



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη και Σχεδίαση Αναβάθμισης της Εργαστηριακής  
Εκπαίδευσης στο Αντικείμενο των Υψηλών Τάσεων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Σοφία Ν. Πέππα

**Καθηγητής:** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
**Επιβλέποντες:** Ιωάννης Φ. Γκόνος  
Ιωάννης Ν. Ζτούπης  
Ελένη Π. Νικολοπούλου

Αθήνα, Μάρτιος 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Μελέτη και Σχεδίαση Αναβάθμισης της Εργαστηριακής Εκπαίδευσης στο Αντικείμενο των Υψηλών Τάσεων

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σοφία Ν. Πέππα

**Καθηγητής:** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέποντες:** Ιωάννης Φ. Γκόνος

Ιωάννης Ν. Ζτούπης

Ελένη Π. Νικολοπούλου

Εγκρίθηκε από τριμελή επιτροπή την 15<sup>η</sup> Μαρτίου 2013.

.....  
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

.....  
Σοφία Ν. Πέππα

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

Copyright © Σοφία Ν. Πέππα, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η σχεδίαση της αναβάθμισης της εργαστηριακής εκπαίδευσης στο αντικείμενο των Υψηλών Τάσεων.

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής προτείνονται πέντε εργαστηριακές ασκήσεις που διαθέτουν πλήρες και εκσυγχρονισμένο θεωρητικό υπόβαθρο και πειραματικό μέρος. Οι ασκήσεις αυτές επιλέχθηκαν με στόχο να καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα των βασικών αντικειμένων μελέτης των Υψηλών Τάσεων. Η πρώτη, η δεύτερη και η τρίτη εργαστηριακή άσκηση μελετούν αντίστοιχα την παραγωγή και μέτρηση των υψηλών εναλλασσόμενων, συνεχών και κρουστικών τάσεων. Η τέταρτη και η πέμπτη μελετούν τα μονωτικά υλικά (στερεά, υγρά και αέρια).

Κάθε μια από αυτές τις ασκήσεις αποτελείται από τρεις ενότητες : το θεωρητικό υπόβαθρο, το πειραματικό μέρος και ερωτήματα κατανόησης.

Για να πιστοποιηθεί η ορθότητα των προτεινόμενων πειραματικών διατάξεων, τα εργαστηριακά πειράματα διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.. Στο τελικό στάδιο της εργασίας πραγματοποιήθηκε ανάλυση και επεξεργασία των μετρήσεων που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και προέκυψαν τα ανάλογα συμπεράσματα.

## ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ

Μετασχηματιστής δοκιμών, διάκενο σφαιρών, ηλεκτροστατικό βολτόμετρο, μέθοδος Chubb-Fortescue, χωρητικός καταμεριστής, διάταξη απλής ανόρθωσης, διάταξη πλήρους ανόρθωσης, διάταξη Greinacher, φαινόμενο πολικότητας, φαινόμενο διαφράγματος, μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια, διβάθμια κρουστική γεννήτρια, πλήρης κυματομορφή κρουστικής τάσης, αποκεκομμένη κυματομορφή κρουστικής τάσης, μηχανισμοί διάσπασης, μηχανισμός εκκένωσης κατά Townsend, μηχανισμός εκκένωσης με θυσάνους, νόμος του Paschen.

## **ABSTRACT**

The purpose of this diploma thesis is to study and design the update of the laboratory education in the field of High Voltages.

Within the scope of this thesis five laboratory exercises are proposed with complete and updated theoretical background and experimental parts. These laboratory exercises are chosen in order to cover a large area of the basic study fields of High Voltages. The first, the second and the third exercise study the generation and the measurement of high alternating, direct and impulse voltages respectively. The fourth and fifth laboratory exercises study the insulating materials (liquid, solid and gas).

Each one of these exercises consists of three parts: theoretical background, experimental part and comprehension questions.

The proposed experiments was carried out at the High Voltage Laboratory of N.T.U.A. in order to verify the correct design of the circuit diagrams. The measurements taken during the experiments were analyzed and the respective conclusions were reached.

## **KEYWORDS**

Testing transformer, sphere gap, electrostatic voltmeter, method of Chubb-Fortescue, capacitive divider, half-wave rectifier circuit, Biphas half-wave rectifier circuit, Greianacher double circuit, polarity effect, barrier effect, single stage impulse generator, two stage impulse generator, full shape of lighting impulse voltages, chopped shape of lighting impulse voltages, breakdown mechanisms, Townsend's breakdown, streamer mechanism, Paschen's Law.

*Στην οικογένεια μου*



## ***ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ***

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω για την υποστήριξή τους όλους όσοι με βοήθησαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα :

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη διάθεση του πολύτιμου χρόνου του και της μεγάλης πείρας του προς καθοδήγηση μου τόσο κατά τη διάρκεια της συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας όσο και κατά τη διεξαγωγή των εργαστηριακών πειραμάτων.

Τον κ. Ιωάννη Ν. Ζτούπη και την κ. Ελένη Π. Νικολοπούλου, υποψήφιους διδάκτορες και μηχανικούς του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη στήριξη τους από το πρώτο λεπτό που ανέλαβα τη διπλωματική εργασία μέχρι και το τελευταίο. Οι παρατηρήσεις τους, οι διορθώσεις τους και τα σχόλια τους ήταν πάντα ουσιαστικής σημασίας. Κυρίως τους ευχαριστώ για τις ώρες που πέρασαν μαζί μου κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, η παρουσία τους συνέβαλε στο να μετατραπεί η πειραματική διαδικασία στο πιο ενδιαφέρον και ευχάριστο κομμάτι κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τον κ. Χρήστο Κ. Ηλία, ειδικό τεχνικό εργαστηριακού προσωπικού του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., που κατασκεύασε τη διάταξη Chubb-Fortescue, η οποία ήταν απαραίτητη για τη διεξαγωγή της πρώτης άσκησης.

Καθώς επίσης όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων που ήταν πάντα πρόθυμα να βοηθήσουν όπου υπήρχε ανάγκη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου που με στήριζαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου και ήταν δίπλα μου σε κάθε βήμα της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

Σοφία Ν. Πέππα



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### *Εισαγωγή : «Εργαστήρια Διεξαγωγής Δοκιμών Υψηλής Τάσης»*

1.1	Γενικά περί Εργαστηρίου	1
1.2	Άλλες απαιτήσεις	3
1.3	Μέγεθος και διαστάσεις του εξοπλισμού στα Εργαστήρια Υψηλής Τάσης	4
1.4	Θεμελιώδεις αρχές ηλεκτρικής προστασίας	5
1.4.1	Τραυματισμοί λόγω ηλεκτρισμού	5
1.4.2	Πρόληψη έναντι άμεσου τραυματισμού	5
1.4.3	Κανόνες ασφαλείας	6
1.5	Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π.	7
1.5.1	Η ιστορία του Εργαστηρίου του Ε.Μ.Π.	7
1.5.2	Αποστολή του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π.	9
1.5.3	Χώρος Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π.	10
1.5.4	Εξοπλισμός Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.	12
1.6	Βιβλιογραφία	14

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### *1<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση : «Παραγωγή και Μέτρηση Υψηλών Εναλλασσόμενων Τάσεων»*

2.1	Γενικά	15
2.2	Παραγωγή υψηλών εναλλασσόμενων τάσεων	16
2.2.1	Μετασχηματιστές δοκιμής	16
2.2.2	Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές δοκιμών	16
2.3	Μέτρηση υψηλών εναλλασσόμενων τάσεων	17
2.3.1	Μέτρηση με αμπερόμετρο και αντίσταση σε σειρά	18
2.3.2	Ωμικός καταμεριστής	18
2.3.3	Διάκενο σφαιρών	19
2.3.4	Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο	22
2.3.5	Μέθοδος Chubb-Fortescue	23
2.3.6	Χωρητικός καταμεριστής	25
2.3.7	Διάταξη κατά Davis, Bowdler και Stardring	25
2.4	Πειραματική διάταξη	27
2.5	Ερωτήματα	31
2.6	Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις στο Εργαστήριο	32
2.6.1	Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη	32

2.6.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων	34
2.6.3 Απαντήσεις στα Ερωτήματα	37
2.7 Βιβλιογραφία	44

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

#### *2η Εργαστηριακή Άσκηση : «Παραγωγή και Μέτρηση Υψηλών Συνεχών Τάσεων»*

3.1 Γενικά	45
3.2 Παραγωγή υψηλών συνεχών τάσεων	46
3.2.1 Διάταξη απλής ανόρθωσης	46
3.2.2 Διάταξη διπλής ανόρθωσης	48
3.2.3 Διάταξη διπλασιασμού Greinacher	49
3.2.4 Πολυβάθμιες ανορθωτικές διατάξεις	50
3.2.5 Ηλεκτροστατικές γεννήτριες – Γεννήτριες Van de Graaff	52
3.3 Μέτρηση υψηλών συνεχών τάσεων	54
3.3.1 Μέτρηση με αμπερόμετρο και αντίσταση σε σειρά	54
3.3.2 Ωμικός καταμεριστής	54
3.3.3 Διάκενο σφαιρών	55
3.3.4 Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο	55
3.4 Φαινόμενο Corona	55
3.4.1 Θετική Corona σε διάκενα ακίδας – πλάκας	56
3.4.2 Αρνητική Corona σε διάκενα ακίδας – πλάκας	57
3.4.3 Το φαινόμενο της πολικότητας	59
3.5 Το φαινόμενο του διαφράγματος	60
3.6 Πειραματική διάταξη	61
3.7 Ερωτήματα	65
3.8 Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις στο Εργαστήριο	66
3.8.1 1 <sup>η</sup> πειραματική διάταξη	66
3.8.1.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη	66
3.8.1.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων	67
3.8.2 2 <sup>η</sup> Πειραματική διάταξη	69
3.8.2.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη	69
3.8.2.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων	70
3.8.3 3 <sup>η</sup> Πειραματική διάταξη	71
3.8.3.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη	71
3.8.3.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων	72
3.8.4 4 <sup>η</sup> Πειραματική διάταξη	73
3.8.4.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη	73
3.8.4.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων	74
3.8.5 Απαντήσεις στα Ερωτήματα	74
3.9 Βιβλιογραφία	78



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### *3<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση : «Παραγωγή και Μέτρηση Υψηλών Κρουστικών Τάσεων»*

4.1	Γενικά	79
4.2	Παραγωγή υψηλών κρουστικών τάσεων	82
4.2.1	Μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια	82
4.2.2	Πολυβάθμια κρουστική γεννήτρια ή γεννήτρια Marx	86
4.3	Μέτρηση υψηλών κρουστικών τάσεων	88
4.3.1	Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο	88
4.3.2	Διάκενο σφαιρών	88
4.3.3	Ωμικός καταμεριστής	89
4.3.4	Χωρητικός καταμεριστής	90
4.3.5	Μικτός καταμεριστής ή καταμεριστής τύπου Zaengl	91
4.4	Εύρεση $T_1$ και $T_2$	92
4.4.1	Πρώτη μέθοδος	92
4.4.2	Δεύτερη μέθοδος	93
4.5	Η Έννοια της αβεβαιότητας	93
4.5.1	Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου A	93
4.5.2	Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου B	95
4.5.3	Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας	95
4.6	Πειραματική διάταξη	96
4.6.1	Μελέτη της μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας	97
4.6.2	Συνάρτηση διασποράς πιθανότητας διάσπασης $P(\hat{V})$	100
4.7	Ερωτήματα	101
4.8	Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις στο Εργαστήριο	102
4.8.1	Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη	102
4.8.2	Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις	104
4.8.3	Απαντήσεις στα Ερωτήματα	108
4.9	Επιπλέον πειραματική διαδικασία πέραν της προτεινόμενης άσκησης	118
4.9.1	Πειραματική διάταξη για τη μελέτη δευτεροβάθμιας κρουστικής γεννήτριας	118
4.9.2	Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις στο Εργαστήριο	120
4.10	Βιβλιογραφία	123

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### *4<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση : «Μονωτικά Λάδια και Μονωτικά Στερεά Υλικά»*

5.1	Γενικά	124
5.2	Μονωτικά λάδια	126
5.2.1	Γενικά	126
5.2.2	Είδη μονωτικών λαδιών	127

5.2.3 Μηχανισμοί διάσπασης μονωτικών λαδιών	127
5.2.3.1 Ηλεκτρονική ή ενδογενής ή εγγενής διάσπαση	127
5.2.3.2 Διάσπαση μέσω ξένων σωματιδίων	128
5.2.3.3 Διάσπαση μέσω φυσαλίδων αέρα ή υγρασίας	129
5.2.4 Εφαρμογές μονωτικών λαδιών	129
5.2.4.1 Καλώδια μέσης και υψηλής τάσης	129
5.2.4.2 Μετασχηματιστές ισχύος	130
5.2.4.3 Διακόπτες λαδιού	130
5.3 Στερεά μονωτικά	131
5.3.1 Γενικά	131
5.3.2 Είδη στερεών μονωτικών	131
5.3.3 Μηχανισμοί διάσπασης στερεών μονωτικών	132
5.3.3.1 Ηλεκτρονική ή εγγενής ή ενδογενής διάσπαση	133
5.3.3.2 Ηλεκτρομηχανική διάσπαση	133
5.3.3.3 Δενδροειδής διάσπαση	134
5.3.3.4 Θερμική διάσπαση	135
5.3.3.5 Ηλεκτροχημική διάσπαση	136
5.3.4 Διάτρηση-Υπερπήδηση-Επιφανειακή διάσπαση-Μερικές Εκκενώσεις	136
5.3.5 Εφαρμογές στερεών μονωτικών	136
5.3.5.1 Μονωτήρες	136
5.3.5.2 Καλώδια	137
5.3.5.3 Μετασχηματιστές ξηρού τύπου	137
5.4 Δοκιμές σε μονώσεις	138
5.4.1 Μέτρηση του ρεύματος διαρροής	138
5.4.2 Μέτρηση του συντελεστή απωλειών με εφαρμογή εναλλασσόμενου ρεύματος	140
5.4.3 Δοκιμή διηλεκτρικής αντοχής	141
5.5 Πειραματική διάταξη	143
5.6 Ερωτήματα	147
5.7 Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις στο Εργαστήριο	148
5.7.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη	148
5.7.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων	149
5.8 Βιβλιογραφία	151

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### *5<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση : «Διάσπαση Μονωτικών Αερίων»*

6.1 Γενικά	152
6.2 Είδη μονωτικών αερίων	152
6.3 Μηχανισμοί διάσπασης μονωτικών αερίων	153
6.3.1 Το φαινόμενο του ιονισμού	153
6.3.2 Ηλεκτρική διάσπαση του αέρα	154
6.3.3 Μηχανισμός εκκενώσεως κατά Townsend	154
6.3.4 Ο νόμος του Paschen	156
6.3.5 Μηχανισμός εκκενώσεως με θυσάνους	158

6.4	Διάσπαση αερίων για διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων και μορφών τάσεων	159
6.5	Τύποι των εκκενώσεων των αερίων	159
6.6	Εφαρμογές μονωτικών αερίων	160
	6.6.1 Διακόπτες	160
	6.6.2 Καλώδια	160
6.7	Πειραματική διάταξη	161
6.8	Ερωτήματα	166
6.9	Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις στο Εργαστήριο	167
	6.9.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη	167
	6.9.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων	169
	6.9.3 Απαντήσεις στα Ερωτήματα	170
6.10	Βιβλιογραφία	174

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### *«Δομικά Στοιχεία των Διατάξεων Υψηλών Τάσεων»*

7.1	Βασικά δομικά στοιχεία	175
7.2	Βοηθητικά δομικά στοιχεία	177
7.3	Αντιστάσεις	178
7.4	Πυκνωτές	179
7.5	Διάκενα	181
7.6	Βιβλιογραφία	182

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### *«Φωτογραφικό Υλικό από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.»*

8.1	Φωτογραφικό Υλικό από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.	183
-----	--	-----

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

### *«Συμπεράσματα»*

9.1	Συμπεράσματα	198
-----	--------------	-----



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## *Εισαγωγή: «Εργαστήρια Διεξαγωγής Δοκιμών Υψηλών Τάσεων»*

### 1.1 Γενικά περί Εργαστηρίου

Τα εργαστήρια υψηλών τάσεων διαχωρίζονται ανάλογα με τις δυνατότητες που έχουν σε [4]:

- **Μικρά εργαστήρια.** Διαθέτουν εξοπλισμό για δοκιμές με εναλλασσόμενη και συνεχή τάση, με ισχύ μικρότερη από 10kVA / 10kW και για δοκιμές με κρουστική τάση με ενέργεια μικρότερη από 10kJ. Η μέγιστη εναλλασσόμενη τάση είναι μικρότερη από 300 kV για μονοβάθμιο μετασχηματιστή ή 500-600kV για πολυβάθμιο. Η μέγιστη συνεχής τάση είναι μικρότερη από ±200 kV έως τα 400kV. Η μέγιστη κρουστική τάση είναι μικρότερη από 100 kV. Ο εξοπλισμός βρίσκεται εντός εργαστηρίου με διαστάσεις: 15m x 10m x 8m. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα περισσότερα πανεπιστημιακά εργαστήρια.
- **Μεσαία εργαστήρια.** Διαθέτουν εξοπλισμό για δοκιμές με εναλλασσόμενη και συνεχή τάση, με ισχύ από 100 έως 1000kVA και για δοκιμές με κρουστική τάση με ενέργεια από 20-100kJ. Η μέγιστη εναλλασσόμενη τάση κυμαίνεται από 200 έως 600kV. Διαθέτουν, επιπλέον, και γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα περισσότερα βιομηχανικά εργαστήρια.
- **Μεγάλα εργαστήρια.** Διαθέτουν περισσότερους ανεξάρτητους χώρους δοκιμών και εξοπλισμό για δοκιμές με εναλλασσόμενη και συνεχή τάση, με ισχύ από λίγα kVA έως αρκετά MVA. Επιπλέον, μπορούν να κάνουν δοκιμές με κρουστική τάση αρκετών MV και διαθέτουν γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων. Έχουν θάλαμο (-ους) τεχνητής ρύπανσης και ελεγχόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών καθώς και δυνατότητα να διεξάγουν δοκιμές και μετρήσεις σε εξωτερικούς χώρους. Ως παράδειγμα δίνεται το μέγεθος ενός εργαστήριο (CEPEL) με ελεγχόμενα δοκίμια εναλλασσόμενης τάσης λειτουργίας 765kV και διαστάσεις: 30m x 44m x 27m [7]. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα μεγάλα εθνικά και ερευνητικά εργαστήρια.

Η τάση λειτουργίας των υπό έλεγχο στοιχείων καθορίζει την τάση δοκιμής, κατά συνέπεια την ονομαστική τάση των διατάξεων παραγωγής Υψηλής Τάσης. Αυτή η ονομαστική τάση προκύπτει από τις τιμές του ακόλουθου πίνακα: 1,1 μετά από πολλαπλασιασμό τους με συντελεστή: 1,1 για την εναλλασσόμενη τάση, 1,8 για κρουστική τάση μικρής διάρκειας (κεραυνική), 2 για κρουστική τάση μεγάλης διάρκειας (ζεύξεως) ή 1,2 για συνεχή τάση [1].

Πίνακας 1.1: Τάση δοκιμής σε kV [1]

Τάση λειτουργίας (kV)	Εναλλασσόμενη Τάση (kV)	Κρουστική Τάση μικρής διάρκειας (kV)	Κρουστική Τάση μεγάλης διάρκειας (kV)	Ελάχιστο Μήκος διακένου σε (m)
36	70	170	-	-
123	230	550	-	-
245	460	1050	-	-
420	510	1425	1050	5
525	630	1550	1175	8
765	850	2100	1550	12
1200	1400	2550	2100	20
1600	1900	3150	2550	30

Επίσης, η τάση δοκιμής καθορίζει και τις ελάχιστες διαστάσεις που πρέπει να έχει ένα πεδίο δοκιμών Υψηλής Τάσης και τη χωρική κατανομή των διαφορών συσκευών, διατάξεων κλπ. μέσα σε αυτό.

Στις πολύ μεγάλες τάσεις λειτουργίας οι ελάχιστες καθαρές αποστάσεις καθορίζονται από το μέγεθος της κρουστικής τάσης μεγάλης διάρκειας, θετικής πολικότητας, καθώς για μια δεδομένη διαμόρφωση ηλεκτροδίων μπορεί να παρατηρηθεί πολύ χαμηλή τάση διάσπασης για αυτόν τον τύπο τάσης.

Για τον καθορισμό των απαιτούμενων διατάξεων παραγωγής Υψηλής Τάσης πρέπει να είναι γνωστή η χωρητικότητα των τμημάτων της διάταξης που αντιπροσωπεύουν το χωρητικό φορτίο της πηγής τάσης:

Πίνακας 1.2: Χωρητικότητα δοκιμών [2]

<b>Μονωτήρες ανάρτηση στήριξης</b>	20...50pF
<b>Μονωτήρες διελεύσεως</b>	200...400F
<b>M/Σ ισχύος</b>	
<b>S&lt;1MVA</b>	3000pF
<b>1&lt;S&lt;100MVA</b>	3000...25000pF
<b>M/Σ μετρήσεως</b>	200...400pF
<b>Καλώδια ανά τρέχον m</b>	150...1000pF
<b>Πυκνωτής μετρήσεως</b>	
<b>Τάση δοκιμής&lt;100kV</b>	100pF
<b>100&lt;Τάση δοκιμής&lt;1000kV</b>	100...1000pF

Η ονομαστική ισχύς θα καθοριστεί από τη σχέση:

$$S = k \cdot \omega \cdot c_p \cdot V^2 \quad (1.1)$$

Όπου  $k$ : 5...10  
 $c_p$ : η χωρητικότητα του δοκιμίου  
 $V$ : η τάση δοκιμής

Ειδικά για τις κρουστικές γεννήτριες, χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η ενέργεια φόρτισης.

Υπάρχει, επίσης, η απαίτηση η εναλλασσόμενη τάση αν είναι δυνατόν να ρυθμίζεται συνεχώς. Συνήθως οι μετασχηματιστές δοκιμών προβλέπονται για λειτουργία επί 15min με 1h, ενώ λειτουργία επί περισσότερο χρόνο απαιτείται μόνο κατά τις δοκιμές μακράς διάρκειας.

Προκειμένου να τηρηθούν οι αποστάσεις ασφαλείας και λόγω του μεγέθους των δοκιμών, διατάξεων παραγωγής και μέτρησης Υψηλών Τάσεων, ο απαιτούμενος όγκος ενός Εργαστηρίου Υψηλής Τάσης είναι σημαντικός. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα είναι ο όγκος που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός μετασχηματιστή δοκιμών 1000kV. Αυτός ο όγκος ισούται με  $6000...7200\text{m}^3$  ( $=20\text{m} \times 20\text{m} \times (15...18)\text{m}$ ), που αναγκαστικά θα αυξηθεί για να περιλάβει το δοκίμιο, τον πυκνωτή μέτρησης, κ.λπ..

Ενδεικτικά δίνεται η δυναμικότητα του Εργαστηρίου Υψηλής Τάσης του Ε.Μ.Π., η οποία συνοψίζεται στα εξής χαρακτηριστικά:

- Μετασχηματιστής δοκιμών 500kV/50kVA
- Πηγή συνεχούς τάσεως 420kV/5kVA
- Κρουστική γεννήτρια LI 1800kV/90kJ
- Κρουστική γεννήτρια SI 1620kV/81kJ

## 1.2 Άλλες απαιτήσεις

- Δυνατότητα διαχωρισμού της αίθουσας δοκιμών σε μικρότερους χώρους (με πλέγματα ασφαλείας για την ταυτόχρονη διεξαγωγή πολλών πειραμάτων), αλλά και η ύπαρξη βοηθητικών χώρων εμβαδού ίσου με το 1/3 του εμβαδού της αίθουσας δοκιμών, καθώς και δυνατότητα εύκολης επικοινωνίας και μεταφορών μεταξύ των διαφόρων χώρων.
- Η αίθουσα Υψηλής Τάσης πρέπει να μπορεί να συσκοτισθεί (δοκιμές μερικών εκκενώσεων, διασπορά τιμών) και να είναι ηχητικά μονωμένη από το περιβάλλον.
- Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στη γείωση των διατάξεων δοκιμής (φύλλο ή πλέγμα χαλκού).
- Η γείωση της κρουστικής γεννήτριας πρέπει να γίνεται κοντά στο δοκίμιο ή στα στοιχεία του κυκλώματος εκφορτίσεως μέσω ιδιαίτερων ηλεκτροδίων προσγειώσεως, τα οποία απαρτίζουν την «κρουστική γη» και τα οποία δεν συνδέονται με την προσγείωση του δικτύου εναλλασσόμενης τάσης [5].

- Για ηλεκτρομαγνητική θωράκιση ιδανική είναι η διαμόρφωση της αίθουσας Υψηλής Τάσης σε κλωβό Faraday, μέσω π.χ. πλέγματος στους τοίχους (πόρτες, ανοίγματα), ιδίως όταν πρόκειται να γίνουν μετρήσεις μερικών εκκενώσεων.
- Συνιστάται γαλβανική απόζευξη από το περιβάλλον με χρήση φίλτρων.
- Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και προς αποφυγή του φαινομένου Corona ως συνδετικοί αγωγοί χρησιμοποιούνται λεπτού πάχους και μεγάλης διαμέτρου μεταλλικοί σωλήνες, ενώ διαμορφώνονται κατάλληλα οι κόμβοι σύνδεσης (σφαίρες, τοροειδή, απιοειδή ηλεκτρόδια, polycan, κ.λπ.).

### 1.3 Μέγεθος και διαστάσεις του εξοπλισμού στα Εργαστήρια Υψηλής Τάσης

Τα Εργαστήρια Υψηλής Τάσης μπορεί να είναι είτε εσωτερικού τύπου είτε εξωτερικού τύπου. Ο εσωτερικός τύπος έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα: α) απαιτεί χαμηλότερη στάθμη προστασίας του εξοπλισμού δοκιμών έναντι ποικίλων καιρικών συνθηκών και β) παρέχει δυνατότητα ελέγχου των συνθηκών κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Από την άλλη μεριά τα εργαστήρια εξωτερικού τύπου πλεονεκτούν ως προς το μειωμένο κόστος τους, λόγω απουσίας κτιριακών δαπανών. Όμως, τα εξωτερικά πειράματα περιορίζονται λόγω:

- απουσίας διορθωτικών και υποστηρικτών παροχών,
- κλιματικών συνθηκών, οι οποίες μπορεί να περιορίζουν ή να εμποδίζουν τη διενέργεια πειραμάτων,
- απουσίας εγγυημένης δυνατότητας αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων λόγω μη ελεγχόμενων ατμοσφαιρικών συνθηκών.

Όταν τα εργαστήρια υψηλής τάσης είναι σχεδιασμένα ως εσωτερικού τύπου οι ακόλουθες παράμετροι ορίζουν τη λειτουργία των εργαστηρίων:

- μέγεθος του εξοπλισμού για εναλλασσόμενες, συνεχείς ή κρουστικές τάσεις,
- αποστάσεις και αντοχές ανάμεσα στο υπό δοκιμή αντικείμενο και τη γη κατά τη διάρκεια του πειράματος, καθώς και μεταξύ όλων των τερματικών υπό υψηλή τάση και των γειωμένων περιβαλλουσών συσκευών καθώς και των τοίχων, ορόφων των κτιρίων και άλλων εξοπλισμών μη ηλεκτρικά τροφοδοτούμενων (Ορισμένα στοιχεία δίνονται στον Πίνακα 1.3).

Πίνακας 1.3: Κατά προσέγγιση διαστάσεις των συσκευών που χρησιμοποιούνται στα πειράματα [4]

Ονομαστική τάση(rms) εξοπλισμού(kV)	Ύψος (m) μετασχηματιστή δοκιμής a.c.	Ύψος (m) κρουστικής γεννήτριας	Διαστάσεις αντικειμένου υπό δοκιμή		
			Μήκος(m)	Πλάτος(m)	Ύψος(m)
400	10	6	7	2	11
765	15	8	11	2	17
1100	18	12	17	2	24
1500	21	15	28	2	38



Οι οριζόμενες αποστάσεις ασφαλείας, που είναι η ελάχιστη απόσταση ανάμεσα σε επιφάνειες υπό υψηλή τάση και τα σημεία γείωσης, είναι εξαιρετικής σημασίας σε μια δοκιμή υψηλής τάσης. Οι κατά προσέγγιση προτεινόμενες αποστάσεις έχουν ως εξής [4]:

- εναλλασσόμενες τάσεις βιομηχανικής συχνότητας:  $200 \text{ kV} (rms \text{ τιμή}) / m$
- συνεχείς τάσεις:  $275 \text{ kV} / m$
- κρουστικές τάσεις μικρής διάρκειας:  $500 \text{ kV} / m$

Για κρουστικές τάσεις μεγάλης διάρκειας (ζεύξεως)  $V(MV)$  η απόσταση  $d(m)$  λαμβάνεται από την ακόλουθη προσεγγιστική σχέση [4, 7]:

$$d = (2V)^2 \quad (1.2)$$

Οι παραπάνω αποστάσεις είναι ασφαλείς αν η τάση δοκιμών δε ξεπερνά τα  $1,5MV$  για εναλλασσόμενες και συνεχείς τάσεις και τα  $2,5MV$  για κρουστικές τάσεις.

## 1.4 Θεμελιώδεις αρχές ηλεκτρικής προστασίας

### 1.4.1 Τραυματισμοί λόγω ηλεκτρισμού

Κάθε χρόνο συμβαίνουν τραυματισμοί ανθρώπων, και απώλειες ανθρώπινων ζωών, ως αποτέλεσμα των επικίνδυνων δυσλειτουργιών στα Ηλεκτρικά Συστήματα αλλά και εξαιτίας επισφαλών πρακτικών που λανθασμένα ακολουθούνται κατά τη χρήση των ηλεκτρικών συστημάτων. Τα πιο συνηθισμένα είδη τραυμάτων είναι: α) το ηλεκτρικό σοκ και β) τα εγκαύματα, με τα τελευταία να προκύπτουν, είτε όταν ρεύμα διαπερνά το ανθρώπινο σώμα, είτε ως αποτέλεσμα ηλεκτρικών τόξων και ηλεκτρικών υπερπηδήσεων. Επιπρόσθετα σε αυτές τις άμεσες μορφές τραυματισμού, μπορεί να εμφανιστούν και δευτερογενή τραύματα, ως ακολούθως:

- εγκαύματα και ποικίλες συνέπειες του καπνού και των αναθυμιάσεων που εισπνέονται κατά την καύση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού,
- συνέπειες μιας έκρηξης λόγω ανάφλεξης ηλεκτρολογικού εξοπλισμού,
- φυσιοπαθολογικά τραύματα που απορρέουν από την αντίδραση σε ηλεκτρικό σοκ, όπως το να πέσει κανείς (π.χ. από τη σκάλα) ως αποτέλεσμα επαφής με το ηλεκτρικό ρεύμα.

### 1.4.2 Πρόληψη έναντι ηλεκτροπληξίας

Οι τραυματισμοί που οφείλονται σε άμεση επαφή με ηλεκτρικό ρεύμα κατά συνθήκη αποφεύγονται με το να εξασφαλίζεται η μη δυνατότητα επαφής οποιουδήποτε αγωγού όταν αυτός βρίσκεται υπό επικίνδυνη υψηλή τάση. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις όπου οι αγωγοί πρέπει να είναι ακάλυπτοι και συνεπώς υπάρχει η πιθανότητα της επαφής με τον άνθρωπο, π.χ. σε περίπτωση εξειδικευμένων δοκιμών

λειτουργίας τους ή στην περίπτωση πειραμάτων σε σιδηροδρομικές γραμμές. Ακολουθούν επιγραμματικά οι πιο συνηθισμένες τεχνικές προφύλαξης:

- μονώσεις και εσώκλειστα κυτία,
- ασφάλεια μέσω απόστασης (υποχρεωτικές θέσεις ασφαλείας),
- κατά το δυνατόν μείωση της επιβαλλόμενης τάσης,
- περιορισμός της ενέργειας,
- διαχωρισμός/απλοποίηση ηλεκτρικών κυκλωμάτων,
- συστήματα γείωσης,
- ηλεκτρόδια (probes) όπου μόνο η απόληξη τους είναι ακάλυπτη, με μέγιστο μήκος ελεύθερης επιφάνειας μετάλλου τα 4mm, ενώ το υπόλοιπο είναι μονωμένο. Θα πρέπει να έχει ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα για προστασία έναντι βραχυκυκλωμάτων, όπως με ενσωματωμένες ασφάλειες ή εξοπλισμό μείωσης του ρεύματος,
- ατομικός προστατευτικός εξοπλισμός, όπως μονωτικά γάντια, μάσκες που αντέχουν σε υψηλή θερμοκρασία, προστατευτικά καλύμματα προσώπου σε περίπτωση υπερπηδήσεων και ηλεκτρικών τόξων, καθώς και κατάλληλος ρουχισμός.

### 1.4.3 Κανόνες ασφαλείας

Κύριο μέλημα κατά τη λειτουργία ενός εργαστηρίου υψηλών τάσεων είναι η ασφάλεια του προσωπικού και για αυτό το λόγο υπάρχουν πολλοί κανόνες ασφαλείας. Ενδεικτικά:

- Το κτίριο του εργαστηρίου πρέπει να είναι συνδεδεμένο στη θεμελιακή γείωση του κτιρίου (σχήμα 8.4).
- Οι εγκαταστάσεις υψηλών τάσεων του εργαστηρίου φράσσονται με προσγειωμένο μεταλλικό πλέγμα, ύψους περίπου 2m. Η ελάχιστη απόσταση αυτού του πλέγματος από τα υπό υψηλή τάση αντικείμενα της εγκαταστάσεως και για τις τάσεις έως 1MV πρέπει να είναι τουλάχιστον:

<b>Εναλλασσόμενες Τάσεις:</b>	5m για κάθε 1MV
<b>Συνεχείς Τάσεις:</b>	3,5m για κάθε 1MV
<b>Κρουστικές Τάσεις:</b>	2m για κάθε 1MV

Ανεξαρτήτως πάντως της μορφής και της τιμής της τάσεως πρέπει να τηρείται μία ελάχιστη απόσταση 50 cm. Για τάσεις τιμής άνω του 1MV, ιδιαίτερα για κρουστικές τάσεις ζεύξεως (μεγάλης διάρκειας), οι αναφερθείσες αποστάσεις είναι δυνατόν να αποδειχθούν ανεπαρκείς και για αυτό πρέπει να λαμβάνονται ιδιαίτερα μέτρα ασφαλείας. Ενδεικτικά:

- Η είσοδος στο χώρο των υψηλών τάσεων γίνεται με πόρτες, εφοδιασμένες με ειδικές επαφές ασφαλείας, ώστε το άνοιγμα αυτών να προκαλεί διακοπή της

τροφοδότησης των πηγών υψηλής τάσης. Εκτός του σταθερού, μερικές φορές χρησιμοποιούνται και κινητά πλέγματα για περιφραγή διατάξεων υψηλών τάσεων (σχήμα 8.3). Επιπλέον, επειδή όλες οι διατάξεις πρέπει να βρίσκονται σε προστατευμένη ζώνη και να μην επιτρέπεται η είσοδος σε όλους υπάρχουν ειδικές επιγραφών - π.χ. «Προσοχή! Κίνδυνος!» (σχήμα 8.1).

- Η ύπαρξη κινητής γείωσης προστασίας. Η κινητή γείωση προστασίας είναι μια μονωτική ράβδος μήκους 2 m. Η κινητή γείωση προστασίας φέρει επιπρόσθετα αγωγίμο άγκιστρο, αξιόπιστα συνδεδεμένο με την εγκατάσταση γείωσης του εργαστηρίου, μέσω του οποίου μπορεί να αναρτάται και να παραμένει επί των στοιχείων εξοπλισμού υψηλής τάσης όταν αυτό απαιτείται (σχήμα 8.5).
- Πυκνωτές ή μετασχηματιστές που βρίσκονται μέσα στο χώρο των υψηλών τάσεων και δεν χρησιμοποιούνται πρέπει να βραχυκυκλώνονται επιμελώς και να γειώνονται.
- Μανδύες γείωσης και θωράκισης χρησιμοποιούνται επιπρόσθετα στα ομοαξονικά καλώδια που χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις.
- Η ανεξάρτητη γείωση στον κυρίως χώρο δοκιμών υψηλών τάσεων, πρόκειται για θεμελιακό σύστημα γείωσης στην οποία συνδέονται άμεσα με χάλκινη ταινία γείωσης οι διατάξεις παραγωγής και μέτρησης υψηλών τάσεων.
- Υπάρχει αυτόματος γειωτής ορατών επαφών της n-βάθμιας γεννήτριας παραγωγής κρουστικών υψηλών τάσεων (9-βάθμια για το Εργαστήριο του Ε.Μ.Π.), ο οποίος γειώνει αυτόματα τη γεννήτρια μετά τη διακοπή της τάσης τροφοδοσίας της.

## 1.5 Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π.

### 1.5.1 Η ιστορία του Εργαστηρίου του Ε.Μ.Π.

Το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. λειτουργεί τυπικά από το 1946 και ουσιαστικά ως Ηλεκτρολογικό Εργαστήριο από το 1909, όπως φαίνεται από την πρώτη εγγραφή στο βιβλίο κτηματολογίου του Εργαστηρίου και ανήκε, διαδοχικά, στο Ε.Μ.Πολυτεχνείο, μέχρι την ίδρυση της Ανωτάτης Σχολής των Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων Μηχανικών (1917), στην οποία και υπήχθη τότε. Μετά το διαχωρισμό της Σχολής αυτής σε δύο (Μηχανολόγων Μηχανικών και Ηλεκτρολόγων Μηχανικών) το 1975, το Εργαστήριο, ευλόγως, υπήχθη στην Ανωτάτη Σχολή των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών. Με το Β.Δ. 132/62 θεσμοθετήθηκε ως «Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μετρήσεων και Υψηλών Τάσεων», ονομασία η οποία μετετράπη με το Π.Δ. 237/73 σε «Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων». Με την εφαρμογή του Νόμου Πλαισίου για τα ΑΕΙ, το 1982, η Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών μετονομάστηκε σε Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών με τρεις τομείς: Ηλεκτροεπιστήμης, Ηλεκτρικής Ισχύος και Πληροφορικής. Το Εργαστήριο εντάχθηκε (1983) στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος (έναν εκ των τριών, τότε, Τομέων του Τμήματος), όπου και παραμένει ενταγμένο και μετά την εσωτερική αναδιάρθρωση του Τμήματος (2000), κατά την οποία, πέραν του υφισταμένου Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος, ιδρύθηκαν άλλοι έξι Τομείς. Το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών

και Μηχανικών Υπολογιστών μετονομάστηκε (2002) σε Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Οι κύριες λειτουργικές κατευθύνσεις του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, είναι η υποστήριξη και κάλυψη τόσο των εκπαιδευτικών αναγκών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου, όσο και η κάλυψη των αναγκών της ελληνικής βιομηχανίας σε θέματα ελέγχου ποιότητας ηλεκτροτεχνικών και ηλεκτρονικών υλικών, συσκευών και διατάξεων. Στο θέμα της διεξαγωγής τεχνικών ελέγχων, ελέγχων ποιότητας υλικών, συσκευών και διατάξεων, δοκιμών, μετρήσεων και πιστοποιήσεων και εν γένει παροχής υπηρεσιών το Εργαστήριο διαθέτει μακρά προϊστορία, που αγγίζει σχεδόν μισό αιώνα: με βασιλικό διάταγμα της 20.8.1954, δημοσιευθέν στο Φ.Ε.Κ. τ. Α' 213/08.9.1954 καθορίζεται η «καταβλητέα εις το Ε.Μ. Πολυτεχνείον αποζημίωσις δια την εκτέλεσιν δοκιμασιών ή ερευνών εις το Εργαστήριον Ηλεκτρικών Μετρήσεων και Υψηλών Τάσεων του Ιδρύματος τούτου». Η δραστηριότητα παροχής υπηρεσιών ασκείται αδιαλείπτως στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, έχει δε ενταθεί την τελευταία εικοσαπενταετία (1989 κ.ε.), λόγω μεταξύ των άλλων, των αυξημένων απαιτήσεων της ελληνικής και ξένης αγοράς, όσον αφορά στην ποιότητα των διοχετευομένων σ' αυτές προϊόντων της ηλεκτρολογικής και ηλεκτρονικής βιομηχανίας, και της επιδιώξεως των ελληνικών επιχειρήσεων του κλάδου για αύξηση της ανταγωνιστικότητάς τους, με τη βελτίωση και επιβεβαίωση, μέσω εργαστηριακών ελέγχων, της ποιότητας των παραγομένων από εκείνες προϊόντων. Το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων λειτουργεί υπό τον τίτλο «Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων», που έχει νομοθετηθεί με την υπουργική απόφαση Β1/29/01.02.1983, δημοσιευμένη στο Φ.Ε.Κ. τ. Β' 80/01.3.1983, είναι δε ένα από τα είκοσι τέσσερα θεσμοθετημένα Εργαστήρια της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. και στεγάζεται από τον Ιούλιο του 1999 στο ιδιόκτητο κτήριο Ηλεκτρολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Η Εργαστηριακή Μονάδα Παροχής Υπηρεσιών (ΕΜΠΥ) Υψηλών Τάσεων θεσμοθετήθηκε με την από 22.03.96 απόφαση της Συγκλήτου του Ε.Μ.Π., η οποία και ενέκρινε τον Κανονισμό Λειτουργίας των Εργαστηριακών Μονάδων Παροχής Υπηρεσιών του Ιδρύματος.

Η ΕΜΠΥ Υψηλών Τάσεων ως εργαστήριο Δημοσίου Πανεπιστημίου παρέχει υπηρεσίες δοκιμών και μετρήσεων, οι οποίες εντάσσονται στη συνολική δραστηριότητα της (εκπαιδευτική, ερευνητική, καθαρώς οικονομική, αλλά και κοινωνική). Η ΕΜΠΥ διεξάγει τις μετρήσεις με γνώμονα τις απαιτήσεις των Προτύπων, τις ανάγκες των πελατών, το υφιστάμενο νομοθετικό και κανονιστικό πλαίσιο και τις απαιτήσεις των οργανισμών που παρέχουν αναγνώριση. Η ΕΜΠΥ Υψηλών Τάσεων είναι πιστοποιημένη με ISO 9001 από το 2000 για «Σχεδιασμό και διεξαγωγή ηλεκτρικών δοκιμών και μετρήσεων και δοκιμών και μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας» και διαπιστευμένη από το Εθνικό Σύστημα Διαπίστευσης από το 2008 με αριθμό πιστοποιητικού διαπίστευσης ΕΣΥΔ 490. Είναι μάλιστα το πρώτο εργαστήριο της ΣΗΜΜΥ που διαπιστεύθηκε.

### 1.5.2 Αποστολή του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π.

Το έργο του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου χωρίζεται στα παρακάτω πεδία:

- Την κάλυψη, σε προπτυχιακό και μεταπτυχιακό επίπεδο, των διδακτικών αναγκών στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, καθώς και σε άλλες Σχολές του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σε θέματα που εμπίπτουν στο γνωστικό αντικείμενο των Υψηλών Τάσεων.
- Την ανάπτυξη προγραμμάτων διδασκαλίας και έρευνας για μεταπτυχιακούς φοιτητές, στα πλαίσια των γνωστικών αντικειμένων του Εργαστηρίου.
- Την κάθε μορφής συνεργασία με άλλα κέντρα ερευνών, ινστιτούτα και ακαδημαϊκά ιδρύματα, ελληνικά και αλλοδαπά, εφόσον οι επιστημονικοί στόχοι συμπίπτουν, συμβαδίζουν και αλληλοσυμπληρώνονται με εκείνους του Εργαστηρίου, μέσα σε πνεύμα αμοιβαιότητας και συλλογικής εργασίας.
- Την οργάνωση σεμιναρίων, συμποσίων, συνεδρίων, διαλέξεων και την πραγματοποίηση ανακοινώσεων, δημοσιεύσεων και εκδόσεων.
- Τη συνεργασία με δημόσιες υπηρεσίες, δήμους, κοινότητες και άλλους κοινωνικούς και επιστημονικούς φορείς και τη συμβολή του στη μελέτη προβλημάτων ανάπτυξης της χώρας.
- Την παροχή υπηρεσιών, κατά τα προβλεπόμενα στο ΠΔ 159/1984(Α'53), στο ΠΔ 432/1981(Α'118), στην κοινή υπουργική απόφαση (ΚΗΑ) ΚΑ/679/96 (ΦΕΚ 826/10.09.96, τ.β) και στον Εσωτερικό Κανονισμό Λειτουργίας του Ε.Μ.Π..



Το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. έχει συνολικό εμβαδό 648,26 τετραγωνικά μέτρα και ύψος 7,20m (και 8,85m στην περιοχή της πολυβάθμιας κρουστικής γεννήτριας). Οι διαστάσεις κάθε Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων είναι σημαντικές, καθώς ο όγκος του πρέπει να είναι κατάλληλος για την τήρηση των αποστάσεων ασφαλείας, αλλά και λόγω του μεγάλου μεγέθους των δοκιμών καθώς και των διατάξεων παραγωγής και μέτρησης Υψηλών Τάσεων.

Το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. δεν είναι ένας ενιαίος χώρος αλλά είναι χωρισμένος σε μικρότερους χώρους. Γενικά πρέπει να δίνεται δυνατότητα διαχωρισμού της αίθουσας δοκιμής σε μικρότερους χώρους (με πλέγματα ασφαλείας, για την ταυτόχρονη διεξαγωγή πολλών πειραμάτων) και η ύπαρξη βοηθητικών χώρων εμβαδού ίσου περίπου με το 1/3 του εμβαδού της αίθουσας δοκιμών (π.χ. γραφεία, αποθήκες, βιβλιοστάσιο), όπως επίσης δυνατότητα εύκολης επικοινωνίας και μεταφορών μεταξύ των διαφόρων χώρων.

Η ηλεκτρομαγνητική θωράκιση του εργαστηρίου επιτυγχάνεται μέσω μεταλλικού πλέγματος στους τοίχους, στις πόρτες και στα όποια άλλα ανοίγματα. Επιπλέον, το εργαστήριο διαθέτει δύο κλωβούς Faraday (σχήμα 8.24) για ηλεκτρομαγνητική θωράκιση σε περίπτωση που πρόκειται να πραγματοποιηθούν πειράματα που το απαιτούν.

Ο **πρώτος κλωβός Faraday** διαστάσεων 3,0m x 3,5m x 2,2m χρησιμοποιείται:

- για δοκιμές καθορισμού ορίων από εκπομπές αρμονικών ρεύματος (EN 61000-3-2),
- για δοκιμές περιορισμού δακτυμάνσεων τάσης και τρεμοσβήματος σε συστήματα παροχής χαμηλής τάσης (EN 61000-3-3),
- για δοκιμές ατρωσίας για γρήγορα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα και απότομες εκφορτίσεις (EN 61000-4-4),
- για δοκιμές ατρωσίας από υπερτάσεις και υπερεντάσεις (EN 61000-4-5),
- για δοκιμές ατρωσίας από μαγνητικό πεδίο βιομηχανικής συχνότητας (EN 61000-4-8 ),
- για δοκιμές ατρωσίας από κρουστικό μαγνητικό πεδίο (EN 61000-4-9 ),
- για βυθίσεις τάσης, βραχείες διακοπές και δοκιμές ατρωσίας μεταβολών τάσης (EN 61000-4-11), και
- δοκιμές ασφαλείας (μετρήσεις αντίστασης γείωσης, ρεύματος διαρροής και διηλεκτρικής αντοχής) (EN 60950-1).

Ο **δεύτερος κλωβός Faraday** διαστάσεων 3,0m x 3,5m x 2,2m χρησιμοποιείται για μετρήσεις και δοκιμές υψηλών τάσεων.

Σημαντική στην λειτουργία του εργαστηρίου είναι η ύπαρξη **ανηχωϊκού θαλάμου**, δηλαδή αίθουσας στην οποία δε συμβαίνουν ανακλάσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.



Ο **ανηχοϊκός θάλαμος** χωρίζεται σε τρία μέρη:

- τον **θάλαμο ελέγχου** με διαστάσεις 3,2m x 2,5m x 3,3m,
- τον **θάλαμο ατρωσίας**, ο οποίος έχει διαστάσεις 3,5m x 2,5m x 3,3m και χρησιμοποιείται:
  - σε δοκιμές ατρωσίας σε αγόμενες διαταραχές (EN 61000-4-6),
  - σε μετρήσεις αγόμενων εκπομπών (EN 55022), και
  - σε μετρήσεις διακοπόμενων διαταραχών (EN 55014-1)
- και στον **κύρια αίθουσα του ανηχοϊκού θαλάμου** διαστάσεων 3,5m x 6,5m x 3,3m, που είναι κατάλληλα εξοπλισμένος:
  - σε δοκιμές ατρωσίας σε εκπεμπόμενες διαταραχές (EN 61000-4-3),
  - για μετρήσεις ακτινοβολούμενων (EN 55022), και
  - μετρήσεις ισχύος διαταραχών (EN 55014-1).

Τέλος, υπάρχουν ακόμα ένας **θάλαμος ρυθμιζόμενων συνθηκών θερμοκρασίας** (όγκου 12 m<sup>3</sup> και υγρασίας και η **αίθουσα Φ.Η.Μ.** στην οποία πραγματοποιούνται σε Φορολογικούς Ηλεκτρονικούς Μηχανισμούς:

- δοκιμές ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις (EN 61000-4-2),
- δοκιμές ατρωσίας για γρήγορα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα και απότομες εκφορτίσεις (EN 61000-4-4)
- και δοκιμές ατρωσίας από υπερτάσεις και υπερεντάσεις (EN 61000-4-5).

#### 1.5.4 Εξοπλισμός Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.

Ο διατιθέμενος βασικός εξοπλισμός, ο οποίος έχει αποκτηθεί κατά καιρούς με στόχο να προσεγγίσει κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο τους τρεις κύριους λειτουργικούς στόχους του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, δηλαδή τόσο την υποστήριξη και κάλυψη των εκπαιδευτικών αναγκών του Ε.Μ.Π., των ερευνητικών ενδιαφερόντων των μελών του εργαστηρίου, όσο και την κάλυψη των αναγκών της ελληνικής βιομηχανίας, σε θέματα ελέγχου ποιότητας ηλεκτροτεχνικών υλικών, συσκευών και διατάξεων, περιλαμβάνει μεταξύ των άλλων [6]:

- Μετασχηματιστή δοκιμής 500 kV, 50 kVA
- Μετασχηματιστή δοκιμής 30 kV, 60 kVA
- Τέσσερις μετασχηματιστές δοκιμής 100 kV, 5 kVA, με δυνατότητα σύνδεσης ώστε να προκύψει διβάθμιος μετασχηματιστής (200kV) ή τριβάθμιος μετασχηματιστής (300 kV)
- Σειρά μετασχηματιστών δοκιμής μικρότερης τάσεως και ισχύος
- Πηγή συνεχούς τάσεως 400 kV
- Γεννήτρια κρουστικών τάσεων LI 1800 kV, 90 kJ
- Γεννήτρια κρουστικών τάσεων SI 1620 kV, 81 kJ
- Λειωμένα γεννήτρια κρουστικών τάσεων 140, 280 ή/και 420kV
- Γεννήτρια κρουστικών τάσεων 12 kV
- Γεννήτριες κρουστικών ρευμάτων/ κρουστικών τάσεων: α) (1,2/50 μs, 0,5...6 kV; 8/20 μs, 0,25...3 kA) και β) (1,2/50μs, 0,25-6,6kV, 0,125...3,3kA)



- Γεννήτρια κρουστικού ρεύματος (8/20  $\mu$ s, έως 25 kA)
- Καταμεριστές τάσεως (ωμικούς, χωρητικούς και μεικτούς)
- Πλήθος μετασχηματιστών μετρήσεως (τάσεως και εντάσεως)
- Μετασχηματιστής έντασης για τη θέρμανση καλωδίων μέσης και υψηλής τάσης
- Πλήθος πυκνωτών υψηλής τάσεως
- Τρεις θαλάμους (ο ένας εξ αυτών όγκου 12 m<sup>3</sup>) ρυθμιζομένων συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας
- Ένα σύστημα για τη διεξαγωγή μετρήσεων αγόμενων, ακτινοβολούμενων και διακοπόμενων διαταραχών, σύμφωνα με τα Πρότυπα EN 55022, EN 55011 και EN 55014-1
- Ένα σύστημα για δοκιμές καθορισμού ορίων από εκπομπές αρμονικών ρεύματος, σύμφωνα με το EN 61000-3-2
- Ένα σύστημα για δοκιμές περιορισμού διακυμάνσεων τάσεως και τρεμοσβήματος σε συστήματα παροχής χαμηλής τάσης, σύμφωνα με το EN 61000-3-3
- Πέντε ηλεκτροστατικές γεννήτριες έως 36 kV, για διεξαγωγή δοκιμών, σύμφωνα με το EN 61000-4-2
- Δύο γεννήτριες κυματομορφών, για τη διεξαγωγή δοκιμών ατρωσίας, σύμφωνα με το EN 61000-4-4 και 61000-4-5
- Ένα σύστημα για τη διεξαγωγή δοκιμών ατρωσίας σε βυθίσεις, μεταβολές τάσης και βραχείες διακοπές, σύμφωνα με το EN 61000-4-11
- Ένα σύστημα για τη διεξαγωγή δοκιμών ατρωσίας σε ακτινοβολούμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ραδιοσυχνότητας, σύμφωνα με το EN 61000-4-3
- Ένα σύστημα για τη διεξαγωγή δοκιμών ατρωσίας σε αγόμενες διαταραχές επαγόμενες από πεδία ραδιοσυχνότητας, σύμφωνα με το EN 61000-4-6
- Άλλες διατάξεις ελέγχου ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας συσκευών
- Δύο συστήματα για δοκιμές και μετρήσεις ηλεκτρικής ασφαλείας (μέτρηση ρεύματος διαρροής, δοκιμή διηλεκτρικής αντοχής και μέτρηση αντίστασης γείωσης), σύμφωνα με το EN 60950-1
- Δύο θωρακισμένους θαλάμους (κλωβούς Faraday)
- Πλήθος παλαμογράφων μέγιστης συχνότητας 2,5GHz
- Διατάξεις ελέγχου διηλεκτρικής αντοχής μονωτικών ελαίων
- Αναλογικούς/ψηφιακούς μετατροπείς
- Συστήματα καταγραφής ταχέως μεταβαλλομένων σημάτων (Dr Strauss, DIAS)
- Αυτόματο ψηφιακό σύστημα πολυμετρήσεων
- Πλήθος πολυμέτρων, γειωσομέτρων, μονωσιομέτρων, κ.λπ
- Όργανα για μέτρηση μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων (5Hz-32Hz) και υψηλών συχνοτήτων (έως 3GHz)
- Γέφυρες AC και DC ακριβείας
- Καταγραφικά όργανα, ενισχυτές, γεννήτριες συχνοτήτων, τροφοδοτικά τάσεως και εντάσεως
- Πρότυπα τάσεως, εντάσεως, χωρητικότητας, αντιστάσεως, συχνότητας
- Συστήματα μέτρησης μη ηλεκτρικών μεγεθών

Πέραν των ανωτέρω, διατίθενται όλα τα αναγκαία για τη διεξαγωγή μετρήσεων μετρητικά όργανα τελευταίας τεχνολογίας (π.χ. όργανα μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών, όπως μετασχηματιστές εντάσεως, μετασχηματιστές τάσεως, βολτόμετρα, αμπερόμετρα, όργανα μετρήσεως πραγματικής και αέργου ηλεκτρικής ισχύος, όργανα μετρήσεως ηλεκτρικής ενεργείας, μετρητές συνημιτόνου, καταγραφικά όργανα, διάταξη ελέγχου σφάλματος μετασχηματιστών, συχνόμετρα και λοιπές βοηθητικές συσκευές και διατάξεις, όργανα μέτρησης μη ηλεκτρικών μεγεθών, όπως μανόμετρα, θερμόμετρα ευρείας κλίμακος, μετρητές παροχής, διατάξεις μετρήσεως αγωγιμότητας υγρών, κ.λπ.), υλικά, εργαλεία και εν γένει υλικοτεχνική υποδομή (διάταξη αναγεννήσεως μονωτικών ελαίων, μηχανουργείο, κ.λπ.), επισημαίνεται δε η οργανική σύνδεση και άριστη συνεργασία του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων με όλα τα υπόλοιπα εργαστήρια του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος (Ηλεκτρικών Μηχανών, Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενεργείας, Φωτοτεχνίας, κ.λπ.), γεγονός που διευκολύνει σημαντικά το έργο του και σε περίπτωση αντιμετώπισεως ανάγκης διεξαγωγής μετρήσεων διαπειθαρχικού χαρακτήρα.

## 1.6 Βιβλιογραφία

- [1] Dieter Kind, Kurt Feser, High-Voltage Test Techniques, Εκδόσεις Newnes, 2001
- [2] Σταθόπουλου Ι.Α., Υψηλές Τάσεις Ι, Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα, 1989
- [3] John Kuffel, E. Kuffel, W. S. Zaengl, High Voltage Engineering Fundamentals, Newnes, 2000
- [4] Naidu M.S., Kamaraju V., High Voltage Engineering, Tata McGraw-Hill Publishing Company, 2009
- [5] «Κανονισμός Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.», Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [6] Ιστοσελίδα Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π.: <http://highvoltages.ece.ntua.gr/>
- [7] Nils Hylten-Carvallius, High Voltage Laboratory planning, ASEA HAEFELY, 1986

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### *1<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση: «Παραγωγή και Μέτρηση Υψηλών Εναλλασσόμενων Τάσεων»*

#### 2.1 Γενικά

Οι εναλλασσόμενες τάσεις είναι σημαντικότερες στην τεχνολογία των υψηλών τάσεων, γιατί είναι απαραίτητες όχι μόνο για την παραγωγή υψηλών εναλλασσόμενων τάσεων, αλλά και για την παραγωγή συνεχών υψηλών τάσεων και υψηλών κρουστικών τάσεων.

Η κυριότερη εφαρμογή των υψηλών εναλλασσόμενων τάσεων είναι η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η υψηλή τάση προτιμάται για λόγους οικονομίας, καθώς για τη μεταφερόμενη ενεργό ισχύ  $P$  ισχύει:

$$P = 3 \cdot V_{\phi} \cdot I \cdot \cos\phi \quad (2.1)$$

όπου  $V_{\phi}$ : φασική τιμή της τάσης  
 $I$ : ρεύμα ανά φάση  
 $R$ : ωμική αντίσταση ανά φάση σε μια τριφασική γραμμή μεταφοράς  
 $\cos\phi$ : συντελεστής ισχύος

Ενώ οι απώλειες ισχύος  $P_{\theta}$  κατά μήκος της γραμμής λόγω του φαινομένου Joule είναι:

$$P_{\theta} = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (2.2)$$

Οπότε από τις σχέσεις (2.1) και (2.2) προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$P_{\theta} = P^2 \frac{R}{3 \cdot V_{\phi}^2 \cdot (\cos\phi)^2} \quad (2.3)$$

Από τη σχέση (2.3) παρατηρείται ότι για δεδομένη μεταφερόμενη ισχύ  $P$  και ωμική αντίσταση  $R$  οι θερμικές απώλειες είναι μικρότερες όσο υψηλότερη είναι η τάση της γραμμής μεταφοράς, οπότε τελικά τόσο μικρότερο είναι το κόστος μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Βέβαια πρέπει να σημειωθεί πως ενώ η αύξηση της τάσης οδηγεί σε μείωση των απωλειών λειτουργίας, δεν μπορούμε να αυξήσουμε την τάση απεριόριστα, καθώς πάνω από μια μέγιστη τιμή η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται αντιοικονομική. Αφού τότε ό,τι εξοικονομείται από τις απώλειες λειτουργίας χάνεται τόσο από τις διηλεκτρικές απώλειες στον περιβάλλοντα αέρα εξαιτίας ιονισμού του από το υψηλό ηλεκτρικό πεδίο, όσο και από το αυξημένο κόστος που θα υπάρχει εξαιτίας των μονωτήρων, μετασχηματιστών και διακοπών που θα χρησιμοποιηθούν σε τέτοια επίπεδα τάσεων.

## 2.2 Παραγωγή υψηλών εναλλασσόμενων τάσεων

### 2.2.1 Μετασχηματιστές δοκιμής

Για την παραγωγή υψηλών εναλλασσόμενων τάσεων χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές δοκιμής και όχι οι κλασσικοί μετασχηματιστές ισχύος που υπάρχουν στο δίκτυο, και αυτό γιατί οι μετασχηματιστές δοκιμής διαφέρουν ως προς τους ισχύος σε κάποια χαρακτηριστικά τους και αυτό τους κάνει καταλληλότερους για εργαστηριακές δοκιμές.

Τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών δοκιμής:

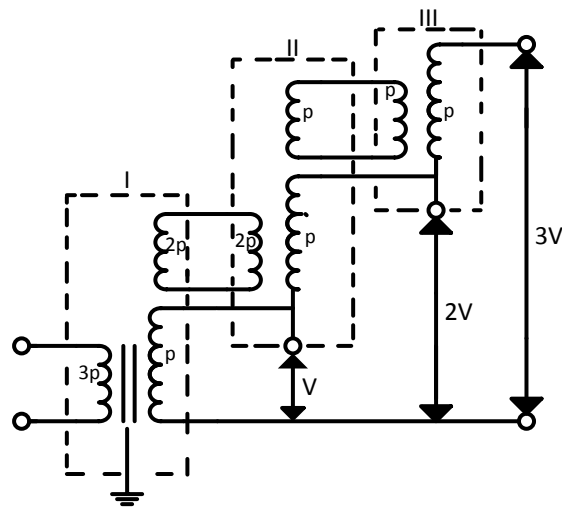
- Έχουν υψηλό λόγο μετασχηματισμού.
- Είναι συνήθως μονοφασικοί.
- Έχουν μικρή ονομαστική ισχύ. Η ένταση ρεύματος στην πλευρά υψηλής τάσης είναι μόλις μερικά Amperes.
- Χρησιμοποιούνται για δοκιμές, επομένως η χρήση τους δεν είναι συνεχής.
- Η τάση εξόδου τους μεταβάλλεται σε ένα εύρος τιμών από μηδέν μέχρι τη μέγιστη τιμή της, ενώ στους μετασχηματιστές ισχύος είναι σταθερή. Για αυτό το λόγο η μόνωσή τους είναι φτιαγμένη να αντέχει στη μέγιστη τιμή της τάσης λειτουργίας.
- Ο πυρήνας τους έχει σχετικά μεγάλη διατομή (μεγάλος σιδηροπυρήνας) για να περιορίζεται η μαγνητική επαγωγή που διέρχεται από αυτόν, ώστε να μην παράγονται ανώτερες αρμονικές.
- Έχουν ενισχυμένη μόνωση και για αυτό παρουσιάζουν αντοχή σε βραχυκυκλώματα και χωρητική συμπεριφορά. Ένα βραχυκύκλωμα προκαλεί την εμφάνιση μηχανικών καταπονήσεων στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, παρόλο που τα ρεύματα βραχυκύκλωσης είναι μικρά, για αυτό το λόγο απαιτείται μια καλή κατανομή του δυναμικού γύρω από τα τυλίγματα ώστε να αποτραπούν οι καταπονήσεις κατά τα μεταβατικά φαινόμενα.

### 2.2.2 Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές δοκιμών

Για τάσεις μεγαλύτερες από 400kV είναι καλύτερα να χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές δοκιμών συνδεδεμένοι σε βαθμίδες. Έτσι το βάρος όλης της μονάδας - που οφείλεται στη μόνωση που χρειάζεται ένας μετασχημαστής για να ανταπεξέλθει στις τόσο μεγάλες τάσεις - διαμοιράζεται στις εκάστοτε βαθμίδες, με αποτέλεσμα η μεταφορά και η ανέγερση τους να είναι ευκολότερες, και η τιμή σαφώς οικονομικότερη.

Ένα σχηματικό διάγραμμα ενός τέτοιου μετασχηματιστή δίνεται στο σχήμα 2.1 στο οποίο φαίνεται πως ο πρώτος μετασχηματιστής δοκιμών είναι γειωμένος και πως κάθε μετασχηματιστής σε όποια βαθμίδα και να ανήκει διαθέτει τρία τυλίγματα, το πρωτεύον, το δευτερεύον και το «τύλιγμα διέγερσης» [3], το οποίο έχει ίδιο αριθμό σπειρών με το πρωτεύον και τροφοδοτεί το πρωτεύον του επόμενου σταδίου.

Σημειώνεται πως μοναδική εξαίρεση αποτελεί το τελευταίο στάδιο που δεν διαθέτει τύλιγμα διέγερσης. Η πρώτη βαθμίδα τροφοδοτείται μέσω αυτομετασχηματιστή με χαμηλή τάση περίπου 230V ή 400V. Η δεύτερη βαθμίδα είναι μονωμένη με κατάλληλο στερεό μονωτικό υλικό και βρίσκεται σε δυναμικό  $V$ , που είναι ίσο με την τάση εξόδου της πρώτης βαθμίδας ως προς γη. Το δευτερεύον τύλιγμα της δεύτερης βαθμίδας είναι συνδεδεμένο σε σειρά με το δευτερεύον τύλιγμα της πρώτης, έτσι ώστε τελικά βρίσκεται υπό τάση  $V$  ως προς μόνωση, οπότε τελικά προκύπτει πως το δευτερεύον έχει τάση  $2 \cdot V$  ως προς γη. Ανάλογα το δευτερεύον του μετασχηματιστή της τρίτης βαθμίδας συνδέεται σε σειρά με το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή της δεύτερης βαθμίδας, οπότε τελικά αποκτά δυναμικό  $3 \cdot V$  ως προς γη [2].



Σχήμα 2.1: Μετασχηματιστής δοκιμών τριών βαθμίδων

Σύμφωνα με τα παραπάνω ένας πολυβάθμιος μετασχηματιστής  $n$  βαθμίδων με την κάθε βαθμίδα να έχει τάση εξόδου  $V$  εμφανίζει στην έξοδο της τελευταίας βαθμίδας τάση  $n \cdot V$  ως προς γη. Το κύριο μειονέκτημα των πολυβάθμιων μετασχηματιστών δοκιμής είναι πως οι πρώτες βαθμίδες καταπονούνται περισσότερο από τις επόμενες.

### 2.3 Μέτρηση υψηλών εναλλασσόμενων τάσεων

Οι μετρήσεις υψηλών τάσεων δεν είναι ένα απλό ζήτημα καθώς λόγω των υψηλών τιμών που φθάνουν παρουσιάζουν προβλήματα που κυρίως αφορούν τα όρια μέτρησης των συμβατικών οργάνων, όπως επίσης την ανάπτυξη θερμότητας στα κυκλώματα μέτρησης και την πιθανότητα υπερπήδησης που μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια του προσωπικού. Εξαιτίας των παραπάνω λόγων υπάρχουν ειδικές διατάξεις μέτρησης υψηλών τάσεων. Εδώ θα αναφερθούν αυτές που αφορούν τις υψηλές εναλλασσόμενες τάσεις.

Για υψηλές εναλλασσόμενες τάσεις από 100kV μέχρι το πολύ 200kV χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι 2.3.1 και 2.3.2, ενώ για μεγαλύτερες τάσεις οι υπόλοιπες αναφερθείσες μέθοδοι.

### 2.3.1 Μέτρηση με αμπερόμετρο και αντίσταση σε σειρά

Η διάταξη του σχήματος 2.2(α) χρησιμοποιείται για τη μέτρηση υψηλών συνεχών ή εναλλασσόμενων τάσεων. Στην περίπτωση των εναλλασσόμενων τάσεων εμφανίζεται παράσιτη χωρητικότητα C και επιπλέον υπάρχει και η αυτεπαγωγή του συστήματος L. Το αμπερόμετρο έχει πολύ μικρή αντίσταση  $r_i$  (ώστε η μέτρηση να είναι ακριβής) μόλις κάποια  $\Omega$  σε σχέση με τα μερικά δεκάδες G $\Omega$  των αντιστάσεων R που είναι συνδεδεμένες σε σειρά. Η συνολική τιμή της αντίστασης R επιλέγεται ώστε το ρεύμα που θα διαρρέει το αμπερόμετρο να είναι από 1 μέχρι 10 $\mu$ A. Το συνολικό μήκος των κυλίνδρων στους οποίους βρίσκονται οι αντιστάσεις είναι περίπου 2m για κάθε MVolt. Θα μπορούσε στην υπάρχουσα διάταξη να τοποθετηθεί σπινθηριστής παράλληλα στο αμπερόμετρο για την προστασία του αμπερομέτρου σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Ουσιαστικά αυτή η διάταξη μετρά το ρεύμα που διαρρέει το αμπερόμετρο και μετά μέσω του νόμου του Ohm μετατρέπεται το ρεύμα σε τάση. Αν λάβουμε υπόψη μας και την αντίσταση του αμπερομέτρου τότε ισχύει:

$$V = (Z_{o\lambda} + r_i) \cdot I \quad (2.4)$$

Όπου θέλουμε η αντίσταση  $Z_{o\lambda}$  να είναι πραγματικός αριθμός, δηλαδή καθαρά ωμική.

Στην περίπτωση των εναλλασσόμενων τάσεων έχουμε:

$$Z_{o\lambda} = \frac{(R+j\omega L) \cdot 1/j\omega C}{R+j\omega L+1/j\omega C} = \frac{R+j\omega L}{1-\omega^2 LC+j\omega CR} \xrightarrow{\omega^2 LC \cong 0}$$

$$Z_{o\lambda} = \frac{R+j\omega L}{1+j\omega CR} = \dots = R + j\omega(L - R^2 C) \quad (2.5)$$

Επομένως για να είναι η  $Z_{o\lambda}$  πραγματικός αριθμός πρέπει:

$$L - R^2 C = 0 \Rightarrow R = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.6)$$

### 2.3.2 Ωμικός καταμεριστής

Η διάταξη του σχήματος 2.2(β) χρησιμοποιείται για τη μέτρηση υψηλών συνεχών ή εναλλασσόμενων τάσεων. Ο ωμικός καταμεριστής τάσης αποτελείται από δύο ωμικές αντιστάσεις, την αντίσταση υψηλής τάσης  $R_1$  και την αντίσταση χαμηλής τάσης  $R_2$ , για τις οποίες ισχύει  $R_1 \gg R_2$ . Εάν V η υψηλή εναλλασσόμενη τάση που θέλουμε να μετρήσουμε και u η μετρούμενη τάση, τότε ισχύει λαμβάνοντας υπόψη και την αντίσταση  $r_i$  του καταγραφικού οργάνου (π.χ. βολτόμετρο):

$$u = \frac{R_2^*}{R_1 + R_2^*} V \quad (2.7)$$

Όπου  $R_2^* = \frac{R_2 \cdot r_i}{R_2 + r_i}$ , αφού οι αντιστάσεις αυτές είναι συνδεδεμένες παράλληλα.

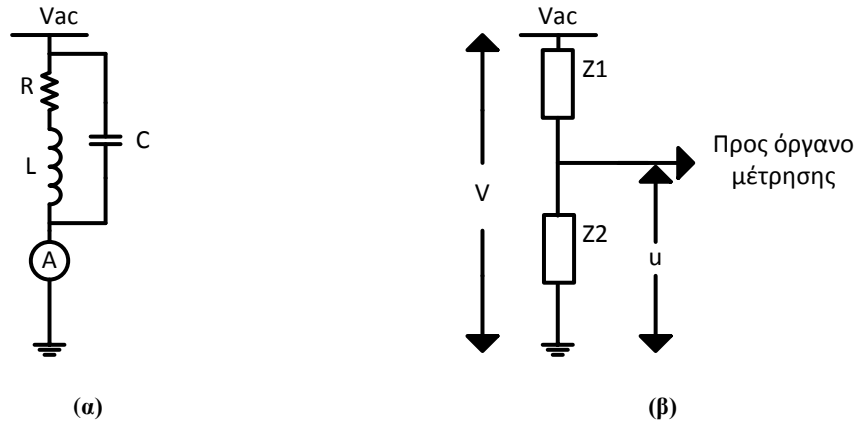
Στην περίπτωση των εναλλασσόμενων τάσεων οι αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται δεν είναι καθαρά ωμικές, αλλά εμφανίζουν και αυτεπαγωγές  $L_1$  και  $L_2$ . Οπότε έχουμε σύνθετες αντιστάσεις  $Z_1 = R_1 + jL_1$  και  $Z_2 = R_2 + jL_2$ . Οπότε ο λόγος καταμερισμού  $\kappa$  θα είναι ίσος με:

$$\kappa = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \sqrt{\frac{R_2^2 + L_2^2}{(R_1 + R_2)^2 + (L_1 + L_2)^2}} e^{j[\tan^{-1}(\frac{L_2}{R_2}) - \tan^{-1}(\frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2})]} \quad (2.8)$$

Για να είναι όμως ο καταμεριστής ωμικός πρέπει να είναι πραγματικός αριθμός οπότε πρέπει να ισχύει:

$$\tan^{-1}\left(\frac{X_2}{R_2}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2}\right) = 0 \Rightarrow \frac{L_2}{R_2} = \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow \frac{L_1}{R_1} = \frac{L_2}{R_2} \quad (2.9)$$

Οι ωμικοί καταμεριστές δε χρησιμοποιούνται για εναλλασσόμενες τάσεις μεγαλύτερες από 100kV λόγω των παράσιτων χωρητικοτήτων ως προς γη και των αυξημένων θερμικών απωλειών πάνω στις αντιστάσεις.



Σχήμα 2.2: (α) Μέτρηση με αμπερόμετρο και αντίσταση σε σειρά, (β) Ωμικός καταμεριστής

### 2.3.3 Διάκενο σφαιρών

Τα σφαιρικά διάκενα μετρούν μέγιστη τιμή οποιασδήποτε μορφής υψηλής τάσης, δηλαδή και συνεχούς και εναλλασσόμενης και των δύο μορφών της κρουστικής τάσεως. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην αρχή πως το διάκενο με ορισμένο μήκος διασπάται σε ορισμένη τάση. Η τάση διασπάσεως όμως ενός διακένου δεν έχει απόλυτα καθορισμένη τιμή, παρουσιάζει στατιστική διασπορά που εξαρτάται από τη γεωμετρική μορφή του διακένου, τη μορφή της τάσεως και άλλους ακόμα παράγοντες. Έχει παρατηρηθεί πως δύο σφαίρες της ίδιας διαμέτρου  $D$  που η απόστασή τους  $s$  είναι σχετικά μικρή παρουσιάζουν τη μικρότερη διασπορά στην τάση διασπάσεως για εναλλασσόμενη και κρουστική τάση [4,5].

Γενικά πρέπει να ισχύει:

$$s < D/2 \quad (2.10)$$

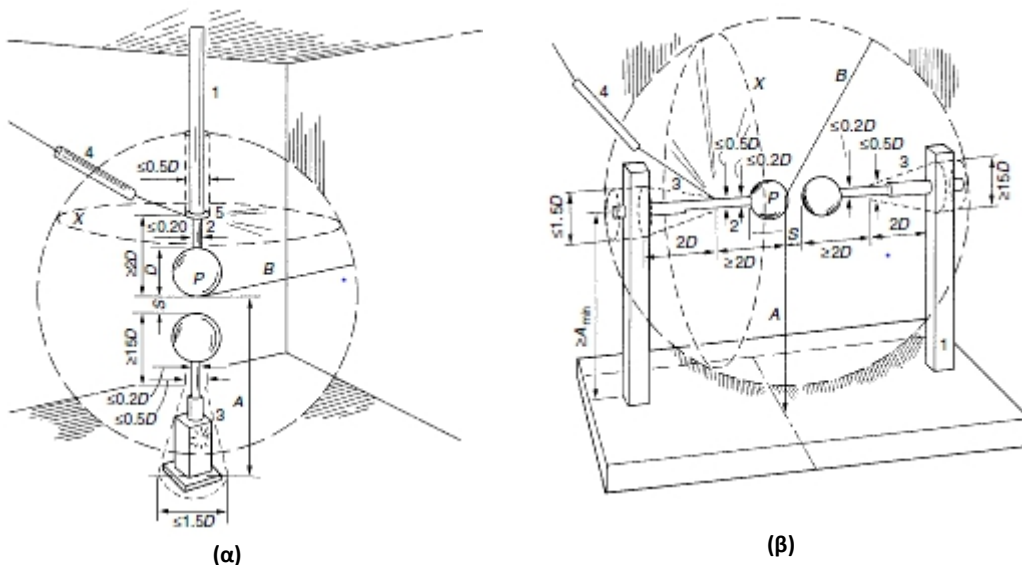


Η ακρίβεια που παρουσιάζουν μετρήσεις με σφαίρες είναι της τάξεως του  $\pm 3\%$  υπό την προϋπόθεση πως η απόστασή τους δεν υπερβαίνει την ακτίνα τους. Σφαιρικά διάκενα μπορούν να κατασκευαστούν με κατακόρυφο ή οριζόντιο άξονα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3(α) και (β) αντίστοιχα. Η γειννίαση του διάκενου με γειωμένα αντικείμενα επηρεάζει το ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις σφαίρες και κατά συνέπεια την τάση διασπάσεως, για αυτό το λόγο σε μια ακτίνα τουλάχιστον  $B$  γύρω από το διάκενο δεν πρέπει να υπάρχουν γειωμένα αντικείμενα (Πίνακας 2.1).

Άλλος παράγοντας που επηρεάζει την τάση διασπάσεως είναι η κατάσταση στην επιφάνεια των σφαιρών, κυρίως στην περιοχή που πλησιάζουν περισσότερο οι σφαίρες και στην οποία συμβαίνουν οι διασπάσεις, για αυτό η επιφάνεια των σφαιρών κυρίως σε αυτό το σημείο πρέπει να διατηρείται καθαρή. Η διάσπαση ανάμεσα στις σφαίρες επιτυγχάνεται με ιονισμό από κρούσεις, για να αρχίσει όμως ο 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. Σε περίπτωση όμως ύπαρξης μικρού διακένου, ο διαθέσιμος αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι μικρός, οπότε συνίσταται τεχνητή δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων με ακτινοβολία.

Πίνακας 2.1: Καθαρή απόσταση γύρω από τις σφαίρες [4]

Διάμετρο Σφαίρας (mm)	Ελάχιστη Τιμή A	Μέγιστη Τιμή A	Ελάχιστη Τιμή B
62,5	7D	9D	14s
125	6	8	12
250	5	7	10
500	4	6	8
750	4	6	8
1000	3,5	5	7
1500	3	4	6
2000	3	4	6



Σχήμα 2.3: (α) Κατακόρυφο σφαιρικό διάκενο [4], (β) Οριζόντιο σφαιρικό διάκενο [4]



Αν η πραγματική πυκνότητα του αέρα διαφέρει από τις συνθήκες αναφοράς πρέπει να αναγάγουμε τις τιμές του πίνακα 2.2 στις πραγματικές συνθήκες. Ισχύει:

$$V_d = k_d \cdot V_{d0} \quad (2.11)$$

Όπου  $V_{d0}$  οι τάσεις διασπάσεως από πίνακα 2.2 και  $k_d$  είναι ο δείκτης που προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$k_d = \delta \cdot k \quad (2.12)$$

Ο διορθωτικός συντελεστής πυκνότητας αέρα  $\delta$  ορίζεται ως εξής:

$$\delta = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{273+T_0}{273+T} \quad (2.13)$$

Όπου  $P_0 = 101,3kPa$  και  $T_0 = 20^\circ C$ , ενώ τα μεγέθη  $T, P$  αναφέρονται στις συνθήκες του πειράματος.

Ενώ ο διορθωτικός συντελεστής υγρασίας ορίζεται ως εξής:

$$k = 1 + 0,002 \cdot \left(\frac{h}{\delta} - h_0\right) \quad (2.14)$$

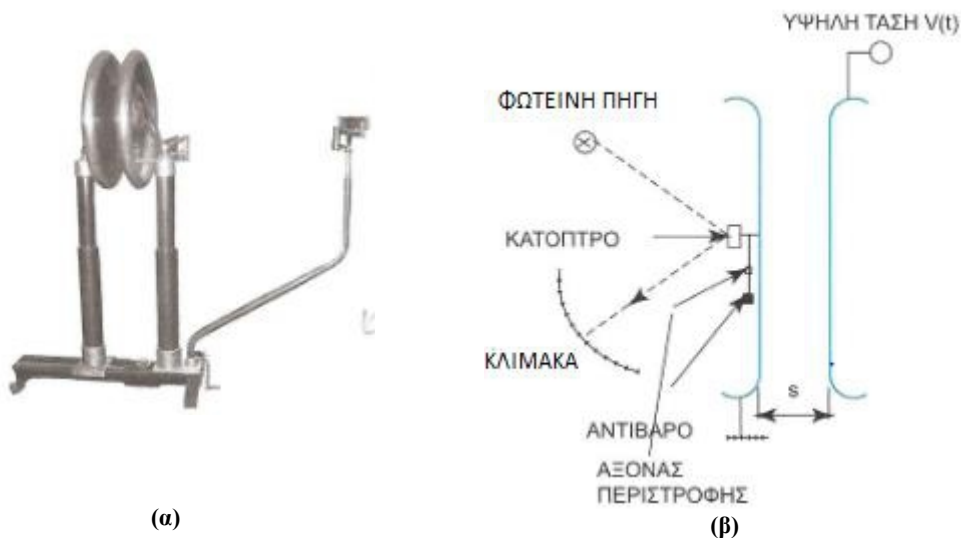
όπου  $h_0 = 8,5 \frac{g}{m^3}$  και  $h$  να αναφέρεται στις συνθήκες του πειράματος.

Πίνακας 2.2: Τιμές διασπάσεως για δεδομένες συνθήκες T,P σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60052:2002

Σφαιρικό Διάκενο s(mm)	Μέγιστη Τάση, kV Σφαιρική διάμετρος D (cm)					
	6,25	10	12,5	15	25	50
5	17,2	16,8	16,8			
10	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7	
15	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	
20	58,5	59,0	59,0	59,0	59,0	
26	72,0	74,5	72,5	75,5	75,5	75,5
30	79,5	84,0	85,0	85,5	86,0	86,0
35	(87,5)	95,0	97,0	98,0	99,0	99,0
40	(95,0)	105	108	110	112	112
45	(101)	115	119	122	125	125
50	(107)	123	129	133	137	138
55	(112)	(131)	138	143	149	151
60	(116)	(138)	146	152	161	164
65		(144)	(154)	161	173	177
70		(150)	(161)	169	184	189
80		(155)	(174)	(185)	206	214
90			(185)	(198)	226	239
100			(195)	(209)	244	263
110				(219)	261	286
120				(229)	275	309
150					(314)	373
170					(337)	411
200					(366)	460

### 2.3.4 Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο

Το ηλεκτρικό πεδίο σύμφωνα με τον Coulomb είναι ένα πεδίο δυνάμεων. Το ηλεκτρικό πεδίο παράγεται από τάσεις, οπότε αν μπορεί να μετρηθεί η πεδιακή δύναμη μπορούν να μετρηθούν και οι τάσεις. Αυτή είναι η λογική πάνω στην οποία στηρίζεται το ηλεκτροστατικό βολτόμετρο, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση και των τριών μορφών τάσεων. Συγκεκριμένα το ηλεκτροστατικό βολτόμετρο αποτελείται από δύο παράλληλες πλάκες ανάμεσα στις οποίες εφαρμόζεται μια τάση  $V(t)$ , με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο προκαλεί μια δύναμη  $F(t)$ , η οποία τείνει να μειώσει το διάκενο. Η δύναμη δημιουργείται από τη διαδικασία κατά την οποία η ηλεκτροστατική ενέργεια  $W(t)$  μετατρέπεται σε μηχανικό έργο. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4 η μια πλάκα είναι σταθερή, ενώ η άλλη έχει ένα μικρό κινητό μέρος το οποίο συγκρατείται από ένα ελατήριο. Η ελκτική δύναμη  $F(t)$  η οποία προκύπτει από την εφαρμοζόμενη τάση αλλάζει τη θέση του κινητού μέρους πάνω στο οποίο έχει τοποθετηθεί ένας καθρέφτης. Μια δέσμη φωτός ανακλάται πάνω στον καθρέφτη και δείχνει την τιμή της τάσης πάνω σε μια βαθμονομημένη κλίμακα [3].



Σχήμα 2.4: (α) Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο [3], (β) Ο τρόπος λειτουργίας του ηλεκτροστατικού βολτομέτρου [3]

Υποθέτοντας πως η χωρητικότητα μεταξύ των πλακών είναι  $C$ , τότε η αποθηκευμένη ηλεκτροστατική ενέργεια είναι:

$$W(t) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V(t)^2 \quad (2.15)$$

Ενώ το μηχανικό έργο προκύπτει από την παράγωγο της ηλεκτροστατικής ενέργειας στην κατεύθυνση  $x$ , όπου έχουμε μεταβολή της απόστασης των δύο πλακών:

$$dW(t) = -F(t) \cdot dx \quad (2.16)$$

Οπότε η δύναμη  $F$  ως συνάρτηση του χρόνου είναι:

$$|F(t)| = \frac{dW(t)}{dx} = \frac{1}{2} \cdot V(t)^2 \cdot \frac{dC}{dx} \quad (2.17)$$

Η δύναμη η οποία δημιουργείται είναι ένας αριθμητικός μέσος της τελευταίας εξίσωσης οπότε για περίοδο μεταβολής  $T$ :

$$\bar{F} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dC}{dx} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T V(t)^2 dt = \frac{1}{2} \cdot \frac{dC}{dx} \cdot V^2 \quad (2.18)$$

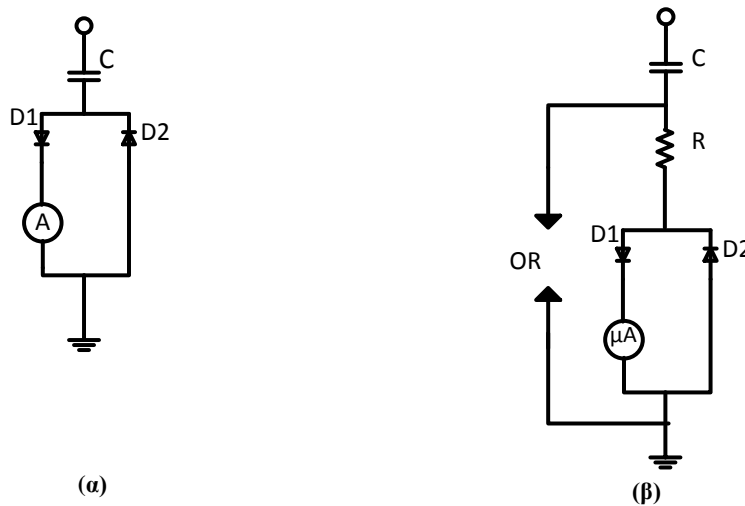
Τέλος επειδή η χωρητικότητα συνδέεται με την επιφάνεια των ηλεκτροδίων  $A$  και την ηλεκτρική διαπερατότητα  $\epsilon_0$  θα έχουμε:

$$\bar{F} = \frac{A \cdot \epsilon_0}{2 \cdot x^2} \cdot V^2 \quad (2.19)$$

Είναι ξεκάθαρο πως για δεδομένη τάση προς μέτρηση όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη τόσο καλύτερη είναι η ακρίβεια που θα μας εξασφαλίσει το βολτόμετρο, βέβαια αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη κλιμάκων μεγάλης ακρίβειας. Για να εξασφαλίσουμε μεγάλη δύναμη για δεδομένη τάση η επιφάνεια των πλακών θα πρέπει να είναι μεγάλη, η μεταξύ τους απόσταση μικρή και κάποιο αέριο μονωτικό πέραν του αέρα, π.χ. κενό ή  $SF_6$ , πρέπει να τοποθετηθεί μεταξύ των πλακών.

### 2.3.5 Μέθοδος Chubb-Fortescue

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για τη μέτρηση της μέγιστης τιμής υψηλής εναλλασσόμενης τάσεως είναι η μέθοδος Chubb-Fortescue που φαίνεται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: (α) Ιδανικό κύκλωμα, (β) Προτεινόμενο πραγματικό κύκλωμα [4]

Το κύκλωμα 2.5(α) αποτελείται από ένα πυκνωτή  $C$  ο οποίος μπορεί να αντέχει στην υψηλή προς μέτρηση τάση, δύο ανορθωτές  $D_1$  και  $D_2$  σε αντιπαράλληλη σύνδεση και ένα μικρο-αμπερόμετρο με αμελητέα αντίσταση σε σειρά με τη  $D_1$ . Όπως φαίνεται στο σχήμα το προς μέτρηση μέγεθος είναι η  $V(t)$ .

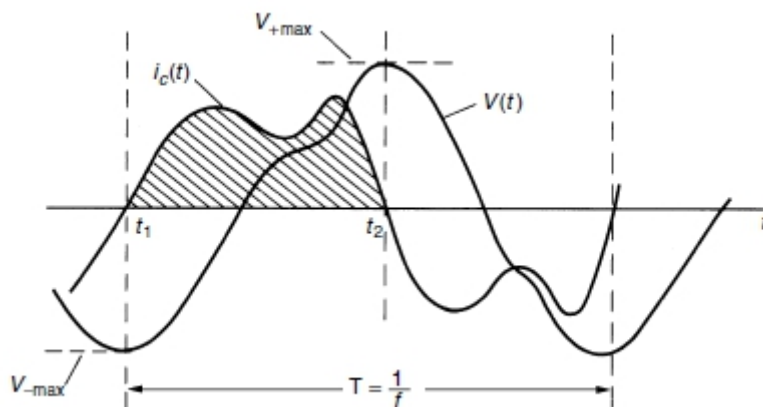
Για το χρονικό διάστημα  $0 < t < \frac{T}{2}$  όταν άγει ο ανορθωτής  $D_1$  ισχύει:

$$i_c(t) = C \frac{dV(t)}{dt} \quad (2.20)$$

επομένως:

$$I_c = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} C \frac{dV(t)}{dt} dt = \frac{C}{T} \cdot (u(\frac{T}{2}) - u(0)) = \frac{C}{T} \cdot (V_{max} - (-V_{max})) = 2 \cdot f \cdot C \cdot V_{max} \quad (2.21)$$

Με σωστή βαθμονόμηση του αμπερομέτρου μπορούμε να μετρήσουμε με μεγάλη ακρίβεια απευθείας τη μέγιστη τιμή της υψηλής εναλλασσόμενης τάσης  $U_{max}$ , αφού τα μόνα μεγέθη που χρειάζεται να ξέρουμε είναι η συχνότητα  $f$ , η χωρητικότητα  $C$  και η μέση τιμή του ρεύματος  $I_c$  που μετρά το μικρο-αμπερόμετρο. Αυτό ισχύει για οποιαδήποτε εναλλασσόμενη τάση, όχι απαραίτητα ημιτονοειδή, αρκεί οι δύο ημιπερίοδοι να είναι όμοιοι και η τάση να παρουσιάζει μόνο ένα μέγιστο κατά τη διάρκεια μιας ημιπεριόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6. Στην περίπτωση που η τάση παρουσιάζει περισσότερα του ενός μέγιστα σε μια ημιπερίοδο, η φορά του χωρητικού ρεύματος αναστρέφεται και το αντίστροφο ρεύμα δε διαρρέει το αμπερόμετρο αλλά περνά μέσα από την ανάστροφη δίοδο και χάνεται [3]. Τα κυριότερα σφάλματα συχνά εισάγονται λόγω των ατελειών που παρουσιάζουν οι δίοδοι οι οποίες πρέπει να υποδιαιρούν το ρεύμα  $i_c(t)$  με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα που κατευθύνεται προς την  $D_1$ , το οποίο περιορίζεται λόγω χωρητικότητας  $C$ , πρέπει να είναι  $10^4$  με  $10^5$  φορές μεγαλύτερο σε σύγκριση με το ρεύμα που κατευθύνεται προς την  $D_2$ . Λόγω της back-to-back σύνδεσης των διόδων οι αντίστροφες τάσεις είναι χαμηλές. Παρόλα αυτά οι δίοδοι καταπονούνται πολύ εξαιτίας μικρών κρουστικών ρευμάτων που παράγονται κατά τις τάσεις διάσπασης. Μια κατάλληλη προστασία της ανορθωτικής διάταξης είναι η χρήση μιας αντίστασης  $R$  που εισάγει μια απαιτούμενη πτώση τάσης κατά τη διάρκεια της διάσπασης ικανή να ενεργοποιήσει τον σπινθηριστή που χρησιμοποιείται για την προστασία του οργάνου από υπερτάσεις, κύκλωμα 2.5(β).



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα τάσης και ρεύματος [4]

### 2.3.6 Χωρητικός καταμεριστής

Στο σχήμα 2.7 φαίνεται ένας τυπικός χωρητικός καταμεριστής με χρήση πυκνωτών  $C_1$  και  $C_2$  με  $C_1 \ll C_2$ . Ανάλογα με τους ωμικούς καταμεριστές θα ισχύει:

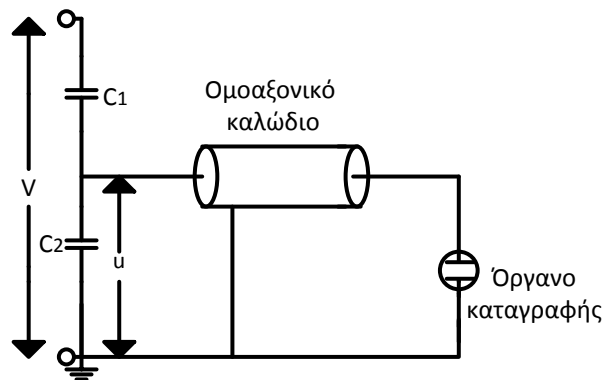
$$u = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} V \quad (2.22)$$

όπου  $Z_1 = 1/j\omega C_1$  και  $Z_2 = 1/j\omega C_2$ .

Άρα τελικά ο λόγος καταμερισμού θα είναι:

$$k = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \rightarrow V = \frac{C_1 + C_2}{C_1} u \quad (2.23)$$

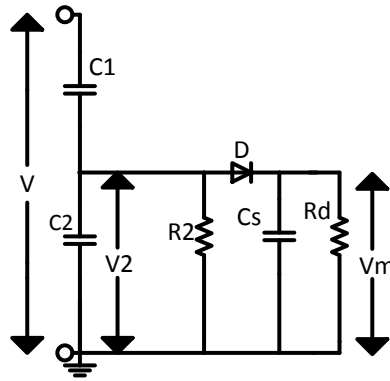
Ο πυκνωτής στην πλευρά χαμηλής τάσης συνίσταται από πολλούς επί μέρους πυκνωτές με χαμηλή αυτεπαγωγή συνδεδεμένους εν σειρά ή παράλληλα.



Σχήμα 2.7: Χωρητικός καταμεριστής [3]

### 2.3.7 Διάταξη κατά Davis, Bowdler και Starding

Η διάταξη κατά Davis, Bowdler και Starding μετρά τη μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης τάσης, όπως και η μέθοδος Chubb-Fortescue, αλλά δεν είναι τόσο ακριβής όπως η δεύτερη. Επίσης η βασική διαφορά των δύο μεθόδων είναι πως η μέτρηση της υψηλής εναλλασσόμενης τάσης με τη διάταξη του σχήματος 2.8 δεν εξαρτάται από τη συχνότητα [3].



Σχήμα 2.8: Διάταξη κατά Davis, Bowdler και Starding

Η διάταξη αποτελείται από έναν χωρητικό καταμεριστή με πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$ , έναν ανορθωτή  $D$  που είναι υπεύθυνος για τη φόρτιση του πυκνωτή  $C_s$  στη μέγιστη τιμή της χαμηλής τάσης του καταμεριστή  $V_{2max}$ , μια αντίσταση  $R_d$  που εκφορτίζει τον πυκνωτή  $C_s$  και κατά μήκος της οποίας συνδέεται όργανο μέτρησης συνεχούς τάσης που καταγράφει την τάση  $V_m \approx V_{2max}$ . Οπότε η μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης τάσης είναι:

$$V_{max} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} V_m \quad (2.24)$$

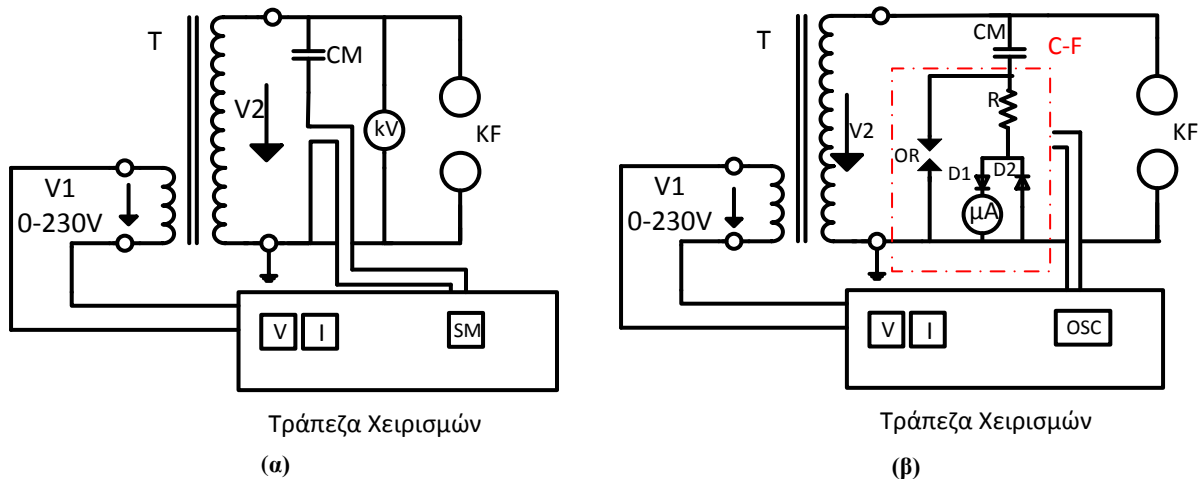
Η σταθερά χρόνου  $C_s \cdot R_d$  θα πρέπει να είναι εντός του χρονικού διαστήματος 0,5 με 1 sec. Ενώ η τιμή της αντίστασης  $R_2$  προκύπτει από την ανισότητα:

$$\frac{1}{\omega \cdot C_2} < R_2 < R_\mu \quad (2.25)$$

Πειραματικά αποδεικνύεται πως η τάση εξόδου  $V_m$  μειώνεται σταδιακά εάν μια συνεχής τάση  $V$  προκύψει στο κύκλωμα. Αυτό είναι αποτέλεσμα της συνεχούς εκφόρτισης των πυκνωτών  $C_2$  και  $C_s$ . Οπότε η  $V_2(t)$  θα αποκτήσει μια αρνητική dc συνιστώσα, που τελικά ισούται με  $V_{2max}$ . Ως εκ τούτου μια αντίσταση  $R_2$  θα τοποθετηθεί παράλληλα στον  $C_2$  για να αντισταθμίσει τα μονοπολικά ρεύματα εκφόρτισης.

## 2.4 Πειραματική διάταξη

Σκοπός αυτής της άσκησης λοιπόν είναι η παραγωγή και η μέτρηση υψηλής εναλλασσόμενης τάσης και για να τον πετύχουμε θα ακολουθήσουμε τη διάταξη που απεικονίζεται στο σχήμα 2.9(α). Για να γίνει η καταγραφή με τη μέθοδο Chubb-Fortescue πρέπει να αποσυνδεθεί το βολτόμετρο μεγίστου από το CM και στη θέση του να τοποθετηθεί η συσκευή C-F, για αυτό το λόγο σε αυτή την περίπτωση επαναλαμβάνεται η πειραματική διαδικασία για την πειραματική διάταξη του σχήματος 2.9(β).



Σχήμα 2.9: (α) Πειραματική διάταξη (III), (β) Πειραματική διάταξη (IV)

- Όπου
- T: μετασχηματιστής δοκιμής με λόγο μετασχηματισμού  $220V/100kV$  και ονομαστική ισχύ 5kVA
  - CM: πυκνωτής μέτρησης υψηλής τάσης, 100pF
  - SM: βολτόμετρο μεγίστου (εντός του βολτομέτρου υπάρχει ενσωματωμένος πυκνωτής  $C_2 = 200nF$ ). Η σύνδεση με το CM γίνεται μέσω ομοαξονικού καλωδίου.
  - OSC: Παλμογράφος
  - KF: σφαιρικό Διάκενο, με διάμετρο  $D=100$  mm.
  - kV: ηλεκτροστατικό Βολτόμετρο
  - C-F: συσκευή που περιέχει τη διάταξη Chubb-Fortescue
  - OR: Σπινθηριστής
  - μA: μικρο-αμπερόμετρο κινητού πηνίου
  - R: αντίσταση Προστασίας, 1,2kΩ
  - D1,D2: Δίοδοι

Αρχικά δίνουμε τάση από την τροφοδοσία του δικτύου στον αυτομετασχηματιστή (ΑΜΣ) ή αλλιώς στην τράπεζα χειρισμών, έτσι ώστε να έχουμε μια διακύμανση των τιμών της τάσης που μπορούμε να λάβουμε (0-230V). Για διαστήματα  $s= 10, 20, 30, 40, 50$ mm η τάση διάσπασης του σφαιρικού διακένου θα πρέπει να προσδιοριστεί

χρησιμοποιώντας τις παρακάτω μεθόδους. Για κάθε s θα γίνουν πέντε μετρήσεις, ώστε να υπολογιστεί τελικά η μέση τιμή των καταγραφών για τη σύγκριση των μεθόδων.

(I) Υπολογίζεται η τάση διάσπασης  $\hat{V}_d$  από τον πίνακα 2.2 της παραγράφου 2.3.3 και τη βοήθεια του διορθωτικού παράγοντα  $k_d$ .

(II) Υπολογίζεται απευθείας η rms τιμή της εναλλασσόμενης τάσεως  $V_{2rms}$  μέσω μέτρησης με ηλεκτροστατικό βολτόμετρο.

(III) Υπολογίζεται η rms τιμή της εναλλασσόμενης τάσης  $\hat{V}_2/\sqrt{2}$  μέσω βολτομέτρου μεγίστου.

(IV) Υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης τάσης  $\hat{V}_2$  σύμφωνα με τη μέθοδο Chubb-Fortescue. Για να καθοριστεί η μέγιστη τιμή μέσω αυτής της μεθόδου μια συσκευή C-F αντικαθιστά την SM. Αυτή η συσκευή περιέχει 2 ημιαγωγίμες διόδους  $D_1$  και  $D_2$  και μια αντίσταση  $R=1,2k\Omega$  και καταγράφει τη μέση τιμή του ρεύματος  $I_c(A)$ .

(V) Ο πιο απλός τρόπος για τον υπολογισμό της υψηλής εναλλασσόμενης τάσης  $V_{2rms}$  είναι η καταγραφή του  $V_1$  και ο πολλαπλασιασμός με τον λόγο μετασχηματισμού  $\alpha$ .

Πίνακας 2.4: Καταγραφή εργαστηριακών μετρήσεων

s(mm)	10				
Μετρήσεις	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>
Τάση 1 <sup>οντός</sup> $V_1(V)$					
Μέθοδος II $V_{2rms}(kV)$					
Μέθοδος III $\hat{V}_2/\sqrt{2}(kV)$					
Μέθοδος IV $I_c(\mu A)$					

Πίεση P(mbar)		Θερμοκρασία T(°C)		Υγρασία(%)	
------------------	--	----------------------	--	------------	--



Πίνακας 2.5: Καταγραφή εργαστηριακών μετρήσεων

s(mm)	20				
Μετρήσεις	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>
Τάση 1 <sup>οντός</sup> $V_1(V)$					
Μέθοδος II $V_{2rms}(kV)$					
Μέθοδος III $\widehat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$					
Μέθοδος IV $I_c(\mu A)$					

Πίεση P(mbar)		Θερμοκρασία T(°C)		Υγρασία(%)	
------------------	--	----------------------	--	------------	--

Πίνακας 2.6: Καταγραφή εργαστηριακών μετρήσεων

s(mm)	30				
Μετρήσεις	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>
Τάση 1 <sup>οντός</sup> $V_1(V)$					
Μέθοδος II $V_{2rms}(kV)$					
Μέθοδος III $\widehat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$					
Μέθοδος IV $I_c(\mu A)$					

Πίεση P(mbar)		Θερμοκρασία T(°C)		Υγρασία(%)	
------------------	--	----------------------	--	------------	--

Πίνακας 2.7: Καταγραφή εργαστηριακών μετρήσεων

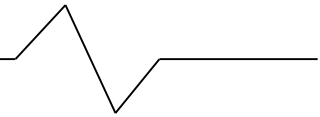
s(mm)	40				
Μετρήσεις	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>
Τάση 1 <sup>οντός</sup> $V_1(V)$					
Μέθοδος II $V_{2rms}(kV)$					
Μέθοδος III $\widehat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$					
Μέθοδος IV $I_c(\mu A)$					

Πίεση P(mbar)		Θερμοκρασία T(°C)		Υγρασία(%)	
------------------	--	----------------------	--	------------	--

Πίνακας 2.8: Καταγραφή εργαστηριακών μετρήσεων

s(mm)	50				
Μετρήσεις	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>
Τάση 1 <sup>οντός</sup> $V_1(V)$					
Μέθοδος II $V_{2rms}(kV)$					
Μέθοδος III $\widehat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$					
Μέθοδος IV $I_c(\mu A)$					

Πίεση P(mbar)		Θερμοκρασία T(°C)		Υγρασία(%)	
------------------	--	----------------------	--	------------	--



## 2.5 Ερωτήματα

(α) Να εξηγηθεί ο λόγος χρήσης αυτομετασχηματιστή και να περιγραφεί η λειτουργία του.

(β) Στον πίνακα 2.9 αφού γίνει η επεξεργασία των τιμών των εργαστηριακών καταγραφών υπολογίζεται η rms τιμή της υψηλής εναλλασσόμενης τάσης  $V_{2rms}(kV)$  για κάθε μέθοδο, ώστε να μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

Πίνακας 2.9: Συγκεντρωτικός πίνακας rms τιμών εναλλασσόμενων υψηλών τάσεων

s(mm)	10	20	30	40	50
Μέθοδος I $\widehat{V}_d/\sqrt{2} (kV)$					
Μέθοδος II $V_{2rms}(kV)$					
Μέθοδος III $\widehat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$					
Μέθοδος IV $\widehat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$					
Μέθοδος V $\alpha \cdot V_1(kV)$					

(γ) Ποια μέθοδος μέτρησης εναλλασσόμενης τάσης είναι πιο ακριβής στις παρούσες συνθήκες και γιατί;

(δ) Να παρουσιαστούν σε ένα κοινό διάγραμμα οι τάσεις  $V_{2rms}(kV)$  που προέκυψαν από τις πέντε μεθόδους καταγραφής ως προς το διάκενο  $s(mm)$ .

(ε) Να απεικονιστεί το ρεύμα  $i_c$  που καταγράφεται μέσω του μικρο-αμπερόμετρου στη μέθοδο Chubb-Fortescue συναρτήσει με το χρόνο  $t$  με τη βοήθεια του παλμογράφου της διάταξης.

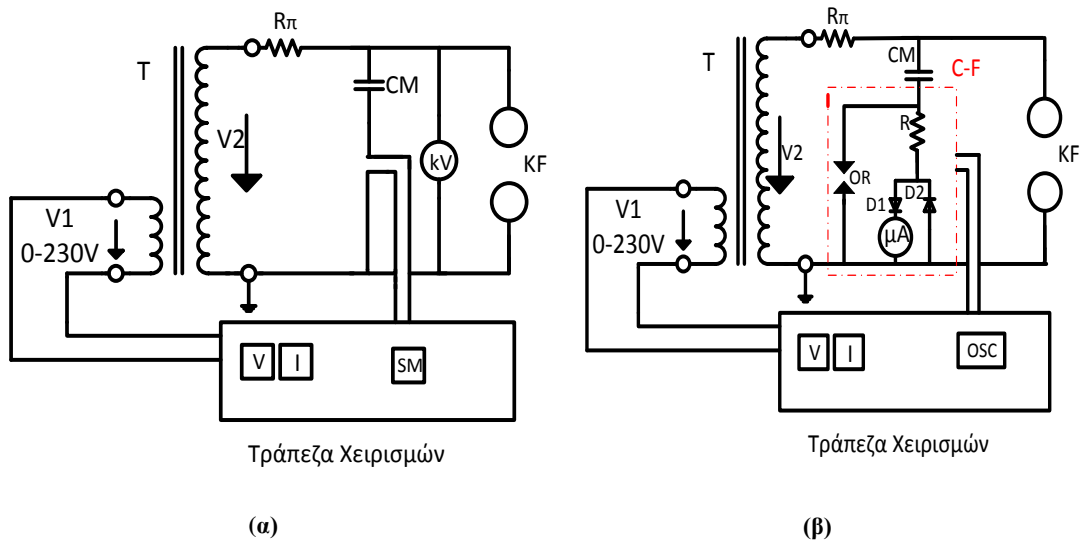
(στ) Να θεωρήσετε ως μέθοδο αναφοράς τη μέθοδο που θεωρήσατε ακριβέστερη στο ερώτημα (β) και να βρείτε τα σχετικά σφάλματα  $\varepsilon(\%)$  των άλλων μεθόδων ως προς τις τάσεις αναφοράς.

## 2.6 Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις στο Εργαστήριο

Η 1<sup>η</sup> άσκηση πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο, ώστε να επαληθευτεί η ορθότητα τόσο της διάταξης όσο και των ερωτημάτων που προτείνονται. Οι μετρήσεις που καταγράφηκαν από τη διεξαγωγή της άσκησης επεξεργάζονται και αναλύονται σε αυτήν την παράγραφο.

### 2.6.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη

Σκοπός αυτής της άσκησης είναι η παραγωγή και η μέτρηση υψηλής εναλλασσόμενης τάσης και για να τον πετύχουμε θα ακολουθήσουμε τη διάταξη που απεικονίζεται στα σχήματα 2.10 (α) και (β).

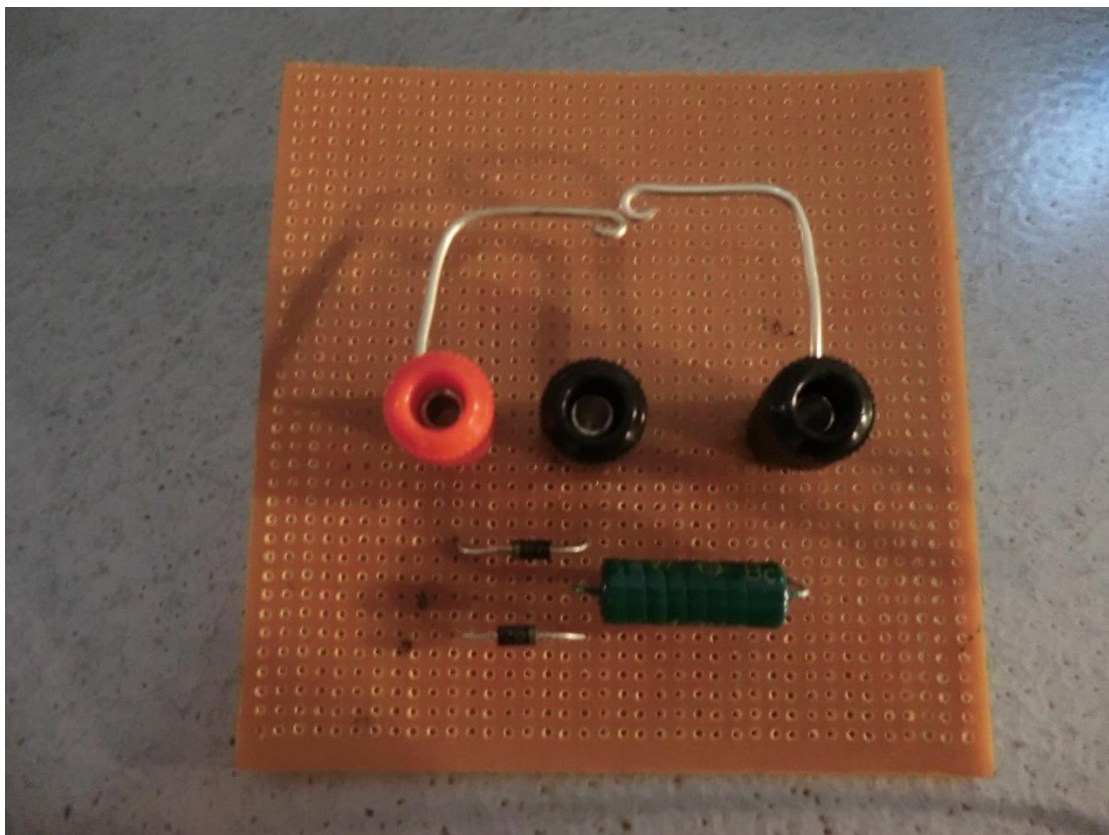


Σχήμα 2.10 : (α) Πειραματική διάταξη συνδεδεμένη με το βολτόμετρο μεγίστου SM, (β) Πειραματική διάταξη συνδεδεμένη με τη συσκευή C-F

- Όπου
- T : μετασχηματιστής δοκιμής με λόγο μετασχηματισμού  $220V/100kV$  και ονομαστική ισχύ 5kVA
  - $R_{\pi}$  : αντίσταση προστασίας, 50k $\Omega$
  - CM: πυκνωτής μέτρησης υψηλής τάσης, 100pF
  - SM: βολτόμετρο μεγίστου. Η σύνδεση με το CM γίνεται μέσω ομοαξονικού καλωδίου. Εντός του βολτομέτρου υπάρχει ενσωματωμένος πυκνωτής  $C_2 = 200nF$
  - OSC: παλμογράφος
  - KF: σφαιρικό Διάκενο, με διάμετρο D=100 mm
  - kV: ηλεκτροστατικό Βολτόμετρο
  - C-F : συσκευή που περιέχει τη διάταξη Chubb-Fortescue
  - OR: σπινθηριστής
  - $\mu A$ : μικρο-αμπερόμετρο κινητού πηνίου
  - R: αντίσταση Προστασίας, 1k $\Omega$
  - D1,D2: δίοδοι



Σχήμα 2.11 : Φωτογραφία πειραματικής διάταξης από το εργαστήριο



Εικόνα 2.12 : Διάταξη Chubb-Fortescue που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της άσκησης

### 2.6.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων

Αρχικά δίνουμε τάση από την τροφοδοσία του δικτύου μέσω σταθεροποιητή (ώστε να μειώνονται οι διακυμάνσεις του δικτύου) στην τράπεζα χειρισμών (δηλαδή στον αυτομετασχηματιστή (ΑΜΣ)).

Για διαστήματα  $s = 10, 20, 30, 40, 50\text{mm}$  η τάση διάσπασης του σφαιρικού διακένου θα πρέπει να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τις παρακάτω μεθόδους :

- Μέθοδος I : Υπολογίζεται η τάση διάσπασης  $\hat{V}_d$  από τον πίνακα 2.2.
- Μέθοδος II : Υπολογίζεται απευθείας η rms τιμή της εναλλασσόμενης τάσεως  $V_{2rms}$  μέσω μέτρησης με ηλεκτροστατικό βολτόμετρο.
- Μέθοδος III : Υπολογίζεται η rms τιμή της εναλλασσόμενης τάσης  $\hat{V}_2/\sqrt{2}$  μέσω μέτρησης με χωρητικό καταμεριστή, το όργανο καταγραφής είναι το βολτόμετρο μεγίστου SM που καταγράφει την χαμηλή εναλλασσόμενη τάση  $u(V)$  πάνω στον πυκνωτή  $C_2$ , ο οποίος είναι ενσωματωμένος στο βολτόμετρο.
- Μέθοδος IV : Υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης τάσης  $\hat{V}_2$  σύμφωνα με τη μέθοδο Chubb-Fortescue και τη βοήθεια της συσκευής C-F.
- Μέθοδος V : Ο πιο απλός τρόπος για τον υπολογισμό της υψηλής εναλλασσόμενης τάσης  $V_{2rms}$  είναι η καταγραφή του  $V_1$  μέσω βολτομέτρου συνδεδεμένου στην τράπεζα ελέγχου και ο πολλαπλασιασμός της τιμής αυτής με τον λόγο μετασχηματισμού  $a = 220V/100kV$ .

Για κάθε  $s$  έγιναν πέντε μετρήσεις, ώστε να υπολογιστεί τελικά η μέση τιμή των καταγραφών και η τυπική απόκλιση για τη σύγκριση των μεθόδων.

Μέση τιμή :

$$x_{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.24)$$

Τυπική απόκλιση :

$$S' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\mu})^2}{n}} \quad (2.25)$$

όπου  $x_i$ : εκάστοτε μέτρηση  
 $n$  : πλήθος μετρήσεων

Πίνακας 2.10 : Καταγραφή εργαστηριακών μετρήσεων για s=10mm

s(mm)	10						
Μετρήσεις	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	$V_{\mu}$	$S'$
Τάση 1 <sup>οντός</sup> $V_1(V)$	52	47,2	45,5	46,7	49	48,08	2,26
Μέθοδος II $V_{2rms}(kV)$	24,4	22,2	21,6	22,4	23	22,72	0,95
Μέθοδος III $\widehat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$	22	19,43	19,79	20,15	20,32	20,34	0,89
Μέθοδος IV $I_c(\mu A)$	295	300	298	295	290	295,6	3,38

Πίνακας 2.11 : Καταγραφή εργαστηριακών μετρήσεων για s=20mm

s(mm)	20						
Μετρήσεις	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	$V_{\mu}$	$S'$
Τάση 1 <sup>οντός</sup> $V_1(V)$	84,4	80	82,7	79,9	80,2	81,44	1,81
Μέθοδος II $V_{2rms}(kV)$	41,1	38,5	40	39	39,2	39,56	0,91
Μέθοδος III $\widehat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$	37,6	34,78	36,37	35,7	34,52	35,80	1,12
Μέθοδος IV $I_c(\mu A)$	540	520	560	550	560	546	14,97

Παρατηρήθηκε φαινόμενο Corona στον αγωγό που χρησιμοποιούνταν για τη σύνδεση του ηλεκτροστατικού βολτομέτρου με το κύκλωμα. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκαν τριγμοί πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή της τάσης περίπου 120V τάση πρωτεύοντος, άρα 54,55kV υψηλή εναλλασσόμενη τάση δευτερεύοντος, οπότε και αποφασίστηκε να αλλάξει ο αγωγός και να χρησιμοποιηθεί ένας άλλος μεγαλύτερης ακτίνας. Καθώς το ηλεκτρικό πεδίο του αγωγού δίνεται από τη σχέση :

$$E = \frac{V}{r \cdot \ln \frac{2H}{r}} \quad (2.26)$$

- όπου
- V : τάση του αγωγού της γραμμής
  - r : ακτίνα του αγωγού της γραμμής
  - H : ύψος του αγωγού από το έδαφος

Οπότε με αύξηση της ακτίνας μειώνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αγωγό. Πράγμα που παρατηρήσαμε και εμείς, αφού οι χαρακτηριστικοί τριγμοί σταμάτησαν.



Πίνακας 2.12 : Καταγραφή εργαστηριακών μετρήσεων για s=30mm

s(mm)	30						
Μετρήσεις	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	$V_{\mu}$	$S'$
Τάση 1 <sup>οντός</sup> $V_1(V)$	126	126,8	115,3	118,9	130,7	123,54	5,61
Μέθοδος II $V_{2rms}(kV)$	58	58,1	54,5	54,8	59,6	57	2,00
Μέθοδος III $\widehat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$	54,04	54,2	50,8	51,46	54,25	52,95	1,50
Μέθοδος IV $I_c(\mu A)$	768	776	797	798	778	783,3	11,99

Πίνακας 2.13 : Καταγραφή εργαστηριακών μετρήσεων για s=40mm

s(mm)	40						
Μετρήσεις	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	$V_{\mu}$	$S'$
Τάση 1 <sup>οντός</sup> $V_1(V)$	158,6	155,5	153,2	157,4	154,8	155,9	1,91
Μέθοδος II $V_{2rms}(kV)$	76	74	73,8	75	74,2	74,6	0,81
Μέθοδος III $\widehat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$	68	64,8	66,8	67,98	67	66,92	1,17
Μέθοδος IV $I_c(\mu A)$	947	1002	995	1001	988	986,6	20,42

Πίνακας 2.14 : Καταγραφή εργαστηριακών μετρήσεων για s=50mm

s(mm)	50						
Μετρήσεις	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	$V_{\mu}$	$S'$
Τάση 1 <sup>οντός</sup> $V_1(V)$	179,2	174	156,5	174,1	182,1	173,18	8,89
Μέθοδος II $V_{rms}(kV)$	85,4	84	75	83,5	87	82,98	4,17
Μέθοδος III $\widehat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$	73,66	72,4	64,7	75,35	78,4	72,90	4,57
Μέθοδος IV $I_c(\mu A)$	1032	1014	965	1036	1026	1014,6	25,89

Οι συνθήκες του πειράματος τη μέρα διεξαγωγής του (9/1/2013) φαίνονται στο παρακάτω πίνακα και υπολογίστηκαν με τη βοήθεια ειδικών οργάνων, βαρομέτρου, θερμομέτρου και υγρασιόμετρου αντίστοιχα :

Πίνακας 2.15

Πίεση P(mbar)	1000	Θερμοκρασία T(°C)	22	Υγρασία(%)	26
------------------	------	----------------------	----	------------	----



### 2.6.3 Απαντήσεις στα Ερωτήματα

(α) Να εξηγηθεί ο λόγος χρήσης αυτομετασχηματιστή και να περιγραφεί η λειτουργία του.

#### Απάντηση

Οι αυτομετασχηματιστές αποτελούνται από ένα πηνίο με σιδηροπυρήνα, το οποίο διαθέτει μία ή περισσότερες λήψεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τάση που λαμβάνεται ανάμεσα σε μία λήψη και ένα κοινό σημείο να είναι μικρότερη από την τάση εισόδου, έτσι πετυχαίνουμε υποβιβασμό τάσης. Για ανύψωση τάσης κάνουμε την αντίστροφη διαδικασία, τροφοδοτούμε τον αυτομετασχηματιστή από το τύλιγμα λήψης και ένα κοινό σημείο και παίρνουμε μεγαλύτερη τάση στα δύο άκρα του.

Αν η λήψη του αυτομετασχηματιστή είναι μεταβλητή, τότε θα παίρνουμε διάφορες τάσεις στην έξοδό του και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται στα πειράματά μας, έτσι ώστε να έχουμε μια διακύμανση των τιμών της τάσης που μπορούμε να λάβουμε από 0 έως 230V.

Το πλεονέκτημα που έχει αυτός ο μετασχηματιστής είναι ότι είναι φτηνότερος σε κόστος, διότι διαθέτει μόνο ένα τύλιγμα οπότε για την κατασκευή του απαιτείται λιγότερος χαλκός, καθώς επίσης και λιγότερο σιδηρομαγνητικό υλικό. Ακόμα ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματά του είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης που έχει.

(β) Στον πίνακα 2.9 αφού γίνει η επεξεργασία των τιμών των εργαστηριακών καταγραφών υπολογίζεται η rms τιμή της υψηλής εναλλασσόμενης τάσης  $V_{2rms}(kV)$  για κάθε μέθοδο, ώστε να μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

#### Απάντηση

#### Μέθοδος I

Η μέθοδος I χρησιμοποιεί τον πίνακα 2.2 του σφαιρικού διακένου για την καταγραφή των θεωρητικών τιμών της υψηλής εναλλασσόμενης τάσης. Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας :

Πίνακας 2.16 : Θεωρητικές τιμές από πίνακα 2.2

s(mm)	10	20	30	40	50
$\hat{V}_{d0}(kV)$	31,7	59	84	105	123

Δύο άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την τάση διασπάσεως του διακένου είναι η πυκνότητα του αέρα και η ποσότητα υδρατμών που περιέχεται σε αυτόν. Συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του αέρα και όσο περισσότερους υδρατμούς περιέχει τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση διασπάσεως. Οι τιμές διασπάσεως που δίνονται στον πίνακα 2.2 αναφέρονται σε θερμοκρασία  $T=20^{\circ}C$ , πίεση  $P=101,3kPa$  (760mmHg) και περιεκτικότητα υδρατμών  $8,5g/m^3$ .

Αν η πραγματική πυκνότητα του αέρα διαφέρει από τις συνθήκες αναφοράς πρέπει να αναγάγουμε τις τιμές αυτού του πίνακα στις πραγματικές συνθήκες.

Ισχύει η σχέση (2.11)  $V_d = k_d \cdot V_{d0}$ , όπου  $V_{d0}$  οι τάσεις διασπάσεως από πίνακα 2.2 και  $k_d$  είναι ο δείκτης που προκύπτει από τη σχέση (2.12) :  $k_d = \delta \cdot k$

Ο διορθωτικός συντελεστής πυκνότητας αέρα  $\delta$  ορίζεται από τη σχέση (2.13):

$$\delta = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{273+T_0}{273+T}$$

Όπου  $P_0 = 101,3kPa$  και  $T_0 = 20^\circ C$ , ενώ τα μεγέθη T,P αναφέρονται στις συνθήκες του πειράματος.

Ενώ ο διορθωτικός συντελεστής υγρασίας ορίζεται από τη σχέση (2.14):

$$k = 1 + 0,002 \cdot \left(\frac{h}{\delta} - h_0\right)$$

όπου  $h_0 = 8,5 \text{ g/m}^3$  και  $h$  να αναφέρεται στις συνθήκες του πειράματος.

Στην **προκειμένη περίπτωση** οι συνθήκες του πειράματος (9/1/2013) ήταν :

$$P = 1000mbar \stackrel{1}{\Rightarrow} 100kPa, T = 22^\circ C, 26\% \text{ υγρασία} \stackrel{2}{\Rightarrow} 5,04 \text{ g/m}^3$$

Άρα :

$$\delta = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{273 + T_0}{273 + T} = \frac{100}{101,3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + 22} = 0,98$$

και

$$k = 1 + 0,002 \cdot \left(\frac{h}{\delta} - h_0\right) = 1 + 0,002 \cdot \left(\frac{5,04}{0,98} - 8,5\right) = 0,993$$

Οπότε από τη σχέση (2.12) προκύπτει πως :  $k_d = \delta \cdot k = 0,973 \cong 0,97$ .

Από τη σχέση (2.11) προκύπτει ο πίνακας 2.17 :

**Πίνακας 2.17 : Οι τιμές του πίνακα 1.2.6 ανηγμένες σε περιβαλλοντικές συνθήκες**

s(mm)	10	20	30	40	50
$\hat{V}_d(kV)$	30,75	57,23	81,48	101,85	119,30

Τέλος, επειδή οι τιμές που παίρνουμε από τον πίνακα 2.2 αντιστοιχούν σε μέγιστες τιμές της τάσης, θα διαιρέσουμε με  $\sqrt{2}$  για να πάρουμε τις rms τιμές της τάσης, οπότε:

**Πίνακας 2.18. : Τελικές τιμές μεθόδου I**

s(mm)	10	20	30	40	50
$\hat{V}_d/\sqrt{2} (kV)$	21,75	40,61	57,62	72,02	84,36

<sup>1</sup>  $1Pa = 10^{-5}bar$

<sup>2</sup> <http://www.cactus2000.de/uk/unit/masshum.shtml>

### Μέθοδος IV

Ισχύει η εξίσωση (2.19) :  $I_C = 2 \cdot f \cdot C \cdot V_{max}$  ,

- όπου  $I_C$ : μέση τιμή του ρεύματος για το χρονικό διάστημα μιας περιόδου  
 $C$ : αντιστοιχεί στον CM που είναι πυκνωτής μέτρησης υψηλής τάσης, 100pF  
 $f$ : συχνότητα 50 Hz  
 $V_{max}$ : μέγιστη τιμή υψηλής εναλλασσόμενης τάσης

Οπότε τελικά η μέγιστη τιμή της υψηλής εναλλασσόμενης τάσης δίνεται από τη σχέση:

$$V_{max}(V) = \hat{V}_2 = \frac{I_C}{2 \cdot f \cdot CM} = \frac{I_C(\mu A)}{10^{-8}} \quad (2.25)$$

Πίνακας 2.19 : Τιμές μεθόδου IV

s(mm)	10	20	30	40	50
$I_C(\mu A)$	295,60	546	783,3	986,6	114,6
$\hat{V}_2(kV)$	29,60	54,60	78,33	98,7	101,5
$\hat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$	20,93	38,60	55,38	69,76	71,74

Το ζητούμενο αυτού του ερωτήματος είναι ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας :

Πίνακας 2.20 : Συγκεντρωτικός πίνακας rms τιμών εναλλασσόμενων υψηλών τάσεων

s(mm)	10	20	30	40	50
<b>Μέθοδος I</b> $\hat{V}_d/\sqrt{2} (kV)$	21,75	40,61	57,62	72,02	84,36
<b>Μέθοδος II</b> $V_{2rms} (kV)$	22,72	39,56	57	74,60	82,98
<b>Μέθοδος III</b> $\hat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$	20,34	35,80	52,95	66,92	72,90
<b>Μέθοδος IV</b> $\hat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$	20,93	38,60	55,38	69,76	71,74
<b>Μέθοδος V</b> $\alpha \cdot V_1(kV)$	21,85	37,02	56,15	70,86	78,72

(γ) Ποια μέθοδος μέτρησης εναλλασσόμενης τάσης είναι πιο ακριβής στις παρούσες συνθήκες και γιατί;

**Απάντηση**

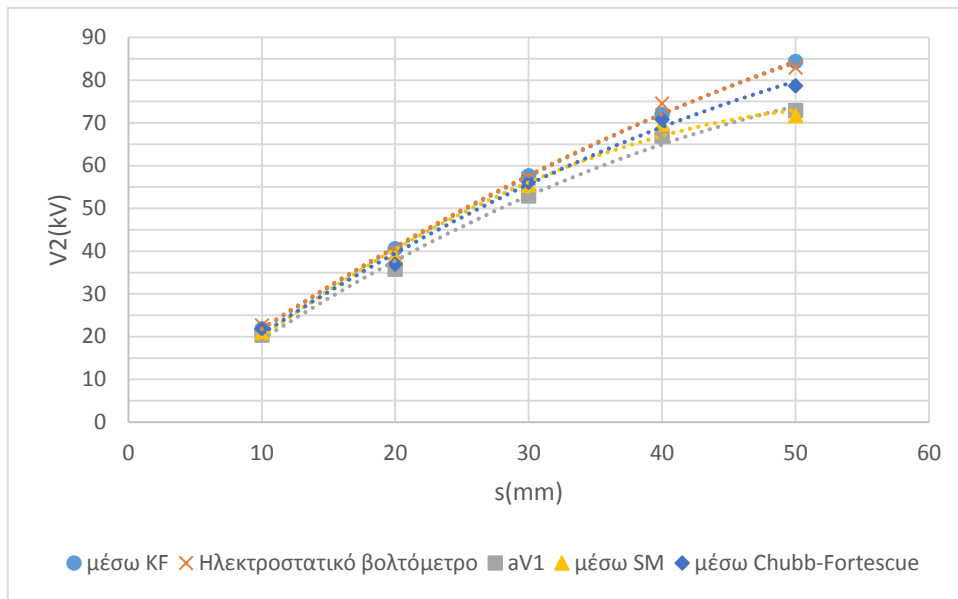
Θεωρούμε πως πιο ασφαλής μέθοδος υπολογισμού είναι η καταγραφή της υψηλής εναλλασσόμενης τάσης μέσω του βολτόμετρου μεγίστου SM, γιατί η καταγραφή των μετρήσεων γίνεται ψηφιακά και αν και υπάρχουν απώλειες εξαιτίας παράσιτων επαγωγών και διηλεκτρικών απωλειών πάνω στους πυκνωτές δεν είναι τόσο σημαντικές. Ενώ:

- Η μέθοδος I υπολογίζεται από πίνακες, οπότε να μην είναι θεωρητική, αλλά η τιμή διασπάσεως ενός διακένου δεν έχει απόλυτα καθορισμένη τιμή και παρουσιάζει στατιστική διασπορά που εξαρτάται από τη γεωμετρική μορφή του διακένου, τη μορφή της τάσεως, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τη σκόνη και άλλους παράγοντες. Επομένως δεν μπορούμε να στηριχτούμε απόλυτα σε αυτή τη διαδικασία υπολογισμού της τάσης.
- Η μέθοδος II δεν είναι απόλυτα αξιόπιστη, γιατί μπορεί να υπάρχει σφάλμα ανάγνωσης καθώς η ανάγνωση γίνεται με το μάτι, οπότε δε είναι απόλυτα ακριβής.
- Η μέθοδος IV δεν επιλέγεται καθώς θεωρούμε πως οι δίοδοι εισάγουν σφάλματα λόγω των ατελειών τους και έτσι η υποδιαίρεση του ρεύματος  $i_c(t)$  δε γίνεται με μεγάλη ακρίβεια.
- Η μέθοδος V δεν προτιμάται, καθώς κατά τη μέθοδο αυτή θεωρούμε το μετασχηματιστή ιδανικό και λαμβάνουμε υπόψη μας μόνο το λόγο μετασχηματισμού  $\alpha$ , ενώ αγνοούμε τις απώλειες και τις αντίστοιχες πτώσεις τάσεως.

(δ) Να παρουσιαστούν σε ένα κοινό διάγραμμα οι τάσεις  $V_{2rms}(kV)$  που προέκυψαν από τις πέντε μεθόδους καταγραφής ως προς το διάκενο  $s(mm)$ .

**Απάντηση**

Από το διάγραμμα του σχήματος 2.13 παρατηρούμε πως στις μικρές τιμές του διακένου οι μετρήσεις από τις διάφορες μεθόδους σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους, ενώ στην πορεία αποκλίνουν. Αυτή η απόκλιση είναι λογική, καθώς οι διάφορες μέθοδοι μέτρησης παρουσιάζουν διαφορετική ακρίβεια στην καταγραφή των μετρήσεων (ερώτημα γ). Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως όσο το μήκος του διακένου αυξάνεται η ακρίβεια των μετρήσεων μειώνεται περισσότερο για τη μέθοδο καταγραφής με το διάκενο των σφαιρών και τη μέθοδο του ηλεκτροστατικού βολτομέτρου σε σχέση με τις υπόλοιπες. Στην περίπτωση του διακένου σφαιρών πρέπει το μήκος του διακένου  $s$  και η διάμετρο των σφαιρών  $D$  να μην είναι συγκρίσιμα μεγέθη, αλλά όσο το  $s$  αυξάνεται αυτή η προϋπόθεση ισχύει όλο και λιγότερο. Στην περίπτωση του ηλεκτροστατικού βολτομέτρου καθώς το μήκος του διακένου  $s$  αυξάνεται, αυξάνεται και η τάση διάσπασης, οπότε αναγκάζομαστε να αλλάξουμε τη βαθμονομημένη κλίμακα μέτρησης, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούμε κλίμακα μικρότερης ακρίβειας.



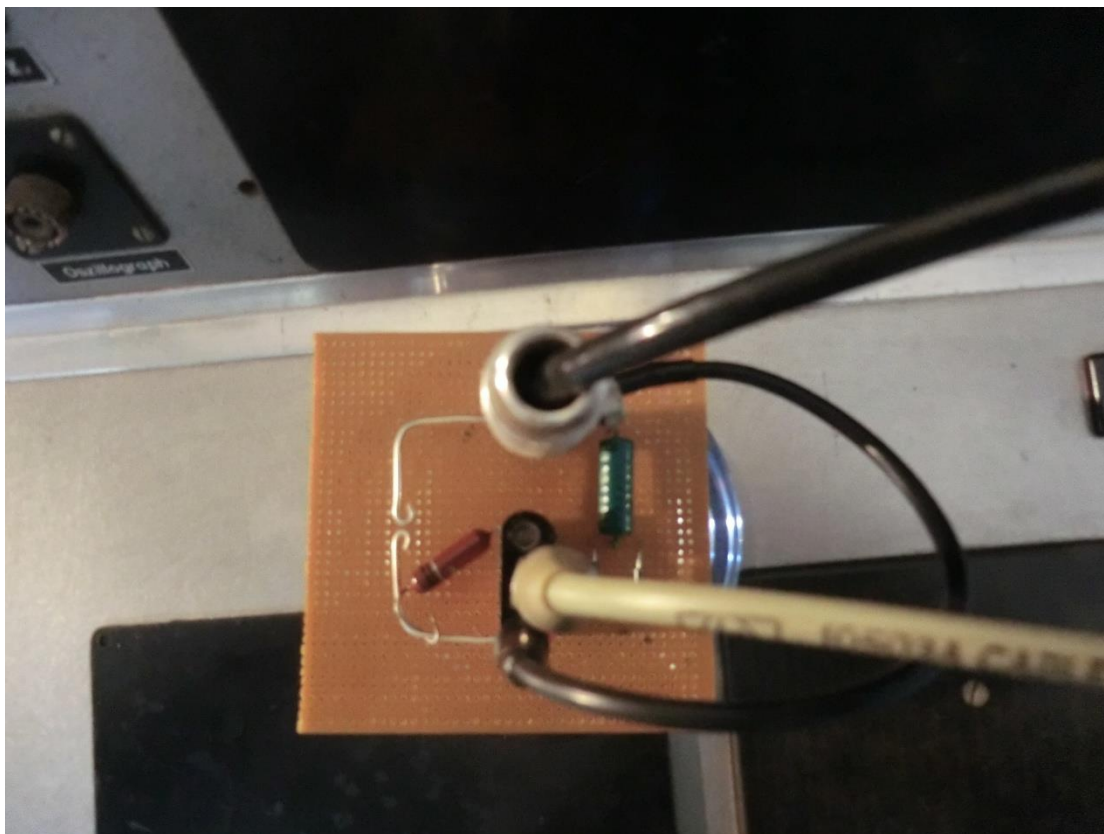
Σχήμα 2.13 : Κοινό διάγραμμα απεικόνισης των τάσεων

(ε) Να απεικονιστεί το ρεύμα  $i_c$  που καταγράφεται μέσω του μικρο-αμπερομέτρου στη μέθοδο Chubb-Fortescue συναρτήσει με το χρόνο  $t$  με τη βοήθεια του παλμογράφου της διάταξης.

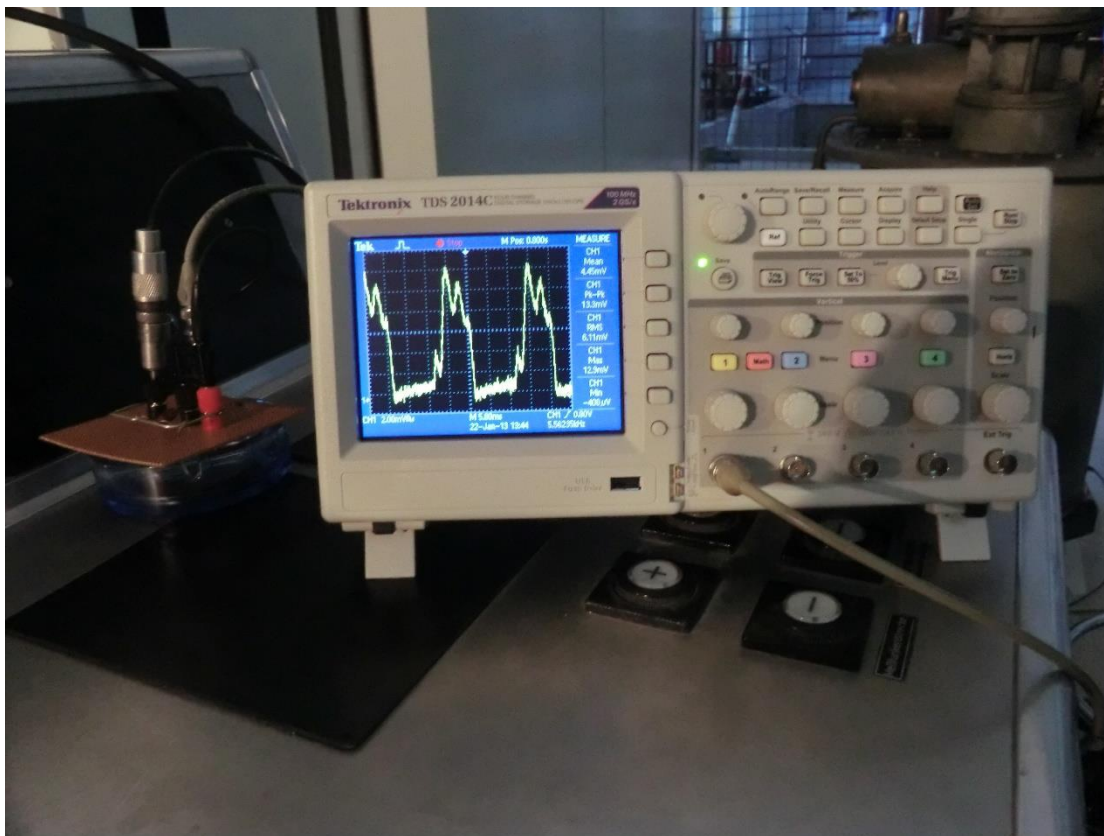
### Απάντηση

Στη διάταξη Chubb-Fortescue που κατασκευάσαμε προσθέτουμε μια αντίσταση  $R = 10\Omega$  (σχήμα 2.14), η οποία μετατρέπει την τάση που παίρνουμε στο σημείο σε ρεύμα, ώστε να έχουμε τη δυνατότητα να απεικονίσουμε την κυματομορφή του ρεύματος στο παλμογράφο, όπως αυτή διακρίνεται στα σχήματα 2.15 και 2.16.

Η κυματομορφή του σχήματος 2.16 είναι η αναμενόμενη κυματομορφή σύμφωνα με τη θεωρία (σχήμα 2.6). Αυτή η κυματομορφή ισχύει για οποιαδήποτε εναλλασσόμενη τάση, όχι απαραίτητα ημιτονοειδή, αρκεί οι δύο ημιπερίοδοι της να είναι όμοιοι και η τάση να παρουσιάζει μόνο ένα μέγιστο κατά τη διάρκεια μιας ημιπεριόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6. Στην περίπτωση που η τάση παρουσιάζει περισσότερα του ενός μέγιστα σε μια ημιπερίοδο, η φορά του χωρητικού ρεύματος αναστρέφεται και το αντίστροφο ρεύμα δε διαρρέει το αμπερόμετρο αλλά περνά μέσα από την ανάστροφη δίοδο και χάνεται. Η τάση που έχουμε εδώ είναι σχεδόν ημιτονοειδής, οπότε παρουσιάζει μόνο ένα μέγιστο εντός μιας περιόδου. Όσο η τάση αυξάνεται η δίοδος  $D_1$  άγει κανονικά και ρεύμα  $i_c(t)$  τη διαρρέει, μόλις η τάση γίνει μέγιστη η δίοδος  $D_1$  σταματάει να άγει και δεν καταγράφεται ρεύμα μέχρι μια νέα περίοδος να ξεκινήσει.

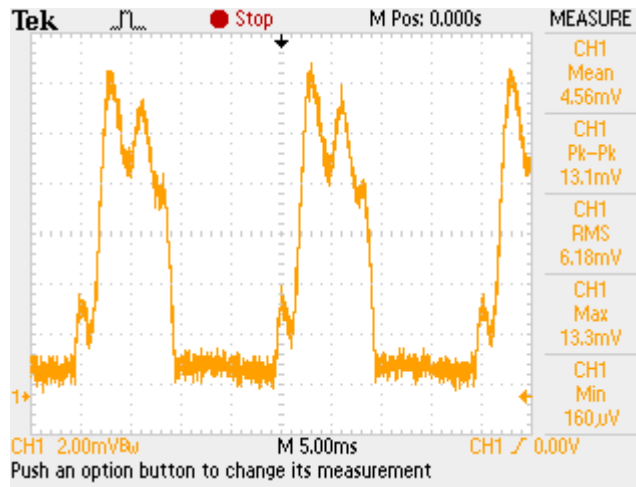


Σχήμα 2.14 : Διάταξη Chubb-Fortescue με προσθήκη  $R=10\Omega$



Σχήμα 2.15 : Σύνδεση Chubb-Fortescue στον παλμογράφο





Σχήμα 2.16 : Κυματομορφή  $i_c(t)$

(στ) Να θεωρήσετε ως μέθοδο αναφοράς την μέθοδο που θεωρήσατε ακριβέστερη στο ερώτημα (β) και να βρείτε τα σχετικά σφάλματα  $\varepsilon(\%)$  των άλλων μεθόδων ως προς τις τάσεις αναφοράς.

**Απάντηση**

Το σχετικό σφάλμα προκύπτει από τον παρακάτω τύπο :

$$\varepsilon(\%) = \left| \frac{V_{\varepsilon\kappa} - V_a}{V_a} \right| \cdot 100\% \tag{2.27}$$

Όπου  $V_{\varepsilon\kappa}$ : η εκάστοτε εξεταζόμενη μέθοδος

$V_a$ : η τάση αναφοράς που ισούται με τις τιμές που προκύπτουν από την καταγραφή με το βολτόμετρο μεγίστου SM

Σύμφωνα με την σχέση (2.27) συμπληρώνεται ο παρακάτω πίνακας :

Πίνακας 2.21 : Σχετικά σφάλματα  $\varepsilon(\%)$

<b>s(mm)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b><math>\varepsilon_I(\%)</math></b>	6,93	13,44	8,82	7,62	15,72
<b><math>\varepsilon_{II}(\%)</math></b>	11,70	10,50	7,65	11,48	13,83
<b><math>\varepsilon_{IV}(\%)</math></b>	2,90	7,80	4,59	4,24	1,59
<b><math>\varepsilon_V(\%)</math></b>	7,42	3,41	6,04	5,89	7,98

Παρατηρούμε πως τα μεγαλύτερα σχετικά σφάλματα σημειώνει το ηλεκτροστατικό βολτόμετρο. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους. Πρώτον, αυτό το όργανο μέτρησης είναι αναλογικό, οπότε υπάρχουν σφάλματα ανάγνωσης. Δεύτερον, εξαιτίας του ότι ανάλογα το επίπεδο της τάσης αλλάζουμε τη βαθμονομημένη κλίμακα μέτρησης του βολτομέτρου και ειδικά για τις μεγάλες τάσεις χρησιμοποιούνται κλίμακα μικρότερης ακρίβειας.

Αρκετά μεγάλα σφάλματα παρατηρούνται και με τη μέθοδο των σφαιρικών διακένων, οπού οι τιμές των μετρήσεων προσεγγίστηκαν θεωρητικά, οπότε λογικό είναι να υπάρχουν αποκλίσεις με τις πειραματικές μετρήσεις, καθώς όπως έχει ήδη ειπωθεί η τιμή διασπάσεως ενός διακένου δεν έχει απόλυτα καθορισμένη τιμή και παρουσιάζει στατιστική διασπορά. Επιπλέον για να παρουσιάζει αυτή η μέθοδος καλή ακρίβεια πρέπει οι τιμές της διαμέτρου των σφαιρών  $D$  και του μήκους του διακένου  $s$  να μην είναι συγκρίσιμες, πιο συγκεκριμένα να ισχύει η σχέση (2.10):  $s < D/2$ . Εδώ παρατηρούμε πως αυτή η σχέση ισχύει έστω και οριακά, αλλά με την αύξηση του διακένου  $s$  τα μεγέθη  $s$ ,  $D$  είναι όλο και πιο συγκρίσιμα.

## 2.7 Βιβλιογραφία

- [1] Dieter Kind, Kurt Feser, High-Voltage Test Techniques, Εκδόσεις Newnes, 2002
- [2] Σταθόπουλου Ι.Α., Υψηλές Τάσεις Ι, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1989
- [3] Οικονόμου Α. και Φώτη Γ., Εισαγωγή στις Υψηλές Τάσεις, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2010
- [4] John Kuffel, E. Kuffel, W. S. Zaengl, High Voltage Engineering Fundamentals, Newnes, 2000
- [5] Wadhwa C.L., High Voltage Engineering, New Age International Publisher, 2007
- [6] Naidu M.S., Kamaraju V., High Voltage Engineering, Tata McGraw-Hill Publishing Company, 2009
- [7] Οικονόμου Α., Ασκήσεις Υψηλών Τάσεων, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2011



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### *2<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση: «Παραγωγή και Μέτρηση Υψηλών Συνεχών Τάσεων»*

#### 3.1 Γενικά

Υπάρχουν διάφορες εφαρμογές των υψηλών συνεχών τάσεων τόσο στη βιομηχανία όσο και εργαστηριακά.

Χρησιμοποιούνται στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ μεγάλες αποστάσεις καθώς είναι πιο οικονομικές και παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες. Η υψηλή συνεχής τάση πλεονεκτεί στις γραμμές μεταφοράς έναντι των υψηλών εναλλασσόμενων τάσεων σε μια σειρά εφαρμογών όπως:

- Υποθαλάσσια διασύνδεση συστημάτων, όπου οι χωρητικότητες προκαλούν επιπλέον απώλειες εάν χρησιμοποιηθούν υψηλές εναλλασσόμενες τάσεις.
- Διασύνδεση συστημάτων με διαφορετική συχνότητα ή τάση λειτουργίας.
- Συγχρονισμός της εναλλασσόμενης τάσης που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Μείωση κόστους κατασκευής, αφού απαιτούνται λιγότεροι αγωγοί, μία και όχι τρεις γραμμές όπως στις εναλλασσόμενες τάσεις και οι αγωγοί εδώ είναι πιο λεπτοί καθώς δεν εμφανίζεται το επιδερμικό φαινόμενο.
- Μεταφορά ισχύος και σταθεροποίηση τάσης μεταξύ συστημάτων εναλλασσόμενης τάσης τα οποία είναι μη συγχρονισμένα.

Ακόμα βρίσκουν εφαρμογή στις δοκιμές των μεγάλου μήκους καλωδίων μεταφοράς υψηλής εναλλασσόμενης τάσης. Αυτές οι δοκιμές είναι πιο οικονομικές και εύκολες σε σχέση με αυτές που θα χρησιμοποιούσαν εναλλασσόμενη τάση, καθώς η μεγάλη χωρητικότητα αυτών των καλωδίων θα καταναλώσει πολύ ρεύμα στη δεύτερη περίπτωση. Βέβαια, υπάρχει ο κίνδυνος η αξιοπιστία των δοκιμών να είναι κάπως μειωμένη καθώς η κατανομή των τάσεων εντός του μονωτικού υλικού θα είναι διαφορετική από ότι σε κανονικές συνθήκες όπου το καλώδιο μεταφέρει ισχύ υπό χαμηλή συχνότητα και εναλλασσόμενη τάση.

Επίσης, χρησιμοποιούνται στην πυρηνική φυσική για την επιτάχυνση των σωματιδίων, κατά τη χρήση των ακτινών X στην ιατρική, στις τηλεπικοινωνίες και σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως τα ηλεκτροστατικά φίλτρα σε καμινάδες εργοστασίων για περιορισμό της ρύπανσης.

Σύμφωνα με το πρότυπο 4-1995 της IEEE, η τιμή μιας συνεχούς τάσης δοκιμής ορίζεται ως η αριθμητική μέση τιμή αυτής:

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \quad (3.1)$$

Όπου  $T$  είναι ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα εάν η τάση  $V(t)$  δεν είναι σταθερή αλλά ταλαντώνεται περιοδικά με συχνότητα  $f = 1/T$ .

Οι τάσεις δοκιμής που παράγονται με τη βοήθεια ανορθωτών δεν είναι ποτέ συνεχείς κατά πλάτος. Οι τάσεις αποκλίνουν από τη μέση τιμή περιοδικά και αυτή η απόκλιση ονομάζεται κυμάτωση (ripple). Η κυμάτωση τάσης συμβολίζεται με  $\delta V$  και ορίζεται ως το μισό της διαφοράς ανάμεσα στη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της τάσης:

$$\delta V = \frac{1}{2}(V_{max} - V_{min}) \quad (3.2)$$

Ο παράγοντας κυμάτωσης (ripple factor) είναι ο λόγος του πλάτους της κυμάτωσης  $\delta V$  προς την αριθμητική μέση τιμή  $\bar{V}$ :

$$ripple\ factor = r.f. = \frac{\delta V}{\bar{V}} \quad (3.3)$$

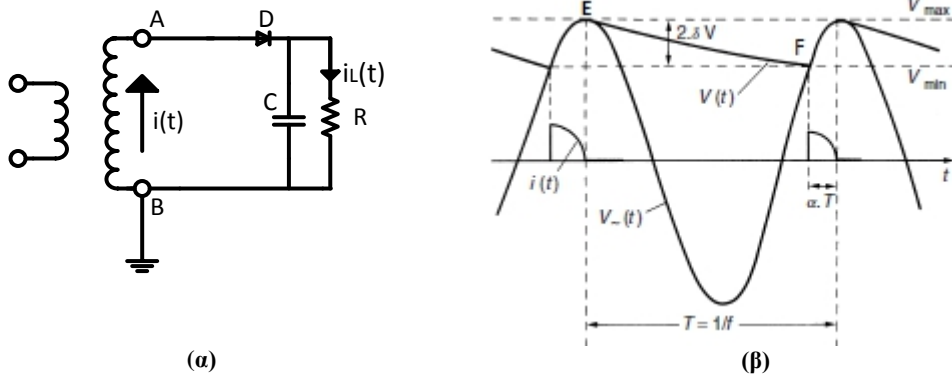
Για τάσεις δοκιμών αυτός ο παράγοντας πρέπει να είναι μικρότερος από 3% , εκτός και αν ορίζεται διαφορετικά από τα δεδομένα της εκάστοτε εφαρμογής [4].

### 3.2 Παραγωγή υψηλών συνεχών τάσεων

Η παραγωγή υψηλών συνεχών τάσεων γίνεται κατά κύριο λόγο από ανόρθωση εναλλασσόμενων υψηλών τάσεων. Οι ανορθωτικές διατάξεις αποτελούνται από διόδους. Με τη σύνδεση των ανορθωτών επιτυγχάνεται η ομοιογενής κατανομή της τάσης. Για την κατασκευή των εν λόγω ανορθωτικών διατάξεων χρησιμοποιούνται πολλά στοιχεία εν σειρά.

#### 3.2.1 Διάταξη απλής ανόρθωσης

Για τάσεις έως και 200kV μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανορθωτικές διατάξεις απλής ανόρθωσης (ή μισού κύματος) και διπλής ανόρθωσης (ή πλήρους κύματος). Η πιο απλή διάταξη είναι η διάταξη του σχήματος 3.1(α). Το κύκλωμα αποτελείται από ένα μετασχηματιστή δοκιμής που χρησιμοποιείται για την παραγωγή υψηλών εναλλασσόμενων τάσεων, ο οποίος ακολουθείται από μία ανορθωτική diode  $D_1$  και μια αντίσταση  $R$ , η οποία φορτίζεται μέσω του ανορθωτή. Επίσης στο σχήμα 3.1(α) απεικονίζεται και πυκνωτής εξομάλυνσης  $C$ , που συνδέεται παράλληλα με την  $R$ . Ο πυκνωτής αυτός πιθανόν και να λείπει. Στην περίπτωση φόρτισης μόνο της αντίστασης  $R$  (απουσία του  $C$ ) η diode  $D_1$  (που θεωρείται ιδανική) άγει μόνο κατά τη θετική ημιπερίοδο της τάσης, ενώ κατά την αρνητική ημιπερίοδο της τάσης θεωρείται πως έχει άπειρη αντίσταση και δεν άγει.



Σχήμα 3.1: (α) Διάταξη απλής ανόρθωσης, (β) Τάση εξόδου με πυκνωτή εξομάλυνσης [4]

Υποθέτοντας ιδανικό μετασχηματιστή και αμελητέα εσωτερική αντίσταση διόδου κατά την αγωγή της διόδου ο πυκνωτής C φορτίζεται στην  $V_{max}$  της  $V_{\sim}(t)$ . Αν τώρα υποθέσουμε ότι δε συνδέεται κανένα φορτίο, η συνεχής τάση κατά μήκος του πυκνωτή παραμένει σταθερή ενώ η τάση παροχής ταλαντώνεται ανάμεσα στις τιμές  $\pm V_{max}$ . Ενώ κατά τη διάρκεια της αρνητικής ημιπεριόδου το δυναμικό του σημείου A γίνεται  $-V_{max}$ , οπότε η διάδος πρέπει να διαστασιολογηθεί για να αντέχει μια μέγιστη τάση αναστροφής ίση με  $2V_{max}$ .

Παρουσία φορτίου η τάση εξόδου δεν παραμένει σταθερή, αλλά παρουσιάζεται κυμάτωση της τάσης. Μετά το σημείο E (σχήμα 3.1(β)) η τάση παροχής γίνεται μικρότερη από την τάση του πυκνωτή και η διάδος σταματάει να άγει. Ο πυκνωτής δεν μπορεί να εκφορτίσει προς την πλευρά του εναλλασσόμενου κυκλώματος εξαιτίας της μονόδρομης δράσης της διόδου. Οπότε το ρεύμα τώρα ρέει από την εκφόρτιση του πυκνωτή προς το φορτίο. Ενώ μειώνεται η ενέργεια του πυκνωτή εξαιτίας της εκφόρτισης, μειώνεται και η τάση του με βαθμό ανάλογο της σταθεράς χρόνου  $C \cdot R$  του κυκλώματος και φθάνει στο σημείο F περίπου ίση με  $V_{min}$ .

Μετά το F η τάση παροχής ξαναγίνεται μεγαλύτερη από την τάση του πυκνωτή, οπότε η διάδος ξεκινά να άγει πάλι και ο πυκνωτής φορτίζεται ξανά με  $V_{max}$ , οπότε και παρέχεται πάλι ρεύμα στο φορτίο. Αυτός ο δεύτερος παλμός είναι μικρότερης διάρκειας από τον πρώτο καθώς συνεισφέρει στην ανάκτηση όσης ενέργειας χάθηκε από τον πυκνωτή C κατά την αρνητική ημιπερίοδο. Επιπλέον, ενώ ο παλμός ρεύματος της διόδου διαρκεί πολύ λιγότερο από μια ημιπερίοδο, το φορτίο δε μένει ποτέ χωρίς ρεύμα καθώς λαμβάνει συνεχώς ρεύμα από τον πυκνωτή [5].

Η μέγιστη τάση εξόδου  $V_{max}$  στα άκρα του πυκνωτή C δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{max} = \sqrt{2}V_{\sim} \quad (3.4)$$

Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου εναλλασσόμενου ρεύματος το φορτίο Q που μεταφέρεται στην αντίσταση R ισούται με:

$$Q = \int_T i_L(t) dt = \frac{1}{R} \int_T V(t) dt = I \cdot T = \frac{I}{f} \quad (3.5)$$

Όπου I: η μέση τιμή του ρεύματος  $i_L$  της d.c. εξόδου

$V(t)$ : η συνεχής τάση, η οποία περιλαμβάνει κυμάτωση όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1(β)

Υποθέτοντας πως η τάση του πυκνωτή ισούται με  $V$  και μειώνεται από μια ποσότητα  $dV$  σε χρόνο  $dt$ , τότε το φορτίο που μεταφέρεται από τον πυκνωτή σε αυτό το χρονικό διάστημα είναι:

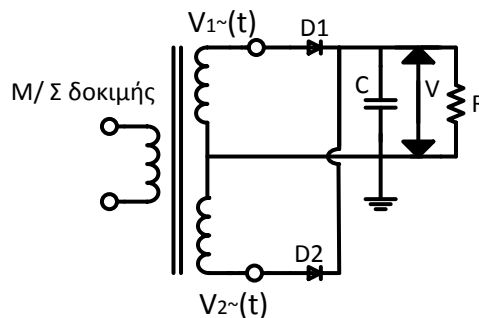
$$dQ = C dV \Rightarrow \int dQ = \int_{V_{max}}^{V_{min}} C dV = -C \cdot (V_{max} - V_{min}) \xrightarrow{\text{κατά μέτρο}} Q = C \cdot (V_{max} - V_{min}) \xrightarrow{(3.2)} \frac{Q}{2} = C \cdot \delta V \xrightarrow{(3.5)} \delta V = \frac{I}{2 \cdot f \cdot C} \quad (3.6)$$

Από τη σχέση (3.6) φαίνεται πως το γινόμενο  $f \cdot C$  αποτελεί σημαντικό σχεδιαστικό παράγοντα για τους ανορθωτές. Όσο μεγαλύτερη η συχνότητα παροχής και το μέγεθος του πυκνωτή εξομάλυνσης τόσο μικρότερη η κυμάτωση της d.c. εξόδου [5].

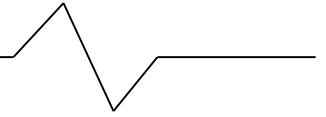
Η παραπάνω διάταξη παρουσιάζει δύο βασικά μειονεκτήματα. Πρώτον, το μέγεθος του κυκλώματος είναι πολύ μεγάλο αν υψηλές d.c. τάσεις επιθυμούνται. Δεύτερον, ο μετασχηματιστής ίσως κορεστεί αν το πλάτος του d.c. ρεύματος είναι συγκρίσιμο με το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή [5].

### 3.2.2 Διάταξη διπλής ανόρθωσης

Με τη διάταξη διπλής ανόρθωσης του σχήματος 3.2 μπορεί να επιλυθεί το δεύτερο από τα παραπάνω μειονεκτήματα. Παρόλα αυτά παρατηρούνται άλλα μειονεκτήματα. Πρώτον χρησιμοποιείται μόνο το μισό της τάσης εξόδου του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και ακόμα το κόστος είναι μεγαλύτερο αφού απαιτείται η χρήση δύο διόδων. Βέβαια με αυτόν τον τρόπο παρατηρείται ανόρθωση σε όλες τις ημιπεριόδους και η κυμάτωση γίνεται ίση με το μισό της τιμής της εξίσωσης (3.2) [3]. Συγκεκριμένα σε διάρκεια μιας περιόδου  $T$  στο πρώτο μισό άγει η μία δίοδος  $D_1$  και στο δεύτερο μισό η άλλη δίοδος  $D_2$ . Αξίζει να σημειωθεί πως η πραγματική κυμάτωση θα αυξηθεί αν οι τάσεις  $V_{1\sim}(t)$  και  $V_{2\sim}(t)$  δεν είναι ακριβώς ίσες.



Σχήμα 3.2: Διάταξη διπλής ανόρθωσης



### 3.2.3 Διάταξη διπλασιασμού Greinacher

Οι διατάξεις απλής και διπλής ανόρθωσης παράγουν συνεχή τάση, η οποία είναι μικρότερη από το μέγιστο της εναλλασσόμενης τάσης. Όταν χρειάζονται υψηλότερες συνεχείς τάσεις χρησιμοποιούνται διατάξεις διπλασιασμού της τάσης, μια τέτοια διάταξη είναι η διάταξη Greinacher που απεικονίζεται στο σχήμα 3.3(α). Κατά την ημιπερίοδο κατά την οποία ο ακροδέκτης Α του δευτερεύοντος είναι αρνητικός, το ρεύμα θα διέλθει από τη δίοδο  $D_1$  για να φορτίσει τον πυκνωτή  $C_1$ . Εξαιτίας της χαμηλής σύνθετης αντίστασης της  $D_1$  και της υψηλής σύνθετης αντίστασης της  $D_2$ , δε θα διέλθει ρεύμα από το φορτίο. Κατά την επόμενη ημιπερίοδο οι δίοδοι  $D_1$  και  $D_2$  θα έχουν υψηλή και χαμηλή σύνθετη αντίσταση αντιστοίχως. Συνεπώς, η τάση που υπάρχει ήδη στο  $C_1$  συν της τάσης του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή  $V_{\sim}$  θα εφαρμοστεί επί του πυκνωτή  $C_2$  και του φορτίου. Επιγραμματικά, κατά την πρώτη ημιπερίοδο καμία τάση δεν εφαρμόστηκε στο φορτίο, ενώ κατά τη δεύτερη εφαρμόζεται διπλάσια τάση. Ο πυκνωτής  $C_2$  ενεργεί σα δεξαμενή για τη διατήρηση της τάσης επί του φορτίου κατά τις ημιπεριόδους εκείνους για τις οποίες ο  $C_1$  φορτίζεται. Ο πυκνωτής  $C_2$  επιλέγεται ώστε να μειώσει την κυμάτωση της τάσεως εξόδου σε λιγότερο του 5% της μέγιστης τιμής της, αλλά και ώστε να αντέχει την πλήρη τάση στα άκρα του [6]. Η μέγιστη τάση εξόδου  $V_{max}$  στα άκρα του  $C_2$  δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{max} = 2\sqrt{2}V_{\sim} \quad (3.7)$$

Από το σχήμα 3.3(α) παρατηρούμε πως παράλληλα στο  $C_2$  συνδέεται φορτίο  $R$ . Εάν  $I_R$  είναι το ρεύμα διαμέσου της αντίστασης κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, τότε σύμφωνα με τη λογική των σχέσεων (3.5) και (3.6) η μεταβολή του φορτίου στον πυκνωτή  $C_2$  θα είναι:

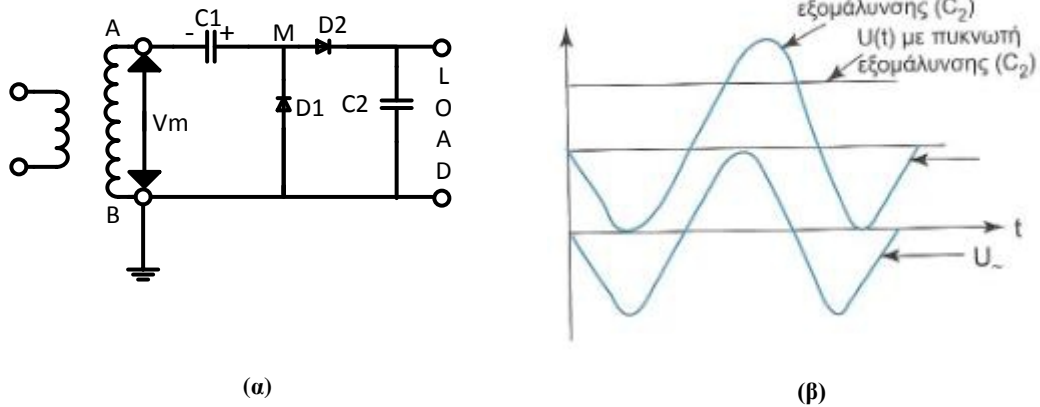
$$\delta Q = \frac{I_R}{f} \quad (3.8)$$

Άρα η κυμάτωση της τάσης  $\delta V$  θα ισούται με:

$$\delta V = \frac{\delta Q}{C} = \frac{I_R}{f \cdot C_2} \quad (3.9)$$

Οπότε κανονικά η τάση κατά μήκος του φορτίου θα είναι μικρότερη από  $2\sqrt{2}V_{\sim}$  εξαρτώμενη από την τιμή της σταθεράς χρόνου  $C_2 \cdot R$  και θα προκύπτει από τη σχέση:

$$\bar{V} = V_{max} - \delta V = 2\sqrt{2}V_{\sim} - \frac{I_R}{f \cdot C_2} \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.3: (α) Διάταξη διπλασιασμού Greinacher, (β) Η τάση εξόδου της διάταξης Greinacher [3]

Πίνακας 3.1: Συγκεντρωτικός πίνακας εξισώσεων των τάσεων συναρτήσει της RMS τιμής του  $2^{ουτος}$  του Μ/Σ

	Απλή ανόρθωση με C	Διπλή ανόρθωση	Ανόρθωση Greinacher
Μέγιστη τάση $V_{max}$	$\sqrt{2}V_{\sim}$	$\sqrt{2}V_{\sim}/2$	$2\sqrt{2}V_{\sim}$
Μέση τιμή $\bar{V}$	$\sqrt{2}V_{\sim} - \delta V$	$\sqrt{2}V_{\sim}/2$	$2\sqrt{2}V_{\sim} - \delta V$
Μέγιστη ανάστροφη τάση $V_i$	$2\sqrt{2}V_{\sim}$	$\sqrt{2}V_{\sim}$	$2\sqrt{2}V_{\sim}$

### 3.2.4 Πολυβάθμιες ανορθωτικές διατάξεις

Το κύκλωμα του σχήματος 3.4(α) ουσιαστικά αποτελεί επέκταση της διάταξης διπλασιασμού της τάσης Greinacher και είναι γνωστό ως πολυβάθμιος ανορθωτής Cockroft-Walton. Είναι η πιο σημαντική μέθοδος παραγωγής πολύ υψηλών τάσεων, γιατί για μεγάλες τιμές συνεχούς τάσης το κόστος τους είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, δεδομένου ότι ο Μ/Σ που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι μικρότερος και πιο φθηνός.

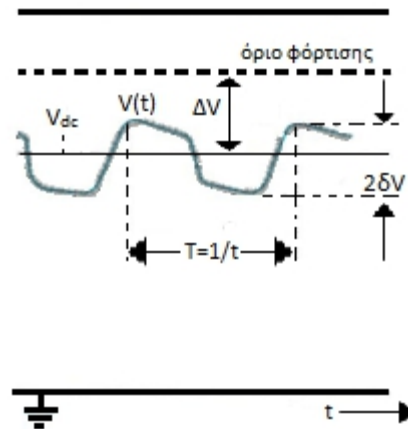
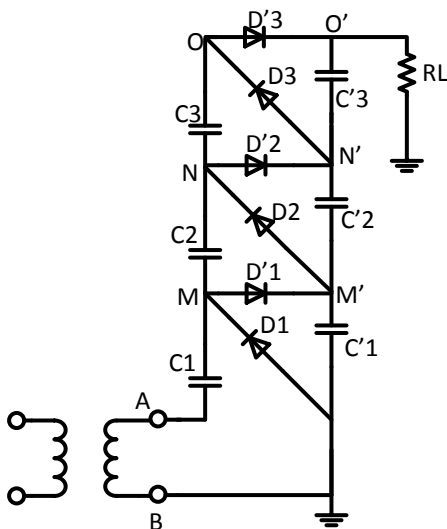
Στην περίπτωση απουσίας φορτίου [5]:

Το τμήμα ABM'MA είναι ένας ανορθωτής πανομοιότυπος με τον Greinacher και η τάση κατά μήκος του  $C_1$  γίνεται  $2 \cdot V_{max}$  όταν το δυναμικό του σημείου Μ φθάνει μια τάση ίση με  $2 \cdot V_{max}$ . Κατά τη διάρκεια της δεύτερης ημιπεριόδου όταν το Β γίνεται θετικό ως προς το σημείο Α, το δυναμικό του Μ πέφτει, ανάλογα πέφτει και το δυναμικό του Ν αφού γίνεται μικρότερο από το Μ' καθώς τότε φορτίζεται ο  $C_2$

διαμέσου της  $D_2$ . Στην επόμενη ημιπερίοδο το δυναμικό του A γίνεται θετικότερο και τα δυναμικά των N και M ανυψώνονται καθώς φορτίζεται ο  $C'_2$  διαμέσου της  $D'_2$ .

Πιο συγκεκριμένα διαπιστώνονται τα παρακάτω:

- Τα δυναμικά των κόμβων M,N,O,... συνεχίζουν να ταλαντώνονται λόγω της εναλλασσόμενης τάσης παροχής  $V(t)$ .
- Τα δυναμικά των  $M',N',O',...$  παραμένουν σταθερά ως προς το δυναμικό της γης.
- Οι τάσεις κατά μήκος όλων των πυκνωτών είναι συνεχείς με μέτρο  $2 \cdot V_{max}$  ανά στάδιο, μόνο η τάση του  $C_1$  έχει μέτρο ίσο με  $V_{max}$ .
- Η τάση εξόδου θα φθάσει μια μέγιστη τιμή ίση με  $2 \cdot n \cdot V_{max}$ , όπου n ισούται με το πλήθος των βαθμίδων.
- Εδώ τα δυναμικά των σημείων  $M',N',O'$  ισούνται αντίστοιχα με  $2 \cdot V_{max}$ ,  $4 \cdot V_{max}$  και  $6 \cdot V_{max}$ .



(α)

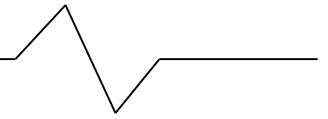
(β)

Σχήμα 3.4: (α) Πολυβάθμιος ανορθωτής, (β) Πτώση τάσης  $\Delta V$  και Κυμάτωση  $\delta V$  σε μια n-βάθμια γεννήτρια Cockcroft-Walton [3]

Στην περίπτωση παρουσίας φορτίου [6]:

Όταν η γεννήτρια φορτίζεται, η τάση εξόδου δε θα φθάσει ποτέ την τιμή  $2 \cdot n \cdot V_{max}$ . Επίσης, η τάση εξόδου θα παρουσιάσει κυμάτωση. Τότε, πρέπει να ασχοληθούμε με δύο ποσότητες την πτώση τάσης  $\Delta V$  και την κυμάτωση  $\delta V$ . Όπως προαναφέραμε υποθέτουμε ένα φορτίο Q μεταφέρεται ανά περίοδο και η μεταβολή του φορτίου πάνω σε κάθε πυκνωτή  $C'$  εξαρτάται από τη βαθμίδα και θα είναι στην προκειμένη περίπτωση:

$$\delta Q_3 = \frac{3 \cdot I_R}{f} \quad (3.11)$$



$$\delta Q_2 = \frac{2 \cdot I_R}{f} \quad (3.12)$$

$$\delta Q_1 = \frac{I_R}{f} \quad (3.13)$$

Γενικά για n βαθμίδες η μεταβολή του συνολικού φορτίου  $\delta Q$  οφειλόμενη στο ρεύμα  $I_R$  ανά περίοδο δίνεται ως το άθροισμα των επιμέρους μεταβολών:

$$\delta Q = \sum_{i=1}^n \delta Q_i \quad (3.14)$$

Η συνολική πτώση τάσης προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους πτώσεων τάσεως πάνω στους πυκνωτές  $C'$ :

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n \Delta V_i = \sum_{i=1}^n \frac{\delta Q_i}{C'} \quad (3.15)$$

Με ιδανικά στοιχεία  $C_1 = 2 \cdot C_2 = 2 \cdot C_3 = 2 \cdot C'_1 = 2 \cdot C'_2 = 2 \cdot C'_3 = 2 \cdot C$  η πτώση τάσης  $\Delta V$  είναι ίση με [3]:

$$\Delta V = \frac{I}{f \cdot C} \frac{8n^3 + 3n^2 + n}{12} \quad (3.16)$$

Παρατηρούμε πως η πτώση τάσης αυξάνεται με τον αριθμό των βαθμίδων.

Η κυμάτωση υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\delta V = \frac{I}{f \cdot C} \frac{n(n+1)}{4} \quad (3.17)$$

Τέλος, να σημειωθεί πως στο σχήμα 3.4(β) φαίνονται η πτώση τάσης  $\Delta V$  και η κυμάτωση  $\delta V$  συναρτήσεως του ορίου φόρτισης ( $n \cdot 2\sqrt{2} \cdot V_L$ ) που μπορεί να δεχθεί ένας τέτοιος ανορθωτής.

### 3.2.5 Ηλεκτροστατικές γεννήτριες – Γεννήτριες Van de Graaff

Η βασική λειτουργία των ηλεκτροστατικών γεννητριών είναι ότι ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια τα οποία κινούνται ενάντια των ηλεκτροστατικών δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά, αναπτύσσουν τάση μετατρέποντας την κινητική τους ενέργεια σε ηλεκτρική. Η αρχή λειτουργίας φαίνεται στο σχήμα 3.5, όπου ένας μονωμένος ιμάντας πλάτους  $b$  και με επιφανειακή πυκνότητα φορτίου  $\sigma$  βρίσκεται εντός ηλεκτρικού πεδίου  $E(x)$  μεταξύ δύο ηλεκτροδίων με απόσταση  $d$  [3].

Το φορτίο που έχει ένα τμήμα του ιμάντα  $dx$  είναι:

$$dq = \sigma \cdot b \cdot dx \quad (3.18)$$

Η δύναμη η οποία ασκείται πάνω στον ιμάντα είναι:

$$F = \int_0^x dF = \int_0^x E(x) dq = \sigma \cdot b \int_0^x E(x) dx \quad (3.19)$$

Εάν το ηλεκτρικό πεδίο είναι ομοιόμορφο ισχύει:



$$F = \sigma \cdot b \cdot V \quad (3.20)$$

Η ισχύς που απαιτείται για να μετακινηθεί ο ιμάντας, εάν κινείται με σταθερή ταχύτητα  $v$  είναι:

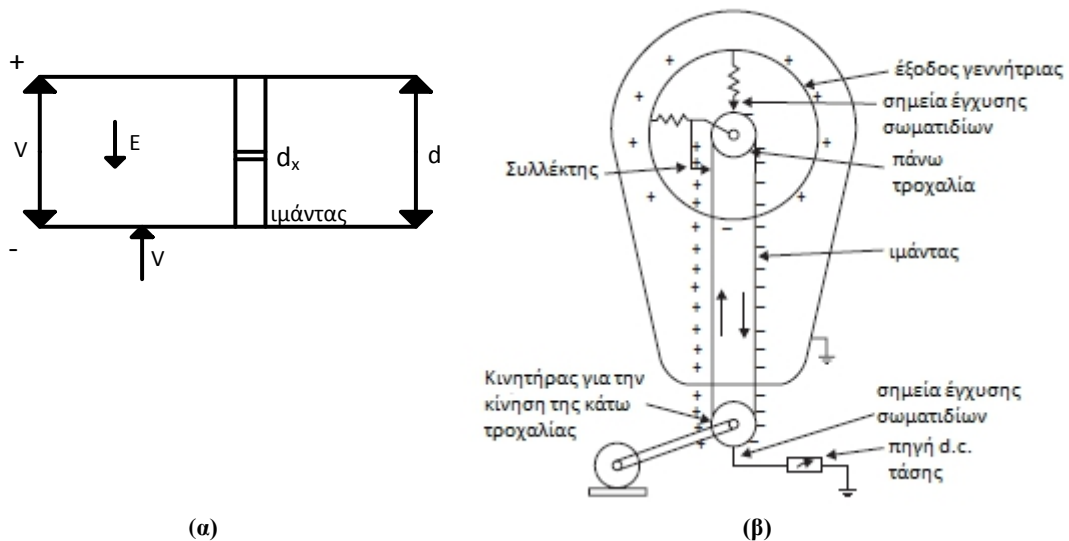
$$P = F \cdot v \quad (3.21)$$

Οπότε το αντίστοιχο ρεύμα είναι:

$$I = \frac{dq}{dt} = \sigma \cdot b \cdot v \quad (3.22)$$

και η τάση στα άκρα της γεννήτριας είναι:

$$V = I \cdot R = \sigma \cdot b \cdot v \cdot R \quad (3.23)$$



Ο πιο κοινός τύπος ηλεκτροστατικής γεννήτριας είναι η γεννήτρια Van de Graaff του σχήματος 3.5(β), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα σε εργαστήρια πυρηνικής φυσικής. Ο ιμάντας με πλάτος από μερικά cm μέχρι μερικά m κινείται με ταχύτητα 15-30m/s με τη βοήθεια ενός κινητήρα που συνδέεται στην κάτω τροχαλία. Ο ιμάντας κοντά στην κάτω τροχαλία φορτίζεται ηλεκτροστατικά από ένα μηχανισμό διέγερσης. Η «μονάδα έγχυσης φορτίου» αποτελείται από έναν αριθμό ακίδων που συνδέονται στην πηγή d.c. τάσης (10kV-100kV) έτσι ώστε η φόρτιση μεταξύ των σημείων και του ιμάντα να γίνεται με σταθερό ρυθμό. Το φορτίο μεταφέρεται στο πάνω άκρο όπου συλλέγεται από τα σημεία εκφόρτισης του ιμάντα, που είναι συνδεδεμένα στο εσωτερικό ενός μονωμένου μεταλλικού ηλεκτροδίου. Ολόκληρος ο εξοπλισμός εμπεριέχεται σε ένα γειωμένο μεταλλικό χώρο γεμάτο με μονωτικό αέριο καλής διηλεκτρικής αντοχής, π.χ. SF<sub>6</sub>, έτσι ώστε το δυναμικό του ηλεκτροδίου να μπορεί να φθάσει τιμή υψηλότερης τάσης χωρίς φαινόμενα Corona [5].

### 3.3 Μέτρηση υψηλών συνεχών τάσεων

#### 3.3.1 Μέτρηση με αμπερόμετρο και αντίσταση σε σειρά

Η διάταξη του σχήματος 3.6(α) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση συνεχών και εναλλασσόμενων υψηλών τάσεων. Στην περίπτωση συνεχών τάσεων μπορεί να μετρηθούν συνεχείς τάσεις μέχρι 300kV. Ο σπινθηριστής (OR) που φαίνεται στο σχήμα χρησιμεύει για την προστασία του αμπερομέτρου από βραχυκυκλώματα. Στην περίπτωση συνεχών τάσεων το μετρούμενο ρεύμα που διαρρέει το αμπερόμετρο πρέπει να μην ξεπερνά το 1 mA, οπότε η τάση R πρέπει να είναι της τάξεως των GΩ. Στην πράξη αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση πολλών ωμικών αντιστάσεων σε σειρά, οι οποίες μπορεί να βρίσκονται εντός μονωτικού ελαίου ή εντός αερίου υψηλής διηλεκτρικής αντοχής για να επιτευχθεί η μέγιστη τιμή τους. Ουσιαστικά αυτή η διάταξη μετρά το ρεύμα που διαρρέει το αμπερόμετρο και μετά μέσω του νόμου του Ohm μετατρέπουμε το ρεύμα σε τάση. Αν λάβουμε υπόψη μας και την αντίσταση του αμπερομέτρου τότε ισχύει:

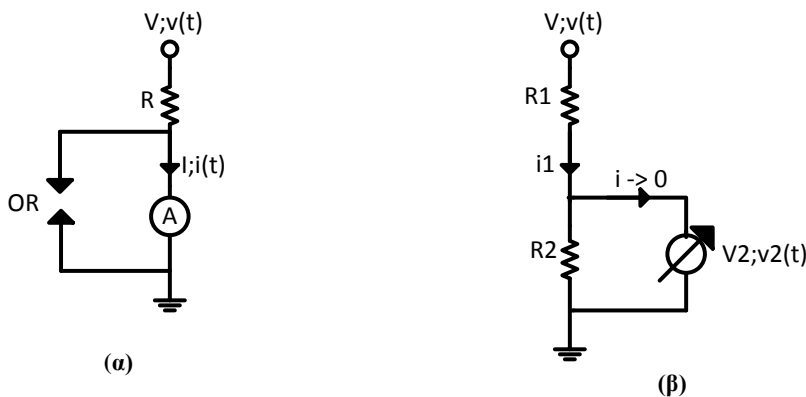
$$V = (R + r_i) \cdot I \quad (3.24)$$

#### 3.3.2 Μέτρηση με ωμικό καταμεριστή

Η διάταξη του σχήματος 3.6(β) χρησιμοποιείται για τη μέτρηση υψηλών συνεχών V ή εναλλασσόμενων τάσεων v(t). Ο ωμικός καταμεριστής τάσης αποτελείται από δύο ωμικές αντιστάσεις, την αντίσταση υψηλής τάσης R<sub>1</sub> και την αντίσταση χαμηλής τάσης R<sub>2</sub>, για τις οποίες ισχύει R<sub>1</sub> >> R<sub>2</sub>. Εάν V η υψηλή συνεχής τάση που θέλουμε να μετρήσουμε και u η μετρούμενη τάση, τότε ισχύει λαμβάνοντας υπόψη και την αντίσταση r<sub>i</sub> του καταγραφικού οργάνου (π.χ. βολτόμετρο):

$$u = \frac{R_2^*}{R_1 + R_2^*} V \quad (3.25)$$

Όπου  $R_2^* = \frac{R_2 \cdot r_i}{R_2 + r_i}$ , αφού οι αντιστάσεις αυτές είναι συνδεδεμένες παράλληλα.



Σχήμα 3.6: (α) Μέτρηση με αμπερόμετρο και αντίσταση σε σειρά, (β) Μέτρηση με ωμικό καταμεριστή

### 3.3.3 Διάκενο σφαιρών

Ανάλογα με άσκηση 1, παράγραφο 2.3.3.

Αξίζει να σημειωθεί πως όσο αφορά συνεχείς τάσεις τα αποτελέσματα θεωρούνται πως παρουσιάζουν αβεβαιότητα  $\pm 5\%$  δεδομένου πως το διάκενο είναι μικρότερο από 0,4D και δεν παρατηρούνται υπερβολικά επίπεδα σκόνης

### 3.3.4 Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο

Ανάλογα με άσκηση 1, παράγραφο 2.3.4.

## 3.4 Φαινόμενο Corona

Το φαινόμενο Corona μπορεί να περιγραφεί σαν το φαινόμενο των τοπικών διασπάσεων (σπινθήρων) μικρού μήκους και μικρής ενέργειας που παρατηρούνται στον αέρα και στην επιφάνεια μονωτικών υλικών μέσα στον χώρο των διακένων σε σημεία «ανωμαλίας», δηλαδή αιχμές ή ακμές, όπου η ένταση του πεδίου είναι μεγαλύτερη από την διηλεκτρική αντοχή του αέρα (30 KV/cm περίπου), ή του αερίου που υπάρχει στο διάκενο. Το φαινόμενο Corona μπορεί να οριστεί απλά σαν τοπικές εκκενώσεις και σαν τέτοιο ανήκει στην κατηγορία των μερικών εκκενώσεων. Ο όρος Corona, όπως χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, αναφέρεται σε κάθε ανιχνεύσιμο φαινόμενο εκκένωσης σε ένα ανομοιογενές πεδίο. Το φαινόμενο προκαλεί αύξηση του ιονισμού στο αέριο, με αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό των ελευθέρων ηλεκτρονίων στο διάκενο και την εμφάνιση μιας ανιχνεύσιμης έντασης ρεύματος. Το φαινόμενο αυτό γίνεται αισθητό ακουστικά με ήχο τριξίματος και οπτικά όταν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες (κυρίως απόλυτο σκοτάδι και δευτερευόντως υψηλή υγρασία).

Το οπτικό φαινόμενο είναι μια φωτεινή Corona γύρω από μια φορτισμένη ακίδα ή ένας φωτεινός σωλήνας γύρω από κάθε αγωγό μιας γραμμής μεταφοράς Υ.Υ.Τ.. Η τιμή της τάσης στην οποία εμφανίζεται το φαινόμενο Corona ονομάζεται τάση έναρξης Corona, είναι διαφορετική για κάθε περίπτωση και εξαρτάται από τη μέγιστη ένταση και την ανομοιογένεια του πεδίου και άρα από τη μορφή των ηλεκτροδίων και το μήκος του διακένου, καθώς και από τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

Στα διάκενα δυο ηλεκτροδίων το φαινόμενο Corona προκαλεί ένταση ρεύματος διαρροής που ονομάζεται ένταση Corona. Παλμοί τάσης μικρής διάρκειας (κρουστική τάση), ή γρήγορα μεταβαλλόμενοι (τάση υψηλής συχνότητας) παράγουν λιγότερο έντονη Corona από ότι παλμοί μεγάλης διάρκειας ή συνεχής τάση, όπου υπάρχει περισσότερος χρόνος για την ανάπτυξη των στοιβάδων [7].

### 3.4.1 Θετική Corona σε διάκενα ακίδας – πλάκας

Οι πληροφορίες που δίνονται παρακάτω αναφέρονται σε εκκενώσεις Corona στον ατμοσφαιρικό αέρα σε μικρά διάκενα (από μερικά mm μέχρι μερικά cm), όταν στην ακίδα εφαρμόζεται μια θετική συνεχής υψηλή τάση και η πλάκα είναι γειωμένη.

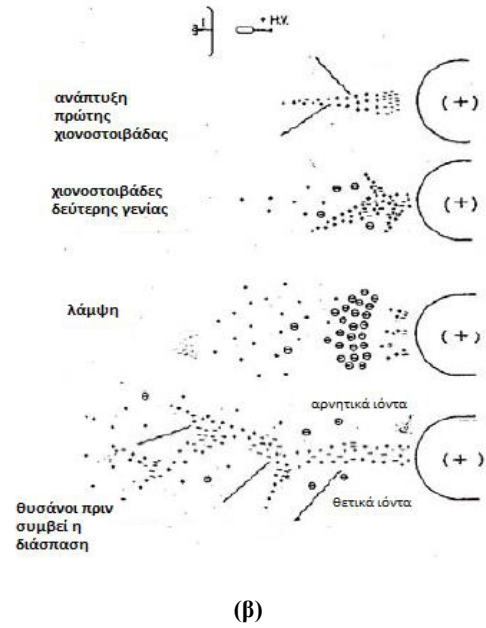
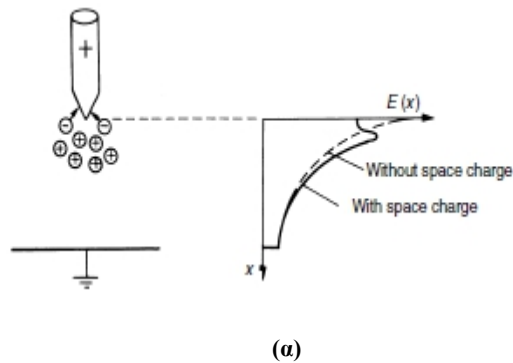
Επιγραμματικά το φαινόμενο περιγράφεται [1,4]:

Αν θεωρήσουμε ακίδα με **θετική πολικότητα** όπως στο σχήμα 3.7(α), τότε ο ιονισμός εξαιτίας κρούσεων μεταξύ των ηλεκτρονίων συμβαίνει στην περιοχή κοντά στην ακίδα, επειδή στην περίπτωση θετικής πολικότητας στη μύτη της ακίδας συγκεντρώνονται αρνητικοί φορείς. Τα ηλεκτρόνια εξαιτίας της μεγάλης κινητικότητας τους θα κινηθούν προς την άνοδο αφήνοντας τα θετικά φορτισμένα ιόντα πίσω τους. Η φόρτιση του πεδίου θα προκαλέσει μια μείωση των πεδιακών δυνάμεων κοντά στην άνοδο και ταυτόχρονα θα αυξήσει το πεδίο μακριά από αυτή. Η παραμόρφωση του πεδίου που προκαλείται φαίνεται στο σχήμα 3.7(α). Η διακεκομμένη καμπύλη παριστάνει την κατανομή του πεδίου χωρίς την επίδραση των παραμορφώσεων και η συνεχόμενη δείχνει το παραμορφωμένο πεδίο. Η πεδιακή δύναμη κοντά στην ακίδα ίσως είναι αρκετά μεγάλη ώστε να ξεκινήσει ένα καθοδικό θύσανο, ο οποίος μπορεί να έχει σαν συνέπεια πλήρη διάσπαση.

Πιο αναλυτικά [7]:

Μεταξύ της τάσης  $V_c$  (τάση έναρξης Corona) και της τάσης  $V_d$  (τάσης διάσπασης) παρατηρούνται γενικά τρεις διαφορετικές διεργασίες, (Σχήμα 3.7(β)):

- Όταν η εφαρμοζόμενη τάση ξεπεράσει την  $V_c$  εμφανίζονται στοιβάδες στο χώρο κοντά στην άνοδο (ακίδα) και δημιουργείται ένα νέφος θετικών ιόντων γύρω από την ακίδα, το οποίο επεκτείνεται προς την άνοδο. Δευτερεύουσες στοιβάδες δημιουργούνται και κατευθύνονται προς το νέφος θετικών φορτίων.
- Σε λίγο υψηλότερες τιμές τάσης ένα νέφος αρνητικών φορτίων δημιουργεί κοντά στην άνοδο μια τέτοια επιφάνεια, οπότε και οι θύσανοι έναρξης (onset streamers) γίνονται πολυπληθείς και μικρού μήκους και δημιουργείται μια λάμψη (glow) γύρω από την ακίδα. Εμφανίζεται και ένα ρεύμα Corona σχεδόν συνεχές, που ανιχνεύεται πολύ εύκολα.
- Σε ακόμα υψηλότερη τάση το νέφος των αρνητικών φορτίων προκαλεί έντονους θυσάνους (streamers). Με περαιτέρω αύξηση της τάσης προκαλείται ο σπινθήρας διάσπασης.



Σχήμα 3.7: (α) Διαμόρφωση πεδίου για διάταξη ακίδας (θετική πολικότητα)-πλάκας [4], (β) Ανάπτυξη των χιονοστιβάδων και των θυσάνων

### 3.4.2 Αρνητική Corona σε διάκενα ακίδας-πλάκας

Όταν στην ακίδα εφαρμόζεται μια αρνητική συνεχής υψηλή τάση και η πλάκα είναι γειωμένη, τότε το φαινόμενο περιγράφεται επιγραμματικά [1,4]:

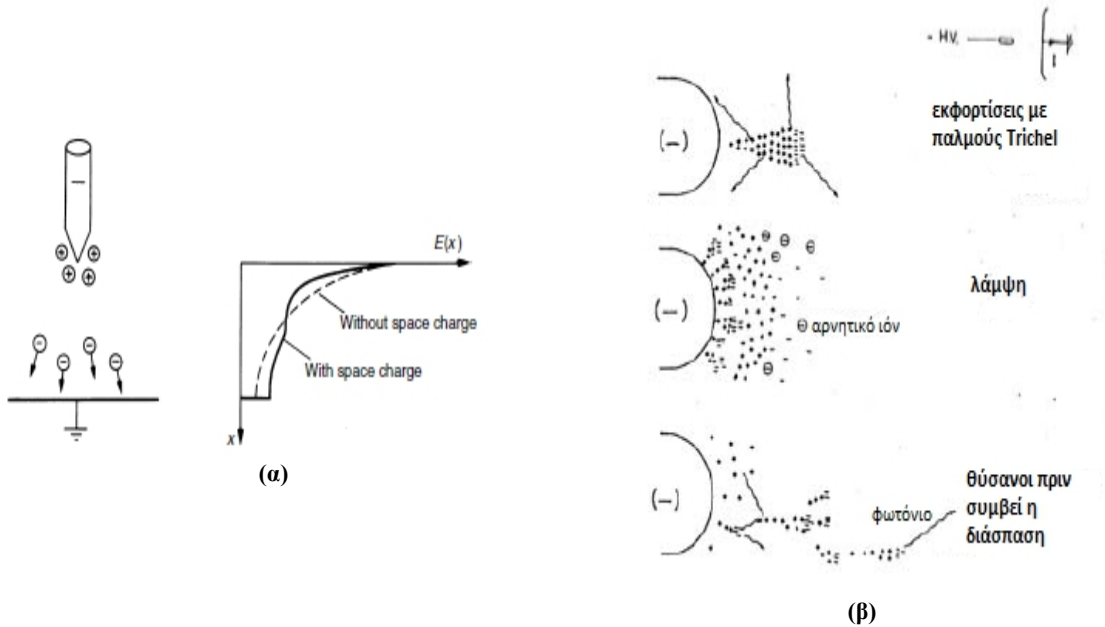
Αν η ακίδα έχει **αρνητική πολικότητα** τα ηλεκτρόνια κατευθύνονται προς την περιοχή χαμηλού δυναμικού του πεδίου (σχήμα 3.8(α)) και τα θετικά ιόντα που είναι πιο δυσκίνητα συγκεντρώνονται μπροστά στην ακίδα. Ενώ στην περίπτωση ηλεκτραρνητικών αερίων τα θετικά ιόντα ενώνονται με τα μόρια του αερίου και τείνουν να συγκρατήσουν το θετικά φορτισμένο χώρο που παραμένει στο χώρο ανάμεσα στο αρνητικό φορτίο και στην ακίδα. Κοντά στην ακίδα το πεδίο ενισχύεται αλλά η περιοχή ιονισμού σταδιακά μειώνεται. Το αποτέλεσμα είναι να σταματήσει ο ιονισμός. Μόλις ο ιονισμός παύει, το εφαρμοζόμενο πεδίο παρασύρει τα αρνητικά και θετικά ιόντα μακριά από την ακίδα και ένας νέος κύκλος ξεκινά. Για να ξεπεραστεί αυτή η επιβράδυνση μια υψηλότερη τάση απαιτείται.

Πιο αναλυτικά [7]:

Σε ένα διάκενο ακίδας-πλάκας με γειωμένη πλάκα και αρνητική τάση, μεγαλύτερη της τάσης έναρξης Corona στην ακίδα παρατηρούνται γενικά τρεις διαφορετικές διεργασίες, (Σχήμα 3.8(β)):

- Όταν η εφαρμοζόμενη τάση ξεπεράσει την τάση έναρξης Corona στην κάθοδο εμφανίζεται Corona με την μορφή των παλμών Trichel. Η ζώνη ιονισμού δεν εκτείνεται πολύ μακριά από την ακίδα. Η κίνηση των φορτίων των στοιβάδων δημιουργεί παλμικό ρεύμα Corona, που ανιχνεύεται εύκολα.

- Με την αύξηση της τάσης η συχνότητα των παλμών Trichel αυξάνεται και δημιουργείται μια σταθερή λάμψη.
- Σε ακόμα υψηλότερες τιμές τάσης εμφανίζονται οι θύσανοι, οι οποίοι οδηγούν το διάκενο σε διάσπαση.

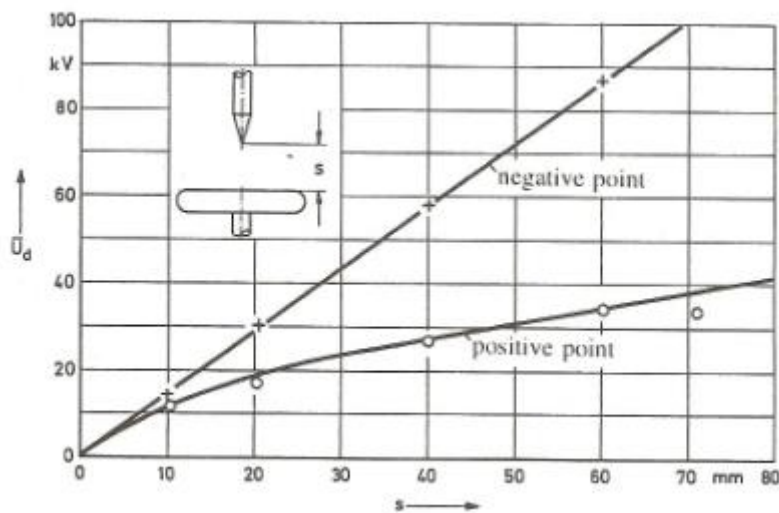


Σχήμα 3.8: (α) Διαμόρφωση πεδίου για διάταξη ακίδας (αρνητική πολικότητα)-πλάκας [4], (β) Ανάπτυξη των χιονοστοιβάδων και των θυσάνων

### 3.4.3 Το φαινόμενο της πολικότητας

Η διηλεκτρική συμπεριφορά των διακένων εξαρτάται σημαντικά από την πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης (φαινόμενο πολικότητας - polarity effect), όταν στα διάκενα ακίδας-πλάκας η πλάκα είναι γειωμένη.

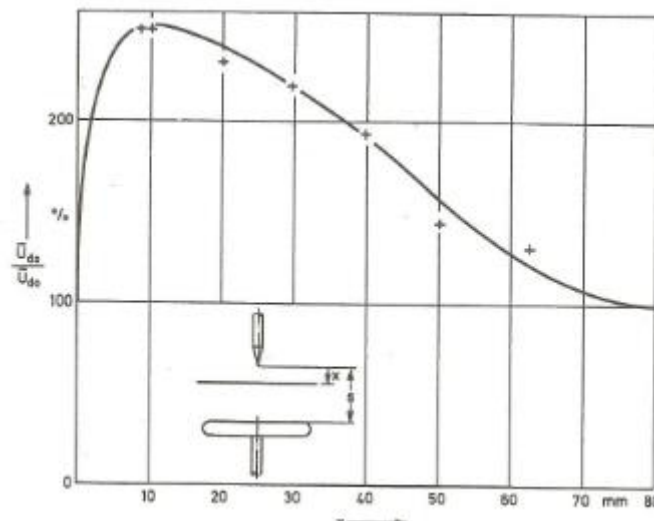
- Η τάση διάσπασης σε διάκενα ακίδας-γειωμένης πλάκας για αρνητική πολικότητα είναι πολύ μεγαλύτερη από την τάση διάσπασης για θετική πολικότητα, εκτός από τις πολύ χαμηλές πιέσεις (σχήμα 3.9). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στις περιπτώσεις που η τάση Corona προηγείται της τάσης διάσπασης. Παρατηρείται δηλαδή σε διατάξεις με έντονα ανομοιογενές πεδίο, όπως διάκενα μεγάλου μήκους με μικρές διαστάσεις ηλεκτροδίων και κυρίως στα διάκενα ακίδας-πλάκας και οφείλεται ακριβώς στα φορτία Corona που αλλοιώνουν το πεδίο. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζεται σημαντικά από τον τρόπο γείωσης του διακένου, δηλαδή από το φαινόμενο της γείωσης.
- Η τάση έναρξης Corona είναι λίγο μεγαλύτερη, μέχρι 25%, στις περιπτώσεις διακένων ακίδας-γειωμένης πλάκας όταν η τάση φόρτισης είναι θετική. Η διαφορά εξαρτάται από τη γεωμετρία του διακένου και ιδιαίτερα από τη διάμετρο της ακίδας.
- Η ένταση ρεύματος Corona είναι σημαντικά μεγαλύτερη στα διάκενα ακίδας-πλάκας όταν η τάση φόρτισης είναι αρνητική, επηρεάζοντας σημαντικά όλα τα συνεπακόλουθα φαινόμενα, όπως π.χ. τις απώλειες Corona και το ρυθμό παραγωγής όζοντος. Ακόμα και η κατανομή, αλλά και η διαδικασία κατανομής των φορτίων Corona σε επιφάνειες μονωτικών υλικών μέσα στα διάκενα είναι διαφορετική για διαφορετική πολικότητα της τάσης.



Σχήμα 3.9:  $V_d(s)$  [1]

### 3.5 Το φαινόμενο του διαφράγματος

Η διάταξη του διακένου ακίδας-πλάκας με την παρεμβολή ενός ή περισσότερων διαφραγμάτων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην καταπόνηση με υψηλές τάσεις συνεχείς, εναλλασσόμενες και κρουστικές. Με την εισαγωγή του διαφράγματος, ιδιαίτερα ενός φύλλου μονωτικού διηλεκτρικού σε ένα διάκενο, μεταβάλλεται σημαντικά η διηλεκτρική συμπεριφορά και κυρίως η τάση διάσπασής του (φαινόμενο διαφράγματος – barrier effect). Το διάκενο χωρίζεται σε 2 τμήματα, το τμήμα ακίδας-διαφράγματος και το τμήμα διαφράγματος - πλάκας. Τα δύο τμήματα λειτουργούν σχετικά ανεξάρτητα και επηρεάζουν συνδυαστικά τη συμπεριφορά του διακένου. Το διάφραγμα φορτίζεται με φορτία τα οποία δημιουργούνται στο τμήμα ακίδας-διαφράγματος και το κέντρο του αποκτά τάση, της οποίας η τιμή εξαρτάται από την τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης και το ηλεκτρικό πεδίο του διακένου αλλοιώνεται σημαντικά. Το πεδίο γίνεται πιο ομοιογενές και σε ορισμένες περιπτώσεις το διάκενο λειτουργεί σαν διάκενο πλάκας-πλάκας. Η τάση διάσπασης αυξάνεται έως και 300%, ανάλογα με το είδος του διακένου, τη μορφή και την πολικότητα της τάσης, αλλά κυρίως με τη θέση του διαφράγματος ή των διαφραγμάτων στο διάκενο. Υπάρχει μια βέλτιστη θέση του διαφράγματος για την οποίαν η τάση διάσπασης γίνεται μέγιστη. Η θέση αυτή είναι συνήθως κοντά στην ακίδα, και είναι διαφορετική ανάλογα με την πολικότητα και το είδος της τάσης. Για κάποιες συγκεκριμένες θέσεις του διαφράγματος πολύ κοντά στην πλάκα και πολύ κοντά τη ακίδα, ιδιαίτερα όταν η τάση είναι αρνητική, το αποτέλεσμα είναι μικρό ή και αρνητικό και η τάση διάσπασης μπορεί να μειώνεται [7].



Σχήμα 3.10:  $\frac{V_{ds}}{V_{a0}}(x)$  [1]



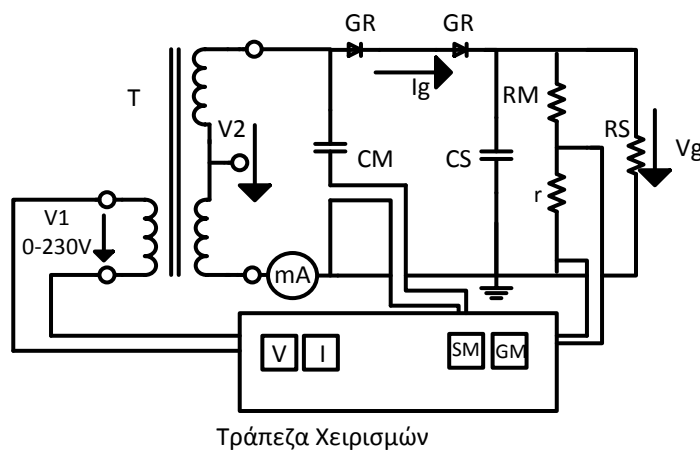
### 3.6 Πειραματική διάταξη

Η τάση του μετασχηματιστή δοκιμής δεν πρέπει να ξεπεράσει τα 50kV για να αποφύγουμε την υπερφόρτιση των ανορθωτών και των πυκνωτών, για αυτό συνιστάται μεσαία λήψη στο δευτερεύον του μετασχηματιστή δοκιμής, ώστε η τάση εξόδου του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή να περιορίζεται κατά το ήμισυ.

Για την πραγματοποίηση των πειραματικών διαδικασιών αυτής της άσκησης θα χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω εξοπλισμός επανειλημμένα:

- Όπου
- T: μετασχηματιστής δοκιμής με μεσαία λήψη και λόγο μετασχηματισμού  $220V/100kV$  και ονομαστική ισχύ 5kVA
  - SM: βολτόμετρο μεγίστου με ενσωματωμένο πυκνωτή χαμηλής τάσης (C2). Η σύνδεση με το CM γίνεται μέσω ομοαξονικού καλωδίου.
  - GR: ανορθωτής σεληνίου με τάση αναστροφής ίση με 140kV, ονομαστικό ρεύμα 5mA
  - GM: βολτόμετρο συνεχούς τάσης (αμπερόμετρο κινητού πηνίου για σύνδεση με RM),  $1mA = 140 kV$
  - RM: αντίσταση μέτρησης 140MΩ
  - r: 3,27kΩ, αντίσταση χαμηλής τάσης για τη δημιουργία ωμικού καταμεριστή
  - RS: 10MΩ
  - CS: 6000pF
  - CB: 1200pF
  - CM: 100pF
  - OSC: παλμογράφος
  - Rπ: αντίσταση προστασίας 10kΩ

**1<sup>η</sup> Πειραματική Διαδικασία:** Μελέτη των χαρακτηριστικών φόρτισης των ανορθωτών



Σχήμα 3.11: 1<sup>η</sup> πειραματική διάταξη

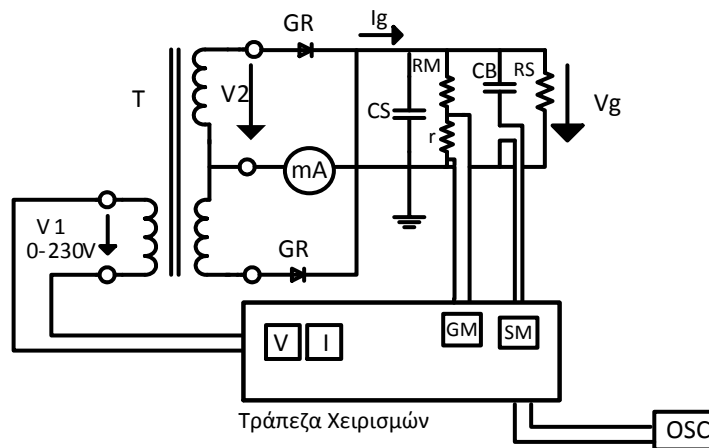
Η μέση τιμή του ρεύματος  $I_g$  διαμέσου των ανορθωτών μετρείται με αμπερόμετρο κινητού πηνίου (mA). Το πλάτος της  $\bar{V}$  θα μετρηθεί στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Φόρτιση μόνο από την αντίσταση μέτρησης RM
- Επιπρόσθετη φόρτιση από RS ( $\bar{I}_g \approx 5mA$ )

Πίνακας 3.2

Ρεύμα $I_g$	
Τάση $\bar{V}$ με φόρτιση μόνο από την RM	
Τάση $\bar{V}$ με φόρτιση μόνο από την RM και την RS	

2<sup>η</sup> Πειραματική Διαδικασία: Προσδιορισμός του δείκτη κυμάτωσης (ripple factor)



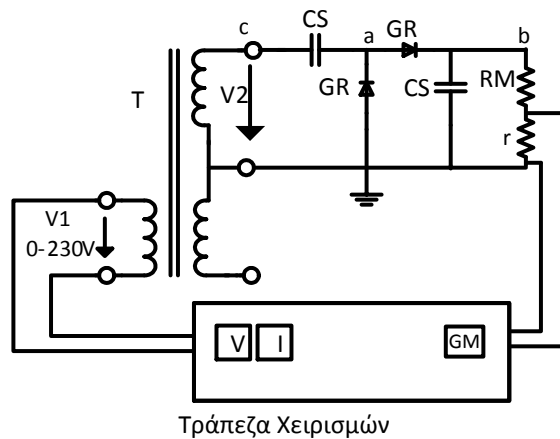
Σχήμα 3.12: 2<sup>η</sup> πειραματική διάταξη

Το κύκλωμα που χρησιμοποιείται είναι πλήρους ανόρθωσης. Ένας παλμογράφος OSC συνδέεται παράλληλα στο βολτόμετρο μεγίστου και με τη βοήθεια του παίρνουμε τις τιμές για τα διάφορα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη συνεχή τάση, καθώς και τις αντίστοιχες κυματομορφές. Ενώ με τη βοήθεια αμπερομέτρου κινητού πηνίου καταγράφουμε την τιμή του ρεύματος.

Πίνακας 3.3

	$I_g(\mu A)$	$V_{\sim}(kV)$	$V_{rms}(mV)$	$V_0(kV)$	$\bar{V}(mV)$	$V_{p-p}(mV)$	$V_{max}(mV)$	$V_{min}(mV)$
Φόρτιση μόνο από την RM								
Φόρτιση από την RM και την RS								

**3<sup>η</sup> Πειραματική Διαδικασία:** Μελέτη διάταξης διπλής ανόρθωσης Greinacher



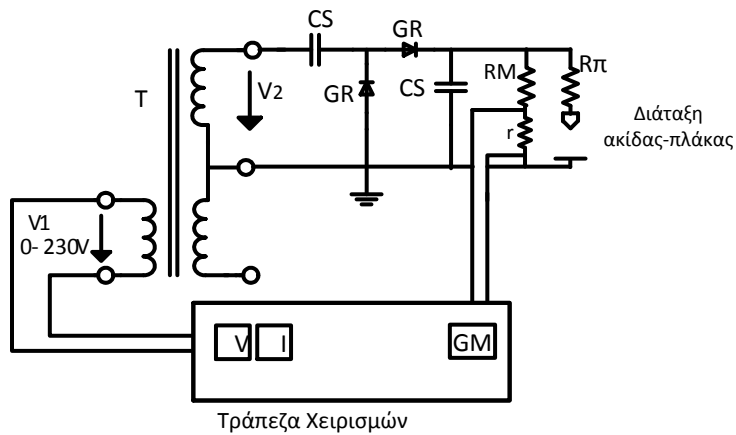
Σχήμα 3.13: 3<sup>η</sup> πειραματική διάταξη

Το βολτόμετρο GM θα μετρήσει το πλάτος της συνεχούς τάσης, όπως επίσης η τιμή του πρωτεύοντος του Μ/Σ, θα πρέπει να μετρηθούν.

Πίνακας 3.4

Τάση Ιοντος Μ/Σ	
Τάση $\bar{V}$ με φόρτιση μόνο από την RM	

**4<sup>η</sup> Πειραματική Διαδικασία:** Μελέτη της επίδρασης του φαινομένου της πολικότητας



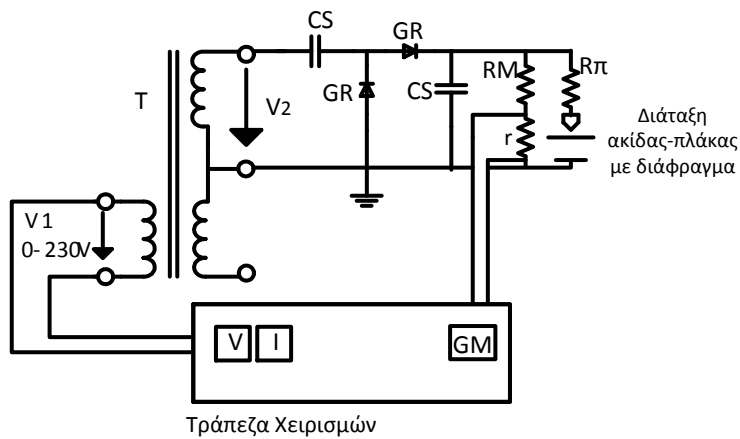
Σχήμα 3.14: 4<sup>η</sup> πειραματική διάταξη

Μια διάταξη ακίδας-πλάκας σε σειρά με αντίσταση προστασίας 10 kΩ συνδέεται παράλληλα στην αντίσταση RM του υπάρχοντος κυκλώματος. Η τάση διάσπασης του διακένου θα πρέπει να μετρηθεί και για τις δύο πολικότητες της ακίδας και για διάκενο μήκους  $s = 10, 20, 40, 60, 80$  mm.

Πίνακας 3.5

s(mm)	10	20	40	60	80
V <sub>d</sub> (mV) (για θετική πολικότητα ακίδας)					
V <sub>d</sub> (mV) (για αρνητική πολικότητα ακίδας)					

5<sup>η</sup> Πειραματική Διαδικασία: Μελέτη της επίδρασης του φαινομένου του διαφράγματος



Σχήμα 3.15: 5<sup>η</sup> πειραματική διάταξη

Κρατάμε την ίδια διάταξη με το παραπάνω βήμα αλλά τώρα προσαρμόζουμε το διάκενο στα s=70 mm. Μια πλάκα από μονωτικό υλικό (χαρτί) τοποθετείται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια κάθετα στον άξονα τους. Η τάση διάσπασης θα πρέπει να μετρηθεί για θετικό πολικότητα στην ακίδα με το διάφραγμα να τοποθετείται σε απόσταση x=0, 10, 20, 30, 40, 60, 80 mm από την ακίδα.

Πίνακας 3.6

x(mm)	0	10	20	40	60	80
V <sub>d</sub> (mV) (για θετική πολικότητα ακίδας)						

### 3.7 Ερωτήματα

- (α) Από τα δεδομένα της 1<sup>ης</sup> πειραματικής διαδικασίας να σχεδιαστεί διάγραμμα  $\bar{V}$  συναρτήσει  $\bar{I}_g$ .
- (β) Να υπολογιστεί ο αναλογικός παράγοντας  $k$  που εξαρτάται από τον τύπο του ανορθωτή, όταν ανά ανορθωτικό στοιχείο η  $V_1$  ισούται με 0,6V.
- (γ) Ο παράγοντας κυμάτωσης να υπολογιστεί με τη βοήθεια της τάσης και του ρεύματος που καταγράφονται από τη 2<sup>η</sup> πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα να συγκριθούν.
- (δ) Να βρεθεί το σχετικό σφάλμα της πραγματικής τιμής συνεχούς τάσης που μετρείται από της 3<sup>η</sup> πειραματική διάταξη ως προς την ιδανική τιμή που υπολογίζουμε από το πρωτεύον του Μ/Σ.
- (ε) Οι τάσεις διάσπασης που υπολογίστηκαν από την 4<sup>η</sup> διάταξη πρέπει να απεικονιστούν διαγραμματικά ως προς  $s$  και για τις δύο πολικότητες. Σχολιάστε τις μετρήσεις. Επαληθεύετε ή όχι το φαινόμενο της πολικότητας.
- (στ) Οι τιμές της τάσης διάσπασης παρουσία διαφράγματος θα πρέπει να απεικονιστούν διαγραμματικά ως προς τη θέση τοποθέτησης του διαφράγματος  $x$  για κάθε τιμή του διακένου  $s$  και για τις δύο πολικότητες.

### 3.8 Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις στο Εργαστήριο

Η 2<sup>η</sup> άσκηση πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο, ώστε να επαληθευτεί η ορθότητα τόσο της διάταξης όσο και των ερωτημάτων που προτείνονται. Οι μετρήσεις που καταγράφηκαν από τη διεξαγωγή της άσκησης επεξεργάζονται και αναλύονται σε αυτήν την παράγραφο. Πρέπει να επισημάνουμε πως στα πλαίσια της πειραματικής διεξαγωγής της άσκησης δε χρησιμοποιήσαμε μεσαία λήψη στον μετασχηματιστή δοκιμής. Οι υλοποιήσιμες συνδεσμολογίες αναφέρονται στη συνέχεια.

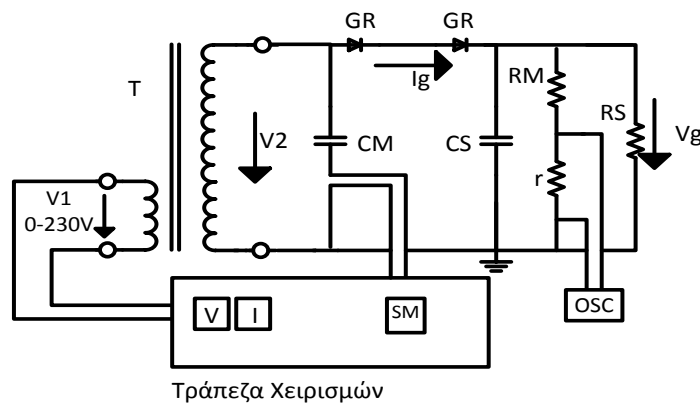
Για την πραγματοποίηση των πειραματικών διατάξεων αυτής της άσκησης θα χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω εξοπλισμός επανειλημμένα:

- Όπου T: μετασχηματιστής δοκιμής με λόγο μετασχηματισμού  $220V/100kV$  και ονομαστική ισχύ 5kVA
- SM: βολτόμετρο μεγίστου (εντός του βολτομέτρου υπάρχει ενσωματωμένος πυκνωτής  $C_2 = 200nF$ ). Η σύνδεση με το CM γίνεται μέσω ομοαξονικού καλωδίου.
- GR: ανορθωτής σεληνίου με τάση αναστροφής ίση με 140kV, ονομαστικό ρεύμα 5mA
- GM: βολτόμετρο συνεχούς τάσης
- RM: Αντίσταση μέτρησης 140MΩ
- r: 3,27kΩ, χρησιμοποιείται ως η αντίσταση χαμηλής τάσης για τη δημιουργία ωμικού καταμεριστή
- RS: 10MΩ
- CS: 6000pF
- CB: 100pF
- CM: 100pF
- OSC: Παλμογράφος
- Rπ: Αντίσταση προστασίας 10kΩ

#### 3.8.1 1<sup>η</sup> πειραματική διάταξη

##### 3.8.1.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη

Με τη βοήθεια της πρώτης πειραματικής διάταξης μελετάμε τα χαρακτηριστικά φόρτισης των ανορθωτών με και χωρίς την επιπρόσθετη φόρτιση από την αντίσταση RS.



Σχήμα 3.16: 1<sup>η</sup> πειραματική διάταξη



Σχήμα 3.17: Φωτογραφίες 1<sup>ης</sup> πειραματικής διάταξης από το εργαστήριο

### 3.8.1.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων

Η τιμή του ρεύματος  $I_g$  διαμέσου των ανορθωτών δεν ήταν δυνατό να μετρηθεί με τη βοήθεια κάποιου αμπερομέτρου. Το διαρρέον ρεύμα ήταν της τάξης των μερικών mA και δεν είχαμε κατάλληλο εξοπλισμό για τη μέτρηση. Το πλάτος της  $\bar{V}$  θα μετρηθεί στις ακόλουθες περιπτώσεις:

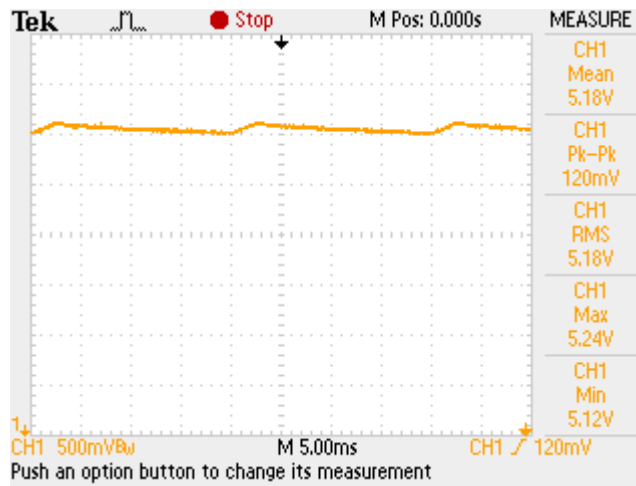
- Φόρτιση μόνο από την αντίσταση μέτρησης RM
- Επιπρόσθετη φόρτιση από RS

Για τη μέτρηση της συνεχούς τάσης συνδέεται μια αντίσταση  $r = 3,27k\Omega$  σε σειρά με την RM, οπότε σχηματίζεται ωμικός καταμεριστής με λόγο καταμερισμού  $\kappa = \frac{r}{r+RM} = 2,336 \cdot 10^{-5}$  και ισχύει  $V_g(mV) = \kappa \cdot V_g(kV)$ .

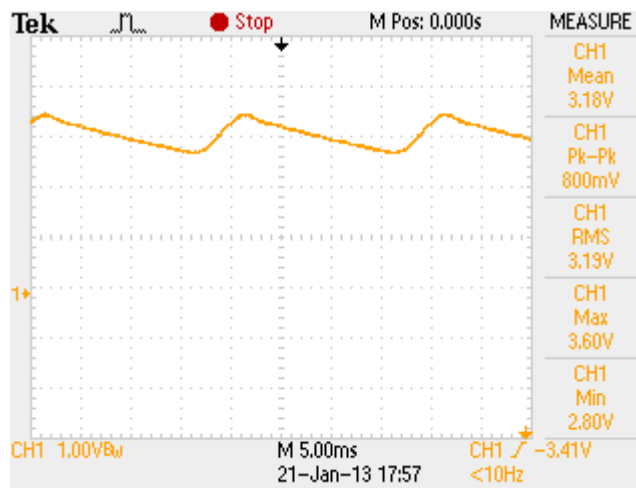
Πίνακας 3.7: Καταγραφή Μετρήσεων

	$V_1(V)$	$V_{grms}(mV)$	$V_g(kV)$	$\bar{V}(mV)$	$V_{p-p}(mV)$	$V_{max}(mV)$	$V_{min}(mV)$
Φόρτιση μόνο από την RM	44	518	22,17	518	12	524	512
Φόρτιση από την RM και την RS	44	318	13,61	319	80	360	280

Με τη βοήθεια του παλμογράφου πήραμε τις κυματομορφές των σχημάτων 3.18 και 3.19 που παρατίθενται στη συνέχεια. Οι τιμές που αναγράφονται πάνω στις κυματομορφές που προέκυψαν από το παλμογράφο φαίνονται στον πίνακα 3.7 και είναι διαιρεμένες με 10, γιατί το probe του παλμογράφου ήταν ρυθμισμένο να καταγράφει x10.



Σχήμα 3.18: Συνεχής τάση από την 1<sup>η</sup> πειραματική διάταξη όπου συμμετέχει μόνο η RM



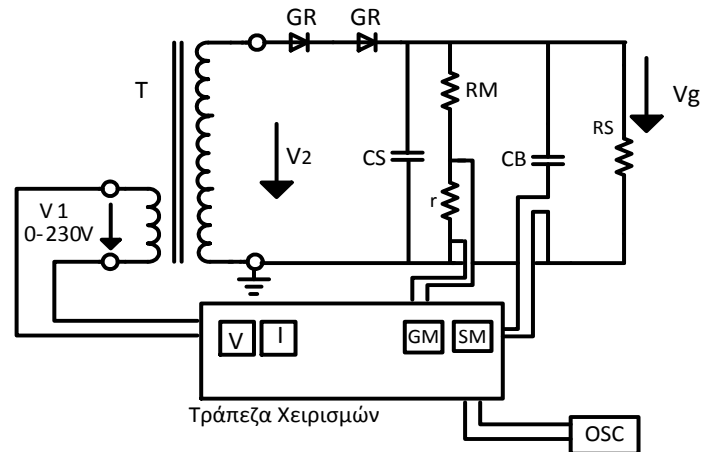
Σχήμα 3.19: Συνεχής τάση από την 1<sup>η</sup> πειραματική διάταξη όπου συμμετέχει και η RM και η RS



### 3.8.2 2<sup>η</sup> πειραματική διάταξη

#### 3.8.2.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη

Με την προσθήκη του πυκνωτή CB μελετάμε τον παράγοντα κυμάτωσης (r.f.) με και χωρίς επιπρόσθετη φόρτιση από την αντίσταση RS. Ο πυκνωτής CB είναι πυκνωτής μέτρησης, ο οποίος συνδέεται στη συνεχή τάση, με σκοπό τη σύνδεση του με παλμογράφο και την καταγραφή της κυμάτωσης της τάσης.



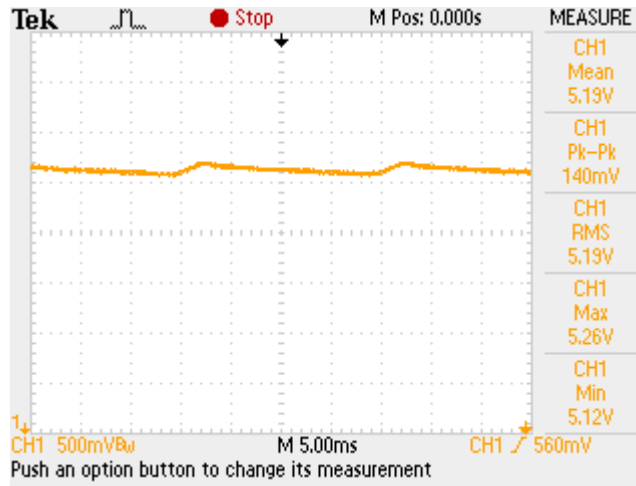
Σχήμα 3.20: 2<sup>η</sup> πειραματική διάταξη



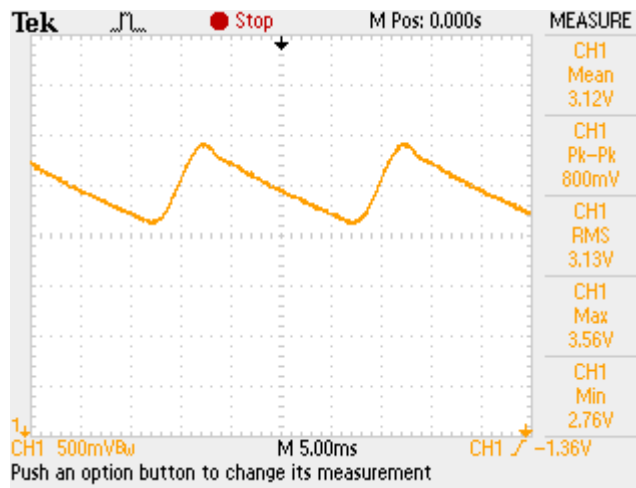
Σχήμα 3.21: Φωτογραφία 2<sup>ης</sup> πειραματικής διάταξης από το εργαστήριο

### 3.8.2.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων

Με τη βοήθεια του παλμογράφου που συνδέεται παράλληλα στο βολτόμετρο μεγίστου πήραμε τις κυματομορφές των σχημάτων 3.22 και 3.23 που παρατίθενται στη συνέχεια. Οι τιμές που αναγράφονται πάνω στις κυματομορφές που προέκυψαν από το παλμογράφο φαίνονται στον πίνακα 3.8 και είναι διαιρεμένες με 10, γιατί το probe του παλμογράφου ήταν ρυθμισμένο να καταγράφει x10.



Σχήμα 3.22: Συνεχής τάση από την 2<sup>η</sup> πειραματική διάταξη όπου συμμετέχει μόνο η RM



Σχήμα 3.23: Συνεχής τάση από την 2<sup>η</sup> πειραματική διάταξη όπου συμμετέχουν RM και RS

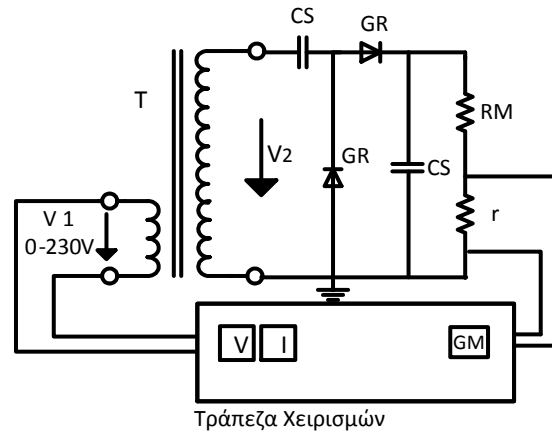
Πίνακας 3.8: Καταγραφή Μετρήσεων

	$V_1(V)$	$V_{grms}(mV)$	$V_g(kV)$	$\bar{V}(mV)$	$V_{p-p}(mV)$	$V_{max}(mV)$	$V_{min}(mV)$
Φόρτιση μόνο από την RM	44	519	22,22	519	14	526	512
Φόρτιση από την RM και την RS	44	312	13,36	313	80	356	276

### 3.8.3 3<sup>η</sup> πειραματική διαδικασία

#### 3.8.3.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη

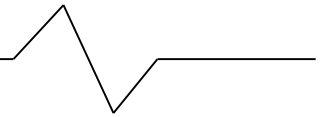
Σε αυτό το κομμάτι διεξαγωγής της άσκησης πραγματοποιήσαμε τη συνδεσμολογία Greinacher για να πιστοποιήσουμε πως όντως οδηγεί σε διπλασιασμό της τάσης.



Σχήμα 3.24: 3<sup>η</sup> πειραματική διάταξη



Σχήμα 3.25: Φωτογραφία 3<sup>ης</sup> πειραματικής διάταξης από το εργαστήριο



### 3.8.3.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων

Πίνακας 3.9: Καταγραφή Μετρήσεων

Τάση Πρωτεύοντος Μ/Σ	44V
Τάση $\bar{V}$ με φόρτιση μόνο από την RM	1,107V

Από τον λόγο μετασχηματισμού του μετασχηματιστή δοκιμών 220V/100kV και τη μέτρηση της τάσης στο πρωτεύον του μετασχηματιστή μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση στο δευτερεύον:

$$V_2 = a \cdot V_1 = \frac{100kV}{220V} \cdot 44V = 20kV$$

Η διάταξη που εξετάσαμε σε αυτό το βήμα της άσκησης είναι η διάταξη διπλασιασμού Greinacher, οπότε θα περιμένουμε από τη θεωρία η συνεχής τάση που θα προκύψει να είναι διπλασιασμένη και ίση με:

$$V_0 = V_{max} = 2\sqrt{2} \cdot V_2 = 2\sqrt{2} \cdot 20 = 56,57kV$$

Ο παραπάνω τύπος μας δίνει τη μέγιστη τιμή της συνεχούς τάσεως.

Για να γίνει σύγκριση με τα θεωρητικά δεδομένα μετρήθηκε η συνεχής τάση με τη βοήθεια ωμικού καταμεριστού που συνδεόταν με ομοαξονικό καλώδιο σε βολτόμετρο συνεχούς. Ο λόγος καταμερισμού ήταν όπως προαναφέρθηκε  $\kappa = \frac{r}{r+RM} = 2,336 \cdot 10^{-5}$  και ισχύει  $V_0(mV) = \kappa \cdot V_0(kV)$ , οπότε:

$$V_0(kV) = \frac{1,107mV}{2,336 \cdot 10^{-5}} = 47,39kV$$

Μεταξύ της θεωρητικής τιμής και της τιμής που καταγράψαμε υπάρχει μια μικρή αλλά δικαιολογίσιμη απόκλιση, οπότε αποδεικνύεται πως όντως είχαμε διπλασιασμό της τάσεως. Η απόκλιση αυτή οφείλεται κυρίως:

- Αρχικά στο ότι κατά τον υπολογισμό της  $V_2$  στην έξοδο του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή θεωρούμε το μετασχηματιστή ιδανικό και λαμβάνουμε υπόψη μας μόνο το λόγο μετασχηματισμού  $\alpha$ , ενώ αγνοούμε τις απώλειες και τις αντίστοιχες πτώσεις τάσεως.
- Επίσης από παράγραφο 3.2.3 η τάση κατά μήκος του φορτίου είναι μικρότερη από  $2\sqrt{2}V_2$ , όπως εμείς υποθέσαμε, εξαρτώμενη από την τιμή της σταθεράς χρόνου  $C \cdot R$  και προκύπτει από τη σχέση (3.9):

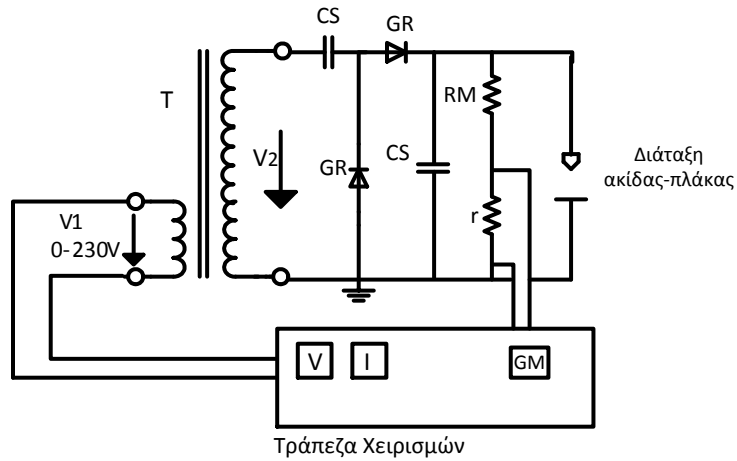
$$V_0 = V_{max} - \delta V = 2\sqrt{2}V_2 - \frac{I_R}{f \cdot C}$$



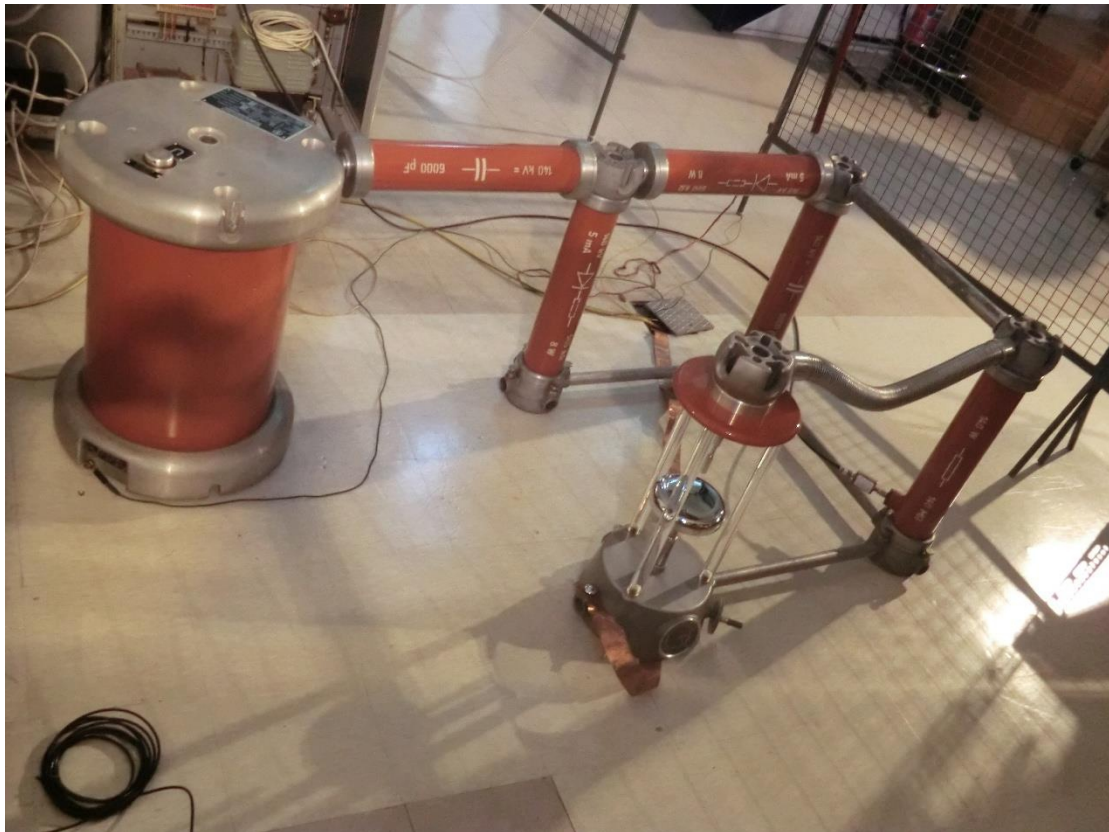
### 3.8.4 4<sup>η</sup> πειραματική διαδικασία

#### 3.8.4.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη

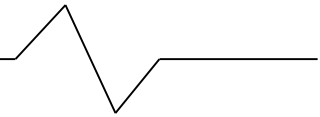
Μια διάταξη ακίδας-πλάκας συνδέθηκε παράλληλα στην αντίσταση  $R_M$  του υπάρχοντος κυκλώματος για να μελετηθεί το φαινόμενο της πολικότητας και η επίδραση του στην τάση διάσπασης του διακένου.



Σχήμα 3.26: 4<sup>η</sup> πειραματική διάταξη



Σχήμα 3.27: Φωτογραφία 4<sup>ης</sup> πειραματικής διάταξης από το εργαστήριο



### 3.8.4.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων

Η τάση διάσπασης του διακένου μετρήθηκε και για τις δύο πολικότητες της ακίδας και για διάκενο μήκους  $s= 10, 20, 40, 60, 80$  mm και οι μετρήσεις που καταγράφηκαν με τη βοήθεια ωμικού καταμεριστή στην πλευρά χαμηλής τάσης αναγράφονται στον πίνακα 3.10:

Πίνακας 3.10: Καταγραφή Μετρήσεων

s(mm)	10	20	40	60	80
V <sub>d</sub> (mV) (για θετική πολικότητα ακίδας)	318mV	487,2mV	777,5mV	918,2mV	970,9mV
V <sub>d</sub> (mV) (για αρνητική πολικότητα ακίδας)	-398,2mV	-900,5mV	-1,656V	-2,483V	-2,6V

Στη μελέτη του φαινομένου της πολικότητας παρατηρήσαμε όλα τα επιμέρους φαινόμενα που περιγράφονται στη θεωρία. Αρχικά μετά από μια τάση (τάση Corona) πολύ μικρότερη της τάσης διάσπασης εμφανίζεται μια μικρή λάμψη στη μύτη της ακίδας, στη συνέχεια αρχίζουν να ακούγονται χαρακτηριστικοί τριγμοί και ταυτόχρονα η λάμψη γίνεται πιο έντονη μέχρι που τελικά λίγο πριν την εμφάνιση του σπινθήρα διάσπασης δημιουργούνται έντονοι θύσανοι. Αξίζει να σημειωθεί πως ενώ οι τάσεις διάσπασης παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στην τιμή τους ανάλογα με την πολικότητα, δε συμβαίνει το ίδιο και με την τάση Corona, η εμφάνιση της οποίας παρατηρήσαμε πως γινόταν σε περίπου ίσες τιμές ανεξαρτήτου πολικότητας.

Επιπλέον, στην περίπτωση που το διάκενο ισούταν με  $s=80$ mm και για αρνητική πολικότητα δεν μπορέσαμε να παρατηρήσουμε διάσπαση (η τιμή 2,6V που αντιστοιχεί σε 111kV είναι ενδεικτική), καθώς αν και όλα τα υπόλοιπα φαινόμενα (λάμψη, τριγμοί) παρουσιάστηκαν κανονικά και γίνονταν πιο έντονα όσο αυξάναμε την τάση, δεν μπορούσαμε να αυξήσουμε την τάση περισσότερο καθώς πλησιάζαμε πάρα πολύ τα όρια του μετασχηματιστή.

### 3.8.5 Απαντήσεις στα Ερωτήματα

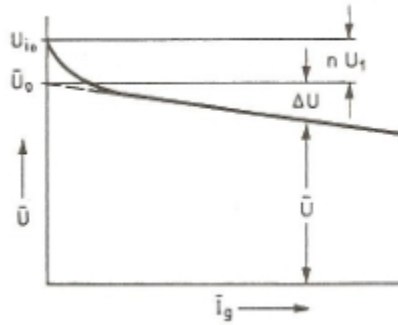
(α) Από τα δεδομένα της 1<sup>ης</sup> πειραματικής διαδικασίας να σχεδιαστεί διάγραμμα  $\bar{V}$  συναρτήσει  $\bar{I}_g$ .

(β) Να υπολογιστεί ο αναλογικός παράγοντας  $k$  που εξαρτάται από τον τύπο του ανορθωτή, όταν ανά ανορθωτικό στοιχείο η  $V_1$  ισούται με 0,6V.

#### Απάντηση

Δεν ήταν δυνατόν να μετρήσουμε τη μέση τιμή του ρεύματος, καθώς ήταν της τάξης των μερικών mA και δε διαθέταμε όργανο καταγραφής με αντίστοιχη κλίμακα.

Θεωρητικά θα περιμέναμε τη γραφική παράσταση του σχήματος 3.28:



Σχήμα 3.28:  $\bar{V}(\bar{I}_g)$  [1]

Στη σχεδίαση των κυκλωμάτων η μη γραμμική συμπεριφορά των ανορθωτών πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν, αφού ο ανορθωτής παρουσιάζει πτώση τάσης κατά τη φορά διέλευσης του ρεύματος, οπότε μια μη γραμμική σχέση μεταξύ της μέσης τιμής του ρεύματος και της συνεχής τάσης είναι το αποτέλεσμα. Στο σχήμα 3.28 φαίνεται η τυπική χαρακτηριστική φορτίου για έναν ανορθωτή. Για  $\bar{I}_g = 0$ , η ιδανική τάση χωρίς φορτίο  $V_{io}$  ισούται με τη μέγιστη τάση στην έξοδο του μετασχηματιστή  $\hat{V}_2$ . Η γραμμική προέκταση της χαρακτηριστικής φορτίου για υψηλά ρεύματα μέχρι το σημείο όπου  $\bar{I}_g = 0$  δίνει ένα σημείο τομής με τη τεταγμένη στο  $\bar{V}_0$ . Η τιμή αυτή είναι μικρότερη της  $V_{io}$  κατά μια ποσότητα  $V_1$  για κάθε ανορθωτικό στοιχείο, και είναι πρακτικά ανεξάρτητη του ρεύματος. Η τάση εξόδου ενός ανορθωτή  $n$  στοιχείων συνδεδεμένων εν σειρά προκύπτει για μικρά ρεύματα από την παρακάτω εξίσωση:

$$\bar{V} = \bar{V}_0 - \Delta V = (V_{io} - n \cdot V_1) - k \cdot I_g = (\hat{V}_2 - n \cdot V_1) - k \cdot I_g \quad (3.18)$$

Όπου  $k$  είναι ένας αναλογικός παράγοντας που εξαρτάται από τον τύπο του ανορθωτή, ενώ ανά ανορθωτικό στοιχείο η  $V_1$  κυμαίνεται από  $0,6 \dots 1,2V$  [1,2].

(γ) Ο παράγοντας κυμάτωσης να υπολογιστεί με τη βοήθεια της τάσης και του ρεύματος που καταγράφονται από τη 2<sup>η</sup> πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα να συγκριθούν.

### Απάντηση

Ο παράγοντας κυμάτωσης (ripple factor) είναι ο λόγος του πλάτους της κυμάτωσης  $\delta V$  προς την αριθμητική μέση τιμή  $\bar{V}$  (σχέση 2.3):

$$\text{ripple factor} = r. f. = \frac{\delta V}{\bar{V}}$$

Όπου η κυμάτωση της τάσης  $\delta V$  προκύπτει από τη σχέση (2.2) και ισούται με:

$$\delta V = \frac{1}{2} (V_{max} - V_{min}) \Rightarrow \delta V = \frac{1}{2} V_{p-p}$$

Ισχύει και ο παρακάτω τύπος, όπου υπολογίζουμε το  $\delta V$  μέσω του ρεύματος  $I_g$  και του CM, αλλά δε μπορούμε να τον εφαρμόσουμε γιατί δεν καταφέραμε να υπολογίσουμε το ρεύμα (σχέση 2.5):

$$\delta V = \frac{I_g}{2 \cdot f \cdot C}$$

Μέσα από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει τελικά ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 3.11

	$V_{p-p}(mV)$	$\delta V(mV)$	$\bar{V}(mV)$	$r.f.(%)$
<b>Φόρτιση μόνο από την RM</b>	14	7	519	1,35
<b>Φόρτιση από την RM και την RS</b>	80	40	313	12,78

Η τιμή του δείκτη κυμάτωσης στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούμε πως αυξάνεται πολύ με την προσθήκη της RS, γιατί από σχέση (3.3):

$$r.f. = \frac{\delta V}{\bar{V}} \stackrel{(3.6)}{\implies} r.f. = \frac{I_g}{2 \cdot f \cdot C} = \frac{\bar{V}}{2 \cdot f \cdot C \cdot \bar{V}} = \frac{1}{2 \cdot f \cdot C \cdot R}$$

Από την τελευταία σχέση προκύπτει πως ο παράγοντας κυμάτωσης r.f. είναι αντιστρόφως ανάλογος της αντίστασης R εάν f, C είναι σταθερά. Εδώ είχαμε:

- Στην πρώτη περίπτωση  $R = RM = 140M\Omega$
- Στη δεύτερη περίπτωση  $R = \frac{RM \cdot RS}{RM + RS} = \frac{140 \cdot 10}{140 + 10} M\Omega = 9,3M\Omega$

Άρα η συνολική αντίσταση μειώθηκε με την προσθήκη της RS, οπότε περιμένουμε ο παράγοντας κυμάτωσης r.f. να αυξηθεί, πράγμα που συμβαίνει.

(γ) Να βρεθεί το σχετικό σφάλμα ε(%) της πραγματικής τιμής συνεχούς τάσης που μετριέται από την 3<sup>η</sup> πειραματική διάταξη ως προς την ιδανική τιμή που υπολογίζουμε από το πρωτεύον του Μ/Σ.

### Απάντηση

Το σχετικό σφάλμα προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$\varepsilon(\%) = \left| \frac{V_{\pi} - V_{\theta}}{V_{\theta}} \right| \cdot 100\% \quad (3.19)$$

- Όπου  $V_{\pi}$ : η πειραματική τιμή που μετρήθηκε μέσω ωμικού καταμεριστή τιμή  
 $V_{\theta}$ : η τιμή που προκύπτει σύμφωνα με τον θεωρητικό τύπο και την τιμή του πρωτεύοντος του Μ/Σ

Οπότε αντικαθιστώντας τις τιμές προκύπτει:

$$\varepsilon(\%) = \left| \frac{47,51 - 56,57}{56,57} \right| \cdot 100\% = 16\%$$

Μεταξύ της θεωρητικής τιμής και της τιμής που καταγράψαμε υπάρχει μια μικρή απόκλιση, η οποία οδηγεί και σε ένα αρκετά μεγάλο σχετικό σφάλμα. Η απόκλιση αυτή οφείλεται κυρίως:



- Στο ότι κατά τον υπολογισμό της  $V_2$  στην έξοδο του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή θεωρούμε το μετασχηματιστή ιδανικό και λαμβάνουμε υπόψη μας μόνο το λόγο μετασχηματισμού  $\alpha$ , ενώ αγνοούμε τις απώλειες και τις αντίστοιχες πτώσεις τάσεως.
- Επίσης από παράγραφο 3.2.3 η τάση κατά μήκος του φορτίου είναι μικρότερη από  $2\sqrt{2}V_2$ , όπως εμείς υποθέσαμε, εξαρτώμενη από την τιμή της σταθεράς χρόνου  $C \cdot R$  και προκύπτει από τη σχέση (3.9):

$$V_0 = V_{max} - \delta V = 2\sqrt{2}V_2 - \frac{I_R}{f \cdot C}$$

(δ) Οι τάσεις διάσπασης που υπολογίστηκαν από την 4<sup>η</sup> διάταξη πρέπει να απεικονιστούν διαγραμματικά ως προς  $s$  και για τις δύο πολικότητες. Σχολιάστε τις μετρήσεις. Επαληθεύετε ή όχι το φαινόμενο της πολικότητας.

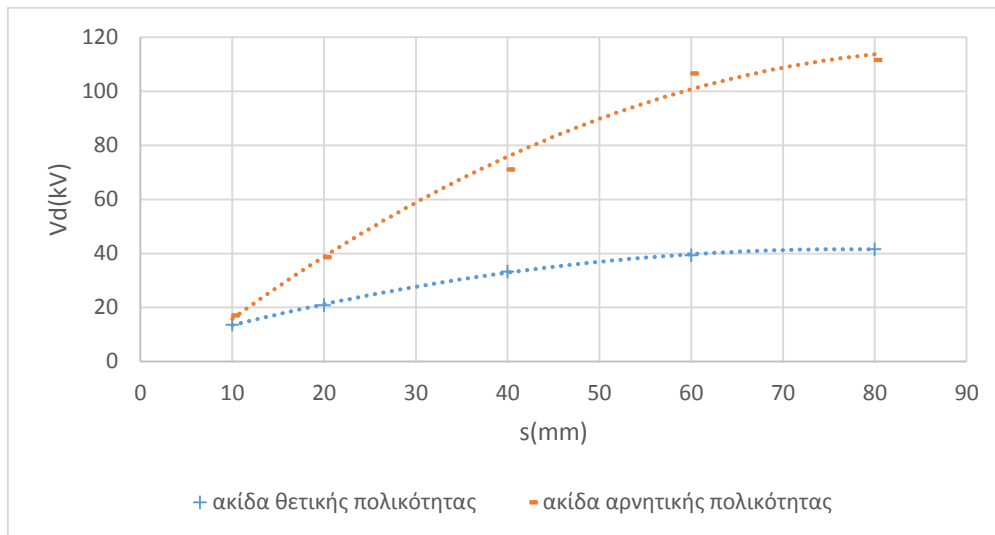
### Απάντηση

Στον πίνακα 3.12 παρατίθενται οι μετρήσεις του πίνακα 3.10 αφού ανάχθηκαν σε kV με τη βοήθεια του λόγου καταμερισμού  $\kappa = \frac{r}{r+RM} = 2,336 \cdot 10^{-5}$  και της σχέσης  $V_0(\text{mV}) = \kappa \cdot V_0(\text{kV})$ , οπότε:

Πίνακας 3.12

<b>s(mm)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>
<b>V<sub>a</sub>(kV) (για θετική πολικότητα ακίδας)</b>	13,65	20,90	33,35	39,40	41,63
<b>V<sub>a</sub>(kV) (για αρνητική πολικότητα ακίδας)</b>	17,08	38,63	71,09	106,57	111,59

Από τις μετρήσεις του πίνακα 3.12 προκύπτει η γραφική παράσταση 3.29, όπου παρατηρούμε πως η τάση διάσπασης είναι μεγαλύτερη για αρνητική συνεχή τάση απ' ότι για θετική σύμφωνα με το φαινόμενο πολικότητας. Συγκεκριμένα από τη θεωρία αναμενόταν η τάση διάσπασης στο διάκενο ακίδας-γειωμένης πλάκας για αρνητική πολικότητα να είναι πολύ μεγαλύτερη από την τάση διάσπασης για θετική πολικότητα, εκτός από τις πολύ χαμηλές πιέσεις. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στις περιπτώσεις που η τάση Corona προηγείται της τάσης διάσπασης, όπως εδώ. Παρατηρείται δηλαδή σε διατάξεις με έντονα ανομοιογενές πεδίο, όπως διάκενα μεγάλου μήκους με μικρές διαστάσεις ηλεκτροδίων αλλά και στα διάκενα ράβδου-πλάκας και οφείλεται ακριβώς στα φορτία Corona που αλλοιώνουν το πεδίο.

Σχήμα 3.29:  $V_d(s)$ 

Επιπλέον αν συγκρίνουμε το διάγραμμα αυτό με το διάγραμμα του σχήματος 3.9 παρατηρούμε πως είναι παρόμοια. Και στα δύο όσο μεγαλώνουν τα διαστήματα, αυξάνεται η διαφορά των τάσεων αρνητικής και θετικής πολικότητας, κάτι που είναι λογικό αφού όσο το μήκος του διακένου αυξάνεται απαιτείται μεγαλύτερη τάση για τη διάσπαση του.

(ε) Οι τιμές της τάσης διάσπασης παρουσία διαφράγματος θα πρέπει να απεικονιστούν διαγραμματικά ως προς τη θέση τοποθέτησης του διαφράγματος  $x$  για κάθε τιμή του διακένου  $s$  και για τις δύο πολικότητες.

### Απάντηση

Δεν πραγματοποιήθηκε το αντίστοιχο κομμάτι της άσκησης.

### 3.9 Βιβλιογραφία

- [1] Dieter Kind, Kurt Feser, High-Voltage Test Techniques, Εκδόσεις Newnes, 2001
- [2] Σταθόπουλου Ι.Α., Υψηλές Τάσεις Ι, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1989
- [3] Οικονόμου Α. και Φώτη Γ., Εισαγωγή στις Υψηλές Τάσεις, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2010
- [4] John Kuffel, E. Kuffel, W. S. Zaengl, High Voltage Engineering Fundamentals, Newnes, 2000
- [5] Wadhwa C.L., High Voltage Engineering, New Age International Publisher, 2007
- [6] Μιχαήλ Γ. Δανίκας, Στοιχεία Υψηλών Τάσεων, Εκδόσεις Σμπίλιας Α.Ε.Β.Ε, Αθήνα, 2005
- [7] Μαγλάρας Α., Διατριβή :«Μελέτη της Επίδρασης της Γείωσης και του Ρεύματος Corona στη Διηλεκτρική Συμπεριφορά των Μικρών Διακένων Αέρα και στο Φαινόμενο του Διαφράγματος», Αθήνα, 2010

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### *3<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση: «Παραγωγή και Μέτρηση Υψηλών Κρουστικών Τάσεων»*

#### 4.1 Γενικά

Η κρουστική τάση ορίζεται ως μια απεριοδική τάση η οποία φθάνει στη μέγιστη τιμή της σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και κατόπιν μηδενίζεται με βραδύτερο ρυθμό. Οι κρουστικές τάσεις χρησιμοποιούνται κατά τη διεξαγωγή τεχνικών δοκιμών υψηλών τάσεων, με στόχο την προσομοίωση των διηλεκτρικών καταπονήσεων που υφίστανται οι εγκαταστημένες στα ηλεκτρικά δίκτυα διατάξεις όταν αναπτύσσονται επί των δικτύων **εσωτερικές και εξωτερικές υπερτάσεις**. Επίσης χρησιμοποιούνται στις δοκιμές που πραγματοποιούνται στα πλαίσια της μελέτης της διασπάσεως των μονωτικών υλικών. Οι κρουστικές τάσεις χωρίζονται σε δύο είδη. Το πρώτο είδος είναι **οι κεραυνικές υπερτάσεις ή αλλιώς κρουστικές τάσεις μικρής διάρκειας (4.1(α))** και το δεύτερο είδος είναι **οι υπερτάσεις χειρισμών ή κρουστικές τάσεις μεγάλης διάρκειας (4.1(β))**.

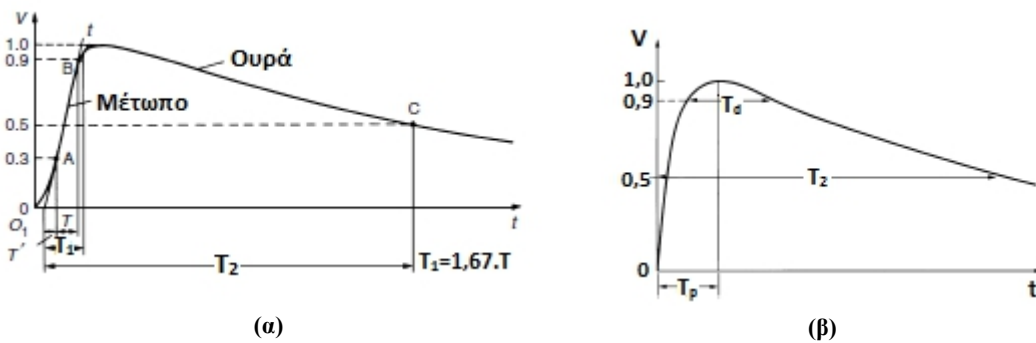
Οι κρουστικές τάσεις στη φύση εμφανίζονται με τη μορφή κεραυνών και παίρνουν τιμές μεγαλύτερες από 1000kV, ενώ τα κεραυνικά ρεύματα μπορούν να φθάσουν σε μέγιστες τιμές των 100-300kA. Εάν κεραυνός πλήξει εναέρια γραμμή μεταφοράς εμφανίζονται οδεύοντα κύματα, των οποίων το πλάτος περιορίζεται από τη μέγιστη διηλεκτρική αντοχή της γραμμής. Ο ρυθμός ανύψωσης της τάσης από ένα τέτοιο οδεύον κύμα είναι ευθέως ανάλογος της κλίσης του κεραυνικού ρεύματος, η οποία μπορεί να ξεπερνά τα 100 kA/s, και τα επίπεδα της τάσης μπορούν να υπολογιστούν από το ρεύμα πολλαπλασιασμένο με την αντίσταση κύματος της γραμμής. Υπερβολικά ψηλά επίπεδα τάσης αποκόπτονται αμέσως εξαιτίας της διάσπασης της μόνωσης και ως εκ τούτου οδεύοντα κύματα με απότομα μέτωπα και ακόμα πιο απότομες ουρές μπορεί να καταπονήσουν σοβαρά τη μόνωση των μετασχηματιστών ισχύος ή άλλου εξοπλισμού υψηλής τάσης. Τα συστήματα αντικεραυνικής προστασίας, τα αλεξικέραυνα και τα διάφορα είδη απωλειών θα μετριάσουν και θα παραμορφώσουν τα οδεύοντα κύματα, με αποτέλεσμα να παραχθούν κεραυνικές υπερτάσεις με πολύ διαφορετικές κυματομορφές στο δίκτυο μεταφοράς.

Οι υπερτάσεις χειρισμών ακολουθούν τους διάφορους χειρισμούς ζεύξης-απόζευξης στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι υπερτάσεις χειρισμών είναι σημαντικά μεγαλύτερης διάρκειας κρουστικές τάσεις. Το πλάτος τους είναι πάντα συσχετισμένο με την τάση λειτουργίας και η κυματομορφή τους επηρεάζεται από τις αντιστάσεις του συστήματος, όπως επίσης και από τις διακοπτικές συνθήκες. Ο ρυθμός ανύψωσης της τάσης είναι συνήθως μικρότερος σε σχέση με το πρώτο είδος, παρόλα αυτά και αυτό το είδος κρουστικής τάσης μπορεί να προκαλέσει διάσπαση της μόνωσης

σε ένα σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μάλιστα είναι σύνηθες τέτοιες υπερτάσεις να εμφανίζονται στο δίκτυο χαμηλής τάσης.

Στο σχήμα 4.1(α) παρουσιάζεται η πλήρης κυματομορφή μιας κεραυνικής υπέρτασης, με τη βοήθεια της οποίας εισάγονται οι ορισμοί των παραμέτρων της κρουστικής τάσης. Συγκεκριμένα:

- $T_2$ : Χρόνος ημίσεως εύρους (κατά τη διάρκεια του οποίου η μέση τιμή της τάσης μειώνεται κατά 50%)
- $T$ : Χρονική διαφορά μεταξύ των σημείων του μετώπου που βρίσκονται στο 90% (σημείο B) και στο 30% (σημείο A) του μεγίστου
- $T_1$ : Χρόνος μετώπου. Με τον όρο αυτό εκφράζεται η χρονική διαφορά μεταξύ του σημείου B και της ονομαστικής αρχής του χρόνου  $O_1$  (είναι το σημείο που η ευθεία που συνδέει τα σημεία A και B περνά από τον οριζόντια άξονα).



Σχήμα 4.1: (α) Πλήρης κυματομορφή κρουστικής τάσης μικρής διάρκειας, (β) Πλήρης κυματομορφή κρουστικής τάσης μεγάλης διάρκειας [3,4]

Ισχύει ο τύπος:

$$T_1 = 1,67 \cdot T \quad (4.1)$$

Κρουστικές τάσεις με διάρκεια μετώπου ( $T_1$ ) της τάξης του 1μs και ημίσεως εύρους ( $T_2$ ) μερικές δεκάδες μs προσομοιώνουν τις κεραυνικές υπερτάσεις ή κρουστικές τάσεις μικρής διάρκειας.

Όσο αφορά τώρα τον καθορισμό των χρόνων που χαρακτηρίζουν τις υπερτάσεις χειρισμών ή κρουστικές τάσεις μεγάλης διάρκειας εισάγονται νέες παράμετροι. Συγκεκριμένα:

- $T_2$ : Χρόνος ημίσεως εύρους. Για τον καθορισμό του ημίσεως εύρους (ουράς) ισχύουν όσα αναφέρθηκαν και στην περίπτωση κρουστικών τάσεων μικρής διάρκειας.
- $T_d$ : Η χρονική διάρκεια κατά την οποία η στιγμιαία τιμή της τάσεως υπερβαίνει το 90% του μεγίστου. Συχνά στην περίπτωση κρουστικών τάσεων μεγάλης διάρκειας προς χαρακτηρισμό της διάρκειας του παλμού και αντί του χρόνου ημίσεως εύρους αναφέρεται αυτή η χρονική διάρκεια.

- $T_p$ : Χρόνος Μεγίστου. Για τον καθορισμό του χρόνου μεγίστου (και όχι μετώπου) λαμβάνεται υπόψιν η πραγματική αρχή των χρόνων και το πραγματικό μέγιστο της κυματομορφής.

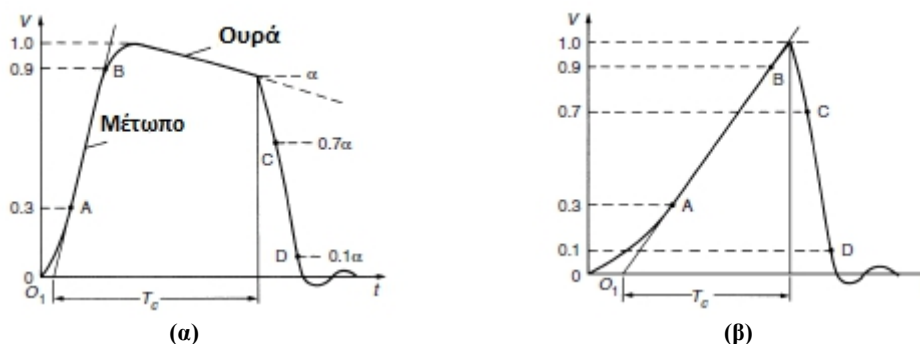
Για την προσομοίωση των καταπονήσεων που δημιουργούν οι υπερτάσεις χειρισμών χρησιμοποιούνται η κυματομορφή 250/2500μs, όπου ο χρόνος μεγίστου και ο χρόνος ημίσεως εύρους είναι αντίστοιχα:

$$T_p = 250\mu s \pm 20\% \text{ και } T_2 = 2500\mu s \pm 60\%.$$

Στις εργαστηριακές δοκιμές όπου γίνεται χρήση κρουστικών τάσεων μικρής διάρκειας σε διάφορα δοκίμια χρησιμοποιείται κυρίως η κυματομορφή 1,2/50μs, η οποία έχει χρόνο μετώπου και χρόνο ημίσεως εύρους αντίστοιχα:

$$T_1 = 1,2\mu s \pm 30\% \text{ και } T_2 = 50\mu s \pm 20\%.$$

Πέραν των πλήρων κυματομορφών υπάρχουν και οι αποκεκομμένες κυματομορφές, οι οποίες χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες. Έτσι έχουμε τις αποκεκομμένες κυματομορφές στο μέτωπο, στην κορυφή ή στην ουρά, οι δύο τελευταίες παρουσιάζονται ενδεικτικά στο σχήμα 4.2. Οι αποκεκομμένες κρουστικές τάσεις δημιουργούνται όταν κατά τη διάρκεια επιβολής της κρουστικής τάσεως συμβεί στο συνδεδεμένο στην κρουστική γεννήτρια δοκίμιο διάσπαση, είτε σκοπούμενη είτε τυχαία στο κύκλωμα υψηλής τάσεως. Σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται απότομος μηδενισμός της τάσης, δημιουργούμενης τότε της αποκεκομμένης κρουστικής τάσης, ο οποίος συνεπάγεται την εμφάνιση της ταλάντωσης της τάσης (μεταβατικό φαινόμενο) [5].

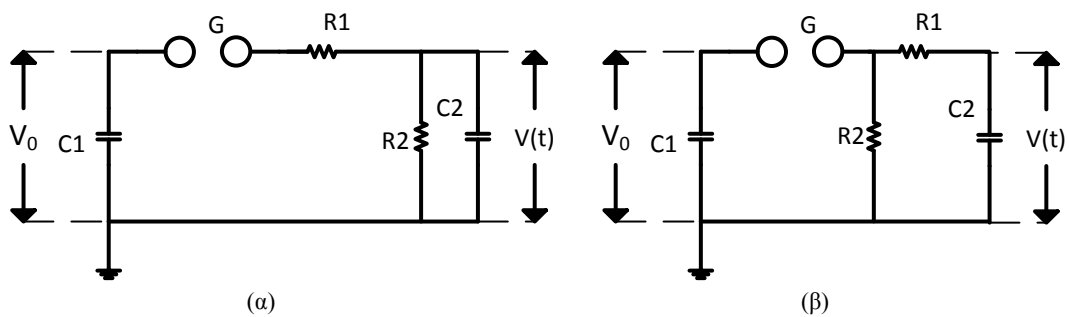


Σχήμα 4.2: (α) αποκεκομμένη κυματομορφή στην ουρά, (β) αποκεκομμένη κυματομορφή στην κορυφή ( $T_c$ : χρονικό διάστημα από την εικονική αρχή  $O_1$  μέχρι τη στιγμή της αποκοπής)

## 4.2 Παραγωγή υψηλών κρουστικών τάσεων

### 4.2.1 Μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια

Η μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια έχει δύο τυπικά κυκλώματα, το κύκλωμα τύπου α (4.3(α)) και το κύκλωμα τύπου β (4.3(β)) κατά VDE. Τα δύο κυκλώματα διακρίνονται μόνο ως προς τη θέση των δύο αντιστάσεων. Και στα δύο κυκλώματα ο πυκνωτής  $C_1$ , που λέγεται πυκνωτής κρούσης, φορτίζεται υπό συνεχή τάση  $V_0$  μέχρι το διάκενο  $G$  να διασπαστεί. Το διάκενο είναι ουσιαστικά ένας διακόπτης (σπινθηριστής) ο οποίος πριν διασπαστεί είναι ανοικτός και κλείνει όταν διασπαστεί. Ο χρόνος διάσπασης του διακένου είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με τον χρόνο μετώπου  $T_1$ . Τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_2$ ) αποτελούν τα στοιχεία διαμόρφωσης της κυματομορφής της κρουστικής τάσης. Συγκεκριμένα, η αντίσταση  $R_1$  λέγεται «αντίσταση μετώπου», καθώς επηρεάζει τον χρόνο μετώπου και η αντίσταση  $R_2$  που εκφορτίζει τους πυκνωτές λέγεται «αντίσταση ουράς ή εκφόρτισης», καθώς παίζει ρόλο στη διαμόρφωση της ουράς εκφόρτισης. Ενώ, ο πυκνωτής  $C_2$  λέγεται «πυκνωτής μετώπου» και αντιπροσωπεύει το φορτίο, δηλαδή το δοκίμιο ή και άλλα χωρητικά στοιχεία παράλληλα σε αυτό.



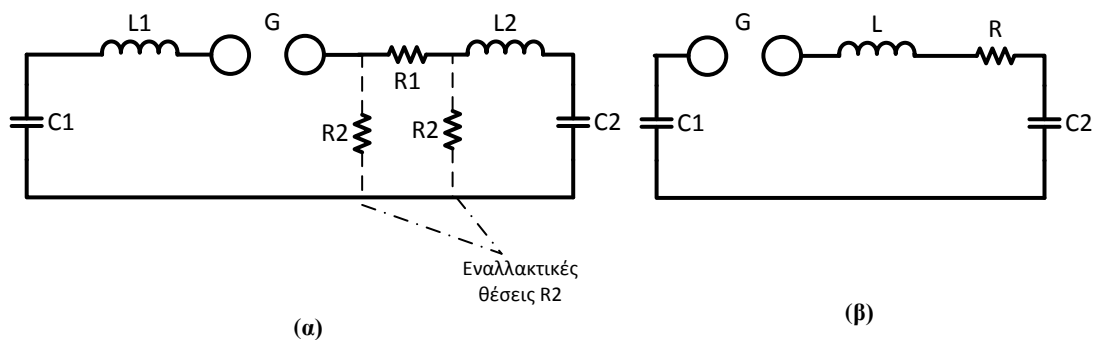
Σχήμα 4.3: (α) Μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια τύπου α, (β) Μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια τύπου β (Δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι επαγωγές)

Εάν οι επαγωγές ληφθούν υπόψιν τότε προκύπτει το κύκλωμα 4.4(α) και 4.4(β), όπου:

$$L = L_1 + L_2 \quad (4.2)$$

και

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.4: (α) Κύκλωμα κρουστικής γεννήτριας με επαγωγές (στο σχήμα φαίνονται οι εναλλακτικές θέσεις της αντίστασης  $R_2$ ), (β) Κύκλωμα για τον υπολογισμό του χρόνου μετώπου [3]

Κατά τη λειτουργία μιας κρουστικής γεννήτριας διακρίνουμε δύο φάσεις: τη φάση της **φόρτισης** και τη φάση της **εκφόρτισης**.

Κατά την 1<sup>η</sup> φάση ο πυκνωτής κρούσης φορτίζεται στη συνεχή τάση  $V_0$ . Όταν λοιπόν ο  $C_1$  φορτιστεί στην επιθυμητή τάση  $V_0$  δημιουργείται ένας σπινθήρας στον διάκενο  $G$  και ο πυκνωτής  $C_1$  συνδέεται στο υπόλοιπο κύκλωμα, οπότε και η 2<sup>η</sup> φάση ξεκινά. Επειδή η  $R_1$  είναι πολύ μικρότερη από την  $R_2$ , ο  $C_2$  θα φορτιστεί μέσω της  $R_1$  με μια σταθερά χρόνου περίπου ίση με  $R_1 \cdot C_2$ . Κατά τη διάρκεια της φόρτισεως του  $C_2$  σχηματίζεται το μέτωπο της κρουστικής τάσεως. Στη συνέχεια οι πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  εκφορτίζονται μέσω της αντίστασης  $R_2$  με μια σταθερά χρόνου ίση περίπου προς  $[(C_1 + C_2) \cdot R_2]$ . Κατά την περίοδο της εκφορτίσεως των δύο πυκνωτών σχηματίζεται η ουρά της κρουστικής τάσεως (4.4(β)). Επειδή κατά κανόνα  $C_1 \gg C_2$  και  $R_2 \gg R_1$ , η ουρά της κρουστικής τάσης διαρκεί πολύ περισσότερο από το μέτωπο.

Η **έναυση** της κρουστικής γεννήτριας μπορεί να επιτευχθεί κατά δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι η «μη ελεγχόμενη» έναυση και ο δεύτερος η «ελεγχόμενη» έναυση.

Για τη «μη ελεγχόμενη» έναυση της γεννήτριας το διάκενο του σπινθηριστή ρυθμίζεται σε μια προκαθορισμένη απόσταση  $d$ , αντιστοιχούσα σε τάση διασπάσεως  $V_d$  και είτε η συνεχής τάση φόρτισης  $V_0$  αυξάνει μέχρι τη  $V_d$ , είτε η  $V_0$  τηρείται μικρότερη της  $V_d$  αλλά μειώνεται το μήκος του διακένου  $d$ . Η «μη ελεγχόμενη» έναυση χαρακτηρίζεται από απλότητα και εφαρμόζεται σε ορισμένες περιπτώσεις δοκιμών, όμως με αυτήν δε μπορούμε να πετύχουμε συγχρονισμό της εκφόρτισης της γεννήτριας και της αφέσεως του παλμογράφου των κρουστικών τάσεων, οπότε δε μπορούμε να καταγράψουμε τις κρουστικές τάσεις.

Η «ελεγχόμενη» έναυση της κρουστικής γεννήτριας ενεργοποιείται είτε χειροκίνητα, οπότε και προσδιορίζεται επακριβώς η χρονική στιγμή εναύσεως, είτε αυτόματα, μόλις η συνεχής τάση φόρτισεως υπερβεί μια εκ των προτέρων καθορισμένη τιμή. Για την επίτευξη της εφαρμοζόμενης εκφορτίσεως εφαρμόζονται διάφοροι τρόποι. Ο πιο διαδεδομένος όμως είναι η συσκευή «**trigatron**», η οποία επιβάλλει στο διάκενο (και συγκεκριμένα μεταξύ της γειωμένης σφαίρας του σπινθηριστή που βρίσκεται προς την πλευρά της χωρητικότητας φορτίου και ενός τρίτου βοηθητικού ηλεκτροδίου) μια βοηθητική κρουστική τάση, η οποία οδηγεί στη διάσπαση του κύριου διακένου του σπινθηριστή [5].

Για το κύκλωμα του σχήματος 4.3(α) η τάση εξόδου είναι:

$$V(s) = \frac{V_0}{s} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (4.4)$$

Όπου:

$$Z_1 = \frac{1}{C_1 \cdot s} + R_1 \quad (4.5)$$

Και

$$Z_2 = \frac{R_2}{R_2 \cdot C_2 \cdot s + 1} \quad (4.6)$$

και αντικαθιστώντας τις σχέσεις (4.2) και (4.3) στην σχέση (4.1) προκύπτει:

$$V(s) = \frac{V_0}{k} \cdot \frac{1}{s^2 + a \cdot s + b} \quad (4.7)$$

Όπου:

$$\alpha = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} + \frac{1}{R_1 \cdot C_2} + \frac{1}{R_2 \cdot C_2} \quad (4.8)$$

$$b = \frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2} \quad (4.9)$$

$$k = R_1 \cdot C_2 \quad (4.10)$$

Όσον αφορά στο κύκλωμα 4.3(β) οι παράμετροι b,k είναι όμοιοι με το κύκλωμα τύπου α ενώ για την παράμετρο α ισχύει:

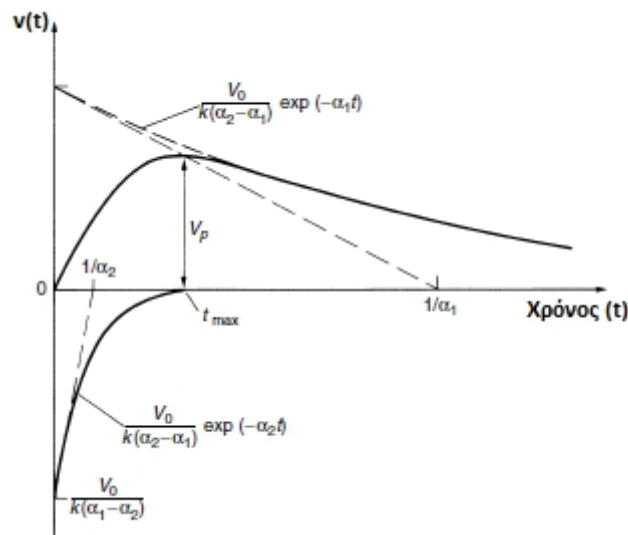
$$\alpha = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} + \frac{1}{R_1 \cdot C_2} + \frac{1}{R_2 \cdot C_1} \quad (4.11)$$

Και για τα δύο κυκλώματα προκύπτει στο πεδίο του χρόνου η ίδια κυματομορφή τάσης εξόδου (σχήμα 4.5):

$$V(t) = \frac{V_0}{k} \cdot \frac{1}{a_2 - a_1} \cdot (e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}) \quad (4.12)$$

Όπου οι ρίζες της εξίσωσης  $s^2 + as + 1 = 0$  είναι:

$$\alpha_{1,2} = \frac{a}{2} \pm \sqrt{(a/2)^2 - b} \quad (4.13)$$



Σχήμα 4.5: Η διπλοεξθετική κυματομορφή της τάσης εξόδου των δύο τύπων κυκλωμάτων της κρουστικής γεννήτριας [3,4]



Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων  $\alpha_1, \alpha_2$  για συγκεκριμένες κυματομορφές κρουστικής τάσης:

Πίνακας 4.1: Τιμές των παραμέτρων  $\alpha_1, \alpha_2$  για συγκεκριμένες κυματομορφές κρουστικής τάσης [3,4]

$T_1/T_2$ ( $\mu s$ )	$T_p/T_2$ ( $\mu s$ )	$1/a_1$ ( $\mu s$ )	$1/a_2$ ( $\mu s$ )
1,2/5	-	3,48	0,80
1,2/50	-	68,2	0,405
1,2/200	-	284	0,381
1,2/2500	-	2877	104
-	250/2500	3155	62,5

Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας ορίζεται ως:

$$n = \frac{V_{max}}{V_0} \quad (4.14)$$

Η χρονική στιγμή  $t_1$  που η τάση γίνεται μέγιστη ( $\frac{dV(t)}{dt} = 0$ ) είναι:

$$t_1 = \frac{\ln\left(\frac{a_2}{a_1}\right)}{a_2 - a_1} \quad (4.15)$$

Συνεπώς ο βαθμός απόδοσης της κρουστικής γεννήτριας είναι:

$$n = \frac{V_{max}}{V_0} = \frac{e^{-a_1 t_1} \cdot e^{-a_2 t_2}}{R_1 \cdot C_2 \cdot (a_2 - a_1)} \quad (4.16)$$

Σύμφωνα με την (4.13) ο βαθμός απόδοσης της κρουστικής γεννήτριας αυξάνει όταν [3,4]:

- Χρησιμοποιείται το κύκλωμα β. Αυτό συμβαίνει γιατί στο κύκλωμα τύπου β δεν υπάρχει πτώση τάσης στην  $R_1$  και έτσι η τάση εξόδου  $V(t)$  και η μέγιστη τάση  $V_{max}$  είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του κυκλώματος α.
- Η αντίσταση  $R_1$  μειώνεται.
- Ο πυκνωτής  $C_2$  είναι όσο το δυνατόν μικρότερος.

Επειδή  $C_1 \gg C_2$  ο βαθμός απόδοσης εκφράζεται επίσης και ως:

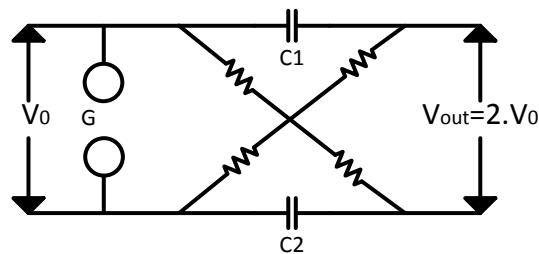
$$n = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (4.17)$$

### 4.2.2 Πολυβάθμια κρουστική γεννήτρια ή γεννήτρια Marx

Βασικό μειονέκτημα της μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας είναι πως η τάση εξόδου της εξαρτάται από τη μέγιστη συνεχή τάση φόρτισης και επομένως τα τροφοδοτικά συνεχούς ρεύματος έχουν πεπερασμένη τιμή της τάσης εξόδου. Ακόμα ο  $C_1$  που χρησιμοποιείται είναι εξαιρετικά ογκώδης και ακριβός. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται οι πολυβάθμιες κρουστικές γεννήτριες στις οποίες για την παραγωγή εξαιρετικά υψηλής τάσης φορτίζονται σε παράλληλη σύνδεση περισσότεροι του ενός πυκνωτές, οι οποίοι έπειτα εκφορτίζονται σε σειρά.

Η πρώτη πολυβάθμια κρουστική γεννήτρια κατασκευάστηκε το 1923 από τον Marx και ήταν διβάθμια (σχήμα 4.6). Τάση  $V_0$  εφαρμόζεται και στους δύο πυκνωτές  $C_1, C_2$  που είναι συνδεδεμένοι παράλληλα. Όταν ο σπινθηριστής διασπαστεί τότε οι δύο πυκνωτές συνδέονται σε σειρά και οι τάσεις τους αθροίζονται, οπότε στην έξοδο της γεννήτριας η τάση είναι:

$$V_{out} = 2 \cdot V_0 \quad (4.18)$$



Σχήμα 4.6: 2-βάθμια κρουστική γεννήτρια Marx

Με αυτή τη λογική προκύπτουν και οι  $n$ -βάθμιες γεννήτριες (σχήμα 4.7). Η διαφορά των δύο κυκλωμάτων είναι ότι στο κύκλωμα 4.7(α) η αντίσταση μετώπου  $R_1$  συνδέεται ολόκληρη έξω από τη γεννήτρια, ενώ στο κύκλωμα 4.7(β) κατανέμεται σε όλες τις βαθμίδες κατά  $r_1$ . Για τα δύο κυκλώματα του σχήματος 4.7 ισχύει:

$$R_1 = n \cdot r_1 \quad (4.19)$$

$$R_2 = n \cdot r_2 \quad (4.20)$$

$$R_3 \gg r_2 \gg r_1 \quad (4.21)$$

$$C_1 = \frac{C_{ki}}{n} \quad (4.22)$$

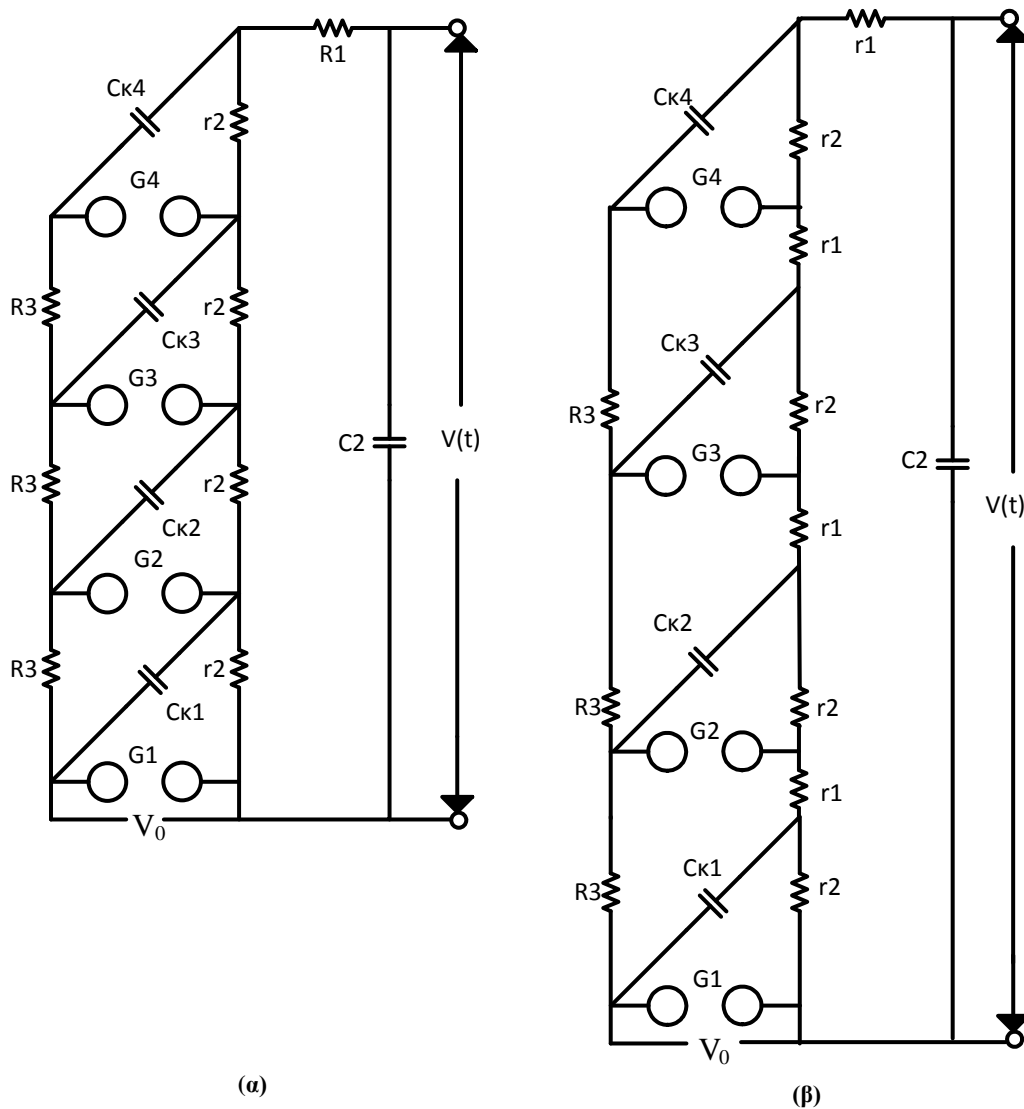
Οι πυκνωτές  $C_{k1}$  έως  $C_{ki}$  είναι πλήρως φορτισμένοι με τάση  $V_0$ . Η εκφόρτιση ξεκινά με τη διάσπαση του πρώτου σπινθηριστή  $G_1$ . Κατόπιν αρχίζει η εκφόρτιση σε σειρά των πυκνωτών  $C_{k1}$  έως  $C_{ki}$  από τη διάσπαση των υπόλοιπων σπινθηριστών, οπότε η συνολική τάση εξόδου είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων των επιμέρους πυκνωτών.

Δηλαδή ισχύει:

$$V_{ολική} = n \cdot V_0 \quad (4.23)$$

Η συνολική ενέργεια της γεννήτριας Marx θα είναι το άθροισμα των ενεργειών των επιμέρους βαθμίδων, δηλαδή:

$$W_{ολική} = n \cdot W_i = \frac{n}{2} \cdot C_{ki} \cdot V_0^2 = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot V_{ολική}^2 \quad (4.24)$$



Σχήμα 4.7: 4-βάθμια κρουστική γεννήτρια Marx (α) τύπου α, (β) τύπου β

### 4.3 Μέτρηση υψηλών κρουστικών τάσεων

Κατά τη δημιουργία κρουστικών τάσεων η μεταβολή της τάσης  $\frac{dV}{dt}$  φθάνει τιμές τάξης  $\frac{kV}{\mu s}$ , με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλων ρευμάτων ( $i = C \cdot \frac{dV}{dt}$ ) τα οποία τελικά δημιουργούν επαγόμενες τάσεις λόγω ισχυρών μεταβατικών πεδίων. Αυτές οι τάσεις προστίθενται στη μετρούμενη κρουστική τάση και αλλοιώνουν την τιμή της. Για να αποφευχθεί αυτή η αλλοίωση πρέπει να τηρούνται τα παρακάτω [3]:

- Όλος ο εξοπλισμός να τοποθετείται σε κλωβό Faraday. Ο κλωβός Faraday είναι ένας μεταλλικός γειωμένος κλωβός με τη χρήση του οποίου το ρεύμα αυτό ρέει εντός του κλωβού και μέσω της γείωσης στη γη χωρίς να επηρεάζει τις μετρήσεις. Το εσωτερικό κάθε εργαστηρίου αποτελεί κλωβό Faraday, αφού το δάπεδο, η οροφή και οι τοίχοι έχουν στο εσωτερικό τους πλέγμα το οποίο γειώνεται.
- Τα όργανα μέτρησης πρέπει να βρίσκονται εντός θωρακισμένου μεταλλικού θαλάμου ώστε να αποφεύγονται οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
- Το ομοαξονικό καλώδιο που χρησιμοποιείται στην πλευρά χαμηλής τάσης του καταμεριστή για τη σύνδεση με τον παλμογράφο πρέπει να είναι διπλής θωράκισης και να είναι τοποθετημένο εντός γειωμένου μεταλλικού σωλήνα, έτσι δε δημιουργείται θόρυβος στο μεταφερόμενο σήμα.
- Πρέπει να υπάρχει στο χώρο του εργαστηρίου σύστημα γείωσης με χαμηλή αντίσταση και αυτεπαγωγή.

#### 4.3.1 Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο

Ανάλογα με την άσκηση 1, παράγραφο 2.3.4.

#### 4.3.2 Διάκενο σφαιρών

Ανάλογα με την άσκηση 1, παράγραφο 2.3.3.

Το ζητούμενο είναι η εύρεση του διακένου για το οποίο η προς μέτρηση υψηλή κρουστική τάση ισούται με την τάση διασπάσεως 50%. Μετά την εξεύρεση του διακένου αυτού από τους διατιθεμένους πίνακες λαμβάνεται η τιμή της καταγραφόμενης κρουστικής τάσεως, η οποία ανάγεται στις επικρατούσες κατά τη διάρκεια της μέτρησης περιβαλλοντικές συνθήκες.

Οι τιμές διασπάσεως του διακένου για κρουστική τάση (μικρής και μεγάλης διάρκειας) αρνητικής πολικότητας ακολουθούν τις τιμές του πίνακα 2.2 της άσκησης 1. Ενώ για κρουστικές τάσεις (μικρής και μεγάλης διάρκειας) θετικής πολικότητας ισχύει ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 4.2: Τιμές διασπάσεως για δεδομένες συνθήκες T,P σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60052:2002

Σφαιρικό Διάκενο s(mm)	Μέγιστη Τάση, kV Σφαιρική διάμετρος D (cm)					
	6,25	10	12,5	15	25	50
5	17,2	16,8	16,8	16,8		
10	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7	
15	45,9	45,5	45,5	45,5	45,5	
20	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0
26	73,5	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5
30	79,5	85,5	85,5	85,5	86,0	86,0
35	82,0	97,5	98,0	98,5	99,0	99,0
40	(91,5)	109	110	111	112	112
45	(101)	120	122	124	125	125
50	(108)	130	134	136	138	138
55	(115)	(139)	145	147	151	151
60		(148)	155	158	163	164
65		(156)	(164)	168	175	177
70		(163)	(173)	178	187	189
80			(189)	(196)	211	214
90			(203)	(212)	233	239
100			(215)	(226)	254	263
110				(238)	273	287
120				(249)	291	311
150					(337)	380
170					(362)	422
200					(395)	480

### 4.3.3 Ωμικός καταμεριστής

Ένας ωμικός καταμεριστής παρουσιάζει εκτός από την ωμική του αντίσταση παράσιτες χωρητικότητες και αυτεπαγωγές. Μια προσέγγιση που μπορεί να γίνει σε θεωρητική βάση για την ικανότητα μεταφοράς υψηλών συχνοτήτων που περιέχονται σε μια κρουστική τάση είναι η εξομοίωση του με μια ομοιογενή γραμμή μεταφοράς με το ένα άκρο της γειωμένο (4.8(α)).

Η τάση  $V_1$  μιας ομοιογενούς γραμμής μεταφοράς συνδέεται με την τάση  $V_2$  και το ρεύμα  $I_2$  στο πέρας της γραμμής με την παρακάτω σχέση:

$$V_1 = V_2 \cdot \cosh(\gamma_1) + I_2 \cdot Z_0 \cdot \sinh(\gamma_1) \quad (4.25)$$

Η σχέση (4.25) για γραμμή με γειωμένο πέρας γίνεται:

$$V_1 = I_2 \cdot Z_0 \cdot \sinh(\gamma_1) \quad (4.26)$$

Όπου:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{j\omega C}} \quad (4.27)$$

και

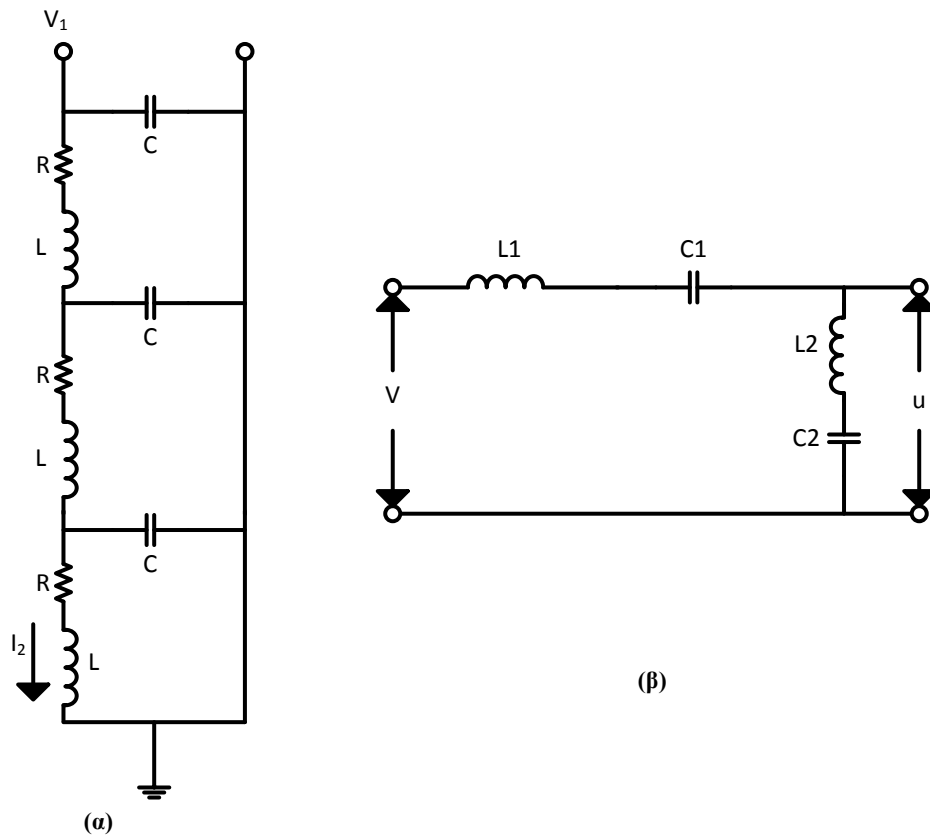
$$\gamma_1 = \sqrt{(R + j\omega L)j\omega C} \quad (4.28)$$

### 4.3.4 Χωρητικός καταμεριστής

Για τον χωρητικό καταμεριστή ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν στην άσκηση 2. Πρέπει όμως να αναφερθεί επιπλέον πως στην πράξη οι αγωγοί σύνδεσης υψηλής και χαμηλής τάσης περιέχουν και αυτεπαγωγές, οι οποίες μαζί με τη χωρητικότητα του καταμεριστή αποτελούν ταλαντούμενα κυκλώματα. Εάν λοιπόν ληφθούν υπόψιν οι αυτεπαγωγές των κυκλωμάτων προκύπτει το κύκλωμα του σχήματος 4.8(β) και ο παρακάτω λόγος καταμερισμού [2]:

$$\kappa = \frac{C_2(1 - L_1 C_1 \omega^2)}{C_1(1 - L_2 C_2 \omega^2)} \quad (4.29)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως συχνά ως χωρητικοί καταμεριστές διαμορφώνονται από τα ίδια τα στοιχεία της κρουστικής γεννήτριας ( $R_2$  και  $C_2$ ), αν παρεμβάλουμε μεταξύ του ακροδέκτη χαμηλής τάσης και της γης τα αντίστοιχα στοιχεία χαμηλής τάσης (δηλαδή μικρή ωμική αντίσταση και μεγάλη χωρητικότητα αντίστοιχα).



Σχήμα 4.8: (α) Ωμικός καταμεριστής, (β) Χωρητικός καταμεριστής

### 4.3.5 Μικτός καταμεριστής ή καταμεριστής τύπου Zaengl

Για την απόσβεση των ταλαντώσεων εισάγονται σε σειρά με τις χωρητικότητες του βραχίονα υψηλής τάσης του καταμεριστή αντιστάσεις. Οι αντιστάσεις αυτές πρέπει να έχουν μεγάλη τιμή ώστε όταν επιβληθεί ένα κύμα τάσης στην κορυφή του καταμεριστή αυτό να αποσβεστεί όταν φθάσει στο κατώτερο άκρο ως προς γη [2].

Ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$R = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{L}{C_e}} \quad (4.30)$$

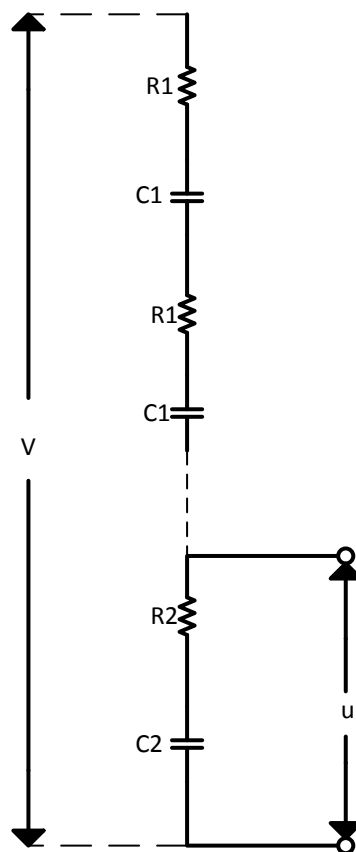
$$R_1 = \frac{R}{N} \quad (4.31)$$

$$C_1 = NC \left(1 - \frac{C_e}{66C}\right) \quad (4.32)$$

όπου L: ολική διαμήκης αυτεπαγωγή

$C_e$ : ολική εγκάρσια χωρητικότητα

N: το πλήθος των ίσων αντιστάσεων  $R_1$  που είναι ίσο με το πλήθος των ίσων πυκνωτών  $C_1$



Σχήμα 4.9: Μικτός Καταμεριστής ή Καταμεριστής τύπου Zaengl

#### 4.4 Εύρεση $T_1$ και $T_2$

##### 4.4.1 Πρώτη μέθοδος

Ανεξαρτήτως του χρησιμοποιούμενου κυκλώματος ( $\alpha$  ή  $\beta$ ) ισχύουν οι αναλογίες:

$$T_1 = \frac{2}{b} \cdot \tau_2 \quad (4.33)$$

$$T_2 = \frac{1}{\alpha} \cdot \tau_1 \quad (4.34)$$

Ενώ οι συντελεστές αναλογίας για κάθε μια από τις τρεις γνωστότερες και ευρύτερα χρησιμοποιούμενες προτυποποιημένες κρουστικές τάσεις δίνονται από τον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Συντελεστές αναλογίας [2]

Συν/τές $T_1/T_2$	1,2/5 $\mu\text{s}$	1,2/50 $\mu\text{s}$	1,2/200 $\mu\text{s}$
$1/\alpha$	1,435	0,733	0,704
$2/b$	1,500	2,963	3,150

Οι απλές προσεγγιστικές σχέσεις που συνδέουν τις χρονικές σταθερές με τα στοιχεία του κυκλώματος παραγωγής κρουστικής τάσεως, καθώς και ο συντελεστής χρησιμοποίησεως δίνονται στη συνέχεια για κάθε μια από τις δύο συνηθέστερες συνδεσμολογίες:

τύπου  $\alpha$

$$\tau_1 \cong (R_2 + R_1) \cdot (C_1 + C_2) \quad (4.35)$$

$$\tau_2 \cong \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (4.36)$$

$$n \cong \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (4.37)$$

τύπου  $\beta$

$$\tau_1 \cong R_2 \cdot (C_1 + C_2) \quad (4.38)$$

$$\tau_2 \cong R_1 \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (4.39)$$

$$n \cong \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (4.40)$$



#### 4.4.2 Δεύτερη μέθοδος

Ειδικά για τον υπολογισμό των στοιχείων γεννήτριας κρουστικής τάσεως της μορφής 1,2/50 μs υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής μιας ακόμα απλούστερης μεθόδου για την επιλογή των αντιστάσεων μετώπου και ουράς εφόσον οι χωρητικότητες του κυκλώματος είναι γνωστές. Αν όμως και οι τιμές των αντιστάσεων είναι δεδομένες τότε μπορούν να βρεθούν οι αντίστοιχοι χρόνοι.

Πίνακας 4.4 [2]

<b>n</b> \ <b>C<sub>2</sub>/C<sub>1</sub></b>	<b>0,04</b>	<b>0,08</b>	<b>0,12</b>	<b>0,16</b>	<b>0,20</b>
<b>A</b>	0,850	0,820	0,810	0,800	0,770
<b>B</b>	0,932	0,899	0,868	0,837	0,810

Οπότε:

$$T_1 = \frac{n \cdot R_1 \cdot C_2}{333} \quad (4.41)$$

$$T_2 = \frac{R_2 \cdot C_1}{1410 \cdot n} \quad (4.42)$$

#### 4.5 Η έννοια της αβεβαιότητας

##### 4.5.1 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου A

Η αβεβαιότητα τύπου A υπολογίζεται βάσει στατιστικών κανόνων. Χρησιμοποιείται όταν το αποτέλεσμα  $x$  μιας μέτρησης προκύπτει από τις τιμές  $x_i$ ,  $i=1,2,\dots,n$  των  $n$  ανεξάρτητων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων μιας μη μεταβαλλόμενης ποσότητας  $X$ , κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες επαναληψιμότητας, χρησιμοποιώντας όργανα μέτρησης χαρακτηριζόμενα από αμελητέα απόκλιση στο χρονικό διάστημα που διαρκεί η μέτρηση. Επειδή η πραγματική κατανομή σπάνια είναι γνωστή, προσεγγίζεται με την **κανονική κατανομή**.

- Για μικρό αριθμό μετρήσεων (π.χ.10):

Η αβεβαιότητα τύπου A δίνεται από τη σχέση:

$$V_r = \frac{t \cdot s_r}{\sqrt{n}} \quad (4.43)$$

όπου  $t$ : Συντελεστής Student, δίνεται από τον Πίνακα 4.5

$P$ : Το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης

$s_r$ : Τυπική απόκλιση του δείγματος των μετρήσεων του δίνεται από τη σχέση:

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \quad (4.44)$$

- όπου    n: ο αριθμός των μετρήσεων  
           $x_i$ : οι μετρηθείσες τιμές  
           $x_m$ : η μέση τιμή των μετρήσεων

**Πίνακας 4.5: Τιμές του συντελεστή t για διάφορα επίπεδα εμπιστοσύνης συναρτήσει του αριθμού των μετρήσεων [2]**

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

Εαν η τυπική απόκλιση  $s$  αναφέρεται στην τάση διάσπασης  $V_{d-50}$ , τότε ορίζεται ο συντελεστής μεταβολής  $v$ :

$$v = s/V_{d-50} \quad (4.45)$$

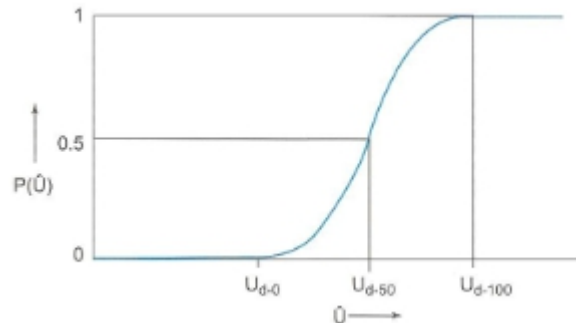
Η σχέση (4.45) μπορεί να ισχύσει για οποιαδήποτε κατανομή. Αν θεωρήσουμε κανονική κατανομή οι τιμές της  $V_{d-50}$  θα πρέπει να περιέχονται εντός της περιοχής  $V_{d-50} \pm 3s$ , οπότε:

«**impulse withstand voltage-κρουστική τάση αντοχής**» (σημαντικός σχεδιαστικός παράγοντας των μονωτικών επιπέδων στις εγκαταστάσεις):

$$V_{d-0} \approx V_{d-50} - 3s \quad (4.46)$$

«assured breakdown voltage- σίγουρη τάση διάσπασης» (αποτελεί το ανώτερο όριο της περιοχής διασποράς):

$$V_{d-100} \approx V_{d-50} + 3s \quad (4.47)$$



Εικόνα 4.10: Συνάρτηση κατανομής της κρουστικής τάσης διάσπασης του σφαιρικού διακένου [8]

#### 4.5.2 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου B

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

Η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων τύπου B είναι:

$$U_s = k \cdot s_s = k \cdot \sqrt{s_{sa}^2 + s_{sg}^2} \quad (4.48)$$

όπου  $s_{sa}$ : Τυπική απόκλιση για την περίπτωση ορθογώνιας κατανομής.

$s_{sg}$ : Τυπική απόκλιση στην περίπτωση κανονικής κατανομής

$k$ : Συντελεστής κάλυψης  $\rightarrow$  συντελεστής Student t για  $\infty$  πλήθος μετρήσεων

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

$$s_{sg} = \frac{U_{95}}{2} \quad (4.49)$$

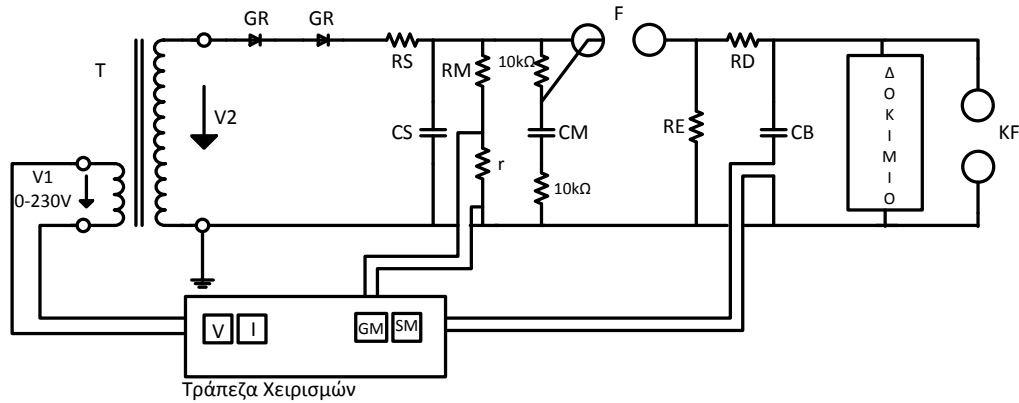
#### 4.5.3 Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας

Η ολική αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση:

$$u_{total} = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} \quad (4.50)$$

#### 4.6 Πειραματική διάταξη

Για την πραγματοποίηση των πειραματικών διαδικασιών αυτής της άσκησης θα χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω εξοπλισμός:



Σχήμα 4.11: Πειραματική διάταξη

- όπου
- T μετασχηματιστής δοκιμής λόγο μετασχηματισμού  $220V/100kV$  και ονομαστική ισχύ 5kVA
  - GR: ανορθωτής σεληνίου(selenium) με τάση αναστροφής ίση με 140kV, ονομαστικό ρεύμα 5mA
  - KF: σφαιρικό Διάκενο, D=100mm
  - F: σπινθηριστής (σφαιρικό διάκενο με «trigatron”,D=100mm)
  - ZG: trigatron για παραγωγή κρουστικών παλμών 5kV
  - GM: βολτόμετρο d.c. τάσης
  - SM: βολτόμετρο μεγίστου
  - R: 140MΩ
  - r: 3,27kΩ, αντίσταση χαμηλής τάσης για τη δημιουργία ωμικού καταμεριστή
  - RS: 10MΩ
  - CS: 6000pF
  - CB: 1200pF
  - CM: 100pF
- Για κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs:
- RD: 416Ω
  - RE: 9500Ω
- Για κρουστικές τάσεις 1,2/5 μs:
- RD: 830Ω
  - RE: 485Ω
- Δοκίμιο (Δ): Μονωτικό υλικό αντοχής 10kV με προστατευτικό διάκενο s=86mm

#### 4.6.1 Μελέτη της μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας

Η πειραματική διάταξη του σχήματος 4.10 απεικονίζει μια μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια τύπου β (δε χρησιμοποιείται εδώ το trigatron και το δοκίμιο). Θεωρούμε πως φορτίζεται η γεννήτρια με συνεχή τάση  $V_0$  περίπου ίση με 90kV. Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης  $V_{max}$  θα υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το σφαιρικό διάκενο KF. Συγκεκριμένα, ένας αριθμός κρουστικών τάσεων σταθερού  $V_{max}$  (π.χ. συνολικά 10 τάσεις) εφαρμόζονται στο σφαιρικό διάκενο ενώ το μήκος του διακένου μεταβάλλεται μέχρι οι μισές από τις εφαρμοζόμενες τάσεις (δλδ. 5) να οδηγήσουν σε διάσπαση. Στη συνέχεια γνωρίζοντας το μήκος του διακένου  $s$  βρίσκουμε τη μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης η οποία ισούται με την τάση διάσπασης  $V_d$  με τη βοήθεια των παραγράφων 2.3.3 και 4.3.2, και ανάγουμε τη θεωρητική τιμή σε πραγματική μέσω της πραγματικής σχετικής πυκνότητας του αέρα. Αυτή η διαδικασία θα διεξαχθεί και για τις δύο πολικότητες (θετική και αρνητική) της κρουστικής τάσης μορφής 1,2/50 μs (περιπτώσεις I και II αντίστοιχα) και μόνο για την αρνητική πολικότητα της 1,2/5 μs κρουστικής τάσης (περίπτωση III). Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τα υπάρχοντα στοιχεία να αναδιαταχθεί το κύκλωμα από β σε α και να επαναληφθεί η μέτρηση της κρουστικής τάσης 1,2/5 μs (περίπτωση IV).

Πίνακας 4.6: Περίπτωση I

$s =$	Επαναλήψεις	Επιτυχία/Αποτυχία
	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	

<b>Πίεση P(mbar)</b>		<b>Θερμοκρασία T(°C)</b>		<b>Υγρασία(%)</b>	
--------------------------	--	------------------------------	--	-------------------	--

Πίνακας 4.7: Περίπτωση II

s =	Επανάληψεις	Επιτυχία/Αποτυχία
	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	

Πίεση P(mbar)		Θερμοκρασία T(°C)		Υγρασία(%)	

Πίνακας 4.8: Περίπτωση III

s =	Επανάληψεις	Επιτυχία/Αποτυχία
	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	

Πίεση P(mbar)		Θερμοκρασία T(°C)		Υγρασία(%)	

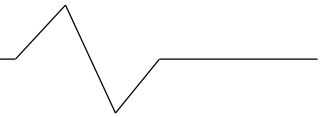
Πίνακας 4.9: Περίπτωση IV

s =	Επανάληψεις	Επιτυχία/Αποτυχία
	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	

Πίεση P(mbar)		Θερμοκρασία T(°C)		Υγρασία(%)	

Πίνακας 4.10: Συγκεντρωτικός Πίνακας

	I	II	III	IV
Μήκος διακένου s(mm)				
Τάση διάσπασης $V_d$ (kV) (θεωρητική)				
Τάση διάσπασης σε πραγματικές συνθήκες $V_d$ (kV)				
$n_{\text{πειραματική}}$				
$n_{\text{θεωρητική}}$				



#### 4.6.2 Συνάρτηση διασποράς πιθανότητας διάσπασης $P(\hat{V})$

Με τη βοήθεια του trigger που συνδέεται μέσω του πυκνωτή CM στον σπινθηριστή F του κυκλώματος β παράγεται θετική 1,2/50μs κρουστική τάση. Το trigger επιτρέπει την έναυση της κρουστικής γεννήτριας σε μια προκαθορισμένη τιμή τάσης φόρτισης. Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης προκύπτει χρησιμοποιώντας την τιμή φόρτισης  $V_0$  και τον συντελεστή απόδοσης από την περίπτωση (I) της παραγράφου 4.5.1:

$$V_{max} = n \cdot V_0 \approx V_{d-50} \quad (4.51)$$

Στο σχήμα 4.10 φαίνεται ένα δοκίμιο το οποίο αντιπροσωπεύει τη διαμόρφωση ενός ανομοιογενούς πεδίου και ένα σφαιρικό διάκενο KF που αντιπροσωπεύει ένα σχεδόν ομοιογενές πεδίο (εδώ το μήκος διακένου του KF είναι σταθερό και ίσο με  $s = 25mm$ ).

Για να καταγράψει η συνάρτηση διασποράς θα ακολουθηθεί η μέθοδος «δοκιμής πολλαπλών επιπέδων»:

Χρησιμοποιώντας τουλάχιστον τρία επίπεδα τάσης στο εύρος της αναμενόμενης τάσης διάσπασης  $V_{d-50}$  δέκα ή περισσότερες κρουστικές τάσεις εφαρμόζονται. Για κάθε επίπεδο τάσης μια πιθανότητα διάσπασης μπορεί να υπολογιστεί αμέσως από τον αριθμό των διασπάσεων, αφού για παράδειγμα  $\frac{3 \text{ διασπάσεις}}{10 \text{ επαναλήψεις}}$

$\Rightarrow P(\hat{V}) = 30\%$ . Σε περίπτωση διάσπασης να σημειώνεται στο παρακάτω πίνακα η εκάστοτε τάση διάσπασης  $V_i$ .

Πίνακας 4.11

Είδος δοκιμίου	Επίπεδο Τάσης(kV)	Επαναλήψεις										$P(\hat{V})$	$V_m$	s (kV)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Διάκενο σφαιρών														
Δοκίμιο														



Για κάθε επίπεδο τάσης θα προκύψει μια πιθανότητα διάσπασης και έτσι θα προκύψει ένα κοινό διάγραμμα  $P(\hat{V})$  για τα δύο δοκίμια. Από αυτό το διάγραμμα θα μπορούν να υπολογιστούν τα ζητούμενα του πίνακα 4.12.

Πίνακας 4.12

	Σφαιρικό Διάκενο	Δοκίμιο
$V_{d-50}$ (kV)		
$v$ (%)		
$V_{d-0}$ (kV)		
$V_{d-100}$ (kV)		

#### 4.7 Ερωτήματα

(α) Να υπολογιστούν ο χρόνος μετώπου  $T_1$  και ο χρόνος ημίσεως εύρους  $T_2$  από τα δεδομένα του κυκλώματος 4.10 και την 1<sup>η</sup> μέθοδο και να επιβεβαιωθεί πως βρίσκονται εντός ορίων. Να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης με αυτή τη μέθοδο επίσης.

(β) Να υπολογιστεί η θεωρητική τιμή του συντελεστή απόδοσης  $\eta$  και με τη βοήθεια της 2<sup>ης</sup> μεθόδου. Στη συνέχεια να συγκριθεί με τη πραγματική τιμή που προέκυψε από τις μετρήσεις της παραγράφου 4.6.1.

(γ) Η συνάρτηση διασποράς  $P(\hat{V})$  πρέπει να παρασταθεί σε κοινό διάγραμμα για το σφαιρικό διάκενο και το δοκίμιο. Η μέση τιμή της κρουστικής τάσης και τα όρια όπου βρίσκεται η αληθής τιμή σύμφωνα με τους υπολογισμούς της αβεβαιότητας  $\alpha$  να φαίνονται στο διάγραμμα.

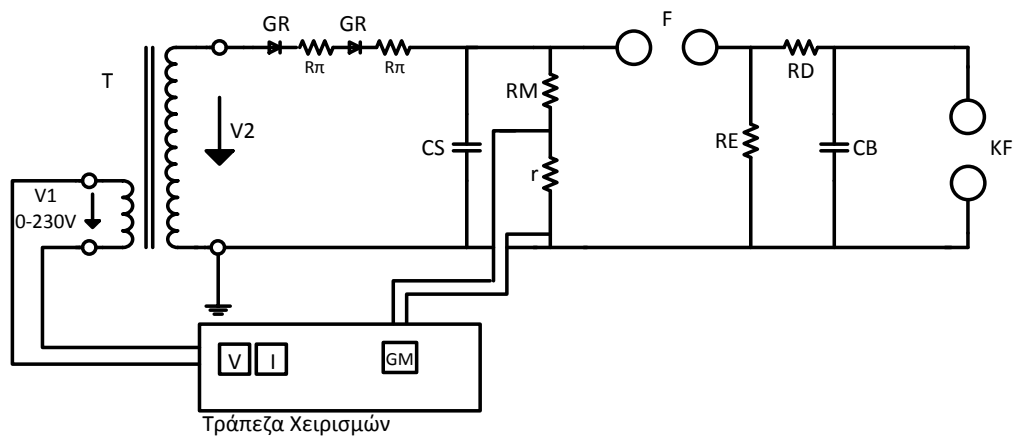
(δ) Οι περιοχές διασποράς των δύο δοκιμίων πρέπει να συγκριθούν και να δικαιολογηθεί που οφείλεται η διαφορά τους.

(ε) Να χρησιμοποιηθεί το σύστημα καταγραφής κρουστικής τάσης DiAS 733 και να καταγραφούν χαρακτηριστικές κυματομορφές της τάσης (π.χ. πλήρης κυματομορφή, αποκεκομμένη στην ουρά, στην κορυφή, στο μέτωπο). Να συγκριθούν τα συμπεράσματα των ερωτημάτων (α) και (β) με τα δεδομένα που προκύπτουν από την πλήρη κυματομορφή.

## 4.8 Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις στο Εργαστήριο

Η 3<sup>η</sup> άσκηση πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο, ώστε να επαληθευτεί η ορθότητα τόσο της διάταξης όσο και των ερωτημάτων που προτείνονται. Οι μετρήσεις που καταγράφηκαν από τη διεξαγωγή της άσκησης επεξεργάζονται και αναλύονται σε αυτήν την παράγραφο. Για την περαιτέρω μελέτη της παραγωγής και μέτρησης υψηλών κρουστικών τάσεων στα πλαίσια αυτής της άσκησης και πέραν των προτεινόμενων ερωτημάτων κατασκευάστηκε και μελετήθηκε διβάθμια κρουστική γεννήτρια (παράγραφος 4.9).

### 4.8.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη



Σχήμα 4.12: Πειραματική διάταξη

- όπου
- T: μετασχηματιστής δοκιμής λόγο μετασχηματισμού  $220V/100kV$  και ονομαστική ισχύ  $5kVA$
  - GR: ανορθωτής σεληνίου(selenium) με τάση αναστροφής ίση με  $140kV$ , ονομαστικό ρεύμα  $5mA$  με  $R_{\pi} = 500k\Omega$
  - KF: Σφαιρικό Διάκενο,  $D=100mm$
  - F: Σπινθηριστής (σφαιρικό διάκενο,  $D=100mm$ )
  - GM: Βολτόμετρο d.c. τάσης
  - SM: Βολτόμετρο μεγίστου
  - RM:  $140M\Omega$
  - r:  $3,27k\Omega$ , αντίσταση χαμηλής τάσης για τη δημιουργία ωμικού καταμεριστή
  - CS:  $6000pF$
  - CB:  $1200pF$
  - B: Βολτόμετρο καταγραφής κρουστικής τάσης
- Για κρουστικές τάσεις  $1,2/50 \mu s$ :
- RD:  $416\Omega$
  - RE:  $9500\Omega$



Σχήμα 4.13: Φωτογραφίες πειραματικής διάταξης από το εργαστήριο

#### 4.8.2 Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις

Η πειραματική διάταξη του σχήματος 4.11 απεικονίζει μια μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια τύπου β. Θεωρούμε πως φορτίζεται η γεννήτρια με συνεχή τάση  $V_0$  περίπου ίση με 70kV. Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης  $V_{\max}$  θα υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το σφαιρικό διάκενο KF. Συγκεκριμένα, ένας αριθμός κρουστικών τάσεων σταθερού  $V_{\max}$  (π.χ. συνολικά 10 τάσεις) εφαρμόζονται στο σφαιρικό διάκενο ενώ το μήκος του διακένου μεταβάλλεται μέχρι οι μισές από τις εφαρμοζόμενες τάσεις (δλδ. 5) να οδηγήσουν σε διάσπαση. Στη συνέχεια γνωρίζοντας το μήκος του διακένου  $s$  βρίσκουμε τη μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης η οποία ισούται με την τάση διάσπασης  $V_{d-50}$ . Αυτή η διαδικασία θα διεξαχθεί στην προκειμένη περίπτωση μόνο για κρουστικές τάσεις θετικής και αρνητικής πολικότητας μορφής 1,2/50  $\mu$ s (περιπτώσεις I και II αντίστοιχα), καθώς τις αντιστάσεις που απαιτούνταν για την υλοποίηση της μορφής 1,2/5 $\mu$ s δεν τις διαθέταμε.

**Αρχικά** θέλουμε να υπολογίσουμε το διάκενο του F ώστε για συνεχή τάση 70kV να διασπάται και να κλείνει το κύκλωμα. Μετά από αυξομειώσεις του διακένου  $s$  παρατηρούμε πως η τιμή του πρέπει να ισούται με  $s=24\text{mm}$ .

**Στη συνέχεια** χρησιμοποιήσαμε ωμικό καταμεριστή αποτελούμενο από  $R_1 = RM = 140M\Omega$  και  $R_2 = 3,27k\Omega$ , οπότε ο λόγος καταμερισμού  $\kappa$  που προκύπτει ισούται με:

$$\kappa = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 2,336 \cdot 10^{-5}$$

Επομένως  $u = \kappa \cdot V \approx 2,336 \cdot 10^{-5} \cdot 65 \cdot 10^3 = 1,635V$ .

Σε αυτό το πείραμα θέλουμε να παρατηρήσουμε ένα διάκενο  $s$  του διακένου σφαιρών KF για το οποίο οι μισές προσπάθειες θα καταλήγουν σε διάσπαση και οι άλλες μισές όχι. Έπειτα γνωρίζοντας την τιμή του διακένου θα συμβουλευτούμε τον πίνακα και θα βρούμε την τάση διάσπασης,  $V_{d-50}$ .

Αυτό που κάνουμε λοιπόν είναι να δίνουμε τάση στον μετασχηματιστή μέσω της τράπεζας και να ανεβάζουμε αυτή την τάση μέχρι να συμβεί διάσπαση στο F. Παρακολουθούμε ταυτόχρονα την τιμή της συνεχούς τάσης πριν τη διάσπαση μέσω βολτομέτρου που είναι συνδεδεμένο στον ωμικό καταμεριστή και περιμένουμε η διάσπαση του σπινθηριστή να γίνει περί τα 1,64V. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία όσες φορές χρειαστεί μέχρι να βρούμε το επιθυμητό διάκενο του KF.

Μετά από αρκετές επαναλήψεις προέκυψαν οι παρακάτω πίνακες:

- για κρουστική τάση θετικής πολικότητας και περιβαλλοντικές συνθήκες (στις 11/1/2013):

Πίνακας 4.13: Περίπτωση Ι

<b>Πίεση P(mbar)</b>	991	<b>Θερμοκρασία T(°C)</b>	21,8	<b>Υγρασία(%)</b>	44,4 <sup>1</sup>
--------------------------	-----	------------------------------	------	-------------------	-------------------

s = 19,5 mm	Επαναλήψεις	Επιτυχία/Αποτυχία	V <sub>0</sub> (V)
	1	επιτυχία	1,649
	2	αποτυχία	1,632
	3	επιτυχία	1,629
	4	αποτυχία	1,615
	5	αποτυχία	1,629
	6	επιτυχία	1,649
	7		
	8		
	9		
	10		

Στην περίπτωση αυτή δυσκολευτήκαμε να βρούμε το επιθυμητό s. Καθώς μια μικρή αύξηση του (0,1mm) οδηγούσε σε αποτυχία κάθε φορά που επαναλαμβάναμε την κρούση, ενώ μια μικρή μείωση του (0,1mm) οδηγούσε κάθε φορά σε επιτυχία. Τελικά καταλήξαμε στο διάστημα s=19,5 με λιγότερες των 10 επαναλήψεις, συγκεκριμένα με 3 επιτυχίες στις 6 επαναλήψεις.

- για κρουστική τάση αρνητικής πολικότητας και περιβαλλοντικές συνθήκες (στις 10/1/2013):

Πίνακας 4.14: Περίπτωση ΙΙ

<b>Πίεση P(mbar)</b>	998	<b>Θερμοκρασία T(°C)</b>	23,2	<b>Υγρασία(%)</b>	24,9 <sup>2</sup>
--------------------------	-----	------------------------------	------	-------------------	-------------------

s = 20 mm	Επαναλήψεις	Επιτυχία/Αποτυχία	V <sub>0</sub> (V)
	1	επιτυχία	-1,645
	2	επιτυχία	-1,653
	3	αποτυχία	-1,642
	4	επιτυχία	-1,653
	5	αποτυχία	-1,612
	6	επιτυχία	-1,623
	7	αποτυχία	-1,649
	8	αποτυχία	-1,641
	9	επιτυχία	-1,621
	10	αποτυχία	-1,642

<sup>1</sup> Βροχερή μέρα, αλλά ο χώρος του εργαστηρίου θερμαινόταν.

<sup>2</sup> Ο χώρος του εργαστηρίου θερμαινόταν.



Από τους αντίστοιχους πίνακες της θεωρίας των σφαιρικών διακένων προκύπτει πως για αυτά τα  $s$  στην περίπτωση και των δύο κρουστικών τάσεων η τάση  $V_{d-50} = 59kV$ .

Το επόμενο μας βήμα είναι να αναγάγουμε **την τάση αυτή σε περιβαλλοντικές συνθήκες**. Για αυτό το λόγο ακολουθούμε την παρακάτω μέθοδο:

Μια παράμετρος που επηρεάζει την τάση διασπάσεως του διακένου είναι η πυκνότητα του αέρα και η ποσότητα υδρατμών που περιέχεται σε αυτόν, συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του αέρα και όσο περισσότερους υδρατμούς περιέχει τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση διασπάσεως. Οι τιμές διασπάσεως που δίνονται στον πίνακα 2.2. αναφέρονται σε θερμοκρασία  $T=20^{\circ}C$ , πίεσης  $P=101,3kPa$  (760mmHg) και περιεκτικότητας υδρατμών  $8,5g/m^3$ .

Αν η πραγματική πυκνότητα του αέρα διαφέρει από τις συνθήκες αναφοράς πρέπει να αναγάγουμε τις τιμές αυτού του πίνακα στις πραγματικές συνθήκες.

Ισχύει η σχέση (2.11)  $V_d = k_d \cdot V_{d0}$ , όπου  $k_d$  είναι ο διορθωτικός παράγοντας που σχετίζεται με την πραγματική πυκνότητα αέρα και  $V_{d0}$  οι τάσεις διασπάσεως από πίνακα 2.2..

Ο δείκτης  $k_d$  προκύπτει από τη σχέση (2.12):  $k_d = \delta \cdot k$

Ο διορθωτικός συντελεστής πυκνότητας αέρα  $\delta$  ορίζεται από τη σχέση (2.13):

$$\delta = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{273+T_0}{273+T}$$

όπου  $P_0 = 101,3kPa$  και  $T_0 = 20^{\circ}C$ , ενώ τα μεγέθη  $T, P$  αναφέρονται στις συνθήκες του πειράματος.

Ενώ ο διορθωτικός συντελεστής υγρασίας ορίζεται από τη σχέση (2.14):

$$k = 1 + 0,002 \cdot \left( \frac{h}{\delta} - h_0 \right)$$

όπου  $h_0 = 8,5 \frac{g}{m^3}$  και  $h$  να αναφέρεται στις συνθήκες του πειράματος.

- για κρουστική τάση θετικής πολικότητας και περιβαλλοντικές συνθήκες (στις 11/1/2013)  $T = 21,8^{\circ}C$ ,  $P = 991mbar \stackrel{3}{\Rightarrow} 99,1kPa$  και υγρασία 44,4% (βροχερή μέρα)  $\stackrel{4}{\Rightarrow} 8,057 \frac{g}{m^3}$  έχουμε:

$$\delta = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{273+T_0}{273+T} = \frac{99,1}{101,3} \cdot \frac{273+20}{273+21,8} = 0,97$$

και

$$k = 1 + 0,002 \cdot \left( \frac{h}{\delta} - h_0 \right) = 1 + 0,002 \cdot \left( \frac{8,057}{0,97} - 8,5 \right) = 0,999$$

Οπότε από τη σχέση (2.12) προκύπτει πως:  $k_d = \delta \cdot k = 0,969 \cong 0,97$

<sup>3</sup>  $1Pa = 10^{-5}bar$

<sup>4</sup> <http://www.cactus2000.de/uk/unit/masshum.shtml>

Οπότε από τη σχέση (2.11) προκύπτει τελικά:  $V_d = k_d \cdot V_{d0} = 0,97 \cdot 59kV = 57,23kV$

- για κρουστική τάση αρνητικής πολικότητας και περιβαλλοντικές συνθήκες (στις 10/1/2013):  $T = 23,2^\circ C$ ,  $P = 998mbar \Rightarrow 99,8kPa$  και υγρασία  $24,9\% \Rightarrow 5,18^g/m^3$ :

$$\delta = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{273+t_0}{273+t} = \frac{99,8}{101,3} \cdot \frac{273+20}{273+23,2} = 0,97$$

και

$$k = 1 + 0,002 \cdot \left( \frac{h}{\delta} - h_0 \right) = 1 + 0,002 \cdot \left( \frac{5,18}{0,97} - 8,5 \right) = 0,994$$

Οπότε από τη σχέση (2.12) προκύπτει πως:  $k_d = \delta \cdot k = 0,964 \cong 0,96$

Οπότε από τη σχέση (2.11) προκύπτει τελικά:  $V_d = k_d \cdot V_{d0} = 0,96 \cdot 59kV = 56,64kV$

Όσο αφορά τώρα τον **βαθμό απόδοσης** της γεννήτριας υπάρχουν δύο τύποι:

- Για τη θεωρητική προσέγγιση ισχύει η σχέση (4.17):  $n = \frac{C_1}{C_1+C_2}$

Σύμφωνα με τη πειραματική μας διάταξη  $C_1 = CS = 6000pF$  και  $C_2 = CB = 1200pF$  και επειδή  $C_1 \gg C_2$  προκύπτει τελικά πως ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης ισούται με:

$$n = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{6000}{6000 + 1200} = 0,83$$

- Για την πειραματική προσέγγιση ισχύει η σχέση (4.14):  $n = \frac{V_{max}}{V_0}$

Όπου  $V_0 \cong 70kV$  και  $V_{max/+} = 57,23kV$ , ενώ  $V_{max/-} = 56,64kV$ , άρα:

$$n_+ = 0,817 \cong 0,82$$

$$n_- = 0,809 \cong 0,81$$

<sup>5</sup>  $1Pa = 10^{-5}bar$

<sup>6</sup> <http://www.cactus2000.de/uk/unit/massshum.shtml>

Πίνακας 4.15: Συγκεντρωτικός πίνακας

	I	II	III	IV
Μήκος διακένου s(mm)	19,5	20	-	-
Τάση διάσπασης $V_d$ (kV) (θεωρητική)	59	59	-	-
Τάση διάσπασης σε πραγματικές συνθήκες $V_d$ (kV)	57,23	56,64	-	-
$n_{\text{πειραματική}}$	0,82	0,81	-	-
$n_{\text{θεωρητική}}$	0,83	0,83	-	-

### 4.8.3 Απαντήσεις στα Ερωτήματα

(α) Να υπολογιστούν ο χρόνος μετώπου  $T_1$  και ο χρόνος ημίσειας εύρους  $T_2$  από τα δεδομένα του κυκλώματος 4.10 και την 1<sup>η</sup> μέθοδο και να επιβεβαιωθεί πως βρίσκονται εντός ορίων. Να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης με αυτή τη μέθοδο επίσης.

#### Απάντηση

Ανεξαρτήτως του χρησιμοποιούμενου κυκλώματος (α ή β) ισχύουν οι αναλογίες:

$$T_1 = \frac{2}{b} \cdot \tau_2 \quad (4.33)$$

και

$$T_2 = \frac{1}{\alpha} \cdot \tau_1 \quad (4.34),$$

όπου  $2/b$ ,  $1/\alpha$ : συντελεστές αναλογίας που προκύπτουν από τον πίνακα 4.3.

Οι απλές προσεγγιστικές σχέσεις που συνδέουν τις χρονικές σταθερές με τα στοιχεία του κυκλώματος παραγωγής κρουστικής τάσεως για το κύκλωμα τύπου β δίνονται από τους παρακάτω τύπου:

$$\tau_1 \cong R_2 \cdot (C_1 + C_2) \quad (4.38)$$

$$\tau_2 \cong R_1 \cdot \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (4.39)$$

Επομένως:

$$\tau_1 \cong 9500 \cdot (6000 + 1200) \cdot 10^{-12} = 68,4 \mu\text{sec}$$

$$\tau_2 \cong 416 \cdot \frac{6000 \cdot 1200}{6000 + 1200} \cdot 10^{-12} = 0,416 \mu\text{sec}$$

Άρα:



$$T_1 = \frac{2}{b} \cdot \tau_2 \text{ όπου από πίνακα 4.3: } \frac{2}{b} = 2,96 \Rightarrow T_1 = 1,23\mu\text{sec} \searrow$$

εντός των ορίων ανοχής

$$T_2 = \frac{1}{a} \cdot \tau_1 \text{ όπου από πίνακα 4.3: } \frac{1}{a} = 0,73 \Rightarrow T_2 = 49,93\mu\text{sec} \nearrow$$

Αφού τα όρια ανοχής προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$T_1 = 1,2\mu\text{s} \pm 30\% \text{ και } T_2 = 50\mu\text{s} \pm 20\%$$

$$\Rightarrow 0,84\mu\text{s} \leq T_1 \leq 1,56\mu\text{s} \text{ και } 40\mu\text{s} \leq T_2 \leq 60\mu\text{s}$$

Επίσης όπως υπολογίστηκε στην παράγραφο 4.8.2:

$$n = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{6000}{6000 + 1200} = 0,83$$

(β) Να υπολογιστεί η θεωρητική τιμή του συντελεστή απόδοσης  $n$  και με τη βοήθεια της 2<sup>η</sup> μεθόδου.

### Απάντηση

Ειδικά για τον υπολογισμό των στοιχείων γεννήτριας κρουστικής τάσεως της μορφής 1,2/50  $\mu\text{s}$  υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής μιας ακόμα απλούστερης μεθόδου για την επιλογή των αντιστάσεων μετώπου και ουράς εφόσον οι χωρητικότητες του κυκλώματος είναι γνωστές. Αν όμως και οι τιμές των αντιστάσεων είναι δεδομένες τότε μπορούν να βρεθούν οι αντίστοιχοι χρόνοι. Έχουμε λοιπόν:

$$\frac{C_\varphi}{C_k} = \frac{1200}{6000} = 0,2 \xrightarrow{\text{πίνακας 4.4}} \eta = 0,810$$

Και ισχύουν οι τύποι:

$$T_1 = \frac{n \cdot R_1 \cdot C_2}{333} \quad (4.41)$$

και

$$T_2 = \frac{R_2 \cdot C_1}{1410 \cdot n} \quad (4.42)$$

Οπότε:

$$T_2 = \frac{9500 \cdot 6000 \cdot 10^{-3}}{1410 \cdot 0,810} = 49,908\mu\text{sec} \searrow$$

εντός των ορίων ανοχής

$$T_1 = \frac{0,810 \cdot 416 \cdot 1200 \cdot 10^{-3}}{333} = 1,214\mu\text{sec} \nearrow$$

(γ) Η συνάρτηση διασποράς  $P(\hat{V})$  πρέπει να παρασταθεί σε κοινό διάγραμμα για το σφαιρικό διάκενο και το δοκίμιο. Η μέση τιμή της κρουστικής τάσης και τα όρια όπου βρίσκεται η αληθής τιμή σύμφωνα με τους υπολογισμούς της αβεβαιότητας  $\alpha$  να φαίνονται στο διάγραμμα.

**Απάντηση**

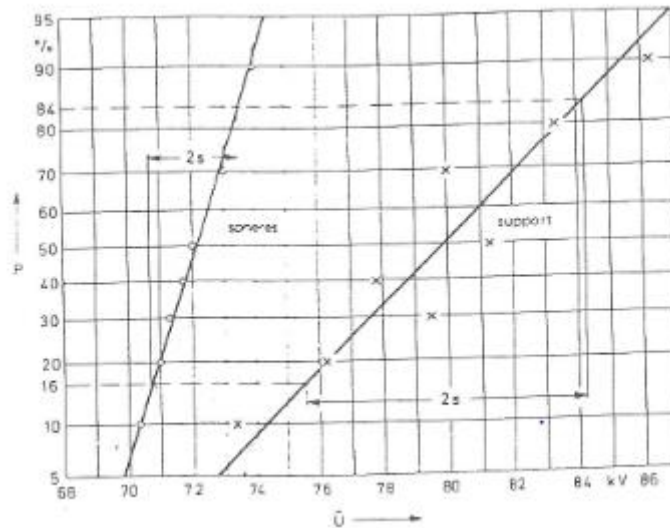
Δεν πραγματοποιήθηκε το προτεινόμενο κομμάτι II της άσκησης.

(δ) Οι περιοχές διασποράς των δύο δοκιμίων πρέπει να συγκριθούν και να δικαιολογηθεί που οφείλεται η διαφορά τους.

**Απάντηση**

Δεν πραγματοποιήθηκε το προτεινόμενο κομμάτι II της άσκησης.

Τα ερωτήματα (γ) και (δ) δεν μπορούν να απαντηθούν πειραματικά αφού το αντίστοιχο κομμάτι της άσκησης δεν πραγματοποιήθηκε, αξίζει όμως να γίνει μια βιβλιογραφική αναφορά. Το διάγραμμα που θα προέκυπτε θα ήταν αυτό του σχήματος 4.14:



Σχήμα 4.14:  $P(\hat{V})$

Από το κοινό διάγραμμα διαπιστώνουμε πως στην περίπτωση του ανομοιογενούς πεδίου η τάση διάσπασης παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη διασπορά σε σχέση με το ομοιογενές πεδίο. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το ότι στο ομοιογενές πεδίο υπάρχει σχετικά σταθερή χωρική κατανομή των φορτιών, οπότε η τάση διάσπασης όσες φορές και να εφαρμοστεί θα ισχύουν περίπου ίδιες συνθήκες. Ενώ στα ανομοιογενή πεδία η χωρική κατανομή δεν είναι όμοια μεταξύ των επαναλήψεων, οπότε η πιθανότητα να βρεθούν τα σωματίδια στην κατάλληλη θέση την κατάλληλη στιγμή διαφέρει.

(ε) Να χρησιμοποιηθεί το σύστημα καταγραφής κρουστικής τάσης DiAS 733 και να καταγραφούν χαρακτηριστικές κυματομορφές της τάσης (π.χ. πλήρης κυματομορφή, αποκεκομμένη στην ουρά, στην κορυφή, στο μέτωπο). Να συγκριθούν τα συμπεράσματα των ερωτημάτων (α) και (β) με τα δεδομένα που προκύπτουν από την πλήρη κυματομορφή.

#### Απάντηση

Χρησιμοποιώντας το σύστημα ψηφιακής ανάλυσης κρουστικών τάσεων DiAS 733 της εταιρείας HAEFELY και αυξομειώνοντας το διάκενο  $s$  του δοκιμίου καταγράψαμε πλήρεις και αποκεκομμένες κρουστικές τάσεις (στο μέτωπο, στην κορυφή ή στην ουρά).

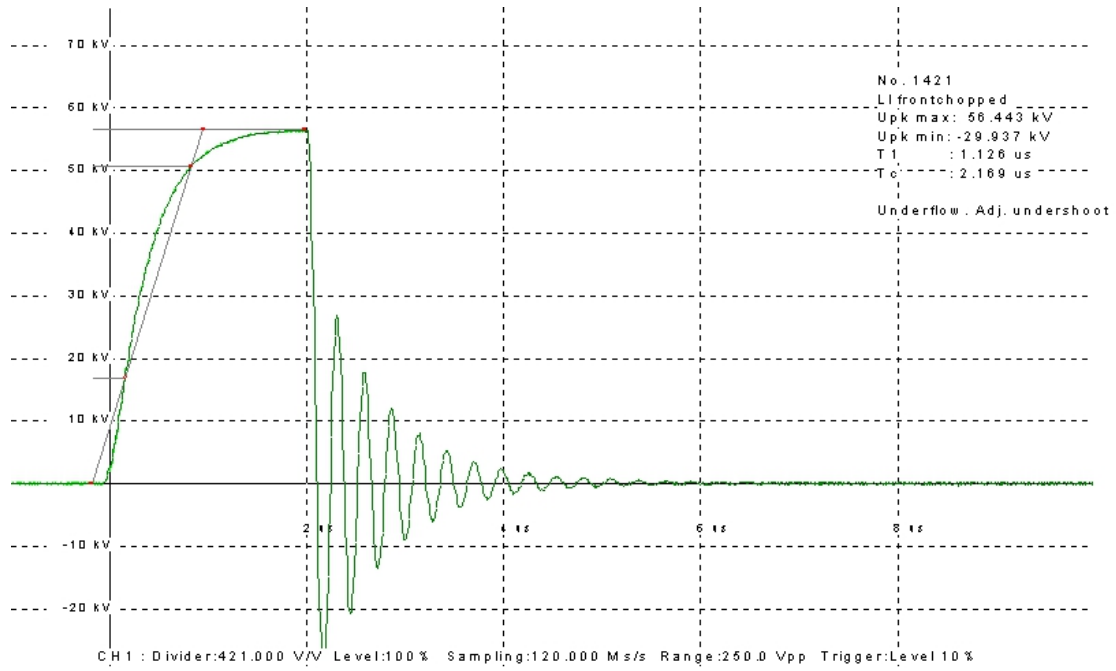


Σχήμα 4.15: Σύστημα ψηφιακής καταγραφής κρουστικών τάσεων DiAS 733

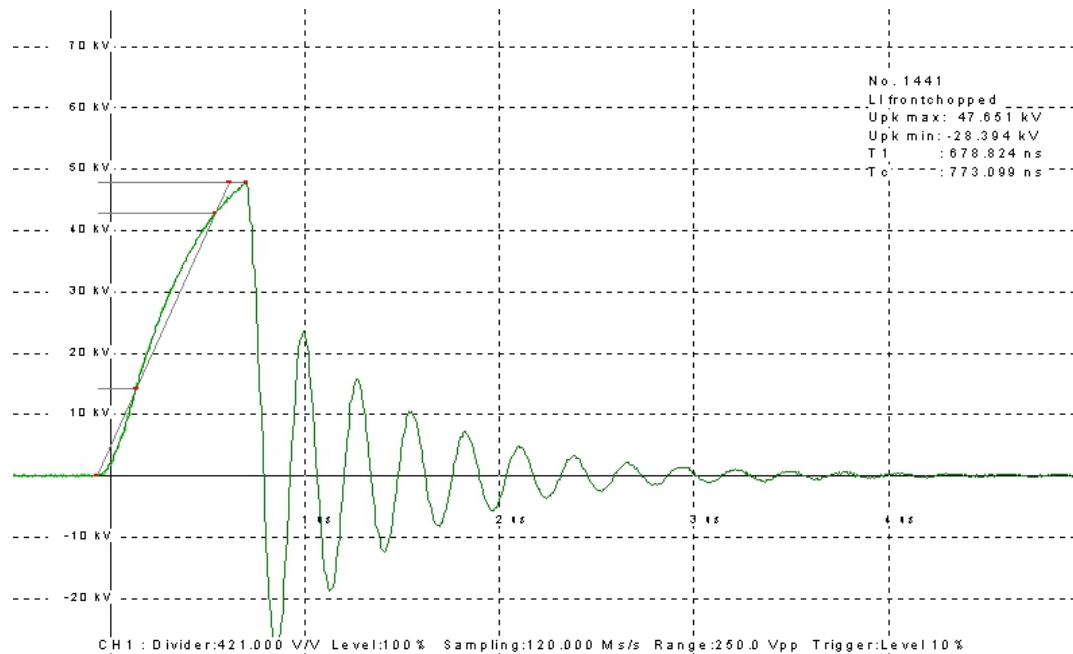
Οι αποκεκομμένες κρουστικές τάσεις δημιουργούνται όταν κατά τη διάρκεια επιβολής της κρουστικής τάσεως συμβεί στο συνδεδεμένο στην κρουστική γεννήτρια δοκίμιο διάσπαση, ή, εν γένει, διάσπαση είτε σκοπούμενη είτε τυχαία στο κύκλωμα υψηλής τάσης. Σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται απότομος μηδενισμός της τάσεως, δημιουργούμενης τότε της αποκεκομμένης κρουστικής τάσεως, ο οποίος συνεπάγεται την εμφάνιση της ταλαντώσεως τάσεως (μεταβατικό φαινόμενο).

Συγκεκριμένα μειώνοντας το διάκενο  $s$  του δοκιμίου η διάσπαση γίνεται πολύ γρηγορότερα, η κρουστική τάση δεν προλαβαίνει να φθάσει στην ουρά και διασπάται όταν είναι στο μέτωπο. Αντίθετα αν αυξήσουμε το διάκενο του δοκιμίου σε τιμές μεγαλύτερες, τότε μπορούμε να επιτύχουμε αποκεκομμένη κυματομορφή στην ουρά.

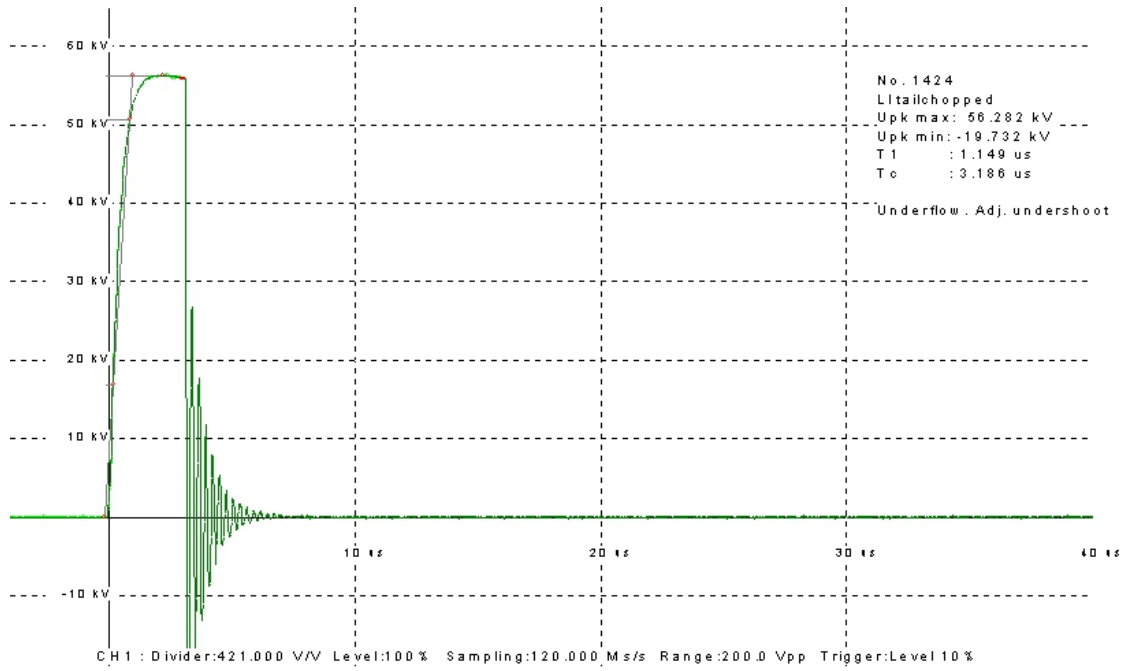
Στο πείραμα μας στην περίπτωση κρουστικής τάσης 1,2/50 θετικής πολικότητας πήραμε αρκετές κυματομορφές, με πιο χαρακτηριστικές τις παρακάτω:



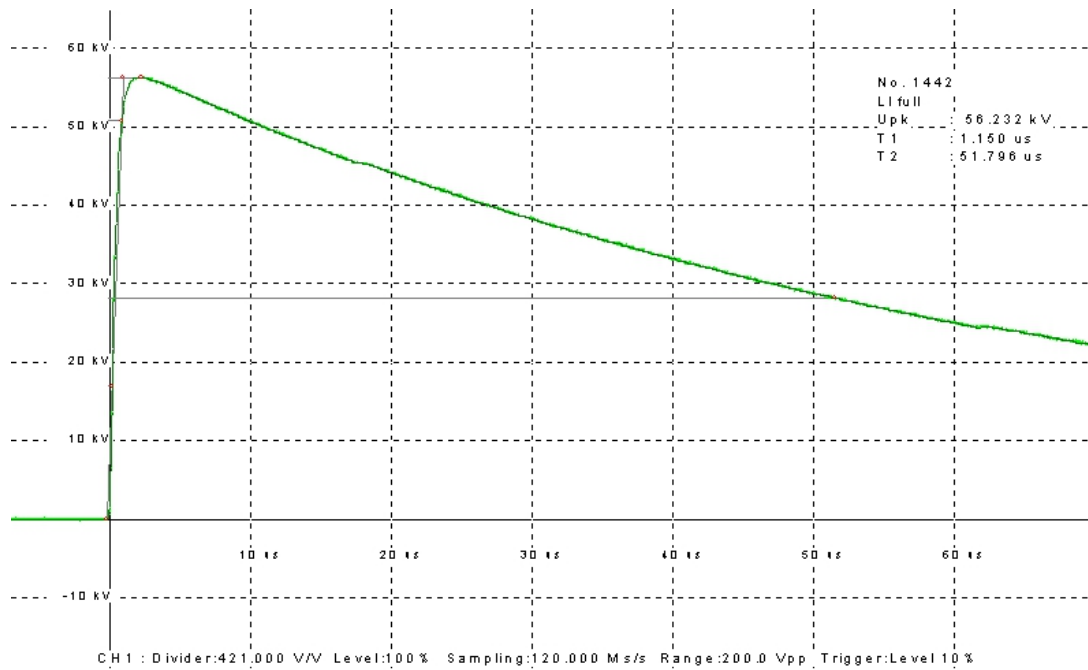
Σχήμα 4.16: Αποκεκομμένη στην κορυφή κρουστική τάση θετικής πολικότητας



Σχήμα 4.17: Αποκεκομμένη στο μέτωπο κρουστική τάση θετικής πολικότητας



Σχήμα 4.18: Αποκεκομμένη στην ουρά κρουστική τάση θετικής πολικότητας



Σχήμα 4.19: Πλήρης κυματομορφή κρουστικής τάσης θετικής πολικότητας

Από τη τελευταία πλήρη κυματομορφή και το σύστημα Dias733 προκύπτουν οι τιμές για την μέγιστη κρουστική τάση, τον χρόνο μετώπου και ημίσειας εύρους αντίστοιχα:

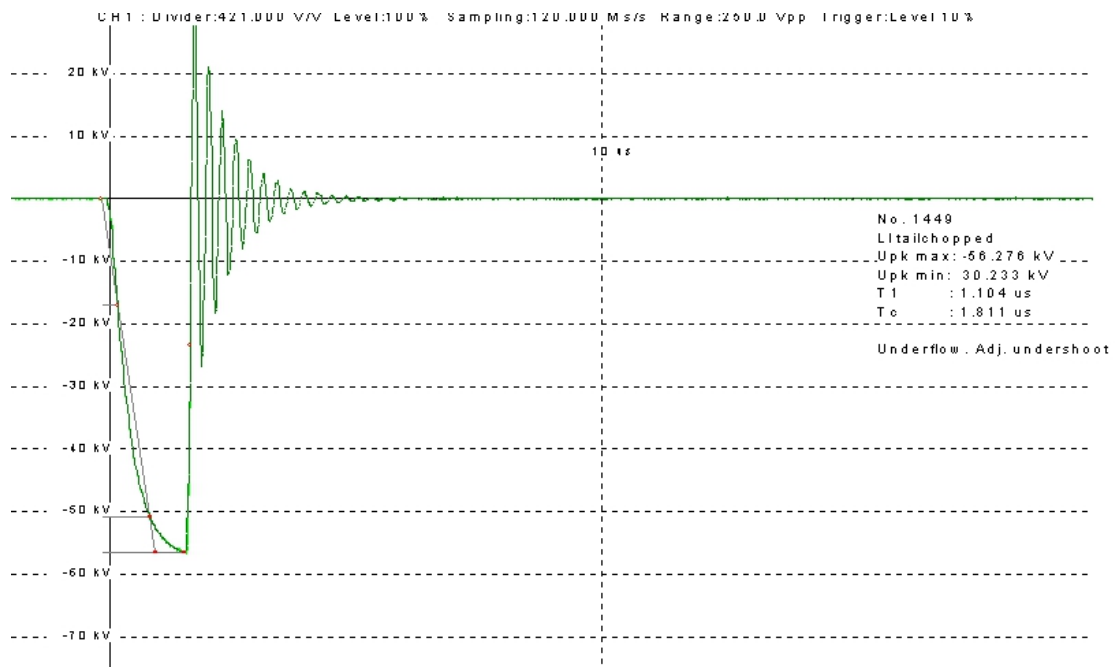
$$\hat{V}_κ = 58,232kV$$

$$T_1 = 1.160\mu sec \searrow$$

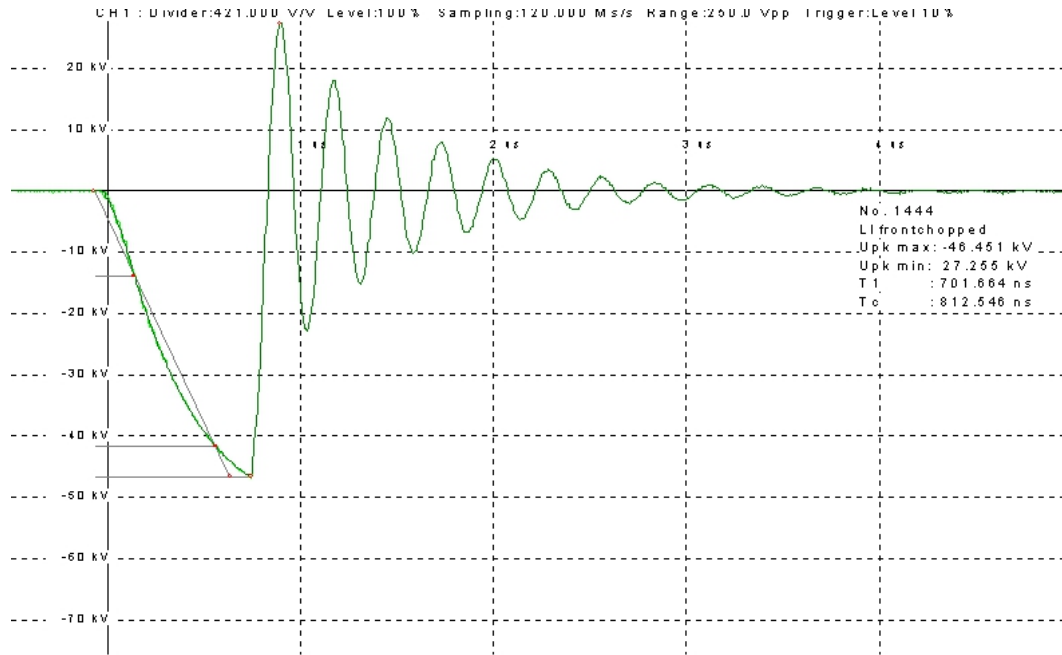
εντός των ορίων ανοχής

$$T_2 = 51,796\mu sec \nearrow$$

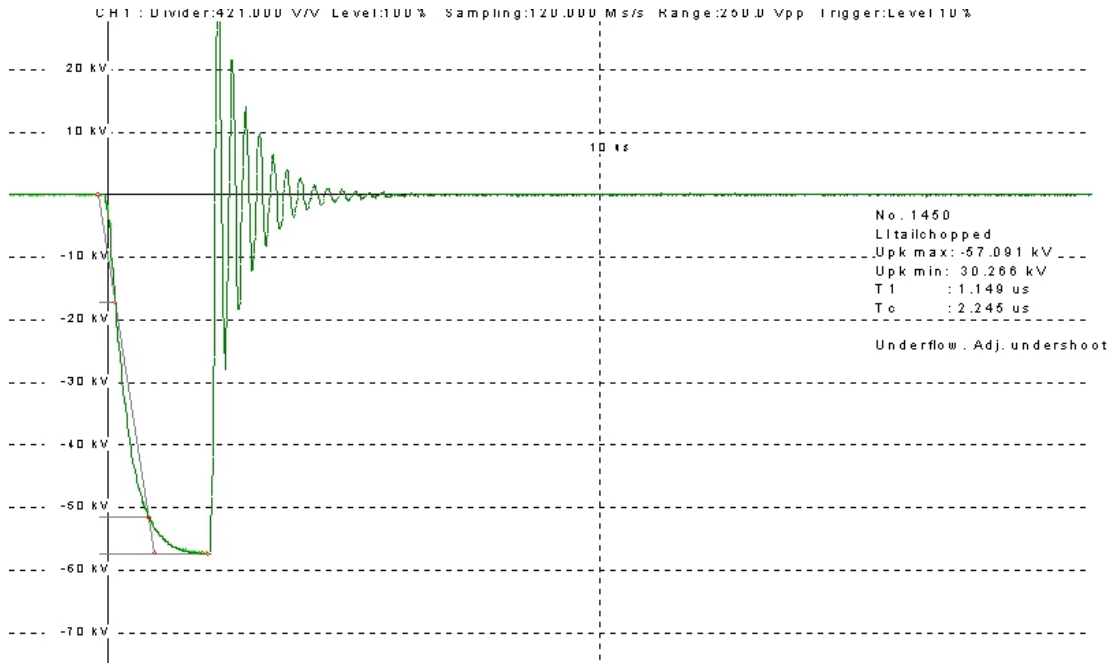
Ανάλογα, στην περίπτωση κρουστικής τάσης 1,2/50 αρνητικής πολικότητας πήραμε αρκετές κυματομορφές, με πιο χαρακτηριστικές τις παρακάτω:



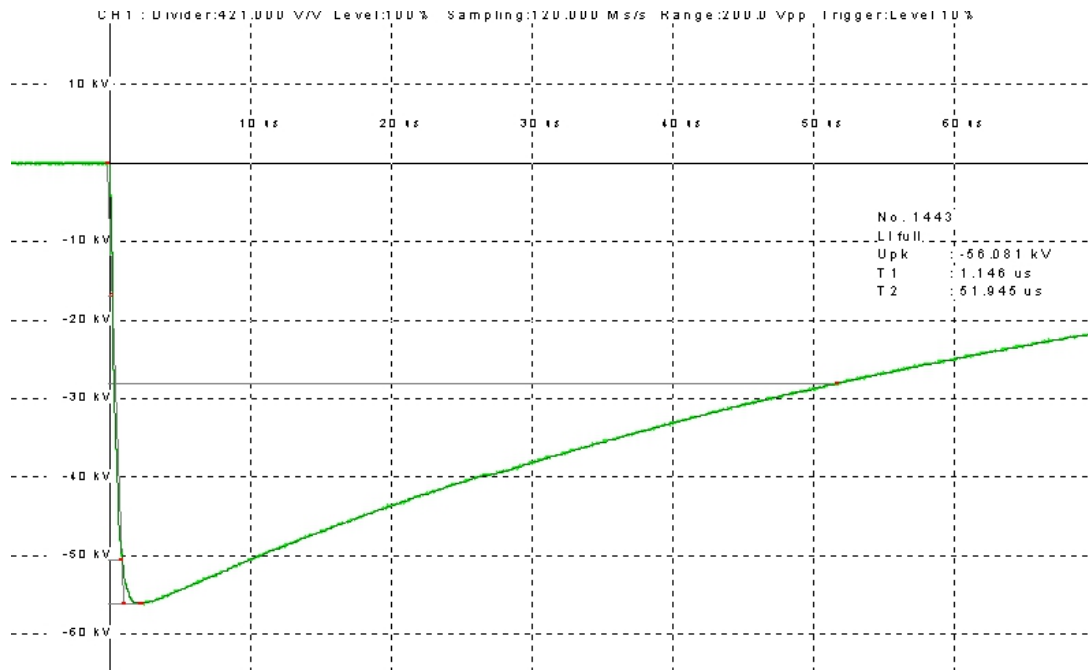
Σχήμα 4.20: Αποκεκομμένη στην κορυφή κρουστική τάση αρνητικής πολικότητας



Σχήμα 4.21: Αποκεκομμένη στο μέτωπο κρουστική τάση αρνητικής πολικότητας



Σχήμα 4.22: Αποκεκομμένη στην ουρά κρουστική τάση αρνητικής πολικότητας



Σχήμα 4.23: Πλήρης κυματομορφή κρουστικής τάσης αρνητικής πολικότητας

Από τη τελευταία πλήρη κυματομορφή και το σύστημα Dias733 προκύπτουν οι τιμές για την μέγιστη κρουστική τάση, τον χρόνο μετώπου και ημίσεως εύρους αντίστοιχα:

$$\hat{V}_k = 56,081kV$$

$$T_1 = 1,148\mu sec \quad \searrow$$

εντός των ορίων ανοχής

$$T_2 = 51,945\mu sec \quad \nearrow$$

Στη συνέχεια συγκρίνουμε τις τιμές που πήραμε με το DiAS 733 με τις τιμές που πήραμε από την προσέγγιση της τιμής μέσω της μεθόδου μέτρησης με σφαιρικό διάκενο. Ο βαθμός απόδοσης που προκύπτει από το Dias733 για τις δύο πολικότητες είναι:

- Για κρουστική τάση θετικής πολικότητας τύπου 1,2/50μs και συνεχή τάση περίπου ίση με 70kV έχουμε:

$$n = \frac{V_{max}}{V_0} = \frac{58,232}{70} \cong 0,83$$

- Για κρουστική τάση αρνητικής πολικότητας τύπου 1,2/50μs και συνεχή τάση περίπου ίση με 70kV έχουμε:

$$n = \frac{V_{max}}{V_0} = \frac{58,081}{70} \cong 0,83$$



Πίνακας 4.16

Μέθοδοι Μέτρησης	Σφαιρικό Διάκενο		DiAS 733	
	I	II	I	II
Είδος τάσης				
Τάση διάσπασης σε πραγματικές συνθήκες $V_d$ (kV)	57,23	56,64	58,232	58,081
<i>n</i> πειραματική	0,82	0,81	0,83	0,83

Θεωρούμε σωστή τη μέθοδο μέτρησης με DiAS 733, γιατί και πιο καλό βαθμό απόδοσης παρουσιάζει, αλλά και γιατί η τάση στη μέθοδο των σφαιρικών διακένων υπολογίζεται από πίνακες, οπότε να μεν είναι θεωρητική, αλλά η τιμή διασπάσεως ενός διακένου δεν έχει απόλυτα καθορισμένη τιμή και παρουσιάζει στατιστική διασπορά που εξαρτάται από τη γεωμετρική μορφή του διακένου, τη μορφή της τάσεως, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τη σκόνη και άλλους παράγοντες. Επομένως δεν μπορούμε να στηριχτούμε απόλυτα σε αυτή τη μέθοδο υπολογισμού της τάσης.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε ο σχετικό σφάλμα από τον παρακάτω τύπο:

$$\varepsilon(\%) = \left| \frac{V_d - V_{pk}}{V_{pk}} \right| \cdot 100\%$$

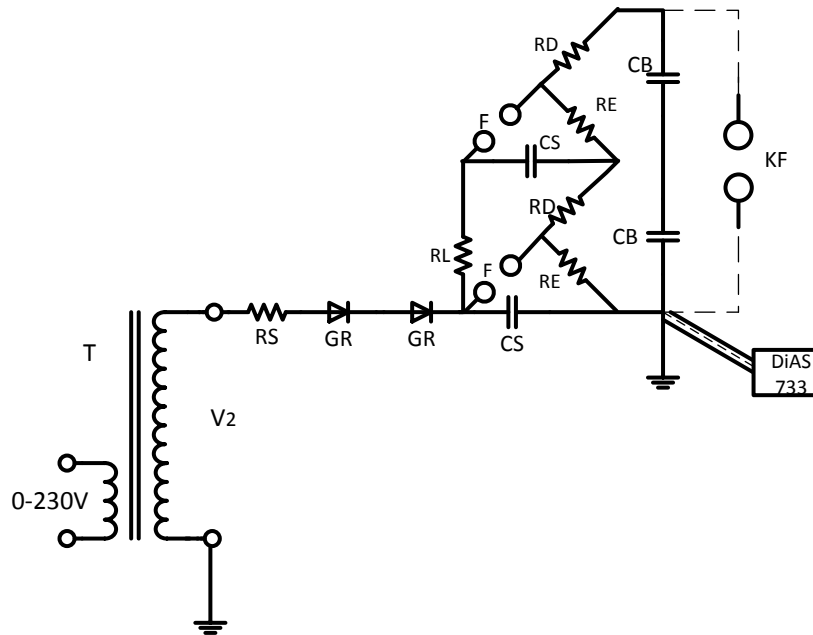
Όπου  $V_d$ : μέθοδος του σφαιρικού διακένου  
 $V_{pk}$ : μέθοδος με DiAS 733

Πίνακας 4.17

Είδος τάσης	I	II
$\varepsilon(\%)$	1,72	2,48

## 4.9 Επιπλέον πειραματική διαδικασία πέραν της προτεινόμενης άσκησης

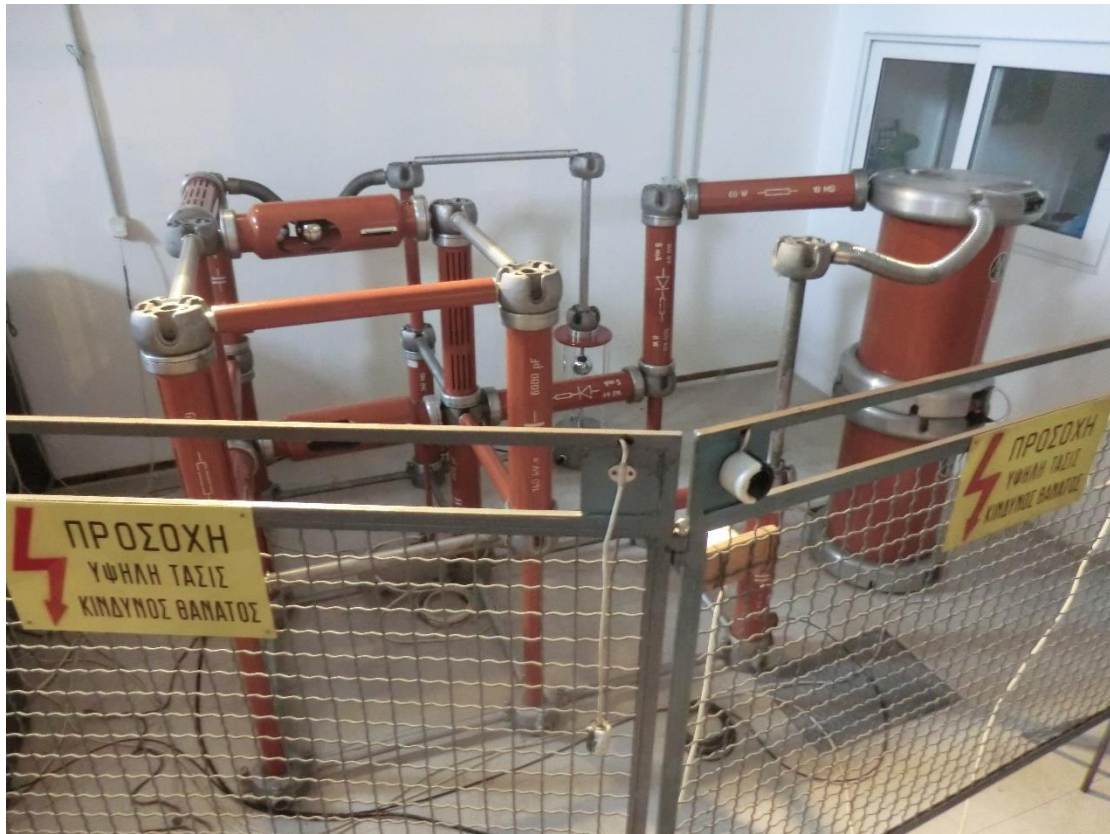
### 4.9.1 Πειραματική διάταξη για τη μελέτη δευτεροβάθμιας κρουστικής γεννήτριας



Σχήμα 4.24: 2βάθμια κρουστική γεννήτρια

όπου

- T: μετασχηματιστής δοκιμής λόγο μετασχηματισμού  $220V/100kV$  και ονομαστική ισχύ  $5kVA$
- GR: ανορθωτής σεληνίου με τάση αναστροφής ίση με  $140kV$ , ονομαστικό ρεύμα  $5mA$  με  $R_{\pi} = 500k\Omega$
- RS:  $10M\Omega$
- KF: σφαιρικό Διάκενο,  $D=100mm$  (=δοκίμιο, προστίθεται για την παραγωγή των αποκεκομμένων κυματομορφών)
- F: σπινθηριστής (σφαιρικό διάκενο,  $D=100mm$ )
- RM:  $140M\Omega$
- CS:  $6000pF$
- CB:  $1200pF$
- CM:  $100pF$
- B: βολτόμετρο καταγραφής κρουστικής τάσης
- Για κρουστικές τάσεις  $1,2/50 \mu s$ :
- RD:  $416\Omega$
- RE:  $9500\Omega$



Σχήμα 4.25: Φωτογραφίες πειραματικής διάταξης από το εργαστήριο

#### 4.9.2 Πειραματική Διαδικασία και Μετρήσεις στο Εργαστήριο

Χρησιμοποιώντας το σύστημα ψηφιακής ανάλυσης κρουστικών τάσεων DiAS733 της εταιρείας HAEFELY καταγράψαμε πλήρεις και αποκεκομμένες κρουστικές τάσεις (στο μέτωπο, στην κορυφή ή στην ουρά) για θετική κρουστική τάση μορφής 1,2/50μs.

**Αρχικά** θέλουμε να υπολογίσουμε το διάκενο των σπινθηριστών F ώστε να διασπώνται ταυτόχρονα και να κλείνει το κύκλωμα. Μετά από αυξομειώσεις του διακένου s παρατηρούμε πως η τιμή τους πρέπει να ισούται με  $s=13\text{mm}$ .

Έπειτα τροφοδοτούμε με τάση και παράλληλα καταγράφουμε τη συνεχή τάση και την κρουστική τάση που εμφανίζονται στη διάταξη για να επικυρώσουμε πως είχαμε διπλασιασμό της τάσης εξόδου στη 2<sup>η</sup> βαθμίδα της κρουστικής σε σχέση με την 1<sup>η</sup>. Έτσι έχουμε:

- Συνεχής τάση  $V_0 = 940\text{mV}$  μέσω ωμικού καταμεριστή. Συγκεκριμένα μια μικρή αντίσταση ίση με  $r=3,27\text{k}\Omega$  συνδέεται σε σειρά με την RM, ενώ η έξοδος χαμηλής τάσης οδηγείται σε βολτόμετρο.
- Κρουστική τάση  $\hat{V}_\kappa = 65,831\text{kV}$  μέσω του Dias 733.

Από τα παραπάνω δεδομένα έχουμε:

- Από τον λόγο καταμερισμού του ωμικού καταμεριστή:

$$V_0(\text{kV}) = V_0(\text{mV})/\kappa = 940/2,336 \cdot 10^{-5} = 40,24\text{kV}$$

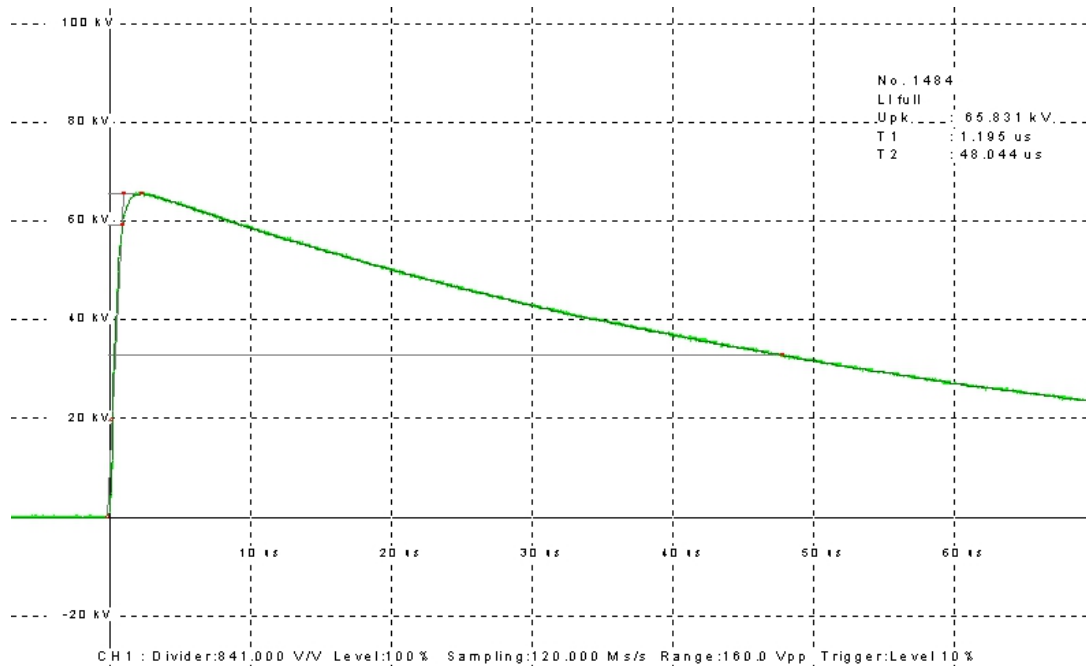
Και αν θεωρήσουμε πως η διάταξη μας θα παρουσιάσει βαθμό απόδοσης ανάλογο της μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας θετικής πολικότητας, δηλαδή περίπου ίσο με  $n = 0,82$ , τότε προκύπτει πως η έξοδος της 1<sup>ης</sup> βαθμίδας θα είναι:

$$V_{\text{max},1\eta\varsigma} = n \cdot V_0 = 0,82 \cdot 40,24 = 32,99\text{kV}$$

Το αποτέλεσμα αυτό μας ικανοποιεί απόλυτα, καθώς έτσι η έξοδος της 2<sup>ης</sup> βαθμίδας θα πρέπει να είναι:

$$V_{\text{max},2\eta\varsigma} = 2 \cdot V_{\text{max},1\eta\varsigma} = 2 \cdot 32,99 = 65,98\text{kV}$$

Με τη βοήθεια του συστήματος Dias733 καταγράψαμε πλήρη και αποκεκομμένες κυματομορφές της κρουστικής τάσης θετικής πολικότητας 1,2/50μs που παράχθηκε μέσω της διβάθμιας κρουστικής γεννήτριας που κατασκευάσαμε. Παρατηρούμε πως οι κρουστικές τάσεις που καταγράφηκαν μέσω του Dias 733 είναι περίπου 65kV, οπότε και έτσι επιβεβαιώνετε πως είχαμε διπλασιασμό της τάσης.



Σχήμα 4.26: Πλήρης κυματομορφή κρουστικής τάσης θετικής πολικότητας

Από την πλήρη κυματομορφή προκύπτουν οι τιμές για την μέγιστη κρουστική τάση, τον χρόνο μετώπου και ημίσεως εύρους αντίστοιχα:

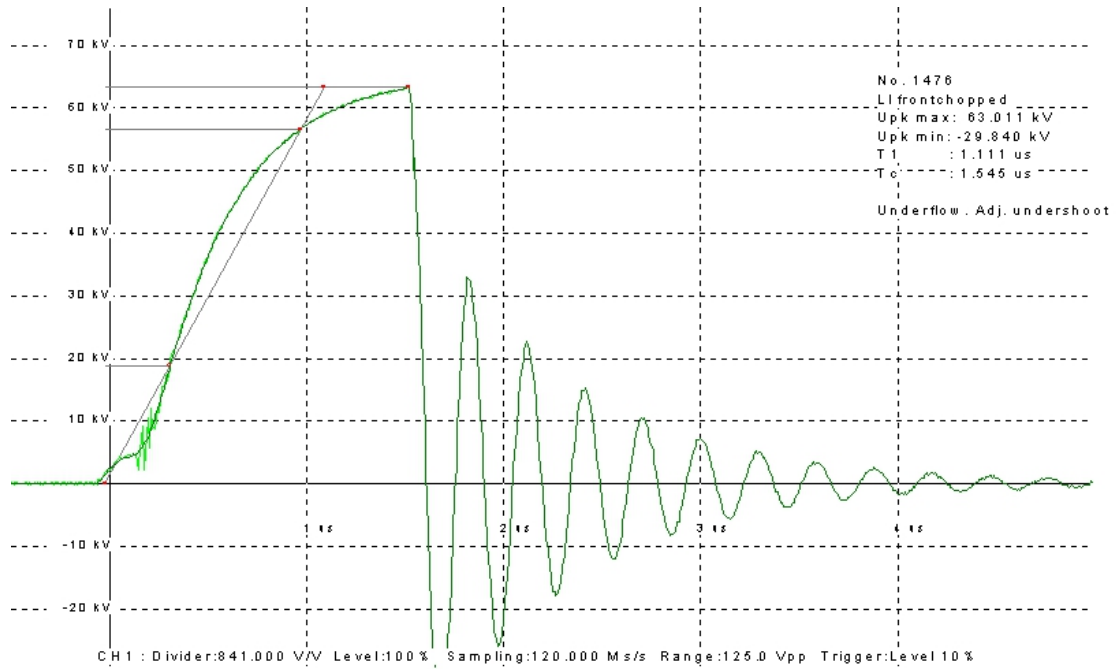
$$\hat{V}_k = 65,831kV$$

$$T_1 = 1,195\mu sec \searrow$$

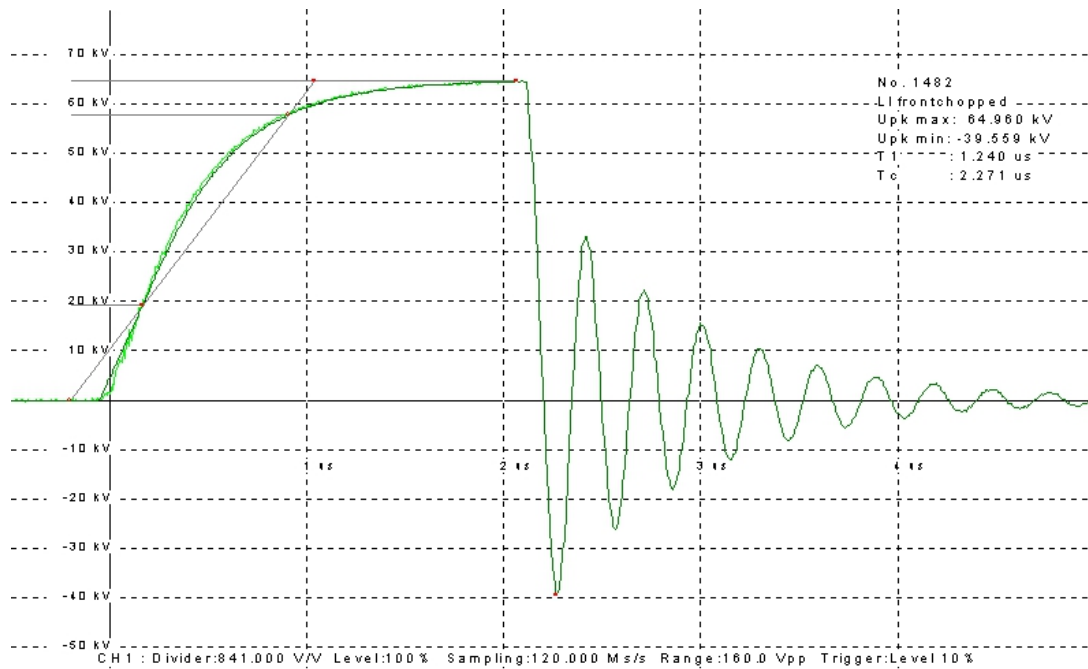
εντός των ορίων ανοχής

$$T_2 = 48,044\mu sec \nearrow$$

Χρησιμοποιώντας το δοκίμιο και αυξομειώνοντας το διάκενο του s παίρνουμε και αποκεκομμένες κυματομορφές:



Σχήμα 4.27: Αποκεκομμένη στην κορυφή κρουστική τάση θετικής πολικότητας



Σχήμα 4.28: Αποκεκομμένη στην ουρά κρουστική τάση θετικής πολικότητας

#### 4.10 Βιβλιογραφία

- [1] Dieter Kind, Kurt Feser, High-Voltage Test Techniques, Εκδόσεις Newnes, 2001
- [2] Σταθόπουλου Ι.Α., Υψηλές Τάσεις Ι, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1989
- [3] Οικονόμου Λ. και Φώτη Γ., Εισαγωγή στις Υψηλές Τάσεις, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2010
- [4] John Kuffel, E. Kuffel, W. S. Zaengl, High Voltage Engineering Fundamentals, Newnes, 2000
- [5] Συμπληρωματικές Σημειώσεις Υψηλών Τάσεων, Αθήνα, Οκτώβριος 2010
- [6] Wadhwa C.L., High Voltage Engineering, New Age International Publisher, 2007
- [7] Naidu M.S., Kamaraju V., High Voltage Engineering, Tata McGraw-Hill Publishing Company, 2009
- [8] Οικονόμου Λ., Ασκήσεις Υψηλών Τάσεων, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2011



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### *4<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση: «Μονωτικά Λάδια και Μονωτικά Στερεά Υλικά»*

#### 5.1 Γενικά

Τα μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται για τον ηλεκτρικό διαχωρισμό μεταξύ των ρευματοφόρων τμημάτων μιας εγκατάστασης/συσκευής, καθώς και των ρευματοφόρων τμημάτων και της γης. Χωρίζονται σε κατηγορίες ως προς:

(α) Τη δομή τους:

- αέρια
- υγρά
- στερεά

(β) Τους δεσμούς τους:

- ιοντικά
- μοριακά
- ομοιοπολικά

Για την αξιολόγηση και την εκτίμηση της καταλληλότητας των μονωτικών υλικών για τις διάφορες εφαρμογές χρησιμοποιούνται κάποια **χαρακτηριστικά μεγέθη**, τα οποία αφορούν όχι μόνο τις ηλεκτρολογικές, αλλά και τις φυσικές, χημικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες τους. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να αναφερθεί πως εκτός από όλα τα παρακάτω πρέπει να συνεκτιμάται και το κόστος, το οποίο πρέπει να είναι τέτοιο που να επιτρέπει την ευρεία χρήση του υλικού στις διάφορες εφαρμογές. Επιπλέον δεν είναι δυνατό ένα υλικό να είναι άριστο ως προς όλα τα χαρακτηριστικά του, οπότε κάθε φορά πρέπει να επιλέγουμε το μονωτικό υλικό σύμφωνα με τις ανάγκες της προς μόνωσης συσκευής [3]. Τα σημαντικότερα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι:

- **Διηλεκτρική αντοχή ( $kV/cm$  ή  $kV/mm$ )**

Είναι η ελάχιστη τιμή της τάσης που απαιτείται για τη διάσπαση ενός μονωτικού προς την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων.

- **Ειδική αντίσταση  $\rho$  ( $\Omega - m$ )**

Ορίζεται ως η αντίσταση μεταξύ δύο απέναντι πλευρών ενός μονωτικού κύβου με ακμή 1cm. Η ειδική αντίσταση κυμαίνεται από  $10^9$  έως  $10^{10}$  για μονωτικά λάδια και  $10^{14}$  για στερεά.



- Αντίσταση μόνωσης  $R$  ( $\Omega$ )

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (5.1)$$

Όπου  $\rho$ : Ειδική αντίσταση

$L$ : Απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων ανάμεσα στα οποία βρίσκονται τα μονωτικά υλικά

$A$ : Επιφάνεια ηλεκτροδίων

- Επιφανειακή αντίσταση

Η επιφανειακή αντίσταση χαρακτηρίζει στερεά μονωτικά υλικά. Ορίζεται ως η αντίσταση  $R$  που εμφανίζεται μεταξύ δύο διαγώνιων κορυφών μιας μονωτικής επιφάνειας σε σχήμα τετραγώνου. Πρέπει να διατηρείται σε τέτοια επίπεδα που να αποφεύγονται φαινόμενα υπερπήδησης (π.χ. υπερπήδηση μονωτήρα), τα οποία προκαλούν γήρανση στη μόνωση μειώνοντας την ποιότητα της.

- Σχετική διηλεκτρική σταθερά ( $\epsilon_r$ )

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά εκφράζει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μιας διάταξης συγκριτικά με εκείνη στο κενό ή στον αέρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η  $\epsilon_r$  τόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα ενός πυκνωτή συγκεκριμένης γεωμετρίας που θα έχει ως μονωτικό το συγκεκριμένο μονωτικό υλικό.

Πίνακας 5.1: Τιμές σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς σε φθίνουσα σειρά για κάποια μονωτικά υλικά[3]

Υλικό	$\epsilon_r$
Γυαλί	2-16
Πορσελάνη	4,5-6
PVC	4-6
Χαρτί-λάδι	3-4,5
Μονωτικό λάδι	2-2,5
Ρητίνη	2,2
Χαρτί	1,8-2,6
Αέρας	1,000594

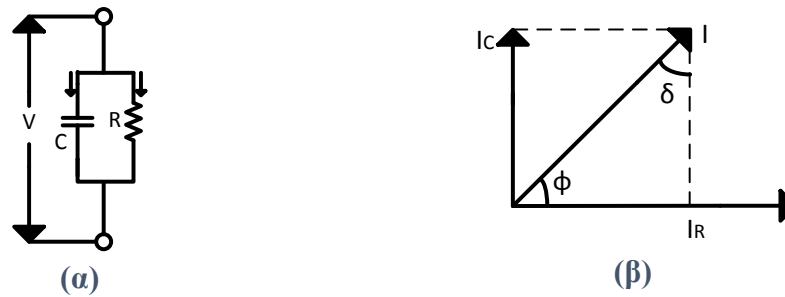
- Συντελεστής απωλειών ( $\tan\delta$ )

Ένα ιδανικό μονωτικό υλικό δεν άγει καθόλου ρεύμα, δηλαδή:

$$R \rightarrow \infty \Rightarrow \text{μηδενική αγωγιμότητα}$$

Πρακτικά όμως όταν τα μονωτικά υλικά βρίσκονται υπό τάση διαρρέονται από ρεύμα, το οποίο προκαλεί απώλειες ενέργειας, ιδιαίτερα σε υλικά με υποβαθμισμένες ηλεκτρικές-μονωτικές ιδιότητες. Αυτό το ρεύμα διαρροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί

ως δείκτης για την ποιότητα και την κατάσταση της μόνωσης, καθώς καταπονημένα υλικά θα παρουσιάσουν αυξημένες τιμές αυτού του δείκτη.



Σχήμα 5.1(α,β): Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μονωτή

Ο συντελεστής απωλειών στην προκειμένη περίπτωση δίνεται από τη σχέση:

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} \quad (5.2)$$

Ένα μονωτικό πρέπει να παρουσιάζει όσο το δυνατόν μικρότερες διηλεκτρικές απώλειες, δηλαδή όσο το δυνατόν μικρότερο συντελεστή απωλειών, ώστε η θερμοκρασία του να περιορίζεται στα απαιτούμενα επίπεδα για την καλή λειτουργία της εγκατάστασης.

- **Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (*kcal*)**

Ορίζεται ως το ποσό της θερμότητας το οποίο διέρχεται ανά μονάδα επιφάνειας από μονωτικό μοναδιαίου πάχους για μοναδιαία διαφορά θερμοκρασίας.

- **Μηχανική αντοχή**

Η μόνωση μιας συσκευής καταπονείται από δυνάμεις μηχανικής ή ηλεκτρικής προέλευσης (π.χ. δυνάμεις λόγω ισχυρών ρευμάτων κατά το βραχυκύκλωμα), οι οποίες φθείρουν το μονωτικό υλικό και ενδέχεται να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης. Για τους λόγους αυτούς τα μονωτικά υλικά ελέγχονται ως προς τις μηχανικές ιδιότητες (αντοχή σύνθλιψης, εφελκυσμό, θραύση, ελαστικότητα κ.α.), ώστε να διαπιστωθεί η καταλληλότητα τους για διάφορες εφαρμογές.

## 5.2 Μονωτικά λάδια

### 5.2.1 Γενικά

Τα μονωτικά λάδια ανήκουν στην κατηγορία των μερικώς επανορθούμενων μονώσεων, όπου το μονωτικό υλικό επανακά μερικώς και υποβαθμισμένα τα φυσικά και ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά μετά από κάποια διάσπαση. Ένα άλλο χαρακτηριστικό τους είναι πως γεμίζουν πλήρως τον προς μόνωση όγκο, όπως τα αέρια.

Σημαντικά χαρακτηριστικά των μονωτικών λαδιών [3]:

- Παρουσιάζουν μεγάλη διηλεκτρική αντοχή.
- Έχουν χαμηλή διηλεκτρική σταθερά (2-2,5).

- Έχουν εξαιρετική ικανότητα να απάγουν τη θερμότητα των συσκευών.
- Εμφανίζουν σχετικά χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες ( $< 10^{-4}$  για θερμοκρασία 20°C,  $10^{-3}$  για θερμοκρασία 90°C)

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά εξαρτώνται από το βαθμό καθαρότητας και τη θερμοκρασία.

Επίσης τα μονωτικά λάδια παρουσιάζουν μείωση της αντοχής τους παρουσία ξένων σωματιδίων, αέρα και υγρασίας. Η παρουσία ακόμα και 0,01% υγρασίας είναι ικανή να μειώσει κατά 20% την αρχική τιμή της διηλεκτρικής αντοχής [5]. Ανάλογα η παρουσία ινώνδων προσμίξεων μειώνει την τιμή της διηλεκτρικής αντοχής πολύ απότομα.

Ο κύριος προβληματισμός στην επιλογή του κατάλληλου μονωτικού λαδιού είναι η χημική του σταθερότητα. Τα λάδια τα οποία είναι χημικά καθαρά, δομικά απλά και δεν περιέχουν ίχνος πρόσμιξης είναι γνωστά ως καθαρά λάδια. Αντιθέτως, τα εμπορικά λάδια είναι χημικώς ακάθαρτα και περιέχουν προσμίξεις σύνθετων οργανικών μορίων, για αυτό και η συμπεριφορά τους είναι αρκετά ασταθής, με αποτέλεσμα σε καμία περίπτωση δύο δείγματα που λαμβάνονται από το ίδιο δοχείο να μη συμπεριφέρονται όμοια.

### 5.2.2 Είδη μονωτικών λαδιών

- **Ορυκτέλαια:** Είναι τα πλέον διαδεδομένα είδη μονωτικών λαδιών και παράγονται ως κλάσματα απόσταξης του πετρελαίου. Χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες ανάλογα με το είδος του πετρελαίου και των υδρογονανθράκων που περιέχει. Οπότε προκύπτουν: (α) τα μεθανέλαια, στα οποία κυριαρχούν κορεσμένοι υδρογονάνθρακες τύπου παραφίνης, (β) τα ναφθανέλαια, στα οποία κυριαρχούν ακόρεστοι υδρογονάνθρακες τύπου ναφθαλίνης, (γ) ναφθαλμεθανέλαια, στα οποία δεν κυριαρχεί κανένας από τους παραπάνω τύπους υδρογονανθράκων.
- **Οργανικά λάδια (εστέρες, φυτικά λάδια κ.α.):** Παρουσιάζουν καλές ηλεκτρικές και φυσικοχημικές ιδιότητες, ωστόσο είναι υδρόφιλα και οξειδώνονται γρήγορα.
- **Συνθετικά λάδια (φθοριομένοι ή χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες, λάδια σιλκόνης κ.α.):** Έχουν αυξημένη διηλεκτρική αντοχή και είναι άκαυστα, αλλά έχουν περιορισμένη εφαρμογή λόγω της κακής απαγωγής θερμότητας, του αυξημένου κόστους και των επικίνδυνων τοξικών συστατικών που περιέχουν.

### 5.2.3 Μηχανισμοί διάσπασης μονωτικών λαδιών

#### 5.2.3.1 Ηλεκτρονική ή ενδογενής ή εγγενής διάσπαση

Η θεωρία της ηλεκτρονικής ή ενδογενούς ή εγγενούς διάσπασης αφορά μονωτικά λάδια από τα οποία έχουν απομακρυνθεί ξένα αιωρήματα και φυσαλίδες αέρα ή υγρασίας. Ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την κάθοδο, καθώς επιταχύνονται λόγω του επιβαλλόμενου πεδίου, συγκρούονται με μόρια του υγρού προκαλώντας των ιονισμό αυτών. Έτσι σχηματίζονται ταχέως αναπτυσσόμενες στοιβάδες ηλεκτρονίων

(φαινόμενο χιονοστιβάδας). Για να ξεκινήσει το φαινόμενο της χιονοστιβάδας πρέπει η αποκτηθείσα ενέργεια του ηλεκτρονίου λόγω του πεδίου να είναι ίση με την ενέργεια που χάνεται κατά τον ιονισμό. Ισχύει:

$$e \cdot \lambda \cdot E = C \cdot h \cdot \nu \quad (5.3)$$

όπου  $\lambda$ : η μέση ελεύθερη διαδρομή  
 $e$ : φορτίο ηλεκτρονίου  
 $E$ : η ένταση ηλεκτρικού πεδίου  
 $h \cdot \nu$ : η ενέργεια του ιονισμού  
 $C$ : Σταθερά

Το τελικό αποτέλεσμα είναι η αύξηση της αγωγιμότητας και η διάσπαση του μονωτικού λαδιού για κάποια τιμή του πεδίου.

### 5.2.3.2 Διάσπαση μέσω ξένων σωματιδίων

Μέσα σε ένα μονωτικό λάδι είναι δυνατό να υπάρχουν ξένα σωματίδια (σκόνη, μεταλλικά ή μονωτικά σωματίδια κ.α.), τα οποία υποβαθμίζουν την ποιότητα του λαδιού, μειώνοντας τη διηλεκτρική του αντοχή. Η διηλεκτρική σταθερά αυτών των σωματιδίων ( $\epsilon_1$ ) είναι πάντα διάφορη αυτής του υγρού ( $\epsilon_2$ ). Θεωρούμε αυτά τα σωματίδια σφαιρικά με ακτίνα  $r$ . Τα σωματίδια αυτά πολώνονται λόγω του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου  $E$ . Η δύναμη που ασκείται τότε σε κάθε σωματίδιο είναι [5]:

$$F = r^3 \cdot \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{2(2\epsilon_1 + \epsilon_2)} \cdot E \cdot \frac{dE}{dx} \quad (5.4)$$

Όπως φαίνεται στη σχέση (5.4) η δύναμη  $F$  είναι ανεξάρτητη της διεύθυνσης του πεδίου  $E$ , άρα εναλλασσόμενη και συνεχής τάση θα δώσουν τα ίδια αποτελέσματα [6]. Εάν  $\epsilon_1 > \epsilon_2$  τότε η δύναμη  $F$  θα κατευθύνει τα σωματίδια στην περιοχή του πεδίου με την υψηλότερη ένταση.

Εάν  $\epsilon_1 < \epsilon_2$  τότε η δύναμη  $F$  θα κατευθύνει τα σωματίδια στην περιοχή του πεδίου με τη χαμηλότερη ένταση.

Όσο αυξάνεται η διηλεκτρική σταθερά των σωματιδίων (π.χ. μεταλλικά σωματίδια) θα αυξάνεται και η δύναμη, οπότε εάν  $\epsilon_1 \rightarrow \infty$  [6], τότε:

$$F = r^3 \cdot \frac{1 - \epsilon_2/\epsilon_1}{1 + 2\epsilon_2/\epsilon_1} \cdot E \cdot \frac{dE}{dx} = r^3 \cdot E \cdot \frac{dE}{dx} \quad (5.5)$$

Οπότε τελικά η  $F$  θα οδηγήσει τα σωματίδια να κινηθούν προς την ισχυρότερη περιοχή του πεδίου.

Σε ένα ομοιογενές πεδίο ισχύει:  $\frac{dE}{dx} = 0 \Rightarrow F = 0$ , οπότε τα σωματίδια βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας. Αφού η διηλεκτρική σταθερά των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη από αυτή του λαδιού, η παρουσία των σωματιδίων θα προκαλέσει ροή συγκέντρωσης στην επιφάνεια του λαδιού. Αν υπάρχουν και άλλα σωματίδια θα κατευθυνθούν προς την κατεύθυνση της υψηλότερης ροής συγκέντρωσης. Αν αυτά τα σωματίδια είναι μεγάλα, θα ευθυγραμμιστούν εξαιτίας των δυνάμεων και θα

σχηματίσουν μια αγώγιμη γέφυρα κατά μήκος του διακένου των δύο ηλεκτροδίων. Το πεδίο τότε θα αυξηθεί και αν φθάσει μια κρίσιμη τιμή, θα συμβεί διάσπαση. Αν ο αριθμός των σωματιδίων δεν είναι επαρκής για να γεφυρωθεί το διάκενο, τα σωματίδια θα αυξήσουν το πεδίο τοπικά και αν το πεδίο υπερβεί τη διηλεκτρική αντοχή του λαδιού, τοπική διάσπαση θα συμβεί. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φυσαλίδων, οι οποίες έχουν πολύ μικρότερη διηλεκτρική αντοχή και τελικά οδηγούν σε διάσπαση του λαδιού.

Αξίζει να σημειωθεί πως η τάση διάσπασης εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ξένων σωματιδίων, την ακτίνα τους, το ιξώδες του υγρού και τη θερμοκρασία του.

Αυτός ο μηχανισμός συμβαίνει τόσο συχνά που στις διατάξεις ηλεκτροδίων υψηλών τάσεων τμήματα μόνο με μονωτικό λάδι πρέπει να αποφεύγονται. Λύση στο πρόβλημα δίνεται τοποθετώντας κάθετα στην κατεύθυνση του πεδίου μονωτικών πλακών (insulating screens).

### 5.2.3.3 Διάσπαση μέσω φυσαλίδων αέρα ή υγρασίας

Εκτός από ξένα σωματίδια, στον όγκο ενός μονωτικού λαδιού είναι δυνατόν να υπάρχουν φυσαλίδες αέρα (οι οποίες προέρχονται κυρίως από αποσύνθεση των μορίων του λαδιού) ή υγρασίας. Έχει παρατηρηθεί πως το ηλεκτρικό πεδίο πάνω σε μια φυσαλίδα που είναι βυθισμένη σε μονωτικό λάδι δίνεται από τη σχέση [4]:

$$E_b = \frac{3 \cdot E_0}{\varepsilon_2 + 2} \quad (5.6)$$

όπου  $E_b$ : το ηλεκτρικό πεδίο της φυσαλίδας

$E_0$ : το ηλεκτρικό πεδίο στο μονωτικό λάδι απουσία φυσαλίδων

$\varepsilon_2$ : η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού λαδιού

Λόγω του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου η φυσαλίδα επιμηκύνεται, χωρίς να αλλάζει ο όγκος της, δημιουργώντας έτσι έναν αγώγιμο δρόμο μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.

Γι' αυτό το λόγο κατά την κατασκευή μετασχηματιστών, η πλήρωση λαδιού γίνεται εν κενώ σε ειδικό θάλαμο όπου αφαιρείται ο ατμοσφαιρικός αέρας, ώστε να αποφεύγεται η ύπαρξη φυσαλίδων εντός του λαδιού.

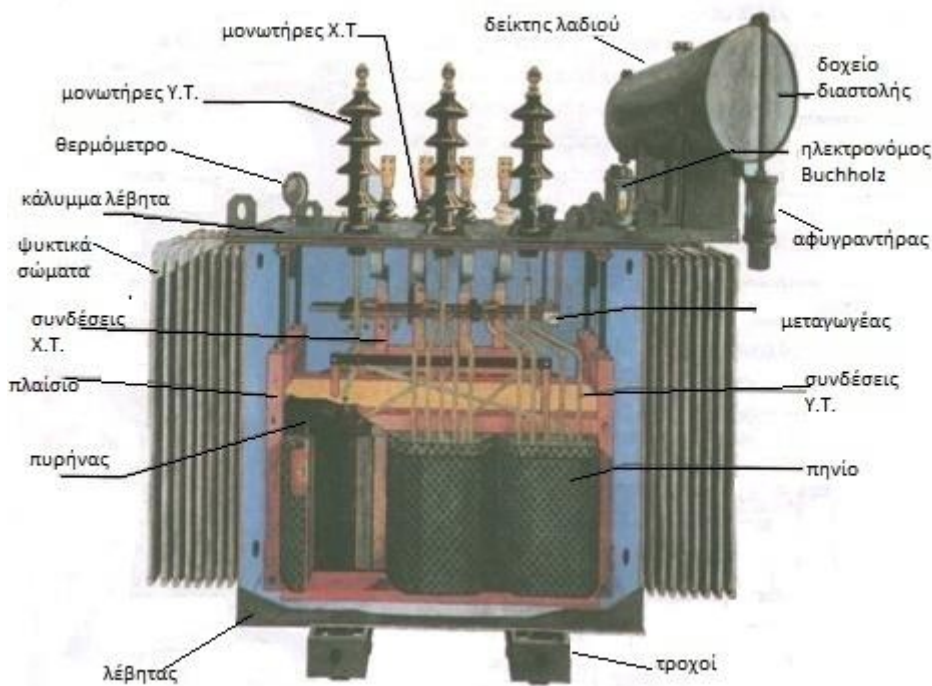
## 5.2.4 Εφαρμογές μονωτικών λαδιών

### 5.2.4.1 Καλώδια μέσης και υψηλής τάσης

Στα καλώδια ισχύος ως μονωτικό μέσο χρησιμοποιείται χαρτί, το οποίο εμποτίζεται σε λάδι για την πλήρωση των κενών που δημιουργούνται κατά την περιέλιξη της χάρτινης μονωτικής ταινίας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η διηλεκτρική αντοχή της μόνωσης, αφού οι θύλακες αέρα ανάμεσα στα στρώματα χαρτιού αποτελούν σημεία έναρξης μερικών εκκενώσεων που επιβαρύνουν τη στερεά μόνωση και μπορούν υπό προϋποθέσεις να οδηγήσουν ακόμα και σε διάσπαση.

### 5.2.4.2 Μετασχηματιστές Ισχύος

Το μονωτικό λάδι (κυρίως ορυκτέλαιο) χρησιμοποιείται στους μετασχηματιστές ισχύος ως μονωτικό μέσο αλλά και ως ψυκτικό μέσο. Συγκεκριμένα, οι μετασχηματιστές λαδιού (σχήμα 5.2) διαθέτουν ένα δοχείο διαστολής, σκοπός του οποίου είναι να δέχεται την αύξηση του όγκου του λαδιού λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας. Πάνω στο δοχείο διαστολής είναι τοποθετημένος ο αφυγραντήρας, ο οποίος απορροφά την υγρασία που δημιουργείται λόγω της συστολής και διαστολής του λαδιού. Επιπλέον, διαθέτουν έναν ηλεκτρονόμο τύπου πλωτήρα, ηλεκτρονόμο Buchholz, ο οποίος προστατεύει το μετασχηματιστή σε περίπτωση σχηματισμού μεγάλης ποσότητας αερίων ή μεγάλης διαρροής λαδιού. Σε μια τέτοια περίπτωση κλείνει ο πρώτος πλωτήρας του ηλεκτρονόμου ενεργοποιώντας ένα σήμα προειδοποίησης. Εάν η βλάβη δε διορθωθεί ενεργοποιείται και η δεύτερη επαφή και η λειτουργία του μετασχηματιστή διακόπτεται.

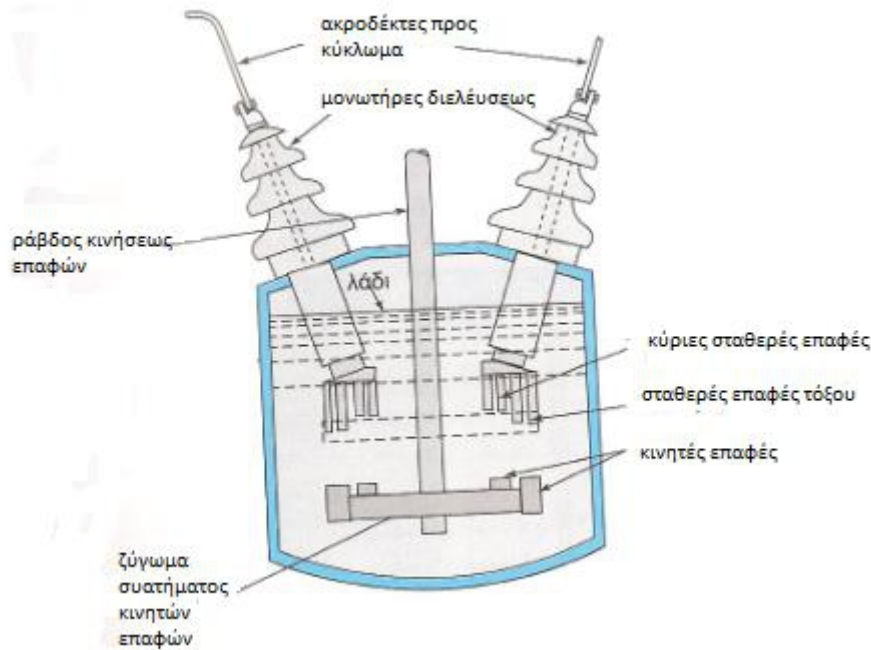


Σχήμα 5.2: Μετασχηματιστής λαδιού

### 5.4.3 Διακόπτες λαδιού

Το μονωτικό λάδι χρησιμοποιείται για τη διακοπή του τόξου, το οποίο δημιουργείται κατά τα ανοιγοκλεισίματα του διακόπτη. Το τόξο προκαλεί την αποσύνθεση του λαδιού (κυρίως σε άνθρακα και οξυγόνο), υποβαθμίζοντας προοδευτικά την ποιότητα του.





Σχήμα 5.3: Διακόπτης λαδιού [3]

## 5.3 Στερεά μονωτικά

### 5.3.1 Γενικά

Τα στερεά μονωτικά ανήκουν στην κατηγορία των μη επανορθούμενων μονώσεων, όπου το υλικό χάνει εντελώς τις μονωτικές του ιδιότητες μετά από κάποια διάσπαση.

Σημαντικά χαρακτηριστικά των μονωτικών στερεών:

- Παρουσιάζουν μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή σε σχέση με υγρά και αέρια.
- Παρουσιάζουν υψηλή μηχανική αντοχή. Για αυτό χρησιμοποιούνται και για τη στήριξη των αγωγικών τμημάτων μιας ηλεκτροτεχνικής κατασκευής.

### 5.3.2 Είδη στερεών μονωτικών

- **Οργανικά υλικά:** Παράγονται από φυτική και ζωική ύλη και έχουν όλα περίπου παρόμοια χαρακτηριστικά. Μερικά ευρέως διαδεδομένα οργανικά υλικά είναι τα: κεχριμπάρι, βαμβάκι, χαρτί, καουτσούκ, κερι, ξύλο. Τα οργανικά υλικά είναι καλοί μονωτές και μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν σε πρακτικές εφαρμογές, αλλά οι μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες τους «αναστέλλονται» για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 100°C. Για αυτό χρησιμοποιούνται ύστερα από εμποτισμό σε λάδι (π.χ. χαρτί που χρησιμοποιείται σε καλώδια, πυκνωτές και μετασχηματιστές).
- **Ανόργανα υλικά:** Μερικά ευρέως διαδεδομένα είναι τα: άσβεστος, κεραμικά, γυαλί, μίκα, πορσελάνη. Από αυτά τα πιο συνηθισμένα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το γυαλί και η πορσελάνη (κυρίως είναι τα κύρια υλικά κατασκευής των διαφόρων τύπων μονωτήρων), εξαιτίας της αντοχής τους

στους ατμοσφαιρικούς ρύπους και στην εξαιρετική τους απόδοση κάτω από διαφορετικές συνθήκες πίεσης και αέρα. Τα ανόργανα υλικά διατηρούν τις μονωτικές και μηχανικές ιδιότητες τους και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 250°C.

- **Συνθετικά πολυμερή (πλαστικά):** Διαθέτουν πολύ καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και χρησιμοποιούνται ευρέως ιδιαίτερα σε κατασκευές όπου απαιτείται υψηλή στάθμη μόνωσης. Τα πολυμερή υλικά αποτελούνται από μακριές αλυσίδες μακρομορίων, που προκύπτουν από συνδυασμούς άνθρακα, υδρογόνου, οξυγόνου, αζώτου, χλωρίου, φθορίου και θείου κατά την παρασκευή τους. Είναι σε υγρή κατάσταση και εύκολα μορφοποιούνται σε στερεά. Χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες:

- **Θερμοπλαστικά (πολυαιθυλένιο, πολυβινοχλωρίδιο, perspex κ.α.):** Παραμορφώνονται με τη θερμοκρασία. Μπορούν να τήκονται και να επαναδιαμορφώνονται πολλές φορές με θέρμανση και ψύξη, και είναι κατάλληλα σε περιπτώσεις που απαιτείται ευκαμψία (π.χ. καλώδια). Έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση, ευκολότερη επεξεργασία και μπορεί να αποκτήσουν πολύπλοκες μορφές.

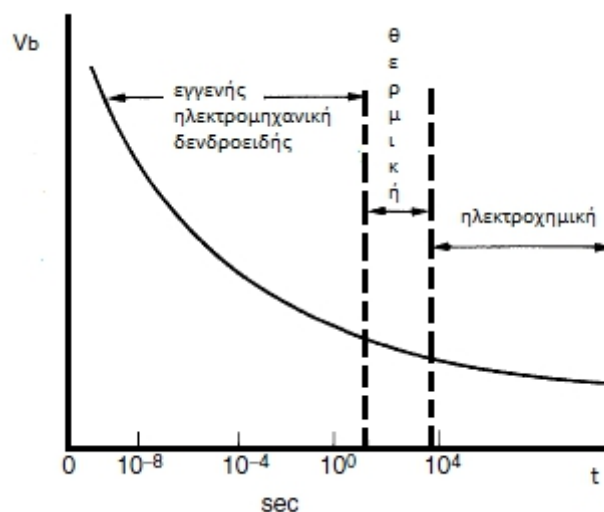
- **Θερμοσκληρυνόμενα (βακελίτης, πολυεστέρες κ.α.):** Υπόκεινται κατά την επεξεργασία τους σε χημική αλλαγή που ονομάζεται σκλήρυνση, γίνονται μόνιμα αδιάλυτα, δεν επανατήκονται και για αυτό δεν μπορούν να επαναμορφοποιηθούν.

### 5.3.3 Μηχανισμοί διάσπασης στερεών μονωτικών

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών εξαρτάται όχι μόνο από το μέγεθος της τάσης αλλά επίσης είναι συνάρτηση του χρόνου, για τον οποίο έχει η τάση εφαρμοστεί στο μονωτικό μέσο. Μπορούμε να πούμε πως ισχύει η παρακάτω σχέση [4]:

$$V_b = \ln t_b = \text{σταθερό} \quad (5.7)$$

Με τη λογική αυτή προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα:

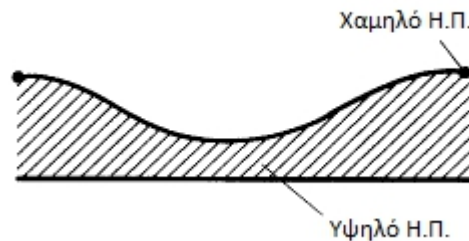


Σχήμα 5.4: Χρονική εξάρτηση των μηχανισμών διάσπασης [4]



### 5.3.3.1 Ηλεκτρονική ή εγγενής ή ενδογενής διάσπαση

Αν το μονωτικό υλικό είναι καθαρό και ομοιογενές, η θερμοκρασία και οι περιβαλλοντικές συνθήκες κατάλληλα ελεγμένες και αν οι τάσεις εφαρμόζονται για πολύ μικρό χρονικό διάστημα της τάξης των  $10^{-8}$ s, η διηλεκτρική αντοχή του υλικού αυξάνεται ραγδαία μέχρι μια μέγιστη τιμή που ονομάζεται εγγενής διηλεκτρική αντοχή. Αυτή η τιμή εξαρτάται κυρίως από τη δομή του υλικού και επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Για να διατηρηθεί σταθερή αυτή η τιμή, τα δείγματα παρασκευάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρχει υψηλό ηλεκτρικό πεδίο στο κέντρο του δείγματος και πολύ χαμηλότερο στις άκρες. Η εγγενής διάσπαση είναι ηλεκτρονικής φύσεως. Οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου είναι από  $1MV/mm$  έως  $15MV/mm$ . Όταν τα ηλεκτρόνια του μονωτικού μέσου αποκτήσουν αρκετή ενέργεια λόγω του εφαρμοζόμενου πεδίου, αποδεσμεύονται νέα ηλεκτρόνια και σχηματίζεται μια ηλεκτρονική στιβάδα, που τελικά οδηγεί σε διάσπαση.



Σχήμα 5.5: Δείγμα κατασκευασμένο για εγγενή διάσπαση [4]

### 5.3.3.2 Ηλεκτρομηχανική διάσπαση

Η ηλεκτρομηχανική διάσπαση επέρχεται για ένταση μεγαλύτερη από αυτή της θερμικής ή της δένδροειδούς διάσπασης λόγω της ανάπτυξης ηλεκτροστατικών δυνάμεων οι οποίες ξεπερνούν τη μηχανική αντοχή του υλικού. Το φαινόμενο είναι πολύ γρήγορο ( $10^{-8}$  s) και η ασκούμενη πίεση στο διηλεκτρικό είναι της τάξης των  $kN/m^2$ . Το μέγεθος των ηλεκτροστατικών δυνάμεων  $F_1$  ισούται με [4]:

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{V^2}{d^2} \quad (5.8)$$

Όπου  $\epsilon_r$ : η διηλεκτρική σταθερά του υλικού  
 $V$ : η εφαρμοζόμενη τάση  
 $d$ : το πάχος του υλικού μετά την εφαρμοζόμενη τάση  $V$

Η μηχανική αντοχή του υλικού είναι:

$$F_2 = \gamma \cdot \ln \frac{d_0}{d} \quad (5.9)$$

όπου  $\gamma$ : η σταθερά του Young  
 $d_0$ : το αρχικό πάχος του υλικού  
 $d$ : το πάχος του υλικού μετά την εφαρμοζόμενη τάση  $V$

Υπό συνθήκες ισορροπίας ισχύει:

$$F_1 = F_2 \Rightarrow \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{V^2}{d^2} = \gamma \cdot \ln \frac{d_0}{d} \Rightarrow V^2 = d^2 \cdot \frac{2\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \cdot \ln \frac{d_0}{d} = d^2 \cdot K \cdot \ln \frac{d_0}{d} \quad (5.10)$$

Διαφορίζοντας ως προς d έχουμε:

$$2 \cdot V \cdot \frac{dV}{dd} = K \left( 2 \cdot d \cdot \ln \frac{d_0}{d} - d^2 \cdot \frac{d}{d_0} \cdot \frac{d_0}{d^2} \right) = 0 \Rightarrow \dots \Rightarrow \frac{d}{d_0} = 0,6 \quad (5.11)$$

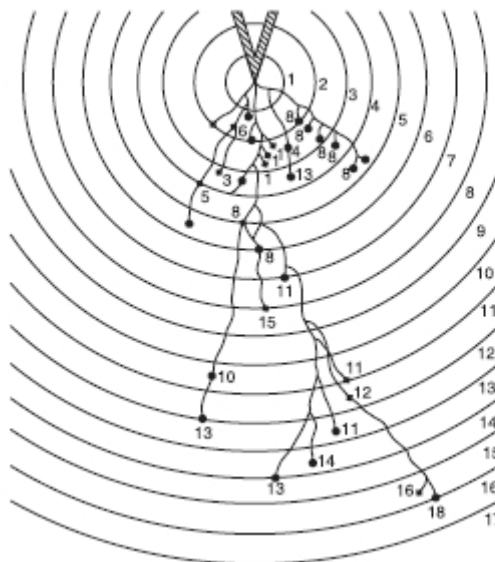
Οπότε η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που μπορεί να αντέξει η μόνωση είναι:

$$E = \frac{V}{d_0} = 0,6 \sqrt{\frac{\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} \quad (5.12)$$

### 5.3.3.3 Δενδροειδής διάσπαση

Η δενδροειδής διάσπαση (σχήμα 5.6) θεωρείται θερμικό φαινόμενο που εμφανίζεται σε τιμές μεγαλύτερης πεδιακής έντασης σε σχέση με τη θερμική διάσπαση και οφείλεται σε αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις. Δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια και το υλικό καταπονείται λόγω των αναπτυσσόμενων δυνάμεων Coulomb, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δενδρίτη, ο οποίος οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού.

Διάσπαση του μονωτικού υλικού λόγω ανάπτυξης δενδρίτη συμβαίνει επίσης και στην περίπτωση παρουσίας ξένων σωματιδίων, σκόνης ή υγρασίας στο όγκο του μονωτικού, οπότε αναπτύσσονται δενδρίτες κατά τη διαδρομή των σωματιδίων ή της υγρασίας, οι οποίοι έχουν ακανόνιστη και ασαφή μορφή.



Σχήμα 5.6: Δενδροειδής διάσπαση [4]

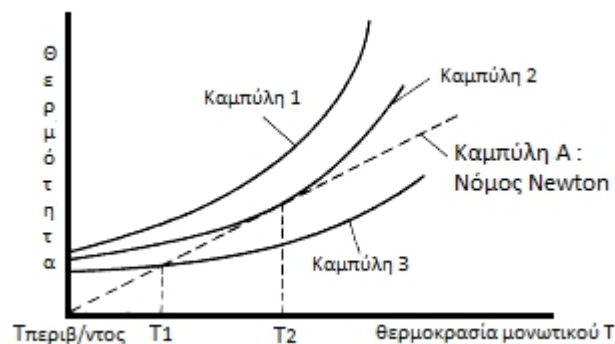
Το φαινόμενο αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί εργαστηριακά εφαρμόζοντας κρουστική τάση ανάμεσα σε ζεύγος ηλεκτροδίων ακίδας-πλάκας, όπου η ακίδα θα είναι εντός διαφανούς στερεού μονωτικού υλικού, π.χ. perspex.

### 5.3.3.4 Θερμική διάσπαση

Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο επιδρά σε ένα μονωτικό υλικό, αναπτύσσονται στο υλικό μικρά ρεύματα διαρροής και διηλεκτρικές απώλειες λόγω της μικρής αγωγιμότητας που παρουσιάζει το μέσο, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του μέσου. Στην περίπτωση που ο ρυθμός παραγωγής της θερμότητας στο μονωτικό μέσο είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό απαγωγής της θερμότητας, τότε η θερμοκρασία αυξάνεται και δημιουργείται μια ασταθής κατάσταση που συνοδεύεται από την ανάπτυξη ενός αγωγίμου δρόμου, ώσπου τελικά το υλικό διασπάται. Στην περιοχή της διάσπασης το μονωτικό υλικό συνήθως καίγεται και τήκεται.

Εάν  $P$  η παραγόμενη θερμότητα,  $P_\alpha$  η απαγόμενη θερμότητα,  $C_v$  η θερμοχωρητικότητα και  $\theta$  η θερμοκρασία, τότε η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας δίνεται:

$$P(\theta) = P_\alpha(\theta) + C_v \frac{d\theta}{dt} \quad (5.13)$$



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα θερμικής ισορροπίας [4]

Αν υποθέσουμε πως η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του περιβάλλοντος και του μέσου είναι μικρή, τότε ο νόμος του Newton για την ψύξη παριστάνεται από μια ευθεία γραμμή (καμπύλη Α).

Στο σχήμα 5.7 φαίνεται το διάγραμμα ισορροπίας, όπου οι τομές των καμπύλων θερμοτήτων σε ένα στερεό και της απαγόμενης θερμότητας από αυτό αντιστοιχούν σε καταστάσεις θερμικής ισορροπίας. Αυξάνοντας την εφαρμοζόμενη τάση το σημείο θερμικής ευστάθειας μετατοπίζεται προς τα πάνω. Όταν μια καμπύλη  $x$  και  $A$  δε τέμνονται πια, το σύστημα γίνεται ασταθές και οδηγούμαστε σε διάσπαση. Η καμπύλη 3 είναι σε θερμική ισορροπία για θερμοκρασία  $T_1$ . Το σημείο στο οποίο εφάπτεται η καμπύλη 2 με την  $A$  αποτελεί το οριακό σημείο θερμικής ισορροπίας, πάνω από το οποίο επέρχεται θερμική διάσπαση. Ενώ η καμπύλη 1 δεν αγγίζει για καμία  $T$  θερμική ισορροπία.

### 5.3.3.5 Ηλεκτροχημική διάσπαση

Όταν κοιλότητες σχηματίζονται σε στερεά διηλεκτρικά υλικά, η διηλεκτρική αντοχή των υλικών μειώνεται. Όταν ο αέρας στις κοιλότητες διασπάται, οι επιφάνειες του μέσου γίνονται στιγμιαία άνοδος και κάθοδος. Μερικά ηλεκτρόνια κατευθύνονται προς την άνοδο με ικανή ενέργεια να σπάσουν τους χημικούς δεσμούς της μονωτικής επιφάνειας. Παρόμοια, κατιόντα βομβαρδίζουν την κάθοδο και ίσως αυξήσουν τη θερμοκρασία της και παράγουν τοπική θερμική αστάθεια. Θερμική υποβάθμιση ίσως συμβεί επίσης από τα προϊόντα της διάσπασης που σχηματίζονται στον αέρα, π.χ.  $O_3$ ,  $NO_2$ . Το καθαρό αποτέλεσμα όλων αυτών των μεθόδων είναι μια αργή διάβρωση του υλικού και μια επακόλουθη μείωση στο πάχος του διηλεκτρικού.

### 5.3.4 Διάτρηση-Υπερπήδηση-Επιφανειακή διάσπαση-Μερικές εκκενώσεις

Στα στερεά μονωτικά η διάσπαση γίνεται είτε μέσω του όγκου τους και ονομάζεται **διάτρηση** είτε στο περιβάλλον γύρω από το μονωτικό (λόγω ρύπανσης και υγρασίας) και ονομάζεται **υπερπήδηση**.

Πιο ειδικά αν η διάσπαση συμβεί στην επιφάνεια του μονωτικού ονομάζεται **επιφανειακή διάσπαση**. Για παράδειγμα σε ένα μονωτήρα ανάρτησης για κάποια τιμή της επιβαλλόμενης τάσης, αναπτύσσονται επιφανειακές εκκενώσεις λόγω ρύπανσης, ξένων σωματιδίων, σκόνης, υγρασίας, οπότε αυξάνεται η αγωγιμότητα της επιφάνειας και μειώνεται το μήκος ερπυσμού. Για μεγαλύτερες τιμές της τάσης εκδηλώνεται υπερπήδηση στον περιβάλλοντα αέρα ως αποτέλεσμα του συνδυασμού των επιφανειακών εκκενώσεων και της άμεσης διάσπασης στρωμάτων αέρα.

Οι **μερικές εκκενώσεις** είναι εκκενώσεις περιορισμένης έκτασης σε ένα μονωτικό υλικό που δεν οδηγούν άμεσα στη διάσπαση του προκαλούν όμως τη σταδιακή υποβάθμιση και γήρανση του. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μέσου ή στην επιφάνεια του. Οι μερικές εκκενώσεις μειώνουν τη διάρκεια ζωής των μονωτικών υλικών, κυρίως μέσω έκλυσης ενέργειας και πρόκλησης διαφόρων ηλεκτροχημικών δράσεων, αλλάζοντας τη μοριακή δομή του υλικού.

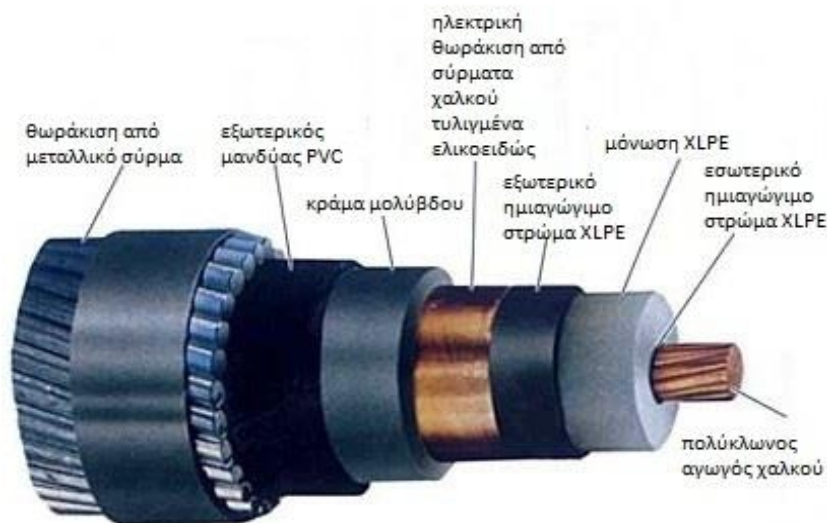
### 5.3.5 Εφαρμογές στερεών μονωτικών

#### 5.3.5.1 Μονωτήρες

Η πορσελάνη, το γυαλί και τα συνθετικά πολυμερή χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κάθε είδους μονωτήρα. Το γυαλί και η πορσελάνη προτιμώνται γιατί έχουν υψηλή διηλεκτρική αντοχή, μηδενική απορροφητικότητα υγρασίας, θερμική σταθερότητα και υψηλή τάση υπερπήδησης. Οι τρεις βασικές κατηγορίες μονωτήρων είναι οι μονωτήρες στήριξης, που χρησιμοποιούνται κυρίως στη μέση τάση και για τάσεις μέχρι 69kV, ενώ για μεγαλύτερες τάσεις χρησιμοποιούνται οι αλυσοειδείς μονωτήρες αναρτήσεως, κύρια χρήση των οποίων είναι η ανάρτηση των αγωγών στους πυλώνες υψηλής τάσης και τέλος οι μονωτήρες διέλευσης, που χρησιμοποιούνται στις θέσεις εξόδου των αγωγών από τους μετασχηματιστές ή άλλες συσκευές και για τη διέλευση αγωγών εγκάρσια μέσω χωρισμάτων.

### 5.3.5.2 Καλώδια

Για πολλές δεκαετίες χρησιμοποιούνταν ως μονωτικό υλικό για καλώδια ισχύος μέσης και υψηλής τάσης χαρτί εμποτισμένο σε λάδι, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 5.2.4.1. Σήμερα πια αυτή η τεχνική είναι ξεπερασμένη και χρησιμοποιούνται πλαστικά συνθετικά όχι μόνο για μόνωση αλλά και ως εξωτερικό περίβλημα των καλωδίων. Τα πιο συνηθισμένα πλαστικά είναι το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), το πολυαιθυλένιο (PE) και το δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (XLPE). Το PVC χρησιμοποιείται για μόνωση σε καλώδια έως 10kV, καθώς οι υψηλές διηλεκτρικές απώλειες που παρουσιάζει δεν επιτρέπουν την εφαρμογή του σε υψηλότερα επίπεδα τάσης. Ακόμα, χρησιμοποιείται και σε καλώδια υψηλής τάσης ως εξωτερικό περίβλημα. Τα PLE και XPLE παρουσιάζουν υψηλότερη διηλεκτρική αντοχή, ενώ συμπεριφέρονται καλύτερα στις υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 5.8: Καλώδιο μέσης τάσης

### 5.3.5.3 Μετασχηματιστές ξηρού τύπου

Οι μετασχηματιστές αυτοί χρησιμοποιούν χυτορητίνη αντί για λάδι ως μονωτικό, καθώς η χυτορητίνη σε αντίθεση με το λάδι είναι άκαυστη. Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου είναι ακριβότεροι από αυτούς με λάδι, αλλά μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο του κτιρίου, ενώ οι μετασχηματιστές λαδιού είτε σε εξωτερικό χώρο είτε στο υπόγειο.



Σχήμα 5.9: Μετασχηματιστής ξηρού τύπου

## 5.4 Δοκιμές σε μονώσεις

### 5.4.1 Μέτρηση του ρεύματος διαρροής

Οι απώλειες στο συνεχές ρεύμα οφείλονται αποκλειστικά στην αγωγιμότητα που παρουσιάζει ένα μονωτικό υλικό και εκφράζονται με τον προσδιορισμό της συνολικής ωμικής αντίστασης, την οποία παρουσιάζει το υλικό όταν χρησιμοποιούμενο ως διηλεκτρικό ενός πυκνωτή τίθεται υπό συνεχή τάση. Εκτός της φυσιολογικής γήρανσης που υφίσταται μια μόνωση, παράγοντες όπως υγρασία, ακτινοβολία, ξένες επικαθίσεις, έκθεση σε ψυχρό ή θερμό περιβάλλον, μηχανικές καταπονήσεις επιδρούν αρνητικά στη μόνωση, με αποτέλεσμα τη μείωση της μόνωσης, πράγμα που συνεπάγεται τη δημιουργία αγωγίων δρόμων και την αύξηση του ρεύματος διαρροής. Εάν διαπιστωθεί μεγάλη ποσοστιαία αύξηση του ρεύματος διαρροής, τότε αυτό είναι ένδειξη υποβάθμισης του υλικού. Για αυτό πρέπει να πραγματοποιούνται περιοδικοί έλεγχοι και μετρήσεις της αντίστασης μόνωσης καθώς και προγραμματισμένες συντηρήσεις.

Στην περίπτωση των μονωτικών λαδιών η αγωγιμότητα εξαρτάται κυρίως από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, τη θερμοκρασία και το ποσοστό των προσμίξεων. Είναι αποτέλεσμα της κίνησης των ιόντων και ποικίλει από  $10^{-15}$  με  $10^{-13} S/cm$  για υγρασία από 10 μέχρι 200ppm (parts per million= $10^{-6}$ ). Η μέτρηση της αγωγιμότητας δίνει σημαντικές πληροφορίες για το βαθμό καθαρότητας του μονωτικού λαδιού. Θετικά και αρνητικά ιόντα παράγονται κατά τη διάσπαση των προσμίξεων. Για δεδομένο είδος ιόντων με φορτίο  $q_1$  και πυκνότητα  $n_1$ , η επαγόμενη συνεισφορά στο ρεύμα διαρροής σε πεδίο έντασης  $\vec{E}$  είναι:

$$S_1 = q_1 \cdot n_1 \cdot \vec{v}_1 = q_1 \cdot n_1 \cdot b_1 \cdot \vec{E} = \kappa_1 \cdot \vec{E} \quad (5.13)$$

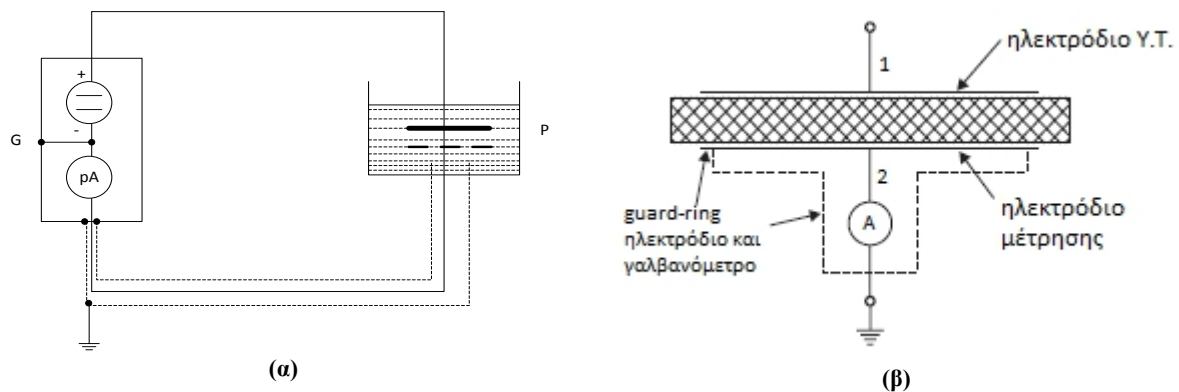
Όπου  $v_1$ : η ταχύτητα των ιόντων

$b_1$ : η κινητικότητα των ιόντων



Όταν μια συγκεκριμένη ένταση πεδίου εφαρμόζεται σε ένα διηλεκτρικό, ένας κατάλληλος μηχανισμός τίθεται σε λειτουργία για να ισορροπήσει την πυκνότητα των διαφόρων τύπων ιόντων. Ο μηχανισμός συνεχίζει να δρα μέχρι να δημιουργηθεί ισορροπία μεταξύ της παραγωγής, της επανασύνδεσης και της διαρροής των ιόντων προς τα ηλεκτρόδια. Εξαιτίας των διαφορετικών κινητικοτήτων των ιόντων αυτός ο μηχανισμός θα ξεκινήσει σε διαφορετικές χρονικές στιγμές για κάθε είδος, γι' αυτό το λόγο η τελική αγωγιμότητα  $\kappa$  είναι συνάρτηση του χρόνου μετά την έναρξη του φαινομένου. Για τη μέτρηση του  $\kappa$  καλό θα ήταν να περιμένουμε μέχρι αυτοί οι παροδικοί μηχανισμοί να σταματήσουν, για αυτό ξεκινάμε την μέτρηση 1 min μετά την εφαρμογή της τάσης.

Οι δοκιμές διεξάγονται με τάση πολύ χαμηλότερη της ονομαστικής και δεν επιφέρουν ηλεκτρική διάσπαση του υλικού, ούτε εσωτερικές εκκενώσεις. Ενώ η τάση που εφαρμόζεται είναι συνεχής.



Σχήμα 5.10: (α) Διάταξη ηλεκτροδίων για τη μέτρηση του  $\kappa$  σε μονωτικό λάδι [1], (β) σε μονωτικό στερεό [5]

Μια διάταξη ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του  $\kappa$  φαίνεται στο σχήμα 5.10 για την περίπτωση υγρών και στερεών μονωτικών υλικών αντίστοιχα. Το σχήμα 5.10(β) συνοδεύεται από ηλεκτρόδια εξομάλυνσης (guard-ring electrodes), δηλαδή ζεύγη πλακών ή ομοαξονικών κυλίνδρων που βοηθούν στη δημιουργία ενός όσο το δυνατόν πιο ομογενούς πεδίου.

Η αγωγιμότητα  $\kappa$  προκύπτει από τη σχέση:

$$\kappa = \frac{s \cdot I}{A \cdot V} \quad (5.14)$$

όπου  $s$ : το διάκενο μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων  
 $I$ : η ένταση του ρεύματος  
 $A$ : το εμβαδό της επιφάνειας των ηλεκτροδίων  
 $V$ : η τάση στα άκρα των δύο ηλεκτροδίων

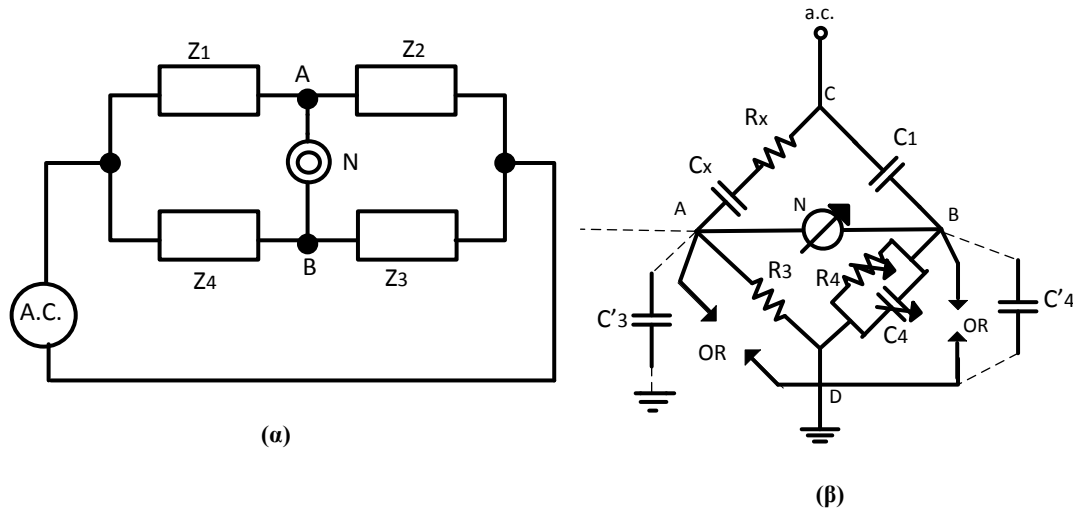
Το ρεύμα που μετριέται είναι της τάξης των picoamperes. Η μέτρηση γίνεται μέσω γαλβανόμετρου κινητού πηνίου. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και ηλεκτρονικά αμπερόμετρα, αλλά είναι πιο ευαίσθητα.

### 5.4.2 Μέτρηση του συντελεστή απωλειών με εφαρμογή εναλλασσόμενου ρεύματος

Για τη μέτρηση του συντελεστή απωλειών  $\tan\delta$  χρησιμοποιούνται κατάλληλες γέφυρες μέτρησης, η γενική μορφή των οποίων φαίνεται στο σχήμα 5.11(α) .

Κατά την ισορροπία της γέφυρας μέτρησης ισχύει:

$$V_{AB} = 0 \Rightarrow Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4 \quad (5.15)$$



Σχήμα 5.11: (α) Γενικό κύκλωμα γεφυρών, (β) Γέφυρα Schering (όπου OR:σπινθηριστής προστασίας)

Η γέφυρα Schering (σχήμα 5.11(β)) αποτελεί την πιο γνωστή διάταξη για τη μέτρηση του συντελεστή απωλειών ενός διηλεκτρικού. Το τμήμα χαμηλής τάσης της γέφυρας θωρακίζεται και συνδέεται με τον πυκνωτή  $C_1$  και με το προς μέτρηση δοκίμιο ( $Z_x$ ). Το όργανο μηδενισμού (N) είναι συνήθως ένας ενισχυτής στενού φάσματος μαζί με ένα γαλβανόμετρο. Ισχύουν:

$$Z_x = R_x - j \frac{1}{\omega \cdot C_x} \quad (5.16)$$

$$Z_1 = \frac{1}{\omega \cdot C_1} \quad (5.17)$$

$$Z_3 = R_3 \quad (5.18)$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{\sqrt{(1+R \cdot \omega \cdot C_4)^2}} \quad (5.19)$$

Αλλάζουμε τις τιμές των μεταβλητών στοιχείων  $R_4$  και  $C_4$  μέχρι τον μηδενισμό της γέφυρας, οπότε και θα ισχύει:

$$Z_x \cdot Z_4 = Z_1 \cdot Z_3 \Rightarrow R_x = R_4 \frac{C_4}{C_1}, C_x = C_1 \frac{R_4}{R_3} \quad (5.20)$$



Ο συντελεστής απωλειών είναι:

$$\tan \delta_x = \omega \cdot C_4 \cdot R_4 = \omega \cdot C_x \cdot R_x \quad (5.21)$$

Η  $\varepsilon_r$  υπολογίζεται από την τιμή της  $C_x$  ανάλογα με τη διάταξη. Για παράδειγμα για πυκνωτή επίπεδων πλακών είναι:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x \cdot d}{A \cdot \varepsilon_0} \quad (5.22)$$

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επηρεάζεται αρκετά από τις παράσιτες χωρητικότητες  $C_3'$  και  $C_4'$ , οι οποίες επηρεάζουν τις συνθήκες ισορροπίας της γέφυρας, εισάγοντας σφάλμα στον υπολογισμό των  $\tan \delta$  [3].

Εξ ορισμού οι διηλεκτρικές απώλειες μόνωσης με χωρητικότητα  $C$  και συχνότητα παροχής  $\omega$  μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το συντελεστή απωλειών.

Ισχύει:

$$P_{\text{απωλειών}} = V^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \delta \quad (5.23)$$

### 5.4.3 Δοκιμή διηλεκτρικής αντοχής

Υπάρχουν πολλές υποκατηγορίες δοκιμών διηλεκτρικής αντοχής ανάλογα με τα επίπεδα τάσης και συχνότητας [3]:

#### - Με εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας

Εφαρμόζεται μια εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας πολλαπλάσια (2 έως 3 φορές ανάλογα με το είδος της μόνωσης και της συσκευής) της ονομαστικής τάσης για ένα χρονικό διάστημα. Εάν η μόνωση δε διασπαστεί η δοκιμή θεωρείται επιτυχής.

Για παράδειγμα σε καλώδια ισχύος με πλαστική μόνωση εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση 3,5 φορές της ονομαστικής και ελέγχονται τυχόν διασπάσεις στον όγκο του μονωτικού.

Άλλο παράδειγμα είναι ο έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής των μονωτικών λαδιών. Το λάδι τοποθετείται σε ένα δοχείο με δύο ηλεκτρόδια που απέχουν 2 έως 2,5 mm, το σχήμα των οποίων ποικίλει ανάλογα το Πρότυπο (συνήθη πρότυπα VDE(γερμανικό) και ASTM(αμερικάνικο)). Εφαρμόζεται υψηλή εναλλασσόμενη τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων, η οποία ανυψώνεται με ρυθμό από 2 έως 3  $kV/sec$ , έως ότου συμβεί διάσπαση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται 5 με 6 φορές και καταγράφονται οι τιμές για τις οποίες συνέβησαν οι διασπάσεις. Μετά από κάθε διάσπαση το λάδι αναδεύεται είτε με μια γυάλινη ράβδο είτε με ειδικό ενσωματωμένο σύστημα ανάδευσης, ώστε τα ξένα σωματίδια να κατανέμονται ομοιογενώς και στη συνέχεια το λάδι αφήνεται να ηρεμήσει για 1-2 min. Η διηλεκτρική αντοχή προκύπτει ως το πηλίκο του μέσου όρου των μετρήσεων της τάσης διάσπασης προς το μήκος του διακένου. Ανάλογα την τιμή της διηλεκτρικής αντοχής που προκύπτει το λάδι κατατάσσεται σε άριστο, καλό και ακατάλληλο σύμφωνα με τις τιμές του πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Ποιότητα λαδιού σύμφωνα με τη διηλεκτρική τους αντοχή

Ποιότητα λαδιού	Διηλεκτρική αντοχή ( $kV/cm$ )
Άριστο	>120
Καλό	70-120
Ακατάλληλο	<70

Αξίζει να σημειωθεί πως μια ένδειξη της ποιότητας του λαδιού είναι το χρώμα του. Τα καινούργια λάδια έχουν ανοιχτό κίτρινο χρώμα, ενώ με την πάροδο του χρόνου το χρώμα γίνεται πιο σκούρο.

- **Με κρουστικές τάσεις**

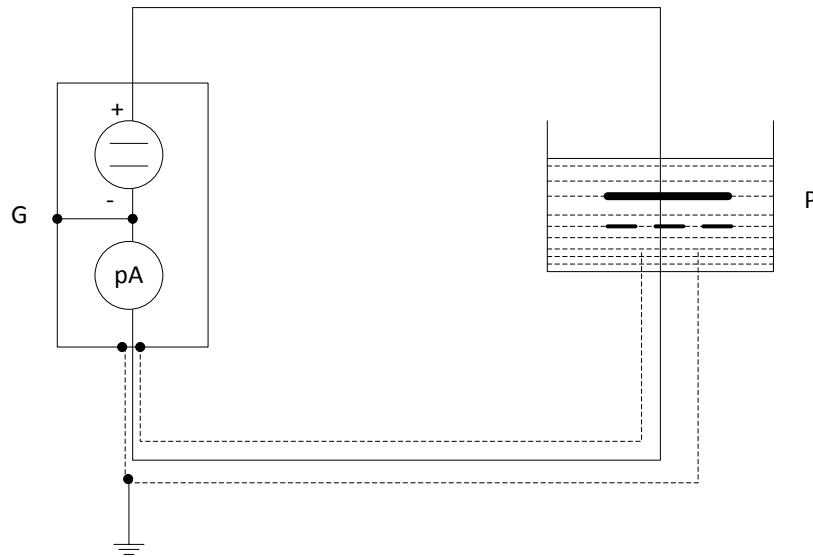
Οι μονώσεις στις διάφορες ηλεκτροτεχνικές κατασκευές καταπονούνται από κεραυνούς και υπερτάσεις χειρισμών, για το λόγο αυτό πρέπει δοκιμάζονται με εφαρμογή κρουστικών τάσεων διαφόρων μορφών (θετικής και αρνητικής πολικότητας), με μέγιστη τιμή πολλαπλάσια της ονομαστικής και να διαπιστώνεται αν διασπώνται ή όχι.

- **Με εναλλασσόμενη τάση χαμηλής συχνότητας**

Πρόκειται κυρίως για δοκιμές μετά την εγκατάσταση του εξοπλισμού, όπου η δοκιμή με τάση βιομηχανικής συχνότητας απαιτεί γεννήτριες πολύ μεγάλης ισχύος, οι οποίες παρουσιάζουν δυσκολίες στη μεταφορά και είναι πολύ ακριβές. Όσο πιο χαμηλή είναι η συχνότητα της εφαρμοζόμενης τάσης, τόσο πιο μικρό είναι το ρεύμα και η ισχύς που απαιτούνται για τη δοκιμή συσκευών υψηλών χωρητικότητων. Για αυτό όταν πρόκειται να πραγματοποιηθούν δοκιμές εκτός εργαστηρίου χρησιμοποιούνται γεννήτριες εναλλασσόμενης τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας (συνήθως 0,1Hz).

## 5.5 Πειραματική διάταξη

**1<sup>η</sup> Πειραματική Διάταξη:** Μέτρηση της d.c. αγωγιμότητας μετασχηματιστή ελαίου



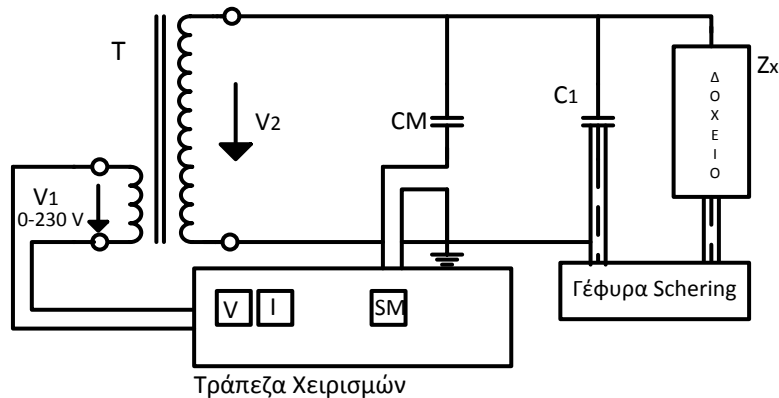
Σχήμα 5.12: Διάταξη για τη μέτρηση της αγωγιμότητας υγρών μονωτικών

όπου G: ευαίσθητο αμπερόμετρο με ενσωματωμένη πηγή d.c. τάσης  
P: δοχείο γεμάτο με μονωτικό λάδι

Συνεχής τάση 100V παρέχεται από την πηγή. Η d.c. αγωγιμότητα δύο διαφορετικών λαδιών θα μετρηθεί για διάκενο από 2 έως 5 mm.

$V_0$ (V)	s(mm)	I(pA)

**2<sup>η</sup> Πειραματική Διάταξη:** Μέτρηση του συντελεστή απωλειών  $\tan\delta$  για μετασχηματιστή λαδιού



Σχήμα 5.13: 2<sup>η</sup> πειραματική διάταξη

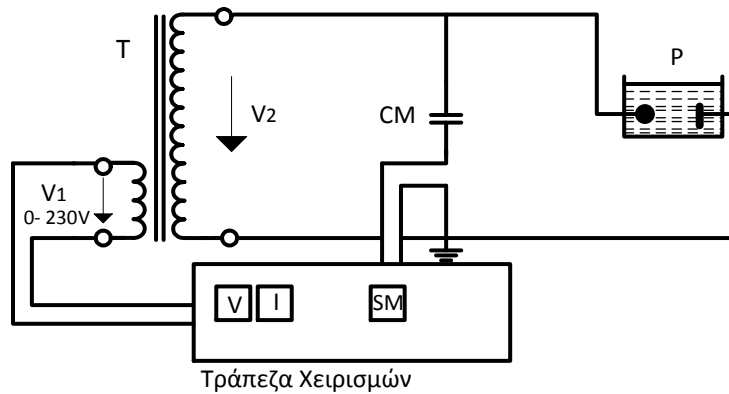
- όπου
- T: μετασχηματιστής δοκιμής με λόγο μετασχηματισμού  $220V/100kV$  και ονομαστική ισχύ  $5kVA$
  - SM: βολτόμετρο μεγίστου με ενσωματωμένο πυκνωτή χαμηλής τάσης (C2). Η σύνδεση με το CM γίνεται μέσω ομοαξονικού καλωδίου.
  - CM: πυκνωτής μέτρησης,  $100pF$
  - C<sub>1</sub>:  $28pF$
  - Z<sub>x</sub>: Δοχείο με το υπό δοκιμή μονωτικό λάδι όπου η διάταξη των ηλεκτροδίων είναι παράλληλες πλάκες

Η χωρητικότητα  $C_x$  και ο συντελεστής απωλειών  $\tan\delta$  της διάταξης θα υπολογιστούν ως συνάρτηση της a.c. τάσης  $V$ , χρησιμοποιώντας το κύκλωμα του σχήματος 5.13.

Πραγματοποιείται μια σειρά από μετρήσεις για τάσεις μέχρι  $35kV$  και για διάκενο  $s=5mm$ . Μεταξύ των μετρήσεων αναδεύουμε το λάδι και το αφήνουμε να ηρεμήσει για περίπου 1-2 min ώστε τα ξένα σωματίδια να κατανεμηθούν ομοιόμορφα. Κατά τη διάρκεια κάθε μέτρησης η εφαρμοζόμενη τάση διατηρείται σταθερή για 2 min και αυξομειώνονται οι τιμές των  $R$ ,  $C$  μέχρι το όργανο μηδενισμού να δείξει μηδενική ένδειξη, τότε καταγράφουμε τις τιμές των  $R$ ,  $C$ .

Πίνακας 5.3

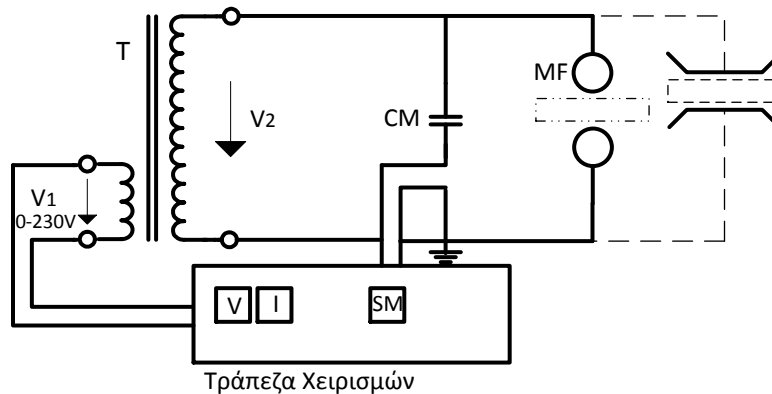
	$V_{AB}(kV)$	$R_4(\Omega)$	$C_4(pF)$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

**3<sup>η</sup> Πειραματική Διάταξη:** Μελέτη της διάσπασης μέσω ξένων σωματιδίωνΣχήμα 5.14: 3<sup>η</sup> πειραματική διάταξη

- όπου
- T: μετασχηματιστής δοκιμής με λόγο μετασχηματισμού  $220V/100kV$  και ονομαστική ισχύ  $5kVA$
  - SM: βολτόμετρο μεγίστου με ενσωματωμένο πυκνωτή χαμηλής τάσης (C2). Η σύνδεση με το CM γίνεται μέσω ομοαξονικού καλωδίου.
  - CM: πυκνωτής μέτρησης,  $100pF$
  - P: Δοχείο με το υπό δοκιμή μονωτικό λάδι όπου η διάταξη των ηλεκτροδίων αποτελείται από μια σφαίρα ( $D=20mm$ ) και μια πλάκα, και το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι μερικά cm

Στο μονωτικό λάδι περιέχονται κάποια ξένα σωματίδια, βρεγμένο βαμβάκι, μήκους  $5mm$ . Μια τάση περίπου  $10kV$  εφαρμόζεται ανάμεσα στη σφαίρα και την πλάκα, με αποτέλεσμα εντός λίγων δευτερολέπτων την ευθυγράμμιση των σωματιδίων με την κατεύθυνση του πεδίου. Έτσι σχηματίζεται μια γέφυρα, η οποία είτε ξεκινά είτε επιταχύνει μια διάσπαση.

**4<sup>η</sup> Πειραματική Διάταξη:** Μελέτη της θερμικής διάσπασης εντός στερεού μονωτικού υλικού και της διηλεκτρικής αντοχής του



Σχήμα 5.15: 4<sup>η</sup> πειραματική διάταξη

- όπου
- T: μετασχηματιστής δοκιμής με λόγο μετασχηματισμού  $220V/100kV$  και ονομαστική ισχύ 5kVA
  - SM: βολτόμετρο μεγίστου με ενσωματωμένο πυκνωτή χαμηλής τάσης (C2). Η σύνδεση με το CM γίνεται μέσω ομοαξονικού καλωδίου.
  - CM: πυκνωτής μέτρησης, 100pF
  - MF: σφαιρικό διάκενο

Στη διάταξη του σχήματος 5.15 παρατηρούμε πως χρησιμοποιείται σφαιρικό διάκενο εντός μονωτικού υλικού αντί για παράλληλες πλάκες. Αυτό συμβαίνει γιατί ενώ η διάταξη των παράλληλων πλακών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τάσεις διάσπασης μέχρι 10kV, η διάταξη των σφαιρών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διερεύνηση τάσεων διάσπασης μέχρι μερικά εκατοντάδες kV.

Θέλουμε να βρούμε την 1-min τάση αντοχής (withstand voltage) για διάταξη πλακών πάχους 1mm από στερεό μονωτικό υλικό. Αυτή η τάση διάσπασης θα προσδιοριστεί μέσα από δύο προκαταρκτικούς κύκλους δοκιμών με λόγο ανύψωσης τάσης  $2 \dots 3 kV/s$ . Η μέση τιμή που θα προκύψει ως τάση διάσπασης  $V_{dm}$  θα θεωρηθεί η τάση αναφοράς μας για τις επόμενες μετρήσεις μας. Στο πρώτο λεπτό εφαρμογής του πεδίου θα εφαρμοστεί τάση ίση με  $0,4 \cdot V_{dm}$ . Στη συνέχεια η τάση αυξάνεται κατά  $0,08 \cdot V_{dm}$  με διάρκεια εφαρμογής 1min μέχρι να συμβεί διάσπαση. Η τάση για την οποία το μονωτικό φθάνει ένα βήμα πριν τη διάσπαση είναι η 1-min τάση αντοχής. The 5-min τάση αντοχής θα προσδιοριστεί με την ίδια λογική.

## 5.6 Ερωτήματα

(α) Να παρασταθούν γραφικά οι τιμές της d.c. αγωγιμότητας του μετασχηματιστή λαδιού ως προς το χρόνο (1<sup>η</sup> πειραματική διάταξη).

(β) Να υπολογιστεί γραφικά ο συντελεστής απωλειών και η χωρητικότητα του μετασχηματιστή λαδιού (2<sup>η</sup> πειραματική διάταξη).

(γ) Να παρασταθούν γραφικά ο συντελεστής απωλειών και η χωρητικότητα του μετασχηματιστή λαδιού ως προς την τάση (2<sup>η</sup> πειραματική διάταξη).

(δ) Να υπολογιστούν η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$  και οι διηλεκτρικές απώλειες (2<sup>η</sup> πειραματική διάταξη).

(ε) Να παρατηρηθεί και να σχολιαστεί ο σχηματισμός γεφυρών ξένων σωματιδίων (3<sup>η</sup> πειραματική διάταξη).

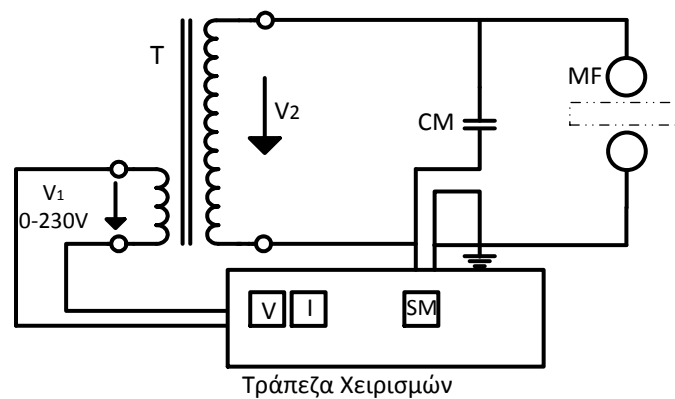
(στ) Η 1-λεπτού τάση αντοχής και η 5-λεπτών τάση αντοχής του μονωτικού υλικού 3mm που χρησιμοποιήθηκε να προσδιοριστεί (4<sup>η</sup> πειραματική διάταξη).

## 5.7 Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις στο Εργαστήριο

Στα πλαίσια της 4<sup>ης</sup> εργαστηριακής άσκησης προτείνεται η μελέτη τεσσάρων πειραματικών διατάξεων, αλλά πραγματοποιήθηκε η μελέτη μόνο της 4<sup>ης</sup> πειραματικής διάταξης, καθώς στις υπόλοιπες περιπτώσεις δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθούν τα πειράματα εξαιτίας ελλείψεων στον εξοπλισμό.

### 5.7.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη

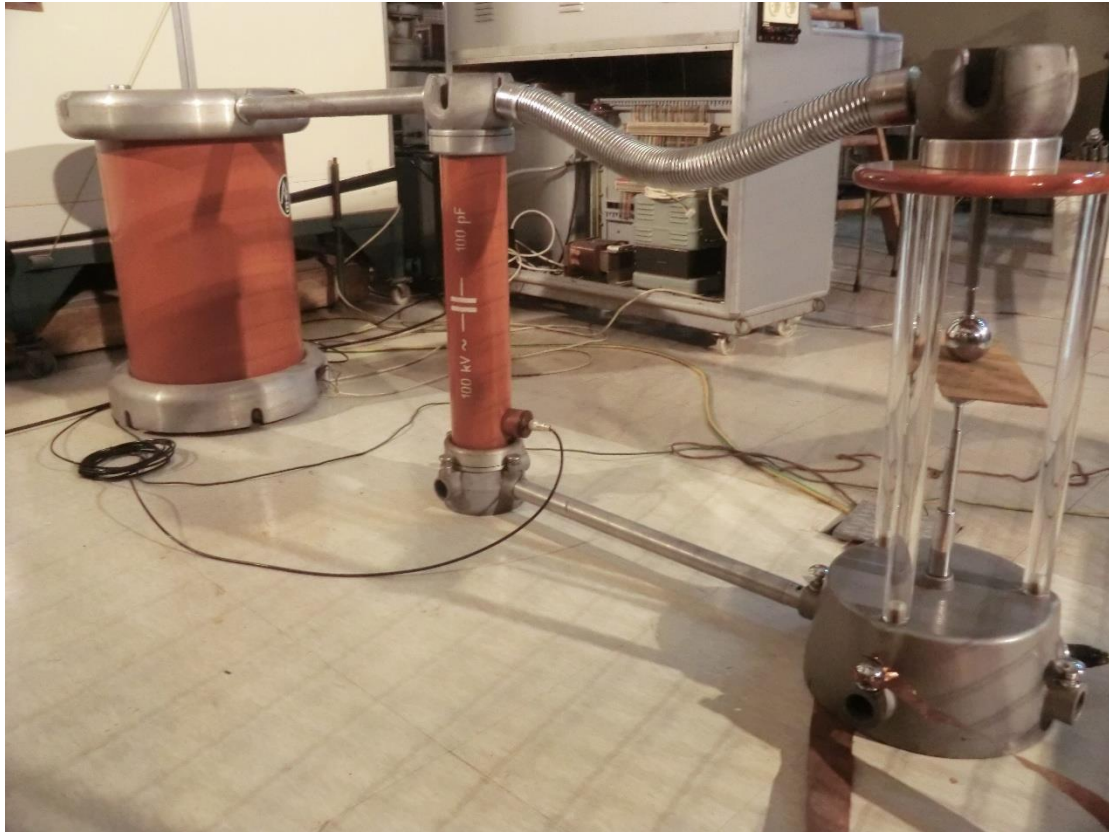
Η διάταξη 5.16 μελετά τη διάσπαση μονωτικού στερεού υλικού και την εξάρτηση της τάσεως διάσπασης από το χρόνο.



Σχήμα 5.16: 4<sup>η</sup> πειραματική διάταξη

- όπου
- T: μετασχηματιστής δοκιμής με λόγο μετασχηματισμού  $220V/100kV$  και ονομαστική ισχύ 5kVA
  - SM: βολτόμετρο μεγίστου με ενσωματωμένο πυκνωτή χαμηλής τάσης (C2). Η σύνδεση με το CM γίνεται μέσω ομοαξονικού καλωδίου.
  - CM: πυκνωτής μέτρησης, 100pF
  - MF: σφαιρικό διάκενο





Σχήμα 5.17: Φωτογραφία πειραματικής διάταξης από το εργαστήριο

### 5.7.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων

Θέλουμε να βρούμε την 1 λεπτού τάση αντοχής (1-min withstand voltage) για πλάκες από μονωτικό υλικό πάχους 3mm. Αυτή η τάση διάσπασης θα προσδιοριστεί μέσα από προκαταρκτικούς κύκλους δοκιμών με λόγο ανύψωσης τάσης  $2 \cdot 10^3 \text{ kV/s}$ . Η μέση τιμή που θα προκύψει ως τάση διάσπασης  $V_{dm}$  θα θεωρηθεί η τάση αναφοράς μας για τις επόμενες μετρήσεις μας. Στο πρώτο λεπτό εφαρμογής του πεδίου θα εφαρμοστεί τάση ίση με  $0,4 \cdot V_{dm}$ . Στη συνέχεια η τάση αυξάνεται κατά  $0,08 \cdot V_{dm}$  με διάρκεια εφαρμογής 1min μέχρι να συμβεί διάσπαση. Η τάση για την οποία το μονωτικό φθάνει ένα βήμα πριν τη διάσπαση είναι η 1 λεπτού τάση αντοχής. Η 5 λεπτών τάση αντοχής (5-min withstand voltage) θα προσδιοριστεί με την ίδια λογική.

Χρησιμοποιήσαμε μια πλάκα 3mm από στερεό μονωτικό υλικό. Αυτή την πλάκα τοποθετήσαμε ανάμεσα στις σφαίρες και εφαρμόζαμε υψηλή εναλλασσόμενη τάση στο δοκίμιο μας μέχρι να συμβεί διάσπαση. Όντως παρατηρήσαμε πως η διάσπαση συνέβη μέσω του δοκιμίου και όχι μέσω του αέρα, δηλαδή είχαμε διάσπαση του στερεού μονωτικού υλικού και όχι υπερπήδηση.

Από επαναλαμβανόμενες δοκιμές παρατηρήσαμε πως το δοκίμιο διασπαζόταν αν αυξάναμε την τάση με λόγο ανύψωσης τάσης  $2 \dots 3 \text{ kV/s}$  στις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.4

$V_d (\text{kV})$
5,3
5,6
6,3
6,7

Άρα  $V_{dm} (\text{kV}) \cong 6 \text{ kV}$ .

Στη συνέχεια μελετήσαμε την τάση αντοχής 1 λεπτού. Για αυτό το λόγο εφαρμόσαμε στο πρώτο λεπτό εφαρμογής του πεδίου τάση ίση με  $0,4 \cdot V_{dm}$ . Στη συνέχεια αυξάναμε την τάση κατά  $0,08 \cdot V_{dm}$  κάθε 1 λεπτό μέχρι να συμβεί διάσπαση.

Πίνακας 5.5

Εφαρμοζόμενη τάση(kV) ανά x min
$0,4 \cdot V_{dm} = 2,4$
$+(0,08 \cdot V_{dm}) = 2,88$
$+(0,08 \cdot V_{dm}) = 3,36$
$+(0,08 \cdot V_{dm}) = 3,84$
$+(0,08 \cdot V_{dm}) = 4,32$
$+(0,08 \cdot V_{dm}) = 4,80$
$+(0,08 \cdot V_{dm}) = 5,28$
$+(0,08 \cdot V_{dm}) = 5,76$
$+(0,08 \cdot V_{dm}) = 6,24$
$+(0,08 \cdot V_{dm}) = 6,72$
$+(0,08 \cdot V_{dm}) = 7,20$

Παρατηρήσαμε πως η διάσπαση συνέβη τελικά μόλις η τάση έφθασε τα  $7,2 \text{ kV}$ , οπότε θεωρούμε πως η τάση αντοχής 1 λεπτού ισούται με  $6,72 \text{ kV} \cong 6,80 \text{ kV}$ .

Στη συνέχεια επαναλάβαμε αυτή τη διαδικασία για να βρούμε την τάση αντοχής των 5 λεπτών. Συγκεκριμένα εφαρμόσαμε τα πρώτα 5 λεπτά εφαρμογής του πεδίου τάση ίση με  $0,4 \cdot V_{dm}$ . Στη συνέχεια αυξάναμε την τάση κατά  $0,08 \cdot V_{dm}$  κάθε 5 λεπτά μέχρι να συμβεί διάσπαση. Παρατηρήσαμε πως η διάσπαση συνέβη τελικά μόλις η τάση έφθασε τα  $6,7 \text{ kV}$ , οπότε θεωρούμε πως η τάση αντοχής 5 λεπτών ισούται με  $6,24 \text{ kV} \cong 6,30 \text{ kV}$ .

Περιμέναμε πως η τάση αντοχής των 5 λεπτών θα είναι μικρότερη από την τάση αντοχής του 1 λεπτού, καθώς το πείραμα πραγματοποιήθηκε κάτω από τις ίδιες συνθήκες για το ίδιο μονωτικό υλικό και το ίδιο βήμα αύξησης της τάσης, με μόνη διαφορά πως στο δεύτερο κύκλο δοκιμών η τάση εφαρμοζόταν περισσότερα λεπτά, οπότε και η καταπόνηση του μονωτικού υλικού ήταν μεγαλύτερη, οπότε και η τιμή της τάσης διάσπασης ήταν μικρότερη.

Δηλαδή:

Πίνακας 5.6

$V_d$ αντοχής $x$ min (kV)	
$x = 1\text{min}$	$\approx 6,80$
$x = 5\text{min}$	$\approx 6,30$

## 5.8 Βιβλιογραφία

- [1] Dieter Kind, Kurt Feser, High-Voltage est Techniques, Εκδόσεις Newnes, 2001
- [2] Σταθόπουλου Ι.Α., Υψηλές Τάσεις Ι, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1989
- [3] Οικονόμου Α. και Φώτη Γ., Εισαγωγή στις Υψηλές Τάσεις, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2010
- [4] John Kuffel, E. Kuffel, W. S. Zaengl, High Voltage Engineering Fundamentals, Newnes, 2000
- [5] Wadhwa C.L., High Voltage Engineering, New Age International Publisher, 2007
- [6] Μιχαήλ Γ. Δανίκας, Στοιχεία Υψηλών Τάσεων, Εκδόσεις Σμπίλιας Α.Ε.Β.Ε., Αθήνα, 2005

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 5<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση: «Διάσπαση Μονωτικών Αερίων»

#### 6.1 Γενικά

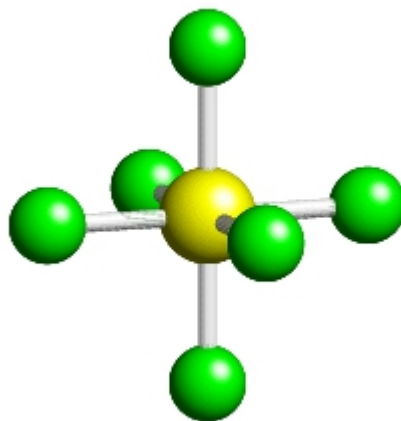
Βλέπε παράγραφο 5.1.

#### 6.2 Είδη μονωτικών αερίων

- **Αέρας:** Το πλέον διαδεδομένο μονωτικό αέριο είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, που χρησιμοποιείται για την ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ των φάσεων και μεταξύ των φάσεων και των γειωμένων τμημάτων των πυλώνων. Ο αέρας αν και έχει σχετικά χαμηλή διηλεκτρική αντοχή, εξαρτώμενη από τις επικρατούσες συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας, ωστόσο είναι άφθονος και δωρεάν, ενώ επανακτά τις μονωτικές του ιδιότητες μετά από διάσπαση.

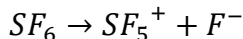
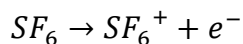
Άλλα μονωτικά αέρια με μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή είναι το εξαφθοριούχο θείο ( $SF_6$ ), το άζωτο (N) και ο εξαφθοριούχος άνθρακας ( $CF_6$ ), ενώ στην κατηγορία των μονωτικών αερίων συμπεριλαμβάνεται και το κενό.

- **Εξαφθοριούχο θείο ( $SF_6$ ):** Το  $SF_6$  έχει δύο με τρεις φορές μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τον αέρα, για αυτό και είναι το πιο δημοφιλές μονωτικό αέριο με εφαρμογές σε διακόπτες μεγάλης ισχύος, μετασχηματιστές, καλώδια ισχύος, πυκνωτές, κ.α.. Το  $SF_6$  είναι άχρωμο, άοσμο, άκανστο και αδιάλυτο στο νερό και το μονωτικό λάδι. Έχει μοριακό βάρος 146 (περίπου πέντε φορές μεγαλύτερο από τον αέρα) και το βάρος του είναι 22% θείο και 78% φθόριο. Είναι επίσης μη τοξικό και χημικά εξαιρετικά αδρανές.  
Η μοριακή δομή του  $SF_6$  όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1 είναι σαν ένα κανονικό οκτάεδρο στο κέντρο του οποίου βρίσκεται το άτομο του θείου, ενώ σε κάθε μια από τις έξι γωνίες τα άτομα του φθορίου [3].



Σχήμα 6.1: Το μόριο του  $SF_6$

Το  $SF_6$  είναι ηλεκτραρνητικό αέριο με ενέργεια ιονισμού 19,3eV για την παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρονίων και 15,8eV για την παραγωγή ιόντων. Οπότε λαμβάνουν χώρα οι ακόλουθες αντιδράσεις για την παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρονίων και ιόντων αντίστοιχα:



- **Κενό:** Το κενό για τιμές πίεσης μικρότερες από  $10^{-6}$ bar παρουσιάζει άριστες μονωτικές ικανότητες, καθώς η μέση ελεύθερη διαδρομή (η διαδρομή που πρέπει να καλύψει ένα ηλεκτρόνιο για να συγκρουστεί με ένα άτομο) είναι αρκετά μεγάλη, οπότε η πιθανότητα σύγκρουσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων με ουδέτερα άτομα σχεδόν εξαλείφεται. Το κενό παρουσιάζει μηδενικές απώλειες, υψηλή διηλεκτρική αντοχή, ενώ ανήκει στις επανορθούμενες μονώσεις. Βέβαια για να χρησιμοποιηθεί το κενό ως μονωτικό υλικό θα πρέπει να εξασφαλίζονται ερμητικές κατασκευές και να αποφεύγεται η παρουσία ξένων σωματιδίων. Το κενό χρησιμοποιείται κυρίως σε διακόπτες ισχύος, καθώς είναι αποτελεσματικό στη σβέση του παραγόμενου κατά τους χειρισμούς ηλεκτρικού τόξου.

### 6.3 Μηχανισμοί διάσπασης μονωτικών αερίων

#### 6.3.1 Το φαινόμενο του ιονισμού

Στα αέρια τα μόρια και τα άτομα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα. Αυτό συμβαίνει γιατί τα άτομα αποτελούνται από θετικούς πυρήνες και από ηλεκτρόνια τα οποία δεν κυκλοφορούν ελεύθερα, αλλά συνδέονται μέσω ισχυρών δυνάμεων με τους πυρήνες. Έτσι όταν το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του αερίου έχει μικρή τιμή, δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια και το αέριο συμπεριφέρεται ως τέλειος μονωτής.

Το φαινόμενο του ιονισμού περιγράφει τη διαδικασία δημιουργίας ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων σε ένα μονωτικό αέριο. Για να απομακρυνθεί ένα ηλεκτρόνιο από τη στοιβάδα του και να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο χρειάζεται την επίδραση ενός πολύ ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Στα αέρια δεν είναι μόνο τα ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου, αλλά και τα θετικά ιόντα τα οποία δεν έχουν σταθερή θέση όπως στα μέταλλα. Έτσι στη δημιουργία αγώγιμου δρόμου μέσα στο αέριο λαμβάνουν μέρος δύο ρεύματα με αντίθετες κατευθύνσεις. Το ρεύμα των ελεύθερων ηλεκτρονίων και το ρεύμα των θετικών φορτισμένων ιόντων.

Η ταχύτητα που αποκτούν τα θετικά ιόντα είναι πολύ μικρότερη από αυτή των αρνητικών ιόντων λόγω της πολύ μεγαλύτερης μάζας τους. Έτσι αν οι αριθμοί των θετικών ιόντων και των ηλεκτρονίων είναι ίσοι, τα θετικά ιόντα θα παραμείνουν για πολύ μεγαλύτερο χρόνο στην περιοχή του αερίου που διασπάται, προσδίδοντας σε αυτή θετικό φορτίο. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την παραμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ ανόδου και καθόδου και έτσι το ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι σταθερό κατά μήκος του δρόμου διάσπασης.

Εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια κινούνται και συγκρούονται ελαστικά με τα ελεύθερα άτομα με συνέπεια την διάδοση τους προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι κρούσεις μεταξύ ηλεκτρονίων και ατόμων μπορεί να είναι ελαστικές, με συνέπεια απλώς τη μεταβολή των ταχυτήτων και των διευθύνσεων του ηλεκτρονίου και του ατόμου, όσο όμως μεγαλώνει το ηλεκτρικό πεδίο, η ταχύτητα των ηλεκτρονίων αυξάνεται με αποτέλεσμα οι κρούσεις να γίνονται ανελαστικές, έχοντας ως αποτέλεσμα αλλαγές της ενεργειακής κατανομής των ηλεκτρονίων στα ουδέτερα άτομα, δηλαδή είτε τη μεταφορά ενός ηλεκτρονίου σε υψηλότερη ενεργειακή στοιβάδα, είτε την απόσπαση ενός ηλεκτρονίου από την επίδραση του πυρήνα του ατόμου. Ιονισμός μπορεί να υπάρξει ακόμα λόγω της παρουσίας ισχυρής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ή υψηλής θερμοκρασίας.

Κατά τη διαδικασία της διάσπασης, μέρος της ενέργειας των ηλεκτρονίων, ιόντων και ταχέως κινούμενων μορίων ή ατόμων, θα εκδηλωθεί σαν θερμότητα στο αέριο και στα ηλεκτρόνια και ένα άλλο μέρος σαν ακτινοβολία.

### 6.3.2 Ηλεκτρική διάσπαση του αέρα

Χαρακτηριστικό της διάσπασης είναι ότι η τάση κατά μήκος του διακένου μειώνεται εξελικτικά, πράγμα που τελικά προξενεί πλήρη αγώγιμη σύνδεση μεταξύ ανόδου και καθόδου. Αυτό λαμβάνει χώρα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, έτσι ώστε η χωρητικότητα του διακένου να μην μπορεί να επαναφορτιστεί γρήγορα και συνεπώς η διάσπαση του διακένου είναι αναπόφευκτο επακόλουθο.

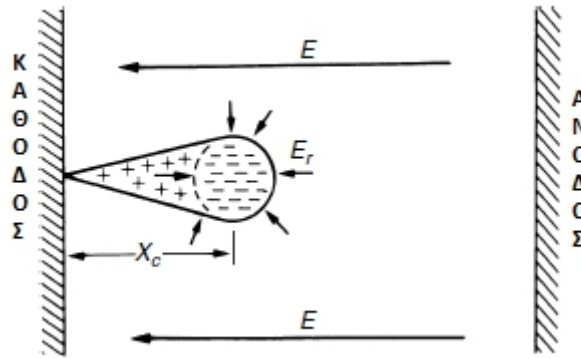
Η παρατήρηση της διάσπασης του ατμοσφαιρικού αέρα υπό στατικό ηλεκτρικό πεδίο σε τάσεις σχετικά μικρές, αποκάλυψε δυο βασικούς μηχανισμούς διάσπασης [3].

- Σε διάκενα αέρα μέχρι 5cm έχει ισχύ ένας σχετικά αργός μηχανισμός, γνωστός ως μηχανισμός εκκενώσεως Townsend.
- Σε διάκενα αέρα μεγαλύτερα από 5cm οι διασπάσεις εκδηλώνονται μέσω ενός γρήγορου μηχανισμού, που από τη μορφή του ομοιού εκκένωσης ονομάζεται μηχανισμός εκκενώσεως με θυσάνους. Χαρακτηριστικό αυτού του μηχανισμού είναι η παρουσία αρνητικών ιόντων στο διάκενο.

### 6.3.3 Μηχανισμός εκκενώσεως κατά Townsend

Οι διασπάσεις των αερίων σε χαμηλές πιέσεις και μικρά διάκενα μπορούν να περιγραφούν με το μηχανισμό εκκενώσεως Townsend. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που υπάρχουν μέσα στο αέριο επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο και αυτά συγκρούονται με τα μόρια του αερίου. Από τις συγκρούσεις αυτές νέα ελεύθερα ηλεκτρόνια παράγονται, ενώ το αέριο ιονίζεται. Με αυτό τον τρόπο ένα σμήνος ελεύθερων ηλεκτρονίων δημιουργείται και μετακινείται από την κάθοδο προς την άνοδο (σχήμα 6.2). Αυτό είναι το γνωστό φαινόμενο της χιονοστοιβάδας, στην οποία όταν ένας επαρκής αριθμός νέων ιόντων δημιουργηθεί κοντά στην κάθοδο, τότε η διάσπαση του αερίου λαμβάνει χώρα [1,6].





Σχήμα 6.2: Μηχανισμός διάσπασης αέριων μονωτικών [6]

Εάν  $n_0$  είναι ο αρχικός αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων στον όγκο του αερίου που ξεκινούν από την κάθοδο, τότε σε απόσταση  $x$  από την κάθοδο, ο αριθμός των ηλεκτρονίων  $n_x$  θα είναι:

$$n_x = n_0 \cdot e^{a \cdot x} \quad (6.1)$$

όπου  $a$ : ο συντελεστής ιονισμού (ή πρώτος συντελεστής Townsend), ο οποίος παριστάνει τον αριθμό των ηλεκτρονίων που προκύπτουν λόγω ιονισμού ανά εκατοστό στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου

Ο συντελεστής ιονισμού  $a$  εξαρτάται από την ένταση του πεδίου, το είδος του αερίου, τη θερμοκρασία και την πίεση του αερίου. Στην περίπτωση ομοιογενούς πεδίου ισχύει:

$$a = A \cdot p \cdot e^{-\frac{B \cdot p}{E}} \quad (6.2)$$

όπου  $A, B$ : Σταθεροί συντελεστές εξαρτώμενοι από τη θερμοκρασία και το είδος του αερίου

$p$  η πίεση του αερίου

$E$ : η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

Στην περίπτωση ανομοιογενούς πεδίου η εξίσωση (6.1) γίνεται:

$$n_x = n_0 \cdot e^{\int_0^x a \, dx} \quad (6.3)$$

Στην περίπτωση ηλεκτραρνητικών αερίων πρέπει να ληφθεί υπόψη ο μηχανισμός ανασύνδεσης, κατά την οποία κάποια από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ενσωματώνονται με ουδέτερα άτομα σχηματίζοντας αρνητικά ιόντα ( $A + e^- \rightarrow A^-$ ), οπότε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που παράγονται θα είναι λιγότερα με τις εξισώσεις να παίρνουν μορφή για ομοιογενές και ανομοιογενές πεδίο αντίστοιχα:

$$n_x = n_0 \cdot e^{(a-n)x} \quad (6.4)$$

$$n_x = n_0 \cdot e^{\int_0^x (a-n) \, dx} \quad (6.5)$$

όπου  $n$ : ο αριθμός των ηλεκτρονίων που επανασυνδέονται ανά εκατοστό

Εάν θεωρήσουμε ομοιογενές πεδίο και  $n_0$  τον αρχικό αριθμό ηλεκτρονίων που ξεκινά από την κάθοδο, τότε σύμφωνα με τη σχέση (6.1) για διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων ίσο με  $s$ , τα ηλεκτρόνια που φθάνουν στην άνοδο θα είναι  $n_0 \cdot e^{a \cdot s}$  και ο αριθμός των θετικών ιόντων που προκύπτουν από τη διαδικασία του ιονισμού είναι  $n_0(e^{a \cdot s} - 1)$ . Τα θετικά ιόντα παραμένουν στην ουρά του κωνοειδούς σμήνους και καθώς προσκρούουν στην κάθοδο δημιουργούνται νέα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Εάν  $\gamma$  είναι το ποσοστό των ηλεκτρονίων που αποδεσμεύονται από την κάθοδο, μετά την πρόσκρουση των θετικών ιόντων, που βρίσκονται στην ουρά της ηλεκτρονικής στοιβάδας, τότε ο αριθμός των ηλεκτρονίων που θα προκύψει από τη δευτερογενή αυτή διαδικασία θα είναι  $n_0 \cdot \gamma(e^{a \cdot s} - 1)$ . Τα ηλεκτρόνια αυτά θα δημιουργήσουν μια νέα ηλεκτρονική στοιβάδα, τα θετικά ιόντα της οποίας θα αποδεσμεύσουν εκ νέου ηλεκτρόνια από την κάθοδο κ.ο.κ. Ο συνολικός αριθμός των ηλεκτρονίων που θα φθάσουν στην άνοδο θα είναι:

$$n_0 + n_0 \cdot \gamma(e^{a \cdot s} - 1) + n_0 \cdot [\gamma(e^{a \cdot s} - 1)]^2 + n_0 \cdot [\gamma(e^{a \cdot s} - 1)]^3 + \dots$$

- Εάν  $\gamma \cdot (e^{a \cdot s} - 1) < 1$ , τότε η εκκένωση είναι μη αυτοσυντηρούμενη και απαιτείται παρουσία εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου για την παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρονίων.
- Εάν  $\gamma \cdot (e^{a \cdot s} - 1) \geq 1$ , τότε ο αριθμός των ηλεκτρονίων αυξάνει ραγδαία και είναι ικανός να οδηγήσει στη διάσπαση του αερίου, οπότε και η εκκένωση τότε γίνεται αυτοσυντηρούμενη.

Κριτήριο για τη διάσπαση είναι η προαναφερθείσα ανισότητα:

$$\gamma \cdot (e^{a \cdot s} - 1) \geq 1 \Leftrightarrow a \cdot s \geq \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (6.6)$$

Η σχέση (5.6) είναι γνωστή ως κριτήριο του Townsend, ενώ για ανομοιογενές πεδίο διαμορφώνεται ως εξής:

$$\int_0^x \alpha dx \geq \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (6.7)$$

### 6.3.4 Ο Νόμος του Paschen

Σύμφωνα με τον μηχανισμό εκκένωσης του Townsend η οριακή συνθήκη για τη διάσπαση του αερίου για ομοιογενές πεδίο είναι:

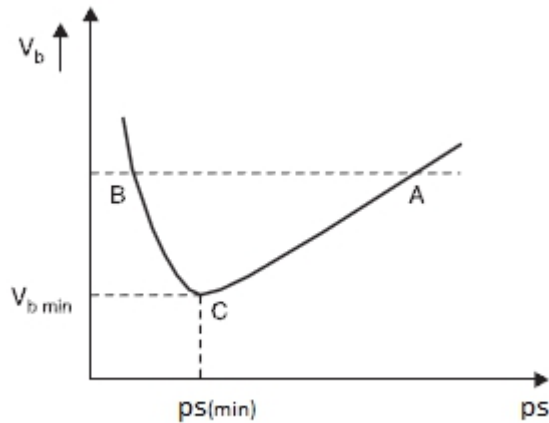
$$a \cdot s = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (6.9)$$

Η παραπάνω σχέση με τη βοήθεια της σχέσης (6.2) και το γεγονός πως το πεδίο είναι ομοιογενές διαμορφώνεται:

$$(6.9) \xrightarrow{(5.2)+\text{ομοιογενές πεδίο: } E=\frac{V}{d}} V_d = B \frac{p \cdot s}{\ln \frac{A \cdot p \cdot s}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \quad (6.10)$$

Από τη σχέση (6.10) διαπιστώνουμε πως η τάση διάσπασης είναι συνάρτηση του γινομένου της πίεσης επί το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Μεταβάλλοντας δηλαδή ένα από τα δύο μεγέθη η τάση στην οποία γίνεται η διάσπαση αλλάζει.

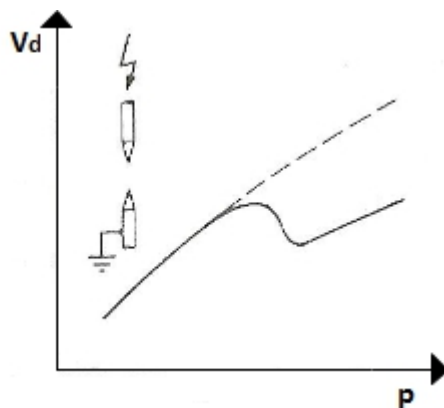




Σχήμα 6.3: Η καμπύλη του Paschen [7]

Από το σχήμα 6.3 φαίνεται πως υπάρχει μόνο μια τιμή του γινομένου  $p \cdot s$  για την οποία η τάση διάσπασης γίνεται ελάχιστη. Για τάσεις μεγαλύτερες από την ελάχιστη τάση αντιστοιχούν δύο τιμές του γινομένου. Αυτό οφείλεται στο ότι για τιμές μικρότερες του  $(p \cdot s)_{min}$  η πυκνότητα του αερίου είναι μικρή και τότε η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα αν και ένα ηλεκτρόνιο αποκτά αρκετή ενέργεια κατάλληλη να προκαλέσει ιονισμό, να μην το επιτυγχάνει καθώς η πιθανότητα να συγκρουστεί με άτομα του αερίου είναι μικρή. Αντίθετα για τιμές μεγαλύτερες του  $(p \cdot s)_{min}$  ο αριθμός των κρούσεων μεταξύ ηλεκτρονίων και ουδετέρων ατόμων του αερίου είναι μεγάλος λόγω της μεγάλης πυκνότητας, ωστόσο τα ηλεκτρόνια δεν προλαβαίνουν να αποκτήσουν την απαραίτητη για τον ιονισμό ενέργεια καθώς η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι πολύ μικρή.

Στα ανομοιογενή πεδία δεν ισχύει ο νόμος του Paschen (σχήμα 6.4), καθώς τότε μια αύξηση της πίεσης θα μπορούσε να οδηγήσει ακόμη και σε μείωση της τάσης διάσπασης. Σε αυτή την περίπτωση η διάσπαση ακολουθεί το μηχανισμό εκκένωσης με θυσάνους που περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

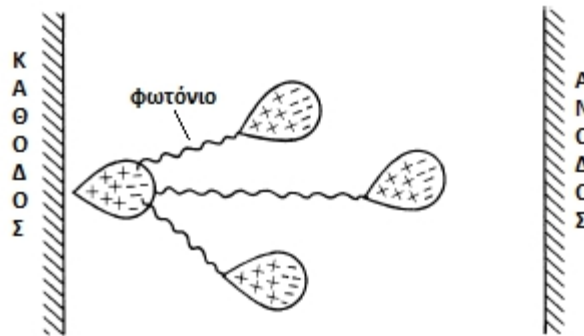


Σχήμα 6.4: Διάγραμμα  $V_d(p)$  σε ανομοιογενές πεδίο [1]

### 6.3.5 Μηχανισμός εκκενώσεως με θυσάνους

Σε υψηλότερες πιέσεις και μεγαλύτερα διάκενα, η εκκένωση πραγματοποιείται ακολουθώντας το μηχανισμό εκκενώσεως με θυσάνους (streamers). Ο μηχανισμός αυτός χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι η εκπομπή φωτονίων από την άκρη του σμήνους ελεύθερων ηλεκτρονίων, παράγει νέα ελεύθερα ηλεκτρόνια προκαλώντας τη δημιουργία ενός θυσάνου με πολύ γρήγορο και απότομο ρυθμό, σε σχέση με το μέγεθος που είχε αρχικά το σμήνος των ελεύθερων ηλεκτρονίων.

Η έναυση του φωτοϊονισμού, ο οποίος είναι πολύ αποτελεσματικός για την ανάπτυξη της εκκένωσης, πρέπει να αναμένεται όταν ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας του φαινομένου της χιονοστοιβάδας  $e^{\alpha \cdot x}$  έχει αποκτήσει την κρίσιμη τιμή  $e^{20} \approx 5 \cdot 10^8$ . Όσο μεγαλύτερο είναι το γινόμενο  $p \cdot s$ , τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα ένα σμήνος ελεύθερων ηλεκτρονίων να διασχίσει το διάκενο της εκκενώσεως πριν ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας αποκτήσει την κρίσιμη τιμή του.



Σχήμα 6.5: Νηματική διάσπαση αερίου[6]

Για υπερτάσεις μεγαλύτερες κατά περίπου 5% πάνω από την τιμή της τάσεως διάσπασης  $V_d$ , αλλά και όταν ισχύει:

$$p \cdot s \leq 10 \text{ bar} \cdot \text{mm} \quad (6.11)$$

πρέπει να αναμένεται διάσπαση με το μηχανισμό εκκένωσης κατά Townsend.

Σε υψηλότερες τιμές η διάσπαση συμβαίνει με το μηχανισμό εκκένωσης με θυσάνους και δεν ισχύει ο νόμος του Paschen.

Η πιθανότητα ιονισμού λόγω της εκπομπής φωτονίων είναι σχεδόν ανάλογη της πυκνότητας του αερίου. Συνεπώς όσο μεγαλύτερο είναι το μοριακό βάρος και η πίεση, τόσο μικρότερος είναι ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας βάσει του οποίου η ανάπτυξη του θυσάνου λαμβάνει χώρα.

#### 6.4. Διάσπαση αερίων για διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων και μορφών τάσεων

Στα ομοιογενή πεδία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι σταθερή σε όλο το μήκος του διακένου. Με τα επίπεδα ηλεκτρόδια και τα σφαιρικά ηλεκτρόδια επιτυγχάνεται η παραγωγή ομοιογενών πεδίων, των οποίων η ένταση του πεδίου είναι ίση με την εφαρμοζόμενη τάση δια το μήκος του διακένου μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Στην περίπτωση των ανομοιογενών πεδίων η ένταση μεταβάλλεται κατά μήκος του διακένου, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή της στο ηλεκτρόδιο με τη μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας. Οι διατάξεις ακίδα-ακίδα και ακίδα-πλάκα είναι οι πιο συνηθισμένες για την παραγωγή ανομοιογενούς πεδίου. Χαρακτηριστικό μέγεθος ενός ανομοιογενούς πεδίου είναι ο συντελεστής χρησιμοποίησης  $n$ :

$$n = \frac{\bar{E}}{E_{max}} \quad (6.12)$$

Όπου  $\bar{E}$ : το μέσο ηλεκτρικό πεδίο που εκδηλώνεται στο διάκενο

$E_{max}$ : μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο που εμφανίζεται στο διάκενο

Η τάση διάσπασης εξαρτάται επίσης από το είδος της εφαρμοζόμενης τάσης. Η διηλεκτρική αντοχή παρουσιάζεται μεγαλύτερη κατά την εφαρμογή κρουστικών τάσεων, σε σύγκριση με την καταπόνηση υπό εναλλασσόμενη τάση, λόγω της μικρότερης διάρκειας των κρουστικών τάσεων, οπότε οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς έχουν μικρότερο διαθέσιμο χρόνο.

#### 6.5 Τύποι των εκκενώσεων των αερίων

Ο τύπος καθώς και η διάρκεια της εκκένωσης ενός αερίου εξαρτάται από την ενεργοποιημένη πηγή ρεύματος. Όταν ρεύματα της τάξης 1A ή περισσότερο ρέουν στο δρόμο της εκκένωσης, δηλαδή στον οχετό, πρέπει να περιμένουμε τοξοειδείς εκκενώσεις (εμφάνιση τόξων). Στην περίπτωση αυτή, λόγω του θερμοϊονισμού αναπτύσσεται ένα καλά αγώγιμο πλάσμα, η τάση του οποίου ελαττώνεται με την αύξηση του ρεύματος.

Αν το ρεύμα που ρέει μετά τη διάσπαση έχει τιμή της τάξης των mA πρέπει να περιμένουμε φωτεινές εκκενώσεις (glow discharges) ειδικά σε χαμηλές πιέσεις (π.χ. 100mbar). Σε αυτό τον τύπο εκκένωσης οι φορείς φορτίου σχηματίζονται από δευτερογενή εκπομπή στην κάθοδο.

Η ασυνεχής μετάβαση σε μία εκκένωση με υψηλότερο ρεύμα αποδίδεται ως σπινθήρας (spark discharge). Στην πορεία της διάσπασης αυτή είναι συνήθως η μετάβαση σε τοξοειδή εκκένωση (arc discharge), η οποία διαρκεί μόνο για ένα μικρό χρονικό διάστημα κατά την εφαρμογή της τάσης. Σε δίκτυα παροχής ισχύος, η εξάλειψη των εγκατεστημένων τόξων είναι συνήθως αποτελεσματική μόνο μετά τη διακοπή.

## 6.6 Εφαρμογές μονωτικών αερίων

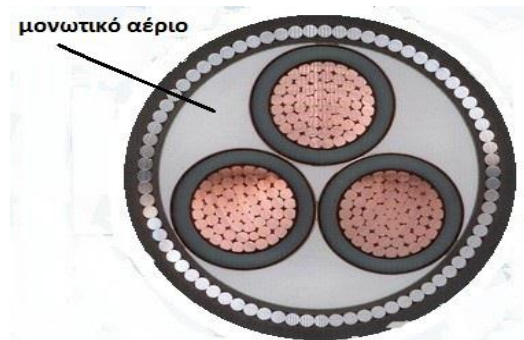
### 6.6.1 Διακόπτες

Οι διακόπτες με αέρα υπό πίεση χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα μέσης τάσης. Η πίεση του αέρα, που εκτοξεύεται μεταξύ των επαφών για τη σβέση του τόξου, είναι 20 με 30atm. Ο αέρας πρέπει να είναι καθαρός από υγρασία και ξένα σωματίδια, ώστε να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη διηλεκτρική αντοχή.

Το  $SF_6$  χρησιμοποιείται σε διακόπτες ισχύος υψηλής τάσης λόγω της μεγαλύτερης του διηλεκτρικής αντοχής, ώστε να μειώνεται ο όγκος του διακόπτη. Οι διακόπτες αυτό συγκριτικά με τους διακόπτες αέρα λειτουργούν σε χαμηλότερες πιέσεις.

### 6.6.2 Καλώδια

Τα καλώδια υψηλής τάσης εξωτερικής πίεσης αερίου αποτελούνται από τρία ξεχωριστά μονοπολικά καλώδια με μόνωση από χαρτί που είναι τοποθετημένα σε έναν χαλύβδινο σωλήνα, ο οποίος περιέχει αέριο υπό πίεση (άζωτο ή  $SF_6$ ). Το αέριο ασκεί πίεση στο μανδύα κάθε πόλου, η οποία μεταδίδεται και στη μόνωση του καλωδίου.

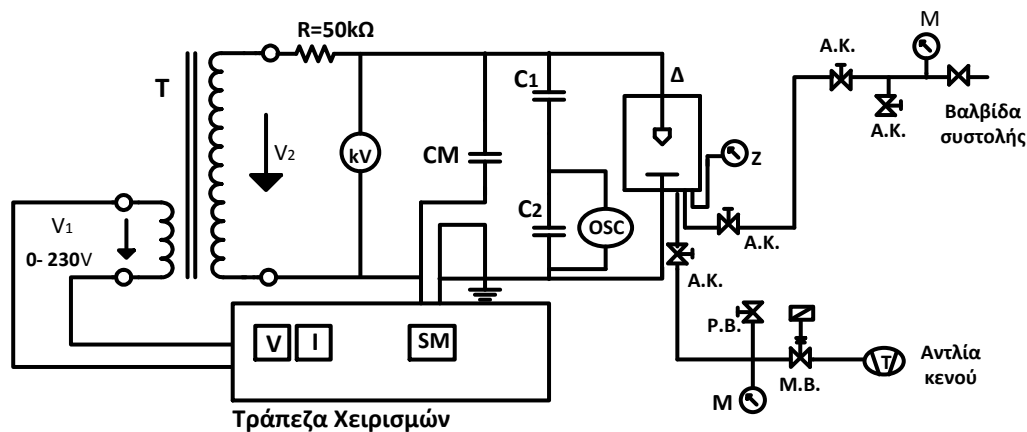


Σχήμα 6.6: Καλώδιο εξωτερικής πίεσης αερίου

### 6.7 Πειραματική διάταξη

Η εναλλασσόμενη τάση που απαιτείται για την πραγματοποίηση τους πειράματος παρέχεται από έναν μετασχηματιστή δοκιμών και μετριέται χρησιμοποιώντας:

- (α) το ηλεκτροστατικό βολτόμετρο,
- (β) το βολτόμετρο μεγίστου SM μέσω του πυκνωτή μέτρησης CM,
- (γ) το βολτόμετρο στο  $1^{ov}$  του μετασχηματιστή λαμβάνοντας υπόψιν το λόγο μετασχηματισμού,
- (δ) το χωρητικό καταμεριστή και τον παλμογράφο.



Σχήμα 6.7: Πειραματική διάταξη

- όπου
- T: μετασχηματιστής δοκιμής με λόγο μετασχηματισμού  $220V/100kV$  και ονομαστική ισχύ  $5kVA$
  - $R_{\pi}$ : αντίσταση προστασίας,  $50k\Omega$
  - kV: ηλεκτροστατικό βολτόμετρο
  - CM: πυκνωτής μέτρησης  $100pF$
  - SM: βολτόμετρο μεγίστου
  - OSC: παλμογράφος
  - $C_1$ : πυκνωτής  $1200pF$
  - $C_2$ : πυκνωτής χαμηλής τάσης  $492nF$
  - Δ: δοχείο ελεγχόμενης πίεσης
  - Z: ενδεικτικό μανόμετρο
  - A.K.: απομονωτικοί κρουνοί ή στρόφιγγες (επιτρέπουν τη σύνδεση στις απαραίτητες σωληνώσεις)
  - P.B.: ρυθμιστική βαλβίδα (χρησιμοποιείται για την ακριβή ρύθμιση της επιθυμητής πίεσης)
  - M.B.: μαγνητική βαλβίδα (κλείνει αυτόματα όταν η αντλία κενού σταματήσει να λειτουργεί, έτσι αποτρέπεται η εξίσωση των πιέσεων)
  - M: μανόμετρο κενού ή κενόμετρο (είναι ενσωματωμένο στο δοχείο υψηλής πίεσης και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση υψηλής πίεσης)

Πληροφορίες για τη διαδικασία του πειράματος:

- Για τις μετρήσεις με υψηλή πίεση ( $>1\text{bar}$ ) είναι απαραίτητη η σύνδεση του δοχείου πίεσης με το σύστημα παροχής αέρα του εργαστηρίου υψηλών τάσεων μέσω της βαλβίδας συστολής.
- Η παραγωγή της υποπίεσης (κενού αέρος) που είναι απαραίτητη για το πείραμα γίνεται μέσω της αντλίας κενού και μετριέται μέσω του μανομέτρου κενού.
- Το δοχείο πίεσης πρέπει να τοποθετείται με ασφαλή τρόπο ώστε να μην είναι δυνατή η ανατροπή του κατά τη διάρκεια του πειράματος.
- Η επιβαλλόμενη υπερπίεση πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη αντοχή του δοχείου μας, δηλαδή μικρότερη από  $6\text{bar}$ . Το δοχείο μπορεί να χρησιμοποιείται για πειράματα, στα οποία το εύρος πίεσης μεταβάλλεται από  $0,1\text{bar}$  έως  $6\text{bar}$ .
- Πριν επιβάλλουμε την υψηλή πίεση είναι απαραίτητο να απομονώσουμε το μανόμετρο κενού, μέσω του ενσωματωμένου διακόπτη του για να μην καταστραφεί από την πίεση η μεμβράνη.
- Επιλέγεται η διάταξη των ηλεκτροδίων στο δοχείο ελεγχόμενης πίεσης (ακίδα-ακίδα, ακίδα-πλάκα, σφαίρα-σφαίρα), ενώ η μεταξύ τους απόσταση λαμβάνει διάφορες τιμές. Στο σχήμα 6.7 απεικονίζεται ενδεικτικά ο συνδυασμός ακίδα-πλάκα.
- Επιλέγεται το αέριο που θα περιέχει το δοχείο ελεγχόμενης πίεσης (αέρας ή  $SF_6$ ).
- Μετά από κάθε διάσπαση αφαιρείται το αέριο του δοχείου και συμπληρώνεται εκ νέου ώστε να μην περιέχονται ιόντα που οφείλονται στην προηγούμενη διάσπαση.

(I) Αρχικά θεωρούμε διάταξη ηλεκτροδίων σφαίρα-σφαίρα, των οποίων η διάμετρος είναι  $D=50\text{mm}$  και η μεταξύ τους απόσταση είναι  $s_1=10\text{mm}$  ή  $s_2=20\text{mm}$ . Κατά τη διεξαγωγή της άσκησης η πίεση στο δοχείο ελεγχόμενης πίεσης μεταβάλλεται από 1-6 bar χρησιμοποιώντας τη συσκευή παροχής αέρα του εργαστηρίου, καθώς και για τιμές υποπίεσης ( $<1\text{bar}$ ) χρησιμοποιώντας την αντλία κενού. Στους παρακάτω πίνακες καταγράφονται οι τιμές της εναλλασσόμενης τάσης με τις μεθόδους α έως δ ενώ μεταβάλλεται η πίεση. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών αυτών.

Πίνακας 6.1: Καταγραφή εναλλασσόμενων τάσεων για διάφορες τιμές πίεσης και απόσταση μεταξύ των σφαιρών  $s_1$

Πίεση $p$ (bar)	Τάση $1^{\circ\varsigma}$ $V_{d1}(V)$	Ηλεκτροστατικό Βολτόμετρο $V_{2rms}(kV)$	Βολτόμετρο μεγίστου $V_{d3i}(kV)$	Χωρητικός Καταμεριστής $V_{d3ii}(kV)$	Μέσος όρος τάσης $V_d(kV)$

Πίνακας 6.2: Καταγραφή εναλλασσόμενων τάσεων για διάφορες τιμές πίεσης και απόσταση μεταξύ των σφαιρών  $s_2$

Πίεση $p$ (bar)	Τάση $1^{\circ\varsigma}$ $V_{d1}(V)$	Ηλεκτροστατικό Βολτόμετρο $V_{2rms}(kV)$	Βολτόμετρο μεγίστου $V_{d3i}(kV)$	Χωρητικός Καταμεριστής $V_{d3ii}(kV)$	Μέσος όρος τάσης $V_d(kV)$

(II) Χρησιμοποιώντας ένα άλλο δοχείο συμπίεσης και κρατώντας την ίδια διάταξη ηλεκτροδίων με απόσταση  $s=20\text{mm}$ , επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία μελετώντας αυτή τη φορά τη συμπεριφορά του  $SF_6$ . Συνιστάται η χρήση διαφορετικών δοχείων, επειδή εάν ένα δοχείο γεμίσει έστω και μια φορά με  $SF_6$ , το εναπομείναν αέριο θα συνεχίσει να επηρεάζει τις μετρήσεις των επόμενων πειραμάτων με αέρα, ακόμα και αν έχει μεσολαβήσει μεγάλη χρονική περίοδος.

**Πίνακας 6.3: Καταγραφή εναλλασσόμενων τάσεων για διάφορες τιμές πίεσης και απόσταση μεταξύ των σφαιρών  $S_2$**

Πίεση $p$ (bar)	Τάση $1^{os}$ $V_{d1}(V)$	Ηλεκτροστατικό Βολτόμετρο $V_{2rms}(kV)$	Βολτόμετρο μεγίστου $V_{d3i}(kV)$	Χωρητικός Καταμεριστής $V_{d3ii}(kV)$	Μέσος όρος τάσης $V_d(kV)$

(III) Για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του  $SF_6$  σε ένα εντελώς ανομοιογενές πεδίο πρέπει η διάταξη των ηλεκτροδίων να αντικατασταθεί με τον συνδυασμό ακίδα-πλάκα, όπου η πλάκα θα έχει διάμετρο  $D=50\text{mm}$ , η ακίδα θα είναι ένας κώνος γωνίας  $10^\circ$  και διαμέτρου  $10\text{mm}$  και η μεταξύ τους απόσταση θα πάρει τις τιμές  $s_1=20\text{mm}$ ,  $s_2=30\text{mm}$  και  $s_3=40\text{mm}$ .

**Πίνακας 6.4: Καταγραφή εναλλασσόμενων τάσεων για διάφορες τιμές πίεσης και απόσταση  $s_1$  μεταξύ της διάταξης ακίδα-πλάκα**

Πίεση $p$ (bar)	Τάση $1^{os}$ $V_{d1}(V)$	Ηλεκτροστατικό Βολτόμετρο $V_{2rms}(kV)$	Βολτόμετρο μεγίστου $V_{d3i}(kV)$	Χωρητικός Καταμεριστής $V_{d3ii}(kV)$	Μέσος όρος τάσης $V_d(kV)$



Πίνακας 6.5: Καταγραφή εναλλασσόμενων τάσεων για διάφορες τιμές πίεσης και απόσταση  $S_2$  μεταξύ της διάταξης ακίδα-πλάκα

Πίεση $p$ (bar)	Τάση $1^{ος}$ $V_{d1}(V)$	Ηλεκτροστατικό Βολτόμετρο $V_{2rms}(kV)$	Βολτόμετρο μεγίστου $V_{d3i}(kV)$	Χωρητικός Καταμεριστής $V_{d3ii}(kV)$	Μέσος όρος τάσης $V_d(kV)$

Πίνακας 6.6: Καταγραφή εναλλασσόμενων τάσεων για διάφορες τιμές πίεσης και απόσταση  $S_3$  μεταξύ της διάταξης ακίδα-πλάκα

Πίεση $p$ (bar)	Τάση $1^{ος}$ $V_{d1}(V)$	Ηλεκτροστατικό Βολτόμετρο $V_{2rms}(kV)$	Βολτόμετρο μεγίστου $V_{d3i}(kV)$	Χωρητικός Καταμεριστής $V_{d3ii}(kV)$	Μέσος όρος τάσης $V_d(kV)$

### 6.8 Ερωτήματα

(α) Αναφέρεται πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφορετικών τρόπων μέτρησης της τάσης.

(β) Υπολογίστε την τάση διάσπασης ( $V_d$ ) συναρτήσει της πίεσης σε κάθε περίπτωση.

(γ) Χαράξτε τη γραφική παράσταση της τάσης διάσπασης ( $V_d$ ) συναρτήσει της πίεσης για τα διαφορετικά  $s$  του (I). Τι παρατηρείται;

(δ) Παρουσιάστε σε κοινή γραφική παράσταση την τάση διάσπασης συναρτήσει της πίεσης στην περίπτωση του αέρα και του  $SF_6$ . Τι παρατηρείτε;

(ε) Παρουσιάστε σε κοινή γραφική παράσταση την τάση διάσπασης συναρτήσει της πίεσης για τα διάφορα  $s$  του (III). Τι παρατηρείτε;

(στ) Εξηγήστε την επίδραση που θα είχε στις μετρήσεις η μη αλλαγή του αέρα μετά από κάθε διάσπαση.

(η) Ποιος ο λόγος ύπαρξης της αντίστασης  $R$ ; Πόση θα ήταν η τιμή της, αν τη βάζαμε στο πρωτεύον; Γιατί δεν τη βάζουμε στο πρωτεύον;

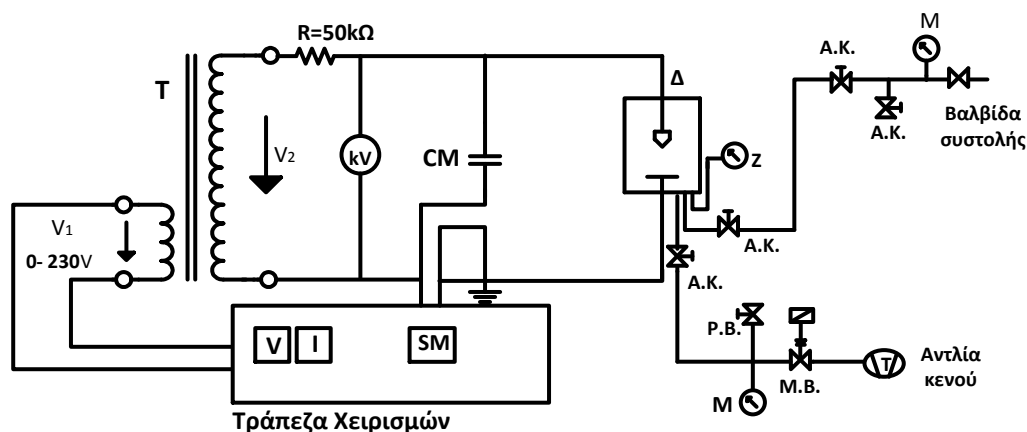
## 6.9 Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις στο Εργαστήριο

Η 5<sup>η</sup> άσκηση πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο, ώστε να επαληθευτεί η ορθότητα τόσο της διάταξης όσο και των ερωτημάτων που προτείνονται. Οι μετρήσεις που καταγράφηκαν από τη διεξαγωγή της άσκησης επεξεργάζονται και αναλύονται σε αυτήν την παράγραφο.

### 6.9.1 Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη

Η εναλλασσόμενη τάση που απαιτείται για την πραγματοποίηση τους πειράματος παρέχεται από έναν μετασχηματιστή δοκιμών και μετριέται χρησιμοποιώντας:

- (α) το ηλεκτροστατικό βολτόμετρο, το οποίο μετρά κατευθείαν την rms τιμή της τάσης,
- (β) το βολτόμετρο μεγίστου SM μέσω του πυκνωτή μέτρησης CM, το οποίο εμείς ρυθμίσαμε να μετρά την rms τιμή της τάσης,
- (γ) το βολτόμετρο στο 1<sup>ο</sup>ν του μετασχηματιστή και πολλαπλασιάζοντας αυτή την τιμή με το λόγο μετασχηματισμού  $a = 100kV/220V$ .



Σχήμα 6.7: Υλοποιήσιμη πειραματική διάταξη

- όπου
- T: μετασχηματιστής δοκιμής με λόγο μετασχηματισμού  $220V/100kV$  και ονομαστική ισχύ  $5kVA$
  - $R_{\pi}$ : αντίσταση προστασίας,  $50k\Omega$
  - kV: ηλεκτροστατικό βολτόμετρο
  - CM: πυκνωτής μέτρησης  $100pF$
  - SM: βολτόμετρο μεγίστου
  - Δ: δοχείο ελεγχόμενης πίεσης
  - Z: ενδεικτικό μανόμετρο
  - A.K.: απομονωτικοί κρουνοί ή στρόφιγγες (επιτρέπουν τη σύνδεση στις απαραίτητες σωληνώσεις)
  - P.B.: ρυθμιστική βαλβίδα (χρησιμοποιείται για την ακριβή ρύθμιση της επιθυμητής πίεσης)
  - M.B.: Μαγνητική βαλβίδα (κλείνει αυτόματα όταν η αντλία κενού σταματήσει να λειτουργεί, έτσι αποτρέπεται η εξίσωση των πιέσεων)

M: Μανόμετρο κενού ή κενόμετρο (είναι ενσωματωμένο στο δοχείο υψηλής πίεσης και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση υψηλής πίεσης)



Σχήμα 6.8: Φωτογραφία πειραματικής διάταξης από το εργαστήριο

Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος μας στο εργαστήριο:

- Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με επιβαλλόμενη πίεση από  $1 \dots 3 \text{ bar}$ .
- Χρησιμοποιήθηκαν δύο ειδών διατάξεις ηλεκτροδίων μέσα στο δοκίμιο. Ένα ζευγάρι σφαιρών με διάμετρο  $D = 5 \text{ cm}$  για την προσομοίωση των ομοιογενών πεδίων και μια διάταξη ακίδας-πλάκας, όπου η πλάκα είχε διάμετρο  $D=2 \text{ cm}$  και η ακίδα ήταν κώνος ελάχιστης γωνίας και διαμέτρου  $D=2 \text{ cm}$ , για την προσομοίωση των ανομοιογενών πεδίων.
- Το αέριο που περιείχε το δοχείο ελεγχόμενης πίεσης ήταν αέρας.
- Μετά από κάθε διάσπαση αφαιρούνταν το αέριο του δοχείου και συμπληρώνονταν εκ νέου ώστε να μην περιέχονται ιόντα που οφείλονται στην προηγούμενη διάσπαση

### 6.9.2 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων

Αρχικά θεωρήσαμε διάταξη ηλεκτροδίων σφαίρα-σφαίρα για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά σε ένα ομοιογενές πεδίο. Πραγματοποιήθηκαν δύο κύκλοι μετρήσεων για  $s_1 = 10mm$  και  $s_2 = 20mm$ . Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων η πίεση στο δοχείο ελεγχόμενης πίεσης μεταβάλλεται από  $1 \dots 3bar$  χρησιμοποιώντας τη συσκευή αέρα του εργαστηρίου. Στους παρακάτω πίνακες καταγράφονται οι τιμές της εναλλασσόμενης τάσης με τις μεθόδους α έως γ ενώ μεταβάλλεται η πίεση. Καθώς επίσης υπολογίζεται και ο μέσος όρος των τιμών αυτών.

Πίνακας 6.7: Καταγραφή εναλλασσόμενων τάσεων για διάφορες τιμές πίεσης και απόσταση μεταξύ των σφαιρών  $s_1 = 10mm$

Πίεση $p$ (bar)	Τάση $1^{ος}$ $V_{d1}(V)$	$\alpha \cdot V_1(kV)$	Ηλεκτροστατικό Βολτόμετρο $V_{2rms}(kV)$	Βολτόμετρο μεγίστου $\widehat{V}_2/\sqrt{2}(kV)$	Μέσος όρος τάσης $V_d(kV)$
1,0	46,2	21,00	22,80	20,18	21,33
1,4	57,1	25,95	26,80	24,13	25,63
1,6	66,8	30,36	31,50	28,25	30,04
1,8	73,1	33,23	34,50	29,80	32,51
2,0	83,0	37,73	39,50	35,32	37,52
2,2	91,8	41,73	42,50	39,06	41,10
2,4	98,4	44,73	45,00	41,81	43,85
2,6	101,5	46,14	47,50	43,21	45,62
2,8	113,4	51,55	53,00	48,51	51,02
3,0	115,4	52,45	54,00	49,72	52,06

Πίνακας 6.8: Καταγραφή εναλλασσόμενων τάσεων για διάφορες τιμές πίεσης και απόσταση μεταξύ των σφαιρών  $s_1 = 20mm$

Πίεση $p$ (bar)	Τάση $1^{ος}$ $V_{d1}(V)$	$\alpha \cdot V_1(kV)$	Ηλεκτροστατικό Βολτόμετρο $V_{2rms}(kV)$	Βολτόμετρο μεγίστου $\widehat{V}_2/\sqrt{2}(kV)$	Μέσος όρος τάσης $V_d(kV)$
1,0	99,0	45,00	47	42,85	44,95
1,4	101,7	46,23	49	43,71	46,31
1,6	114,2	51,91	53	49,58	51,50
1,8	126,0	57,27	59	53,74	56,67
2,0	140,9	64,05	64	57,80	61,95
2,2	150,5	68,41	72	70,50	70,30

Στη συνέχεια για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά σε ένα εντελώς ανομοιογενές πεδίο αντικαταστήσαμε την υπάρχουσα διάταξη με μια διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Οι μετρήσεις που καταγράψαμε για  $s = 10\text{mm}$  και από  $1 \dots 3\text{bar}$ , καθώς και η μέση τιμή αυτών, καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 6.9: Καταγραφή εναλλασσόμενων τάσεων για διάφορες τιμές πίεσης και απόσταση της διάταξης ακίδας-πλάκας  $s_1 = 20\text{mm}$**

Πίεση $p$ (bar)	Τάση $1^{\circ\varsigma}$ $V_{d1}(V)$	$\alpha \cdot V_1(kV)$	Ηλεκτροστατικό Βολτόμετρο $V_{2rms}(kV)$	Βολτόμετρο μεγίστου $\widehat{V}_2/\sqrt{2} (kV)$	Μέσος όρος τάσης $V_d(kV)$
1,0	27,1	12,32	13,6	11,98	12,63
1,4	30,0	13,64	15,0	13,89	14,18
1,6	44,9	20,41	21,9	21,78	21,36
1,8	48,0	21,82	21,6	20,38	21,27
2,0	36,0	16,36	17,6	16,08	16,68
2,2	43,0	19,55	21,4	22,79	21,25
2,4	49,0	22,27	26,8	23,88	24,32
2,6	59,4	27,00	29,0	26,00	27,33
2,8	60,9	27,68	29,0	25,86	27,51

### 6.9.3 Απαντήσεις στα Ερωτήματα

(α) Αναφέρατε πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφορετικών τρόπων μέτρησης της τάσης.

#### Απάντηση

- Το ηλεκτροστατικό βολτόμετρο είναι αναλογικό όργανο μέτρησης, οπότε οι μετρήσεις που γίνονται με το μάτι δεν είναι απόλυτα αξιόπιστες. Επίσης ανάλογα με το επίπεδο της τάσης αλλάζουμε τη βαθμονομημένη κλίμακα μέτρησης του βολτομέτρου και ειδικά για τις μεγάλες τάσεις χρησιμοποιούνται κλίμακες μικρότερης ακρίβειας.
- Πιο ασφαλής μέθοδος υπολογισμού θεωρείται η καταγραφή της υψηλής εναλλασσόμενης τάσης μέσω του βολτόμετρου μεγίστου SM. Εδώ η καταγραφή των μετρήσεων γίνεται ψηφιακά και αν και υπάρχουν απώλειες εξαιτίας παράσιτων επαγωγών και διηλεκτρικών απωλειών πάνω στους πυκνωτές δεν είναι τόσο σημαντικές.
- Τέλος στη μέθοδο με το βολτόμετρο στο πρωτεύον του μετασχηματιστή θεωρούμε το μετασχηματιστή ιδανικό και λαμβάνουμε υπόψη μας μόνο το λόγο μετασχηματισμού  $\alpha$ , ενώ αγνοούμε τις απώλειες και τις αντίστοιχες πτώσεις τάσεως, οπότε υπάρχει απόκλιση στην τιμή που υπολογίζουμε και την πραγματική.

(β) Υπολογίστε την τάση διάσπασης ( $V_d$ ) συναρτήσει της πίεσης σε κάθε περίπτωση.

**Απάντηση**

Η τάση διάσπασης  $V_d$  προκύπτει ως ο μέσος όρος των τριών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της, δηλαδή:

$$V_d = \frac{\sum_{i=1}^3 V_i}{3}$$

Οπότε προκύπτει ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας:

Πίνακας 6.10

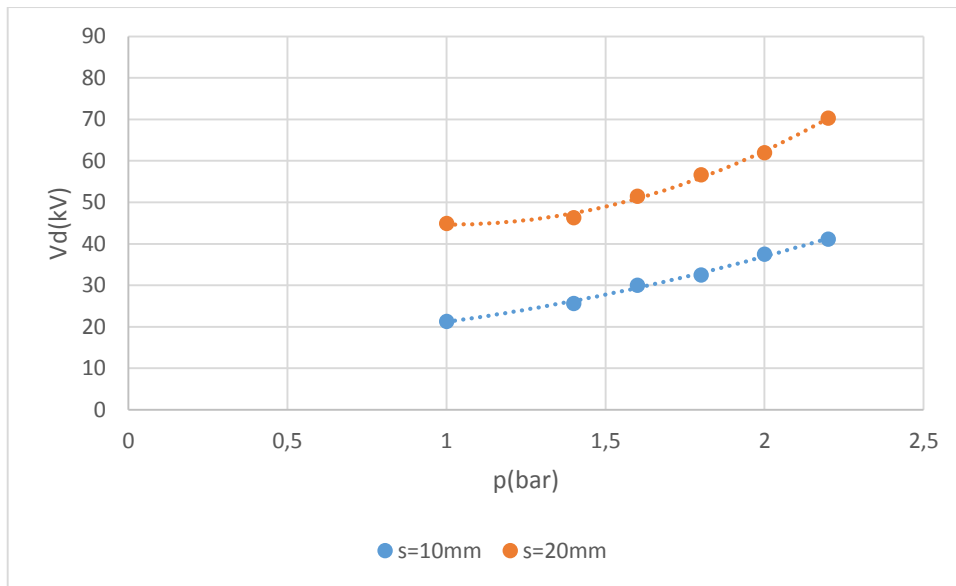
Πίεση p (bar)	Σφαίρα-Σφαίρα		Ακίδα-Πλάκα
	$V_{d,s_1}$ (kV)	$V_{d,s_2}$ (kV)	$V_d$ (kV)
1,0	21,33	44,95	12,63
1,4	25,63	46,31	14,18
1,6	30,04	51,50	21,36
1,8	32,51	56,67	21,27
2,0	37,52	61,95	16,68
2,2	41,10	70,30	21,25
2,4	43,85		24,32
2,6	45,62		27,33
2,8	51,02		27,51
3,0	52,06		

(γ) Χαράξτε τη γραφική παράσταση της τάσης διάσπασης ( $V_d$ ) συναρτήσει της πίεσης για τα διαφορετικά s του (I). Τι παρατηρείτε;

**Απάντηση**

Η διάταξη ηλεκτροδίων σφαίρα-σφαίρα δημιουργεί ομοιογενές πεδίο. Στα ομοιογενή πεδία ισχύει ο νόμος του Paschen (σχήμα 6.3), σύμφωνα με τον οποίο η τάση διάσπασης στα αέρια εξαρτάται τόσο από την πίεση p όσο και από το μήκος του διακένου s. Επιπλέον, αν οι συνθήκες αυτού του νόμου ικανοποιούνται τότε η εκκένωση πραγματοποιείται σύμφωνα με το μηχανισμό εκκένωσης κατά Townsend. Όμως μια αύξηση της πίεσης πάνω από τα 10 bar έχει σαν αποτέλεσμα τη βαθμιαία απόκλιση από το νόμο του Paschen.

Στην προκειμένη περίπτωση το σχήμα 6.9 που προκύπτει από τις μετρήσεις μας επιβεβαιώνει πως ο νόμος του Paschen όντως ισχύει. Συγκεκριμένα για σταθερό μήκος διακένου και αύξηση της πίεσης η τάση διάσπασης όντως αυξάνεται, ενώ για σταθερή πίεση και αύξηση του διακένου η τάση διάσπασης αυξάνεται επίσης.



Σχήμα 6.9: Διάγραμμα  $V_d(p)$

(δ) Παρουσιάστε σε κοινή γραφική παράσταση την τάση διάσπασης συναρτήσει της πίεσης στην περίπτωση του αέρα και του  $SF_6$ . Τι παρατηρείτε;

**Απάντηση**

Αυτό το κομμάτι της άσκησης δεν πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο. Υποθέτουμε όμως πως η τάση διάσπασης που θα καταγραφόταν σε αυτή την περίπτωση θα ήταν αρκετά μεγαλύτερη συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές στην περίπτωση του αέρα. Αυτό θα συμβαίνει γιατί το  $SF_6$  έχει δύο με τρεις φορές μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τον αέρα, οπότε χρειάζεται μεγαλύτερη τάση για τη διάσπαση του.

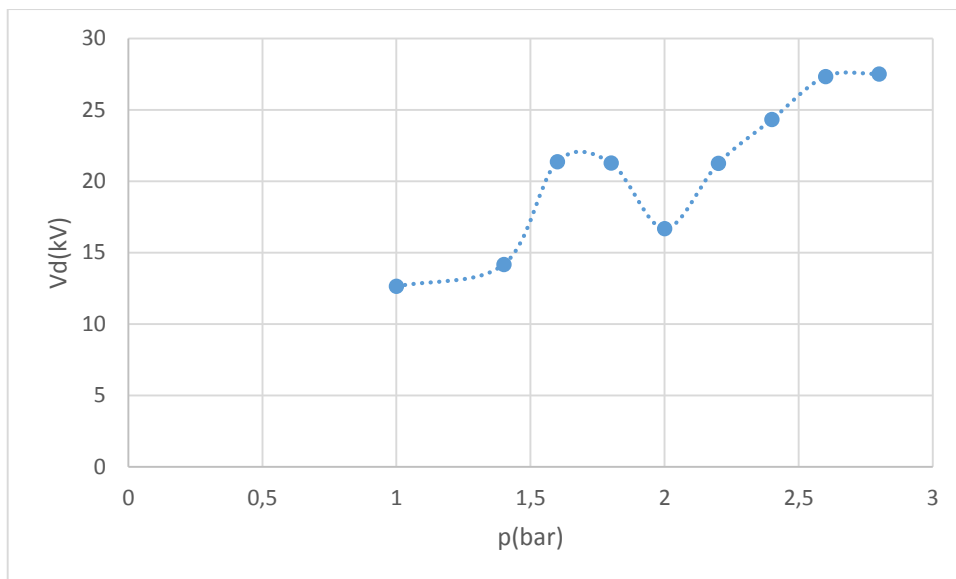
(ε) Παρουσιάστε σε κοινή γραφική παράσταση την τάση διάσπασης συναρτήσει της πίεσης για τα διάφορα s του (III). Τι παρατηρείτε;

**Απάντηση**

Οι μετρήσεις που καταγράψαμε εδώ ήταν μόνο για ένα μήκος διακένου, οπότε δε μπορούμε να παρουσιάσουμε ένα συγκριτικό διάγραμμα για διαφορετικά s, μπορούμε όμως να μελετήσουμε την τάση διάσπασης για σταθερό μήκος διακένου.

Η διάταξη των ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα δημιουργεί ανομοιογενές πεδίο, οπότε δεν ισχύει ο νόμος του Paschen σε όλο το εύρος των πιέσεων. Με αποτέλεσμα μια αύξηση της πίεσης να μη συνεπάγεται πάντα αύξηση της τάσης διάσπασης. Στην προκειμένη περίπτωση για πιέσεις μικρότερες των 1,5-2 bar ακολουθείται ο μηχανισμός εκκενώσεως κατά Townsend και παρατηρούμε πως ο νόμος του Paschen ισχύει. Ενώ για πιέσεις μεγαλύτερες των 1,5-2 bar παρατηρούμε απότομη μείωση της τάσης διάσπασης. Οπότε και ο νόμος του Paschen σταματά να ισχύει και η τάση διάσπασης αρχίζει να ακολουθεί το μηχανισμό εκκενώσεως με θυσάνους.





Σχήμα 6.10: Διάγραμμα \$V\_d(p)\$

(στ) Εξηγήστε την επίδραση που θα είχε στις μετρήσεις η μη αλλαγή του αέρα μετά από κάθε διάσπαση.

#### Απάντηση

Μετά από κάθε διάσπαση αφαιρείται το αέριο του δοχείου και συμπληρώνεται εκ νέου ώστε να μην περιέχονται ιόντα που οφείλονται στην προηγούμενη διάσπαση. Αν δε γινόταν η αλλαγή αέρα, τότε θα διευκολυνόταν πολύ το φαινόμενο του ιονισμού, που είναι η διαδικασία δημιουργίας ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων σε ένα μονωτικό αέριο, καθώς θα υπήρχαν ήδη ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς για να ξεκινήσουν σταδιακά οι μηχανισμοί διάσπασης, οπότε η τάση διάσπασης θα μειωνόταν αισθητά.

(η) Ποιος ο λόγος ύπαρξης της αντίστασης \$R\$; Πόση θα ήταν η τιμή της, αν τη βάζαμε στο πρωτεύον; Γιατί δεν τη βάζουμε στο πρωτεύον;

#### Απάντηση

Ο κύριος λόγος τοποθέτησης της αντίστασης είναι η προστασία του δευτερεύοντος και ο περιορισμός του μεγάλου ρεύματος που θα το διαρρεύσει κατά τη διάσπαση.

Η τιμή των \$50k\Omega\$ έχει προσδιοριστεί με βάση τα στοιχεία του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή και την τιμή στην οποία θέλουμε να μειώσουμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης.

Αν ήταν, όμως, στο πρωτεύον η τιμή της θα ισούταν μέσω του λόγου μετασχηματισμού:

$$R' = a^2 \cdot R = \left(\frac{220}{100k}\right)^2 \cdot 50k\Omega = 0.242\Omega$$

Για να απαντήσουμε στο ερώτημα γιατί δεν πρέπει να τοποθετηθεί η αντίσταση προστασίας στο πρωτεύον θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας πως πριν γίνει η διάσπαση το δευτερεύον του μετασχηματιστή είναι ουσιαστικά ανοικτοκυκλωμένο. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα του πρωτεύοντος ταυτίζεται με το ρεύμα του εγκάρσιου κλάδου-πυρήνα, το οποίο όμως έχει κάποιες αρμονικές 3ης, 5ης τάξης κλπ. Εξαιτίας αυτού του μη απόλυτα ημιτονικού ρεύματος έχουμε μια πτώση τάσης στο πρωτεύον που επιφέρει τελικά αντίστοιχη παραμόρφωση της τάσης του δευτερεύοντος.

Αυτή η παραμόρφωση θα γίνει ακόμα εντονότερη αν προσθέσουμε την αντίσταση προστασίας στο πρωτεύον, καθώς η τιμή της θα ισούταν με  $242\text{m}\Omega$ , θα ήταν δηλαδή συγκρίσιμη με τα στοιχεία  $R1$ ,  $R2'$ ,  $X1$ ,  $X2'$  του ισοδύναμου του συγκεκριμένου μετασχηματιστή, που είναι της τάξης των  $100\text{-}200\text{m}\Omega$ . Άρα ο κύριος λόγος για την αποφυγή τοποθέτησης της αντίστασης στο πρωτεύον είναι η αποφυγή παραμόρφωσης της τάσης, διότι οι κανονισμοί απαιτούν ημιτονοειδής τάσεις δοκιμών [2].

## 6.10 Βιβλιογραφία

- [1] Dieter Kind, Kurt Feser, High-Voltage Test Techniques, Εκδόσεις Newnes, 2001
- [2] Σταθόπουλου Ι.Α., Υψηλές Τάσεις Ι, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1989
- [3] Συμπληρωματικές Σημειώσεις Υψηλών Τάσεων, Εργαστηριακός Οδηγός, Αθήνα, Οκτώβριος 2010
- [4] Οικονόμου Λ. και Φώτη Γ., Εισαγωγή στις Υψηλές Τάσεις, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2010
- [5] Μιχαήλ Γ. Δανίκας, Στοιχεία Υψηλών Τάσεων, Εκδόσεις Σμπίλιας Α.Ε.Β.Ε, Αθήνα, 2005
- [6] John Kuffel, E. Kuffel, W. S. Zaengl, High Voltage Engineering Fundamentals, Newnes, 2000
- [7] Wadhwa C.L., High Voltage Engineering, New Age International Publisher, 2007

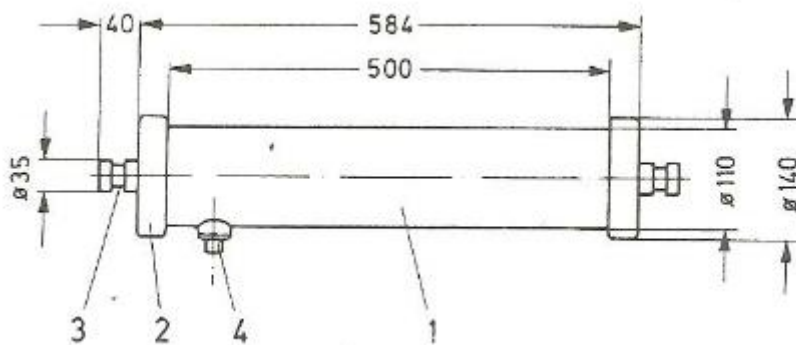
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### «Δομικά Στοιχεία των Διατάξεων Υψηλών Τάσεων»

#### 7.1 Βασικά δομικά στοιχεία










Οι διαστάσεις που απαιτούνται για την κατασκευή των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στις πειραματικές διατάξεις των υψηλών τάσεων καθορίζονται κυρίως από το μέγεθος της τάσης που θα εφαρμοστεί κατά μήκος τους. Εκτός αυτού είναι απαραίτητο να θεωρήσουμε πως γίνεται διάχυση των λειτουργικών απωλειών για να αποφευχθεί η υπερβολική υπερθέρμανση των στοιχείων.

Λαμβάνοντας υπόψιν τους παραπάνω περιορισμούς, αλλά και επιδιώκοντας την απλή συναρμολόγηση μιας πειραματικής διάταξης υψηλών τάσεων έχουν κατασκευαστεί βασικά δομικά στοιχεία για εναλλασσόμενη τάση (a.c.) 100kV και συνεχή (d.c.) ή κρουστική (impulse) τάση 140kV, τα οποία διαθέτουν κοινές διαστάσεις σύμφωνα με το σχήμα 7.1. Τα δομικά στοιχεία που συναντάμε πιο συχνά παρατίθενται ενδεικτικά στον πίνακα 7.1.



Σχήμα 7.1: Βασικό δομικό στοιχείο, όπου 1: μονωτικός σωλήνας, 2: μεταλλικό καπάκι, 3: προεξέχων ακροδέκτης, 4: ακροδέκτης μέτρησης για ομοαξονικό καλώδιο [1]

Πίνακας 7.1: Βασικά δομικά στοιχεία στις διατάξεις υψηλών τάσεων






Δομικά στοιχεία		Φωτογραφία	Χαρακτηριστικά
πυκνωτής μέτρησης	CM		a.c. 100kV, 100pF
αντίσταση μέτρησης	RM		d.c. 140kV, 140MΩ
ανορθωτής	GR		Μέγιστη τάση αναστροφής 140kV, 5mA
αντίσταση προστασίας	RS		Impulse, d.c. 140kV, 10MΩ, 60W
πυκνωτής κρούσης	CS		Impulse, d.c. 140kV, 6nF
πυκνωτής μετώπου	CB		Impulse, d.c. 140kV, 1,2nF
αντίσταση απόσβεσης	RD		Impulse 140kV, 400Ω(1,2/50), 830(1,2/5)
αντίσταση εκφόρτισης	RE		Impulse 140kV, 9500Ω(1,2/50), 485(1,2/5)
σφαιρικό διάκενο	KF		Impulse 140kV, D=100mm, s=80mm

Τα στοιχεία CM, RM, CB και RE του πίνακα 7.1 έχουν έναν ακροδέκτη ενσωματωμένο στα πλάγια του μονωτικού τους σωλήνα, ώστε να είναι δυνατή η σύνδεση μέσω ομοαξονικού καλωδίου με το εκάστοτε όργανο καταγραφής. Αν αυτός ο ακροδέκτης δε χρησιμοποιείται πρέπει να βραχυκυκλώνεται.

## 7.2 Βοηθητικά δομικά στοιχεία

Τα βασικά δομικά στοιχεία μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με βοηθητικά στοιχεία. Η χρήση των βοηθητικών στοιχείων απαιτείται για την μηχανική και ηλεκτρική συνδεσμολογία ενός κυκλώματος υψηλών τάσεων. Τα σημαντικότερα από αυτά τα βοηθητικά στοιχεία φαίνονται στον πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2: Βοηθητικά δομικά στοιχεία

Δομικά στοιχεία	Φωτογραφία	Χαρακτηριστικά
μονωτική ράβδος		για καλύτερη μηχανική στήριξη της διάταξης χωρίς να έχουμε αγωγίμη σύνδεση μεταξύ των στοιχείων
αγωγίμη ράβδος		για να συνδέσουμε αγωγή δύο στοιχεία
επιδαπέδια ράβδος		για τη σύνδεση των στοιχείων με τις βάσεις δαπέδου
καπάκι σύνδεσης		τέσσερα στοιχεία μπορούν να συνδεθούν οριζόντια και δύο κάθετα
επιδαπέδια βάση		Τέσσερις επιδαπέδιες ράβδοι (spacer bars) μπορούν να συνδεθούν οριζόντια και ένα στοιχείο κάθετα

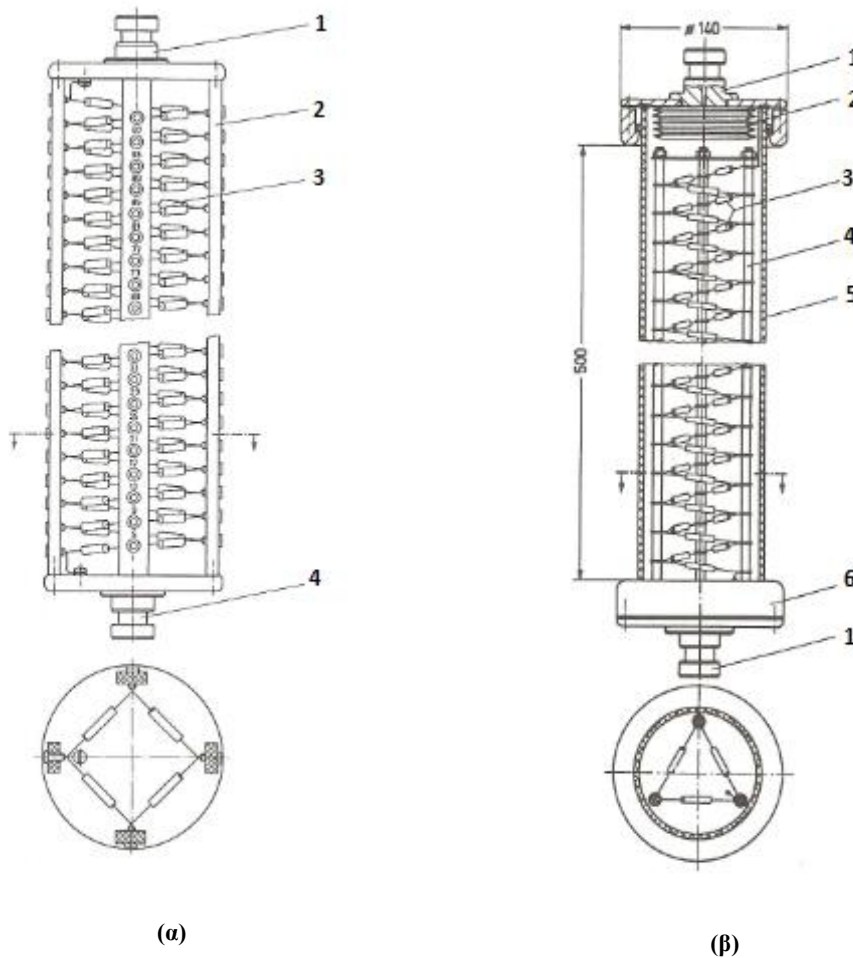
### 7.3 Αντιστάσεις

Οι αντιστάσεις στις διατάξεις υψηλών τάσεων μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες: τις αντιστάσεις φόρτισης (charging resistors), τις αντιστάσεις εκφόρτισης (discharge resistors), τις αντιστάσεις απόσβεσης (damping resistors) και τις αντιστάσεις μέτρησης (measuring resistors). Για αυτό οι απαιτήσεις που υπάρχουν κάθε φορά ως προς την ακρίβεια, τα θερμικά όρια και τη διηλεκτρική αντοχή μπορεί να είναι διαφορετικές ανάλογα την κατηγορία στην οποία ανήκει η αντίσταση.

Για εφαρμογές που απαιτούν υψηλά θερμικά όρια χρησιμοποιούνται αντιστάσεις νερού (water resistors). Ανοξειδωτά ηλεκτρόδια (από γραφίτη ή ανοξειδωτο χάλυβα) είναι βυθισμένα μέσα σε νερό που περιέχεται συνήθως σε κύλινδρο ή εύκαμπτο σωλήνα από μονωτικό υλικό. Η τιμή της αντίστασης καθορίζεται από το μήκος και τη διατομή του κυλινδρικού δοχείου και μπορεί να κυμαίνεται σε ένα ευρύ φάσμα τιμών χρησιμοποιώντας πρόσθετα σε αποσταγμένο νερό ή νερό βρύσης. Για παράδειγμα ειδική αντίσταση  $10^5 \Omega \cdot cm$  μπορεί να επιτευχθεί με αποσταγμένο νερό για μεγαλύτερη περίοδο (το νερό της βρύσης παίρνει τιμές από  $10^2 \Omega \cdot cm$  μέχρι  $10^3 \Omega \cdot cm$ ). Σταθερότητα καλύτερη από  $\pm 10\%$  μπορεί σπάνια να επιτευχθεί για αντιστάσεις νερού, για αυτό και είναι εφαρμόσιμες σε περιπτώσεις που δεν απαιτείται τόση μεγάλη ακρίβεια, π.χ. μια αντίσταση που περιορίζει το ρεύμα σε κυκλώματα φόρτισης (current-limiting resistors). Μια κάπως καλύτερη σταθερότητα στην τιμή της αντίστασης μπορεί να επιτευχθεί με αντιστάσεις υγρού  $Cu_2SO_4$ .

Ένα χαρακτηριστικό δείγμα του πως είναι εσωτερικά μια αντίσταση απεικονίζεται στο σχήμα 7.2. Παρατηρούμε πως ο μονωτικός σωλήνας περιέχει ένα μεγάλο αριθμό από αντιστάσεις χαμηλής τάσης συνδεδεμένες σε σειρά. Σε αυτή την περίπτωση αυτά τα ανεξάρτητα στοιχεία που περιέχονται πρέπει να είναι τοποθετημένα κατάλληλα, ώστε η εξωτερική κατανομή της τάσης να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη. Στο σχήμα 7.2 παρατίθενται δύο διαφορετικές κατασκευές, οι οποίες είναι κατάλληλες για ασκήσεις υψηλών τάσεων και αντιστοιχούν στις διαστάσεις και τους ακροδέκτες των στοιχείων που ανήκουν στον εξοπλισμό ενός εργαστηρίου υψηλών τάσεων.

Στο σχήμα 7.2(α) του σχήματος οι ακροδέκτες τοποθετούνται ανάμεσα στις αντιστάσεις έτσι ώστε ένας καταμεριστής τάσης με μικρά μεταβλητά βήματα να δημιουργείται. Για να αυξήσουμε τα επίπεδα της επιτρεπόμενης καταπόνησης και να βελτιώσουμε τη διάχυση της θερμότητας σε κάθε αντίσταση, οι αντιστάσεις μπορούν να βυθιστούν σε λάδι, σχήμα 7.2(β).



Σχήμα 7.2: (α) Αντίσταση μέτρησης που περιέχει αέρα, όπου 1: ακροδέκτης, 2: μονωτικός σωλήνας, 3: αντιστάσεις, (β) Αντίσταση φορτίου που περιέχει λάδι, όπου 1: ακροδέκτης, 2: φυσητήρας, 3: αντιστάσεις, 4: μονωτικό υλικό, 5: σωλήνας, 6: μεταλλικό καπάκι

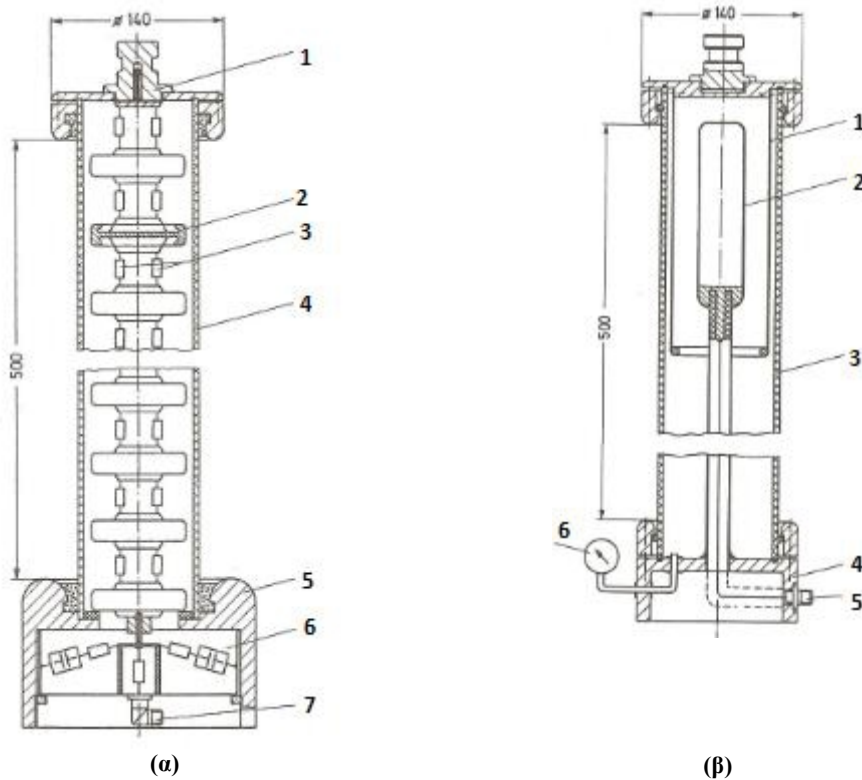
#### 7.4 Πυκνωτές

Οι πυκνωτές είναι τα πιο συχνά στοιχεία στα κυκλώματα υψηλών τάσεων. Χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα για την παραγωγή των συνεχών και κρουστικών τάσεων ως πυκνωτές μέτρησης και επίσης για την αποθήκευση ενέργειας.

Ο τύπος του διηλεκτρικού που συνήθως χρησιμοποιείται στους πυκνωτές αποτελείται από αρκετά στρώματα από μονωτικό χαρτί εμποτισμένο σε λάδι. Το πάχος του διηλεκτρικού είναι της τάξης των  $50 \dots 100 \mu m$ . Τα ηλεκτρόδια είναι φτιαγμένα από λεπτό φύλλο αλουμινίου. Ένας μεγάλος αριθμός πυκνωτών με επιμέρους τάση των λίγων kV συνδέονται σε σειρά. Για υψηλές τάσεις αυτό το σύνολο των πυκνωτών τοποθετείται συνήθως εντός λεπτού μονωτικού δοχείου που μπορεί να δεχτεί θερμική επέκταση. Οι πυκνωτές φορτίου (load capacitors) και οι πυκνωτές μέτρησης (measuring capacitor) τοποθετούνται συνήθως εντός κυλινδρικού δοχείου από μονωτικό υλικό, το οποίο είναι γεμάτο με λάδι. Οι πυκνωτές CM, CS, CB που χρησιμοποιούνται στις ασκήσεις είναι φτιαγμένοι με αυτόν τον τρόπο.

Ένα άλλο είδος διηλεκτρικού είναι το κεραμικό, το οποίο χαρακτηρίζεται από μειούμενο παράγοντα απωλειών με την αύξηση της συχνότητας. Για αυτό το λόγο το κεραμικό είναι κατάλληλο για την κατασκευή πυκνωτών υψηλής συχνότητας στις υψηλές τάσεις. Όμως για τεχνικούς λόγους η επιτρεπτή τάση ανά στοιχείο είναι περίπου 10kV. Για να φθάσουμε υψηλότερες τάσεις μια σειριακή σύνδεση από αρκετά στοιχεία πρέπει να πραγματοποιηθεί, ενώ εντός του μονωτικού σωλήνα μπορεί να υπάρχει είτε αέρας είτε λάδι. Στο σχήμα 7.3(α) φαίνεται ένα παράδειγμα εφαρμογής των κεραμικών πυκνωτών, στην κατασκευή ενός πυκνωτή απόσβεσης που συμμετέχει στη διάταξη κρουστικής γεννήτριας.

Ένα άλλο είδος διηλεκτρικού είναι ο συμπιεσμένος αέρας, ο οποίος είναι κατάλληλος για την παραγωγή πυκνωτών πολύ χαμηλών απωλειών, όπως για παράδειγμα αυτοί που απαιτούνται ως πρότυποι πυκνωτές (reference capacitor) στις γέφυρες Schering για τη μέτρηση του συντελεστή απωλειών. Στο σχήμα 7.3(β) απεικονίζεται ένας τέτοιος πυκνωτής.



Σχήμα 7.3: (α) Πυκνωτής απόσβεσης για κρουστικές τάσεις μέχρι 200kV δομημένος από κεραμικούς πυκνωτές και αντιστάσεις layer type σε αέρα, όπου 1: ακροδέκτης υψηλής τάσης, 2: κεραμικός πυκνωτής, 3: αντιστάσεις απόσβεσης, 4: μονωτικός σωλήνας, 5: γειωμένη μεταλλική βάση, 6: τμήμα χαμηλής τάσης, 7: ακροδέκτης μέτρησης για ομοαξονικό καλώδιο, (β) πρότυπος πυκνωτής για 100kV,26pF με συμπιεσμένο αέρα, όπου 1: ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης, 2: ηλεκτρόδιο μέτρησης, 3:μονωτικός σωλήνας, 4: γειωμένη μεταλλική βάση, 5: ακροδέκτης μέτρησης για ομοαξονικό καλώδιο, 6: μανόμετρο



### 7.5 Διάκενα

Τα διάκενα είναι κλασικά στοιχεία των διατάξεων υψηλών τάσεων και μπορεί να διασπώνται ανάλογα με την τάση ή το χρόνο. Η μεγάλη αντίσταση του αγωγισμού δρόμου μεταξύ των ηλεκτροδίων αποτελεί σπάνια πρόβλημα για τα κυκλώματα των υψηλών τάσεων. Το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι συνήθως σε μη αγώγιμη κατάσταση όταν παρεμβάλλεται κάποιο μονωτικό αέριο, π.χ. ο ατμοσφαιρικός αέρας. Υγρά ή στερεά μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται σπάνια. Διάκενα όπου η διάταξη των ηλεκτροδίων χρησιμοποιείται σε διακόπτης όταν η τάση υπερβαίνει κάποια τιμή ονομάζονται προστατευτικά και χρησιμοποιούνται για να αποφευχθούν οι υπερβολικές υπερτάσεις, ως σπινθηριστές στις κρουστικές γεννήτριες ή ως διάκενα μέτρησης για τη μέτρηση των υψηλών τάσεων. Κάποιες από τις πιο συνηθισμένες διατάξεις ηλεκτροδίων απεικονίζονται στο σχήμα 7.4.

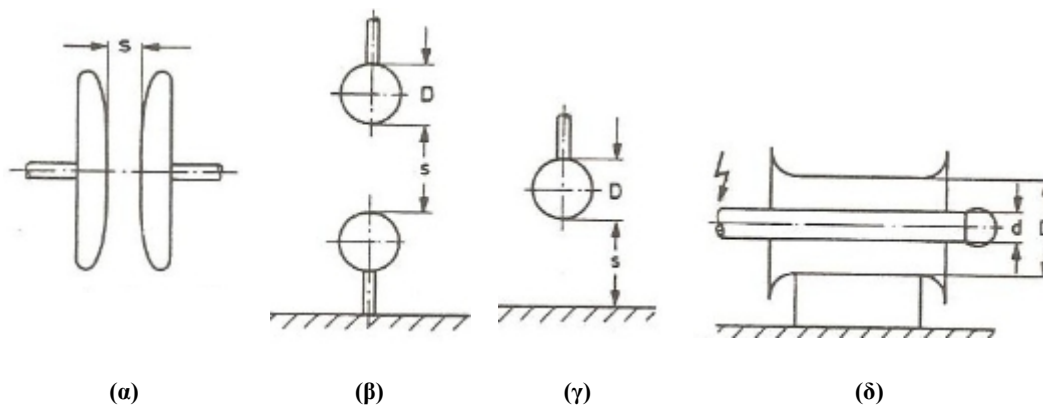
Η διάταξη ηλεκτροδίων πλάκα-πλάκα (σχήμα 7.4(α)) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της τάσης διάσπασης ενός ομοιογενούς πεδίου και είναι κατάλληλη για τη μελέτη του μηχανισμού της διάσπασης.

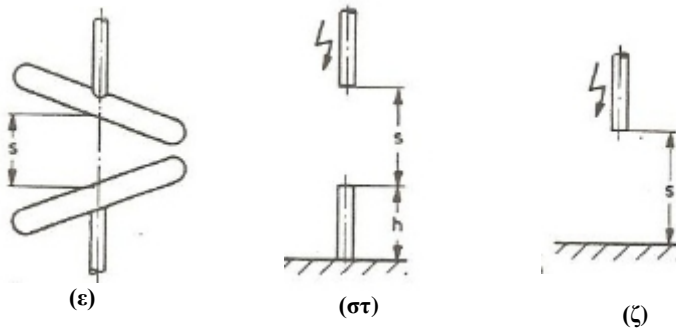
Η μετατροπή από ένα εντελώς ομοιογενές πεδίο σε ένα λιγότερο ομοιογενές γίνεται με τη διάταξη σφαίρα-σφαίρα (σχήμα 7.4(β)), και για ακόμα περισσότερο ανομοιογενές πεδίο με τη διάταξη σφαίρα-πλάκα (σχήμα 7.4(γ)). Και στις δύο περιπτώσεις το πεδίο επηρεάζεται από την αυξομείωση του μήκους του διακένου μεταξύ των ηλεκτροδίων  $s$ .

Το πεδίο που δημιουργείται από ένα ομοαξονικό κυλινδρικό διάκενο (σχήμα 7.4(δ)) μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια και η επίδραση του στην περιφέρεια του πεδίου περιορίζεται από ηλεκτρόδια εξομάλυνσης (guard-ring electrodes), δηλαδή ζεύγη πλακών ή ομοαξονικών κυλίνδρων που βοηθούν στη δημιουργία ενός όσο το δυνατόν πιο ομογενούς πεδίου.

Οι σταυρωτοί κύλινδροι του σχήματος 7.4(ε) είναι κατάλληλοι επίσης για τη μέτρηση της τάσης, καθώς μια σχεδόν γραμμική σχέση υπάρχει ανάμεσα στην τάση διάσπασης και τον λόγο του μήκους του διακένου  $s$  προς τη διάμετρο τους  $d$ .

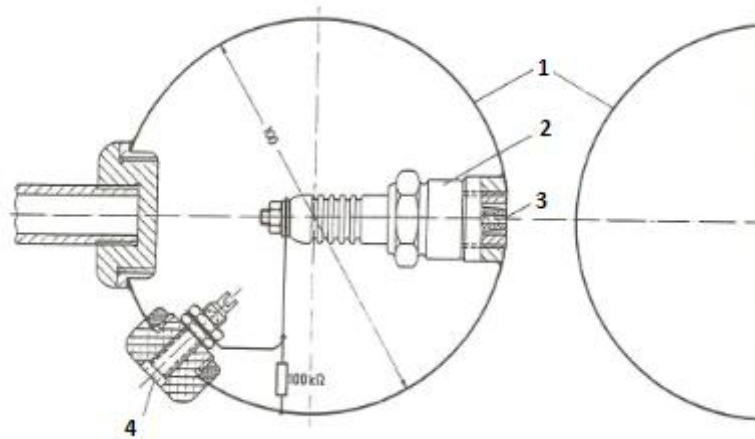
Οι διατάξεις ακίδα-ακίδα και ακίδα-πλάκα (σχήματα 7.4 (στ) και (ζ) αντίστοιχα) παριστάνουν ένα εντελώς ανομοιογενές πεδίο. Η διάταξη ακίδα-ακίδα χρησιμοποιείται για τη μέτρηση συνεχών τάσεων, εναλλασσόμενων και κρουστικών βραχείας διάρκειας. Ενώ η διάταξη ακίδα-πλάκα χρησιμοποιείται για τη μελέτη του φαινομένου της πολικότητας.





Σχήμα 7.4: Διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων

Τα διάκενα που παρουσιάζουν ασθενές ανομοιογενές πεδίο μπορούν να επεκτείνουν τη λειτουργία τους και να χρησιμοποιηθούν σε διακόπτες που εξαρτώνται από το χρόνο μόνο με τη προσθήκη ενός βοηθητικού ηλεκτροδίου, το οποίο συνήθως είναι ανεξάρτητο της τάσης που εφαρμόζεται ανάμεσα στα άλλα δύο ηλεκτρόδια. Συγκεκριμένα, μια βοηθητική τάση εφαρμόζεται ανάμεσα στο βοηθητικό ηλεκτρόδιο και τη γειωμένη σφαίρα του κυρίου διακένου, η οποία οδηγεί σε συγκεκριμένη στιγμή στη διάσπαση του κυρίου διακένου. Αυτό το είδος διακένου ονομάζεται σπινθηριστής (σχήμα 7.5) και χρησιμοποιείται για την έναυση μονοβάθμιων και πολυβάθμιων κρουστικών γεννητριών και την παραγωγή κρουστικών τάσεων πλήρων και αποκεκκομένων κυματομορφών.



Σχήμα 7.5: Διάκενο τριών ηλεκτροδίων για τάσεις μέχρι 140kV, όπου 1: κύριο ηλεκτρόδιο, 2: αναφλεκτήρας, 3: ηλεκτρόδιο έναυσης, 4: ακροδέκτης για τον παλμό της έναυσης

## 7.6 Βιβλιογραφία

[1] Dieter Kind, Kurt Feser, High-Voltage Test Techniques, Εκδόσεις Newnes, 2001

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### *«Φωτογραφικό Υλικό από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.»*

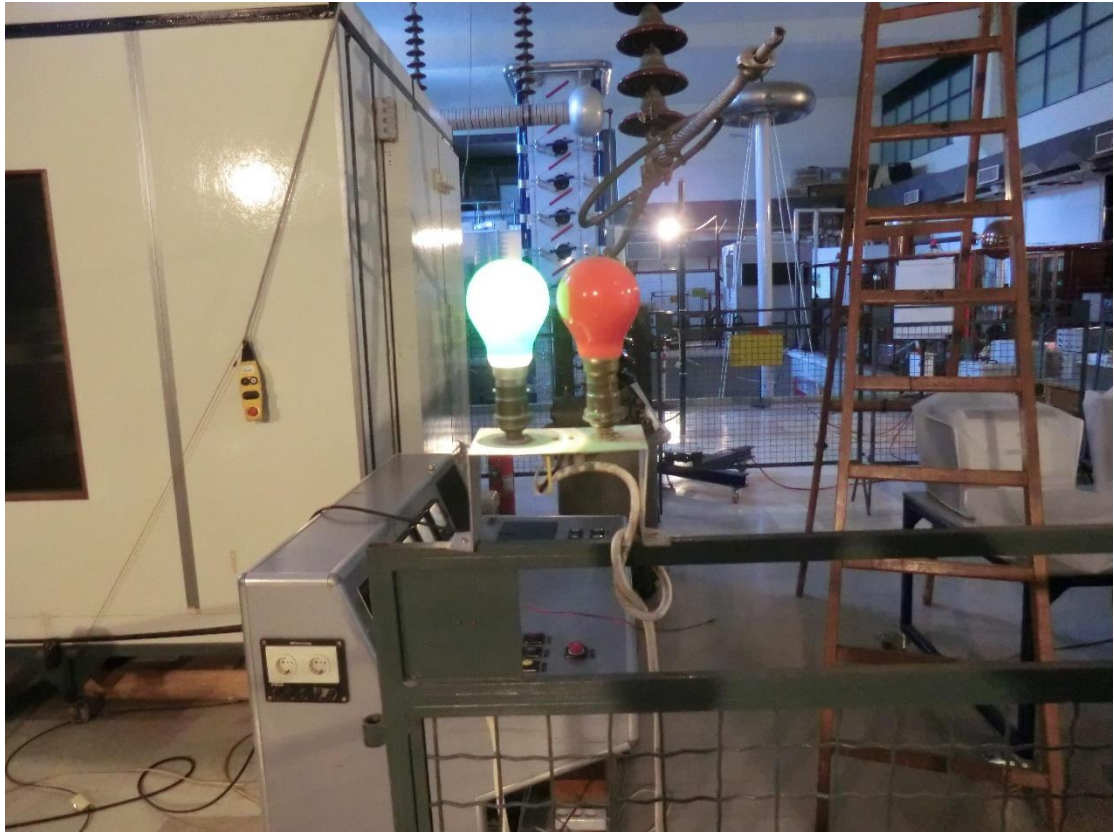
Σε αυτό το κεφάλαιο έχει συγκεντρωθεί φωτογραφικό υλικό από τις ημέρες διεξαγωγής των πειραμάτων. Οι φωτογραφίες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Στον εξοπλισμό του Εργαστηρίου που ανήκει στις θεμελιώδεις αρχές ηλεκτρικής προστασίας, σχήματα 8.1 με 8.5,
- Στο βασικό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, σχήματα 8.6 με 8.18,
- Σε λοιπό εξοπλισμό που ανήκει στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., σχήματα 8.19-8.24.



Σχήμα 8.1: Ειδική επιγραφή «Προσοχή! Κίνδυνος!» για την απαγόρευση της εισόδου στο χώρο διεξαγωγής των πειραμάτων

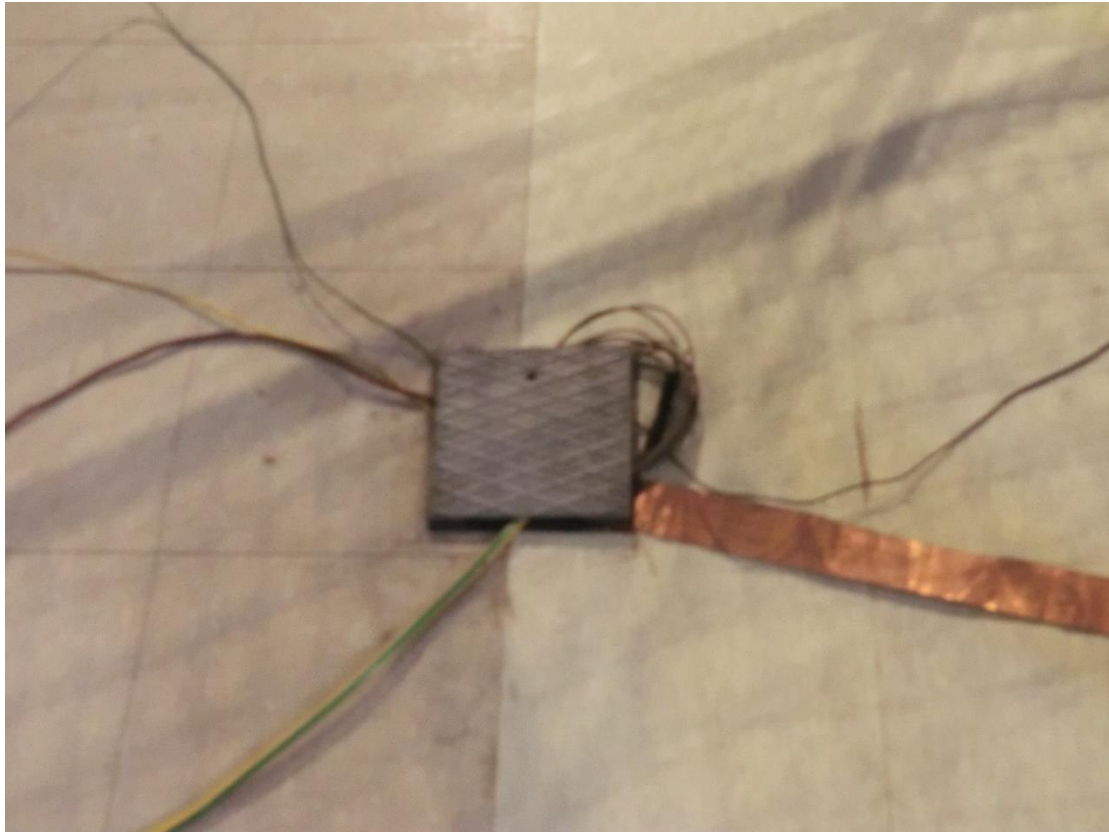




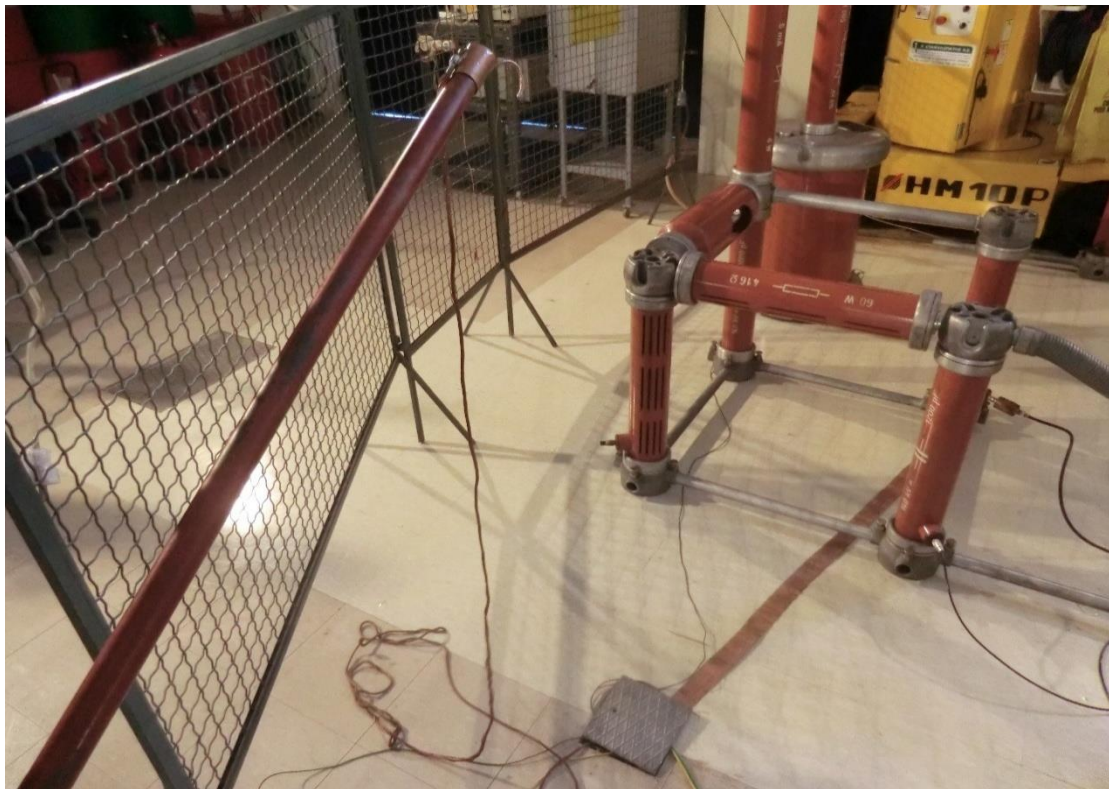
Σχήμα 8.2: Φωτεινές ενδείξεις για την είσοδο-έξοδο στο χώρο των πειραμάτων. Η αναμμένη πράσινη λάμπα (μη διεξαγωγή πειράματος) επιτρέπει την είσοδο-έξοδο, η αναμμένη κόκκινη λάμπα (διεξαγωγή πειράματος) την απαγορεύει.



Σχήμα 8.3: Κινητά πλέγματα για περίφραξη διατάξεων υψηλών τάσεων



**Σχήμα 8.4:** Σύνδεση όλων των γειώσεων της συνδεσμολογίας σε φρεάτιο που οδηγεί στη θεμελιακή γείωση του κτιρίου



**Σχήμα 8.5:** Κινητή γείωσης προστασίας, δηλαδή μονωτική ράβδος μήκους 2 m στην άκρη της οποίας υπάρχει αγωγμο άγκιστρο, αξιόπιστα συνδεδεμένο με την εγκατάσταση γείωσης του εργαστηρίου, μέσω του οποίου μπορεί να αναρτάται και να παραμένει επί των στοιχείων εξοπλισμού υψηλής τάσης όταν αυτό απαιτείται





Εικόνα 8.6: Σταθεροποιητής Wechselspannungs-Stabilisator 3kW, WS-30, ο οποίος δίνει τάση από την τροφοδοσία του δικτύου στην τράπεζα χειρισμών και μειώνει τις διακυμάνσεις της τάσης του δικτύου εξασφαλίζοντας ότι για τη μεταβολή της τάσης του δικτύου εντός των ορίων  $230 \pm 10\% V$  η τάση στην έξοδό του θα έχει μικρή διακύμανση  $230V \pm 0,5\% V$  (μεταξύ 228,9 και 231,1V)



Σχήμα 8.7: Τράπεζα Χειρισμών / Αυτομετασχηματιστής με μεταβλητή λήψη ώστε η τάση να κυμαίνεται από 0-230V



Σχήμα 8.8: Λήψεις μετασχηματιστή δοκιμών (προς γείωση και από τράπεζα χειρισμών αντίστοιχα)



Σχήμα 8.9: Βολτόμετρο μεγίστου (SM), TERCO HV9150 PEAK VOLTMETER



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 8.10: (α) Πολύμετρο WAVETEK DM27XT, με το οποίο μετρούσαμε την τάση εισόδου του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή, (β) Πολύμετρο BI HD160 TrueRMS, το οποίο συνδέσαμε με ωμικό καταμεριστή και μετρούσαμε χαμηλή τάση, (γ) Παλμογράφος TEKTRONIX TDS 2014C, 100MHz, 2GS/s.





Σχήμα 8.11: Μικρο-αμπερόμετρο κινητού πηνίου, μετρά τη μέση τιμή του ρεύματος



Εικόνα 8.12: Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο για τη μέτρηση και των τριών μορφών υψηλών τάσεων



(α)

(β)

Σχήμα 8.13: Διάκενα με διάταξη ηλεκτροδίων (α) ακίδα-πλάκα, (β) σφαίρα-σφαίρα, (γ) πλάκα-πλάκα



Εικόνα 8.14: Ωμικός καταμεριστής για υποβιβασμό της υψηλής τάσης. Στην αντίσταση μέτρησης  $R_M=140M\Omega$  συνδέεται εν σειρά μια μικρή αντίσταση  $r=3,27k\Omega$ , οπότε σχηματίζεται ωμικός καταμεριστής που συνδέεται μέσω ομοαξονικού καλωδίου στο όργανο καταγραφής



Σχήμα 8.15: Βαλβίδα συστολής για τη σύνδεση του δοχείου πίεσης με το σύστημα παροχής αέρα του εργαστηρίου υψηλών τάσεων



Σχήμα 8.16: Σύστημα ψηφιακής καταγραφής κρουστικών τάσεων DiAS 733





**Σχήμα 8.17: Κλωβός Faraday όπου βρίσκεται το καταγραφικό σύστημα DiAS 733**



Σχήμα 8.18: Συσκευή SIEMENS για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής μονωτικού λαδιού



Σχήμα 8.19: Μετασχηματιστής δοκιμών 500kV/50kVA



(α)



(β)

Σχήμα 8.20: (α) 9-βάθμια γεννήτρια κρουστικών τάσεων 1800kV, 18kWs, (β)Χωρητικός καταμεριστής





Σχήμα 8.21: Σπινθηριστής σφαιρών για μέτρηση υψηλών τάσεων



**Σχήμα 8.22:** Συσκευή SEBA KMT VLF Test System 40 για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης καλωδίων, με εφαρμογή υψηλής τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας



**Σχήμα 8.23:** Κλωβός Faraday





Σχήμα 8.24: Ωμικός καταμεριστής

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

### «Συμπεράσματα»

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι ο εκσυγχρονισμός της εργαστηριακής εκπαίδευσης στο αντικείμενο των υψηλών τάσεων. Σήμερα στο πλαίσιο των προπτυχιακών μαθημάτων: «Παραγωγή Υψηλών Τάσεων» και «Μετρήσεις και Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων» πραγματοποιούνται έξι εργαστηριακές ασκήσεις για την εμπέδωση της θεωρίας από τους φοιτητές. Οι ασκήσεις που πραγματοποιούνται καλύπτουν την παρακάτω ύλη:

- παραγωγή και μέτρηση διαφορών μορφών τάσεων,
- υπερπήδηση και διάτρηση μονωτήρων,
- κατανομή της επιβαλλόμενης σε έναν αλυσοειδή μονωτήρα τάσης
- μονωτικά λάδια-διάσπαση αέρα,
- απώλειες Corona σε γραμμές υψηλής τάσης, και
- μετρητικό σύστημα γεννήτριας υψηλών κρουστικών τάσεων.

Η ανάγκη για ανανέωση των εργαστηριακών ασκήσεων προέκυψε από το γεγονός πως:

- χρησιμοποιείται συγκεκριμένος εξοπλισμός, με αποτέλεσμα ένα μεγάλο μέρος του εξοπλισμού που διαθέτει το εργαστήριο να μένει ανεκμετάλλευτο,
- ορισμένες από τις υπάρχουσες ασκήσεις απαιτούν περισσότερο από 1,5-2h που διαρκεί ένα εργαστηριακό μάθημα,
- οι υπάρχουσες εργαστηριακές ασκήσεις πραγματοποιούνται αρκετά χρόνια, με αποτέλεσμα να υπάρχουν έτοιμες οι τεχνικές εκθέσεις από προηγούμενες χρονιές.

Τα στάδια που ακολουθήθηκαν για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας επιγραμματικά είναι:

- καταγραφή εξοπλισμού εργαστηρίου,
- επιλογή ασκήσεων που θα μελετηθούν,
- μελέτη και σχεδίαση πειραματικών διατάξεων,
- διεξαγωγή πειραμάτων στο εργαστήριο,
- επεξεργασία πειραματικών δεδομένων και μετρήσεων,
- συγγραφή θεωρητικού μέρους,
- πρόταση για απόκτηση νέου εξοπλισμού.

Πιο αναλυτικά, αρχικά καταγράφηκε ο εξοπλισμός που ανήκει στο εργαστήριο, ώστε να είναι γνωστό τι εξοπλισμό διαθέτουμε και μπορούμε να εκμεταλλευτούμε για την κατασκευή των εκάστοτε διατάξεων. Στη συνέχεια αποφασίστηκε πως στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μελετηθούν με σκοπό την αναμόρφωση και τον εκσυγχρονισμό τους οι δύο εκ των έξι συνολικά υπάρχουσών εργαστηριακών ασκήσεων, συγκεκριμένα οι ασκήσεις: παραγωγή και μέτρηση διαφορών μορφών

τάσεων και μονωτικά λάδια-διάσπαση αέρα. Από την αναμόρφωση αυτών των ασκήσεων προέκυψαν πέντε νέες εργαστηριακές ασκήσεις: α) παραγωγή και μέτρηση υψηλών εναλλασσόμενων τάσεων, β) παραγωγή και μέτρηση υψηλών συνεχών τάσεων, γ) παραγωγή και μέτρηση υψηλών κρουστικών τάσεων, δ) μονωτικά υγρά και μονωτικά στερεά υλικά και ε) διάσπαση μονωτικού αέρα.

Έπειτα ορίστηκε η δομή των προτεινόμενων ασκήσεων, που είναι η παρακάτω:

- Εκσυγχρονισμένο θεωρητικό υπόβαθρο, ώστε ο φοιτητής να προσέρχεται στο εργαστήριο ενημερωμένος και έτοιμος να συμμετάσχει και όχι απλά να παρακολουθήσει το εκάστοτε πείραμα.
- Αναλυτικό πειραματικό μέρος με πλήθος διατάξεων. Αξίζει να σημειωθεί πως σε αρκετές περιπτώσεις η διεξαγωγή των πειραματικών διαδικασιών μπορεί να πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα. Επομένως, δίνεται η δυνατότητα να πραγματοποιείται η μελέτη ενός κεφαλαίου της ύλης από διαφορετική σκοπιά από ομάδα σε ομάδα, ή από βδομάδα σε βδομάδα, έτσι αυξάνεται το ενδιαφέρον των φοιτητών και μειώνονται τα φαινόμενα αντιγραφής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η 2<sup>η</sup> εργαστηριακή άσκηση «Παραγωγή και μέτρηση υψηλών συνεχών τάσεων» που εμπεριέχει πέντε εργαστηριακές διατάξεις για τη μελέτη των συνεχών τάσεων.
- Ερωτήσεις κατανόησης, για την εμπέδωση της εκάστοτε άσκησης από τους φοιτητές.

Το επόμενο βήμα ήταν η διεξαγωγή της πλειοψηφίας των προτεινόμενων πειραματικών διαδικασιών στο εργαστήριο, τα αντίστοιχα αποτελέσματα των οποίων επισυνάπτονται στο τέλος κάθε άσκησης. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας παρατηρήθηκαν κάποιες ελλείψεις στον εξοπλισμό του εργαστηρίου εξαιτίας των οποίων κάποια κομμάτια των ασκήσεων δε μπόρεσαν να πραγματοποιηθούν. Συνεπώς προτείνεται η απόκτηση του εξοπλισμού του πίνακα 9.1 για την υλοποίηση του συνόλου των πειραμάτων.

Πίνακας 9.1

Εξοπλισμός	Άσκηση	Λεπτομέρειες
Μίλλι-αμπερόμετρο	Άσκηση 2- 1 <sup>η</sup> / 2 <sup>η</sup> πειραματική διάταξη	Μέτρηση ρεύματος $I_g (mA)$ .
Μηχανισμός στήριξης διαφράγματος	Άσκηση 2- 5 <sup>η</sup> πειραματική διάταξη	Για την τοποθέτηση του διαφράγματος (μονωτικό υλικό) ανάμεσα στα ηλεκτρόδια κάθετα στον άξονα τους.
Συσκευή trigatron	Άσκηση 3- 2 <sup>η</sup> πειραματική διάταξη	Για ελεγχόμενη έναυση της κρουστικής γεννήτριας.
Πίκο-αμπερόμετρο	Άσκηση 4- 1 <sup>η</sup> πειραματική διάταξη	Για τη μέτρηση του ρεύματος διαρροής $I(pA)$ .
Γέφυρα Schering	Άσκηση 4- 2 <sup>η</sup> πειραματική διάταξη	Για τον υπολογισμό του συντελεστή απωλειών.
Δοχείο λαδιού	Άσκηση 4- 3 <sup>η</sup> πειραματική διάταξη	Για τη μελέτη της διάσπασης μονωτικού λαδιού μέσω ξένων σωματιδίων

Επίσης, προτείνεται η αναβάθμιση ή ακόμα και η αλλαγή των υφιστάμενων τραπεζών χειρισμού με νεότερες που να διαθέτουν ενσωματωμένα όργανα μέτρησης. Θα μπορούσε, επιπροσθέτως, το Εργαστήριο να αποκτήσει δύο νέες αντιστάσεις για να μετατρέπεται η λειωμένη κρουστική γεννήτρια από γεννήτρια παλμών μικρής διάρκειας και σε μεγάλης διάρκειας (ζεύξεως). Τέλος, για λόγους ασφαλείας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αυτόματο σύστημα γείωσης του πυκνωτή φόρτισης.

Όπως προαναφέρθηκε οι πέντε ασκήσεις που προτείνονται, πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, ώστε να πιστοποιηθεί η ορθότητα τους και προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα για τη βελτίωση τους. Όμως για να έχουμε ουσιαστική άποψη για την πειραματική διαδικασία σχετικά με το χρόνο διεξαγωγής των πειραμάτων, τη συμμετοχή των φοιτητών κ.ά. προτείνεται η πραγματοποίηση ενός πιλοτικού εργαστηρίου ανεξάρτητα από τα πλαίσια των αντίστοιχων μαθημάτων που θα έχει σα μοναδικό στόχο την αξιολόγηση των νέων ασκήσεων.

Τέλος, ως αντικείμενο επόμενων διπλωματικών κοινού ενδιαφέροντος και σκοπού με την παρούσα μπορούν να μελετηθούν και να αναμορφωθούν οι τέσσερις υπάρχουσες ασκήσεις που δεν μελετήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, αλλά φυσικά υπάρχουν και αρκετές ακόμα ασκήσεις που θα μπορούσαν να μελετηθούν και να ενταχθούν στο πρόγραμμα του εργαστηριακού μαθήματος των Υψηλών Τάσεων. Ενδεικτικά προτείνονται τα παρακάτω πεδία ενδιαφέροντος :

- Μερικές εκκενώσεις
- Ηλεκτρικό πεδίο
- Οδεύοντα κύματα
- Εσωτερικές υπερτάσεις
- Κρουστικά ρεύματα και τόξα

Γενικός στόχος του εργαστηρίου είναι η σύνθεση των διπλωματικών που θα έχουν ως αντικείμενο τη μελέτη και τη σχεδίαση νέων εργαστηριακών ασκήσεων για τη δημιουργία ενός πλήρους οδηγού υψηλών τάσεων που θα βοηθά τον φοιτητή κατά τη διάρκεια των σπουδών του στα πλαίσια των αντίστοιχων μαθημάτων, αλλά και στην πορεία της σταδιοδρομίας του.