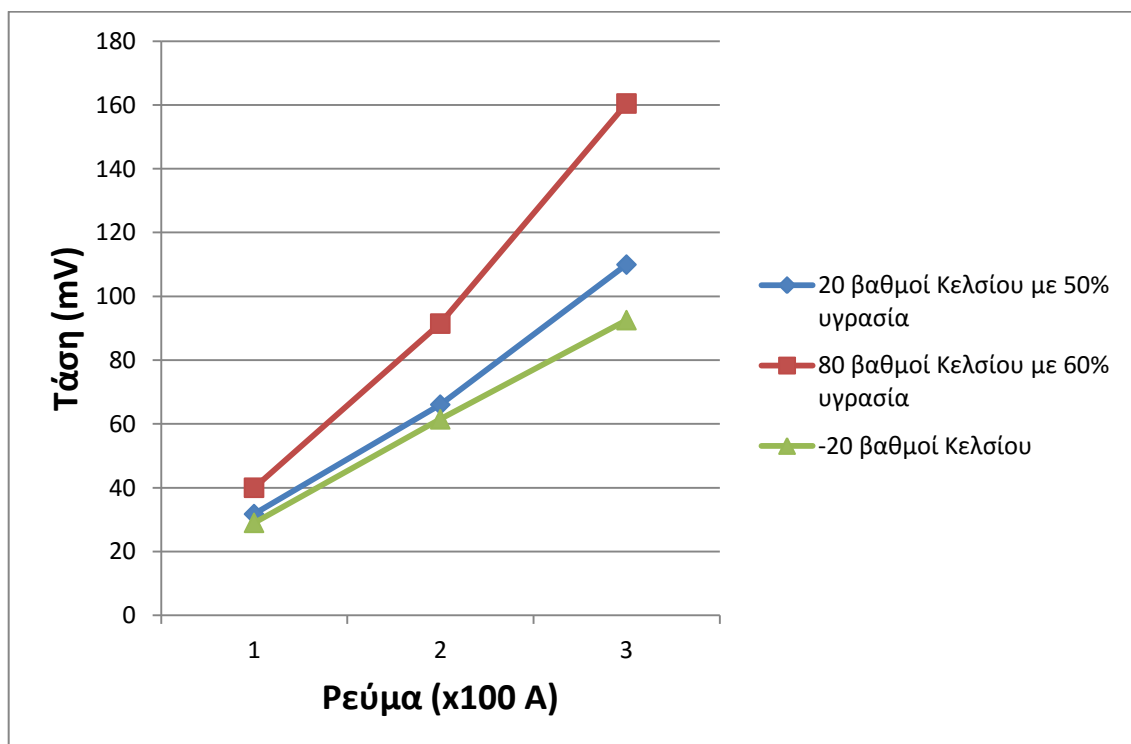
Σχήμα 4.3.2-1: Θερμοκρασίες αισθητήρων του πρώτου Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 15 Nm με συνθήκες θαλάμου 20 °C / 50% για τις τρεις τιμές ρεύματος



Σχήμα 4.3.2-2 Θερμοκρασίες αισθητήρων του πρώτου Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 15 Nm με συνθήκες θαλάμου 80 °C / 60% για τις τρεις τιμές ρεύματος

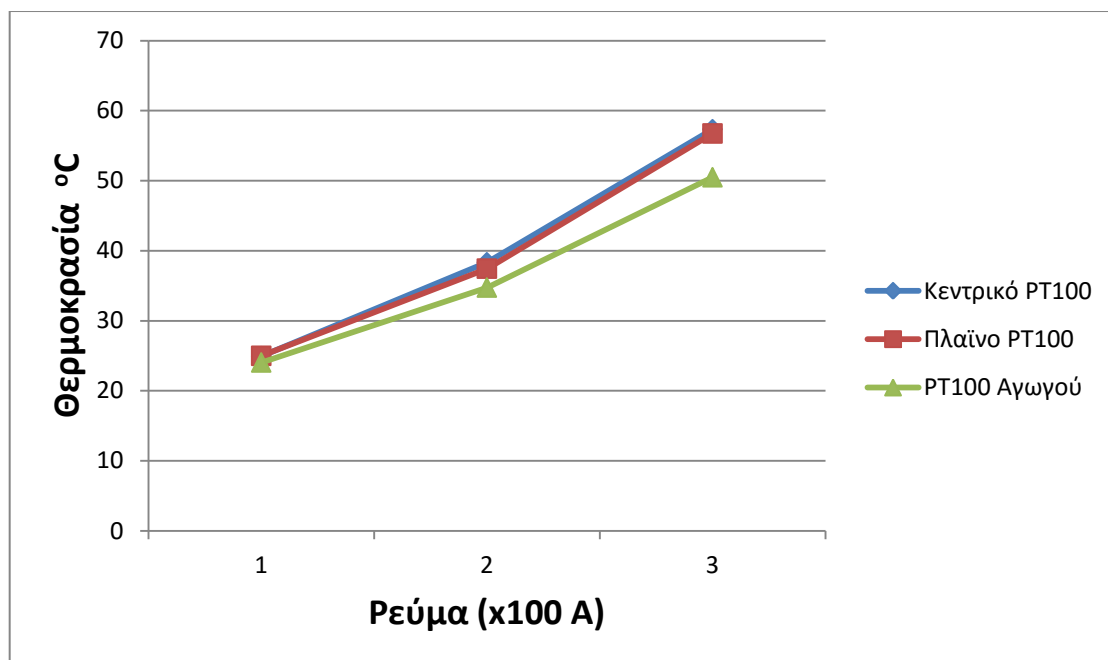


Σχήμα 4.3.2-3: Θερμοκρασίες αισθητήρων του πρώτου *Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50* σφιγμένο στα 15 Nm με συνθήκες θαλάμου -20 °C για τις τρεις τιμές ρεύματος

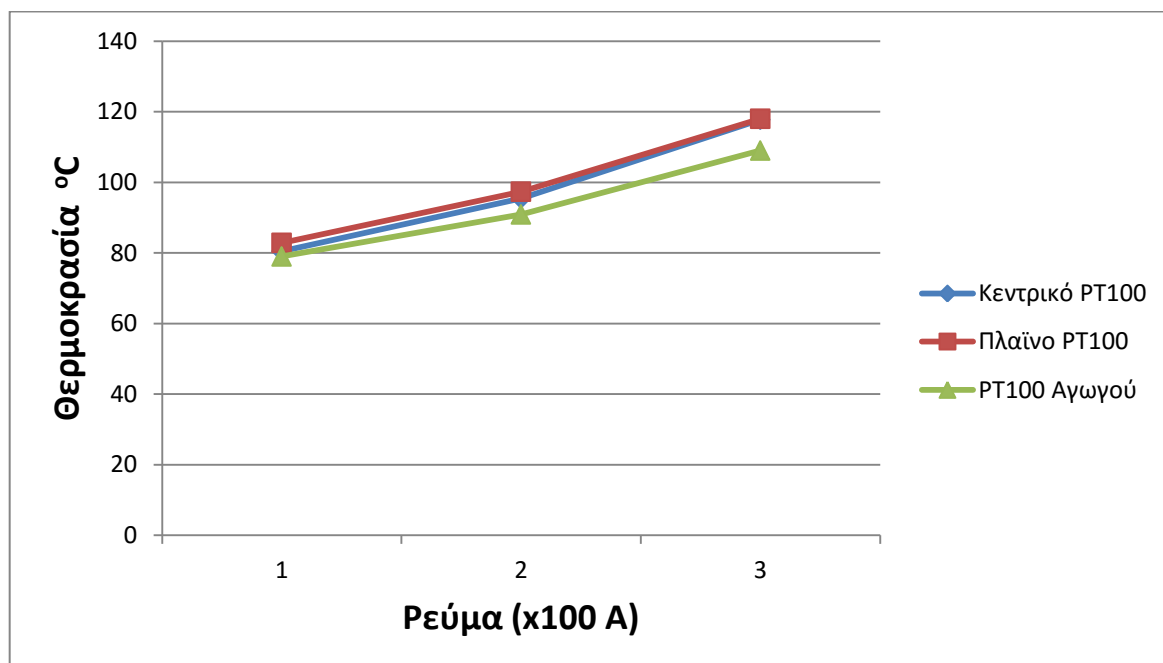


Σχήμα 4.3.2-4: Τάση του πρώτου συνδέσμου *Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50* σφιγμένου στα 15 Nm, στις τρεις περιβαλλοντικές συνθήκες για τις τρεις τιμές ρεύματος

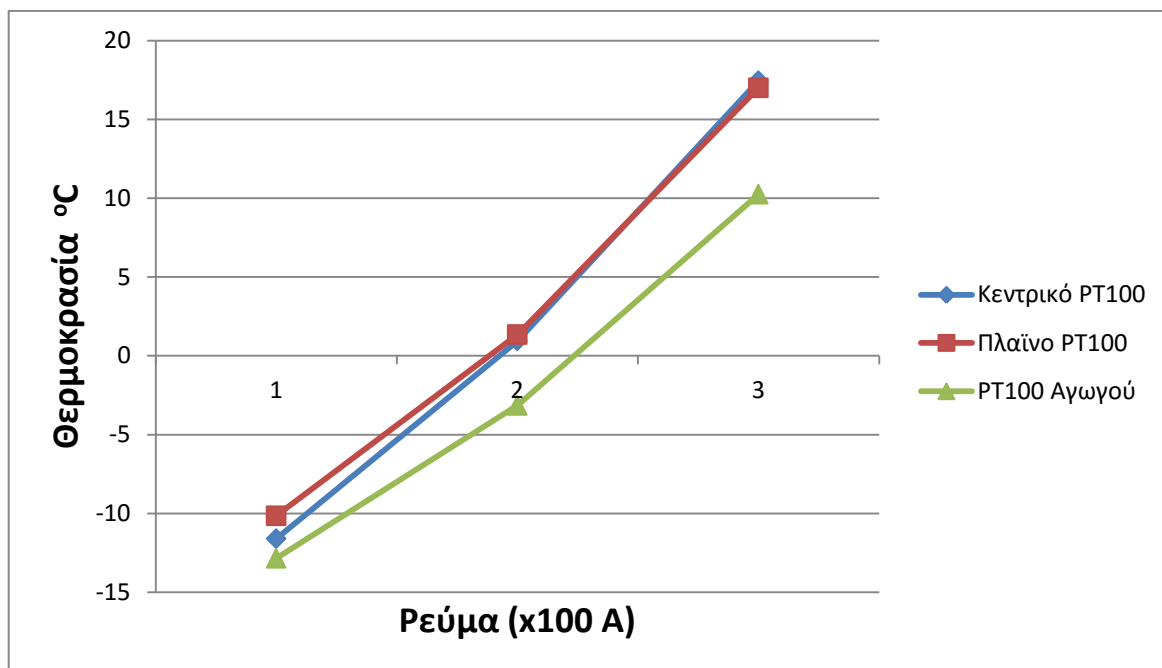
4.4.1 Μετρήσεις για τον δεύτερο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 20Nm.



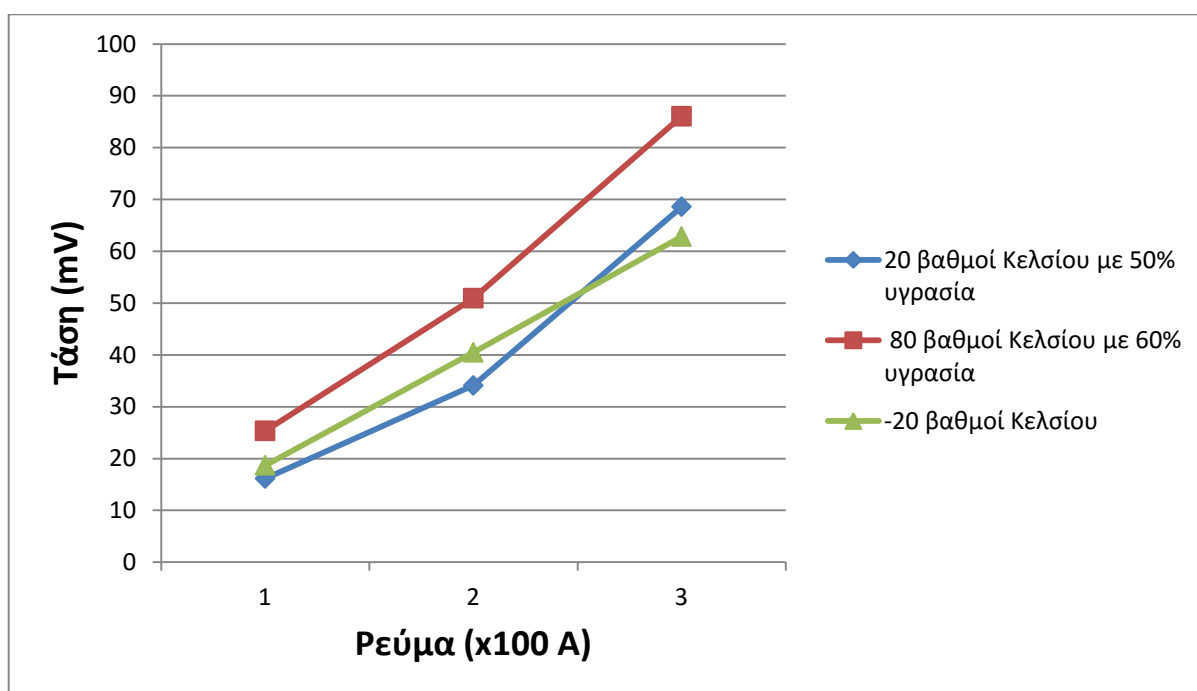
Σχήμα 4.4.1-1: Θερμοκρασίες αισθητήρων του δεύτερου Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 20 Nm με συνθήκες θαλάμου 20 °C / 50% για τις τρεις τιμές ρεύματος



Σχήμα 4.4.1-2: Θερμοκρασίες αισθητήρων του δεύτερου Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 20 Nm με συνθήκες θαλάμου 80 °C / 60% για τις τρεις τιμές ρεύματος

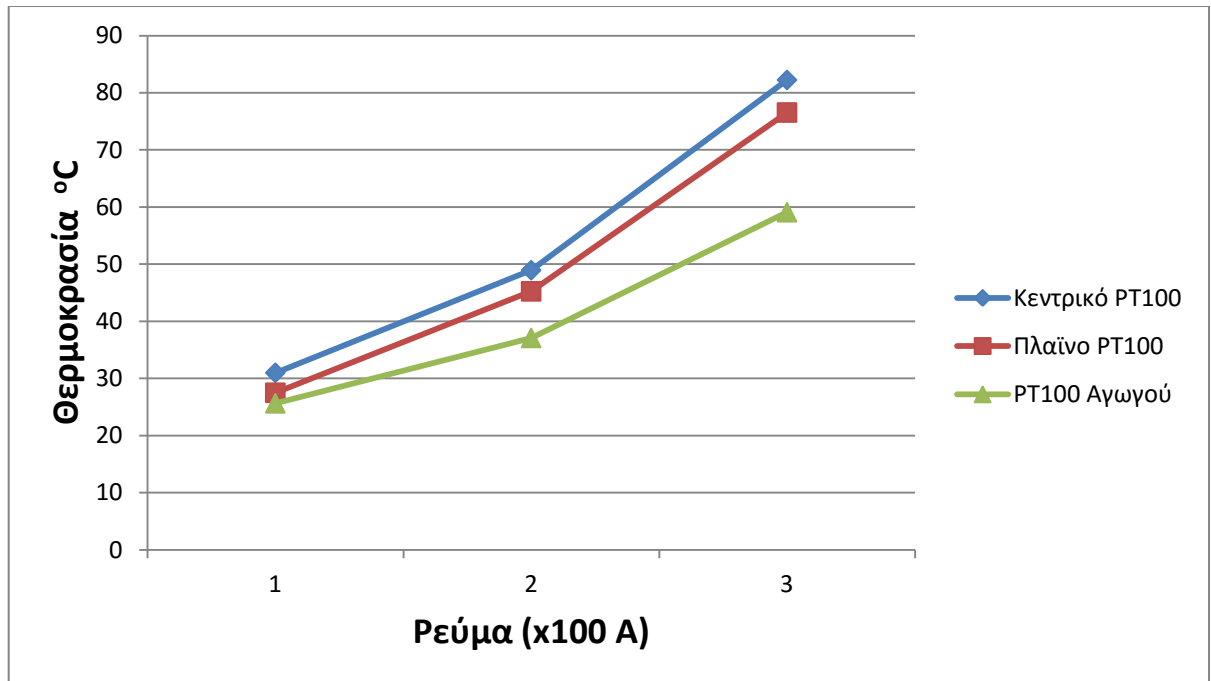


Σχήμα 4.4.1–3: Θερμοκρασίες αισθητήρων του δεύτερου *Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50* σφισμένο στα 20 Nm με συνθήκες θαλάμου -20 °C για τις τρεις τιμές ρεύματος

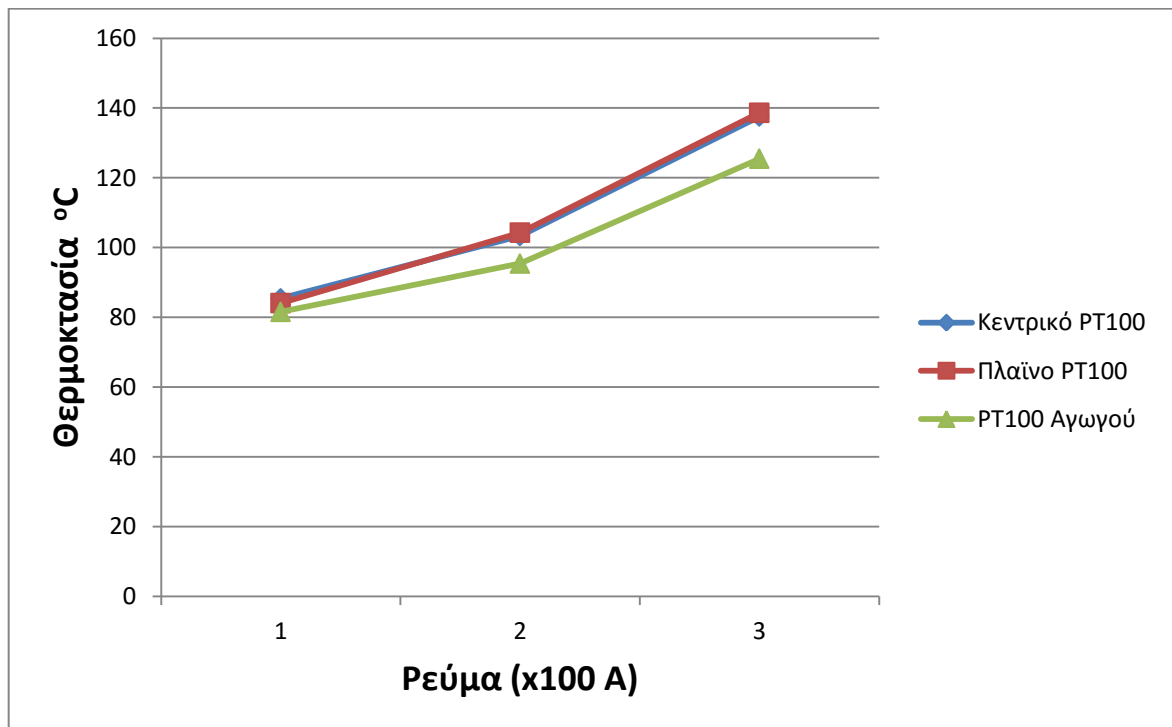


Σχήμα 4.4.1–4: Τάση του δεύτερου συνδέσμου *Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50* σφισμένου στα 20 Nm, στις τρεις περιβαλλοντικές συνθήκες για τις τρεις τιμές ρεύματος

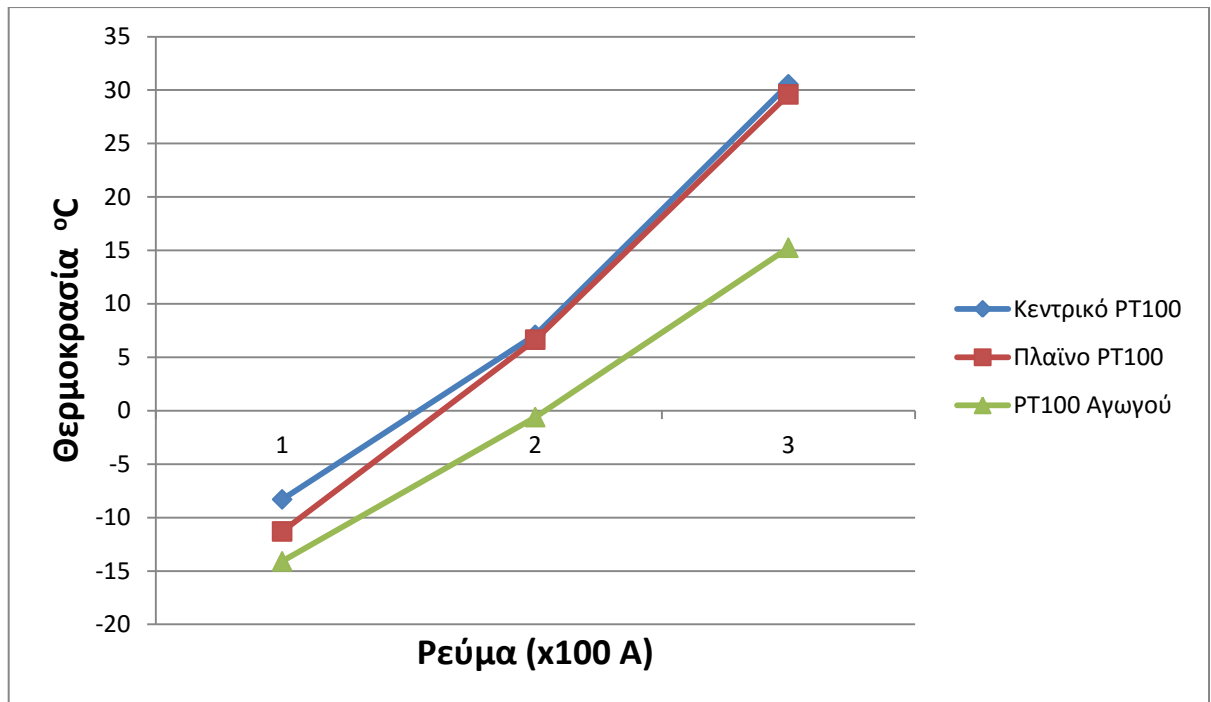
4.4.2 Μετρήσεις για τον δεύτερο σύνδεσμο Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 15Nm.



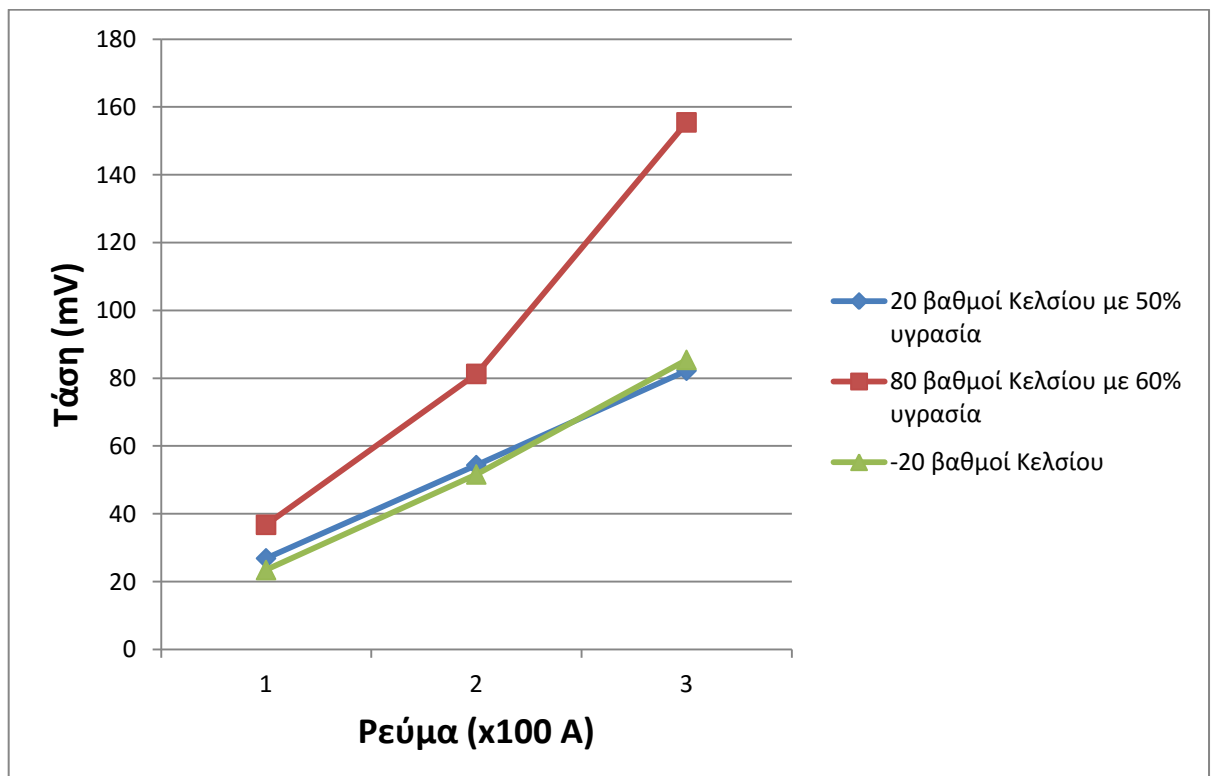
Σχήμα 4.4.2-1: Θερμοκρασίες αισθητήρων του δεύτερου Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 15 Nm με συνθήκες θαλάμου 20 °C / 50% για τις τρεις τιμές ρεύματος



Σχήμα 4.4.2-2: Θερμοκρασίες αισθητήρων του δεύτερου Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50 σφιγμένο στα 15 Nm με συνθήκες θαλάμου 80 °C / 60% για τις τρεις τιμές ρεύματος



Σχήμα 4.4.2-3: Θερμοκρασίες αισθητήρων του δεύτερου *Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50* σφιγμένο στα 15 Nm με συνθήκες θαλάμου -20 °C για τις τρεις τιμές ρεύματος



Σχήμα 4.4.2-4: Τάση του δεύτερου συνδέσμου *Rivimetal GR-261A ACSR 95 – ACSR 16-50* σφιγμένου στα 15 Nm, στις τρεις περιβαλλοντικές συνθήκες για τις τρεις τιμές ρεύματος

5. Σχόλια – Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα διαγράμματα που παρατέθηκαν στο κεφάλαιο 4, καθώς επίσης και βάση των αναλυτικών πινάκων του παραρτήματος Α, παρατηρείται η εξάρτηση της ποιότητας διασύνδεσης των δοκιμίων από τις περιβαλλοντικές συνθήκες σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις μεταφοράς ισχύος.

Στη συνέχεια αναλύεται η συμπεριφορά των συνδέσμων ως προς τις παραμέτρους του πειράματος.

5.1 Σχέση διερχόμενου ρεύματος και εμφανιζόμενης πτώσης τάσης συνδέσμου

Παρατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια σταδιακά αυξανόμενη πτώση τάσης στα άκρα τους σαν αποτέλεσμα της σταδιακής αύξησης του ρεύματος. Πράγμα που συμβαδίζει με την θεωρία.

Οι σύνδεσμοι Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50 παρουσίασαν μικρότερες τιμές τάσης από τους συνδέσμους Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16. Αποτέλεσμα εύλογο δεδομένου ότι προορίζονται για μεγαλύτερους αγωγούς και μεγαλύτερα ρεύματα.

Επιπροσθέτως αξίζει να σημειωθεί πως είναι μεγαλύτερων διαστάσεων και έτσι η επιφάνεια επαφής με τον αγωγό είναι μεγαλύτερη, άρα το ρεύμα διέρχεται από περισσότερα *a-spots*, όπως έχει αναλυθεί στην θεωρία του πρώτου κεφαλαίου.

5.2 Σχέση διερχόμενου ρεύματος και εμφανιζόμενης αντίστασης συνδέσμου

Η αντίσταση του συνδέσμου υπολογίζεται σύμφωνα με τον νόμο του Ohm. Η τάση στα άκρα του συνδέσμου παρακολουθείται από τον παλμογράφο, καθώς το παρεχόμενο ρεύμα μετράται από την αμπεροτσιμπίδα.

Η αντίσταση του συνδέσμου διέπεται από δύο ιδιαίτερα γνωρίσματα:

- 1) Η αντίσταση είναι της τάξης των μικρο-Ohm ($\mu\Omega$). Αυτό καθιστά την απευθείας μέτρηση με όργανο πολύ δύσκολη, καθώς θα βρισκόταν εντός του σφάλματος του οργάνου.
- 2) Η αντίσταση αυτή εμφανίζεται και εξαρτάται από το διερχόμενο ρεύμα καθώς περνά από τα *a-spots* της ηλεκτρικής επαφής, όπως έχει αναλυθεί στην θεωρία του πρώτου κεφαλαίου.
Επομένως το δοκίμιο πρέπει να είναι εν λειτουργία.

Στο σχήμα 5.2–1 και 5.2–2 δίνονται οι τιμές αντίστασης όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις της εμφανιζόμενης τάσης και του ρεύματος που διαρρέει τον σύνδεσμο.

Ροπή σύσφιξης 20Nm		1ος Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16	2ος Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16	1ος Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50	2ος Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50
Συνθήκες	I (A)	R (μΩ)	R (μΩ)	R (μΩ)	R (μΩ)
20 °C / 50 %	100	389	349	173	161,5
	200	415	358	237,25	170,5
	300	456,83	375	275	228,67
80 °C / 60 %	100	431	358	292	253,5
	200	447,5	401,5	349,25	254,75
	300	535	443,33	358,83	286,83
-20 °C	100	404	282,5	214	187
	200	411,75	303	230	202,5
	300	416,67	336,67	258,67	209,5

Σχήμα 5.2-1 : Αντίσταση συνδέσμων με ροπή σύσφιξης 20 Nm

Ροπή σύσφιξης 15Nm		1ος Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16	2ος Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16	1ος Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50	2ος Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50
Συνθήκες	I (A)	R (μΩ)	R (μΩ)	R (μΩ)	R (μΩ)
20 °C / 50 %	100	401	392	318	269
	200	424,25	405,5	330,5	272
	300	466,67	441,67	366,67	274,17
80 °C / 60 %	100	480	471,5	400,5	368
	200	502,5	527,5	457,5	406,5
	300	586,67	555	535	518,33
-20 °C	100	412,5	353,5	290,5	234,5
	200	415,25	373	307,5	258,25
	300	443,33	408,33	308,67	284,83

Σχήμα 5.2-2: Αντίσταση συνδέσμων με ροπή σύσφιξης 15 Nm

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η αντίσταση που εμφανίζει ο σύνδεσμος αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος. Ως αποτέλεσμα η σχέση μεταξύ ρεύματος και τάσης συνδέσμου παρατηρείται μη γραμμική. Η τάση του αυξάνεται δυσανάλογα πολύ, καθώς αυξάνεται το ρεύμα που τον διαρρέει.

5.3 Σχέση διερχόμενου ρεύματος και παραγόμενης θερμοκρασίας συνδέσμου

Στην πειραματική διαδικασία μέτρησης αντικείμενο προς μελέτη αποτέλεσε ο σύνδεσμος. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε τα δοκίμια να μην επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες πέραν των παραμέτρων ρύθμισης του πειράματος. Οι παράμετροι του πειράματος ήταν οι περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας, το ρεύμα που διέρρεε τον σύνδεσμο και η ροπή σύσφιξης των κοχλιών του. Προκειμένου στα δοκίμια να μην μεταφέρεται θερμότητα από τους αγωγούς, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3

χρησιμοποιήθηκαν διπλοί αγωγοί από τους οποίους είχε αφαιρεθεί η χαλύβδινη ψυχή. Παρατηρώντας τις τιμές των αισθητήρων θερμοκρασίας φαίνεται πως πάντα κατά την διάρκεια του πειράματος η θερμοκρασία του αγωγού ήταν χαμηλότερη από του συνδέσμου γεγονός που υποδεικνύει ότι το δοκίμιο έμεινε ανεπηρέαστο από την θερμοκρασία των αγωγών.

Οι τιμές των αισθητήρων που τοποθετήθηκαν στον σύνδεσμο παρουσίασαν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται κυρίως στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συνδέσμων, που όρισαν την απόσταση τοποθέτησης των αισθητήρων από την πραγματική διαδρομή που ακολουθεί το ρεύμα από τους αγωγούς και μέσα στον σύνδεσμο.

Λόγω μεγάλης διάρκειας κάθε μέτρησης μέχρι να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία στις εκάστοτε συνθήκες, λόγω επαγωγής θερμότητας ο σύνδεσμος έτεινε να αποκτήσει ομοιόμορφα κατανεμημένη θερμοκρασία.

5.4 Ρόλος συνθηκών περιβάλλοντος και ροπής σύσφιξης στην συμπεριφορά των συνδέσμων μέσης τάσης.

Οι αρχικές περιβαλλοντικές συνθήκες των συνδέσμων ήταν 20 βαθμοί Κελσίου με 50% σχετική υγρασία.

Συγκριτικά με αυτές παρατηρείται η επίδραση των άλλων δυο ακραίων στην τάση, την αντίσταση και συμπεριφορά της θερμοκρασίας του συνδέσμου.

Μετά από ανάλυση των αποτελεσμάτων φαίνεται έντονη επίδραση του θερμού και υγρού κλίματος στην λειτουργία των συνδέσμων. Η αύξηση της τάσης και της αντίστασης σε αυτές τις συνθήκες είναι σημαντική.

Στην περίπτωση σύσφιξης των κοχλιών των συνδέσμων με 15 Nm ροπής η επίδραση του περιβάλλοντος είναι πιο έντονη. Κατά πάσα πιθανότητα η επαφή μεταξύ αγωγού και συνδέσμου υποβαθμίζεται λόγω διαφορετικής διαστολής των δύο εξαρτημάτων και πιθανής εισχώρησης υγρασίας ανάμεσα στον αγωγό και τον σύνδεσμο.

Σε χαμηλές θερμοκρασίες δεν παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή συγκριτικά με τις τυπικές συνθήκες. Η επίδραση του ρεύματος στην τάση του συνδέσμου και την αντίσταση που εμφανίζει, είναι αντίστοιχη με εκείνη των τυπικών συνθηκών, και δεν φαίνεται να επηρεάζεται επιπλέον από το κρύο περιβάλλον.

Βιβλιογραφία

- [1] Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος 'Μετρήσεις σε βιομηχανικές διατάξεις και υλικά.' Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2004.
- [2] Π.Δ. Μπούρκας Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1998.
- [3] Paul G. Slade 'Electrical contacts: Principles and Applications' Marcel Dekker Editions, Unit. States of America, 1999.
- [4] R. Holm 'Electric contacts: Theory and applications' 4th Edition Springer-Verlag, Germany, 2000.
- [5] Πολυκράτη Αικατερίνη 'Συμπεριφορά στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων υπό ταχέως μεταβαλλόμενες ηλεκτρικές καταπονήσεις' Διδακτορική διατριβή. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005.
- [6] Karagiannopoulos C.G., Bourkas P.D., Dervos C.T.: "Measurements on contacts of no-load switches, using different currents and clamping spring force values" Pro.Int.Applied Modeling and Simulations, Lugano, p.94-97, 1990.
- [7] A.Polykrati, M. Paisios, K. Karagiannopoulos, P. Bourkas: 'Model for temperature estimation of electric couplings suffering heavy lightning currents', IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 1, Jan 2004.
- [8] A.D. Polykrati, N.E. Koungelis, M.P. Paisios, P.T. Tsarabaris, P. D. Bourkas 'Evaluation of the reliability of electrical screw couplings of lightning Protection systems' Int. Conference on Power and Energy Systems (EuroPES) Rhodes, Greece , 28-30 June, 2004.
- [9] Milenko Braunovic, Valery V. Konchits, and Nikolai K. Myshkin 'Electrical Contacts, Fundamentals, Applications and Technology '
- [10] Λυράκης Εμμανουήλ, «Μέτρηση του ονομαστικού ρεύματος σε στατικούς ηλεκτρικούς συνδέσμους για γυμνούς αγωγούς ACSR» Διπλωματική εργασία, Ιούνιος 2013
- [11] Καρατζάς – Πλιάκας Αντώνιος, «Θερμική καταπόνηση για διάφορες ροπές σύσφιξης σε σφικτήρα διατομής 35mm² εναέριου δικτύου μέσης τάσης.» Διπλωματική εργασία, Οκτώβριος 2012

Παράρτημα

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται οι αναλυτικοί πίνακες των μετρήσεων, όπως προέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία.

Ο πίνακας 1 περιλαμβάνει τις μετρήσεις για τον πρώτο Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16 σφιγμένο στα 20Nm.

Ο πίνακας 2 περιλαμβάνει τις μετρήσεις για τον πρώτο Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16 σφιγμένο στα 15Nm.

Ο πίνακας 3 περιλαμβάνει τις μετρήσεις για τον δεύτερο Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16 σφιγμένο στα 20Nm.

Ο πίνακας 4 περιλαμβάνει τις μετρήσεις για τον δεύτερο Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16 σφιγμένο στα 15Nm.

Ο πίνακας 5 περιλαμβάνει τις μετρήσεις για τον πρώτο Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50 σφιγμένο στα 20Nm.

Ο πίνακας 6 περιλαμβάνει τις μετρήσεις για τον πρώτο Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50 σφιγμένο στα 15Nm.

Ο πίνακας 7 περιλαμβάνει τις μετρήσεις για τον δεύτερο Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50 σφιγμένο στα 20Nm.

Ο πίνακας 8 περιλαμβάνει τις μετρήσεις για τον δεύτερο Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50 σφιγμένο στα 15Nm.

Όλοι οι πίνακες περιλαμβάνουν και τις μετρήσεις από επανάληψη.

Θερμοκρασία και υγρασία θαλάμου	Ρεύμα Συνδέσμου(A)	Θερμοκρασία Αισθητήρων ΡΤ100			RMS Τάση Συνδέσμου (mV)
		Κέντρο συνδέσμου	Πλαϊνή πλευρά συνδέσμου	Αγωγός	
20 °C / 50 %	100	27,7	28	27,1	39
20 °C / 50 %	100	27,6	27,9	27,1	38,8
20 °C / 50 %	200	50,5	52	46,1	82,9
20 °C / 50 %	200	52,5	54	47,1	83,1
20 °C / 50 %	300	94,8	98,1	80	137
20 °C / 50 %	300	94,1	98	82	137,1
80 °C / 60 %	100	86	86	84	43,4
80 °C / 60 %	100	85,6	85,8	83,7	42,8
80 °C / 60 %	200	105,5	103,8	99,7	89
80 °C / 60 %	200	106	105,6	102,5	90
80 °C / 60 %	300	125,1	128	123	160
80 °C / 60 %	300	127	131	124,3	161
-20 °C	100	-9	-8,5	-7,5	40,5
-20 °C	100	-8,5	-8	-7,9	40,3
-20 °C	200	14,2	15,8	10,6	82,5
-20 °C	200	14,5	16	10,4	82,2
-20 °C	300	45	54,2	41,5	125
-20 °C	300	44,7	54,4	41,5	125

Πίνακας 1: 1^{ος} Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16, Ροπή σύσφιξης 20Nm

Θερμοκρασία και υγρασία θαλάμου	Ρεύμα Συνδέσμου(A)	Θερμοκρασία Αισθητήρων ΡΤ100			RMS Τάση Συνδέσμου (mV)
		Κέντρο συνδέσμου	Πλαϊνή πλευρά συνδέσμου	Αγωγός	
20 °C / 50 %	100	30	30	28,4	40,2
20 °C / 50 %	100	29,9	29,8	28,1	40
20 °C / 50 %	200	53	54,1	47	84,4
20 °C / 50 %	200	54	56	49	85,3
20 °C / 50 %	300	102	105	83,5	140
20 °C / 50 %	300	103	105,4	84,3	140
80 °C / 60 %	100	85,7	85,6	82,5	48
80 °C / 60 %	100	85,4	85,1	82	48
80 °C / 60 %	200	110,1	110,9	101,3	100
80 °C / 60 %	200	109,8	110,2	101,2	101
80 °C / 60 %	300	148	157	132	176
80 °C / 60 %	300	147	155	131,8	176
-20 °C	100	-7	-7	-6,7	41
-20 °C	100	-6,6	-6,5	-7,3	41,5
-20 °C	200	16,5	17	9,8	82,8
-20 °C	200	16,6	17,5	10,7	83,3
-20 °C	300	63	65,1	44,6	133
-20 °C	300	63	65	45,7	133

Πίνακας 2: 1^{ος} Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16, Ροπή σύσφιξης 15Nm

Θερμοκρασία και υγρασία θαλάμου	Ρεύμα Συνδέσμου(A)	Θερμοκρασία Αισθητήρων ΡΤ100			RMS Τάση Συνδέσμου (mV)
		Κέντρο συνδέσμου	Πλαϊνή πλευρά συνδέσμου	Αγωγός	
20 °C / 50 %	100	27,9	27,8	26,8	34,8
20 °C / 50 %	100	28,1	28	27,4	35
20 °C / 50 %	200	46,3	46,4	42	71,3
20 °C / 50 %	200	48	47,6	43,8	71,9
20 °C / 50 %	300	87,8	87,4	76,5	112
20 °C / 50 %	300	88	87,8	76,5	113
80 °C / 60 %	100	77,3	77,1	74,8	35,7
80 °C / 60 %	100	77,4	77,5	77	35,9
80 °C / 60 %	200	105,3	107,1	96,1	79,2
80 °C / 60 %	200	105,1	106,8	97,2	81,4
80 °C / 60 %	300	130,4	131,6	126,8	132
80 °C / 60 %	300	131,7	129,1	127,3	134
-20 °C	100	-12	-12,1	-11,7	28,2
-20 °C	100	-12	12,2	-11,9	28,3
-20 °C	200	9,2	9	4,6	60,7
-20 °C	200	10,1	10,2	4,9	60,5
-20 °C	300	47,4	47,8	33	101
-20 °C	300	48	47,9	31,9	101

Πίνακας 3: 2^{ος} Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16, Ροπή σύσφιξης 20Nm

Θερμοκρασία και υγρασία θαλάμου	Ρεύμα Συνδέσμου(A)	Θερμοκρασία Αισθητήρων ΡΤ100			RMS Τάση Συνδέσμου (mV)
		Κέντρο συνδέσμου	Πλαϊνή πλευρά συνδέσμου	Αγωγός	
20 °C / 50 %	100	29,3	29	28,8	39,1
20 °C / 50 %	100	29,5	29,2	28,9	39,3
20 °C / 50 %	200	56,3	54,8	48,7	81,1
20 °C / 50 %	200	55,7	54,3	48,4	81,1
20 °C / 50 %	300	99,1	99,2	81,1	132
20 °C / 50 %	300	103,8	100,6	83,1	133
80 °C / 60 %	100	86,3	86,2	83,4	46,5
80 °C / 60 %	100	86,3	85,8	83	47,8
80 °C / 60 %	200	111,4	111,2	104,3	106
80 °C / 60 %	200	111,2	110,8	105,6	105
80 °C / 60 %	300	155	153,8	134,7	165
80 °C / 60 %	300	154,9	154,2	134,2	168
-20 °C	100	-10,7	-11,5	-9,4	35,2
-20 °C	100	-10,5	-11,3	-9,4	35,5
-20 °C	200	14,9	13,7	9,5	74,5
-20 °C	200	15	13,9	9,5	74,7
-20 °C	300	58,5	55,9	40,4	122
-20 °C	300	58,2	56	40,5	123

Πίνακας 4: 2^{ος} Rivimetal GR-261 AAAC AL 35 16, Ροπή σύσφιξης 15Nm

Θερμοκρασία και υγρασία θαλάμου	Ρεύμα Συνδέσμου(A)	Θερμοκρασία Αισθητήρων PT100			RMS Τάση Συνδέσμου (mV)
		Κέντρο συνδέσμου	Πλαϊνή πλευρά συνδέσμου	Αγωγός	
20 °C / 50 %	100	28,5	28,2	28,2	17,3
20 °C / 50 %	100	28,8	28,5	28,3	17,3
20 °C / 50 %	200	41,2	41,2	39,8	47,4
20 °C / 50 %	200	41,3	41,3	40	47,5
20 °C / 50 %	300	56	56	53,9	83
20 °C / 50 %	300	56,3	56,3	54	82
80 °C / 60 %	100	81,3	81	80	29,1
80 °C / 60 %	100	81	81	80	29,3
80 °C / 60 %	200	96,4	96,4	93,8	69,1
80 °C / 60 %	200	96,3	96,2	94	70,6
80 °C / 60 %	300	114,5	114,5	108,4	107,3
80 °C / 60 %	300	115	115,1	109,8	108
-20 °C	100	-15	-15,1	-14,3	21,5
-20 °C	100	-14,9	-15,2	-14,1	21,3
-20 °C	200	6,5	6,6	3,2	46
-20 °C	200	6,9	6,7	3,5	46
-20 °C	300	17	17,3	12,8	79,6
-20 °C	300	18,3	19	14	75,6

Πίνακας 5: 1^{ος} Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50, Ροπή σύσφιξης 20Nm

Θερμοκρασία και υγρασία θαλάμου	Ρεύμα Συνδέσμου(A)	Θερμοκρασία Αισθητήρων ΡΤ100			RMS Τάση Συνδέσμου (mV)
		Κέντρο συνδέσμου	Πλαϊνή πλευρά συνδέσμου	Αγωγός	
20 °C / 50 %	100	31,3	31,3	29,6	31,8
20 °C / 50 %	100	31,8	31,7	30,3	31,8
20 °C / 50 %	200	50,5	50,2	43,5	66
20 °C / 50 %	200	51,5	51,3	44,9	66,2
20 °C / 50 %	300	85,7	85,2	70,9	110
20 °C / 50 %	300	85,6	85,3	69,9	110
80 °C / 60 %	100	83	82,3	81	40
80 °C / 60 %	100	84,3	84,2	81,7	40,1
80 °C / 60 %	200	106,4	105,9	98	92,8
80 °C / 60 %	200	106,8	106,7	98,6	90,2
80 °C / 60 %	300	138,3	137,8	130	160
80 °C / 60 %	300	138,5	137	128,2	161
-20 °C	100	-9,9	-9,8	-11,2	29
-20 °C	100	-9,8	-9,8	-11,3	29,1
-20 °C	200	7,6	7,8	1,5	61,6
-20 °C	200	8	7,9	1,9	61,4
-20 °C	300	40,6	40,8	24,7	92,2
-20 °C	300	40,7	40,6	25	93

Πίνακας 6: 1^{ος} Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50, Ροπή σύσφιξης 15Nm

Θερμοκρασία και υγρασία θαλάμου	Ρεύμα Συνδέσμου(A)	Θερμοκρασία Αισθητήρων ΡΤ100			RMS Τάση Συνδέσμου (mV)
		Κέντρο συνδέσμου	Πλαϊνή πλευρά συνδέσμου	Αγωγός	
20 °C / 50 %	100	24,9	25	24,1	16,1
20 °C / 50 %	100	25	25	24	16,2
20 °C / 50 %	200	38,3	37,5	34,8	34,1
20 °C / 50 %	200	38,4	37,4	34,7	34,1
20 °C / 50 %	300	56,7	56	50	68,6
20 °C / 50 %	300	58	57,5	51	68,6
80 °C / 60 %	100	80	82,5	78,5	25,7
80 °C / 60 %	100	81	83,2	79,5	25
80 °C / 60 %	200	95,6	97,2	90,9	50,9
80 °C / 60 %	200	95,3	97,5	90,9	51
80 °C / 60 %	300	117,3	117,7	108,9	85,9
80 °C / 60 %	300	118,2	118,3	109,1	86,2
-20 °C	100	-11,7	-10,2	-12,9	18,7
-20 °C	100	-11,5	-10,1	-12,8	18,7
-20 °C	200	1	1,4	-3,1	40
-20 °C	200	0,9	1,3	-3,2	41
-20 °C	300	17,4	16,9	10,3	62,8
-20 °C	300	17,5	17,1	10,2	62,9

Πίνακας 7: 2^{ος} Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50, Ροπή σύσφιξης 20Nm

Θερμοκρασία και υγρασία θαλάμου	Ρεύμα Συνδέσμου(A)	Θερμοκρασία Αισθητήρων ΡΤ100			RMS Τάση Συνδέσμου (mV)
		Κέντρο συνδέσμου	Πλαϊνή πλευρά συνδέσμου	Αγωγός	
20 °C / 50 %	100	31,2	27,8	25,9	26,8
20 °C / 50 %	100	30,8	27,2	25,4	27
20 °C / 50 %	200	48,9	45,1	36,7	54,3
20 °C / 50 %	200	49	45,4	37,5	54,5
20 °C / 50 %	300	82	77,1	58,1	82,3
20 °C / 50 %	300	82,5	76	60,1	82,2
80 °C / 60 %	100	85,5	84	81,5	36,7
80 °C / 60 %	100	85,4	84,2	81,7	36,9
80 °C / 60 %	200	103,2	104,1	95,8	80,5
80 °C / 60 %	200	103,5	104,5	95,1	82,1
80 °C / 60 %	300	137,2	138,6	125	155
80 °C / 60 %	300	138	138,7	126	156
-20 °C	100	-8,1	-11,4	-14	23,7
-20 °C	100	-8,5	-11,2	-14,2	23,2
-20 °C	200	7	6,6	-0,8	51,5
-20 °C	200	7,2	6,7	-0,4	51,8
-20 °C	300	30,1	29,5	15,2	85,7
-20 °C	300	31	29,7	15,3	85,2

Πίνακας 8: 2^{ος} Rivimetal GR Rivimetal GR-261 ACSR 95 16-50, Ροπή σύσφιξης 15Nm