



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

**Θερμική καταπόνηση για διάφορες ροπές σύσφιξης σε
σφικτήρα διατομής 35mm^2 εναέριου δικτύου μέσης τάσης.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καρατζάς – Πλιάκας Αντώνιος

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012



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

**Θερμική καταπόνηση για διάφορες ροπές σύσφιξης σε
σφικτήρα διατομής 35mm^2 εναέριου δικτύου μέσης τάσης.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καρατζάς – Πλιάκας Αντώνιος

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26 Οκτωβρίου 2012

.....

.....

.....

Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος

Ν.Ι. Θεοδώρου

Π.Δ. Μπούρκας

Καθηγητής ΕΜΠ

Καθηγητής ΕΜΠ

Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΡΙΟΣ 2012

.....
ΚΑΡΑΤΖΑΣ – ΠΛΙΑΚΑΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Καρτζάς – Πλιάκας Αντώνιος, 2012
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

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 ΕΜΠ, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2011-2012.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Καραγιαννόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ. Θεοδώρου και κ. Μπούρκα. Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στην κ. Πολυκράτη για την πολύτιμη βοήθεια της σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς και της ροπής σύσφιξης υπό καταπόνηση με εναλλασσόμενο ρεύμα σε στατικούς ηλεκτρικούς συνδέσμους μέσης τάσης. Συγκεκριμένα έγιναν μετρήσεις σε σύνδεσμο αλουμινιού, ο οποίος συνδέει παράλληλα αγωγούς διατομής 35mm^2 για ροπή σύσφιξης 18Nm, 20Nm και 22Nm.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια θεωρητική εισαγωγή στην οποία περιγράφεται το δίκτυο διανομής, οι αγωγοί που το αποτελούν με τα χαρακτηριστικά τους, καθώς και οι ηλεκτρικές επαφές. Αναλυτικότερα περιγράφονται οι στατικοί ηλεκτρικοί σύνδεσμοι, η δύναμη σύσφιξης, οι επικαθίσεις στην επιφάνεια τους και γενικότερα οι παράγοντες που επιδρούν στις ηλεκτρικές επαφές. Τέλος γίνεται αναφορά στις διατάξεις μέτρησης και αξιολόγησης των στατικών ηλεκτρικών επαφών.

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

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία και αναλύεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε με τα μέρη τα οποία την αποτελούν.

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

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τον σχολιασμό και τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

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

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

ABSTRACT

The objective of this diploma thesis is to study and report the thermal behavior and the response of the applied tightening torque on wedge-connectors, through which alternative current was passing. Specifically, aluminium two-bolt parallel connectors were examined. The torque was set at 18Nm, 20Nm and 22Nm.

In the first chapter, there is a theoretical introduction, where the distribution network, with its lines and the electrical contacts are described. An in depth analysis of the electrical contacts, the tightening torque, the surficial oxides and contaminants and the all the factors in general which affect electrical contacts, is also included. Finally, methods to measure and evaluate electrical contacts are mentioned.

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

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

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

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

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

Keywords: tightening torque, wedge connectors, electrical contacts, overheating test, contact resistance

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	9
1.1. Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	9
1.2. Το εναέριο δίκτυο διανομής Μέσης Τάσης.....	10
1.3. Οι αγωγοί του δικτύου Διανομής	14
1.3.1. Αγωγοί από Χαλκό.....	14
1.3.2. Αγωγοί από Αλουμίνιο	14
1.3.3. Αγωγοί από Αλουμίνιο - Χάλυβα (ACSR).....	15
1.4. Ηλεκτρικοί σύνδεσμοι.....	18
1.4.1. Η δύναμη σύσφιξης στις στατικές ηλεκτρικές επαφές.....	18
1.4.2. Αντίσταση στένωσης και αντίσταση στρώματος επικαθίσεων	20
1.4.3. Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντίσταση στένωσης	23
1.6. Οξείδωση και επικαθίσεις	30
1.7. Γαλβανική διάβρωση.....	32
1.8. Επίδραση της υγρασίας	34
1.9. Σχηματική αναπαράσταση των παραγόντων που επιδρούν σε μία ηλεκτρική επαφή. 35	
1.10. Η εκδήλωση του φαινομένου της σήραγγος στις επαφές.....	36
1.11. Η φυσική διερεύνηση των φαινομένων μεταφοράς στις επαφές.....	41
1.12. Οι επαφές σαν ένα μη γραμμικό δυναμικό σύστημα.....	49
1.13. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα για την ερμηνεία των μη γραμμικών φαινομένων στις επαφές.....	52
1.14. Η ηλεκτρομονωτική και η αγώγιμη συμπεριφορά των μικροδομών MIM, MOM και MGM μίας στατικής ηλεκτρικής επαφής	53
1.15. Οι διατάξεις μέτρησης και αξιολόγησης των στατικών ηλεκτρικών επαφών	55
1.15.1. Η δοκιμή υπερθέρμανσης.....	55
1.15.2. Δηλεκτρικές δοκιμές διακοπών	56
1.15.3. Δοκιμή μηχανικής αντοχής.....	56
1.15.4. Δοκιμή υπό τριπολικό βραχυκύκλωμα.....	56
2. Σκοπός της εργασίας	57
3. Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας	58
3.1. Πειραματική διάταξη.....	58
3.1.1. Ο αυτομετασχηματιστής.....	59
3.1.2. Ο μετασχηματιστής έντασης	60
3.1.3. Οι αγωγοί.....	60
3.1.4. Ο ηλεκτρικός σύνδεσμος.....	61
3.1.5. Μετρητές θερμοκρασίας.....	61

3.2. Πειραματική διαδικασία.....	62
4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων	66
4.1. Μετρήσεις για ροπή σύσφιξης 18Nm.....	67
4.2. Μετρήσεις για ροπή σύσφιξης 20Nm.....	72
4.3. Μετρήσεις για ροπή σύσφιξης 22Nm.....	77
5. Σχόλια και Συμπεράσματα	82
5.1. Επεξεργασία των μετρήσεων και συμπεράσματα	82
5.2. Γενικά συμπεράσματα.....	85
Βιβλιογραφία.....	86
Παράρτημα Α.....	88

1. Εισαγωγή

1.1. Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

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

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

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

Το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από γραμμές μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσης (στο ελληνικό δίκτυο 400kV, 150kV και 66kV), οι οποίες μπορεί να είναι εναέριες, υπόγειες είτε υποβρύχιες.

Στο δίκτυο διανομής η ενέργεια μεταφέρεται από τους υποσταθμούς διανομής στις περιοχές κατανάλωσης και από εκεί διανέμεται στους καταναλωτές.

Οι καταναλωτές χωρίζονται σε βιομηχανικούς καταναλωτές (μέσης τάσης 15 και 20 kV), εμπορικούς και οικιακούς (χαμηλής τάσης 400V).

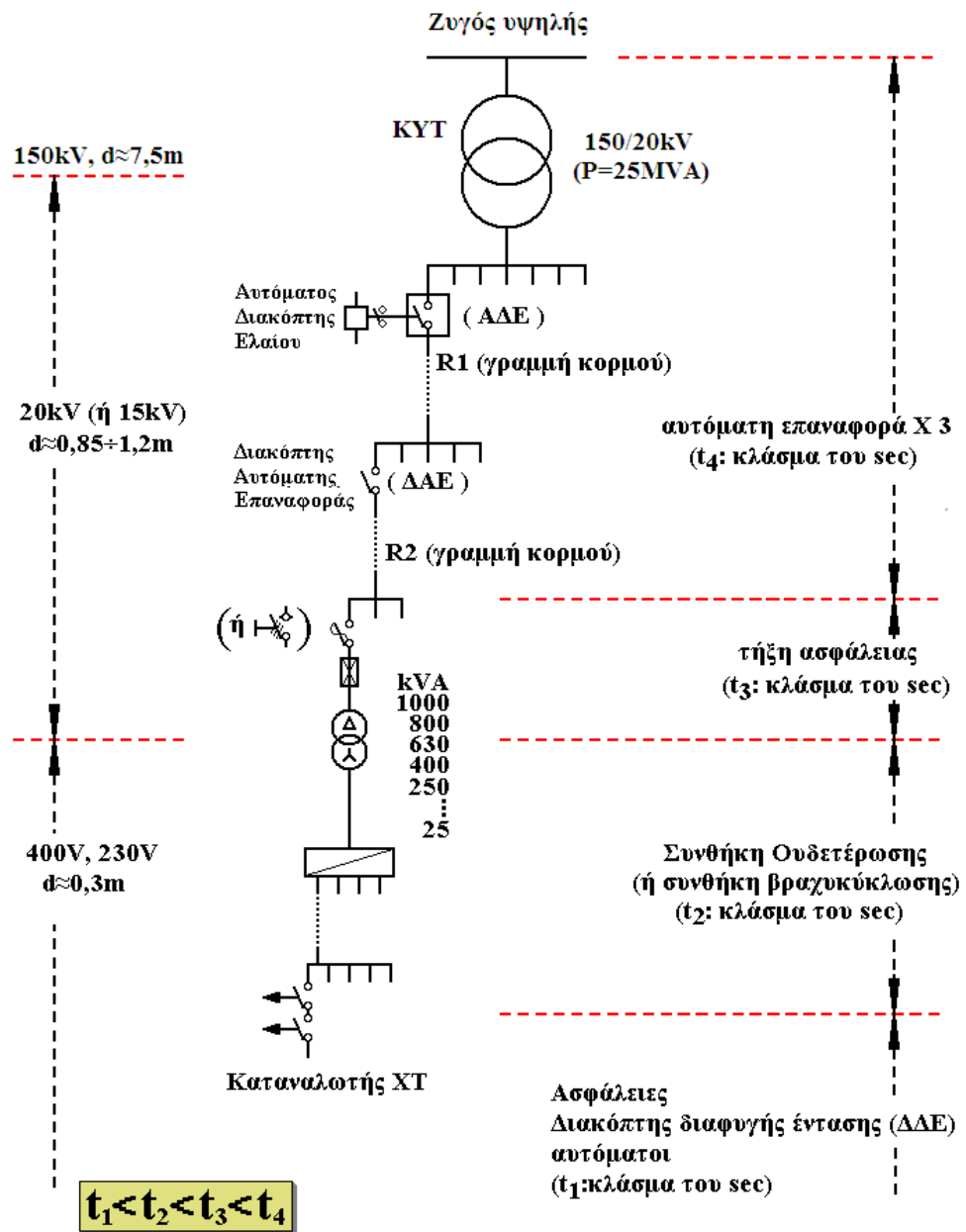
1.2. Το εναέριο δίκτυο διανομής Μέσης Τάσης

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

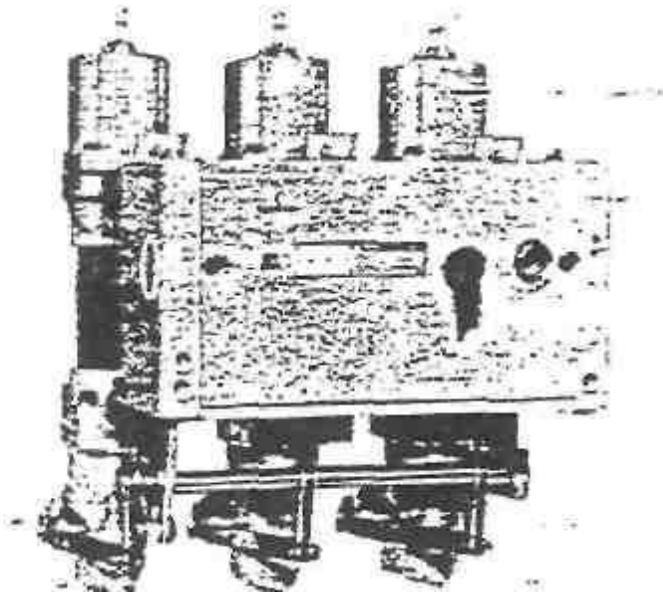
Διακρίνονται δύο βαθμίδες διανομής, η διανομή μέσης τάσης ή αλλιώς πρωτεύουσα διανομή, και η διανομή χαμηλής τάσης ή αλλιώς δευτερεύουσα διανομή. Τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης τροφοδοτούνται από τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, από υψηλή σε μέση, και τροφοδοτούν τους υποσταθμούς διανομής και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

Τα εναέρια δίκτυα μέσης τάσης του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από μεγάλο πλήθος στοιχείων και έχουν κατά κανόνα δενδροειδή μορφή. Στο σχήμα 1.2-1 φαίνεται απλοποιημένα ένα παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με αυτό, από το μετασχηματιστή υψηλής τάσης (150kV/20kV, 25MVA) του Κέντρου Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ) αναχωρούν μέσω αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ – σχήμα 1.2-2) διάφορες γραμμές μέσης τάσης (20kV), που η καθεμία αφορά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ευρύτερη περιοχή. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται γραμμές κορμού και κατασκευάζονται με αγωγούς μεγάλης διατομής, συνήθως 95mm² ισοδύναμου χαλκού, ενώ συμβολίζονται στα σχέδια με το γράμμα R και ένα αριθμό (π.χ. R 23). Κάθε μία από τις παραπάνω γραμμές διακλαδίζεται σε ορισμένες γραμμές, που αφορούν την ηλεκτροδότηση τμημάτων της ευρύτερης περιοχής μέσω διακοπών αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ), οι οποίες ονομάζονται επίσης γραμμές κορμού.

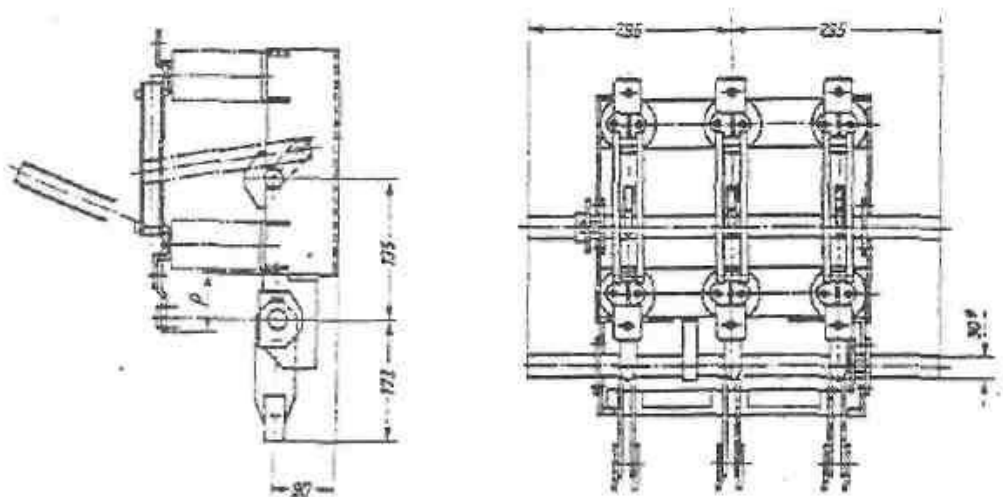
Δεδομένου ότι τα δίκτυα διανομής λειτουργούν ακτινικά η προστασία τους είναι δυνατή με απλές διατάξεις διαβαθμισμένες κατάλληλα. Κατά μήκος του δικτύου διανομής μέσης τάσης εγκαθίστανται μέσα ζεύξεως όπως αποζεύκτες (σχήμα 1.2-3) και διακόπτες φορτίου και μέσα προστασίας όπως διακόπτες ισχύος (ΑΔΕ), διακόπτες απομονώσεως (Sectionalizers) και ασφάλειες. Τα μέσα ζεύξεως χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση ή την απομόνωση των τμημάτων του δικτύου (π.χ. σε περιπτώσεις πυρκαγιών, εργασιών συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών). Τα μέσα προστασίας χρησιμοποιούνται για την απομόνωση τμημάτων του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος. Λόγω του ότι τα εναέρια δίκτυα μέσης τάσης είναι εκτεθειμένα, η συχνότητα εμφάνισης σφαλμάτων είναι αυξημένη. Αξιοσημείωτο είναι ότι σε ποσοστό που υπερβαίνει το 80% του συνόλου, τα σφάλματα είναι παροδικά.



Σχήμα 1.2-1 : Απλοποιημένο παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 1.2-2 : Αυτόματος διακόπτης ελαίου



Σχήμα 1.2-3 : Τριπολικός αποξεύκτης μέσης τάσης με γείωση

Όταν συμβεί ένα σφάλμα σε μία γραμμή κορμού (π.χ. βραχυκύκλωμα λόγω πτώσης ενός κλαδιού στη γραμμή), τότε ο διακόπτης προστασίας (ΑΔΕ ή ο ΔΑΕ) θα διακόψει αυτομάτως στη θέση εντός για να ηλεκτροδοτηθεί η γραμμή και αν υπάρχει ακόμα το σφάλμα θα γίνει και πάλι αυτόματη διακοπή και ακολούθως αυτόματη εκ νέου ηλεκτροδότηση. Αν και κατά τη δεύτερη αυτή αυτόματη προσπάθεια του διακόπτη συνεχίζει να υπάρχει το σφάλμα θα γίνει και μία τρίτη αυτόματη διακοπή –

εκ νέου ηλεκτροδότηση και μόνο αν εξακολουθεί να υπάρχει το σφάλμα θα συμβεί πλέον οριστική διακοπή ρεύματος της εν λόγω γραμμής κορμού. Είναι προφανές ότι η προαναφερθείσα σε τρεις κύκλους λειτουργία των ΑΔΕ και των ΔΑΕ αποσκοπεί, σε περιπτώσεις εμφάνισης παροδικών σφαλμάτων, τόσο στην προσπάθεια για απρόσκοπτη ηλεκτροδότηση μίας μεγάλης περιοχής, όσο και στην αποφυγή άσκοπων μετακινήσεων συνεργείων. Σημειώνεται ότι η διακοπή της ηλεκτροδότησης σε κάθε κύκλο λειτουργίας των ΑΔΕ και των ΔΑΕ συμβαίνει πάντοτε σε κλάσματα δευτερολέπτου (π.χ 0,15, 0,35 δευτερόλεπτα), που στην πράξη σημαίνει πως δεν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χρόνος για την εκδήλωση αξιόλογων θερμικών φαινομένων (δεν προκαλείται υπερθέρμανση της γραμμής πάνω από τα ανεκτά όρια, πολύ δε περισσότερο δεν δημιουργούνται τήγματα μετάλλου από τους αγωγούς).

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

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

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

1.3. Οι αγωγοί του δικτύου Διανομής

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

Οι αγωγοί κατασκευάζονται μονόκλωνοι ή πολύκλωνοι. Στα εναέρια δίκτυα δεν χρησιμοποιούνται μονόκλωνοι αγωγοί, γιατί έχουν πολύ μικρότερη μηχανική αντοχή από τους πολύκλωνους. Επίσης οι μονόκλωνοι είναι δύσκαμπτοι και η διατομή τους είναι μέχρι 16 mm². Οι αγωγοί χαλκού και αλουμινίου αποτελούνται από κλώνους της ίδιας διατομής ανά διατομή αγωγού και παίρνουν τη μορφή των συρματόσχοινων. Οι αριθμοί των κλώνων είναι κυρίως 7, 19, 37, 61 κλπ.

1.3.1. Αγωγοί από Χαλκό

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

1.3.2. Αγωγοί από Αλουμίνιο

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

Έτσι ένας αγωγός αλουμινίου με ισοδύναμη διατομή με αγωγό από χαλκό έχει το 1/2 του βάρους του και διάμετρο μεγαλύτερη κατά 1,6 φορές (60% μεγαλύτερη). Τα παραπάνω μας δείχνουν ότι ο αγωγός από αλουμίνιο δέχεται

μεγαλύτερες επιφορτίσεις από τον άνεμο και τον πάγο λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειάς του.

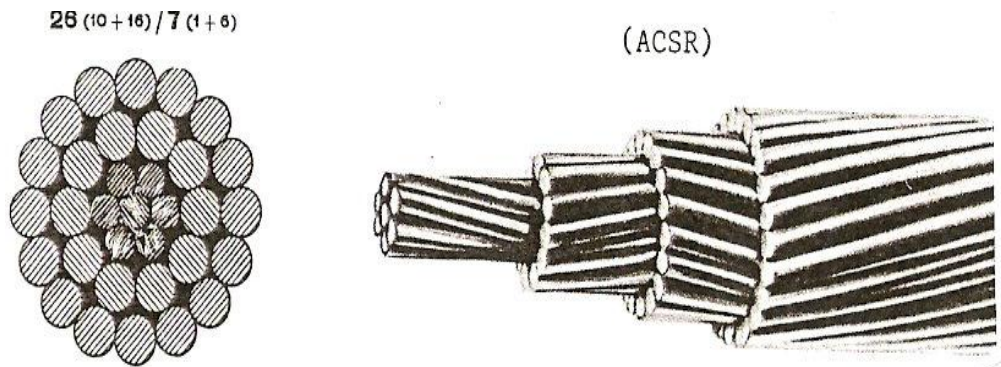
Το αλουμίνιο με κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες οξειδώνεται (σκουριάζει) επιφανειακά. Το στρώμα της οξείδωσης είναι πολύ λεπτό και προστατεύει τον αγωγό από την παραπέρα οξείδωση. Κοντά στη θάλασσα όμως (σε απόσταση μέχρι 1km περίπου) διαβρώνεται από το αλάτι που περιέχεται στον αέρα, σε βάθος μέχρι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

1.3.3. Αγωγοί από Αλουμίνιο - Χάλυβα (ACSR)

Το μειονέκτημα των αγωγών αλουμινίου αντιμετωπίζεται με επιτυχία με τους αγωγούς ACSR. Αυτοί έχουν ψυχή από κλώνους με γαλβανισμένο χάλυβα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3.3-1. Ο χάλυβας αναλαμβάνει τη μηχανική αντοχή και το αλουμίνιο την ηλεκτροδότηση. Το ρεύμα οδεύει κυρίως μέσα από το αλουμίνιο, δηλαδή το ρεύμα μέσα από το χάλυβα είναι αμελητέο.

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

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



Σχήμα 1.3.3-1 : Μορφή αγωγών Αλουμινίου-Χάλυβα (ACSR)

Συνήθως, στον χαρακτηρισμό των αγωγών ACSR ή αλουμινίου, δίνεται και η ισοδύναμη διατομή χαλκού. Αυτή είναι η διατομή που θα είχε ένας αγωγός ίσης αντίστασης, αν κατασκευαζόταν από χαλκό. Οι ωμικές αντιστάσεις των πολύκλωνων αγωγών προκύπτουν από την ονομαστική διατομή τους. Η αγωγιμότητα που πρέπει να ληφθεί στους υπολογισμούς είναι διαφορετική απ' ό,τι η αγωγιμότητα του καθαρού υλικού. Η μηχανική επεξεργασία και η συστροφή των αγωγών αυξάνουν την αντίσταση του αγωγού.

Στο σχήμα 1.3.3-2 φαίνονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των διάφορων αγωγών, για τις διάφορες διατομές τους.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΥΜΝΩΝ ΑΓΩΓΩΝ				
Διατομή Αγωγών mm ²	Βάρος Kg/m	Διάμετρος mm	Στρώσι mm	Φορτίο θραύσεως Kg
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΧΑΛΥΒΙΝΗ ΨΙΧΗ (ACSR)				
16	0,102	6,96	6Al/1St/2,32	950
35	0,224	10,32	6Al/1St/3,44	2000
50	0,321	12,33	6Al/1St/4,11	2900
95	0,609	17,24	26/2,72Al+7/2,12St	5650
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΒΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΧΑΛΥΒΙΝΗ ΨΙΧΗ (ACSR-2)				
16	0,372	10,32	3Al/4St/3,44	4635
ΑΓΩΓΟΙ ΕΚ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ (AAAC)				
35	0,098	7,50	7/2,50	980
70	0,189	10,50	19/2,10	1880
95	0,269	12,50	19/2,50	2670
185	0,525	17,50	37/2,50	5170
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ (Al)				
16	0,074	6,63	7/2,21	470
35	0,158	9,66	7/3,22	940
50	0,229	11,75	19/2,35	1442
70	0,320	13,90	19/2,78	2018
ΑΓΩΓΟΙ ΧΑΛΚΟΥ (Cu)				
16	0,144	5,13	7/1,71	739
35	0,315	7,59	7/2,53	1566
50	0,453	9,20	19/1,83	2299
70	0,634	10,70	19/2,17	3162
Σημείωση:				
Οι διατομές αγωγών ACSR, ACSR-R και Al είναι ισοδύναμοι Χαλκού. Οι διατομές των αγωγών Χαλκού και AAAC είναι πραγματικές. Η ανοχή του βάρους των αγωγών είναι +2%.				

Σχήμα 1.3.3-2 : Χαρακτηριστικά γυμνών αγωγών εναέριων γραμμών
 Οι διατομές αγωγών ACSR, ACSR-R και Al είναι ισοδύναμου χαλκού
 Οι διατομές των αγωγών Χαλκού και AAAC είναι πραγματικές
 Η ανοχή του βάρους των αγωγών είναι +2%

1.4. Ηλεκτρικοί σύνδεσμοι

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

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

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

- τις *στατικές ηλεκτρικές επαφές (stationary electrical contacts)* : είναι οι επαφές που δεν έχουν ισχύ διακοπής, μπορούν δηλαδή να χειρίζονται μόνο όταν το κυκλωμα έχει τεθεί εκτός τάσης μέσω ενός διακόπτη) όπως οι επαφές ενός αποζεύκτη ή ενός γειωτή.
- και τις *ηλεκτρικές επαφές που έχουν ισχύ διακοπής*, χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητά τους να διακόπτουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, χωρίς να υφίστανται συνέπειες στη συμπεριφορά τους από το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται κατά το χειρισμό του φορτίου, όπως συμβαίνει με τις επαφές των διακοπών ισχύος και των διακοπών φορτίου.

1.4.1. Η δύναμη σύσφιξης στις στατικές ηλεκτρικές επαφές

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

Τα μέταλλα από τα οποία κατασκευάζονται συνήθως οι επαφές έχουν, για λόγους διευκόλυνσης της διάβασης του ρεύματος, μεγάλη ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Για το λόγο αυτό η σκληρότητα των μετάλλων δεν είναι μεγάλη και υπό την επίδραση των δυνάμεων σύσφιξης παραμορφώνονται ελαστικά και πλαστικά στις περιοχές, που εφάπτονται υπό την επίδραση της δύναμης σύσφιξης. Αποτέλεσμα

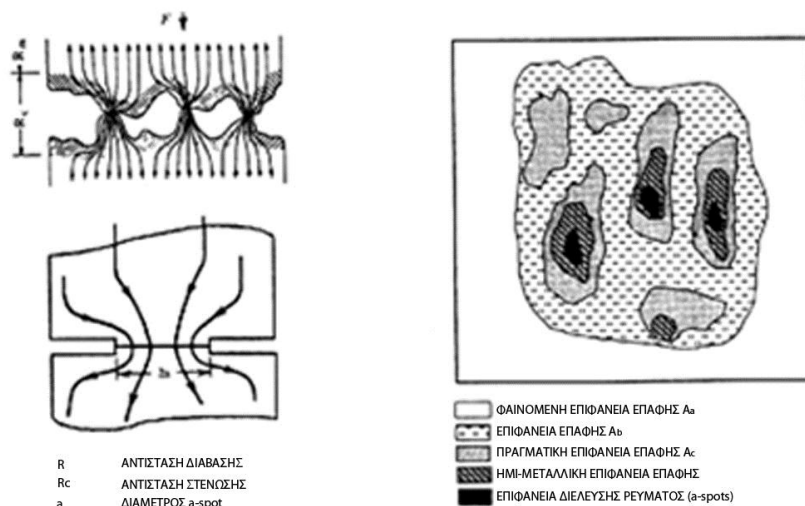
των παραμορφώσεων αυτών είναι η δημιουργία ορισμένων περιοχών πάνω στον λυόμενο σύνδεσμο, οι οποίες φέρουν το φορτίο σύσφιξης της επαφής, χωρίς αυτό να σημαίνει αναγκαστικά ότι μέσω αυτών των περιοχών γίνεται διέλευση του ρεύματος. Το σύνολο των περιοχών αυτών δίνει την *επιφάνεια σύσφιξης* A_b . Η κατανομή των παραπάνω περιοχών είναι στατιστική και εξαρτάται κυρίως από το είδος των υλικών και την τραχύτητα των επιφανειών. Υπάρχει μία εμπειρική σχέση που συνδέει την δύναμη σύσφιξης F με την επιφάνεια σύσφιξης A_b η οποία είναι:

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

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

Ως *πραγματική επιφάνεια* A_c (*true contact area*) μίας επαφής εννοούμε την επιφάνεια μέσω της οποίας γίνεται τελικά η διέλευση του ρεύματος από το ένα μέρος της επαφής στο άλλο. Η επιφάνεια αυτή είναι, λόγω των ξένων επικαθίσεων στις επαφές (κυρίως οξειδία μετάλλων και σκόνη), **μικρότερη** από την A_b . Όταν παρατηρεί κανείς μία ηλεκτρική επαφή έχει την εντύπωση ότι τα δύο μέρη της εφάπτονται σε μία πολύ ευρύτερη επιφάνεια από το σύνολο των περιοχών επαφής που αποτελούν την A_b . Αυτή η μακροσκοπικά παρατηρούμενη επιφάνεια ονομάζεται *φαινόμενη επιφάνεια επαφής* A_a (*apparent contact area*) και είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από το σύνολο των επί μέρους επιφανειών πραγματικής επαφής A_c , οι οποίες έχουν την δυνατότητα να άγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Οι περιοχές αυτές φαίνονται στο Σχήμα 1.4.1-1 Γενικά ισχύει:

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



Σχήμα 1.4.1-1 : Οι επιφάνειες επαφής μεταξύ των μετάλλων του συνδέσμου

1.4.2. Αντίσταση στένωσης και αντίσταση στρώματος επικαθίσεων

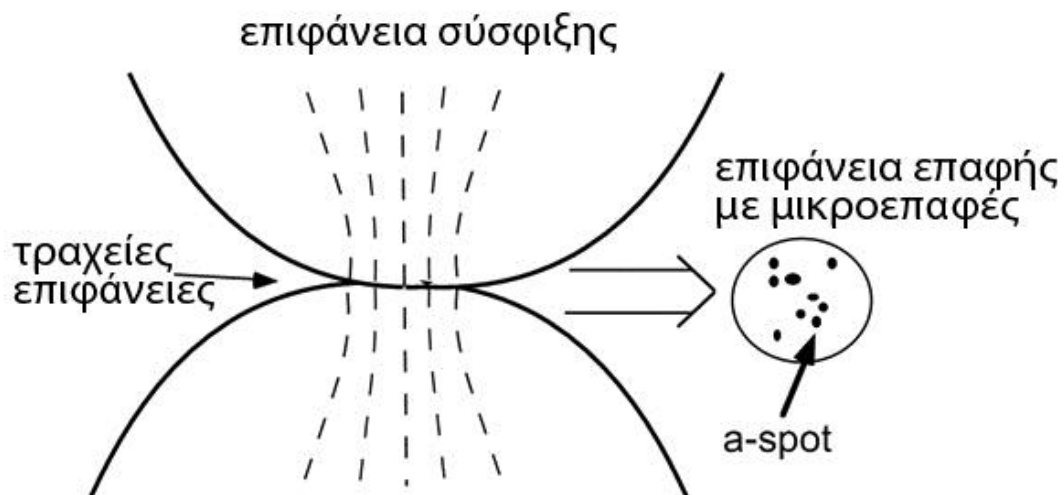
Η αντίσταση που παρουσιάζει μία επαφή κατά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος ονομάζεται *αντίσταση διάβασης*. Η αντίσταση διάβασης R περιλαμβάνει γενικά δύο όρους. Την *αντίσταση στένωσης* R_c , (*constriction resistance*) και την *αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων* στις επαφές R_f (*film resistance*). Η αντίσταση στένωσης R_c , είναι αποτέλεσμα της εξαναγκασμένης ροής του ηλεκτρικού ρεύματος από το ένα μέρος της επαφής στο άλλο. Η αντίσταση στένωσης περιλαμβάνει εξ ορισμού, την αντίσταση και στα δύο μέρη της επαφής. Η αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων οφείλεται στη δυσκολία των ηλεκτρικών φορέων να διαπεράσουν το στρώμα αυτό.

Η αντίσταση στένωσης R_c για ένα μόνο σημείο (a-spot) έχει αποδειχθεί ότι δίνεται από την σχέση:

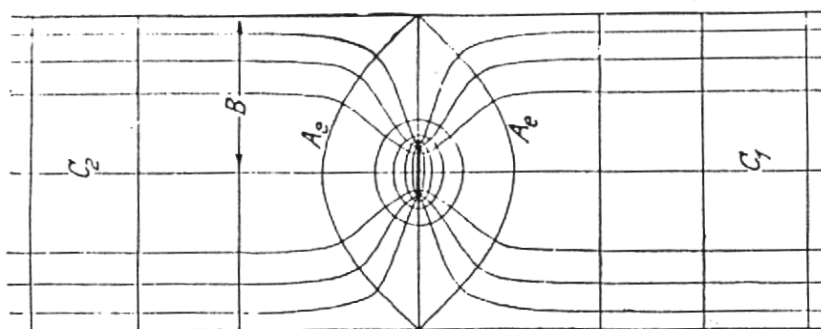
$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} \quad (3)$$

όπου ρ_1 και ρ_2 είναι οι ειδικές αντιστάσεις των μετάλλων που έρχονται σε επαφή και a η ακτίνα της περιοχής επαφής μεταξύ των μετάλλων. Εάν τα δύο υλικά που έρχονται σε επαφή είναι τα ίδια τότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$R_c = \frac{\rho}{2a} \quad (4)$$



Σχήμα 1.4.1-2 : Σχηματικό διάγραμμα όπου φαίνονται οι σημειακές επαφές a-spots



Σχήμα 1.4.1-3: Γραμμές ροής ρεύματος και δημιουργία της αντίστασης στένωσης R_c

Στο σχήμα 1.4.1-3 φαίνονται οι γραμμές ροής του ηλεκτρικού ρεύματος και οι ισοδυναμικές επιφάνειες δύο κυλίνδρων, που άγουν ηλεκτρικό ρεύμα κατά την διεύθυνση του άξονα συμμετρίας τους. Θεωρούμε ότι η μόνη θέση στην οποία είναι δυνατό λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας να διέλθει το ρεύμα είναι η ελλειπτική επιφάνεια A_c που έχει ως διαστάσεις τους ημιάξονες α και β . Στην περίπτωση αυτή η αντίσταση στένωσης θα οφείλεται στην εξαναγκασμένη συμπύκνωση των γραμμών ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.

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

- το υλικό των επαφών ήταν το ίδιο και για τα δύο μέρη της επαφής
- το υλικό ήταν ισοτροπικό 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.

Κάνοντας χρήση του σχήματος 1.1-2 και των παραδοχών που αναφέρονται παραπάνω μπορεί να πραγματοποιηθεί μία σύντομη απόδειξη της σχέσης που έχει δοθεί προηγουμένως για την R_c .

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

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{\mu} \frac{d\mu}{\sqrt{(a^2 + \mu)(\beta^2 + \mu)\mu}} \quad (5)$$

όπου a και β 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 . Για $A_c \ll A_a$ ισχύει $\mu \rightarrow \infty$

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

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{\mu} \frac{d\mu}{(r^2 + \mu)\sqrt{\mu}} = \frac{\rho}{2\pi} \arctan \frac{\sqrt{\mu}}{r} \quad (6)$$

Για $\mu \rightarrow \infty$ η σχέση (6) γίνεται $R_c = \frac{\rho}{2a}$ όπως είχε αναφερθεί και προηγουμένως.

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

$$R_c = \sum_{i=1}^n \frac{\rho}{2 \sum_{i=1}^n r_i} \quad (7)$$

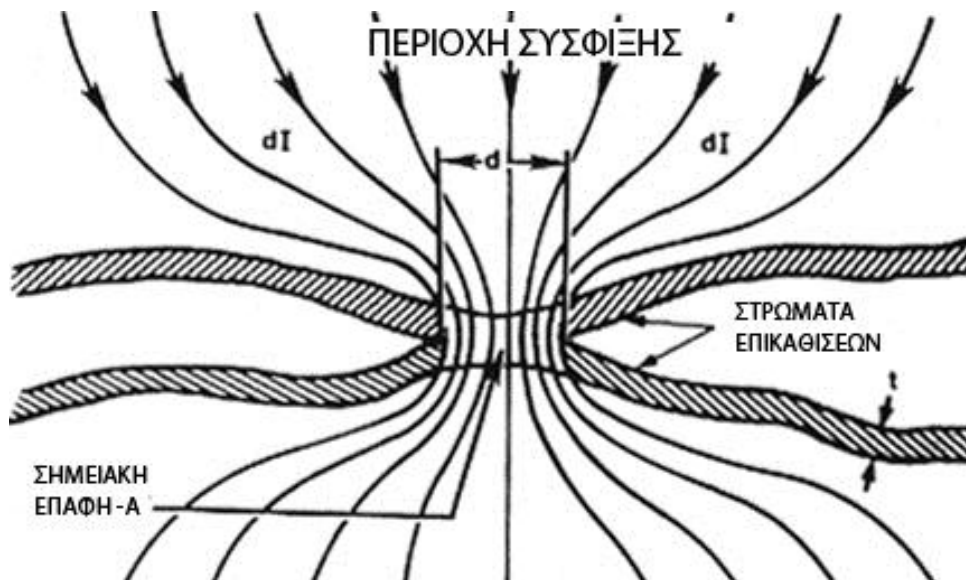
Πειραματικά αποτελέσματα από τους Holm και Stormer συμπίπτουν με τα υπολογιζόμενα από την σχέση (4). Έχει διαπιστωθεί επίσης ότι σε περίπτωση που η περίμετρος της A_c έχει σχήμα έλλειψης τότε η σχέση (4) εκφράζει με ικανοποιητική ακρίβεια την αντίσταση στένωσης και μπορεί να χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς με ακρίβεια περίπου $\pm 1,5\%$.

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

$$R_f = \frac{\sigma}{na^2} \quad (8)$$

όπου σ είναι η ανά μονάδα επιφάνειας αντίσταση του υλικού.

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



Σχήμα 1.4.1-4: Σχηματική παράσταση σημείων επαφής (a-spot) μεταξύ επιφανειών.

Από την προηγούμενη ανάλυση είναι φανερό ότι οι οδοί διέλευσης του ρεύματος είναι λιγότερες από αυτές που φυσιολογικά αναμένονται και για τον λόγο αυτό θα υπάρχει και μία περισσότερο ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος. (σχήμα 1.4.1-4).

1.4.3. Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντίσταση στένωσης

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

$$R_c(T) = R_c(T_0)(1 + a_x(T - T_0)) \quad (9)$$

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 a_x ο θερμικός συντελεστής μεταβολής της αντίστασης στένωσης. Θεωρητικοί υπολογισμοί επαληθεύουν τη σχέση (9) και προσδιορίζουν τον συντελεστή a_x ίσο προς τα 2/3 του θερμικού συντελεστή a του υλικού των επαφών. Έτσι η σχέση (1.8) γίνεται:

$$R_c(T) = R_c(T_0) \left(1 + \frac{2}{3} a_x (T - T_0) \right) \quad (9)$$

Οι σχέσεις (4) και (9) για τα συνήθη μέταλλα, που χρησιμοποιούνται στις επαφές, δίνουν τιμές της R_c οι οποίες είναι πολύ μικρές. Πειραματικά δεδομένα για συνήθεις επαφές των πρακτικών εφαρμογών δίνουν επίσης πολύ μικρές τιμές για την R_c , (της τάξης των $2 \cdot 10^{-4} \Omega$). Οι τιμές αυτές της αντίστασης στένωσης δεν μπορούν να δικαιολογήσουν τις συνήθεις (κατά τις προδιαγραφές) τιμές της πτώσης τάσης (π.χ. της τάξης των 55mV για διακόπτες του δικτύου ΧΤ). Γι' αυτό μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η αντίσταση λόγω των ξένων επικαθίσεων σε μία επαφή έχει πρωτεύοντα ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της ολικής αντίστασης διάβασης.

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

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

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

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

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

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

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \cdot \lambda(T) dT = \frac{V^2}{8} \quad (10)$$

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 (10) γίνεται:

$$\frac{V^2}{8} = \Delta T \cdot \overline{\rho\lambda} \quad (11)$$

$$V = \sqrt{8 \cdot \Delta T \cdot \overline{\rho\lambda}} \quad (12)$$

Η σχέση (12) δίνει τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί σε επαφές λόγω της αντίστασης στένωσης για δεδομένη πτώση τάσης.

Σε περίπτωση, που μέρος της παραγόμενης θερμότητας, διαφεύγει προς το περιβάλλον μέσο (όπως συμβαίνει στην πράξη), τότε η σχέση (10) γίνεται:

$$\Delta T \cdot \overline{\rho\lambda} \leq \frac{V^2}{8} \quad (13)$$

$$\Rightarrow V \geq \sqrt{8 \cdot \Delta T \cdot \overline{\rho\lambda}} \quad (14)$$

Θεωρώντας το νόμο των Wiedemann – Franz κατά τον οποίο:

$$\rho(T) \cdot \lambda(T) = LT \quad (15)$$

όπου L σταθερά ανεξάρτητη από το μέταλλο ($L \cong 2.4 \times 10^{-8} \left[\left(\frac{V}{K} \right)^2 \right]$), τότε η σχέση (10) γίνεται:

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \cdot \lambda(T) dT = \int_{T_0}^T LT dT = \frac{L}{2} (T^2 - T_0^2) \leq \frac{V^2}{8} \quad (16)$$

$$V \geq 2 \sqrt{L(T^2 - T_0^2)} \quad (17)$$

όπου T_0 η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

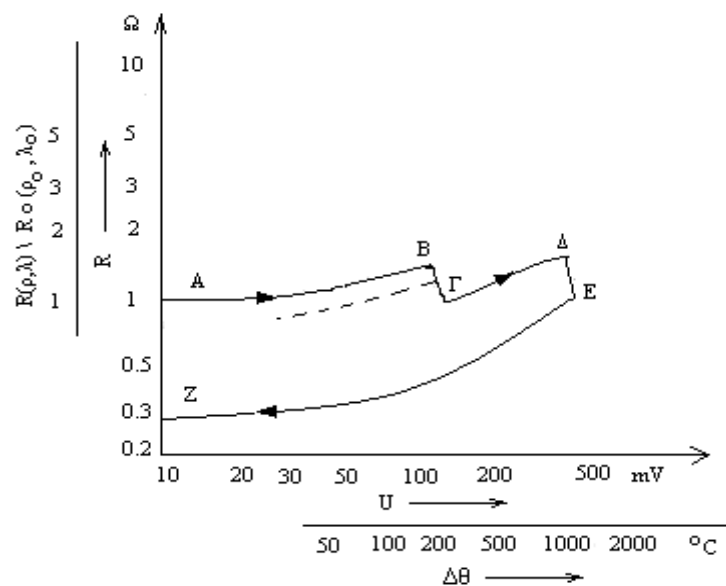
Οι σχέσεις (12), (14) και (17) παρέχουν την δυνατότητα του κατά προσέγγιση υπολογισμού της πτώσης τάσης σε επαφές χωρίς επικαθίσεις. Στις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής της πτώσης τάσης σε καινούργιες επαφές.

1.5. Χαρακτηριστικές καμπύλες αντίστασης – πτώσης τάσης και αντίστασης – θερμοκρασίας

Στη βιβλιογραφία δίνονται διαγράμματα που αφορούν στην αντίσταση διάβασης σε συνάρτηση με την πτώση τάσης ή τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον λυόμενο σύνδεσμο, ανάλογα με τη δύναμη σύσφιξης και την τιμή του ρεύματος. Μία τέτοια καμπύλη δίνεται στο σχήμα 1.5-1 από όπου φαίνεται ότι οι συναρτήσεις $R = f(V)$ και $R = f(\Delta\theta)$ είναι αύξουσες στην περιοχή των πρακτικών εφαρμογών ($\Delta\theta < 50^\circ\text{C}$). Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5-1 οι χαρακτηριστικές αυτές σχεδιάζονται σε λογαριθμική κλίμακα. Στον άξονα των y δίνεται συνήθως η πτώση τάσης στην επαφή και ταυτόχρονα η διαφορά θερμοκρασίας (τα μεγέθη αυτά συνδέονται σύμφωνα με τη σχέση (17)). Στον άξονα των x δίνεται ο λόγος $R(\rho, \lambda)/R_0(\rho_0, \lambda_0)$, δηλαδή το πηλίκο της αντίστασης διάβασης R σε θερμοκρασία θ (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 θ_0 (με ειδική αντίσταση ρ_0 και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ_0). Ο λόγος αυτός θα μπορούσε να γραφεί και ως $R(\theta)/R_0(\theta_0)$.

Στη χαρακτηριστική του σχήματος 1.5-1 διακρίνονται οι περιοχές AB, ΒΓ, ΓΔ, ΔΕ και ΕΖ. Η σειρά των γραμμάτων αντικατοπτρίζει τη χρονική εξέλιξη της σχέσης. Στο τμήμα AB η αντίσταση διάβασης αυξάνει με τη θερμοκρασία. Η αύξηση της αντίστασης διάβασης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (9)

$$R_c(T) = R_c(T_0) \left(1 + \frac{2}{3} a_x (T - T_0) \right)$$



Σχήμα 1.5-1: Τυπική χαρακτηριστική $R=f(U)$ ή $R=f(\Delta\theta)$ για μία συμμετρική καινούργια επαφή από χαλκό με δύναμη σύσφιξης 100gr. Γεωμετρία επαφής: κύλινδρος – κύλινδρος.

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. Όπως φαίνεται από το σχήμα 1.5-1 η περιοχή της θερμοκρασίας ανόπτησης (περιοχή ΒΓ) 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 $R = f(\Delta\theta)$ η επιφάνεια A_c φαίνεται ότι έχει σταθερή τιμή μετά την ανακρυστάλλωση και γι' αυτό η αντίσταση διάβασης αυξάνεται σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Το τμήμα ΓΔ είναι πρακτικά παράλληλο προς το ΑΒ. Σε αρκετά υλικά επαφών η παραπάνω αύξηση είναι σύντομη ή δεν υπάρχει, γιατί συνεχίζεται η ανακρυστάλλωση με την αύξηση της θερμοκρασίας.

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

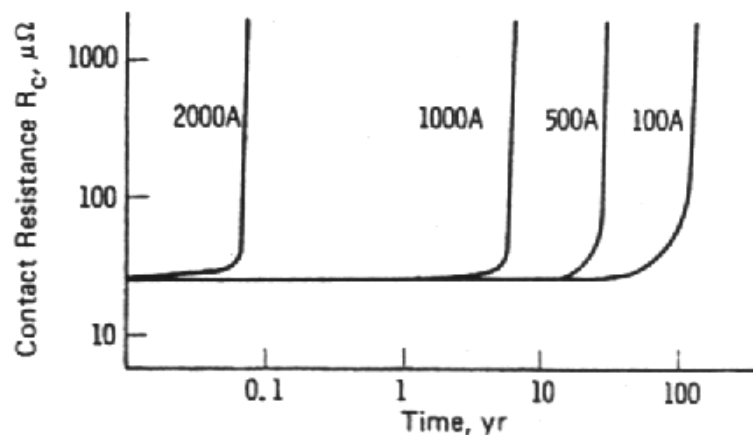
Όταν από το σημείο Ε της χαρακτηριστικής μειωθεί η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, τότε η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη (τμήμα ΕΖ). Το τμήμα ΕΖ είναι πρακτικά παράλληλο προς το ΑΒ.

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

Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις επαφών οι οποίες έχουν συγκολληθεί υπό την επίδραση υψηλής θερμοκρασίας, το τμήμα ΕΖ στο σχήμα είναι το ίδιο, τόσο κατά την αύξηση όσο και τη μείωση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος (η επιφάνεια A_c μένει σταθερή λόγω της συγκόλλησης). Στις περιπτώσεις που η θερμοκρασία είναι μικρότερη από εκείνη του σημείου τήξης και βρίσκεται κοντά στη θερμοκρασία ανόπτησης, η χαρακτηριστική μπορεί να είναι η ίδια κατά την αύξηση ή μείωση της τιμής του ρεύματος, όπως αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 1.5-1 με διακεκομμένη γραμμή. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να εξηγηθεί από την ψυχρή συγκόλληση που συμβαίνει σε καινούργιες και καθαρές επαφές. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση οι επαφές πρέπει να θεωρούνται ότι έχουν σχεδόν κολλήσει αν και η θερμοκρασία τους δεν έχει φθάσει στο σημείο τήξης.

Από τις χαρακτηριστικές $R = f(V)$ και $R = f(\Delta\theta)$ του σχήματος 1.5-1 παρατηρείται ότι οι περιοχές τιμών της θερμοκρασίας και της πτώσης τάσης σε μία επαφή, που συνεπάγονται ανακρυστάλλωση στα υλικά των επαφών (περιοχή ΒΓ), αποτελούν την έναρξη της αποσταθεροποίησης της επαφής. Πέρα από αυτή την περιοχή οι επαφές που λειτουργούν υπό ονομαστικό ρεύμα, πρέπει να θεωρούνται ότι έχουν ουσιαστικά καταστραφεί. Η θεωρία που διατυπώθηκε για τη χαρακτηριστική του σχήματος αφορά καθαρές επαφές χωρίς αξιόλογο στρώμα επικαθίσεων σε αυτές. Σε περιπτώσεις που το στρώμα των επικαθίσεων έχει σημαντικό πάχος και καλύπτει μεγάλο ποσοστό της επιφάνειας A_c η χαρακτηριστική του σχήματος 1.5-1 δεν ισχύει και παρατηρείται εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στα αρχικά στάδια λειτουργίας τους, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία.

Η επίδραση του θερμικού αποτελέσματος στην αντίσταση της επαφής φαίνεται και στο επόμενο σχήμα 1.5-2 για διαφορετικές τιμές ρεύματος. Για αρκετά μεγάλες τιμές ρεύματος χρειάζεται μικρότερος χρόνος για την αύξηση της αντίστασης της επαφής.



Σχήμα 1.5-2: Μεταβολή της αντίστασης του συνδέσμου σε σχέση με τον χρόνο για διαφορετικές τιμές ρεύματος.

1.6. Οξείδωση και επικαθίσεις

Οι επικαθίσεις σε μία ηλεκτρική επαφή είναι μία από τις βασικότερες αιτίες αύξησης της αντίστασης διάβασης και επομένως ο κύριος λόγος κακής λειτουργίας της. Οι επικαθίσεις μπορούν να διακριθούν, σύμφωνα με την σύνθεσή τους, σε δύο 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). Η οξείδωση των μεταλλικών επαφών είναι ένας από τους σοβαρότερους μηχανισμούς που αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά τους. Στην περίπτωση του χαλκού έχει αποδειχθεί ότι η παρουσία του σε περιβάλλον με έντονες συνθήκες οξείδωσης μπορεί να προκαλέσει ραγδαία αύξηση της αντίστασης της επαφής σε μία σχετικά υψηλή τιμή μετά από ένα χρονικό διάστημα.

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

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

Το βολφράμιο καλύπτεται από ένα στρώμα οξειδίου το οποίο δεν μπορεί να θεωρηθεί ως προστατευτικό. Σε θερμοκρασία χώρου αυτό το οξείδιο παραμένει στο πάχος των περίπου 50Å. Έχει διατυπωθεί η άποψη ότι μεγάλο ποσοστό αυτού του οξειδίου καταστρέφεται κατά την επαφή των δύο μερών, με αποτέλεσμα η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος να γίνεται στις περιοχές όπου έχει αποκολληθεί το οξείδιο. Η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος σε περιοχές της επαφής, όπου δεν έχουν αποκολληθεί τα λεπτά στρώματα του οξειδίου, έχει αποδοθεί στην εκδήλωση του 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 επικαθίση η οποία υπάρχει στην επιφάνεια επαφών από χρυσό είναι μία στοιβάδα

ατόμων οξυγόνου (που υπάρχει και σε κάθε μέταλλο), η οποία όμως δεν αυξάνεται με το χρόνο και είναι διαπερατή στα ηλεκτρόνια λόγω του φαινομένου σήραγγος. Ο χρυσός είναι άριστο υλικό επαφών αλλά με απαγορευτικό κόστος.

Ο άργυρος οξειδώνεται σε 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 $200\text{ }^\circ\text{C}$. 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.

Με διακριτικό στοιχείο το πάχος διακρίνονται οι παρακάτω κατηγορίες επικαθίσεων:

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

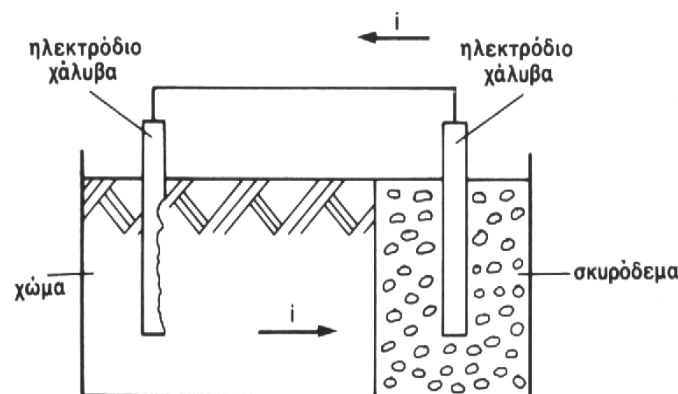
Ορισμένες χημικές ενώσεις στην επιφάνεια της επαφής αυξάνουν από 10 έως 100 \AA και προστατεύουν με αυτόν τον τρόπο την επιφάνεια των μετάλλων της επαφής από την επίδραση του οξυγόνου της ατμόσφαιρας καθώς και από άλλα χημικά στοιχεία. Το ανοξείδωτο ατσάλι και το αλουμίνιο έχουν εξαιρετικά προστατευτικά οξείδια και ανήκουν σε αυτήν 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.

1.7. Γαλβανική διάβρωση

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

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

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

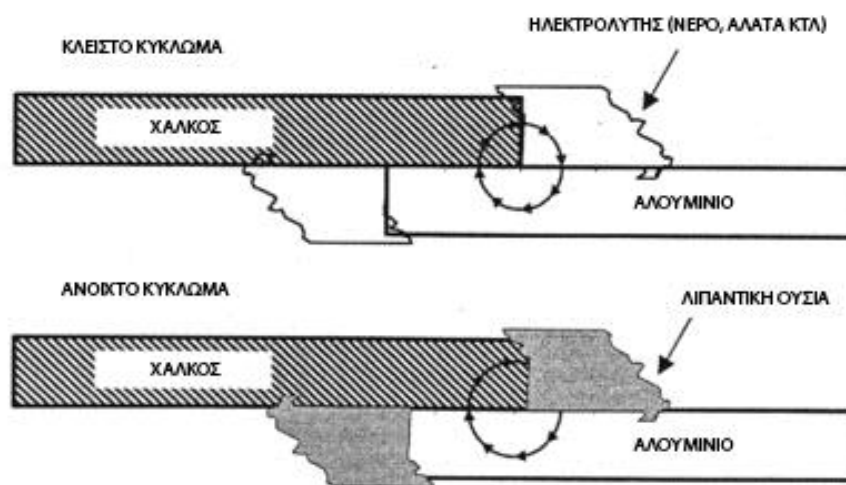


Σχήμα 1.7-1: Ηλεκτροχημική διάβρωση μετάλλων σε διαφορετικό περιβάλλον

Στην περίπτωση συνδέσεων από αλουμίνιο και χαλκό, το αλουμίνιο διαβρώνεται και εναποτίθεται στον χαλκό με την μορφή σύνθετων οξειδίων. Η παραπάνω διαδικασία θα συνεχίζεται έως του σημείου που παρευρίσκεται ηλεκτρολύτης ή έως όλα τα προϊόντα της διάβρωσης του αλουμινίου καλύψουν ολόκληρη την επιφάνεια του χαλκού. Η τελική επίδραση της διάβρωσης στην επαφή

αλουμίνιου και χαλκού συντελείται τελικά με δύο τρόπους που είναι είτε η δραστική μείωση της περιοχής επαφής που προκαλεί ηλεκτρική δυσλειτουργία είτε η μηχανική αστοχία λόγω της εκτεταμένης διάβρωσης. Οι παράγοντες που καθορίζουν τον βαθμό του φαινομένου είναι αρκετοί και σύνθετοι αλλά ο πλέον σημαντικός είναι η υγρασία, η οποία αναφέρεται σε επόμενη παράγραφο.

Στο Σχήμα 1.7-2 φαίνεται ότι ένας απλός τρόπος για να σταματήσει η αποδόμηση της επαφής είναι η ύπαρξη λιπαντικού ή γράσου στην διεπιφάνεια των υλικών η οποία τελικά οδηγεί σε ανοιχτοκύκλωμα. Στην αντίθετη περίπτωση η ύπαρξη ηλεκτρολύτη (π.χ. κοντά σε θαλάσσιο περιβάλλον) οδηγεί σε διάβρωση της επαφής αφού αντιστοιχεί σε κλειστό κύκλωμα.



Σχήμα 1.7-2: Περίπτωση γαλβανικής διάβρωσης σε επαφή χαλκού-αλουμινίου (περιπτώσεις ανοικτού και κλειστού κυκλώματος)

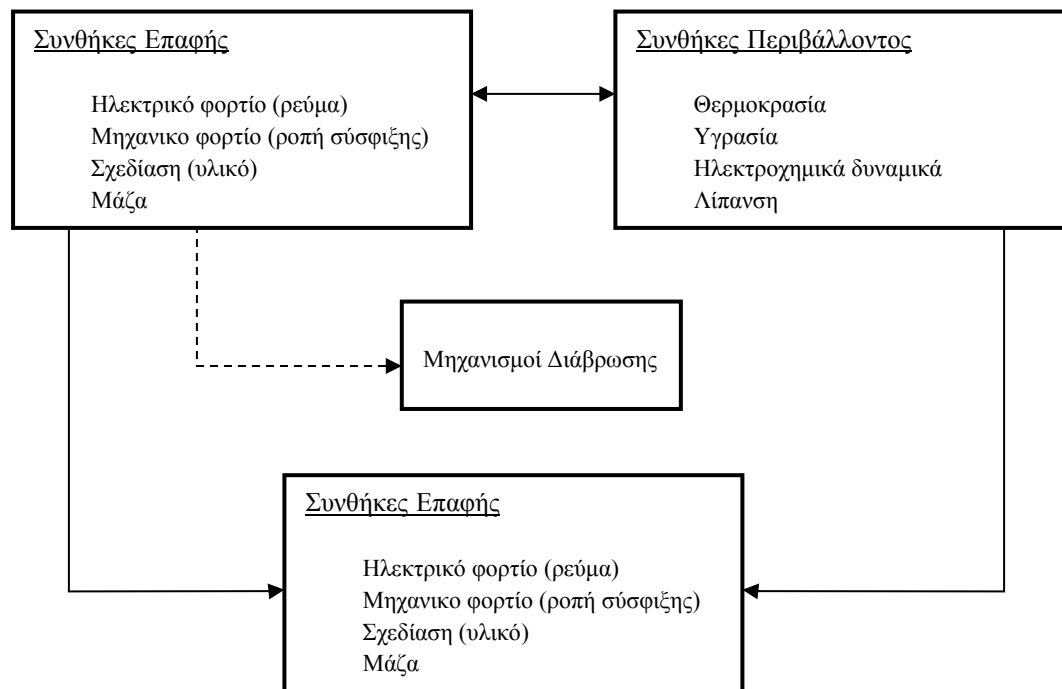
1.8. Επίδραση της υγρασίας

Το πάχος του στρώματος της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα εξαρτάται από την τραχύτητα των επιφανειών της επαφής. Στον άργυρο, αυτό το στρώμα θεωρείται ότι είναι μικρότερο από 50Å. Στρώματα νερού του πάχους αυτού δεν αντέχουν την πίεση των δύο μερών της επαφής και γι' αυτό διατάσσονται περιφερειακά στην επιφάνεια A_c και στα πιθανά κενά που υπάρχουν. Έχει υποστηριχθεί ότι λεπτά στρώματα νερού, ανάμεσα σε μεταλλικές επιφάνειες αφ' ενός και 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 στοιβάδες 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 στη στήριξη των ηλεκτρικών επαφών. Ο πολυμερισμός είναι πολύ διαδεδομένος στους υδρογονάνθρακες και έχει επισημανθεί ότι πάρα πολλά μονωτικά υλικά παράγουν ατμούς κατά τον πολυμερισμό τους. Ορισμένα υλικά επαφών όπως το παλλάδιο (Pd), ο λευκόχρυσος (Pt), το ρουθίνιο (Ru) και το χρώμιο (Cr) δρουν καταλυτικά για την εναπόθεση οργανικών ουσιών σε αυτά και άλλα όχι, όπως π.χ. ο χαλκός (Cu), ο σίδηρος (Fe), το βολφράμιο (W), ο άργυρος (Ag) και το νικέλιο (Ni). Τέλος όταν σε μία επαφή δημιουργούνται τοπικά μικρές ηλεκτρικές εκκενώσεις τότε τα οργανικά στρώματα, που προαναφέρθηκαν, απανθρακώνονται, με αποτέλεσμα από τα λεπτά στρώματα άνθρακα, να διευκολύνεται η εκδήλωση ηλεκτρικών εκκενώσεων μεγαλύτερης ενέργειας. Ο σχηματισμός γενικά των επικαθίσεων στις επαφές διέπεται από περίπλοκους μηχανισμούς, που δεν έχουν ερμηνευτεί πλήρως, παρά τις εκτεταμένες έρευνες.

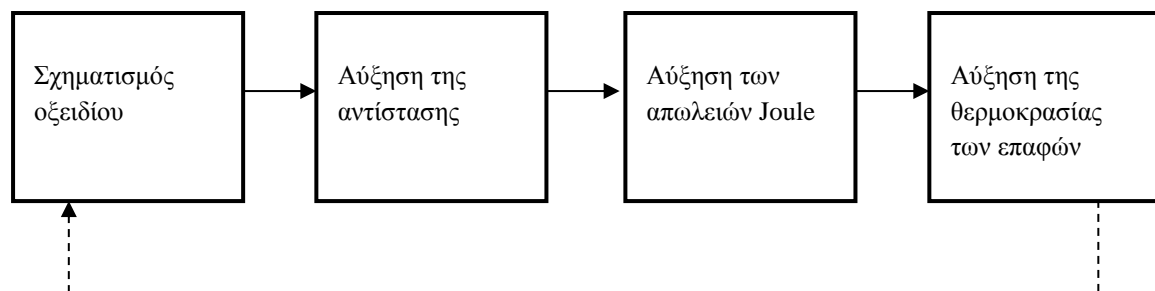
1.9. Σχηματική αναπαράσταση των παραγόντων που επιδρούν σε μία ηλεκτρική επαφή

Παρακάτω δίνεται με την μορφή ενός σχηματικού διαγράμματος μία εικόνα των παραγόντων που επηρεάζουν γενικότερα μία ηλεκτρική επαφή. Οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης δεν είναι πλήρως διαχωρισμένοι ούτε και διακριτοί με αποτέλεσμα το επόμενο διάγραμμα (σχήμα 1.9-1) να έχει αξία μόνο για μία γενικότερη κατανόηση της κατάστασης.



Σχήμα 1.9-1: Σχηματικό διάγραμμα παραγόντων που επηρεάζουν μία ηλεκτρική επαφή

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην δημιουργία οξειδίων και γενικά επικαθίσεων στις επαφές παρουσιάζει ενδιαφέρον δεδομένου ότι το φαινόμενο ανακυκλώνεται κατά την σειρά που απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα 1.9-2.



Σχήμα 1.9-2: Σχηματικό διάγραμμα δημιουργίας οξειδίων στις ηλεκτρικές επαφές

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

$$s^2 = 20^2 + t \cdot 10^{14,9 - \frac{5100}{T}} \quad (18)$$

όπου s το πάχος σε Å, t ο χρόνος σε ώρες και T η θερμοκρασία σε K. Έχει διαπιστωθεί επίσης ότι μέχρι τους 400°C στην επιφάνεια του χαλκού δημιουργείται Cu_2O και σε υψηλότερες θερμοκρασίες CuO . Όταν τα παραπάνω οξείδια έχουν πάχος μεγαλύτερο από 100Å τότε μειώνουν συνήθως ηλεκτρικά την επαφή. Παρεμφερής σχέση ισχύει για το πάχος NiO το οποίο σχηματίζεται σε θερμοκρασίες από 200°C έως 600°C.

$$s^2 = 5^2 + t \cdot 10^{13,3 - \frac{6000}{T}} \quad (19)$$

1.10. Η εκδήλωση του φαινομένου της σήραγγος στις επαφές

Σύμφωνα με την κλασική φυσική, επικαθίσεις πάχους λίγων Angstrom μονώνουν ηλεκτρικά τα δύο μέρη μίας επαφής. Αντίθετα όμως κατά την κβαντική θεώρηση τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μπορούν να περάσουν λεπτά στρώματα μονωτικών υλικών ως κύματα De Broglie. Αυτή η δυνατότητα, που έχουν τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας να μπορούν να διαπεράσουν φράγματα δυναμικού τα οποία έχουν εισαχθεί από ένα λεπτό στρώμα μονωτικού υλικού, ονομάζεται φαινόμενο σήραγγος. Οι Sommerfeld και Bethe έκαναν πρώτοι μία θεωρητική προσέγγιση του θέματος για μερικά mV πτώσης τάσης στα ηλεκτρόδια. Αργότερα ο R. Holm επεξέτεινε 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.

Για μία επαφή με επίπεδες επιφάνειες από το ίδιο μέταλλο και με απόσταση μεταξύ των δύο μερών της (λόγω των επικαθίσεων), τα επίπεδα δυναμικού στην περιοχή της επαφής δίδονται στο σχήμα 1.10-1α. Τα επίπεδα Fermi των δύο μεταλλικών μερών της επαφής (E_f) συμπίπτουν, όταν δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ τους. Τα φράγματα δυναμικού στην επιφάνεια κάθε μέρους της

επαφής επεκτείνονται στη μεταξύ τους απόσταση, η οποία είναι ίση με το πάχος του οξειδίου 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 η απόσταση s είναι μικρή 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 ($\varphi_0 < \Phi$). Για ένα ηλεκτρόνιο μάζας m με ταχύτητα v_x , το οποίο πλησιάζει το φράγμα δυναμικού του σχήματος 1.10-1α ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{1}{2}mv_x^2 = q_e\varphi_x \quad (20)$$

όπου φ_x το δυναμικό του ηλεκτρονίου και q_e το φορτίο του. Σε περίπτωση που $\varphi_x > \varphi_0$ τότε το ηλεκτρόνιο θα βρεθεί στο άλλο μέρος της επαφής, όπου και θα αποδώσει το περίσσειμα της ενέργειάς του υπό μορφή ακτινοβολίας. Αυτό είναι γνωστό ως θερμιονική εκπομπή. Εάν το $\varphi_x < \varphi_0$ τότε κατά την κλασική φυσική ανακλάται το ηλεκτρόνιο πάνω στο φράγμα. Σύμφωνα όμως με την κβαντική θεωρία υπάρχει μία πιθανότητα το παραπάνω ηλεκτρόνιο να περάσει το φράγμα δυναμικού και να βρεθεί στο άλλο μέρος της επαφής. Αυτή η πιθανότητα εξαρτάται από έναν συντελεστή διάβασης $D(\varphi_x)$ για τον οποίο ισχύει η σχέση:

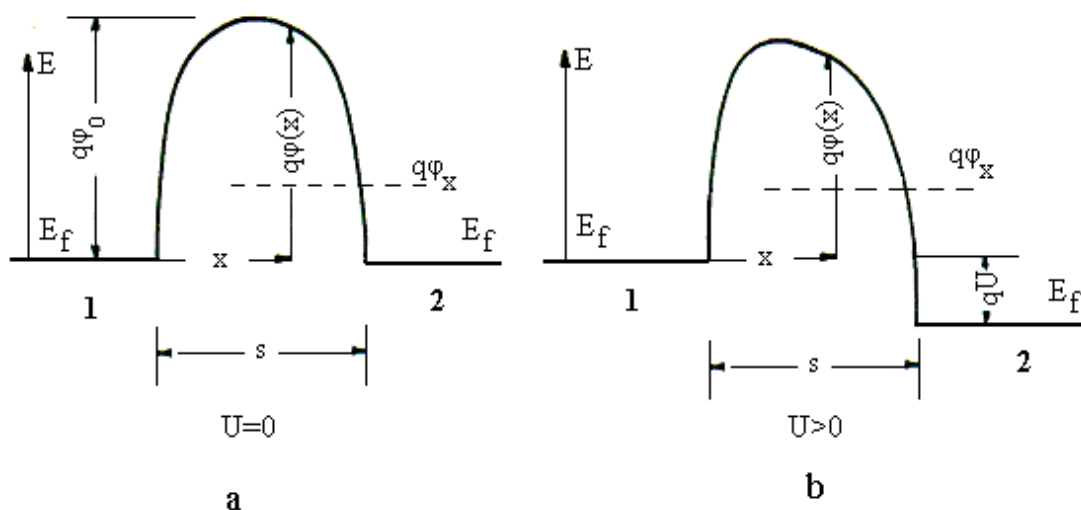
$$D(\varphi_x) = \exp \left[-\frac{4\pi}{h} \int_0^s \sqrt{2m(\varphi(x) - E_x)} dx \right] \quad (21)$$

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

Η παραπάνω σχέση βασίζεται στην κατά προσέγγιση λύση της εξίσωσης Schrödinger, όπως αυτή έγινε από τους Brillouin - Wentzel - Kramer.

Όταν το ηλεκτρόνιο διαπεράσει το φράγμα δυναμικού λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος, τότε δεν χάνει την ενέργεια του (όπως συμβαίνει στην θερμιονική εκπομπή), αλλά αυτή παραμένει αμετάβλητη γιατί η συχνότητα de Broglie είναι σταθερά. Η ενέργεια όμως, που πιθανώς του δόθηκε από το πεδίο αποδίδεται στην άνοδο. Κατά την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος, που προαναφέρθηκε, τα ηλεκτρόνια περνάνε το φράγμα δυναμικού από δεξιά προς αριστερά τόσο συχνά όσο και προς την αντίθετη διεύθυνση με αποτέλεσμα να μην μπορεί να παρατηρηθεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Επισημαίνεται ότι η απόσταση s μεταξύ των δύο μερών της επαφής είναι συνήθως ένα λεπτό στρώμα οξειδίου του μετάλλου της επαφής. Αν μεταξύ των δύο μερών της επαφής του σχήματος 1.10-1α υπάρχει μία διαφορά δυναμικού U , τότε όπως φαίνονται στο σχήμα 1.10-1b οι στάθμες Fermi διαφοροποιούνται μεταξύ τους κατά U , με αποτέλεσμα μία ροή

ηλεκτρικού ρεύματος από την επαφή με το υψηλό δυναμικό προς την επαφή με το χαμηλό δυναμικό. Αυτό συμβαίνει γιατί το ρεύμα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας, λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος, δεν είναι ίσο και κατά τις δύο διευθύνσεις με αποτέλεσμα η διαφορά του αριθμού των φορέων μεταξύ των δύο μερών της επαφής να μπορεί να μετρηθεί ως ηλεκτρικό ρεύμα. Από τις δύο σχέσεις 20 και 21 φαίνεται ότι μόνον η ταχύτητα του ηλεκτρονίου v_x , που είναι κάθετη στο φράγμα δυναμικού, λαμβάνεται υπ' όψιν στους υπολογισμούς του συντελεστή διάβασης $D(\varphi_x)$ και επομένως και στον προσδιορισμό της πυκνότητας ρεύματος. Σε ένα καρτεσιανό σύστημα με συντεταγμένες x , y και z τα ηλεκτρόνια με υψηλές ταχύτητες v_y στη διεύθυνση y και v_z στη διεύθυνση z αλλά μικρή ταχύτητα v_x στη διεύθυνση x έχουν μικρή πιθανότητα να διαπεράσουν το φράγμα δυναμικού, αν και έχουν υψηλή συνολική ενέργεια.

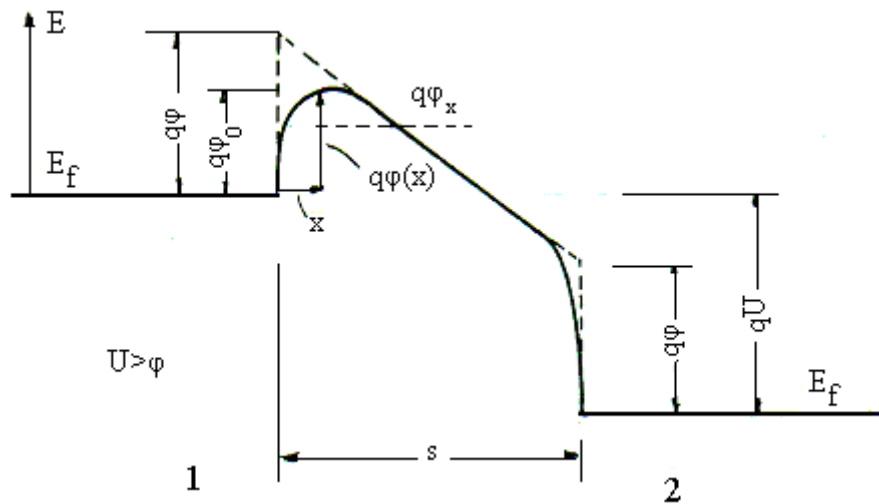


Σχήμα 1.10-1: Το φράγμα δυναμικού σε ένα κενό s δύο επαφών από το ίδιο υλικό 1 και 2 τα δύο μέρη της επαφής
a: χωρίς την επιβολή διαφοράς δυναμικού
b: με την επιβολή διαφοράς δυναμικού U

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 $\varphi_0 \gg U > 0$. Το φαινόμενο θεωρείται ότι είναι ωμικό (η πυκνότητα ρεύματος J είναι ανάλογη της τάσης U).
- Στη δεύτερη περίπτωση η τιμή της εφαρμοζόμενης συνεχούς τάσης είναι μεγαλύτερη από προηγουμένως και ισχύει ότι $\varphi_0 > U$. Η πυκνότητα του ρεύματος J αυξάνει μη γραμμικά σε σχέση με την τιμή της τάσης U .

- Η τρίτη περίπτωση (γνωστή από την βιβλιογραφία ως εκπομπή πεδίου) αφορά μεγαλύτερες τιμές της τάσης από προηγουμένως, υπό την προϋπόθεση ότι ισχύει $U > U_0$. Η πυκνότητα του ρεύματος J αυξάνει απότομα με την αύξηση της τάσης U στο σύστημα. Στο σχήμα 1.10-2 φαίνονται οι ενεργειακές στάθμες που αφορούν την περίπτωση αυτή. Είναι φανερό 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 1.10-2: Το φράγμα δυναμικού μεταξύ δύο όμοιων μεταλλικών ηλεκτροδίων που απέχουν μεταξύ τους κατά s για $U > \Phi$ (1 και 2: τα δύο μέρη της επαφής)

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

$$\rho_T = \frac{U}{J} \text{ [συνήθως σε } \Omega m^2 \text{]} \quad (22)$$

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:

$$\rho_T = f(s, \Phi, U, \epsilon_r, \varphi(x)) \quad (23)$$

Από τις σχέσεις 22 και 23 φαίνεται ότι για τον υπολογισμό της πυκνότητας ρεύματος J χρειάζεται να γίνει μία μαθηματική προσέγγιση για την συνάρτηση $\varphi(x)$. Από τους ερευνητές, που ασχολήθηκαν με το θέμα, οι υπολογισμοί έγιναν με διάφορες παραδοχές. Κατά μία π.χ. προσέγγιση για μικρές τιμές του U και μεγάλο πάχος s θεωρείται η $\varphi(x)$ 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 $\varphi(x)$ ως παραβολή. Στην προσέγγιση αυτή λαμβάνεται υπ' όψη η επίδραση της θερμοκρασίας, ανάλογα προς την οποία προκαλείται αύξηση της ενεργειακής στάθμης σημαντικού αριθμού ηλεκτρονίων πάνω από την στάθμη Fermi, γεγονός που βοηθά να διαπεράσουν οι φορείς αυτοί το φράγμα δυναμικού. Η παραπάνω προσέγγιση ενδείκνυται για μικρά πάχη s (τα μεγάλα πάχη επικαθίσεων δεν προσεγγίζονται ικανοποιητικά με παραβολή και είναι προτιμότερη η προσέγγιση τους με τραπέζιο). Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης σήραγγος επιχειρήθηκε από ερευνητές σε συνδυασμό με πειραματικά δεδομένα.

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

$$R = \frac{\rho}{2r} + \frac{\rho_T}{\pi r^2} \quad (24)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση σε Ωcm και ρ_T η ειδική αντίσταση σήραγγας (*tunnel sistivity*) μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, που ορίζεται ως το πηλίκο της πτώσης τάσης U προς την πυκνότητα του ρεύματος J . Ο πρώτος όρος της εξίσωσης 24 δίνει την αντίσταση στένωσης και ο δεύτερος την αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων.

Ο πίνακας 1.10-1 δίνει για διάφορα υλικά επαφών την αντίσταση διάβασης σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Υλικό επαφών	Δύναμη σύσφιξης των επαφών F (g)	Ειδική αντίσταση σύραγγος ρ_T ($10^{-13} \Omega m^2$)	Αντίσταση στένωσης $R_c = \rho/2r$ ($10^{-4} \Omega$)	Αντίσταση επικαθίσεων $R_f = \rho/\pi r^2$ ($10^{-4} \Omega$)	Ολική αντίσταση διάβασης R ($10^{-4} \Omega$)
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 1.10-1: Τιμές της αντίστασης διάβασης, της αντίστασης στένωσης και της αντίστασης των επικαθίσεων για διάφορα υλικά επαφών

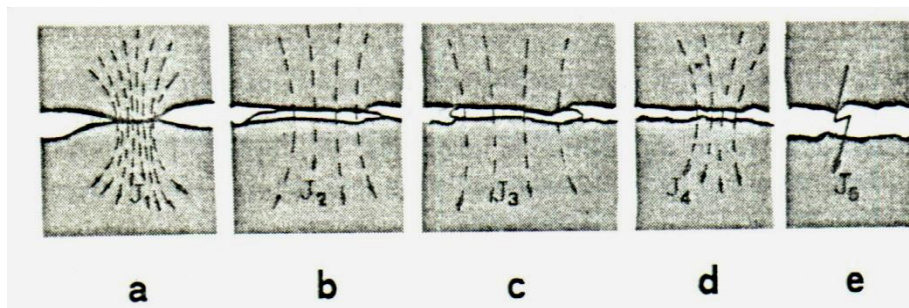
1.11. Η φυσική διερεύνηση των φαινομένων μεταφοράς στις επαφές

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 1.11-1, πριν και μετά τη γήρανση των επαφών φαινομενικά δεν θα μπορούσε να αποδοθεί σε τρόπους ηλεκτρονικής αγωγιμότητας διαμέσου λεπτών στρωμάτων οξειδίων, και γενικά επικαθίσεων. Αυτό γιατί μετά την γήρανση των επαφών το πάχος του οξειδίου αποκτά μεγαλύτερο εύρος και συνεπώς χρειάζεται μεγαλύτερη πεδιακή ένταση προκειμένου να υπάρξει ανάλογη πυκνότητα ρεύματος. Για να γίνει όμως μία λεπτομερής περιγραφή προκειμένου να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα, απαιτούνται όμοιες εντάσεις ρεύματος και για τις δύο περιπτώσεις (πριν και μετά την γήρανση). Για μία 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 αμοιτέρων των μεταβλητών, δηλαδή και της πυκνότητας ρεύματος και του επιβαλλομένου δυναμικού ΔU .

Τύπος επαφής	Υλικό επαφών	Με θερμική καταπόνηση		Χωρίς θερμική καταπόνηση		Γραμμική παρεμβολή στις τιμές I^* , ΔU^*	
		I [A]	ΔU [mV]	I^* [A]	ΔU^* [mV]	$I^{*'} [A]$	$\Delta U^{*'} [mV]$
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 1.11-1: Μετρήσεις σε επαφές εμπορίου που αφορούν προσδιορισμό τιμών ρεύματος και πτώσης τάσης πέραν των οποίων αναπτύσσεται μη γραμμική συμπεριφορά



Σχήμα 1.11-1: Μακροσκοπική απεικόνιση δύο μεταλλικών ηλεκτρικών επαφών.

Παρατηρούνται οι 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)

Οι περιοχές αυτές μπορούν να γίνουν αγωγίμες πέραν μίας κρίσιμης τιμής του τοπικού ηλεκτρικού πεδίου.

J_1, J_2, J_3, J_4, J_5 : οι αντίστοιχες πυκνότητες ηλεκτρικού ρεύματος

Με βασική αιτία την ανομοιομορφία στην επιφάνεια των επαφών (η οποία μπορεί να είναι μορφολογικής ή ηλεκτροχημικής φύσεως) το πεδίο μεταξύ των επαφών ενδέχεται να παρουσιάζει ανομοιογένειες. Έχει διαπιστωθεί ότι ένα μικρό μέρος της φαινόμενης επιφάνειας της επαφής A_a άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Οι γραμμές ροής του ηλεκτρικού ρεύματος υποχρεώνονται να διέλθουν πολύ κοντά η μία στην άλλη ώστε να περάσουν από τις μικρές αγωγίμες περιοχές (οι οποίες απαρτίζουν την επιφάνεια A_c) οι οποίες είναι στατιστικά κατανομημένες στην επιφάνεια A_a και οι οποίες συχνά καλύπτονται από στρώμα επικαθίσεων. Το ηλεκτρικό πεδίο ποικίλλει στην περιοχή της επαφής αφού και οι δύο επιφάνειες

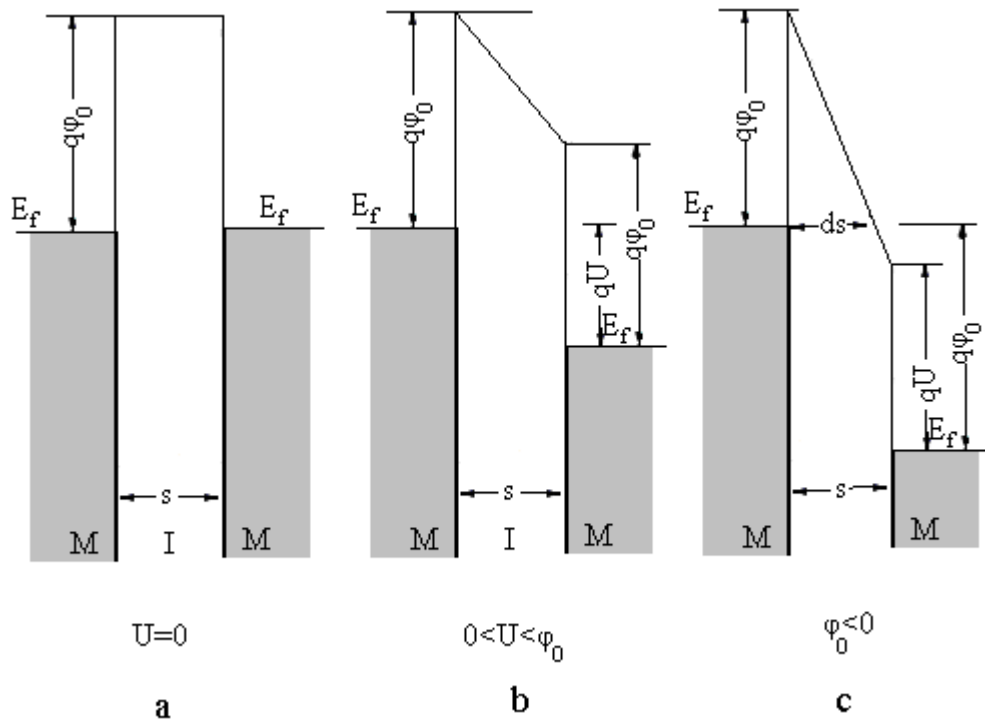
διαπερνώνται επιλεκτικά από υψηλή πυκνότητα ρεύματος και σύμφωνα με τον νόμο του Ohm θα πρέπει να υπάρχει επιφανειακή πτώση τάσης μεταξύ των σημείων διάβασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Συνεπώς, η διαχωριστική επιφάνεια των δύο μεταλλικών μερών παύει να είναι ισοδυναμική. Εκτός τούτου, η παρουσία ακινήτων 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' αυτόν τον τρόπο προκύπτουν μεταβολές δυναμικού στην επιφάνεια επαφής ακόμα και όταν δεν εφαρμοστεί εξωτερική τάση, ένα φαινόμενο παρόμοιο με αυτό της εξάντλησης-αναστροφής (*depletion-inversion*) των ημιαγώγιμων επιφανειών.

Το σχήμα 1.11-1 παρουσιάζει μακροσκοπικά τα δύο μέρη μίας επαφής. Οι περιοχές M - M οι οποίες εφάπτονται ιδανικά χωρίς την παρεμβολή άλλου μέσου (a) είναι διανεμημένες τυχαία ανάμεσα σε περιοχές οι οποίες άγουν δια του φαινομένου σήραγγος (b) και (c). Οι περιοχές (b) και (c) ορίζονται από την στατιστική κατανομή της ανάπτυξης οξειδίων του μετάλλου στην περιοχή της επαφής και συμπεριφέρονται σαν λεπτά υμένα υλικών τα οποία πρέπει να τα διαπεράσουν τα ηλεκτρόνια προκειμένου να μεταφερθούν μέσα από την επαφή.

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

Καθώς η ροή του ρεύματος διαμέσου των επαφών αυξάνει, τα φαινόμενα της επιφανειακής σκέδασης αρχίζουν να κυριαρχούν μόλις η διάβαση του φορτίου διαμέσου των ωμικών κέντρων (*spots*) φτάσει στον κορεσμό. Τότε η διαφορά δυναμικού κατά μήκος των μικροδομών MIM, MOM και MGM αυξάνει ραγδαία. Για μεγαλύτερες τιμές από μία 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 1.11-1 (d) και (e) μπορούν επίσης να καταστούν αγωγίμες 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 τη θερμοκρασία των επαφών, ιονίζουν το διάκενο και αυξάνουν δραστικά την αγωγιμότητα, οδηγώντας στην ανεπιθύμητη δημιουργία τόξων.

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



Σχήμα 1.11-2: Διάγραμμα δυναμικής ενέργειας των ηλεκτρονίων για συμμετρική δομή MIM και για διαφορετικές τιμές δυναμικού στα ηλεκτρόδια
 α) $U = 0$: Η διαφορά δυναμικού είναι μηδενική. Η επαφή δεν άγει.
 β) $0 < U < \varphi_0$: Δεν έχει επιτευχθεί η αναγκαία διαφορά δυναμικού για την εκδήλωση του φαινομένου. Τυχόν ροή ρεύματος οφείλεται σε θερμοϊονική εκπομπή πάνω από το φράγμα δυναμικού.
 γ) $\varphi_0 < U$: Η επαφή άγει δια του φαινομένου της σήραγγος, διότι το πάχος s έχει μειωθεί σε ds .

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

- Συμμετρική μικροδομή MIM κάτω από μηδενική διαφορά δυναμικού (Σχήμα 1.11-2α). 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 1.11-2b)
- Εφαρμογή υψηλού ηλεκτρικού πεδίου. Η μονωτική ικανότητα (πάχος s) μεταξύ των ηλεκτροδίων έχει μειωθεί και η μικροδομή άγει (Σχήμα 1.11-2c)

Η κλασική μαθηματική προσέγγιση για μία μεμονωμένη δομή MIM εξετάζει την πυκνότητα του ρεύματος σήραγγος μέσα από ένα φράγμα δυναμικού με κλασσικά όρια x_1, x_2 κατά μήκος του άξονα των x . Η πυκνότητα ρεύματος J για δύο αγώγιμες

περιοχές (ηλεκτρόδια) που διαχωρίζονται από ένα λεπτό φράγμα δυναμικού περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση, η οποία ισχύει για βαθμούς Kelvin:

$$J = J_0 [\bar{\varphi} \cdot \exp(-A\sqrt{\bar{\varphi}}) - (\bar{\varphi} + U) \cdot \exp(-A\sqrt{\bar{\varphi} + U})] \quad (25)$$

όπου

$$J_0 = \frac{q_e^2}{2\pi h(ds)^2} \quad (26)$$

$$A = \frac{4\pi ds\sqrt{2mq_e}}{h} \quad (27)$$

h είναι η σταθερά του Planck, m η μάζα του ηλεκτρονίου και q_e το φορτίο του.

Οι παράγοντες οι οποίοι έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το πλάτος του φράγματος δυναμικού $ds = x_2 - x_1$, το μέσο ύψος του φράγματος πάνω από 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 1.11-2α) οι συνθήκες που απαγορεύουν την εκδήλωση φαινομένου σήραγγος είναι το σχετικά μεγάλο πάχος του στρώματος των επικαθίσεων (s). Το μέσο ύψος του φράγματος δυναμικού ($\varphi = \varphi_0$) προσδιορίζεται από το έργο εξόδου του μετάλλου και την σχετική θέση των επιπέδων Fermi.

Για μία πτώση τάσης μέσου μεγέθους κατά μήκος του φράγματος (διεύθυνση x) ισχύει (Σχήμα 1.11-2b):

$$0 < U < \varphi_0 \quad (28)$$

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

$$\bar{\varphi} = \varphi_0 - U/2 \quad (29)$$

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

Όταν η διαφορά δυναμικού έχει πλέον αυξηθεί περισσότερο και ικανοποιείται η σχέση (Σχήμα 1.11-2c):

$$U \geq \varphi_0 \quad (30)$$

το μέσο ύψος του φράγματος γίνεται:

$$\bar{\varphi} < \frac{\varphi_0}{2} \quad (31)$$

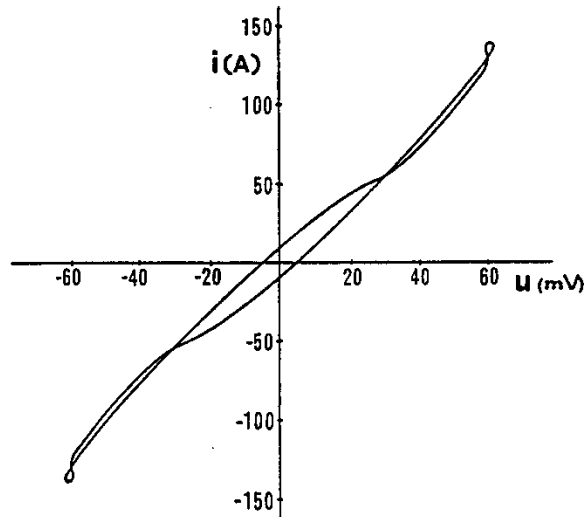
και το πλάτος του φράγματος δυναμικού έχει μειωθεί σημαντικά, και δίνεται από τη σχέση:

$$ds = \frac{s \cdot \varphi_0}{U} \quad (32)$$

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

$$U > \varphi_0 + \frac{E_f}{q} \quad (33)$$

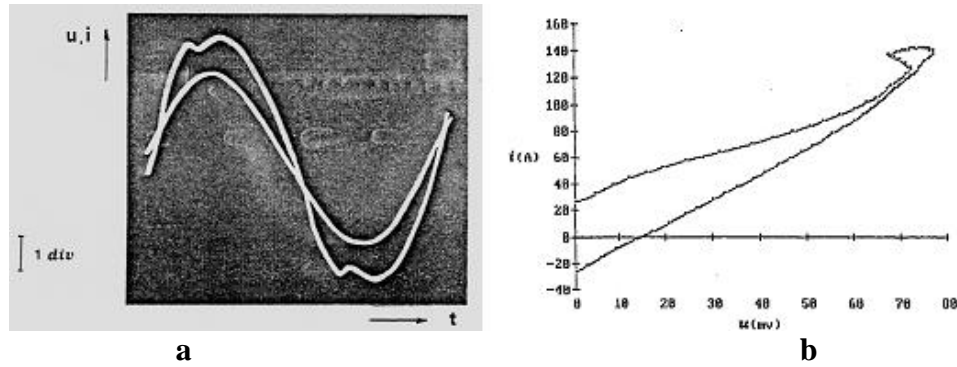
Η σχέση (33) τείνει στην γνωστή σχέση των Fowler – Nordheim. Πρόσφατες πειραματικές εργασίες της βιβλιογραφίας, που αφορούν μικροδομές MOM απέδειξαν ότι η πτώση τάσης κατά μήκος του φράγματος δυναμικού προσδιορίζει κατά κύριο λόγο το χρώμα, του εκπεμπόμενου φωτός όταν η μικροδομή MOM άγει.



Σχήμα 1.11-3: Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης σε ένα αποζεύκτη 500V/100A με επαφές από χαλκό για μία περίοδο λειτουργίας
 Ενεργός τιμή ρεύματος: 100A
 Δύναμη σύσφιξης επαφών: 200p
u: στιγμιαία τιμή τάσης
i: στιγμιαία τιμή ρεύματος

Ειδικά μία ηλεκτρική επαφή των πρακτικών εφαρμογών σύμφωνα με τη βιβλιογραφία παρουσιάζει περιοχές (spots) στις οποίες η αγωγή ρεύματος γίνεται δια του φαινομένου σήραγγος και οι οποίες είναι τυχαία κατανεμημένες στη φαινόμενη επιφάνεια της επαφής. Οι μικροδομές MIM δημιουργούνται από τις επικαθίσεις στην μεταλλική επιφάνεια, οι οποίες επιφέρουν φράγματα δυναμικού, των οποίων το πάχος και το ύψος ποικίλει. Η επίδραση του μη ομοιόμορφου πάχους των διηλεκτρικών στρωμάτων των επαφών στην πυκνότητα του ρεύματος δια μέσου περιοχών που άγουν με το φαινόμενο σήραγγος, καθώς και άλλων που παρουσιάζουν χωρητικότητα, διερευνήθηκε θεωρητικά από τον Hurysch. 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 1.11-3 και 1.11-4 έχουν αποδοθεί κατά τη βιβλιογραφία στα φαινόμενα μεταφοράς φορτίου διαμέσου λεπτών μονωτικών στρωμάτων (πρωτεύον φαινόμενο), και παρατηρήθηκαν σε μία περίοδο 50Hz.



Σχήμα 1.11-4: a) Τυπικό παλμογράφηματάσης ρεύματος στις επαφές ενός αποζεύκτη 500V/100A με επάργυρες επαφές από χαλκό ο οποίος λειτουργεί υπό ονομαστικό ρεύμα 100A. Κλίμακα τάσης 20mV/div, κλίμακα ρεύματος 60A/div, κλίμακα χρόνου 2ms/div
 b) Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης του παραπάνω παλμογραφήματος για μία ημπερίοδο(50Hz) λειτουργίας
 Δύναμη σύσφιξης των επαφών: 400p

1.12. Οι επαφές σαν ένα μη γραμμικό δυναμικό σύστημα

Η μη γραμμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών επαφών σύμφωνα με τη βιβλιογραφία εξηγείται λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ακόλουθες παραμέτρους συνολικά ή μέρος από αυτές:

- Τις μικροδομές MM, MIM, MOM και MGM συνδεδεμένες παράλληλα μεταξύ τους (βλέπε §1.11, σχήμα 1.11-1).
- Την στατιστική φύση των μικροδομών των οξειδίων στην φαινόμενη επιφάνεια της επαφής, δηλαδή τις μικροδομές MOM και την δράση του φαινομένου σήραγγος.
- Την εκπομπή πεδίου στις προηγούμενες μικροδομές.
- Την ανάπτυξη πέρα από ένα όριο, ενός μηχανισμού σκέδασης (π.χ. σκέδαση στην επιφάνεια), ο οποίος θα μπορούσε πιθανώς να προκαλέσει απρόσμενες διακυμάνσεις της ειδικής αντίστασης διάβασης της επαφής, με αποτέλεσμα χαοτικά φαινόμενα.
- Την πιθανή μαγνητική φύση των επικαθίσεων στην επαφή και γύρω από αυτή, οι οποίες θα έφταναν στον κόρο όταν το τοπικό μαγνητικό πεδίο περάσει μία συγκεκριμένη τιμή.

Όπως και άλλα κυκλώματα οι επαφές οι οποίες λειτουργούν κάτω από υψηλούς ρυθμούς έγχυσης φορτίου έχουν μοντελοποιηθεί από μία διαφορική εξίσωση σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Αυτή προσδιορίζει την συμπεριφορά των χαρακτηριστικών ποσοτήτων (αγνώστων) όπως το ρεύμα και η τάση σε συνάρτηση με το χρόνο. Εξαιτίας της μη γραμμικής φύσης ενός τουλάχιστον στοιχείου του κυκλώματος, ως ανωτέρω ανέφερα, επαφές που λειτουργούν κάτω από υψηλούς ρυθμούς έγχυσης φορτίου εκλαμβάνονται ως μη γραμμικά δυναμικά συστήματα. Τέτοια συστήματα μπορούν να επιδεικνύουν διαφορετική απόκριση ανάλογα με τις αρχικές τους συνθήκες. Μπορούν ακόμα να περνούν από τη μία κατάσταση στην άλλη με αφορμή μία μικρή αλλαγή σε μία από τις παραμέτρους τους. Το απλούστερο μη γραμμικό δυναμικό κύκλωμα που παρουσιάζεται στη σχετική βιβλιογραφία για την περίπτωση των ηλεκτρικών επαφών που δεν έχουν ισχύ διακοπής, όταν λειτουργούν σε υψηλή πυκνότητα ρεύματος, αποτελείται από μία πηγή ημιτονοειδούς τάσης, μία χωρητικότητα προερχόμενη από την παρουσία επιφανειακών οξειδίων και γενικά επικαθίσεων στις επαφές και μία μη γραμμική αντίσταση σε συνδυασμό με μία επαγωγή που να προσομοιώνει την έγχυση φορτίων διαμέσου μικροεπαφών (που έχουν ενεργοποιηθεί) και οι οποίες είναι τυχαία κατανεμημένες στη φαινόμενη επιφάνεια της επαφής. Όλα τα παραπάνω στοιχεία είναι συνδεδεμένα σε σειρά, και μόνο ο πυκνωτής παράλληλα.

Εάν η καμπύλη κόρου (ρεύμα σαν συνάρτηση της μαγνητικής ροής) της επαγωγής αποδίδεται από μία κυβική σχέση, τότε η διαφορική εξίσωση δευτέρου βαθμού που αποδίδει το σύστημα είναι του ακόλουθου τύπου :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} + x^3 = b \cos(t) \quad (34)$$

όπου η παράμετρος b χαρακτηρίζει την πηγή τάσης και η παράμετρος k τις απώλειες της αντιστάσεως στο κύκλωμα. Για ορισμένες τιμές των παραμέτρων b και k οι επαφές χωρίς ισχύ διακοπής έχουν επιδείξει κατά τη βιβλιογραφία, χασοτικά φαινόμενα ικανά να εισάγουν μη προβλέψιμη συμπεριφορά του δυναμικού συστήματος μετά από μακρά λειτουργία.

Για λόγους καλύτερης κατανόησης, η συμπεριφορά των δυναμικών συστημάτων συνήθως παρατηρείται σε διάγραμμα ενός φασικού χώρου. Για την κάθε στιγμή η κατάσταση λειτουργίας αντιστοιχεί σε ένα σημείο που έχει συντεταγμένες τις μεταβλητές που το προσδιορίζουν (διέγερση - απόκριση συστήματος). Σε αυτό το διάγραμμα η απόκριση του συστήματος, όταν αυτό ενεργοποιείται από μία εξωτερική πηγή δείχνεται από μία τροχιά σημείων (τουλάχιστον για ένα κλασικό φυσικό σύστημα). Στην περίπτωση ενός συστήματος που ενεργοποιείται από μία περιοδική πηγή, η απόκριση του συστήματος είναι γενικά περιοδική, και η αντίστοιχη τροχιά των προαναφερθέντων σημείων είναι μία κλειστή καμπύλη. Συστήματα που παρουσιάζουν συνολικά τυχαία συμπεριφορά τείνουν να γεμίσουν το σύνολο του χώρου παρατήρησης του διαγράμματος από σημεία που παρουσιάζουν την

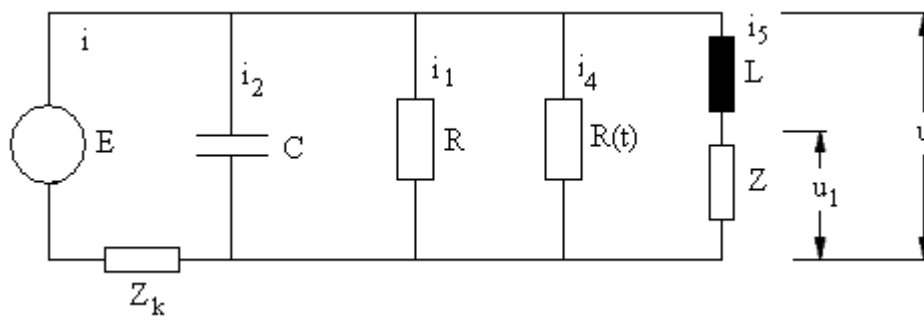
κατάσταση μετά από κάποιο χρόνο λειτουργίας. Εξάλλου στην περίπτωση των συστημάτων με χαοτική συμπεριφορά οι τροχιές των σημείων περιβάλλονται από συγκεκριμένες περιβάλλουσες (όρια) με περίπλοκη γεωμετρία, γνωστές στη διεθνή βιβλιογραφία ως "*strange attractors*". Σε μαθηματικούς όρους είναι αντικείμενα φραγής που χαρακτηρίζονται από μη ακέραίες ευκλείδειες διαστάσεις. Η μαθηματική θεωρία της διστάθειας (*bifurcation theory*) έδωσε τα απαραίτητα εργαλεία προκειμένου να μελετηθεί και να κατανοηθεί η απόκριση αυτών των συστημάτων.

Τα διαγράμματα διστάθειας βοηθούν στην απεικόνιση των σταθερών και ασταθών καταστάσεων μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων με πολλά σημεία λειτουργίας (σταθερότητας). Στην προκειμένη περίπτωση τα διαγράμματα της σχετικής βιβλιογραφίας παρουσιάζουν μία παράμετρο διέγερσης του κυκλώματος (το ρεύμα της πηγής) και μία παράμετρο απόκρισης που χαρακτηρίζει την επαφή, την πτώση τάσης σε έναν κύκλο 50Hz. Η ανάπτυξη της διστάθειας μπορεί να διερευνηθεί συστηματικά με την μεταβολή μίας ακόμα φυσικής παραμέτρου. Στην περίπτωση των επαφών τέτοιες παράμετροι είναι κατά τη βιβλιογραφία, η δύναμη σύσφιξης, ή η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία. Σαν μία γενική παρατήρηση, έχει λεχθεί ότι για μία δεδομένη ένταση ρεύματος υψηλότερες τιμές για την δύναμη σύσφιξης των επαφών τείνουν να αποκαταστήσουν γραμμική συμπεριφορά παρά το γεγονός ότι η πολυστάθεια είναι προφανής κατά τις μέγιστες τιμές ρεύματος σε όλες τις περιπτώσεις.

1.13. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα για την ερμηνεία των μη γραμμικών φαινομένων στις επαφές

Ένα ισοδύναμο κύκλωμα που κατά τη βιβλιογραφία ικανοποιεί τις παραπάνω προϋποθέσεις δίνεται στο σχήμα 1.13-1.

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



Σχήμα 1.13-1: Το ισοδύναμο κύκλωμα:
 C : πυκνωτής που αποδίδει την χωρητική συμπεριφορά της επαφής
 R_1 : γραμμική αντίσταση στένωσης
 Z : μη γραμμική αγωγιμότητα των επικαθίσεων
 L : επαγωγή που αποδίδει την πιθανή επαγωγική συμπεριφορά επαφών
 $R(t)$: αντίσταση που προσομοιώνει την εκδήλωση τοπικών τόξων
 E : η πηγή
 Z_k : το φορτίο

1.14. Η ηλεκτρομονωτική και η αγώγιμη συμπεριφορά των μικροδομών MIM, MOM και MGM μίας στατικής ηλεκτρικής επαφής

Η μη ροή ηλεκτρικών φορτίων στις μικροδομές MIM και MM (μίας στατικής επαφής εν λειτουργία) σημαίνει ότι αυτές έχουν ηλεκτρομονωτική συμπεριφορά, η οποία κατ' ουσίαν δημιουργεί ένα ηλεκτροστατικό πεδίο. Αυτό έχει παρασταθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.13-1 με τη χωρητικότητα C . Η μελέτη της συμπεριφοράς της ανωτέρω χωρητικότητας για τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω αυτής σημαίνει αναίρεση της μονωτικής της ικανότητας, που αφορά, κατά τα γνωστά, την εξειδικευμένη περιοχή της ηλεκτρικής (ή διηλεκτρικής) συμπεριφοράς των μονώσεων. Σύμφωνα με την ανωτέρω βιβλιογραφία, η ροή ρεύματος μέσω της χωρητικότητας (του ισοδύναμου κυκλώματος του σχήματος 1.13-1) μπορεί να συμβεί με διάσπαση του διακένου ή εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.

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

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

Στην πράξη βέβαια συνδυάζονται τα ανωτέρω αίτια και υποβοηθούνται από τις ειδικές συνθήκες που επικρατούν, όπως μορφή του ηλεκτρικού, περιβάλλον μέσο κ.λ.π., έτσι ώστε η αγώγιμη κατάσταση στον πυκνωτή C (βλέπε σχήμα 1.13-1) να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμα τους. Όμως οι τέσσερις ανωτέρω παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής δεν περιλαμβάνουν φαινόμενα που μπορεί κανείς να ακούσει ή να παρατηρήσει, το κυριότερο των οποίων είναι το μη ορατό φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Πληροφορίες για το εν λόγω φάσμα της ακτινοβολίας, αλλά και γενικότερα για όλο το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχουν δοθεί μέσω της κβαντικής φυσικής από μετρήσεις της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων.

Τα βασικότερα συμπεράσματα από τη θεωρία αυτή είναι:

1. το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες
2. το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα)

Η μονωτική ή αγώγιμη συμπεριφορά των μικροδομών MOM μπορεί να επεξηγηθεί με τα προαναφερόμενα υπό την προϋπόθεση ότι τα οξειδία έχουν μονωτική συμπεριφορά. Σε περίπτωση ημιάγωγιμης συμπεριφοράς των οξειδίων θα πρέπει να ισχύουν για τη διέλευση του ρεύματος μέσω αυτών οι σχετικές θεωρίες περί ημιαγωγών (κυρίως το φαινόμενο tunnel).

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

1.15. Οι διατάξεις μέτρησης και αξιολόγησης των στατικών ηλεκτρικών επαφών

Για την αξιολόγηση των στατικών ηλεκτρικών επαφών και τη διερεύνηση των φαινομένων τα οποία εκδηλώνονται σε αυτές, έχουν γίνει κυρίως μετρήσεις με εναλλασσόμενη τάση 230V/50Hz. Οι μετρήσεις αφορούν βασικά:

- στο αρχικό στάδιο λειτουργίας των επαφών και ειδικότερα τη διαχρονική διερεύνηση της πτώσης τάσης και της αντίστασης διάβασης σε διάφορες τιμές της θερμοκρασίας υπό σταθερή τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος
- στην κατάσταση θερμικής ισορροπίας των επαφών, για διάφορες τιμές του ρεύματος που διαρρέει τον λυόμενο σύνδεσμο και ειδικότερα την ενεργό τιμή της πτώσης τάσης στα πλαίσια μίας περιόδου λειτουργίας (50Hz).

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

1.15.1. Η δοκιμή υπερθέρμανσης

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

Η εξακρίβωση της ικανότητας σε ονομαστικό ρεύμα ενός στατικού ηλεκτρικού συνδέσμου βασίζεται κυρίως, κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης, στη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$ ως προς το περιβάλλον, που αναπτύσσεται σε αυτόν. Η τιμή $\Delta\theta$ θεωρείται ότι έχει σταθεροποιηθεί όταν μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων, που απέχουν μεταξύ τους μία ώρα, η αύξηση της τιμής είναι μικρότερη από 1°C. Στην πράξη συμβαίνει αυτό συνήθως για $\Delta\theta$ περίπου 55°C. Η τιμή του

ρεύματος, κατά την οποία επιτυγχάνεται η ανωτέρω σταθεροποίηση της θερμοκρασίας, ονομάζεται ονομαστικό ρεύμα I_N της επαφής.

1.15.2. Διηλεκτρικές δοκιμές διακοπών

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

1.15.3. Δοκιμή μηχανικής αντοχής

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

1.15.4. Δοκιμή υπό τριπολικό βραχυκύκλωμα

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

2. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς και της ροπής σύσφιξης υπό καταπόνηση με εναλλασσόμενο ρεύμα σε στατικούς ηλεκτρικούς συνδέσμους μέσης τάσης. Γι' αυτούς δεν έχουν προσδιοριστεί στο παρελθόν ονομαστικές τιμές για το ρεύμα και τη ροπή σύσφιξης, ούτε σαφείς προδιαγραφές στους κανονισμούς του δημόσιου φορέα ηλεκτρικής ενέργειας. Ο καθορισμός των ονομαστικών μεγεθών αυτών είναι μεγάλης σημασίας, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες στους συνδέσμους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε όλες τις συνδέσεις μεταξύ των αγωγών του δικτύου διανομής καθώς και στους υποσταθμούς.

Μέσω της διαδικασίας των μετρήσεων αποσκοπείται η μελέτη ενός ηλεκτρικού συνδέσμου όταν αυτός καταπονείται από ρεύμα κοντά στο ονομαστικό των αγωγών τους οποίους συνδέει για διάφορες τιμές της ροπής σύσφιξης στους κοχλίες του συνδέσμου. Το ονομαστικό ρεύμα αυτό των αγωγών επιλέγεται, διότι ανταποκρίνεται στις συνθήκες μόνιμης λειτουργίας. Ο σύνδεσμος δηλαδή στην πράξη σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας καταπονείται για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Αναμένεται η εξαγωγή συμπερασμάτων για το πώς η ροπή σύσφιξης επηρεάζει την αύξηση θερμοκρασίας του αγωγού, καθώς και για τη χαλάρωση της ροπής σύσφιξης κατά τη χρόνια καταπόνηση των αγωγών. Με βάση αυτά μπορούν να καθοριστούν προδιαγραφές για την εγκατάσταση νέων συνδέσμων στο δίκτυο, για τις εργασίες συντήρησης και τη συχνότητα με την οποία θα πρέπει να γίνονται οι έλεγχοι στο υπάρχον δίκτυο.

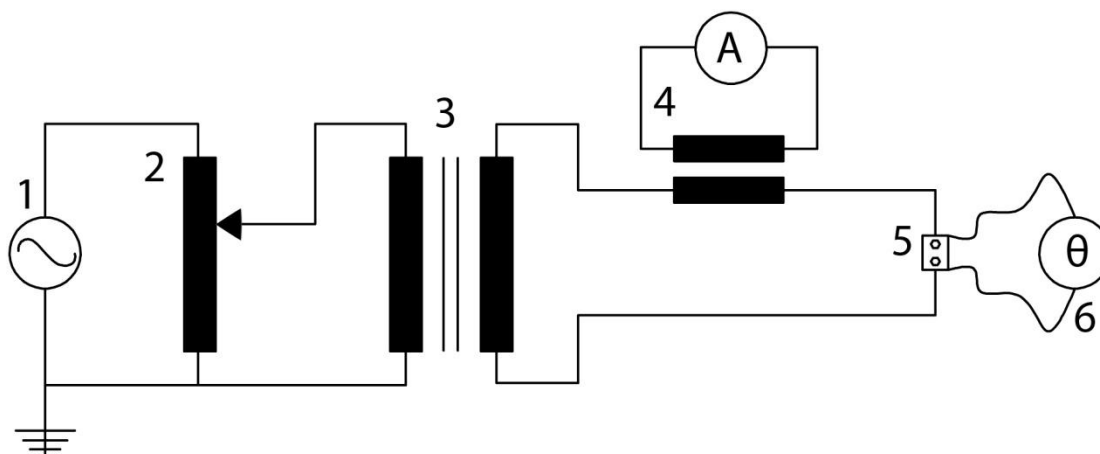
Τέλος, οι μετρήσεις αυτές μπορούν να αποτελέσουν αφετηρία της έρευνας που θα προσδοκά στον ακριβή καθορισμό των ονομαστικών μεγεθών του ρεύματος και της ροπής σύσφιξης στους στατικούς ηλεκτρικούς συνδέσμους.

3. Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

3.1. Πειραματική διάταξη

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, σκοπός του πειράματος είναι η μελέτη της θερμικής καταπόνησης στους ηλεκτρικούς συνδέσμους μέσης τάσης σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Για το λόγο αυτό ως δοκίμιο επιλέχθηκε σύνδεσμος, ο οποίος συνδέει δυο αγωγούς ASCR ίδιας διατομής 35 mm^2 . Η διατομή και ο τύπος των αγωγών αυτών είναι αντιπροσωπευτικά για το δίκτυο μέσης τάσης. Η θερμική καταπόνηση οφείλεται κυρίως στο ρεύμα το οποίο διαρρέει τον σύνδεσμο. Έτσι για το συγκεκριμένο πείραμα δεν υπάρχει λόγος η τιμή της τάσης να είναι στα επίπεδα της μέσης τάσης, συνεπώς για λόγους ασφαλείας διατηρείται χαμηλή. Επίσης επιλέγονται τιμές ροπής σύσφιξης οι οποίες είναι φυσιολογικές, που συναντούνται δηλαδή σε έναν σωστά τοποθετημένο σύνδεσμο.

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1-1.



Σχήμα 3.1-1:

- 1: Πηγή τάσης, τάση δικτύου 230 V
- 2: Αυτομετασχηματιστής (VARIAC)
- 3: Μετασχηματιστής Έντασης
- 4: Επαγωγικό Αμπερόμετρο
- 5: Ηλεκτρικός Σύνδεσμος (δοκίμιο)
- 6: Ψηφιακό Θερμόμετρο

Ο αυτομετασχηματιστής υποβιβασμού τροφοδοτείται από το δίκτυο χαμηλής τάσης και επιβάλλει στην είσοδο του μετασχηματιστή έντασης (M/Σ) τάση 0V εως 230V. Έτσι η ένταση στην έξοδο του M/Σ ρυθμίζεται από την ενδιάμεση λήψη του αυτομετασχηματιστή. Στους δυο ακροδέκτες του μετασχηματιστή συνδέονται δύο πανομοιότυποι αγωγοί διατομής. Οι αγωγοί αυτοί συνδέονται ηλεκτρικά μέσω του ηλεκτρικού συνδέσμου, ο οποίος είναι και το αντικείμενο μελέτης. Το ρεύμα

μετράται επαγωγικά. Τέλος λαμβάνονται τέσσερις μετρήσεις για τη θερμοκρασία, στους δύο αγωγούς και στο εσωτερικό του σύνδεσμου δεξιά και αριστερά.

3.1.1. Ο αυτομετασχηματιστής

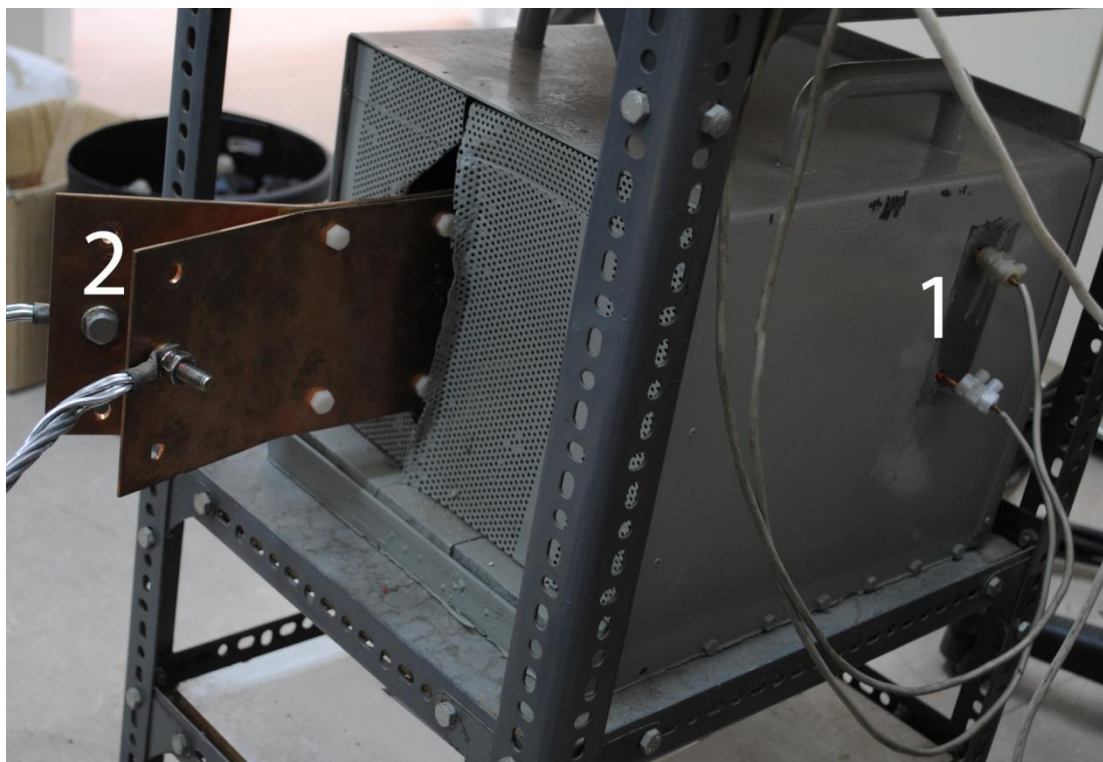
Ο αυτομετασχηματιστής που χρησιμοποιήθηκε (S-260-5 Yamabishi electric Σχήμα 3.1.1-1) έχει τέσσερις ακροδέκτες. Στους δύο ακροδέκτες εισόδου συνδέεται η τάση του δικτύου 230V. Οι δύο ακροδέκτες εξόδου συνδέονται εσωτερικά του μετασχηματιστή με το ένα άκρο του δευτερεύοντος τυλίγματος και την ενδιάμεση λήψη αντίστοιχα. Η ενδιάμεση λήψη ρυθμίζεται μέσω ποτενσιόμετρου. Με τον τρόπο αυτό η τάση στην έξοδο του αυτομετασχηματιστή μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ 0V και 230V.



Σχήμα 3.1.1-1: φωτογραφία του αυτομετασχηματιστή ενδιάμεσης λήψης (VARIAC)

3.1.2. Ο μετασχηματιστής έντασης

Για την προσομοίωση του ρεύματος του δικτύου μέσης τάσης στην πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε μετασχηματιστής ρεύματος του εργαστηρίου μέγιστης ισχύς 1,5kVA, τάσης εξόδου $V_{out,max} = 2,5V$, και μέγιστου ρεύματος $I_{out,max} = 400A$. Ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή είναι $A[\frac{A}{V}] = 160$.



Σχήμα 3.1.2-1: Φωτογραφία του μετασχηματιστή έντασης
1: Ακροδέκτες εισόδου Μ/Σ
2: Ακροδέκτες εξόδου Μ/Σ

3.1.3. Οι αγωγοί

Οι αγωγοί της διάταξης είναι πολύκλωνοι αγωγοί ASCR διατομής 35mm^2 . Οι αγωγοί συνδέονται στους ακροδέκτες εξόδου του μετασχηματιστή έντασης και έχουν μήκος 1m ο καθένας. Η σύνδεση με τον σύνδεσμο γίνεται πριν το άκρο του κάθε αγωγού. Στο άλλο άκρο τους στερεώνονται με κοχλίες στους ακροδέκτες εξόδου του μετασχηματιστή. Μεταξύ του μετασχηματιστή έντασης και του συνδέσμου παρεμβάλλονται μόνο οι αγωγοί καθώς η μέτρηση της έντασης του ρεύματος πραγματοποιείται με επαγωγικό τρόπο, και άλλοι σύνδεσμοι δεν υπάρχουν.

3.1.4. Ο ηλεκτρικός σύνδεσμος

Ο σύνδεσμος που χρησιμοποιήθηκε (σχήμα 3.1.4-1) είναι σύνδεσμος αλουμινίου (Al 30 70, RIVIMETAL) ο οποίος συνδέει παράλληλα δύο αγωγούς (αλουμινίου, χαλκού, ACSR) διατομής 35mm². Η σύσφιξη του συνδέσμου πραγματοποιείται μέσω δυο κοχλιών M16. Ο σύνδεσμος φυλάσσεται σε εσωτερικό χώρο και δεν έχει εκτεθεί σε εξωτερικές συνθήκες. Έτσι στο σύνδεσμο οι επικαθίσεις των οξειδίων είναι οι λιγότερες δυνατές.



Σχήμα 3.1.4-1: Φωτογραφία του ηλεκτρικού συνδέσμου αλουμινίου

3.1.5. Μετρητές θερμοκρασίας

Το είδος των θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στη μέτρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του συνδέσμου και στους αγωγούς κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης ήταν θερμοστοιχεία τύπου σιδήρου – κωνσταντάνης. Η κωνσταντάνη αποτελεί κράμα χαλκού και νικελίου. Ο συγκεκριμένος τύπος θερμοστοιχείου χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές. Στο σχήμα 3.1.5-1 φαίνεται το ψηφιακό θερμόμετρο, ενώ στο σχήμα 3.1.5-2 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των θερμοστοιχείων.



Σχήμα 3.1.5-1: Θερμοστοιχείο σιδήρου – κονσταντάνης

Υλικό	Κωδικοί καλωδίων επέκτασης	HEΔ στους 100°C (mV)	Περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας (°C)
+Fe/-CuNi	+Κίτρινο/-Μπλε	5.268	0~+850

Σχήμα 3.1.5-2: Πίνακας χαρακτηριστικών θερμοστοιχείο σιδήρου – κονσταντάνης

3.2. Πειραματική διαδικασία

Κατά την πειραματική διαδικασία στο πειραματικό μοντέλο πραγματοποιήθηκε δοκιμή υπερθέρμανσης, σε προκαθορισμένη τιμή ρεύματος των αγωγών για διαφορετικές τιμές ροπής σύσφιξης και για δέκα κύκλους λειτουργίας.

Ως ρεύμα καταπόνησης του συνδέσμου επιλέχθηκε ρεύμα κανονικής λειτουργίας, δηλαδή ρεύμα το οποίο αποτελεί ποσοστό του ονομαστικού ρεύματος για τους αγωγούς ASCR διατομής 35mm² στο δίκτυο μέσης τάσης. Η ονομαστική τιμή του ρεύματος δίνεται από τον Πίνακα (σχήμα 3.2-1) $I_{ov} = 224A$. Επιλέχθηκε για ρεύμα καταπόνησης του αγωγού $I = 165A \cong 75\% I_{ov}$. Μια σταθερή καταπόνηση υπό το 75% του ονομαστικού ρεύματος ανταποκρίνεται στη μέση τιμή της καταπόνησης ενός αγωγού διανομής σε κανονικές συνθήκες. Η τιμή του ρεύματος ρυθμίζεται με την βοήθεια του αυτομετασχηματιστή, ο οποίος τροφοδοτεί τον μετασχηματιστή ρεύματος. Η μέτρηση της γίνεται επαγωγικά με αμπεροτσιμπίδα και όχι άμεσα, επί του κυκλώματος, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα την εισαγωγή σοβαρού σφάλματος στις μετρήσεις. Το σφάλμα αυτό όμως δεν επηρεάζει τη φύση του προβλήματος, καθώς το ζητούμενο είναι να διαρρέεται ρεύμα σταθερό και με

τιμή κοντά στην ονομαστική. Για τις ανάγκες αυτές η χρήση της αμπεροτσιμπίδας είναι επαρκής.

ΑΓΩΓΟΙ	$Z_1=Z_2=R+jX$		$Y_1=Y_2=j\omega C$	$Z_0=R_0+jX_0$		$Y_0=j\omega C_0$	$Z_c = \frac{Z_1+Z_2+Z_0}{3}$	I _{max} (A)
	R (Ω/km)	X (Ω/km)	C (nF/km)	R ₀ (Ω/km)	X ₀ (Ω/km)	C ₀ (nF/km)	Z _c (Ω/km)	
16 ACSR	1,268	0,422	9,248	1,416	1,620	4,388	1,317+j0,821	136
35 ACSR	0,576	0,397	9,896	0,724	1,595	4,518	0,625+j0,796	224
50 ACSR	0,404	0,386	10,220	0,552	1,584	4,587	0,453+j0,785	295
95 ACSR	0,215	0,334	10,890	0,363	1,556	4,712	0,264+j0,741	448
95 ACSR (δωπλή)	0,108	0,160	20,970	0,256	1,363	5,966	0,157+j0,561	896
35 AAAC	1,071	0,393	9,364	1,219	1,616	4,406	1,120+j0,801	160
70 AAAC	0,562	0,370	9,927	0,710	1,592	4,527	0,611+j0,777	240
185 AAAC	0,204	0,337	10,922	0,352	1,559	4,723	0,253+j0,744	462
16 Cu	1,274	0,417	8,802	1,422	1,639	4,292	1,323+j0,824	115
35 Cu	0,596	0,393	9,383	0,744	1,615	4,443	0,645+j0,800	185
50 Cu	0,426	0,377	9,698	0,574	1,600	4,510	0,475+j0,785	232
95 Cu	0,220	0,358	10,268	0,368	1,580	4,629	0,269+j0,765	352
95 Cu (δωπλή)	0,110	0,172	19,817	0,258	1,375	5,922	0,159+j0,573	704
16 ACSR-R	1,150	0,397	9,896	1,298	1,600	4,507	1,199+j0,798	148
3x50 Al+50 St	0,823	0,150	146	1,689	1,589	146	1,112+j0,630	123
3x150Al+50 St	0,266	0,125	217	1,183	1,395	217	0,572+j0,548	241
3x150 Al NAEKBA	0,245	0,116		1,117	0,616		0,536+j0,283	233
3x240 Al NAEKBA	0,150	0,108	530	1,083	0,585	530	0,461+j0,267	310
3X240 Al+ 25 Al XLPE	0,162	0,115	270	1,092	0,800	270	0,472+j0,343	410
1x50 Al υποβρ.	0,739	0,619	235	3,695	1,857	235	1,724+j1,032	203
1x50Cu υποβρ.	0,388	0,645	247	1,940	1,935	247	0,905+j1,075	228
1x95 Cu υποβρ.	0,215	0,626	296	1,075	1,878	296	0,502+j1,043	300
3x35 Al υποβρ.	1,035	0,115	226	5,175	0,345	226	2,415+j0,192	145
3x35 CU υποβρ.	0,617	0,115	226	3,085	0,345	226	1,440+j0,192	190
3x50 Al υποβρ.	0,757	0,112	280	3,785	0,336	280	1,766+j0,187	170
3x150Al υποβρ.	0,243	0,079	373	1,215	0,237	373	0,567+j0,132	300
3x95 Cu υποβρ.	0,248	0,125	296	0,620	0,210	296	0,372+j0,153	350

Σχήμα 3.2-1: Πίνακας ονομαστικών τιμών για αγωγούς Μέσης Τάσης (πηγή: ΔΕΗ)

Οι μετρήσεις έγιναν σε τρεις διαφορετικές ομάδες, για τρεις διαφορετικές τιμές ροπής σύσφιξης, για 22Nm, 20Nm και 18Nm. Για κάθε τιμή ροπής σύσφιξης έγιναν δέκα κύκλοι μετρήσεων διάρκειας τριών ωρών. Οι τιμές ροπής σύσφιξης ορίστηκαν εμπειρικά, έπειτα από δοκιμές με κανονικό κλειδί και σύγκριση με το ροπόκλειδο. Για τους συγκεκριμένους κοχλίες μπορεί να ειπωθεί πως στην πράξη μια αυθαίρετη, αλλά επιμελής σύσφιξη του συνδέσμου χωρίς τη χρήση ροπόκλειδου, κυμαίνεται στις τιμές, οι οποίες εξετάστηκαν.

Η ροπή σύσφιξης του συνδέσμου ήταν ίδια και για τους δύο κοχλίες για κάθε ομάδα μετρήσεων και η μέτρηση της έγινε με τη χρήση ροπόκλειδου (σχήμα 3.2-2). Η σύσφιξη του συνδέσμου γίνεται κάθε φορά πριν το πρώτο τρίωρο μετρήσεων και γίνεται μέτρηση της ροπής ξανά μετά την ολοκλήρωση των δέκα κύκλων προκειμένου να διαπιστωθεί η ύπαρξη και το μέγεθος της χαλάρωσης μετά από τις 30 ώρες κανονικής λειτουργίας. Η διαδικασία με την οποία έγινε η μέτρηση αυτή ήταν η εξής: Αρχικά ρυθμίστηκε το ροπόκλειδο σε τιμή πολύ χαμηλότερη από την αρχική τιμή σύσφιξης. Όσο δεν υπήρχε περιστροφή του κοχλία αυξάνονταν η τιμή στο ροπόκλειδο έως την τιμή στην οποία το ροπόκλειδο μετακινούσε τον κοχλία. Η τιμή αυτή σημειώνονταν ως η τελική τιμή της ροπής στο σύνδεσμο.



Σχήμα 3.2-2: Το ροπόκλειδο, εργαλείο με το οποίο καθορίστηκε η τιμή της ροπής σύσφιξης στους κοχλίες του συνδέσμου

Τιμές για την θερμοκρασία λήφθηκαν για τους δύο αγωγούς καθώς και στο εσωτερικό του συνδέσμου από την αριστερή και τη δεξιά πλευρά. Ο τρόπος με τον οποίο τοποθετήθηκαν τα καλώδια σιδήρου – κωνσταντάνης (οι αισθητήρες του θερμομέτρου) φαίνεται στη φωτογραφία (σχήμα 3.2-3)



Σχήμα 3.2-3: Φωτογραφία της διάταξης μέτρησης της θερμοκρασίας

Οι τιμές της θερμοκρασίας σημειώνονταν:

- Κάθε 2 λεπτά στο πρώτο μισάωρο της μέτρησης
- Κάθε 5 λεπτά στο δεύτερο μισάωρο
- Κάθε 10 λεπτά έως το τέλος της μέτρησης

Ο λόγος για τον οποίο αραιώνονται οι μετρήσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι ότι η θερμοκρασία του συνδέσμου αυξάνεται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε μια τελική θερμοκρασία σε διάστημα 45 με 50 λεπτών κατά μέσο όρο. Στη συνέχεια η θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Από αυτό το χρονικό σημείο και έπειτα γίνονται μετρήσεις ενδεικτικά κάθε δέκα λεπτά και κυρίως για να γίνεται έλεγχος εάν η υπερθέρμανση ξεπερνά τους 55°C. Στην περίπτωση αυτή η διαδικασία διακόπτεται και η μέτρηση ακυρώνεται.

Τέλος, σημειώνεται πως ανά τακτά χρονικά διαστήματα γίνονταν μετρήσεις με την αμπεροτσιμπίδα ώστε να διαπιστωθεί πως το ρεύμα παραμένει σταθερό. Σε περίπτωση απόκλισης του ρεύματος από το αρχικά ορισμένο της δοκιμής γίνονταν οι απαραίτητες διορθωτικές κινήσεις. Οι αποκλίσεις της τιμής του ρεύματος παρουσιάζονταν στην πρώτη φάση του πειράματος, πριν σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία, καθώς με τη μεταβολή της θερμοκρασίας αλλάζει και η ειδική αγωγιμότητα τόσο των αγωγών όσο και του συνδέσμου με αποτέλεσμα την μεταβολή του ρεύματος.

4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία διεξαγωγής του πειράματος. Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή προκύπτουν τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό με τη μορφή διαγραμμάτων. Οι αναλυτικοί πίνακες των μετρήσεων δίνονται στο παράρτημα Α.

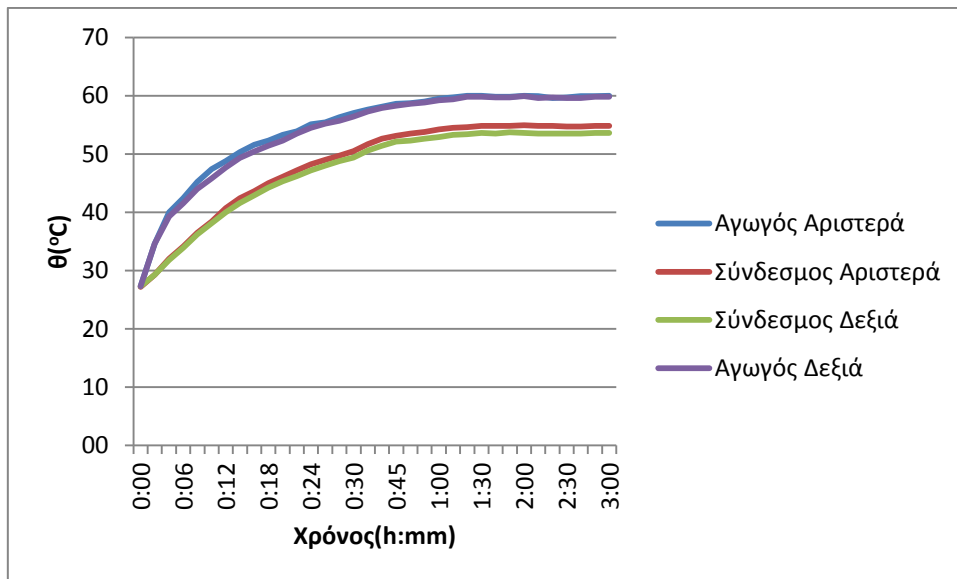
Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται τέσσερις γραφικές παραστάσεις, οι οποίες αναφέρονται στη θερμοκρασία του αγωγού αριστερά, του συνδέσμου αριστερά, του συνδέσμου δεξιά και του αγωγού δεξιά αντίστοιχα για κάθε χρονική στιγμή στη τρίωρη διάρκεια διεξαγωγής κάθε πειραματικού κύκλου.

Τα σχήματα 4.1-1 έως 4.1-10 αποτελούν την πρώτη ομάδα των 10 τρίωρων κύκλων μετρήσεων, όπου η αρχική ροπή σύσφιξης είχε οριστεί 18Nm.

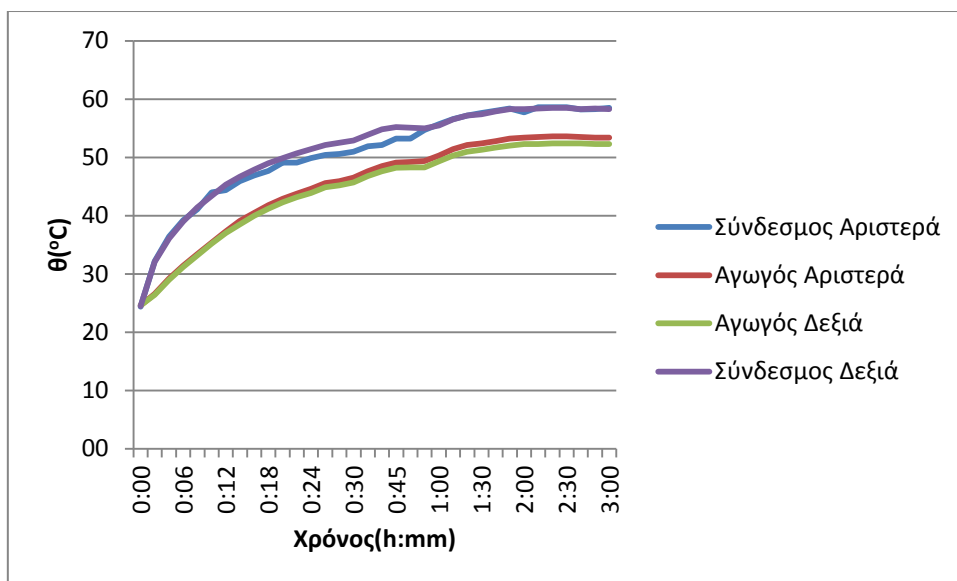
Τα σχήματα 4.2-1 έως 4.2-10 αποτελούν την δεύτερη ομάδα των 10 τρίωρων κύκλων μετρήσεων, όπου η αρχική ροπή σύσφιξης είχε οριστεί 20Nm.

Τα σχήματα 4.3-1 έως 4.3-10 αποτελούν την τρίτη ομάδα των 10 τρίωρων κύκλων μετρήσεων, όπου η αρχική ροπή σύσφιξης είχε οριστεί 22Nm.

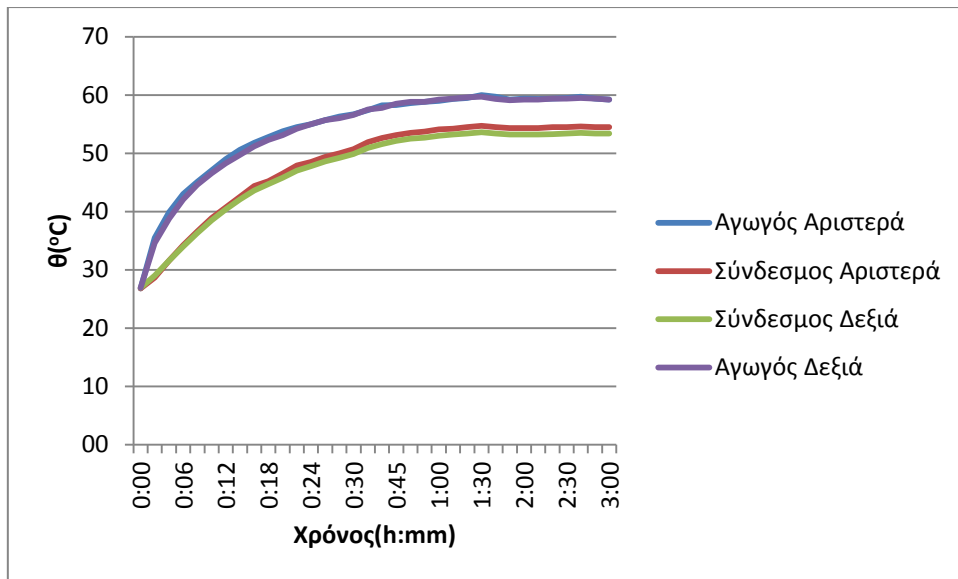
4.1. Μετρήσεις για ροπή σύσφιξης 18Nm



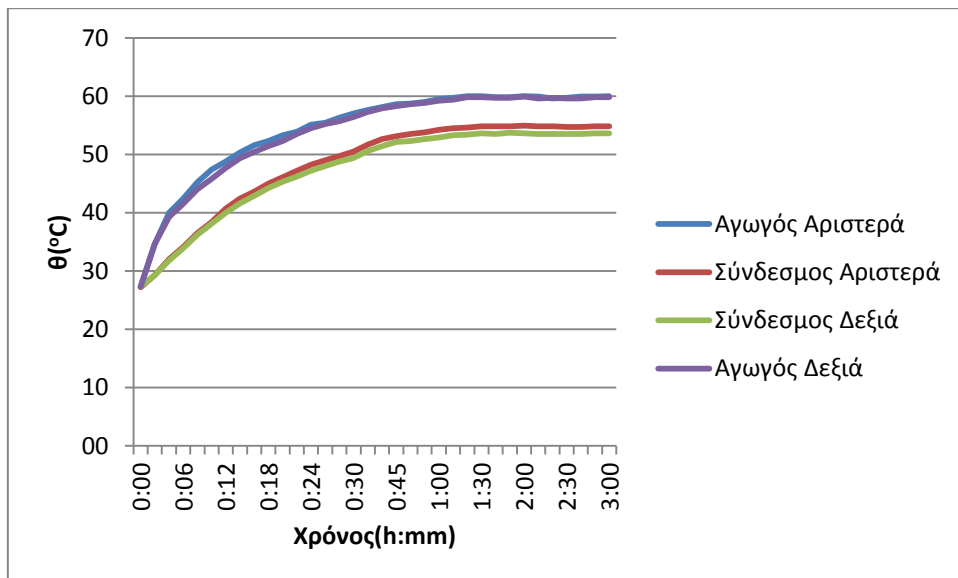
Σχήμα 4.1-1: Πρώτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 18Nm



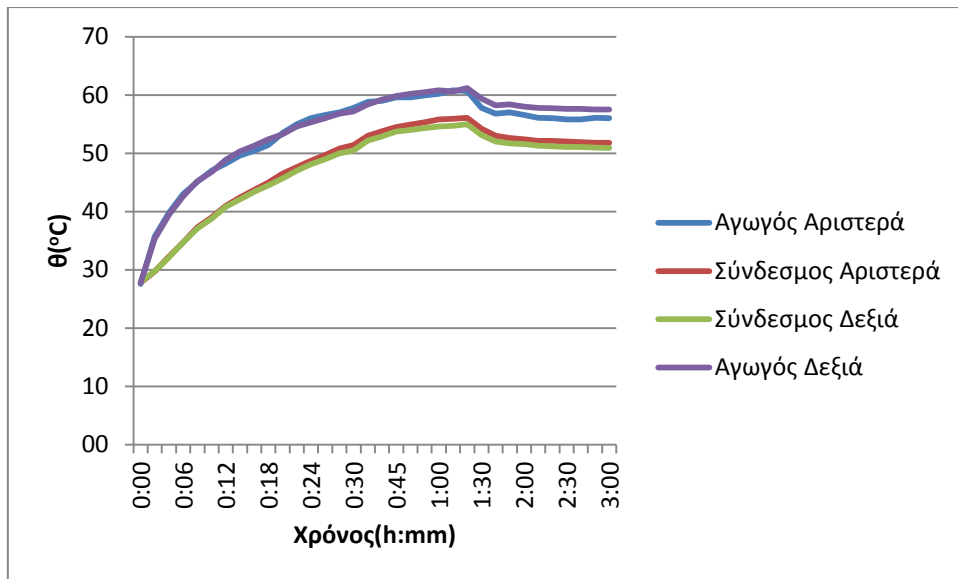
Σχήμα 4.1-2: Δεύτερο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 18Nm



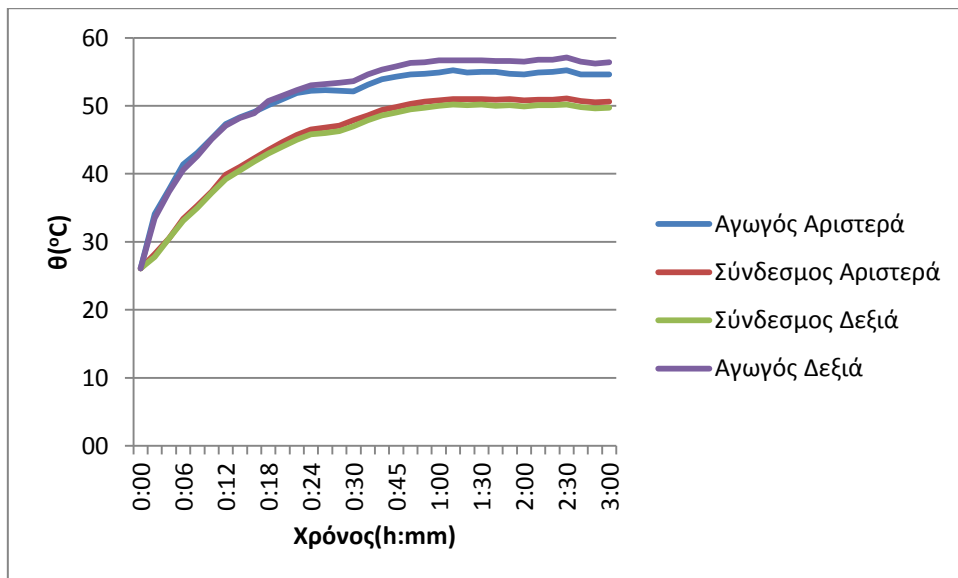
Σχήμα 4.1-3: Τρίτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 18Nm



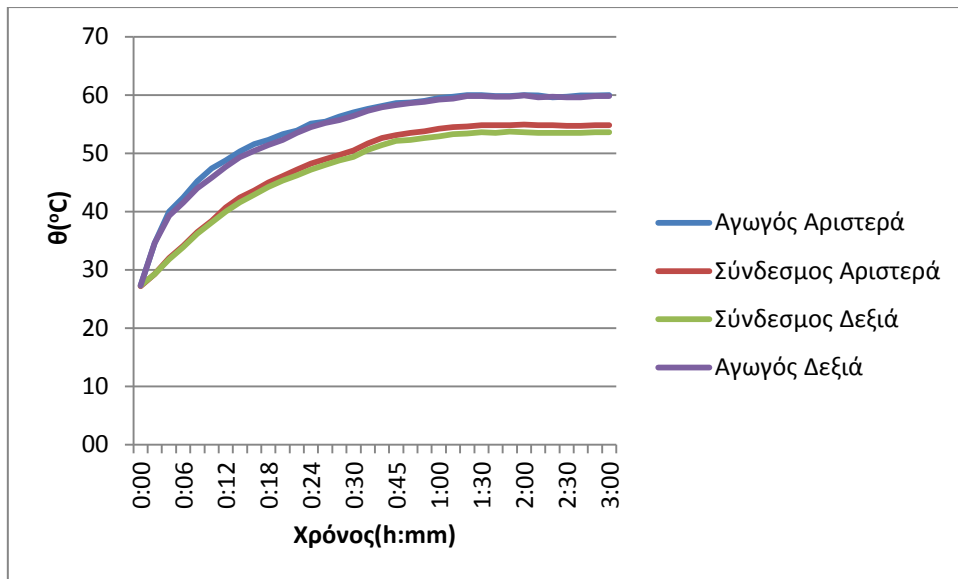
Σχήμα 4.1-4: Τέταρτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 18Nm



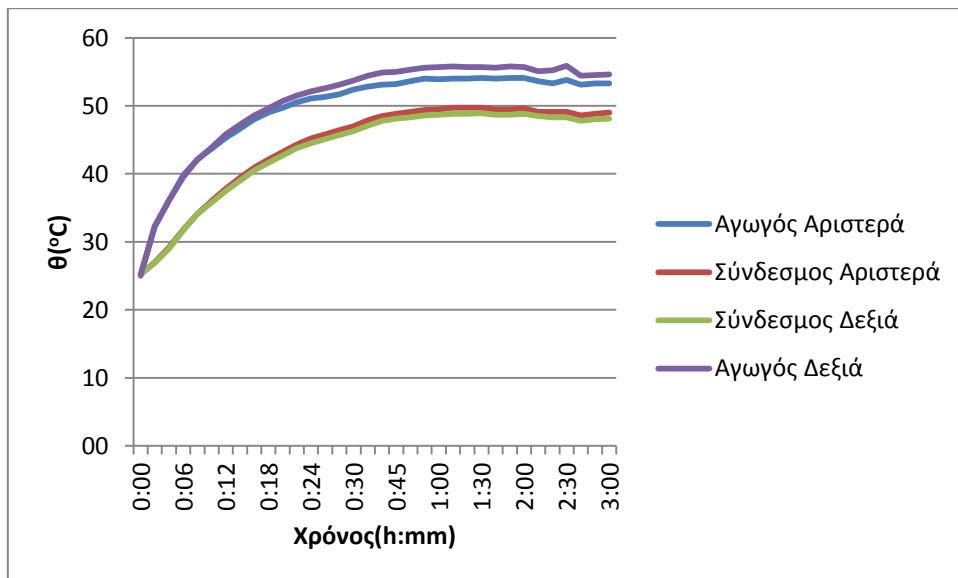
Σχήμα 4.1-5: Πέμπτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 18Nm



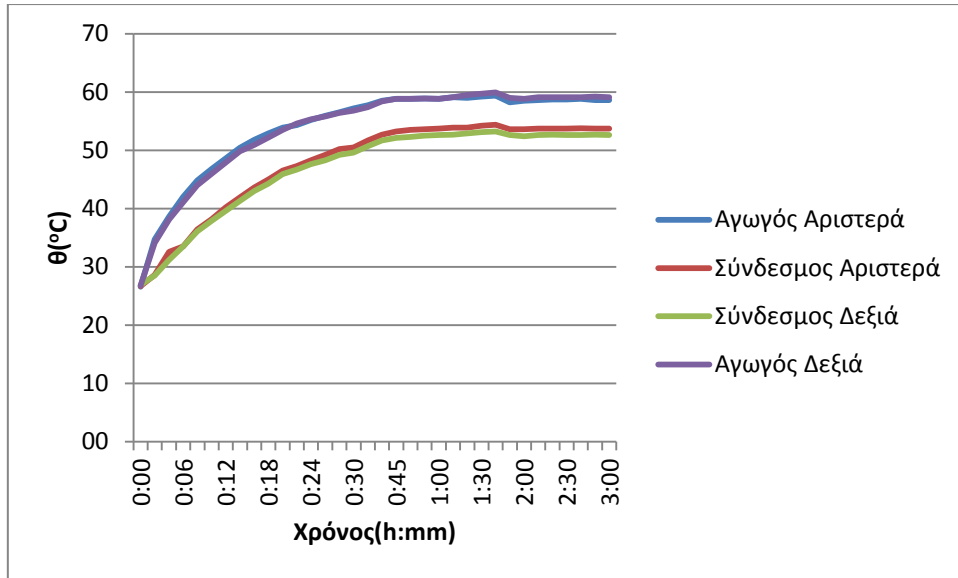
Σχήμα 4.1-6: Έκτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 18Nm



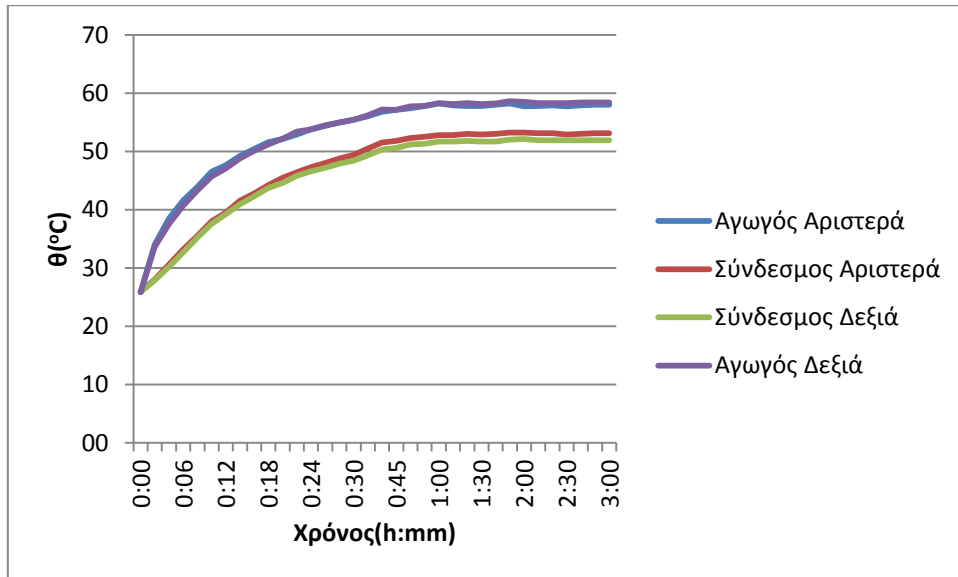
Σχήμα 4.1-7: Έβδομο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 18Nm



Σχήμα 4.1-8: Όγδοο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 18Nm

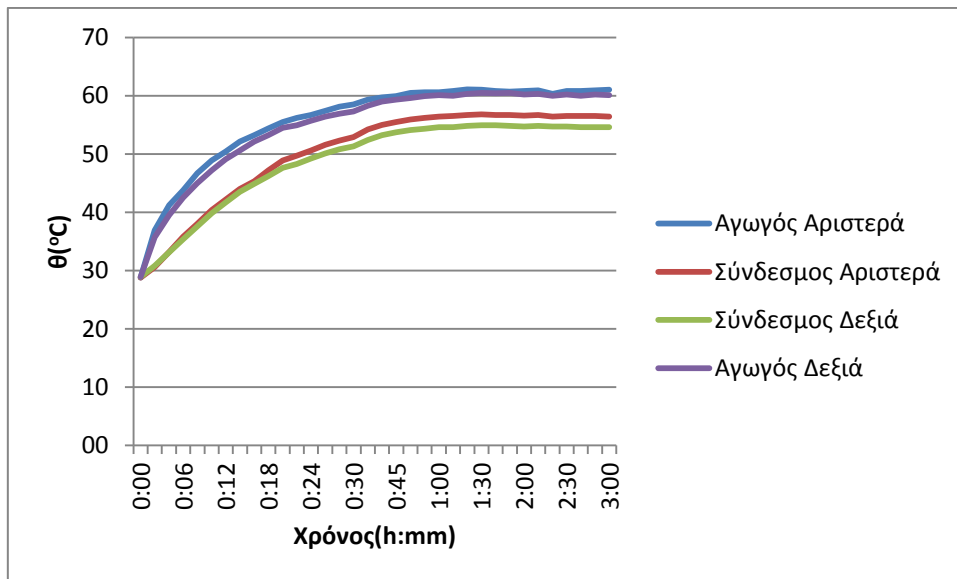


Σχήμα 4.1-9: Ένατο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 18Nm

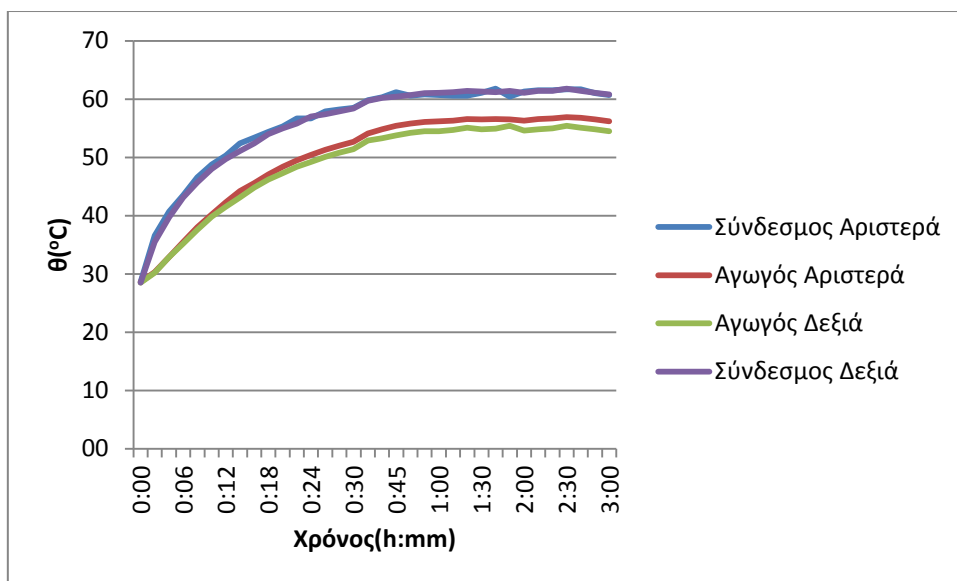


Σχήμα 4.1-10: Δέκατο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 18Nm

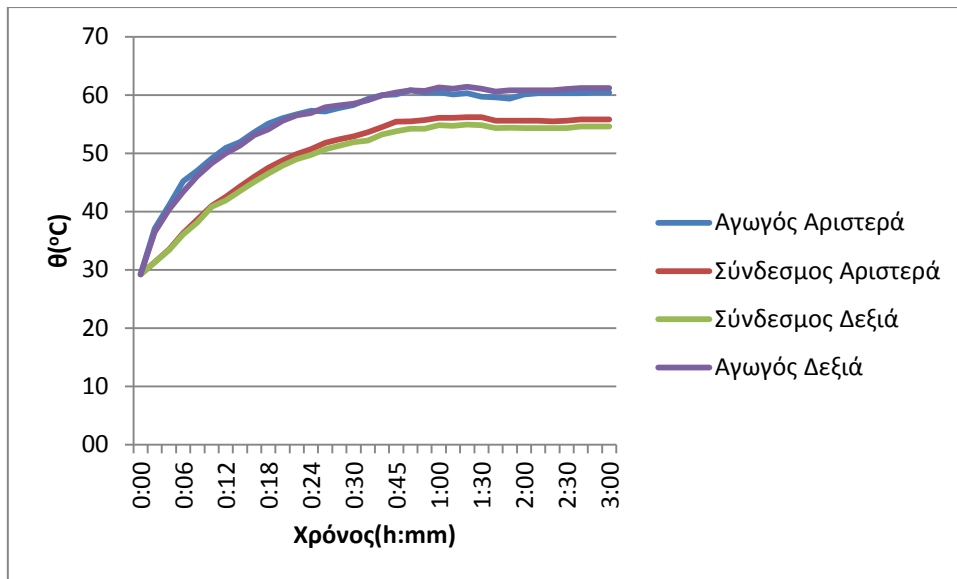
4.2. Μετρήσεις για ροπή σύσφιξης 20Nm



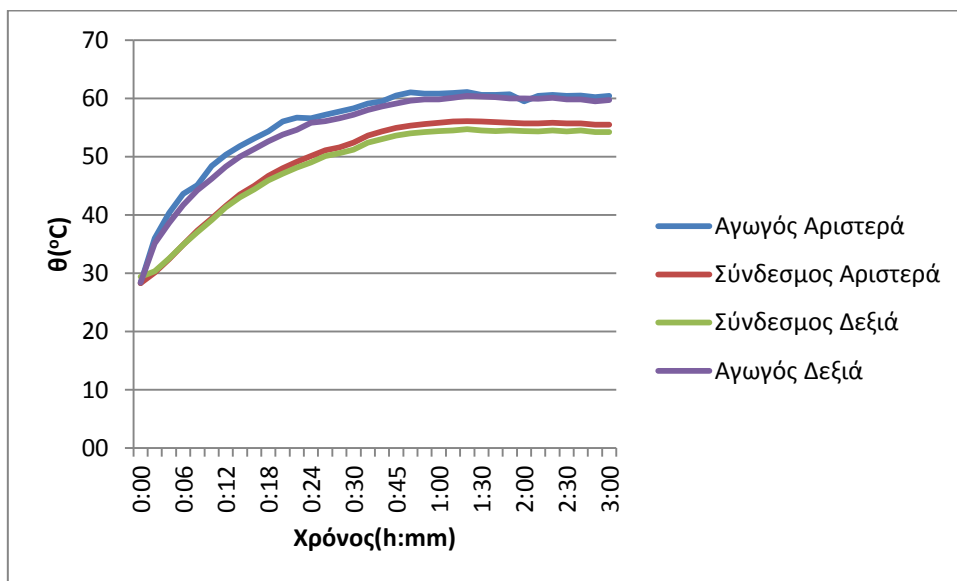
Σχήμα 4.2-1: Πρώτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 20Nm



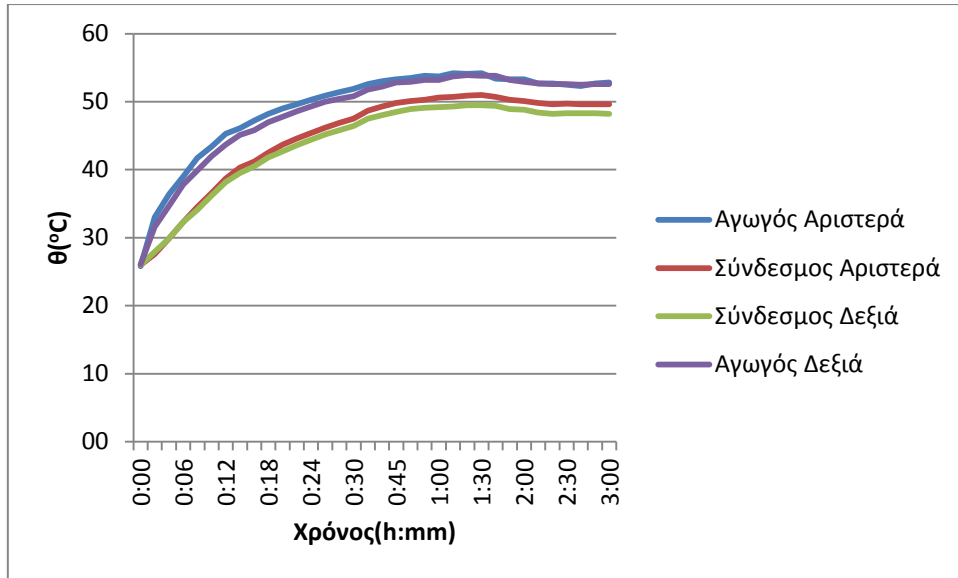
Σχήμα 4.2-2: Δεύτερο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 20Nm



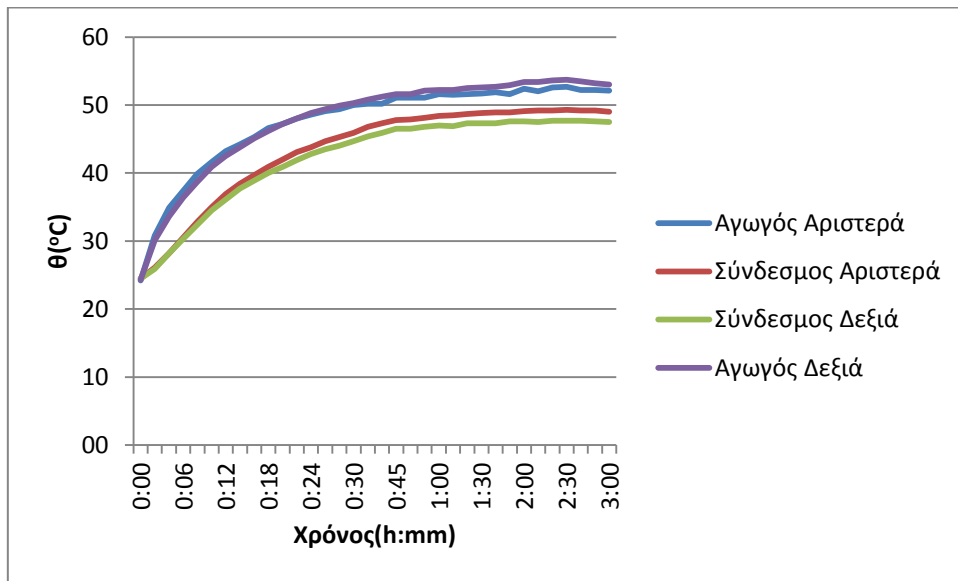
Σχήμα 4.2-3: Τρίτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 20Nm



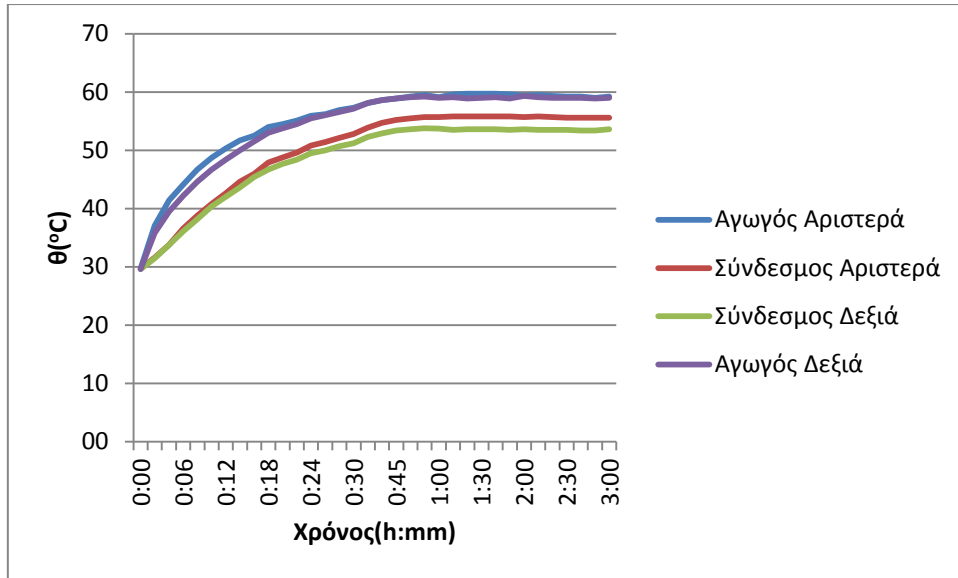
Σχήμα 4.2-4: Τέταρτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 20Nm



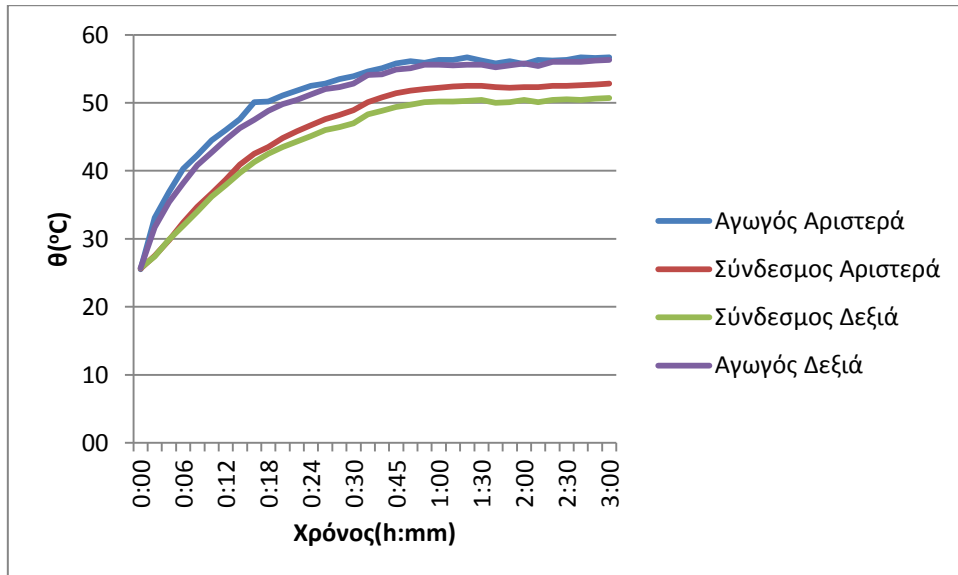
Σχήμα 4.2-5: Πέμπτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 20Nm



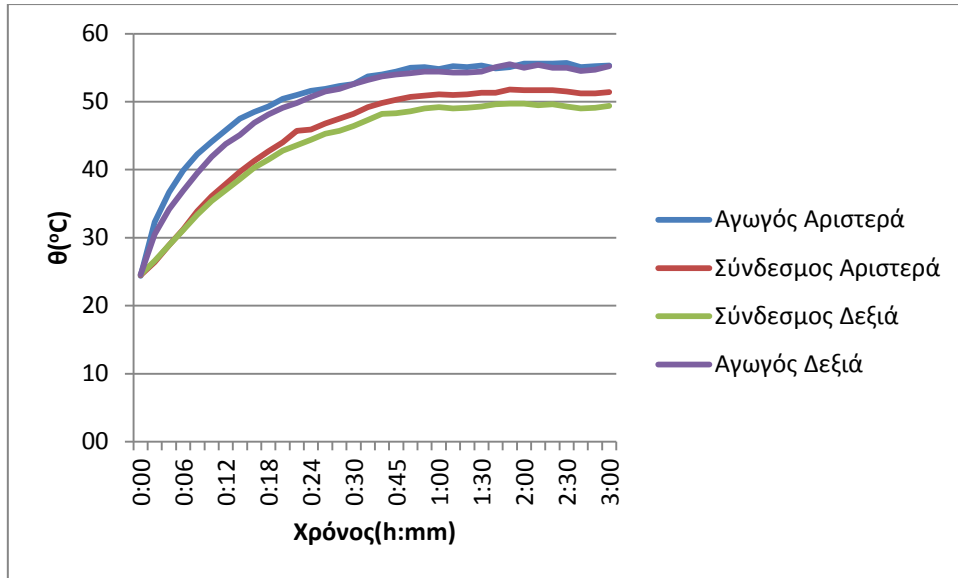
Σχήμα 4.2-6: Έκτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 20Nm



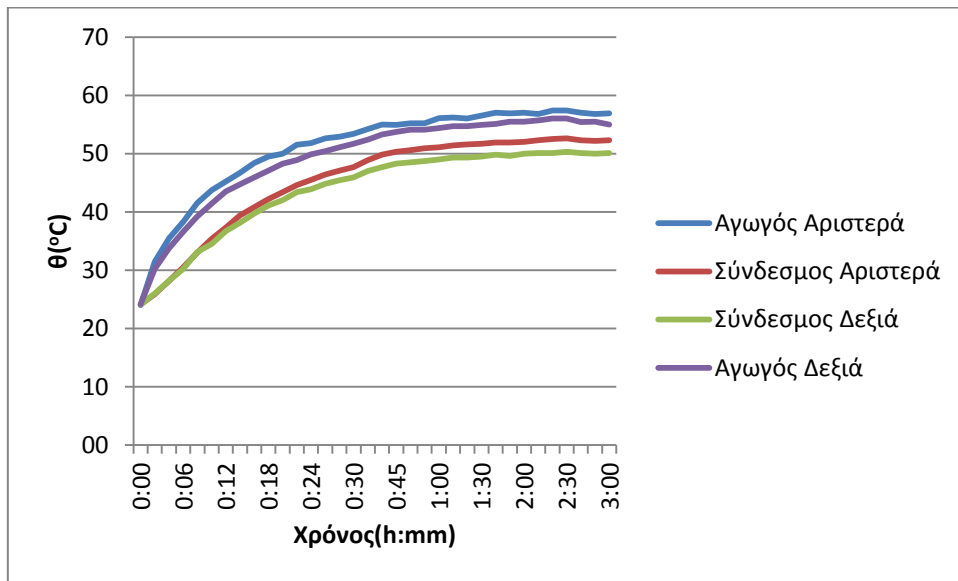
Σχήμα 4.2-7: Έβδομο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 20Nm



Σχήμα 4.2-8: Έκτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 20Nm

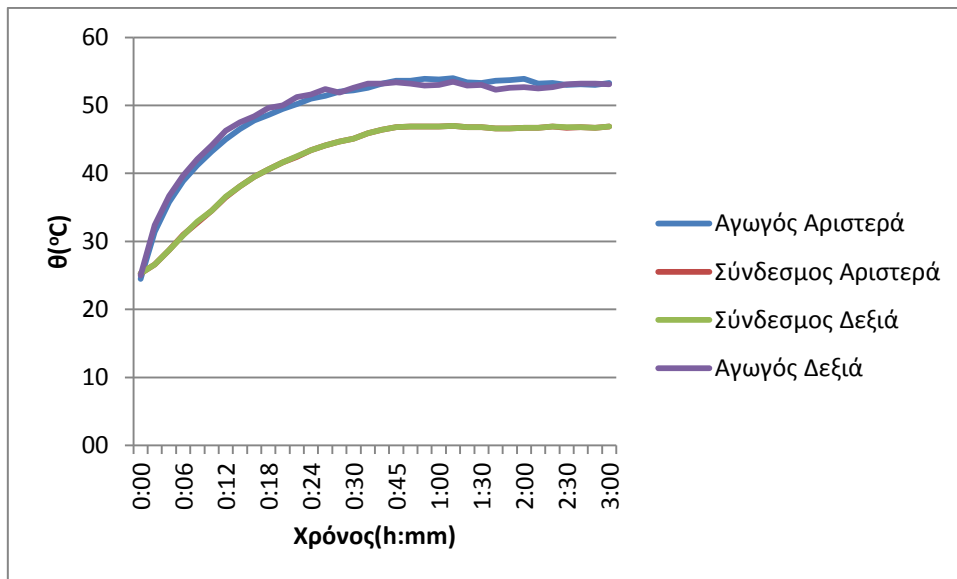


Σχήμα 4.2-9: Ένατο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 20Nm

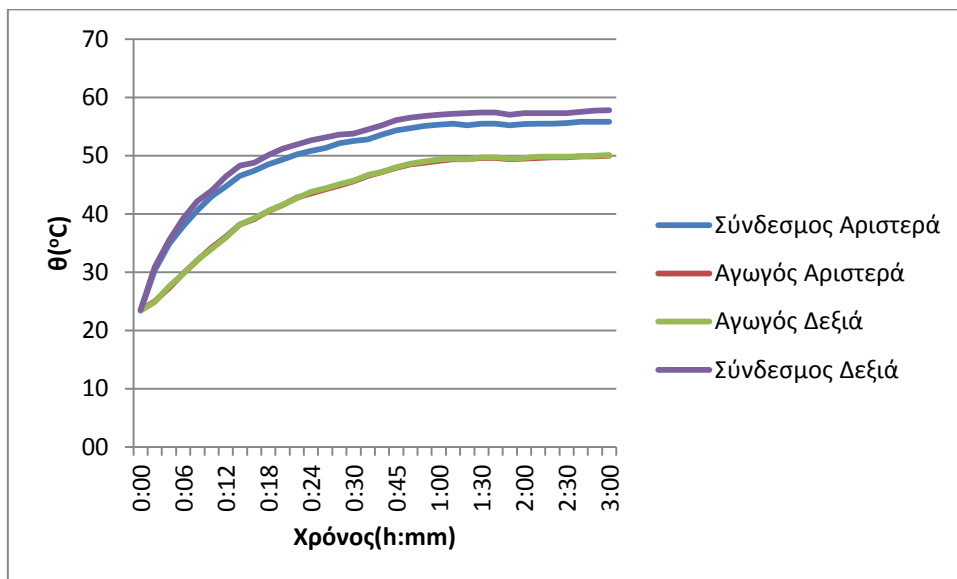


Σχήμα 4.2-10: Δέκατο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 20Nm

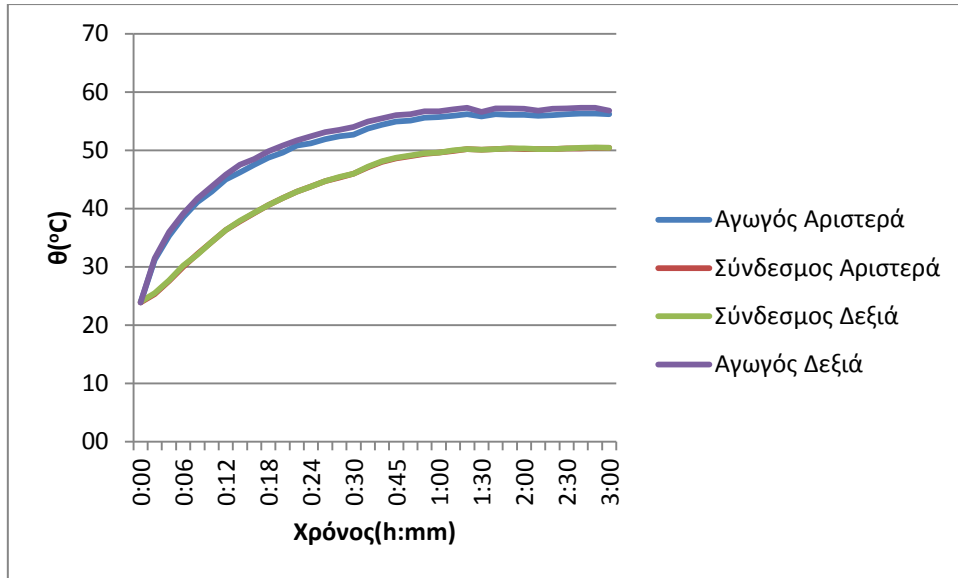
4.3. Μετρήσεις για ροπή σύσφιξης 22Nm



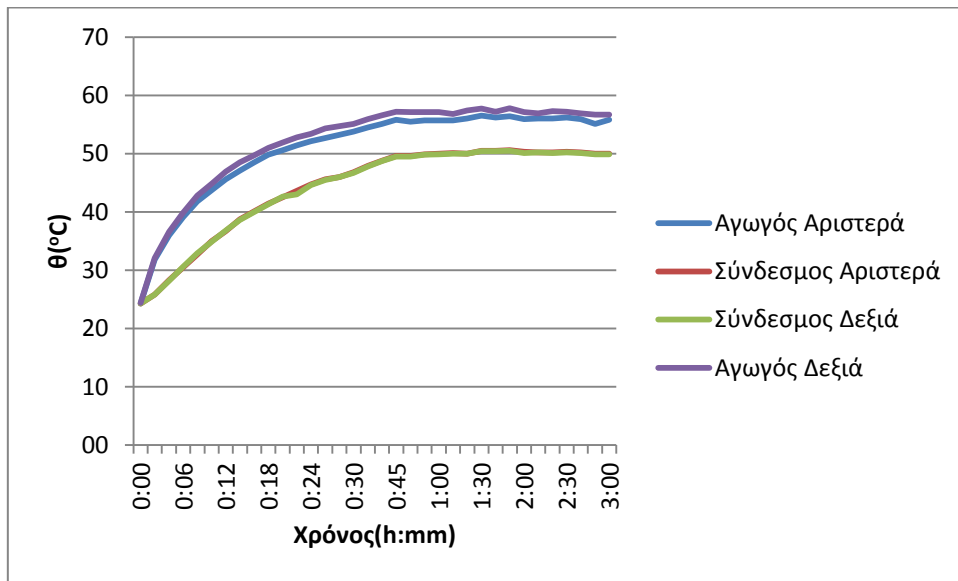
Σχήμα 4.3-1: Πρώτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 22Nm



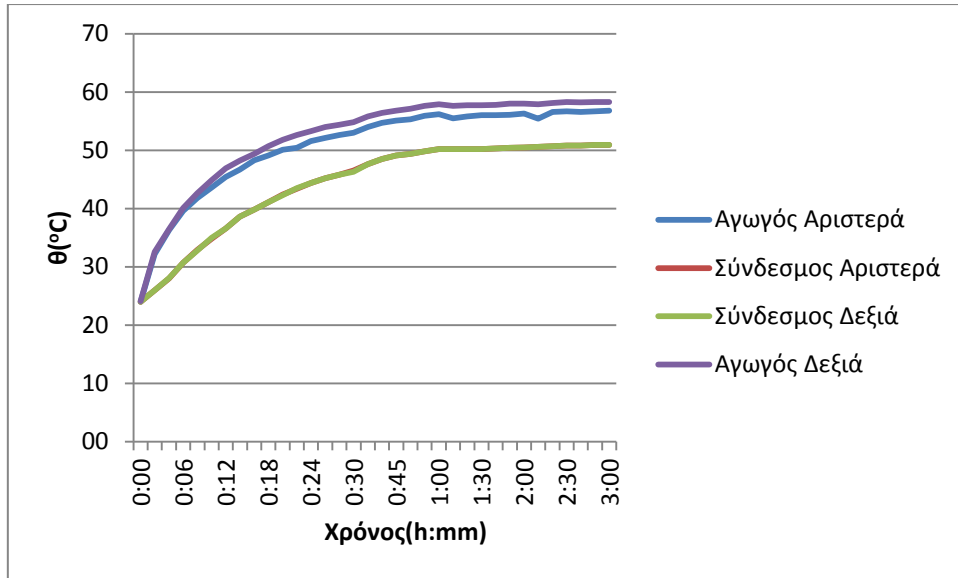
Σχήμα 4.3-2: Δεύτερο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 22Nm



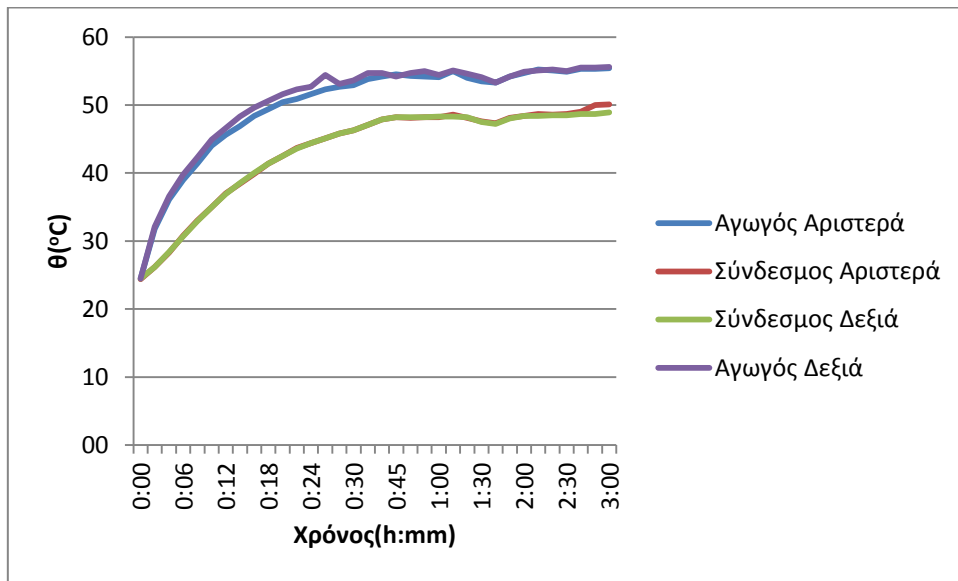
Σχήμα 4.3-3: Τρίτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 22Nm



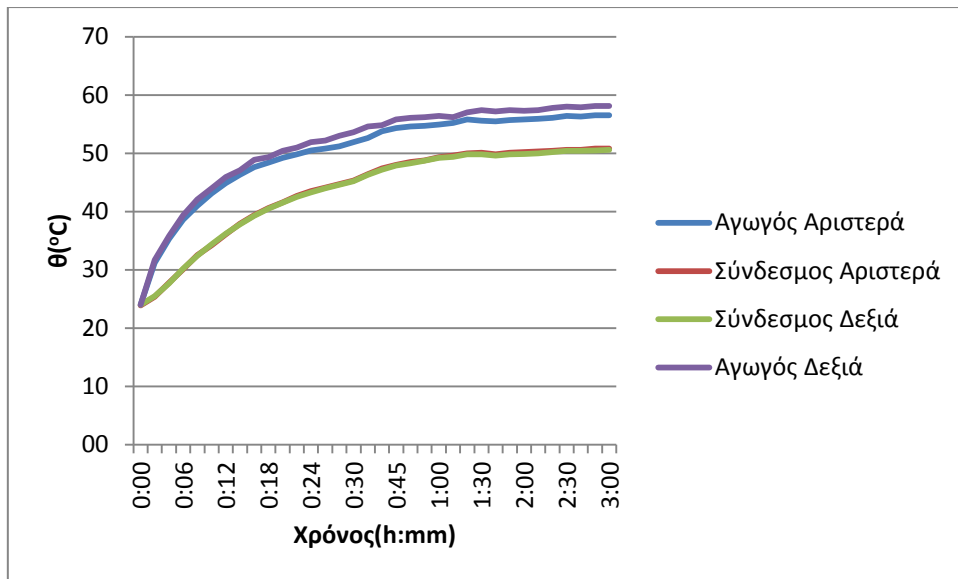
Σχήμα 4.3-4: Τέταρτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 22Nm



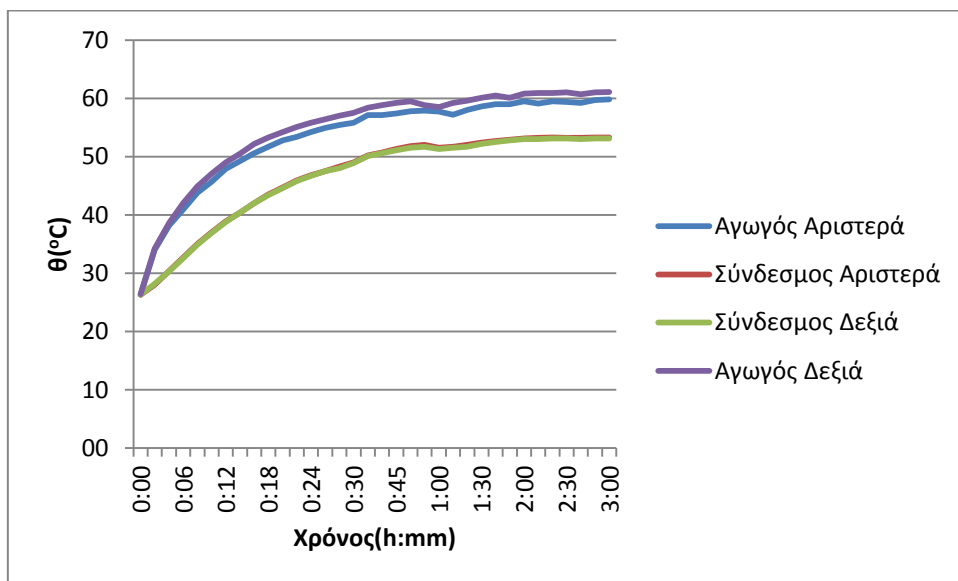
Σχήμα 4.3-5: Πέμπτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 22Nm



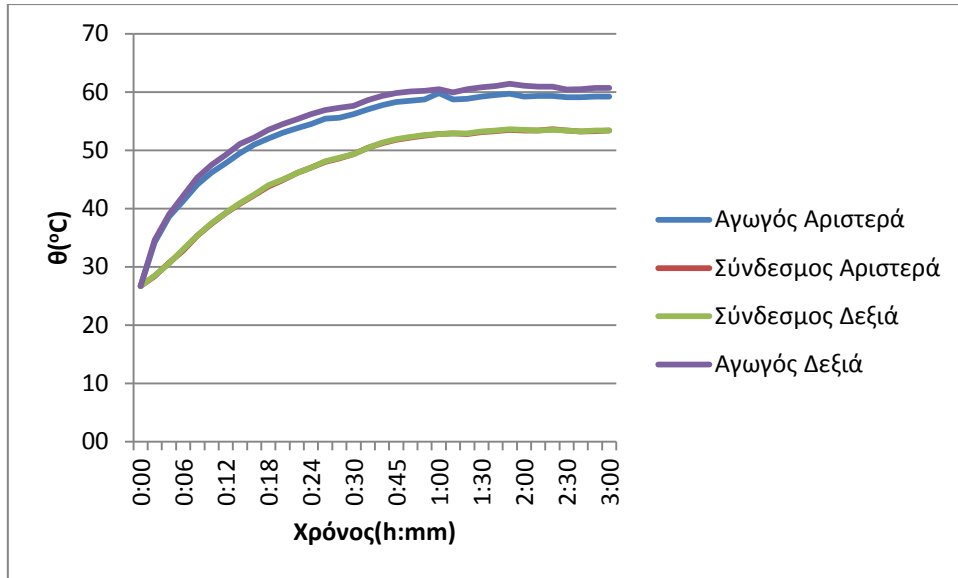
Σχήμα 4.3-6: Έκτο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 22Nm



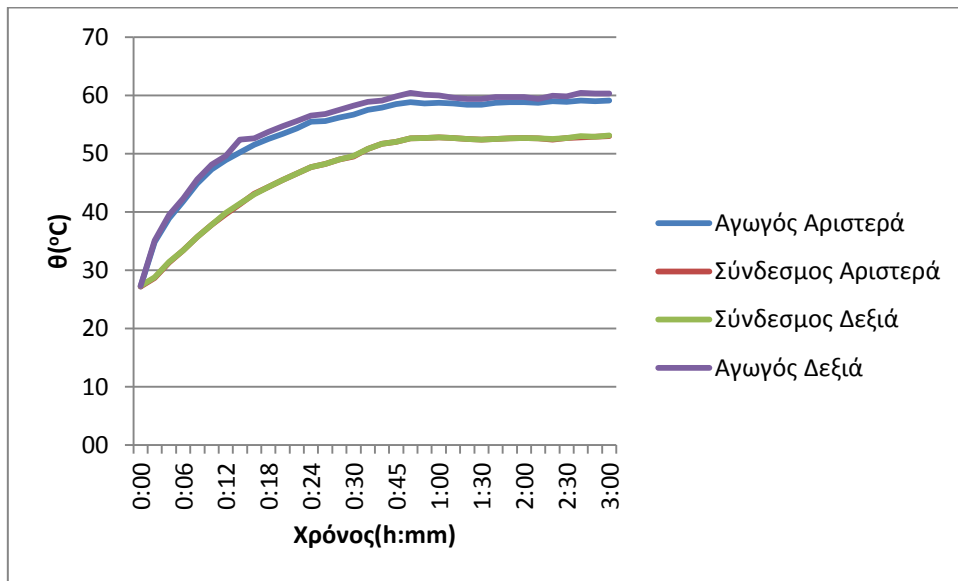
Σχήμα 4.3-7: Έβδομο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 22Nm



Σχήμα 4.3-8: Όγδοο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 22Nm



Σχήμα 4.3-9: Ένατο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 22Nm



Σχήμα 4.3-10: Δέκατο τρίωρο για ροπή σύσφιξης 22Nm

5. Σχόλια και Συμπεράσματα

5.1. Επεξεργασία των μετρήσεων και συμπεράσματα

Από τα διαγράμματα του προηγούμενου κεφαλαίου και τους αναλυτικούς πίνακες του παραρτήματος, μπορούν να εξάχθουν χρήσιμα συμπεράσματα για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Οι μετρήσεις οι οποίες ενδιαφέρουν ιδιαίτερα είναι οι τιμές της θερμοκρασίας στον ηλεκτρικό σύνδεσμο, ο οποίος αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης. Αρχικά παρατηρείται πως σε όλες τις μετρήσεις δεν υπάρχει σημαντική απόκλιση στις τιμές της θερμοκρασίας μεταξύ της δεξιάς και της αριστερής πλευράς του συνδέσμου (μέγιστη απόκλιση μικρότερη των 2°C). Η όποια απόκλιση οφείλεται κυρίως σε διαφορές στην τοποθέτηση των αισθητήρων στο εσωτερικό του συνδέσμου, ως προς το ακριβές σημείο και τον τρόπο της επαφής τους με την επιφάνεια του συνδέσμου. Η ομοιομορφία αυτή των μετρήσεων είναι αναμενόμενη και μπορεί να γίνει η παραδοχή πως η θερμοκρασία του συνδέσμου είναι κοντά στο μέσο όρο των δύο αυτών μετρήσεων σε κάθε χρονικό σημείο.

Από τη σύγκριση της θερμοκρασίας των μετρήσεων στο σύνδεσμο με αυτή στους αγωγούς διαπιστώνεται πως για όλες τις ροπές σύσφιξης, η θερμοκρασιακή αύξηση στους αγωγούς κατά τη διαρροή με το επιλεγμένο ρεύμα καταπόνησης είναι μεγαλύτερη στους αγωγούς απ'ότι στο σύνδεσμο. Συνεπώς εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα του συνδέσμου είναι μεγαλύτερη από αυτή του αγωγού ASCR. Καθώς οι αγωγοί αυτοί χρησιμοποιούνται στο δίκτυο διανομής συμπεραίνεται πως με τη χρησιμοποίηση των συνδέσμων αυτών δεν αναμένονται επιπλέον θερμικές απώλειες στο δίκτυο στην κανονική λειτουργία για τις συγκεκριμένες ροπές σύσφιξης.

Μετά την ολοκλήρωση κάθε ομάδας μετρήσεων, δηλαδή τους 10 κύκλους μετρήσεων τρίωρης διάρκειας για συγκεκριμένη ροπή σύσφιξης, διαπιστώθηκε με τη διαδικασία που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.1 πως δεν υπάρχει χαλάρωση στη σύσφιξη του συνδέσμου μετά τις 30 ώρες λειτουργίας. Αυτό ισχύει για όλες τις ομάδες των μετρήσεων, για ροπή σύσφιξης δηλαδή 18Nm, 20Nm και 22Nm. Έτσι προκύπτει το συμπέρασμα πως για τιμές στο 75% του ονομαστικού ρεύματος των αγωγών, το ποσοστό χαλάρωσης στη ροπή σύσφιξης του συνδέσμου είναι μικρό.

Υστερα από επεξεργασία στις μετρήσεις του προηγούμενου Κεφαλαίου 4, οι μετρήσεις μπορούν να συνοψιστούν με την εξής διαδικασία:

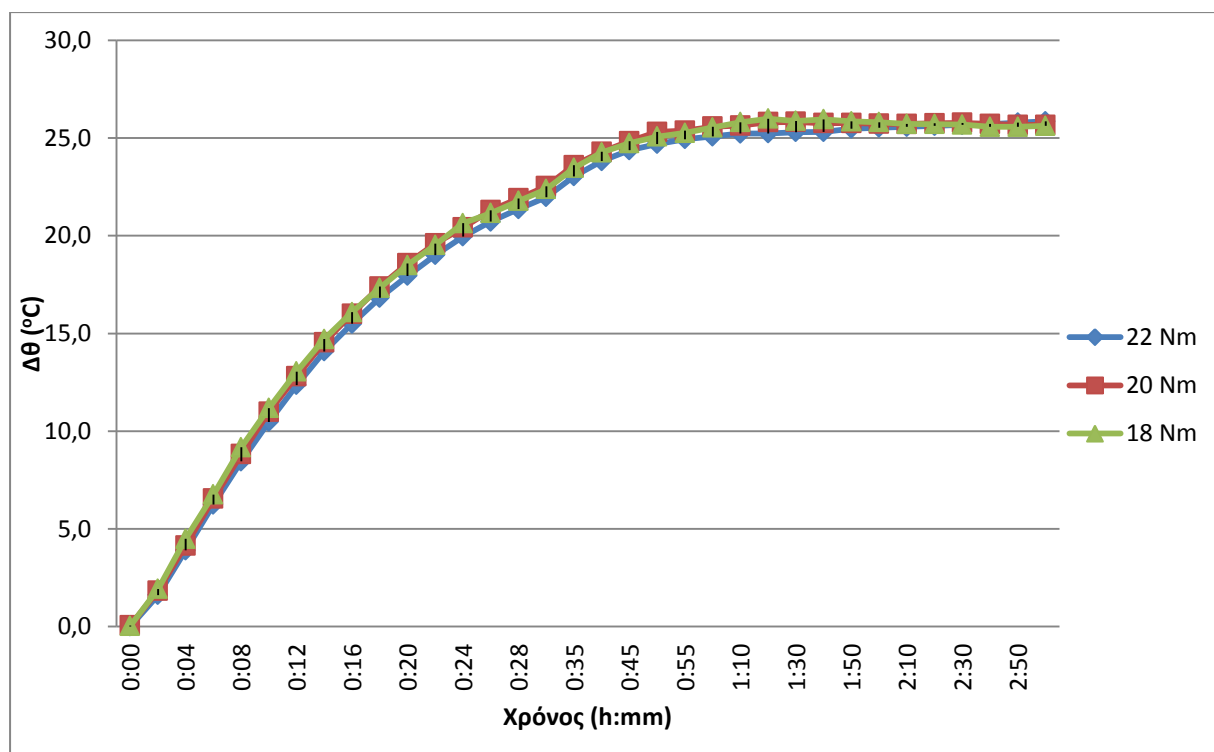
Αρχικά υπολογίζεται ο μέσος όρος μεταξύ των θερμοκρασιών δεξιά και αριστερά στο εσωτερικό του συνδέσμου για κάθε χρονική στιγμή. Έπειτα για κάθε

κύκλο μετρήσεων αφαιρείται η θερμοκρασία του συνδέσμου τη χρονική στιγμή $t_0=0:00$. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας σε κάθε χρονική στιγμή του πειράματος. Για κάθε ομάδα μετρήσεων, με κοινή ροπή σύσφιξης, υπολογίζεται για κάθε χρονικό σημείο ο μέσος όρος της αύξησης θερμοκρασίας των δέκα κύκλων. Προκύπτουν έτσι τα δεδομένα του παρακάτω πίνακα 5.1-1.

Χρόνος (h:m)	Αύξηση θερμοκρασίας $\Delta\theta$ ($^{\circ}\text{C}$)		
	22 Nm	20 Nm	18 Nm
0:00	0,0	0,1	0,0
0:02	1,6	1,8	1,9
0:04	3,9	4,2	4,5
0:06	6,2	6,5	6,8
0:08	8,5	8,8	9,2
0:10	10,5	11,0	11,2
0:12	12,4	12,8	13,1
0:14	14,1	14,6	14,7
0:16	15,5	16,0	16,1
0:18	16,8	17,4	17,3
0:20	18,0	18,6	18,5
0:22	19,0	19,6	19,5
0:24	20,0	20,4	20,6
0:26	20,7	21,3	21,2
0:28	21,4	21,9	21,8
0:30	22,0	22,5	22,4
0:35	23,0	23,6	23,5
0:40	23,8	24,3	24,3
0:45	24,4	24,8	24,7
0:50	24,7	25,3	25,1
0:55	24,9	25,4	25,3
1:00	25,1	25,6	25,5
1:10	25,2	25,6	25,8
1:20	25,2	25,8	26,0
1:30	25,3	25,8	25,9
1:40	25,3	25,8	26,0
1:50	25,5	25,8	25,9
2:00	25,5	25,7	25,8
2:10	25,6	25,7	25,7
2:20	25,6	25,8	25,7
2:30	25,7	25,8	25,7
2:40	25,7	25,7	25,6
2:50	25,8	25,7	25,6
3:00	25,9	25,7	25,6

Πίνακας 5.1-1: Συγκεντρωτικός Πίνακας του μέσου όρου των μετρήσεων αύξησης θερμοκρασίας στον ηλεκτρικό σύνδεσμο για ροπή σύσφιξης 18, 20 και 22Nm

Τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα αποτυπώνονται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 5.1-1):



Σχήμα 5.1-1 : Συγκεντρωτικό Διάγραμμα του μέσου όρου των μετρήσεων αύξησης θερμοκρασίας στον ηλεκτρικό σύνδεσμο για ροπή σύσφιξης 18, 20 και 22Nm

5.2. Γενικά συμπεράσματα

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας ήταν η μελέτη του ηλεκτρικού συνδέσμου σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Παρατηρείται για τις συνθήκες αυτές ότι ο σύνδεσμος δεν δοκιμάζεται στα όρια του. Αυτό γίνεται σαφές από την ανύψωση θερμοκρασίας, η οποία απέχει πολύ – είναι περίπου στο 45% – από το όριο του ονομαστικού ρεύματος για τον σύνδεσμο στους 55°C (βλ. πίνακας 5.1-1, σχήμα 5.1-1). Έπειτα από το γεγονός ότι δεν υπήρξε χαλάρωση στους κοχλίες του συνδέσμου. Ακόμη φαίνεται έμμεσα από το γεγονός ότι η ανύψωση της θερμοκρασίας και για τις τρεις ροπές σύσφιξης ήταν η ίδια. Αυτό δεν σημαίνει πως η ανύψωση της θερμοκρασίας είναι ανεξάρτητη από τη ροπή σύσφιξης, αλλά ότι η συγκεκριμένη ανύψωση που υπήρξε για το συγκεκριμένο ρεύμα καταπόνησης δεν ήταν αρκετή ώστε να φανεί αυτή η εξάρτηση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας ο σύνδεσμος συμπεριφέρεται ομαλά, χωρίς να επιβαρύνει το δίκτυο με θερμικές απώλειες. Το γεγονός αυτό είναι λογικό καθώς ο σύνδεσμος προορίζεται για αυτή ακριβώς τη χρήση, οπότε προφανώς είναι επιθυμητό οι απώλειες να είναι όσο το δυνατόν ελάχιστες. Μάλιστα η περιοχή της ανύψωσης της θερμοκρασίας φανερώνει πως ο σύνδεσμος επιδέχεται επιπλέον επιβάρυνσης. Συνεπώς η συμπεριφορά του δεν επηρεάζεται από τυχόν διακυμάνσεις στη λειτουργία του δικτύου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως η θερμική συμπεριφορά του συνδέσμου καθώς και η χαλάρωση της ροπής σύσφιξης επηρεάζονται κατά κύριο λόγο από κεραυνικές τάσεις και ρεύματα. Ένα θέμα το οποίο έχει αποτελέσει στο παρελθόν αντικείμενο άλλων διπλωματικών εργασιών.

Ακόμη προτείνεται η μελέτη του ίδιου ηλεκτρικού συνδέσμου υπό το ίδιο ρεύμα καταπόνησης, αφού όμως το δοκίμιο θα έχει υποστεί διαδικασία γήρανσης, εκτεθειμένο σε εξωτερικές συνθήκες, με αποτέλεσμα το πάχος οξειδίου στην επιφάνεια της επαφής να είναι σημαντικά μεγαλύτερο. Με αυτό τον τρόπο θα διερευνηθεί η θερμική συμπεριφορά του συνδέσμου, όταν η αντίσταση επικαθίσεων R_f είναι σημαντική.

Παρά το γεγονός ότι στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία δεν παρατηρήθηκε χαλάρωση στους κοχλίες, δεν συνεπάγεται πως αυτή δεν υφίσταται στους εγκατεστημένους συνδέσμους του δικτύου. Οι σύνδεσμοι αυτοί όχι μόνο καταπονούνται για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα στη διάρκεια του χρόνου, αλλά επιβαρύνονται επιπλέον από κεραυνικά ρεύματα, υπερτάσεις και ρεύματα βραχυκύκλωσης. Έτσι σε ότι αφορά στη συντήρηση και τους ελέγχους, συστήνεται η επιμελής παρακολούθηση και συντήρηση των συνδέσμων ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Βιβλιογραφία

- [1] Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος ‘Μετρήσεις σε βιομηχανικές διατάξεις και υλικά.’ Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2004.
- [2] Π.Δ. Μπούρκας Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1998.
- [3] Paul G. Slade ‘Electrical contacts: Principles and Applications’ Marcel Dekker Editions, Unit. States of America, 1999.
- [4] R. Holm ‘Electric contacts: Theory and applications’ 4th Edition Springer-Verlag, Germany, 2000.
- [5] Ι.Α. Σταθόπουλος ‘Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων’ Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1989.
- [6] Ι.Α. Σταθόπουλος ‘Υψηλές τάσεις Ι’ Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- [7] Πολυκράτη Αικατερίνη ‘Συμπεριφορά στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων υπό ταχέως μεταβαλλόμενες ηλεκτρικές καταπονήσεις’ Διδακτορική διατριβή. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005.
- [8] Karagiannopoulos C.G., Bourkas P.D., Dervos C.T.: “Measurements on contacts of no-load switches, using different currents and clamping spring force values” Pro.Int.Applied Modeling and Simulations, Lugano, p.94-97, 1990.
- [9] A.Polykrati, M. Paisios, K. Karagiannopoulos, P. Bourkas: ‘Model for temperature estimation of electric couplings suffering heavy lightning currents’, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 1, Jan 2004.

- [10] A.D. Polykrati, N.E. Kounghelis, M.P. Paisios, P.T. Tsarabaris, P. D. Bourkas 'Evaluation of the reliability of electrical screw couplings of lightning Protection systems' Int. Conference on Power and Energy Systems (EuroPES) Rhodes, Greece , 28-30 June, 2004.
- [11] Λαγός Γεώργιος 'Μετρήσεις Λυόμενων Συνδέσμων σε Κυκλώματα Γειώσεων' Διπλωματική Εργασία. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2004.
- [12] Σαββινίδης Α. Ηλίας 'Επίδραση Ροπής Σύσφιξης στην Αξιοπιστία Μόνιμων Ηλεκτρικών Συνδέσμων Κυκλωμάτων Γειώσεων' Διπλωματική Εργασία. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005.
- [13] Παναγιώτης Εμ. Λιβανός 'Ποιοτικός Έλεγχος Μόνιμων Ηλεκτρικών Συνδέσμων Αντικεραυνικής Προστασίας' Διπλωματική Εργασία. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005.

Παράρτημα Α

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται οι αναλυτικοί πίνακες των μετρήσεων, όπως προέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία, η οποία αναλύθηκε στο τρίτο κεφάλαιο. Κάθε πίνακας αντιστοιχεί σε έναν τρίωρο κύκλο του πειράματος και απεικονίζει σε κάθε χρονική στιγμή τη θερμοκρασία που μετρήθηκε στον αγωγό αριστερά, στο συνδέσμο αριστερά, στο συνδέσμο δεξιά και στον αγωγό δεξιά.

Οι πίνακες 1-1 έως 1-10 απαρτίζουν την πρώτη ομάδα μετρήσεων, με ροπή σύσφιξης 18Nm (βλ. σχήματα κεφαλαίου 4.1).

Οι πίνακες 2-1 έως 2-10 απαρτίζουν την δεύτερη ομάδα μετρήσεων, με ροπή σύσφιξης 20Nm (βλ. σχήματα κεφαλαίου 4.2).

Οι πίνακες 3-1 έως 3-10 απαρτίζουν την τρίτη ομάδα μετρήσεων, με ροπή σύσφιξης 22Nm (βλ. σχήματα κεφαλαίου 4.3)

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	27,3	27,2	27,3	27,3
0:02	34,6	29,3	29,3	34,6
0:04	40,0	32,0	31,8	39,3
0:06	42,4	34,1	33,9	41,5
0:08	45,2	36,5	36,2	44,0
0:10	47,4	38,4	38,1	45,8
0:12	48,8	40,7	40,0	47,7
0:14	50,3	42,4	41,6	49,3
0:16	51,6	43,6	42,9	50,4
0:18	52,3	45,0	44,2	51,4
0:20	53,3	46,1	45,3	52,3
0:22	53,9	47,2	46,2	53,5
0:24	55,1	48,2	47,2	54,5
0:26	55,4	49,0	48,0	55,2
0:28	56,3	49,7	48,8	55,7
0:30	57,0	50,5	49,4	56,4
0:35	57,6	51,7	50,6	57,3
0:40	58,1	52,6	51,4	57,9
0:45	58,6	53,1	52,1	58,3
0:50	58,7	53,5	52,3	58,6
0:55	59,0	53,8	52,6	58,8
1:00	59,5	54,2	52,9	59,2
1:10	59,7	54,5	53,3	59,4
1:20	60,0	54,6	53,4	59,8
1:30	60,0	54,8	53,6	59,8
1:40	59,8	54,8	53,5	59,7
1:50	59,8	54,8	53,7	59,7
2:00	60,0	54,9	53,6	59,9
2:10	59,9	54,8	53,5	59,6
2:20	59,6	54,8	53,5	59,7
2:30	59,7	54,7	53,5	59,6
2:40	59,9	54,7	53,5	59,6
2:50	59,9	54,8	53,6	59,8
3:00	60,0	54,8	53,6	59,8

Πίνακας 1-1: Πρώτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 18Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	24,4	24,6	24,6	24,5
0:02	32,2	26,6	26,4	32,1
0:04	36,4	29,2	29,0	36,1
0:06	39,2	31,4	31,2	39,0
0:08	41,1	33,4	33,2	41,4
0:10	44,0	35,4	35,2	43,4
0:12	44,4	37,3	37,0	45,3
0:14	45,9	39,1	38,5	46,7
0:16	46,9	40,5	40,0	47,9
0:18	47,7	41,8	41,2	49,0
0:20	49,1	42,9	42,3	49,9
0:22	49,1	43,8	43,2	50,7
0:24	49,9	44,6	43,9	51,4
0:26	50,4	45,6	44,9	52,1
0:28	50,6	45,9	45,2	52,5
0:30	51,0	46,5	45,7	52,9
0:35	51,9	47,6	46,8	53,9
0:40	52,1	48,5	47,6	54,8
0:45	53,2	49,1	48,2	55,2
0:50	53,2	49,2	48,3	55,1
0:55	54,7	49,4	48,3	55,0
1:00	55,7	50,3	49,3	55,5
1:10	56,6	51,4	50,3	56,5
1:20	57,2	52,1	51,0	57,2
1:30	57,6	52,4	51,3	57,4
1:40	58,0	52,8	51,7	57,9
1:50	58,4	53,2	52,0	58,3
2:00	57,7	53,4	52,3	58,3
2:10	58,6	53,5	52,3	58,4
2:20	58,6	53,6	52,4	58,5
2:30	58,6	53,6	52,4	58,5
2:40	58,2	53,5	52,4	58,3
2:50	58,3	53,4	52,3	58,4
3:00	58,5	53,4	52,3	58,3

Πίνακας 1-2: Δεύτερο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 18Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	26,8	26,8	26,9	26,9
0:02	35,5	28,7	29,0	34,6
0:04	39,9	31,6	31,6	38,8
0:06	43,0	34,2	34,0	42,1
0:08	45,1	36,6	36,3	44,6
0:10	47,1	38,9	38,5	46,6
0:12	49,0	40,7	40,4	48,3
0:14	50,6	42,5	42,1	49,7
0:16	51,8	44,4	43,6	51,2
0:18	52,8	45,2	44,7	52,3
0:20	53,8	46,5	45,8	53,1
0:22	54,5	47,9	47,0	54,2
0:24	55,0	48,5	47,8	55,0
0:26	55,7	49,4	48,6	55,7
0:28	56,3	50,0	49,2	56,0
0:30	56,7	50,7	49,9	56,6
0:35	57,4	51,9	50,9	57,5
0:40	58,2	52,6	51,6	57,8
0:45	58,3	53,1	52,1	58,5
0:50	58,6	53,5	52,5	58,8
0:55	58,8	53,7	52,7	58,8
1:00	59,0	54,1	53,0	59,2
1:10	59,3	54,2	53,2	59,4
1:20	59,5	54,5	53,4	59,6
1:30	60,0	54,7	53,6	59,7
1:40	59,7	54,5	53,4	59,3
1:50	59,2	54,3	53,2	59,1
2:00	59,4	54,3	53,2	59,2
2:10	59,3	54,3	53,2	59,2
2:20	59,4	54,5	53,3	59,4
2:30	59,5	54,5	53,4	59,4
2:40	59,7	54,6	53,5	59,5
2:50	59,4	54,5	53,4	59,4
3:00	59,2	54,5	53,4	59,2

Πίνακας 1-3: Τρίτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 18Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	26,8	26,9	27,0	26,9
0:02	35,2	28,9	28,8	34,4
0:04	39,1	31,4	31,2	38,6
0:06	42,5	32,0	33,7	41,5
0:08	45,1	36,2	36,1	43,6
0:10	47,0	38,7	38,1	46,2
0:12	48,8	40,4	39,9	47,7
0:14	50,5	42,6	42,0	49,5
0:16	52,0	43,6	43,3	50,7
0:18	52,7	45,2	44,5	51,9
0:20	53,9	46,4	45,6	53,1
0:22	54,5	47,4	46,6	53,7
0:24	55,1	48,4	47,6	54,8
0:26	55,7	49,3	48,6	55,4
0:28	56,2	49,9	49,0	55,8
0:30	56,8	50,7	49,7	56,2
0:35	57,4	51,6	50,8	57,2
0:40	58,1	52,5	51,6	57,9
0:45	58,7	53,1	52,2	58,3
0:50	59,0	53,5	52,5	58,8
0:55	58,2	53,7	52,7	59,0
1:00	58,8	53,8	52,7	59,2
1:10	59,7	54,3	53,2	59,5
1:20	59,2	54,2	53,2	59,3
1:30	59,5	54,2	53,2	59,3
1:40	58,5	54,0	53,0	59,0
1:50	58,8	53,8	52,8	58,7
2:00	58,7	53,9	52,9	59,1
2:10	59,1	54,0	52,9	59,1
2:20	58,9	54,0	53,0	59,3
2:30	58,6	53,9	53,0	59,2
2:40	58,7	53,9	52,8	59,0
2:50	58,9	54,0	53,0	59,2
3:00	58,9	54,0	53,1	59,2

Πίνακας 1-4: Τέταρτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 18Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	27,6	27,8	27,9	27,8
0:02	35,7	29,7	29,8	35,3
0:04	39,8	32,3	32,2	39,5
0:06	43,0	34,7	34,7	42,6
0:08	45,1	37,3	37,1	45,2
0:10	47,0	39,0	38,8	46,8
0:12	48,2	41,0	40,8	48,9
0:14	49,6	42,4	42,1	50,3
0:16	50,4	43,7	43,4	51,3
0:18	51,4	45,0	44,5	52,4
0:20	53,5	46,5	45,7	53,3
0:22	55,0	47,6	47,0	54,6
0:24	56,0	48,7	48,1	55,3
0:26	56,6	49,7	49,0	56,0
0:28	57,0	50,8	50,0	56,8
0:30	57,8	51,4	50,5	57,2
0:35	58,8	53,0	52,2	58,4
0:40	59,0	53,8	52,9	59,2
0:45	59,6	54,5	53,7	59,8
0:50	59,6	54,9	54,0	60,2
0:55	59,9	55,3	54,3	60,5
1:00	60,2	55,8	54,6	60,8
1:10	60,8	55,9	54,7	60,6
1:20	60,7	56,1	55,0	61,2
1:30	57,8	54,2	53,1	59,4
1:40	56,8	53,0	52,0	58,2
1:50	57,0	52,6	51,7	58,4
2:00	56,6	52,4	51,6	58,0
2:10	56,1	52,1	51,3	57,8
2:20	56,0	52,1	51,2	57,7
2:30	55,8	52,0	51,1	57,6
2:40	55,8	51,9	51,1	57,6
2:50	56,1	51,8	51,0	57,5
3:00	56,0	51,8	50,9	57,5

Πίνακας 1-5: Πέμπτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 18Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	26,1	26,1	26,1	26,1
0:02	34,1	28,2	27,8	33,5
0:04	37,7	30,5	30,5	37,4
0:06	41,4	33,4	33,1	40,6
0:08	43,1	35,3	35,0	42,6
0:10	45,2	37,4	37,2	45,1
0:12	47,3	39,9	39,2	47,1
0:14	48,3	41,0	40,5	48,2
0:16	49,1	42,3	41,8	48,9
0:18	50,1	43,5	43,0	50,7
0:20	51,0	44,7	44,0	51,5
0:22	51,9	45,7	45,0	52,3
0:24	52,2	46,5	45,8	53,0
0:26	52,3	46,8	46,0	53,2
0:28	52,2	47,1	46,3	53,4
0:30	52,1	47,9	47,0	53,6
0:35	53,1	48,6	47,9	54,6
0:40	53,9	49,4	48,6	55,3
0:45	54,3	49,8	49,0	55,8
0:50	54,6	50,3	49,5	56,3
0:55	54,7	50,6	49,7	56,4
1:00	54,9	50,8	50,0	56,7
1:10	55,2	51,0	50,2	56,7
1:20	54,9	51,0	50,1	56,7
1:30	55,0	51,0	50,2	56,7
1:40	55,0	50,9	50,0	56,6
1:50	54,7	51,0	50,1	56,6
2:00	54,6	50,8	49,9	56,5
2:10	54,9	50,9	50,1	56,8
2:20	55,0	50,9	50,1	56,8
2:30	55,2	51,1	50,2	57,1
2:40	54,6	50,7	49,8	56,5
2:50	54,6	50,5	49,6	56,2
3:00	54,6	50,6	49,7	56,4

Πίνακας 1-6: Έκτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 18Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	26,6	26,5	26,6	26,7
0:02	33,7	28,3	28,4	33,7
0:04	38,0	30,8	30,6	37,8
0:06	40,6	33,1	32,9	40,6
0:08	42,9	35,3	35,2	42,7
0:10	44,8	37,0	37,0	44,8
0:12	46,5	39,0	38,5	46,6
0:14	47,9	40,7	40,3	48,0
0:16	48,8	41,8	41,4	49,3
0:18	49,6	43,0	42,5	50,1
0:20	50,1	43,9	43,4	51,1
0:22	51,0	44,8	44,4	51,8
0:24	51,7	45,8	45,2	52,8
0:26	52,1	46,4	45,9	53,3
0:28	52,6	46,9	46,3	53,6
0:30	52,9	47,5	46,8	54,2
0:35	53,8	48,4	47,7	54,8
0:40	54,0	49,0	48,3	55,1
0:45	54,3	49,2	48,5	55,4
0:50	53,9	49,5	48,8	55,4
0:55	53,8	49,4	48,7	55,3
1:00	53,4	49,3	48,6	55,1
1:10	54,0	49,4	48,7	55,4
1:20	54,4	49,7	49,0	55,7
1:30	54,0	49,5	48,8	55,4
1:40	58,0	51,9	50,8	57,5
1:50	55,8	51,3	50,6	57,2
2:00	55,3	50,9	50,1	56,8
2:10	55,2	50,6	49,7	56,4
2:20	54,7	50,2	49,5	56,2
2:30	54,4	50,1	49,3	56,0
2:40	54,5	49,9	49,1	55,8
2:50	54,5	49,8	49,1	55,8
3:00	54,4	49,9	49,1	56,0

Πίνακας 1-7: Εβδομο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 18Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	25,0	25,2	25,3	25,2
0:02	32,2	27,0	26,9	32,3
0:04	36,1	29,2	29,0	36,1
0:06	39,8	31,8	31,7	39,5
0:08	42,1	34,1	34,1	42,1
0:10	43,7	36,0	35,8	43,9
0:12	45,3	37,8	37,5	45,8
0:14	46,6	39,4	39,0	47,2
0:16	48,0	40,9	40,5	48,6
0:18	49,0	42,1	41,6	49,6
0:20	49,7	43,2	42,7	50,7
0:22	50,5	44,3	43,8	51,5
0:24	51,1	45,2	44,5	52,1
0:26	51,3	45,8	45,1	52,6
0:28	51,7	46,4	45,7	53,1
0:30	52,4	47,0	46,3	53,7
0:35	52,8	47,9	47,1	54,4
0:40	53,1	48,5	47,8	54,9
0:45	53,2	48,8	48,1	55,0
0:50	53,6	49,1	48,3	55,3
0:55	54,0	49,4	48,6	55,6
1:00	53,9	49,5	48,7	55,7
1:10	54,0	49,7	48,8	55,8
1:20	54,0	49,7	48,8	55,7
1:30	54,1	49,7	48,9	55,7
1:40	54,0	49,5	48,7	55,6
1:50	54,1	49,5	48,7	55,8
2:00	54,1	49,6	48,8	55,7
2:10	53,6	49,1	48,5	55,1
2:20	53,3	49,1	48,3	55,2
2:30	53,8	49,1	48,3	55,9
2:40	53,1	48,6	47,8	54,4
2:50	53,3	48,8	48,0	54,5
3:00	53,3	49,0	48,1	54,6

Πίνακας 1-8: Όγδοο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 18Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	26,6	26,7	26,9	26,8
0:02	34,7	28,6	28,5	34,1
0:04	38,6	32,6	31,2	38,1
0:06	42,0	33,5	33,5	41,1
0:08	44,8	36,4	36,1	44,0
0:10	46,8	38,2	37,9	46,0
0:12	48,6	40,2	39,6	47,9
0:14	50,4	41,9	41,3	49,8
0:16	51,8	43,6	43,0	50,9
0:18	52,9	45,0	44,3	52,2
0:20	53,9	46,5	45,9	53,5
0:22	54,3	47,3	46,7	54,6
0:24	55,2	48,3	47,6	55,3
0:26	55,9	49,2	48,3	55,8
0:28	56,5	50,2	49,2	56,4
0:30	57,2	50,5	49,6	56,8
0:35	57,7	51,7	50,7	57,4
0:40	58,5	52,7	51,7	58,4
0:45	58,8	53,2	52,1	58,8
0:50	58,8	53,5	52,3	58,8
0:55	58,9	53,6	52,5	58,9
1:00	58,8	53,7	52,6	58,8
1:10	59,1	53,9	52,7	59,1
1:20	59,0	53,9	52,9	59,5
1:30	59,2	54,2	53,1	59,7
1:40	59,4	54,4	53,2	59,9
1:50	58,2	53,6	52,6	59,0
2:00	58,5	53,6	52,4	58,8
2:10	58,6	53,7	52,6	59,1
2:20	58,7	53,7	52,7	59,1
2:30	58,7	53,7	52,6	59,1
2:40	58,8	53,8	52,6	59,1
2:50	58,6	53,7	52,7	59,2
3:00	58,6	53,7	52,6	59,1

Πίνακας 1-9: Ένατο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 18Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	25,9	26,0	25,9	25,8
0:02	34,0	28,0	27,9	33,6
0:04	38,5	30,6	30,2	37,6
0:06	41,6	33,2	32,7	40,7
0:08	43,9	35,5	35,2	43,3
0:10	46,5	38,0	37,6	45,7
0:12	47,6	39,5	39,2	47,1
0:14	49,2	41,5	40,9	48,8
0:16	50,4	42,8	42,3	50,1
0:18	51,6	44,2	43,7	51,2
0:20	52,1	45,5	44,6	52,2
0:22	52,9	46,4	45,8	53,4
0:24	53,8	47,3	46,6	53,8
0:26	54,5	48,0	47,2	54,4
0:28	54,9	48,8	47,9	55,0
0:30	55,4	49,4	48,4	55,4
0:35	56,0	50,5	49,3	56,2
0:40	56,8	51,5	50,3	57,2
0:45	57,1	51,8	50,6	57,1
0:50	57,4	52,3	51,2	57,7
0:55	57,8	52,5	51,3	57,8
1:00	58,2	52,8	51,7	58,3
1:10	57,9	52,8	51,7	58,1
1:20	57,8	53,0	51,8	58,3
1:30	57,8	52,9	51,7	58,1
1:40	58,0	53,0	51,7	58,2
1:50	58,2	53,2	52,0	58,6
2:00	57,7	53,2	52,1	58,5
2:10	57,8	53,1	51,9	58,3
2:20	57,9	53,1	51,9	58,3
2:30	57,7	52,9	51,9	58,3
2:40	57,9	53,0	51,9	58,4
2:50	58,0	53,1	51,9	58,4
3:00	58,0	53,1	51,9	58,4

Πίνακας 1-10: Δέκατο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 18Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	28,8	28,8	28,9	28,9
0:02	36,9	30,6	30,8	35,7
0:04	41,2	33,2	33,1	39,5
0:06	43,8	35,8	35,4	42,5
0:08	46,7	38,0	37,6	45,0
0:10	48,9	40,4	39,8	47,2
0:12	50,4	42,2	41,7	49,1
0:14	52,1	44,0	43,5	50,6
0:16	53,2	45,3	44,9	52,1
0:18	54,4	47,2	46,2	53,2
0:20	55,5	48,9	47,6	54,5
0:22	56,2	49,7	48,3	54,9
0:24	56,7	50,6	49,2	55,7
0:26	57,4	51,6	50,1	56,4
0:28	58,1	52,3	50,8	56,9
0:30	58,5	52,9	51,3	57,3
0:35	59,3	54,2	52,4	58,3
0:40	59,7	55,0	53,2	59,0
0:45	59,9	55,5	53,7	59,3
0:50	60,5	55,9	54,1	59,6
0:55	60,6	56,2	54,3	59,9
1:00	60,6	56,4	54,6	60,1
1:10	60,8	56,5	54,6	60,0
1:20	61,1	56,7	54,8	60,3
1:30	61,0	56,8	54,9	60,5
1:40	60,8	56,7	54,9	60,4
1:50	60,7	56,7	54,8	60,5
2:00	60,8	56,6	54,7	60,2
2:10	60,9	56,7	54,8	60,3
2:20	60,3	56,4	54,7	60,0
2:30	60,8	56,5	54,7	60,2
2:40	60,8	56,5	54,6	60,0
2:50	60,9	56,5	54,6	60,2
3:00	61,0	56,4	54,6	60,1

Πίνακας 2-1: Πρώτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 20Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	28,6	28,6	28,5	28,5
0:02	36,6	30,3	30,2	35,5
0:04	40,7	32,9	32,9	39,7
0:06	43,5	35,5	35,2	43,1
0:08	46,6	38,0	37,6	45,7
0:10	48,8	40,2	39,8	48,0
0:12	50,3	42,3	41,5	49,7
0:14	52,4	44,2	43,1	51,1
0:16	53,4	45,6	44,8	52,4
0:18	54,4	47,1	46,2	54,0
0:20	55,3	48,4	47,3	55,0
0:22	56,7	49,5	48,4	55,8
0:24	56,7	50,4	49,2	57,0
0:26	57,9	51,3	50,1	57,4
0:28	58,2	52,0	50,8	57,9
0:30	58,5	52,7	51,4	58,4
0:35	59,8	54,1	52,9	59,7
0:40	60,3	54,8	53,3	60,2
0:45	61,2	55,4	53,8	60,4
0:50	60,6	55,8	54,2	60,7
0:55	60,8	56,1	54,5	61,0
1:00	60,7	56,2	54,5	61,1
1:10	60,6	56,3	54,7	61,2
1:20	60,6	56,6	55,1	61,4
1:30	61,1	56,5	54,8	61,3
1:40	61,8	56,6	54,9	61,2
1:50	60,4	56,5	55,4	61,4
2:00	61,3	56,3	54,6	61,1
2:10	61,5	56,6	54,8	61,4
2:20	61,5	56,7	55,0	61,4
2:30	61,7	56,9	55,4	61,8
2:40	61,7	56,8	55,1	61,4
2:50	61,0	56,5	54,8	61,1
3:00	60,7	56,2	54,5	60,8

Πίνακας 2-2: Δεύτερο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 20Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	29,2	29,2	29,2	29,2
0:02	37,1	31,3	31,3	36,5
0:04	41,1	33,5	33,4	40,4
0:06	45,2	36,3	36,1	43,4
0:08	47,0	38,6	38,1	46,1
0:10	49,1	41,0	40,8	48,3
0:12	50,9	42,5	41,9	50,0
0:14	51,9	44,3	43,5	51,3
0:16	53,6	46,0	45,1	53,1
0:18	55,1	47,5	46,5	54,1
0:20	56,0	48,8	47,9	55,6
0:22	56,7	49,9	49,0	56,5
0:24	57,3	50,7	49,7	56,9
0:26	57,2	51,8	50,7	57,9
0:28	57,8	52,4	51,3	58,2
0:30	58,3	52,9	51,9	58,5
0:35	59,3	53,6	52,2	59,1
0:40	60,0	54,5	53,2	59,9
0:45	60,1	55,4	53,8	60,4
0:50	60,8	55,5	54,2	60,8
0:55	60,4	55,7	54,2	60,7
1:00	60,5	56,1	54,8	61,3
1:10	60,1	56,1	54,7	61,1
1:20	60,3	56,2	54,9	61,4
1:30	59,7	56,2	54,8	61,1
1:40	59,6	55,6	54,3	60,6
1:50	59,4	55,6	54,4	60,8
2:00	60,1	55,6	54,3	60,8
2:10	60,3	55,6	54,3	60,8
2:20	60,3	55,5	54,3	60,8
2:30	60,3	55,6	54,3	61,0
2:40	60,3	55,8	54,6	61,2
2:50	60,5	55,8	54,6	61,2
3:00	60,4	55,8	54,6	61,2

Πίνακας 2-3: Τρίτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 20Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	28,3	28,3	29,4	28,4
0:02	36,0	30,1	30,3	35,1
0:04	40,3	32,4	32,5	38,6
0:06	43,6	34,9	34,9	41,7
0:08	45,1	37,3	37,0	44,2
0:10	48,4	39,4	39,1	46,2
0:12	50,3	41,5	41,3	48,3
0:14	51,8	43,5	43,0	50,0
0:16	53,1	45,0	44,4	51,3
0:18	54,3	46,7	45,9	52,6
0:20	56,0	48,0	47,1	53,8
0:22	56,7	49,1	48,1	54,6
0:24	56,6	50,1	49,0	55,8
0:26	57,2	51,1	50,1	56,1
0:28	57,7	51,6	50,6	56,6
0:30	58,3	52,4	51,2	57,2
0:35	59,1	53,6	52,4	58,0
0:40	59,5	54,3	53,0	58,6
0:45	60,5	54,9	53,6	59,1
0:50	61,0	55,3	54,0	59,6
0:55	60,8	55,6	54,2	59,8
1:00	60,8	55,8	54,4	59,8
1:10	60,9	56,0	54,5	60,1
1:20	61,1	56,1	54,7	60,4
1:30	60,6	56,0	54,5	60,3
1:40	60,6	55,9	54,4	60,2
1:50	60,7	55,8	54,5	60,0
2:00	59,5	55,7	54,4	60,0
2:10	60,4	55,7	54,3	59,9
2:20	60,6	55,8	54,5	60,1
2:30	60,4	55,7	54,3	59,8
2:40	60,5	55,7	54,5	59,8
2:50	60,2	55,5	54,2	59,5
3:00	60,4	55,5	54,2	59,7

Πίνακας 2-4: Τέταρτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 20Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	25,8	26,0	26,0	26,1
0:02	33,0	27,6	27,9	31,6
0:04	36,4	29,9	29,9	34,7
0:06	39,0	32,3	32,3	37,8
0:08	41,7	34,5	34,1	39,9
0:10	43,4	36,6	36,2	42,0
0:12	45,3	38,7	38,2	43,7
0:14	46,1	40,3	39,5	45,1
0:16	47,2	41,2	40,5	45,8
0:18	48,2	42,5	41,8	47,0
0:20	49,0	43,7	42,7	47,8
0:22	49,6	44,6	43,6	48,6
0:24	50,3	45,4	44,4	49,3
0:26	50,9	46,2	45,2	50,0
0:28	51,4	46,9	45,8	50,4
0:30	51,9	47,5	46,4	50,8
0:35	52,6	48,7	47,5	51,8
0:40	53,0	49,3	48,0	52,2
0:45	53,3	49,8	48,5	52,8
0:50	53,5	50,1	48,9	52,9
0:55	53,8	50,3	49,1	53,2
1:00	53,7	50,6	49,2	53,2
1:10	54,2	50,7	49,3	53,7
1:20	54,1	50,9	49,5	53,9
1:30	54,2	51,0	49,5	53,8
1:40	53,4	50,7	49,4	53,8
1:50	53,3	50,3	48,9	53,2
2:00	53,3	50,1	48,8	52,9
2:10	52,7	49,8	48,4	52,7
2:20	52,7	49,6	48,2	52,6
2:30	52,5	49,7	48,3	52,6
2:40	52,3	49,6	48,3	52,5
2:50	52,7	49,6	48,3	52,6
3:00	52,8	49,6	48,2	52,6

Πίνακας 2-5: Πέμπτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 20Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	24,2	24,5	24,5	24,3
0:02	30,8	26,1	25,9	30,1
0:04	34,9	28,2	28,2	33,6
0:06	37,4	30,5	30,3	36,4
0:08	39,9	32,8	32,4	38,7
0:10	41,6	35,0	34,5	40,9
0:12	43,2	36,9	36,1	42,5
0:14	44,2	38,4	37,7	43,8
0:16	45,3	39,7	38,9	45,1
0:18	46,6	40,9	40,0	46,2
0:20	47,2	42,0	40,9	47,2
0:22	48,0	43,1	41,9	48,0
0:24	48,6	43,8	42,8	48,8
0:26	49,1	44,7	43,5	49,4
0:28	49,4	45,3	44,0	49,9
0:30	50,0	45,9	44,7	50,3
0:35	50,2	46,8	45,4	50,8
0:40	50,2	47,3	45,9	51,2
0:45	51,1	47,8	46,5	51,6
0:50	51,1	47,9	46,5	51,6
0:55	51,1	48,1	46,8	52,1
1:00	51,6	48,4	47,0	52,2
1:10	51,5	48,5	46,9	52,2
1:20	51,6	48,7	47,3	52,5
1:30	51,7	48,8	47,3	52,6
1:40	51,9	48,9	47,3	52,7
1:50	51,6	48,9	47,6	52,9
2:00	52,4	49,1	47,6	53,4
2:10	52,0	49,2	47,5	53,4
2:20	52,6	49,2	47,7	53,6
2:30	52,7	49,3	47,7	53,7
2:40	52,2	49,2	47,7	53,5
2:50	52,2	49,2	47,6	53,2
3:00	52,1	49,0	47,5	53,0

Πίνακας 2-6: Έκτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 20Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	29,7	29,7	29,6	29,6
0:02	37,1	31,6	31,5	35,8
0:04	41,4	33,8	33,8	39,5
0:06	44,1	36,6	36,1	42,2
0:08	46,7	38,8	38,2	44,6
0:10	48,7	40,8	40,4	46,7
0:12	50,3	42,6	42,0	48,4
0:14	51,7	44,6	43,6	50,0
0:16	52,5	46,0	45,4	51,5
0:18	54,0	47,9	46,7	53,0
0:20	54,5	48,8	47,7	53,8
0:22	55,1	49,6	48,4	54,5
0:24	55,9	50,8	49,5	55,5
0:26	56,2	51,4	50,0	56,0
0:28	56,9	52,1	50,7	56,6
0:30	57,3	52,8	51,2	57,1
0:35	58,1	53,9	52,3	58,1
0:40	58,6	54,7	52,9	58,6
0:45	58,9	55,2	53,4	58,9
0:50	59,2	55,5	53,6	59,1
0:55	59,5	55,7	53,8	59,2
1:00	59,1	55,7	53,7	59,0
1:10	59,6	55,8	53,5	59,1
1:20	59,7	55,8	53,6	58,9
1:30	59,7	55,8	53,6	59,0
1:40	59,7	55,8	53,6	59,1
1:50	59,6	55,8	53,5	58,9
2:00	59,4	55,7	53,6	59,3
2:10	59,5	55,8	53,5	59,1
2:20	59,3	55,7	53,5	59,0
2:30	59,2	55,6	53,5	59,0
2:40	59,2	55,6	53,4	59,0
2:50	59,0	55,6	53,4	58,9
3:00	59,2	55,6	53,6	59,0

Πίνακας 2-7: Εβδομο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 20Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	25,5	25,6	25,7	25,7
0:02	33,1	27,5	27,4	31,7
0:04	36,9	29,8	29,9	35,4
0:06	40,3	32,4	31,9	38,2
0:08	42,3	34,7	34,0	40,8
0:10	44,5	36,7	36,2	42,7
0:12	46,0	38,7	37,9	44,6
0:14	47,6	40,9	39,7	46,3
0:16	50,1	42,5	41,3	47,5
0:18	50,2	43,5	42,5	48,8
0:20	51,1	44,8	43,5	49,8
0:22	51,8	45,8	44,3	50,4
0:24	52,5	46,7	45,1	51,2
0:26	52,8	47,6	46,0	52,0
0:28	53,5	48,2	46,4	52,3
0:30	53,9	48,9	47,0	52,8
0:35	54,6	50,1	48,3	54,1
0:40	55,1	50,8	48,8	54,2
0:45	55,8	51,4	49,4	54,9
0:50	56,1	51,8	49,7	55,1
0:55	55,9	52,0	50,1	55,6
1:00	56,3	52,2	50,2	55,6
1:10	56,3	52,4	50,2	55,5
1:20	56,7	52,5	50,3	55,6
1:30	56,2	52,5	50,4	55,6
1:40	55,8	52,3	50,0	55,2
1:50	56,1	52,2	50,1	55,5
2:00	55,7	52,3	50,4	55,8
2:10	56,3	52,3	50,1	55,4
2:20	56,2	52,5	50,4	56,0
2:30	56,3	52,5	50,5	56,0
2:40	56,7	52,6	50,4	56,0
2:50	56,6	52,7	50,6	56,2
3:00	56,7	52,8	50,7	56,3

Πίνακας 2-8: Όγδοο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 20Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	24,4	24,5	24,6	24,6
0:02	32,3	26,4	26,6	30,5
0:04	36,7	28,9	28,9	34,2
0:06	39,9	31,2	31,1	36,9
0:08	42,3	33,9	33,4	39,5
0:10	44,1	36,1	35,4	41,9
0:12	45,8	37,9	37,0	43,8
0:14	47,5	39,7	38,6	45,1
0:16	48,5	41,3	40,3	46,9
0:18	49,3	42,7	41,5	48,1
0:20	50,4	44,0	42,8	49,1
0:22	51,0	45,7	43,6	49,8
0:24	51,6	45,9	44,4	50,7
0:26	51,9	46,8	45,3	51,5
0:28	52,3	47,5	45,7	51,9
0:30	52,6	48,2	46,4	52,6
0:35	53,7	49,2	47,3	53,2
0:40	54,0	49,8	48,2	53,7
0:45	54,4	50,3	48,3	54,0
0:50	55,0	50,7	48,6	54,2
0:55	55,1	50,9	49,0	54,4
1:00	54,8	51,1	49,2	54,4
1:10	55,2	51,0	49,0	54,3
1:20	55,1	51,1	49,1	54,3
1:30	55,3	51,3	49,3	54,4
1:40	54,9	51,3	49,6	55,1
1:50	55,1	51,8	49,7	55,5
2:00	55,6	51,7	49,7	55,0
2:10	55,6	51,7	49,5	55,4
2:20	55,6	51,7	49,6	55,0
2:30	55,7	51,5	49,3	55,0
2:40	55,1	51,2	49,0	54,5
2:50	55,2	51,2	49,1	54,7
3:00	55,3	51,4	49,4	55,2

Πίνακας 2-9: Ένατο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 20Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	24,0	24,1	24,1	24,2
0:02	31,4	25,9	26,0	30,2
0:04	35,5	28,2	28,2	33,8
0:06	38,3	30,5	30,2	36,6
0:08	41,5	33,0	33,1	39,2
0:10	43,7	35,4	34,5	41,4
0:12	45,2	37,3	36,7	43,5
0:14	46,7	39,4	38,1	44,7
0:16	48,4	40,8	39,7	45,9
0:18	49,5	42,2	41,1	47,1
0:20	50,0	43,4	42,0	48,3
0:22	51,5	44,6	43,4	48,9
0:24	51,8	45,5	43,9	49,9
0:26	52,6	46,4	44,8	50,4
0:28	52,9	47,1	45,4	51,1
0:30	53,4	47,7	45,9	51,7
0:35	54,2	48,9	47,0	52,4
0:40	55,0	49,8	47,7	53,3
0:45	54,9	50,3	48,3	53,7
0:50	55,2	50,6	48,5	54,1
0:55	55,2	50,9	48,7	54,1
1:00	56,1	51,1	49,0	54,4
1:10	56,2	51,4	49,3	54,7
1:20	56,0	51,6	49,3	54,7
1:30	56,5	51,7	49,5	54,9
1:40	57,0	51,9	49,8	55,1
1:50	56,9	51,9	49,6	55,5
2:00	57,0	52,0	50,0	55,5
2:10	56,8	52,3	50,1	55,7
2:20	57,4	52,5	50,1	56,0
2:30	57,4	52,6	50,3	56,0
2:40	57,0	52,3	50,1	55,4
2:50	56,8	52,2	50,0	55,5
3:00	56,9	52,3	50,1	55,0

Πίνακας 2-10: Δέκατο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 20Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	24,5	25,3	25,3	25,0
0:02	31,4	26,6	26,6	32,4
0:04	35,8	28,7	28,7	36,7
0:06	38,9	31,0	30,9	39,7
0:08	41,2	32,7	32,9	42,1
0:10	43,2	34,5	34,5	44,1
0:12	45,0	36,5	36,6	46,3
0:14	46,5	38,1	38,1	47,5
0:16	47,8	39,5	39,5	48,4
0:18	48,6	40,6	40,6	49,6
0:20	49,5	41,6	41,6	50,0
0:22	50,2	42,4	42,5	51,2
0:24	51,0	43,4	43,4	51,6
0:26	51,4	44,1	44,1	52,4
0:28	52,0	44,7	44,7	51,9
0:30	52,2	45,1	45,1	52,6
0:35	52,6	45,9	45,9	53,2
0:40	53,2	46,4	46,4	53,2
0:45	53,6	46,8	46,8	53,4
0:50	53,6	46,9	46,9	53,2
0:55	53,9	46,9	46,9	52,9
1:00	53,8	46,9	46,9	53,0
1:10	54,0	47,0	47,0	53,5
1:20	53,4	46,8	46,8	52,9
1:30	53,3	46,8	46,8	53,0
1:40	53,6	46,6	46,6	52,3
1:50	53,7	46,6	46,6	52,6
2:00	53,9	46,7	46,7	52,7
2:10	53,2	46,7	46,7	52,5
2:20	53,3	46,9	46,9	52,7
2:30	53,0	46,7	46,8	53,1
2:40	53,1	46,8	46,8	53,2
2:50	53,0	46,7	46,7	53,2
3:00	53,3	46,9	46,9	53,1

Πίνακας 3-1: Πρώτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 22Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	23,4	23,5	23,4	23,5
0:02	30,3	25,0	24,9	30,9
0:04	34,8	27,3	27,6	35,5
0:06	37,9	29,8	29,7	39,2
0:08	40,6	32,0	32,1	42,2
0:10	43,0	34,2	34,0	44,0
0:12	44,7	36,1	35,9	46,4
0:14	46,5	38,2	38,2	48,3
0:16	47,4	39,1	39,3	48,8
0:18	48,5	40,5	40,5	50,1
0:20	49,3	41,5	41,6	51,2
0:22	50,2	42,8	42,7	51,9
0:24	50,8	43,5	43,8	52,6
0:26	51,3	44,2	44,4	53,1
0:28	52,1	44,9	45,1	53,6
0:30	52,5	45,6	45,7	53,8
0:35	52,8	46,5	46,7	54,5
0:40	53,6	47,2	47,2	55,2
0:45	54,3	47,9	48,0	56,1
0:50	54,7	48,5	48,6	56,5
0:55	55,1	48,8	49,0	56,8
1:00	55,3	49,1	49,3	57,0
1:10	55,5	49,4	49,5	57,2
1:20	55,2	49,4	49,4	57,3
1:30	55,5	49,6	49,7	57,4
1:40	55,5	49,6	49,7	57,4
1:50	55,2	49,4	49,5	57,0
2:00	55,4	49,5	49,6	57,3
2:10	55,5	49,6	49,8	57,3
2:20	55,5	49,7	49,8	57,3
2:30	55,6	49,7	49,8	57,3
2:40	55,8	49,9	49,9	57,5
2:50	55,8	49,9	50,0	57,7
3:00	55,8	50,0	50,1	57,8

Πίνακας 3-2: Δεύτερο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 22Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	23,9	23,9	24,0	23,9
0:02	31,2	25,3	25,5	31,5
0:04	35,3	27,6	27,7	36,0
0:06	38,5	30,0	30,2	39,1
0:08	41,1	32,2	32,1	41,7
0:10	42,9	34,3	34,3	43,8
0:12	45,0	36,3	36,3	45,8
0:14	46,2	37,8	37,9	47,5
0:16	47,5	39,2	39,3	48,5
0:18	48,7	40,6	40,6	49,8
0:20	49,6	41,8	41,8	50,8
0:22	50,8	42,9	42,9	51,7
0:24	51,2	43,8	43,8	52,4
0:26	51,9	44,7	44,7	53,1
0:28	52,4	45,3	45,4	53,5
0:30	52,7	46,0	46,0	54,0
0:35	53,7	47,1	47,2	54,9
0:40	54,4	48,0	48,1	55,5
0:45	54,9	48,6	48,7	56,0
0:50	55,1	49,0	49,1	56,2
0:55	55,6	49,4	49,5	56,7
1:00	55,7	49,6	49,6	56,7
1:10	55,9	49,9	50,0	57,0
1:20	56,2	50,2	50,2	57,3
1:30	55,8	50,1	50,1	56,6
1:40	56,2	50,2	50,2	57,2
1:50	56,1	50,3	50,3	57,2
2:00	56,1	50,2	50,3	57,1
2:10	55,9	50,2	50,2	56,8
2:20	56,0	50,2	50,2	57,1
2:30	56,2	50,3	50,3	57,2
2:40	56,3	50,3	50,4	57,3
2:50	56,3	50,4	50,5	57,3
3:00	56,2	50,4	50,4	56,8

Πίνακας 3-3: Τρίτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 22Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	24,3	24,3	24,3	24,4
0:02	31,8	25,8	25,8	32,1
0:04	36,0	28,3	28,2	36,6
0:06	39,1	30,5	30,6	39,9
0:08	41,8	32,7	32,9	42,8
0:10	43,7	35,0	34,9	44,8
0:12	45,6	36,7	36,8	46,9
0:14	47,1	38,7	38,6	48,5
0:16	48,5	40,1	40,0	49,7
0:18	49,8	41,4	41,3	51,0
0:20	50,6	42,5	42,6	51,9
0:22	51,4	43,6	43,0	52,8
0:24	52,1	44,7	44,6	53,4
0:26	52,7	45,6	45,5	54,3
0:28	53,2	46,0	46,0	54,7
0:30	53,8	46,8	46,7	55,1
0:35	54,5	47,9	47,8	55,9
0:40	55,1	48,8	48,7	56,6
0:45	55,8	49,6	49,5	57,2
0:50	55,5	49,6	49,5	57,1
0:55	55,7	49,9	49,8	57,1
1:00	55,7	50,0	49,9	57,1
1:10	55,7	50,1	50,0	56,8
1:20	56,0	50,0	50,0	57,4
1:30	56,5	50,5	50,4	57,7
1:40	56,2	50,5	50,4	57,2
1:50	56,4	50,6	50,5	57,8
2:00	55,9	50,3	50,1	57,1
2:10	56,0	50,2	50,2	56,9
2:20	56,0	50,2	50,1	57,3
2:30	56,2	50,3	50,2	57,2
2:40	55,9	50,2	50,1	56,9
2:50	55,1	50,0	49,9	56,7
3:00	55,8	50,0	49,9	56,7

Πίνακας 3-4: Τέταρτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 22Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	24,0	24,0	24,0	24,1
0:02	32,2	26,0	26,0	32,6
0:04	36,3	28,0	28,1	36,5
0:06	39,6	30,7	30,7	40,1
0:08	41,8	32,9	32,8	42,6
0:10	43,6	34,8	35,0	44,9
0:12	45,4	36,6	36,6	46,9
0:14	46,7	38,6	38,6	48,2
0:16	48,3	39,8	39,8	49,4
0:18	49,1	41,1	41,1	50,7
0:20	50,1	42,4	42,3	51,8
0:22	50,4	43,4	43,5	52,6
0:24	51,6	44,4	44,4	53,3
0:26	52,1	45,2	45,2	54,0
0:28	52,6	45,8	45,8	54,4
0:30	53,0	46,5	46,3	54,8
0:35	54,0	47,6	47,6	55,8
0:40	54,7	48,5	48,5	56,4
0:45	55,1	49,1	49,1	56,8
0:50	55,3	49,4	49,4	57,1
0:55	55,9	49,8	49,8	57,6
1:00	56,2	50,2	50,2	57,9
1:10	55,5	50,2	50,2	57,6
1:20	55,8	50,2	50,2	57,7
1:30	56,0	50,2	50,2	57,7
1:40	56,0	50,3	50,3	57,8
1:50	56,1	50,4	50,4	58,0
2:00	56,3	50,5	50,5	58,0
2:10	55,4	50,6	50,6	57,9
2:20	56,6	50,7	50,7	58,1
2:30	56,7	50,8	50,8	58,3
2:40	56,6	50,8	50,8	58,2
2:50	56,7	50,9	50,9	58,3
3:00	56,8	50,9	50,9	58,3

Πίνακας 3-5: Πέμπτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 22Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	24,5	24,4	24,5	24,5
0:02	31,8	26,2	26,2	32,1
0:04	36,1	28,3	28,4	36,6
0:06	39,0	30,8	30,7	39,8
0:08	41,4	33,0	32,9	42,3
0:10	44,0	35,0	35,0	44,9
0:12	45,6	37,0	36,9	46,6
0:14	46,9	38,4	38,5	48,3
0:16	48,4	39,9	40,0	49,6
0:18	49,4	41,4	41,4	50,6
0:20	50,4	42,5	42,5	51,6
0:22	50,9	43,7	43,6	52,3
0:24	51,6	44,4	44,4	52,7
0:26	52,3	45,1	45,1	54,4
0:28	52,7	45,8	45,8	53,1
0:30	52,9	46,3	46,3	53,6
0:35	53,8	47,1	47,1	54,7
0:40	54,2	47,9	47,9	54,7
0:45	54,5	48,2	48,2	54,2
0:50	54,3	48,1	48,2	54,7
0:55	54,2	48,2	48,2	55,0
1:00	54,1	48,2	48,3	54,4
1:10	55,0	48,6	48,3	55,1
1:20	54,0	48,1	48,2	54,6
1:30	53,5	47,6	47,5	54,1
1:40	53,3	47,3	47,2	53,3
1:50	54,2	48,1	48,0	54,2
2:00	54,7	48,4	48,4	54,9
2:10	55,2	48,7	48,4	55,1
2:20	55,1	48,6	48,5	55,2
2:30	54,9	48,7	48,5	55,0
2:40	55,3	49,0	48,7	55,5
2:50	55,3	50,0	48,7	55,5
3:00	55,4	50,1	48,9	55,6

Πίνακας 3-6: Έκτο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 22Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	24,0	23,9	24,0	24,0
0:02	31,2	25,4	25,5	31,7
0:04	35,3	27,8	27,7	35,8
0:06	38,6	30,1	30,2	39,4
0:08	41,0	32,5	32,4	42,1
0:10	43,1	34,2	34,4	44,0
0:12	44,9	36,1	36,2	45,9
0:14	46,3	37,9	37,8	47,1
0:16	47,6	39,4	39,3	48,9
0:18	48,4	40,6	40,5	49,3
0:20	49,2	41,6	41,5	50,4
0:22	49,8	42,7	42,5	51,0
0:24	50,5	43,5	43,3	51,9
0:26	50,8	44,1	44,0	52,2
0:28	51,2	44,7	44,6	53,0
0:30	51,9	45,3	45,2	53,6
0:35	52,6	46,4	46,3	54,6
0:40	53,8	47,4	47,2	54,8
0:45	54,3	48,0	47,9	55,8
0:50	54,6	48,5	48,3	56,1
0:55	54,7	48,8	48,7	56,2
1:00	54,9	49,3	49,2	56,4
1:10	55,2	49,6	49,4	56,2
1:20	55,8	50,0	49,8	57,0
1:30	55,6	50,1	49,8	57,4
1:40	55,5	49,8	49,6	57,2
1:50	55,7	50,1	49,8	57,4
2:00	55,8	50,2	49,9	57,3
2:10	55,9	50,3	50,0	57,4
2:20	56,1	50,4	50,2	57,8
2:30	56,4	50,6	50,4	58,0
2:40	56,3	50,6	50,4	57,9
2:50	56,5	50,8	50,5	58,1
3:00	56,5	50,8	50,6	58,1

Πίνακας 3-7: Εβδομο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 22Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	26,3	26,3	26,3	26,4
0:02	34,0	28,0	28,2	34,2
0:04	38,2	30,4	30,3	38,6
0:06	40,9	32,7	32,6	42,0
0:08	43,8	35,0	34,9	44,9
0:10	45,7	37,0	36,9	47,1
0:12	47,9	38,9	38,8	49,0
0:14	49,2	40,4	40,4	50,5
0:16	50,6	42,0	42,0	52,2
0:18	51,7	43,5	43,4	53,3
0:20	52,8	44,7	44,6	54,2
0:22	53,4	45,9	45,8	55,1
0:24	54,2	46,8	46,7	55,8
0:26	54,9	47,5	47,5	56,4
0:28	55,4	48,3	48,0	57,0
0:30	55,8	49,0	48,9	57,5
0:35	57,1	50,2	50,1	58,4
0:40	57,1	50,7	50,6	58,8
0:45	57,4	51,3	51,1	59,2
0:50	57,8	51,8	51,5	59,5
0:55	57,9	52,0	51,7	58,8
1:00	57,7	51,5	51,3	58,5
1:10	57,2	51,7	51,5	59,2
1:20	58,0	52,0	51,7	59,6
1:30	58,6	52,4	52,2	60,1
1:40	59,0	52,7	52,5	60,5
1:50	59,0	52,9	52,8	60,1
2:00	59,5	53,1	53,0	60,8
2:10	59,1	53,2	53,0	60,9
2:20	59,5	53,3	53,1	60,9
2:30	59,4	53,2	53,1	61,0
2:40	59,2	53,2	53,0	60,7
2:50	59,7	53,3	53,1	61,0
3:00	59,8	53,3	53,1	61,1

Πίνακας 3-8: Όγδοο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 22Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	26,7	26,7	26,7	26,7
0:02	34,2	28,4	28,5	34,6
0:04	38,6	30,7	30,6	39,0
0:06	41,3	32,8	33,0	42,2
0:08	44,1	35,3	35,4	45,3
0:10	46,2	37,4	37,5	47,5
0:12	47,8	39,2	39,3	49,2
0:14	49,5	40,8	40,9	51,1
0:16	51,0	42,3	42,4	52,2
0:18	52,0	43,8	44,0	53,5
0:20	53,0	44,9	45,0	54,5
0:22	53,8	46,1	46,1	55,3
0:24	54,5	47,0	47,0	56,2
0:26	55,4	48,0	48,1	56,9
0:28	55,6	48,6	48,7	57,3
0:30	56,2	49,3	49,3	57,6
0:35	57,0	50,4	50,4	58,6
0:40	57,7	51,2	51,3	59,3
0:45	58,3	51,8	51,9	59,8
0:50	58,5	52,2	52,3	60,1
0:55	58,7	52,5	52,6	60,2
1:00	59,8	52,8	52,8	60,5
1:10	58,7	52,9	52,9	59,9
1:20	58,8	52,8	52,9	60,5
1:30	59,2	53,1	53,2	60,8
1:40	59,5	53,3	53,4	61,0
1:50	59,7	53,5	53,6	61,4
2:00	59,2	53,4	53,5	61,1
2:10	59,3	53,4	53,4	60,9
2:20	59,3	53,6	53,5	60,9
2:30	59,1	53,4	53,4	60,4
2:40	59,1	53,2	53,2	60,5
2:50	59,2	53,3	53,4	60,7
3:00	59,2	53,4	53,4	60,7

Πίνακας 3-9: Ένατο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 22Nm

Χρόνος	Αγωγός Αριστερά	Σύνδεσμος Αριστερά	Σύνδεσμος Δεξιά	Αγωγός Δεξιά
0:00	27,2	27,2	27,3	27,3
0:02	34,8	28,7	28,8	35,1
0:04	38,9	31,3	31,4	39,5
0:06	41,8	33,4	33,4	42,3
0:08	44,9	35,7	35,7	45,6
0:10	47,3	37,8	37,8	48,1
0:12	48,9	39,6	39,8	49,6
0:14	50,2	41,3	41,4	52,4
0:16	51,5	43,1	43,0	52,6
0:18	52,5	44,3	44,3	53,7
0:20	53,4	45,5	45,5	54,7
0:22	54,3	46,6	46,6	55,6
0:24	55,5	47,7	47,7	56,5
0:26	55,6	48,2	48,2	56,8
0:28	56,2	49,0	49,0	57,5
0:30	56,7	49,5	49,6	58,2
0:35	57,5	50,8	50,8	58,9
0:40	57,9	51,7	51,7	59,1
0:45	58,5	52,0	52,0	59,8
0:50	58,8	52,6	52,6	60,4
0:55	58,6	52,7	52,7	60,1
1:00	58,7	52,8	52,8	60,0
1:10	58,6	52,7	52,7	59,6
1:20	58,4	52,5	52,5	59,4
1:30	58,4	52,4	52,4	59,4
1:40	58,7	52,5	52,5	59,7
1:50	58,8	52,6	52,6	59,7
2:00	58,8	52,7	52,7	59,7
2:10	58,7	52,6	52,6	59,4
2:20	59,0	52,4	52,5	59,9
2:30	58,9	52,7	52,7	59,8
2:40	59,1	52,8	53,0	60,4
2:50	59,0	52,9	52,9	60,3
3:00	59,1	53,0	53,1	60,3

Πίνακας 3-10: Δέκατο τρίωρο μετρήσεων για ροπή σύσφιξης 22Nm