

Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ
ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΙΩΝ
ΓΙΑ ΤΟ ΝΕΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Σπουδαστή **Σταμούλια Π. Γεώργιου**

Α.Μ. 27731

Επιβλέπων: **Δρ. Ψωμόπουλος Σ. Κωνσταντίνος**

Επίκουρος Καθηγητής

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ψωμόπουλου Κωνσταντίνου, χωρίς τη βοήθεια του οποίου δεν θα ήταν δυνατή η πραγματοποίησή της. Η επιστημονική του κατάρτιση επί του αντικειμένου της εργασίας, η άψογη συνεργασία μας, το ενδιαφέρον καθώς και η διαθεσιμότητα και η υπομονή του, είναι χαρακτηριστικά που μου προσέφερε αφειδώς κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δασκάλους μου Κότσαλο Ευθύμιο και Κουτουλάκο Χρήστο που μου έδειξαν το δρόμο, καθώς και τους γονείς μου Ελευθερία και Παναγιώτη για την ηθική υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Σταμούλιας Γεώργιος
Πειραιάς, Φεβρουάριος 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.	.iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.	.iv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.	.xi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.	.xii
SUMMARY.	.xix
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	. 1
1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ “ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ”	. . . . . 2
1.1 ΜΕΤΡΗΣΗ.	. . . . . 2
1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.	. . . . . 3
1.2.1 ΠΡΟΘΕΜΑΤΑ ΜΟΝΑΔΩΝ.	. . . . . 7
1.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.	. . . . . 7
1.3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.	. . . . . 7
1.3.2 ΜΟΡΦΕΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΩΝ.	. . . . . 8
1.3.3 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	. . . . . 9
1.3.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.	. . . . . 9
<i>Αναφορές.</i>	. . . . . 10
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ “ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ”	. . . . . 11
2.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ.	. . . . . 11
2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.	. . . . . 12
2.2.1 ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ.	. . . . . 12
2.2.1.1 ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟ ΒΟΛΤΟΜΕΤΡΟ.	. . . . . 13
2.2.2 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΦΑΙΡΩΝ.	. . . . . 14

2.2.3	ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.	.16
2.2.4	ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ.	.16
2.2.4.1	ΩΜΙΚΟΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ.	.17
2.2.4.2	ΧΩΡΗΤΙΚΟΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ.	.18
2.3	ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.	.18
2.3.1	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ.	.18
2.3.2	ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ.	.22
2.3.2.1	ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΑΣΗΣ.	.22
2.3.2.2	ΘΩΡΑΚΙΣΗ.	.23
2.3.2.3	ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ.	.24
2.4	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ.	.24
2.4.1	ΓΩΝΙΑ ΑΠΩΛΕΙΩΝ.	.24
2.4.2	ΦΥΣΙΚΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ.	.26
2.4.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ.	.28
2.5	ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥΣ.	.29
2.5.1	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.	.29
2.5.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.	.29
2.5.3	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ.	.30
2.5.3.1	ΧΩΡΗΤΙΚΗ ΣΥΖΕΥΞΗ.	.30
2.5.3.1.1	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ.	.32
2.5.3.1.2	ΘΩΡΑΚΙΣΗ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ.	.32
2.5.3.2	ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΣΥΖΕΥΞΗ.	.34
2.5.3.2.1	ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΟΥΜΕΝΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ.	.36
2.5.3.2.2	ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΔΙΑΤΑΡΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΑΓΩΓΟΥ.	.36
2.5.3.3	ΣΥΖΕΥΞΗ ΑΠΟ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.	.38
2.5.4	ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΣΤΗ ΓΕΙΩΣΗ.	.39

2.5.5	ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ. . . . .	.40
2.5.5.1	ΕΠΑΓΟΜΕΝΑ ΡΕΥΜΑΤΑ. . . . .	.41
2.5.5.2	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ ΣΤΗ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΤΑΣΗ. . . . .	.42
2.5.5.3	ΘΩΡΑΚΙΣΗ ΤΗΣ ΠΛΕΥΡΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ. . . . .	.45
	<i>Αναφορές</i>. . . . .	.46
3^ο	ΚΕΦΑΛΑΙΟ "ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ". . .	48
3.1	ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ. . . . .	.48
3.2	ΕΙΔΗ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ ΤΑΣΗΣ. . . . .	.49
3.2.1	ΩΜΙΚΟΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗΣ. . . . .	.50
3.2.2	ΧΩΡΗΤΙΚΟΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗΣ. . . . .	.50
3.2.3	ΜΙΚΤΟΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗΣ. . . . .	.51
3.2.3.1	ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΣΕΙΡΑ. . . . .	.51
3.2.3.2	ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ. . . . .	.52
3.2.3.3	ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΜΙΚΤΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ. . . . .	.53
3.3	ΟΙ ΒΡΑΧΙΟΝΕΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ. . . . .	.54
3.3.1	Ο ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΩΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ. . . . .	.54
3.3.2	Ο ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ. . . . .	.55
3.3.3	Ο ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΜΕΝΩΝ ΧΩΡΗΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ. . . . .	.57
3.4	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ. . . . .	.57
3.4.1	ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ. . . . .	.57
3.4.1.1	ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΑΝΟΧΗ ΜΙΑΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ. . . . .	.57
3.4.1.2	ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΟΧΕΣ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ. . . . .	.58
3.4.1.3	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ. . . . .	.58
3.4.1.4	ΚΩΔΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ. . . . .	.59
3.4.1.5	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ, ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ. . . . .	.60

3.4.1.5.1	ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ. . . . .	.61
3.4.1.5.1.1	ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ. . . . .	.61
3.4.1.5.2	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ. . . . .	.63
3.4.1.5.2.1	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ. . . . .	.63
3.4.1.5.2.2	ΚΩΔΙΚΕΣ ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ. . . . .	.64
3.4.1.5.2.3	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ, ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ. . . . .	.65
3.4.1.5.3	ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ. . . . .	.65
3.4.1.5.3.1	ΘΕΡΜΙΣΤΟΡΣ (THERMISTORS). . . . .	.65
3.4.1.6	ΕΠΙΛΕΓΟΝΤΑΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΈΝΑ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ Υ.Τ.. . . . .	.66
3.4.2.	ΠΥΚΝΩΤΕΣ. . . . .	.67
3.4.2.1	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ. . . . .	.67
3.4.2.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΥΚΝΩΤΩΝ. . . . .	.67
3.4.2.2.1	ΣΤΑΘΕΡΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ. . . . .	.67
3.4.2.2.1.1	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ. . . . .	.67
3.4.2.2.1.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ. . . . .	.68
3.4.2.2.2	ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ. . . . .	.69
3.4.3	ΠΥΚΝΩΤΕΣ Υ.Τ. ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ. . . . .	.71
3.4.3.1	ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΕΣ ΧΩΡΗΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ. . . . .	.71
3.4.3.2	ΣΩΡΕΥΜΕΝΕΣ ΧΩΡΗΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ. . . . .	.76
3.4.3.3	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΥΚΝΩΤΩΝ Υ.Τ.. . . . .	.79
3.4.3.3.1	ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ. . . . .	.79
3.4.3.3.2	ΚΕΡΑΜΙΚΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ. . . . .	.80
	<i>Αναφορές.</i>	.80
4^ο	ΚΕΦΑΛΑΙΟ “ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΙΑ Υ.Τ.”.	82
4.1	ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ. . . . .	.82
4.2	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΝ. . . . .	.82

4.2.1	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ. . . . .	.82
4.2.2	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΝ. . . . .	.83
4.2.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ. . . . .	.86
4.2.4	ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΡΟΕΡΧΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΕΚΚΕΝΩΣΕΙΣ, ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ. . . . .	.87
4.2.5	ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΠΡΟΕΡΧΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΑ, ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ.. . . . .	.89
4.2.6	ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ.. . . . .	.90
4.2.6.1	ΚΕΡΑΥΝΙΚΕΣ ΚΡΟΥΣΕΙΣ. . . . .	.91
4.2.6.2	ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟΙ ΚΡΟΥΣΤΙΚΟΙ ΠΑΛΜΟΙ.. . . . .	.92
4.2.6.3	ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.. . . . .	.97
4.2.6.4	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ. . . . .	.97
4.3	ΒΑΣΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΜΟΝΩΣΗΣ.	100
4.4	ΚΥΡΙΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.	102
4.5	ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ.	105
4.5.1	ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ.	105
4.5.2	ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.	106
	<i>Αναφορές.</i>	107
5^ο	ΚΕΦΑΛΑΙΟ “ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ”	108
5.1	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.	108
5.1.1	ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΑΣΗΣ	108
5.1.2	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ .	109
5.1.3	ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.	114
5.1.4	ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΓΝΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ..	116
5.1.5	ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ.	121

5.1.5.1 ΧΩΡΗΤΙΚΟΙ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ.	123
5.1.6 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΚΡΟΔΕΚΤΗ ΤΟΥ.	129
5.1.6.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ.	133
5.1.7 Ο ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ Χ.Τ. ΤΟΥ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ.	135
5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ.	139
5.2.1 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 1 : 2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ.	139
5.2.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 2 : 3 ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ.	140
5.2.3 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 3 : N ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ.	141
5.2.4 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 4 : 1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ 2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ.	143
5.2.5 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 5 : 1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ N ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ.	144
5.2.6 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 6 : 2 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ.	144
5.2.7 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 7 : 1 ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ 2 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ.	145
5.2.8 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 8 : 1 ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ N ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ.	146
5.2.9 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 9 : 1 ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ 1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.	147
5.2.10 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 10 : 2 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ, ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ 2 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ.	148
5.2.11 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 11 : ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕ ΣΕΙΡΑ, N ΚΛΑΔΩΝ 2 ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ.	148
5.2.12 ΣΥΝΟΨΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ.	151
Αναφορές.	158
6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ “ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ”	160
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.	160
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ	161

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	162
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α “ΚΩΔΙΚΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ”	162
Α.1 ΚΩΔΙΚΑΣ ΧΡΩΜΑΤΩΝ	162
Α.2 ΚΩΔΙΚΑΣ ΑΡΙΘΜΩΝ	162
Α.2.1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	163
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β “ΚΩΔΙΚΕΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ”	164
Β.1 ΠΥΚΝΩΤΕΣ POLYESTER	164
Β.2 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΤΑΝΤΑΛΙΟΥ	164
<i>Αναφορές</i>	165
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	166

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ	ΤΙΤΛΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ
1.2-1	<i>Οι βασικές μονάδες του Διεθνούς Συστήματος (S.I.)</i>	6
1.2.1-1	<i>Προθέματα των S.I. μονάδων</i>	7
1.3.4-1	<i>Θεμελιώδεις μέθοδοι μέτρησης υψηλών τάσεων και ρευμάτων</i>	10
3.4.1.5.1.1-1	<i>Οι κυριότερες χρήσεις των διαφόρων κατηγοριών αντιστάσεων</i>	62
3.4.1.5.2.2-1	<i>Κατηγορίες και κώδικες ποτενσιομέτρων</i>	64
3.4.1.5.3.1-1	<i>Οι εφαρμογές των θερμίστορς</i>	65
4.3-1	<i>Βασικά επίπεδα μόνωσης για κρουστική τάση</i>	101
4.5.2-1	<i>Συχνότερα χρησιμοποιούμενες τάσεις U των συστημάτων εναλλασσομένου ρεύματος</i>	106
5.2.12-1	<i>Διατάξεις καταμεριστών τάσης, αντίστοιχες σχέσεις καταμερισμού k και μέγιστα απόλυτα σφάλματα |Δ_k|</i>	152 ~ 157
A.1-1	<i>Κώδικας Χρωμάτων Αντιστάσεων</i>	162
B.1-1	<i>Κώδικας Χρωμάτων Πυκνωτών Polyester</i>	164
B.2-1	<i>Κώδικας Χρωμάτων Πυκνωτών Τανταλίου (I)</i>	164
B.2-2	<i>Κώδικας Χρωμάτων Πυκνωτών Τανταλίου (II)</i>	165

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ	ΤΙΤΛΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ
2.2.1-1	<i>Σύμβολο και κατασκευαστική δομή του ηλεκτροστατικού οργάνου. Ο σταθερός οπλισμός του πυκνωτή αποτελείται από δύο επιφάνειες</i>	12
2.2.4.1-1	<i>Ωμικός καταμεριστής τάσης</i>	17
2.2.4.2-1	<i>Χωρητικός καταμεριστής τάσης</i>	18
2.3.1-1	<i>Διατάξεις καταγραφής ταχέως μεταβαλλόμενων τάσεων ή ρευμάτων μέσω παλμογράφου</i>	19
2.3.1-2	<i>Προσγείωση και επίτευξη προσαρμογής συγκεντρικού καλωδίου μέτρησης</i>	20
2.3.1-3	<i>Διάταξη μέτρησης υψηλών κρουστικών τάσεων με θωρακισμένο τετράπολο μέτρησης και αντίσταση προσαρμογής Z</i>	21
2.3.2.2-1	<i>Ο βραχίονας χαμηλής τάσης ενός ωμικού καταμεριστή συνδέεται στη μονάδα (καταγραφέας) μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου το οποίο τερματίζεται με μια σύνθετη αντίσταση Z και έχει διπλή θωράκιση προκειμένου να προλαμβάνονται επαγωγές διαταραχών</i>	23
2.3.2.2-2	<i>Βραχίονας χαμηλής τάσης ενός αποσβεσμένου χωρητικού καταμεριστή</i>	23
2.4.1-1	<i>Οι διηλεκτρικές απώλειες προκαλούνται από ένα μικρό στοιχείο απώλειας I_R</i>	25
2.4.1-2	<i>Ισοδύναμα κυκλώματα ενός πυκνωτή με υψηλό βαθμό απωλειών</i>	25
2.4.2-1	<i>Οι απώλειες αγωγιμότητας αναγνωρίζονται από μια μειούμενη εφραπτομένη απωλειών σε αντίστοιχα αύξουσα συχνότητα</i>	26
2.4.2-2	<i>Απώλειες διπόλου προκαλούνται από τριβή μεταξύ των περιστρεφόμενων ηλεκτρικών διπόλων και του μονωτικού υλικού</i>	27
2.4.2-3	<i>Διασύνδεση μεταξύ ενός διηλεκτρικού χωρίς απώλειες K και ενός διηλεκτρικού με απώλειες C</i>	27

ΣΧΗΜΑ	ΤΙΤΛΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ
2.4.2-4	<i>Οι απώλειες που προκλήθηκαν από εσωτερικές εκφορτίσεις αναγνωρίζονται από μια αύξουσα εφραπτομένη απωλειών σε αυξανόμενη τάση</i>	28
2.5.3.1-1	<i>Χωρητική σύζευξη μεταξύ των αγωγών 1 και 2</i>	31
2.5.3.1.1-1	<i>Παρασιτική χωρητικότητα μεταξύ των αγωγών 1 και 2, η οποία εξαρτάται από την απόστασή τους D</i>	32
2.5.3.1.2-1	<i>Εξουδετέρωση της τάσης θορύβου στον αγωγό 2, εξαιτίας της χωρητικής σύζευξη με τον αγωγό 1, με τη χρήση θωράκισης</i>	33
2.5.3.1.2-2	<i>Ανάπτυξη τάσης θορύβου μικρής τιμής στον αγωγό 2, ο οποίος δεν προστατεύεται στο άκρο του από τη γειωμένη θωράκιση</i>	34
2.5.3.2-1	<i>Ανάπτυξη τάσης θορύβου στον αγωγό 2, λόγω της επαγωγικής σύζευξης με τον αγωγό 1</i>	35
2.5.3.2.1-1	<i>Μείωση της τάσης θορύβου με τον περιορισμό του ακτινοβολούμενου μαγνητικού πεδίου από τον αγωγό διαταραχής με τη χρήση θωρακισμένου καλωδίου για την επιστροφή του ρεύματος I_1</i>	36
2.5.3.2.2-1	<i>Μείωση της τάσης θορύβου με τον περιορισμό του ακτινοβολούμενου μαγνητικού πεδίου από τον αγωγό διαταραχής με τη χρήση καλωδίου συνεστραμμένων αγωγών για την επιστροφή του ρεύματος I_1</i>	37
2.5.3.2.2-2	<i>Τα ρεύματα στον εσωτερικό αγωγό και τη θωράκιση του καλωδίου δεν είναι ίσα όταν η θωράκιση γειώνεται και στα δύο άκρα</i>	37
2.5.3.2.2-3	<i>Η τάση θορύβου V_{12} που επάγεται στον αγωγό 2 εξαρτάται από την επιφάνεια S και τον προσανατολισμό της S ως προς τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου B_1, που ακτινοβολείται από τον αγωγό 1</i>	38
2.5.4-1	<i>Σύνδεση της θωράκισης του καλωδίου με τη γείωση, στην περίπτωση του τελεστικού ενισχυτή χωρίς αντιστροφή (α) και του διαφορικού ενισχυτή (β)</i>	39
2.5.5-1	<i>Ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε σύστημα μέτρησης υψηλών τάσεων</i>	40
2.5.5.1-1	<i>Επαγόμενο ρεύμα στον μανδύα του καλωδίου</i>	41

ΣΧΗΜΑ	ΤΙΤΛΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ
2.5.5.2-1	<i>Περιέλιξη του καλωδίου σε σιδηρομαγνητικό πυρήνα για αύξηση της αυτεπαγωγής του</i>	42
2.5.5.2-2	<i>Διέλευση του καλωδίου μέσα από σιδηρομαγνητικούς δακτυλίους για αύξηση της αυτεπαγωγής του</i>	42
2.5.5.2-3	<i>Το περίσσειμα του καλωδίου περιελίσσεται σε "κουλούρα" για αύξηση της αυτεπαγωγής του</i>	42
2.5.5.2-4	<i>Το καλώδιο τοποθετείται στη μικρότερη δυνατή απόσταση από το έδαφος, ώστε να ελαχιστοποιείται ο κλειστός βρόχος μεταξύ του γειωμένου μανδύα και της γείωσης του εργαστηρίου</i>	42
2.5.5.2-5	<i>Πολλαπλά σημεία γείωσης του καλωδίου για μείωση του βρόχου επαγωγής και απαγωγή των επαγόμενων ρευμάτων</i>	43
2.5.5.2-6	<i>Τοποθέτηση του καλωδίου σε υποδαπέδιο κανάλι</i>	43
2.5.5.2-7	<i>Αποφυγή δημιουργίας κλειστών βρόχων διέλευσης ρευμάτων εξ' επαγωγής στο όργανο μέτρησης</i>	44
2.5.5.2-8	<i>Απαλλαγή του σήματος της βηματικής απόκρισης από επαγόμενες διαταραχές</i>	45
2.3.12-1	<i>Θωράκιση της πλευράς χαμηλής τάσης μιας διάταξης για τη μέτρηση μεταβαλλόμενης τάσης μέσω καταμεριστή τάσης</i>	45
3.1-1	<i>Γενικός καταμεριστής τάσης</i>	48
3.2.1-1	<i>Ωμικός καταμεριστής</i>	50
3.2.2-1	<i>Χωρητικός καταμεριστής</i>	50
3.2.3.1-1	<i>R και C σε σειρά, R₀ και C₀ σε σειρά</i>	51

ΣΧΗΜΑ	ΤΙΤΛΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ
3.2.3.2-1	<i>R και C παράλληλα, R_o και C_o παράλληλα</i>	52
3.3.2-1	<i>Προσαρμογή καλωδίου συνδέσεων καταμεριστή-παλμογράφου με βραχίονα Χ.Τ. καταμεριστή</i>	55
3.3.3-1	<i>Προσαρμογή βραχίονα Χ.Τ. αποσβεσμένου χωρητικού καταμεριστή</i>	57
3.4.3.1-1	<i>Τομή (a) και τυπική εικόνα (b) ενός «πρότυπου πυκνωτή» για μια τάση 2KV (r.m.s.)</i>	72
3.4.3.1-2	<i>Τομή ενός πυκνωτή συμπιεσμένου αερίου (πρότυπος πυκνωτής)</i>	73
3.4.3.1-3	<i>Δυναμική κατανομή κατά μήκος ενός συμπιεσμένου πυκνωτή για διάφορα μήκη του ηλεκτροδίου Υ.Τ.</i>	74
3.4.3.1-4	<i>Πρότυπος πυκνωτής συμπιεσμένου αερίου για 1000 KV r.m.s</i>	75
3.4.3.2-1	<i>Παράσιτες χωρητικότητες που επηρεάζουν την ισοδύναμη ή ενεργό χωρητικότητα των καταμεριστών Υ.Τ.</i>	76
3.4.3.2-2	<i>Κυλινδρικός αγωγός πάνω από επίπεδο</i>	78
4.2.2-1	<i>Προστασία μόνωσης με τη χαρακτηριστική «Α» από συσκευή προστασίας με τη χαρακτηριστική «Β»</i>	84
4.2.3-1	<i>Κατανομή εκκενώσεων επί ενός κύκλου της τάσης</i>	86
4.2.3-2	<i>Κοιλότητες που προκαλούν εκκενώσεις σε στερεά διηλεκτρικά</i>	87
4.2.4-1	<i>Διάβρωση μιας κοιλότητας, ακολουθούμενη από δημιουργία δένδρειδούς θυσάνου (treeing)</i>	88

ΣΧΗΜΑ	ΤΙΤΛΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ
4.2.4-2	<i>Χρόνος εφαρμογής της τάσης υπό την παρουσία εκκενώσεων ή ανομοιογενειών, συναρτήσει της πεδιακής έντασης</i>	88
4.2.5-1	<i>Εγκλείσματα σε ένα στερεό διηλεκτρικό τα οποία μπορούν να προκαλέσουν δενδροειδείς θυσάνους (treeing) και οριστική διάσπαση</i>	90
4.2.6.1-1	<i>Αιτίες κεραυνικών υπερτάσεων</i>	91
4.2.6.2-1	<i>Μεταβατική υπέρταση μετά τη διακοπή ενός ρεύματος βραχυκύκλωσης</i>	92
4.2.6.2-2	<i>Αποσύνδεση ενός μετασχηματιστή εν κενώ</i>	93
4.2.6.2-3	<i>Αποσύνδεση ενός χωρητικού εξαρτήματος χωρίς φορτίο, όπως μια γραμμή, καλώδιο ή συστοιχία πυκνωτών</i>	94
4.2.6.2-4	<i>Μεταβατική ταλάντωση προκαλούμενη από οδεύοντα κύματα σε μια ανοιχτή γραμμή</i>	95
4.2.6.2-5	<i>Υπερτάσεις συμβαίνουν εάν οι τρεις φάσεις ενός μετασχηματιστή, U, V και W δεν συνδεθούν ταυτόχρονα. (r = μείωση από αντικεραυνικό προστατευτικό)</i>	95
4.2.6.2-6	<i>Κανονικοποιημένος διακοπτικός κρουστικός παλμός που αναπαριστά ένα ταλαντούμενο κύμα των 1000 Hz</i>	96
4.2.6.4-1	<i>Έλεγχος εκφόρτισης. Κάθε μερική εκκένωση μεγαλύτερη από q_0 μετρούμενη κάτω από την τάση ελέγχου U_t οδηγεί στην απόρριψη του υπό έλεγχο αντικειμένου</i>	98
4.2.6.4-2	<i>Αποτελέσματα του ελέγχου αντοχής σε ένα διηλεκτρικό με κοιλότητες ποικίλων βαθμών</i>	99
4.4-1	<i>Σε ένα φυσικό διηλεκτρικό το χωρητικό ρεύμα i_c διαφέρει κατά μια γωνία δ από την ιδανική περίπτωση</i>	103
5.1.1-1	<i>Βασικό σύστημα παραγωγής και μέτρησης τάσης</i>	109

ΣΧΗΜΑ	ΤΙΤΛΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ
5.1.2-1	<i>Παράσιτες χωρητικότητες καταμεριστή Υ.Τ.</i>	109
5.1.2-2	<i>Βρόχος του συστήματος μέτρησης</i>	110
5.1.2-3	<i>Επαγόμενες τάσεις σε σύστημα μέτρησης Υ.Τ.</i>	110
5.1.2-4	<i>Επίδραση των οδευόντων κυμάτων στην απόκριση κυκλώματος που αποτελείται μόνο από ένα χάλκινο αγωγό</i>	113
5.1.3-1	<i>Αναπαράσταση του συστήματος μέτρησης ως δικτύου τεσσάρων ακροδεκτών</i>	114
5.1.4-1	<i>«Σύστημα τριών στοιχείων» αποτελούμενο από σύστημα απόσβεσης (1), σύστημα μετάδοσης (2) και τερματικό σύστημα (3)</i>	119
5.1.5-1	<i>Ισοδύναμο κύκλωμα καταμεριστών τάσης με κατανεμημένες παραμέτρους</i>	122
5.1.5.1-1	<i>Ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικών καταμεριστών τάσης</i>	124
5.1.5.1-2	<i>Υπολογισμένη μοναδιαία βηματική απόκριση για ένα χωρητικό καταμεριστή τάσης</i>	126
5.1.5.1-3	<i>Υπολογισμένη μοναδιαία βηματική απόκριση $G_i(t)$ για αποσβεσμένους χωρητικούς καταμεριστές σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 5.1.5.1-1</i>	127
5.1.5.1-4	<i>Αποσβεσμένος χωρητικός καταμεριστής σειράς για κρουστική τάση 6MV</i>	128
5.1.6-1	<i>Υπολογισμένη μοναδιαία βηματική απόκριση ενός εξιδανικευμένου ωμικού ή παράλληλου-μικτού ωμικοχωρητικού καταμεριστή με ακροδέκτη</i>	131
5.1.6.1-1	<i>Η μέθοδος του μοναδιαίου βήματος</i>	134

ΣΧΗΜΑ	ΤΙΤΛΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ
5.1.7-1	<i>Κυκλώματα για την προσαρμογή του καλωδίου σήματος</i>	136
5.1.7-2	<i>Σχεδιασμένες τομές πιθανών διατάξεων για το βραχίονα Χ.Τ. των καταμεριστών τάσης</i>	138
5.2.1-1	<i>Ωμικός καταμεριστής με 2 αντιστάσεις σε σύνδεση σειράς</i>	140
5.2.2-1	<i>Ωμικός καταμεριστής με 3 αντιστάσεις σε σύνδεση σειράς</i>	140
5.2.3-1	<i>Ωμικός καταμεριστής με N αντιστάσεις σε σύνδεση σειράς</i>	142
5.2.4-1	<i>Ωμικός καταμεριστής με 1 αντίσταση σε σύνδεση σειράς με 2 αντιστάσεις σε παράλληλη σύνδεση</i>	143
5.2.5-1	<i>Ωμικός καταμεριστής με 1 αντίσταση σε σύνδεση σειράς με N αντιστάσεις σε παράλληλη σύνδεση</i>	144
5.2.6-1	<i>Χωρητικός καταμεριστής με 2 πυκνωτές σε σύνδεση σειράς</i>	145
5.2.7-1	<i>Χωρητικός καταμεριστής με 1 πυκνωτή σε σύνδεση σειράς με 2 πυκνωτές σε παράλληλη σύνδεση</i>	145
5.2.8-1	<i>Χωρητικός καταμεριστής με 1 πυκνωτή σε σύνδεση σειράς με N πυκνωτές σε παράλληλη σύνδεση</i>	146
5.2.9-1	<i>Μικτός καταμεριστής με 1 πυκνωτή σε σύνδεση σειράς με 1 αντίσταση</i>	147
5.2.10-1	<i>Χωρητικός καταμεριστής με N πυκνωτές C_1 σε παράλληλη σύνδεση, σε σύνδεση σειράς με N πυκνωτές C_2 σε παράλληλη σύνδεση</i>	148
5.2.11-1	<i>Διατάξεις καταμεριστών τάσης, αντίστοιχες σχέσεις καταμερισμού k και μέγιστα απόλυτα σφάλματα |Δ_k|</i>	149

SUMMARY

Nowadays, the voltage divider is the most generally used method for high voltage measuring. This study is triggered by the development of the new High Voltage Laboratory of the T.E.I. of Piraeus, namely the exploration of different dividers assemblies, which will need to be implemented in the future for the laboratory's academic purposes. The generated results can be used to break up the divider's development trend with the desired characteristics.

The study begins with an introduction to the measurement theory and then presents elements of high voltage measurements. Then, the theoretical data for the measuring dividers, both their structure and construction are presented. The dielectric stresses are considered and the voltage samples are studied. Besides, multiple circuits of voltage dividers are analyzed and the division ratio k as well as the maximum absolute error and the mean square error, are calculated for each schema. The study concludes with the presentation of the results and suggestions for future research.

Keywords: Measurement, high voltage, voltage divider, division ratio, maximum absolute error.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι καταμεριστές τάσης αποτελούν σήμερα τη βασική μέθοδο για τη μέτρηση υψηλών τάσεων. Η μελέτη αυτή γίνεται με αφορμή την ανάπτυξη του νέου Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Τ.Ε.Ι. Πειραιά και συγκεκριμένα, τη διερεύνηση διαφόρων συνδεσμολογιών καταμεριστών, που θα χρειαστεί να υλοποιηθούν μελλοντικά για τους ακαδημαϊκούς σκοπούς του εργαστηρίου. Τα αποτελέσματα που θα παραχθούν δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη καταμεριστών τάσης με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Η μελέτη ξεκινά με μια εισαγωγή στη θεωρία των μετρήσεων και στη συνέχεια παρουσιάζει στοιχεία των μετρήσεων υψηλών τάσεων. Κατόπιν παρουσιάζονται τα θεωρητικά στοιχεία για τους καταμεριστές μετρήσεων, τόσο για τη δομή όσο και τη κατασκευή τους. Εξετάζονται οι διηλεκτρικές καταπονήσεις και μελετώνται δοκίμια. Στη συνέχεια, μελετώνται διάφορες συνδεσμολογίες καταμεριστών τάσης και υπολογίζεται η σχέση καταμερισμού k καθώς και το μέγιστο απόλυτο αλλά και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, για κάθε μια από αυτές. Η μελέτη ολοκληρώνεται με την παράθεση των αποτελεσμάτων και των προτάσεων για μελλοντική έρευνα.

Λέξεις κλειδιά: Μέτρηση, υψηλή τάση, καταμεριστής τάσης, σχέση καταμερισμού, μέγιστο απόλυτο σφάλμα.

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ”

1.1 ΜΕΤΡΗΣΗ

Ο όρος μέτρηση αναφέρεται στη λήψη μιας πληροφορίας σχετικά με την τιμή ενός φυσικού μεγέθους. Οι μετρήσεις αποτέλεσαν τη βάση για την ανάπτυξη του τεχνολογικού μας πολιτισμού. Το πρώτα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μηχανικά. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν τα ηλεκτρομηχανικά όργανα, τα οποία εξακολουθούν να είναι σε ευρεία χρήση. Το κύριο μειονέκτημα των οργάνων αυτών είναι ότι δεν μπορούν να μετρήσουν μεγέθη που μεταβάλλονται με υψηλή ταχύτητα, εξαιτίας της αδράνειας του κινητού τους μέρους. Έτσι επινοήθηκαν τα ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης. Οι μετρήσεις εξυπηρετούν πολλούς και διαφορετικούς σκοπούς, μερικοί από τους οποίους είναι οι εξής:

- Η διατύπωση εμπειρικών σχέσεων σε περιπτώσεις όπου η θεωρητική ανάλυση είναι ανεπαρκής.
- Ο προσδιορισμός των παραμέτρων υλικών όπως η ειδική αντίσταση, η διηλεκτρική σταθερά, η μαγνητική διαπερατότητα.
- Η πειραματική επιβεβαίωση θεωρητικών αποτελεσμάτων.
- Η καταγραφή και η παρακολούθηση. Ως παραδείγματα αναφέρεται η καταγραφή της ηλεκτρικής ενέργειας και των σεισμών. Ακόμη, η τάση και το ρεύμα σε μια κατανάλωση όπως και η ταχύτητα ενός κινητήρα πρέπει συχνά να επιτηρούνται για την ανίχνευση βλαβών.
- Ο αυτόματος έλεγχος διεργασιών. Προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η θερμοκρασία ενός φούρνου απαιτείται η μέτρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του, έτσι ώστε το σύστημα ελέγχου να ρυθμίσει την ισχύ στην ηλεκτρική αντίσταση θέρμανσης.

Το αντικείμενο των ηλεκτρικών μετρήσεων εστιάζεται στη μέτρηση των βασικών ηλεκτρικών μεγεθών (τάσης, έντασης, αντίστασης, ισχύος), με τη χρήση οργάνων μέτρησης. Ακόμη, εξετάζονται και αξιολογούνται οι διάφορες μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοστούν στη μέτρηση του κάθε ηλεκτρικού μεγέθους.

Τα μη ηλεκτρικά φυσικά μεγέθη (πίεση, δύναμη, ταχύτητα, ροή, θερμοκρασία, φωτεινότητα κ.α.) μετρώνται με τη χρήση στοιχείων μετατροπής, τα οποία ονομάζονται *αισθητήρια*. Τα αισθητήρια αντιστοιχίζουν το μετρούμενο φυσικό μέγεθος σε κάποιο άλλο μέγεθος, το οποίο σχεδόν πάντα είναι ηλεκτρικό. Συχνά η πληροφορία για το μετρούμενο φυσικό μέγεθος πρέπει να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις ή να χρησιμοποιηθεί

ως είσοδος σε κάποιο σύστημα που ελέγχει αυτόματα κάποια διαδικασία. Στην περίπτωση αυτή αναφερόμαστε σ' ένα σύστημα μέτρησης. Τα αισθητήρια και γενικότερα τα συστήματα μέτρησης αποτελούν αντικείμενο των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών μετρήσεων. [1]

1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Κάθε φυσικό μέγεθος x εκφράζεται πλήρως από τη σχέση:

$$x = \{x\} [x] \quad (1.2-1)$$

όπου:

- $\{x\}$ καθαρός αριθμός, καλούμενος μέτρο ή αριθμητική τιμή του μεγέθους, που εκφράζει πόσες φορές το υπόψη μέγεθος είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο της μονάδας του και
- $[x]$ η μονάδα (το σύμβολο της μονάδας) του μεγέθους x .

Για να βρούμε την αριθμητική τιμή ή το μέτρο του μεγέθους x συγκρίνουμε αυτό προς άλλο ομοειδές μέγεθος, το οποίο λαμβάνουμε ως μοναδιαίο. Η διαδικασία αυτή της σύγκρισης των δύο ομοειδών μεγεθών καλείται *μέτρηση* του φυσικού μεγέθους x . Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι για την πρακτική διεξαγωγή της μέτρησης ενός μεγέθους, πρέπει:

1. να έχει καθορισθεί η μονάδα του μεγέθους και
2. να είναι γνωστή η διαδικασία σύγκρισης.

Οι μονάδες των φυσικών μεγεθών πρέπει να είναι σαφώς καθορισμένες και εύκολα αναπαραγώγιμες. Καταρχήν, η εκλογή της μονάδας μέτρησης οποιουδήποτε φυσικού μεγέθους μπορεί να είναι ελεύθερη, δηλαδή αυθαίρετη. Όμως οι σχέσεις που συνδέουν μεταξύ τους τα φυσικά μεγέθη (σχέσεις ορισμού ή σχέσεις εκφράζουσες φυσικούς νόμους), επιτρέπουν τη σκόπιμη εκλογή ορισμένων μεγεθών και τον ορισμό των μονάδων τους, κατά τρόπο ώστε οι μαθηματικές εξισώσεις που εκφράζουν τις σχέσεις αυτές να γράφονται χωρίς αριθμητικούς συντελεστές. Προκύπτουν έτσι τα συστήματα των μονάδων μετρήσεων στα οποία το πλήθος των μεγεθών που οι μονάδες τους εκλέγονται αυθαίρετα, περιορίζεται στο ελάχιστο. Τα μεγέθη αυτά ονομάζονται *θεμελιώδη* ή *βασικά μεγέθη* και οι μονάδες τους *θεμελιώδεις* ή *βασικές μονάδες*. Οι μονάδες όλων των άλλων μεγεθών παράγονται από τις θεμελιώδεις, μέσω των ισχύοντων φυσικών νόμων και καλούνται *παράγωγες μονάδες*.

Συστήματα μονάδων τα οποία δημιουργούνται με τον παραπάνω τρόπο, στα οποία δηλαδή ορίζονται ελεύθερα μόνον όσες μονάδες είναι αναγκαίες (οι θεμελιώδεις), οι δε υπόλοιπες προκύπτουν ως παράγωγοι αυτών, καλούνται *συνηρημοσμένα* συστήματα

μονάδων. Στο εξής με τον όρο *σύστημα μονάδων* θα εννοούμε ένα συνηρμισμένο σύστημα μονάδων.

Στο παρελθόν αναπτύχθηκαν και είναι σήμερα γνωστά, περισσότερα από ένα συστήματα μονάδων, τόσο στη μηχανική όσο και στην ηλεκτροτεχνία.

Στη μηχανική αναπτύχθηκαν τα εξής τριαδικά συστήματα μονάδων:

1. Το σύστημα μονάδων *C.G.S.*, στο οποίο ως βασικά μεγέθη ελήφθησαν το μήκος, η μάζα και ο χρόνος, με αντίστοιχες βασικές μονάδες το εκατοστό (cm), το γραμμάριο (gr) και το δευτερόλεπτο (sec).
2. Το *τεχνικό* σύστημα μονάδων, στο οποίο ως βασικά μεγέθη ελήφθησαν το μήκος, η δύναμη και ο χρόνος, με αντίστοιχες βασικές μονάδες το μέτρο (m), το χιλιόγραμμο βάρους ή Κιλοπόντ (Kgr) ή (Kp) και το δευτερόλεπτο (sec).
3. Το σύστημα μονάδων *M.K.S.*, στο οποίο ως βασικά μεγέθη ελήφθησαν το μήκος, η μάζα και ο χρόνος, με αντίστοιχες βασικές μονάδες το μέτρο (m), το χιλιόγραμμο μάζας (kg) και το δευτερόλεπτο (sec).

Στον ηλεκτρισμό αποδεικνύεται ότι αρκεί να ληφθούν τέσσερα μεγέθη ως θεμελιώδη και να ορισθούν οι μονάδες τους. Τα τρία εκ των τεσσάρων αυτών μεγεθών μπορούν να είναι τα ανωτέρω αναφερθέντα μεγέθη της μηχανικής, ενώ το τέταρτο πρέπει να είναι ηλεκτρικό ή μαγνητικό μέγεθος.

α) Κατ' αυτόν τον τρόπο, από το σύστημα C.G.S. της μηχανικής προέκυψαν δύο τετραδικά συστήματα μονάδων στον ηλεκτρισμό:

1. Το *ηλεκτροστατικό* σύστημα μονάδων C.G.S. στο οποίο ως τέταρτο θεμελιώδες μέγεθος ελήφθη το ηλεκτρικό φορτίο, η μονάδα του οποίου προέκυψε από την εφαρμογή του νόμου του Coulomb, ο οποίος δίνει την δύναμη F που ασκείται μεταξύ δύο σημειακών φορτίων Q_1 και Q_2 που βρίσκονται σε απόσταση r .
2. Το *ηλεκτρομαγνητικό* σύστημα μονάδων C.G.S στο οποίο ως τέταρτο βασικό μέγεθος ελήφθη η ποσότητα μαγνητισμού, με αντίστοιχη μονάδα τη μονάδα ποσότητας μαγνητισμού, οριζόμενη (ανάλογα με το ηλεκτροστατικό σύστημα μονάδων) ως η ποσότητα μαγνητισμού η οποία στο κενό και από απόσταση ενός εκατοστού εξασκεί επί ίσης ποσότητας μαγνητισμού δύναμη μιας δίνης.

β). Από το σύστημα M.K.S της μηχανικής προέκυψε το τετραδικό ηλεκτροτεχνικό σύστημα μονάδων *M.K.S.A*, στο οποίο ως τέταρτο βασικό μέγεθος ελήφθη η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος με αντίστοιχη βασική μονάδα το Αμπέρ (A).

Για να καταστεί δυνατή η μελέτη όλων των μεγεθών της φυσικής, στα ανωτέρω τέσσερα βασικά μεγέθη του συστήματος M.K.S.A προστέθηκαν και τα ακόλουθα τρία:

- Η θερμοδυναμική θερμοκρασία με αντίστοιχη βασική μονάδα το Κέλβιν (K) (Kelvin)

για την εξέταση των θερμικών μεγεθών.

- Η φωτεινή ένταση ή ένταση φωτεινής πηγής με αντίστοιχη βασική μονάδα την Καντέλα ή καντήλα (cd) (candela) για το πεδίο της φωτομετρίας.
- Η ποσότητα της ύλης με αντίστοιχη βασική μονάδα το γραμμομόριο (mol) για το πεδίο της χημείας και της μοριακής φυσικής.

Δημιουργήθηκε έτσι ένα νέο σύστημα το οποίο βασίζεται σε επτά βασικές μονάδες και το οποίο περιγράφεται πλήρως στο πρότυπο *ΕΛΟΤ 100*¹.

Το *Διεθνές Σύστημα Μονάδων Μετρήσεων*, με συντετμημένη γραφή (*S.I.*) για όλες τις γλώσσες, υιοθετήθηκε αρχικά από την 11η Γενική Συνδιάσκεψη Μέτρων και Σταθμών (C.G.P.M.) το έτος 1960 και καθιερώθηκε επίσημα από πολλά κράτη. Επόμενες Γενικές Συνδιασκέψεις Μέτρων και Σταθμών επέφεραν ορισμένες τροποποιήσεις, κυρίως όσον αφορά τους ορισμούς ορισμένων μονάδων.

Το Διεθνές Σύστημα Μονάδων Μετρήσεων είναι αυτοσυνεπές ή σύμφωνο σύστημα μονάδων, δηλαδή η επιλογή των μονάδων είναι τέτοια ώστε οι εξισώσεις μεταξύ των αριθμητικών τιμών και οι αντίστοιχες εξισώσεις μεταξύ των φυσικών μεγεθών να είναι ίδιες.

Στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (S.I.) οι επτά βασικές μονάδες ορίζονται ως εξής:

1. *Μέτρο* (m). Ως μονάδα μήκους ορίζεται το μέτρο (m) το οποίο είναι ίσο προς το μήκος της διαδρομής που διανύεται από το φως στον κενό χώρο, σε χρονικό διάστημα $1/299792458$ του δευτερόλεπτου (17^η C.G.P.M. 1983).
2. *Χιλιόγραμμα μάζας* (kg). Ως μονάδα μάζας ορίζεται το χιλιόγραμμα μάζας (kg), ίσο προς τη μάζα του προτύπου χιλιόγραμμου, το οποίο είναι ίσο προς τη μάζα μίας κυβικής παλάμης νερού με κανονική πίεση και θερμοκρασία 4°C (1^η C.G.P.M 1889 και 3^η C.G.P.M. 1901).
3. *Δευτερόλεπτο* (s). Ως μονάδα χρόνου ορίζεται το δευτερόλεπτο (s), ίσο προς τη διάρκεια 9.192.631.770 περιόδων της ακτινοβολίας, η οποία αντιστοιχεί στη μετάπτωση της θεμελιώδους καταστάσεως του ατόμου Καισίου 133 από τη μία υπέρλεπτη στάθμη στην άλλη (13^η C.G.P.M. 1967).
4. *Αμπέρ* (A). Ως μονάδα εντάσεως του ηλεκτρικού ρεύματος ορίζεται το Αμπέρ (A), ίσο με την ένταση σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο ρέοντας δια δύο παραλλήλων ευθυγράμμων αγωγών απείρου μήκους και αμελητέας κυκλικής διατομής οι οποίοι βρίσκονται σε απόσταση ενός μέτρου μεταξύ τους στον κενό χώρο, προκαλεί ανάπτυξη μηχανικής δύναμης 2×10^{-7} N (Newton) ανά μέτρο μήκους του αγωγού (9^η C.G.P.M. 1948).
5. *Κέλβιν* (K). Ως μονάδα θερμοδυναμικής θερμοκρασίας ορίζεται το Κέλβιν (K),

ίσο προς $1/273,16$ της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας του τριπλού σημείου του νερού. Η μονάδα "βαθμός Κελσίου" ($^{\circ}\text{C}$) είναι ίση με το Κέλβιν (K) και χρησιμοποιείται για την έκφραση της θερμοκρασίας Κελσίου. Η θερμοκρασία Κελσίου t ορίζεται από τη σχέση $t = T - T_0$, όπου T η θερμοδυναμική θερμοκρασία και $T_0 = 273,16$ K. Θερμοκρασιακές διαφορές μπορούν να εκφράζονται αδιάκριτα σε Κέλβιν ή σε βαθμούς Κελσίου δεδομένου ότι γι' αυτό, η θέση του μηδενός είναι αδιάφορη.

6. *Καντέλα (ή καντήλα) (cd)*. Ως μονάδα έντασης φωτεινής πηγής ορίζεται η Καντέλα (cd), η οποία είναι η φωτεινή ένταση προς ορισμένη κατεύθυνση, μιας πηγής που εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία συχνότητας $540 \cdot 10^{12}$ Hz και της οποίας η ένταση ακτινοβολίας προς την κατεύθυνση αυτή είναι $1/683$ w/sr (βατ ανά στερεακτίνιο) (16^η C.G.P.M. 1979).
7. *Γραμμομόριο (mol)*. Ως μονάδα ποσότητας της ύλης ορίζεται το γραμμομόριο (mol), ίσο με την ποσότητα της ύλης η οποία περιέχει το αυτό πλήθος μορίων (ή ιόντων ή ηλεκτρονίων ή άλλων στοιχειωδών σωματιδίων ανάλογα με την περίπτωση) με το πλήθος των ατόμων που περιέχονται σε 0,012 χιλιόγραμμα άνθρακα 12 (14^η C.G.P.M. 1971).

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΜΟΝΑΔΑ	
	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΣΥΜΒΟΛΟ
Μήκος	Μέτρο	m
Μάζα	Χιλιόγραμμα	kg
Χρόνος	Δευτερόλεπτο	s
Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος	Αμπέρ	A
Θερμοδυναμική θερμοκρασία	Κέλβιν	K
Ένταση φωτεινής πηγής	Καντέλα	cd
Ποσότητα της ύλης	Γραμμομόριο	mol

Πίνακας 1.2-1 : Οι βασικές μονάδες του Διεθνούς Συστήματος (S.I.)

Παράγωγες μονάδες όπως ήδη αναφέρθηκε είναι όλες οι άλλες μονάδες. Ο σχηματισμός τους πραγματοποιείται κατά τρόπο συνεπή με πολλαπλασιασμό και διαίρεση των θεμελιωδών μονάδων του S.I., χωρίς την χρήση αριθμητικών συντελεστών. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι οι εξισώσεις (σχέσεις) μεγεθών έχουν ακριβώς την ίδια μορφή με τις εξισώσεις αριθμητικών τιμών. Μέχρι το 1995 οι μονάδες ακτίνιο (rad) και στερεακτίνιο (sr) οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση επιπέδων και στερεών γωνιών αντίστοιχα, αποτελούσαν ειδική κατηγορία μονάδων, τις λεγόμενες *συμπληρωματικές μονάδες* του Διεθνούς Συστήματος Μονάδων Μετρήσεως. Όμως, από

το 1995 η 20^η Γενική Συνδιάσκεψη Μέτρων και Σταθμών έπαψε να τις θεωρεί ως ειδική κατηγορία μονάδων και τις ενέταξε στις παράγωγες μονάδες.

1.2.1 ΠΡΟΘΕΜΑΤΑ ΜΟΝΑΔΩΝ

Δεκαδικά πολλαπλάσια και υποπολλαπλάσια των μονάδων, τόσο των βασικών όσο και των παραγώγων, καθορίζονται με τη χρησιμοποίηση ορισμένων συμβόλων (προθεμάτων) τα οποία τίθενται πριν από το σύμβολο της μονάδας. Τα εν χρήσει προθέματα του S.I. παρατίθενται στον πίνακα 1.2.1-1.

Όταν ένα πρόθεμα τίθεται εμπρός από το σύμβολο της μονάδας, τότε το σύμπλεγμα προθέματος και μονάδας θεωρείται ως νέο σύμβολο. Αυτό το νέο σύμβολο υψώνεται σε δύναμη χωρίς την χρησιμοποίηση παρενθέσεων π.χ. cm^3 , mA^2 , ms^3 κτλ. Η χρήση διπλών προθεμάτων πρέπει να αποφεύγεται, εφόσον υφίστανται απλά προθέματα.

ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑ			ΥΠΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑ		
da	Δέκα	10^1	d	Ντέσι	10^{-1}
h	Εκατό	10^2	c	Σέντι	10^{-2}
k	Κίλο	10^3	m	Μίλλι	10^{-3}
M	Μέγα	10^6	μ	Μίκρο	10^{-6}
G	Γίγα	10^9	n	Νάνο	10^{-9}
T	Τέρα	10^{12}	p	Πίκο	10^{-12}
P	Πέτα	10^{15}	f	Φέμπτο	10^{-15}
E	Εξά	10^{18}	a	Άπτο	10^{-18}
Z	Ζέτα	10^{21}	z	Ζέπτο	10^{-21}
Y	Υούτα	10^{24}	y	Γυόκτο	10^{-24}

Πίνακας 1.2.1-1 : Προθέματα των S.I. μονάδων [2]

1.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

1.3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Στην πράξη συναντάμε υψηλές τάσεις, οι οποίες είναι επιθυμητές όταν είναι απαραίτητες για τη λειτουργία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και ανεπιθύμητες όταν εμφανίζονται σαν επακόλουθα φαινομένων τα οποία είναι αναπόφευκτα.

Οι κυριότερες εφαρμογές εγκαταστάσεων ή και μηχανημάτων, η λειτουργία των οποίων απαιτεί τροφοδότησή τους με υψηλή τάση (άνω των 1000V AC ή 1500V DC) αναφέρονται ενδεικτικά ακολούθως:

- Μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας
- Ηλεκτρική έλξη (Ηλεκτρικοί σιδηρόδρομοι)

- Εγκαταστάσεις ακτινών Rontgen (Εγκαταστάσεις ακτινοσκόπησης και ακτινογραφίας)
- Φίλτρα αιωρημάτων στη βιομηχανία και τους σταθμούς παραγωγής

Για τις παραπάνω περιπτώσεις απαιτείται η εφαρμογή των τάσεων *κανονικής λειτουργίας* των εγκαταστάσεων οι οποίες φυσικά και είναι επιθυμητές δεδομένου ότι είναι απαραίτητες για τη λειτουργία των εγκαταστάσεων αυτών. Εμφανίζονται όμως στις εγκαταστάσεις αυτές και σε έκτακτες περιστάσεις, τάσεις πολύ υψηλότερες, οι οποίες καλούνται *υπερτάσεις* και που μπορούν να φθάσουν στο τριπλάσιο μέχρι ακόμη και στο επταπλάσιο της πολικής τάσης λειτουργίας των εγκαταστάσεων και σε πολλές περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες. Οι εν λόγω υπερτάσεις είναι ανεπιθύμητες, είναι δε και αναπόφευκτες.

Ο τομέας της τεχνολογίας των υψηλών τάσεων (Τ.Υ.Τ.) προσπαθεί να διαμορφώσει τα στοιχεία ενός δικτύου με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται το βέλτιστο οικονομικό αποτέλεσμα υπό τον όρο ότι εξασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία του. Είναι λοιπόν προφανές ότι στο αντικείμενο της Τ.Υ.Τ. εμπίπτουν τόσο η μελέτη του τρόπου διεξαγωγής μετρήσεων σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις Υ.Τ. όσο και ο τρόπος αναπαραγωγής στο εργαστήριο των Υ.Τ. που εμφανίζονται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, ώστε να είναι δυνατή η εργαστηριακή διεξαγωγή έρευνας και η δοκιμή των διαφόρων μονωτικών υλικών ή ολόκληρων συσκευών πριν αυτές χρησιμοποιηθούν στα ηλεκτρικά δίκτυα. [3]

1.3.2 ΜΟΡΦΕΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΩΝ

Σαν μορφή μιας τάσης ορίζεται το διάγραμμα του στιγμιαίου εύρους της, συναρτήσει του χρόνου. Τις πιο πολλές φορές σαν *μέγιστο εύρος* ή απλώς *εύρος* της τάσης ενός αγωγού, χαρακτηρίζεται η μέγιστη διαφορά τάσης που παρουσιάζει ο εν λόγω αγωγός από έναν άλλο αγωγό που διατηρείται μόνιμα στο δυναμικό της γης. Μερικές φορές όμως μπορεί και οι δύο αγωγοί να παρουσιάζουν κάποια τάση ως προς τη γη με αποτέλεσμα στην περίπτωση αυτή το εύρος της τάσης ανάμεσα στους δύο αγωγούς να είναι ίσο με τη διαφορά των τάσεων που παρουσιάζουν προς τη γη σε μια ορισμένη χρονική στιγμή.

Οι διάφορες τάσεις μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Στη μία ανήκουν τάσεις που η μορφή τους επαναλαμβάνεται σε σταθερά χρονικά διαστήματα και ονομάζονται *περιοδικές* το δε σταθερό χρονικό διάστημα επανάληψης *περίοδος*.
- Στην άλλη κατηγορία ανήκουν όλες οι υπόλοιπες *μη περιοδικές* μορφές τάσης.

Μια άλλη υποδιαίρεση στη μορφή των τάσεων μπορεί να γίνει ανάλογα με τη διατήρηση της πολικότητας τους με το χρόνο, έστω και αν το εύρος τους μεταβάλλεται:

- Τάσεις που διατηρούν τη πολικότητα τους με το χρόνο λέγονται *μονόφορες*.

Οι τάσεις που εμφανίζονται στα ηλεκτρικά δίκτυα και που συνήθως έχουν εύρος μεγαλύτερο από εκείνο της κανονικής τάσης λειτουργίας τους (*υπερτάσεις*), έχουν κατά κανόνα ανώμαλη μορφή. [4]

1.3.3 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Όταν ερευνούμε ένα σύστημα μόνωσης, η τάση διασπάσεώς του προσδιορίζει το άνω όριο της παροχής της τάσης που μπορεί να επιβάλλεται. Όμως γενικά δεν είναι δυνατό να βγάλουμε συμπεράσματα για την αιτία της διάσπασης από μόνη τη γνώση της τάσης διάσπασης και τα ίχνη που αφήνει η διάσπαση αυτή στα μονωτικά υλικά, δηλαδή τα διηλεκτρικά υλικά και κυρίως τα στερεά μονωτικά υλικά. Πιο εμπεριστατωμένα συμπεράσματα θα πρέπει να αναμένονται από τη μελέτη της συμπεριφοράς των διηλεκτρικών υλικών σε καταπόνησή τους σε υψηλή τάση, η οποία όμως δεν φτάνει ή φτάνει σταδιακά την τάση διασπάσεως. Οι καταπονήσεις του είδους αυτού οι οποίες βέβαια γίνονται με βάση κάποιες συγκεκριμένες διαδικασίες, αποτελούν τις λεγόμενες *διηλεκτρικές δοκιμές*.

Για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής των εγκαταστάσεων στο εργαστήριο, χρησιμοποιούνται μερικές κανονικές μορφές τάσεων. Η τιμή των τάσεων δοκιμής εξαρτάται από το σκοπό της χρησιμοποιήσεώς τους. Για δοκιμές σε έτοιμες κατασκευές (μετασχηματιστές, διακόπτες κ.τ.λ.) απαιτούνται τάσεις δοκιμής που πολλές φορές υπερβαίνουν και τα 2000KV. Ερευνητικές όμως δοκιμές σε απλά δοκίμια από μονωτικά υλικά, διεξάγονται συνήθως με τάση τιμών από 10 μέχρι 100KV. [3]

1.3.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Στις υψηλές τάσεις διεξάγεται πλήθος μετρήσεων πολλών κατηγοριών, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση δυο κριτήρια:

1. την τιμή των υπό μέτρηση μεγεθών και
2. την ταχύτητα της χρονικής μεταβολής τους.

Τις περισσότερες φορές στην έξοδο των διατάξεων παραγωγής υψηλών τάσεων, συνδέεται καταμεριστής τάσης για τον υποβιβασμό της τάσης σε επίπεδα που επιβάλλονται από τη λειτουργία των οργάνων μέτρησης χαμηλής τάσης. Ένας καταμεριστής τάσης είναι μια διάταξη που όταν συνδεθεί με το ένα άκρο της στην υπό μέτρηση τάση προκύπτει στο άλλο άκρο της μια χαμηλή τάση περίπου στα 100 V, που έχει μια γνωστή και σταθερή αναλογία με την υπό μέτρηση τάση και που μπορεί να μετρηθεί με ένα συνηθισμένο όργανο χαμηλής τάσης όπως είναι ένα βολτόμετρο, ένας

παλμογράφος ή κάτι ανάλογο.

Οι υψηλές τάσεις και τα υψηλά ρεύματα μπορούν να μετρηθούν με ποικίλους τρόπους, με τις θεμελιώδεις μεθόδους να είναι:

Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο	U	A.C.	D.C.	...
Διάκενα σφαιρών	U	A.C.	D.C.	Παλμός
Ωμικός καταμεριστής τάσης	U	A.C.	D.C.	Παλμός
Χωρητικός καταμεριστής τάσης	U	A.C.	D.C.	Παλμός
Διακλαδωτήρας (Shunt)	i	A.C.	D.C.	Παλμός
Πηνίο Rogowski	i	A.C.	...	Παλμός

Πίνακας 1.3.4-1 : Θεμελιώδεις μέθοδοι μέτρησης υψηλών τάσεων και ρευμάτων

Πριν γενικευθεί η χρήση των καταμεριστών, χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση υψηλών τάσεων διάφορες μέθοδοι πολλές από τις οποίες εξακολουθούν και σήμερα να χρησιμοποιούνται σποραδικά και που περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο [3,5,6].

Αναφορές

- [1] Κιοσκερίδης, Ι., «Ηλεκτρικές Μετρήσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρονικής της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2003.
- [2] Μανωλάς, Σ., «Ηλεκτρικές Μετρήσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αθήνα 2002.
- [3] Διαμαντόπουλος, Δ., «Υψηλές Τάσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αιγάλεω 2006.
- [4] Κούκος, Π., «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας, Χαλκίδα 2003-04.
- [5] Πυργιώτη, Ε., «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Πάτρας, Πάτρα 2005.
- [6] Kreuger, F., "Industrial High Voltage", (Volume II), Delft University of Technology, Netherland 1992.

¹ Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης Α.Ε., Αχαρνών 313, Τ.Κ. 11145, Αθήνα, Τηλ. 2102120410, www.elot.gr

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ”

2.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ

Τα ηλεκτρομηχανικά όργανα χρησιμοποιούνται στη μέτρηση ηλεκτρικών μεγεθών όπως η ένταση, η τάση, η ισχύς και η ωμική αντίσταση. Στην ένδειξη της τιμής του μετρούμενου μεγέθους χρησιμοποιείται συνήθως ένας δείκτης (βελόνη), ο οποίος κινείται πάνω σε μια βαθμονομημένη κλίμακα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η απεικόνιση γίνεται από μια φωτεινή δέσμη, η οποία ανακλάται από ένα στρεφόμενο κάτοπτρο πάνω στην κλίμακα.

Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους, τα ηλεκτρομηχανικά όργανα διακρίνονται σε:

- Ηλεκτρομαγνητικά όργανα
 1. Κινητού πηνίου (και ανορθωτικά).
 2. Ηλεκτροδυναμικά.
 3. Διασταυρωμένων πηνίων.
 4. Επαγωγικά.
 5. Κινητού μαγνήτη.
 6. Κινητού σιδήρου.
 7. Παλλόμενων ελασμάτων.
- Ηλεκτροστατικά όργανα
- Θερμικά όργανα
 1. Θερμικής διαστολής.
 2. Θερμοηλεκτρικά.

Καθένα από τα παραπάνω όργανα χαρακτηρίζεται από ένα σύμβολο, το οποίο σχεδιάζεται πάνω στην επιφάνεια απεικόνισης του οργάνου. Στην ίδια επιφάνεια οι κατασκευαστές παραθέτουν μέσω συμβόλων και αριθμών διάφορα χαρακτηριστικά στοιχεία του οργάνου, όπως:

- Το είδος του ρεύματος στο οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Συνεχές ρεύμα — , εναλλασσόμενο ρεύμα \sim , συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα ⌚ .
- Την κλάση (ακρίβεια) του οργάνου, ως ποσοστό επί τοις εκατό.
- Την περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας (για όργανα που λειτουργούν στο εναλλασσόμενο ρεύμα).
- Την τάση δοκιμής. Τάση δοκιμής 500V \star , τάση δοκιμής μεγαλύτερη από 500V και ειδικότερα 1KV \star .

- Τη θέση λειτουργίας. Οριζόντια θέση \square , κατακόρυφη θέση \perp , τοποθέτηση σε γωνία 30° $\angle 30^\circ$.

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

2.2.1 ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

Όταν μεταξύ των οπλισμών ενός επίπεδου πυκνωτή εφαρμοστεί μια τάση, αναπτύσσονται στους οπλισμούς του πυκνωτή ίσα και ετερόνυμα ηλεκτρικά φορτία και ένα ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο. Ως αποτέλεσμα ασκείται σε κάθε οπλισμό μια δύναμη, η οποία είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης. Όταν ο ένας οπλισμός του πυκνωτή είναι σταθερός ενώ ο άλλος μπορεί να στραφεί γύρω από ένα άξονα, όπως στο σχήμα 2.2.1-1, τότε η μέση ροπή στρέψης ορίζεται από τη σχέση

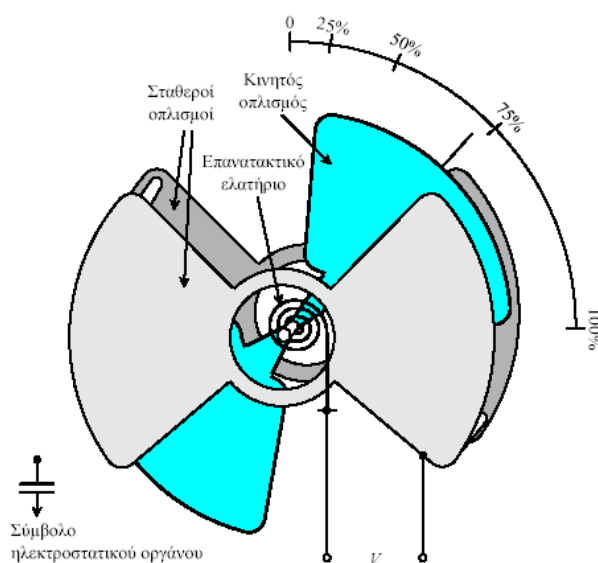
$$T = k_1 \cdot V^2 \quad (2.2.1.-1)$$

όπου k_1 είναι μια σταθερά αναλογίας.

Ο κινητός οπλισμός ισορροπεί όταν η ροπή στρέψης είναι ίση με τη ροπή που ασκεί το επανατακτικό ελατήριο

$$T = T_s \Rightarrow k_1 \cdot V^2 = c \cdot \theta \Rightarrow \theta = k \cdot V^2 \quad (2.2.1.-2)$$

επομένως, η απόκλιση του δείκτη του ηλεκτροστατικού οργάνου θ είναι ανάλογη με το τετράγωνο της μετρούμενης τάσης V . Στη σχέση 2.2.1-2 c είναι η σταθερά του ελατηρίου και k η σταθερά του οργάνου. Η τάση V είναι είτε συνεχής, είτε η ενεργός τιμή της εναλλασσόμενης τάσης με οποιαδήποτε κυματομορφή.



Σχήμα 2.2.1-1 : Σύμβολο και κατασκευαστική δομή του ηλεκτροστατικού οργάνου. Ο σταθερός οπλισμός του πυκνωτή αποτελείται από δύο επιφάνειες

Τα ηλεκτροστατικά όργανα χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως βολτόμετρα. Τα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα υπόλοιπα όργανα μέτρησης της τάσης είναι ότι παρουσιάζουν ουσιαστικά άπειρη εσωτερική αντίσταση, οπότε η μέτρηση της τάσης γίνεται άμεσα, χωρίς τη μετατροπή της τάσης σε ρεύμα. Επιπλέον, μπορούν να μετρήσουν dc τάσεις αλλά και την ενεργό τιμή ac τάσεων κάθε κυματομορφής με εξαιρετικά υψηλή τιμή, εκατοντάδων KV, αλλά και υψηλής συχνότητας, δεκάδων MHz. Η ένδειξή τους δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. [1]

2.2.1.1 ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟ ΒΟΛΤΟΜΕΤΡΟ

Όταν ένας αγωγός βρίσκεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, ασκείται πάνω του μια δύναμη. Η δύναμη αυτή δύναται να εκτιμηθεί από τη μεταβολή που υφίσταται η ηλεκτροστατική ενέργεια w του πεδίου για μια μικρή μετακίνηση ds του αγωγού και δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\theta w}{\theta s} \quad (2.2.1.1-1)$$

Εάν το ηλεκτρικό πεδίο σχηματίζεται ανάμεσα στους δύο παράλληλους οπλισμούς ενός επίπεδου πυκνωτή, είναι γνωστό πως

$$W = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot C \cdot V^2 \quad (2.2.1.1-2)$$

όπου C η χωρητικότητα του πυκνωτή και V η τάση ανάμεσα στους οπλισμούς του. Γ' αυτή την ειδική περίπτωση προκύπτει ότι

$$F = -\left(\frac{d}{ds}\right) \left[\left(\frac{1}{2}\right) C \cdot V^2\right] = -\left(\frac{1}{2}\right) V^2 \left(\frac{dC}{ds}\right) \quad (2.2.1.1-3)$$

και επειδή για ένα επίπεδο πυκνωτή με επιφάνεια οπλισμών A και διάκενο s είναι

$$C = \epsilon_0 \cdot \left(\frac{A}{s}\right) \quad \text{και} \quad \frac{\theta C}{\theta s} = -\epsilon_0 \cdot \frac{A}{s^2} \quad (2.2.1.1-4)$$

προκύπτει

$$F = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \epsilon_0 \cdot V^2 \cdot \left(\frac{A}{s^2}\right) \quad (2.1.1.1-5)$$

Εάν είναι γνωστά τα A και s μπορεί από τη μέτρηση της δύναμης F που ασκείται στους οπλισμούς του πυκνωτή να υπολογιστεί η τάση V .

Τα ηλεκτροστατικά βολτόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για τη μέτρηση συνεχούς ή εναλλασσόμενης τάσης. Επειδή η δύναμη είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης, σε περίπτωση μέτρησης εναλλασσόμενης ή γενικά διακυμαινόμενης τάσης τα ηλεκτροστατικά βολτόμετρα δίνουν απευθείας ενδεικνυόμενη τιμή.

Ένα ηλεκτροστατικό βολτόμετρο αποτελείται από δύο παράλληλα δισκοειδή ηλεκτρόδια με διαμορφωμένα τα άκρα τους για να αποφεύγεται το φαινόμενο κορόνα. Στο ένα από τα δύο ηλεκτρόδια εφαρμόζεται η τάση για μέτρηση και το άλλο γειώνεται.

Στο μέσο του γειωμένου ηλεκτροδίου είναι τοποθετημένος ένας μικρός δίσκος. Σύμφωνα με όσα εκτέθηκαν πιο πάνω, η δύναμη που ασκείται πάνω στο μικρό δίσκο είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης. Η δύναμη αυτή μετριέται από τη μετακίνηση του μικρού δίσκου που χρειάζεται για να εξισορροπηθούν η ηλεκτροστατική και η ανταγωνιστική δύναμη που συγκρατεί το μικρό δίσκο στη θέση του. Η μετακίνηση αυτή μετριέται από την απόκλιση μιας φωτεινής δέσμης πάνω σε ένα κάτοπτρο στερεωμένο πάνω στο κινητό σύστημα του μικρού δίσκου. Η περιοχή μέτρησης του βολτόμετρου μεταβάλλεται με την απόσταση των δύο παράλληλων δίσκων. Η ακρίβεια του βολτόμετρου χειροτερεύει όσο μεγαλώνει η απόσταση ανάμεσα στους δύο δίσκους και αυτό είναι που περιορίζει την μέγιστη τάση που μπορεί να μετρηθεί με ένα βολτόμετρο του τύπου αυτού.

Εκτός από το ηλεκτροστατικό βολτόμετρο με δύο παράλληλους δίσκους που περιγράφηκε πιο πριν, μπορούν να κατασκευαστούν βολτόμετρα βασιζόμενα στην ίδια αρχή, που χρησιμοποιούν δύο σφαίρες αντί για δύο δίσκους ή που χρησιμοποιούν ακόμα την αρχή ενός ηλεκτροδίου συγκρατούμενου ελαστικά μέσα σε ένα ηλεκτροστατικό πεδίο και ταλαντούμενου με συχνότητα ανάλογη με την έκταση του ηλεκτρικού πεδίου.

2.2.2 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΦΑΙΡΩΝ

Η μέτρηση μιας υψηλής τάσης με τη βοήθεια του διακένου γενικά, όχι αναγκαστικά δύο σφαιρών, βασίζεται στην αρχή του διακένου ορισμένου μήκους που διασπάται σε ορισμένη τάση. Η τάση διάσπασης όμως του διακένου δεν έχει απόλυτα καθορισμένη τιμή· παρουσιάζει στατιστική διασπορά που εξαρτάται από τη γεωμετρική μορφή του διακένου, τη μορφή της τάσης και άλλους ακόμα παράγοντες. Για το λόγο αυτό, για τη μέτρηση τάσεων χρησιμοποιούνται διάκενα που παρουσιάζουν τη μικρότερη δυνατή διασπορά και καθορίζονται όλες οι παράμετροι – αυτές τουλάχιστον που μπορούν να καθοριστούν – που επηρεάζουν την τάση διάσπασης. Έχει παρατηρηθεί ότι το διάκενο που παρουσιάζει τη μικρότερη διασπορά στη τάση διάσπασης για εναλλασσόμενη και κρουστική τάση είναι δύο σφαίρες της ίδιας διαμέτρου, που η απόστασή τους είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με τη διάμετρό τους. Για συνεχή τάση έχει παρατηρηθεί ότι μικρότερη διασπορά από τις σφαίρες παρουσιάζει το διάκενο ανάμεσα σε δύο ράβδους, αλλά συστηματική μελέτη του τελευταίου για χρησιμοποίησή του σε μετρήσεις δεν έχει γίνει ακόμα. Η χρησιμοποίηση του διακένου δυο ίσων σφαιρών για μέτρηση υψηλών τάσεων έχει μελετηθεί εμπειριστικώς. Η ακρίβεια που παρουσιάζουν μετρήσεις με σφαίρες είναι της τάξεως του $\pm 3\%$ υπό την προϋπόθεση ότι η απόστασή τους δεν υπερβαίνει την ακτίνα τους. Σφαιρικά διάκενα μέτρησης μπορούν να κατασκευαστούν με τον άξονά τους

οριζόντιο ή κατακόρυφο. Η γειτονία με το διάκενο γειωμένων αντικειμένων επηρεάζει το ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις δύο σφαίρες και κατά συνέπεια την τάση διάσπασης. Για αυτό σε μια ακτίνα (τουλάχιστον B) γύρω από το διάκενο δεν πρέπει να υπάρχουν γειωμένα αντικείμενα. Η τιμή του B εξαρτάται από το διάκενο S των σφαιρών. Η κατάσταση της επιφάνειας των σφαιρών επηρεάζει επίσης την τάση διάσπασης. Γι' αυτό η επιφάνεια των σφαιρών κυρίως στην περιοχή που πλησιάζουν περισσότερο και στην οποία συμβαίνουν οι διασπάσεις, πρέπει να διατηρείται καθαρή. Και κόκκοι σκόνης ακόμα επηρεάζουν την τάση διάσπασης.

Η διάσπαση ανάμεσα στις σφαίρες επιτυγχάνεται με ιονισμό από κρούσεις. Για να αρχίσει όμως ιονισμός εκτός από το ηλεκτρικό πεδίο που προκύπτει από την επιβαλλόμενη τάση, χρειάζονται μερικά αρχικά ηλεκτρόνια. Από φυσικό ιονισμό υπάρχουν στον αέρα πάντα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Όταν όμως το διάκενο μεταξύ των σφαιρών αυξηθεί, αυτό μπορεί να αυξήσει τη διασπορά της τάσεως διάσπασης. Για να προληφθεί αυτό το μειονέκτημα συνιστάται για τα μικρά διάκενα, τεχνητή δημιουργία ελευθέρων ηλεκτρονίων με ακτινοβολία. Σαν πηγή ακτινοβολίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε λυχνία υπεριωδών ακτινών ή μια παστίλια ραδιενεργού ουσίας εντάσεως 0,2-0,6 millicurie. Μια άλλη παράμετρος που επηρεάζει την τάση διάσπασης του διακένου είναι η πυκνότητα του αέρα και η ποσότητα υδρατμών που περιέχει. Η τάση διάσπασης γίνεται μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του αέρα και όσο περισσότερους υδρατμούς περιέχει. Η ίδια αρχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη μέτρηση συνεχών υψηλών τάσεων.

Η μετρούμενη τάση έχει την τιμή $U = I \cdot R$ όπου R η - γνωστή - τιμή της αντίστασης σειράς και I το ρεύμα που μετρείται με το μιλιαμπερόμετρο. Η αντίσταση του μιλιαμπερομέτρου συνήθως παραλείπεται ως πολύ μικρή. Η τιμή του R επιλέγεται ώστε το I να είναι περί τα 100 μA . Κατά την επιλογή του R λαμβάνεται επίσης υπόψη η εσωτερική αντίσταση της πηγής η τάση της οποίας πρόκειται να μετρηθεί και η δυνατότητα να παραληφθεί το ρεύμα I χωρίς να αλλοιώσει την τάση της. Παράλληλα με το μιλιαμπερόμετρο συνδέεται μια διάταξη προστασίας από υπέρταση. Το πιο ευαίσθητο τμήμα της διάταξης είναι η αντίσταση. Πρέπει να παρουσιάζει σταθερότητα τιμής και να έχει αρκετό μήκος ώστε η πτώση τάσης κατά μήκος της να μην υπερβαίνει τα 5 KV/cm όταν είναι εκτεθειμένη στον αέρα ή τα 15 KV/cm αν είναι μέσα σε λάδι. Με μια μικρή τροποποίηση η αντίσταση αυτή μπορεί, όπως αναφέρεται πιο κάτω, να μετατραπεί σε καταμεριστή τάσης που η λειτουργία του σαν διάταξη μέτρησης είναι πιο ικανοποιητική.

2.2.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Είναι όργανα που χρησιμεύουν στη μέτρηση υψηλών εναλλασσομένων εντάσεων και τάσεων. Οι μετασχηματιστές τάσης υπερτερούν από τους συνηθισμένους καταμεριστές τάσης ως προς την ασφάλεια των μετρήσεων, λόγω της προσφερόμενης απομόνωσης του κυκλώματος μέτρησης από το κύκλωμα υψηλής τάσης. Για τη μέτρηση υψηλών εναλλασσόμενων τάσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετασχηματιστές τάσης όμοιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα για μετρήσεις. Η μόνη διαφορά ανάμεσα σε ένα μετασχηματιστή ισχύος και ένα μετασχηματιστή μέτρησης έγκειται στην έμφαση που δίνεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του καθενός εξ αιτίας του ειδικού προορισμού τους.

Σε ένα μετασχηματιστή τάσης, η σχέση ανάμεσα στις τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πρέπει να είναι όσο γίνεται καλύτερα καθορισμένη και σταθερή. Σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή μέτρησης της τάσης, οι τάσεις στο πρωτεύον και το δευτερεύον πρέπει να έχουν ακριβώς την ονομαστική σχέση που αναφέρεται στην πινακίδα του μετασχηματιστή και να έχουν διαφορά φάσης ακριβώς 180°. Εξαιτίας των απωλειών σιδήρου και χαλκού και τη ροή σκεδάσεων ανάμεσα στο πρωτεύον και το δευτερεύον, η σχέση ανάμεσα στις τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αποκλίνει από την ιδανική κατά ένα βαθμό που εξαρτάται από το φορτίο του μετασχηματιστή. Το φορτίο ενός μετασχηματιστή *μέτρησης* ονομάζεται *burden* για διάκριση από τον όρο *load* που χρησιμοποιείται για ένα μετασχηματιστή *ισχύος*. Για την μέτρηση τάσεων, εκείνο που ενδιαφέρει είναι η ακρίβεια της σχέσης μεταφοράς μόνο. Το σφάλμα γωνίας ανάμεσα στις τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος έχει σημασία όταν ο μετασχηματιστής χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση του πηνίου τάσης ενός βολτόμετρου για μέτρηση ισχύος. Για να μειωθεί η διακύμανση της σχέσης τάσης και γωνίας, το φορτίο των μετασχηματιστών μέτρησης προβλέπεται από δύο μέχρι τριάντα φορές μικρότερο από αυτό που επιβάλλουν λόγοι υπερθέρμανσης του μετασχηματιστή. Η σχέση μεγέθους και γωνίας ανάμεσα στις τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος εξαρτάται όχι μόνο από την ένταση ρεύματος που απορροφά το φορτίο, αλλά και από το συντελεστή ισχύος. Είναι γνωστό επίσης πως η σχέση E_1/E_2 γίνεται μέγιστη όταν η γωνία του φορτίου συμπίπτει με τη γωνία που σχηματίζουν τα R και L του μετασχηματιστή. [9,4]

2.2.4 ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ

Οι καταμεριστές τάσης αποτελούν σήμερα τη σχεδόν γενικά χρησιμοποιούμενη μέθοδο για τη μέτρηση υψηλών τάσεων. Ένας καταμεριστής αποτελείται από το βραχίονα χαμηλής και το βραχίονα υψηλής τάσης, στους οποίους γίνεται εκτενής αναφορά στο τρίτο κεφάλαιο της παρούσης εργασίας. Η *σχέση μεταφοράς* του καταμεριστή

επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε η τάση εξόδου να είναι αρκετά χαμηλή για να μπορεί να μετρηθεί από ένα όργανο χαμηλής τάσης.

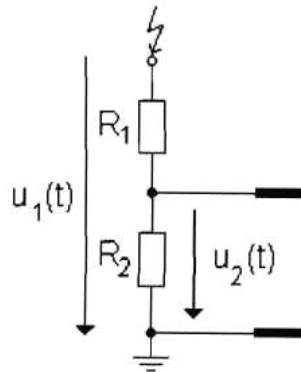
Τα όργανα χαμηλής τάσης που χρησιμοποιούνται για τη μέτρησή της, εξαρτώνται από τη μορφή της τάσης. Για συνεχή ή εναλλασσόμενη τάση αρκεί ένα κοινό βολτόμετρο αναλογικό ή ψηφιακό. Για κρουστικές τάσεις χρησιμοποιούνται παλμογράφοι ή κρουστικά βολτόμετρα. Τα κρουστικά βολτόμετρα δίνουν μόνο το εύρος και όχι ολόκληρο το σχήμα της τάσης όπως οι παλμογράφοι αλλά είναι πολύ πιο εύχρηστα και συνήθως μεγαλύτερης ακρίβειας.

Παρόλη τους την απλότητα, οι καταμεριστές τάσης παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται για την μέτρηση εναλλασσόμενων τάσεων μεγάλης συχνότητας ή κρουστικών τάσεων. Με ένα καταμεριστή τάσης επιδιώκεται η μείωση του εύρους των υψηλών τάσεων υπό την προϋπόθεση ότι η μορφή τους παραμένει αναλλοίωτη. Αν $u_1=u_1(t)$ η αρχική τάση και $u_2=u_2(t)$ η τάση στην πλευρά χαμηλής τάσης του καταμεριστή, καλούμε *σχέση καταμερισμού* το πηλίκο

$$K = \frac{u_1}{u_2} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} \quad (2.2.4-1)$$

το οποίο πρέπει για κάθε τιμή του t να είναι σταθερό και ανεξάρτητο του t . [5,2]

2.2.4.1 ΩΜΙΚΟΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ



Σχήμα 2.2.4.1-1 : Ωμικός καταμεριστής τάσης

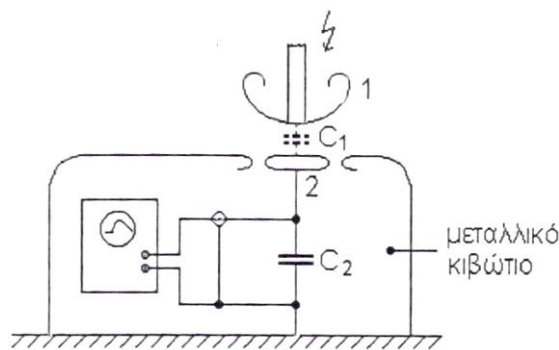
Στο σχήμα 2.2.4.1-1 απεικονίζεται ο ωμικός καταμεριστής τάσης. Αποτελείται από δύο αντιστάσεις, μια υψηλής τάσης R_1 και μία χαμηλής τάσης R_2 . Θα είναι προφανώς

$$K = \frac{u_1}{u_2} = \frac{R_1+R_2}{R_2} \quad (2.2.4.1-1)$$

2.2.4.2 ΧΩΡΗΤΙΚΟΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

Στο σχήμα 2.2.4.2-1 απεικονίζεται ο χωρητικός καταμεριστής τάσης. Αποτελείται από δυο χωρητικότητες (πυκνωτές), μια υψηλής τάσης C_1 και μια χαμηλής τάσης C_2 . Ο πυκνωτής υψηλής τάσης σχηματίζεται, ως πυκνωτής αέρος, μεταξύ ενός ηλεκτροδίου υψηλής τάσης 1 και ενός ενδιάμεσου ηλεκτροδίου 2, ενώ μεταξύ του τελευταίου και της γης παρεμβάλλεται η χωρητικότητα χαμηλής τάσης C_2 . Η C_2 βρίσκεται μέσα σε μεταλλικό κιβώτιο, το οποίο περιλαμβάνει και τον παλμογράφο. Η σχέση καταμερισμού είναι στην περίπτωση αυτή

$$K = \frac{C_1 + C_2}{C_2} \quad (2.2.4.2-1)$$



Σχήμα 2.2.4.2-1: Χωρητικός καταμεριστής τάσης [2]

2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

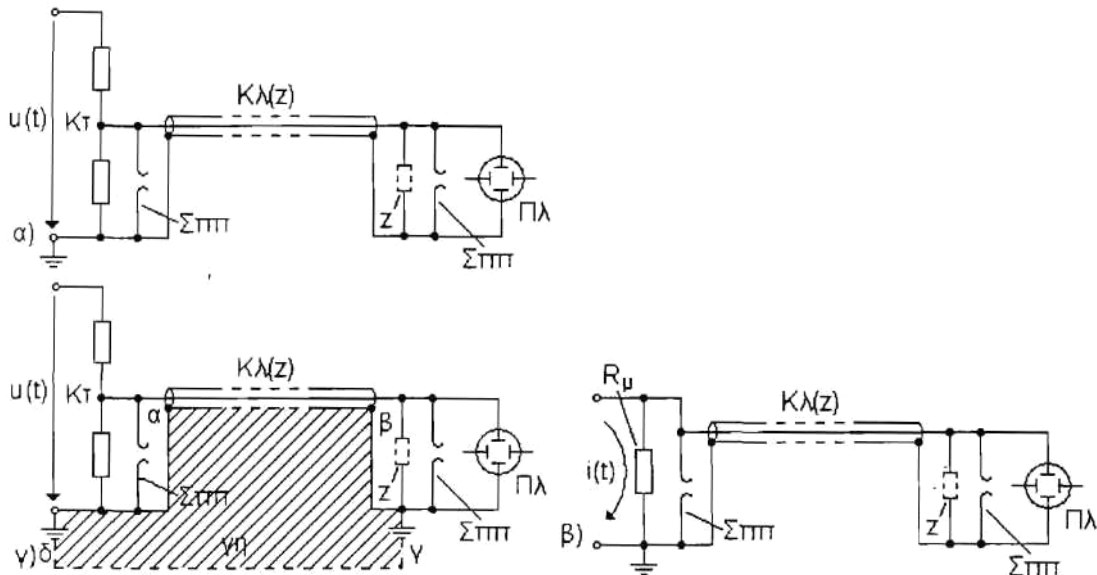
2.3.1 ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ

Για τη συμβατική καταγραφή των πληροφοριών που πηγάζουν από μια μέτρηση Υ.Τ., χρησιμοποιείται ο παλμογράφος. Αν η τάση $u(t)$ που πρόκειται να μετρηθεί έχει τιμή μεγαλύτερη της επιτρεπόμενης τάσης των πλακών κατακόρυφης απόκλισης του παλμογράφου, θα παρεμβάλλεται καταμεριστής τάσης όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.3.1-1α, όπου Κτ ο καταμεριστής τάσης.

Επίσης ανάλογα με το ύψος της τάσης, ο παλμογράφος θα τοποθετηθεί σε απόσταση περίπου 3...10m από τον Κτ, η δε σύνδεση από την πλευρά χαμηλής τάσης προς το ζεύγος πλακών κατακόρυφης απόκλισης αυτού, θα γίνει με συγκεντρικό καλώδιο μέτρησης με το οποίο πετυχαίνουμε όσο το δυνατό καλύτερη θωράκιση της διάταξης μέτρησης από παράσιτα στοιχεία, η ύπαρξη των οποίων μπορεί να συνεπάγεται σοβαρό σφάλμα στη μέτρηση.

Για την προστασία του παλμογράφου και του καλωδίου από τις υψηλές τάσεις οι οποίες εμφανίζονται στην πλευρά χαμηλής τάσης του καταμεριστή Κτ, πρέπει στην

είσοδο και στην έξοδο του καλωδίου μέτρησης να τίθεται από ένας σπινθηριστής προστασίας. Για τη μέτρηση ταχέως μεταβαλλόμενων ρευμάτων (σχήμα 2.3.1-1β) θα χρησιμοποιηθεί μια αντίσταση R_{μ} , ενώ η αντίστοιχη πτώση τάσης $u(i)=R_{\mu}i(t)$ από το μετρούμενο ρεύμα θα οδηγηθεί μέσω συγκεντρικού καλωδίου μέτρησης προς το ζεύγος των πλακών κατακόρυφης απόκλισης του παλμογράφου.



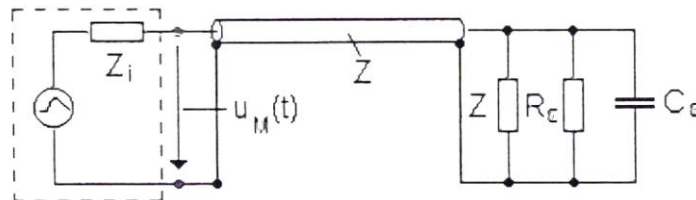
Σχήμα 2.3.1-1 : Διατάξεις καταγραφής ταχέως μεταβαλλόμενων τάσεων ή ρευμάτων μέσω παλμογράφου

- α, γ : καταγραφή τάσεων
- β : καταγραφή ρευμάτων
- K_T : καταμεριστής τάσης
- R_{μ} : αντίσταση μέτρησης
- Z : κυματική αντίσταση καλωδίου
- $\Pi\lambda$: παλμογράφος
- $\Sigma\pi\pi$: σπινθηριστής προστασίας

Σήμερα σχεδόν αποκλειστικά, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί παλμογράφοι επαρκούς μέγιστης ταχύτητας καταγραφής. Οι παλμογράφοι καλής ποιότητας έχουν οριακή συχνότητα της τάξης των μερικών δεκάδων MHz και οριακή ταχύτητα καταγραφής ανερχόμενη σε μερικά cm/μs.

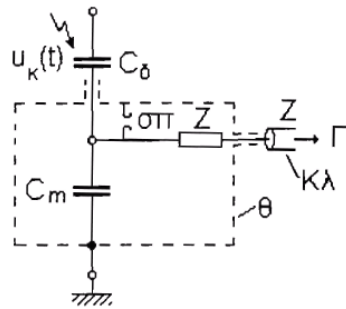
Όπως φαίνεται στα σχήματα 2.3.1-1α και 2.3.1-1β ο εξωτερικός μεταλλικός μανδύας του συγκεντρικού καλωδίου μέτρησης έχει σε ένα μόνο σημείο του γειωθεί και συγκεκριμένα στην είσοδό του, δηλαδή στη γείωση του καταμεριστή τάσης. Η συγκεκριμένη γείωση συνδέεται με την κρουστική γη K_{γ} , όπως άλλωστε και όλος ο εξοπλισμός της κρουστικής γεννήτριας. Όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα, τόσο ο παλμογράφος όσο και το κιβώτιο του το οποίο δεν δείχνεται στα σχήματα αυτά,

γείωνεται μόνο μέσω του μεταλλικού μανδύα του καλωδίου μέτρησης και όχι σε ανεξάρτητη γείωση. Αυτά αποσκοπούν στην αποφυγή σχηματισμού μέσω του μανδύα και της γης κλειστών αγώγιμων βρόχων αξιόλογου εμβαδού, εντός των οποίων θα ήταν δυνατό να δημιουργηθούν εξ' επαγωγής σαν συνέπεια ταχέως μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων, αξιόλογης τιμής τάσεις οι οποίες μπορούν να αλλοιώσουν το αποτέλεσμα της μέτρησης. Ένας τέτοιος βρόχος αβγδ δείχνεται στο σχήμα 2.3.1-1γ όπου ο παλμογράφος συνδέεται με τη γη όχι μέσω του μανδύα του καλωδίου, αλλά με ανεξάρτητη γείωση. Εξάλλου ο παλμογράφος πρέπει να τροφοδοτείται από το δίκτυο μέσω μετασχηματιστή μόνωσης. Ο μετασχηματιστής μόνωσης είναι απαραίτητος σε κάθε περίπτωση εφ' όσον παρουσιάζονται διαφορές δυναμικού μεταξύ του σημείου γείωσης του δικτύου ηλεκτρικής τροφοδοσίας Π_{δ} και των σημείων γείωσης της διάταξης δοκιμής (κρουστική γη K_{γ}).



Σχήμα 2.3.1-2 : Προσγείωση και επίτευξη προσαρμογής συγκεντρικού καλωδίου μέτρησης

Επειδή το καλώδιο μέτρησης συμπεριφέρεται σαν γραμμή μεταφοράς και προκειμένου να μην υπάρξουν στο πέρας αυτού ανακλάσεις, πρέπει το πέρας του καλωδίου να κλείνεται με μια αντίσταση ίση με την κυματική του αντίσταση Z όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.1-2. Παράλληλα με τη Z συνδέεται ο παλμογράφος, ο οποίος έχει ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα τα παράλληλα στοιχεία R_{ϵ} και C_{ϵ} , με αποτέλεσμα ότι για σήματα υψηλής συχνότητας, η ισοδύναμη αντίσταση των Z , R_{ϵ} και C_{ϵ} γίνεται σημαντικά μικρότερη της Z . Έχουμε τότε τη δημιουργία ανακλώμενων κυμάτων τα οποία επιστρέφουν στην αρχή του καλωδίου. Για να μην έχουμε και νέα ανάκλαση στην αρχή, πρέπει η εσωτερική αντίσταση Z_i της διπολικής πηγής του κυκλώματος στην αρχή του καλωδίου να είναι επίσης ίση προς Z . Είναι τότε προφανές ότι υπό συνθήκες προσαρμογής του καλωδίου προς την πηγή η εφαρμοζόμενη τάση $u(t)$ στην είσοδο του είναι το μισό της τάσης αυτής χωρίς σύνδεση του καλωδίου (ανοικτής πηγής) και συνεπώς η σχέση μεταφοράς του καταμεριστή τάσης πρέπει να πολλαπλασιαστεί επί 2. Στην πράξη οι μετρήσεις σε ένα δοκίμιο το οποίο καταπονείται σε υψηλές κρουστικές τάσεις, γίνεται με βάση τη διάταξη του σχήματος 2.3.1-3.



Σχήμα 2.3.1-3 : Διάταξη μέτρησης υψηλών κρουστικών τάσεων με θωρακισμένο τετράπολο μέτρησης και αντίσταση προσαρμογής Z

- C_{δ} : χωρητικότητα δοκιμίου
- C_m : πυκνωτής μέτρησης
- $r_{\sigma\pi}$: σπινθηριστής προστασίας
- θ : θωράκιση
- $\kappa\lambda$: ομοαξονικό καλώδιο
- Z : ωμική αντίσταση προσαρμογής (ίση με την κυματική αντίσταση του καλωδίου)
- Π : παλμογράφος

Στον καταμεριστή τάσης της διάταξης αυτής, τη θέση του πυκνωτή υψηλής τάσης καταλαμβάνει συνήθως το δοκίμιο χωρητικού χαρακτήρα και χωρητικότητας C_{δ} . Επομένως οι μετρήσεις των μεταβολών της ηλεκτρικής κατάστασης στο δοκίμιο γίνονται με ένα όπως καλείται, *τετράπολο μέτρησης* σε σειρά με τη διάταξη του δοκιμίου. Το τετράπολο μέτρησης περιλαμβάνει τον πυκνωτή χαμηλής τάσης του καταμεριστή και πρέπει να είναι απαλλαγμένο από τις παρασιτικές παρεμβολές. Στο σχήμα 2.3.1-3 φαίνεται το τετράπολο μέτρησης με θωράκιση. Η διάταξη του τετραπόλου μέτρησης περιλαμβάνει ένα σπινθηριστή προστασίας και μια ωμική αντίσταση τιμής Z ίσης με την τιμή της κυματικής αντίστασης του ομοαξονικού καλωδίου μέτρησης. Η γνώση της χωρητικότητας της διάταξης μέτρησης είναι απαραίτητη για την επιλογή μιας τάξης μεγέθους της χωρητικότητας C_m του τετραπόλου μέτρησης.

Τέλος το ομοαξονικό καλώδιο μέτρησης συνδέεται με τον παλμογράφο, χωρίς τη σύνδεση στην είσοδό του και παράλληλα με αυτόν ωμικής αντίστασης τιμής Z . Με αυτό τον τρόπο το καλώδιο στην πλευρά του παλμογράφου κλείνεται μόνο με τη σύνθετη αντίσταση Z_{ϵ} ($R_{\epsilon}/C_{\epsilon}$) του παλμογράφου, η οποία είναι πολύ μεγάλης τιμής ώστε το καλώδιο στην πλευρά του παλμογράφου να συμπεριφέρεται ως ανοικτή γραμμή μεταφοράς.

Η αναπτυσσόμενη κρουστική τάση στα άκρα του C_m , οδεύει προς τον παλμογράφο στον οποίο και φθάνει υποβιβασμένη στο μισό της τιμής της λόγω του καταμερισμού της στις δύο ίσες ωμικές αντιστάσεις Z , και της κυματικής αντίστασης του καλωδίου.

Η εν λόγω τάση σύμφωνα με του νόμους των οδευόντων κυμάτων, ανακλάται κατά την άφιξή της στον παλμογράφο, που όπως είπαμε λόγω της πολύ μεγάλης αντίστασής του αποτελεί ανοικτό άκρο του τέρματος του καλωδίου κατά 100% και συνεπώς στην είσοδο του παλμογράφου, η τάση διπλασιάζεται. Άρα ο παλμογράφος θα μετρήσει την αρχική τάση στα άκρα του C_m .

Προκειμένου αυτό το επιστρέφον ανακλώμενο κύμα στην αρχή του καλωδίου να μην υποστεί και νέα ανάκλαση, πρέπει η αρχή του καλωδίου να κλείνεται με μια ωμική αντίσταση ίση με την κυματική αντίσταση Z του καλωδίου μέτρησης (κατάσταση προσαρμογής), όπως επιτάσσουν οι νόμοι των οδευόντων κυμάτων. Πράγματι αυτό συμβαίνει γιατί για κύματα υψηλής συχνότητας όπως στην εξεταζόμενη περίπτωση, η αντίσταση του πυκνωτή C_m καθίσταται πολύ μικρή και τείνει προς το μηδέν, ώστε πρακτικά το καλώδιο στην είσοδό του για την περίπτωση των ανακλώμενων κυμάτων που φθάνουν σ' αυτήν να κλείνεται με αντίσταση ίση με την κυματική αντίστασή του, δηλαδή να βρίσκεται σε προσαρμογή. Τότε σύμφωνα με τους νόμους των οδευόντων κυμάτων, το παραπάνω εξ' ανακλάσεως κύμα απορροφάται εξολοκλήρου από την αντίσταση Z χωρίς νέα ανάκλασή του προς την κατεύθυνση του παλμογράφου.

Με την ανωτέρω μέθοδο περιορίζουμε σημαντικά σφάλματα τα οποία οφείλονται στη συμπεριφορά του καλωδίου μέτρησης ως γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης. [2]

2.3.2 ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ

Η ψηφιακή καταγραφή έχει το πλεονέκτημα σε σχέση με τη συμβατική καταγραφή με παλμογράφους, ότι οι πληροφορίες που αποκτώνται μπορούν να αποθηκευθούν και να γίνουν αντικείμενο επεξεργασίας ευκολότερα. Η χρήση των ψηφιακών καταγραφών απαιτεί τη λήψη προφυλάξεων τουλάχιστον στα ακόλουθα τρία πεδία:

1. Επίπεδο τάσης του σήματος
2. Θωράκιση ενάντια σε διαταραχές
3. Ψηφιοποίηση του σήματος

2.3.2.1 ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΑΣΗΣ

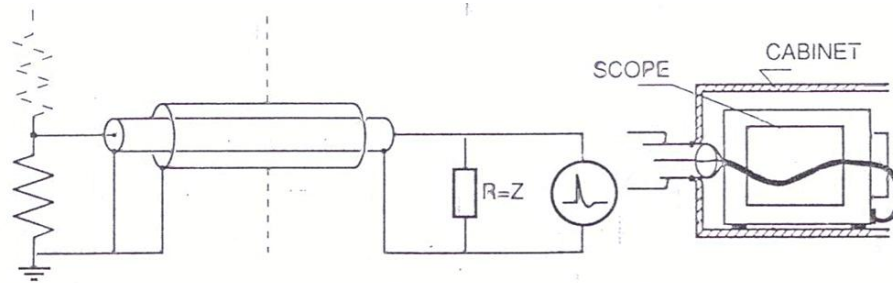
Οι συμβατικοί παλμογράφοι ελέγχου στιγμιαίων εξάρσεων τάσης, δίνουν άμεση πρόσβαση στις πλάκες απόκλισης του καθοδικού σωλήνα. Το σήμα μπορεί να διαιρεθεί από έναν προσαρμόσιμο υποβιβαστή ενώ το επίπεδο τάσης της μονάδας παρατήρησης είναι αρκετά υψηλό, περίπου 1KV. Αυτό έχει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι ο έλεγχος του κυκλώματος είναι αρκετά ανεπηρέαστος από ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή.

Οι ψηφιακοί καταγραφείς και οι παλμογράφοι λαμβάνουν αρκετά χαμηλότερες τάσεις

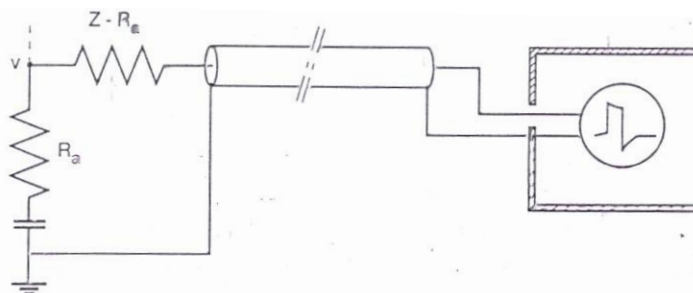
εισόδου, επομένως απαιτείται περαιτέρω καταμερισμός του σήματος υψηλής τάσης χωρίς όμως αυτό να προκαλεί βασικά προβλήματα.

2.3.2.2 ΘΩΡΑΚΙΣΗ

Η θωράκιση των καταγραφών γενικής χρήσης, δεν είναι επαρκής για να προστατεύσει το όργανο απέναντι στα έντονα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που μεταδίδονται από μια κρουστική γεννήτρια υψηλής τάσης. Ο καταγραφέας τοποθετείται σε έναν κλωβό Faraday, ανοιχτό στη μια του πλευρά ώστε να λειτουργεί ο καταγραφέας. Το σήμα λαμβάνεται και περνάει στον καταγραφέα ο οποίος λειτουργεί στο μέγιστο εύρος του, όπως περιγράφεται σύντομα στα σχήματα 2.3.2.2-1 και 2.3.2.2-2.



Σχήμα 2.3.2.2-1 : Ο βραχίονας χαμηλής τάσης ενός ωμικού καταμεριστή συνδέεται στη μονάδα (καταγραφέας) μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου το οποίο τερματίζεται με μια σύνθετη αντίσταση Z και έχει διπλή θωράκιση προκειμένου να προλαμβάνονται επαγωγές διαταραχών



Σχήμα 2.3.2.2-2 : Βραχίονας χαμηλής τάσης ενός αποσβεσμένου χωρητικού καταμεριστή. Το σήμα u εισέρχεται στο ομοαξονικό καλώδιο, καταγράφεται και ανακλάται στο άλλο άκρο. Το ανακλασμένο κύμα απορροφάται από την αντίσταση εισόδου $Z - R_a$ η οποία συνδεδεμένη σε σειρά με την αντίσταση απόσβεσης R_a μας δίνει άθροισμα Z . Ο καταγραφέας τοποθετείται σε καλώς αγώγιμο ερμάριο (π.χ. αλουμινίου) με το ανοιχτό άκρο προφυλαγμένο από το κύκλωμα $Y.T.$ Το ομοαξονικό καλώδιο τερματίζεται στο πίσω μέρος του ερμαρίου. Αυτό το μέτρο μαζί με άλλες προφυλάξεις, αποτρέπει τις διαταραχές στο κύκλωμα ελέγχου μεγάλης ισχύος. Το τελευταίο συστήνεται ιδιαίτερα κατά τη χρήση συσκευών ψηφιακής καταγραφής

Το ομοαξονικό καλώδιο εισόδου είναι δύο στρωμάτων, η δε εξωτερική του επιφάνεια γειώνεται και στις δύο πλευρές. Το ομοαξονικό καλώδιο προτιμάται να τοποθετείται εντός μεταλλικού εύκαμπτου σωλήνα, ενώ οι σπείρες θα πρέπει να αποφεύγονται. Περαιτέρω βελτίωση επιτυγχάνεται με οπτική μετάδοση μέσω ενός καλωδίου οπτικής ίνας με αποτέλεσμα οποιαδήποτε διαταραχή που προκαλείται από πιθανές διαφορές να αποτρέπεται.

Η κύρια παροχή φιλτράρεται εισάγοντας ένα φίλτρο RF στη γραμμή παροχής. Ο καταγραφέας προστατεύεται περαιτέρω ενάντια στις υπερτάσεις και στις παρεμβολές, από ένα μετασχηματιστή απομόνωσης με μια εξαιρετικά χαμηλή χωρητικότητα ανάμεσα στα τυλίγματα. Ένα IEC πρότυπο καθορίζει έναν αριθμό ελέγχων για εξέταση αυτών των προφυλάξεων, όπως διαρροή ρεύματος στη θωράκιση του ομοαξονικού καλωδίου, μια αιφνίδια μεταβολή τάσης της τάξης των 4KV από την παροχή ισχύος και την εφαρμογή ταχέως αυξανόμενων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων της τάξης του 0.1KV/mm και του 1kA/mm.

Ένας γενικός έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί, λειτουργώντας το σύνολο της υψηλής τάσης και του μετρητικού κυκλώματος στη μέγιστη τάση ελέγχου, αλλά χωρίς ένα σήμα εισόδου στο ομοαξονικό καλώδιο (καλώδιο βραχυκυκλωμένο ή αποσυνδεδεμένο).

2.3.2.3 ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ

Ένας αριθμός απαιτήσεων είναι καθορισμένος από την IEC, προκειμένου να διατηρηθεί επαρκής ακρίβεια της τάξης του 2% στις μετρήσεις τάσης και περίπου 4% στις μετρήσεις χρόνου.

- Ο ρυθμός δειγματοληψίας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από $30T$ αν T είναι το μικρότερο διάστημα προς ανάλυση. Ο ρυθμός δειγματοληψίας θα πρέπει επίσης να είναι μεγαλύτερος από $8f_m$ εάν f_m είναι η υψηλότερη συχνότητα προς μέτρηση.
- Η ανάλυση θα πρέπει να είναι 0.4% της πλήρους κλίμακας απόκλισης, ανταποκρινόμενη σε 2^{-8} της πλήρους κλίμακας.
- Ο χρόνος ανύψωσης του ψηφιοποιητή θα πρέπει να είναι μικρότερος από $0.03 T$.

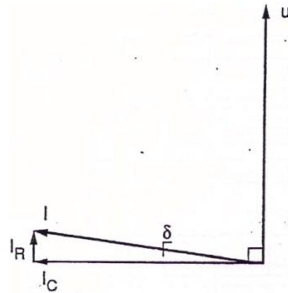
Επίσης από την IEC, είναι καθορισμένες περαιτέρω διευκρινήσεις για τη μη γραμμικότητα των κλιμάκων καθώς και για τις παρεμβολές και το θόρυβο. [6]

2.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

2.4.1 ΓΩΝΙΑ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Όταν ένα μονωτικό υλικό υπόκειται σε εναλλασσόμενη τάση, προκαλούνται απώλειες στο υλικό. Αυτές οι απώλειες είναι συνήθως μικρές αλλά σημαντικές από την οπτική γωνία

της μηχανικής υψηλών τάσεων. Προκαλούνται από ένα στοιχείο απώλειας I_R του διηλεκτρικού ρεύματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.1-1. Το διάνυσμα του τελικού ρεύματος I σχηματίζει γωνία δ με το χωρητικό στοιχείο I_C .



Σχήμα 2.4.1-1 : Οι διηλεκτρικές απώλειες προκαλούνται από ένα μικρό στοιχείο απώλειας I_R . Αυτό το στοιχείο σχηματίζει γωνία δ με το αμιγώς χωρητικό ρεύμα I_C και ισοδυναμεί με $I_R = I_C \cdot \tan\delta$. Οι τελικές απώλειες είναι $W = U^2 \cdot \omega C \cdot \tan\delta$

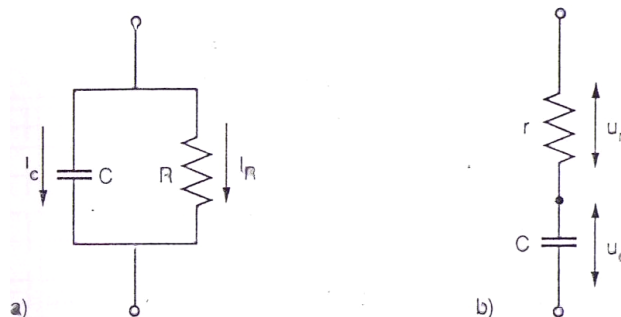
Η εφαπτομένη αυτής της γωνίας είναι ένα μέτρο για τις διηλεκτρικές απώλειες W :

$$W = U \cdot I_C \cdot \tan\delta = U^2 \cdot \omega C \cdot \tan\delta \quad (2.4.1-1)$$

και οι απώλειες επομένως είναι ακριβώς ανάλογες της *εφαπτομένης απωλειών* $\tan\delta$.

Ένας πυκνωτής με υψηλό βαθμό απωλειών αναπαριστάται συχνά με ένα από τα ισοδύναμα κυκλώματα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.1-2. Αυτό το κύκλωμα διευκολύνει την ανάλυση των απωλειών ή εκείνη των μετρήσεων απωλειών στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Το παράλληλο κύκλωμα χρησιμοποιείται πιο συχνά. Η εφαπτομένη απωλειών δίνεται από τη σχέση

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega RC} \quad (2.4.1-2)$$



Σχήμα 2.4.1-2 : Ισοδύναμα κυκλώματα ενός πυκνωτή με υψηλό βαθμό απωλειών

- α) Παράλληλο κύκλωμα
- β) Κύκλωμα σειράς

Όσο μικρότερη είναι η υποθετική παράλληλη αντίσταση R , τόσο μεγαλύτερη είναι η εφαπτομένη απωλειών, η οποία δίνεται από τη σχέση

$$\tan\delta = \frac{U_r}{U_c} = \omega \cdot r \cdot C \quad (2.4.1-3)$$

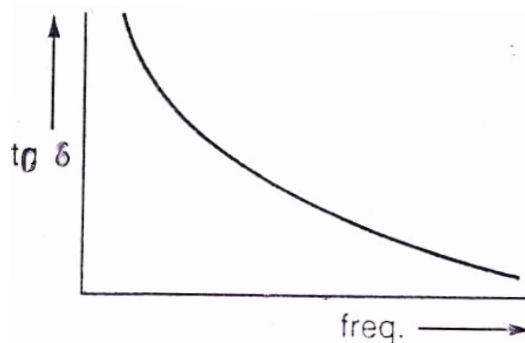
Όσο μεγαλύτερη είναι η υποθετική αντίσταση σειράς r , τόσο μεγαλύτερη είναι η εφαπτομένη απωλειών, ενώ και στις δύο περιπτώσεις η ισοδύναμη αντίσταση είναι έγκυρη για *μια* μόνο συχνότητα.

2.4.2 ΦΥΣΙΚΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Οι διηλεκτρικές απώλειες μπορεί να έχουν ποικίλες φυσικές προελεύσεις, ορισμένες από τις οποίες εξετάζονται παρακάτω:

1. Απώλειες αγωγιμότητας

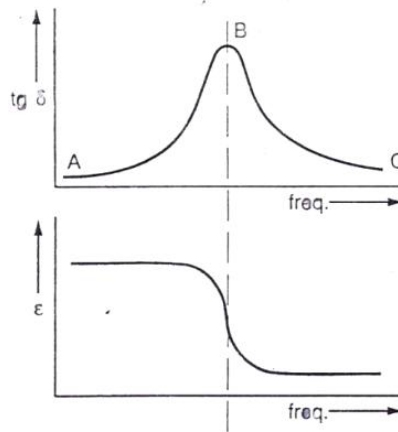
Όταν η αντίσταση μόνωσης R ενός διηλεκτρικού υλικού είναι αρκετά χαμηλή, το ρεύμα διαρροής προστίθεται στις διηλεκτρικές απώλειες. Το παράλληλο κύκλωμα στο σχήμα 2.4.2-2α είναι εικονικά παρόν και η εφαπτομένη απώλειας είναι $\tan\delta = \frac{1}{\omega RC}$. Αν η συχνότητα αυξάνεται, η $\tan\delta$ μειώνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.2-1. Συχνά χρησιμοποιούνται ποικίλες συχνότητες όταν αναλύουμε διηλεκτρικές απώλειες. Οι απώλειες αγωγιμότητας εύκολα αναγνωρίζονται με αυτό τον τρόπο.



Σχήμα 2.4.2-1 : Οι απώλειες αγωγιμότητας αναγνωρίζονται από μια μειούμενη εφαπτομένη απωλειών σε αντίστοιχα αύξουσα συχνότητα

2. Απώλειες διπόλου

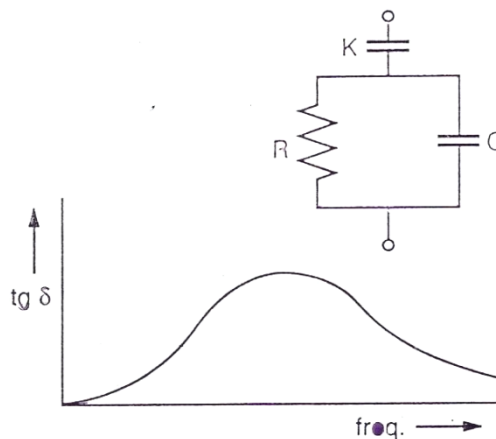
Τα ηλεκτρικά δίπολα σε ένα μονωτικό υλικό, συνεχώς αντιστρέφουν την κατεύθυνσή τους σε ένα πεδίο εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε χαμηλές συχνότητες τα δίπολα ακολουθούν το εναλλασσόμενο πεδίο αρκετά καλά, δεν παρουσιάζονται διαφορές φάσης και δεν υπάρχουν απώλειες όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.2-2(A). Όταν η συχνότητα αυξάνεται, η τριβή παίζει ένα ρόλο και τα δίπολα καθυστερούν το διανυσματικό πεδίο. Έτσι, προκαλούνται απώλειες και φθάνουν στο ζενίθ όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.2-2(B). Σε συχνότητες πάνω από αυτό το ύψιστο επίπεδο, τα δίπολα αδυνατούν πλέον να ακολουθήσουν το εναλλασσόμενο πεδίο και οι απώλειες μειώνονται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.2-2(C). Οι διπολικές απώλειες μπορούν λοιπόν να αναγνωριστούν εύκολα από τα χαρακτηριστικά της συχνότητάς τους.



Σχήμα 2.4.2-2 : Απώλειες διπόλου προκαλούνται από τριβή μεταξύ των περιστρεφόμενων ηλεκτρικών διπόλων και του μονωτικού υλικού. Σε χαμηλές συχνότητες *A*, αυτή η τριβή είναι χαμηλή και η $\tan\delta$ επίσης. Σε υψηλότερη συχνότητα αυξάνονται στο μέγιστο, στο *B*. Σε πάρα πολύ υψηλές συχνότητες, στο *C*, τα δίπολα δεν μπορούν να ακολουθήσουν το εναλλασσόμενο πεδίο και οι απώλειες μειώνονται ξανά. Η διηλεκτρική σταθερά ϵ είναι υψηλή όταν τα δίπολα ακολουθούν το εναλλασσόμενο πεδίο *A*, πέφτει απότομα όταν εμφανίζεται τριβή *B* και είναι χαμηλή όταν τα δίπολα είναι σχεδόν ακίνητα σε υψηλές συχνότητες *C*

3. Διασυνδέσεις

Συχνά ένα ιδανικό διηλεκτρικό χρησιμοποιείται σε σειρά με ένα διηλεκτρικό με απώλειες, για παράδειγμα ένα αέριο σε σειρά με ένα στερεό υλικό. Τέτοια διασύνδεση μεταξύ υλικών μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα ισοδύναμο κύκλωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.2-3.



Σχήμα 2.4.2-3 : Διασύνδεση μεταξύ ενός διηλεκτρικού χωρίς απώλειες *K* και ενός διηλεκτρικού με απώλειες *C*. Αυτή η περίπτωση χαρακτηρίζεται από απώλεια καμπύλης με εντελώς επίπεδη ύψιστη τιμή

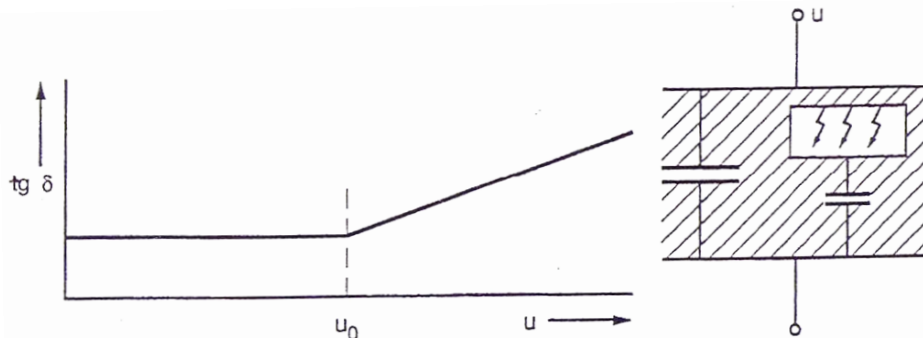
Όταν το διηλεκτρικό με απώλειες παρουσιάζει απώλειες αγωγιμότητας, η εφαπτομένη απωλειών ισοδυναμεί με

$$\tan\delta = \frac{\omega RK}{1 + \omega^2 R^2 C(K+C)} \quad (2.4.2-1)$$

Αν $\omega = 0$, η εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta = 0$ και αν $\omega \rightarrow \infty$ η εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta \rightarrow 0$. Ενδιάμεσα μια μέγιστη τιμή λαμβάνει χώρα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.2-3. Αυτή η μέγιστη τιμή είναι λιγότερο απότομη από την προηγούμενη περίπτωση των απωλειών πόλωσης και επομένως είναι διακριτή.

4. Απώλειες εκκενώσεων

Όταν μερικές εκκενώσεις λαμβάνουν χώρα σε ένα διηλεκτρικό, προκαλούνται απώλειες οι οποίες εκφράζονται από αύξηση της τιμής της $\tan\delta$. Από την αρχική τάση U_0 και μετά, οι απώλειες διογκώνονται όταν αυξάνεται η τάση όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.2-4. Αυτό το αποτέλεσμα αν εξεταστεί περαιτέρω, δείχνει ότι η αύξηση της τιμής της $\tan\delta$ είναι μεγαλύτερη αν ο αριθμός και το μέγεθος των εκκενώσεων είναι μεγαλύτερα. Κάτω από το U_0 , η εφαπτομένη απωλειών ισούται με εκείνη του υλικού χωρίς εκκενώσεις. Για να αναγνωρίσουμε αυτό τον τύπο της απώλειας, η τάση πρέπει να ποικίλει σε αντίθεση με άλλες περιπτώσεις, όπου η συχνότητα ποικίλει.



Σχήμα 2.4.2-4 : Οι απώλειες που προκλήθηκαν από εσωτερικές μερικές εκκενώσεις αναγνωρίζονται από μια αύξουσα εφαπτομένη απωλειών σε αυξανόμενη τάση. Η αύξηση ξεκινάει στην αρχική τάση U_0 . Η κλίση της καμπύλης αντανακλά την έκταση των εκκενώσεων

2.4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Μια πλήρης ανάλυση των διηλεκτρικών απωλειών συμπεριλαμβάνει την έρευνα πολλών μεταβλητών, ενώ το αποτέλεσμα της συχνότητας και της τάσης είναι άσχετο με τις παραπάνω θεωρήσεις. Μια άλλη σημαντική μεταβλητή είναι η *θερμοκρασία*. Τα δίπολα κερδίζουν κινητικότητα σε υψηλότερες θερμοκρασίες έτσι ώστε, με βάση τις υποσημειώσεις Α και C στο σχήμα 2.4.2-2, οι απώλειες διπόλου αυξάνονται ή μειώνονται με τη θερμοκρασία. Οι απώλειες αγωγιμότητας σε εμποτισμένα διηλεκτρικά αυξάνονται με τη θερμοκρασία καθώς το ιξώδες του υγρού μειώνεται και η κινητικότητα των

φορτίσεων αυξάνεται. Η *πίεση* θα μπορούσε επίσης να αποτελέσει αξιόλογη μεταβλητή, καθώς οι εκφορτίσεις μπορεί να κατασταλούν από αυξανόμενη πίεση. [6]

2.5 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥΣ

Ένα σύστημα μέτρησης πρέπει να παρέχει ένα σήμα πληροφορίας, το οποίο να αντιστοιχεί αποκλειστικά στο προς μέτρηση φυσικό μέγεθος. Η απαίτηση αυτή δεν μπορεί να επιτευχθεί στα πρακτικά συστήματα μέτρησης, καθώς ατέλειες στην κατασκευή των επιμέρους διατάξεων όπως των αισθητηρίων και των τελεστικών ενισχυτών αλλά και ο θόρυβος, αλλοιώνουν το αποτέλεσμα της μέτρησης.

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια αναφορά στις πηγές των διαταραχών σ' ένα σύστημα μέτρησης και προτείνονται τρόποι αντιμετώπισής τους.

2.5.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος προκαλεί διαταραχές σε ένα σύστημα μέτρησης. Η θερμοκρασία δύναται να μεταβάλλει την ειδική αντίσταση, τη διηλεκτρική σταθερά και τη μαγνητική διαπερατότητα των παθητικών εξαρτημάτων του συστήματος μέτρησης αλλά και του υλικού των αισθητηρίων, χωρίς αυτό να είναι πάντα επιθυμητό. Παράλληλα, η θερμοκρασία προκαλεί την ολίσθηση των παραμέτρων από τα ενεργά εξαρτήματα του συστήματος. Έτσι, στους τελεστικούς ενισχυτές μεταβάλλει τα ρεύματα πόλωσης και ασυμμετρίας των εισόδων, την τάση ασυμμετρίας εισόδου, επομένως επηρεάζει την τάση εξόδου του ενισχυτή. Στα transistor είναι γνωστό ότι η θερμοκρασία επιδρά στο ανάστροφο ρεύμα κόρου, στο συντελεστή ενίσχυσης β και στην τάση ορθής πόλωσης των επαφών $p-n$.

2.5.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Η υγρασία όπως και η θερμοκρασία, προκαλεί μεταβολές στην ειδική αντίσταση και τη διηλεκτρική σταθερά των εξαρτημάτων. Επίσης μειώνει τις σύνθετες αντιστάσεις απομόνωσης, με αποτέλεσμα την αύξηση των διαταραχών που οφείλονται σε χωρητική σύζευξη. Για την προστασία από την υγρασία συχνά τα ευαίσθητα στοιχεία φέρουν επικάλυψη από μονωτική βαφή. Ακόμη τα αέρια της υγρής ατμόσφαιρας προκαλούν μια χημική αντίδραση, η οποία αυξάνει την αντίσταση επαφής στα σημεία σύνδεσης των αγωγών.

2.5.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

Ο θόρυβος αναφέρεται σε ανεπιθύμητα και συχνά απρόβλεπτα ηλεκτρικά σήματα, τα οποία συνυπάρχουν με το ωφέλιμο σήμα πληροφορίας. Ο θόρυβος σ' ένα σύστημα μέτρησης διακρίνεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τον *εσωτερικό* θόρυβο και τον *εξωτερικό* θόρυβο. Ο εσωτερικός θόρυβος παράγεται μέσα στο ίδιο το σύστημα μέτρησης, ενώ ο εξωτερικός θόρυβος προέρχεται από πηγές έξω από το σύστημα μέτρησης.

Ο εξωτερικός θόρυβος μπορεί να έχει *φυσική* προέλευση, όπως τα ατμοσφαιρικά παράσιτα και η κοσμική ακτινοβολία, ή να οφείλεται στην ανθρώπινη δραστηριότητα οπότε έχει *τεχνητή* προέλευση, όπως η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή από ακτινοβολούμενα σήματα τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και γενικότερα ηλεκτρικών συσκευών, ή από το ηλεκτρικό δίκτυο, τα βιομηχανικά και τα κυκλοφοριακά παράσιτα κ.α.

Η κυριότερη πηγή εσωτερικού θορύβου είναι ο *θερμικός* θόρυβος. Ο θερμικός θόρυβος ο οποίος ανήκει στους φυσικούς θορύβους, οφείλεται στην τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα στα αγώγιμα υλικά και αποτελεί μια αναπόφευκτη πηγή θορύβου σε κάθε ηλεκτρικό κύκλωμα. Εκτός από το θερμικό θόρυβο, σε μια βαθμίδα ενός συστήματος μέτρησης μπορεί να εισάγεται θόρυβος είτε από εξωτερικές πηγές ή και από τη λειτουργία κάποιας άλλης βαθμίδας του ίδιου συστήματος.

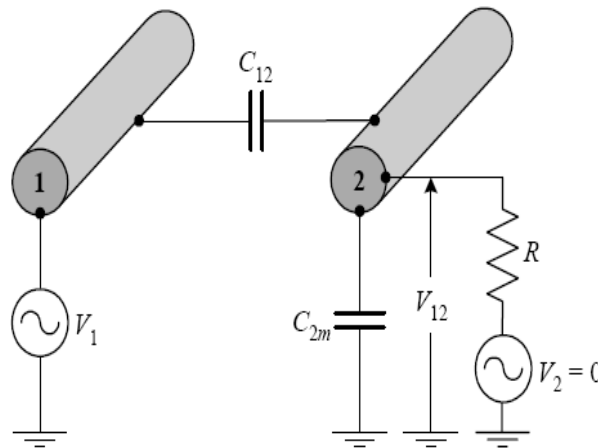
Οι θόρυβοι αυτοί οφείλονται σε:

1. *Χωρητική σύζευξη.*
2. *Επαγωγική σύζευξη.*
3. *Σύζευξη από αγωγιμότητα.*

Στην επίδραση καθεμιάς σύζευξης σ' ένα σύστημα μέτρησης και στους τρόπους περιορισμού των συζεύξεων, γίνεται αναφορά στη συνέχεια.

2.5.3.1 ΧΩΡΗΤΙΚΗ ΣΥΖΕΥΞΗ

Θεωρούμε τη διάταξη του σχήματος 2.5.3.1-1, στην οποία ο αγωγός 2 ανήκει στο σύστημα μέτρησης και μεταφέρει στο χώρο της συχνότητας το σήμα πληροφορίας V_2 , το οποίο θεωρείται μηδενικό. Ο αγωγός 1 δεν ανήκει στο σύστημα μέτρησης και φέρεται σε δυναμικό V_1 ως προς τη γείωση. Εξαιτίας της χωρητικής σύζευξης μεταξύ των δύο αγωγών η οποία οφείλεται στην παρασιτική χωρητικότητα C_{12} , το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται από την τάση V_1 του αγωγού 1, προκαλεί στον αγωγό 2 μια τάση θορύβου V_{12} . Η τάση θορύβου V_{12} προκύπτει από το διαιρέτη τάσης που σχηματίζουν η σύνθετη αντίσταση $Z_2 = \frac{R}{sC_{2m}}$ και ο πυκνωτής C_{12} .



Σχήμα 2.5.3.1-1 : Χωρητική σύζευξη μεταξύ των αγωγών 1 και 2

$$V_{12} = \frac{Z_2}{Z_2 + \frac{1}{sC_{12}}} V_1 = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2m}} \cdot \frac{1}{1 + sR(C_{12} + C_{2m})} V_1 = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2m}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\omega C}{s}} V_1 \quad (2.5.3.1-1)$$

όπου R είναι η ολική ισοδύναμη αντίσταση μεταξύ του αγωγού 2 και της γείωσης, ενώ

$$\omega_c = \frac{1}{R(C_{12} + C_{2m})} \quad (2.5.3.1-2)$$

είναι η συχνότητα αποκοπής του υπερπαρασυμμετρικού φίλτρου που αντιπροσωπεύει ο δεύτερος όρος στη σχέση (2.5.3.1-1). Όταν ισχύει

$$\frac{1}{\omega(C_{12} + C_{2m})} \ll R \quad (2.5.3.1-3)$$

η σχέση (2.5.3.1-1) αποκτά τη μορφή

$$V_{12} = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2m}} V_1 \quad (2.5.3.1-4)$$

Συνήθως οι παρασιτικές χωρητικότητες είναι πολύ μικρές, οπότε ισχύει η συνθήκη

$$\frac{1}{\omega(C_{12} + C_{2m})} \gg R \quad (2.5.3.1-5)$$

με αποτέλεσμα η σχέση (2.5.3.1-1) να απλοποιείται στην

$$V_{12} = sV_1 C_{12} R \quad (2.5.3.1-6)$$

Από τη σχέση (2.5.3.1-6) προκύπτει ότι η τάση θορύβου στον αγωγό 2 είναι ανάλογη με το πλάτος και τη συχνότητα της τάσης στον αγωγό 1, με τη χωρητικότητα σύζευξης C_{12} και την αντίσταση R . Καθώς η τιμή της αντίστασης R επιβάλλεται από το σύστημα μέτρησης, για τη μείωση της τάσης θορύβου V_{12} πρέπει να μειωθεί η παρασιτική χωρητικότητα C_{12} . Η μείωση της C_{12} μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους:

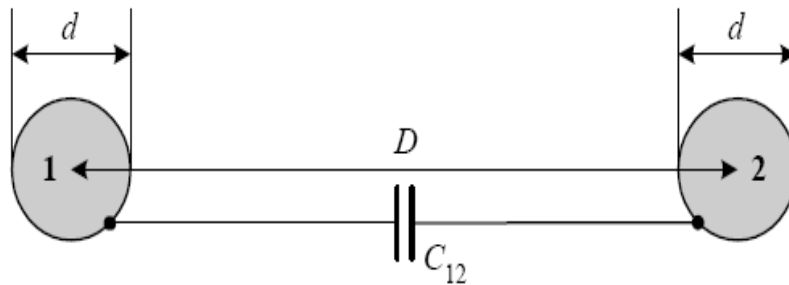
1. Την απομάκρυνση των αγωγών 1 και 2.
2. Τη θωράκιση του αγωγού 2.

2.5.3.1.1 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ

Η τιμή της παρασιτικής χωρητικότητας C_{12} εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των αγωγών 1 και 2 (σχήμα 2.5.3.1.1-1) και ορίζεται ανά μονάδα μήκους των αγωγών, σύμφωνα με τη σχέση

$$C_{12} = \frac{\pi \varepsilon}{\log \frac{2D}{d}} \quad (2.5.3.1.1-1)$$

όπου ε είναι η διηλεκτρική σταθερά του αέρα η οποία είναι περίπου ίση μ' εκείνη του κενού ($\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m), d είναι η διάμετρος των αγωγών και D η μεταξύ τους απόσταση.



Σχήμα 2.5.3.1.1-1 : Παρασιτική χωρητικότητα μεταξύ των αγωγών 1 και 2, η οποία εξαρτάται από την απόστασή τους D

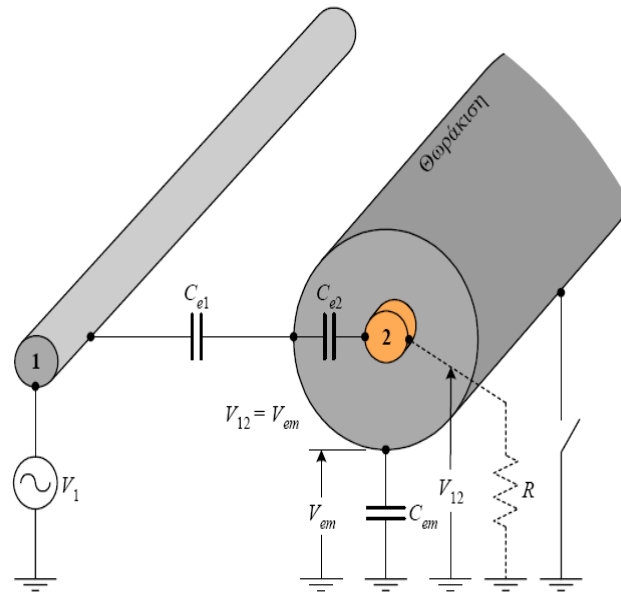
Από τη σχέση (2.5.3.1.1-1) προκύπτει ότι λόγω της λογαριθμικής μεταβολής της χωρητικότητας με την απόσταση, η μείωση της C_{12} με την απόσταση όταν $D > 50d$, είναι εξαιρετικά μικρή. Επομένως, η μείωση της τάσης θορύβου στον αγωγό 2 με την απομάκρυνσή του από τον αγωγό 1 περισσότερο από ένα όριο είναι ασήμαντη.

2.5.3.1.2 ΘΩΡΑΚΙΣΗ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

Για τη δραστική μείωση της τάσης θορύβου στον αγωγό 2 απαιτείται η θωράκιση του αγωγού, επομένως η χρήση θωρακισμένου καλωδίου. Οι παρασιτικές χωρητικότητες μεταξύ του αγωγού 1 και του θωρακισμένου καλωδίου 2 εικονίζονται στο σχήμα 2.5.3.1.2-1. Στην περίπτωση που η θωράκιση δεν συνδέεται στη γείωση, το δυναμικό της θωράκισης ως προς τη γείωση εξαιτίας του διαιρέτη τάσης που σχηματίζουν οι χωρητικότητες C_{e1} και C_{em} είναι ίσο με

$$V_{em} = \frac{C_{e1}}{C_{e1} + C_{em}} V_1 \quad (2.5.3.1.2-1)$$

Στον ορισμό της τάσης θορύβου V_{em} στη σχέση (2.5.3.1.2-1) έχουμε θεωρήσει ότι η αντίσταση R είναι άπειρη.



Σχήμα 2.5.3.1.2-1 : Εξουδετέρωση της τάσης θορύβου στον αγωγό 2, εξαιτίας της χωρητικής σύζευξη με τον αγωγό 1, με τη χρήση θωράκισης

Η χωρητικότητα μεταξύ του αγωγού 2 και της θωράκισής του C_{e2} δεν μπορεί να φορτιστεί, επομένως η τάση στα άκρα της C_{e2} είναι μηδενική. Έτσι, η τάση θορύβου στον αγωγό 2 (V_{12}) είναι ίση με την τάση θορύβου στη θωράκιση.

$$V_{12} = V_{em} = \frac{C_{e1}}{C_{e1} + C_{em}} V_1 \quad (2.5.3.1.2-2)$$

Από τη σχέση (2.5.3.1.2-2) προκύπτει ότι η θωράκιση δεν μείωσε την τάση θορύβου στον αγωγό 2, σε σχέση με τον απλό αγωγό στο σχήμα 2.5.3.1-1. Για να συμβεί αυτό απαιτείται η σύνδεση της θωράκισης με τη γείωση. Τότε, η χωρητικότητα C_{em} βραχυκυκλώνεται και έτσι μηδενίζονται οι τάσεις θορύβου V_{em} και V_{12} .

Στην περίπτωση που ο αγωγός 2 δεν καλύπτεται πλήρως από τη θωράκισή του η οποία γειώνεται, αναπτύσσεται μια μικρή τάση θορύβου V_{12} . Η τιμή της V_{12} , αναγνωρίζοντας ότι οι χωρητικότητες C_{2m} και C_{e2} συνδέονται παράλληλα και η C_{em} βραχυκυκλώνεται, υπολογίζεται ακολουθώντας την προηγούμενη διαδικασία. Έτσι,

$$V_{12} = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2m} + C_{e2}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{sR(C_{12} + C_{2m}C_{e2})}} V_1 \quad (2.5.3.1.2-3)$$

Όταν ισχύει

$$\frac{1}{\omega(C_{12} + C_{2m} + C_{e2})} \ll R \quad (2.5.3.1.2-4)$$

η σχέση (2.5.3.1.2-3) γράφεται

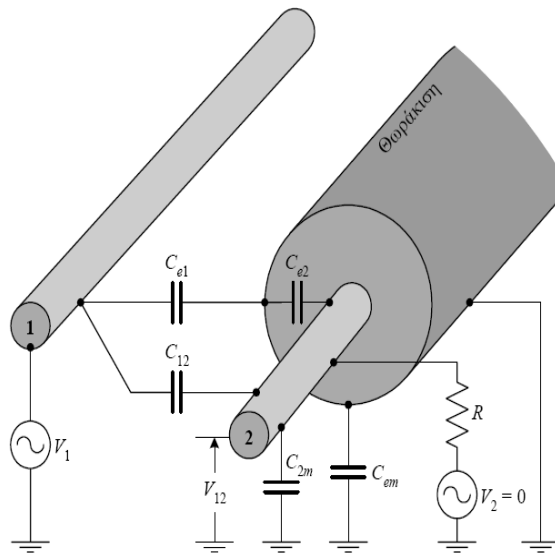
$$V_{12} = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2m} + C_{e2}} V_1 \quad (2.5.3.1.2-5)$$

ενώ όταν

$$\frac{1}{\omega(C_{12}+C_{2m}+C_{e2})} \gg R \quad (2.5.3.1.2-6)$$

ισχύει

$$V_{12} = sV_1C_{12}R \quad (2.5.3.1.2-7)$$



Σχήμα 2.5.3.1.2-2 : Ανάπτυξη τάσης θορύβου μικρής τιμής στον αγωγό 2, ο οποίος δεν προστατεύεται στο άκρο του από τη γειωμένη θωράκιση

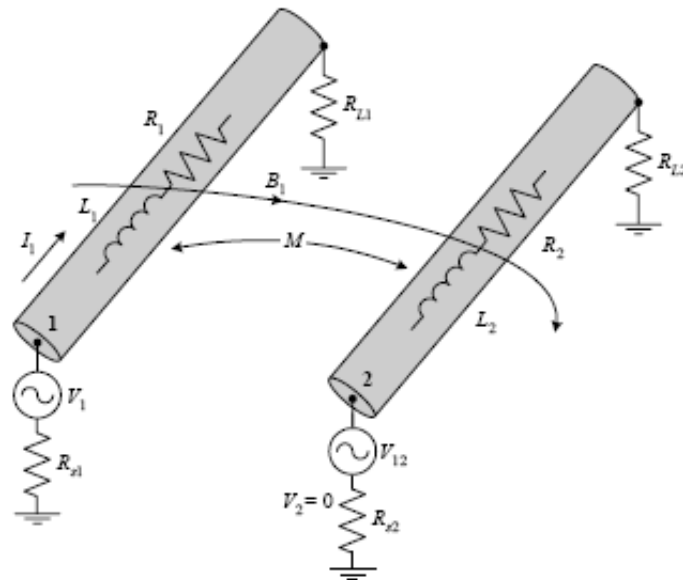
Η σχέση (2.5.3.1.2-7) είναι ίδια με την σχέση (2.5.3.1-6) του αγωγού χωρίς θωράκιση. Η διαφορά είναι ότι η παρασιτική χωρητικότητα σύζευξης C_{12} είναι πολύ μικρότερη στην περίπτωση που το μήκος του αγωγού που δεν προστατεύεται από τη θωράκιση είναι μικρό, σε σχέση με το ολικό μήκος του αγωγού. Επομένως με τη χρήση του θωρακισμένου καλωδίου το οποίο γειώνεται, είναι δυνατός ο μηδενισμός της τάσης θορύβου που οφείλεται σε χωρητική σύζευξη αρκεί ο εσωτερικός αγωγός του καλωδίου να είναι πλήρως καλυμμένος από τη θωράκιση.

2.5.3.2 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΣΥΖΕΥΞΗ

Η επαγωγική σύζευξη προκαλείται από το μαγνητικό πεδίο που παράγει κάθε αγωγός όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Στο σχήμα 2.5.3.2-1 ο αγωγός 1 που προκαλεί τη διαταραχή, διαρρέεται από το ρεύμα I_1 το οποίο αναπτύσσει ένα μαγνητικό πεδίο με μαγνητική επαγωγή B_1 . Η μαγνητική επαγωγή είναι ανάλογη της έντασης του μαγνητικού πεδίου H_1 , άρα και του ρεύματος, καθώς η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα είναι σταθερή

$$B_1 = \mu_r \mu_0 H_1 \triangleq k I_1 \quad (2.5.3.2-1)$$

όπου, μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, μ_r είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του αέρα και k ένας συντελεστής αναλογίας.



Σχήμα 2.5.3.2-1 : Ανάπτυξη τάσης θορύβου στον αγωγό 2, λόγω της επαγωγικής σύζευξης με τον αγωγό 1

Εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου B_1 που αναπτύσσει ο αγωγός 1, επάγεται στον αγωγό 2 που ανήκει στο σύστημα μέτρησης μια τάση θορύβου V_{12} . Θεωρούμε, όπως και στη χωρητική σύζευξη, ότι η ωφέλιμη τάση που μεταφέρεται από τον αγωγό 2 είναι μηδενική. Η αντίσταση R_{s2} στο σχήμα 2.5.3.2-1 παριστά την εσωτερική αντίσταση της πηγής πληροφορίας V_2 ($V_2 = 0$). Αντίστοιχα R_{s1} είναι η εσωτερική αντίσταση της πηγής V_1 . Η τάση θορύβου στον αγωγό 2 ορίζεται από τη σχέση

$$V_{12} = s M I_1 \quad (2.5.3.2-2)$$

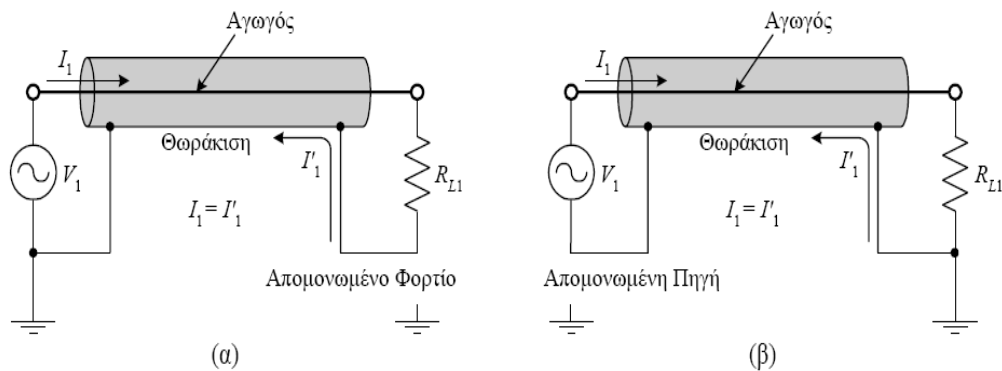
όπου M είναι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των αγωγών 1 και 2. Η τιμή της αμοιβαίας επαγωγής εξαρτάται από την απόσταση και τον προσανατολισμό των αγωγών. Κάθε αγωγός παρουσιάζει μια αυτεπαγωγή και μια ωμική αντίσταση, L_1 , R_1 και L_2 , R_2 αντίστοιχα.

Η τάση θορύβου V_{12} που επάγεται στον αγωγό 2 μπορεί να περιοριστεί με δύο τρόπους:

1. Τη μείωση του μαγνητικού πεδίου που ακτινοβολείται από τον αγωγό 1.
2. Την προστασία του αγωγού 2.

2.5.3.2.1 ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΟΥΜΕΝΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ

Το ακτινοβολούμενο μαγνητικό πεδίο από τον αγωγό διαταραχής 1 μπορεί ιδανικά να μηδενιστεί, αν προκαλέσουμε την κυκλοφορία ενός ρεύματος I'_1 ίσου και αντίθετου με το ρεύμα του αγωγού I_1 . Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα θωρακισμένο καλώδιο, όπως στο σχήμα 2.5.3.2.1-1 ή ένα ζεύγος συνεστραμμένων αγωγών (*twisted pair*), όπως στο σχήμα 2.5.3.2.2-1. Με τον τρόπο αυτό το ρεύμα I'_1 ρέει παράλληλα με το I_1 και το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσει εξουδετερώνει το μαγνητικό πεδίο του προκαλεί το ρεύμα I_1 . Προϋπόθεση για το μηδενισμό του ολικού πεδίου είναι το ρεύμα επιστροφής I'_1 να είναι ίσο με το I_1 .



Σχήμα 2.5.3.2.1-1 : Μείωση της τάσης θορύβου με τον περιορισμό του ακτινοβολούμενου μαγνητικού πεδίου από τον αγωγό διαταραχής με τη χρήση θωρακισμένου καλωδίου για την επιστροφή του ρεύματος I_1

(α): Γειωμένη πηγή – απομονωμένο φορτίο

(β): Απομονωμένη πηγή – γειωμένο φορτίο

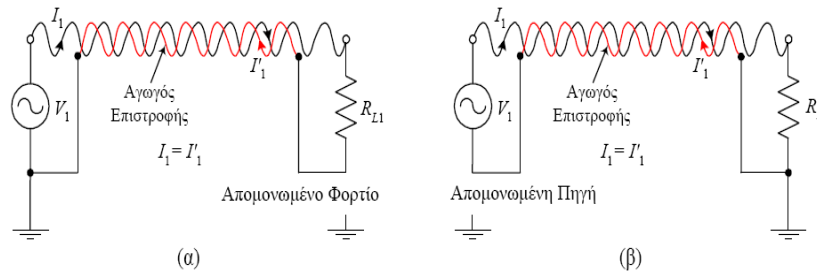
Η ισότητα των ρευμάτων εξασφαλίζεται μόνο όταν το ένα άκρο του αγωγού επιστροφής συνδέεται στη γείωση. Στα σχήματα 2.5.3.2.1-1α και 2.5.3.2.2-1α γειώνεται ο αγωγός στην πλευρά της πηγής, ενώ στα σχήματα 2.5.3.2.1-1β και 2.5.3.2.2-1β γειώνεται η πλευρά του φορτίου.

2.5.3.2.2 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΔΙΑΤΑΡΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

Η τάση που επάγεται από το μαγνητικό πεδίο B_1 με ημιτονοειδή μεταβολή, το οποίο προκαλεί ο αγωγός 1 στο κλειστό βρόχο με επιφάνεια S που σχηματίζει ο αγωγός 2 με τη γη (σχήμα 2.5.3.2.2-3), ορίζεται από τη σχέση

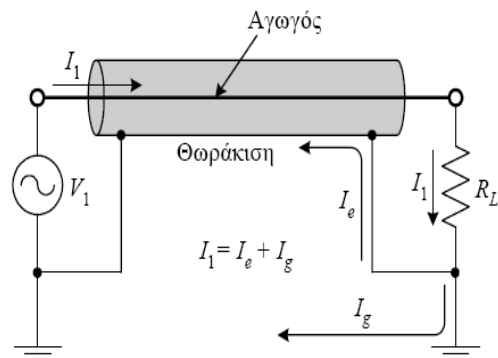
$$V_{12} = sB_1S \sin \delta \quad (2.5.3.2.2-1)$$

όπου δ είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου και της επιφάνειας S . Επομένως, η τάση θορύβου V_{12} είναι μέγιστη όταν η επιφάνεια είναι κάθετη στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.



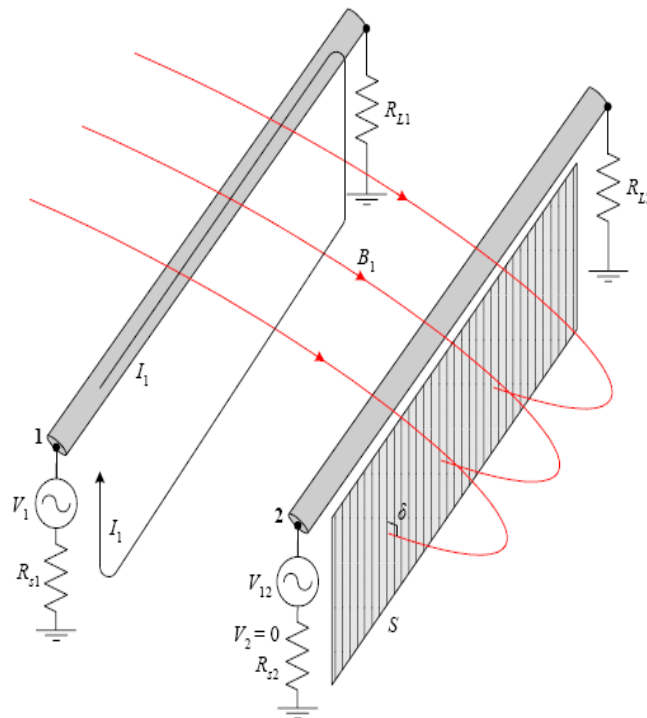
Σχήμα 2.5.3.2.2-1 : Μείωση της τάσης θορύβου με τον περιορισμό του ακτινοβολούμενου μαγνητικού πεδίου από τον αγωγό διαταραχής με τη χρήση καλωδίου συνεστραμμένων αγωγών για την επιστροφή του ρεύματος I_1

- (α): Γειωμένη πηγή – απομονωμένο φορτίο
- (β): Απομονωμένη πηγή – γειωμένο φορτίο



Σχήμα 2.5.3.2.2-2 : Τα ρεύματα στον εσωτερικό αγωγό και τη θωράκιση του καλωδίου δεν είναι ίσα όταν η θωράκιση γειώνεται και στα δύο άκρα. Έτσι, το ακτινοβολούμενο μαγνητικό πεδίο δεν εξουδετερώνεται πλήρως

Από τη σχέση (2.5.3.2.2-1) προκύπτει ότι για τη μείωση της τάσης θορύβου V_{12} στο διαταρασσόμενο αγωγό 2, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί είτε η επιφάνεια S είτε ο όρος $\sin \delta$. Η κλειστή επιφάνεια S που δημιουργείται μεταξύ του αγωγού 2 και της γείωσης (σχήμα 2.5.3.2.2-3), καταργείται με τη χρήση θωρακισμένου καλωδίου ή καλωδίου με συνεστραμμένους αγωγούς, αρκεί να συνδέεται στη γείωση μόνο το ένα άκρο του καλωδίου.



Σχήμα 2.5.3.2.2-3 : Η τάση θορύβου V_{12} που επάγεται στον αγωγό 2 εξαρτάται από την επιφάνεια S και τον προσανατολισμό της S ως προς τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου B_1 , που ακτινοβολείται από τον αγωγό 1

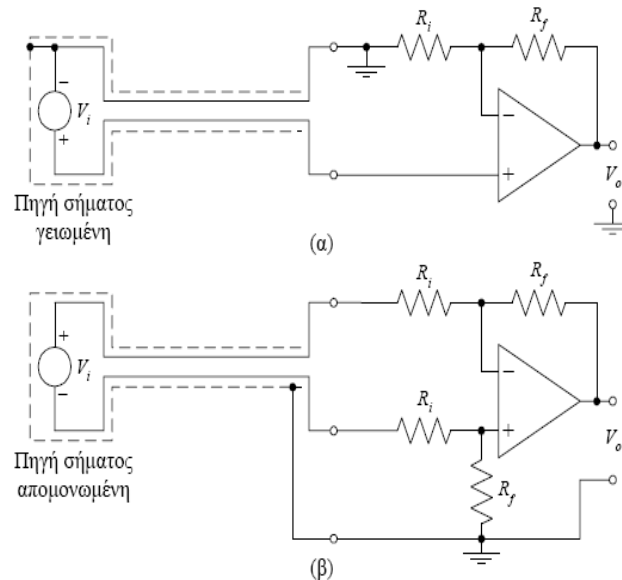
Για την εξουδετέρωση του όρου $\sin \delta$ πρέπει ο αγωγός 2 να προσανατολιστεί κάθετα ως προς τον αγωγό 1. Αντίστοιχα, η τάση θορύβου είναι μέγιστη όταν οι αγωγοί είναι τοποθετημένοι παράλληλα, όπως εικονίζεται στο σχήμα 2.5.3.2.2-3. Ο κατάλληλος προσανατολισμός των αγωγών δεν είναι συνήθως εύκολος στις πρακτικές εφαρμογές.

2.5.3.3 ΣΥΖΕΥΞΗ ΑΠΟ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του σήματος πληροφορίας εμφανίζουν μια ισοδύναμη αυτεπαγωγή και μια ισοδύναμη αντίσταση (σχήμα 2.5.3.2-1). Επομένως οι αγωγοί έχουν μια σύνθετη αντίσταση με μικρή, αλλά μη μηδενική τιμή. Έτσι η ροή του ρεύματος μέσω των αγωγών των θωρακίσεων και των γειώσεων, προκαλεί την ανάπτυξη τάσεων θορύβου στα άκρα τους. Οι θόρυβοι αυτής της κατηγορίας οφείλονται στη σύζευξη από αγωγιμότητα και εξετάζονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

2.5.4 ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΣΤΗ ΓΕΙΩΣΗ

Η καλύτερη μέθοδος για τη μεταφορά ενός σήματος μικρού πλάτους από ένα αισθητήριο στον ενισχυτή, είναι με τη χρήση θωρακισμένου καλωδίου όπως εικονίζεται στο σχήμα 2.5.4-1.



Σχήμα 2.5.4-1 : Σύνδεση της θωράκισης του καλωδίου με τη γείωση, στην περίπτωση του τελεστικού ενισχυτή χωρίς αντιστροφή (α) και του διαφορικού ενισχυτή (β). Η θωράκιση γειώνεται μόνο στο ένα άκρο

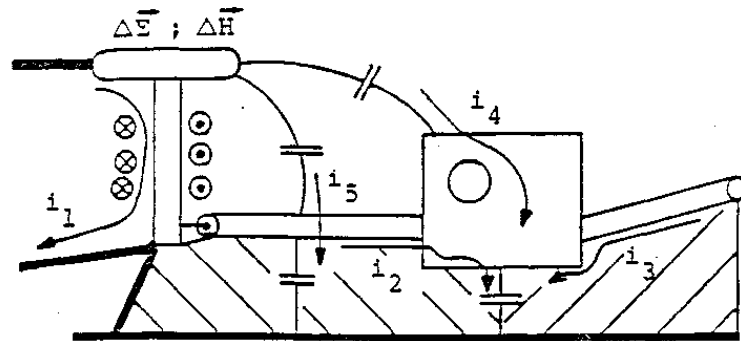
Ειδικότερα, η πηγή V_i γειώνεται στο σχήμα 2.5.4-1α και για την ενίσχυση του σήματος χρησιμοποιείται ένας τελεστικός ενισχυτής χωρίς αντιστροφή. Το καλώδιο έχει δύο αγωγούς για τη μεταφορά του σήματος χωρίς αυτό να είναι αναγκαίο, έτσι ώστε η θωράκιση να μη φέρει ωφέλιμο σήμα. Αντίστοιχα, στο σχήμα 2.5.4-1β η πηγή του σήματος είναι απομονωμένη από τη γείωση.

Επομένως η χρήση καλωδίου με δύο αγωγούς είναι απαραίτητη και χρησιμοποιείται ένας διαφορικός ενισχυτής για την ενίσχυση του σήματος. Η προσέγγιση αυτή δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα ως προς την εξάλειψη του θορύβου.

Η θωράκιση του καλωδίου γειώνεται μόνο στο ένα άκρο, έτσι ώστε να μην υπάρχουν βρόχοι γης. Στην περίπτωση του σχήματος 2.5.4-1α το σημείο γείωσης της θωράκισης είναι σημαντικό για τη στάθμη του κοινού θορύβου που αναπτύσσεται από ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή. Συνήθως η θωράκιση γειώνεται στη θέση της πηγής του σήματος. [7]

2.5.5 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Η μεθοδολογία για τον πλήρη υπολογισμό των επαγόμενων τάσεων δεν μπορεί να εφαρμοσθεί στις περισσότερες εργαστηριακές διατάξεις όπως π.χ. αυτή του σχήματος 2.5.5-1, λόγω των εξαιρετικά πολύπλοκων μαθηματικών εξισώσεων ¹ που μπορούν να επιλυθούν μόνο στις περιπτώσεις απλών διατάξεων.



Σχήμα 2.5.5-1 : Ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε σύστημα μέτρησης υψηλών τάσεων

- α) : Επίδραση της μεταβολής ΔH του μαγνητικού πεδίου
 i_1 : Το κύριο ρεύμα προκαλεί μαγνητικό πεδίο
 i_2 : Ρεύμα επαγόμενο στη θωράκιση του ομοαξονικού καλωδίου
 i_3 : Ρεύμα επαγόμενο στις γραμμές ελέγχου και στο δίκτυο παροχής τάσης 230 V, 50 Hz στις συσκευές
- β) : Επίδραση της μεταβολής ΔE του ηλεκτρικού πεδίου
 i_4, i_5 : Χωρητικά ρεύματα στο ομοαξονικό καλώδιο και στα όργανα μέτρησης.

Επιπρόσθετα, το πρόβλημα των υπερτιθέμενων διαταραχών στο μετρούμενο σήμα δεν μπορεί να αντιμετωπισθεί απόλυτα με τεχνικές μεθόδους. Αντίθετα οι τεχνικές μέθοδοι οι οποίες προτείνονται, είναι μερικές φορές ανεφάρμοστες ή απαιτούν υψηλό κόστος. Σαν παράδειγμα αναφέρεται ότι η επαρκής απόσταση μεταξύ του συστήματος παραγωγής της υψηλής τάσης και του συστήματος μέτρησης είναι ανέφικτη σε αρκετά εργαστήρια λόγω της στενότητας του χώρου και του πλήθους ογκωδών διατάξεων, οι οποίες δεν επιτρέπουν τη μετακίνηση του υπάρχοντος συστήματος. Επίσης όλες οι διατάξεις που βρίσκονται στο εργαστήριο λειτουργούν σαν κεραίες που δέχονται αλλά και εκπέμπουν υψίσυχνη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Συνεπώς είναι αναγκαίο να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα με κάποιες εναλλακτικές (π.χ. αριθμητικές) μεθόδους, αφού φυσικά προηγουμένως γίνουν και μερικές τεχνικές βελτιώσεις που είναι εφικτές.

2.5.5.1 ΕΠΑΓΟΜΕΝΑ ΡΕΥΜΑΤΑ

Η μαγνητική ζεύξη μεταξύ του κλάδου υψηλής τάσης και της θωράκισης του καλωδίου, εκφράζεται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.5.5.1-1 από το οποίο προκύπτει

$$U_2 = -I_2 \cdot s \cdot L_2 + I_1 \cdot s \cdot M \quad (2.5.5.1-1)$$

όπου:

I_1, U_1 : Ρεύμα και τάση στον κλάδο υψηλής τάσης.

I_2, U_2 : Επαγόμενο ρεύμα και τάση στο μανδύα του καλωδίου.

L_1, L_2 : Αυτεπαγωγή του κλάδου υψηλής τάσης και του μανδύα του καλωδίου αντίστοιχα.

M : Αμοιβαία επαγωγή των ανωτέρω.

R, C_0 : Αντίσταση και χωρητικότητα ως προς γη του οργάνου μέτρησης.

Η ανωτέρω σχέση καταλήγει τελικά στην εξής μορφή:

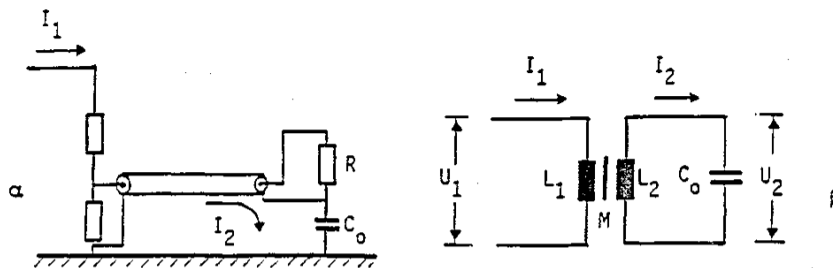
$$I_2 = \frac{M \cdot C_0 \cdot s^2}{1 + L_2 \cdot C_0 \cdot s^2} I_1 \quad (2.5.5.1-2)$$

Με την παραδοχή ότι το ρεύμα έχει τη μορφή της βηματικής συνάρτησης

$$i_1(t) = I_1 \cdot s(t) \Rightarrow I_1 = I_1 \cdot \frac{1}{s} \quad (2.5.2.1-3)$$

η σχέση (2.3.11.2-2) καταλήγει στην εξής έκφραση για το επαγόμενο ρεύμα $i_2(t)$

$$i_2(t) = I_1 \cdot \frac{M}{L_2} \cdot \cos\left(\frac{t}{\sqrt{L_2 \cdot C_0}}\right) \quad (2.5.5.1-4)$$



Σχήμα 2.5.5.1-1 : Επαγόμενο ρεύμα στον μανδύα του καλωδίου

α) : Καταμεριστής, καλώδιο και όργανο μέτρησης

β) : Ισοδύναμο κύκλωμα μαγνητικής ζεύξης

Από τη σχέση αυτή φαίνεται ότι το επαγόμενο ρεύμα έχει μορφή ταλαντούμενη με μέγιστη τιμή

$$I_{2,max} = I_1 \cdot \frac{M}{L_2} \quad (2.5.5.1-5a)$$

και συχνότητα

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_0}} \quad (2.5.5.1-5b)$$

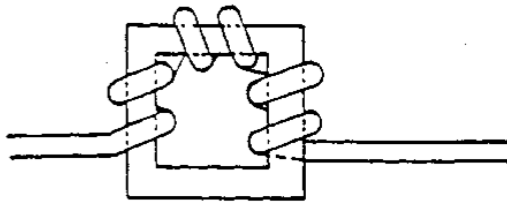
Το συμπέρασμα που εξάγεται από τη σχέση (2.5.5.1-4) είναι ότι τα επαγόμενα ρεύματα μειώνονται με:

- α) την αύξηση της αυτεπαγωγής L_2 του μανδύα του ομοαξονικού καλωδίου και
- β) τη μείωση της αμοιβαίας επαγωγής M μεταξύ του καλωδίου και του κλάδου υψηλής τάσης του συστήματος.

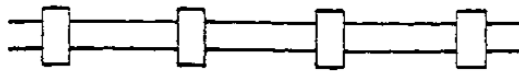
2.5.5.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ ΣΤΗ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΤΑΣΗ

Οι επαγόμενες τάσεις είναι σχεδόν αναπόφευκτες και επομένως, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται τείνουν στον περιορισμό των μεγεθών που τις προκαλούν.

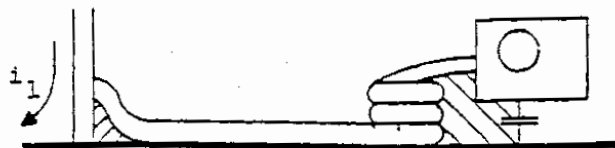
Βάσει της ανάλυσης της προηγούμενης υποενότητας, πρέπει η αυτεπαγωγή του ομοαξονικού καλωδίου να είναι μεγάλη και η αμοιβαία επαγωγή μικρή. Αυτό επιτυγχάνεται με τους τρόπους που απεικονίζονται στα σχήματα ² 2.5.5.2-1,2,3,4 :



Σχήμα 2.5.5.2-1 : Περιέλιξη του καλωδίου σε σιδηρομαγνητικό πυρήνα για αύξηση της αυτεπαγωγής του



Σχήμα 2.5.5.2-2 : Διέλευση του καλωδίου μέσα από σιδηρομαγνητικούς δακτυλίους για αύξηση της αυτεπαγωγής του



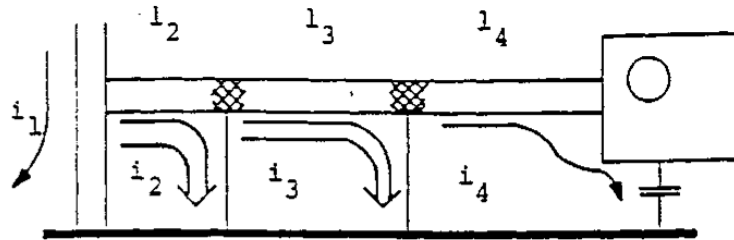
Σχήμα 2.5.5.2-3 : Το περίσσειμα του καλωδίου περιελίσσεται σε "κουλούρα" για αύξηση της αυτεπαγωγής του



Σχήμα 2.5.5.2-4 : Το καλώδιο τοποθετείται στη μικρότερη δυνατή απόσταση από το έδαφος ώστε να ελαχιστοποιείται ο κλειστός βρόχος μεταξύ του γειωμένου μανδύα και της γείωσης του εργαστηρίου

Τα επαγόμενα ρεύματα μειώνονται σημαντικά με τη χρήση καλωδίων διπλής θωράκισης³. Εναλλακτικά, μπορεί το καλώδιο να τοποθετηθεί σε μεταλλικό σωλήνα ο οποίος θα λειτουργεί σαν δεύτερος μανδύας.

Μια άλλη τεχνική για τη μείωση του βρόχου επαγωγής, είναι η γείωση του μανδύα του καλωδίου σε πολλά σημεία κατά μήκος της όδευσης του, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.5.2-5.

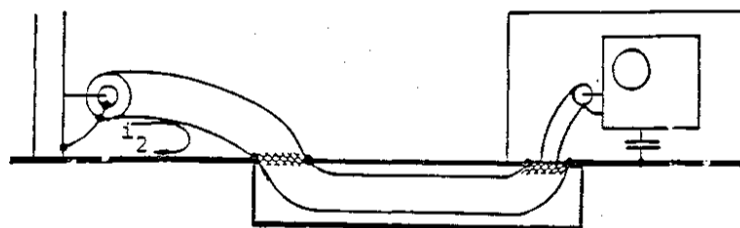


Σχήμα 2.5.5.2-5 : Πολλαπλά σημεία γείωσης του καλωδίου για μείωση του βρόχου επαγωγής και απαγωγή των επαγόμενων ρευμάτων

Το μέτρο αυτό έχει σαν πρόσθετο θετικό αποτέλεσμα την απαγωγή των επαγόμενων ρευμάτων προς γη αποφεύγοντας έτσι την είσοδο τους στο όργανο μέτρησης⁴.

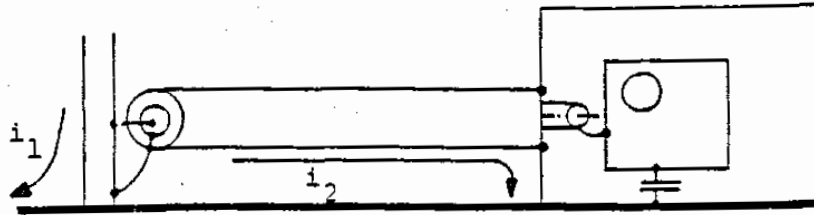
Στην περίπτωση χρησιμοποίησης καλωδίου διπλής θωράκισης ή τοποθέτησης του σε σωλήνα, η τεχνική των πολλαπλών γειώσεων εφαρμόζεται στον εξωτερικό μανδύα του καλωδίου ή (αντίστοιχα) στο μεταλλικό σωλήνα αφήνοντας άθικτο τον εσωτερικό μανδύα.

Για τη μείωση του κλειστού βρόχου επαγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική της τοποθέτησης του καλωδίου σε υποδαπέδιο κανάλι (σχήμα 2.5.5.2-6), αφού γειωθεί στο σημείο εισόδου του. Στην περίπτωση αυτή δεν επάγονται ρεύματα στο καλώδιο, αλλά όμως η αυτεπαγωγή αυτού μειώνεται σημαντικά.



Σχήμα 2.5.5.2-6 : Τοποθέτηση του καλωδίου σε υποδαπέδιο κανάλι

Για την αποφυγή δημιουργίας κλειστού βρόχου μεταξύ του μανδύα του καλωδίου, του περιβλήματος του οργάνου και της γείωσης του εργαστηρίου, δε γειώνεται το σημείο σύνδεσης του μανδύα με τον ακροδέκτη του περιβλήματος (σχήμα 2.5.5.2-7). Αντίθετα, γειώνεται το άλλο άκρο του στο σημείο σύνδεσης του με τη γείωση του καταμεριστή. Για τους ίδιους λόγους, δε γειώνεται *ποτέ* το όργανο μέτρησης.



Σχήμα 2.5.5.2-7 : Αποφυγή δημιουργίας κλειστών βρόχων διέλευσης ρευμάτων εξ' επαγωγής στο όργανο μέτρησης

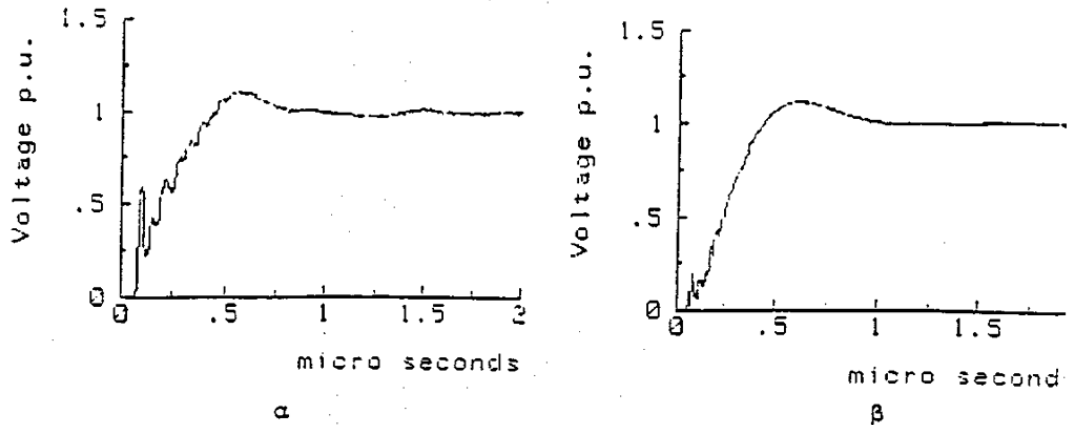
Προς την κατεύθυνση των προσπαθειών για τη θωράκιση όλων των μερών της χαμηλής τάσης του συστήματος μέτρησης, συμβάλλει και η θωράκιση του κλάδου χαμηλής τάσης του καταμεριστή. Αν αυτός δεν περικλείεται από μεταλλικό περίβλημα, τότε ενδείκνυται η θωράκιση του με γειωμένα φύλλα χαλκού.

Μέσα στο πλαίσιο των τεχνικών μεθόδων για τη μείωση των διαταραχών, η τοποθέτηση όλων των οργάνων σε μεταλλικό κλωβό Faraday είναι εκ των ων ουκ άνευ. Ένας τέτοιος θάλαμος, εκτός της θωράκισης των οργάνων από διαταραχές διαθέτει ειδικό σύστημα παροχής τάσης 230 V - 50 Hz στα όργανα μέτρησης. Το σύστημα αυτό αποτελείται από:

- α) Φίλτρα αποκοπής υψίσυχνων αρμονικών, οι οποίες υπερτίθενται στην τάση του δικτύου της ΔΕΗ και κατόπιν εισέρχονται στα όργανα μέτρησης από την «πίσω πόρτα».
- β) Μετασχηματιστή 230V/230V για μια επιπλέον γαλβανική απομόνωση των οργάνων από το δίκτυο της τάσης λειτουργίας τους.

Οι τεχνικές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση των διαταραχών στο μετρούμενο μέγεθος, είναι αρκετά απλές και έχουν μικρό κόστος. Εντούτοις το αποτέλεσμα είναι σημαντικό, όπως φαίνεται σε ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα στο σχήμα 2.5.5.2-8 όπου η αρχική ανύψωση της τάσης λόγω επαγόμενων διαταραχών μειώθηκε κατά 74% και η καμπύλη της βηματικής απόκρισης

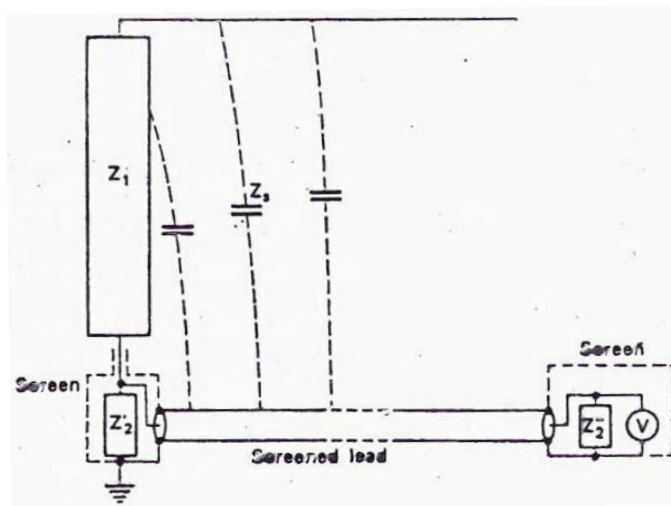
απαλλάχθηκε από τις υπερτιθέμενες παραμορφώσεις.



Σχήμα 2.5.5.2-8 : Απαλλαγή του σήματος της βηματικής απόκρισης από επαγόμενες διαταραχές

- α) : Σύστημα μέτρησης στην αρχική του μορφή
- β) : Σύστημα μετά τις τεχνικές βελτιώσεις [8]

2.5.5.3 ΘΩΡΑΚΙΣΗ ΤΗΣ ΠΛΕΥΡΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ



Σχήμα 2.3.12-1 : Θωράκιση της πλευράς χαμηλής τάσης μιας διάταξης για τη μέτρηση μεταβαλλόμενης τάσης μέσω καταμεριστή τάσης

Επειδή ο βραχίονας υψηλής τάσης του καταμεριστή βρίσκεται σε επικίνδυνα υψηλές τάσεις, το όργανο μέτρησης και ο παρατηρητής τοποθετούνται σε ορισμένη απόσταση από το βραχίονα χαμηλής τάσης. Η σύνδεση του οργάνου μέτρησης με τον καταμεριστή γίνεται με ένα συγκεντρικό καλώδιο ο μανδύας του οποίου συνδέεται με τη γη

(συνήθως μόνο από το ένα άκρο). Ο βραχίονας χαμηλής τάσης μπορεί να βρίσκεται είτε κοντά στο βραχίονα υψηλής τάσης είτε κοντά στο όργανο μέτρησης. Για ασφάλεια αλλά και για την αποφυγή επιδράσεων εξ' επαγωγής, ο βραχίονας χαμηλής τάσης και το όργανο μέτρησης θωρακίζονται με ένα μεταλλικό περίβλημα και συνδέονται αμφότερα με το μανδύα του καλωδίου όπως δείχνεται στο σχήμα 2.5.5.3-1. Η αντίσταση Z_2'' στο άκρο του καλωδίου χρησιμοποιείται μόνο για τη μέτρηση κρουστικών τάσεων μικρής διάρκειας, διότι χωρίς αυτή θα συνέβαινε στο ανοιχτό άκρο του καλωδίου διπλασιασμός της τάσης λόγω ανάκλασης. [4,5]

Αναφορές

- [1] Κιοσκερίδης, Ι., «Ηλεκτρικές Μετρήσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρονικής της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2003.
- [2] Διαμαντόπουλος, Δ., «Υψηλές Τάσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αιγάλεω 2006.
- [3] Πυργιώτη, Ε., «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Πάτρας, Πάτρα 2005.
- [4] Κούκος, Π., «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας, Χαλκίδα 2003-04.
- [5] Μαινεμενλής, Χ., «Τεχνική του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007.
- [6] Kreuger, F., "Industrial High Voltage", (Volume II), Delft University of Technology, Netherland 1992.
- [7] Κιοσκερίδης, Ι., «Ηλεκτρονικές Μετρήσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρονικής της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2003.
- [8] Τοπαλής, Φ., «Υψηλές Τάσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 1996.
- [9] Θεοδώρου, Ν., «Ηλεκτρικές Μετρήσεις», Τεύχος Ι: Κλασσικές Μετρήσεις, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2004.

1

Αναφορά [26] : N. Ari : "Die Ausbreitung der von Wanderwellen hervorgerufenen elektromagnetischen Wellen und deren Wirkung in Stoss Spannungsmesskreisen", Diss. ETHZ, Nr. 5345, Zurich, 1974.

Αναφορά [27] : N. Ari : "Electromagnetic phenomena in impulse voltage measuring systems", Vol. PAS-96, No. 4, July-August 1977, pp. 1162-1172.

Αναφορά [41] : H. Bellm, R. Maier, A. Schwab : "Impulse voltage divider equivalent circuit considering transient radiation effects", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Paper 61.08, Athens, September 1983.

Αναφορά [42] : R. Maier, A. Schwab : "Transient radiation-field interaction with impulse voltage dividers", 5th International Symposium on High Voltage Engineering, Paper 71.12, Braunschweig, August 1987.

Αναφορά [43] : A. Schwab, R. Maier, H. Bellm : "Calculation of transient electromagnetic fields with the transient elementary dipole method", Zurich CMC-Symposium, No. 29, F1, 1987.

Αναφορά [44] : S.G. Zaky, S.D.T. Robertson : "Integral equation formulation for the solution of magnetic field problems. Part I. Dipole and current models", IEEE PES Winter Meeting, New York, January, 1972.

Αναφορά [45] : K.H. Gonschorek : "The electromagnetic behavior of widely extended high voltage test circuits", 3rd International Symposium on High Voltage Engineering, Paper 42.02, Milan, August 1979.

Αναφορά [46] : R. Malewski, D. Train : "Une etude des interferences de haute frequence qui paraissent dans le Laboratoire Haute Tension", Rapport IREQ-1230, 20/06/75, Varennes, Canada.

2

Αναφορά [47] : A.Schwab, J Herold : "Electromagnetic interference in impulse measuring systems", IEEE PES Summer Meeting and EHV/UHV Conference, Vancouver B.C., Canada, Paper T73062-7, July 15-20, 1973.

3

Αναφορά [15] : A. Pedersen, J. Starves, L. Thione : "Instruments for impulse voltage measurements . Oscilloscopes and crest voltmeters", Electra No. 59, 1978.

4

Αναφορά [47] : A.Schwab, J Herold : "Electromagnetic interference in impulse measuring systems", IEEE PES Summer Meeting and EHV/UHV Conference, Vancouver B.C., Canada, Paper T73062-7, July 15-20, 1973.

Αναφορά [48] : W. Chen-Qi, S. Jia-Ping : "On-line data processing system for power frequency testing", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Paper No.650, Athens, September 1983.

Αναφορά [49] : Y. Yinmei, X. Muhong : "Interferences in impulse voltage measuring system", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Paper 64.02, Athens, September 1983.

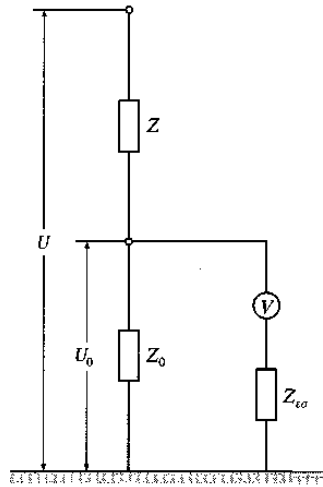
Αναφορά [50] : P.C.T. Laan, E.F. Steennis : "Design of shielded high voltage laboratories", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Paper 64.11, Athens, September 1983.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ”

3.1 ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ

Η διάταξη των δύο αντιστάσεων Z και Z_0 που χρησιμεύει στην αύξηση της περιοχής μέτρησης ενός βολτομέτρου ονομάζεται και *καταμεριστής τάσης*. Ένας καταμεριστής τάσης παριστάνεται στο σχήμα 3.1-1.



Σχήμα 3.1-1 : Γενικός καταμεριστής τάσης

Το βολτόμετρο του σχήματος έχει εσωτερική αντίσταση $Z_{\varepsilon\sigma}$ και μέγιστη ένδειξη $|U_0|$ ή περιοχή μέτρησης $[0 \div |U_0|]$. Με τη διάταξη του σχήματος επιτυγχάνεται αύξηση της περιοχής μέτρησης από $|U_0|$ σε $|U|$. Για $Z_{\varepsilon\sigma} = \infty$ ισχύει η σχέση

$$\kappa = \frac{U}{U_0} = 1 + \frac{Z}{Z_0} \quad (3.1-1)$$

όπου κ η *σχέση καταμερισμού* και για $Z_{\varepsilon\sigma} \neq \infty$ ισχύει η σχέση

$$\kappa' = \frac{U'}{U_0} = 1 + \frac{Z}{Z_0} + \frac{Z}{Z_{\varepsilon\sigma}} \quad (3.1-2)$$

Οι προηγούμενες σχέσεις δεν ισχύουν μόνο για τις μέγιστες ενδείξεις αλλά και για τυχαίες ενδείξεις. Έτσι, αν A_U , A_{U_0} και E_U , E_{U_0} είναι οι ανακρίβειες και ευαισθησίες του βολτομέτρου με και χωρίς καταμεριστή, λόγω των σχέσεων ορισμού τους και των ανωτέρω σχέσεων ισχύουν οι σχέσεις

$$A_U = |\kappa| A_{U_0} \quad \text{ή} \quad A_U = |\kappa'| A_{U_0} \quad (3.1-3)$$

$$E_U = |\kappa^{-1}| E_{U_0} \quad \text{ή} \quad E_U = |\kappa'^{-1}| E_{U_0} \quad (3.1-4)$$

ανάλογα με το αν θεωρηθεί $Z_{\varepsilon\sigma} = \infty$ ή $Z_{\varepsilon\sigma} \neq \infty$.

Το μέγιστο απόλυτο συστηματικό σφάλμα ΔU_{max} , το μέγιστο απόλυτο τυχαίο σφάλμα $4m_U$ και το μέγιστο απόλυτο σύνθετο σφάλμα $\sigma_{U_{max}}$ μπορούν να βρεθούν σύμφωνα με τους τύπους

$$\sigma_{\psi_{max}} = |\Delta\psi_{max}| + 4m_{\psi} \quad (3.1-5)$$

και

$$\sigma_{\psi_{max}} = \left| \frac{\partial\psi}{\partial\chi_1} \Delta\chi_{1max} \right| + \dots + \left| \frac{\partial\psi}{\partial\chi_n} \Delta\chi_{nmax} \right| + 4 \left[\left(\frac{\partial\psi}{\partial\chi_1} \right)^2 m_1^2 + \dots + \left(\frac{\partial\psi}{\partial\chi_n} \right)^2 m_n^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.1-6)$$

Μια άλλη πηγή συστηματικών σφαλμάτων είναι η πεπερασμένη εσωτερική αντίσταση $Z_{\epsilon\sigma}$ του βολτομέτρου. Δεχόμενοι ότι οι αντιστάσεις Z, Z_0 και $Z_{\epsilon\sigma}$ είναι γνωστές με απόλυτη ακρίβεια, τότε το απόλυτο συστηματικό σφάλμα ΔU που προκύπτει αν δεν ληφθεί υπόψη η εσωτερική αντίσταση του βολτομέτρου, ορίζεται ως εξής:

$$\Delta U = |U'| - |U| \quad (3.1-7)$$

και βάσει των σχέσεων (3.1-1) και (3.1-2) ισούται με

$$\Delta U = |U_0| \left(\left| 1 + \frac{Z}{Z_0} + \frac{Z}{Z_{\epsilon\sigma}} \right| - \left| 1 + \frac{Z}{Z_0} \right| \right) \quad (3.1-8)$$

Το δε σχετικό συστηματικό σφάλμα r_u ορίζεται ως εξής:

$$r_u = \frac{\Delta U}{|U'|} \quad (3.1-9)$$

και βάσει των σχέσεων (3.1-1) , (3.1-2) και (3.1-8) ισούται με

$$r_u = 1 - \frac{|Z_{\epsilon\sigma}(\frac{1}{Z} + \frac{1}{Z_0})|}{|1 + Z_{\epsilon\sigma}(\frac{1}{Z} + \frac{1}{Z_0})|} \quad (3.1-10)$$

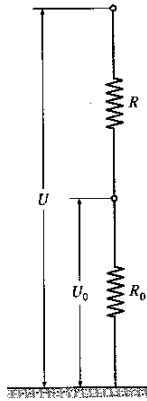
Από την τελευταία σχέση παρατηρούμε ότι το σχετικό συστηματικό σφάλμα είναι τόσο μικρότερο όσο μικρότερες είναι οι αντιστάσεις του καταμεριστή Z και Z_0 ως προς την εσωτερική αντίσταση του βολτομέτρου $Z_{\epsilon\sigma}$. Από την άλλη πλευρά όμως, επειδή ο καταμεριστής παρεμβάλλεται παράλληλα σε ένα κλάδο κυκλώματος, για να μην επηρεάσει αυτός σημαντικά το κύκλωμα πρέπει οι αντιστάσεις Z και Z_0 να είναι αρκετά μεγάλες.

Υπάρχουν διάφορα είδη καταμεριστών, ωμικοί, χωρητικοί, κ.λ.π., ανάλογα με το είδος των αντιστάσεων Z και Z_0 . Στην περίπτωση που οι αντιστάσεις αυτές είναι πυκνωτές, πρέπει να υπολογιστούν και οι απώλειες τους. [1]

3.2 ΕΙΔΗ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ ΤΑΣΗΣ

Στη συνέχεια εξετάζονται μερικά είδη καταμεριστών τάσης και υπολογίζονται οι σχέσεις καταμερισμού για τον καθένα, ενώ οι ευαισθησίες και τα σφάλματα μπορούν να βρεθούν βάσει των όσων αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.1.

3.2.1 ΩΜΙΚΟΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗΣ

**Σχήμα 3.2.1-1** : Ωμικός καταμεριστής

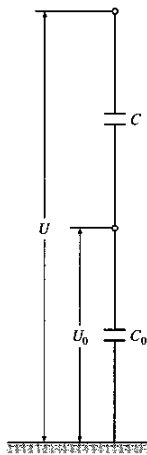
Για τον ωμικό καταμεριστή του σχήματος 3.2.1-1, ισχύουν οι σχέσεις:

$$Z = R \quad (3.2.1-1)$$

$$Z_0 = R_0 \quad (3.2.1-2)$$

$$\kappa_R = \frac{U}{U_0} = 1 + \frac{Z}{Z_0} = 1 + \frac{R}{R_0} \Rightarrow \kappa_R = \frac{R+R_0}{R_0} \quad (3.2.1-3)$$

3.2.2 ΧΩΡΗΤΙΚΟΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗΣ

**Σχήμα 3.2.2-1** : Χωρητικός καταμεριστής

Για το χωρητικό καταμεριστή του σχήματος 3.2.2-1, ισχύουν οι σχέσεις:

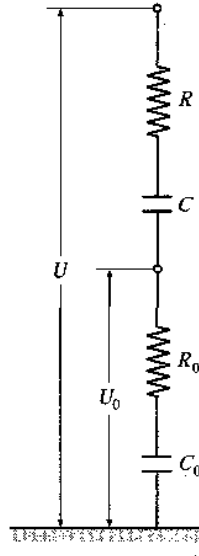
$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (3.2.2-1)$$

$$Z_0 = \frac{1}{j\omega C_0} \quad (3.2.2-2)$$

$$\kappa_C = 1 + \frac{Z}{Z_0} = 1 + \frac{C_0}{C} \Rightarrow \kappa_C = \frac{C+C_0}{C} \quad (3.2.2-3)$$

3.2.3 ΜΙΚΤΟΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗΣ

3.2.3.1 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΣΕΙΡΑ



Σχήμα 3.2.3.1-1 : R και C σε σειρά, R_0 και C_0 σε σειρά

Για το μικτό καταμεριστή του σχήματος 3.2.3.1-1, ισχύουν οι σχέσεις:

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C} = \frac{1+j\omega RC}{j\omega C} \quad (3.2.3.1-1)$$

$$Z_0 = R_0 + \frac{1}{j\omega C_0} = \frac{1+j\omega R_0 C_0}{j\omega C_0} \quad (3.2.3.1-2)$$

$$\kappa = 1 + \frac{Z}{Z_0} = 1 + \frac{(1+j\omega RC)j\omega C_0}{(1+j\omega R_0 C_0)j\omega C} = \frac{\frac{C+C_0}{C} + j\omega R_0 C_0 \frac{R+R_0}{R_0}}{1+j\omega R_0 C_0} \quad (3.2.3.1-3)$$

Ορίζοντας τις σχέσεις καταμερισμού κ_R και κ_C όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις των ωμικών και χωρητικών καταμεριστών αντίστοιχα και

$$\lambda \triangleq \omega RC, \quad \lambda_0 \triangleq \omega R_0 C_0 \quad (3.2.3.1-4)$$

η προηγούμενη σχέση γίνεται

$$\kappa = \frac{\kappa_C + j\lambda_0 \kappa_R}{1 + j\lambda_0} \quad (3.2.3.1-5)$$

ή ακόμα

$$\kappa = \frac{\kappa_C + \lambda_0^2 \kappa_R}{1 + \lambda_0^2} + j \frac{\lambda_0 (\kappa_R - \kappa_C)}{1 + \lambda_0^2} = |\kappa| e^{j\theta} \quad (3.2.3.1-6)$$

όπου

$$|\kappa| = \frac{\sqrt{(\kappa_C + \lambda_0^2 \kappa_R)^2 + \lambda_0^2 (\kappa_R - \kappa_C)^2}}{1 + \lambda_0^2} \quad (3.2.3.1-7)$$

$$\theta = \tau_0 \xi \varepsilon \varphi \frac{\lambda_0 (\kappa_R - \kappa_C)}{\kappa_C + \lambda_0^2 \kappa_R} \quad (3.2.3.1-8)$$

Για $\omega = 0$ οι προηγούμενες σχέσεις δεν ισχύουν, λόγω της αρχικής σχέσης (3.2.3.1-1). Αλλά για $\omega \rightarrow 0$, $\omega = \infty$ και $RC = R_0C_0$ ισχύουν τα εξής:

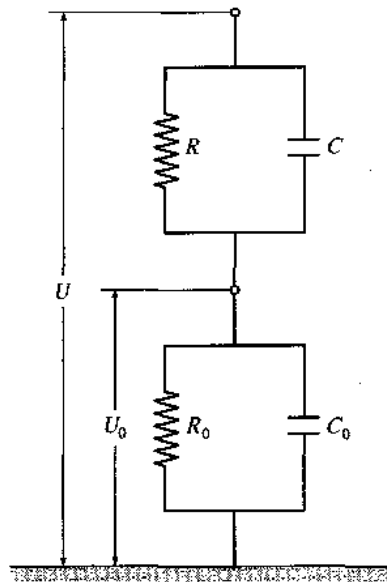
$$\omega \rightarrow 0 \Rightarrow \lambda_0 \rightarrow 0 \Rightarrow \kappa = \kappa_C, \theta = 0$$

$$\omega = \infty \Rightarrow \lambda_0 = \infty \Rightarrow \kappa = \kappa_R, \theta = 0$$

$$RC = R_0C_0 \Rightarrow \lambda = \lambda_0 \Rightarrow \kappa = \kappa_R = \kappa_C, \theta = 0$$

Στην τελευταία περίπτωση η σχέση καταμερισμού κ είναι ένας πραγματικός αριθμός και ισούται με τις σχέσεις καταμερισμού κ_R , του ωμικού, και κ_C , του χωρητικού καταμεριστή, ανεξάρτητα του ω .

3.2.3.2 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ



Σχήμα 3.2.3.2-1 : R και C παράλληλα, R_0 και C_0 παράλληλα

Για το μικτό καταμεριστή του σχήματος 3.2.3.2-1, ισχύουν οι σχέσεις:

$$Z = \frac{R \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega RC} \quad (3.2.3.2-1)$$

$$Z_0 = \frac{R_0 \frac{1}{j\omega C_0}}{R_0 + \frac{1}{j\omega C_0}} = \frac{R_0}{1 + j\omega R_0 C_0} \quad (3.2.3.2-2)$$

$$\kappa = 1 + \frac{Z}{Z_0} = 1 + \frac{(1 + j\omega R_0 C_0)R}{(1 + j\omega RC)R_0} = \frac{R + R_0 + j\omega RC + C_0}{1 + j\omega RC} \quad (3.2.3.2-3)$$

Ορίζοντας τις σχέσεις καταμερισμού κ_R και κ_C όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις των ωμικών και χωρητικών καταμεριστών αντίστοιχα και τα λ και λ_0 όπως στην προηγούμενη περίπτωση, η ως άνω σχέση γίνεται

$$\kappa = \frac{\kappa_R + j\lambda\kappa_C}{1 + j\lambda} \quad (3.2.3.2-4)$$

ή ακόμα

$$\kappa = \frac{\kappa_R + \lambda^2\kappa_C}{1 + \lambda^2} + j \frac{\lambda(\kappa_C - \kappa_R)}{1 + \lambda^2} = |\kappa|e^{j\theta} \quad (3.2.3.2-5)$$

όπου

$$|\kappa| = \frac{\sqrt{(\kappa_R + \lambda^2\kappa_C)^2 + \lambda^2(\kappa_C - \kappa_R)^2}}{1 + \lambda^2} \quad (3.2.3.2-6)$$

$$\theta = \tau_0 \xi \varepsilon \varphi \frac{\lambda(\kappa_C - \kappa_R)}{\kappa_R + \lambda^2\kappa_C} \quad (3.2.3.2-7)$$

Για $\omega = 0$, $\omega = \infty$ και $RC = R_0C_0$ ισχύουν τα εξής

$$\omega = 0 \Rightarrow \lambda_0 = 0 \Rightarrow \kappa = \kappa_R, \theta = 0$$

$$\omega = \infty \Rightarrow \lambda = \infty \Rightarrow \kappa = \kappa_C, \theta = 0$$

$$RC = R_0C_0 \Rightarrow \lambda = \lambda_0 \Rightarrow \kappa = \kappa_R = \kappa_C, \theta = 0$$

Στην τελευταία περίπτωση η σχέση καταμερισμού κ είναι ένας πραγματικός αριθμός και ισούται με τις σχέσεις καταμερισμού κ_R του ωμικού, και κ_C του χωρητικού καταμεριστή, ανεξάρτητα του ω .

3.2.3.3 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΜΙΚΤΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις:

1. R και C σε σειρά, R_0 και C_0 παράλληλα
2. R και C παράλληλα, R_0 και C_0 σε σειρά

Και για τις δύο περιπτώσεις θεωρούμε τον ισοδύναμο μετασχηματισμό πυκνωτή με απώλειες σε σύνδεση σε σειρά ή παράλληλα της προηγούμενης υποενότητας και το πρόβλημα ανάγεται σε μία από τις ανωτέρω περιπτώσεις (3.2.3.1 ή 3.2.3.2).

Πρέπει να αναφερθεί ότι παρόλο που τα πηνία δεν χρησιμοποιούνται στους καταμεριστές τάσης, υπάρχουν *επαγωγικοί* καταμεριστές, με εξειδικευμένη όμως χρησιμότητα. Στο επόμενο κεφάλαιο υπολογίζονται οι σχέσεις καταμερισμού κ για διάφορες συνδεσμολογίες καταμεριστών. [1]

3.3 ΟΙ ΒΡΑΧΙΟΝΕΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ

Οι καταμεριστές που εξετάστηκαν στα προηγούμενα ανήκουν βασικά σε δύο τύπους: τους *ωμικούς* (με διάφορες παραλλαγές) και τους *χωρητικούς*.

Ο *αποσβεσμένος* χωρητικός ανήκει κι αυτός στην κατηγορία των χωρητικών καταμεριστών. Οι βραχίονες χαμηλής τάσης για τους δύο τύπους καταμεριστών παρουσιάζουν επίσης διαφορές. Στους ωμικούς καταμεριστές το κύριο στοιχείο του βραχίονα χαμηλής τάσης είναι μια αντίσταση, στους χωρητικούς ένας πυκνωτής και στους χωρητικούς αποσβεσμένους ένας πυκνωτής με μια αντίσταση στη σειρά. Πιο κάτω εξετάζονται τα προβλήματα που αφορούν στους βραχίονες χαμηλής τάσης των διαφόρων τύπων καταμεριστών.

Βασική προϋπόθεση για όλους τους τύπους καταμεριστών είναι ότι το ρεύμα που εξέρχεται από το κατώτερο άκρο του βραχίονα υψηλής τάσης και διαρρέει το βραχίονα χαμηλής τάσης, είναι ανεξάρτητο από την επίδραση του τελευταίου κι αυτό γιατί σε σύγκριση με το βραχίονα υψηλής τάσης, ο βραχίονας χαμηλής τάσης παρουσιάζει αμελητέα αντίδραση.

3.3.1 Ο ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΩΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ

Επειδή η αντίσταση και κατά συνέπεια οι διαστάσεις του βραχίονα χαμηλής τάσης είναι μικρές, οι παράσιτες χωρητικότητες που υπεισέρχονται είναι αμελητέες πράγμα που δεν συμβαίνει όμως με τις παράσιτες αυτεπαγωγές.

Αν το ρεύμα που διαρρέει το βραχίονα είναι i και η αντίστασή του είναι r και απαλλαγμένη από παράσιτη αυτεπαγωγή, η τάση που θα εμφανιστεί στα άκρα θα είναι

$$u = i \cdot r \quad (3.3.1-1)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς ανάμεσα στο ρεύμα i που αποτελεί το σήμα εισόδου και την τάση u που αποτελεί το σήμα εξόδου θα είναι

$$F(p) = \frac{u}{i \cdot r} = 1 \quad (3.3.1-2)$$

όπου $p = j \cdot \omega$. Επειδή όπως αναφέρθηκε, ο χρόνος αποκρίσεως T_0 συνδέεται με τη συνάρτηση μεταφοράς $F(p)$ με τη σχέση

$$T_0 = \frac{dF(r)}{dp} \text{ για } p \rightarrow 0 \quad (3.3.1-3)$$

θα είναι στην περίπτωση αυτή $T_0 = 0$. Δηλαδή ο βραχίονας χαμηλής τάσης θα παρουσιάζει μηδενικό χρόνο αποκρίσεως που σημαίνει πως θα μεταφέρει απόλυτα πιστά το σήμα εισόδου. Εάν ο βραχίονας παρουσιάζει εκτός από την αντίσταση r και αυτεπαγωγή l τότε θα είναι

$$u = i \cdot (r + l \cdot p) \quad (3.3.1-4)$$

Σε αυτή την περίπτωση η συνάρτηση μεταφοράς θα είναι

$$F(p) = \frac{u}{i \cdot r} = 1 + \frac{l}{r} \cdot p \quad (3.3.1-5)$$

και ο χρόνος αποκρίσεως

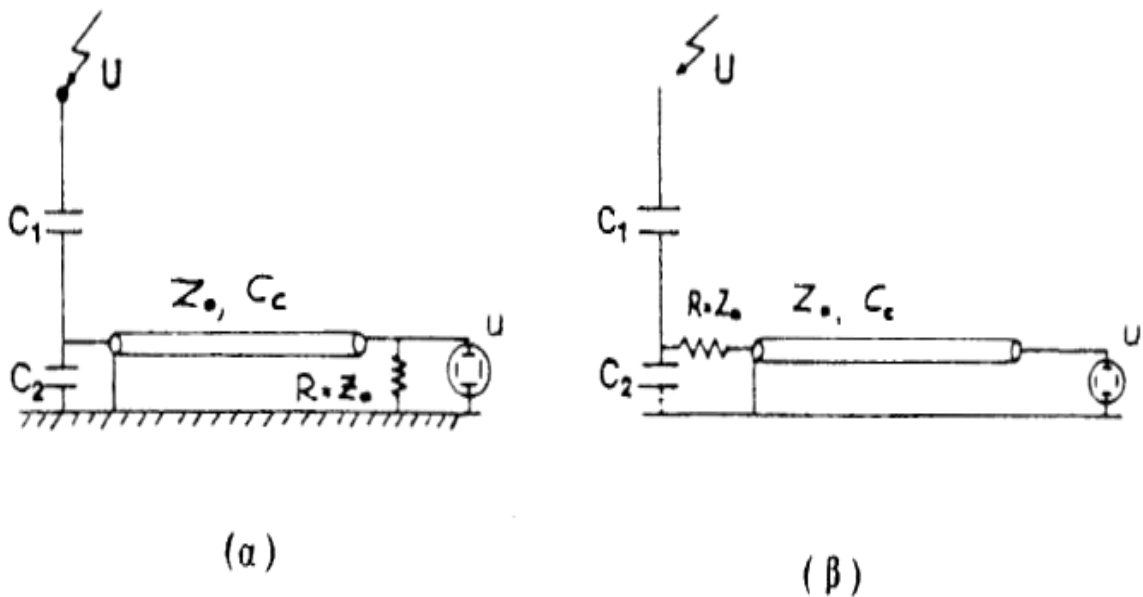
$$T_0 = \frac{dF(p)}{dp} = -\frac{1}{r} \quad (3.3.1-6)$$

δηλαδή ο βραχίονας χαμηλής τάσης θα παρουσιάζει μια πρόσθετη παραμόρφωση στο αρχικό σήμα που έχει ήδη παραμορφωθεί διανύοντας το βραχίονα υψηλής τάσης.

Μπορεί όμως να παρατηρηθεί ότι εξ αιτίας της αυτεπαγωγής του, ο βραχίονας χαμηλής τάσης εισάγει ένα αρνητικό χρόνο απόκρισης ενώ ο βραχίονας υψηλής τάσης εξαιτίας της κυριαρχούσας χωρητικότητάς του, εισάγει ένα θετικό χρόνο απόκρισης. Έτσι ο βραχίονας χαμηλής τάσης, διορθώνει μερικώς τη συμπεριφορά του βραχίονα υψηλής.

3.3.2 Ο ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ

Ο βραχίονας χαμηλής τάσης ενός καταμεριστή, συνδέεται κατά κανόνα με τον παλμογράφο με ένα συγκεντρικό καλώδιο. Επειδή η αντίδραση εισόδου του παλμογράφου είναι πολύ μεγάλη, σε σήματα υψηλής συχνότητας εμφανίζεται σαν ανοιχτό κύκλωμα. Για να αποφευχθεί λοιπόν ανάκλαση και διπλασιασμός της τάσης του μετρούμενου σήματος, πρέπει να γίνει προσαρμογή του άκρου του καλωδίου με μια αντίσταση, R , ίση με την κυματική του αντίσταση όπως δείχνεται στο σχήμα 3.3.2-1α.



Σχήμα 3.3.2-1 : Προσαρμογή καλωδίου συνδέσεων καταμεριστή-παλμογράφου με βραχίονα Χ.Τ. καταμεριστή

Το κύκλωμα όμως που σχηματίζεται από την αντίσταση προσαρμογής R και τον πυκνωτή C_1 παρουσιάζει μια σταθερά χρόνου $T = C_1 \cdot R$ που είναι γενικά πολύ μικρή. Σαν παράδειγμα, για $C_1 = 10nF$ και $Z_0 = 75\Omega$ θα είναι $T = 10 \cdot 10^{-9} \cdot 75 = 0,75\mu s$.

Αυτό σημαίνει πως ενώ σήματα μεγάλης συχνότητας θα διαβιβάζονται μάλλον πιστά στον παλμογράφο, σήματα μικρής συχνότητας όπως είναι η ουρά μιας κρουστικής τάσης που έχει διάρκεια πολλές δεκάδες μs δεν θα διαβιβάζονται. Έτσι η συνδεσμολογία του σχήματος 3.3.2-1α δεν μπορεί κατά κανόνα να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις με ένα χωρητικό καταμεριστή. Αντί αυτής χρησιμοποιείται η συνδεσμολογία του σχήματος 3.3.2-1β. Σε αυτήν η αντίσταση προσαρμογής τοποθετείται σε σειρά με τον κεντρικό αγωγό του καλωδίου προς το άκρο του καταμεριστή.

Η λειτουργία αυτής της συνδεσμολογίας είναι η ακόλουθη: το σήμα της τάσης που παράγεται στην έξοδο του βραχίονα χαμηλής τάσης του καταμεριστή εξ αιτίας των δύο ίσων αντιστάσεων R και Z_0 (αυτή της προσαρμογής και τη χαρακτηριστική αντίσταση του καλωδίου), μοιράζεται σε δύο ίσα μέρη και έτσι στην είσοδο του καλωδίου εμφανίζεται μόνο η μισή τάση. Το μειωμένο αυτό σήμα της τάσης οδεύει μέσα στο καλώδιο όταν όμως αυτό φτάσει προς τον παλμογράφο, στο άκρο του διπλασιάζεται (επειδή ο παλμογράφος παρουσιάζει πολύ μεγάλη αντίδραση) και έτσι επανακτά το αρχικό του μέγεθος. Ο παλμογράφος λοιπόν μετρά το σωστό εύρος του σήματος. Το διπλασιασμένο σήμα επιστρέφοντας στην αρχή του καλωδίου απορροφάται τελείως από την αντίσταση προσαρμογής R γιατί ο πυκνωτής C_1 για πολύ μεγάλες συχνότητες εμφανίζεται σχεδόν σα βραχυκύκλωμα.

Για υψηλές λοιπόν συχνότητες, η σχέση της υψηλής τάσης V_1 προς την τάση u που μετρείται από τον παλμογράφο θα είναι

$$\frac{u}{V_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \approx \frac{C_1}{C_2} \quad (3.3.2-1)$$

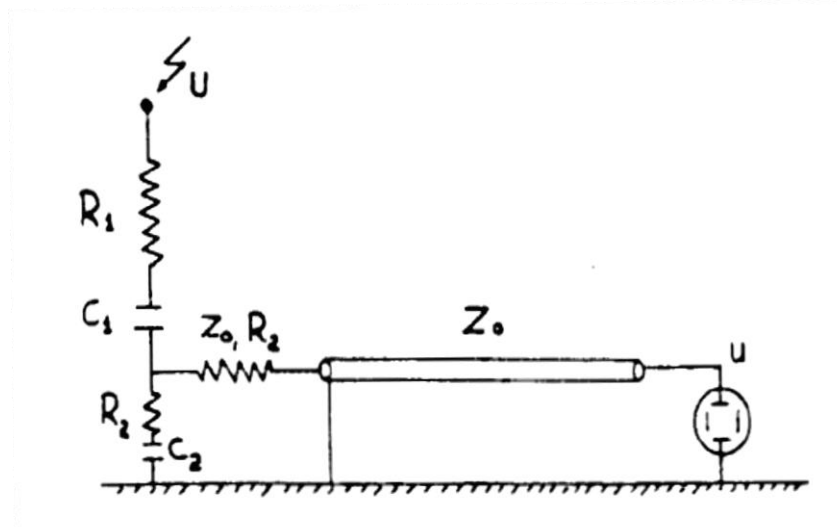
Για σχετικά μικρές όμως συχνότητες με περίοδο ίση με 2~3 φορές το χρόνο διαδρομής του καλωδίου, η χωρητικότητα C_C ανάμεσα στον αγωγό και το μανδύα του καλωδίου, έχει τον χρόνο να φορτιστεί και έτσι εμφανίζεται παράλληλα συνδεδεμένη με την χωρητικότητα C_2 . Η σχέση μεταφοράς γίνεται σε αυτή την περίπτωση

$$\frac{u}{V_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_C} \quad (3.3.2-2)$$

Επειδή για σχετικά μικρά μήκη καλωδίων (λίγα μέτρα) η C_C είναι μικρή σε σύγκριση με τη C_2 , η αλλοίωση αυτής της σχέσης μεταφοράς για τις μικρές συχνότητες είναι κατά κανόνα αμελητέα.

3.3.3 Ο ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΜΕΝΩΝ ΧΩΡΗΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ

Ο βραχίονας χαμηλής τάσης ενός αποσβεσμένου χωρητικού καταμεριστή περιέχει ένα πυκνωτή C_2 και μια αντίσταση R_2 σε σειρά. Κατά τον ίδιο τρόπο που σχηματίζεται και ο βραχίονας υψηλής τάσης με το καλώδιο μετρήσεως όπως και στους καθαρά χωρητικούς καταμεριστές (σχήμα 3.3.3-1), με μόνη διαφορά πως η αντίσταση προσαρμογής R πρέπει να μειωθεί κατά την αντίσταση R_2 του βραχίονα χαμηλής τάσης.



Σχήμα 3.3.3-1 : Προσαρμογή βραχίονα Χ.Τ. αποσβεσμένου χωρητικού καταμεριστή [2,3]

3.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ

3.4.1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ

3.4.1.1 ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΑΝΟΧΗ ΜΙΑΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Μια αντίσταση η οποία διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμική σύμφωνα με το νόμο του Joule:

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t \quad (\text{cal}) \quad (3.4.1.1-1)$$

όπου Q το ποσό της θερμότητας (cal) που θα παραχθεί σε χρόνο t (sec) από μία αντίσταση R (Ω) και ρεύμα I (A).

Για το συνεχές ρεύμα ισχύουν οι σχέσεις της ισχύος

$$P = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} = U \cdot I \quad (\text{W}) \quad (3.4.1.1-2)$$

όπου P η καταναλισκόμενη ισχύς (W) από την αντίσταση R (Ω), με τάση U (V) και ρεύμα I (A).

Άρα η (3.4.1.1-1) μπορεί να γίνει από την (3.4.1.1-2)

$$Q = 0,24 \cdot P \cdot t \quad (\text{cal}) \quad (3.4.1.1-3)$$

Ισχύει επίσης η σχέση

$$P = \frac{T_{max} - T_{amb}}{A} \quad (W) \quad (3.4.1.1-4)$$

όπου T_{max} (°C) η μέγιστη θερμοκρασία του θερμού σημείου (*hot spot*) στο κέντρο του σώματος της αντίστασης, T_{amb} (°C) η θερμοκρασία περιβάλλοντος και A (°C/W) ο συντελεστής αναλογίας στο θερμό σημείο.

Από τη σχέση (3.4.1.1-4) συμπεραίνεται ότι η καταναλισκόμενη ισχύς P εξαρτάται κυρίως από τη μέγιστη θερμοκρασία T_{max} , δηλαδή το υλικό της αντίστασης και από το συντελεστή αναλογίας A , δηλαδή τη γεωμετρία της αντίστασης και τη θερμική αγωγιμότητα της ή αντίστοιχα το υλικό του περιβλήματος. Καλό είναι στις εργαστηριακές εφαρμογές να εκλέγονται αντιστάσεις με διπλάσια ισχύ απ' αυτή που προκύπτει στους υπολογισμούς.

Είναι γνωστό ότι η σχέση

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (\Omega) \quad (3.4.1.1-5)$$

εκφράζει τη μεταβολή της αντίστασης R_0 (Ω) - αντίσταση στη θερμοκρασία αναφοράς 25°C - σε συνάρτηση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας ΔT °C και το θερμοκρασιακό συντελεστή α (ppm/°C).

3.4.1.2 ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΟΧΕΣ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ

Οι τιμές των αντιστάσεων είναι τυποποιημένες και δίνονται σε σειρές E όπως λέγονται, ανά δεκάδα. Για όλες τις σειρές ισχύει η σχέση:

$$R_n = 10^{\frac{n-1}{k}} \quad (3.4.1.2-1)$$

όπου R_n η τιμή της αντίστασης με $n = 1, 2, 3, \dots$, k ο αύξων αριθμός της αντίστασης και $k = 3, 6, 12, 24, 48, 96, 192$ το σύνολο των τιμών της αντίστασης ανά δεκάδα.

Η τυποποίηση σε σειρές ανά δεκάδα χαρακτηρίζονται ως $E3$, $E6$, $E12$, $E24$, $E48$, $E96$, $E192$ και λαμβάνεται υπόψη η ανοχή στην κάθε σειρά, έτσι ώστε να μην έχουμε αλληλοκάλυψη τιμών.

3.4.1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ

Τα χαρακτηριστικά των σταθερών αντιστάσεων είναι τα ακόλουθα:

1. *Ονομαστική τιμή αντίστασης* : η τιμή που αναγράφεται στο περίβλημα του αντιστάτη σε Ω .
2. *Ονομαστική ισχύς* : η μέγιστη θερμική ισχύς που μπορεί να αποδώσει ο αντιστάτης στο περιβάλλον χωρίς να καταστραφεί, δίνεται δε σε διάγραμμα από τον

κατασκευαστή σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Δίνεται σε Watt και καθορίζει γενικά τις διαστάσεις του αντιστάτη. Μερικές τιμές ισχύος είναι $\frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, \dots$ Watt.

3. *Ανοχή της αντίστασης* : η % μεταβολή της ονομαστικής τιμής της και δίνεται ως $\pm A\%$.
4. *Θερμοκρασιακός συντελεστής* : δηλώνει τη μεταβολή μιας αντίστασης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και συνήθως δίνεται σε $ppm/^{\circ}C$. Εκφράζει τη μεταβολή μιας αντίστασης 1MΩ ανά βαθμό Κελσίου. Τα μέταλλα και τα κράματα έχουν θετικό θερμοκρασιακό συντελεστή, ο άνθρακας και οι καθαροί ημιαγωγοί έχουν αρνητικό, ενώ υπάρχουν και κράματα που ο θερμοκρασιακός τους συντελεστής είναι μηδενικός.
5. *Μέγιστη τάση λειτουργίας* : αυτή που προκαλεί την απώλεια θερμότητας, όση είναι η ονομαστική τιμή της ισχύος που δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$U = \sqrt{P \cdot R} \quad (V_{DC} \cdot n \cdot V_{RMS}) \quad (3.4.1.3-1)$$
6. *Ολίσθηση $\Delta R/R$ (%)* : είναι η μόνιμη μεταβολή της αντίστασης που οφείλεται σε δομικές αλλαγές του υλικού. Η ολίσθηση μειώνεται εκθετικά με το χρόνο, που σημαίνει ότι μία αντίσταση όσο πιο παλαιά είναι, τόσο πιο σταθερή είναι. Γι' αυτό το λόγο σε κυκλώματα ακριβείας χρησιμοποιούνται εξαρτήματα με τεχνητή προπαλαιώση. Οι υψηλές θερμοκρασίες, η υγρασία, τα μεγάλα ρεύματα κτλ. αυξάνουν την ολίσθηση μιας αντίστασης.
7. *Περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας* : είναι η περιοχή μέσα στην οποία η αντίσταση λειτουργεί χωρίς προβλήματα. Ανάλογα με τον τύπο της αντίστασης οι περιοχές έχουν διαφορετικό εύρος.

3.4.1.4 ΚΩΔΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ

Στα περιβλήματα των αντιστάσεων αναγράφονται κωδικοποιημένα διάφορα στοιχεία όπως η τιμή τους, η ανοχή τους, ή ο θερμοκρασιακός συντελεστής τους. Στη συνέχεια θα αναφερθούν οι δύο κώδικες που βρίσκονται περισσότερο σε χρήση.

1. *Χρωματικός κώδικας (IEC 62)* : σύμφωνα μ' αυτόν μία αντίσταση μπορεί να φέρει 3, 4, 5 ή 6 δακτυλίους, ανάλογα με τη σειρά E στην οποία ανήκει.
 - Αν έχει τρεις δακτυλίους, τότε οι δύο πρώτοι είναι σημαντικοί αριθμοί και ο τρίτος ο πολλαπλασιαστής.
 - Αν έχει τέσσερις δακτυλίους, οι τρεις πρώτοι είναι ό,τι και οι προηγούμενοι και ο τέταρτος δηλώνει την ανοχή της αντίστασης.

- Αν έχει πέντε δακτυλίους, τότε οι τρεις πρώτοι είναι σημαντικοί αριθμοί, ο τέταρτος ο πολλαπλασιαστής και ο πέμπτος η ανοχή.
- Τέλος αν έχει έξι δακτυλίους, οι πέντε πρώτοι δηλώνουν ό,τι και οι προηγούμενοι και ο έκτος δακτύλιος δείχνει το θερμοκρασιακό συντελεστή¹.

Να σημειωθεί ότι αν ο συντελεστής αναφέρεται με δακτυλίδι χρώματος, τότε βρίσκεται πάντα δεξιά από το δακτυλίδι ανοχών, είναι πάντα πάνω στο καπάκι και είναι πλατύτερος.

- Οι αντιστάσεις με τρεις δακτυλίους θεωρείται ότι έχουν ανοχή $\pm 50\%$ ή $\pm 20\%$, συνεπώς ανήκουν στις σειρές E3 ή E6.
- Οι αντιστάσεις με τέσσερις δακτυλίους έχουν ανοχή $\pm 10\%$ ή $\pm 5\%$, άρα ανήκουν στις σειρές E12 ή E24 αντίστοιχα.
- Οι αντιστάσεις με πέντε δακτυλίους έχουν ανοχή $\pm 2\%$, $\pm 1\%$ ή $\pm 0,5\%$, θα ανήκουν δηλαδή στις σειρές E48, E96 ή E192 αντίστοιχα.
- Οι αντιστάσεις με έξι δακτυλίους έχουν ανοχή $\pm 1\%$ ή $\pm 0,5\%$, $\pm 0,25\%$, $\pm 0,1\%$, $\pm 0,05\%$, $\pm 0,02$, $\pm 0,01\%$, θα ανήκουν δηλαδή στις σειρές E96 ή E 192 αντίστοιχα.

2. *Κώδικας BS1852* (British Standards) : σύμφωνα μ' αυτόν, στο περίβλημα της αντίστασης η τιμή και η ανοχή αναγράφονται με σύμβολα.

- Αν υπάρχει το γράμμα R και ακολουθεί αριθμός, τότε η τιμή της αντίστασης είναι ο αριθμός σε εκατοστά του Ω, π.χ. R47=0,47Ω.
- Αν υπάρχει αριθμός που ακολουθείται από το γράμμα R, K, M, G και ως τρίτο στοιχείο μπορεί να υπάρχει ή όχι ένας ακόμη αριθμός, τότε τα γράμματα παίζουν το ρόλο της υποδιαστολής στον αριθμό σε Ω, KΩ, MΩ, GΩ αντίστοιχα, π.χ. 2R7=2,7Ω ή 27R=27Ω ή 47K=47KΩ ή 6G8=6,8GΩ.
- Στην περίπτωση που έχουμε τιμές μονάδας, δίνονται τα σύμβολα R0, K0, M0,G0 για 1Ω, 1KΩ, 1MΩ, 1GΩ αντίστοιχα.

Η ανοχή σ' αυτόν τον τρόπο συμβολισμού δίνεται με γράμματα που ακολουθούν την τιμή της αντίστασης και είναι F= $\pm 1\%$, G= $\pm 2\%$, J = $\pm 5\%$, K= $\pm 10\%$, M= $\pm 20\%$ ².

3.4.1.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ, ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ

Οι αντιστάσεις γενικά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Σταθερές
2. Μεταβλητές
3. Ρυθμιζόμενες

3.4.1.5.1 ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ

Οι αντιστάσεις μεγάλης ισχύος (4~1000)W, είναι συνήθως σύρματος και αναγράφουν την τιμή και την ανοχή τους πάνω στο σώμα τους, σύμφωνα με το 2ο τρόπο κωδικοποίησης. Στις συνήθεις αντιστάσεις ανήκουν αυτές που είναι ισχύος από 1/8W έως 4W και ακολουθούν στην κωδικοποίηση τους το χρωματικό κώδικα.

Οι σταθερές αντιστάσεις συνήθους μορφής κατασκευάζονται από διάφορα υλικά και κατατάσσονται σύμφωνα με αυτά, διότι έχουν διαφορετικές ιδιότητες και συνεπώς διαφορετική συμπεριφορά.

Οι αντιστάσεις αυτές είναι:

- α) *μίγματος άνθρακα (carbon composition)*
- β) *φιλμ άνθρακα (carbon film)*
- γ) *μεταλλικού φιλμ (metal film)*
- δ) *σύρματος (wirewound)* και
- ε) *κεραμομεταλλικού φιλμ (cermet film)*.

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι το χρώμα του σώματος της αντίστασης δηλώνει την κατηγορία στην οποία ανήκει. Αν το χρώμα του σώματος μιας συνήθους αντίστασης είναι:

- α) *Ανοικτό μπλε*, πρόκειται για αντιστάσεις υψηλής τιμής/υψηλής τάσης.
- β) *Γκρι*, για αντιστάσεις ασφαλείας.
- γ) *Πράσινο*, για αντιστάσεις ακριβείας ή πολύ μεγάλης ακριβείας.
- δ) *Καφέ ή πράσινο*, για αντιστάσεις σύρματος.
- ε) *Κόκκινο*, για αντιστάσεις μεταλλικού φιλμ ισχύος.
- στ) *Μαύρο*, για αντιστάσεις σύρματος ακριβείας (εδώ οι αντιστάσεις δεν ακολουθούν το χρωματικό κώδικα, αλλά το 2ο τρόπο κωδικοποίησης).
- ζ) *Καφέ ή ανοικτό πράσινο ή σπάνια κόκκινο-καφέ*, είναι standard.

3.4.1.5.1.1 ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ

Οι αντιστάσεις είναι γνωστό ότι χρησιμοποιούνται ή για τον περιορισμό του ρεύματος ή για την ανάπτυξη κάποιας τάσης στα άκρα τους. Στις διάφορες εφαρμογές όμως οι απαιτήσεις είναι διαφορετικές, γι' αυτό και οι τύποι των αντιστάσεων είναι πολλοί. Στον πίνακα 3.4.1.5.1.1-1 που ακολουθεί, δίνονται συνοπτικά οι κυριότερες χρήσεις των διαφόρων κατηγοριών αντιστάσεων.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	ΧΡΗΣΕΙΣ
Μίγματος άνθρακα	Είναι γενικών εφαρμογών και αντέχει σε μεγάλα παλμορεύματα. Ακατάλληλες για υψηλές συχνότητες, λόγω της μεταβολής της αντίστασης τους. Τείνουν να αντικατασταθούν από τις αντιστάσεις film άνθρακα.
Film άνθρακα	Είναι γενικής χρήσης και δεν αντέχει σε μεγάλα παλμορεύματα. Καλύτερη συμπεριφορά στις υψηλές συχνότητες από τις μίγματος άνθρακα. Έχουν χαμηλό κόστος και επιδόσεις.
Metal film	Γενικής χρήσης με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας και σταθερότητας, χαμηλό θερμοκρασιακό συντελεστή και μικρή τάση θορύβου. Χρησιμοποιείται σε καταναλωτικές συσκευές, computers, τηλεπικοινωνίες, μετρήσεις ακριβείας, αυτόματο έλεγχο κτλ. Επίσης έχει καλή συμπεριφορά στις υψηλές συχνότητες, γι' αυτό χρησιμοποιείται σε συντονισμένα κυκλώματα, φίλτρα κτλ.
Σύρματος	Γενικής χρήσης και όπου απαιτείται μεγάλη ή πολύ μεγάλη ισχύς. Επίσης για πολύ μικρές τιμές αντίστασης (της τάξης των 100στών του Ohm), με πολύ μικρή τάση θορύβου και μεγάλη τάση λειτουργίας. Χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα υψηλών απαιτήσεων ακριβείας, καθώς και σε ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος. Οι αντιστάσεις ακριβείας σύρματος είναι σχετικά ογκώδεις και υψηλού κόστους.
Κεραμομεταλλικού film (cermet)	Χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα με απαιτήσεις υψηλής αντίστασης και σταθερότητας, όπως εφαρμογές με απαιτήσεις υψηλής σύνθετης αντίστασης εισόδου, κυκλώματα χρονισμού, ταλαντωτές κρυστάλλου κτλ.
Ειδικού τύπου	Οι αντιστάσεις ασφαλείας είναι έτσι κατασκευασμένες, ώστε να προστατεύουν το κύκλωμα που εργάζονται από υπερφορτίσεις. Ο τύπος NFR, για παράδειγμα, ανοιχτοκυκλώνεται μετά 30 sec υπερφόρτισης για αντιστάσεις 4W και μετά 10 sec για αντιστάσεις 6W. Χρησιμοποιούνται συνήθως στα τροφοδοτικά συσκευών audio, video κ.ά.

Πίνακας 3.4.1.5.1.1-1 : Οι κυριότερες χρήσεις των διαφόρων κατηγοριών αντιστάσεων

3.4.1.5.2 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ

Μεταβλητές αντιστάσεις είναι αυτές στις οποίες μπορούμε να αλλάξουμε την τιμή τους ανάλογα με τις απαιτήσεις ενός κυκλώματος χωρίς να διακοπούν ούτε στιγμή. Οι μεταβλητές αντιστάσεις ανάλογα με τη χρήση και την κατασκευή τους, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- α) Ροοστάτες
- β) Ποτενσιόμετρα ελέγχου και
- γ) Προρυθμιζόμενα ποτενσιόμετρα (*trimmers*)

Οι ροοστάτες είναι συνήθως αντιστάσεις σύρματος μεγάλης ισχύος με δύο ή τρεις ακροδέκτες. Χρησιμοποιούνται όμως οι δύο ακροδέκτες, δηλαδή τοποθετούνται σε σειρά με το φορτίο και είναι ρυθμιστές ρεύματος. Υπάρχουν σε τιμές 0.5Ω έως 100ΚΩ και σε ισχείς από 1/4W έως αρκετά ΚW. Οι ανοχές τους είναι ±5%, ±10% ή ±20%.

Τα ποτενσιόμετρα χρησιμοποιούνται ως διαιρέτες τάσης, έχουν τρεις ακροδέκτες και συνδέονται παράλληλα με το φορτίο. Οι ενδιάμεσες θέσεις της μεσαίας λήψης δίνουν διάφορα ποσοστά της τάσης εισόδου επιτυγχάνοντας έτσι ρύθμιση της τάσης εξόδου, η οποία εφαρμόζεται στο φορτίο. Το ποτενσιόμετρο μπορεί να λειτουργήσει και ως ροοστάτης.

3.4.1.5.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ

Τα βασικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών αντιστάσεων είναι τα ακόλουθα:

1. *Ονομαστική αντίσταση* R_{nom} : η αντίσταση μεταξύ των άκρων a και c , όταν η μεσαία λήψη b είναι στο ένα τέρμα της.
2. *Ολική αντίσταση* R_{tot} ή R_{ac} : η αντίσταση μεταξύ των άκρων a και c .
3. *Ονομαστική τιμή του ποτενσιόμετρου* R_0 : η τιμή σε Ω που αναγράφεται στο περίβλημα του σε κάποιο κώδικα.
4. *Μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς* P_{max} : η ισχύς που καταναλώνεται σε θερμότητα και μεταφέρεται στο περιβάλλον. Όταν το ποτενσιόμετρο χρησιμοποιείται ως ροοστάτης, το ρεύμα δεν διαρρέει όλη την αντίσταση, αλλά μέρος αυτής.
5. *Μέγιστη τάση* V_{max} : είναι αυτή που μπορεί να εφαρμοσθεί όταν έχουμε το μέγιστο της ισχύος για την ονομαστική αντίσταση του ποτενσιόμετρου και δίνεται από τη σχέση

$$U = \sqrt{P \cdot R} \quad (\text{V}) \quad (3.4.1.5.2.1-1)$$
6. *Μέγιστο ρεύμα* I_{max} : το ρεύμα που μπορεί να περάσει μέσα από αυτό και δίνεται από τη σχέση

$$I_{max} = \sqrt{\frac{P_{max}}{R}} \quad (\text{A}) \quad (3.4.1.5.2.1-2)$$

και

7. *Μέγιστη εξασθένιση* : αυτή που δίνεται από τη σχέση

$$A_{max} = 20 \log \frac{U_{ab}}{U_{ac}} \quad (\text{db}) \quad (3.4.1.5.2.1-3)$$

όταν το ποτενσιόμετρο χρησιμοποιείται ως εξασθενητής.

3.4.1.5.2.2 ΚΩΔΙΚΕΣ ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ

Συνήθως στα ποτενσιόμετρα αναγράφεται η τιμή και η κατηγορία τους, δηλαδή ο νόμος τον οποίο ακολουθεί η αντίσταση σε συνάρτηση με τη γωνία περιστροφής του άξονα τους. Επίσης μπορεί να αναγράφεται και η ανοχή τους.

Η τιμή τους αναγράφεται με δύο τρόπους, ανάλογα με τον τύπο του ποτενσιόμετρου:

- α) ακολουθώντας το δεύτερο τρόπο κωδικοποίησης των αντιστάσεων και
- β) με αναγραφή τριών αριθμών, των οποίων οι δύο πρώτοι είναι σημαντικοί και ο τρίτος ο πολλαπλασιαστής.

Η κατηγορία τους δίνεται με έναν από τους κώδικες που φαίνονται στον πίνακα 3.4.1.5.2.2-1.

a/a	Κατηγορία	Κώδικες			
		Ευρωπαϊκός	Ιαπωνικός	Γερμανικός	Περιγραφικός
1	Γραμμικό	A	B	1	LIN
2	Λογαριθμικό	B	D (A , K)	4	LOG
3	Αντιλογαριθμικό	C	RD (E , K)	5	ALOG
4	Γραμμικό, ισοστάθμισης με διαβάθμιση (μόνο για διπλά)	F	M , N	11	---
5	Λογαριθμικό με διαβάθμιση	H	---	41	---

Πίνακας 3.4.1.5.2.2-1 : Κατηγορίες και κώδικες ποτενσιομέτρων

Η ανοχή τους μπορεί να αναγράφεται σύμφωνα με το δεύτερο κώδικα των αντιστάσεων. Στα μικρά trimmers, σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο χρωματικός κώδικας με γραμμές ή στιγμές (οι δύο πρώτες είναι σημαντικοί αριθμοί και η τρίτη ο πολλαπλασιαστής).

3.4.1.5.2.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ, ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ

Τα ποτενσιόμετρα χωρίζονται σε κατηγορίες, ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους, το νόμο μεταβολής της αντίστασης τους, τον αριθμό των στροφών του άξονα τους (εφόσον είναι περιστροφικά), τον τρόπο κατασκευής κτλ.

3.4.1.5.3 ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ

Ρυθμιζόμενες αντιστάσεις είναι αυτές των οποίων η τιμή μεταβάλλεται σύμφωνα με κάποιο φυσικό μέγεθος, θερμοκρασία, τάση, κτλ. είναι μη γραμμικές, δηλαδή δεν ακολουθούν το νόμο του Ohm αλλά κάποια άλλη σχέση, κατά περίπτωση. Αυτές είναι τα θερμίστορες (NTC και PTC), το βαρίστορ (VDR) και η φωτοαντίσταση (LDR).

3.4.1.5.3.1 ΘΕΡΜΙΣΤΟΡΣ (THERMISTORS)

Τα θερμίστορες είναι δύο ειδών: το NTC (Negative Temperature Coefficient), δηλαδή αντιστάσεις με αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας και το PTC (Positive Temperature Coefficient), δηλαδή αντιστάσεις με θετικό συντελεστή θερμοκρασίας. Στον πίνακα 3.4.1.5.3.1-1 παρουσιάζονται οι εφαρμογές των thermistors.

PTC		NTC	
Απομαγνήτισης	Έγχρωμη TV Μόνιτορ	Αισθητήρας θερμοκρασίας	Οικιακές εφαρμογές Συστήματα αυτοκινήτου Βιομηχανικά ηλεκτρονικά Ηλεκτρονικά ιατρικών μηχανημάτων
Αισθητήρας θερμοκρασίας - Προστασίας από θερμοκρασία	Βιομηχανικά ηλεκτρονικά Τροφοδοτικά Ηλεκτρονική επεξεργασία δεδομένων	Περιοριστής υπερέυματος	Τροφοδοτικά Φωτιστικά Ηλεκτρονική επεξεργασία δεδομένων
Προστασίας από υπερφόρτωση	Τηλεπικοινωνίες Συστήματα αυτοκινήτου Βιομηχανικά ηλεκτρονικά Εμπορικά ηλεκτρονικά Ηλεκτρονική επεξεργασία δεδομένων	Αντισταθμιστής θερμοκρασίας	Εμπορικά ηλεκτρονικά Βιομηχανικά ηλεκτρονικά Ηλεκτρονική επεξεργασία δεδομένων

Πίνακας 3.4.1.5.3.1-1 : Οι εφαρμογές των θερμίστορες [4]

3.4.1.6 ΕΠΙΛΕΓΟΝΤΑΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΈΝΑ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ Υ.Τ.

Ο λόγος των ωμικών πρότυπων καταμεριστών οι οποίοι χρησιμοποιούνται για ακριβείς μετρήσεις τάσεων Σ.Ρ., θα πρέπει να είναι επακριβώς γνωστός και κυρίως ανεξάρτητος της τάσης. Μια αλλαγή στην ενεργό αντίσταση με την τάση, μπορεί να οφείλεται σε έναν ή σε συνδυασμό κάποιων από τους ακόλουθους παράγοντες. Ένας από αυτούς είναι η θέρμανση του σύρματος της αντίστασης λόγω των απωλειών ισχύος, ο δεύτερος είναι οι διαρροές ρεύματος εντός της μονάδας και ο τρίτος είναι οι εκκενώσεις Corona οι οποίες μπορεί να εμφανιστούν σε σημεία υψηλών ανακλάσεων κατά μήκος των αντιστάσεων. Η επιρροή της θερμοκρασίας μπορεί να είναι ιδιαίτερα ενοχλητική, εκτός και αν ο ολικός θερμοκρασιακός συντελεστής είναι πολύ μικρής τιμής³. Στην περίπτωση αυτή, η επιλογή των αντιστάσεων για έναν καταμεριστή Υ.Τ. έχει έναν πολύ σημαντικό ρόλο. Έτσι ο θερμοκρασιακός συντελεστής θα πρέπει να μειωθεί σε μια αμελητέα ελάχιστη τιμή, μέσω της επιλογής ζευγών αντιστάσεων συνδεδεμένων σε σειρά εκ των οποίων η μία αντίσταση θα έχει θετικό και η άλλη αρνητικό θερμοκρασιακό συντελεστή.

Ένας καταμεριστής Υ.Τ. Σ.Ρ. αποτελείται από αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά. Οι αντιστάσεις αυτές επιλέγονται για χαμηλή θερμοκρασία και εξάρτηση από την τάση και συνήθως παλαιώνονται με επιβολή θερμότητας προκειμένου να εξασφαλιστεί η σταθερότητα κατά τη λειτουργία. Οι θερμοκρασιακοί συντελεστές υπολογίζονται για θερμοκρασίες 23~33°C οι οποίες συνιστούν το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας των αντιστάσεων. Η σχέση μέσω της οποίας πραγματοποιείται ο υπολογισμός τους είναι

$$a = \frac{1}{T_{33} - T_{23}} \cdot \left(1 - \frac{R_{33}}{R_{23}} \right) \quad (3.4.1.6-1)$$

Ένας καταμεριστής Υ.Τ. Σ.Ρ. κατασκευάζεται για υψηλής ακρίβειας μετρήσεις Υ.Τ. Σ.Ρ.. Εφόσον η επίδραση της θερμοκρασίας είναι η καθοριστικότερη παράμετρος για την επίτευξη της μετρητικής ακρίβειας ενός τέτοιου καταμεριστή, θα πρέπει ο θερμοκρασιακός συντελεστής/ές των μεμονωμένων αντιστάσεων ή των συνδεδεμένων σε σειρά αντιστάσεων να προσεγγίζει το μηδέν⁴. Συνεπώς οι αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται στους καταμεριστές πρέπει να συντονίζονται, λαμβάνοντας υπόψη το χαμηλό θερμοκρασιακό συντελεστή. Επίσης προκειμένου να επιτευχθεί σταθερός λόγος καταμερισμού, οι αντιστάσεις που θα χρησιμοποιηθούν στο βραχίονα Χ.Τ. θα πρέπει να επιλεγούν λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό θερμοκρασιακό συντελεστή του καταμεριστή.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, θα λέγαμε ότι οι κύριες δυσκολίες που συναντώνται στους ωμικούς καταμεριστές Υ.Τ σχετίζονται με τη σταθερότητα των αντιστάσεων του καταμεριστή και συνεπώς η επιλογή τους θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή. [5]

3.4.2. ΠΥΚΝΩΤΕΣ

3.4.2.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ

Πυκνωτής είναι εκείνο το παθητικό στοιχείο που δημιουργείται μεταξύ δύο αγωγών, όταν αυτοί βρίσκονται υπό τάση και ανάμεσα τους υπάρχει κάποιο διηλεκτρικό υλικό. Οι αγωγοί είναι οι οπλισμοί του πυκνωτή, ενώ το διηλεκτρικό αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι πυκνωτών, σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας τους, το υλικό κατασκευής και την πόλωση τους. Μια γενική ταξινόμησή τους είναι η εξής :

1. Σταθεροί πυκνωτές
2. Μεταβλητοί πυκνωτές

3.4.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΥΚΝΩΤΩΝ

3.4.2.2.1 ΣΤΑΘΕΡΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ

Οι σταθεροί πυκνωτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

1. στους *διηλεκτρικούς* πυκνωτές και
2. στους *ηλεκτρολυτικούς* πυκνωτές

Τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών κατηγοριών αναλύονται στις ακόλουθες υποενότητες⁵.

3.4.2.2.1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ

1. *Ονομαστική χωρητικότητα (Rated capacitance) C* : η θεωρητική χωρητικότητα που είναι τυπωμένη στο περίβλημα του πυκνωτή και αναφέρεται σε δοσμένη θερμοκρασία και συχνότητα.
2. *Ανοχή χωρητικότητας* : η εκατοστιαία θετική ή αρνητική απόκλιση της πραγματικής από την ονομαστική χωρητικότητα και δίνεται σε $\pm\%$.
3. *Ονομαστική τάση DC, U_{DC}* : η μέγιστη DC τάση που μπορεί να εφαρμοσθεί σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας στους 40°C.
4. *Τάση κατηγορίας (Category Voltage) U_C* : η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση που μπορεί να εφαρμοσθεί σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας και για θερμοκρασίες πάνω από 40°C, είναι δε μικρότερη της U_{DC} . Για θερμοκρασίες 40°C ή μικρότερες, η U_{DC} ισούται με την U_C . Η τάση κατηγορίας δηλώνει τη μέγιστη τάση AC ή DC ή το άθροισμα της AC και DC συνιστώσας που πρέπει να είναι ίσο ή μικρότερο της U_C και για συχνότητα 50Hz.
5. *Ονομαστική τάση AC (Rated AC voltage) U_{DC}* : η μέγιστη επιτρεπόμενη ενεργός τιμή τάσης AC που μπορεί να εφαρμοσθεί σε ένα πυκνωτή για συνεχή λειτουργία και η οποία ελαττώνεται με τη συχνότητα.

6. *Μεταβολή της χωρητικότητας με τη θερμοκρασία $\Delta C/C\%$* : η εκατοστιαία μεταβολή της ονομαστικής χωρητικότητας για μεταβολή της θερμοκρασίας κατά ΔT . Είναι συνήθως αρνητικός αριθμός, δηλαδή αυξανόμενης της θερμοκρασίας ελαττώνεται η χωρητικότητα και μετράται στο 1 KHz. Δίνεται από τη σχέση

$$\frac{\Delta C}{C} \% = \frac{\Delta T \cdot ppm/^{\circ}C}{10^4} \quad (3.4.2.2.1.1-1)$$

όπου ΔT η μεταβολή της θερμοκρασίας σε $^{\circ}C$.

7. *Συντελεστής απωλειών $\tan\delta$* : ισούται με

$$\tan\delta = \omega \cdot ESR \cdot C \quad (3.4.2.2.1.1-2)$$

Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής, τόσο καλύτερης ποιότητας είναι ο πυκνωτής. Η ακρίβεια μέτρησης πρέπει να είναι της τάξης του $\pm 10^4$. Ο συντελεστής αυτός αυξάνεται αυξανόμενης της συχνότητας. Το *ESR* δηλώνει την ισοδύναμη αντίσταση σειράς του πυκνωτή.

8. *Περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας* : το εύρος μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας που επιτρέπεται να λειτουργήσει ο πυκνωτής. Αυτή δίνεται από τους κατασκευαστές με την κλιματική κατηγορία π.χ. 55/125/56 που σημαίνει περιοχή θερμοκρασιών (-55 έως +125) $^{\circ}C$ και για χρόνο παραμονής σε θερμοκρασία και υγρασία για 56 ημέρες.

3.4.2.2.1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ

Παρακάτω αναλύονται τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών:

1. *Ονομαστική χωρητικότητα C* : η θεωρητική χωρητικότητα που είναι τυπωμένη στο περίβλημα του πυκνωτή και αναφέρεται σε δοσμένη θερμοκρασία και συχνότητα. Επειδή όμως το ισοδύναμο κύκλωμα αυτών των πυκνωτών είναι διαφορετικό για το A.C. και το D.C., συνεπάγεται ότι και η σύνθετη αντίσταση τους είναι διαφορετική και κατ' επέκταση και η χωρητικότητά τους που μετράται στο A.C. ή στο D.C. Η χωρητικότητα αναγράφεται στο περίβλημα αυτών των πυκνωτών, - μετρούμενη στο D.C. - και είναι 1,1 έως 1,6 φορές μεγαλύτερη από αυτή στο A.C. Εξαρτάται δε από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα.
2. *Ανοχή χωρητικότητας* : η εκατοστιαία θετική ή αρνητική απόκλιση της πραγματικής από την ονομαστική χωρητικότητα και δίνεται σε $\pm\%$. Παίρνει τιμές $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, (-10 έως +30)% και (10 έως +50)%.
3. *Ονομαστική τάση U_{DC}* : η μέγιστη DC τάση που μπορεί να εφαρμοσθεί σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας στους 40 $^{\circ}C$. Συνήθεις ονομαστικές τιμές

είναι τα : 6,3-10-16-25-35-40-50-63-100-125-160-200-250-350-385-400... Volt.

4. *Τάση κατηγορίας U_C* : η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση που μπορεί να εφαρμοσθεί σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας και για θερμοκρασίες πάνω από 40°C, είναι δε μικρότερη της U_{DC} . Για θερμοκρασίες 40°C ή μικρότερες, η U_{DC} ισούται με την U_C . Η τάση κατηγορίας δηλώνει τη μέγιστη τάση AC ή DC ή το άθροισμα της AC και DC συνιστώσας που πρέπει να είναι ίσο ή μικρότερο της U_C και για συχνότητα 50Hz.
5. *Ανάστροφη τάση U_{rev}* : η μέγιστη ανάστροφη τάση που μπορεί να εφαρμοσθεί στον πυκνωτή.
6. *Συντελεστής απωλειών $\tan\delta$* : ισούται με

$$\tan\delta = \omega \cdot ESR \cdot C \quad (3.4.2.2.1.2-1)$$
 Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής, τόσο καλύτερης ποιότητας είναι ο πυκνωτής. Η ακρίβεια μέτρησης πρέπει να είναι της τάξης του $\pm 10^4$. Ο συντελεστής αυτός αυξάνεται αυξανόμενης της συχνότητας. Το *ESR* δηλώνει την ισοδύναμη αντίσταση σειράς του πυκνωτή. Συμπίπτει με το συντελεστή ισχύος για τιμές μέχρι 0,15. Πολλές φορές εκφράζεται και σε ποσοστό επί τοις εκατό.
7. *Περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας* : το εύρος μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας που επιτρέπεται να λειτουργήσει ο πυκνωτής. Αυτή δίνεται από τους κατασκευαστές με την κλιματική κατηγορία π.χ. 55/125/56 που σημαίνει περιοχή θερμοκρασιών (-55 έως +125) °C και για χρόνο παραμονής σε θερμοκρασία και υγρασία για 56 ημέρες.
8. *Ρεύμα διαρροής (Leakage current) I_L* : Το ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή όταν στα άκρα του εφαρμοσθεί DC τάση. Αυτό εξαρτάται από το χρόνο, τη θερμοκρασία και την τάση. Συγκεκριμένα ελαττώνεται γρήγορα με την πάροδο του χρόνου και αυξάνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία και την τάση.

3.4.2.2.2 ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ

Είναι αυτοί οι πυκνωτές των οποίων η χωρητικότητα μεταβάλλεται (χειροκίνητα ή με κινητήρα) και τίθενται σε μία επιθυμητή τιμή. Γνωρίζουμε ότι :

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (F) \quad (3.4.2.2.2-1)$$

όπου

ε_0 = διηλεκτρική σταθερά του κενού

ε_r = σχετική διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού

S = επιφάνεια πυκνωτή και

d = απόσταση μεταξύ των οπλισμών του.

Είναι φανερό ότι μεταβολή της χωρητικότητας μπορεί να επιτευχθεί, είτε χρησιμοποιώντας διαφορετικό ϵ_r δηλαδή υλικό, είτε μεταβάλλοντας την επιφάνεια του πυκνωτή, είτε την απόσταση μεταξύ των οπλισμών.

Αν επιλέξουμε διαφορετικό διηλεκτρικό υλικό, τότε έχουμε μεταβλητούς πυκνωτές πλαστικούς, κεραμικούς, αέρος κτλ. Αν μεταβάλλουμε την επιφάνεια των οπλισμών έχουμε τους μεταβλητούς, trimmers ή padders, περιστροφικούς ή σωληνωτούς. Τέλος αν μεταβάλλουμε την απόσταση μεταξύ των οπλισμών, μεταβάλλοντας τη συμπίεση μεταξύ των επάλληλων φύλλων μονωτικού και οπλισμών έχουμε τους μεταβλητούς κεραμικού, πλαστικού ή μίκας τύπου δίσκου.

Μεταβλητοί ονομάζονται συνήθως οι πυκνωτές ελέγχου που βρίσκονται σε συντονισμένα κυκλώματα, όπως π.χ. στα ραδιόφωνα για την ανεύρεση σταθμών. Οι προρυθμιζόμενοι είναι δύο τύπων :

- α) τα trimmers που μπαίνουν παράλληλα στο κύκλωμα συντονισμού, έχουν υψηλό συντελεστή ποιότητας Q και κατασκευαστικά οι δίσκοι είναι στερεωμένοι μεταξύ τους και
- β) τα padders που μπαίνουν σε σειρά στο κύκλωμα συντονισμού και κατασκευαστικά οι δίσκοι είναι ελεύθεροι μεταξύ τους.

Όλοι οι τύποι των μεταβλητών πυκνωτών υπάρχουν για οριζόντια ή κατακόρυφη τοποθέτηση στο σασί ή την πλακέτα. Επίσης άλλα είναι μισής στροφής δηλ. 180° , άλλα μιας στροφής ή 360° και άλλα πολύστροφα. Τέλος, υπάρχουν μεταβλητοί ανοικτού ή κλειστού τύπου.

Ο αριθμός των μεταλλικών δίσκων δεν είναι απαραίτητα ακέραιος και στους πυκνωτές μικρής χωρητικότητας έχουμε δίσκους $1 \frac{1}{8}$, $1 \frac{1}{4}$, $1 \frac{3}{4}$ κτλ. Η μέγιστη χωρητικότητα C_{max} ενός μεταβλητού πυκνωτή παρουσιάζεται όταν λάβουμε το 100% των περιστροφών του, ενώ η ελάχιστη C_{min} όταν αυτός έχει τεθεί στο ελάχιστο των περιστροφών.

Οι μεταβλητοί πυκνωτές ως προς τη μεταβολή της χωρητικότητας τους διακρίνονται σε

- α) γραμμικούς και
- β) λογαριθμικούς.

Οι γραμμικοί χωρίζονται σε:

- α) γραμμικούς, ως προς τη χωρητικότητα (straight line capacity)
- β) γραμμικούς, ως προς το μήκος κύματος (straight line wave length ή square law) και
- γ) γραμμικούς ως προς τη συχνότητα (straight line frequency).

Τέλος υπάρχουν και οι ενδιάμεσης μορφής, οι καλούμενοι midline. [4]

3.4.3 ΠΥΚΝΩΤΕΣ Υ.Τ. ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Συγκριτικά με τους πυκνωτές Υ.Τ. που χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς και διανομής Υ.Τ. για αντιστάθμιση φορτίων ή σειράς, οι απαιτήσεις για *πυκνωτές μετρήσεων* είναι διαφορετικές. Αρχικά οι τιμές των πυκνωτών είναι σχετικά χαμηλές και κυμαίνονται μεταξύ μερικών δεκάδων και εκατοντάδων pF μόνο. Αυτές οι μικρές τιμές είναι αρκετές για να παρέχουν την ενέργεια ή την ισχύ που απαιτείται για τη μέτρηση και επίσης για να παρέχουν χαμηλό φορτίο για την πηγή τάσης. Η δεύτερη απαίτηση σχετίζεται με τη σταθερότητα των τιμών C όσον αφορά στις ατμοσφαιρικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία), στα εξωτερικά πεδία και στο λόγο της τάσης. Εδώ λαμβάνονται υπόψη θέματα όπως μερικές εκκενώσεις ή μη γραμμικότητα.

Ένας πυκνωτής Υ.Τ. μπορεί να αποτελείται μόνο από μία μονάδα χωρητικότητας, η οποία ορίζεται βασικά ως μια διάταξη *δύο ηλεκτροδίων*, ή από μια αλυσίδα μονάδων χωρητικότητας προορισμένων για σχετικά χαμηλές τάσεις (στο εύρος των KV) και ηλεκτρικά συνδεδεμένων μεταξύ τους εν σειρά. Η τεχνολογία όπως επίσης και η ηλεκτρική συμπεριφορά είναι σχετικά διαφορετικές για τις δύο αυτές περιπτώσεις.

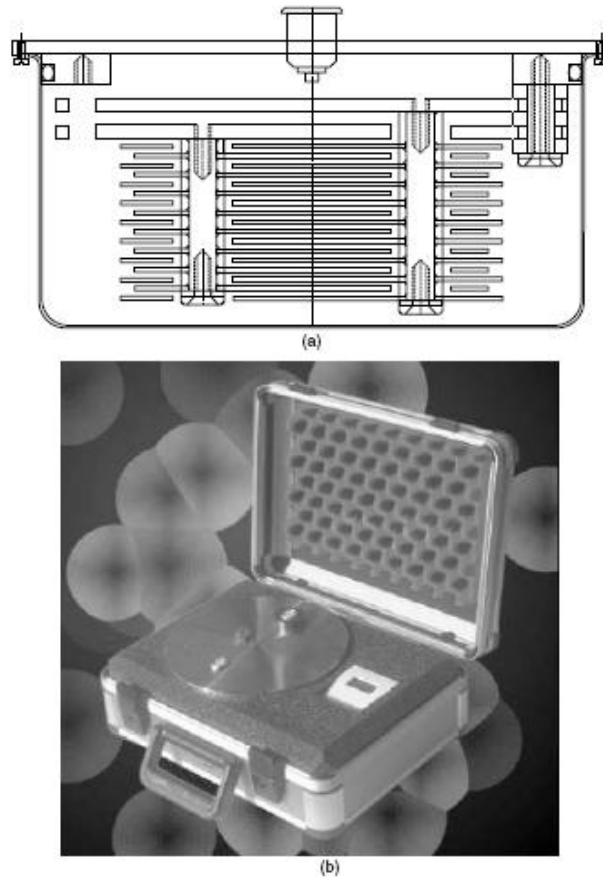
3.4.3.1 ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΕΣ ΧΩΡΗΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ

Ακραιώς υψηλά κενά μπορούν να παρέχουν το ιδανικό διηλεκτρικό μεταξύ των μεταλλικών πλακών σχηματίζοντας μια διάταξη με γνωστή και σταθερή πεδιακή κατανομή. Το ακραιώς υψηλό κενό έχει εξαιρετική ηλεκτρική αντοχή παρόλο που αυτή περιορίζεται από τις πολύ γνωστές επιδράσεις των ηλεκτροδίων. Οι δυσκολίες και τα σχετικά κόστη ωστόσο για την τοποθέτηση τέτοιων ηλεκτροδίων εντός μεγάλων δοχείων ή δεξαμενών ώστε να παρέχουν εξαιρετικά υψηλές συνθήκες κενού χωρίς να απαιτείται συντήρηση είναι οι λόγοι για τους οποίους το κενό δεν χρησιμοποιείται για πολύ υψηλές τάσεις.

Σύμφωνα με το νόμο του Paschen, η υψηλή ηλεκτρική αντοχή μπορεί επίσης να επιτευχθεί με αέρια υπό υψηλή πίεση. Η ατμοσφαιρική πίεση μπορεί να θεωρηθεί ως το κατώτερο όριο μιας υψηλής πίεσης και ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο τύπο αερίου. Το ανώτερο όριο ρυθμίζεται πάλι μέσω των ηλεκτροδίων, όπου θέτουν ένα οικονομικό όριο από τη σχετική διηλεκτρική αντοχή του αερίου και το αυξανόμενο κόστος των δοχείων πίεσης. Τα αέρια είναι διηλεκτρικά που παρέχουν μια πολύ χαμηλή σχετική διηλεκτρική σταθερά η οποία δεν επηρεάζεται ακόμα και σε πολύ υψηλές συχνότητες. Συνεπώς ένα αέριο διηλεκτρικό είναι επαρκές για την κατασκευή των καταμεριστών Υ.Τ.

Έτσι το πρόβλημα μειώνεται στο να βρεθούν κατάλληλες διατάξεις ηλεκτροδίων που διαμορφώνουν τη χωρητικότητα. Η βέλτιστη πεδιακή κατανομή θα επιτυγχάνονταν εάν το κεντρικό κομμάτι μιας τέτοιας διάταξης χρησιμοποιούνταν μόνο για τη διαμόρφωση

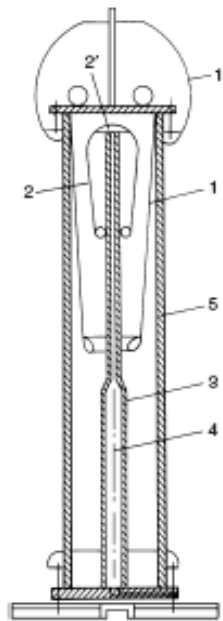
της ενεργού χωρητικότητας. Αυτό είναι εύκολο εφικτό μέσω της υποβίβασης του ηλεκτροδίου χαμηλού δυναμικού σε ένα δαχτυλίδι επιτήρησης και σε μετρητικό τμήμα. Το μειονέκτημα της εν λόγω λύσης είναι ωστόσο η πολύ μικρή τιμή της χωρητικότητας για τα διάκενα που είναι απαραίτητα για τις υψηλές τάσεις. Είναι επίσης δύσκολη η επακριβής ρύθμιση της απόστασης του κενού, εάν ληφθούν υπόψη οι θερμοκρασιακές διαφορές και οι συνεπακόλουθες αυτών επιδράσεις στα υλικά. Τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα μπορούν να αποφευχθούν εάν χρησιμοποιηθούν διατάξεις πολλαπλών στρώσεων όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.3.1-1a.



Σχήμα 3.4.3.1-1 : Τομή (a) και τυπική εικόνα (b) ενός «πρότυπου πυκνωτή» για μια τάση 2KV (r.m.s.)

Ένας μεγαλύτερος αριθμός κυκλικών μεταλλικών φύλλων μονωμένων μεταξύ τους μέσω ξηρού και πολύ καθαρού αέρα ή SF₆, καθιστούν δυνατή την επίτευξη χωρητικών τιμών έως και μερικά nF για τάσεις έως και μερικά KV. Ένα πολύ προσεκτικό επιφανειακό φινίρισμα των μεταλλικών φύλλων είναι απαραίτητο. Η διάταξη στρώσεων τοποθετείται σε ένα γειωμένο μεταλλικό δοχείο. Πολύ χαμηλοί θερμοκρασιακοί συντελεστές λίγων ppm/°K μπορούν να επιτευχθούν εάν γίνει η κατάλληλη επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή. Τέτοιες μονάδες πυκνωτών χρησιμοποιούνται ως *χωρητικά πρότυπα* (etalons) καθώς οι απώλειες τους είναι εξαιρετικά χαμηλές.

Η ομοαξονική κυλινδρική διαμόρφωση των ηλεκτροδίων συμβάλλει ουσιαστικά στην επίτευξη μιας επαρκώς καλής πεδιακής κατανομής, εάν η διαφορά μεταξύ των δύο ακτινών των ηλεκτροδίων δεν είναι πολύ μεγάλη. Στη μελέτη του δισδιάστατου ομοαξονικού πεδίου φαίνεται ότι οι ακτίνες μπορούν να βελτιστοποιηθούν προκειμένου να κρατηθεί η διάμετρος του εξωτερικού του ηλεκτροδίου στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα για μια δεδομένη τάση και μια περιορισμένη πεδιακή αντοχή στο εσωτερικό του ηλεκτροδίου. Συνεπώς, οι τιμές των ακτινών των διαστάσεων δεν διαμορφώνονται σε πολύ μεγάλα επίπεδα εάν το σύστημα είναι συμπιεσμένο.



Σχήμα 3.4.3.1-2 : Τομή ενός πυκνωτή συμπιεσμένου αερίου (πρότυπος πυκνωτής).

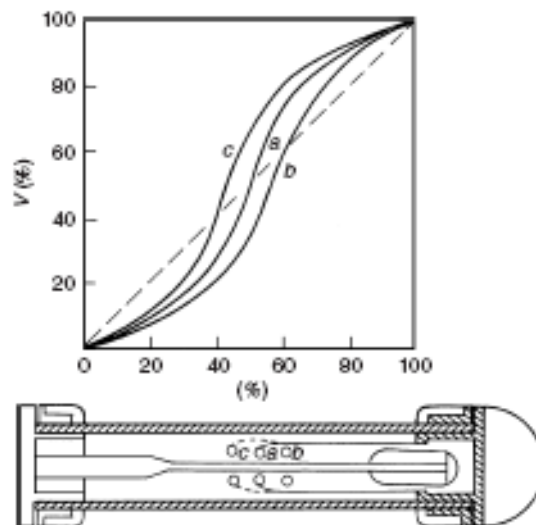
- (1) Εσωτερικό ηλεκτρόδιο Υ.Τ. , (1') Εξωτερικό ηλεκτρόδιο Υ.Τ.
- (2) Ηλεκτρόδιο Χ.Τ. με επιτηρητή , (2') Επιτηρητής
- (3) Υποστηρικτικός σωλήνας
- (4) Ομοαξονική σύνδεση στο αισθητήριο ηλεκτρόδιο Χ.Τ.
- (5) Μονωτικός κύλινδρος

Η χωρητικότητα C ανά μονάδα αξονικού μήκους l είναι $C/l = 2\pi\epsilon/\ln(r_2/r_1)$, όπου τα r_1 και r_2 είναι οι ακτίνες των εσωτερικών και εξωτερικών κυλίνδρων αντίστοιχα. Αυτή η χωρητικότητα με το βέλτιστο λόγο $r_2/r_1 = e$ είναι περίπου 56pF/m και επομένως αρκετά μεγάλη για την επίτευξη επαρκών χωρητικών τιμών (30-100 pF) σε περιορισμένο μήκος ηλεκτροδίων. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα σχετίζεται με την πιθανή μεταβλητότητα της χωρητικότητας εάν το εσωτερικό ηλεκτρόδιο δεν είναι εντελώς κεντραρισμένο. Η κεντρική θέση είναι μια θέση ελάχιστης τιμής χωρητικότητας όπως αυτό φαίνεται από τον υπολογισμό της μεταβαλλόμενης με την εκκεντρικότητα χωρητικότητας στην ακόλουθη σχέση

$$\frac{C}{l} = \frac{2\pi\epsilon}{\cos^{-1}\left(\frac{r_1^2+r_2^2-D^2}{2r_1r_2}\right)} \quad (3.4.3.1-1)$$

Όπου D είναι η απόσταση μεταξύ των αξόνων αμφοτέρων των κυλίνδρων. Η παρατήρηση αυτή δείχνει ότι μια μικρή εκκεντρικότητα δεν συμβάλλει ιδιαίτερα σε μια αλλαγή της χωρητικότητας. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο οι περισσότεροι από τους *πρότυπους πυκνωτές* που χρησιμοποιούνται σήμερα περιέχουν αυτό το ομοαξονικό κυλινδρικό σύστημα. Οι Schering και Vieweg το 1928 ⁶ πρότειναν ένα τέτοιο πυκνωτή. Μια τομή ενός τέτοιου πυκνωτή συμπιεσμένου αερίου εικονίζεται στο σχήμα 3.4.3.1-2.

Το κύριο ηλεκτρόδιο Υ.Τ. (1) εμπεριέχει ολόκληρο το ηλεκτρόδιο Χ.Τ. με το δαχτυλίδι επιπήρησης (2) το οποίο θωρακίζει το ηλεκτρόδιο από την επίδραση όλων των εξωτερικών πεδίων. Το δοχείο πίεσης (5) είναι κατασκευασμένο από διηλεκτρικό υλικό και συνεισφέρει στην ελαχιστοποίηση του ύψους. Ο υποστηρικτικός σωλήνας (3) βρίσκεται στο δυναμικό της γης. Ένα κύριο μονωτικό πρόβλημα που εμπλέκεται σε αυτή την κατασκευή σχετίζεται με την εφαιπτόμενη πεδιακή κατανομή εκτός του διηλεκτρικού δοχείου, καθώς η περιορισμένη ηλεκτρική αντοχή του ατμοσφαιρικού αέρα πρέπει να αντέξει την υψηλή πεδιακή συγκέντρωση γύρω από το χαμηλότερο άκρο του ηλεκτροδίου Υ.Τ. Ακόμη και ένα πρόχειρο διάγραμμα των ισοδυναμικών γραμμών που περικλείουν το σύστημα των ηλεκτροδίων μπορεί να δείξει αυτή την πεδιακή συγκέντρωση, η οποία εικονίζεται στο σχήμα 3.4.3.1-3, ένα αποτέλεσμα που επιτεύχθηκε από τον Keller ⁷. Η μέγιστη ένταση που προκύπτει στο άκρο του ηλεκτροδίου Υ.Τ. παραμένει περίπου η ίδια και είναι ανεξάρτητη του μήκους του διηλεκτρικού κυλίνδρου. Η μείωση αυτού του εξωτερικού πεδίου απλά δεν είναι δυνατή γιατί ακόμα και η απλούστερη λύση για αύξηση της διαμέτρου του δοχείου και κατανομής των ισοδυναμικών γραμμών εντός του κυλίνδρου, είναι δύσκολη λόγω της απαραίτητης αύξησης της μηχανικής αντοχής της κυλινδρικής κατασκευής.



Σχήμα 3.4.3.1-3 : Δυναμική κατανομή κατά μήκος ενός συμπιεσμένου πυκνωτή για διάφορα μήκη του ηλεκτροδίου Υ.Τ.

Οι πυκνωτές συμπιεσμένου αερίου παρέχουν, εφόσον είναι καλά σχεδιασμένοι και κατασκευασμένοι, μια χωρητικότητα Υ.Τ. μέγιστης δυνατής σταθερότητας. Είναι ωστόσο δαπανηροί εάν σχεδιαστούν για τάσεις από 100KV και πάνω. Χάρη στην αξιοσημείωτη απόδοσή τους και λαμβάνοντας υπόψη την ακρίβεια της χωρητικής τιμής και τις πολύ χαμηλές τιμές της $\tan\delta$, έχουν επικρατήσει ως πρότυποι πυκνωτές εντός γεφυρών Υ.Τ. για μετρήσεις των $C \tan \delta$. Είναι φυσικά δυνατές διάφορες κατασκευαστικές παραλλαγές⁸. Αυτές έχουν σχεδιαστεί για τάσεις Ε.Ρ. έως 1500KV. Τα CO_2 , N_2 , ή SF_6 είναι ιδανικά αέρια για μόνωση. Το SF_6 παρέχει την υψηλότερη ηλεκτρική αντοχή και για το λόγο αυτό μόνο πιέσεις σε τιμές περίπου έως 0.4 MPa (σε σύγκριση με το 1 με 1.5 MPa άλλων αερίων) είναι απαραίτητες. Η σχετική επίδραση της επηρεαζόμενης από την πίεση διηλεκτρικής σταθεράς επί της χωρητικής τιμής, μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση της σχετικής διαπερατότητας ϵ_r με την πυκνότητα του αερίου η οποία δίνεται από τη σχέση

$$\epsilon_r = 1 + a \frac{273}{100} \cdot \frac{p}{T} \quad (p \text{ σε } kPa \text{ και } T \text{ σε } ^\circ K) \quad (3.4.3.1-2)$$

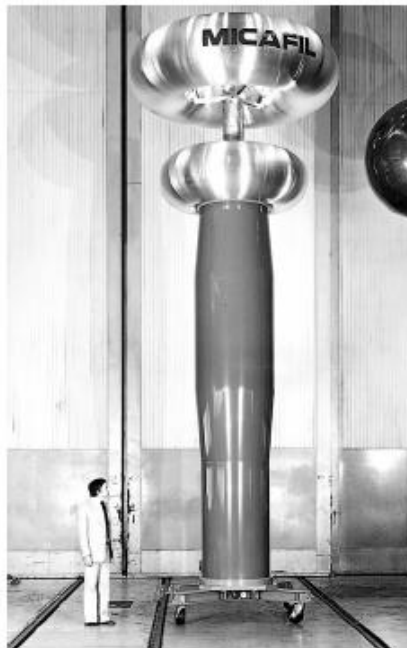
όπου

$$a \approx 0.00232 \text{ για το } SF_6$$

$$a \approx 0.00055 \text{ για το } N_2 \text{ και}$$

$$a \approx 0.00076 \text{ για το } CO_2$$

Καθώς η πραγματική πυκνότητα ενός αερίου εντός ενός δοχείου επηρεάζεται από την κατασκευή, η πραγματική απόκλιση από τα p και T προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή. Οι παράγοντες απωλειών της $\tan \delta$ είναι γενικά περίπου 10^{-5} για τη συχνότητα ισχύος.



Σχήμα 3.4.3.1-4 : Πρότυπος πυκνωτής συμπιεσμένου αερίου για 1000 KV r.m.s.

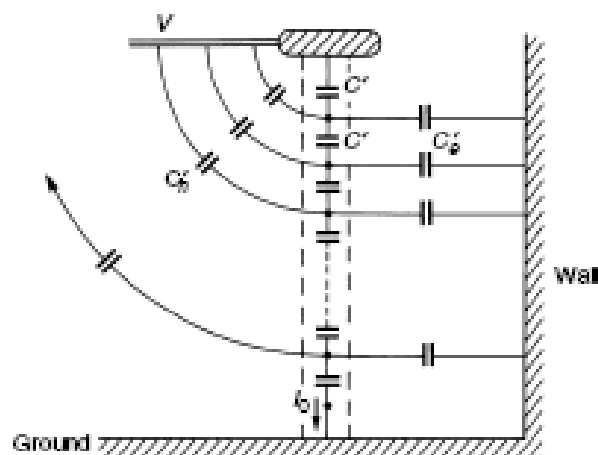
Το σχήμα 3.4.3.1-4 δείχνει μια φυσική φωτογραφία ενός πρότυπου πυκνωτή για μια τάση κλάσης 1000KV. Η αυξημένη διάμετρος και το πάχος του ανώτερου μέρους του μονωτικού κυλίνδρου, είναι κατασκευασμένο για να μειώσει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το ηλεκτρόδιο Υ.Τ. στο εξωτερικό μέρος αυτού του κυλίνδρου.

3.4.3.2 ΣΩΡΕΥΜΕΝΕΣ ΧΩΡΗΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ

Αυτός ο δεύτερος τύπος της βασικής κατασκευής πυκνωτών αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό μεμονωμένων χωρητικών μονάδων συνδεδεμένων σε σειρά. Οι μεμονωμένες χωρητικές μονάδες με συμβατικούς πυκνωτές όπως για παράδειγμα χαρτιού εμποτισμένου ελαίου ή αμιγώς στερεάς διηλεκτρικής μόνωσης, δεν μπορούν να κατασκευαστούν για τάσεις άνω των περίπου 10KV και επομένως αυτή η σύνδεση σε σειρά είναι απαραίτητη. Οι εν λόγω μονάδες πυκνωτών δημιουργούν μια στήλη και έτσι διαμορφώνεται μια επιμήκης δέσμη μεγάλου λόγου ύψους-διαμέτρου.

Όποια και αν είναι η κατασκευή της κάθε μονάδας, υπάρχουν πάντοτε φορτία που εντοπίζονται σε ορισμένα σημεία των ηλεκτροδίων, τα οποία δεν συνεισφέρουν στην πραγματική χωρητικότητα της μονάδας. Αυτά τα ενδιάμεσα ηλεκτρόδια, βρίσκονται σε ένα δυναμικό το οποίο στην ουσία παρέχεται από τα τερματικά των στοιχείων των πυκνωτών που αποτελούν το σύστημα καταμερισμού της τάσης. Τα ξένα αυτά φορτία σχετίζονται επομένως με τις παράσιτες χωρητικότητες.

Ένα ρεαλιστικό ισοδύναμο κύκλωμα μιας σωρευμένης μονάδας πυκνωτών κατασκευασμένο από έναν προκαθορισμένο και συνήθως μεγάλο αριθμό μονών πυκνωτών C' , εικονίζεται στο σχήμα 3.4.3.2-1.



Σχήμα 3.4.3.2-1 : Παράσιτες χωρητικότητες που επηρεάζουν την ισοδύναμη ή ενεργό χωρητικότητα των καταμεριστών Υ.Τ.

Για τους πυκνωτές που βρίσκονται σε εργαστήρια, οι παράσιτες χωρητικότητες προς τη γη μπορεί επίσης να επηρεαστούν από τους τοίχους οι οποίοι είναι συχνά ηλεκτρομαγνητικά θωρακισμένοι· αυτή είναι και η περίπτωση που εξετάζεται σε αυτό το σχήμα. Ο ακροδέκτης Υ.Τ. συμπεριλαμβανομένου του ανώτερου ηλεκτροδίου όλου του πυκνωτή, μπορεί να συνεισφέρει σε μικρότερες παράσιτες χωρητικότητες του δυναμικού Υ.Τ. V . Ένας υπολογισμός του ρεύματος I_o που ρέει προς τη γη από τον τελευταίο γειωμένο πυκνωτή μπορεί να πραγματοποιηθεί ουσιαστικά με τον τρόπο που αναφέρεται στη συνέχεια. Επεκτείνοντας τις υπερβολικές συναρτήσεις, πετυχαίνουμε το ακόλουθο αποτέλεσμα

$$I_o = V\omega C \frac{1 + \frac{C_h}{4C}}{1 + \frac{C_e + C_h}{6C + 12C}} = V\omega C_{eq} \quad (3.4.3.2-1)$$

όπου $C = C'/n$, $C_e = nC'_e$, $C_h = nC'_h$ και n ένας μεγάλος (άπειρος) αριθμός στοιχείων χωρητικότητας C' . Η χωρητικότητα $C = C'/n$ είναι προφανώς η απορρέουσα της αλυσίδας υπολογισμένη από το σύνηθες κύκλωμα σειράς, για παράδειγμα $1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_n$. Η σχέση 3.4.3.2-1 υποδεικνύει ότι η *ισοδύναμη* ή *ενεργός* χωρητικότητα C_{eq} ενός σωρευμένου πυκνωτή δεν μπορεί να υπολογιστεί μέσω μεμονωμένων στοιχείων καθώς οι παράσιτες χωρητικότητες C_h και C_e δεν είναι γνωστές επακριβώς. Για το λόγο αυτό ο πυκνωτής Χ.Τ. C_2 εντός του καταμεριστή τάσης ή οι διόδοι που περιέχονται στο κύκλωμα Chubb-Fortescue θα *βλέπουν* μόνο το ρεύμα I_o .

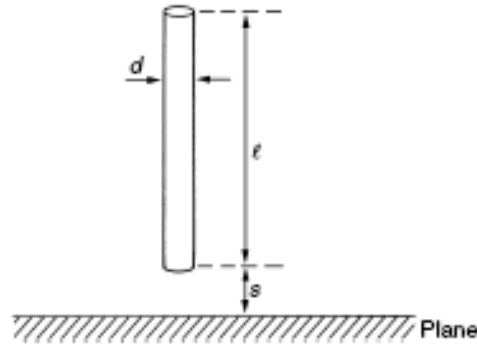
Πολλές μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί με τεράστιες μονάδες σωρευμένων πυκνωτών⁹ επιβεβαίωσαν την ουσιαστική εφαρμοσιμότητα της σχέσης 3.4.3.2-1. Επίσης έδειξαν ότι η επίδραση της παράσιτης χωρητικότητας C'_h στην πλευρά Υ.Τ., μπορεί γενικά να παραληφθεί. Ωστόσο είναι απαραίτητο να αποτιμηθεί η τιμή των πυκνωτών σειράς έτσι ώστε ο λόγος $C_e/6C$ να μην υπερβαίνει το 1~2%. Έτσι, η σχέση 3.4.3.2-1 μπορεί να απλουστευθεί στην

$$C_{eq} \approx C \left(1 - \frac{C_e}{6C}\right) \quad (3.4.3.2-2)$$

Αυτή η επίδραση της μειούμενης χωρητικότητας μπορεί πειραματικά να ελεγχθεί από μια ορθή μέτρηση της C_{eq} μέσω μιας γέφυρας Υ.Τ. (Schering ή γέφυρας σύγκρισης ρευμάτων). Σε τέτοια κυκλώματα γεφυρών, ο άγνωστης τιμής πυκνωτής αξιολογείται στις συνθήκες εργασίας του. Όταν εφαρμοσθεί η Υ.Τ., το άκρο Χ.Τ. αυτού του άγνωστου πυκνωτή παραμένει ουσιαστικά στο δυναμικό της γης καθώς το δυναμικό της γέφυρας είναι πολύ χαμηλό· έτσι η κατανομή του δυναμικού επί του δοκιμίου παραμένει σταθερή. Μια μέτρηση της C_{eq} με μια συνηθισμένη χωρητική γέφυρα δύο τερματικών δεν θα πρέπει να γίνεται ποτέ καθώς θα οδηγούσε σε λάθος αποτελέσματα.

Η διαστασιολόγηση των σωρευμένων μονάδων πυκνωτών για τη μέτρηση Υ.Τ. θα πρέπει να

λαμβάνει υπόψη αυτή την επίδραση. Η C_e μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά μέσω της θεώρησης ότι οι σωρευμένοι πυκνωτές έχουν κυλινδρικό σχήμα και επομένως συγκροτούν έναν μεταλλικό κάθετο κύλινδρο τοποθετημένο πάνω σε ένα οριζόντιο επίπεδο, όπως εικονίζεται στο σχήμα 3.4.3.2-2.



Σχήμα 3.4.3.2-2 : Κυλινδρικός αγωγός πάνω από επίπεδο

Η πολύ γνωστή σχέση για αυτή τη διάταξη¹⁰ είναι

$$C_e = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left[\frac{2l}{d}\sqrt{\frac{4s+l}{4s+3l}}\right]} \quad (3.4.3.2-3)$$

και για $s \ll 1$ η προηγούμενη σχέση γίνεται

$$C_e \approx \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\frac{1.15l}{d}} \quad (3.4.3.2-4)$$

Εφόσον ακριβέστερες προσεγγίσεις δεν θα συνεισέφεραν ιδιαίτερα στο αποτέλεσμα που έχει δειχθεί από τους Zaengl¹¹ και Luehmann¹², μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει μόνο τη σχέση 3.4.3.2-4 και μπορεί κανείς να διακρίνει με ευκολία ότι οι απόλυτες τιμές C_e/l κυμαίνονται μεταξύ 10 και 15pF/m.

Το φαινόμενο κατά το οποίο η ενεργός χωρητικότητα (σχέση 3.4.3.2-2) μεταβάλλεται με τις διαστάσεις του πυκνωτή ή των αναρτήσεών του, είναι γνωστή ως *φαινόμενο εγγύτητας* (proximity effect). Η ακριβής επίδραση των αναρτήσεων στον C_e θα μπορούσε να υπολογιστεί μόνο μέσω αριθμητικών πεδιακών υπολογισμών. Καθώς οι διακυμάνσεις του C_e λόγω των μεταβληθέντων συνθηκών της ανάρτησης είναι συνήθως λιγότερες από 20%, ο παράγοντας σφάλματος σε αυτή την εξίσωση μπορεί να είναι μέχρι 5% για να λάβει διακυμάνσεις του C_{eq} μικρότερες από 1%. Η συνθήκη αυτή οδηγεί στη σχέση

$$\frac{C_e}{6C} = \frac{C_e/l}{6C/l} \lesssim 5\% \quad (3.4.3.2-5)$$

Με το $C_e/l = 10 - 15 \text{ pF/m}$ λαμβάνουμε ότι

$$C/l \approx C_{eq}/l \cong 30 - 50 \text{ pF/m} \quad (3.4.3.2-6)$$

Εάν αυτή η συνθήκη δεν εκπληρωθεί, οι πυκνωτές που περιέχονται στα συστήματα μέτρησης θα πρέπει να σταθεροποιούνται και να τοποθετούνται εντός ενός κυλίνδρου και δεν θα πρέπει να υπάρχουν στην εμβέλειά τους καθόλου κινούμενες μεταλλικές κατασκευές ή εξοπλισμός που να παρενοχλεί την κατανομή του δυναμικού του πυκνωτή.

3.4.3.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΥΚΝΩΤΩΝ Υ.Τ.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η τεχνολογία των ιδιαίτερων πυκνωτών *σπήλης*, με ειδική έμφαση σε αυτούς που χρησιμοποιούνται για μετρητικούς σκοπούς. Οι βασικές απαιτήσεις για αυτού του είδους τις εφαρμογές είναι οι ακόλουθες:

- η χωρητικότητα C θα πρέπει να είναι ανεξάρτητη του μεγέθους του επιπέδου της τάσης και δεν θα πρέπει να μεταβάλλεται με το χρόνο της εφαρμογής (φαινόμενο γήρανσης)
- ο θερμοκρασιακός συντελεστής TC ($ppm/^{\circ}K$) θα πρέπει να είναι μικρός ή πολύ μικρός, ανάλογα με το είδος και το θερμοκρασιακό εύρος της κατασκευής, και θα πρέπει να είναι τουλάχιστον γνωστός
- η ενεργός επαγωγή του C θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, εάν χρησιμοποιείται για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων όπως για παράδειγμα οι καταμεριστές τάσης για κρουστικές τάσεις.

3.4.3.3.1 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

Οι περισσότερες από τις μεμονωμένες χωρητικές μονάδες για συσσωρευμένους πυκνωτές κατασκευάζονται από επιμήκεις ταινίες δύο τουλάχιστον στρωμάτων όπως για παράδειγμα *χαρτί* και ένα λεπτό στρώμα ελάσματος Α1. Ο πυκνωτής τότε κατασκευάζεται τυλίγοντας δύο τέτοιες ταινίες μεταξύ τους ώστε να σχηματίσουν ένα ρολό. Τα ρολά τότε γενικώς πρεσάρονται σε επίπεδη μορφή για τη μείωση του μεγέθους, αλλά δύναται να χρησιμοποιηθούν και σε κυλινδρική μορφή. Ένας κατάλληλος αριθμός μονάδων συναρμολογούνται και πρεσάρονται εντός μονωμένου κιβωτίου. Μετά τη συναρμολόγηση ο πυκνωτής βρίσκεται σε κενό αέρος και εμποτισμένος με ένα διηλεκτρικό υγρό. Στην εποχή μας αντί για χαρτί υψηλής ποιότητας (πυκνωτικό χαρτί πάχους 10~30 μm), χρησιμοποιούνται απλά πλαστικά φιλμ όπως το polystyrene, ή μείγματα από πλαστικό φιλμ και χαρτί. Οι τυλιγμένοι σε ρολό πυκνωτές θα έχουν υψηλή επαγωγή εάν τα μεταλλικά ηλεκτρόδια είναι απλώς ενωμένα στα άκρα τους ή σε μερικές ενδιάμεσες θέσεις. Πολύ χαμηλή επαγωγή μπορεί να επιτευχθεί εάν εφαρμοστεί η τεχνική της κατασκευής του εκτεταμένου ελάσματος. Στη μέθοδο αυτή κάθε ένα από τα δύο ηλεκτρόδια μεταλλικού ελάσματος, επιμηκύνεται στη μια πλευρά πέρα από τα διηλεκτρικά ελάσματα και μετά το συνεχές τύλιγμα και πρεσάρισμα ενώνονται (συγκολλούνται) στην κάθε πλευρά για να διαμορφώσουν τα τερματικά καπάκια.

3.4.3.3.2 ΚΕΡΑΜΙΚΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ

Μονάχα λίγοι κατασκευαστές παγκοσμίως είναι σε θέση να παράξουν εξειδικευμένους και άριστης ποιότητας κεραμικούς πυκνωτές, για χρήση στη μέτρηση Υ.Τ. Οι περισσότεροι τύποι αυτών των κεραμικών πυκνωτών ισχύος ραδιοσυχνότητας, είναι κατασκευασμένοι από κεραμικό υλικό τύπου class/type2. Το διηλεκτρικό υλικό που χρησιμοποιείται για το είδος αυτό του κεραμικού, περιέχει κυρίως αλκαλικούς εστέρες γεωπιτανίου παρέχοντας αρκετά υψηλές τιμές διηλεκτρικών σταθερών. Το υλικό αυτό ρέπει προς τη γήρανση λόγω μιας σταδιακής αναδιάρθρωσης της κρυσταλλικής του δομής, έχει πολύ υψηλούς θερμοκρασιακούς συντελεστές (TC), είναι εξαρτώμενο από την τάση και δεν συνιστάται για μετρητικούς σκοπούς. Υπάρχουν ωστόσο ορισμένοι τύποι κεραμικού, τύπου class/type1 χωρίς τα παραπάνω μειονεκτήματα. Μέσα σε αυτό το class 1 κεραμικό το οποίο κατασκευάζεται κυρίως από διοξείδιο του τιτανίου ή εστέρα μαγνησίου, τα υλικά με σχετική διηλεκτρική σταθερά κάτω του 1000 εμφανίζουν τιμές TC μέχρι 10ppm/°K εντός θερμοκρασιακού εύρους από -25~+95°C και πολύ χαμηλούς παράγοντες απωλειών έως και το εύρος των MHz. Το κύριο πλεονέκτημα όλων των τύπων των κεραμικών πυκνωτών είναι η εξαιρετικά χαμηλή επαγωγή λόγω του σχεδιασμού τους, ο οποίος είναι είτε σωληνοειδούς τύπου ή κεκλιμένου επιπέδου με μεταλλικά ηλεκτρόδια ιδιαίτερης αγωγιμότητας. Το μοναδικό μειονέκτημα είναι ότι υπόκειται στους περιορισμούς για συνεχόμενη τάσης λειτουργίας E.P. (κορυφές μέχρι περίπου 40KV) και για χωρητικότητα (έως περίπου 6nF) ανά μονάδα. Οι κεραμικοί πυκνωτές όπως επίσης και οι πυκνωτές ελασμάτων, χρησιμοποιούνται γενικότερα σε συστήματα καταμερισμού της τάσης. [6]

Αναφορές

- [1] Θεοδώρου, Ν., «Ηλεκτρικές Μετρήσεις», Τεύχος Ι:Κλασσικές Μετρήσεις, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2004.
- [2] Κούκος, Π., «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας, Χαλκίδα 2003-04.
- [3] Μαινεμενλής, Χ., «Τεχνική του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007.
- [4] Γκιόκας, Γ., Α., Φριλίγκος, Β., Σ., «Τεχνολογία Διατάξεων Ηλεκτρονικής», Ο.Ε.Δ.Β., Αθήνα.
- [5] Merev, A., Yilmaz, O., Kalenderli, O., "Selecting Resistors for a High Voltage Divider", XIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands 2003.

[6] Kuffel, E., Zaengl, W. S., Kuffel, J., "High Voltage Engineering: *Fundamentals*", (second edition), Newnes, published by Butterworth – Heinemann, Oxford 2000.

-
- 1 Ο χρωματικός κώδικας των αντιστάσεων δίνεται στο Παράρτημα Α(1) της εργασίας.
 - 2 Ο αριθμητικός κώδικας των αντιστάσεων δίνεται στο Παράρτημα Α(2) της εργασίας.
 - 3 Αναφορά [1] : J. H. Park, "Special Shielded Resistor for High-Voltage DC Measurement". *Journal of Research of NBS*, vol. 66 C no. 1, pp. 19-24, 1962.
 - 4 Αναφορά [4] : N. F. Ziegler, "Dual Highly Stable 150 kV Divider". *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurements*, vol. IM-19, no. 9, pp. 281-285, 1970.
 - 5 Ο χρωματικός κώδικας των πυκνωτών Χ.Τ. δίνεται στο Παράρτημα Β της εργασίας.
 - 6 Αναφορά [1] : A.J. Schwab. *High Voltage Measurement Techniques*. MIT Press, Cambridge, Ma. And London, England, 1972.
 - 7 Αναφορά [46] : A. Keller. Symposium on Precision Electrical Measurements, NPL, London, 1955.
 - 8 Αναφορά [47] : H.R. Lucas and D.D. McCarthy. *Trans. IEEE* PAD 89 (1970), pp. 1513–1521.
Αναφορά [48] : U. Brand and M. Marckmann. Outdoor high-voltage compressed-gas capacitors using SF₆. 2nd Int. Symp. on High Voltage Engg., Zurich, 1975.
Αναφορά [49] : D.L. Hillhouse and A.E. Peterson. *Trans. IEEE* IM 22 (1973), No. 4.
 - 9 Αναφορά [50] : IRR-IMS Group. Facing uhv measuring problems. *Electra* No. 35 (1974), pp. 157–254.
 - 10 Αναφορά [51] : W. Zaengl. *Arch. Techn. Messen (ATM)*, Blatt Z 130-3 (1969).
 - 11 Αναφορά [51] : W. Zaengl. *Arch. Techn. Messen (ATM)*, Blatt Z 130-3 (1969).
 - 12 Αναφορά [52] : H. Luehrmann. *ETZ-A* 91 (1971), pp. 332–335.

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΙΑ Υ.Τ.”

4.1 ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ

Οι ηλεκτρικές καταπονήσεις που εμφανίζονται στα δίκτυα από ατμοσφαιρικά ή εσωτερικά αίτια, έχουν κατά κανόνα ανώμαλη μορφή, ενώ ο έλεγχος των μονώσεων στο εργαστήριο γίνεται με τις ομαλές διπλοεκθετικές τάσεις που παράγονται από τις κρουστικές γεννήτριες. Δεδομένου ότι σκοπός των δοκιμών είναι ο έλεγχος της ικανότητας της μόνωσης να αντέχει τις πραγματικές καταπονήσεις, είναι αναγκαία η γνώση της ισοδυναμίας μεταξύ πραγματικών και εργαστηριακών καταπονήσεων. Η ουσία της ισοδυναμίας αυτής είναι πως οι εργαστηριακές και οι πραγματικές καταπονήσεις δημιουργούν για την εξεταζόμενη μόνωση τον ίδιο κίνδυνο διάσπασης. Για τις ατμοσφαιρικές υπερτάσεις (κεραυνού) έχει οριστεί σαν τάση δοκιμής η κρουστική 1,2/50 μs γιατί η μέση τιμή πολλών καταγραφέντων ρευμάτων κεραυνού κατέληξε σε αυτή περίπου τη μορφή. Ο κάθε κεραυνός έχει κατά κανόνα διαφορετική μορφή από την τυποποιημένη τάση, συνεπώς η καταπόνηση που αντιπροσωπεύει θα διαφέρει από αυτή της τυποποιημένης κρουστικής. Για τις υπερτάσεις χειρισμών η ισοδυναμία καθίσταται ακόμα πιο πολύπλοκη διότι εκτός από την ανωμαλία της μορφής τους, απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στη σχεδίαση των μονώσεων. Με εμπειριστατωμένες δοκιμές έχουν καθοριστεί ορισμένες βασικές αρχές της ισοδυναμίας αυτής. [1]

4.2 ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΝ

4.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η διαβάθμιση των μονώσεων δεν είχε ληφθεί σοβαρά υπόψη μέχρι και μετά τον πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο, κυρίως εξαιτίας της έλλειψης πληροφόρησης σχετικά με τη φύση των κεραυνικών υπερτάσεων και της μονωτικής αντοχής των συσκευών έναντι αυτών. Από τη στιγμή που συγκεκριμένη πληροφόρηση απουσίαζε σχετικά με την αντοχή της μόνωσης έναντι υπερτάσεων ή σχετικά με τα χαρακτηριστικά εκφόρτισης του εξοπλισμού προστασίας, πρώιμες προσπάθειες αποτέλεσαν πρόχειρες μεθόδους βασισμένες στην εμπειρία και σε υποκειμενικές ιδέες. Ως αποτέλεσμα, κάποια τμήματα των εγκαταστάσεων μόνωνονταν υπερβολικά ενώ κάποια άλλα ανεπαρκώς. Επίσης η βαθμιαία αύξηση της μόνωσης της γραμμής σε μια προσπάθεια να εμποδιστεί η εκκένωση της γραμμής, έθεσε τον εξοπλισμό σε πιο ισχυρές υπερτάσεις και σε πολλές περιπτώσεις εκκενώσεις γραμμής

εξαλείφονταν εις βάρος των σφαλμάτων των συσκευών. Η ανάπτυξη των συστημάτων ισχύος και οι απαιτήσεις για βελτιωμένη εξυπηρέτηση ισχύος και πιο οικονομική λειτουργία του συστήματος, εστίασαν όλο και περισσότερο την προσοχή στα προβλήματα των στιγμιαίων υπερτάσεων, της επαρκούς μόνωσης και της προστασίας της. Έτσι στη διάρκεια της περιόδου από το 1918 περίπου έως το 1930, έγινε σημαντική δουλειά από μεμονωμένους ερευνητές και εργαστήρια για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τις φυσικές εκκενώσεις και για την ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών του ελέγχου μόνωσης. Αν και φαινομενικά η πρόοδος ήταν αργή, κατέληξε σε μια επαρκή γνώση της φύσης των κεραυνικών υπερτάσεων και στη διεθνή καθιέρωση μέτρων για την κατασκευή και μέτρηση συσκευών υπερτάσεων. Πολύ μικρή συνεργασία μεταξύ των εργαστηρίων επιχειρήθηκε στη διάρκεια εκείνης της περιόδου.

Το 1930 η *Ενιαία Επιτροπή για τη Διαβάθμιση των Μονώσεων* (NEMA-NELA) δημιουργήθηκε για να μελετήσει την τεχνική και τους ελέγχους των εργαστηρίων, για να καθορίσει τα επίπεδα μόνωσης στην κοινή χρήση, για να ορίσει τη διηλεκτρική αντοχή του εξοπλισμού και για να αναπτύξει τα επίπεδα μόνωσης για τις διάφορες κατηγορίες τάσεων. Μετά από δέκα χρόνια έρευνας και συλλογής πληροφοριών αυτό το πρόγραμμα ολοκληρώθηκε αρκετά καλά. Πολυάριθμα άρθρα σε περιοδικά δείχνουν τα αποτελέσματα. Σε μια αναφορά που εκδόθηκε τον *Ιανουάριο* του 1941, η επιτροπή γνωστή ως η *Ενιαία Επιτροπή για τη Διαβάθμιση των Μονώσεων* (AIEE-EEI-NEMA), γνωστοποίησε το πρόγραμμα διευκρινίζοντας τα βασικά επίπεδα της μόνωσης για τις διαφορετικές κατηγορίες τάσης.

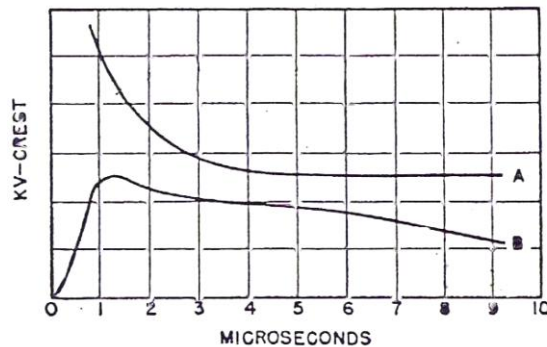
Οι προδιαγραφές ελέγχου για τις συσκευές δημιουργούνται με βάση την παραδοχή ότι η μονωτική αντοχή του εξοπλισμού θα είναι ίση ή μεγαλύτερη από το επιλεγμένο βασικό επίπεδο. Ο εξοπλισμός προστασίας, θα πρέπει να επιλεγεί, ώστε να δίνει μόνωση επαρκή για τα επίπεδα τάσης λειτουργίας με τεχνοοικονομικά κριτήρια. [2]

4.2.2 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΝ

Η διαβάθμιση των μονώσεων είναι η συσχέτιση της μόνωσης του ηλεκτρικού εξοπλισμού και των κυκλωμάτων με τα χαρακτηριστικά των προστατευτικών συσκευών, ούτως ώστε η μόνωση να προστατεύεται από υπερβολικές υπερτάσεις. Επομένως σε έναν υποσταθμό η μόνωση των μετασχηματιστών, των διακοπών, των υποστηρικτικών μπαρών κ.τ.λ. πρέπει να έχει μονωτική αντοχή που υπερβαίνει τα επίπεδα τάσης που μπορεί να παρέχει ο προστατευτικός εξοπλισμός, όπως τα αλεξικέραυνα και τα διάκενα. Ο καθορισμός της οικονομικής σχέσης μεταξύ της

κρουστικής αντοχής της μόνωσης του εξοπλισμού και του επιπέδου της τάσης προστασίας που παρέχεται από διατάξεις προστασίας είναι ιδιαίτερα σημαντικός.

Η βασική ιδέα του συντονισμού μόνωσης απεικονίζεται στο σχήμα 4.2.2-1. Η *καμπύλη Α* είναι η κρουστική αντοχή της μόνωσης σε ένα τμήμα ηλεκτρικού εξοπλισμού, που όταν είναι σε λειτουργία εκτίθεται στους κινδύνους των κεραυνικών υπερτάσεων. Η *καμπύλη Β* είναι ένα προστατευτικό επίπεδο παρεχόμενο από ένα αλεξικέραυνο τύπου βαλβίδας. Επομένως οποιαδήποτε μόνωση που έχει αντοχή σε τιμή τάσης που υπερβαίνει τη μονωτική δύναμη της *καμπύλης Α* προστατεύεται από την προστατευτική διάταξη της *καμπύλης Β*. Προκειμένου να προστατεύουμε τη μόνωση από υπερβολικές τάσεις, η προστατευτική διάταξη πρέπει να έχει μια χαμηλότερη τάση διάσπασης.



Σχήμα 4.2.2-1 : Προστασία μόνωσης με τη χαρακτηριστική «Α» από συσκευή προστασίας με τη χαρακτηριστική «Β»

Η μόνωση του ηλεκτρικού εξοπλισμού υπόκειται κατά καιρούς σε στιγμιαίες υπερτάσεις, οι οποίες μπορεί να προκαλούνται από σφάλματα του συστήματος, διακοπτικές ή κεραυνικές υπερτάσεις. Με εξαίρεση κάποιες ειδικές περιπτώσεις, οι υπερτάσεις που προκαλούνται από σφάλματα του συστήματος ή διακοπτική λειτουργία δεν προκαλούν φθορά στη μόνωση ενός εξοπλισμού, αν και μπορούν να αποβούν καταστροφικές σε συσκευές προστασίας. Οι υπερτάσεις που προκαλούνται από κεραυνό έχουν επαρκές μέγεθος για να προκαλέσουν εκκένωση ή διάσπαση στο μονωτικό εξοπλισμό και είναι επομένως οι πιο προβληματικές ενώ προκαλούν μεγάλη ανησυχία στους κατασκευαστές και στους χειριστές του ηλεκτρικού εξοπλισμού. Τα τελευταία 20 χρόνια έχουν γίνει μεγάλα βήματα στη βελτίωση του σχεδιασμού των συστημάτων ισχύος και του εξοπλισμού, με αποτέλεσμα η αστοχία στη μόνωση του κύριου ηλεκτρικού εξοπλισμού να είναι σπάνια.

Το πρόβλημα της παροχής μόνωσης κατάλληλα διαβαθμισμένης με τις διατάξεις προστασίας περιλαμβάνει όχι μόνο την προφύλαξη του μονωτικού εξοπλισμού, αλλά επίσης την προστασία των ίδιων των διατάξεων. Για να εμποδίσουμε τη βλάβη σε έναν απαγωγό ή σε ένα προστατευτικό σωλήνα, ο καθένας από αυτούς θα πρέπει να εφαρμόζεται σε ένα σύστημα με τέτοιο τρόπο ώστε να εκφορτίζει την περίσσεια τάση με ασφάλεια στο έδαφος. Άρα ο απαγωγός ή ο σωλήνας πρέπει να προστατεύει τη μόνωση και να μπορούν να επαναφέρουν τις μονωτικές τους ιδιότητες ενάντια στις όποιες τάσεις συστήματος μπορεί να υπάρξουν κατά μήκος του προς το έδαφος. Η τάση προς το έδαφος καθορίζεται για ένα σύστημα δεδομένης τάσης κατά κύριο λόγο από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη γείωση του συστήματος, με τη μέγιστη τάση προς το έδαφος συνήθως να υφίσταται υπό την παρουσία ενός σφάλματος φάσης προς τη γη. Τα διάκενα ράβδων δεν επανασφραγίζονται όταν υποστούν ηλεκτρική εκκένωση και επομένως το κύκλωμα πρέπει να αποσυνδεθεί από το σύστημα για να καθαριστούν διασπάσεις διακένων.

Τα μονωτικά υλικά υψηλής τάσης είναι ακριβά, αλλά μια διάσπαση στη μόνωση είναι ακόμα πιο δαπανηρή. Είναι επομένως ιδιαίτερα σημαντικό να αποκτηθεί κατάλληλη ισορροπία ανάμεσα στο κόστος της μόνωσης και στην αξιοπιστία του συστήματος. Αυτή η διαδικασία εξισορρόπησης ονομάζεται *διαβάθμιση των μονώσεων*. Περιλαμβάνει την κατάλληλη επιλογή του επιπέδου μόνωσης ανάμεσα στα διάφορα εξαρτήματα στο δίκτυο, επίσης εμπεριέχει την κατάλληλη επιλογή προστατευτικού εξοπλισμού όπως διάκενα σφαιρών και προστατευτικά υπέρτασης. Αν η διάσπαση είναι αναπόφευκτη, καλό θα ήταν να συμβεί σε επιλεγμένο σημείο, δηλαδή καλύτερα σε ένα διάκενο σφαιρών από το να αγγίξει το μονωτικό υλικό μιας γραμμής και καλύτερα σε ένα προστατευτικό υπέρτασης από έναν ακριβό μετασχηματιστή ισχύος.

Το πρόβλημα της διαβάθμισης των μονώσεων του ηλεκτρικού εξοπλισμού, έχει εξελιχθεί από ένα θέμα ασαφές σε μια ισχυρή πρακτική της μηχανικής, η οποία βασίζεται σε σαφώς διατυπωμένες αρχές και γνωστά γεγονότα. Τα βασικά επίπεδα μόνωσης έχουν πια συγκροτηθεί ώστε να καθορίζουν τα κατώτατα όρια της αντοχής μόνωσης υπό στιγμιαίες εξάρσεις τάσης σε συγκεκριμένες τιμές, οι οποίες μπορούν να απεικονιστούν από τυποποιημένες μεθόδους ελέγχου. Οι προστατευτικές συσκευές είναι διαθέσιμες για να παρέχουν υψηλό βαθμό προστασίας στη μόνωση που συναντά τα βασικά επίπεδα και έχουν επινοηθεί αποτελεσματικές μέθοδοι για την προστασία της μόνωσης, κάτι που απαιτεί ιδιαίτερη μελέτη. Αυτή η πρόοδος υλοποιήθηκε με τη συνεργασία κατασκευαστών και χρηστών του ηλεκτρικού εξοπλισμού και έτσι αποκτήθηκε ανεκτίμητης αξίας

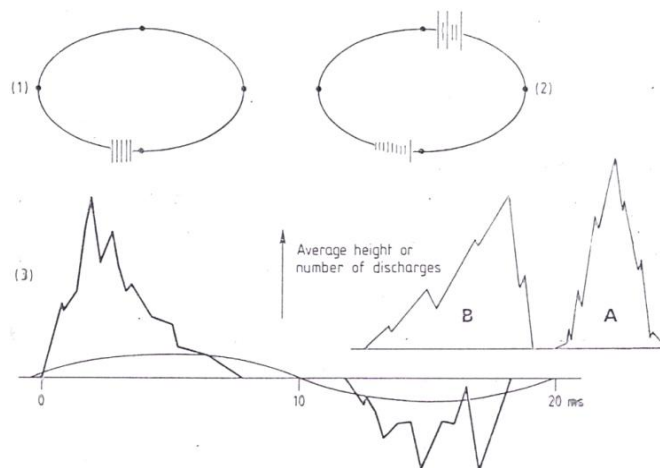
πληροφόρηση σχετικά με τη φύση των κεραυνών και με τα αποτελέσματά τους πάνω σε εξοπλισμό που βρίσκεται σε λειτουργία.

Η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή, (International Electrotechnical Commission ή IEC για συντομία) έχει συστήσει έναν αριθμό τυποποιημένων επιπέδων μόνωσης. Επιπλέον, η τυποποίηση της IEC διατυπώνει μια σειρά απαιτήσεων ελέγχου, ούτως ώστε οι κατασκευαστές και οι χρήστες του εξοπλισμού να είναι σε θέση να έχουν τυποποιημένες παραδοχές επί των χαρακτηριστικών ενός εξαρτήματος δικτύου. [2,3]

4.2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ

Οι μερικές εκκενώσεις είναι η κύρια αιτία διάσπασης σε περιπτώσεις τροφοδοσίας εναλλασσόμενου ρεύματος. Λαμβάνουν χώρα σε κοιλότητες διηλεκτρικών που εσωκλείουν αέρια και προκαλούν την αργή διάβρωση του υλικού.

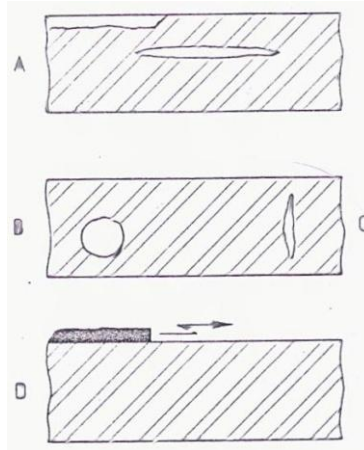
Το δείγμα (δοκίμιο) που έχει υποστεί εκκένωση περιέχει αρκετές πληροφορίες ως προς την προέλευση και τον τύπο της εκκένωσης. Αυτές οι πληροφορίες δύναται να οπτικοποιηθούν μέσω ενός παλμογράφου ή μπορεί να γίνουν πιο προφανείς μέσω της στατιστικής ανάλυσης. Στη δεύτερη περίπτωση, η κατανομή του ύψους των παλμών πάνω από την περίοδο των 50 ή 60 Hz καθορίζεται επί μιας χρονικής διάρκειας, π.χ. 500 περιόδων. Ακόμη, ο αριθμός των ισοκατανεμημένων - επί της αυτής περιόδου - παλμών είναι προσδιορίσιμος. Μια κατανομή αυτής της μορφής μπορεί κανείς να παρατηρήσει στο σχήμα 4.2.3-1.



Σχήμα 4.2.3-1 : Κατανομή εκκενώσεων επί ενός κύκλου της τάσης

- A : μια οξεία κατανομή δίνει μια υψηλή κύρτωση
- B : μια ασύμμετρη κατανομή δίνει μια υψηλή ασύμμετρία (κύρτωσης)
- C : η σύγκριση θετικών και αρνητικών ημιπεριόδων δίνει έναν υψηλό παράγοντα διασταυρούμενης συσχέτισης στην περίπτωση που αυτές οι ημιπερίοδοι είναι κατά πολύ διαφορετικές μεταξύ τους

Σε πολλές περιπτώσεις η προέλευση της εκκένωσης (εσωτερική, επιφανειακή ή οφειλόμενη στο φαινόμενο corona) μπορεί να προκύψει. Επίσης μπορούν να προσδιοριστούν λεπτομέρειες όπως το αν η εκκένωση είναι στα όρια του ηλεκτροδίου ή όχι, ή το σχήμα της κοιλότητας όπως αυτό εικονίζεται στο σχήμα 4.2.3-2.

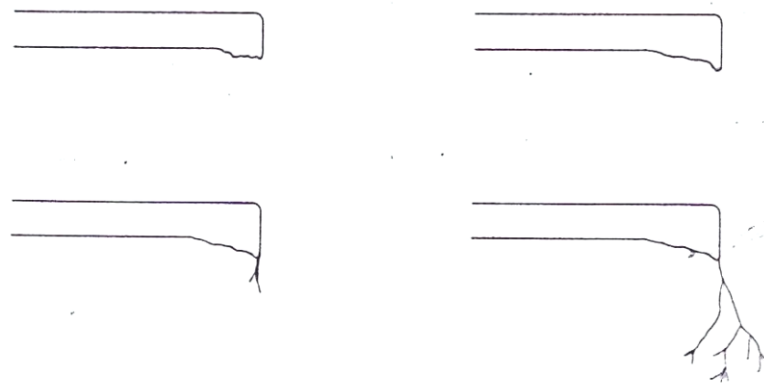


Σχήμα 4.2.3-2 : Κοιλότητες που προκαλούν εκκενώσεις σε στερεά διηλεκτρικά

- A : σχισμές ή ανοίγματα μεταξύ του ηλεκτροδίου και του διηλεκτρικού
- B : κοιλότητες σφαιρικής μορφής
- C : σχισμές στην κατεύθυνση του πεδίου
- D : ακμή επί του ηλεκτροδίου ικανή να προκαλέσει επιφανειακές εκκενώσεις

4.2.4 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΡΟΕΡΧΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΕΚΚΕΝΩΣΕΙΣ, ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

Η πρόσκρουση των ηλεκτρονίων και των ιόντων στο τοίχωμα των κοιλοτήτων προκαλεί μια δριμεία διάβρωση σε αυτό. Σε βάθος χρόνου σχηματίζεται μια τάφρος, συνήθως στην ακμή της κοιλότητας. Η τάφρος βαθιάει διαρκώς και σε δεδομένη στιγμή το πεδιακό δυναμικό στην άκρη της πλησιάζει την εγγενή δύναμη διάσπασης του διηλεκτρικού. Το διηλεκτρικό τότε διασπάται σε μια κοντινή απόσταση σχηματίζοντας έτσι ένα λεπτό κανάλι, στην κορυφή του οποίου η τιμή της εγγενούς δύναμης διάσπασης επανέρχεται και το κανάλι αναπτύσσεται με τον τρόπο αυτό σταδιακά. Στη συνέχεια το κανάλι πλαταίνει και αναπτύσσεται περαιτέρω, αλλά αυτή τη φορά σε μορφή ζιγκ-ζάγκ και με διακλαδώσεις παρόμοιες με αυτές των κεραυνών. Αυτή η διαδικασία καλείται δημιουργία δενδροειδών θυσάνων (treeing) και παρέρχεται πολύ γρήγορα. Η διάβρωση της κοιλότητας και η διαμόρφωση μιας τάφρου, είναι μια διαδικασία που μπορεί να διαρκέσει πολλές ώρες ή ακόμα και χρόνια. Ο σχηματισμός ενός δενδρίτη (σχήμα 4.2.4-1) λαμβάνει χώρα σε λεπτά ή ακόμα και σε δευτερόλεπτα και προκαλεί μια πλήρη διάσπαση μόλις η έκταση του δενδρίτη φθάσει τα ηλεκτρόδια.



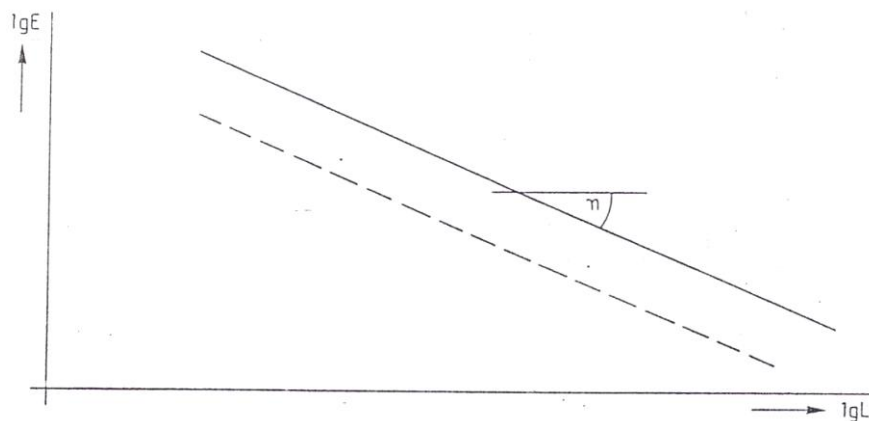
Σχήμα 4.2.4-1 : Διάβρωση μιας κοιλότητας, ακολουθούμενη από δημιουργία δενδροειδούς θυσάνου (treeing)

Ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται έως ότου προκληθεί η διάσπαση, καλείται *χρόνος εφαρμογής ή ζωής της τάσης (voltage life)* και ποικίλει, ιδιαίτερα σε σχέση με την πεδιακή ένταση στο διηλεκτρικό. Η σχέση του χρόνου εφαρμογής της τάσης L με τη μέση πεδιακή ένταση E στο διηλεκτρικό, έχει πειραματικά προσδιοριστεί ως:

$$L = \frac{c}{E^n} \quad \text{ή} \quad \log L = k - n \log E \quad (4.2.4-1)$$

όπου k , c , και n είναι σταθερές.

Σε περίπτωση που οι μεταβλητές δοθούν σε λογαριθμική κλίμακα, η σχέση δίνεται από μια ευθεία γραμμή όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.4-2.



Σχήμα 4.2.4-2 : Χρόνος εφαρμογής της τάσης υπό την παρουσία εκκενώσεων ή ανομοιογενειών, συναρτήσεως της πεδιακής έντασης. Η κλίση της γραμμής καθορίζεται από τον παράγοντα n ($9 < n < 20$), έτσι ώστε η εξάρτηση της πεδιακής έντασης να είναι πολύ μεγάλη. Μεγαλύτερες εκκενώσεις οδηγούν σε μικρότερο χρόνο εφαρμογής της τάσης όπως υποδεικνύεται από τη διακεκομμένη χαρακτηριστική γραμμή

Δύο επιδράσεις φαίνονται στο σχήμα 4.2.4-2:

1. Η επίδραση της *πεδιακής έντασης*.

Η κλίση της γραμμής δίνεται από τη σταθερά n , με την εφαπτομένη της γωνίας της να είναι n . Καθώς το n είναι μεγάλο ($9 < n < 20$), η επίδραση της πεδιακής έντασης είναι εξαιρετικά μεγάλη. Αν το n λάβει την τιμή 9, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του πολυαιθυλενίου, τότε μια αύξηση διπλάσιας τιμής στην πεδιακή ένταση προκαλεί ένα κατά $2^9 \approx 500$ φορές μικρότερο χρόνο εφαρμογής της τάσης.

2. Η επίδραση του *μεγέθους* της διάσπασης

Η επίδραση αυτή είναι κατά πολύ μικρότερη. Μια αυξανόμενη εκκένωση τροποποιεί τη χαρακτηριστική γραμμή του χρόνου εφαρμογής, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.4-2, αλλά θα πρέπει να υπάρξει μια δεκαπλάσια αύξηση στο μέγεθος της εκκένωσης για μια αξιοπρόσεκτη μεταβολή.

4.2.5 ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΠΡΟΕΡΧΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΑ, ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

Κανένα διηλεκτρικό δεν είναι ποτέ απαλλαγμένο από *εγκλείσματα* (*inclusions*). Σκόνη, ίνες, ρινίσματα, μεταλλικά σωματίδια, κ.τ.λ. βρίσκονται σε υλικά μόνωσης. Σημαντικά υλικά όπως το πολυαιθυλένιο πρέπει να κατασκευάζονται σύμφωνα με πρότυπα, όπου όχι περισσότερα από x εγκλείσματα μεγέθους y επιτρέπονται σε z cm³ υλικού.

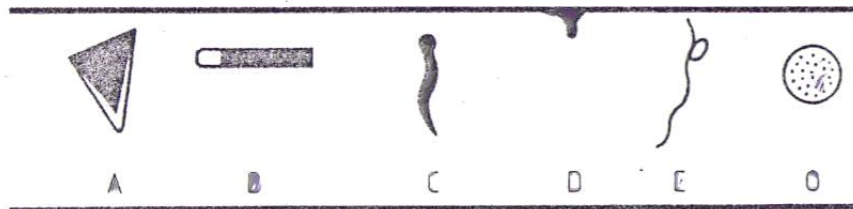
Οι μοντέρνες κατασκευαστικές τεχνικές εγγυώνται έναν υψηλό βαθμό απουσίας εγκλεισμάτων, παρόλα αυτά πολλά σωματίδια μεγέθους από 1 έως 100 μ υπάρχουν στις πρώτες ύλες, πράγμα το οποίο έχει ως αποτέλεσμα χιλιάδες μέχρι και εκατομμύρια ξένα σωματίδια σε ένα προς παράδοση προϊόν, όπως ένα καλώδιο υψηλής τάσης με μόνωση πολυαιθυλενίου ή μονωτές χυτορητίνης σε αυτόματους διακόπτες.

Κάποια από αυτά τα εγκλείσματα μπορεί να προκαλέσουν διάσπαση. Επιζήμια είναι τα:

- *Εγκλείσματα χαμηλής διηλεκτρικής αντοχής*. Παραδείγματα των οποίων είναι σταγονίδια έντονα οξειδωμένου ή ακόμα και καμένου πολυαιθυλενίου και εγκλείσματα σκόνης. Οι κοιλότητες ανήκουν επίσης σε αυτή την κατηγορία. (βλ. σχήμα 4.2.3-2, *παράδειγμα Β*).
- *Εγκλείσματα* (μονωτικά ή αγώγιμα) που δεν είναι *καλώς αφομοιωμένα* στη μόνωση (*παράδειγμα Α*). Μπορεί να υποθεθεί ότι θύλακες αέρος μεταξύ των εγκλεισμάτων και του μονωτή είναι υπεύθυνοι για την τελική διάσπαση. Στο σχήμα 4.2.3-2B δίνεται ένα παράδειγμα κομματιών ινών γυαλιού που στα πειράματα προκάλεσε τον εξαιρετικά μικρό χρόνο εφαρμογής της τάσης.

- *Οξεία αγώγιμα εγκλείσματα.* Συγκεντρώσεις πεδίου σε μια οξεία προεξοχή μπορεί να πυροδοτήσουν διάσπαση. Παραδείγματα οξειών εγκλεισμάτων είναι σε αυτή την περίπτωση ρινίσματα μετάλλου, ακίδες, οξείες προεξοχές στο ηλεκτρόδιο, όπως τα C και D στο σχήμα 4.2.3-2. Οι ίνες όπως στο E είναι εξαιρετικά οξείες, αλλά θα μπορούσαν επίσης να ταξινομηθούν στην πρώτη κατηγορία καθώς η διηλεκτρική τους αντοχή είναι χαμηλή.

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, ηλεκτρικά δέντρα σχηματίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως στην περίπτωση των κοιλότητων. Πάλι, ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου να πυροδοτηθεί ένα δέντρο είναι εξαιρετικά μεγάλος σε σύγκριση με το χρόνο του σχηματισμού. Η καμπύλη του χρόνου εφαρμογής του σχήματος 4.2.4-2 ισχύει εδώ επίσης. Σε υψηλού πεδίου δυνάμεις των 20 έως 30 KV/mm η διαδικασία μπορεί να προκαλέσει διάσπαση σε ώρες, ακόμη και λεπτά.



Σχήμα 4.2.5-1 : Εγκλείσματα σε ένα στερεό διηλεκτρικό τα οποία μπορούν να προκαλέσουν δένδροειδείς θυσάνους (treeing) και οριστική διάσπαση

- A : αγώγιμο, όχι καλά αφομοιωμένο
- B : μονωτικό, όχι καλά αφομοιωμένο
- C : αγώγιμο και οξύ
- D : προεξοχή στο ηλεκτρόδιο
- E : ίνα
- O : χαμηλή διηλεκτρική αντοχή

Σε δοκιμές κατά το σχεδιασμό, από 3 έως 7KV/mm, η πορεία διάσπασης μπορεί να είναι μακροχρόνια, μέχρι και πολλά χρόνια. Είναι προφανές ότι η μόνωση υψηλής τάσης θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο απαλλαγμένη από ελαττώματα, κοιλότητες, εγκλείσματα κ.τ.λ. Αυτό ελέγχεται στην πράξη από μια σειρά ελέγχων υπέρτασης και μετρήσεων. [4]

4.2.6 ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ

Υπάρχουν τρεις τύποι υπέρτασης οι οποίοι επηρεάζουν το σχεδιασμό των κατασκευών μόνωσης και καθορίζουν τις απαιτήσεις για τους ελέγχους υπερτάσεων:

1. Κεραυνικές κρουστικές τάσεις
2. Διακοπτικοί κρουστικοί παλμοί

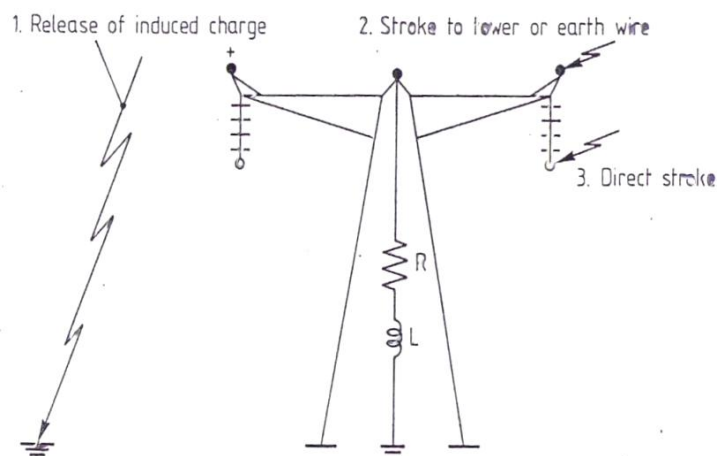
3. Υπερτάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος

Επιπροσθέτως, το αίτημα για αδιάλειπτη λειτουργία στην ονομαστική τάση, θέτει απαιτήσεις σχετικές με την τάση λειτουργίας

4.2.6.1 ΚΕΡΑΥΝΙΚΕΣ ΚΡΟΥΣΕΙΣ

Οι κεραυνικές κρουστικές τάσεις προκαλούνται από:

1. Ένα κεραυνικό χτύπημα κοντά σε μια γραμμή ή σε έναν υποσταθμό. Η φόρτιση που επάγεται στη γραμμή από τα κεραυνικά σύννεφα απελευθερώνεται ξαφνικά και προκαλεί οδεύοντα κύματα επιπέδου υψηλής τάσης. Αυτή η αιτία της κεραυνικής υπέρτασης είναι σημαντική μόνο για δίκτυα μέσης τάσης.
2. Ένα κεραυνικό χτύπημα στον πυλώνα ή στον αγωγό γείωσης μιας γραμμής μεταφοράς. Το κεραυνικό ρεύμα περνάει τη σύνθετη αντίσταση $\omega L + R$ στη γη και προκαλεί μια υψηλή τάση στη κορυφή του πυλώνα. Η ηλεκτρική εκκένωση κατά μήκος των σειριακών στοιχείων της μόνωσης από το πλαίσιο στη γραμμή, μπορεί να συμβεί όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.6.1-1.
3. Ένα άμεσο κεραυνικό χτύπημα στη γραμμή, που επίσης φαίνεται στο σχήμα 4.2.6.1-1. Αυτό το χτύπημα αντιμετωπίζεται με τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση Z και η τάση που προκύπτει είναι $\frac{1}{2} \cdot i \cdot Z$. Σε ένα ρεύμα μέσης τιμής 20kA και μιας Z περίπου 300Ω, η προκύπτουσα υπέρταση ισοδυναμεί με αρκετά μεγαβόλτ.



Σχήμα 4.2.6.1-1 : Αιτίες κεραυνικών υπέρτασεων

Στις προδιαγραφές ελέγχου της IEC, η κεραυνική υπέρταση αναπαριστάται από μια τυποποιημένη κρούση με μέτωπο 1.2 μs και ουρά 50 μs.¹

4.2.6.2 ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟΙ ΚΡΟΥΣΤΙΚΟΙ ΠΑΛΜΟΙ

Οι διακοπτικοί κρουστικοί παλμοί προκαλούνται από λειτουργίες διακοπής σε ένα δίκτυο. Οι κύριες περιπτώσεις είναι:

1. Εκκαθάριση σφαλμάτων

Αφού διακόψουμε ένα βραχυκύκλωμα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.6.2-1, προκαλείται μια αιφνίδια μεταβολή τάσης η οποία συνήθως ισοδυναμεί με

$$\frac{U}{U_0} = 1 - e^{-at}(\cos \omega t) + \frac{a}{\omega} \sin \omega t \quad (4.2.6.2-1)$$

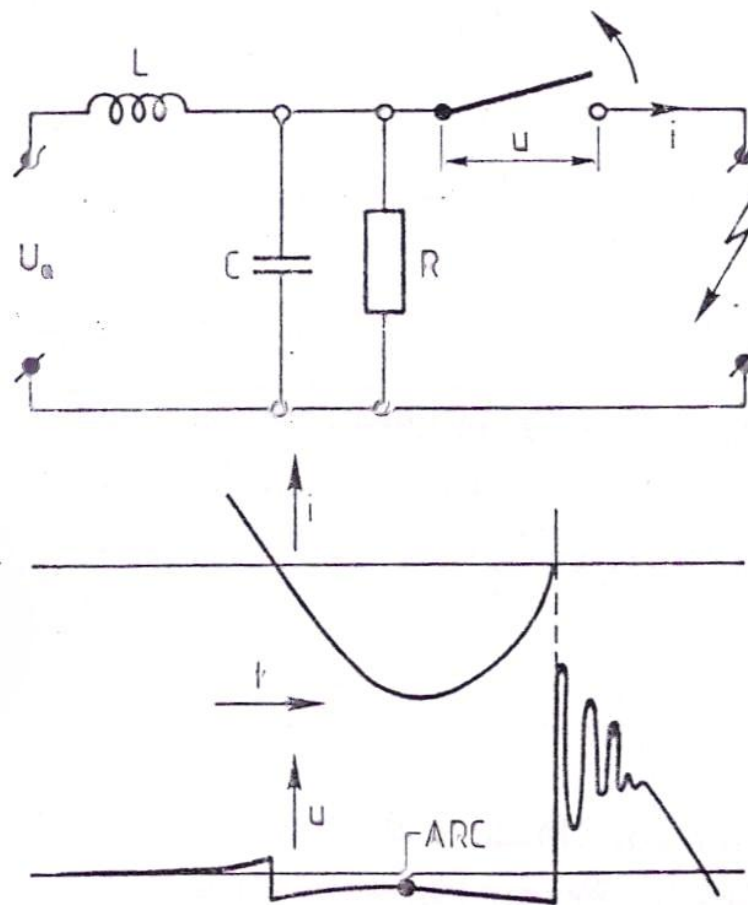
όπου

$$a = \frac{1}{2RC} \quad (4.2.6.2-2)$$

και

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} - \frac{1}{4C^2R^2} \quad (4.2.6.2-3)$$

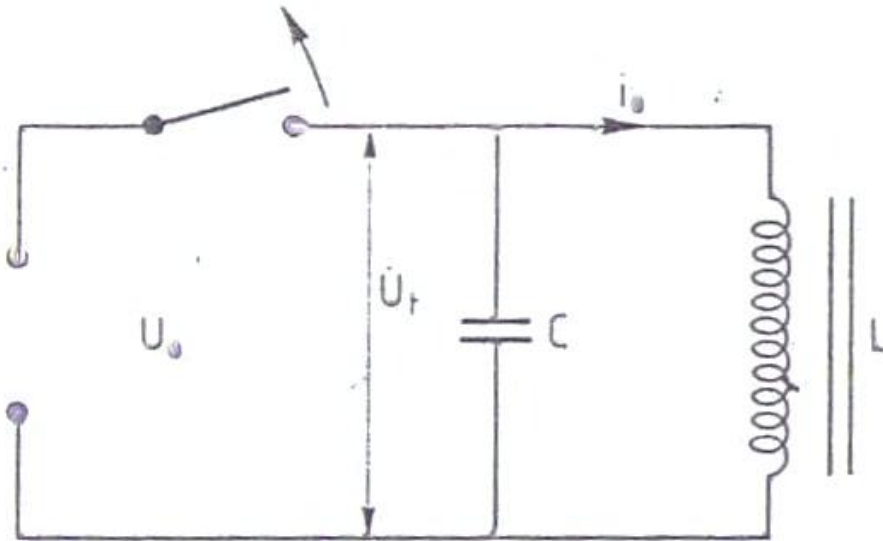
Αυτή η τάση είναι μέγιστη εάν $R \rightarrow \infty$ και φτάνει την τιμή $\hat{u} = 2U_0$ (4.2.6.2-4)



Σχήμα 4.2.6.2-1: Μεταβατική υπέρταση μετά τη διακοπή ενός ρεύματος βραχυκύκλωσης

2. Αποσύνδεση μετασχηματιστών εν κενώ

Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, ένα μικρό ρεύμα i_0 διακόπτεται. Αυτό το ρεύμα ωστόσο είναι επαγωγικό και αντιπροσωπεύει μια αισθητά μεγάλη μαγνητική ενέργεια: $\frac{1}{2} Li_0^2$ (βλέπε σχήμα 4.2.6.2-2)



Σχήμα 4.2.6.2-2 : Αποσύνδεση ενός μετασχηματιστή εν κενώ

Το ρεύμα είναι μικρό και ένας καλός διακόπτης μπορεί να διακόψει αυτό το ρεύμα ανά πάσα στιγμή. Μια ακατάλληλη περίπτωση προκύπτει αν $i_0 = max$. Τότε η μαγνητική ενέργεια $\frac{1}{2} Li_0^2$ μετατρέπεται σε ηλεκτροστατική ενέργεια στη χωρητικότητα C των τυλιγμάτων:

$$\frac{1}{2} Cu^2 = \frac{1}{2} Li_0^2 \quad (4.2.6.2-5)$$

Ένα μεταβαλλόμενο κύμα δημιουργείται με κάποια εξασθένηση και με μια συχνότητα

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (4.2.6.2-6)$$

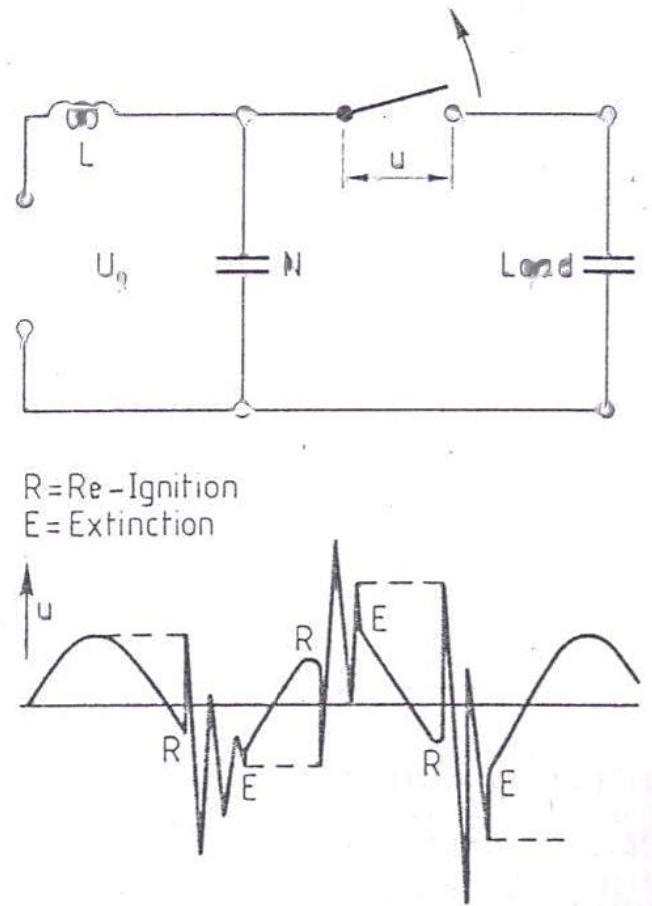
και με μέγιστο πλάτος

$$\hat{u} = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.2.6.2-7)$$

Καθώς η C είναι μικρή, προκύπτει μια υψηλή υπέρταση. Ταχυδιακόπτες όπως οι διακόπτες κενού μπορούν να προκαλέσουν αιφνίδιες μεταβολές τάσης περισσότερο από τέσσερις φορές πάνω από την τάση λειτουργίας. Αυτές οι αιφνίδιες μεταβολές τάσης, μπορούν επίσης να προκαλέσουν επαναδιέγερση του διακόπτη του κυκλώματος.

3. Αποσύνδεση γραμμών χωρίς φορτίο

Αν μια γραμμή χωρίς φορτίο, ένα καλώδιο, ή μια συστοιχία πυκνωτών αποσυνδεθεί, ένα χωρητικό ρεύμα διακόπτεται. Αυτή η διακοπή λαμβάνει χώρα σε μηδενικό ρεύμα και ο πυκνωτής C στο σχήμα 4.2.6.2-3, έχει τότε τη μέγιστη τάση.

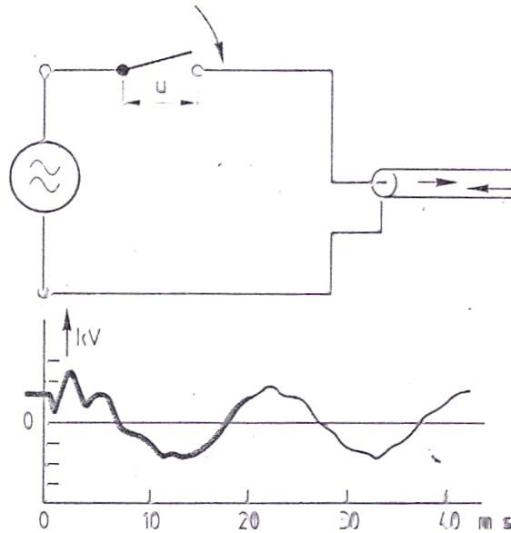


Σχήμα 4.2.6.2-3 : Αποσύνδεση ενός χωρητικού εξαρτήματος χωρίς φορτίο, όπως μια γραμμή, καλώδιο ή συστοιχία πυκνωτών

Αυτή η τάση παραμένει για αξιόλογο χρονικό διάστημα καθώς το ρεύμα διαρροής στον πυκνωτή είναι μικρό. Στο μεταξύ η κύρια τάση αντιστρέφεται στη μισή περίοδο και εμφανίζεται η διπλάσια τάση λειτουργίας στις επαφές του αποζεύκτη κυκλώματος. Αν ο αποζεύκτης κυκλώματος επαναδιεγερθεί, ένα ρεύμα υψηλής συχνότητας αρχίζει να ρέει, το οποίο διακόπτεται λίγο αργότερα και εμφανίζεται μια αιφνίδια υπέρταση. Η ενίσχυση και η συχνότητα αυτής της αιφνίδιας μεταβολής καθορίζεται από το L και το C στο δίκτυο. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές και να οδηγήσει σε σημαντικές υπερτάσεις. Προκειμένου να εμποδίσουμε αυτή την εξέλιξη απαιτείται αποζεύκτης κυκλώματος χωρίς διάταξη επαναδιέγερσης.

4. Σύνδεση γραμμής χωρίς φορτίο

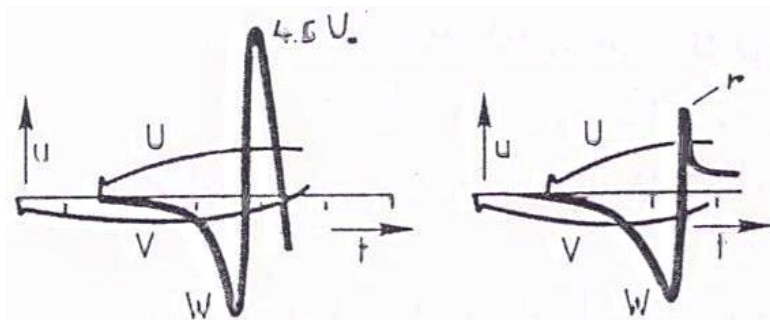
Όπου ενεργοποιείται μια μεγάλου μήκους γραμμή ή καλώδιο, επάγεται ένα βηματικό κύμα το οποίο οδεύει στον πιο απομακρυσμένο κόμβο. Στον πιο απομακρυσμένο κόμβο και αργότερα στον κοντινότερο κόμβο, το οδεύον κύμα θα ανακλαστεί. Οι επαναλαμβανόμενες ανακλάσεις θα προκαλέσουν μια μεταβατική ταλάντωση με $\hat{u} = 2U_0$, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.6.2-4.



Σχήμα 4.2.6.2-4 : Μεταβατική ταλάντωση προκαλούμενη από οδεύοντα κύματα σε μια ανοιχτή γραμμή

5. Μη ταυτόχρονη μεταγωγή

Υψηλή υπέρταση μπορεί να προκληθεί εάν ένας μετασχηματιστής ισχύος συνδεθεί στο δίκτυο και οι πόλοι του αποζεύκτη κυκλώματος δεν κλείσουν ταυτόχρονα. Αυτές οι υπερτάσεις μπορούν να υπολογιστούν με εξομοίωση μέσω υπολογιστή. Αυτοί οι υπολογισμοί συνάδουν με πραγματικές περιπτώσεις. Στο σχήμα 4.2.6.2-5 φαίνεται ένα παράδειγμα τέτοιου είδους υπέρτασης, στο οποίο το εύρος της αιφνίδιας μεταβολής φτάνει τη μέγιστη τιμή του $4.5 \cdot U_0$.

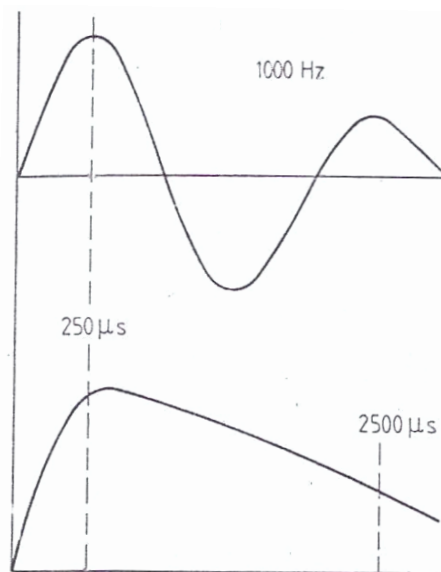


Σχήμα 4.2.6.2-5 : Υπερτάσεις συμβαίνουν εάν οι τρεις φάσεις ενός μετασχηματιστή, U , V και W δεν συνδεθούν ταυτόχρονα. (r = μείωση από αντικεραυνικό προστατευτικό)

Πολλοί άλλοι διακοπτικοί κρουστικοί παλμοί μπορεί να συμβούν αλλά οι παραπάνω υποθέσεις αναπαριστούν τις χειρότερες περιπτώσεις. Μπορεί να φτάσουν το $5 \cdot U_0$ το οποίο είναι λιγότερο υψηλό από την περίπτωση των κεραυνικών κρούσεων, αλλά αρκετά υψηλό για να θέσει σε κίνδυνο τη μόνωση.

Έλεγχος σε διακοπτικούς κρουστικούς παλμούς

Στις περισσότερες περιπτώσεις, μια μεταβατική ταλάντωση συμβαίνει με μια συχνότητα της τάξης μεταξύ μερικών εκατοντάδων Hertz έως μερικών χιλιάδων Hertz. Μια μέση τιμή των χιλίων Hertz μπορεί να υιοθετηθεί. Με σκοπό να αποκτήσουμε ομοιομορφία, ένα διεθνές πρότυπο έχει επινοηθεί για τους ελέγχους με *διακοπτικούς κρουστικούς παλμούς*. Η έναρξη της ταλάντωσης εξομοιώνεται από ένα μέτωπο των $250 \mu s$ όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.6.2-6. Η εξασθένιση της μετάβασης αναπαρίσταται από μια μέση τιμή των $2500 \mu s$.



Σχήμα 4.2.6.2-6 : Κανονικοποιημένος διακοπτικός κρουστικός παλμός που αναπαριστά ένα ταλαντούμενο κύμα των 1000 Hz

Μία μονοπολική κρούση έχει επιλεγεί έτσι ώστε μια διακοπτική υπέρταση να μπορεί να παραχθεί από την ίδια κρουστική γεννήτρια όπως μία κεραυνική κρούση. Μια εύλογη ερώτηση θα ήταν αν χρειάζεται ξεχωριστός έλεγχος στους διακοπτικούς κρουστικούς παλμούς. Το υλικό υψηλής τάσης σε κάθε περίπτωση ελέγχεται με κεραυνικούς κρουστικούς παλμούς μέχρι και 9 φορές το U_0 , ενώ οι διακοπτικοί κρουστικοί παλμοί φτάνουν περίπου τις 4.5 φορές το U_0 . Έχει ωστόσο βρεθεί ότι τα διηλεκτρικά παρουσιάζουν χαμηλότερη αντοχή διάσπασης στην περίπτωση

των διακοπτικών κρουστικών παλμών από την περίπτωση των κεραυνικών κρουστικών παλμών. Επομένως πολλές κατασκευές ελέγχονται σε αυτούς τους μέσους διακοπτικούς κρουστικούς παλμούς καθώς και σε υψηλούς κεραυνικούς κρουστικούς παλμούς.

4.2.6.3 ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Υπάρχουν τρεις λόγοι για τους οποίους η τάση λειτουργίας των 50 ή 60 Hz μπορεί να λάβει προσωρινά υψηλές τιμές:

1. Αν ένα μεγάλο φορτίο αποσυνδεθεί, οι ωμικές και οι άεργες πτώσεις τάσης εξαφανίζονται και προκύπτει μια υπέρταση μέχρι να αποκατασταθεί η τιμή λειτουργίας.
2. Η χωρητικότητα ενός καλωδίου χωρίς φορτίο, σε συνδυασμό με την αυτεπαγωγή ενός μετασχηματιστή ή μιας γεννήτριας, μπορεί να αυξήσει την τάση.
3. Αν μια βλάβη γείωσης συμβεί σε ένα δίκτυο με μη γειωμένο ουδέτερο, οι υγιείς φάσεις θα υιοθετήσουν μια υψηλότερη κατά $\sqrt{3}$ φορές τάση έως ότου η βλάβη αποκατασταθεί. Αυτά τα πιθανά γεγονότα επηρεάζουν τις προδιαγραφές των ελέγχων, είτε καθιερώνοντας μια υψηλότερη ονομαστική τάση, είτε υποδεικνύοντας συγκεκριμένους ελέγχους που πρέπει να γίνουν μεταξύ πολικών τάσεων.

4.2.6.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Προκειμένου να διασφαλιστεί αδιάλειπτη λειτουργία για κάποιες δεκαετίες, οι ακόλουθες αιτίες διάσπασης θα πρέπει να προληφθούν:

1. Υπερθέρμανση προκαλούμενη από διηλεκτρικές απώλειες
2. Μερικές εκκενώσεις
3. Δενδροειδείς διατρήσεις

Οι προαναφερθείσες αιτίες αναλύονται διεξοδικά στη συνέχεια

1. Διηλεκτρικές Απώλειες

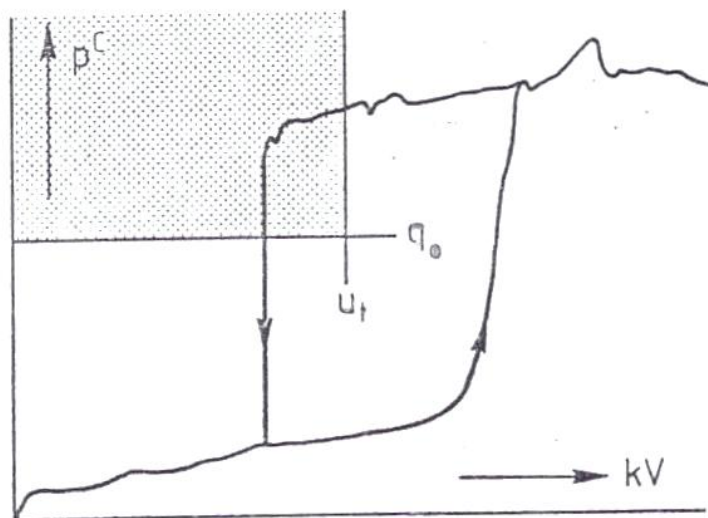
Οι διηλεκτρικές απώλειες ενός νέου εξοπλισμού είναι γενικά τόσο χαμηλές που δεν θέτουν σε κίνδυνο τη μόνωση. Ωστόσο υπάρχει κάποια ανησυχία σχετικά με το συνδυασμό της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας και της θερμότητας προκαλούμενης από διηλεκτρικές απώλειες. Αυτός ο συνδυασμός μπορεί να αποβεί επικίνδυνος με την πάροδο του χρόνου, καθώς οι διηλεκτρικές απώλειες μπορούν βαθμιαία να αυξηθούν με τη γήρανση. Γι' αυτό το λόγο αρκετές προδιαγραφές ελέγχου θέτουν όρια στην $\tan\delta$ σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. 90⁰ C), καθώς και στη σταθερότητα της $\tan\delta$ μετά από παρατεταμένους ελέγχους σε αυξημένους κύκλους τάσης και θερμότητας.

Άλλοι λόγοι για τον περιορισμό της $\tan\delta$ είναι:

- Οι διηλεκτρικές απώλειες επηρεάζουν την ικανότητα μεταφοράς ρεύματος του εξοπλισμού. Σε ένα καλώδιο ελαίου (oil filled cable) 400KV για παράδειγμα, οι διηλεκτρικές απώλειες είναι υπεύθυνες για το 1/3 της αύξησης της θερμοκρασίας έτσι ώστε μόνο τα 2/3 της επιτρεπτής αύξησης της θερμοκρασίας είναι διαθέσιμα για ωμικές απώλειες.
- Οι διηλεκτρικές απώλειες αναπαριστούν μια απώλεια ενέργειας η οποία μπορεί να αντιστοιχεί σε μια σεβαστή απώλεια χρημάτων.
- Οι μετρήσεις των διηλεκτρικών απωλειών χρησιμοποιούνται ορισμένες φορές σαν ποιοτικός έλεγχος. Ένα χαμηλό όριο τίθεται για να διασφαλίσει ότι ο κατασκευαστής έχει τον έλεγχο της κατασκευής. Για παράδειγμα, σε μόνωση ελαίου 33KV απαιτείται να έχουμε μια $\tan\delta$ μικρότερη ή ίση με $35 \cdot 10^{-4}$. Αυτή η απαίτηση δεν ισχύει σε λειτουργική βάση καθώς οι απώλειες δε θα επηρέαζαν την τάση διάσπασης, το ρυθμό, ή τα κόστη των απωλειών. Αλλά υψηλότερες απώλειες θεωρούνται ως έλλειψη ελέγχου της παραγωγής.

2. Μερικές εκκενώσεις

Οι μερικές εκκενώσεις στις μονωτικές κατασκευές μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο το χρόνο και τη μορφή της τάσης. Για το λόγο αυτό, πολλές προδιαγραφές ελέγχου θέτουν όρια στο μέγεθος και στην τάση εμφάνισης των εκκενώσεων. Συνήθως ένα όριο εκφόρτισης q_0 και μια τάση U_t καθορίζονται όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.4.4-1 όπου εκφορτίσεις στη σκιασμένη περιοχή δεν είναι αποδεκτές.



Σχήμα 4.2.6.4-1 : Έλεγχος εκφόρτισης. Κάθε μερική εκκένωση μεγαλύτερη από q_0 μετρούμενη κάτω από την τάση ελέγχου U_t οδηγεί στην απόρριψη του υπό έλεγχο αντικειμένου. (βλέπε σκιασμένη περιοχή)

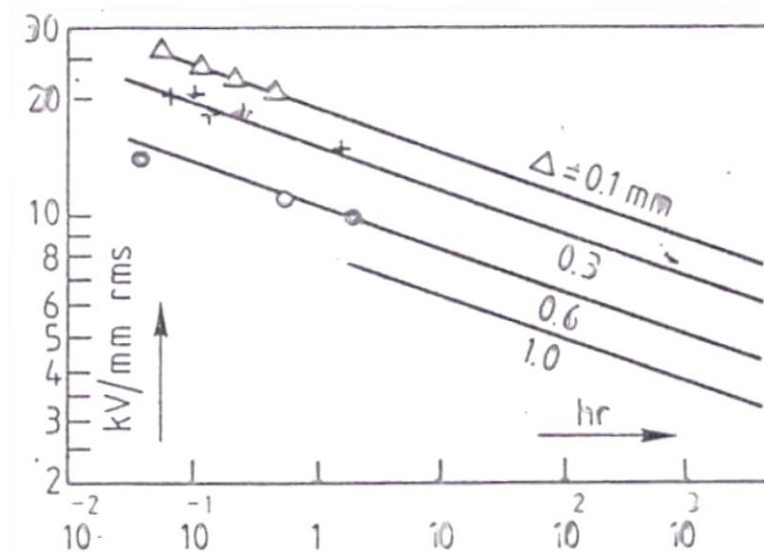
Ο έλεγχος συχνά πραγματοποιείται σε αυξανόμενη ή μειούμενη τάση. Στο παράδειγμα που δίνεται στο σχήμα 4.2.6.4-1, το δείγμα απορρίπτεται εξαιτίας ανεπιθύμητων εκφορτίσεων σε μειούμενη τάση.

3. Δενδροειδείς διατρήσεις

Ελαττώματα, όπως ανομοιογένειες στο διηλεκτρικό και προεξοχές στα ηλεκτρόδια μπορεί να προκαλέσουν τις δενδροειδείς διατρήσεις. Το ίδιο ισχύει για κοιλότητες και για τους χώρους μεταξύ των ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος που εμπεριέχουν τμηματικές εκφορτίσεις. Οι δενδροειδείς διατρήσεις εξαπλώνονται πολύ αργά σε πεδία χαμηλών εντάσεων και μπορεί να οδηγήσουν σε διάσπαση μετά από μήνες ή χρόνια σε τάση λειτουργίας. Σε μια αυξημένη ένταση πεδίου, ο ρυθμός ανάπτυξης ανεβαίνει σημαντικά και η διάσπαση μπορεί να λάβει χώρα μέσα σε κάποιες ώρες ή ακόμα και λεπτά. Όπως είναι γενικά αποδεκτό, ο χρόνος εφαρμογής και η μορφή της τάσης, L , ποικίλλει αντιστρόφως ανάλογα με την ένταση του πεδίου E ως προς τη δύναμη n :

$$L = \frac{c}{E^n} \quad (4.2.6.4-1)$$

όπου n παίρνει τιμές από 9 έως 12 και το c είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται από το μέγεθος των ανομοιογενειών. Σε μια διπλή λογαριθμική κλίμακα, αυτή η σχέση παριστάνεται ως μια ευθεία γραμμή όπου το n καθορίζει την κλίση της γραμμής και το c την τοποθεσία. Στο σχήμα 4.2.6.4-2 αυτή η χαρακτηριστική του χρόνου εφαρμογής παρουσιάζεται για ένα διηλεκτρικό με ανομοιογένειες διαφορετικών μεγεθών, όπου όσο μεγαλύτερη είναι η ανομοιογένεια τόσο μικρότερη είναι η χαρακτηριστική του χρόνου εφαρμογής της τάσης σε μια δεδομένη ένταση πεδίου.



Σχήμα 4.2.6.4-2 : Αποτελέσματα του ελέγχου αντοχής σε ένα διηλεκτρικό με κοιλότητες ποικίλων βαθμών

Αυτή η σχέση χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις ελέγχων σε αυξημένη τάση για σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα ένας έλεγχος σε $3U_0$ επί 24 ώρες, αναπαριστά (εάν $n = 9$) μια διάρκεια εφαρμογής τάσης 3^9 ημερών η οποία ανταποκρίνεται σε περίπου 50 χρόνια στην τάση λειτουργίας. [3]

4.3 ΒΑΣΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΜΟΝΩΣΗΣ

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που παρέχουν διαβάθμιση μεταξύ των επιπέδων μόνωσης μέσα στους σταθμούς και στη γραμμή που οδηγεί στους σταθμούς. Η καλύτερη μέθοδος είναι να καθορίσουμε ένα συγκεκριμένο κοινό επίπεδο για όλη τη μόνωση μέσα στο σταθμό και να βασίσουμε όλη τη μόνωση σε αυτό ή πάνω από αυτό. Αυτό περιορίζει το πρόβλημα σε τρεις βασικές απαιτήσεις, συγκεκριμένα στην επιλογή ενός κατάλληλου επιπέδου μόνωσης, στη διαβεβαίωση ότι η διάσπαση ή η αντοχή εκκένωσης όλης της μόνωσης στο σταθμό θα ισοδυναμεί ή θα υπερβαίνει το επιλεγμένο επίπεδο και στην εφαρμογή προστατευτικών συσκευών που θα δίνουν στη συσκευή την καλύτερη προστασία που μπορεί να δικαιολογηθεί οικονομικά.

Οι πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν από τα συστήματα εν λειτουργία κατά τη διάρκεια της πρώιμης εργασίας σχετικά με τη διαβάθμιση των μονώσεων, παρείχαν τα υπάρχοντα επίπεδα μόνωσης. Οι πληροφορίες που συλλέχτηκαν κυμαίνονταν εντός καλώς καθορισμένων ορίων. Το ανώτατο όριο ανταποκρινόταν σε περίπου 10 φορές την E_n στο υψηλότερο σημείο της καμπύλης και σε περίπου 6 φορές την E_n στο χαμηλότερο σημείο της καμπύλης, με E_n να είναι η φασική τάση (φάση-ουδέτερος) του συστήματος. Το χαμηλότερο όριο βρισκόταν σε μια καμπύλη περίπου 4 φορές την E_n για τα συστήματα $46kV$ και κάτω και περίπου 3 φορές την E_n για τα συστήματα $69kV$ και πάνω. Αυτές οι πληροφορίες μαζί με τα κρουστικά χαρακτηριστικά της μόνωσης που αποκτήθηκαν στην πράξη και στο εργαστήριο, παρείχαν τη βάση για τον καθορισμό των επιπέδων μόνωσης. Τα επίπεδα ελέγχου των κρούσεων όσον αφορά το μήκος διάκενου, επομένως επιλέχθηκαν ώστε να αναπαριστούν μια μέση τιμή μεταξύ των ανώτερων και των κατώτερων ορίων που περιγράφονται πιο πάνω και που κυμαίνονται μέσα στο όριο των διαθέσιμων προστατευτικών διατάξεων. Καθώς η εργαστηριακή τεχνική βελτιωνόταν τόσο ώστε διαφορετικά εργαστήρια συμφωνούσαν απόλυτα στα αποτελέσματα των ελέγχων, τα επίπεδα των ελέγχων εκφράζονταν σε κιλοβόλτ ανταποκρινόμενα στους ελέγχους διάκενων, βασισμένων σε ένα θετικό κύμα της τάξης του $1,2/50$ μs . Τα βασικά επίπεδα εκφράστηκαν σε μια βάση εκκένωσης 50-50, δηλαδή τιμές σε KV κορυφής ανταποκρινόμενα σε διάκενα που προσφέρουν 50% εκκένωση και 50% πλήρες κύμα όταν υπόκεινται σε θετική κρούση μεγέθους $1,2/50$ μs . Αναγνωρίζοντας ότι δεν

ήταν πρακτικό να θέσουν τους περισσότερους τύπους συσκευών σε σειρά ελέγχων εκκενώσεων για να δείξουν τα επίπεδα μόνωσης τους, μια αρνητική ανοχή της τάξεως του 5% επιτράπηκε στον καθορισμό των βασικών επιπέδων προκειμένου να επιτραπεί μια πρακτική επίδειξη ελέγχου αποδοχής του εξοπλισμού. Τελικά τον *Ιανουάριο* του 1941, η Ενιαία Επιτροπή ΑΙΕΕ-ΕΕΙ-NEMA υιοθέτησε βασικά επίπεδα μόνωσης (πίνακας 4.3-1) υπό το πρίσμα των τάσεων αντοχής σύμφωνα με τον ακόλουθο ορισμό:

«Τα βασικά επίπεδα μόνωσης σε κρουστική τάση είναι επίπεδα αναφοράς που εκφράζονται σε μέγιστη τάση με ένα πρότυπο κύμα όχι μεγαλύτερο από 1,2/50 μ s. Η μόνωση συσκευών όπως απεικονίζεται από τους κατάλληλους ελέγχους πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από το βασικό επίπεδο μόνωσης». (πίνακας 4.3-1)

Κλάση αναφοράς (KV)	Καθιερωμένο βασικό επίπεδο μόνωσης για κρουστική τάση (KV)	Μειωμένα επίπεδα μόνωσης κατά τη χρήση (KV)
1.2	30* 45**	...
2.5	45* 60**	...
5.0	60* 75**	...
8.7	75* 95**	...
15	95* 110**	...
23	150	...
34.5	200	...
46	250	...
69	350	...
92	450	...
115	550	450
138	650	550
161	750	650
196	900	...
230	1050	900
287	1300	...
345	1550	...

* : Για εξοπλισμό κλάσης διανομής
 **: Για εξοπλισμό κλάσης ισχύος

Πίνακας 4.3-1 : Βασικά επίπεδα μόνωσης για κρουστική τάση

Αυτό απαιτεί ότι η συσκευή που θα προσαρμόζεται σε αυτά τα επίπεδα θα έχει μια τιμή ελέγχου ανοχής όχι μικρότερη από το μέγεθος σε KV που δίνεται στη *στήλη 2* του πίνακα 4.3-1. Έγινε επίσης κατανοητό ότι οι συσκευές που ακολουθούσαν αυτές τις απαιτήσεις θα είχαν την ικανότητα να αντέχουν την καθορισμένη τάση είτε η κρούση ήταν θετική είτε αρνητική στην πολικότητα. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες στην περίοδο του ελέγχου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Οι τιμές στον πίνακα 4.3-1, *στήλη 2*, επιλέχθηκαν αρχικά ως τα κοινώς αποδεκτά βασικά επίπεδα κρουστικής μόνωσης (BILs) προς εφαρμογή, ανεξάρτητα με το πώς το σύστημα θα γειωνόταν. Αγείωτα ή γειωμένα συστήματα που να επιτρέπουν πλήρη απομάκρυνση του ουδέτερου κατά τη διάρκεια σφαλμάτων γραμμής-γής απαιτούν αντικεραυνικά προστατευτικά βασισμένα στην πλήρη *πολική* τάση του συστήματος. Αν το σύστημα είναι γειωμένο σταθερά ή τόσο ώστε να περιορίζει την τάση της γραμμής προς τη γη κατά τη διάρκεια σφαλμάτων γης ($X_0/X_1 \leq 3$) το επονομαζόμενο σύστημα *80% απαγωγέας υπερτάσεων* μπορεί και έχει χρησιμοποιηθεί. Έτσι σε κάποιες από τις κλάσεις τάσης των 115KV και πάνω ένας αριθμός συστημάτων έχει χρησιμοποιήσει σταθερή γείωση, εξοπλισμό που έχει μόνωση με BILs μια κλάση χαμηλότερη, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.3-1, *στήλη 3*.

Σε κάποια συστήματα στέρεας γείωσης όπου η αναλογία X_0/X_1 είναι ίση με τη μονάδα ή λιγότερο, έχει χρησιμοποιηθεί μια τάξη χαμηλότερο BIL με *75%* απαγωγείς υπερτάσεων με ικανοποιητική εμπειρία. Ως αποτέλεσμα αυτής της εμπειρίας, της καλύτερης καθ' όλα κατανόησης του προβλήματος και της οικονομίας της μείωσης BIL στις κλάσεις υψηλότερης ισχύος ιδιαίτερα στους μετασχηματιστές, η Ενιαία Επιτροπή ΑΙΕΕ-ΕΕΙ-NEMA για τη Διαβάθμιση των Μονώσεων εξετάζει την πιθανότητα μείωσης των στοιχείων BIL (για $X_0/X_1 \leq 1.0$) σε μικρότερες τιμές από εκείνες που εμφανίζονται στον πίνακα 1, *στήλη 3*. Ένας άλλος λόγος για να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στη μείωση BIL για συστήματα στέρεας γείωσης είναι ότι υπάρχουν πολλοί παλαιοί μετασχηματιστές σε λειτουργία με επίπεδα μόνωσης κατώτερα από εκείνα που δίνονται στον πίνακα 4.3-1, *στήλη 3* οι οποίοι έχουν λειτουργήσει 20 ή παραπάνω χρόνια χωρίς σφάλματα. Επομένως από τη στιγμή που η πρώτη ομάδα BILs υιοθετήθηκε το *1941*, ο τρόπος με τον οποίο το σύστημα γειώνεται ήρθε στην επιφάνεια με αποτέλεσμα ο χαμηλότερος BIL εξοπλισμός να μπορεί να προστατευθεί και ως εκ τούτου να καθιστά ικανά τα συστήματα να κατασκευάζονται ώστε να κάνουν τη ίδια δουλειά με χαμηλότερο κόστος. [2]

4.4 ΚΥΡΙΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Υπάρχουν εκατοντάδες διαφορετικών μονωτικών υλικών, αλλά επτά από αυτά καλύπτουν το *95%* ή και περισσότερο από το σύνολο των εφαρμογών.

1. ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ

Υπάρχουν πολλοί τύποι συνθετικής ρητίνης, αλλά μια χρησιμοποιείται ευρέως σαν μονωτής: η *εποξική* ρητίνη. Αποτελείται από ένα υγρό το οποίο αναμιγνύεται με έναν καταλύτη (όπως το δύο συστατικών οικιακής χρήσης τσιμέντο). Το μείγμα εκχύνεται υπό

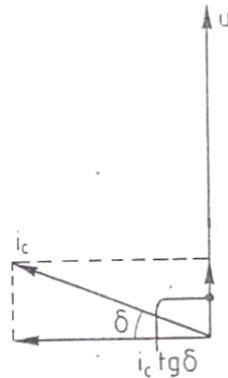
κενό και στερεοποιείται υπό θερμική επεξεργασία. Με αυτό τον τρόπο παράγονται μονωτές ελεύθεροι κενού οι οποίοι μπορεί να έχουν περίπλοκα μοντέλα.

Εφαρμογές:

Στερεοί μονωτές σε αυτόματους διακόπτες αέρος (GIS). Μετασχηματιστές, Παρελκόμενα καλωδίων.

Χαρακτηριστικά:

$\varepsilon \approx 4$, $\tan\delta$ μεταξύ 10 και $50 \cdot 10^{-4}$, (βλέπε σχήμα 4.4-1) .



Σχήμα 4.4-1 : Σε ένα φυσικό διηλεκτρικό το χωρητικό ρεύμα i_c διαφέρει κατά μια γωνία δ από την ιδανική περίπτωση. Οι διηλεκτρικές απώλειες προκαλούνται όταν $U i_c \tan\delta$, έτσι ώστε η $\tan\delta$ να είναι ένα σημαντικό κριτήριο για την ποιότητα ενός μονωτή.

2. ΠΟΡΣΕΛΑΝΗ

Η πορσελάνη μοντελοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου και διατηρείται και γυαλίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Μπορεί να δουλευτεί σε αρκετά περίπλοκα σχήματα και έχει άριστες ιδιότητες για χρήση σε εξωτερικούς χώρους.

Εφαρμογές:

Μονωτές σε γραμμές υψηλής τάσης. Τερματικά καλωδίων εξωτερικής χρήσης και κυλινδρικές επιστρώσεις στηριγμάτων. Σπινθηριστές αυτοκινήτων.

Χαρακτηριστικά:

$\varepsilon \approx 6$, $\tan\delta$ χαμηλή.

3. ΓΥΑΛΙ

Το γυαλί λιώνει σε υψηλή θερμοκρασία και μπορεί να γίνει χυτό ή φουσητό στο απαιτούμενο σχήμα.

Εφαρμογές:

Μονωτές ομάδας σε γραμμές υψηλής τάσης. TV. Ακτίνες-X. Ραδιοφωνικές λυχνίες.

Χαρακτηριστικά:

Όπως η πορσελάνη.

4. ΜΙΚΑ

Η μικά είναι ένα φυσικό στοιχείο. Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη ρητίνη.

Εφαρμογές:

Μόνωση γεννητριών υψηλής τάσης. Συλλέκτης σε μηχανές συνεχούς ρεύματος.

5. ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ

Το πολυαιθυλένιο είναι ένα πολυμερές, σχηματισμένο από μακριές αλυσίδες ομάδων CH_2 . Χρησιμοποιείται σε πολλές καθημερινές εφαρμογές. Λειώνει μεταξύ 100°C και 150°C και χρησιμοποιείται σε σωλήνες, λάστιχα, μόνωση καλωδίων κ.τ.λ. Υπάρχει μια τροποποίηση του, η οποία δεν λειώνει και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασίες μέχρι 130°C . Αυτή ονομάζεται πολυαιθυλένιο ομοιοπολικού δεσμού, ή XLPE.

Εφαρμογή:

Μόνωση καλωδίων.

Χαρακτηριστικά:

$\varepsilon = 2.3$, $\tan\delta < 10 \cdot 10^{-4}$. Θερμοκρασία λειτουργίας 70°C . *ibid* XLPE 90°C . Ευλύγιστο.

6. ΣΥΝΘΕΤΙΚΟ ΚΑΟΥΤΣΟΥΚ

Υπάρχουν πολλοί τύποι συνθετικού καουτσούκ. Για τους σκοπούς της μόνωσης είναι σημαντικά το καουτσούκ *αιθυλενίου-προπυλενίου* (EPR) και το καουτσούκ σιλικόνης. Χρησιμοποιούνται για την ευλυγισία τους σε καλώδια και σύρματα. Επίσης χρησιμοποιούνται και για την ελαστικότητα τους καθώς τεντώνοντας το καουτσούκ μπορεί να δημιουργηθεί μια πίεση, η οποία χρησιμοποιείται στα αξεσουάρ καλωδίων.

Εφαρμογές:

Εύκαμπτα καλώδια, καλώδια ακτινών-Χ, αξεσουάρ καλωδίων.

Χαρακτηριστικά:

Υψηλό ε , μέχρι 10. Η $\tan\delta$ είναι μερικές φορές υψηλή. Ευλύγιστο, ελαστικό.

7. ΧΑΡΤΙ

Το χαρτί χρησιμοποιείται πάντα σε συνδυασμό με λάδι ή ρητίνη, με το εμποτισμένο χαρτί να αποτελεί έναν άριστο μονωτή.

Εφαρμογές:

Χαρτί με παχύρρευστο λάδι σε καλώδιο 10KV. Χαρτί με λεπτόρρευστο λάδι υπό χαμηλή πίεση σε μετασχηματιστές και καλώδιο με έγχυση ελαίου. Χαρτί εμποτισμένο με συνθετική ρητίνη σε κυλινδρικές επιστρώσεις στηριγμάτων.

Χαρακτηριστικά:

$\varepsilon \approx 3.5$, $\tan\delta \approx 25 \cdot 10^{-4}$. Το χαρτί εμποτισμένο με λάδι είναι ευλύγιστο, ενώ το χαρτί εμποτισμένο με ρητίνη σκληρό. [4]

4.5 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

4.5.1 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

Η μελέτη της διαβάθμισης των μονώσεων έχει παράξει μια απογραφή *υπερτάσεων* καθώς και μια έρευνα από μηχανισμούς που θέτουν σε κίνδυνο τα εξαρτήματα υψηλής τάσης σε *τάση λειτουργίας*. Θα πρέπει να εξακριβωθεί ότι τα εξαρτήματα θα μπορούν να αντέξουν αυτούς τους κινδύνους για μια διάρκεια ζωής από 30 έως 50 χρόνια. Γι' αυτό το λόγο έχουν σχεδιαστεί έλεγχοι οι οποίοι καθορίζονται στις *προδιαγραφές ελέγχου*. Αυτές οι προδιαγραφές περιγράφουν ελέγχους για κεραυνικές και διακοπτικές κρούσεις, εναλλασσόμενη και συνεχή τάση, σε συνδυασμό με κύκλους θερμότητας, κύκλους φορτίων, μηχανικά φορτία κ.τ.λ. Επιπρόσθετα, ο εξοπλισμός εξωτερικού χώρου υπόκειται σε περιβαλλοντικούς ελέγχους όπως ελέγχους βροχής, ελέγχους ρύπανσης, ελέγχους κλίματος, κ.τ.λ. Αν ένα εξάρτημα ικανοποιεί όλους αυτούς τους ελέγχους, υπάρχει σημαντική πιθανότητα να ανταποκριθεί επαρκώς σε συνθήκες λειτουργίας.

Οι περισσότερες προδιαγραφές περιλαμβάνουν τέσσερις κατηγορίες ελέγχου:

- Έλεγχοι τύπου
- Έλεγχοι δείγματος
- Έλεγχοι ρουτίνας
- Έλεγχοι μετά την εγκατάσταση

Οι *έλεγχοι τύπου* πραγματοποιούνται εφάπαξ σε ένα νέου σχεδιασμού εξάρτημα, προκειμένου να καθιερώσουν ότι αυτός ο σχεδιασμός θα ανταποκριθεί καλά κατά τη λειτουργία. Ο έλεγχος τύπου δεν επαναλαμβάνεται εκτός κι αν έχουν γίνει σημαντικές μετατροπές στο σχεδιασμό, όπως η χρήση άλλων υλικών, μια αύξηση στη μέγιστη επιτρεπτή τάση εφαρμογής σε δοκίμιο, μια αλλαγή στη μορφοποίηση, κ.τ.λ.

Οι *έλεγχοι δείγματος* πραγματοποιούνται πάνω σε δείγματα τα οποία επιλέγονται τυχαία από έναν αριθμό εξαρτημάτων τα οποία πρόκειται να προμηθευθούν στην αγορά. Για παράδειγμα 1 μετασχηματιστής τάσης στους 200, ή ένα δείγμα 10m καλωδίου στα 10km καλωδίου. Οι έλεγχοι δείγματος πραγματοποιούνται για να ελέγξουν εάν μια σειρά προϊόντων πληροί τη συμφωνημένη ποιότητα. Όπως στον έλεγχο τύπου, αυτοί οι έλεγχοι είναι καταστρεπτικοί και το δείγμα δεν παρέχεται στο χρήστη μετά τον έλεγχο.

Οι *έλεγχοι ρουτίνας* είναι έλεγχοι που πραγματοποιούνται σε όλα τα είδη τα οποία πρόκειται να προμηθευθούν στην αγορά. Είναι μη καταστρεπτικοί έλεγχοι.

Οι *έλεγχοι μετά την εγκατάσταση* είναι συμπληρωματικοί των ελέγχων ρουτίνας. Σε μερικές περιπτώσεις ένα εξάρτημα εγκαθίσταται σε καθορισμένη θέση· για παράδειγμα, ένας μεγάλος μετασχηματιστής ισχύος ο οποίος ήταν πολύ μεγάλος για να μεταφερθεί διά θαλάσσης αέρας, ή ένα κύκλωμα ενός υπόγειου καλωδίου ισχύος. Ο έλεγχος πραγματοποιείται για να εξετάσει εάν το εγκατεστημένο προϊόν είναι κατάλληλο για χρήση.

Οι προδιαγραφές ελέγχου βασίζονται σε μια προκαθορισμένη τάση λειτουργίας όπως θα εξεταστεί στην ενότητα 4.5.2 που ακολουθεί.

4.5.2 ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Προκειμένου να τυποποιηθεί ο εξοπλισμός υψηλής τάσης και να αποκτηθούν ενιαίες προδιαγραφές, έχουν τυποποιηθεί τα επίπεδα τάσης των δικτύων.

Τρεις ορισμοί παίζουν ρόλο:

- U = η πολιτική τάση, που καθορίζει το όνομα ενός δικτύου.
Ένα δίκτυο 400KV αναφέρεται στην εναλλασσόμενη τάση μεταξύ των γραμμών.
- U_m = η μέγιστη τάση μεταξύ των γραμμών η οποία μπορεί να επιτραπεί για μια απεριόριστα μεγάλη περίοδο. Η U_m είναι συνήθως 5 με 15% υψηλότερη από την U .
- U_0 = το χαρακτηριστικό όριο της τιμής της τάσης μεταξύ αγωγού και γης.
Άρα $U_0 = \frac{U}{\sqrt{3}}$. Στις προδιαγραφές ελέγχου, η U_0 είναι η πιο σημαντική τιμή, αφού οι έλεγχοι των τάσεων καθορίζονται σε πολλαπλάσια της U_0 .

Διεθνής προέλευση	Βρετανική προέλευση	Αμερικάνικη προέλευση
10 KV	11 KV	12.5 KV
20 KV	22 KV	23 KV
35 KV	33 KV	35 KV
50 KV	66 KV	69 KV
110 ή 150 KV	132 KV	130 KV
220 KV	220 KV	230 KV
400 KV	400 KV	345 KV
800 KV	–	500 KV
–	–	765 KV

Πίνακας 4.5.2-1 : Συχνότερα χρησιμοποιούμενες τάσεις U των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος

Παρόλο που τα επίπεδα παρέκκλισης είναι γνωστά, ο παραπάνω πίνακας δίνει μια ρεαλιστική εικόνα των συχνότερα χρησιμοποιούμενων τάσεων U των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ένα υποσχόμενο ξεκίνημα έγινε προς την τυποποίηση των συστημάτων συνεχούς ρεύματος με την επιλογή του 1x100KV στην πρώτη υποθαλάσσια εγκατάσταση και μερικών 2x200KV και 2x400KV συστημάτων λίγο αργότερα. Ωστόσο, αυτή η τυποποίηση δεν παρέμεινε, με αποτέλεσμα όλα τα είδη αυθαίρετων επιπέδων τάσης να έχουν από τότε εγκατασταθεί. [3]

Αναφορές

- [1] Μαινεμενλής, Χ., «Τεχνική του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007.
- [2] Monteith, A.C., Vaughan, H.R., (original authors), Johnson, A.A., (revised by), "Insulation Coordination", Chapter 18.
- [3] Kreuger, F., "Industrial High Voltage", (Volume II), Delft University of Technology, Netherland 1992.
- [4] Kreuger, F., "Industrial High Voltage", (Volume I), Delft University of Technology, Netherland 1992.

¹ Βλέπε : Αναφορά [4] , Κεφάλαιο 7, Παράγραφος 3

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ”

5.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Η μέτρηση κρουστικών τάσεων ακόμα και μικρής διάρκειας δεν παρουσιάζει καθόλου δυσκολίες, εάν τα πλάτη είναι χαμηλά ή αν βρίσκονται στην κλίμακα των κιλοβόλτ μόνο. Η τεράστια ανάπτυξη κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριών δεκαετιών σε ότι αφορά την τεχνική των κοινών παλμογράφων, των ψηφιακών παλμογράφων ή των μεταβατικών καταγραφών, παρέχει όργανα με πολύ υψηλό εύρος ζώνης και τη δυνατότητα σύλληψης σχεδόν κάθε τύπου μεμονωμένων φαινομένων μικρής διάρκειας. Παρόλο που το σύνηθες εύρος της τάσης εισόδου αυτών των οργάνων είναι χαμηλό, ακροδέκτες (probes) Υ.Τ. ή υποβιβαστές για τάσεις έως μερικές 10δες KV είναι εμπορικά διαθέσιμοι.

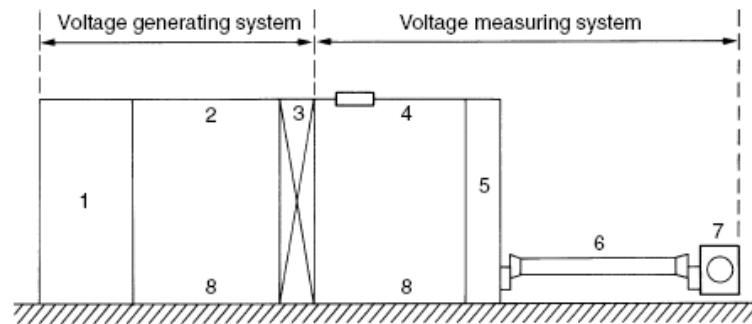
Τα προβλήματα εγείρονται στις πολύ υψηλότερες τάσεις και είναι ευρέως γνωστό ότι οι κρουστικές τάσεις με μεγέθη έως κάποια μεγαβόλτ χρησιμοποιούνται για ελέγχους και έρευνα. Οι καταμεριστές τάσης που είναι απαραίτητοι για να εξομαλύνουν αυτές τις τάσεις, είναι ειδικές συσκευές και υπάρχουν μόνο λίγοι κατασκευαστές παγκοσμίως που μπορούν να παράξουν τους εν λόγω καταμεριστές με επαρκή ακρίβεια. Ιδιόχειρες κατασκευές είναι συχνά επαρκείς εάν τα προβλήματα είναι γνωστά. Όμως η εφαρμογή τέτοιων καταμεριστών τάσης χρειάζεται θεμελιώδη κατανόηση των αλληλεπιδράσεων που υφίστανται στα συστήματα καταμερισμού της τάσης.

5.1.1 ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΑΣΗΣ

Στο σχήμα 5.1.1-1 δείχνεται η κοινή και επαρκέστερη διάταξη ενός οποιουδήποτε κυκλώματος ελέγχου τάσης εντός της περιοχής ελέγχου των Υ.Τ. Η *γεννήτρια τάσης* (1) συνδέεται σε ένα *δοκίμιο* (3) μέσω ενός *ακροδέκτη* (2). Τα τρία αυτά στοιχεία σχηματίζουν ένα σύστημα παραγωγής και μέτρησης της τάσης.

Ο *ακροδέκτης* (2) προς το δοκίμιο μπορεί να περιέχει σύνθετη ή ωμική αντίσταση σε εξασθενημένες κυματοώσεις - αν απαιτείται - ή να περιορίζει τα ρεύματα από βραχυκυκλώματα σε περίπτωση αποτυχίας του δοκιμίου. Το σύστημα μέτρησης ξεκινά από τα άκρα του δοκιμίου και περιέχει έναν *ακροδέκτη σύνδεσης* (4) προς τον *καταμεριστή τάσης* (5) και ένα *καταγραφικό όργανο* (7) του οποίου το *καλώδιο μέτρησης* ή *σήματος* (6) τοποθετείται μεταξύ των άκρων εισόδου και του κάτω μέρους (βραχίονα Χ.Τ.) του καταμεριστή. Η κατάλληλη *επιστροφή γείωσης* (8) θα πρέπει

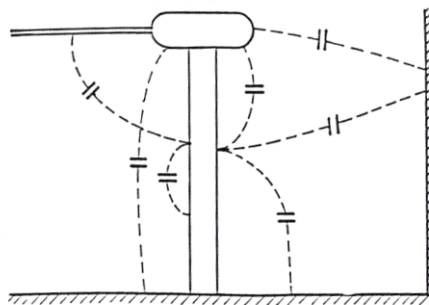
να εγγυάται ασήμαντες πτώσεις τάσης για αντίστοιχα υψηλά μεταβατικά φαινόμενα και να κρατά το δυναμικό της γείωσης όσο το δυνατό πιο κοντά σε αυτό της γης.



Σχήμα 5.1.1-1 : Βασικό σύστημα παραγωγής και μέτρησης τάσης [1]

5.1.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

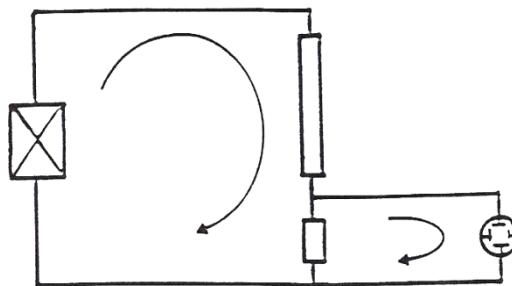
Οι μεγάλες διαστάσεις των σύγχρονων συστημάτων μέτρησης Υ.Τ. δεν επιτρέπουν τη θεώρηση των ηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών απαλλαγμένων από παράσιτα στοιχεία. Οι γεινιάζουσες διατάξεις, όπως επίσης και οι επιφάνειες της κτιριακής εγκατάστασης (δάπεδο, τοίχοι, οροφή), δεν μπορούν να απομακρυνθούν ικανοποιητικά με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου (σχήμα 5.1.2-1) και την αναπόφευκτη εμφάνιση αγωγιμοτήτων προς τη γη και προς τις άλλες επιφάνειες.



Σχήμα 5.1.2-1 : Παράσιτες χωρητικότητες καταμεριστή Υ.Τ.

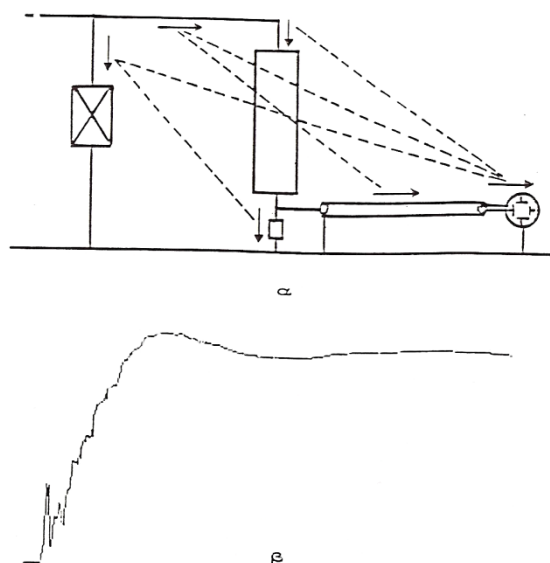
Η εισαγωγή της σύγχρονης ηλεκτρονικής στη σχεδίαση καταγραφικών οργάνων με ψηφιακή τεχνική (π.χ. αναλυτές ταχύτατων μεταβατικών φαινομένων με μετατροπή τους σε ψηφιακά), οδήγησε στην περαιτέρω ανάγκη για μείωση του μετρούμενου σήματος με αποτέλεσμα την αύξηση των διαστάσεων των καταμεριστών. Η αύξηση αυτή που γίνεται ούτως ή άλλως αναπόφευκτη και από τη χρησιμοποίηση ολοένα και αυξανόμενων τάσεων δοκιμής, προκαλεί μια ακόμα ισχυρότερη παραμόρφωση του καταγραφόμενου σήματος.

Η αύξηση των τάσεων δοκιμής δημιουργεί απαιτήσεις για μια επαρκή απόσταση μεταξύ του συστήματος παραγωγής και μέτρησης (σχήμα 5.1.1-1), αφενός μεν για την επίτευξη επαρκούς μόνωσης, αφετέρου δε για την απομάκρυνση κατά το δυνατό του συστήματος μέτρησης από το ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το σύστημα παραγωγής της Υ.Τ. Τα προαναφερθέντα επιτυγχάνονται με την αύξηση του μήκους του αγωγού τάσης [σχήμα 5.1.1-1 , (4)] και του καλωδίου μέτρησης [σχήμα 5.1.1-1 , (6)]. Επομένως δημιουργείται μια πολλαπλάσια αύξηση του μήκους του βρόχου μέτρησης (σχήμα 5.1.2-2), με αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής αυτεπαγωγής του η οποία προκαλεί ισχυρές ταλαντώσεις αφενός και σημαντικές ωμικές απώλειες αφετέρου.



Σχήμα 5.1.2-2 : Βρόχος του συστήματος μέτρησης

Συνέπεια των προαναφερθέντων είναι η παραμόρφωση τόσο της παραγόμενης τάσης $u_i(t)$, όσο και της μετρούμενης $u_o(t)$. Ειδικά η αύξηση του μήκους του καλωδίου μέτρησης (αρκετές δεκάδες μέτρα) προκαλεί μια σημαντική απώλεια πληροφοριών του μετρούμενου σήματος, ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί καλώδιο πολύ καλής ποιότητας.



Σχήμα 5.1.2-3 : Επαγόμενες τάσεις σε σύστημα μέτρησης Υ.Τ.

Λόγω των μεγάλων διαστάσεων των σύγχρονων συστημάτων Υ.Τ. δημιουργούνται έντονα ηλεκτρομαγνητικά πεδία¹ (σχήμα 5.1.2-3α), τα οποία προκαλούν υπερθέσεις επαγόμενων τάσεων και υψίσυχνων διαταραχών στο προς μέτρηση σήμα $u_o(t)$, οφειλόμενων σε ημιμόνιμα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με αποτέλεσμα η τάση $u_o(t)$ να καταγράφεται παραμορφωμένη (σχήμα 5.1.2-3β).

Για τη μείωση της επίδρασης των προαναφερθέντων διαταραχών χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές όπως :

- Η τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης σε θωρακισμένο μεταλλικό θάλαμο. Η τροφοδότηση τους από το ηλεκτρικό δίκτυο γίνεται μέσω μετασχηματιστή απομόνωσης και φίλτρων αποκοπής υψηλών συχνοτήτων.
- Η χρησιμοποίηση καλωδίου διπλής θωράκισης και η τοποθέτηση του σε μεταλλικό σωλήνα, κατά προτίμηση χάλκινο.
- Η θωράκιση του τμήματος Χ.Τ. του καταμεριστή.
- Η χρησιμοποίηση συστήματος γείωσης με χαμηλή αντίσταση και αυτεπαγωγή.

Επιπροσθέτως, καλώδια διπλής θωράκισης με δύο μονωμένα μπλεντάζ βελτιώνουν τη συμπεριφορά του συστήματος. Ιδανικές συνθήκες επιτυγχάνονται, τοποθετώντας το ομοαξονικό καλώδιο εντός πρόσθετου μεταλλικού σωλήνα ο οποίος συνδέεται με το δυναμικό της γης τουλάχιστον στο άκρο εισόδου του καλωδίου μέτρησης καθώς επίσης και στο τέλος του.

Στο σχήμα 5.1.1-1 παρατηρεί κανείς την *επιστροφή γείωσης (ground return)* (8). Στα συστήματα μέτρησης Υ.Τ. οι εκκενώσεις διάσπασης θα πρέπει πάντοτε να λαμβάνονται υπόψη, καθώς αναπτύσσονται μεγάλα και με έντονη κυμάτωση ρεύματα βραχυκύκλωσης με αποτέλεσμα κάθε επιστροφή γείωσης με απλούς ακροδέκτες να μην καταφέρνει να κρατήσει σε χαμηλή τιμή τις πτώσεις τάσης. Συνεπώς θα πρέπει να μειωθεί η σύνθετη αντίσταση.

Μεγάλα μεταλλικά φύλλα με υλικό υψηλής τιμής χωρητικότητας όπως ο χαλκός ή το αλουμίνιο είναι η βέλτιστη λύση. Πολλά εργαστήρια Υ.Τ. έχουν εγκατεστημένες τέτοιου τύπου επιστροφές γείωσης σε συνδυασμό με ένα κλωβό Faraday για την επίτευξη της πλήρους θωράκισης του εργαστηρίου. Τα επεκτεινόμενα μεταλλικά φύλλα παρέχουν παρόμοια απόδοση αλλά τουλάχιστον μεταλλικές ταινίες μεγάλου μήκους θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη μείωση της σύνθετης αντίστασης. Μια παράλληλη σύνδεση τέτοιων ταινιών επί επίπεδων επιφανειών μπορεί επιπλέον να μειώσει την επαγωγή και επομένως να προσεγγίσει την αξιοπιστία των τεράστιων μεταλλικών φύλλων².

Η χρησιμοποίηση των ανωτέρω τεχνικών μειώνει την επίδραση των μαγνητικών διαταραχών, όχι όμως πάντα σε σημαντικό βαθμό. Για την αποφυγή του φαινομένου

Corona που μπορεί να αλλάξει τα χαρακτηριστικά του αγωγού Υ.Τ. σημαντικά και να επηρεάσει τη μέτρηση, χρησιμοποιούνται μερικές φορές σωληνοειδείς αγωγοί μεγάλης διαμέτρου. Όπως έχει αποδειχθεί³, αντίθετα απ' ό τι αναμενόταν, η χρησιμοποίηση τέτοιων αγωγών μειώνει την ποιότητα του συστήματος μέτρησης.

Οι μεγάλες διαστάσεις του συστήματος μέτρησης δεν επιτρέπουν να θεωρηθεί ότι αποτελείται από συγκεντρωμένα στοιχεία. Αναπόφευκτα το σύστημα αποκτά ιδιότητες γραμμής μεταφοράς με μεταβλητή κυματική αντίσταση, ειδικά στα σημεία σύνδεσης των στοιχείων του συστήματος μεταξύ τους.

Κάθε στοιχείο του συστήματος μέτρησης μπορεί να προσομοιωθεί με κυλινδρικό αγωγό του οποίου η κυματική αντίσταση Z δίνεται από τη σχέση

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{v \cdot C} \quad (5.1.2-1)$$

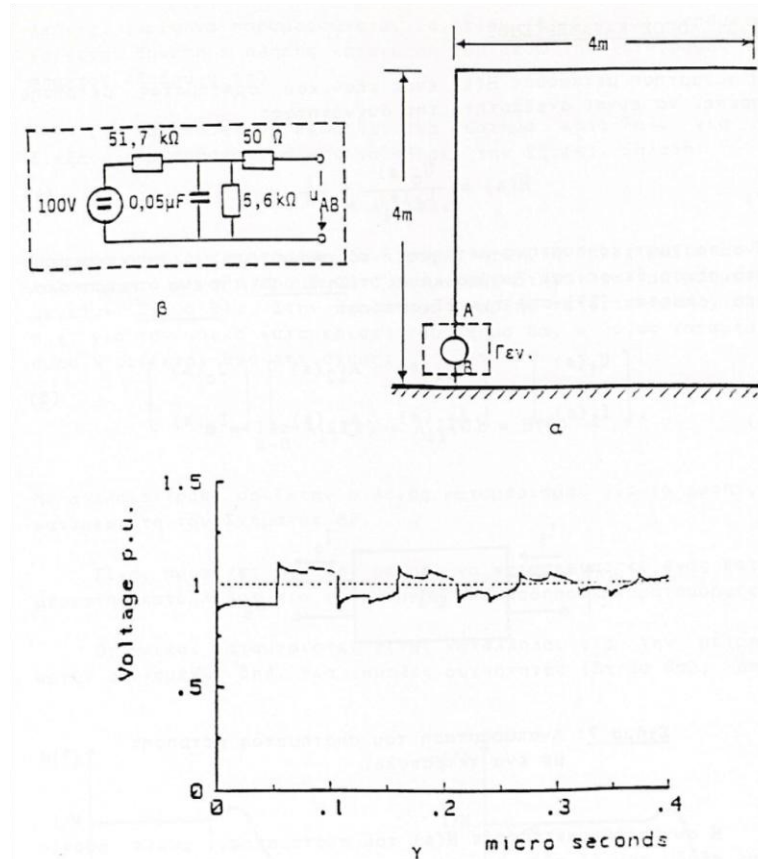
όπου

L η αυτεπαγωγή του αγωγού, C η χωρητικότητά του ως προς γη και v η ταχύτητα διάδοσης της τάσης στον αγωγό.

Η κυματική αντίσταση Z δεν παραμένει σταθερή κατά μήκος του κάθε στοιχείου του συστήματος. Η κυματική αντίσταση του καταμεριστή π.χ. μεταβάλλεται σημαντικά αν ληφθεί υπόψη η διαφορετική κατανομή των παράσιτων χωρητικοτήτων κατά μήκος της στήλης του⁴, η οποία επηρεάζει σημαντικότερα τη συνολική ως προς γη χωρητικότητα C της σχέσης 5.1.2-1. Η αυτεπαγωγή L μεταβάλλεται επίσης σημαντικά κατά μήκος του βρόχου του συστήματος μέτρησης. Οι αλλαγές της κυματικής αντίστασης προκαλούν σημαντικές ανακλάσεις/διαθλάσεις του κύματος $u_i(t)$ με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πλήθους ανακλώμενων/διαθλώμενων κυμάτων που κατά την όδυσή τους δημιουργούν τοπικές απότομες μεταβολές της τάσης. Είναι επομένως αναγκαία σε ορισμένα σημεία του συστήματος η τοποθέτηση αντιστάσεων προσαρμογής για τη μείωση ή και εξάλειψη ανεπιθύμητων ανακλάσεων, όπως π.χ. σε ένα από τα άκρα του αγωγού Υ.Τ. και του καλωδίου μέτρησης. Η προσαρμογή σε άλλα σημεία του συστήματος δεν είναι δυνατή. Συνεπώς η επίδραση των οδευόντων κυμάτων χρειάζεται πλήρη υπολογισμό με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Η επίδραση των οδευόντων κυμάτων στη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών απόκρισης ενός συστήματος φαίνεται στο παράδειγμα του σχήματος 5.1.2.-4. Η διάταξη του σχήματος 5.1.2-4α περιλαμβάνει ένα γυμνό χάλκινο αγωγό διατομής 1.5 mm^2 που αποτελείται από ένα οριζόντιο τμήμα μήκους 4 m που βρίσκεται σε ύψος 4 m από την επιφάνεια της γης. Στο έδαφος βρίσκεται μια γεννήτρια η οποία τροφοδοτεί τον αγωγό μέσω ενός κατακόρυφου αγωγού μήκους επίσης 4 m . Η γεννήτρια,

το ισοδύναμο κύκλωμα της οποίας φαίνεται στο σχήμα 5.1.2-4β, παράγει μοναδιαίες βηματικές τάσεις των οποίων η αναλυτική μορφή σχεδιάζεται με διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 5.1.2-4γ.



Σχήμα 5.1.2-4 : Επίδραση των οδευόντων κυμάτων στην απόκριση κυκλώματος που αποτελείται μόνο από ένα χάλκινο αγωγό. Με αρχικά συμβολίζονται αντιστοίχως τα (α) Διάταξη κατακόρυφου-οριζόντιου αγωγού, (β) Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας βηματικών τάσεων, (γ) Απόκριση (u_{AB}) του συστήματος στην είσοδο της γεννήτριας (διακεκομμένη γραμμή)

Για τον υπολογισμό της τάσης στην είσοδο του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα υπολογιστή. Για την προσομοίωση του κυκλώματος των δύο αγωγών αυτοί διαιρέθηκαν σε 20 τμήματα ο καθένας, μήκους Δl_i ($\Delta l_i = 20 \text{ cm}, i = 1, 2, 3, \dots, 20$), των οποίων υπολογίστηκε η χωρητικότητα C_i ως προς γη και επομένως και η κυματική της αντίσταση $Z_i = 1/(\nu \cdot C_i)$, όπου ν η ταχύτητα όδευσης του κύματος στους ανωτέρω αγωγούς. Ο υπολογισμός της απόκρισης έγινε με βήματα $\tau = \nu/\Delta l_i = 1,5 \text{ ns}$.

Αφού το κύκλωμα τροφοδοτείται με τη μοναδιαία βηματική τάση και δεν περιλαμβάνει κανένα ηλεκτρικό στοιχείο (παρά μόνο τους δύο χάλκινους αγωγούς), θα ήταν αναμενόμενο η τάση στην είσοδο του να ήταν η ίδια η τάση που παράγει η γεννήτρια. Αντίθετα λόγω της επίδρασης των οδευόντων κυμάτων γίνεται μια προφανής

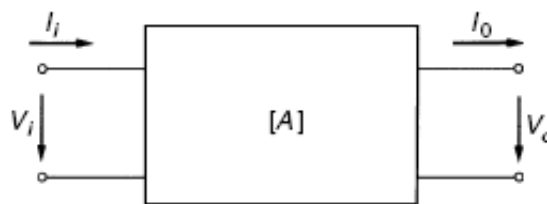
παραμόρφωση της τάσης u_{AB} η οποία αντί της αναμενόμενης μοναδιαίας βηματικής τάσης (διακεκομμένη γραμμή) έχει τη μορφή αυτής του σχήματος 5.1.2-4γ.

Στο πραγματικό σύστημα που υπάρχουν περισσότερα σημεία ασυνέχειας της κυματικής αντίστασης, οι ανακλάσεις των οδευόντων κυμάτων είναι πολλαπλάσιες και η συμμετοχή τους στη διαμόρφωση της απόκρισης σημαντικότερη. [2,1]

5.1.3 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Υπερθεματίζοντας επί των προαναφερθέντων, μπορεί να υποθεθεί ότι το σύστημα μέτρησης περιλαμβάνει τέσσερις κύριες συνιστώσες με σχεδόν διαφορετική ηλεκτρική συμπεριφορά μεταξύ τους. Η προσομοίωση αυτών των συνιστωσών εξαρτάται από το απαιτούμενο εύρος συχνότητας για μέτρηση της τάσης επί του δοκιμίου. Συνεπώς, μια εκτίμηση αυτού του εύρους συχνότητας θα πρέπει να προηγείται της προσομοίωσης.

Το σύστημα μέτρησης τάσης που περιγράφεται στο σχήμα 5.1.1-1 είναι ένα δίκτυο τεσσάρων ακροδεκτών και επομένως μπορεί να αναπαρασταθεί όπως στο σχήμα 5.1.3-1.



Σχήμα 5.1.3-1 : Αναπαράσταση του συστήματος μέτρησης ως δικτύου τεσσάρων ακροδεκτών

Το V_i υποδεικνύει την τάση στο δοκίμιο [σχήμα 5.1.1-1,(3)] και η τάση εξόδου V_o είναι αυτή που εμφανίζεται στο όργανο καταγραφής, π.χ. στην οθόνη ενός παλμογράφου ή ενός κρουστικού καταγραφέα. Οι τάσεις εισόδου V_i είναι είτε συνεχείς σταθερής κατάστασης τάσεις για συστήματα παραγωγής Σ.Ρ. ή Ε.Ρ, ή μεμονωμένες περιπτώσεις για κρουστικές τάσεις. Σε κάθε περίπτωση τα στιγμιαία πλάτη θα αλλάξουν στο χρόνο, ακόμα και για τάσεις Σ.Ρ. με περιοδική κυμάτωση.

Για μια ημιτονοειδή τάση εισόδου $u_i(t) = V_{mi} \sin(\omega t + \varphi_i)$ το μέγεθος V_{m0} και η φασική γωνία φ_0 της τάσης εξόδου $u_o(t) = V_{m0} \sin(\omega t + \varphi_0)$ μπορούν να προσδιοριστούν είτε μέσω υπολογισμών με γνωστές τις παραμέτρους του συστήματος ή μέσω μετρήσεων, παρόλο που τέτοιες μετρήσεις είναι δύσκολο να εκτελεστούν για πολύ υψηλούς λόγους των $\frac{V_{mi}}{V_{m0}}$. Η απόκριση συχνοτήτων του συστήματος μπορεί τότε

να υποδιαιρεθεί σε μια απόκριση πλάτους (συχνότητας) $H(\omega) = \frac{V_{m0}}{V_{mi}}$ και μια απόκριση φάσης (συχνότητας) $\varphi(\omega) = \varphi_0(\omega) - \varphi_i(\omega)$. Είναι γνωστό ότι αμφότερες οι ποσότητες δύνανται να αναπαρασταθούν μέσω υποτιθέμενων πολύπλοκων πλατών $V_i = V_{mi} \exp(j\varphi_i)$ και $V_0 = V_{m0} \exp(j\varphi_0)$, με τη σχέση μεταφοράς ή συνάρτηση απόκρισης του συστήματος να είναι

$$H(j\omega) = \frac{V_{mi}}{V_{m0}} = |H(j\omega)| \exp\{j[\varphi_0(\omega) - \varphi_i(\omega)]\} \quad (5.1.3-1)$$

όπου $|H(j\omega)| = H(\omega)$ όπως έχουν καθοριστεί στα προηγούμενα.

Θα πρέπει στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι στην ουσία ούτε οι τάσεις Σ.Ρ. με κυμάτωση αλλά ούτε και οι Ε.Ρ. τάσεις δοκιμών είναι αμιγώς ημιτονοειδείς, αλλά περιοδικές. Με το δεδομένο αυτό, οι τάσεις εισόδου μπορούν να περιγραφούν μέσω ενός – γενικευμένου – περιορισμένου αριθμού πολύπλοκων πλατών V_{ik} που προκύπτουν από την εφαρμογή σειρών Fourier

$$V_{ik} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u_i(t) \exp(-jk\omega t) dt = |V_{ik}| \exp(j\varphi_{ik}) \quad (5.1.3-2)$$

Τότε, το περιοδικό μέγεθος εισόδου αναλύεται σε ημιτονοειδείς συνιστώσες συχνοτήτων και τα πολύπλοκα πλάτη αναπαρίστανται από το πλάτος του φάσματος γραμμής $|V_{ik}|$ και το φάσμα της γωνιακής συχνότητας γραμμής. Για κάθε συνιστώσα με τη συχνότητα $\omega_k = k\omega$, η απόκριση του συστήματος μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από τη σχέση 5.1.3-1 και οι αποκρίσεις μπορούν να αθροιστούν με χρήση της αρχής της υπέρθεσης. Εφαρμόζοντας ξανά την πολύπλοκη φόρμα των σειρών Fourier, αυτή η άθροιση δίνει

$$u_0(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} V_{ik} H(j\omega_k) \exp(jk\omega t). \quad (5.1.3-3)$$

Είναι έτσι πλέον δυνατό να γίνει σύγκριση μεταξύ των $u_0(t)$ και $u_i(t)$ και να εκτιμηθούν τα σφάλματα.

Στην πράξη, η πραγματική τιμή της τάσης εισόδου $u_i(t)$ είναι άγνωστη καθώς μόνον η $u_0(t)$ είναι μετρήσιμη. Αυτή η τάση εξόδου όμως υφίσταται απώλεια πληροφοριών οι οποίες περιέχονται στο $H(j\omega)$. Συνεπώς ο υπολογισμός του φάσματος μιας εκτιμώμενης τιμής εισόδου, κρίνεται ένα πολύ αποτελεσματικό εργαλείο για την εκτίμηση του απαιτούμενου εύρους συχνοτήτων ή του εύρους ζώνης του συστήματος μέτρησής μας καθώς και των επιμέρους συνιστωσών του.

Η μέθοδος για τον προσδιορισμό της τιμής των χαρακτηριστικών μεταφοράς στο πεδίο ορισμού της συχνότητας για την εκτίμηση των σφαλμάτων μέτρησης που περιγράφηκε ως εδώ, είναι δύσκολη στη χρήση καθώς οι δύο τιμές $H(\omega)$ και $\varphi(\omega)$

είναι δύσκολο να μετρηθούν λόγω των μεγάλων «συντελεστών κλίμακας» των μετρητικών συστημάτων. Για συστήματα μέτρησης Υ.Τ., τα χαρακτηριστικά μεταφοράς συνεπώς εκτιμώνται μέσω μιας μετρηθείσας (πειραματικής μονάδας) *βηματικής απόκρισης*⁵ η οποία συμβολίζεται με τον όρο $G(t)$ και για την οποία θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στη συνέχεια.

Η αρχή των χρόνων απόκρισης δεν μπορεί να παραβλεφθεί και χρησιμοποιείται ξανά στα σύγχρονα πρότυπα IEC που σχετίζονται με τα συστήματα μέτρησης. Για το λόγο αυτό, η αξία αυτής της τιμής η οποία δίνει μια εκτίμηση στην ποσοτικοποίηση των δεδομένων μεταφοράς ενός συστήματος μέτρησης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και να αναγνωρίζεται παρόλο που επιπρόσθετες παράμετροι απόκρισης είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν για τη συσχέτιση των βηματικών αποκρίσεων με άλλους τύπους σφαλμάτων μέτρησης⁶.

5.1.4 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΓΝΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Κάθε ανάλυση ενός σύνθετου και εξεζητημένου δικτύου όπως αυτό που περιγράφεται στο σχήμα 5.1.1-1 είτε αυτή πραγματοποιείται στο πεδίο ορισμού της συχνότητας ή του χρόνου, βασίζεται σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα το οποίο μπορεί να αντιπροσωπεύει όσο το δυνατό ακριβέστερα τη φυσική πραγματικότητα. Παρόλο που η εκτέλεση αυτής της εργασίας είναι ιδιαίτερος δύσκολη υπόθεση για τα συστήματα μέτρησης Υ.Τ. λόγω των μεγάλων διαστάσεών τους και των σύνθετων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που εμπλέκονται σε αυτά, έχουμε ήδη προσομοιώσει το σύστημα με ένα απλό *τεσσάρων ακροδεκτών* ή *δύο πυλών* δίκτυο, όπως αυτό που εικονίζεται στο σχήμα 5.1.3-1. Η ανάλυση ή ο υπολογισμός κάθε αριθμητικής αποτίμησης αποτελεσμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί από κατάλληλα προγράμματα H/Y στο πεδίο ορισμού του χρόνου ή της συχνότητας. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ωστόσο το γεγονός ότι η επίδραση των ιδιαίτερων παραμέτρων του συστήματος καθίσταται πολύ δύσκολο να εντοπιστεί.

Η αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος μέτρησης (σχήμα 5.1.1-1) μέσω ενός συστήματος τεσσάρων ακροδεκτών επιβάλλει ωστόσο συγκεκριμένους περιορισμούς. Το θεώρημα των οδευόντων κυμάτων ή των κατανεμημένων παραμέτρων χρησιμοποιείται επίσης για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος κατά τη διάρκεια αιφνίδιων μεταβολών της τάσης και επομένως υποτίθεται ότι τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα είναι ημιμόνιμα στις δύο κατευθύνσεις και κάθετα ως προς την κατεύθυνση της κυματικής διάδοσης. Αυτές οι συνθήκες μειώνουν κατά κάποιο τρόπο την εγκυρότητα των υπολογισμών όταν οι διαστάσεις του συστήματος μέτρησης είναι πολύ μεγάλες.

Οι περιορισμοί είναι προφανώς ευθέως συνυφασμένοι με τον προσδιορισμό μιας τάσης ως μιας αυτόνομης ποσότητας στο διάστημα εντός ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, και όσο οι διαστάσεις των συστημάτων Υ.Τ. είναι της τάξης των μέτρων, η ημιμόνιμη κατάσταση των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων λίγο έως πολύ περιορίζεται.

Με δεδομένους αυτούς τους περιορισμούς, μπορούμε ωστόσο να ξεκινήσουμε ένα γενικευμένο υπολογισμό του δικτύου των τεσσάρων ακροδεκτών (σχήμα 5.1.3-1) και στη συνέχεια να εφαρμόσουμε τα αποτελέσματα σε ισοδύναμα κυκλώματα. Ο μετασχηματισμός Laplace θα χρησιμοποιηθεί, με τη σύνθετη συχνότητα $s = \sigma + j\omega$ να είναι ο τελεστής Laplace. Οι παράμετροι εισόδου και εξόδου μπορούν να περιγραφούν από την εξίσωση πίνακα

$$\begin{bmatrix} V_i(s) \\ I_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(s) & A_{12}(s) \\ A_{21}(s) & A_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_o(s) \\ I_o(s) \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} V_o(s) \\ I_o(s) \end{bmatrix} \quad (5.1.4-1)$$

όπου $[A]$ είναι ο πίνακας του δικτύου που καθορίζεται από αυτή τη σχέση.

Το σύστημα μέτρησης θα φορτίσει το σύστημα παραγωγής και επομένως η σύνθετη αντίσταση εισόδου του συστήματος μέτρησης είναι κάποιες φορές απαραίτητη. Καθώς το ρεύμα εξόδου I_o για ένα σύστημα καταμερισμού της τάσης με μεγάλο λόγο ή παράγοντα κλίμακας N δεν μπορεί να επηρεάσει την είσοδο, η συνθήκη $I_o = 0$ μπορεί να θεωρείται πάντοτε δεδομένη. Από τη σχέση 5.1.4-1 η σύνθετη αντίσταση εισόδου είναι

$$Z_i(s) = \frac{V_i(s)}{I_i(s)} = \frac{A_{11}(s)}{A_{21}(s)} \quad (5.1.4-2)$$

Το πιο σημαντικό μέγεθος είναι η συνάρτηση της μεταφοράς της τάσης. Για $I_o = 0$, αυτή η συνάρτηση γίνεται

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{A_{11}(s)} \quad (5.1.4-3)$$

Σε αυτή τη σχέση εμπεδώνεται ο παράγοντας κλίμακας N του συστήματος καταμερισμού της τάσης. Ο παράγοντας (ή ο λόγος) αυτός είναι μια σταθερά για μέτριες συχνότητες μόνο και συνεπώς μπορούμε να εξάγουμε αυτό το λόγο από τη σχέση

$$N = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{V_i(s)}{V_o(s)} \right] = \lim_{s \rightarrow 0} [A_{11}(s)] = A_{11}(0) \quad (5.1.4-4)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς της τάσης (σχέση 5.1.4-3), είναι κατάλληλα κανονικοποιημένη από τον N . Συμβολίζοντας την κανονικοποίηση με $h(s)$, λαμβάνουμε

$$h(s) = NH(s) = \frac{A_{11}(0)}{A_{11}(s)} \quad (5.1.4-5)$$

Η μοναδιαία βηματική τάση μπορεί να βρεθεί εφαρμόζοντας το αντίστροφο ολοκλήρωμα Laplace στη σχέση μεταφοράς πολλαπλασιαζόμενο με $(1/s)$, το μετασχηματισμό Laplace ενός μοναδιαίου βήματος. Έτσι

$$G(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{s} H(s) \right] = L^{-1} \left[\frac{1}{sA_{11}(s)} \right] \quad (5.1.4-6)$$

Από τη σχέση 5.1.4-5 η κανονικοποιημένη μοναδιαία βηματική απόκριση είναι

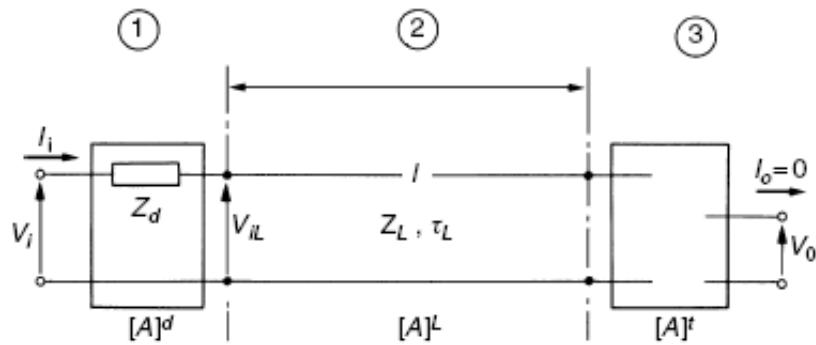
$$g(t) = NG(t) \quad (5.1.4-7)$$

Για ιδιαίτερα σύνθετες συναρτήσεις μεταφοράς οι οποίες συχνά εμπλέκονται σε μικτά κυκλώματα καταμερισμένων παραμέτρων, η εφαρμοσιμότητα της σχέσης 5.1.4-6 είναι περιορισμένη καθώς είναι πολύ δύσκολο να βρεθούν λύσεις στο πεδίο ορισμού του χρόνου. Δεν θα ασχοληθούμε όμως περαιτέρω με το εν λόγω ζήτημα καθώς κρίνεται ότι η μελέτη του ξεφεύγει από το πλαίσιο της εργασίας.

Τα γενικά αποτελέσματα που προηγήθηκαν, δύναται τώρα να εφαρμοσθούν σε πιο λεπτομερή συστήματα μέτρησης. Θα μπορούσαν να παρουσιαστούν πολυάριθμα παραδείγματα, ωστόσο θα ακολουθήσει μια αναπαράσταση θεμελιωμένη από τους *Asner*⁷, *Creed*⁸ και *Zaengl*⁹. Κατά τη διέπουσα αρχή της, αυτή ασχολείται με μια ικανοποιητική προσομοίωση του ακροδέκτη προς τον καταμεριστή τάσης, για παράδειγμα του απλού μεταλλικού καλωδίου ή αγωγού που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του δοκιμίου και του καταμεριστή. Ήταν για μεγάλο διάστημα αδύνατο να ανευρεθεί η επιρροή αυτού του ακροδέκτη καθώς κανένας παλμογράφος δεν είχε τη δυνατότητα να μετρήσει την πραγματική μοναδιαία βηματική απόκριση των συστημάτων. Συνεπώς ούτε η απόδοση των καταμεριστών τάσης που χρησιμοποιούντουσαν αλλά ούτε και η απόδοση ολόκληρου του συστήματος μέτρησης μπορούσε πραγματικά να ελεγχθεί. Ωστόσο, πολλές κατασκευαστικές λεπτομέρειες ενός καταμεριστή τάσης μπορούν να καταστρέψουν εντελώς το θεμελιωδώς καλό πλάνο το οποίο έχει βασιστεί σε θεωρητικές έρευνες.

Μέσω αυτής της εισαγωγής, μια πιο λεπτομερής αναπαράσταση του απλού δικτύου τεσσάρων ακροδεκτών (σχήμα 5.1.3-1) δείχνεται στο σχήμα 5.1.4-1. Τρεις τομείς δύο πυλών συνδυάζονται, σχηματίζοντας ένα *σύστημα τριών στοιχείων*. Τα σύστημα 1 αναπαριστά μια σύνθετη αντίσταση απόσβεσης Z_d στο άκρο εισόδου του ακροδέκτη 2 συνδέοντας την εν λόγω σύνθετη αντίσταση με το σύστημα καταμερισμού της τάσης 3, το οποίο τερματίζει τον ακροδέκτη.

Λόγω της πολύπλοκης δομής της σύνθετης αντίστασης εισόδου και της εξάρτησης της από τη συχνότητα, οι καταμεριστές τάσης δεν μπορούν επαρκώς να εναρμονιστούν με την κυματική σύνθετη αντίσταση Z_L του ακροδέκτη. Η σύνθετη αντίσταση απόσβεσης Z_d τοποθετείται για το λόγο αυτό στο άκρο εισόδου του ακροδέκτη, καθώς η θεωρία των οδευόντων κυμάτων μπορεί εύκολα να δείξει ότι μόνο σε αυτή τη θέση είναι εφικτή μια αποτελεσματική απόσβεση της κυμάτωσης.



Σχήμα 5.1.4-1 : «Σύστημα τριών στοιχείων» αποτελούμενο από σύστημα απόσβεσης (1), σύστημα μετάδοσης (2) και τερματικό σύστημα (3)

Ο ακροδέκτης 2 είναι επομένως προτιμότερο να θεωρείται ως μια γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες, προσομοιούμενη από την κυματική σύνθετη αντίσταση Z_L και το χρόνο όδευσης τ_L , πράγμα το οποίο συνεπάγεται ότι η χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους είναι σταθερή. Οι ακροδέκτες προς τον καταμεριστή τάσης αποτελούνται από μεταλλικούς αγωγούς ή μεταλλικά καλώδια, η διάμετρος των οποίων θα πρέπει να είναι η κατάλληλη ώστε να αποφεύγονται οποιεσδήποτε ισχυρές προεκκνώσεις. Το ότι τα κύματα πραγματικά οδεύουν με την ταχύτητα του φωτός φαίνεται εύκολα σε πολλές έρευνες¹⁰. Η απλή αναπαράσταση του ακροδέκτη μόνο από τη Z_L και το τ_L , επίσης επιβεβαιώνονται από τις έρευνες αυτές.

Στο σχήμα 5.1.4-1 δεν παριστάνονται το καλώδιο σήματος καθώς και το καταγραφικό όργανο. Όπως θα δειχθεί στην ενότητα 5.1.7, ένα καλώδιο σήματος χωρίς απώλειες (βλέπε σχήμα 5.1.1-1, στοιχείο 6) μπορεί να συνδεθεί στα διαφορετικά είδη καταμεριστών χωρίς να επηρεάζει την εκτίμηση της μοναδιαίας βηματικής απόκρισης. Σε αυτή τη διάταξη αποτελούν ένα μέρος του βραχίονα Χ.Τ. του καταμεριστή. Επίσης καθώς τα καταγραφικά όργανα (βλέπε σχήμα 5.1.1-1, στοιχείο 7) έχουν υψηλές τιμές σύνθετης αντίστασης εισόδου και μεγάλο εύρος φάσματος, η πιθανή επίδραση στην απόκριση είναι μικρή και μπορεί επομένως να παραληφθεί εάν τα όργανα είναι κατάλληλα συνδεδεμένα στους βραχίονες Χ.Τ. Σε αντίθεση με τα προλεχθέντα, σημαντικός παράγοντας επιρροής του χρόνου απόκρισης T ή T^o ενός συστήματος μπορεί να είναι η αντίσταση απόσβεσης – η οποία για το λόγο αυτό θα πρέπει να τοποθετείται στο άκρο εισόδου του ακροδέκτη -, καθώς και το μήκος τ_L του ακροδέκτη.

Μέχρι αυτό το σημείο οι προδιαγραφές του τερματικού ή συστήματος καταμερισμού της τάσης 3 δεν είχαν καθοριστεί λεπτομερώς, καθώς το σύστημά τους εξαρτάται από τον τύπο του καταμεριστή που θα χρησιμοποιηθεί. Για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων

μεταφοράς, χρησιμοποιείται η σχετική αναπαράσταση πίνακα σύμφωνα με τη σχέση 4.7.4-1. Έτσι ο πίνακας $[A]$ ολόκληρου του συστήματος μέτρησης είναι

$$[A] = [A]^d \cdot [A]^L \cdot [A]^t \quad (5.1.4-8)$$

Ο πίνακας $[A]$ μπορεί εν μέρει να λυθεί εισάγοντας τα κατάλληλα στοιχεία του πίνακα για τα $[A]^d$ και $[A]^L$ όπως αυτά προσδιορίζονται από τα στοιχεία του κυκλώματος του σχήματος 5.1.4-1. Οι λεπτομέρειες του υπολογισμού είναι εκτενείς και για το λόγο αυτό παραλείπονται εδώ. Τα ακόλουθα αποτελέσματα ωστόσο, είναι γενικού ενδιαφέροντος.

Ο κανονικοποιημένη συνάρτηση μεταφοράς $h(s) = NV_o(s)/V_i(s)$ περιγράφεται καλύτερα εισάγοντας συντελεστές ανάκλασης K για οδεύοντα κύματα, οι οποίοι ανακλώνται είτε από το σύστημα τερματισμού (K_t) ή από το σύστημα απόσβεσης (K_d). Οι συντελεστές αυτοί ορίζονται από τις σχέσεις

$$K_t(s) = \frac{\frac{A_{11}^t(s)}{A_{21}^t(s)} - Z_L}{\frac{A_{11}^t(s)}{A_{21}^t(s)} + Z_L} = \frac{Z_t(s) - Z_L}{Z_t(s) + Z_L} \quad (5.1.4-9)$$

και

$$K_d(s) = \frac{\frac{A_{12}^d(s)}{A_{11}^d(s)} - Z_L}{\frac{A_{12}^d(s)}{A_{11}^d(s)} + Z_L} = \frac{Z_d(s) - Z_L}{Z_d(s) + Z_L} \quad (5.1.4-10)$$

Με αυτούς τους συντελεστές, η συνάρτηση μεταφοράς είναι

$$h(s) = e^{-t_L s} \cdot \frac{Z_d(0) + Z_L}{Z_d(s) + Z_L} \cdot \frac{1 + K_t(s)}{1 + K_t(0)} \times \frac{1 - K_t(0) \cdot K_d(0)}{1 - K_t(s) \cdot K_d(s) \cdot \exp(-2\tau_L s)} \cdot \frac{A_{11}^t(0)}{A_{11}^t(s)} \quad (5.1.4-11)$$

Ο ενυπάρχων χρόνος υστέρησης που προκαλείται από το χρόνο όδευσης του ακροδέκτη τ_L , μπορεί καθαρά να παρατηρηθεί από τον πρώτο παράγοντα· ο τελευταίος παράγοντας αντιπροσωπεύει την κανονικοποιημένη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος καταμερισμού της τάσης. Η κανονικοποιημένη βηματική απόκριση θα μπορούσε να υπολογιστεί με χρήση της σχέσης 4.7.4-6. Μια γρήγορη ματιά στη συνάρτηση μεταφοράς υποδεικνύει τις δυσκολίες που συναντώνται κατά το μετασχηματισμό της στο πεδίο ορισμού του χρόνου.

Σε γενικές γραμμές, το σύστημα καταμερισμού της τάσης το οποίο εκφράζεται κατά κύριο λόγο από το χρόνο απόκρισής του T_t , θα ρυθμίζει στην ουσία τα χαρακτηριστικά μεταφοράς ολόκληρου του συστήματος. Συνεπώς δικαιολογείται η πραγμάτευση του συστήματος τερματισμού προκαταβολικά και όντας αυτό απομονωμένο από τον ακροδέκτη, προκειμένου να επιτευχθεί μια γενική κατανόηση όλων των συστημάτων καταμερισμού Υ.Τ. και των πολλαπλών εφαρμογών τους.

5.1.5 ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ

Οι καταμεριστές τάσης για τάσεις Σ.Ρ., Ε.Ρ. ή κρουστικές, αποτελείται από αντιστάσεις ή πυκνωτές ή κατάλληλους συνδυασμούς αυτών των στοιχείων. Τα πηνία γενικότερα δεν χρησιμοποιούνται στους καταμεριστές τάσης για χρήση σε ελέγχους, παρόλο που υφίστανται *επαγωγικοί καταμεριστές τάσης* και οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση τάσεων ισχυρών συχνοτήτων¹¹, όντες ανεξάρτητοι από τους επαγωγικούς μετασχηματιστές τάσης όπως αυτοί χρησιμοποιούνται στη μεταφορά ισχύος.

Τα στοιχεία των προαναφερθέντων καταμεριστών Υ.Τ. είναι συνήθως εγκατεστημένα εντός μονωτικών δοχείων κυλινδρικού σχήματος με τα τερματικά της γης και της Υ.Τ. στο κάθε άκρο αντίστοιχα. Το ύψος ενός καταμεριστή Υ.Τ. εξαρτάται τελικά από την εξωτερική τάση εκκένωσης και αυτό είναι επακόλουθο του μέγιστου ορίου της εφαρμοζόμενης τάσης· αυτή η τάση εκκένωσης επηρεάζεται ακόμη από την κατανομή του δυναμικού και είναι επομένως επηρεάσιμη και από την κατασκευή του ηλεκτροδίου Υ.Τ., όπως για παράδειγμα το ανώτατο ηλεκτρόδιο.

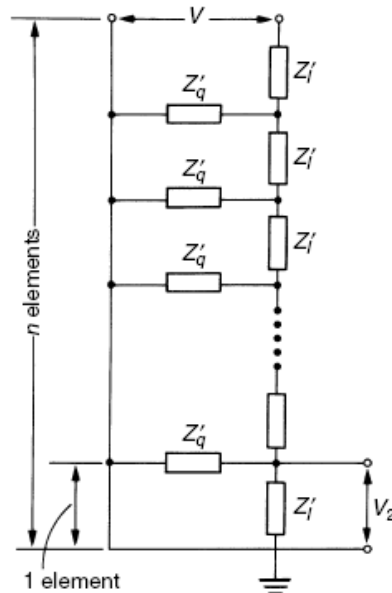
Για τάσεις στην περιοχή των μεγαβόλτ, το ύψος των καταμεριστών γίνεται μεγάλο καθώς μπορεί κανείς να αξιώσει τις ακόλουθες αποστάσεις αναφοράς μεταξύ του ανώτατου ηλεκτροδίου και της γης:

- 2.5 με 3 m/MV για τάσεις Σ.Ρ.
- 2 με 2.5m/MV για κεραυνικές κρουστικές τάσεις
- Έως ή περισσότερο από 5m/MV (r.m.s.) για τάσεις Ε.Ρ.
- Έως και περισσότερο από 4m/MV για διακοπτικές κρουστικές τάσεις

Επειδή οι τάσεις διάσπασης στον ατμοσφαιρικό αέρα καθίστανται ισχυρά μη γραμμικές με το μέγεθος της τάσης για αστραπιαίες και Ε.Ρ. κρουστικές τάσεις, οι παραπάνω προτεινόμενες αποστάσεις μπορούν να θεωρηθούν μόνο ως κατευθυντήριες οδηγίες.

Τα δυσκολότερα προβλήματα σε μια προσομοίωση του πραγματικού δικτύου των καταμεριστών τάσης είναι στην ανεπαρκή αναπαράσταση των παράσιτων χωρητικότητων (βλέπε σχήμα 3.4.3.2-1). Αν και η θέση και οι διαστάσεις των ενεργών μερών όπως για παράδειγμα οι ωμικές ή οι χωρητικές μονάδες εντός ενός καταμεριστή τάσης είναι γνωστές επακριβώς, οι ίδιοι ισχυρισμοί δεν δύναται να επιτευχθούν για παράσιτες χωρητικότητες. Θα ήταν εξίσου πολύ δύσκολο να παρουσιάσει κανείς τα ισοδύναμα κυκλώματα με παράσιτες χωρητικότητες τα οποία χαρακτηριστικά ερμηνεύουν το φυσικό μέγεθος των μονάδων, υποθέτοντας έναν πολύ υψηλό αριθμό στοιχείων ανισόποσων τιμών. Πέρα από τις θεμελιώδεις δυσκολίες στην πραγματοποίηση αναλυτικών υπολογισμών σε τέτοιου είδους κυκλώματα, τα αποτελέσματα στη συνέχεια σχετίζονται με τον υψηλό αριθμό παραμέτρων.

Είναι αναγνωρισμένο από πολλούς ερευνητές ότι ένα δικτύωμα περιοδικών ή κατανεμημένων παραμέτρων με *ισομερώς* κατανεμημένες παραμέτρους, είναι πιθανώς η καλύτερη συμβιβαστική λύση προκειμένου να προσομοιωθούν τα χαρακτηριστικά μεταφοράς μέσω ισοδύναμων κυκλωμάτων. Ένα τέτοιο δίκτυο κατανεμημένων παραμέτρων για ένα γενικευμένο καταμεριστή τάσης δείχνεται στο σχήμα 5.1.5-1.



Σχήμα 5.1.5-1 : Ισοδύναμο κύκλωμα καταμεριστών τάσης με κατανεμημένες παραμέτρους

Το σύστημα τερματισμού $[A]^t$ του σχήματος 5.1.4-1 προσομοιώνεται τώρα από ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων ή τομέων (n) και οι συνδεδεμένες σε σειρά n σύνθετες αντιστάσεις Z'_i προκαλούν μείωση της τάσης. Ένας ισοδύναμος αριθμός σύνθετων αντιστάσεων Z'_q προς τη γη έχουν κατανεμηθεί κατά μήκος αυτής της στήλης. Η τάση εισόδου V είναι κατ' αυτό τον τρόπο μειωμένη στην τιμή της χαμηλής τάσης εξόδου V_2 . Οι συνολικές σύνθετες αντιστάσεις καθορίζονται τότε από τις σχέσεις

$$Z_i = \sum Z'_i = nZ'_i \quad (5.1.5-1)$$

και

$$Z_q = \left(\sum \frac{1}{Z'_q} \right)^{-1} = \frac{Z'_q}{n} \quad (5.1.5-2)$$

Ο αριθμός n είναι μέσω αυτής της θεώρησης ισοδύναμος με το λόγο τάσης ή παράγοντα κλίμακας V/V_2 του καταμεριστή· μπορεί να διαφέρει από το N όπως προσδιορίστηκε προηγουμένως, καθώς η σύνθετη αντίσταση Z_d του ακροδέκτη (βλέπε σχήμα 5.1.4-1) μπορεί να μετατρέψει το λόγο ολόκληρου του συστήματος μέτρησης της τάσης.

Η απεικόνιση σε πίνακα ενός τέτοιου δικτύου το οποίο είναι ισοδύναμο ενός δικτύου γραμμής μεταφοράς, είναι γνωστή. Εφαρμόζοντας τις σχέσεις 5.1.4-3 και 5.1.4-5 σε αυτό το δίκτυο, μπορεί κανείς εύκολα να βρει τον κανονικοποιημένο παράγοντα μεταφοράς (με το δείκτη t να σημαίνει τερματισμό), ο οποίος είναι

$$h_t(s) = \frac{nV_2}{V} = \frac{nsinh\frac{1}{n}\sqrt{Z_l(s)/Z_q(s)}}{sinh\sqrt{Z_l(s)/Z_q(s)}} \quad (5.1.5-3)$$

Η κανονικοποιημένη μοναδιαία βηματική απόκριση είναι

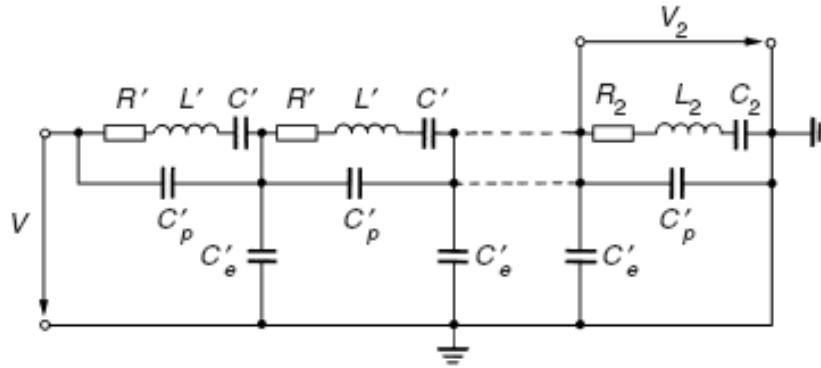
$$g_t(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{s} h_t(s) \right] \quad (5.1.5-4)$$

Αμφότερες οι σχέσεις μπορούν τώρα να υπολογιστούν και να αναλυθούν για διαφορετικά ισοδύναμα κυκλώματα, για τα οποία οι σύνθετες αντιστάσεις Z'_l και Z'_q έχουν προσδιοριστεί. Ωστόσο η Z'_q πάντοτε θα αναπαρίσταται από παράσιτες χωρητικότητες C'_e προς τη γη, καθώς δεν υπάρχει γνωστό σύστημα καταμερισμού της τάσης που θα μπορούσε να περιλαμβάνει οποιαδήποτε άλλα παθητικά στοιχεία σε αυτές τις θέσεις. Αυτή η παράσιτη χωρητικότητα συνεπώς θεωρείται ως ισότιμα καταμερισμένη¹².

5.1.5.1 ΧΩΡΗΤΙΚΟΙ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ

Είναι γνωστό ότι οι αμιγώς χωρητικοί καταμεριστές τάσης μπορούν να κατασκευαστούν είτε χρησιμοποιώντας μεμονωμένες μονάδες χωρητικότητας Υ.Τ. - για παράδειγμα έναν πυκνωτή συμπιεσμένου αερίου - ή χρησιμοποιώντας αρκετές συστοιχίες εν σειρά συνδεδεμένων μονάδων πυκνωτών σχηματίζοντας έτσι έναν πυκνωτή Υ.Τ.. Η έλλειψη παράσιτης χωρητικότητας προς τη γη στους πυκνωτές συμπιεσμένου αερίου παρέχει μια καλώς καθορισμένη χωρητικότητα Υ.Τ., μικρή σε τιμή και διαστάσεις, παρατήρηση μέσω της οποίας μπορεί να κατασκευαστεί ακόμη και ένας αμιγώς χωρητικός καταμεριστής τάσης με αρκετά καλή απόδοση στις υψηλές συχνότητες εάν ο βραχίονας Χ.Τ. ή ο πυκνωτής είναι κατασκευαστικά ενοποιημένοι όπως ένας τέτοιος πυκνωτής. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι αυτός ο πυκνωτής πρέπει να πλησιάζει τη χωρητικότητα Υ.Τ. και αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί για παράδειγμα με την εισαγωγή μιας συμμετρικής τοποθέτησης των πυκνωτών Χ.Τ. μεταξύ του αισθητήριου ηλεκτροδίου (2) και του δακτυλίου προστασίας (2') ή του υποστηρικτικού σωλήνα (3) (βλέπε σχήμα 3.4.3.1-2). Παρόλο που μια τέτοια κατασκευή είχε προταθεί από τους *Schwab* και *Pagel*¹³, παρεμφερή συστήματα μπορούν να μορφοποιηθούν με άλλες ομοαξονικές τοπολογίες¹⁴. Η εφαρμοσιμότητα σε πολύ υψηλές τάσεις ωστόσο, περιορίζεται κυρίως από το υψηλό κόστος τέτοιων κατασκευών και τις δυσκολίες που εμπίπτουν κατά την αντικατάσταση των βραχιόνων Υ.Τ. ή κατά την αλλαγή τους προκειμένου να διαφοροποιηθούν οι συντελεστές κλίμακας.

Επομένως απαιτείται μια πραγμάτευση χωρητικών καταμεριστών τάσης με συστοιχίες μονάδων πυκνωτών. Το δίκτυο κατανεμημένων παραμέτρων είναι ικανό να προσομοιώσει τις ιδιότητες μεταφοράς. Το σχήμα 5.1.5.1-1 απεικονίζει ένα τέτοιο δίκτυο, το οποίο μπορεί να εμπλέκει όλα τα πιθανά παθητικά στοιχεία του κυκλώματος.



Σχήμα 5.1.5.1-1 : Ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικών καταμεριστών τάσης.
 $R=nR', L=nL', C_e=nC_e', C=C'/n, C_p=C_p'/n, R_2=R', L_2=L', C_2=C'$

Οι πραγματικές συστοιχίες προσομοιώνονται τώρα από τις μονάδες πυκνωτών C' , και το L λαμβάνει υπόψη την υπάρχουσα επαγωγή. Η αντίσταση σειράς R' μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση μόνο μικρών απωλειών εντός των μονάδων χωρητικότητας C' , ή ακόμα και πραγματικών αντιστάσεων σε σειρά με τις εν λόγω μονάδες. Οι μικρές τιμές των παράσιτων χωρητικότητας που είναι παράλληλα συνδεδεμένες με τις στήλες συστοιχιών C_p' και τη γη C_e' ολοκληρώνουν το ισοδύναμο κύκλωμα.

Μια γρήγορη ματιά στη μοναδιαία βηματική απόκριση, η οποία παρουσιάζεται ως

$$g_t(t) = 1 - \frac{C_e}{6(C+C_p)} + 2 \exp(-at) \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k} \sinh(b_k t)}{AB} \quad (5.1.5.1-1)$$

όπου

$$A = \left(1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{Ck^2\pi^2}\right), \quad a = \frac{R}{2L} \quad (5.1.5.1-2)$$

και

$$B = \left(1 + \frac{C_p k^2 \pi^2}{C_e}\right), \quad b_k = \sqrt{\frac{k^2 \pi^2 \cdot A}{LC_e B}} \quad (5.1.5.1-3)$$

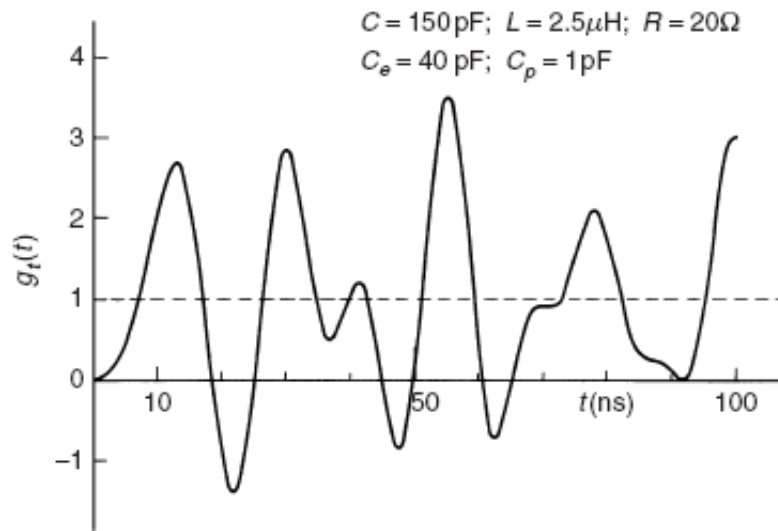
δείχνει μια κοντινή ομοιότητα με την αντίστοιχη μοναδιαία βηματική απόκριση των ωμικών καταμεριστών. Στην πράξη, αμφότερες οι συναρτήσεις είναι ίδιες αν η τιμή C στη σχέση 5.1.5.1-2 πλησιάζει άπειρες τιμές. Για πεπερασμένες τιμές της C οι οποίες

αντιπροσωπεύουν τους χωρητικούς καταμεριστές τάσης, η κύρια διαφορά είναι αρχικά συνυφασμένη με τον αρνητικό όρο $C_e/6(C + C_p) \cong C_e/6C$, ο οποίος είναι ανεξάρτητος του χρόνου και κατά συνέπεια και της συχνότητας. Ο όρος αυτός επανεμφανίζεται ως ένα αποτέλεσμα της διαδικασίας που ακολουθήσαμε για την κανονικοποίηση της μοναδιαίας βηματικής απόκρισης. Επομένως όλες οι επεξηγήσεις που αναφέρονται στην ορθή διαστασιολόγηση των συστοιχιών πυκνωτών, άπτονται επίσης αυτού του αποτελέσματος, το οποίο αναπαριστά τις πιθανές αποκλίσεις του λόγου n με το C_e .

Η χρονική εξάρτηση της μοναδιαίας βηματικής απόκρισης για τους *αμιγώς* χωρητικούς καταμεριστές – όπως επί παραδείγματι με $R = 0$ στο ισοδύναμο κύκλωμα – είναι προφανώς πολύ σύνθετη. Στη σχέση 5.1.5.1-2 με $R = 0$, ο όρος απόσβεσης $\exp(-at)$ θα ισοδυναμεί με τη μονάδα και όλες οι υπερβολικές συναρτήσεις μετατρέπονται σε τριγωνομετρικές. Η αριθμητική εκτίμηση αυτής της σχέσης για τη συγκεκριμένη περίπτωση είναι αδύνατη λόγω του άπειρου αριθμού των ημιτονοειδών όρων. Είναι επίσης μη ρεαλιστικό να μην υποτεθεί καθόλου ωμική αντίσταση, καθώς τουλάχιστον ο - εξαρτώμενος από τη συχνότητα - συντελεστής απωλειών του διηλεκτρικού θα προκαλέσει μια εξασθένηση. Για ένα απλό ισοδύναμο συνδεδεμένου σε σειρά πυκνωτή απωλειών, αυτός ο συντελεστής απωλειών είναι $\tan\delta = \omega R' C' = \omega R C$. Ωστόσο τα φαινόμενα χαλάρωσης εντός των διηλεκτρικών υλικών, ρυθμίζουν στην πραγματικότητα αυτόν τον συντελεστή απωλειών για τις υψηλές συχνότητες. Έχει επιβεβαιωθεί από μετρήσεις¹⁵ ότι μια επαρκής τιμή χαμηλής αντίστασης μπορεί να θεωρηθεί για τον υπολογισμό της σχέσης 5.1.5.1-1 όπως έχει γίνει στο σχήμα 5.1.5.1-2.

Εδώ οι κυματώσεις μπορούν να συσχετισθούν με το χρόνο όδευσης $\tau = \sqrt{LC_e}$, καθώς μια βηματική τάση εφαρμοζόμενη στην είσοδο ενός τέτοιου κλιμακούμενου δικτύου μπορεί να ταξιδέψει κατά μήκος της στήλης. Εάν το πλάτος της τάσης δεν μειωθεί σε μηδενική τιμή όταν το κύμα φθάσει στο γειωμένο μέρος της Χ.Τ., θα ανακλαστεί επηρεάζοντας τις κυματώσεις. Οι αμιγώς χωρητικοί καταμεριστές τάσης είναι επομένως ευαίσθητοι σε εισερχόμενες τάσεις με βραχείς χρόνους ανύψωσης και η τάση εξόδου μπορεί να παρουσιάσει κυμάτωση για μη κυματοειδείς τάσεις εισόδου. Επιπρόσθετα, ένας τέτοιος χωρητικός καταμεριστής εντός του συνόλου του κυκλώματος μέτρησης – για παράδειγμα με ακροδέκτες συνδεδεμένους στην είσοδό του – θα σχηματίσει ένα συντονισμένο κύκλωμα σειράς. Συνεπώς είναι προφανές το γεγονός ότι οι αμιγώς χωρητικοί καταμεριστές δεν είναι επαρκείς για μετρήσεις κρουστικών τάσεων με απότομο μέτωπο (ακαριαίες κρουστικές τάσεις διακεκομμένου μετώπου) ή με υψηλά επίπεδα αιφνίδιων μεταβολών (τάση κατά τη διάρκεια διακοπής). Ωστόσο οι τιμές κορυφής των

ακαριαίων κρούσεων ή ακόμη και των πλήρως ακαριαίων κρουστικών τάσεων, μπορούν να καταγραφούν επαρκώς εάν τα μεταβατικά φαινόμενα κατά τη διάρκεια της εμφάνισης του μετώπου των αιφνίδιων μεταβολών της τάσης έχουν εξαφανιστεί.

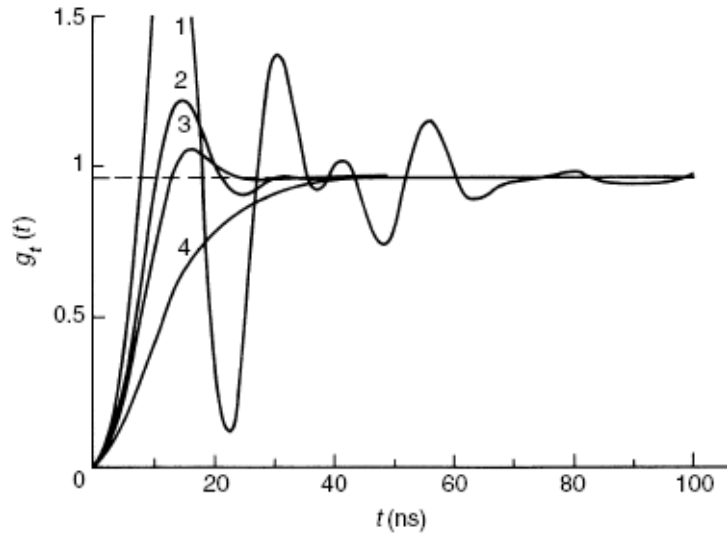


Σχήμα 5.1.5.1-2 : Υπολογισμένη μοναδιαία βηματική απόκριση για ένα χωρητικό καταμεριστή τάσης. Το ισοδύναμο κύκλωμα εικονίζεται στο σχήμα 5.1.5.1-1

Η ομοιότητα των συναρτήσεων των βηματικών αποκρίσεων για τους ωμικούς καταμεριστές τάσης με αυτούς που πραγματεύονται στην παρούσα υποενότητα, ώθησε τον *Zaengl* στο να προτείνει και να αντιληφθεί την πιθανή βελτίωση των αμιγώς χωρητικών καταμεριστών εισάγοντας πραγματικές μονάδες αντιστάσεων σε σειρά με τους πυκνωτές¹⁶. Εάν η τιμή αυτών των αντιστάσεων δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή αλλά επαρκής για να αποσβέσει τις κυματώσεις, είναι πιθανό να επιτευχθεί μια εξαιρετική απόδοση της αιφνίδιας μεταβολής της τάσης. Μια σχέση κατά πολύ παρόμοια με την

$$R_{crit} \approx R \leq 2\pi \sqrt{\frac{L}{C_e} \cdot \frac{1}{1+\pi^2 C_p/C_e}} \quad (5.1.5.1-4)$$

η οποία ισχύει για τους ωμικούς καταμεριστές, μπορεί να παραχθεί υπολογίζοντας τη μετάβαση από τις υπερβολικές συναρτήσεις στις τριγωνομετρικές για το όρισμα b_k με $k = 1$ στη σχέση 5.1.5.1-1, παρέχοντας ξανά την κρίσιμη τιμή R_{crit} της αντίστασης. Μια τέτοια κρίσιμη τιμή μπορεί επίσης να αναγνωριστεί στο σχήμα 5.1.5.1-3, στο οποίο εικονίζονται ορισμένες βηματικές αποκρίσεις υπολογισμένες σύμφωνα με τη σχέση 5.1.5.1-1. Για αυτή την προσομοίωση, χρησιμοποιούνται επαρκείς τιμές για έναν χωρητικό καταμεριστή τάσης και για μια τάση περίπου 1MV (ύψος $\approx 3\mu$).



Σχήμα 5.1.5.1-3 : Υπολογισμένη μοναδιαία βηματική απόκριση $G_t(t)$ για αποσβεσμένους χωρητικούς καταμεριστές σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 5.1.5.1-1. Τα στοιχεία των παραμέτρων είναι αυτά που ισχύουν για το κύκλωμα του σχήματος 5.1.5.1-1 ενώ μια ικανοποιητική αποσβεσμένη απόκριση δίνει η τιμή $R=1000 \Omega$ υπολογισμένη από τη σχέση 4.7.5.1-5. Οι τιμές των αντιστάσεων δοκιμής είναι αντίστοιχα (1) $R = 250 \Omega$, (2) $R = 750 \Omega$, (3) $R = 1000 \Omega$ και (4) $R = 2000 \Omega$

Η επίδραση του μεγέθους της αντίστασης R είναι προφανής. Μια πολύ καλώς αποσβεσμένη απόκριση πλησιάζεται μέσω μιας τιμής αντίστασης περίπου ίσης με

$$R \approx 4 \sqrt{\frac{L}{C_e}} \quad (5.1.5.1-5)$$

παρότι η μεγαλύτερη στιγμιαία απότομη απόκλιση (overshoot) ακολουθούμενη από μικρότερες τιμές γίνεται αποδεκτή. Ο χρόνος βραχείας απόκρισης είναι σε συμφωνία με αυτή τη θεωρία. Το T^0 ή το T δύναται να υπολογιστούν μέσω της συνάρτησης μεταφοράς όπως επίσης και μέσω της σχέσης 5.1.5.1-1. Επομένως ισχύει ότι

$$T^0 = \frac{RC_e}{6} \approx T \quad (5.1.5.1-6)$$

Οι μικρές τιμές αντιστάσεων καθώς είναι απαραίτητες για την απόσβεση των κυματώσεων, ευθύνονται για αυτούς τους χρόνους βραχείας απόκρισης και έτσι σχηματίζεται ένας αποσβεσμένος χωρητικός καταμεριστής σειράς. Η σύνθετη αντίσταση εισόδου αυτών των καταμεριστών αυξάνεται με μειούμενες τις συχνότητες και κατ' επέκταση το φαινόμενο της φόρτισης του συστήματος παραγωγής της τάσης περιορίζεται. Επομένως η εφαρμογή τους για διακοπόμενες ή ακαριαίες κρουστικές τάσεις Ε.Ρ. είναι εφικτή, χωρίς κανένα περιορισμό. Εάν προστεθεί ένας παράλληλος κλάδος ωμικών αντιστάσεων υψηλής τιμής, μπορούν επίσης να μετρηθούν τάσεις Σ.Ρ. όπως έχει δειχθεί στα προηγούμενα και έτσι, σχηματίζεται ένας καταμεριστής τάσης γενικής χρήσης (universal voltage divider).

Αυτοί οι αποσβεσμένοι χωρητικοί καταμεριστές σειράς δεν υφίστανται περιορισμούς στο εύρος της τάσης, όσο δεν υπάρχει περιορισμός στο πλήθος των μονάδων των πυκνωτών όπως επίσης και στην εισαγωγή κατανεμημένων αντιστάσεων. Αυτές οι αντιστάσεις δεν φορτίζονται έντονα, καθώς μόνο οι μεταβατικές τάσεις εισόδου προκαλούν ρεύματα. Οι καταμεριστές τάσης γενικής χρήσης είναι επομένως διαθέσιμοι και χρησιμοποιούνται γενικευμένα περίπου από το 1970 έως και στα υψηλότερα επίπεδα τάσεων.



Σχήμα 5.1.5.1-4 : Αποσβεσμένος χωρητικός καταμεριστής σειράς για κρουστική τάση 6MV

Στο σχήμα 5.1.5.1-4 εικονίζεται ένας τέτοιος καταμεριστής τάσης για αιφνίδιες κρουστικές τάσεις των 6MV. Τα ηλεκτρόδια δεν υπάρχουν για να θωρακίσουν τον καταμεριστή – για παράδειγμα για να μειώσουν τη C_e -, αλλά μόνο για την αποτροπή εκκενώσεων και επομένως για την αύξηση της τάσης υπερπήδησης (flashover voltage) των διακοπόμενων κρούσεων.

5.1.6 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΚΡΟΔΕΚΤΗ ΤΟΥ

Η αναλυτική πραγμάτευση του συστήματος μέτρησης που έχει παρουσιαστεί μέχρι το σημείο αυτό, δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί. Παρόλο που η μοναδιαία βηματική απόκριση των καταμεριστών τάσης θα μπορούσε άμεσα να υπολογιστεί, παρεμφερή αποτελέσματα υπολείπονται για ολόκληρο το κύκλωμα. Τώρα μπορεί να δειχθεί ότι η γενικευμένη έκφραση του χρόνου απόκρισης T και η αλληλεπίδρασή του με τα στοιχεία του κυκλώματος μπορούν να εφαρμοσθούν αποτελεσματικά στην πράξη.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί στην παράγραφο 5.1.4, είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστεί μια αναλυτική επίλυση στη μοναδιαία βηματική απόκριση ολόκληρου του συστήματος, το οποίο έχει αναπαρασταθεί από το *σύστημα τριών στοιχείων* του σχήματος 5.1.4-1. Οι αριθμητικές λύσεις που προκύπτουν από προχωρημένα προγράμματα είναι ωστόσο εφικτές και πολλά λογισμικά είναι διαθέσιμα για το σκοπό αυτό. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ έχουν υπολογιστεί μέσω του *προγράμματος μεταβατικού δικτύου* (transient network program) του Dommel¹⁷. Στο πρόγραμμα αυτό, η γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες (σχήμα 5.1.4-1, στοιχείο 2) προσομοιώνεται από την ακριβή επίλυση των επιμέρους διαφορικών συναρτήσεων μιας γραμμής και συνεπώς δεν εισάγει κάποια σφάλματα. Η προσομοίωση του τερματικού συστήματος – για παράδειγμα των καταμεριστών τάσης -, χρήζει ωστόσο ενός υποβιβασμού των κατανεμημένων παραμέτρων του δικτύου σε ένα πεπερασμένο αριθμό τμημάτων. Σε περίπτωση που ο αριθμός των στοιχείων n (βλέπε σχήμα 5.1.5-1) είναι μεγαλύτερος από περίπου 5, τότε τα αποτελέσματα πλησιάζουν τη λύση του άπειρου αριθμού.

Οι αριθμητικοί υπολογισμοί χρειάζονται αριθμητικές τιμές για τη σύνθετη κυματική αντίσταση Z_L του ακροδέκτη προς τον καταμεριστή. Για τη συνηθισμένη διάταξη ενός συστήματος δοκιμών τάσης, αυτός ο ακροδέκτης είναι λίγο έως πολύ οριζόντια τοποθετημένος πάνω από την επιστροφή της γης, η οποία θεωρείται ένα εκτεταμένο επίπεδο. Αρκετά πειράματα¹⁸ απέδειξαν ότι αυτός ο χρόνος όδευσης τ_L εξαρτάται από την ταχύτητα του φωτός c_0 . Καθώς η $Z_L = \sqrt{L_L/C_L}$ και ο $\tau_L = \sqrt{L_L \cdot C_L} = l/c_0$ με την L_L να είναι η ολική επαγωγή και τη C_L η ολική χωρητικότητα αυτού του ακροδέκτη, $Z_L = l/c_0 \cdot C_L$ με το l να είναι το μήκος του ακροδέκτη. Η χωρητικότητα του ακροδέκτη μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας ότι ένας κυλινδρικός ακροδέκτης διαμέτρου d βρίσκεται σε ύψος H πάνω από μια επιφάνεια, η οποία είναι γειωμένη. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ο πολύ γνωστός τύπος για τη χωρητικότητα

$$C_L = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{A} \quad (5.1.6-1)$$

όπου

$$A = \ln \left[\frac{2l}{d} \frac{\sqrt{\left\{1 + \left(\frac{2H}{l}\right)^2\right\} - 1}}{\sqrt{\left\{1 + \left(\frac{2H}{l}\right)^2\right\} + 1}} \right] = \ln \left(\frac{4H}{d} \right) - \ln \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 2\left(\frac{H}{l}\right)^2} \right) \quad (5.1.6-2)$$

παρόλο που αυτός ο ακροδέκτης είναι τοποθετημένος μεταξύ του δοκιμίου και του καταμεριστή τάσης. Καθώς η $c_0 = (\varepsilon_0 \mu_0)^{-0.5}$, όπου ε_0 η διηλεκτρική σταθερά και μ_0 η διαπερατότητα του κενού, η σύνθετη κρουστική αντίσταση γίνεται

$$(ZL)_{hor} = A \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 60 \times A(l, d, H) \quad [\Omega] \quad (5.1.6-3)$$

για τον εν λόγω οριζόντια τοποθετημένο ακροδέκτη. Ορισμένες φορές ο οριζόντιος ακροδέκτης επιμηκύνεται από έναν κάθετο ακροδέκτη προκειμένου να μετρηθεί η πειραματική μοναδιαία βηματική απόκριση του συστήματος. Συνεπώς χρειάζεται να υπολογίσουμε επιπροσθέτως τη Z_L για έναν κάθετο ακροδέκτη. Σύμφωνα με το σχήμα 3.4.3.2-2 και τη σχέση 3.4.3.2-4, η χωρητικότητα αυτή είναι γνωστή. Με τις ίδιες υποθέσεις που έγιναν στα προηγούμενα, λαμβάνουμε ότι

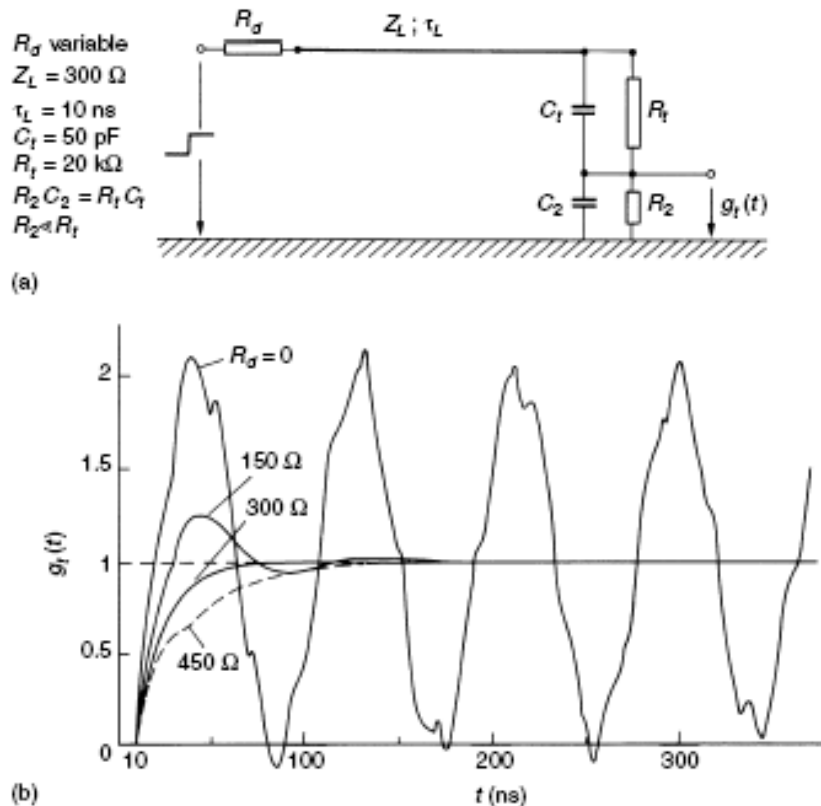
$$(ZL)_{ver} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \ln \left[\frac{2l}{d} \sqrt{\frac{4s+l}{4s+3l}} \right] \approx 60 \ln \left(\frac{1.15l}{d} \right) \quad [\Omega] \quad \text{για } s \ll l \quad (5.1.6-4)$$

Οι διαφορές στις σύνθετες κρουστικές υπερτάσεις δεν είναι μεγάλες όταν λαμβάνονται υπόψη οι συνήθεις διαστάσεις.

Στο σχήμα 5.1.6-1(a) ένα πολύ απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα παριστάνει έναν ωμικό καταμεριστή των 20KΩ με ένα μήκος ακροδέκτη ίσο με 3m. ($\tau_L = 10 \text{ ns}$). Το παράδειγμα που ακολουθεί ισχύει επίσης και για τη μοναδιαία βηματική απόκριση των αμιγώς χωρητικών ή των μικτών ωμικοχωρητικών καταμεριστών τάσης, καθώς η C_t μπορεί να αναπαρασταθεί το ίδιο ικανοποιητικά για την αναπαράσταση τέτοιων τύπων καταμεριστών.

Ο καταμεριστής καθίσταται εξιδανικευμένος από την παράλειψη κάθε παράσιτης χωρητικότητας ή επαγωγής, αλλά μια παράλληλη χωρητικότητα τιμής $C_t = 50 \text{ pF}$ κατά μήκος ολόκληρου του καταμεριστή αναπαριστά ένα ηλεκτρόδιο κορυφής το οποίο μπορεί να θωρακίζει τον καταμεριστή. Μια αμιγής αντίσταση R_d παρέχει ιδανικές συνθήκες απόσβεσης για οδεύοντα κύματα. Το σχήμα 5.1.6-1(b) δείχνει μερικά υπολογισμένα αποτελέσματα της μοναδιαίας βηματικής απόκρισης. Για $R_d = 0$, δεν παρατηρείται κανένα αξιοπρόσεκτο συμβάν απόσβεσης εντός της κλίμακας του χρόνου έκθεσης. Παρόλο που οι κυματώσεις είναι μη ημιτονοειδείς, η θεμελιώδης συχνότητα μπορεί να παρατηρηθεί καθαρά. Η τιμή αυτής της συχνότητας είναι προφανώς κοντά σε αυτή της συχνότητας συντονισμού f_r , η οποία έχει παραχθεί από την επαγωγή L_L του ακροδέκτη και τη

χωρητικότητα C_t του καταμεριστή. Καθώς η $L_L = Z_L \cdot \tau_L$, η τιμή της επαγωγής αυτής είναι $3\mu H$, δίνοντας την $f_r = 13MHz$.



Σχήμα 5.1.6-1 : Υπολογισμένη μοναδιαία βηματική απόκριση ενός εξιδανικευμένου ωμικού ή παράλληλου-μικτού ωμικοχωρητικού καταμεριστή με ακροδέκτη. (a) Το ισοδύναμο κύκλωμα και (b) Η υπολογισμένη μοναδιαία βηματική απόκριση

Υψηλότερες τιμές της C_t θα μείωναν τη συχνότητα των κυματώσεων. Αποδεκτές αποκρίσεις παρέχονται αποκλειστικά από τον αποσβεσμένο ακροδέκτη. Για την αποφυγή κάθε στιγμιαίας απότομης απόκλισης (overshoot), η τιμή της R_d πρέπει να βρίσκεται κοντά σε αυτή της Z_L . Η εκθετική αύξηση στο μέτωπο και η αύξηση του χρόνου απόκρισης T^0 ή $T = T^0 - \tau_L$ είναι προφανώς προϊόν της χρονικής σταθεράς $R_d C_t$, η οποία ισούται με $15ns$ για $R_d = Z_L$ για συγκεκριμένες τιμές. Οι μεγάλοι χωρητικοί καταμεριστές με στήλες χωρητικών μονάδων, περιέχουν στην πραγματικότητα κατά πολύ υψηλότερες τιμές χωρητικοτήτων και στις περιπτώσεις αυτές ο μεγάλος χρόνος απόκρισης τέτοιων συστημάτων μέτρησης προέρχεται από την επιβεβλημένη απόσβεση του ακροδέκτη.

Μπορούμε με ευκολία να υπολογίσουμε τον T^0 ή τον πραγματικό χρόνο απόκρισης $T = T^0 - \tau_L$ μέσω των εξισώσεων που ακολουθούν. Έτσι, αν στη σχέση 5.1.4-11 αντικαταστήσουμε τη σχέση

$$T^o = \lim_{s \rightarrow 0} \left[-\frac{dh(s)}{ds} \right] = \lim_{s \rightarrow 0} [-h'(s)] \quad (5.1.6-5)$$

παίρνουμε

$$T^o = T_t + \tau_L = \left[\frac{Z_t(0) \frac{Z_d(0)}{Z_L} + Z_L}{Z_t(0) + Z_d(0)} \right] + \frac{Z_d(0)}{Z_L} \times \left[T_{kt} \frac{Z_t(0) + Z_L}{Z_t(0) + Z_d(0)} - T_{kd} \frac{Z_d(0) + Z_L}{Z_t(0) + Z_d(0)} \right] \quad (5.1.6-6)$$

Στη σχέση αυτή

$$T_t = \frac{A_{11}^{t'}(0)}{A_{11}^t(0)} \quad (5.1.6-7)$$

είναι ο χρόνος απόκρισης του καταμεριστή τάσης ή του τερματικού,

$$T_{kt} = \frac{K_t'(0)}{1 + K_t(0)} \quad (5.1.6-8)$$

είναι ο χρόνος απόκρισης της ανάκλασης του τερματικού,

$$T_{kd} = \frac{K_d'(0)}{1 + K_d(0)} \quad (5.1.6-9)$$

είναι ο χρόνος απόκρισης της ανάκλασης του συστήματος απόσβεσης,

$$Z_t(0) = \frac{A_{11}^t(0)}{A_{21}^t(0)} \quad (5.1.6-10)$$

είναι η αντίσταση εισόδου Σ.Ρ. του τερματικού και τέλος

$$Z_d(0) = \frac{A_{12}^d(0)}{A_{11}^d(0)} \quad (5.1.6-11)$$

είναι η αντίσταση εισόδου του συστήματος απόσβεσης. Η επιρροή του ακροδέκτη του καταμεριστή είναι εμφανής στη σχέση 5.1.6-6, όπως επίσης εμφανές είναι το γεγονός ότι για αυτό τον ιδανικό καταμεριστή ισχύει ότι $T_t = 0$ και $T_{kd} = 0$ (καμία εξάρτηση από τη συχνότητα του $Z_d(s) = R_d$). Με το μόνο εξαρτώμενο από τη συχνότητα όρο για τη σύνθετη αντίσταση εισόδου του καταμεριστή $Z_t(s) = R_t / (l + sR_t C_t)$, μπορούμε εύκολα να βρούμε ότι $T_{kt} = R_t C_t / (1 + Z_L / R_t)$. Το τελικό αποτέλεσμα θα μπορούσε να παρουσιαστεί στη μορφή

$$T = T^o - \tau_L = \frac{1}{(1 + \frac{R_d}{R_t})} \cdot \left[R_d C_t - \tau_L \left(1 - \frac{Z_L}{R_t} \right) \cdot \left(1 - \frac{R_d}{Z_L} \right) \right] \quad (5.1.6-12)$$

Από τα παραπάνω μπορούν να προκύψουν ορισμένες αξιοσημείωτες διαπιστώσεις, οι οποίες αξίζει να σχολιασθούν.

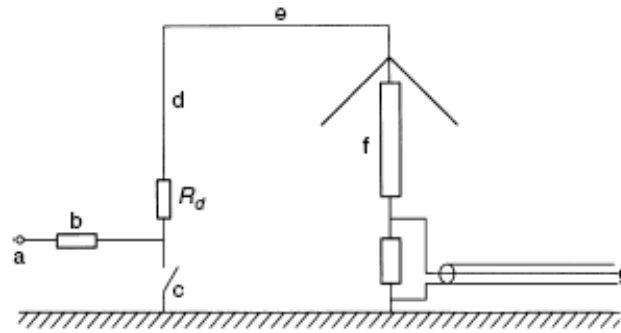
Για $R_d = Z_L$, το μήκος του ακροδέκτη δεν έχει *καμία* επίδραση επί του χρόνου απόκρισης. Αυτή η περίπτωση ταιριάζει με την *απόκριση άπειρης γραμμής*, καθώς το ίδιο αποτέλεσμα θα επιτυγχανόνταν εφόσον μια βηματική τάση προερχόμενη από έναν εξαιρετικά μακρύ ακροδέκτη θα εφαρμόζονταν στο σύστημα μέτρησης.

Με καθόλου αντίσταση απόσβεσης ή με $R_d < Z_L$, ο χρόνος απόκρισης που προέρχεται ουσιαστικά από το ξεκίνημα της μοναδιαίας βηματικής απόκρισης θα ήταν συνεχώς μειούμενος ανάλογα με το μήκος $l = \tau_L c_0$ του ακροδέκτη. Αυτή η μείωση του T προέρχεται προφανώς από μια υπερύψωση (overshoot) της μοναδιαίας βηματικής απόκρισης. Όπως έχει παρατηρηθεί από την υπολογισμένη μοναδιαία βηματική απόκριση, ο καθοριστικός παράγοντας είναι ο $R_d C_t$ ο οποίος προσδίδει μια θετική συνεισφορά στον T . Για χωρητικούς καταμεριστές, ισχύει ότι $R_t \rightarrow \infty$ και η ίδια σχέση μπορεί να εφαρμοσθεί.

5.1.6.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ

Παρότι πολλές ακόμη έρευνες¹⁹ έχουν επιβεβαιώσει την εγκυρότητα τέτοιων αναλυτικών προσεγγίσεων όπως αυτές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, μια θεωρητική προσέγγιση από μόνη της δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις πραγματικές ανάγκες. Στην πράξη, μια πειραματικά εκτελεσμένη μέτρηση βηματικής απόκρισης πρέπει να αποδεικνύει την απόδοση των χρησιμοποιούμενων συστημάτων, καθώς ανεπαρκείς κατασκευές είναι πιθανό να δείξουν χειρότερα αποτελέσματα. Το δυσκολότερο πρόβλημα σχετίζεται με το γεγονός ότι τα πραγματικά *τερματικά εισόδου* του συστήματος μέτρησής μας (σχήμα 3.4.3.2-2), χωρίζονται από μια μεγάλη αντίσταση λόγω των διαστάσεων του δοκιμίου. Όμως η ύπαρξη μιας βηματικής τάσης με ένα χρόνο ανύψωσης του $1ns$ ή λιγότερο δεν μπορεί να προσδιοριστεί μέσω μιας ηλεκτροστατικής διαφοράς δυναμικού μεταξύ σημείων η απόσταση των οποίων είναι στο εύρος των μέτρων, λόγω της βασικής θεωρίας των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων. Μπορούμε όμως παρόλα αυτά να υποθέσουμε ότι πραγματικά ρεύματα τα οποία φορτίζουν τα δοκίμια εντός βραχέως αλλά πεπερασμένου χρόνου θα παράξουν ένα ημιμόνιμο πεδίο και μέσω αυτού μια διαφορά δυναμικού για την οποία χρησιμοποιείται ο όρος *τάση*.

Με τους παραπάνω περιορισμούς στο μυαλό - οι οποίοι συνήθως αμελούνται -, η μέτρηση της βηματικής απόκρισης ανήκει τώρα στη διαδικασία ρουτίνας ενός *τεστ έγκρισης* για ένα *εγκεκριμένο σύστημα μέτρησης* όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση κεραυνικών ή ακόμα και διακοπτόμενων κρουστικών παλμών²⁰. Οι βηματικές τάσεις παράγονται συνήθως από μικρές γεννήτριες για μερικές εκατοντάδες βολτ και στην εποχή μας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορισμένες διαφορετικές κυκλωματικές τοπολογίες για τη μέτρηση της βηματικής απόκρισης. Παρότι μερικές επιπρόσθετες λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στο σχετικό πρότυπο IEC²¹, στο σχήμα 5.1.6.1-1 παρουσιάζονται μερικές πρόσθετες πληροφορίες.



Σχήμα 5.1.6.1-1 : Η μέθοδος του μοναδιαίου βήματος. Με αρχικά συμβολίζονται αντιστοίχως τα (a) Προς παροχή Σ.Ρ. , (b) Αντίσταση φορτίσεως , (c) Ταχυδιακόπτης , (d) (Πρόσθετος) κάθετος ακροδέκτης , (e) Ακροδέκτης Υ.Τ. , (f) Καταμεριστής τάσης , (g) Προς καταγραφικό όργανο

Στο σχήμα αυτό, δείχνεται μια τοπολογία *τετράγωνου βρόχου* όπως συνιστούν τα σύγχρονα πρότυπα²². Η βηματική γεννήτρια *a* με *c* πρέπει να έχει σχεδόν μηδενική σύνθετη αντίσταση κατά τη διάρκεια παραγωγής του βήματος της τάσης και κατά τη διάρκεια της ακολουθούμενης απόκρισης. Οποιαδήποτε συσκευή *c* ταχείας διακοπής η οποία να μπορεί να βραχυκυκλώσει μια σταθερή τάση Σ.Ρ. που απαιτείται για τη φόρτιση του συστήματος μέτρησης πριν συμβεί το βραχυκύκλωμα, είναι κατάλληλη. Ιδιαίτερα κατάλληλοι διακόπτες είναι τα ρελέ υδραργύρου (mercury wetted relays) αλλά ακόμη και ένα διάκενο με ομογενές πεδίο με διάστημα 1mm περίπου στον ατμοσφαιρικό αέρα ή ένα διάκενο με διάστημα έως και κάποια χιλιοστά υπό αυξημένη πίεση αερίων. Τα διάκενα με αέρια μόνωση (gas insulated gaps) μπορούν να βραχυκυκλώσουν έπειτα από τάσεις διάσπασης μεγέθους έως και κάποια κιλοβόλτ, αλλά μόνο μεμονωμένα συμβάντα μπορούν να προξενηθούν. Αν και αυτοί οι διακόπτες εκπληρώνουν τις απαιτήσεις για *μηδενική σύνθετη αντίσταση*, υπάρχουν εμπορικοί τύποι ηλεκτρονικών παλμογεννητριών με μερικές δεκάδες Ohm εσωτερικής σύνθετης αντίστασης τα οποία συνεισφέρουν στην αντίσταση απόσβεσης (βλέπε R_d). Τουλάχιστον ένας μεταλλικός διαμήκης πυκνωτής (τύπου ταινίας) μήκους 1m θα πρέπει να παίζει το ρόλο της επιστροφής της γης μεταξύ του καταμεριστή και της βηματικής γεννήτριας. Το μήκος του ακροδέκτη που στο σχήμα 4.7.6.1-1 αναπαρίσταται με τα αρχικά *d* και *e*, θα πρέπει να ισούται με το μήκος που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της πραγματικής μέτρησης της κρουστικής τάσης σε περίπτωση που ο χρόνος απόκρισης είναι μια καθοριστική παράμετρος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Εάν χρησιμοποιηθεί μόνο το μέρος *e* κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, θα είναι εφικτός ο υπολογισμός του σχετικού χρόνου απόκρισης χάρη στη θεωρία όπως αυτή αναπτύχθηκε στα προηγούμενα αλλά

και σε άλλες πηγές²³. Για την αποφυγή τέτοιων αποτελεσμάτων, η βηματική γεννήτρια θα πρέπει να τοποθετηθεί επί ενός μεταλλικού τοίχου. Τότε το σύνθηδες μήκος του ακροδέκτη που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια ελέγχων τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Αυτή η *τοπολογία τετράγωνου βρόχου* παρουσιάστηκε από έναν εκ των συγγραφέων της βιβλιογραφικής αναφοράς²⁴ στην οποία βασίστηκε η ενότητα ετούτη και είναι το προτιμώμενο κύκλωμα στην εποχή μας.

Μια από τις αμφιβολίες της μεθόδου του μοναδιαίου βήματος σχετίζεται με το σημείο εκκίνησης – για παράδειγμα την τιμή του τ_{de} - της απόκρισης. Αυτό το σημείο εκκίνησης στην *περιοχή της παρυφής* (toe-region) επηρεάζεται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από τους ακροδέκτες μεταξύ της βηματικής γεννήτριας και του καταμεριστή. Αυτά τα φαινόμενα έχουν ερευνηθεί σε βάθος από έναν Διεθνή Ερευνητικό Όμιλο (IRR-IMS Group)²⁵. Οι μέθοδοι για τον υπολογισμό αυτών των φαινομένων είναι βασισμένες στις εξισώσεις του Maxwell οι οποίες μπορούν είτε να λυθούν στο πεδίο ορισμού του χρόνου²⁶ ή στο πεδίο ορισμού της συχνότητας²⁷. Οι λύσεις είναι ιδιαίτερα εξεζητημένες. Το νέο πρότυπο IEC²⁸ ωστόσο δίνει ερμηνεία σε όλα αυτά ορίζοντας μια *πρακτική προέλευση* (virtual origin) O_1 της μοναδιαίας βηματικής απόκρισης μαζί με ένα *χρόνο αρχικής παραμόρφωσης* (initial distortion time) T_0 , ο τρόπος προσδιορισμού των οποίων μπορεί να βρεθεί στο εν λόγω πρότυπο.

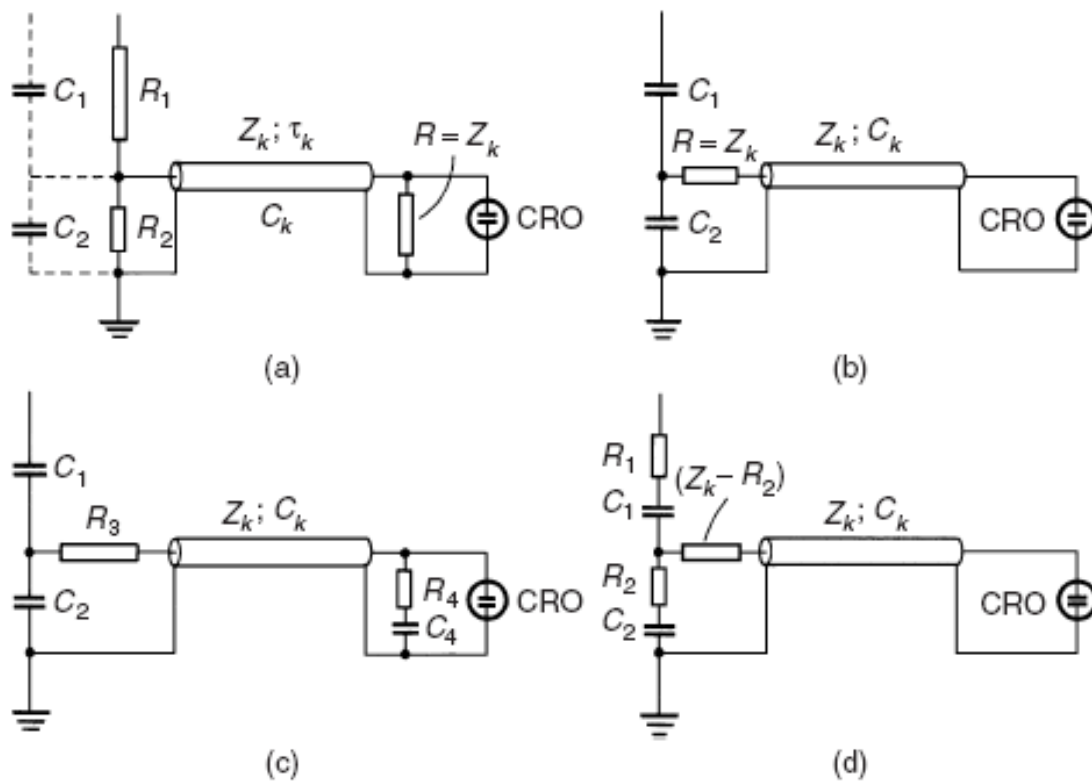
5.1.7 Ο ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ Χ.Τ. ΤΟΥ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ

Υποθέσαμε για τη θεωρία των καταμεριστών στην ενότητα 5.1.5, ότι ο βραχίονας Χ.Τ. είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι του καταμεριστή και παρέχει μια δομή σύνθετης αντίστασης η οποία είναι ισοδύναμη με αυτή του βραχίονα Υ.Τ. Στην πραγματικότητα, η δομή – για παράδειγμα η σύνθεση των στοιχείων του κυκλώματος – είναι αρκετά διαφορετική. Συνεπώς μπορεί να εμφανιστούν ορισμένα επιπρόσθετα προβλήματα, τα οποία αφορούν αρκετά την κατασκευή και το σχεδιασμό του βραχίονα Χ.Τ. του συστήματος μέτρησής μας. Πολλές παραμορφώσεις στην απόκριση μπορεί να συσχετισθούν με αυτό το κομμάτι του συστήματος.

Για τους καταμεριστές τάσης Σ.Ρ. και Ε.Ρ., η σχεδίαση του βραχίονα Χ.Τ. δεν είναι κρίσιμη εάν χρειάζεται να καταγραφούν μόνο σταθερής κατάστασης τάσεις (steady state voltages). Ωστόσο εάν πρέπει να μεταδοθούν αιφνίδιες μεταβολές της τάσης από τον καταμεριστή τάσης στο καταγραφικό όργανο (βλέπε σχήμα 5.1.1-1, στοιχεία 5~7), μπορεί ο ίδιος ο βραχίονας Χ.Τ. του καταμεριστή τάσης να εισάγει μεγάλες διαταραχές στην απόκριση. Ας δούμε αρχικά την προσαρμογή της υπάρχουσας σύνθετης αντίστασης

η οποία είναι απαραίτητη για τη μετάδοση των κρουστικών τάσεων από τον καταμεριστή στο όργανο καταγραφής.

Στο σχήμα 5.1.7-1 εικονίζονται τα - σε μεγάλο βαθμό απλοποιημένα - ισοδύναμα κυκλώματα για τις διαδικασίες προσαρμογής για τους διαφορετικούς τύπους καταμεριστών. Η πραγμάτευση βέβαια των υπολοίπων τύπων πλην των χωρητικών και των αποσβεσμένων χωρητικών, δεν άπτεται στους σκοπούς της παρούσης ενότητας της εργασίας και κατά συνέπεια παραλείπεται²⁹. Το καλώδιο σήματος θεωρείται κυρίως ως καλώδιο χωρίς απώλειες, ούτως ώστε η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής $Z_k = \sqrt{L_k/C_k}$ να καταστεί ανεξάρτητη της συχνότητας και ο χρόνος όδευσης $\tau_k = \sqrt{L_k \cdot C_k}$ να πάρει ακέραιη τιμή.



Σχήμα 5.1.7-1 : Κυκλώματα για την προσαρμογή του καλωδίου σήματος, (a) Ωμικοί ή μικτοί-παράλληλοι χωρητικοί καταμεριστές, (b) Απλή προσαρμογή χωρητικών καταμεριστών, (c) Αντισταθμιστική προσαρμογή χωρητικών καταμεριστών, (d) Απλή προσαρμογή αποσβεσμένου χωρητικού καταμεριστή

Για τους χωρητικούς καταμεριστές τάσης (σχήμα 5.1.7-1 b ή c), το καλώδιο σήματος δεν μπορεί να προσαρμοστεί στο άκρο του. Μια αντίσταση χαμηλής ωμικής τιμής σε παράλληλη σύνδεση με τον C_2 , θα φόρτιζε το βραχίονα Χ.Τ. του καταμεριστή ιδιαίτερα πολύ και θα μείωνε την τάση εξόδου με την πάροδο του χρόνου. Για την αποφυγή

κυματώσεων οδευόντων κυμάτων, το καλώδιο θα πρέπει στην περίπτωση αυτή να τερματιστεί στο άκρο εισόδου του. Τότε ένα βήμα τάσης σταθερού εύρους στον C_2 - για παράδειγμα $C_2 \rightarrow \infty$ -, θα διχοτομείται από την $R = Z_k$ στο άκρο εισόδου του καλωδίου καθώς η R και η Z_k σχηματίζουν ένα καταμεριστή τάσης. Αυτή η διχοτομημένη τάση οδεύει προς το ανοιχτό άκρο και διπλασιάζεται μέσω ανάκλασης. Επομένως το αρχικό πλάτος της τάσης κατά μήκος του C_2 εμφανίζεται στην είσοδο του οργάνου καταγραφής. Το ανακλασμένο κύμα φορτίζει το καλώδιο στο τελικό πλάτος της τάσης και απορροφάται από την R καθώς ο πυκνωτής C_2 σχηματίζει ένα βραχυκύκλωμα. Στην πραγματικότητα ο C_2 είναι πεπερασμένης τιμής και έχει επομένως εκφορτιστεί κατά τη διάρκεια αυτών των μεταβατικών φαινομένων.

Ο υπολογισμός δείχνει ότι η περίοδος εκφόρτισης είναι πολύ κοντά στη διπλάσια τιμή του χρόνου όδευσης. Έπειτα από αυτή τη φορά, η χωρητικότητα του καλωδίου φορτίζεται στην τελική τιμή της τάσης και από ετούτο λαμβάνουμε δύο λόγους από τον καταμεριστή της τάσης, δηλαδή

$$n_0 = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad \text{για } t = 0 \quad (5.1.7-1)$$

και

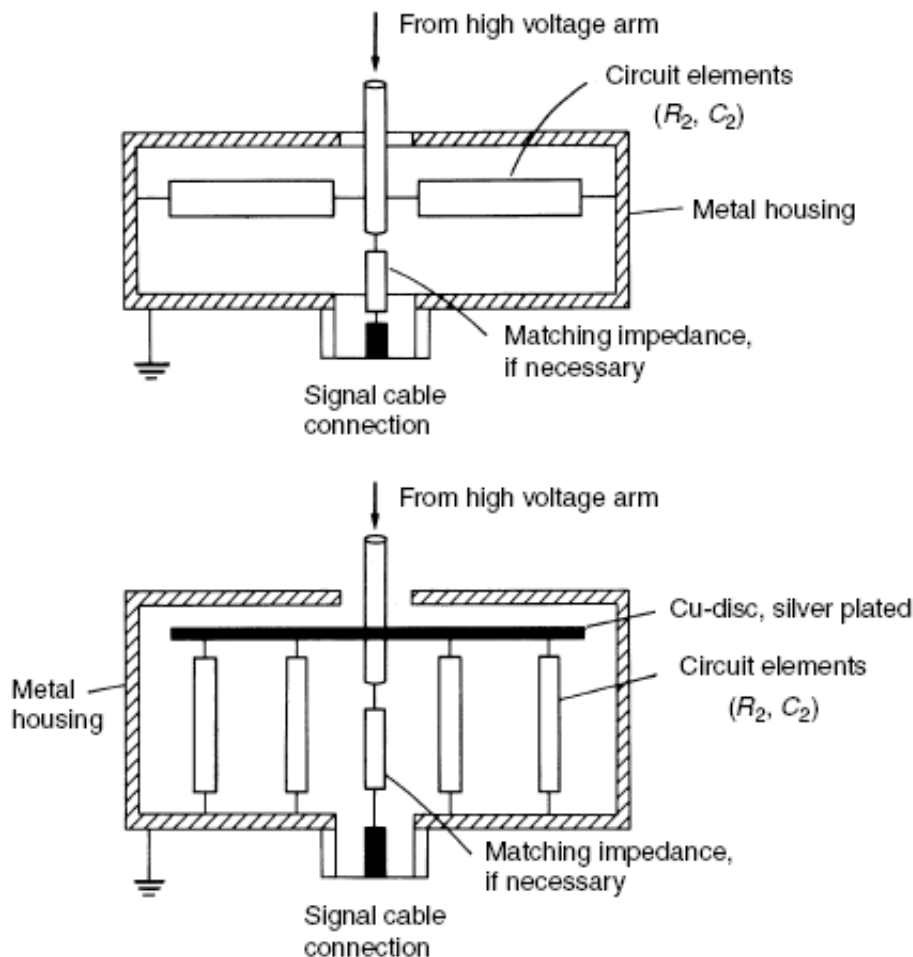
$$n_e = \frac{C_1 + C_2 + C_k}{C_1} \quad \text{για } t \geq 2\tau_k \quad (5.1.7-2)$$

Το καλώδιο σήματος επομένως εισάγει μια αρχική υπερύψωση της τάσης (overshoot) τιμής $\Delta V = (n_e/n_0) - 1 = C_k/(C_1 + C_2)$, η οποία μπορεί κάλλιστα να παραβλεφθεί για μικρό ή μέτριο μήκος καλωδίου και υψηλές τιμές του C_2 , όπως για παράδειγμα υψηλούς λόγους των καταμεριστών τάσης.

Όμως οι χωρητικοί καταμεριστές χρησιμοποιούνται συχνά για ελέγχους πεδίων μεταβατικών τάσεων και για το λόγο αυτό είναι συχνά απαραίτητα καλώδια μεγαλύτερου μήκους. Η απόκριση μπορεί να βελτιωθεί μεταφέροντας ένα μέρος του πυκνωτή Χ.Τ. C_2 στο άκρο του καλωδίου και συνδέοντάς το σε σειρά με μια αντίσταση όπως δείχνεται στο σχήμα 5.1.7-1c. Το σύστημα αυτό, το οποίο πρωτοαναπτύχθηκε από τον *Burch*³⁰, προσφέρει ορισμένες ευκαιρίες μείωσης των επιδράσεων του φαινομένου της υπερύψωσης. Ο *Burch* πρότεινε να κατασκευάζονται αμφότερες οι αντιστάσεις εφαρμογής ίσες και $R_3 = R_4 = Z_k$. Εάν τότε ικανοποιείται η συνθήκη $C_1 + C_2 = C_3 + C_k$, οι αρχικές και άπειρες τιμές της τάσης εξισώνονται και η αρχική στιγμιαία απότομη απόκλιση τιμής περίπου $C_k/(C_1 + C_2)$ μειώνεται περίπου κατά 1/6. Υπάρχουν ωστόσο επιπλέον ευκαιρίες βελτίωσης της απόκρισης όπως αποκάλυψε ο *Zaengl*³¹.

Στους αποσβεσμένους χωρητικούς καταμεριστές, οι απαραίτητες εντός του βραχίονα Χ.Τ. αντιστάσεις R_1 και R_2 , είναι για το ανακλασμένο κύμα συνδεδεμένες σε σειρά με την αντίσταση προσαρμογής στο βραχίονα Χ.Τ. όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.7-1d. Καθώς η R_2 είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με την R_1 , η τιμή αυτής της αντίστασης προσαρμογής πρέπει να μειωθεί μόνο από τη μικρή τιμή της R_2 . Επίσης εφαρμόσιμες, είναι οι μέθοδοι του σχήματος 5.1.7-1c.

Δεδομένου ότι οι αντιστάσεις προσαρμογής για ομοαξονικά καλώδια – λόγω χάριν αντιστάσεις μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών αγωγών – είναι εμπορικά διαθέσιμες, οι αντιστάσεις σειράς είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι του βραχίονα Χ.Τ. όλων των χωρητικών καταμεριστών.



Σχήμα 5.1.7-2 : Σχεδιασμένες τομές πιθανών διατάξεων για το βραχίονα Χ.Τ. των καταμεριστών τάσης

Μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό ότι η διαδρομή προς τη γη για το ανακλασμένο κύμα δεν θα πρέπει να παρακωλυθεί από πολύ υψηλές επαγωγές. Η θεωρητική τιμή αυτής της

επαγωγής δίνεται από το λόγο του καταμεριστή, ο οποίος καταμερίζει επίσης τη συνολική επαγωγή της στήλης των σωρευμένων πυκνωτών. Το φυσικό μέγεθος των τιμών της χωρητικότητας C_2 , η οποία είναι απαραίτητη για τη μείωση της Υ.Τ. σε μια μετρήσιμη ποσότητα, είναι εντούτοις σχετικά μεγάλο. Η ομοαξονική τοπολογία οποιονδήποτε στοιχείων του κυκλώματος που χρησιμοποιούνται εντός του βραχίονα Χ.Τ. είναι μια προϋπόθεση που θα πρέπει να τηρείται αυστηρά. Στο σχήμα 5.1.7-2 εικονίζονται απλές τομές πιθανών διατάξεων του βραχίονα Χ.Τ.

Τα στοιχεία σε τοποθέτηση ακτινωτής διάταξης τείνουν να δώσουν ακόμη χαμηλότερες επαγωγικές τιμές. Τα μεταλλικά καπάκια αποτρέπουν την πρόσκρουση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Λόγω της ομοαξονικής σύνδεσης του αρχικού καλωδίου, ο βρόχος εισόδου αυτού του καλωδίου δεν θα *δεί* κανένα δραστικό μαγνητικό πεδίο γεγονός το οποίο συνεισφέρει σε μειωμένες τάσεις κατά τα μεταβατικά ρεύματα. Για το λόγο αυτό, οι διαδρομές του ρεύματος θα πρέπει να διανέμονται ισότιμα εντός των ακτινωτά διατεταγμένων στοιχείων. Μια πολύ χαμηλή επαγωγή μπορεί εύκολα να αυξηθεί υπό την επήρεια μικρών βρόχων καλωδίου σε σειρά με τα στοιχεία. Για περαιτέρω πληροφόρηση σχετικά με τα όσα πραγματεύτηκαν στην ενότητα 5.1.7, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στις προτεινόμενες βιβλιογραφικές αναφορές³². [1]

5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ

Στη συνέχεια θα αναλυθούν διάφορες συνδεσμολογίες καταμεριστών τάσης που δύνανται να χρησιμοποιηθούν στο Νέο Εργαστήριο Υ.Τ., προς επίτευξη της επιθυμητής συμπεριφοράς. Για κάθε συνδεσμολογία που παρατίθεται, υπολογίζονται :

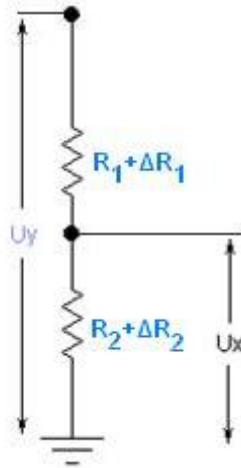
- Η σχέση καταμερισμού k , όπου $k = f(R, C)$
- Το μέγιστο απόλυτο σφάλμα $|\Delta_k| = \sum_{i=1}^n |\Delta_{k_i}|$, όπου $|\Delta_{k_i}| = \frac{\partial k}{\partial x}$ με $x = R_i, C_i$ και
- Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $m_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n |\Delta_{k_i}^2|}$

5.2.1 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 1 : 2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ

Η πρώτη διάταξη που εξετάζεται είναι ο ωμικός καταμεριστής τάσης με 2 αντιστάσεις R_1 και R_2 σε σύνδεση σειράς που εικονίζεται στο σχήμα 5.2.1-1.

Η σχέση καταμερισμού k που προκύπτει είναι

$$k = \frac{U_y}{U_x} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_2} \quad (5.2.1-1)$$



Σχήμα 5.2.1-1 : Ωμικός καταμεριστής με 2 αντιστάσεις σε σύνδεση σειράς

Για τον υπολογισμό του μέγιστου απόλυτου σφάλματος $|\Delta_k|$ έχουμε

$$\Delta_k = \frac{\partial k}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial k}{\partial R_2} \Delta R_2 = \frac{1}{R_2} \Delta R_1 - \frac{R_1}{R_2^2} \Delta R_2, \text{επομένως}$$

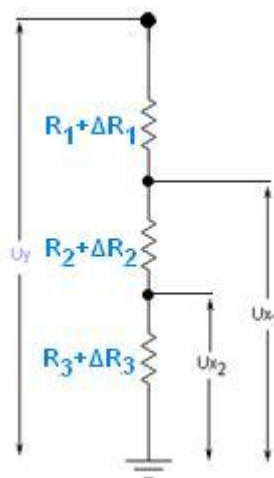
$$|\Delta_k| = \frac{1}{R_2} |\Delta R_1| - \frac{R_1}{R_2^2} |\Delta R_2| \quad (5.2.1-2)$$

και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα θα είναι

$$m_k = \sqrt{\left(\frac{1}{R_2} \Delta R_1\right)^2 + \left(\frac{R_1}{R_2^2} \Delta R_2\right)^2} \quad (5.2.1-3)$$

5.2.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 2 : 3 ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ

Στη συνέχεια εξετάζεται ο ωμικός καταμεριστής τάσης με 3 αντιστάσεις R_1 , R_2 και R_3 σε σύνδεση σειράς που εικονίζεται στο σχήμα 5.2.2-1.



Σχήμα 5.2.2-1 : Ωμικός καταμεριστής με 3 αντιστάσεις σε σύνδεση σειράς

Οι σχέσεις καταμερισμού k που προκύπτουν είναι

$$k_1 = \frac{U_y}{U_{x1}} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2+R_3} = \frac{R_1+R_2+R_3}{R_2+R_3} \quad (5.2.2-1)$$

και

$$k_2 = \frac{U_y}{U_{x2}} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{R_1+R_2}{R_3} = \frac{R_1+R_2+R_3}{R_3} \quad (5.2.2-2)$$

Για τον υπολογισμό του μέγιστου απόλυτου σφάλματος $|\Delta_k|$ έχουμε

$$\Delta_{k_1} = \frac{\partial k_1}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial k_1}{\partial R_2} \Delta R_2 + \frac{\partial k_1}{\partial R_3} \Delta R_3 = \frac{1}{R_2+R_3} \Delta R_1 - \frac{R_1}{(R_2+R_3)^2} \Delta R_2 - \frac{R_1}{(R_2+R_3)^2} \Delta R_3 \quad ,$$

επομένως

$$|\Delta_{k_1}| = \frac{1}{R_2+R_3} |\Delta R_1| + \frac{R_1}{(R_2+R_3)^2} (|\Delta R_2| + |\Delta R_3|) \quad (5.2.2-3)$$

Ομοίως,

$$\Delta_{k_2} = \frac{\partial k_2}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial k_2}{\partial R_2} \Delta R_2 + \frac{\partial k_2}{\partial R_3} \Delta R_3 = \frac{1}{R_3} \Delta R_1 + \frac{1}{R_3} \Delta R_2 - \frac{R_1+R_2}{R_3^2} \Delta R_3 \quad , \text{επομένως}$$

$$|\Delta_{k_2}| = \frac{1}{R_3} (|\Delta R_1| + |\Delta R_2|) + \frac{R_1+R_2}{R_3^2} |\Delta R_3| \quad (5.2.2-4)$$

και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα θα είναι

$$m_{k_1} = \sqrt{\left(\frac{1}{R_2+R_3} \Delta R_1\right)^2 + \left(\frac{R_1}{(R_2+R_3)^2} \Delta R_2\right)^2 + \left(\frac{R_1}{(R_2+R_3)^2} \Delta R_3\right)^2} \quad (5.2.2-5)$$

και

$$m_{k_2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R_3} \Delta R_1\right)^2 + \left(\frac{1}{R_3} \Delta R_2\right)^2 + \left(\frac{R_1+R_2}{R_3^2} \Delta R_3\right)^2} \quad (5.2.2-6)$$

5.2.3 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 3 : N ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ

Γενικότερα, από ωμικό καταμεριστή τάσης με N αντιστάσεις ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_N$) σε σύνδεση σειράς όπως τον εικονιζόμενο στο σχήμα 5.2.3-1, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις καταμερισμού

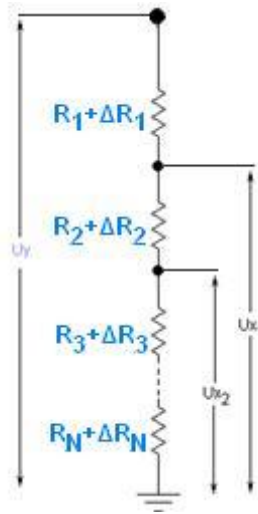
$$k_1 = \frac{U_y}{U_{x1}} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2+R_3+\dots+R_N} = \frac{R_1+R_2+R_3+\dots+R_N}{R_2+R_3+\dots+R_N} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{\sum_{i=2}^N R_i} \quad (5.2.3-1)$$

και

$$k_2 = \frac{U_y}{U_{x2}} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{R_1+R_2}{R_3+\dots+R_N} = \frac{R_1+R_2+R_3+\dots+R_N}{R_3+\dots+R_N} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{\sum_{i=3}^N R_i} \quad (5.2.3-2)$$

και γενικότερα για $1 \leq n \leq N$ ισχύει

$$k_n = \frac{U_y}{U_{xn}} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{\sum_{i=n+1}^N R_i} \quad (5.2.3-3)$$



Σχήμα 5.2.3-1 : Ωμικός καταμεριστής με N αντιστάσεις σε σύνδεση σειράς

Για τον υπολογισμό του μέγιστου απόλυτου σφάλματος $|\Delta_k|$ έχουμε

$$\Delta_{k_1} = \frac{\partial k_1}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial k_1}{\partial R_2} \Delta R_2 + \dots + \frac{\partial k_1}{\partial R_n} \Delta R_n = \frac{1}{\sum_{i=2}^N R_i} \Delta R_1 - \frac{R_1}{(\sum_{i=2}^N R_i)^2} \Delta R_2 - \dots - \frac{R_1}{(\sum_{i=2}^N R_i)^2} \Delta R_n = \frac{1}{\sum_{i=2}^N R_i} \Delta R_1 - \sum_{m=2}^N \frac{R_m}{(\sum_{i=2}^N R_i)^2} \Delta R_m, \text{ επομένως}$$

$$|\Delta_{k_1}| = \frac{1}{\sum_{i=2}^N R_i} |\Delta R_1| + \sum_{m=2}^N \frac{R_m}{(\sum_{i=2}^N R_i)^2} |\Delta R_m| \quad (5.2.3-4)$$

Ομοίως,

$$\Delta_{k_2} = \frac{\partial k_2}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial k_2}{\partial R_2} \Delta R_2 + \dots + \frac{\partial k_2}{\partial R_n} \Delta R_n = \frac{1}{\sum_{i=3}^N R_i} \Delta R_1 + \frac{1}{\sum_{i=3}^N R_i} \Delta R_2 - \frac{(R_1+R_2)}{(\sum_{i=3}^N R_i)^2} \Delta R_3 - \dots - \frac{(R_1+R_2)}{(\sum_{i=3}^N R_i)^2} \Delta R_n = \sum_{m=1}^2 \frac{1}{\sum_{i=3}^N R_i} \Delta R_m - \sum_{m=3}^N \frac{\sum_{i=1}^2 R_i}{(\sum_{i=3}^N R_i)^2} \Delta R_m,$$

επομένως

$$|\Delta_{k_2}| = \sum_{m=1}^2 \frac{1}{\sum_{i=3}^N R_i} |\Delta R_m| + \sum_{m=3}^N \frac{\sum_{i=1}^2 R_i}{(\sum_{i=3}^N R_i)^2} |\Delta R_m| \quad (5.2.3-5)$$

και

$$\Delta_{k_n} = \sum_{m=1}^n \frac{1}{\sum_{i=n+1}^N R_i} \Delta R_m - \sum_{m=n+1}^N \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{(\sum_{i=n+1}^N R_i)^2} \Delta R_m, \text{ επομένως}$$

$$|\Delta_{k_n}| = \sum_{m=1}^n \frac{1}{\sum_{i=n+1}^N R_i} |\Delta R_m| + \sum_{m=n+1}^N \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{(\sum_{i=n+1}^N R_i)^2} |\Delta R_m| \quad (5.2.3-6)$$

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα θα είναι

$$m_{k_1} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sum_{i=2}^N R_i} \Delta R_1\right)^2 + \sum_{m=2}^N \left(\frac{R_m}{(\sum_{i=2}^N R_i)^2} \Delta R_m\right)^2}, \quad (5.2.3-7)$$

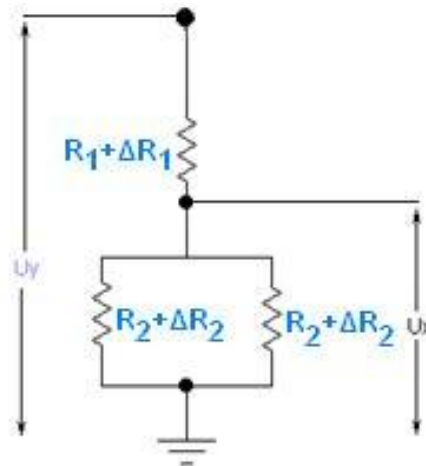
$$m_{k_2} = \sqrt{\sum_{m=1}^2 \left(\frac{1}{\sum_{i=3}^N R_i} \Delta R_m \right)^2 + \sum \left(\frac{\sum_{i=1}^2 R_i}{\left(\sum_{i=3}^N R_i \right)^2} \Delta R_m \right)^2} \quad (5.2.3-8)$$

και

$$m_{k_n} = \sqrt{\sum_{m=1}^n \left(\frac{1}{\sum_{i=n+1}^N R_i} \Delta R_m \right)^2 + \sum_{m=n+1}^N \left(\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\left(\sum_{i=n+1}^N R_i \right)^2} \Delta R_m \right)^2} \quad (5.2.3-9)$$

5.2.4 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 4 : 1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ 2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ

Έπειτα εξετάζεται ο ωμικός καταμεριστής τάσης που εικονίζεται στο σχήμα 5.2.4-1, η συνδεσμολογία του οποίου περιλαμβάνει 1 αντίσταση R_1 σε σύνδεση σειράς με 2 αντιστάσεις R_2 σε παράλληλη σύνδεση.



Σχήμα 5.2.4-1 : Ωμικός καταμεριστής με 1 αντίσταση σε σύνδεση σειράς με 2 αντιστάσεις σε παράλληλη σύνδεση

Η σχέση καταμερισμού k που προκύπτει είναι

$$k = \frac{U_y}{U_x} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2/2} = 1 + \frac{2R_1}{R_2} = \frac{2R_1 + R_2}{R_2} \quad (5.2.4-1)$$

Για τον υπολογισμό του μέγιστου απόλυτου σφάλματος $|\Delta_k|$ έχουμε

$$\Delta_k = \frac{\partial k}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial k}{\partial R_2} \Delta R_2 = \frac{2}{R_2} \Delta R_1 - \frac{2R_1}{R_2^2} \Delta R_2, \text{ επομένως}$$

$$|\Delta_k| = \frac{2}{R_2} |\Delta R_1| + \frac{2R_1}{R_2^2} |\Delta R_2| \quad (5.2.4-2)$$

και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα θα είναι

$$m_k = \sqrt{\left(\frac{2}{R_2} \Delta R_1 \right)^2 + \left(\frac{2R_1}{R_2^2} \Delta R_2 \right)^2} \quad (5.2.4-3)$$

5.2.5 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 5 : 1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ Ν ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ

Γενικότερα, ωμικός καταμεριστής τάσης με 1 αντίσταση R_1 σε σύνδεση σειράς με N αντιστάσεις R_2 σε παράλληλη σύνδεση όπως ο καταμεριστής του σχήματος 5.2.5-1, παρέχει σχέση καταμερισμού

$$k = \frac{U_y}{U_x} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2/N} = 1 + \frac{NR_1}{R_2} = \frac{NR_1 + R_2}{R_2} \quad (5.2.5-1)$$

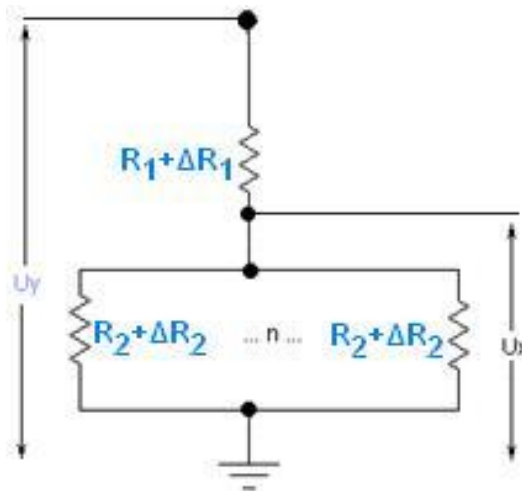
Για τον υπολογισμό του μέγιστου απόλυτου σφάλματος $|\Delta_k|$ έχουμε

$$\Delta_k = \frac{N}{R_2} \Delta R_1 - \frac{NR_1}{R_2^2} \Delta R_2, \text{ επομένως}$$

$$|\Delta_k| = \frac{N}{R_2} |\Delta R_1| + \frac{NR_1}{R_2^2} |\Delta R_2| \quad (5.2.5-2)$$

και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα θα είναι

$$m_k = \sqrt{\left(\frac{N}{R_2} \Delta R_1\right)^2 + \left(\frac{NR_1}{R_2^2} \Delta R_2\right)^2} \quad (5.2.5-3)$$



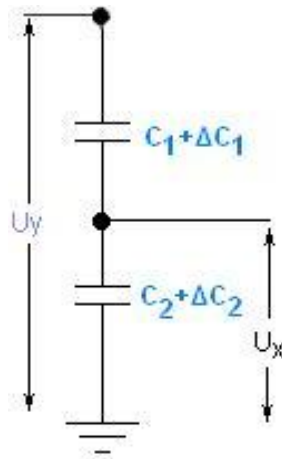
Σχήμα 5.2.5-1 : Ωμικός καταμεριστής με 1 αντίσταση σε σύνδεση σειράς με N αντιστάσεις σε παράλληλη σύνδεση

5.2.6 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 6 : 2 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ

Στο σχήμα 5.2.6-1 εικονίζεται χωρητικός καταμεριστής τάσης με 2 πυκνωτές C_1 και C_2 σε σύνδεση σειράς

Η σχέση καταμερισμού που προκύπτει από την εικονιζόμενη διάταξη είναι

$$k = \frac{U_y}{U_x} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{\frac{1}{C_1}}{\frac{1}{C_2}} = 1 + \frac{C_2}{C_1} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (5.2.6-1)$$



Σχήμα 5.2.6-1 : Χωρητικός καταμεριστής με 2 πυκνωτές σε σύνδεση σειράς

Για τον υπολογισμό του μέγιστου απόλυτου σφάλματος $|\Delta_k|$ έχουμε

$$\Delta_k = \frac{\partial k}{\partial C_1} \Delta C_1 + \frac{\partial k}{\partial C_2} \Delta C_2 = -\frac{C_2}{C_1^2} \Delta C_1 + \frac{1}{C_1} \Delta C_2, \text{ επομένως}$$

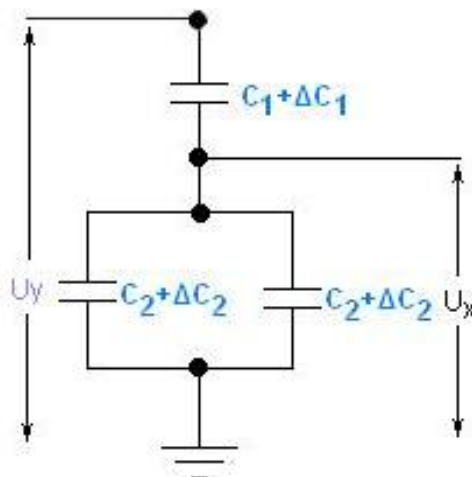
$$|\Delta_k| = \frac{C_2}{C_1^2} |\Delta C_1| + \frac{1}{C_1} |\Delta C_2| \quad (5.2.6-2)$$

και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα θα είναι

$$m_k = \sqrt{\left(\frac{C_2}{C_1^2} \Delta C_1\right)^2 + \left(\frac{1}{C_1} \Delta C_2\right)^2} \quad (5.2.6-3)$$

5.2.7 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 7 : 1 ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ 2 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ

Στο σχήμα 5.2.7-1 εικονίζεται χωρητικός καταμεριστής τάσης με 1 πυκνωτή C_1 σε σύνδεση σειράς με 2 πυκνωτές C_2 σε παράλληλη σύνδεση.



Σχήμα 5.2.7-1 : Χωρητικός καταμεριστής με 1 πυκνωτή σε σύνδεση σειράς με 2 πυκνωτές σε παράλληλη σύνδεση

Η σχέση καταμερισμού που προκύπτει είναι

$$k = \frac{U_y}{U_x} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{\frac{1}{C_1}}{\frac{\frac{1}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_2}}}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_2}}} = 1 + 2 \frac{\frac{1}{C_1}}{\frac{1}{C_2}} = 1 + 2 \frac{C_2}{C_1} = \frac{C_1 + 2C_2}{C_1} \quad (5.2.7-1)$$

Για τον υπολογισμό του μέγιστου απόλυτου σφάλματος $|\Delta_k|$ έχουμε

$$\Delta_k = -2 \frac{C_2}{C_1^2} \Delta C_1 + \frac{2}{C_1} \Delta C_2, \text{ επομένως}$$

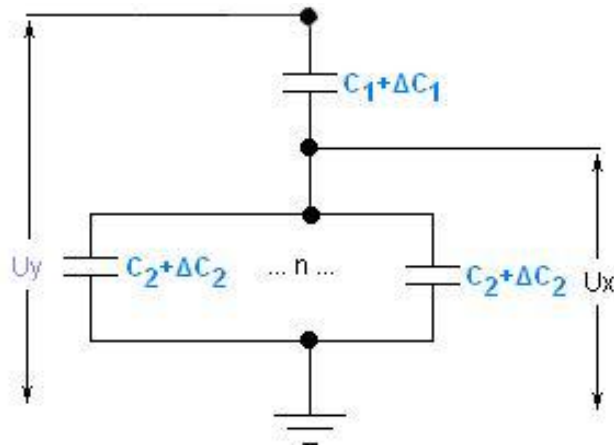
$$|\Delta_k| = 2 \frac{C_2}{C_1^2} |\Delta C_1| + \frac{2}{C_1} |\Delta C_2| \quad (5.2.7-2)$$

και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα θα είναι

$$m_k = \sqrt{\left(2 \frac{C_2}{C_1^2} \Delta C_1\right)^2 + \left(\frac{2}{C_1} \Delta C_2\right)^2} \quad (5.2.7-3)$$

5.2.8 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 8 : 1 ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ Ν ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ

Στο σχήμα 5.2.8-1 εικονίζεται χωρητικός καταμεριστής τάσης με 1 πυκνωτή C_1 σε σύνδεση σειράς με N πυκνωτές C_2 σε παράλληλη σύνδεση.



Σχήμα 5.2.8-1 : Χωρητικός καταμεριστής με 1 πυκνωτή σε σύνδεση σειράς με N πυκνωτές σε παράλληλη σύνδεση

Η σχέση καταμερισμού που προκύπτει είναι

$$k = \frac{U_y}{U_x} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{\frac{1}{C_1}}{\frac{\frac{1}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_2}}}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_2}}} = 1 + N \frac{\frac{1}{C_1}}{\left(\frac{1}{C_2}\right)^{N-1}} = 1 + N \frac{C_2^{N-1}}{C_1} =$$

$$= 1 + N \frac{C_2^{N-1}}{C_1} = 1 + N \frac{C_2^{N-1}}{C_1} = \frac{C_1 + N C_2^{N-1}}{C_1} \quad (5.2.8-1)$$

Για τον υπολογισμό του μέγιστου απόλυτου σφάλματος $|\Delta_k|$ έχουμε

$$\Delta_k = \frac{-NC_2^{N-1}}{C_1^2} \Delta C_1 + (N-1) \frac{NC_2^{N-2}}{C_1} \Delta C_2, \text{ επομένως}$$

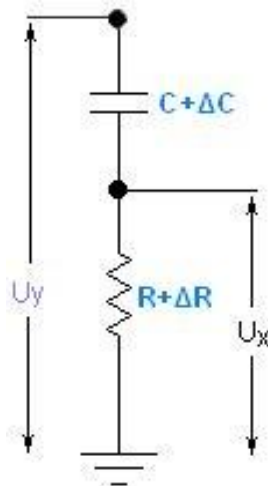
$$|\Delta_k| = \frac{NC_2^{N-1}}{C_1^2} |\Delta C_1| + (N-1) \frac{NC_2^{N-2}}{C_1} |\Delta C_2| \quad (5.2.8-2)$$

και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα θα είναι

$$m_k = \sqrt{\left(\frac{NC_2^{N-1}}{C_1^2} \Delta C_1\right)^2 + \left[(N-1) \frac{NC_2^{N-2}}{C_1} \Delta C_2\right]^2} \quad (5.2.8-3)$$

5.2.9 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 9 : 1 ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ 1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Στο σχήμα 5.2.9-1 εικονίζεται μικτός καταμεριστής τάσης με 1 πυκνωτή C σε σύνδεση σειράς με 1 αντίσταση R .



Σχήμα 5.2.9-1 : Μικτός καταμεριστής με 1 πυκνωτή σε σύνδεση σειράς με 1 αντίσταση

Η σχέση καταμερισμού k που προκύπτει είναι

$$k = \frac{U_y}{U_x} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{1}{\frac{C}{R}} = 1 + \frac{R}{C} = \frac{1+RC}{RC} \quad (5.2.9-1)$$

Για τον υπολογισμό του μέγιστου απόλυτου σφάλματος $|\Delta_k|$ έχουμε

$$\Delta_k = \frac{\partial k}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial k}{\partial C} \Delta C = -\frac{1}{CR^2} \Delta R - \frac{1}{RC^2} \Delta C, \text{ επομένως}$$

$$|\Delta_k| = \frac{1}{CR^2} |\Delta R| + \frac{1}{RC^2} |\Delta C| \quad (5.2.9-2)$$

και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα θα είναι

$$m_k = \sqrt{\left(\frac{1}{CR^2} \Delta R\right)^2 + \left(\frac{1}{RC^2} \Delta C\right)^2} \quad (5.2.9-3)$$

5.2.10 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 10 : 2 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ, ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ 2 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ

Στο σχήμα 5.2.10-1 εικονίζεται χωρητικός καταμεριστής τάσης με ζεύγη παράλληλων πυκνωτών σε σύνδεση σειράς. Η σχέση καταμερισμού που προκύπτει είναι

$$k = \frac{U_y}{U_x} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{\frac{\frac{1}{C_1} \cdot \frac{1}{C_1}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_1}}}{\frac{\frac{1}{C_2} \cdot \frac{1}{C_2}}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_2}}} = 1 + \frac{C_2}{C_1} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (5.2.10-1)$$

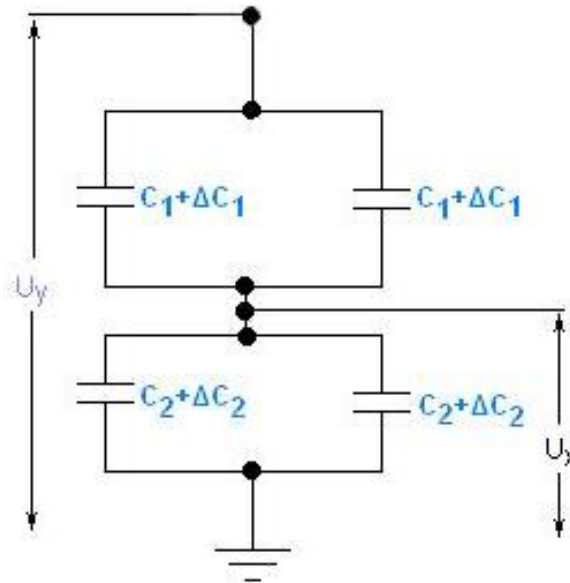
Για τον υπολογισμό του μέγιστου απόλυτου σφάλματος $|\Delta_k|$ έχουμε

$$\Delta_k = \frac{\partial k}{\partial C_1} \Delta C_1 + \frac{\partial k}{\partial C_2} \Delta C_2 = -\frac{C_2}{C_1^2} \Delta C_1 + \frac{1}{C_1} \Delta C_2, \text{ επομένως}$$

$$|\Delta_k| = \frac{C_2}{C_1^2} |\Delta C_1| + \frac{1}{C_1} |\Delta C_2| \quad (5.2.10-2)$$

και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα θα είναι

$$m_k = \sqrt{\left(\frac{C_2}{C_1^2} \Delta C_1\right)^2 + \left(\frac{1}{C_1} \Delta C_2\right)^2} \quad (5.2.10-3)$$



Σχήμα 5.2.10-1 : Χωρητικός καταμεριστής με 2 πυκνωτές σε παράλληλη σύνδεση, σε σύνδεση σειράς με 2 πυκνωτές σε παράλληλη σύνδεση

5.2.11 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 11 : ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕ ΣΕΙΡΑ, Ν ΚΛΑΔΩΝ 2 ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ

Στο σχήμα 5.2.11-1 εικονίζεται χωρητικός καταμεριστής τάσης με Ν ζεύγη παράλληλων πυκνωτών σε σύνδεση σειράς.

Οι σχέσεις καταμερισμού που προκύπτουν από την εικονιζόμενη διάταξη είναι

$$k_1 = \frac{U_y}{U_{x1}} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{\frac{1}{\frac{C_1}{2}}}{\frac{1}{\frac{C_2}{2} + \frac{C_3}{2} + \dots + \frac{C_N}{2}}} = 1 + \frac{\frac{1}{C_1}}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}} \quad (5.2.11-1)$$

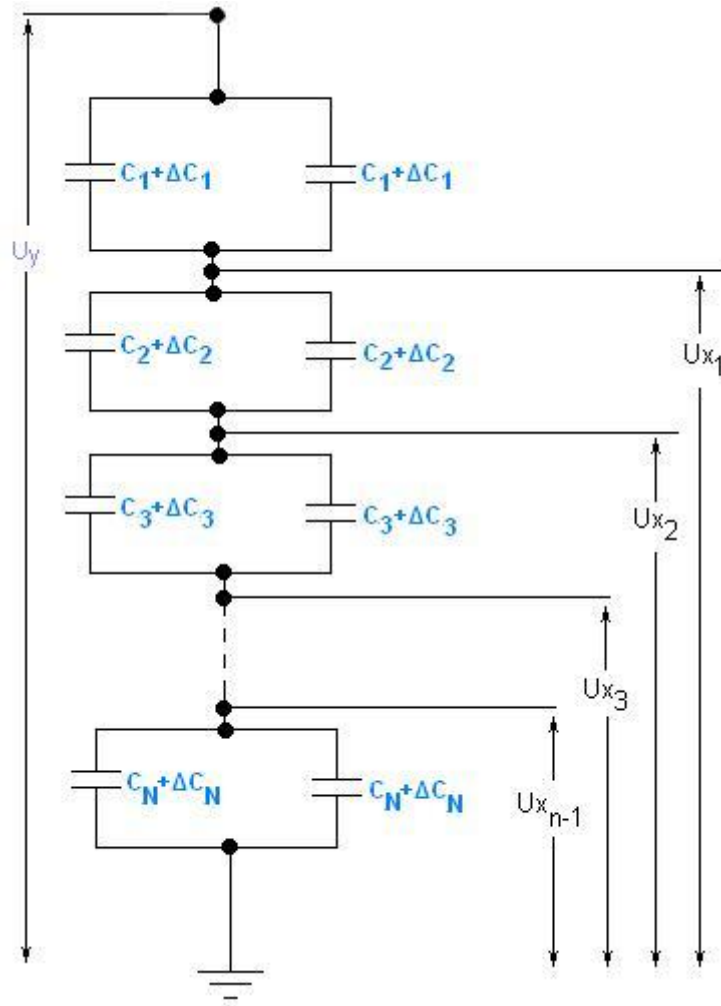
ομοίως

$$k_2 = 1 + \frac{\frac{1}{\frac{C_1}{2} + \frac{C_2}{2}}}{\frac{1}{\frac{C_3}{2} + \dots + \frac{C_N}{2}}} \quad (5.2.11-2)$$

$$k_3 = 1 + \frac{\frac{1}{\frac{C_1}{2} + \frac{C_2}{2} + \frac{C_3}{2}}}{\frac{1}{\frac{C_4}{2} + \dots + \frac{C_N}{2}}} \quad (5.2.11-3)$$

και

$$k_n = 1 + \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}}{\sum_{i=n+1}^N \frac{1}{C_i}} \quad (5.2.11-4)$$



Σχήμα 5.2.11-1 : Χωρητικός καταμεριστής με σύνδεση σε σειρά, N κλάδων 2 πυκνωτών σε παράλληλη σύνδεση

Για τον υπολογισμό των αντίστοιχων μέγιστων απόλυτων σφαλμάτων $|\Delta_k|$ έχουμε

$$|\Delta_{k_1}| = \left| \frac{\partial k_1}{\partial C_1} \Delta C_1 \right| + \left| \frac{\partial k_1}{\partial C_2} \Delta C_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial k_1}{\partial C_N} \Delta C_N \right| =$$

$$\frac{\frac{1}{(C_1)^2}}{\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}} |\Delta C_1| + \frac{\frac{1}{C_1} \cdot \frac{1}{(C_2)^2}}{\left(\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}\right)^2} |\Delta C_2| + \dots + \frac{\frac{1}{C_1} \cdot \frac{1}{(C_N)^2}}{\left(\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}\right)^2} |\Delta C_N| \quad (5.2.11-5)$$

ομοίως

$$|\Delta_{k_2}| = \frac{\frac{1}{(C_1)^2}}{\sum_{i=3}^N \frac{1}{C_i}} |\Delta C_1| + \frac{\frac{1}{(C_2)^2}}{\sum_{i=3}^N \frac{1}{C_i}} |\Delta C_2| + \frac{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) \cdot \frac{1}{(C_3)^2}}{\left(\sum_{i=3}^N \frac{1}{C_i}\right)^2} |\Delta C_3| + \dots + \frac{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) \cdot \frac{1}{(C_N)^2}}{\left(\sum_{i=3}^N \frac{1}{C_i}\right)^2} |\Delta C_N| \quad (5.2.11-6)$$

$$|\Delta_{k_3}| = \frac{\frac{1}{(C_1)^2}}{\sum_{i=4}^N \frac{1}{C_i}} |\Delta C_1| + \frac{\frac{1}{(C_2)^2}}{\sum_{i=4}^N \frac{1}{C_i}} |\Delta C_2| + \frac{\frac{1}{(C_3)^2}}{\left(\sum_{i=4}^N \frac{1}{C_i}\right)^2} |\Delta C_3| + \dots + \frac{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right) \cdot \frac{1}{(C_N)^2}}{\left(\sum_{i=4}^N \frac{1}{C_i}\right)^2} |\Delta C_N| \quad (5.2.11-7)$$

και

$$|\Delta_{k_n}| = \frac{\frac{1}{(C_1)^2}}{\sum_{i=n+1}^N \frac{1}{C_i}} |\Delta C_1| + \dots + \frac{\frac{1}{(C_n)^2}}{\sum_{i=n+1}^N \frac{1}{C_i}} |\Delta C_n| + \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}\right) \cdot \frac{1}{(C_{n+1})^2}}{\left(\sum_{i=n+1}^N \frac{1}{C_i}\right)^2} |\Delta C_{n+1}| + \dots +$$

$$\frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}\right) \cdot \frac{1}{(C_N)^2}}{\left(\sum_{i=n+1}^N \frac{1}{C_i}\right)^2} |\Delta C_N| \quad (5.2.11-8)$$

και τα αντίστοιχα μέσα τετραγωνικά σφάλματα θα είναι

$$m_{k_1} = \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{(C_1)^2}}{\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}} |\Delta C_1|\right)^2 + \left(\frac{\frac{1}{C_1} \cdot \frac{1}{(C_2)^2}}{\left(\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}\right)^2} |\Delta C_2|\right)^2 + \dots + \left(\frac{\frac{1}{C_1} \cdot \frac{1}{(C_N)^2}}{\left(\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}\right)^2} |\Delta C_N|\right)^2} \quad (5.2.11-9)$$

$$m_{k_2} = \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{(C_1)^2}}{\sum_{i=3}^N \frac{1}{C_i}} |\Delta C_1|\right)^2 + \left(\frac{\frac{1}{(C_2)^2}}{\sum_{i=3}^N \frac{1}{C_i}} |\Delta C_2|\right)^2 + \left(\frac{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) \cdot \frac{1}{(C_3)^2}}{\left(\sum_{i=3}^N \frac{1}{C_i}\right)^2} |\Delta C_3|\right)^2 + \dots + \left(\frac{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) \cdot \frac{1}{(C_N)^2}}{\left(\sum_{i=3}^N \frac{1}{C_i}\right)^2} |\Delta C_N|\right)^2} \quad (5.2.11-10)$$

$$m_{k_3} = \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{(c_1)^2}}{\sum_{i=4}^N \frac{1}{c_i}} |\Delta C_1|\right)^2 + \left(\frac{\frac{1}{(c_2)^2}}{\sum_{i=4}^N \frac{1}{c_i}} |\Delta C_2|\right)^2 + \left(\frac{\frac{1}{(c_3)^2}}{\left(\sum_{i=4}^N \frac{1}{c_i}\right)^2} |\Delta C_3|\right)^2 + \dots + \left(\frac{\left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3}\right) \cdot \frac{1}{(c_N)^2}}{\left(\sum_{i=4}^N \frac{1}{c_i}\right)^2} |\Delta C_N|\right)^2} \quad (5.2.11-11)$$

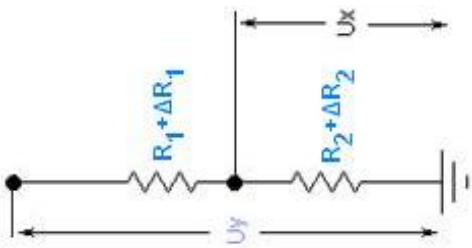
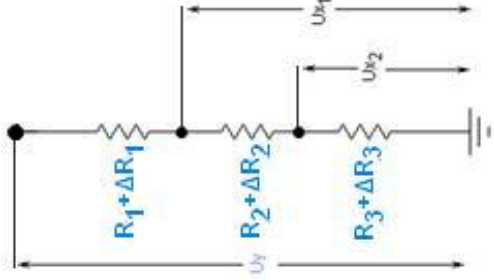
και

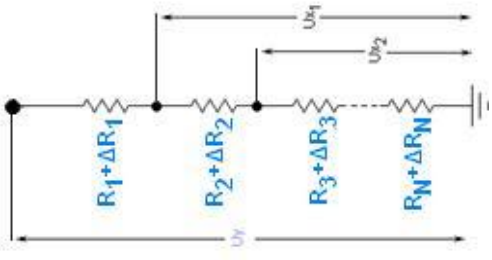
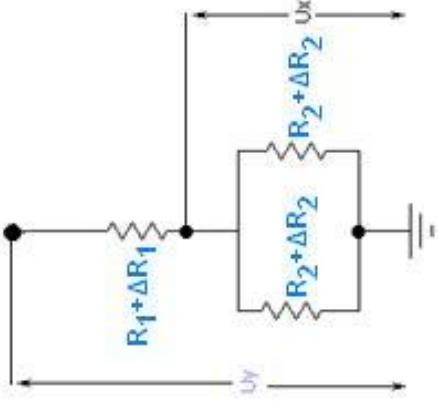
$$m_{k_n} = \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{(c_1)^2}}{\sum_{i=n+1}^N \frac{1}{c_i}} |\Delta C_1|\right)^2 + \dots + \left(\frac{\frac{1}{(c_n)^2}}{\sum_{i=n+1}^N \frac{1}{c_i}} |\Delta C_n|\right)^2 + \left(\frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i}\right) \cdot \frac{1}{(c_{n+1})^2}}{\left(\sum_{i=n+1}^N \frac{1}{c_i}\right)^2} |\Delta C_{n+1}|\right)^2 + \dots + \left(\frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i}\right) \cdot \frac{1}{(c_N)^2}}{\left(\sum_{i=n+1}^N \frac{1}{c_i}\right)^2} |\Delta C_N|\right)^2} \quad (5.2.11-12)$$

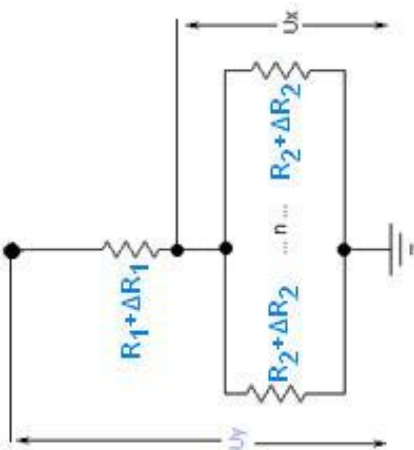
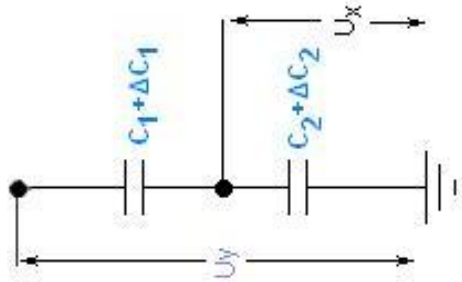
[3]

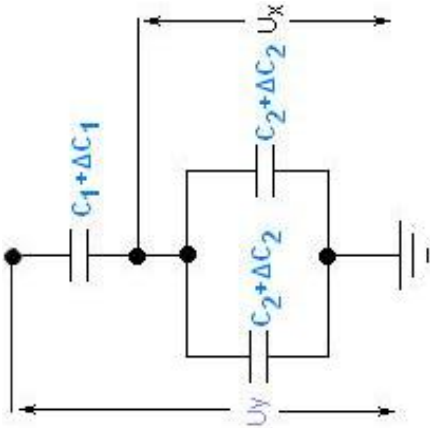
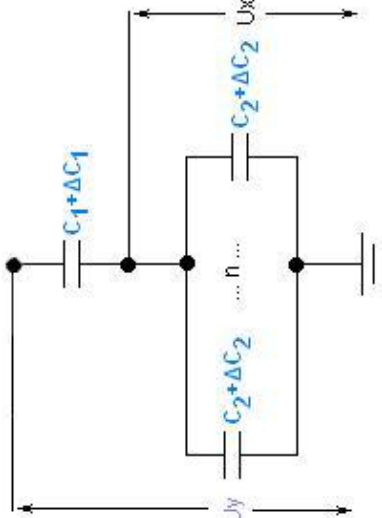
5.2.12 ΣΥΝΟΨΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΩΝ

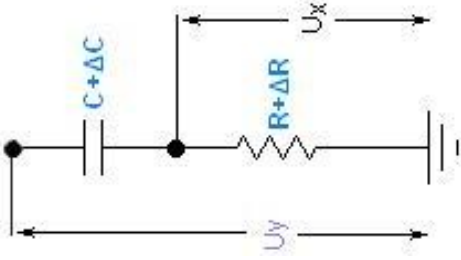
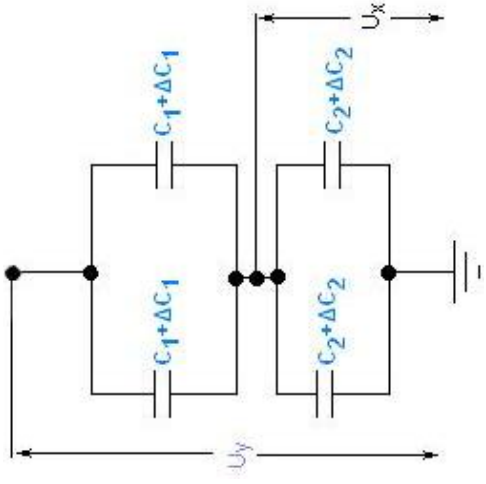
Οι συνδεσμολογίες των κυκλωμάτων των καταμεριστών τάσης που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο αυτό, συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2.12-1. Στον ίδιο Πίνακα φαίνονται επίσης οι αντίστοιχες σχέσεις καταμερισμού k καθώς και τα μέγιστα απόλυτα σφάλματα Δ_k για την κάθε συνδεσμολογία. Με βάση την επιθυμητή μορφή της σχέσης καταμερισμού k , δύναται να επιλεγεί και η αντίστοιχη συνδεσμολογία κυκλώματος καταμεριστή τάσης.

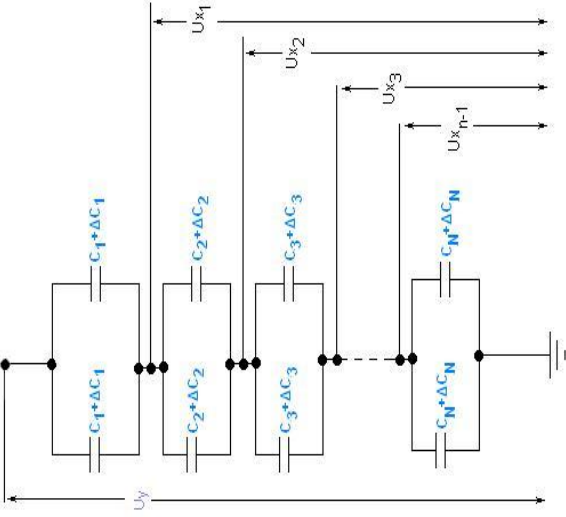
ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ	ΣΧΕΣΗ/ΕΙΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΥ k	ΜΕΓΙΣΤΟ/Α ΑΠΟΛΥΤΟ/Α ΣΦΑΛΜΑ/ΤΑ $|\Delta_k|$
	$k = \frac{R_2 + R_1}{R_2}$	$|\Delta_k| = \frac{1}{R_2} |\Delta R_1| - \frac{R_1}{R_2^2} |\Delta R_2|$
	$k_1 = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + R_3}$ $k_2 = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3}$	$|\Delta_{k_1}| = \frac{1}{R_2 + R_3} |\Delta R_1| + \frac{R_1}{(R_2 + R_3)^2} (|\Delta R_2| + |\Delta R_3|)$ $|\Delta_{k_2}| = \frac{1}{R_3} (|\Delta R_1| + |\Delta R_2|) + \frac{R_1 + R_2}{R_3^2} |\Delta R_3|$

ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ	ΣΧΕΣΗ/ΕΙΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΥ k	ΜΕΓΙΣΤΟ/Α ΑΠΟΛΥΤΟ/Α ΣΦΑΛΜΑ/ΤΑ $|\Delta_k|$
	$k_1 = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{\sum_{i=2}^N R_i}$ $k_2 = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{\sum_{i=3}^N R_i}$ $k_n = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{\sum_{i=n+1}^N R_i}$	$|\Delta_{k_1}| = \frac{1}{R_2 + R_3} |\Delta R_1| + \frac{R_1}{(R_2 + R_3)^2} (|\Delta R_2| + |\Delta R_3|)$ $|\Delta_{k_2}| = \frac{1}{R_3} (|\Delta R_1| + |\Delta R_2|) + \frac{R_1 + R_2}{R_3^2} |\Delta R_3|$ $|\Delta_{k_n}| = \sum_{m=1}^n \frac{1}{\sum_{i=n+1}^N R_i} |\Delta R_m| + \sum_{m=n+1}^N \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{(\sum_{i=n+1}^N R_i)^2} |\Delta R_m|$
	$k = \frac{2R_1 + R_2}{R_2}$	$|\Delta_k| = \frac{2}{R_2} |\Delta R_1| + \frac{2R_1}{R_2^2} |\Delta R_2|$

ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ	ΣΧΕΣΗ/ΕΙΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΥ k	ΜΕΓΙΣΤΟ/Α ΑΠΟΛΥΤΟ/Α ΣΦΑΛΜΑ/ΤΑ $|\Delta_k|$
	$k = \frac{NR_1 + R_2}{R_2}$	$|\Delta_k| = \frac{N}{R_2} |\Delta R_1| + \frac{NR_1}{R_2^2} |\Delta R_2|$
	$k = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$	$|\Delta_k| = \frac{C_2}{C_1^2} |\Delta C_1| + \frac{1}{C_1} |\Delta C_2|$

ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ	ΣΧΕΣΗ/ΕΙΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΥ k	ΜΕΓΙΣΤΟ/Α ΑΠΟΛΥΤΟ/Α ΣΦΑΛΜΑ/ΤΑ $|\Delta_k|$
	$k = \frac{C_1 + 2C_2}{C_1}$	$|\Delta_k| = 2 \frac{C_2}{C_1^2} |\Delta C_1| + \frac{2}{C_1} |\Delta C_2|$
	$k = \frac{C_1 + NC_2^{N-1}}{C_1}$	$|\Delta_k| = \frac{NC_2^{N-1}}{C_1^2} |\Delta C_1| + (N-1) \frac{NC_2^{N-2}}{C_1} |\Delta C_2|$

ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ	ΣΧΕΣΗ/ΕΙΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΥ k	ΜΕΓΙΣΤΟ/Α ΑΠΟΛΥΤΟ/Α ΣΦΑΛΜΑ/ΤΑ $|\Delta_k|$
	$k = \frac{1 + RC}{RC}$	$|\Delta_k| = \frac{1}{CR^2} |\Delta R| + \frac{1}{RC^2} |\Delta C|$
	$k = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$	$|\Delta_k| = \frac{C_2}{C_1^2} |\Delta C_1| + \frac{1}{C_1} |\Delta C_2|$

ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ	ΣΧΕΣΗ/ΕΙΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΥ k	ΜΕΓΙΣΤΟ/Α ΑΠΟΛΥΤΟ/Α ΣΦΑΛΜΑ/ΤΑ $|\Delta_k|$
	$k_1 = 1 + \frac{\frac{1}{C_1}}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}}$	$|\Delta_{k_1}| = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \dots + \frac{1}{C_N}} \left(\frac{1}{C_1} |\Delta_{C_1}| + \frac{1}{\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}} \frac{1}{C_1} |\Delta_{C_2}| + \dots + \frac{1}{\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}} \frac{1}{C_1} \frac{1}{C_N} |\Delta_{C_N}| \right)$
	$k_2 = 1 + \frac{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}{\frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}}$	$|\Delta_{k_2}| = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}} \left(\frac{1}{C_1} |\Delta_{C_1}| + \frac{1}{\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}} \frac{1}{C_1} |\Delta_{C_2}| + \frac{1}{\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}} \frac{1}{C_2} \frac{1}{C_1} |\Delta_{C_3}| + \dots + \frac{1}{\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}} \frac{1}{C_2} \frac{1}{C_1} \frac{1}{C_N} |\Delta_{C_N}| \right)$
	$k_3 = 1 + \frac{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}{\frac{1}{C_4} + \dots + \frac{1}{C_N}}$	$|\Delta_{k_3}| = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}} \left(\frac{1}{C_1} |\Delta_{C_1}| + \frac{1}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}} \frac{1}{C_1} |\Delta_{C_2}| + \frac{1}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}} \frac{1}{C_2} \frac{1}{C_1} |\Delta_{C_3}| + \dots + \frac{1}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}} \frac{1}{C_2} \frac{1}{C_3} \frac{1}{C_1} |\Delta_{C_N}| \right)$
	$k_n = 1 + \frac{\frac{1}{C_1}}{\frac{1}{C_{n+1}} + \dots + \frac{1}{C_n}}$	$|\Delta_{k_n}| = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} + \frac{1}{C_{n+1}} + \dots + \frac{1}{C_N}} \left(\frac{1}{C_1} |\Delta_{C_1}| + \frac{1}{\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} + \frac{1}{C_{n+1}} + \dots + \frac{1}{C_N}} \frac{1}{C_1} |\Delta_{C_n}| + \frac{1}{\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} + \frac{1}{C_{n+1}} + \dots + \frac{1}{C_N}} \frac{1}{C_2} \frac{1}{C_1} |\Delta_{C_{n+1}}| + \dots + \frac{1}{\frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} + \frac{1}{C_{n+1}} + \dots + \frac{1}{C_N}} \frac{1}{C_2} \frac{1}{C_1} \frac{1}{C_N} |\Delta_{C_N}| \right)$

Πίνακας 5.2.12-1 : Διατάξεις καταμεριστών τάσης, αντίστοιχες σχέσεις καταμερισμού k και μέγιστα απόλυτα σφάλματα $|\Delta_k|$

Αναφορές

- [1] Kuffel, E., Zaengl, W. S., Kuffel, J., "High Voltage Engineering: *Fundamentals*", (second edition), Newnes, published by Butterworth – Heinemann, Oxford 2000.
- [2] Τοπαλής, Φ., «Υψηλές Τάσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 1996.
- [3] Μανωλάς, Σ., «Ηλεκτρικές Μετρήσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Ε.Φ. του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αθήνα 2002.

1

Αναφορά [26] : N. Ari : "Die Ausbreitung der von Wanderwellen hervorgerufenen elektromagnetischen Wellen und deren Wirkung in Stoss Spannungsmesskreisen", Diss. ETHZ , Nr. 5345 , Zurich , 1974.

Αναφορά [27] : N. Ari : "Electromagnetic phenomena in impulse voltage measuring systems" , Vol. PAS-96 , No. 4 , July-August 1977 , pp. 1162-1172.

2

Αναφορά [57] : IEC Publication 60-4 (1977). High voltage test techniques, Part 4 : Application Guide for Measuring Devices.

3

Αναφορά [28] : Malewski , R. , "Measuring properties of IREQ's 5.4 MV voltage divider" , IEE Proceedings-A , Vol. 133 , Part A , No. 8 , pp.523-533 , October 1986.

4

Αναφορά [5] : Νικολόπουλος , Ν. , «Υψηλές Τάσεις» , Τόμος Α , Αθήνα 1971.

5

Αναφορά [57] : IEC Publication 60-4 (1977). High voltage test techniques, Part 4 : Application Guide for Measuring Devices.

Αναφορά [53] : IEC Publication 60:High voltage test techniques, Part 2 : Measuring Systems, 2nd Edition, 1944-11.

6

Αναφορά [53] : IEC Publication 60:High voltage test techniques, Part 2 : Measuring Systems, 2nd Edition, 1944-11.

Αναφορά [129] : Q.-C. Qi and W. Zaengl. Investigations of errors related to the measured virtual front time T of lightning impulses. *Trans. IEEE PAS 102* (1983), pp. 2379–2390.

Αναφορά [130] : N. Hylten - Cavallius et al. A new approach to minimize response errors in the measurement of high voltages. *Trans. IEEE PAS 102* (1983), pp. 2077–2091.

7

Αναφορά [58] : A. Asner. *Bull. SEV.* 52 (1961), pp. 192–203.

8

Αναφορά [59] : F. Creed, R. Kawamura and G. Newi. *Trans. IEEE PAS 86* (1967), pp. 1408–1420.

9

Αναφορά [60] : W. Zaengl. *Bull. SEV.* 61 (1970), pp. 1003–1017.

10

Αναφορά [50] : IRR-IMS Group. Facing uhv measuring problems. *Electra* No. 35 (1974), pp. 157–254.

Αναφορά [59] : F. Creed, R. Kawamura and G. Newi. *Trans. IEEE PAS 86* (1967), pp. 1408–1420.

Αναφορά [60] : W. Zaengl. *Bull. SEV.* 61 (1970), pp. 1003–1017.

11

Αναφορά [139] : L. Schnell (Editor). *Technology of Electrical Measurements*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, 1993.

12

Αναφορά [5] , σελίδες 149-156 (Ωμικοί καταμεριστές τάσης) & 156-159 (Μικτοί ωμικοχωρητικοί καταμεριστές τάσης).

13

Αναφορά [70] : A. Schwab and J. Pagel. *Trans. IEEE PAS 91* (1972), pp. 2376–2382.

14

Αναφορά [71] : W. Breilmann. Effects of the leads on the transient behavior of coaxial divider for the measurement of high ac and impulse voltage. 3rd Int. Symp. on High Voltage Engg., Milan, 1979, Report 42.12.

15

Αναφορά [72] : W. Zaengl. *Bull. SEV.* 56 (1965), pp. 232–240.

- 16 Αναφορά [72] : W. Zaengl. *Bull. SEV*. 56 (1965), pp. 232–240.
- 17 Αναφορά [73] : H. Dommel. *Trans. IEEE PAS* 88 (1969), pp. 388–399.
- 18 Αναφορά [50] : IRR-IMS Group. Facing uhv measuring problems. *Electra* No. 35 (1974), pp. 157–254.
- 19 Αναφορά [54] : High voltage measurements, present state and future developments. *Rev. Gen. Electr.*, Special Issue, June 1978.
- 20 Αναφορά [53] : IEC Publication 60:High voltage test techniques, Part 2 : Measuring Systems, 2nd Edition, 1944-11.
- 21 Αναφορά [53] : IEC Publication 60:High voltage test techniques, Part 2 : Measuring Systems, 2nd Edition, 1944-11.
- 22 Αναφορά [6] : IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing. IEEE Std. 4-1995.
Αναφορά [57] : IEC Publication 60-4 (1977). High voltage test techniques, Part 4 : Application Guide for Measuring Devices.
- 23 Αναφορά [131] : E. Kuffel and W.S. Zaengl. *High Voltage Engineering Fundamentals*. Pergamon Press, 1984.
- 24 Αναφορά [60] : W. Zaengl. *Bull. SEV*. 61 (1970), pp. 1003–1017.
- 25 Αναφορά [50] : IRR-IMS Group. Facing uhv measuring problems. *Electra* No. 35 (1974), pp. 157–254.
- 26 Αναφορά [76] : N. Ari. Electromagnetic phenomena in impulse voltage measuring systems. *Trans. IEEE PAS* 96 (1977), pp. 1162–1172.
- 27 Αναφορά [77] : K.H. Gonschorek. 3rd Int. Symp. on High Voltage Engg., Milan, 1979, Report 42.02.
- 28 Αναφορά [53] : IEC Publication 60:High voltage test techniques, Part 2 : Measuring Systems, 2nd Edition, 1944-11.
- 29 Αναφορά [5] , σελίδες 172~173 (Ωμικοί και παράλληλοι-μικτοί ωμικοί καταμεριστές τάσης).
- 30 Αναφορά [120] : F.G. Burch. On potential dividers for cathode-ray oscillographs. *Phil. Magazine*, Series 7,13 (1932), pp. 760–774.
- 31 Αναφορά [121] : W. Zaengl. *ETZ-A* 98 (1977), pp. 792–795.
- 32 Αναφορά [123] : R. Malewski and N. Hylten-Cavallius. *Trans. IEEE PAS* 93 (1974), pp. 1797–1804.
Αναφορά [126] : T. Harada *et al.* Development of high-performance low voltage arms for capacitive voltage dividers. 3rd Int. Symp. on High Voltage Engg., Milan, 1979, Report 42.14.

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ”

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το θέμα της εργασίας αυτής ήταν οι καταμεριστές τάσης, που αποτελούν στις μέρες μας τη σχεδόν γενικότερα χρησιμοποιούμενη μέθοδο για τη μέτρηση υψηλών τάσεων. Η μελέτη αυτή έγινε με αφορμή την ανάπτυξη του νέου Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά και αφορά στη διερεύνηση διαφόρων τύπων και συνδεσμολογιών καταμεριστών, που θα χρειαστεί να υλοποιηθούν μελλοντικά για τους ακαδημαϊκούς σκοπούς του εργαστηρίου.

Η μελέτη ξεκίνησε με μια εισαγωγή στη θεωρία των μετρήσεων και στη συνέχεια παρουσιάστηκαν στοιχεία των μετρήσεων υψηλών τάσεων. Έγιναν αναφορές σε διηλεκτρικές μετρήσεις καθώς και μετρήσεις υψηλών τάσεων και ρευμάτων. Ταξινομήθηκαν τα ηλεκτρομηχανικά όργανα και παρουσιάστηκαν μέθοδοι μέτρησης και καταγραφής υψηλών τάσεων και διηλεκτρικών απωλειών καθώς και μέθοδοι αντιμετώπισης ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σε συστήματα μέτρησης υψηλών τάσεων.

Κατόπιν παρουσιάστηκε μια θεωρητική προσέγγιση των στοιχείων των καταμεριστών μετρήσεων, τόσο ως προς τη δομή όσο και ως προς τη κατασκευή τους. Μελετήθηκαν τα είδη των καταμεριστών που χρησιμοποιούνται στην πράξη όπως και οι βραχίονες χαμηλής τάσης τους. Παρατέθηκαν και αναλύθηκαν κατασκευαστικά στοιχεία για τους καταμεριστές.

Ακολούθησε μελέτη των διηλεκτρικών καταπονήσεων. Παρουσιάστηκε η διαβάθμιση των μονώσεων, τα βασικά επίπεδα μόνωσης και τα κύρια μονωτικά υλικά. Εισήχθησαν οι προδιαγραφές ελέγχου και αναφέρθηκαν τεχνικές εφαρμογών προστατευτικών διατάξεων σε συστήματα υψηλής τάσης. Το υλικό που παρατίθεται στο *4ο Κεφάλαιο*, δύναται μελλοντικά να αποτελέσει το θεωρητικό υπόβαθρο για την κατασκευή δοκιμών υψηλής τάσης.

Τέλος μελετήθηκαν διάφορες συνδεσμολογίες καταμεριστών τάσης και υπολογίστηκε η σχέση καταμερισμού k για κάθε μια από αυτές καθώς και το αντίστοιχο μέγιστο απόλυτο και μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Τα αποτελέσματα που παρήχθησαν, συνοψίζονται στον *Πίνακα 5.2.12-1* και δύναται να χρησιμοποιηθούν μελλοντικά για την κατασκευή καταμεριστών υψηλής τάσης με τα επιθυμητά - από τους ακαδημαϊκούς σκοπούς του νέου Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά - χαρακτηριστικά.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας μελετήθηκαν θεωρητικά τα δοκίμια και οι καταμεριστές τάσης, με σκοπό τη μελλοντική χρήση τους στο νέο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά. Παρουσιάστηκαν τα κύρια μονωτικά υλικά και υπολογίστηκαν οι σχέσεις καταμερισμού για διάφορες συνδεσμολογίες καταμεριστών τάσης. Πλέον είναι εφικτή η ανάπτυξη και κατασκευή των επιθυμητών δοκιμίων αλλά και καταμεριστών τάσης, γνωρίζοντας αντίστοιχα τα χαρακτηριστικά τους καθώς και τη μορφή της σχέσης καταμερισμού που θέλουμε να αναπτύξουμε.

Μελλοντικός μελετητής, θα μπορούσε να εξετάσει την τυχούσα επίδραση του υλικού του δοκιμίου στη σχέση καταμερισμού k και εφόσον υφίσταται τέτοια εξάρτηση, επόμενο στάδιο θα ήταν η μοντελοποίηση του φαινομένου αυτού.

Μια εξίσου σημαντική μελέτη θα μπορούσε να είναι ο καθορισμός των διαθέσιμων υλικών κατασκευής δοκιμίων ανάλογα με τις τάσεις που ο ερευνητής επιθυμεί να μετρήσει, ώστε η διάταξη μέτρησης να αντέχει τις σχετικές καταπονήσεις χωρίς να καταστρέφεται.

Τέλος, ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα και χρήσιμη θα μπορούσε να είναι η κατασκευή διατάξεων καταμεριστών υψηλής τάσης. Προτείνεται η κατασκευή δύο καταμεριστών, εκ των οποίων ο ένας θα μπορούσε κομμένος σε τομή να αποτελέσει εποπτικό μέσο διδασκαλίας, ενώ ο δεύτερος κατάλληλα μελετημένος ως προς τη σχέση καταμερισμού του θα μπορούσε να αποτελέσει μια στοχευμένη λειτουργική διάταξη του νέου Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά.


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

“ΚΩΔΙΚΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ”

Οι σημαντικότεροι τρόποι με τους οποίους δίνεται η τιμή μιας αντίστασης είναι ο Κώδικας Χρωμάτων και ο Κώδικας Αριθμών.

A.1 ΚΩΔΙΚΑΣ ΧΡΩΜΑΤΩΝ

A	B	C	D	E	
1 ^η ΖΩΝΗ	2 ^η ΖΩΝΗ	3 ^η ΖΩΝΗ	ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗΣ	ΑΝΟΧΗ	
					
ΧΡΩΜΑ	ΖΩΝΗ A	ΖΩΝΗ B	ΖΩΝΗ C	ΖΩΝΗ D	ΖΩΝΗ E
ΜΑΥΡΟ	0	0	0	x 1	± 1%
ΚΑΦΕ	1	1	1	x 10	± 2%
ΚΟΚΚΙΝΟ	2	2	2	x 100	-
ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ	3	3	3	x 1K	-
ΚΙΤΡΙΝΟ	4	4	4	x 10K	-
ΠΡΑΣΙΝΟ	5	5	5	x 100K	± 0.5%
ΜΠΛΕ	6	6	6	x 1M	-
ΙΩΔΕΣ (ΜΩΒ)	7	7	7	-	-
ΓΚΡΙ	8	8	8	-	-
ΛΕΥΚΟ	9	9	9	-	-
ΧΡΥΣΟ	-	-	-	x 0.1	± 5%
ΑΣΗΜΙ	-	-	-	x 0.01	± 10%
ΧΩΡΙΣ ΧΡΩΜΑ	-	-	-	-	± 20%

Πίνακας A.1-1 : Κώδικας Χρωμάτων Αντιστάσεων

A.2 ΚΩΔΙΚΑΣ ΑΡΙΘΜΩΝ

Η τιμή της αντίστασης, η ανοχή της και η ισχύς της αναγράφονται με αριθμούς πάνω στο σώμα της. Έτσι τα γράμματα Ω, R, K, M και G ακολουθούν, προηγούνται, ή υπάρχουν ανάμεσα στους αριθμούς για να δηλώσουν την τιμή της, ενώ το γράμμα W ακολουθεί την τιμή της αντίστασης.

Για παράδειγμα

R47 1% 5W σημαίνει αντίσταση 0.47Ω ισχύος 5W με ανοχή 1%

4R7 5% 1W σημαίνει αντίσταση 4.7Ω ισχύος 1W με ανοχή 5%

100 0.5% 2W σημαίνει αντίσταση 100Ω ισχύος 2W με ανοχή 0.5%

Αν υποθέσουμε ότι το πρώτο χρώμα είναι κόκκινο, το 2^ο μωβ, το 3^ο κίτρινο και το χρώμα της ανοχής χρυσαφί, τότε σύμφωνα με τον κώδικα χρωμάτων η τιμή του αντιστάτη είναι

Κόκκινο	Μωβ	Κίτρινο	Ανοχή
2	7	0000	5%

δηλαδή 270.000 Ωhm (ή 270 ΚΩ) με 5% ανοχή.

Πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι μπορεί και το τρίτο χρώμα (αριθμός μηδενικών) να είναι χρυσαφί ή και ασημί . Αυτό στην περίπτωση που η ωμική τιμή είναι μικρότερη από 10Ωhm ή 1Ωhm. Έτσι αν το τρίτο χρώμα είναι χρυσαφί, διαιρούμε τον αριθμό που βγαίνει από τα δυο πρώτα ψηφία δια 10 ή αν το τρίτο χρώμα είναι ασημί διαιρούμε δια 100. Σημειώνεται ότι αν το 3^ο χρώμα είναι μαύρο τότε δεν βάζουμε καθόλου μηδενικά.

Όσον αφορά στην ισχύ των αντιστάσεων, αυτές κυκλοφορούν σε τιμές : 1/8 Watt, 1/4 Watt, 1/2 Watt, 1 Watt και 2 Watt.

Για να μπορέσει κανείς να αναγνωρίσει την ισχύ κάποιας αντίστασης, πρέπει να ανατρέξει στο κατάλληλο βιβλίο της εταιρίας που την παράγει και να διαβάσει τα χαρακτηριστικά της (μήκος, διατομή κ.λ.π.).

Στις βαττικές αντιστάσεις συνήθως πάνω από 2 Watt δεν υπάρχουν χρώματα αλλά η ωμική τιμή και η ανοχή γράφονται αριθμητικώς (π.χ. 10R = 10Ω, 10K =10ΚΩ, 8Κ2 = 8,2ΚΩ. Κάτι τέτοιο μπορεί να συναντηθεί και σε μικρότερης ισχύος αντιστάσεις, αλλά σπανιότερα.

A.2.1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Τα τελευταία χρόνια κυκλοφορούν στο εμπόριο αντιστάσεις με μικρές ανοχές, λόγος για τον οποίο τις ονομάζουμε και ακριβείας. Αυτές οι αντιστάσεις έχουν τουλάχιστον μια λωρίδα χρώματος περισσότερη ενώ, αν υπάρχει και 6^ο χρώμα αυτό ορίζει το θερμοκρασιακό συντελεστή. Για τον υπολογισμό της πρέπει να γνωρίζουμε ότι τα 3 πρώτα χρώματα σημαίνουν αντίστοιχα 1^ο, 2^ο και 3^ο ψηφίο και το 4^ο χρώμα δείχνει τον αριθμό των μηδενικών. Η ανοχή της είναι το 5^ο χρώμα που μπορεί να είναι καφέ (1%), κόκκινο (2%) και σπανιότερα πορτοκαλί (3%), κίτρινο (4%) και πράσινο (0,5%).

Πρέπει να αναφερθεί ότι σε κάποιες αντιστάσεις σημειώνεται επάνω τους με τη μορφή αριθμού η ωμική τους τιμή και η ανοχή τους. Μια γνωστή κατηγορία της οποίας τα χαρακτηριστικά σημειώνονται, είναι οι βαττικές αντιστάσεις (γνωστές και ως 'τουβλάκια') όπου σημειώνεται συνήθως και η τιμή τους σε Watt.

Ολοκληρώνοντας τη μικρή αυτή αναφορά στις μεθόδους ανάγνωσης των αντιστάσεων, πρέπει να γνωρίζουμε ότι αν δεν βρούμε αντίσταση στην ισχύ που θέλουμε ή αν έχουμε αμφιβολία για την τιμή της, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσουμε αντίσταση μεγαλύτερης ισχύος από την απαιτούμενη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β “ΚΩΔΙΚΕΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ”

B.1 ΠΥΚΝΩΤΕΣ POLYESTER

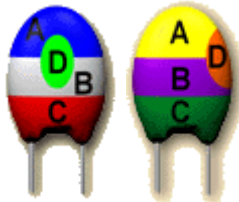
Ο Κώδικας Χρωμάτων για τους πυκνωτές Polyester είναι ο ακόλουθος

A	B	C	D	E	
1 ^Η ΖΩΝΗ	2 ^Η ΖΩΝΗ	ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗΣ	ΑΝΟΧΗ	ΤΑΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	
					
ΧΡΩΜΑ	ΖΩΝΗ A	ΖΩΝΗ B	ΖΩΝΗ C	ΖΩΝΗ D	ΖΩΝΗ E
ΜΑΥΡΟ	-	0	x 1	± 20%	-
ΚΑΦΕ	1	1	x 10	± 1%	-
ΚΟΚΚΙΝΟ	2	2	x 100	± 2%	250V
ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ	3	3	x 1K	-	-
ΚΙΤΡΙΝΟ	4	4	x 10K	-	400V
ΠΡΑΣΙΝΟ	5	5	x 100K	± 5%	-
ΜΠΛΕ	6	6	-	-	630V
ΙΩΔΕΣ (ΜΩΒ)	7	7	-	-	-
ΓΚΡΙ	8	8	-	-	-
ΛΕΥΚΟ	9	9	-	-± 10%	-

Πίνακας B.1-1 : Κώδικας Χρωμάτων Πυκνωτών Polyester

B.2 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΤΑΝΤΑΛΙΟΥ

Ο Κώδικας Χρωμάτων για τους πυκνωτές Τανταλίου είναι ο ακόλουθος

A	B	C	D	
1 ^Η ΖΩΝΗ	2 ^Η ΖΩΝΗ	ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗΣ	ΤΑΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	
				
ΧΡΩΜΑ	ΖΩΝΗ A	ΖΩΝΗ B	ΖΩΝΗ C	ΖΩΝΗ D
ΜΑΥΡΟ	-	0	x 1	10V
ΚΑΦΕ	1	1	x 10	1.5V
ΚΟΚΚΙΝΟ	2	2	-	30V
ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ	3	3	-	35V
ΚΙΤΡΙΝΟ	4	4	-	6.3
ΠΡΑΣΙΝΟ	5	5	-	16V
ΜΠΛΕ	6	6	-	20V
ΙΩΔΕΣ (ΜΩΒ)	7	7	-	-
ΓΚΡΙ	8	8	:10	25V
ΛΕΥΚΟ	9	9	:10	3V

Πίνακας B.2-1 : Κώδικας Χρωμάτων Πυκνωτών Τανταλίου (I)

A	B	C	D
1^η ΖΩΝΗ	2^η ΖΩΝΗ	ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗΣ	ΤΑΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
ΧΡΩΜΑ	ΖΩΝΗ A	ΖΩΝΗ B	ΖΩΝΗ C
ΜΑΥΡΟ	-	0	-
ΚΑΦΕ	1	1	-
ΚΟΚΚΙΝΟ	2	2	-
ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ	3	3	-
ΚΙΤΡΙΝΟ	4	4	:100
ΠΡΑΣΙΝΟ	5	5	:10
ΜΠΛΕ	6	6	x1
ΙΩΔΕΣ (ΜΩΒ)	7	7	x10
ΓΚΡΙ	8	8	-
ΛΕΥΚΟ	9	9	-

Πίνακας Β.2-2 : Κώδικας Χρωμάτων Πυκνωτών Τανταλίου (II)

Αναφορές

- [1] Γκιόκας, Γ., Α., Φριλίγκος, Β., Σ., «Τεχνολογία Διατάξεων Ηλεκτρονικής», Ο.Ε.Δ.Β., Αθήνα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

- [1] Κιοσκερίδης, Ι., «Ηλεκτρικές Μετρήσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρονικής της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2003.
- [2] Μανωλάς, Σ., «Ηλεκτρικές Μετρήσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αθήνα 2002.
- [3] Διαμαντόπουλος, Δ., «Υψηλές Τάσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αιγάλεω 2006.
- [4] Κούκος, Π., «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας, Χαλκίδα 2003-04.
- [5] Πυργιώτη, Ε., «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Πάτρας, Πάτρα 2005.
- [6] Kreuger, F., "Industrial High Voltage", (Volume II), Delft University of Technology, Netherland 1992.

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

- [1] Κιοσκερίδης, Ι., «Ηλεκτρικές Μετρήσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρονικής της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2003.
- [2] Διαμαντόπουλος, Δ., «Υψηλές Τάσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αιγάλεω 2006.
- [3] Πυργιώτη, Ε., «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Πάτρας, Πάτρα 2005.
- [4] Κούκος, Π., «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας, Χαλκίδα 2003-04.
- [5] Μαινεμενλής, Χ., «Τεχνική του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007.
- [6] Kreuger, F., "Industrial High Voltage", (Volume II), Delft University of Technology, Netherland 1992.
- [7] Κιοσκερίδης, Ι., «Ηλεκτρονικές Μετρήσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρονικής της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2003.

- [8] Τοπαλής, Φ., «Υψηλές Τάσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 1996.
- [9] Θεοδώρου, Ν., «Ηλεκτρικές Μετρήσεις», Τεύχος Ι:Κλασσικές Μετρήσεις, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2004.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

- [1] Θεοδώρου, Ν., «Ηλεκτρικές Μετρήσεις», Τεύχος Ι:Κλασσικές Μετρήσεις, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2004.
- [2] Κούκος, Π., «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας, Χαλκίδα 2003-04.
- [3] Μαινεμενλής, Χ., «Τεχνική του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007.
- [4] Γκιόκας, Γ., Α., Φριλίγκος, Β., Σ., «Τεχνολογία Διατάξεων Ηλεκτρονικής», Ο.Ε.Δ.Β., Αθήνα.
- [5] Merev, A., Yilmaz, O., Kalenderli, O., "Selecting Resistors for a High Voltage Divider", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands 2003.
- [6] Kuffel, E., Zaengl, W. S., Kuffel, J., "High Voltage Engineering: *Fundamentals*", (second edition), Newnes, published by Butterworth – Heinemann, Oxford 2000.

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

- [1] Μαινεμενλής, Χ., «Τεχνική του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων», Σημειώσεις μαθήματος για το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007.
- [2] Monteith, A.C., Vaughan, H.R., (original authors), Johnson, A.A., (revised by), "Insulation Coordination", Chapter 18.
- [3] Kreuger, F., "Industrial High Voltage", (Volume II), Delft University of Technology, Netherland 1992.
- [4] Kreuger, F., "Industrial High Voltage", (Volume I), Delft University of Technology, Netherland 1992.

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

- [1] Kuffel, E., Zaengl, W. S., Kuffel, J., "High Voltage Engineering: *Fundamentals*", (second edition), Newnes, published by Butterworth – Heinemann, Oxford 2000.
- [2] Τοπαλής, Φ., «Υψηλές Τάσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 1996.
- [3] Μανωλάς, Σ., «Ηλεκτρικές Μετρήσεις», Σημειώσεις μαθήματος για το Τμήμα Ηλεκτρολογίας της Σ.Τ.Εφ. του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αθήνα 2002.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

- [1] Γκιόκας, Γ., Α., Φριλίγκος, Β., Σ., «Τεχνολογία Διατάξεων Ηλεκτρονικής», Ο.Ε.Δ.Β., Αθήνα.