



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

**Χρονική έναρξη και περαίωση των μερικών εκκενώσεων
στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι μετασχηματιστή» εντός
ανομοιογενούς πεδίου υπό κρουστικές τάσεις $\pm 250/2500\mu\text{s}$
σε θερμοκρασία λαδιού 20°C**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευάγγελος Π. Μπλιθικιώτης

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010



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

**Χρονική έναρξη και περαίωση των μερικών εκκενώσεων
στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι μετασχηματιστή» εντός
ανομοιογενούς πεδίου υπό κρουστικές τάσεις $\pm 250/2500\mu\text{s}$
σε θερμοκρασία λαδιού 20°C**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευάγγελος Π. Μπλιθικιώτης

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....
Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Περικλής Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Νικόλαος Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

.....
Ευάγγελος Π. Μπλιθικιώτης

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

Copyright © Ευάγγελος Π. Μπλιθικιώτης 2010

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.

Περίληψη

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μέτρηση, ο υπολογισμός και η γραφική αναπαράσταση ηλεκτρικών μεγεθών κατά την χρονική έναρξη και περαίωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax –λάδι μετασχηματιστή» εντός ανομοιογενούς πεδίου υπό κρουστικές τάσεις $\pm 250/2500\mu\text{s}$ σε θερμοκρασία λαδιού 20°C και διάταξη ηλεκτροδίων «ακίδα – πλάκα».

Στο πρώτο κεφάλαιο βρίσκεται το θεωρητικό κομμάτι της εργασίας, στο οποίο γίνεται μια περιγραφή των κυριότερων χαρακτηριστικών των μονωτικών υλικών (στερεά, υγρά, αέρια) που χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές εφαρμογές, αναφέροντας ειδικά τις βασικές ιδιότητες αυτών. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν εκτενώς τα στερεά, που είναι και το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας καθώς και τα φαινόμενα πριν και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο σκοπό της διπλωματικής εργασίας, τη διάταξη και γίνεται καταγραφή όλων των σχέσεων και μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο καταγράφονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Έγιναν τέσσερις σειρές πειραμάτων από δύο δοκίμια πάχους 1 mm και 2 mm, σε κρουστικές τάσεις $\pm 250/2500\mu\text{s}$ και παρουσιάζονται όλες οι χαρακτηριστικές των μετρούμενων και των υπολογισθέντων μεγεθών, ούτως ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω μελέτη και έρευνα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων από την μελέτη των ανωτέρω γραφικών παραστάσεων μέσω παρατηρήσεων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο υπάρχουν μερικές αναφορές στην χρησιμότητα της εργασίας στην έρευνα και τις πρακτικές εφαρμογές των στερεών μονωτικών υλικών.

Η εργασία τελειώνει με το έκτο κεφάλαιο στο οποίο παρατίθεται η βιβλιογραφία από την οποία αντλήθηκαν όλα τα θεωρητικά στοιχεία που την συνοδεύουν για την πληρέστερη ενημέρωση του αναγνώστη.

Λέξεις κλειδιά

Μονωτικά υλικά, Στερεά μονωτικά, Pertinax, Κρουστικές τάσεις, Μερικές εκκενώσεις, ταχύτητα ελεύθερων ηλεκτρονίων, κινητικότητα ελεύθερων ηλεκτρονίων, ειδική αγωγιμότητα ελεύθερων ηλεκτρονίων.

Abstract

The purpose of this thesis is the measurement, calculation and graphical representation of electrical quantities at the start and completion time of partial discharges in conjunction «Pertinax-transformer oil" within the heterogeneous field under impulse voltages $\pm 250/2500\text{ms}$ oil temperature 20°C and arrangement of electrodes' Rod - plate.

The first chapter is that theoretical piece of work, which we describe the main features of the insulating material (solid, liquid, gas) currently used in many applications, specifically the essential properties. Then, we analyze in detail the solid, which is the subject of this thesis and events before and during decomposition of solid insulation.

The second chapter refers to the purpose of this thesis is the layout and inventory of all sizes and relations used in the preparation of this thesis.

In the third chapter, the measurements taken during the experiments. I became a series of four experiments from two pieces of 1 mm thick and 2 mm, on impulse voltages $\pm 250/2500\text{ms}$ and shows all the characteristic of the measured and calculated quantities, so that they can be used for further study and research.

The fourth chapter attempts to draw conclusions from the study of these graphs through observations.

In the fifth chapter there are some references to the usefulness of working in research and practical applications of solid insulating materials.

The paper concludes with the sixth chapter, which sets out the literature from which they learned all the theoretical elements that accompany the complete information of the reader.

Keywords

Insulating materials, insulating solid, Pertinax, impulse voltages, Partial discharge, free electrons speed, mobility, free electron conductivity of free electrons.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων υπό την επίβλεψη του κ. καθηγητή Κωνσταντίνου Καραγιαννόπουλου και αφορά στην μελέτη της χρονικής έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων του στερεού ηλεκτρομονωτικού Pertinax εντός ελαίου μετασχηματιστή σε θερμοκρασία 20° C εντός ανομοιογενούς πεδίου υπό κρουστικές τάσεις $\pm 250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων «ακίδα – πλάκα».

Συγκεκριμένα διεξήχθησαν στο εργαστήριο μια σειρά από μετρήσεις με στόχο τον υπολογισμό διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών, πάνω σε δοκίμια 1mm και 2mm του στερεού ηλεκτρομονωτικού Pertinax. Τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων για την συμπεριφορά του συγκεκριμένου ηλεκτρομονωτικού υλικού. Απώτερος στόχος της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι αφενός να μπορεί ο αναγνώστης να έχει άμεση εποπτική εικόνα της μεταβολής αυτών των μεγεθών ανάλογα με την πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης αλλά και του πάχους του εξεταζόμενου δοκιμίου και αφετέρου να εξαχθούν συμπεράσματα που θα βοηθήσουν ακόμα περισσότερο στην κατανόηση της χρονικής έναρξης και περαίωσης των στερεών μονωτικών υλικών.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Κωνσταντίνο Γ. Καραγιαννόπουλο, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας καθώς και τον κύριο Περικλή Δ. Μπούρκα για την πολύτιμη βοήθειά του κατά την διάρκεια συγγραφής της παρούσας εργασίας αλλά και τις χρήσιμες συμβουλές και επισημάνσεις του.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	11
1.1.1 Η διηλεκτρική αντοχή	12
1.1.2. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά	12
1.1.3 Ο συντελεστής απωλειών	13
1.1.4 Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα	15
1.1.5 Ο συντελεστής ετgd	16
1.1.6 Η επιφανειακή αγωγιμότητα	16
1.1.7 Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	17
1.1.8 Η μηχανική αντοχή	19
1.2. ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	19
1.2.1 Αέρια μονωτικά	19
1.2.1.1 Η διάσπαση των αερίων μονωτικών	20
1.2.1.2 Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού του αέρα με στερεά και υγρά μονωτικά	22
1.2.2 Υγρά μονωτικά	23
1.2.3 Στερεά μονωτικά	23
1.2.3.1 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών	24
1.2.3.2 Μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών	24
1.2.3.2.1 Η θερμική διάτρηση	25
1.2.3.2.2 Η ηλεκτρική διάτρηση	27
1.2.3.2.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση)	29
1.2.3.2.4 Η θερμοχημική διάτρηση	32
1.2.3.2.5 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση	33
1.2.3.2.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων	33
1.2.3.3 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών	38
1.2.3.4 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση	40
1.2.3.5 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση	40
1.2.3.6 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών	43
1.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ	44
2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	47
2.1 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	47
2.2 ΔΙΑΤΑΞΗ	47
2.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΩΝ	48
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	51
3.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ	51
3.1.1 Δοκίμιο πάχους d=1mm με κρουστική τάση +250/2500μs	51
3.1.2 Δοκίμιο πάχους d=1mm με κρουστική τάση -250/2500μs	63

3.1.3 Δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ με κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$	75
3.1.4 Δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ με κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$	87
3.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	99
3.2.1 Δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ με κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$	99
3.2.2 Δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ με κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$	99
3.2.3 Δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ με κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$	100
3.2.4 Δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ με κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$	100
4. ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	101
5. ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	103
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	105

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Σκοπός των μονώσεων σε μια ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο ηλεκτρικός διαχωρισμός μεταξύ ρευματοφόρων μερών, καθώς και ρευματοφόρων μερών προς γη.

Ως **μονωτικά υλικά** ή **μονωτές** χαρακτηρίζονται τα υλικά που πρακτικά δεν έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σχετικά ασθενή πεδία συνεχούς ρεύματος. Στη χημική τους σύνθεση οι μονωτές είναι σώματα ιοντικής, ομοιοπολικής ή μοριακής κατασκευής. Καθώς μάλιστα τα ιόντα των σωμάτων αυτών είναι δυσκίνητα, ή η ισχύς των ομοιοπολικών δεσμών είναι μεγάλη, ή τα μόριά τους είναι σταθερά, δηλαδή δεν διασπώνται εύκολα σε φορτισμένες ρίζες, δεν υπάρχουν στα παραπάνω σώματα ευκίνητοι φορείς σε αξιόλογη ποσότητα, και έτσι δεν έχουν την δυνατότητα της εκδήλωσης μιας ουσιαστικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Πάντως είναι πρακτικά αναπόφευκτη η ύπαρξη, σε κάθε σώμα, ενός κάποιου πλήθους προσμίξεων, ακαθαρσιών, διεγέρσεων και διασπάσεων που δημιουργούν έναν μικρό αριθμό φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος.

Αποτέλεσμα της έλλειψης αξιόλογης ηλεκτρικής αγωγιμότητας, τα μονωτικά σώματα είναι κατάλληλα για να εμποδίζουν τη δημιουργία ηλεκτρικών ρευμάτων δια μέσου της μάζας τους, και για να διατηρούν τις διαφορές δυναμικού στα διάφορα τμήματα των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων και εγκαταστάσεων.

Σκοπός των μονώσεων σε μια ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο ηλεκτρικός διαχωρισμός μεταξύ ρευματοφόρων μερών καθώς και των ρευματοφόρων μερών προς τη γη. Έτσι βρίσκουν πολύ σημαντικές χρήσεις, κυρίως ως ηλεκτρικές μονώσεις σε όλες τις ηλεκτρικές εφαρμογές, και ως διηλεκτρικά υλικά στην κατασκευή των πυκνωτών

Με τον όρο **διάσπαση** εννοούμε την αγωγή σύνδεση δύο, μεταξύ τους μονωμένων, ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μονωτικών (π.χ: αέρας-πορσελάνη, βακελίτης-μονωτικό λάδι) τότε ονομάζεται **επιφανειακή διάσπαση** (ή **υπερπήδηση**). Η διάσπαση διά του όγκου ενός μονωτικού υλικού καλείται **διάτρηση**. Η διάσπαση σε περιορισμένο μήκος του μονωτικού ονομάζεται **μερική εκκένωση**. Οι μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε θέσεις ανομοιογένειας στον όγκο ή στην επιφάνεια του υλικού (κυρίως φυσαλίδες αερίων στον όγκο του υλικού και διάφορες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνεια του: σκόνη, υγρασία, κ.λ.π.). οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού ονομάζονται **εσωτερικές μερικές εκκενώσεις** και εκείνες στην επιφάνεια του **εξωτερικές μερικές εκκενώσεις**. Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν την ξεχωριστή ονομασία **Korona** (**στεματοειδείς μερικές εκκενώσεις**).

Η ανάγκη για την αξιόπιστη, διαχρονική συμπεριφορά των μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής αυτών. Αυτά είναι η διηλεκτρική αντοχή, η σχετική διηλεκτρική σταθερά, ο συντελεστής απωλειών και η ειδική αγωγιμότητα. Σε πολλές εφαρμογές ενδιαφέρον παρουσιάζει η αντοχή των μονωτικών υλικών σε μηχανικές καταπονήσεις καθώς και η επιφανειακή ειδική αγωγιμότητα. Παρακάτω αναλύονται τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών υλικών.

1.1.1 Η διηλεκτρική αντοχή

Ως **διηλεκτρική αντοχή** (E_d) ενός μονωτικού υλικού ορίζεται το πηλίκο της ελάχιστης ενεργού τιμής της τάσης για τη διάσπαση (U_{dmin}) προς την απόσταση των ηλεκτροδίων (d) σε ομογενές πεδίο:

$$E_d = U_{dmin} / d \quad (\text{kV/cm}) \quad (1.1-1)$$

Μονωτικό υλικό	d (mm)	E_d (kV/cm)
Αέρας		21
Λάδι μετασχηματιστών		60 ... 200
Πορσελάνη	0,5 ... 3	340 ... 380
Στεατίτης	0,5 ... 3	200 ... 300
Γυαλί	< 1	160 ... 450
Χαρτόνι	0,5 ... 1,5	300 ... 450
Χαρτί στο λάδι	< 2	200 ... 400
Σκληρό ελαστικό	< 3	300 ... 500
Ξύλο	< 3	30 ... 50
Glimmer	0,01 ... 0,1	500 ... 1000

Πίνακας 1.1-1: Διηλεκτρική αντοχή (E_d) για καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας ορισμένων μονωτικών υλικών σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50 Hz

Η διηλεκτρική αντοχή μετριέται με επιβολή ημιτονικής εναλλασσόμενης τάσης σε δοκίμιο πάχους 1 mm, και είναι η ενεργός τιμή της τάσης στην οποία εκδηλώνεται ακαριαία η διάσπαση του υλικού. Στις εφαρμογές όμως ενδιαφέρει η μακροχρόνια και όχι η στιγμιαία συμπεριφορά των υλικών. Επειδή λοιπόν όταν η τάση επιβάλλεται για μεγάλο χρονικό διάστημα προκαλείται εξασθένηση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού, λόγω κυρίως των μερικών εκκενώσεων, στους υπολογισμούς των μονωτικών υλικών θεωρείται συνήθως ότι η διηλεκτρική αντοχή τους είναι πρακτικά περίπου 10% της τιμής που μετριέται στις δοκιμές.

1.1.2 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά

Η **σχετική διηλεκτρική σταθερά** ϵ_r , ή απλούστερα διηλεκτρική σταθερά (επιτρεπτότητα ή διαπερατότητα) ενός υλικού είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και εκφράζει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μιας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό. Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών υλικών, που συνθέτουν μία μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών, μονώσεις καλωδίων) θα πρέπει να επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειές τους, ώστε να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που ο συνδυασμός του μονωτικού λαδιού και του χαρτιού βρίσκει πολλές πρακτικές εφαρμογές. Τα δύο μονωτικά υλικά έχουν την ίδια περίπου σχετική διηλεκτρική σταθερά με αποτέλεσμα να μην συμβαίνει διάθλαση των πεδιακών γραμμών στη διαχωριστική επιφάνειά τους. Επιπλέον το λάδι εμποτίζει το χαρτί, ώστε να αποκλείεται η ύπαρξη του αέρα ο οποίος μόνο

προβλήματα θα μπορούσε να δημιουργήσει λόγω της μικρής του διηλεκτρικής αντοχής, σύμφωνα με τον Πίνακα 1.1-2.

Υλικό	ϵ_r	Υλικό	ϵ_r
Αέρας (Κανονικ. συνθήκες)	1,000594	Πάγος	2 – 3
Αέρας (υγρός)	1,5	Pertinax	4,8 – 5,4
Απεσταγμένο νερό	8	PVC	4 – 6
Βακελίτης	3,5 – 8,2	Plexiglas	2,6 – 3,5
Condensa	4 – 8	Πορσελάνη	5,5 – 6
Glimmer	4 – 8	Presspann	2,5 – 3,4
Γυαλί	5 – 16	Ρητίνη	2,2
Θερμοπλαστικά συνθετικά	2 – 5	SF ₆	1,002049
Μονωτικό λάδι	2 – 2,5	Στεατίτης	6,4
Λάστιχο	2,8 – 6,5	Teflon	2,1
Mikanit	4 – 6	Χαλαζίας	3 – 7
Ξύλο	2,5 – 6,5	Χαρτί	1,8 – 2,6

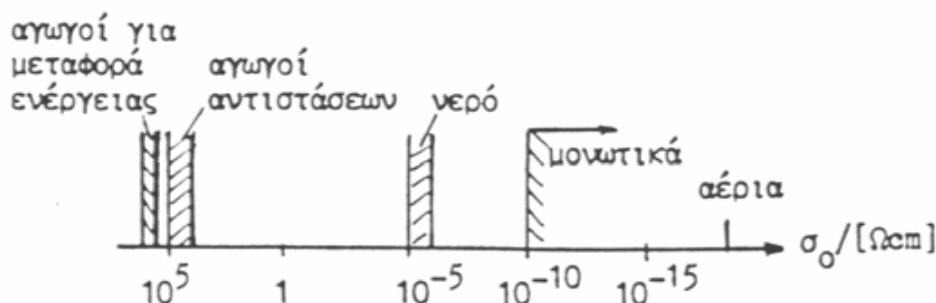
Πίνακας 1.1-2: Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20 °C

1.1.3 Ο συντελεστής απωλειών (tgδ)

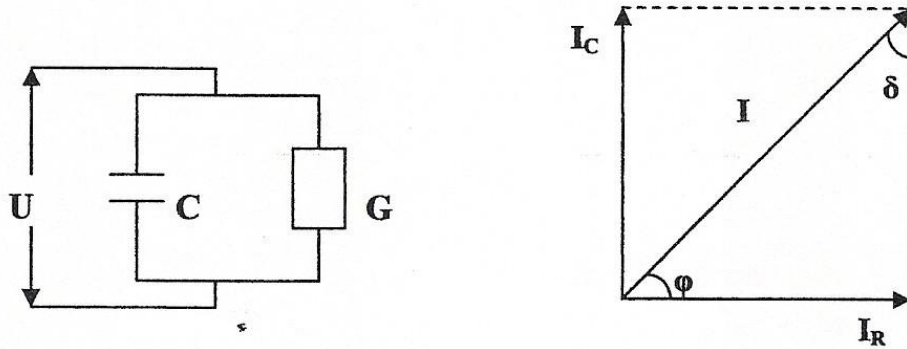
Σε μία μόνωση, που παρεμβάλλεται μεταξύ ηλεκτροδίων με σκοπό τη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας, οι οποίες υπό εναλλασσόμενη τάση οφείλονται:

- στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής των διπόλων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης,
- στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά (σχήμα 1.1-1).

Έτσι, ο μονωτής έχει, εκτός από το χωρητικό ρεύμα I_C και ένα ρεύμα διαρροής I_R . Στην πράξη το ρεύμα διαρροής αυξάνει, γιατί η αγωγιμότητα του μονωτή γίνεται μεγαλύτερη, όπως συμβαίνει π.χ. κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων, και τη θερμική καταπόνηση του μονωτή από τις απώλειες των αγωγών.



Σχήμα 1.1-1: Τάξη μεγέθους της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διαφόρων κατηγοριών υλικών.



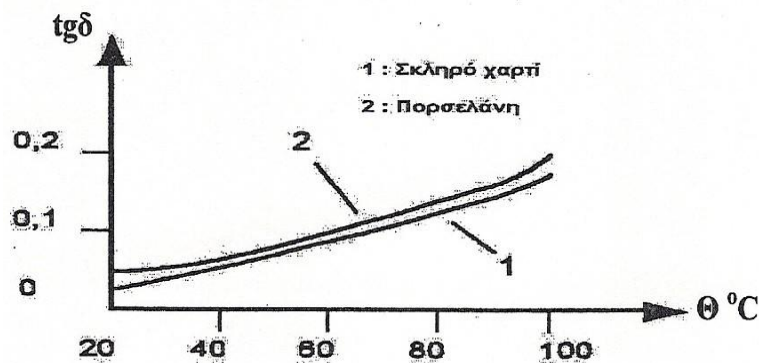
Σχήμα 1.1-2: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας G

Ο συντελεστής απωλειών:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C} \quad (1.1-2)$$

είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού, ή μιας μονωτικής διάταξης γενικότερα, γιατί παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αγωγιμότητά του.

Ο συντελεστής απωλειών όπως εξαρτάται και από την θερμοκρασία περιβάλλοντος που είναι το μονωτικό υλικό όπως βλέπουμε και από το Σχήμα 1.1-2



Σχήμα 1.1-3: Αύξηση του συντελεστή απωλειών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Οι απώλειες Joule (P_w) στην αγωγιμότητα είναι:

$$P_w = I_R U = G U^2 = U^2 \nu C \operatorname{tg} \delta = P_B \operatorname{tg} \delta \quad (1.1-3)$$

όπου P_w η άεργος ισχύς στη χωρητικότητα C.

Αν υποθέσουμε, ότι ο παραπάνω πυκνωτής αποτελείται από δύο επίπεδες πλάκες διατομής A σε απόσταση d και ότι ο μεταξύ τους χώρος καταλαμβάνεται από ένα μονωτικό υλικό χωρητικότητας C τότε θα είναι :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1.1-4)$$

Για την αγωγιμότητα G του παραπάνω πυκνωτή ισχύει ότι:

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (1.1-5)$$

όπου σ η ειδική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού. Για τις απώλειες του πυκνωτή, σύμφωνα με τις σχέσεις 1.1-3 και 1.1-4 θα είναι:

$$P_w = U^2 \omega \varepsilon \frac{A}{d} \operatorname{tg} \delta \quad (1.1-6)$$

και πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με την απόσταση d:

$$P_w = (U / d)^2 \omega \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot (Ad) = (U / d)^2 \omega \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot V \quad (1.1-7)$$

όπου V ο όγκος του διηλεκτρικού.

Αν θεωρήσουμε ότι ο στοιχειώδης όγκος dV μίας τυχαίας διάταξης ηλεκτροδίων είναι ένας μικρός πυκνωτής επιπέδων πλακών, τότε οι απώλειες Joule της είναι:

$$P_w = \omega \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \int (U / d)^2 dV = \omega \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \int E^2 dV \quad (1.1-8)$$

1.1.4 Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μία πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σχήμα 1.1-1), που εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή της πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία, κ.λ.π.). Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι επομένως ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των διηλεκτρικών, γιατί εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς.

Η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα στερεά μονωτικά, σε τιμές πεδίου, που η καταπόνηση του διηλεκτρικού μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μόνο θερμική, δίνεται από την σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-w/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.1-9)$$

όπου σ_0 : η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας θ ως προς το περιβάλλον

σ : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

W: η ενέργεια ενεργοποίησης (ενέργεια για τη μεταφορά ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας)

k: η σταθερά Boltzmann ($1,37 \cdot 10^{-23}$ Ws/°K)

T: η απόλυτη θερμοκρασία

β : ένας συντελεστής του υλικού (π.χ. για το presspan $\beta \approx 0,02$)

Από έρευνες σε οργανικά στερεά μονωτικά συμπεραίνεται, ότι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνει απότομα με την ενέργεια των μερικών εκκενώσεων. Έχει διαπιστωθεί ότι η τιμή της πεδιακής έντασης είναι καθοριστική για την τιμή σ . Μία τιμή πεδιακής έντασης χαρακτηρίζεται ως χαμηλή όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις, ή έστω όταν οι μερικές εκκενώσεις συμμετέχουν μόνο στην αύξηση των απωλειών Joule. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω π.χ. του μεγάλου πάχους του διηλεκτρικού, ή της μικρής τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης.

Για μεγαλύτερες τιμές της πεδιακής έντασης από προηγουμένως, η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας οφείλεται κυρίως στις μερικές εκκενώσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι στην περίπτωση αυτή συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, όπως στα ιονισμένα αέρια. Για την

αύξηση της τιμής σ , από τις απώλειες του διηλεκτρικού και τις μερικές εκκενώσεις, έχει διατυπωθεί η σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\exp(\beta\theta)}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.1-10)$$

όπου E η πεδιακή ένταση στο τμήμα του υλικού, που δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (το οποίο χαρακτηρίζεται ως υγιές τμήμα) και δ ένας συντελεστής, που εκφράζει τη συμμετοχή των ανομοιογενειών του υλικού στη διαμόρφωση της τιμής σ . Για το ομοιογενές υλικό είναι $\delta=0$, διαφορετικά ισχύει $\delta>0$.

Η αγωγιμότητα τέλος των μονωτικών υλικών αυξάνει όταν προσβάλλονται με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία X ειδικότερα μπορεί να μετατρέψει ένα μονωτή σε αγωγό. Φαίνεται ότι η ακτινοβολία προκαλεί διαχωρισμό των ηλεκτρονίων από τους μητρικούς τους πυρήνες και ανύψωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο, με αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας των μονωτικών. Το φαινόμενο αυτό, που είναι γνωστό ως επαγόμενη αγωγιμότητα, αποτελεί πρόβλημα στις διαστημικές κατασκευές, λόγω του υψηλού ποσοστού κοσμικής ακτινοβολίας.

1.1.5 Ο συντελεστής $\epsilon_r \tan \delta$

Για ένα ομοιογενές μονωτικό υλικό σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο ισχύει ότι

$$\epsilon_r \tan \delta = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (1.1-11)$$

όπου $\epsilon_0 = 8,857 \text{ pF/m}$ και ω η κυκλική συχνότητα. Στην πράξη χρησιμοποιείται συνήθεστερα το γινόμενο $\epsilon_r \tan \delta$ για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών. Στον πίνακα 1.1-3 δίνονται οι τιμές $\epsilon_r \tan \delta$ για ορισμένα υλικά.

Υλικό	Πάχος μόνωσης (mm)	$\epsilon_r \tan \delta$
Λάδι μετασχηματιστών	-	0,004 ... 0,0046
Πορσελάνη	0,5 ... 3	0,085 ... 0,16
Στεατίτης	0,5 ... 3	0,006 ... 0,02
Γυαλί	< 1	
Χαρτόνι	0,5 ... 1,5	0,03 ... 0,1
Glimmer	0,01 ... 0,1	0,009 ... 0,012

Πίνακας 1.1-3: Τάξη μεγέθους της τιμής $\epsilon_r \tan \delta$ για ορισμένα μονωτικά στους 20 °C.

1.1.6 Η επιφανειακή αγωγιμότητα

Η διηλεκτρική αντοχή των στερεών μονωτικών μειώνεται, όταν η επιφάνειά τους περιλαμβάνει ξένες επικαθίσεις (σκόνη, υγρασία, κ.λ.π.). Το ίδιο συμβαίνει όταν καταπονηθεί θερμικά η επιφάνεια. Έχει διαπιστωθεί, ότι στα φαινόμενα που εκδηλώνονται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και μερικές εκκενώσεις), συμμετέχει η επιφάνειά τους σε πάχος μέχρι 30Å. Γι' αυτό, η επιφανειακή αγωγιμότητα είναι ένα κριτήριο για την προδιάθεση των διαφόρων στερεών

διηλεκτρικών στην εκδήλωση των παραπάνω φαινομένων. Επειδή οι παράγοντες, που προκαλούν αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας ποικίλουν (ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας), η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα δεν είναι κάποια σταθερά των στερεών μονωτικών.

Η επιφανειακή αγωγιμότητα έχει συσχετιστεί με έννοιες, που αφορούν την αντοχή των στερεών μονωτικών από τις καταπονήσεις στην επιφάνειά τους (όπως: αντοχή σε ρεύμα διαρροής, αντοχή σε ηλεκτρικό τόξο, δυνατότητα απομάκρυνσης των επικαθίσεων κατά τη βροχή κ.λ.π.), που ενδιαφέρουν στην πράξη για την κατασκευή π.χ. μονωτήρων και φλογοθαλάμων διακοπών. Με κριτήριο π.χ. τη μείωση του ποσοστού της σκόνης συμπεραίνει κανείς, ότι οι μονωτήρες πορσελάνης χρησιμοποιούνται ως εξωτερικού χώρου, έναντι των μονωτήρων ρητίνης (που χρησιμοποιούνται ως εσωτερικού χώρου), γιατί η επιφάνειά τους διευκολύνει περισσότερο στην απομάκρυνση της σκόνης κατά τη βροχή.

Πληροφορίες για τη μέτρηση της επιφανειακής αγωγιμότητας μπορούν να αναζητηθούν στις προδιαγραφές (π.χ. VDE 0303) και στη βιβλιογραφία περί ηλεκτρικών μετρήσεων.

1.1.7 Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Ένα ακόμα κριτήριο αξιολόγησης των μονωτικών υλικών είναι και ο **συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ)**. Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις περιοχές όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως π.χ. ανομοιογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο μονωτικό λάδι, παρουσία υγρασίας στην περίπτωση αέριου μονωτικού). Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντοτε κατά τη λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ.: απώλειες joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπών, κλπ). Γενικά ισχύει ότι η θερμική ειδική αγωγιμότητα (λ) συμβαδίζει με την ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα.

Υλικό	Πάχος μόνωσης (mm)	λ (Wcm / cm ² grad)
Πορσελάνη	0,5 ... 3	0,008 ... 0,015
Στεατίτης	0,5 ... 3	0,02 ... 0,026
Γυαλί	< 1	0,0075 ... 0,012
Ξύλο	< 3	0,001 ... 0,002
Χαρτόνι	0,3 ... 1,5	0,003
Σκληρό ελαστικό	< 3	0,001
Glimmer	< 0,5	0,003
Χαρτί στο λάδι	< 2	0,014 ... 0,03

Πίνακας 1.1-4: Τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ορισμένων μονωτικών υλικών

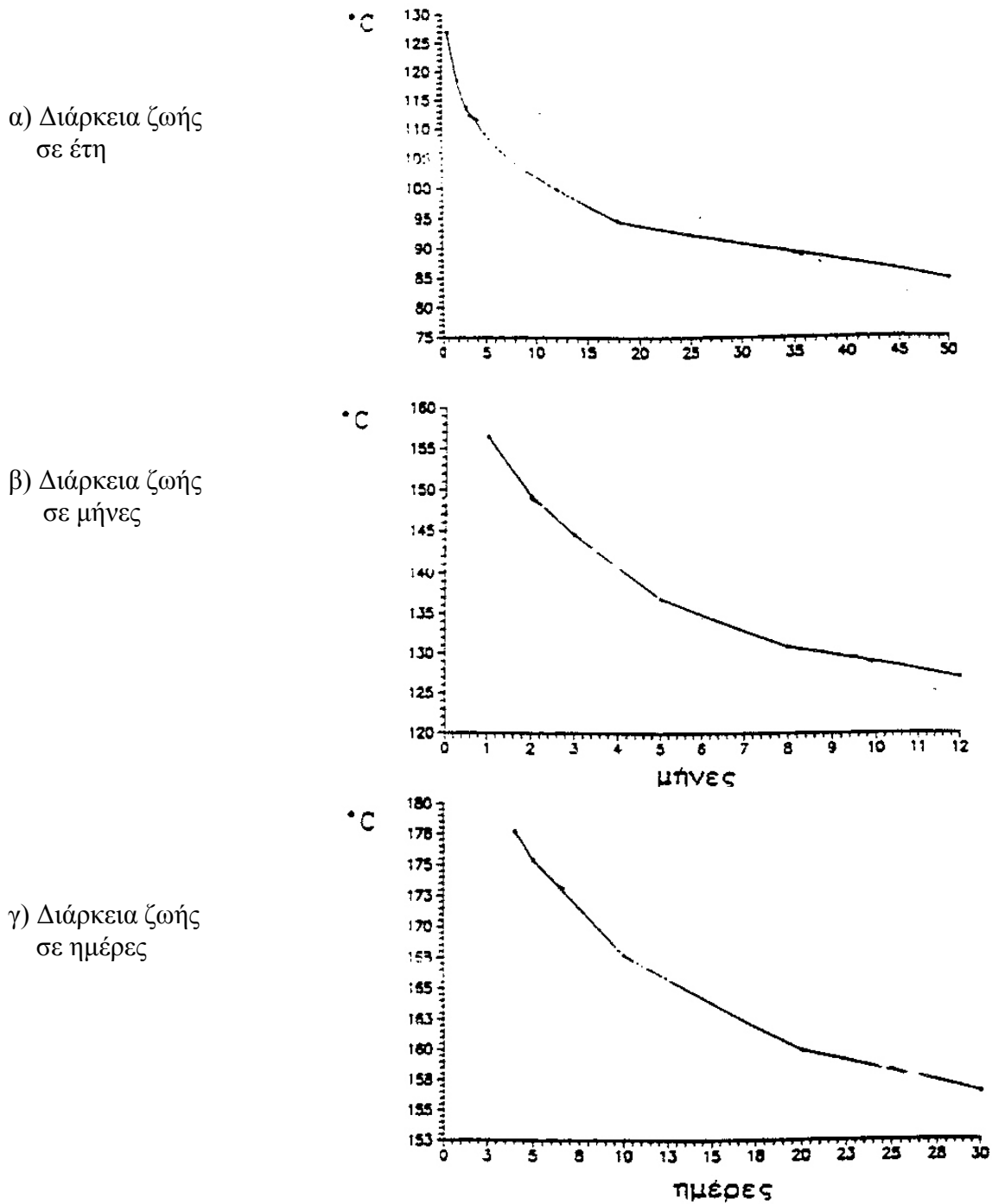
Στις προδιαγραφές IEC και VDE γίνεται μια διαβάθμιση των στερεών μονωτικών ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Για την επίδραση της θερμοκρασίας στη διάρκεια ζωής των στερεών μονωτικών υλικών έχουν γίνει αρκετές έρευνες, που δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για τις πρακτικές εφαρμογές. Οι χαρακτηριστικές π.χ. κατά τα σχήματα 1-5 δίνουν τη διάρκεια ζωής του χαρτιού, ανάλογα με τη θερμοκρασία

θ. Από μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών αυτών (μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή) ισχύουν αντίστοιχα οι σχέσεις:

α) διάρκεια ζωής σε έτη : $t = 1,15242 \times 10^2 \times e^{-0,00736482 \theta}$ (1.1-12)

β) διάρκεια ζωής σε μήνες : $t = 1,54429 \times 10^2 \times e^{-0,01838 \theta}$ (1.1-13)

γ) διάρκεια ζωής σε ημέρες : $t = 1,78848 \times 10^2 \times e^{-0,00483647 \theta}$ (1.1-14)



Σχήμα 1.1-4: Διάρκεια ζωής του χαρτιού, ανάλογα με τη θερμοκρασία.

1.1.8 Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Τελευταία ιδιότητα των μονωτικών υλικών είναι η **μηχανική αντοχή** που έχουν. Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρουν εκτός από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών και οι μηχανικές ιδιότητές τους, όπως π.χ. τα πλαστικά μέρη του μηχανισμού περιστροφής ενός ασφαλειοαποζεύκτη σε ένα πίνακα μέσης τάσης, η αντοχή σε εφελκυσμό ενός μονωτικού, η δύναμη τάνυσης σε μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς. Στις περιπτώσεις αυτές θεωρείται το στερεό μονωτικό ως ένα "μηχανολογικό εξάρτημα", οπότε ισχύουν για τον υπολογισμό του οι κανόνες της μηχανικής αντοχής των υλικών.

Συχνά ενδιαφέρει η μηχανική αντοχή σε πλήρεις κατασκευές, που περιλαμβάνουν στερεά μονωτικά, όταν αυτή ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από την εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης, όπως συμβαίνει κατά το βραχυκύκλωμα (π.χ. πίνακες μέσης τάσης, μετασηματιστές μεταφοράς και διανομής, μετασηματιστές μέτρησης στο δίκτυο υψηλών τάσεων, διακόπτες υψηλών τάσεων). Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να γίνουν αιτία καταστροφής της κατασκευής, όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή κατά το βραχυκύκλωμα. Η μόνωση π.χ. ενός διακόπτη υψηλής τάσης δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης, προς δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου, όταν η επιδίωξη αυτή δεν συνδυάζεται με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, που θα διασφαλίζει την ικανότητα μόνωσης μέχρι να διακοπεί το βραχυκύκλωμα από το μέσο προστασίας του δικτύου.

1.2 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά χωρίζονται, με βάση την φυσική τους κατάσταση σε τρεις κατηγορίες: τα αέρια, τα υγρά και τα στερεά μονωτικά. Παρακάτω ακολουθεί περιγραφή των αερίων και των υγρών μονωτικών καθώς επίσης και εκτενής ανάλυση των στερεών, όπως το συγκεκριμένο δοκίμιο (Pertinax) της διπλωματικής αυτής εργασίας.

1.2.1 Αέρια μονωτικά

Τα αέρια μονωτικά έχουν την ιδιαιτερότητα ότι μετά το τέλος της διάσπασής τους αποκτούν και πάλι την μονωτική τους ικανότητα. Το γεγονός αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των στερεών μονωτικών, των οποίων η διάσπαση συνοδεύεται από παραμορφώσεις, ανάλογα με την καταπόνησή τους, όπως κάψιμο, διάτρηση, κ.τ.λ.

Από τα εκατομμύρια χιλιόμετρα των εναέριων γραμμών γίνεται φανερό ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι το περισσότερο χρησιμοποιούμενο μονωτικό της κατηγορίας αυτής. Αποτελεί επίσης τη μόνωση ενός πολύ μεγάλου αριθμού ηλεκτροτεχνικών κατασκευών, όπως: διακόπτες μέσης τάσης (αποζεύκτες, γειωτές, διακόπτες φορτίου και ασφαλειοαποζεύκτες), πίνακες μέσης τάσης, αυτόματοι διακόπτες του δικτύου μεταφοράς της ενέργειας κ.λ.π. Όμως, συγκριτικά με άλλα μονωτικά υλικά, έχει χαμηλή διηλεκτρική σταθερά, πολύ κοντά στη μονάδα, και κατά συνέπεια απαιτούνται μεγάλα διάκενα αέρος για να μην συμβούν φαινόμενα ιονισμού. Ωστόσο, τα τελευταία τριάντα χρόνια έχει γίνει αρκετή έρευνα με σκοπό την χρησιμοποίηση άλλων μονωτικών με καλύτερα χαρακτηριστικά από εκείνα του ατμοσφαιρικού αέρα (π.χ SF6).

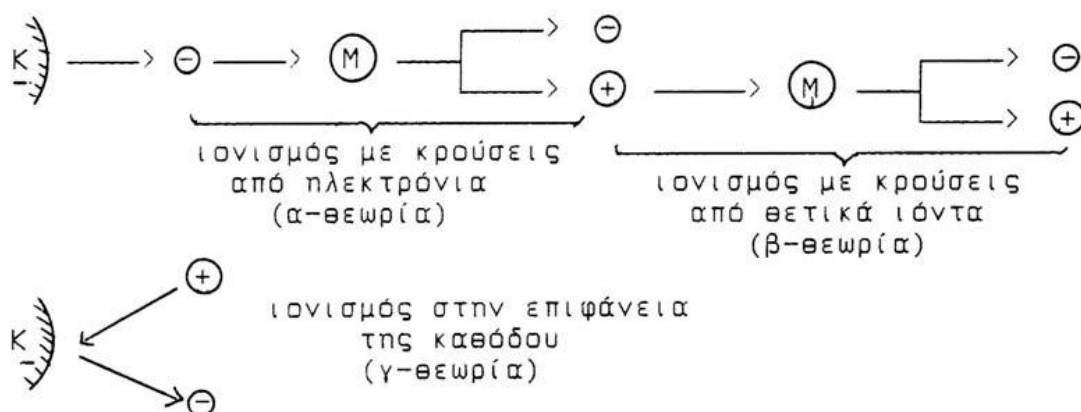
Η διηλεκτρική αντοχή ενός αερίου είναι συνάρτηση της πυκνότητάς του. Το γεγονός αυτό βρίσκει εφαρμογή σε συστήματα διακοπών ισχύος, τα οποία χρησιμοποιούν αέριο υψηλής πυκνότητας προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση των ελεύθερων αποστάσεων μόνωσης, καθώς επίσης η σβέση του τόξου. Ένα τέτοιο σπουδαίο αέριο μονωτικό είναι το εξαφθοριούχο θείο (SF_6), που χρησιμοποιείται κυρίως σε διακόπτες και πίνακες υψηλής τάσης ως μονωτικό και ψυκτικό μέσο. Είναι άχρωμο, άοσμο, άφλεκτο, χημικά αδρανές και μη τοξικό. Στην ατμοσφαιρική πίεση, η διηλεκτρική αντοχή του SF_6 είναι περίπου τριπλάσια από την αντίστοιχη του αέρα ή του αζώτου. Τέλος το αέριο αυτό είναι εξαιρετικό υλικό για τη σβέση τόξων, γιατί αφ' ενός διευκολύνει τη διακοπή τους και αφ' ετέρου δεν επιτρέπει την επαναδημιουργία τους.

Άλλα αέρια μονωτικά υλικά είναι το άζωτο, τα ευγενή αέρια, με τάση διάσπασης πολύ μικρότερη της αντίστοιχης του αέρα, καθώς και ο εξαφθοριούχος άνθρακας (C_2F_6). Ο τελευταίος είναι αέριο μη εύφλεκτο, αντιεκρηκτικό και μη τοξικό.

Επιπλέον, επειδή τα αέρια δεν προσφέρουν μηχανική υποστήριξη χρησιμοποιούνται πάντα σε συνδυασμό με κάποια στερεά μονωτικά (μονωτήρες στήριξης). Η διεπιφάνεια μεταξύ αερίου και στερεού μονωτικού θα πρέπει να εξεταστεί με ιδιαίτερη προσοχή κατά την ηλεκτρική σχεδίαση μιας διάταξης, δεδομένου ότι οι αδυναμίες αυτής της περιοχής ενδέχεται να επηρεάσουν τη λειτουργία της διάταξης με πιθανά αποτελέσματα τις μερικές εκκενώσεις, την υπερπήδηση ή και τη διάσπαση των μονωτικών. Όμως, ακόμη και όταν έχουν χρησιμοποιηθεί οι καλύτερες αρχές σχεδίασης, η διάσπαση μπορεί να συμβεί κάτω από αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα η ρύπανση, σε συνδυασμό με την υγρασία.

1.2.1.1 Η διάσπαση των αερίων μονωτικών

Η διάσπαση των αερίων για μικρά διάκενα ερμηνεύεται από τη θεωρία Thowsend και τον νόμο του Paschen. Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τη θεωρία Thowsend δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.2.1.1-1: Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τις περιπτώσεις ιονισμού με κρούσεις κατά τη θεωρία Thowsend.

- K : κάθοδος
- : ηλεκτρόνιο
- + : θετικό ιόν
- M : μόριο

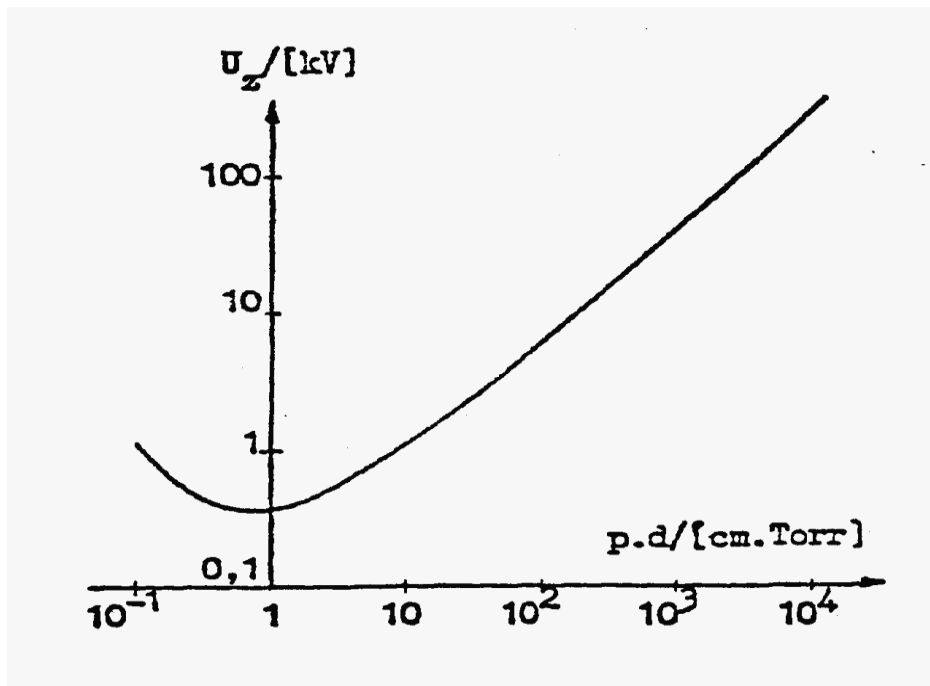
Σύμφωνα με αυτό, η δημιουργία των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται σε τρεις δυνατότητες ιονισμού:

- Ιονισμός με κρούσεις από ηλεκτρόνια.
- Ιονισμός με κρούσεις από θετικά ιόντα.
- Ιονισμός στην επιφάνεια της καθόδου

Κατά το νόμο του Paschen η τάση έναυσης (U_z : τάση αυτοσυντήρησης του ιονισμού) διέπεται από τη σχέση:

$$U_z = f(p \cdot d) \quad (1.2.1.1-1)$$

όπου p είναι η πίεση του αερίου και d η απόσταση των ηλεκτροδίων. Η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης για τον αέρα σε ομογενές πεδίο δίνεται στο σχήμα 1.2.1.1-2.

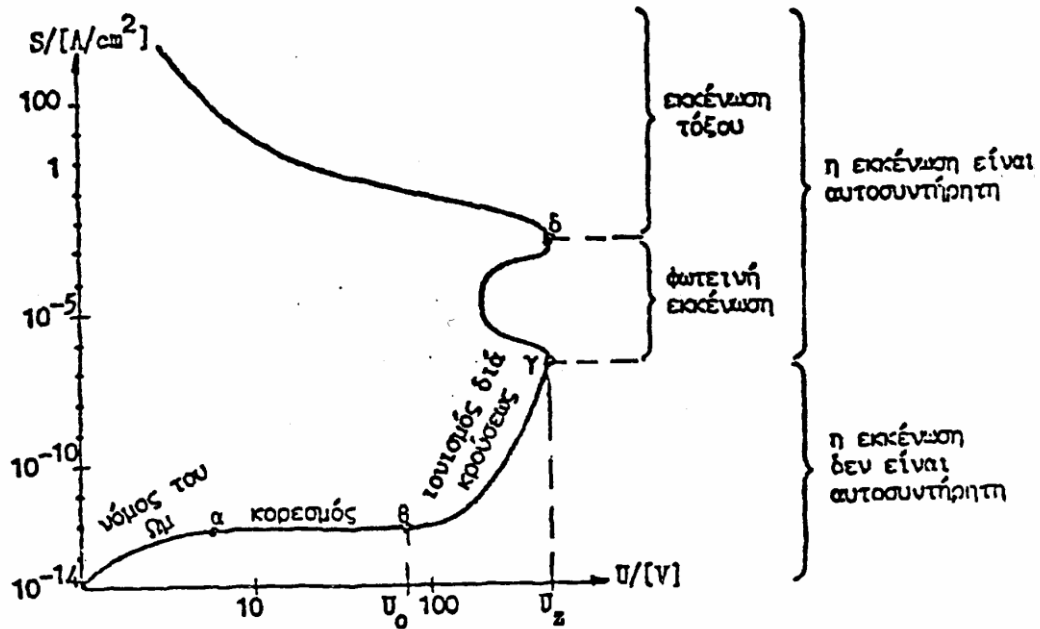


Σχήμα 1.2.1.1-2: $U_z = f(p \cdot d)$ για τον αέρα σε κανονική θερμοκρασία

Από τις μετρήσεις που έχουν γίνει για την ερμηνεία των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και μετά τη διάσπαση των αέριων μονωτικών, έχει ιδιαίτερη σημασία η χαρακτηριστική «ρεύματος-τάσης», κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενες τάσεις υπό κανονικές συνθήκες (20 °C, 760 Torr). Η χαρακτηριστική αυτή δίνεται προσεγγιστικά στο σχήμα 1.2-2 για την πυκνότητα ροής S , ανάλογα με την ενεργό τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης U . Στην χαρακτηριστική αυτή επισημαίνονται οι διάφορες περιοχές ανάλογα με το είδος της εκκένωσης.

Ο μηχανισμός διάσπασης μεγάλων διακένων αποδίδεται στη δημιουργία διαδοχικών οχετών. Στην περίπτωση αυτή δεν ισχύει ο νόμος του Paschen. Η θεωρία της διάσπασης με διαδοχικούς οχετούς βασίζεται στον ιονισμό, που εκδηλώνεται αρχικά στην περιοχή της ανόδου, με αποτέλεσμα να προκαλείται πρακτικά μείωση της απόστασης του διάκενου και να

διευκολύνεται η εκδήλωση διαδοχικών οχρών, ανάλογα με τη μορφή του πεδίου και την απόσταση των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 1.2.1.1-3: Χαρακτηριστική «τάσης – πυκνότητας ροής» των αερίων, υπό κανονικές συνθήκες, κατά G. Oberdoffer.
 U_0 : αρχική τάση
 U_z : τάση έναυσης
 S : πυκνότητας ροής

1.2.1.2 Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού του αέρα με στερεά και υγρά μονωτικά

Τα αέρια μονωτικά έχουν το μειονέκτημα να προκαλούν βλάβες στα στερεά μονωτικά, που συνεργάζονται μαζί τους. Αυτό οφείλεται στις ξένες κυρίως επικαθίσεις, λόγω των οποίων μειώνονται οι αποστάσεις μόνωσης, με αποτέλεσμα την εκδήλωση εκκενώσεων στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών. Προκαλούν επίσης βλάβες στα στερεά και υγρά μονωτικά, όταν εγκλωβίζονται μέσα σ' αυτά, γιατί τότε επενεργούν ως ανεπιθύμητες ανομοιογένειες, οι οποίες μειώνουν (κυρίως λόγω μερικών εκκενώσεων) τη διηλεκτρική αντοχή των στερεών και υγρών μονωτικών.

Παράδειγμα: Ο συνδυασμός "χαρτί-μονωτικό λάδι" έχει δείξει στην πράξη ότι είναι μία πολύ καλή μόνωση γιατί, εκτός του ότι τα δύο παραπάνω μονωτικά έχουν την ίδια περίπου τιμή ϵ , εμποτίζει το λάδι το χαρτί και δεν επιτρέπει έτσι την ύπαρξη αέρα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποφυγής της ανεπιθύμητης συνεργασίας των αερίων μονωτικών με τα στερεά και υγρά μονωτικά είναι η πλήρωση του δοχείου των μετασχηματιστών υψηλής τάσης με μονωτικό λάδι υπό συνθήκες κενού.

1.2.2 Υγρά μονωτικά

Τα υγρά μονωτικά υλικά έχουν αρκετά μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από ότι τα αέρια σε ατμοσφαιρική πίεση. Για παράδειγμα η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι 21kV/cm και η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών είναι 60-200kV/cm. Η σημασία τους στις πρακτικές εφαρμογές είναι μεγάλη γιατί έχουν τα παρακάτω γνωρίσματα:

- Μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα να διευκολύνουν την απαγωγή θερμότητας, η οποία δημιουργείται στους αγωγούς, στις επαφές διακοπών και στους σιδηροπυρήνες των μετασχηματιστών.
- Ο συνδυασμός τους με στερεά μονωτικά δεν επιτρέπει την ύπαρξη του αέρα, ο οποίος προκαλεί βλάβες στις επιφάνειες των στερεών μονωτικών. Αυτό επιτυγχάνεται όταν η πλήρωση του χώρου, που καταλαμβάνει το υγρό μονωτικό, γίνεται υπό συνθήκες κενού σε ορισμένη θερμοκρασία. Τυπικό παράδειγμα της διαδικασίας αυτής είναι η πλήρωση των δοχείων των μετασχηματιστών υψηλών τάσεων με λάδι.
- Ο συνδυασμός, ειδικότερα χαρτί-λάδι έχει μεγάλη εφαρμογή, λόγω της περίπου ίδιας σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, που έχουν τα υλικά αυτά.

Το κυρίως χρησιμοποιούμενο υγρό μονωτικό, σε μετασχηματιστές, καλώδια, διακόπτες και πυκνωτές, είναι το μονωτικό λάδι. Παράγεται σαν κλάσμα της απόσταξης του πετρελαίου και η χημική του σύσταση διαφέρει με την προέλευση του πετρελαίου.

Στα μονωτικά υγρά ανήκουν επίσης υδρογονάνθρακες οι οποίοι έχουν υποστεί χλωρίωση (το χλώριο έχει αντικαταστήσει μεμονωμένα άτομα υδρογόνου), όπως: το Askarel, το ryranol, το Nerdin κ.λ.π. Τα μονωτικά αυτά είναι άκαυστα και έχουν περίπου διπλάσια έως τριπλάσια διηλεκτρική σταθερά ως προς το μονωτικό έλαιο. Δεν χρησιμοποιούνται πλέον, γιατί περιέχουν τοξικά συστατικά, που μετατρέπονται βιολογικά στη φύση σε επικίνδυνες ουσίες.

Μία άλλη κατηγορία συνθετικών μονωτικών υγρών είναι υδρογονάνθρακες που έχουν υποστεί φθορίωση. Η διηλεκτρική σταθερά τους είναι μεγαλύτερη από εκείνη του μονωτικού ελαίου. Δεν προκαλούν φθορές στα στερεά μονωτικά και είναι άκαυστα υλικά. Η εφαρμογή τους είναι πρακτικά ανύπαρκτη λόγω του μεγάλου κόστους τους.

1.2.3 Στερεά μονωτικά

Τα στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά εξαιτίας της σταθερότητας της μοριακής τους δομής δεν έχουν τη δυνατότητα να επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση ύστερα από μία διάσπαση. Η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη και η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σ' αυτά (κάψιμο, τήξη, μηχανικές κακώσεις, κ.λ.π.). Επίσης, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των στερεών μονωτικών, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται κατά τη διάσπαση ή να αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες (λόγω επιφανειακής διάσπασης, υπερπήδησης και μερικών εκκενώσεων) είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού της γήρανσης, της διάσπασής τους.

Τα στερεά μονωτικά χρησιμεύουν στις μονώσεις ηλεκτρικών μηχανών, σε καλώδια, για την κατασκευή μονωτήρων κάθε είδους (όπως μονωτήρες εναέριων γραμμών, διακοπών κ.λ.π.). Επίσης, χρησιμοποιούνται ως διηλεκτρικά υλικά στην κατασκευή των πυκνωτών. Τέλος, πολλές φορές συνδυάζονται με υγρά μονωτικά, όπως ο συνδυασμός χαρτί-λάδι. Ο

συνδυασμός στερεού με υγρό μονωτικό αποσκοπεί κυρίως στον εμποτισμό του στερεού μονωτικού με το υγρό, ώστε να αποφεύγονται οι θύλακες αέρα.

1.2.3.1 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών

Από τις διάφορες έρευνες, που έχουν γίνει, για τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών, μπορεί κανείς να ομαδοποιήσει τις μεθόδους που εφαρμόζονται σε δύο βασικές θεωρίες:

- 1) Τη μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.
- 2) Τη κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.

Σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεωρία, τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται (ή αποσκοπούν) σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση ακουστικών φωτεινών φαινομένων, καθώς και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού.

Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια. Πρόκειται δηλαδή για μία συσχέτιση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση, με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που εκπέμπεται.

1.2.3.2 Μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών

Όπως προαναφέρθηκε, τα στερεά μονωτικά αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες προ της διάσπασης και καταστρέφονται κατά τη διάτρηση. Η ανάγκη για να δοθεί μία εξήγηση στις παραπάνω αλλαγές των υλικών, οδήγησε στην αναζήτηση των διαφόρων παραγόντων, που τις προκαλούν. Έτσι, από μετρήσεις που έχουν γίνει σε διάφορα στερεά μονωτικά (κυρίως μετρήσεις της τάσης διάσπασης σε σχέση με το χρόνο και τη μορφή της τάσης), οι οποίες έχουν συνδυαστεί με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής που προκαλείται στα υλικά αυτά, θεωρείται ότι υπάρχουν οι παρακάτω βασικοί παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων τους:

1. Οι απώλειες Joule.
2. Οι δυνάμεις Coulomb.
3. Οι μερικές εκκενώσεις.
4. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι αντίστοιχες προς τους παραπάνω παράγοντες θεωρητικές μορφές της διάτρησης είναι:

1. Η θερμική διάτρηση.
2. Η ηλεκτρική διάτρηση (που διακρίνεται στη δένδροειδή και στην ηλεκτρομηχανική)
3. Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση).
4. Η θερμοχημική διάτρηση.

Στην πράξη βέβαια οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται και υποβοηθούνται από διάφορες ειδικές συνθήκες, που επικρατούν (μορφή ηλεκτρικού πεδίου, περιβάλλον μέσο, κ.λ.π.), έτσι ώστε η αλλαγή της μοριακής δομής να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμά τους.

1.2.3.2.1 Η θερμική διάτρηση

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

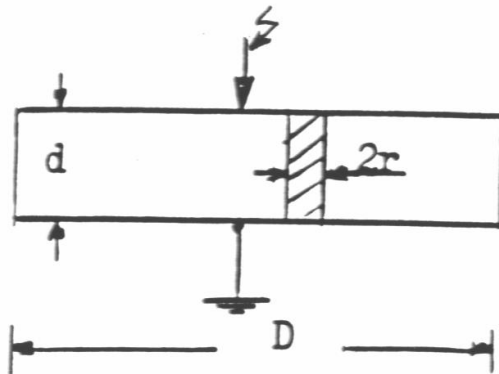
Ο σχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 , οπότε έχουμε σύμφωνα με προηγούμενη σχέση (1.1-9)

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.2.3.2.1-1)$$

Με την προϋπόθεση σταθερής διατομής (A) του σχετού διάτρησης (σχήμα 1.2.3.2.1-1) και ειδική αγωγιμότητα σ_1 , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} \quad (1.2.3.2.1-2)$$

όπου U η ενδεικνυόμενη τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια.



Σχήμα 2.3.2.1-1: Απλοποιημένη παράσταση του σχετού διάτρησης λόγω των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού .
D: διάμετρος δοκιμίου
d: πάχος του μονωτικού
2r: διάμετρος του σχετού διάτρησης.

Αν P_a είναι η τιμή της απαγόμενης θερμικής ισχύος, C_0 η θερμοχωρητικότητα και t ο χρόνος, ισχύει γενικά ότι:

$$P = P_a + C_0 (d\theta / dt) \quad (1.2.3.2.1-3)$$

Η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι (για $d \gg r$):

$$P_a = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (1.2.3.2.1-4)$$

όπου κ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

Στην περίπτωση όμως της θερμικής διάτρησης ισχύει, ότι η θερμική ισχύς που παράγεται είναι ίση με εκείνη που απάγεται, δηλαδή ότι:

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (1.2.3.2.1-5)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δύο συναρτήσεις της θερμοκρασίας ($P=f(\theta)$ και $P_a=f(\theta)$). Για το λόγο αυτό, η οριακή τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση (U_θ) δίνεται όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι, από τη διαφορίση ως προς θ , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης (1.2.3.2.1-5), έχουμε:

$$\frac{\beta U_\theta^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \quad (1.2.3.2.1-6)$$

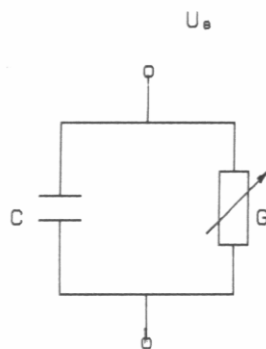
Από τις σχέσεις (1.2.3.2.1-5) και (1.2.3.2.1-6) φαίνεται ότι:

$$\beta \cdot \theta = 1 \quad (1.2.3.2.1-7)$$

$$\text{και } U_\theta = d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.2.3.2.1-8)$$

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_θ μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα 1.2.3.2.1-2, όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μία μεταβλητή αγωγιμότητα G .

Η διάτρηση στην τιμή U_θ συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ_0 στην τιμή σ_1), μία οριστική τιμή G_{\max} .



Σχήμα 1.2.3.2.1-2: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule.

$$G = G_0 \dots G_{\max}$$

G_0 : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή.

G_{\max} : αγωγιμότητα για τη διάτρηση.

C : χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή.

1.2.3.2.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

Όταν η ενεργός τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη για τη θερμική διάτρηση, τότε η πεδιακή ένταση γίνεται μεγαλύτερη και επομένως μπορεί να αυξηθεί η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων μέσα στο μονωτικό υλικό.

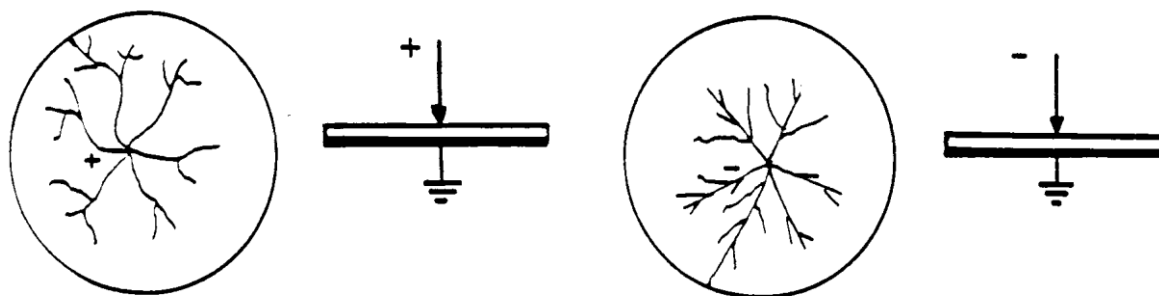
Από μία τιμή της τάσης και μετά η διάτρηση του υλικού αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb. Θεωρείται, ότι η διάτρηση οφείλεται σε:

- 1) Αυτοσυντηρούμενο ιονισμό.
- 2) Μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου).
- 3) Συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

Η μορφή της διάτρησης αυτής ονομάζεται ηλεκτρική και διακρίνεται ανάλογα με την εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση. Έτσι υπάρχει:

- Η δενδροειδής (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) μορφή.
- Η μορφή οχετού κατά τη διεύθυνση του πεδίου.

Η **δενδροειδής διάτρηση** είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, γιατί λόγω της μεγαλύτερης τιμής της έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά τη διάτρηση σχετίζεται με θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μία διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγωγή σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 1.2.3.2.2-1 δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη, ανάλογα με την πολικότητα της τάσης, για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (δηλαδή την περίπτωση ηλεκτροδίων τύπου ακίδας - πλάκας).



Σχήμα 1.2.3.2.2-1: Επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη

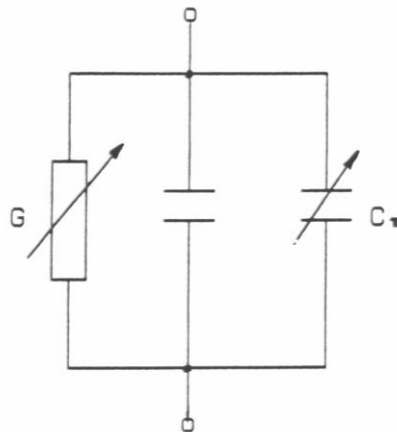
Στην περίπτωση της θετικής ακίδας ο δενδρίτης έχει, λόγω των δυνάμεων Coulomb που εξασκούνται μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων κατά την κίνησή τους προς την ακίδα, αρκετές διακλαδώσεις, κατά κανόνα μη ευθύγραμμες. Όταν όμως η ακίδα είναι αρνητική, οι δυνάμεις απομάκρυνσης μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων είναι, λόγω της μεγάλης ακτίνας, μικρότερες και έτσι οι διαδρομές είναι περίπου οι ακτίνες του κύκλου, των οποίων όμως η λαμπρότητα μειώνεται προς την περιφέρειά του.

Η **διάτρηση υπό μορφή οχετού** (ή **ηλεκτρομηχανική διάτρηση**) οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από ότι κατά τη δενδροειδή διάτρηση. Στα πολυμερή υλικά διαχωρίζονται τα μόρια σε αρνητικούς και θετικούς φορείς. Η διάτρηση συμβαίνει κυρίως από τις δυνάμεις Coulomb, που εξασκούνται μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών

φορέων και ηλεκτροδίων. Η χρονική διάρκεια του φαινομένου είναι μερικά μs . Η εικόνα που παρουσιάζει το υλικό είναι κυρίως το αποτέλεσμα μιας ακαριαίας εξάσκησης δυνάμεων, στην περιοχή όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα μεγάλη (μηχανική τάνυση υπό την επίδραση των δυνάμεων του πεδίου).

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις, έχει διαπιστωθεί, ότι πάνω από μία μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης $U_{\text{κρίσιμη}}$, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, συμβαίνει η διάτρηση με μία κρούση υπό μορφή οχητού, αν και η τιμή της πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης. Η μορφή της διάτρησης αυτής χαρακτηρίζεται επίσης ως ηλεκτρομηχανική. Το φαινόμενο έχει αποδοθεί στην απότομη μεταβολή της πεδιακής έντασης, λόγω της οποίας δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα την ηλεκτρομηχανική διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ του αρνητικού ηλεκτροδίου και των θετικών ηλεκτρικών φορέων, που συγκρατούνται στο πλέγμα των μορίων.

Μία ερμηνεία της ηλεκτρικής διάτρησης, μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος, μπορεί να δοθεί ως ακολούθως:



Σχήμα 1.2.3.2.2-2: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα.

$C_{\pi}=0\dots C_{\text{max}}$: χωρητικότητα, που συμβολίζει την πόλωση του στερεού μονωτικού στη θέση θα συμβεί η διάτρηση.

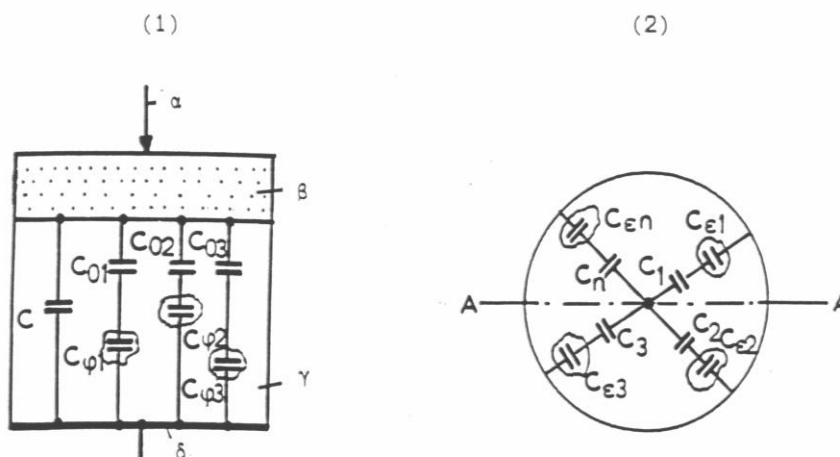
$G=0\dots G_{\text{max}}$: αγωγιμότητα λόγω αύξησης των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στη θέση όπου θα συμβεί η διάτρηση.

Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μία κρίσιμη για το υλικό τιμή σ_2 τότε η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα (σχήμα 1.2.3.2.2-2), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_{π} (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Όταν η αγωγιμότητα G και ο πυκνωτής C_{π} έχουν αποκτήσει μόλις προ της διάτρησης τις τιμές G_{max} και C_{max} (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα σ_2 , λόγω κάποιας ανομοιογένειας), τότε συμβαίνει η διάτρηση.

1.2.3.2.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση)

α) Γενικά περί μερικών εκκενώσεων

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (**εσωτερικές μερικές εκκενώσεις**), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνειά του (**εξωτερικές εκκενώσεις**). Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίνεται στο σχήμα 1.2.3.2.3-1. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές $C_{ε1} \dots C_{εn}$ και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές $C_{φ1} \dots C_{φn}$. Οι πυκνωτές $C_1 \dots C_n$ και $C_{01} \dots C_{0n}$ παριστάνουν αντίστοιχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (κάθε ένας από αυτούς δίνει την ολική χωρητικότητα δύο πυκνωτών, εκ των οποίων ο ένας είναι η χωρητικότητα μεταξύ ακίδας και της θέσης διαταραχής και ο άλλος η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας και της θέσης διαταραχής).



Σχήμα 1.2.3.2.3-1: Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής σε στερεό μονωτικό εντός μονωτικού ελαίου

1) Τομή A-A της διάταξης πειραματισμού :

α: ηλεκτρόδιο ακίδα.

β: επιφανειακό φιλμ του μονωτικού ελαίου και επιφάνεια του στερεού μονωτικού.

γ: στερεό μονωτικό.

δ: ηλεκτρόδιο πλάκα

2) Κάτοψη της διάταξης πειραματισμού :

$C_1 \dots C_n$: πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος της επιφάνειας του στερεού μονωτικού και του επιφανειακού φιλμ ελαίου.

$C_{ε1} \dots C_{εn}$: πυκνωτές επιφανειακών (εξωτερικών) θέσεων διαταραχής

C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

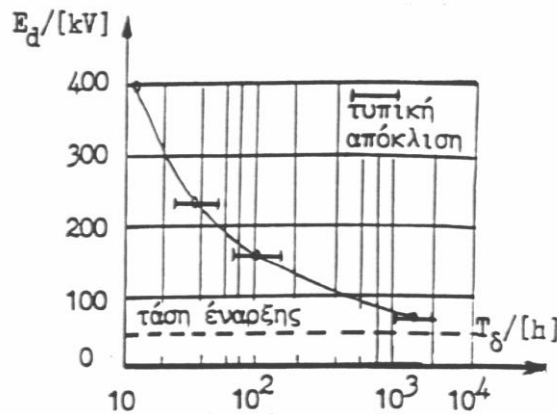
$C_{φ1} \dots C_{φn}$: πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων).

$C_{01} \dots C_{0n}$: πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος του στερεού μονωτικού.

Από τη στιγμή της έναρξης των μερικών εκκενώσεων προκαλείται συνήθως σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του στερεού μονωτικού, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε

περιορισμένο τμήμα του, όπου δηλαδή έτυχε οι θέσεις ανομοιογένειας να είναι περισσότερο αγωγιμες. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού.

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού. Στο σχήμα 1.2.3.2.3-2 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



Σχήμα 1.2.3.2.3-3: Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του (κατά Gemant και Philipoff).

α: σχηματική παράσταση.

β: ισοδύναμο κύκλωμα.

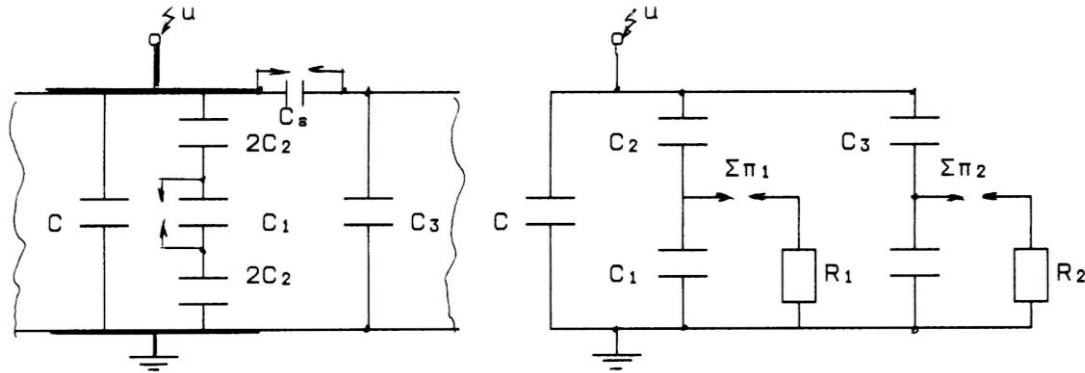
C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

C₁: χωρητικότητα της φυσαλίδας.

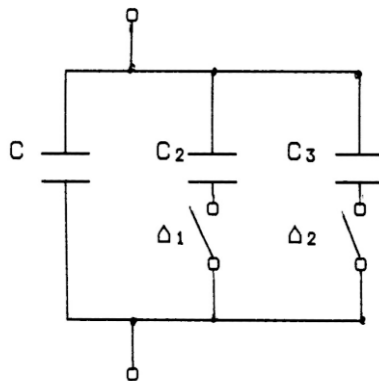
C₂: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού.

R₁: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_{π1}.

Στο επόμενο σχήμα 1.2.3.2.3-4 έχει συμπληρωθεί το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο και για τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C₁) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (C_ε). Με τον τρόπο δηλαδή αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού (C₂ και C₃ αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C. Οι σπινθήρες Σ_{π1} και Σ_{π2} στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R₁, R₂) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C₁, C_ε). Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη. Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς συχνά στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα 1.2.3.2.3-5.



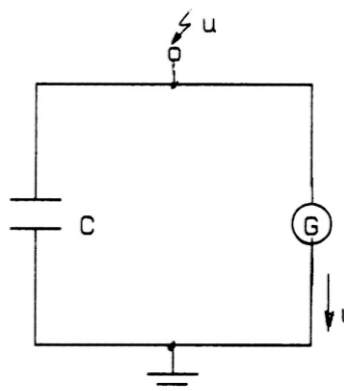
Σχήμα 1.2.3.2.3-4: Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής.
 α: σχηματική παράσταση
 β: ισοδύναμο κύκλωμα
 C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
 C₁: χωρητικότητα της φυσαλίδας
 C_ε: χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής
 C₂: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού
 C₃: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ
 R₁: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ₁
 R₂: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ₂



Σχήμα 1.2.3.2.3-5: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff).
 C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
 C₂: χωρητικότητα του υγιούς στον όγκο του μονωτικού
 C₃: χωρητικότητα του υγιούς στην επιφάνεια του μονωτικού
 Δ₁ και Δ₂: διακόπτες, που όταν κλείνουν συμβολίζουν την διάσπαση αντίστοιχα των εσωτερικών και των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων.

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φυσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κ.λ.π. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει επίσης μία ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 1.2.3.2.3-6). Σύμφωνα με αυτό, οι

θέσεις διαταραχής αποδίδονται ως μία γεννήτρια μερικών εκκενώσεων G . Έτσι, όταν διεγείρεται η γεννήτρια G συμβαίνει αύξηση του δυναμικού στους ακροδέκτες της διάταξης.



Σχήμα 1.2.3.2.3-6: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann.
C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
G: γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

1.2.3.2.4 Η θερμοχημική διάτρηση

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη. Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως η ενέργεια εξόδου των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από το πλέγμα των μορίων είναι μικρότερη.

Η διάτρηση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος του στερεού μονωτικού μέσου, ονομάζεται θερμοχημική. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι, μετά από μία τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης.

Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής. Η τάση αυτή αποτελεί το κριτήριο για το τεχνικοοικονομικό πάχος των στερεών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές (όπως μετασχηματιστές, καλώδια κ.λ.π.). Η τιμή της για τα περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση 50Hz, είναι της τάξης του 1MV.

Πρόσφατες έρευνες σε στερεά μονωτικά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο του στερεού μονωτικού ενισχύει τις μερικές εκκενώσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται, λόγω της θερμότητας του περιβάλλοντος, σε μικρότερες τιμές της τάσης απ' ότι σε κανονική θερμοκρασία (20°C), με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός διακρούσεως σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου απ' ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C).

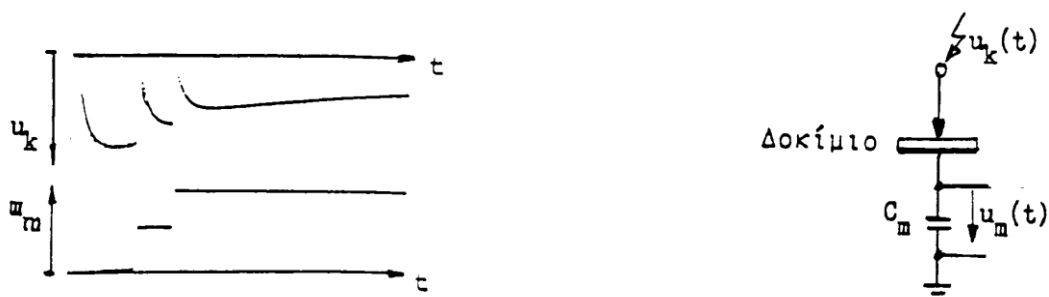
Στην διπλωματική αυτή εργασία δεν λαμβάνεται υπόψη η θερμοχημική διάσπαση, ακριβώς γιατί θεωρείται πως μέσα στο εργαστήριο επικρατεί σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος.

1.2.3.2.5 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση

Η εκδήλωση των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στη διαχωριστική επιφάνεια του συνδυασμού «στερεό μονωτικό-αέριο μονωτικό», ή του συνδυασμού «στερεό μονωτικό- υγρό μονωτικό» θα οδηγήσει σε επιφανειακή διάσπαση, όταν μία ομάδα ελεύθερων ηλεκτρονίων (η οποία, με βάση τις οπτικές παρατηρήσεις, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μία διαδρομή της δένδροειδούς φωτεινής ακτινοβολίας, που εκδηλώνεται) θα προκαλέσει μείωση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων (δηλαδή μείωση της απόστασης μόνωσης), ώστε τελικά να συμβεί ένας οχετός διάσπασης στην επιφάνεια του στερεού (επιφανειακή διάσπαση), ή στο περιβάλλον μέσο του (υπερπήδηση).

Από πειράματα είναι γνωστό, ότι στα φαινόμενα παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών συμμετέχει και η ίδια η επιφάνεια σε βάθος μέχρι 30\AA . Έτσι, εκτός από τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις (οι οποίες οφείλονται σε ξένες επικαθίσεις και έχουν συνήθως τον κυρίαρχο ρόλο στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στην επιφάνεια), μπορεί κανείς να υποθέσει ότι εκδηλώνονται και οι άλλοι παράγοντες (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος), όπως κατά τη διάτρηση.

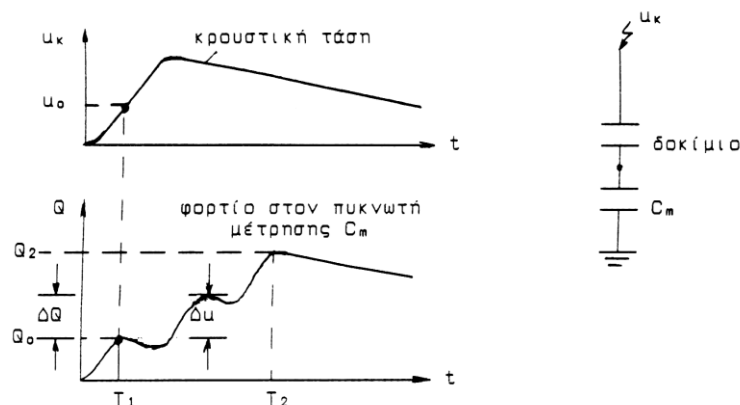
Πειραματικές έρευνες σε στερεά μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών με κρουστικές τάσεις, δείχνουν ότι υπάρχει ομοιότητα των παλμογραφημάτων της διάτρησης ως προς εκείνα της επιφανειακής διάσπασης, με τη διαφορά ότι η επιφανειακή διάσπαση εκδηλώνεται στην ουρά της κρουστικής τάσης.



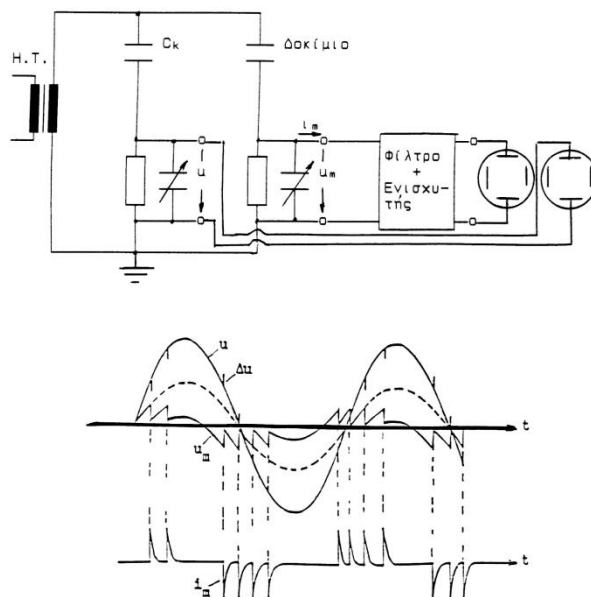
Σχήμα 1.2.3.2.5: Τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση 10/200 μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.
 C_m : 1835 nF
 U_k : 70kV

1.2.3.2.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων

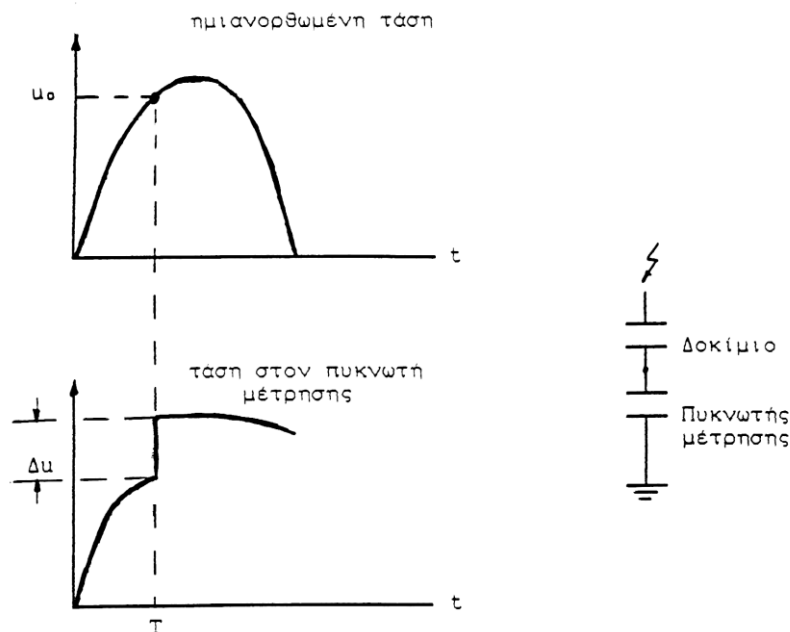
Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων των κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως π.χ. στο σχήμα 1.2.3.2.6-1 για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Με παρόμοιες σκέψεις, μπορεί κανείς να καθορίσει μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση με άλλες μορφές τάσεων, καθώς και με άλλα τετράπολα μέτρησης (συνήθως ωμική αντίσταση, αντί του πυκνωτή, ή συνδυασμός των δύο αυτών στοιχείων μέτρησης, σχήμα 1.2.3.2.6-2). Στο σχήμα π.χ. 1.2.3.2.6-3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



Σχήμα 1.2.3.2.6-1: Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.
 T_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.
 T_2 : Χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.
 Q_0 : Φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων.
 Q_2 : Φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.
 U_k : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.
 U_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).
 ΔU : Άλμα δυναμικού.
 ΔQ : Αύξηση φορτίου.

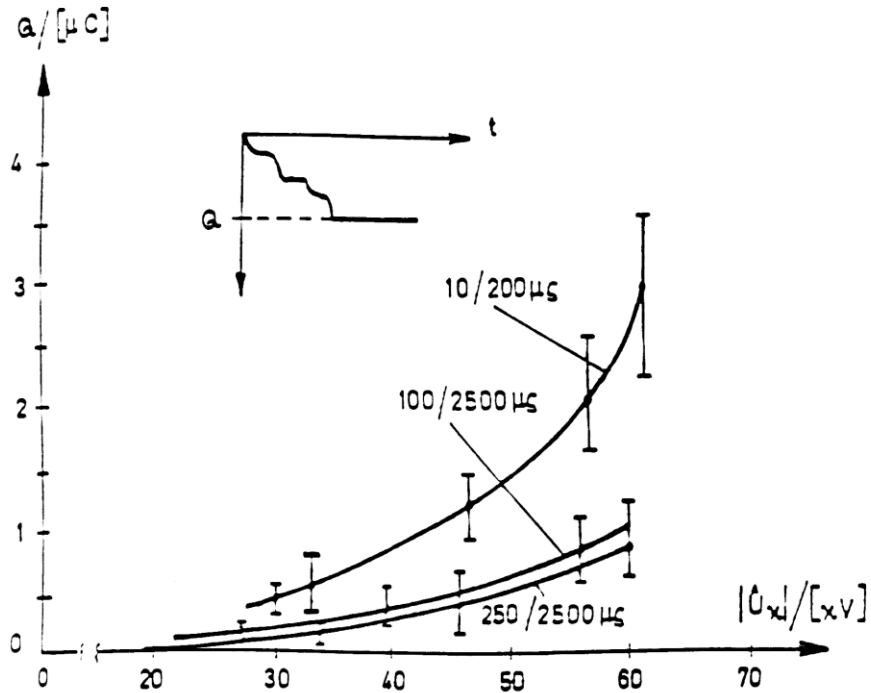


Σχήμα 1.2.3.2.6-2: Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω «ωμικού - χωρητικού» τετράπολου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz.
 $H.T.$: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.
 C_k : Πυκνωτής υψηλής τάσης.
 U : Στιγμιαία τιμή της εναλλασσόμενης τάσης (η οποία μετράται σε ένα ωμικό - χωρητικό τετράπολο).
 U_m : Στιγμιαία τιμή της τάσης στο ωμικό-χωρητικό τετράπολο.
 I_m : Στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων.
 ΔU : Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων.

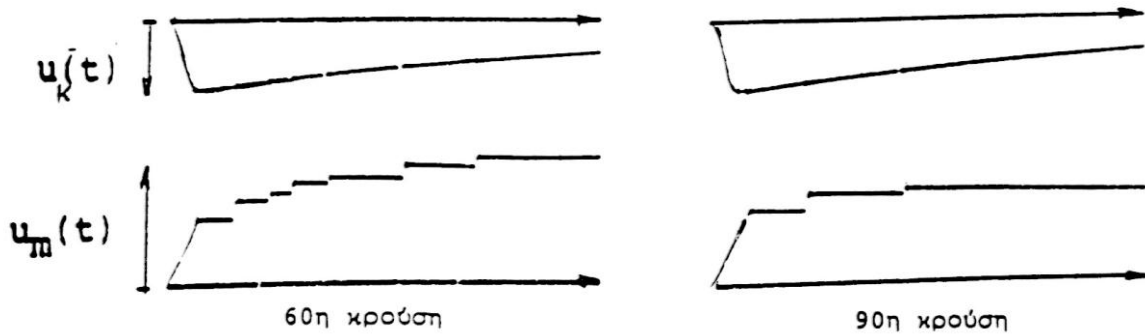


Σχήμα 1.2.3.2.6-3: Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.
 T_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.
 U_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).
 Δu : άλμα δυναμικού.

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως: η χαρακτηριστική $Q=f(\hat{U}_k)$, η χαρακτηριστική $u_0=f(\hat{U}_k)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της τάσης, κ.λ.π. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q=f(\hat{U}_k)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 1.2.3.2.6-4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs ή 10/200μs, όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Στο σχήμα 1.2.3.2.6-5 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90^η κρούση, ως προς την 60^η. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών, εύκολα διαπιστώνεται, ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου Q στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις (θραύσματα) στην επιφάνεια του μονωτικού.



Σχήμα 1.2.3.2.6-4: Χαρακτηριστική $Q_2=f(\dot{U}_κ)$ για τον βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs. Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι. Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα. C_m : 1000nF.



Σχήμα 1.2.3.2.6-5: Άλματα δυναμικού κατά την 60η και την 90η κρούση στο pertinax (πάχους 2mm). Μορφή τάσης: 1,2/50μs ($\kappa U^* = 99,7kV$). Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι. Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα - πλάκα. C_m : 210nF.

Ένα σημαντικό αποτέλεσμα των ερευνών του είδους αυτού είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης στο στερεό μονωτικό. Έχει διαπιστωθεί ότι:

- 1) οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή μηδενισμού της τάσης, ή γενικότερα στην περιοχή της μέγιστης χρονικής μεταβολής της,
- 2) οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή, όπου δεν μηδενίζεται η τάση.

Τα παραπάνω σημαίνουν π.χ. για καταπονήσεις με κρουστικές τάσεις ότι: οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης, ενώ οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις κατά τη διάρκεια της ουράς της κρουστικής τάσης.

Μία πειραματική προσέγγιση του παραπάνω διαχωρισμού, μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, έχει δοθεί από παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού σε στερεά οργανικά μονωτικά, με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών (σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα), που συνδυάστηκαν με ταυτόχρονες οπτικές παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

Στον πίνακα 1.2.3.2.6 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \sim 2,5-4,5$, από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που προαναφέρθηκε. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης 1,2/50 μ s) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

<i>Μορφή τάσης σε μs</i>	<i>Δενδρίτης</i>	<i>Εικόνα επιφανειακών διαταραχών</i>	<i>Άλματα Δυναμικού</i>	<i>Συμπεράσματα για τις μερικές εκκενώσεις</i>
1,2/50	ΝΑΙ	ΝΑΙ	Στην ουρά	Εξωτερικές μερικές εκκενώσεις
10/200	ΝΑΙ (αλλά μικρότερος από εκείνον κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50 μ s	ΝΑΙ (αλλά μικρότερη από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50 μ s	στην ουρά και στο μέτωπο	εξωτερικές και εσωτερικές μερικές εκκενώσεις
250/2500	ΟΧΙ	ΟΧΙ	Στο μέτωπο	Εσωτερικές μερικές εκκενώσεις

Πίνακας 1.2.3.2.6: Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

1.2.3.3 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών οφείλονται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες (απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb, και θερμότητα του περιβάλλοντος). Οι παράγοντες αυτοί δεν περιλαμβάνουν όμως στοιχεία για φαινόμενα που δεν μπορεί κανείς να ακούσει ή να παρατηρήσει, όπως:

- **ο ιονισμός με κρούσεις**, που πιστεύεται ότι εκδηλώνεται στα στερεά μονωτικά,
- **το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας**, που εκπέμπεται κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων στα ηλεκτρόδια.

Τα δύο τελευταία φαινόμενα συσχετίζονται με τις καταπονήσεις και τα φωτεινά φαινόμενα, που παρατηρούνται στα στερεά μονωτικά δίνοντας έτσι περισσότερες πληροφορίες για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής τους.

Οι πληροφορίες αυτές, καθώς και άλλες, δόθηκαν με κβαντομηχανική ερμηνεία των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, η οποία βασίζεται κυρίως:

- στις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις,
- στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης (ως στοιχείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε δηλαδή μία αντίσταση, αντί του πυκνωτή μέτρησης),
- στην ανίχνευση του μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση),
- στην ικανοποιητική πειραματική και θεωρητική ταύτιση του μηχανισμού παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

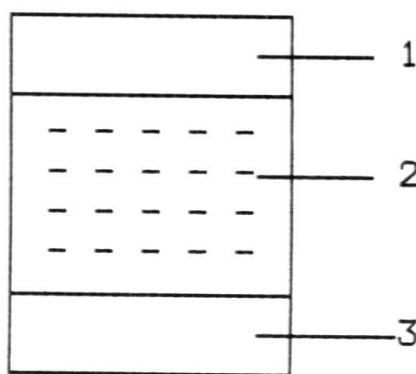
Στη κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η **ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων** (κυρίως ηλεκτρόνια). Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την ενέργεια Fermi των ηλεκτροδίων διευκολύνει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Τα βασικότερα συμπεράσματα από τη θεωρία αυτή είναι:

- 1) Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί ότι:
 - α) το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.
 - β) Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα)
- 2) Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 2,5-4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2MV/cm.
- 3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση (1.1-9).

- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση (1.1-9). Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια.

Κατά τη θεωρία αυτή ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και όχι ο διαχωρισμός των τελευταίων σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης C_m ανά άλμα δυναμικού, με την σχέση $W = 0,5q_e\Delta u$, όπου: q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου και Δu το άλμα δυναμικού). Η σχέση αυτή ισχύει για μηδενική τιμή της ωμικής αντίστασης R από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης.

Μία διαδρομή της δενδροειδούς μορφής εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αντιστοιχεί σε μία κρούση φορτίου, η οποία περιλαμβάνει ελεύθερα ηλεκτρόνια, που είχαν την ίδια ενεργειακή στάθμη (κατά την άφιξή τους στην άνοδο προκάλεσαν εκπομπή του ίδιου μήκους κύματος). Μπορούμε να υποθέσουμε, λόγω του εύρους της παραπάνω ακτινοβολίας, ότι υπάρχουν στο υλικό διάφορες ενεργειακές στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη, που είναι καθοριστικής σημασίας για την εκδήλωση του ιονισμού (σχήμα 1.2.3.3). Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff (σχήμα 1.2.3.2.3-4). Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 1.2.3.3-1: Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

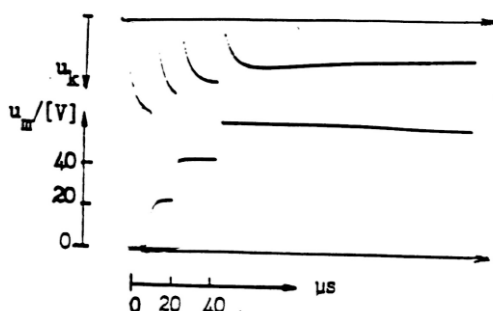
- 1: ζώνη αγωγιμότητας
- 2: στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη
- 3 ζώνη σθένους

Από πρόσφατες έρευνες, που έχουν γίνει κατά τη γήρανση στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, υπό εναλλασσόμενη (ή συνεχή) τάση καταπόνησης, διαπιστώνεται επίσης η εκπομπή του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που έχει προαναφερθεί για την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις.

1.2.3.4 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση

Η διάτρηση έχει διερευνηθεί με καταπονήσεις στερεών μονωτικών με σχετική διηλεκτρική σταθερά περίπου 2,5~4,5 (διάφορα χαρτιά μετασηματιστών, πεπιεσμένο χαρτί, βακελίτης, pertinax, πανίτης, κ.λ.π.). Οι τάσεις δοκιμής, που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κβαντομηχανική ερμηνεία του μηχανισμού διάτρησης, είναι κυρίως κρουστικής μορφής (1,2/50μs, 10/200μs, 250/2500μs, κ.λ.π.). Πειράματα έχουν γίνει επίσης με εναλλασσόμενες και ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

Ένα τυπικό παλμογράφημα του φαινομένου δίνεται στο σχήμα 1.2.3.4-1. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων (W) υπολογίζεται ότι είναι περίπου 105eV. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε, ότι η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων X.



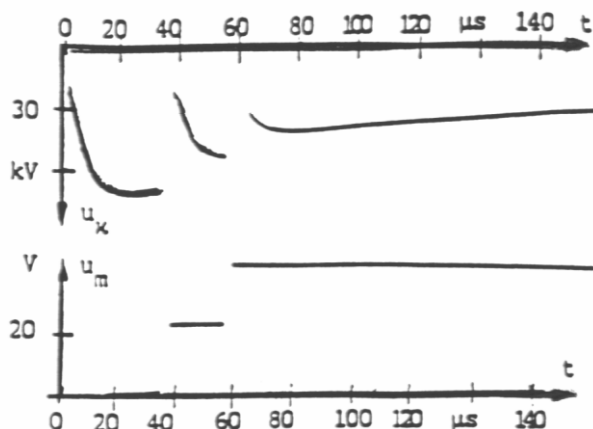
Σχήμα 1.2.3.4-1: Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου.
Κρουστική τάση : 1,2/50μs.
R της ακίδας ~1mm.
 \dot{U}_k 85kV.
E: 1,2 MV/cm.
 C_m : 1835nF.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα στερεά μονωτικά κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων της γήρανσης και της διάτρησης εξαρτάται σημαντικά από τον συντελεστή χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων. Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο, τόσο μειώνεται το εύρος της παραπάνω ακτινοβολίας. Όταν ακίδα έχει π.χ. ακτίνα καμπυλότητας 0,3mm (αντί του ~1mm), τότε (όπως έχει διαπιστωθεί πειραματικά) η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επεκτείνεται μέχρι το ορατό τμήμα της.

1.2.3.5 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση

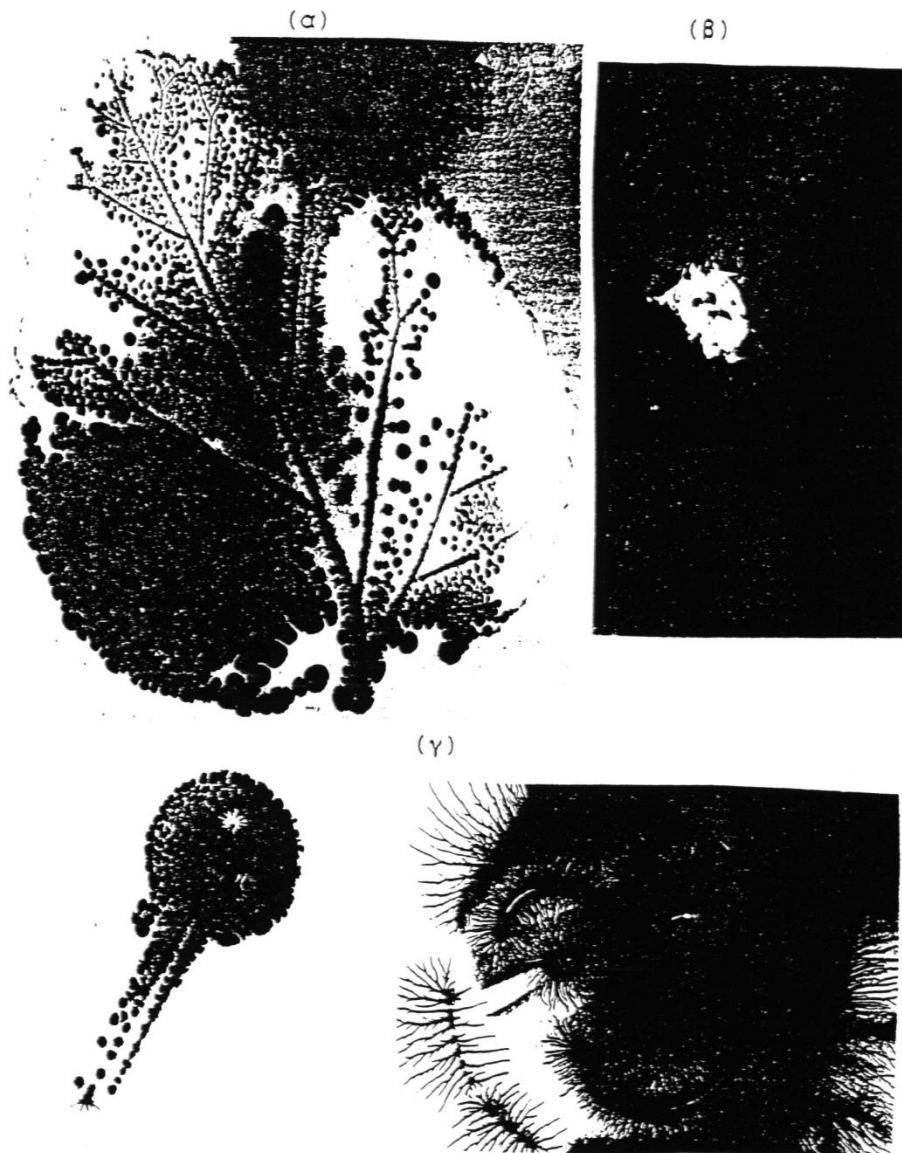
Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι ισχύει ότι και προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης. Παρακάτω εξετάζεται (για λόγους σύγκρισης με τη διάτρηση) ένα τυπικό παράδειγμα επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών πάχους 2mm σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs και διάταξη ηλεκτροδίων

ακίδα - πλάκα. Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος 1.2.3.5-1 υπολογίζεται η ενέργεια W των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η ενέργεια αυτή για το πρώτο και το τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα : 122eV και 96,5eV. Όπως φαίνεται η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτίνων X.



Σχήμα 1.2.3.5-1: Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pertinax (πάχους 2mm και με διάμετρο της επιφάνειάς του 150mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου. Ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης : «ακίδα - πλάκα».

Αν τελικά συμβαίνει εκπομπή ακτίνων X κατά τη διάτρηση και την επιφανειακή διάσπαση, τότε θα πρέπει να προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και να απεικονίζονται αντικείμενα (όπως π.χ. συμβαίνει με τις λυχνίες των ακτινολογικών μηχανημάτων). Το ίδιο θα πρέπει να ισχύει και κατά την εκπομπή υπερύδους ακτινοβολίας (τουλάχιστον σε τιμές πεδίου πλησίον της διάσπασης, όπου αυτή να είναι αρκετά eV). Από πειράματα που έγιναν για τον σκοπό αυτό, φαίνεται ότι προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και απεικονίζονται αντικείμενα, καθώς και βιολογικοί οργανισμοί. Στο σχήμα 1.2.3.5-2 δίνονται ορισμένες από τις φωτογραφίες αυτές.



Σχήμα 1.2.3.5-2: Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερούς στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση $1,2/50\mu\text{s}$.
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα - πλάκα.
 α) Φωτογράφιση φύλλου δένδρου
 β) Φωτογραφία βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι).
 γ) Φωτογραφία μεταλλικών αντικειμένων.

Επίσης, στο σχήμα 1.2.3.5-3 δίνονται φωτογραφίες επιφανειακών δενδριτών, που αφορούν αντίστοιχα τη γήρανση και τη διάσπαση. Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2mm και διαμέτρου 150mm), υπό κρουστικές τάσης $1,2/50\mu\text{s}$ σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα.



Σχήμα 1.2.3.5-3: Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερών στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα - πλάκα).

1.2.3.6 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών

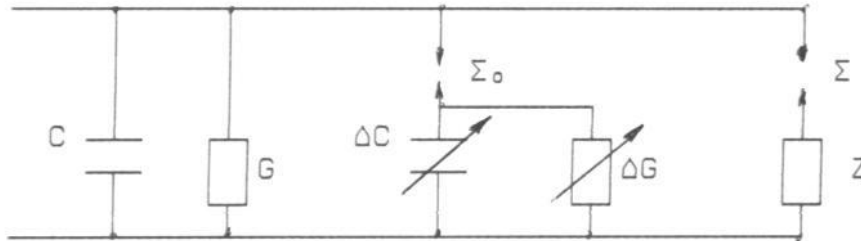
Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 1.2.3.5 φαίνεται, ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα υλικά αυτά κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους. Οι πληροφορίες αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεώρηση των παραπάνω φαινομένων. Πλεονέκτημα όμως της μακροσκοπικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών μονωτικών φαίνεται ότι είναι ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής εφαρμοζόμενης τάσης, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη. Ο διαχωρισμός αυτός των μερικών εκκενώσεων δεν μπορεί να δοθεί από την θεωρία του ιονισμού με κρούσεις, γιατί, ο συντελεστής A στον τύπο

$$Q = Q_0 e^{\frac{A(E^2 - E_0^2)}{E_0^2}} \quad (1.2.3.6-1)$$

αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του και η τιμή της θα πρέπει να εξαρτάται από την διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών χρειάζεται να συνδυαστούν οι δύο θεωρίες, ώστε να δίνουν περισσότερες πληροφορίες για την πράξη. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που έχει προταθεί για το σκοπό αυτό, δίνεται στο σχήμα 1.2.3.6-1. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant – Philipoff (Σχήμα 1.2.3.2.3-4), όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσει κανείς, ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει στην τιμή της πεδιακής E_0 (περίπου 0,2MV/cm), τότε, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.2.3.6-1 ως ακολούθως:

- 1) Για $E < E_0$: Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δεν διασπώνται οι σπινθηριστές Σ_0, Σ).
- 2) Για $E > E_0$: Εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (Διασπάται ο Σ_0) και η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διέπεται από την σχέση: $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$.
- 3) Για $E \gg E_0$: Εμφανίζεται αρνητική διαφορική αντίσταση και εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις. Δεν ισχύει η σχέση $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$, αλλά η σχέση:

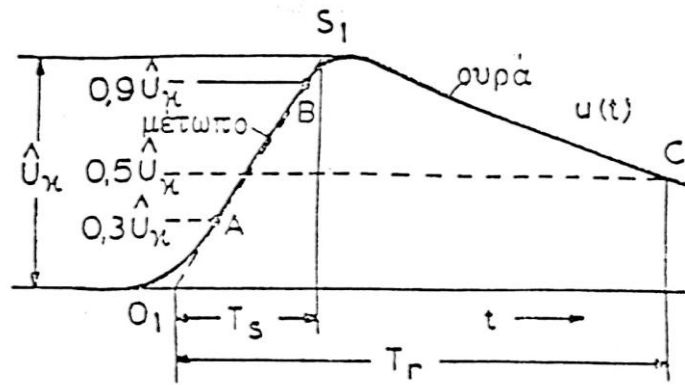
Το φάσμα της ακτινοβολίας, που εκπέμπεται, εξαρτάται από την τιμή E . Για τιμές $W > 20\text{eV}$ συμβαίνει η διάτρηση.



Σχήμα 1.2.3.2.3-1: Ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάτρηση.
 C: ιδανική χωρητικότητα.
 G: ιδανική αγωγιμότητα.
 ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων.
 ΔG : αύξηση της αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων.
 Z: αρνητική διαφορική αντίσταση.
 Σ_0 : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 Σ : σπινθηριστής εκδήλωσης της Z

1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Μεγάλη σημασία για την μελέτη της ηλεκτρικής αντοχής των μονώσεων έχει η καταγραφή των φαινομένων προ και κατά τη διάσπασή τους, ως προς τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης. Το γεγονός αυτό είναι προφανές αν αναλογιστεί κανείς πως χρειάζονται πληροφορίες για την αξιοπιστία των μονώσεων έναντι των διαφόρων μορφών υπερτάσεων, που μπορεί να δεχτεί ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Οι υπερτάσεις διακρίνονται κυρίως σε κεραυνικές υπερτάσεις και υπερτάσεις χειρισμών (δηλαδή υπερτάσεις που δημιουργούνται κατά τους χειρισμούς των διακοπών στο δίκτυο). Ως κρουστικές τάσεις ονομάζονται οι υπερτάσεις που έχουν μία συγκεκριμένη και τυποποιημένη μορφή, η οποία δίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 1.3-1: Χαρακτηρισμός των μεγεθών μίας κρουστικής τάσης.

\hat{U}_k : Μέγιστη τιμή.

T_s : Διάρκεια μετώπου.

T_r : Διάρκεια ημίσεος εύρους της ουράς.

Οι κρουστικές τάσεις συμβολίζονται με τον χρόνο μετώπου (T_s) και τον χρόνο ουράς (T_r). Η κεραυνική τάση είναι μία κρουστική τάση της μορφής 1,2/50 μs , που σημαίνει ότι $T_s=1,2\mu\text{s}$ και $T_r=50\mu\text{s}$. Αντίστοιχα, ως τυποποιημένη κρουστική τάση χειρισμών θεωρείται η 250/2500 μs . Στην παρούσα διπλωματική εργασία η τάση που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των εργαστηριακών μετρήσεων είναι της μορφής 250/2500 μs . Για την παραγωγή υψηλών μέγιστων τιμών \hat{U}_k χρησιμοποιούνται πολυβάθμιες γεννήτριες. Η αρχή λειτουργίας των γεννητριών αυτών στηρίζεται στην παράλληλη φόρτιση των πυκνωτών φόρτισης όλων των βαθμίδων και ακολούθως στην σε σειρά εκφόρτισή τους, μέσω αντίστοιχων σπινθηριστών σφαιρών.

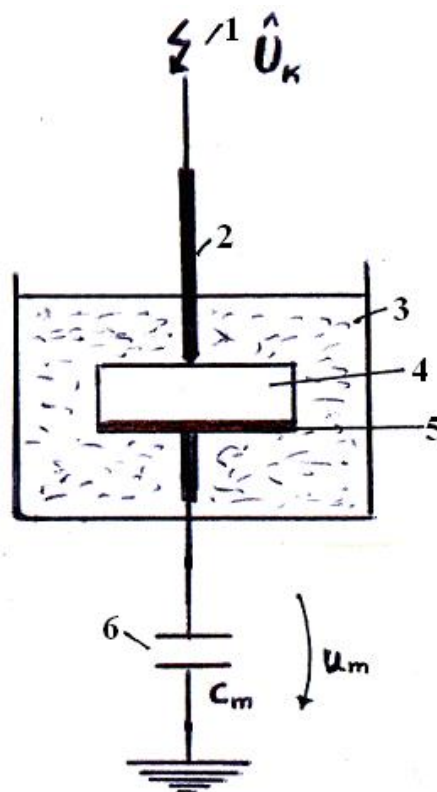


2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2.1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο σκοπός συγγραφής αυτής της εργασίας είναι να πραγματοποιήσουμε μια στατιστική ανάλυση των ηλεκτρικών φαινομένων κατά την έναρξη και περαίωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι Μ/Σ» εντός ανομοιογενούς πεδίου υπό κρουστικές τάσεις $\pm 250/2.500\mu\text{s}$. Οι μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται σε δοκίμια πάχους 1mm και 2mm εντός ελαίου μετασχηματιστών 20°C και διάταξη ακίδα – πλάκα.

2.2. ΔΙΑΤΑΞΗ



Σχήμα 2.2.1 Απεικονίζει το κύκλωμα της διάταξής μας.

- 1: Κρουστική τάση με μέγιστη τιμή \hat{U}_k , που παράγεται από κρουστική γεννήτρια
- 2: Ακίδα
- 3: Μονωτικό λάδι
- 4: Δοκίμιο Pertinax
- 5: Πλάκα
- 6: Πυκνωτής μέτρησης

2.3. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΩΝ

Χρησιμοποιώντας τα μεγέθη \hat{U}_k , C_m , t_1 , t_2 , q_1 , q_2 και με τη βοήθεια των παρακάτω τύπων, συμπληρώθηκαν οι πίνακες 3.1.1-1 έως 3.1.1-4, 3.1.2-1 έως 3.1.2-4, 3.1.3-1 έως 3.1.3-4 και 3.1.4-1 έως 3.1.4-4.

Η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης στο άκρο της ακίδας δίνεται, προσεγγιστικά (κατά Zeller):

$$\hat{E}_k = 2\hat{U}_k / R \ln(4d / R) \quad , \text{σε [MV/cm]} \quad (2.3-1)$$

όπου \hat{U}_k σε [MV] και R , d σε [cm].

Υπό την προϋπόθεση ότι τα παραχθέντα ελεύθερα ηλεκτρόνια (που προήλθαν από διεργασίες ιονισμού κατά την καταπόνηση στερεού μονωτικού με υψηλή τάση) συλλέγονται πλέον ανεμπόδιστα από την άνοδο με ταχύτητα $v \leq 0,2c$ (όπου c η ταχύτητα του φωτός), ισχύει:

$$W_k = q \int^x E dx = \frac{m_0 v^2}{2} = q \Delta \phi \quad (2.3-2)$$

όπου m_0 η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρικού φορτίου, q το ηλεκτρικό φορτίο και $\Delta \phi$ η διαφορά δυναμικού μεταξύ αρχής και τέλους της διαδρομής. Από την παραπάνω σχέση για την ταχύτητα του ελεύθερου ηλεκτρονίου:

$$v = \sqrt{\frac{2q_e \Delta \phi}{m_0}} \quad , \text{σε [m/s]} \quad (2.3-3)$$

όπου $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{Kg}$ και $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{As}$. Έτσι η ταχύτητα του v στο τέλος της διαδρομής χ είναι:

$$v = 600 \sqrt{\Delta \phi} \quad (2.3-4)$$

όπου $\Delta \phi$ σε V. Για ταχύτητα του ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα είναι $v \geq 0,2c$ (όπου $c = 300 \text{ m/}\mu\text{s}$), είναι $\Delta \phi = 10,25 \text{ kV}$

Όταν η ταχύτητα κίνησης του ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα $v \geq 0,2c$ (όπου $c = 300 \text{ m/}\mu\text{s}$) θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη στους υπολογισμούς η σχέση του Einstein:

$$m = m_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (2.3-5)$$

Στην περίπτωση αυτή η κινητική ενέργεια είναι:

$$W_k = q_e \Delta \phi = mc^2 - m_0 c^2 \quad (2.3-6)$$

Και οι ταχύτητες:

$$v_1 = c \sqrt{1 - 1/\left(\frac{q_e U_{\epsilon v}}{m_0 c^2} + 1\right)^2} \quad , \text{σε [m/s]} \quad (2.3-7)$$

$$v_2 = c \sqrt{1 - 1/\left(\frac{q_e U_{\pi}}{m_0 c^2} + 1\right)^2} \quad , \text{σε [m/s]} \quad (2.3-8)$$

Η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων, υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου δίνεται από την σχέση:

$$b_1 = v_1 / E_{\epsilon v} \quad , \text{σε [m}^2\text{/kVs]} \quad (2.3-8)$$

$$b_2 = v_2 / E_{\pi} \quad , \text{σε [m}^2\text{/kVs]} \quad (2.3-9)$$

Όπου E η ένταση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

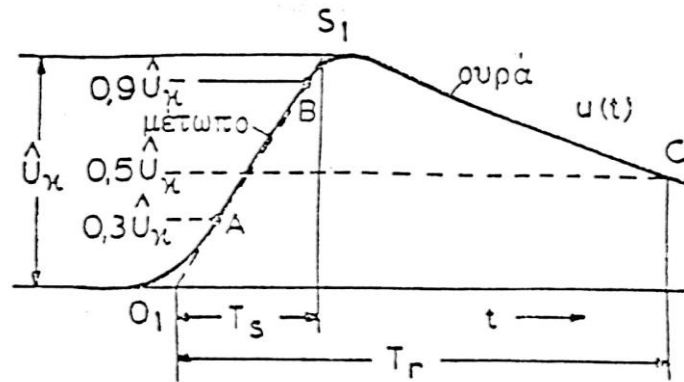
Συνεπώς για παραγόμενο ηλεκτρικό φορτίο Δq για $v \geq 0,2c$ όταν $u_{\pi} > 10,25 \text{ kV}$ ειδική αγωγιμότητα στο τέλος της διαδρομής δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_2 = \frac{\Delta q}{E_{\pi}} \sqrt{1 - 1/\left(\frac{q_e U_{\pi}}{m_0 c^2} + 1\right)^2} \quad , \text{σε [(m}^2\text{/}\Omega\text{)]} \quad (2.3-10)$$

Και για την αρχή της διαδρομής από την σχέση:

$$\sigma_1 = \frac{q_1}{E_{ev}} \sqrt{1 - 1 / \left(\frac{q_e u_{ev}}{m_0 c^2} + 1 \right)^2} \quad , \text{σε } [(m^2/\Omega)] \quad (2.3-11)$$

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο υπολογισμός των τιμών u_{ev} και u_{π} έχει πραγματοποιηθεί με γραφικό τρόπο αφού γνωρίζουμε \hat{U}_k , t_1 και t_2 από μία συγκεκριμένη και τυποποιημένη μορφή, η οποία δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.3-1: Χαρακτηρισμός των μεγεθών μίας κρουστικής τάσης
 \hat{U}_k : Μέγιστη τιμή.
 T_s : Διάρκεια μετώπου (250 μ s)
 T_r : Διάρκεια ημίσεος εύρους της ουράς (2.500 μ s)

Τέλος από τις μετρήσεις που έχουμε λάβει στο εργαστήριο και από τις παραπάνω σχέσεις (2.3-1 έως 2.3.11) θα σχεδιάσουμε τις χαρακτηριστικές $u_{ev}=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $u_{\pi}=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $v_1=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $v_2=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $b_1=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $b_2=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $\sigma_1=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ και $\sigma_2=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για τα δοκίμια 1mm και 2mm για κρουστικές τάσεις $\pm 250/2.500\mu$ s.



3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ

3.1.1 Δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ με κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	t_1 (μs)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	v_1 (m/s) $\times 10^6$	b_1 (m^2/kVs)
13,4	1.000	0,1996	200,9	10,77	0,1604	169,026	10.537,781
16,8	1.000	0,2503	104,6	7,03	0,1047	142,91	13.649,475
20,1	1.000	0,2994	76,9	6,18	0,0921	135,449	14.706,732
23,4	1.000	0,3486	55,4	5,19	0,0773	125,729	16.265,071
26,7	1.000	0,3978	42,2	4,51	0,0672	118,258	17.597,917
30,2	1.000	0,4499	41,2	5,00	0,0745	123,714	16.605,906
33,5	1.000	0,4991	36,8	4,93	0,0734	122,958	16.751,771
36,9	1.000	0,5497	32,1	4,74	0,0706	120,868	17.120,113
40,2	1.000	0,5989	30	4,82	0,0718	121,755	16.957,521
43,6	1.000	0,6495	24,6	4,29	0,0639	115,676	18.102,660

Πίνακας 3.1.1-1: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_{ev} , E_{ev} , v_1 και b_1 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι Μ/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής $+250/2500 \mu\text{s}$ σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: $d=1\text{mm}$.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

t_1 : Ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{ev} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_{ev}

v_1 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

b_1 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	t_2 (μ s)	u_π (kV)	E_π (MV/cm)	v_2 (m/s) $\times 10^6$	b_2 (m ² /kVs)
13,4	1.000	0,1996	260,1	13,37	0,1992	182,806	9.177,008
16,8	1.000	0,2503	190,7	12,81	0,1908	180,066	9.437,421
20,1	1.000	0,2994	272,7	20,00	0,298	208,487	6.996,208
23,4	1.000	0,3486	251,8	23,39	0,3485	218,177	6.260,459
26,7	1.000	0,3978	268	26,59	0,3961	225,872	5.702,398
30,2	1.000	0,4499	288,2	29,94	0,446	232,747	5.218,543
33,5	1.000	0,4991	251,1	33,49	0,4989	238,982	4.790,178
36,9	1.000	0,5497	243,7	35,97	0,5359	242,811	4.530,901
40,2	1.000	0,5989	215	34,57	0,515	240,698	4.673,748
43,6	1.000	0,6495	253,8	43,56	0,6489	252,451	3.890,445

Πίνακας 3.1.1-2: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: $u_{\pi\epsilon}$, $E_{\pi\epsilon}$, v_2 και b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι Μ/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +250/2500 μ s σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: d=1mm.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

t_2 : Ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

u_π : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

E_π : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_π

v_2 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

b_2 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	q_1 (μCb)	q_2 (μCb)	Δq (μCb)	σ_1 (m^2/Ω) $\times 10^{-18}$
13,4	1.000	0,1996	10,77	0,1604	0,019	0,028	0,009	66,739
16,8	1.000	0,2503	7,03	0,1047	0,025	0,059	0,034	113,746
20,1	1.000	0,2994	6,18	0,0921	0,024	0,096	0,072	117,653
23,4	1.000	0,3486	5,19	0,0773	0,054	0,33	0,276	292,771
26,7	1.000	0,3978	4,51	0,0672	0,067	0,74	0,673	393,022
30,2	1.000	0,4499	5,00	0,0745	0,067	1,03	0,963	370,865
33,5	1.000	0,4991	4,93	0,0734	0,067	1,51	1,443	374,123
36,9	1.000	0,5497	4,74	0,0706	0,067	1,99	1,923	382,348
40,2	1.000	0,5989	4,82	0,0718	0,13	3,14	3,01	734,824
43,6	1.000	0,6495	4,29	0,0639	0	4,1	4,1	0

Πίνακας 3.1.1-3: Στατιστική ανάλυση του μεγέθους: σ_1 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι M/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +250/2500 μs σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: d=1mm.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

u_{ev} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_{ev}

q_1 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q_2 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Δq : Η διαφορά των φορτίων $q_2 - q_1$

σ_1 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	u_π (kV)	E_π (MV/cm)	q_1 (μCb)	q_2 (μCb)	Δq (μCb)	σ_2 (m^2/Ω) $\times 10^{-18}$
13,4	1.000	0,1996	13,37	0,1992	0,019	0,028	0,009	27,531
16,8	1.000	0,2503	12,81	0,1908	0,025	0,059	0,034	106,957
20,1	1.000	0,2994	20,00	0,298	0,024	0,096	0,072	167,909
23,4	1.000	0,3486	23,39	0,3485	0,054	0,33	0,276	575,962
26,7	1.000	0,3978	26,59	0,3961	0,067	0,74	0,673	1.279,238
30,2	1.000	0,4499	29,94	0,446	0,067	1,03	0,963	1.675,150
33,5	1.000	0,4991	33,49	0,4989	0,067	1,51	1,443	2.304,073
36,9	1.000	0,5497	35,97	0,5359	0,067	1,99	1,923	2.904,308
40,2	1.000	0,5989	34,57	0,515	0,13	3,14	3,01	4.689,321
43,6	1000	0,6495	43,56	0,6489	0	4,1	4,1	5.316,943

Πίνακας 3.1.1-4: Στατιστική ανάλυση του μεγέθους: σ_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι M/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +250/2500 μs σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: d=1mm.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

u_π : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

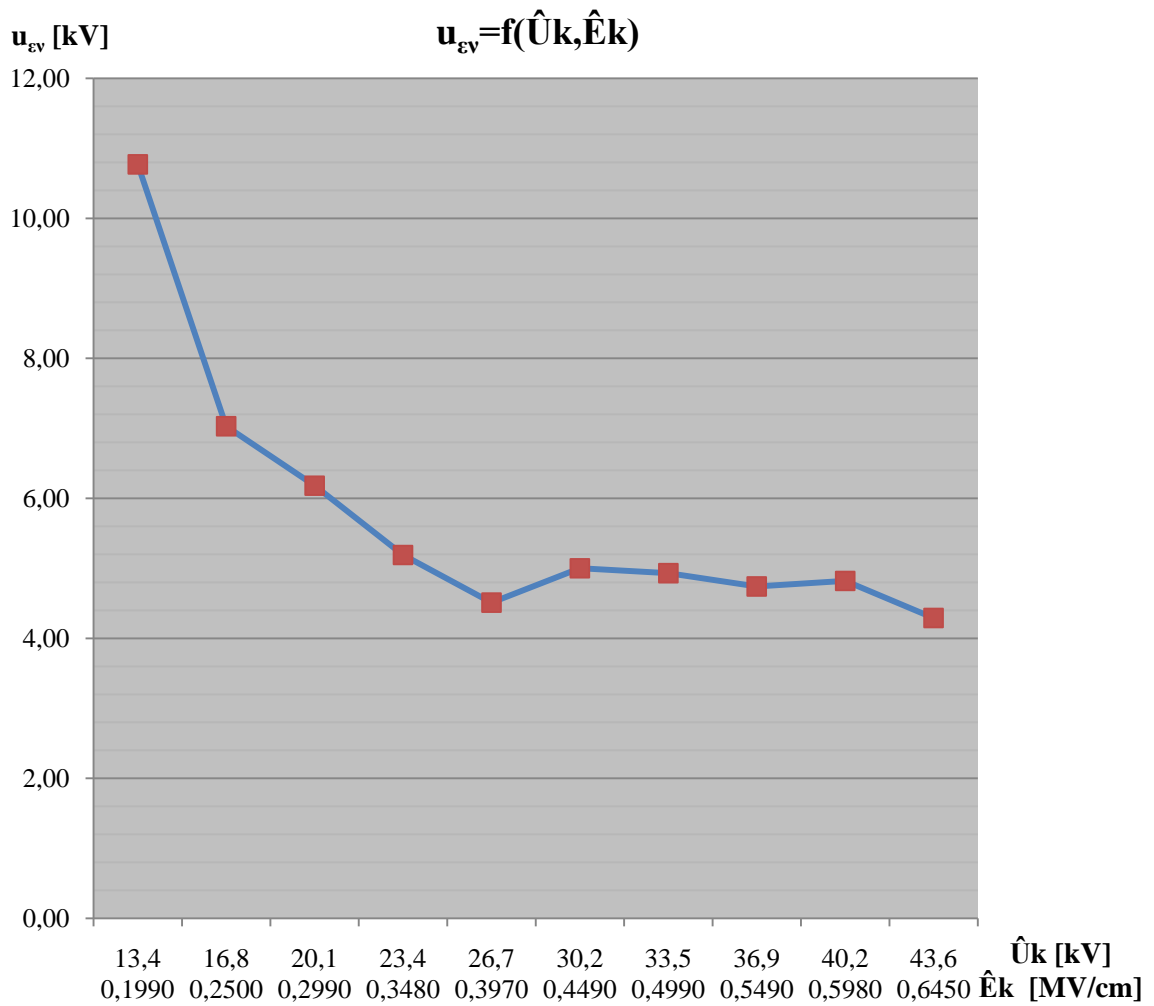
E_π : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_π

q_1 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q_2 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Δq : Η διαφορά των φορτίων $q_2 - q_1$

σ_2 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.1.1-1: Χαρακτηριστική $u_{\varepsilon v} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

$u_{\varepsilon v}$: Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

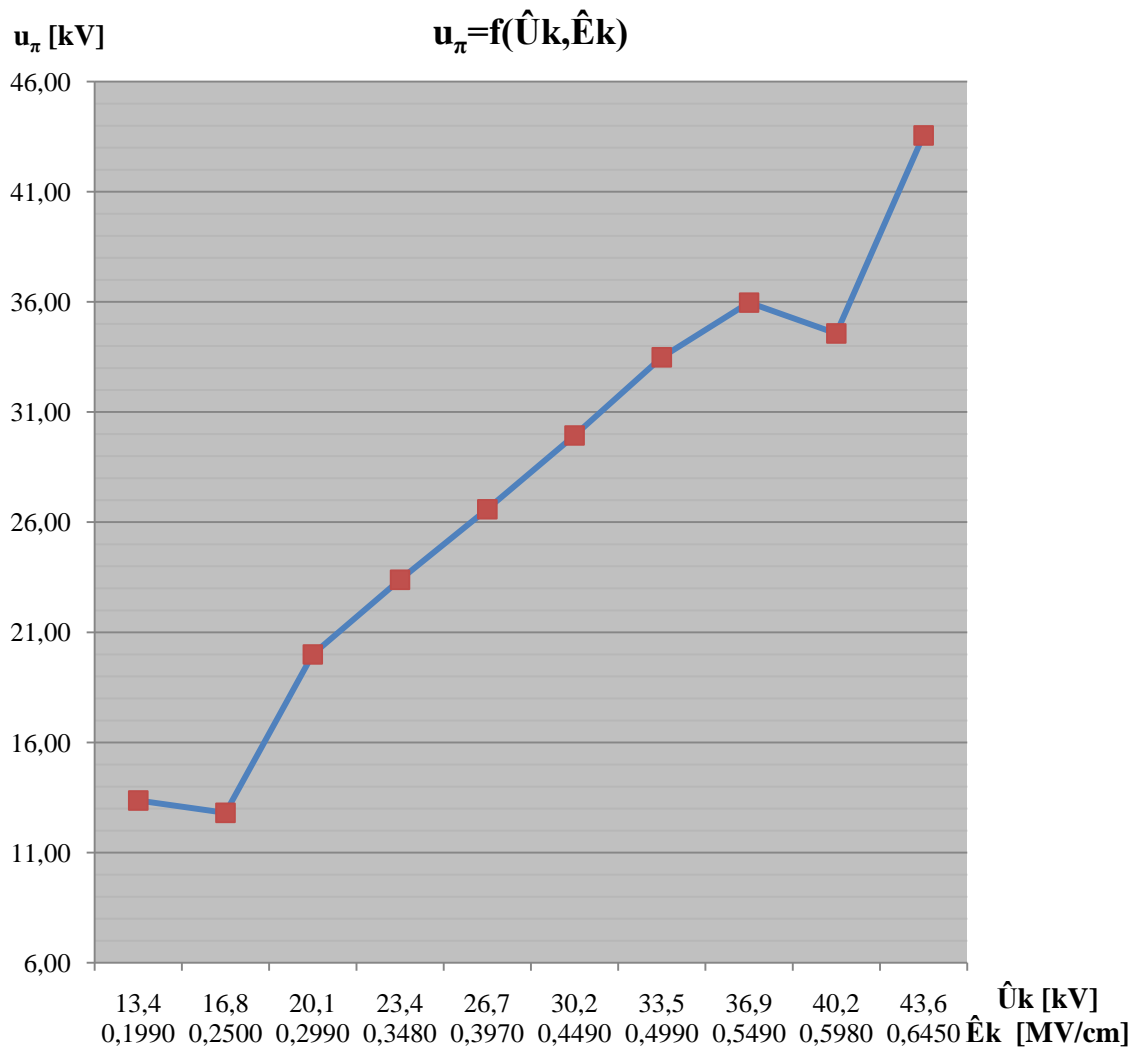
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.1-2: Χαρακτηριστική $u_{\pi} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

u_{π} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

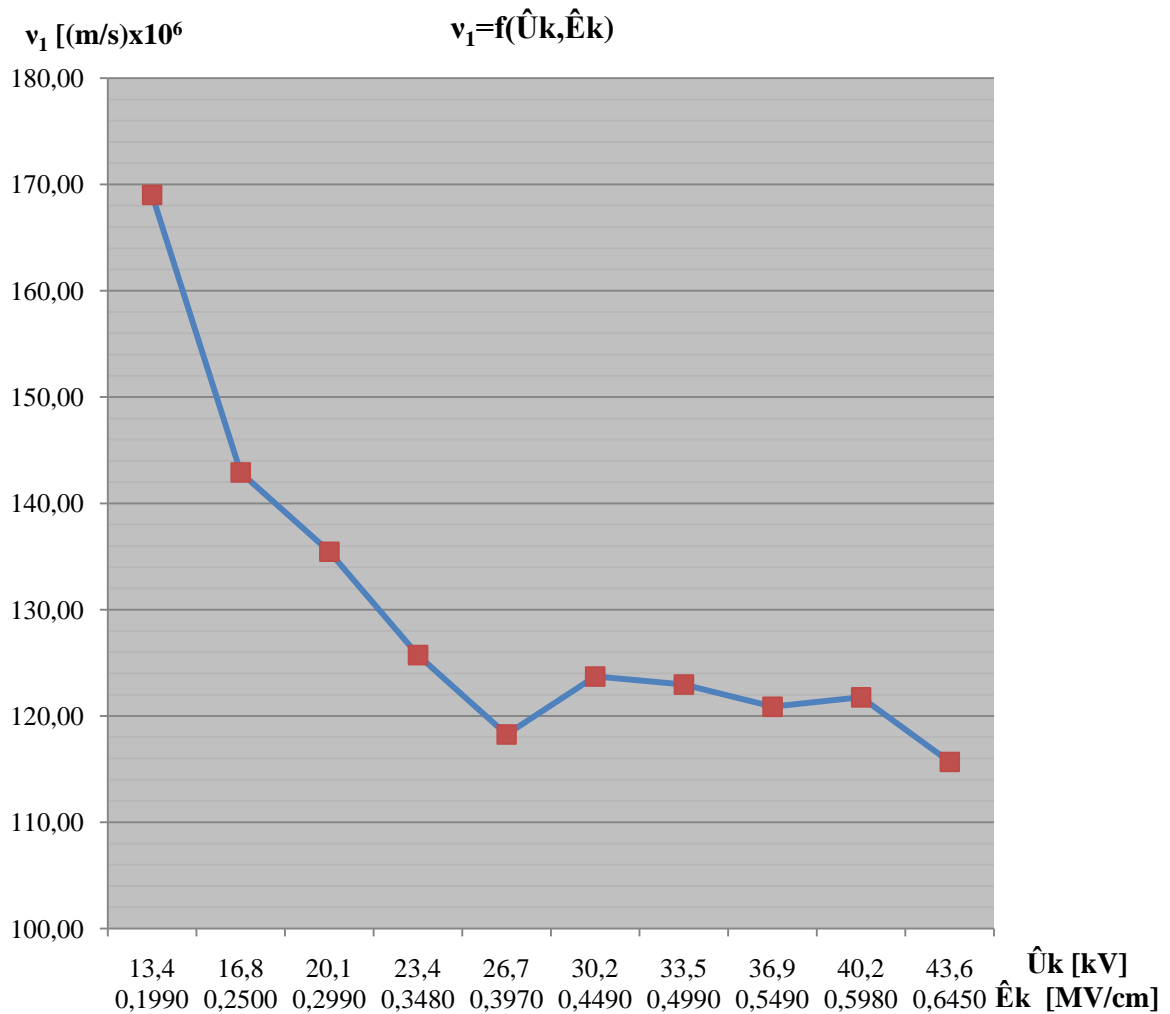
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.1-3: Χαρακτηριστική $v_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

v_1 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

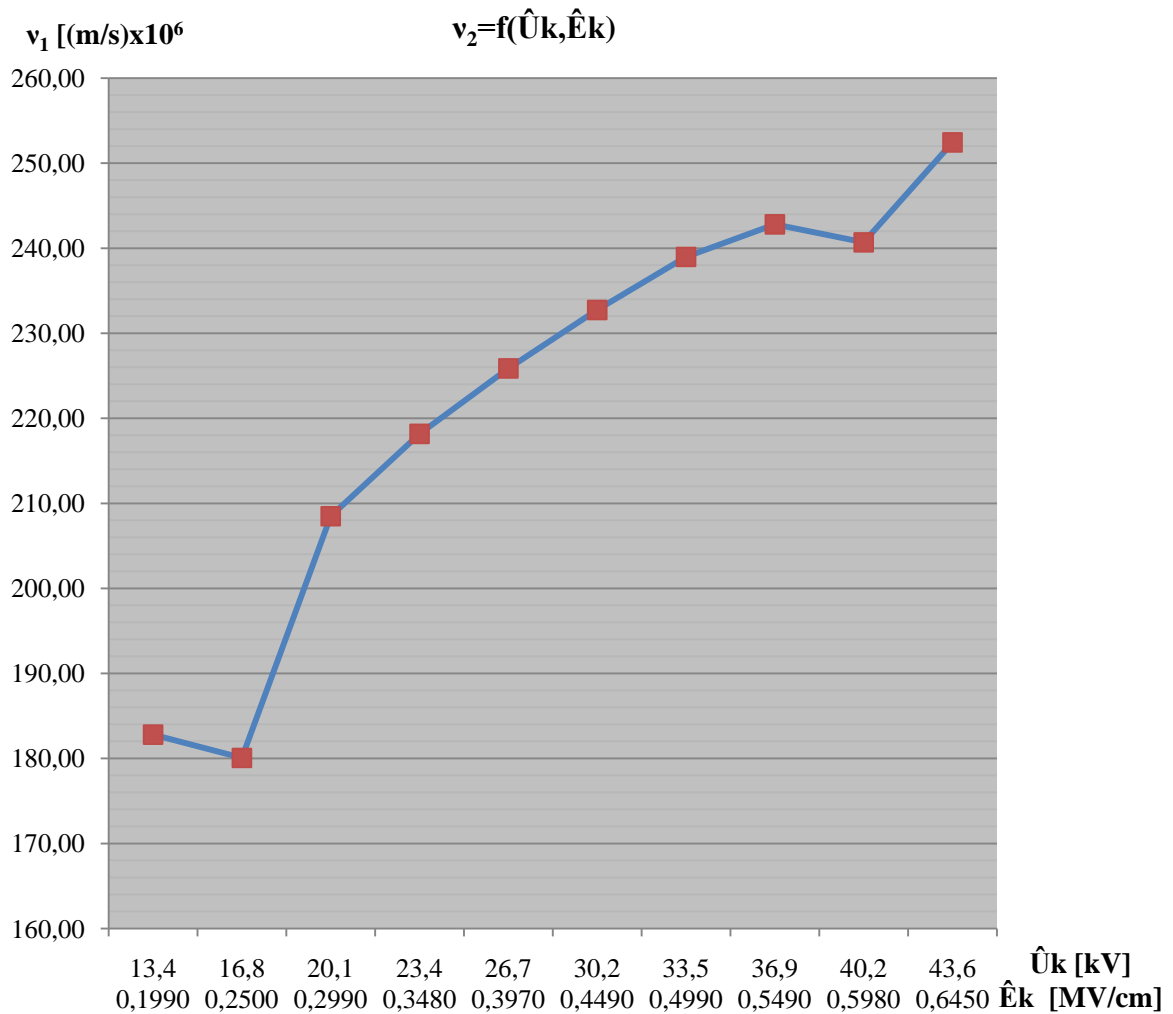
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.1-4: Χαρακτηριστική $v_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

v_2 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων

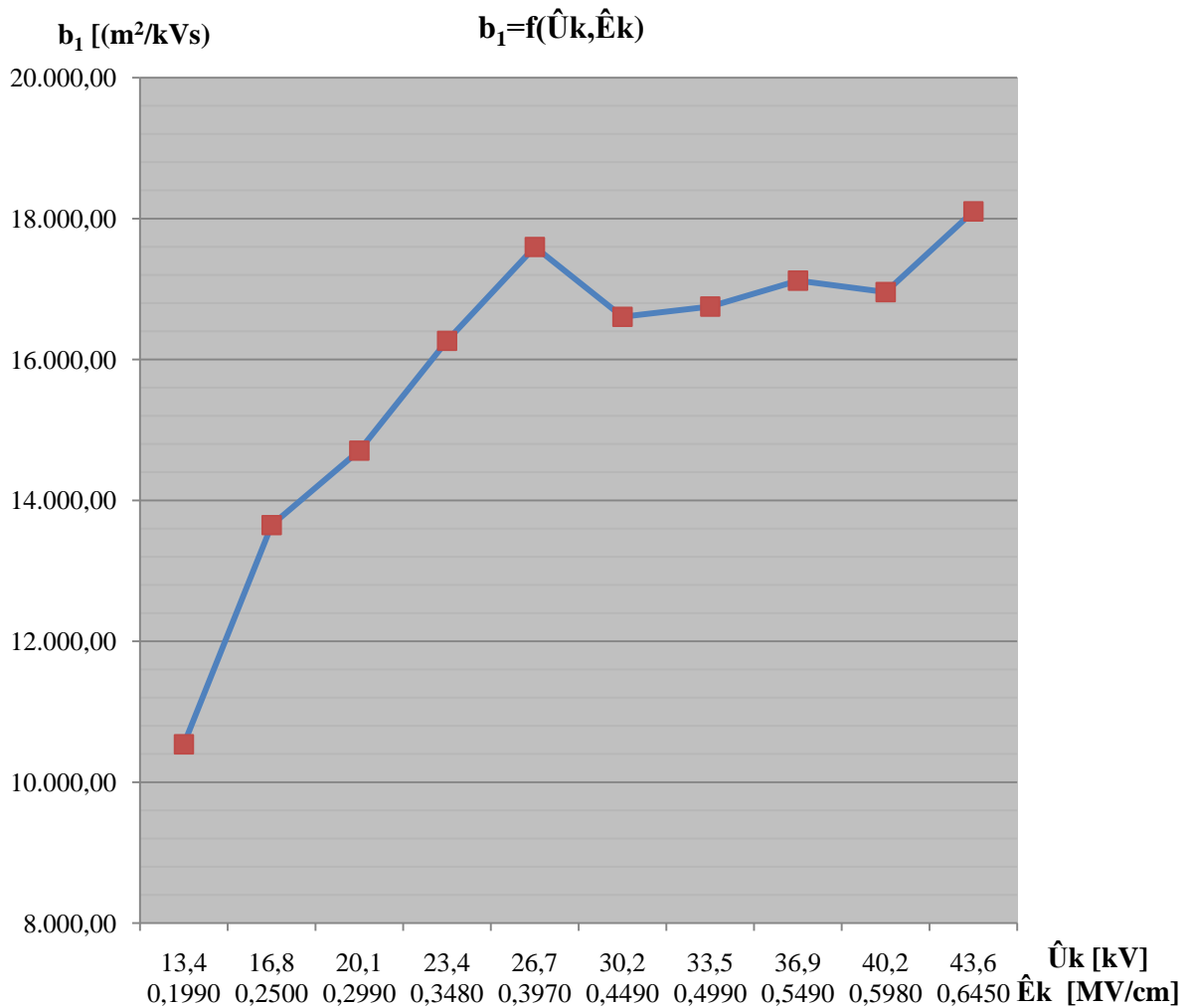
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.1-5: Χαρακτηριστική $b_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

b_1 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

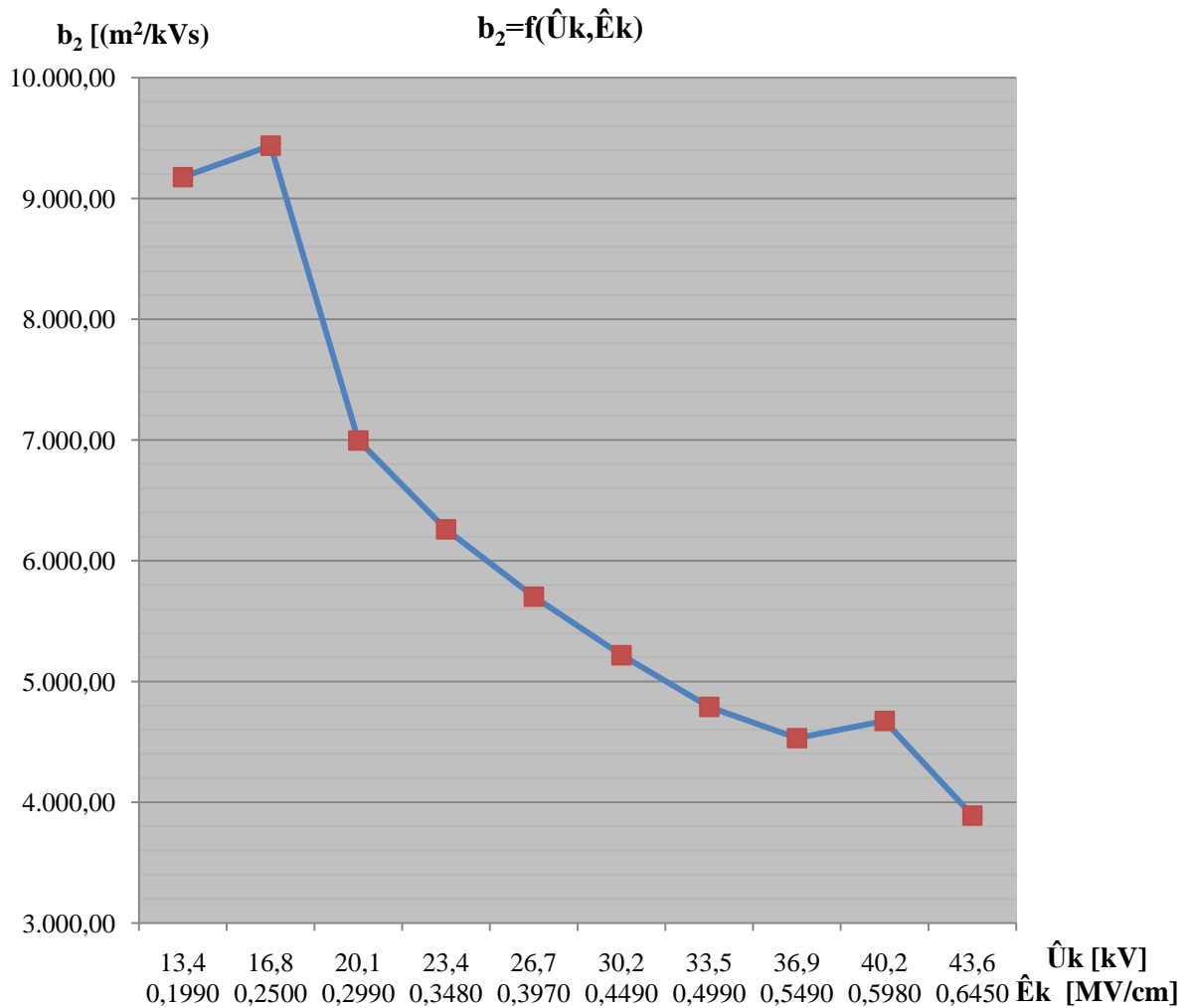
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μs

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.1-6: Χαρακτηριστική $b_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

b_2 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

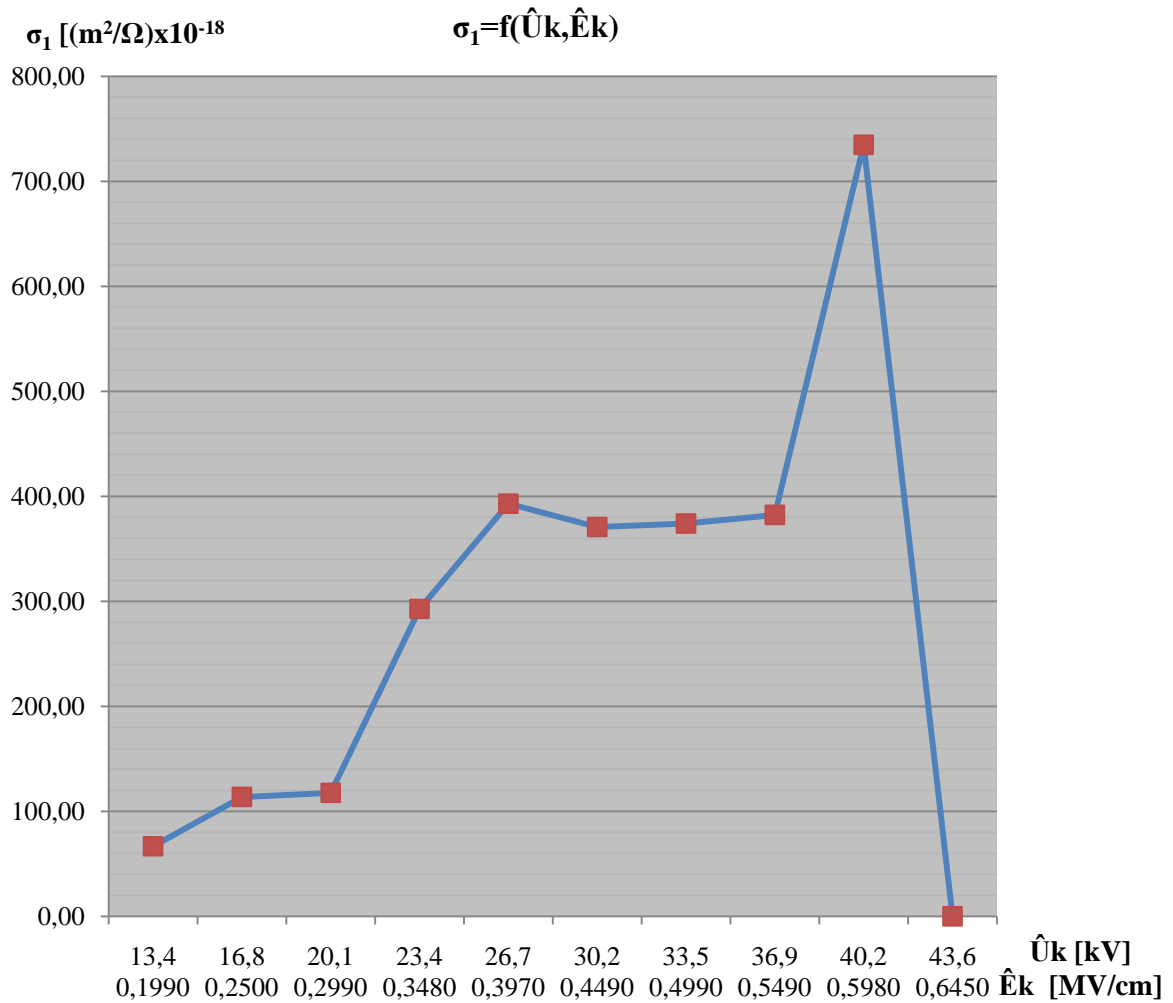
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μs

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.1-7: Χαρακτηριστική $\sigma_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

σ_1 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

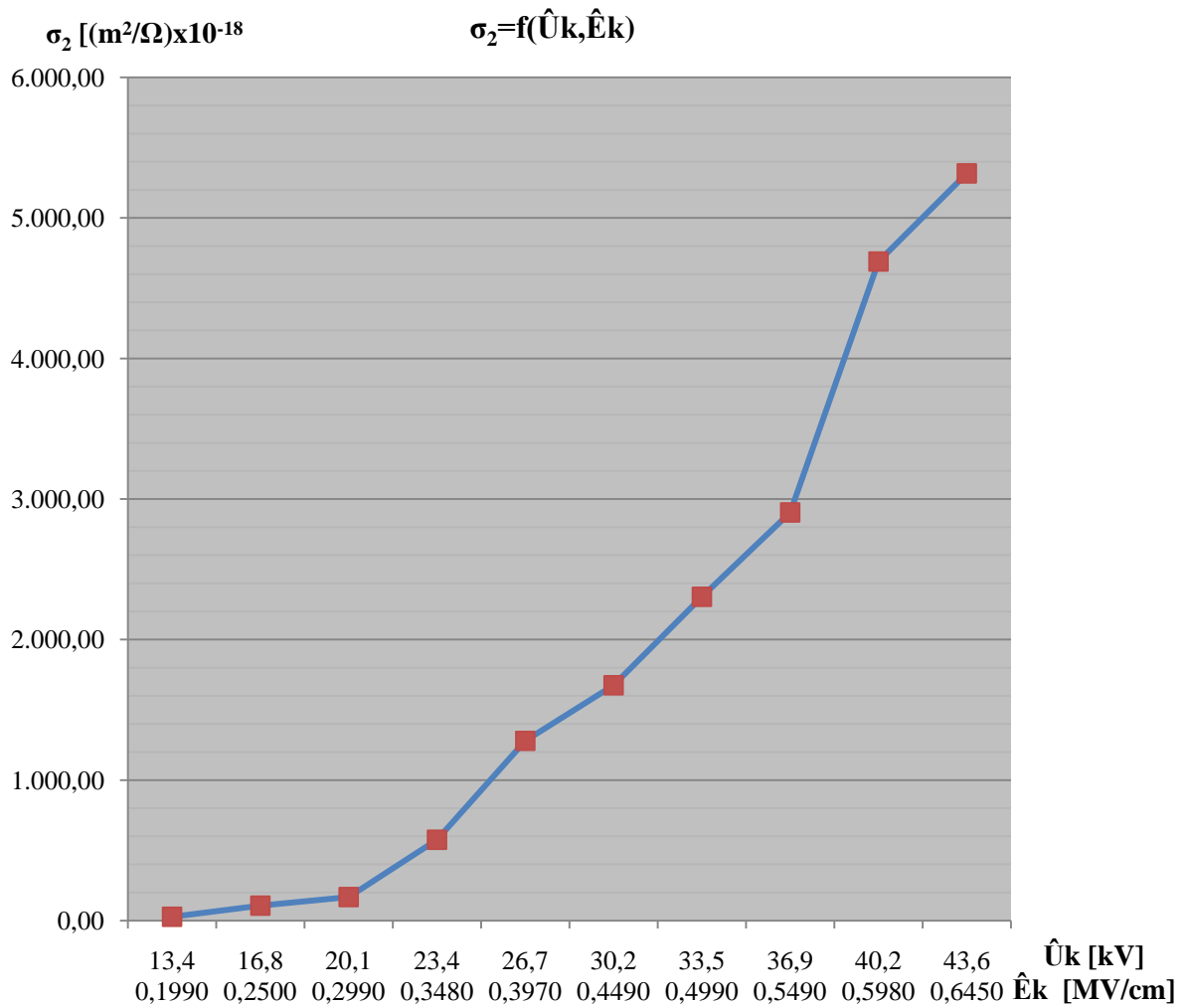
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.1-8: Χαρακτηριστική $\sigma_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

σ_2 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μs

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα

3.1.2 Δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ με κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	t_1 (μs)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	v_1 (m/s) $\times 10^6$	b_1 (m^2/kVs)
20,7	1.000	0,3084	110,9	9,18	0,1368	159,032	11.625,146
24,2	1.000	0,3605	87,1	8,43	0,1256	153,795	12.244,825
27,6	1.000	0,4112	76,3	8,42	0,1254	153,722	12.258,533
31,1	1.000	0,4633	54,5	6,78	0,101	140,790	13.939,604
34,5	1.000	0,514	50,9	7,02	0,1046	142,827	13.654,589
37,9	1.000	0,5646	44,2	6,71	0,1	140,186	14.018,600
41,4	1.000	0,6168	41,8	6,92	0,1031	141,985	13.771,581
44,8	1.000	0,6674	37,1	6,65	0,0991	139,664	14.093,239

Πίνακας 3.1.2-1: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_{ev} , E_{ev} , v_1 και b_1 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι Μ/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -250/2500 μs σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: $d=1\text{mm}$.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

t_1 : Ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{ev} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_{ev}

v_1 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

b_1 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	t_2 (μ s)	u_π (kV)	E_π (MV/cm)	v_2 (m/s) $\times 10^6$	b_2 (m ² /kVs)
20,7	1.000	0,3084	129,6	10,73	0,1599	168,791	10.556,035
24,2	1.000	0,3605	142,4	13,78	0,2053	184,743	8.998,685
27,6	1.000	0,4112	113,1	12,49	0,1861	178,447	9.588,769
31,1	1.000	0,4633	128,2	15,95	0,2376	194,122	8.170,118
34,5	1.000	0,514	163,7	22,59	0,3365	216,048	6.420,446
37,9	1.000	0,5646	217	32,90	0,4901	238,011	4.856,376
41,4	1.000	0,6168	187,6	31,07	0,4629	234,838	5.073,191
44,8	1.000	0,6674	145,1	26,00	0,3873	224,544	5.797,676

Πίνακας 3.1.2-2: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: $u_{\pi\epsilon}$, $E_{\pi\epsilon}$, v_2 και b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι Μ/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -250/2500 μ s σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: d=1mm.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

t_2 : Ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

u_π : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

E_π : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_π

v_2 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

b_2 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	q_1 (μCb)	q_2 (μCb)	Δq (μCb)	σ_1 (m^2/Ω) $\times 10^{-18}$
20,7	1.000	0,3084	9,18	0,1368	0,079	0,13	0,051	306,128
24,2	1.000	0,3605	8,43	0,1256	0,083	0,24	0,157	338,773
27,6	1.000	0,4112	8,42	0,1254	0,067	0,38	0,313	273,774
31,1	1.000	0,4633	6,78	0,101	0,1	0,48	0,38	464,655
34,5	1.000	0,514	7,02	0,1046	0,067	0,82	0,753	304,952
37,9	1.000	0,5646	6,71	0,1	0,067	1,89	1,823	313,082
41,4	1.000	0,6168	6,92	0,1031	0	2,29	2,29	0,000
44,8	1.000	0,6674	6,65	0,0991	0	2,24	2,24	0,000

Πίνακας 3.1.2-3: Στατιστική ανάλυση του μεγέθους: σ_1 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι M/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής – 250/2500 μs σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: d=1mm.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

u_{ev} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_{ev}

q_1 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q_2 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Δq : Η διαφορά των φορτίων $q_2 - q_1$

σ_1 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	u_π (kV)	E_π (MV/cm)	q_1 (μCb)	q_2 (μCb)	Δq (μCb)	σ_2 (m^2/Ω) $\times 10^{-18}$
20,7	1.000	0,3084	10,73	0,1599	0,079	0,13	0,051	179,452
24,2	1.000	0,3605	13,78	0,2053	0,083	0,24	0,157	470,932
27,6	1.000	0,4112	12,49	0,1861	0,067	0,38	0,313	1.000,431
31,1	1.000	0,4633	15,95	0,2376	0,1	0,48	0,38	1.034,881
34,5	1.000	0,514	22,59	0,3365	0,067	0,82	0,753	1.611,530
37,9	1.000	0,5646	32,90	0,4901	0,067	1,89	1,823	2.951,055
41,4	1.000	0,6168	31,07	0,4629	0	2,29	2,29	3.872,528
44,8	1.000	0,6674	26,00	0,3873	0	2,24	2,24	4.328,929

Πίνακας 3.1.2-4: Στατιστική ανάλυση του μεγέθους: σ_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι M/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -250/2500 μs σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: d=1mm.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

u_π : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

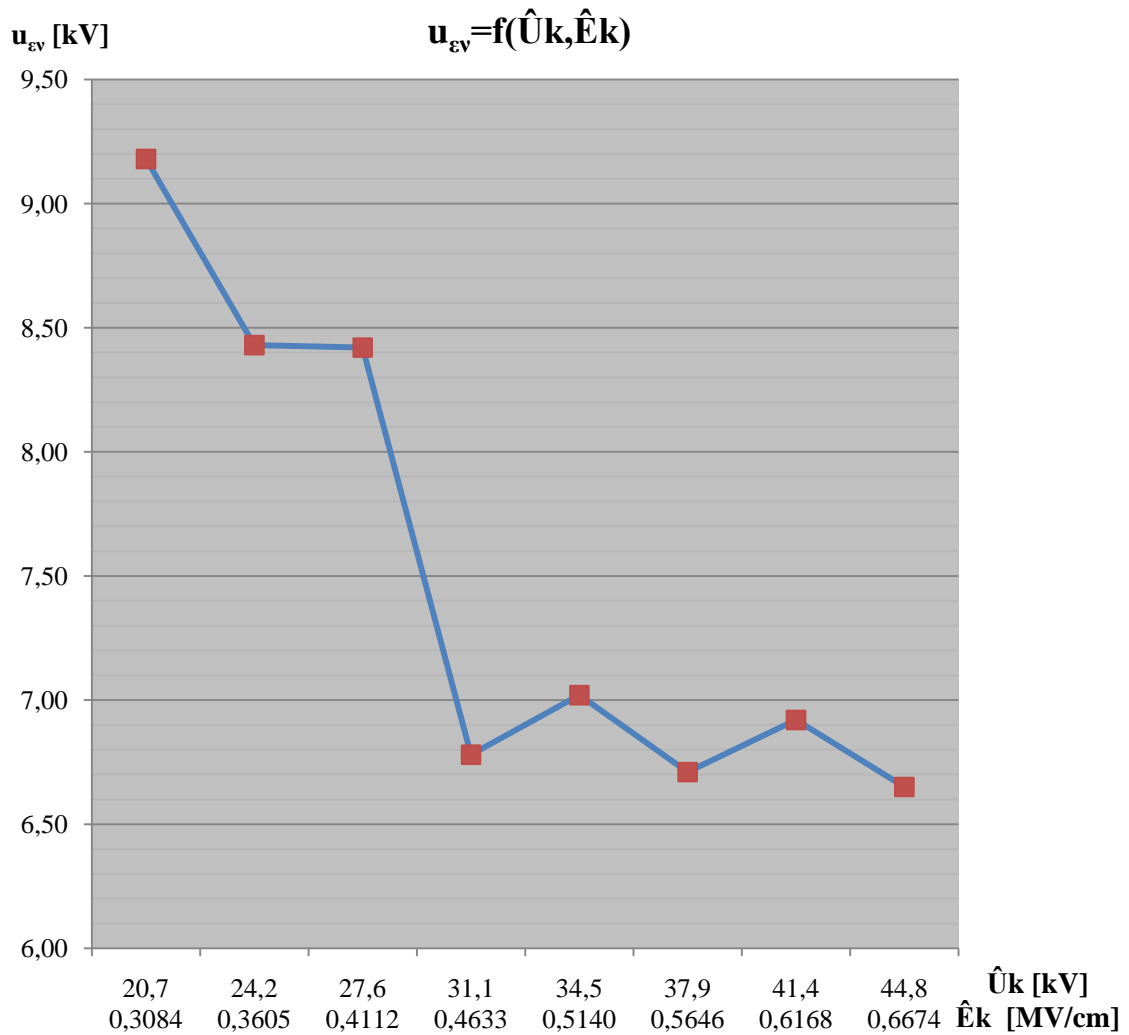
E_π : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_π

q_1 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q_2 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Δq : Η διαφορά των φορτίων $q_2 - q_1$

σ_2 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.1.2-1: Χαρακτηριστική $u_{εν} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

$u_{εν}$: Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

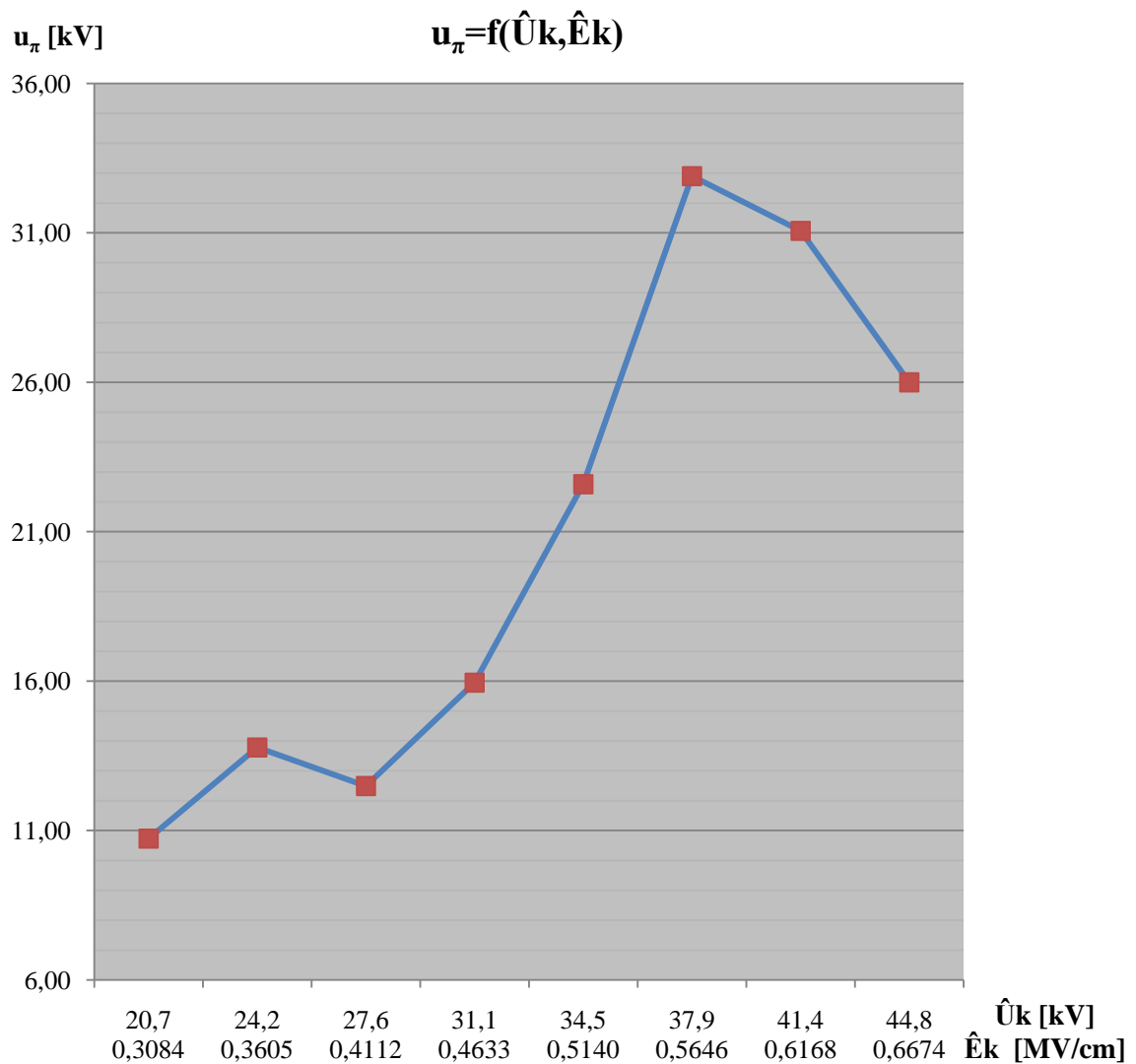
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.2-2: Χαρακτηριστική $u_{\pi} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

u_{π} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

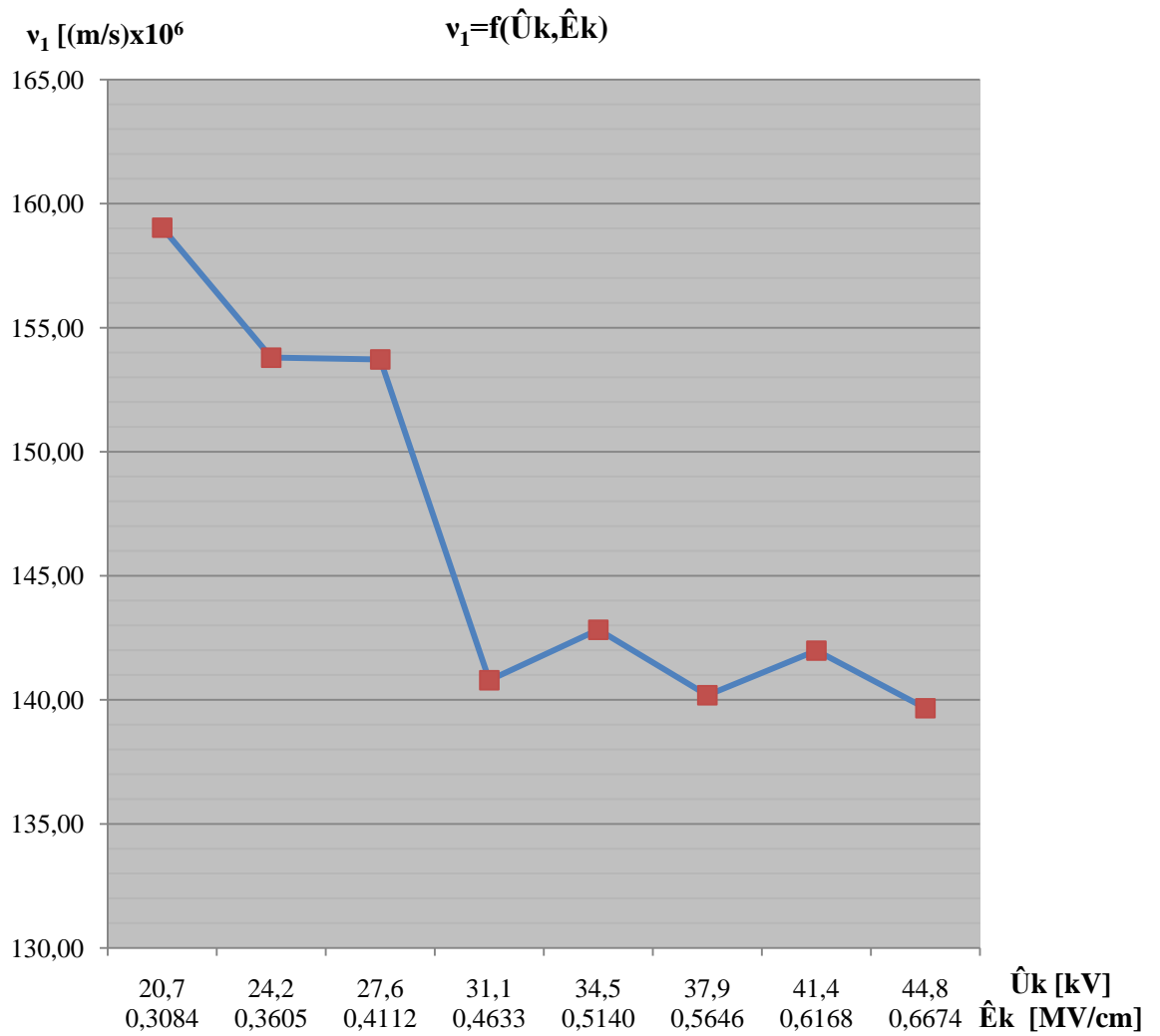
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.2-3: Χαρακτηριστική $v_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

v_1 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

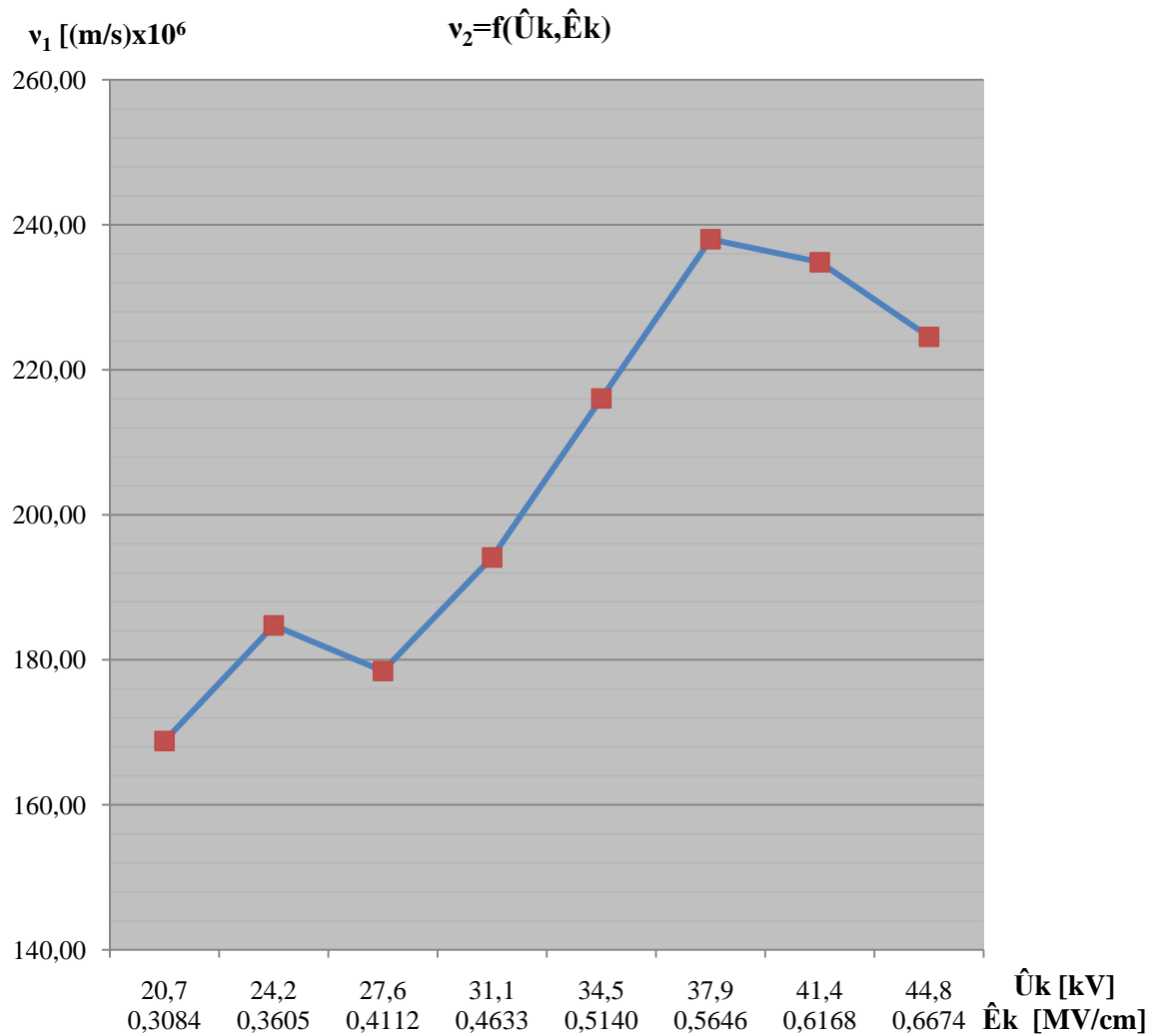
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.2-4: Χαρακτηριστική $v_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

v_2 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

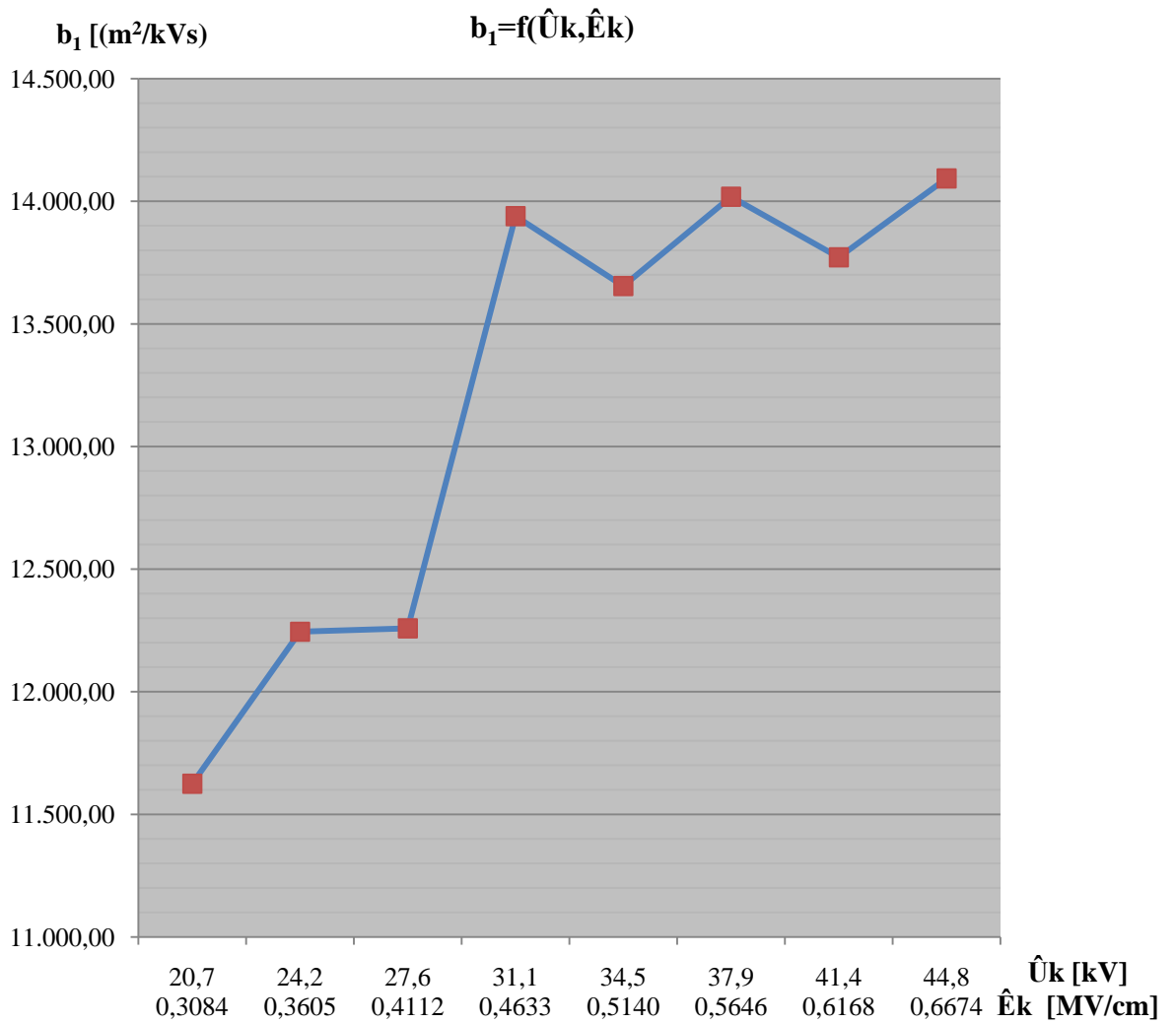
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.2-5: Χαρακτηριστική $b_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

b_1 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

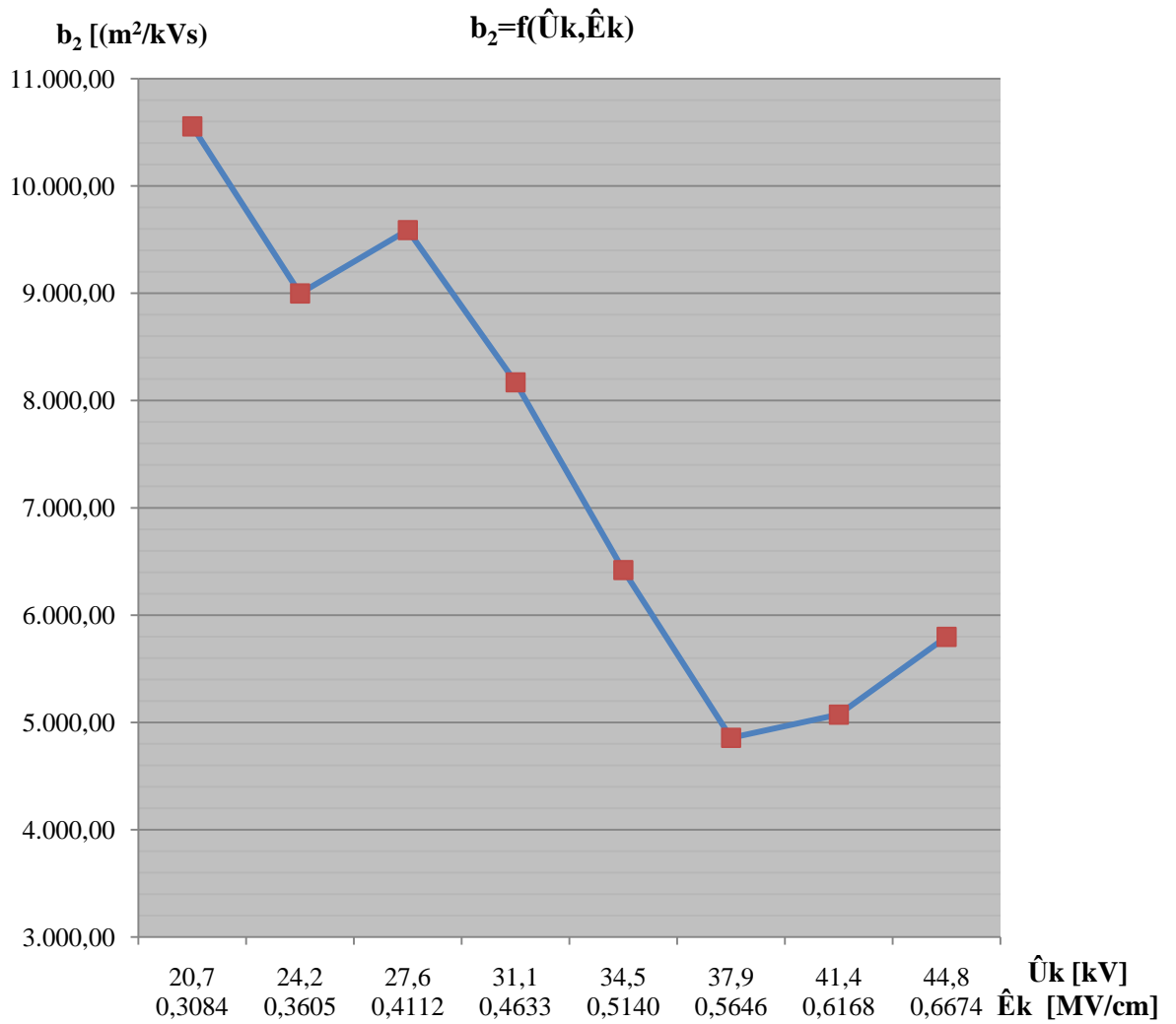
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.2-6: Χαρακτηριστική $b_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

b_2 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

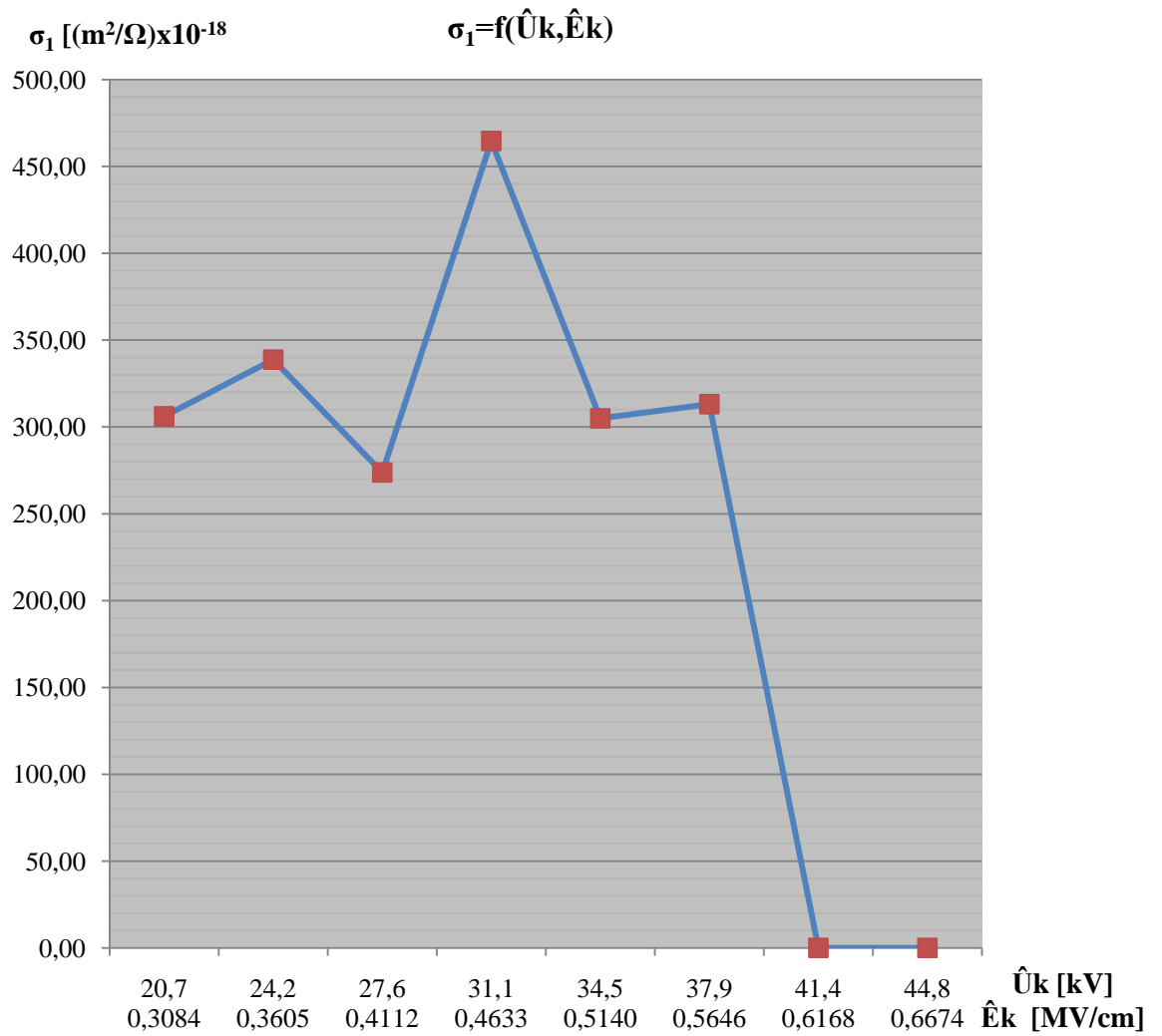
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.2-7: Χαρακτηριστική $\sigma_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

σ_1 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

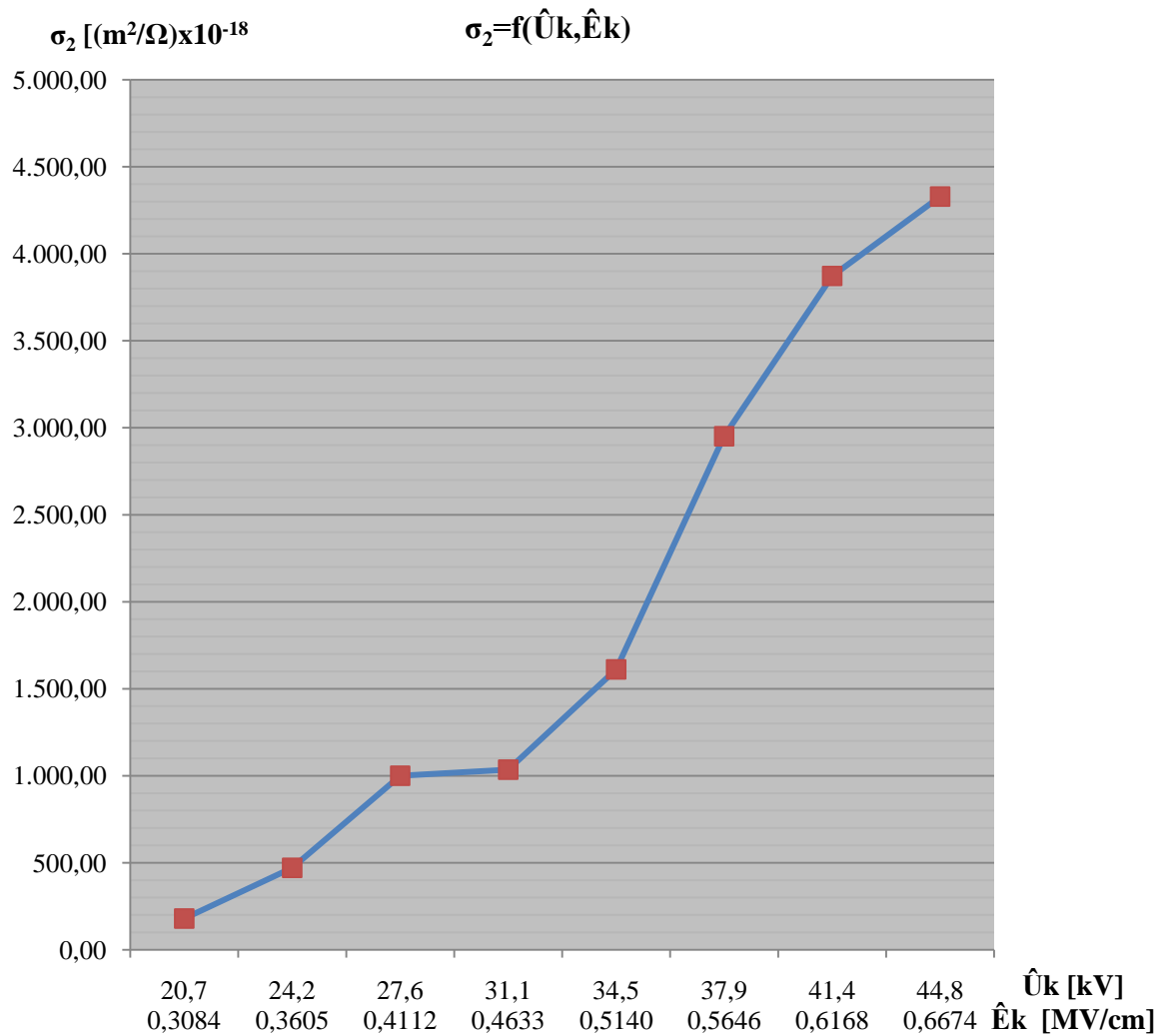
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μs

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.2-8: Χαρακτηριστική $\sigma_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

σ_2 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα

3.1.3 Δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ με κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	t_1 (μs)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	v_1 (m/s) $\times 10^6$	b_1 (m^2/kVs)
20,8	1.000	0,3099	141,7	11,79	0,1756	174,767	9.952,563
24,1	1.000	0,359	99,6	9,60	0,143	161,809	11.315,315
27,7	1.000	0,4127	71,5	7,92	0,118	150,010	12.712,712
31,1	1.000	0,4633	45,2	5,62	0,0837	130,102	15.543,847
34,5	1.000	0,514	41,5	5,73	0,0854	131,182	15.360,890
37,8	1.000	0,5631	36,4	5,50	0,0819	128,907	15.739,560
41,4	1.000	0,6168	36,4	5,50	0,0819	128,907	15.739,560
44,6	1.000	0,6644	36,1	6,44	0,0959	137,809	14.370,073

Πίνακας 3.1.3-1: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_{ev} , E_{ev} , v_1 και b_1 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι Μ/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής $+250/2500 \mu\text{s}$ σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: $d=2\text{mm}$.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

t_1 : Ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{ev} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_{ev}

v_1 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

b_1 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	t_2 (μ s)	u_π (kV)	E_π (MV/cm)	v_2 (m/s) $\times 10^6$	b_2 (m ² /kVs)
20,8	1.000	0,3099	186,3	15,50	0,2309	192,289	8.327,804
24,1	1.000	0,359	173,5	16,73	0,2492	197,175	7.912,319
27,7	1.000	0,4127	157,9	17,50	0,2607	200,045	7.673,379
31,1	1.000	0,4633	235,6	29,31	0,4367	231,534	5.301,901
34,5	1.000	0,514	185,6	25,61	0,3815	223,645	5.862,254
37,8	1.000	0,5631	233,5	35,31	0,526	241,830	4.597,529
41,4	1.000	0,6168	199,1	32,97	0,4912	238,127	4.847,862
44,6	1.000	0,6644	201,8	36,00	0,5363	242,855	4.528,342

Πίνακας 3.1.3-2: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: $u_{\pi\epsilon}$, $E_{\pi\epsilon}$, v_2 και b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι Μ/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +250/2500 μ s σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: d=2mm.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

t_2 : Ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

u_π : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

E_π : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_π

v_2 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

b_2 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	t_2 (μ s)	u_π (kV)	E_π (MV/cm)	v_2 (m/s) $\times 10^6$	b_2 (m ² /kVs)
20,8	1.000	0,3099	186,3	15,50	0,2309	192,289	8.327,804
24,1	1.000	0,359	173,5	16,73	0,2492	197,175	7.912,319
27,7	1.000	0,4127	157,9	17,50	0,2607	200,045	7.673,379
31,1	1.000	0,4633	235,6	29,31	0,4367	231,534	5.301,901
34,5	1.000	0,514	185,6	25,61	0,3815	223,645	5.862,254
37,8	1.000	0,5631	233,5	35,31	0,526	241,830	4.597,529
41,4	1.000	0,6168	199,1	32,97	0,4912	238,127	4.847,862
44,6	1.000	0,6644	201,8	36,00	0,5363	242,855	4.528,342

Πίνακας 3.1.3-3: Στατιστική ανάλυση του μεγέθους: σ_1 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι Μ/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +250/2500 μ s σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: d=2mm.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

u_{ev} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_{ev}

q_1 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q_2 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Δq : Η διαφορά των φορτίων $q_2 - q_1$

σ_1 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	u_π (kV)	E_π (MV/cm)	q_1 (μCb)	q_2 (μCb)	Δq (μCb)	σ_2 (m^2/Ω) $\times 10^{-18}$
20,8	1.000	0,3099	15,50	0,2309	0,082	0,13	0,048	133,245
24,1	1.000	0,359	16,73	0,2492	0,074	0,12	0,046	121,322
27,7	1.000	0,4127	17,50	0,2607	0,081	0,18	0,099	253,221
31,1	1.000	0,4633	29,31	0,4367	0,067	0,34	0,273	482,473
34,5	1.000	0,514	25,61	0,3815	0,067	0,39	0,323	631,168
37,8	1.000	0,5631	35,31	0,526	0,067	0,64	0,573	878,127
41,4	1.000	0,6168	32,97	0,4912	0,1	0,78	0,68	1.098,850
44,6	1.000	0,6644	36,00	0,5363	0,067	0,75	0,683	1.030,953

Πίνακας 3.1.3-4: Στατιστική ανάλυση του μεγέθους: σ_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι M/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +250/2500 μs σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: d=2mm.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

u_π : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

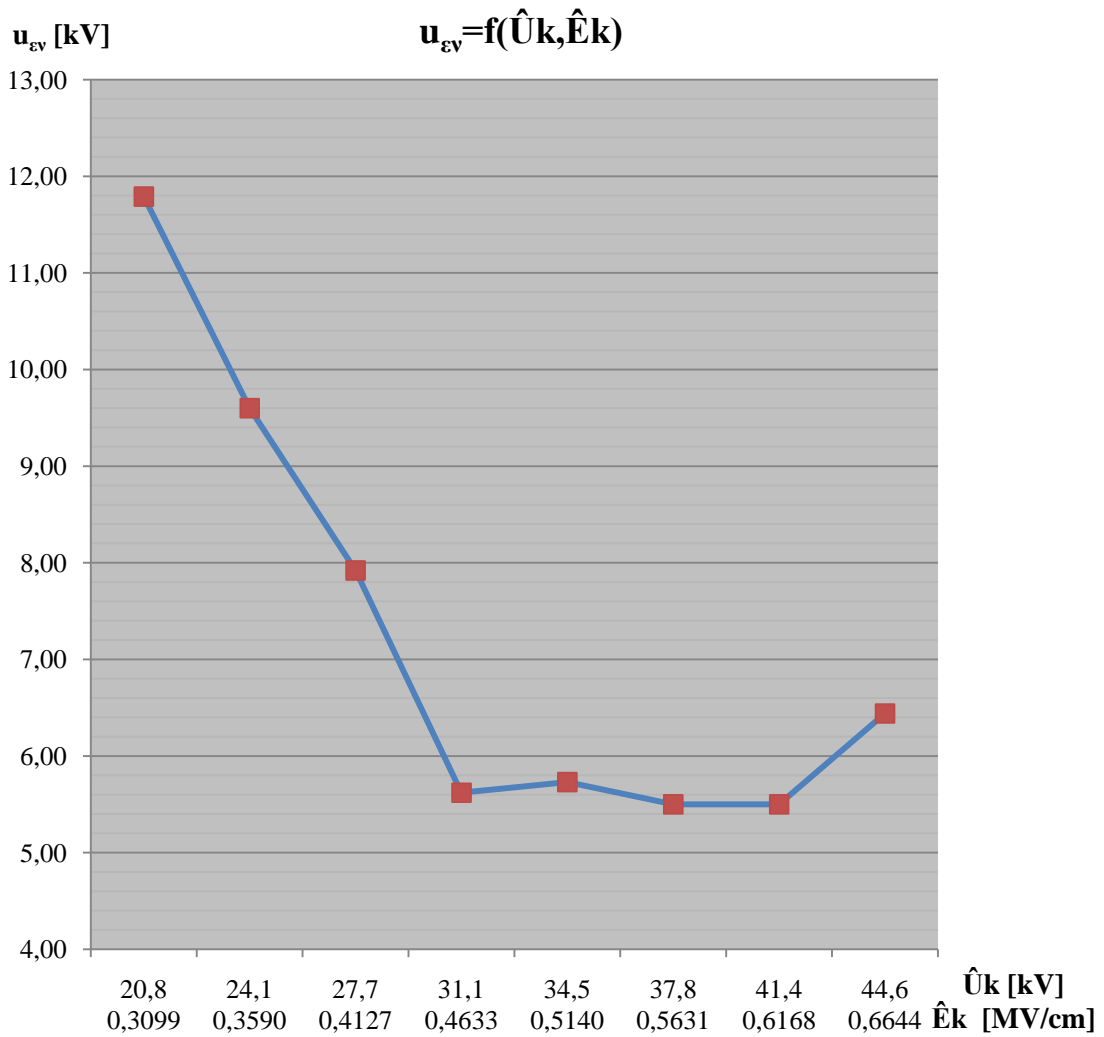
E_π : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_π

q_1 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q_2 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Δq : Η διαφορά των φορτίων $q_2 - q_1$

σ_2 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.1.3-1: Χαρακτηριστική $u_{ev} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

u_{ev} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

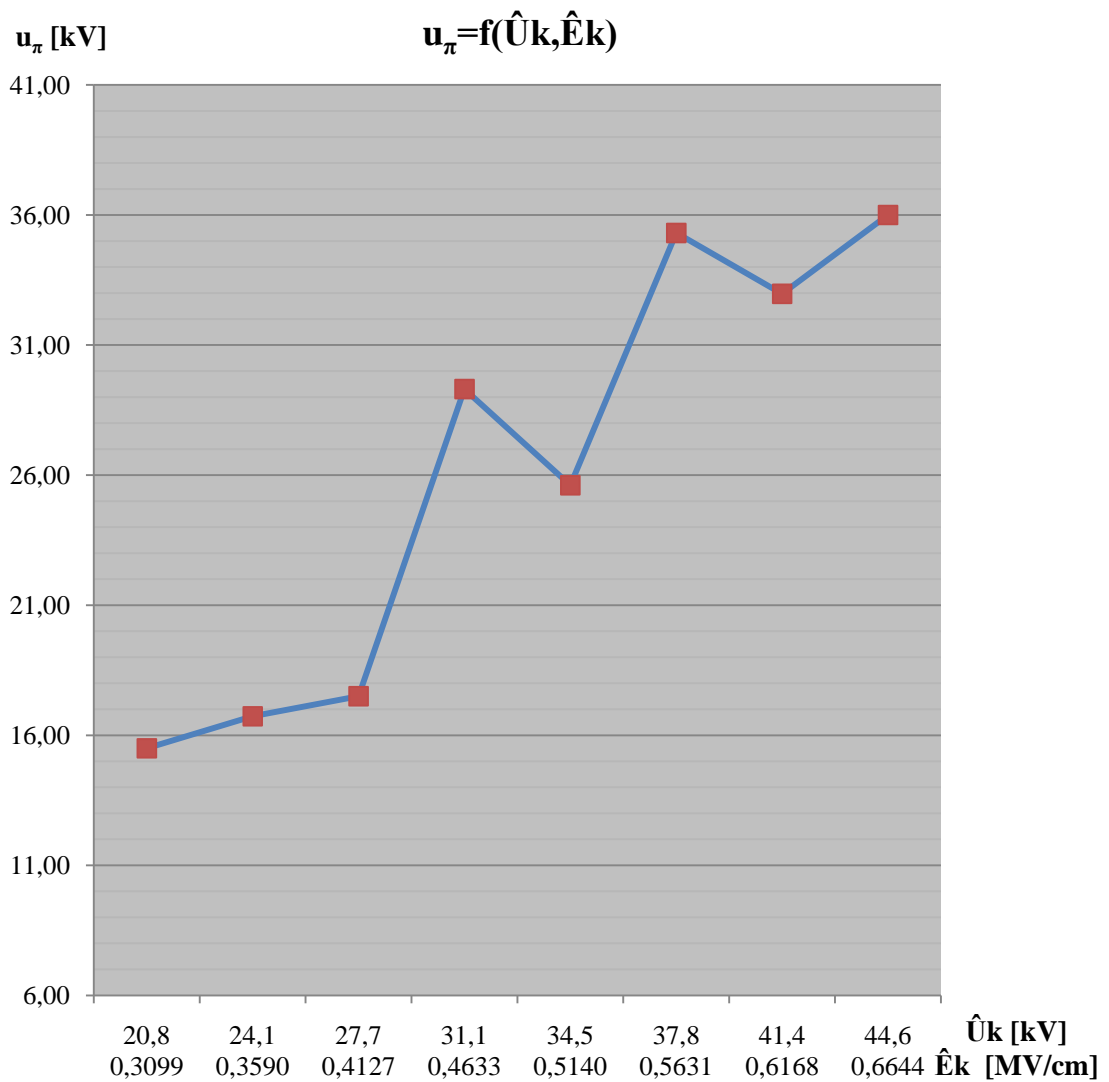
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.3-2: Χαρακτηριστική $u_{\pi} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

u_{π} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

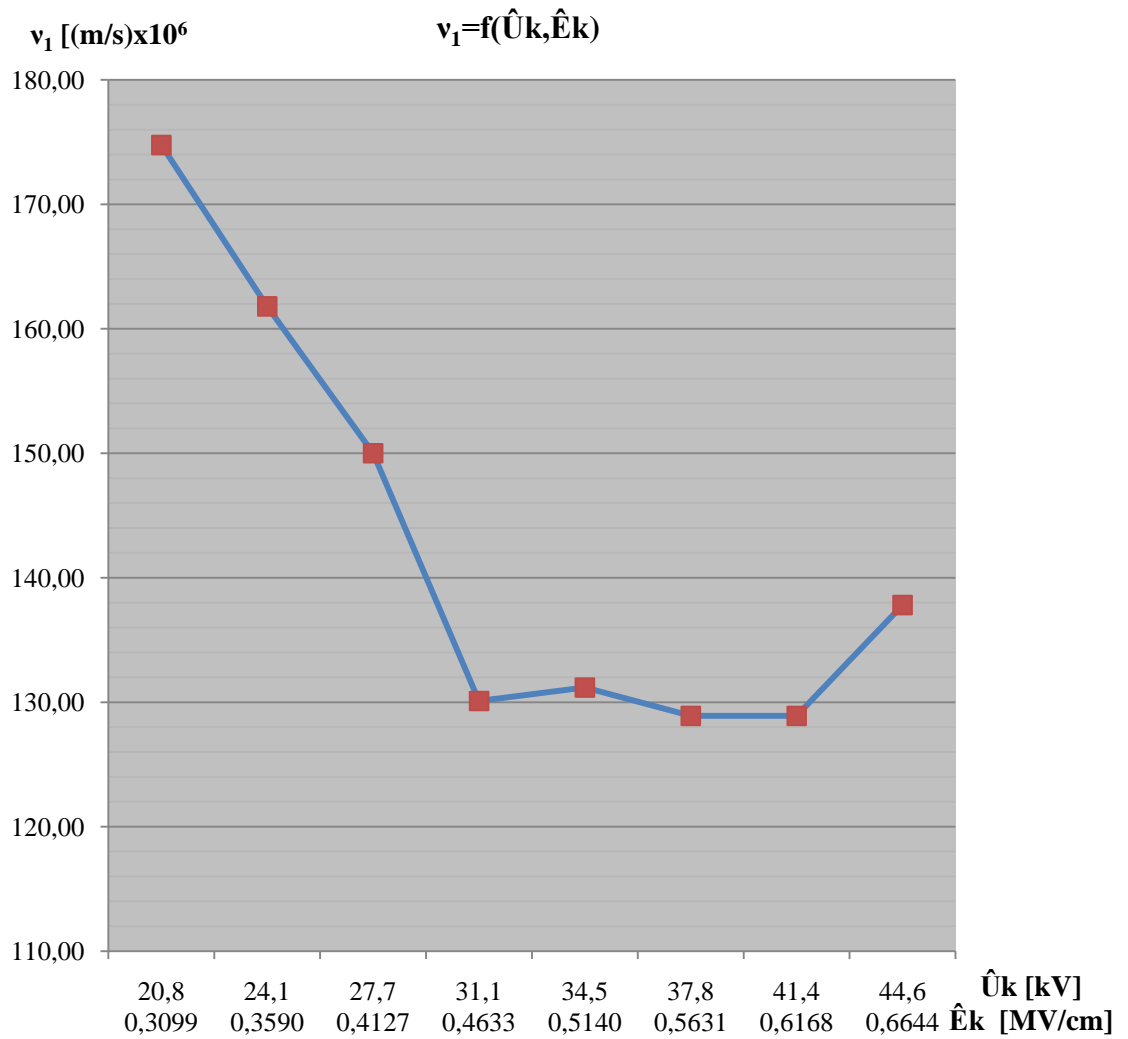
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.3-3: Χαρακτηριστική $v_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

v_1 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

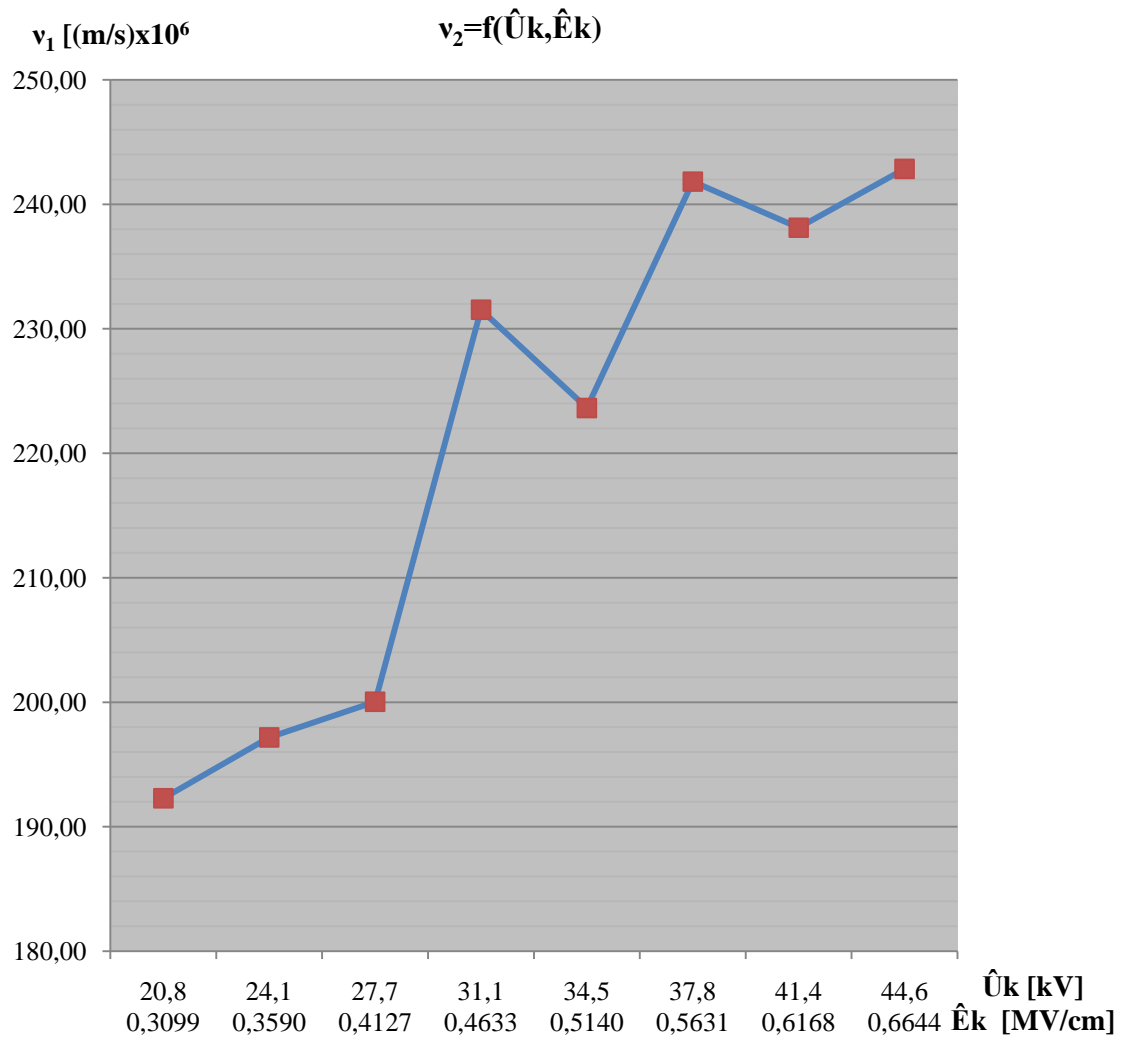
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.3-4: Χαρακτηριστική $v_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

v_2 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

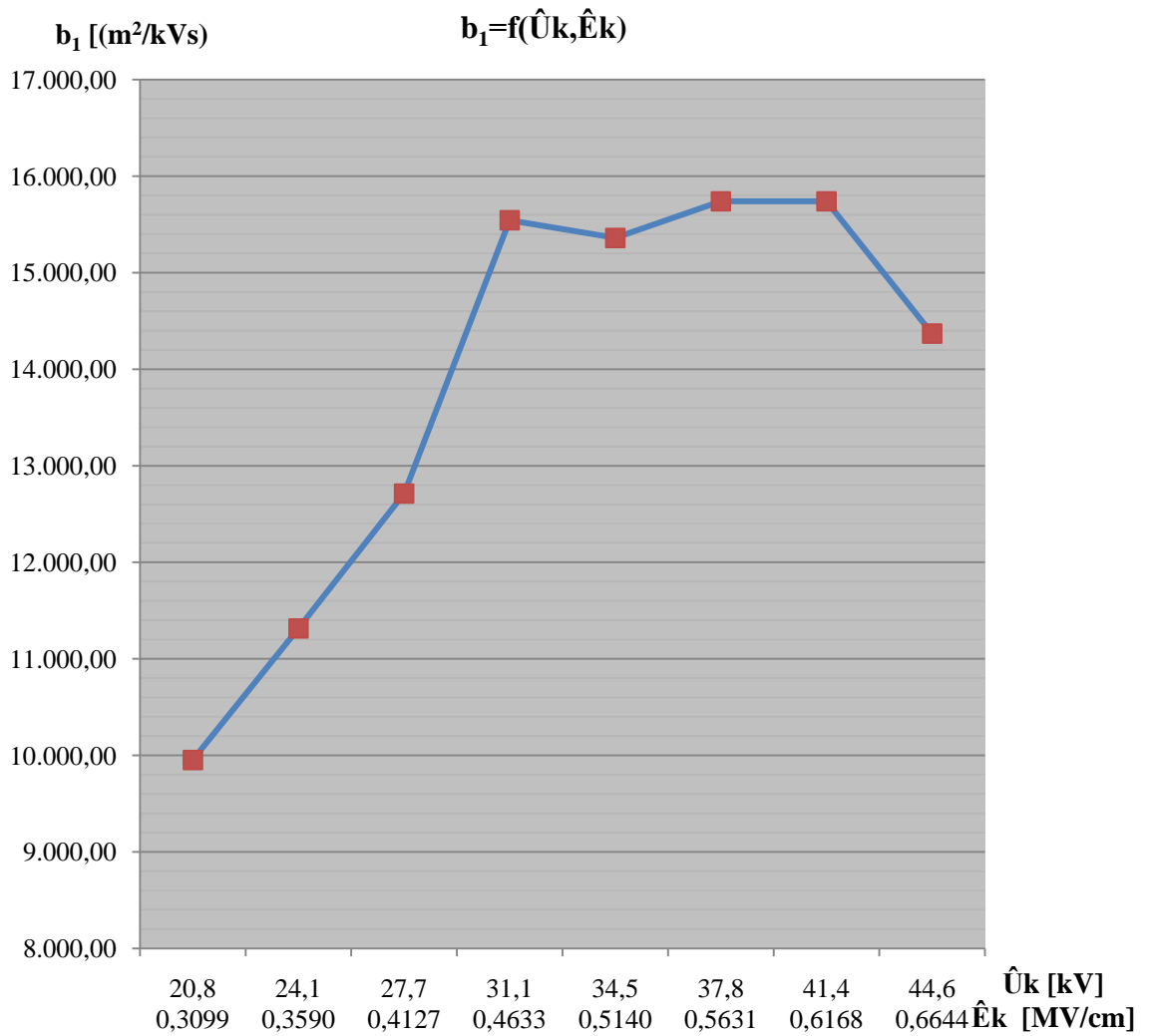
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα $R=0,9$ mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.3-5: Χαρακτηριστική $b_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

b_1 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

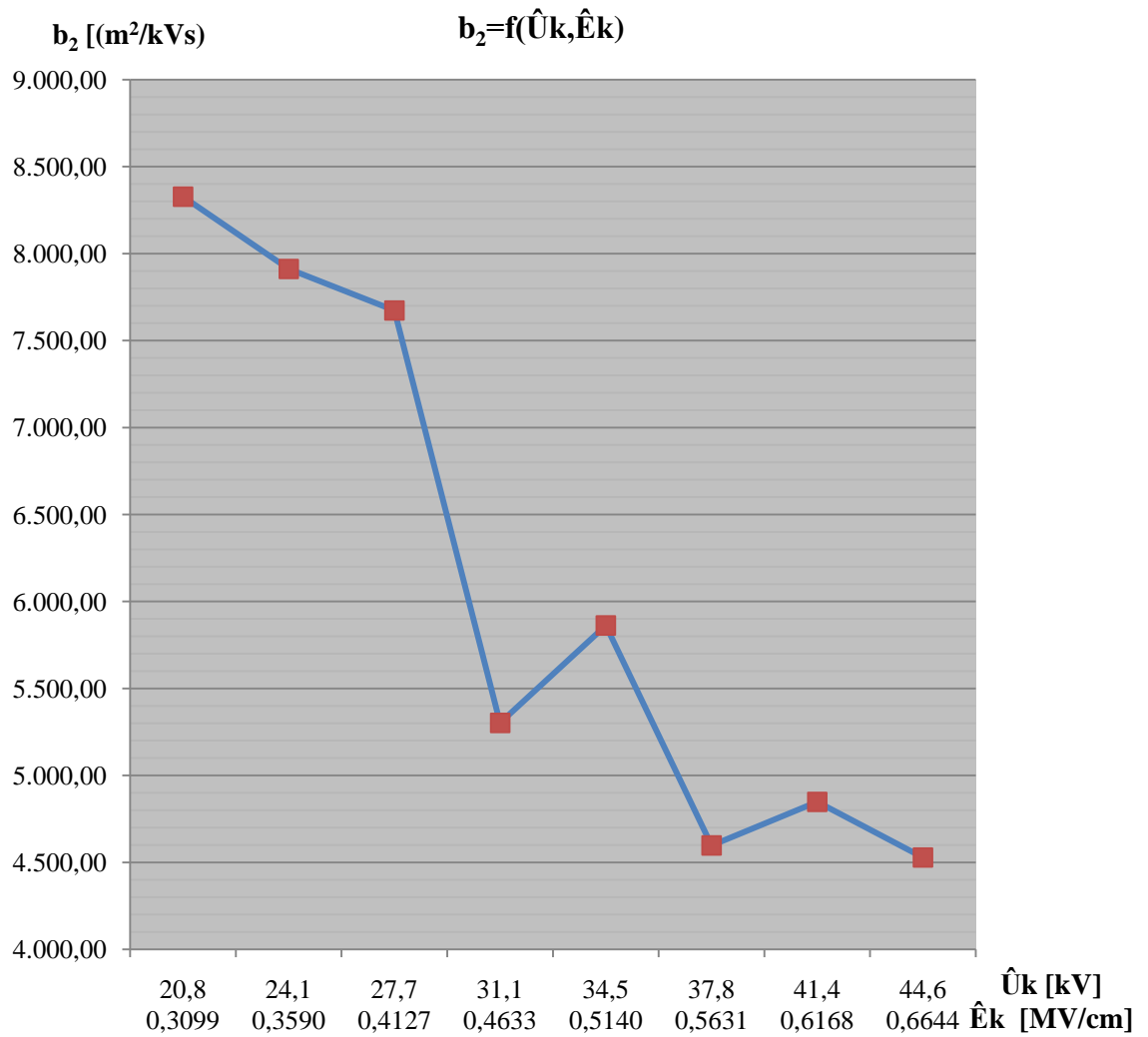
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.3-6: Χαρακτηριστική $b_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

b_2 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

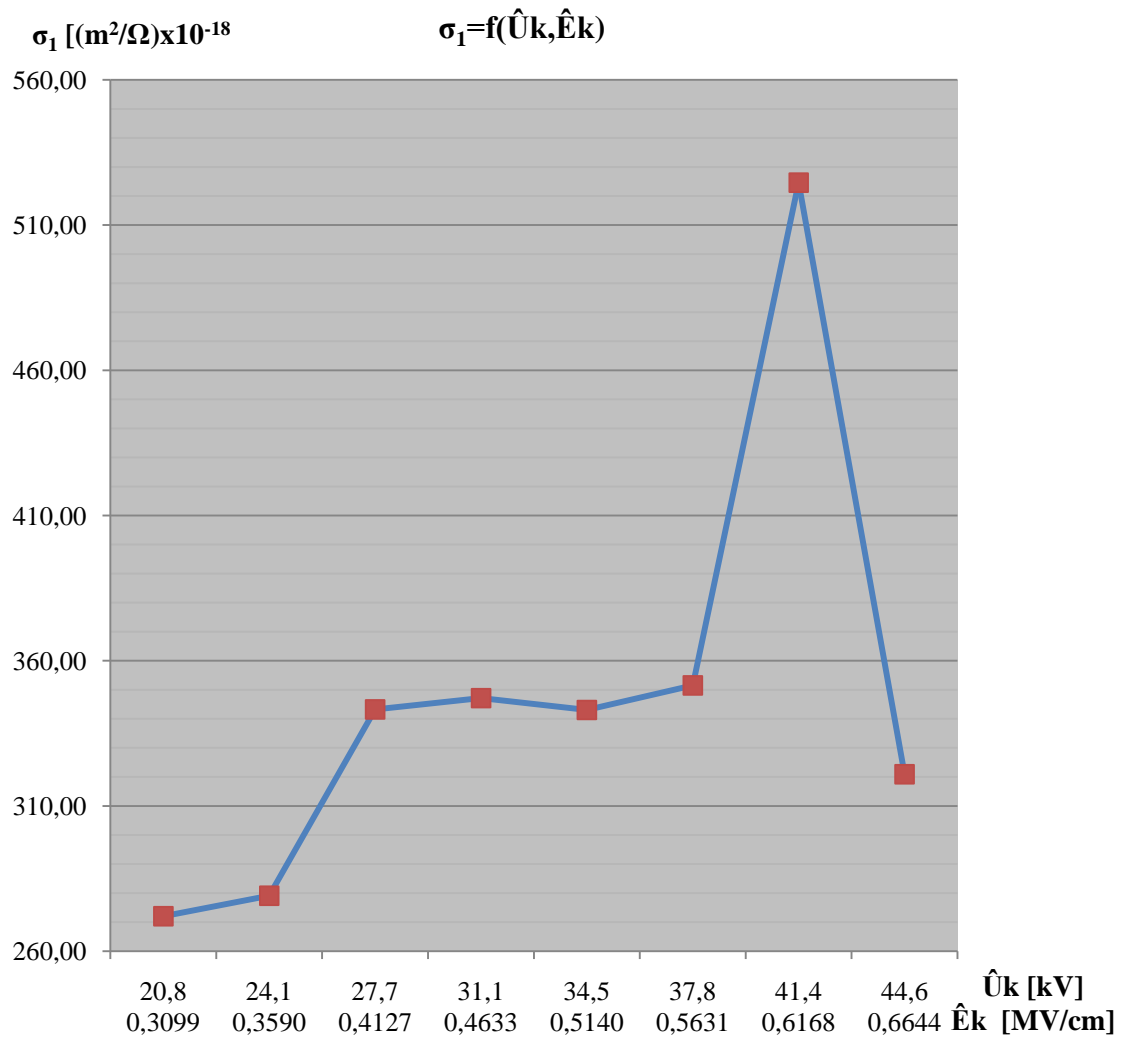
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.3-7: Χαρακτηριστική $\sigma_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

σ_1 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

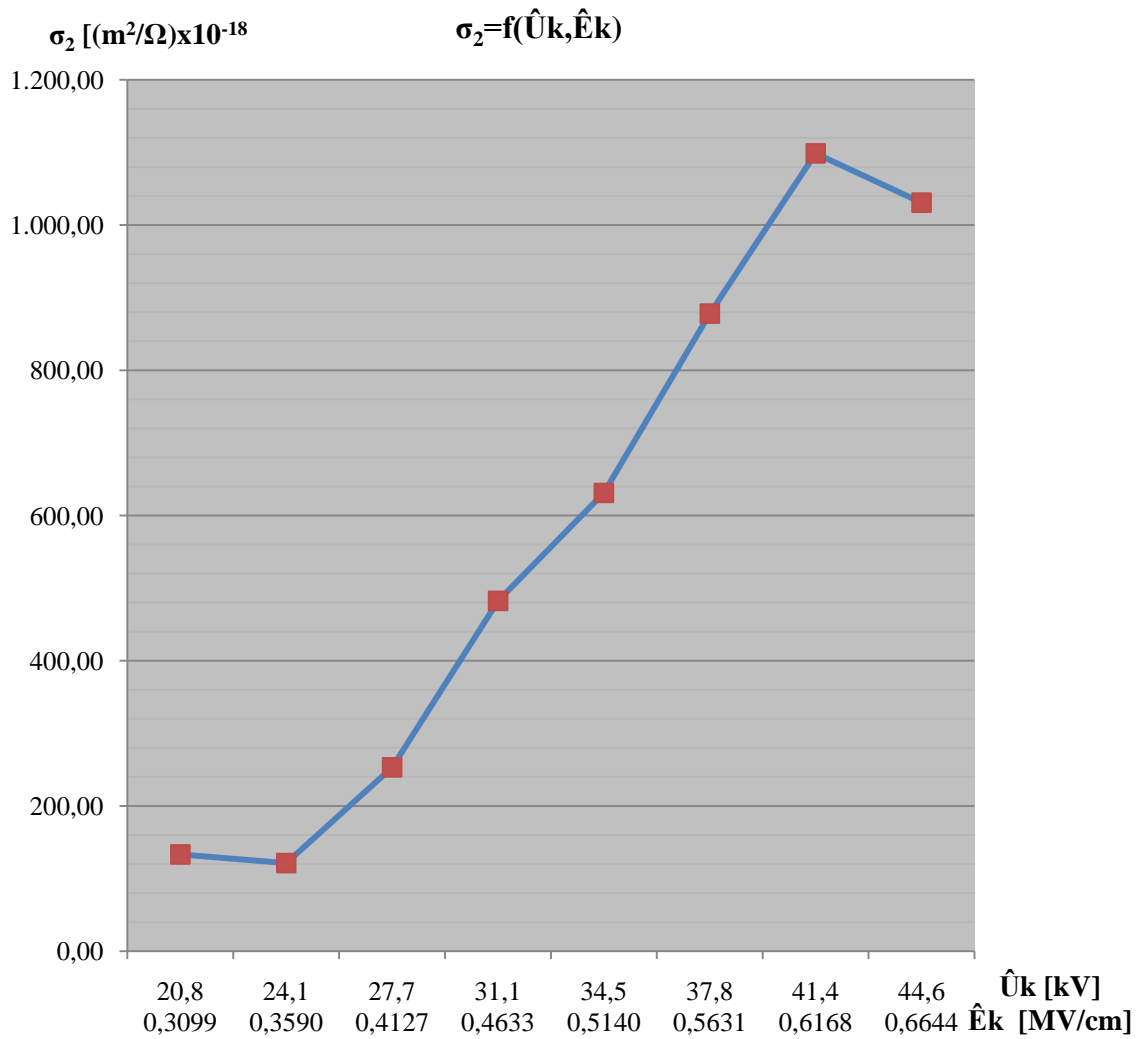
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μs

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.3-8: Χαρακτηριστική $\sigma_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

σ_2 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μs

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα

3.1.4 Δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ με κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	t_1 (μs)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	v_1 (m/s) $\times 10^6$	b_1 (m^2/kVs)
21,2	1.000	0,3158	139,7	11,85	0,1765	175,090	9.920,113
24,6	1.000	0,3665	135	13,28	0,1978	182,373	9.220,071
28,3	1.000	0,4216	98,2	11,12	0,1657	171,049	10.322,812
31,8	1.000	0,4737	77,6	9,87	0,147	163,540	11.125,170
35,1	1.000	0,5229	72,2	10,14	0,1511	165,230	10.935,142
38,6	1.000	0,5751	55,3	8,54	0,1272	154,586	12.152,987
42,4	1.000	0,6317	44,2	7,5	0,1117	146,742	13.137,153
44,8	1.000	0,6674	39,8	7,13	0,1062	143,742	13.535,028

Πίνακας 3.1.4-1: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_{ev} , E_{ev} , v_1 και b_1 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι Μ/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής $-250/2500 \mu\text{s}$ σε θερμοκρασία λαδιού 20°C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: $d=2\text{mm}$.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

t_1 : Ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{ev} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_{ev}

v_1 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

b_1 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	t_2 (μ s)	u_π (kV)	E_π (MV/cm)	v_2 (m/s) $\times 10^6$	b_2 (m ² /kVs)
21,2	1.000	0,3158	159,9	13,56	0,202	183,711	9.094,604
24,6	1.000	0,3665	162	15,95	0,2376	194,122	8.170,118
28,3	1.000	0,4216	152,5	17,26	0,2571	199,165	7.746,597
31,8	1.000	0,4737	130,9	16,65	0,248	196,869	7.938,266
35,1	1.000	0,5229	111,7	15,68	0,2336	193,028	8.263,185
38,6	1.000	0,5751	100,6	15,53	0,2314	192,413	8.315,169
42,4	1.000	0,6317	140,4	23,81	0,3547	219,259	6.181,534
44,8	1.000	0,6674	136,3	24,43	0,364	220,815	6.066,346

Πίνακας 3.1.4-2: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: $u_{\pi\epsilon}$, $E_{\pi\epsilon}$, v_2 και b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι Μ/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -250/2500 μ s σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: d=2mm.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

t_2 : Ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

u_π : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

E_π : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_π

v_2 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

b_2 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	q_1 (μCb)	q_2 (μCb)	Δq (μCb)	σ_1 (m^2/Ω) $\times 10^{-18}$
21,2	1.000	0,3158	11,85	0,1765	0,085	0,1	0,015	281,070
24,6	1.000	0,3665	13,28	0,1978	0,089	0,15	0,061	273,529
28,3	1.000	0,4216	11,12	0,1657	0,094	0,16	0,066	323,449
31,8	1.000	0,4737	9,87	0,147	0,081	0,24	0,159	300,380
35,1	1.000	0,5229	10,14	0,1511	0,087	0,34	0,253	317,120
38,6	1.000	0,5751	8,54	0,1272	0,067	0,42	0,353	271,417
42,4	1.000	0,6317	7,5	0,1117	0,067	0,88	0,813	293,397
44,8	1.000	0,6674	7,13	0,1062	0,067	0,79	0,723	302,283

Πίνακας 3.1.4-3: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_{ev} , E_{ev} , v_1 και b_1 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι Μ/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -250/2500 μs σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: d=2mm.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

u_{ev} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_{ev}

q_1 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q_2 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Δq : Η διαφορά των φορτίων $q_2 - q_1$

σ_1 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k (kV)	C_m (nF)	\hat{E}_k (MV/cm)	u_π (kV)	E_π (MV/cm)	q_1 (μCb)	q_2 (μCb)	Δq (μCb)	σ_2 (m^2/Ω) $\times 10^{-18}$
21,2	1.000	0,3158	13,56	0,202	0,085	0,1	0,015	45,473
24,6	1.000	0,3665	15,95	0,2376	0,089	0,15	0,061	166,126
28,3	1.000	0,4216	17,26	0,2571	0,094	0,16	0,066	170,425
31,8	1.000	0,4737	16,65	0,248	0,081	0,24	0,159	420,728
35,1	1.000	0,5229	15,68	0,2336	0,087	0,34	0,253	696,864
38,6	1.000	0,5751	15,53	0,2314	0,067	0,42	0,353	978,416
42,4	1.000	0,6317	23,81	0,3547	0,067	0,88	0,813	1.675,198
44,8	1.000	0,6674	24,43	0,364	0,067	0,79	0,723	1.461,990

Πίνακας 3.1.4-4: Στατιστική ανάλυση του μεγέθους: σ_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertinax – λάδι M/Σ» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm - πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -250/2500 μs σε θερμοκρασία λαδιού 20 °C με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2.2.1 και στις σχέσεις 2.3-1 ως 2.3-11. **Πάχος δοκιμίου: d=2mm.**

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : Πυκνωτής μέτρησης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

u_π : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

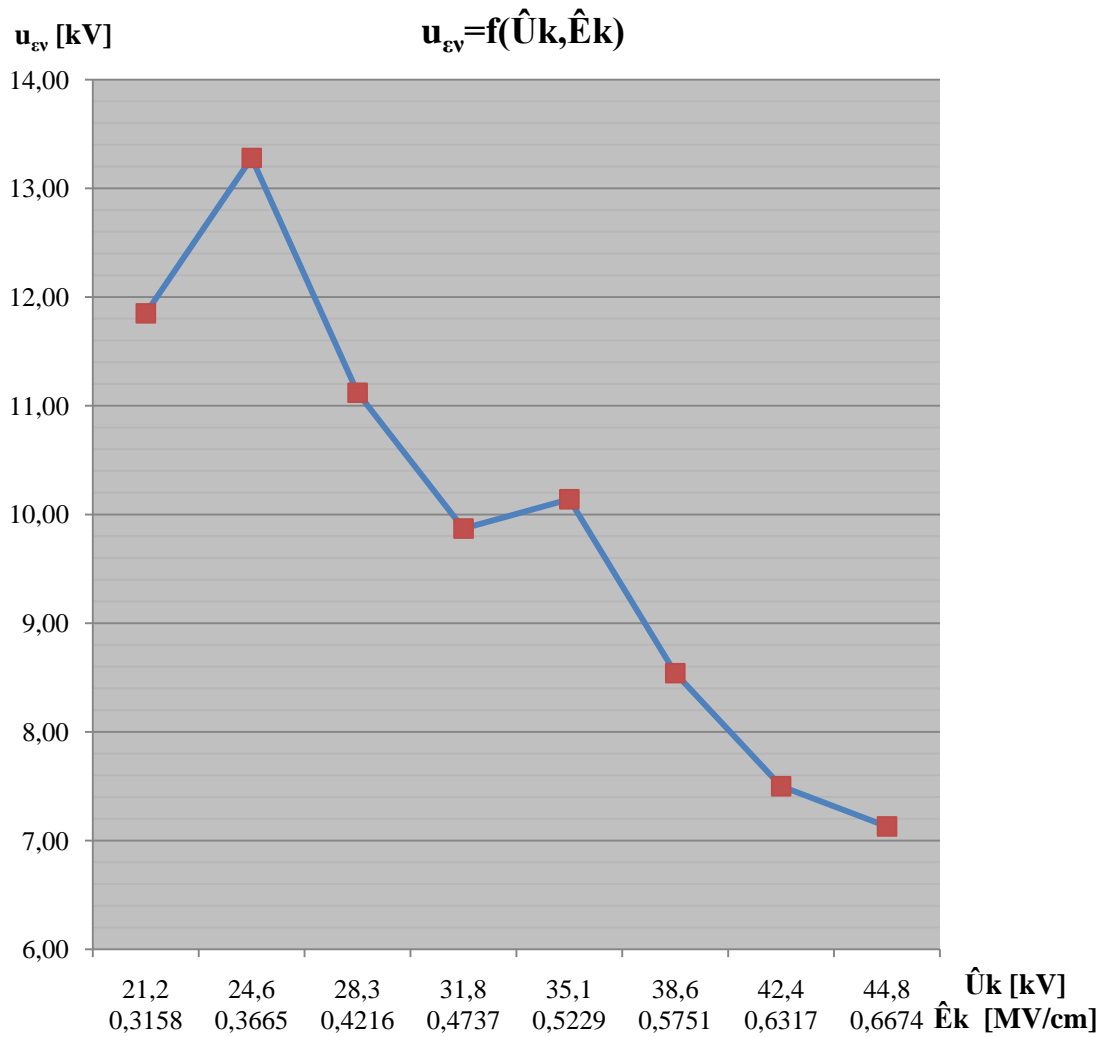
E_π : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_π

q_1 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q_2 : Η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Δq : Η διαφορά των φορτίων $q_2 - q_1$

σ_2 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.1.4-1: Χαρακτηριστική $u_{\text{ev}} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

u_{ev} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

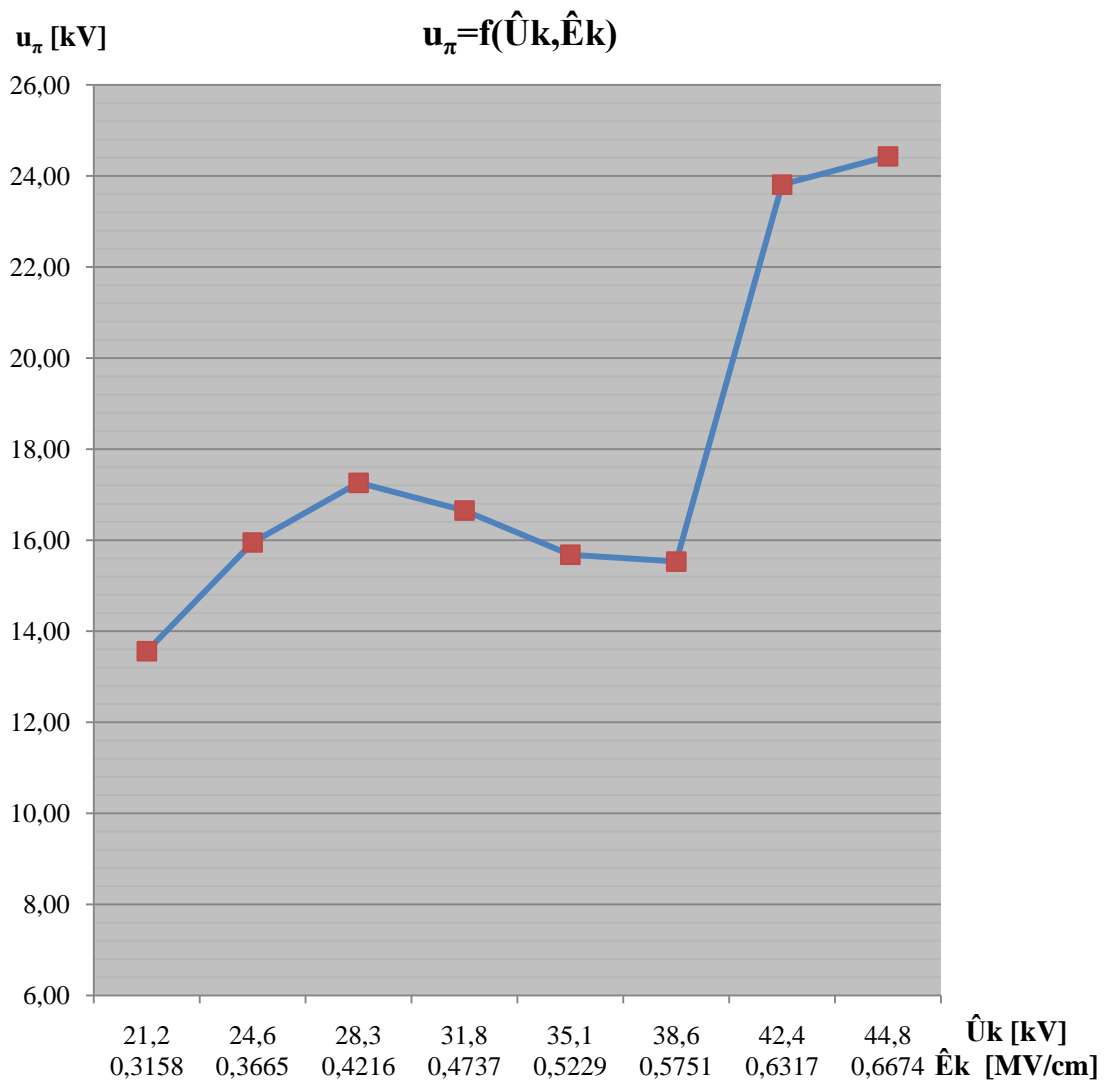
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μs

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα $R=0,9\text{mm}$ – πλάκα



Σχήμα 3.1.4-2: Χαρακτηριστική $u_{\pi} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

u_{π} : Η στιγμιαία τιμή της τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

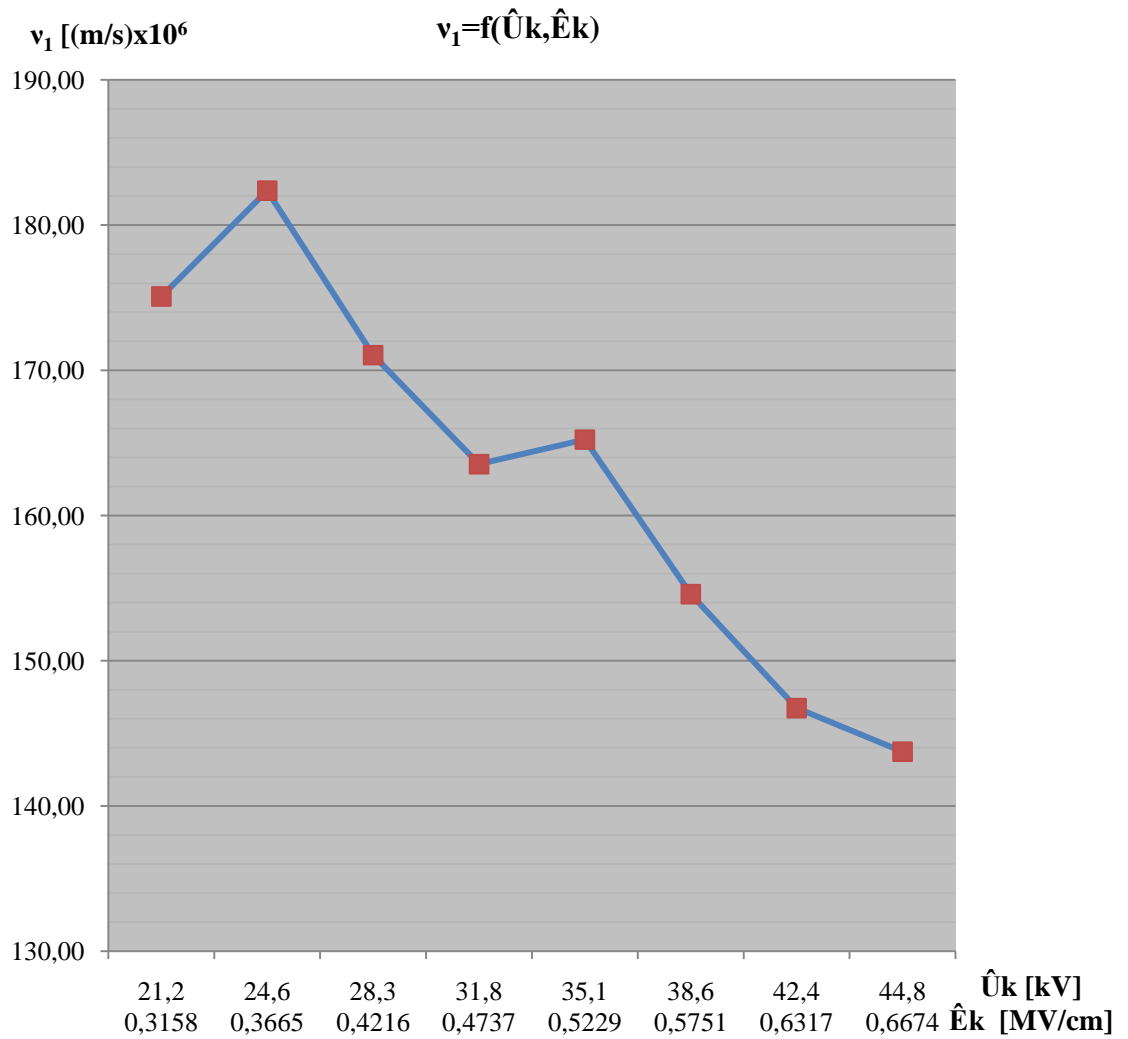
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.4-3: Χαρακτηριστική $v_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

v_1 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

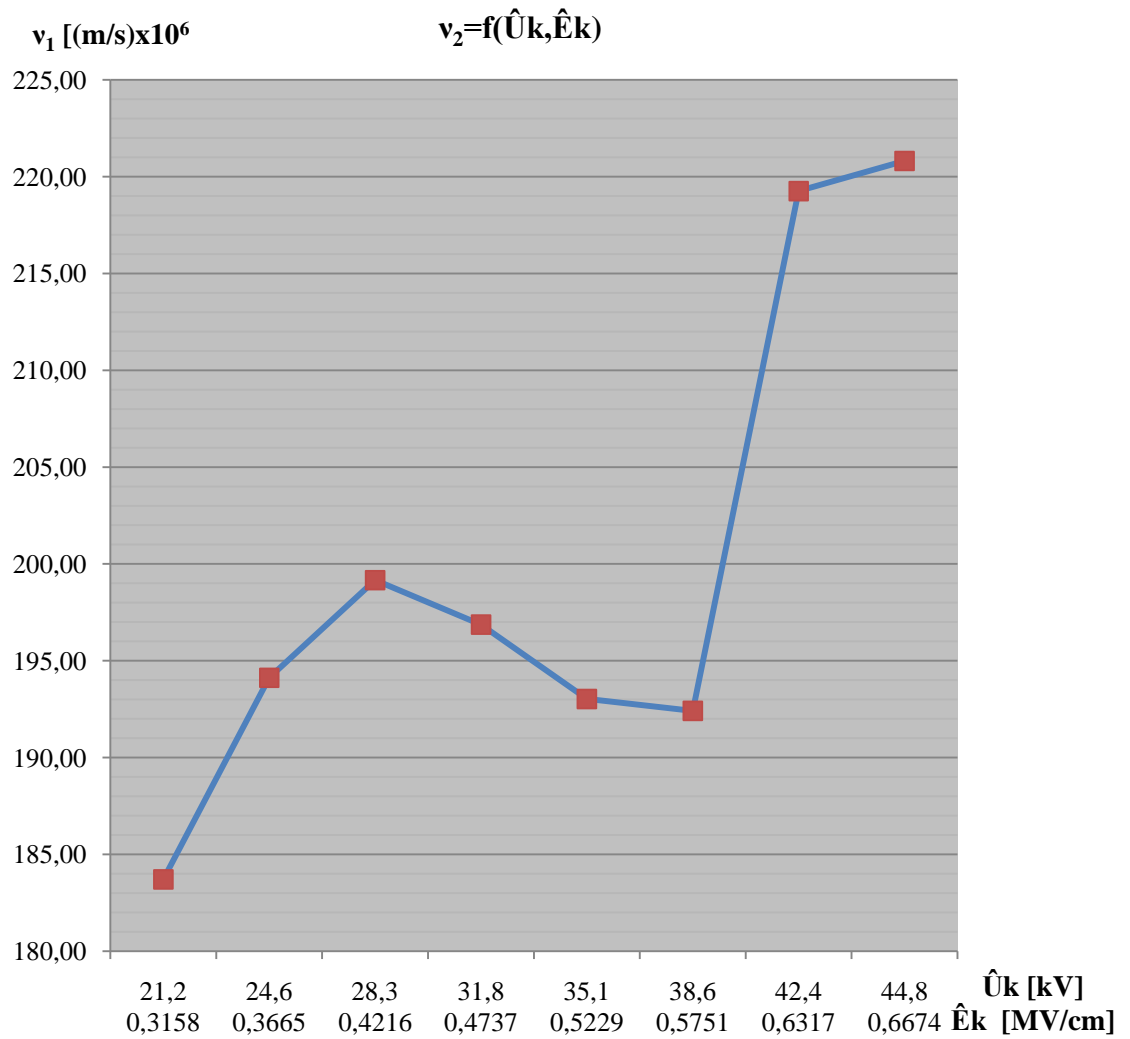
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μs

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.4-4: Χαρακτηριστική $v_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

v_2 : Η ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

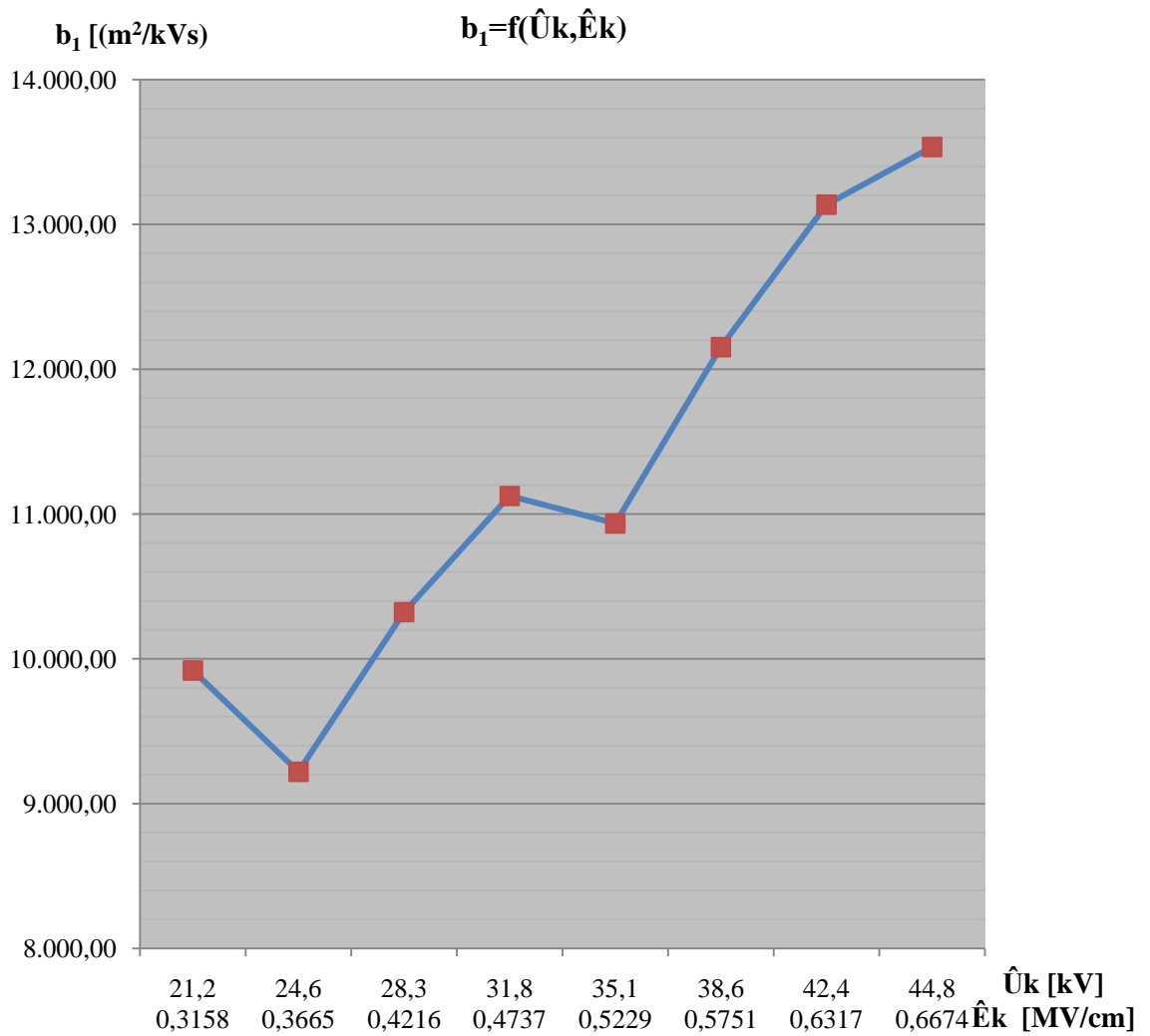
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.4-5: Χαρακτηριστική $b_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

b_1 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

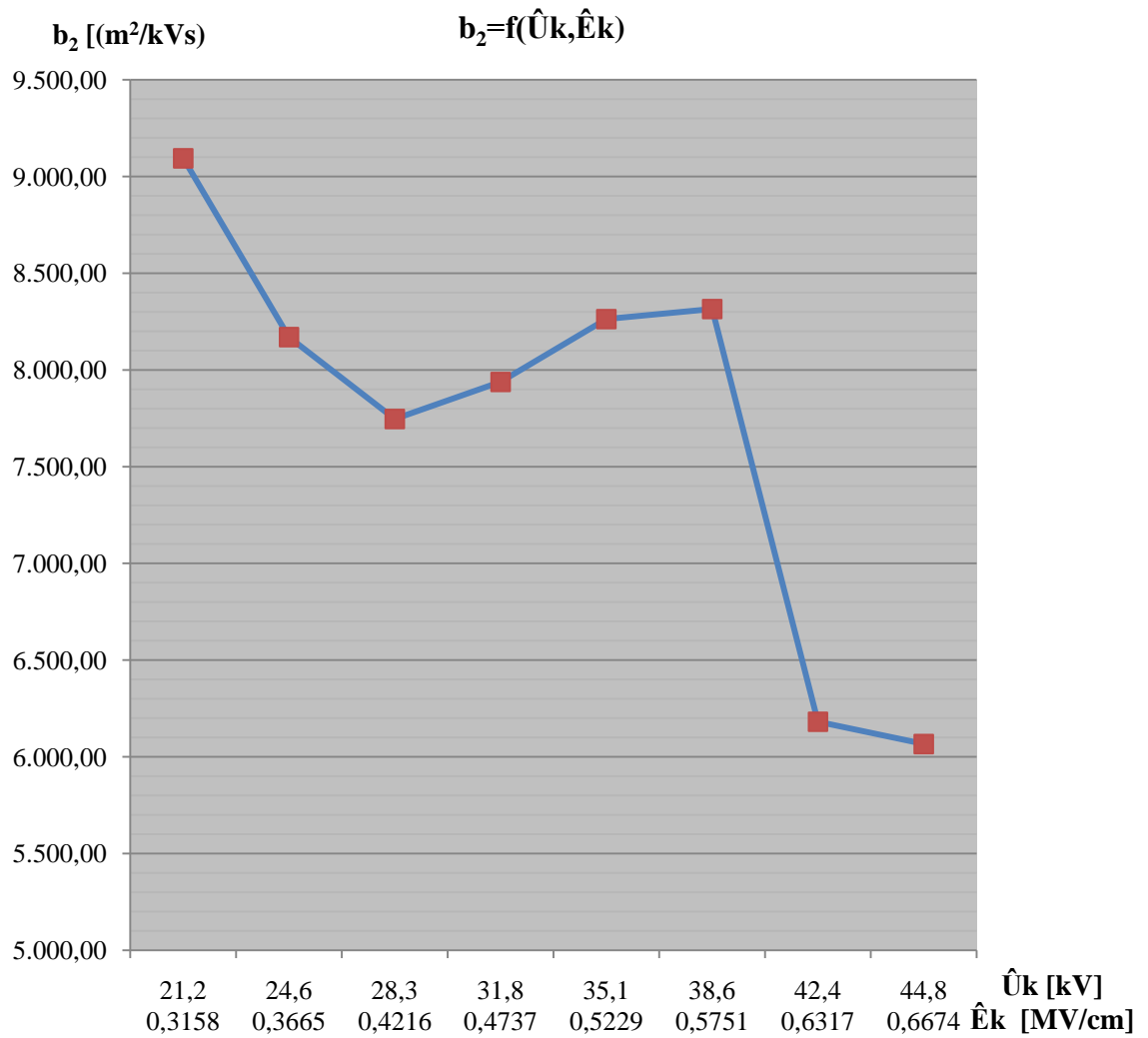
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.4-6: Χαρακτηριστική $b_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

b_2 : Η κινητικότητα ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

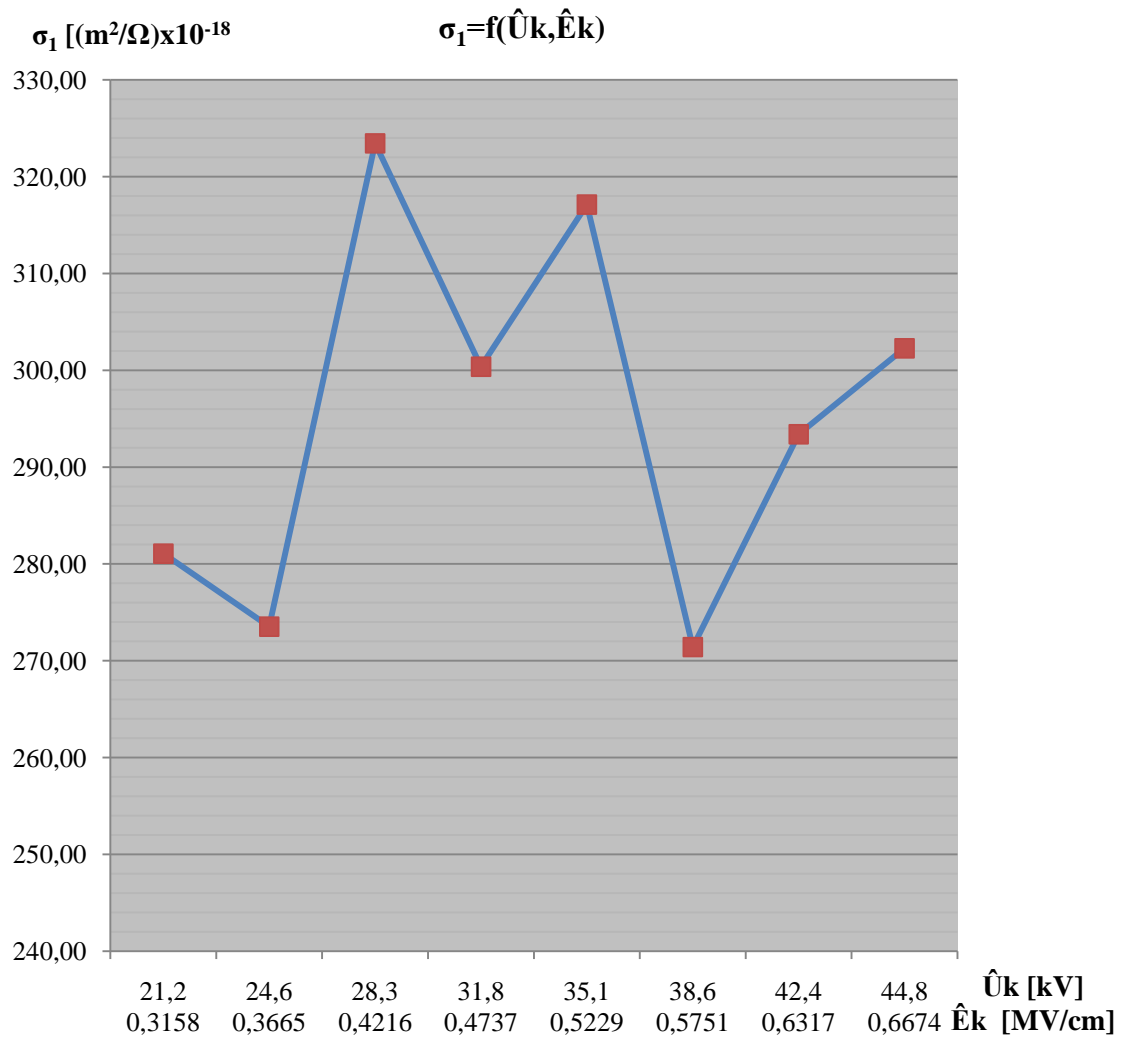
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μ s

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.4-7: Χαρακτηριστική $\sigma_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

σ_1 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

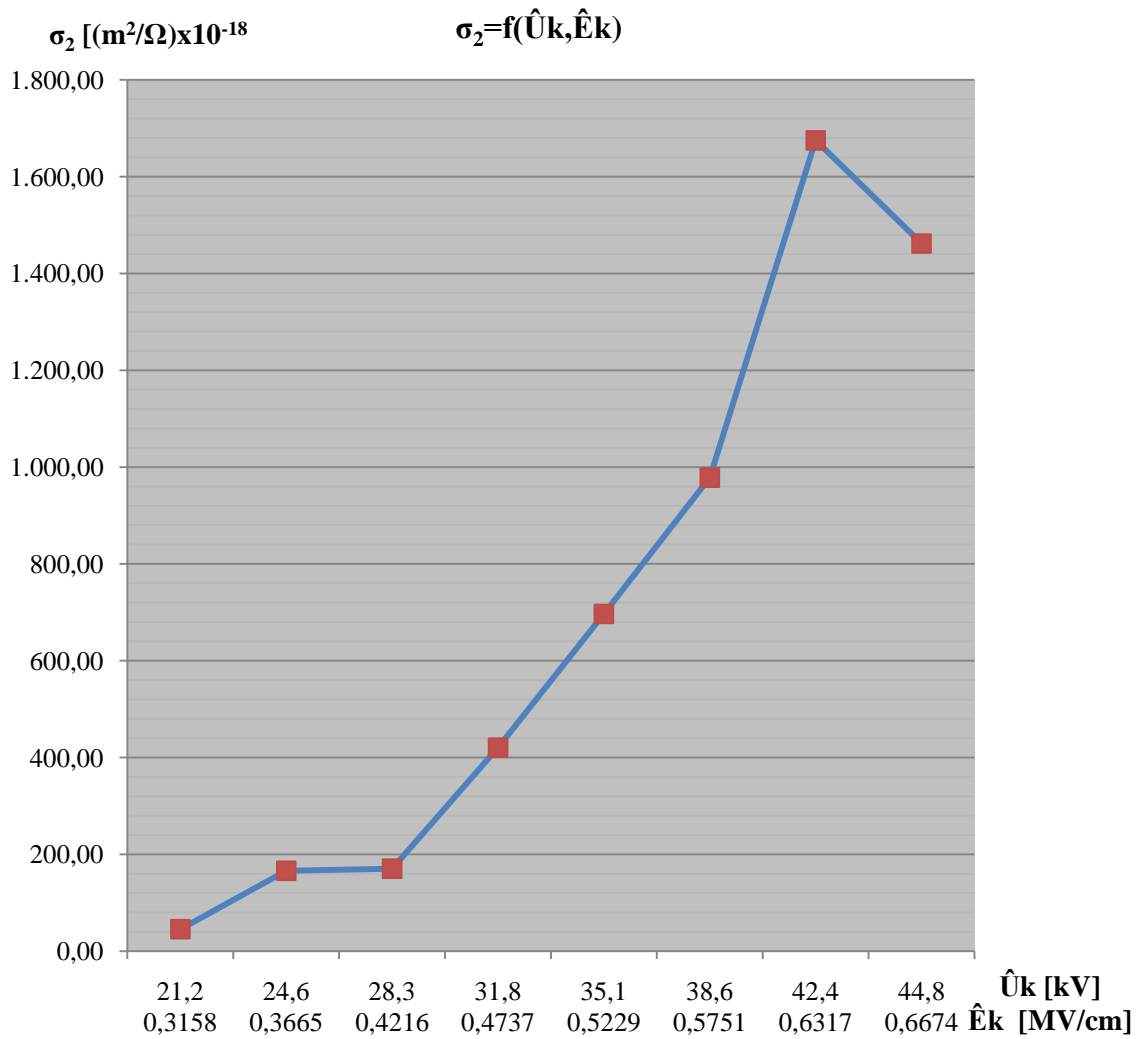
\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι M/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μs

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα



Σχήμα 3.1.4-8: Χαρακτηριστική $\sigma_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$

σ_2 : Η ειδική αγωγιμότητα κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

\hat{U}_k : Η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{E}_k : Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην \hat{U}_k

Υλικό: Pertinax – λάδι Μ/Σ

Μορφή τάσης: +250/2500 μs

Διατομή ηλεκτροδίου: ακίδα R=0,9mm – πλάκα

3.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Στην συνέχεια θα παραθέσουμε σε μορφή πίνακα των μαθηματικών προσεγγίσεων των χαρακτηριστικών που έχουμε υπολογίσει.

3.2.1 Δοκίμιο πάχους d=1mm με κρουστική τάση +250/2500μs

α/α σχήματος	Χαρακτηριστική	Μαθηματική Προσέγγιση
Σχήμα 3.1.1-1	$u_{εν}=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -0,036x^3 + 0,736x^2 - 4,728x + 14,49$
Σχήμα 3.1.1-2	$u_{π}=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 0,009x^3 - 0,225x^2 + 4,695x + 7,234$
Σχήμα 3.1.1-3	$v_1=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -0,274x^3 + 5,543x^2 - 36,30x + 198,9$
Σχήμα 3.1.1-4	$v_2=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 0,028x^3 - 1,246x^2 + 18,51x + 159,7$
Σχήμα 3.1.1-5	$b_1=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 35,69x^3 - 720,1x^2 + 4788x + 6421$
Σχήμα 3.1.1-6	$b_2=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 1,721x^5 - 53,39x^4 + 605,8x^3 - 2977x^2 + 5099x + 6620$
Σχήμα 3.1.1-7	$\sigma_1=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -1,488x^4 + 28,27x^3 - 178,9x^2 + 490,8x - 307,2$
Σχήμα 3.1.1-8	$\sigma_2=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 36,43e^{0,560x}$

3.2.2 Δοκίμιο πάχους d=1mm με κρουστική τάση -250/2500μs

α/α σχήματος	Χαρακτηριστική	Μαθηματική Προσέγγιση
Σχήμα 3.1.2-1	$u_{εν}=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -0,009x^4 + 0,172x^3 - 0,989x^2 + 1,497x + 8,447$
Σχήμα 3.1.2-2	$u_{π}=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -0,109x^4 + 1,605x^3 - 7,172x^2 + 13,26x + 3,564$
Σχήμα 3.1.2-3	$v_1=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -10,1\ln(x) + 159,9$
Σχήμα 3.1.2-4	$v_2=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 0,185x^5 - 4,424x^4 + 38,22x^3 - 145,3x^2 + 244,3x + 35,89$
Σχήμα 3.1.2-5	$b_1=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 10,73x^4 - 197,7x^3 + 1164x^2 - 1981x + 12687$
Σχήμα 3.1.2-6	$b_2=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -15,93x^5 + 377x^4 - 3245x^3 + 12356x^2 - 20966x + 22034$
Σχήμα 3.1.2-7	$\sigma_1=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 1,256x^5 - 25,53x^4 + 184,4x^3 - 587,9x^2 + 830,2x - 94,08$
Σχήμα 3.1.2-8	$\sigma_2=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 180,3e^{0,434x}$

3.2.3 Δοκίμιο πάχους d=2mm με κρουστική τάση +250/2500μs

α/α σχήματος	Χαρακτηριστική	Μαθηματική Προσέγγιση
Σχήμα 3.1.3-1	$u_{εν}=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 0,272x^2 - 3,223x + 14,83$
Σχήμα 3.1.3-2	$u_{π}=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -0,129x^3 + 1,611x^2 - 2,177x + 15,78$
Σχήμα 3.1.3-3	$v_1=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 1,997x^2 - 23,75x + 198,9$
Σχήμα 3.1.3-4	$v_2=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -0,302x^3 + 3,362x^2 - 1,067x + 188,9$
Σχήμα 3.1.3-5	$b_1=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -253,3x^2 + 3017x + 6722$
Σχήμα 3.1.3-6	$b_2=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 21,65x^3 - 232,1x^2 - 29,03x + 8672,$
Σχήμα 3.1.3-7	$\sigma_1=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -0,433x^6 + 10,02x^5 - 88,07x^4 + 369,1x^3 - 763,1x^2 + 753,5x - 9,407$
Σχήμα 3.1.3-8	$\sigma_2=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 89,96e^{0,349x}$

3.2.4 Δοκίμιο πάχους d=2mm με κρουστική τάση -250/2500μs

α/α σχήματος	Χαρακτηριστική	Μαθηματική Προσέγγιση
Σχήμα 3.1.4-1	$u_{εν}=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -0,005x^6 + 0,169x^5 - 2,04x^4 + 12,23x^3 - 37,91x^2 + 55,32x - 15,92$
Σχήμα 3.1.4-2	$u_{π}=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -0,055x^4 + 1,125x^3 - 7,501x^2 + 19,37x + 0,23$
Σχήμα 3.1.4-3	$v_1=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -0,356x^2 - 2,096x + 181,3$
Σχήμα 3.1.4-4	$v_2=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -0,196x^4 + 4,031x^3 - 27,26x^2 + 72,01x + 133,8$
Σχήμα 3.1.4-5	$b_1=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 52,46x^2 + 125,3x + 9391$
Σχήμα 3.1.4-6	$b_2=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 16,27x^4 - 333,8x^3 + 2269x^2 - 6046x + 13291$
Σχήμα 3.1.4-7	$\sigma_1=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = -0,301x^5 + 7,253x^4 - 63,72x^3 + 246,9x^2 - 397,1x + 487,5$
Σχήμα 3.1.4-8	$\sigma_2=f(\hat{U}k, \hat{E}k)$	$y = 44,85e^{0,495x}$

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό μέρος της διπλωματικής αυτής εργασίας τέσσερεις είναι οι βασικοί παράγοντες γήρανσης των ηλεκτρομονωτικών υλικών. Οι απώλειες Joule, οι δυνάμεις Coulomb, οι μερικές εκκενώσεις και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Οι παράγοντες αυτοί και οι αντίστοιχες επιδράσεις τους πάνω στα υλικά θα βοηθήσουν στην ερμηνεία των γραφικών παραστάσεων και στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Καταρχήν όμως, πρέπει να αποκλειστούν από τους παραπάνω παράγοντες οι απώλειες Joule και η μεταβολή της θερμοκρασία του περιβάλλοντος, καθώς αυτοί δεν υφίστανται στις συνθήκες των μετρήσεων. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος δεν επιδρά, γιατί ήταν σταθερή σε όλη τη διάρκεια και ίση με 20°C. Από την άλλη, οι απώλειες Joule αποκλείονται, γιατί η χρονική διάρκεια της καταπόνησης είναι μικρή και δεν προλαβαίνει να υπάρξει αύξηση της θερμοκρασίας. Συνεπώς απομένουν δύο παράγοντες με βάση τους οποίους ερμηνεύονται οι γραφικές παραστάσεις, οι δυνάμεις Coulomb και οι μερικές εκκενώσεις. Είναι γνωστό πως κάθε φορά που αναπτύσσονται δυνάμεις Coulomb παρατηρείται μείωση του φορτίου, ενώ η αύξηση του φορτίου μαρτυρά την αύξηση των μερικών εκκενώσεων.

Τα δύο αυτά στοιχεία, έρχονται να συμπληρώσουν οι δύο θεωρίες η μακροσκοπική και η κβαντομηχανική. Με την κβαντική θεωρία εξηγείται η αύξηση των φορτίων. Σύμφωνα με αυτήν, η αύξηση της τάσης δημιουργεί πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ενισχύεται ο ιονισμός με κρούσεις. Από τους παραπάνω συγκεντρωτικούς πίνακες στους οποίους υπολογίζονται τα βασικά ηλεκτρικά μεγέθη των μετρήσεων για κάθε επίπεδο τάσης, παρατηρείται κατά κανόνα αύξηση του φορτίου με την αύξηση της τάσης. Επομένως, ο κυριότερος παράγοντας γήρανσης του δοκιμίου είναι οι μερικές εκκενώσεις. Οι δυνάμεις Coulomb θεωρητικά υπάρχουν αλλά είναι αμελητέες, σε σχέση με τις μερικές εκκενώσεις, και δεν είναι ικανές να καταπονήσουν το υλικό.

Η φυσική ερμηνεία για την γήρανση και την διάσπαση των μονωτικών υλικών έχει δοθεί από την σχέση $Q = Q_0 e^{\frac{A(E^2 - E_0^2)}{E_0^2}}$ όπου Q_0 είναι στην έναρξη των μερικών εκκενώσεων και Q μία τυχαία τιμή [1,2].

Συνεπώς επειδή η χαρακτηριστική $\sigma_2 = f(\dot{U}_k, \dot{E}_k)$ για όλα τα δοκίμια 1mm και 2mm και για κρουστικές τάσεις $\pm 250/2500\mu s$ έχουν εκθετική μορφή μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η γήρανση και διάσπαση του μονωτικού υλικού εκδηλώθηκε με ιονισμό με κρούσεις.

Για τις υπόλοιπες χαρακτηριστικές παρατηρούμε ότι δεν έχουν συγκεκριμένη μορφή αν και κυρίως είναι πολυωνυμικές συναρτήσεις διαφόρων βαθμών και απαιτείται η περαιτέρω διερεύνηση ώστε να μπορέσουμε να εξάγουμε πιο ασφαλή συμπεράσματα.



5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία προσπάθεια με στόχο τον υπολογισμό διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών, πάνω σε δοκίμια 1mm και 2mm του στερεού ηλεκτρομονωτικού Pertinax. Τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων για την συμπεριφορά του συγκεκριμένου ηλεκτρομονωτικού υλικό. Απώτερος στόχος της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι αφενός να μπορεί ο αναγνώστης να έχει άμεση εποπτική εικόνα της μεταβολής αυτών των μεγεθών ανάλογα με την πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης αλλά και του πάχους του εξεταζόμενου δοκιμίου και αφετέρου να εξαχθούν συμπεράσματα που θα βοηθήσουν ακόμα περισσότερο στην κατανόηση της χρονικής έναρξης και περαίωσης των στερεών μονωτικών υλικών.



6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Μπούρκας Π.Δ., Καραγιαννόπουλος Κ.Γ., «Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και υλικά» Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003.

[2] Μπούρκας Π.Δ., «Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων» Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1998.

[3] Δέρβος Κ.Θ., Μπούρκας Π.Δ., «Εισαγωγή στα Ηλεκτρομονωτικά Υλικά» Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1991.

[4] Σταθόπουλος Ι.Α., Μπούρκας Π.Δ., Τοπαλής Φ.Β., «Μετρήσεις και δοκιμές Υψηλών Τάσεων» Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1991.

[5] Σταθόπουλος Ι.Α., «Υψηλές Τάσεις» Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1995.

[6] Δέρβος Κ.Θ., «Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων» Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997.