



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

ΔΟΚΙΜΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

Επιβλέπων : Παναγιώτης Τσαραμπάρης

Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2010



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

ΔΟΚΙΜΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

Επιβλέπων : Παναγιώτης Τσαραμπάρης

Λέκτορας ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την. 2010

.....
Παναγιώτης Τσαραμπάρης

.....
Νικόλαος Ι. Θεοδώρου

.....
Κωνσταντίνος Γ.
Καραγιαννόπουλος

Αθήνα, Φεβρουάριος 2010

.....
Αγγελική Παπαδοπούλου

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

Copyright ©Αγγελική Παπαδοπούλου,2009

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη δοκιμή υπερθέρμανσης και βραχυκύκλωσης εξοπλισμού χαμηλής τάσης. Η δοκιμή υπερθέρμανσης και βραχυκύκλωσης έχει ως στόχο τη διαπίστωση του ονομαστικού ρεύματος του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού. Συγκεκριμένα, ο εξοπλισμός χαμηλής τάσης αποτελείται από 10 ρευματοδότες και δοκιμάζονται ένας προς έναν. Η δοκιμή υπερθέρμανσης πραγματοποιείται με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου. Η δοκιμή βραχυκύκλωσης γίνεται κι αυτή με βραχυκύκλωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου, διότι εκεί αναπτύσσονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες. Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και στα οποία έγινε βαθμονόμηση πριν τη χρήση τους.

Λέξεις - κλειδιά : Φαινόμενο Peltier – Seebeck, δοκιμή υπερθέρμανσης, δοκιμή βραχυκύκλωσης, διηλεκτρικές επαφές, θερμοστοιχείο

ABSTRACT

The object of this diploma thesis is the overheating test and the short-circuit test of low-voltage electrotechnical equipment. The overheating test and the short-circuit test aims at the ascertainment of the nominal current of the electrotechnical equipment. In particular, the low-voltage equipment consists of 10 plugs tested one by one. The test of overheating is performed by bridging slots. The short-circuiting test is also performed bridged, because in this case higher temperatures are developed. The thermocouples, which were firstly calibrated, are used to measure the temperature

Keywords : Peltier - Seebeck effect, overheating test, short-circuiting test, dielectric contacts, thermocouple

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ομ.καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα και τον Λέκτορα κ. Παναγιώτη Τσαραμπάρη για την αμέριστη υποστήριξη και ανάθεση της παρούσας διπλωματικής. Επίσης ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Χαλεβίδη για τη συνεχή του καθοδήγηση και τις κατευθυντήριες συμβουλές που μου προσέφερε στη διεξαγωγή των πειραμάτων αλλά και στο τελικό στάδιο συγγραφής της διπλωματικής.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου Μαριάννα και Παναγιώτη, καθώς και την αδελφή μου Ειρήνη για την υποστήριξη και την αγάπη τους.

Παπαδοπούλου Αγγελική

Αθήνα, Φεβρουάριος 2010

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	11
1.1. Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο	12
1.1.1. Γενικά για το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο	12
1.1.2. Το φαινόμενο Seebeck	12
1.1.3. Το φαινόμενο Peltier	18
1.1.4. Το φαινόμενο Thomson	19
1.2. Θερμοστοιχεία	20
1.2.1 Γενικά για τα θερμοστοιχεία	20
1.2.2. Αρχή λειτουργίας.....	21
1.2.3. Τύποι Θερμοστοιχείων	22
1.2.4. Νόμοι θερμοστοιχείων	25
1.3. Έλεγχος αξιοπιστίας ηλεκτρολογικού εξοπλισμού- Κατηγορίες δοκιμών	26
1.4. Φαινόμενα σε ηλεκτρικές επαφές	28
1.4.1. Ηλεκτρικές επαφές	28
1.4.2. Η πτώση τάσης σε μία επαφή σε σχέση με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται.	30
1.4.3. Οξειδία σε επαφές διακοπών και η σημασία της θερμοκρασίας στην αύξηση του πάχους τους.....	32
1.4.4. Η επίδραση της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα στην οξείδωση των επαφών.	34
1.4.5. Η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος στις επαφές.	35
Κεφάλαιο 2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	42
2.1.Σκοπός της εργασίας	43
Κεφάλαιο 3 Μεθοδολογία και αποτελέσματα υπολογισμών	44
3.1. Βαθμονόμηση θερμοστοιχείων	45
3.2. Δοκιμές	60
3.2.1. Δοκιμή υπερθέρμανσης	60
3.2.2. Δοκιμή βραχυκύκλωσης	83
Κεφάλαιο 4 Σχόλια επί των αποτελεσμάτων	89
4.1. Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.1.	90
4.2. Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.2.1.....	90
4.3. Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.2.2.	90

4.4. Γενικές Παρατηρήσεις.....	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	92

Κεφάλαιο

1

Εισαγωγή

1.1.Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

1.1.1.Γενικά για το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

Το **θερμοηλεκτρικό φαινόμενο**, συνίσταται στην μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική, ή στη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας για τη μεταβίβαση θερμότητας. Με άλλα λόγια, είναι η απευθείας μετατροπή διαφορών θερμοκρασίας σε ηλεκτρική τάση.

Μια θερμοηλεκτρική συσκευή δημιουργεί μια τάση όταν βρίσκεται υπό διαφορετική θερμοκρασία σε κάθε πλευρά. Αντίθετα, όταν εφαρμόζεται τάση σε αυτή, δημιουργεί μια διαφορά θερμοκρασίας (γνωστό ως φαινόμενο Peltier). Σε ατομική κλίμακα (συγκεκριμένα, στους φορείς φορτίου) μία εφαρμοζόμενη βαθμιαία μεταβολή θερμοκρασίας ωθεί κάποιους φορείς του υλικού, είτε πρόκειται για ηλεκτρόνια ή οπές ηλεκτρονίων, να διαχέονται από τη θερμή στην ψυχρή πλευρά, όπως και σε ένα κλασικό αέριο που διαστέλλεται όταν θερμαίνεται. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και για τη θέρμανση ή την ψύξη αντικειμένων. Επειδή η κατεύθυνση της θέρμανσης και της ψύξης εξαρτάται από το πρόσημο της εφαρμοζόμενης τάσης, οι θερμοηλεκτρικές συσκευές κάνουν τους ελεγκτές θερμοκρασίας πολύ βολικούς.

Παραδοσιακά, ο όρος θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ή θερμοηλεκτρισμός περιλαμβάνει τρία ξεχωριστά φαινόμενα. Το φαινόμενο Seebeck, το φαινόμενο Peltier, και το φαινόμενο Thomson. Σε πολλά βιβλία, το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί επίσης να ονομάζεται φαινόμενο Peltier-Seebeck. Ο διαχωρισμός αυτός προκύπτει από τις ανεξάρτητες ανακαλύψεις του Γάλλου φυσικού Jean Charles Peltier και του εσθονογερμανού φυσικού Thomas Johann Seebeck. Η θερμότητα Joule, δηλαδή η θερμότητα που παράγεται κάθε φορά που μια τάση εφαρμόζεται σε ένα υλικό με αντίσταση, συνδέεται κατά κάποιο τρόπο με τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα, αν και γενικά δεν αποκαλείται θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Τα φαινόμενα Peltier-Seebeck και Thomson μπορούν κατ' αρχήν να είναι θερμοδυναμικά αναστρέψιμα, ενώ η θερμότητα Joule δεν είναι.

1.1.2.Το φαινόμενο Seebeck

Το φαινόμενο Seebeck είναι η μετατροπή των διαφορών θερμοκρασίας απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο Seebeck ανακάλυψε ότι η βελόνα της πυξίδας παρέκκλινε όταν σχημάτισε ένα κλειστό βρόχο δύο ενωμένων μετάλλων σε δύο κόμβους με διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των κόμβων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μέταλλα αντιδρούν διαφορετικά στη διαφορά θερμοκρασίας, η οποία δημιουργεί μια ροή ρεύματος. Η ροή ρεύματος παράγει με τη σειρά της ένα μαγνητικό πεδίο. Ο

Seebeck, ωστόσο, εκείνη τη στιγμή δεν αναγνώρισε ότι υπήρχε ηλεκτρικό ρεύμα που εμπλεκόταν και έτσι ονόμασε το συγκεκριμένο φαινόμενο ως θερμομαγνητικό, νομίζοντας ότι τα δύο μέταλλα πολώθηκαν μαγνητικά από τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Ο φυσικός Hans Christian Orsted με καταγωγή από τη Δανία διαδραμάτισε ζωτικό ρόλο στην εξήγηση και σύλληψη του όρου "θερμοηλεκτρισμός".

Σύμφωνα μ' αυτό, όταν δύο διαφορετικά μέταλλα ή κράματα τεθούν σε επαφή, τότε, λόγω του διαφορετικού έργου εξόδου τους, ελεύθερα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν από το μέταλλο με το μικρότερο έργο εξόδου προς το μέταλλο με το μεγαλύτερο έργο εξόδου, έστω και αν δεν εφαρμόζεται εξωτερική τάση σ' αυτά. Έτσι το πρώτο μέταλλο καθίσταται θετικότερο του δεύτερου με αποτέλεσμα στο σημείο επαφής να εμφανίζεται μια 'τάση επαφής'. Αν τώρα τα δύο ελεύθερα άκρα βρεθούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες, τότε αναπτύσσεται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη (HEΔ) ίση με :

$$E = a + b\Delta T + c\Delta t \quad (\text{mV}) \quad (1.1.2-1)$$

όπου a , b , c σταθερές εξαρτώμενες από τα υλικά που συμμετέχουν και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των μετάλλων. Επειδή η σταθερά c είναι πολύ μικρή και αν η ψυχρή επαφή είναι στους 0°C , τότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

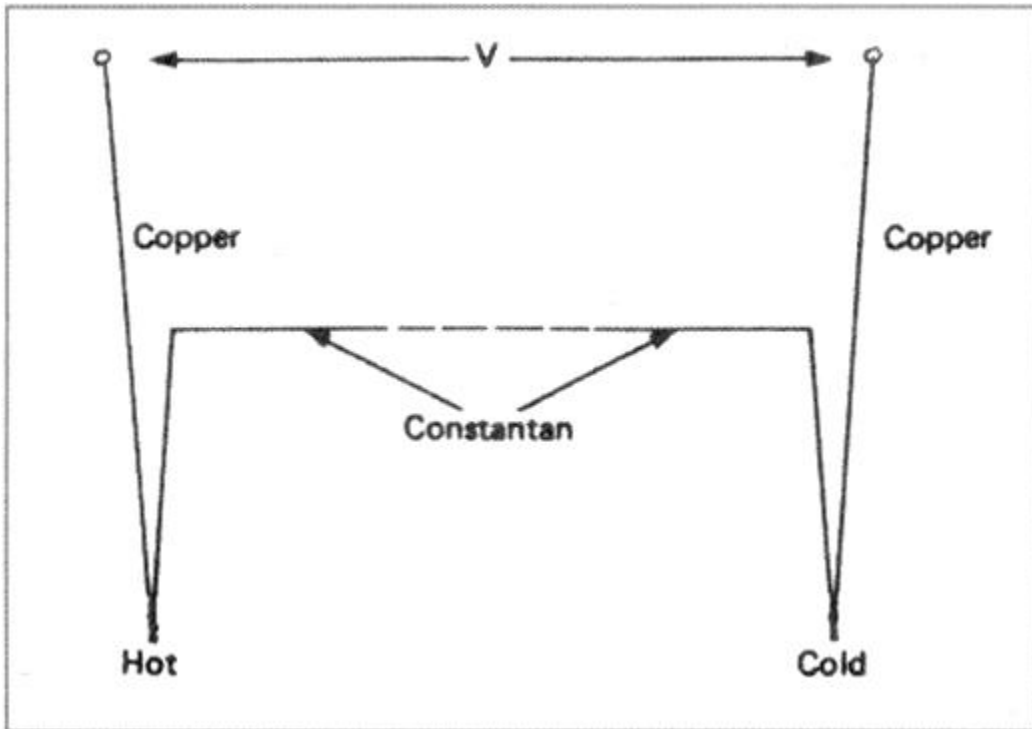
$$E = aT^2 + bT \quad (\text{mV}) \quad (1.1.2-2)$$

όπου T η θερμοκρασία της θερμής επαφής και a , b σταθερές εξαρτώμενες από τον τύπο της επαφής. Ορίζεται ως ουδέτερη θερμοκρασία T_N αυτή στην οποία η HEΔ γίνεται μέγιστη και είναι :

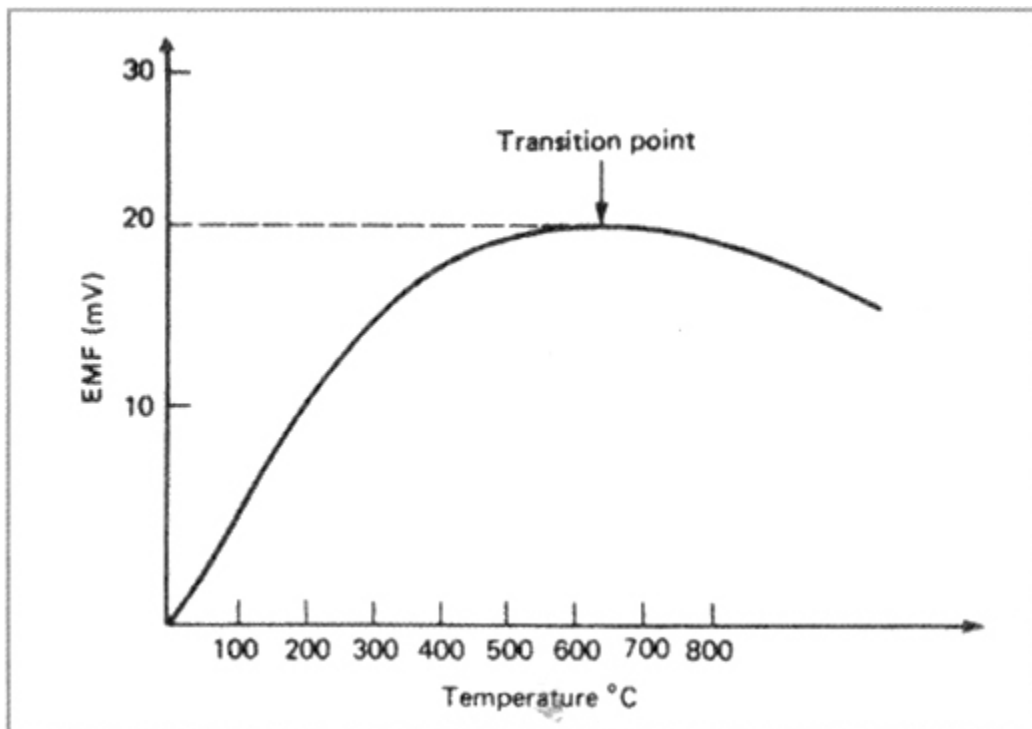
$$T_N = -\frac{b}{2a} \quad (1.1.2-3)$$

Χρησιμοποιείται δε για να καθοριστεί η περιοχή μέτρησης θερμοκρασιών από ένα συγκεκριμένο τύπο επαφής.

Πρακτικά δε χρησιμοποιείται μια απλή επαφή αλλά δυο, μια ψυχρή και μια θερμή όπως π.χ. στο σχήμα 1.1.2.1. Εφόσον και οι δύο επαφές βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία, η παραγόμενη τάση είναι μηδενική, αλλά αυξάνεται όσο αυξάνεται η διαφορά θερμοκρασίας τους μέχρι του σημείου μετάβασης, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1.2.2. Πολλές επαφές βέβαια δεν έχουν σημείο μετάβασης, αλλά έχουν πολύ μικρή τάση εξόδου π.χ. Cu/Ag.



Σχήμα 1.1.2.1 Χρήση δύο επαφών, μιας ψυχρής και μιας θερμής για τον καθορισμό της περιοχής μέτρησης θερμοκρασιών.



Σχήμα 1.1.2.2 Αύξηση της τάσης των δυο επαφών μέχρι το σημείο μετάβασης καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία

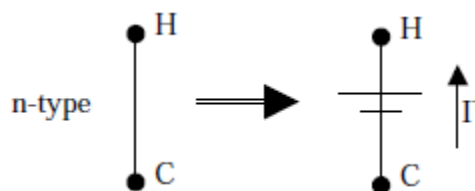
Στον πίνακα 1.1.2.1 δίνονται οι τιμές ΗΕΔ σε mV για επαφές πλατίνας και άλλων υλικών (ανά δύο) με διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τους 100 °C για απλή επαφή.

α/α	Υλικό	ΗΕΔ (mV)
1	Κονσταντάνη	-3.30
2	Νικέλιο	-1.50
3	Αλουμίνιο	0.40
4	Μαγγανίνη	0.65
5	Άργυρος	0.70
6	Χαλκός	0.75
7	Βολφράμιο	0.80
8	Μολυβδένιο	1.20
9	Σίδηρος	1.88
10	Πυρίτιο	45.00

Πίνακας 1.1.2.1 Τιμές ΗΕΔ(mV) για επαφές πλατίνας και άλλων υλικών

Ένας, ίσως, απλός τρόπος να καταλάβει κανείς το φαινόμενο αυτό είναι αν σκεφτεί ένα κλειστό δοχείο γεμάτο με αέριο. Έστω ότι τα μόρια του αερίου είναι ηλεκτρικά φορτισμένα. Αν το ένα άκρο του δοχείου θερμανθεί ενώ το άλλο ψυχθεί τότε τα ιόντα κοντά στο θερμό άκρο θ' αρχίσουν να κινούνται προς το ψυχρό άκρο. Έτσι θα παρατηρηθεί μια αύξηση στην ποσότητα των ιόντων του αερίου στο ένα άκρο του δοχείου. Αφού τα ιόντα έχουν ηλεκτρικό φορτίο ,αυτό συνεπάγεται και δημιουργίας διαφοράς δυναμικού μεταξύ των άκρων του δοχείου. Στα πειράματα, δεν χρησιμοποιούνται αέρια αλλά αγωγοί ή ημιαγωγοί. Κι εκεί τα ιόντα κινούνται λόγω της διαφοράς της θερμοκρασίας και δημιουργούν διαφορά δυναμικού με τη συσσώρευσή τους σε κάποιο άκρο του υλικού. Αν τα ιόντα που κινούνται είναι θετικά φορτισμένα τότε το υλικό λέγεται p-type ενώ αν τα ιόντα έχουν αρνητικό φορτίο τότε το υλικό είναι n-type.

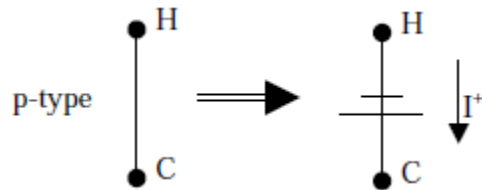
Έστω ότι το υλικό του σχήματος 1.1.2.3 είναι τύπου n. Δηλαδή, τα ιόντα που κινούνται με τη διαφορά θερμοκρασίας είναι αρνητικά φορτισμένα. Έστω ότι εφαρμόζουμε μια διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα του έτσι ώστε το πάνω άκρο να θερμαίνεται ενώ το κάτω άκρο να ψύχεται. Τα αρνητικά φορτία θα κινηθούν προς την ψυχρή περιοχή και έτσι η ΗΕΔ που θα δημιουργηθεί θα έχει την πολικότητα που φαίνεται στο σχήμα 1.1.2.3 .



Σχήμα 1.1.2.3 Εφαρμογή διαφοράς θερμοκρασίας σε υλικό τύπου n

Αν συνδεθεί μια αντίσταση στα άκρα του υλικού, θα παρατηρηθεί ρεύμα με κατεύθυνση όπως υπαγορεύεται από την πολικότητα της πηγής που φαίνεται στο σχήμα.

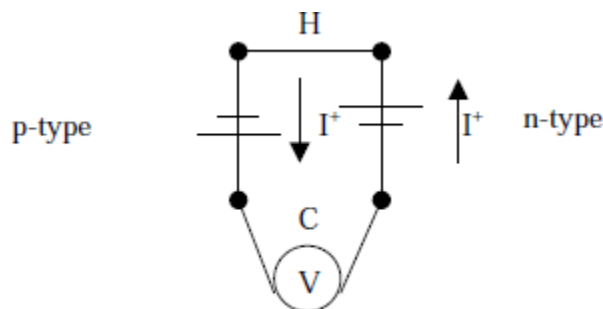
Ανάλογα, έστω ότι το υλικό του σχήματος είναι τύπου p. Δηλαδή, τα ιόντα που κινούνται με τη διαφορά θερμοκρασίας είναι θετικά φορτισμένα. Έστω ότι εφαρμόζουμε μια διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα του έτσι ώστε το πάνω άκρο να θερμαίνεται ενώ το κάτω άκρο να ψύχεται. Τα θετικά φορτία θα κινηθούν προς την ψυχρή περιοχή και έτσι η ΗΕΔ που θα δημιουργηθεί θα έχει τη πολικότητα που φαίνεται στο σχήμα 1.1.2.4 .



Σχήμα 1.1.2.4. Εφαρμογή διαφοράς θερμοκρασίας σε υλικό τύπου p

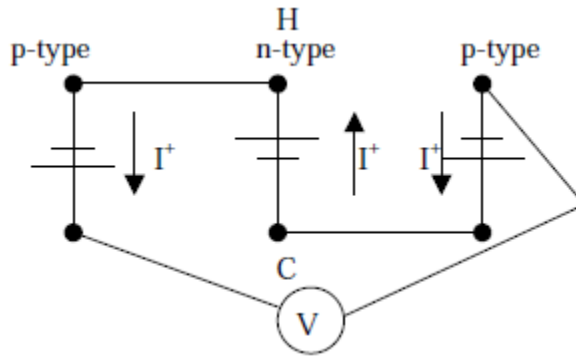
Αν συνδεθεί μια αντίσταση στα άκρα του υλικού μας, θα παρατηρηθεί ρεύμα με κατεύθυνση όπως υπαγορεύεται από την πολικότητα της πηγής που φαίνεται στο σχήμα.

Οι διαφορές δυναμικού που παρατηρούνται στα άκρα μοναχικών υλικών είναι πολύ μικρές και έτσι είναι πολύ καλύτερο να συνδέουμε κατά σειρά τα υλικά μεταξύ τους ώστε ν'αυξάνουμε την ΗΕΔ στα άκρα του κυκλώματος. Ένας απλός τρόπος σύνδεσης είναι ο παρακάτω :



Σχήμα 1.1.2.5 Σύνδεση κατά σειρά των υλικών για αύξηση της ΗΕΔ στα άκρα του κυκλώματος

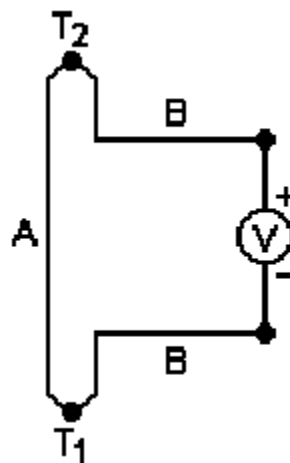
Η διαφορά δυναμικού που μετρά το βολτόμετρο είναι το άθροισμα των διαφορών δυναμικού στα άκρα του p-type και του n-type υλικού. Ένα κύκλωμα που αποτελείται από τη σύνδεση τριών θερμοηλεκτρικών υλικών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 1.1.2.6.: Κύκλωμα με 3 θερμοηλεκτρικά υλικά

Δεν είναι απαραίτητο να έχουμε εναλλαγή ενός p-type, ενός n-type κι ενός p-type. Θα μπορούσαμε να είχαμε ένα n-type, ένα p-type κι ένα n-type. Στην πρώτη περίπτωση, το θετικό άκρο του βολτομέτρου είναι συνδεδεμένο με το κρύο άκρο του υλικού και το αρνητικό άκρο του με το ζεστό, ενώ στη δεύτερη έχουμε το αντίστροφο.

Μια πιο συμπτυγμένη μορφή του παραπάνω κυκλώματος φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 1.1.2.7.: Συμπτυγμένη μορφή του προηγούμενου κυκλώματος

Τα υλικά A και B συνδέονται στα σημεία 1 και 2 τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες T_1 και T_2 αντίστοιχα. Αν $T_2 > T_1$ τότε εύκολα μπορούμε να προσδιορίσουμε το p και το n-type υλικό.

Κάθε υλικό έχει ένα χαρακτηριστικό συντελεστή Seebeck που συμβολίζεται με S. Αν T είναι η θερμοκρασία του υλικού, τότε το S είναι, γενικά, μια συνάρτηση του T: $S(T)$. Το υλικό A έχει $S_A(T)$ σταθερά Seebeck ενώ το υλικό B έχει $S_B(T)$. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων 1 και 2 δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT \quad (1.1.2-4)$$

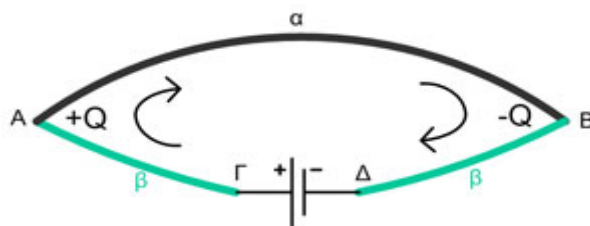
Αν για κάποιο εύρος θερμοκρασιών τα S_A και S_B είναι σταθερά και ανεξάρτητα της θερμοκρασίας τότε η διαφορά δυναμικού απλοποιείται στην μορφή :

$$V = (S_B - S_A) * (T_2 - T_1) \quad (1.1.2-5)$$

1.1.3. Το φαινόμενο Peltier

Το αντίστροφο φαινόμενο, η μετατροπή, δηλαδή, της διαφοράς δυναμικού σε διαφορά θερμοκρασίας λέγεται φαινόμενο Peltier από τον Jean Peltier που το ανακάλυψε κάπου 13 χρόνια μετά την παρατήρηση της ύπαρξης του φαινομένου Seebeck.

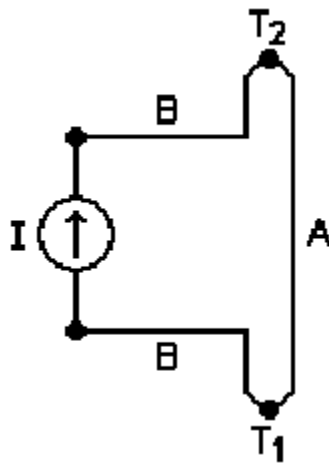
Το απλό ανοικτό κύκλωμα του σχήματος 1.1.3.1 που ακολουθεί, παριστάνει ένα θερμοζεύγος. Οι κλάδοι του α και β, αποτελούνται από διαφορετικά αγωγικά υλικά. Αν στα σημεία Γ και Δ του θερμοζεύγους προστεθεί μια πηγή ΗΕΔ, ώστε να δημιουργηθεί ένα ρεύμα εντάσεως I , τότε ένα ποσό θερμότητας Q απάγεται (στη μονάδα του χρόνου) από την επαφή Α, ενώ αντίστοιχα το ίδιο ποσό απορροφάται από την επαφή Β. Το αποτέλεσμα είναι η θέρμανση της επαφής Α και η ψύξη της επαφής Β. Έτσι έχουμε το φαινόμενο Peltier. Ο λόγος $\pi_{\alpha\beta} = Q/I$, όπου $\pi_{\alpha\beta} = \pi_\alpha + \pi_\beta$, ονομάζεται συντελεστής Peltier ή ακριβέστερα αθροιστικός συντελεστής Peltier $\pi_{\alpha\beta}$, επειδή εκφράζει το άθροισμα των απόλυτων συντελεστών Peltier των δυο υλικών. Το πρόσημο του $\pi_{\alpha\beta}$ είναι θετικό όταν για την δεξιόστροφη φορά της έντασης η επαφή Α θερμαίνεται ενώ η Β ψύχεται και μετράται σε W/A ή σε V .



Σχήμα 1.1.3.1 : Σχηματικό διάγραμμα φαινομένου Peltier

Στο αρχικό παράδειγμα με το αέριο, αν θεωρηθεί ότι τα ιόντα του αερίου δεν κινούνται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας αλλά λόγω της ύπαρξης διαφοράς δυναμικού, τότε όταν η ποσότητα των ιόντων αυξηθεί σε κάποιο άκρο του δοχείου οι κρούσεις τόσο μεταξύ τους όσο και με τα τοιχώματα του δοχείου θα αυξηθούν κι έτσι θα αυξηθεί η θερμοκρασία του αερίου στην περιοχή αυτή. Ανάλογα, θα μειωθεί η θερμοκρασία στο άλλο άκρο του δοχείου. Παρόμοια φαινόμενα παρατηρούνται στους αγωγούς ή τους ημιαγωγούς.

Ένα κύκλωμα για την παρατήρηση του φαινομένου Peltier φαίνεται στο σχήμα :



Σχήμα 1.1.3.2. :Κύκλωμα για την παρατήρηση του φαινομένου Peltier

Μια πηγή σταθερής έντασης συνδέεται με τα θερμοηλεκτρικά υλικά ώστε η φορά του ρεύματος να είναι κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Αν το υλικό A είναι p-type τότε θερμότητα θα παράγεται στο άκρο 2 ενώ θ' απορροφάται στο άκρο 1. Θα έχουμε, έτσι, $T_2 > T_1$. Αν αλλάξουμε τη φορά του ρεύματος αλλά διατηρήσουμε το είδος των θερμοηλεκτρικών υλικών, θα παρατηρηθεί η αντιστροφή της παραπάνω σχέσης : $T_1 > T_2$.

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από το σημείο 2 στο 1 (αν $T_2 > T_1$) δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$Q = \pi_{AB} I = (\pi_B - \pi_A) I \quad (1.1.3-1)$$

όπου π_{AB} η σταθερά Peltier του κυκλώματος και π_A , π_B οι σταθερές Peltier κάθε υλικού.

Το φαινόμενο Peltier βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην παραγωγή ψυκτικών διατάξεων.

1.1.4. Το φαινόμενο Thomson

Στο φαινόμενο αυτό, κατά τη διεύλευση ρεύματος μέσα από ένα ομογενές αγώγιμο υλικό με σταθερή θερμοκρασιακή διαβάθμιση, παράγεται ή απορροφάται θερμότητα.

Για μικρές θερμοκρασιακές διαφορές, ισχύει $Q = \beta / \Delta T$.

Η σταθερά β ονομάζεται συντελεστής Thomson και όπως ο συντελεστής Seebeck, μετράται σε $V/^\circ K$. Το φαινόμενο Thomson έχει μικρή επίδραση στις θερμοηλεκτρικές διατάξεις, ωστόσο πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη όταν χρειάζονται λεπτομερείς υπολογισμοί.

1.2.Θερμοστοιχεία

1.2.1 Γενικά για τα θερμοστοιχεία

Το θερμοστοιχείο είναι μια ένωση μεταξύ δύο διαφορετικών μετάλλων που παράγει μία τάση που σχετίζεται με τη διαφορά θερμοκρασίας. Τα θερμοστοιχεία είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο είδος αισθητήρων θερμοκρασίας και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μετατροπή θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι φθηνά, έχουν τυποποιημένες συνδέσεις, και μπορούν να μετρούν ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Ο κύριος περιορισμός είναι η ακρίβεια. Τα συστηματικά σφάλματα για λιγότερο από ένα Κέλβιν ($^{\circ}\text{K}$) μπορεί να είναι δύσκολο να αποφευχθούν.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα θερμοστοιχείο που αν συνδεθεί σε ένα πολύμετρο δείχνει την θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 1.2.1.1: Θερμοστοιχείο συνδεδεμένο σε πολύμετρο

Κάθε κύκλωμα από ανόμοια μέταλλα θα παράγει μια τάση που θα σχετίζεται με τη θερμοκρασία. Τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιούνται για πρακτικές μετρήσεις είναι συνδέσεις ειδικών κραμάτων, τα οποία σε συνδυασμό δημιουργούν μια γραμμική σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της τάσης. Ιδιαίτερα κράματα χρησιμοποιούνται για τις διάφορες θερμοκρασίες. Άλλες ιδιότητες, όπως η αντοχή στη διάβρωση μπορεί επίσης να είναι σημαντικές, όταν επιλέγουμε τον τύπο του θερμοστοιχείου που είναι πιο κατάλληλο για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Όταν το σημείο μέτρησης είναι μακριά από το όργανο μέτρησης, η ενδιάμεση σύνδεση μπορεί να γίνει από καλώδια επέκτασης των ιδίων μετάλλων, τα οποία είναι λιγότερο δαπανηρά από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τον αισθητήρα. Τα θερμοστοιχεία είναι συνήθως τυποποιημένα σύμφωνα με τη θερμοκρασία αναφοράς των 0 βαθμών Κελσίου. Κάποια θερμοστοιχεία χρησιμοποιούν ηλεκτρονικές μεθόδους αντιστάθμισης ψυχρής ένωσης για την προσαρμογή της διακύμανσης της θερμοκρασίας στα τερματικά των συσκευών. Ηλεκτρονικές συσκευές μπορούν επίσης να αντισταθμίσουν τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των θερμοστοιχείων και κατά συνέπεια να βελτιωθεί η ακρίβεια των μετρήσεων.

Τα θερμοστοιχεία χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα της επιστήμης και της βιομηχανίας. Μερικές εφαρμογές περιλαμβάνουν τη μέτρηση της θερμοκρασίας των κάμινων, των καυσαερίων των αεριοστροβίλων, των ντιζελοκινητήρων, καθώς και πολλών άλλων βιομηχανικών διεργασιών.

Παλαιότερες συσκευές χρησιμοποιούν αναλογικά κυκλώματα. Τα θερμοστοιχεία μετρούν τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο σημείων και όχι απόλυτη θερμοκρασία. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, μία από τις δύο ενώσεις, συνήθως η ψυχρή ένωση διατηρείται σε μια γνωστή θερμοκρασία αναφοράς, ενώ η άλλη ένωση έχει τη θερμοκρασία που θέλουμε να μετρήσουμε.

Γνωρίζοντας μια θερμοκρασία αναφοράς ψυχρής ένωσης, ενώ είναι χρήσιμη για εργαστηριακή βαθμονόμηση, δεν είναι βολική για τις περισσότερες μετρήσεις και εφαρμογές ελέγχου. Αντ' αυτού, τα σύγχρονα θερμοστοιχεία ενσωματώνουν στα κυκλώματά τους μια τεχνητή ψυχρή ένωση χρησιμοποιώντας κάποιο άλλο θερμοευαίσθητο μηχανισμό, όπως ένα θερμίστορ ή μια δίοδο, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των εισερχόμενων συνδέσεων στη συσκευή, με τη λήψη ειδικής μέριμνας ώστε να ελαχιστοποιείται κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ των ακροδεκτών. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως αντιστάθμιση ψυχρής ένωσης. Εναλλακτικά, ένα θερμοστοιχείο μπορεί να εκτελέσει αντιστάθμιση ψυχρής ένωσης με υπολογισμούς από πίνακες ή χρησιμοποιώντας πολυωνυμική παρεμβολή.

Ένα θερμοστοιχείο μπορεί να παράγει ρεύμα, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση ορισμένων κυκλωμάτων άμεσα, χωρίς την ανάγκη για επιπλέον κυκλώματα και πηγές ενέργειας. Για παράδειγμα, η τάση από ένα θερμοστοιχείο μπορεί να ενεργοποιήσει μια βαλβίδα, όταν προκύπτει διαφορά θερμοκρασίας. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα θερμοστοιχείο είναι η μετατροπή της θερμικής ενέργειας που πρέπει συνεχώς να προσφέρεται στη θερμή ένωση του θερμοστοιχείου για τη διατήρηση του ηλεκτρικού δυναμικού. Η συνεχής ροή της θερμότητας είναι αναγκαία, διότι το ρεύμα που διαρρέει το θερμοστοιχείο τείνει να κρύνει τη θερμή ένωση και να ζεσταίνει την ψυχρή (φαινόμενο Peltier).

Τα θερμοστοιχεία μπορούν να συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους για να σχηματίσουν μια θερμοστήλη όπου όλες οι θερμές ενώσεις εκτίθενται στην υψηλότερη θερμοκρασία και όλες οι ψυχρές στην χαμηλότερη. Η έξοδος είναι το άθροισμα της τάσης μεταξύ των επιμέρους κόμβων, δίνοντας μεγαλύτερη τάση και ισχύ.

1.2.2. Αρχή λειτουργίας

Το 1821, ο γερμανοεσθονός φυσικός Thomas Johann Seebeck ανακάλυψε ότι όταν ένας αγωγός υποβάλλεται σε θερμική βαθμιαία μεταβολή, δημιουργεί μια τάση. Αυτό είναι τώρα γνωστό ως θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ή φαινόμενο Seebeck, το οποίο θα αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Κάθε προσπάθεια για τη μέτρηση της τάσης αυτής, συνεπάγεται απαραίτητα τη σύνδεση ενός άλλου αγωγού στο θερμό ακροδέκτη. Αυτός ο πρόσθετος αγωγός θα υποστεί επίσης αυτή τη βαθμιαία

μεταβολή θερμοκρασίας και θα αναπτύξει μία δική του τάση, η οποία θα αντιτίθεται στην αρχική. Το μέγεθος της επίδρασης εξαρτάται από το μέταλλο που χρησιμοποιείται. Επομένως, χρησιμοποιώντας ένα διαφορετικό μέταλλο για να ολοκληρωθεί το κύκλωμα, δημιουργείται ένα κύκλωμα στο οποίο τα δύο σκέλη παράγουν διαφορετικές τάσεις, αφήνοντας μια μικρή διαφορά στην τάση που διατίθεται για τη μέτρηση. Αυτή η διαφορά αυξάνει με τη θερμοκρασία, και μπορεί κατά κανόνα να είναι μεταξύ 1 και 70 μικροβόλτ ανά βαθμό Κελσίου ($\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$) για τυποποιημένους συνδυασμούς μετάλλων. Ορισμένοι συνδυασμοί έχουν καταστεί δημοφιλείς ως πρότυπα βιομηχανίας, λόγω του κόστους, της διαθεσιμότητας, του σημείου τήξεως, των χημικών ιδιοτήτων, της σταθερότητας και της ευκολίας παραγωγής.

1.2.3. Τύποι Θερμοστοιχείων

α/α	Κωδικός	Υλικό	Κωδικοί καλωδίων επέκτασης	ΗΕΔ στους 100°C (mV)	Περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας (°C)
1	S	+PtRh/-Pt	+Άσπρο/-Μπλε	0.645	0~1400
2	R	+PtRh/-Pt	+Άσπρο/-Μπλε	0.647	0~1350
3	K	+NiCr/-NiAl	+Καφέ/-Μπλε	4.095	-200~+1100
4	T	+Cu/-CuNi	+Άσπρο/-Μπλε	4.277	-200~+400
5	J	+Fe/-CuNi	+Κίτρινο/-Μπλε	5.268	0~+850
6	E	+NiCr/-CuNi	+Καφέ/-Μπλε	6.137	0~+850
7	N	+NiCrSi/-NiSi	+Πορτοκαλί/-Μπλε	-	-230~+1300

Πίνακας 1.2.3-1: Στοιχεία για τους διάφορους τύπους θερμοστοιχείων

Στο εμπόριο κυκλοφορούν διάφοροι τύποι θερμοστοιχείων όπως οι S, R, J, K, T, N, E και δηλώνουν τα υλικά κατασκευής. Στοιχεία για αυτούς τους τύπους δίνονται στον πίνακα 1.2.3-1 με Αγγλικούς κωδικούς ακροδεκτών, διότι στις Η.Π.Α. το αρνητικό είναι κόκκινο και το θετικό είναι άσπρο για J, κίτρινο για K, μπλε για T, βυσσινί για E, ενώ στη Γερμανία το θετικό είναι κόκκινο και το αρνητικό είναι μπλε για το J, πράσινο για το K και καφέ για το T. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την επιλογή του αισθητήρα, διότι πολλές εταιρίες δεν ακολουθούν τους παραπάνω κωδικούς. Όταν η απόσταση μεταξύ του θερμοστοιχείου και του οργάνου μέτρησης, είναι σημαντική, τότε τα καλώδια επέκτασης ή αντιστάθμισης πρέπει να συνδέονται με τα άλλα δύο. Η διαφορά τους είναι ότι τα καλώδια επέκτασης κατασκευάζονται από το ίδιο υλικό με το θερμοστοιχείο και χρησιμοποιούνται στις ίδιες θερμοκρασίες, ενώ τα αντιστάθμισης κατασκευάζονται από μέταλλα μικρού κόστους και χρησιμοποιούνται σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ιδιαίτερη επίσης προσοχή πρέπει να δίνεται στη σύνδεση των καλωδίων με τη σωστή πολικότητα. Στον πίνακα

1.2.3.2. δίνονται οι κωδικοί των καλωδίων αντιστάθμισης για δύο τύπους, U = ευγενών μετάλλων και VX=μεταλλικής βάσης.

Όμως και οι σύνδεσμοι (connectors) μεταξύ θερμοστοιχείων και καλωδίων είναι κωδικοποιημένοι χρωματικά. Έτσι π.χ. για τη Μεγ.Βρετανία ισχύει : K= κίτρινος, N=πορτοκαλί, T= μπλε, J= μαύρος και R=πράσινος.

Είναι πλέον προφανές ότι για να αναγνωρίσουμε πλήρως ένα set θερμοστοιχείου πρέπει να γνωρίζουμε τη χώρα καθώς επίσης και την εταιρία παραγωγής.

α/α	Κωδικός	Μεγ. Βρετανία	Η.Π.Α.	Γερμανία
1	U	+ Άσπρο/-Μπλε εξωτερικό πράσινο	+ Μαύρο/-Κόκκινο εξωτερικό πράσινο	+ Κόκκινο/-Άσπρο εξωτερικό άσπρο
2	VX	+ Άσπρο/-Μπλε εξωτερικό κόκκινο	+ Καφέ/-Κόκκινο εξωτερικό κόκκινο	+ Κόκκινο/-Πράσινο εξωτερικό πράσινο

Πίνακας 1.2.3-2.: Κωδικοί των καλωδίων αντιστάθμισης για τους τύπους U και VX

Στα σχήματα που ακολουθούν 1.2.3-3. α, β, γ, δ παρουσιάζονται διάφοροι τύποι θερμοστοιχείων.

Οι χρήσεις των θερμοστοιχείων ποικίλλουν και εξαρτώνται από τον τύπο της επαφής, από την ύπαρξη ή όχι μόνωσης, από τα γεωμετρικά στοιχεία τους, από την τεχνική κατασκευής της επαφής, από τις απαιτήσεις των εφαρμογών κ.λ.π.

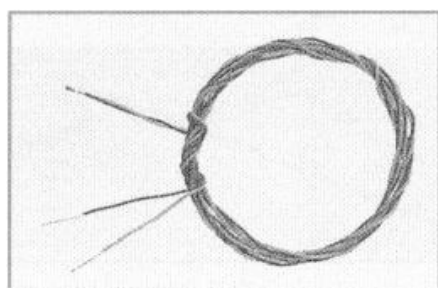
Έτσι, ο τύπος K έχει διάφορες μορφές, όπως βιομηχανική για θερμοκρασίες (-100~+100)°C και γενικές εφαρμογές, μονωμένο με γυαλί ή PTFE ή MgO για γενικές εφαρμογές ή μετρήσεις θερμοκρασίας φούρνων-κλιβάνων-καυσαερίων Probe για μικρές θερμικές επιφάνειες, βιομηχανικό Probe με μόνωση MgO για μπάνια-καμίνια-κλιβάνους κ.λ.π.

— Ο τύπος R χρησιμοποιείται κυρίως σε κεραμικούς κλιβάνους και βιομηχανίες γυαλιού.

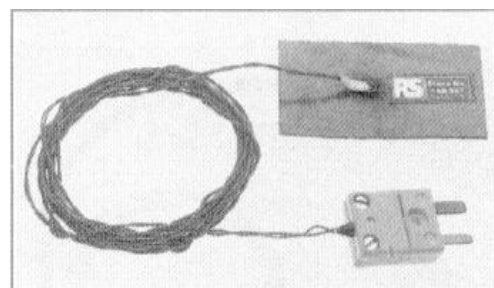
— Ο τύπος T είναι οικονομικό θερμοστοιχείο γενικών εφαρμογών.

— Ο τύπος J χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές και

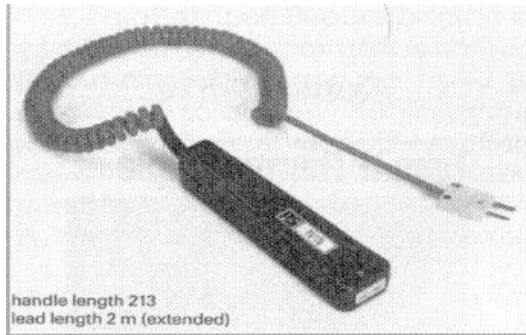
— Ο τύπος N-βελτιωμένος τύπος K-χρησιμοποιείται όπου και ο K.



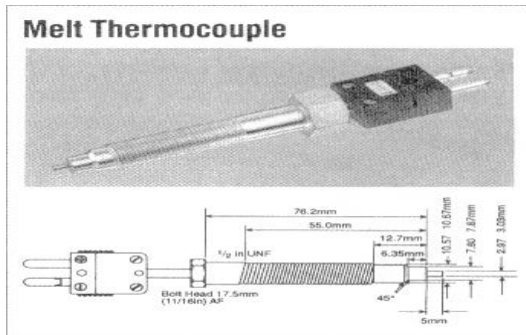
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 1.2.3-3(α, β, γ, δ) : Ενδεικτικοί τύποι θερμοστοιχείων

Τα θερμοστοιχεία αποτελούνται από :

S=90%Pt, 10%Rh και 100%Pt

R=87% Pt, 13%Rh και 100%Pt

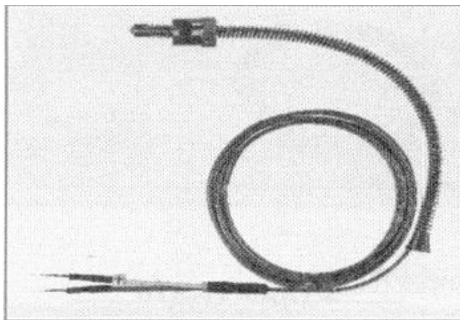
J=100%Fe και (57-60)%Cu, (40-43)%Ni ή στοιχείο σιδήρου-κωνσταντάνης

K=90%Ni, 10%Cr και 95% Ni, 5% Al-Si-Mn ή στοιχείο cromel-alumel

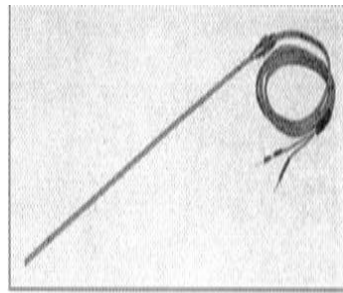
T=100% Cu και (57-60)% Cu, (40-43)% Ni ή στοιχείο χαλκού-κωνσταντάνης

N=84% Ni, 16% Cr-Si-Fe-C και 95% Ni, 5% Cr-Si-Fe-C-Mg ή στοιχείο nicrosil-nisil

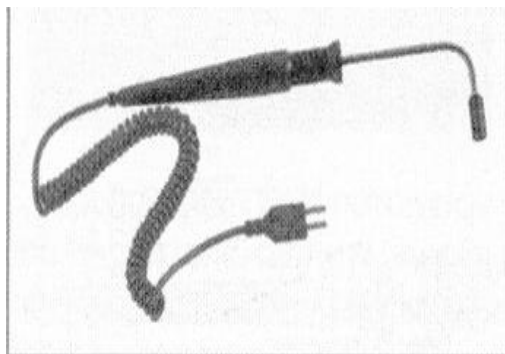
E=90% Ni, 10% Cr και (57-60)% Cu, (40-43)%Ni ή στοιχείο cromel –κωνσταντάνης.



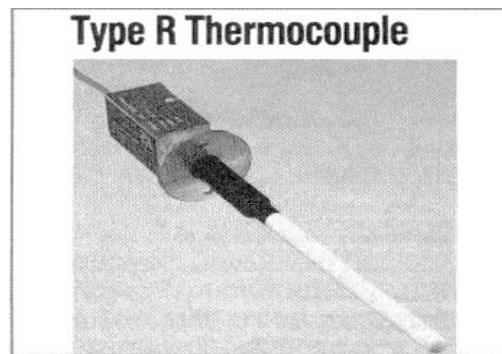
(ε)



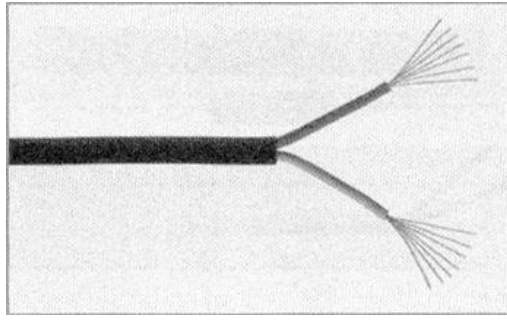
(στ)



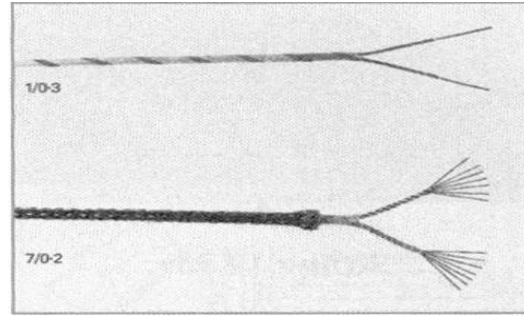
(ζ)



(η)



(θ)



(ι)

Σχήμα 1.2.3-3(ε, στ, ζ, η, θ, ι): Ενδεικτικοί τύποι θερμοστοιχείων

1.2.4.Νόμοι θερμοστοιχείων

1.Νόμος του ομοιογενούς υλικού

Το θερμοηλεκτρικό ρεύμα δεν μπορεί να διατηρηθεί σε ένα κύκλωμα ενός ομοιογενούς υλικού από την εφαρμογή της θερμότητας και μόνο, ανεξάρτητα από το πόσο μπορεί να διαφέρει στην περιοχή διασταύρωσης. Με άλλα λόγια, οι αλλαγές στη θερμοκρασία της καλωδίωσης μεταξύ των εισόδων και των εξόδων δεν επηρεάζουν την τάση εξόδου, εφόσον όλα τα καλώδια είναι κατασκευασμένα από τα ίδια υλικά με το θερμοστοιχείο.

2.Νόμος των ενδιάμεσων υλικών

Το αλγεβρικό άθροισμα των θερμοηλεκτρικών δυνάμεων σε ένα κύκλωμα που αποτελείται από οποιοδήποτε αριθμό ανόμοιων υλικών είναι μηδέν εάν το σύνολο των κόμβων είναι σε ομοιόμορφη θερμοκρασία. Έτσι εάν ένα τρίτο μέταλλο προστεθεί στα δύο καλώδια, και αν οι δύο νέες ενώσεις είναι στην ίδια θερμοκρασία, δεν θα υπάρξει καθαρή τάση που να δημιουργήθηκε από το νέο μέταλλο.

3.Νόμος διαδοχικών ή ενδιάμεσων θερμοκρασιών

Αν δύο ανόμοια ομοιογενή υλικά παράγουν θερμική ηλεκτρεγερτική δύναμη (τάση) α όταν οι ενώσεις είναι σε θερμοκρασία T_1 και T_2 και παράγουν θερμική ηλεκτρεγερτική δύναμη β όταν οι ενώσεις είναι σε θερμοκρασία T_2 και T_3 , η ΗΕΔ που δημιουργείται όταν οι ενώσεις είναι σε θερμοκρασία T_1 και T_3 θα είναι $\alpha+\beta$.

1.3. Έλεγχος αξιοπιστίας ηλεκτρολογικού εξοπλισμού-

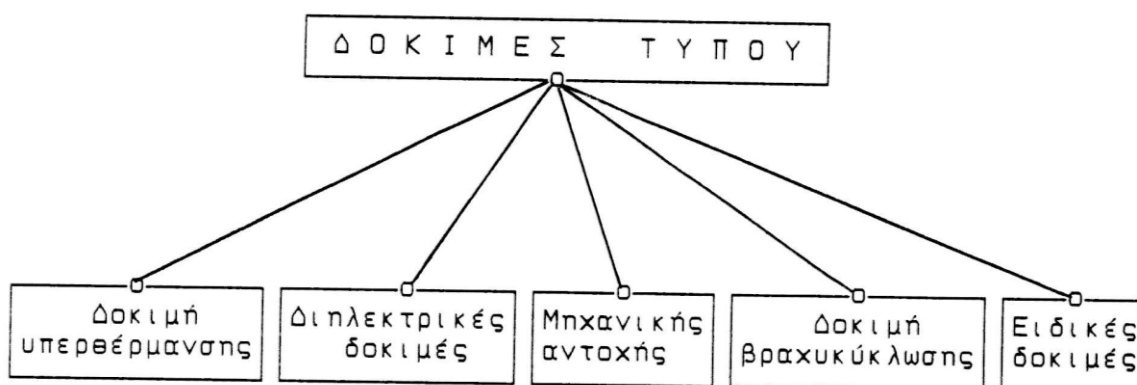
Κατηγορίες δοκιμών

Βασική προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων ενός κτιρίου είναι να έχει δοκιμαστεί τόσο ο εξοπλισμός τους (καλώδια, διακόπτες, ασφάλειες, κ.λ.π) όσο και οι ηλεκτρικές συσκευές που ηλεκτροδοτεί η εγκατάσταση (ηλεκτρική κουζίνα, ψυγείο, τηλεόραση, στερεοφωνικό, κ.λ.π.), πριν διατεθεί προς χρήση και μάλιστα σε λειτουργικές συνθήκες που αντιστοιχούν στις μελλοντικές μέγιστες καταπονήσεις στην πράξη. Οι δοκιμές αυτές, που συνήθως αποτελούν την τελευταία φάση της παραγωγικής διαδικασίας, προβλέπονται στους διάφορους ισχύοντες κανονισμούς (VDE, IEC, EN, κλπ) και διακρίνονται κυρίως στις δοκιμές τύπου και στις δοκιμές σειράς [1, 4].

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

Οι **δοκιμές τύπου** δεν είναι ίδιες για κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή, αλλά εξαρτώνται από το είδος της (πίνακας, καλώδιο, αποζεύκτης, ασφάλεια, ρελαί, κλπ), τα ονομαστικά στοιχεία (τάση, ρεύμα, κ.λ.π) και τις συνθήκες λειτουργίας που πρόκειται να αντιμετωπίσει αυτή κατά περίπτωση στην εγκατάσταση (π.χ. για αποζεύκτες εξωτερικού χώρου προβλέπεται ως δοκιμή τύπου η εξακρίβωση της ικανότητας μόνωσης υπό βροχή, ενώ για αποζεύκτες εσωτερικού χώρου δεν έχει νόημα ο έλεγχος αυτός, κ.λ.π). Για την κατανόηση των δοκιμών τύπου, που προβλέπονται στους διάφορους κανονισμούς, έχουν παρασταθεί στο σχήμα 1.3-1 συγκεντρωτικά οι κατηγορίες τους, οι οποίες πραγματοποιούνται όταν έχουν νόημα για την υπό έλεγχο κατασκευή (σε ένα μονωτήρα π.χ. δεν έχει νόημα η δοκιμή βραχυκύκλωσης, οι δοκιμές μηχανικής αντοχής αφορούν τις επαφές διακοπών κ.λ.π). Το σκεπτικό για την κατάταξη και διεξαγωγή των δοκιμών κατά το σχήμα 1.3-1. προήλθε από την ανάγκη να δοθεί μία αξιόπιστη απάντηση στις εξής βασικές ερωτήσεις για κάθε κατασκευή :

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



Σχήμα 1.3-1: Κατηγορίες των δοκιμών τύπου.

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

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

Σε ότι αφορά την τελευταία ερώτηση οι δοκιμές, που χαρακτηρίστηκαν ως "ειδικές", περιλαμβάνονται επίσης αναλυτικά στους κανονισμούς, ανάλογα με την περίπτωση. Έτσι, η μέτρηση π.χ. των απωλειών ενός μετασχηματιστή, ο έλεγχος της ποιότητας βαφής ενός πίνακα εξωτερικού χώρου κλπ, αποτελούν, κατά το παραπάνω σκεπτικό, ειδικές δοκιμές, γιατί αναφέρονται σε συγκεκριμένες ειδικές απαιτήσεις που καθορίζονται από το είδος και τη χρήση της κατασκευής.

Η **δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας)** αφορά την εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος (μέγιστο ρεύμα συνεχούς λειτουργίας) μίας κατασκευής. Η δοκιμή θεωρείται ότι είναι επιτυχής, όταν η θερμοκρασία δεν υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο κατά τις προδιαγραφές όριο, που είναι συνήθως της τάξεως $50 \div 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

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 του δικτύου, που είναι π.χ.: 230V, 400 V, 20 kV, κ.λ.π.). 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. Στη χαμηλή τάση (230 V, 400 V)

μία τάση 2,5 kV εφαρμοζόμενη στον υπό έλεγχο εξοπλισμό επί 1 min, αντιπροσωπεύει στις περισσότερες των περιπτώσεων τις προαναφερθείσες υπερτάσεις.

Η **δοκιμή μηχανικής αντοχής** αφορά κυρίως την ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα των επαφών των διακοπών μετά από ένα μεγάλο αριθμό χειρισμών, ενώ παράλληλα ελέγχεται η στιβαρότητα της κατασκευής (ενδεχομένως παραμορφώσεις των επαφών ή τυχόν αποσυναρμολογήσεις ή ακατάλληλα ελατήρια κλπ). Ένας αποζεύκτης π.χ. 400 V/100A θα πρέπει να έχει μετά από 1000 πλήρεις κύκλους χειρισμών την ίδια ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα (100 A). Μετά το πέρας δηλαδή της δοκιμής αυτής, θα πρέπει να γίνει η δοκιμή υπερθέρμανσης.

Τέλος, 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 1sec, αρκετό δηλαδή χρόνο, ως προς εκείνον της ενεργοποίησης των μέσων προστασίας της εγκατάστασης. 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). Όταν μία συσκευή δεν αντεπεξέλθει επιτυχώς σε κάποια από τις προβλεπόμενες γι' αυτή δοκιμές τύπου και σειράς, τότε κρίνεται ακατάλληλη και η ζημιά για τον κατασκευαστή μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη (αναλογιστείτε σαν παράδειγμα τη διαμόρφωση του κόστους και τις καθυστερήσεις σε άλλες προγραμματισμένες κατασκευές, όταν το προσωπικό παραγωγής των προαναφερθέντων διακοπών ασχοληθεί με εργασίες επισκευής, γιατί η μόνωση τους κατά τις δοκιμές βρέθηκε ακατάλληλη. Επειδή της παραγωγής προηγείται μελέτη και κατασκευή δείγματος (που έχει υποστεί επιτυχώς τις δοκιμές τύπου και σειράς), είναι φυσικό οι τυχόν αποτυχίες δοκιμών τύπου και σειράς να οφείλονται σε λάθη κατά την παραγωγική διαδικασία, ή ακόμα σε ελαττώματα που μπορεί να έχουν οι πρώτες ύλες. Γι'αυτό, προς ελαχιστοποίηση των βλαβών στην τελευταία φάση της παραγωγής, επιβάλλεται έλεγχος ποιότητας, τόσο στις πρώτες ύλες, όσο και στις διάφορες φάσεις της παραγωγής (δοκιμές πρώτων υλών και δοκιμές παραγωγής αντίστοιχα).

1.4.Φαινόμενα σε ηλεκτρικές επαφές

1.4.1.Ηλεκτρικές επαφές

Οι στατικές ηλεκτρικές επαφές δηλαδή οι επαφές που δεν έχουν ισχύ διακοπής, μπορούν να χειρίζονται μόνο όταν το κύκλωμα έχει τεθεί εκτός τάσης μέσω ενός διακόπτη φορτίου ή ισχύος, ανάλογα με το είδος παροχής της τάσης. Επαφές αυτού του τύπου, που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως 'stationary contacts',

χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε βιομηχανικές εφαρμογές σαν αποζεύκτες, γειωτές και ασφαλειοθήκες. Ως στατικές επαφές θεωρούνται επίσης και οι επαφές των αυτομάτων διακοπών, των ασφαλειοαποζευκτών και των διακοπών φορτίου (δηλαδή όλων των διακοπών που έχουν ισχύ διακοπής) όταν όμως αυτές βρίσκονται ήδη σε λειτουργία στη θέση εντός.

Ως **ηλεκτρική επαφή** ορίζεται μια λυόμενη σύνδεση δύο αγωγών η οποία έχει τη δυνατότητα να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Η παραπάνω λυόμενη σύνδεση αποτελείται από δύο μέρη, το κινητό και το σταθερό μέρος. 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. 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 αυτών δεν είναι μεγάλη, και υπό την επίδραση των δυνάμεων σύσφιξης παραμορφώνονται ελαστικά και πλαστικά στις περιοχές, που εφάπτονται υπό την επίδραση της δύναμης σύσφιξης. Αποτέλεσμα των παραμορφώσεων αυτών είναι η δημιουργία ορισμένων περιοχών πάνω στον λυόμενο σύνδεσμο, οι οποίες φέρουν το φορτίο σύσφιξης της επαφής, χωρίς αυτό να σημαίνει αναγκαστικά ότι μέσω αυτών των περιοχών γίνεται διέλευση του ρεύματος. Το σύνολο των περιοχών αυτών δίνει την επιφάνεια σύσφιξης A_b . Η κατανομή των παραπάνω περιοχών είναι στατιστική και εξαρτάται κυρίως από το είδος των υλικών και την τραχύτητα των επιφανειών.

Ως πραγματική επιφάνεια A_c μιας επαφής 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 οξειδία μετάλλων και σκόνη), μικρότερη από την A_b . Όταν παρατηρεί κανείς μια ηλεκτρική επαφή νομίζει ότι τα δύο μέρη της εφάπτονται σε μια πολύ ευρύτερη επιφάνεια από το σύνολο των περιοχών επαφής A_b που προαναφέρθηκαν. Αυτή η μακροσκοπικά παρατηρούμενη επιφάνεια ονομάζεται φαινόμενη επιφάνεια επαφής A_a και είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από το σύνολο των επί μέρους επιφανειών πραγματικής επαφής A_c , οι οποίες έχουν την δυνατότητα να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Γενικά ισχύει:

$$A_a > A_b > A_c$$

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

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

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

Για 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 επιφάνεια αρκετά μακριά από την είσοδο ώστε η ροή σε αυτή να μην επηρεάζει την θερμική και ηλεκτρική ροή στο άμεσο περιβάλλον της επαφής.
- Το σύστημα των δύο μερών της ηλεκτρικής επαφής είναι συμμετρικό.

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

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

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \lambda_\theta(T) dT = \frac{U^2}{8} \quad (1.4-1)$$

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

Εάν χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του γινομένου $\overline{\rho \lambda_\theta}$ τότε η σχέση 1.4.1 γίνεται:

$$\overline{\rho \lambda_\theta} \Delta T = \frac{U^2}{8} \quad (1.4-2)$$

ή

$$U = \sqrt{8 \overline{\rho \lambda_{\theta}} \Delta T} \quad (1.4-3)$$

Η σχέση 1.4-3 δίνει την 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 1.4-1 γίνεται :

$$\overline{\rho \lambda_{\theta}} \Delta T \leq \frac{U^2}{8} \quad (1.4-4)$$

και

$$U \geq \sqrt{8 \overline{\rho \lambda_{\theta}} \Delta T} \quad (1.4-5)$$

θεωρώντας τον νόμο των Wiedemann Franz-Lorenz, κατά τον οποίο:

$$\rho(T) \lambda_{\theta}(T) = L T \quad (1.4-6)$$

όπου L σταθερά ανεξάρτητη από το μέταλλο ($L \cong 2.4 \cdot 10^{-8} (V / ^{\circ} K)^2$), τότε η σχέση 1.4-1 γίνεται:

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \lambda_{\theta}(T) d(T) = \int_{T_0}^T L T dT = \frac{L}{2} (T^2 - T_0^2) \leq \frac{U^2}{8} \quad (1.4-7)$$

ή

$$U \geq 2 \sqrt{L (T^2 - T_0^2)} \quad (1.4-8)$$

όπου T_0 η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι σχέσεις 1.4-3, 1.4-4 και 1.4-8 παρέχουν την δυνατότητα του κατά προσέγγιση υπολογισμού της πτώσης τάσης σε επαφές χωρίς επικαθίσεις. Στις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής της πτώσης τάσης σε καινούργιες επαφές.

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

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

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

Με βάση το πάχος μπορούμε να διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες επικαθίσεων:

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

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

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

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

δύναμης σύσφιξης και να μειώνεται αντίστοιχα η πίεση, πράγμα που βοηθάει στην οξειδωση της επιφάνειάς του.

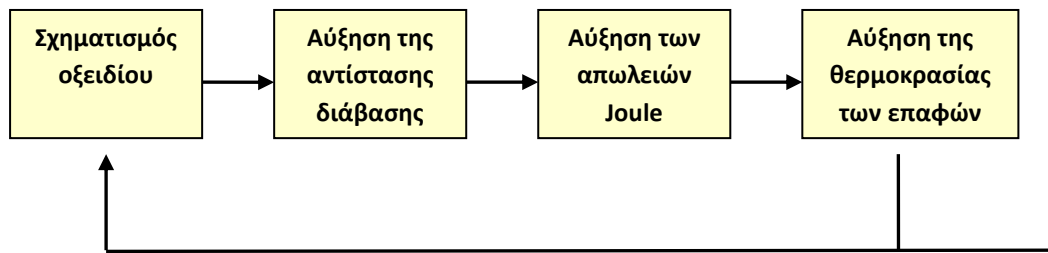
Ο μπρούντζος είναι ένα γενικά αποδεκτό υλικό επαφών σε χαμηλές θερμοκρασίες. Εμφανίζει παρεμφερή συμπεριφορά με τον χαλκό, με την διαφορά ότι τα οξειδία του, που αυξάνουν με σταθερό ρυθμό, δεν αποτελούν προστατευτικό στρώμα, όπως συμβαίνει με το οξείδιο του χαλκού.

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

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

Ο άργυρος οξειδώνεται σε Ag_2O σε θερμοκρασία χώρου, μόνο με την παρουσία του όζοντος. Το οξείδιο του αργύρου έχει χαμηλή σκληρότητα, αποχωρίζεται μηχανικά από το μέταλλο και αποσυντίθεται στους 200°C. Το παραπάνω οξείδιο δεν αυξάνει την αντίσταση διάβασης. Σε συνθήκες ατμοσφαιρικές συνθήκες ο άργυρος προσβάλλεται από ενώσεις του θείου και σχηματίζει ένα επιφανειακό ανθεκτικό στρώμα Ag_2S το οποίο δεν είναι προστατευτικό. Το στρώμα Ag_2S αυξάνεται αργά αλλά σταθερά γιατί η περιεκτικότητα γενικά του H_2O στον αέρα είναι χαμηλή. Περιεκτικότητα σε H_2O μεγαλύτερη από $1/10^9$ στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι καταστροφική για τις επαφές. Η ρύπανση γενικά του ατμοσφαιρικού αέρα, σε περιοχές με έντονη βιομηχανική δραστηριότητα, καταστρέφει στις επαφές από άργυρο. Η ειδική αντίσταση του Ag_2S κυμαίνεται από $10\Omega\text{m}$ έως $10^{10}\Omega\text{m}$ ανάλογα με την κρυσταλλική δομή του. Αυτή είναι περίπου και η ειδική αντίσταση του οξειδίου του χαλκού. Ορατά στρώματα του σουλφιδίου δρουν πρακτικά σαν μονωτές για τις επαφές. Δεδομένου ότι ο άργυρος είναι άριστο υλικό επαφών, έχει διερευνηθεί σε βάθος η προσβολή του σε Ag_2S και έχουν προταθεί διάφορα κράματα για πρακτικές εφαρμογές καθώς και η δυνατότητα επιχρυσώσής του για μικροεπαφές.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην δημιουργία οξειδίων και γενικά επικαθίσεων στις επαφές παρουσιάζει ενδιαφέρον δεδομένου ότι το φαινόμενο ανακυκλώνεται κατά την σειρά που απεικονίζεται στο σχήμα 1.4.3- 1. Ως παράδειγμα εξετάζονται παρακάτω επαφές από Cu ή Ni.



Σχήμα 1.4.3-1: Απλοποιημένη παράσταση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη δημιουργία οξειδίων.

Όσον αφορά τον χαλκό, ο Ronnquist διερεύνησε το πάχος του Cu_2O και CuO , σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας, και του χρόνου, και διατύπωσε την σχέση:

$$s^2 = 20^2 + t \cdot 10^{(14.9 - 5100/T)} \quad (1.4-9)$$

όπου s το πάχος σε \AA , t ο χρόνος σε ώρες και T η θερμοκρασία σε $^\circ\text{K}$. Έχει διαπιστωθεί επίσης ότι μέχρι τους 400°C στην επιφάνεια του χαλκού δημιουργείται Cu_2O και σε υψηλότερες θερμοκρασίες CuO . Όταν τα παραπάνω οξείδια έχουν πάχος μεγαλύτερο από 100\AA τότε μειώνουν συνήθως ηλεκτρικά την επαφή.

Παρεμφερής σχέση ισχύει για το πάχος NiO το οποίο σχηματίζεται σε θερμοκρασίες από 200°C έως 600°C :

$$s^2 = 5^2 + t \cdot 10^{(13.3 - 6000/T)} \quad (1.4-10)$$

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

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

Έχει διατυπωθεί επίσης η άποψη, ότι τα στρώματα του νερού και των στερεών λιπαντικών σε μία επαφή επηρεάζουν ελάχιστα την αντίσταση διάβασης γιατί ο κύριος όγκος τους απομακρύνεται με το κλείσιμο του λυόμενου συνδέσμου και μένουν μόνο απλές στοιβάδες ατόμων, οι οποίες είναι αγωγίμες λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος. Στερεά κατάλοιπα όμως μαύρου χρώματος και μικρού πάχους (έως 10\AA), που έχουν γίνει αναπόσπαστο μέρος της επιφάνειας της επαφής παρουσιάζουν στην πράξη μεγάλη αντίσταση και μπορούν να γίνουν αιτία αύξησης της αντίστασης διάβασης. Μία ερμηνεία μπορεί να δοθεί από την μείωση των δυνατοτήτων απαγωγής θερμότητας, που έχουν γενικά σε 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 στην στήριξη των ηλεκτρικών επαφών. Ο πολυμερισμός είναι πολύ διαδεδομένος στους υδρογονάνθρακες και έχει επισημανθεί ότι πάρα πολλά μονωτικά υλικά παράγουν ατμούς κατά τον πολυμερισμό τους. Ορισμένα υλικά επαφών όπως το Pd, Fe, W, Ag και το Ni δρουν καταλυτικά για την εναπόθεση οργανικών ουσιών σε αυτά και άλλα. Όχι, όπως π.χ.: Cu, Fe, W, Ag και το Ni. Τέλος όταν σε μια επαφή δημιουργούνται τοπικά μικρές ηλεκτρικές εκκενώσεις τότε τα οργανικά στρώματα, που προαναφέρθηκαν, απανθρακώνονται, με αποτέλεσμα από τα λεπτά στρώματα άνθρακα, να διευκολύνεται η εκδήλωση ηλεκτρικών εκκενώσεων μεγαλύτερης ενέργειας.

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

1.4.5. Η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος στις επαφές.

Σύμφωνα με την κλασική φυσική, επικαθίσεις πάχους λίγων Angstrom μονώνουν ηλεκτρικά τα δυο μέρη μιας 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 μια θεωρητική προσέγγιση του θέματος για μερικά mV πτώσης τάσης στα ηλεκτρόδια. Αργότερα ο R. Holm επεξέτεινε την θεωρία αυτή για μεγαλύτερες τιμές της πτώσης τάσης από προηγουμένως. Η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το πάχος του μονωτικού στρώματος μεταξύ των 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 διάφοροι υπολογισμοί έχουν γίνει με απλουστευτικές παραδοχές. Σημασία σε μία επαφή φαίνεται ότι έχει η πυκνότητα ρεύματος, που

συνεπάγεται η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος σε αυτή. Το θέμα αυτό εξετάζεται παρακάτω.

Αν θεωρήσουμε μια επαφή με επίπεδες επιφάνειες από το ίδιο μέταλλο και με απόσταση s μεταξύ των δυο μερών της (λόγω των επικαθίσεων), τότε τα επίπεδα δυναμικού στην περιοχή της επαφής δίδονται στο σχήμα 1.4.5-1α. Τα επίπεδα Fermi των δυο μεταλλικών μερών της επαφής (E_f) συμπίπτουν, όταν δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ τους. Τα φράγματα δυναμικού στην επιφάνεια κάθε μέρους της επαφής επεκτείνονται στη μεταξύ τους απόσταση s και διαμορφώνουν το φράγμα δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Σε περίπτωση που η απόσταση s είναι αρκετά μεγάλη, η μέγιστη τιμή του ύψους του φράγματος δυναμικού ϕ_0 της επαφής ισούται με το έργο εξόδου Φ του μετάλλου (οι μονάδες μέτρησης των οποίων είναι συνήθως το eV ή το 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 v_x το οποίο πλησιάζει το φράγμα δυναμικού του σχήματος 1.4.5-1α ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{1}{2} m v_x^2 = q_e \phi_x \quad (1.4-11)$$

όπου ϕ_x το δυναμικό του ηλεκτρονίου και q_x το φορτίο του. Σε περίπτωση που $\phi_x > \phi_0$ τότε το ηλεκτρόνιο θα βρεθεί στο άλλο μέρος της επαφής, όπου και θα αποδώσει το περίσσειμα της ενέργειάς του υπό μορφή ακτινοβολίας. Αυτό είναι γνωστό ως θερμοϊονική εκπομπή. Εάν το $\phi_x < \phi_0$ τότε κατά την κλασική φυσική ανακλάται το ηλεκτρόνιο πάνω στο φράγμα. Σύμφωνα όμως με την κβαντική θεωρία υπάρχει μια πιθανότητα το παραπάνω ηλεκτρόνιο να περάσει το φράγμα δυναμικού και να βρεθεί στο άλλο μέρος της επαφής.

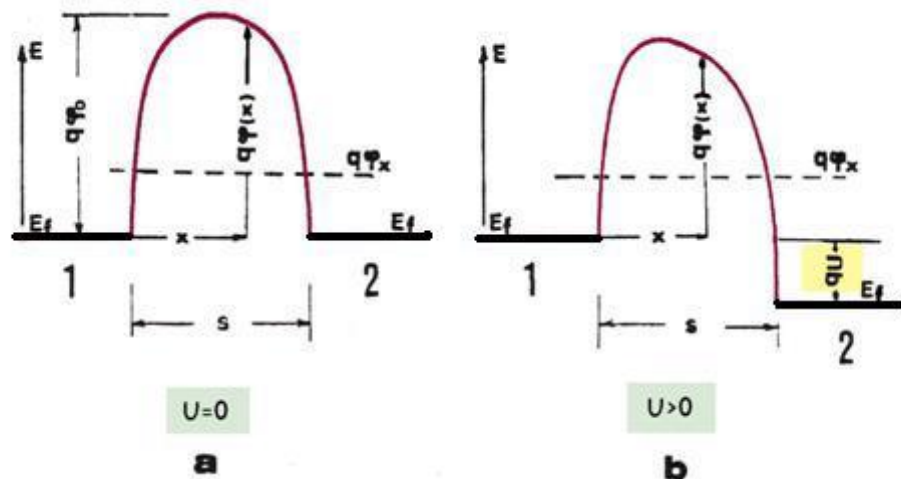
Αυτή η πιθανότητα εξαρτάται από έναν συντελεστή διάβασης $D(\phi_x)$ για τον οποίο ισχύει η σχέση:

$$D(\phi_x) = \exp\left[\frac{-4\pi}{h} \int_0^s \sqrt{2 m [\phi(x) - \phi_x]} dx\right] \quad (1.4-12)$$

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

Όταν το ηλεκτρόνιο διαπεράσει το φράγμα δυναμικού λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος, τότε δεν χάνει την ενέργεια του (όπως συμβαίνει στην θερμοϊονική 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. Επισημαίνεται ότι η απόσταση s μεταξύ των δυο μερών της επαφής είναι συνήθως ένα λεπτό στρώμα οξειδίου του μετάλλου της επαφής. Αν μεταξύ των δύο μερών της επαφής του σχήματος 1.4.5-1α υπάρχει μία διαφορά δυναμικού U , τότε όπως φαίνονται στο σχήμα 1.4.5-1β οι στάθμες Fermi διαφοροποιούνται μεταξύ τους κατά U , με αποτέλεσμα μια ροή ηλεκτρικού ρεύματος από την επαφή με το υψηλό δυναμικό προς την επαφή με το χαμηλό δυναμικό. Αυτό συμβαίνει γιατί το ρεύμα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας, λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος δεν είναι ίσο και κατά τις δύο διευθύνσεις με αποτέλεσμα η διαφορά του αριθμού των φορέων μεταξύ των δυο μερών της επαφής να μπορεί να μετρηθεί ως ηλεκτρικό ρεύμα. Από τις δύο σχέσεις 1.4-11 και 1.4-12 φαίνεται ότι μόνον η ταχύτητα του ηλεκτρονίου v_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 v_y στη διεύθυνση y και v_z στη διεύθυνση z αλλά μικρή ταχύτητα v_x στη διεύθυνση x έχουν μικρή πιθανότητα να διαπεράσουν το φράγμα δυναμικού, αν και έχουν υψηλή συνολική ενέργεια.



Σχήμα 1.4.5-1: Το φράγμα δυναμικού στο κενό δύο επαφών από το ίδιο υλικό.

1, 2: τα δύο μέρη της επαφής

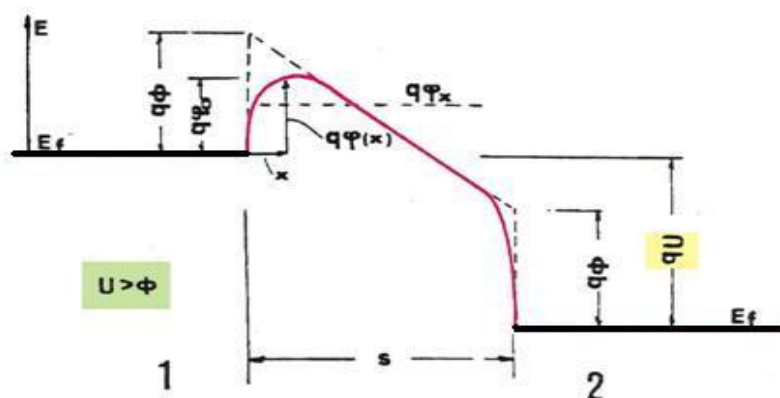
α: χωρίς την επιβολή διαφοράς δυναμικού

β: με την επιβολή διαφοράς δυναμικού U

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

- Η πρώτη περίπτωση αφορά πολύ μικρές τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης U σε σχέση με το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού $\varphi_0 \gg U > 0$. Το φαινόμενο θεωρείται ότι είναι ωμικό (η πυκνότητα ρεύματος J είναι ανάλογη της τάσης U).

- Στη δεύτερη περίπτωση η τιμή της εφαρμοζόμενης συνεχούς τάσης είναι μεγαλύτερη από προηγουμένως και ισχύει ότι $\phi_0 > U$. Η πυκνότητα του ρεύματος J αυξάνει μη γραμμικά σε σχέση με την τιμή της τάσης U .
- Η τρίτη περίπτωση (γνωστή από την βιβλιογραφία ως εκπομπή πεδίου) αφορά μεγαλύτερες τιμές της τάσης από προηγουμένως, υπό την προϋπόθεση ότι ισχύει $U > U_0$. Η πυκνότητα του ρεύματος J αυξάνει απότομα με την αύξηση της τάσης U στο σύστημα. Στο σχήμα 1.4.5-2 φαίνονται οι ενεργειακές στάθμες που αφορούν την περίπτωση αυτή. Παρατηρούμε ότι το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού ϕ_0 είναι αρκετά μικρότερο από το έργο εξόδου Φ . Σε αυτή την περίπτωση τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μπορούν να μετακινούνται επάνω από φράγμα δυναμικού.



Σχήμα 1.4.5-2: Το φράγμα δυναμικού μεταξύ δύο ομοίων μεταλλικών ηλεκτροδίων που απέχουν μεταξύ τους κατά s για $U > \phi$. 1, 2: τα δύο μέρη της επαφής

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

$$\rho_T = \frac{U}{J} \quad (1.4-13)$$

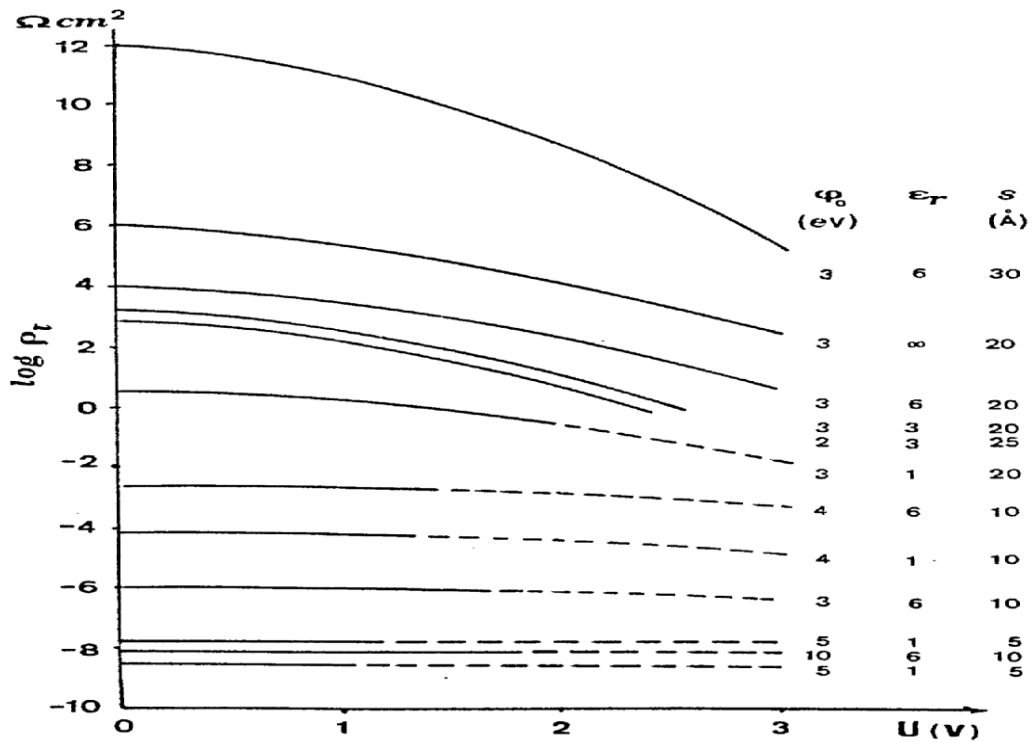
Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από το πάχος s , το έργο εξόδου Φ του μετάλλου των ηλεκτροδίων (όταν πρόκειται για το ίδιο υλικό) και την σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r , των επικαθίσεων. Η τιμή ρ_T εξαρτάται επίσης από την μορφή που έχει το φράγμα δυναμικού. Από τα παραπάνω- φαίνεται ότι Ισχύει γενικά:

$$\rho_T = f(s, \Phi, U, \epsilon_r, \phi(x)) \quad (1.4-14)$$

Από τις σχέσεις 1.4-13 και 1.4-14 φαίνεται ότι για τον υπολογισμό της πυκνότητας ρεύματος J χρειάζεται να γίνει μια μαθηματική προσέγγιση για την συνάρτηση $\phi(x)$. Από τους ερευνητές, που ασχολήθηκαν με το θέμα, οι υπολογισμοί έγιναν με διάφορες παραδοχές. Κατά μία π.χ. προσέγγιση για μικρές τιμές του U και μεγάλο πάχος s θεωρείται η $\phi(x)$ ότι έχει μορφή τραπεζίου. Η προσέγγιση αυτή αν και αφορά

χαμηλές θερμοκρασίες ($T=0$), δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και σε θερμοκρασίες χώρου. Σε μία άλλη προσεγγιστική μέθοδο θεωρείται η $\varphi(x)$ ως παραβολή. Στην προσέγγιση αυτή λαμβάνεται υπ όψη η επίδραση της θερμοκρασίας, ανάλογα προς την οποία προκαλείται αύξηση της ενεργειακής στάθμης σημαντικού αριθμού ηλεκτρονίων πάνω από την στάθμη Fermi, γεγονός που βοηθά να διαπεράσουν οι φορείς αυτοί το φράγμα δυναμικού. Η παραπάνω προσέγγιση ενδείκνυται για μικρά πάχη (τα μεγάλα πάχη επικαθίσεων δεν προσεγγίζονται ικανοποιητικά με παραβολή και είναι προτιμότερη η προσέγγιση τους με τραπέζιο).

Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης σήραγγος επιχειρήθηκε από ερευνητές σε συνδυασμό με πειραματικά δεδομένα. Συνδυασμός αποτελεσμάτων υπολογισμών διαφόρων ερευνητών είναι το διάγραμμα $\text{Log}(\rho_T) = f(J, \epsilon, \varphi_0, s)$ που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.4.5-3. Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η ειδική αντίσταση σήραγγος ρ_T σαν συνάρτηση της τάσης U για διαφορετικές τιμές του πάχους, της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r και του φράγματος δυναμικού φ_0 , σταθεράς ϵ_r και του φράγματος δυναμικού φ_0 .



Σχήμα 1.4.5-3 : Η ειδική αντίσταση σήραγγος ρ_T σε μία επαφή σε σχέση με την πτώση τάσης U με παραμέτρους το πάχος s των επικαθίσεων, τη σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r και το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού φ_0 .

1.4.6. Η φυσική διερεύνηση των φαινομένων μεταφοράς στις επαφές.

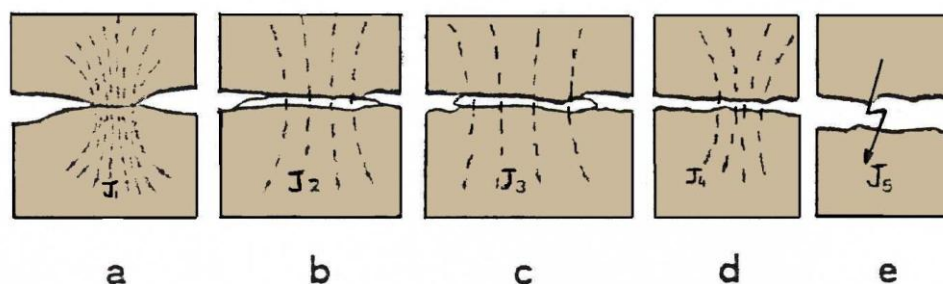
Η δοκιμή υπερθέρμανσης χρησιμοποιείται στην πράξη για τον προσδιορισμό του ονομαστικού ρεύματος των επαφών. Η μετρούμενη πτώση τάσης κατά μήκος των επαφών σχετίζεται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του λυομένου συνδέσμου καθώς επίσης και με την θερμοκρασία λειτουργίας του. Αν και η δοκιμή υπερθέρμανσης εφαρμόζεται για την τεχνικό-οικονομική μελέτη και τον έλεγχο των επαφών διακοπών δεν δίνει επαρκείς πληροφορίες όσον αφορά την φυσική ερμηνεία φαινομένων που αναπτύσσονται κατά την μεταφορά των ηλεκτρικών φορέων μεταξύ των δύο μερών μιας επαφής.

Τύπος επαφής	Υλικό επαφών	Με θερμική καταπόνηση		Χωρίς θερμική καταπόνηση		Γραμμική παρεμβολή στις τιμές I*, ΔU*	
		I (A)	ΔU (mV)	I* (A)	ΔU* (mV)	I* (A)	ΔU* (mV)
αποζεύκτης 500V/100 ^A	Άργυρος	37	19	44	21	37	17,6
αποζεύκτης 500V/100 ^A	Χαλκός	26	13	36	16	26	11,5
αποζεύκτης 20kV/200 ^A	Χαλκός	48	21	52	22	48	20,3
Ασφαλειοθήκη 20mV/100A	Ορείχαλκος	67	24	73	24	67	22,0

Πίνακας 1.4.6-1. Μετρήσεις σε επαφές εμπορίου που αφορούν τον προσδιορισμό τιμών ρεύματος και πτώσης τάσης πέραν των οποίων αναπτύσσεται μη γραμμική συμπεριφορά.

Οι φυσικές ερμηνείες που αφορούν τα προαναφερθέντα φαινόμενα σχετίζονται άμεσα με την μεταφορά των ηλεκτρικών φορέων μέσα από τις διάφορες περιοχές επαφής (A_C), οι οποίες διαπερνώνται από υψηλές πυκνότητες ρεύματος. Η παρατηρούμενη μείωση της οριακής (κατωφλικής) τιμής της τάσης, για την ανάπτυξη μη γραμμικών φαινομένων στον πίνακα 1.4.6-1, πριν και μετά τη γήρανση των επαφών φαινομενικά δεν θα μπορούσε να αποδοθεί σε τρόπους ηλεκτρονικής

αγωγιμότητας διαμέσου λεπτών στρωμάτων οξειδίων και γενικά επικαθίσεων. Αυτό γιατί μετά την γήρανση των επαφών το πάχος του οξειδίου αποκτά μεγαλύτερο εύρος και συνεπώς χρειάζεται μεγαλύτερη πεδιακή ένταση προκειμένου να υπάρξει ανάλογη πυκνότητα ρεύματος. Για να γίνει όμως μία λεπτομερής περιγραφή προκειμένου να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα, απαιτούνται όμοιες εντάσεις ρεύματος και για τις δύο περιπτώσεις (πριν και μετά την γήρανση). Για μια δομή Μέταλλο — Μονωτής — Μέταλλο (MIM) η παραπάνω διαπίστωση συμφωνεί με την αναλυτική έκφραση για την ένταση ρεύματος (φαινομένου σήραγγος) η οποία είναι μη γραμμική συνάρτηση αμφοτέρων των μεταβλητών, δηλαδή και της πυκνότητας ρεύματος και του επιβαλλομένου δυναμικού ΔU .



Σχήμα 1.4.6-1. Μακροσκοπική απεικόνιση δύο μεταλλικών ηλεκτρικών επαφών. Μπορούμε να παρατηρήσουμε τις ακόλουθες μικροδομές.

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

Αυτές οι περιοχές μπορούν να γίνουν αγώγιμες πέραν μίας κρίσιμης τιμής του τοπικού ηλεκτρικού πεδίου. J_1, J_2, J_3, J_4, J_5 : πυκνότητες ρεύματος.

Κεφάλαιο

2

**Σκοπός της διπλωματικής
εργασίας**

2.1.Σκοπός της εργασίας

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η δοκιμή υπερθέρμανσης και η δοκιμή βραχυκύκλωσης ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού χαμηλής τάσης και συγκεκριμένα 10 ρευματοδοτών (πρίζες) αλλά και μιας ασφαλειοθήκης. Επίσης, η βαθμονόμηση 5 θερμοστοιχείων σιδήρου – κονσταντάνης τα οποία θα χρησιμοποιηθούν.

Με τις δύο δοκιμές εξετάζεται η άνοδος της θερμοκρασίας του υλικού και κατά πόσο αυτή βρίσκεται μέσα στα επιτρεπόμενα όρια. Έτσι διαπιστώνεται το πραγματικό ονομαστικό ρεύμα. Με άλλα λόγια ελέγχεται η αντοχή και η ανθεκτικότητα των πριζών για τη συνεχή λειτουργία (δοκιμή υπερθέρμανσης) και για την περίπτωση βραχυκυκλώματος (δοκιμή βραχυκύκλωσης). Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε κάθε περίπτωση στις πρίζες κατά τις δοκιμές χρησιμοποιήσαμε θερμοστοχεία.

Η δοκιμή υπερθέρμανσης στους ρευματοδότες πραγματοποιείται με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου όπως και η δοκιμή βραχυκύκλωσης διότι εκεί αναπτύσσονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες.

Τέλος, η βαθμονόμηση των θερμοστοιχείων αποσκοπεί στην όσο το δυνατόν ακριβέστερη μέτρηση της θερμοκρασίας.

Κεφάλαιο

3

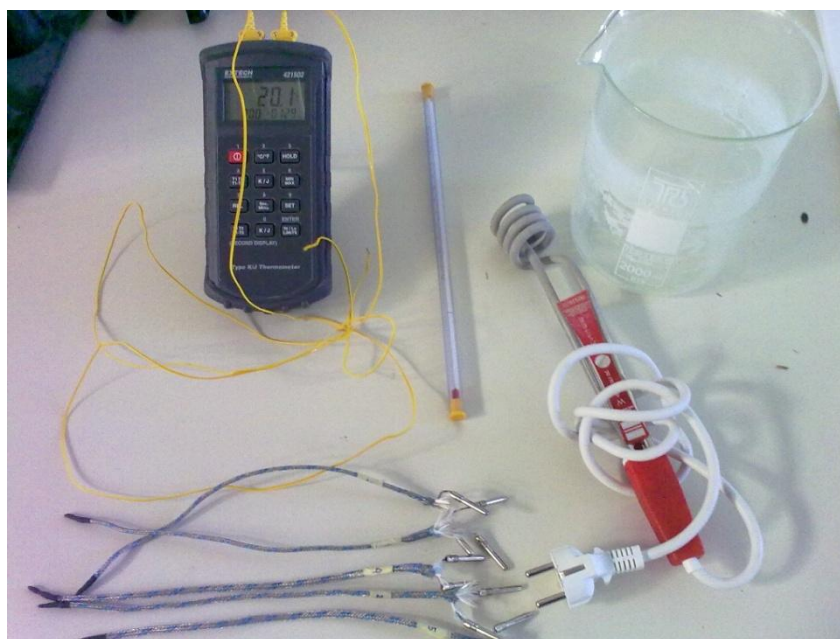
**Μεθοδολογία και αποτελέσματα
υπολογισμών**

3.1.Βαθμονόμηση θερμοστοιχείων

Όπως προαναφέρθηκε τα 5 θερμοστοιχεία που βαθμονομήθηκαν είναι σιδήρου – κωνσταντάνης. Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση των θερμοστοιχείων ήταν :

- Θερμόμετρο υδραργύρου
- Θερμόμετρο Pt 100
- Ηλεκτρική αντίσταση
- Βολτόμετρο
- Δοχείο με νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος

Αρχικά τοποθετήθηκαν στο δοχείο με το νερό το θερμόμετρο υδραργύρου και το θερμόμετρο Pt 100. Στη συνέχεια συνδέθηκε το θερμοστοιχείο στο βολτόμετρο και τροφοδοτήθηκε με τάση η ηλεκτρική αντίσταση μέσω του δικτύου. Ακολούθως τοποθετήθηκαν η ηλεκτρική αντίσταση και η κοινή επαφή του θερμοστοιχείου στο δοχείο.



Σχήμα 3.1-1 : Συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση των 5 θερμοστοιχείων

Καθώς η ηλεκτρική αντίσταση θέρμαινε το δοχείο, το βολτόμετρο άρχισε να δείχνει κάποια τάση και αντίστοιχα αυξάνονταν οι ενδείξεις των δύο θερμομέτρων. Ανά 5 °C περίπου γινόταν διακοπή της τροφοδότησης της αντίστασης και καταγράφονταν οι ενδείξεις θερμοκρασίας και τάσης των οργάνων. Αυτό επαναλήφθηκε αρκετές φορές μέχρι η θερμοκρασία να αγγίξει τους 80 °C. Κατ 'αυτόν τον τρόπο βαθμονομήθηκε

το κάθε ένα από τα πέντε θερμοστοιχεία (σιδήρου-κωνσταντάνης) και προέκυψε η χαρακτηριστική εξίσωση θερμοκρασίας – τάσης (θ° - mV) του κάθε θερμοστοιχείου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η βαθμονόμηση έγινε δύο φορές σε κάθε θερμοστοιχείο, ώστε να εξαχθούν πιο σωστά αποτελέσματα και μεταξύ των βαθμονομήσεων μεσολαβούσε αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε η ηλεκτρική αντίσταση, το δοχείο και τα δύο θερμόμετρα να αποκτήσουν εκ νέου θερμοκρασία περιβάλλοντος και να διασφαλίζεται όσο το δυνατόν η αξιοπιστία της βαθμονόμησης. Τέλος τα θερμοστοιχεία είχαν αποκτήσει την κοινή επαφή τους μέσω οξυγονοκόλλησης και ήταν κατάλληλα μονωμένα στο υπόλοιπο μέρος.

Ανάλυση με ελάχιστα τετράγωνα

Εφόσον η χαρακτηριστική εξίσωση του θερμοστοιχείου προσεγγίζει την ευθεία, τότε η ακριβέστερη μέθοδος εύρεσης της ευθείας που αντιστοιχεί στα πειραματικά σημεία προέρχεται από τα ελάχιστα τετράγωνα.

Η ευθεία που αναζητείται ορίζεται με τον άξονα y να αναπαριστά την τάση και τον άξονα x τη θερμοκρασία, δηλαδή υπάρχει η παρακάτω αντιστοιχία:

y : mV

x : $^\circ\text{C}$

Ο συντελεστής β της ευθείας καθώς και ο σταθερός όρος α υπολογίζονται με τους παρακάτω τύπους :

$$\alpha = \frac{[y][x^2] - [x][xy]}{n[x^2] - [x]^2} \quad (3.1-1)$$

$$\beta = \frac{n[xy] - [x][y]}{n[x^2] - [x]^2} \quad (3.1-2)$$

όπου

$$[x] = \sum_{i=1}^n x_i \quad , \quad (3.1-3)$$

$$[y] = \sum_{i=1}^n y_i \quad , \quad (3.1-4)$$

$$[xy] = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad , \quad (3.1-5)$$

$$[x^2] = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad , \quad (3.1-6)$$

με (x_i, y_i) το πειραματικό σημείο και n τον αριθμό των πειραματικών σημείων

Όσον αφορά τα σφάλματα $\delta\alpha$ και $\delta\beta$, οι τύποι υπολογισμού είναι οι παρακάτω:

$$\delta\alpha = \sqrt{\frac{1}{n-2} \frac{[x^2][d^2]}{n[x^2] - [x]^2}} \quad (3.1-7)$$

$$\delta\beta = \delta\alpha \sqrt{\frac{n}{[x^2]}} \quad (3.1-8)$$

όπου

$$[d^2] = \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (3.1-9)$$

με

$$d_i = y_i - \alpha - \beta x_i \quad (3.1-10)$$

Στη συνέχεια δίδονται οι μετρήσεις για το κάθε θερμοστοιχείο και προσδιορίζεται η χαρακτηριστική εξίσωση για κάθε ένα απ' αυτά.

ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟ 1

1^η Σειρά μετρήσεων

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$ Pt100	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$ Hg	V (mV)
28	25	0,0
32	30	0,6
38	36	0,9
42	41	1,2
46	45	1,5
53	50	1,7
56	55	1,7
60	60	2,0
66	65	2,3
70	70	2,4
75	75	2,8
80	80	3,0

Πίνακας 3.1-1: Τιμές της τάσης και της θερμοκρασίας της πρώτης σειράς μετρήσεων του θερμοστοιχείου 1

2^η Σειρά μετρήσεων

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$ Pt100	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$ Hg	V (mV)
24	22	0,0
27	26	0,5
30	30	0,7
37	36	1,1
42	40	1,3
46	45	1,6
50	50	1,8
56	55	2,1
61	60	2,2
65	65	2,3
70	70	2,5
75	75	2,7
80	80	2,8

Πίνακας 3.1-2: Τιμές της τάσης και της θερμοκρασίας της δεύτερης σειράς μετρήσεων του θερμοστοιχείου 1

Λαμβάνοντας το μέσο όρο από τις δύο πρώτες στήλες του κάθε πίνακα, ώστε να ληφθεί μια μέση θερμοκρασία από τα δύο θερμόμετρα, και συνδυάζοντας τους 2 πίνακες για όλες τις πειραματικές τιμές της μεταβλητής y_i με μέσο όρο για τις κοντινές τιμές των αντίστοιχων x_i προκύπτει με βάση την ανάλυση για τα ελάχιστα τετράγωνα που προηγήθηκε ο παρακάτω πίνακας :

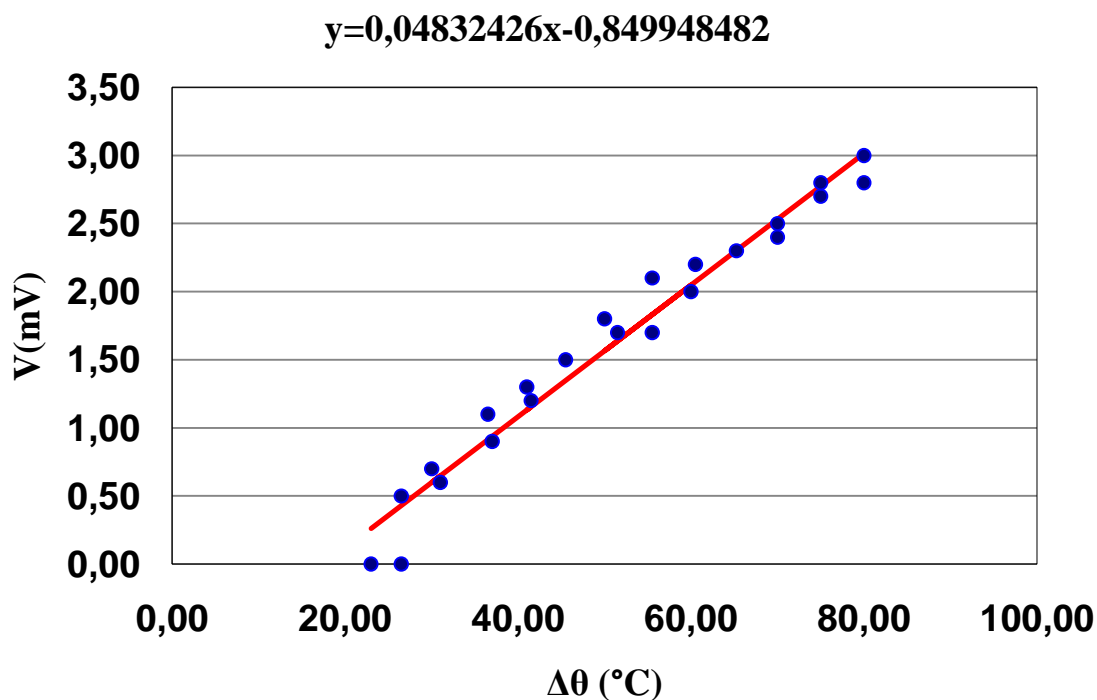
x_i	y_i	x^2	x_i*y_i	d_i	d_i^2
23,00	0,00	529,000	0,000	-0,262	0,068
26,50	0,00	702,250	0,000	-0,431	0,185
26,50	0,50	702,250	13,250	0,069	0,005
31,00	0,60	961,000	18,600	-0,048	0,002
30,00	0,70	900,000	21,000	0,100	0,010
37,00	0,90	1369,000	33,300	-0,038	0,001
36,50	1,10	1332,250	40,150	0,186	0,035
41,50	1,20	1722,250	49,800	0,045	0,002
41,00	1,30	1681,000	53,300	0,169	0,028
45,50	1,50	2070,250	68,250	0,151	0,023
51,50	1,70	2652,250	87,550	0,061	0,004
55,50	1,70	3080,250	94,350	-0,132	0,017
50,00	1,80	2500,000	90,000	0,234	0,055
60,00	2,00	3600,000	120,000	-0,049	0,002
55,50	2,10	3080,250	116,550	0,268	0,072

x_i	y_i	x^2	x_i*y_i	d_i	d_i^2
60,50	2,20	3660,250	133,100	0,126	0,016
65,25	2,30	4257,563	150,075	-0,003	0,000
70,00	2,40	4900,000	168,000	-0,133	0,018
70,00	2,50	4900,000	175,000	-0,033	0,001
75,00	2,70	5625,000	202,500	-0,074	0,006
75,00	2,80	5625,000	210,000	0,026	0,001
80,00	2,80	6400,000	224,000	-0,216	0,047
80,00	3,00	6400,000	240,000	-0,016	0,000
[x]	[y]	[x ²]	[xy]		[d ²]
1186,75	37,80	68649,813	2308,775		0,598

Πίνακας 3.1-3: Συντελεστές από ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων του θερμοστοιχείου 1

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 3.1-1, 3.1-2, 3.1-7 και 3.1-8 προκύπτουν: $\alpha = -0,84995$, $\beta = 0,048324$, $\delta\alpha = 0,107074347$, $\delta\beta = 0,001959881$

Με βάση τα παραπάνω κατασκευάζεται η ακόλουθη χαρακτηριστική.



Σχήμα 3.1-1: Γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής εξίσωσης ($\Delta\theta$ -mV) του θερμοστοιχείου 1

ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟ 2

1^η Σειρά μετρήσεων

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$ Pt100	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$ Hg	V (mV)
27	23	0,3
27	25	0,4
31	30	0,9
36	35	1,3
41	40	1,5
46	46	1,8
50	50	2,0
56	56	2,2
61	61	2,5
65	65	2,7
69	69	2,8
75	75	3,1
81	80	3,2

Πίνακας 3.1-4: Τιμές της τάσης και της θερμοκρασίας της πρώτης σειράς μετρήσεων του θερμοστοιχείου 2

2^η Σειρά μετρήσεων

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$ Pt100	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$ Hg	V (mV)
27	24	0,0
27	35	0,3
32	31	0,9
36	36	1,1
41	41	1,4
46	46	1,7
50	50	1,9
55	55	2,1
60	60	2,3
65	65	2,6
70	70	2,8
75	75	3,1
81	80	3,1

Πίνακας 3.1-5: Τιμές της τάσης και της θερμοκρασίας της δεύτερης σειράς μετρήσεων του θερμοστοιχείου 2

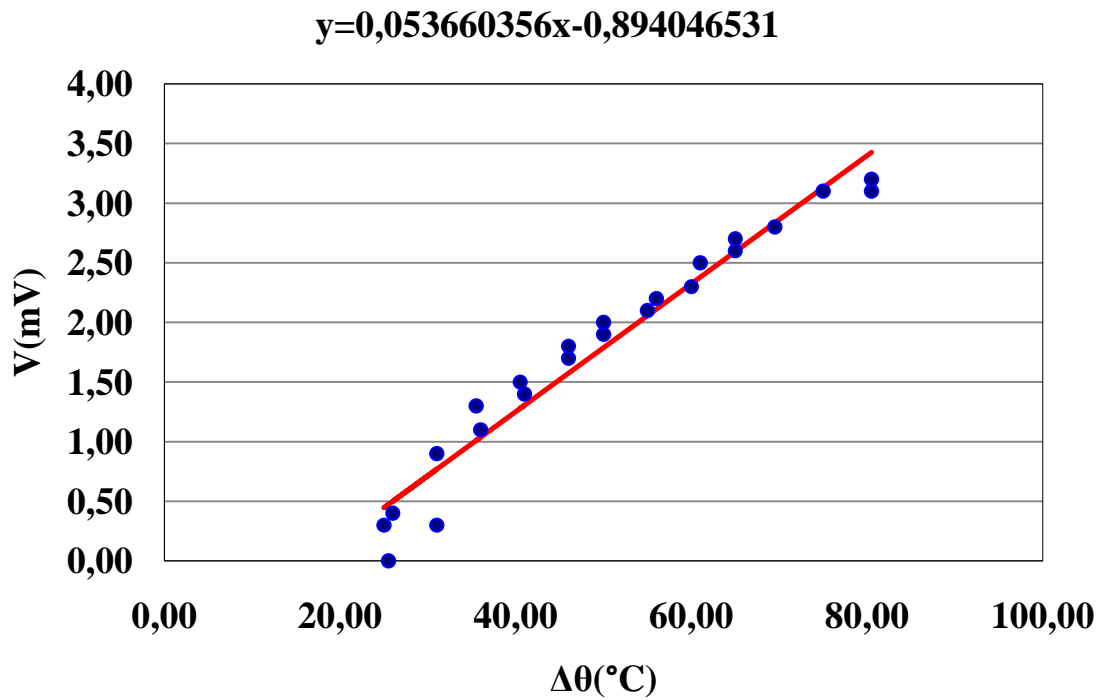
Λαμβάνοντας το μέσο όρο από τις δύο πρώτες στήλες του κάθε πίνακα, ώστε να ληφθεί μια μέση θερμοκρασία από τα δύο θερμόμετρα, και συνδυάζοντας τους 2 πίνακες για όλες τις πειραματικές τιμές της μεταβλητής y_i με μέσο όρο για τις κοντινές τιμές των αντίστοιχων x_i προκύπτει με βάση την ανάλυση για τα ελάχιστα τετράγωνα που προηγήθηκε ο παρακάτω πίνακας :

x_i	y_i	x_i^2	x_i*y_i	d_i	d_i^2
25,50	0,00	650,250	0,000	-0,474	0,225
25,00	0,30	625,000	7,500	-0,147	0,022
31,00	0,30	961,000	9,300	-0,469	0,220
26,00	0,40	676,000	10,400	-0,101	0,010
31,00	0,90	961,000	27,900	0,131	0,017
36,00	1,10	1296,000	39,600	0,062	0,004
35,50	1,30	1260,250	46,150	0,289	0,084
41,00	1,40	1681,000	57,400	0,094	0,009
40,50	1,50	1640,250	60,750	0,221	0,049
46,00	1,70	2116,000	78,200	0,126	0,016
46,00	1,80	2116,000	82,800	0,226	0,051
50,00	1,90	2500,000	95,000	0,111	0,012
50,00	2,00	2500,000	100,000	0,211	0,045
55,00	2,10	3025,000	115,500	0,043	0,002
56,00	2,20	3136,000	123,200	0,089	0,008
60,00	2,30	3600,000	138,000	-0,026	0,001
61,00	2,50	3721,000	152,500	0,121	0,015
65,00	2,60	4225,000	169,000	0,006	0,000
65,00	2,70	4225,000	175,500	0,106	0,011
69,50	2,80	4830,250	194,600	-0,035	0,001
75,00	3,10	5625,000	232,500	-0,030	0,001
80,50	3,10	6480,250	249,550	-0,326	0,106
80,50	3,20	6480,250	257,600	-0,226	0,051
[x]	[y]	[x ²]	[xy]		[d ²]
1151,00	41,20	64330,50	2422,950		0,958

Πίνακας 3.1-6: Συντελεστές από ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων του θερμοστοιχείου 2

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 3.1-1, 3.1-2, 3.1-7 και 3.1-8 προκύπτουν: $\alpha = -0,89405$, $\beta = 0,05366$, $\delta\alpha = 0,137713398$, $\delta\beta = 0,002603944$

Με βάση τα παραπάνω κατασκευάζεται η χαρακτηριστική.



Σχήμα 3.1-2: Γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής εξίσωσης ($\Delta\theta\text{-mV}$) του θερμοστοιχείου 2

ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟ 3

1^η Σειρά μετρήσεων

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$ Pt100	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$ Hg	V (mV)
26	24	0,0
32	30	0,7
37	36	1,1
42	41	1,3
47	46	1,6
52	51	1,8
57	56	2,1
61	61	2,3
65	65	2,5
70	70	2,7
75	75	3,0
80	80	3,2

Πίνακας 3.1-7: Τιμές της τάσης και της θερμοκρασίας της πρώτης σειράς μετρήσεων του θερμοστοιχείου 3

2^η Σειρά μετρήσεων

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$ Pt100	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$ Hg	V (mV)
25	24	0,0
27	25	0,2
31	30	0,6
35	35	0,9
40	40	1,2
46	46	1,5
50	50	1,7
55	55	2,0
60	60	2,2
65	65	2,5
70	70	2,7
75	75	2,9
80	80	3,1

Πίνακας 3.1-8: Τιμές της τάσης και της θερμοκρασίας της δεύτερης σειράς μετρήσεων του θερμοστοιχείου 3

Λαμβάνοντας το μέσο όρο από τις δύο πρώτες στήλες του κάθε πίνακα, ώστε να ληφθεί μια μέση θερμοκρασία από τα δύο θερμόμετρα, και συνδυάζοντας τους 2 πίνακες για όλες τις πειραματικές τιμές της μεταβλητής y_i με μέσο όρο για τις κοντινές τιμές των αντίστοιχων x_i προκύπτει με βάση την ανάλυση για τα ελάχιστα τετράγωνα που προηγήθηκε ο παρακάτω πίνακας :

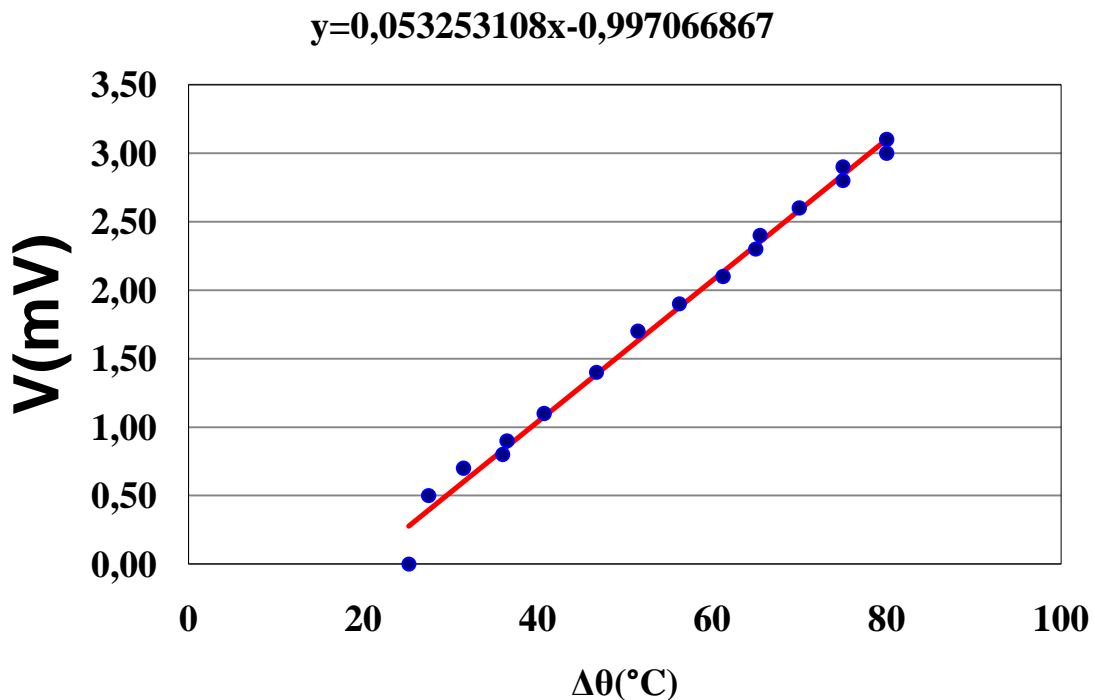
x_i	y_i	x_i^2	x_i*y_i	d_i	d_i^2
24,75	0,00	612,563	0,000	-0,321	0,103
26,00	0,20	676,000	5,200	-0,188	0,035
30,50	0,60	930,250	18,300	-0,027	0,001
31,00	0,70	961,000	21,700	0,046	0,002
35,00	0,90	1225,000	31,500	0,033	0,001
36,50	1,10	1332,250	40,150	0,153	0,024
40,00	1,20	1600,000	48,000	0,067	0,004
41,50	1,30	1722,250	53,950	0,087	0,008
46,00	1,50	2116,000	69,000	0,047	0,002
46,50	1,60	2162,250	74,400	0,121	0,015
50,00	1,70	2500,000	85,000	0,034	0,001
51,50	1,80	2652,250	92,700	0,055	0,003
55,00	2,00	3025,000	110,000	0,068	0,005
56,50	2,10	3192,250	118,650	0,088	0,008
60,00	2,20	3600,000	132,000	0,002	0,000

x_i	y_i	x_i^2	x_i*y_i	d_i	d_i^2
61,00	2,30	3721,000	140,300	0,049	0,002
65,00	2,50	4225,000	162,500	0,036	0,001
70,00	2,70	4900,000	189,000	-0,031	0,001
75,00	2,90	5625,000	217,500	-0,097	0,009
75,00	3,00	5625,000	225,000	0,003	0,000
80,00	3,10	6400,000	248,000	-0,163	0,027
80,00	3,20	6400,000	256,000	-0,063	0,004
[x]	[y]	[x ²]	[xy]		[d ²]
1136,75	38,60	65203,063	2338,850		0,256

Πίνακας 3.1-9: Συντελεστές από ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων του θερμοστοιχείου 3

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 3.1-1, 3.1-2, 3.1-7 και 3.1-8 προκύπτουν: $\alpha = -0,99707$,
 $\beta = 0,053253$, $\delta\alpha = 0,076555$, $\delta\beta = 0,001406212$

Με βάση τα παραπάνω κατασκευάζεται η χαρακτηριστική.



Σχήμα 3.1-3: Γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής εξίσωσης ($\Delta\theta$ -mV) του θερμοστοιχείου 3

ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟ 4

1^η Σειρά μετρήσεων

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$ Pt100	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$ Hg	V (mV)
28	25	0,0
32	30	0,6
37	35	0,9
43	41	1,2
46	45	1,3
51	50	1,6
56	55	1,8
62	60	2,1
66	65	2,3
70	70	2,6
76	75	2,9
80	80	3,1

Πίνακας 3.1-10: Τιμές της τάσης και της θερμοκρασίας της πρώτης σειράς μετρήσεων του θερμοστοιχείου 4

2^η Σειρά μετρήσεων

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$ Pt100	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$ Hg	V (mV)
27	24	0,0
27	25	0,2
32	30	0,7
38	36	1,0
43	41	1,3
47	45	1,5
51	50	1,7
56	55	2,0
60	60	2,2
65	65	2,4
70	70	2,6
75	75	2,9
80	80	3,1

Πίνακας 3.1-11: Τιμές της τάσης και της θερμοκρασίας της δεύτερης σειράς μετρήσεων του θερμοστοιχείου 4

Λαμβάνοντας το μέσο όρο από τις δύο πρώτες στήλες του κάθε πίνακα, ώστε να ληφθεί μια μέση θερμοκρασία από τα δύο θερμόμετρα, και συνδυάζοντας τους 2

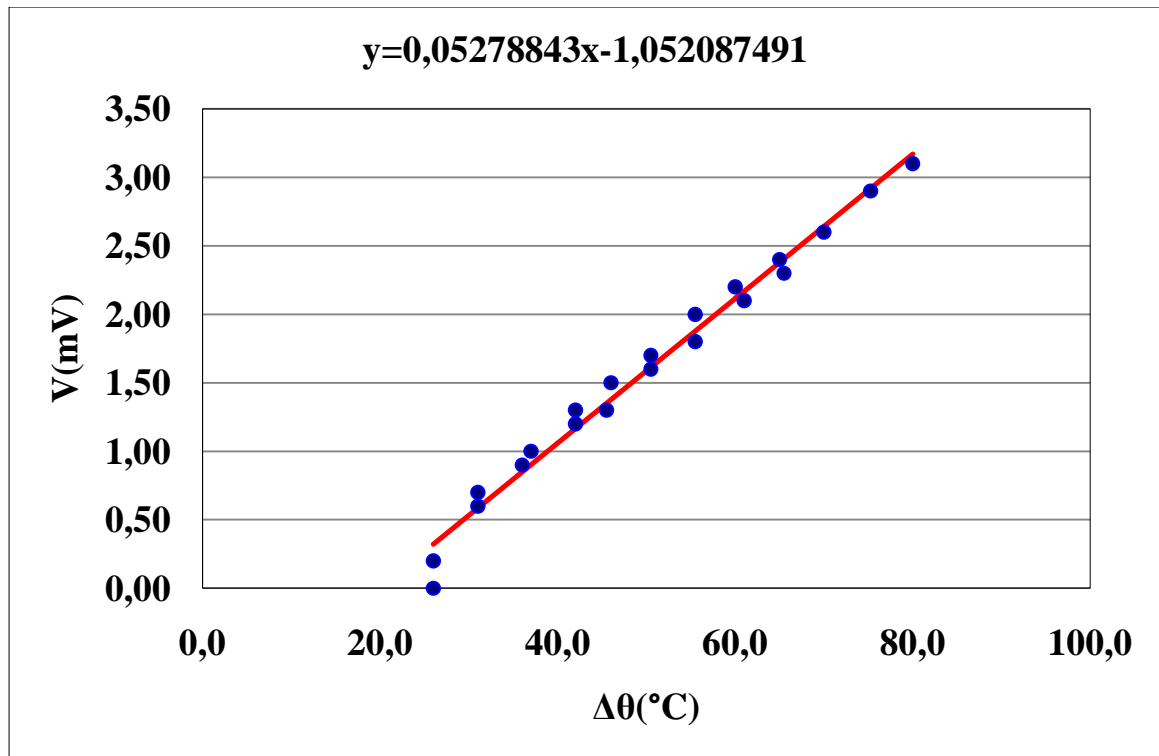
πίνακες για όλες τις πειραματικές τιμές της μεταβλητής y_i με μέσο όρο για τις κοντινές τιμές των αντίστοιχων x_i προκύπτει με βάση την ανάλυση για τα ελάχιστα τετράγωνα που προηγήθηκε ο παρακάτω πίνακας :

x_i	y_i	x_i^2	x_i*y_i	d_i	d_i^2
26,0	0,00	676,000	0,000	-0,320	0,103
26,0	0,20	676,000	5,200	-0,120	0,014
31,0	0,60	961,000	18,600	0,016	0,000
31,0	0,70	961,000	21,700	0,116	0,013
36,0	0,90	1296,000	32,400	0,052	0,003
37,0	1,00	1369,000	37,000	0,099	0,010
42,0	1,20	1764,000	50,400	0,035	0,001
42,0	1,30	1764,000	54,600	0,135	0,018
45,5	1,30	2070,250	59,150	-0,050	0,002
46,0	1,50	2116,000	69,000	0,124	0,015
50,5	1,60	2550,250	80,800	-0,014	0,000
50,5	1,70	2550,250	85,850	0,086	0,007
55,5	1,80	3080,250	99,900	-0,078	0,006
55,5	2,00	3080,250	111,000	0,122	0,015
61,0	2,10	3721,000	128,100	-0,068	0,005
60,0	2,20	3600,000	132,000	0,085	0,007
65,5	2,30	4290,250	150,650	-0,106	0,011
65,0	2,40	4225,000	156,000	0,021	0,000
70,0	2,60	4900,000	182,000	-0,043	0,002
75,3	2,90	5662,563	218,225	-0,020	0,000
80,0	3,10	6400,000	248,000	-0,071	0,005
[x]	[y]	[x ²]	[xy]		[d ²]
1051,3	33,40	57713,063	1940,575		0,240

Πίνακας 3.1-12: Συντελεστές από ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων του θερμοστοιχείου 4

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 3.1-1, 3.1-2, 3.1-7 και 3.1-8 προκύπτουν: $\alpha = -1,05209$, $\beta = 0,052788$, $\delta\alpha = 0,082568609$, $\delta\beta = 0,001575025$

Με βάση τα παραπάνω κατασκευάζεται η χαρακτηριστική.



Σχήμα 3.1-4: Γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής εξίσωσης ($\Delta\theta$ -mV) του θερμοστοιχείου 4

ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟ 5

1^η Σειρά μετρήσεων

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$ Pt100	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$ Hg	V (mV)
28	25	0,0
32	30	9,7
37	36	0,9
41	40	1,1
48	46	1,4
53	50	1,7
58	55	1,9
62	60	2,1
66	65	2,4
70	70	2,6
75	75	2,9
80	80	3,0

Πίνακας 3.1-13: Τιμές της τάσης και της θερμοκρασίας της πρώτης σειράς μετρήσεων του θερμοστοιχείου 5

2^η Σειρά μετρήσεων

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$ Pt100	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$ Hg	V (mV)
25	23	0,0
29	26	0,5
33	31	0,7
37	35	0,8
42	40	1,1
47	46	1,4
52	51	1,7
57	55	1,9
62	61	2,1
65	65	2,3
70	70	2,6
75	75	2,8
80	80	3,1
80	80	3,0

Πίνακας 3.1-14: Τιμές της τάσης και της θερμοκρασίας της δεύτερης σειράς μετρήσεων του θερμοστοιχείου 5

Λαμβάνοντας το μέσο όρο από τις δύο πρώτες στήλες του κάθε πίνακα, ώστε να ληφθεί μια μέση θερμοκρασία από τα δύο θερμόμετρα, και συνδυάζοντας τους 2 πίνακες για όλες τις πειραματικές τιμές της μεταβλητής y_i με μέσο όρο για τις κοντινές τιμές των αντίστοιχων x_i προκύπτει με βάση την ανάλυση για τα ελάχιστα τετράγωνα που προηγήθηκε ο παρακάτω πίνακας :

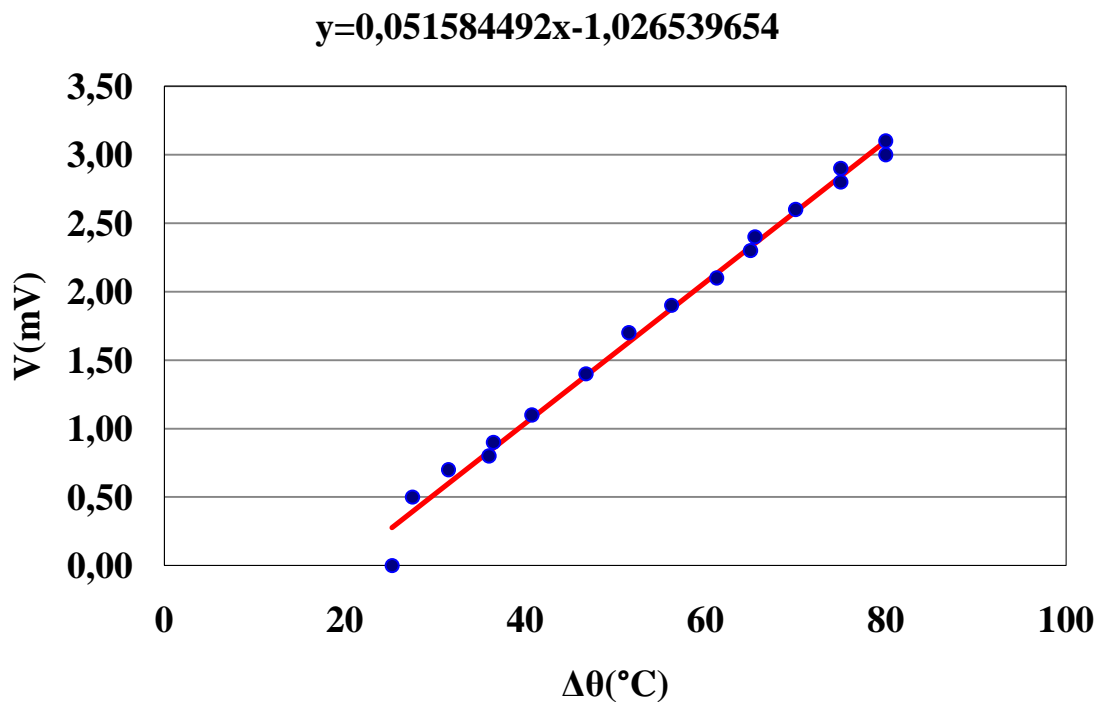
x_i	y_i	x_i^2	x_i*y_i	d_i	d_i^2
25,25	0,00	637,562	0,000	-0,276	0,076
27,50	0,50	756,250	13,750	0,108	0,012
31,50	0,70	992,250	22,050	0,102	0,010
36,00	0,80	1296,000	28,800	-0,030	0,001
36,50	0,90	1332,250	32,850	0,044	0,002
40,75	1,10	1660,5625	44,825	0,024	0,001
46,75	1,40	2185,5625	65,450	0,015	0,000
51,50	1,70	2652,250	87,550	0,070	0,005
56,25	1,90	3164,0625	106,875	0,025	0,001
61,25	2,10	3751,5625	128,625	-0,033	0,001
65,00	2,30	4225,000	149,500	-0,026	0,001
65,50	2,40	4290,250	157,200	0,048	0,002
70,00	2,60	4900,000	182,000	0,016	0,000
75,00	2,80	5625,000	210,000	-0,042	0,002

x_i	y_i	x_i^2	x_i*y_i	d_i	d_i^2
75,00	2,90	5625,000	217,500	0,058	0,003
80,00	3,00	6400,000	240,000	-0,100	0,010
80,00	3,10	6400,000	248,000	0,000	0,000
[x]	[y]	[x ²]	[xy]		[d ²]
923,75	30,20	55893,563	1934,975		0,127

Πίνακας 3.1-15: Συντελεστές από ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων του θερμοστοιχείου 5

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 3.1-1, 3.1-2, 3.1-7 και 3.1-8 προκύπτουν: $\alpha = -1,02654$, $\beta = 0,051584$, $\delta\alpha = 0,069835891$, $\delta\beta = 0,00121793$

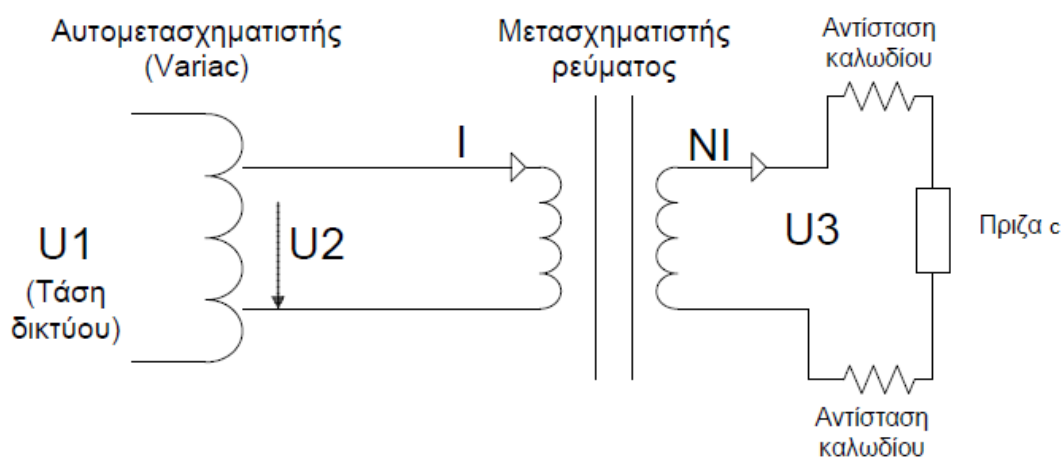
Με βάση τα παραπάνω κατασκευάζεται η χαρακτηριστική.



Σχήμα 3.1-5: Γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής εξίσωσης ($\Delta\theta$ -mV) του θερμοστοιχείου 5

3.2. Δοκιμές

3.2.1. Δοκιμή υπερθέρμανσης



Σχήμα 3.2.1-1 Κύκλωμα διάταξης δοκιμών υπερθέρμανσης και βραχυκύκλωσης ρευματοδοτών

Η δοκιμή υπερθέρμανσης αλλά και η δοκιμή βραχυκύκλωσης που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο, έγιναν σε εξοπλισμό χαμηλής τάσης και συγκεκριμένα σε 10 ρευματοδότες και μία ασφαλειοθήκη.

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, το δίκτυο (η U_1 είναι η τάση δικτύου) τροφοδοτεί τον αυτομετασχηματιστή, ο οποίος ρυθμίζει μέσω της τάσης U_2 το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος. Τέλος, οι ακροδέκτες εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος, οι οποίοι έχουν τάση U_3 , τροφοδοτούν μέσω καλωδίων τις 10 πρίζες (κάθε μία ξεχωριστά).

Οι πρίζες που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή είχαν ονομαστικό ρεύμα 16A, άρα, το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος ρυθμίστηκε στα 16A. Τα καλώδια σύνδεσης (από χαλκό) του μετασχηματιστή ρεύματος με τις πρίζες είχαν διατομή $1,5\text{mm}^2$ (κατάλληλη διατομή για μέγιστη ένταση συνεχούς λειτουργίας 16A). Τοποθετήσαμε τις πρίζες σε όρθια θέση μέσα σε ειδικό πλαστικό περίβλημα και με τα καπάκια τους έτσι ώστε να περιοριστούν όσο είναι δυνατό οι θερμικές απώλειες και να προσομοιωθεί η κανονική λειτουργία. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στις πρίζες χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία. Η γεφύρωση έγινε στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου. Η δοκιμή υπερθέρμανσης θεωρείται ότι είναι επιτυχής, όταν η θερμοκρασία δεν υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο κατά τις προδιαγραφές όριο, που είναι της τάξεως $50\div 60\text{ }^\circ\text{C}$ ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επίσης η δοκιμή υπερθέρμανσης διακόπτεται όταν παρέλθει μία ώρα και η μεταβολή θερμοκρασίας μέσα στην ώρα είναι το πολύ $1\text{ }^\circ\text{C}$.

Η ίδια διάταξη εφαρμόστηκε και για τη δοκιμή υπερθέρμανσης στην ασφαλειοθήκη, μόνο που αυτή τη φορά το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος ρυθμίστηκε στα 400A. Όσον αφορά τα καλώδια σύνδεσης του μετασχηματιστή ρεύματος με την ασφαλειοθήκη, συνδέσαμε 2 παράλληλα καλώδια

διατομής 3.5 mm^2 για κάθε ακροδέκτη προκειμένου να έχουμε αντοχή στο μεγάλο ρεύμα .

Δοκιμή υπερθέρμανσης στις 10 πρίζες με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Ρευματοδότης Νο1

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής είναι τα εξής:

$V_1(\text{V})$	$V_2(\text{V})$	$V_3(\text{V})$	$I_1(\text{A})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$	$\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$	Χρόνος(min)
223,4	83,3	0,500	16	22,0	22,0	22,0	0
224,1	85,6	0,515	16	22,0	49,7	60,1	15
224,5	84,7	0,509	16	22,0	51,1	60,8	30
225,4	85,1	0,510	16	22,0	50,7	60,0	45
226,2	84,5	0,512	16	22,0	51,2	60,6	60
228,2	85,2	0,511	16	22,0	51,5	60,3	75

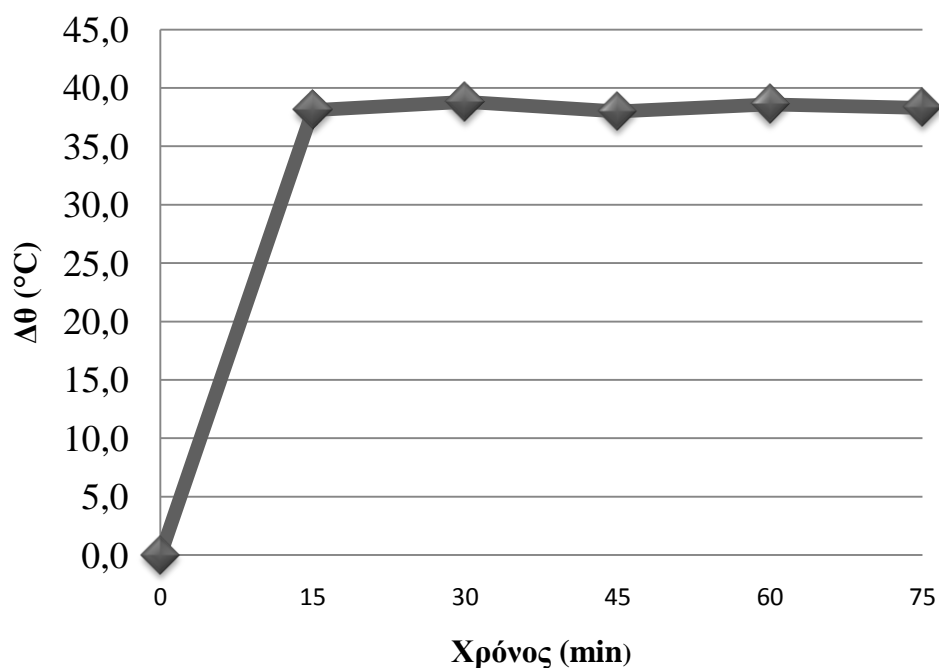
Πίνακας 3.2.1-1: Δοκιμή υπερθέρμανσης στον ρευματοδότη 1 με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου, όπου θ_x είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ_1 , θ_2 θερμοκρασίες του ρευματοδότη 1 και I_1 το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος.

Οι διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x προκύπτουν από τον πίνακα 3.2.1-1 ως εξής:

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
0,0	0,0	22
27,7	38,1	22
29,1	38,8	22
28,7	38,0	22
29,2	38,6	22
29,5	38,3	22

Πίνακας 3.2.1-2: Διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη 1 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Επειδή μας ενδιαφέρουν οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην πρίζα κρατάμε τη δεύτερη στήλη του προηγούμενου πίνακα. Η γραφική παράσταση που δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ του ρευματοδότη σε σχέση με το χρόνο ακολουθεί παρακάτω:



Σχήμα 3.2.1-2: Γραφική παράσταση μεταβολής των θερμοκρασιών $\Delta\theta$ του ρευματοδότη 1 σε σχέση με το χρόνο t , κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Ρευματοδότης Νο2

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής είναι τα εξής:

V_1 (V)	V_2 (V)	V_3 (V)	I_1 (A)	θ_x (°C)	θ_1 (°C)	θ_2 (°C)	Χρόνος(min)
229,8	88,1	0,529	16	22,0	22,0	22,0	0
226,8	89,1	0,535	16	22,0	49,7	52,3	15
227,5	89,5	0,537	16	22,0	52,0	54,8	30
228,4	88,7	0,532	16	22,0	51,9	54,3	45
228,5	88,6	0,532	16	22,0	51,4	53,1	60
229,1	88,9	0,535	16	22,0	51,8	54,1	75
229,3	90,0	0,541	16	22,0	52,6	55,8	90

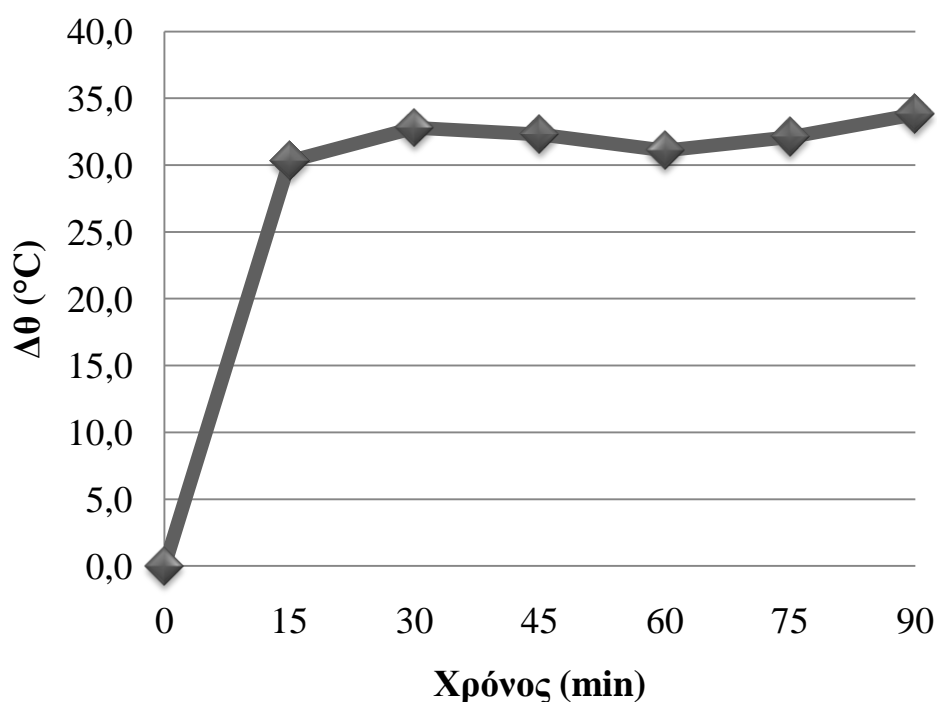
Πίνακας 3.2.1-3: Δοκιμή υπερθέρμανσης στον ρευματοδότη 2 με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου, όπου θ_x είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ_1 , θ_2 θερμοκρασίες του ρευματοδότη 2 και I_1 το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος.

Οι διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x προκύπτουν από τον πίνακα 3.2.1-3 ως εξής:

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
0,0	0,0	22,0
27,7	30,3	22,0
30,0	32,8	22,0
29,9	32,3	22,0
29,4	31,1	22,0
29,8	32,1	22,0
30,6	33,8	22,0

Πίνακας 3.2.1-4: Διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη 2 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Επειδή μας ενδιαφέρουν οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην πρίζα κρατάμε τη δεύτερη στήλη του προηγούμενου πίνακα. Η γραφική παράσταση που δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ του ρευματοδότη σε σχέση με το χρόνο ακολουθεί παρακάτω:



Σχήμα 3.2.1-3: Γραφική παράσταση μεταβολής των θερμοκρασιών $\Delta\theta$ του ρευματοδότη 2 σε σχέση με το χρόνο t , κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Ρευματοδότης Νο3

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής είναι τα εξής:

V ₁ (V)	V ₂ (V)	V ₃ (V)	I ₁ (A)	θ _x (°C)	θ ₁ (°C)	θ ₂ (°C)	Χρόνος(min)
220,5	85,4	0,520	16	23,0	23,0	23,0	0
219,8	86,6	0,524	16	23,0	64,6	50,8	15
217,7	88,2	0,535	16	23,0	69,3	52,0	30
218,5	88,5	0,540	16	23,0	73,7	53,4	45
220,6	87,9	0,535	16	23,0	72,3	54,0	60
221,0	88,0	0,535	16	23,0	70,9	53,2	75
219,0	88,0	0,536	16	23,0	70,6	53,3	90
220,5	88,8	0,540	16	23,0	72,9	53,9	105

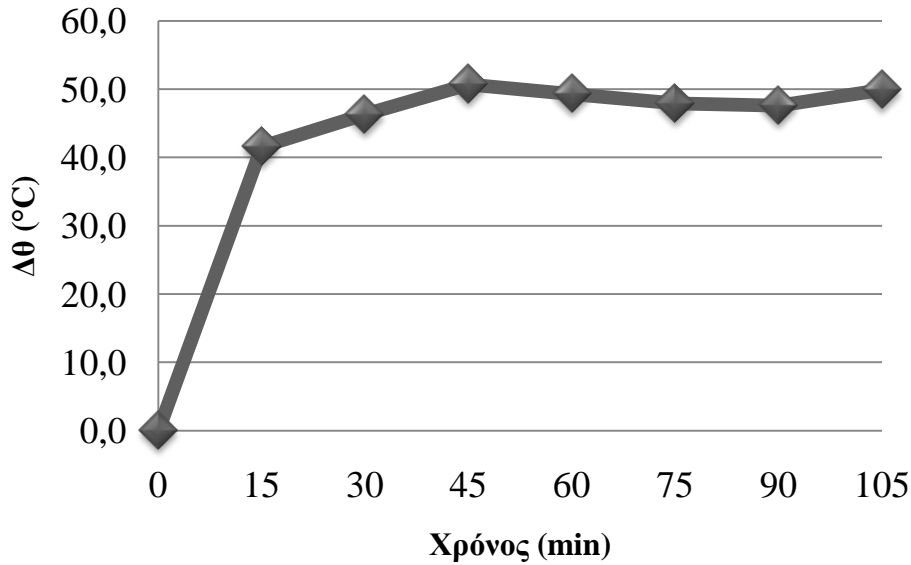
Πίνακας 3.2.1-5: Δοκιμή υπερθέρμανσης στον ρευματοδότη 3 με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου, όπου θ_x είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ₁, θ₂ θερμοκρασίες του ρευματοδότη 3 και I₁ το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος.

Οι διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x προκύπτουν από τον πίνακα 3.2.1-5 ως εξής:

Δθ ₁ (°C)	Δθ ₂ (°C)	θ _x (°C)
0,0	0,0	23,0
41,6	27,8	23,0
46,3	29,0	23,0
50,7	30,4	23,0
49,3	31,0	23,0
47,9	30,2	23,0
47,6	30,3	23,0
49,9	30,9	23,0

Πίνακας 3.2.1-6: Διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη 3 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Επειδή μας ενδιαφέρουν οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην πρίζα κρατάμε την πρώτη στήλη του προηγούμενου πίνακα. Η γραφική παράσταση που δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας Δθ του ρευματοδότη σε σχέση με το χρόνο ακολουθεί παρακάτω:



Σχήμα 3.2.1-4: Γραφική παράσταση μεταβολής των θερμοκρασιών $\Delta\theta$ του ρευματοδότη 3 σε σχέση με το χρόνο t , κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Ρευματοδότης Νο4

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής είναι τα εξής:

V_1 (V)	V_2 (V)	V_3 (V)	I_1 (A)	θ_x (°C)	θ_1 (°C)	θ_2 (°C)	Χρόνος(min)
220,7	92,7	0,557	16	23,0	23,0	23,0	0
222,2	91,4	0,556	16	23,0	82,2	61,7	15
222,2	92,0	0,558	16	23,0	83,0	61,6	30
220,2	91,9	0,559	16	23,0	83,5	62,2	45
222,2	92,6	0,562	16	23,0	84,6	63,4	60
221,8	91,7	0,556	16	23,0	84,3	63,5	75
221,2	91,5	0,557	16	23,0	82,5	62,5	90
224,7	92,2	0,562	16	23,0	84,2	63,5	105
226,7	92,2	0,559	16	23,0	84,1	63,6	120
225,9	93,1	0,563	16	23,0	84,2	63,0	135
226,4	93,2	0,565	16	23,0	85,7	64,2	150

Πίνακας 3.2.1-7: Δοκιμή υπερθέρμανσης στον ρευματοδότη 4 με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου, όπου θ_x είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ_1 , θ_2 θερμοκρασίες του ρευματοδότη 4 και I_1 το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος.

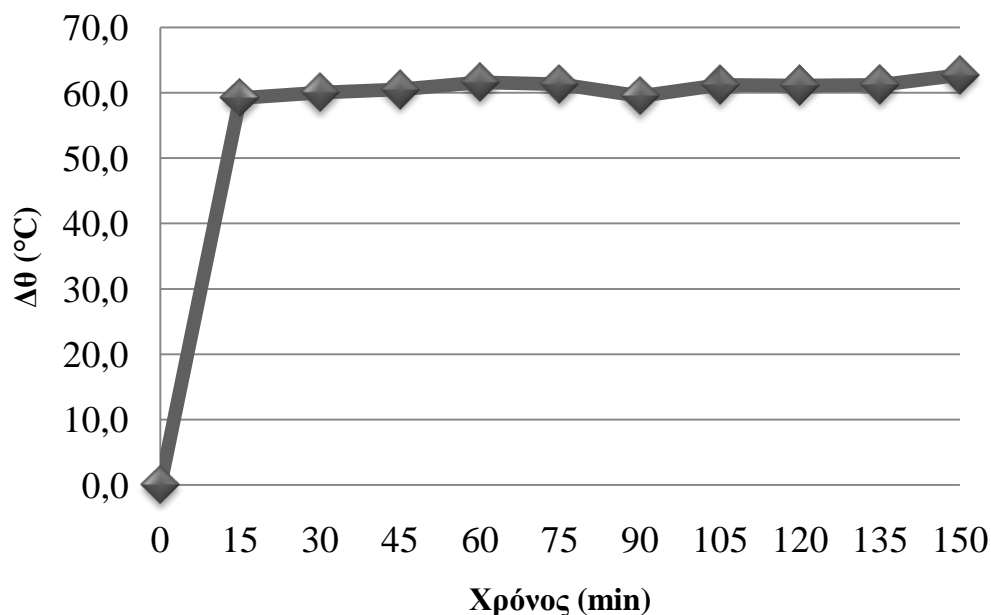
Οι διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x προκύπτουν από τον πίνακα 3.2.1-7 ως εξής:

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
0,0	0,0	23,0
59,2	38,7	23,0
60,0	38,6	23,0
60,5	39,2	23,0
61,6	40,4	23,0
61,3	40,5	23,0
59,5	39,5	23,0
61,2	40,5	23,0
61,1	40,6	23,0
61,2	40,0	23,0
62,7	41,2	23,0

Πίνακας 3.2.1-8: Διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη 4 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

62,7 °C :Μη αποδεκτή τιμή για τη δοκιμή.

Επειδή μας ενδιαφέρουν οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στον ρευματοδότη κρατάμε την πρώτη στήλη του προηγούμενου πίνακα. Η γραφική παράσταση που δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ του ρευματοδότη σε σχέση με το χρόνο ακολουθεί παρακάτω:



Σχήμα 3.2.1-5: Γραφική παράσταση μεταβολής των θερμοκρασιών $\Delta\theta$ του ρευματοδότη 4 σε σχέση με το χρόνο t , κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Ρευματοδότης Νο5

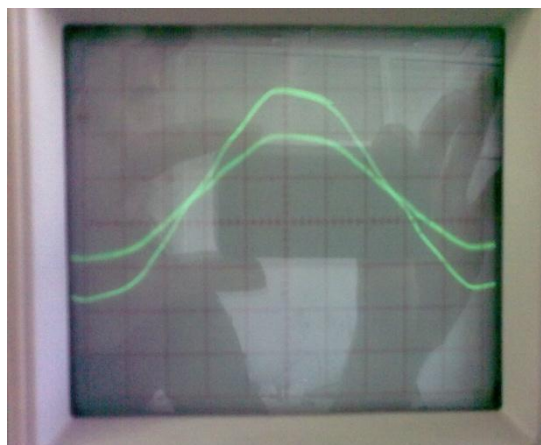
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής είναι τα εξής:

$V_1(V)$	$V_2(V)$	$V_3(V)$	$I_1(A)$	$\theta_x(^{\circ}C)$	$\theta_1(^{\circ}C)$	$\theta_2(^{\circ}C)$	Χρόνος(min)
222,1	190,2	1,162	16	23,0	23,0	23,0	0
222,6	191,3	1,170	16	23,0	56,2	50,9	15
223,8	193,2	1,180	16	23,0	60,0	55,1	30
222,5	194,6	1,190	16	23,0	59,0	54,8	45
222,3	196,5	1,209	16	23,0	60,8	56,8	60
224,5	197,6	1,209	16	23,0	61,5	57,6	75
225,2	198,5	1,212	16	23,0	61,5	57,5	90
225,3	198,5	1,215	16	23,0	61,4	57,5	105
226,7	200,1	1,226	16	23,0	61,6	57,7	120

Πίνακας 3.2.1-9: Δοκιμή υπερθέρμανσης στον ρευματοδότη 5 με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου, όπου θ_x είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ_1 , θ_2 θερμοκρασίες του ρευματοδότη 5 και I_1 το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος.

Παρατηρώντας τους προηγούμενους πίνακες διαπιστώθηκε μια πτώση στη μετρούμενη θερμοκρασία μετά από κάποια ώρα. Ένας παλμογράφος συνδέθηκε στο κύκλωμα για να παρακολουθήσουμε τι συμβαίνει με τις κυματομορφές του ρεύματος και της τάσης.

Για να το πραγματοποιήσουμε αυτό, ξεγυμνώθηκε το ένα καλώδιο σε δύο σημεία με απόσταση μεταξύ τους 12 cm τοποθετώντας στο κάθε σημείο του καλωδίου από ένα κροκοδειλάκι τα οποία καταλήγουν με τη σειρά τους στο κανάλι Y του παλμογράφου. Στη συνέχεια ξεγυμνώθηκε ένα μικρό τμήμα του αλλού καλωδίου στο οποίο τοποθετήθηκε το probe και η γείωσή του κοντά στο ένα από τα δύο του δεύτερου καλωδίου που προαναφέρθηκε. Η εικόνα που παίρνουμε είναι η εξής :



Σχήμα 3.2.1-6 : Απεικόνιση παλμογράφου για το ρευματοδότη 5

Από την απεικόνιση του παλμογράφου μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση του ρευματοδότη. Στο σχήμα 3.2.1-6, παρατηρούμε ότι το πλάτος της κυματομορφής που απεικονίζει την πτώση τάσης στο ρευματοδότη (κυματομορφή με πιο μικρό πλάτος σχηματικά) είναι 0,2 V. Άρα

$$V_{rms} = \frac{0,2}{\sqrt{2}} = 0,141 \text{ V και}$$

$I_{rms} = 16 \text{ A}$ οπότε η αντίσταση του ρευματοδότη 5 προκύπτει

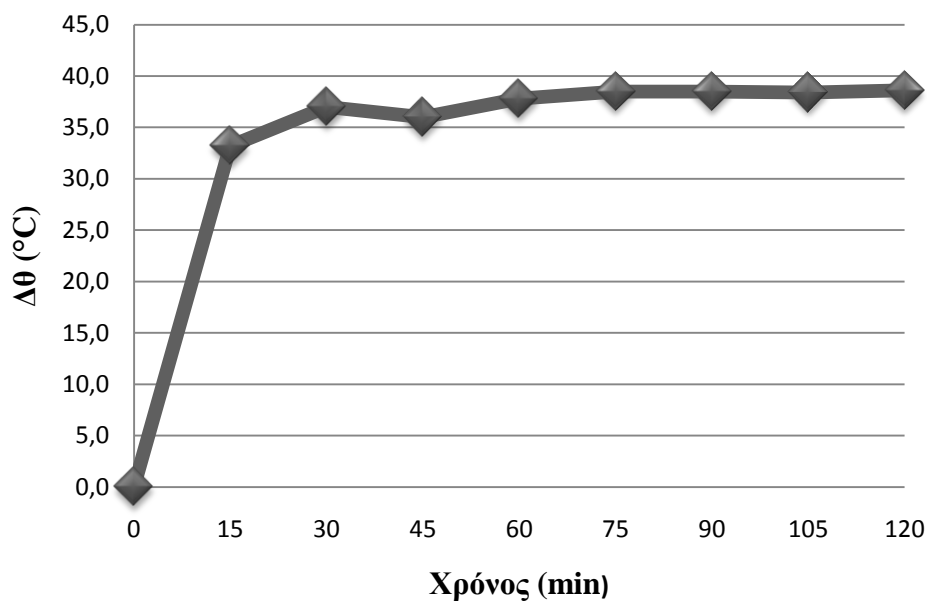
$$R_5 = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = 0,009 \text{ } \Omega$$

Οι διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x προκύπτουν από τον πίνακα 3.2.1-9 ως εξής:

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
0,0	0,0	23,0
33,2	27,9	23,0
37,0	32,1	23,0
36,0	31,8	23,0
37,8	33,8	23,0
38,5	34,6	23,0
38,5	34,5	23,0
38,4	34,5	23,0
38,6	34,7	23,0

Πίνακας 3.2.1-10: Διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη 5 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Επειδή μας ενδιαφέρουν οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στον ρευματοδότη κρατάμε την πρώτη στήλη του πρηγούμενου πίνακα. Η γραφική παράσταση που δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ του ρευματοδότη σε σχέση με το χρόνο ακολουθεί παρακάτω:



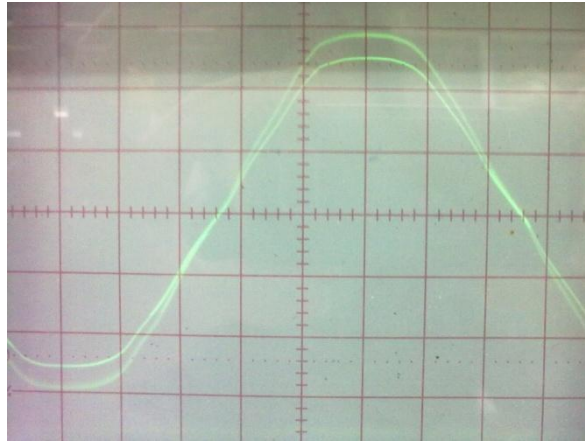
Σχήμα 3.2.1-7: Γραφική παράσταση μεταβολής των θερμοκρασιών $\Delta\theta$ του ρευματοδότη 5 σε σχέση με το χρόνο t , κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Ρευματοδότης Νο6

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής είναι τα εξής:

$V_1(V)$	$V_2(V)$	$V_3(V)$	$I_1(A)$	$\theta_x(^{\circ}C)$	$\theta_1(^{\circ}C)$	$\theta_2(^{\circ}C)$	Χρόνος(min)
219,9	109,9	0,668	16	24,0	24,0	24,0	0
220,9	114,3	0,693	16	24,0	39,9	36,9	15
221,9	113,4	0,691	16	24,0	40,9	37,3	30
221,8	113,8	0,692	16	24,0	41,0	38,2	45
222,1	114,0	0,692	16	24,0	41,0	37,9	60
221,7	113,9	0,693	16	24,0	41,2	37,5	75
223,4	115,5	0,703	16	24,0	41,9	38,8	90
224,6	114,6	0,698	16	24,0	42,1	39,1	105

Πίνακας 3.2.1-11: Δοκιμή υπερθέρμανσης στον ρευματοδότη 6 με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου, όπου θ_x είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ_1 , θ_2 θερμοκρασίες του ρευματοδότη 6 και I_1 το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος.



Σχήμα 3.2.1-8:Απεικόνιση παλμογράφου για το ρευματοδότη 6

Από την απεικόνιση του παλμογράφου όπως και προηγουμένως μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση του ρευματοδότη. Στο σχήμα 3.2.1-8, παρατηρούμε ότι το πλάτος της κυματομορφής που απεικονίζει την πτώση τάσης στον ρευματοδότη (κυματομορφή με πιο μικρό πλάτος σχηματικά) είναι 24 mV. Άρα

$$V_{rms} = \frac{24}{\sqrt{2}} = 16,971\text{mV και}$$

$I_{rms} = 16 \text{ A}$ οπότε η αντίσταση του ρευματοδότη 6 προκύπτει

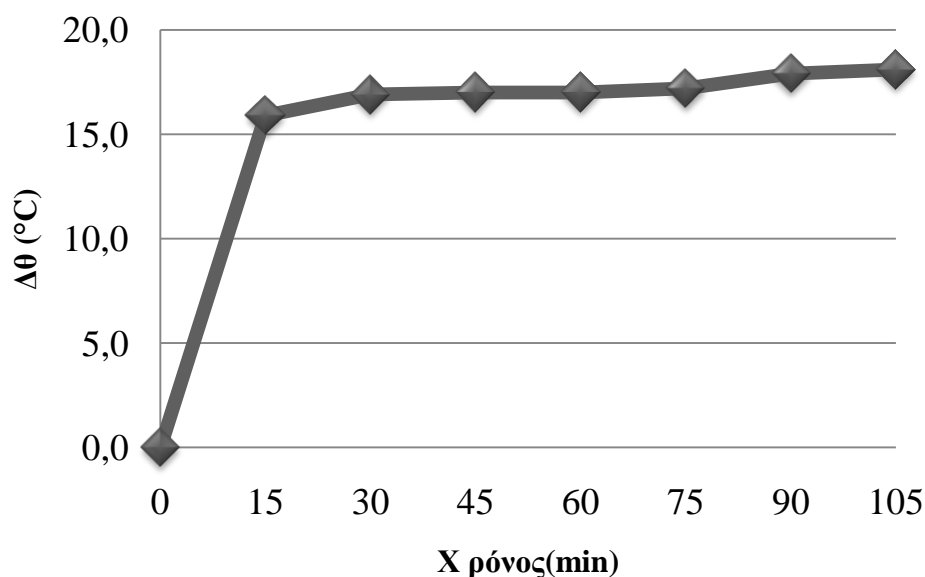
$$R_6 = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = 1,061\text{m}\Omega$$

Οι διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x προκύπτουν από τον πίνακα 3.2.1-11 ως εξής:

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
0,0	0,0	24,0
15,9	12,9	24,0
16,9	13,3	24,0
17,0	14,2	24,0
17,0	13,9	24,0
17,2	13,5	24,0
17,9	14,8	24,0
18,1	15,1	24,0

Πίνακας 3.2.1-12:Διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη 6 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Επειδή μας ενδιαφέρουν οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται του ρευματοδότη κρατάμε την πρώτη στήλη του πρηγούμενου πίνακα. Η γραφική παράσταση που δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ του ρευματοδότη σε σχέση με το χρόνο ακολουθεί παρακάτω:



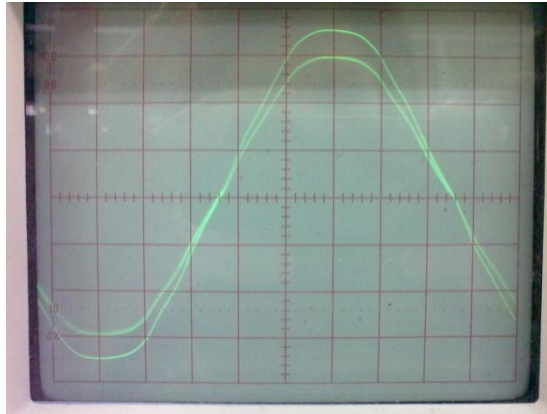
Σχήμα 3.2.1-9: Γραφική παράσταση μεταβολής των θερμοκρασιών $\Delta\theta$ του ρευματοδότη 6 σε σχέση με το χρόνο t , κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Ρευματοδότης Νο7

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής είναι τα εξής:

V_1 (V)	V_2 (V)	V_3 (V)	I_1 (A)	θ_x (°C)	θ_1 (°C)	θ_2 (°C)	Χρόνος(min)
221,5	125,8	0,764	16	22,0	22,0	22,0	0
221,4	127,8	0,778	16	22,0	69,0	62,4	15
220,1	126,3	0,768	16	22,0	72,0	66,7	30
220,6	126,2	0,770	16	22,0	72,8	66,9	45
218,4	128,4	0,786	16	22,0	77,4	68,9	60
220,1	128,5	0,784	16	22,0	76,8	69,1	75
220,0	128,2	0,781	16	22,0	76,8	68,9	90
220,3	128,5	0,781	16	22,0	76,8	69,0	105
220,8	128,3	0,780	16	22,0	76,7	68,8	120

Πίνακας 3.2.1-13: Δοκιμή υπερθέρμανσης στο ρευματοδότη 7 με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου, όπου θ_x είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ_1 , θ_2 θερμοκρασίες του ρευματοδότη 7 και I_1 το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος.



Σχήμα 3.2.1-10 :Απεικόνιση παλμογράφου για το ρευματοδότη 7

Από την απεικόνιση του παλμογράφου όπως και προηγουμένως μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση του ρευματοδότη 7. Στο 3.2.1-10, παρατηρούμε ότι το πλάτος της κυματομορφής που απεικονίζει την πτώση τάσης στον ρευματοδότη (κυματομορφή με πιο μικρό πλάτος σχηματικά) είναι 0,3V. Άρα

$$V_{rms} = \frac{0,3}{\sqrt{2}} = 0,212V \text{ και}$$

$I_{rms} = 16 \text{ A}$ οπότε η αντίσταση του ρευματοδότη 7 προκύπτει

$$R_7 = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = 0,013\Omega$$

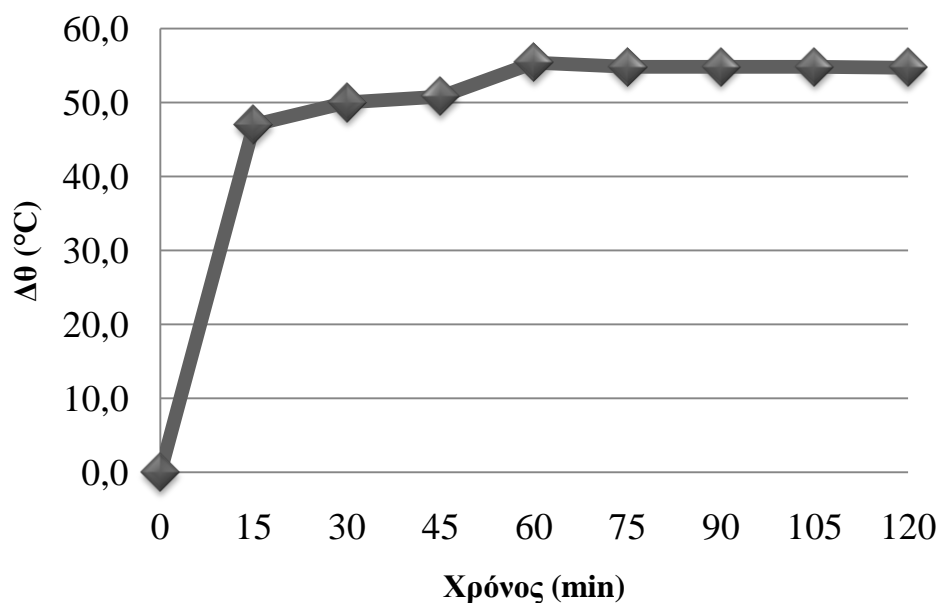
Οι διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x προκύπτουν από τον πίνακα 3.2.1-13 ως εξής:

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
0,0	0,0	22,0
47,0	40,4	22,0
50,0	44,7	22,0
50,8	44,9	22,0
55,4	46,9	22,0
54,8	47,1	22,0
54,8	46,9	22,0
54,8	47,0	22,0
54,7	46,8	22,0

Πίνακας 3.2.1-14:Διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη 7 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

54,7 °C :Μη αποδεκτή τιμή για τη δοκιμή

Επειδή μας ενδιαφέρουν οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στον ρευματοδότη κρατάμε την πρώτη στήλη του προηγούμενου πίνακα. Η γραφική παράσταση που δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ του ρευματοδότη σε σχέση με το χρόνο ακολουθεί παρακάτω:



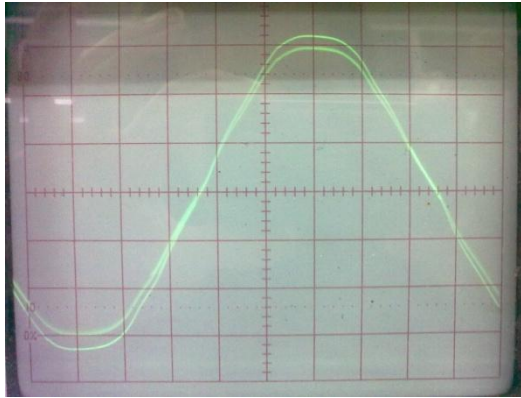
Σχήμα 3.2.1-11: Γραφική παράσταση μεταβολής των θερμοκρασιών $\Delta\theta$ του ρευματοδότη 7 σε σχέση με το χρόνο t , κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Ρευματοδότης Νο8

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής είναι τα εξής:

V_1 (V)	V_2 (V)	V_3 (V)	I_1 (A)	θ_x (°C)	θ_1 (°C)	θ_2 (°C)	Χρόνος(min)
221,6	124,8	0,76	16	23,0	23,0	23,0	0
223,4	124,7	0,76	16	23,0	65,4	60,1	15
222,5	123,9	0,753	16	23,0	67,9	62,6	3
223,4	124,0	0,755	16	23,0	69,0	63,5	0
223,2	124,0	0,755	16	23,0	68,9	63,5	45
219,5	124,4	0,761	16	23,0	68,4	63,0	60
219,0	124,0	0,756	16	23,0	68,7	63,4	75
219,0	123,3	0,755	16	23,0	68,7	63,3	90

Πίνακας 3.2.1-15: Δοκιμή υπερθέρμανσης στην πρίζα 8 με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου, όπου θ_x είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ_1 , θ_2 του ρευματοδότη 8 και I_1 το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος.



Σχήμα 3.2.1-12 :Απεικόνιση παλμογράφου για το ρευματοδότη 8

Από την απεικόνιση του παλμογράφου όπως και προηγουμένως μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση του ρευματοδότη 8. Στο σχήμα 3.2.1-12, παρατηρούμε ότι το πλάτος της κυματομορφής που απεικονίζει την πτώση τάσης στο ρευματοδότη (κυματομορφή με πιο μεγάλο πλάτος σχηματικά) είναι 0,32 V. Άρα

$$V_{rms} = \frac{0,32}{\sqrt{2}} = 0,226 \text{ V και}$$

$I_{rms} = 16 \text{ A}$ οπότε η αντίσταση του ρευματοδότη 8 προκύπτει

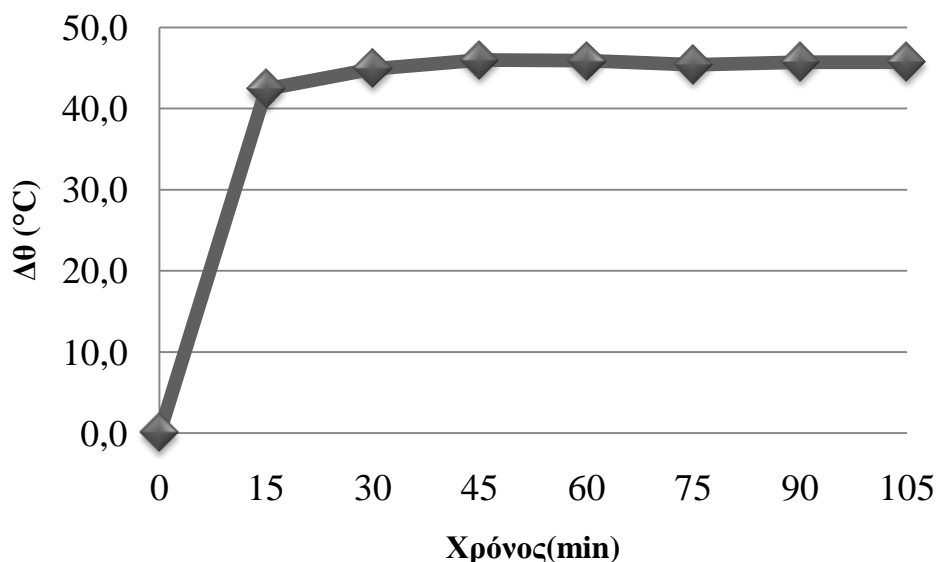
$$R_8 = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = 0,014 \text{ } \Omega$$

Οι διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x προκύπτουν από τον πίνακα 3.2.1-15 ως εξής:

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
0,0	0,0	23,0
42,4	37,1	23,0
44,9	39,6	23,0
46,0	40,5	23,0
45,9	40,5	23,0
45,4	40,0	23,0
45,7	40,4	23,0
45,7	40,3	23,0

Πίνακας 3.2.1-16: Διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη 8 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Επειδή μας ενδιαφέρουν οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο ρευματοδότη κρατάμε την πρώτη στήλη του πηγαίου πίνακα. Η γραφική παράσταση που δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ του ρευματοδότη σε σχέση με το χρόνο ακολουθεί παρακάτω:



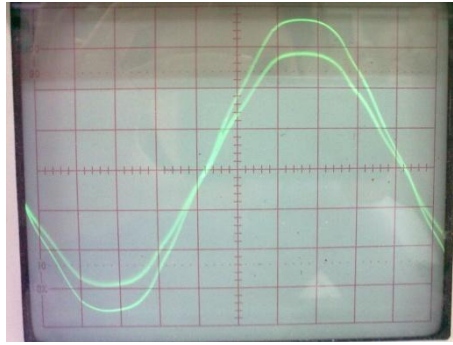
Σχήμα 3.2.1-13: Γραφική παράσταση μεταβολής των θερμοκρασιών $\Delta\theta$ του ρευματοδότη 8 σε σχέση με το χρόνο t , κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Ρευματοδότης Νο9

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής είναι τα εξής:

V_1 (V)	V_2 (V)	V_3 (V)	I_1 (A)	θ_x (°C)	θ_1 (°C)	θ_2 (°C)	Χρόνος(min)
221,5	125,5	0,764	16	22,0	22,0	22,0	0
220,1	127,2	0,776	16	22,0	64,1	61,2	15
220,8	125,3	0,767	16	22,0	66,2	61,7	30
219,1	125,5	0,764	16	22,0	66,1	61,2	45
218,2	125,4	0,765	16	22,0	66,0	61	60
219,5	125,5	0,765	16	22,0	66,1	61,0	75
218,3	124,8	0,76	16	22,0	65,9	60,7	90

Πίνακας 3.2.1-17: Δοκιμή υπερθέρμανσης στο ρευματοδότη 9 με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου, όπου θ_x είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ_1 , θ_2 θερμοκρασίες του ρευματοδότη 9 και I_1 το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος.



Σχήμα 3.2.1-14 :Απεικόνιση παλμογράφου για το ρευματοδότη 9

Από την απεικόνιση του παλμογράφου όπως και προηγουμένως μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση του ρευματοδότη 9. Στο σχήμα 3.2.1-14, παρατηρούμε ότι το πλάτος της κυματομορφής που απεικονίζει την πτώση τάσης στο ρευματοδότη (κυματομορφή με πιο μικρό πλάτος σχηματικά) είναι 0,28 V. Άρα

$$V_{rms} = \frac{0,28}{\sqrt{2}} = 0,198V \text{ και}$$

$I_{rms} = 16 \text{ A}$ οπότε η αντίσταση του ρευματοδότη 9 προκύπτει

$$R_9 = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = 0,012 \Omega$$

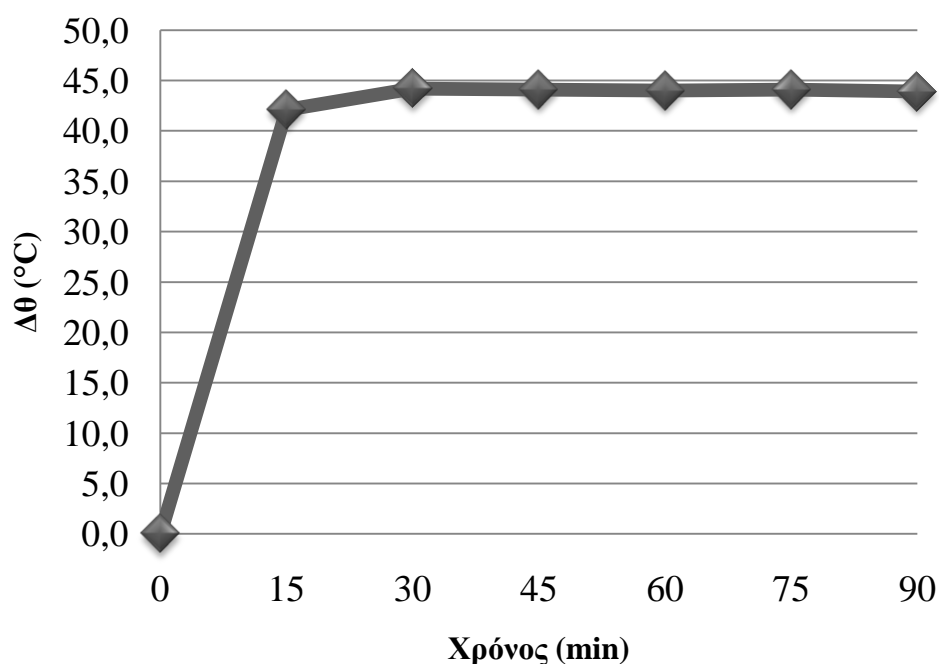
Οι διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x προκύπτουν από τον πίνακα 3.2.1-17 ως εξής:

$\Delta\theta_1(^{\circ}C)$	$\Delta\theta_2(^{\circ}C)$	$\theta_x(^{\circ}C)$
0,0	0,0	22,0
42,1	39,2	22,0
44,2	39,7	22,0
44,1	39,2	22,0
44,0	39,0	22,0
44,1	39,0	22,0
43,9	38,7	22,0

Πίνακας 3.2.1-18:Διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη 9 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Επειδή μας ενδιαφέρουν οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο ρευματοδότη κρατάμε την πρώτη στήλη του προηγούμενου πίνακα. Η γραφική

παράσταση που δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ του ρευματοδότη σε σχέση με το χρόνο ακολουθεί παρακάτω:



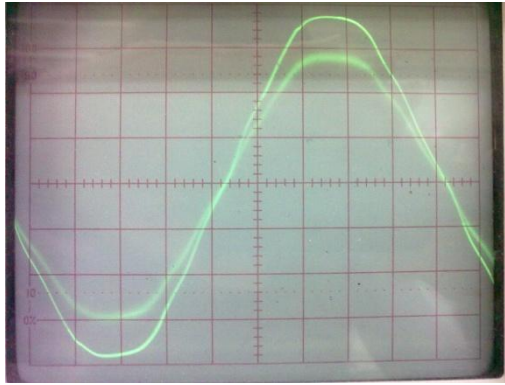
Σχήμα 3.2.1-15: Γραφική παράσταση μεταβολής των θερμοκρασιών $\Delta\theta$ του ρευματοδότη 9 σε σχέση με το χρόνο t , κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Ρευματοδότης Νο10

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής είναι τα εξής:

V_1 (V)	V_2 (V)	V_3 (V)	I_1 (A)	θ_x (°C)	θ_1 (°C)	θ_2 (°C)	Χρόνος(min)
218,2	136,9	0,834	16	23,0	23,0	23,0	0
218,3	130,9	0,798	16	23,0	77,6	59,9	15
217,6	130,5	0,793	16	23,0	78,8	61,8	30
218,8	129,7	0,796	16	23,0	80,3	64,3	45
219,5	130,8	0,798	16	23,0	81,8	64,8	60
219,5	130,6	0,799	16	23,0	82,1	65,4	75

Πίνακας 3.2.1-19: Δοκιμή υπερθέρμανσης στο ρευματοδότη 10 με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου, όπου θ_x είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ_1 , θ_2 θερμοκρασίες του ρευματοδότη 10 και I_1 το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος.



Σχήμα 3.2.1-16 :Απεικόνιση παλμογράφου για το ρευματοδότη 10

Από την απεικόνιση του παλμογράφου όπως και προηγουμένως μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση του ρευματοδότη 10. Στο σχήμα 3.2.1-16, παρατηρούμε ότι το πλάτος της κυματομορφής που απεικονίζει την πτώση τάσης στο ρευματοδότη (κυματομορφή με πιο μικρό πλάτος σχηματικά) είναι 0,28 V. Άρα

$$V_{rms} = \frac{0,28}{\sqrt{2}} = 0,198V \text{ και}$$

$I_{rms} = 16 \text{ A}$ οπότε η αντίσταση του ρευματοδότη 10 προκύπτει

$$R_{10} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = 0,012 \Omega$$

Οι διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x προκύπτουν από τον πίνακα 3.2.1-19 ως εξής:

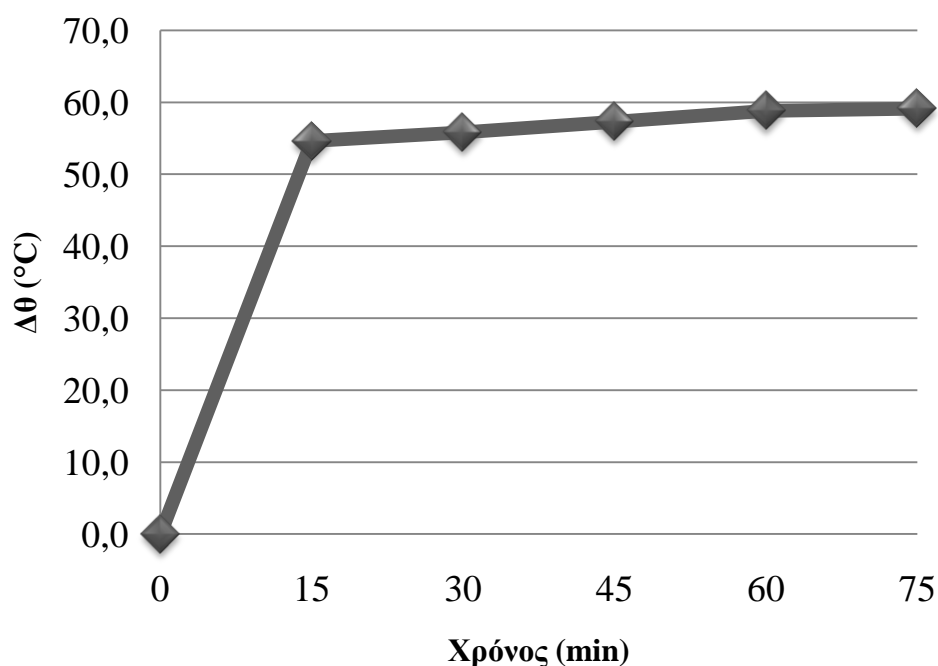
$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
0,0	0,0	23,0
54,6	36,9	23,0
55,8	38,8	23,0
57,3	41,3	23,0
58,8	41,8	23,0
59,1	42,4	23,0

Πίνακας 3.2.1-20:Διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη 10 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

59,1 °C :Μη αποδεκτή τιμή για τη δοκιμή

Επειδή μας ενδιαφέρουν οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο ρευματοδότη κρατάμε την πρώτη στήλη του πηηγούμενου πίνακα. Η γραφική

παράσταση που δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ του ρευματοδότη σε σχέση με το χρόνο ακολουθεί παρακάτω:

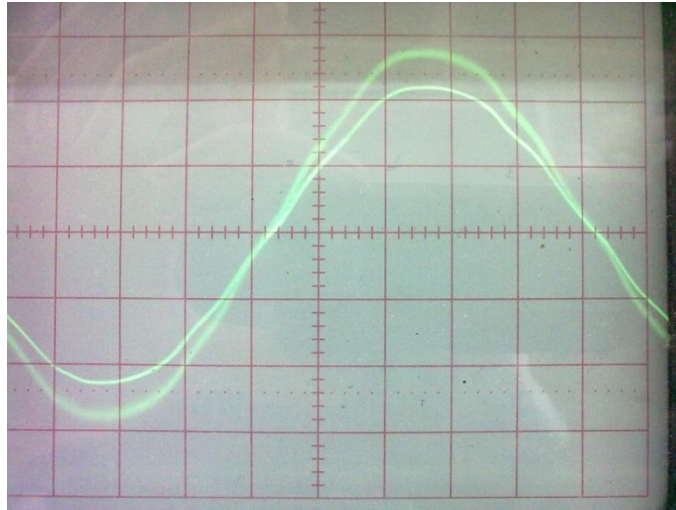


Σχήμα 3.2.1-17: Γραφική παράσταση μεταβολής των θερμοκρασιών $\Delta\theta$ του ρευματοδότη 10 σε σχέση με το χρόνο t , κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Η δοκιμή του ρευματοδότη 10 επαναλήφθηκε και τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

V_1	V_2	V_3	θ_1	θ_2	I_1	Χρόνος(min)
223,6	139,6	0,848	22,0	22,0	16	0
222,8	137,2	0,837	90,0	69,4	16	15
222,2	138,9	0,849	96,5	73,6	16	30
222,1	138,1	0,846	95,0	73,2	16	45
222,8	142,4	0,869	95,8	73,2	16	60
221,4	141,2	0,863	98,7	74,7	16	75
219,0	142,7	0,873	97,9	77,9	16	90

Πίνακας 3.2.1-21: Δεύτερη δοκιμή υπερθέρμανσης στο ρευματοδότη 10 με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου, όπου θ_x είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ_1 , θ_2 θερμοκρασίες του ρευματοδότη 10 και I_1 το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος.



Σχήμα 3.2.1-18 :Δεύτερη απεικόνιση παλμογράφου για το ρευματοδότη 10

Από την απεικόνιση του παλμογράφου όπως και προηγουμένως μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση του ρευματοδότη 10. Στο σχήμα 3.2.1-18, παρατηρούμε ότι το πλάτος της κυματομορφής που απεικονίζει την πτώση τάσης στο ρευματοδότη (κυματομορφή με πιο μικρό πλάτος σχηματικά) είναι 0,44 V. Άρα

$$V_{\text{rms}} = \frac{0,44}{\sqrt{2}} = 0,311\text{V και}$$

$I_{\text{rms}} = 16\text{ A}$ οπότε η αντίσταση του ρευματοδότη 10 προκύπτει

$$R_{10} = \frac{V_{\text{rms}}}{I_{\text{rms}}} = 0,019\ \Omega$$

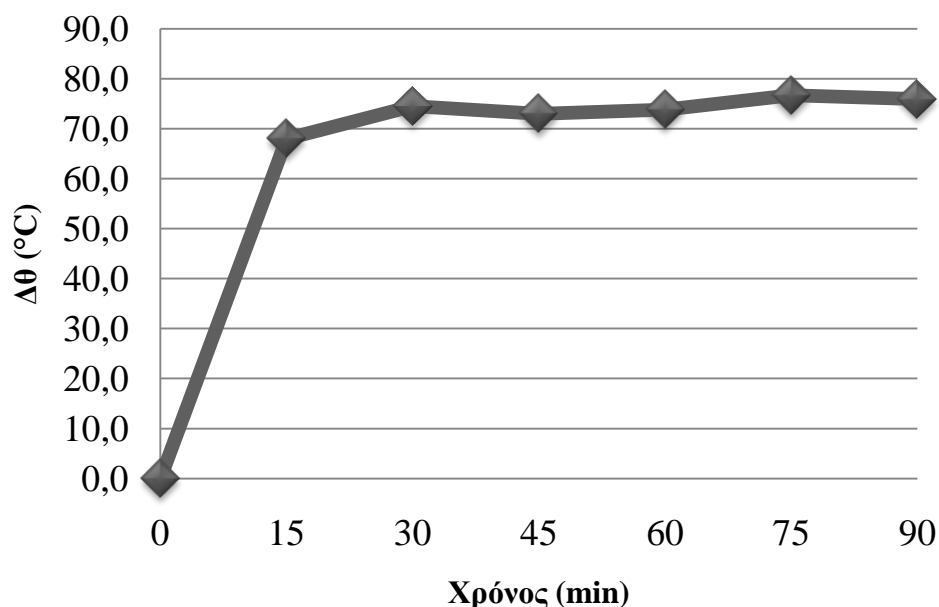
Οι διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x προκύπτουν από τον πίνακα 3.2.1-21 ως εξής:

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
0,0	0,0	22,0
68,0	47,4	22,0
74,5	51,6	22,0
73,0	51,2	22,0
73,8	51,2	22,0
76,7	52,7	22,0
75,9	55,9	22,0

Πίνακας 3.2.1-22:Διαφορές θερμοκρασίας του ρευματοδότη 10 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δεύτερη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

75,9 °C :Μη αποδεκτή τιμή για τη δοκιμή

Επειδή μας ενδιαφέρουν οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο ρευματοδότη κρατάμε την πρώτη στήλη του πηγούμενου πίνακα. Η γραφική παράσταση που δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ του ρευματοδότη σε σχέση με το χρόνο ακολουθεί παρακάτω:



Σχήμα 3.2.1-19 Γραφική παράσταση μεταβολής των θερμοκρασιών $\Delta\theta$ του ρευματοδότη 10 σε σχέση με το χρόνο t , κατά τη δεύτερη δοκιμή υπερθέρμανσης με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου

Δοκιμή υπερθέρμανσης στην ασφαλειοθήκη

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής είναι τα εξής:

V_2	V_3	I_1	θ_1	θ_2	θ_γ	Χρόνος(min)
79	0,036	393,7	23	23	23	0
79,3	0,373	377,6	72,2	71,6	23	15
79,4	0,371	375	74,5	73,6	23	30
79,5	0,376	375,7	73	72,1	23	45
79,8	0,375	374,2	73,6	72,8	23	60
80,1	0,379	381	74,5	72,8	23	75
80,7	0,38	379,6	74,8	73	23	90

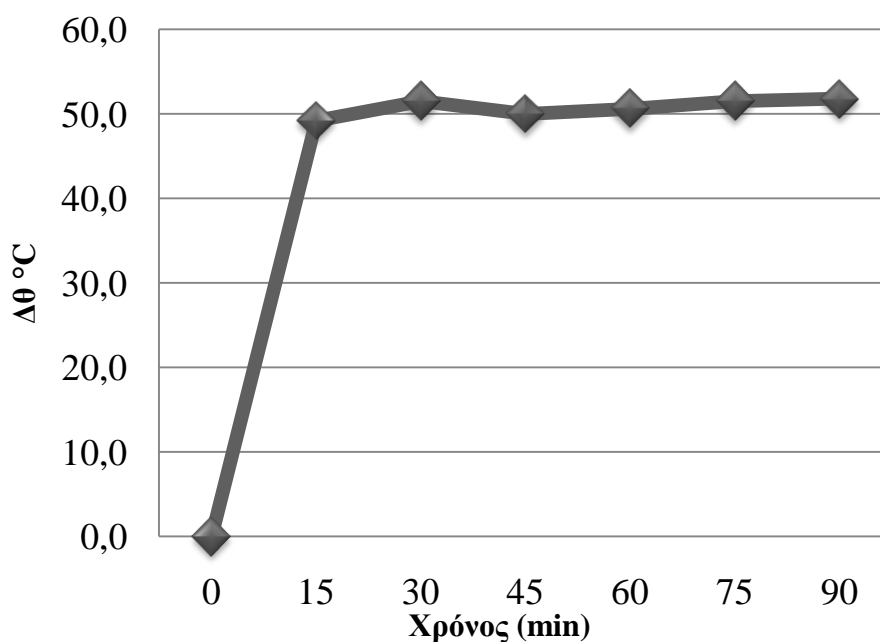
Πίνακας 3.2.1-23: Δοκιμή υπερθέρμανσης στην ασφαλειοθήκη, όπου θ_γ είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ_1 , θ_2 θερμοκρασίες της ασφαλειοθήκης και I_1 το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή ρεύματος.

Οι διαφορές θερμοκρασίας της ασφαλειοθήκης σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x προκύπτουν από τον πίνακα 3.2.1-21 ως εξής:

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
0,0	0,0	23,0
49,2	48,6	23,0
51,5	50,6	23,0
50,0	49,1	23,0
50,6	49,8	23,0
51,5	49,8	23,0
51,8	50,0	23,0

Πίνακας 3.2.1-24: Διαφορές θερμοκρασίας της ασφαλειοθήκης σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης

Επειδή μας ενδιαφέρουν οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην ασφαλειοθήκη κρατάμε την πρώτη στήλη του προηγούμενου πίνακα. Η γραφική παράσταση που δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ της ασφαλειοθήκης σε σχέση με το χρόνο ακολουθεί παρακάτω:



Σχήμα 3.2.1-20: Γραφική παράσταση μεταβολής των θερμοκρασιών $\Delta\theta$ της ασφαλειοθήκης σε σχέση με το χρόνο t , κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης

3.2.2.Δοκιμή βραχυκύκλωσης

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης ήταν όμοια με τη δοκιμή υπερθέρμανσης και έχει αναλυθεί στην παράγραφο 3.2.1. Το ρεύμα που εφαρμόστηκε σε κάθε ρευματοδότη ήταν τριπλάσιο του ονομαστικού, δηλαδή 48A(16 επί 3) και τα καλώδια σύνδεσης (από χαλκό) του μετασχηματιστή ρεύματος με τις πρίζες είχαν διατομή 1,5mm². Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στις πρίζες χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία.

Η δοκιμή βραχυκύκλωσης θεωρείται ότι είναι επιτυχής, όταν η θερμοκρασία δεν υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο κατά τις προδιαγραφές όριο, που είναι της τάξεως 55÷60 °C ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η διάρκεια της δοκιμής βραχυκύκλωσης ήταν 5 sec και πραγματοποιήθηκε τρεις φορές για τον κάθε ρευματοδότη. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με γεφύρωση στις υποδοχές του φορτίου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις 10 πρίζες φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Ρευματοδότης Νο1

θ1 (°C)	θ2(°C)
29,2	40,2
36,5	53,2
40,9	61,4

Πίνακας 3.2.2-1 Θερμοκρασίες του ρευματοδότη Νο1 κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

Ρευματοδότης Νο2

θ1(°C)	θ2(°C)
35,5	36,1
37,3	40,3
50,2	61,7

Πίνακας 3.2.2-2 Θερμοκρασίες του ρευματοδότη Νο2 κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

Ρευματοδότης Νο3

θ1(°C)	θ2(°C)
43,4	63,3
45,5	48,7
43,1	47,1

Πίνακας 3.2.2-3 Θερμοκρασίες του ρευματοδότη Νο3 κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

Ρευματοδότης Νο4

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$
38,5	58,1
47,4	56,8
45,6	53,0

Πίνακας 3.2.2-4 Θερμοκρασίες του ρευματοδότη Νο4 κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

Ρευματοδότης Νο5

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$
74,9	37,3
51,6	47,1
38,6	32,1

Πίνακας 3.2.2-5 Θερμοκρασίες του ρευματοδότη Νο5 κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

Ρευματοδότης Νο6

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$
37,9	29,4
44,3	32,1
41,7	39,0

Πίνακας 3.2.2-6 Θερμοκρασίες του ρευματοδότη Νο6 κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

Ρευματοδότης Νο7

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$
49,9	42,2
50,5	45,5
49,1	36,2

Πίνακας 3.2.2-7 Θερμοκρασίες του ρευματοδότη Νο7 κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

Ρευματοδότης Νο8

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$
20,5	27,2
45,2	43,3
58,7	42,6

Πίνακας 3.2.2-8 Θερμοκρασίες του ρευματοδότη Νο8 κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

Ρευματοδότης Νο9

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$
34,6	24,9
29,6	26,8
29,8	27,1

Πίνακας 3.2.2-9 Θερμοκρασίες του ρευματοδότη Νο9 κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

Ρευματοδότης Νο10

$\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\theta_2(^{\circ}\text{C})$
47,5	43,5
38,1	33,1
101,7	39,2

Πίνακας 3.2.2-10 Θερμοκρασίες του ρευματοδότη Νο10 κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος θ_x μετρήθηκε 20 °C. Επομένως οι μεταβολές θερμοκρασίας των ρευματοδοτών σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x προκύπτουν από τους παραπάνω πίνακες ως εξής:

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
9,2	20,2	20
16,5	33,2	20
20,9	41,4	20

Πίνακας 3.2.2-11: Μεταβολές θερμοκρασίας του ρευματοδότη Νο1 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
15,5	16,1	20
17,3	20,3	20
30,2	41,7	20

Πίνακας 3.2.2-12: Μεταβολές θερμοκρασίας του ρευματοδότη Νο2 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
23,4	43,3	20
25,5	28,7	20
23,1	27,1	20

Πίνακας 3.2.2-13: Μεταβολές θερμοκρασίας του ρευματοδότη Νο3 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
18,5	38,1	20
27,4	36,8	20
25,6	33	20

Πίνακας 3.2.2-14: Μεταβολές θερμοκρασίας του ρευματοδότη Νο4 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
54,9	17,3	20
31,6	27,1	20
18,6	12,1	20

Πίνακας 3.2.2-15: Μεταβολές θερμοκρασίας του ρευματοδότη Νο5 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
17,9	9,4	20
24,3	12,1	20
21,7	19	20

Πίνακας 3.2.2-16: Μεταβολές θερμοκρασίας του ρευματοδότη Νο6 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
29,9	22,2	20
30,5	25,5	20
29,1	16,2	20

Πίνακας 3.2.2-17: Μεταβολές θερμοκρασίας του ρευματοδότη Νο7 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
0,5	7,2	20
25,2	23,3	20
38,7	22,6	20

Πίνακας 3.2.2-18: Μεταβολές θερμοκρασίας του ρευματοδότη Νο8 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
14,6	4,9	20
9,6	6,8	20
9,8	7,1	20

Πίνακας 3.2.2-19: Μεταβολές θερμοκρασίας του ρευματοδότη Νο9 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

$\Delta\theta_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_2(^{\circ}\text{C})$	$\theta_x(^{\circ}\text{C})$
27,5	23,5	20
18,1	13,1	20
81,7	19,2	20

Πίνακας 3.2.2-20: Μεταβολές θερμοκρασίας του ρευματοδότη Νο10 σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης

Κρατώντας μόνο τις στήλες με τις υψηλές θερμοκρασίες από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει ο πίνακας που ακολουθεί :

$\Delta\theta_1$ (°C)	$\Delta\theta_2$ (°C)	$\Delta\theta_3$ (°C)	$\Delta\theta_4$ (°C)	$\Delta\theta_5$ (°C)	$\Delta\theta_6$ (°C)	$\Delta\theta_7$ (°C)	$\Delta\theta_8$ (°C)	$\Delta\theta_9$ (°C)	$\Delta\theta_{10}$ (°C)
20,2	16,1	43,3	38,1	54,9	17,9	29,9	0,5	14,6	27,5
33,2	20,3	28,7	36,8	31,6	24,3	30,5	25,2	9,6	18,1
41,4	41,7	27,1	33,0	18,6	21,7	29,1	38,7	9,8	81,7

Πίνακας 3.2.2-21: Μεταβολές θερμοκρασίας των 10 ρευματοδοτών σε σχέση με τη θερμοκρασία θ_x κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης και η μέση τιμή με το σφάλμα μέσης τιμής του καθενός

Μέση τιμή – Τυπική απόκλιση μέσης τιμής

Η μέση τιμή και το σφάλμα μέσης τιμής που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί έχουν υπολογισθεί με βάση τους παρακάτω τύπους :

Έχοντας κάνει n μετρήσεις με αποτελέσματα x_i $i=(1,2,\dots,n)$ μπορούμε να υπολογίσουμε τη **μέση τιμή** μιας σειράς μετρήσεων ,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.2.2-1)$$

Η τυπική απόκλιση της μέση τιμής ονομάζεται και τυπικό σφάλμα ή απλώς σφάλμα της μέτρησης του μεγέθους x και το συμβολίζουμε δ_x ή σ_x

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (3.2.2-2)$$

Έτσι λοιπόν προκύπτει :

$\bar{\Delta\theta}_1 \pm \sigma_1$ (°C)	$\bar{\Delta\theta}_2 \pm \sigma_2$ (°C)	$\bar{\Delta\theta}_3 \pm \sigma_3$ (°C)	$\bar{\Delta\theta}_4 \pm \sigma_4$ (°C)	$\bar{\Delta\theta}_5 \pm \sigma_5$ (°C)	$\bar{\Delta\theta}_6 \pm \sigma_6$ (°C)	$\bar{\Delta\theta}_7 \pm \sigma_7$ (°C)	$\bar{\Delta\theta}_8 \pm \sigma_8$ (°C)	$\bar{\Delta\theta}_9 \pm \sigma_9$ (°C)	$\bar{\Delta\theta}_{10} \pm \sigma_{10}$ (°C)
31,60± 6,172	26,03± 7,927	33,03± 5,154	35,97± 1,530	35,03± 10,619	21,30± 1,858	29,83± 0,406	21,47± 11,184	11,33± 1,634	42,43± 19,820

Πίνακας 3.2.2-22 : Μέση τιμή και σφάλμα μέσης τιμής για την κάθε πρίζα

Κεφάλαιο

4

Σχόλια επί των αποτελεσμάτων

4.1. Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.1.

Με βάση τα αποτελέσματα της παραγράφου 3.1 εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα 5 θερμοστοιχεία σιδήρου-κωνσταντάνης παρουσιάζουν σχεδόν κοινή χαρακτηριστική εξίσωση θερμοκρασίας-τάσης. Αυτό συμβαίνει, διότι όλα τα θερμοστοιχεία αποτελούνται από τα ίδια μέταλλα και έχουν κατασκευαστεί με όμοιο τρόπο. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν κάποιες μικρές διαφορές, οι οποίες οφείλονται στις συνθήκες διεξαγωγής της κάθε βαθμονόμησης, οι οποίες δεν είναι δυνατόν να είναι ακριβώς ίδιες κάθε φορά.

Για κάθε θερμοστοιχείο η διαδικασία βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε 2 φορές, ώστε να εξαχθεί ένα πιο ασφαλές αποτέλεσμα και να μειωθεί η πιθανότητα λάθους. Όμως, κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης πιθανώς να προκύπτουν σφάλματα, τα οποία οφείλονται στα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν (Pt 100, θερμόμετρο Hg). Συγκεκριμένα, τα παραπάνω όργανα χρειάζονται ένα ορισμένο χρονικό διάστημα για να φτάσουν σε κατάσταση θερμοτικής ισορροπίας, επομένως ενδέχεται κάποιες μετρήσεις να έχουν ληφθεί στη διάρκεια της μεταβατικής περιόδου. Επίσης τα παραπάνω όργανα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν σφάλματα ανάγνωσης. Ένας ακόμη παράγοντας σφάλματος είναι η κατανομή της θερμοκρασίας στο δοχείο του νερού.

4.2. Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.2.1

Η δοκιμή υπερθέρμανσης πραγματοποιείται με γεφύρωση στους ακροδέκτες υποδοχής του φορτίου. Με βάση τα αποτελέσματα της παραγράφου 3.2.1 παρατηρείται ότι η θερμοκρασία $\Delta\theta$ (διαφορά θερμοκρασίας σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) στους ρευματοδότες ξεπερνά τους 50 °C στους ρευματοδότες No4, No7 και No10, επομένως η δοκιμή υπερθέρμανσης θεωρείται αποτυχής σ' αυτούς τους τρεις και επιτυχής στους υπόλοιπους.

4.3. Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.2.2.

Με βάση τα αποτελέσματα της παραγράφου 3.2.2 παρατηρείται ότι η μέση τιμή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ (διαφορά θερμοκρασίας σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) ξεπερνά τους 50 °C στο ρευματοδότη No10, επομένως η δοκιμή βραχυκύκλωσης θεωρείται αποτυχής στο συγκεκριμένο ρευματοδότη και επιτυχής στους υπόλοιπους.

Οι διαφορές των μετρούμενων τιμών $\Delta\theta$ (μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) για κάθε ρευματοδότη, οφείλονται στη δυσκολία της καταγραφής των ενδείξεων των βαθμοστοιχείων ακριβώς στα 5 sec για κάθε μέτρηση.

4.4.Γενικές Παρατηρήσεις

Από τις μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, διαπιστώθηκε πως τα δοκίμια Νο4, Νο7, Νο10 απέτυχαν τη δοκιμή υπερθέρμανσης και το δοκίμιο Νο10 απέτυχε τη δοκιμή βραχυκύκλωσης.

Συνεπώς δε διασφαλίζεται η απροβλημάτιστη λειτουργία τους σε βάθος χρόνου εξαιτίας παραγόντων όπως η οξείδωση των μεταλλικών επαφών, η επικάλυψη ξένων σωματιδίων κ.λ.π.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΜΠΟΥΡΚΑΣ Π.Δ., *Εφαρμογές Κτιριακών Και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων*, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1998
- [2] ΙΩΑΝΝΗΣ Ι. ΠΕΡΠΙΝΙΑΣ : «Δοκιμή βραχυκύκλωσης και υπερθέρμανσης σε ηλεκτροτεχνικό υλικό χαμηλής τάσης» - Διπλωματική εργασία με επιβλέπον τον καθηγητή Π.Δ. Μπούρκα (Αθήνα 2009)
- [3] *CRC Handbook of Thermoelectrics* by D.M. Rowe (1995)
- [4] ΧΡΗΣΤΟΣ Κ.ΚΟΥΤΣΟΓΕΩΡΓΑΣ : «Διερεύνηση φαινομένων σε ηλεκτρικές επαφές» - Διπλωματική εργασία με επιβλέπον τον αν.καθηγητή Κ.Καραγιαννόπουλο (Αθήνα 2006)
- [5] ΘΑΝΑΣΗΣ Γ. ΓΚΙΟΚΑΣ, *Εγχειρίδιο Ηλεκτρικών Εξαρτημάτων Και Υλικών*, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, 2004
- [6] <http://users.physics.uoc.gr/~kele/teaching/tei/civil/lab/lab1/lab1ans.pdf>