



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

Δοκιμές υπερθέρμανσης ηλεκτρικών επαφών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εμμανουήλ Στ. Κοντοπίδης

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

Αθήνα, Μάιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Δοκιμές υπερθέρμανσης ηλεκτρικών επαφών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εμμανουήλ Στ. Κοντοπίδης

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την
Αθήνα,

.....
Π. Δ. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Ι. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2011

.....
Εμμανουήλ Στ. Κοντοπίδης

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

Copyright © Εμμανουήλ Στ. Κοντοπίδης, 2011
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

*Αφιερώνεται
Στους γονείς μου*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων, του Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων, της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. κατά το ακαδημαϊκό έτος 2010-2011.

Εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες, προς τον επιβλέποντα της παρούσης διπλωματικής εργασίας κ. Περικλή Μπούρκα, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπό μου, αναθέτοντάς μου αυτήν τη διπλωματική εργασία, αλλά και για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθειά του, καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Θα αποτελούσε σημαντική παράλειψη εάν δεν ευχαριστούσα τους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς, και υποψήφιους Διδάκτορες Μηχανικό Ε.Μ.Π., Ιάσωνα Κρητικό, και Κωνσταντίνο Χαλεβίδη για την πολύτιμη βοήθειά του στις μετρήσεις και στο συντονισμό της παρούσης διπλωματικής εργασίας . Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω την Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, Διδάκτορα Μηχανικό Ε.Μ.Π., κα. Αικατερίνη Πολυκράτη για την ουσιαστική της συμβολή σε αυτό το πόνημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η περιγραφή του φαινομένου της υπερθέρμανσης των ηλεκτρικών επαφών και συγκεκριμένα των μαχαιρωτών ασφαλειών χαμηλής τάσης 250 και 315 Ampere.

Οι συγκεκριμένες ασφάλειες χρησιμοποιούνται στη διανομή ηλεκτρικής ισχύος στη χαμηλή τάση και σκοπός τους είναι η προστασία των γραμμών διανομής. Στο πλαίσιο της εργασίας, πραγματοποιήσαμε μετρήσεις στο εργαστήριο ηλεκτρικών μετρήσεων μετρώντας την αύξηση της θερμοκρασίας σε τρεις μαχαιρωτές ασφάλειες χαμηλής τάσης τροφοδοτώντας με ρεύμα ίσο με το ονομαστικό τους.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τις στατικές ηλεκτρικές επαφές σχετικά με την οξειδωσή τους, την πτώση τάσης και την αύξηση της θερμοκρασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά το σκοπό της εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και η μεθοδολογία που χρησιμοποιήσαμε για την λήψη των μετρήσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνονται σχόλια επί των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και εξάγονται σχετικά συμπεράσματα.

Λέξεις Κλειδιά:

Στατικές ηλεκτρικές επαφές, αντίσταση διάβασης, μαχαιρωτή ασφάλεια, βάση ασφάλειας, οξειδωση ηλεκτρικών επαφών, χαμηλή τάση.

ABSTRACT

The purpose of this work is to describe the phenomenon of overheating of electrical contacts and the stabbing concerned are low voltage fuses 250 and 315 Ampere.

These fuses used to distribute electrical power to low voltage and their purpose is to protect the lines distribution. In this work we measured the temperature rise in three stabber powering low-voltage fuses with a current equal to the nominal fed.

The first chapter presents the theoretical background of the static electrical contacts and the oxidation, the voltage drop and the temperature rise.

The second chapter describes the aim of this work.

The third chapter describes in detail the experimental setup and the methodology used for taking measurements.

The fourth chapter presents the results of measurement for each fuse.

The fifth chapter includes comments on the results of measurements and conclusions.

Keywords:

Static electrical contacts, crossing resistance, knife fuse, fuse holder, oxidation of electrical contacts, low voltage

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.Εισαγωγή για τις στατικές ηλεκτρικές επαφές.....	13
1.1 Καθορισμός όρων και εννοιών	13
1.2 Η αντίσταση στένωσης.....	14
1.3 Η πτώση τάσης σε μια επαφή σε σχέση με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται	17
1.4 Η αντίσταση διάβασης σε σχέση με την πτώση τάσης και τη διαφορά Θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην επαφή.....	19
1.5 Οξειδία σε επαφές διακοπών και η σημασία της θερμοκρασίας στην αύξηση του πάχους τους.....	22
1.6 Η επίδραση της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα στην οξείδωση των επαφών.....	25
1.7 Η εκδήλωση του φαινομένου σύραγγος στις επαφές.....	27
1.8 Μοντέλο εξομάλυνσης επιφάνειας αγωγών.....	34
1.9 Η φυσική διερεύνηση φαινομένων μεταφοράς στις επαφές.....	36
1.10 Αστάθειες που οφείλονται στη θερμοκρασία.....	49
2.Σκοπός της εργασίας.....	57
3.Η διάταξη και η διαδικασία των μετρήσεων.....	58
4.Αποτελέσματα των μετρήσεων.....	63
4.1 Μέτρηση θερμοκρασίας επαφών για το 1 ^ο δοκίμιο.....	63
4.2 Μέτρηση θερμοκρασίας επαφών για το 2 ^ο δοκίμιο.....	66
4.3 Μέτρηση θερμοκρασίας επαφών για το 2 ^ο δοκίμιο.....	68
4.4 Συγκριτική αύξηση της θερμοκρασίας της θερμοκρασίας των τριων δοκιμίων.....	71
5. Σχόλια επί των μετρήσεων – Συμπεράσματα.....	73
Βιβλιογραφία.....	74

Παράρτημα	75
Μετρήσεις μαχαιρωτών ασφαλειών κατά IEC 60269-2-1	75

1.Εισαγωγή για τις στατικές ηλεκτρικές επαφές

Οι συγκεκριμένες επαφές , αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία ως stationary contacts. Οι αποζεύκτες, γειωτές, ασφαλειοαποζεύκτες και ασφαλειοθήκες θεωρούνται στατικές ηλεκτρικές επαφές. Ως στατικές επαφές θεωρούνται επίσης και οι επαφές των αυτοματων διακοπών, των διακοπών φορτίου καθώς και γενικά όλων των διακοπών που έχουν ισχύ διακοπής εφόσον αυτές βρίσκονται στην στατική τους κατάσταση (διακόπτης στη θέση εντός).

Στο κεφάλαιο αυτό καθορίζονται βασικοί όροι και έννοιες σχετικά με τις επαφές, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται κατά τη λειτουργία τους και δίνονται βασικές σχέσεις που τις χαρακτηρίζουν κατά τις προδιαγραφές.

1.1 Καθορισμοί όρων και εννοιών

Ως ηλεκτρική επαφή ορίζεται μία λυόμενη σύνδεση δύο αγωγών η οποία έχει τη δυνατότητα να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Η παραπάνω λυόμενη σύνδεση αποτελείται από δύο μέρη, την κινητή και την σταθερή επαφή. Ως ανοικτή επαφή θεωρείται όχι μόνο αυτή, που έχει 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 επαφής A_c (εννοούμε την επιφάνεια μέσω της οποίας γίνεται τελικά η διέλευση του ρεύματος από το ένα μέρος της επαφής στο άλλο. Η επιφάνεια αυτή είναι, μικρότερη από την A_b λόγω των ξένων επικαθίσεων στις επαφές (κυρίως οξειδία μετάλλων και σκόνη). Όταν παρατηρεί κανείς μια ηλεκτρική επαφή νομίζει ότι τα δύο μέρη της εφάπτονται σε μία πολύ ευρύτερη επιφάνεια από το σύνολο των περιοχών επαφής A_b που προαναφέρθηκαν. Αυτή η μακροσκοπικά παρατηρούμενη επιφάνεια ονομάζεται φαινόμενη επιφάνεια επαφής A_c 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:

$$A_a > A_b > A_c \quad (1.1-1)$$

Ο όρος αντίσταση διάβασης ο οποίος θα χρησιμοποιείται στην συνέχεια 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.

1.2 Η αντίσταση στένωσης

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται ένα παράδειγμα υπολογισμού της αντίστασης στένωσης, που αναφέρεται στην βιβλιογραφία για την κατανόηση των προαναφερθέντων. Πρόκειται για δύο κυλίνδρους, που άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα στην διεύθυνση του

άξονα συμμετρίας τους. Η φαινόμενη επιφάνεια A_a είναι η διατομή των κυλίνδρων. Υποτίθεται ότι η μόνη θέση στην οποία είναι δυνατό (λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας A_a) να διέλθει το ρεύμα, είναι η ελλειπτική επιφάνεια A_c με ημιάξονες a και b . Η αντίσταση στένωσης, οφείλεται στην εξαναγκασμένη συμπίκνωση των γραμμών ροής του ηλεκτρικού ρεύματος, ώστε το ηλεκτρικό ρεύμα να μπορεί να διέλθει από την επιφάνεια A_c , η οποία είναι αρκετά μικρότερη από την A_a .

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

- ότι το υλικό των επαφών ήταν το ίδιο και για τα δύο μέρη της επαφής,
- το υλικό ήταν ιστροπικό και η ειδική αντίσταση του σταθερή
- η θερμοκρασία είναι σταθερή σε όλα τα σημεία της επιφάνειας επαφής A_c η οποία είναι ισοδυναμική επιφάνεια.
- Για τον υπολογισμό της αντίστασης μεταξύ διαδοχικών ισοδυναμικών επιφανειών ισχύει $\Delta\phi=0$ όπου ϕ το δυναμικό .

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές οι Kottler και Smythe διατύπωσαν για την αντίσταση στένωσης R_c την σχέση:

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{\mu} \frac{d\mu}{\sqrt{(\alpha^2 + \mu)(\beta^2 + \mu)\mu}} \quad (1.2-1)$$

όπου a και b οι ημιάξονες της έλλειψης σε cm, ρ η ειδική αντίσταση σε Ωcm και μ μία παράμετρος η οποία εξαρτάται από τον λόγο της επιφάνειας A_c προς την επιφάνεια A_a σε cm^2 . Για $A_c \ll A_a$ ισχύει $\mu \rightarrow \infty$

Σε περίπτωση που η περίμετρος της A_c είναι περιφέρεια ακτίνας r , τότε έχουμε στην παραπάνω σχέση $a=b=r$ και επομένως η αντίσταση στένωσης είναι:

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{\mu} \frac{d\mu}{(r^2 + \mu)\sqrt{\mu}} = \frac{\rho}{2\pi} \arctan \frac{\sqrt{\mu}}{r} \quad (1.2-2)$$

Για $\mu = \infty$ η σχέση γίνεται :

$$R_c = \frac{\rho}{2r} \quad (1.2-3)$$

Η σχέση (1.2-3) δίνει την αντίσταση στένωσης για επιφάνεια A_c κυκλικής διατομής σε συνάρτηση με την ειδική αντίσταση του υλικού ρ και την ακτίνα r . Πειραματικά αποτελέσματα από τους Holm και Stormer συμπίπτουν με τα υπολογιζόμενα από την σχέση (2.2-3). Έχει διαπιστωθεί επίσης ότι σε περίπτωση που η περίμετρος της A_c έχει σχήμα έλλειψης για την οποία ισχύει $\alpha, \beta=r^2$, τότε η σχέση (1.2-3) εκφράζει με ικανοποιητική ακρίβεια την αντίσταση στένωσης και μπορεί να χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς, με ακρίβεια περίπου $\pm 1,5\%$.

Οι παραπάνω υπολογισμοί προϋποθέτουν μια μόνο επιφάνεια A_c σε όλη την φαινόμενη επιφάνεια A_a . Σε περίπτωση περισσοτέρων επιφανειών A_c ισχύει η σχέση:

$$R_c = \sum R_{ci} = \frac{\rho}{2 \sum r_i} \quad (1.2-4)$$

όπου i ο αριθμός των επιφανειών.

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

$$R_c(T) = R_c(T_0)(1 + \alpha_\chi(T - T_0)) \quad (1.2-5)$$

όπου $R_c(T_0)$ η τιμή της αντίστασης στένωσης σε θερμοκρασία T_0 , $R_c(T)$ η τιμή της αντίστασης στένωσης σε θερμοκρασία $T > T_0$ και α_χ ο θερμικός συντελεστής μεταβολής της αντίστασης στένωσης. Θεωρητικοί υπολογισμοί επαληθεύουν την σχέση 1.2-5 και προσδιορίζουν τον συντελεστή α_χ ίσο προς τα 2/3 του θερμικού συντελεστή α του υλικού των επαφών. Έτσι η σχέση 1.2-5 γίνεται:

$$R_c(T) = R_c(T_0) \left[1 + \frac{2}{3} \alpha (T - T_0) \right] \quad (1.2-6)$$

Οι σχέσεις (1.2-3), (1.2-4) και (1.2-6) για τα συνήθη μέταλλα, που χρησιμοποιούνται στις επαφές, δίνουν τιμές της R_c οι οποίες είναι πολύ μικρές. Πειραματικά δεδομένα για συνήθεις επαφές των πρακτικών εφαρμογών δίδουν επίσης πολύ μικρές τιμές για την R_c (της τάξης των $2 \cdot 10^{-4} \Omega$). Οι τιμές αυτές της αντίστασης στένωσης δεν μπορούν να δικαιολογήσουν τις συνήθεις, (κατά τις προδιαγραφές), τιμές της πτώσης τάσης (έως 55mV). Γι' αυτό μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η αντίσταση λόγω των ξένων επικαθίσεων σε μία επαφή έχει πρωτεύοντα ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της ολικής αντίστασης διάβασης. Φαίνεται επομένως ότι η αιτία της γήρανσης των ηλεκτρικών επαφών θα πρέπει να αναζητηθεί κυρίως στους μηχανισμούς που αυξάνουν το ποσοστό των επικαθίσεων.

1.3 Η πτώση τάσης σε μια 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 συνάρτηση με την διαφορά δυναμικού. Σε συμμετρικά συστήματα ηλεκτρικών επαφών, η θερμική ροή ακολουθεί την ίδια διεύθυνση με την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Ως εκ τούτου υπάρχει μία σχέση μεταξύ θερμοκρασιακής διαφοράς και διαφοράς δυναμικού. Η σχέση αυτή διερευνήθηκε κάτω από διάφορες παραδοχές, όπως π.χ. οι παραδοχές που προαναφέρθηκαν για τον υπολογισμό της αντίστασης στένωσης (παράγραφος 1.2), και επιπλέον ότι ο αγωγός (που συνδέεται με την επαφή) είναι μονωμένος θερμικά και ηλεκτρικά σε όλο το μήκος του.

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

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

Η δεύτερη παραδοχή σημαίνει ότι τα δύο μέρη της επαφής είναι από το ίδιο υλικό, το οποίο είναι ισотροπικό, δηλαδή ότι η ειδική αντίσταση ρ , και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ , 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 :

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T)\lambda(T)dT = \frac{U^2}{8} \quad (1.3-1)$$

όπου ΔT η διαφορά της θερμοκρασίας των σημείων επαφής από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Εάν χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του γινομένου $\overline{\rho\lambda}$ τότε η σχέση 1.3-1 γίνεται:

$$\overline{\rho\lambda} \cdot \Delta T = \frac{U^2}{8} \quad (1.3-2)$$

$$\text{ή } U = \sqrt{8\overline{\rho\lambda} \cdot \Delta T} \quad (1.3-3)$$

Η σχέση 1.3-3 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 1.3-1 γίνεται:

$$\overline{\rho\lambda} \cdot \Delta T \leq \frac{U^2}{8} \quad (1.3-4)$$

$$U \geq \sqrt{8\overline{\rho\lambda} \cdot \Delta T} \quad (1.3-5)$$

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

$$\rho(T)\lambda(T) = LT \quad (1.3-6)$$

όπου L σταθερά ανεξάρτητη από το μέταλλο, $L \cong (2,4 \cdot 10^{-8} (V / ^\circ K)^2)$ τότε η σχέση 1.3-1 γίνεται:

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T)\lambda(T)dT = \int_{T_0}^T LTdT = \frac{L}{2}(T^2 - T_0^2) \leq \frac{U^2}{8} \quad (1.3-7)$$

$$U \geq 2\sqrt{L(T^2 - T_0^2)} \quad (1.3-8)$$

όπου T_0 η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι σχέσεις 1.3-3, 1.3-5 και 1.3-8 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 καινούριες επαφές.

1.4. Η αντίσταση διάβασης σε σχέση με την πτώση τάσης και την διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε επαφή

Στη βιβλιογραφία δίνονται διαγράμματα, που αφορούν την αντίσταση διάβασης σε συνάρτηση με την πτώση τάσης ή την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο λυόμενο

σύνδεσμο, ανάλογα με τη δύναμη σύσφιξης και την τιμή του ρεύματος. Ένα παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 1.4-1, από όπου φαίνεται ότι οι συναρτήσεις $R=f(U)$ και $R=f(\Delta T)$ είναι αύξουσες στην περιοχή των πρακτικών εφαρμογών ($\Delta T < 50^\circ\text{C}$). Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4-1 οι χαρακτηριστικές αυτές σχεδιάζονται σε λογαριθμική κλίμακα. Στον άξονα των x δίνεται συνήθως η πτώση τάσης στην επαφή και ταυτόχρονα η διαφορά θερμοκρασίας <τα μεγέθη αυτά συνδέονται σύμφωνα με την σχέση 1.3-5). Στον άξονα των y δίνεται επίσης ο λόγος $R(\rho, \lambda)/R_0(\rho_0, \lambda_0)$ δηλαδή το πηλίκο της αντίστασης διάβασης R σε θερμοκρασία T (όπου η ειδική αντίσταση έχει την τιμή ρ και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας έχει την τιμή λ) προς την αντίσταση διάβασης R_0 σε θερμοκρασία χώρου T_0 (με ειδική αντίσταση ρ_0 και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ_0). Ο λόγος αυτός θα μπορούσε να γραφεί και ως $R(T)/R(T_0)$ (βλέπε σχέση 1.3-6).

Στη χαρακτηριστική διακρίνει κανείς τις περιοχές (AB, ΒΓ, ΓΔ, ΔΕ και ΕΖ), οι οποίες θα σχολιαστούν παρακάτω: Στο τμήμα AB η αντίσταση διάβασης αυξάνει με την θερμοκρασία. Η αύξηση της αντίστασης διάβασης μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση 1.2-6. Στην περιοχή ΒΓ η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη. Η μείωση αυτή μπορεί να αιτιολογηθεί από την αύξηση της επιφάνειας A_c (προς την οποία η R είναι αντιστρόφως ανάλογη), λόγω μείωσης της σκληρότητας του υλικού από την ανακρυστάλλωση, που υφίσταται, κατά την ανόπτηση. Η περιοχή της θερμοκρασίας ανόπτησης για τον χαλκό είναι από 190°C έως 200°C . Η περιοχή αυτή είναι για τον άργυρο 180°C έως 185°C .

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

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

Όταν από το σημείο E της χαρακτηριστικής μειωθεί η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος τότε η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη (τμήμα EZ). Η EZ είναι πρακτικά παράλληλη προς την AB.

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

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

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

1.5 Οξείδια σε επαφές διακοπών και η σημασία της θερμοκρασίας στην αύξηση του πάχους τους.

Οι επικαθίσεις σε μια ηλεκτρική 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 σύνθεση τους, σε δυο κατηγορίες: σε χημικές ενώσεις (όπως π.χ. τα οξείδια του μετάλλου της επαφής) και σε διάφορα παρασιτικά στοιχεία (όπως η σκόνη, τα λιπαντικά και υδρατμοί). Με διακριτικό στοιχείο το πάχος μπορούμε να διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες επικαθίσεων :

- επικαθίσεις με πάχος λίγων ατόμων (όπως ένα στρώμα μιας ή δύο στοιβάδων μορίων νερού).
- προστατευτικές επικαθίσεις, που είναι χημικές ενώσεις, και οι οποίες δεν αυξάνονται όταν αποκτήσουν ένα μικρό πάχος. Οι επικαθίσεις αυτές θεωρείται ότι προστατεύουν την επιφάνεια της επαφής, 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 ολίγων ατόμων γίνεται διάκριση, σε αυτές που τα άτομα τους ενώνονται με το μέταλλο της επαφής μέσω δυνάμεων Van derWaals 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 100A 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 ανοξείδωτο ατσάλι και το αλουμίνιο έχουν εξαιρετικά προστατευτικά οξείδια και ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Τα οξείδια του χαλκού και του νικελίου δεν προστατεύουν αποτελεσματικά τα αντίστοιχα μέταλλα αλλά συνεχίζουν να αυξάνονται αργά μεν αλλά συνεχώς στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ειδικά στο Ni και το NiO σε ξηρή ατμόσφαιρα με σχετική υγρασία μικρότερη του 25% είναι προστατευτικό της

επιφάνειας του μετάλλου αυτού, αλλά σε υγρή ατμόσφαιρα η οξείδωση 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 επιφάνεια του, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αγώγιμες περιοχές οι οποίες οξειδώνονται επίσης με τον χρόνο. Σε αυτή τη περίπτωση η αντίσταση διάβασης γίνεται μεγαλύτερη (και επομένως και η θερμοκρασία, και έτσι αυξάνει δευτερογενώς η οξείδωση. Ο ψευδάργυρος δεν είναι ιδανικό υλικό για επαφές και για τον πρόσθετο λόγο ότι δεν έχει ικανοποιητική σκληρότητα με αποτέλεσμα να αυξάνει η επιφάνεια A_c , υπό την επίδραση της δύναμης σύσφιξης και να μειώνεται αντίστοιχα η πίεση, πράγμα που βοηθάει την οξείδωση της επιφάνειας 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.

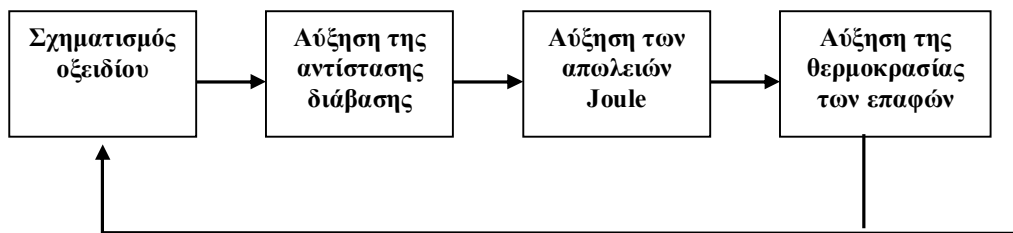
Το βολφράμιο καλύπτεται από ένα στρώμα οξειδίου το οποίο δεν μπορεί να θεωρηθεί ως προστατευτικό. Σε θερμοκρασία χώρου αυτό το οξείδιο παραμένει στο πάχος των περίπου 50Å. Έχει διατυπωθεί η άποψη ότι μεγάλο ποσοστό αυτού του οξειδίου καταστρέφεται κατά την επαφή των δύο μερών, με αποτέλεσμα η διέλευση 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 χάλυβα.

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 επικάθιση 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 με απαγορευτικό κόστος για τις σχετικά μεγάλες επαφές των διακοπών.

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 συνήθεις 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_2S στον αέρα είναι χαμηλή. Περιεκτικότητα σε H_2S 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 τις επαφές από άργυρο. Η ειδική αντίσταση του Ag_2S κυμαίνεται από 10^5 έως 10^{10} Ωm 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 επιχρυσώσης 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 1.5-1. Ως παράδειγμα εξετάζονται παρακάτω επαφές από Cu ή Ni



Σχήμα 1.5-1: 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:

$$s^2 = 20^2 + t \cdot 10^{(14,9-5100/T)} \quad (1.5-1)$$

όπου S το πάχος σε \AA , t ο χρόνος σε h 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 οξειδία έχουν πάχος μεγαλύτερο από 100\AA τότε μονώνουν συνήθως ηλεκτρικά την επαφή. Παρεμφερής σχέση ισχύει για το πάχος NiO το οποίο σχηματίζεται σε θερμοκρασίες από 200°C έως 600°C :

$$s^2 = 5^2 + t \cdot 10^{(13,3-6000/T)} \quad (1.5-2)$$

1.6 Η επίδραση της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα στην οξειδωση 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 πύσων των μερών της επαφής και γι' αυτό διατάσσονται περιφερειακά στην επιφάνεια As και στα πιθανά κενά που υπάρχουν. Έχει υποστηριχθεί ότι λεπτά στρώματα νερού, ανάμεσα σε μεταλλικές επιφάνειες αφ' ενός και οξειδία 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 στιβάδες ατόμων, οι οποίες είναι αγωγίμες λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος.

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

συνέχεια γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης των παραπάνω επικαθίσεων σχετικά με τις δυνατότητες τους να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα.

1.7 Η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος στις επαφές

Σύμφωνα με την κλασική φυσική, επικαθίσεις πάχους λίγων Angstrom μονώνουν ηλεκτρικά τα δύο 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 προηγούμενως. Η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το πάχος s 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 1.7-1α. 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 δίνονται συνήθως σε eV ή σε V). Όταν το πλάτος s είναι μικρό τότε τα φράγματα δυναμικού στην επιφάνεια των δύο μεταλλικών μερών της επαφής αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε μικρότερες τιμές με αποτέλεσμα η μέγιστη τιμή του φράγματος δυναμικού της επαφής να γίνεται μικρότερη από το έργο εξόδου Φ ($\phi_0 < \Phi$). Για ένα ηλεκτρόνιο μάζας m με ταχύτητα V_x το οποίο πλησιάζει το φράγμα δυναμικού του σχήματος 1.7-1α ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{1}{2} m V_x^2 = e \phi_x \quad (1.7-1)$$

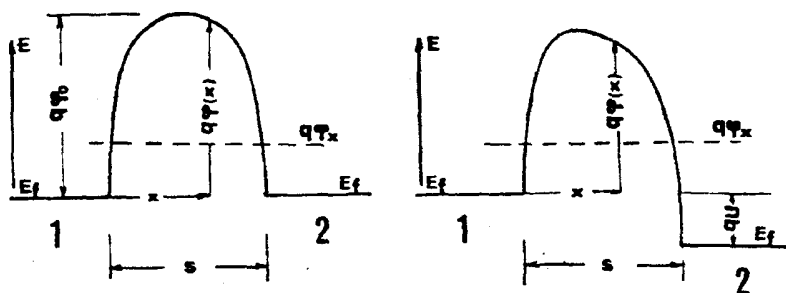
όπου ϕ_x το δυναμικό του ηλεκτρονίου και e το φορτίο του. Σε περίπτωση που $\phi_x > \phi_0$ τότε το ηλεκτρόνιο θα βρεθεί στο άλλο μέρος της επαφής, όπου και θα αποδώσει το περίσσειμα της ενέργειας του υπό μορφή ακτινοβολίας. Αυτό είναι γνωστό ως θερμιονική εκπομπή. Εάν το $\phi_x < \phi_0$ τότε κατά 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 :

$$D(\phi_x) = \exp\left[-\frac{4\pi}{h} \int_0^s \sqrt{2m[\phi(x) - \phi_x]} dx\right] \quad (1.7-2)$$

όπου h η σταθερά του Plank 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 θερμιονική εκπομπή) αλλά αυτή παραμένει αμετάβλητη γιατί η συχνότητα D_e Bronglie 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 μέταλλου της επαφής, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 1.5 . Αν μεταξύ των δύο μερών της επαφής του σχήματος 1.7-1α υπάρχει μία διαφορά δυναμικού U τότε όπως φαίνονται στο σχήμα 1.71b 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 1.7-1 και 1.7-2 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.



$$v=0$$

$$v>0$$

Σχήμα 1.7-1: Το φράγμα δυναμικού στο κενό s δύο επαφών από το ίδιο υλικό.

1 και 2: τα δύο μέρη της επαφής

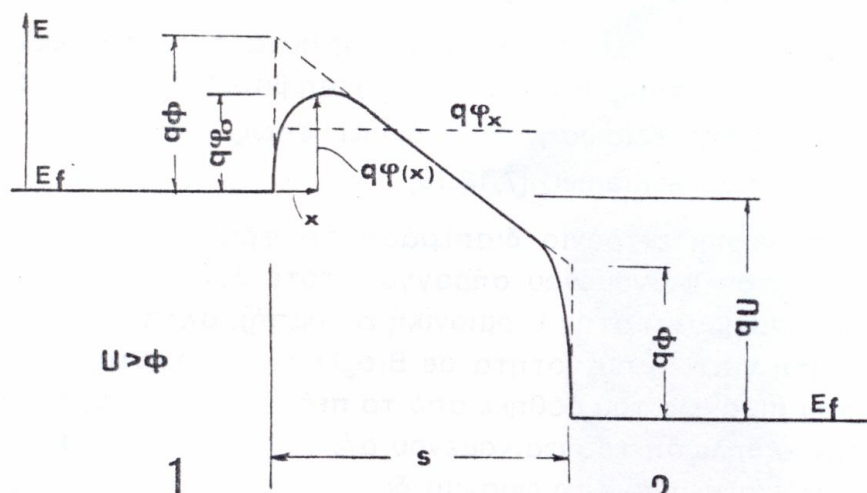
a: χωρίς την επιβολή διαφοράς δυναμικού

b: με την επιβολή διαφοράς δυναμικού U

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

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

Στο σχήμα 1.7-2 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 1.7-2: Το φράγμα δυναμικού μεταξύ δύο ομοίων μεταλλικών ηλεκτροδίων που απέχουν μεταξύ τους κατά s για $U > \Phi$, 1 και 2: τα δύο μέρη της επαφής

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

$$\rho_T = \frac{U}{J} \quad (\text{Συνήθως σε } \Omega\text{m}^2)$$

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:

$$\rho_T = f(S, \Phi, U, \epsilon_r, \varphi(\chi))$$

Από τις σχέσεις 1.7-3 και 1.7-4 φαίνεται ότι για τον υπολογισμό της πυκνότητας ρεύματος χρειάζεται να γίνει μια μαθηματική προσέγγιση για την συνάρτηση $\varphi(\chi)$. Από τους ερευνητές που ασχολήθηκαν με το θέμα, οι υπολογισμοί έγιναν με διάφορες παραδοχές. Κατά μία προσέγγιση για μικρές τιμές του U και μεγάλο πάχος s θεωρείται η $\varphi(\chi)$ ως τραπέζιο. Η προσέγγιση αυτή αν και αφορά χαμηλές θερμοκρασίες ($T=0$), δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και σε θερμοκρασίες χώρου. Σε μία άλλη προσεγγιστική μέθοδο θεωρείται η $\varphi(\chi)$ ως παραβολή. Στην προσέγγιση αυτή λαμβάνεται υπ' όψη η επίδραση της θερμοκρασίας ανάλογα προς την οποία

προκαλείται αύξηση της ενεργειακής στάθμης σημαντικού αριθμού ηλεκτρονίων πάνω από την στάθμη Fermi, γεγονός που βοηθά να διαπεράσουν οι φορείς αυτοί το φράγμα δυναμικού. Η παραπάνω προσέγγιση ενδείκνυται για μικρά πάχη s (τα μεγάλα πάχη επικαθίσεων δεν προσεγγίζονται ικανοποιητικά με παραβολή και είναι προτιμότερη η προσέγγιση τους με τραπέζιο).

Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης σήραγγας επιχειρήθηκε από ερευνητές σε συνδυασμό με πειραματικά δεδομένα. Συνδυασμός αποτελεσμάτων υπολογισμών διαφόρων ερευνητών είναι το διάγραμμα $\log(\rho_\tau) = f(J, \epsilon_r, \phi_0, s)$ που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.7-3. Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η ειδική αντίσταση σήραγγας ρ_τ σαν συνάρτηση της τάσης U για διαφορετικές τιμές του πάχους s , της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r και του φράγματος δυναμικό ϕ_0 . Στα σημεία, που οι χαρακτηριστικές εμφανίζονται ως διακεκομμένες γραμμές, πιθανολογείται διάσπαση του μονωτικού στρώματος.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα καθώς και τα αναφερόμενα στην παράγραφο 1.1 το φαινόμενο σήραγγος σε μία επαφή σχετίζεται με την διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης των επικαθίσεων R_f . Για μία π.χ. επαφή με μια μόνο επιφάνεια A_c ακτίνας r η αντίσταση διάβασης θεωρείται ότι δίνεται από την σχέση:

$$R = \frac{\rho}{2r} + \frac{\rho_\tau}{\pi r^2} \quad (1.7-5)$$

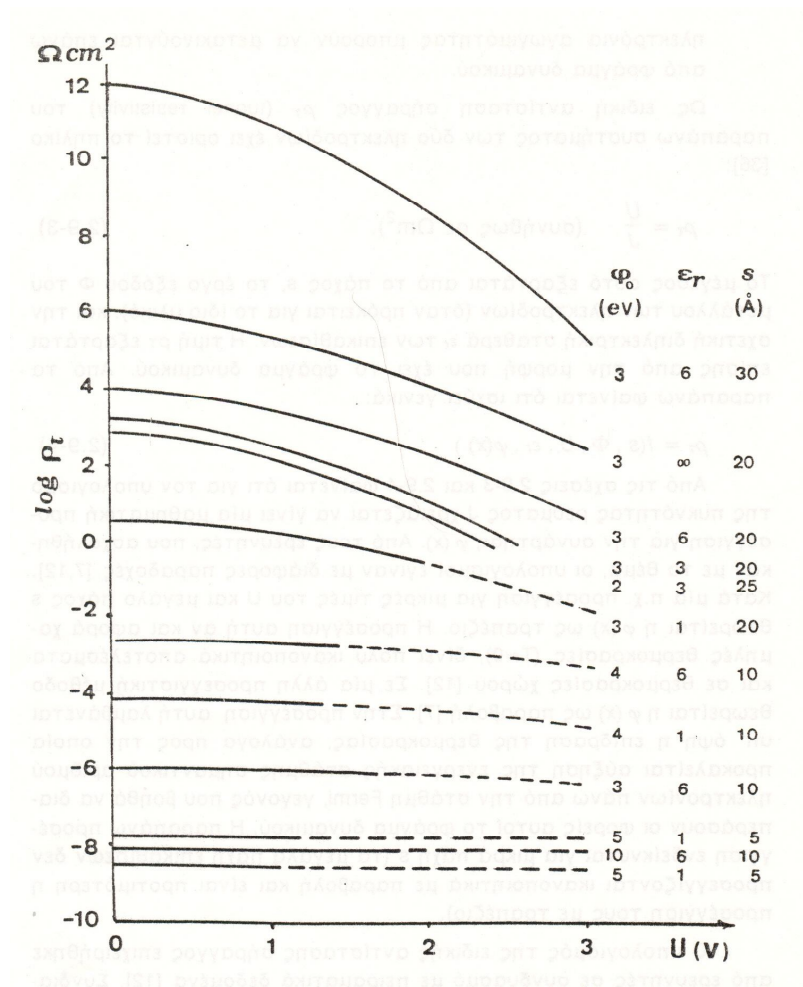
όπου ο πρώτος όρος είναι η αντίσταση στένωσης και ο δεύτερος όρος η αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων.

Ο πίνακας 1.7-1 δίνει για διάφορα υλικά επαφών την αντίσταση διάβασης σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

Υλικό επαφών	Δύναμη σύσφιξης των επαφών F	Ειδική αντίσταση σήραγγος ρ_τ	Αντίσταση στένωσης $R_c = \rho/2r$	Αντίσταση επικαθίσεων $R_f = \rho_\tau/\pi r^2$	Ολική αντίσταση διάβασης R

	g	$10^{-13} \Omega m^2$	$10^{-4} \Omega$	$10^{-4} \Omega$	$10^{-4} \Omega$
Au - Au	35	5	3,94	1,86	5,8
Cu - Cu	35	4,6	7	87	94,0
Ni - Ni	35	54	45	154	199,0

Πίνακας 1.7-1 : Τιμές της αντίστασης διάβασης, της αντίστασης στένωσης και της αντίστασης των επικαθίσεων για διάφορα υλικά επαφών



Σχήμα 1.7-3 : Η ειδική αντίσταση σήραγγος ρ_t σε μια επαφή σε σχέση με την πτώση τάσης U με παραμέτρους το πάχος s των επικαθίσεων, την σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r και το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού ϕ_0 .

1.8. Το μοντέλο εξομάλυνσης της επιφανείας των επαφών

Οι μεταλλικές επιφάνειες των καθαρών επαφών (ακόμα και χωρίς την επικάλυψη διαφόρων επικαθίσεων) υφίστανται παραμορφώσεις υπό την επίδραση της αξονικής δύναμης σύσφιξης. Επίσης μία επιφάνεια τυχαίου σχήματος, από την οποία διέρχεται υψηλή πυκνότητα ρεύματος, θερμαίνεται και αλλάζει το σχήμα της προκειμένου να ελαχιστοποιήσει την συνολική της ελεύθερη ενέργεια. Η απαραίτητη μετανάστευση του υλικού προκειμένου να διευθετηθεί η αλλαγή του σχήματος μπορεί να γίνει με τήξη, εξάτμιση - συμπύκνωση, διάχυση και ροή μάζας. Η σκληρότητα H των μετάλλων εξαρτάται από την θερμοκρασία και τον χρόνο καταπόνησης. Αυτό αποδίδεται σε συνεχή θερμική διάχυση των ατόμων κάτω από την ύπαρξη μηχανικών τάσεων. Πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι η αντίσταση στένωσης R_c για καθαρές επαφές μειώνεται αργά με τον χρόνο λειτουργίας. Η μείωση αυτή θα μπορούσε να αποδοθεί στην διεύρυνση της πραγματικής επιφανείας επαφής A_c λόγω της μείωσης της σκληρότητας H σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η εξομάλυνση μιας επιφάνειας είναι (δυναμικά) ικανή να γίνει αιτία γήρανσης των ηλεκτρικών επαφών, ειδικότερα στις επαφές που δεν έχουν ισχύ διακοπής και για το λόγο αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψει στις πρακτικές εφαρμογές. Μία καλή ηλεκτρική επαφή διασφαλίζεται με την τραχύτητα των επιφανειών, γιατί κατά την επαφή των δύο μερών οι ανωμαλίες της επιφανείας υφίστανται ελαστική ή πλαστική παραμόρφωση. Επίσης επέρχεται πρόσθετη παραμόρφωση μετά την παρέλευση ικανού χρόνου λειτουργίας λόγω της μηχανικής καταπόνησης (κόπωσης), των ηλεκτροχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην ευρύτερη περιοχή της επαφής και της διάχυσης των επικαθίσεων. Η διάχυση των επικαθίσεων επαυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας που μπορεί να προέρχεται από τον κακό αερισμό στην περιοχή της επαφής κατά την αυξημένη συμπίεση του λυομένου συνδέσμου. Η μετατόπιση μάζας στις επιφάνειες των συνδέσμων μπορεί να οδηγήσει και σε φαινόμενα επίτηξης ορισμένων περιοχών του μετάλλου της επαφής (Sintering). Επίσης η παραπάνω αιτία μπορεί (εναλλακτικά με τα προαναφερθέντα) να οδηγήσει και σε εξομάλυνση των ανωμαλιών εφόσον οι επιφάνειες αναπτύξουν επιφανειακό στρώμα επικαθίσεων (π. χ. οξειδίου του μετάλλου) το οποίο δεν επιτρέπει την δημιουργία συνθηκών ιδανικής επαφής.

Διαταραχές στην πραγματική επιφάνεια της επαφής, Ac, μπορούν να μεταβάλουν την αντίσταση διάβασης και συνεπώς την πτώση τάσης για μια σταθερή παροχή μεταφερόμενων φορτίων. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 1.8-1 όπου η πτώση τάσης αλλάζει λόγω των μεταβολών της αντίστασης διάβασης. Οι μεταβολές αυτές θα μπορούσαν να αποδοθούν σε διάφορες αιτίες όπως αυξομειώσεις της ενεργού επιφανείας επαφής, θερμικές αστάθειες, και ανομοιογενή κατανομή του πεδίου λόγω διελύσεως φορέων μέσα από μικροδομές της μορφής μέταλλο - μονωτής - μέταλλο (MIM), οι οποίες οδηγούν σε διαφοροποίηση του τοπικού ηλεκτρικού πεδίου.

1.9 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 μπορεί να σχετίζεται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του λυομένου συνδέσμου καθώς επίσης και με την θερμοκρασία λειτουργίας του. Αν και η δοκιμή υπερθέρμανσης εφαρμόζεται για την τεχνικοοικονομική μελέτη και τον έλεγχο των επαφών διακοπών δεν μας παρέχει επαρκείς πληροφορίες όσον αφορά την φυσική ερμηνεία φαινομένων που αναπτύσσονται κατά την μεταφορά των ηλεκτρικών φορέων μεταξύ των δύο μέρων 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/100A	Άργυρος	37	19	44	21	37	17,6
Αποζεύκτης 500V/100A	Χαλκός	26	13	36	16	26	11,5
Αποζεύκτης 20kV/200A	Χαλκός	48	21	52	22	48	20,3
Ασφαλειοθήκη 20kV/100A	Ορείχαλκος	67	24	73	24	67	22,0

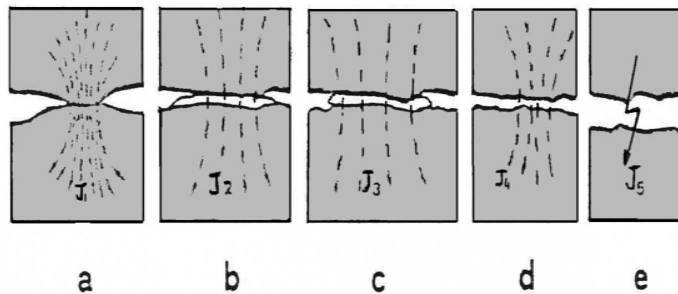
Πίνακας 1.9-1. Μετρήσεις σε επαφές εμπορίου που αφορούν τον προσδιορισμό τιμών

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 1.9-1 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 πάχος και συνεπώς θα χρειαζόταν 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 .

Με βασική αιτία την ανομοιομορφία στην επιφάνεια των επαφών (η οποία μπορεί να είναι μορφολογικής ή ηλεκτροχημικής φύσεως) το πεδίο μεταξύ των επαφών ενδέχεται να παρουσιάζει ανομοιογένειες. Έχει διαπιστωθεί ότι ένα μικρό μέρος της φαινόμενης επιφάνειας της επαφής A_a άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Οι γραμμές ροής του ηλεκτρικού ρεύματος υποχρεώνονται να διέλθουν πολύ κοντά ή μια στην άλλη ώστε να περάσουν από τις μικρές αγωγίμες περιοχές (οι οποίες απαρτίζουν την επιφάνεια A_c) οι οποίες είναι στατιστικά κατανεμημένες στην επιφάνεια A_a και οι οποίες συχνά καλύπτονται από στρώμα επικαθίσεων. Το ηλεκτρικό πεδίο ποικίλλει στην περιοχή της επαφής αφού και οι δύο επιφάνειες διαπερνώνται επιλεκτικά από υψηλή πυκνότητα ρεύματος και σύμφωνα με το νόμο του Ohm θα πρέπει να υπάρχει επιφανειακή πτώση τάσης μεταξύ των σημείων διάβασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Συνεπώς, η

διαχωριστική επιφάνεια των δυο μεταλλικών μερών παύει να είναι ισοδυναμική. Εκτός τούτου, η παρουσία ακινήτων φορτίων ανά την επαφή (όπως: σταθερά, παγιδευμένα και φορτία ιόντων) εισάγουν κατοπτρικά ηλεκτρικά φορτία τα οποία κατανέμονται σε βάθος Thomas Fermi από την επιφάνεια. Κατ' αυτό τον τρόπο προκύπτουν μεταβολές δυναμικού στην επιφάνεια επαφής ακόμα και όταν δεν εφαρμοστεί εξωτερική τάση, ένα φαινόμενο παρόμοιο με το της εξάντλησης-αναστροφής (depletion-inversion) των ημιαγωγικών επιφανειών



Σχήμα 1.9-1. 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.

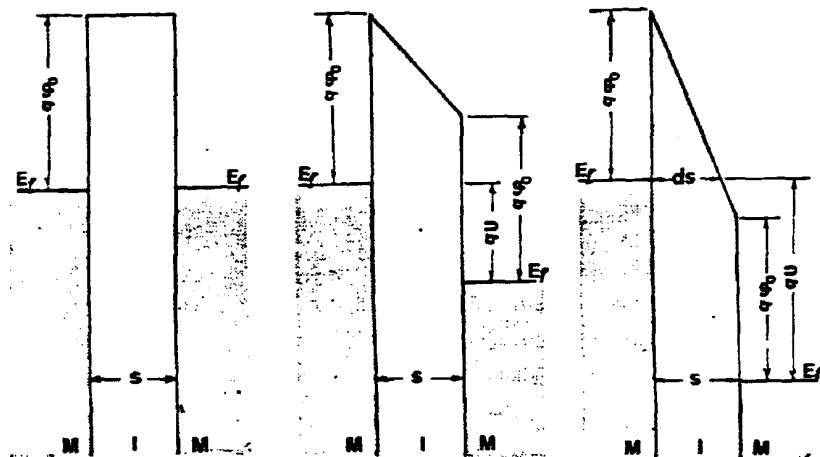
Το σχήμα 1.9-1 παρουσιάζει μακροσκοπικά τα δύο μέρη μίας επαφής. Οι περιοχές M-M οι οποίες εφάπτονται ιδανικά χωρίς την παρεμβολή άλλου μέσου (a) είναι διανεμημένες τυχαία ανάμεσα σε περιοχές οι οποίες άγουν δια του φαινομένου σήραγγος (b) και (c). Οι περιοχές (b) και (c) ορίζονται από την στατιστική κατανομή της ανάπτυξης οξειδίων του μετάλλου στην περιοχή της επαφής και αναμένεται να συμπεριφέρονται σαν λεπτά υμένα υλικών τα οποία πρέπει να τα διαπεράσουν τα ηλεκτρόνια προκειμένου να μεταφερθούν μέσα από την επαφή.

Οι περιοχές που άγουν δια του φαινομένου σήραγγας και έχουν πάχος της τάξης των 50Å ή και λιγότερο, αναφέρονται στο εξής ως μικροδομές μέταλλο - οξείδιο - μέταλλο (MOM) ή μέταλλο - μονωτής - μέταλλο (MIM). Έχει παρατηρηθεί ότι οι επαφές των μετάλλων καλύπτονται αμέσως από λεπτό στρώμα οξειδίου (ή άλλων χημικών ενώσεων) πάχους 10-50Å μόλις έρθουν σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Όταν το πάχος του οξειδίου είναι μικρότερο από τα 50Å το φαινόμενο σήραγγος λαμβάνει χώρα ακόμα και για φαινομενικά μικρές τιμές πτώσης τάσης (εντός των προδιαγραφών, δηλαδή <55mV) αφού το ηλεκτρικό πεδίο στις μικροδομές μπορεί να φτάσει μέχρι 1MV/cm. Αυτή η υψηλή τιμή πεδίου αναμένεται να αναπτύσσεται στις προαναφερθείσες μικροδομές των επαφών αφού πειραματικά παρατηρήθηκε ότι η πτώση τάσης κατά μήκος των επαφών ήταν της τάξης των 50mV. (σχήμα 2.8-1). Αυτή η πτώση τάσης δημιουργεί πεδία της τάξης των 0,1MV/cm έως 0,5MV/cm ή και περισσότερο (ανάλογα με το πάχος των επικαθίσεων) τα οποία έχουν την δυνατότητα να δημιουργήσουν ακόμη και συνθήκες εκπομπής πεδίου για την μεταφορά των φορέων μεταξύ των συνδέσμων. Οι διάφορες θέσεις στην επαφή οι οποίες εγγέουν τα φορτία είναι τυχαία κατανεμημένες μέσα στην φαινόμενη περιοχή επαφής και ενεργοποιούνται μόλις το τοπικό πεδίο αναπτυχθεί σε τιμές 0,1MV/cm περίπου. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι αν και η κλασική θεωρία εκπομπής πεδίου, όπως προτάθηκε από τους Fowler και Nordheim, προβλέπει πεδία της τάξεως των 40MV/cm, στην πράξη τα απαιτούμενα εφαρμοζόμενα πεδία μπορεί να είναι κατά πολύ μικρότερα. Αυτό έχει αποδοθεί σε ανομοιογένειες του πεδίου στην επιφάνεια των υλικών και την ύπαρξη παγιδευμένων φορτίων τα οποία δημιουργούν τοπικές συνθήκες επαύξησης του πεδίου.

Καθώς η ροή του ρεύματος διαμέσου των επαφών αυξάνει, τα φαινόμενα της επιφανειακής σκέδασης αρχίζουν να κυριαρχούν μόλις η διάβαση του φορτίου διαμέσου των ωμικών κέντρων (spots) φτάσει στον κορεσμό. Τότε η διαφορά δυναμικού κατά μήκος των μικροδομών MIM, MOM και MGM αυξάνει ραγδαία. Για μεγαλύτερες τιμές από μια κρίσιμη τιμή πεδίου, περιοχές της επαφής οι οποίες έχουν ένα σημαντικό πάχος επικαθίσεων μπορούν και αυτές να άγουν. Επίσης περιοχές της επαφής οι οποίες δεν έχουν επικαθίσεις αλλά χωρίζονται από διάκενο (στο οποίο έχει εισχωρήσει το υγρό ή αέριο μονωτικό μέσο που περιβάλλει την επαφή όπως αέρας, λάδι, SF₆, κλπ) όπως φαίνεται στο σχήμα 1.9-1 (d) και (e) μπορούν επίσης να καταστούν αγωγιμες μόλις το πεδίο στα σημεία αυτά γίνει ικανό να εγχείει ηλεκτρόνια (εκπομπή πεδίου). Ιδεατά αυτές οι περιοχές θα έπρεπε να γίνουν ενεργές για τιμές της έντασης ρεύματος πέρα από το ονομαστικό ρεύμα της κάθε επαφής. Τον κύριο παράγοντα αποτελεί το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια αυτά (της εκπομπής πεδίου) αποδίδουν την επιπλέον ενέργεια τους μόλις προσκρούσουν στο θετικό ηλεκτρόδιο σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (10^{-12} sec τυπικά). Τέτοια φαινόμενα αυξάνουν έντονα την θερμοκρασία των επαφών, ιονίζουν το διάκενο και αυξάνουν δραστικά την αγωγιμότητα, οδηγώντας στην ανεπιθύμητη δημιουργία τόξων.

Τα ηλεκτρόνια του φαινομένου σήραγγος μόλις μεταφερθούν στο άλλο μέρος του λυόμενου συνδέσμου αποδίδουν επιφανειακούς ρυθμούς ενεργειακών ταλαντώσεων που χαρακτηρίζονται από μη συγκεκριμένα ενεργειακά όρια (Surface plasmon polaritons). Οι ρυθμοί αυτοί με την παρουσία της επιφανειακής τραχύτητας μπορούν να μετατραπούν σε φωτόνια. Η ενέργεια των φωτονίων εξαρτάται από την ενέργεια των ενεργειακών ταλαντώσεων που τα δημιούργησαν. Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποκτηθεί από ένα ηλεκτρόνιο που διαπερνά το φράγμα δυναμικού στο φαινόμενο σήραγγας ισοδυναμεί με το φορτίο του ηλεκτρονίου επί την διαφορά δυναμικού κατά μήκος του φράγματος (δηλαδή την τοπική πτώση τάσης μεταξύ των δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων). Εάν υποθέσουμε ότι η πτώση τάσης στις μικροδομές που άγουν, έχει την ίδια τιμή με την συνολική πτώση τάσης κατά μήκος των επαφών όταν παρατηρούμε τα μη γραμμικά φαινόμενα (τοπικά 40-60mV) τότε μπορούμε να πούμε ότι κατά την διάρκεια λειτουργίας της επαφής τα παραγόμενα φωτόνια έχουν μέση ενέργεια της τάξεως των 0,06 eV η οποία αντιστοιχεί σε υπέρυθρη περιοχή του

ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αυτό συνεπάγεται φαινόμενα αυτοθέρμανσης (self heating) κατά την λειτουργία των επαφών. Πτώση τάσης μεγαλύτερη από αυτή που προαναφέρθηκε (σε περιπτώσεις λειτουργίας της επαφής εκτός των προδιαγραφών) μπορεί να συνεπάγεται εκπομπή ακτινοβολίας που επεκτείνεται μέχρι τις υπεριώδεις ακτίνες. Γενικά κάθε απόκλιση από τη γραμμικότητα θα μπορούσε να αποδοθεί στην επαύξηση του πεδίου και στην παράλληλη παρουσία των μικροδομών MIM, MOM και MGM οι οποίες μπορούν να καταστούν αγωγίμες πέραν της καταωφλικής πεδιακής τιμής, διαμορφώνοντας την ενεργό διατομή της επαφής, A_c , ανάλογα με την τοπική πεδιακή ένταση. Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζονται και φαινόμενα διαφοράς φάσεως τα οποία οφείλονται στην χωρητική φύση των μικροδομών που ενεργοποιήθηκαν.



$$U=0$$

$$0 < U < \varphi_0$$

$$\varphi_0 < U$$

Σχήμα 1.9-2: Διάγραμμα δυναμικής ενέργειας των ηλεκτρονίων για συμμετρική δομή MIM και για διαφορετικές τιμές δυναμικού. Το πάχος s δεν επιτρέπει το φαινόμενο σήραγγος για μικρή διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια.

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

(b) $0 < U < \phi_0$ Δεν έχει επιτευχθεί η αναγκαία διαφορά δυναμικού για την εκδήλωση του φαινομένου. Τυχόν ροή ρεύματος οφείλεται σε θερμοϊονική εκπομπή πάνω από το φράγμα δυναμικού.

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

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

- Συμμετρική μικροδομή MIM κάτω από μηδενική διαφορά δυναμικού (Σχήμα 1.9-2α). Το σύστημα δεν άγει λόγω του μεγάλου πάχους s (Σχήμα 1.9-2b).
- Εφαρμογή μέτριας τιμής πεδίου. Το σύστημα δεν άγει ακόμα λόγω του μεγάλου πάχους s (Σχήμα 1.9-2b))
- Εφαρμογή υψηλού ηλεκτρικού πεδίου. Η μονωτική ικανότητα (πάχος s) μεταξύ των ηλεκτροδίων έχει μειωθεί και η μικροδομή άγει (Σχήμα 1.9-2c)

Η κλασική μαθηματική προσέγγιση για μία μεμονωμένη δομή MIM εξετάζει την πυκνότητα του ρεύματος σήραγγος μέσα από ένα φράγμα δυναμικού με κλασσικά όρια χ_1, χ_2 κατά μήκος του άξονα των χ . Η πυκνότητα ρεύματος J για δύο αγωγιμες περιοχές (ηλεκτρόδια) που διαχωρίζονται από ένα λεπτό φράγμα δυναμικού περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση, η οποία ισχύει για $0 < K$:

$$J = J_0 \left[\bar{\phi} \exp(-A\sqrt{\bar{\phi}}) - (\bar{\phi} + U) \cdot \exp(-A\sqrt{\bar{\phi} + U}) \right] \quad (1.9-1)$$

$$\text{όπου} \quad J_0 = \frac{q^2}{2\pi h(ds)^2} \quad (1.9-2)$$

$$A = \frac{4 \cdot \pi \cdot ds \cdot \sqrt{2mq}}{h} \quad (1.9-3)$$

h η σταθερά του Planck και m η μάζα του ηλεκτρονίου

Οι παράγοντες οι οποίοι έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το πλάτος του φράγματος δυναμικού, $ds = \chi_2 - \chi_1$ το μέσον ύψος του φράγματος πάνω από τη στάθμη Fermi ϕ , και ο τρόπος που τα παραπάνω μεγέθη αλλάζουν με την επιβολή του ηλεκτρικού πεδίου. Για την περίπτωση της μηδενικής διαφοράς δυναμικού (σχήμα 1.9-2α) οι συνθήκες που απαγορεύουν την εκδήλωση φαινομένου σήραγγος είναι το σχετικά μεγάλο πάχος του στρώματος των επικαθίσεων (s). Το μέσο ύψος του φράγματος δυναμικού ($\phi = \phi_0$) προσδιορίζεται από το έργο εξόδου του μετάλλου και την σχετική θέση των επιπέδων Fermi. Για μια πτώση τάσης μέσου μεγέθους κατά μήκος του φράγματος (διεύθυνση χ) οπότε ισχύει

(σχήμα 1.9-2b)

$$0 < U < \phi_0 \quad (1.9-4)$$

εξακολουθούν να ισχύουν οι απαγορευτικές συνθήκες καθ' όσον το μέσο ύψος του φράγματος δυναμικού έχει ελάχιστα μειωθεί, σύμφωνα με την σχέση :

$$\phi = \phi_0 - U/2 \quad (1.9-5)$$

Εάν υπάρξει ροή φορέων, αυτή μπορεί να αποδοθεί μόνο σε θερμοϊονική εκπομπή πάνω από το φράγμα δυναμικού. Όταν η διαφορά δυναμικού έχει πλέον αυξηθεί περισσότερο και ικανοποιείται η σχέση

(σχήμα 1.9-2c):

$$U \geq \phi_0 \quad (1.9-6)$$

και το μέσο ύψος του φράγματος γίνεται

$$\bar{\phi} \leq \phi_0 / 2 \quad (1.9-7)$$

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

$$ds = s \cdot \phi_0 / U \quad (1.9-8)$$

Σύμφωνα με τα ανωτέρω όταν το φράγμα δυναμικού γίνει αρκετά λεπτό ώστε να επιτρέψει την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος η αντίσταση στην διάβαση των ηλεκτρονίων μειώνεται κατά αρκετές τάξεις μεγέθους οπότε το ρεύμα αυξάνεται δραστικά. Τελικά, όταν η πτώση τάσης κατά μήκος του φράγματος γίνει:

$$U > \phi_0 + E_F / q \quad (1.9-9)$$

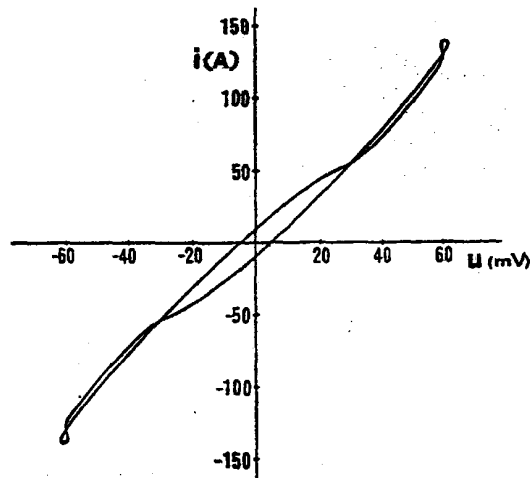
η σχέση (2.9-1) τείνει στην γνωστή σχέση των Fowler- Nordheim. Πρόσφατες πειραματικές εργασίες σε μικροδομές MOM απέδειξαν ότι η πτώση τάσης κατά μήκος του φράγματος δυναμικού προσδιορίζει κατά κύριο λόγο το χρώμα, του εκπεμπόμενου φωτός όταν η μικροδομή MOM άγει.

Ειδικά μία ηλεκτρική επαφή των πρακτικών εφαρμογών θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι παρουσιάζει περιοχές (spots) στα οποία η αγωγή ρεύματος γίνεται δια του φαινομένου σήραγγος και οι οποίες είναι τυχαία κατανεμημένες στην φαινόμενη επιφάνεια της επαφής. Οι μικροδομές MIM αναμένεται ότι δημιουργούνται από τις επικαθίσεις στην μεταλλική επιφάνεια, οι οποίες επιφέρουν φράγματα δυναμικού, των οποίων το πάχος και το ύψος ποικίλει. Η επίδραση του μη ομοιόμορφου πάχους των διηλεκτρικών στρωμάτων των επαφών στην πυκνότητα του ρεύματος δια μέσου περιοχών που άγουν με το φαινόμενο σήραγγος καθώς και άλλων που παρουσιάζουν χωρητικότητα, διερευνήθηκε θεωρητικά από τον Hurysch. Γενικά μία εις βάθος φυσική προσέγγιση απαιτεί την εξέταση της ροής θερμών ηλεκτρονίων σε μία ανομοιογενή κατανομή πεδίου. Οι μη γραμμικές χαρακτηριστικές που φαίνονται στα σχήματα 1.9-3 και 1.9-4 μπορούν να αποδοθούν στα φαινόμενα μεταφοράς φορτίου διαμέσου λεπτών μονωτικών στρώματος (πρωτεύον φαινόμενο), και παρατηρήθηκαν σε μια περίοδο 50Hz. Τα φαινόμενα των σχημάτων 1.9-5, και 1.8-1 παρατηρήθηκαν σε μία κλίμακα

χρόνου η οποία διάφέρει κατά δύο τάξεις μεγέθους και πιθανώς σχετίζονται με θερμικά φαινόμενα όπως ροή θερμών ηλεκτρονίων ή επιφανειακούς ρυθμούς ενεργειακών ταλαντώσεων που χαρακτηρίζονται από μη συγκεκριμένα ενεργειακά όρια (Surface plasmon polaritons) με αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίων που εμπίπτουν στην υπέρυθη περιοχή, χαρακτηριστικές του σχήματος 1.9.7 παρατηρήθηκαν για σταθερή ένταση ρεύματος. Με αυτό δεδομένο, η σχέση 2.2-5 (η οποία ισχύει για τιμές θερμοκρασίας 0-100 °C περίπου) γίνεται:

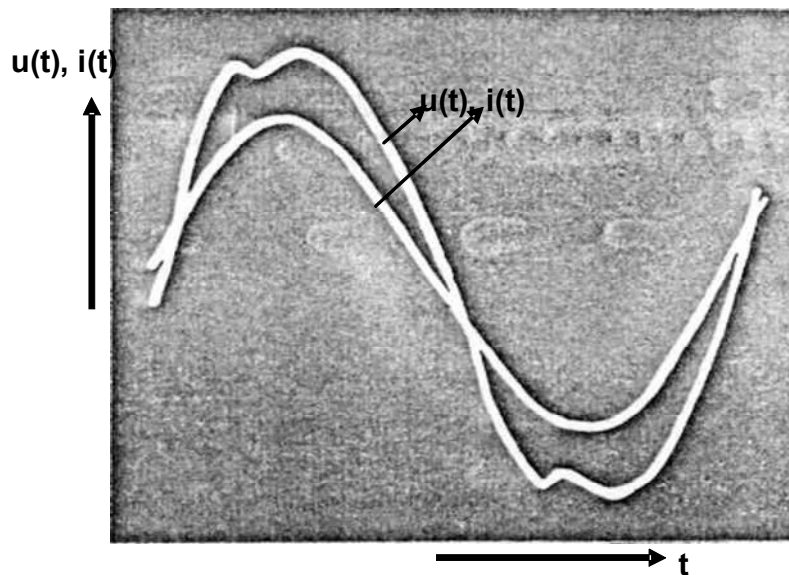
$$\Delta U(T) = \Delta U(T_0)(1 + \alpha_x(T - T_0)) \quad (1.9-10)$$

$$\text{και } \alpha_x = \frac{1}{\Delta U_0} \cdot \frac{\Delta U - \Delta U_0}{T - T_0} \quad (1.9-11)$$

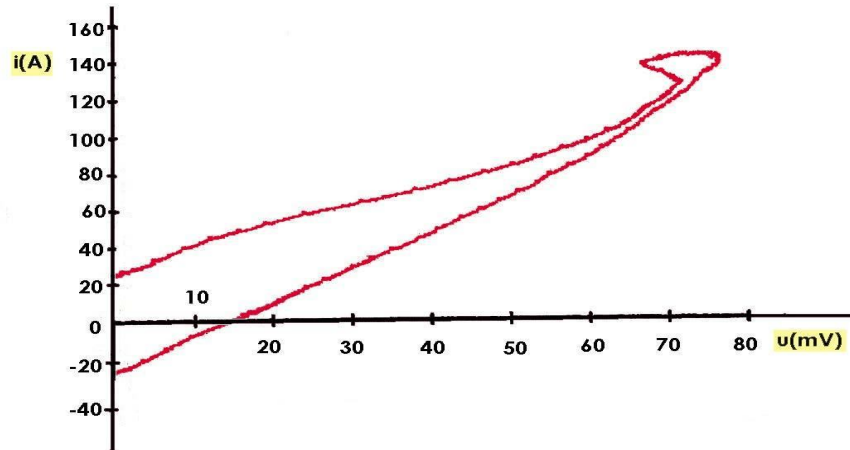


Σχήμα 1-9.3: Χαρακτηριστική ρεύματος - τάσης σε ένα αποζεύκτη 500V/100A με επαφές από χαλκό για μια περίοδο λειτουργίας. Ενεργός τιμή του ρεύματος : 100 A Δύναμη σύσφιξης επαφών : 200ρ , u: στιγμιαία τιμή της τάσης, i : στιγμιαία τιμή του ρεύματος

α



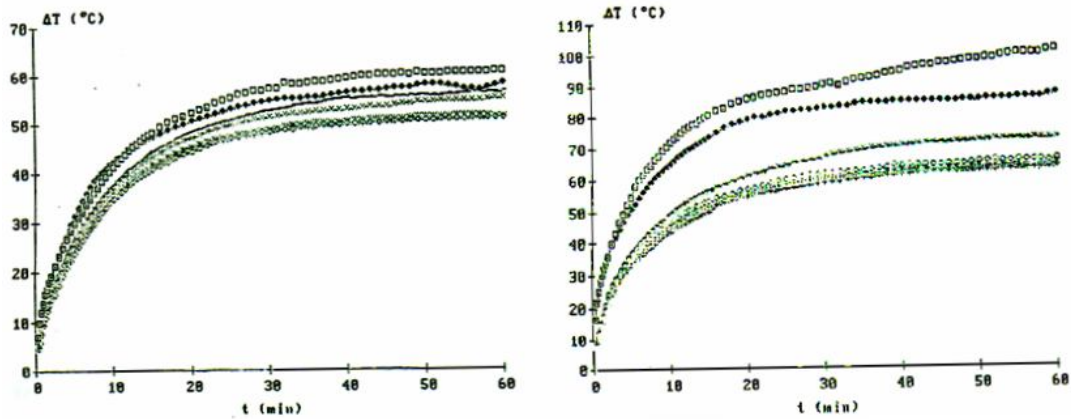
β



Σχήμα 1-9.4: α) Τυπικό παλμογράφημα τάσης ρεύματος στις επαφές ενός αποζεύκτη 500V/100A με επάργυρες επαφές από χαλκό ο οποίος λειτουργεί υπό ονομαστικό ρεύμα 100A. Κλίμακα τάσης 20mV/ div, κλίμακα ρεύματος 60 A/div, κλίμακα χρόνου 2ms/div.

β) Χαρακτηριστική ρεύματος - τάσης του παραπάνω παλμογραφήματος για μία ημιπερίοδο (50HZ) λειτουργίας.

Δύναμη σύσφιξης των επαφών : 400ρ.



Σχήμα 1.9-5: Μεταβολή της διαφοράς θερμοκρασίας, ΔT στις επαφές σε συνάρτηση με τον χρόνο λειτουργίας, για διαφορετικές δυνάμεις σύσφιξης του λυομένου συνδέσμου. Σταθερή ενεργός τιμή ρεύματος: 100A Δυνάμεις σύσφιξης: 100ρ-800ρ Αγωγοί παροχής: NYA 35 mm² θερμοκρασία περιβάλλοντος: 20°C Υλικό επαφών: α) Άργυρος, β) Χαλκός

Με την χρήση Η/Υ υπολογίσθηκε ο θερμικός συντελεστής α_χ . Οι τιμές που προέκυψαν με βάση τα πειραματικά δεδομένα που προαναφέρθηκαν ευρίσκονται μεταξύ $-0,0037/^\circ\text{C}$ και $-0,0061/^\circ\text{C}$ και έχουν ένα μέσο όρο $-0,0046/^\circ\text{C}$. Αρνητικές τιμές του θερμικού συντελεστή αποτελούν σημείο αναγνώρισης ενός ημιαγωγού γιατί σε αυτούς (σε αντίθεση με τα μέταλλα) η πυκνότητα n των ηλεκτρικών φορέων αυξάνει γρήγορα με την θερμοκρασία (για παράδειγμα ο θερμικός συντελεστής της ειδικής αντίστασης του πυριτίου είναι $-0,007/^\circ\text{C}$).

Υποθέτοντας ότι η συνολική πτώση τάσης $\Delta U(T)$ που μετρήθηκε (υπό σταθερή ένταση ρεύματος) είναι το άθροισμα της πτώσης τάσης λόγω της αντίστασης στένωσης και της πτώσης τάσης λόγω του στρώματος των επικαθίσεων συμπεραίνεται ότι οι επικαθίσεις εμφανίζουν ημιαγωγική συμπεριφορά εφόσον η πτώση τάσης λόγω της αντίστασης στένωσης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Οι τιμές που προαναφέρθηκαν και μετρήθηκαν πειραματικά για επαφές από χαλκό ευρίσκονται κοντά στις τιμές που

ισχύουν για τον πολυκρυσταλλικό άνθρακα. Τα ανωτέρω εναρμονίζονται και με τις χαρακτηριστικές του σχημάτων 1.9-5 β και 1.9-6β που αφορούν επίσης επαφές χαλκού. Αντίθετα οι χαρακτηριστικές 2.9-5α και 2.9-6α που αφορούν επαφές από άργυρο φαίνεται ότι έχουν θετικό θερμικό συντελεστή, και μικρότερη πτώση τάσης. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί στα λεπτά στρώματα σουλφιδίων που σε αντίθεση προς τα οξειδία του χαλκού δεν έχουν ιδιότητες ημιαγωγού.

1.10 Αστάθειες στις επαφές που οφείλονται στη θερμοκρασία.

Αστάθειες γενικώς μπορούν να παρουσιασθούν σε πολλές περιπτώσεις επαφών Μ-Μ και για πολλούς λόγους, θερμικές αστάθειες μπορούν να παρουσιασθούν εάν η συνθήκη θερμικής ισορροπίας (ο ρυθμός παραγωγής να είναι ίσος προς τον ρυθμό απαγωγής της θερμότητας) ισχύει διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας T . Αυτό συμβαίνει είτε όταν η συνολική ειδική αντίσταση εξαρτάται έντονα από την θερμοκρασία T , είτε όταν η ειδική σχέση μετάδοσης θερμότητας $W(T)$ μεταξύ της επαφής και του περιβάλλοντος χώρου έχει σχήμα N .

Αστάθειες αναμένεται επίσης να εμφανιστούν όταν η ειδική αντίσταση μειώνεται κάθετα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ένα τυπικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι η επαφή μέταλλο - μονωτής όπου η αυτοθέρμανση σε αυτά τα συστήματα έχει σαν συνέπεια η χαρακτηριστική $i - u$ με σχήμα S . Σε αυτή την περίπτωση οι δύο φάσεις διαχωρίζονται εγκάρσια προς την διεύθυνση της ροής του ρεύματος. Αυτό σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος προξενεί νηματοειδή κατανομή φορτίων διαμέσου του μονωτή. Έτσι η εξωτερική παράμετρος γίνεται το ηλεκτρικό πεδίο E και η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να προσδιορισθεί από την θερμοκρασία του συστήματος.

Σημαντικό παράγοντα για την περιγραφή της απόδοσης των επαφών αποτελεί ο ρυθμός παραγωγής και απαγωγής της θερμότητας στο άμεσο περιβάλλον της. Για ένα κλασικό σύστημα ισχύει η ακόλουθη σχέση που εκφράζει το ισοζύγιο ενέργειας σε μια (απόλυτη) θερμοκρασία T .

$$Q(T) = W(T) \quad (1.10-1)$$

όπου $Q(T)$ η συνάρτηση παραγωγής θερμότητας και $W(T)$ η συνάρτηση απαγωγής της θερμότητας. Για έναν αγωγό ηλεκτρικού ρεύματος η εκλυόμενη θερμότητα δίδεται από την σχέση

$$Q(T, J) = \rho(T) J^2 \quad (1.10-2)$$

όπου J είναι η ολική πυκνότητα ρεύματος και $\rho(T)$ είναι η ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού. Η μη γραμμική συμπεριφορά ρεύματος - τάσης σε μεταλλικές επαφές που διαρρέονται από υψηλές εντάσεις ρεύματος μπορούν να αποδοθούν στα φαινόμενα νηματοειδούς κατανομής ρεύματος στην ζώνη επαφής (A_C) και την δράση της διστάθειας που οφείλεται στην ισχυρή θερμότητα Joule. Θερμικές αστάθειες θα μπορούσαν να εμφανισθούν στις επαφές εάν η συνθήκη που εκφράζει το ισοζύγιο της θερμικής ισχύος

$$\rho(T) J^2 = W(T) \quad (1.10-3)$$

ισχύει για δύο ή περισσότερες τιμές της θερμοκρασίας T .

Αυτό θα μπορούσε να συμβεί είτε όταν η συνολική ειδική αντίσταση $\rho(T)$ εξαρτάται έντονα από την θερμοκρασία T (υπάρχει μία μικρή περιοχή όπου το $\rho(T)$ αυξάνεται σημαντικά για μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας, βλέπε σχήμα 1.10-1α), είτε όταν η συνάρτηση απαγωγής θερμότητας $W(T)$ από την επαφή προς τον περιβάλλοντα χώρο έχει σχήμα N όπως φαίνεται στο σχήμα 1.10-1b. Η διστάθεια εμφανίζεται στην περίπτωση κατά την οποία η πυκνότητα ρεύματος J_0 μεταβάλλεται μεταξύ των ορίων J_L και J_H και οι καμπύλες $Q(T)$ και $W(T)$ έχουν τρία σημεία τομής (Σχήμα 1.10-1). Οι οριακές τιμές πυκνότητας ρεύματος J_L και J_H προσδιορίζονται γραφικά εάν θέσουμε την συνθήκη, ώστε οι δύο προαναφερθείσες καμπύλες $Q(T)$ και $W(T)$ να εφάπτονται σε ένα μοναδικό σημείο. Αναλυτικά προκύπτουν ως λύσεις του συστήματος των εξισώσεων:

$$Q(T, J) = W(T) \quad (1.10-4)$$

$$\frac{\partial Q(T, J)}{\partial T} = \frac{\partial W(T)}{\partial T} \quad (1.10-5)$$

Στα υλικά για τα οποία η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται γρήγορα όταν αυξάνει η θερμοκρασία, είναι πιθανόν να υπάρχει μία τιμή πυκνότητας ρεύματος πέραν της οποίας η θερμότητα δεν προλαβαίνει να απαχθεί στο περιβάλλον. Εφόσον δε οι ρυθμοί παραγωγής και απαγωγής της θερμότητας δεν μπορούν να ταυτισθούν τότε δεν μπορεί να επιτευχθεί θερμική ισορροπία. Τότε το σύστημα οδηγείται σε παγίδευση της θερμότητας Joule με συνέπεια την τήξη των επαφών. Η σταθερότητα των καταστάσεων που αντιστοιχούν στα σημεία τομής των συναρτήσεων $Q(T, J)$ και $W(T)$ μπορούν να διερευνηθούν συστηματικά χρησιμοποιώντας την (πρώτη) μερική παράγωγο της θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο. Αυτή παρουσιάζει την αύξηση της θερμοκρασίας στο άμεσο περιβάλλον της επαφής.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = Q(T, J) - W(T) \quad (1.10-6)$$

όπου C είναι η ειδική θερμότητα για το υλικό του περιβάλλοντος της επαφής.

Εάν θεωρήσουμε μικρές γραμμικές διακυμάνσεις για την $\partial T / \partial t$ από τη σχέση (1.10-6) προκύπτει ότι το κριτήριο για την ευστάθεια είναι:

$$\frac{\partial W}{\partial T} > \frac{\partial Q}{\partial T} \quad (1.10-7)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, καταστάσεις που αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες T_1 και T_2 του σχήματος 1.10-1 είναι σταθερές (καταστάσεις ισορροπίας), ενώ καταστάσεις που αντιστοιχούν στην θερμοκρασία T_2 είναι ασταθείς.

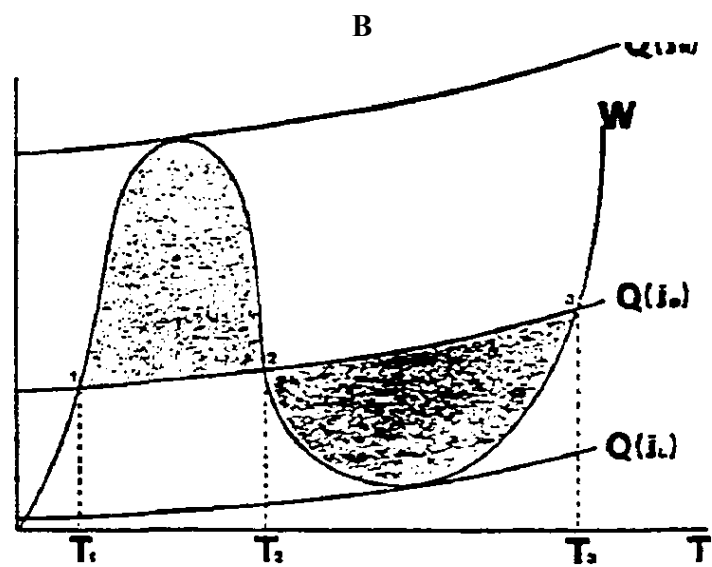
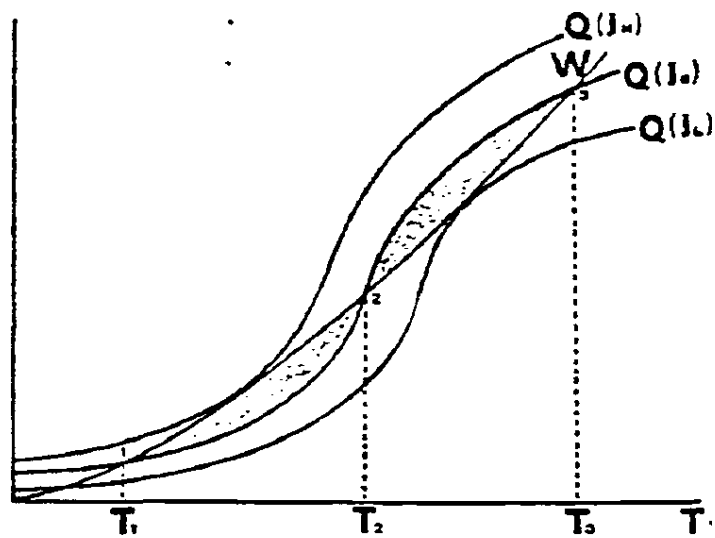
Παρατηρούμε ότι με ικανοποιητική προσέγγιση (σχήμα 1.9-5) ισχύει ότι:

$$\Delta T = c_1 [1 - \exp(-c_2 t)] \quad (1.10-8)$$

όπου c_1 και c_2 σταθερές. Λαμβάνοντας την πρώτη παράγωγο της προηγούμενης σχέσης έχουμε:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = c_1 c_2 \exp(-c_2 t) \quad (1.10-9)$$

Από την πρακτική σκοπιά, τα ανωτέρω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι θα παρουσιαστεί το φαινόμενο υστέρησης μεταξύ των ημών πυκνότητας ρεύματος J_L και J_H



Σχήμα 1.10-1: Γραφική λύση της σχέσης $Q(T) = W(T)$ η οποία δείχνει διστάθεια όταν η πυκνότητα του ρεύματος J_0 , έχει τιμές από J_L έως J_H ($J_L < J_H$)
 α) Συνάρτηση ειδικής αντίστασης $\rho(T)$ που εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία T .
 β) Συνάρτηση απαγωγής θερμότητας $W(T)$ σε σχήμα N

1.11 Μηχανισμός γήρανσης των στατικών ηλεκτρικών επαφών

Σε εξαιρετικά δυσμενείς συνθήκες ρύπανσης του περιβάλλοντος που λειτουργούν οι ηλεκτρικές επαφές (ύπαρξη H_2S , καθαλατώσεις κλπ.), οι επαφές αποκτούν πάχος επικαθίσεων που δεν επιτρέπει την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος και φυσικά δεν υπάρχουν μικροδομές MM που να άγουν ωμικά, καθώς όλη η φαινόμενη επιφάνεια Αο έχει σκεπαστεί από το φιλμ των επικαθίσεων. Εδώ πρέπει να γίνει σαφές ότι διακοπή της αγωγής του ηλεκτρικού ρεύματος σε μια ηλεκτρική επαφή θα σήμαινε ότι μεταξύ των δυο μερών της θα αναπτυσσόταν τάση ίση με αυτή της πηγής. Αυτό είναι αδύνατο, διότι ένα φιλμ πάχους έστω μερικών εκατοντάδων Α μπορεί να μονώσει ηλεκτρικά τις τάσεις που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (230/400 V, 20 κV), όση και αν είναι η διηλεκτρική του αντοχή. Εξαιρέση στα παραπάνω αποτελούν επαφές σε ηλεκτρικά κυκλώματα συνεχούς τάσης (12- 24 V) που έχουν εφαρμογές σε ειδικές περιπτώσεις (πχ. Χειρισμός ηλεκτρονόμων, σκάφη, αυτοκίνητα).

Κατά την εκπομπή πεδίου, ηλεκτρόνια εκπέμπονται κατ' ευθείαν από το επίπεδο Fermi της καθόδου στη ζώνη αγωγιμότητας του διηλεκτρικού στρώματος. Αυτό γίνεται αν το επιτρέπει το ύψος του φράγματος δυναμικού. Τα ηλεκτρόνια αυτά επιταχύνονται στη ζώνη αγωγιμότητας του λεπτού διηλεκτρικού στρώματος και προσκρούουν στο ηλεκτρόδιο ανόδου, όπου αποδίδουν ενέργεια. Στην περίπτωση των επαφών μέταλλο-ημιαγωγός και ειδικά για τα μέταλλα ηλεκτρικών επαφών των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών όπως ο χαλκός (Cu), ο ψευδάργυρος (Zn), το κάδμιο (Cd) και το νικέλιο (Ni) το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού δεν ξεπερνά τα 0,8 eV . Οι τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία γενικά μεταβάλλονται από 0,4 eV έως 0,6 eV αλλά μπορούν να είναι μικρότερες εάν εφαρμοστεί υψηλό πεδίο. Η μέγιστη απόλυτη τιμή της πτώσης τάσης στις επαφές που μετρήθηκαν ήταν της τάξης των 600mV. Από τις μετρήσεις που έχουν γίνει φαίνεται ότι η απόλυτη τιμή της πτώσης τάσης δεν ήταν ποτέ μικρότερη από 400 mV. Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτή η απόλυτη τιμή αποτελεί ένα κατώτερο όριο, πέρα από το οποίο εμφανίζεται εκπομπή πεδίου. Αυτό συμβαίνει γιατί η τιμή της πτώσης τάσης είναι κατά προσέγγιση η ίδια με το ύψος του φράγματος δυναμικού εξαιτίας της ύπαρξης των επικαθίσεων στην επαφή. Εάν

υποθεθεί ότι το πάχος του επιφανειακού στρώματος είναι 100Å, το πεδίο με βάση τη σχέση $E=U/d$, για μια μέγιστη τιμή της πτώσης τάσης (0,6 V), φτάνει τα 0,6 MV/cm. Αυτή η τιμή μπορεί να είναι ακόμη μεγαλύτερη (μέχρι και μία τάξη μεγέθους) επειδή το πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων δεν είναι ομογενές και εξαρτάται από την επιφάνεια της επαφής, η οποία το ενισχύει τοπικά λόγω των επιφανειακών ανωμαλιών. Αυτή η διαδικασία είναι υπεύθυνη για την έναρξη τόξων.

Ο ιονισμός με κρούσεις σε στερεούς μονωτές κατά την βιβλιογραφία λαμβάνει χώρα σε τιμές πεδίου που συμπίπτουν με αυτές που υπολογίστηκαν παραπάνω. Ο ιονισμός που οφείλεται στο πεδίο εξάγει ηλεκτρόνια σθένους από το υλικό των επικαθίσεων. Αυτά τα ηλεκτρόνια εγχέονται κατ' ευθείαν στο επίπεδο Fermi της ανόδου. Έτσι δημιουργείται σημαντικός αριθμός θετικών ιόντων στο επιφανειακό στρώμα. Αν θεωρηθεί ότι το επιφανειακό στρώμα συμπεριφέρεται σαν στερεό ηλεκτρομονωτικό, η θεωρία που αφορά αυτά τα μονωτικά υλικά κατά την καταπόνηση τους από υψηλά πεδία μπορεί να εφαρμοστεί και εδώ. Η ανάπτυξη και η σβέση τόξων στα σημεία επαφής ή η έναρξη και τερματισμός ιονισμού με κρούσεις στο επιφανειακό στρώμα εξαρτάται από το πάχος και το είδος του υλικού των επικαθίσεων. Και στις δύο περιπτώσεις η μείωση της τιμής του εφαρμοζόμενου δυναμικού, εξαιτίας της μείωσης της αντίστασης διάβασης κατά τη διάρκεια των παραπάνω φαινομένων έχει ως αποτέλεσμα τη σβέση των τόξων τοπικά, ή τον τερματισμό του ιονισμού με κρούσεις, αντίστοιχα. Η χρονική διάρκεια μεταξύ της ανάπτυξης και της σβέσης είναι της τάξης των 300μs. Από όλα αυτά προκύπτει η τραπεζοειδής μορφή της πτώσης τάσης. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα η πτώση τάσης μειώνεται στο μηδέν, ως αποτέλεσμα της μειούμενης πυκνότητας ρεύματος μέσα από τις αγωγίμες μικροδομές. Στις μετρήσεις μπορεί επίσης να παρατηρηθεί μία μικρή και σταθερή μείωση στην κατωφλική τιμή της τάσης έναυσης των τόξων. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην τοπική αύξηση στη θερμοκρασία η οποία μειώνει την κατωφλική τιμή και ευνοεί την εμφάνιση και των φαινομένων. Επισημαίνεται ότι στα σχήματα εμφανίζεται αρνητική διαφορική αντίσταση τύπου S (S-NDR).

Η παρατηρούμενη διαφορά φάσης μεταξύ του ρεύματος και της τάσης μπορεί να αποδοθεί στη χωρητική φύση των μικροδομών αφού φαίνεται από τις μετρήσεις ότι το ρεύμα προηγείται αισθητά. Γενικά οι πειραματικές μετρήσεις της χωρητικότητας των

ηλεκτρικών επαφών δίνουν μεγαλύτερες τιμές από αυτές που υπολογίζονται με βάση το μέσο πάχος του διηλεκτρικού στρώματος Αυτό συμβαίνει επειδή το πάχος του επιφανειακού στρώματος είναι ανομοιογενές, όπως και η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στα δύο ηλεκτρόδια (σταθερό και κινητό μέρος της επαφής). Εξ' αιτίας της κατανομής του πεδίου στα ηλεκτρόδια, η συνολική εν σειρά χωρητικότητα είναι:

$$\frac{1}{C} = \frac{s}{E_1} + \frac{2,3\lambda_m}{E_m} \quad (\text{Y.2-2})$$

όπου E_1 και E_m είναι οι διηλεκτρικές σταθερές του μονωτή και του μετάλλου των ηλεκτροδίων αντίστοιχα και λ_m είναι το χαρακτηριστικό μήκος διείσδυσης. Και εδώ οι πειραματικοί υπολογισμοί της χωρητικότητας της επαφής δίνουν υψηλότερες τιμές συγκριτικά με την προηγούμενη σχέση.

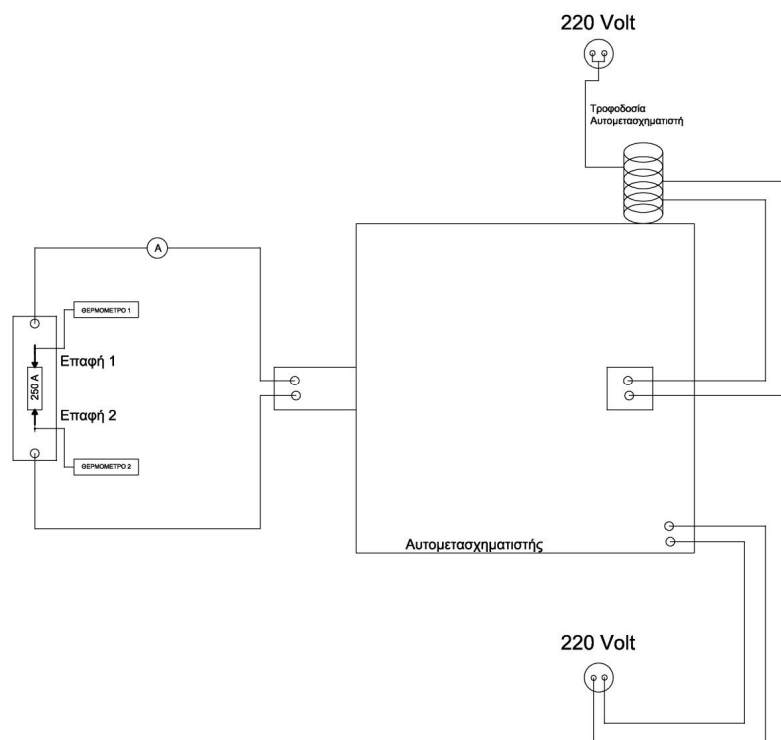
Συνοψίζοντας τα παραπάνω, μπορεί να πει κανείς ότι στην περίπτωση ηλεκτρικών επαφών που λειτουργούν για σημαντικό διάστημα στις ηλεκτροτεχνικές κατασκευές, παρατηρούνται φαινόμενα τοπικών εκκενώσεων (ανάπτυξη τόξων μεταξύ μη-ιδανικών ηλεκτρικών επαφών). Αυτά είναι στενά συνδεδεμένα με τη μεταβολή της ενεργής επιφάνειας της επαφής. Μη γραμμικά φαινόμενα ενεργοποιούνται όταν το επιφανειακό πεδίο έχει αυξηθεί αρκετά ώστε να είναι εφικτή η αγωγή διαμέσου των μικροδομών μέταλλο - μονωτής - μέταλλο (MIM), μέταλλο - οξείδιο του μετάλλου - μέταλλο (MOM) και μέταλλο - ημιαγωγός - μέταλλο (MSM), είτε μέσω εκπομπής πεδίου, είτε από διαδικασίες ιονισμού οφειλόμενες στο πεδίο.

2. Σκοπός της εργασίας

Οι στατικές ηλεκτρικές επαφές όταν διαρρέονται από το ονομαστικό τους ρεύμα, ειδικά σε ρυπασμένο περιβάλλον, μπορεί να υπερθερμανθούν σε βαθμό που αλλοιωθούν τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά (παραμορφώνεται η επιφάνεια επαφών τους, συγκολλούνται μεταξύ τους και μειώνεται η ικανότητα τους σε ρεύμα). Ειδικά σε κυκλώματα που τροφοδοτούν επείγοντα φορτία (ΜΕΘ, νοσοκομεία κτλ) τέτοια φαινόμενα δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν λόγω μη δυνατότητας συντήρησης. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στις στατικές ηλεκτρικές επαφές, όταν αυτές καταπονούνται με ρεύμα βιομηχανικής συχνότητας, με έμφαση στα θερμικά φαινόμενα. Ειδικότερα εξετάζεται η αύξηση της θερμοκρασίας των στατικών ηλεκτρικών επαφών κατά την καταπόνηση τους με το ονομαστικό τους ρεύμα ώστε να διαπιστωθεί κάτω από ποιες συνθήκες η αύξηση αυτή μπορεί να λάβει απαγορευτικές τιμές, που μπορούν να οδηγήσουν στην καταστροφή τους. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της αύξησης της θερμοκρασίας μαχαιρωτών ασφαλειών χαμηλής τάσης τα αποτελέσματα των οποίων, η ερμηνεία τους και η εξαγωγή σχετικών συμπερασμάτων εξετάζονται στα παρακάτω κεφάλαια.

3.Η διάταξη και η διαδικασία των μετρήσεων

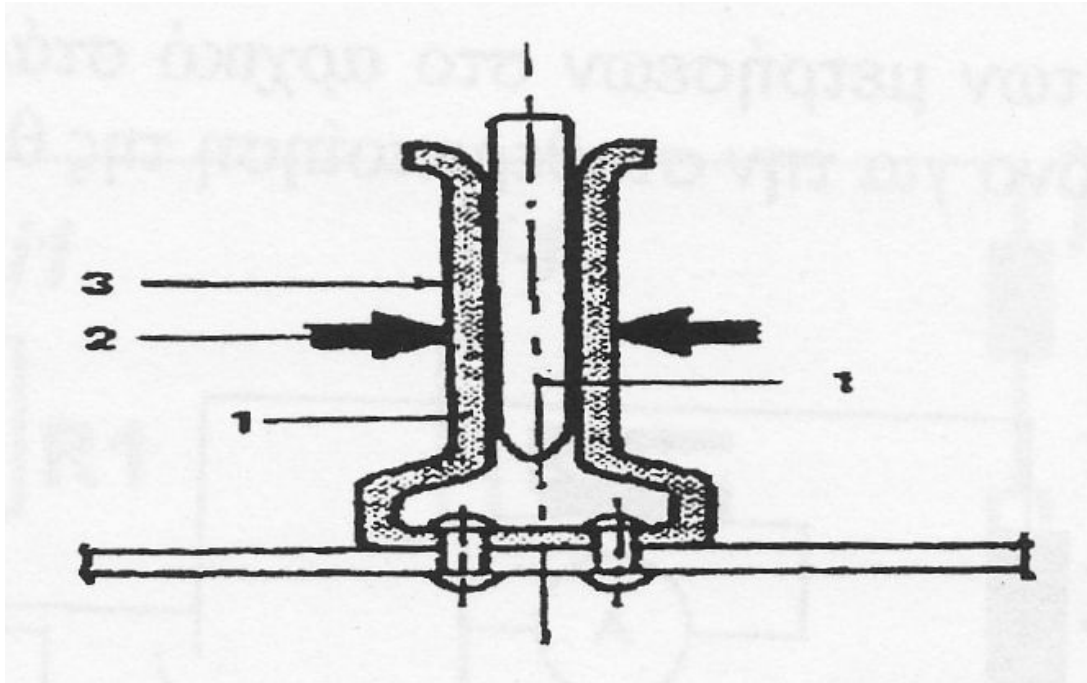
Η πειραματική διάταξη αποτελείται από μετασχηματιστή έντασης ο οποίος ελέγχει μέσω αυτομετασχηματιστή ώστε στην έξοδο του να βγάζει την επιθυμητή ένταση ρεύματος. Ο μετασχηματιστής έντασης τροφοδοτούσε κύκλωμα το οποίο αποτελούνταν από μαχαιρωτή ασφάλεια τοποθετημένη επί αντίστοιχης βάσης (σχήμα 3.1) και η διάταξη συνδεόταν με τους ακροδέκτες του μετασχηματιστή εντάσεως μέσω μονοπολικών καλωδίων χαμηλής τάσης με αγωγό χαλκού διατομής 240mm². Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 3-1: Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης μετρήσεων θερμοκρασίας στις επαφές 1,2

Ελήφθηκαν μετρήσεις χρησιμοποιώντας 3 διαφορετικά δοκίμια (μαχαιρωτές ασφάλειες τοποθετημένες επί αντίστοιχων βάσεων). Το πρώτο περιελάμβανε καινούρια μαχαιρωτή ασφάλεια 250 A τοποθετημένη σε βάση ασφαλείας ίδιας ονομαστικής έντασης. Το δεύτερο, μαχαιρωτή ασφάλεια 315 A με βάση ασφαλείας ονομαστικού ρεύματος 400 A χρησιμοποιημένη στο δίκτυο της δημόσιας επιχείρησης ηλεκτρισμού και το τρίτο μαχαιρωτή ασφάλεια 250 A με βάση ασφαλείας ίδιας έντασης ονομαστικού ρεύματος χρησιμοποιημένη επίσης στο δίκτυο της δημόσιας επιχείρησης ηλεκτρισμού. Η ένταση του ρεύματος του κυκλώματος μέτρησης μετρούνταν μέσω αμπεροτσιμπίδας και ρυθμιζόταν μέσω του αυτομετασχηματιστή ώστε να ισούται με την ονομαστική τιμή της ασφάλειας που χρησιμοποιούνταν κάθε φορά. Η μέτρηση της θερμοκρασίας των επαφών μέσω θερμοζεύγους μάρκας Extech όπως φαίνεται στο ακόλουθο σκαρίφημα. (σχήμα 3.2)

Στο σχήμα 3.2 φαίνεται ο τύπος των επαφών και τα σημεία πάνω στα οποία τοποθετήθηκαν τα αισθητήρια της θερμοκρασίας. Μετά την τροφοδότηση του κυκλώματος ελήφθησαν μετρήσεις της θερμοκρασίας χώρου και της θερμοκρασίας των δύο επαφών θ_1 , θ_2 σχήμα 3.1 ανά τακτά χρονικά διαστήματα έως ότου η θερμοκρασία των επαφών σταθεροποιηθεί.



Σχήμα 3-2: Ο τύπος των επαφών και οι θέσεις των αισθητηρίων θερμοκρασίας .

- 1) Τα δύο μέρη της επαφής,
- 2) Η δύναμη σύσφιξης
- 3) Θέση του αισθητηρίου

Στα σχήματα 3-3, 3-4 και 3-5 δίνονται φωτογραφίες των δοκιμών που μελετήθηκαν .



Σχήμα 3-5: Χρησιμοποιημένη μαχαιρωτή ασφάλεια χαμηλής τάσης 250 Ampere

4 .ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Αρχικά, παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμοκρασίας των επαφών στις επαφές 1 και 2 (σχήμα 3.1) που έγιναν στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μετρήσεων της Σχολής Η.Μ.Μ.Υ. του Ε.Μ.Π.. Στην συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα της θερμοκρασίας των επαφών σε συνάρτηση με το χρόνο από την αρχή της δοκιμής.

4.1 Μέτρηση αύξησης θερμοκρασίας επαφών του 1^{ου} δοκιμίου

Στον παρακάτω πίνακας 3.1 απεικονίζονται οι μετρήσεις της θερμοκρασίας των επαφών της καινούριας μαχαιρωτής ασφάλειας και της αντίστοιχης βάσης της για ονομαστικό ρεύμα 250 A.

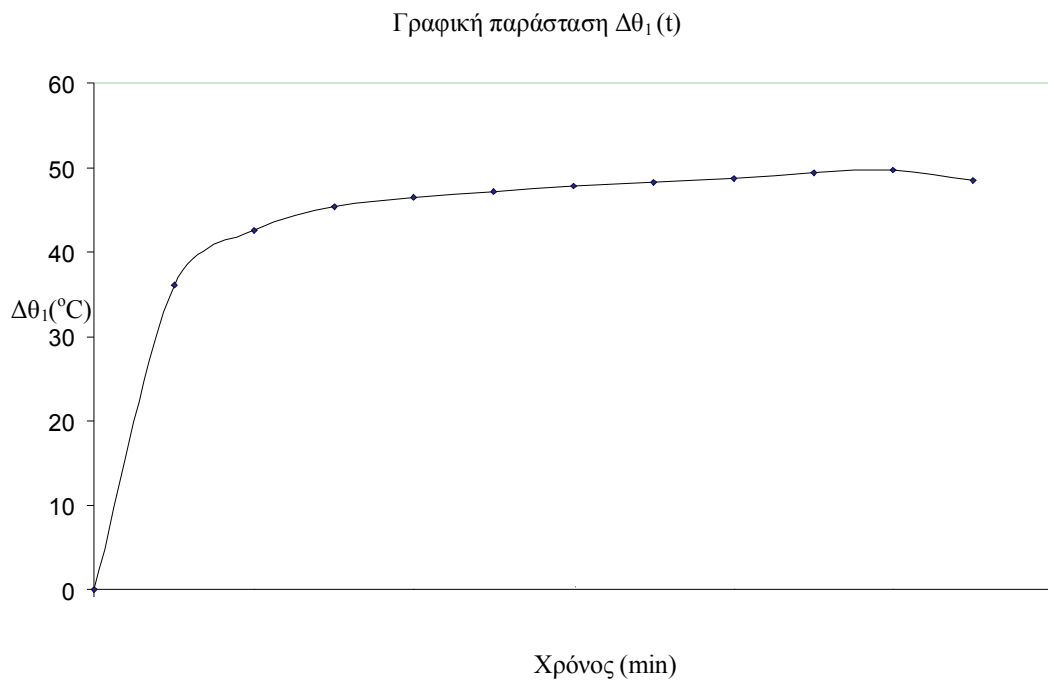
Χρόνος (min)	Θερμοκρασία χώρου μετρήσεων(⁰ C)	Θερμοκρασία θ ₁ 1ης επαφής(⁰ C)	Θερμοκρασία θ ₂ 2ης επαφής(⁰ C)	Δθ ₁ (⁰ C)	Δθ ₂ (⁰ C)
0	23,9	23,9	23,9	0	0
1	23,7	59,8	57,8	36,1	34,1
2	23,6	66,2	65,1	42,6	41,5
3	23,5	68,9	68,7	45,4	45,2
4	23,5	70	70,2	46,5	46,7
5	23,3	70,5	69,8	47,2	46,5
6	23,3	71,1	70,3	47,8	47
7	23,3	71,6	71,2	48,3	47,9

8	23,2	71,9	72,5	48,7	49,3
9	23,2	72,6	73	49,4	49,8
10	23,1	72,8	73,3	49,7	50,2
11	23,1	71,6	72,6	48,5	49,5

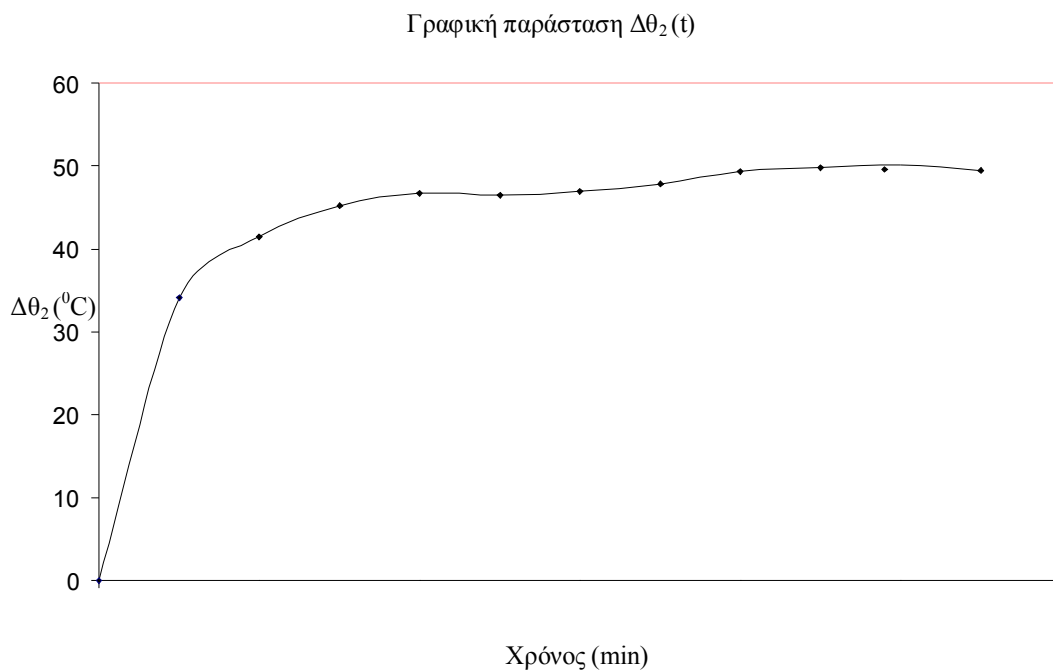
Πίνακας 3.1 : Μετρήσεις θερμοκρασίας στις επαφές της καινούριας μαχαιρωτής ασφάλειας 250 A

Η πτώση τάσης στην πρώτη επαφή είναι 4 mV ενώ στη δεύτερη είναι 3 mV. Οι τιμές των $\Delta\theta_1$ και $\Delta\theta_2$ προκύπτουν από την αφαίρεση της τιμής της θερμοκρασίας χώρου(εργαστηρίου συγκεκριμένα) από τις τιμές των θερμοκρασιών επαφής θ_1 και θ_2 αντίστοιχα.

Στη συνέχεια φαίνονται στο σχήμα 4.1-1 οι θερμοκρασίες $\Delta\theta_1$ σε σχέση με το χρόνο, $\Delta\theta_2$ σε σχέση με το χρόνο για το 1^ο δοκίμιο



Σχήμα 4.1-1: Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας $\Delta\theta_1$ σε συνάρτηση με το χρόνο



Σχήμα 4.1-2 :Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας $\Delta\theta_2$ σε συνάρτηση με το χρόνο

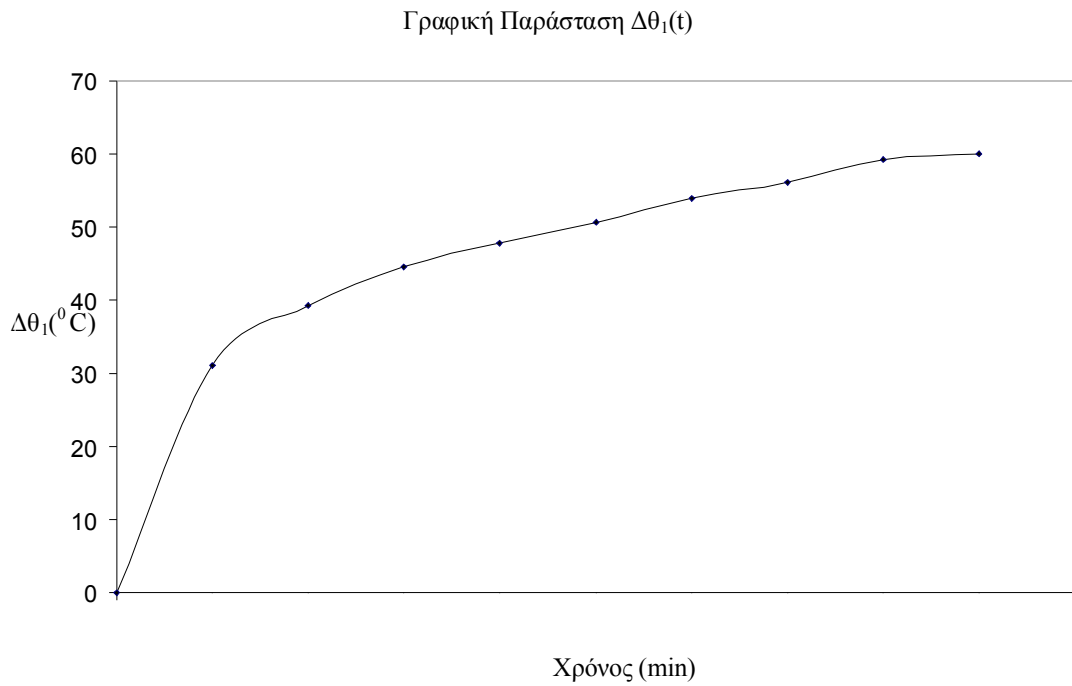
4.2 Μέτρηση αύξησης θερμοκρασίας επαφών του 2^{ου} δοκιμίου

Ο παρακάτω πίνακας απεικονίζει τις μετρήσεις θερμοκρασίας των επαφών της μαχαιρωτής ασφάλειας ονομαστικού ρεύματος 315 A και της αντίστοιχης βάσης της για ονομαστικό ρεύμα στα 400 A. Το δοκίμιο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί σε δίκτυο της δημόσιας επιχείρησης ηλεκτρισμού επί σειρά ετών.

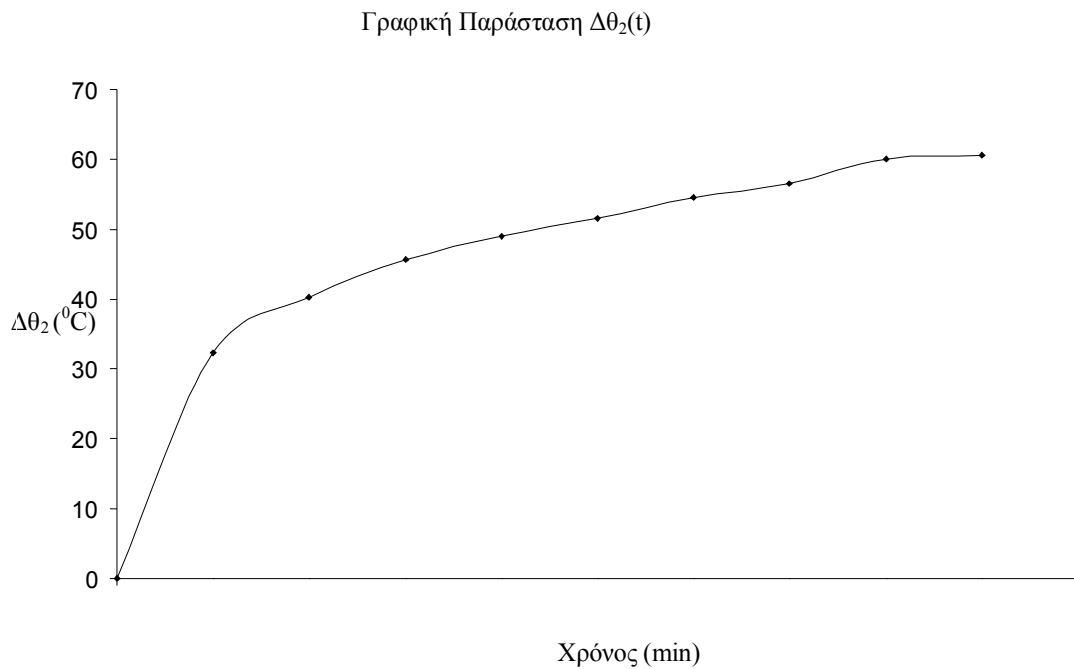
Χρόνος (min)	Θερμοκρασία χώρου μετρήσεων (°C)	Θερμοκρασία θ ₁ 1ης επαφής (°C)	Θερμοκρασία θ ₂ 2ης επαφής (°C)	Δθ ₁	Δθ ₂
0	18,7	18,7	18,7	0	0
1	18,4	49,5	50,7	31,1	32,3
2	18,7	58	59	39,3	40,3
3	18,7	63,3	64,4	44,6	45,7
4	18,7	66,5	67,7	47,8	49
5	18,8	69,5	70,3	50,7	51,5
6	19,1	73	73,6	53,9	54,5
7	18,8	74,9	75,3	56,1	56,5
8	18,7	78	78,7	59,3	60
9	18,7	78,7	79,3	60	60,6
10	18,7	78,9	79,6	60,2	60,9
11	18,7	79,1	79,7	60,4	61

Πίνακας 3.2 : Μετρήσεις θερμοκρασίας στις επαφές της χρησιμοποιημένης μαχαιρωτής ασφάλειας 315 A

Παρακάτω φαίνονται στο διάγραμμα του σημείου επαφής οι θερμοκρασίες Δθ₁ σε σχέση με το χρόνο, Δθ₂ σε σχέση με το χρόνο για το 2^ο δοκίμιο



Σχήμα 4.2-1 : Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας $\Delta\theta_1$ σε συνάρτηση με το χρόνο



Σχήμα 4.2-2 : Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας $\Delta\theta_2$ σε συνάρτηση με το χρόνο

4.3 Μέτρηση αύξησης θερμοκρασίας επαφών του 3^{ου}

δοκιμίου

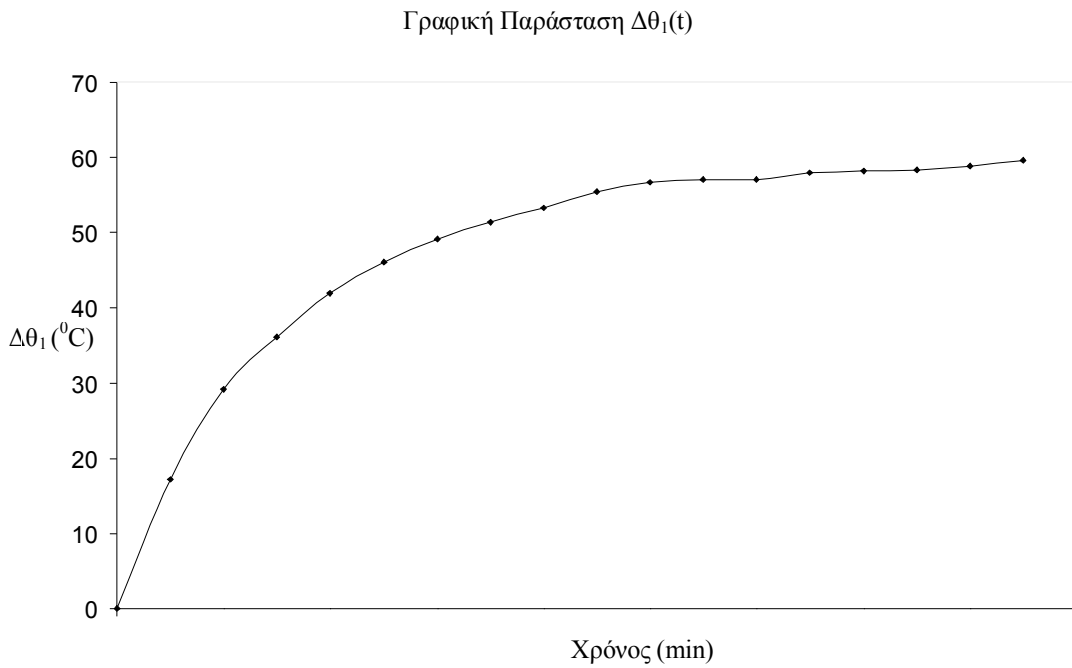
Ο παρακάτω πίνακας απεικονίζει τις μετρήσεις θερμοκρασίας των επαφών μαχαιρωτής ασφάλειας και της αντίστοιχης βάσης της για ονομαστικό ρεύμα στα 250 Α. Το δοκίμιο έχει επίσης χρησιμοποιηθεί σε δίκτυο της δημόσιας επιχείρησης ηλεκτρισμού.

Χρόνος (min)	Θερμοκρασία χώρου μετρήσεων (°C)	Θερμοκρασία θ ₁ 1ης επαφής (°C)	Θερμοκρασία θ ₂ 2ης επαφής (°C)	Δθ ₁ (°C)	Δθ ₂ (°C)
0	20,7	20,7	20,7	0	0
1	20,9	38,1	43,1	17,2	22,2
2	20,8	50	53,4	29,2	32,6
3	21,3	57,4	59,8	36,1	38,5
4	20,7	62,7	64,7	42	44
5	21	67,1	68	46,1	47
6	21	70,2	71	49,2	50
7	21	72,4	73,2	51,4	52,2
8	21	74,3	75,2	53,3	54,2
9	21	76,5	77,5	55,5	56,5
10	21	77,7	78,8	56,7	57,8
11	21	78,1	79,4	57,1	58,4
12	21,3	78,4	79,5	57,1	58,2
13	21,1	79,1	80,3	58	59,2
14	21	79,3	81,1	58,3	60,1
15	21,2	79,6	82,3	58,4	61,1
16	21,3	80,2	83	58,9	61,7

17	21	80,6	83,7	59,6	62,7
----	----	------	------	------	------

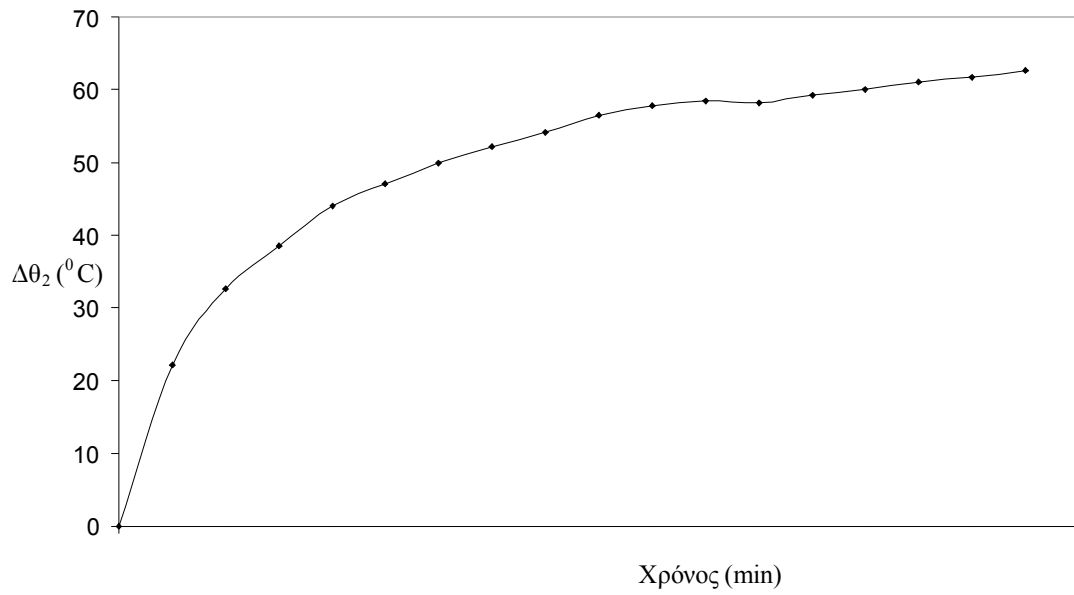
Πίνακας 3.3 : Μετρήσεις θερμοκρασίας στις επαφές της χρησιμοποιημένης μαχαιρωτής ασφάλειας 250 A

Παρακάτω φαίνονται στα σχήματα 4.3-1 και 4.3-2 οι θερμοκρασίες $\Delta\theta_1$ σε σχέση με το χρόνο, $\Delta\theta_2$ σε σχέση με το χρόνο αντίστοιχα για το 3^ο δοκίμιο



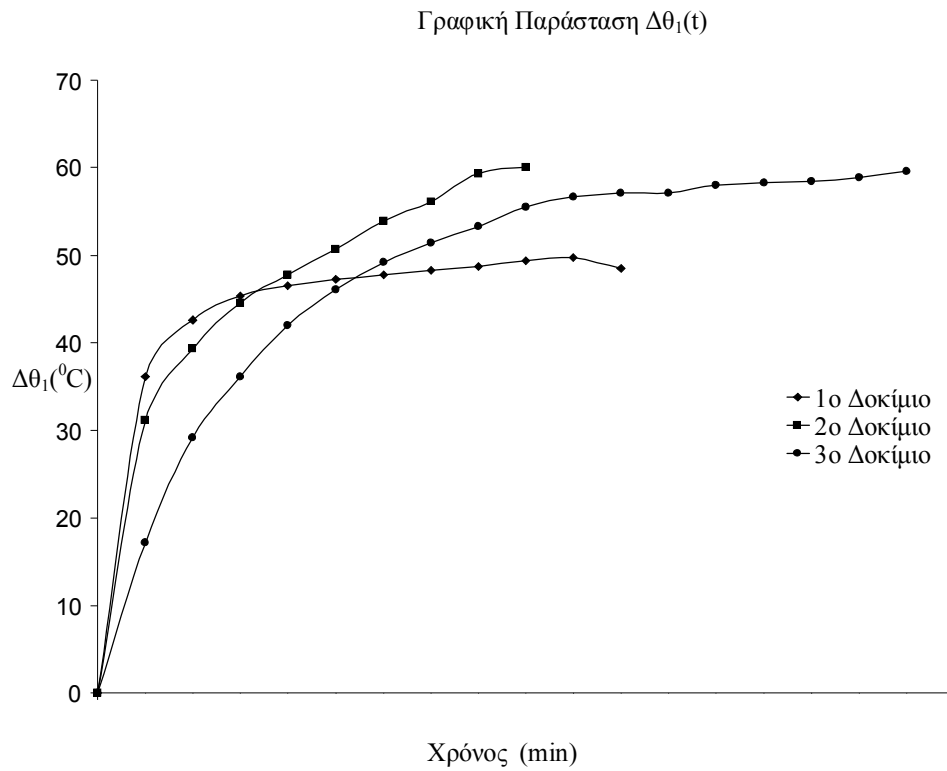
Σχήμα 4.3-1 : Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας $\Delta\theta_1$ σε συνάρτηση με το χρόνο

Γραφική Παράσταση $\Delta\theta_2(t)$

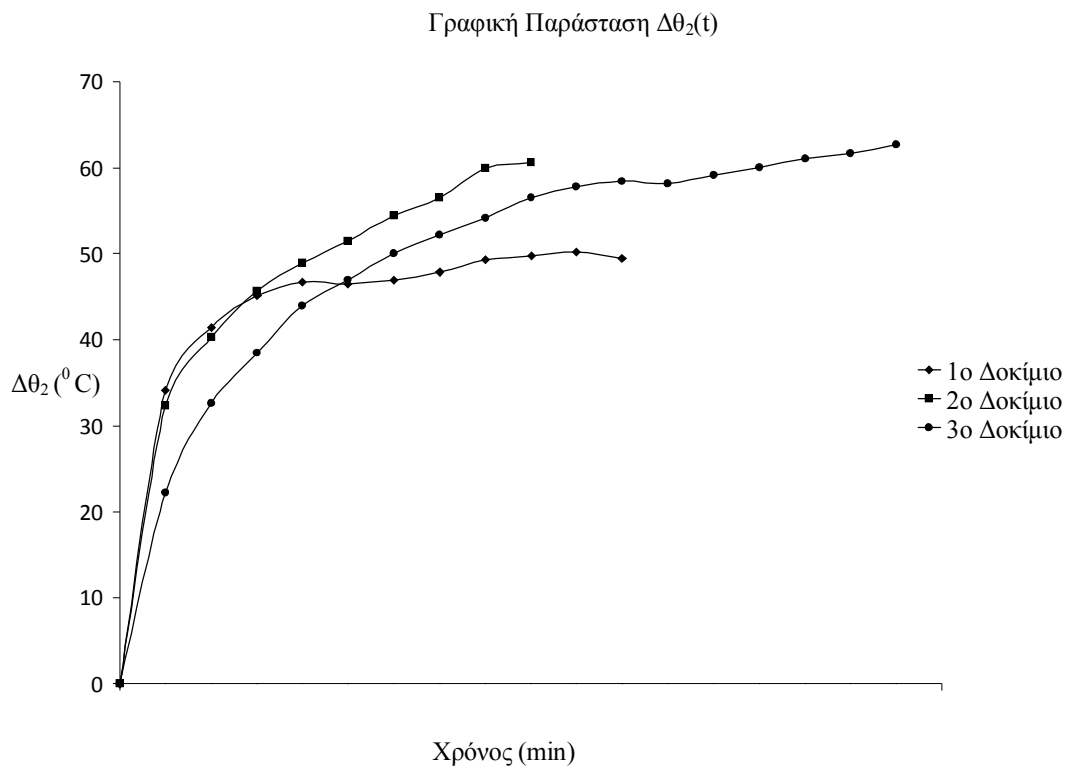


Σχήμα 4.3-2 : Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας $\Delta\theta_2$ σε συνάρτηση με το χρόνο

4.4 Συγκριτική αύξηση της θερμοκρασίας της θερμοκρασίας των τριων δοκιμιών



Σχήμα 4.4-1 : Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας $\Delta\theta_1$ σε συνάρτηση με το χρόνο



Σχήμα 4.4-2 : Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας $\Delta\theta_2$ σε συνάρτηση με το χρόνο

5. Σχόλια επί των μετρήσεων - Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι ακόμα και σε καινούριο εξοπλισμό όταν φορτίζεται για παρατεταμένο χρονικό διάστημα σε ονομαστικό ρεύμα παρουσιάζεται αξιοσημείωτη αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta_{1\max}=48,5$ ° C, $\Delta\theta_{2\max}=49,5$ ° C παράγραφος 4.1 χωρίς ωστόσο να υπερβεί το όριο ασφαλείας που είναι 55° C. Στον γηρασμένο και καταπονημένο εξοπλισμό που βρίσκεται εν λειτουργία για μεγάλο χρονικό διάστημα (παραγραφοι 4.2 , 4.3) παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας ασφαλειών πέραν των ορίων των δοκιμών. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οδηγήσει στην παραμόρφωση των επιφανειών της επαφής και στη συγκόλλησή τους και επομένως σε καταστροφή της επαφής. Ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις όπου η συντήρηση είναι αδύνατη π.χ.(επείγοντα φορτία όπως ψυγεία, θάλαμοι αίματος, πύργοι ελέγχοι αεροδρομίων, data centers, χειρουργεία, τέτοια ενδεχόμενη βλάβη μπορεί να δημιουργήσει σημαντικό πρόβλημα.

Κατά τη λήψη των μετρήσεων η θερμοκρασία χώρου ήταν 23° C για το πρώτο δοκίμιο, 18,7 °C για το δεύτερο δοκίμιο και 21 °C για το τρίτο δοκίμιο . Οι συνήθεις θερμοκρασίες του περιβάλλοντος λειτουργίας (μαχαιρωτή ασφάλεια, ασφαλειοθήκη) όταν είναι τοποθετημένα σε πίνακες χαμηλής τάσης είναι πολύ μεγαλύτερες καθώς συνεισφέρουν και οι γειτονικές ασφάλειες στην αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στον πίνακα. Επομένως αυξάνεται η αντίσταση των επαφών άρα και οι θερμικές απώλειες επ'αυτών ($I^2 \cdot R$). Ειδικά όταν οι συνθήκες εξαερισμού του πίνακα είναι ελλιπής και το περιβάλλον είναι ρυπασμένο (όπως συχνά συμβαίνει στην βιομηχανία, τσιμεντοβιομηχανίες, διυλιστήρια, ναυπηγεία κτλ), αυτό συμβάλλει στην γρήγορη οξείδωση των μετάλλων της επαφής πολύ περισσότερο την περίοδο θέρους όπου η απαγωγή θερμότητας είναι πιο δύσκολη.

Για τέτοια είδους φορτία κρίνεται απαραίτητη η μείωση του ορίου αύξησης της θερμοκρασίας των κανονισμών όσον αφορά την ονομαστική ικανότητα των επαφών σε ρεύμα προκειμένου να είναι περισσότερο αξιόπιστες. Επίσης προτείνεται σε περιπτώσεις επείγοντων φορτίων η χρήση ασφαλειοθήκης με μεγαλύτερο ονομαστικό ρεύμα από αυτό της ασφάλειας ώστε η αύξηση της θερμοκρασίας της επαφής να είναι μικρότερη από 55° C.

Βιβλιογραφία

- [1] Π.Δ. Μπούρκας, "Εφαρμογές Εγκαταστάσεων σε Νοσοκομεία", Εκδόσεις Ε.Μ.Π. , 1999.
- [2] Π. Δ. Μπούρκας, Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος "Μετρήσεις σε Βιομηχανικές Διατάξεις και Υλικά"
- [3] IEC 60269-2-1, International Standard , Έκδοση 3^η (Ημερομηνία Έκδοσης 1998-03)
- [4] Holm R.: "Electric contacts. Theory and applications". Springer-Verlag, 4th edition, Berlin, (1979).
- [5] Μ.Π. Φιλιππάκου : " Ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων και πειραματική διερεύνηση θερμικών και ηλεκτρικών φαινομένων καταπόνησης σε επαφές διακοπών", Διδακτορική Διατριβή, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1999
- [6] Χρήστος Γεώργιος Αρώνης, "Μοντελοποίηση Βιομηχανικών Ηλεκτρικών Επαφών Υψηλής και Χαμηλής Τάσης", Διδακτορική Διατριβή, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα Νοέμβριος 2006
- [7] Electrical Contacts : "Fundamentals, Applications and technology", Milenko Braunovic, Valery Konchits, Nikolai Myshkin, London, 2007

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕC 60269-2-1

Ασφάλειες τήξης χαμηλής τάσης

Τμήμα Ι – Μαχαιρωτές ασφάλειες

1.1 Σκοπός

Οι παρακάτω πρόσθετες απαιτήσεις απευθύνονται σε μαχαιρωτές ασφάλειες δηλαδή φυσίγγια ασφαλειών με μαχαιρωτές επαφές που πρόκειται να αντικατασταθούν με τη βοήθεια μιας συσκευής, για παράδειγμα χειρολαβή αντικατάστασης ασφαλειών η οποία συμμορφώνεται με τις διαστάσεις των προδιαγραφών των πινάκων 1(I) και 2(I). Τέτοιες ασφάλειες έχουν ονομαστικό ρεύμα συμπεριλαμβανομένου και των 250 A και ονομαστικής τάσης μέχρι και 690 V AC ή 440 V DC.

1.2 Ονομαστική τάση

Για εναλλασσόμενο ρεύμα, η τιμή της ονομαστικής τάσης σύμφωνα με το πρότυπο είναι 400 V, 500 V και 690 V. Για συνεχές ρεύμα, η τιμή της ονομαστικής τάσης σύμφωνα με το πρότυπο είναι 250 V και 440 V. Σύμφωνα με το πρότυπο η τιμή της ονομαστικής τάσης για συνεχές ρεύμα δεν σχετίζεται με την τιμή της ονομαστικής τάσης για εναλλασσόμενο ρεύμα. Για παράδειγμα, οι πιθανοί ακόλουθοι συνδυασμοί σύμφωνα με το πρότυπο είναι: AC 500 V - 250 V DC, AC 500 V - DC 440 V, AC 500 V, κλπ.

1.3.1 Ονομαστικό ρεύμα της βάσης της ασφάλειας

Για κάθε μέγεθος ασφάλειας το μέγιστο ονομαστικό ρεύμα δίνεται στο σχήμα 1 (I). Οι τιμές αυτές σχετίζονται με τον τύπο της κάθε βάσης και τις ονομαστικές τάσεις που τις διαρρέουν.

1.3.2 Ονομαστικό ρεύμα της χειρολαβής τοποθέτησης ασφάλειας

Το ονομαστικό ρεύμα για τα διάφορα μεγέθη των βάσεων ασφαλειών δίνονται στο σχήμα 2 (I).

1.4 Ονομαστική δύναμη διάσπασης της βάσης ασφαλείας και ονομαστική δύναμη που αποδέχεται η χειρολαβή ασφάλειας

Οι μέγιστες τιμές της ονομαστικής δύναμης διάσπασης για διαφορετικά μεγέθη των βάσεων ασφαλείας απεικονίζονται στο σχήμα 1 (I). Οι τιμές ισχύουν για το μέγιστο ονομαστικό ρεύμα των βάσεων ασφαλειών. Οι τιμές της μέγιστης δύναμης που αποδέχονται οι βάσεις ασφαλειών δίνονται στο σχήμα 2 (I).

1.5 Όρια των χαρακτηριστικών τιμών του ρεύματος

1.5.1 Χαρακτηριστικές των τιμών του ρεύματος, όρια τιμών του ρεύματος και καμπύλες φορτίου

Η απόκλιση των τιμών του ρεύματος που δίνει ο κατασκευαστής δεν πρέπει να είναι περισσότερο από $\pm 10\%$ του ονομαστικού ρεύματος. Τα όρια των τιμών του ρεύματος δίνονται στο σχήμα 4 (I), συμπεριλαμβανομένων των ανοχών της κατασκευής θα πρέπει να πληρούνται από όλους τους συνολικούς χρόνους πριν την εμφάνιση ηλεκτρικού τόξου και ο συνολικός χρόνος να μετρείται με τάση δοκιμής σύμφωνα με την παράγραφο 8.7.4.

1.5.2 Συμβατοί χρόνοι και ρεύματα

Οι συμβατοί χρόνοι και τα ρεύματα, εκτός από τις τιμές σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60269-1, δίνονται και στον πίνακα II.

Ονομαστικό ρεύμα I_n A	Συμβατός χρόνος ώρες	Συμβατό ρεύμα	
		I_{nf}	I_f
$I_n < 4$	1	$1,5 I_n$	$2,1 I_n$
$4 < I_n < 16$	1	$1,5 I_n$	$1,9 I_n$

Πίνακας II : Χρόνοι και ρεύματα για "gG " μαχαιρωτές ασφάλειες με ονομαστικό ρεύμα μικρότερο από 16 A

1.5.3 Όρια

Για "gG "ασφάλειες τα όρια δίνονται στον πίνακα III, εκτός από τα όρια σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60269-1

I_n A	I_{min} (10 s) A	I_{max} (5 s) A	I_{min} (0,1 s) A	I_{max} (0,1 s) A
2	3,7	9,2	6,0	23,0
4	7,8	18,5	14,0	47,0
6	11,0	28,0	26,0	72,0
8	16,0	35,2	41,6	92,0
10	22,0	46,5	58,0	110,0
12	24,0	55,2	69,6	140,4

Πίνακας III : Όρια για συγκεκριμένες χρονικές διάρκειες λειτουργίας πριν την εμφάνιση ηλεκτρικού τόξου των μαχαιρωτών ασφαλειών "gG" με ονομαστικό ρεύμα μικρότερο από 16 A

2. Διακριτικές ταμπέλες

Οι μαχαιρωτές ασφάλειες και οι χειρολαβές τοποθέτησης ασφαλειών που πληρούν τις προδιαγραφές των δοκιμών του τμήματος I αυτού του προτύπου αναφέρονται στο πρότυπο 60269-2-1.

2.1 Χαρακτηριστικά των χειρολαβών τοποθέτησης ασφαλειών

Το ονομαστικό ρεύμα και η ονομαστική τάση πρέπει να διακρίνονται στο μπροστινό μέρος της χειρολαβής, όταν η ασφάλεια δεν έχει τοποθετηθεί.

2.2 Χαρακτηριστικά των μαχαιρωτών ασφαλειών

Το ονομαστικό ρεύμα και η ονομαστική τάση πρέπει να διακρίνονται από το μπροστινό μέρος. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά των ασφαλειών που πρέπει να διακρίνονται, όπως περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:

Χαρακτηριστικά	gG		aM	
Χαρακτηριστικό χρώμα	Μαύρο		Πράσινο	
Είδος μεγέθους	Απογυμνωμένο με αντίστροφο μέγεθος	Κανονικό μέγεθος	Απογυμνωμένο με αντίστροφο μέγεθος	Κανονικό μέγεθος
Τάση				
400 V ¹⁾	X		X	
500 V		X		X
690 V	X		X	
¹⁾ Για ασφάλεια 400 V gG, το μπλε χρώμα επιτρέπεται				

Πίνακας C : Διακριτικά ασφαλειών

3.1 Μηχανική σχεδίαση

Οι διαστάσεις των μαχαιρωτών ασφαλειών και των βάσεων τους δίνονται στα σχήματα 1 (I) και 2 (I).

3.1.2 Συνδέσεις, συμπεριλαμβανομένων των ακροδεκτών

Υπάρχουν διάφορα είδη ακροδεκτών. Όσον αφορά την στερέωση των ακροδεκτών, τα όρια διακύμανσης στα οποία οι ακροδέκτες θα πρέπει να δέχονται τις ακόλουθες τιμές των ονομαστικών ρευμάτων για κάθε μέγεθος ασφάλειας.

Οι ακροδέκτες που σχεδιάζονται για κακούς αγωγούς πρέπει να είναι σε θέση να δέχονται το λιγότερο τρία συνεχόμενα μεγέθη αγωγών εντός των ορίων διακύμανσης που αναγράφονται στον πίνακα D. Σε περίπτωση που ο ακροδέκτης είναι τελικός, οι δυνάμεις σύσφιξης που πρέπει να εφαρμόζονται παρατίθενται στον πίνακα F. Οι δυνάμεις σύσφιξης για τους υπόλοιπους ακροδέκτες θα δίνονται στις οδηγίες των κατασκευαστών.

Μέγεθος	Εύρος ονομαστικού ρεύματος μαχαιρωτών ασφαλειών			Εύρος διατομής mm ²	
	A		A	Χαλκός	Αλουμίνιο
00	6	ως	160	10 ως 70	25 ως 95
0*	6	ως	160	10 ως 70	25 ως 95
1	80	ως	250	70 ως 120	95 ως 150
2	125	ως	400	95 ως 240	120 ως 300
3	315	ως	630	Μη διαθέσιμες τιμές	
4	500	ως	1000		
4a	500	ως	1250		

* Δεν επιτρέπεται για νέες εγκαταστάσεις παρά μόνο για ασφάλειες με strikers.

Πίνακας D : Ελάχιστες διατομές για κακούς αγωγούς

Για συνδέσεις μεγαλύτερου ή και μικρότερου εύρους διατομής μπορεί να είναι απαραίτητες. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με κατάλληλη κατασκευή του ακροδέκτη, είτε με πρόσθετα μέσα σύνδεσης, όπως συνιστάται από τον κατασκευαστή.

Όπως και να χει οι ακροδέκτες για κακούς αγωγούς είτε είναι κατάλληλοι για χαλκό, αλουμίνιο ή χαλκό και αλουμίνιο θα πρέπει να διαθέτουν την ανάλογη σήμανση. Επιπλέον, το εύρος των διατομών πρέπει να αναγράφεται πλησίον της βάσης μόνωσης του σφικτήρα, ή να δίδονται στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή.

3.1.3 Επαφές ασφαλειών

Οι επιφάνειες επαφής των μαχαιρωτών ασφαλειών και οι βάσεις τους θα πρέπει να είναι επαγυρωμένες, αλλιώς θα πρέπει να ελέγχεται ότι επαφή δεν φθείρεται κατά τη λειτουργία της με ονομαστικό ρεύμα. Οι απαιτήσεις για τις επαφές ασφαλειών, θα ελέγχονται από τις δοκιμές που αναφέρονται στην παράγραφο 8.10 του προτύπου IEC 60269-1.

3.1.4 Κατασκευή μαχαιρωτών ασφαλειών

Η προτιμώμενη κατασκευή είναι η εξής: Οι μαχαιρωτές επαφές θα πρέπει να είναι κατασκευάζονται από στερεό υλικό. Για οποιαδήποτε άλλη κατασκευή που θα χρησιμοποιηθεί, ο κατασκευαστής πρέπει να αποδείξει ότι η κατασκευή αυτή είναι κατάλληλη για τον σκοπό αυτό.

Με εξαίρεση τη λαβή αντικατάστασης ασφαλειών τα ακριανά ελάσματα δεν επιτρέπεται να εξέχουν ακτινωτά από την επιφάνεια της μόνωσης. Για ορισμένες εφαρμογές είναι προτιμότερο να απομονωθούν οι ακροδέκτες στα τμήματα που διαρέονται από ρεύμα.

Οι μαχαιρωτές ασφάλειες τήξης πρέπει να έχουν ένδειξη.

3.2 Χαρακτηριστικές I^2t

Για τις μαχαιρωτές ασφάλειες που αναφέρονται στο παράρτημα αυτό οι μέγιστες χαρακτηριστικές λειτουργίας πριν το σχηματισμό τόξου δίνονται στον πίνακα VI του προτύπου IEC 60269-1 και ισχύουν για τις ονομαστικές μέγιστες τιμές λειτουργίας. Οι τιμές για ονομαστικά ρεύματα μικρότερα από 16 A, δίνονται παρακάτω στον πίνακα VI.

I_n	I^2t_{min}	I^2t_{max}
A	A ² s	A ² s
2	1,00	23,00
4	6,25	90,25
6	24,00	225,00
8	49,00	420,00
10	100,00	576,00
12	420,00	1150,00

Πίνακας VI : Χαρακτηριστικές I^2t για ονομαστικές τιμές λειτουργίας πριν την εμφάνιση τόξου σε 0,01 δευτερόλεπτα για "gG" μαχαιρωτές ασφάλειες.

3.3 Αντιμετώπιση του φαινομένου της υπερέντασης των "gG" μαχαιρωτών ασφαλειών

Μια σειρά από μαχαιρωτές ασφάλειες με λόγο ονομαστικού ρεύματος 1:1,6 και ονομαστικό ρεύμα από 16 A και άνω, τα χαρακτηριστικά τους προσδιορίζονται στην παράγραφο 8.7.4.Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά τους, όταν διακόπτες φορτίου χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες χαρακτηριστικές δίνονται στον πίνακα E .

I_n	I^2t_{min}	I^2t_{max}
A	A ² s	A ² s
16	250	500
20	450	670
25	810	900
32	1400	1180
40	2500	1580
50	4000	2000
63	6300	2510
80	10000	3160

100	16000	4000
125	24000	4900
160	42500	6520
200	78000	8830

Πίνακας Ε : Επιλογή χαρακτηριστικών πριν την εμφάνιση ηλεκτρικού τόξου

3.4 Προστασία από ηλεκτροπληξία

Η προστασία από ηλεκτροπληξία μπορεί να αυξηθεί με τη βοήθεια διαχωριστικών κιβωτιών και καλύμματα στις επαφές των ασφαλειών.

4. Έλεγχος των βάσεων στήριξης ασφαλειών

Εκτός από τη δοκιμή που αναφέρονται στο IEC 60269-1, οι βάσεις στήριξης των ασφαλειών πρέπει να υπόκεινται στους ελέγχους σύμφωνα με τον πίνακα VIII.

Δοκιμή σύμφωνα με την υποπαράγραφο	Αριθμός βάσεων ασφαλειών στήριξης				
	1	1	1	1	1
8.5.5.1 Έλεγχος της αντοχής της κορυφής ρεύματος της βάσης ασφαλείας				X	X
8.9 Έλεγχος αντοχής σε θερμότητα					X
8.11.1.2 Μηχανική δύναμη στη βάση της ασφάλειας					
8.11.2.4 Μη επιδείνωση των μονωμένων τμημάτων των ασφαλειών και της βάσης της ασφάλειας	X	X	X		
	X	X	X		

Πίνακας VIII : Έρευνα δοκιμών των βάσεων στήριξης των ασφαλειών και ο αριθμός των βάσεων στήριξης των ασφαλειών που ελέγχθηκαν.

4.1 Έλεγχος της αύξησης θερμοκρασίας και η ισχύς διακοπής

4.1.1 Ταξινόμηση των ασφαλειών

Εάν ο κατασκευαστής καθορίζει τις τιμές της δύναμης σύσφιξης, αυτές πρέπει να χρησιμοποιηθούν στις δοκιμές των παραγράφων 8.3 και 8.10. Αν όχι, οι βίδες ή τα παξιμάδια των ακροδεκτών πρέπει να είναι στερεωμένα σύμφωνα με τον πίνακα F.

I _n A	Μέγεθος	Νούμερο βίδας	Δύναμη Nm
160	00	M 8	10
160	0*	M 8	10
250	I	M 10	32
400	2	M 10/12	32
630	3	M 10/12	32
1000	4	M 12	56
1250	4a	2 x M 12/16	56

* Δεν επιτρέπεται για νέες συνδέσεις εκτός από μαχαιρωτές ασφάλειες με strikers.

Πίνακας F : Ροπή που πρέπει να εφαρμόζεται στις βίδες των ακροδεκτών

4.1.2 Η αύξηση της θερμοκρασίας της χειρολαβής τοποθέτησης ασφαλειών

Το δοκίμιο δίνεται στο σχήμα 5 (I). Το σημείο στο οποίο η αύξηση της θερμοκρασίας μετριέται επισημαίνεται με E στο σχήμα 6 (I).

4.1.3 Ισχύς διακοπής της μαχαιρωτής ασφάλειας

Τα σημεία ανάμεσα στο οποία η ισχύς διακοπής των ασφαλειών συμβολίζονται με S στο σχήμα 6 (I).

4.2 Καλώδιο προστασίας υπερφόρτισης (μόνο για μαχαιρωτές ασφάλειες "gG")

ΣΗΜΕΙΩΣΗ - Οι δοκιμές στο μέρος I, θεωρείται ότι έδωσαν θετικά αποτελέσματα για ρεύμα ίσο με 1,45 I_n για τριφασικές εφαρμογές και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 30 ° C. Μια ειδική δοκιμή μπορεί να απαιτηθεί από ορισμένες χώρες για να αποδειχθεί ότι οι ασφάλειες και μικροσκοπικά διακόπτες φορτίου (MCBs) παρέχουν εξίσου την ίδια προστασία.

4.3 Ταξινόμηση των ασφαλειών

Η δοκιμή θα γίνει σε μία από τις φάσεις. Η δοκιμή της βάσης της ασφάλειας πρέπει να είναι σύμφωνη με το πρότυπο IEC 60269-1. Το ρεύμα πρέπει να περιορίζεται από ασφάλεια τήξης με την υψηλότερη βαθμολογία για κάθε μέγεθος. Οι μέγιστες τιμές των ρευμάτων δοκιμής που επιτυγχάνονται πρέπει να καταρρίπτουν τα όρια διακύμανσης που φαίνονται στον πίνακα G.

Μέγεθος	Ρεύμα διακοπής kA
00	22...24
0	22...24
1	34...37
2	44...48
3	65...70

Πίνακας G : Ρεύματα δοκιμών

Οι μέγιστες τιμές μπορούν να ξεπεραστούν, εφόσον πληρούνται οι απαιτήσεις που προβλέπονται στην παράγραφο 4.3.2 . Αν η διακοπή του ρεύματος διακύμανσης δεν μπορεί να επιτευχθεί με την υψηλότερη βαθμολογία για το μέγεθος, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί υψηλότερο μέγεθος ασφάλειας. Οι εξωτερικές διαστάσεις αντιστοιχούν σε εκείνες που δίνονται στο σχήμα 1 (I).

4.3.1 Μέθοδος δοκιμής

Η δοκιμή πρέπει να πραγματοποιείται σε δύο βάσεις ασφαλειών. Στην περίπτωση των ασφαλειών βάσης τύπου 1, δοκιμάζεται ένα σκληρό και γυαλισμένο μαχαίρι από χάλυβα, και παρουσιάζεται στο σχήμα 7 (I), προστίθεται με το χέρι, προκειμένου να ανοίξει τις επαφές σε κάποιο βαθμό. Σκοπός αυτής της δοκιμής είναι να εξασφαλιστεί ότι η ευκαμψία περιορίζεται από τα όρια ελαστικότητας. Οι επαφές αυτές θα πρέπει να ανοίξουν τρεις φορές. Η δοκιμή αυτή θα πρέπει να παραλείπεται, εάν μια μηχανική διακοπή περιορίζει το κενό σε λιγότερο από 7 mm έτσι ώστε η λεπίδα που εξετάζεται να μη μπορεί να τοποθετηθεί σωστά με το χέρι. Η βάση ασφάλειας τύπου 2 δοκιμάζεται σύμφωνα με την παράγραφο 5.1 . Οι τιμές των μέγιστων δυνάμεων

σύμφωνα με τον πίνακα J πρέπει να τηρούνται. Μετά από αυτά τα προκαταρκτικά που προαναφέρθηκαν η δοκιμή ρεύματος πρέπει να εκτελείται.

4.3.2 Αποδοχή των αποτελεσμάτων των δοκιμών

Οι ασφάλειες τήξης θα πρέπει να πεταχτούν. Δεν πρέπει να υπάρχουν σημεία σχηματισμού του τόξου ή συγκόλλησης ή άλλες βλάβες που ενδέχεται να εμποδίζουν την περαιτέρω χρήση των βάσεων ασφαλειών. Σημάδια διάβρωσης για τις επαφές αυτές είναι επιτρεπτές.

4.4 Έλεγχος των ιδιαίτερων υπερεντάσεων

Οι ιδιαίτερες υπερεντάσεις για ασφάλειες με ονομαστικό ρεύμα μέχρι και 12 A και λόγο διάκρισης υπερέντασης ίσο με 1:1,6 για ασφάλειες με ονομαστικό ρεύμα μεγαλύτερο από 12 A ελέγχεται από τις χαρακτηριστικές I^2t αξιολογούμενες από τα καταγεγραμμένα αποτελέσματα των δοκιμών.

Τα δείγματα ελέγχονται, σε δοκιμή διακοπτικής ικανότητας, σχετικά με το κύκλωμα δοκιμής και την ανοχή του ρεύματος. Τέσσερα δείγματα που ελέγχθηκαν, τα δύο δείγματα ελέγχθηκαν κατά την rms μελλοντική δοκιμή ρεύματος I , που αντιστοιχεί στην ελάχιστη χαρακτηριστική πριν την εμφάνιση ηλεκτρικού τόξου, τα άλλα δείγματα στην rms μελλοντική δοκιμή ενεργού ρεύματος I , που αντιστοιχούν στις χαρακτηριστικές τιμές I^2t λειτουργίας.

Η τάση δοκιμής για ασφάλειες 690 V είναι $1,05x \frac{U_n}{\sqrt{3}}$

Η τάση δοκιμής για όλες τις άλλες ασφάλειες είναι $1,1x \frac{U_n}{\sqrt{3}}$

I _n	Ελάχιστο ρεύμα πριν το ηλεκτρικό τόξο		Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας		Λόγος αντοχής
	Αναμενόμενο I rms kA	I ² t A ² s	Αναμενόμενο I rms kA	I ² t A ² s	
2	0,013	0,67	0,064	16,4	Δεν υπολογίζεται
4	0,035	4,90	0,130	67,6	
6	0,064	16,40	0,220	193,6	
8	0,100	40,00	0,310	390,0	
10	0,130	67,60	0,400	640,0	
12	0,180	130,00	0,450	820,0	
16	0,270	291,00	0,550	1210,0	1:1,6
20	0,400	640,00	0,790	2500,0	
25	0,550	1210,00	1,000	4000,0	
32	0,790	2500,00	1,200	5750,0	
40	1,000	4000,00	1,500	9000,0	
50	1,200	5750,00	1,850	13700,0	
63	1,500	9000,00	2,300	21200,0	
80	1,850	13700,00	3,000	36000,0	
100	2,300	21200,00	4,000	64000,0	
125	3,000	36000,00	5,100	104000,0	
160	4,000	64000,00	6,800	185000,0	
200	5,100	104000,00	8,700	302000,0	
250	6,800	185000,00	11,800	557000,0	
315	8,700	302000,00	15,000	90000,0	
400	11,800	557000,00	20,000	160000,0	
500	15,000	900000,00	26,000	270000,0	
630	20,000	1600000,00	37,000	547000,0	
800	26,000	2700000,00	50,000	1000000,0	
1000	37,000	5470000,00	66,000	1740000,0	
1250	50,000	10000000,00	90,000	3310000,0	

Πίνακας Η : Δοκιμές ρευμάτων και όρια για την αντοχή δοκιμών

Τα ρεύματα που εξετάζονται πρέπει να βρίσκονται εντός των ορίων του πίνακα Η

4.5 Έλεγχος θερμοκρασίας της αντίστασης

Οι δοκιμές αυτές ισχύουν για ασφάλειες τήξης και βάσεις ασφαλειών.

4.5.1 Βάση ασφάλειας

Οι δοκιμές που δίνονται παρακάτω θα είναι εφαρμόσιμες, αν δεν είναι προφανές ότι τα υλικά εφαρμογών δεν επηρεάζονται αρνητικά από τη δεδομένη θερμοκρασία και τις δυνάμεις απομόνωσης.

4.5.2 Έλεγχος διάταξης

Μια εικονική ασφάλεια σύμφωνα με το σχήμα 5(I), έχει τοποθετηθεί σε μια βάση ασφάλειας και επίσης απομονώνεται από τη συσκευή μέτρησης, όπως φαίνεται, για παράδειγμα, στο σχήμα 8 (I). Η μέθοδος σύμφωνα με την οποία το δοκίμιο είναι τοποθετημένο και ασφαλισμένο (π.χ. με πείρους ασφάλισης), στις βάσεις ασφαλειών πρέπει να εξασφαλίζει ότι η απαγωγή της θερμότητας δεν είναι επιδρά σοβαρά. Ο αγωγός διατομής εξαρτάται από το ονομαστικό ρεύμα (βλ. IEC 60269-1, πίνακας X), καθώς και οι συνδέσεις έξω από το τμήμα που θερμαίνεται πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 m μήκος. Η δοκιμή διάταξης είναι εγκατεστημένη σε ένα τέτοιο θάλαμο παροχής θερμότητας ή κάτω από ένα θερμαινόμενο κάλυμμα ισχύος τουλάχιστον 50 αμπερ, ώστε να δούμε ότι οι μονωτήρες διελεύσεως των μονάδων μέτρησης και των συνδέσεων είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Οι θερμαντήρες θα είναι τέτοιοι ώστε να εξασφαλίζουν ότι κατά την εκτέλεση της δοκιμής που περιγράφεται παρακάτω η θερμοκρασία των (80_0^{+5}) °C, διατηρείται, με ή χωρίς τη δοκιμή ρεύματος, η θερμοκρασία μετριέται σε οριζόντια απόσταση 150 mm από το κεντρικό σημείο του δοκιμίου.

4.5.3 Μέθοδος δοκιμής

Η θερμοκρασία στο θάλαμο θέρμανσης αυξάνεται σε (80_0^{+5}) °C, και διατηρείται για 2 ώρες. Το δοκίμιο στη συνέχεια φορτίζεται με περίπου 160% του ονομαστικού ρεύματος με ανοχή $\pm 2\%$ για 2 ώρες. Η δοκιμή μπορεί να διεξάγεται με ελαττούμενη τάση. Μετά τη φόρτωση και 3 λεπτά πριν το τέλος της δοκιμής, η μέγιστη δύναμη αντοχής F_{max} (βλέπε πίνακα J) εφαρμόζεται ομαλά στο δοκίμιο. Η δύναμη F_{max} ασκείται για διάστημα 15 s.

4.5.4 Αποδοχή των αποτελεσμάτων των δοκιμών

Μετά από αυτή τη δοκιμή, τα δοκίμια επαφής των βάσεων ασφαλειών δεν πρέπει να έχουν μετακινηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να επηρεάζεται η περαιτέρω χρήση των ασφαλειών βάσης. Μετά την έξοδο του δοκιμίου οι διαστάσεις του σχήμα 2 (I), πρέπει να μελετηθούν. Η μόνωση που είναι τοποθετημένη στις βάσεις των ασφαλειών δεν πρέπει να κοπεί ούτε πρέπει έχει σημάδια σχισμών.

4.6 Ασφάλειες με προεξοχές από χυτό υλικό ή από μέταλλο που καθορίζονται στο χυτό υλικό

4.6.1 Μηχανισμός δοκιμής

Μια ασφάλεια με το μεγαλύτερο ονομαστικό ρεύμα τοποθετείται στη βάση ασφάλειας και πρέπει να τοποθετείται από μια συσκευή μέτρησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 8 (I).

4.6.2 Μέθοδος δοκιμής

Η θερμοκρασία στο θάλαμο θέρμανσης αυξάνεται στους (80_0^{+5}) °C και διατηρείται για 2 ώρες. Η ασφάλεια εν συνεχεία φορτίζεται με ρεύμα ίσο με το 150% του ονομαστικού μέχρι να φυσηθεί, αλλά η δοκιμή περιορίζεται σε χρόνο σύμφωνα με το πρότυπο. Η μειούμενη τάση δοκιμής μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Τρία λεπτά αφότου η ασφάλεια έχει καεί ή ο χρόνος διεξαγωγής της δοκιμής έχει λήξει, η δύναμη αντοχής με αντοχής F_{max} (βλέπε πίνακα J) εφαρμόζεται ομαλά στις προεξοχές. Η δύναμη που ασκείται για διάστημα περίπου 15 δευτερόλεπτα.

4.6.3 Αποδοχή των αποτελεσμάτων των δοκιμών

Οι προεξοχές θα πρέπει να παραμένουν σε πλήρη λειτουργία, καθώς και το μήκος του λαιμού $(2,5_0^{+0,5})$ mm δεν πρέπει να εξέχει περισσότερο από 2 mm, σύμφωνα με τις διαστάσεις d του σχήματος 1(I). Το ίδιο ισχύει και για τις μέγιστες τιμές των διαστάσεων c_1 .

4.7 Επαλήθευση της μη φθοράς των επαφών και των σφικκτήρων που μεσολαβούν

4.7.1 Διάταξη της ασφάλειας

Το δοκίμιο της ασφάλειας δίνεται στο σχήμα 5 (I).

4.7.2 Επαφές

4.7.3 Σφικκτήρες

Η δοκιμή πραγματοποιείται σε 10 σφικκτήρες των πέντε βάσεων ασφαλειών. Η διάταξη δοκιμής θα είναι ως εξής: οι βάσεις των ασφαλειών πρέπει να είναι τοποθετηθεμένες σε κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των κέντρων των βάσεων των ασφαλειών, τουλάχιστον τρεις φορές την τιμή e_2 , όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1 (I). Το μήκος των αγωγών μεταξύ της πηγής των δοκιμών και τα δείγματα, καθώς και μεταξύ των δειγμάτων, πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 μέτρο. Ο αγωγός διατομής εξαρτάται από το ονομαστικό ρεύμα (για χάλκινους αγωγούς, βλέπε IEC 60269-1, πίνακας X οι σχετικές διατομές αγωγών αλουμινίου δίνονται στον ακόλουθο πίνακα R. Η μόνωση των αγωγών πρέπει να αφαιρεθεί όλο το μήκος.

Ονομαστικό ρεύμα A	Διατομή αγωγών mm ²
40	25
50	25
63	35
80	50
100	70
125	95
160	95
200	150
224	185
250	185
315	240
400	300

Πίνακας R : Εμβαδόν διατομής των αγωγών αλουμινίου για τις δοκιμές που αντιστοιχούν στην παράγραφο 4.7

Η δοκιμή στους σφικτήρες, οι οποίοι μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για αγωγούς αλουμινίου, πρέπει να γίνεται μόνο με αγωγούς αλουμινίου. Σε περίπτωση που οι σφικτήρες διατρυπήσουν τη μόνωση των αγωγών όταν τοποθετούνται, μόνο η μόνωση της εκτός σύσφιξης περιοχή θα αφαιρεθεί. Ο αντίστοιχος αριθμός των αγωγών πρέπει να επεξεργαστεί στην περιοχή σύσφιξης. Η επιφάνεια επαφής των έξι αγωγών πρέπει να προετοιμαστεί ως εξής. Οι αγωγοί πρέπει να έχουν καθαριστεί με κατάλληλο λειαντικό μέσο και να συνδεθούν μέσα σε χρονικό διάστημα όχι μεγαλύτερο από 5 λεπτά. Οι αγωγοί που απομένουν πρέπει να φυλάσσονται σε εσωτερικό χώρο για 14 ημέρες. Οι αγωγοί δεν πρέπει να δοκιμαστούν πρώτου συνδεθούν. Τα μπουλόνια των σφικτήρων θα βιδωθούν όπως καθορίζεται από τον κατασκευαστή. Η αναπροσαρμογή των κοχλιών κατά τη διάρκεια των δοκιμών δεν επιτρέπεται. Για ξεφτισμένους αγωγούς αλουμινίου, πρέπει να διασφαλιστεί ότι το ρεύμα δοκιμής διαρρέεται στην διατομή όπως και εξίσου δυνατό. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη συνένωση ή τη συμπίεση του αγωγού στο μέσο του μήκους.

4.7.4 Μέθοδος δοκιμής

Ένας κύκλος δοκιμών περιλαμβάνει μια περίοδο φορτίου και μια περίοδο μη-φορτίου όπως αναφέρεται στο χρόνο δοκιμής. Τα ρεύματα δοκιμής για την περίοδο φόρτισης και μη φόρτισης προσδιορίζονται ακολούθως:

Ρεύμα δοκιμής :	συμβατικό ρεύμα I_{nf}
Περίοδος φόρτισης	25% του συμβατικού χρόνου βλέπε πίνακα II του IEC 60269-1
Περίοδος μη φόρτισης	10% του συμβατικού χρόνου

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τάση δοκιμής χαμηλότερη από την ονομαστική τάση.

Η πτώση τάσης των επαφών μετράται μεταξύ 50 και 250 κύκλους και, εφόσον είναι αναγκαίο, μετά από 500 με 750 κύκλους σε συνεχές ρεύμα. Όμως το ρεύμα

$I_m = (0,05 \div 0,20)I_{nf}$ πρέπει να επιλεγεί τέτοιο ώστε να δίνει πτώση τάσης ίση με 100mV. Εάν είναι απαραίτητο το άνω όριο του I_m μπορεί να αυξηθεί σε $0,30 I_{nf}$. Η ανοχή του I_m κατά τη διάρκεια των μετρήσεων δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από

$^{+1}_0\%$. Η πτώση τάσης στην αντίσταση των επαφών πρέπει να αλλάξει. Πριν από τη μέτρηση, το δείγμα πρέπει να ψύχεται σε θερμοκρασία δωματίου. Αν η θερμοκρασία δωματίου κατά τη διάρκεια της μέτρησης αποκλίνει περισσότερο από 20°C, ο ακόλουθος τύπος μπορεί να εφαρμοστεί:

$$R_{20} = \frac{R_T}{1 + a_{20}(T - 20)}$$

4.7.5 Επαφές

Κατά τη διάρκεια της περιόδου μη φόρτισης το δείγμα πρέπει να ψυχθεί σε θερμοκρασία μικρότερη από 35°C, επιπρόσθετη ψύξη πχ μέσω ανεμιστήρα είναι επιτρεπτή. Τα δοκίμια υποβάλλονται σε μια αρχική δοκιμή 250 κύκλων. Εάν τα αποτελέσματα της δοκιμής είναι ικανοποιητικά, το τεστ σταματάει. Εάν τα αποτελέσματα της δοκιμής ξεπερνούν τα όρια η δοκιμή συνεχίζεται μέχρι τους 750 κύκλους. Πριν την αρχή της δοκιμής η πτώση τάσης των επαφών όπως περιγράφεται παρακάτω πρέπει να μετρηθεί στο ονομαστικό ρεύμα σε κανονική κατάσταση λειτουργίας. Τα σημεία μεταξύ των οποίων μετράται η πτώση τάσης σημειώνονται με α και β στο σχήμα 6 (I).

Εάν οι ασφάλειες είναι τόσο μικρές ώστε να μην μπορεί να γίνουν αξιόπιστες οι μετρήσεις στις επαφές τότε οι μετρήσεις στους ακροδέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν κριτήριο για τη δοκιμή.

4.7.6 Σφικτήρες ακροδεκτών

Τα σημεία μεταξύ των οποίων μετριέται η πτώση τάσης του δοκιμίου δίνονται στο σχήμα 10(I). Το σημείο της μέτρησης στον αγωγό πρέπει να είναι ένα κεντρικό σημείο για σταθερούς αγωγούς ή τυλιγμένο γύρω από συνεστραμμένους αγωγούς.

Η σχετική σταθερά a_{20} ανάλογα με το υλικό του αγωγού (αλουμίνιο ή χαλκός) πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Για αγωγούς αλουμινίου η δοκιμή πρέπει να πραγματοποιηθεί για 750 κύκλους σύμφωνα με την παράγραφο 8.10.2 του IEC 60269-1.

Η επαλήθευση της αύξησης της θερμοκρασίας πρέπει να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με την παράγραφο 8.3.4.1. Το σημείο στο οποίο μετράται η αύξηση της θερμοκρασίας

του αγωγού βρίσκεται σε απόσταση 10 mm από το σφικτήρα (βλέπε σχήμα 10 (I)). Η διαδικασία της μέτρησης περιγράφεται στον ακόλουθο πίνακα S.

Μέτρηση της $R_{kl\ 0}$
50 κύκλοι
Μέτρηση της $R_{kl\ 50}$
200 κύκλοι
Μέτρηση της $R_{kl\ 250}$
250 κύκλοι
Μέτρηση της $R_{kl\ 500}$
250 κύκλοι
Μέτρηση της $R_{kl\ 750}$
Επιβεβαίωση της αύξησης της θερμοκρασίας για ρεύμα I_n

Πίνακας S : Σειρά με την οποία γίνονται οι δοκιμές

4.8 Αποδοχή των αποτελεσμάτων της μέτρησης

4.8.1 Επαφές

Οι επιτρεπτές αλλαγές που δίνονται παρακάτω βασίζονται σε εργαστηριακή εμπειρία σε δοκιμές επαφών. Το τελικό κριτήριο πρέπει να εκπληρωθεί. Εάν στο τέλος του 250 κύκλου οι μετρούμενες τιμές δεν υπερβαίνουν το ακόλουθο όριο τότε η βάση της ασφάλειας θεωρείται ότι έχει περάσει τη δοκιμή και η δοκιμή μπορεί να σταματήσει:

$$\frac{R_{250} - R_{50}}{R_{50}} \leq 15\%$$

Εάν στο τέλος του 250 κύκλου οι μετρούμενες τιμές υπερβαίνουν το ακόλουθο όριο η δοκιμή συνεχίζεται. Μετά από 500 κύκλους το ακόλουθο όριο δεν πρέπει να υπερβαίνεται:

$$\frac{R_{500} - R_{250}}{R_{250}} \leq 30\%$$

Εάν το όριο υπερβαίνεται η δοκιμή δεν ικανοποιείται, εάν το όριο δεν υπερβαίνεται τότε η δοκιμή συνεχίζεται μέχρι τους 750 κύκλους. Στο τέλος του 750 κύκλου η δοκιμή πρέπει να μην υπερβαίνεται:

$$\frac{R_{750} - R_{50}}{R_{50}} \leq 40\%$$

Στο τέλος της δοκιμής μετά από 750 και 250 κύκλους η δύναμη αφαίρεσης μετράται. Για το σκοπό αυτό ένα ασάλινο και στιλπνό μαχαίρι πρέπει να εισαχθεί ώστε να ανοίξουν οι επαφές (παράγραφος 4.3.1).

Μετά η δύναμη απομάκρυνσης μετριέται με έναν σύνδεσμο κατασκευασμένο από σκληρό χάλυβα όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.1. Ο σύνδεσμος αυτός εισέρχεται τρεις φορές στην ασφαλειοθήκη. Οι δυνάμεις απομάκρυνσης πρέπει να βρίσκονται μεταξύ των ορίων του πίνακα J. Εάν οι μετρούμενες τιμές είναι πολύ χαμηλές η δοκιμή πρέπει να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με την παράγραφο 8.5.5.1

4.8.2 Τερματικοί σφικτήρες

Η επιτρεπτή ανοχή της αντίστασης R_{kl} ο για δοκίμια με καθαρούς αγωγούς αλουμινίου είναι :

$$R_{kl0max} \leq 2R_{kl0min}$$

Οι αλλαγές της αντίστασης από $R_{KI 50}$ σε $R_{KI 750}$ πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες τιμές του πίνακα T.

	Επιτρεπτές αλλαγές %	
	Καθαροί αγωγοί	Βρώμικοι αγωγοί
$\frac{R_{KI250} - R_{KI50}}{R_{KI50}} \cdot 100$	15	30
$\frac{R_{KI500} - R_{KI250}}{R_{KI250}} \cdot 100$	20	40

$\frac{R_{KI750} - R_{KI500}}{R_{KI500}} \cdot 100$	15	30
$\frac{R_{KI750} - R_{KI50}}{R_{KI50}} \cdot 100$	40	80
Σημείωση: Η αύξηση της θερμοκρασίας πρέπει να είναι χαμηλότερη από 70 °C		

Πίνακας T : Επιτρεπτές αλλαγές της αντίστασης

Οι επιτρεπτές αλλαγές που δίνονται στον πίνακα T βασίζονται σε εργαστηριακή εμπειρία από δοκιμές ακροδεκτών.

5 Μηχανικές και τυχαίες αντοχές

5.1 Μηχανική αντοχή της ασφαλειοθήκης

Η μηχανική αντοχή των βάσεων ασφαλειών και των εξαρτημάτων τους επαληθεύεται από τις ακόλουθες δοκιμές

Η δοκιμή για την επαλήθευση της δύναμης επαφής των βάσεων ασφαλειών πραγματοποιείται με τρεις ασφαλειοθήκες χωρίς ασφάλεια. Ένας σύνδεσμος δοκιμής από σκληρό ατσάλι με χρωμιωμένες και γυαλιστερές επιφάνειες τοποθετείται τρεις φορές στην ασφαλειοθήκη. Οι διαστάσεις της λεπίδας του συνδέσμου δοκιμής είναι παρόμοιες σύμφωνα με το σχήμα 1(I).

Η δύναμη απομάκρυνσης F που μετράται όταν τραβάμε σταθερά μέσω ειδικού εξοπλισμού πρέπει να βρίσκεται μεταξύ των ορίων που βρίσκεται στον πίνακα J.

Μέγεθος	Δύναμη απομάκρυνσης	
	F _{min} N	F _{max} N
00	60	250
0	80	300
1	110	350
2	150	400
3	210	400

Πίνακας J : Δύναμη απομάκρυνσης της μαχαιρωτής ασφάλειας από την βάση ασφάλειας

Για να πιστοποιήσουμε ότι οι επαφές της ασφαλειοθήκης είναι σταθερά τοποθετημένες (ατσάλινες βίδες κλάσης 8.8) βιδώνονται στους ακροδέκτες με ροπή σύσφιξης 1,2 φορές την ροπή που προσδιορίζεται από τον κατασκευαστή ή εάν δεν προσδιορίζεται συγκεκριμένη τιμή 1,2 φορές την τιμή του πίνακα F. Μετά από αυτή τη δοκιμή οι επαφές της ασφαλειοθήκης δε θα πρέπει να έχουν μετακινηθεί τόσο ώστε να επηρεάζεται η χρήση της ασφαλειοθήκης. Το μονωτικό μέρος της ασφαλειοθήκης δεν πρέπει να έχει σπάσει ή να έχει σημάδια ρωγμών.

5.2 Μη επιδείνωση των μονωτικών μερών της ασφάλειας και της ασφαλειοθήκης

5.2.1 Μέθοδος δοκιμής

Τρεις ασφάλειες και τρεις βάσεις ασφαλειών που πρόκειται να μετρηθούν πρέπει να εκτεθούν στις ακόλουθες θερμοκρασίες:

Για μια περίοδο 168 ωρών

$(150 \pm 5)^{\circ}C$ Για εξοπλισμό που περιλαμβάνει στοιχεία που υποστηρίζουν τα σημεία υπό τάση

$(100 \pm 5)^{\circ}C$ Για τα καλύμματα,

Για περίοδο μεγαλύτερη από μία ώρα

$(150 \pm 5)^{\circ}C$ μεγαλύτερη από μια ώρα για τα υλικά επισήμανσης

Μετά από ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος τα ακόλουθα πρέπει να δοκιμαστούν:

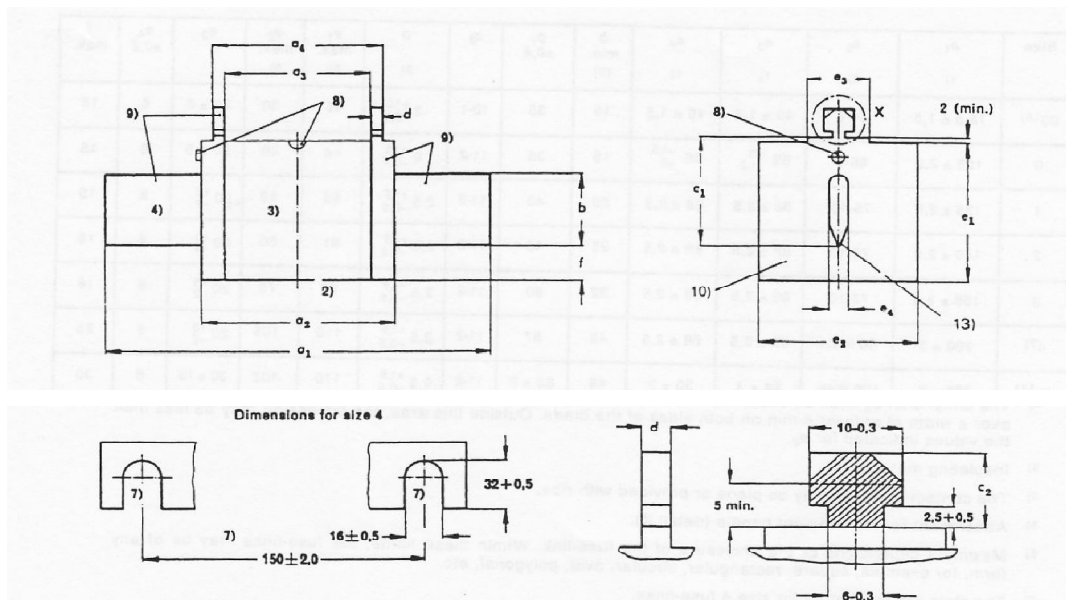
Για τις ασφάλειες: Επαλήθευση της ικανότητας διακοπής για ρεύμα I_1 και I_2 .

Για τις βάσεις των ασφαλειών: επαλήθευση της μηχανικής αντοχής τους σύμφωνα με την παράγραφο 5.1 .

5.2.2 Αποδοχή των αποτελεσμάτων της δοκιμής

Οι θέσεις των επαφών της βάσης μετά την αφαίρεση της ασφάλειας δε θα πρέπει να έχουν αλλάξει κατά τρόπο που να αλλάζει τη σωστή τους λειτουργία. Το μονωτικό μέρος πάνω στο οποίο είναι στερεωμένοι οι ακροδέκτες δε θα πρέπει να έχει σπάσει ή να έχει σημάδια ρωγμών. Τα υλικά επισφράγισης πρέπει να μην έχουν αλλοιωθεί σε βαθμό τέτοιο που να αφήνει εκτεθημένα τα σημεία υπό τάση. Οι ασφάλειες πρέπει να λειτουργούν σωστά.

Τα στοιχεία που διακρίνουν τις βάσεις πρέπει να είναι ανθεκτικά και ευανάγνωστα.



Σχήμα 1 (Γ*) : Μαχαρωτή ασφάλεια σε διάφορες όψεις

Οι διαστάσεις δίνονται σε χιλιοστά

Μέγεθος	gG				aM			
	AC 400 V και 500 V		AC 690 V		AC 400 V και 500 V		AC 690 V	
	In (A)	Pn (W)	In (A)	Pn (W)	In (A)	Pn (W)	In (A)	Pn (W)
00	100/160	7,5/12	100	12	100	7,5	100	12
0	160	16	100	25	160	16	100	25
1	250	23	200	32	250	23	250	32
2	400	34	315	45	400	34	400	45

3	630	48	500	60	630	48	630	60
4	1000	90	800	90	1000	90	1000	90
4a	1250	110	1000	110	1250	110	1250	110

Πίνακας 1(I)* : Μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ισχύος

Μέγεθος	a ₁ 1)	a ₂ 2)	a ₃ 1)	a ₄ 1)	b min 12)	c ₁ ±0,8	c ₂	d 5)	e ₁ max 6)	e ₂ max 6)	e ₃	e ₄ ±0,2	f max
00 ¹⁴⁾	78,5 ± 1,5	54-6	45 ± 1,5	49 ± 1,5	15	35	10-1	2 ⁺¹ _{-0,5}	48	30	20 ± 5	6	15
0	125 ± 2,5	68-8	62 ⁺³ _{-1,5}	68 ^{-1,5} ₋₃	15	35	11-2	2 ^{+1,5} _{-0,5}	48	40	20 ± 5	6	15
1	135 ± 2,5	75-10	62 ± 2,5	68 ± 2,5	20	40	11-2	2,5 ^{+1,5} _{-0,5}	53	52	20 ⁺⁵ ₋₂	6	15
2	150 ± 2,5	75-10	62 ± 2,5	68 ± 2,5	25	48	11-2	2,5 ^{+1,5} _{-0,5}	61	60	20 ⁺⁵ ₋₂	6	15
3	150 ± 2,5	75-10	62 ± 2,5	68 ± 2,5	32	60	11-2	2,5 ^{+1,5} _{-0,5}	76	75	20 ⁺⁵ ₋₂	6	18
4 ⁷⁾	200 ± 3	90 max	62 ± 2,5	68 ± 2,5	49	87	11-2	2,5 ^{+1,5} _{-0,5}	110	105	20 ⁺⁵ ₋₂	8	25
4a ¹¹⁾	200 ± 3	100 max	84 ± 3	90 ± 3	49	85 ± 2	11-2	2,5 ^{+1,5} _{-0,5}	110	102	30 ± 10	6	30

Πίνακας 1(I) : Διαστάσεις των μαχαιρωτών ασφαλειών που δίνονται στην εικόνα 1 (I*)

- 1) Τα κέντρα των διαστάσεων a₁, a₃ και a₄ δεν πρέπει να αποκλίνουν από το κέντρο της a₂ περισσότερο από 1,5 mm.
- 2) Η διάσταση a₂ πρέπει να εκτείνεται γύρω από το b_{min} / 2, μετρίεται στο κάτω άκρο της λεπίδας, σε πλάτος τουλάχιστον 4 mm και από τις δύο πλευρές της λεπίδας. Έξω από αυτή την περιοχή, η διάσταση αυτή μπορεί να είναι μικρότερη από τις τιμές που αναφέρονται για την a₂.
- 3) Μονωτικό υλικό
- 4) Οι επιφάνειες επαφής μπορεί να είναι επίπεδες ή με ραβδώσεις.
- 5) Επισημασμένη λαβή αντικατάστασης (λεπτομέρεια X)
- 6) Μέγιστες διαστάσεις στο εσωτερικό των ασφαλειών τήξης. Εντός των ορίων αυτών, οι ασφάλειες τήξης μπορεί να είναι οποιασδήποτε μορφής, για παράδειγμα, τετράγωνα, ορθογώνια, κυκλικά, οβάλ, πολυγωνικά, κλπ.
- 7) Τα απαιτούμενα διάκενα για μέγεθος νούμερο 4 των ασφαλειών τήξης.
- 8) Διάταξη ένδειξης. Η θέση της διάταξης ένδειξης, επιλέγεται από τον κατασκευαστή.

9) Τμήματα, προεξοχές που μπορούν να μονωθούν.

10) Με εξαίρεση την επισυναπτόμενη λαβή αντικατάστασης (λεπτομέρεια X), οι τελικές πλάκες δεν επιτρέπεται να εξέχουν ακτινωτά από το μονωμένο κομμάτι.

11) Πρέπει να χρησιμοποιείται με το περιστρεφόμενο σύνδεσμο που έχει η συσκευή απεμπλοκής.

12) Όσον αφορά τις προεξοχές που διαρρέονται από ονομαστικά ρεύματα στο εσωτερικό των μεγεθών 0, 1, 2 και 3 η διάσταση του μικρότερου μεγέθους επιτρέπεται.

13) Η άκρη των μαχαιρωτών επαφών μπορεί να είναι στρογγυλή ή οποιοδήποτε άλλου κατάλληλου σχήματος.

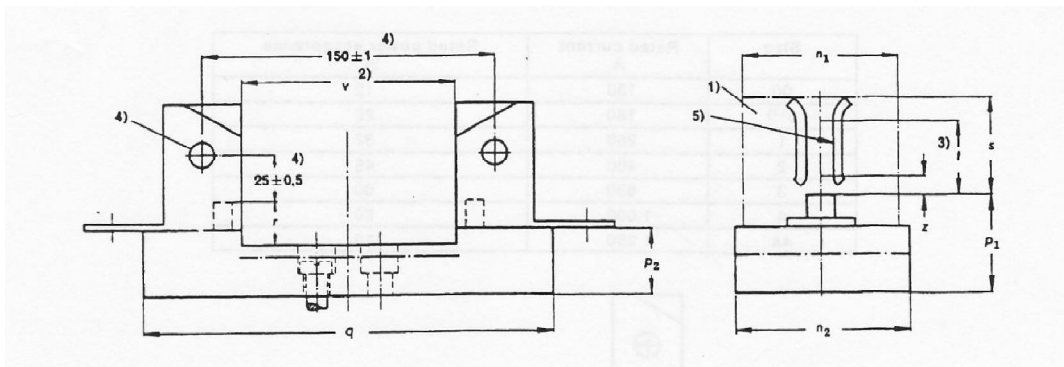
14) Ένα νέο μέγεθος 000 (πρώην C00) είναι προς το παρόν υπό εξέταση. Οι παρακάτω διαστάσεις συνιστώνται για τις ασφάλειες τήξης:

$$e_{1\max} = 41\text{mm}$$

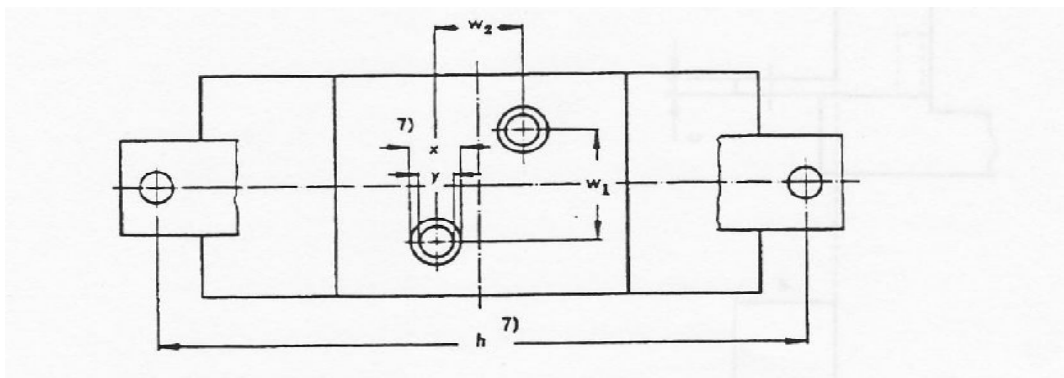
$$e_3 = 16^{+5}_{-2}\text{mm}$$

$$e_{2\max} = 21\text{mm}$$

$$f_{\max} = 8\text{mm}$$



Σχήμα 2.1 (I) : Βάση μαχαιρωτής ασφάλειας σε πλάγιες όψεις



Σχήμα 2.2 (I) : Βάση μαχαιρωτής ασφάλειας σε κάτοψη

Οι διαστάσεις δίνονται σε χιλιοστά.

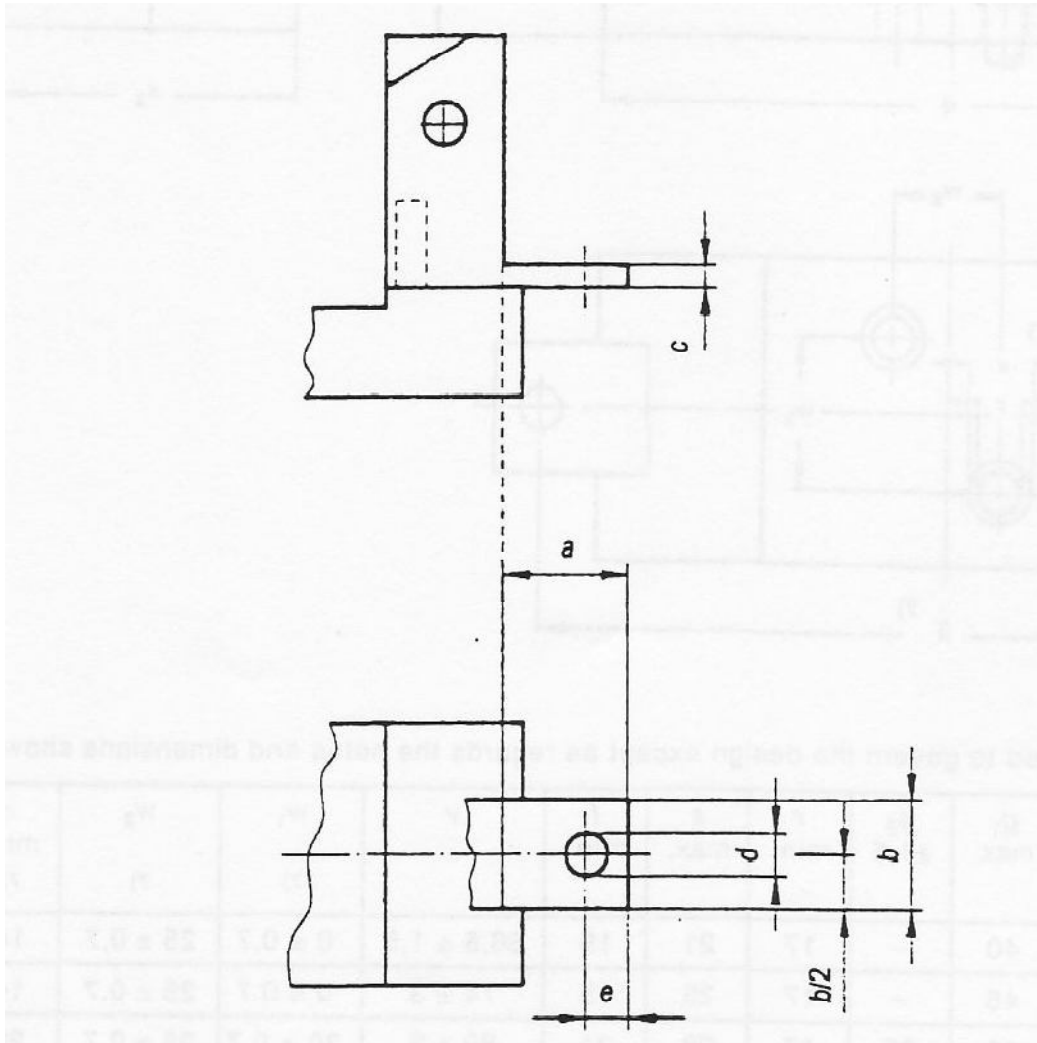
Τα σχέδια δεν πρόκειται να επηρεάσουν τον σχεδιασμό, εκτός σε ό,τι αφορά τις σημειώσεις και τις διαστάσεις που δίνονται.

Μέγεθος	h ±1,5 7)	n ₁ max	n ₂ max	p ₁ max	p ₂ ±1,5	r min	S max	t min	v	w ₁ 7)	w ₂ 7)	x min 7)	y ±0,5 7)	z max
00	100	30	38	40	-	17	21	15	56,5 ± 1,5	0 ± 0,7	25 ± 0,7	14	7,5	3
	150	40	48	48	-	17	25	15	74 ± 3	0 ± 0,7	25 ± 0,7	14	7,5	3
1	175	52	60	55	35	17	38	21	80 ± 3	30 ± 0,7	25 ± 0,7	20	10,5	5
2	200	60	68	60	35	17	46	27	80 ± 3	30 ± 0,7	25 ± 0,7	20	10,5	5
3	210	75	83	68	35	20	58	33	80 ± 3	30 ± 0,7	25 ± 0,7	20	10,5	5
4	-	-	-	-	-	27	84	50	97 min	-	-	-	-	5
4a ⁶⁾	270	102	115	-	40	32	84	50	110 ± 15	45 ± 0,7	30 ± 0,7	36	14	6

Πίνακας 2(I) : Διαστάσεις των βάσεων μαχαιρωτών ασφαλειών που δίνονται στις εικόνες 2.1(I) , 2.2(I) , 2.3(I)

Μέγεθος βάσης	Ονομαστικό ρεύμα A	Ονομαστική επιτρεπτή ισχύς W
00	160	12
0 ¹⁴⁾	160	25
1	250	32
2	400	45
3	630	60
4	1000	90
4a	1250	110

Πίνακας K : Ονομαστική επιτρεπτή ισχύς και ονομαστικό ρεύμα κάθε βάσης

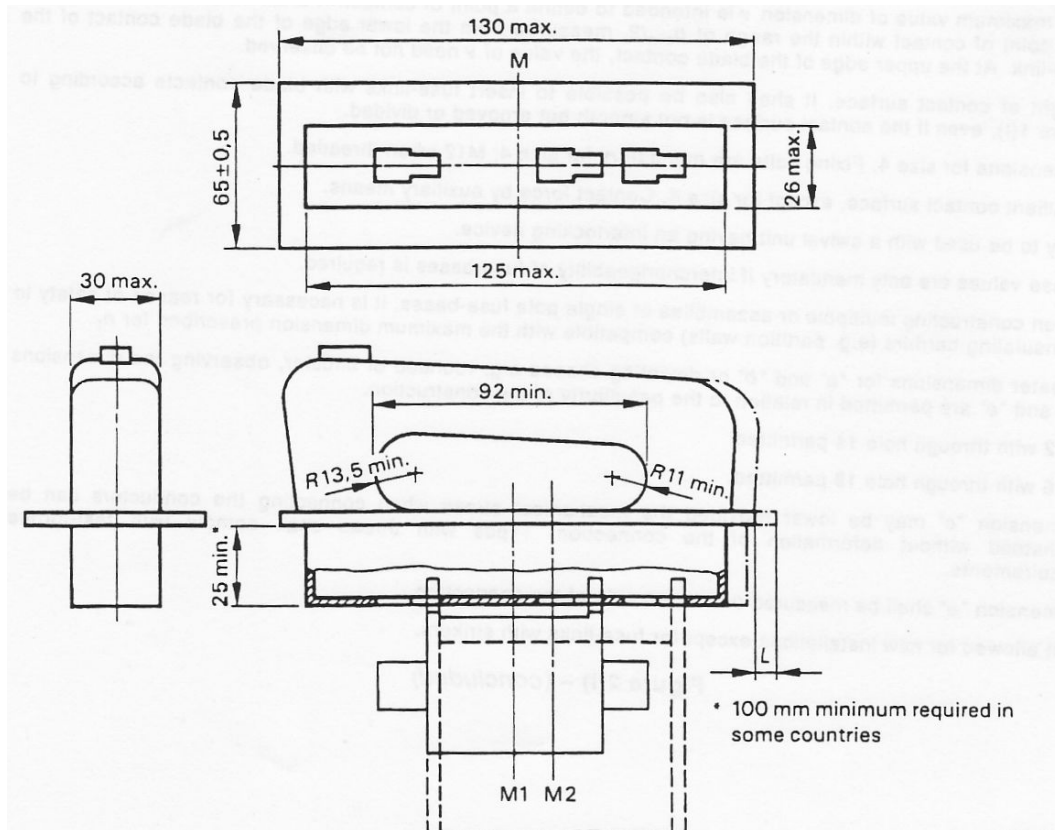


Σχήμα 2.3 (I) : Σημεία τοποθέτησης ακροδεκτών της βάσης μαχαιρωτής ασφάλειας

Μέγεθος	a ⁹⁾¹³⁾ min	b ⁹⁾ min	c ¹²⁾ min	d ± 0,25		Παξιμάδι	e ± 0,5
				Συνολική διάμετρος	Σπείρωμα		
00	20	20	3	9	M ₈	M ₈	10
0 ¹⁴⁾	23	20	3	9	M ₈	M ₈	10
1	24	25	4	11	M ₁₀	M ₁₀	12,5
2	28	25	4	11 ¹⁰⁾	M ₁₀ ¹⁰⁾	M ₁₀ ¹⁰⁾	12,5
3	35	30	5	11 ¹⁰⁾	M ₁₀ ¹⁰⁾	M ₁₀ ¹⁰⁾	15
4	45	40	8	14 ¹¹⁾	M ₁₂ ¹¹⁾	M ₁₂ ¹¹⁾	20
4a	45	40	10	18	M ₁₆	M ₁₆	20

Πίνακας 2 (I) : Βάσεις ασφαλειών για μαχαιρωτές ασφάλειες

- 1) Η περιοχή αυτή θεωρείται ενεργή.
- 2) Η μέγιστη τιμή του v διάστασης που εκτείνεται για να καθορίσει το σημείο επαφής. Θα πρέπει τουλάχιστον ένα σημείο της επαφής να είναι εντός του εύρους $b_{\min} / 2$, μετρούμενο από το κατώτερο άκρο της επαφής της ασφάλειας. Στο ανώτερο άκρο της μαχαιρωτής επαφής, η τιμή v δεν είναι απαραίτητο να παρατηρηθεί.
- 3) Ύψος της επιφάνειας επαφής. Είναι επίσης δυνατό να εισαχθούν μαχαιρωτές ασφάλειες σύμφωνα με το σχήμα 1 (I), ακόμη και αν η επιφάνεια επαφής δεν είναι ομαλή, χαραγμένη ή τεμαχισμένη.
- 4) Διαστάσεις για το 4^ο μέγεθος. Παξιμάδια στερέωσης είναι υποχρεωτικά για το 4^ο μέγεθος. Σπείρωμα M_{12} όπου απαιτείται.
- 5) Ελαστικές επιφάνειες επαφής, εκτός από το 4^ο μέγεθος. Η δύναμη επαφής είναι δευτερεύουσας σημασίας.
- 6) Πρέπει να χρησιμοποιείται με το περιστρεφόμενο σύνδεσμο που έχει η συσκευή απεμπλοκής.
- 7) Οι τιμές αυτές είναι υποχρεωτικές μόνο εάν η αντικατάσταση των βάσεων ασφαλειών είναι απαραίτητη.
- 8) Κατά την κατασκευή πολυπολικού ή μαζικών ενιαίων ακροδεκτών βάσεων ασφαλειών, είναι απαραίτητο για λόγους ασφαλείας να τοποθετηθεί διαχωριστικό εμπόδιο, συμβατό με τη μέγιστη διάσταση που περιγράφεται στη διάσταση n_1 .
- 9) Μεγαλύτερες διαστάσεις για τα "a" και "b" ή για σχήματα που αποκλίνουν π.χ. στρογγυλεμένα ή κυκλικά, παρατηρώντας τις διαστάσεις "d" και "e" που επιτρέπονται σε σχέση με την ιδιαιτερότητα της κατασκευής.
- 10) Επιτρέπεται παξιμάδι M_{12} με σπείρωμα διαμέτρου 14.
- 11) Επιτρέπεται παξιμάδι M_{16} με σπείρωμα διαμέτρου 18.
- 12) Η διάσταση "c" μπορεί να είναι μικρότερη υπό τον όρο ότι οι συνδέσεις των αγωγών μπορούν να αντέξουν τη μηχανική καταπόνηση χωρίς να παραμορφωθούν. Τα σπειρώματα θα πρέπει να είναι σύμφωνα με τις δοκιμές αντοχής.
- 13) Η διάσταση "a" πρέπει να μετρηθεί στην επάνω πλευρά της σύνδεσης.
- 14) Δεν επιτρέπεται σε νέες εγκαταστάσεις εκτός των ασφαλειών τήξης.



Εικόνα 3(I) : Χειρολαβή αντικατάστασης μαχαιρωτών ασφαλειών

Μέγεθος	L	Απόσταση	
		M-M ₁	M-M ₂
00	14	0 ± 3	-
0 ... 3	16	-	11 ± 3

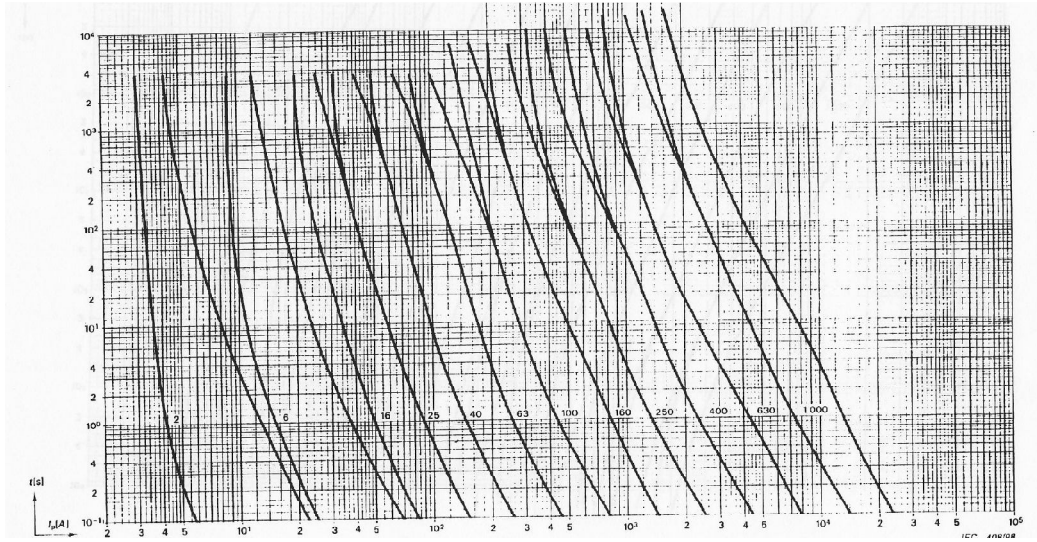
Πίνακας L : Διαστάσεις της χειρολαβής αντικατάστασης μαχαιρωτών ασφαλειών

M₁ για το μέγεθος 00

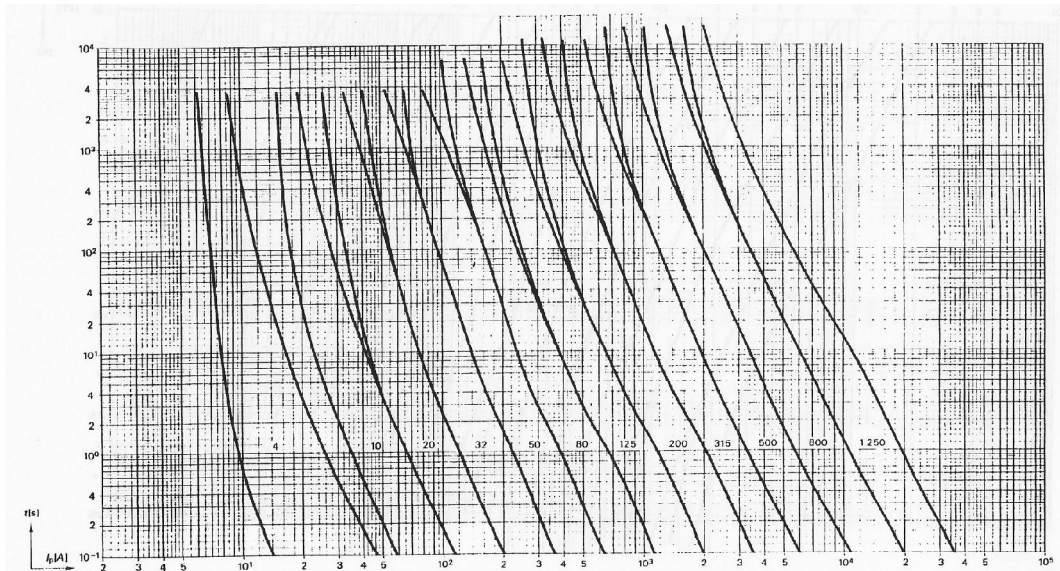
M₂ για τα μεγέθη 0 ... 3

M = Κέντρο της ζεύξης

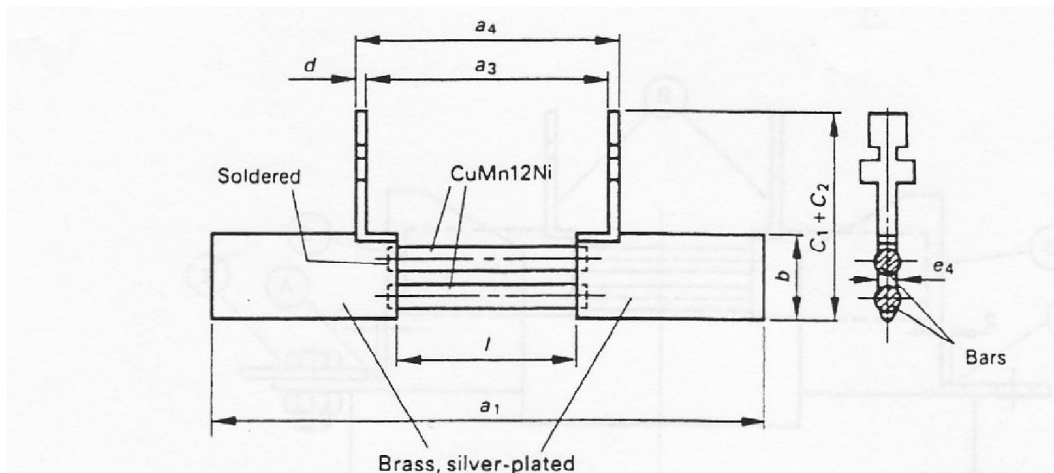
L = Επιτρεπτό όριο τοποθέτησης και αφαίρεσης της ασφάλειας



Σχήμα 4.1 (I) : Περιοχή ονομαστικού χρόνου για gG μαχαιρωτές ασφάλειες



Σχήμα 4.2 (I) : Περιοχή ονομαστικού χρόνου για gG μαχαιρωτές ασφάλειες (συνέχεια)



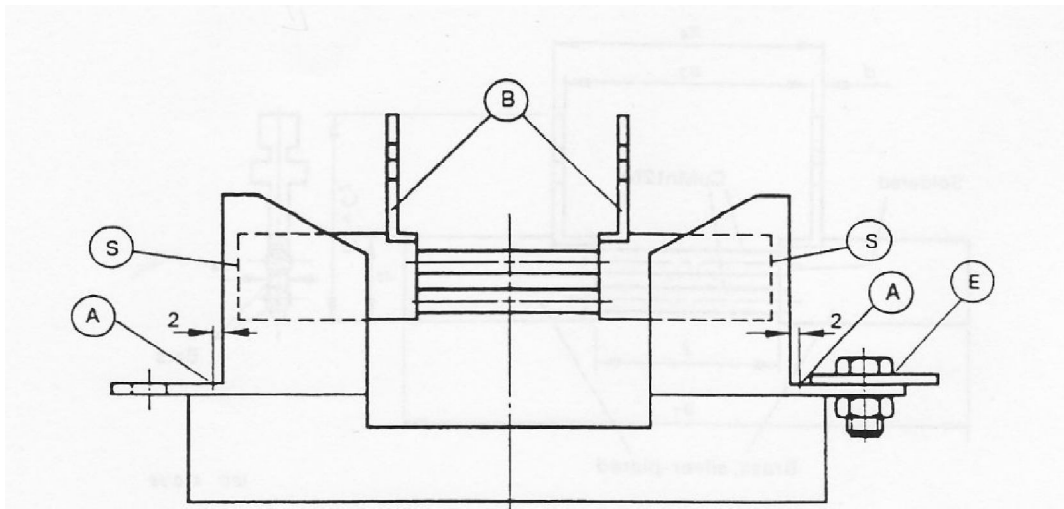
Σχήμα 5 (I) : Δοκίμιο ασφάλειας σύμφωνα με την παράγραφο 4.1.2, 4.3, 4.5.1 και 4.7 του προτύπου IEC 60269-1

Οι διαστάσεις δίνονται σε χιλιοστά. Για τις υπόλοιπες διαστάσεις, βλέπε το σχήμα που ακολουθεί.

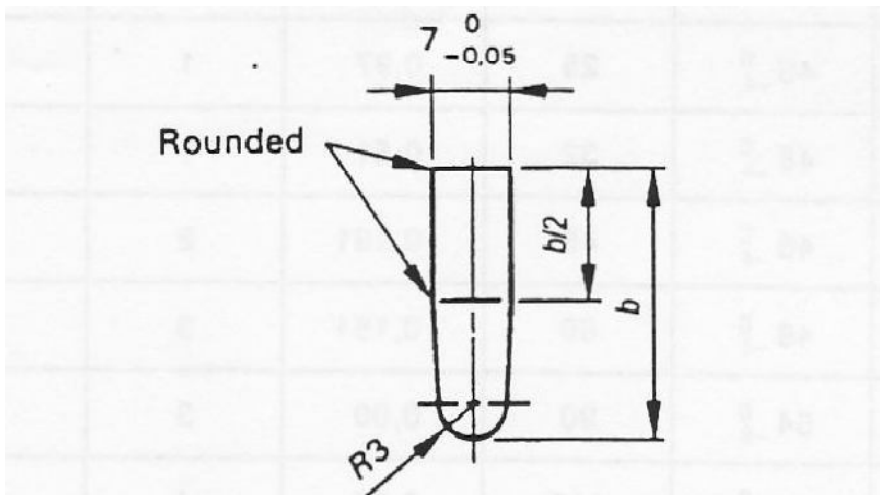
Μέγεθος	I	P* W	R** mΩ	Ράβδος (bars)	
				Νούμερο	Διάμετρος
00	$30,5_{-3}^0$	12	0,47	1	7
0 ¹⁴⁾	46_{-4}^0	25	0,97	1	6
1	46_{-4}^0	32	0,51	1	8
2	46_{-4}^0	45	0,281	2	8
3	46_{-4}^0	60	0,151	3	9
4	54_{-6}^0	90	0,09	3	12
4a	54_{-6}^0	110	0,07	4	12

* Στο μέγιστο ονομαστικό ρεύμα
 ** Μετρίεται επάνω στους ακροδέκτες με απόκλιση $\pm 2\%$

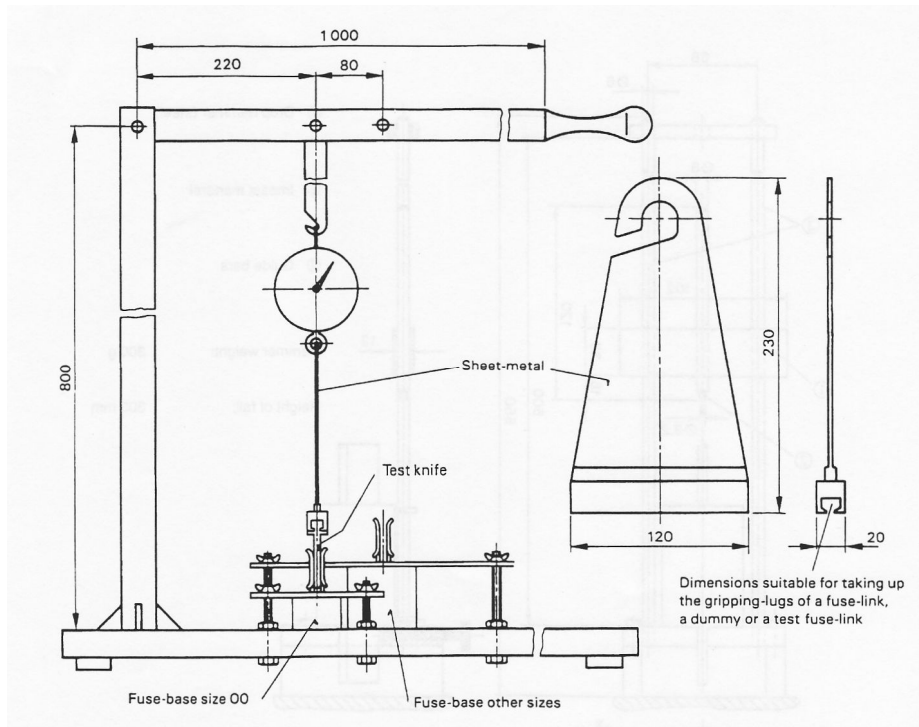
Πίνακας 5 (I) : Δοκίμιο ασφάλειας σύμφωνα με την παράγραφο 4.1.2, 4.3, 4.5.1 και 4.7



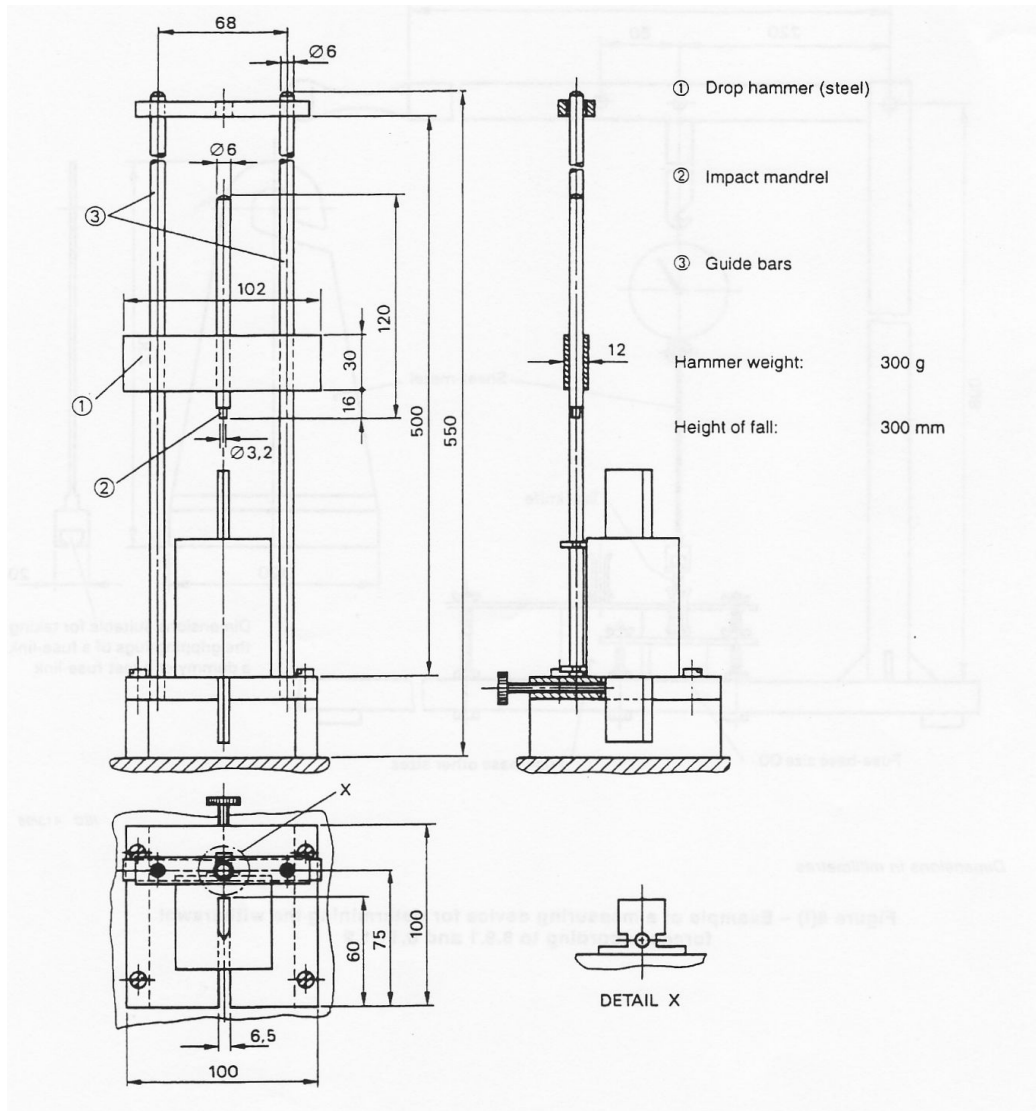
Σχήμα 6 (I) : Σημεία μέτρησης σύμφωνα με την παράγραφο 8.3.4 του προτύπου IEC 60269-1, 8.3.4.1 (I), 8.3.4.2 (I) και 8.10.2 (I) της παρούσας έκδοσης.



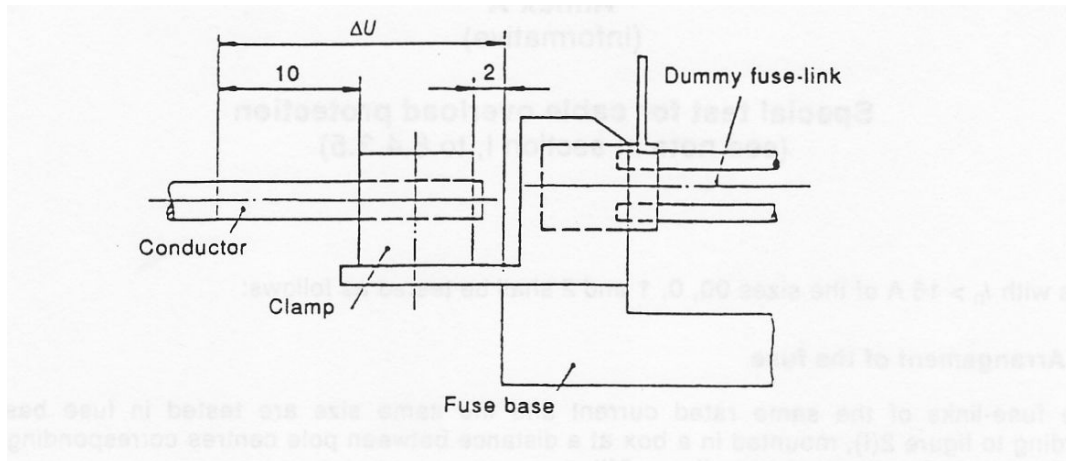
Σχήμα 7 (I) : Δοκιμή μαχαιριών ασφάλειας σύμφωνα με την παράγραφο 4.3.1



Σχήμα 8 (I) : Παράδειγμα μιας συσκευής μέτρησης για τον υπολογισμό της δύναμης αποκοπής, σύμφωνα με την παράγραφο 4.5.1 και 5.1.2



Σχήμα 9 (I) : Μέσο για την επιβεβαίωση της μηχανικής αντοχής των ακροδεκτών



Σχήμα 10 (I) : Σημεία μεταξύ των οποίων μετρείται η πτώση τάσης ΔU του δείγματος

