



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## Μέθοδοι ανίχνευσης σφαλμάτων σε υπόγεια καλώδια

### ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπυρίδων Κορκόντζηλας 7329

Επαμεινώνδας Καρακώστας 7373

**Επιβλέπων:** Δρ. Βασίλειος Χαραλαμπίκος  
Επίκουρος Καθηγητής

Πάτρα, Ιανουάριος 2022

# Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε από καρδιάς για την ειλικρινή και αγαστή συνεργασία που είχαμε, τον επιβλέπων καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ενέργειας και Ενεργειακών Συστημάτων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, κ. Βασίλειο Χαραλαμπάκο για την υποστήριξη που μας παρείχε στο εγχείρημα μας και την εμπιστοσύνη που μας επέδειξε, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μας εργασίας.

Οφείλουμε να ευχαριστήσουμε θερμά το κ. Παναγιώτη Ράπτη, μέλος Ειδικού Τεχνικού & Εργαστηριακού προσωπικού της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, για την επιτήρηση και τις απαραίτητες υποδείξεις κατά την εκπόνηση της πειραματικής διάταξης.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε το κ. Παναγιώτη Κορκόντζηλα για την διάθεση των ξύλινων πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν στη βάση της πειραματικής διάταξης.

Ευχαριστούμε από καρδιάς το κ. Χρήστο Φιλιππακόπουλο-Τεχνικό Βλαβοδιαχείρισης Πεδίου στο ΤΤΛΠ Αχαΐας του ΟΤΕ-που χωρίς τη συνδρομή του και τις τεχνικές του γνώσεις δεν θα ήταν εφικτή η υλοποίηση του κατασκευαστικού μέρους της πειραματικής διάταξης, τον κ. Γιώργο Τ. για την παροχή των κατάλληλων οργάνων προς την λήψη μετρήσεων και την διασφάλιση έγκυρης λειτουργίας της διάταξης.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την οικογένεια και τους φίλους μας για την αμέριστη στήριξη και κατανόηση που μας έδειξαν όλο αυτό το διάστημα που χρειάστηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

## Περιεχόμενα

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΩΝ- ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΛΩΔΙΑ -ΑΙΤΙΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ**

1.1 Δομή Υπόγειων Καλωδίων Ισχύος .....	7
1.1.1 Ηλεκτρικοί Αγωγοί .....	10
1.1.2 Εξομαλυντικά Ημιαγώγιμα Στρώματα .....	10
1.1.3 Μόνωση .....	11
1.1.4 Εξωτερικός Γειωμένος Αγωγός(ή μανδύας ή μεταλλικός μανδύας ή ηλεκτρική θωράκιση ή μεταλλική θωράκιση) .....	12
1.1.5 Ζώνη Μηχανικής Ενίσχυσης ή Θωράκιση .....	13
1.1.6 Εξωτερικό Προστατευτικό Στρώμα ή Εξωτερικός Μανδύας .....	13
1.2 Βλάβες και αστοχίες υπογείων καλωδίων .....	15
1.2.1 Ορισμός σφάλματος και κατηγορίες σφαλμάτων .....	15
1.2.2 Είδη σφαλμάτων .....	16
1.2.2.1 Βραχυκυκλώματα .....	16
1.2.2.2 Ανοικτό κύκλωμα (Open-Conductor Faults) .....	18
1.2.3 Αιτίες σφαλμάτων και βλαβών καλωδίων .....	20
1.2.3.1 Μηχανικές Βλάβες .....	20
1.2.3.2 Διάβρωση του μανδύα .....	20
1.2.3.3 Γήρανση .....	21
1.2.3.4 Αστοχία Μόνωσης Καλωδίου .....	26
1.2.3.5 Αστοχία συνδέσμων(ματίσεων) .....	27
1.2.3.6 Θέρμανση Καλωδίων .....	28
1.2.3.7 Υπερτάσεις λόγω κεραυνών .....	29
1.2.3.8 Δόνηση .....	29

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΟΥΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΛΩΔΙΑ**

2. Κατηγοριοποίηση των μεθόδων ανίχνευσης σφαλμάτων .....	31
2.1 Τεχνικές ακροδεκτών .....	32
2.1.1 Μέθοδος Γέφυρας(Murray Loop) .....	32
2.1.2 Μέθοδος Radar(αντήχησης παλμών)(Pulse Reflection Method) .....	34
2.1.3 Μέθοδος Συντονισμού(Standing Wave differential Method) .....	38
2.2 Τεχνικές ανίχνευσης .....	41

2.2.1 Μέθοδος Κρουστικών Τάσεων(Impulse Voltage Method) .....	41
2.2.2 Μέθοδος Δυναμικού Γης(Earth gradient method) .....	47
2.2.3 Μέθοδος Radar με εφαρμογή παλμών υψηλής τάσης ή μέθοδος ανάκλασης τόξου(Arc Reflection Method) .....	49
2.2.4 Μέθοδος ανίχνευσης ρεύματος(Tracing Current Method) .....	51
2.2.5 Μέθοδος Ακουστικής Συχνότητας(Acoustic Method) .....	53

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

#### **ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ**

3.1 Γενικά .....	56
3.2 Χρησιμοποιούμενα υλικά .....	56
3.3 Χαρακτηριστικά υλικών κατασκευής .....	57
3.3.1 Χορδή Χρωμιονικελίνης .....	57
3.3.2 Όργανο ισορροπίας .....	59
3.3.3 Υπό δοκιμή αγωγός .....	61
3.3.4 Τροφοδοσία διάταξης .....	63
3.4 Διαδικασία κατασκευής .....	64
3.5 Προβλήματα κατά το στάδιο των πειραματικών δοκιμών .....	72
3.5.1 Όργανο ισορροπίας .....	72
3.5.2 Αντίσταση προστασίας .....	74
3.5.3 Τροφοδοσία διάταξης .....	77
3.5.4 Τελική μελέτη υλικών .....	78

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ - ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

4.1 Προσομοίωση της υπό διερεύνηση διάταξης .....	79
4.1.1 Γενικά.....	79
4.1.2 Προσομοίωση της διάταξης εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση βρόχου Murray .....	80
4.1.3 Επιλογή των παραμέτρων εξομοίωσης .....	80
4.1.4 Αποτελέσματα της προσομοίωσης .....	82
4.2 Συνδεσμολογία πειραματικής διάταξης .....	85
4.3 Πειραματική διαδικασία .....	90
4.4 Πειραματικά αποτελέσματα .....	91
Βιβλιογραφία .....	95

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Η συντήρηση και επισκευή του υπογείου δικτύου μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη για την απρόσκοπτη και ορθή λειτουργία του δικτύου και την εξασφάλιση των αναγκών σε ενέργεια των καταναλωτών. Ορισμένοι φυσικοί ή ανθρώπινοι παράγοντες διαταράσσουν τη λειτουργία των υπόγειων καλωδίων, και τα καθιστούν ευάλωτα σε διάφορα σφάλματα. Ο εντοπισμός των σφαλμάτων των καλωδίων αποτελεί τη σημαντικότερη εργασία που πραγματοποιείται επι των γραμμών μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ταχύτητα και η ακρίβεια αυτής της εργασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί τα σφάλματα των καλωδίων προκαλούν διακοπές τροφοδότησης ρεύματος, οι οποίες κοστίζουν τόσο στο καταναλωτή όσο και στο πάροχο. Έτσι, στην εργασία αυτή πραγματοποιείται μια συγκριτική μελέτη των κυριότερων μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων, αναλύοντας τα χαρακτηριστικά και τις τεχνικές απαιτήσεις της κάθε μίας από αυτές.

Αρχικά η μελέτη μας επικεντρώνεται στην ανάλυση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των υπογείων καλωδίων. Έπειτα παρουσιάζονται και αναλύονται τα είδη σφαλμάτων σε υπόγεια καλώδια και παρατίθενται οι κυριότερες αιτίες αστοχιών και σφαλμάτων των καλωδίων. Ακολουθεί η συγκριτική μελέτη των μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων σε υπόγεια καλώδια. Τέλος, με αναφορά τη μέθοδο ανίχνευσης σφαλμάτων με χρήση βρόχου Murray (Murray Loop), καταδεικνύονται τα απαιτούμενα βήματα για την μελέτη και κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης εντοπισμού της θέσης σφάλματος, η οποία βασίζεται στη λογική της γέφυρας μετρήσεων.

## **Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή**

Βεβαιώνουμε ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχαμε για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης έχουμε αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες κάναμε χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνουμε ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμάς προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη εργασία. Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων των συγγραφέων εκ μέρους του Τμήματος. Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία των φοιτητών Επαμεινώνδα Καρακώστα και Σπυρίδων Κορκόντζηλα που την εκπόνησαν από κοινού. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης οι συγγραφείς εκχωρούν στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας των συγγραφέων/δημιουργών ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση των συγγραφέων/δημιουργών. Οι συγγραφείς/δημιουργοί διατηρούν το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΩΝ–ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΛΩΔΙΑ-ΑΙΤΙΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

#### 1.1 Δομή Υπόγειων Καλωδίων Ισχύος

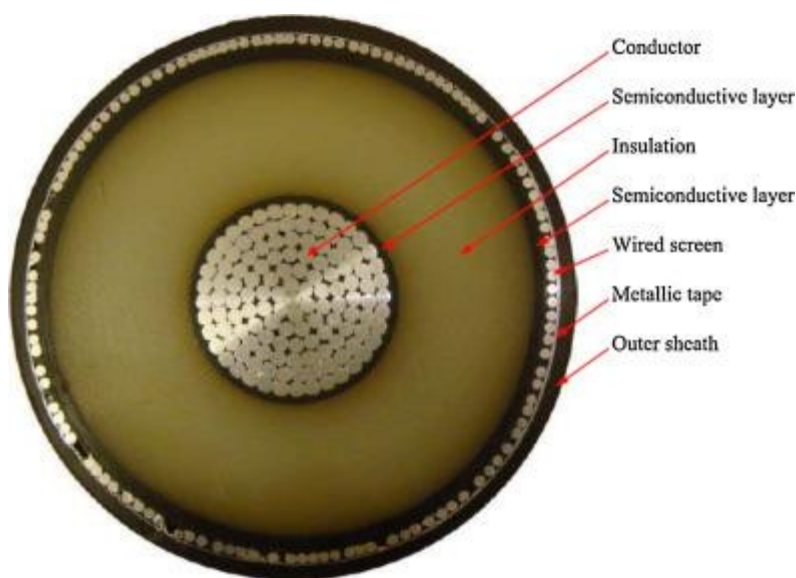
Ένα καλώδιο υψηλής είναι ο φορέας μεταφοράς ηλεκτρικής ενεργείας σε υψηλή τάση. Τα υπόγεια καλώδια διακρίνονται σε καλώδια υψηλής(Υ.Τ), μέσης(Μ.Τ) και χαμηλής τάσης(Χ.Τ), με τα καλώδια ΜΤ και ΥΤ να παρουσιάζουν πού μεγάλες ομοιότητες. Η δομή των καλωδίων ισχύος είναι ομοαξονική, δηλαδή διαθέτουν έναν κεντρικό αγωγό(μονοπολικό) ή περισσοτέρους αγωγούς(τριπολικά) σε τάση γραμμής, μία εξωτερική μόνωση επαπτόμενη στον αγωγό και έναν εξωτερικό γειωμένο αγωγό στο δυναμικό της γης. Η κατασκευαστική-δομική διαφορά των καλωδίων Υ.Τ σε σχέση με αυτά της Χ.Τ συνίσταται στη χρήση εσωτερικών στρωμάτων στο περίβλημα της μόνωσης για τον έλεγχο του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αγωγό, όπως ο εξωτερικός γειωμένος αγωγός. Δεδομένου ότι κάθε καλώδιο εναλλασσόμενης τάσης αντιπροσωπεύει μια φάση σε ένα σύστημα τριών φάσεων, ο εξωτερικός γειωμένος αγωγός(μεταλλικός μανδύας) χρησιμοποιείται για τη μεταφορά απωλειών ρεύματος ή παρασιτικών σφαλμάτων. Για κυκλώματα με τάση λειτουργίας μεγαλύτερη των 2kV, ο μονωμένος αγωγός ίσως περιβάλλεται από ζώνη μηχανικής ενίσχυσης(θωράκιση), δηλαδή ένα οπλισμό αποτελούμενο από ατσαλοσύρματα ή σιδηροταινίες. Εάν τα καλώδια είναι μονοπολικά και προορίζονται για χρήση με εναλλασσόμενο ρεύμα τότε ο οπλισμός κατασκευάζεται με μη μαγνητικό υλικό(χαλκός,αλουμίνιο, ανοξείδωτο ατσάλι κτλ.) [1] [2] [3] [4].

Ωστόσο, η ύπαρξη ασυνεχειών ή κενών στο στρώμα της μόνωσης, εντείνουν την ηλεκτρική καταπόνηση του καλωδίου και μπορεί να οδηγήσουν ακόμη και σε πρόωρη αστοχία του καλωδίου. Για να ξεπεραστεί αυτό, ένας πολυμερής ημιαγωγός(ημιαγωγίμο στρώμα), μια αγωγήμη πολυμερής σύνθεση τοποθετείται

και στις δύο πλευρές της μόνωσης. Τα ημιαγώγιμα στρώματα εξασφαλίζουν την ακεραιότητα της μόνωσης, δηλαδή ότι οι ασυνέχειες της δεν γεμίζουν με αέρα, οπότε δεν θα προκληθούν ηλεκτρικές εκκενώσεις που θα βλάψουν το μονωτικό υλικό [1] [3].

Τα πρώτα καλώδια χρησιμοποιούσαν **μόνωση** από χαρτί, το οποίο τυλίγονταν με μία στρώση χαρτιού εμποτισμένου σε λάδι (MIND). Ταυτόχρονα, χρησιμοποιούνταν ως υλικό το EPDM(Μ αιθυλοπροπυλένιο). Ωστόσο, η ηλεκτρική μόνωση που κυριάρχησε στα υπόγεια καλώδια μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μετά την ανάπτυξη των πλαστικών, είναι το δικτυωτό διασυνδεδεμένο πολυαιθυλένιο (XLPE) ή διασταυρωμένο πολυαιθυλένιο [5] [6].

Τέλος, το καλώδιο καλύπτεται από ένα μη αγώγιμο υλικό το οποίο ονομάζεται **εξωτερικό προστατευτικό στρώμα**(jacket). Χρησιμοποιείται για τη παροχή προστασίας από υγρασία. Παλαιότερα, για τη κατασκευή του χρησιμοποιούνταν PVC, μόλυβδος ή ίνες γιούτας με πίσσα. Σήμερα, χρησιμοποιείται PVC, PE, HDPE ή CR(νεοπρένιο) [2] [3] [5] [7].



**Εικόνα 1.1** Τομή ενός καλωδίου ισχύος [8]





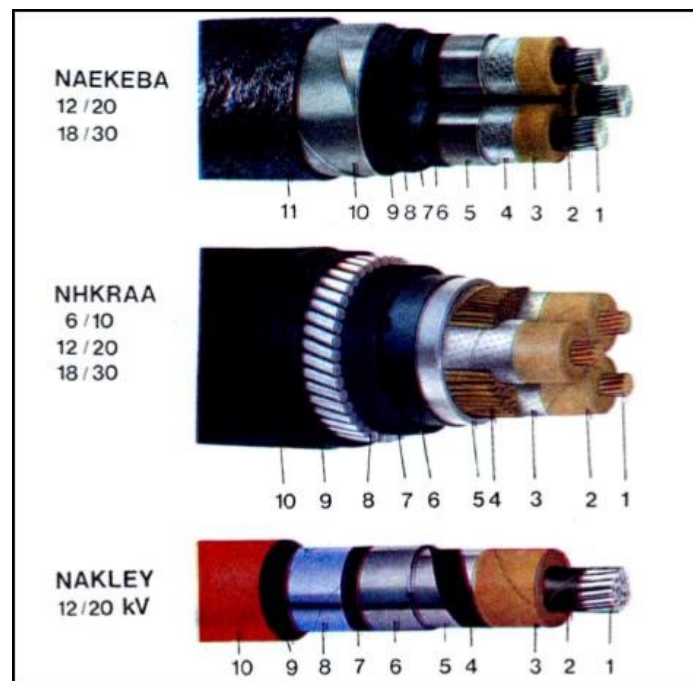
α



β

**Εικόνα 1.2 α)** Τυπική Δομή Μονοπολικού Καλωδίου Ισχύος: 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 [6]

**β)** Τυπική δομή Πολυπολικού Καλωδίου Ισχύος. Διαφοροποιείται από το α στο γεγονός ότι διαθέτει ζώνη μηχανικής ενίσχυσης(Galvanized Steel Wire Armour) [53]



**Εικόνα 1.3** Καλώδια MT ακτινικού πεδίου παλαιού τύπου : α.) Καλώδιο τριών μανδυών NAEKEBA 12/20...18/30kV: 1) αγωγός, 2) εξομαλυντικό ημιαγωγίμο στρώμα, 3) μόνωση, 4) ταινίες από αλουμίνιο, 5) μόλυβδος, 6,7,8,9) προστατευτικά στρώματα, 10) ταινία χαλύβδινη, 11) προστατευτικό στρώμα από εμποτισμένες ίνες(νήματα γιούτας) 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 εμπροσπισμένες ίνες. γ.) Καλώδιο μονοπολικό NAKLEY 12/20kV: 1) αγωγός, 2) εξομαλυντικό ημιαγωγίμο στρώμα, 3) χαρτί-μάζα, 4) ημιαγωγίμο χαρτί, 5) ταινία συγκράτησης, 6) μόλυβδος, 7,8,9) προστατευτικά στρώματα από μάζα παχύρρευστη με ταινίες πλαστικού, 10) προστατευτικό στρώμα από PVC. [7]

### 1.1.1 Ηλεκτρικοί Αγωγοί

Ένας ή τρεις αγωγοί φέρουν το ρεύμα του φορτίου. Για την κατασκευή των αγωγών χρησιμοποιείται αλουμίνιο και χαλκός. Τα μέταλλα αυτά έχουν υποστεί μία θερμική κατεργασία ώστε να είναι εύκαμπτα. Ο χαλκός έχει υψηλή αγωγιμότητα και όταν είναι σκληρής ολκήσεως, εμφανίζει μεγάλη μηχανική αντοχή. Βασικά μειονεκτήματα είναι το βάρος του και το υψηλό κόστος σε σύγκριση με το αλουμίνιο, περίπου 50% ακριβότερο. Το αλουμίνιο υστερεί του χαλκού σε αγωγιμότητα και αντοχή, αλλά έχει λιγότερο κόστος και είναι πολύ ελαφρύτερο. Μειονέκτημα του, είναι επίσης ότι δε συγκολλάται με μαλακή κόλληση χαμηλού σημείου τήξεως (π.χ. κασσιτεροκόλληση) και ότι διαβρώνεται ευκολότερα λόγω ηλεκτροχημικών δράσεων.

Η μορφή της διατομής μπορεί να είναι κυκλική ή να αποτελείται από κυκλικούς τομείς. Οι κυκλικές διατομές μπορεί να είναι συμπαγείς μέχρι 16mm για χαλκό και 50mm για αλουμίνιο. Για μεγαλύτερες διατομές οι αγωγοί γίνονται για λόγους ευκαμψίας πολύκλωνοι. Για πολυπολικά καλώδια μεγάλων διατομών χρησιμοποιούνται διατομές κυκλικού τομέα. Αν σε πολύκλωνους αγωγούς επιβληθεί συμπίεση των συρματιδίων (συμπιεσμένοι αγωγοί), εξοικονομείται όγκος, μειώνοντας τη γεωμετρική διατομή του αγωγού. Πάνω από 35mm οι πολύκλωνοι αγωγοί συμπιέζονται. Κοίλες και ελλειπτικές διατομές συναντώνται σε καλώδια με μόνωση χαρτιού-λαδιού και εξωτερικής πίεσης αντίστοιχα, για να κυκλοφορεί το λάδι και μεταδίδεται καλύτερα η πίεση [4] [6].

### 1.1.2 Εξομαλυντικά Ημιαγωγίμο Στρώματα

Στην επιφάνεια των πολύκλωνων αγωγών παρατηρείται μία μορφολογική ανωμαλία, με αποτέλεσμα η πεδιακή ένταση (KV/mm) στην επιφάνεια τους να

είναι υψηλότερη σε σχέση με τους μονόκλωνους. Για να μειωθεί η πεδιακή ένταση στην επιφάνεια των πολύκλωνων αγωγών τοποθετούνται, μεταξύ αγωγού και μανδύα, στρώματα από ημιαγώγιμα υλικά (όπως χαρτί με γραφίτη ή πλαστικά με γραφίτη). Τα πρόσθετα ημιαγώγιμα στρώματα αποτρέπουν την εμφάνιση κενών μεταξύ αγωγού και μόνωσης, που θα οδηγούσαν σε ηλεκτρικές εκκενώσεις και βαθμιαία καταστροφή της μόνωσης. Τέλος τα στρώματα αυτά αυξάνουν τη θερμική και μηχανική αντοχή της μόνωσης κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων [4] [6].

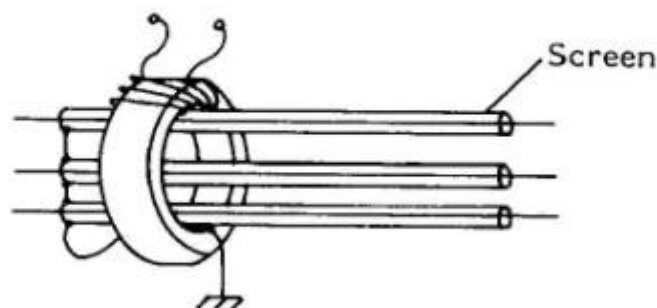
### 1.1.3 Μόνωση

Ως μονωτικά υλικά των καλωδίων μεταφοράς και διανομής χρησιμοποιούνται συνήθως **χαρτί εμποτισμένο με λάδι(MIND), PE, EPR, XLPE**. Η ηλεκτρική αντοχή του καλωδίου σε τάση αλλά και η επιτρεπόμενη ένταση του ρεύματος φόρτισης του αγωγού, προσδιορίζονται από το είδος και το πάχος του μονωτικού υλικού. Το είδος της μόνωσης καθορίζει τόσο τη μέγιστη συνεχή όσο και την παροδικά επιτρεπόμενη θερμοκρασία. Το είδος της εφαρμογής, με διαφορετικές ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες ανάλογα με αυτή, καθώς και η ανάγκη εύκολης εγκατάστασης του καλωδίου(που καθορίζει την ευκαμψία ή μηχανική αντοχή του) καθορίζουν το είδος της μόνωσης που θα χρησιμοποιηθεί. 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 μικροεκκενώσεων(μη αυτοσυντηρούμενες εκκενώσεις στο διηλεκτρικό). Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις διαβρώνουν βαθμιαία το μονωτικό υλικό και μπορεί να βλάψουν τη μόνωση του καλωδίου, οπότε χρησιμοποιούνται εξομαλυντικά ημιαγώγιμα στρώματα για τη προστασία της [6].

Στα υπόγεια δίκτυα MT και XT έχει γενικευτεί η χρήση συνθετικής μόνωσης(XLPE,PE,EPR κλπ), ενώ η χρήση μόνωσης χαρτιού τείνει να εκλείψει. Μάλιστα, στην Ελλάδα, η χρήση των καλωδίων με συνθετική μόνωση έχει γενικευτεί στα δίκτυα XT ενώ στα δίκτυα MT πρόκειται να υποκαταστήσει

πλήρως τη χρήση καλωδίων με εμποτισμένο χαρτί. Σε γραμμές Υ.Τ και Υ.Υ.Τ κυριαρχεί ήδη η χρήση καλωδίων με συνθετική μόνωση [4].

#### 1.1.4 Εξωτερικός Γειωμένος Αγωγός (ή μανδύας ή μεταλλικός μανδύας ή ηλεκτρική θωράκιση ή μεταλλική θωράκιση)



**Εικόνα 1.4** Αποψη ενός μεταλλικού μανδύα στερεωμένου σε έναν δακτύλιο όπου και γειώνεται.

Ο εξωτερικός γειωμένος αγωγός περιβάλλει τα καλώδια τάσης, διαχωρίζοντας τους φέροντας τάση αγωγούς, έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος να τεθούν υπό τάση τα περί το καλώδιο τμήματα της εγκατάστασης. Μέσω των γειωμένων αγωγών ρέουν ρεύματα (χωρητικά ή βραχυκυκλωμάτων), δια μέσω μικρής αντίστασης και κατά τρόπο ελεγχόμενο, ως προς τη γη. Ακόμα σε κάποιες περιπτώσεις ο αγωγός λειτουργεί ταυτόχρονα και ως το τμήμα του καλωδίου που φέρει το ρεύμα του ουδετέρου. Οι αγωγοί αυτοί, γειώνονται πάντοτε σε ένα τουλάχιστον σημείο. Με τον τρόπο αυτόν αποφεύγονται ηλεκτρικές διασπάσεις σε περιπτώσεις σφαλμάτων καθώς και η εμφάνιση τάσης ως προς γη υπό κανονική λειτουργία. Επιπρόσθετα, ο γειωμένος αγωγός έχει συχνά και προστατευτικό χαρακτήρα εμποδίζοντας την διείσδυση υγρασίας ή άλλων χημικών επιδράσεων από έξω προς τη μόνωση. Ο μεταλλικός μανδύας κατασκευάζεται από μόλυβδο ή αλουμίνιο, ενώ σε ειδικές κατασκευές χρησιμοποιείται χάλκινη ταινία ή χάλκινα συρματίδια για τη βελτίωση της αγωγιμότητας προς όλες τις κατευθύνσεις [4] [6].

### 1.1.5 Ζώνη Μηχανικής Ενίσχυσης ή Θωράκιση

Η μηχανική ενίσχυση είναι απαραίτητη σε ειδικές περιπτώσεις όπου τα καλώδια καταπονούνται μηχανικά. Στα υπόγεια καλωδιακά συστήματα, τα καλώδια τραβιούνται από μηχανές έλξης μέσα σε σωλήνες ή χαντάκια κατά την εγκατάστασή τους, διότι για να περάσει ένα καλώδιο μέσα από το σωλήνα χρειάζεται μια δύναμη εφελκυσμού ανάλογη με το μήκος του, οπότε καταπονούνται μηχανικά. Η μηχανική προστασία επιτυγχάνεται μέσω της θωράκισης των καλωδίων. Η θωράκιση προστασίας συνήθως κατασκευάζεται από χαλύβδινες ταινίες για καλώδια μόνιμης εγκατάστασης ή σε καλώδια που ποντίζονται, χαλύβδινα συρματίδια. Η χρήση του χάλυβα, σε μονοπολικά καλώδια, μπορεί να προξενήσει μαγνητική υστέρηση και απώλειες λόγω κυκλικών ρευμάτων, με αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας μεταφοράς ρεύματος [4] [6].

Ωστόσο, η αντίσταση που παρουσιάζει ο εξωτερικός μανδύας(jacket), ελαττώνεται με την ύπαρξη συρματιδίων(ο μανδύας και η θωράκιση είναι συνδεδεμένα εν παραλλήλω). Όταν η αντίδραση του μανδύα γίνει ίση με την αντίσταση του, τότε μεγιστοποιούνται οι απώλειες λόγω κυκλικών ρευμάτων. Χωρίς συρματίδια θωράκισης, η αντίδραση του πυρήνα είναι πολύ πιο μικρή από την αντίσταση του. Συνεπώς, προτιμάται η κατασκευή των συρματιδίων θωράκισης με τη χρήση κράματος χαλκού-πυριτίου-μαγγανίου για την ελαχιστοποίηση των επιμέρους απωλειών. Όταν οι αποστάσεις των καλωδιακών δικτύων είναι μεγάλες, η τιμή της αντίδρασης αυξάνεται. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δύναται να χρησιμοποιηθεί θωράκιση χαμηλής αντίστασης, δεδομένου ότι η προκύπτουσα αντίσταση θα είναι πολύ μικρότερη από την αντίδραση, με αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών [1] [4].

### 1.1.6 Εξωτερικό Προστατευτικό Στρώμα ή Εξωτερικός Μανδύας

Η πλειοψηφία των καλωδίων ισχύος, και ιδιαίτερα εκείνων που θάβονται στο έδαφος, διαθέτουν εξωτερικά προστατευτικά στρώματα. Το καλώδιο, ο μεταλλικός μανδύας και η μηχανική ενίσχυση πρέπει να προστατευτούν κατά

της διάβρωσης, κατά των χημικών επιδράσεων και κατά της διείσδυσης της υγρασίας. Για τη κατασκευή αυτού του στρώματος προστασίας χρησιμοποιούνται συνθετικά υλικά ή ίνες εμποτισμένες με πίσσα. Καλώδια που διαθέτουν μηχανική ενίσχυση(όπως της φωτογραφίας 1.1β), εκτός του εξωτερικού προστατευτικού στρώματος(outer sheath) έξω από τη ζώνη μηχανικής ενίσχυσης, υπάρχουν προστατευτικά στρώματα(inner sheath) μεταξύ του μεταλλικού μανδύα και της ζώνης μηχανικής ενίσχυσης [4] [6].

Όσον αφορά τη προστασία με ίνες εμποτισμένες με πίσσα, οι ίνες είναι φυτικές(γιούτα) ή υαλίνες ή συνθετικές ίνες, ενώ μεταξύ τους υπάρχουν πλαστικές ταινίες για να δημιουργούν φράγματα στην υγρασία. Ταυτόχρονα, το καλώδιο του συγκεκριμένου τύπου, περιχαρακώνεται με κιμωλία ή ταλκ για να μη κολλάει επάνω στο τύμπανο που βρίσκεται κατά τη μεταφορά του και επίσης να μη δυσχεραίνεται η εγκατάστασή του [6].

Όσον αφορά τη προστασία με χρήση στρωμάτων από PVC ή πολυαιθυλένιο(PE) ή νεοπρένιο(CR), η χρήση τους περιορίζεται σε καλώδια με ηλεκτρική θωράκιση από αλουμίνιο ή χάλυβα. Οι μεταλλικοί μανδύες περιβάλλονται καταρχήν με αυτοβουλκανιζόμενες, αυτοκόλλητες ταινίες μερικών mm πάχους και ακολούθως συμπιέζεται πάνω τους ένας μανδύας χωρίς ραφή, από PVC ή πολυαιθυλένιο ή νεοπρένιο(CR), πάχους 4-6mm [5] [6].

## 1.2 Βλάβες και αστοχίες υπογείων καλωδίων

Παρά το γεγονός ότι τα υπόγεια καλώδια είναι θαμμένα στο έδαφος, και θεωρητικά περισσότερο προστατευμένα συγκριτικά με εξωτερικά καλώδια μεταφοράς, δεν είναι εντελώς ανεπηρέαστα από φυσικούς και ανθρώπινους παράγοντες. Επίσης, οι επιζήμιοι αυτοί παράγοντες, τα καθιστούν ευάλωτα σε διάφορα σφάλματα. Κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, οι γραμμές μεταφοράς του ηλεκτρικού συστήματος υπόκειται σε θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν καταστρεπτικά αποτελέσματα και να αποτελέσουν καθοριστικό συντελεστή στη λειτουργία της γραμμής, στην περίπτωση της μη έγκαιρης εξουδετέρωσης τους. Η μη έγκαιρη απομόνωση του σφάλματος, μπορεί να δημιουργήσει και προβλήματα αστάθειας στο σύστημα. Οι λόγοι αυτοί, δημιουργούν την ανάγκη εντοπισμού του σημείου του σφάλματος, προκειμένου να επισπευθεί η επισκευή, να βελτιωθεί η αξιοπιστία του συστήματος και να μειωθεί η περίοδο διακοπής [9] [3] [10].

### 1.2.1 Ορισμός σφάλματος και κατηγορίες σφαλμάτων

#### α) Ορισμός σφάλματος

Με τον όρο σφάλμα σε ένα σύστημα Σ.Η.Ε., ορίζεται ένα μη φυσιολογικό ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο παρακάμπτει την κανονική πορεία του κυκλώματος και προκαλεί διαταραχές στη γραμμή μεταφοράς [11] [12].

β) Ο χρόνος που η γραμμή θα παραμείνει εκτός λειτουργίας διαχωρίζει τα είδη των σφαλμάτων σε τρεις επιμέρους κατηγορίες οι οποίες είναι τα παροδικά, τα μόνιμα και τα παραμένοντα.

- Παροδικό σφάλμα: είναι το σφάλμα που θέτει μια γραμμή μεταφοράς εκτός λειτουργίας για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (λίγα δευτερόλεπτα), έπειτα η γραμμή επανατίθεται αυτόματα σε κανονική λειτουργία χωρίς την επέμβαση τεχνικών.
- Μόνιμο σφάλμα: είναι το σφάλμα το οποίο θέτει μία γραμμή μεταφοράς μόνιμα εκτός λειτουργίας. Σ εαυτή την περίπτωση σφάλματος, απαιτείται η επέμβαση τεχνικών, ώστε να εντοπιστεί η βλάβη, στη συνέχεια να

επισκευαστεί και να ξαναμπει η γραμμή σε λειτουργία. Τα μόνιμα σφάλματα είναι τα πιο σημαντικά και αποτελούν βασικό παράγοντα αξιοπιστίας σε μία γραμμή μεταφοράς και γενικότερα σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

- Παραμένον σφάλμα: είναι το σφάλμα που εμφανίζεται σε μία ηλεκτρική γραμμή μεταφοράς, όταν είναι εκτός λειτουργίας (μόνιμο σφάλμα) και μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, χωρίς να επέμβουν οι τεχνικοί, επανέρχεται σε κανονική λειτουργία. Για αυτούς τους λόγους το παραμένον σφάλμα ορίζεται ως ένα ενδιάμεσο μεταξύ του παροδικού και του μόνιμου σφάλματος [3] [11] [12].

## 1.2.2 Είδη σφαλμάτων

### 1.2.2.1 Βραχυκυκλώματα

Με τον όρο βραχυκυκλώματα σε ένα Σ.Η.Ε., χαρακτηρίζουμε οποιαδήποτε λειτουργική κατάσταση που συμβάλει στη ροή ρευμάτων στους διαφόρους κλάδους του συστήματος, πολύ μεγαλύτερου μεγέθους από τα αντίστοιχα κατά την ονομαστική λειτουργία και τα οποία προκαλούνται από απότομες αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου. Τα σφάλματα αυτά προέρχονται, όταν μία ή περισσότερες φάσεις του δικτύου έρθει σε επαφή με τη γη, είτε απευθείας είτε μέσω αντίστασης σφάλματος, ή και στις περιπτώσεις όπου δύο ή περισσότερες φάσεις έρθουν σε επαφή μεταξύ τους είτε απευθείας είτε μέσω αντίστασης σφάλματος [10].

#### A) Σφάλματα διαρροής προς τη γη

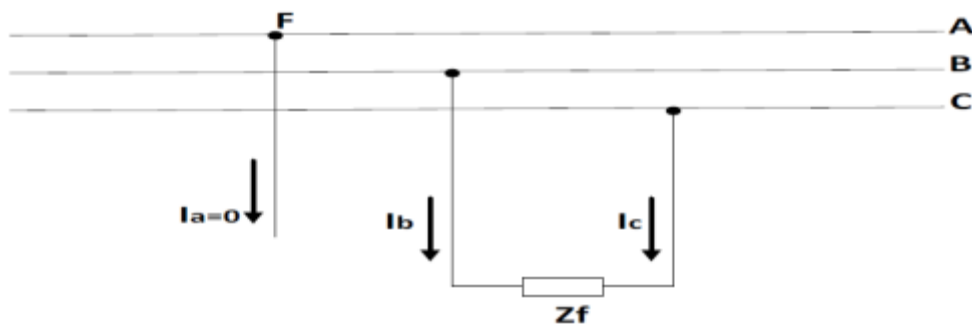
- Σφάλμα χαμηλής αντίστασης προς γη (Shorted Faults): Ένα σφάλμα γης χαρακτηρίζεται από μια χαμηλής αντίστασης διαδρομή προς γη (shunted fault). Η αντίσταση από τον αγωγό προς τη γη είναι χαμηλότερη από την αντίσταση κύματος του καλωδίου για ένα σφάλμα διαρροής προς γη χαμηλής αντίστασης.
- Σφάλμα υψηλής αντίστασης προς γη (High-Impedance Faults): Ένα σφάλμα υψηλής σύνθετης αντίστασης περιλαμβάνει μια υψηλής



αντίστασης διαδρομή προς τη γη (shunted fault) που είναι μεγάλη σε σύγκριση με την αντίσταση κύματος του καλωδίου. Αυτός ο τύπος σφάλματος μπορεί επίσης να επιδείξει μη γραμμικά χαρακτηριστικά ως προς την αντίστασή τους που επιτρέπουν την πλασματική αντίσταση να ποικίλει ανάλογα με το επίπεδο της εφαρμοζόμενης τάσης ή ρεύματος [13].

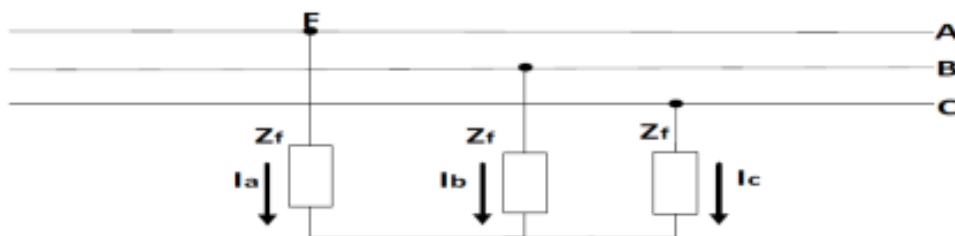
#### B) Σφάλματα μεταξύ φάσεων

- Σφάλμα μεταξύ δύο φάσεων: το σφάλμα φάσης με φάση εμφανίζεται όταν δύο αγωγοί βραχυκυκλωθούν, έρθουν σε επαφή ο ένας όπως φαίνεται στο Εικόνα 1.5. Για παράδειγμα οι φάσεις B και C.



**Εικόνα 1.5** Απεικόνιση σφάλματος φάση με φάση [3].

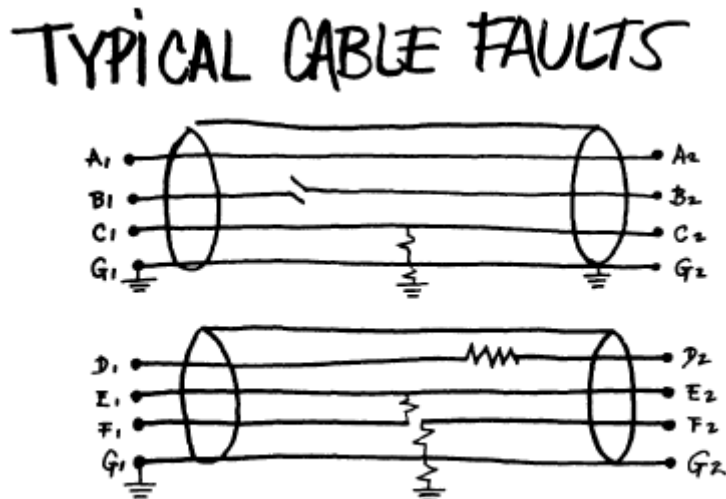
- Σφάλμα μεταξύ τριών φάσεων: είναι από τα λιγότερο πιθανά σφάλματα αλλά και τα πιο σοβαρά, και οι τρεις φάσεις βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους. Το βραχυκύκλωμα μεταξύ τριών φάσεων είναι το σοβαρότερο σφάλμα που μπορεί να συμβεί στο σύστημα όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Συνεπώς οι μηχανικοί χρησιμοποιούν τα εν λόγω σφάλματα ως βάση για τον υπολογισμό της αντοχής του υλικού που απαιτείται για τα καλώδια διανομής ή για άλλο εξοπλισμό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα τέτοιο σφάλμα απεικονίζεται και στο Εικόνα 1.6.



**Εικόνα 1.6** Απεικόνιση σφάλματος μεταξύ τριών φάσεων [3]

### 1.2.2.2 Ανοικτό κύκλωμα (Open-Conductor Faults)

Ένα σφάλμα ανοικτού κυκλώματος παρατηρείται όταν ο αγωγός ενός καλωδίου έχει σπάσει εντελώς ή παρουσιάζει διακοπή στη θέση σφάλματος του καλωδίου. Είναι πιθανό να παρουσιαστεί σφάλμα υψηλής αντίστασης (προς γη) στη μία ή και στις δύο πλευρές της θέσης του αγωγού που έχει υποστεί βλάβη [3].



Εικόνα 1.7. Τυπικά σφάλματα καλωδίων [14]

Αναφερόμενοι στην **εικόνα 1.7**, το A είναι υγιής αγωγός, το B είναι ανοικτό κύκλωμα, το C είναι ένα γειωμένο κύκλωμα και το G αντιπροσωπεύει είτε στρώμα μόνωσης, ένα μεταλλικό περίβλημα, έναν αγωγό ή τη γη. Το D παρουσιάζει σφάλμα υψηλής αντίστασης, το οποίο είναι χαρακτηριστικό των αγωγών αλουμινίου. Τα E και F είναι βραχυκυκλωμένα. Το F είναι επίσης παρουσιάζει ασυνέχεια ανάμεσα στο άκρο 1 και 2, μια κατάσταση που δεν είναι ασυνήθιστη. Οποτεδήποτε κάποιες από αυτές τις συνθήκες πληρούνται, μπορεί να επαληθευτούν λαμβάνοντας μετρήσεις από ένα ή περισσότερα άκρα των καλωδίων. Σημειώστε ότι, εκτός από το ανοικτό κύκλωμα, όλα τα σφάλματα και οι διαρροές προς γης φαίνεται ότι έχουν κάποια συγκεκριμένη τιμή αντίστασης που αντιπροσωπεύει το κάθε σφάλμα και διευκολύνει την ανίχνευση του. Το σφάλμα ανοικτού κυκλώματος και σφάλμα υψηλής αντίστασης ταξινομούνται και τα δύο ως σφάλματα σειράς και μπορεί να εντοπιστούν από τη μέτρηση οποιασδήποτε αλλαγής από τη πραγματική τιμή της αντίστασης του αγωγού. Τέτοιου είδους σφάλματα παρουσιάζουν μικρή πιθανότητα εμφάνισης. Το

μεγαλύτερο ποσοστό σφαλμάτων που παρουσιάζονται είναι βραχυκυκλώματα και σφάλματα διαρροής προς γη και μπορούν να εκτιμηθούν με μέτρηση οποιουδήποτε αλλαγής από την τυπική αντίσταση της μόνωσης του αγωγού[14].

Σε μία γραμμή μεταφοράς, τα σφάλματα μπορεί να επηρεάσουν ταυτόχρονα και τις τρεις φάσεις του δικτύου, τότε χαρακτηρίζονται ως συμμετρικά σφάλματα. Τα συμμετρικά σφάλματα τα συναντάμε συνήθως στα εξωτερικά μέρη του δικτύου μεταφοράς, συμβαίνει σπάνια και η ανάλυση του σφάλματος είναι σχετικά εύκολη. Εάν μόνο μερικές φάσεις επηρεάζονται, αυτού του είδους τα σφάλματα χαρακτηρίζονται ως ασύμμετρα σφάλματα. Σε αντίθεση με τα συμμετρικά, τα ασύμμετρα σφάλματα είναι συχνότερα αλλά έχουν δυσκολότερο τρόπο ανάλυσης καθώς χάνεται η συμμετρία των φάσεων. Από τα παραπάνω σφάλματα στις γραμμές μεταφοράς , μόνο το 5% είναι συμμετρικά, δηλαδή επηρεάζουν και τις τρεις φάσεις με τον ίδιο τρόπο, τα περισσότερα σφάλματα είναι ασύμμετρα [10] [11].

<b>Shunt fault</b>	<b>Balanced faults</b>	Three phases direct (L-L-L) fault Three phases to earth (L-L-L-E) fault
	<b>Unbalanced faults</b>	Single phase to earth (L-E) fault Double phases to earth (L-L-E) fault Phase to phase (L-L) fault
<b>Series fault</b>	Single phase open Double phase open	

Εικόνα 1.8 Είδη σφαλμάτων [15]

### 1.2.3 Αιτίες σφαλμάτων και βλαβών καλωδίων

Οι αιτίες που προκαλούνται σφάλματα και βλάβες σε καλώδια ισχύος οφείλονται σε πολλούς λόγους και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες. Ακολουθεί ανάλυση των κυριότερων αιτιών σφαλμάτων και βλαβών σε καλώδια ισχύος.

#### 1.2.3.1 Μηχανικές Βλάβες

Αυτή είναι ίσως η πιο διαδεδομένη αιτία αστοχίας ενός καλωδίου και μπορεί να οδηγήσει σε άμεση καταστροφή του καλωδίου, ή μήνες βλάβης, ή ακόμα και χρόνια, μετά τη ζημιά, εάν αυτή δεν είναι τόσο σοβαρή. Οι μηχανικές βλάβες οφείλονται συχνά σε ένα χτύπημα ή ένα κόψιμο όταν έχουν πραγματοποιηθεί εργασίες ανασκαφής κοντά στη διαδρομή του καλωδίου ή σε υπόγεια φρεάτια, ή σε τραυματισμό του καλωδίου ενώ βρίσκεται τυλιγμένο (πριν τη διαδικασία της εγκατάστασης) ή σε κακή διαχείριση στο σημείο της εκσκαφής. Είναι σημαντικό επομένως να ληφθούν οι απαραίτητες προφυλάξεις ώστε οι πιθανότητες για άμεση ή έμμεση μηχανική βλάβη να ελαχιστοποιούνται με την σωστή επιλογή, εγκατάσταση και συντήρηση των καλωδιακών συστημάτων. Αυτές οι παρατηρήσεις ισχύουν ιδιαίτερα για τα υπόγεια και εμποτισμένα καλώδια. Όταν ένα καλώδιο είναι εκτεθειμένο (εναέριο), συνήθως υπόκειται σε άλλες μορφές ζημιών, όπως φωτιά, σαμποτάζ κ.λπ. [16] [17].

#### 1.2.3.2 Διάβρωση του μανδύα



**Εικόνα 1.9** Διάβρωση του μανδύα σε καλώδιο Μ.Τ [18]

Η διάβρωση του εξωτερικού μανδύα μπορεί να οφείλεται είτε σε χημική είτε σε ηλεκτρολυτική δράση, ή σε συνδυασμό και των δύο. Το πρώτο εξαρτάται από τη φύση του εδάφους στο οποίο είναι τοποθετημένο το καλώδιο, και αυτό διαφέρει κατά τόπους. Σε ορισμένα μέρη, όπου το έδαφος είναι γενικά καλό από αυτή την άποψη, η διάβρωση προκαλείται από την τοποθέτηση του καλωδίου σε έδαφος μολυσμένο από απόβλητα χημικά ή οργανικά απορρίμματα. Η ηλεκτρολυτική διάβρωση προκαλείται από παρασιτικά ρεύματα στον εξωτερικό μανδύα των καλωδίων, τα οποία οφείλονται συχνά σε ρεύματα επιστροφής από ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα.

Η διάβρωση του εξωτερικού μανδύα του καλωδίου θα εισάγει υγρασία στο στρώμα της μόνωσης, ενισχύοντας τη πιθανότητα αστοχίας ή βλάβης του. Η διάβρωση του μανδύα μπορεί να αποτραπεί με την εφαρμογή καθοδικής προστασίας(ειδικό προστατευτικό φινίρισμα), δηλαδή εφαρμογή μονωτικών χρωμάτων, που παρέχουν ταυτόχρονα επαρκή αποστράγγιση, απομακρύνοντας με αυτό τον τρόπο τη πηγή της χημικής μόλυνσης [16] [17].

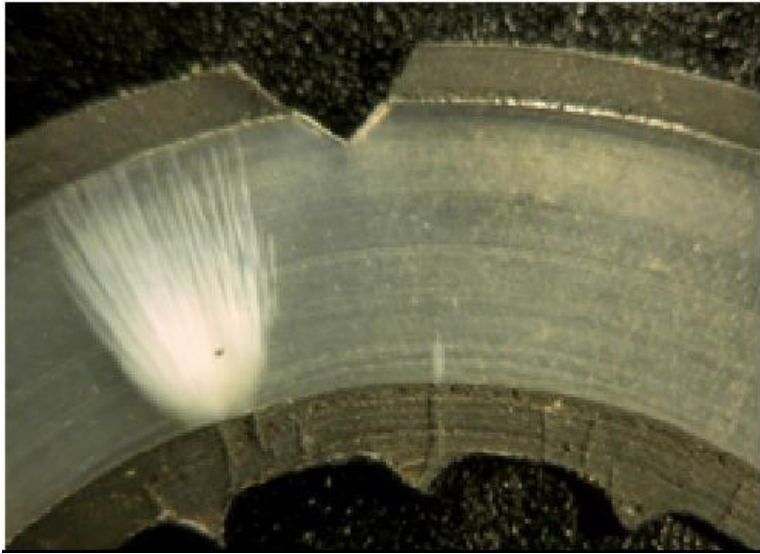
### 1.2.3.3 Γήρανση

Η καταπόνηση της μόνωσης είναι ένα αναπόφευκτο φαινόμενο στα υπόγεια καλώδια, ενώ σε πολλές περιπτώσεις οδηγεί στη καταστροφή της. Η γήρανση προκαλείται από απλή ή ταυτόχρονη δράση διαφόρων παράγοντες γήρανσης, δηλαδή θερμικούς, ηλεκτρικούς, μηχανικούς και περιβαλλοντικούς. Οι επίμονοι παράγοντες γήρανσης προκαλούν αστοχία στη μόνωση του καλωδίου μέσω μιας σειράς μηχανισμών που συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Η ενεργοποίηση των παραγόντων γήρανσης είτε μεταβάλλει τις κυριότερες ιδιότητες των μονωτικών υλικών που αναφέρονται ως ενδογενής γήρανση είτε προκαλεί υποβάθμιση γνωστή ως εξωγενής γήρανση, η οποία είναι αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης των αναφερθέντων παραγόντων γήρανσης του πίνακα . Η υποβάθμιση είναι αποτέλεσμα της παρουσίας κηλίδων, ελαττωμάτων, κενών και προεξοχών στο υλικό της μόνωσης και την συσχέτιση τους με διαφόρους παράγοντες γήρανσης [19].

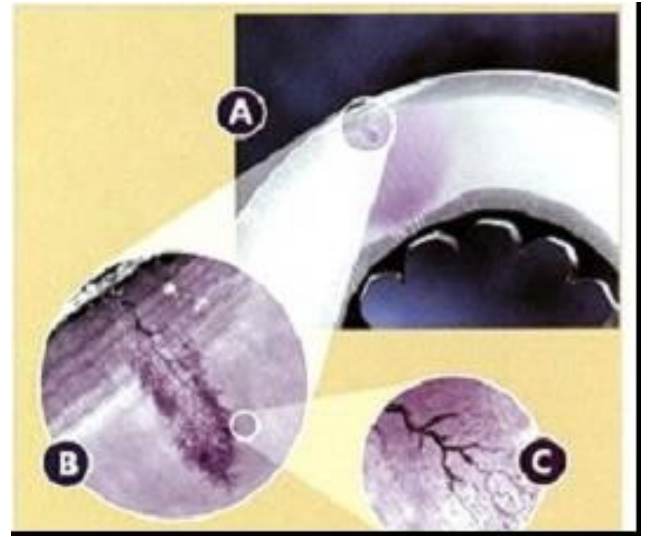
Πίνακας 1 Περίληψη των παραγόντων γήρανσης στα καλώδια [19]

Παράγοντες Γήρανσης		Μηχανισμοί Γήρανσης
Θερμικοί	Υψηλή Θερμοκρασία	Διάχυση
		Χημική αντίδραση
		Τήξη Μόνωσης
		Θερμική Διαστολή
	Χαμηλή Θερμοκρασία	Ράγισμα
		Θερμική συστολή
Ηλεκτρικοί	Τάση Σ.Ρ,Ε.Ρ, Κρουστική Τάση	Μερικές εκφορτίσεις
		Ηλεκτρικοί δενδρίτες
		Υδάτινοι δενδρίτες
		Εγγενής διακοπή
		Διηλεκτρικές απώλειες και χωρητικότητα
	Ρεύμα	Υπερθέρμανση
Μηχανικοί	Κραδασμοί, καταπόνηση, συμπίεση	Υποχώρηση των υλικών
		Ράγισμα
		Ρήξη
Περιβαλλοντικοί	Νερό, υγρασία, μόλυνση, υγρά, αέρια	Υδάτινοι δενδρίτες
		Διάβρωση
		Διηλεκτρικές απώλειες και χωρητικότητα
	Ραδιενέργεια	Αύξηση του ρυθμού χημικής αντίδρασης

### Α)Υδάτινοι δενδρίτες



α)



β)

**Εικόνα 1.10 α)** Παράδειγμα πορώδους δομής στη μόνωση ενός καλωδίου (που υποδεικνύεται από το λευκό βέλος) με ένα μεγάλο υδάτινο δενδρίτη που αναπτύσσεται μόνωση του αγωγού σε ένα καλώδιο XLPE μέσης τάσης μετά τη θέρμανση. Σημειώστε ότι δεν αναπτύσσονται υδάτινοι δενδρίτες από τις ρωγμές / κατασκευές που προκαλούν ασυνέχεια σε ένα αγωγό.

**β)** Μικρογραφία ενός υδάτινου δενδρίτη σε μόνωση από πολυαιθυλένιο(PE) [54]

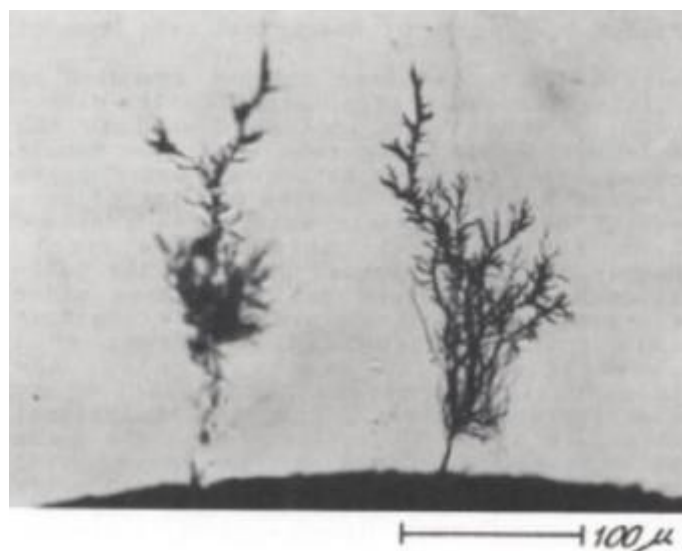
Είναι γνωστό από τεχνικής άποψης ότι, μετά από χρόνια παραμονή σε ένα γεμάτο υγρασία περιβάλλον, μπορεί να δημιουργηθούν υδάτινοι δενδρίτες στη μόνωση των καλωδίων, αλλά για ορισμένους λόγους καλώδια με την ίδια κατασκευή δομή που υπόκεινται στο ίδιο φορτίο και περιβαλλοντικές συνθήκες, μπορεί να συμπεριφέρονται διαφορετικά όσον αφορά την συχνότητα εμφάνισης υδάτινων δενδριτών, ακόμη και η μορφή των υδάτινων δενδριτών ίσως διαφέρει από καλώδιο σε καλώδιο.

Οι υδάτινοι δενδρίτες σε καλώδια χαρακτηρίζονται από μόνιμου χαρακτήρα, τοπικές αλλαγές της μορφολογίας της μόνωσης, πιθανώς σχετιζόμενες με χημικές μεταβολές, αλλά σε κάθε περίπτωση με τοπικά ιζήματα υγρού νερού. Η επικινδυνότητα των υδάτινων δενδριτών συνίσταται στο γεγονός ότι αυτά τα ιζήματα επηρεάζουν τις μονωτικές(διηλεκτρικές) ιδιότητες του πολυμερούς. Υπό συνθήκες συντήρησης, η πυκνότητα του ηλεκτρικού πεδίου γειτονικά των υδάτινων δενδριτών αλλάζει και λόγω των ρευμάτων μετατόπισης ή της κίνησης

των φορέων ηλεκτρισμού εντός των υδάτινων δενδριτών, ενώ ενδέχεται να προκύψει τοπική θέρμανση και ειδικά στην περίπτωση υπερτάσεων οι υδάτινοι δενδρίτες μπορεί να οδηγήσουν σε βλάβη του καλωδίου.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι, η ανάπτυξη υδάτινων δέντρων, προϋποθέτει ύπαρξη ηλεκτρικού πεδίου, υγρασίας και συγκεκριμένων σημείων ενεργοποίησης. Στο πλαίσιο αυτό, εκτός από τους ρύπους στη μόνωση που δημιουργούν δενδρίτες σε σχήμα παπιγιόν(bow-tie trees), καθοριστικό ρόλο παίζουν ξένες προσμίξεις ή ιόντα στη δημιουργία υδάτινων δενδριτών. Από αυτά τα ευρήματα και την πειραματικά επαληθευμένη επίδραση των σωματιδίων αλατιού στη δημιουργία δενδριτών σε σχήμα παπιγιόν, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι τα ιόντα, ειδικότερα, μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία δημιουργίας υδάτινων δενδριτών στη μόνωση [20].

#### *B) Ηλεκτρικοί δενδρίτες*



**Εικόνα 1.11** Ηλεκτρικοί δενδρίτες που αναπτύσσονται από ελαττώματα ενίσχυσης πεδίου στη διασύνδεση ημιαγώγιμου στρώματος και μόνωσης σε καλώδιο με μόνωση από πολυαιθυλένιο. Με την πρόοδο στην παραγωγή καλωδίων, σπάνια παρατηρείται αυτός ο τύπος δενδριτών [21].

Οι ηλεκτρικοί δενδρίτες μπορούν να σχηματιστούν από διαβρωμένες επιφάνειες κατά τη διάρκεια μιας ηλεκτρικής εκκένωσης και επίσης σε καταπονημένες επιφάνειες χωρίς ηλεκτρικές εκκενώσεις. Για τις τελευταίες,



υπάρχουν δύο φάσεις ανάπτυξης ηλεκτρικών δενδριτών: Μία αρχική περίοδος – κατά την οποία η κίνηση του ηλεκτρικού φορτίου ανά μισό κύκλο της εφαρμοζόμενης τάσης οδηγεί σε σταδιακή επιδείνωση του πολυμερούς με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ενός μικρού κενού · και μία περίοδος αύξησης που προκύπτει από την επέκταση του αρχικού κενού οδηγώντας στον σχηματισμό ενός δενδροειδούς δικτύου από κλάδους εξαιτίας της ηλεκτρικής εκκένωσης μεταξύ αυτών. Είναι ευρέως γνωστό ότι κατά τη διάρκεια μίας ηλεκτρικής εκκένωσης η πίεση που δέχεται η αιχμή από την τάση εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εκκένωσης παρά από το σχήμα του ηλεκτροδίου από το οποίο αυτή προκλήθηκε. Επομένως, εφόσον έχει σχηματιστεί ένα ηλεκτρικό δενδρίτη η ανάπτυξή του δεν εξαρτάται από το εάν προκλήθηκε από μία ακίδα ή από άλλη ατέλεια στο σύστημα μόνωσης του καλωδίου [22] [23].

Ένας ηλεκτρικός δενδρίτης που είναι περιχαρακωμένος μέσα στη μόνωση (που εμφανίζεται με τη μορφή μίας βελόνας ή με τη μορφή ενός ρύπου) συχνά διαδίδεται με διακοπές. Αυτές οι διακοπές θα προκαλέσουν αύξηση του χρόνου διάδοσης του. Μερικές εκκενώσεις μπορούν να αναπτύξουν μεγάλες πιέσεις εντός των καναλιών των δενδριτών, η οποία με τη σειρά της μπορεί να ανακόψει τις εκκενώσεις για κάποιο χρονικό διάστημα (λεπτά έως ώρες). Οι εκκενώσεις επανεμφανίζονται αφού τα αέρια διαχέονται από τα κανάλια των δενδριτών στη μόνωση. Αυτό το φαινόμενο πίεσης μπορεί να αυξήσει την χρόνο διάδοσης του δέντρου από 16 λεπτά(εικόνα) σε ώρες ή ακόμη και ημέρες. Από άποψη λειτουργίας του καλωδίου, η χρονική διάρκεια του διαστήματος διάδοσης, είτε λεπτά είναι είτε και ημέρες, είναι ουσιαστικά άνευ σημασίας. Η κρίσιμη χρονική περίοδος καθορισμού της διάρκειας ζωής του καλωδίου είναι ο χρόνος έναρξης σχηματισμού των δενδριτών. Στη δοκιμή ακίδας, ο χρόνος αυτός μειώνεται σημαντικά (αρκετές τάξεις μεγέθους) από την υψηλή αναλογία της εφαρμοζόμενης τάσης σε σχέση με τη πραγματική που εμφανίζεται στο άκρο της βελόνας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του χρόνου έναρξης του δέντρου μέσω δοκιμών βελόνας είναι πολύ ασυνεπή επειδή η μόνωση δεν είναι ομοιογενής και μόνο μία μικρή αναλογία τάσης στην άκρη μιας βελόνας

εμπλέκεται σε κάθε μία δοκιμή. Είναι επίσης εξαιρετικά δύσκολο να διατηρηθεί το ίδιο επίπεδο μερικής εκφόρτισης σε επόμενες δοκιμές ακίδας που είναι απαραίτητο για την αναπαραγωγή επαναλαμβανόμενων αποτελεσμάτων. Κατά την αξιολόγηση των δοκιμών με ακίδες, η έννοια της διάδοσης των δενδριτών χρησιμοποιείται συνήθως για την εκτίμηση του συνολικού χρόνου έναρξης των δένδριτών συν του χρόνου διάδοσης τους. Ωστόσο, επειδή δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της έναρξης και της διάδοσης τους, η δοκιμή ακίδας έχει αμφίβολη αξία ως μέθοδος πιστοποίησης μόνωσης. Η δοκιμή ακίδας, ωστόσο, αποτελεί πολύτιμο εργαλείο για τη μελέτη του μηχανισμού εκκενώσεων σε ηλεκτρικούς δενδρίτες [23].

Έτσι, οι μερικές εκκενώσεις στους ηλεκτρικούς δενδρίτες είναι ένας κρίσιμος παράγοντας γήρανσης των καταπονημένων συστημάτων μόνωσης. Γνώση της συμπεριφοράς τους σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, με δεδομένες ορισμένες ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις, μπορούν να επιτρέψουν στους χρήστες να κάνουν καλύτερη εκτίμηση της κατάστασης των καλωδιακών τους συστημάτων [22].

#### 1.2.3.4 Αστοχία Μόνωσης Καλωδίου

##### **A. Εξαιτίας κατασκευής και κακής λειτουργίας**

Ένα καλώδιο, που λειτουργεί με την καθορισμένη τάση και ρεύμα για τα οποία κατασκευάστηκε, έχει σχεδόν απεριόριστο χρόνο ζωής, αλλά κακής κατασκευής ή υπερφορτισμένα καλώδια, ενδέχεται να υποστούν βλάβη, λόγω αστοχίας της μόνωσης. Όταν βλαφθεί η ακεραιότητα της μόνωσης, για διάφορους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί, μπορεί να αποτύχει ηλεκτρικά. Κατά συνέπεια, το στρώμα της μόνωσης αδυνατεί να συγκρατήσει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στον αγωγό. Αυτά τα σφάλματα μπορεί να έχουν τη μορφή φάσης-προς-γη ή φάσης-προς-φάση και μερικές φορές δεν υπάρχουν εξωτερικές ενδείξεις στο σημείο της βλάβης. Ορισμένες αστοχίες που είναι δύσκολο να ανιχνευτούν είναι οι εξής:

- 1) Διόγκωση του μανδύα.
- 2) Έλλειψη ή κενό στο στρώμα της μόνωσης [16] [17].

### **B. Εξαιτίας υγρασίας**

Η είσοδος υγρασίας στο στρώμα της μόνωσης έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή του καλωδίου, ενώ μπορεί να οφείλεται σε μηχανική βλάβη του καλωδίου ή σε φθορά από κάποιο απρόσεκτο εργάτη ή άλλο λόγο. Οι κυριότερες ενδείξεις που υποδεικνύουν την ύπαρξη βλάβης εξαιτίας υγρασίας είναι οι παρακάτω:

- 1) Ξεθωριασμένο ή εμποτισμένο με νερό χαρτί, σε περίπτωση που χρησιμοποιείται μόνωση χαρτιού.
- 2) Δυσκολία στην αφαίρεση των ταινιών των ημιαγώγιμων στρωμάτων.
- 3) Κηλίδες ή λεκέδες στην εσωτερική επιφάνεια του μανδύα.
- 4) Ύπαρξη νερού.
- 5) Ύπαρξη σκόνης στην επιφάνεια του αγωγού [16].

#### 1.2.3.5 Αστοχία συνδέσμων(ματίσεων)



**Εικόνα 1.12** Αστοχία σε μια εγκατεστημένη μάτιση δύο καλωδίων. [24]

Η αστοχία στις ενώσεις των καλωδίων προκαλείται συχνά από τη "μετανάστευση" της παχύρευστου γράσου ή αλλού λιπαντικού από τη μάτιση στο καλώδιο, λόγω της διαστολής του εξωτερικού μανδύα στο φορτίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μερικής εκκένωσης, κατά την οποία εμφανίζεται

μια στιγμιαία εκτόνωση από τον αγωγό στο περίβλημα του [17]. Αυτό μπορεί να υποδειχθεί από τα ακόλουθα:

1. Ορατή αλλαγή στην λιπαντικό υλικό
2. Δημιουργία στρώσης κεριού, σε περίπτωση ορυκτελαίου [16]

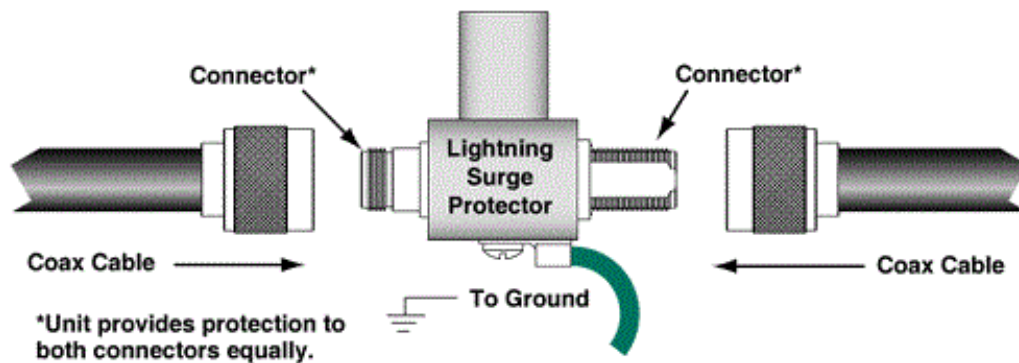
Η παρουσία ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μόνωσης, λόγω του κακού ελέγχου της ηλεκτρικής καταπόνησης, είναι μια άλλη αστοχία των ματίσεων και εντοπίζεται μόνο σε παλιά δίκτυα τροφοδοσίας υψηλής τάσης [17].

#### 1.2.3.6 Θέρμανση Καλωδίων

Είναι γνωστό ότι η μεγάλη θερμική καταπόνηση του καλωδίου μπορεί να οδηγήσει σε υποβιβασμό ή αστοχία της μόνωσης του. Το αυξημένο θερμικό φορτίο στο εσωτερικό του καλωδίου, μπορεί να οφείλεται σε υπερφόρτιση του, σε υψηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος, ανεπαρκή εξαερισμό, μαγνητική επαγωγή των γειτονικών αγωγών, ή από άλλες εξωτερικές πηγές θερμότητας. Η προστασία της μόνωσης του καλωδίου από θερμική καταπόνηση είναι αντικείμενο μελέτης.

Η προστασία της μόνωσης του καλωδίου γίνεται με την αναγνώριση των περιβαλλοντικών και λειτουργικών παραγόντων, οι οποίοι θα καθορίσουν τη σωστή επιλογή της μόνωσης του καλωδίου και του μέγεθος του αγωγού. Η ακεραιότητα και η μεγάλη διάρκεια ζωής του καλωδίου εξασφαλίζεται με τακτική συντήρηση και επιθεώρηση του, αφού προηγουμένως επιλέγουν η κατάλληλη μόνωση και στρώματα προστασίας [16].

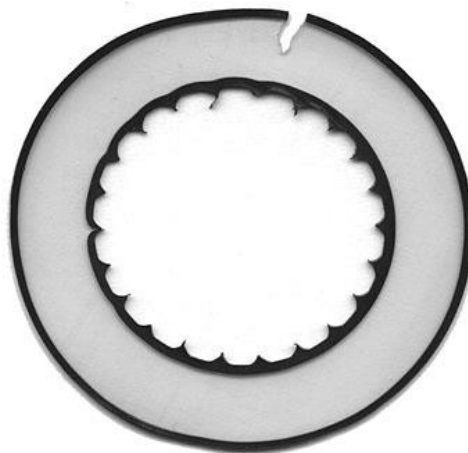
### 1.2.3.7 Υπερτάσεις λόγω κεραυνών



**Εικόνα 1.13** Αλεξικέραυνο για τη προστασία καλωδίων [31]

Για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης σφαλμάτων και βλαβών που οφείλονται στις υπερτάσεις που προκαλούνται από κεραυνούς, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση αλεξικέραυνων, για προστασία, στο σημείο που τα συνδέονται με τις εναέριες γραμμές [16]

### 1.2.3.8 Δόνηση



**Εικόνα 1.14** Αστοχία καλωδίου λόγω δονήσεων [56]

Το αποτέλεσμα της συνεχούς δόνησης είναι η δημιουργία μιας διαυγούς ρωγμής στην επιφάνεια του εξωτερικού μανδύα ενός καλωδίου, με αποτέλεσμα υγρασία να διεισδύσει στη μόνωση του καλωδίου και τελικά να προκαλέσει βλάβη. Ο

εξωτερικός μανδύας του καλωδίου είναι ευαίσθητος σε βλάβες που προκαλούνται από δονήσεις. Σε μέρη όπου συμβαίνουν σοβαρές δονήσεις, καλώδια με ταινία αλουμινίου κάτω από τον εξωτερικό μανδύα έχουν αποτελεσματικά υπό συνθήκες έντονης δόνησης [17].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΟΥΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΛΩΔΙΑ

#### 2. Κατηγοριοποίηση των μεθόδων ανίχνευσης σφαλμάτων

Όλα αυτά τα χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι ανίχνευσης σφαλμάτων από σχετικές μελέτες, κατασκευάστριες εταιρίες ανάλογου εξοπλισμού, workshops, και ειδικούς του χώρου [13]. Πολλές από αυτές έχουν εξελιχθεί ενώ έχουν προκύψει και άλλες καινούργιες μέθοδοι [13]. Οι βασικότερες από αυτές συνοψίζονται στο παρόν κεφάλαιο, όπου αναλύεται η διαδικασία εφαρμογής τους και η διαφορετική προσέγγιση που ακολουθεί η κάθε μέθοδος [13]. Οι μέθοδοι για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε καλώδια μπορεί να χωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες:

1. **Τεχνικές ακροδεκτών**(Terminal Techniques) Οι τεχνικές ακροδεκτών εφαρμόζονται στο ένα ή και τα δύο άκρα του καλωδίου, όπου και λαμβάνουν μετρήσεις. Γενικά, είναι περισσότερο χρήσιμες στο προεντοπισμό σφαλμάτων καθώς δεν υποδεικνύουν με ακρίβεια τη θέση σφάλματος [3] [13]
2. **Τεχνικές ανίχνευσης**(Tracer Techniques) Η ανίχνευση σφαλμάτων με χρήση τεχνικών ακροδεκτών απαιτεί κίνηση κατά μήκος της διαδρομής για τον εντοπισμό ενός ηχητικού ή ηλεκτρομαγνητικού σήματος. Αυτές οι μέθοδοι είναι πιο χρήσιμες για τον ακριβή εντοπισμό της θέσης σφάλματος μετά τον κατά προσέγγιση προσδιορισμό της θέσης του σφάλματος. Γενικά, για την εφαρμογή μεθόδων ανίχνευσης απαιτούνται δύο άτομα. Ένας για το χειρισμό της πηγής παραγωγής σήματος και ένας άλλος για να κινηθεί κατά μήκος της διαδρομής του καλωδίου. Για να ανιχνευθεί το σήμα ιχνηλάτισης κατά μήκος της διαδρομής του καλωδίου, ένας τεχνικός πεδίου πρέπει να ακολουθήσει το καλώδιο κατά μήκος της διαδρομής του ή να εισέλθει στις φρεάτια ώστε να αποκτήσει πρόσβαση στο καλώδιο [13].

Ορισμένες τεχνικές ανίχνευσης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν εντοπίσουν το καλώδιο ή τη διαδρομή του [13]. Συνήθως, οι τεχνικές ακροδεκτών προηγούνται των τεχνικών ανίχνευσης στη διαδικασία εντοπισμού ενός σφάλματος. Η γνώση της διαδρομής του καλωδίου είναι σημαντική δεδομένου ότι πολλές από τις τεχνικές ανίχνευσης παράγουν σήματα που μπορούν ανιχνευτούν μόνο σε περιορισμένο εύρος του καλωδίου [13]. Μεγάλες αποκλίσεις του χειριστή της διάταξης ανίχνευσης από τη διαδρομή του καλωδίου κατά την εφαρμογή μεθόδων ανίχνευσης μπορεί να καταστήσει την ανίχνευση του σφάλματος δύσκολη [13].

## 2.1 Τεχνικές ακροδεκτών

Οι τεχνικές ακροδεκτών, αφού πραγματοποιήσουν μέτρηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του ελλαττωματικού αγωγού από έναν ακροδέκτη του, συγκρίνουν τα χαρακτηριστικά του ελλαττωματικού αγωγού με αυτά ενός υγιούς αγωγού, οπότε εξακριβώνεται το σημείο που υπάρχει βλάβη. Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από το ιστορικό των μετρήσεων σε υγιείς αγωγούς. Οι πιο συνήθεις τεχνικές ακροδεκτών που χρησιμοποιούνται είναι **η μέθοδος γέφυρας, ραντάρ, και η μέθοδος συντονισμού [3]**.

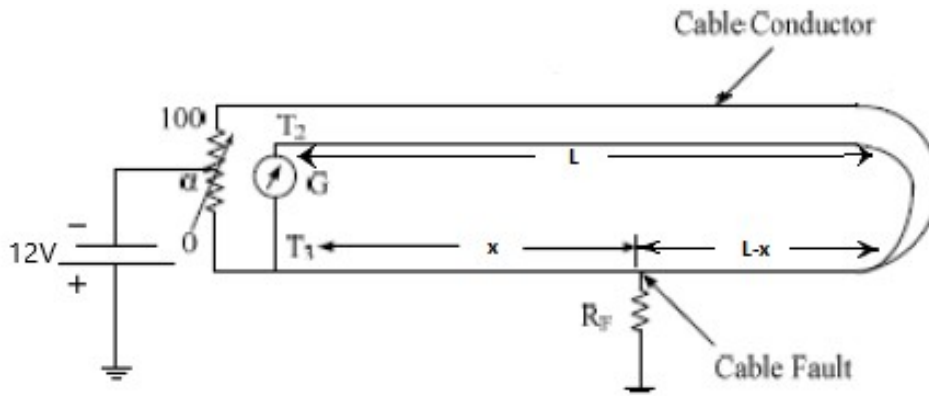
### 2.1.1 Μέθοδος Γέφυρας(Murray Loop)

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για το εντοπισμό των παρακάτω σφαλμάτων:

- Σφάλματα χαμηλής αντίστασης προς γή( Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Φάση και Γη) για ακαμπτα καλώδια με μεταλλικό μανδύα
- Σφάλματα Υψηλής αντίστασης προς γή(Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Φάση και Γη) για ακαμπτα καλώδια με μεταλλικό μανδύα
- Σφάλματα μεταξύ φάσεων των αγωγών σε καλώδια χαμηλής τάσης χωρίς μεταλλικό μανδύα [13].

Η μέθοδος αυτή εφευρέθηκε πριν 100 χρόνια και με διάφορες τροποποιήσεις μπορεί να καλύψει ένα ευρύ φάσμα βλαβών. Ο εντοπισμός σφαλμάτων δύναται να πραγματοποιηθεί με τη χρήση διαφόρων τύπων γέφυρας. Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος γέφυρας είναι ο βρόχος Murray(Murray Loop). Κατασκευαστικά αποτελείται από δύο κλάδους, ενός υγιούς αγωγού και του αγωγού που φέρει τη βλάβη. Ο υγιής και ελλατωματικός αγωγός συνδέονται μεταξύ τους στο ένα άκρο, και μια μεταβλητή αντίσταση, με δύο set αντιστάσεων, συνδέονται κατά μήκος των βρόχων που σχηματίζουν τα καλώδια στο άκρο δοκιμής όπως φαίνονται στην **Εικόνα 2.1**. Ένα γαλβανόμετρο είναι επίσης συνδεδεμένο κατά μήκος του βρόχου, ενώ η πηγή συνεχούς τάσης είναι συνδεδεμένη μεταξύ του κεντρικού κόμβου και της γης. Η ισορροπία επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας το ποτενσιόμετρο της μεταβλητής αντίστασης [3] [17].





**Εικόνα 2.1** Σχηματική αναπαράσταση του βρόχου Murray (Murray Loop) [25]

Η αρχή ισορροπίας είναι η εξής:

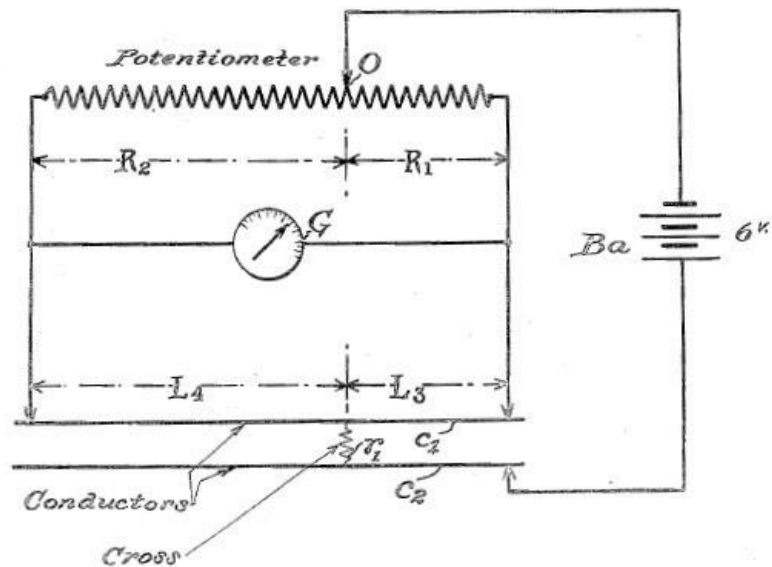
$$\frac{R_{0-\alpha}}{R_{\alpha-100}} = \frac{R_x}{R_{2l-x}} \Rightarrow x = 2l \left( \frac{R_{0-\alpha}}{R_{0-\alpha} + R_{\alpha-100}} \right)$$

, όπου το μήκος του καλωδίου που συμβαίνει το σφάλμα είναι ανάλογο της αντίστασης των κλάδων γέφυρας

Η τάση της πηγής ΣΡ εξαρτάται από την αντίσταση του σφάλματος. Μια συμβατική μπαταρία με περιορισμό στην ισχύ τροφοδοσίας (στα 1kΩ αντίσταση σφάλματος) είναι ικανή να χρησιμοποιηθεί, αλλά εάν απαιτείται παροχή υψηλότερης τάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια συμβατική γεννήτρια δοκιμής μόνωσης. Όπου η αντίσταση σφάλματος παραμένει πολύ υψηλή, είναι απαραίτητη η τροφοδοσία της γέφυρας από έναν ανορθωτή τάσης. Με αυτόν τον τύπο γέφυρας, σφάλματα της τάξης των μερικών mA, σε καλώδια της τάξης των 20kV ή παραπάνω, μπορούν να ανιχνευτούν [17].

Στο κλάδο του καλωδίου, ο βρόχος που περιλαμβάνει τον υγιή αγωγό διαρρέεται από μικρότερη ποσότητα ρεύματος σε σχέση με το βρόχο του ελαττωματικού καλωδίου οπότε το γαλβανόμετρο συνδέεται παράλληλα του κλάδου αντιστάθμισης, εισάγοντας στη γέφυρα μικρότερη παρασιτική αντίσταση [17].

Ένας εντοπισμός στο ένα άκρο ή στο άλλο της διαδρομής χρειάζεται προσεκτικό έλεγχο πριν γίνει αποδεκτός ως σωστός, όταν οι εκτός βρόχου αγωγοί υποδεικνύουν ένα σφάλμα στο πιο απομακρυσμένο άκρο, ενώ μία λανθασμένη γείωση σε κάποιο σημείο του βρόχου θα δώσει ένα προφανές σφάλμα σε αυτή τη θέση [17].



**Εικόνα 1.2** Σχηματική αναπαράσταση της θέσης σφάλματος μεταξύ αγωγών ενός καλωδίου [26]

Ο εντοπισμός της θέσης σφάλματος επαφής μεταξύ αγωγών (μεταξύ φάσεων ή φάσης και γη) ενός καλωδίου, πραγματοποιείται με την εφαρμογή μιας τάσης Σ.Ρ στη γέφυρα Wheatstone, έτσι ώστε οι επαγωγικές και χωρητικές αντιδράσεις των στοιχείων της διάταξης να μηδενιστούν και οι μετρήσεις να εξαρτώνται από τις ωμικές αντιστάσεις. Το σχήμα δείχνει δύο αγωγούς  $C_1$ ,  $C_2$  ενός καλωδίου που παρουσιάζει σφάλμα μεταξύ δυο φάσεων, όπως υποδεικνύεται από την αντίσταση σύνδεσης  $r_1$ . Το ποτενσιόμετρο και το γαλβανόμετρο συνδέονται στα άκρα ενός εκ των δύο αγωγών. Το ένα άκρο του άλλου αγωγού συνδέεται με έναν πόλο πηγής συνεχούς ρεύματος  $Ba$ , ενώ ο άλλος πόλος συνδέεται με τη κινούμενη επαφή  $O$  του ποτενσιόμετρου που μεταβάλλει τη τιμή της αντίστασης της γέφυρας Murray [26].

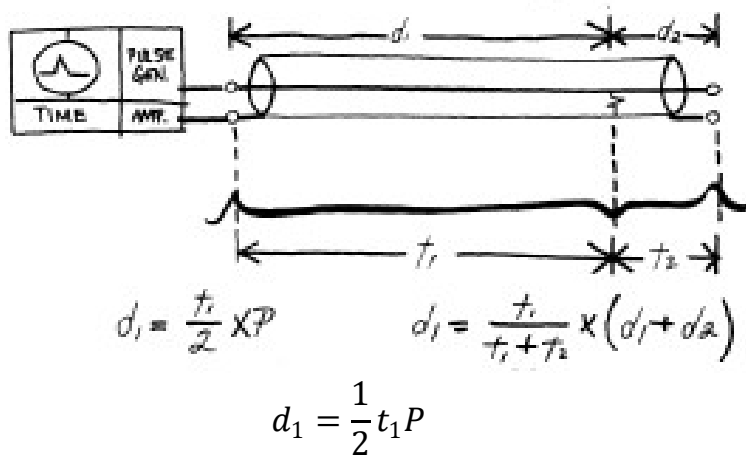
### 2.1.2 Μέθοδος Radar (αντήχησης παλμών) (Pulse Reflection Method)

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για το εντοπισμό των παρακάτω σφαλμάτων:

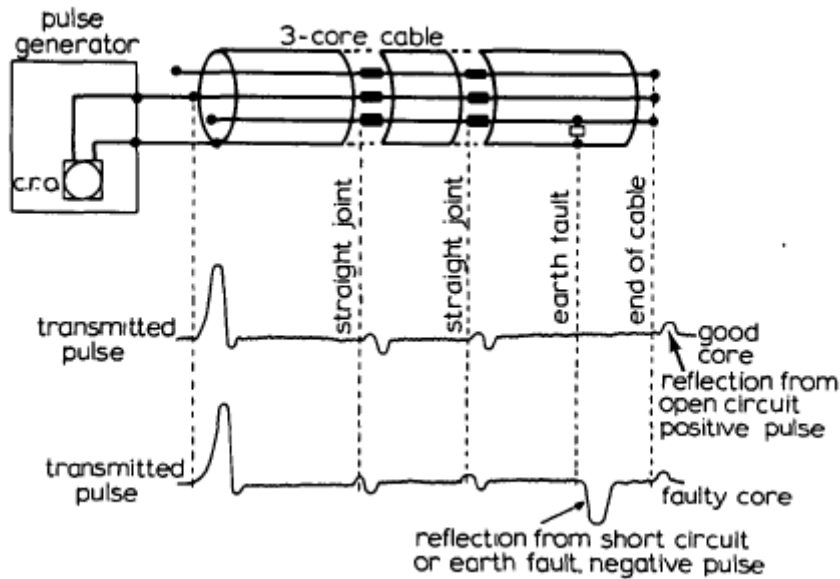
- Σφάλματα ανοικτού κυκλώματος
- Σφάλματα χαμηλής αντίστασης προς γη (Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Φάση και Γη) [27]

Η μέθοδος Radar(ή ανάκλαση παλμού) βασίζεται στην ανάκλαση ενός εγγεόμενου παλμού στη θέση σφάλματος [17]. Ένας d.c. παλμός εγχέεται στο υπό δοκιμή καλώδιο. Ο παλμός ταξιδεύει κατά μήκος του καλωδίου έως ότου εντοπίσει μεταβολή της τιμής της αντίστασης όπως μούφες , κόμβους ή ανοιχτό κύκλωμα ή βραχυκύκλωμα. Η αναντιστοιχία προκαλεί μια αντανάκλαση, η οποία επιστρέφει στο άκρο του καλωδίου και λαμβάνεται από το όργανο δοκιμής [27]. Η απόσταση d του σημείου που έγινε το σφάλμα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

## PULSE REFLECTION TIME (RADAR)



όπου  $t_1$  είναι ο απαιτούμενος χρόνος για να ταξιδέψει ο παλμός και να επιστρέψει πίσω και  $P$  η ταχύτητα διάδοσης του παλμού [14].



**Εικόνα 2.3** Τυπικές κυματομορφές που φαίνονται στην οθόνη ενός παλμογράφου με την εφαρμογή της μεθόδου ανάκλασης παλμών. Στο σχήμα συγκρίνονται οι κυματομορφές ενός υγιούς αγωγού(επάνω) και ενός αγωγού με σφάλμα(κάτω) [27]

Η θέση των αναντιστοιχιών, όπως μούφες ,κόμβοι ,και το πραγματικό σφάλμα, θα εμφανιστούν απευθείας σε σημεία του χρονικού άξονα ανάλογα με το σημείο της βλάβης .Το είδος της βλάβης μπορεί να προσδιοριστεί από το τύπο του ανακλώμενου παλμού, δηλαδή ένας παλμός με φορά προς τα πάνω σημαίνει ότι έχουμε σφάλμα ανοιχτού κυκλώματος, ή ένας παλμός με φορά προς τα κάτω σηματοδοτεί εάν σφάλμα διαρροής προς γη [27].Ένα βραχυκύκλωμα(διαρροή προς γη) θα υποδεικνύεται στην οθόνη με μίας αντίθετης πολικότητας αντίδραση σε σχέση με τον εφαρμοσμένο παλμό. Η απόσταση έως την αναντιστοιχία που προκαλεί εάν σφάλμα, προκύπτει από τη μέτρηση του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί , σε  $\mu s$  , μεταξύ της αποστολής του παλμού και της λήψης της αντανάκλασης του. Οι ταχύτητες διάδοσης ενός παλμού για κάθε τύπο καλωδίου είναι γνωστές , ενώ η απόσταση έως το σφάλμα(σε μέτρα) προκύπτει από το μετρούμενο χρονικό διάστημα και τη γνωστή(διαφορετική για κάθε τύπο καλωδίου) ταχύτητα διάδοσης σε  $m/s^2$  . Επειδή ο παλμός ταξιδεύει έως το σφάλμα και επιστρέφει , είναι βολικό να χρησιμοποιήσουμε τη μισή τιμή της ταχύτητας διάδοσης, δηλαδή  $V / 2$  [27].

Γίνεται χρήση παλμού μικρής διάρκειας και βρίσκει εφαρμογή στον εντοπισμό συγκεκριμένων σφαλμάτων σε μονωμένα καλώδια ισχύος. Η διάρκεια του παλμού είναι μικρή, το duty cycle είναι χαμηλό, οπότε η μέση τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης στο σφάλμα είναι χαμηλή. Ο χρόνος διάδοσης του παλμού μέχρι το σφάλμα είναι πολύ μεγαλύτερος της διάρκειας του εγχεόμενου παλμού. Το κυριότερο πλεονέκτημα της χρήσης παλμού μικρής διάρκειας είναι η δυνατότητα απρόσκοπτης απεικόνισης στην οθόνη του παλμογράφου. Όσο ελκυστική και αν είναι η μέθοδος Radar, έχει περιορισμούς. Σφάλματα

καλωδίων μεταξύ του κεντρικού αγωγού και του μανδύα με τιμές αντίστασης μεγαλύτερες από δέκα φορές τη χαρακτηριστική αντίσταση του καλωδίου(σφάλματα υψηλής αντίστασης) έχουν μικρές ανακλάσεις και δεν μπορούν εύκολα να διακριθούν από τις ανακλάσεις κάποιων άλλων ασυνεχειών του καλωδίου(ματίσεις, συγκολλήσεις, μετασχηματιστές, σφάλματα, αλλαγές στον τύπο καλωδίου, καθώς και το μακρύτερο άκρο του καλωδίου). Σε αυτή τη περίπτωση είναι απαραίτητη η σύγκριση των κυματομορφών ενός υγιούς και ενός ελαττωματικού αγωγού ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα **[3] [13] [28]**.

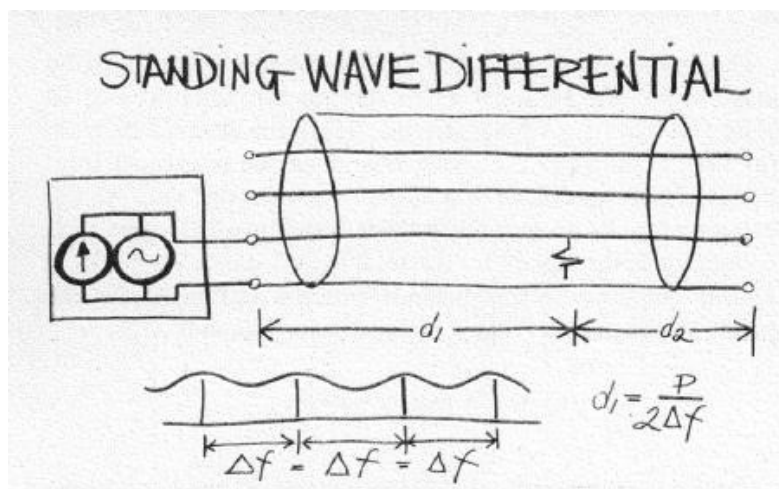
Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε καλώδια μεταφοράς μεγάλου μήκους και είναι επίσης χρήσιμη σε συστήματα διανομής τα οποία δεν έχουν την ίδια διατομή καλωδίου σε όλο το μήκος τους **[17]**.

### 2.1.3 Μέθοδος Συντονισμού (Standing Wave differential Method)

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για το εντοπισμό των παρακάτω σφαλμάτων:

- Σφάλματα ανοικτού κυκλώματος
- Σφάλματα χαμηλής αντίστασης προς γή ( Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Φάση και Γη) [27]

Η μέθοδος συντονισμού βασίζεται στην αρχή της ανάκλασης κυμάτων, ενώ ταυτόχρονα εξαρτάται από το φαινόμενο που εμφανίζεται στις γραμμές μεταφοράς, γνωστό και ως συντονισμός κύματος [3] [27]. Μια πηγή τάσης μεταβλητής συχνότητας τροφοδοτεί το κύκλωμα και η τάση που εφαρμόζει ρυθμίζεται μέχρις ότου να διαμορφωθεί η βασική αρμονική (για την οποία η αντίσταση εισόδου είναι ελάχιστη), και καθοριστεί η δεύτερη αρμονική. Γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης του καλωδίου και τη διαφορά μεταξύ δύο αρμονικών (δηλ. 1 έως 2, 2 έως 3 κ.λπ.), μπορεί να προσδιοριστεί η θέση του σφάλματος [13]. Το μήκος κύματος θα συντονίζεται με μια τάση ημιτονοειδούς μορφής, δηλαδή για μια συχνότητα αναφοράς  $f_1$ , το μήκος κύματος του καλωδίου όπου υπάρχει σφάλμα θα αντιπροσωπεύει μια ποσότητα του μήκους κύματος (πχ  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{3}$  κ.λπ.) [27].



**Εικόνα 2.4** Εφαρμογή της μεθόδου συντονισμού για εντοπισμό σφάλματος διαρροής προς γη [14]

Το διάστημα συχνοτήτων,  $\Delta f$ , μεταξύ διαδοχικών σημείων συντονισμού είναι συνεχές, και το μήκος του καλωδίου όπου εντοπίζεται το σφάλμα δίνεται από το τύπο:

$$l = \frac{u}{N_1 * \Delta f} = \frac{u}{f_r * N}$$

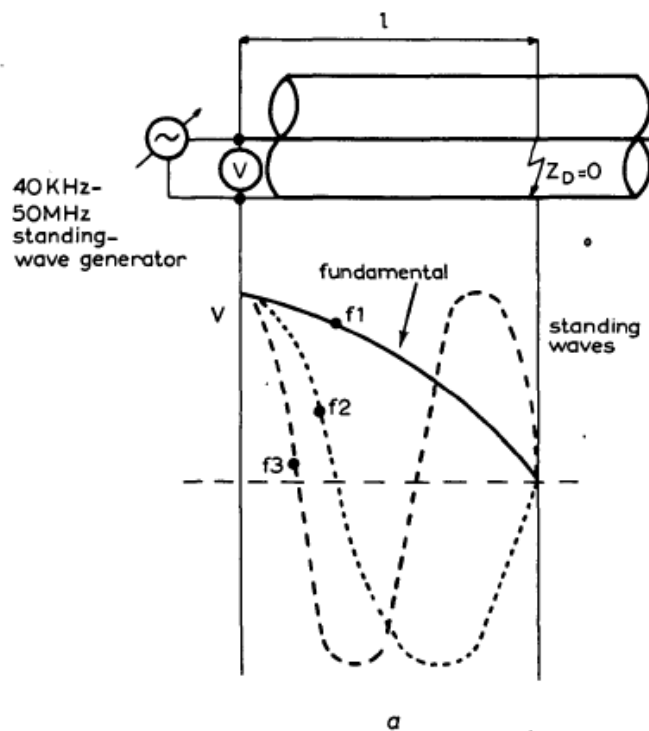
όπου  $u$  η ταχύτητα διάδοσης

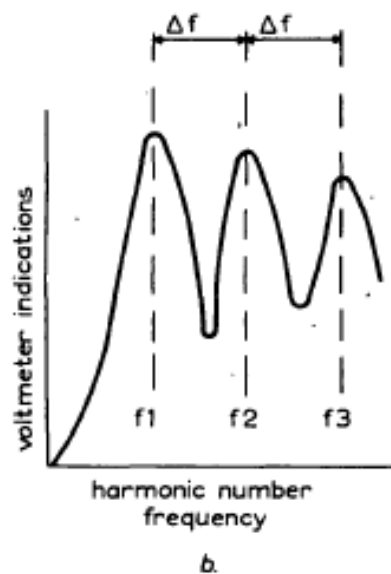
$N_1$  ο αριθμός των υποαρμονικών

$f_r$  η συχνότητα συντονισμού  
(μισού)

$N$  ο αριθμός των κυμάτων (ενός τετάρτου ή

Η ελάχιστη συχνότητα του διαστήματος συχνοτήτων  $\Delta f$ , καθορίζεται από το μήκος του καλωδίου, ενώ η μέγιστη καθορίζεται από την απόσταση του πλησιέστερου σημείου από το σφάλμα [3]. Γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης του καλωδίου και τη διαφορά μεταξύ δύο αρμονικών (δηλ. 1 έως 2, 2 έως 3 κ.λπ.), μπορεί να προσδιοριστεί η θέση του σφάλματος. Σφάλματα χαμηλής αντίστασης προς γη που οφείλονται στη διάβρωση της μόνωσης του καλωδίου εντοπίζονται σε μήκη κύματος της τάξεως του ενός τετάρτου του μήκους κύματος της αρμονικής συχνότητας, ενώ τα ανοικτά σφάλματα εντοπίζονται σε μήκη κύματος ίσα με το μισό της αρμονικής συχνότητας [13].





**Εικόνα 2.5** Αρχή λειτουργίας της μεθόδου συντονισμού κυμάτων α) Στάσιμα κύματα που αναπτύσσονται κατά μήκος ενός καλωδίου με σφάλμα βραχυκυκλώματος σε διάφορες αρμονικές συχνότητες β) Φάσμα διαφόρων αρμονικών συχνοτήτων [27]

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί για οποιοδήποτε είδος σφάλματος. Ωστόσο, η μορφή των κορυφών της κυματομορφής συντονισμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απόκλιση της αντίστασης σφάλματος σε σχέση με την αντίσταση του κύματος. Σε ανοιχτά κυκλώματα έχοντας άπειρη αντίσταση, ή σε βραχυκυκλώματα και διαρροές προς τη γη έχοντας μηδενική αντίσταση σφαλμάτων, οι κορυφές είναι σχετικά έντονες. Δυστυχώς, αυτές οι κορυφές γίνονται λιγότερο έντονες σε αναλογία με οποιαδήποτε αντίσταση που συμβαίνει κατά μήκος της απόστασης του καλωδίου, και οι κορυφές τελικά εξαφανίζονται όταν υπάρχει αντίσταση κατά μήκος του σφάλματος. Επί πλέον η ύπαρξη τυχόν ασυνεχών, όπως ματίσματα, διακλαδώσεις, ή σε σειρά σφάλματα δημιουργούν παρεμβολές που δρουν σκοτεινά και ενδεχομένως να επηρεάσουν τις κορυφές των βλαβών. Τέτοιες ασυνέχειες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για σημεία αναφοράς όπου είναι γνωστές οι τοποθεσίες τους [14].



## 2.2 Τεχνικές ανίχνευσης

Οι τεχνικές ανίχνευσης εκχέουν ένα ηλεκτρικό σήμα(ηλεκτρικό, ακουστικό) στον ελαττωματικό αγωγό στο ένα ή και τα δύο άκρα του, το οποίο ανιχνεύεται με τη βοήθεια κατάλληλων δεκτών σε όλη τη διάρκεια της διαδρομής του καλωδίου(ακολουθώντας κατά μήκος της διαδρομή του καλωδίου). Οι κυριότερες μέθοδοι ανίχνευσης είναι οι εξής [3] [13]:

1. Μέθοδος κρουστικών τάσεων (Impulse Voltage)
2. Δυναμικό γής (Earth gradient)
3. Μέθοδος Radar με εφαρμογή παλμών υψηλής τάσης ή μέθοδος ανάκλασης τόξου (Arc Reflection)
4. Ανίχνευση ρεύματος (Tracing Current)
5. Ακουστική συχνότητα (ανίχνευση τόνου) (Audio Frequency)

### 2.2.1 Μέθοδος Κρουστικών Τάσεων(Impulse Voltage Method)

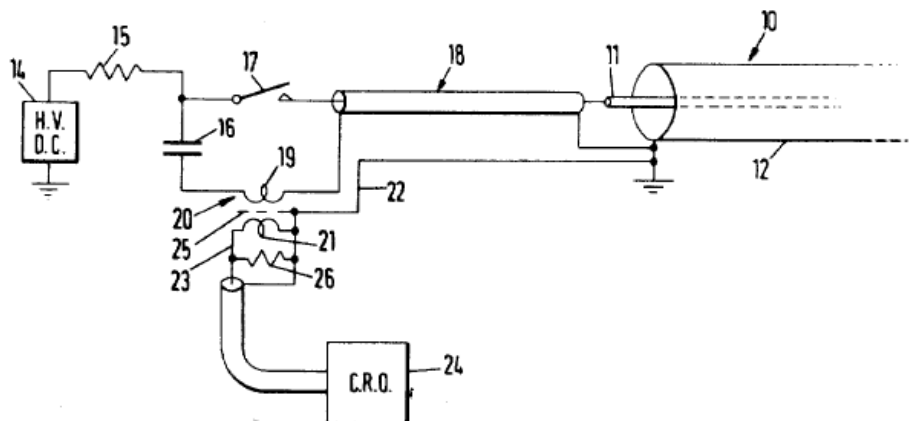
Η συγκεκριμένη μέθοδος διατηρεί όλα τα πλεονεκτήματα της μεθόδου Radar (ανάκλασης παλμού). Στους ακροδέκτες εξόδου μιας γεννήτριας εκκένωσης πυκνωτή συνδέεται παλμογράφος με τη χρήση πυκνωτή ζεύξης υψηλής χωρητικότητας. Η μέθοδος κρουστικών τάσεων για εντοπισμό της θέσης σφάλματος συνήθως χρησιμοποιείται για όλους τους τύπους σφαλμάτων εκεί όπου η αντίσταση του σφάλματος δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να απαιτείται η εφαρμογή της τεχνικής καύσης της αντίστασης σφάλματος προηγουμένως [29]. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα, η μέθοδος έχει επιλεγεί για να ικανοποιήσει την αυξανόμενη απαίτηση για προεντοπισμό σφαλμάτων σε διακλαδισμένα δίκτυα με δοκιμές σε ένα μόνο άκρο του καλωδίου(τερματικό) [29]. Ο πυκνωτής  $C_g$  φορτίζεται μέσω της γεννήτριας παλμών, ενώ κατά την εκφόρτιση μεταδίδει έναν παλμό υψηλής ενέργειας, μεταξύ του ελαττωματικού αγωγού και της γης [3].

Η θέση σφάλματος μπορεί να εντοπιστεί είτε με ακρόαση του ηχητικού παλμού είτε με τον εντοπισμό μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τη δημιουργία τόξου στο σφάλμα είτε αναλύοντας τις κυματομορφές ρεύματος και τάσης που επιστρέφουν από τον ελαττωματικό αγωγό [3]. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται τόσο σε συστήματα μεταφοράς όσο και σε συστήματα διανομής, κυρίως σε διακλαδισμένα συστήματα όπου η μέθοδος ανάκλασης παλμού αποτυγχάνει.

#### A) Λήψη Κρουστικού Ρεύματος

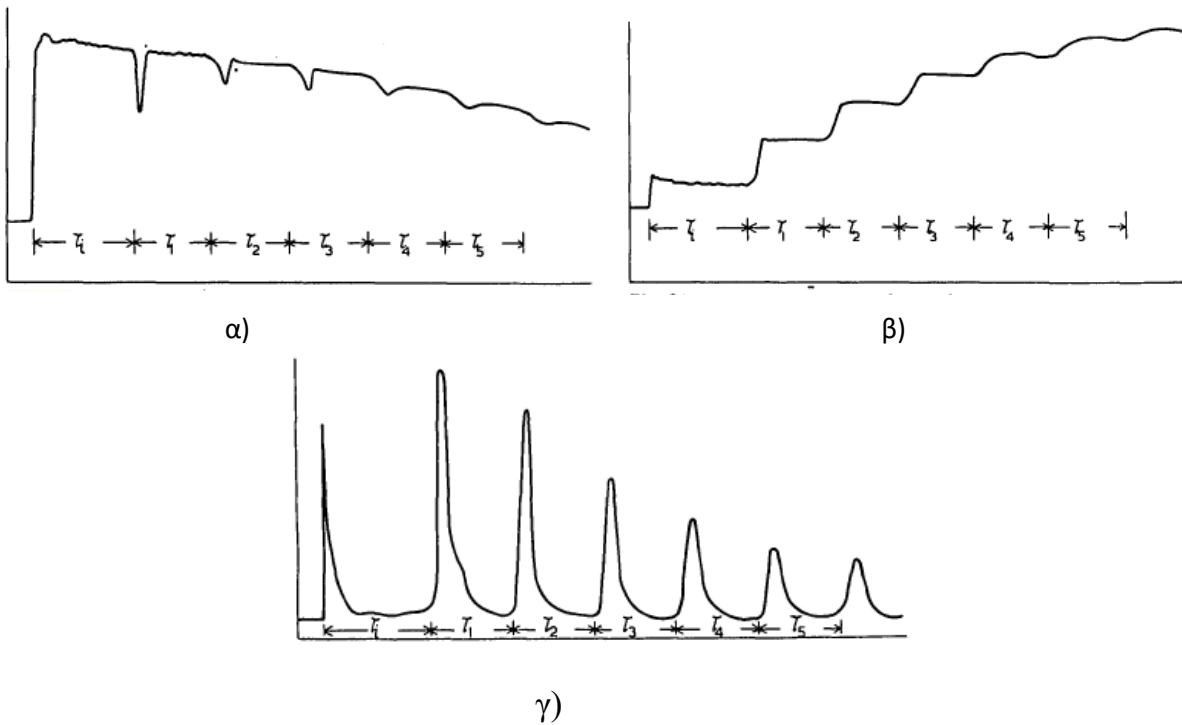
Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψιν το παλμικό ρεύμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μιας γεννήτριας παλμών (16) τόσο περισσότερο σχεδόν προσομοιάζει τη συμπεριφορά μιας πηγής σταθερής τάσης, κάτι που

υποδηλώνει ότι θα ήταν πιο λογικό να ανιχνεύσουμε και να εμφανίσουμε την κυματομορφή του ρεύματος παρά την κυματομορφή της τάσης [29].



**Εικόνα 2.6** Τυπική διάταξη της μεθόδου κρουστικών τάσεων με λήψη κρουστικού ρεύματος [30]

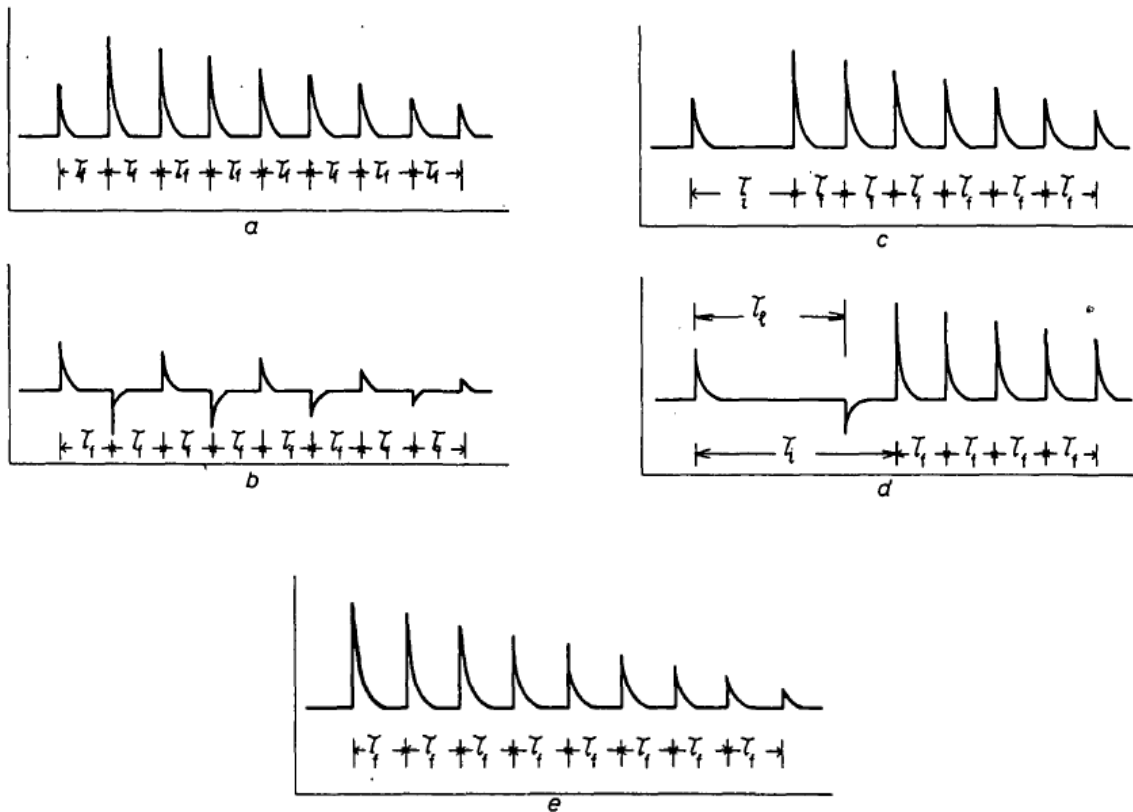
Εάν το καλώδιο έχει σφάλμα με μια αντίσταση να αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά της κρουστικής τάσης του καλωδίου ή ένα σφάλμα που προκαλεί κατάρρευσή του όταν εφαρμόζεται η κρουστική τάση στο καλώδιο, λοιπόν, με αυτήν τη μέθοδο, όταν εφαρμόζεται ένα κρουστικό σήμα στο καλώδιο (από μια γεννήτρια παλμών), θα προκύψει μια κυματομορφή, της οποίας η μορφή θα εξαρτάται από τη φύση του σφάλματος. Για ένα σφάλμα χαμηλής αντίστασης, η βηματική αντίδραση ρεύματος θα έχει την ίδια πολικότητα με το εφαρμοζόμενο παλμό και θα προκαλέσει διπλασιασμό της μέσης τιμής του ρεύματος στη γεννήτρια παλμών, παράγοντας έτσι ένα περαιτέρω βήμα στη κυματομορφή ρεύματος που είναι συνεπώς μια διαδοχή βημάτων δίνοντας αυξανόμενου πλάτους ρεύμα. Αναφερόμενοι στο παραπάνω σχήμα, το υπό δοκιμή καλώδιο (10) απεικονίζεται ως αγωγός (11) εντός γειωμένου εξωτερικού περιβλήματος (12). Το γραμμικό φίλτρο (20) ωστόσο λαμβάνει το παράγωγο αυτής της κυματομορφής δίνοντας έτσι ένα σήμα στην έξοδο που είναι ένας παλμός σχετικά μικρής διάρκειας κάθε φορά μια αντανάκλαση της πρωτεύουσας κρουστικής αντίδρασης γυρίζει στη γεννήτρια παλμών. Έτσι η κυματομορφή απλοποιείται και γίνεται πιο βολικό από ό, τι με απεικόνιση της τάσης και η ανάλυση μπορεί να γίνει πολύ πιο εύκολα. Η αυξανόμενη απόκριση συχνότητας του φίλτρου δίνει έμφαση στα τμήματα υψηλής συχνότητας στα εμπρός τμήματα των ανακλάσεων και έτσι, στην οθόνη του παλμογράφου (24), απεικονίζεται καλύτερα η κυματομορφή. Η κυματομορφή του ρεύματος, που προκύπτει από την εφαρμοζόμενη κρουστική τάση, εξαρτάται από το τύπο του σφάλματος [30].



**Εικόνα 2.7** Αφού εφαρμοστεί η τάση της γεννήτριας παλμών λαμβάνονται οι παρακάτω κυματομορφές α)Κυματομορφή της τάσης στην έξοδο του καλωδίου β) Κυματομορφή του ρεύματος στην έξοδο του καλωδίου γ) Κυματομορφή του ρεύματος στην έξοδο του καλωδίου, αφού περάσει από γραμμικό φίλτρο (21) [30]

Ένας διακόπτης(17) χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του κλάδου υψηλής τάσης του πυκνωτή με έναν αγωγό του υπό δοκιμή καλωδίου, ενώ η πλευρά χαμηλής τάσης συνδέεται μέσω του γραμμικού φίλτρου(20) με ένα γειωμένο αγωγό του υπό δοκιμή καλωδίου [30].

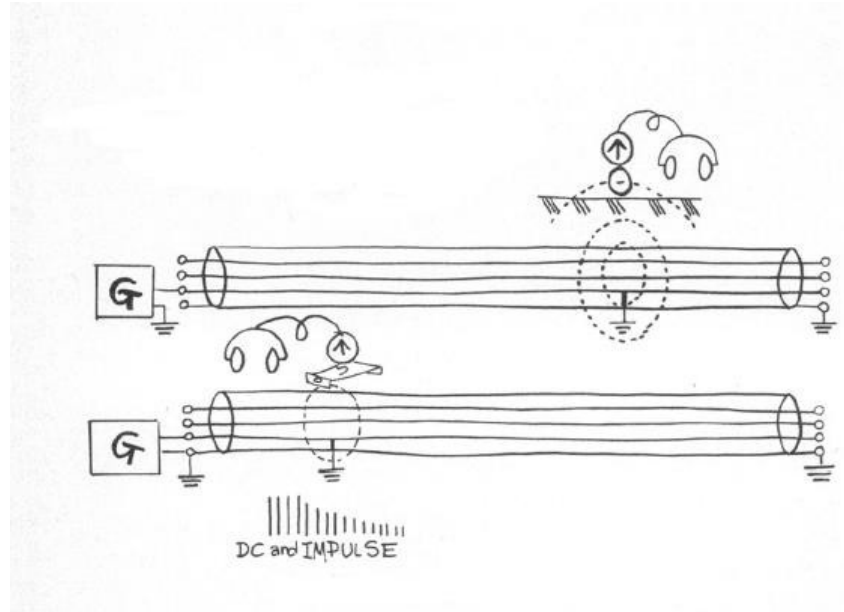
Οι πραγματικές κυματομορφές των κρουστικών ρευμάτων λαμβάνονται με τη χρήση ενός δεύτερου γραμμικού φίλτρου(21) που ενσωματώνεται στη διάταξη και διαφοροποιούνται για το κάθε τύπο σφάλματος [29].



**Εικόνα 2.8** Πραγματικές κυματομορφές του ρεύματος στην έξοδο του καλωδίου, αφού περάσουν από γραμμικό φίλτρο για διαφόρους τύπους σφαλμάτων α) Σφάλμα χαμηλής αντίστασης προς γη β) Σφάλμα ανοικτού κυκλώματος γ) Σφάλμα υψηλής αντίστασης προς γη δ) Σφάλμα υψηλής αντίστασης προς γη με πτώση τάσης ε) Σφάλμα που μπορεί να οφείλεται σε αστοχία εξοπλισμού [29]

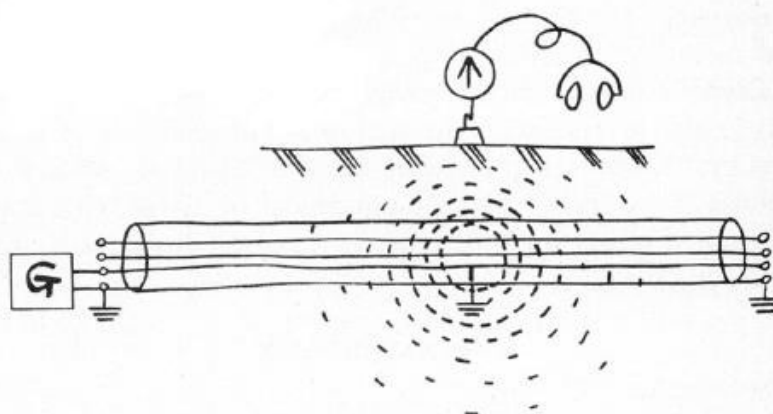
Οι κυματομορφές που λαμβάνονται με τον γραμμικό ζεύκτη για διάφορους τύπους σφάλματος παρουσιάζονται προσεγγιστικά στην εικόνα 2.8. Τα χρονικά διαστήματα που επισημαίνονται ως  $\tau$  είναι οι χρόνοι που αντιπροσωπεύουν το σημείο του σφάλματος και συνήθως εμπεριέχουν κάποιο χρόνο καθυστέρησης λόγω ιονισμού, ενώ τα διαστήματα που επισημαίνονται ως  $\tau_f$  είναι χρόνοι μετάβασης έως το σφάλμα. Το σχήμα 2.8α φαίνεται η κυματομορφή ρεύματος για σφάλμα βραχυκυκλώματος πολύ χαμηλής αντίστασης. Το διάκενο σπινθήρων δεν διασπάται στο Σχ. 2.8α, και επομένως δεν παράγεται ακουστικό σήμα. Το Σχ. 2.8β, η κυματομορφή από σφάλμα ανοικτού κυκλώματος, δείχνει μια χαρακτηριστική κυματομορφή όπως φαίνεται στην οθόνη ενός παλμογράφου. Το σχήμα 2.8γ δείχνει την κυματομορφή που προκύπτει από ένα σφάλμα όπου το διάκενο σπινθήρων διασπάται, ενώ η επίδραση του χρόνου καθυστέρησης λόγω ιονισμού είναι πολύ εμφανής [29].

## B) Ηλεκτρομαγνητική λήψη



**Εικόνα 2.9** Ένας Ηλεκτρομαγνητικός ανιχνευτής [14]

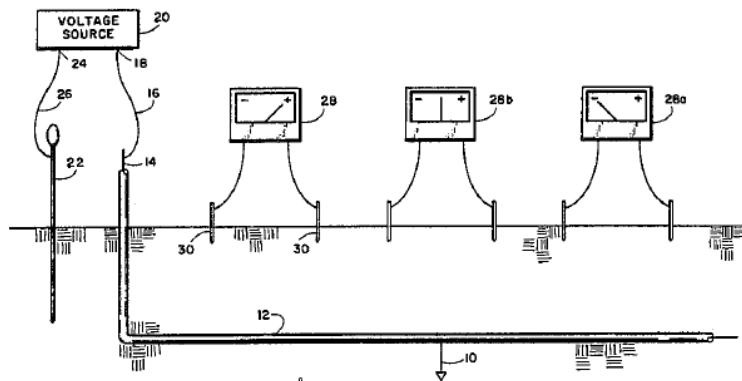
Για συγκεκριμένους τύπους σφαλμάτων παράγεται μία ηχητική εκτόνωση από τη διάσπαση του διακένου (το διάκενο δημιουργείται από το σφάλμα). Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αποτελούν σφάλματα όπως βραχυκυκλώματα μεταξύ δύο φάσεων ή μεταξύ τριών φάσεων ή μεταξύ φάσης και γης και σφάλματα υψηλής αντίστασης σε συνδυασμό με οξείδωση στη περιοχή σφάλματος [3]. Συνεπώς κρίνεται αναγκαία η χρήση μιας διαφορετικής τεχνικής ανίχνευσης. Ένας ηλεκτρομαγνητικός ανιχνευτής ανιχνεύει το πλάτος του μαγνητικού πεδίου που προκύπτει όταν μέρος του μεταδιδόμενου σήματος επιστρέφει στη γεννήτρια παλμών μέσω της γείωσης και μέρος αυτού χάνεται στην μόνωση του καλωδίου (όταν αυτή υπάρχει). Εκτός από τα σήματα εντοπισμού εναλλασσόμενου ρεύματος, ανιχνεύει επίσης την κατεύθυνση του κυρίαρχου ρεύματος. Για το διακοπτόμενο DC και τα παλμικά σήματα, ο δείκτης αντιδρά σε κάθε παλμό. Αυτό το συγκεκριμένο όργανο ονομάζεται επίσης βαλλιστικός ανιχνευτής γιατί έχει σχεδιαστεί για να υποδεικνύει το μέγεθος και την κατεύθυνση του κρουστικού παλμού. Ταυτόχρονα λειτουργεί και με διακοπτόμενα DC σήματα, όπου ο δείκτης του οργάνου (γαλβανόμετρο) αντιδρά αντίθετα με κάθε απόκλιση, εξαιτίας της αυξομείωσης κάθε παρεμβολής [14].



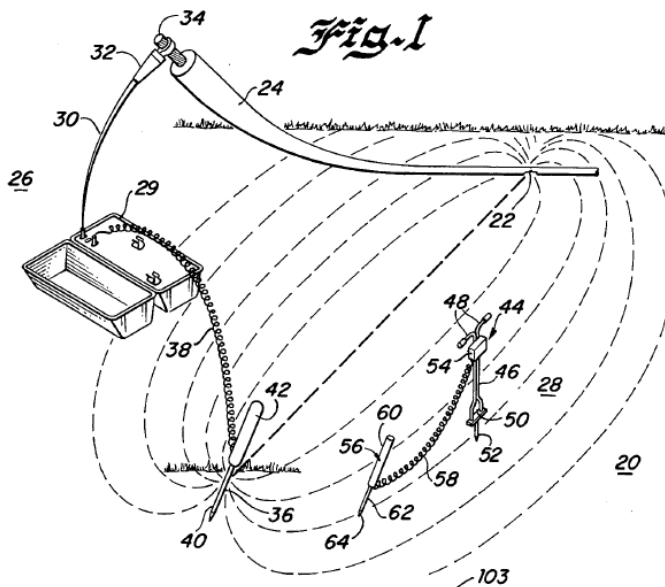
**Εικόνα 2.10** Ακουστικός ανιχνευτής [14]

Η γεννήτρια παλμών μεταδίδει έναν παλμό υψηλής τάσης κατά μήκος του καλωδίου. Στο σημείο του σφάλματος συμβαίνει διάσπαση του, όταν ο παλμός φτάσει στο σημείο [31]. Τότε ακούγεται ένα σήμα, το οποίο χτυπά το μανδύα στη θέση σφάλματος ή κοντά σε αυτή [17]. Εξαιτίας των διαδοχικών παλμών τάσης παράγονται περισσότερες από μια ηχητικές εκτόνωσεις (χτυπήματα), οι οποίες εντοπίζονται από την επιφάνεια του εδάφους χρησιμοποιώντας ένα μικρόφωνο εδάφους, έναν δέκτη και ακουστικά [31]. Ο δέκτης συνήθως περιλαμβάνει έναν ενισχυτή διότι η ηχητική εκτόνωση πολλές φορές γίνεται βουβή και δεν ακούγεται πάντα πάντα με τη βοήθεια του μικροφώνου [14]. Όσο πιο κοντά είναι η απόσταση του μικροφώνου από το σφάλμα, τόσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος της ηχητικής εκτόνωσης που θα ανιχνευτεί και που οφείλεται στο θόρυβο διάσπασης. Εάν τοποθετηθεί ακριβώς πάνω από τη θέση σφάλματος, το μεγαλύτερο μέρος του θορύβου διάσπασης μπορεί να εντοπιστεί. Χρησιμοποιώντας γεννήτρια μεγαλύτερης ονομαστικής ικανότητας θα είχε καλύτερη επίδραση στη δημιουργία μεγαλύτερης ηχητικής εκτόνωσης [31].

## 2.2.2 Μέθοδος Δυναμικού Γης(Earth gradient method)



α)



β)

**Εικόνα 2.11** α,β) Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου δυναμικού γης με τη χρήση probes. [32]

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για το εντοπισμό των παρακάτω σφαλμάτων:

- Σφάλματα βραχυκυκλωμάτων μεταξύ αγωγών( Φάση-Φάση, Φάση-Φάση-Φάση)
- Σφάλματα υψηλής αντίστασης προς γή( Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Φάση και Γη) [13] [17].

Μια τάση εφαρμόζεται μεταξύ του ελλαττωματικού αγωγού και της γης [13]. Όταν η τάση αυτή(παλμική τάση) διαπεράσει την αντίσταση που προκαλεί το σφάλμα (αποκαλύπτοντας το σφάλμα), ένα ρεύμα ταξιδεύει από το σημείο του σφάλματος στη γείωση [32]. Στο σημείο όπου ένα ρεύμα διαρροής εισέρχεται στη γη από έναν ελλαττωματικό αγωγό, δημιουργείται διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια της γης, και αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιβεβαίωση της θέσης σφάλματος ενός καλωδίου [17]. Η κατεύθυνση αυτού του πεδίου μπορεί να ανιχνευτεί συνήθως με τη χρήση ενισχυτή μεγάλου κέρδους, ενώ το σύστημα εντοπισμού διαθέτει και ένα γαλβανόμετρο [32]. Το ρεύμα σφάλματος που επιστρέφει μέσω της γης, μπορεί να εντοπιστεί είτε με τη χρήση ενός βολτομέτρου, είτε με τη χρήση δύο probe [13].

Στη περίπτωση που χρησιμοποιηθεί βολτόμετρο, η διαδικασία εντοπισμού βασίζεται στην αρχή ότι η πτώση τάσης ανάμεσα σε οποιαδήποτε σημεία της επιφάνειας του εδάφους μπορεί να μετρηθεί. Συνήθως, η κατεύθυνση της πτώσης τάσης υποδεικνύει τη κατεύθυνση του σφάλματος. Όσο κινούμαστε κατά μήκος της γραμμής και προσεγγίσουμε τη θέση σφάλματος, η απόκλιση της βελόνας του βολτομέτρου μειώνεται έως ότου φτάσουμε ακριβώς πάνω από τη θέση σφάλματος, οπότε και μηδενίζεται(0V). Όταν απομακρυνθούμε πάλι από τη θέση σφάλματος, η απόκλιση του βολτομέτρου αυξάνεται πάλι. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη χρήση ενός βολτομέτρου στον εντοπισμό του δυναμικού που αναπτύσσεται στο έδαφος, είναι η ακριβής γνώση της διαδρομής που ακολουθεί το ελλαττωματικό καλώδιο [3].

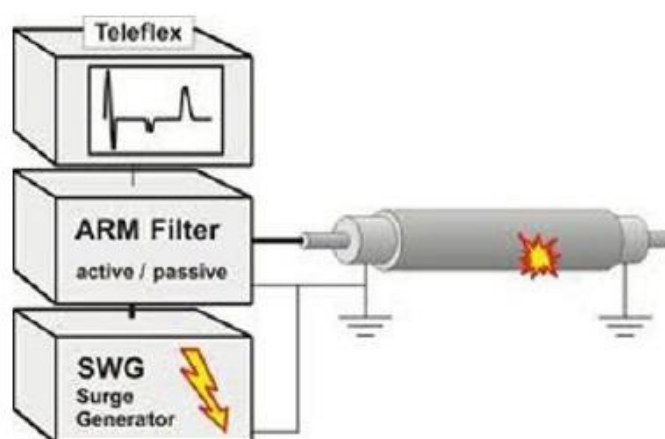
Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν probes για τον εντοπισμό του δυναμικού της γης, οι είσοδοι του ανιχνευτή είναι δύο καλώδια(probes) που μπορούν να θαφτούν στο έδαφος για να ανιχνευτεί το δυναμικό τάσης που υπάρχει. Ο ανιχνευτής μετακινείται κατά μήκος της διαδρομής του ελλαττωματικού καλωδίου και, σε τακτικά διαστήματα, τα καλώδια του θάβονται στη γη σε θέσεις που ισαπέχουν μεταξύ τους. Το σημείο όπου τοποθετήθηκαν τα καλώδια του ανιχνευτή και βρισκόταν πιο κοντά στο σημείο του σφάλματος θα φανεί από τη διέγερση της βελόνας του γαλβανομέτρου, αποκλίνοντας όλο και πιο κοντά στο +. Εάν ο ανιχνευτής απομακρυνθεί από σφάλμα, η βελόνα του γαλβανομέτρου εκτρέπεται προς την αντίθετη κατεύθυνση(δηλαδή το -), επειδή το αντίθετο καλώδιο εισόδου είναι τώρα πιο κοντά στο σφάλμα. Όταν τα δύο καλώδια βρίσκονται σε ίση απόσταση από τη θέση του σφάλματος, η βελόνα δεν θα εκτραπεί καθόλου. Λόγω της αναμενόμενα υψηλής αντίστασης στο σημείο του σφάλματος, η μέθοδος εφαρμόζει παλμική τάση υψηλής τάξης αρχικά στο υπό βλάβη καλώδιο ή κοντά στη μέγιστη τάση που μπορεί να παράγει η πηγή, για παράδειγμα μερικές χιλιάδες volts. Μετά την εγκατάσταση του δυναμικού (δηλ.μετά την εμφάνιση του σφάλματος), η αντίσταση μειώνεται και αυτόματα μειώνεται και η τάση καθώς αυξάνεται η τιμή του ρεύματος αυξάνεται, λόγω του περιορισμού ισχύος στην έξοδο της πηγής τάσης. Ένας μετρητής ρεύματος ,που συνδέεται στον αγωγό γείωσης, χρησιμοποιείται συνήθως για την εξακρίβωση της εγκατάστασης του δυναμικού τάσης . Εάν η



αντίσταση σφάλματος αυξηθεί για οποιονδήποτε λόγο μετά την εγκατάσταση του δυναμικού τάσης, η τάση εξόδου επιτρέπεται επίσης να αυξηθεί ανάλογα, ακόμη και στη μέγιστη τιμή της τάσης της πηγής, εάν είναι απαραίτητο [32].

Το κύριο πρόβλημα με την προαναφερθείσα συμβατική πρακτική είναι ότι το καλώδιο συχνά καταπονείται όταν υποβάλλεται σε τάση πολύ υψηλότερη από τη τάση λειτουργίας του, και πολύ υψηλότερη από ό, τι χρειάζεται για να ανακαλυφθεί το σφάλμα. Η αρχική εφαρμογή μιας υπερβολικά υψηλής τάσης, ακόμη και αν για λίγους παλμούς, μπορεί να προκαλέσει σοβαρή ζημιά σε ένα καλώδιο. Εάν μια τέτοια υψηλή τάση επιτρέπεται να εφαρμοστεί ξανά μετά την αρχική εγκατάσταση του δυναμικού, ο κίνδυνος ζημιάς μεγαλώνει [32].

### 2.2.3 Μέθοδος Radar με εφαρμογή παλμών υψηλής τάσης ή μέθοδος ανάκλασης τόξου(Arc Reflection Method)



**Εικόνα 2.12** Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου ανάκλασης τόξου [33]

Η συγκεκριμένη μέθοδος συνίσταται στη συνδυαστική λειτουργία μιας γεννήτριας κρουστικών παλμών(SWG), ενός παλμοηχομέτρου(TDR) και ενός φίλτρου διαχωρισμού(ARM). Διαφέρει με τη μέθοδο κρουστικών τάσεων με λήψη κρουστικού ρεύματος, στο γεγονός ότι αντί παλμογράφου χρησιμοποιεί παλμοηχομέτρο. Ο συνδυασμός ενός TDR και μιας γεννήτριας κρουστικών παλμών επιτρέπει τον εντοπισμό οποιουδήποτε είδους σφάλματος, ιδιαίτερα σφαλμάτων υψηλής αντίστασης. Ένα φίλτρο διαχωρισμού ενέργειας απομονώνει το TDR από τους παλμούς υψηλής τάσης και διασφαλίζει ότι οι παλμοί υψηλής συχνότητας, που εισάγονται στο καλώδιο από το TDR, δεν επηρεάζονται από τη γεννήτρια παλμών [28]Το φίλτρο επίσης διαμορφώνει την εφαρμοζόμενη Υ.Τ(σε ορισμένη στάθμη), ικανή να προκαλέσει ένα τόξο στο σημείο του σφάλματος [3].

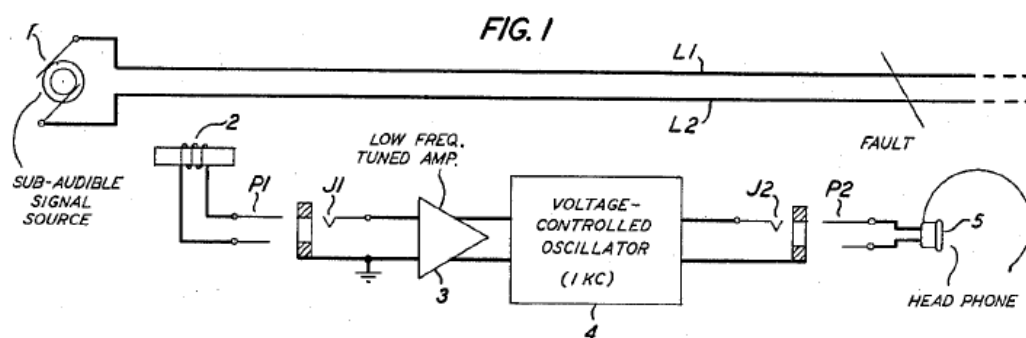
Κατά την πρώτη φάση της μέτρησης, η εφαρμογή παλμών TDR δεν προκαλεί ανακλάσεις με σφάλματα υψηλής αντίστασης ή τύπου διαλείψεως και μόνο η αρχή του καλωδίου, οι ματίσεις, οι συγκολλήσεις, οι μετασχηματιστές, οι ανωμαλίες και το πιο απομακρυσμένο άκρο του καλωδίου είναι ορατά [28].

Στη δεύτερη φάση, η γεννήτρια κρουστικών παλμών ενεργοποιείται. Το πλάτος των παλμών γίνεται μόνο αρκετά μεγάλο για να διασπάσει το σφάλμα και να δημιουργηθεί τόξο στη θέση σφάλματος [28]. Κάθε επαφή του τόξου από τον παλμό TDR θα παράξει μια αντανάκλαση, εξ ου και το όνομα "Μέθοδος ανάκλασης Τόξου," και μια εικόνα ενός πλασματικού σφάλματος χαμηλής αντίστασης, μια αντίθετης πολικότητας αντανάκλαση, θα δείξει τη θέση σφάλματος στην οθόνη(CRT).Για να επιτύχει η μέθοδος πρέπει ο παλμός να φτάσει στο σημείο του σφάλματος όταν σταθεροποιηθεί και όσο διαρκεί το τόξο αγωγιμότητας . Μόλις το τόξο ατονίσει, το σφάλμα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση(υψηλή αντίσταση) [28]. Συνεπώς πρόκειται για στιγμιαία καταπόνηση του καλωδίου.

Η ARM επιτρέπει τον εντοπισμό βλαβών στα καλώδια διανομής ηλεκτρικής ισχύος, γρήγορα, με ακρίβεια και αξιόπιστα με τον ελάχιστο κίνδυνο για ένα υγιές καλώδιο. Είναι μοναδική στο ότι συνδυάζει μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως, ενώ εξαλείφει τους περιορισμούς τους. Η εφαρμογή της ARM δεν περιορίζεται από το μήκος ή τον τύπο του καλωδίου, ούτε από τη τάση λειτουργίας [28].

#### 2.2.4 Μέθοδος ανίχνευσης ρεύματος (Tracing Current Method)

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί στην εφαρμογή της τόσο πηγές ΣΡ όσο ΕΡ, κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται πηγές ΕΡ. Ταυτόχρονα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε διακλαδισμένα όσο και μη διακλαδισμένα καλωδιακά δίκτυα, αλλά και υπόγειες εγκαταστάσεις καλωδίων μέσα σε σωλήνες. Παρόλο που η συγκεκριμένη μέθοδος υστερεί σε ακρίβεια σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους ακριβούς εντοπισμού, η χρήση σε υπόγεια καλωδιακά συστήματα ενδείκνυται διότι είναι αρκετός ο προσεγγιστικός προσδιορισμός της θέσης σφάλματος, δεδομένου ότι είναι επιβεβλημένη η αντικατάσταση ολοκλήρου του τμήματος του καλωδίου που βρίσκεται θαμμένο ανάμεσα σε φρεάτια [3].



**Εικόνα 2.13** Μπλοκ διάγραμμα τυπικής διάταξης που χρησιμοποιεί τη συγκεκριμένη μέθοδο. Το πηνίο παραλαβής φαίνεται με τον αριθμό 2 ενώ η ακουστική συσκευή με τον αριθμό 5. [34]

Η μέθοδος ανίχνευσης ρεύματος συνίσταται στη χρήση μιας πηγής ανίχνευσης, η οποία περιλαμβάνει μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος μιας θεμελιώδους συχνότητας, στον ελαττωματικό αγωγό ενός καλωδίου [34]. Στο εμπρός άκρο του καλωδίου συνδέεται η πηγή ανίχνευσης ενώ το πιο απομακρυσμένο άκρο του καλωδίου συνδέεται στη γη, και μετά να υπάρχει σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος της εξωτερικής επιφάνειας του καλωδίου ένα πηνίο παραλαβής, του οποίου οι ακροδέκτες είναι συνδεδεμένοι σε έναν ακουστικό δεκτή [35]. Όταν το πηνίο παραλαβής περάσει από τη θέση σφάλματος μια πτώση στη τιμή του ρεύματος σφάλματος, προκαλεί μεταβολή στη τάση παραλαβής σε εκείνο το σημείο, καθιστώντας δυνατό τον εντοπισμό του σφάλματος [34]. Η θεωρία είναι ότι η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή μεταξύ του αγωγού και του πηνίου παραλαβής θα προκαλέσει έναν ήχο στο ακουστικό έως ότου το πηνίο παραλαβής απομακρυνθεί από το σημείο όπου ο αγωγός παρουσιάζει επαφή με τη γη, και πέρα από αυτό το σημείο δεν θα εντοπίζεται ηχητικό σήμα από το ακουστικό [35]. Όμως, στη πραγματικότητα έχει παρατηρηθεί σημαντική δυσκολία στον εντοπισμό σφαλμάτων με αυτή τη μέθοδο επειδή οι ήχοι στο τηλέφωνο θα συνεχίσουν να ακούγονται ακόμα και όταν το πηνίο παραλαβής απομακρυνθεί από το σημείο όπου υπάρχει επαφή [35].

Όταν ένας αγωγός του καλωδίου εμφανίσει επαφή με το περίβλημα, το ρεύμα διάσπασης, αφού περάσει από τον αγωγό στο περίβλημα, θα διαιρεθεί, και μέρος

αυτού θα οδηγηθεί(μέσω του περιβλήματος στο σημείο σφάλματος) στη κοντινότερη γείωση και μετά πίσω στη πηγή, ενώ το υπόλοιπο θα ρέει σε όλο το πλάτος του περιβλήματος μέχρι τη πλησιέστερη γη, και από εκεί πάλι πίσω στη πηγή [35]. Το φαινόμενο διάχυσης ρεύματος στο μεταλλικό περίβλημα προκαλεί πρόβλημα στο προσδιορισμό της ακριβούς θέσης του σφάλματος, επειδή ενεργεί επαγωγικά στο πηνίο παραλαβής με τον ίδιο τρόπο όπως το ρεύμα που ρέει από τον ελαττωματικό αγωγό στην γείωση, προκαλώντας έτσι ήχο στο ακουστικό ακόμα και όταν το πηνίο παραλαβής απομακρυνθεί από το σημείο σφάλματος [35]. Το φαινόμενο διάχυσης ρεύματος μπορεί να αντιμετωπιστεί. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα πηνίο παραλαβής με δύο περιελίξεις συνδεδεμένες εσωτερικά, και τοποθετώντας αυτές τις περιελίξεις συμμετρικά σε σχέση με το καλώδιο, έτσι ώστε τα επαγόμενα πεδία και στις δύο πλευρές λόγω του ρεύματος στο περίβλημα να είναι ίσα και αντίθετα και να εξουδετερώνουν το ένα το άλλο, χωρίς να παράγεται ήχος στο τηλέφωνο [35]. Οι αγωγοί στο εσωτερικό του καλωδίου, ωστόσο, τοποθετούνται σπειροειδώς, και δεν είναι συμμετρικοί σε σχέση με το περίβλημα, αλλά θα ποικίλλουν σε θέση, καθώς βρίσκονται σε ορισμένα σημεία πλησιέστερα στη μία πλευρά του καλωδίου και σε άλλα μέρη πιο κοντά στην άλλη πλευρά [35]. Το διακοπτόμενο ρεύμα που ρέει στον ελαττωματικό αγωγό παράγει έτσι μια άνιση μαγνητική επαγωγή που επηρεάζεται από τις εν λόγω περιελίξεις και συνεπώς προκαλεί το χαρακτηριστικό ήχο στο τηλέφωνο, έως ότου οι εν λόγω περιελίξεις φτάσουν στο σημείο όπου το βρίσκεται το σφάλμα, οπότε από εκείνο το σημείο και μετά ο θόρυβος θα σταματήσει [35].

Σύγχρονες διατάξεις που βασίζονται στη συγκεκριμένη μέθοδο, περιλαμβάνουν γεννήτρια συχνοτήτων των 20 κύκλων ανά δευτερόλεπτο για να εισάγει το ρεύμα ιχνηλάτισης στον ελαττωματικό αγωγό. Η συσκευή παραλαβής περιλαμβάνει ένα πηνίο παραλαβής, έναν ψηφιακό ενισχυτή, ανορθωτή και μεγάλης ευαισθησίας αμπερόμετρο συνεχούς ρεύματος, δίνοντας έτσι μια οπτική ένδειξη της διαδικασίας παραλαβής του πηνίου εξερεύνησης που μεταφέρεται κατά μήκος του ελαττωματικού καλωδίου σε αναζήτηση του σφάλματος. Η χαμηλή συχνότητα των 20 κύκλων ανά δευτερόλεπτο χρησιμοποιείται συνήθως για να ελαχιστοποιήσει την εξασθένηση του ρεύματος σφάλματος. Ωστόσο η χρήση συχνότητας κοντά στους 20 κύκλους/δευτερόλεπτο προκαλεί πρόβλημα στην εφαρμογή της μεθόδου, κυρίως σε καλώδια με συχνότητα λειτουργίας κοντά στους 25 κύκλους/δευτερόλεπτο. Γι' αυτό, καθίσταται απαραίτητη η χρήση αρκετά διαφορετικής συχνότητας ρεύματος σφάλματος από τη συχνότητα της γραμμής ισχύος ώστε να παρέχει την απαραίτητη διάκριση που θα διευκολύνει τον ακριβή εντοπισμό της θέσης σφάλματος. Η αύξηση της συχνότητας, μειώνει την αντίσταση χωρητικότητας μεταξύ των αγωγών, η οποία επηρεάζεται με αύξηση της συχνότητας, και επομένως, η μεταβολή της τιμής του ρεύματος στη γραμμή από τη μία πλευρά του σφάλματος στην άλλη δεν είναι αρκετά μεγάλη για να προσφέρει την απαιτούμενη διάκριση. Έχει διαπιστωθεί ότι μια συχνότητα 10 κύκλων ανά δευτερόλεπτο είναι ικανοποιητική και παρέχει επαρκή διάκριση

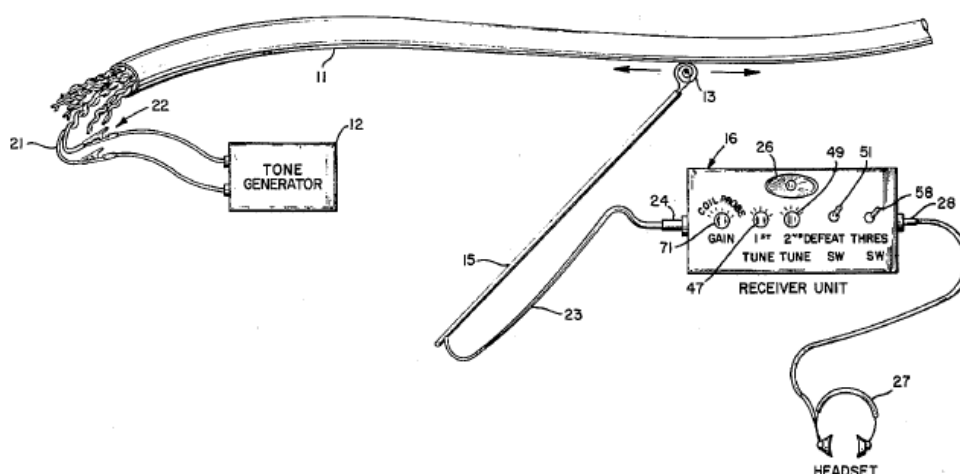
έναντι των ρευμάτων με συχνότητα της τάξεως 25 κύκλων ανά δευτερόλεπτο που είναι και η συχνότητα της γραμμής ισχύος [34].

Ενώ έχουμε αναφερθεί σε έναν δέκτη τηλεφώνου ως το προτιμώμενο όργανο για την ανίχνευση των ρευμάτων που παράγονται επαγωγικά στο Πηνίο εξερεύνησης, θα είναι προφανές ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε συσκευή ανίχνευσης ηλεκτρικού ρεύματος επαρκούς ευαισθησίας [35].

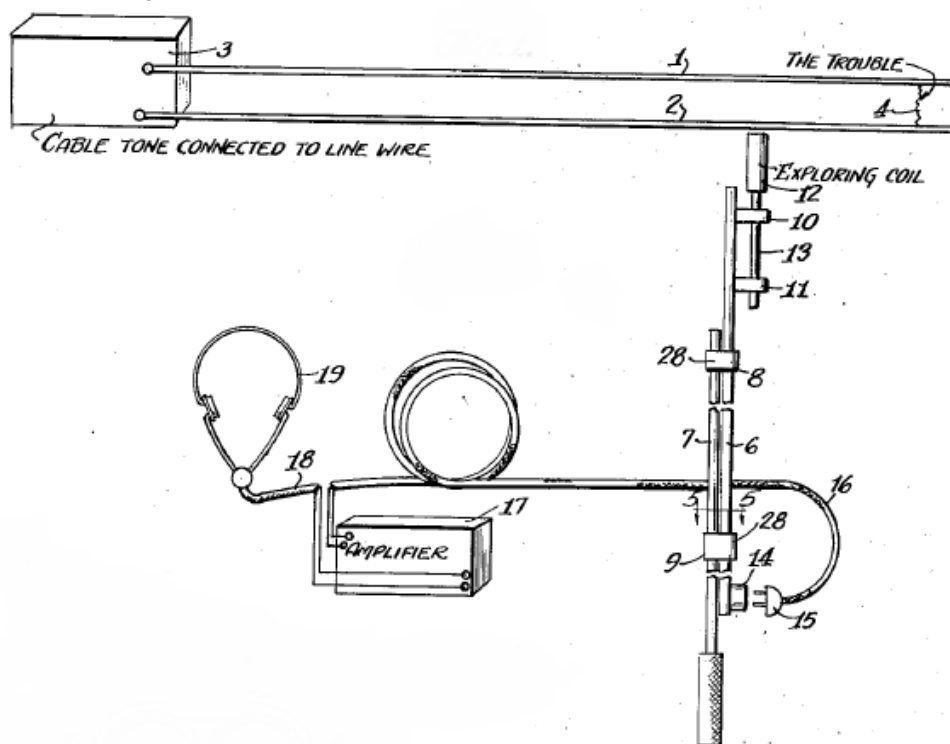
### 2.2.5 Μέθοδος Ακουστικής Συχνότητας(Acoustic Method)

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για το εντοπισμό των παρακάτω σφαλμάτων:

- Σφάλματα βραχυκυκλωμάτων μεταξύ αγωγών( Φάση-Φάση, Φάση-Φάση-Φάση ή τριφασικό βραχυκύκλωμα)
- Σφάλματα υψηλής και χαμηλής αντίστασης προς γή(Φάση-Φάση-Γη, Φάση-Φάση-Φάση- Γη) [27]



**Εικόνα 2.14** Σχηματική αναπαράσταση μιας τυπικής διάταξης εντοπισμού σφαλμάτων με την μέθοδο της ακουστικής συχνότητας [37]



**Εικόνα 2.15** Ακόμα μία διάταξη εντοπισμού σφαλμάτων με τη μέθοδο της ακουστικής συχνότητας, όπου είναι εμφανής η κατασκευαστική δομή της κεραίας μαγνητικού βρόχου [36].

Αυτή η μέθοδος συνίσταται στην εισαγωγή ενός τόνου ή σήματος χαμηλής συχνότητάς στον ελαττωματικό αγωγό και στη συνέχεια στην ανίχνευση ή εντοπισμό της παρουσίας του σήματος ξεκινώντας από τη θέση στην οποία εισάγεται το σήμα στο ζευγάρι των αγωγών και καταλήγοντας μακριά από την πηγή μέχρι να εξαφανιστεί το σήμα [37]. Με μια διαδικασία παρεμβολής, εντοπίζεται η ακριβής θέση του σφάλματος [37]. Το σήμα ή ο τόνος που εφαρμόζεται στο ελαττωματικό ζεύγος κινείται κατά μήκος του ενός αγωγού μέχρι το σημείο του σφάλματος και επιστρέφει πίσω στη πηγή μέσω του άλλου αγωγού [37]. Το ταλαντωμένο ρεύμα που αντιπροσωπεύει το εφαρμοζόμενο σήμα δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο, και είναι η παρουσία ή η απουσία αυτού του πεδίου που επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό της θέσης σφάλματος [37]. Η συσκευή αυτή περιλαμβάνει μια απλή κεραία μαγνητικού βρόχου, η οποία στο ένα άκρο της διαθέτει ένα πηνίο παραλαβής (exploring coil), ενισχυτή σήματος, ακουστικά ή μετρητή (δέκτης) [27] [36].

Η ισχύς του σήματος που ποικίλλει ανάλογα με τις σχετικές θέσεις των πυρήνων ενός αγωγού καθώς επίσης η άνοδος και η πτώση στη τιμή της εξαιτίας της γεωμετρίας των αγωγών ενός καλωδίου, επιβεβαιώνουν ότι ανιχνεύεται το επιθυμητό σήμα [27]. Επιπλέον δύναται να πραγματοποιηθεί ανάλυση του μαγνητικού πεδίου σε οριζόντιες και κατακόρυφες συνιστώσες με σκοπό το προσδιορισμό της πιθανής θέσης σφάλματος [3]. Το μαγνητικό πεδίο που

οφείλεται στα αμφίδρομα μετακινούμενα ρεύματα τείνει να ακυρωθεί, αλλά, αν πραγματοποιηθεί ανάλυση, οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου(για κάθε άξονα) μπορούν να ανιχνευθούν πάνω από την επιφάνεια του έδαφος με το πηνίο παραλαβής και το δέκτη [27]. Η κεραία μαγνητικού βρόχου, στη θέση σφάλματος, φτάνει στη μέγιστη διέγερσή της[3]. Όταν το πηνίο παραλαβής μετακινείται κατά μήκος του καλωδίου, αλλά χωρίς να έρθει σε επαφή με αυτό, θα παραλάβει επαγωγικά μια μικρή ποσότητα ρεύματος όταν βρεθεί πάνω από τη διαδρομή του ρεύματος που προέρχεται από την γεννήτρια συχνοτήτων [36]. Όπως είναι προφανές, ένα ενισχυμένο σήμα θα ληφθεί στον δέκτη(ακουστική συσκευή ή μετρητής) οπουδήποτε εντοπιστεί διάχυση του ταλαντώμενου ρεύματος(σημείο με μέγιστη διέγερση), έτσι ώστε ο χειριστής να μπορεί εύκολα να εντοπίσει τη διαδρομή του ρεύματος και άρα τη θέση σφάλματος [36].

Αν και αυτή η τεχνική λειτουργεί καλά αν εξασφαλίσουμε ότι το εκπεμπόμενο σήμα είναι ισχυρό , πολλές φορές το ανιχνεύσιμο σήμα που δημιουργείται από το εγκατεστημένο μαγνητικό πεδίο, είναι τόσο αδύναμο που η συσκευή λήψης δεν μπορεί να ξεχωρίσει το επιθυμητό ηχητικό σήμα από άλλα παρεμβαλλόμενα σήματα [37]. Αυτό ισχύει ακόμη και αν τα σήματα που λαμβάνονται από το πηνίο ενισχύονται και εφαρμόζονται σε ακουστική μορφή σε ένα ακουστικό ή ένα ηχείο [37]. Αυτή η δυσκολία στον εντοπισμό του εισαγόμενου ηχητικού σήματος, παρουσία παρασιτικών σημάτων και παρεμβολών, μπορεί να αποδοθεί στην έλλειψη ευαισθησίας εξοπλισμού της προηγούμενης τεχνολογίας [37]. Συνήθως, χρησιμοποιείται μια γεννήτρια συχνοτήτων με ονομαστική συχνότητα περίπου 500 Hertz, αλλά η χρησιμοποιούμενη συχνότητα ποικίλλει από όργανο σε όργανο [37]. Συνεπώς, οι ενισχυτές της προηγούμενης τεχνολογίας που χρησιμοποιούνται στις μονάδες λήψης πρέπει να είναι ευαίσθητοι σε ένα εύρος ή ζώνη συχνοτήτων γύρω από την ονομαστική συχνότητα γεννήτριας συχνοτήτων, όπως 500 Hertz, για να επιτρέπουν τη λήψη σημάτων από οποιαδήποτε από τις γεννήτριες συχνοτήτων, παρόλο που η συχνότητα δεν έχει ρυθμιστεί ακριβώς στα 500 Hertz [37]. Κατασκευάζοντας τον ενισχυτή του δέκτη να προσαρμόζεται σε ένα εύρος συχνοτήτων, και όχι σε μια συγκεκριμένη συχνότητα γνωστής τιμής, η ανάλυση του συστήματος είναι ουσιαστικά περιορισμένη και η παρεμβολή από παρασιτικά σήματα, καθίσταται κρίσιμος περιορισμός στην ικανότητα εντοπισμού της θέσης του σφάλματος [37]. Σε όλα τα κυκλώματα ηχητικού τόνου, δημιουργούνται αρμονικές υψηλότερης συχνότητας της θεμελιώδους συχνότητας. Αυτές οι αρμονικές ταξιδεύουν όχι μόνο πάνω από τα καλώδια που πρόκειται να ελεγχθούν αλλά επηρεάζουν και γειτονικά καλώδια, ακόμη και πέρα από τη ζώνη σφάλματος. Επειδή το όργανο λήψης είναι ευαίσθητο σε αυτές τις αρμονικές, το πραγματικό σήμα χάνεται και το πρόβλημα δεν εντοπίζεται εύκολα [36]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

#### 3.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε την διαδικασία κατασκευής της διάταξης εύρεσης σφαλμάτων με χρήση βρόχου Murray, θα δούμε τον τρόπο επιλογής όλων των στοιχείων της κατασκευής, τον τρόπο υπολογισμού των τιμών τους, και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους. Η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω, συνιστά πρόωπη μελέτη κατασκευής της διάταξης, καθώς κατά στο στάδιο των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν ποιοτικές και ποσοτικές παρεμβάσεις προκειμένου να διασφαλιστεί η λειτουργικότητα της διάταξης. Οι παρεμβάσεις αυτές περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

#### 3.2 Χρησιμοποιούμενα υλικά

Υλικό	Κόστος	Ποσότητα
Μεζούρα ραπτικής (150cm)	0,62 €	1
Ξύλινος πήχης μήκους 1.5m	3 €	1
Ξύλινες βάσεις σύρματος	1 €	2
Ξυλόβιδες	1 €	
Σύρμα χρωμιονικελίνης 1m (3mm)	3,60 €	1
Μπορνα C 015B	1,20 €	3
Μπορνα Ασφαλείας 4mm	6,60 €	3
Μαχαιρωτος διακόπτης με μπόρνες	4,465 €	1
Καλώδιο μπανάνα-μπανάνα θυληκό 4mm	14,20 €	4
Καλώδιο κροκοδειλάκι-μπανάνα θυληκό 4mm	11,56 €	3
Αναλογικό Αμπερομετρο FC60P +-30A	11,62 €	1
Αντίσταση προστασίας άνθρακα 1κΩ(0.25W)	0,20 €	1
Καλώδιο συνδέσεων 2mm <sup>2</sup> (καρούλι)	5 €	1
11m καλώδιο NYM 3X1.5mm <sup>2</sup>	10,45 €	1
Ξύλινη Βάση 0.70mX0.25m	5 €	1
Βάση δύο Μπαταριών(3V)	5 €	4
Αλκαλικές μπαταρίες AA(1.5V)	8 €	8
Σύνολο:	92 €	36



### 3.3 Χαρακτηριστικά υλικών κατασκευής

#### 3.3.1 Χορδή Χρωμιονικελίνης

Το Nichrome (γνωστό και ως NiCr, νικέλιο-χρώμιο ή χρώμιο-νικέλιο) είναι μια οικογένεια κραμάτων που περιέχουν νικέλιο, χρώμιο και συχνά σίδηρο(και πιθανώς άλλα στοιχεία) που χρησιμοποιούνται συνήθως στη κατασκευή συρμάτων αντίστασης, θερμαντικών στοιχείων σε τοστιέρες, ηλεκτρικές θερμάστρες κλπ, σε ορισμένες οδοντικές αποκαταστάσεις (σφραγίσματα) και σε μερικές άλλες εφαρμογές [38].

Ένα κοινό κράμα νικελίου-χρωμίου είναι περιεκτικότητας 80% νικέλιο και 20% χρώμιο, κατά μάζα, αλλά υπάρχουν πολλοί άλλοι συνδυασμοί μετάλλων για τις διάφορες εφαρμογές [38].

Είναι ένα κράμα μετάλλου το οποίο έχει ιδιαίτερα χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα(αναλόγως και του πάχους), σημείο τήξης υψηλότερο από εκείνο του καθαρού χαλκού, μη οξειδώσιμο σε μεγάλο βαθμό, και μπορεί να διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να σχηματίσει ιδιαίτερα ανθεκτικές, αποδοτικές λωρίδες, κλώνους ή νήματα κατάλληλα για χρήση στις διάφορες συνδέσεις, όπου είναι επιθυμητές ηλεκτρικές αντιστάσεις [39].

Κυριότερα χαρακτηριστικά του κράματος Nichrome [40]:

· ΠΑΡΑΜΕΙΝΕΙ ΟΛΚΙΜΟ ΜΕΤΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ

Το Nichrome είναι γνωστό ότι παραμένει όλκιμο, ακόμη και μετά από μακρά χρήση.

· ΥΨΗΛΟΤΕΡΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

Σε σύγκριση με άλλα κράματα αντοχής στον αέρα, τα κράματα Nichrome έχουν υψηλότερη αντοχή σε θερμική και μηχανική καταπόνηση.

· ΥΨΗΛΟΤΕΡΗ ΕΚΟΜΠΗ

Όταν οξειδώνονται πλήρως, τα κράματα Nichrome έχουν υψηλότερη εκπομπή σε σύγκριση με άλλα μη οξειδωτικά κράματα . Αυτό σημαίνει ότι για το ίδιο επιφανειακό φορτίο, η θερμοκρασία του στοιχείου του Nichrome είναι χαμηλότερη από άλλα κράματα.

· ΜΗ-ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ

Σε ορισμένες εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας, προτιμάται ένα μη μαγνητικό υλικό. Το Nichrome είναι μη μαγνητικό, καθιστώντας την προτιμώμενη επιλογή έναντι άλλων μη οξειδωτικών κραμάτων, τα οποία είναι μόνο μη μαγνητικά πάνω από 600 ° C (1100 ° F).

#### · ANTOXH ΣΕ ΥΓΡΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Ενώ υπάρχουν κάποιες εξαιρέσεις (όπως ατμόσφαιρες που περιέχουν θείο και ορισμένες ελεγχόμενες ατμόσφαιρες), τα κράματα Nichrome έχουν συνήθως καλύτερη αντοχή στη διάβρωση σε θερμοκρασία δωματίου σε σύγκριση με άλλα μη οξειδωτικά κράματα

**Πίνακας 2** Τιμή της αντίστασης ενός σύρματος Constantan για διαφορετική διάμετρο σύρματος [41]

Dia.(mm)	Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ) <sup>±</sup>	Weight/Meter (g/m) <sup>±</sup>	Resistance/Meter at 20°C (Ω/m) <sup>±</sup>
0.018 <sup>±</sup>	0.0002550 <sup>±</sup>	0.002117 <sup>±</sup>	3410-4610 <sup>±</sup>
1.500 <sup>±</sup>	1.767 <sup>±</sup>	15.69 <sup>±</sup>	0.261-0.282 <sup>±</sup>

**Πίνακας 3** Τιμή της αντίστασης ενός σύρματος χρωμιοκελίνης(NiCr) για διαφορετικές διαμέτρους σύρματος [57]

Diameter (mm)	Tolerance of Diameter	Cross Sectional Area (mm <sup>2</sup> )	N80CR20			N60CR15			Tolerance of conductor resistance (%)
			Resistance per metre (20°C Ω/m)	Length per kg (m/kg)	Weight per metre (kg/m)	Resistance per metre (20°C Ω/m)	Length per kg (m/kg)	Weight per metre (kg/m)	
3.500	± 0.050	9.621	0.1133	12.373	0.08082	0.1164	12.676	0.07889	± 5
3.650	± 0.050	10.465	0.1042	11.375	0.08791	0.1070	11.662	0.08575	± 5
3.750	± 0.050	11.046	0.0987	10.777	0.0928	0.10138	11.049	0.09051	± 5
4.000	± 0.063	12.57	0.08674	9.470	0.1056	0.08913	9.709	0.1030	± 5
4.500	± 0.063	15.91	0.06853	7.485	0.1336	0.07042	7.669	0.1304	± 5
5.000	± 0.063	19.63	0.05551	6.064	0.1649	0.05704	6.211	0.1610	± 5
5.500	± 0.080	23.76	0.04588	5.010	0.1996	0.04714	5.133	0.1948	± 5
6.000	± 0.080	28.27	0.03855	4.211	0.2375	0.03961	4.314	0.2318	± 5
6.500	± 0.080	33.18	0.03285	3.588	0.2787	0.03375	3.675	0.2721	± 5
7.000	± 0.080	34.48	0.02832	3.093	0.3233	0.02910	3.169	0.3156	± 5

Η χρήση σύρματος κράματος NiCr για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι προτιμότερη σε σύγκριση με σύρμα κράματος Constantan. Όπως αναλύθηκε

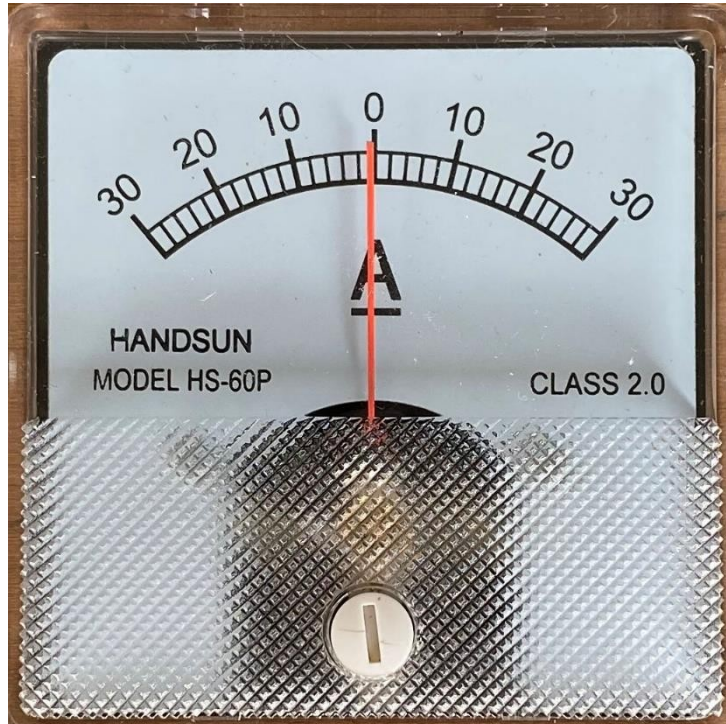
παραπάνω, κράματα που δεν περιέχουν χαλκό ή σίδηρο, στη προκειμένη το NiCr, υπερέχουν. Ακόμη συγκρίνοντας το Π1 με το Π2, διαπιστώνουμε ότι για την προσομοίωση μιας αντίστασης οποιασδήποτε τιμής απαιτείται μεγαλύτερη διάμετρος σύρματος NiCr σε σχέση με σύρμα Constantan. Συνεπώς, προτιμάμε τη χρήση σύρματος NiCr και για λόγους πρακτικότητας και ευκολίας χρήσης της διάταξης, καθότι είναι ευκολότερη η διενέργεια λήψης με το κροκοδειλάκι. Έγινε επιλογή συρματος χρωμιονικελίνης 3.5mm, το οποίο σύμφωνα με το Π2 έχει αντίσταση 0,1133 στους 20C, ώστε η αντίσταση του σύρματος να έχει περίπου την ίδια τιμή με τη συνολική αντίσταση του υπο δοκιμή αγωγού.

### 3.3.2 Όργανο ισορροπίας

Για το προσδιορισμό της θέσης σφάλματος είναι απαραίτητη η χρήση ενός οργάνου ένδειξης της ισορροπίας. Σχεδόν το σύνολο των διατάξεων εντοπισμού σφαλμάτων του εμπορίου, χρησιμοποιούν για το σκοπό αυτό ένα όργανο που ονομάζεται γαλβανόμετρο συνεχούς ρεύματος. Ένα γαλβανόμετρο συνεχούς ρεύματος είναι ένα αμπερόμετρο με κινούμενο πηνίο. Συνεπώς επιλέξαμε ένα **αμπερόμετρο δύο κατευθύνσεων**, το οποίο λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο [42].

Τα όργανα κινητού πηνίου είναι αναλογικά ηλεκτρομηχανικά όργανα. Τα όργανα αυτά ανήκουν στη κατηγορία των ηλεκτρομηχανικών οργάνων καθώς η συνύπαρξη των ηλεκτρικών ή μηχανικών ποσοτήτων στο εσωτερικό τους έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μηχανικής δύναμης ή ροπής. Αποτελούνται από ένα κινητό μέρος που διαθέτει μια αρχική θέση ηρεμίας, στο οποίο επενεργεί η ροπή-ως αποτέλεσμα της συνύπαρξης των διαφόρων ηλεκτρικών και μηχανικών ποσοτήτων- δημιουργώντας κίνηση. Στην ανάπτυξη κινητήριας ροπής οδήγησης αντιδρά η διάταξη επαναφοράς, που και εκείνη προσπαθεί να αναπτύξει ροπή, ανάλογη με τη ποσότητα της κινητήριας ροπής που δέχεται το κινητό μέρος, ώστε όταν πάψει η δράση της κινητήριας ροπής το κινητό μέρος να επανέλθει στην αρχική του θέση ηρεμίας [42].

Από την αλληλεπίδραση των δύο ροπών προκαλείται μια γωνιακή απόκλιση η οποία είναι ανάλογη της μετρούμενης ποσότητας, δηλαδή η μετατόπιση της ένδειξης του οργάνου είναι ανάλογη της ροής του ρεύματος στο κινούμενο πηνίο(γραμμικότητα) [42]. Η αναλογικότητα της ένδειξης του οργάνου με τη ροή ρεύματος στο κινούμενο πηνίο είναι βασικότερος ο λόγος επιλογής του συγκεκριμένου τύπου οργάνου.



**Εικόνα 3.1** Το αναλογικό αμπερόμετρο δύο κατευθύνσεων που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη

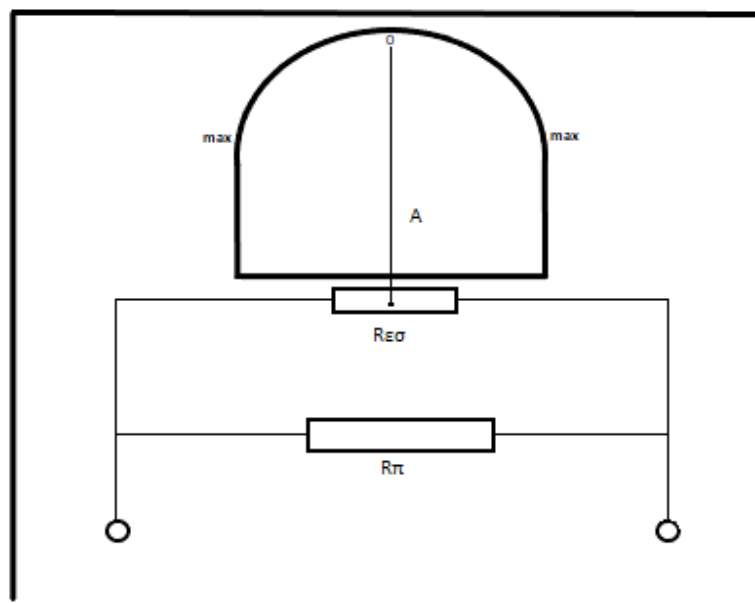
Το εύρος μέτρησης του οργάνου που επελέγη είναι διπλό, αφού είναι όργανο διπλής πολικότητας, δηλαδή 0 έως 30A και 0 έως -30A. Το συγκεκριμένο εύρος μέτρησης επετεύχθη κατασκευαστικά, χρησιμοποιώντας ένα βασικό όργανο και πραγματοποιώντας επέκταση κλίμακας του, τοποθετώντας παράλληλα της εσωτερικής αντίστασης( $R_{εσ}$ ) του οργάνου μία προστατευτική αντίσταση( $R_{π}$ )(εικόνα 4.2). Ανοίγοντας το όργανο και καταγράφοντας τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των εσωτερικών του στοιχείων, η εσωτερική αντίσταση μετρήθηκε 0.2Ω ενώ η αντίσταση προστασίας μετρήθηκε πρακτικά 0. Για να προσδιορίσουμε με ακρίβεια την αντίσταση προστασίας, αφαιρέσαμε το σύρμα( $R_{π}$ ) που είχε τοποθετηθεί παράλληλα στην εσωτερική αντίσταση και εφαρμόσαμε στα άκρα του οργάνου κατάλληλη τάση-μέσω ενός τροφοδοτικού συνεχούς τάσης-ώστε να επιτύχουμε μέγιστη απόκλιση της βελόνας, αφού προηγουμένως παρεμβάλαμε μεταξύ του τροφοδοτικού και του οργάνου μια αντίσταση των 10Ω για να μη κάψουμε το όργανο και ένα φορητό πολύμετρο για να μετρήσουμε το ρεύμα. Εφαρμόσαμε μέσω του τροφοδοτικού τάση 1V και το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα μετρήθηκε περίπου 215mA(υπο τάση 43.14mV) [43].Γνωρίζοντας από το κατασκευαστή το εύρος μέτρησης του οργάνου, πριν την αφαίρεση της προστατευτικής αντίστασης( $R_{π}$ ), μπορούμε να κάνουμε τους παρακάτω υπολογισμούς:

- Η σταθερά που δείχνει πόσες φορές πρέπει να κάνουμε επέκταση κλίμακας είναι 
$$K = \frac{30[A]}{215 \cdot 10^{-3}[A]} = 139$$

- Η ακριβής τιμή της προστατευτικής αντίστασης του οργάνου είναι

$$R_{\pi} = \frac{R_{\varepsilon\sigma}}{K - 1} = \frac{0.2\Omega}{139 - 1} = 1.45m\Omega$$

Συμπερασματικά, το εύρος μέτρησης του βασικού οργάνου είναι από 0 έως 215mA και 0 έως -215mA, ενώ το εύρος μέτρησης του οργάνου με επέκταση κλίμακας(όπως αγοράστηκε) είναι από 0 έως 30A και 0 έως -30A. Αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε το όργανο με την επέκταση κλίμακας. Ωστόσο κατά το στάδιο των δοκιμών της διάταξης, αντιμετωπίσαμε διάφορα προβλήματα από την επιλογή αυτή, τα οποία θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.



**Εικόνα 3.2** Κάτοψη του εσωτερικού του οργάνου

### 3.3.3 Υπό δοκιμή αγωγός

Η μέθοδος ανίχνευσης σφαλμάτων με χρήση βρόχου Murray, χρησιμοποιείται τόσο σε συστήματα καλωδίων χαμηλής τάσης(XT) και τηλεπικοινωνιακά καλώδια όσο σε συστήματα καλωδίων υψηλής τάσης(YT) [14]. Για λόγους πρακτικότητας, επιλέξαμε τη χρήση καλωδίου εσωτερικών εγκαταστάσεων(XT) για τη διεξαγωγή της δοκιμής. Το καλώδιο που χρησιμοποιούμε είναι NYM 3X1,5mm<sup>2</sup>, το οποίο είναι ελαφρύ, με άκαμπτο αγωγό, ενώ εκτός από μανδύα διαθέτει και μόνωση στο εσωτερικό του [44]. Παράλληλα διαθέτει 3 αγωγούς(πυρήνες), συνεπώς μπορούμε να προσομοιάσουμε κάθε τύπο σφάλματος.

Ανατρέχοντας στο technical data sheet του συγκεκριμένου καλωδίου, παρατηρούμε ότι η αντίσταση του κάθε πυρήνα του καλωδίου είναι 12,1 Ω/km.

Προφανώς, όσο μεγαλύτερο μήκος καλωδίου χρησιμοποιήσουμε, τόσο καλύτερη ορθότητα και επαναληψιμότητα θα έχουν και οι ενδείξεις του οργάνου. Από την επιλογή του μήκους καλωδίου και τύπου του καλωδίου καθορίζεται και το πάχος του σύρματος χρωμιονικελίνης, το οποίο χρησιμοποιείται στο κλάδο αντιστάθμισης. Στη κατασκευή της διάταξης επιλέξαμε, ως υπό δοκιμή αγωγό, ένα εύκαμπτο, τριπολικό, μονωμένο καλώδιο NYM 3x1,5mm<sup>2</sup>, παρότι η αντίσταση του συγκεκριμένου αγωγού ανά μέτρο είναι μεγαλύτερη από ένα καλώδιο ΜΤ. Ωστόσο, ανατρέχοντας σε άλλες διατάξεις εντοπισμού σφαλμάτων με τη συγκεκριμένη μέθοδο εντοπισμού, διαβάσαμε ότι μπορεί και ένα τηλεφωνικό καλώδιο, το οποίο έχει μεγαλύτερη αντίσταση ανά μέτρο ακόμη και από τα καλώδια εσωτερικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, να χρησιμοποιηθεί ως υπό δοκιμή αγωγός. Το μήκος του καλωδίου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 5m [45]. Γνωρίζοντας ότι η αντίσταση του συγκεκριμένου καλωδίου είναι 12,1Ω/km, αν χρησιμοποιήσουμε 5m αγωγού η συνολική αντίσταση του αγωγού(υπο δοκιμή αγωγός και αγωγός αντιστάθμισης) είναι  $R_{5m\ 20^{\circ}\text{C}} = \frac{12,1[\Omega/\text{km}] * 5[\text{m}]}{1000[\text{m}]} = 0,0605\Omega$ , δηλαδή πρέπει να επιλεγεί σύρμα χρωμιονικελίνης πάχους 4,5mm. Ωστόσο, εξαιτίας περιορισμένης εμπορικής διάθεσης, δεν κατέστη δυνατή η εύρεση σύρματος χρωμιονικελίνης με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, επιλέξαμε σύρμα χρωμιονικελίνης πάχους 3,5m, και κατά συνέπεια χρησιμοποιήσαμε 10m καλωδίου με αντίσταση  $R_{10m\ 20^{\circ}\text{C}} = 12,1[\Omega/\text{km}] * 10[\text{m}]/1000[\text{m}] = 0,121\Omega$



**Εικόνα 3.3** Άποψη ενός αγωγού 3X1.5mm<sup>2</sup>

### 3.3.4 Τροφοδοσία διάταξης

Από τη θεωρητική ανάλυση της διάταξης Murray στην **ενότητα 2.1.1**, η τάση τροφοδοσίας της διάταξης εξαρτάται από την αντίσταση σφάλματος. Θεωρούμε αυθαίρετα ότι η αντίσταση του σφάλματος έχει μηδενική τιμή. Από τη παραπάνω ανάλυση, είναι προφανές ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια συμβατική πηγή τάσης(πχ μπαταρία), εφόσον η τιμή της αντίστασης σφάλματος είναι μικρότερη από  $1k\Omega$  όπου υπάρχει δέσμευση να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός τύπος τροφοδοσίας(ανορθωτής τάσης, γεννήτρια δοκιμής μόνωσης). Κάθε εφαρμογή χρειάζεται μια ελάχιστη τάση λειτουργίας, και το επίπεδο τάσης που είναι αρκετό για κάθε εφαρμογή αναφέρεται συνήθως ‘‘τάση αποκοπής’’, ακόμη και αν για την εφαρμογή απαιτείται μια συστοιχία μπαταριών [46]. Η τάση τροφοδοσίας στην οποία μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά η διάταξη μπορεί να επιλεγεί από ένα πεδίο τιμών, μεταξύ των οποίων 4V, 6V, 8V, 12V. Ωστόσο, η επιλογή μιας πηγής τάσης των 12V είναι προτιμότερη [17] [47]

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευκολία μεταφοράς της διάταξης, σε περίπτωση που καταστεί αναγκαίο, και κατ’ επέκταση η λειτουργικότητα της σε περιπτώσεις έλλειψης πηγής τροφοδοσίας, επιλέξαμε τη χρήση συστοιχίας μπαταριών AA αντί μιας συμβατικής πηγής τάσης(τροφοδοτικού). Η τάση μιας αλκαλικής μπαταρίας κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1.55V και 1.65V(**τάση ανοικτού κυκλώματος**), κάτι το οποίο επιβεβαιώσαμε και με μέτρηση. Η ονομαστική της τάση, ωστόσο, θεωρείται πως είναι 1.5V [46]. Η απαίτηση για τάση της τάξεως των 12V, ικανοποιείται συνδέοντας σε σειρά 4 βάσεις αλκαλικών μπαταριών AA, κάθε μια από τις οποίες παρέχει θεωρητικά 3V(έχει υποδοχή για 2 μπαταρίες AA).

Ο βαθμός της πτώσης τάσης κατά τη χρήση, εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής και την απαίτηση του φορτίου που συνδέεται στη μπαταρία, ενώ ταυτόχρονα καθορίζεται και από τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Μετρώντας τη τάση ανοικτού κυκλώματος παίρνουμε μόνο μια πρόχειρη ιδέα της χωρητικότητας μιας μπαταρίας και/ή της κατάστασης της μπαταρίας [46]. Στο στάδιο των δοκιμών για την εξασφάλιση της λειτουργικότητας της διάταξης, μας απασχόλησε η πτώση τάσης των μπαταριών κατά τη χρήση, καθώς από αυτή θα εξαρτηθεί εν πολλοίς η ορθότητα των ενδείξεων του οργάνου ισορροπίας και κατά συνέπεια ο ακριβής εντοπισμός του σημείου σφάλματος. Η φύση του προβλήματος και η αντιμετώπιση του θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

### 3.4 Διαδικασία κατασκευής

Αρχικά, χρησιμοποιώντας ένα τρυπάνι με το κατάλληλο ξυλουργικό ποτήρι δημιουργήσαμε στην ξύλινη επιφάνεια την βάση υποδοχής για το γαλβανόμετρο.





Βιδώσαμε την μετροταινία στον ξύλινο πήχη



Προχωρήσαμε στην στερέωση του σύρματος χρωμονικελίνης . Κόψαμε δύο μικρούς ξύλινους κύβους τους οποίους τρυπήσαμε στο κέντρο τους, με τρυπάνι διατομής 3.5mm, και βάλαμε τις άκρες του σύρματος στις οπές που δημιουργήσαμε, ώστε να μπορούμε να λαμβάνουμε εύκολη μέτρηση με το κροκοδειλάκι.



Έπειτα, βιδώσαμε τους ξύλινους κύβους στον πήχη με την μετροταινία.

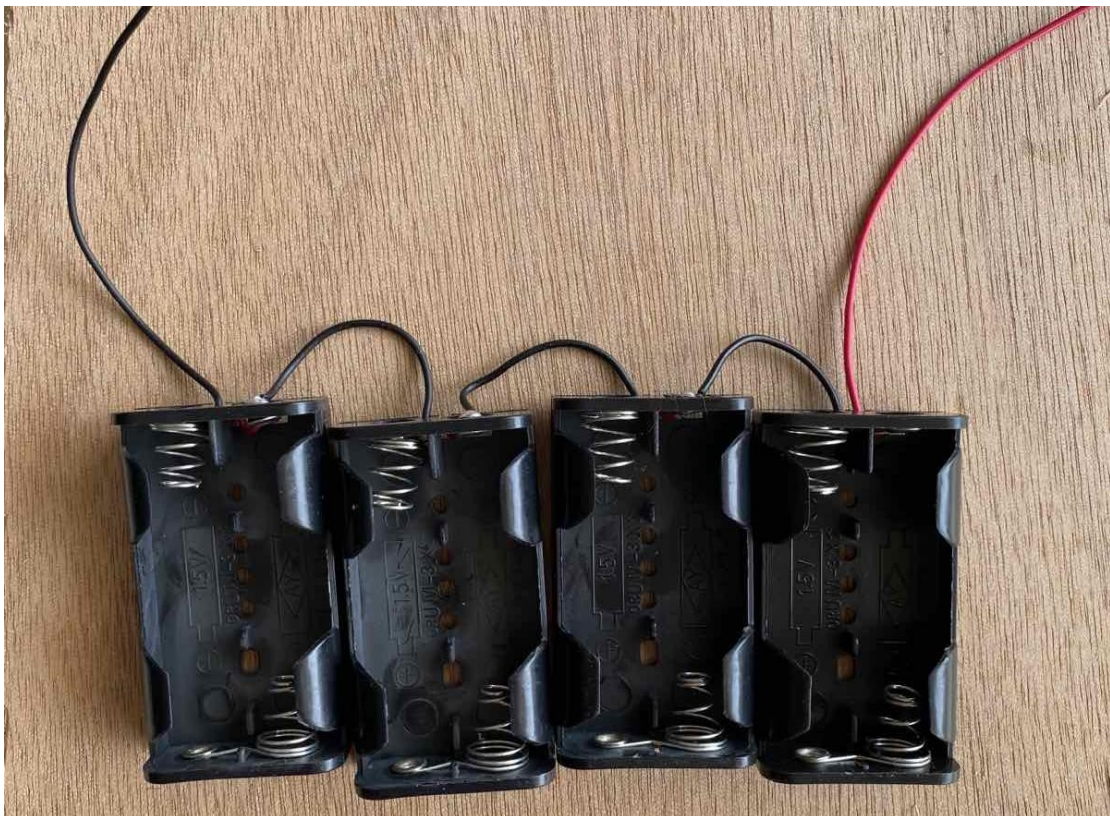
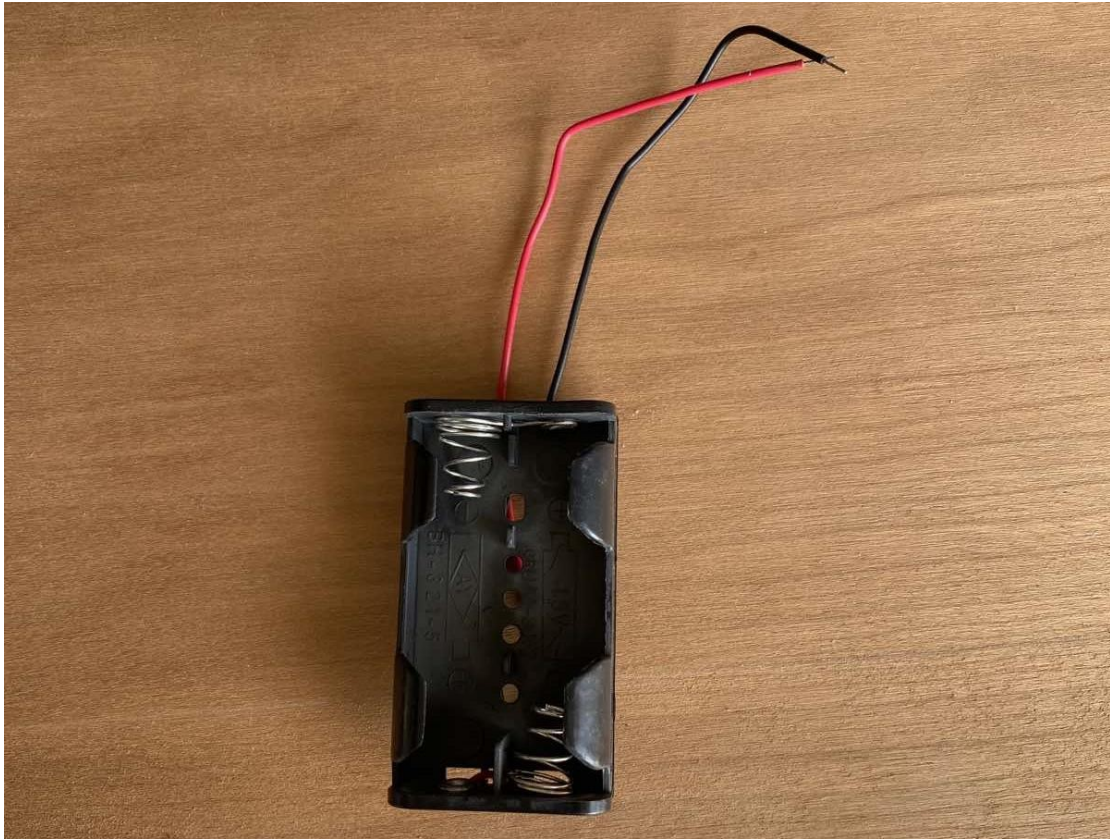




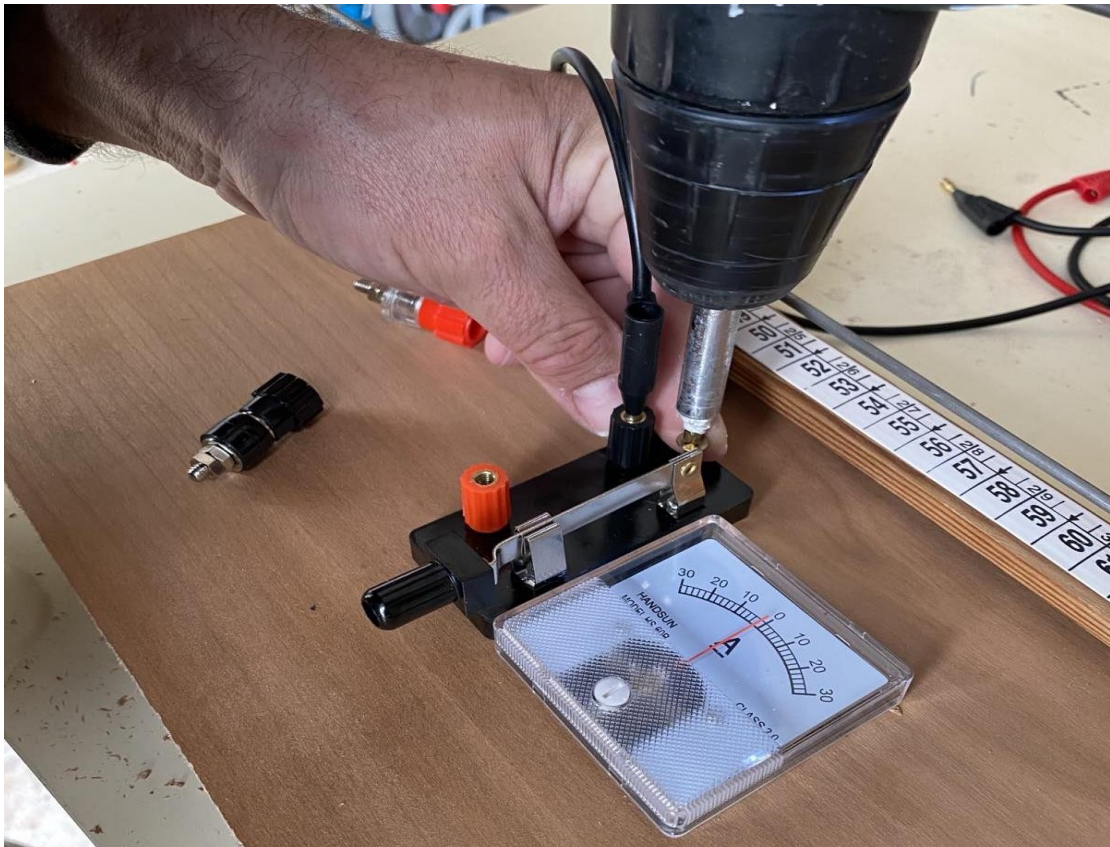
Κολλήσαμε με ξυλόκολλα τον πήχη με το πλαίσιο.



Για την τροφοδοσία χρησιμοποιήσαμε 4 θήκες μπαταρίας AA, 2 θέσεων, όπου τις συνδέσαμε σε σειρά και τις θερμοκολλήσαμε με σιλικόνη στην κάτω πλευρά του πλαισίου.

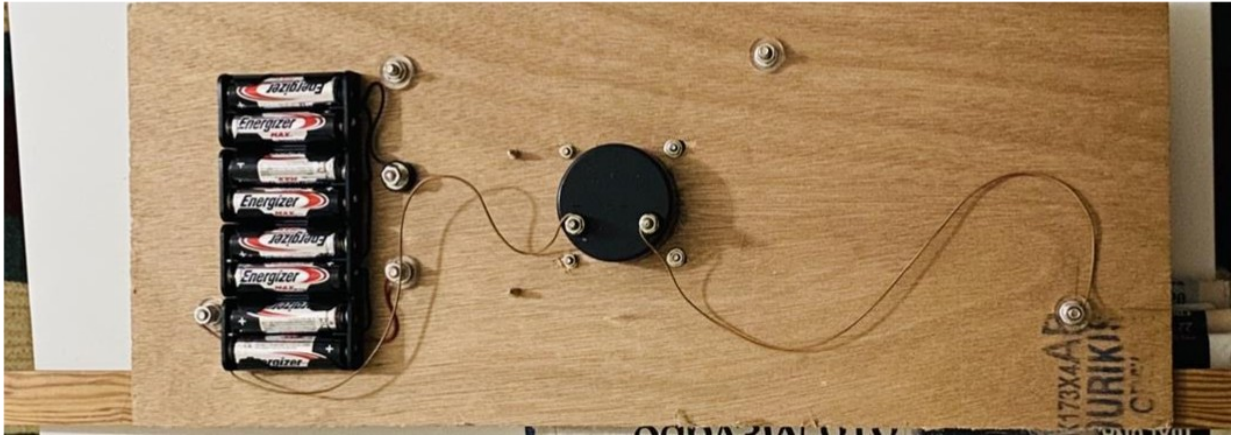


Στην συνέχεια , βιδώσαμε τον μαχαιρωτό διακόπτη του κυκλώματος και ανοίξαμε με το τρυπάνι κατάλληλες διατομές αντίστοιχα για κάθε μπόρνα.



Πραγματοποιήσαμε την συνδεσμολογία με τα κατάλληλα μήκη καλωδίων.

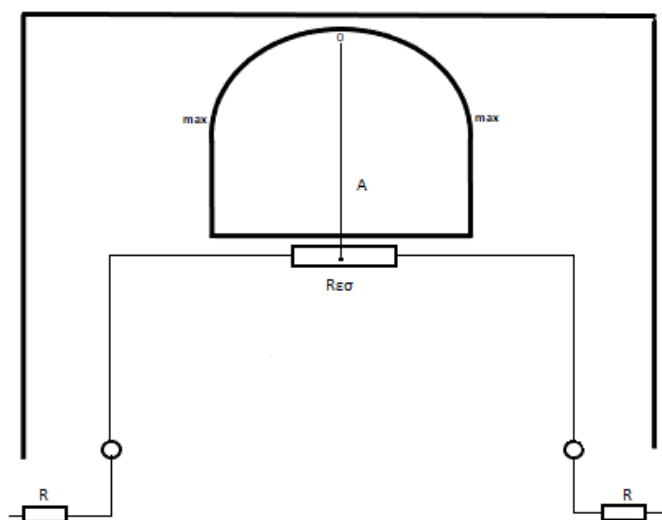




### 3.5 Προβλήματα κατά το στάδιο των πειραματικών δοκιμών

#### 3.5.1 Όργανο ισορροπίας

Η επιλογή που, κατά συνθήκη, κάναμε σε προηγούμενο κεφάλαιο να χρησιμοποιήσουμε το όργανο όπως το αγοράσαμε με την επέκταση κλίμακας, δηλαδή με εύρος μέτρησης  $-30\text{A}$  έως  $30\text{A}$ , οδήγησε στη μη λειτουργικότητα της διάταξης. Εφόσον από την ένδειξη του οργάνου ισορροπίας εξαρτάται και ο προσδιορισμός της θέσης σφάλματος του καλωδίου, η χαμηλή ευαισθησία του οργάνου μέτρησης δεν μας δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της θέσης σφάλματος. Είναι ενδεικτικό να αναφέρουμε ότι μεταβάλλοντας τη λήψη με το κροκοδειλάκι, ακόμα και στην ακραία περίπτωση όπου το σφάλμα συνέβη στο 100% του εσφαλμένου αγωγού, όπου κάνουμε λήψη στο 50% της αντίστασης ισοστάθμισης (η χορδή χρωμιονικελίνης παίζει το ρόλο αυτής της αντίστασης), η απόκλιση της βελόνας δεν ξεπέρασε ούτε το μισό τετραγωνάκι προς τα δεξιά. Το ίδιο σχεδόν συνέβη και στην άλλη ακραία περίπτωση όπου το σφάλμα συνέβη στο 0% του εσφαλμένου αγωγού, όπου κάνουμε λήψη στο 0% της αντίστασης ισοστάθμισης (η χορδή χρωμιονικελίνης παίζει το ρόλο αυτής της αντίστασης).



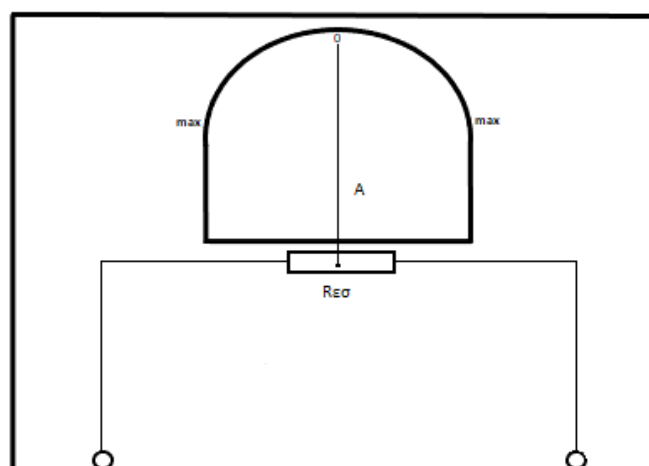
Εικόνα 3.4 Συνδεσμολογία οργάνου

Επειτα, πραγματοποιήσαμε δοκιμές με αντιστάσεις προστασίας διαφόρων τιμών ( $R\pi$ ). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε αντίσταση προστασίας των  $400\Omega$  και των  $200\Omega$ . Ακολουθώντας τη ίδια διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω, είδαμε την απόκλιση της βελόνας να μην ξεπερνά το 1 τετραγωνάκι και το 1.5 τετραγωνάκι αντίστοιχα. Έτσι ακολουθήσαμε διαφορετική στρατηγική, αφαιρώντας εντελώς την προστατευτική αντίσταση ( $R\pi$ ) του οργάνου, δηλαδή λειτουργώντας το ως βασικό όργανο. Ωστόσο, εξαιτίας του γεγονότος ότι η διαφορά δυναμικού στα άκρα του κλάδου του οργάνου ισορροπίας μας ήταν άγνωστη, προτιμήσαμε για προστασία του οργάνου τη χρήση δύο αντιστάσεων ( $R$ ), όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4. Χρησιμοποιήσαμε δυο



αντιστάσεις των  $12\Omega$  και δυο αντιστάσεις  $8\Omega$ . Ακολουθήσαμε την ίδια διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω, χωρίς μεγάλη βελτίωση, αφού είδαμε τη βελόνα να προσεγγίζει τα 2 τετραγωνάκια για αντιστάσεις των  $12\Omega$  και να τα ξεπερνάει ελαφρώς για αντιστάσεις των  $8\Omega$ .

Παρατηρώντας ότι η ευαισθησία του οργάνου εξακολουθούσε να είναι χαμηλή, αφαιρέσαμε τις δύο αντιστάσεις που είχαμε τοποθετήσει αντιδιαμετρικά και **προτιμήσαμε τη λειτουργία του ως βασικό όργανο**(εικόνα 3.5). Πραγματοποιώντας δοκιμές για να επιβεβαιώσουμε την επιθυμητή λειτουργία της διάταξης παρατηρήσαμε ότι μεταβάλλοντας τη λήψη με το κροκοδειλάκι, ακόμα και στην ακραία περίπτωση όπου το σφάλμα συνέβη στο 100% του εσφαλμένου αγωγού, όπου κάνουμε λήψη στο 50% της αντίστασης ισοστάθμισης(η χορδή χρωμιονικελίνης παίζει το ρόλο αυτής της αντίστασης), η απόκλιση της βελόνας ξεπέρασε τα 5 τετραγωνάκια προς τα δεξιά(ένδειξη 10, όπως φαίνεται στο όργανο). Το ίδιο σχεδόν συνέβη και στην άλλη ακραία περίπτωση όπου το σφάλμα συνέβη στο 0% του εσφαλμένου αγωγού, όπου κάνουμε λήψη στο 0% της αντίστασης ισοστάθμισης(η χορδή χρωμιονικελίνης παίζει το ρόλο αυτής της αντίστασης). Όμως, στη κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή με λήψη στο 25% της χορδής χρωμιονικελίνης, παρατηρούμε ότι η βελόνα του οργάνου δεν ισορροπεί εντελώς αλλά παρουσιάζει μια απόκλιση κατά σχεδόν 1 τετραγωνάκι. Το γεγονός αυτό-όπως αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο-οφείλεται αφενός μεν στην ανισότητα των αντιστάσεων του κλάδου αντιστάθμισης, οποίος αποτελείται από τη χορδή χρωμιονικελίνης, και του κλάδου του καλωδίου, ο οποίος αποτελείται από τον αγωγό αναφοράς μαζί με τον υπό δοκιμή αγωγό. Αφετέρου, όπως θα αναλύσουμε και παρακάτω, διαπιστώσαμε ότι στο συγκεκριμένο πρόβλημα συνέβαλαν το φαινόμενο της εκφόρτισης των μπαταριών και η αντίσταση προστασίας της διάταξης, αποτρέποντας τη παροχή σταθερής τάσης τροφοδοσίας από τη συστοιχία μπαταριών.



**Εικόνα 3.5** Συνδεσμολογία οργάνου ισορροπίας που καταλήξαμε

### 3.5.2 Αντίσταση προστασίας

Θεωρητικά, η διάταξη Murray μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά ανεξαρτήτως της ποσότητας του ρεύματος που θα δεχθεί από τη πηγή τροφοδοσίας. Στη πράξη, δεν θα ικανοποιείται η συνθήκη για μια ελάχιστη τάση λειτουργίας (τάση αποκοπής), οι μπαταρίες θα προσπαθήσουν να εφαρμόσουν όσο μεγαλύτερη τάση μπορούν έως ότου εκφορτιστούν εντελώς. Δηλαδή, σε περίπτωση ανυπαρξίας αντίστασης προστασίας, η πηγή καλείται να δώσει θεωρητικά άπειρο ρεύμα. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η χρήση προστατευτικής αντίστασης περιορισμού του ρεύματος που διαρρέει τους κλάδους τη γέφυρας.

Ανατρέχοντας σε διατάξεις εντοπισμού σφαλμάτων, και συγκεκριμένα σε διατάξεις της εταιρείας Leeds&Northrup [48], παρατηρούμε ότι χρησιμοποιούνται δυο προστατευτικές αντιστάσεις των  $9\text{k}\Omega$  και  $1\text{k}\Omega$  οι οποίες προστατεύουν τόσο τη μπαταρία όσο και τη διάταξη από υπερφόρτωση λόγω ροής μεγάλου ρεύματος. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψιν ότι τέτοιες διατάξεις είναι πολυμορφικές-δηλαδή δέχονται τάσεις τροφοδοσίας διαφόρων σταθμών, ανάλογα και της αντίστασης του σφάλματος-η αντίσταση των  $9\text{k}\Omega$  βραχυκυκλώνεται και χρησιμοποιείται μόνο αυτή των  $1\text{k}\Omega$ . Συνεπώς, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε μια αντίσταση άνθρακα των  $1\text{k}\Omega/0,25\text{W}$ .



**Εικόνα 3.6** Άποψη μιας αντίστασης άνθρακα 1kΩ 1/4W

Ωστόσο με τη χρήση αντίστασης προστασίας του 1kΩ, είδαμε την απόκλιση της βελόνας του οργάνου να μην ξεπερνά το 1 τετραγωνάκι για ακραίες λήψεις. Συνεπώς η χαμηλή ευαισθησία της διάταξης και η τιμή της αντίστασης, δεν μας επιτρέπει τη χρήση της συγκεκριμένης αντίστασης. Έπειτα, πραγματοποιήσαμε δοκιμές με αντιστάσεις προστασίας διαφόρων τιμών. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε αντίσταση προστασίας των 200Ω/0,25W και των 100Ω/0,25W. Τροφοδοτώντας με τάση το κύκλωμα, είδαμε την βελόνα του οργάνου να αποκλίνει περισσότερο. Προτιμήσαμε, όμως, τη χρήση διαφορετικής αντίστασης προστασίας καθώς το εύρος μέτρησης του οργάνου δεν ήταν το επιθυμητό στις ακραίες λήψεις, κατά συνέπεια και η ακρίβεια εντοπισμού της θέσης σφάλματος. Έπειτα χρησιμοποιήσαμε δυο αντιστάσεις των 10Ω/0,25W και 8Ω/0,25W. Παρατηρήσαμε σημαντική βελτίωση, αφού είδαμε τη βελόνα να ξεπερνά τα 10 τετραγωνάκια για τις δύο ακραίες λήψεις της αντίστασης αντιστάθμισης(χορδή χρωμιονικελίνης). Για τιμή της αντίστασης 10Ω, και λαμβάνοντας υπόψιν πως οι αντιστάσεις των κλάδων της γέφυρα έχουν πολύ μικρές τιμές, συμπεραίνουμε ότι το συνολικό ρεύμα που απορροφά το κύκλωμα από τη πηγή είναι κοντά στα 1,2A, αφού  $I = 12[V] / 10[\Omega] = 1,2A$ . Στη πράξη, με χρήση φορητού πολυμέτρου, το ρεύμα αυτό μετρήθηκε πάνω από 1,25A, ενώ στιγμιαία ξεπερνούσε τη τιμή αυτή. Έτσι δύναται να υπολογιστεί και η **μέγιστη μεταφορά ισχύος**(Resistor Power Rating) που απαιτείται  $P = V * I = 12 * 1,2 = 14,4W$ , η οποία είναι όση ενέργεια καταναλώνει η αντίσταση και τη μετατρέπει σε θερμότητα [49]. Η αντίσταση άνθρακα των 10Ω έχει μέγιστη μεταφορά ισχύος 0,25W. Όπως κάθε αντίσταση, έτσι και η συγκεκριμένη, έχει μία **μέγιστη ισχύ διασποράς**(Maximum Dissipated Power Rating) η οποία είναι η μέγιστη ποσότητα ισχύος που μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα. Οι αντιστάσεις που ξεπερνούν τη μέγιστη επιτρεπόμενη μεταφορά ισχύος, τείνουν να καταστραφούν οι ίδιες αλλά και να καταστρέψουν και το κύκλωμα στο οποίο είναι συνδεδεμένες [49]. Συνεπώς δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε τη συγκεκριμένη αντίσταση ως αντίσταση προστασίας. Έτσι η χρήση των δύο

αυτών αντιστάσεων είχε ως αποτέλεσμα την υπερθέρμανση και μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα τη καταστροφή τους, ενώ παράλληλα, δεν μας εξασφαλίζουν ότι η ποσότητα του ρεύματος που απορροφά το κύκλωμα είναι σταθερή.

Για την επιλογή αντίστασης για μία συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψιν τη μέγιστη μεταφορά ισχύος στην αντίσταση αυτή. Ο ρόλος μιας αντίστασης είναι να αντιστέκεται στη ροή ρεύματος, η οποία παράγεται από μια διαφορά δυναμικού επάνω σε αυτή, ενός κυκλώματος και αυτό το καταφέρνει διαχέοντας την περίσσεια ενέργεια ως θερμότητα στο περιβάλλον. Η επιλογή μιας αντίστασης με μικρή τιμή ισχύος όταν δέχεται μεγάλη ισχύ, όπως αναλύσαμε και παραπάνω, θα προκαλέσει υπερβολική διάχυση θερμότητας στην αντίσταση, καταστρέφοντας τόσο την αντίσταση όσο και το κύκλωμα. Γι' αυτό κρίθηκε απαραίτητη η χρήση βαττικής αντίστασης ισχύος ως αντίσταση προστασίας. Εξάλλου, οι αντιστάσεις ισχύος έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν και να μπορούν να μετατρέψουν σε θερμότητα μεγάλες τιμές ισχύος. Ένα κοινό χαρακτηριστικό όλων των αντιστάσεων ισχύος είναι ότι έχουν κατασκευαστεί για να μπορούν να μετατρέψουν σε θερμότητα μεγάλες τιμές ισχύος, ενώ παράλληλα να καταλαμβάνουν μικρό όγκο(δηλαδή να έχουν μικρό μέγεθος) [49]. Μόνο με τη προσθήκη βαττικής αντίστασης προστασίας το ρεύμα που απορροφά η αντίσταση σταθεροποιήθηκε, ενώ διαρρέεται απρόσκοπτα από ρεύμα ανεξαρτήτως χρόνου. Η αντίσταση των  $10\Omega/15W$  μπορεί να μετατρέψει σε θερμότητα μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας και ζεσταίνεται λιγότερο, σε σχέση με μια αντίσταση των  $9\Omega/10W$  που δοκιμάσαμε και η οποία έχει χαμηλότερο όριο μέγιστης μεταφοράς ισχύος από τα  $14,4W$ .



**Εικόνα 3.7** Άποψη μιας βαττικής αντίστασης  $10\Omega/15W$

### 3.5.3 Τροφοδοσία διάταξης

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3.3.4, στο στάδιο των δοκιμών για την εξασφάλιση της λειτουργικότητας της διάταξης, μας απασχόλησε η πτώση τάσης των μπαταριών που στελεχώνουν τη συστοιχία μπαταριών, καθώς από αυτή εν πολλοίς θα εξαρτηθεί η ορθότητα των ενδείξεων του οργάνου ισορροπίας και κατά συνέπεια ο ακριβής εντοπισμός της θέσης σφάλματος. Αρχικά δεν χρησιμοποιήσαμε αντίσταση προστασίας. Τότε η ποσότητα του ρεύματος που δύναται να απορροφήσει το κύκλωμα είναι θεωρητικά άπειρη, λαμβάνοντας υπόψιν πως οι αντιστάσεις των κλάδων της γέφυρα έχουν πολύ μικρές τιμές. Στη πράξη, η ποσότητα του ρεύματος που απορροφούσε το κύκλωμα ήταν διαρκώς μεταβαλλόμενη, ενώ μετρήθηκε πάνω 8A καθώς η κάθε μία αλκαλική μπαταρία αν βραχυκυκλωθεί μπορεί να εκφορτιστεί με 1A μέγιστο ρεύμα. Για τη δεδομένη τιμή της αντίστασης που καταλήξαμε παραπάνω(10Ω), και λαμβάνοντας υπόψιν πως οι αντιστάσεις των κλάδων της γέφυρα έχουν πολύ μικρές τιμές, συμπεραίνουμε ότι το συνολικό ρεύμα που απορροφά το κύκλωμα από τη πηγή είναι κοντά στα 1,2A, αφού  $I = 12[V] / 10[\Omega] = 1,2A$ . Στη πράξη, με χρήση φορητού πολυμέτρου, το ρεύμα αυτό μετρήθηκε πάνω από 1,2A, ενώ στιγμιαία ξεπερνούσε τη τιμή αυτή.

Μετά τις δοκιμές που διεξάγαμε, όπου δεν χρησιμοποιήσαμε προστατευτική αντίσταση, διαπιστώσαμε ιδιαίτερα ασταθή λειτουργία της διάταξης. Η πτώση τάσης των μπαταριών ήταν πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα αυτές να εκφορτίζονται πολύ γρήγορα και να μη παρέχουν την επιθυμητή τάση των 1.5V η κάθε μία. Συνεπώς εφόσον δεν εξασφαλιζόνταν η απαίτηση για σταθερή τάση 12V, η λειτουργικότητα της διάταξης ήταν περιορισμένη, δηλαδή παρατηρήσαμε ότι κάθε φορά που δίναμε τάση στο κύκλωμα είχαμε και διαφορετική απόκλιση της βελόνας παρόλο που η λήψη στο κλάδο αντιστάθμισης(σύρμα χρωμιονικελίνης) παρέμενε ίδια.

Μετά τις δοκιμές που διεξάγαμε, όπου χρησιμοποιήσαμε προστατευτική αντίσταση, διαπιστώσαμε ότι παρόλο που οι μπαταρίες δεν εκφορτίζονταν με τον ίδιο ρυθμό, ωστόσο κάθε φορά που δίναμε τάση στο κύκλωμα η απόκλιση της βελόνας ήταν διαφορετική παρόλο που η λήψη στο κλάδο αντιστάθμισης(σύρμα χρωμιονικελίνης) παρέμενε ίδια.

Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω παρατηρήσεις, κρίθηκε απαραίτητη η αντικατάσταση της συστοιχίας μπαταριών με μια συμβατική πηγή σταθερής τάσης. Για το σκοπό αυτό επιλέξαμε ένα τροφοδοτικό συνεχούς τάσης(DC), το οποίο προσφέρει-με τη βοήθεια ενός κυκλώματος εσωτερικά-προστασία από βραχυκύκλωμα. Με τη χρήση του τροφοδοτικού, ικανοποιήθηκε η απαίτηση για σταθερή τάση, και ταυτόχρονα η απόκλιση της βελόνας κάθε φορά που δίναμε τάση στο κύκλωμα ήταν ίδια.

### 3.5.4 Τελική μελέτη υλικών

<b>Υλικό</b>	<b>Κόστος</b>	<b>Ποσότητα</b>
Μεζούρα ραπτικής (150cm)	0,62 €	1
Ξύλινος πήχης μήκους 1.5m	3 €	1
Ξύλινες βάσεις σύρματος	1 €	2
Ξυλόβιδες	1 €	
Σύρμα χρωμονικελίνης 1m (3.5mm)	3,60 €	1
Μπορνα C 015B	1,20 €	3
Μπορνα Ασφαλείας 4mm	6,60 €	3
Μαχαιρωτος διακόπτης με μπόρνες	4 €	1
Καλώδιο μπανάνα-μπανάνα θηλυκό 4mm	14,20 €	4
Καλώδιο κροκοδειλάκι-μπανάνα θηλυκό 4mm	11,56 €	3
Αναλογικό Αμπερομετρο FC60P +-30A	11,62 €	1
Βαττική αντίσταση προστασίας 6.8Ω(10W)	0,40 €	1
Βαττική αντίσταση προστασίας 2.2Ω(10W)	0,40 €	1
Καλώδιο συνδέσεων 2mm <sup>2</sup> (καρούλι)	5 €	1
11m καλώδιο NYM 3X1.5mm <sup>2</sup>	10,45 €	1
Ξύλινη Βάση 0.70mX0.25m	5 €	1
Τροφοδοτικό 15V 5A DC	119 €	1
Σύνολο:	199 €	26

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ- ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 4.1 Προσομοίωση της υπό διερεύνηση διάταξης

##### 4.1.1 Γενικά

Με χρήση ενός προγράμματος εξομοίωσης δύναται να μελετηθεί η επίδραση στη συμπεριφορά ενός κυκλώματος, αλλάζοντας τις τιμές διαφόρων παραμέτρων. Παράλληλα, ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα της εξομοίωσης του κυκλώματος, μπορούμε να έχουμε μία σαφή εικόνα για τη δυναμική συμπεριφορά των στοιχείων, τις τάσεις και τα ρεύματα που θα τους εφαρμοστούν και τις καταπονήσεις των στοιχείων.

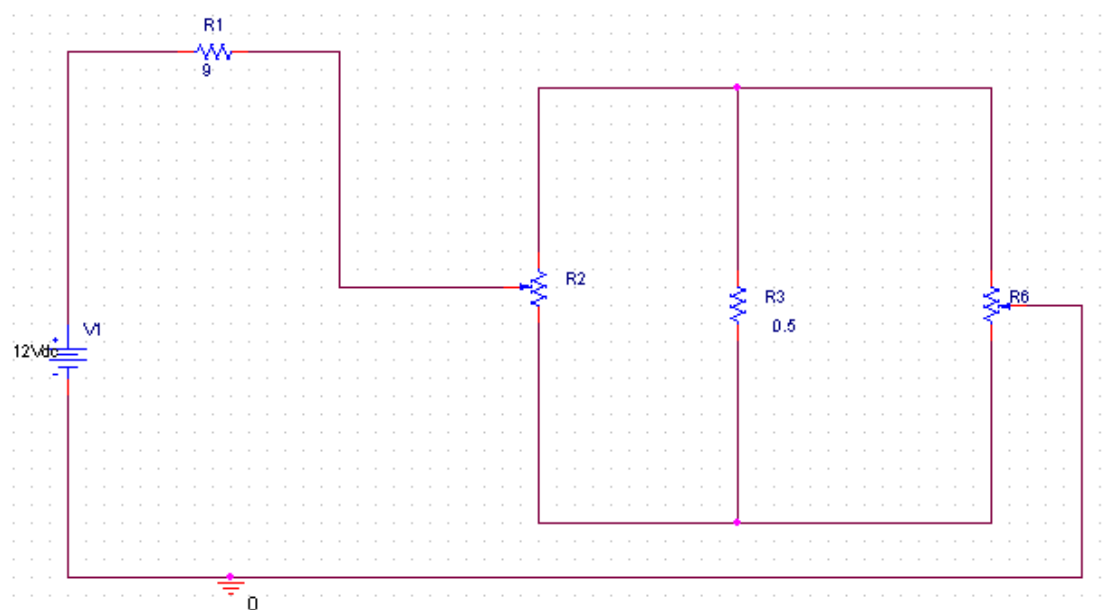
Οι προσομοιώσεις έγιναν μέσω του προγράμματος P-Spice, ενός προγράμματος προσανατολισμένο προς το κύκλωμα [50] [51]. Αφού σχεδιαστεί στο περιβάλλον Capture η τοπολογία του κυκλώματος, δώσουμε τις τιμές των στοιχείων και τις λεπτομέρειες των μοντέλων των στοιχείων, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί διάφορους αλγορίθμους επίλυσης, κατά τους οποίους αρχικά σχηματίζονται οι κανονικές μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις και στη συνέχεια επιλύεται ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων. Με άλλα λόγια, κάθε κατάσταση του κυκλώματος περιγράφεται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων. Η δημιουργία των εξισώσεων βασίζεται στις γνωστές εξισώσεις επίλυσης κυκλωμάτων που προκύπτουν από τους νόμους των ρευμάτων και τάσεων του Kirchhoff.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ανάλυσης που εκτελεί το Spice. Οι πιο συνηθισμένες είναι η γραμμική DC, η bias point, η μη γραμμική transient και η γραμμική AC. Το συγκεκριμένο κύκλωμα είναι μη γραμμικό κύκλωμα, ενώ ταυτόχρονα δεν χρησιμοποιούνται διακοπτικά ηλεκτρονικά στοιχεία (πχ IGBT) που να μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου.

Για την υπό διερεύνηση διάταξη, πραγματοποιήθηκε εξομοίωση του κυκλώματος χρησιμοποιώντας ανάλυση bias point, η οποία υπολογίζει τα ρεύματα και τις τάσεις κάθε κόμβου που αναπτύσσονται από τα διάφορα στοιχεία του κυκλώματος, κάτω από σταθερές συνθήκες λειτουργίας.

#### 4.1.2 Προσομοίωση της διάταξης εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση βρόχου Murray

Το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος είναι το εξής:



**Εικόνα 4.1** Σχηματικό κύκλωμα του διάταξης Murray(Βρόχος Murray)

#### 4.1.3 Επιλογή των παραμέτρων εξομοίωσης

Για αναπαράσταση της πηγής τάσης χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο Vdc από τη βιβλιοθήκη Source, όπου θέσαμε στη παράμετρο value τη τιμή **12V**.

Παρατηρώντας το κύκλωμα της **εικόνας 4.1**, διαπιστώνουμε ότι υπάρχει μια αντίσταση που παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής τάσης και του βρόχου ισοροπίας(**R1**). Για αναπαράσταση της αντίστασης προστασίας χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο R από τη βιβλιοθήκη ANALOG, όπου θέσαμε στη παράμετρο value τη τιμή **10Ω**. Η επιλογή της συγκεκριμένης τιμής για αυτή την αντίσταση, προέκυψε από το στάδιο των πρακτικών δοκιμών της κατασκευής ενώ τα χαρακτηριστικά της αντίστασης που επιλέχθηκε θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Ταυτόχρονα, η αντίσταση **R3** αντιπροσωπεύει την εσωτερική αντίσταση του οργάνου μέτρησης της ισοροπίας της γέφυρας(γαλβανόμετρο), για την αναπαράσταση της οποίας χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο R από τη βιβλιοθήκη ANALOG, όπου θέσαμε στη παράμετρο value τη τιμή **0,5Ω**, της οποίας η επιλογή προέκυψε επίσης από το στάδιο των πρακτικών δοκιμών της κατασκευής.

Το στοιχείο **R6** αντιπροσωπεύει τη συνολική αντίσταση του υπό δοκιμή αγωγού- ο οποίος περιέχει και το σφάλμα- και του αγωγού αναφοράς. Στο στάδιο των πρακτικών δοκιμών, επιλέχθηκε καλώδιο μήκους 10m με αντίσταση

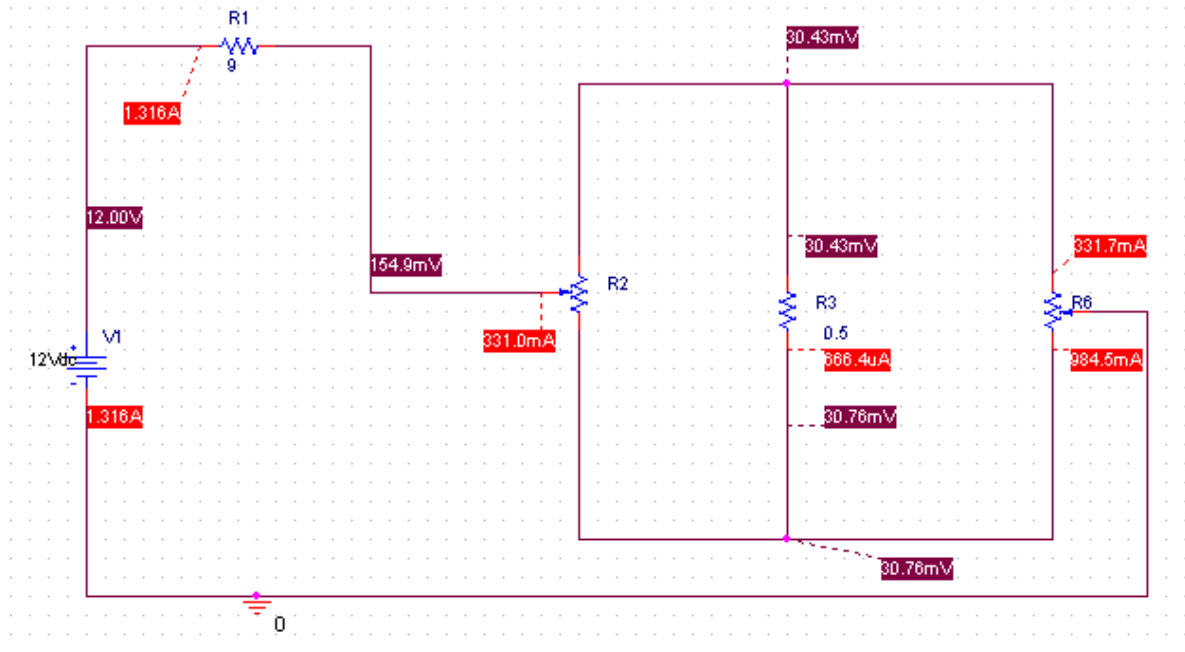


0,121Ω. Σε πραγματικές συνθήκες, όπου ενδεχομένως να απαιτείται εντοπισμός σφαλμάτων σε ένα δίκτυο υπογείων καλωδίων μήκους ακόμη και μερικών χιλιομέτρων, η τιμή αυτής της αντίστασης θα είναι πολλαπλάσια. Οπότε, για αναπαράσταση της αντίστασης αυτής χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο POT από τη βιβλιοθήκη BREAKOUT, όπου θέσαμε στη παράμετρο value τη τιμή **0,121Ω**.

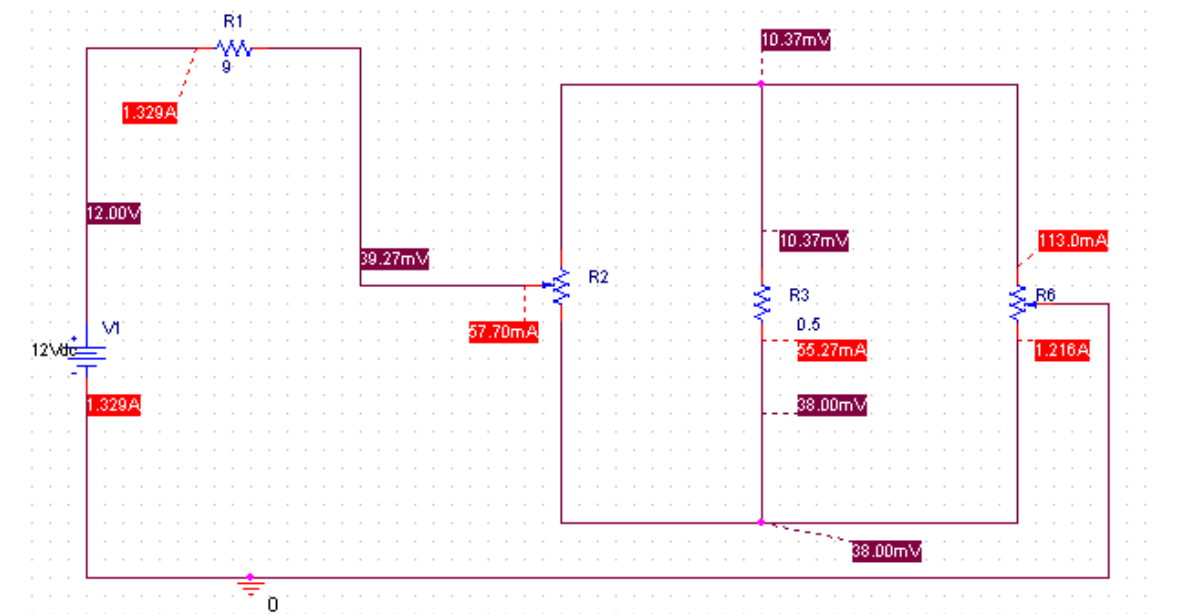
Το στοιχείο **R2** αντιπροσωπεύει τη μεταβλητή αντίσταση που χρησιμοποιείται για την επίτευξη της ισορροπίας της γέφυρας Murray, καθώς μεταβάλλοντας τη λήψη του ποτενσιόμετρου έχουμε εικόνα του σημείου όπου υπάρχει σφάλμα. Όπως διαπιστώσαμε και από το στάδιο της επιλογής υλικών, η αντίσταση αυτή αντιπροσωπεύεται από μια χορδή(μεταλλικό σύρμα) κατασκευασμένη από πρόσμιξη χρωμιονικελίνης. Οπότε, για αναπαράσταση της αντίστασης αυτής χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο POT από τη βιβλιοθήκη BREAKOUT, όπου θέσαμε στη παράμετρο value τη τιμή **0,1133Ω**, όση είναι και η αντίσταση του σύρματος.

#### 4.1.4 Αποτελέσματα της προσομοίωσης

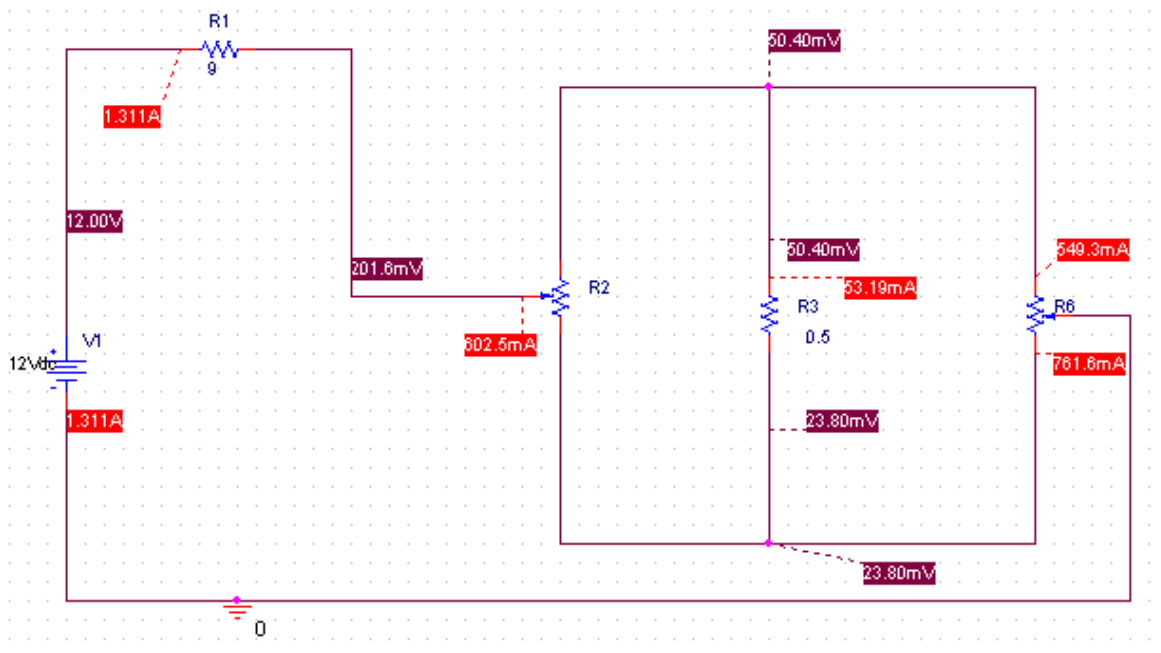
Τα σχηματικά διαγράμματα του κυκλώματος είναι τα εξής:



**Εικόνα 4.2** Σχηματικό κύκλωμα του διάταξης σε κατάσταση ισορροπίας



**Εικόνα 4.3** Σχηματικό κύκλωμα της διάταξης σε κατάσταση ανισορροπίας(λήψη στο 0%)



**Εικόνα 4.4** Σχηματικό κύκλωμα της διάταξης σε κατάσταση ανισορροπίας(λήψη στο 50%)

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της εξομοίωσης Bias Point, διαπιστώνουμε ότι επιβεβαίωσαν την ιδέα και τη διαδικασία σχεδιασμού της διάταξης που καταγράφηκε βιβλιογραφικά για πρώτη φορά το 1871 [52]. Η διάταξη ισορροπεί σε μια προκαθορισμένη θέση της μεταβλητής αντίστασης **R2**, άμεσα εξαρτώμενη από το σημείο σφάλματος(αντιπροσωπεύεται από την μεταβλητή αντίσταση **R6**).

Τα αποτελέσματα της **εικόνας 4.2**, προέκυψαν ρυθμίζοντας τη λήψη της μεταβλητής αντίστασης **R2** στο **25% της συνολικής αντίστασης** ισοστάθμισης. Η αντίσταση **R6** από την άλλη έχει τη λήψη της στο 25%, δηλαδή στο 50% του υπό δοκιμή αγωγού εκεί όπου συνέβη και το σφάλμα, αφού και η αντίσταση **R6** αντιπροσωπεύει τη συνολική αντίσταση του υπό δοκιμή αγωγού- ο οποίος περιέχει και το σφάλμα- και του αγωγού αναφοράς. Ορίζοντας στο πρόγραμμα τις παραπάνω παραμέτρους, η διάταξη ισορροπεί. Αξιοσημείωτο βέβαια ήταν και το γεγονός, ότι το ρεύμα που διαρρέει το κλάδο του οργάνου δεν είναι ακριβώς 0 αλλά της τάξη μερικών εκατοντάδων  $\mu A$ , πράγμα που καταδεικνύει ότι η βελόνα του οργάνου θα αποκλίνει ελαφρώς, δηλαδή δεν θα έχουμε απόλυτη ισορροπία. Τροποποιώντας, ωστόσο, στο κύκλωμα της διάταξης τη τιμή της μεταβλητής αντίστασης **R2** από  $0,1133\Omega$  σε  $0,121\Omega$ , το ρεύμα που θα διαρρέει πλέον το κλάδο του οργάνου θα είναι ακριβώς 0. Στη πράξη μια τέτοια δοκιμή θα ήταν αδύνατη καθώς δεν είναι δυνατή η ανεύρεση χορδής χρωμιονικελίνης με αντίσταση ίση με  $0,121$ .

Τα αποτελέσματα της **εικόνας 4.3**, προέκυψαν ρυθμίζοντας τη λήψη της μεταβλητής αντίστασης **R2** στο **0% της συνολικής αντίστασης** ισοστάθμισης. Η αντίσταση **R6** από την άλλη έχει τη λήψη της στο 25%, δηλαδή

στο 50% του υπό δοκιμή αγωγού, αφού και η αντίσταση R6 αντιπροσωπεύει τη συνολική αντίσταση του υπό δοκιμή αγωγού- ο οποίος περιέχει και το σφάλμα- και του αγωγού αναφοράς(όπως στη προηγούμενη περίπτωση). Ορίζοντας στο πρόγραμμα τις παραπάνω παραμέτρους, αναπτύσσεται μεγαλύτερη διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντίστασης στο κλάδο του οργάνου, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι αυξάνεται και το ρεύμα το οποίο διέρχεται από το κλάδο. Συνεπώς, η διάταξη οδηγείται σε πλήρη ανισορροπία. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επαναφέρουμε σιγά σιγά τη λήψη στο 25% της αντίστασης ισοστάθμισης(R2), οπότε και το ρεύμα θα αρχίσει πάλι να μειώνεται μέχρι να φτάσουμε στο 25% όπου θα ελαχιστοποιηθεί.

Τα αποτελέσματα της **εικόνας 4.4**, προέκυψαν ρυθμίζοντας τη λήψη της μεταβλητής αντίστασης **R2** στο **50% της συνολικής αντίστασης** ισοστάθμισης. Η αντίσταση **R6** από την άλλη έχει τη λήψη της στο 25%, δηλαδή στο 50% του υπό δοκιμή αγωγού, αφού και η αντίσταση R6 αντιπροσωπεύει τη συνολική αντίσταση του υπό δοκιμή αγωγού-ο οποίος περιέχει και το σφάλμα- και του αγωγού αναφοράς(όπως στη προηγούμενη περίπτωση). Ορίζοντας στο πρόγραμμα τις παραπάνω παραμέτρους, αναπτύσσεται μεγαλύτερη διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντίστασης στο κλάδο του οργάνου, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι αυξάνεται και το ρεύμα το οποίο διέρχεται από το κλάδο. Συνεπώς, η διάταξη οδηγείται σε πλήρη ανισορροπία. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επαναφέρουμε σταδιακά τη λήψη στο 25% της αντίστασης ισοστάθμισης(R2), οπότε και το ρεύμα θα αρχίσει πάλι να μειώνεται μέχρι να φτάσουμε στο 25%, όπου θα ελαχιστοποιηθεί.

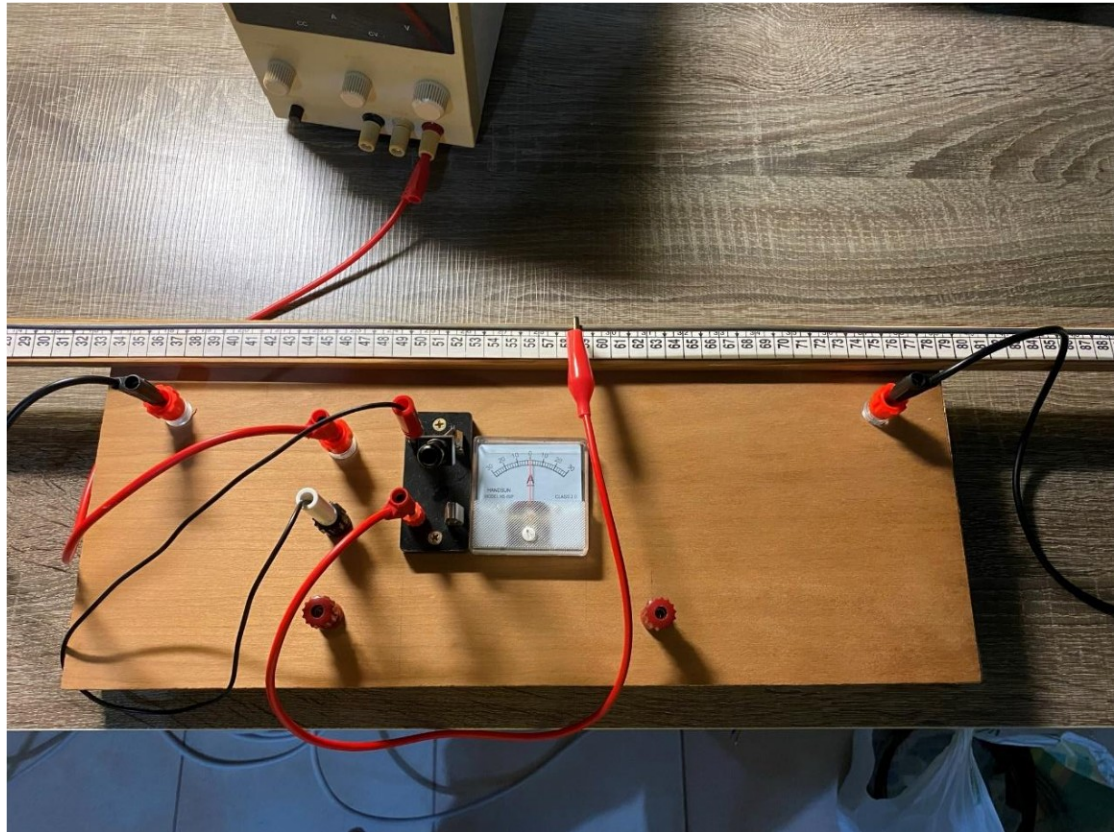
## 4.2 Συνδεσμολογία πειραματικής διάταξης

Στη παράγραφο αυτή θα παρατεθούν τα βήματα που απαιτούνται για τη πραγματοποίηση της επιθυμητής συνδεσμολογίας, απαραίτητη προϋπόθεση για τη εξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων.

1. Αρχικά συνδέουμε το κλάδο αντιστάθμισης, ο οποίος περιέχει τη χορδή χρωμιονικελίνης σε βαθμονομημένο άξονα, με το κυρίως “σώμα” της γέφυρας

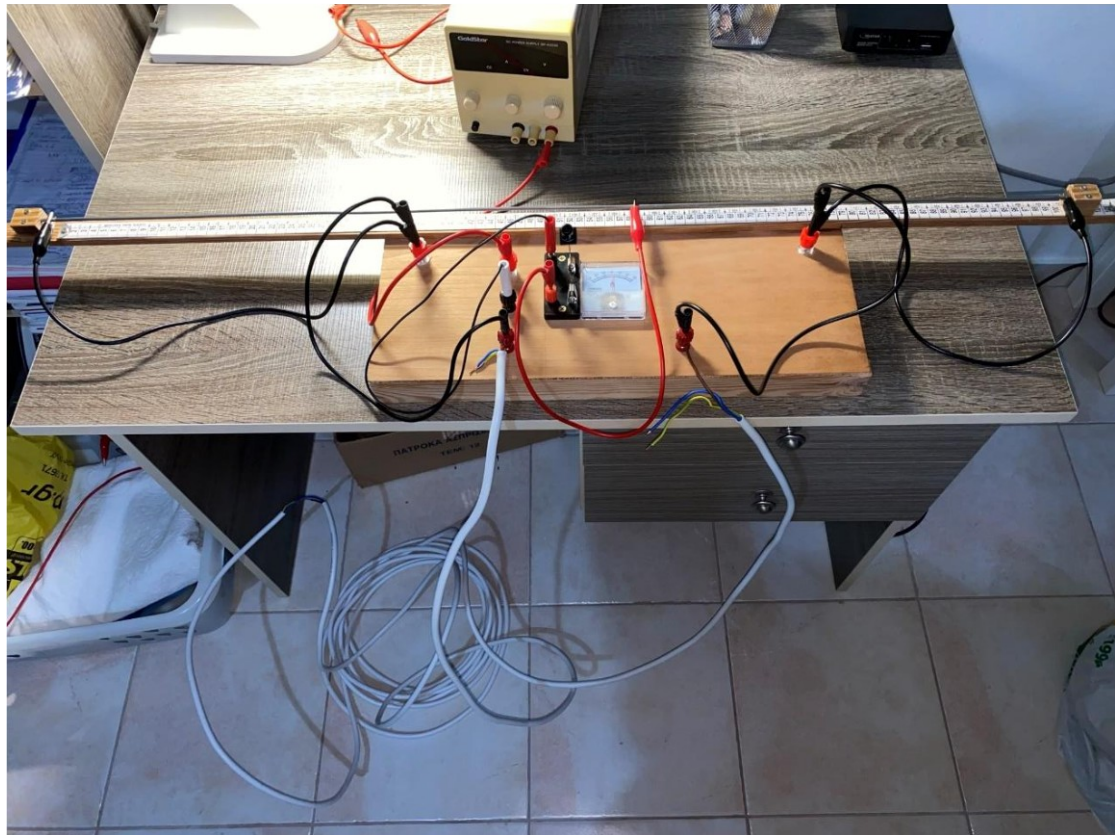
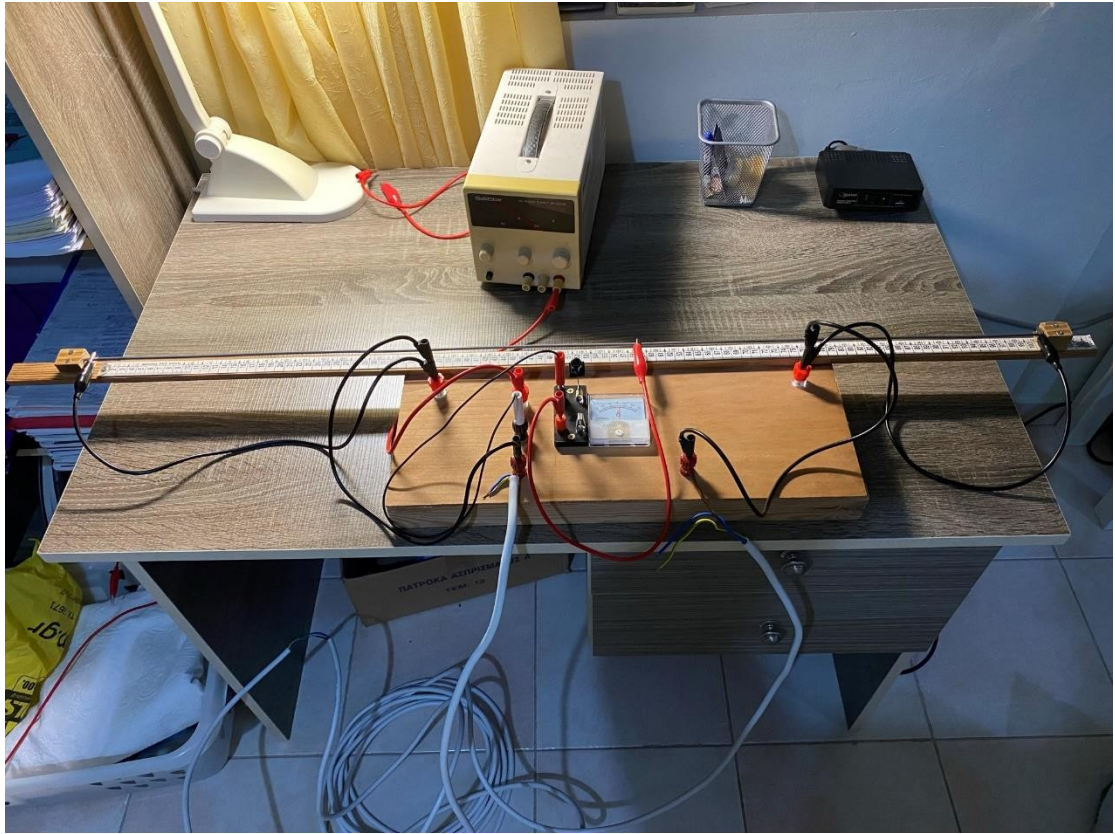


2. Μέσω ενός τροφοδοτικού Goldstar Power Supply GP-4303D, τροφοδοτούμε τη γέφυρα με την επιθυμητή τάση εισόδου. Τη διερχόμενη ισχύ στο κύκλωμα τη ρυθμίζουμε μέσω μιας αντίστασης προστασίας σταθερής τιμής, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ του τροφοδοτικού και του διακόπτη. Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της αντίστασης προστασίας που επελέγη, αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

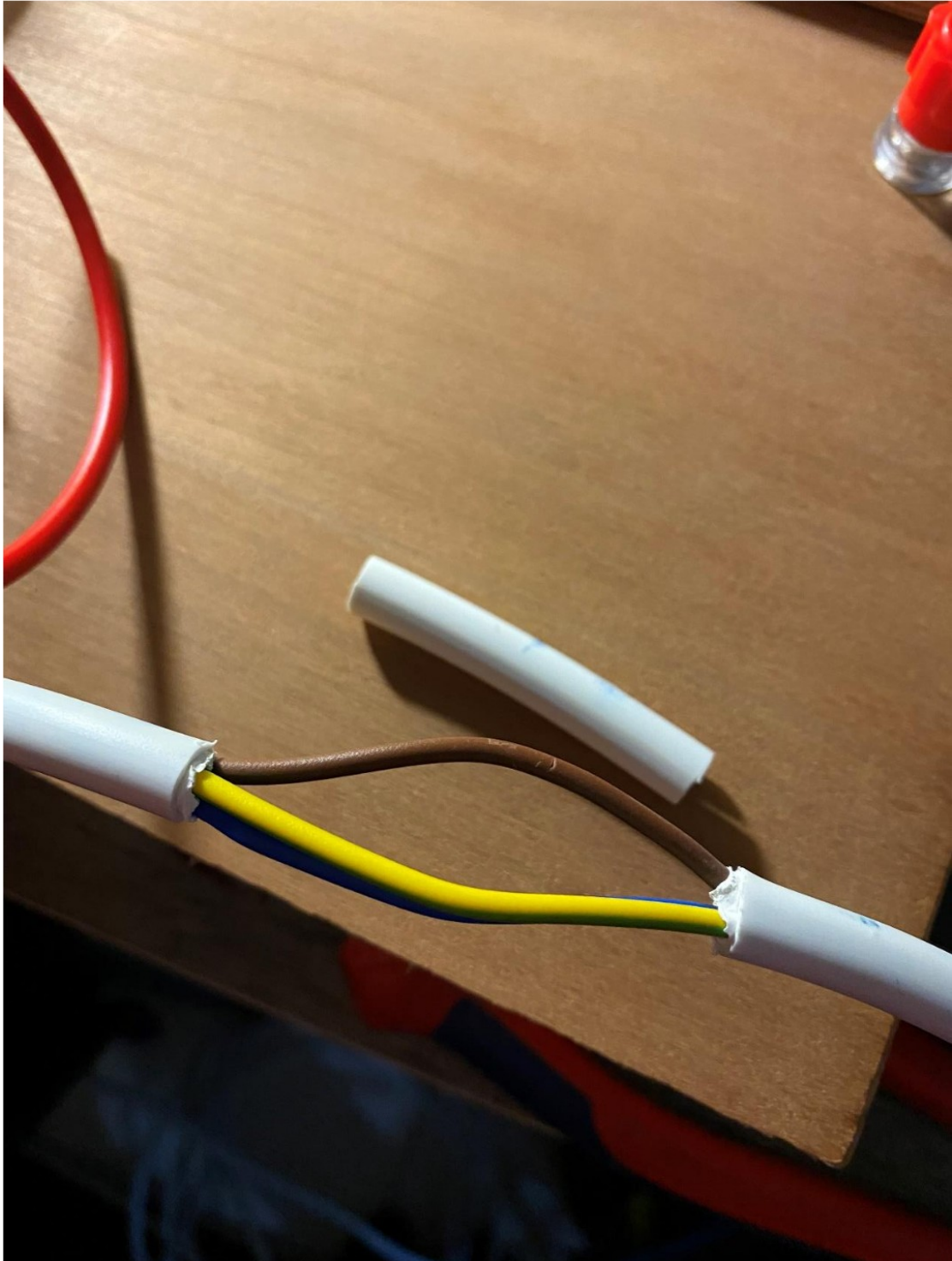


3. Δημιουργούμε το κλάδο του καλωδίου, παγιώνοντας το υπό δοκιμή καλώδιο μαζί με τον αγωγό αναφοράς επάνω στις δύο υπολειπόμενες μπόρνες. Με τον τρόπο αυτό, σχηματίζονται δύο παράλληλοι κλάδοι, αυτός της αναφοράς και αυτός του καλωδίου, ενώ ενδιάμεσα τους βρίσκεται το όργανο που δείχνει την ισορροπία.

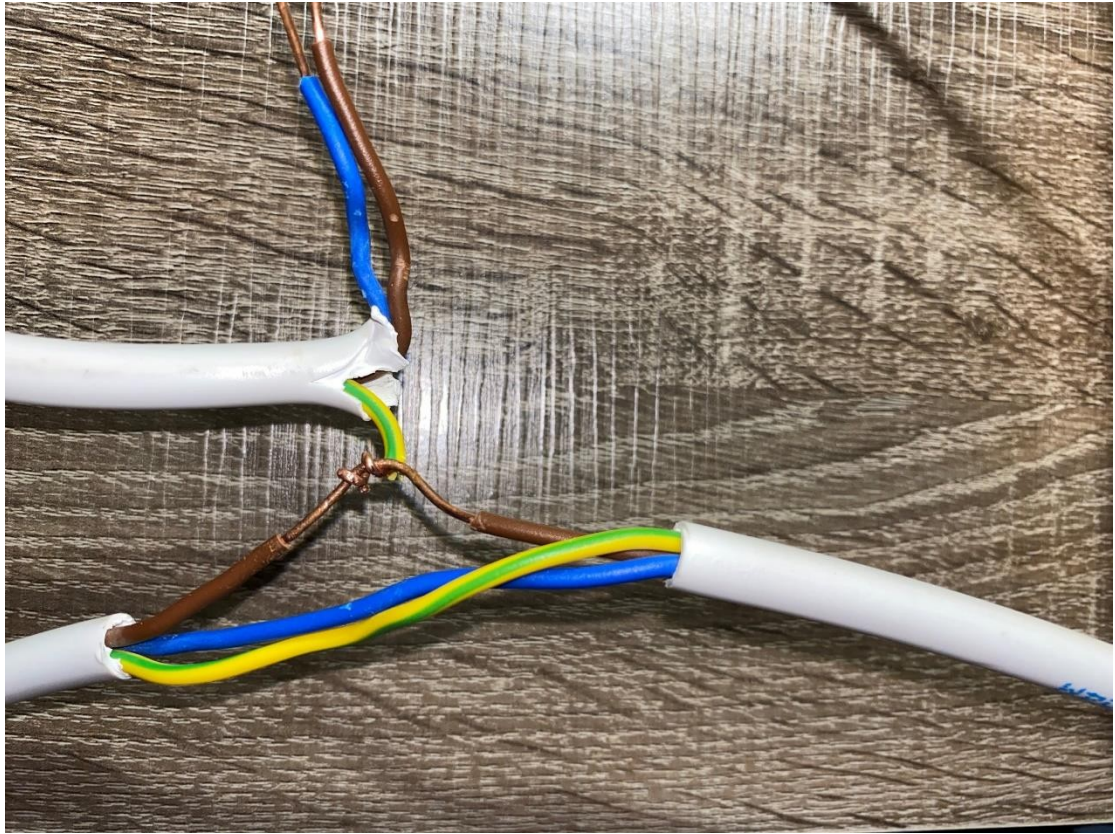




4. Προσπαθώντας να προσομοιάσουμε ένα σφάλμα φάσης-γης, χρησιμοποιούμε περίπου 1m καλωδίου ίδιου τύπου με το υπό δοκιμή καλώδιο, το οποίο δένουμε πάνω στη φάση(καφέ αγωγός) και μέσω αυτού επιστρέφουμε στον αρνητικό ακροδέκτη (-) του τροφοδοτικού.







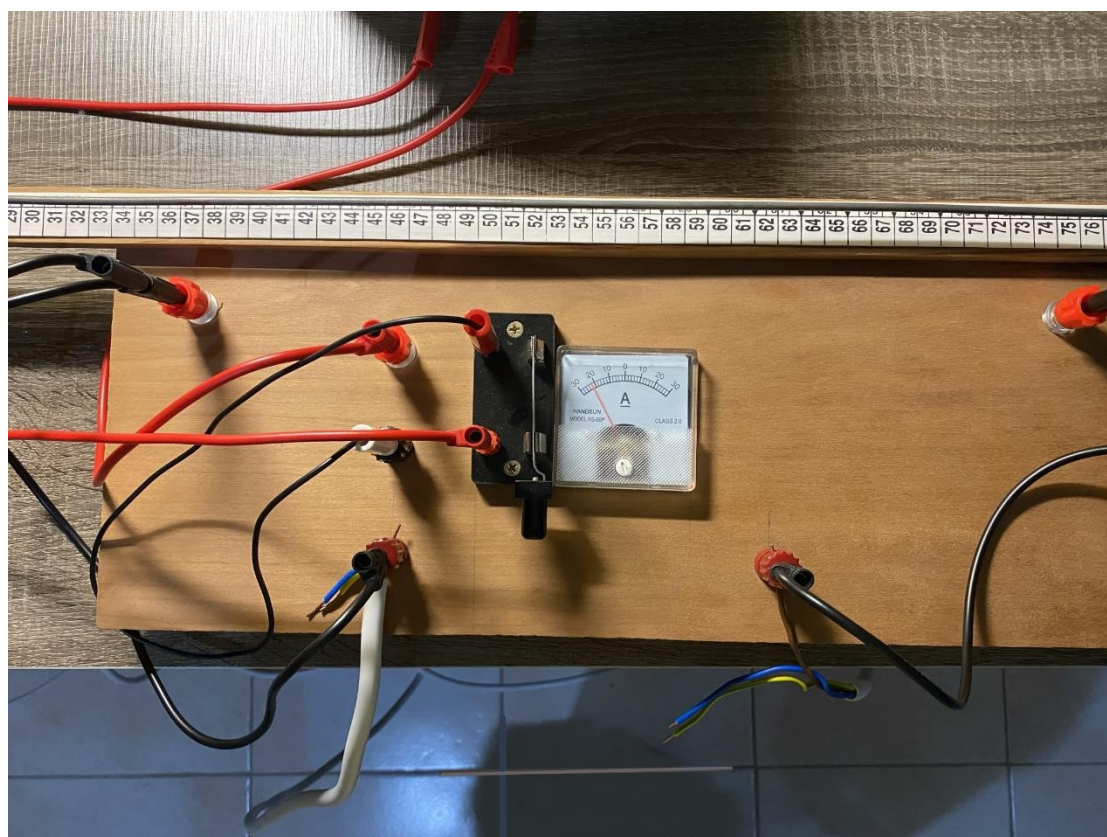
### 4.3 Πειραματική διαδικασία

- 1) Πραγματοποιούμε όλες τις απαραίτητες συνδέσεις
- 2) Τροφοδοτούμε τη διάταξη, με χρήση του τροφοδοτικού **Goldstar Power Supply GP-4303D**, το οποίο ρυθμίζουμε σε κάθε περίπτωση να μας δίνει την επιθυμητή τάση εισόδου, για τη συγκεκριμένη εφαρμογή **12VDC**. Ωστόσο, η διάταξη δεν λειτουργεί ακόμη διότι δεν έχει κλείσει ο διακόπτης, άρα δεν έχει “κλείσει” κύκλωμα.
- 3) Ρυθμίζουμε τη λήψη, από το 0-50 της κλίμακας, δηλαδή από το 0% μέχρι το 100% του υπό δοκιμή αγωγού, όπως έχει εξηγηθεί και παραπάνω. Στη προηγούμενη παράγραφο, φαίνεται και στη φωτογραφία, ρυθμίσαμε τη λήψη με το κροκοδειλάκι στο 50 της κλίμακας, δηλαδή στο 100% του υπό δοκιμή αγωγού. Προφανώς, είναι στη διακριτική ευχέρεια του καθενός το σημείο που θα ρυθμίσει τη λήψη.
- 4) Κλείνουμε το διακόπτη. Το κύκλωμα πλέον τροφοδοτείται κανονικά υπό τάση 12V. Καταγράφουμε την απόκλιση του οργάνου ισορροπίας.
- 5) Δοκιμάζουμε να μεταβάλλουμε τη λήψη με το κροκοδειλάκι ,σύροντας το αριστερά ή δεξιά, παρατηρώντας την απόκλιση της βελόνας και για τις δύο περιπτώσεις.
- 6) Μεταβάλλουμε τη λήψη με το κροκοδειλάκι, σύροντας το προς τη πλευρά(αριστερά ή δεξιά) που διαπιστώσαμε ότι η απόκλιση της βελόνας τείνει να ελαχιστοποιηθεί, δηλαδή τείνει προς το 0, έως ότου η απόκλιση του οργάνου(γαλβανομέτρου) να γίνει μηδέν. Το σημείο όπου η βελόνα του γαλβανόμετρου δεν αποκλίνει, είναι και το σημείο ισορροπίας της γέφυρας, δηλαδή το σημείο όπου συνέβη το σφάλμα.
- 7) Ανοίγουμε το διακόπτη, διακόπτοντας τη τροφοδοσία του κυκλώματος.
- 8) Ρυθμίζουμε τη λήψη με το κροκοδειλάκι στο 0 της κλίμακας, δηλαδή στο 0% του υπό δοκιμή αγωγού. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 4-7.

#### 4.4 Πειραματικά αποτελέσματα

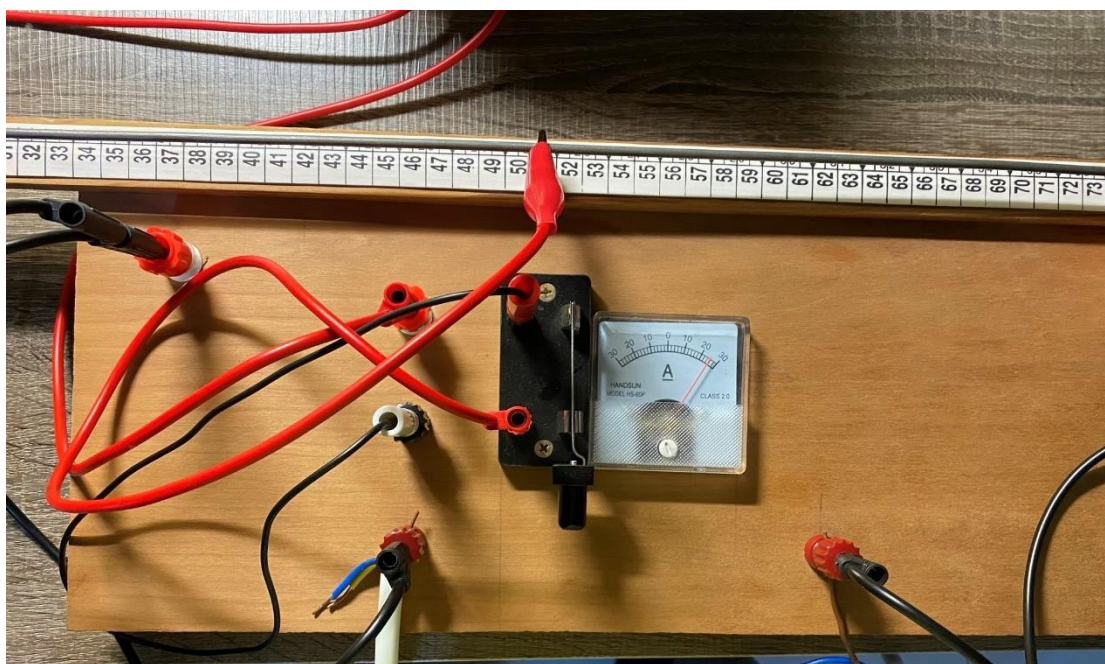
Στη παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται οι μετρήσεις που λήφθηκαν από τη διάταξη εντοπισμού που κατασκευάσαμε, ώστε να εξετάσουμε αν αυτές επαληθεύουν την εξομοίωση και τη θεωρητική ανάλυση που προηγήθηκαν, και κατ' επέκταση αν εξασφαλίζεται η λειτουργικότητα της διάταξης.

Οι δοκιμές της διάταξης πραγματοποιήθηκαν, όπως και στην παράγραφο της εξομοίωσης, για σφάλμα που έχει συμβεί στο 50% του υπό δοκιμή αγωγού. Για δεδομένο σημείο σφάλματος, πραγματοποιήσαμε διάφορες λήψεις στο κλάδο αντιστάθμισης στο εύρος 0-50 της κλίμακας. Αυτό έγινε για να παρατηρήσουμε την απόκλιση της βελόνας για τις διαφορετικές περιπτώσεις. Έπειτα ρυθμίσαμε τη λήψη στον κλάδο αντιστάθμισης στο 0 και στο 50 της κλίμακας, ώστε να εξετάσουμε τη συμπεριφορά της διάταξης για τις δύο ακραίες περιπτώσεις. Τέλος, ρυθμίσαμε τη λήψη στον κλάδο αντιστάθμισης στο 25 της κλίμακας, ώστε να εξετάσουμε αν η διάταξη ισορροπεί, εφόσον εκείνο το σημείο της κλίμακας αντιπροσωπεύει το σημείο σφάλματος, δηλαδή το 50% του μήκους του υπό δοκιμή αγωγού. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τη θεωρητική ανάλυση και η συμπεριφορά της διάταξης ήταν αναμενόμενη.



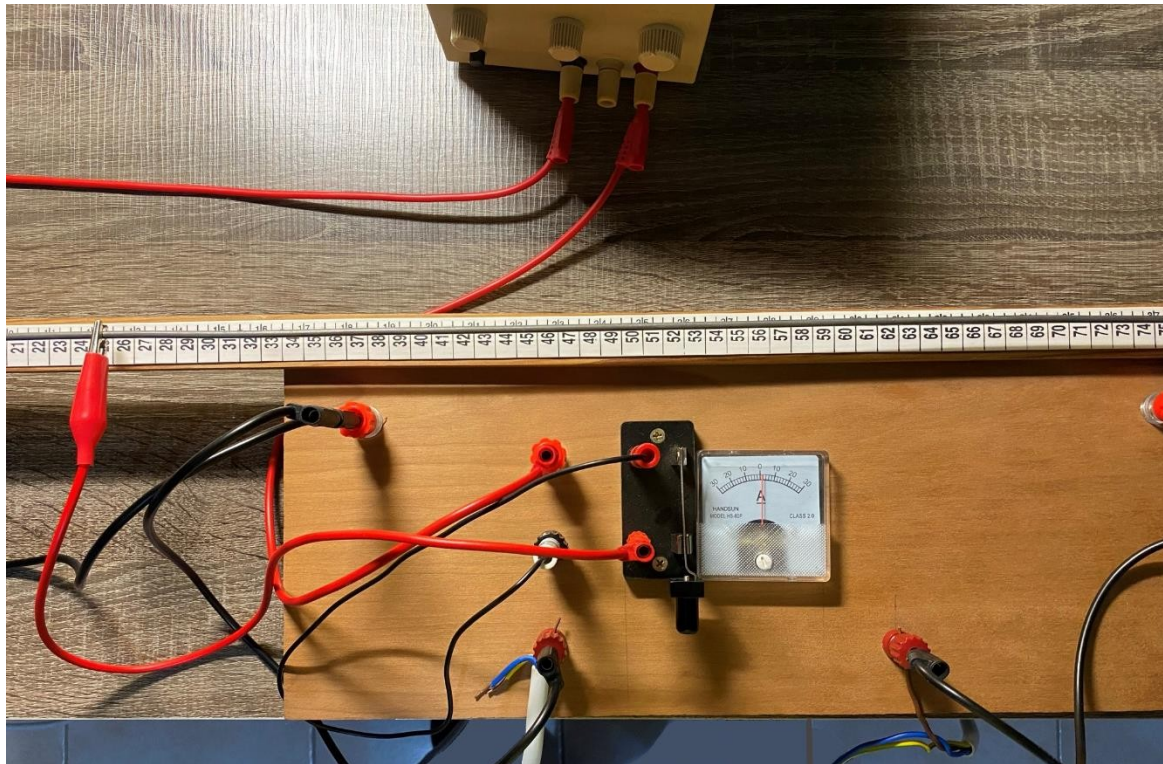
**Εικόνα 4.5** Επιβεβαίωση λειτουργίας της διάταξης για λήψη στο 0 της κλίμακας του κλάδο αντιστάθμισης

Τα αποτελέσματα της **εικόνας 4.5**, προέκυψαν ρυθμίζοντας τη λήψη του κλάδου αντιστάθμισης στο **0** της κλίμακας. Έτσι, αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του κλάδου του οργάνου, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι διέρχεται ταυτόχρονα ρεύμα από το κλάδο του οργάνου. Συνεπώς, η διάταξη οδηγείται σε πλήρη ανισορροπία, ενώ παρατηρούμε μέγιστη απόκλιση της βελόνας του οργάνου προς τα αριστερά. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επαναφέρουμε σταδιακά τη λήψη στο 25 της κλίμακας της αντίστασης ισοστάθμισης, οπότε και το ρεύμα στο κλάδο του οργάνου θα αρχίσει πάλι να μειώνεται μέχρι να φτάσουμε στο 25 όπου θα ελαχιστοποιηθεί.



**Εικόνα 4.6** Επιβεβαίωση λειτουργίας της διάταξης για λήψη στο 50 της κλίμακας του κλάδου αντιστάθμισης

Τα αποτελέσματα της **εικόνας 4.6**, προέκυψαν ρυθμίζοντας τη λήψη του κλάδου αντιστάθμισης στο **50** της κλίμακας. Έτσι, αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του κλάδου του οργάνου, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι διέρχεται ταυτόχρονα ρεύμα από το κλάδο του οργάνου. Συνεπώς, η διάταξη οδηγείται σε πλήρη ανισορροπία, ενώ παρατηρούμε μέγιστη απόκλιση της βελόνας του οργάνου προς τα αριστερά. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επαναφέρουμε σταδιακά τη λήψη στο 25 της κλίμακας της αντίστασης ισοστάθμισης, οπότε και το ρεύμα στο κλάδο του οργάνου θα αρχίσει πάλι να μειώνεται μέχρι να φτάσουμε στο 25 όπου θα ελαχιστοποιηθεί.



**Εικόνα 4.7** Επιβεβαίωση λειτουργίας της διάταξης για λήψη στο 25 της κλίμακας του κλάδου αντιστάθμισης

Τα αποτελέσματα της **εικόνας 4.7**, προέκυψαν ρυθμίζοντας τη λήψη του κλάδου αντιστάθμισης στο **25** της κλίμακας. Ρυθμίσαμε τη λήψη στον κλάδο αντιστάθμισης στο 25 της κλίμακας, ώστε να επιβεβαιώσουμε ότι η διάταξη ισορροπεί, εφόσον εκείνο το σημείο της κλίμακας αντιπροσωπεύει το σημείο σφάλματος, δηλαδή το 50% του μήκους του υπό δοκιμή αγωγού. Πράγματι, παρατηρούμε ότι η διάταξη ισορροπεί. Αυτό συμβαίνει διότι ο λόγος μεταξύ των μηκών της χορδής προς τα αριστερά και τα δεξιά στο κλάδο αντιστάθμισης είναι ίσος με τον λόγο μεταξύ των μηκών του αγωγού εκατέρωθεν του σημείου σφάλματος, οπότε δεν αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του κλάδου του οργάνου, πράγμα το οποίο σημαίνει ταυτόχρονα ότι δεν διέρχεται ρεύμα από το κλάδο του οργάνου.

Αφού συμβουλευτήκαμε την ενότητα 2.1.1, εξάγουμε τις παρακάτω παρατηρήσεις /συμπεράσματα:

- Το μήκος του αγωγού αναφοράς είναι  **$L=5m$**
- Το μήκος του υπό δοκιμή αγωγού είναι επίσης  **$5m$**

- Η αντίσταση  $R_{0-100} = 0,1133\Omega$ , οπότε στην ισορροπία η αντίσταση  $R_{0-\alpha} = 0,25 * 0,1133 = 0,028325\Omega$ , ενώ η αντίσταση  $R_{\alpha-100} = 0,75 * 0,1133 = 0,084975\Omega$
- Η συνθήκη που είναι απαραίτητη για την επίτευξη ισορροπίας της διάταξης, κατά την οποία υπολογίζεται το σημείο σφάλματος, είναι η παρακάτω:

$$\begin{aligned}
 x &= 2 * L * \left( \frac{R_{0-\alpha}}{R_{0-\alpha} + R_{\alpha-100}} \right) = \\
 &= 2 * 5 [m] * \left( \frac{0,028325[\Omega]}{0,028325[\Omega] + 0,084975[\Omega]} \right) = 2,5m
 \end{aligned}$$

## Βιβλιογραφία

- [1] Δ. ΚΑΡΑΚΩΣΤΑΣ, «Μελέτη ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε εγκαταστάσεις υπογείων καλωδίων υψηλής τάσης,» Πάτρα.
- [2] Σ. ΠΗΞΑΡΑΣ , «Μελέτες Κατασκευής Δικτύων Διανομής,» Καβάλα, 2005.
- [3] Κ. ΜΑΥΡΗΣ, «Συγκριτική αξιολόγηση των μεθοδολογιών και των οργάνων που χρησιμοποιούνται για την εύρεση βλαβών σε υπόγεια καλώδια ισχύος,» Αιγάλεο, 2017.
- [4] Μ. ΖΟΥΡΑΚΗ, «Υπολογισμός μεταφερόμενης ισχύος σε υπόγειο καλώδιο μέσης τάσης,» Αθήνα, 2012.
- [5] Ν. Γιαννόπουλος, «ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΑΘΜΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ Υ.Τ/Μ.Τ,» Αιγάλεω, 2017.
- [6] Φ. Γ. ., Χ. Χ. Οικονόμου Λάμπρος, Υψηλές Τάσεις, Εκδόσεις Τζιόλα, 2016.
- [7] Χ. Τσίχλης , «Αγωγοί και καλώδια για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας» Καβάλα, 2012.
- [8] INMR, «<https://www.powerandcables.com/svls-sheath-voltage-limiters-for-protection-of-mv-hv-cables/>,» 2019 April 29. [Ηλεκτρονικό].
- [9] Κ. Εξαδάκτυλος , «Μελέτη Σφαλμάτων σε Γραμμές Μεταφοράς,» Πάτρα.
- [10] Π. Μαλατέστας , Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Τζιόλα, 2015.
- [11] Χ. ΚΑΡΑΜΠΟΓΙΑΣ, «Μελέτη Σφαλμάτων σε Γραμμές Μεταφοράς,» Πάτρα, 2014.
- [12] Ν. Α. ΕΥΘΥΜΙΟΥ , «Σφάλματα σε γραμμές υψηλής τάσης της Κύπρου,» Πάτρα, 2016.
- [13] Ε. C. Bascom , D. W. Von Dollen και Η. W. Ng, «Computerized underground cable fault location expertise,» σε *Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference*, Chicago, IL, USA, USA, 1994.
- [14] C. . A. Maloney, «Locating Cable Faults,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, Τόμ. %1 από %2Volume: IA-9, pp. 380 - 394, Ιούλιος 1973.
- [15] Κ. Κ. Kuan και Κ. Warwick, «Real-time expert system for fault location on high voltage underground distribution cables,» *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, τόμ. Volume: 139, pp. 235 - 240, Μάιος 1992.
- [16] P. GILL, ELECTRICAL POWER EQUIPMENT MAINTENANCE AND TESTING, 2η επιμ., CRC PRESS, 1998.
- [17] Η. T. Gooding, «Cable-fault location on power systems,» *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, τόμ. Vol. 113, pp. 111 - 119, Ιανουάριος 1966.

- [18] C. Dodds, «Cable joints,» 24th January 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.cablejoints.co.uk/blog/article/cable-corrosion-repair>.
- [19] MIR RASOUL JAAFARI MOUSAVI, UNDERGROUND DISTRIBUTION CABLE INCIPIENT FAULT DIAGNOSIS SYSTEM, 2005.
- [20] R. Patsch και J. Jung, «Water trees in cables: generation and detection,» *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, τόμ. Vol. 146, αρ. No. 5, p. p. 253 – 259, Σεπτέμβριος 1999.
- [21] R. M. Eichhorn, «Treeing in Solid Extruded Electrical Insulation,» *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Τόμ. %1 από %2Volume: EI-12, pp. 2 - 18, Feb. 1977.
- [22] J. Densley, «Characteristics of PD pulses in electrical trees and interfaces in extruded cables,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, τόμ. Volume: 8 , pp. 48 - 57, Μάρτιος 2001.
- [23] G. Bahder, C. Katz, J. Lawson και W. Vahlstrom, «Electrical and Electro-Chemical Treeing Effect in Polyethylene and Crosslinked Polyethylene Cables,» *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Τόμ. %1 από %2Volume: PAS-93, pp. 977 - 989, Μαιος 1974.
- [24] Dodds, Chris; Thorne & Derrick, «Thorne & Derrick International,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.powerandcables.com/tag/scotchcast/>.
- [25] S. Gajbhiye και P. S. Karmore, «Cable Fault Monitoring and Indication: A Review,» *International Journal of Computer Science and Network(IJCSN)*, τόμ. Vol 2, αρ. 4, pp. 20-24, August 2013.
- [26] P. H. Estes και M. Orris, «METHOD OF LOCATING FAULTS IN CABLE CONDUCTORS». United States Ευρεσιτεχνία 1,958,361, 8 May 1934.
- [27] B. Clegg και N. G. Lord , «Modern cable-fault-location methods,» *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Τόμ. %1 από %2Volume 122,, αρ. Issue 4,, p. p. 395 – 402, Απρίλιος 1975.
- [28] R. H. Gnerlich, «Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,» σε *Cable testing and cable fault locating with minimum risk to good cable*, Leesburg, VA, USA, USA, 29 Oct.-2 Nov. 1989.
- [29] P. F. Gale και B. Tech, «Cable-fault location by impulse-current method,» *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, τόμ. Volume: 122 , αρ. Issue: 4, pp. 403 - 408, Απρίλιος 1975.
- [30] P. F. Gale,, Clwyd και Wales, «CABLE FAULT LOCATION». United States Ευρεσιτεχνία 4,165,482, 21 Αυγούστου 1979.
- [31] G. Cheung, Y. Tian και T. Neier, «2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD),» σε *Technics of locating underground cable faults inside conduits*, Xi'an, China, 25-28 Sept. 2016.



- [32] M. Haddon και C. H. Moulton, «Method of nondestructively establishing an earth gradient for cable fault locating». United States Ευρεσιτεχνία 4,697,137, 29 September 1987.
- [33] I. Touaibia και E.-B. Azzag, «Cable fault location in medium voltage of Sonelgaz underground,» *Revue des Sciences et de la Technologie, Synthèse*, τόμ. numéro 1, pp. 33-44, 21 12 2018.
- [34] J. B. Hays, J. Summit και N. J., «FAULT DETECTOR,». United States Ευρεσιτεχνία 2,651,021, 1 Sept. 1953.
- [35] W. O. PENNELL και H. . L. HOFFMANN, «FAULT-LOCATOR FOR ELECTRIC CABLES.». United States Ευρεσιτεχνία 925,594, 8 May 1908.
- [36] R. B. Cummings, "Trouble finder cable tone device". United States Patent 2,291,533, July 28 1942.
- [37] J. F. Simmonds, "Method and apparatus for detecting faults and locating conductors in multi-conductor cables". United States Patent 3,882,287, 6 May 1975.
- [38] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nichrome#cite\\_note-2](https://en.wikipedia.org/wiki/Nichrome#cite_note-2).
- [39] A. L. Marsh, «ELECTRIC RESISTANCE ELEMENT». United States Ευρεσιτεχνία 811,859, 6 Φεβρουαρίου 1906.
- [40] «<https://ucfilament.com/materials/nichrome/>,» 2007. [Ηλεκτρονικό].
- [41] CHENGXIN, «Alibaba,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.alibaba.com/product-detail/new-constantan-copper-nickel-alloy-resistance\\_60726717772.html](https://www.alibaba.com/product-detail/new-constantan-copper-nickel-alloy-resistance_60726717772.html).
- [42] Κ. Σ. Ψωμόπουλος, Ηλεκτρικές Μετρήσεις, 2η έκδοση επιμ., Εκδόσεις Τσότρας, 2015.
- [43] *Σημειώσεις Τεχνολογίας Μετρήσεων*, Πάτρα: ΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ.
- [44] Nexans, «Kafkas,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.kafkas.gr/ilektrologiko-yliko/kalodia/esot-egkatastaseon/nym-h05vv-u-h05vv-r/kalodio-esoterikon-egkatastaseon-nym-a05vv-u-3x1-5mm-\\_191501/](https://www.kafkas.gr/ilektrologiko-yliko/kalodia/esot-egkatastaseon/nym-h05vv-u-h05vv-r/kalodio-esoterikon-egkatastaseon-nym-a05vv-u-3x1-5mm-_191501/).
- [45] «Εξετάσεις πιστοποίησης Ηλεκτρολόγων Α' Ειδικότητας,» pp. 36-37, 2017.
- [46] «PANASONIC ALKALINE HANDBOOK,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [www.panasonic.com](http://www.panasonic.com).
- [47] E. N. Spon και F. N. Spon, *Electrical Tables and Formulæ: For Use of Telegraph Inspectors and Operators*, W. CLOCES, Επιμ., London, 1871.
- [48] Nehemiah Hawkins&Staff, σε *Hawkins Electrical Guide Questions, Answers, & Illustrations, A progressive course of study for engineers, electricians, students*, τόμ. 3, NEW YORK, THEO. AUDEL & CO., 1914, pp. 510-517.

- [49] EEPower, 2021. [Ηλεκτρονικό] Available:<https://eepower.com/resistor-guide/resistor-applications/power-resistor/#>.
- [50] Φ. Δ. Κωνσταντάτου, «ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ» Πάτρα, 2008.
- [51] Γ. Σουλιώτης, Εργαστηριακές Σημειώσεις, «Εξομοίωση κυκλωμάτων με Η/Υ,» Πάτρα, 2017.
- [52] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό] . Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Murray\\_loop\\_bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Murray_loop_bridge) .
- [53] Zhenglán Cable, «<http://xlpeinsulatedcables.sell.everychina.com>,» Zhenglán Cable Technology Co., Ltd. [Ηλεκτρονικό].
- [54] S. Terézia, «Posterius,» 30 September 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.posterius.sk/?p=16307>.
- [55] S. Berry, «ITM components,» 04 September 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://itm-components.co.uk/blogs/news/surge-protectors-the-best-option-to-protect-your-wireless-network>.
- [56] Buchholz, Vern; Director of Electrical Technologies, Powertech Labs Inc, «Electricenergyonline,» December 2004. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://electricenergyonline.com/show\\_article.php?article=186](https://electricenergyonline.com/show_article.php?article=186).
- [57] NOCKERS ENGINEERING PRODUCTS, «NOCKERS,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.nockers.co.za/industrial-wire/heating-wire/>