



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

**Ηλεκτρικές δοκιμές σε καλώδια μέσης τάσης -
Διαδικασίες επαλήθευσης και υπολογισμού αβεβαιότητας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Αθήνα, Μάρτιος 2006

Στους γονείς μου



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

128

Ηλεκτρικές δοκιμές σε καλώδια μέσης τάσης - Διαδικασίες επαλήθευσης και υπολογισμού αβεβαιότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνοσ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9^η Μαρτίου 2006.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής

Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Μάρτιος 2006

Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου

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

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
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.

*Χαίρε, φιλοσόφους ασόφους δεικνύουσα
Χαίρε, τεχνολόγους αλόγους ελέγχουσα*

*(Από τον Ακάθιστο Ύμνο
Γ' Στάσις των οίκων της Θεοτόκου αναγινωσκόμενη
την Παρασκευή της γ' εβδομάδας των νηστειών)*

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τις ηλεκτρικές δοκιμές σε καλώδια μέσης τάσης και τις διαδικασίες επαλήθευσης και υπολογισμού αβεβαιοτήτων για τη γεννήτρια κρουστικών τάσεων και τη συσκευή παραγωγής τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF) του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. Μελετήθηκαν τα κατασκευαστικά στοιχεία των καλωδίων μέσης τάσης και δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται και στις δοκιμές και μετρήσεις που γίνονται σε αυτά, ενώ περιγράφεται και η παραγωγική διαδικασία κατασκευής των καλωδίων μέσης τάσης. Μελετήθηκαν επίσης ο κανονισμός IEC 60502-2, που αφορά τις δοκιμές τύπου, σειράς και δειγματοληψίας που γίνονται σε καλώδια μέσης τάσης και οι κανονισμοί IEEE 400TM και IEEE 400.2TM, που αφορούν τις δοκιμές VLF σε καλώδια μέσης τάσης. Στα πλαίσια αυτά έγινε δοκιμή VLF στο εργαστήριο σε καλώδιο μέσης τάσης και τονίστηκε η σημασία και η χρησιμότητα των δοκιμών αυτών για την διαπίστωση της κατάστασης του καλωδίου μετά την εγκατάσταση και λειτουργία του. Με τη χρήση απλών διατάξεων και οργάνων του Εργαστηρίου έγινε προσπάθεια επαλήθευσης της κρουστικής γεννήτριας και της συσκευής VLF. Με βάση τον κανονισμό IEC 60-2 υπολογίστηκαν οι αβεβαιότητες για διάφορες τιμές τάσεων, με βάση τις ληφθείσες μετρήσεις και τα στοιχεία για τις αβεβαιότητες των οργάνων που ήταν διαθέσιμα. Τα αποτελέσματα κρίθηκαν ικανοποιητικά και έγιναν ορισμένες προτάσεις για βελτίωση της διαδικασίας επαλήθευσης.

Λέξεις κλειδιά

Μονωτικό υλικό, δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (XLPE), πολιβινυλοχλωρίδιο (PVC), διηλεκτρική αντοχή, μεταλλικός μανδύας, μερικές εκκενώσεις, ηλεκτρικές δοκιμές, δοκιμές VLF, διάσπαση, αβεβαιότητα (τύπου A και τύπου B), διακρίβωση, επαλήθευση

Abstract

The present diploma thesis deals with the electrical tests for power cables and the procedures of verification and calculation of uncertainty for the impulse voltage generator and the VLF device. For this purpose, were examined the structure of medium voltage cables, the insulating materials of cables, the tests for insulating materials and the production of power cables. Also, were studied the Standard IEC 60502-2 that specifies the routine tests, the sample tests and the type tests for power cables and the Standards IEEE 400TM and IEEE 400.2TM that specify the VLF tests. Based on those, a medium voltage cable was tested with VLF voltage in the High Voltage Laboratory of N.T.U.A. and was showed how significant are the VLF tests in order to check the cable system insulation condition after installation. Additionally, it was made an effort to verify the impulse voltage generator and the VLF device. Based on the Standard IEC 60-2 were calculated the uncertainties for some values of voltage, using the measurements and some data from the measuring systems and devices. The results were very good and were suggested some ideas to improve the procedure of verification.

Key words

Insulating material, cross-linked polyethylene (XLPE), Polyvinylchlorid (PVC), dielectric strength, metallic screen, partial discharges, electrical tests, VLF tests, breakdown, uncertainty (type A and type B), calibration, verification

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας είναι οι ηλεκτρικές δοκιμές σε καλώδια μέσης τάσης και οι διαδικασίες επαλήθευσης και υπολογισμού αβεβαιοτήτων. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τα κατασκευαστικά στοιχεία των καλωδίων μέσης τάσης, η παραγωγική διαδικασία για την κατασκευή τους, οι δοκιμές που γίνονται στα καλώδια μέσης τάσης και ειδικά οι δοκιμές αντοχής σε κρουστική τάση και οι δοκιμές με εφαρμογή υψηλής τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF), ενώ πραγματοποιήθηκε δοκιμή VLF στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. Έγινε επίσης μια προσπάθεια επαλήθευσης της γεννήτριας κρουστικών τάσεων και της συσκευής VLF και υπολογισμός των αβεβαιοτήτων για ορισμένες τιμές τάσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν απλές μετρητικές διατάξεις και όργανα, και ο υπολογισμός βασίστηκε στα αποτελέσματα των δοκιμών και των διαθέσιμων στοιχείων που υπήρχαν για κάθε όργανο.

Αναλυτικά :

Το **Κεφάλαιο 1** αναφέρεται στα μονωτικά υλικά, τις ιδιότητές τους και τους μηχανισμούς διάσπασής τους, με ιδιαίτερη έμφαση στα στερεά μονωτικά, και ειδικά στο πολυαιθυλένιο και το πολυβινυλοχλωρίδιο που χρησιμοποιούνται ως μονωτικά σε καλώδια μέσης τάσης.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα καλώδια μέσης τάσης και τα στοιχεία από τα οποία αποτελούνται. Γίνεται επίσης αναφορά στους διάφορους τύπους καλωδίων μέσης τάσης, στον τρόπο εγκατάστασης και στις σημάνσεις των καλωδίων.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται η παραγωγική διαδικασία κατασκευής των καλωδίων. Παρουσιάζονται τα στάδια παραγωγής από την παραγωγή των ράβδων χαλκού μέχρι τον τελικό σχηματισμό των καλωδίων. Η συγγραφή του κεφαλαίου αυτού έγινε ύστερα από επίσκεψη στο εργοστάσιο παραγωγής καλωδίων NEXANS στην Αγία Μαρίνα Στυλίδος (Φθιώτιδα) και ενημέρωση από μηχανικούς και εργαζομένους του εργοστασίου.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφονται αναλυτικά οι δοκιμές που γίνονται σε καλώδια μέσης τάσης, όπως προβλέπονται από τον κανονισμό IEC 60502-2, και δοκιμές πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF) σύμφωνα με τους κανονισμούς IEEE 400TM και IEEE 400.2TM. Γίνεται επίσης εκτενής αναφορά στις δοκιμές και μετρήσεις στα μονωτικά υλικά, η κατάσταση των οποίων παίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία του καλωδίου. Για το λόγο αυτό, γίνεται αναλυτική περιγραφή του μηχανισμού των μερικών εκκενώσεων, οι οποίες υπό συνθήκες οδηγούν στη διάσπαση της μόνωσης του καλωδίου, και στις τεχνικές μέτρησής τους.

Το **Κεφάλαιο 5** πραγματεύεται την έννοια της αβεβαιότητας και τον τρόπο υπολογισμού της με βάση το πρότυπο IEC 60-2. Για το σκοπό αυτό γίνεται σύντομη αναφορά στον ποιοτικό χαρακτηρισμό των συστημάτων μέτρησης, καθώς και σε ορισμένες έννοιες πιθανοτήτων και στατιστικής

Στο **Κεφάλαιο 6** περιγράφονται οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. Οι δοκιμές που έγιναν αφορούν την επαλήθευση της γεννήτριας κρουστικών τάσεων και της συσκευής VLF, και τη δοκιμή VLF σε καλώδιο μέσης τάσης. Γίνεται αρχικά μια σύντομη περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε και γίνεται αναφορά στις διαδικασίες της διακρίβωσης (calibration) και επαλήθευσης (verification), καταδεικνύοντας το γενικό τρόπο υπολογισμού των αβεβαιοτήτων. Παρατίθενται κατόπιν οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν, οι μετρήσεις που ελήφθησαν καθώς και η επεξεργασία αυτών, και αναπτύσσονται τα σχετικά σχόλια και συμπεράσματα που προκύπτουν.

Το **Κεφάλαιο 7** συνοψίζει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία, θέτει κάποιους πιθανούς μελλοντικούς στόχους για τις δοκιμές καλωδίων και κάνει ορισμένες προτάσεις, που θα βοηθούσαν στον ακριβέστερο υπολογισμό των αβεβαιοτήτων κατά την επαλήθευση.

Τέλος, σε αυτό το σημείο νιώθω την υποχρέωση να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας και συγκεκριμένα :

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Ε.Μ.Π. για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη καθοδήγηση του, την ουσιαστική βοήθεια του, το χρόνο που διέθεσε και την άνογη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τον κ. Γεώργιο Π. Φώτη, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών Ε.Μ.Π. και Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π., για τη βοήθεια και τις συμβουλές που μου προσέφερε.

Τον κ. Χρήστο Ηλία για την τεχνική υποστήριξη κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών.

Τον κ. Δημήτριο Ιγγλέζο, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, Γενικό Διευθυντή του εργοστασίου NEXANS, για την παραχώρηση της άδειας να επισκεφθώ το χώρο του εργοστασίου καθώς και για τις πληροφορίες σχετικά με το εργοστάσιο και την παραγωγική διαδικασία.

Τον κ. Παναγιώτη Λιάκο, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, Διευθυντή Εμπορικού Τμήματος του εργοστασίου NEXANS για την ξενάγηση στο χώρο του εργοστασίου και την αναλυτική ενημέρωση για την παραγωγική διαδικασία.

Την οικογένειά μου για την κάθε είδους υποστήριξη που μου παρείχε σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Αθήνα, Μάρτιος 2006
Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου

Κεφάλαιο 1

Μονωτικά Υλικά

1.1 Εισαγωγικά

Σκοπός των μονώσεων σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο ηλεκτρικός διαχωρισμός μεταξύ των ρευματοφόρων μερών, καθώς και των ρευματοφόρων μερών προς γη, κατά τρόπο ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό. [1]

Τα μονωτικά υλικά με βάση τη μορφή τους διακρίνονται σε *αέρια*, *υγρά* και *στερεά*, ενώ με βάση τους δεσμούς σε *ιοντικά*, *μοριακά* και *ομοιοπολικά*. Ανεξαρτήτως του μέσου που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί σαν ηλεκτρομονωτικό υλικό (δηλαδή στερεό, υγρό ή αέριο ή και συνδυασμός αυτών) είναι απαραίτητο να δοθεί πρωταρχική σημασία στον υπολογισμό του ηλεκτροστατικού πεδίου ανάλογα με τη γεωμετρία της διάταξης προκειμένου να διασφαλισθεί ο συμπαγής, αποτελεσματικός, οικονομικός και αξιόπιστος σχεδιασμός του εξοπλισμού. [2]

1.2 Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών υλικών

Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών υλικών είναι :

A.) Διηλεκτρική αντοχή

Σε αντιστοιχία προς την μηχανική αντοχή των υλικών, έχει αναπτυχθεί μία εξειδικευμένη περιοχή της ηλεκτρολογίας που αφορά την διηλεκτρική αντοχή των μονώσεων. Ως διηλεκτρική αντοχή (E_d) ενός μονωτικού υλικού εντός ομογενούς πεδίου έχει οριστεί το πηλίκο της ελάχιστης ενεργού τιμής της τάσης διάσπασης (U_{dmin}) προς την απόσταση των ηλεκτροδίων (d):

$$E_d = U_{dmin} / d \quad (\text{σε kV/cm}) \quad (1.1)$$

Διάσπαση είναι η αγωγή σύνδεση δύο μεταξύ τους μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση πάνω στην επιφάνεια ενός στερεού μονωτικού ονομάζεται *επιφανειακή διάσπαση*.

Η διάσπαση στο περιβάλλον μέσο ενός στερεού μονωτικού, λόγω μείωσης της απόστασης μόνωσης του στερεού μονωτικού από αγωγικές ξένες επικαθίσεις στην επιφάνειά του χαρακτηρίζεται ως *υπερπήδηση*.

Η διάσπαση μέσω του όγκου ενός μονωτικού υλικού καλείται *διάτρηση*.

Η διάσπαση σε περιορισμένο μήκος του μονωτικού ονομάζεται *μερική εκκένωση*. Οι μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε θέσεις ανομοιογένειας στον όγκο ή στην επιφάνεια του υλικού. Οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού ονομάζονται *εσωτερικές μερικές εκκενώσεις* και εκείνες στην επιφάνειά του *εξωτερικές μερικές εκκενώσεις*. [1] [2]

B.) Σχετική διηλεκτρική σταθερά

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r (>1) είναι ένας συντελεστής, η τιμή του οποίου διαφέρει σε κάθε είδος μονωτικού, και εξαρτάται από τη στατιστικότητα των

ανομοιογενειών στο υλικό. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά δίνει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μια διάταξης συγκριτικά με εκείνη στο κενό ή στον αέρα. Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές διαφόρων μονωτικών που συνθέτουν μία μόνωση θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειες τους, για να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. [4]

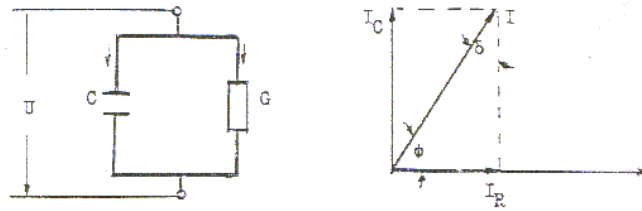
Γ.) Συντελεστής απωλειών

Σε μια μόνωση υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας, οι οποίες υπό εναλλασσόμενη τάση οφείλονται :

- στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής εναλλαγής των διπόλων στο ρυθμό εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης.
- στην πολύ μικρή ειδική αγωγιμότητα που έχουν τα μονωτικά υλικά.

Ο ιδανικός μονωτής είναι ένα ομοιογενές υλικό που δεν έχει απώλειες. Το ισοδύναμο κύκλωμα του ιδανικού μονωτή είναι μια χωρητικότητα C. Πρακτικά όμως δεν υπάρχει ιδανικός μονωτής με μηδενικές απώλειες. Το μονωτικό υλικό έχει έστω ένα ελάχιστο ρεύμα διαρροής, λόγω της αγωγιμότητάς του. Παρακάτω δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του πραγματικού ιδανικού μονωτή, όπου οι τιμές C και G θεωρούνται σταθερές. [1] Ο συντελεστής απωλειών δίνεται από τη σχέση :

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C} \quad (1.2)$$



Σχ. 1-1 : Ισοδύναμο κύκλωμα του πρακτικά ιδανικού μονωτή

Δ.) Ειδική αγωγιμότητα

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μία πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα που εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία κ.α.) και έχει τιμή μεγαλύτερη από $10^{-10} [\Omega\text{cm}]^{-1}$. Η ειδική αγωγιμότητα είναι ένα πολύ σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των μονωτικών υλικών, γιατί εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς. [1] [4]

Ε.) Επιφανειακή αγωγιμότητα

Ένα κριτήριο αξιολόγησης για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, που οφείλεται στις ξένες επικαθήσεις και στη θερμική καταπόνηση, είναι η επιφανειακή αγωγιμότητα. Επειδή οι παράγοντες που προκαλούν την αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας ποικίλουν ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα δεν είναι κάποια σταθερά των στερεών μονωτικών υλικών. [1] [4]

ΣΤ.) Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών σχετίζεται με τα φαινόμενα τοπικής αύξησης του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, σε θέσεις όπου η πεδιακή ένταση είναι αυξημένη. Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντα κατά τη λειτουργία των διαφόρων κατασκευών. Γενικά ισχύει ότι όσο πιο καλός μονωτής είναι ένα υλικό, τόσο καλύτερες είναι οι θερμομονωτικές του ιδιότητες. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ συμβαδίζει με το συντελεστή ηλεκτρικής αγωγιμότητας. . [1] [4]

Z.) Μηχανική αντοχή

Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρουν εκτός από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών και οι μηχανικές τους ιδιότητες (αντοχή σε εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας, δύναμη τάνυσης κτλ). Συχνά ενδιαφέρει η μηχανική αντοχή της όλης κατασκευής, όταν αυτή ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης, όπως συμβαίνει κατά το βραχυκύκλωμα. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης ή και να καταστρέψουν τα μονωτικά υλικά, όταν δεν έχουν γίνει σωστές επιλογές ως προς τη μηχανική αντοχή των μονώσεων και τη διατήρηση των αποστάσεων μόνωσης γενικότερα. . [1] [4]

Εκτός από τα παραπάνω, κριτήρια για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών είναι επίσης το **κόστος**, η **χημική σταθερότητα**, η **αντοχή σε ακτινοβολίες**, η **πυκνότητα**, το **ιξώδες** (για υγρά), η **αντοχή σε καύση** και η **αντοχή σε βιολογικές επιδράσεις**. [2]

1.3 Αέρια μονωτικά

Τα αέρια αποτελούν τα πιο απλά και πιο συνηθισμένα μονωτικά. Οι περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές χρησιμοποιούν αέρα σαν μονωτικό μέσο, ενώ σε άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται αέρια όπως το άζωτο (N_2), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το φρέον (CCl_2F_2) και το εξαφθοριούχο θείο (SF_6).

Η *διάσπαση των αερίων μονωτικών για μικρά διάκενα* ερμηνεύεται από τη *θεωρία του Townsend* και διέπεται από το *νόμο του Paschen*. Η δημιουργία των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται σε τρεις δυνατότητες ιονισμού :

- ιονισμός με κρούσεις από ηλεκτρόνια
- ιονισμός με κρούσεις από θετικά ιόντα
- ιονισμός στην επιφάνεια της καθόδου

Πιο αναλυτικά, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιταχύνονται υπό την επίδραση του πεδίου και συγκρούονται με τα μόρια του αερίου. Από τις συγκρούσεις αυτές δημιουργούνται νέα ελεύθερα ηλεκτρόνια, ενώ το αέριο ιονίζεται. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα σμήνος ελεύθερων ηλεκτρονίων, το οποίο μετακινείται από την κάθοδο προς την άνοδο (φαινόμενο χιονοστιβάδας). Όταν ένας επαρκής αριθμός νέων ιόντων δημιουργηθεί κοντά στην κάθοδο, τότε η διάσπαση του αερίου λαμβάνει χώρα. Κατά το νόμο του Paschen η τάση διάσπασης U_d εξαρτάται από την πίεση p και το μήκος του διακένου s : $U_d = U_d(p \cdot s)$. [2] [4] [6]

Ο *μηχανισμός διάσπασης μεγάλων διακένων* αποδίδεται στη δημιουργία διαδοχικών οχετών. Στην περίπτωση αυτή δεν ισχύει ο νόμος του Paschen. Η

διαδικασία διάσπασης με οχετούς έχει το γνώρισμα ότι η υψηλή πεδιακή ένταση προκαλεί αρχικά ιονισμό στην περιοχή της ανόδου, λόγω του οποίου δημιουργείται πρακτικά επιμήκυνση του ηλεκτροδίου (δηλαδή μείωση του διακένου). Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπαση υπό μορφή διαδοχικών οχετών, ανάλογα με τη μορφή του πεδίου και την απόσταση των ηλεκτροδίων. [4]

Ο ατμοσφαιρικός αέρας συνιστά το πιο άφθονο διηλεκτρικό υλικό και χρησιμοποιείται πρακτικά σαν μονωτικό υλικό σε όλο σχεδόν τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Αυτό οφείλεται στο μηδενικό του κόστος και στην ικανότητα του να επαναποκτά τις μονωτικές του ιδιότητες μετά από μία ενδεχόμενη διάσπασή του. Όμως, συγκριτικά με άλλα μονωτικά υλικά, έχει χαμηλή διηλεκτρική αντοχή και κατά συνέπεια απαιτούνται μεγάλα διάκενα αέρος για να αποφευχθούν οι διασπάσεις. [2]

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει αρκετή έρευνα με σκοπό την ανάπτυξη αερίων μονωτικών με καλύτερα χαρακτηριστικά από αυτά του ατμοσφαιρικού αέρα. Η διηλεκτρική αντοχή ενός αερίου μέσου είναι συνάρτηση της πυκνότητάς του. Το γεγονός αυτό βρίσκει εφαρμογή σε συστήματα διακοπών ισχύος τα οποία χρησιμοποιούν αέριο υψηλής πυκνότητας προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση των ελεύθερων αποστάσεων μόνωσης καθώς επίσης και η σβέση του τόξου. Ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα αέρια μονωτικά υλικά είναι το εξαφθοριούχο θείο.

Το εξαφθοριούχο θείο SF_6 ανακαλύφθηκε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα αλλά η ευρεία του χρήση ξεκίνησε από το 1960 και μετά. Το SF_6 έχει μοριακό βάρος 146 και το βάρος του είναι 22% θείο και 78% φθόριο. Η μοριακή δομή του είναι σαν ένα κανονικό οκτάεδρο στο κέντρο του οποίου βρίσκεται το άτομο του θείου, ενώ σε κάθε μία από τις έξι γωνίες τα άτομα του φθορίου. Το SF_6 με πυκνότητα 6,139gr/lit στους 20°C και σε ατμοσφαιρική πίεση περιβάλλοντος είναι ένα από τα βαρύτερα αέρια και είναι πέντε φορές βαρύτερο από τον αέρα. Είναι άχρωμο, άοσμο, μη τοξικό και χημικά εξαιρετικά αδρανές. Η διηλεκτρική αντοχή του ξηρού εξαφθοριούχου θείου σε πίεση μίας ατμόσφαιρας είναι δύο φορές καλύτερη από αυτή του αέρα, ενώ παράλληλα διαθέτει άριστη χαρακτηριστική θερμικής καταπόνησης και δυνατότητα σβέσης των ηλεκτρικών τόξων. Μια σημαντική εφαρμογή του SF_6 (το οποίο είναι πολύ σταθερό για ΥΤ-μείωση διαστάσεων υποσταθμών) είναι η χρησιμοποίησή του σε διακόπτες ισχύος ως μονωτικού μέσου. Η ζήτηση διακοπών ισχύος που λειτουργούν με SF_6 είναι ιδιαίτερα αυξημένη για τα συστήματα διανομής, ενώ παράλληλα αυξημένες απαιτήσεις παρουσιάζονται και σε διατάξεις διακοπών ισχύος για συστήματα τάσεως πάνω από 132kV και μέχρι τα 400kV. Εκτός από τη μόνωση διακοπών ισχύος, το SF_6 χρησιμοποιείται και για τη μόνωση καλωδίων μεγάλης ισχύος και μετασχηματιστών. [2] [6]

1.4 Υγρά μονωτικά

Τα υγρά μονωτικά χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρολογικούς εξοπλισμούς, τόσο για τη μονωτική τους ικανότητα, όσο και για τη θερμική τους αγωγιμότητα. Έχουν αρκετά μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από ότι τα αέρια σε ατμοσφαιρική πίεση (διηλεκτρική αντοχή αέρα 21kV/cm, ενώ διηλεκτρική αντοχή υγρών μονωτικών 60-200kV), ενώ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι αρκετά μεγάλος ($0,3 \cdot 10^{-3}$ cal/cms°C) με αποτέλεσμα να διευκολύνουν την απαγωγή θερμότητας, η οποία δημιουργείται στους αγωγούς, τις επαφές διακοπών και τους σιδηροπυρήνες

μετασχηματιστών. Τα υγρά, όπως και τα αέρια, γεμίζουν πλήρως τον προς μόνωση όγκο. [1] [6]

Τα υγρά μονωτικά χρησιμοποιούνται συνήθως για τον εμποτισμό του χαρτιού σε καλώδια ΜΤ και ΥΤ και πυκνωτές, και για τη μόνωση των μετασχηματιστών, περιβάλλοντας τα ηλεκτροφόρα στοιχεία και εμποδίζοντας την ηλεκτρική υπερπήδηση ανάμεσα σε σημεία με διαφορά δυναμικού. Τα πετρελαϊκά έλαια (ορυκτέλαια) είναι τα πιο συνηθισμένα υγρά μονωτικά (βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στους μετασχηματιστές). Για πολύ υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται σιλικονούχα έλαια και φθοριούχοι υδρογονάνθρακες. Τα τελευταία χρόνια δοκιμάζονται επίσης φυτικά έλαια (πολύ καλές ηλεκτρολογικές ιδιότητες, αλλά υδρόφιλα) καθώς και εστέρες (συνθετικά με βάση τον άνθρακα, πολύ καλά μονωτικά, αποικοδομούνται πιο γρήγορα από τα ορυκτέλαια, αλλά είναι υδρόφιλα). Οι συνθετικοί υδρογονάνθρακες και οι αλογονούχοι υδρογονάνθρακες χρησιμοποιούνται επίσης σε διάφορες εφαρμογές. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι ορισμένα από τα υγρά μονωτικά είναι τοξικά και δηλητηριώδη και η χρήση τους έχει περιοριστεί. [2]

Τα υγρά διηλεκτρικά δεν πρέπει να περιέχουν υγρασία, προϊόντα οξειδωσης και ξένα αιωρούμενα σωματίδια. Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την διηλεκτρική αντοχή ενός μονωτικού λαδιού είναι η παρουσία υγρασίας που μειώνει κατά πολύ τη μονωτική του ικανότητα, ενώ τα αιωρούμενα σωματίδια δημιουργούν αγωγίμες γέφυρες. Τα μονωτικά λάδια οξειδώνονται από τον αέρα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή τους. Για αυτό η παρουσία του αέρα θα πρέπει αποκλείεται στις κατασκευές που χρησιμοποιείται μονωτικό λάδι. [4]

Η συντήρηση των μονωτικών λαδιών συνίσταται στον έλεγχο μερικών φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών του. Το χρώμα του λαδιού είναι μια ένδειξη της ποιότητάς του. Πρέπει να είναι κίτρινο ανοιχτό, ενώ όταν σκουρύνει χρειάζεται να υποστεί μια σειρά ελέγχων. Ο έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής ενός μονωτικού λαδιού είναι η πιο συνηθισμένη δοκιμή και γίνεται συνήθως με βάση τους γερμανικούς κανονισμούς (VDE 0370/10.66), κατατάσσοντας το λάδι ανάλογα με τη διηλεκτρική του αντοχή : [6]

$E_d \leq 70 \text{ kV/cm}$: Ακατάλληλο λάδι

$E_d = (70-120) \text{ kV/cm}$: Καλό λάδι

$E_d > 120 \text{ kV/cm}$: Άριστο λάδι

Τέλος, οι κυριότεροι μηχανισμοί διάσπαση υγρών μονωτικών είναι :

Ενδογενής ή ηλεκτρονική διάσπαση : στηρίζεται σε μηχανισμούς ανάλογους με αυτούς του ατμοσφαιρικού αέρα . Βρίσκει εφαρμογή στα υγρά διηλεκτρικά τα οποία είναι καθαρά (δεν είναι μίξεις).

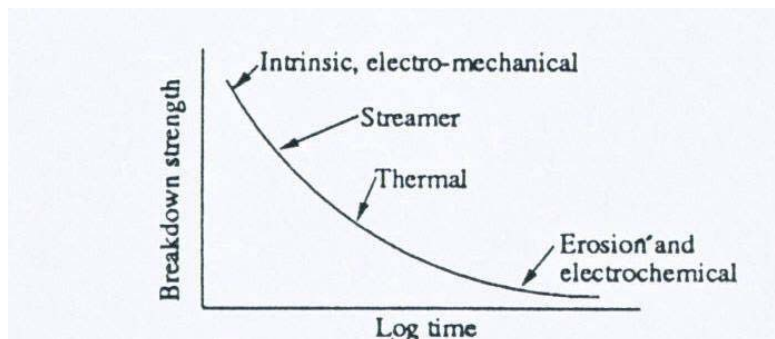
Διάσπαση μέσω αιωρούμενων σωματιδίων (π.χ. σταγόνες νερού) : γίνεται προσανατολισμός των σωματιδίων (λόγω της εφαρμογής του πεδίου) και με αυτό τον τρόπο δημιουργείται αγωγίμος δρόμος (υπάρχει τόξο, υπάρχει ρεύμα μέσα από το δρόμο) με αποτέλεσμα να «σπάει» το λάδι.

Διάσπαση δια φυσαλίδων : μια φυσαλίδα με μικρότερη διηλεκτρική αντοχή ανοίγει το δρόμο μεταξύ των ηλεκτροδίων, με αποτέλεσμα τη διάσπαση του λαδιού.

1.5 Στερεά μονωτικά

Η πλειοψηφία των συστημάτων μόνωσης που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι στερεά. Όταν συμβαίνει διάσπαση τα στερεά μονωτικά καταστρέφονται μόνιμα, σε αντίθεση με τα αέρια και τα υγρά, τα οποία -ολικώς ή μερικώς αντίστοιχα-

ξαναβρίσκουν τη μονωτική τους ικανότητα, μετά την «απομάκρυνση» του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Ο μηχανισμός διάσπασης των στερεών μονωτικών είναι σύνθετο φαινόμενο και εξαρτάται από το χρονικό διάστημα εφαρμογής της τάσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. [6]



Σχ. 1-2 : Μεταβολή της διηλεκτρικής αντοχής με το χρόνο μετά την εφαρμογή τάσης

Οι διάφοροι μηχανισμοί διάσπασης μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής :

- θερμική διάσπαση
- ηλεκτρική διάσπαση (δενδροειδής (treeing) και ηλεκτρομηχανική)
- ηλεκτροχημική διάσπαση
- θερμοχημική διάσπαση [4] [5]

Οι παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων, αντίστοιχα προς τις παραπάνω μορφές διάσπασης, είναι :

- οι απώλειες του μονωτικού
- οι δυνάμεις Coulomb
- οι μερικές εκκενώσεις
- η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

Πιο αναλυτικά :

Θερμική διάσπαση

Η μορφή αυτή της διάτρησης συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule. Η εικόνα που παρουσιάζει το θερμικά καταπονούμενο υλικό είναι συνήθως η *απανθράκωση* και η *τήξη* του στην περιοχή όπου οι απώλειες Joule είναι ιδιαίτερα αυξημένες.

Ηλεκτρική διάσπαση

Όταν η σταθερή ενεργός τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στο δοκίμιο είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη για τη θερμική διάτρηση, τότε η πεδιακή ένταση γίνεται μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων μέσα στο μονωτικό υλικό. Από μία τιμή της τάσης και πάνω συμβάλλουν στη διάτρηση του υλικού και οι δυνάμεις Coulomb. Η μορφή της διάτρησης αυτής ονομάζεται ηλεκτρική και διακρίνεται, ανάλογα με την εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση, στη *δενδροειδή* (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) και εκείνη υπό μορφή *οχετού* κατά τη διεύθυνση του πεδίου.

Ηλεκτροχημική διάσπαση (γήρανση της μόνωσης)

Η ηλεκτροχημική διάσπαση οφείλεται στις *μερικές εκκενώσεις*, οι οποίες εμφανίζονται σε θέσεις ανομοιογένειας στον όγκο ή στην επιφάνεια του μονωτικού, προκαλώντας σταδιακή αλλαγή στη μοριακή δομή του υλικού. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, που βαθμιαία προκαλεί τη μείωση της ηλεκτρικής

αντοχής του μονωτικού. Η ηλεκτροχημική διάσπαση είναι μακροπρόθεσμη διαδικασία, που εξαρτάται από το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και για αυτό ονομάζεται και *γήρανση*.

Θερμοχημική διάσπαση

Η διάτρηση που προκαλείται μόνο από τη *θερμότητα του περιβάλλοντος του στερεού μονωτικού μέσου* ονομάζεται *θερμοχημική*. Η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου αυξάνει την παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, με αποτέλεσμα τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι μετά από μία τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης.

Τα στερεά μονωτικά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες : οργανικά υλικά, ανόργανα υλικά και συνθετικά πολυμερή.

<i>Οργανικά Υλικά</i>	<i>Ανόργανα Υλικά</i>	<i>Συνθετικά</i>	<i>Πολυμερή</i>
Κεχριμπάρι	Άσβεστος	Θερμοπλαστικά Πολυαιθυλένιο	Θερμοσκληρυνόμενα Βακελίτης
Βαμβάκι	Κεραμικά	Perspex	Εποξειδικές ρητίνες
Χαρτί	Γυαλί	Πολυπροπυλένιο	Πολυεστέρες
Καουτσούκ	Μίκα	Πολυστυρένιο	
Κερί		Πολυβινυλοχλωρίδιο	
Ξύλο			

Τα *οργανικά υλικά* παράγονται από φυτική και ζωική ύλη και όλα έχουν περίπου παρόμοια χαρακτηριστικά. Είναι καλοί μονωτές και μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν σε πρακτικές εφαρμογές. Παρ' όλ' αυτά, οι μηχανικές και ηλεκτρικές τους ιδιότητες «αναστέλλονται» για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 100°C. Για αυτό χρησιμοποιούνται ύστερα από εμποτισμό με λάδι, όπως π.χ. το χαρτί που χρησιμοποιείται σε καλώδια, πυκνωτές και μετασχηματιστές. [5]

Σε αντίθεση με τα οργανικά υλικά, τα *ανόργανα υλικά* διατηρούν ικανοποιητικά τις ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητές τους και σε θερμοκρασίας πάνω από 250°C. Σημαντικά ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το γυαλί και η πορσελάνη, εξαιτίας της αντοχής τους στους ατμοσφαιρικούς ρύπους και στην εξαιρετική τους απόδοση κάτω από διάφορες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. [5]

Τα *συνθετικά πολυμερή* είναι πολυμερή υλικά που διαθέτουν πολύ καλές μονωτικές ιδιότητες και μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Ως πολυμερές θεωρείται ένα καθαρό υλικό, χωρίς προσμίξεις που αποτελείται από μακριές αλυσίδες μακρομορίων. Οι αλυσίδες αποτελούνται από συνδυασμούς άνθρακα, υδρογόνου, οξυγόνου, αζώτου, χλωρίου, φθορίου και θείου. Είναι σε υγρή φάση κατά την παρασκευή τους και έτσι μπορεί εύκολα να μορφοποιηθούν σε τελικά στερεά προϊόντα. Πολύ σπάνια χρησιμοποιούνται τα καθαρά πολυμερή. Όταν προστίθενται σε αυτά άλλες ουσίες ονομάζονται *πλαστικά* ή *ρητίνες*. Τα σύνθετα υλικά μπορούν να ορισθούν ως μακροσκοπικοί συνδυασμοί υλικών, που έχουν μία χαρακτηριστική διεπιφάνεια μεταξύ τους. Το ένα από τα υλικά ονομάζεται μήτρα και το άλλο πληρωτικό. [7]

Τα πολυμερή προέρχονται από τη δημιουργία χημικών δεσμών μεταξύ μικρών μορίων, που ονομάζονται μονομερή. Οι δεσμοί που δημιουργούνται είναι από αντιδράσεις προσθήκης, συμπύκνωσης ή το συνδυασμό και των δύο. Η διεργασία

του πολυμερισμού προσθήκης χαρακτηρίζεται από τον απλό συνδυασμό μορίων χωρίς τη δημιουργία παραπροϊόντων. Όταν συνδέονται μονάδες του ίδιου μονομερούς τότε το παραγόμενο προϊόν είναι ένα ομοπολυμερές (π.χ. το πολυαιθυλένιο που παράγεται από μονομερές αιθυλένιο), ενώ όταν χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότερα πολυμερή το προϊόν είναι ένα συμπολυμερές (π.χ. αιθυλένιο και προπυλένιο). Στον πολυμερισμό με συμπύκνωση η χημική ένωση μεταξύ δύο μορίων επιτυγχάνεται μόνο με την παραγωγή ενός μορίου παραπροϊόντος, το οποίο συνήθως απομακρύνεται από το πολυμερές, έτσι ώστε να μην παραμείνει ως ανεπιθύμητη πρόσμιξη στο τελικό προϊόν. Εάν οι παραπάνω τύποι αντίδρασης συμβαίνουν σε σειρά, τότε έχουμε τον πολυμερισμό συνδυασμού προσθήκης και συμπύκνωσης. [7] [8]

Τα μόρια των πολυμερών διευθετούνται ως μεγάλου μήκους μόρια και ονομάζονται γραμμικά μόρια. Όμως ο πολυμερισμός μπορεί να δημιουργήσει πιο περίπλοκες δομές με διασταυρώσεις, που μοιάζουν με τα κλαδιά ενός δέντρου. Αυτές οι προεξοχές σε ένα γραμμικό μόριο ονομάζονται στερεοχημικές παρεμποδίσεις. Τα απλά γραμμικά μόρια μπορούν να τακτοποιηθούν πιο κοντά το ένα στο άλλο και να γλιστράνε μεταξύ τους πιο εύκολα από ότι τα άλλα με τις διακλαδώσεις. Τα γραμμικά μόρια έχουν επίσης υψηλότερη πυκνότητα, υψηλότερη αντοχή εφελκυσμού, μεγαλύτερη ακαμψία και υψηλότερη θερμοκρασία όπου γίνονται πιο μαλακά. Τα μόρια με διακλαδώσεις έχουν πιο πολλά κενά, μικρότερη πυκνότητα, είναι πιο εύκαμπτα και πιο διαπερατά σε αέρια και διαλυτικά από τα γραμμικά μόρια.

Ανάλογα με τα μονομερή μόρια που χρησιμοποιούνται για να γίνει το πολυμερές, είναι δυνατόν οι μακροσκοπικές αλυσίδες να συνδέονται μεταξύ τους. Ο δεσμός μεταξύ δύο αλυσίδων ονομάζεται διασταύρωση. Αυτό συνήθως συμβαίνει όταν τα μονομερή έχουν πάνω από ένα διπλό δεσμό στη δομή τους. Οι διασταυρώσεις κάνουν την ολίσθηση μεταξύ των αλυσίδων πολύ δύσκολη, και έτσι το πολυμερές γίνεται άκαμπτο και πολύ δύσκολα παραμορφώσιμο. Τα διασταυρούμενα μόρια δεν έχουν τακτοποιημένη δομή και έτσι είναι μη κρυσταλλικά – άμορφα. [7]

Δύο βασικές κατηγορίες πλαστικών ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της παραμόρφωσής τους σε υψηλές θερμοκρασίες είναι τα θερμοπλαστικά (thermoplastic) και τα θερμοσκληρυνόμενα (thermosetting). Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο τύπων είναι η απουσία των διασταυρώσεων στα θερμοπλαστικά και η παρουσία τους στα μακρομόρια των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών. Τα θερμοπλαστικά παραμορφώνονται με τη θερμοκρασία, ενώ τα θερμοσκληρυνόμενα όχι και κρατούν την μορφή τους.

Τα θερμοπλαστικά αποτελούνται από μακριά, γραμμικά μόρια που το καθένα τους μπορεί να έχει πλευρικές αλυσίδες, αλλά όχι διασταυρώσεις. Όταν θερμαίνονται, οι αλυσίδες ολισθαίνουν προκαλώντας πλαστική ροή. Έτσι μπορεί να τήκονται και να επαναδιαμορφώνονται πολλές φορές με θέρμανση και ψύξη. Τα θερμοπλαστικά έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση, ευκολότερη επεξεργασία και μπορεί να αποκτήσουν πολύπλοκες μορφές πιο εύκολα από τα θερμοσκληρυνόμενα.

Τα θερμοσκληρυνόμενα υπόκεινται κατά την επεξεργασία τους σε χημική αλλαγή που ονομάζεται σκλήρυνση, όπου δημιουργούν διασταυρούμενες δομές, γίνονται μόνιμα αδιάλυτα, δεν επανατήκονται και για αυτό δεν μπορούν να επαναμορφοποιηθούν.

Τα θερμοπλαστικά κατηγοριοποιούνται σε τεχνικά-μηχανολογικά θερμοπλαστικά και σε ευρείας χρήσης θερμοπλαστικά. Τα ευρείας χρήσης

χρησιμοποιούνται όταν δεν υπάρχει τάση ή φορτίο ή είναι πολύ μικρό, ενώ τα τεχνικά είναι σχεδιασμένα για να υπόκεινται σε υψηλά φορτία για πολύ χρόνο. Δύο κατηγορίες θερμοπλαστικών που χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό (ειδικά σε καλώδια) είναι το πολυαιθυλένιο και το πολυβινυλοχλωρίδιο. [2] [7]

Πολυαιθυλένιο (PE-XLPE)

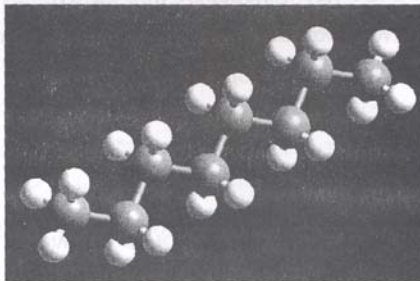
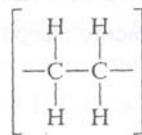
Το πολυαιθυλένιο είναι ένα θερμοπλαστικό υλικό, το οποίο συνδυάζει εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, σχεδόν μηδενική απορρόφηση υγρασίας, χημική αντοχή, χημική αντίσταση στα οξέα και στα αλκάλια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και χαμηλό κόστος. Έχει επίσης υψηλή μηχανική αντοχή, μικρό συντελεστή τριβής, ευκολία κατεργασίας και καλές διηλεκτρικές ιδιότητες στις υψηλές συχνότητες (για αυτό χρησιμοποιείται ευρέως σε καλώδια ισχύος, σε τηλεφωνικά καλώδια κ.α.). [5] [7] [10]

Με διάφορες διαδικασίες κατασκευάζονται διάφοροι τύποι πολυαιθυλενίου με συγκεκριμένες ιδιότητες για διαφορετικές χρήσεις. Έτσι διακρίνουμε πολυαιθυλένια χαμηλής, μέσης και υψηλής πυκνότητας, που ποικίλουν σε μοριακό βάρος. Πιο συγκεκριμένα διακρίνουμε :

- το LDPE (low-density polyethylene)
- το MDPE (medium-density polyethylene)
- το HDPE (high-density polyethylene)
- το LLDPE (linear low-density polyethylene)

Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο PE για καλώδια ΜΤ και ΥΤ είναι το XLPE το οποίο είναι LDPE δικτυωμένο με ένα οργανικό υπεροξείδιο. [9]

Το πολυαιθυλένιο είναι υδρογονάνθρακας και συνεπώς τα μόριά του δεν έχουν ισχυρό διπολικό χαρακτήρα. Αποτελείται από κρυσταλλικές περιοχές που διακόπτονται από άμορφες περιοχές, για αυτό λέγεται μερικά κρυσταλλικό υλικό (ημικρυσταλλικό). [7] [9]



μόριο πολυαιθυλενίου

Σχ. 1-3 : Μόριο πολυαιθυλενίου

Η δομή του πολυαιθυλενίου παίζει σημαντικό ρόλο στις μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του πολυαιθυλενίου, και επηρεάζει τη διηλεκτρική του αντοχή. Η διηλεκτρική σταθερά του PE είναι σχετικά μικρή, $\epsilon_r = 2,5$, και ο συντελεστής απωλειών είναι επίσης χαμηλός, $\tan\delta = 10^{-4}$. Χρησιμοποιείται στους 200-250°C για την κατασκευή των καλωδίων, οπότε εν θερμώ συμπίεζεται πάνω στον αγωγό και

πρέπει ακολούθως να ψυχθεί αργά, αλλιώς δημιουργούνται κενά στη μόνωση που μπορούν να μειώσουν αισθητά την αντοχή του.

Η διηλεκτρική αντοχή του PE εξαρτάται από το πάχος του. Σε μικρά πάχη είναι μεγάλη και μειώνεται σημαντικά με αύξηση του πάχους. Αυτό οφείλεται σε μικρορωγμές του υλικού και συσσώρευση ηλεκτρικών φορτίων στο χώρο, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται μικροεκεκνώσεις. Η αντοχή σε μεγάλα πάχη μπορεί να βελτιωθεί με προσμίξεις οργανικών ενώσεων που σκοπό έχουν την εξουδετέρωση των φορτίων. Η δικτύωση των μορίων και ακολούθως μια επιμελημένη ψύξη του υλικού οδηγούν επίσης σε ανύψωση της αντοχής σε μεγάλα πάχη. Η αντοχή του PE στην υγρασία και στα χημικά είναι πολύ καλή. Μειονέκτημα του PE είναι το ότι συντηρεί τη φλόγα και το ότι διογκώνεται όταν είναι μέσα σε μονωτικό λάδι. Τέλος προσβάλλεται από την υπεριώδη ακτινοβολία, η οποία το αποικοδομεί.

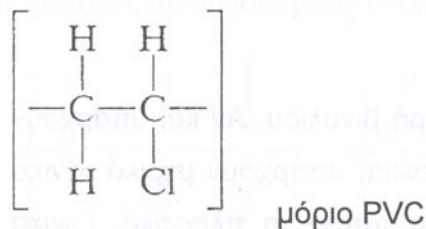
Η αντοχή του PE στις υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να βελτιωθεί με δικτύωση των μορίων του. Τα μόρια πολυαιθυλενίου έχουν τη μορφή ινών και είναι διατεταγμένα στο χώρο. Με ακτινοβολία γ μέσα σε πυρηνικούς αντιδραστήρες ή με χημικές κατεργασίες χρησιμοποιώντας οργανικά υπεροξειδία μπορεί να επέλθει μία δικτύωση των μεμονωμένων μορίων σε μεγάλα μοριακά συμπλέγματα. Το νέο υλικό λέγεται **δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (XLPE)**. Ενώ το πολυαιθυλένιο PE είναι χρησιμοποιήσιμο σε διαρκείς θερμοκρασίες 70°C, το XLPE αντέχει διαρκώς μέχρι και 90 °C. Βραχυχρόνια κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων τα υλικά PE και XLPE επιτρέπεται να καταπονηθούν σε θερμοκρασίες 150 °C και 250 °C αντίστοιχα.

Το δικτυωμένο πολυαιθυλένιο εκτός της αυξημένης αντοχής του σε υψηλές θερμοκρασίες, παρουσιάζει σε σχέση με το πολυαιθυλένιο και μία βελτιωμένη αντίσταση στη δημιουργία ρωγμών, όταν επιβάλλονται σε αυτό μηχανικές τάσεις. Το δικτυωμένο πολυαιθυλένιο παρουσιάζει επίσης αυξημένη αντοχή στην επίδραση χημικών ουσιών που προσβάλλουν την επιφάνειά του. [5] [7] [8] [10]

Πολυβινυλοχλωρίδιο (P.V.C.)

Το πολυβινυλοχλωρίδιο ανήκει στην κατηγορία των πλαστικών βινυλίου. Αυτά είναι πολυμερή με βάση τα μονομερή βινυλίου. Έχουν πολύ καλή αντοχή στο νερό, στα χημικά, μηχανική αντοχή, αντοχή σε τριβή και είναι αυτοσβενόμενα σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Το πολυβινυλοχλωρίδιο ή P.V.C (C_2H_3Cl) είναι ένα πολικό διηλεκτρικό, όπου το μέγεθος και το φορτίο των ατόμων του χλωρίου είναι διαφορετικά από αυτά του ατόμου του υδρογόνου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 1-4 : Μόριο πολυβινυλοχλωριδίου

Το P.V.C. είναι στην αρχική του μορφή διαθέσιμο σαν ένα άκαμπτο, σκληρό, άσπρο υλικό, το οποίο μπορεί να σχηματοποιηθεί στην απαιτούμενη μορφή με την πρόσμιξη κατάλληλων υλικών (αδρανή συμπληρωματικά υλικά, ελαστικοποιητές, σταθεροποιητές, χρώματα και υλικά που μειώνουν την τριβή). Αδρανή σε σκόνες, όπως κιμωλία, προσμειγνύονται στο PVC για τη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας. Οι ελαστικοποιητές είναι λάδια που προσμειγνύονται στο PVC, ελαττώνοντας τις ενδομοριακές τριβές του και καθιστώντας το ελαστικό ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες (-10°C). Οι σταθεροποιητές δυσχεραίνουν την αποσύνθεση των μακρομορίων του PVC από το φως και τη θερμότητα.

Το PVC έχει υψηλές διηλεκτρικές απώλειες ($\tan\delta=10^{-2}$). Εφαρμόζεται, ως εκ τούτου, σε τάσεις μέχρι 5,8/10kV. Πρόσθετο μειονέκτημα του είναι το εύθραυστο του στις χαμηλές θερμοκρασίες. Σε υψηλές θερμοκρασίες, π.χ. σε πυρκαγιές, διασπάται και σχηματίζεται υδροχλωρίδιο, το οποίο δρα ανασταλτικά στην εξάπλωση της πυρκαγιάς, είναι όμως πολύ τοξικό και οξειδωτικό. Πλεονέκτημα του PVC είναι ότι είναι πολύ ανθεκτικό σε χημικές προσβολές και στην υγρασία. Η μέγιστη συνεχώς επιτρεπόμενη θερμοκρασία είναι 60°C ή 70°C εξαρτώμενη από την τάση. Βραχυχρόνια, π.χ για τους χρόνους που διαρκούν τα βραχυκυκλώματα, η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία είναι 170°C . [5] [7] [8] [10]

Κεφάλαιο 2

Καλώδια Μέσης Τάσης

2.1 Εισαγωγικά

Μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας με καλώδια συναντάται στην περίπτωση που το περιβάλλον δεν προσφέρεται για εναέρια μεταφορά ή όταν δεν μπορούν να στηριχθούν οι αγωγοί λόγω μεγάλων ανοιγμάτων. Οι καλωδιακές γραμμές είναι πολυδάπανες και παρουσιάζουν δυσκολία στη συντήρηση. Από την άλλη, τα καλώδια σε αντιδιαστολή με τους απλούς μονωμένους αγωγούς μπορούν να ενταφιασθούν ή να ποντισθούν, χωρίς αυτό να επηρεάζει αρνητικά τη λειτουργία τους. Το κόστος των υπόγειων γραμμών είναι πολλαπλάσιο του κόστους των εναέριων και δικαιολογείται μόνο όταν σημαντικοί λόγοι αισθητικής του περιβάλλοντος, ή λόγοι ασφαλείας ή δυσχέρειες στην εξεύρεση ζωνών διέλευσης καθιστούν ανεπιθύμητη ή και ανέφικτη τη μεταφορά με εναέριες γραμμές. Τέτοιες συνθήκες συναντώνται στις πόλεις και γενικώς στις κατοικήσιμες περιοχές, για διαφόρους λόγους σε κάθε περίπτωση. [10] [11] [12]

Ανάλογα με την τάση του δικτύου διακρίνουμε τα παρακάτω είδη καλωδίων :

- Καλώδια Χαμηλής Τάσης : $U_N < 1 \text{ kV}$
- Καλώδια Μέσης Τάσης : $1 \text{ kV} < U_N < 45 \text{ kV}$
- Καλώδια Υψηλής Τάσης : $U_N > 60 \text{ kV}$

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με καλώδια Μέσης Τάσης.

2.2 Από τι αποτελούνται τα καλώδια μέσης τάσης

Τα καλώδια μέσης τάσης αποτελούνται από τα παρακάτω στοιχεία : [10]

-Αγωγοί : Ένας ή τρεις αγωγοί φέρουν το ρεύμα του φορτίου. Είναι από αλουμίνιο ή χαλκό.

-Εξομαλυντικά (ημιαγώγιμα) στρώματα : Εφαρμόζονται πάνω σε αγωγούς με ανώμαλη επιφάνεια, επιφέροντας μείωση του ηλεκτρικού πεδίου και ανύψωση της διηλεκτρικής αντοχής.

-Μόνωση : Η μόνωση είναι συνήθως χαρτί εμποτισμένο με λάδι ή παχύρρευστη μάζα, PVC, PE, XLPE κ.α.

-Εξωτερικός γειωμένος αγωγός (ή μανδύας ή μεταλλικός μανδύας ή ηλεκτρική θωράκιση ή μεταλλική θωράκιση) : Είναι σχετικά λεπτός και δε φέρει μεγάλα ρεύματα παρά μόνο σε περίπτωση σφαλμάτων.

-Ζώνη μηχανικής ενίσχυσης : Είναι περίβλημα από ατσάλινα σύρματα ή ταινίες.

-Εξωτερικό προστατευτικό στρώμα (ή εξωτερικός μανδύας) : Προστατεύει από την υγρασία. Κατασκευάζεται από συνθετικό (PVC), μόλυβδο ή ίνες γιούτας με πίσσα. Ο μόλυβδος παίζει ταυτόχρονα το ρόλο του μανδύα.

Τα καλώδια κατά την εγκατάσταση και λειτουργία τους συνοδεύονται συνήθως από τις παρακάτω διατάξεις :

-Ακροκιβώτια : Χρησιμοποιούνται στα άκρα των καλωδίων για να αποφευχθούν εκεί υπερπηδήσεις και δημιουργία ηλεκτρικών τόξων.

-Σύνδεσμοι ή μούφες : Χρησιμεύουν για τη σύνδεση δύο καλωδίων, για διακλαδώσεις και σαν παγίδες υδροστατικής πίεσης.

-Σύστημα επιβολής και ελέγχου πίεσης : Χρησιμοποιείται σε καλώδια με λάδι ή αέριο υπό πίεση.

-Σύστημα κυκλοφορίας ψυκτικού υγρού : Χρησιμοποιείται όταν γίνεται ψύξη με βεβιασμένη κυκλοφορία νερού ή λαδιού.



Σχ. 2-1 : 1) Πολύκλωνος στρογγυλός αγωγός χαλκού(ή αλουμινίου), 2) Εσωτερικό ημιαγωγίμο στρώμα XLPE, 3) Μόνωση XLPE, 4) Εξωτερικό ημιαγωγίμο στρώμα XLPE, 5) Ηλεκτρική θωράκιση αποτελούμενη από σύρματα χαλκού τυλιγμένα ελικοειδώς (χάλκινη ταινία προαιρετική κατόπιν παραγγελίας), 6) Πλαστική ταινία (προαιρετική), 7) Εξωτερικός μανδύας PVC

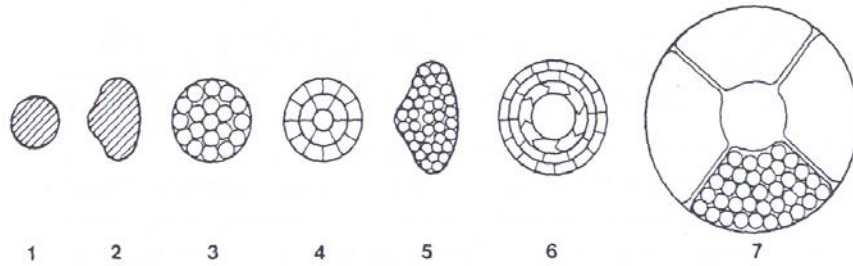
2.3 Κατασκευαστικά στοιχεία για κάθε μέρος των καλωδίων μέσης τάσης

2.3.1 Αγωγοί

Υλικό : Οι αγωγοί των καλωδίων κατασκευάζονται από ηλεκτροτεχνικό **χαλκό** E-Cu ή ηλεκτροτεχνικό **αλουμίνιο** E-Al. Ο όρος ηλεκτροτεχνικός (E) δείχνει ότι πρόκειται για τεχνικό υλικό υψηλής αγωγιμότητας. Τα μέταλλα αυτά είναι κατεργασμένα θερμικά ώστε να είναι εύκαμπτα. Ο χαλκός έχει υψηλή αγωγιμότητα και όταν είναι σκληρής ολκήσεως, εμφανίζει μεγάλη μηχανική αντοχή. Βασικό τεχνικό μειονέκτημα είναι το βάρος του. Το αλουμίνιο είναι κατώτερο του χαλκού σε αγωγιμότητα και αντοχή, αλλά είναι φθηνότερο και πολύ ελαφρύτερο από το χαλκό. Μειονέκτημά του είναι επίσης ότι δε συγκολλάται με μαλακή κόλληση χαμηλού σημείου τήξεως (π.χ. κασσιτεροκόλληση) και ότι διαβρώνεται ευκολότερα λόγω ηλεκτροχημικών δράσεων. [10] [11] [12]

Διατομή : Η μορφή της διατομής μπορεί να είναι **κυκλική** ή να αποτελείται από **κυκλικούς τομείς**. Οι κυκλικές διατομές μπορεί να είναι συμπαγείς μέχρι 16mm^2 για E-Cu και 50mm^2 για E-Al. Για μεγαλύτερες διατομές οι αγωγοί γίνονται για λόγους ευκαμψίας πολύκλωνοι. Για πολυπολικά καλώδια μεγάλων διατομών χρησιμοποιούνται διατομές κυκλικού τομέα. Αν σε πολύκλωνους αγωγούς επιβάλλουμε μια συμπίεση των συρματιδίων (συμπιεσμένοι αγωγοί), εξοικονομούμε όγκο, μειώνοντας τη γεωμετρική διατομή του αγωγού. Πάνω από 35mm^2 πολύκλωνοι αγωγοί συμπιέζονται. **Κοίλες και ελλειπτικές διατομές** συναντώνται σε καλώδια με μόνωση χαρτιού-λαδιού και εξωτερικής πίεσης αντίστοιχα, για να κυκλοφορεί το λάδι και να μεταδίδεται καλύτερα η πίεση. Σε μεγάλες διατομές μπορεί ο αγωγός κάθε φάσης να διαμοιρασθεί σε πολλούς αγωγούς παράλληλους, με διατομή μορφής κυκλικού τομέα, όπου οι τομείς είναι μεμονωμένοι μεταξύ τους και οι επί μέρους αγωγοί είναι συνεστραμμένοι. Έτσι μειώνεται η αντίσταση στο

εναλλασσόμενο ρεύμα σε σχέση με αγωγούς όπου δεν έχουμε μονωμένους τομείς. Αυτό προκύπτει λόγω του επιδερμικού φαινομένου. [10] [11] [12]

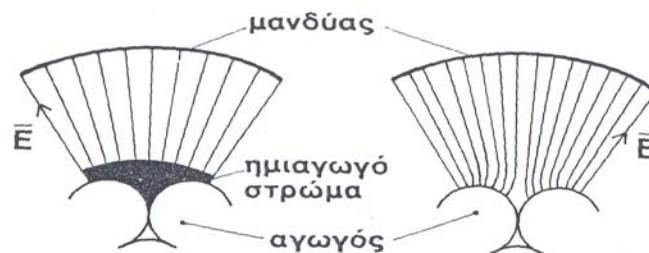


Σχ. 2-2 : Αγωγοί καλωδίων

1) πλήρης στρογγυλή διατομή (r), 2) πλήρης κυκλικός τομέας (s), 3) πολύκλωνη στρογγυλή διατομή (rm), 4) πολύκλωνη στρογγυλή συμπιεσμένη διατομή (rm/v), 5) πολύκλωνος κυκλικός τομέας (sm) 6) πολύκλωνη στρογγυλή διατομή συμπιεσμένη με κανάλι ψύξης ($rm/v... h$), 7) διατομή με επιμέρους τομείς μονωμένους, για μείωση του επιδερμικού φαινομένου, με κανάλι ψύξης στο κέντρο.

2.3.2 Εξομαλυντικά (ημιαγωγικά) στρώματα

Λόγω της ανωμαλίας που παρουσιάζει η επιφάνεια των πολύκλωνων αγωγών, η πεδιακή ένταση (kV/mm) στην επιφάνεια τους είναι αυξημένη σε σχέση με τους μονόκλωνους. Για να μειωθεί η πεδιακή ένταση στην επιφάνεια των πολύκλωνων αγωγών, τοποθετούνται στρώματα από **ημιαγωγικά υλικά** (όπως χαρτί με γραφίτη ή πλαστικά με γραφίτη). Τα ημιαγωγικά αυτά στρώματα εξασφαλίζουν επίσης το να μη δημιουργούνται κενά μεταξύ αγωγού και μόνωσης, που θα οδηγούσαν σε ηλεκτρικές εκκενώσεις και βαθμιαία καταστροφή της μόνωσης. Τέλος τα στρώματα αυτά μειώνουν τη θερμική και μηχανική καταπόνηση της μόνωσης κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων. [10]



Σχ. 2-3 : Επίδραση των εξομαλυντικών στρωμάτων στη μορφή του ηλεκτρικού πεδίου ενός πολύκλωνου αγωγού.

2.3.3 Μόνωση

Το μονωτικό και το πάχος του προσδιορίζει την ηλεκτρική αντοχή του καλωδίου σε τάση, αλλά και την επιτρεπόμενη ένταση του ρεύματος φόρτισης του αγωγού, γιατί αυτή είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας στην οποία αντέχει το μονωτικό. Το είδος της μόνωσης καθορίζει τόσο τη μέγιστη συνεχή όσο και την παροδικά επιτρεπόμενη θερμοκρασία. Η εκλογή της μόνωσης γίνεται ανάλογα με την εφαρμογή, λαμβάνοντας υπόψη τις ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες,

καθώς και τη δυνατότητα εύκολης εγκατάστασης του καλωδίου, σε σχέση με την ευκαμψία του ή τη μηχανική αντοχή του.

Οι μονωτικές ιδιότητες στα καλώδια χαρακτηρίζονται κυρίως από τη διηλεκτρική αντοχή σε kV/mm, την ωμική αντίσταση του υλικού, το συντελεστή απωλειών $\tan\delta$ και το μέγεθος των μικροεκεκνώσεων (μη αυτοσυντηρούμενες εκκενώσεις στο διηλεκτρικό). Οι μικροεκεκνώσεις προκαλούν βαθμιαία διάβρωση του υλικού και καταστροφή του. [10] [13]

Η μονωτική ικανότητα ενός καλωδίου δίνεται κατά VDE 0271 από τις ονομαστικές τάσεις του U_o και U_N . Συγκεκριμένα, η ονομαστική τάση U_o είναι η τάση μεταξύ αγωγού και γης (ή μεταξύ αγωγού και μεταλλικής επένδυσης του καλωδίου), ενώ η ονομαστική τάση U_N είναι η τάση μεταξύ αγωγών και φάσεων.[3]

Τα βασικά μονωτικά που χρησιμοποιούνται στα καλώδια είναι θερμοπλαστικές ύλες, ελαστικές ύλες, χαρτί και χαρτί ποτισμένο με λάδι. Παρακάτω γίνεται μία συνοπτική περιγραφή της μόνωσης χαρτί-λάδι, PVC και πολυαιθυλενίου :

Μόνωση χαρτί-λάδι : Η μόνωση αυτή είναι η πιο συμβατική, υπάρχει εδώ και 100 χρόνια, και η πιο δοκιμασμένη σε όλες τις περιοχές τάσεων από 380 V έως 400 kV. Ωστόσο σήμερα η χρήση καλωδίων MT με μόνωση χαρτί-λάδι είναι σπάνια και γίνεται κυρίως από τη ΔΕΗ. Η μόνωση χαρτιού σχηματίζεται με την ελικοειδή περιέλιξη ταινίας χαρτιού επάνω στους αγωγούς, μέχρι να σχηματισθεί ορισμένο συνολικό πάχος μόνωσης. Το περιτύλιγμα του χαρτιού γίνεται με προσοχή, ώστε η τοποθέτηση των ταινιών να είναι ομοιόμορφη, για να προκύψει ομοιογενής μόνωση χωρίς κενά αέρος στο εσωτερικό της. Το τελευταίο είναι σημαντικό, διότι θύλακες αέρα στο εσωτερικό της μόνωσης αποτελούν ασθενή σημεία, τα οποία σύντομα γίνονται εστίες μερικών ηλεκτρικών εκκενώσεων. Ο εμποτισμός του χαρτιού με λάδι αποσκοπεί στην αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης και στη συμπλήρωση των διακένων, τα οποία υπάρχουν μεταξύ των ταινιών. Ο εμποτισμός της μόνωσης με λάδι γίνεται μετά την τοποθέτηση της επάνω στους αγωγούς και πριν από την τοποθέτηση του μολύβδινου μανδύα και γίνεται με το λάδι υπό πίεση. Το χρησιμοποιούμενο λάδι έχει σχετικά υψηλό ιξώδες, ώστε να είναι παχύρρευστο και να μη μετακινείται εύκολα στις υψομετρικές διακυμάνσεις της διαδρομής το καλωδίου ή διαρρέει σε μεγάλες ποσότητες κατά το κόψιμό του. Τα μονωτικά λάδια μπορεί να διασπαστούν με το χρόνο αλλοιώνοντας έτσι τις μονωτικές τους ιδιότητες. Έτσι προσμειγνύονται προστατευτικές ουσίες (φαινόλες κτλ) στο λάδι για προστασία κατά της γήρανσης. [10] [11] [12] [15]

Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) : Το PVC χρησιμοποιείται εφ' όσον αυτό επιτρέπεται από τεχνικούς λόγους, γιατί είναι φθινό και ανθεκτικό από μηχανική και χημική άποψη. Τα όριά του από άποψη τάσης είναι 6kV/10kV (φασική/πολική τάση). Λόγω των υψηλών διηλεκτρικών απωλειών δε χρησιμοποιείται σε υψηλότερες τάσεις. Δεν είναι ανθεκτικό σε πολύ χαμηλές (<-30°C) ή πολύ υψηλές θερμοκρασίες (>70°C). Σε διαρκή καταπόνηση πάνω από 70°C γίνεται εύθραυστο και σχηματίζει ρωγμές. Επιτρέπεται η διαρκής καταπόνηση του μέχρι 70°C. [10] [15]

Πολυαιθυλένιο (PE) – Δικτυωμένο Πολυαιθυλένιο (XLPE) : Το πολυαιθυλένιο χρησιμοποιείται στη μέση τάση γιατί έχει χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες και είναι μηχανικά και χημικά ανθεκτικό. Η θερμοκρασιακή του συμπεριφορά είναι όμοια με αυτή του PVC. Επιτρέπονται θερμοκρασίες μέχρι 70°C συνεχώς. Το δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (XLPE) έχει καλύτερη συμπεριφορά στη διαρκή θερμοκρασιακή

καταπόνηση. Αντέχει μέχρι 90°C συνεχώς. Είναι ακριβότερο μονωτικό από το PVC. Το πολυαιθυλένιο αποικοδομείται σταδιακά από την ηλιακή ακτινοβολία, για αυτό και δεν χρησιμοποιείται συχνά σαν εξωτερικός μανδύας καλωδίων εξωτερικού χώρου. Σήμερα χρησιμοποιείται στη μέση τάση κατ' εξοχήν *χημικά δικτυωμένο* και όχι απλό πολυαιθυλένιο. [15]

Άλλα συνθετικά ελαστικά όπως βουτύλιο, οξικό βινυλαιθύλιο (EVA) και αιθυλένιο-προπυλένιο (EPR) χρησιμοποιούνται για λόγους ευκαμψίας ή και αντοχής σε θερμοκρασία. Για διαρκείς υψηλές θερμοκρασίες γίνεται χρήση με ελαστικό σιλικόνης. Η μόνωση ελαστικού σιλικόνης αντέχει διαρκώς σε 180°C χωρίς να αποικοδομείται. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες π.χ. 120 °C, γίνεται και χρήση του ελαστικού από οξικό βινυλαιθύλιο (EVA) ή και χρήση του μονωτικού αιθυλενιούχο-προπυλενιούχο ελαστικού (EPR) που αντέχει συνεχώς σε 90°C.

Πίνακας 2-1

Μονωτικά καλωδίων MT	Συνεχώς επιτρεπόμενες θερμοκρασίες σε °C	Βραχυχρόνια (5 sec) επιτρεπόμενες θερμοκρασίες σε °C
PVC, V, (Y) μέχρι 6kV/10kV	70	170
Αιθυλενιούχο προπυλαινιούχο ελαστικό EPR, B2, (3G)	90	250
XLPE (2X) μέχρι 86/150kV)	90	250

2.3.4 Μανδύας (ή μεταλλικός μανδύας ή μεταλλική θωράκιση ή ηλεκτρική θωράκιση)

Τα καλώδια μέσης τάσης περιβάλλονται από ένα γειωμένο αγωγό, σκοπός του οποίου είναι να απομονωθούν οι φέροντες τάση αγωγοί, έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος να τεθούν υπό τάση τα περί το καλώδιο τμήματα της εγκατάστασης. Επίσης μέσω των γειωμένων αγωγών ρέουν τα ρεύματα (τα χωρητικά ή των βραχυκυκλωμάτων) δια μέσου μικρής αντίστασης και κατά τρόπο ελεγχόμενο. Ο αγωγός αυτός έχει συχνά και θέση προστατευτικού στρώματος κατά της εισβολής της υγρασίας ή άλλων χημικών επιδράσεων από έξω προς τη μόνωση.

Ο μεταλλικός μανδύας κατασκευάζεται από **μόλυβδο** ή **αλουμίνιο**. Στην τελευταία περίπτωση το καλώδιο αποκτά και μηχανική αντοχή έναντι εξωτερικών αιτιών, την οποία δεν έχει ο μόλυβδος. Ο μόλυβδος είναι εύκαμπτος, δεν επιτρέπει τη διείσδυση υγρασίας και αντέχει σε χημικές επιδράσεις του εδάφους. Μειονέκτημά του είναι ότι δεν αντέχει σε κραδασμούς, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών. Το αλουμίνιο έχει αυξημένη αντοχή στους κραδασμούς, υψηλότερη μηχανική αντοχή και αγωγιμότητα. Μειονέκτημά του είναι ότι δεν είναι εύκαμπτο και η ευαισθησία του στη διάβρωση. Σε καλώδια με πλαστικές μονώσεις ο αγωγός γης είναι από **συρματίδια χάλκινα** πλεγμένα ή από ταινίες χάλκινες με πρόσθετες διασταυρούμενες ταινίες για τη βελτίωση της αγωγιμότητας σε όλες τις κατευθύνσεις.

Οι μεταλλικοί μανδύες των καλωδίων γειώνονται στο ένα τουλάχιστον άκρο τους, για να αποφευχθούν ηλεκτρικές διασπάσεις σε περίπτωση σφαλμάτων και για

να μην υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης τάσης ως προς γη υπό κανονική λειτουργία. Η πιο συνηθισμένη πρακτική είναι οι μεταλλικοί μανδύες να γειώνονται και στα δύο άκρα τους και να βραχυκυκλώνονται. Στην περίπτωση αυτή επάγονται δινορρέυματα στους μανδύες που προέρχονται από το πεδίο των ρευμάτων των φορτίων, δημιουργώντας έτσι πρόσθετες απώλειες μανδύα, που μπορούν να μειωθούν βάζοντας σύνθετες αντιστάσεις μεταξύ των μανδύων. Επίσης χρησιμοποιείται και η τεχνική διασταύρωσης των μεταλλικών μανδύων (Cross Bonding), όπου ο μεταλλικός μανδύας κάθε μονοπολικού καλωδίου χωρίζεται σε τρία μέρη (ή πολ/σια του τρία) που είναι μονωμένα μεταξύ τους με κατάλληλες μούφες. Οι επιμέρους μανδύες βραχυκυκλώνονται χιαστί, ώστε να έχουμε αθροιστικά μηδενική ροή στους βρόχους που δημιουργούνται από τους μανδύες. [10] [11] [13] [14]

2.3.5 Ζώνη μηχανικής ενίσχυσης

Τα καλώδια μπορεί να καταπονούνται σε ειδικές περιπτώσεις μηχανικά και να καταστραφούν αν δεν έχουν κατάλληλη μηχανική ενίσχυση. Οι καταπονήσεις εμφανίζονται κυρίως κατά τη μεταφορά, την εγκατάσταση και λειτουργία :

- όταν τραβιέται το καλώδιο από μηχανές έλξης μέσα σε σωλήνες ή χαντάκια σε μεγάλα μήκη (>20m). Το καλώδιο για να περάσει μέσα από ένα σωλήνα χρειάζεται μία δύναμη εφελκυσμού ανάλογη με το μήκος, για να υπερνικηθεί η τριβή.
- όταν ποντίζεται στη θάλασσα σε μεγάλα βάθη,
- όταν αναρτάται σε μεγάλες αποστάσεις.

Σε όλες τις περιπτώσεις πρέπει να εξασφαλιστεί από τον κατασκευαστή ότι το καλώδιο είναι κατάλληλο για τέτοιες καταπονήσεις. Συνήθως για καλώδια μόνιμης εγκατάστασης επιτυγχάνεται μηχανική προστασία με **χαλύβδινες ταινίες**, ή, σε καλώδια που ποντίζονται, με **χαλύβδινα σύρματα**. Οι χαλύβδινες ταινίες τοποθετούνται πάνω από το μανδύα, έχουν μερικά εκατοστά πλάτος, είναι τυλιγμένες αντίστροφα η μία ως προς την άλλη και επικαλύπτει η μία τα κενά της άλλης. Το πάχος τους εκλέγεται ανάλογα με τη διάμετρό του καλωδίου και είναι της τάξης του 0,1-1mm. Τα καλώδια με πλαστική μόνωση και τα καλώδια με μανδύες από αλουμίνιο, σε αντιδιαστολή προς τα καλώδια με μόνωση χαρτιού, είναι συνήθως ανθεκτικά και ενισχύονται μόνο για την περίπτωση υψηλών καταπονήσεων. Τέλος, μεταξύ της ενίσχυσης και του μολύβδινου εξωτερικού αγωγού τοποθετούνται στρώματα από πλαστικές ταινίες και ίνες με πίσσα, ώστε να μην πληγώνεται ο μανδύας του καλωδίου από τα χαλύβδινα σύρματα της ενίσχυσης. [10] [15]

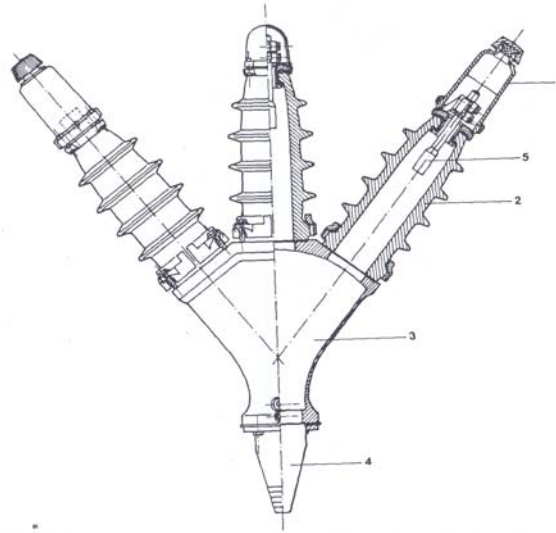
2.3.6 Εξωτερικό προστατευτικό στρώμα (ή εξωτερικός μανδύας)

Το καλώδιο, ο μεταλλικός του μανδύας και η μηχανική ενίσχυση πρέπει να προστατευθούν κατά της διάβρωσης, κατά των χημικών επιδράσεων και κατά της διείδυσης υγρασίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται στρώματα από **συνθετικά υλικά ή ίνες εμποτισμένες με πίσσα**. Σε καλώδια με μηχανική ενίσχυση υπάρχουν στρώματα προστατευτικά μεταξύ μεταλλικού μανδύα και μηχανικής ενίσχυσης και επιπρόσθετα στρώματα έξω από τη μηχανική ενίσχυση. Όσον αφορά την προστασία με ίνες εμποτισμένες με πίσσα, οι ίνες είναι φυτικές (γιούτα) ή υαλοίνες ή συνθετικές ίνες, ενώ μεταξύ τους συνήθως υπάρχουν πλαστικές ταινίες

για να δημιουργούνται φράγματα στην υγρασία. Το καλώδιο στην περίπτωση αυτή επικαλύπτεται με σκόνη κιμωλία ή με τάλκ για να μην κολλάει πάνω στο τύμπανο που ευρίσκεται κατά τη μεταφορά του και επίσης για να μη δυσχεραίνεται η εγκατάστασή του. Σε καλώδια με ηλεκτρική θωράκιση από αλουμίνιο ή χάλυβα γίνεται χρήση προστατευτικών στρωμάτων από **PVC** ή **πολυαιθυλένιο**. Οι μεταλλικοί μανδύες περιβάλλονται κατ' αρχήν με αυτοβουλκανιζόμενες, αυτοκόλλητες ταινίες μερικών mm πάχους και ακολούθως συμπιέζεται πάνω τους ένας μανδύας χωρίς ραφή, από PVC ή πολυαιθυλένιο, πάχους 4-6mm. [10] [11]

2.3.7 Ακροκιβώτια (ακροκεφαλές)

Κατά την κατασκευή ενός καλωδίου πρέπει να καταβάλλεται μεγάλη φροντίδα, ώστε η μόνωση να είναι τέλεια σε όλο το μήκος του. Η ίδια φροντίδα πρέπει να καταβληθεί κατά την κατασκευή των συνδέσεων των τμημάτων των καλωδίων μεταξύ τους, κατά την εγκατάσταση της καλωδιακής γραμμής, ώστε να εξασφαλισθεί η αποφυγή ασθενών σημείων στο εσωτερικών των συνδέσεων, τα οποία θα ήταν δυνατό να προκαλέσουν βλάβη της γραμμής κατά τη λειτουργία της. Το ίδιο ισχύει και για τους τερματισμούς των καλωδίων, δηλαδή στα άκρα όπου πρέπει να γίνει η σύνδεση με τις εγκαταστάσεις που τροφοδοτεί το καλώδιο ή με εγκαταστάσεις από τις οποίες τροφοδοτείται. Οι ακροκεφαλές στη ΜΤ προσδίνουν ηλεκτρική αντοχή στην άκρη του καλωδίου και απαγορεύουν την είσοδο υγρασίας, νερού (π.χ. από βροχή) και ρύπων της ατμόσφαιρας στο καλώδιο. Αποτελούνται από ελαστικό σιλικόνης για εσωτερικούς χώρους, από πορσελάνη για εξωτερικούς χώρους ή από ρητίνες για εσωτερικούς ή και εξωτερικούς χώρους. [14]



Σχ. 2-4 : Ακροκεφαλή λαδιού ΜΤ 20kV, χωρίς καλώδιο : 1) γυάλινο δοχείο για να βλέπει κανείς τη στάθμη του λαδιού, 2) μονωτήρας πορσελάνης, 3) χυτοσιδερένιο δοχείο διανομής των φάσεων, 4) κώνος εισόδου του καλωδίου στην ακροκεφαλή, 5) ηλεκτρόδιο σύνδεσης.

Τα ακροκιβώτια αποτελούνται συνήθως από μονωτήρες διελεύσεως από πορσελάνη, ένα για κάθε αγωγό, οι οποίοι καλύπτουν τα άκρα του καλωδίου και εξασφαλίζουν αφ' ενός τη μόνωση των αγωγών οι οποίοι εισέρχονται ελαιοστεγώς

στο εσωτερικό των μονωτήρων αυτών, αφ' ετέρου την ηλεκτρική συνέχεια του κυκλώματος από το ελεύθερο άκρο τους. Στη βάση του ακροκιβωτίου το καλώδιο απογυμνώνεται κατά την είσοδό του στο ακροκιβώτιο από το εξωτερικό περίβλημα και τη μηχανική ενίσχυση και ο μανδύας του στη θέση εκείνη συγκολλάται στο ακροκιβώτιο. Ο μανδύας αφαιρείται από το τμήμα του καλωδίου που βρίσκεται μέσα στο ακροκιβώτιο και από το σημείο διακοπής του μανδύα αρχίζει η διαμόρφωση της μονώσεως του άκρου του καλωδίου, έτσι ώστε να αποφεύγονται αυξημένες πεδιακές εντάσεις και επικίνδυνες διηλεκτρικές καταπονήσεις αυτής. Η μόνωση αυτή βρίσκεται σε περιβάλλον λαδιού, το οποίο γεμίζει όλο το εσωτερικό του ακροκιβωτίου προς ενίσχυση της μονώσεως. [10] [11]

2.3.8 Σύνδεσμοι ή μούφες

Οι σύνδεσμοι ή μούφες χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν καλώδια ή και να γίνονται διακλαδώσεις. Οι μούφες βρίσκονται ενταφιασμένες μαζί με το καλώδιο και πρέπει να είναι σε θέση να αντέχουν στις επιδράσεις του εδάφους και να εξασφαλίζουν στεγανότητα στην είσοδο υγρασίας ή νερού και αντοχή στην τάση. Οι μούφες, αν είναι μεταλλικές, συνδέονται με το γειωμένο αγωγό, οπότε λειτουργούν και σαν πρόσθετο ηλεκτρόδιο γείωσης.

Τα δύο άκρα των καλωδίων, τα οποία πρόκειται να ενωθούν με το σύνδεσμο, εισέρχονται και από τις δύο πλευρές με το μολύβδινο μανδύα τους. Ο τελευταίος συγκολλάται στην είσοδο με το περίβλημα του συνδέσμου, το οποίο είναι δυνατόν να αποτελείται από μόλυβδο ή χαλκό και το οποίο αποτελεί κατά κάποιο τρόπο τη συνέχεια του μανδύα. Τα καλώδια απογυμνώνονται σταδιακά μέχρι το κέντρο του συνδέσμου όπου αποκαλύπτονται τα άκρα των αγωγών, τα οποία συνενώνονται μεταξύ τους μέσω κοίλου κυλινδρικού στοιχείου, με το οποίο συγκολλώνται ή συμπιέζονται. Στη συνέχεια αποκαθίσταται η μόνωση του καλωδίου στο εσωτερικό του συνδέσμου, η οποία διαμορφώνεται κατάλληλα ώστε να ευνοεί την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Συνήθως ο σύνδεσμος μετά την κατασκευή του περιβάλλεται με ένα εξωτερικό κιβώτιο χυτοσίδηρο, το οποίο του παρέχει μηχανική προστασία, αποτελώντας τη συνέχεια της μηχανικής ενίσχυσης του καλωδίου στη θέση του συνδέσμου. Στη μέση τάση χρησιμοποιούνται επίσης, σε πλαστικά καλώδια, ρητίνες σα μόνωση μούφών. Δηλαδή, γίνεται η σύνδεση και ακολούθως εκχύονται οι ρητίνες σε ειδικά καλούπια που περιβάλλουν τον σύνδεσμο, όπου γίνεται η στερεοποίηση. [10] [11] [15]

2.3.9 Σύστημα επιβολής και ελέγχου πίεσης

Σε ορισμένα καλώδια επιβάλλονται πιέσεις στο διηλεκτρικό για τη βελτίωση της μονωτικής ικανότητας. Σαν μέσο μετάδοσης της πίεσης χρησιμοποιείται λεπτόρρευστο λάδι ή αέριο, π.χ άζωτο (N_2). Σε αυτές τις περιπτώσεις το καλώδιο βρίσκεται σε ένα χαλύβδινο, άκαμπτο σωλήνα. Αφού εγκατασταθεί ο σωλήνας περνιέται το καλώδιο μέσα στο σωλήνα. Η διατήρηση της πίεσης σε καλώδια γίνεται με δοχεία διαστολής σε συνδυασμό με φιάλη αερίου αζώτου ρυθμιζόμενης πίεσης. [10]

2.3.10 Σύστημα ψύξης καλωδίων με νερό ή λάδι

Μια αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος σε καλώδια μπορεί να επιτευχθεί με κατευθείαν ψύξη του αγωγού με νερό. Το καλώδιο έχει στον άξονά του ένα κανάλι από όπου περνά το νερό που ανακυκλώνεται, αφού διοχετευθεί μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας. Το νερό είναι απιονισμένο. Αντί για νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μονωτικό λάδι με ανάλογο ψυκτικό κύκλωμα. Εκτός της κατευθείαν ψύξης μπορεί να εφαρμοστεί και η έμμεση ψύξη, όπου ψύχεται ο μανδύας. Δίπλα από το καλώδιο τοποθετούνται σωλήνες με νερό υπό κυκλοφορία. Το καλώδιο τοποθετείται σε έναν αμιαντοσωλήνα με ροή νερού, οπότε ψύχεται ο μανδύας του. Το καλώδιο μπορεί να τοποθετηθεί και σε ένα ανοιχτό αυλάκι με νερό. [10]

2.4 Τύποι καλωδίων μέσης τάσης

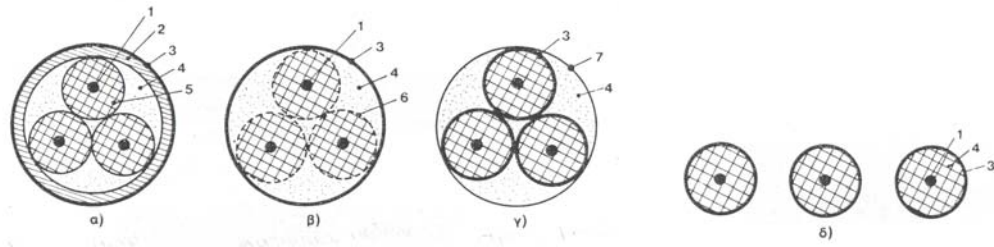
Τα καλώδια ΜΤ μπορεί να είναι μονοπολικά (μονοφασικά) ή τριπολικά (τριφασικά). Στα μονοπολικά καλώδια κάθε μια φάση με τον μανδύα της είναι αυτόνομη, όπου τα τρία καλώδια που σχηματίζουν ένα τριφασικό σύστημα μπορεί να είναι συνεστραμμένα μεταξύ τους, ή τρία καλώδια μπορεί να εγκαθίστανται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Η κατασκευή μονοπολικών συναντάται συνήθως στα πλαστικά καλώδια, όπου μια τριφασική κατασκευή θα οδηγούσε σε δυσκαμψία. Επίσης έχουμε το πλεονέκτημα ότι αν χαλάσει μια φάση αντικαθιστούμε μόνο αυτή τη φάση. [10]

Τα τριπολικά καλώδια ΜΤ είναι δυνατό να έχουν ένα κοινό μανδύα ή τρεις μανδύες (ένα ανά φάση). Στην πρώτη περίπτωση πέρα από τη χωριστή μόνωση κάθε αγωγού υπάρχει και κοινή μόνωση, η οποία περιβάλλει και τους τρεις μονωμένους αγωγούς και επάνω στην οποία βρίσκεται ο κοινός μανδύας. Στα καλώδια τριών μανδυών κάθε αγωγός έχει τη δική του μόνωση και επάνω από αυτή το δικό του μανδύα. Ο τελευταίος τύπος προσφέρει καλύτερη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του καλωδίου, η οποία σε συνδυασμό και με ορισμένα πλεονεκτήματα κατασκευής και λειτουργίας έχει συντελέσει στην εξάπλωση της χρησιμοποιήσεως των καλωδίων τριών μανδυών κατά τα τελευταία χρόνια. Ενδιάμεσο τύπο αποτελούν τα καλώδια, τα οποία έχουν μεν κοινό μολύβδινο μανδύα, αλλά για την ομοιόμορφη κατανομή του πεδίου φέρουν επάνω από τη μόνωση κάθε φάσεως ένα λεπτό διάτρητο μεταλλικό διάφραγμα. Διακρίνουμε λοιπόν, ανάλογα με τη διάταξη της μόνωσης και του μανδύα τις εξής κατηγορίες : [10] [11]

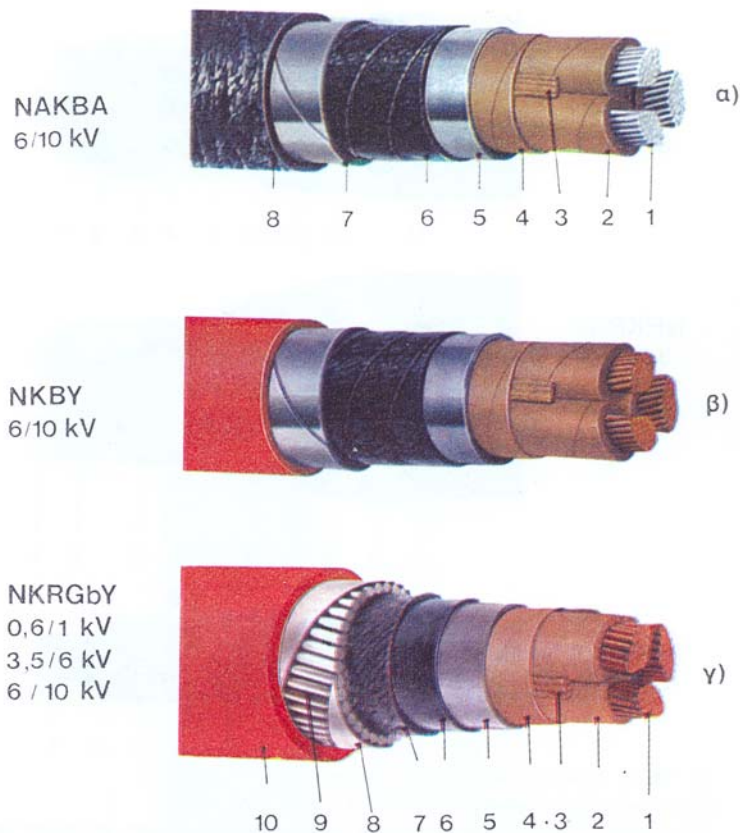
- **Περιζωμένα καλώδια**
- **Καλώδια ακτινικού πεδίου (Hochstadter)**
- **Καλώδια τριών μανδυών**

Οι παραπάνω κατηγορίες έχουν διαφορές στη μορφή του ηλεκτρικού πεδίου. Στα περιζωμένα καλώδια οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου δεν είναι όλες κάθετες στη μόνωση. Η μόνωση όμως δεν έχει τη μέγιστη αντοχή της σε πεδία με διεύθυνση λοξή στην επιφάνεια της μόνωσης. Για αυτό περιορίζεται η εφαρμογή των περιζωμένων καλωδίων σε τάσεις μέχρι 15 kV συνήθως. Αντίθετα, στα καλώδια τύπου Hochstadter, όπου τοποθετούμε σαν οδηγούς του ηλεκτρικού πεδίου λεπτά φύλλα αλουμινίου (φύλλα Hochstadter) , και στα καλώδια τύπου τριών μανδυών το πεδίο γύρω από κάθε αγωγό είναι ακτινικό. Στην περίπτωση αυτή η μόνωση

καταπονείται μόνο κατά την έννοια του πάχους της, η οποία είναι η κατεύθυνση της μέγιστης ηλεκτρικής αντοχής. [10] [12]



Σχήμα 2-5 : α) καλώδιο περιζωμένο, β) καλώδιο με τρεις μανδύες από αλουμινοφύλλα (Hochstadter), γ) καλώδιο τριών μανδύων, δ) τρία μονοπολικά καλώδια
1) αγωγός, 2) περίζωμα από μόνωση, 3) μανδύας, 4) συμπληρωματική μόνωση, 5) κυρίως μόνωση, 6) φύλλα Hochstadter, 7) προστατευτικό περίβλημα.



Σχ. 2-6 : Καλώδια χαρτιού - μάζας περιζωμένα

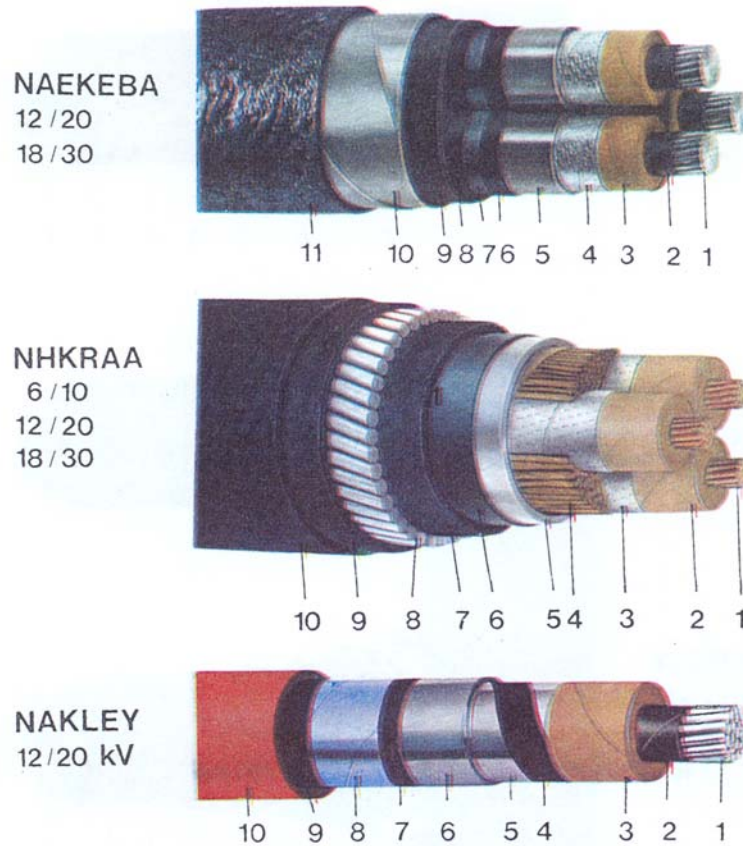
α.) NAKBA 6/10kV :

1) αγωγός, 2) μόνωση χαρτί μάζας, 3) γέμισμα κενού, 4) περίζωμα (ζώνη) από μονωτικό, 5) μόλυβδος, 6) ταινίες προστατευτικές, 7) ενίσχυση με χαλύβδινες ταινίες

β) NKBY 6/10kV : όπως στο α) αλλά με εξωτερικό προστατευτικό μανδύα PVC.

γ) NKRGBY 0,6/1kV...6/10kV, καλώδια MT με μηχανική ενίσχυση :

1) αγωγός, 2) μόνωση, 3) γέμισμα, 4) ζώνη από μονωτικό, 5) μόλυβδος, 6,7) προστατευτικά στρώματα για να μην πληγώνεται ο μόλυβδος, 8) ταινία χαλύβδινη, 9) σύρματα χαλύβδινα, 10) προστατευτικός μανδύας από PVC



Σχ.2- 7: Καλώδια MT ακτινικού πεδίου :

α.) Καλώδιο τριών μανδύων NAEKEBA 12/20...18/30kV :

1) αγωγός, 2) εξομαλυντικό ημιαγώγιμο στρώμα, 3) μόνωση, 4) ταινίες από αλουμίνιο, 5) μόλυβδος, 6,7,8,9) προστατευτικά στρώματα, 10) ταινία χαλύβδινη, 11) προστατευτικό στρώμα από εμπεποτισμένες ίνες

β.) Καλώδιο Hochstadter NHKRAA :

1) αγωγός, 2) μόνωση χαρτί-μάζα, 3) φύλλα αλουμινίου (Hochstadter), 4) γέμιση, 5) μόλυβδος, 6,7) προστατευτικά στρώματα, 8) ενίσχυση από χαλύβδινα σύρματα, 9,10) διπλό προστατευτικό στρώμα από εμπεποτισμένες ίνες.

γ.) Καλώδιο μονοπολικό NAKLEY 12/20kV :

1) αγωγός, 2) εξομαλυντικό ημιαγώγιμο στρώμα, 3) χαρτί-μάζα, 4) ημιαγώγιμο χαρτί, 5) ταινία συγκράτησης, 6) μόλυβδος, 7,8,9) προστατευτικά στρώματα από μάζα παχύρρευστη με ταινίες πλαστικού, 10) προστατευτικό στρώμα από PVC.

2.5 Αντίσταση καλωδίων

Η ωμική αντίσταση ενός καλωδίου εξαρτάται από :

- τα υλικά των αγωγών και της ενίσχυσης του καλωδίου
- τις γεωμετρικές διαστάσεις
- τα ρεύματα που διαρρέουν τους μανδύες.

Εάν : P_w οι απώλειες του καλωδίου / μονάδα μήκους

I το ρεύμα (rms) / φάση

R_w η συνολική ενεργός αντίσταση / φάση

τότε ισχύει :

$$P_w = R_w I^2 \text{ (Ισχύς / φάση)} \quad (2.1)$$

Οι απώλειες διακρίνονται σε απώλειες αγωγών (P_L) και απώλειες μανδύα (P_M). Ισχύει

$$P_w = P_L + P_M = (R_L + R_M)I^2 \quad (2.2)$$

Αντίσταση αγωγού

Εάν η αντίσταση του αγωγού στο συνεχές ρεύμα στους 20°C είναι R_{20} , τότε η αντίσταση συνεχούς ρεύματος στη θερμοκρασία λειτουργίας θ είναι :

$$R_\theta = R_{20} \{1 + \alpha(\theta - 20)\} \quad (2.3)$$

όπου α ο θερμοκρασιακός συντελεστής του υλικού.

Ωστόσο η αντίσταση του αγωγού R_L διαμορφώνεται και από το γεγονός ότι το ρεύμα είναι εναλλασσόμενο. Έτσι η συνολική αντίσταση του αγωγού μπορεί να γραφεί σα γινόμενο της αντίστασης στο συνεχές ρεύμα, διορθωμένη κατά δύο συντελεστές, σύμφωνα με τη σχέση :

$$R_L = R \cdot F_S \cdot F_P \quad (2.4)$$

όπου οι συντελεστές F_S και F_P είναι μεγαλύτεροι της μονάδας και αντιστοιχούν στο επιδερμικό φαινόμενο (Skin Effect) και στο φαινόμενο γεινίασης (Proximity Effect). Συνήθως το γινόμενο $F_S \cdot F_P$ δεν υπερβαίνει το 1,05, δηλαδή η συνολική επαύξηση είναι περίπου 5%. [15]

Αντίσταση μανδύα

Στους μανδύες επάγονται ρεύματα, τα οποία είναι είτε δινορρέυματα είτε συνολικά ρεύματα που ρέουν κατά μήκος των μανδύων. Οι απώλειες ισχύος λόγω του μανδύα και της μηχανικής ενίσχυσης μπορούν να εκφραστούν είτε σε συνάρτηση του τετραγώνου του ρεύματος είτε σε συνάρτηση των απωλειών του αγωγού :

$$P_M = R_M I^2 = P_L (\lambda_M + \lambda_B) \quad (2.5)$$

όπου $P_L \lambda_M$ οι απώλειες που οφείλονται στο μανδύα και $P_L \lambda_B$ οι απώλειες που οφείλονται στη μηχανική ενίσχυση. [10]

2.6 Αυτεπαγωγή καλωδίων

Η αυτεπαγωγή λειτουργίας των καλωδίων εξαρτάται από το εάν οι μανδύες φέρουν ρεύμα. Χωρίς την επίδραση των μανδύων οι αυτεπαγωγές των καλωδίων υπολογίζονται, ανάλογα με τη διάταξη, σύμφωνα με τα παρακάτω : [10] [16]

- Επίπεδη διάταξη :

$$L' = \frac{\mu_o}{2\pi} \left(\ln \frac{a}{r} + \frac{1}{4} \right) = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{a}{\rho} \quad (2.6)$$

$$\rho = 0,779r, \mu_o = 4\pi 10^{-4} \text{ H/km}$$

- Τριγωνική διάταξη :

$$L_R' = L_S' = L_T' = L' = \frac{\mu_o}{2\pi} \left(\ln \frac{a}{r} + \frac{1}{4} \right) \quad (2.7)$$

Εάν οι μανδύες φέρουν ρεύμα τότε η αυτεπαγωγή μειώνεται, διότι τα ρεύματα των μανδύων μειώνουν τη ροή. Για τις αυτεπαγωγές λειτουργίας του μανδύα ισχύουν οι παρακάτω προσεγγιστικοί τύποι :

$$X_M = \omega \frac{\mu_o}{2\pi} \ln\left(\frac{a}{D_M \sqrt{2}}\right) \text{ για τριγωνική διάταξη} \quad (2.8)$$

$$X_M = \omega \frac{\mu_o}{2\pi} \ln\left(\frac{a\sqrt[3]{2}}{D_M / 2}\right) \text{ για επίπεδη διάταξη} \quad (2.9)$$

D_M : διάμετρος μανδύων

a : αποστάσεις των κέντρων των μανδύων

Για τη συνολική αυτεπαγωγή του καλωδίου ισχύει :

$$X_{\text{καλωδίου}} = X_{\text{αγωγού}} - \Delta X \quad (2.10)$$

όπου

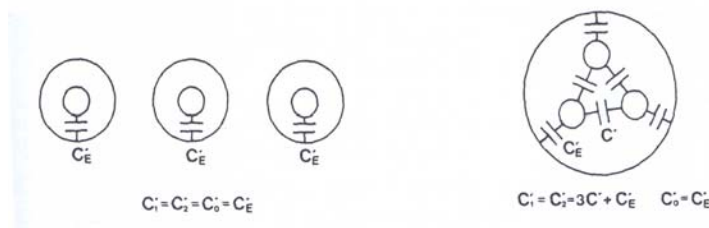
$$\Delta X = \frac{X_M}{1 + (R_M / X_M)^2} \quad (2.11)$$

2.7 Χωρητικότητες καλωδίων

Στα καλώδια οι χωρητικότητες μεταξύ των αγωγών είναι πολύ μεγαλύτερες απ' ό τι σε εναέριες γραμμές, επειδή οι αποστάσεις είναι μικρές και η διηλεκτρική σταθερά είναι 2,5-3,5 φορές μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Τυπικές τιμές χωρητικότητας καλωδίων είναι 0,1-1,2μF/km.

Στα τριφασικά περιζωμένα καλώδια διακρίνουμε τη χωρητικότητα μεταξύ αγωγού-αγωγού (C') και τη χωρητικότητα μεταξύ αγωγού-γης (C_E'), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Για να βρούμε την ισοδύναμη φασική χωρητικότητα αλλάζουμε τις χωρητικότητες C' που συνδέονται κατά τρίγωνο σε ισοδύναμη συνδεσμολογία αστέρα, καταλήγοντας στη σχέση : [14]

$$C_n' = 3C' + C_E' \quad (2.12)$$



Σχ.2-8 : Χωρητικότητες καλωδίων : α) τριφασικό σύστημα μονοπολικών καλωδίων β) περιζωμένα καλώδια

Στα μονοφασικά καλώδια η χωρητικότητα μεταξύ αγωγού και μανδύα είναι :

$$C_E' = 2\pi\epsilon_r\epsilon_o / \ln(r_M/r_L) \quad (2.13)$$

(Χωρητικότητα καλωδίων ακτινικού πεδίου, μονοπολικών και Hochstadter)

όπου r_M , r_L οι ακτίνες εσωτερικά του μανδύα και εξωτερικά του αγωγού, ϵ_r η σχετική διηλεκτρική σταθερά και $\epsilon_o = 8,86\text{pF/m}$. [16]

Το χωρητικό ρεύμα ανά km I_c και η άεργος ισχύς υπολογίζονται με τις σχέσεις :

$$I_C' = \frac{U \cdot C' \cdot \omega}{\sqrt{3}} \quad (2.14)$$

και

$$Q_C = U^2 \cdot C' \cdot \omega \quad (2.15)$$

2.8 Διηλεκτρικές απώλειες

Οι διηλεκτρικές απώλειες οφείλονται στις κινήσεις που εκτελούν τα δίπολα των μονωτικών, καθώς διεγείρονται από το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο που επάγεται μέσα στο καλώδιο. Οι διηλεκτρικές απώλειες είναι συνάρτηση του τετραγώνου της τάσης, της θερμοκρασίας και της κυκλικής συχνότητας, σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_d' = U^2 C' \omega \tan \delta \quad (2.16)$$

όπου P_d' η ανηγμένη τριφασική ισχύς σε W/m

U η πολική τάση

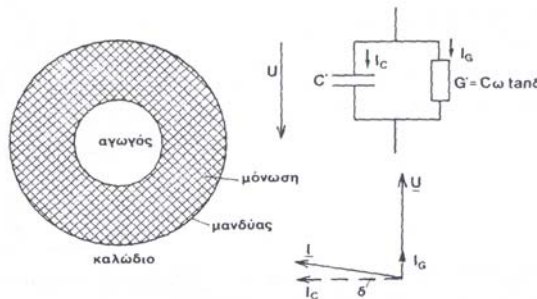
C' η ανηγμένη χωρητικότητα λειτουργίας 0,2-0,9nF/m

$\tan \delta$ ο συντελεστής απωλειών

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση οι διηλεκτρικές απώλειες μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχονται από ένα υποθετικό ρεύμα που διαρρέει μία αγωγιμότητα G' που βρίσκεται υπό τάση $U/\sqrt{3}$:

$$G' = C' \omega \tan \delta \quad (\Omega^{-1} m^{-1}) \quad (2.17)$$

Οι διηλεκτρικές απώλειες είναι σταθερές και υφίστανται όσο το καλώδιο βρίσκεται υπό τάση, ενώ οι απώλειες λόγω ρεύματος μεταβάλλονται από μηδέν μέχρι του μεγίστου τους ανάλογα με τη φόρτιση. [10]



Σχ.2-9 : Καλώδιο και ισοδύναμο κύκλωμα για τη μόνωσή του

2.9 Εγκατάσταση καλωδίων

Η εγκατάσταση των καλωδίων γίνεται : [15]

- εναέρια, με στήριξη ή όχι σε χαλύβδινο συρματόσχοινο
- στο έδαφος
- με ποντισμό στη θάλασσα
- πάνω στο δάπεδο με κατάλληλη μηχανική προστασία
- πάνω στον τοίχο με σωλήνες, στηρίγματα ή σχάρες

Η εγκατάσταση των καλωδίων εντός του εδάφους γίνεται σε διάφορα βάθη, τα οποία ποικίλλουν από 0,80m έως 1,50m ή και περισσότερο. Όσο υψηλότερη είναι η

τάση της γραμμής, τόσο μεγαλύτερο είναι συνήθως και το βάθος εγκατάστασης. Οι υπόγειες γραμμές εγκαθίστανται είτε κάτω από τα πεζοδρόμια είτε κάτω από τα οδοστρώματα. Στις ελληνικές πόλεις εφαρμόζεται κατά κανόνα η πρώτη από τις παραπάνω τεχνικές στις περιπτώσεις διαμορφωμένων οδών, στις οποίες υπάρχει επαρκής χώρος κάτω από τα πεζοδρόμια, τον οποίο μοιράζονται με τα υπόγεια δίκτυα άλλων κοινωφελών επιχειρήσεων. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να ελεγχθεί η αλληλεπίδραση των γραμμών αυτών. [11]

Το **χώμα** το οποίο τοποθετείται επάνω από τα καλώδια, μετά την εγκατάσταση είναι **λεπτόκοκκο και χωρίς πέτρες**, αφ' ενός για την καλύτερη απαγωγή της εκλυόμενης θερμότητας, της οφειλόμενης στις απώλειες της γραμμής, αφ' ετέρου δε για να αποφευχθεί τραυματισμός των καλωδίων από τις πέτρες. Επίσης για η μηχανική προστασία των καλωδίων τοποθετούνται επάνω από αυτά και σε όλο το μήκος της διαδρομής της γραμμής τούβλα ή επιμήκεις πλάκες συνήθως από σκυρόδεμα. Εκτός του ενταφιασμού όπου το καλώδιο βρίσκεται σε κατευθείαν επαφή με το χώμα, υπάρχουν και οι παρακάτω μέθοδοι τοποθέτησης καλωδίων στη γη : μέσα σε **κανάλια από μπετόν ή σωλήνες αμιαντοτσιμέντου ή χαλύβδινους**, ή μέσα σε **τούνελ** επισκέψημα. Κατά αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η εκσκαφή του δρόμου σε περίπτωση βλάβης ή άλλης εργασίας επί των καλωδίων, ενώ ταυτόχρονα παρέχεται ενισχυμένη μηχανική προστασία σε αυτά. Τα καλώδια κατά τη διέλευσή τους μέσω σωληνώσεων, οχετών ή σηράγγων, πρέπει να αερίζονται με φυσικό ή τεχνητό αερισμό, δεδομένου ότι η φυσική ψύξη τους σε περιβάλλον ακίνητου αέρα είναι ατελής. [11] [13]

Σε καλώδια που περιέχουν υγρές μονώσεις, κατά την εγκατάστασή τους σε χώρους με υψομετρικές διαφορές παρουσιάζεται – λόγω αυτής της υψομετρικής διαφοράς - διαφορά πίεσης, που μπορεί να επιφέρει μηχανική καταστροφή του μανδύα. Για το λόγο αυτό υπάρχει όριο στη διαφορά υψομέτρου για κάθε κατασκευή, που κυμαίνεται από 40m έως 200m (εάν θέλουμε να υπερβούμε αυτό το όριο πρέπει να εγκαταστήσουμε παγίδες πίεσης). Σε μεγάλες κλίσεις πρέπει να ληφθεί υπόψη και το βάρος του καλωδίου και να ενισχυθεί ενδεχομένως ο εξωτερικός οπλισμός για να μπορέσει το καλώδιο να φέρει το μηχανικό φορτίο. [10]

2.10 Πρότυπα – σημάνσεις, κώδικας καλωδίων

Τα πρότυπα που διέπουν τα καλώδια μπορεί να είναι διαφόρων τύπων.

- **Εθνικά, όχι αναγνωρισμένα από τη CENELEC πρότυπα**, φέρουν το χαρακτηριστικό κατά CENELEC “CC-N”.
- **Εθνικά, αναγνωρισμένα από την ευρωπαϊκή επιτροπή της CENELEC πρότυπα**, φέρουν το χαρακτηριστικό “A”. Αυτά είναι τεχνικά ισοδύναμα με εναρμονισμένα πρότυπα, δηλαδή συμφωνούν σε ουσιαστικά σημεία με τα πιο κάτω εναρμονισμένα πρότυπα.
- **Εναρμονισμένα πρότυπα**, φέρουν το χαρακτηριστικό “H”. Στην ουσία χρησιμοποιούνται από πολλές χώρες και περιγράφονται σε έγγραφα εναρμόνισης.
- **Πρότυπα της IEC**, είναι πρότυπα που εκδίδει η International Electrotechnical Commission.
- **Πρότυπα ενός κατασκευαστή**. Είναι πρότυπα που λόγω έλλειψης εθνικών ή άλλων προτύπων αναγκάστηκε ο κατασκευαστής να τα δημιουργήσει.

Μερικοί κανονισμοί που αφορούν συνήθη καλώδια ΜΤ είναι : ΕΛΟΤ 1099, IEC 502, VDE 0273, VDE 0271. Ουσιαστικά οι κανονισμοί του ΕΛΟΤ έχουν παρθεί από τους αντίστοιχους κανονισμούς IEC ή προέρχονται από έγγραφα εναρμόνισης, Harmonization Documents (HD) της CENELEC. Οι κανονισμοί προσδιορίζουν όλα τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, τους τρόπους δοκιμής και χρήσης τους, όπως :

- μείγματα ή υλικά που χρησιμοποιούνται σαν κύρια μονωτικά
- υλικά αγωγών
- μείγματα ή υλικά που χρησιμοποιούνται στο μανδύα
- διαστάσεις
- μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες
- χρώμα και τρόπος συμβολισμού και σήμανσης των καλωδίων (κωδικοί κλπ)
- προτεινόμενες χρήσεις, πεδία εφαρμογών
- φόρτιση ρεύματος
- δοκιμές

Καλώδια κατασκευασμένα κατά τους κανονισμούς εξασφαλίζουν μια ορισμένη ποιότητα και πρέπει οπωσδήποτε να προτιμούνται, από άποψη ποιότητας, άλλων, τα οποία δεν ακολουθούν κανονισμούς.

Οι κανονισμοί σύμφωνα με τους οποίους έχει κατασκευασθεί το καλώδιο είναι γραμμένοι ή ανάγλυφοι στο μανδύα. Επίσης σε ένα καλώδιο πρέπει να αναφέρεται ο κατασκευαστής. Στο καλώδιο χαρτιού εμποτισμένου τοποθετείται ταινία με το όνομα της εταιρίας που επαναλαμβάνεται ανά σταθερό μήκος. Σε καλώδια με πλαστική μόνωση υπάρχει μέσα στο καλώδιο ένα νήμα λεπτό με χαρακτηριστικό χρώμα που έχει κατοχυρωθεί στον κατασκευαστή του καλωδίου. Συνήθως όμως τυπώνεται το όνομα ή το κατατεθέν σήμα της εταιρίας πάνω στον εξωτερικό πλαστικό μανδύα του καλωδίου. [10]

Πίνακας 2-2

Γράμμα	Σημασία
N	Καλώδιο σύμφωνα με τους κανονισμούς VDE, NKBA
A	Αλουμίνιο σαν αγωγός, NAKBA
-	Χαλκός σαν αγωγός, λείπει το χαρακτηριστικό
-	Μόνωση χαρτιού, λείπει το χαρακτηριστικό
Y	Μόνωση PVC, NY Y
2Y	Μόνωση πολυαιθυλενίου, N2Y SY
2X	Μόνωση δικτυωμένου πολυαιθυλενίου, N2X SY
H	Καλώδιο τριφασικό με μανδύες από φύλλα αλουμινίου, NHKBA
E	Καλώδιο τριφασικό με τρεις μανδύες, NEKBA
K	Μανδύας από μόλυβδο NKBA
F	Ενίσχυση με χαλύβδινα σύρματα πλατιά NYFGbY
B	Ενίσχυση με χαλύβδινες ταινίες, NAKBA
S	Πλέγμα εξωτερικό, N2Y SY
A	Αντιδιαβρωτικό στρώμα γούτας και πίσσας, NKBA
Y	Αντιδιαβρωτικός μανδύας από PVC, NY Y
2Y	Αντιδιαβρωτικός μανδύας από πολυαιθυλένιο, N2X2Y

Η κατασκευή των καλωδίων χαρακτηρίζεται από μια σειρά γραμμάτων. Η σειρά των γραμμάτων αρχίζει από N, αν το καλώδιο είναι σύμφωνα με τους κανονισμούς VDE, αλλιώς λείπει το N. Τα επόμενα γράμματα χαρακτηρίζουν τα υλικά που

χρησιμοποιήθηκαν αρχίζοντας από το εσωτερικό του καλωδίου, δηλαδή τον αγωγό φάσης και πηγαίνοντας προς τα έξω, δηλ. προς το εξωτερικό προστατευτικό περίβλημα. Αν ο αγωγός είναι από χαλκό δεν χαρακτηρίζεται, δηλαδή αν λείπει το αντίστοιχο γράμμα, τότε υπονοείται χαλκός. Παρόμοια, αν η μόνωση δε χαρακτηρίζεται πρόκειται για εμπεποτισμένο χαρτί. Πέραν αυτών, η κατασκευή των καλωδίων χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των αγωγών επί τη διατομή τους σε mm² (π.χ. 3x95), χαρακτηριστικά μικρά γράμματα για το είδος και τη μορφή των αγωγών, τη διατομή του μανδύα σε mm² και τις ονομαστικές τάσεις σε kV (φασική / πολική). [15]

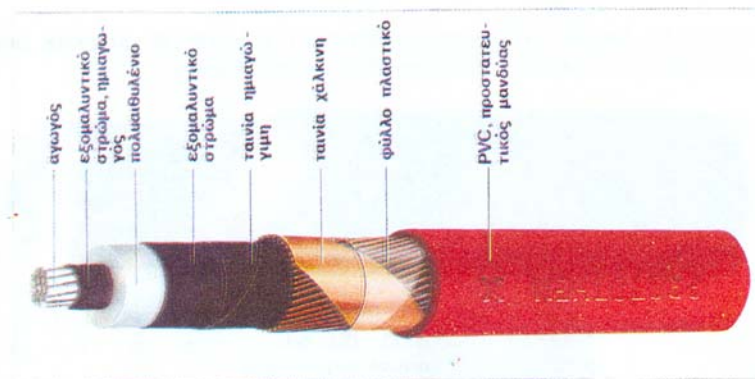
Πίνακας 2-3

Γράμμα	Σημασία
r	πλήρης στρογγυλή διατομή
s	πλήρης κυκλικός τομέας
rm	πολύκλωνη στρογγυλή διατομή
rm/v	πολύκλωνη στρογγυλή συμπιεσμένη διατομή
sm	πολύκλωνος κυκλικός τομέας



N2XSY 6/10...18/30 συνεστρ. διαν. MT

α)



NA2SXY 12 / 20 kV

β)

Σχ. 2-10 : Καλώδια πλαστικά MT :

α.) Καλώδια πολυαιθυλενίου N2XSY 6/10kV...18/30kV, συνεστραμμένα μονοπολικά καλώδια.

β.) Καλώδιο μονοπολικό NA2SXY 12/20kV, με μόνωση από δικτυωμένο πολυαιθυλένιο



Σχ. 2-11 : Καλώδια MT με πλαστικές μονώσεις :

α.) Καλώδιο για βιομηχανικές εφαρμογές 6/10kV VDE0273, IEC 502

1) αγωγός αλουμινίου, 2) ημιαγώγιμο στρώμα, 3) μόνωση πολυαιθυλενίου, 4) ημιαγώγιμο στρώμα, 5) στρώμα προστατευτικό, 6) εξωτερικός αγωγός αποτελούμενος από συρματίδια και χάλκινη ταινία αντίστροφα τυλιγμένη

β.) καλώδιο PVC 6/10kV VDE 0273 για σταθμούς παραγωγής και υποσταθμούς

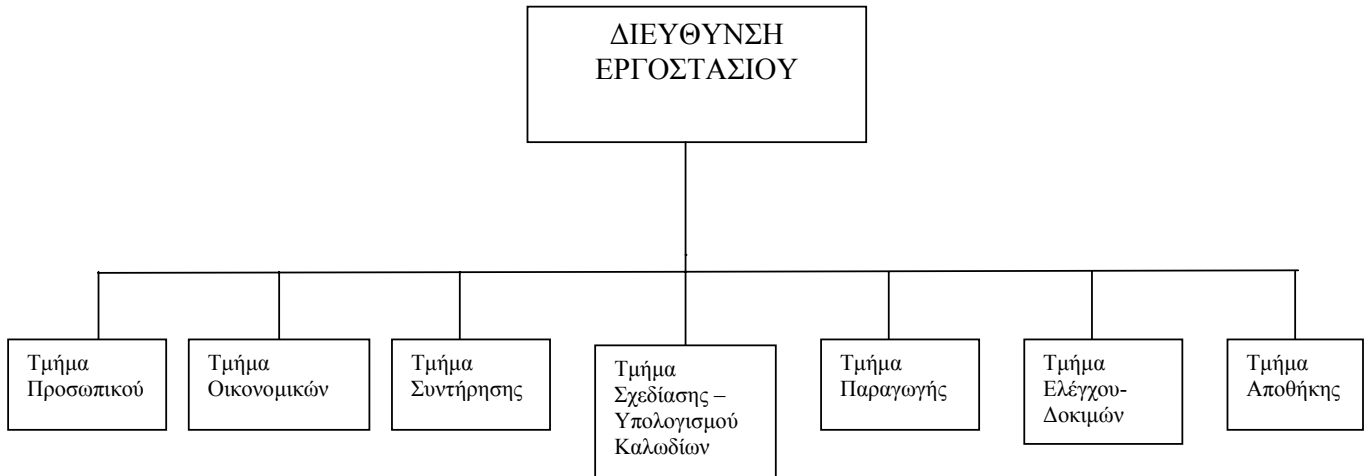


Σχ. 2-12 : Καλώδιο MT : Διακρίνονται ο πολύκλωνος αγωγός, το ημιαγώγιμο στρώμα του αγωγού, η μόνωση, το ημιαγώγιμο στρώμα της μόνωσης, η ηλεκτρική θωράκιση από συρματίδια και ταινίες χαλκού, και ο εξωτερικός προστατευτικός μανδύας. (Φωτογραφία από τον αιολικό σταθμό στα Δίδυμα Αργολίδος, Δεκέμβριος 2005)

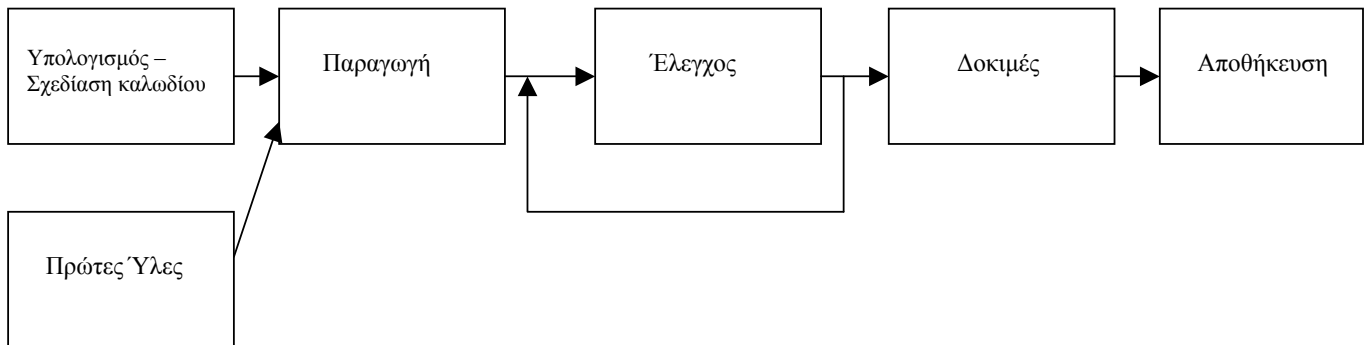
Κεφάλαιο 3

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

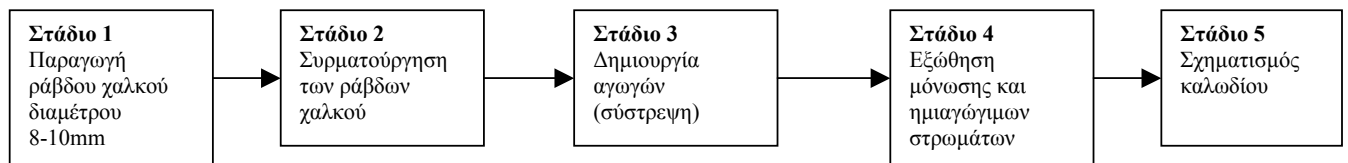
3.1 Τυπικό διάγραμμα λειτουργίας εργοστασίου παραγωγής καλωδίων



3.2 Τυπική διαδικασία παραγωγής καλωδίων



Παραγωγή καλωδίου



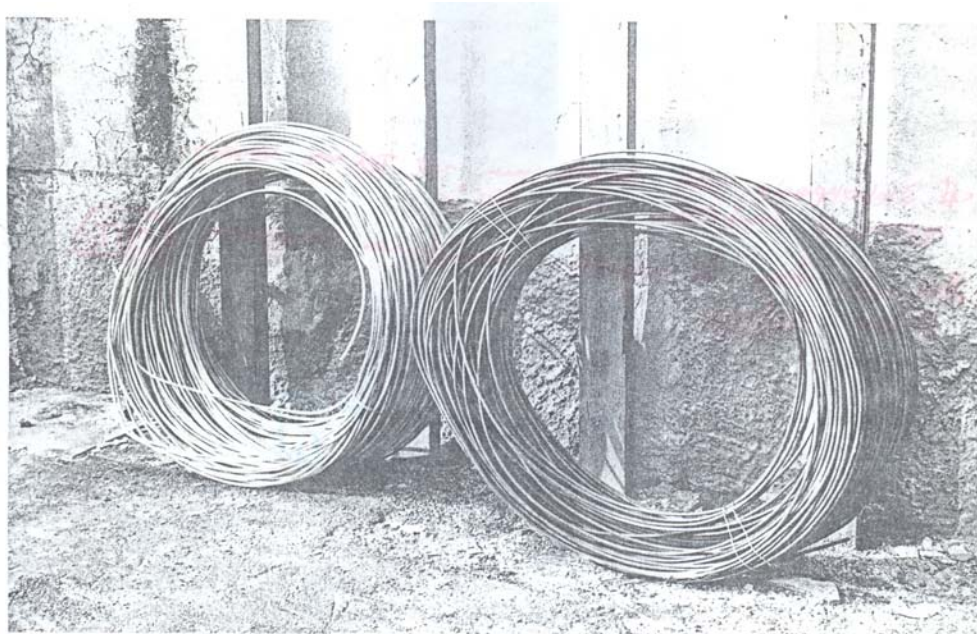
3.3 Στάδιο 1 : Παραγωγή ράβδου χαλκού

Η παραγωγή σύρματος χαλκού διαμέτρου 8mm ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία :

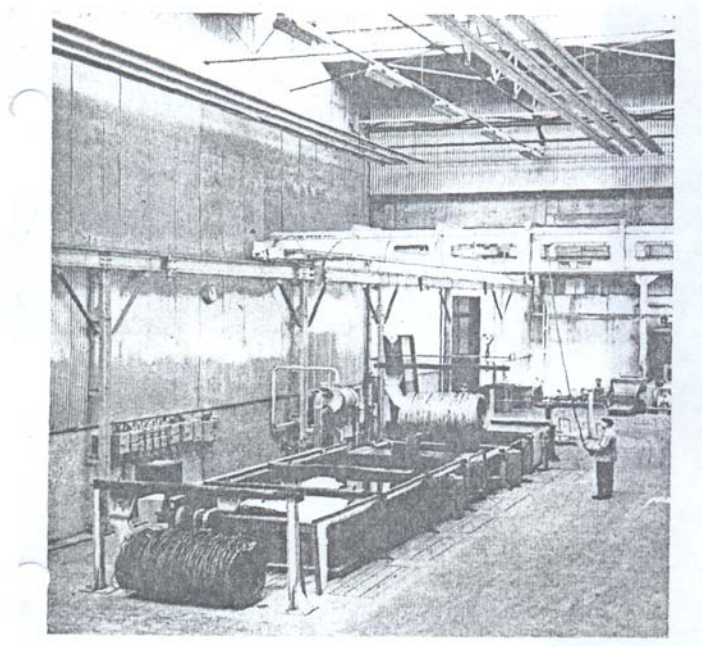
Τεμάχια τυποποιημένου χαλκού διαστάσεων 70x15x10cm θερμαίνονται σε κατάλληλους φούρνους μέχρι τη θερμοκρασία ελασματοποίησης. Στη συνέχεια μετά από αναγκαστική διαδοχική κύλιση μεταξύ κατάλληλα διαμορφωμένων επιφανειών (με αύλακες κατάλληλης μορφής και διαδοχικών διαστάσεων διατομής) και περιστρεφόμενων κυλίνδρων, παράγεται σύρμα διαμέτρου 8-10mm, διαμορφούμενο σε κουλούρα διαμέτρου 80-100cm.

Κατά την εν θερμώ κατεργασία του χαλκού δημιουργείται στην επιφάνεια του χαλκού μία λεπτή φλούδα (μαύρου χρώματος), η οποία σχηματίζεται από ένα εσωτερικό στρώμα οξειδίου του χαλκού (Cu_2O) χρώματος κόκκινου και ένα πιο λεπτό εξωτερικό στρώμα οξειδίου του χαλκού (CuO) χρώματος μαύρου. Η απομάκρυνση του οξειδίου του χαλκού είναι απαραίτητη , προς αποφυγή δυσμενών συνθηκών κατά τη συρματούργηση. Η απομάκρυνση γίνεται βυθίζοντας τις κουλούρες χαλκού διαμέτρου 8-10mm σε διάλυμα αποτελούμενο από τέσσερα μέρη νερού και ένα μέρος H_2SO_4 στους 50-60°C. Κατά τη διάρκεια της χημικής αυτής διαδικασίας, παρατηρείται αποκόλληση μικρών σωματιδίων οξειδίου χαλκού, που το διάλυμα καθαρισμού δεν απορροφά. Αυτά αιωρούνται στο διάλυμα και κατά την απομάκρυνση των συρμάτων από το διάλυμα επικολλούνται στην επιφάνειά τους. Για αυτό οι κουλούρες σύρματος χαλκού μετά την έξοδό τους από το διάλυμα πλένονται πολύ καλά με μεγάλη ποσότητα νερού. Εάν τα σωματίδια αυτά δεν απομακρυνθούν στο σύνολό τους παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της συρμάτωσης σα σκόνη, «λερώνοντας» το σύρμα και μολύνοντας το διάλυμα της συρμάτωσης. Η πλύση συντελεί επίσης και στην απομάκρυνση ιχνών οξειδίων στην επιφάνεια του σύρματος, με αποτέλεσμα να φθείρονται γρήγορα οι συρματομήτρες και κώνοι έλξης.

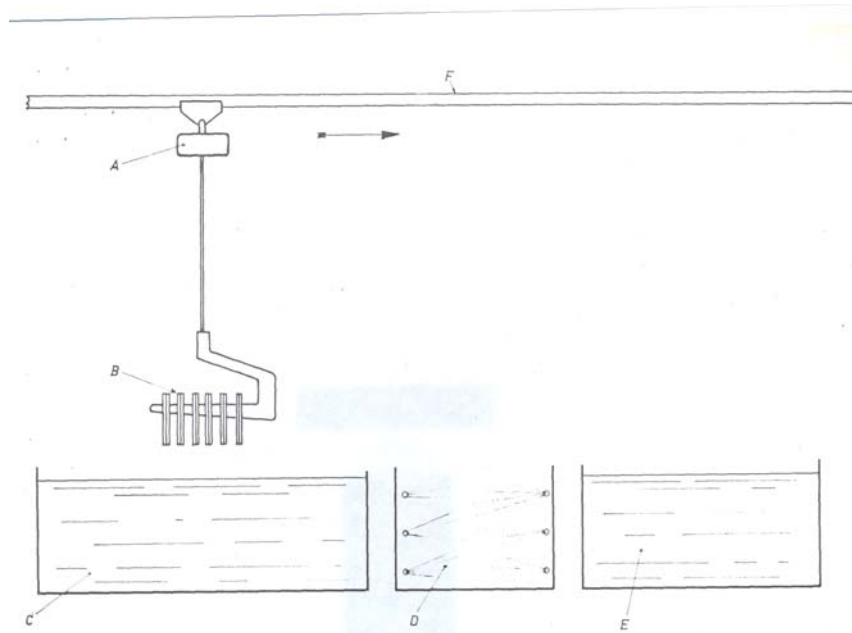
Το σύρμα χαλκού που έχει υποστεί την παραπάνω επεξεργασία παρουσιάζει επιφάνεια χρώματος καθαρού ρόδινου.



Σχ.3-1: Κουλούρες σύρματος 8mm. Δεξιά πριν την επεξεργασία και αριστερά μετά την επεξεργασία.



Σχ.3- 2: Εγκατάσταση επεξεργασίας σύρματος χαλκού



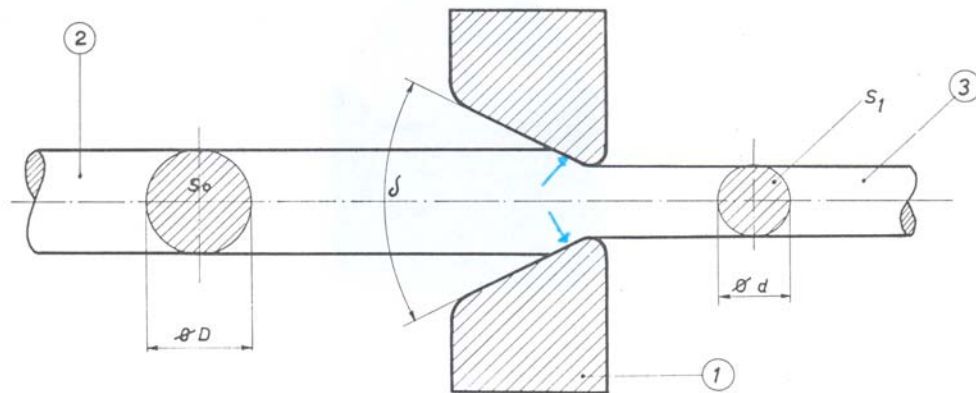
Σχ.3-3: Σχηματική διάταξης εμβάπτισης της κουλούρας χαλκού σε δεξαμενή με διάλυμα θειικού οξέως

3.4 Στάδιο 2 : Συρματούργηση

3.4.1 Διαδικασία

Η συρματούργηση (ή συρματοποίηση ή συρμάτωση) συνίσταται στο αναγκαστικό πέρασμα ενός σύρματος διαμέσου μιας οπής κατάλληλου τύπου και διατομής λίγο μικρότερης από εκείνη του προς συρματούργηση σύρματος. (Σχήμα) Πρόκειται για μια διαδικασία πλαστικής παραμόρφωσης εν ψυχρώ, που γίνεται με ολίσθηση μεταξύ δύο επιφανειών : της επιφάνειας του σύρματος και της επιφάνειας της μήτρας.

Κατά τη συρματούργηση το σύρμα διαμέτρου D αναγκάζεται να περάσει διαμέσου οπών, έτσι ώστε να μειωθεί η διάμετρος σε d . Η είσοδος της οπής έχει μια γωνία δ . Η ράβδος πιέζεται στις πλευρές αυτής της γωνίας συναντώντας τριβή, η τιμή της οποίας είναι ευθέως ανάλογη με την επιφάνεια επαφής. Αυξάνοντας τη γωνία δ μειώνονται οι δυνάμεις τριβής αλλά η πραγματική παραμόρφωση είναι πάντα διαφορετική από τη θεωρητική.



Σχ. 3- 4: Τυπικό σχήμα συρματούργησης

1.) μήτρα, 2.) σύρμα στην είσοδο διατομής S_0 , 3.) σύρμα στην έξοδο διατομής S_1 , δ η γωνία συρμάτωσης

Κατά τη διάρκεια της συρμάτωσης, λόγω της τριβής μεταξύ του σύρματος και της επιφάνειας της μήτρας, αναπτύσσεται θερμότητα, η οποία ανεβάζει αισθητά τη θερμοκρασία των επιφανειών του σύρματος και της μήτρας. Η θέρμανση των επιφανειών είναι στιγμιαία, καθόσον η ανάπτυξη της θερμοκρασίας γίνεται στο κλάσμα του χρόνου που χρειάζεται το μοναδικό στοιχείο του σύρματος για να περάσει τη μήτρα. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του σύρματος μειώνεται πολύ γρήγορα, αφού η θερμότητα μεταδίδεται εξ επαγωγής στο εσωτερικό του σύρματος και δια ακτινοβολίας στο περιβάλλον εργασίας. Η επιφάνεια της μήτρας αντιθέτως παραμένει στη μέγιστη θερμοκρασία, παρότι λιπαίνεται με ειδικό υγρό το οποίο ενεργεί και σαν ψυκτικό. Οι παράγοντες στους οποίους μπορούμε να παρέμβουμε για να μειωθεί η θέρμανση των επιφανειών της μήτρας είναι η φύση των επιφανειών επαφής μεταξύ σύρματος και μήτρας και ο συντελεστής τριβής.

3.4.2 Λίπανση

Σκοπός της λίπανσης είναι η ανάπτυξη συνεχούς μεμβράνης μεταξύ των επιφανειών, ώστε να αναπτύσσεται τριβή τύπου ρευστού, με τα εξής χαρακτηριστικά :

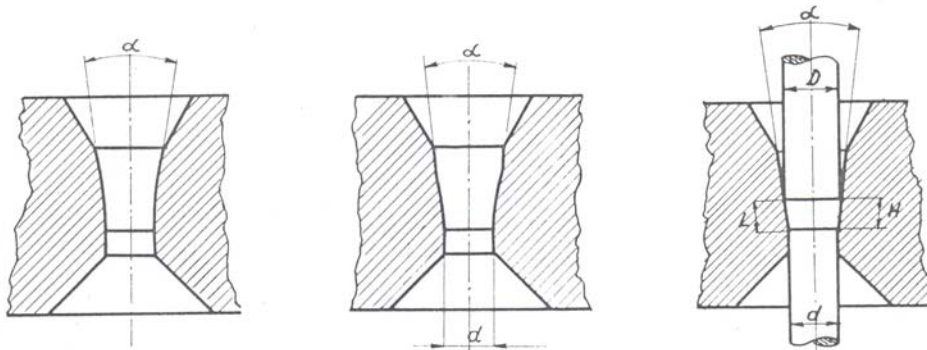
- Αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της συρμάτωσης
- Ψυκτικές ιδιότητες για την άμεση αποβολή θερμότητας
- Απουσία υπολειμμάτων άνθρακα στην επιφάνειες, ειδικά σε περιπτώσεις που το σύρμα θα υποβληθεί σε ανόπτυση

Η θερμοκρασία των λιπαντικών (γαλακτώματα λίπανσης) πρέπει να διατηρείται μεταξύ 40°C – 60°C. Κάτω από τους 40 °C η λίπανση γίνεται δυσχερής, διότι το γαλάκτωμα δεν έχει ικανή ρευστότητα για να καλύπτει πλήρως το σύρμα μέσα στη μήτρα. Πάνω από τους 60°C το γαλάκτωμα δεν έχει επαρκή λιπαντική και ψυκτική ικανότητα.

3.4.3 Μήτρα

Είναι το εργαλείο με το οποίο πραγματοποιείται η συρμάτωση και από αυτό εξαρτάται η επίτευξη καλού προϊόντος. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι η καρδιά της συρμάτωσης. Δεν είναι ικανοποιητικό να διαθέτουμε μόνο σύγχρονες μηχανές συρμάτωσης αλλά είναι απαραίτητο να διαθέτουμε πολύ καλές μήτρες.

Η μήτρα είναι ένα εργαλείο εφοδιασμένο με μια οπή κατάλληλης μορφής με διατομή μικρότερη από του διατομή του σύρματος προς συρμάτωση, διάμεσου της οποίας διέρχεται το υλικό για να μειωθεί στην επιθυμητή διατομή.



Σχ.3-5: Τομές διαφόρων μήτρων. Από αριστερά προς τα δεξιά υπό μορφή σάλπιγγας, καμπάνας και κώνου.

Στη μήτρα διακρίνουμε τα εξής βασικά στοιχεία :

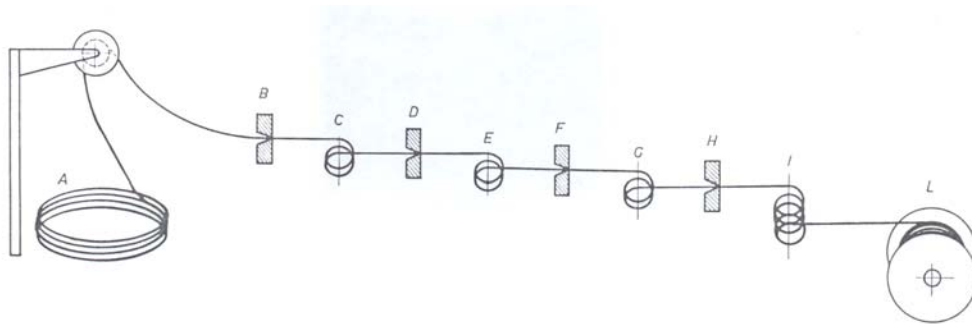
- Κώνος εισαγωγής : Οδηγεί το σύρμα μέχρι το σημείο στο οποίο αρχίζει να αλλάζει η διατομή. Επιπλέον επιτρέπει το λιπαντικό ρευστό να συνοδεύει το σύρμα στο εσωτερικό της μήτρας.
- Κώνοι εργασίας : Είναι η ζώνη όπου πραγματικά συντελείται η μείωση της διατομής του σύρματος. Εδώ το υλικό γλιστρά κατά μήκος των τοιχωμάτων ασκώντας πάνω τους μια μεγάλη ειδική πίεση. Σε αυτή τη ζώνη είναι αναγκαίο το λιπαντικό-ψυκτικό ρευστό να παρέμβει με όλα τα

χαρακτηριστικά ώστε να μειώσει στο ελάχιστο την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του σύρματος και τη επιφάνειας της μήτρας.

- Κύλινδρος : Είναι το μέρος της μήτρας όπου διαμορφώνεται η διάμετρος του σύρματος.
- Κώνοι εξόδου : Αυτή η ζώνη επιτρέπει την έξοδο του σύρματος, εντελώς καθαρό χωρίς επιφανειακές χαράξεις, τόσο στο σύρμα όσο και στην επιφάνεια της μήτρας.

3.4.4 Συρματοσυγκές μηχανές (τραβηχτικές)

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διάταξη μιας συρματοσυγκής μηχανής.



Σχ. 3-6 : Σχηματική διάταξη μηχανής συρμάτωσης

A. Κουλούρα του προς συρμάτωση χαλκού

B. Μήτρα εισαγωγής

C. Δακτύλιοι έλξης της πρώτης μήτρας (B)

D. Μήτρα ενδιάμεση

E. Δακτύλιος έλξης του της δεύτερης μήτρας (D)

F. Μήτρα ενδιάμεση

G. Δακτύλιος έλξης της τρίτης μήτρας (F)

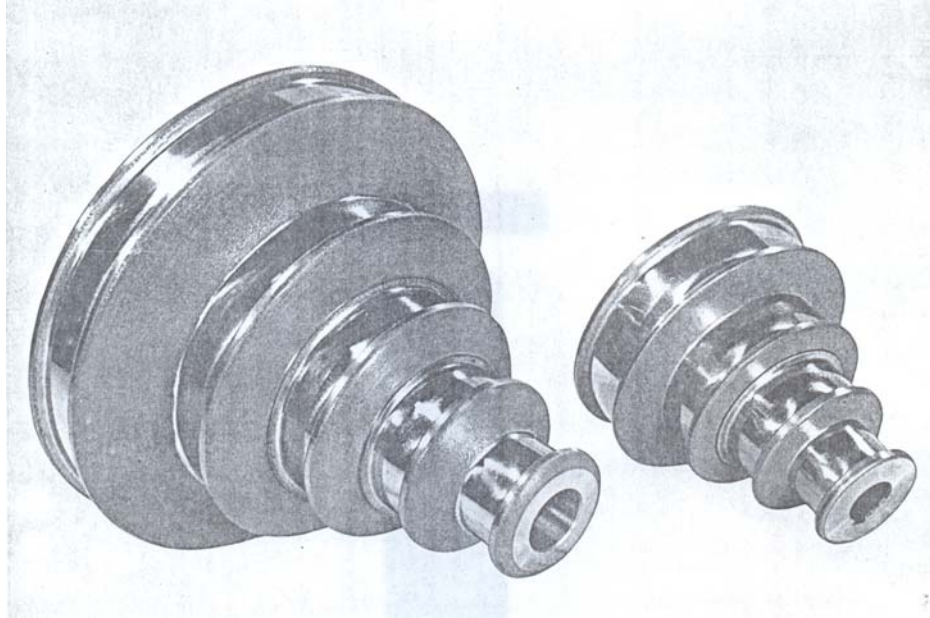
H. Μήτρα εξόδου

I. Δακτύλιος ή τύμπανο τελικής έλξης

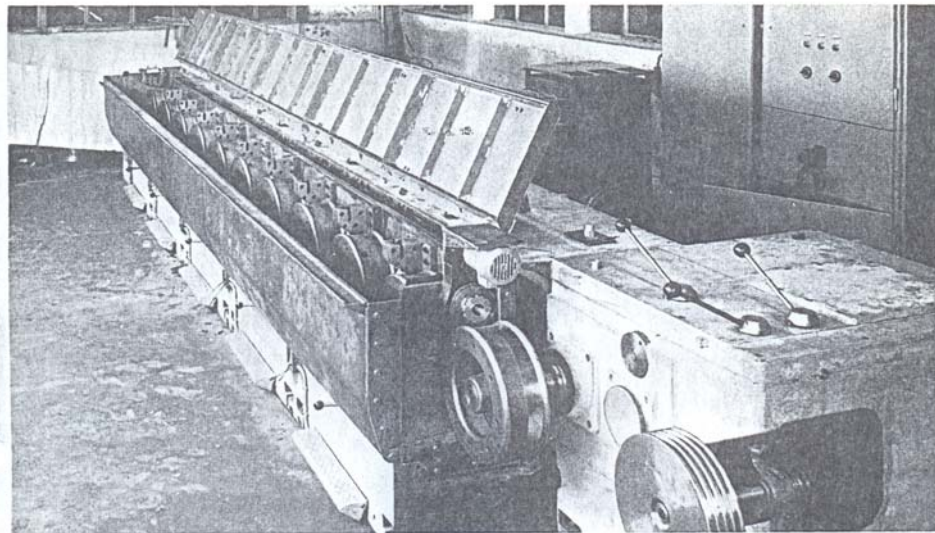
L. Τύμπανο περιέλιξης του σύρματος

Κατά τη διάρκεια της συρμάτωσης το σύρμα που εξέρχεται από τη μήτρα B έχει διάμετρο μεγαλύτερη από τη διάμετρο της μήτρας D. Η περιφερειακή ταχύτητα του δακτυλίου E είναι μεγαλύτερη από την περιφερειακή ταχύτητα του δακτυλίου C. Το ίδιο συμβαίνει και στα στάδια μεταξύ των μητρών D και F, F και H. Στο δακτύλιο C τυλίγονται δύο ή τρεις σπείρες του σύρματος, οι οποίες πρέπει να είναι τυλιγμένες γύρω από το δακτύλιο με ικανή τάση διαφορετικά θα ήταν αδύνατη η συρμάτωση μέσα από τη μήτρα B. Εάν όλοι οι δακτύλιοι έλξης τοποθετηθούν στη σειρά με τις ανάλογες μήτρες μία πίσω από την άλλη το μήκος της μηχανής θα ήταν πολύ μεγάλο. Τοποθετώντας τους δακτυλίους έλξης στον ίδιο άξονα και μεταβάλλοντας τις διαμέτρους σε συνάρτηση της αναγκαίας μείωσης της διατομής του σύρματος δημιουργείται ένας άξονας με πολλούς δακτυλίους σε άμεση επαφή μεταξύ τους σχηματίζοντας έτσι ένα κώνο κλιμακωτό ονομαζόμενος κώνος συρμάτωσης (βλ. Σχήμα 3-7). Από τη στιγμή που η γωνιακή ταχύτητα του κώνου είναι σταθερή οι δακτύλιοι με μικρότερη διάμετρο θα έχουν περιφερειακή ταχύτητα μικρότερη και θα τυλίγονται πάνω τους σύρματα μεγαλύτερης διαμέτρου. Αυξάνοντας η διάμετρος

των δακτυλίων και κατά συνέπεια η περιφερειακή ταχύτητα, η διάμετρος του σύρματος μειώνεται. Γενικά οι μηχανές είναι κατασκευασμένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν δύο κώνους τον ένα απέναντι από τον άλλον με τις μήτρες τοποθετημένες μεταξύ αυτών. Στις σύγχρονες μηχανές και οι δύο κώνοι είναι ενεργοί και το σύρμα συρματώνεται τόσο από την πλευρά τροφοδοσίας όσο και από την πλευρά επιστροφής.



Σχ.3-7: Κώνοι συρμάτωσης



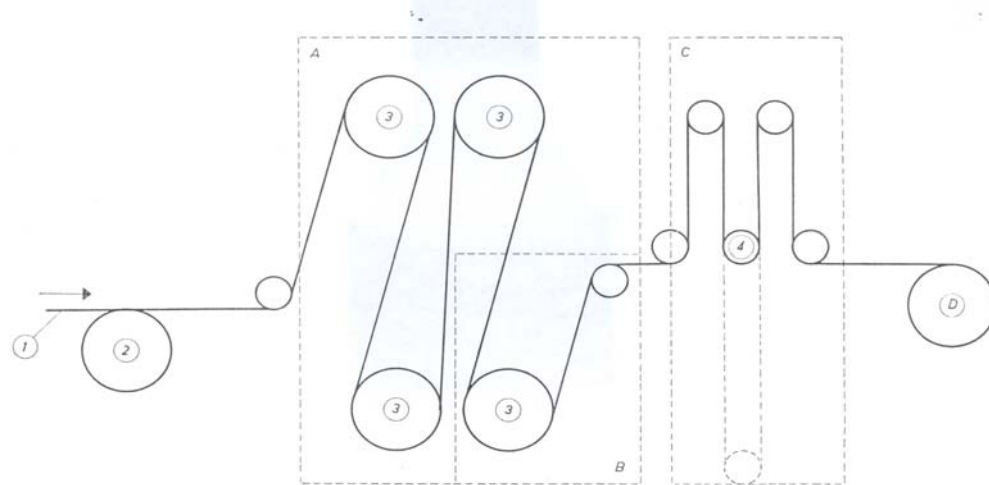
Σχ. 3-8: Μηχανή συρματούργησης Niehoff tipo M85 για σύρμα χαλκού. Αρχίζοντας από σύρμα χαλκού διαμέτρου 8μμ μπορούν να παραχθούν 1,5 τόνο ανά ώρα με διάμετρο 3μμ.

3.4.5 Ανόπτυση

Το σύρμα χαλκού όπως παράγεται από τη μηχανή συρμάτωσης δηλαδή σκληρό (άψητο) έχει περιορισμένες χρήσεις. Σχεδόν σε όλες τις τελικές εφαρμογές το σύρμα υφίσταται επεξεργασίες και διαδοχικές διαμορφώσεις οι οποίες είναι δυνατόν να γίνουν μόνο με σύρμα το οποίο έχει υποστεί ανόπτυση. Παράδειγμα στις κτιριακές κατασκευές χρησιμοποιείται σύρμα χαλκού μονωμένου το οποίο πρέπει εύκολα να κάμπτεται για να ανταποκριθεί στις ανάγκες των κατασκευών. Σημειώνεται ότι περίπου το 90% των συρμάτων χαλκού χρειάζεται μια αισθητή ικανότητα παραμόρφωσης. Η χρήση του σκληρού (άψητου) χαλκού περιορίζεται σε ειδικές κατασκευές ή σε εναέριες ηλεκτρικές γραμμές. Η χρήση του σκληρού σύρματος χαλκού δεν προέρχεται από τις ηλεκτροτεχνικές ανάγκες αλλά αποκλειστικά από τις απαιτούμενες μηχανικές χαρακτηριστικές.

Είναι γνωστό ότι ο χαλκός έχει μεγάλη χημική συγγένεια με το οξυγόνο. Αυτή η συγγένεια αυξάνεται υπερβολικά με την αύξηση της θερμοκρασίας και εμφανίζεται ήδη στους 80°C. Θερμαίνοντας το χαλκό στους 80 °C η επιφάνειά του καλύπτεται από ένα σκούρο, λεπτό στρώμα CuO. Για αυτό κατά τη διάρκεια της ανόπτυσης πρέπει να αποφεύγεται η επαφή του χαλκού με την ατμόσφαιρα. Αρχικά για την ανόπτυση των συρμάτων χαλκού απουσία οξυγόνου χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι φούρνοι μέσα στους οποίους τοποθετούνταν τα σύρματα χαλκού τυλιγμένα σε μεταλλικά στροφέια. Σήμερα χρησιμοποιείται η συνεχής ανόπτυση η οποία πραγματοποιείται μετά την τελευταία μήτρα της συρματοουργικής μηχανής και πριν την περιέλιξη στο τελικό στροφέιο.

Η εγκατάσταση της συνεχούς ανόπτυσης η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ της μηχανής συρματούργησης και του στροφείου περιέλιξης του σύρματος χαλκού φαίνεται στο σχήμα 9 και αποτελείται από τα εξής τμήματα :



Σχ 3-9: Τυπική διάταξη εγκατάστασης συνεχούς ανόπτυσης

- A. Τμήμα θέρμανσης, το οποίο διαιρείται σε περισσότερα στάδια το καθένα εκ των οποίων φέρνει τα σύρματα σε μια προκαθορισμένη θερμοκρασία προοδευτικά αυξανόμενη μέχρι την επιθυμητή θερμοκρασία ανόπτυσης.
- B. Τμήμα ψύξης, στο οποίο το σύρμα ψύχεται μέχρι τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
- C. Τμήμα εξασφάλισης περιέλιξης του σύρματος υπό σταθερή τάση
- D. Τμήμα περιέλιξης του ανοπτιμένου σύρματος σε στροφέιο

Όλες οι κινήσεις των τροχαλιών έλξης, επιστροφής (ή αλλαγής διεύθυνσης) και ανόπτωσης συνεργάζονται με τη μηχανή συρμάτωσης ώστε να επιτυγχάνεται πλήρης συγχρονισμός της ταχύτητας. Ιδιαίτερη φροντίδα σε αυτές τις εγκαταστάσεις δίνεται στη ρύθμιση της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται σε συνάρτηση με την ταχύτητα κίνησης και τη διατομή του σύρματος. Είναι απαραίτητο η κατανάλωση του ρεύματος να κυμαίνεται σε προκαθορισμένα όρια τιμών για να αποφεύγεται το σύρμα να είναι πολύ ανοπτυμένο ή τα αντίθετο. Το ποσό της θερμότητας που καταναλώνεται κατά τη διαδικασία της ανόπτωσης υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\Phi = Pc(\theta_1 - \theta_2) \text{ σε kcal} \quad (3.1)$$

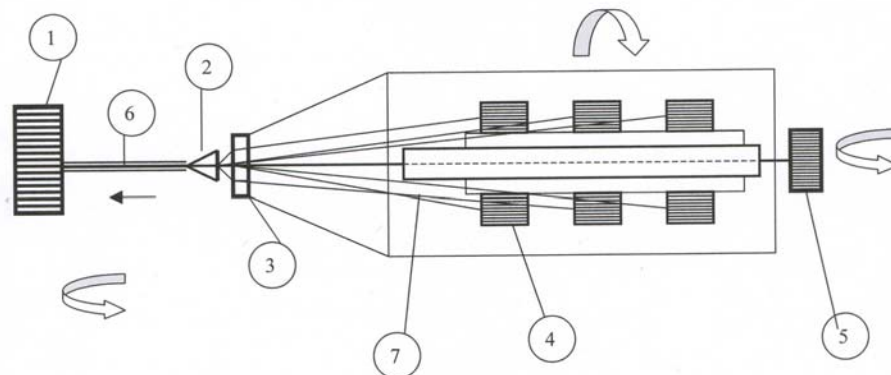
όπου P το βάρος του σύρματος χαλκού σε kg (συνάρτηση της διαμέτρου του σύρματος και της ταχύτητας με την οποία κινείται) c ειδική θερμότητα του χαλκού, θ_1 η αρχική θερμοκρασία και θ_2 η τελική θερμοκρασία.

3.5 Στάδιο 3: Σύστρεψη και συμπίεση των αγωγών

Στο προηγούμενο στάδιο 2 παράγονται σύρματα διαφόρων διαμέτρων τα οποία αποτελούν τους αγωγούς των καλωδίων. Για καλώδια χαμηλής τάσης ανάλογα με την τελική χρήση τους και τις απαιτούμενες ηλεκτροτεχνικές χαρακτηριστικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν αγωγοί μονόκλωνοι διαφόρων διαμέτρων μονωμένοι με κατάλληλο μονωτικό υλικό. Για καλώδια μέσης και υψηλής τάση στα οποία απαιτούνται μεγάλες διατομές αγωγών και ικανή ευκαμψία οι αγωγοί των καλωδίων διαμορφώνονται σε κατάλληλες στρεπτικές μηχανές με τη σύστρεψη πολλών αγωγών μικρής διαμέτρου. Η διαδικασία σύστρεψης πολλών αγωγών μικρής διαμέτρου για την κατασκευή αγωγού τύπου χορδής περιλαμβάνει τα εξής στάδια :

- Φόρτωση της στρεπτικής μηχανής με μεταλλικά στροφεία στα οποία είναι περιελιγμένοι αγωγοί χαλκού μικρής διαμέτρου.
- Πέρασμα όλων των αγωγών με κατάλληλους οδηγούς στο σημείο συγκέντρωσης (μεταλλικός δίσκος με περιφερειακές οπές)
- Οδήγηση όλων των συρμάτων στη μήτρα (συμπίεσης – συστροφής) δημιουργίας της χορδής.
- Περιέλιξη σε μεταλλικά ή ξύλινα στροφεία καταλλήλων διαστάσεων ανάλογα με τη διάμετρο της σχηματιζόμενης χορδής.

Στο σχήμα 3-10 φαίνεται η τυπική διάταξη μιας συστρεπτικής μηχανής.



Σχ. 3-10 : Τυπική διάταξη συστρεπτικής μηχανής :

1) Στροφείο περιέλιξης χορδής, 2) Μήτρα, 3) Μεταλλικός δίσκος με περιμετρικές οπές διέλευσης (οδήγησης) των αγωγών, 4) Στροφεία, 5) Στροφείο με αγωγό χαλκού, 6) Χορδή, 7) Αγωγοί χαλκού

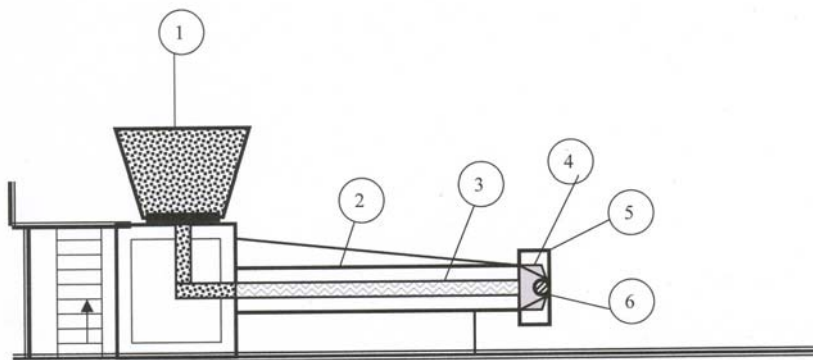
Ένας αγωγός διέρχεται από το κέντρο της μηχανής εκτυλισσόμενος από το στροφέιο 5 και μέσω της κεντρικής οπής του δίσκου καταλήγει στη μήτρα. Από τα περιστρεφόμενα στροφέια αγωγοί οδηγούνται μέσω των περιφερειακών οπών του δίσκου στη μήτρα. Η μήτρα έχει διαστάσεις και σχήμα ανάλογες με τη διατομή και το σχήμα της χορδής που επιθυμούμε να πετύχουμε. Το στροφέιο περιέλιξης της παραγόμενης χορδής έλκει τη χορδή στη κατεύθυνση του βέλους.

Σημείωση : η φόρτωση και εκφόρτωση στη μηχανή των μεταλλικών στροφείων γίνεται με κατάλληλα ανυψωτικά μηχανήματα (γερανογέφυρες). Η διακίνηση των στροφείων από τμήμα σε τμήμα γίνεται με περαινοφόρα ανυψωτικά μηχανήματα (κλαρκ).

Το μήκος της παραγόμενης χορδής μετράται με ειδικό μετρητή στην έξοδο της χορδής από τη μήτρα. Επειδή ο αριθμός στροφών περιστροφής της μηχανής (ποικίλει ανάλογα με το μήκος της χορδής) πολλές φορές είναι αρκετά μεγάλος και προς αποφυγή ατυχημάτων η μηχανή καλύπτεται από ισχυρά μεταλλικά καλύμματα.

3.6 Στάδιο 4 : Εξώθηση ημιαγωγίμων στρωμάτων και μόνωσης

Σε όλα τα θερμοπλαστικά υλικά εφαρμόζεται μια διαδικασία εξώθησης. Το υλικό σε μορφή κόκκων τοποθετείται στη χοάνη του εξωθητή, η οποία τροφοδοτεί έναν μεγάλου μήκους κύλινδρο, μέσα στον οποίο περιστρέφεται ένας ατέρμων κοχλίας (κοχλίας του Αρχιμήδη). Λόγω της θερμότητας του κυλίνδρου καθώς και της επιπλέον θερμότητας που αναπτύσσεται λόγω της τριβής το υλικό γίνεται πιο μαλακό, παίρνοντας παχύρρευστη μορφή. Στο τέλος του κυλίνδρου τοποθετείται μια κεφαλή εξώθησης με μήτρες διαφόρων μεγεθών, ανάλογα με τη διατομή του καλωδίου.



Σχ. 3-11 : Τυπική διάταξη μηχανής εξώθησης :

1) Μονωτικό υλικό σε κόκκους, 2) Κύλινδρος, 3) Μονωτικό υλικό σε πλαστική μορφή, 4) Μήτρα, 5) Κεφαλή, 6) Καλώδιο

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην ομοιόμορφη ροή του υλικού περιφερειακά του ανοίγματος μεταξύ των μητρών. Για την απόκτηση του απαιτούμενου βαθμού συμπίεσης, ο όγκος του υλικού μεταξύ του κοχλίας και του κυλίνδρου πρέπει να μειώνεται κοντά στην κεφαλή εξώθησης. Διαφορετικά υλικά απαιτούν διαφορετικές αναλογίες μήκος κυλίνδρου / διάμετρο, ενώ ο βαθμός συμπίεσης ποικίλει επίσης ανάλογα με το υλικό, όπως και τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Η διατήρηση της κατάλληλης θερμοκρασίας είναι πολύ σημαντική και όταν επιτυγχάνεται η απαιτούμενη θερμοκρασία, μειώνεται η θέρμανση του κυλίνδρου ή παρέχεται επιπλέον ψύξη.

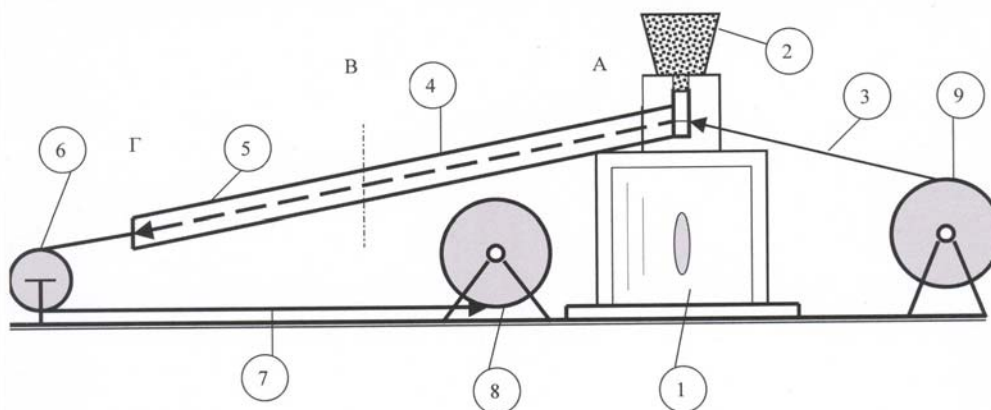
Για την τοποθέτηση (εξώθηση) πάνω στον αγωγό του ημιαγωγίμου στρώματος (εξομαλυντικό στρώμα), της μόνωσης και του ημιαγωγίμου στρώματος της μόνωσης χρησιμοποιείται συνήθως μία κεφαλή εξώθησης με τρεις διαφορετικές μήτρες, μία για κάθε υλικό. Εναλλακτικά, χρησιμοποιούνται τρεις ξεχωριστές κεφαλές με μία μήτρα η κάθε μία ή μία κεφαλή για τη μόνωση και μια κεφαλή με δύο μήτρες για τα ημιαγωγίμα στρώματα.

Κατά την εξώθηση τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά είναι ακόμα θερμοπλαστικά και η μόνη διαφορά στην τεχνική είναι ότι ακολουθεί βουλκανισμός. Παλαιότερα αποτελούσε ξεχωριστή διαδικασία, αλλά σήμερα είναι μέρος της όλης διαδικασίας και είναι γνωστό ως continuous vulcanizing (CV). Οι πιο συνήθεις διαδικασίες βουλκανισμού που χρησιμοποιούνται είναι :

- α.) CCV (continuous catenary vulcanizing): με μεταφορά θερμότητας με ατμό ή υγρό, ή με ακτινοβολία θερμότητας σε περιβάλλον αζώτου.
- β.) VCV (vertical catenary vulcanizing): παρόμοια μέθοδος με την προηγούμενη αλλά με το σωλήνα βουλκανισμού κάθετα τοποθετημένο.
- γ.) PLVC : βουλκανισμός με χρήση υγρών χημικών μιγμάτων υπό πίεση.

Τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι απολύτως καθαρά και να αποκλείεται εγκλωβισμός σκόνης και άλλων σωματιδίων. Απαιτείται επίσης η θερμική αποσύνθεση (decomposition) των υπεροξειδίων που τυχόν είχαν σχηματιστεί πάνω στο πολυμερές. Η θερμοκρασία εξώθησης δεν ξεπερνά τους 140°C, ενώ η θερμοκρασία βουλκανισμού είναι 300-350 °C υπό πίεση 7bar (0,7MN/m²).

Ο σωλήνας βουλκανισμού έχει μήκος 80-100m και αποτελείται από δύο περίπου ίσα τμήματα. Στο πρώτο τμήμα, σε περιβάλλον αζώτου υπό κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, πραγματοποιείται η κυρίως διαδικασία βουλκανισμού. Είναι το τμήμα όπου γίνεται η διασύνδεση των δεσμών του πολυαιθυλενίου (PE) για το σχηματισμό του δικτυωμένου πολυαιθυλενίου (XLPE). Στο δεύτερο τμήμα του σωλήνα γίνεται η ψύξη του καλωδίου με νερό. Το σχήμα του σωλήνα βουλκανισμού είναι απαραίτητο (σε περίπτωση που δεν είναι τοποθετημένος κάθετα, όπως στο σχήμα) να ταιριάζει στη φυσική κάμψη του καλωδίου, όπως αυτό βγαίνει από τον εξωθητή, αποφεύγοντας έτσι το γρατσούνισμα του καλωδίου στα τοιχώματα του σωλήνα.



Σχ. 3-11 : Τυπική διάταξη εγκατάστασης μόνωσης καλωδίων και βουλκανισμού :

1) Μηχανή, 2) Ελαστικό ή πλαστικό υλικό, 3) Καλώδιο προς μόνωση, 4) Σωλήνας βουλκανισμού Τμήμα AB, 5) Σωλήνας βουλκανισμού Τμήμα ΒΓ, 6) Τύμπανο επιστροφής καλωδίου, 7) Καλώδιο μονωμένο, 8) Στροφέιο περιέλιξης μονωμένου καλωδίου, 9) Στροφέιο εκτύλιξης καλωδίου

3.7 Στάδιο 5 : Σχηματισμός του καλωδίου (ηλεκτρική θωράκιση – μηχανική προστασία – εξωτερικό προστατευτικό στρώμα)

Οι μονωμένοι αγωγοί συστρέφονται σε ειδικές μηχανές με κατάλληλο βήμα. Οι μηχανές αυτές λειτουργούν με την ίδια περίπου αρχή, που λειτουργούν οι μηχανές σύστρεψης που περιγράφηκαν στο στάδιο 3, με τη διαφορά ότι είναι πιο μεγάλες και κινούνται με μικρότερες ταχύτητες. Η πλήρωση των κενών, που δημιουργούνται κατά τη σύστρεψη των μονωμένων αγωγών, γίνεται με χρήση γεμισμάτων και περιέλιξη του συνόλου με πλαστική ταινία είτε τοποθέτηση θερμοπλαστικής ύλης (συνήθως PVC), ώστε να έχουμε κυλινδρική μορφή των συστραμμένων μονωμένων αγωγών.

Σε καλώδια με πλαστική μόνωση η ηλεκτρική θωράκιση (μανδύας) αποτελείται από χάλκινα συρματίδια ή χάλκινες ταινίες. Η τοποθέτησή τους στους μονωμένους αγωγούς γίνεται με στρεπτική μηχανή, ανάλογη με τις προηγούμενες.

Η προστασία του καλωδίου εξαρτάται από τον τρόπο εγκατάστασής του. Για καλώδια τοποθετημένα στον αέρα ή στο έδαφος μέσα σε σωλήνα, η προστασία τους συνίσταται σε μία εξωτερική επένδυση από θερμοπλαστική ύλη, η οποία τοποθετείται με τρόπο ανάλογο με αυτό της μόνωσης και των ημιαγωγικών στρωμάτων. Για καλώδια τοποθετημένα απευθείας στο έδαφος ή στη θάλασσα η προστασία επιτυγχάνεται με ένα στρώμα από δύο χαλύβδινες ταινίες ελικοειδώς περιτυλιγμένες ή από χαλύβδινα σύρματα –στρογγυλά ή πεπλατυσμένα- ελικοειδώς περιτυλιγμένα στον πυρήνα του καλωδίου και από μία χαλύβδινη ελικοειδώς περιτυλιγμένες επί των συρμάτων. Η τοποθέτηση τόσο των ταινιών όσο και των συρμάτων γίνεται με στρεπτικές μηχανές.

Κεφάλαιο 4

Δοκιμές σε καλώδια Μέσης Τάσης – Κανονισμοί

4.1 Γενικά περί δοκιμών ποιοτικού ελέγχου σε ηλεκτροτεχνικές κατασκευές

Κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή, πριν διατεθεί σε χρήση, πρέπει να δοκιμαστεί σε λειτουργικές συνθήκες, που αντιστοιχούν σε μελλοντικές μέγιστες καταπονήσεις, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της κατασκευής. Θα πρέπει τόσο τα επιμέρους στοιχεία όσο και η κατασκευή στο σύνολό της να εναρμονίζονται με τις απαιτήσεις των κατά περίπτωση κανονισμών κατασκευής και προδιαγραφών δοκιμής.

Οι δοκιμές προβλέπονται από διάφορους κανονισμούς (VDE, IEC, ΕΛΟΤ κτλ) και διακρίνονται σε **δοκιμές τύπου** και **δοκιμές σειράς**. Οι δοκιμές τύπου γίνονται σε περιορισμένο αριθμό έτοιμων προς διάθεση προϊόντων, ενώ οι δοκιμές σειράς πραγματοποιούνται σε όλα ανεξαιρέτως τα τεμάχια. [1] [3]

Οι δοκιμές σειράς δεν είναι καταστρεπτικές και για αυτό θα πρέπει να πραγματοποιούνται παρουσία του αγοραστή. Η ΔΕΗ πραγματοποιεί όλες τις δοκιμές σειράς στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό που προμηθεύεται. Σε μικρές προμήθειες εξοπλισμού ή σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατόν να γίνουν οι δοκιμές παρουσία του αγοραστή, θα πρέπει να επιβεβαιώνεται η ποιότητα του εξοπλισμού από διεθνώς αναγνωρισμένα εργαστήρια. [3]

Οι δοκιμές τύπου γίνονται σε διεθνώς αναγνωρισμένα εργαστήρια ή εργαστήριο του κατασκευαστή και αφορούν συνήθως ένα τυχαίο δείγμα ακριβώς ίδιο με αυτό με τα έτοιμα προς διάθεση προϊόντα. Οι δοκιμές τύπου χαρακτηρίζονται ως καταστρεπτικές γιατί παρά την επιτυχή διεξαγωγή τους μπορεί να γίνουν αιτία μελλοντικών βλαβών.

Όταν μια κατασκευή δεν ανταπεξέλθει επιτυχώς σε κάποια από τις προβλεπόμενες δοκιμές, τότε κρίνεται ακατάλληλη, πράγμα ιδιαίτερα ζημιογόνο για τον κατασκευαστή. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται έλεγχος τόσο στις πρώτες ύλες (δοκιμές πρώτων υλών), όσο και στις διάφορες φάσεις της παραγωγής (δοκιμές παραγωγής). Οι **δοκιμές πρώτων υλών** είναι κυρίως δειγματοληπτικοί έλεγχοι που βασίζονται σε κάποια μέθοδο πιθανοτήτων, λόγω των μεγάλων προς έλεγχο ποσοτήτων. Οι **δοκιμές παραγωγής** είναι μετρήσεις που ελέγχουν την ποιότητα στις διάφορες φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας, οπότε ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες για λάθη στην τελική συναρμολόγηση. [4]

Οι δοκιμές τύπου και σειράς δεν είναι ίδιες για κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή, αλλά εξαρτώνται από το είδος της κατασκευής, τα ονομαστικά στοιχεία και τις συνθήκες λειτουργίας που πρόκειται να αντιμετωπίσει αυτή κατά περίπτωση στο δίκτυο. Το σκεπτικό για την αναζήτηση των δοκιμών που χρειάζεται να πραγματοποιηθούν σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή, πηγάζει βασικά από την ανάγκη να δοθεί μία απάντηση στα παρακάτω ερωτήματα, όταν αυτά έχουν νόημα για την προς έλεγχο κατασκευή :

- α.) Πως θα επιβεβαιωθεί το ονομαστικό ρεύμα
- β.) Πως θα επιβεβαιωθεί η διηλεκτρική αντοχή της κατασκευής
- γ.) Ποιες είναι οι απαιτήσεις σε μηχανική αντοχή
- δ.) Αντέχει η κατασκευή το βραχυκύκλωμα μέχρι να γίνει διακοπή του από το μέσο προστασίας του δικτύου
- ε.) Ποιες οι ειδικές απαιτήσεις που πρέπει να χαρακτηρίζουν την κατασκευή.

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

- α.) δοκιμή υπερθέρμανσης
- β.) διηλεκτρικές δοκιμές
- γ.) δοκιμή μηχανικής αντοχής
- δ.) δοκιμή βραχυκύκλωσης [6]

Η **δοκιμή υπερθέρμανσης** αφορά την εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος μιας κατασκευής. Η τιμή αυτή δεν μπορεί να είναι τυχαία, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται σε προδιαγεγραμμένες τιμές ρεύματος. Για το σκοπό αυτό η δοκιμή αυτή διαρκεί συνήθως αρκετές ώρες και θεωρείται ότι είναι επιτυχής όταν η θερμοκρασία δεν υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο όριο σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

Οι **διηλεκτρικές δοκιμές** στοχεύουν στην εξακρίβωση της ικανότητας μόνωσης. Η ονομαστική τάση κάθε κατασκευής δεν μπορεί να είναι μια τυχαία τιμή, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγεγραμμένη διαβάθμιση των τάσεων του δικτύου. Συνήθως γίνεται αναφορά εκτός από την ονομαστική τάση, στη στάθμη μόνωσης της κατασκευής (μέγιστη τάση λειτουργίας), που είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση. Οι μετρήσεις που γίνονται για τον έλεγχο της ικανότητας μόνωσης αφορούν κυρίως τις μέγιστες λειτουργικές καταστάσεις της κατασκευής, από τις οποίες επιβεβαιώνεται η στάθμη μόνωσης.

Η **δοκιμή μηχανικής αντοχής** αφορά κυρίως την ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα των επαφών των διακοπών μετά από ένα μεγάλο αριθμό χειρισμών, ενώ παράλληλα ελέγχεται η στιβαρότητα της κατασκευής.

Με τη **δοκιμή σε τριπολικό βραχυκύκλωμα** ελέγχεται η καταπόνηση μιας κατασκευής από τις μεγάλες δυνάμεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά το βραχυκύκλωμα και μάλιστα για χρονικό διάστημα 1s, μέχρι δηλαδή να ενεργοποιηθούν τα μέσα προστασίας του δικτύου. Κατά τη δοκιμή μετρώνται το κρουστικό και το εναλλασσόμενο τμήμα του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Οι τιμές των ρευμάτων αυτών καθορίζονται από την ισχύ του δικτύου στη θέση βραχυκύκλωσης, 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. [6]

4.2 Δοκιμές σε μονώσεις (Είδη των δοκιμών και σκοπός αυτών)

4.2.1 Εισαγωγικά

Όταν στη μάζα ενός μονωτικού υλικού εγκατασταθεί ηλεκτρικό πεδίο, τότε παρατηρούνται :

- Μηχανικές καταπονήσεις. Οφείλονται σε πεδιακές δυνάμεις, οι οποίες ασκούνται στα δεσμευμένα ηλεκτρόνια, τείνοντας να επιφέρουν την διάσπαση του μονωτικού

- Θερμικές καταπονήσεις. Οφείλονται σε απώλειες ενέργειας μέσα στη μάζα του υλικού λόγω αγωγιμότητας, ανομοιογένειας και εσωτερικών ή επιφανειακών ασυνεχειών στη μάζα του υλικού. [2] [17]

4.2.2 Μη καταστρεπτικές δοκιμές συνεχούς ρεύματος

Οι απώλειες στο συνεχές ρεύμα οφείλονται αποκλειστικά στην αγωγιμότητα που παρουσιάζει ένα μονωτικό υλικό και εκφράζονται με τον προσδιορισμό της συνολικής ωμικής αντίστασης, την οποία παρουσιάζει το υλικό όταν χρησιμοποιούμενο ως διηλεκτρικό ενός πυκνωτή τίθεται υπό συνεχή τάση. Η αντίσταση αυτή ονομάζεται αντίσταση μόνωσης του υλικού. Η αντίσταση μόνωσης είναι συνάρτηση του μεγέθους του δοκιμίου, γεγονός που κάνει αδύνατη τη σύγκριση μεταξύ δοκιμίων άνισων μεγεθών.

Με τις μη καταστρεπτικές δοκιμές συνεχούς ρεύματος μετράται η αντίσταση μόνωσης και διαπιστώνεται ο βαθμός ανομοιογένειας του υλικού. Οι δοκιμές διεξάγονται με τάση πολύ χαμηλότερη από την ονομαστική, και δεν επιφέρουν ηλεκτρική διάσπαση του υλικού, ούτε προκαλούν εσωτερικές εκκενώσεις.[5] [17]

4.2.3 Μη καταστρεπτικές δοκιμές εναλλασσόμενου ρεύματος

Οι απώλειες ενέργειας, που εμφανίζονται αποκλειστικά στο εναλλασσόμενο ρεύμα και δεν υφίστανται στο συνεχές, οφείλονται στο βαθμό ανομοιογένειας του υλικού. Κυρίως ενδιαφέρουν οι απώλειες ενέργειας που οφείλονται σε εσωτερικές εκκενώσεις. Οι εσωτερικές εκκενώσεις οφείλονται σε ανωμαλίες (ασυνέχειες της φύσης και της γεωμετρίας του μονωτικού) στον όγκο ή στην επιφάνεια του υλικού. Η σύγκριση μεταξύ μονωτικών υλικών ως προς το μέγεθος των συνολικών απωλειών σε εναλλασσόμενο ρεύμα επιτυγχάνεται με τη μέτρηση του συντελεστή απωλειών $\tan\delta$ του μονωτικού. Οι τάσεις με τις οποίες μετράται ο συντελεστής απωλειών μπορεί να είναι μεγαλύτερες της ονομαστικής, αλλά δεν ξεπερνούν το όριο τάσης που αντιστοιχεί στη διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού. Κατά συνέπεια, το υλικό δεν κινδυνεύει να υποστεί ηλεκτρική διάσπαση. [5] [17]

4.2.4 Δοκιμή αντοχής της μόνωσης

Διεξάγεται με συνεχή ή εναλλασσόμενη τάση υπό την ονομαστική συχνότητα του δοκιμίου. Σκοπός της δοκιμής είναι η διαπίστωση εάν το υλικό έχει την απαιτούμενη από τους κανονισμούς διηλεκτρική αντοχή. Η δοκιμή αυτή είναι καταστρεπτική και διεξάγεται μόνο κατά την κατασκευή και παραλαβή του δοκιμίου καθώς και μετά από σημαντικές επισκευές. [5] [17]

4.3 Μετρήσεις σε μονωτικά υλικά και μονωτικές διατάξεις

4.3.1 Εισαγωγικά

Η διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών εξαρτάται από τη διάταξη των ηλεκτροδίων και τη μορφή της τάσης. Ισχύουν :

α.) Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή.

β.) Η διηλεκτρική αντοχή υπό κρουστική τάση είναι μεγαλύτερη από ότι με εναλλασσόμενη τάση 50Hz επί 1min.

γ.) Η διηλεκτρική αντοχή υπό συνεχή τάση είναι μεγαλύτερη από ότι με εναλλασσόμενη τάση.

δ.) Η τάση διάσπασης κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις είναι μεγαλύτερη κατά την αρνητική πολικότητα από ότι κατά τη θετική πολικότητα.

Είναι φανερό, ότι η επιλογή της κατάλληλης τάσης και διάταξης παίζει σημαντικό ρόλο στις μετρήσεις και δοκιμές μονωτικών υλικών. [1]

4.3.2 Η επιλογή της τάσης για τη δοκιμή

Η μορφή και η τιμή της τάσης για τη δοκιμή είναι βασική επιλογή, από την οποία εξαρτώνται αρκετοί παράγοντες που θα συμμετέχουν στο φαινόμενο το οποίο θα ερευνηθεί. Συγκεκριμένα :

α.) Η τιμή της τάσης είναι καθοριστικός παράγοντας για την εκδήλωση των διαφόρων παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

β.) Η εναλλασσόμενη τάση 50Hz εκφράζει τη συνήθη κατάσταση λειτουργίας στο δίκτυο και παρέχει τη δυνατότητα μελέτης φαινομένων που σχετίζονται με το χρόνο καταπόνησης και την εναλλαγή της πολικότητας.

γ.) Η συνεχής τάση εκφράζει τη συνήθη λειτουργία στο δίκτυο συνεχούς τάσης. Ενδείκνυται για μετρήσεις στις οποίες η καταπόνηση δε μεταβάλλεται με το χρόνο, ενώ στο φαινόμενο δεν συμμετέχει η αυτεπαγωγή της διάταξης που ερευνάται.

δ.) Η κρουστική τάση 1,2/50μs παρέχει πρακτικά τη δυνατότητα ότι μπορεί να ερευνηθεί ένα φαινόμενο κατά την έναρξή του. Η μεταβολή της κρουστικής τάσης σε μορφές μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας (10/200μs, 100/2000μs, 250/2500μs, κλπ) διευκολύνει τη μελέτη των φαινομένων που εκδηλώνονται κατά τη γήρανση και διάσπαση των μονώσεων σε σχέση με το χρόνο.

ε.) Ο συνδυασμός της «προσθετικής δράσης» δύο μορφών τάσης σε ένα δοκίμιο είναι μία μέθοδος που μπορεί να έχει εφαρμογή για τον έλεγχο της συμπεριφοράς των μονώσεων στις υπερτάσεις. [4]

4.3.3 Η διάταξη των ηλεκτροδίων

Η διάταξη των ηλεκτροδίων καθορίζει την επίδραση της μορφής του πεδίου στο φαινόμενο. Η πιο συνήθης διάταξη είναι ένας πυκνωτής με ηλεκτρόδια ακίδα-πλάκα και μονωτικό το υπό εξέταση υλικό, η οποία δίνει τη δυνατότητα έρευνας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης στη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών. Ο διαχωρισμός των μερικών εκκενώσεων στα στερεά μονωτικά σε εσωτερικές και εξωτερικές έχει οδηγήσει σε έρευνες όπου τα ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης τοποθετούνται στην επιφάνεια του υλικού ή μέσα στον όγκο του. [4]

4.3.4 Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης

Η ηλεκτρική μόνωση των αγωγών των διαφόρων ηλεκτρικών διατάξεων (καλώδια, ΜΣ, κινητήρες κλπ) χαρακτηρίζεται ποιοτικά και ποσοτικά από την αντίσταση που παρουσιάζει όταν τεθεί υπό συνεχή τάση (αντίσταση μόνωσης). Όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση μόνωσης, τόσο μικρότερο είναι το ρεύμα που διαρρέει τη μόνωση. Στην πράξη δεν υπάρχει τέλεια μόνωση άπειρης αντίστασης, και πάντοτε υπάρχει ένα ρεύμα της τάξης των μΑ.

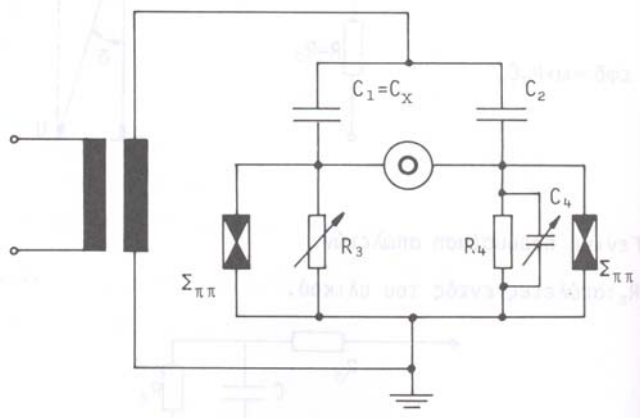
Εκτός της φυσιολογικής γήρανσης που υφίσταται μία μόνωση, παράγοντες όπως η υγρασία, η ακτινοβολία, οι ξένες επικαθίσεις, η έκθεση σε θερμό ή ψυχρό περιβάλλον, οι μηχανικές καταπονήσεις κ.α. επιδρούν αρνητικά στη μόνωση, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντίστασης μόνωσης, πράγμα που συνεπάγεται τη δημιουργία αγωγίμων δρόμων και την αύξηση του ρεύματος διαρροής. Για αυτό είναι απαραίτητο να γίνονται περιοδικοί έλεγχοι και μετρήσεις της αντίστασης μόνωσης καθώς και προγραμματισμένες συντηρήσεις, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η βελτίωση της μόνωσης πριν καταστραφεί.

Η αντίσταση μόνωσης μετράται σε ΜΩ με μετρητή αντίστασης μόνωσης, ο οποίος είναι ένα ωμόμετρο με ευρεία περιοχή μέτρησης, εφοδιασμένο συνήθως με μαγνητοηλεκτρική γεννήτρια συνεχούς ρεύματος.

Οι μετρούμενες τιμές της αντίστασης θα πρέπει να θεωρηθούν ως σχετικές, διότι εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες (π.χ. οι μετρηθείσες τιμές μπορεί να είναι τελείως διαφορετικές όταν διεξάγονται επί τρεις συνεχείς ημέρες, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η μόνωση είναι ακατάλληλη). Εκείνο που έχει σημασία, είναι εάν η κλίση της γραφικής παράστασης των μετρήσεων συναρτήσει του χρόνου δείχνει μείωση της αντίστασης μόνωσης, πράγμα που αποτελεί προειδοποίηση για επερχόμενο πρόβλημα. Για αυτό το λόγο πρέπει να διεξάγονται περιοδικές δοκιμές με τον ίδιο τρόπο και υπό τις ίδιες συνθήκες. [14]

4.3.5 Μέτρηση της $\tan\delta$ και του συντελεστή ϵ_r

Για τη μέτρηση του συντελεστή απωλειών $\tan\delta$ χρησιμοποιείται η γέφυρα Schering.



Σχ. 4-1 : Γέφυρα Schering

C_X, R_X : πυκνωτής προς μέτρηση με γωνία απωλειών δ_X

$\Sigma\pi\pi$: σπινθηριστής προστασίας

C_2 : πρότυπος πυκνωτής

Ισχύουν :

$$Z_X = R_X - j \frac{1}{\omega C_X} = \sqrt{R_X^2 + (1/\omega C_X)^2} \quad (4.1)$$

$$Z_2 = 1/\omega C_2 \quad (4.2)$$

$$Z_3 = R_3 \quad (4.3)$$

$$Z_4 = R_4 / \sqrt{(1 + R\omega C_4)^2} \quad (4.4)$$

Στην περίπτωση μηδενισμού της γέφυρας ισχύουν :

$$Z_X Z_4 = Z_2 Z_3 \rightarrow R_X = R_4 \frac{C_4}{C_2}, \quad C_X = C_2 \frac{R_4}{R_3} \quad (4.5)$$

Ο συντελεστής απωλειών είναι :

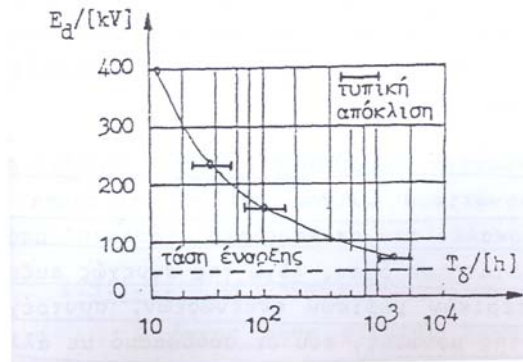
$$\tan\delta_X = \omega C_4 R_4 = \omega R_X C_X \quad (4.6)$$

Η ϵ_r υπολογίζεται από την τιμή της C_X ανάλογα με τη διάταξη. Για παράδειγμα για πυκνωτή επίπεδων πλακών είναι [4] [6]:

$$\epsilon_r = C_X \cdot d / A \cdot \epsilon_o \quad (4.7)$$

4.3.6 Μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων

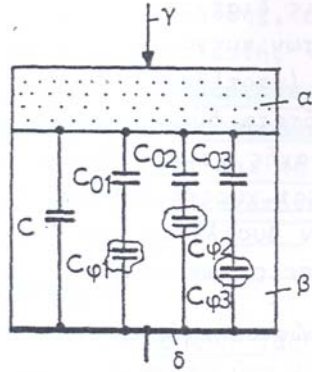
Οι μερικές εκκενώσεις είναι εκκενώσεις περιορισμένης έκτασης μέσα σε ένα διηλεκτρικό, τέτοιες που δεν προκαλούν άμεσα τη διάσπασή του. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (εσωτερικές ME) και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις στην επιφάνειά του (εξωτερικές ME). Από τη στιγμή της έναρξής τους προκαλούν σταδιακά αλλαγή της μοριακής δομής, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε περιορισμένο τμήμα του μονωτικού, όπου δηλαδή έτυχε οι θέσεις ανομοιογένειας να είναι περισσότερο αγωγίμες. Η σπουδαιότητα των μερικών εκκενώσεων έγκειται στο ότι προκαλούν μείωση της διάρκειας ζωής των διαφόρων διηλεκτρικών, κυρίως μέσω έκλυσης ενέργειας και πρόκλησης διαφόρων ηλεκτροχημικών δράσεων. [4]



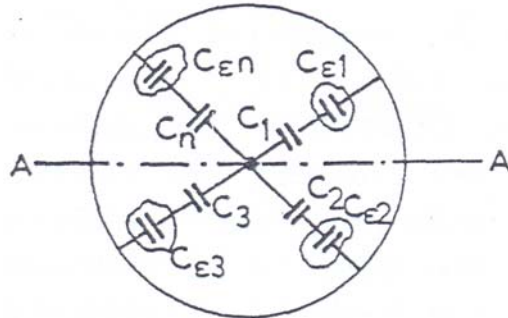
Σχ. 4-2 : Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάλον (πάχος 0,125mm), λόγω μερικών εκκενώσεων. Αριθμός δοκιμών : 10 ανά σημείο μέτρησης, T_d : χρόνος διάσπασης

Τόσο στην επιφάνεια όσο και στον όγκο ενός στερεού μονωτικού υπάρχουν πάντοτε θέσεις διαταραχής, οι οποίες λόγω τοπικών ασθενών ρευμάτων προκαλούν χωρικά φορτία. Η δημιουργία χωρικών φορτίων στην επιφάνεια του μονωτικού μειώνει τις αποστάσεις μόνωσης και προκαλεί την επιφανειακή διάσπαση. Μπορεί όμως να οδηγήσει και στη διάτρηση όταν λόγω της συνεχώς αυξανόμενης ενέργειας των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, συντρέχουν λόγοι μείωσης του πάχους της μόνωσης, που σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες διάτρησης προκαλούν την

απαιτούμενη για τη διάτρηση μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Στον όγκο του μονωτικού δημιουργούνται χωρικά φορτία, που προέρχονται από τον ιονισμό των αερίων των φυσαλίδων και τις τοπικές αυξήσεις της αγωγιμότητας στις θέσεις ανομοιογένειας. Οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις προκαλούν μείωση της ικανότητας μόνωσης. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η σχηματική των θέσεων διαταραχής στο στερεό μονωτικό με περιβάλλον μονωτικό λάδι. [1]



Σχ. 4-3: Τομή της διάταξης. α : επιφανειακό φιλμ λαδιού και επιφάνεια του στερεού μονωτικού, β : στερεό μονωτικό, γ : ακίδα, δ : πλάκα

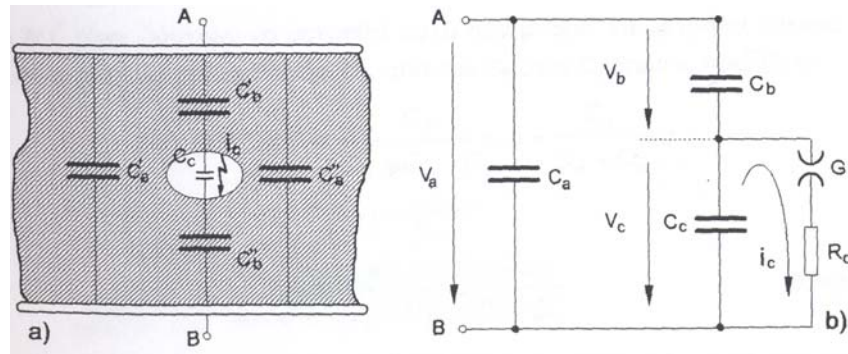


Σχ. 4-4 : Κάτοψη της διάταξης. C : χωρητικότητα της διάταξης, C₁-C_n : πυκνωτές του υγιούς τμήματος της επιφάνειας του στερεού μονωτικού και του επιφανειακού λαδιού, C_{φ1}-C_{φn} : πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (φυσαλίδες), C₀₁-C_{0n} : πυκνωτές του υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού, C_{ε1}-C_{εn} : πυκνωτές επιφανειακών θέσεων διαταραχής.

Ισοδύναμο κύκλωμα μερικών εκκενώσεων

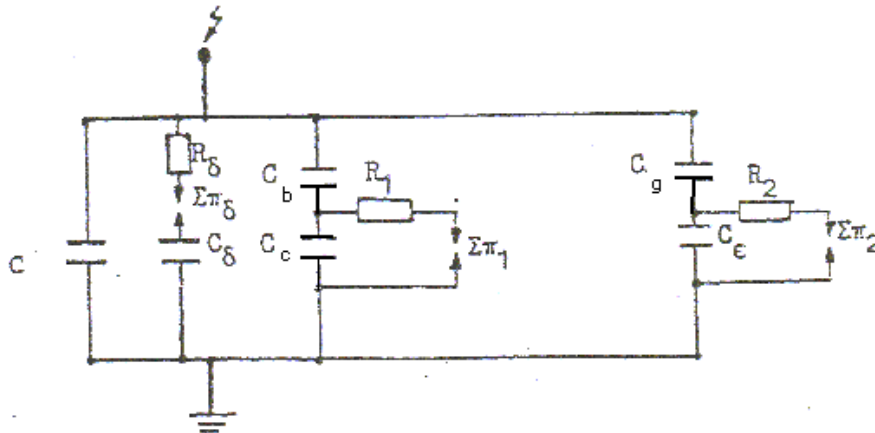
Το παρακάτω σχήμα παριστάνει μια φυσαλίδα μέσα σε στερεό ή υγρό διηλεκτρικό που βρίσκεται μεταξύ των ηλεκτροδίων A και B. Η φυσαλίδα έχει χωρητικότητα C_c και αν η τάση μεταξύ των A και B υπερβεί κάποιο όριο τότε το αέριο που βρίσκεται μέσα της θα διασπασθεί και η C_c θα εκκενωθεί μέσω ενός κρουστικού ρεύματος i_c(t). Οι δυναμικές γραμμές που ξεκινούν από τη φυσαλίδα προς το ηλεκτρόδιο A αποτελούν τον πυκνωτή C_b ενώ αυτές προς το B τον C_b". Οι υπόλοιπες δυναμικές γραμμές αποτελούν τον πυκνωτή C_a, που αποτελείται από όλες τις χωρητικότητες C_a' αριστερά και C_a" δεξιά της φυσαλίδας. Ισχύουν : [18]

$$C_a = C_a' + C_a'', C_b = C_b' C_b'' / (C_b' + C_b'') \text{ και } C_a \gg C_c \gg C_b. \quad (4.8)$$



Σχ. 4-5 : Ισοδύναμο κύκλωμα μερικών εκκενώσεων

Το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων, που προτάθηκε από τους Gemant και Philipoff, φαίνεται παρακάτω.



Σχ. 4-6 : Ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff για τη γήρανση και την ηλεκτρομηχανική διάσπαση :

C_c : η χωρητικότητα της φυσαλίδας

C_e : η χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

C_b : η χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C_g : η χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος της επιφάνειας

C : η ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_δ : η χωρητικότητα λόγω πόλωσης του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου

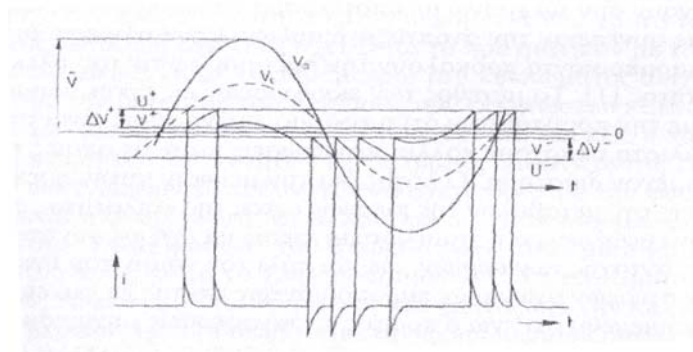
R_1 : η αντίσταση τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_1$

R_2 : η αντίσταση τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_2$

$R_\delta, \Sigma\pi_\delta$: διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του C_δ

Η ύπαρξη εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C_c) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (C_e). Με τον τρόπο αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπολοίπου «υγιούς τμήματος» του μονωτικού (C_b και C_g αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Οι σπινθηριστές $\Sigma\pi_1$ και $\Sigma\pi_2$ στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου (R_1, R_2) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C_b, C_e). [4]

Μία μερική εκκένωση πραγματοποιείται όταν η τάση V_c (βλ. Σχ. 4-7) ισούται με την τάση διάσπασης U^+ , όπως αυτή προσδιορίζεται από την καμπύλη Paaschen. Μετά τη διάσπαση η τάση στη φουσαλίδα μειώνεται σε κάποια τιμή V^+ . Η τάση αυξάνεται και πάλι, έως ότου φθάσει την τιμή U^+ , μειώνεται και πάλι κ.ο.κ., έτσι ώστε να καταγράφεται η αλληλουχία του παρακάτω σχήματος. [12]



Σχ. 4-7 : Κάθε φορά που η τάση V_c φθάνει την τιμή U^+ ή U^- , συμβαίνει εκκένωση και συνεπώς η τάση μειώνεται σε V^+ ή V^- .

Το ύψος των καταγραφόμενων παλμών είναι ανάλογο του μεγέθους των εκκενώσεων στη θέση ανομοιογένειας. Οι παλμοί των εκκενώσεων παρατηρούνται με έναν παλμογράφο ή ένα ανιχνευτή εκκενώσεων, ενώ το μέγεθός τους εκφράζεται συνήθως σε pC. Μία αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης έχει ως συνέπεια την αύξηση του αριθμού των εκκενώσεων ανά περίοδο.

Η χαμηλότερη τάση στην οποία επαναλαμβάνονται μερικές εκκενώσεις ενός ορισμένου μεγέθους σε διαδοχικές περιόδους, καθώς μια αυξανόμενη εναλλασσόμενη τάση εφαρμόζεται στη μόνωση, ονομάζεται **τάση έναρξης** των μερικών εκκενώσεων.

Η χαμηλότερη τάση στην οποία επαναλαμβάνονται μερικές εκκενώσεις ενός ορισμένου μεγέθους σε διαδοχικές περιόδους, καθώς μια μειούμενη εναλλασσόμενη τάση εφαρμόζεται στη μόνωση, ονομάζεται **τάση εξάλειψης** των μερικών εκκενώσεων. [12]

Μέτρηση των μερικών εκκενώσεων

Οι μερικές εκκενώσεις δεν είναι εύκολα ανιχνεύσιμες και η ανίχνευσή τους βασίζεται σε διάφορα φαινόμενα που προκαλούνται από αυτές. Τα φαινόμενα αυτά είναι :

- κρουστικοί παλμοί ρεύματος, με εξαίρεση μερικές μορφές εκκενώσεων αίγλης
- διηλεκτρικές απώλειες
- ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (φωτεινή)
- θόρυβος (ήχος)
- αύξηση της πίεσης του αερίου
- χημικές δράσεις

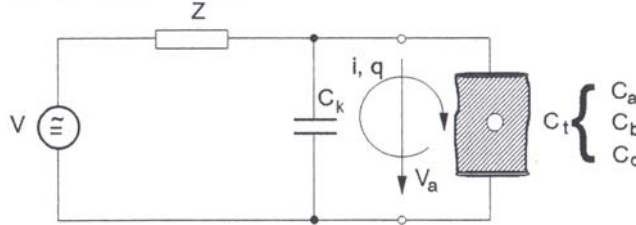
Παρ' όλο που σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ανιχνευτές ήχων ή υπερήχων για την ανίχνευση μερικών εκκενώσεων (όμοια σε διαφανή μονωτικά μπορούν να ανιχνευθούν και με οπτικά μέσα) ή συνηθέστερη και επιτυχέστερη ανίχνευσή του γίνεται με ηλεκτρικές μεθόδους. [18]

Ηλεκτρικά κυκλώματα για την ανίχνευση των μερικών εκκενώσεων

Με βάση το σχήμα 4.5, όταν συμβεί μια μερική εκκένωση το ρεύμα $i_c(t)$ απελευθερώνει φορτίο q_c . Η αλλαγή στην τάση που προκαλείται εξαιτίας της εκκένωσης ΔV_c εμφανίζεται σε μία συνολική χωρητικότητα $C_c + (C_a C_b / C_a + C_b)$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι $C_a \gg C_c \gg C_b$ έχουμε $q_c = (C_c + C_b) \Delta V_c$. Εάν θεωρήσουμε ότι οι χωρητικότητες C_b και C_a ενεργούν ως καταμεριστής τάσης για τη ΔV_c , τότε :

$$\Delta V_a = \Delta V_c \frac{C_b}{C_a + C_b} = \frac{C_b}{C_a + C_b} \frac{q_c}{C_c} \quad (4.9)$$

Η ΔV_a είναι ανάλογη του φορτίου που εκλύεται από την εκκένωση και μπορεί να μετρηθεί. Η μέτρηση αυτή όμως δεν είναι εύκολη, διότι η πτώση τάσης ΔV_a είναι μικρή, καθώς ο λόγος C_b/C_a είναι της τάξης 10^{-4} - 10^{-3} . Για αυτό προτιμάται η μέτρηση μιας άλλης ποσότητας που γίνεται με τη διάταξη του παρακάτω σχήματος.



Σχ. 4-8 : Συσκευή μέτρησης μερικών εκκενώσεων

Το δοκίμιο C_t συνδέεται με μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης μέσω μιας αντίδρασης Z που απομονώνει την πηγή με τον πυκνωτή ζεύξης C_k και το δοκίμιο κατά τη διάρκεια της μερικής εκκένωσης. Ο πυκνωτής ζεύξης χρησιμεύει για να αντισταθμίζει την πτώση τάσης στο δοκίμιο, παρέχοντας ένα φορτίο q και ένα ρεύμα φόρτισης $i(t)$, ενώ η χωρητικότητά του πρέπει να είναι όσο γίνεται μεγαλύτερη από αυτή του δοκιμίου αλλά και της παρασιτικής χωρητικότητας του όλο ανιχνευτικού κυκλώματος για την πιστότερη καταγραφή του φαινομενικού φορτίου. Η ΔV_a αντισταθμίζεται πλήρως και το φορτίο q δίνεται από τη σχέση :

$$q = \int i(t) dt = (C_a + C_b) \Delta V_a \cong C_b \Delta V_c \quad (4.10)$$

όπου q είναι το «φαινόμενο φορτίο» μιας μερικής εκκένωσης. Αν και αυτό το φορτίο δεν είναι ίσο με το φορτίο της εκκένωσης, εν τούτοις είναι μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση του φαινομένου της μερικής εκκένωσης από τη ΔV_a . Στην πράξη όμως είναι πολύ δύσκολο η C_k να είναι πολύ μεγαλύτερη από τη C_t . Ως εκ τούτου το ρεύμα $i(t)$ προκαλεί μια πτώση τάσης ΔV^* κατά μήκος του C_k που δίνεται από τη σχέση :

$$\begin{aligned} \Delta V_a (C_a + C_b) &= \Delta V^* (C_a + C_b + C_k) \rightarrow \\ \Delta V^* &= \frac{C_b}{C_a + C_b + C_k} \frac{q}{C_a + C_b + C_k} \end{aligned} \quad (4.11)$$

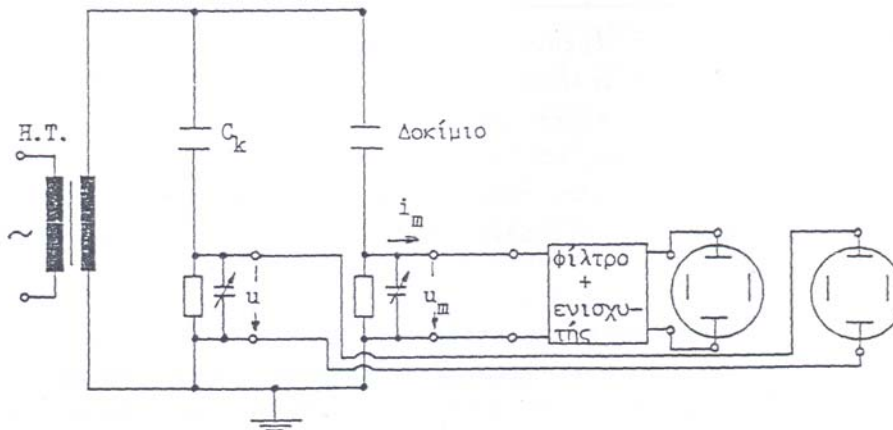
Το ΔV^* είναι δύσκολο να μετρηθεί. Αυτό που μπορεί να μετρηθεί εύκολα είναι το φορτίο q_m που μεταφέρεται από τον C_k στον C_t , όπου :

$$\begin{aligned} q &= C_k \Delta V^* = \frac{C_k}{C_a + C_b + C_k} q \approx \frac{C_k}{C_a + C_k} q \rightarrow \\ \frac{q_m}{q} &\approx \frac{C_k}{C_a + C_k} \approx \frac{C_k}{C_t + C_k} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Η τελευταία σχέση δείχνει τις δυσκολίες που αντιμετωπίζονται στη μέτρηση μερικών εκκενώσεων, ιδίως όταν η C_t έχει μεγάλη τιμή. Αν και οι τιμές των χωρητικοτήτων μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια, η ικανότητα να ανιχνευθούν μικρές τιμές του φαινομένου φορτίου q ελαττώνεται εφόσον όργανα ικανά να ολοκληρώσουν ρεύματα $i(t)$ έχουν ένα κατώτερο όριο για το q_m . [12] [18]

Μέθοδος ισοστάθμισης

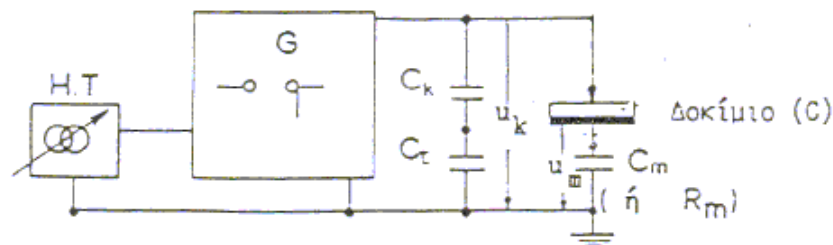
Σε ένα ισοσταθμισμένο σύστημα ανίχνευσης το παρατηρούμενο σήμα είναι το σήμα διαφοράς τάσης μεταξύ των δύο σύνθετων αντιστάσεων. Η μία σύνθετη αντίσταση είναι σε σειρά με το δοκίμιο και η άλλη σε σειρά με έναν πυκνωτή στον οποίο δεν παρατηρούνται εκκενώσεις. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι εκκενώσεις που προέρχονται από το τροφοδοτικό ή άλλες πηγές παράγουν τα ίδια σήματα στις δύο σύνθετες αντιστάσεις και συνεπώς δε δίνουν σήμα στο διαφορικό ενισχυτή. Το μόνο σήμα στον ενισχυτή προέρχεται από τις μερικές εκκενώσεις στο δοκίμιο. Στην ιδανική περίπτωση, ο πυκνωτής (στον οποίο δεν παρουσιάζονται εκκενώσεις) θα πρέπει να είναι της ίδιας χωρητικότητας με το δοκίμιο. Ωστόσο πρακτικά τέλεια ισοστάθμιση δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί και θα υπάρχει κάποιο σήμα στον ενισχυτή, ακόμα και όταν δεν παρατηρούνται εκκενώσεις στο δοκίμιο. [4] [10]



Σχ. 4-9 : H.T. : ΜΣ ΥΤ , C_k : πυκνωτής ΥΤ, u : στιγμιαία τάση της εφαρμοζόμενης υψηλής εναλλασσόμενης τάσης, u_m : στιγμιαία τιμή της τάσης λόγω μερικών εκκενώσεων, i_m : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων

Μέτρηση των μερικών εκκενώσεων με κρουστικές τάσεις

Για τη μέτρηση των μερικών εκκενώσεων με κρουστικές τάσεις χρησιμοποιείται η παρακάτω διάταξη.



Σχ. 4-10 : Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης μερικών εκκενώσεων με κρουστικές τάσεις

Στην περίπτωση που δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις, η τιμή C είναι σταθερή και ισχύει η σχέση καταμερισμού :

$$u_m(t) = \frac{C}{C + C_m} u_k(t) \quad (4.13)$$

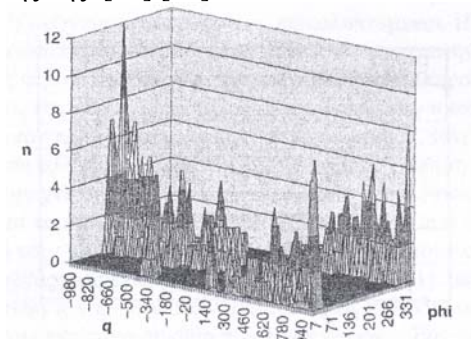
Είναι φανερό ότι όταν δεν εμφανίζονται μερικές εκκενώσεις, η μετρούμενη τιμή στον παλμογράφο $u_m(t)$ έχει την ίδια μορφή με την $u_k(t)$.

Όταν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις, τότε αυξάνει η χωρητικότητα του δοκιμίου και εμφανίζονται άλματα δυναμικού στην $u_m(t)$. [4] [5]

Καταμετρητής πλήθους μερικών εκκενώσεων

Πρόκειται για μία συσκευή η οποία δίνει τον αριθμό των μερικών εκκενώσεων, το αντίστοιχο μέγεθός τους καθώς και τη γωνία φάσης στην οποία συνέβησαν οι εκκενώσεις αυτές. Τα τρισδιάστατα γραφήματα που προκύπτουν προσφέρουν τη δυνατότητα για πληρέστερη κατανόηση της συμπεριφοράς του μονωτικού και δίνουν πληροφορίες για ένα πλήθος παραμέτρων χρήσιμων για την εκτίμηση μιας μόνωσης, όπως η ενέργεια των εκκενώσεων, η ισχύς, το μέσο ρεύμα κ.α. [12]

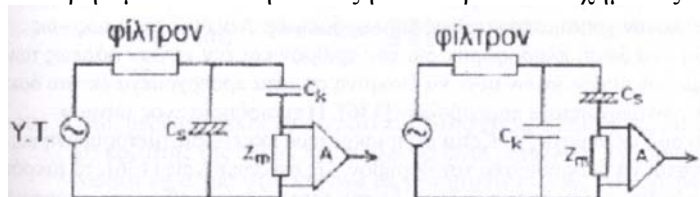
Οι πρώτοι καταμετρητές, που κατασκευάστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 70', ήταν πολυδιαυλικοί αναλυτές παλμών (με 512 ή 1024 διαύλους) οι οποίοι είχαν τη δυνατότητα καταγραφής του αριθμού και του μεγέθους των εκκενώσεων συναρτήσει του χρόνου. Η κεντρική ιδέα ήταν να μετατραπούν τα αναλογικά σήματα των εκκενώσεων σε ψηφιακά. Σήμερα, οι καταμετρητές πλήθους μερικών εκκενώσεων είναι συμβατοί με τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και είναι δυνατόν να παρατηρήσει κανείς στην οθόνη του υπολογιστή τη δραστηριότητα των εκκενώσεων σε μία μόνωση και να υπολογίσει τις απαραίτητες παραμέτρους και μεγέθη για την εκτίμηση της κατάστασής της. [12] [14]



Σχήμα 4-11 : Τρισδιάστατο διάγραμμα πλήθους εκκενώσεων – μεγέθους εκκενώσεων – γωνίας φάσεως.

Ανίχνευση εκκενώσεων με βάση το χρόνο

Χρησιμοποιείται η διάταξη του παρακάτω σχήματος.



Σχ. 4-12 : Κυκλώματα ανίχνευσης μερικών εκκενώσεων : (α) καταγραφή παλμού τάσης, (β) καταγραφή παλμού ρεύματος

Οι παλμοί των ρευμάτων των εκκενώσεων δύνανται να παρατηρηθούν στην οθόνη του παλμογράφου. Η ανίχνευση με βάση το χρόνο έχει το πλεονέκτημα να δίνει σημαντικές πληροφορίες για το μηχανισμό της παρατηρούμενης εκκένωσης, εάν δηλαδή είναι τύπου streamer ή Townsend ή κάποιος άλλος μηχανισμός. [12]



Σχ. 4-13 : Ρεύμα μερικής εκκένωσης σε φύλλα πολυαιθυλενίου (χρόνος ανόδου 1nsec)

Η παρούσα μέθοδος ανίχνευσης δίνει πληροφορίες για την αλλαγή του μηχανισμού της εκκένωσης με την πάροδο του χρόνου, τη μετάβαση δηλαδή από τον ένα τύπο εκκένωσης στον άλλο, αλλά δε συνιστά αποτελεσματικό εργαλείο για τη μελέτη της σχέσης μεταξύ της δραστηριότητας των εκκενώσεων και της διάβρωσης μιας μόνωσης. Από την άλλη, ο καταμετρητής πλήθους μερικών εκκενώσεων προσφέρεται για την εκτίμηση της κατάστασης μιας μόνωσης και τη μελέτη της σχέσης μεταξύ εκκενώσεων και φθοράς. Ο συνδυασμός λοιπόν των δύο αυτών μεθόδων δίνει χρήσιμες πληροφορίες τόσο για το μηχανισμό των παρατηρούμενων εκκενώσεων όσο και το βαθμό γήρανσης μιας μόνωσης. [12]

Άλλες μέθοδοι (μη ηλεκτρικές) ανίχνευσης μερικών εκκενώσεων

Στις ακουστικές μεθόδους ανίχνευσης εκκενώσεων, εάν ένας ήχος ακουστεί από τη συσκευή υψηλής τάσης σε μια δεδομένη τάση, συμπεραίνεται ότι η μόνωση της συσκευής δεν είναι κατάλληλη. Η μέθοδος αυτή μπορεί να ανιχνεύσει εκκενώσεις μεγέθους το πολύ 40pC. Μια άλλη ακουστική μέθοδος βασίζεται στην ανίχνευση της ακουστικής ενέργειας των μερικών εκκενώσεων στην περιοχή των υπερήχων. Συνήθως χρησιμοποιούνται ένα μικρόφωνο των 40kHz και ένας ενισχυτής μαζί με μια οθόνη για την ένδειξη του επιπέδου του υπερήχου που ανιχνεύεται. Η ακουστική μέθοδος, αν και έχει αρκετά υψηλή ευαισθησία (έως μερικά pC), δεν μπορεί να δώσει δεδομένα από τα οποία να μπορούμε να συμπεράνουμε τη φύση, τον τύπο και τη συχνότητα της δραστηριότητας των μερικών εκκενώσεων. [12]

Η εκπομπή φωτός μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό των μερικών εκκενώσεων, εφόσον βέβαια το μονωτικό υλικό είναι διαφανές. Η ένταση εκπομπής φωτός είναι χαμηλή και για αυτό χρησιμοποιούνται συχνά φωτοπολλαπλασιαστές. [18]

Άλλη μέθοδος ανίχνευσης μερικών εκκενώσεων είναι η οφειλόμενη στην επιτόπιο θέρμανση, η οποία αναπτύσσεται λόγω των εκκενώσεων. Εάν τοποθετήσουμε θερμοζεύγη κατά διαστήματα κατά μήκος του καλωδίου, θα έχουμε αντίληψη περί των θερμών σημείων της μόνωσης. Η μέθοδος αυτή δεν είναι πολύ ευαίσθητη και για αυτό δεν έχει ευρεία εφαρμογή. [12]

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω μέθοδοι είναι λιγότερο ευαίσθητες από τις ηλεκτρικές και για το λόγο αυτό δεν μπορούμε να βασισθούμε αποκλειστικά σε αυτές, αλλά τις χρησιμοποιούμε ως συμπληρωματικές των ηλεκτρικών.

Μέτρηση των μερικών εκκενώσεων σε καλώδια

Τα καλώδια μέσης και υψηλής τάσης παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα κατά τη μέτρηση των μερικών εκκενώσεων που συμβαίνουν στις μονώσεις τους. Η χωρητικότητα ενός καλωδίου είναι πολύ μεγάλη και είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί υψηλή ευαισθησία κατά τις μετρήσεις των εκκενώσεων. Το καλώδιο δρα ως γραμμή μεταφοράς και ένας παλμός εκκένωσης θα «ταξιδέψει» και προς τις δύο κατευθύνσεις από το σημείο όπου παρουσιάζεται η εκκένωση. Όταν ο παλμός φθάσει στο ένα άκρο θα ανακλασθεί, με αποτέλεσμα να υπάρξει αλλοίωση του μεγέθους και της μορφής του παλμού. Παλμοί προερχόμενοι από διαφορετικά σημεία είναι δυνατόν, να φθάσουν επικαλυπτόμενοι στο άλλο άκρο του καλωδίου, όπου υπάρχει ο ανιχνευτής εκκενώσεων. Η απόκριση του παλμού είναι σπουδαίος παράγοντας, ενώ οι ανακλάσεις από τους ακροδέκτες του καλωδίου δημιουργούν σφάλματα τα οποία αλλοιώνουν το μέγεθος μιας εκκένωσης. Ακόμη όμως και με αλλοιωμένα μεγέθη, μετρήσεις σε καλώδια μέσης και χαμηλής τάσης γίνονται δεκτές για συνήθη ποιοτικό έλεγχο. Η ευαισθησία, η οποία απαιτείται για τις δοκιμές των καλωδίων μέσης και υψηλής τάσης, είναι $\leq 5\text{pC}$ για καλώδια με μόνωση διασταυρωμένου πολυαιθυλενίου και $\leq 20\text{pC}$ για καλώδια με μόνωση PVC (όταν η δοκιμή γίνεται με τάση διπλάσια της ονομαστικής). Τέλος πρέπει να επισημανθεί ότι, η ανίχνευση και καταγραφή των εκκενώσεων δεν δίνει πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό, τον τύπο, την κατάσταση ή τη θέση των πηγών των μερικών εκκενώσεων εντός της μόνωσης (εάν δηλαδή είναι εγκεκλεισμένες κοιλότητες, αγωγή σωματίδια κτλ). [12] [14]

4.4 Δοκιμές σε καλώδια

Οι δοκιμές σε καλώδια έχουν ιδιαίτερη σημασία, αφενός γιατί απαιτείται μεγάλη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία στις εγκαταστάσεις, αφετέρου γιατί η επισκευή μιας καλωδιακής σύνδεσης είναι επίπονη, μακροχρόνια και πολυδιάστατη διαδικασία. Οι δοκιμές που γίνονται σε καλώδια εξαρτάται από τον τύπο τους, την ονομαστική τάση, την κατασκευή του καλωδίου και τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Υπάρχει μια σειρά χημικών, μηχανικών, θερμικών και ηλεκτρικών δοκιμών που χωρίζονται στις εξής ομάδες :

- **Δοκιμές σειράς**, που γίνονται σε κάθε καλωδιακό μήκος και περιλαμβάνουν τη μέτρηση της αντίστασης στο συνεχές ρεύμα, μετρήσεις για την ποιότητα του αγωγού, δοκιμή υπό τάση και δοκιμές μερικών εκκενώσεων. Επιπλέον γίνονται μετρήσεις του συντελεστή απωλειών συναρτήσει της τάσης, όπου διαπιστώνεται από ποια τάση και πάνω το καλώδιο έχει ιδιαίτερα μεγάλες απώλειες, οπότε δεν ενδείκνυται η λειτουργία του πέραν αυτής της τάσης.
- **Δοκιμές σε τυχαία δείγματα (δειγματοληψίας)**. Αυτές αφορούν κυρίως μετρήσεις των διαστάσεων του καλωδίου. Μετρώνται οι διάμετροι των διαφόρων στρωμάτων και το πάχος της μόνωσης του καλωδίου, διαπιστώνεται η διατομή των αγωγών φάσεων και του γειωμένου αγωγού, ενώ σε καλώδια δικτυωμένου

πολυαιθυλενίου διαπιστώνεται ο βαθμός της δικτύωσης του υλικού με μέτρηση του συντελεστή θερμικής διαστολής.

- **Δοκιμές σχεδίασης**, που γίνονται στην πρώτη κατασκευή ενός καλωδίου και επίσης μετά από αλλαγή ενός υλικού ή της διαδικασίας κατασκευής. Πρόκειται για έρευνα πάνω στο υπό δοκιμή καλώδιο, που αρχίζει με μετρήσεις των διαστάσεων, προχωρεί στις ιδιότητες των υλικών και τελειώνει με δοκιμές γήρανσης σε ένα τεμάχιο του καλωδίου. Το καλώδιο δοκιμάζεται υπό συνθήκες λειτουργίας και πρέπει να αποδειχθεί ότι δεν επιφέρονται επικίνδυνες αλλοιώσεις στα υλικά του καλωδίου.

- **Δοκιμές τύπου**, που διακρίνονται σε ηλεκτρικές δοκιμές τύπου και μηχανικές δοκιμές τύπου. Οι δοκιμές τύπου μπορεί να είναι καταστρεπτικές και για αυτό πραγματοποιούνται σε ένα δείγμα καλωδίων.

- **Δοκιμές μετά την εγκατάσταση**. Οι δοκιμές σε εγκατεστημένα καλώδια μπορούν να γίνουν θεωρητικά με συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα. Ωστόσο στην πράξη δεν διεξάγονται καταστρεπτικές ή μη δοκιμές με εναλλασσόμενο ρεύμα, διότι, ιδίως σε μεγάλου μήκους καλώδια, λόγω της χωρητικότητας του δοκιμίου θα απαιτούνταν πηγές με πολύ μεγάλη ισχύ, σχεδόν ανέφικτη. Γι' αυτό διεξάγονται δοκιμές με συνεχές ρεύμα, οπότε η απαιτούμενη πηγή είναι μικρών διαστάσεων και μπορεί εύκολα να μεταφερθεί, ή δοκιμές με τάση πολύ χαμηλής συχνότητας (βλ. παράγραφο 4.6) [10] [15] [17] [19]

4.5 Δοκιμές σε καλώδια MT 1-30 kV σύμφωνα με τους κανονισμούς IEC 60502-2

A. Συνθήκες Δοκιμών (Test Conditions)

A1.) Θερμοκρασία περιβάλλοντος χώρου

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου όπου θα γίνουν οι δοκιμές θα πρέπει να είναι $(20 \pm 15)^{\circ}\text{C}$, εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά για συγκεκριμένες δοκιμές.

A2.) Συχνότητα και κυματομορφή των τάσεων

Η εναλλασσόμενη τάση που εφαρμόζεται θα πρέπει να είναι ημιτονοειδής, συχνότητας 49-61 Hz.

A3.) Κυματομορφή των κρουστικών τάσεων

Οι κρουστικές τάσεις πρέπει να έχουν χρόνο μετώπου 1-5μs και χρόνο ημίσειας εύρους 40-60μs.

B. Δοκιμές Σειράς

B1.) Γενικά

Οι δοκιμές σειράς πραγματοποιούνται σε όλο το μήκος του καλωδίου, για να επιβεβαιωθεί ότι πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Οι δοκιμές σειράς που πραγματοποιούνται είναι :

- α.) Μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης των αγωγών
- β.) Δοκιμή μερικών εκκενώσεων
- γ.) Δοκιμή τάσης

B2.) Ηλεκτρική αντίσταση αγωγών

Η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης πρέπει να γίνεται σε όλα τα αγωγή τμήματα κάθε τεμαχίου (αγωγός, μεταλλικός μανδύας, θωράκιση κτλ), συμπεριλαμβανομένου και του κεντρικού αγωγού (concentric conductor – ψύχα), εάν υπάρχει.

Το προς δοκιμή καλώδιο τοποθετείται στην αίθουσα δοκιμών, όπου παραμένει για τουλάχιστον 12h σε σταθερή θερμοκρασία. Εάν υπάρχουν αμφιβολίες για το εάν η θερμοκρασία των αγωγών είναι ίδια με τη θερμοκρασία του χώρου, η αντίσταση μετράται αφού το καλώδιο παραμείνει στην αίθουσα δοκιμών για 24h. Εναλλακτικά η αντίσταση μετράται σε ένα δείγμα του αγωγού, το οποίο προηγουμένως τοποθετήθηκε για 1h τουλάχιστον σε υγρό, τη θερμοκρασία του οποίου ελέγχουμε.

Οι μετρούμενες τιμές προκύπτουν σε Ω/km και ανάγονται σε θερμοκρασία 20°C . Η αντίσταση κάθε αγωγού δε θα πρέπει να ξεπερνάει τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές που ορίζονται στον κανονισμό IEC 60228.

B3.) Δοκιμή μερικών εκκενώσεων

Η δοκιμή μερικών εκκενώσεων πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60885-3. Για τριπολικά καλώδια η δοκιμή πραγματοποιείται σε κάθε μονωμένο αγωγό, ενώ η τάση εφαρμόζεται μεταξύ αγωγού και μεταλλικού μανδύα. Η τιμή της τάσης αυξάνει βαθμιαία και φθάνει την τιμή $2U_0$ για 10sec και στη συνέχεια μειώνεται στην τιμή $1,73 U_0$. Σημειώνεται ότι U_0 είναι η τάση μεταξύ αγωγού και γης ή μεταλλικού μανδύα. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής δε θα πρέπει να ανιχνευθούν εκκενώσεις, που μπορεί να αποδειχθούν ιδιαίτερες καταστροφικές. Το φορτίο μιας εκκένωσης δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 10pC.

B4.) Δοκιμή τάσης

I.) Γενικά

Η δοκιμή τάσης πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χώρου, με εναλλασσόμενη τάση.

II.) Δοκιμή σε μονοπολικά καλώδια

Για μονοπολικά καλώδια εφαρμόζεται τάση για 5min μεταξύ του αγωγού και του μεταλλικού μανδύα του καλωδίου.

III.) Δοκιμή σε τριπολικά καλώδια

Για τριπολικά καλώδια με ξεχωριστό μεταλλικού μανδύα εφαρμόζεται τάση για 5min μεταξύ κάθε αγωγού και της μεταλλικής επένδυσης.

Για τριπολικά καλώδια με κοινό μεταλλικό μανδύα εφαρμόζεται τάση για 5min διαδοχικά μεταξύ κάθε μονωμένου αγωγού και όλων των άλλων αγωγών και του κοινού μεταλλικού μανδύα.

IV.) Τάση δοκιμής

Η τάση δοκιμής είναι $3,5U_0$.

Πίνακας 4-1

U₀ (kV)	3,6	6	8,7	12	18
Τάση δοκιμής (kV)	12,5	21	30,5	42	63

Εάν για τριπολικά καλώδια η δοκιμή τάσης πραγματοποιείται με τριφασικό ΜΣ η τάση δοκιμής μεταξύ των φάσεων πολλαπλασιάζεται με 1,73.

V.) Απαιτήσεις

Δεν πρέπει να συμβεί διάσπαση της μόνωσης.

Γ. Δοκιμές με δειγματοληψία

Γ1.) Γενικά

I.) Ορισμοί που αφορούν τη δειγματοληψία

- Παρτίδα : μια παρτίδα είναι ένα σύνολο από παραχθέντα είδη του ίδιου τύπου και του ίδιου μεγέθους, που έχουν παραχθεί σε μια καθορισμένη χρονική περίοδο κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

- Δείγμα : ένα δείγμα είναι ένας αριθμός από παραγόμενες μονάδες επιλεγμένες στην τύχη από μια παρτίδα.

- Δοκίμιο : δοκίμιο είναι ένα στοιχείο του δείγματος

II.) Δοκιμές

Οι δοκιμές με δειγματοληψία που πραγματοποιούνται είναι :

- α.) εξέταση του αγωγού
- β.) μέτρηση των διαστάσεων
- γ.) δοκιμές τάσης για καλώδια τάσης μεγαλύτερης από 3,6/6 (7,2)kV
- δ.) δοκιμές θέρμανσης για καλώδια με μόνωση EPR, HEP, XLPE

Η εξέταση του αγωγού καθώς και η μέτρηση του πάχους της μόνωσης και του μανδύα και της διαμέτρου ολόκληρου του καλωδίου γίνεται στο 10% το πολύ των αριθμών των στροφείων του ίδιου τύπου της παραγόμενης παρτίδας.

Για τις δοκιμές δειγματοληψίας ισχύει ο παρακάτω πίνακας :

Πίνακας 4-2

	Μήκος καλωδίου		Αριθμός δειγμάτων	
Πολυπολικά καλώδια	Μονοπολικά καλώδια	Πολυπολικά καλώδια	Μονοπολικά καλώδια	Αριθμός δειγμάτων
> (km)	≤ (km)	> (km)	≤ (km)	
2	10	4	20	1
10	20	20	40	2
20	30	40	60	3

Γ2.) Επανάληψη των δοκιμών

Εάν κάποιο τεμάχιο αποτύχει στη δοκιμή, τότε δύο επιπλέον τεμάχια από την ίδια παρτίδα υποβάλλονται στις ίδιες δοκιμές. Εάν τα δύο αυτά τεμάχια περάσουν με επιτυχία τις δοκιμές τότε όλα τα τεμάχια της συγκεκριμένης παρτίδας θεωρείται ότι ανταποκρίνονται στις απαιτούμενες προδιαγραφές. Εάν ένα από τα δύο αυτά τεμάχια αποτύχει στις δοκιμές, τότε όλη η παρτίδα θεωρείται ότι δεν ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές.

Γ3.) Εξέταση του αγωγού

Ο έλεγχος του αγωγού για το αν είναι κατασκευασμένος σύμφωνα με τους κανονισμούς, γίνεται σύμφωνα με τους κανονισμούς IEC 60228.

Γ4.) Μέτρηση του πάχους της μόνωσης και των μη μεταλλικών περιβλημάτων

I.) Γενικά

Κάθε τεμάχιο που επιλέγεται για τη δοκιμή πρέπει να είναι απαλλαγμένο από τμήματα που έχουν υποστεί τυχόν φθορές.

II.) Απαιτήσεις για τη μόνωση

Η ελάχιστη μετρούμενη τιμή δε θα πρέπει να είναι μικρότερη από το 90% της ονομαστικής τιμής του πάχους. Ισχύουν :

$$t_{\min} \geq 0,9t_n - 0,1 \quad \text{και} \quad (t_{\max} - t_{\min})/t_{\max} \leq 0,15 \quad (4.14 \alpha, \beta)$$

όπου :

t_{\max} : το μέγιστο πάχος σε mm

t_{\min} : το ελάχιστο πάχος σε mm

t_n : το ονομαστικό πάχος σε mm

III.) Απαιτήσεις για τα μη μεταλλικά περιβλήματα

Το τμήμα του εξεταζόμενου περιβλήματος πρέπει να ανταποκρίνεται στα παρακάτω :

α.) Για καλώδια χωρίς μηχανική θωράκιση, για καλώδια με εξωτερικό περίβλημα που δεν τοποθετείται απευθείας πάνω από τη μηχανική ή την ηλεκτρική θωράκιση η μικρότερη μετρούμενη τιμή δε θα πρέπει να είναι κάτω από το 85% της ονομαστικής τιμής. Ισχύει : $t_{\min} \geq 0,85t_n - 0,1$ (4.15)

β.) Για καλώδια με εξωτερικό περίβλημα που τοποθετείται απευθείας στην ηλεκτρική ή μηχανική θωράκιση, η μικρότερη μετρούμενη τιμή δε θα πρέπει να είναι κάτω από το 80% της ονομαστικής τιμής. Ισχύει : $t_{\min} \geq 0,8t_n - 0,2$ (4.16)

Γ5.) Μέτρηση του πάχους του μολύβδινου μανδύα

Το ελάχιστο πάχος του μολύβδινου μανδύα δε θα πρέπει να είναι μικρότερο από το 95% της ονομαστικής τιμής. Ισχύει : $t_{\min} \geq 0,95t_n - 0,1$ (4.17)

Το πάχος του μολύβδινου μανδύα μετράται με ένα μικρόμετρο με ακρίβεια της τάξης $\pm 0,01\text{mm}$. Η μέτρηση πρέπει να γίνει σε ένα κομμάτι του μανδύα τουλάχιστον 50mm σε μήκος, το οποίο θα έχει αφαιρεθεί προσεκτικά από το καλώδιο. Στη συνέχεια αφού καθαριστεί, λαμβάνονται οι μετρήσεις, οι οποίες γίνονται στην περιφέρεια του μανδύα και όχι λιγότερο από 10mm από τη άκρη του επίπεδου κομματιού για να βεβαιωθούμε ότι μετρήθηκε το ελάχιστο πάχος.

Γ6.) Μέτρηση της μεταλλικής και μηχανικής θωράκισης

I.) Μέτρηση των συρμάτων

Η διάμετρος των κυκλικών συρματιδίων και το πάχος των επιπέδων συρματιδίων μετρώνται με ένα μικρόμετρο με δύο επίπεδα άκρα με ακρίβεια $\pm 0,01\text{mm}$. Για κυκλικής διαμέτρου συρματίδια γίνονται δύο μετρήσεις (με διαφορά γωνίας 90°) στο ίδιο σημείο και ο μέσος όρος τους λαμβάνεται ως διάμετρος.

Π.) Μέτρηση των ταινιών

Η μέτρηση γίνεται με μικρόμετρο που έχει δύο επίπεδα άκρα διαμέτρου 5mm και ακρίβειας $\pm 0,01\text{mm}$. Για ταινίες πλάτους μεγαλύτερου από 40mm το πάχος μετράται στο κέντρο του πλάτους. Για πλατύτερες ταινίες οι μετρήσεις γίνονται 20mm από κάθε άκρο της ταινίας και ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων λαμβάνεται ως πάχος.

ΠΙ.) Απαιτήσεις

Οι διαστάσεις των συρμάτων και των ταινιών δεν πρέπει να είναι μικρότερες από τις τιμές που δίνονται στον παρακάτω πίνακα περισσότερο από :

- 5% για κυκλικά σύρματα
- 8% για επίπεδα σύρματα
- 10% για ταινίες

Πίνακας 4-3 : Ονομαστικές διαμέτροι για κυκλικά σύρματα

Διάμετρος κάτω από τη θωράκιση		Ονομαστικοί διάμετρος των συρμάτων
> (mm)	≤ (mm)	σε mm
-	10	0,8
10	15	1,25
15	25	1,6
25	35	2
35	60	2,5
60	-	3,15

Πίνακας 4-4 : Ονομαστικά πάχη των ταινιών

Διάμετρος κάτω από τη θωράκιση		Ονομαστικό πάχος ταινιών	
> (mm)	≤ (mm)	Χάλυβας	Αλουμίνιο
-	30	0,2	0,5
30	70	0,5	0,5
70	-	0,8	0,8

Για επίπεδα σύρματα και διάμετρο κάτω από τη ζώνη μηχανικής ενίσχυσης μεγαλύτερη από 15mm, το ονομαστικό πάχος των επιπέδων χαλύβδινων συρμάτων πρέπει να είναι 0,8mm. Καλώδια με διαμέτρους κάτω από τη θωράκιση έως 15mm δεν πρέπει να θωρακίζονται με επίπεδα σύρματα.

Γ7.) Μέτρηση της εξωτερικής διαμέτρου

Γίνεται με βάση τους κανονισμούς IEC 60811-1-1.

Γ8.) Δοκιμή τάσης για 4h

Εφαρμόζεται μόνο σε καλώδια πάνω από 3,6/6 (7,2) kV, με μήκος μεγαλύτερο από 5m.

I.) Διαδικασία

Εφαρμόζεται μία τάση για 4h σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μεταξύ κάθε αγωγού και του μεταλλικού μανδύα.

Π.) Τάσεις δοκιμής

Η τάση δοκιμής πρέπει να είναι $4U_0$.

Πίνακας 4-5

U_0 kV	6	8,7	12	18
Τάση δοκιμής kV	24	35	48	72

ΠΙ.) Απαιτήσεις

Δεν πρέπει να συμβεί διάσπαση της μόνωσης.

Γ9.) Δοκιμή επιμήκυνσης εν θερμώ

Η δοκιμή έχει σκοπό να καθορίσει την επιμήκυνση (ϵ) της μόνωσης, μετά από συγκεκριμένη κατεργασία που περιγράφεται παρακάτω.

Πάνω στο δοκίμιο σημειώνονται δύο ενδεικτικές γραμμές. Η επιμήκυνση (ϵ) αποτελεί την απόκλιση του μήκους μεταξύ των ενδεικτικών γραμμών κατά την εκτέλεση της δοκιμής, από το μήκος μεταξύ των ενδεικτικών γραμμών πριν την έναρξη εκτέλεσης της δοκιμής, εκφρασμένη σε ποσοστό επί τοις εκατό.

Η δοκιμή γίνεται σε κλίβανο σε θερμοκρασία $200 \pm 3^\circ\text{C}$. Στο δοκίμιο εφαρμόζεται μία δύναμη τάσης (N/cm^2), και μετά από παραμονή στον κλίβανο στην παραπάνω θερμοκρασία μετράται η απόσταση μεταξύ των ενδεικτικών γραμμών. Στη συνέχεια η δύναμη φόρτισης απομακρύνεται από το δοκίμιο, το οποίο αφήνεται να κρυώσει (έως ότου φθάσει στην προδιαγραφόμενη θερμοκρασία) και ξαναμετράται η απόσταση μεταξύ των δύο γραμμών. Η μέγιστη επιμήκυνση υπό φορτίο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 175%, ενώ η μέγιστη παραμένουσα επιμήκυνση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 15%.

Δ. Ηλεκτρικές δοκιμές τύπου

Όταν οι δοκιμές τύπου ολοκληρωθούν επιτυχώς για έναν τύπο καλωδίου συγκεκριμένης διατομής και τάσης, τότε θεωρείται ότι όλα τα καλώδια του ίδιου τύπου πληρούν τις προβλεπόμενες προδιαγραφές, εφόσον ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες :

- α.) να έχουν χρησιμοποιηθεί τα ίδια υλικά και οι ίδιες διαδικασίες κατασκευής
- β.) η διατομή των καλωδίων να μην είναι μεγαλύτερη από τη διατομή του ήδη ελεγμένου και εγκεκριμένου καλωδίου
- γ.) η τάση των καλωδίων να μην είναι μεγαλύτερη από την τάση του ήδη ελεγμένου και εγκεκριμένου καλωδίου

Δ1.) Καλώδια με ημιαγώγιμα στρώματα αγωγού και μόνωσης

I.) Σειρά των δοκιμών

Η σειρά των δοκιμών πρέπει να είναι η ακόλουθη :

- α.) δοκιμή κάμψης ακολουθούμενη από μέτρηση μερικών εκκενώσεων
- β.) μέτρηση της $\tan\delta$
- γ.) κύκλοι θέρμανσης ακολουθούμενοι από μέτρηση μερικών εκκενώσεων
- δ.) δοκιμή αντοχής σε κρουστική τάση ακολουθούμενη από δοκιμή τάσης σε ac
- ε.) δοκιμή διηλεκτρικής αντοχής για 4h

II.) Ειδικές απαιτήσεις

Για τη διεξαγωγή των δοκιμών απαιτείται καλώδιο 10-15m μήκος. Η μέτρηση της $\tan\delta$ πρέπει να γίνεται σε ξεχωριστό τεμάχιο καλωδίου, από αυτό των υπολοίπων δοκιμών. Η μέτρηση της $\tan\delta$ δεν απαιτείται για τάσεις μικρότερες από 6/10 (12) kV. Για τη δοκιμή διηλεκτρικής αντοχής απαιτείται επίσης νέο τεμάχιο (στροφείο), εφόσον έχουν πραγματοποιηθεί οι δοκιμές α και γ.

III.) Δοκιμή κάμψης ακολουθούμενη από μέτρηση μερικών εκκενώσεων

Το δοκίμιο περιελίσσεται για μία τουλάχιστον φορά γύρω από έναν κύλινδρο (τύμπανο). Η διάμετρος του κυλίνδρου πρέπει να είναι :

- για καλώδια με μολύβδινο μεταλλικό μανδύα
- 25 (d+D) \pm 5% για μονοπολικά καλώδια

- 20 (d+D) ± 5% για πολυπολικά καλώδια
 - για άλλα καλώδια
 - 20 (d+D) ± 5% για μονοπολικά καλώδια
 - 15 (d+D) ± 5% για πολυπολικά καλώδια
- όπου D η εξωτερική διάμετρος του καλωδίου σε mm
d η διάμετρος του αγωγού σε mm.
- Εάν ο αγωγός δεν είναι κυκλικής διατομής τότε :

$$d = 1,13\sqrt{S} \quad (4.18)$$

όπου S η διατομή του καλωδίου σε mm².

Η δοκιμή ακολουθείται από μερικές εκκενώσεις, σύμφωνα με την επόμενη παράγραφο.

IV.) Δοκιμή μερικών εκκενώσεων

Η τάση δοκιμής αυξάνεται βαθμιαία μέχρι την τιμή 2U₀ για 10sec και στη συνέχεια μειώνεται στην τιμή 1,73U₀. Δε θα πρέπει να διαπιστώνεται καμία διάτρηση της μόνωσης. Το φορτίο μιας εκκένωσης δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 5pC.

V.) Μέτρηση της tanδ για καλώδια 6/10 (12) kV και πάνω συναρτήσει της θερμοκρασίας

Το δοκίμιο θερμαίνεται με έναν από τους παρακάτω τρόπους :

- το δοκίμιο τοποθετείται σε ένα δοχείο με υγρό ή σε έναν κλίβανο
- ένα ρεύμα διαπερνά το μεταλλικό περίβλημα ή τον αγωγό ή και τα δύο

Το δοκίμιο θερμαίνεται μέχρι η θερμοκρασία του αγωγού να φθάσει 5-10°C πάνω από τη μέγιστη θερμοκρασία σε κανονική λειτουργία. Σε κάθε περίπτωση η θερμοκρασία του αγωγού υπολογίζεται είτε με τη μέτρηση της αντίστασης του αγωγού είτε μέσω μιας κατάλληλης συσκευής μέτρησης της θερμοκρασίας στο δοχείο με το υγρό ή στον κλίβανο ή στην επιφάνεια του μεταλλικού περιβλήματος. Η tanδ μετράται με εφαρμογή μίας εναλλασσόμενης τάσης τουλάχιστον 2kV. Οι μετρούμενες τιμές δε θα πρέπει να ξεπερνούν τις τιμές που δίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 4-6

		PVC	EPR/HEPR	XLPE
Μέγιστη θερμοκρασία του αγωγού σε κανονική λειτουργία	°C	70	90	90
ρ - στους 20°C - στη μέγιστη θερμοκρασία του αγωγού σε κανονική λειτουργία	Ω.cm	10 ¹⁴	-	-
	Ω.cm	10 ¹¹	10 ¹²	-
K_i (insulation resistance constant) - στους 20°C - στη μέγιστη θερμοκρασία του αγωγού σε κανονική λειτουργία	MΩ.km	367	-	-
	MΩ.km	0,37	3,67	-
tanδ - tanδ σε θερμοκρασία 5-10°C πάνω από τη μέγιστη θερμοκρασία σε κανονική λειτουργία	x10 ⁻⁴	-	400	40

VI.) Κύκλοι θέρμανσης

Το δοκίμιο, που προηγουμένως υποβλήθηκε στις παραπάνω δοκιμές, θερμαίνεται καθώς ένα ρεύμα διαπερνά τον αγωγό, έως ότου η θερμοκρασία του αγωγού σταθεροποιηθεί σε μία τιμή 5-10°C πάνω από τη μέγιστη θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας.

Για τριπολικά καλώδια το ρεύμα αυτό πρέπει να διαπερνά και τους τρεις αγωγούς.

Κάθε κύκλος θέρμανσης πρέπει να έχει διάρκεια τουλάχιστον 8h. Η θερμοκρασία του αγωγού πρέπει να παραμείνει στα προδιαγραφόμενα όρια τουλάχιστον 2h για κάθε περίοδο θέρμανσης. Ακολουθεί ψύξη του αγωγού για 3h τουλάχιστον. Η μέγιστη θερμοκρασία των αγωγών στο τέλος της περιόδου θέρμανσης θα πρέπει να είναι 95-100°C. Οι κύκλοι θέρμανσης πρέπει να επαναληφθούν 20 φορές.

Μετά τον τελευταίο κύκλο το δοκίμιο υποβάλλεται σε δοκιμή μερικής εκκένωσης, όπου το φορτίο μιας εκκένωσης δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 5pC.

V.) Δοκιμή αντοχής σε κρουστική τάση ακολουθούμενη από δοκιμή τάσης σε a.c.

Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται σε ένα δοκίμιο με θερμοκρασία αγωγού 5-10°C πάνω από τη μέγιστη θερμοκρασία σε συνθήκες λειτουργίας. Η μέγιστη τάση λειτουργίας για κάθε περίπτωση φαίνεται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 4-7

U₀/U (U_m) kV	3,6/6 (7,2)	6/10 (12)	8,7/15 (17,5)	12/20 (24)	18/30 (36)
Τάση δοκιμής (μέγιστο) kV	60	75	95	125	170

Κάθε πόλος του καλωδίου πρέπει να αντέχει 10 θετικές κρουστικές τάσεις και 10 αρνητικές κρουστικές τάσεις.

Στη συνέχεια κάθε πόλος του καλωδίου υποβάλλεται σε δοκιμή τάσης για 15min. Δε θα πρέπει να συμβεί διάτρηση της μόνωσης.

VI.) Δοκιμή διηλεκτρικής αντοχής για 4h

Εφαρμόζεται μία τάση 4U₀ μεταξύ αγωγού και μεταλλικού μανδύα για 4h. Δε θα πρέπει να συμβεί διάτρηση της μόνωσης.

VII.) Ειδική αγωγιμότητα (ρ) των ημιαγωγικών θωρακίσεων του αγωγού και της μόνωσης

Μετράται η ειδική αγωγιμότητα σε Ωm πριν τη γήρανση και μετά τη γήρανση, σε κομμάτι καλωδίου θερμοκρασίας ± 2°C από τη μέγιστη θερμοκρασία του αγωγού για συνθήκες λειτουργίας.

Η ειδική αγωγιμότητα πριν και μετά τη γήρανση δεν πρέπει να ξεπερνά τις παρακάτω τιμές :

- για την ημιαγωγική θωράκιση του αγωγού : 1000 Ωm
- για την ημιαγωγική θωράκιση της μόνωσης : 500 Ωm.

Δ2.) Καλώδια τάσης 3,6/6 (7,2) kV χωρίς ημιαγωγική θωράκιση της μόνωσης

Το κάθε δοκίμιο, μήκους 10-15m, υποβάλλεται στις παρακάτω δοκιμές :

- α.) μέτρηση της αντίστασης μόνωσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χώρου
- β.) μέτρηση της αντίστασης μόνωσης στη μέγιστη θερμοκρασία του αγωγού σε κανονική λειτουργία

- γ.) δοκιμή τάσης για 4h

Τα καλώδια υποβάλλονται επίσης σε δοκιμή μερικών εκκενώσεων.

I.) Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η δοκιμή αυτή πρέπει να γίνει πριν κάθε άλλη δοκιμή.

Όλα τα εξωτερικά περιβλήματα αφαιρούνται και οι πόλοι βυθίζονται σε νερό με θερμοκρασία περιβάλλοντος για τουλάχιστον 1h πριν τη δοκιμή.

Η συνεχής τάση δοκιμής πρέπει να είναι από 80V έως 500V και να εφαρμόζεται από 1min έως 5min, μεταξύ αγωγού και νερού.

Η ειδική αντίσταση υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση :

$$\rho = \frac{2\pi lR}{\ln(D/d)} \quad (4.19)$$

όπου : ρ η ειδική αντίσταση σε Ωcm

R η αντίσταση μόνωσης σε Ω

l το μήκος του καλωδίου σε cm

D η εξωτερική διάμετρος της μόνωσης σε mm

d η εσωτερική διάμετρος της μόνωσης σε mm

Η σταθερά αντίστασης μόνωσης K_i (ΜΩ.km) μπορεί να υπολογιστεί με τον τύπο

$$K_i = \frac{l \cdot R \cdot 10^{-11}}{\lg(D/d)} = 10^{-11} \cdot 0,367 \cdot \rho \quad (4.20)$$

Για μη κυκλικούς αγωγούς ο λόγος D/d είναι ο λόγος της περιμέτρου πάνω από τη μόνωση προς την περίμετρο κάτω από τη μόνωση.

Οι τιμές που θα προκύψουν από τις μετρήσεις δε θα πρέπει να είναι μικρότερες από τις τιμές που ορίζονται στον πίνακα της παραγράφου Δ.1.V. (Πίνακας 4-6)

II.) Υπολογισμός της αντίστασης μόνωσης στη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του αγωγού

Οι πόλοι των καλωδίων βυθίζονται σε νερό θερμοκρασίας $\pm 2^\circ\text{C}$ από τη μέγιστη θερμοκρασία του αγωγού σε συνεχή λειτουργία, για 1h τουλάχιστον πριν από τη δοκιμή.

Η συνεχής τάση δοκιμής πρέπει να είναι από 80V έως 500V και να εφαρμόζεται από 1min έως 5min, μεταξύ αγωγού και νερού.

Για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης της μόνωσης χρησιμοποιούνται οι τύποι της παραπάνω παραγράφου.

Οι τιμές που θα προκύψουν από τις μετρήσεις δε θα πρέπει να είναι μικρότερες από τις τιμές που ορίζονται στον πίνακα της παραγράφου Δ.1.V. (Πίνακας 4-6)

III.) Δοκιμή διηλεκτρικής αντοχής για 4h

Οι πόλοι του καλωδίου βυθίζονται σε νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 1h τουλάχιστον.

Εφαρμόζεται μία τάση $4U_0$ μεταξύ αγωγού και νερού για 4h. Δε θα πρέπει να συμβεί διάτρηση της μόνωσης.

IV.) Δοκιμή αντοχής σε κρουστική τάση

Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται σε ένα δοκίμιο με θερμοκρασία αγωγού $5-10^\circ\text{C}$ πάνω από τη μέγιστη θερμοκρασία σε συνθήκες λειτουργίας. Η μέγιστη τάση λειτουργίας πρέπει να είναι 60kV. Οι κρουστικές τάσεις εφαρμόζονται μεταξύ κάθε αγωγού και των υπολοίπων, οι οποίοι είναι βραχυκλωμένοι μεταξύ τους και γειωμένοι προς γη.

Δε θα πρέπει να συμβεί διάτρηση της μόνωσης.

E. Μη ηλεκτρικές δοκιμές τύπου**E1.) Δοκιμές στη μόνωση****I.) Μηχανικές ιδιότητες πριν τη γήρανση**

Μετρώνται το ελάχιστο ειδικό φορτίο θραύσης σε N/mm^2 καθώς και η επί τοις εκατό (%) ελάχιστη επιμήκυνση θραύσης. Οι τιμές πρέπει να ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές του Πίνακα 4-8.

II.) Μηχανικές ιδιότητες μετά τη γήρανση

Πραγματοποιούνται μέσα σε φούρνο αέρα. Μετρώνται η μέγιστη μεταβολή του ειδικού φορτίου θραύσης (%) και η μέγιστη μεταβολή της επιμήκυνσης θραύσης (%). Οι τιμές πρέπει να ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές του Πίνακα 4-8.

Πίνακας 4-8

		PVC	EPR	HEPR	XLPE
Μέγιστη θερμοκρασία αγωγού	°C	70	90	90	90
<u>Πριν τη γήρανση</u>					
Ελάχιστο ειδικό φορτίο θραύσης	N/mm^2	12,5	4,2	8,5	12,5
Ελάχιστη επιμήκυνση θραύσης	%	125	200	200	200
<u>Μετά τη γήρανση</u>					
Θερμοκρασία	°C	100 ± 2	135 ± 3	135 ± 3	135 ± 3
Διάρκεια	h	168	168	168	168
Ειδικό φορτίο θραύσης					
α.) ελάχιστη τιμή μετά τη γήρανση	N/mm^2	12,5	12,5	12,5	12,5
β.) μέγιστη μεταβολή	%	± 25	± 30	± 30	± 25
Επιμήκυνση θραύσης					
α.) ελάχιστη τιμή μετά τη γήρανση	%	125	125	125	125
β.) μέγιστη μεταβολή	%	± 25	± 30	± 30	± 25

III.) Δοκιμή επιμήκυνσης εν θερμώ

Εφαρμόζεται μία δύναμη τάνσης $20 N/cm^2$ και μετρώνται η μέγιστη επιμήκυνση υπό φορτίο (%) και μέγιστη παραμένουσα επιμήκυνση (%). Οι μετρήσεις θα πρέπει να ανταποκρίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 4-9

		EPR	HEPR	XLPE
Θερμοκρασία ($\pm 3^\circ C$)	°C	250	250	200
Χρονική διάρκεια	min	15	15	15
Δύναμη τάνσης	N/cm^2	20	20	20
Μέγιστη επιμήκυνση υπό φορτίο	%	175	175	175
Μέγιστη παραμένουσα επιμήκυνση	%	15	15	15

IV.) Δοκιμή απορρόφησης νερού

Μετράται η μέγιστη μεταβολή της μάζας σε mg/cm^2 .

Πίνακας 4-10

		EPR	HEPR	XLPE	PVC
Θερμοκρασία ($\pm 2^\circ\text{C}$)	$^\circ\text{C}$	85	85	85	100
Χρονική διάρκεια	h	336	336	336	168
Μέγιστη μεταβολή της μάζας	mg/cm^2	5	5	1	1,5

V.) Δοκιμή συρρίκνωσης

Μετράται η μέγιστη συρρίκνωση. Για XLPE η δοκιμή πραγματοποιείται στους $130 \pm 3^\circ\text{C}$ για 1h και η μέγιστη συρρίκνωση δεν πρέπει να ξεπερνά το 4%. Προκειμένου για μόνωση PE η δοκιμή πραγματοποιείται στους $80 \pm 2^\circ\text{C}$ για 5h και η μέγιστη συρρίκνωση δεν πρέπει να ξεπερνά το 3%.

E2.) Δοκιμές σε μη μεταλλικά περιβλήματα**I.) Μηχανικές ιδιότητες πριν τη γήρανση**

Μετρώνται το ελάχιστο ειδικό φορτίο θραύσης σε N/mm^2 καθώς και η επί τοις εκατό (%) ελάχιστη επιμήκυνση θραύσης.

II.) Μηχανικές ιδιότητες μετά τη γήρανση

Η δοκιμή πραγματοποιείται μέσα σε φούρνο αέρα. Μετρώνται το ελάχιστο ειδικό φορτίο θραύσης σε N/mm^2 , η μέγιστη μεταβολή του ειδικού φορτίου θραύσης (%), η ελάχιστη επιμήκυνση θραύσης (%) και μέγιστη μεταβολή της επιμήκυνσης θραύσης (%).

Πίνακας 4-11

		ST₁	ST₂	ST₃	ST₄
Μέγιστη θερμοκρασία αγωγού	$^\circ\text{C}$	70	90	90	90
<u>Πριν τη γήρανση</u>					
Ελάχιστο ειδικό φορτίο θραύσης	N/mm^2	12,5	12,5	10	12,5
Ελάχιστη επιμήκυνση θραύσης	%	150	150	300	300
<u>Μετά τη γήρανση</u>					
Θερμοκρασία	$^\circ\text{C}$	100 ± 2	100 ± 2	100 ± 2	100 ± 2
Διάρκεια	h	168	168	240	240
<u>Ειδικό φορτίο θραύσης</u>					
α.) ελάχιστη τιμή μετά τη γήρανση	N/mm^2	12,5	12,5	12,5	12,5
β.) μέγιστη μεταβολή	%	± 25	± 25	± 25	± 25
<u>Επιμήκυνση θραύσης</u>					
α.) ελάχιστη τιμή μετά τη γήρανση	%	150	150	300	300
β.) μέγιστη μεταβολή	%	± 25	± 25	± 25	± 25

III.) Απώλεια μάζας μετά τη γήρανση

Η δοκιμή γίνεται σε φούρνο αέρα στους $100 \pm 2^{\circ}\text{C}$ για 7 ημέρες και μετράται η μέγιστη απώλεια μάζας, η τιμή της οποίας δεν πρέπει να ξεπερνά το $1,5\text{mg}/\text{cm}^2$.

IV.) Δοκιμές σε χαμηλή θερμοκρασία ($-15 \pm 2^{\circ}\text{C}$)

Πραγματοποιείται δοκιμή επιμήκυνσης, όπου μετράται η ελάχιστη επιμήκυνση (%), καθώς και δοκιμή κρούσης, όπου δε θα πρέπει να παρατηρηθούν σπασίματα.

V.) Δοκιμή πίεσης σε υψηλή θερμοκρασία $90 \pm 2^{\circ}\text{C}$

Μετράται η μέγιστη παραμόρφωση, η οποία δε θα πρέπει να ξεπερνά το 50%.

VI.) Δοκιμή απότομης θέρμανσης στους $150 \pm 3^{\circ}\text{C}$ για 1h

Δε θα πρέπει να παρατηρηθούν σπασίματα.

VII.) Δοκιμή μη διάδοσης της φλόγας

VIII.) Δοκιμή συρρίκνωσης

Αφορά κυρίως το PE, πραγματοποιείται στους $8 \pm 2^{\circ}\text{C}$ για 5h και η μέγιστη επιτρεπόμενη συρρίκνωση είναι 3%.

ΣΤ.) Ηλεκτρικές Δοκιμές μετά την εγκατάσταση

Οι δοκιμές μετά την εγκατάσταση πραγματοποιούνται αφού ολοκληρωθεί η εγκατάσταση του καλωδίου και των εξαρτημάτων του (ακροκιβώτια, ακροκεφαλές κ.α.)

ΣΤ1) Δοκιμή συνεχούς τάσης στα μεταλλικά περιβλήματα

Η τάση εφαρμόζεται μεταξύ του μεταλλικού μανδύα και της γης.

ΣΤ2.) Δοκιμή μόνωσης

I.) Δοκιμή AC

Εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση σύμφωνα για 5min μεταξύ του αγωγού και του μεταλλικού περιβλήματος.

II.) Δοκιμή DC

Εφαρμόζεται συνεχής τάση ίση με $4U_0$ για 15min.

Οι ηλεκτρικές δοκιμές μετά την εγκατάσταση που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι οι δοκιμές με εφαρμογή τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF), που εξετάζονται στην επόμενη παράγραφο.

4.6 Δοκιμές VLF (Very low frequency testing)

4.6.1 Γενικά

Σκοπός της δοκιμής VLF είναι να διαπιστωθεί εάν η εγκατάσταση του υπό ελέγχου καλωδίου έγινε με επιτυχία, οπότε το καλώδιο μπορεί να ηλεκτριστεί χωρίς πρόβλημα. Αναλυτικότερα ελέγχονται τα εξής :

- αν το καλώδιο κατά την εγκατάσταση του έχει υποστεί μηχανικές καταπονήσεις που μπορεί να έχουν επίδραση στην ηλεκτρική του συμπεριφορά, και συγκεκριμένα να έχουν προκαλέσει αλλοίωση των μονωτικών ιδιοτήτων της μόνωσης.
- αν η τοποθέτηση των ενδιάμεσων συνδέσμων (μούφες) και των ακροκιβωτίων τερματισμού έγινε με επιτυχία, ώστε το καλώδιο να λειτουργήσει σύμφωνα με τις προδιαγραφές στο σύνολό του.

Κανονισμοί που αναφέρονται στις δοκιμές με εφαρμογή υψηλής τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας είναι αυτοί της CENELEC (Harmonization Document 620) και της IEEE (400TM IEEE Guide for field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems, 400.2TM IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)). Οι παραπάνω κανονισμοί απαγορεύουν τη χρήση υψηλής τάσης DC σε καλώδια μέσης τάσης με πλαστική μόνωση, διότι όπως έχει αποδειχθεί η εφαρμογή DC τάσης :

- δεν ανιχνεύει την παρουσία πολλών τύπων αλλοίωσης μόνωσης και δεν εξασφαλίζει ότι σφάλματα που έχουν ξεκινήσει να σχηματίζονται θα εκδηλωθούν την ώρα της δοκιμής.
- προκαλεί πολλαπλές εστίες δημιουργίας νέων σφαλμάτων λόγω της παρατεταμένης εφαρμογής ισχυρών φορτίων μιας πολικότητας. Οι εστίες αυτές είναι συνήθως ξένα σωματίδια και μικροκοιλότητες που σχηματίζονται κατά τη διαδικασία έκχυσης του θερμοπλαστικού μονωτικού υλικού.

Αντιθέτως, έχει πλέον αποδειχθεί πως η εφαρμογή τάσης VLF σε καλώδια με πλαστική μόνωση είναι η πλέον αποτελεσματική και δεν προκαλεί καμία απολύτως καταπόνηση στο μονωτικό υλικό.

Οι δοκιμές VLF διακρίνονται σε **δοκιμές αντοχής (withstand)** και **διαγνωστικές δοκιμές (diagnostic)**. Στις *δοκιμές αντοχής* το δοκίμιο πρέπει να αντέξει μια συγκεκριμένη τάση που εφαρμόζεται στη μόνωση για ένα συγκεκριμένο χρόνο, χωρίς να συμβεί διάτρηση της μόνωσης. Εάν η μόνωση του καλωδίου είναι αρκετά φθαρμένη, τότε συμβαίνει διάτρηση. Το καλώδιο σε αυτήν την περίπτωση επιδιορθώνεται και η μόνωση δοκιμάζεται και πάλι έως ότου περάσει με επιτυχία τη δοκιμή. Η δοκιμή αντοχής θεωρείται καταστρεπτική δοκιμή. Οι *διαγνωστικές δοκιμές* επιτρέπουν την εξακρίβωση της κατάστασης και του βαθμού φθοράς του καλωδίου και διαπιστώνουν εάν μπορεί να συνεχίσει να βρίσκεται σε λειτουργία. Οι διαγνωστικές δοκιμές θεωρούνται μη καταστρεπτικές.

Οι VLF δοκιμές αντοχής είναι :

- VLF δοκιμή με τάση συνημιτονοειδούς-ορθογώνιας μορφής (cosine-rectangular)
- VLF δοκιμή με τάση ημιτονοειδούς μορφής (sinusoidal)
- VLF δοκιμή με τάση διπολικής ορθογώνιας μορφής (bipolar rectangular)
- VLF δοκιμή με θετικές και αρνητικές βηματικές DC τάσεις (VLF testing with alternating regulated positive and negative DC step voltages)

Οι VLF διαγνωστικές δοκιμές είναι :

- μέτρηση του συντελεστή απωλειών $\tan\delta$ (VLF-DF)
- μέτρηση των μερικών εκκενώσεων (VLF-PD)

- διηλεκτρική φασματοσκοπία
- μέτρηση ρεύματος διαρροής και απωλειών

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι συνδυασμός διαγνωστικών δοκιμών και δοκιμών αντοχής. Οι μέθοδοι που θα εφαρμοστούν επιλέγονται με βάση τις απαιτήσεις του δοκιμίου, την ευκολία εκτέλεσης, το λόγο κόστος / ωφέλη και την ηλικία και την κατάσταση του καλωδίου.

Πίνακας 4-12 : Ανάπτυξη ηλεκτρικού δενδρίτη (mm/h) συναρτήσει τάσης και συχνότητας

V / V ₀	50 Hz (mm/h)	0,1Hz (sinusoidal) (mm/h)	0,1Hz (cos-rect) (mm/h)
2	1,7-2,4	2,3	1,4
3	2,2-5,9	10,9-12,6	3,4-7,8
4	175-611	58,3-64,2	22,2-30,3
5	-	336	125

Ο αριθμός και η σοβαρότητα των ελαττωμάτων ενός καλωδίου επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα κάθε διαγνωστικής δοκιμής, συμπεριλαμβανομένης και της δοκιμής VLF. Όσο πιο φθαρμένο είναι το καλώδιο, τόσο μικρότερη είναι η διηλεκτρική του αντοχή και τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες και τα ρεύματα διαρροής. Σοβαρές φθορές είναι για παράδειγμα η παρουσία υδάτινων δενδριτών, μεγάλα κενά και ασυνέχειες στη μόνωση, αιχμηρές προεξοχές που μπορούν να αποτελέσουν σημεία έναρξης μερικών εκκενώσεων και ηλεκτρικών δενδριτών. Λιγότερο σοβαρές φθορές είναι μικροί υδάτινοι δενδρίτες, μικρά κενά και ασυνέχειες και λιγότερο αιχμηρές προεξοχές.

Πίνακας 4-13 : VLF δοκιμές που χρησιμοποιούνται για διαφορετικές καταστάσεις του καλωδίου

Βαθμός φθοράς / Αριθμός σημείων φθοράς	Μικρός	Μεγάλος
Λίγα	<ul style="list-style-type: none"> • Αντοχής • Συντελεστής απωλειών • Μερικές εκκενώσεις • Διηλεκτρική φασματοσκοπία • Αρμονικό ρεύμα απωλειών * 	<ul style="list-style-type: none"> • Συντελεστής απωλειών • Αρμονικό ρεύμα απωλειών • Μερικές εκκενώσεις • Διηλεκτρική φασματοσκοπία **
Πολλά	<ul style="list-style-type: none"> • Συντελεστής απωλειών • Αρμονικό ρεύμα απωλειών • Μερικές εκκενώσεις • Διηλεκτρική φασματοσκοπία *** 	<ul style="list-style-type: none"> • Αντοχής • Μερικές εκκενώσεις • Διηλεκτρική φασματοσκοπία • Αρμονικό ρεύμα απωλειών ****

* Οι διαγνωστικές αυτές δοκιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων μετρήσεων, για σύγκριση με μελλοντικές δοκιμές.

** Οι δοκιμές αυτές εντοπίζουν τις ελαττωματικές περιοχές χωρίς να διακινδυνεύουν την ακεραιότητα του καλωδίου. Οι διαγνωστικές αυτές δοκιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν αφού τα σημεία φθοράς επιδιορθωθούν, δοκιμαστούν ξανά και μπου πάλι σε λειτουργία.

*** Οι δοκιμές επαναλαμβάνονται για να διαπιστωθεί τότε το καλώδιο καταστρέφεται

**** Τα καλώδια αυτά πρέπει να αντικαθίστανται.

4.6.2 Παράμετροι των δοκιμών VLF

Κατά τη δοκιμή VLF ένας ηλεκτρικός δενδρίτης, που εμφανίζεται σε ένα σημείο ανομοιογένειας της μόνωσης, ενισχύεται, προκαλώντας τη διάτρηση της μόνωσης. Η έναρξη της δενδροειδούς διάσπασης και ο χρόνος δημιουργίας του αγωγίμου καναλιού είναι συνάρτηση της συχνότητας και του πλάτους της εφαρμοζόμενης τάσης δοκιμής. Τα επίπεδα της VLF τάσης δοκιμής και η χρονική διάρκεια της δοκιμής έχουν καθοριστεί για τις δύο πιο συνηθισμένες VLF δοκιμές, τη VLF δοκιμή με τάση συνημιτονοειδούς-ορθογώνιας μορφής (cosine-rectangular) και τη VLF δοκιμή με τάση ημιτονοειδούς μορφής (sinusoidal). Τα επίπεδα τάσης είναι $2U_0$ έως $3U_0$ και φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 4-14: VLF τάσεις δοκιμής για συνημιτονοειδή-ορθογώνια κυματομορφή (cosine-rectangular waveform)

Πολική τάση καλωδίου	Εγκατάσταση ⁽¹⁾ (φασική)	Αποδοχή ⁽²⁾ (φασική)	Συντήρηση ⁽³⁾ (φασική)
rms (kV)	rms voltage/peak voltage	rms voltage/peak voltage	rms voltage/peak voltage
5	12	14	10
8	16	18	14
15	25	28	22
25	38	44	33
35	55	62	47

Πίνακας 4-15: VLF τάσεις δοκιμής για ημιτονοειδή κυματομορφή (sinusoidal waveform)

Πολική τάση καλωδίου	Εγκατάσταση ⁽¹⁾ (φασική)	Αποδοχή ⁽²⁾ (φασική)	Συντήρηση ⁽³⁾ (φασική)
rms (kV)	rms voltage (or peak voltage)	rms voltage (or peak voltage)	rms voltage (or peak voltage)
5	9 (13)	10 (14)	7 (10)
8	11 (16)	13 (18)	10 (14)
15	18 (25)	20 (28)	16 (22)
25	27 (38)	31 (44)	23 (33)
35	39 (55)	44 (62)	33 (47)

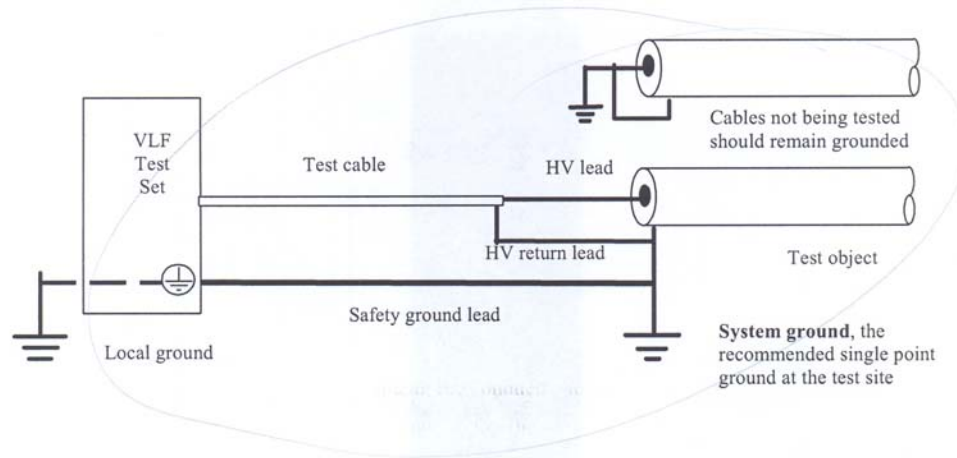
(1) **Installation test** : Η δοκιμή γίνεται μετά την εγκατάσταση του καλωδίου, αλλά πριν τη σύνδεσή του με τις μούφες και τα ακροκιβώτια. Σκοπός της δοκιμής είναι να εντοπισθούν οι θέσεις ανομοιογένειας και φθοράς της μόνωσης.

(2) **Acceptance test** : Η δοκιμή γίνεται αφού το καλώδιο εγκατασταθεί και συνδεθεί με τις μούφες και τα ακροκιβώτια, αλλά πριν μπει σε λειτουργία. Σκοπός της δοκιμής είναι να ενοπισθούν τυχόν φθορές στη μόνωση που έχουν γίνει κατά την εγκατάσταση του καλωδίου.

(3) **Maintenance test** : Η δοκιμή γίνεται κατά τη διάρκεια ζωής και λειτουργίας του καλωδίου, με σκοπό να ελεγχθεί η καταλληλότητα του καλωδίου.

Σημείωση : Για τάση συνημιτονοειδούς-ορθογώνιας μορφής η rms τιμή και η μέγιστη τιμή (peak) θεωρούνται ίσες. Για ημιτονοειδή τάση η rms τιμή είναι 0,707 της μέγιστης τιμής.

Στις VLF δοκιμές χρησιμοποιούνται εναλλασσόμενες τάσεις συχνότητας από 0,01Hz έως 1Hz. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη συχνότητα είναι 0,1Hz. Ένα καλώδιο μεγάλου μήκους έχει υψηλή χωρητικότητα. Ο μόνος πρακτικός τρόπος να δοκιμαστούν υψηλές χωρητικότητες με εναλλασσόμενη τάση είναι να χρησιμοποιήσουμε εναλλασσόμενη τάση πολύ χαμηλής συχνότητας. Όσο πιο χαμηλή είναι η συχνότητα, τόσο πιο μικρό είναι το ρεύμα και η ισχύς που απαιτούνται για τη δοκιμή υψηλών χωρητικότητας. Η χωρητική εμπέδηση X_c δίνεται από τη σχέση $X_c = 1/2\pi fC$. Ένα καλώδιο 15kV, για παράδειγμα, έχει χωρητικότητα 0,1μF. Η χωρητική εμπέδηση στα 60Hz είναι 2653Ω. Για να δοκιμάσουμε το καλώδιο με τάση 22kV απαιτούνται 8,3A ή 183kVA. Στα 0,1Hz η χωρητική εμπέδηση είναι 1,6MΩ και για την ίδια δοκιμή απαιτούνται 14mA ή 0,302kVA, δηλαδή 600 λιγότερο από ότι στα 60Hz. Στα 0,01Hz καλώδιο 6000 φορές μεγαλύτερου μήκους από ότι στα 60Hz μπορεί να δοκιμαστεί με την ίδια ισχύ.



Σχ. 4-14 : Σχηματική διάταξη δοκιμών VLF

4.6.3 VLF δοκιμή με τάση ημιτονοειδούς μορφής

Μέθοδος

Η συσκευή VLF παράγει εναλλασσόμενη ημιτονοειδή τάση με συχνότητα μικρότερη από 1Hz. Όταν σε ένα σημείο ανομοιογένειας η τιμή του πεδίου ξεπεράσει τη διηλεκτρική αντοχή της μόνωσης, τότε έχουμε έναρξη μερικών εκκενώσεων. Η τιμή του πεδίου αυτού είναι συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης, της γεωμετρίας των θέσεων ανομοιογένειας και του χωρικού φορτίου. Μετά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, τα αγωγίμα κανάλια που δημιουργούνται οδηγούν στη διάσπαση της μόνωσης, σε χρόνο που καθορίζεται από τις προδιαγραφές. Στη συνέχεια με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού μπορούν να εντοπισθούν οι θέσεις ανομοιογένειας και φθοράς, οι οποίες επιδιορθώνονται. Τα καλώδια δοκιμάζονται είτε προληπτικά είτε ύστερα από κάποιο πιθανό σφάλμα. Όταν το καλώδιο περάσει με επιτυχία τη δοκιμή, μπορεί να τεθεί ξανά σε λειτουργία.

Μετρήσεις και εξοπλισμός

Το προς δοκιμή καλώδιο συνδέεται με τη συσκευή VLF. Η εφαρμοζόμενη τάση δοκιμής είναι περίπου 3V₀ και η διάρκεια της δοκιμής 60min ή λιγότερο. Η συσκευή VLF πρέπει να έχει αρκετή χωρητικότητα, ώστε να μπορεί να παρέχει και να διανέμει την ενέργεια φόρτισης του καλωδίου. Όταν το καλώδιο περάσει με επιτυχία τη δοκιμή, η τάση μηδενίζεται και το καλώδιο και η συσκευή VLF εκφορτίζονται και γειώνονται. Όταν το καλώδιο δεν περάσει τη δοκιμή, εκφορτίζεται και εντοπίζονται οι θέσεις ανομοιογένειας με ειδικό εξοπλισμό (βλ. παράγραφο 4.7)

Η μέγιστη τιμή της τάσης δοκιμής πρέπει να μετράται με ολική αβεβαιότητα $\pm 5\%$ και χρόνο απόκρισης του συστήματος μέτρησης όχι μεγαλύτερο από 0,5sec.

Πλεονεκτήματα

- Εξαιτίας της διαρκούς εναλλαγής της πολικότητας μειώνεται η πιθανότητα δημιουργίας χωρικών φορτίων στη μόνωση του καλωδίου.
- Τα καλώδια δοκιμάζονται με εναλλασσόμενη τάση τρεις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση. Μετά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων τα αγωγία κανάλια, που εμφανίζονται στις θέσεις ανομοιογένειας και οδηγούν στη διάσπαση, αναπτύσσονται πολύ γρήγορα.
- Η συσκευή δοκιμής είναι εύκολα μεταφερόμενη
- Το επίπεδο της τάσης δοκιμής και η κυματομορφή είναι ανεξάρτητα από το μήκος του καλωδίου.
- Η δοκιμή μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο σε καλώδια με πλαστική μόνωση όσο και σε καλώδια με μόνωση χαρτί-λάδι.

Μειονεκτήματα

- Όταν η μόνωση του καλωδίου έχει υδάτινους δενδρίτες, η δοκιμή αντοχής δεν είναι αρκετή, και θα πρέπει να γίνουν επιπλέον δοκιμές και μετρήσεις.
- Υπάρχει περίπτωση τα αποτελέσματα των δοκιμών να μην είναι συγκρίσιμα με δεδομένα και αποτελέσματα βιομηχανικής συχνότητας (50Hz).
- Σε πολύ υψηλές τιμές της τάσης και συχνότητες χαμηλότερες από 0,01Hz δημιουργούνται χωρικά φορτία σε πλαστικές μονώσεις.
- Κατά τη δοκιμή τα καλώδια θα πρέπει να είναι εκτός λειτουργίας.
- Η μέγιστη διαθέσιμη τάση δοκιμής είναι 36kV rms και η μέγιστη χωρητικότητα 3μF στα 0,1Hz (30μF στα 0,01Hz).

4.6.4 VLF δοκιμή με συνημιτονοειδή-ορθογώνια/διπολική κυματομορφή τάσης

Μέθοδος

Το προς δοκιμή καλώδιο συνδέεται με τη συσκευή VLF και η συνημιτονοειδής-ορθογώνια τάση αυξάνει μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή σύμφωνα με τον πίνακα 4.14. Όταν η ένταση του πεδίου στις θέσεις ανομοιογένειας ξεπεράσει την διηλεκτρική αντοχή της μόνωσης, τότε έχουμε την έναρξη των μερικών εκκενώσεων στα σημεία ανομοιογένειας της μόνωσης, οι οποίες μέσα σε λίγα λεπτά προκαλούν τη διάσπαση της μόνωσης. Όταν το καλώδιο περάσει με επιτυχία τη δοκιμή, η τάση μηδενίζεται και το καλώδιο και η συσκευή VLF εκφορτίζονται και γειώνονται. Το καλώδιο στη συνέχεια τίθεται πάλι σε λειτουργία. Εάν το καλώδιο αποτύχει στη δοκιμή, η τάση

δοκιμής μηδενίζεται και το σύστημα εκφορτίζεται και γειώνεται. Το σημείο του σφάλματος εντοπίζεται με χρήση ειδικού εξοπλισμού.

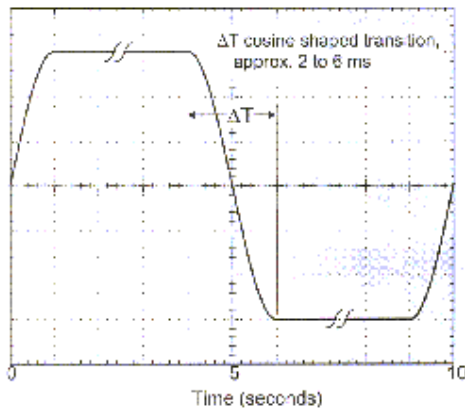
Μετρήσεις και εξοπλισμός

Ένας αντιστροφέας μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενο σήμα πολύ χαμηλής συχνότητας. Ο αντιστροφέας αποτελείται από ένα στραγγαλιστικό πηνίο υψηλής τάσης και ένα περιστρεφόμενο ρελαί, που αλλάζει την πολικότητα κάθε 5sec. Με αυτόν τον τρόπο παράγεται διπολικό σήμα (bipolar wave) συχνότητας 0,1Hz.

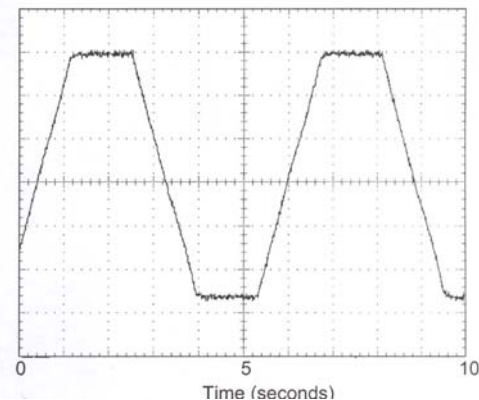
Το προς δοκιμή καλώδιο συνδέεται με τη συσκευή VLF. Βηματικά η τάση αυξάνεται μέχρι την τιμή $3V_0$ (V_0 η φασική τάση). Ο χρόνος δοκιμής κυμαίνεται από 15-60min. Όταν η δοκιμή γίνεται με την κυματομορφή του σχ.4-16, οι τάσεις δοκιμής πρέπει να είναι ίσες με τις μέγιστες τιμές (peak voltages) του πίνακα 4.14. Η rms τιμή της κυματομορφής αυτής εξαρτάται από τη μορφή του σήματος και είναι πιθανό να μην είναι ίση με το 0,707 της μέγιστης τιμής.

Όταν το καλώδιο περάσει με επιτυχία τη δοκιμή, η τάση μηδενίζεται και το καλώδιο και η συσκευή VLF εκφορτίζονται και γειώνονται. Όταν το καλώδιο δεν περάσει τη δοκιμή, εκφορτίζεται και εντοπίζονται οι θέσεις ανομοιογένειας με ειδικό εξοπλισμό.

Η μέγιστη τιμή της τάσης δοκιμής πρέπει να μετράται με ολική αβεβαιότητα $\pm 5\%$ και χρόνο απόκρισης του συστήματος μέτρησης όχι μεγαλύτερο από 0,5sec.



Σχ 4-15 Cosine-rectangular waveform



Σχ.4-16 Bipolar rectangular waveform

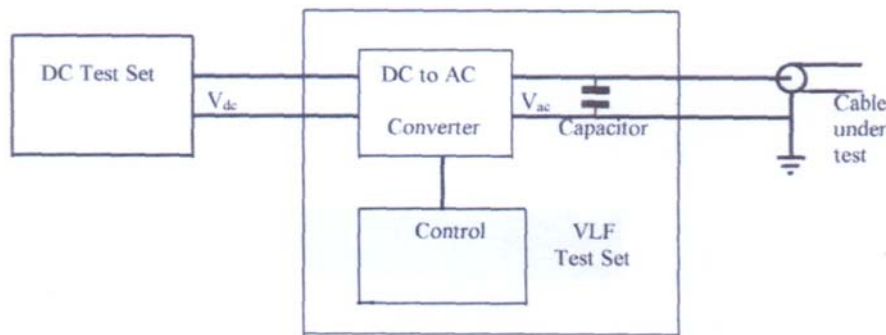
Πλεονεκτήματα

- Η δοκιμή χρησιμοποιεί έναν παλμό συχνότητας 0,1Hz που αλλάζει πολικότητα ημιτονοειδώς. Οι ημιτονοειδείς μεταβολές σε επίπεδο βιομηχανικής συχνότητας μπορεί να προκαλέσουν την έναρξη μερικών εκκενώσεων σε ένα σημείο φθοράς, όπου το σήμα συχνότητας 0,1Hz οδηγεί σε διάσπαση της μόνωσης.
- Δεν δημιουργούνται οδεύοντα κύματα.
- Εξαιτίας της διαρκούς εναλλαγής της πολικότητας μειώνεται η πιθανότητα δημιουργίας χωρικών φορτίων στη μόνωση του καλωδίου.
- Τα καλώδια δοκιμάζονται με εναλλασσόμενη τάση τρεις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση, με μία συσκευή συγκρίσιμη σε μέγεθος, βάρος και ισχύ με μία διάταξη δοκιμών συνεχούς τάσης.

- Μπορούν να μετρηθούν τα ρεύματα διαρροής.
- Εξαιτίας της διαρκούς εναλλαγής της πολικότητας δεν δημιουργούνται χωρικά φορτία.
- Όταν ένα καλώδιο περάσει με επιτυχία τη δοκιμή τίθεται πάλι σε λειτουργία.
- Η δοκιμή είναι κατάλληλη τόσο για καλώδια με πλαστική μόνωση όσο και για καλώδια με μόνωση χαρτί-λάδι.

Μειονεκτήματα

- Όταν η μόνωση του καλωδίου έχει υδάτινους δενδρίτες, η δοκιμή αντοχής δεν είναι αρκετή, και θα πρέπει να γίνουν επιπλέον δοκιμές και μετρήσεις.
- Η διάρκεια της δοκιμής κρίνεται μεγάλη.
- Η κυματομορφή της τάσης εξαρτάται από το μήκος του καλωδίου.



Σχ. 4-17 : Συσκευή VLF συνημιτονοειδούς-ορθογώνιας κυματομορφής.

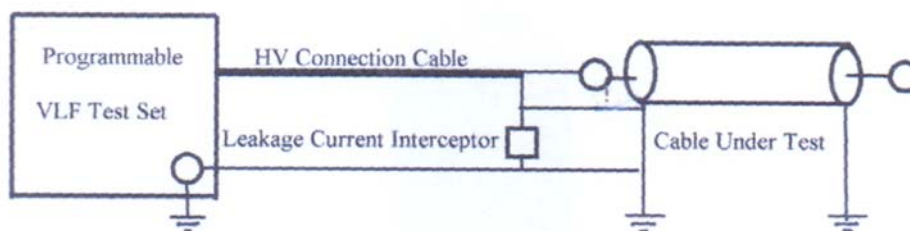
4.6.5 Μέτρηση του $\tan\delta$, του ρεύματος απωλειών και του ρεύματος διαρροής με VLF τάση ημιτονικής μορφής

Μέθοδος

Η μέτρηση του συντελεστή απωλειών ($\tan\delta$) και του ρευμάτων απωλειών και διαρροής χρησιμοποιείται για τον έλεγχο γηρασμένων και φθαρμένων καλωδίων. Έχει διαπιστωθεί μία συσχέτιση μεταξύ της αύξησης του $\tan\delta$ στα 0,1Hz και της μείωσης της τάσης διάσπασης της μόνωσης σε βιομηχανική συχνότητα. Οι απώλειες και τα ρεύματα απωλειών στα 0,1Hz καθορίζονται από τη φθορά που έχει υποστεί η μόνωση λόγω των υδάτινων δενδριτών. Η μέτρηση των μεγεθών αυτών στα 0,1Hz με ημιτονική τάση παρέχει τη δυνατότητα για συγκριτική εκτίμηση της κατάστασης των PE, XLPE και EPR μονώσεων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών κατατάσσουν τη μόνωση σε καινούργια (new), ελαττωματική (defective) και πολύ φθαρμένη (highly degraded). Η δοκιμή θεωρείται διαγνωστική. Να σημειωθεί ότι είναι δυνατόν η παρουσία ακροκιβωτίων και μουφών να προκαλέσει αλλοίωση στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Μετά τη δοκιμή το καλώδιο τίθεται πάλι σε λειτουργία. Με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής VLF αποφασίζεται τυχόν αντικατάσταση ή επιδιόρθωση του καλωδίου. Η μέγιστη τάση δοκιμής πρέπει να μετράται με ολική αβεβαιότητα $\pm 5\%$, ενώ ο χρόνος απόκρισης του συστήματος μέτρησης δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 5sec.

Μέτρηση και εξοπλισμός

Το καλώδιο συνδέεται με μία συσκευή VLF 0,1Hz με δυνατότητα μέτρησης του συντελεστή απωλειών και των ρευμάτων διαρροής. Μετρώνται οι συντελεστές απωλειών $\tan\delta$ σε τάση V_0 και $2V_0$ και καθώς και η διαφορά τους $\Delta\tan\delta$. Οι μετρούμενες τιμές χρησιμοποιούνται για την κατάταξη του καλωδίου σε μία από τις προαναφερθείσες κατηγορίες. Εάν παρατηρείται σημαντική αύξηση του συντελεστή απωλειών αυξανόμενης της τάσης, δε χρειάζεται να αυξήσουμε την τάση μέχρι την τιμή $2V_0$, καθώς υπάρχει κίνδυνος για τη δημιουργία ηλεκτρικών δενδριτών, που μπορεί να καταστρέψουν τη μόνωση.



Σχ.4-18 : VLF (0,1Hz) συσκευή για τη μέτρηση του συντελεστή απωλειών

Πίνακας 4-16

$\tan\delta (2V_0)$	$\tan\delta 2V_0 - \tan\delta V_0$	Εκτίμηση της κατάστασης της μόνωσης
$< 1,2 \times 10^{-3}$	$< 0,6 \times 10^{-3}$	Καλή (good)
$\geq 1,2 \times 10^{-3}$	$\geq 0,6 \times 10^{-3}$	Γηρασμένη (aged)
$\geq 2,2 \times 10^{-3}$	$\geq 1,0 \times 10^{-3}$	Πολύ φθαρμένη (highly degraded)

Πλεονεκτήματα

- Η διαγνωστική, μη καταστρεπτική.
- Η συσκευή δοκιμής είναι ικανοποιητικής ισχύος και εύκολα μεταφερόμενη.
- Η κατάσταση της μόνωσης χαρακτηρίζεται ως καλή (good), ελαττωματική (defective) και πολύ φθαρμένη (highly deteriorated).
- Η κατάσταση του καλωδίου ελέγχεται ανά διαστήματα και κρατείται αρχείο με τις μετρήσεις, με βάση το οποίο αποφασίζεται η αντικατάσταση, η συντήρηση ή επιδιόρθωση του εξοπλισμού.

Μειονεκτήματα

- Η μέγιστη τάση δοκιμής που παρέχει η συσκευή VLF για 0,1Hz είναι 36kV και η μέγιστη χωρητικότητα φορτίου 3μF.
- Η δοκιμή είναι χρήσιμη μόνο εφόσον έχουμε δεδομένα προς σύγκριση από παλαιότερες δοκιμές.

4.6.6 Δοκιμή VLF με θετικές και αρνητικές DC τάσεις

Μετρήσεις και εξοπλισμός

Εκτός από τη συνήθη συσκευή VLF που παράγει τάση ημιτονοειδή 0,1Hz, υπάρχουν και άλλες συσκευές VLF που ικανοποιούν συγκεκριμένες απαιτήσεις σχετικά με τις δοκιμές καλωδίων και παράγουν συγκεκριμένες κυματομορφές :

- 0,1Hz διπολικές κυματομορφές
- DC τάσεις με θετική και αρνητική πολικότητα
- Προγραμματιζόμενες βηματικές τάσεις με ρυθμιζόμενη διάρκεια
- Θετικές και αρνητικές DC τάσεις με υπερτιθέμενα AC σήματα

Για την εκτίμηση της κατάστασης της μόνωσης μετρώνται τα ρεύματα διαρροής και συγκρίνονται με παλαιότερες μετρήσεις και δεδομένα. Τα ρεύματα διαρροής – ιδιαίτερα σε πλαστικές μονώσεις – πρέπει να είναι αμελητέα.

Η μέγιστη τιμή της τάσης δοκιμής πρέπει να μετράται με ολική αβεβαιότητα $\pm 5\%$, ενώ ο χρόνος απόκρισης του συστήματος μέτρησης δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 5sec.

Μέθοδος

Το προς δοκιμή καλώδιο συνδέεται με το άκρο YT της συσκευής VLF. Εφαρμόζεται στη μόνωση του καλωδίου μία τάση μέγιστης τιμής $3V_0$ και μετρώνται τα ρεύματα διαρροής. Εάν το καλώδιο περάσει με επιτυχία τη δοκιμή, η τάση δοκιμής μηδενίζεται και το καλώδιο και η συσκευή εκφορτίζονται και γειώνονται.

Εάν ένα καλώδιο αποτύχει στην DC ή AC δοκιμή, η τάση δοκιμής μηδενίζεται και το σύστημα εκφορτίζεται. Το σημείο του σφάλματος μπορεί να εντοπιστεί με ειδικό εξοπλισμό. Όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο φθοράς ξεπεράσει τη διηλεκτρική αντοχή της μόνωσης, τότε έχουμε την έναρξη μερικών εκκενώσεων. Η ένταση του πεδίου είναι συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης, της γεωμετρίας του σημείου ανομοιογένειας (π.χ της φυσαλίδας) και του χωρικού φορτίου. Μετά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων δημιουργείται ένας ηλεκτρικός δενδρίτης, ο οποίος μέσα σε λίγα λεπτά αναπτύσσεται σε έναν αγωγίμο διαύλο. Τα σφάλματα που εντοπίζονται επιδιορθώνονται ή εάν είναι αναγκαίο το καλώδιο αντικαθίσταται. Όταν το καλώδιο περάσει με επιτυχία τη δοκιμή, τίθεται πάλι σε λειτουργία.

4.6.7 Δοκιμή μερικών εκκενώσεων με VLF τάση ημιτονικής μορφής

Μετρήσεις και εξοπλισμός

Η μέθοδος βασίζεται στην εφαρμογή μίας ημιτονικής τάσης συχνότητας 0,1Hz στο υπό δοκιμή καλώδιο. Η εφαρμοζόμενη τάση έχει τιμή $2V_0$ και μπορεί να προκαλέσει την έναρξη μερικών εκκενώσεων. Με τη μέθοδο των οδοντών κυμάτων μετράται το μέγεθος των μερικών εκκενώσεων, καθώς και εντοπίζονται τα σημεία ανομοιογένειας στο καλώδιο, τις μούφες και τα ακροκιβώτια. Οι μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων με τάσεις πολύ χαμηλής συχνότητας αποτελούν διαγνωστικά «εργαλεία», μη καταστρεπτικά, που χρησιμοποιούνται για να εντοπισθεί η θέση και η σοβαρότητα των θέσεων ανομοιογένειας της μόνωσης. Τέλος, είναι δυνατόν να παρατηρηθούν διαφορές στις μετρήσεις μερικών εκκενώσεων με χρήση VLF από ότι με χρήση βιομηχανικής συχνότητας. Η μέγιστη τάση δοκιμής πρέπει να μετράται με ολική αβεβαιότητα $\pm 5\%$, ενώ ο χρόνος απόκρισης του συστήματος μέτρησης δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 5sec.

Μέθοδος

Το καλώδιο συνδέεται με τη συσκευή VLF και εφαρμόζεται σε αυτό μια τάση έως $2V_0$ για λιγότερο από 10min. Μετά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων – partial discharge inception voltage PDIV),

σχηματίζεται ένας ηλεκτρικός δενδρίτης, ο οποίος μέσα σε λίγα λεπτά δημιουργεί αγωγίμους διαύλους που οδηγούν στη διάσπαση της μόνωσης. Το μέγεθος και η τοποθεσία (θέση) κάθε εκκένωσης καταγράφονται με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Οι πληροφορίες όλων των καταγραφόμενων εκκενώσεων παρουσιάζονται σε ένα διάγραμμα ME (PD Map). Ο συνολικός αριθμός, η φάση και το μέγεθος των μερικών εκκενώσεων που παρουσιάζονται στο PD Map δίνουν σημαντικές πληροφορίες για τη θέση και τη σοβαρότητα των σημείων ανομοιογένειας και φθοράς της μόνωσης. Η δοκιμή θεωρείται διαγνωστική και μετά το τέλος της το καλώδιο μπορεί να επιστρέψει σε λειτουργία, αφού βέβαια γίνουν οι απαραίτητες επιδιορθώσεις.

Πλεονεκτήματα

- Είναι δυνατή η ανίχνευση της θέσης των ME
- Η μόνωση κατατάσσεται σε καλή (good), ελαττωματική (defective) και πολύ φθαρμένη (highly deteriorated), συγκρινόμενη με παλαιότερα αποτελέσματα και μετρήσεις.
- Οι αντικαταστάσεις και οι επιδιορθώσεις των καλωδίων γίνονται με βάση συγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα.
- Η συσκευή δοκιμής είναι εύκολα μεταφερόμενη

Μειονεκτήματα

- Η δοκιμή είναι χρήσιμη, μόνο εφόσον υπάρχει αρχείο με παλαιότερες μετρήσεις και αποτελέσματα.
- Τα VLF αποτελέσματα δεν είναι συγκρίσιμα με αυτά της βιομηχανικής συχνότητας.
- Η δοκιμή δεν είναι αποτελεσματική όταν στη μόνωση υπάρχουν υδάτινοι δενδρίτες.
- Κατά τη δοκιμή τα καλώδια πρέπει να είναι εκτός λειτουργίας.

4.6.8 Διηλεκτρική φασματοσκοπία με VLF τάση ημιτονικής μορφής

Μετρήσεις και εξοπλισμός

Η διηλεκτρική φασματοσκοπία παρέχει πολύ σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση της μόνωσης. Μια προγραμματιζόμενη συσκευή VLF YT σε συνδυασμό με μία γέφυρα (active bridge) χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των ρευμάτων απωλειών (loss current) σε καλώδια μέσης τάσης, με εφαρμογή υψηλών τάσεων συχνότητας από 0,1mHz έως 1Hz.

Τα ρεύματα απωλειών σε συχνότητες μικρότερες του 1Hz, οφείλονται στη φθορά που έχει υποστεί η μόνωση εξαιτίας των υδάτινων δενδριτών που υπάρχουν στα καλώδια με πλαστική μόνωση, ενώ προσφέρουν συγκριτικά στοιχεία για την εκτίμηση της γήρανσης του καλωδίου. Η δοκιμή θεωρείται διαγνωστική, χρησιμοποιεί τάσεις με rms τιμές πάνω από 14kV, ενώ μετά τη διεξαγωγή της το καλώδιο τίθεται και πάλι σε λειτουργία.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι η παρουσία ακροκιβωτίων, μουφών ή άλλου συνοδευτικού εξοπλισμού, μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα των δοκιμών. Η χρήση υλικών με μη γραμμικές χαρακτηριστικές τάσης μπορεί να δώσει υψηλές τιμές ρεύματος απωλειών για αυξημένες τιμές τάσης, ενώ το διάγραμμα $\tan\delta=f(V)$

στην περίπτωση αυτή δε διαφέρει σημαντικά από το διάγραμμα ενός πολύ φθαρμένου (highly degraded) καλωδίου.

Μέθοδος

Το προς δοκιμή καλώδιο συνδέεται με μία συσκευή VLF μεταβλητής συχνότητας από 0,0001Hz και 1Hz. Ρυθμίζοντας την τάση (συνήθως πάνω από την τιμή 2V₀) και τη συχνότητα στα επιθυμητά επίπεδα, η γέφυρα μετρά τη διηλεκτρική σταθερά για κάθε τάση και συχνότητα. Η διάρκεια της δοκιμής δεν ξεπερνά τα 15min.

Η τάση κατά μήκος του καλωδίου, το ρεύμα απωλειών και το χωρητικό ρεύμα μετρώνται με ακρίβεια με ένα διαιρέτη τάσης. Το χωρητικό ρεύμα μπορεί να αντισταθμιστεί, επιτρέποντας έτσι τη μέτρηση μικρών μεταβολών στις χαρακτηριστικές του καλωδίου.

Πλεονεκτήματα

- Η δοκιμή είναι διαγνωστική και οι τάσεις δοκιμής είναι μεγαλύτερες από την τάση λειτουργίας.
- Όταν το ρεύμα απωλειών και το χωρητικό ρεύμα αυξάνονται ταυτόχρονα, ο συντελεστής απωλειών που είναι ο λόγος των δύο αυτών ρευμάτων είναι λιγότερο ευαίσθητος στον εντοπισμό της φθοράς του καλωδίου. Για το λόγο αυτό τα ρεύματα αυτά παριστάνονται σε ξεχωριστά διαγράμματα συναρτήσεως της συχνότητας και της τάσης.
- Οι περιοδικές δοκιμές και μετρήσεις δίνουν την εικόνα και την κατάσταση του καλωδίου, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αρχείο δεδομένων και μετρήσεων για μελλοντικές συγκρίσεις.
- Η μόνωση κατατάσσεται σε καλή (good), ελαττωματική (defective) και πολύ φθαρμένη (highly deteriorated), συγκρινόμενη με παλαιότερα αποτελέσματα και μετρήσεις.
- Οι αντικαταστάσεις και οι επιδιορθώσεις των καλωδίων γίνονται με βάση συγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα.
- Η συσκευή δοκιμής είναι εύκολα μεταφερόμενη

Μειονεκτήματα

- Η δοκιμή εφαρμόζεται προς το παρόν μόνο για καλώδια μέσης τάσης.
- Η δοκιμή είναι χρήσιμη, μόνο εφόσον υπάρχει αρχείο με παλαιότερες μετρήσεις και αποτελέσματα.
- Κυκλώματα με «υγή» καλώδια που διαθέτουν ακροκιβώτια ή συνδέσμους με υλικά μη γραμμικών χαρακτηριστικών τάσης, είναι πιθανό να δώσουν αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε φθαρμένα και γηρασμένα καλώδια.
- Σε πολύ υψηλές τάσεις και συχνότητες κάτω από 0,01Hz, παράγονται χωρικά φορτία σε πλαστικές μονώσεις.
- Κατά τη δοκιμή το καλώδιο πρέπει να είναι εκτός λειτουργίας.

4.6.9 Συμπεράσματα

Η καταλληλότητα και η αποτελεσματικότητα των δοκιμών VLF βασίζεται στα παρακάτω κριτήρια :

- α.) Ποιο επίπεδο τάσης απαιτείται για τον εντοπισμό των σημείων φθοράς και ανομοιογένειας της μόνωσης ;
- β.) Είναι δυνατόν να μην εντοπιστεί ένα ελαττωματικό σημείο, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σφάλμα μετά την επιστροφή του καλωδίου σε λειτουργία;

γ.) Επιβαρύνει η δοκιμή την κατάσταση του καλωδίου και μειώνει τη διάρκεια ζωής του;

δ.) Ποιο το κόστος της δοκιμής συγκρινόμενο με τα ποσοτικά και ποιοτικά πλεονεκτήματα;

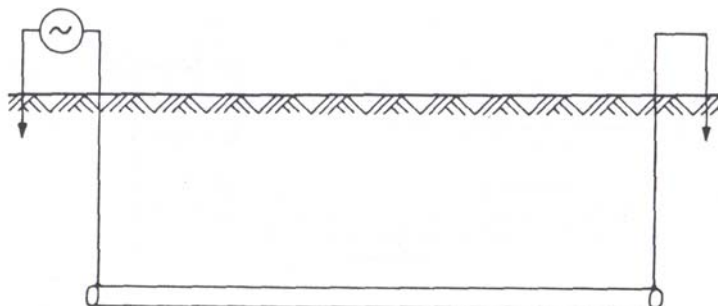
Οι δοκιμές VLF, που είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές για καλώδια με πλαστική μόνωση, διαρκώς βελτιώνονται και εξελίσσονται. Ωστόσο, για την αποδοτικότερη ερμηνεία και ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μιας βάσης προηγούμενων μετρήσεων και αποτελεσμάτων.

4.7 Ανίχνευση της πορείας των καλωδίων και εντοπισμός των σφαλμάτων

4.7.1 Ανίχνευση της πορείας των καλωδίων

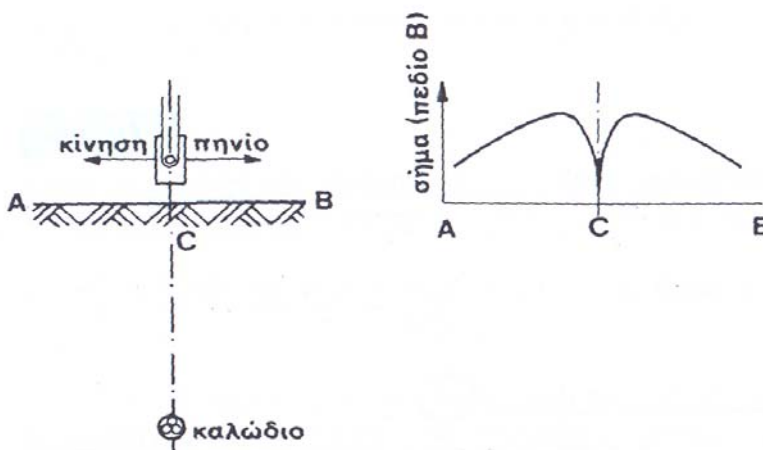
Σε καλά οργανωμένες πόλεις υπάρχουν σχέδια με συντεταγμένες της πορείας και του βάθους των καλωδίων. Σε ποντίσεις γίνεται ακριβής αποτύπωση της πορείας του καλωδίου, έτσι ώστε με χρήση σύγχρονου εξοπλισμού προσδιορισμού στίγματος (π.χ με δορυφορικούς προσδιορισμούς SATNAV και το σύστημα Ωμέγα) είναι δυνατή η εύρεση της πορείας με ακρίβεια μερικών δεκάδων μέτρων.

Σε διαφορετική περίπτωση χρησιμοποιείται η διάταξη του παρακάτω σχήματος.



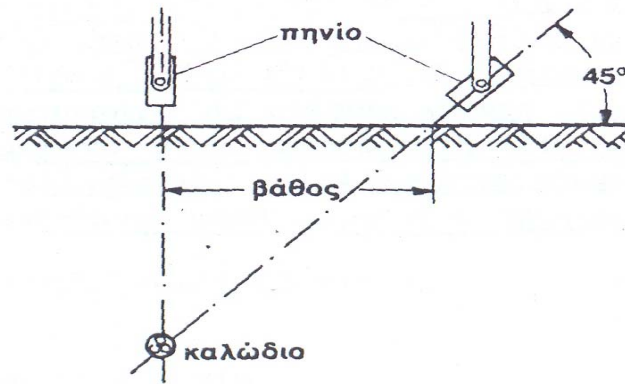
Σχ. 4-19: Προσδιορισμός της διαδρομής ενός καλωδίου με πηγή ακουστικής συχνότητας 1-12kHz

Το καλώδιο με όλους τους αγωγούς του και το μεταλλικό μανδύα βραχυκυκλώνεται και στα δύο άκρα του, ενώ στο ένα άκρο γειώνεται. Μεταξύ του άλλου άκρου και της γης συνδέεται πηγή τάσης, ακουστικής συχνότητας 1-12 kHz. Με ένα ανιχνευτικό πηνίο εξετάζουμε το πεδίο πάνω από το έδαφος. Η κάθετη συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής παρουσιάζει μέγιστο γύρω από το καλώδιο και ελάχιστο ακριβώς πάνω από το καλώδιο. Έτσι ανιχνεύοντας το ελάχιστο της επαγωγής βρίσκουμε την πορεία του καλωδίου. [10]



Σχ. 4-20 : Προσδιορισμός της πορείας με μέτρηση της κατακόρυφης συνιστώσας του πεδίου

Το βάθος του καλωδίου ανιχνεύεται μετρώντας με το παραπάνω ανιχνευτικό πηνίο την συνιστώσα του πεδίου 45° ως προς το έδαφος, η οποία παρουσιάζει ελάχιστο στη θέση που ο άξονας του πηνίου συναντά το καλώδιο. Η απόσταση των δύο θέσεων στο έδαφος, όπου μετρήθηκαν τα ελάχιστα προηγουμένως δίνει το βάθος του καλωδίου.[10]



Σχ. 4-21: Προσδιορισμός του βάθους με μέτρηση της συνιστώσας του πεδίου 45° ως προς την κατακόρυφο.

4.7.2 Προσεγγιστικός προσδιορισμός θέσης σφάλματος

Τα σφάλματα σε ένα καλώδιο μπορεί να είναι ηλεκτρικά (βραχυκυκλώματα ή διακοπές) ή μηχανικά. Τα ηλεκτρικά σφάλματα ανιχνεύονται σε δύο στάδια δηλαδή γίνεται προσεγγιστικός και ακριβής προσδιορισμός της θέσης του σφάλματος.

Για τον προσεγγιστικό προσδιορισμό της θέσης του σφάλματος διακρίνουμε τις παρακάτω μεθόδους :

α.) Μέτρηση του χρόνου όδευσης κυμάτων

Μεταξύ του αγωγού με το σφάλμα και του μανδύα συνδέεται μια γεννήτρια παλμών. Σε έναν παλμογράφο μετράται ο χρόνος τ που χρειάζεται ο παλμός για να πάει μέχρι το σφάλμα και να επιστρέψει, αφού ανακλασθεί στο σφάλμα. Η απόσταση του σφάλματος από το σημείο τροφοδότησης είναι :

$$l = \tau v / 2 \quad (4.21)$$

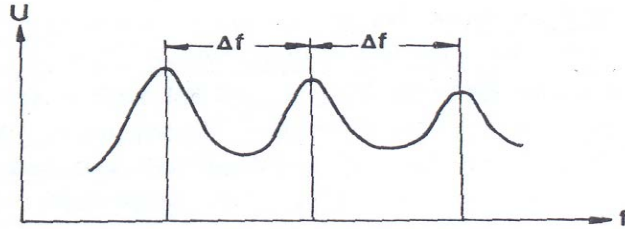
όπου v η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο καλώδιο ($v = 156 \dots 170 \text{m/sec}$).

β.) Μέτρηση μεγίστων συντονισμού

Στην αρχή του καλωδίου, μεταξύ ενός αγωγού με το σφάλμα και του μανδύα, συνδέεται πηγή υψηλής, μεταβλητής συχνότητας. Η τάση στην αρχή του καλωδίου είναι συνάρτηση της συχνότητας f και παρουσιάζει μέγιστα όταν η περίοδος της τάσης $1/f$ συμπίπτει με ένα πολλαπλάσιο του διπλάσιου χρόνου όδευσης τ , δηλαδή $1/f = k2\tau$. Η συνθήκη συντονισμού είναι εκείνη που αντιστοιχεί σε στάσιμα κύματα με μηδέν τάση στο σφάλμα και μέγιστο στην τροφοδότηση. Στο μήκος l περιέχονται περίττα πολλαπλάσια του $\lambda/4$ ($\lambda =$ μήκος κύματος). Για μια συχνότητα f_k αντίστοιχο μήκος κύματος λ_k προκύπτει :

$$l = (2k+1)\lambda_k/4 = (2k+1)v/4f_k \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad \text{ή} \quad 4f_k l = (2k+1)v \quad (4.22)$$

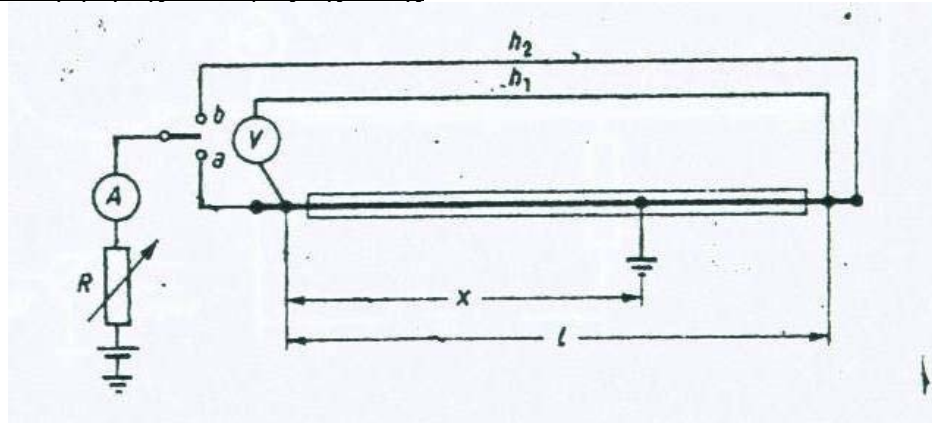
Αν η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών συχνοτήτων, όπου εμφανίζεται μέγιστο, είναι $\Delta f = f_{k+1} - f_k$, τότε η απόσταση σφάλματος προκύπτει από τη σχέση : [10]
 $4l (f_{k+1} - f_k) = \{[(2k+1)\lambda] - (2k+1)\lambda\}v$ ή $l = v / 2\Delta f$ (4.23)



Σχ. 4-22 : Προσδιορισμός θέσης σφάλματος από την καμπύλη συντονισμού : Τάση στο άκρο σαν συνάρτηση της συχνότητας τροφοδότησης του καλωδίου.

γ.) Ηλεκτρικές μέθοδοι

γ1) Μέτρηση της αναλογίας της τάσης



Σχ. 4-23: Μέτρηση της αναλογίας της τάσης

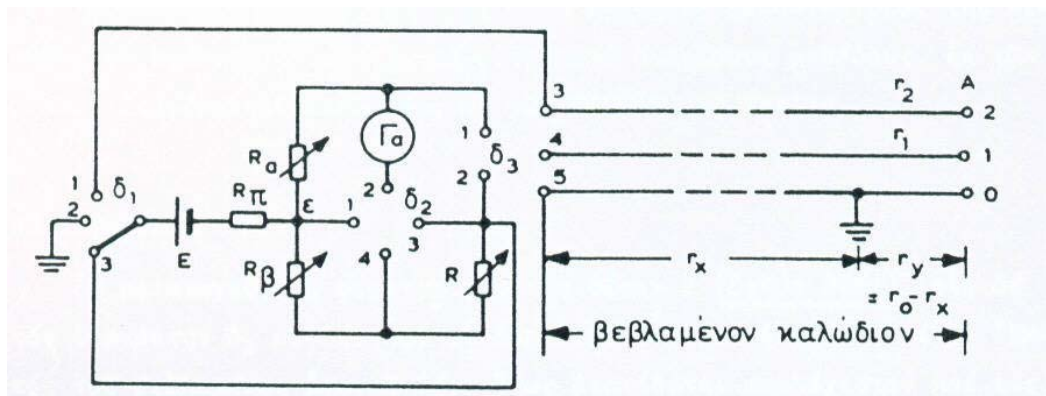
Ο προσδιορισμός της θέσης σφάλματος καλωδίου γίνεται με χρήση του τύπου :

$$l_x = l \frac{V_a}{V_a + V_b} \quad (4.24)$$

όπου V_a, V_b οι ενδείξεις του βολτομέτρου σε Volt για τα αντίστοιχα κυκλώματα, l το μήκος του καλωδίου και h_1, h_2 βοηθητικοί αγωγοί. [24]

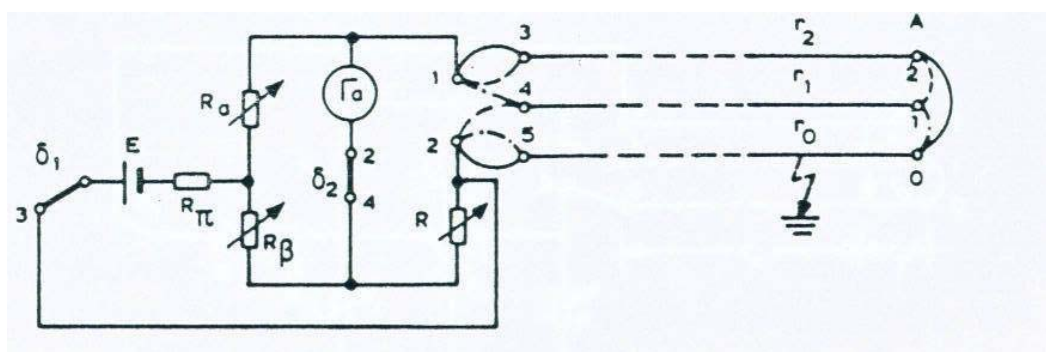
γ2) Μέτρηση της αντίστασης

Μια γέφυρα προσδιορισμού της θέσης σφάλματος καλωδίου έχει συνήθως τη συνδεσμολογία του παρακάτω σχήματος. [25]



Σχ. 4-24 : Διάταξη σύνθετης γέφυρας συνεχούς ρεύματος για τον προσδιορισμό της θέσης σφάλματος καλωδίων

Το άθροισμα των αντιστάσεων R_a , R_β , οι οποίες αποτελούν συνήθως τα δύο τμήματα μιας χορδής, παραμένει σταθερό, ενώ κατά την εξισορρόπηση της γέφυρας μεταβάλλονται οι R_a , R_β και R . Εκτός του αγωγού 0 που εμφανίζει το σφάλμα, υπάρχουν ένας ή δύο ακόμη αγωγοί ίδιου μήκους με τον αγωγό 0. [25]



Σχ. 4-25 : Συνδεσμολογία της γέφυρας του σχήματος 4-24 για τη μέτρηση της ωμικής αντίστασης των αγωγών του καλωδίου που φέρει το σφάλμα

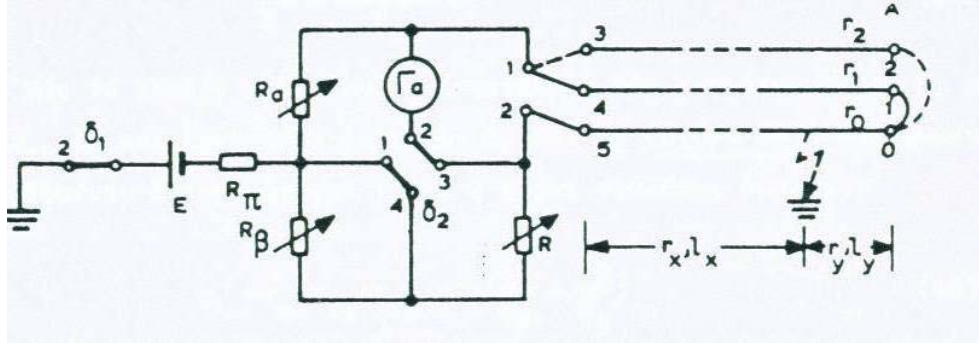
Όπως φαίνεται στο σχήμα 4-25 ο μεταγωγέας δ_1 βρίσκεται στη θέση 3 και ο διακόπτης δ_2 συνδέει τις επαφές 2 και 4. Στη συνέχεια, μέσω αγωγού μεγάλης διατομής και μικρού μήκους, ώστε η αντίσταση να είναι μικρή, συνδέονται τα άκρα A ανά δύο, ενώ οι αρχές αυτών των άκρων συνδέονται στα σημεία 1 και 2. Με τον τρόπο αυτό ο αντίστοιχος κλάδος της γέφυρας καταλαμβάνεται κάθε φορά από τις αντιστάσεις $r_0 + r_1$, $r_0 + r_2$, $r_1 + r_2$, όπου r_0 , r_1 , r_2 οι αντιστάσεις των αγωγών 0, 1, 2. Εάν κατά τις αντίστοιχες εξισορροπήσεις είναι R_{01} , R_{02} , R_{12} οι τιμές της αντίστασης R , και R_a και R_β διατηρούν σταθερή τιμή, τότε είναι :

$$r_1 = \frac{R_a}{R_\beta} \cdot \frac{R_{12} + R_{10} - R_{20}}{2} \quad (4.25)$$

$$r_2 = \frac{R_a}{R_\beta} \cdot \frac{R_{12} + R_{20} - R_{10}}{2} \quad (4.26)$$

$$r_1 = \frac{R_a}{R_\beta} \cdot \frac{R_{10} + R_{20} - R_{12}}{2} \quad (4.27)$$

Μετά τον υπολογισμό των τιμών των αντιστάσεων ακολουθεί ο προσδιορισμός της θέσης του σφάλματος με τη μέθοδο Murray. [24] [25]



Σχήμα 4-26 : Συνδεσμολογία της γέφυρας του σχ. 4-24 για τον καθορισμό της θέσης σφάλματος καλωδίων με τη μέθοδο Murray.

Ο μεταγωγέας δ_1 βρίσκεται στη θέση 2 και στο διακόπτη δ_2 συνδέονται οι ακροδέκτες 1 και 4 και 2 και 3. Η σχηματιζόμενη γέφυρα έχει ως κλάδους τους R_a , R , r_x και $r_y - r_1$ (ή $r_y - r_2$ ανάλογα με τον αγωγό που χρησιμοποιείται). Κατά την εξισορρόπηση θα είναι :

$$\frac{R_a}{R_1} = \frac{r_1 + r_o - r_{x1}}{r_{x1}}, \quad \frac{R_a}{R_2} = \frac{r_2 + r_o - r_{x2}}{r_{x2}} \quad (4.28 \text{ α,β})$$

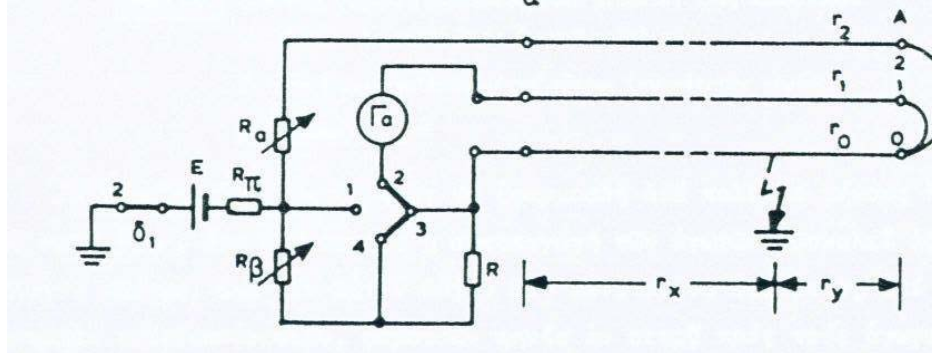
όπου R_1 , R_2 οι τιμές της R και r_{x1} , r_{x2} οι τιμές της r_x κατά την χρήση του υγιούς αγωγού 1 ή 2. Από τα προηγούμενα προκύπτει :

$$r_{x1} = \frac{R_a + R_1}{R_1} (r_1 + r_o), \quad r_{x2} = \frac{R_a + R_2}{R_2} (r_2 + r_o) \quad (4.29 \text{ α,β})$$

Το μήκος l_x της θέσης σφάλματος είναι :

$$l_x = l \frac{r_x}{r_o} \quad (4.30)$$

Εάν το καλώδιο έχει ελάχιστη αντίσταση, χρησιμοποιείται η παρακάτω διάταξη, γνωστή επίσης ως μεθόδου Murray. [24] [25]



Σχ. 4-27 : Συνδεσμολογία της γέφυρας του σχήματος 4-24 για τον προσδιορισμό της θέσης του σφάλματος καλωδίων χαμηλής ωμικής αντίστασης

Με την παραδοχή ότι $R_{\sigma} = R_{\alpha} + R_{\beta} \gg r_2$ η θέση σφάλματος είναι :

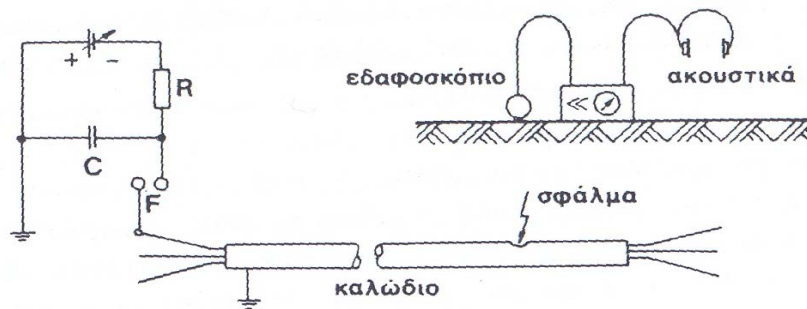
$$l_x = l \frac{R_{\beta}}{R_{\sigma}} \quad (4.31)$$

4.7.3 Επακριβής προσδιορισμός του σημείου σφάλματος

Αφού προσδιορισθεί περίπου η θέση ενός σφάλματος, τότε οι παρακάτω μέθοδοι επιτρέπουν τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης του σφάλματος.

α) Με εκκένωση πυκνωτή

Ένας πυκνωτής φορτίζεται και εκφορτίζεται περιοδικά μεταξύ αγωγού και γειωμένου μανδύα. Επειδή η αντίσταση στο σφάλμα είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τις άλλες αντιστάσεις, η ενέργεια του πυκνωτή μεταφέρεται σε ένα μεγάλο μέρος της στο σημείο του σφάλματος. Συγκεκριμένα δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο και κρουστικά κύματα, που μπορεί κανείς να τα ανιχνεύσει με ένα εδαφосκόπιο. Η μέθοδος αυτή είναι πιο επιτυχής εφόσον δεν έχουμε πλήρη μεταλλική επαφή όλων των αγωγών στη θέση του βραχυκυκλώματος. Η συχνότητα εμφάνισης των εκκενώσεων εξαρτάται από το χρόνο που χρειάζεται η πηγή να φορτίσει τον πυκνωτή στην τάση διάσπασης του διακένου. Αυτή η συχνότητα που γίνεται αντιληπτή ακουστικά δίνεται από το διάκενο του σπινθηριστή, το γινόμενο RC και την τάση U της πηγής. Η τάση του πυκνωτή δίνεται από το διάκενο του σπινθηριστή. [10]



Σχήμα : Επακριβής προσδιορισμός της θέσης σφάλματος ενός καλωδίου, με κρουστική γεννήτρια και ακουστικά (εδαφосκόπιο).

β.) Γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων

Μια γεννήτρια συχνότητας 1-12kHz συνδέεται με τον αγωγό που παρουσιάζει το σφάλμα. Ο άλλος πόλος είναι γειωμένος. Γίνονται μετρήσεις του πεδίου επί του εδάφους. Στο σημείο του σφάλματος προκαλείται μια διαταραχή λόγω του ρεύματος που ρέει προς το μεταλλικό μανδύα. [10]

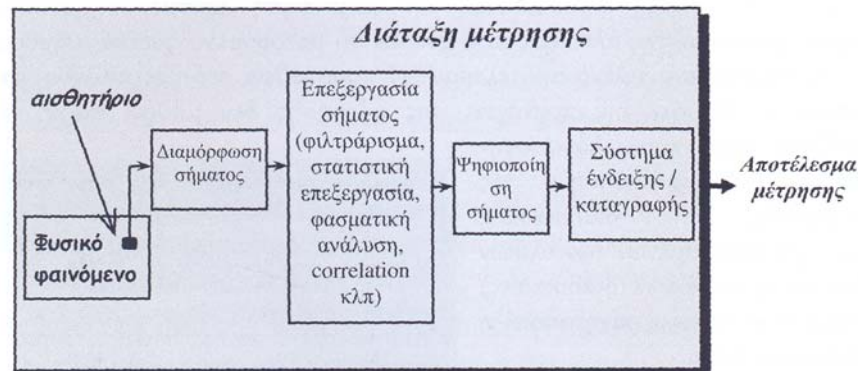
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα

5.1 Ποιοτικός χαρακτηρισμός συστημάτων και μεθόδων μέτρησης

5.1.1 Εισαγωγικά

Τα σφάλματα και η ποιότητα μέτρησης σχετίζονται με τη συμπεριφορά συγκεκριμένων μετρητικών διατάξεων και διαδικασιών, σε συγκεκριμένες συνθήκες χρήσης.



Σχ. 5-1 : Σχηματική δομή μετρητικών διατάξεων

Ένα όργανο μέτρησης αποτελεί στην πράξη λειτουργικό σύνολο από ένα ή περισσότερα διακριτά στοιχεία, με σκοπό την παραγωγή μιας ένδειξης, η οποία είναι συνάρτηση του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Βασικό στοιχείο του συστήματος είναι ο αισθητήρας που δέχεται την επίδραση του μετρούμενου μεγέθους και μεταφράζει την επίδραση αυτή σε άμεσα ή έμμεσα αναγνώσιμη πληροφορία. Άλλα συνήθη στοιχεία είναι ο μετατροπέας ή διαμορφωτής σήματος, ο οποίος μετατρέπει την πληροφορία στην έξοδο του αισθητήρα σε μια άλλη πληροφορία πιο εύκολα εκμεταλλεύσιμη, ένα στοιχείο αναλογικής ή ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και ένα στοιχείο απεικόνισης της μέτρησης.

Τα όργανα μέτρησης διακρίνονται σε **αναλογικά** ή **ψηφιακά**, **παθητικά** ή **ενεργητικά** (ανάλογα με το εάν η παρεχόμενη ένδειξη παράγεται κατευθείαν από το μετρούμενο μέγεθος ή εάν το μετρούμενο μέγεθος διαμορφώνει κατάλληλα ένα άλλο μέγεθος) και **μηδενισμού** ή **απόκλισης** (ανάλογα με το εάν το όργανο χρησιμεύει στο να εξισορροπήσει την επίδραση του άγνωστου μετρούμενου μεγέθους με ένα άλλο ομοειδές και γνωστό ή απεικονίζει μια μεταβαλλόμενη ένδειξη).

Στην προσπάθεια για εναρμόνιση σε διεθνές επίπεδο των εννοιών στον τομέα των μετρήσεων χρησιμοποιείται μια τυποποιημένη ορολογία και κωδικοποίηση του χαρακτηρισμού οργάνων, συστημάτων και υλικών μέτρησης. Οι κυριότεροι όροι είναι : **όργανο μέτρησης**, **σύστημα μέτρησης** (σύνολο οργάνων συνδεδεμένων μεταξύ τους σε ένα ενιαίο σύνολο), **υλικά μέτρησης και υλικά αναφορά** (υλικά για τα οποία οι τιμές μιας ή περισσότερων ιδιοτήτων είναι ομογενείς και καλά γνωστές,

έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διακρίβωση μιας συσκευής, για την αξιολόγηση μιας μεθόδου μέτρησης ή για να αποδοθούν τιμές σε άλλα υλικά), **πιστοποιημένο υλικό αναφοράς** (υλικό αναφοράς συνοδευόμενο από ένα πιστοποιητικό, μία ή περισσότερες ιδιότητες του οποίου είναι κατάλληλα πιστοποιημένες), **πρωτεύον πρότυπο**, **διεθνές πρότυπο**, **εθνικό πρότυπο**, **πρότυπα αναφοράς**, **πρότυπο μεταφοράς** (χρησιμοποιείται ως ενδιάμεσο για συγκρίσεις μεταξύ προτύπων), **μετακινούμενο πρότυπο** (προορίζεται για μεταφορά από μια τοποθεσία σε μια άλλη), **πρότυπο εργασίας**. [26]

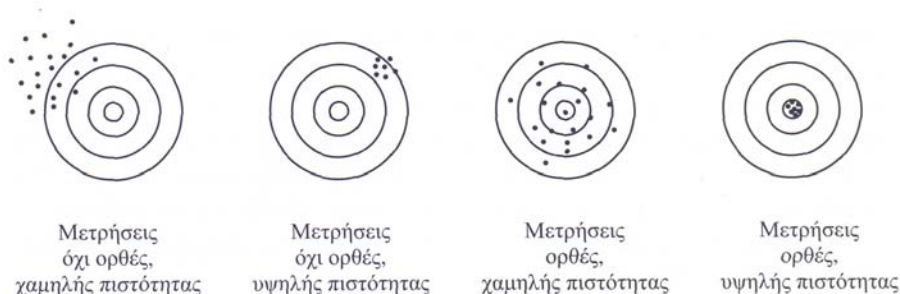
5.1.2 Στατικός χαρακτηρισμός οργάνων μέτρησης

Τα στατικά χαρακτηριστικά αναφέρονται στην τεκμηρίωση που συνοδεύει το όργανο και λαμβάνονται υπόψη όταν πρόκειται να κριθεί η καταλληλότητα του για μια συγκεκριμένη χρήση. Ο στατικός χαρακτηρισμός ισχύει μόνο όταν η συσκευή χρησιμοποιείται ικανοποιώντας τις προδιαγραφόμενες τυπικές απαιτήσεις διακρίβωσης. Τα βασικά στατικά χαρακτηριστικά είναι : [26]

- **Ορθότητα** : Αποτελεί μέτρο του «πόσο ορθά μετράει» το όργανο και ορίζεται ως το μισό του διαστήματος που περιέχει την ένδειξη του οργάνου και μέσα στο οποίο αναμένεται να περιέχεται η ορθή τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η ορθότητα χαρακτηρίζει τη μετρολογική ποιότητα του οργάνου και όχι την ποιότητα μιας συγκεκριμένης μέτρησης.

- **Ανοχή** : Ορίζει το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα στην τιμή μιας μέτρησης ή ακόμα τη μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση ενός μεγέθους από μια προδιαγεγραμμένη τιμή.

- **Πιστότητα** : Αποτελεί χαρακτηριστικό ενός οργάνου ή μιας μεθόδου μέτρησης και όχι του αποτελέσματος της μέτρησης. Η πιστότητα περιγράφει ποιοτικά και όχι ποσοτικά τη διασπορά των ενδείξεων ενός οργάνου ή των αποτελεσμάτων μιας διαδικασίας μέτρησης για το ίδιο μετρούμενο μέγεθος κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Η σχέση πιστότητας και ορθότητας απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 5-2 : Πιστότητα και ορθότητα

- **Επαναληψιμότητα (ή πιστότητα επαναληψιμότητας)** : Περιγράφει την εγγύτητα των αποτελεσμάτων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, όταν εφαρμόζεται για μια σύντομη χρονική περίοδο ή ίδια τιμή στην είσοδο του οργάνου, διατηρώντας ταυτόχρονα σταθερές τις συνθήκες μέτρησης.

- **Αναπαραγωγιμότητα (ή πιστότητα αναπαραγωγιμότητας)** : Περιγράφει την εγγύτητα των ενδείξεων για το ίδιο μετρούμενο μέγεθος, αλλά με διαφορετικά όργανα ή με μεταβολές στις συνθήκες μέτρησης.

- **Διακριτότητα** : Ορίζεται ως η μικρότερη μεταβολή του μετρούμενου μεγέθους η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μια ανιχνεύσιμη μεταβολή της ένδειξης ενός οργάνου.
- **Εύρος** : Αντιπροσωπεύει την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή του μετρούμενου μεγέθους.
- **Μετατόπιση (ή συστηματικό σφάλμα)** : Αντιστοιχεί σε ένα σφάλμα το οποίο υφίσταται σε όλο το εύρος μέτρησης ενός οργάνου.
- **Ολίσθηση** : Περιγράφει την επίδραση της μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών τόσο σε μια συγκεκριμένη ένδειξη όσο και στην ευαισθησία ενός οργάνου.
- **Γραμμικότητα** : Αναφέρεται στη γραμμική μεταβολή της εξόδου ενός οργάνου ως συνάρτηση του μετρούμενου μεγέθους.
- **Ευαισθησία** : Ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής των ενδείξεων λόγω μεταβολής του μετρούμενου μεγέθους προς τη μεταβολή αυτή του μετρούμενου μεγέθους.
- **Υστέρηση** : Χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά των οργάνων, η ένδειξη των οποίων για την ίδια τιμή του μετρούμενου μεγέθους είναι διαφορετική, ανάλογα με το αν η μέτρηση εντάσσεται σε μια αλληλουχία σταδιακά αυξανόμενων ή σταδιακά μειούμενων τιμών.

5.1.3 Χαρακτηρισμός και επικύρωση μεθόδων μέτρησης

Σε αντίθεση με το όργανο μέτρησης, όπου η διαδικασία μέτρησης είναι προκαθορισμένη, η μέθοδος μέτρησης υπόκειται σε περισσότερο και λιγότερο ελεγμένες παραμέτρους επιρροής που επιδρούν στο αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό, σημαντική πηγή πληροφορίας για την εκτίμηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων αποτελεί η επικύρωση των χρησιμοποιούμενων μεθόδων. Ο όρος **επικύρωση μεθόδου** αναφέρεται στη διαδικασία αξιολόγησης της καταλληλότητας μιας μεθόδου μέτρησης για το σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιείται, και στην ποσοτική εκτίμηση των επιδόσεών της, ως συνάρτηση των παραγόντων που επιδρούν στην αβεβαιότητα του τελικού αποτελέσματος. Η επικύρωση αποσκοπεί στον προσδιορισμό ορισμένων παραμέτρων, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων στο αποτέλεσμα. Οι κυριότερες από τις παραμέτρους αυτές είναι :

- Η **επαναληψιμότητα** της μεθόδου, εκφραζόμενη ως τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων, με χρήση του ίδιου εξοπλισμού.
- Η **αναπαραγωγιμότητα** της μεθόδου, εκφραζόμενη ως τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων, με χρήση του ίδιου υλικού.
- Η **ενδιάμεση πιστότητα**, εκφραζόμενη ως τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων, όταν μεταβάλλονται μία ή περισσότερες παράμετροι επιρροής.
- Η **γραμμικότητα** και το **συστηματικό σφάλμα**
- Το **όριο ανίχνευσης**, το οποίο προσδιορίζει τα όρια αποτελεσματικότητας της μεθόδου, πέρα από τα οποία η μέθοδος θεωρείται αναποτελεσματική.
- Η **ευστάθεια**, η οποία εκφράζει τις μεταβολές στην απόκριση μιας μεθόδου όταν μεταβάλλονται μία ή περισσότερες παράμετροι επιρροής. [26]

5.2 Βασικές έννοιες πιθανοτήτων και στατιστικής

5.2.1 Εισαγωγικά

Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένο, αλλά εξαρτάται από πολλές μη ελεγχόμενες επιδράσεις (ικανότητα του μετρολόγου, επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών, ασταθής συμπεριφορά του οργάνου ή του μετρούμενου μεγέθους κλπ.). Επομένως, το επιζητούμενο αποτέλεσμα της μέτρησης μπορεί να θεωρηθεί **στοχαστική μεταβλητή** και το αποτέλεσμα της ως προερχόμενο από ένα πιθανοσύνολο τυχαία διαμορφούμενο από τις μη ελεγχόμενες επιδράσεις. Η **στοχαστική προσέγγιση** της μέτρησης θεωρεί ότι, μη μπορώντας να ελέγξουμε τις επιρροές που διαμορφώνουν το εκάστοτε αποτέλεσμα, τα διάφορα αποτελέσματα αποτελούν δυνητικά συμβάντα μιας τυχαίας πειραματικής διαδικασίας. [23] Έτσι, είναι απαραίτητη η χρήση εννοιών στατιστικής και πιθανοτήτων, που θα δώσουν απάντηση στο ερώτημα : ποια είναι η πιθανότητα η αποσπασματική πληροφορία που διαθέτουμε (δηλαδή η μέτρηση-παρατήρηση) για μια πιο σύνθετη πραγματικότητα (δηλαδή την αληθή τιμή) να μην αποτελεί σύμπτωση, αλλά να δίνει πληροφορίες για την πραγματικότητα του εξεταζόμενου φαινομένου, ή αλλιώς, με βάση το αποτέλεσμα της μέτρησης και την κατανομή την οποία ακολουθεί το αποτέλεσμα αυτό, ποια η πιθανότητα η αληθής τιμή να βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα. Το πραγματικό ζητούμενο μιας μέτρησης δεν είναι επομένως μια απλή τιμή, αλλά η διαμόρφωση μιας ρεαλιστικής άποψης για τη στοχαστική συμπεριφορά του ίδιου αποτελέσματος, δηλαδή για τη συνάρτηση κατανομής που περιγράφει τη διαδικασία. [26]

5.2.2 Ορισμοί στατιστικών εννοιών

***Τυχαία μεταβλητή :** Ο όρος τυχαία μεταβλητή χρησιμοποιείται για να δηλώσει έναν κανόνα σύμφωνα με τον οποίο ένας πραγματικός αριθμός αντιστοιχεί σε κάθε δυνατό γεγονός ενός πειράματος. Αν ταυτοποιήσουμε τα πιθανά γεγονότα ενός πειράματος με τα σύμβολα λ_i και θεμελιώσουμε αυθαίρετα κάποιο τρόπο σύμφωνα με τον οποίο θα αντιστοιχούμε πραγματικούς αριθμούς $X(\lambda_i)$ σε κάθε δυνατό γεγονός, ο κανόνας ή η συναρτησιακή σχέση που παριστάνεται με το σύμβολο $X(\cdot)$ καλείται τυχαία μεταβλητή.

***Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας :** Ονομάζουμε συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (σ.κ.π) της τυχαίας μεταβλητής X την $F(x) = P(X \leq x), x \in R$.

Ισχύουν : $0 \leq F(x) \leq 1$, $F(-\infty) = 0$, $F(\infty) = 1$, $F(x_1) \leq F(x_2)$ όταν $x_1 \leq x_2$

***Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας :** Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

(σ.π.π) ορίζεται ως : $f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$. Ισχύουν :

$$- f(x) \geq 0, \forall x \quad (\alpha) \quad - F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) \cdot dx \quad (\gamma) \quad (5.1)$$

$$- \int_{-\infty}^{\infty} f(x) = 1 \quad (\beta) \quad - P(x_1 \leq X \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) \cdot dx \quad (\delta)$$

***Αναμενόμενη τιμή (expectation) :** $E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x) \cdot dx$ (5.2)

***Μεταβλητότητα :** Μια τυχαία μεταβλητή X έχει μεταβλητότητα (variance) :

$$V(x) = E(X - E(X))^2 = E(X)^2 - E^2(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(x))^2 f(x) \cdot dx$$
 (5.3)

***Τυπική απόκλιση (standard deviation) :** Παράμετρος που χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών και ορίζεται ως η τετραγωνική ρίζα της μεταβλητότητας :

$$\sigma = \sqrt{V(x)}$$
 (5.4)

***Συνδυασμένη συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων :** Στην περίπτωση δύο μεταβλητών η πληροφορία σχετικά με τις τιμές τους διατυπώνεται με την παρακάτω σχέση : $f(x,y) = f(x/y)f(x)$, όπου $f(x/y)$ αντιπροσωπεύει την υποθετική κατανομή πιθανοτήτων του Y με δεδομένη την τιμή x του X.

***Συμμεταβλητότητα (covariance) :** Αντίστοιχα με τη μεταβλητότητα, ορίζεται η συμμεταβλητότητα μεταξύ δύο μεγεθών X και Y :

$$Cov(X,Y) = E([X - E(X)][Y - E(Y)]) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [x - E(X)][y - E(Y)]f(x,y)dx dy$$

(5.5)

***Συσχετιζόμενα και ανεξάρτητα μεγέθη :** Τα μεγέθη X,Y καλούνται συσχετιζόμενα εάν η συμμεταβλητότητά τους είναι διάφορη του μηδενός, ενώ αντίθετα θεωρούνται ανεξάρτητα εάν η συνδυασμένη συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων τους ισούται με το γινόμενο των αντιστοιχών τους κατανομών : $f(x,y) = f(x)f(y)$. [28]

5.2.3 Βασικοί τύποι συναρτήσεων κατανομών πιθανοτήτων

5.2.3.1 Κανονική κατανομή

Το εύρος των εφαρμογών της κανονικής κατανομής εξηγείται από το ότι αντιστοιχεί στο ιδεατό θεωρητικό μοντέλο συμπεριφοράς μιας πραγματικά τυχαίας μεταβλητής. Μία τυχαία μεταβλητή ακολουθεί κανονική κατανομή με παραμέτρους μ, σ ($-\infty < \mu < +\infty, \sigma > 0$) όταν έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας :

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$
 (5.6)

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ειδική περίπτωση όπου $\mu=0$ και $\sigma=1$.

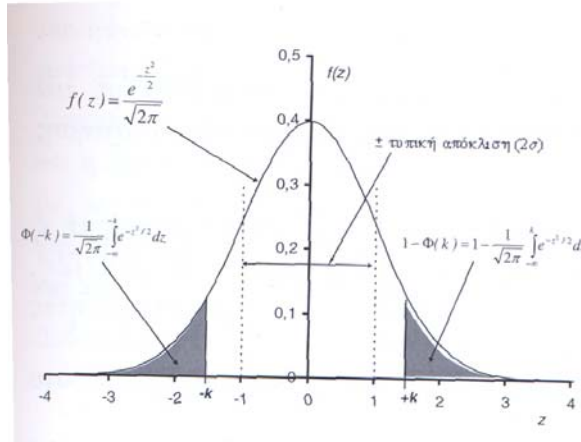
Με σκοπό την τυποποίηση και τη διευκόλυνση των υπολογισμών, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός $z = (x-\mu)/\sigma$ και η κατανομή πιθανοτήτων γράφεται :

$$f(z) = \frac{e^{-\frac{z^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}}$$
 , με μέση τιμή και τυπική απόκλιση του z ίσες με 0 και 1 αντίστοιχα.

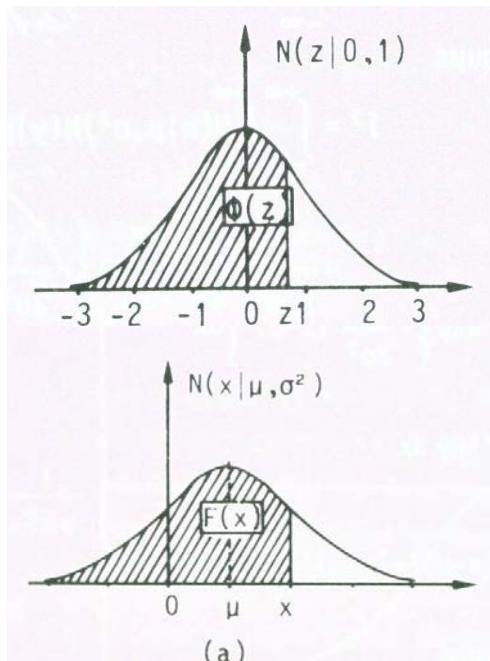
Έτσι $dx=\sigma dz$, και επομένως έχουμε :

$$F(x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2\right) dx = \int_{-\infty}^{\frac{x_0-\mu}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \Phi\left(\frac{x_0-\mu}{\sigma}\right)$$

όπου Φ η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της τυποποιημένης κανονικής κατανομής $N(0,1)$.



Σχήμα 5-3 : Τυπική κανονική κατανομή $f(z)$ με $\mu=0$ και $\sigma=1$



Σχήμα 5-4 : Μετασχηματισμός κανονικής κατανομής με μέση τιμή μ και διακύμανση σ^2 σε κανονική κατανομή με $\mu=0$ και $\sigma=1$

Η πιθανότητα μια τιμή να περιέχεται σε ένα δεδομένο διάστημα $\Delta X=(x_a, x_b)$ υπολογίζεται από τη σχέση :

$$p = \int_{x_a}^{x_b} f(x) dx = \int_{z_a}^{z_b} f(z) dz = \Phi(z_b) - \Phi(z_a) \quad (5.7)$$

με $z_a=(x_a-\mu)/\sigma$ και $z_b=(x_b-\mu)/\sigma$. [27] [28]

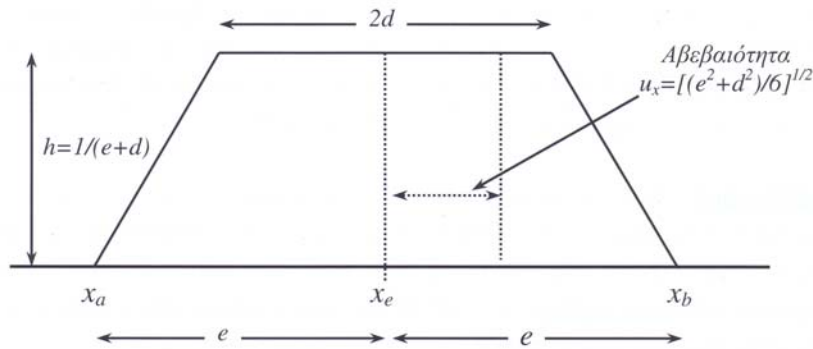
5.2.3.2 Τραπεζοειδής κατανομή

Η τραπεζοειδής κατανομή έχει ως υποπεριπτώσεις την ορθογώνια και την τριγωνική κατανομή. Οι κατανομές αυτές περιγράφουν μεγέθη για τα οποία γνωρίζουμε ότι η καλύτερη αναμενόμενη τιμή x_e περιέχεται σε ένα διάστημα της μορφής (x_a, x_b) ή $x_e \pm e$ με γραμμικά αυξανόμενη πιθανότητα, όσο απομακρυνόμαστε από τα άκρα του διαστήματος αυτού.

Δεδομένης της συμμετρίας, η αναμενόμενη τιμή είναι στο μέσο και προκύπτει από τη σχέση : $E(X) = x_e = (x_a + x_b) / 2$.

Η τυπική απόκλιση δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma = \sqrt{[V(X)]} = \sqrt{E(X)^2} = \sqrt{\frac{e^2 + d^2}{6}} \quad (5.8)$$



Σχήμα 5-5 : Τραπεζοειδής, ορθογώνια και τριγωνική κατανομή

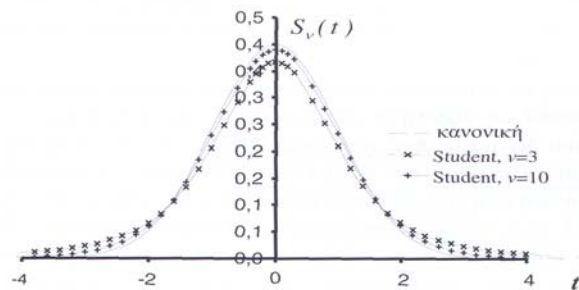
Η ορθογώνια κατανομή ($d=e$) περιγράφει τη στατιστική συμπεριφορά των τιμών ενός μεγέθους, για τις οποίες η μόνη διαθέσιμη πληροφορία συνίσταται στο ότι η αληθής τιμή περιέχεται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα. Η τριγωνική κατανομή ($d=0$) έχει εφαρμογή, μεταξύ άλλων, σε μεγέθη εκφραζόμενα ως συνδυασμός άλλων, οι κατανομές των οποίων είναι ορθογώνιες. [26]

5.2.3.3 Η κατανομή Student (t-distribution)

Η πρακτική σημασία της κατανομής Student έγκειται στο γεγονός ότι επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων, σχετικών με τη στοχαστική συμπεριφορά ενός μεγέθους, όταν είναι διαθέσιμες περιορισμένες μόνο πληροφορίες για το μέγεθος αυτό. Η συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων γράφεται :

$$S_v(t) = \frac{\Gamma((v+1)/2)}{\Gamma(v/2)\sqrt{\pi v}} \left(1 + \frac{t^2}{v}\right)^{-(v+1)/2} \quad (5.9)$$

όπου Γ είναι η συνάρτηση gamma και v ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας, ο οποίος αποτελεί μέτρο της πληρότητας της διαθέσιμης γνώσης σχετικά με την κατανομή.



Σχήμα 5-6 : Κανονική κατανομή Student για διάφορους βαθμούς ελευθερίας

Όταν εξετάζεται ένα δείγμα παρατηρήσεων x_i , $i=1, \dots, N$ ενός μεγέθους X , η κατανομή του οποίου θεωρείται κανονική με αναμενόμενη τιμή μ και μεταβλητότητα σ^2 , υπολογίζεται ο μέσος όρος \bar{x} του δείγματος και η τυπική

απόκλιση s και αποδεικνύεται ότι η μεταβλητή :
$$t = \frac{(\bar{x} - \mu)}{s/\sqrt{N}} = \frac{(\bar{x} - \mu)}{\sigma}$$

ακολουθεί κατανομή Student με $\nu = N-1$ βαθμούς ελευθερίας. Η κατανομή Student της μεταβλητής αυτής επιτρέπει την εκτίμηση της πιθανότητας η διαφορά $\bar{x} - \mu$ να βρίσκεται σε συγκεκριμένα όρια, σχετιζόμενα με την τυπική απόκλιση σ της μέσης τιμής του δείγματος. Η εξάρτηση της κατανομής Student από τους βαθμούς ελευθερίας ν μπορεί να ερμηνευθεί ως εξάρτηση της ποιότητας της εκτίμησης του \bar{x} από το μέγεθος του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση αυτή.

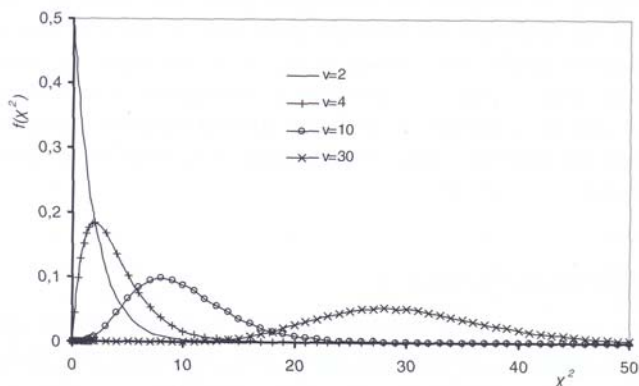
Όπως και στην περίπτωση της κανονικής κατανομής, οι τιμές $k_{p,\nu}$ (που ορίζουν ένα διάστημα $(-k_{p,\nu}, +k_{p,\nu})$ στο οποίο η πιθανότητα να περιέχεται το t είναι $p_{v,kt}$) για κάθε πιθανότητα $p_{v,kt}$ και για δεδομένο αριθμό βαθμών ελευθερίας ν δίνονται σε τυποποιημένους πίνακες της συνάρτησης Student. Η πιθανότητα να περιέχεται η μέση τιμή \bar{x} ενός δείγματος τιμών στο διάστημα από $\mu - k_{p,\nu}s/\sqrt{N}$ έως $\mu + k_{p,\nu}s/\sqrt{N}$ είναι ίση με την πιθανότητα $p_{v,kt}$ να περιέχεται το t στο διάστημα $(-k_{p,\nu}, +k_{p,\nu})$. [26]

5.2.3.4 Η κατανομή χ^2 (Chi-square)

Σε αντίθεση με την κανονική κατανομή και την κατανομή Student που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της μέσης ή της πιθανότερης τιμής ενός μεγέθους, η κατανομή χ^2 χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της τυπικής απόκλισης του μεγέθους αυτού. Πρόκειται για μια μη συμμετρική κατανομή που δίνεται από τη σχέση :

$$f(x) = \frac{x^{\nu/2-1} e^{-x/2}}{2^{\nu/2} \Gamma(\nu/2)}, x > 0 \quad (5.10)$$

όπου ν είναι οι βαθμοί ελευθερίας της στοχαστικής μεταβλητής.



Σχήμα 5-7 : Κατανομές Chi-square για τέσσερις βαθμούς ελευθερίας

Η κατανομή περιγράφει τη συμπεριφορά του αθροίσματος χ^2 των τετραγώνων n τυπικών κανονικών κατανομών, όπου n εκφράζει τους βαθμούς ελευθερίας του αθροίσματος αυτού : $\chi^2 = \sum_1^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma}\right)^2$. Η πιθανότερη τιμή της κατανομής είναι ίση με n και η μεταβλητότητά της ίση με $2n$. Εάν έχουμε ένα δείγμα μεγέθους N και τυπικής απόκλισης s μιας μεταβλητής, η οποία ακολουθεί κανονική κατανομή τυπικής απόκλισης σ , η στοχαστική μεταβλητή $\chi^2 = \frac{(N-1)s^2}{\sigma^2}$ ακολουθεί με τη σειρά της κατανομή Chi-square $n=N-1$ βαθμών ελευθερίας. Έτσι η πιθανότητα να περιέχεται η μεταβλητή $\chi^2 = \frac{(N-1)s^2}{\sigma^2}$ σε ένα συγκεκριμένο διάστημα (l_1, l_2) είναι $p(l_1 < \chi^2 < l_2) = p_{11,v} - p_{12,v}$ και είναι ίση με την πιθανότητα $p(vs^2/l_2 < \sigma^2 < vs^2/l_1)$ να περιέχεται η μεταβλητότητα σ^2 στο διάστημα $(vs^2/l_2, vs^2/l_1)$: $\frac{vs^2}{l_2} < \sigma^2 < \frac{vs^2}{l_1}$. [26]

5.3 Αβεβαιότητα μετρήσεων

5.3.1 Εισαγωγικά

Η αξιοπιστία, η εγκυρότητα και η ποιότητα μιας μέτρησης αποτελούσε στο παρελθόν περισσότερο μια αφηρημένη επιδίωξη και λιγότερο μια οργανωμένη προσπάθεια αναζήτησης τρόπων διασφάλισης και συγκεκριμενοποίησης της ποιότητας αυτής. Τις τελευταίες όμως δεκαετίες έγινε επιτακτική η ανάγκη για έναν κοινά αποδεκτό και έγκυρο **τρόπο «μέτρησης» της ποιότητας μέτρησης**, αφού έχει μεγάλη σημασία τα όργανα όχι μόνο να μετράνε σωστά, αλλά και να είναι γνωστό το πόσο σωστά μετράνε. Το ζητούμενο λοιπόν είναι η αποδοχή ενός ενιαίου μηχανισμού αποτίμησης της ποιότητας μέτρησης, δηλαδή της **αβεβαιότητας (uncertainty)**. [26]

Κάθε μέτρηση, ανεξάρτητα από το πόσο καλά έχει σχεδιαστεί και εκτελεστεί, υπόκειται σε σφάλματα και επομένως το αποτέλεσμα μιας μέτρησης εμπεριέχει κάποιο ποσοστό αβεβαιότητας. Με τον όρο αβεβαιότητα προσδιορίζεται το εύρος

τιμών εκατέρωθεν της μετρούμενης τιμής από το όργανο (\pm) μέσα στο οποίο βρίσκεται η «αληθινή» ή «πραγματική» τιμή του μετρούμενου μεγέθους, με μια συγκεκριμένη πιθανότητα (επίπεδο εμπιστοσύνης). Είναι φανερό ότι βασικό πρόβλημα της μετρολογίας είναι η εύρεση της «αληθινής» τιμής του μετρούμενου μεγέθους. Παλαιότερα, η χρήση του όρου ακρίβεια προσδιόριζε τη μέγιστη απόκλιση της μετρούμενης τιμής από την «αληθινή», ως εάν η «αληθινή» τιμή να ήταν απολύτως γνωστή. Εάν αυτό ήταν αληθές, τα προβλήματα της μετρολογίας θα είχαν επιλυθεί. Αντί για αυτό προσπαθούμε να προσεγγίσουμε το «σύννεφο» που περιβάλλει την «αληθινή» τιμή με όρους στατιστικής. [29]

Επομένως, σήμερα είναι κοινά αποδεκτό μια ποσοτική δήλωση σχετική με οποιοδήποτε μέγεθος δεν μπορεί να είναι πλήρης εάν δεν περιλαμβάνει, εκτός από το αποτέλεσμα της μέτρησης, μια αναφορά στην αβεβαιότητα που συνοδεύει το αποτέλεσμα αυτό. Το να συμπεριληφθεί η αβεβαιότητα στις πληροφορίες ποσοτικού προσδιορισμού ενός μεγέθους υπακούει σε μια διπλή αναγκαιότητα : αφενός επισημαίνεται στο χρήστη της μέτρησης η πιθανότητα ύπαρξης σφαλμάτων, επιστώντας την προσοχή του στον πεπερασμένο χαρακτήρα της γνώσης μας για μια συγκεκριμένη ποσότητα, αφετέρου δίνεται μια ποσοτική εκτίμηση του διαστήματος μέσα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή του μετρούμενου μεγέθους, καθώς και της πιθανότητας να βρίσκεται η αληθής αυτή τιμή σε μια συγκεκριμένη περιοχή του διαστήματος αυτού. [26] [30]

5.3.2 Από το σφάλμα στην αβεβαιότητα

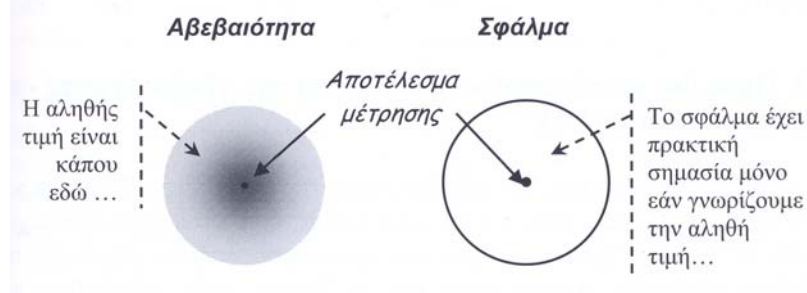
Ως **σφάλμα** ορίζεται η διαφορά ανάμεσα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης και μιας αληθούς τιμής του μετρούμενου μεγέθους. Πρέπει να σημειωθεί ότι με τη λέξη αληθής χρησιμοποιείται το αόριστο άρθρο «μια» και όχι το οριστικό «η» για να τονιστεί ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν περισσότερες από μία τιμές συμβατές με τον ορισμό του μετρούμενου μεγέθους και ότι δεν μπορούμε να ξέρουμε ποια είναι η αληθής τιμή. Δηλαδή το σφάλμα είναι εξ ορισμού μια μη προσδιορίσιμη αφηρημένη έννοια, που **αντιπροσωπεύει τη διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη και την αληθή αλλά άγνωστη τιμή ενός μεγέθους.** [26]

Τα σφάλματα διακρίνονται σε συστηματικά και τυχαία. Τα συστηματικά σφάλματα οφείλονται στην κακή βαθμονόμηση ή χρήση των οργάνων, στην παράβλεψη ορισμένων φαινομένων, στον μη απόλυτο έλεγχο των συνθηκών του πειράματος, στον παρατηρητή ή σε άλλα εξωτερικά αίτια. Η αιτία των συστηματικών σφαλμάτων είναι γνωστή, όχι και όμως και η τιμή τους, ενώ υπακούουν σε φυσικούς νόμους. Τα τυχαία σφάλματα οφείλονται στην έλλειψη ευαίσθητης απόκρισης του οργάνου ή του παρατηρητή, σε φαινόμενα όπου το ίδιο το σύστημα χαρακτηρίζεται από διακυμάνσεις, σε εξωτερικό «θόρυβο» ή σε στατιστικές διαδικασίες. Τα τυχαία σφάλματα έχουν άγνωστη αιτία και τιμή, δεν υπακούουν σε φυσικούς νόμους, ενώ μελετώνται στη θεωρία σφαλμάτων. [31] [32]

Με τον όρο σφάλμα, λοιπόν, δεν εννοούμε την απόκλιση της μέτρησης από τη θεωρητικά αποδεκτή τιμή. Η έννοια του σφάλματος αναφέρεται στην αβεβαιότητα των μετρήσεων την οποία δεν μπορούμε να διορθώσουμε. Ακόμα και αν επαναλάβουμε τις μετρήσεις δεν μπορεί να εξαλειφθεί, μπορεί όμως να οδηγήσει σε μια κατανομή των μετρούμενων μεγεθών που μπορούν να αναλυθούν στατιστικά. Πρέπει επομένως το σφάλμα να διαφοροποιείται προσεκτικά από την αβεβαιότητα, η οποία αποτελεί ένα ποσοτικό μέτρο της ποιότητας των γνώσεων που διαθέτουμε για το μετρούμενο μέγεθος. Τελικά το σφάλμα δεν έχει ιδιαίτερα πρακτική χρησιμότητα,

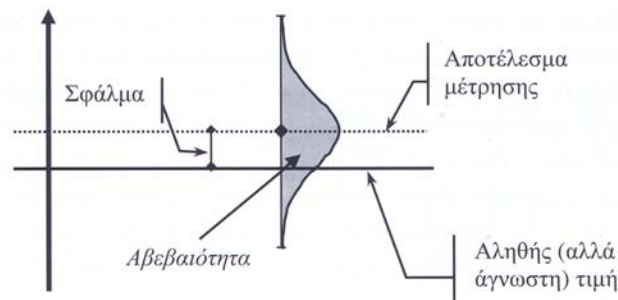
αφού εκφράζει τη διαφορά της αληθούς τιμής, που δεν είναι δυνατόν να γνωρίζουμε, από μια μέτρηση, για την αξιοπιστία της οποίας δε διαθέτουμε καμία ένδειξη. **Το σφάλμα αποτελεί μια αφηρημένη έννοια σχετική με ένα σημείο, ενώ η αβεβαιότητα περιγράφει ένα εύρος τιμών.** [26] [29]

Σε αντιδιαστολή με τον αφηρημένο χαρακτήρα του σφάλματος, η αβεβαιότητα ορίζεται πρακτικά –σύμφωνα με τον Guide to the expression of uncertainty (GUM)- ως παράμετρος συνδεδεμένη με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης, η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που θα μπορούσε εύλογα να αποδοθεί στο μετρούμενο μέγεθος.



Σχήμα 5-8 : Η αβεβαιότητα, συγκρινόμενη με το σφάλμα, δίνει μια θολή αλλά ρεαλιστική εικόνα για την τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Σχηματικά μπορεί να ειπωθεί ότι η τοποθέτηση του σφάλματος στο επίκεντρο της προσοχής έχει τις ρίζες της σε μια ντετερμινιστική προσέγγιση, ενώ η αβεβαιότητα συνδέεται με μια στοχαστική προσέγγιση.

Η πληροφορία επομένως που διαθέτουμε για το αποτέλεσμα μιας μέτρησης αφορά όχι μόνο στην εκτιμώμενη καλύτερη προσέγγιση της τιμής του μετρούμενου μεγέθους, αλλά και στη διασπορά των πιθανών τιμών που το μέγεθος αυτό θα μπορούσε να έχει, με επίγνωση της αδυναμίας να εντοπιστεί η μία και μοναδική αληθής τιμή. [26]



Σχήμα 5-9 : Σφάλμα και αβεβαιότητα

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ένα αποτέλεσμα μέτρησης μπορεί τελικά να εμπεριέχει μικρό (αλλά άγνωστο) σφάλμα και να χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα, όπως και αντίστροφα, μπορεί να χαρακτηρίζεται από μικρή αβεβαιότητα αλλά στην πραγματικότητα το σφάλμα να είναι μεγάλο. Αυτό που απαιτείται είναι η διατύπωση ενός διαστήματος $\Delta X = (x_a, x_b)$, μέσα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή με μια λιγότερο ή περισσότερο σημαντική πιθανότητα p , αποκαλούμενη **πιθανότητα κάλυψης** (coverage probability) ή **επίπεδο**

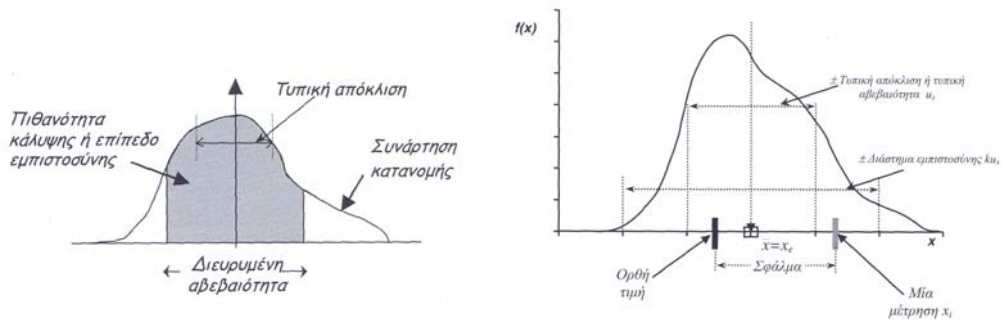
εμπιστοσύνης (confidence level). Για τις συνήθεις κατανομές πιθανοτήτων η επιλογή ενός διαστήματος ΔX εκατέρωθεν της αναμενόμενης τιμής x_e , οδηγεί σε χαμηλά επίπεδα εμπιστοσύνης. Εάν επιζητείται μεγαλύτερη πιθανότητα κάλυψης, είναι αναγκαία η αύξηση του διαστήματος, πολλαπλασιάζοντας αντίστοιχα την τυπική αβεβαιότητα με ένα **συντελεστή κάλυψης k**, η τιμή του οποίου εξαρτάται από το είδος της κατανομής $f(x)$ και από το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης. Το γινόμενο $U_x = k u_x$ ονομάζεται διευρυμένη αβεβαιότητα και το τελικό αποτέλεσμα διατυπώνεται ως $x_e \pm U_x$. [26] [32]

Πέρα λοιπόν από την πιθανότερη τιμή, απαιτείται η γνώση της τυπικής απόκλισης σ_x των πιθανών τιμών, αλλά και πληροφορίες για το είδος της κατανομής $f(x)$, έτσι ώστε να είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η τυπική αβεβαιότητα $u_x = \sigma_x$ και το διάστημα $(x_e - k u_x, x_e + k u_x)$, μέσα στο οποίο περιέχεται η ορθή αλλά άγνωστη τιμή για ένα δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης, το οποίο ορίζεται με τη βοήθεια του συντελεστή κάλυψης k, που εξαρτάται με τη σειρά του από την επιθυμητή πιθανότητα εμπιστοσύνης. [29]

5.3.3 Κατηγοριοποίηση αβεβαιοτήτων (Τύπου A & Τύπου B)

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν παραπάνω, το αποτέλεσμα μιας μέτρησης δεν περιορίζεται σε καμία περίπτωση στην τιμή του μετρούμενου μεγέθους, αφού πρόκειται για μία στοχαστική μεταβλητή και η αποδιδόμενη τιμή χαρακτηρίζεται από μία αβεβαιότητα. Η αβεβαιότητα αυτή μπορεί να εκφραστεί είτε ως τυπική απόκλιση της συνάρτησης κατανομής που χαρακτηρίζει το αποτέλεσμα, και αποκαλείται τότε «τυπική αβεβαιότητα», είτε ως διάστημα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή, με μια ορισμένη στάθμη σιγουριάς ή εμπιστοσύνης, και αποκαλείται «διευρυμένη αβεβαιότητα».

Πρέπει να τονισθεί ότι, η αβεβαιότητα χαρακτηρίζει την ποιότητα μίας μέτρησης και πιο συγκεκριμένα το αποτέλεσμά της. Δεν αφορά άμεσα τα παρατηρούμενα μεγέθη, τα οποία είναι δεδομένα και ανεξάρτητα από τη δυνατότητα του παρατηρητή να τα προσεγγίσει. Η αβεβαιότητα αφορά πάντα μια συγκεκριμένη τιμή, όπως αυτή εκτιμήθηκε κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, σύμφωνα με συγκεκριμένη διαδικασία, και χαρακτηρίζει τη γνώση που διαθέτουμε για το μετρούμενο μέγεθος. Είναι επομένως δυνατόν, κάποιος άλλος να δώσει μια άλλη εκτίμηση τόσο για την τιμή του ίδιου μεγέθους όσο και για την αβεβαιότητα που συνοδεύει την τιμή αυτή.



Σχήμα 5-10, 5-11 : Κατανομή πιθανοτήτων των πιθανών τιμών μιας μεταβλητής

Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται γενικά από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους : οι αβεβαιότητες **τύπου A**, που υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους, και οι αβεβαιότητες **τύπου B**, που υπολογίζονται με άλλα μέσα. Η κατηγοριοποίηση αυτή δεν αντιστοιχεί στη διάκριση μεταξύ «τυχαίων» και «συστηματικών» αβεβαιοτήτων. [26] [29] [30]

Οι συνιστώσες **τύπου A** προκύπτουν από τη μεταβλητότητα (variance) ή την τυπική απόκλιση (standard deviation) και τους βαθμούς ελευθερίας του αποτελέσματος, ενώ είναι συχνά απαραίτητη και η γνώση της συμμεταβλητότητας (covariance).

Οι συνιστώσες **τύπου B**, παρά το ότι δεν προκύπτουν απευθείας από κάποια στατιστική επεξεργασία, οφείλουν να παρουσιάζονται με όρους τυπικής αβεβαιότητας. Η τυπική αυτή αβεβαιότητα μπορεί να θεωρηθεί ως προσέγγιση της αντίστοιχης μεταβλητότητας, η ύπαρξη της οποίας υφίσταται ως υπόθεση.

Η τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα προκύπτει από το συνδυασμό όλων των επιμέρους συνιστωσών, εκφραζόμενων με τη μορφή τυπικών αποκλίσεων.

5.3.4 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου A

Η **αβεβαιότητα τύπου A (random uncertainty)**, σύμφωνα με τους κανονισμούς IEC 60-2, 1994, Amendment 1 High Voltage Test Techniques, Part 2 : Measuring Systems, Annex H Procedure for estimating uncertainty in High Voltage measurements) χρησιμοποιείται όταν το αποτέλεσμα x μιας μέτρησης προκύπτει από τις τιμές x_i , $i=1,2,\dots,n$ των n ανεξάρτητων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων μιας μη μεταβαλλόμενης ποσότητας X , κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες επαναληψιμότητας, χρησιμοποιώντας όργανα μέτρησης χαρακτηριζόμενα από αμελητέα απόκλιση στο χρονικό διάστημα που διαρκεί η μέτρηση.

Οι αβεβαιότητες τύπου A υπολογίζονται βάσει στατιστικών κανόνων. Πραγματοποιείται ένας αριθμός μετρήσεων και προκύπτει η στατιστική κατανομή των αποτελεσμάτων μέτρησης. Η πραγματική κατανομή σπάνια είναι γνωστή με ακρίβεια και για λόγους πρακτικούς όσο και στατιστικούς προσεγγίζεται με την κανονική κατανομή.

Ανάλογα με το πλήθος των μετρήσεων διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις : [30]

α.) U_r για μικρό αριθμό μετρήσεων (π.χ. 10)

Σε αυτήν την περίπτωση η αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση :

$$U_r = \frac{ts_r}{\sqrt{n}} \quad (5.11)$$

όπου t : συντελεστής Student (Student's factor)

P : το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης (confidence level)

s_r : τυπική απόκλιση του δείγματος των μετρήσεων που δίνεται από τη σχέση

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \quad (5.12)$$

όπου n : ο αριθμός των μετρήσεων

x_i : οι μετρηθείσες τιμές

x_m : η μέση τιμή των μετρήσεων

Πίνακας 5-1 : Τιμές του συντελεστή Student 't' για διάφορα επίπεδα εμπιστοσύνης συναρτήσει του αριθμού των μετρήσεων

n \ P%	68,3	90	95	99,7
2	1,84	6,31	12,7	-
3	1,32	2,92	4,30	-
4	1,20	2,35	3,18	9,22
5	1,14	2,13	2,78	6,62
6	1,11	2,02	2,57	5,51
7	1,09	1,94	2,45	4,90
8	1,08	1,89	2,36	4,53
9	1,07	1,86	2,31	4,28
10	1,06	1,83	2,26	4,09
20	1,03	1,73	2,09	3,45
∞	1,00	1,65	1,96	3,00

β.) U_r μεγάλο αριθμό μετρήσεων ($n \gg 10$)

Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (που είναι και αυτό που ζητείται συνήθως) και για ένα δείγμα με περισσότερες από 10 μετρήσεις ($n \gg 10$), ο συντελεστής Student t μπορεί να αντικατασταθεί από το συντελεστή κάλυψης k. Σε αυτήν την περίπτωση η αβεβαιότητα της μέσης τιμής είναι :

$$U_r = \frac{ks_r}{\sqrt{n}} \quad (5.13)$$

γ.) Χρησιμοποίηση προϋπάρχουσας γνώσης για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί όταν υφίσταται προηγούμενη πληροφορία για τη συμπεριφορά του οργάνου ή της μεθόδου μέτρησης. Η πληροφορία αυτή αφορά μια ήδη γνωστή τυπική απόκλιση s_r , η οποία υπολογίστηκε από μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων μετρήσεων παρόμοιου μεγέθους, σε παρόμοιες συνθήκες μέτρησης. Στην περίπτωση αυτή αντί να χρησιμοποιηθεί η τυπική απόκλιση του μικρού τρέχοντος δείγματος μετρήσεων, χρησιμοποιείται η παλαιότερα υπολογισμένη s_r και η αβεβαιότητα λαμβάνεται ίση με :

$$U_r = \frac{ks_r}{\sqrt{n_2}} \quad (5.14)$$

5.3.5 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου B

Αβεβαιότητα τύπου B (systematic uncertainty) έχουμε στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Στην περίπτωση αυτή η αβεβαιότητα υπολογίζεται αξιοποιώντας κάθε διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με την πιθανή μεταβλητότητα του μετρούμενου μεγέθους, έτσι ώστε να οικοδομηθεί μια εικόνα για την πιθανή κατανομή των τιμών του μεγέθους. Τέτοιου είδους πληροφορίες είναι δυνατόν να προέρχονται από :

- πιστοποιητικά διακρίβωσης
- δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις

- εμπειρία ή επιστημονική ανάλυση
- χαρακτηριστικά οργάνου μέτρησης
- υποκειμενικές κρίσεις του μετρολόγου [26]

Η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων τύπου Β είναι :

$$U_s = k \cdot s_s = k \cdot \sqrt{s_{sa}^2 + s_{sg}^2} \quad (5.15)$$

όπου s_{sa} η τυπική απόκλιση για την περίπτωση ορθογώνιας κατανομής και s_{sg} η τυπική απόκλιση στην περίπτωση κανονικής κατανομής.

Όταν η διαθέσιμη πληροφορία αφορά μόνο στα όρια $\pm a$ ανάμεσα στα οποία κυμαίνεται το αναμενόμενο σφάλμα, χωρίς να υπάρχουν ειδικότερες ενδείξεις για την κατανομή ανάμεσα στα όρια αυτά, τότε η υποτιθέμενη κατανομή είναι

ομοιόμορφη (ορθογώνια) και η τυπική απόκλιση είναι ίση με : $s_{sa} = \frac{a}{\sqrt{3}}$. Στην

περίπτωση που έχουμε n ανεξάρτητες κατανομές η τυπική απόκλιση δίνεται από τη σχέση :

$$s_{sa} = \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3}} \quad (5.16)$$

Όταν η αβεβαιότητα δίνεται μαζί με ένα επίπεδο εμπιστοσύνης, τότε πρέπει να υποθεθεί ότι έχουμε κανονική κατανομή. Εάν το επίπεδο εμπιστοσύνης είναι της τάξης του 95% , η τιμή του συντελεστή k είναι 2 και η τυπική απόκλιση είναι :

$s_{sg} = \frac{U_{95}}{2}$. Έτσι η εξίσωση (5.15) γίνεται :

$$U_s = k \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_{95}}{2}\right)^2} \quad (5.17)$$

Η γενική μορφή της εξίσωσης (5.15) γίνεται :

$$U_s = k \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_1}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{k_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_m}{k_m}\right)^2} \quad (5.18)$$

όπου U_1 έως U_m είναι οι αβεβαιότητες (calibration contribution) με δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης

k_1 έως k_m οι αντίστοιχοι συντελεστές κάλυψης [30]

5.3.6 Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας

Η ολική αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση :

$$u_{total} = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} \quad (5.19)$$

5.3.7 Συνδυασμός αβεβαιοτήτων – Νόμος διάδοσης αβεβαιοτήτων

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους Y πραγματοποιείται έμμεσα, δηλαδή στη βάση απευθείας μετρήσεων μιας σειράς πρωτογενών μεγεθών X_i , $i=1,2,\dots,N$. Η μετρούμενη κάθε φορά τιμή y_i του Y

προκύπτει από το συνδυασμό των τιμών x_1, x_2, \dots, x_N των πρωτογενών μεγεθών μέσω μιας συνάρτησης $Y=M(X_1, X_2, \dots, X_N)$ η οποία αντιπροσωπεύει το φυσικό μοντέλο συσχέτισης των μετρούμενων στην πράξη με το προς μέτρηση μέγεθος.

Ο νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων (law of error propagation) προκύπτει από την ανάπτυξη σε 1^{ης} τάξης σειρά Taylor της συνάρτησης $M(Y)$ γύρω από το σημείο της μέτρησης $y_e=M(x_{1e}, x_{2e}, \dots, x_{Ne})$. Η τυπική συνδυασμένη αβεβαιότητα (standard combined uncertainty) γύρω από την τιμή μέτρησης δίνεται από την παρακάτω σχέση, γνωστή και ως νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων : [26]

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial M}{\partial x_i}\right)^2 u_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial M}{\partial x_i} \frac{\partial M}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (5.20)$$

όπου u_{x_i} είναι η τυπική αβεβαιότητα του μεγέθους X_i και $u(x_i, x_j)$ είναι η συμμεταβλητότητα μεταξύ X_i και X_j .

Συνήθως στις δοκιμές τα μεγέθη X_1, X_2, \dots, X_N θεωρούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους και η παραπάνω σχέση γράφεται : [26]

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial M}{\partial x_i}\right)^2 u_{x_i}^2 \quad (5.21)$$

Κεφάλαιο 6

Δοκιμές στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων

6.1 Εξοπλισμός

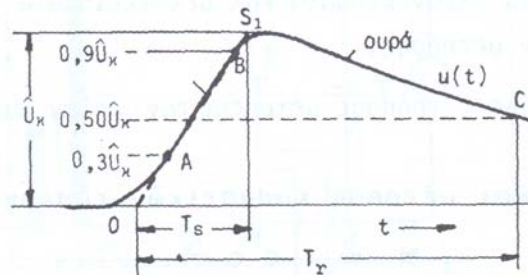
6.1.1 Γεννήτρια υψηλών τάσεων

6.1.1.1 Εισαγωγικά

Οι κρουστικές τάσεις χρησιμοποιούνται κατά τη διεξαγωγή τεχνικών δοκιμών υψηλών τάσεων, με στόχο την προσομοίωση των διηλεκτρικών καταπονήσεων που υφίστανται οι εγκατεστημένες στα ηλεκτρικά δίκτυα διατάξεις και στοιχεία, κατά την ανάπτυξη επί των δικτύων εσωτερικών και εξωτερικών υπερτάσεων, καθώς επίσης και κατά την έρευνα και μελέτη διάσπασης μονωτικών υλικών. [6]

Ως κρουστική τάση χαρακτηρίζεται ένας μοναδιαίος και ενιαίος πολικότητας παλμός τάσης. Διακρίνουμε ορθογωνικές, σφηνοειδείς και διπλοεκθετικές κρουστικές τάσεις. Για τη διεξαγωγή δοκιμών χρησιμοποιούνται προτυποποιημένες διπλοεκθετικές κρουστικές τάσεις. Κρουστικές τάσεις με διάρκεια μετώπου της τάξης 1μs και ημίσεως εύρους μερικές δεκάδες μs προσομοιώνουν τις υπερτάσεις που δημιουργούνται από κεραυνούς, ενώ σημαντικά μεγαλύτερης διάρκειας κρουστικές τάσεις προσομοιώνουν τις υπερτάσεις που ακολουθούν τους διάφορους χειρισμούς ζεύξης και απόζευξης σε ένα δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνήθως χρησιμοποιούνται μικρής διάρκειας κρουστικές τάσεις 1,2μs και χρόνου ημίσεως εύρους 50μs, χαρακτηριζόμενες ως κρουστικές τάσεις μορφής 1,2/50μs, όπου είναι επιτρεπτές ανοχές $\pm 30\%$ στο χρόνο μετώπου και $\pm 20\%$ στο χρόνο ημίσεως εύρους. Σε περίπτωση κρουστικών τάσεων μικρής διάρκειας εμφανίζεται επί της κυματομορφής υψίσυχνες ταλαντώσεις, των οποίων το εύρος στην περιοχή του μεγίστου δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει το 5% της U_k . [6] [12]



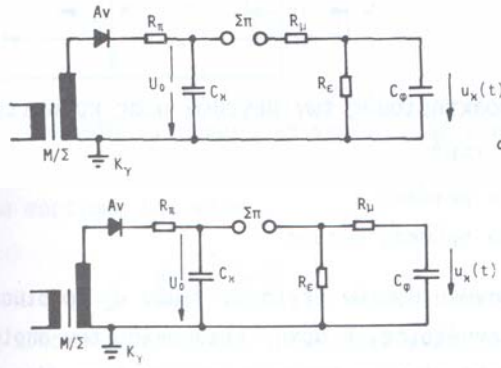
Σχήμα 6-1 Κρουστική τάση

Για τον ορισμό του χρόνου μετώπου λαμβάνονται υπόψη τα σημεία του μετώπου που βρίσκονται στο 30% και στο 90% του μεγίστου. Η χρονική διαφορά των δύο

σημείων πολλαπλασιαζόμενη επί 1,67 δίνει το χρόνο μετώπου. Η ευθεία που συνδέει τα δύο προαναφερθέντα σημεία ορίζει στον άξονα του χρόνου την ονομαστική αρχή του χρόνου. Το σημείο στην ουρά της κρουστικής τάσης που αντιστοιχεί στο 50% του μεγίστου ορίζει, σε συνδυασμό με την ονομαστική αρχή του χρόνου το χρόνο ημίσειας εύρους. [6]

6.1.1.2 Μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια

Τα δύο βασικά κυκλώματα της μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 6-2 : Κύκλωμα α και κύκλωμα β μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας

Καθένα από τα δύο κυκλώματα συνίσταται από τέσσερα βασικά στοιχεία :

- τον πυκνωτή κρούσης C_{κ}
- τον πυκνωτή φορτίου C_{ϕ}
- την αντίσταση μετώπου R_{μ}
- την αντίσταση ουράς R_{ϵ}

Επιπλέον υπάρχουν :

- η αντίσταση προστασίας R_{π}
- η συνολική παράσιτη αυτεπαγωγή $L = L_1 + L_2$
- ο σπινθηριστής σφαιρών $\Sigma\pi$ μεταβλητού διακένου, μέσω του οποίου το κύκλωμα χωρίζεται σε δύο τμήματα I και II, καλούμενα τμήμα φόρτισης και τμήμα εκφόρτισης αντίστοιχα

Κατά τη λειτουργία της κρουστικής γεννήτριας διακρίνουμε δύο φάσεις : την φάση φόρτισης (I) και την φάση εκφόρτισης (II). Κατά τη **φάση I** ο πυκνωτής κρούσης C_{κ} φορτίζεται με συνεχή τάση U_0 , η οποία περιορίζεται στα 200-250kV, διότι διαφορετικά θα απαιτούνταν υπερβολικά μεγάλες διαμέτροι σφαιρών για την επίτευξη ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου. Η **φάση II** αρχίζει μετά τη διάσπαση του διακένου, όταν ο πυκνωτής C_{κ} αρχίζει να εκφορτίζεται εμφανιζόμενης τότε της κρουστικής τάσης στους ακροδέκτες του πυκνωτή φορτίου C_{ϕ} . Πιο αναλυτικά, όταν ο πυκνωτής C_{κ} φορτισθεί στην τάση U_0 , δημιουργείται ένας σπινθήρας στο σπινθηριστή $\Sigma\pi$, με τη βοήθεια μιας συσκευής trigatron η οποία είναι ενσωματωμένη σε μία από τις δύο σφαίρες του σπινθηριστή. Με το σπινθήρα αυτό συνδέεται ο πυκνωτής C_{κ} στο υπόλοιπο κύκλωμα. Επειδή η αντίσταση R_{μ} είναι πολύ μικρότερη από την R_{ϵ} , ο C_{ϕ} θα φορτισθεί μέσω της R_{μ} με μία σταθερά χρόνου $R_{\mu}C_{\phi}$. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης του C_{ϕ} σχηματίζεται το μέτωπο της κρουστικής

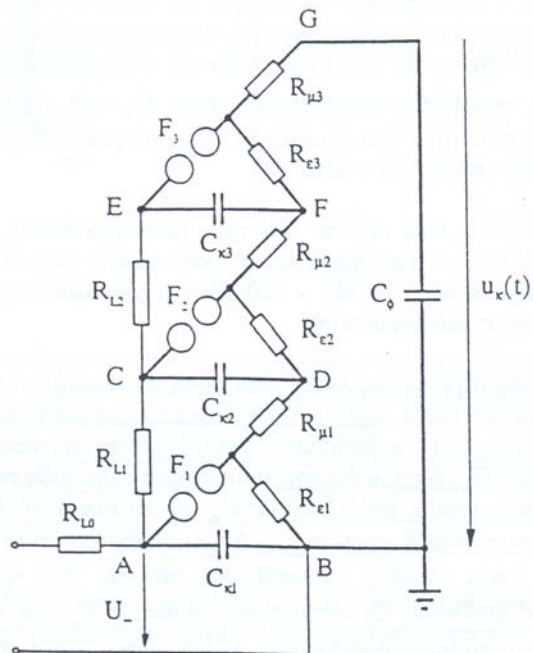
τάσης. Στη συνέχεια οι πυκνωτές C_ϕ και C_κ εκφορτίζονται μέσω της R_e με μια σταθερά χρόνου $(C_\kappa+C_\phi)R_e$. Κατά την περίοδο εκφόρτισης των δύο πυκνωτών σχηματίζεται η ουρά της κρουστικής τάσης. Επειδή κατά κανόνα $C_\kappa \gg C_\phi$ και $R_e \gg R_\mu$, η ουρά της κρουστικής τάσης διαρκεί περισσότερο από το μέτωπο. [6]

Η κρουστική τάση πρέπει να πλησιάζει όσο γίνεται περισσότερο τη μορφή του σχήματος 1 και να μην περιέχει κατά το δυνατό ταλαντώσεις. Ταλαντώσεις στο πρώτο μέρος της κρουστικής κυματομορφής είναι ανεκτές εάν δεν υπερβαίνουν το 5% της U_κ . Αιτία των ταλαντώσεων είναι η ύπαρξη των αυτεπαγωγών, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η παράσιτη αυτεπαγωγή L_1 είναι αλληλένδετη με τα εσωτερικά στοιχεία της γεννήτριας και εξαρτάται από τη γεωμετρική διάταξη και τις διαστάσεις της. Η L_2 περιλαμβάνει την αυτεπαγωγή του εξωτερικού κυκλώματος, τα οποία συνδέει τη γεννήτρια με το δοκίμιο και εξαρτάται από το μήκος, τη διάταξη και τη διατομή των αγωγών σύνδεσης. Η παρουσία των παράσιτων αυτεπαγωγών είναι αναπόφευκτη και για αυτό καταβάλλεται προσπάθεια μείωσης τους με χρήση αγωγών σύνδεσης μεγάλης διατομής και με τη μείωση των διαστάσεων της γεννήτριας και των εξωτερικών συνδέσεων, όσο αυτό βέβαια είναι δυνατό. [6] [12]

6.1.1.3 Πολυβάθμια κρουστική γεννήτρια

Για τάσεις μεγαλύτερες των 200kV χρησιμοποιείται η πολυβάθμια κρουστική γεννήτρια ή γεννήτρια του Marx, η αρχή λειτουργία της οποίας στηρίζεται στην παράλληλη φόρτιση των πυκνωτών κρούσης όλων των βαθμίδων και στη συνέχεια στην εν σειρά εκφόρτιση τους μέσω σπινθηριστή σφαιρών.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη συνδεσμολογία, σύμφωνα με κύκλωμα τύπου b, μιας τριβάθμιας γεννήτριας Marx.



Σχ. 6-3 : Πολυβάθμια κρουστική γεννήτρια

Ο $C_{κ1}$ φορτίζεται στη συνεχή τάση φόρτισης U_- μέσω της R_{L0} , ο $C_{κ2}$ μέσω της R_{L0} , R_{L1} και ο $C_{κ3}$ μέσω των R_{L0} , R_{L1} , R_{L2} . Οι ακροδέκτες B, D, F των τριών πυκνωτών κρούσης είναι γειωμένοι, του $C_{κ1}$ απευθείας, ενώ του $C_{κ2}$ και του $C_{κ3}$ μέσω των $(R_{μ1}+R_{ε1})$ και $(R_{μ1}+R_{ε1}+ R_{μ2}+R_{ε2})$ αντίστοιχα. Οι αντιστάσεις φόρτισης R_{Li} χρησιμεύουν για να περιορίζουν το ρεύμα φόρτισης των πυκνωτών $C_{κi}$ και δεν επηρεάζουν τη μορφή της παραγόμενης τάσης. [6]

Η εν σειρά σύνδεση των πυκνωτών κρούσης και η σε σειρά εκφόρτιση της πολυβάθμιας γεννήτριας γίνεται ως εξής : μόλις διασπασθεί ο F_1 , το σημείο D λαμβάνει το δυναμικό του A U_- ως προς γη. Οι αντιστάσεις φόρτισης R_{Li} είναι πολύ μεγάλης τιμής και ισχύει η ανισότητα $R_{Li} \gg R_{εi} \gg R_{μi}$, συνεπώς ο πυκνωτής $C_{κ2}$ δεν προλαβαίνει να εκφορτισθεί μέσω της R_{L1} , και για το λόγο αυτό η τάση προς τη γη του σημείου C γίνεται $2U_-$. Το διάκενο F_2 του σπινθηριστή βρίσκεται τότε υπό τάση $2U_-$, και εάν είναι ίδιο ή και ελαφρώς μεγαλύτερο από F_1 , διασπάται αμέσως, οπότε το σημείο F αποκτά δυναμικό $2U_-$ προς C, και κατά συνέπεια το σημείο E αποκτά δυναμικό $3U_-$ προς γη. Το διάκενο του σπινθηριστή F_3 ευρισκόμενο υπό τάση $3U_-$ διασπάται αμέσως και ο πυκνωτής μετώπου $C_{φ}$ αρχίζει να φορτίζεται. Με τη διάσπαση όλων των σπινθηριστών οι πυκνωτές κρούσης συνδέονται εν σειρά με συνολική τάση ίση με το άθροισμα των τάσεων τους, οπότε και αρχίζει η μέσω των αντιστάσεων μετώπου $R_{μ1}$, $R_{μ2}$ και $R_{μ3}$ φόρτιση του πυκνωτή μετώπου $C_{φ}$ και στη συνέχεια εκφόρτιση του $C_{φ}$ και της ισοδύναμης προς τον εν σειρά συνδυασμό των $C_{κi}$ χωρητικότητας μέσω των αντιστάσεων του κυκλώματος. [6]

Εάν θεωρηθεί ότι όλα τα καταμεμημένα στοιχεία ανά βαθμίδα είναι ίσα μεταξύ τους, τότε το ισοδύναμο μονοβάθμιο κύκλωμα μιας n-βάθμιας γεννήτριας θα είναι το κύκλωμα τύπου α ή β με ισοδύναμες τιμές των κυκλωματικών στοιχείων :

$$C_{κ} = \frac{C_{κi}}{n} \quad (6.1)$$

$$R_{μ} = n \cdot R_{μi} \quad (6.2)$$

$$R_{ε} = n \cdot R_{εi} \quad (6.3)$$

$$C_{φ} = C_{φ} \quad (6.4)$$

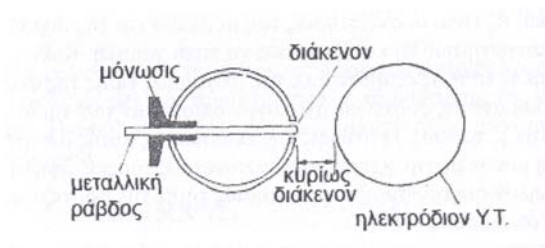
και συνεχή τάση φόρτισης

$$U_{ολ} = nU_- \quad (6.5)$$

Να σημειωθεί ότι οι αντιστάσεις μετώπου συχνά κατανέμονται κατά το ήμισυ του συνόλου εξ ίσου ανά βαθμίδα και κατά το υπόλοιπο ήμισυ συγκεντρωμένο ως ενιαία αντίσταση στην έξοδο της γεννήτριας. Αντίστοιχα, και η αντίσταση εκφόρτισης (ουράς) πολλές φορές δεν κατανέμεται στις βαθμίδες αλλά τίθεται ως ενιαία αντίσταση στην έξοδο. [6]

Για την ορθή λειτουργία της πολυβάθμιας γεννήτριας πρέπει το πρώτο διάκενο να είναι λίγο μικρότερο των υπολοίπων διακένων, δηλαδή πρέπει η τάση διάσπασης του να είναι λίγο μικρότερη αυτής του δευτέρου διακένου. Αυτό γίνεται διότι η διάσπαση του πρώτου διακένου εξασφαλίζει τη διάσπαση των υπολοίπων διακένων. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση της συσκευής trigatron, η οποία προκαλεί την έναυση του διακένου αυτού, η διάσπαση των υπολοίπων σπινθηριστών ακολουθεί περίπου ακαριαία. [12]

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια συσκευή trigatron.



Σχ. 6-4 : Συσκευή trigatron

Η γειωμένη σφαίρα έχει μια μικρή οπή και είναι εφοδιασμένη με μια μεταλλική ράβδο (ράβδος διέγερσης). Η απόσταση μεταξύ του στομίου και της ράβδου είναι περίπου 1mm. Ένας παλμός διέγερσης εφαρμόζεται στη ράβδο, προκαλεί εκκένωση μεταξύ της ράβδου και της γειωμένης σφαίρας. Η εκκένωση προκαλεί διατάραξη του ηλεκτρικού πεδίου και δημιουργούνται φορτία επί της επιφάνειας της σφαίρας. Το ηλεκτρικό πεδίο στο κυρίως διάκενο αυξάνει, διότι η πολικότητα του παλμού διέγερσης είναι αντίθετη της πολικότητας της τάσης φόρτισης της γεννήτριας. Ο συνδυασμός του χωρικού φορτίου και της αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου εξασφαλίζει μια ελεγχόμενη διάσπαση του κυρίως διακένου σε τάση πολύ μικρότερη από την τάση που απαιτούνταν χωρίς τον παλμό διέγερσης. [6] [12]

Όσον αφορά το κύκλωμα φόρτισης, πρέπει να προσεχθεί έτσι ώστε να μη δημιουργούνται ταλαντώσεις στο μέτωπο της κρουστικής τάσης. Τροφοδοτικά με θυρίστορ και με περιορισμό του ρεύματος εξόδου βοηθούν στον περιορισμό των ταλαντώσεων. Επίσης, οι διαστάσεις των επιμέρους εξαρτημάτων (καλώδια κ.α.) πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να μην προκαλούν έντονο φαινόμενο κορόνα κατά τη φόρτιση της γεννήτριας. Οι πυκνωτές πρέπει να έχουν χαμηλή επαγωγή και μεγάλη ικανότητα για ταχεία εκφόρτιση. Τέλος, η γείωση μιας τέτοιας γεννήτριας πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή και μάλιστα να υπάρχει κοινή γείωση της γεννήτριας με τον κλωβό του παλμογράφου. [6] [12]

6.1.1.4 Γεννήτρια κρουστικών τάσεων του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π

Κατά τη διαδικασία των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. κατασκευής MICAFIL, TYPE SG31.16, NR60 H226 του 1960. Είναι οκταβάθμια των 0,1μF ανά βαθμίδα, με δυνατότητα παραγωγής κρουστικών τάσεων 1,2/50 έως 1600kV και τάσεων ζεύξης από 3...600/2500μs τιμής έως 1200kV. Το ηλεκτρόδιο έναυσης βρίσκεται στην πρώτη βαθμίδα της γεννήτριας. Ο χωρητικός καταμεριστής που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της παραγόμενης τάσης παίζει και το ρόλο του πυκνωτή φορτίου. Η βαθμίδα υψηλής τάσης (MICAFIL, TYPE S.DK NR60 H15) του καταμεριστή αποτελείται από 8 πυκνωτές, ίσης χωρητικότητας, συνδεδεμένους σε σειρά. Η ολική χωρητικότητα του καταμεριστή είναι $C_{Hολ} = 200pF$, άρα για καθέναν πυκνωτή θα ισχύει: $C_1 = C_2 = \dots = C_8 = 8 * 200pF = 1600pF$. Αν, λοιπόν, χρησιμοποιήσουμε ν βαθμίδες του καταμεριστή τάσης, τότε αυτές θα αποτελούν τον **πυκνωτή υψηλής τάσης**,

$$C_H = \frac{1600}{\nu} pF \quad (6.6)$$

Επίσης, ο καταμεριστής τάσης περιλαμβάνει και τον **πυκνωτή χαμηλής τάσης** (MICAFIL, TYPE MC/15),

$$C_L = 0,615 \text{ ή } 0,312 \mu\text{F}$$

Επομένως, ο **λόγος καταμερισμού** είναι :

$$n = 1 + \frac{C_L}{C_H} \quad (6.7)$$

Παρακάτω, υπολογίζεται ο λόγος καταμερισμού συναρτήσει του πλήθους των χρησιμοποιούμενων βαθμίδων n και του πυκνωτή χαμηλής τάσης.

Πίνακας 6-1

v	1	2	3	4	5	6	7	8
n ($C_L=615\text{nF}$)	385,4	769,8	1154,9	1538,5	1922,9	2304,4	2686,6	3076,0
n ($C_L=312\text{nF}$)	196,0	391,0	586,3	781,0	976,0	1168,5	1363,4	1561,0



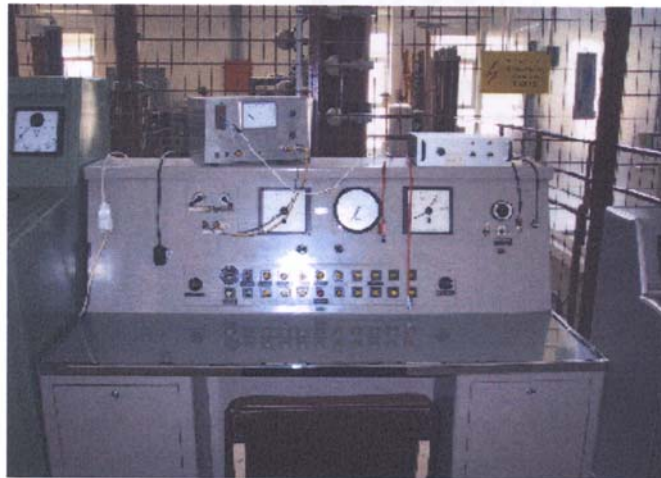
Εικόνα 6-1 : Οκταβάθμια γεννήτρια κρουστικών τάσεων στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.



Εικόνα 6-2 : Χωρητικός καταμεριστής τάσης στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π

Οι χειρισμοί της γεννήτριας γίνονται από απομακρυσμένη και υπερυψωμένη τράπεζα χειρισμών κατασκευής MICAFIL 3x380V, 8kVA με δυνατότητες ρύθμισης

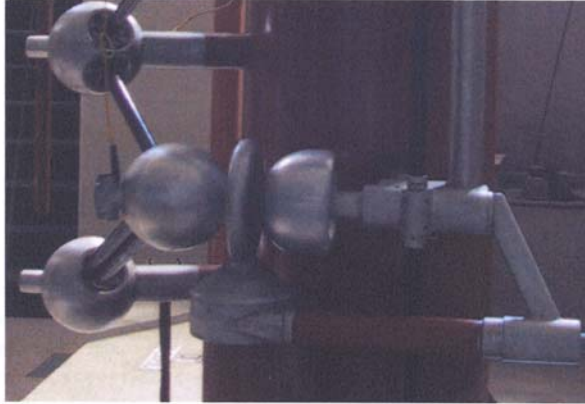
1. της τάσης φόρτισης (0-450kV)
2. της πολικότητας της παραγόμενης κρουστικής τάσης
3. της απόστασης των σφαιρών
4. του σήματος έναρξης της κρουστικής τάσης



Εικόνα 6-3 : Τράπεζα χειρισμών

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η πρώτη βαθμίδα της γεννήτριας με το σπινθηριστή έναυσης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σκοπός της συσκευής έναυσης είναι να ενισχύει τον παλμό που προέρχεται από τη συσκευή συγχρονισμού. Ο παλμός αυτός διέρχεται από καλώδιο με κυματική αντίσταση 75Ω και ενισχύεται από τη συσκευή στα 10kV. Στη συνέχεια μέσω του πυκνωτή ζεύξεως C_{π} (1000pF,

100kV), μεταφέρεται στο ηλεκτρόδιο του Σπ1. Ο πυκνωτής ζεύξεως είναι τοποθετημένος επί μονωτικού στηρίγματος και χρησιμοποιείται τόσο για τη μεταφορά του σήματος από τη συσκευή έναυσης στο Σπ1, όσο και για τη γαλβανική απομόνωση της συσκευής από τα στοιχεία υψηλής τάσης της διάταξης.



Εικόνα 6-4 : Η πρώτη από τις οκτώ βαθμίδες της κρουστικής γεννήτριας με το σπινθηριστή έναυσης.

Τέλος, οι τιμές των αντιστάσεων ανά βαθμίδα που χρησιμοποιήθηκαν είναι :

$$R_{\mu} = 460\Omega // 460\Omega = 230\Omega$$
$$R_{\epsilon} = 2,3k\Omega // 2,3k\Omega // 2,3k\Omega // 4,6k\Omega = 575\Omega$$
$$R_L = 65k\Omega$$

6.1.1.5 Χειρισμός της γεννήτριας κρουστικών τάσεων

Στην παρακάτω φωτογραφία φαίνεται η τράπεζα χειρισμών του εργαστηρίου υψηλών τάσεων.



Εικόνα 6-5 : Τράπεζα χειρισμών κρουστικής γεννήτριας

(1) : Μπουτόν αποζεύξεως δικτύου.

(2) : Κύριος διακόπτης τριών θέσεων O, I, II

- (3a) : Μπουτόν παροχής τάσης στη γεννήτρια (Hochspannung)
(3b) : Μπουτόν αυτόματης διακοπής τροφοδοσίας γεννήτριας.
(4) : Μπουτόν ρύθμισης πολικότητας τάσης, σε θετική **(a)** και σε αρνητική **(b)**.
(Polaritat)
(5) : Μπουτόν ρύθμισης της τάσης τροφοδοσίας πρωτεύοντος, για αύξηση **(a)** και για μείωση **(b)**. (Ladespannung)
(6) : Μπουτόν ρύθμισης της απόστασης μεταξύ των σφαιρών, για αύξηση **(a)** και για μείωση **(b)**.
(7) : Μπουτόν ζεύξεως δικτύου.
(8) : Ρύθμιση κλίμακας οργάνων.
(9) : Βολτόμετρο τάσεως πρωτεύοντος του μετασχηματιστή.
(10) : Όργανο ένδειξης της απόστασης μεταξύ των σφαιρών.
(11) : Βολτόμετρο για τη μέτρηση της τάσης φόρτισης (τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή).
(MA) : Μικροαμπερόμετρο το οποίο μας επιτρέπει να ελέγχουμε το πότε θα γίνεται εκφόρτιση των πυκνωτών. Ο κόκκινος δείκτης αποτελεί έναν διακόπτη, ο οποίος ρυθμίζεται από εμάς, έτσι ώστε, όταν η βελόνα του οργάνου φτάσει στο δείκτη αυτό, να δίνεται εντολή στη γεννήτρια για την εκφόρτιση των πυκνωτών.

Τα βήματα που ακολουθούνται για την εφαρμογή της κρουστικής τάσης είναι :

1. Τοποθέτηση του μπαστουινού γείωσης στις σφαίρες της γεννήτριας, έτσι ώστε να εκφορτιστούν.

ΠΡΟΣΟΧΗ ! : ΤΟ ΜΠΑΣΤΟΥΝΙ ΓΕΙΩΣΗΣ ΤΟ ΠΙΑΝΟΥΜΕ ΠΑΝΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΩΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΟΧΙ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΤΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ.

2. Επιλογή πλήθους βαθμίδων γεννήτριας από κάτω προς τα πάνω.
3. Βγάζω εκτός τις υπόλοιπες βαθμίδες, βραχυκυκλώνοντας την αμέσως επόμενη.
4. Σύνδεση δοκιμίου στη γεννήτρια υψηλών τάσεων.
5. Σύνδεση της γεννήτριας με τον καταμεριστή τάσης, επιλέγοντας τον κατάλληλο λόγο υποβιβασμού τάσης **n** (βαθμίδες πυκνωτή υψηλής τάσης **v**, πυκνωτή χαμηλής τάσης).
6. Σύνδεση του πυκνωτή χαμηλής τάσης μέσω αντίστασης προσαρμογής και ομοαξονικού καλωδίου στο σύστημα καταγραφής της τάσης (παλμογράφος ή όργανο μεγίστου).
7. Αποσύνδεση του μπαστουινού γείωσης.
8. Κλείσιμο θυρών, ώστε να είναι δυνατή η παροχή τάσης στον χώρο των δοκιμών.
9. Θέτουμε το διακόπτη (1) στη θέση II.
10. Πιέζουμε το μπουτόν (7) ώστε να γίνει ζεύξη με το δίκτυο.
11. Θέτουμε σε λειτουργία το μικροαμπερόμετρο (MA) και ρυθμίζουμε τον κόκκινο δείκτη.
12. Περιμένουμε να ανάψει η πορτοκαλί λυχνία του κυκλώματος έναυσης.
13. Ρυθμίζουμε την πολικότητα (Polaritat), την τάση (Ladespannung) και το διάκενο των σφαιρών του σπινθηριστή.
14. Πιέζουμε το κόκκινο μπουτόν (3.a) (Hochspannung) και μετακινώ το σύρμα που συνδέει τη γείωση μέχρι να οπλίσει το ρελαί στο εσωτερικό της τράπεζας.
15. Σε περίπτωση που δε συμβαίνει διάσπαση ρυθμίζουμε εκ νέου την τάση και το διάκενο.
16. Όταν γίνει διάσπαση πιέζουμε το πράσινο μπουτόν (3.b).

17. Κάνουμε απόζευξη του δικτύου πιέζοντας το μπουτόν (1) και θέτουμε το διακόπτη (2) στη θέση Ο.
18. Λαμβάνουμε την κυματομορφή και τα στοιχεία της παραγόμενης τάσης από την οθόνη του υπολογιστή του συστήματος DIAS.

6.1.2 Σύστημα καταγραφής τάσεων DIAS

Το περιβάλλον μέσα στο οποίο λειτουργεί το σύστημα μέτρησης, η εγκατάσταση της γείωσης καθώς και η παρουσία ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση, την ακρίβεια και την αξιοπιστία του. Για αυτό θα πρέπει να λαμβάνονται κάθε φορά ιδιαίτερα μέτρα για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας λειτουργίας και της ακρίβειας τέτοιων συστημάτων. Σε πολλές δοκιμές συνεκτιμώνται κάποιες ειδικές απαιτήσεις ακρίβειας μόνο για τις παραμέτρους των παλμών, οι οποίες περιγράφονται στα διεθνή πρότυπα IEC 60 και IEC1083. Για δοκιμές οι οποίες απαιτούν σύγκριση των καταγραφόμενων μεγεθών, η ανάλυση και η απόκριση του καταγραφικού θα πρέπει να πληρούν ειδικές προδιαγραφές για να ανιχνεύονται εύκολα οι μικρές αποκλίσεις των καταγραφόμενων μεγεθών τάσης και ρεύματος. Οι πιο υψηλές απαιτήσεις τίθενται στο σύστημα μέτρησης, σε περιπτώσεις μετρήσεων αναφοράς για διακρίβωση και για σύγχρονες μεθόδους διάγνωσης. Ένα τέτοιο σύστημα είναι το DIAS (Digital Impulse Analyzing System) που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο υψηλών τάσεων του Ε.Μ.Π.

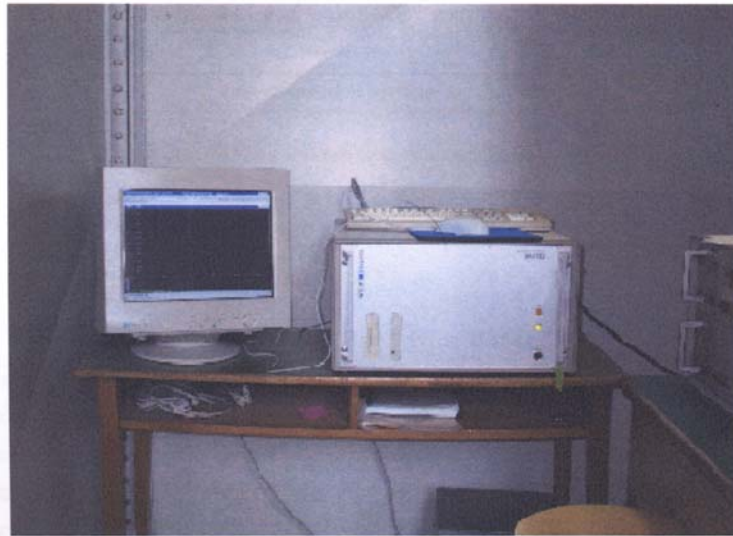
Το σύστημα DIAS (Digital Impulse Analyzing System) είναι ένα ψηφιακό σύστημα για καταγραφή, μέτρηση και ανάλυση κρουστικών τάσεων και ρευμάτων διαφόρων μορφών. Το DIASTM 733 διαθέτει ένα ή δύο κανάλια, ενώ η καταγραφή και η ανάλυση των κρουστικών τάσεων ή ρευμάτων γίνεται σύμφωνα με τις αντίστοιχες προδιαγραφές (IEC 61083, IEC 60060, IEC 60076, IEC 60099, IEC 60230) και τα αποτελέσματα λαμβάνονται μέσω υπολογιστή. Η συσκευή DIAS συνδέεται με τον καταμεριστή ή το δοκίμιο με ένα ομοαξονικό καλώδιο. Μέσω του υπολογιστή γίνεται ρύθμιση διαφόρων παραμέτρων, ενώ η μορφή της κρουστικής τάσης καθώς και οι τιμές διαφόρων παραμέτρων (τάση, χρόνος μετώπου, χρόνος ουράς κ.α.) φαίνονται στην οθόνη του υπολογιστή. Οι κυματομορφές αποθηκεύονται σε αρχεία, τα οποία μπορούμε να πάρουμε με δισκέτα από τη συσκευή DIAS.

Ορισμένα χαρακτηριστικά της συσκευής είναι :

- Διακριτότητα 10 bit (real vertical resolution)
- 128 kB memory point depth
- Αυτόματος υπολογισμός όλων των κρουστικών κυματομορφών και των παραμέτρων τους
- Εναρμόνιση με τα πρότυπα IEC 61083-1 & IEC 61083-2
- Εύκολη διακρίβωση και αναβάθμιση του συστήματος

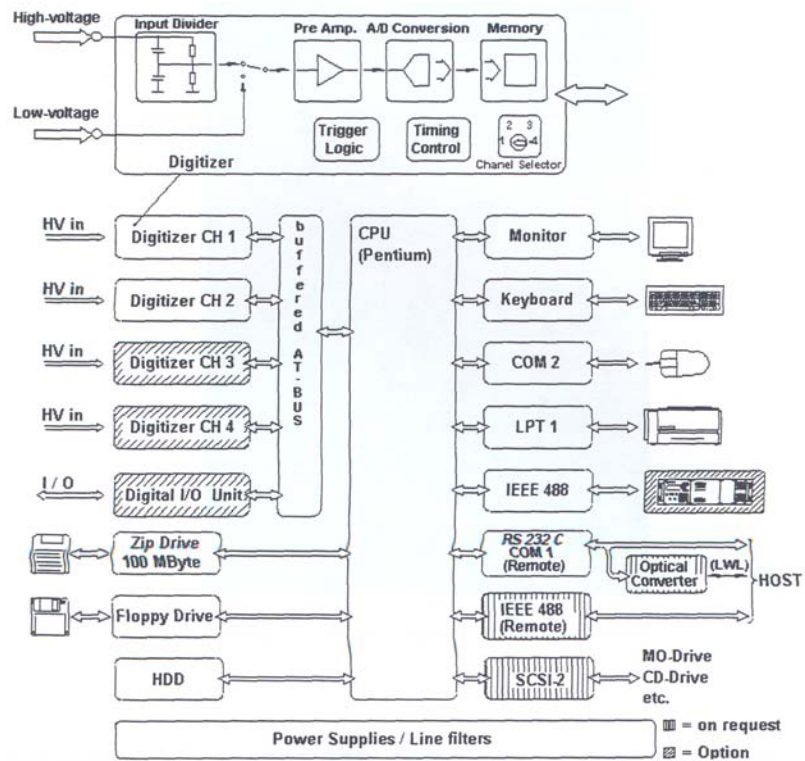
Το DIASTM 733 μπορεί να εφαρμοστεί για δοκιμές σε :

- Μετασχηματιστές
- Διακόπτες
- Καλώδια
- Ερευνητικούς σκοπούς



Εικόνα 6-6 : Σύστημα μέτρησης και καταγραφής DIAS™ 733

Η δομή του συστήματος DIAS™ 733 δύο καναλιών αποτυπώνεται από το ακόλουθο μπλοκ διάγραμμα :



Σχήμα 6-5 : Μπλοκ διάγραμμα του συστήματος DIAS™ 733

6.1.3 Θωρακισμένος θάλαμος

Ο θωρακισμένος θάλαμος δεν είναι τίποτε άλλο από έναν κλωβό Faraday κατασκευής SIEMENS, εφοδιασμένος με αντιπαρασιτικό φίλτρο, μεταλλικά πλέγματα στο παράθυρο που διαθέτει, θωρακισμένη πόρτα και ειδικά αντιπαρασιτικά κανάλια διέλευσης των καλωδίων που έρχονται από τις περιφερειακές διατάξεις, για την αποφυγή επιδράσεων από εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Στο εσωτερικό του είναι τοποθετημένο το σύστημα μέτρησης και καταγραφής που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

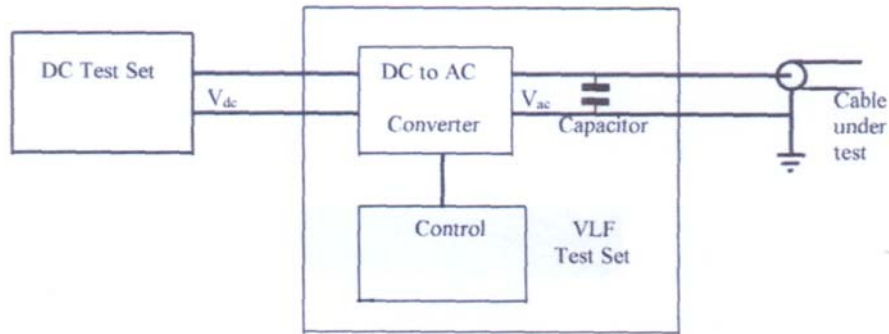


Εικόνα 6-7 : Θωρακισμένος θάλαμος Siemens

6.1.4 Συσκευή VLF

Οι συσκευές VLF που διατίθενται από τις διάφορες εταιρείες έχουν δυνατότητα παροχής τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας που κυμαίνεται από 25kV έως 200kV, ενώ τα επίπεδα των χωρητικότητων των καλωδίων που μπορούν να δοκιμαστούν με μια συσκευή VLF είναι 0,4μF – 50μF. Κάθε συσκευή VLF πρέπει να παρέχει τάση συχνότητας 0.1Hz (ή και μικρότερη) με το χρόνο που μεσολαβεί για την αλλαγή της πολικότητας να είναι από 2msec έως 10msec. Επίσης η συσκευή θα πρέπει να είναι μικρών διαστάσεων, μικρού βάρους και μικρής κατανάλωσης ισχύος.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα λειτουργίας μιας συσκευής VLF.



Σχ. 6-6 : Διάγραμμα λειτουργίας μιας συσκευής VLF

Ένας αντιστροφέας DC-AC μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη τάση πολύ χαμηλής συχνότητας. Ο αντιστροφέας αποτελείται από ένα πηνίο και ένα περιστρεφόμενο ρελαί, το οποίο αλλάζει την πολικότητα κάθε 5sec, δημιουργώντας έτσι μια κυματομορφή 0,1Hz. Ένα κύκλωμα αποτελούμενο από έναν επαγωγέα υψηλής τάσης και έναν πυκνωτή παράλληλα με το δοκίμιο, εγγυάται την αλλαγή της πολικότητας σε κλίμακα βιομηχανικής συχνότητας (δηλ. 2msec-10msec)

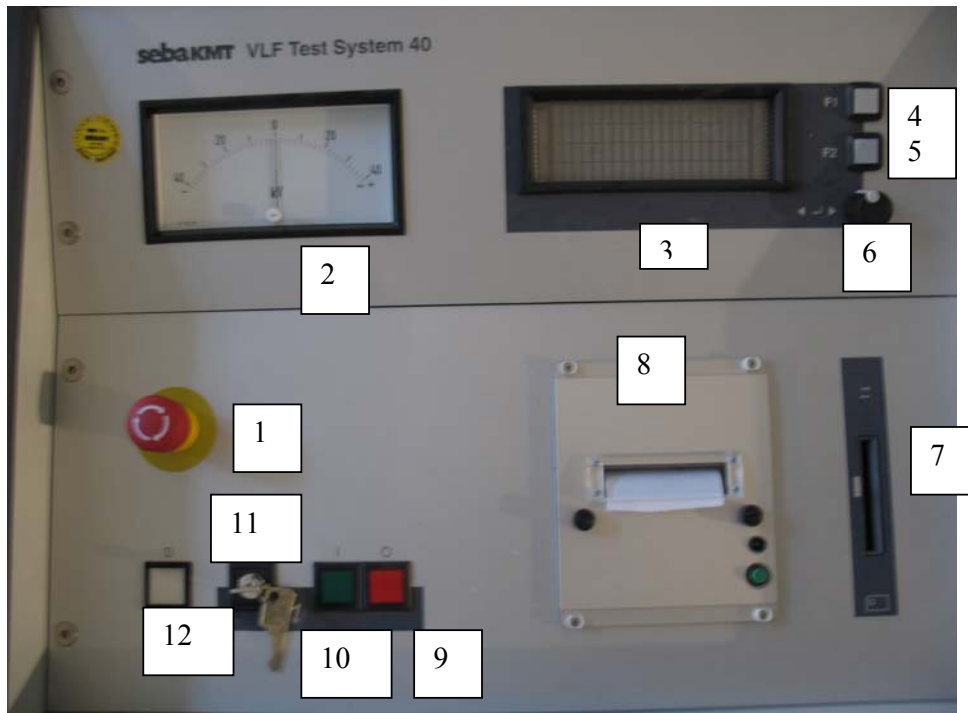


Εικόνα 6-8 : Η συσκευή VLF του Εργαστηρίου ΥΤ του Ε.Μ.Π. Διακρίνονται τα δύο μέρη της συσκευής : Operating Module (το πάνω μέρος) και HV module (το κάτω μέρος)

Η συσκευή VLF του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. είναι κατασκευής sebaKMT. Αποτελείται από δύο μέρη (κομμάτια) : το τμήμα

λειτουργίας (operating module) και το τμήμα YT (HV module). Η συσκευή έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

- Τάση εξόδου DC : 0 - 40 kV
- Μέτρηση ρευμάτων διαρροής : 0 – 7 mA
- Διακριτότητα (resolution) : 10μΑ
- Τάση εξόδου VLF : 0 – 40 kV
- Συχνότητα : 0,1 Hz
- Κυματομορφή : cosine – rectangular
- Χωρητικότητα του προς δοκιμή καλωδίου : 4,4 μF
- Ισχύς : 300 VA (max)
- Διαστάσεις : 550x1000x420mm



Εικόνα 6-9 : Operating Module (πρόσθια όψη)

Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται τα στοιχεία χειρισμού και ελέγχου της συσκευής. Πιο αναλυτικά :

1. Μπουτόν έκτακτης ανάγκης (Emergency Off)
2. Ένδειξη της τάσης σε kV
3. Οθόνη ενδείξεων
4. Μπουτόν ρύθμισης (F1)
5. Μπουτόν ρύθμισης (F2)
6. Knob / push μπουτόν
7. Υποδοχή κάρτας
8. Protocol printer
9. HV Off
10. HV On
11. Κλειδί
12. Μπουτόν έναρξης παροχής τάσης

6.2 Διακρίβωση οργάνων

6.2.1 Εισαγωγικά

Με τον όρο διακρίβωση (calibration) εννοείται το σύνολο των ενεργειών βάσει των οποίων αποκαθίσταται κάτω από ορισμένες συνθήκες, μια σχέση ανάμεσα στις ποσοτικές ενδείξεις ενός οργάνου ή συστήματος μέτρησης και στις αντίστοιχες τιμές όπως αυτές υλοποιούνται από πρότυπα. Με άλλα λόγια, ο όρος διακρίβωση αφορά τον προσδιορισμό και την τεκμηρίωση της σχέσης των ενδείξεων ή τιμών του υπό διακρίβωση συστήματος με τη μη συμβατικά θεωρούμενη αληθή τιμή η οποία δίνεται από ένα πρότυπο αναφοράς.

Σκοπός λοιπόν της διακρίβωσης είναι :

- Να αποκατασταθεί μια σχέση ανάμεσα στην ένδειξη του οργάνου και τη θεωρούμενη αληθή τιμή
- Να εκτιμηθεί το εύρος του σφάλματος ή ακριβέστερα η αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τις μετρήσεις.

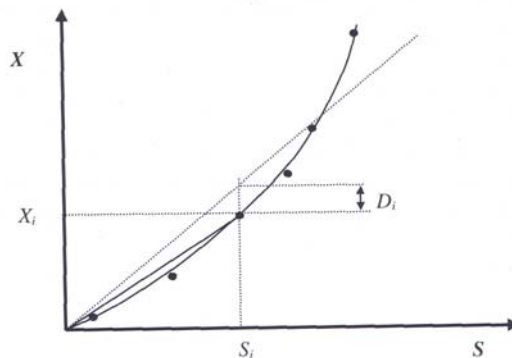
Για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων πρέπει να συνυπολογίζονται όλες οι πιθανές πηγές σφάλματος, συμπεριλαμβανομένων των αβεβαιοτήτων που :

- χαρακτηρίζουν την τιμή αναφοράς
- σχετίζονται με τη μέτρηση της ενδεχόμενης απόκλισης του υπό διακρίβωση μεγέθους από την τιμή αναφοράς (αβεβαιότητες μεθόδου μέτρησης, αβεβαιότητες διακριτότητας οργάνων, αβεβαιότητες επαναληψιμότητας)
- σχετίζονται με τις συνθήκες που επικρατούν κατά τη διακρίβωση

Σε κάθε σημείο διακρίβωσης i συγκρίνεται η ένδειξη του οργάνου X_i με την αντίστοιχη τιμή αναφοράς S_i . Οι αποκλίσεις $D_i = S_i - X_i$ συνιστούν εκτιμήσεις για ενδεχόμενες διορθώσεις είτε απευθείας είτε με τη βοήθεια συντελεστών $F_i = S_i / X_i$ ή άλλων σχέσεων διόρθωσης $f(X_i)$. Επιπλέον, κάθε σημείο χαρακτηρίζεται από τις αβεβαιότητες u_{S_i} και u_{X_i} της τιμής αναφοράς και της μετρούμενης τιμής αντίστοιχα. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με τη μορφή καμπύλης διακρίβωσης, η οποία πλησιάζει τα σημεία διακρίβωσης. Η καμπύλη αυτή υπολογίζεται με παρεμβολή και εκφράζεται με τη μορφή μιας σχέσης, συνήθως πολυωνυμικής :

$$Y = \sum_k A_k X^k \quad (6.8)$$

όπου X η ένδειξη του οργάνου, Y η διορθωμένη ένδειξη και A_k οι συντελεστές, η εύρεση των οποίων αποτελεί αντικειμενικό στόχο της διακρίβωσης. [26]



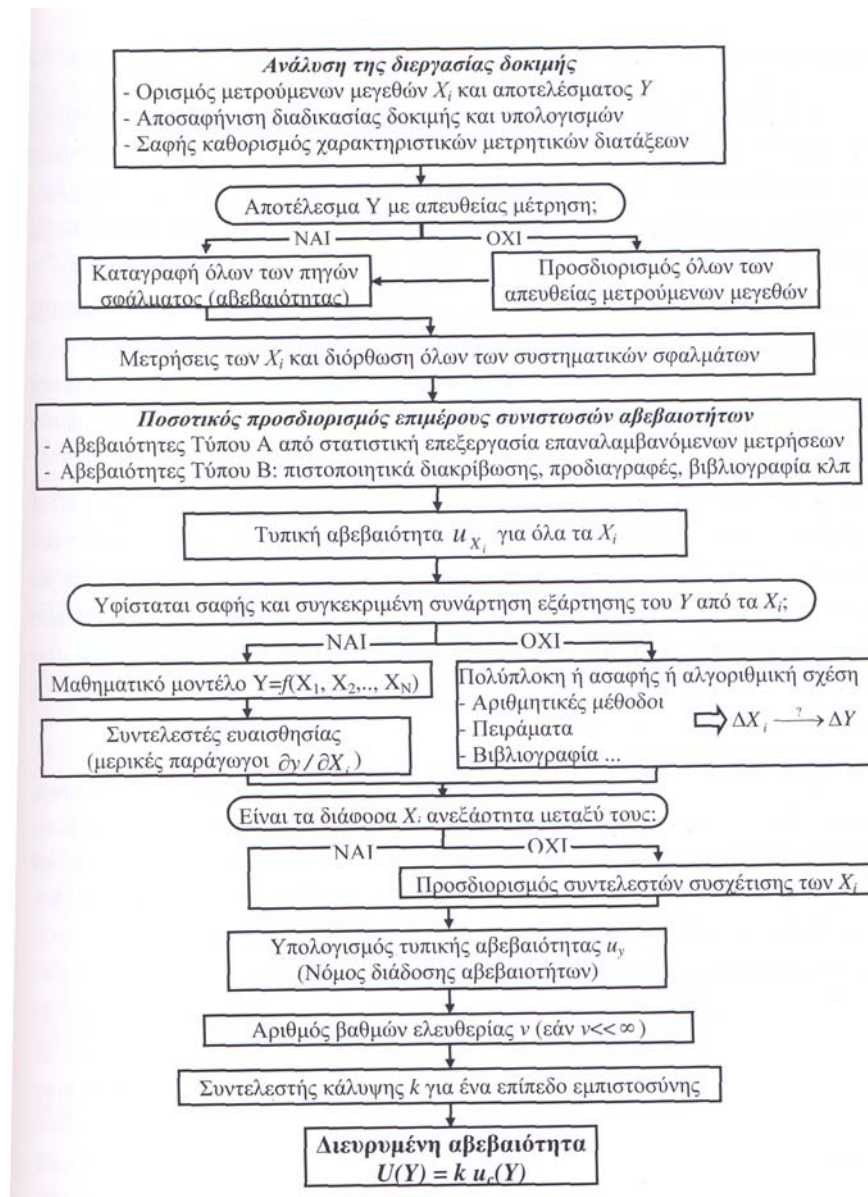
Σχ. 6-7 : Καμπύλη διακρίβωσης

6.2.2 Διαδικασία υπολογισμού αβεβαιότητας

Όπως ειπώθηκε και στο οικείο κεφάλαιο, ο υπολογισμός της αβεβαιότητας στις δοκιμές έχει σκοπό την ποσοτική εκτίμηση της ποιότητας του αποτελέσματος. Τα ζητήματα που πρέπει να απαντηθούν είναι :

- Ποιες παράμετροι επηρεάζουν το αποτέλεσμα και επομένως ποιες είναι οι δυνατές πηγές σφάλματος
- Πώς διαχέονται τα σφάλματα αυτά κατά τη δοκιμή μέχρι το τελικό αποτέλεσμα

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται ένα τυπικό διάγραμμα ροή των ενεργειών που απαιτούνται για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας στις δοκιμές. [26]



Σχ. 6-8 : Ροή ενεργειών για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας στο αποτέλεσμα της δοκιμής

Η γενική ροή ενεργειών περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα γενικής εφαρμογής :

Ανάλυση – σαφής διατύπωση του προβλήματος

Αναλύεται η διαδικασία της δοκιμής με τη μεγαλύτερη δυνατή σαφήνεια και καθορίζονται οι μετρούμενες τιμές, τα αποτελέσματα και οι απαιτούμενοι υπολογισμοί βήμα προς βήμα.

Καταγραφή όλων των πηγών αβεβαιότητας

Εξετάζονται όλες οι παράμετροι που είναι δυνατόν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα της δοκιμής : μεγέθη που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς, μεγέθη που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς, μεγέθη που μετρώνται αλλά δε συνυπολογίζονται και παράμετροι που δεν μετρώνται αλλά επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Εντοπίζονται επίσης τυχόν αβεβαιότητες οφειλόμενες στον πιθανά προσεγγιστικό χαρακτήρα των υπολογισμών ή του μοντέλου συμπεριφοράς του προϊόντος.

Υπολογισμός τυπικών αβεβαιοτήτων για κάθε παράμετρο επιρροής

Υπολογίζονται οι τυπικές αβεβαιότητες για καθεμία από τις παραμέτρους επιρροής, εφαρμόζοντας την Τύπου Α ή την Τύπου Β διαδικασία υπολογισμού.

Καθορισμός συντελεστών ευαισθησίας και συμμεταβλητότητας

Προσδιορίζονται οι συντελεστές ευαισθησίας του τελικού αποτελέσματος σε σχέση με τα μεγέθη επιρροής, δηλαδή πόσο επηρεάζεται το αποτέλεσμα από μικρές μεταβολές των τιμών των μεγεθών αυτών. Η ύπαρξη συντελεστών συμμεταβλητότητας διαφορετικών του μηδενός είναι σπάνια στις δοκιμές και μπορεί κατά κανόνα αποφευχθεί αν οι σχέσεις μεταξύ αποτελέσματος και μετρήσεων διατυπωθούν με τρόπο ώστε να μην εμφανίζονται ενδιάμεσες μεταβλητές, οι οποίες είναι συνάρτηση των ίδιων πρωτογενών μετρήσεων.

Υπολογισμός τυπικής συνδυασμένης αβεβαιότητας του αποτελέσματος

Ο υπολογισμός της τυπικής συνδυασμένης αβεβαιότητας του αποτελέσματος γίνεται με εφαρμογή του νόμου διάδοσης των αβεβαιοτήτων.

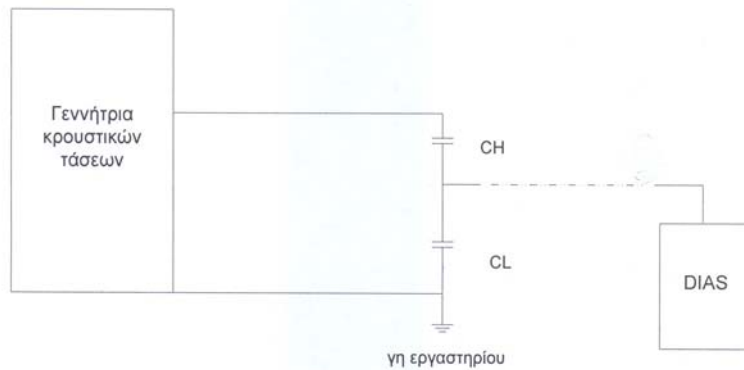
Καθορισμός συντελεστή κάλυψης και υπολογισμός διευρυμένης αβεβαιότητας

Συνήθως λαμβάνεται $k=2$ και ο υπολογισμός της διευρυμένης αβεβαιότητας γίνεται με τη γνωστή σχέση. [26]

6.2.3 Επαλήθευση γεννήτριας κρουστικών τάσεων

Η διακρίβωση είναι μια διαδικασία ακριβής, που γίνεται από διαπιστευμένα εργαστήρια και ελέγχεται ένα πλήθος παραμέτρων. Είναι μια διαδικασία υψηλού κόστους και πραγματοποιείται συνήθως με χρήση ενός συστήματος αναφοράς (reference measuring system). Αντίθετα η επαλήθευση (verification) είναι μια πιο γρήγορη και απλή διαδικασία, που γίνεται πριν από κάποια δοκιμή για να βεβαιωθούμε ότι ο εξοπλισμός λειτουργεί σωστά. Η επαλήθευση, αν και απλούστερη διαδικασία, ακολουθεί σε γενικές γραμμές τα βήματα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων.

Για την επαλήθευση της γεννήτριας κρουστικών τάσεων του εργαστηρίου υψηλών τάσεων του Ε.Μ.Π. χρησιμοποιήθηκε η διάταξη του παρακάτω σχήματος :

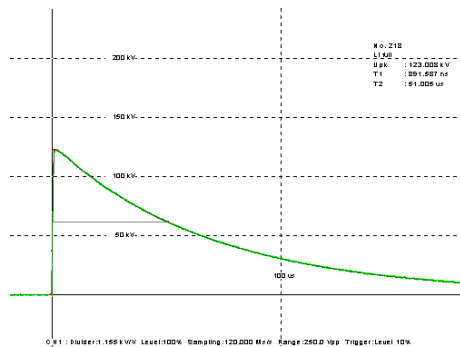


Σχ. 6-9 : Διάταξη για την επαλήθευση της γεννήτριας κρουστικών τάσεων

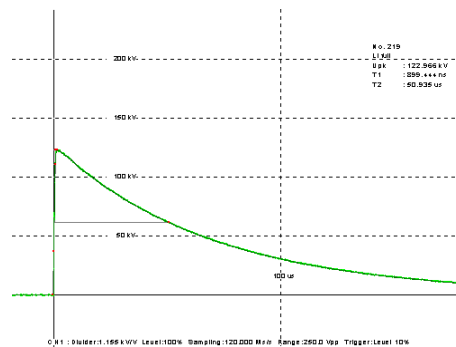
Ο χωρητικός καταμεριστής και το σύστημα DIAS περιγράφηκαν στις παραγράφους 6.1.1.4 και 6.1.2 αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο βαθμίδες της κρουστικής γεννήτριας και 3 βαθμίδες του χωρητικού καταμεριστή, ενώ το καλώδιο που συνδέει τον χωρητικό καταμεριστή με το σύστημα DIAS έχει κυματική αντίσταση $Z=75\Omega$.

Έγιναν δοκιμές για δύο τιμές κρουστικής τάσης : $\pm 123 \text{ kV}$ και $\pm 170 \text{ kV}$. Η επιλογή των δύο αυτών τιμών ήταν τυχαία και απλώς καταδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η επαλήθευση. Παρακάτω φαίνονται οι γραφικές των κρουστικών τάσεων που ελήφθησαν από το σύστημα DIAS.

A. Μέγιστη τιμή κρουστικής τάσης +123 kV

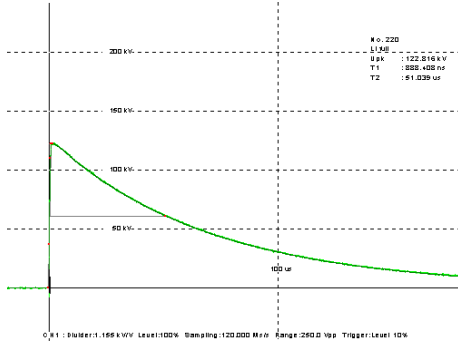


Γραφική No 1

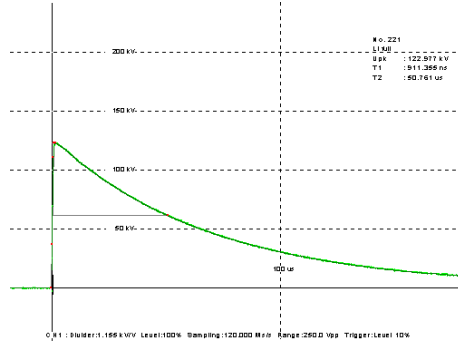


Γραφική No 2

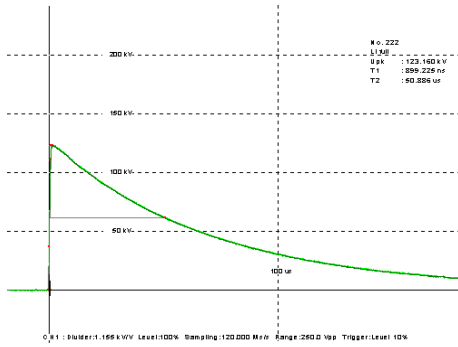
Κεφάλαιο 6 : Δοκιμές στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



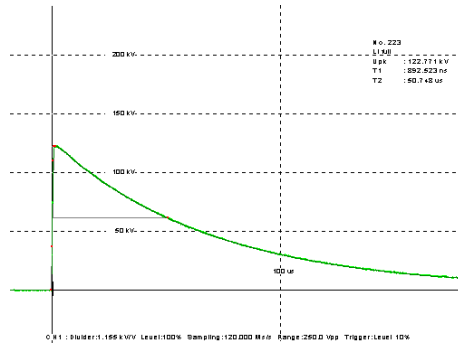
Γραφική Νο3



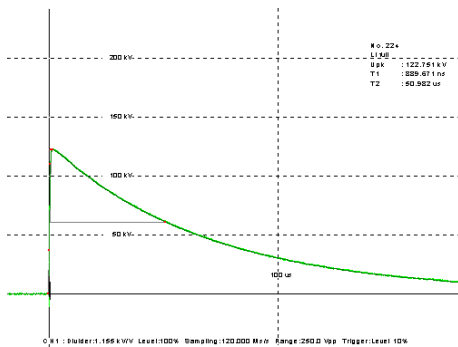
Γραφική Νο 4



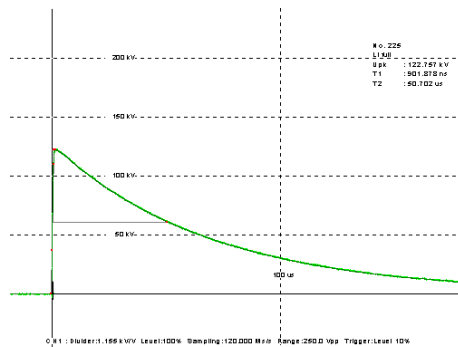
Γραφική Νο 5



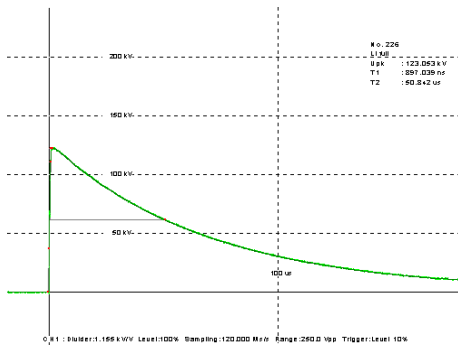
Γραφική Νο 6



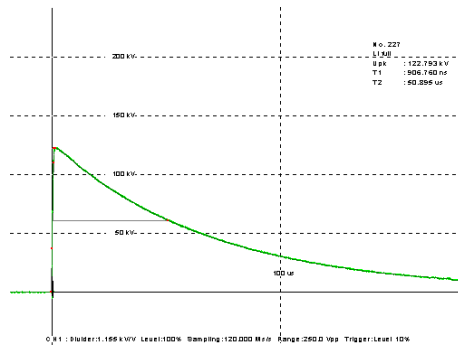
Γραφική Νο 7



Γραφική Νο 8



Γραφική Νο 9



Γραφική Νο 10

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές της μέγιστης τάσης (U_K), του χρόνου μετώπου (T_1) και του χρόνου ημίσειας εύρους (T_2) για κάθε γραφική. Υπολογίστηκε επίσης η αβεβαιότητα τύπου A για κάθε μέγεθος σύμφωνα με τη σχέση (5.18) :

$$U_r = \frac{ts_r}{\sqrt{n}}$$

όπου ο συντελεστής Student t είναι από τον Πίνακα 5-1 για $n = 10$ και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% $t = 2,26$.

Πίνακας 6-2

n	Up (kV)	T1 (ns)	T2 (μs)
1	123,008	891,587	51,005
2	122,966	899,444	50,935
3	122,816	888,408	51,039
4	122,977	911,355	50,761
5	123,160	899,225	50,886
6	122,771	892,523	50,748
7	122,751	889,671	50,982
8	122,757	901,878	50,702
9	123,053	897,039	50,842
10	122,793	906,760	50,895
M.O.	122,900	897,780	50,870
sr	0,145	7,503	0,115
u	0,104	5,362	0,082

Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω αβεβαιότητες είναι τύπου A.

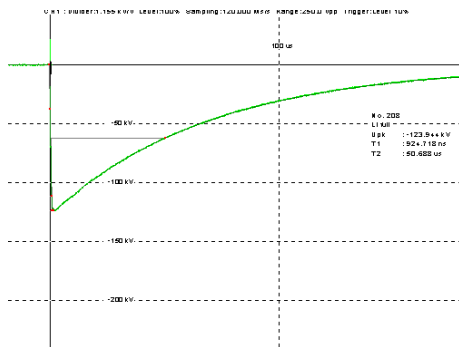
Συνοπτικά :

$$U_K = 122,9 \pm 0,104 \text{ kV}$$

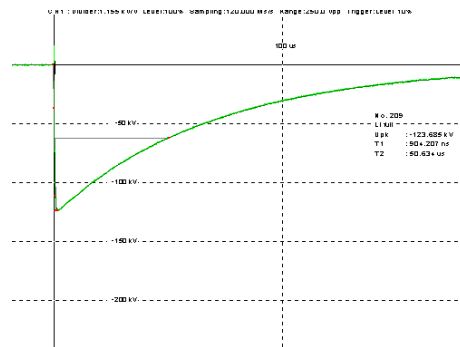
$$T_1 = 897,78 \pm 5,362 \text{ nsec}$$

$$T_2 = 50,87 \pm 0,082 \text{ μsec}$$

B. Μέγιστη τιμή κρουστικής τάσης -123kV

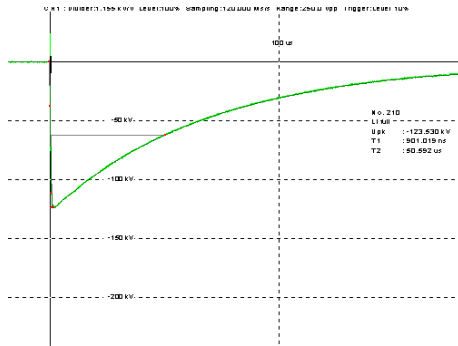


Γραφική Νο 1

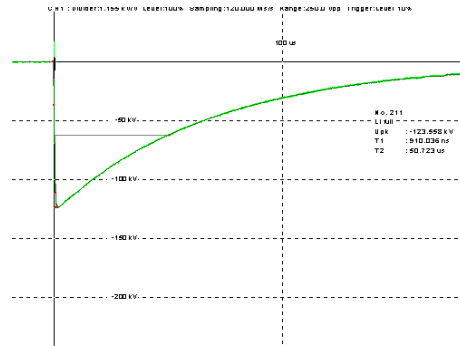


Γραφική Νο 2

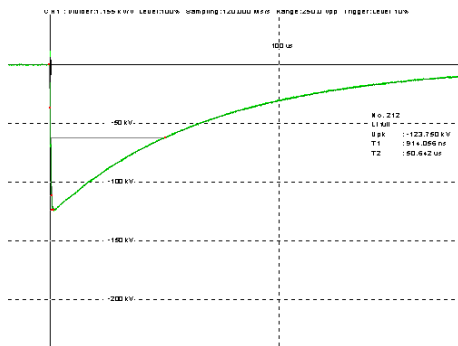
Κεφάλαιο 6 : Δοκιμές στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



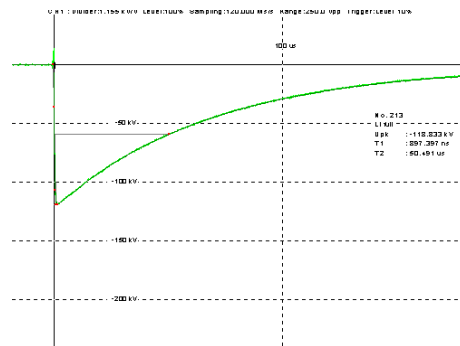
Γραφική Νο 3



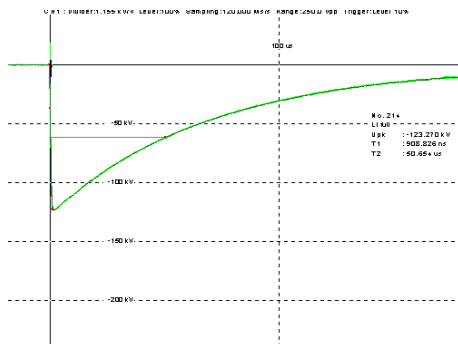
Γραφική Νο 4



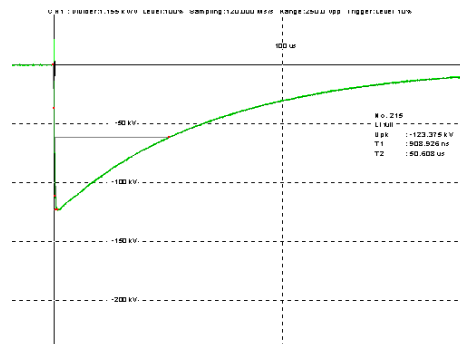
Γραφική Νο 5



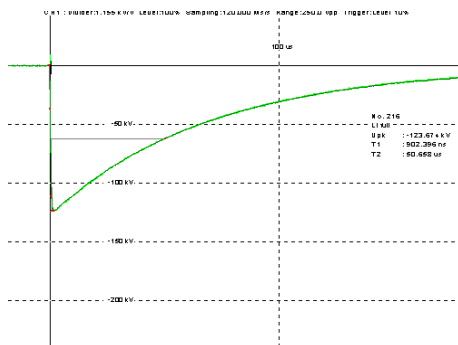
Γραφική Νο 6



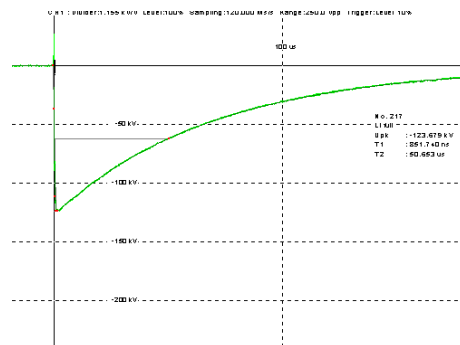
Γραφική Νο 7



Γραφική Νο 8



Γραφική Νο 9



Γραφική Νο 10

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές της μέγιστης τάσης (U_{κ}), του χρόνου μετώπου (T_1) και του χρόνου ημίσειας εύρους (T_2) για κάθε γραφική και υπολογίστηκε η αβεβαιότητα τύπου A για κάθε μέγεθος όπως και προηγούμενα.

Πίνακας 6-3

n	U_{κ} (kV)	T_1 (ns)	T_2 (μ s)
1	-123,944	924,718	50,688
2	-123,685	904,207	50,634
3	-123,53	901,019	50,592
4	-123,558	910,036	50,723
5	-123,75	914,056	50,642
6	-118,833	897,397	50,491
7	-123,27	908,826	50,654
8	-123,375	908,926	50,608
9	-123,674	902,396	50,658
10	-123,679	851,74	50,653
M.O.	-123,100	902,330	50,630
sr	1,521	19,358	0,062
u	1,087	13,384	0,045

Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω αβεβαιότητες είναι τύπου A.

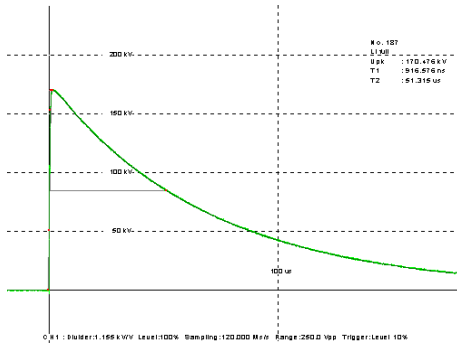
Συνοπτικά :

$$U_{\kappa} = -123,1 \pm 1,087 \text{ kV}$$

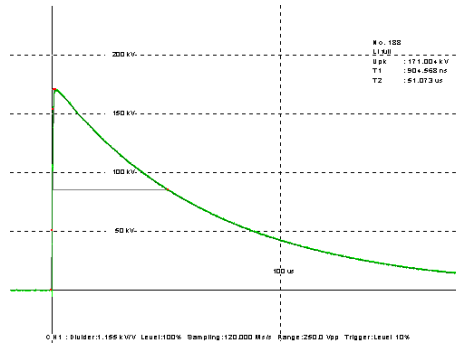
$$T_1 = 902,33 \pm 13,384 \text{ nsec}$$

$$T_2 = 50,63 \pm 0,045 \text{ } \mu\text{sec}$$

Γ. Μέγιστη τιμή κρουστικής τάσης +170kV

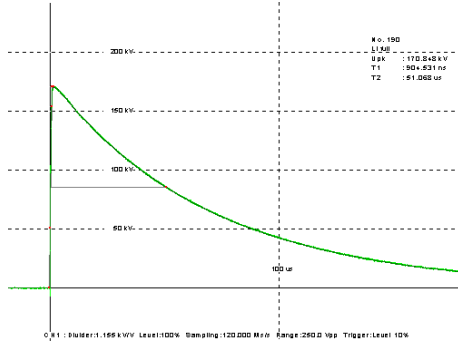


Γραφική Νο 1

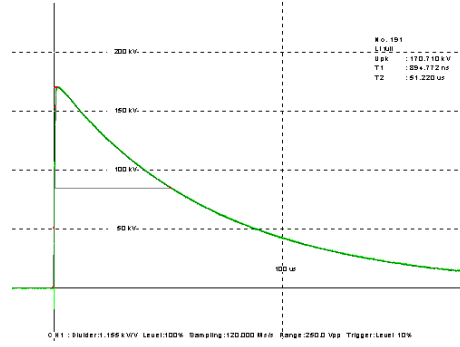


Γραφική Νο 2

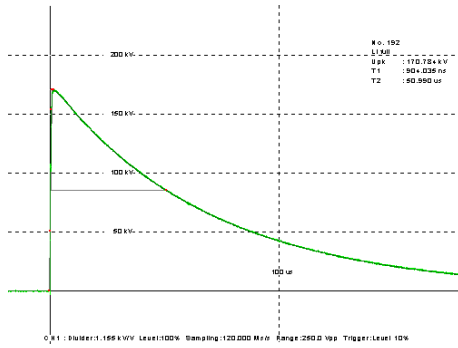
Κεφάλαιο 6 : Δοκιμές στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



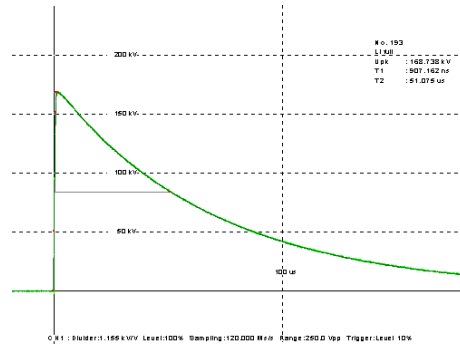
Γραφική Νο 3



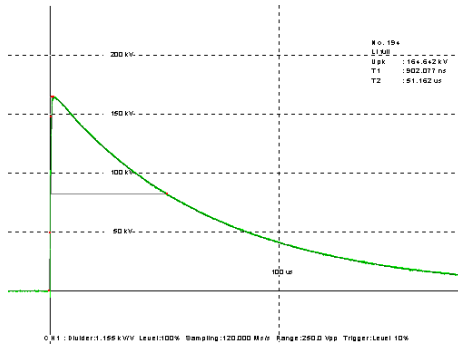
Γραφική Νο 4



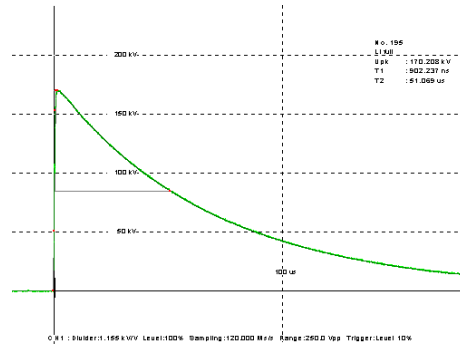
Γραφική Νο 5



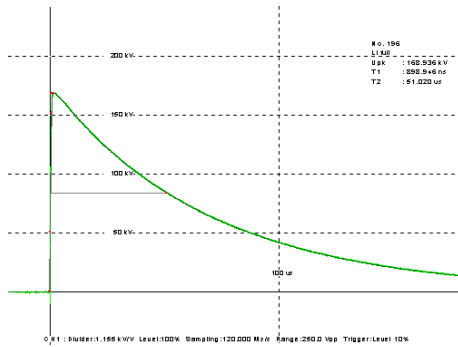
Γραφική Νο 6



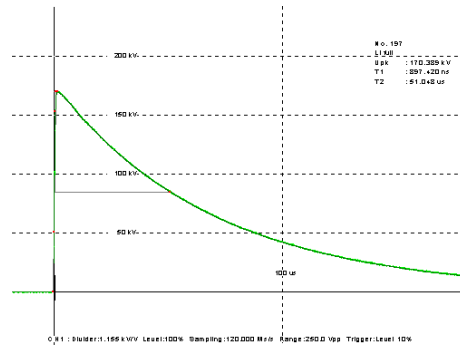
Γραφική Νο 7



Γραφική Νο 8



Γραφική Νο 9



Γραφική Νο 10

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές της μέγιστης τάσης (U_k), του χρόνου μετώπου (T_1) και του χρόνου ημίσεως εύρους (T_2) για κάθε γραφική και υπολογίστηκε η αβεβαιότητα τύπου A για κάθε μέγεθος όπως και προηγούμενα.

Πίνακας 6-4

n	U_{pk} (kV)	T1	T2
1	170,476	916,576	51,315
2	171,004	904,508	51,073
3	170,848	904,531	51,068
4	170,710	894,772	51,220
5	170,784	904,035	50,990
6	168,738	907,162	51,075
7	164,642	902,077	51,162
8	170,208	902,237	51,069
9	168,936	898,946	51,020
10	170,389	897,42	51,048
M.O.	169,670	903,230	51,100
sr	1,933	5,995	0,099
u	1,381	4,285	0,071

Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω αβεβαιότητες είναι τύπου A.

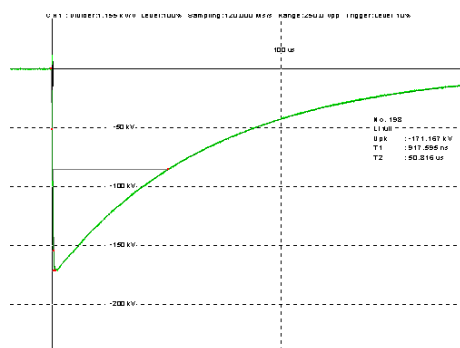
Συνοπτικά :

$$U_k = 169,67 \pm 1,381 \text{ kV}$$

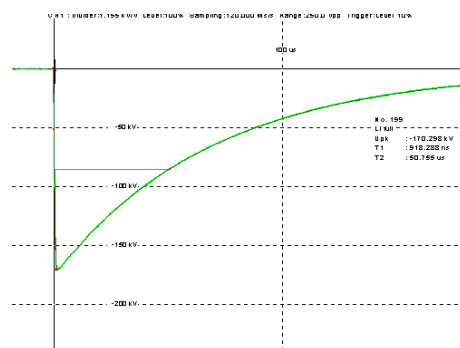
$$T_1 = 903,23 \pm 4,285 \text{ nsec}$$

$$T_2 = 51,1 \pm 0,071 \text{ msec}$$

Δ. Μέγιστη τιμή κρουστικής τάσης -170kV

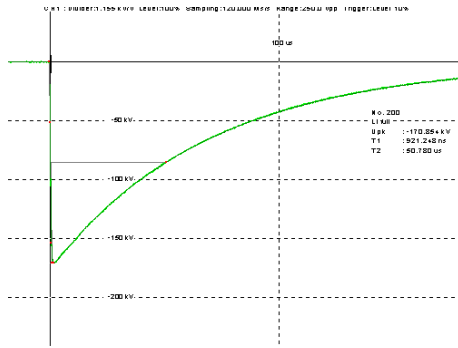


Γραφική Νο 1

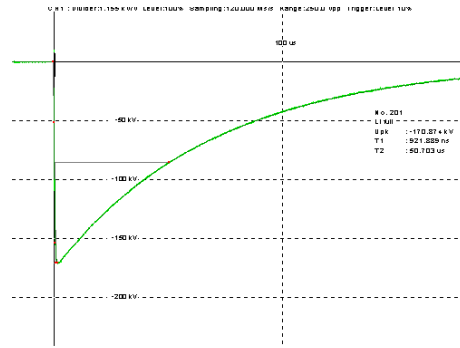


Γραφική Νο 2

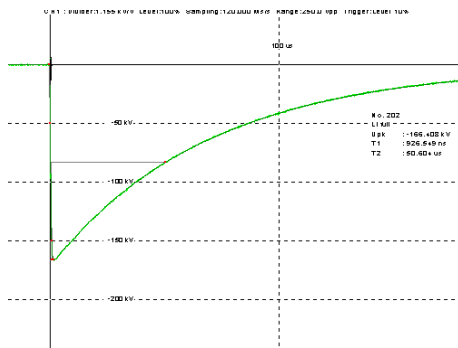
Κεφάλαιο 6 : Δοκιμές στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



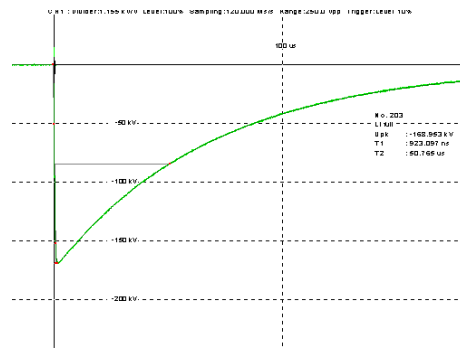
Γραφική Νο 3



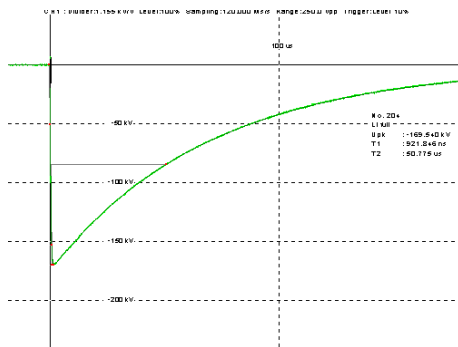
Γραφική Νο 4



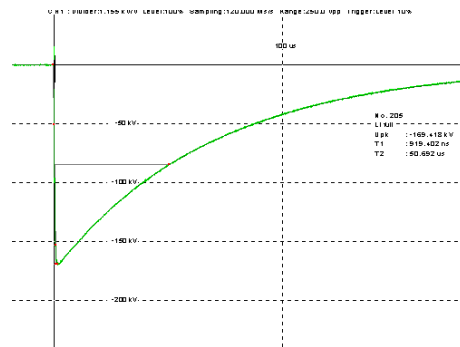
Γραφική Νο 5



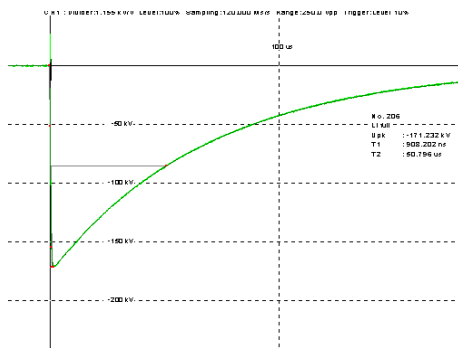
Γραφική Νο 6



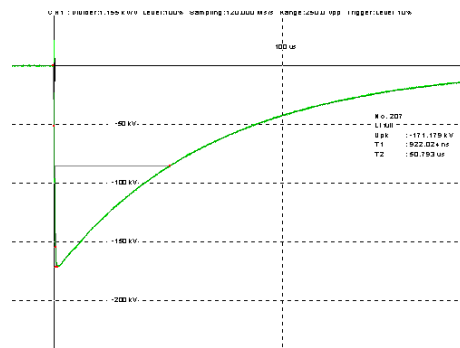
Γραφική Νο 7



Γραφική Νο 8



Γραφική Νο 9



Γραφική Νο 10

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές της μέγιστης τάσης (U_{κ}), του χρόνου μετώπου (T_1) και του χρόνου ημίσεως εύρους (T_2) για κάθε γραφική και υπολογίστηκε η αβεβαιότητα τύπου A για κάθε μέγεθος όπως και προηγούμενα.

Πίνακας 6-5

n	U_p (kV)	T1 (ns)	T2 (μ s)
1	-171,167	917,595	50,816
2	-170,298	918,288	50,755
3	-170,854	921,248	50,78
4	-170,874	921,889	50,703
5	-166,408	926,549	50,604
6	-168,953	923,097	50,765
7	-169,540	921,846	50,775
8	-169,418	919,402	50,692
9	-171,232	908,202	50,796
10	-171,179	922,024	50,793
M.O.	-169,990	920,020	50,750
sr	1,506	4,869	0,0640
u	1,076	3,480	0,046

Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω αβεβαιότητες είναι τύπου A.

Συνοπτικά :

$$U_{\kappa} = 169,99 \pm 1,076 \text{ kV}$$

$$T_1 = 920,02 \pm 3,480 \text{ nsec}$$

$$T_2 = 50,75 \pm 0,046 \text{ } \mu\text{sec}$$

Στον επόμενο πίνακα είναι συγκεντρωμένα τα παραπάνω αποτελέσματα :

Πίνακας 6-6

(kV)	U_{κ} (kV)	u(kV)	u(%)	T1(ns)	u(ns)	u(%)	T2(μ s)	u(μ s)	u(%)
+123	122,9	0,104	0,084	897,78	5,362	0,59	50,87	0,082	0,16
-123	-123,1	1,087	0,88	902,33	13,384	1,48	50,63	0,045	0,09
+170	169,67	1,381	0,81	903,23	4,285	0,47	51,1	0,071	0,14
-170	-169,99	1,076	0,63	920,02	3,480	0,38	50,75	0,046	0,09

Να σημειωθεί ότι οι αβεβαιότητες του παραπάνω πίνακα είναι τύπου A.

Οι παραπάνω υπολογισμοί που έγιναν αφορούν τις αβεβαιότητες τύπου A, που σχετίζονται δηλαδή με τις ληφθείσες μετρήσεις και υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους. Οι αβεβαιότητες τύπου B αφορούν κυρίως την αβεβαιότητα των οργάνων και των μεθόδων που προκύπτουν από τα πιστοποιητικά διακρίβωσης και τα χαρακτηριστικά του οργάνου μέτρησης.

Κύριες πηγές αβεβαιότητας τύπου B στη διάταξη μέτρησης αποτελούν ο χωρητικός καταμεριστής και το σύστημα DIAS. Για το χωρητικό καταμεριστή δεν έχουμε στοιχεία. Χρειαζόμαστε :

- ratio meter για τη μέτρηση του λόγου καταμερισμού
- πρότυπο καταμεριστή (reference divider) για σύγκριση

Για το σύστημα DIAS έχουμε τα παρακάτω στοιχεία :

1) **Διακριτότητα** οργάνου 10bit

Εφαρμόζοντας τη διαδικασία του προτύπου IEC 602 υπολογίζουμε :

$$a_1 = \frac{1}{(2^{10} - 1) \cdot 0,8} = \frac{1}{1023 \cdot 0,8} = 0,12\%$$

2) **Ακρίβεια** μέτρησης : $\pm 1\%$ για τη μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης και $\pm 2\%$ για τους χρόνους μετώπου και ημίσεως εύρους.

3.) **Ολίσθηση** : άγνωστη. Απαραίτητα στοιχεία από προηγούμενη συμπεριφορά του οργάνου, καθώς και προγενέστερες διακριβώσεις.

Χρησιμοποιώντας μόνο τα γνωστά στοιχεία αβεβαιοτήτων και θεωρώντας την κατανομή της αβεβαιότητας για τη διακριτότητα ορθογώνια και την κατανομή της αβεβαιότητας για την ακρίβεια κανονική, υπολογίζουμε την αβεβαιότητα τύπου B από τη γενική σχέση (5.18) :

$$u_B = k \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \left(\frac{U_1}{k}\right)^2}$$

Οπότε αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση έχουμε :

$$u_{BU_p} = 2 \sqrt{\frac{0,12^2}{3} + \left(\frac{1}{2}\right)^2} = 1,01\%$$

$$u_{BT_{1,2}} = 2 \sqrt{\frac{0,12^2}{3} + \left(\frac{2}{2}\right)^2} = 2,01\%$$

Η ολική αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση (5.19) :

$$u_{total} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Έτσι έχουμε :

- Για τη μέγιστη τιμή των κρουστικών τάσεων

$$+123 \text{ kV} : u_{total} = \sqrt{0,084^2 + 1,01^2} = 1,01\% \rightarrow 1,242 \text{ kV}$$

$$-123 \text{ kV} : u_{total} = \sqrt{0,88^2 + 1,01^2} = 1,34\% \rightarrow 1,648 \text{ kV}$$

$$+170 \text{ kV} : u_{total} = \sqrt{0,81^2 + 1,01^2} = 1,29\% \rightarrow 2,193 \text{ kV}$$

$$-170 \text{ kV} : u_{total} = \sqrt{0,63^2 + 1,01^2} = 1,19\% \rightarrow 2,023 \text{ kV}$$

- Για το χρόνο μετώπου :

$$+123 \text{ kV} : u_{total} = \sqrt{0,59^2 + 2,01^2} = 2,09\% \rightarrow 18,045 \text{ n sec}$$

$$-123 \text{ kV} : u_{total} = \sqrt{1,4^2 + 2,01^2} = 2,44\% \rightarrow 22,016 \text{ n sec}$$

$$+170 \text{ kV} : u_{total} = \sqrt{0,47^2 + 2,01^2} = 2,06\% \rightarrow 18,606 \text{ n sec}$$

$$-170 \text{ kV} : u_{total} = \sqrt{0,38^2 + 2,01^2} = 2,04\% \rightarrow 18,768 \text{ nsec}$$

- Για το χρόνο ημίσεως εύρους :

$$+123 \text{ kV} : u_{total} = \sqrt{0,16^2 + 2,01^2} = 2,02\% \rightarrow 1,027 \mu\text{sec}$$

$$-123 \text{ kV} : u_{total} = \sqrt{0,09^2 + 2,01^2} = 2,01\% \rightarrow 1,018 \mu\text{sec}$$

$$+170 \text{ kV} : u_{total} = \sqrt{0,14^2 + 2,01^2} = 2,01\% \rightarrow 1,029 \mu\text{sec}$$

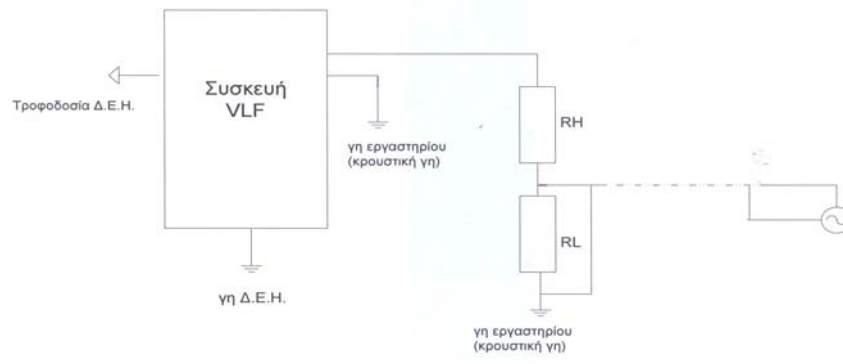
$$-170 \text{ kV} : u_{total} = \sqrt{0,09^2 + 2,01^2} = 2,01\% \rightarrow 1,021 \mu\text{sec}$$

Πίνακας 6-7

(kV)	U _κ (kV)	u(kV)	u(%)	T ₁ (ns)	u(ns)	u(%)	T ₂ (μs)	u(μs)	u(%)
+123	122,9	1,242	1,01	897,78	18,045	2,09	50,87	1,027	2,02
-123	-123,1	1,648	1,34	902,33	22,016	2,44	50,63	1,018	2,01
+170	169,67	2,193	1,29	903,23	18,606	2,06	51,1	1,029	2,01
-170	-169,99	2,023	1,19	920,02	18,768	2,04	50,75	1,021	2,01

6.2.4 Επαλήθευση της συσκευής VLF

Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 400.2TM η μέγιστη τάση δοκιμής πρέπει να μετράται με ολική αβεβαιότητα $\pm 5\%$. Για την επαλήθευση του οργάνου χρησιμοποιήθηκε η διάταξη του παρακάτω σχήματος :



Σχ.6-10 : Διάταξη για την επαλήθευση της συσκευής VLF

Η διαδικασία που πραγματοποιείται για την επαλήθευση του οργάνου περιγράφεται με τα εξής βήματα (βλ. εικόνες 6.8-6.9, σελ.114-115):

Βήμα 1^ο : Συνδέουμε και τα δύο μέρη της συσκευής VLF (Operating module και HV module)

Βήμα 2^ο : Βραχυκυκλώνουμε τα δύο μέρη της συσκευής με ένα μεταλλικό έλασμα, το οποίο γειώνεται με ένα καλώδιο (βλ. εικόνα 6.8, κίτρινο-πράσινο καλώδιο) στη γη λειτουργίας (γη Δ.Ε.Η.)

Βήμα 3^ο : Συνδέουμε τους ακροδέκτες υψηλής τάσης στη συσκευή.

Βήμα 4^ο : Συνδέουμε το άλλο άκρο του καλωδίου παροχής υψηλής τάσης είτε στο δοκίμιο, εάν πραγματοποιούμε δοκιμή, είτε στον ωμικό καταμεριστή, εάν κάνουμε επαλήθευση.

Βήμα 5^ο : Η γείωση των ακροδεκτών ΥΤ συνδέεται στη γη του εργαστηρίου (κρουστική γη) που είναι διαφορετική από τη γη της Δ.Ε.Η.

Βήμα 6^ο : Ο ωμικός καταμεριστής συνδέεται στη γη του εργαστηρίου (κρουστική γη).

Βήμα 7^ο : Συνδέουμε την τροφοδοσία του οργάνου στη Δ.Ε.Η.

Βήμα 8^ο : Συνδέουμε τον ωμικό καταμεριστή μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου στον παλμογράφο.

Βήμα 9^ο : Επιλέγουμε στον παλμογράφο κλίμακα τάσεων 1 έως 5V/div και χρόνο από 1 έως 5sec.

Βήμα 10^ο : Στρέφουμε το κλειδί (11) δεξιά και πιέζουμε το λευκό μπουτόν Mains-On (12)

Βήμα 11^ο : Με το μπουτόν knob/push (6) ρυθμίζουμε την τάση, το χρόνο και το είδος της κυματομορφής (VLF 0,1Hz, DC⁺, DC⁻).

Βήμα 11^ο : Πιέζουμε το πράσινο μπουτόν HV ON (12) όταν ανάψει.

Βήμα 13^ο : Η διακοπή της τάσης σε έκτατες περιπτώσεις γίνεται είτε με το μπουτόν Emergency Off (1) είτε με το κόκκινο μπουτόν HV OFF (9).

Βήμα 14^ο : Παρατηρούμε την κυματομορφή στον παλμογράφο και αποθηκεύουμε τα δεδομένα σε δισκέτα.

Η δοκιμή θα πρέπει να γίνεται με την παρουσία δύο τουλάχιστον ατόμων, έναν στον παλμογράφο για την καταγραφή των τιμών, και έναν στη συσκευή VLF έτοιμο ανά πάσα στιγμή να διακόψει τη λειτουργία της συσκευής.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο παλμογράφοι (YOKOGAWA DL1504, TEKTRONIX TDS 3052).

Ο ωμικός καταμεριστής που χρησιμοποιήθηκε έχει ονομαστικές τιμές αντιστάσεων $R_H = 140 \text{ M}\Omega$ και $R_L = 55,54 \text{ k}\Omega$. Ωστόσο για τον ακριβή υπολογισμό του λόγου καταμερισμού και της αβεβαιότητας μετρήθηκαν οι αντιστάσεις με όργανο μέτρησης μονώσεων UNILAP ISO-X). Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω :

Για την αντίσταση χαμηλής τάσης (οι τιμές είναι σε kΩ) :

Πίνακας 6-8

n	100V	250V	500V	1kV
1	54,7	54,7	54,7	54,6
2	54,8	54,6	54,6	54,7
3	54,7	54,5	54,6	54,6
4	54,6	54,6	54,6	54,6
5	54,6	54,8	54,6	54,6
6	54,6	54,6	54,7	54,6
7	54,6	54,6	54,6	54,6
8	54,6	54,6	54,6	54,6
9	54,6	54,6	54,6	54,7
10	54,7	54,6	54,6	54,6
M.O.	54,65	54,62	54,62	54,62
sr	0,070	0,079	0,042	0,042
u	0,050	0,056	0,030	0,030

Για την αντίσταση υψηλής τάσης (οι τιμές είναι σε MΩ) :

Πίνακας 6-9

n	100V	250V	500V	1kV
1	139,7	139,4	139,4	139,5
2	139,8	139,5	139,5	139,6
3	139,9	139,6	139,4	139,5
4	140,1	139,7	139,5	139,5
5	140,2	139,8	139,6	139,5
6	140,2	139,8	139,6	139,5
7	139,9	139,8	139,6	139,5
8	139,9	139,8	139,6	139,5
9	139,9	139,6	139,5	139,6
10	139,9	139,6	139,5	139,5
M.O.	139,95	139,66	139,52	139,52
sr	0,165	0,143	0,079	0,0421
u	0,118	0,102	0,056	0,030

Τα παραπάνω φαίνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα :

$R_L = 55,54k\Omega$ (ονομαστική τιμή)

Πίνακας 6-10

	M.O.	Αβεβαιότητα	Αβεβαιότητα (%)
100V	54,65	0,05	0,09
200V	54,62	0,056	0,1
500V	54,62	0,03	0,054
1kV	54,62	0,03	0,054
Συνολικά	54,62	0,0189	0,034

$R_H = 140M\Omega$ (ονομαστική τιμή)

Πίνακας 6-11

	M.O.	Αβεβαιότητα	Αβεβαιότητα (%)
100V	139,95	0,118	0,084
200V	139,66	0,102	0,073
500V	139,52	0,056	0,04
1kV	139,52	0,030	0,02
Συνολικά	139,6	0,067	0,048

Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω αβεβαιότητες είναι τύπου A.



Εικόνα 6-10 : Ωμικός καταμεριστής

Θεωρούμε ως καλύτερη προσέγγιση για την αντίσταση χαμηλής τάσης αυτή των 100V και για την υψηλής αυτή του 1kV, ανάλογα με τις τάσεις που πρόκειται να «δεχθούν» οι δύο αντιστάσεις. Έτσι :

$$\begin{aligned} R_L &= 54,65 \pm 0,05 \text{ k}\Omega \\ R_H &= 139,52 \pm 0,03 \text{ M}\Omega \end{aligned}$$

Ο λόγος καταμερισμού είναι :

$$\kappa = 1 + \frac{R_H}{R_L} = 2553,97 \quad (6.9)$$

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας γίνεται χρήση του νόμου διάδοσης των αβεβαιοτήτων. Για ένα φυσικό μοντέλο της μορφής $y = a \frac{X_1}{X_2}$ το μοντέλο διάδοσης

$$\text{αβεβαιοτήτων είναι } u_y = a \frac{X_1}{X_2} \sqrt{\frac{u_{X_1}^2}{X_1^2} + \frac{u_{X_2}^2}{X_2^2}} \quad (6.10)$$

Έτσι για την αβεβαιότητα του λόγου καταμερισμού έχουμε :

$$u_\kappa = \frac{R_H}{R_L} \sqrt{\frac{u_{R_H}^2}{R_H^2} + \frac{u_{R_L}^2}{R_L^2}} \quad (6.11)$$

Οι αβεβαιότητες u_{R_H} και u_{R_L} είναι ολικές αβεβαιότητες, δηλαδή περιλαμβάνουν τις αβεβαιότητες τύπου A και τύπου B, σύμφωνα με το γενικό τύπο (5.19) :

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Οι αβεβαιότητες που υπολογίστηκαν στους προηγούμενους πίνακες είναι τύπου A. Οι αβεβαιότητες τύπου B αφορούν το όργανο μέτρησης, και προκύπτουν από τη διακρίβωση του οργάνου. Σύμφωνα με την τελευταία διακρίβωση η αβεβαιότητα του οργάνου μέτρησης μονώσεων UNILAP ISO-X είναι 3,94% για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Έτσι οι ολικές αβεβαιότητες των αντιστάσεων είναι :

$$u_{R_H} = \sqrt{0,02^2 + 3,94^2} \approx 3,94\% \rightarrow 5,497M\Omega$$

$$u_{R_L} = \sqrt{0,09^2 + 3,94^2} \approx 3,94\% \rightarrow 2,153k\Omega$$

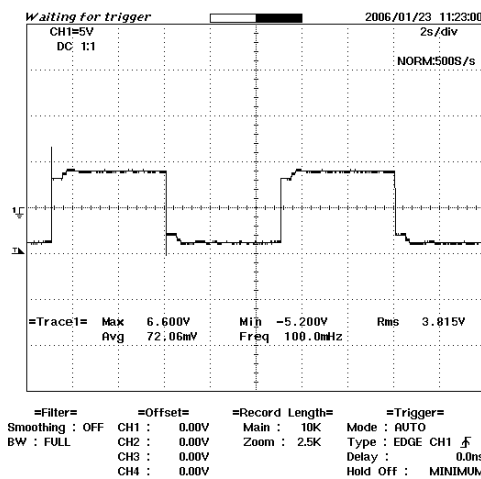
Με εφαρμογή της σχέσης (6.9) προκύπτει ότι η αβεβαιότητα του λόγου καταμερισμού είναι :

$$u_{\kappa} = 142,97 \rightarrow 5,6\%$$

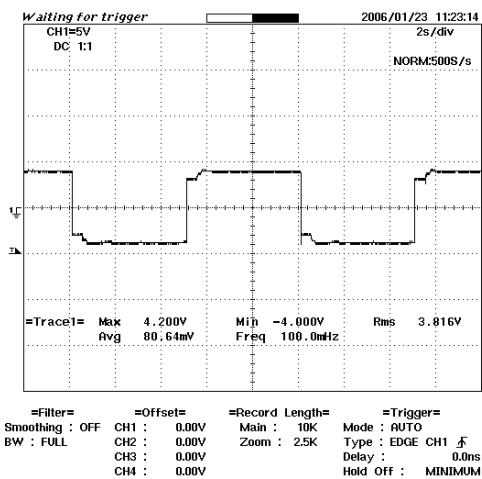
Κάναμε την επαλήθευση εφαρμόζοντας τάση VLF 10kV σε παλμογράφο YOKOGAWA DL 1504 και τάση VLF 36kV μία φορά σε παλμογράφο YOKOGAWA DL 1504 και μία σε TEKTRONIX TDS 3052. Οι γραφικές και τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται παρακάτω :

A. Εφαρμογή 10kV με τον παλμογράφο YOKOGAWA DL 1504

Εφαρμόσαμε τάση 10kV και παρατηρήσαμε την μορφή στον παλμογράφο. Ορισμένα στιγμιότυπα της κυματομορφής φαίνονται στις παρακάτω γραφικές :

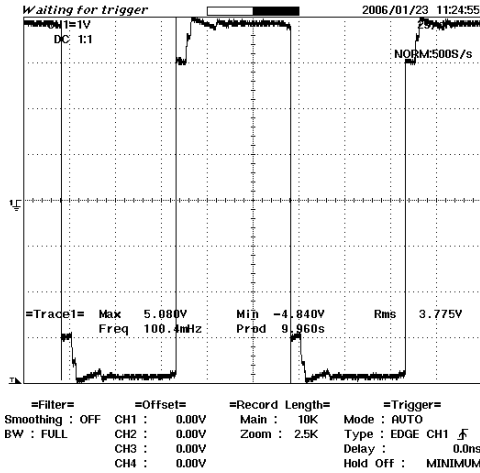


Γραφική Νο 1

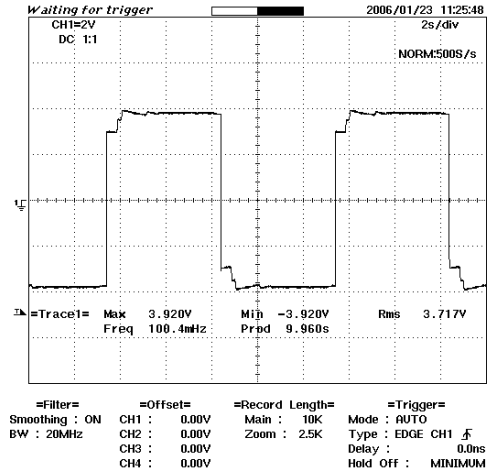


Γραφική Νο 2

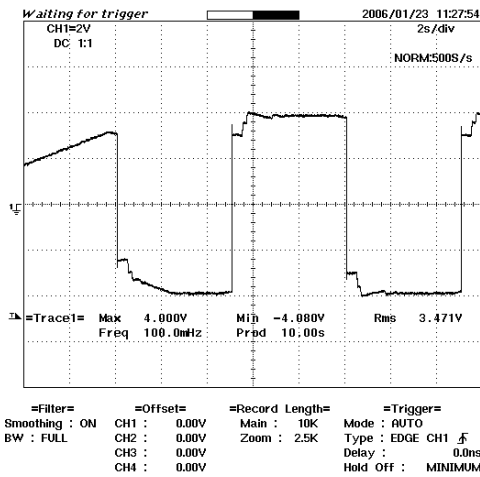
Κεφάλαιο 6 : Δοκιμές στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



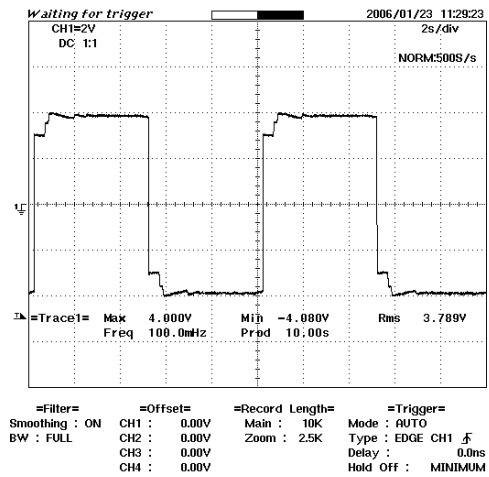
Γραφική Νο 3



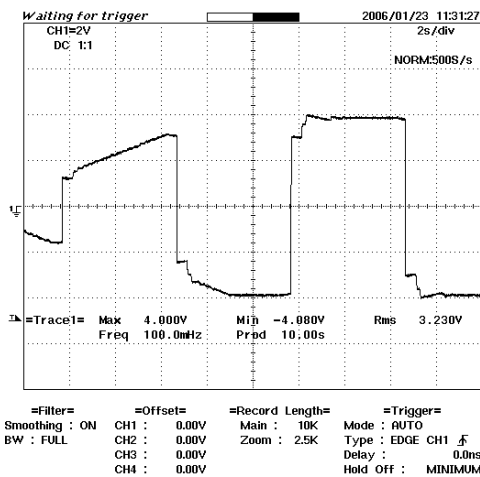
Γραφική Νο 4



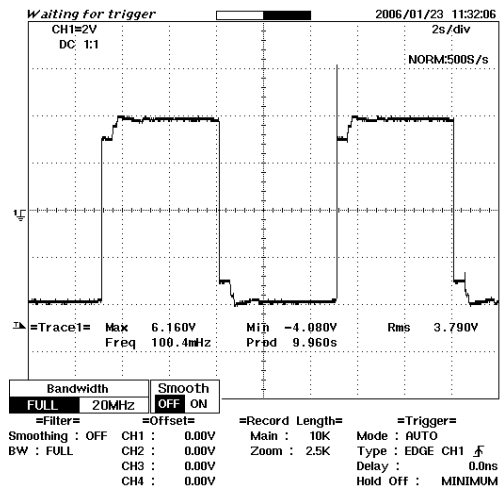
Γραφική Νο 5



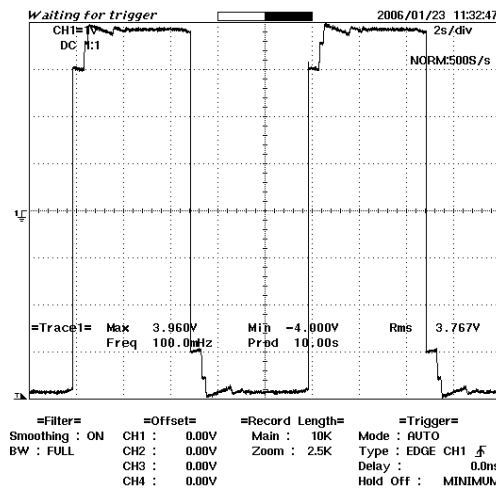
Γραφική Νο 6



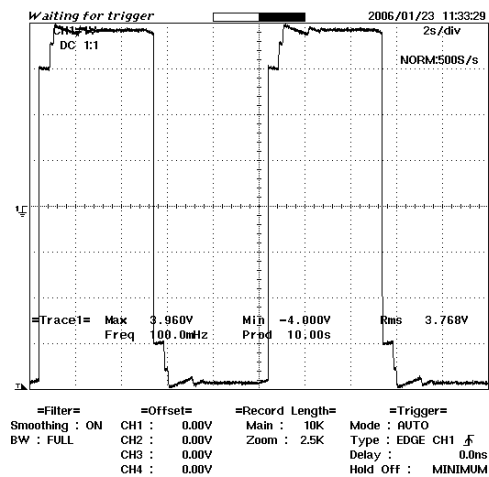
Γραφική Νο 7



Γραφική Νο 8



Γραφική No 9



Γραφική No 10

Όπως φαίνεται στις γραφικές η μέγιστη και ελάχιστη τάση δεν είναι απολύτως σταθερές στο χρόνο, αλλά παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις. Για κάθε γραφική επιλέξαμε τυχαία ορισμένες τιμές της μέγιστης και ελάχιστης τάσης, με βάση την εκτιμώμενη συχνότητα αυτών κατά τη διάρκεια της ημιπεριόδου. Οι ληφθείσες τιμές φαίνονται στον επόμενο πίνακα :

Πίνακας 6-12

n	max	min	Θετικές (V)	Αρνητικές (V)
1	6,6	-5,5	4	-4
			3,8	-3,6
			4,2	-4,2
			3,7	-4,2
2	4,2	-4	4	-3,8
			4,05	-4
			3,9	-4
			4,2	-3,9
3	5,08	-4,84	4	-4
			3,8	-3,76
			3,84	-3,8
			3,76	-3,88
			3,72	-3,96
4	3,92	-3,92	3,92	-3,96
			3,76	-3,92
			3,68	-3,72
			3,84	-3,84
5	4	-4,08	3,96	-4
			4	-4,1
			3,76	-3,84
			3,84	-3,92
			3,92	-3,76
6	4	-4,08	4	-4,1

			3,96	-4
			3,76	-3,8
			3,84	-3,96
			3,92	-3,92
7	4	-4,08	4	-4
			3,72	-3,84
			3,76	-3,92
			3,84	-3,8
			3,92	-4,1
8	6,16	-4,08	4	-4,08
			3,72	-4,16
			3,92	-4
			3,84	-3,76
				-3,84
				-3,88
9	3,96	-4	3,78	-3,8
			3,84	-4
			4	-3,98
			3,96	-3,96
			3,88	-3,88
10	3,96	-4	3,96	-4
			3,72	-3,78
			3,76	-3,8
			3,96	-3,88
			3,92	-3,96
		M.O.	3,88	-3,92
		sr	0,123	0,127
		u	0,036	0,037

Να σημειωθεί ότι οι υπολογισμένες αβεβαιότητες είναι τύπου A.

Συνοπτικά :

$$U_{\text{low-positive}} = 3,88 \pm 0,036 \text{ V}$$

$$U_{\text{low-negative}} = -3,92 \pm 0,037 \text{ V}$$

Πολλαπλασιάζοντας με το λόγο καταμερισμού $\kappa = 2553,97$ έχουμε :

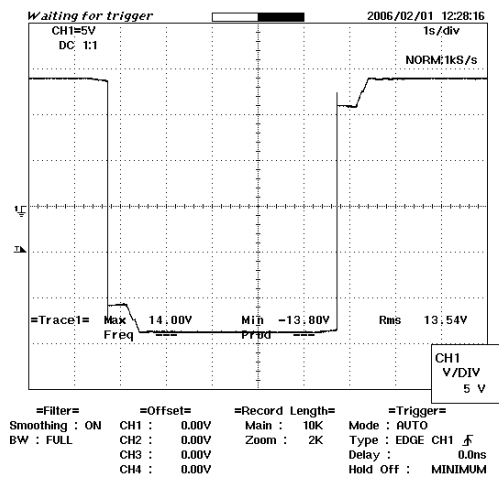
$$U_{\text{high-positive}} = 9,90 \text{ kV}$$

$$U_{\text{high-negative}} = - 10,01 \text{ kV}$$

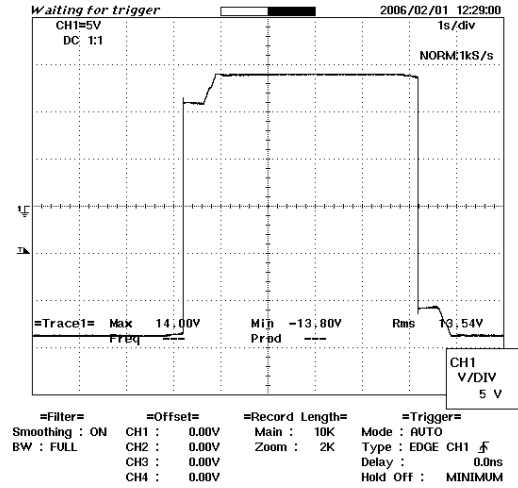
B. Εφαρμογή 36kV με τον παλμογράφο YOKOGAWA DL 1504

Εφαρμόσαμε τάση 36kV και παρατηρήσαμε την μορφή στον παλμογράφο. Ορισμένα στιγμιότυπα της κυματομορφής φαίνονται στις παρακάτω γραφικές :

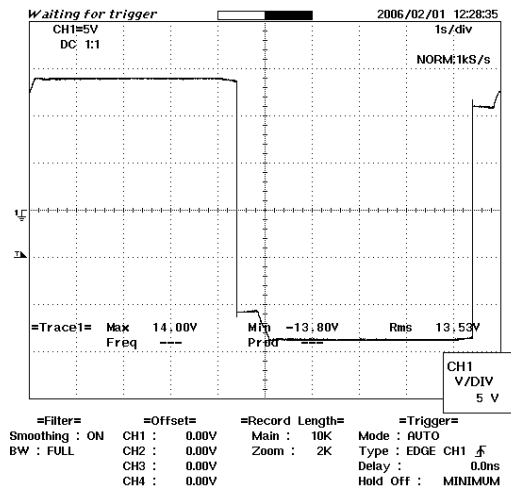
Κεφάλαιο 6 : Δοκιμές στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



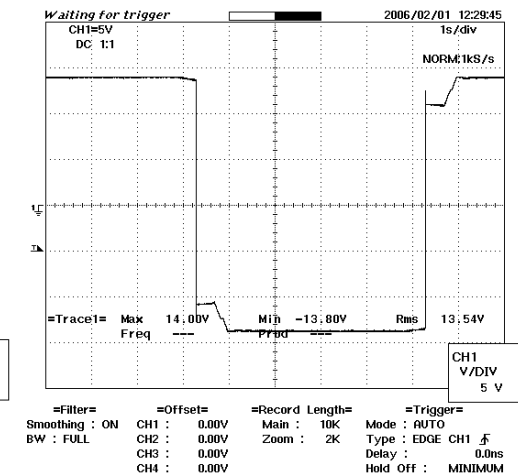
Γραφική Νο 1



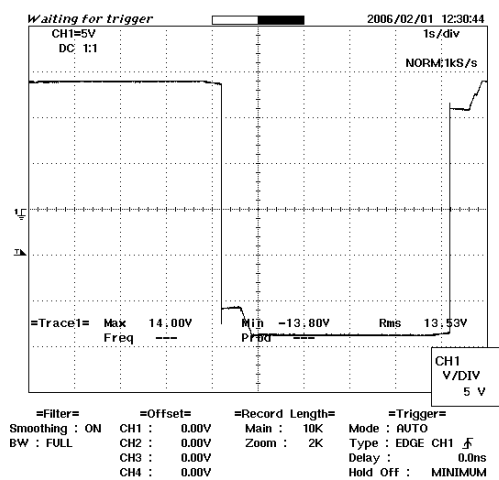
Γραφική Νο 2



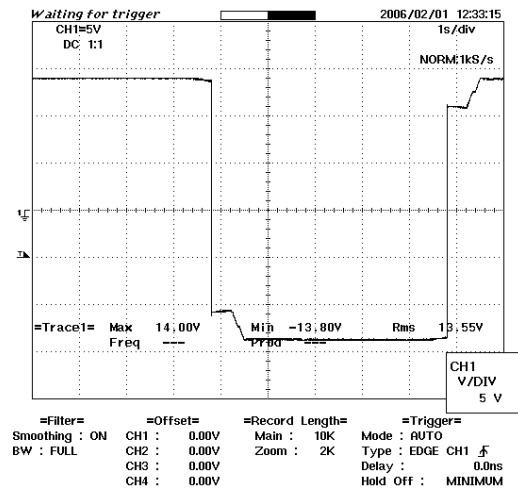
Γραφική Νο 3



Γραφική Νο 4

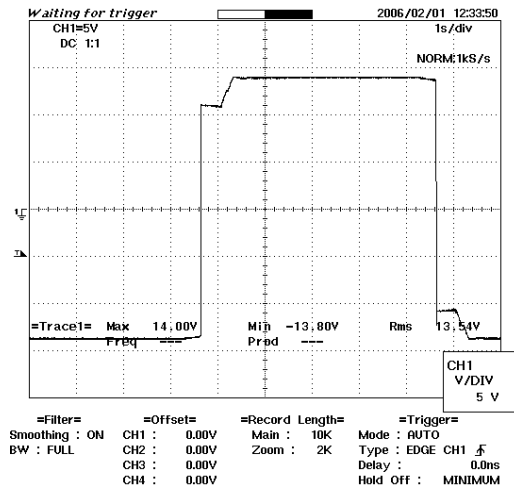


Γραφική Νο 5

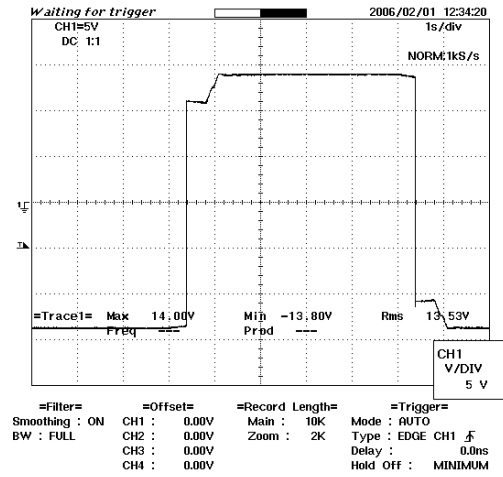


Γραφική Νο 6

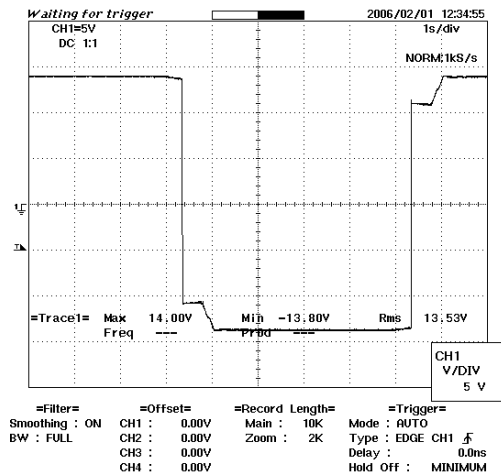
Κεφάλαιο 6 : Δοκιμές στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



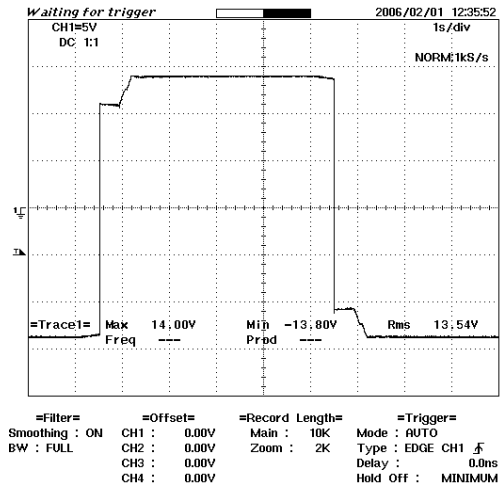
Γραφική Νο 7



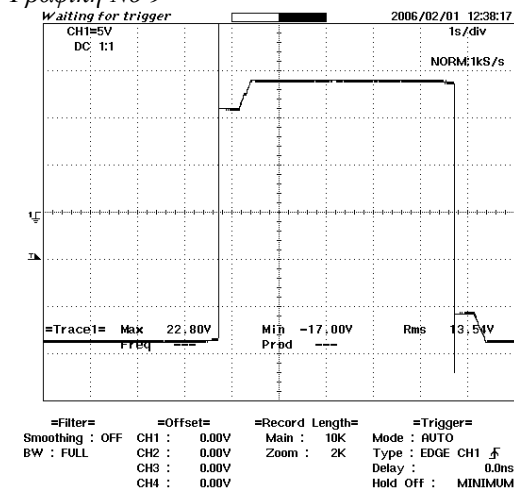
Γραφική Νο 8



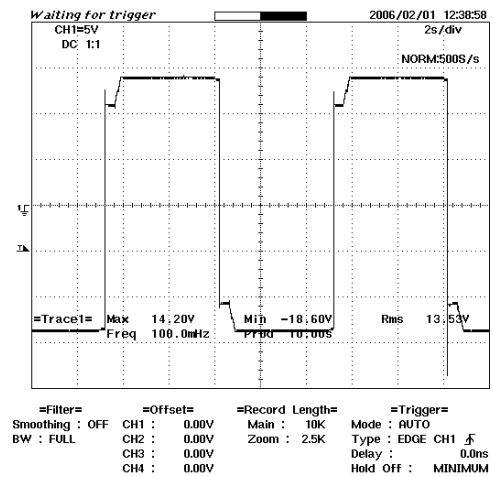
Γραφική Νο 9



Γραφική Νο 10

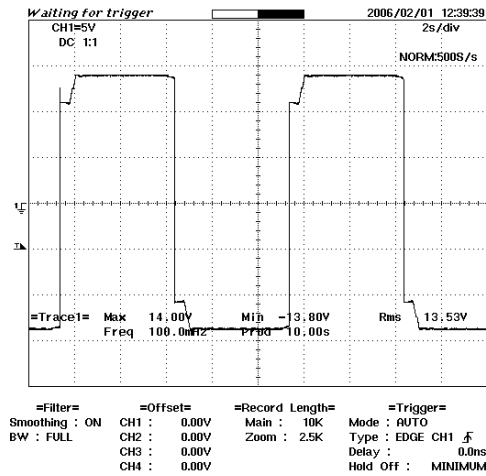


Γραφική Νο 11



Γραφική Νο 12

Κεφάλαιο 6 : Δοκιμές στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



Γραφική Νο 13

Με την ίδια λογική που ακολουθήθηκε στην προηγούμενη περίπτωση των 10kV συμπληρώνεται ο παρακάτω πίνακας :

Πίνακας 6-13

n	max	min	Θετικές	Αρνητικές
1	14	-13,8	14	-13,6
			13,9	-13,8
			14	-13,7
			13,8	-13,5
2	14	-13,8	14	-13,8
			13,8	-13,6
			13,7	-13,8
			13,6	-13,6
3	14	-13,8	14,2	-13,8
			14	-13,6
			13,8	-13,7
			14	-13,8
4	14	-13,8	14	-13,8
			13,6	-13,6
			13,8	-13,7
			13,9	-13,8
5	14	-13,8	14	-13,8
			13,8	-13,6
			13,7	-13,7
			13,9	-13,8
6	14	-13,8	14	-13,8
			13,8	-13,6
			13,7	-13,7
			13,9	-13,8
7	14	-13,8	14	-13,8

			13,8	-13,6
			14	-13,7
			13,9	-13,8
8	14	-13,8	14	-13,8
			13,8	-13,6
			13,9	-13,8
			14	-13,7
9	14	-13,8	14	-13,8
			13,7	-13,7
			13,8	-13,6
			14	-13,8
10	14	-13,8	14	-13,8
			13,8	-13,7
			13,9	-13,8
			14	-13,8
11	22,8	-17	14,2	-13,6
			13,8	-13,9
			13,9	-13,8
			14	-13,6
12	14,2	-18,6	14,2	-13,8
			14	-13,9
			13,8	-13,8
			14	-13,6
13	14	13,8	14	-13,8
			13,8	-13,6
			13,9	-13,8
			14	-13,7
		M.O.	13,90	-13,73
		sr	0,136	0,097
		u	0,038	0,027

Να σημειωθεί ότι οι υπολογισμένες αβεβαιότητες είναι τύπου A.

Συνοπτικά :

$$U_{\text{low-positive}} = 13,9 \pm 0,038 \text{ V}$$

$$U_{\text{low-negative}} = -13,73 \pm 0,027 \text{ V}$$

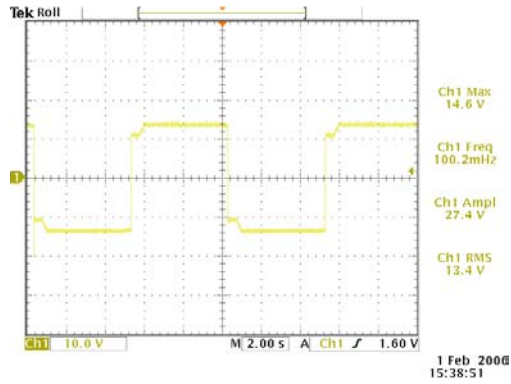
Πολλαπλασιάζοντας με το λόγο καταμερισμού $\kappa = 2553,97$ έχουμε :

$$U_{\text{high-positive}} = 35,5 \text{ kV}$$

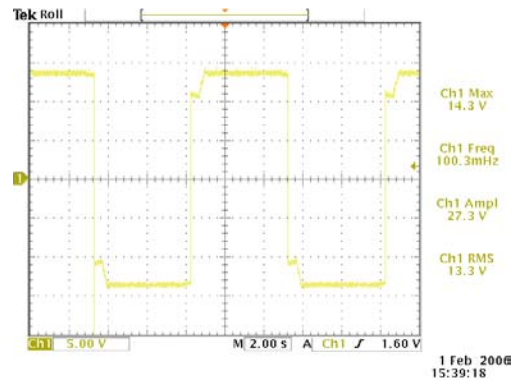
$$U_{\text{high-negative}} = - 35,06 \text{ kV}$$

Γ. Εφαρμογή 36kV με τον παλμογράφο TEKTRONIX TDS 3052

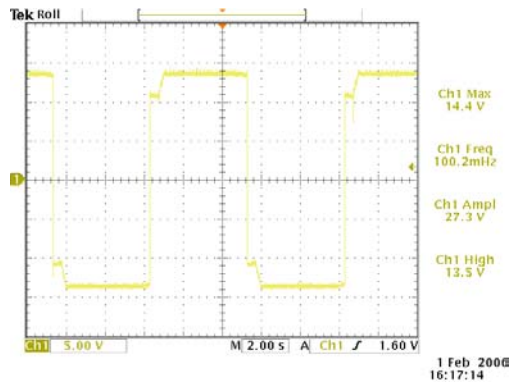
Εφαρμόσαμε τάση 36kV και παρατηρήσαμε την μορφή στον παλμογράφο. Ορισμένα στιγμιότυπα της κυματομορφής φαίνονται στις παρακάτω γραφικές :



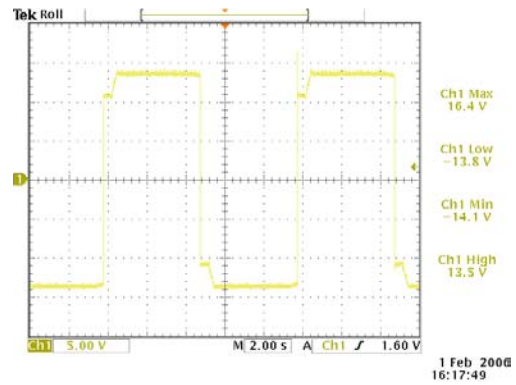
Γραφική Νο 1



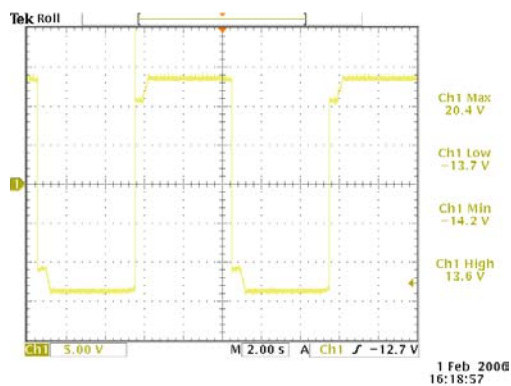
Γραφική Νο 2



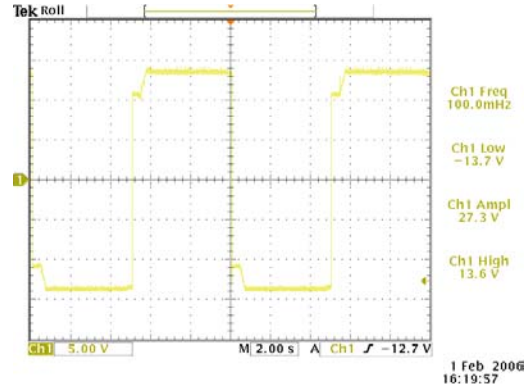
Γραφική Νο 3



Γραφική Νο 4

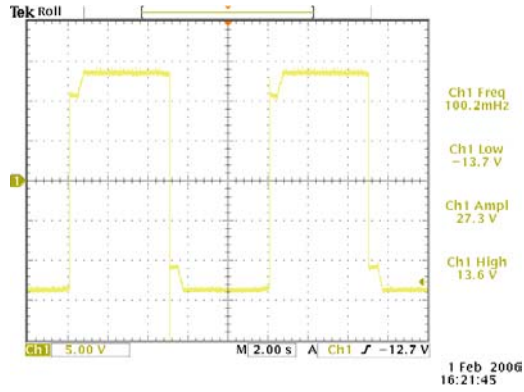


Γραφική Νο 5

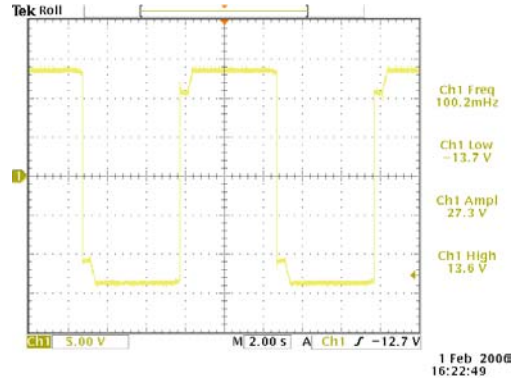


Γραφική Νο 6

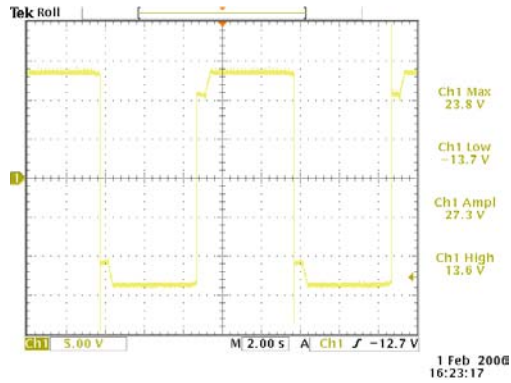
Κεφάλαιο 6 : Δοκιμές στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



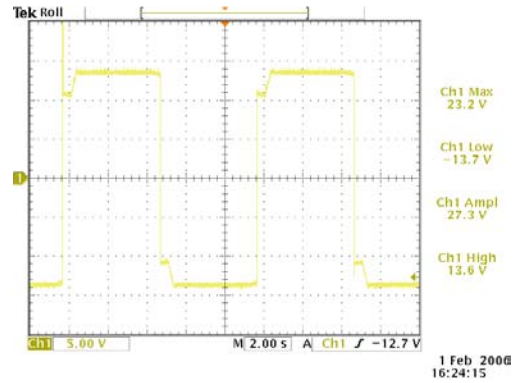
Γραφική Νο 7



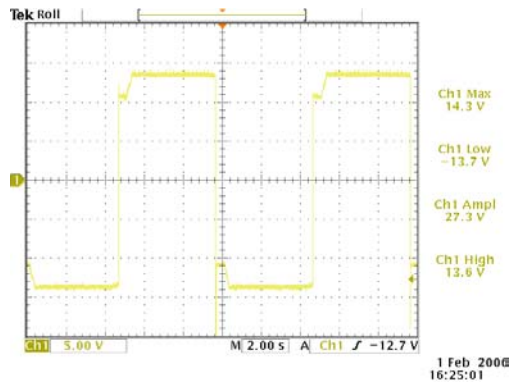
Γραφική Νο 8



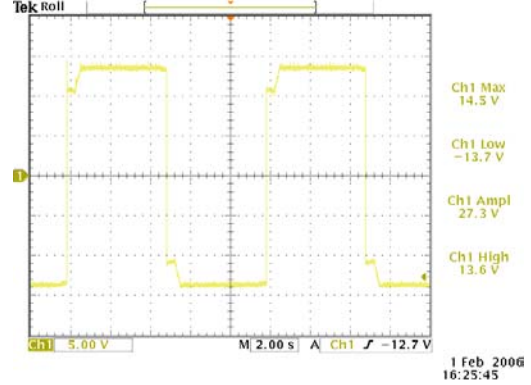
Γραφική Νο 9



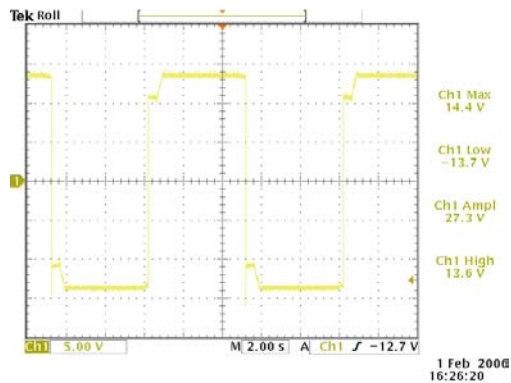
Γραφική Νο 10



Γραφική Νο 11



Γραφική Νο 12



Γραφική Νο 13

Με την ίδια λογική που ακολουθήθηκε προηγουμένως συμπληρώνεται ο παρακάτω πίνακας :

Πίνακας 6-14

n	Θετικές	Αρνητικές
1	14,6	-14
	14,2	-13,8
	14,4	-14,2
	14,3	-14,2
2	14	-13,7
	13,8	-14
	14,2	-14,2
	14,4	-13,7
3	13,6	-14
	14	-13,8
	13,5	-14,1
4	14	-14
	14,4	-13,7
	13,6	-14,2
5	14	-14
	13,8	-13,7
	13,6	-14,2
6	14,1	-13,9
	13,8	-13,7
	13,6	-13,4
7	14,4	-14
	14	-14,1
	13,9	-13,7
	13,6	-14,1
8	14,4	-13,9
	14	-14
	13,8	-13,7
	13,6	-14
9	13,3	-13,6
	14,3	-13,8
	14,1	-13,7
10	13,6	-14
	14,1	-13,5
	13,8	-13,7
11	14,3	-14,1
	13,6	-13,6
	13,3	-14
	14	-13,7
12	14,5	-13,3
	13,6	-14,1
	13,8	-13,9
	14	-13,7
13	14,4	-14,1

	13,6	-13,9
	14,2	-14
	14,1	-14,1
M.O.	13,96	-13,89
sr	0,334	0,224
u	0,098	0,066

Να σημειωθεί ότι οι υπολογισμένες αβεβαιότητες είναι τύπου A.

Συνοπτικά :

$$U_{\text{low-positive}} = 13,96 \pm 0,098 \text{ V}$$

$$U_{\text{low-negative}} = -13,89 \pm 0,066 \text{ V}$$

Πολλαπλασιάζοντας με το λόγο καταμερισμού $\kappa = 2553,97$ έχουμε :

$$U_{\text{high-positive}} = 35,65 \text{ kV}$$

$$U_{\text{high-negative}} = - 35,47 \text{ kV}$$

Τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνονται συνοπτικά στον επόμενο πίνακα :

Πίνακας 6-15 : Αβεβαιότητες τύπου A για τη U_{low}

	M.O (V) U_{low}	Αβεβαιότητα A (V)	Αβεβαιότητα A (%)
+10 kV	3,89	0,036	0,93
-10 kV	-3,92	0,037	0,95
+36 kV (1^ο παλμ)	13,90	0,038	0,27
-36 kV (1^ο παλμ)	-13,72	0,027	0,20
+36 kV (2^ο παλμ)	13,96	0,098	0,70
-36 kV (2^ο παλμ)	-13,89	0,066	0,48

Όλες οι αβεβαιότητες που υπολογίστηκαν προηγουμένως είναι τύπου A. Η αβεβαιότητα τύπου B για τη U_{low} συνίσταται στην αβεβαιότητα του παλμογράφου που χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά.

Για τον παλμογράφο YOKOGAWA DL 1504 διαθέτουμε τα παρακάτω στοιχεία :

- **Διακριτότητα** : 9 bits

Εφαρμόζοντας τη διαδικασία του προτύπου IEC 602 υπολογίζουμε:

$$a_1 = \frac{1}{(2^9 - 1) \cdot 0,8} = \frac{1}{511 \cdot 0,8} = 0,24\%$$

- **Ακρίβεια** : 1,5%

Η αβεβαιότητα του παλμογράφου είναι :

$$u_{\text{YOKOGAWA}} = 2 \sqrt{\frac{0,24^2}{3} + \left(\frac{1,5}{2}\right)^2} = 1,52\%$$

Για τον παλμογράφο TEKTRONIX TDS 3052 διαθέτουμε τα παρακάτω στοιχεία :

- **Διακριτότητα** : 9 bits

Εφαρμόζοντας τη διαδικασία του προτύπου IEC 602 υπολογίζουμε:

$$a_1 = \frac{1}{(2^9 - 1) \cdot 0,8} = \frac{1}{511 \cdot 0,8} = 0,24\%$$

- **Ακρίβεια** : 2%

Η αβεβαιότητα του παλμογράφου είναι :

$$u_{TEKTRONIX} = 2\sqrt{\frac{0,24^2}{3} + \left(\frac{2}{2}\right)^2} = 2,02\%$$

Έτσι, σε κάθε περίπτωση η ολική αβεβαιότητα της U_{low} είναι :

$$u_{total U_{low}} = \sqrt{u_A^2 + u_{\text{παλμογρ.}}^2}$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση, υπολογίζουμε τις ολικές αβεβαιότητες της U_{low} , που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 6-16 : Ολικές αβεβαιότητες για τη U_{low}

Εφαρμοζόμενη Τάση (kV)	Παλμογράφος	Μετρούμενη τιμή (V)	$u_{total U_{low}}$ (V)	$u_{total U_{low}}$ (%)
10	YOKOGAWA	3,88	0,069	1,78
-10	YOKOGAWA	-3,92	0,070	1,79
36	YOKOGAWA	13,9	0,214	1,54
-36	YOKOGAWA	-13,73	0,210	1,53
36	TEKTRONIX	13,96	0,298	2,14
-36	TEKTRONIX	-13,89	0,288	2,08

Για τον υπολογισμό της ολικής αβεβαιότητας της υψηλής τάσης γίνεται χρήση του νόμου διάδοσης των αβεβαιοτήτων. Για ένα φυσικό μοντέλο της μορφής $y = aX_1X_2$, όπως είναι και η σχέση υπολογισμού της υψηλής τάσης $U_{high} = \kappa U_{low}$

το μοντέλο διάδοσης αβεβαιοτήτων είναι $u_y = aX_1X_2 \sqrt{\frac{u_{X_1}^2}{X_1^2} + \frac{u_{X_2}^2}{X_2^2}}$.

Έτσι για την αβεβαιότητα της υψηλής τάσης έχουμε :

$$u_{high} = \kappa U_{low} \sqrt{\frac{u_{\kappa}^2}{\kappa^2} + \frac{u_{U_{low}}^2}{U_{low}^2}} \quad (6.10)$$

Εφαρμόζοντας τη σχέση (6.10) υπολογίζεται η ολική αβεβαιότητα για την υψηλή τάση. Οι υπολογιζόμενες αβεβαιότητες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

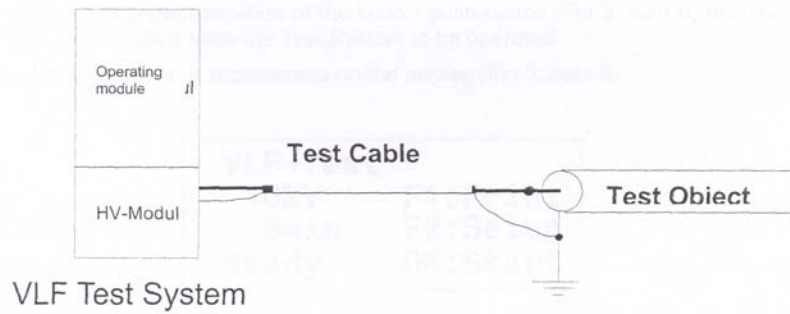
Πίνακας 6-17 : Ολικές αβεβαιότητες για τη U_{high}

Τάση (kV)	Παλμογράφος	Μέση τιμή (kV)	$u_{total U_{high}}$ (kV)	$u_{total U_{high}}$ (%)
10	YOKOGAWA	9,90	0,581	5,87
-10	YOKOGAWA	-10,01	0,589	5,88
36	YOKOGAWA	35,50	2,059	5,80
-36	YOKOGAWA	-35,06	2,033	5,80
36	TEKTRONIX	35,65	2,125	5,99
-36	TEKTRONIX	-35,47	2,110	5,97

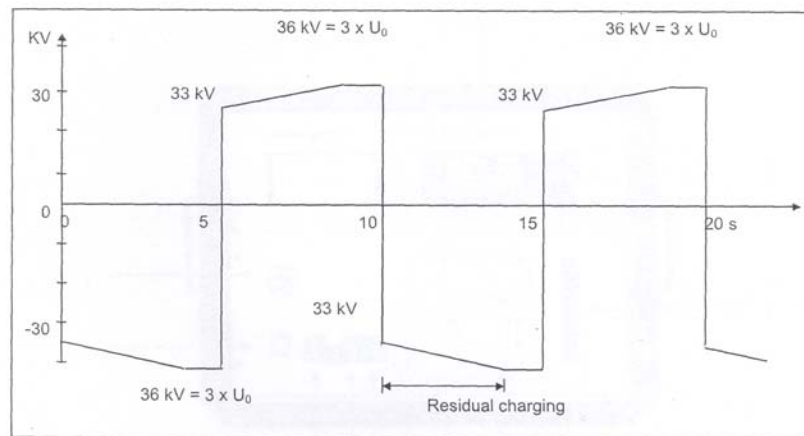
Παρατηρούμε ότι η αβεβαιότητα με την οποία λαμβάνουμε την υψηλή τάση είναι πάνω από 5%, δηλαδή ξεπερνά τις προδιαγραφές που θέτει το πρότυπο. Στην πραγματικότητα ωστόσο η αβεβαιότητα δεν είναι τόσο μεγάλη. Η αβεβαιότητα στην τιμή της υψηλής τάσης οφείλεται κυρίως στην υψηλή τιμή της αβεβαιότητας του λόγου καταμερισμού, που με τη σειρά της οφείλεται στην υψηλή αβεβαιότητα μέτρησης του οργάνου μέτρησης μονώσεων UNILAP ISO-X. Όμως η καλύτερη μέθοδος για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας του λόγου καταμερισμού δεν είναι αυτή που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία, αλλά η σύγκριση του καταμεριστή με έναν πρότυπο καταμεριστή (reference divider) και η εφαρμογή της διαδικασίας του προτύπου IEC 60-2 και χρήση του συντελεστή $F_i = S_i / X_i$. Στην περίπτωση αυτή η αβεβαιότητα του λόγου καταμερισμού αναμένεται μικρότερη, οπότε και η ολική αβεβαιότητα της U_{high} θα είναι κάτω από 5%. Επίσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί όργανο μέτρησης αντιστάσεων με μικρότερη αβεβαιότητα.

6.3 Δοκιμές σε καλώδια

Στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. πραγματοποιήθηκε δοκιμή σε καλώδιο Μέσης Τάσης 12kV, στερεάς μόνωσης (XLPE) και μήκους 10m περίπου. Χρησιμοποιήθηκε η συσκευή sebaKMT 40 που περιγράφηκε στην παράγραφο 6.1.4. Ακολουθήθηκε η συνδεσμολογία που επιβάλλουν τόσο οι κανονισμοί IEEE 400TM και 400.2TM, όσο και ο κατασκευαστής της συσκευής.

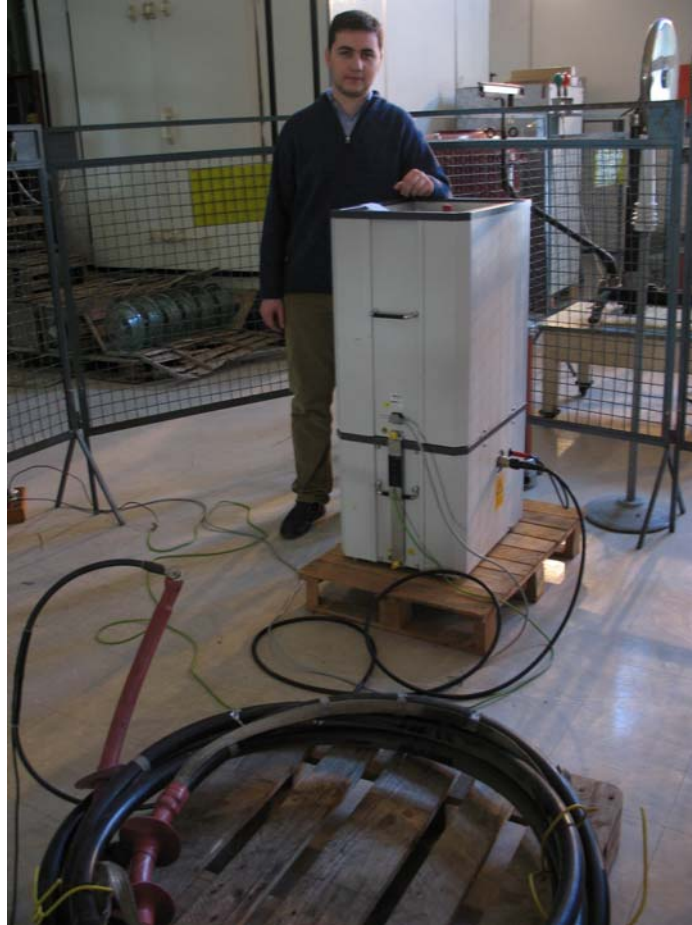


Σχ. 6-11: Συνδεσμολογία για τη διεξαγωγή δοκιμής VLF σε καλώδιο



Σχ. 6-12 : Η κυματομορφή της τάσης εξόδου της συσκευής VLF sebaKMT 40

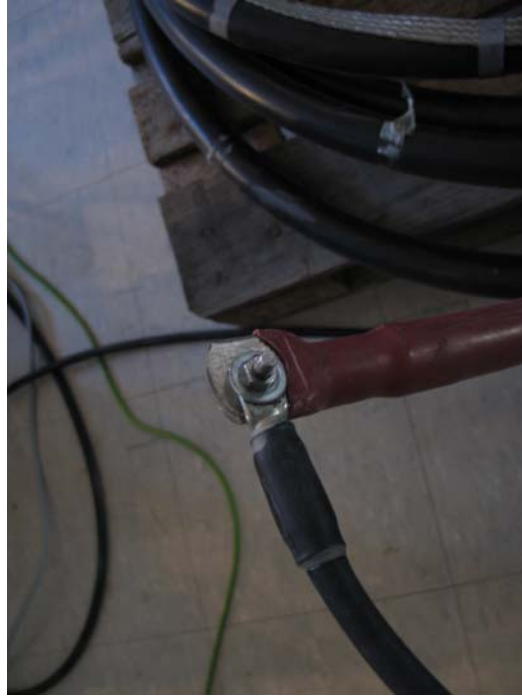
Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα και στις φωτογραφίες που παρατίθενται παρακάτω, ο ακροδέκτης υψηλής τάσης της συσκευής συνδέεται στον αγωγό του καλωδίου και ο ακροδέκτης γείωσης της συσκευής συνδέεται με την ηλεκτρική θωράκιση και γειώνεται στη γη του εργαστηρίου (κρουστική γη).



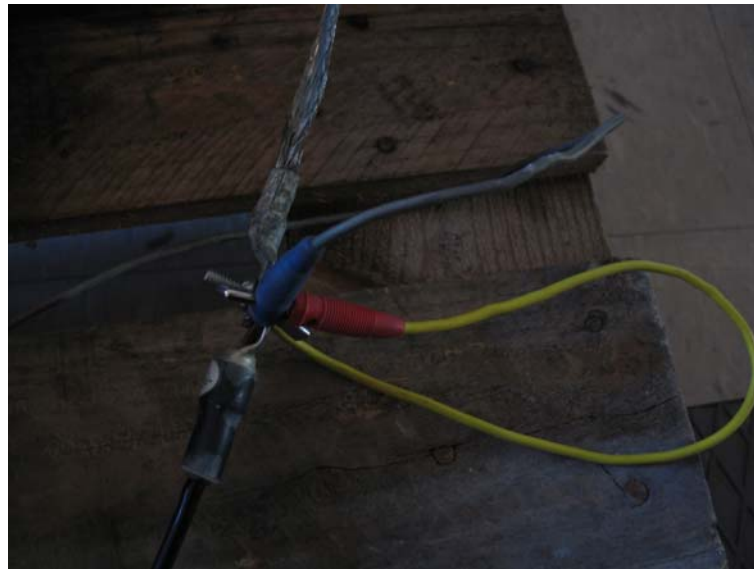
Εικόνα 6-11 : Διάταξη για τη δοκιμή VLF σε καλώδιο. Διακρίνεται η συσκευή VLF το καλώδιο και οι συνδεσμολογίες



Εικόνα 6-12: Το καλώδιο συνδεδεμένο με τους ακροδέκτες της συσκευής VLF



Εικόνα 6-13: Σύνδεση του ακροδέκτη παροχής ΥΤ της συσκευής VLF με το ακροκίβωτο του καλωδίου



Εικόνα 6-14: Σύνδεση του ακροδέκτη γης της συσκευής VLF με την ηλεκτρική θωράκιση του καλωδίου

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό έντυπο αποτελεσμάτων μιας δοκιμής VLF. Η πρώτη δοκιμή γίνεται σε καλώδιο 12/20 kV μήκους 12m περίπου, $1 \times 95/16 \text{mm}^2$ με μόνωση XLPE και εξωτερικό περίβλημα PVC. Εφαρμόστηκε τάση VLF $3U_0 = 36 \text{kV}$ για 40min. Το καλώδιο πέρασε με επιτυχία τη δοκιμή, αφού άντεξε την εφαρμοζόμενη τάση για 40min χωρίς να συμβεί διάσπαση.

Η δεύτερη δοκιμή γίνεται σε καλώδιο 12/20 kV μήκους 12m $3 \times 240/25 \text{mm}^2$ με μόνωση XLPE και εξωτερικό περίβλημα PVC. Εφαρμόστηκε τάση VLF $3U_0 = 36 \text{kV}$ για 40min. Το καλώδιο δεν πέρασε τη δοκιμή, αφού άντεξε την τάση 8min και 21sec.



VLF 0.1 Hz

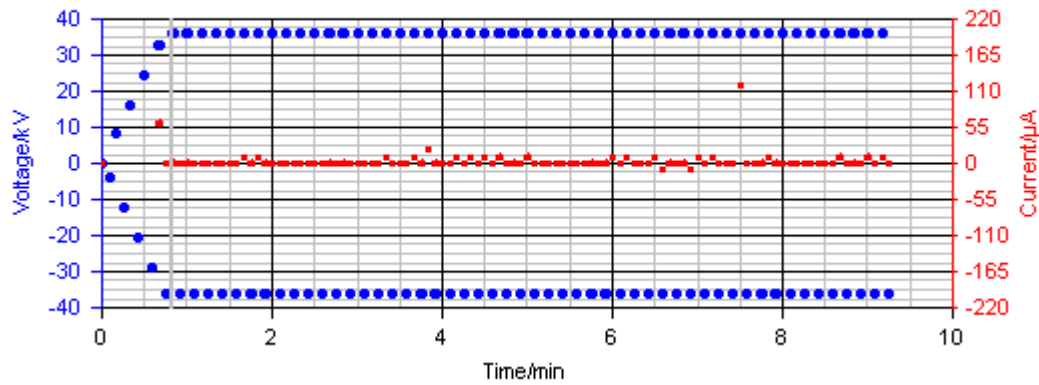
Printed at: 01/02/2006

Test Start: 01/02/2005 11:14:59

Utility: X&X S.A.
Contractor: X&X S.A.
Client: X&X S.A.

Cable Number: (L2) Station:
Cable Type: X&X S.A. Location: X&X
Phase: L2 Start of cable: L2s
Rated voltage: 12/20 kV End: L2e
Cross Section: 3x240+25 mm² Length: ~12 m
Cable Info: AL/XLPE/ALT/PVC

Comments:



Test Time [min]	Voltage [kV]	Current [mA]	Voltage max.:	36.2 kV
00:00	0.0	0.00	Voltage min.:	-36.1 kV
01:00	36.0	0.00	Current (absolute maximum):	
04:00	36.1	0.00	(Test period):	0.12 mA (Polarity +)
08:00	36.1	0.00	Current (absolute minimum):	
			(Test period):	0.00 mA
			Current (absolute average):	
			(Test period):	0.00 mA

Test Voltage: 36 kV
Test Time: 40 min
Remaining Test Time: 31:31 min

Last Voltage: -36.1 kV
Bkdn.-Voltage: 36.1 kV
Bkdn.-Current: 0.0 mA

Result: Breakdown in Cable !

Tester:
Christos Christodoulou



VLF 0.1 Hz

Printed at: 01/02/2005

Test Start: 01/02/2005 10:00:45

Utility: X&X S.A.
Contractor: X&X S.A.
Client: X&X S.A.

Cable Number: (L1)

Station:

Cable Type: X&X S.A.

Location: X&X

Phase: L1

Start of cable: L1s

Rated voltage: 12/20 kV

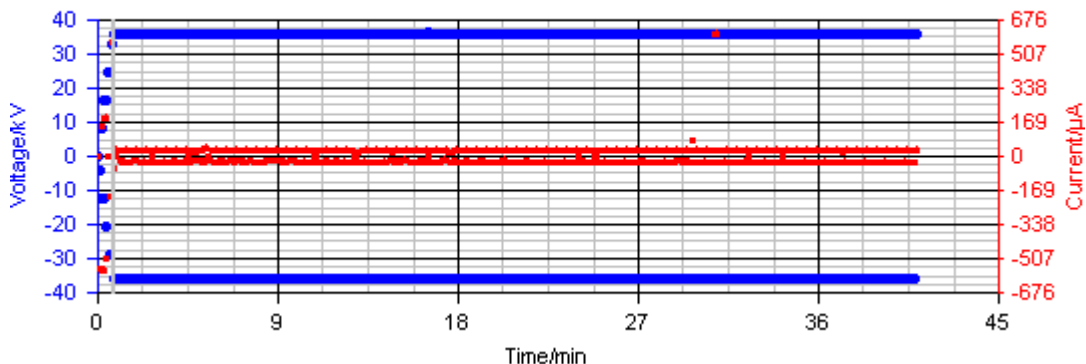
End: L1e

Cross Section: 1x95/16 mm²

Length: ~12 m

Cable Info: Insulation: XLPE. External sheath: red PVC.

Comments:



Test Time [min]	Voltage [kV]	Current [mA]	Voltage max.:	36.2 kV
00:00	0.0	0.00	Voltage min.:	-36.1 kV
01:00	36.0	0.03	Current (absolute maximum):	
04:00	36.1	0.03	(Test period):	0.61 mA (Polarity +)
08:00	36.1	0.03	Current (absolute minimum):	
12:00	36.1	0.03	(Test period):	0.00 mA
16:00	36.1	0.03	Current (absolute average):	
20:00	36.1	0.03	(Test period):	0.00 mA
24:00	36.1	0.00		
28:00	36.1	0.03		
32:00	36.1	0.03		
36:00	36.1	0.03		
39:00	36.1	0.03		

Test Voltage: 36 kV

Last Voltage: 36.1 kV

Test Time: 40 min

Remaining Test Time: 00:00 min

Result: Test time expired.

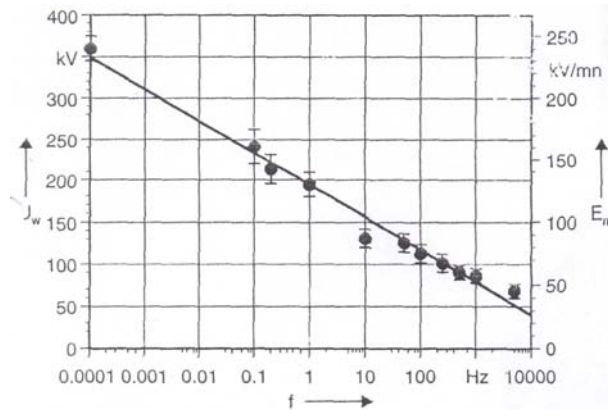
Tester:

Christos Christodoulou

Υπάρχει ωστόσο και άλλη άποψη, που δεν υποστηρίζει τις δοκιμές VLF και δεν τις θεωρεί ενδεδειγμένες λύσεις για τις δοκιμές σε καλώδια, για δύο κυρίως λόγους :

- Τα καλώδια λειτουργούν με εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας και με τέτοια τάση θα πρέπει να δοκιμάζονται, για να φανεί η καταπόνηση του καλωδίου υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας
- Ο μηχανισμός διάσπασης στα 0,1 Hz είναι διαφορετικός από ότι στα 50 Hz.

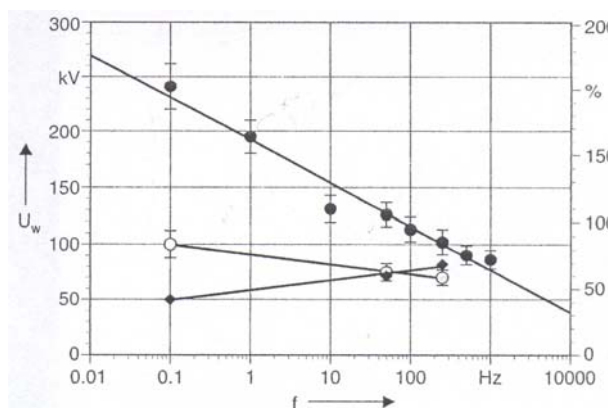
Η συχνότητα της εφαρμοζόμενης τάσης έχει ισχυρή επίδραση στην τάση διάσπασης της μόνωσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 6-13 : Τάση διάσπασης και ηλεκτρικό πεδίο συναρτήσει της συχνότητας της εφαρμοζόμενης τάσης

Η τάση διάσπασης μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της συχνότητας σε λογαριθμική κλίμακα. Λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά του μονωτικού υλικού, είναι φανερό ότι ο μηχανισμός διάσπασης στα 0,1 Hz είναι διαφορετικός από ότι στα 50Hz.

Για να ελεγχθεί η μεταβολή της τάσης διάσπασης συναρτήσει της συχνότητας στην περίπτωση μηχανικών καταπονήσεων ή ύπαρξης υδατινών δενδριτών, προκλήθηκαν τομές σε καλώδια ή τοποθετήθηκαν σε υδατινό περιβάλλον για ορισμένο χρονικό διάστημα.



Σχ.6-14: Τάση διάσπασης συναρτήσει της συχνότητας για καλώδια χωρίς και με μηχανικές καταπονήσεις.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η τάση διάσπασης στα 0,1 Hz μεταβάλλεται πολύ περισσότερο από ότι στα 50 Hz. Οι τιμές των τάσεων διάσπασης στην περίπτωση που υπάρχουν μηχανικές φθορές είναι πιο κοντά (μικρότερη κλίση)

καθώς σε όλο το εύρος των συχνοτήτων κύρια αιτία της διάσπασης είναι οι μηχανικές αυτές βλάβες. Η τάση διάσπασης χωρίς μηχανικές βλάβες είναι 200% μεγαλύτερη στα 0,1Hz από ότι στα 50Hz, πράγμα που δείχνει ότι ο μηχανισμός διάσπασης είναι διαφορετικός για τις δύο συχνότητες.

Παρ' όλα αυτά, οι δοκιμές VLF χρησιμοποιούνται ευρέως, καθώς έχουν γίνει αποδεκτές από οργανισμούς όπως η IEEE, η EPRI, η CEA (Canadian Electric Association) κ.α. Οι δοκιμές VLF χρησιμοποιούνται κυρίως για δοκιμή σε καλώδια εγκατεστημένα και προτιμάται για το μικρό όγκο και ισχύ του εξοπλισμού και το χαμηλότερο κόστος, σε σχέση με δοκιμές σε βιομηχανική συχνότητα.

Η δοκιμή VLF δεν είναι καταστρεπτική για μονώσεις που βρίσκονται σε καλή κατάσταση, ενώ δεν προκαλεί επιπλέον φθορές στη μόνωση. Σε περίπτωση που η μόνωση περιέχει θέσεις φθοράς, ανομοιογένειας και υδάτινους δενδρίτες, η μόνωση διασπάται, πράγμα το οποίο επιδιώκεται, αφού εάν μια μόνωση δεν μπορεί να αντέξει τάση 2-3 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής, δε θα αντέξει για πολύ βρισκόμενη σε λειτουργία. Είναι προτιμότερο, λοιπόν, να προκληθεί διάσπαση κατά τη δοκιμή, όπου στη συνέχεια μπορούμε να εντοπίσουμε και να διορθώσουμε τις θέσεις φθοράς, παρά κατά τη λειτουργία του καλωδίου.

Μπορεί βέβαια ο μηχανισμός διάσπασης να είναι διαφορετικός στα 0,1Hz από ότι στα 50Hz, αλλά αυτό που ενδιαφέρει είναι να εξακριβωθεί εάν το καλώδιο έχει φθορές που μπορεί να οδηγήσουν σε διάσπαση. Δηλαδή αυτό που έχει σημασία δεν είναι σε ποια τάση έχουμε διάσπαση στο υγιές καλώδιο, αλλά να διαπιστωθεί εάν ο βαθμός φθοράς της μόνωσης επιτρέπει τη συνέχιση της λειτουργίας του καλωδίου. Επιπλέον, η τάση διάσπασης για υγιές καλώδιο είναι αρκετά μεγαλύτερη στα 0,1Hz από ότι στα 50Hz, αλλά η τιμή της για τις δύο συχνότητες δε διαφέρει σημαντικά για καλώδια με μηχανικές βλάβες και υδάτινους δενδρίτες.

Σκοπός λοιπόν της δοκιμής δεν είναι να καταδείξει σε ποια τάση έχουμε τη διάσπαση του καλωδίου, αλλά το αποτέλεσμα της δοκιμής είναι ποιοτικό (pass/fail) και όχι ποσοτικό. Άλλωστε και από τους κανονισμούς λαμβάνεται υπόψη μια σχέση ανάμεσα στα αποτελέσματα στα 0,1Hz και στα φαινόμενα αποτελέσματα στα 50Hz.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα – Η επόμενη μέρα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με δύο βασικά θέματα :

- Τις δοκιμές σε καλώδια Μέσης Τάσης, και ειδικότερα τις δοκιμές αντοχής σε κρουστικές τάσεις και τις δοκιμές με εφαρμογή τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF). Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι αντίστοιχοι κανονισμοί για τις δοκιμές και πραγματοποιήθηκε δοκιμή σε καλώδιο MT στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.
- Την επαλήθευση (verification) της γεννήτριας κρουστικών τάσεων και της συσκευής VLF (συσκευές που χρησιμοποιούνται για δοκιμές καλωδίων MT), και την εύρεση της αβεβαιότητας των τιμών της τάσης εξόδου κάθε συσκευής.

Η παρούσα εργασία αναδεικνύει την αξία της δοκιμής VLF, μιας νέας σχετικά μεθόδου που βρίσκει ευρεία εφαρμογή τα τελευταία χρόνια για τις δοκιμές εγκατεστημένων καλωδίων. Είναι μια μέθοδος αξιόπιστη για την εκτίμηση της κατάστασης του καλωδίου, εάν είναι δυνατόν δηλαδή το καλώδιο να συνεχίσει να βρίσκεται σε λειτουργία, ή απαιτείται επιδιόρθωση ή αντικατάσταση του. Επιπλέον, η δοκιμή VLF υπερτερεί άλλων μεθόδων στο γεγονός ότι δεν είναι καταστρεπτική, δεν προκαλεί επιπλέον φθορές στο καλώδιο, στο μικρό βάρος και όγκο του εξοπλισμού και στο χαμηλό σχετικά κόστος.

Μελλοντικός στόχος της έρευνας πάνω στη δοκιμή VLF, αποτελεί η κατάδειξη της διαφοράς του μηχανισμού διάσπασης σε πολύ χαμηλή συχνότητα σε σχέση με τη βιομηχανική συχνότητα λειτουργίας του καλωδίου. Επίσης, βελτιώσεις μπορεί να υπάρξουν στο δευτερεύοντα εξοπλισμό των συσκευών VLF που χρησιμοποιείται στις διαγνωστικές δοκιμές, ενώ ερευνάται και η εφαρμογή νέων μεθόδων για την αρτιότερη διαδικασία μέτρησης μεγεθών, όπως οι μερικές εκκενώσεις, ο συντελεστής απωλειών και τα ρεύματα διαρροής. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει και η μελέτη της συμπεριφοράς των καλωδίων στην περίπτωση σημαντικών μηχανικών φθορών (π.χ. τομές στον εξωτερικό μανδύα ή τη μόνωση του καλωδίου), πράγμα πολύ σημαντικό για τα εγκατεστημένα καλώδια, αφού σημαντικές μηχανικές καταπονήσεις συνεπάγονται διάσπαση του καλωδίου. Αυτό απαιτεί επιδιόρθωση ή αντικατάσταση του καλωδίου, διαδικασία επίπονη αφού χρειάζεται εντοπισμός της θέσης του σφάλματος, εκσκαφή και επανατοποθέτηση του καλωδίου. Η διαδικασία γίνεται ακόμα πιο δύσκολη και δαπανηρή σε περιπτώσεις που το σφάλμα εντοπίζεται σε μούφα.

Στα πλαίσια της εργασίας και με αφορμή τόσο τη συσκευή VLF όσο και την κρουστική γεννήτρια, με την οποία πραγματοποιούνται δοκιμές αντοχής σε καλώδια, έγινε μια προσπάθεια επαλήθευσης των παραπάνω συσκευών. Σε κάθε περίπτωση υπολογίστηκαν για συγκεκριμένες τιμές τάσης οι ολικές αβεβαιότητες με βάση το πρότυπο IEC 602, χρησιμοποιώντας τις αβεβαιότητες τόσο τύπου A που προέκυψαν από τις μετρήσεις, όσο και τύπου B που προέκυψαν από τα στοιχεία των οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν.

Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης κρίθηκαν ικανοποιητικά. Άλλωστε στόχος της εργασίας δεν είναι μόνο ο ποσοτικός υπολογισμός της αβεβαιότητας κάθε συσκευής, αλλά η παρουσίαση ενός απλού και πρακτικού τρόπου για την επαλήθευση των οργάνων, που μπορεί να πραγματοποιηθεί με τα υπάρχοντα μέσα του εργαστηρίου.

Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης και ο υπολογισμός των αντίστοιχων αβεβαιοτήτων θα ήταν ακριβέστερος, εάν τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διακριβωμένα από διαπιστευμένα εργαστήρια, έτσι ώστε να είναι γνωστές επακριβώς οι αβεβαιότητες των οργάνων αυτών. Συγκεκριμένα, η συσκευή DIAS που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή και μέτρησης των κρουστικών τάσεων πρέπει να σταλεί για διακρίβωση σε κατάλληλο εργαστήριο. Στην προοπτική αυτή θα βοηθούσε και η αγορά ενός δευτέρου καναλιού για το DIAS, έτσι ώστε όταν το ένα έχει σταλεί για διακρίβωση να λειτουργεί το άλλο. Εναλλακτικός τρόπος, είναι η αγορά μιας συσκευής RIC 422-4 ή 422-1 (Reference Impulse Calibrator) για τη διακρίβωση του DIAS. Να σημειωθεί ότι πρέπει να επιβεβαιώνεται η ορθή λειτουργία της συσκευής τόσο πριν όσο και μετά τη διακρίβωση. Η ύπαρξη επίσης ενός ratio meter για τη μέτρηση του λόγου καταμερισμού του ωμικού καταμεριστή ή ενός πρότυπου καταμεριστή (reference divider), θα βοηθούσε στην καλύτερη εκτίμηση των αβεβαιοτήτων, ενώ θα μπορούσε στην περίπτωση αυτή να έχει χρησιμοποιηθεί και όργανο μέτρησης μονώσεων με μικρότερη αβεβαιότητα. Τέλος, οι παλμογράφοι που χρησιμοποιήθηκαν πρέπει να σταλούν για διακρίβωση, καθώς τα μόνα στοιχεία που είναι διαθέσιμα για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων, προκύπτουν από τα αντίστοιχα φυλλάδια του κάθε παλμογράφου.

Η διαδικασία επαλήθευσης είναι, λοιπόν, απαραίτητη να γίνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα πριν τη χρήση μιας συσκευής ή ενός οργάνου. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλές διατάξεις, όπως αυτές που περιγράφονται στην παρούσα εργασία, υπό την προϋπόθεση βέβαια να υπάρχουν διακριβωμένα όργανα μέτρησης. Οι οδηγίες από τους οργανισμούς για την επαλήθευση τέτοιων συσκευών δεν είναι ακόμα σαφώς ορισμένες, ενώ αναμένεται η έκδοση νέου προτύπου σχετικά με την διακρίβωση, την επαλήθευση και τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων για συσκευές και μετρητικές διατάξεις.

Βιβλιογραφία

1. Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος, «Μετρήσεις σε βιομηχανικές διατάξεις και υλικά», Αθήνα 2004
2. Κ.Θ. Δέρβος, «Μονωτικά Υλικά ΥΤ», Αθήνα 2001
3. Π.Δ. Μπούρκας, «Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων», Αθήνα 1998
4. Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Θ. Δέρβος, «Ηλεκτρομονωτικά Υλικά», Αθήνα 1990
5. M.S. Naidu, V. Kamaraju, «High Voltage Engineering», McGraw-Hill
6. Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος, «Υψηλές Τάσεις Ι», Εκδόσεις Συμεών
7. Κ.Θ. Δέρβος, Παν. Βασιλείου, «Εισαγωγή στα Υλικά, Μέρος ΙΙ : Πολυμερή – Σύνθετα», Αθήνα 2004
8. M. Khalifa, «High Voltage Engineering, Theory and Practice», Cairo University Giza, Egypt
9. IEEE, January/February 2003 – Vol.19, No.1, A general review of Polymeric Insulation for use in HVDC Cables, T. Hanley, R. Burford, R. Fleming, K.Barber
10. Πέτρος Ντοκόπουλος, «Εισαγωγή στα ΣΗΕ», Εκδόσεις Παρατηρητής, Θεσσαλονίκη 1986
11. Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, «Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1999
12. Μιχ. Δανίκας, «Στοιχεία Υψηλών Τάσεων», Εκδόσεις Οικονομικών
13. George J. Anders, «Rating of Electric Power Cables», IEEE Press Power Engineering Series
14. «Electrical Power Cable Engineering», edited by William A. Thue
15. Πέτρος Ντοκόπουλος, «Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις καταναλωτών Μέσης και Χαμηλής τάσης», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη
16. Syed A. Nasar, «Συστήματα Ηλεκτρικής Ισχύος», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
17. Ευδόκιμος Μ. Μούσογλου, «Δοκιμαί και Μετρήσεις επί Ηλεκτρικών Μονώσεων», Αθήνα 1976
18. Κ.Α.Στασινόπουλος, «Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων», Υπηρεσία δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Α' Έκδοση
19. IEC 60502-2 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1kV ($U_m=1,2kV$) up to 30kV ($U_m=36kV$)
20. Τεχνική Προδιαγραφή Δ.Ε.Η. : Συνεστραμμένα καλώδια προοριζόμενα για χρήση σε εναέρια δίκτυα Χ.Τ.
21. 400TM IEEE Guide for field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems
22. 400.2TM IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)
23. Άρθρο του Mike Peschel : Very Low Frequency AC Technology : VLF Cable Testing and Answers to Frequently Asked Questions
24. Αρίσταρχος Τσακόπουλος, «Ηλεκτρικά Μετρήσεις», Αθήνα 1973
25. Παν. Ν. Νικολόπουλος, «Ηλεκτρικά Μετρήσεις, Τόμος Α : Κλασικά διατάξεις, όργανα και μέθοδοι μετρήσεως», Αθήνα 1972
26. Μανώλης Ε. Μαθιουλάκης, «Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα», Ελληνική Έκδοση Εργαστηρίων

27. Taub/Shilling, «Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
28. Γ.Κοκολάκης, Ι.Σπηλιώτης, «Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστική», Εκδόσεις Συμεών
29. Άρθρο του Δρ. Α. Λευκόπουλου, Διευθυντή τομέα διακρίβωσης & διευθυντή εργαστηρίου θερμοκρασίας της C3T, «Αβεβαιότητα μετρήσεων»
30. IEC 60-2, 1994, Amendment 1 High Voltage Test Techniques, Part 2 : Measuring Systems, Annex H Procedure for estimating uncertainty in high voltage measurements
31. Νικόλαος Ι. Θεοδώρου, «Ηλεκτρικές Μετρήσεις, Τεύχος Ι : Κλασσικές μετρήσεις», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2000
32. <http://physlab.phys.uoa.gr> Ιστοσελίδα του εργαστηρίου φυσικής του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών