



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Τομέας Βιομηχανικών διατάξεων και συστημάτων
αποφάσεων**

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΕΝΤΟΣ ΣΤΕΡΕΩΝ
ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ
ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ 250/2500 μ s**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ Α. ΠΑΝΑΓΙΑΝΝΑΚΗΣ

Επιβλέπων : Π. Δ. ΜΠΟΥΡΚΑΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Τομέας Βιομηχανικών διατάξεων και συστημάτων
αποφάσεων

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΕΝΤΟΣ ΣΤΕΡΕΩΝ
ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ
ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ 250/2500 μ s**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ Α. ΠΑΝΑΓΙΑΝΝΑΚΗΣ

Επιβλέπων : Π. Δ. ΜΠΟΥΡΚΑΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 8^η Δεκεμβρίου 2009

Π.Δ. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2009

Ιωάννης Α. Παναγιαννάκης

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

Copyright © Ιωάννης Α Παναγιαννάκης, 2009
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.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων υπό την επίβλεψη του καθηγητή Περικλή Μπούρκα και αφορά στη μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά υλικά πάχους $d=2\text{mm}$ κατά την καταπόνησή τους με κρουστικές τάσεις χειρισμών (250/2500 μs), υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, για θετική και αρνητική πολικότητα ακίδας.

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμα τον καθηγητή μου κύριο Περικλή Μπούρκα για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Χάρη στις υποδείξεις του και φυσικά χάρη στο χρόνο που μου αφιέρωσε ήταν δυνατή η υλοποίησή της. Άλλωστε η θεωρητική ανάλυση που ακολουθεί προέρχεται κυρίως από τα βιβλία «Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά» των καθηγητών Π.Δ. Μπούρκα- Κ.Γ. Καραγιαννόπουλου και «Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων» του καθηγητή Κ.Θ.Δέρβου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των μερικών εκκενώσεων και οι επιπτώσεις αυτών, σε βιομηχανικά μονωτικά υλικά υπό κρουστική τάση της μορφής 250/2500 μs . Η προαναφερθείσα μελέτη πραγματοποιείται με τη βοήθεια μετρήσεων αλμάτων δυναμικού, λόγω μερικών εκκενώσεων, σε δοκίμια $d=2 \text{ mm}$ και στατιστικής μελέτης των μετρήσεων αυτών.

Αρχικά, στο θεωρητικό κομμάτι της εργασίας, γίνεται μια περιγραφή των κυριότερων χαρακτηριστικών των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές εφαρμογές, αναφέροντας ειδικά τις βασικές ιδιότητες αυτών. Στη συνέχεια, γίνεται εκτενής αναφορά στα φαινόμενα πριν και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών επεξηγώντας τις δύο θεωρίες που αναλύουν τα φαινόμενα γήρανσης και διάτρησης : μακροσκοπική και κβαντική.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων μέσω των αλμάτων δυναμικού ενώ τα τελευταία κεφάλαια της εργασίας, που αποτελούν και το πιο ουσιαστικό κομμάτι αυτής, περιλαμβάνουν: α) τη στατιστική μελέτη της γήρανσης στερεών μονωτικών υπό κρουστικές τάσεις (πίνακες και διαγράμματα των αντίστοιχων μεγεθών) και β) τις μαθηματικές προσεγγίσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων (εκθετική προσέγγιση για κάθε διάγραμμα).

Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από την πραγματοποίηση της εργασίας.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται και η βιβλιογραφία από την οποία αντλήθηκαν όλα τα θεωρητικά στοιχεία που την συνοδεύουν για την πληρέστερη ενημέρωση του αναγνώστη.

Λέξεις Κλειδιά

Μονωτικά υλικά, Διάσπαση – Διάτρηση μόνωσης , Μερικές εκκενώσεις, Γήρανση υλικών, Κρουστική τάση, Δύναμη Coulomb, Ανομοιογένειες υλικού.

ABSTRACT

The scope of this thesis is the study of certain partial electrical discharges and the repercussions of these, in solid insulating materials under impact stress of form of 250/2500 μ s. The mentioned before study is realised with the help of measurements of distinctive potential steps, because of partial electrical discharges, in essays $d=2$ mm and the statistical study of these measurements.

In the theoretical part it is given a description of the main characteristics of insulating materials that are used today in a lot of applications, reporting specifically the basic attributes of these. Afterwards, it is given a report in the phenomena before and at the breakdown of solid insulating materials explaining the two theories that analyze the phenomena of ageing and breakdown: Macroscopic and Quantum Mechanics Theory.

Afterwards there is a report of the statistical measurements of certain partial electrical discharges via distinctive potential steps while the last chapters, that constitute also the most essential piece of this thesis, include: a) the statistical study of ageing solid insulating materials under impact stress (tables and diagrams of corresponding sizes) and b) the mathematic approaches of experimental results (exponential approach for each diagram).

In the last chapter the conclusions that were exported from the realisation of work are reported.

In the end it is mentioned the bibliography from which all the theoretical elements were drawn that to provide a more complete briefing for the reader.

Key Words

Insulating materials, break – perforation of insulation, partials discharges, ageing – destruction of materials, impact voltage, Coulomb's force, material's incongruity.

Περιεχόμενα

1. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΕΝΝΟΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΝ	11
2. ΒΑΣΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	14
2.1 Η ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	14
2.2 Η ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ	14
2.3 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ($\text{tg}\delta$)	15
2.4 Η ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	17
2.5 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ $\varepsilon \text{tg}\delta$	18
2.6 Η ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	20
2.7 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	21
2.8 Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	22
3. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	24
3.1 Η ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ	25
3.1.1 Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ	26
3.1.2 Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ	28
3.1.3 Η ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΛΟΓΩ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ (ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ Η ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ)	32
3.1.3.2 Η ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ	34
3.1.3.3 ΤΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ	35
3.1.4 Η ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ	43
3.1.5 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ	44
3.1.5.2 Ο ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟΥΣ ΑΛΛΟΥΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ	49
3.1.5.2.1 Ο ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ JOULE	49
3.1.5.2.2 Η ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ, ΛΟΓΩ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ	51
3.1.5.2.3 Η ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΜΕΡΙΚΕΣ ΕΚΚΕΝΩΣΕΙΣ	52
3.1.5.2.4 Η ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΑΝ ΑΡΙΘΜΟ ΚΡΟΥΣΕΩΝ (ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ, ΜΕ ΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ JOULE ΚΑΙ ΤΙΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ COULOMB)	52
3.1.5.2.5 Ο ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ	60
3.1.6 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ	64

3.1.7 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΣΤΕΡΕΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ	70
3.2 Η ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΚΑΙ Η ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗ	71
3.3 Η ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ.....	72
3.3.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	74
3.3.2 ΤΟ ΦΑΣΜΑ ΤΗΣ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ	81
3.3.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ ΜΕ ΚΡΟΥΣΕΙΣ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ	83
3.3.4 ΦΑΣΜΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ	84
3.4 ΈΝΑΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ.....	86
3.4.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ.....	88
4. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	91
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	95
6. ΕΚΘΕΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	105
6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΕΚΘΕΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ	114
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑ	117
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	119

1. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΕΝΝΟΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΝ

Σκοπός των μονώσεων σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των ρευματοφόρων μερών καθώς και των ρευματοφόρων μερών προς γη, κατά τρόπο ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό. Η ανάγκη την εκπλήρωση του σκοπού αυτού και η μελέτη των φαινομένων, που προκαλούν ολική ή μερική αναίρεση του ηλεκτροστατικού πεδίου σε μία κατασκευή, οδήγησαν στον καθορισμό ορισμένων εννοιών. Έτσι, σε αντιστοιχία προς την μηχανική αντοχή των υλικών, έχει αναπτυχθεί μία εξειδικευμένη περιοχή της ηλεκτρολογίας, που αφορά την ηλεκτρική (ή διηλεκτρική) αντοχή των μονώσεων.

Με τον όρο διάσπαση εννοεί κανείς την αγωγήμη σύνδεση δύο μεταξύ τους μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση επί της επιφάνειας ενός στερεού μονωτικού ονομάζεται επιφανειακή διάσπαση. Η διάσπαση στο περιβάλλον μέσο ενός στερεού μονωτικού, λόγω μείωσης της απόστασης μόνωσης του στερεού μονωτικού από αγωγήμες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνειά του (όπως π.χ. συμβαίνει σε ρυπασμένους μονωτήρες) χαρακτηρίζεται ως υπερπήδηση. Η διάσπαση μέσω του όγκου ενός στερεού μονωτικού υλικού καλείται διάτρηση. Ως διηλεκτρική αντοχή (E_d) ενός μονωτικού υλικού εντός ομογενούς πεδίου έχει οριστεί το πηλίκο της ελάχιστης τιμής της τάσης για τη διάσπαση προς την απόσταση των ηλεκτροδίων.

Η τιμή E_d είναι ένα κριτήριο για την επιλογή των διάφορων μονωτικών υλικών σε μια κατασκευή. Οι τιμές που δίνονται στο παρακάτω πίνακα 1-1. για τη διηλεκτρική αντοχή μερικών μονωτικών υλικών (σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50Hz και για μικρό χρόνο καταπόνησης) δείχνουν τη δυνατότητα αυτή.

Όταν η διηλεκτρική αντοχή αναφέρεται στην ελάχιστη απόσταση μόνωσης d υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης (ενεργού τιμής U_d), τότε ισχύει:

$$E_d = \frac{U_d \sqrt{2}}{d}$$

(1-1)

Η πεδιακή ένταση για τη διάσπαση ενός μονωτικού υλικού στη μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης τάσης καταπόνησης του $\sqrt{2}U_{da}$ εντός ανομοιογενούς

πεδίου, δίνεται από τη σχέση: $E_{da} = \frac{U_{da} \sqrt{2}}{dn}$

(1-2)

όπου n ο συντελεστής χρησιμοποίησης ($0 < n < 1$)

Μονωτικό Υλικό	Πάχος μόνωσης d σε mm	E_d σε kV/cm
Λάδι μετασχηματιστών	-	60...200
Πορσελάνη	0,5.....3	240...380
Στεατίτης	0,5.....3	200...300
Γυαλί	<1	160...450
Χαρτόνι	0,5.....1,5	300...450
Glimmer	0,01.....0,1	500...1000
Χαρτί στο λάδι	<2	200...400
Σκληρό ελαστικό	<3	300...500
Ξύλο	<3	30...50
Αέρας	-	21

Πίνακας 1-1: E_d για καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας ορισμένων μονωτικών υλικών σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50Hz

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις είναι προφανές ότι:

$$E_{da} < E_d \quad \text{ή} \quad U_{da} < U_d \quad (1-3)$$

Σε διάφορες πρακτικές εφαρμογές υψηλών τάσεων συναντώνται συχνότατα χωρικά φορτία μεταξύ των ηλεκτροδίων. Σε μία δεδομένη διάταξη δυο ηλεκτροδίων, τα χωρικά φορτία συγκεντρώνονται προ του ηλεκτροδίου με την αντίθετη προς αυτά πολικότητα και σχηματίζουν έτσι ένα νέφος χωρικών φορτίων. Το πεδίο είναι ηλεκτροστατικό όταν τα χωρικά φορτία του νέφους είναι αμετακίνητα. Μπορεί καποις να υποθέσει, ότι μέχρι μια τιμή της

εφαρμοζόμενης τάσης συμβαίνει μια κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των εξασκούμενων δυνάμεων Coulomb, ώστε το πεδίο να εξακολουθεί να είναι χωρικό. Όταν μετά την παραπάνω τιμή εφαρμοζόμενου πεδίου καταστρέφεται η κατάσταση ισορροπίας(χωρίς να συμβαίνει διάσπαση), τότε εκδηλώνονται περιορισμένης έκτασης εκκενώσεις, που ονομάζονται μερικές εκκενώσεις. Οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού χαρακτηρίζονται ως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις και εκείνες στην επιφάνεια ως εξωτερικές μερικές εκκενώσεις. Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν την ξεχωριστή ονομασία: στεμματοειδής μερικές εκκενώσεις (ήCorona)

2. ΒΑΣΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η ανάγκη για την αξιόπιστη διαχρονική συμπεριφορά των διαφόρων μονωτικών υλικών σε μια κατασκευή υψηλών τάσεων έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησης τους, τα οποία δεν αφορούν μόνο τις ηλεκτρικές (ή διηλεκτρικές) ιδιότητες τους, αλλά και άλλες ιδιότητες, που πρέπει να έχουν, ανάλογα με την κατασκευή, όπως π.χ.: η θερμική αντοχή κατά την απαγωγή των απωλειών Joule των αγωγών, η ψυκτική ικανότητα κατά τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου σε διακόπτες, η μηχανική αντοχή των μονωτήρων (π.χ. λόγω του βάρους της γραμμής), η αντοχή κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος, κ.λ.π..

Τα κριτήρια είναι:

2.1 Η ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Η διηλεκτρική αντοχή (E_d) είναι ένας ορισμός για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών, μέσω της ελάχιστης τιμής της πεδιακής έντασης για τη διάσπαση εντός ομογενούς πεδίου.

2.2 Η ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) δίνει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μιας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα.

Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών, που συνθέτουν μια μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών και μονώσεις καλωδίων), θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο, ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειες τους, για να μην διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.

Ο συνδυασμός του χαρτιού με το μονωτικό λάδι είναι μια μόνωση, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην πράξη, γιατί:

- τα δυο αυτά μονωτικά υλικά έχουν την ίδια περίπου σχετική διηλεκτρική σταθερά με αποτέλεσμα να μην συμβαίνει ουσιαστικά διάθλαση των γραμμών στη διαχωριστική επιφάνεια τους, και

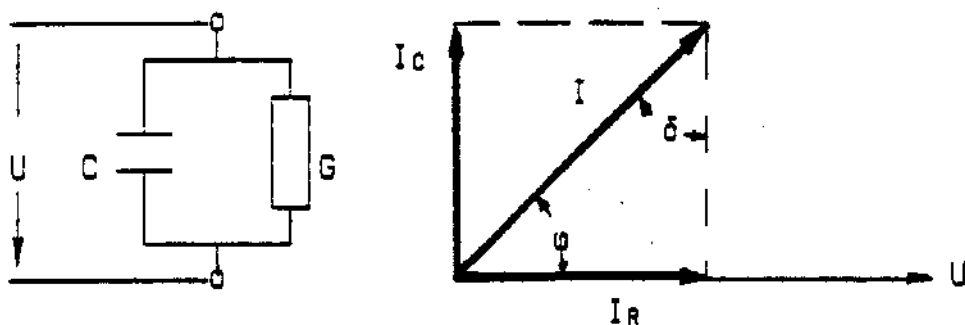
- το λάδι εμποτίζει το χαρτί, ώστε να αποκλείεται έτσι η ύπαρξη του αέρα, ο οποίος μόνο προβλήματα θα μπορούσε να δημιουργήσει, λόγω της μικρής του διηλεκτρικής αντοχής κατά τον πίνακα 1.1 (κυρίως βλάβες στην επιφάνεια του χαρτιού από μερικές εκκενώσεις ή διάσπασης σε φυσαλίδες του αέρα).

2.3 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ($tg\delta$)

Σε μια μόνωση, που περιλαμβάνεται 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 δίπολων στο ρυθμό εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης, και στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά .

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.

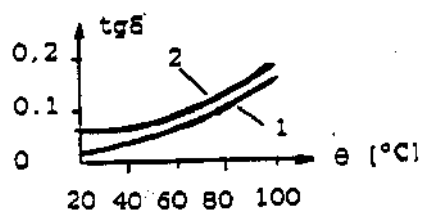
Στο σχήμα 2.3-1 δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με ομοιογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητας του G).



Σχήμα 2.3-1: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας του G του διηλεκτρικού του.

$$\text{Ο συντελεστής απωλειών: } tg\delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{G}{\omega C} \quad (2.3-1)$$

είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μιας μονωτικής διάταξης γενικότερα), γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του (σχήμα 2.3-2). Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό η $\text{tg}\delta$ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 2.3-2: $\text{tg}\delta$ ορισμένων διηλεκτρικών 1: σκληρό χαρτί 2: πορσελάνη

Οι απώλειες Joule (P_w) στην αγωγιμότητα G είναι:

$$P_w = I_R U = G U^2 = U^2 \omega C \text{tg}\delta = P_B \text{tg}\delta \quad (2.3-2)$$

όπου P_B η άεργος ισχύς (ισχύς στην χωρητικότητα C).

Αν υποθέσουμε, ότι ο παραπάνω πυκνωτής αποτελείται από δυο επίπεδες πλάκες διατομής A σε απόσταση d και ότι ο μεταξύ τους χώρος καταλαμβάνεται από ένα μονωτικό με σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ , τότε η τιμή της χωρητικότητας C είναι:

$$(2.3-3)$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Για την αγωγιμότητα G του παραπάνω πυκνωτή ισχύει η σχέση:

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (2.3-4)$$

όπου σ η ειδική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού. Για τις απώλειες του πυκνωτή

αυτού ισχύει κατά τις σχέσεις 2.3-2 και 2.3-3 : $P_w = U^2 \omega \epsilon \frac{A}{d} \text{tg}\delta$

$$(2.3-5)$$

ή πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με d :

$$P_w = \text{tg}\delta (U/d)^2 \omega \epsilon V \quad (2.3-6)$$

όπου V ο όγκος του διηλεκτρικού.

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

$$P_w = tg\delta \cdot \omega \varepsilon \int (U/d)^2 dV = tg\delta \cdot \omega \varepsilon \int E^2 dV \quad (2.3-7)$$

2.4 Η ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μια πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, 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 τη σχέση:

$$\sigma = \sigma_o e^{-W/kT} = \sigma_o e^{\beta\theta} \quad (2.4-1)$$

όπου : σ_o : 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 . Μια τιμή πεδιακής έντασης χαρακτηρίζεται ως χαμηλή όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις ή έστω όταν οι μερικές εκκενώσεις συμμετέχουν μόνο στην αύξησης 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 και ότι δεν ισχύει η σχέση 2.4-1.

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

$$\sigma = \sigma_0 \frac{e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2} \quad (2.4-2)$$

όπου E η πεδιακή ένταση στο τμήμα υλικού, που δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (το οποίο χαρακτηρίζεται ως υγείες 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.

2.5 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$

Από τις σχέσεις 2.3-1, 2.3-2, 2.3-3 έχουμε για ένα πυκνωτή επίπεδων πλακών:

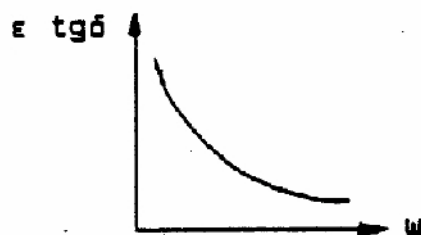
$$\varepsilon_r \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}$$

(2.5-1)

ή με $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$:

$$\varepsilon \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (2.5-2)$$

Στο σχήμα 2.5-1 δίνεται η γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής κατά την παραπάνω σχέση. Το φαινόμενο $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών (πίνακας 2.5-1).



Σχήμα 2.5-1: $\varepsilon \operatorname{tg} \delta = f(\omega)$ για το ομοιογενές μονωτικό υλικό

Υλικό	Πάχος μόνωσης σε mm	$\varepsilon \operatorname{tg} \delta$
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	0.5.....3	0,009...0,012

Πίνακας 2.5-1: Τάξη μεγέθους των τιμών $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ για ορισμένα διηλεκτρικά σε θερμοκρασία 20 °C.

Από την σχέση 2.4-1 και 2.5-2 έπεται ότι ο συντελεστής $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ του ομοιογενούς στερεού μονωτικού υλικού (ή γενικότερα του στερεού διηλεκτρικού όταν δεν εκδηλώνονται σε αυτό μερικές εκκενώσεις, π.χ. λόγω $U > U_a$) αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία:

$$\varepsilon \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma_o}{\omega} e^{\beta \theta}$$

(2.5-3)

Αν θεωρήσουμε την τιμή ε ως σταθερή, τότε από την παραπάνω σχέση έπεται ότι η αύξηση της $\tan\delta$ είναι εκθετική (σχήμα 2.3-2).

Για την αύξηση της τιμής $\varepsilon \tan\delta$ στην περιοχή του στερεού μονωτικού, όπου οι μερικές εκκενώσεις στην αύξησης των απωλειών Joule, έχουμε αντίστοιχα (από τις σχέσεις 2.4-2 και 2.5-2):

$$\varepsilon \tan\delta = \frac{\sigma_o}{\omega} \frac{e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2}$$

(2.5-4)

2.6 Η ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η διηλεκτρική αντοχή των στερεών μονωτικών μειώνεται, όταν η επιφάνεια 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 καταπόνηση τους (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και μερικές εκκενώσεις), συμμετέχει η επιφάνεια τους σε πάχος μέχρι 30Å°. Για 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 επιφάνεια 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 επιφάνεια τους διευκολύνει περισσότερο στην απομάκρυνση σκόνης κατά τη βροχή.

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

2.7 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις θέσεις, όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως π.χ.: ανομειογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο λάδι). Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντοτε κατά την λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ. απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπών, κ.λ.π.). Επειδή γενικά ισχύει, ότι η θερμική αγωγιμότητα (λ) συμβαδίζει με την ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα, η τιμή λ είναι (όπως και η τιμή σ) ένα κριτήριο για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών.

Στο πίνακα 2.7-1 δίνονται τιμές του συντελεστή λ για διάφορα διηλεκτρικά.

Υλικό	Πάχος μόνωσης σ [mm]	λ $\left[\frac{W \text{ cm}}{cm^2 \text{ grad}} \right]$
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 2.7-1: Τιμές του συντελεστή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας (λ) για ορισμένα μονωτικά υλικά.

Στις προδιαγραφές IEC και VDE γίνεται μια διαβάθμιση των στερεών μονωτικών ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Πρόκειται για κατηγορίες (ή κλάσεις) των υλικών αυτών, που διευκολύνουν στην πράξη για τη διάρκεια ζωής τους.

Το χαρτί μαζί με το λάδι αποτελούν κυρίως τη μόνωση ενός μετασχηματιστή υψηλής τάσης (μετασχηματιστής μεταφοράς, μετασχηματιστής διανομής και μετασχηματιστής μέτρησης). Έτσι, μπορεί κανείς να εκτιμήσει (μετά από μετρήσεις στα πλαίσια των προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης) τον μέγιστο υπολειπόμενο χρόνο ζωής του. Αν θεωρηθεί η μεταβολή της τιμής ϵ πολύ μικρή συγκριτικά προς εκείνη της μεταβολής της $\text{tg}\delta$ (λόγω επικαθίσεων αιωρούμενων σωματιδίων στο χαρτί, που δημιουργούνται ως ανεπιθύμητες προσμείξεις στο λάδι), τότε με τη μέτρηση της $\text{tg}\delta$ (μετά από αφύγρανση και πλήρωση του μετασχηματιστή με λάδι, υπό συνθήκες κενού), από τις σχέσεις 2.4-1 και 2.5-3 έχουμε:

$$\theta = \frac{\ln(\text{tg}\delta / \text{tg}\delta')}{\beta} \quad (2.7-1)$$

όπου $\text{tg}\delta'$ ο αρχικός συντελεστής απωλειών (όταν ο μετασχηματιστής πρωτοεγκαταστάθηκε στο δίκτυο). Για τον συντελεστή β μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει : $\beta \approx 0,02$.

2.8 Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρουν (εκτός από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών) και οι μηχανικές ιδιότητες τους, όπως π.χ.: τα πλαστικά μέρη του μηχανισμού περιστροφής ενός ασφαλειοποζεύκτη σε ένα πίνακα μέσης τάσης, η αντοχή σε εφελκυσμό ενός μονωτικού, η δύναμη τάνυσης σε μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς, κ.λ.π.. 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 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, μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστές μέτρησης στο δίκτυο υψηλών τάσεων, διακόπτες υψηλών τάσεων, κ.λ.π.). 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.

3. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών αερίων εξηγούνται ικανοποιητικά. Αυτό οφείλεται βασικά στη μικρή σταθερότητα των μορίων τους, ως προς εκείνη των υγρών και προ πάντων των στερεών μονωτικών, με αποτέλεσμα να επανέρχεται το αέριο μετά τη διάσπαση (ή την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων) στην αρχική του κατάσταση. Στα στερεά μονωτικά, η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη και η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σε 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 υλικών, 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.

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

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

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

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

3.1 Η ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε, τα στερεά μονωτικά αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες προ της διάσπασης και καταστρέφονται κατά τη διάτρηση. Η ανάγκη για να δοθεί μια εξήγηση στις παραπάνω αλλαγές των υλικών (προ και κατά τη διάτρηση), 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:

- οι απώλειες Joule
- οι απώλειες Coulomb
- οι μερικές εκκενώσεις
- η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

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

- η θερμική διάτρηση
- η ηλεκτρική διάτρηση (που διακρίνεται στη δένδροειδή και την ηλεκτρομηχανική)
- η ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση)
- η θερμοχημική διάτρηση

Στην πράξη βέβαια συνδυάζονται οι παράγοντες αυτοί 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 αποτέλεσμα τους.

3.1.1. Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

Η μορφή της διάτρησης αυτής συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule (π.χ. κακή απαγωγή θερμότητας από τη μόνωση ενός καλωδίου λόγω σκόνης και ύγρανσης). Η εικόνα που παρουσιάζει το θερμικά καταπονούμενο υλικό είναι συνήθως απανθράκωση και τήξη του, στην περιοχή όπου οι απώλειες Joule είναι ιδιαίτερα αυξημένες.

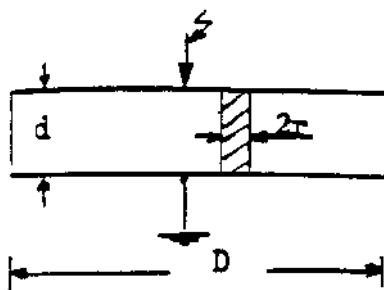
Ο οχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 , όποτε έχουμε (κατά τη σχέση 2.4-1) :

$$\sigma_1 = \sigma_o e^{\beta\theta} \quad (3.1.1-1)$$

Με την προϋπόθεση σταθερότητας (A) του οχετού διάτρησης (σχήμα 3.1.1-1) και ειδική αγωγιμότητα σ_1 , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \sigma_o e^{\beta\theta} A}{d} \quad (3.1.1-2)$$

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



Σχήμα 3.1.1-1: Απλοποιημένη παράσταση του οχετού διάτρησης λόγω απωλειών Joule του στερεού μονωτικού.

D:διάμετρος δοκιμίου

δ: πάχος του μονωτικού

2r: διάμετρος του οχετού διάτρησης

Αν P_{α} είναι η τιμή της απαγόμενης θερμικής ισχύος, C_0 η θερμοχωρητικότητα και t ο χρόνος, ισχύει γενικά ότι:

$$P = P_{\alpha} + C_0(d\theta/dt) \quad (3.1.1-3)$$

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

$$P_{\alpha} = 2\pi r d \kappa \theta \quad (3.1.1-4)$$

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:

$$\frac{U^2 \sigma_o e^{\beta \theta} A}{d} = 2\pi r d \kappa \theta \quad (3.1.1-5)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δυο συναρτήσεις της θερμοκρασίας $P=f(\theta)$ και $P_{\alpha}=f(\theta)$. Για το λόγο αυτό, η οριακή τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση (U_0) δίνεται όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι από τη διαφορίση ως προς e , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης 3.1.1-5, έχουμε:

$$\frac{\beta U_o^2 \sigma_o e^{\beta \theta} A}{d} = 2\pi r d \kappa \quad (3.1.1-6)$$

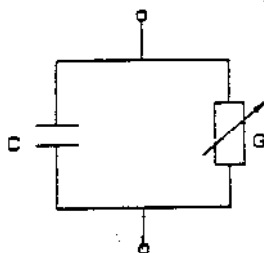
Από τις σχέσεις 3.1.1-5 και 3.1.1-6 φαίνεται ότι:

$$\beta \theta = 1 \quad (3.1.1-7)$$

και
$$U_0 = d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_o r}} \quad (3.1.1-8)$$

Την αύξηση απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_0 μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα 3.1.1-2, όπου (συγκριτικά προς το ισοδύναμο κύκλωμα του ομοιογενούς μονωτή: σχήμα 2.3-1, η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μια μεταβλητή αγωγιμότητας G .

Η διάτρηση στην τιμή U_0 συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει, λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ_0 σε σ_1 : σχέση 3.1.1-1, μια οριστική τιμή G_{max} .



Σχήμα 3.1.1-2: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού υλικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule. $G = G_0 \dots G_{max}$, G_0 : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή, G_{max} : αγωγιμότητα για τη διάτρηση

3.1.2. Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

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

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

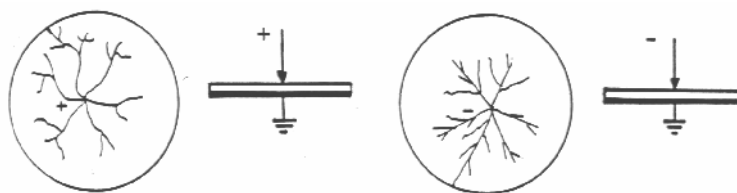
- αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις (όπως στα αέρια μονωτικά), ή
- μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή
- συνδυασμό των δυο παραπάνω περιπτώσεων.

Η μορφή της διάτρησης αυτής ονομάζεται ηλεκτρική και διακρίνεται, ανάλογα με την εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση, στην δενδροειδή (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) και εκείνη υπό μορφή οχετού κατά τη διεύθυνση του πεδίου (ηλεκτρομηχανική).

Η δενδροειδής διάτρηση είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης. Γιατί λόγω της μεγαλύτερης τιμής της τάσης και επομένως της πεδιακής έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά

τη διάτρηση σχετίζεται με τη θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μια διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγωγή σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 3.1.2-1 δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη (ανάλογα με την πολικότητα της τάσης) για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (ηλεκτρόδια ακίδα – πλάκα) στην περίπτωση της θετικής ακίδας ο δενδρίτης έχει, λόγω των δυνάμεων Coulomb που εξασκούνται μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) κατά την κίνηση τους προς την ακίδα, αρκετές διακλαδώσεις (κατά κανόνα μη ευθύγραμμες).

Όταν όμως η ακίδα είναι αρνητική, οι δυνάμεις απομάκρυνσης μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών 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 περιφέρεια του. Έχουμε δηλαδή, ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας, ομοιότητα με τις εικόνες Lichtenberg κατά την μέτρηση κεραυνών.



Σχήμα 3.1.2-1: Προς επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη.

Η διάτρηση υπό μορφή οχετού (η ηλεκτρομηχανική διάτρηση) οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από ότι τη δένδροειδή 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 μς. Η εικόνα, που παρουσιάζει το υλικό είναι κυρίως το αποτέλεσμα μιας ακαριαίας εξάσκησης δυνάμεων, στην περιοχή όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα μεγάλη (μηχανική τάση, υπό την επίδραση των δυνάμεων του πεδίου).

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις έχει διαπιστωθεί, ότι πάνω από μια μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$U_{\text{κmin}}$, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, συμβαίνει η διάτρηση με μια κρούση υπό μορφή οχετού, αν και η τιμή της πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης. 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 φορέων, που συγκρατούνται στο πλέγμα των μορίων.

Λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας για την ηλεκτρική διάτρηση και επειδή τα στερεά μονωτικά είναι και μονωτές θερμότητας (παράγραφος 2.7), μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμότητα που απάγεται μόλις πριν από τη διάτρηση είναι αμελητέα. Κατά τη σχέση επομένως 3.1.1-3 και για έναν οχετό διατομής $A = \pi r^2$ (κατά το σχήμα 3.1.1-1) ισχύει μόλις προ τη διάτρηση ότι:

$$U_n^2 \sigma_2 \frac{A}{d} = \sigma_o \frac{d\theta}{dt} \quad (3.1.2-1)$$

όπου: σ_2 η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια ανομοιογένεια (λόγω της οποίας η πεδιακή ένταση έγινε ιδιαίτερα μεγάλη στην περιοχή εκείνη του υλικού) και U_n η ενδεικνυόμενη τιμή της τάσης για την ηλεκτρική διάσπαση του υλικού στην παραπάνω περιοχή.

Αν υποθέσουμε ότι, λόγω του μικρού διατιθέμενου χρόνου είναι $d\theta/dt = \theta/T_\delta$, όπου T_δ ο χρόνος για την ηλεκτρική διάτρηση, τότε από τη σχέση 3.1.2-1 έχουμε:

$$U_n = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_o \theta}{\sigma_2 A T_\delta}} \quad (3.1.2-2)$$

Για τη διάτρηση στη μέγιστη τιμή $U_{\text{κn}}$ μιας κρουστικής τάσης ισχύει αντίστοιχα:

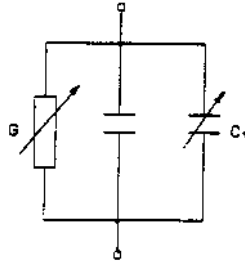
$$\hat{U}_{\text{κn}} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_o \theta}{\sigma_2 A T_s}} \quad (3.1.2-3)$$

όπου T_s η διάρκεια του μετώπου της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης. Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν μια ικανοποιητική ερμηνεία σε πειράματα, που έχουν γίνει. Πράγματι, όσο αυξάνει ο χρόνος T_s μίας κρουστικής τάσης, τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1.2-1:

d [mm]	κρουστική τάση		\hat{U}_k 50% [kV]	Περιοχή τιμών \hat{U}_k για τη διάσπαση [kV]
	μορφή [μs]	πολικότητα		
1	1,2/50	θετική	80	78.....90
	1,2/50	αρνητική	86	81.....95
	10/200	θετική	74	69.....78
	10/200	αρνητική	77	71.....79
	25/2500	Θετική	66	63.....69
	25/2500	αρνητική	68	65.....70
2	1,2/50	θετική	135	126.....151
	1,2/50	αρνητική	148	132.....165
	10/200	θετική	74	69..... 80

Πίνακας 3.1.2-1: τιμές της τάσης διάσπασης του στερεωτικού μονωτικού ρτινάχ Η 1270 (πάχους 1 mm & 2 mm) κατά την καταπόνηση του με διάφορες μορφές κρουστικών τάσεων σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών.
Διάμετρος δοκιμίων: 150 mm
Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα
Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: R=0,9 mm

Μια ερμηνεία της ηλεκτρικής διάτρησης, μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος, μπορεί να δοθεί ως ακολούθως: Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μια κρίσιμη για το υλικό τιμή σ_2 , 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 (σχήματος 3.1.2-3), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_{π} (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C .



Σχήμα 3.1.2-2: Ισοδύναμο κύκλωμα στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα.

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

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

Όταν η αγωγιμότητα G και ο πυκνωτής C_{π} έχουν αποκτήσει μόλις πριν της διάτρησης τις τιμές G_{\max} και C_{\max} (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα σ_2 , λόγω κάποιας ανομοιογένειας), τότε συμβαίνει η διάτρηση.

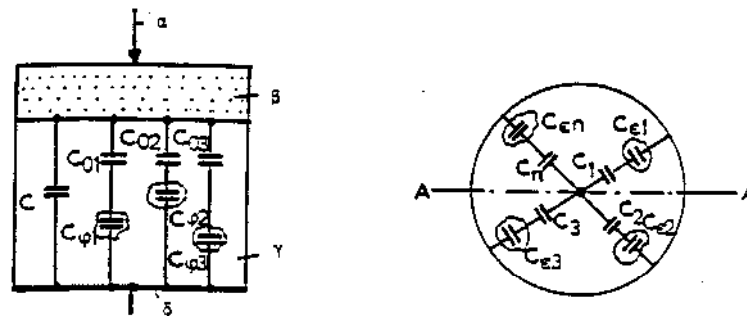
3.1.3 Η ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΛΟΓΩ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ

(ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ Η ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ)

3.1.3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ

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 επιφάνεια του (εξωτερικές εκκενώσεις). Μια μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίνεται στο σχήμα 3.1.3.1-1. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές $C_{\epsilon 1} \dots C_{\epsilon n}$ και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$. Οι πυκνωτές $C_1 \dots C_n$ και $C_{on} \dots C_{on}$ παριστάνουν αντίστοιχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (κάθε ένας από αυτούς δίνει την ολική χωρητικότητα δυο 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 3.1.3.1-1 : Μια μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχή σε στέρεο 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

C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

$C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$: πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φουσαλίδες αερίων)

$C_{ο 1} \dots C_{ο n}$: πυκνωτές του “υγιούς” τμήματος του στερεού μονωτικού.

2) Κάτοψη της διάταξης πειραματισμού:

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

$C_{\epsilon 1} \dots C_{\epsilon n}$: πυκνωτές επιφανειακών (εξωτερικών

θέσεων διαταραχής)

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 αγώγιμες. 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 μακροπρόθεσμα, γι αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού.

3.1.3.2 Η ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ

Κατά την καταπόνηση ενός στέρεου μονωτικού υλικού με κάποια μορφή τάσης (εναλλασσόμενη, κρουστική ή συνεχή), διαπιστώνει κανείς ότι μετά από κάποια τιμή της τάσης (ανάλογα με τη μορφή της) εμφανίζονται μερικές εκκενώσεις.

Η γήρανση του μονωτικού υλικού στο εργαστήριο με τιμές της τάσης μεγαλύτερες από την τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων χαρακτηρίζεται τεχνητή γήρανση. Η τεχνητή αυτή γήρανση του στέρεου μονωτικού δεν ανταποκρίνεται βέβαια στην πραγματική κατάσταση, που δημιουργείται με τη πάροδο του χρόνου (όταν το υλικό εργάζεται υπό ονομαστικά μεγέθη στο δίκτυο), δίνει όμως την δυνατότητα ανίχνευσης των παραγόντων διάσπασης, που τελικά δεν μπορεί να είναι διαφορετικοί από τους πραγματικούς.

Ένα κριτήριο αξιολόγησης που έχει προταθεί, βασισμένο στην έναρξη της τεχνητής γήρανσης, είναι ο φαινόμενος συντελεστής ανομοιογενειών. Ο συντελεστής αυτός έχει ορισθεί ως το πηλίκο της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων προς την τάση της διηλεκτρικής δόκιμης που προβλέπεται στις προδιαγραφές, ανάλογα με την ονομαστική τάση και τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης.

Στην περίπτωση της καταπόνησης με εναλλασσόμενη τάση η τιμή του συντελεστή είναι:

$$\mu_s = \frac{U_s}{U} \quad (3.1.3.2-1)$$

όπου U η προβλεπόμενη τάση δοκιμής (π.χ.:55kV επί 1 min για ονομαστική τάση 20 kV) και U_s εκείνη κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη εκκένωση.

Κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ισχύει αντίστοιχα:

$$\mu_o = \frac{\hat{U}_{ks}}{\hat{U}_k} \quad (3.1.3.2-2)$$

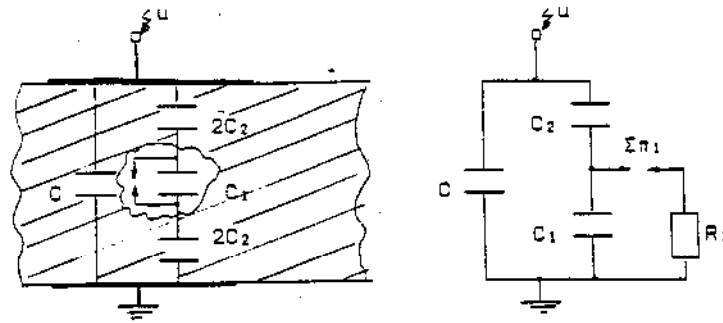
όπου \hat{U}_{ks} η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης, κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη μερική εκκένωση και U_k η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης που προβλέπεται από τις προδιαγραφές για τη διηλεκτρική δοκιμή υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s.

3.1.3.3 ΤΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ

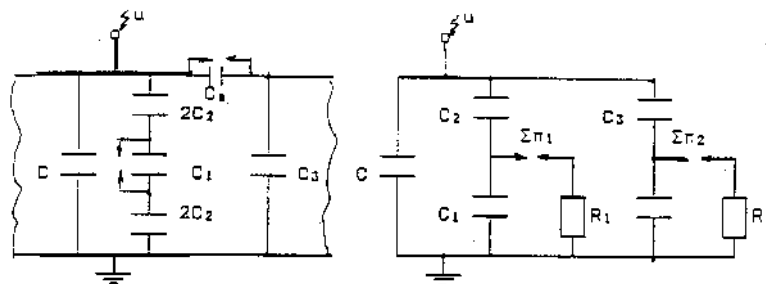
Όπως είναι γνωστό, με τη γέφυρα Schering μέτρα κανείς το σύνολο απωλειών ενός μονωτικού υλικού ή μιας διάταξης υψηλής τάσης, δηλαδή της απώλειες αγωγιμότητας, πόλωσης και εκείνης λόγω εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων. Όταν άρχισε να γίνεται αντιληπτό το φαινόμενο της γήρανσης των μονωτικών υλικών εμφανίστηκε πρώτη μέθοδος ανίχνευσης των μερικών εκκενώσεων. Πρόκειται για την μέθοδο Callender, η οποία είναι παραλλαγή της γέφυρας Schering και με την οποία κατορθώθηκε η εξουδετέρωση των παράσιτων χωρητικοτήτων του κυκλώματος μέτρηση κατά τον διαχωρισμό των απωλειών αγωγιμότητας και πόλωσης από εκείνες λόγω μερικών εκκενώσεων.

Η ανάγκη για τη φυσική εξήγηση και τη μαθηματική ανάλυση του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων μέσα στον όγκο του στερεού μονωτικού, οδήγησε τους Gemant και Philipoff στο ισοδύναμο κύκλωμα (σχήμα 3.1.3.3-1), γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου.

Στο σχήμα 3.1.3.3-2 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 χωρητικότητας, η οποία επιταχύνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C_1) & του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (C_s). Με τον τρόπο αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου “υγιούς τμήματος” του μονωτικού (C_2 & C_3 αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Οι σπινθήρες $\Sigma_{\pi 1}$ και $\Sigma_{\pi 2}$ στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσο της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R_1 , R_2) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C_1 , C_2).

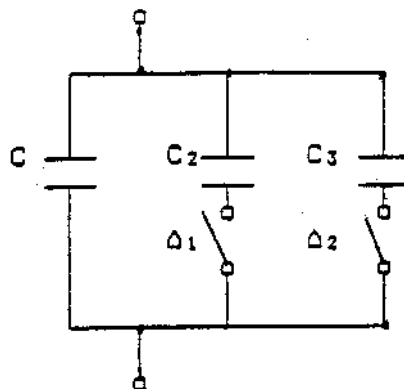


Σχήμα 3.1.3-3 : Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του κατά Gemant και Philipoff
 α: σχηματική παράσταση
 β: ισοδύναμο κύκλωμα
 C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
 C₁: χωρητικότητα της φυσαλίδας
 C₂: χωρητικότητα του υπόλοιπου “υγιούς τμήματος” του στερεού μονωτικού
 R₁: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_{π1}



Σχήμα 3.1.3-2 : Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θάση διαταραχή.
 α: σχηματική παράσταση
 β: ισοδύναμο κύκλωμα
 C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
 C₁: χωρητικότητα της φυσαλίδας
 C₂: χωρητικότητα της επιφανειακής θάσης διαταραχής
 C₃: χωρητικότητα του υπόλοιπου “υγιούς τμήματος” του στερεού μονωτικού
 C₃: χωρητικότητα του υπόλοιπου “υγιούς τμήματος” του επιφανειακού φιλμ
 R₁: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_{π1}
 R₂: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_{π2}

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 στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα 3.1.3.3-3:



Σχήμα 3.1.3.3-3 : Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff)

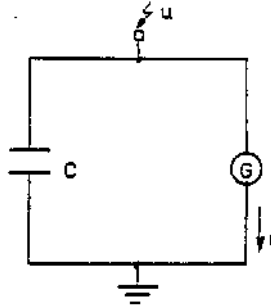
C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_2 : χωρητικότητα του υγιούς τμήματος στον όγκο του μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υγιούς τμήματος στην επιφάνεια του μονωτικού

Δ_1 και Δ_2 : διακόπτες που όταν κλείνουν συμβολίζουν την διάσπαση αντίστοιχα των εσωτερικών και εξωτερικών 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 φουσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κ.λ.π. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει επίσης μια ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 3.1.3.3-4). Σύμφωνα με αυτό, οι θέσεις διαταραχής αποδίδονται ως μια γεννήτρια μερικών εκκενώσεων G . Έτσι όταν διεγείρεται η γεννήτρια G συμβαίνει αύξηση του δυναμικού στους ακροδέκτες της διάταξης.

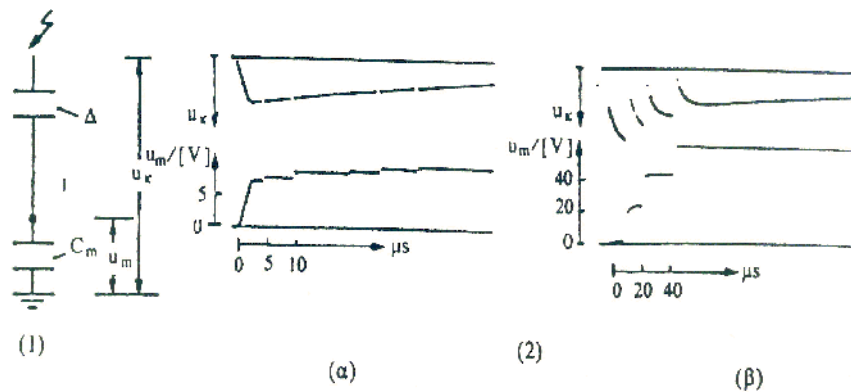


Σχήμα 3.1.3.3-4: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann

- C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
 G: γεννήτρια μερικών εκκενώσεων.

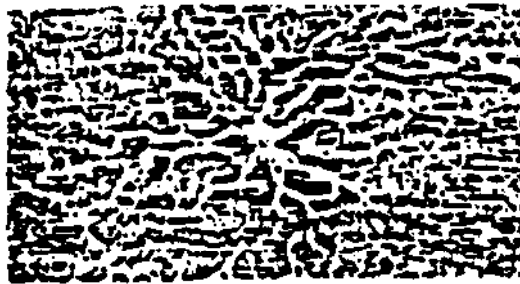
3.1.3.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΡΜΗΝΕΙΑΣ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

Στο σχήμα 3.1.3.4-1 δίνεται απλοποιημένα το κύκλωμα για τη μέτρηση των μερικών εκκενώσεων. Σύμφωνα με αυτό δοκίμια στερεών μονωτικών πάχους 1 mm (Δ) κατά DIN 7735, καταπονούνται με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 μs, υπό διάταξη ηλεκτρόδιων “ακίδα - πλάκα” (με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9 mm). Το παλμογράφημα (α) αφορά τη γήρανση του βακελίτη και το παλμογράφημα (β) τη διάτρηση του pertinax. Η διακεκομμένη γραμμή, που έχει σχεδιαστεί στο παλμογράφημα (α), δείχνει την ιδανική συμπεριφορά όταν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις. Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι, μετά από μια τιμή $U_k \approx 45$ kV (όπου U_k η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται κατά τη γήρανση επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρεί στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 3.1.3.4-2).



Σχήμα 3.1.3.4-1: Τυπικά παλμογραφήματα κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών

- 1) απλοποιημένη διάταξη μέτρησης (u_{κ} : στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης, Δ : δοκίμιο, u_m : τάση στον πυκνωτή C_m)
- 2) Μετρήσεις με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 μs :
 - (α) γήρανση: (τιμή πεδίου 1,11 MV/cm, $U_{\kappa} = 77,5$ kV, $C_m = 210$ nF, υλικό: βακελίτης)
 - (β) διάτρηση: (τιμή πεδίου 1,20 MV/cm, $U_{\kappa} = 85$ kV, $C_m = 210$ nF, υλικό: pertinax)



Σχήμα 3.1.3.4-2: Αλλαγή της μοριακής δομής στην επιφάνεια του μονωτικού pertinax κατά την εκδήλωση επιφανειακού δένδριτη (μετά από πολλές κρούσεις 10/200 μs , μέγιστης τιμής 75 kV)

Κατά τη διάτρηση δεν εκδηλώνεται επιφανειακός δένδριτης, αλλά ηλεκτρικό τόξο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η εικόνα, που παρουσιάζουν τα δοκίμια μετά τη διάτρηση, είναι μια μικρή τρύπα (μικρότερη από 0,1 mm) πλησίον της ακίδας.

Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται ως ακολούθως:

Από το παλμογράφημα της γήρανσης σχήμα 3.1.3.4-1α, φαίνεται ότι εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού, τα οποία προκαλούνται, κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.1.3.3-2 (ή του σχήματος 3.1.3.1-1), από τη σταδιακή διάσπαση διαφόρων θέσεων διαταραχής (C_1 , C_2). Μπορούμε να υποθέσουμε ότι στην περίπτωση αυτή ισχύει για την σχέση καταμερισμού μεταξύ χωρητικότητας του δοκιμίου C και του πυκνωτή μέτρησης C_m :

$$U_m(t) = \frac{C + \Delta C}{C_m} = u_x(t) \quad (3.1.3.4-1)$$

όπου ΔC η αύξηση της χωρητικότητας, λόγω εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων. Ο δεικνόμενος μπορεί να ερμηνευτεί από τα παραπάνω ισοδύναμα κυκλώματα ως επέκταση του ίχνους της ακίδας μέχρι τις θέσεις διαταραχής, που διασπώνται. Η διάτρηση φαίνεται ότι συμβαίνει στη θέση διαταραχής, όπου η πεδιακή ένταση έχει τη μέγιστη τιμή της. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι πρόκειται για ηλεκτρομηχανική διάτρηση.

3.1.3.5 ΜΙΑ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ GEMANT ΚΑΙ PHILIPPOFF, ΜΕΣΩ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

Για την ερμηνεία της μηχανικής καταπόνησης των στερεών υλικών χρησιμοποιούνται μηχανικά πρότυπα, που βασίζονται σε δυο γραμμικά στοιχεία: το ελαστικό και το ιξώδες. Το πρώτο εκφράζει τη μεταβολή της τροπής λόγω της ακαριαίας επιβολής (ή αφαίρεσης) φορτίου σε ένα στερεό υλικό και το δεύτερο τη διαχρονική μεταβολή της τροπής. Το ελαστικό στοιχείο

θεωρείται ότι είναι ένα ελατήριο και το ιξώδες η αντίσταση ροής ενός συνεκτικού υγρού, το οποίο γεμίζει το χώρο ενός κυλίνδρου κάτω από ένα έμβολο, κατά τρόπο ώστε να διαρρέει από ένα μικρό κενό μεταξύ κυλίνδρου & εμβόλου ή από μια τρύπα στο έμβολο. Από την σύνδεση των δυο παραπάνω στοιχείων σε σειρά προκύπτει το μοντέλο Maxwell (σχήμα 3.1.3.5-1,α), για το οποίο ισχύει:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} E + \frac{\tau}{\kappa} \quad (3.1.3.5-1)$$

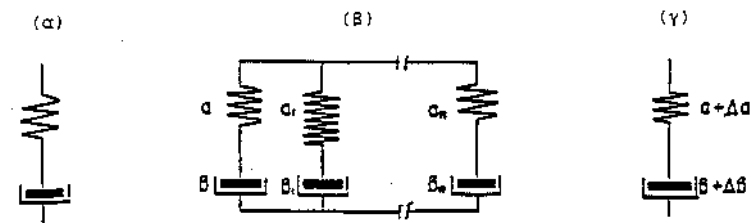
όπου ε η τροπή, τ η μηχανική τάση, E το μέτρο ελαστικότητας, κ μια σταθερά του υλικού και t ο χρόνος. Επειδή η μεταβολή της τροπής $d\varepsilon$ αντιστοιχεί σε μια μεταβολή του μήκους κατά dL και η μηχανική τάση είναι ανάλογη της

δύναμη, έπεται ότι:

$$\frac{dL}{dt} = a \frac{dF}{dt} + \beta F$$

(3.1.3.5-2)

όπου a και β σταθερές του υλικού. Η παραπάνω σχέση αφορά τη συμπεριφορά του ομοιογενούς στερεού, γιατί οι τιμές a και β δεν μεταβάλλονται με την καταπόνηση.



Σχήμα 3.1.3.5-1: Στοιχείο Maxwell (α) και μηχανικό μοντέλο του ανομοιογενούς στερεού υλικού

(β): αναλυτικό μοντέλου και γ: απλουστευμένο μοντέλο

Ένα μοντέλο για τη συμμετοχή των θέσεων ανομοιογένειας σε ένα στερεό υλικό φαίνεται ότι μπορεί να γίνεται με την παράλληλη σύνδεση πολλών μοντέλων Maxwell (σχήμα 3.1.3.5-1,β και γ), ένα των οποίων αντιστοιχεί στο βασικό υλικό και τα υπόλοιπα στις επιμέρους ανομοιογένειες του. Η μεταβολή μήκους κατά dL στο μοντέλο αυτό μπορεί να δοθεί από την

παραπάνω σχέση, με την εισαγωγή των συντελεστών A και B του υλικού, όπου:

$$A = a + \Delta a \quad (3.1.3.5-3)$$

$$B = \beta + \Delta\beta \quad (3.1.3.5-4)$$

όπου Δa και $\Delta\beta$ οι αντίστοιχες μεταβολές των συντελεστών A και B, ως προς τις σταθερές a και β του βασικού. Κατά αναλογία προς τη σχέση 3.1.3.5-2

έχουμε επομένως:

$$\frac{dL}{dt} = (\alpha + \Delta\alpha) \frac{dF}{dt} + (\beta + \Delta\beta)F$$

(3.1.3.5-5)

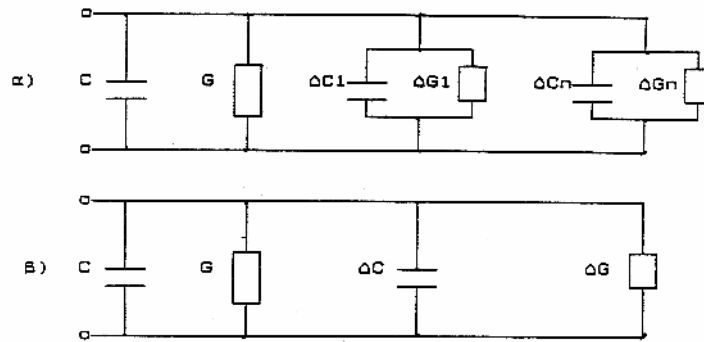
Από την αναλογία μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών μεγεθών κατά G. Oberdorffer (πίνακας 3.1.3.5), μπορούμε να καταλήξουμε (κατά την εφαρμογή μιας ηλεκτρικής τάσης στο υλικό) στη σχέση:

$$\frac{dQ}{dt} = (C + \Delta C) \frac{dU}{dt} + (G + \Delta G)U \quad (3.1.3.5-6)$$

από την οποία φαίνεται ότι ο συντελεστής $C + \Delta C$ είναι η χωρητικότητα του ανομοιογενούς υλικού όταν έχει μονωτικές ιδιότητες, ενώ ο $G + \Delta G$ η αγωγιμότητα του όταν έχει αγώγιμες ιδιότητες. Το ομοιογενές στερεό μονωτικό δίνεται από την παραπάνω σχέση $\Delta C = 0$ και $\Delta G = 0$, ενώ για $C + \Delta C = 0$ το στερεό υλικό είναι μια ωμική αντίσταση. Από τη σχέση 3.1.3.5-6 καταλήγει κανείς στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.1.3.5-2, το οποίο φαίνεται ότι ταυτίζεται (ως προς την ερμηνεία για την αύξηση της χωρητικότητας κατά την εκδήλωση των ανομοιογενειών του μονωτικού) με εκείνο των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff (σχήμα 3.1.3.3-2).

Πίνακας 3.1.3.5: Αναλογίες μεταξύ ηλεκτρομαγνητικών και μηχανικών μεγεθών

Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο	Μηχανικό σύστημα
τάση	δύναμη
ρεύμα	ταχύτητα
ηλεκτρικό φορτίο	επιμήκυνση
ωμική αντίσταση	τριβή
αυτεπαγωγή	μάζα
χωρητικότητα	ελαστικότητα



Σχήμα 3.1.3.5-2: Ισοδύναμο κύκλωμα για την αύξηση της χωρητικότητας λόγω ανομοιογενειών στο στερεό μονωτικό υλικό
 α: πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα
 β: απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα

3.1.4 Η ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη (σχέσεις 2.5-3 και 2.5-4). Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως η ενέργεια έξοδο των ελευθέρων 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 μια τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης. Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής και δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta U_1 = U_\theta - U_{\theta_{\varepsilon \min}} = d \delta E \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_o r}} \quad (3.1.4-1)$$

όπου α σταθερά του υλικού που εξαρτάται από τη μορφή της τάσης. Η σταθερά α έχει την τιμή 2,83 για καταπόνηση με συνεχή τάση, ενώ για εναλλασσόμενη τάση είναι 1,88. Η θερμική τάση ανατροπής αποτελεί το κριτήριο για το τεχνικοοικονομικό πάχος των στερεών μονωτικών στις

πρακτικές εφαρμογές (όπως μετασχηματιστές, καλώδια κ.λ.π.) η τιμή είναι για περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση 50Hz, της τάξης του 1 MV.

Πρόσφατες έρευνες σε στέρεα 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 από ότι σε κανονική θερμοκρασία (20 °C), με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός δια κρούσεως σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου από ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C.

Τα παραπάνω ερευνητικά αποτελέσματα οδηγούν στο πρακτικό συμπέρασμα ότι, οι διηλεκτρικές δοκιμές τύπου θα πρέπει να διεξάγονται ακριβώς μετά τη δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας (εφ' όσων βέβαια προβλέπεται η δοκιμή υπερθέρμανσης σε μια κατασκευή). Κατά τον τρόπο δηλαδή αυτόν, εξετάζεται ουσιαστικά η εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων εντός των παραδεκτών ορίων υπερθέρμανσης μιας κατασκευής. Αν υποθέσουμε, ως παράδειγμα, ότι πρόκειται να γίνουν δοκιμές τύπου κατά τον ποιοτικό έλεγχο κάποιων μετασχηματιστών διανομής, τότε κρίνεται σκόπιμο να διεξάγονται διηλεκτρικές δοκιμές (δοκιμή υπό κρουστική τάση και δοκιμή με εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας) ακριβώς μετά το πέρας της δοκιμής ανύψωσης θερμοκρασίας, όπου θερμοκρασία στο λάδι είναι της τάξης των 70 °C.

3.1.5 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 3.1 τα φαινόμενα προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών μπορούν να αποδοθούν σε τέσσερις βασικούς παράγοντες αποσταθεροποίησης των μορίων (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb, μερικές εκκενώσεις, και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος), οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως παράγοντες γήρανσης και διάτρησης. Οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται στη πράξη με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού.

3.1.5.1 Ο ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΜΕΣΟΥ ΜΕ ΤΟΥΣ ΑΛΛΟΥΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

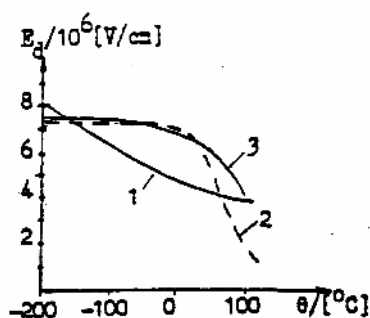
Όπως είναι γνωστό, οι διεθνείς προδιαγραφές προσδιορίζουν τα ανώτερα όρια υπερθέρμανσης των ηλεκτρολογικών κατασκευών υψηλής τάσης, βάσει των οποίων καθορίζεται το ονομαστικό ρεύμα (δοκιμή υπερθέρμανσης ή ανύψωσης θερμοκρασίας). Έτσι, έχει γίνει αποδεκτό κάποιο όριο θέρμανσης, που είναι π.χ. της τάξης των $(40 \div 50)^{\circ}\text{C}$ στο λάδι, λόγω του οποίου, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η οριακή θερμοκρασία λειτουργίας να είναι της τάξης των $(80 \div 90)^{\circ}\text{C}$. Όταν όμως συντρέχουν λόγοι μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής από άλλους παράγοντες, η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως το ρόλο τους, γιατί:

- Αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα (σχέση 2.4-1).
- Διευκολύνεται η άσκηση δυνάμεων Coulomb, γιατί η δομή στο πλέγμα των μορίων των πολυμερών υλικών γίνονται ασθενέστεροι.
- Ενισχύεται ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων, λόγω μεγαλύτερης ευκινησίας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κυρίως στις φυσαλίδες (σχέση 2.4-2).

Έτσι, αυξάνει διαχρονικά η $\tan\delta$ και μειώνεται η διάρκεια ζωής του στερεού μονωτικού και των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών γενικότερα. Η καταπόνηση που υφίσταται το στερεό μονωτικό, με τη θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου του φαίνεται ότι προκαλεί μείωση της τάσης για την θερμική διάτρηση, λόγω αύξησης της αγωγιμότητας του. Επίσης, στα στερεά μονωτικά εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις κατά τη δένδροειδή ή την ηλεκτρομηχανική διάτρηση (παράγραφος 3.1.2). Γι αυτό η αύξηση της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου φαίνεται ότι προκαλεί μείωση και της τιμής της τάσης για την διηλεκτρική διάτρηση.

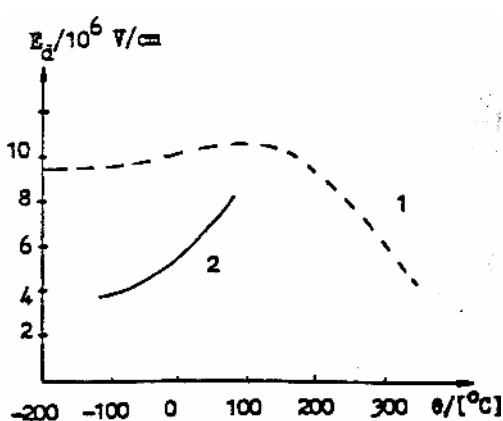
Στο σχήμα 3.1.5.1-1 δίνονται παραδείγματα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής διαφόρων μονωτικών υλικών, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, η οποία μπορεί να ερμηνευτεί από τον παραπάνω συνδυασμό της επίδρασης της θερμότητας του περιβάλλοντος με τους

υπόλοιπους παράγοντες γήρανσης και διάσπασης. Επίσης, η χαρακτηριστική $\text{tg}\delta=f(\theta)$ του σχήματος 2.3-2 είναι ένα τυπικό παράδειγμα του αποτελέσματος της θερμικής καταπόνησης των στερεών μονωτικών.



Σχήμα 3.1.5.1-1: Μείωση διηλεκτρικής αντοχής σε στερεά μονωτικά κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου.
 1 : Βακελίτης
 2 : Πολυαιθυλένιο
 3 : Πολυστετυρόλη

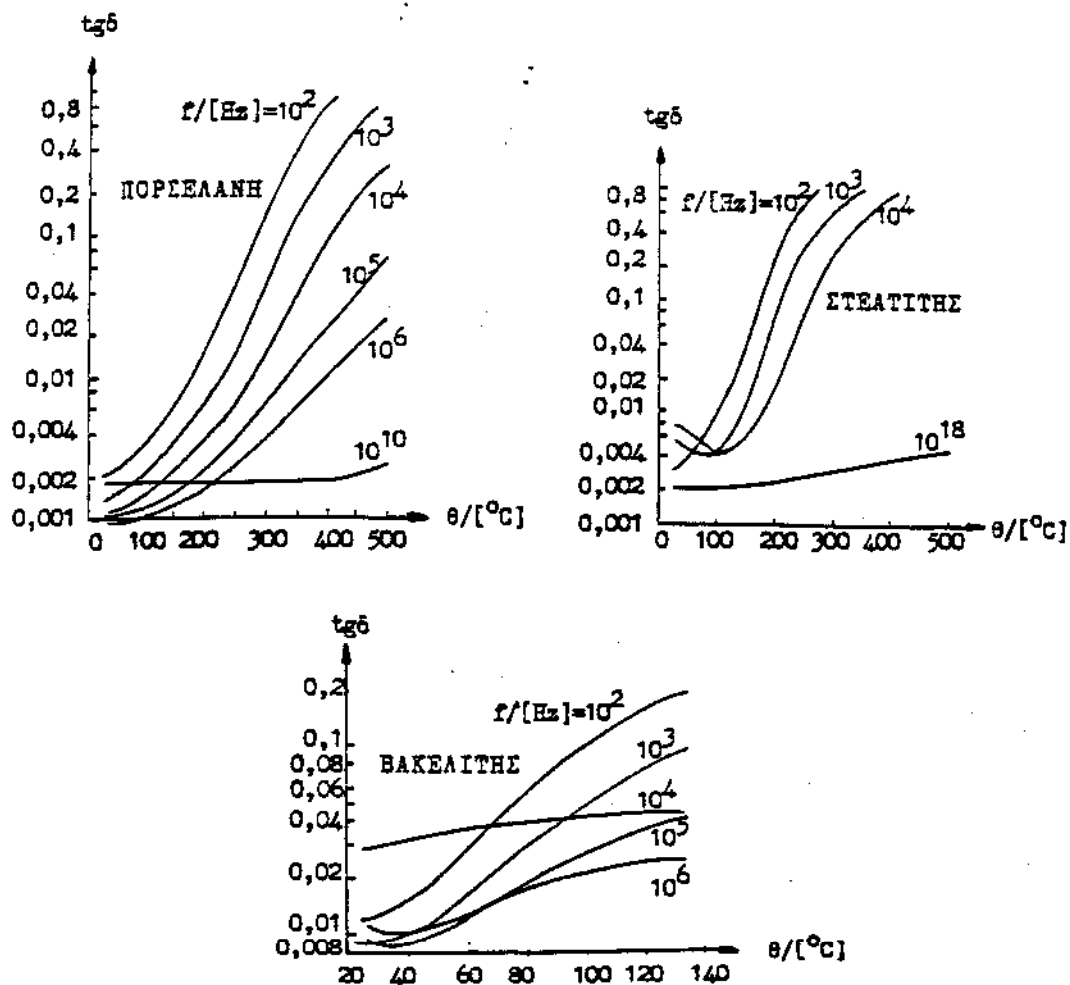
Υπάρχουν όμως περιπτώσεις στερεών μονωτικών υλικών όπου η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος δεν οδηγεί σε μείωση διηλεκτρικής αντοχής, τουλάχιστον σε κάποια περιοχή τους. Στο σχήμα 3.1.5.1-2 φαίνονται δυο παραδείγματα που ανήκουν στην περίπτωση αυτή. Μια ερμηνεία, για τη διαφορετική αυτή ανασύνδεση της μίκας (Glimmer) και του χαλαζία (Quarz) μπορεί να αποδοθεί σε αλληλεξουδετέρωση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.



Σχήμα 3.1.5.1-2: Διηλεκτρική αντοχή σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
 (1) της μίκας
 (2) του κρυστάλλου χαλαζία

Αποτέλεσμα της παραπάνω εξουδετέρωσης φαίνεται ότι είναι η μείωση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και κατά συνέπεια η αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής. Στη μίκα παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό μεταξύ -200 έως 100 °C, ενώ στο χαλαζία εκδηλώνεται μόνο αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής για τις θερμοκρασίες.

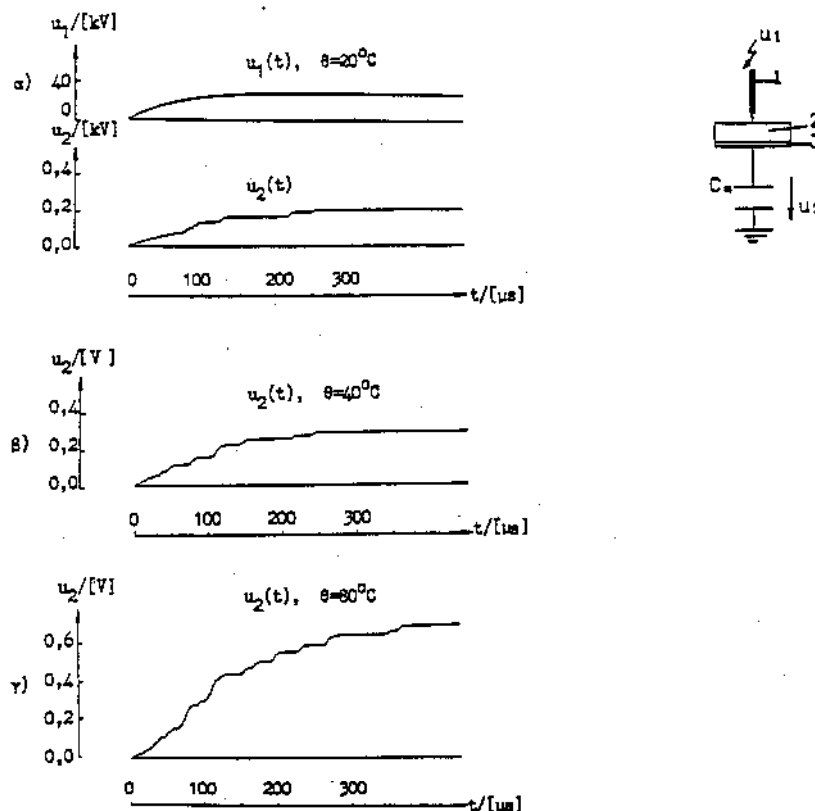
Οι χαρακτηριστικές $\text{tg}\delta=f(\theta)$ διαφόρων στερεών μονωτικών (σχήμα 3.1.5.1-3), κατά τη βιβλιογραφία, δείχνουν επίσης την αύξηση των συνολικών απωλειών με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, λόγω των οποίων μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή.



Σχήμα 3.1.5.1-3: $\text{tg}\delta=f(\theta)$ σε διάφορα στερεά μονωτικά.

Η μείωση των απωλειών που παρατηρείται σε κάποια περιοχή ορισμένων χαρακτηριστικών του σχήματος 3.1.5.1-3, κατά την αύξηση της θερμοκρασίας και της συχνότητας, μπορεί ίσως να αποδοθεί σε επανασύνδεση των παραγόμενων φορέων.

Πρόσφατες μετρήσεις με κρουστικές τάσεις σε στερεά μονωτικά, κατά την καταπόνηση τους σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (20°C , 40°C & 80°C), οδηγούν επίσης στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας (και επομένως η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής) είναι δεδομένη, όσο αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτό φαίνεται πολύ παραστατικά στα παλμογραφήματα του σχήματος 3.1.5.1-4, όπου οι μερικές εκκενώσεις γίνονται ισχυρότερες όταν αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 3.1.5.1-4: Αύξηση των μερικών εκκενώσεων λόγω μεγαλύτερης θερμοκρασία στο περιβάλλον μέσο.

α) $\theta = 20^{\circ}\text{C}$, β) $\theta = 40^{\circ}\text{C}$ και γ) $\theta = 80^{\circ}\text{C}$.

1: Ηλεκτρόδιο ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας $R = 0,9 \text{ mm}$).

2: Δοκίμιο: Pertinax (πάχους 1 mm και διαμέτρου 150 mm).

3: Ηλεκτρόδιο πλάκα (διαμέτρου 150 mm).

Μορφή κρουστικής τάσης: $250/2500 \text{ μs}$.

Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης: $U_k = 28,8 \text{ kV}$.

u_1 : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης

u_2 : άλματα δυναμικού σε ένα πυκνωτή μέτρηση $C_m = 1000 \text{ μF}$ σε σειρά με το δοκίμιο

3.1.5.2 Ο ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟΥΣ ΑΛΛΟΥΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ.

Οι μερικές εκκενώσεις θεωρείται ότι είναι ο κυρίαρχος παράγοντας γήρανσης και διάσπασης των μονώσεων στην πράξη. Μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, προεξέχοντα ρόλο έχουν οι τελευταίες, γιατί σχετίζονται με χημικές μεταβολές στον όγκο του υλικού (οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις από ξένες επικαθίσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν με προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης). Λόγω της μεγάλης σπουδαιότητας των μερικών εκκενώσεων, εξετάζονται παρακάτω διάφορες περιπτώσεις συνεργασίας τους με τους άλλους παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής.

3.1.5.2.1 Ο ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ JOULE

Στην παράγραφο 3.1.1 θεωρήθηκε ότι η θερμική διάτρηση αρχίζει σε μια θέση του μονωτικού υλικού, όπου αρχικά, λόγω κάποιας ανομοιογένειας, υπάρχει η αιτία για τοπική αύξηση της αγωγιμότητας. Για να μελετηθεί ειδικά η θερμική διάτρηση, δεν λήφθηκε υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις, που εμφανίζονται λόγω της μικρότερης διηλεκτρικής αντοχής, στην ανομοιογένεια του υλικού.

Προς κατανόηση της συμμετοχής των θέσεων διαταραχής, στον όγκο και στην επιφάνεια του στερεού μονωτικού, έχει σχεδιαστεί στο σχήμα 3.1.5.2-1 η χαρακτηριστική $E=f(x)$ του στερεού μονωτικού, όταν αυτό καταλαμβάνει όλο το χώρο μεταξύ ηλεκτροδίων και δεν έχει ανομοιογένειες στον όγκο του, συγκριτικά με εκείνη του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού με περιβάλλον μέσο το μονωτικό λαδί. Παρατηρούμε ότι στις θέσεις ανομοιογένειας, όπου η αγωγιμότητα είναι αυξημένη έναντι του υπόλοιπου “υγιούς” τμήματος του συνδυασμού των δυο μονωτικών (στερεό μονωτικό – μονωτικό λάδι), η πεδιακή ένταση έχει μεγαλύτερες τιμές από ότι αν δεν υπάρχουν ανομοιογένειες.

Τη συμμετοχή αυτή των ανομοιογενειών στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής μπορεί να λάβει κανείς υπ' όψη σαν να πρόκειται για αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού από την πεδιακή ένταση (σχέση 2.5-4).

Για το ανομοιογενές στερεό μονωτικό έχουμε επομένως κατά τη σχέση 3.1.1-3:

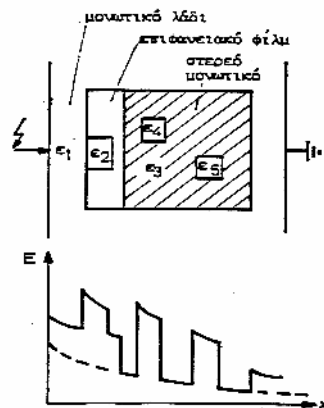
$$\frac{U^2 \sigma_o e^{\beta\theta} A}{(1 - \delta E)^2 d} = \kappa 2\pi r d\theta + C_o \frac{d\theta}{dt} \quad (3.1.5.2-1)$$

και στην περίπτωση της διάτρησης (στην τιμή $U_{\theta\varepsilon}$):

$$\frac{U_{\theta\varepsilon}^2 \sigma_o e^{\beta\theta} A}{(1 - \delta E)^2 d} = \kappa 2\pi r d\theta \quad (3.1.5.2-2)$$

από την οποία προκύπτει ότι:

$$\theta = \frac{U_{\theta\varepsilon}^2 \sigma_o e^{\beta\theta} A}{d \kappa 2\pi r^2 (1 - \delta E)^2 d} \quad (3.1.5.2-3)$$



Σχήμα 3.1.5.2-1: Αύξηση της πεδιακής έντασης στις θέσεις ανομοιογενειών στερεού μονωτικού.

ε_1 έως ε_5 : διηλεκτρικές σταθερές

ε_1 : Μονωτικό λάδι

ε_2 : Ανομοιογένειες στο επιφανειακό φιλμ ($\varepsilon_1 < \varepsilon_2$).

ε_3 : Στερεό μονωτικό ($\varepsilon_3 > \varepsilon_1$).

$\varepsilon_4, \varepsilon_5$: Ανομοιογένειες στον όγκο του στερεού μονωτικού ($\varepsilon_3 >$

ε_4 και $\varepsilon_3 > \varepsilon_5$).

- - -: Χαρακτηριστική του στερεού μονωτικού όταν δεν καταλαμβάνει όλο το χώρο μεταξύ ηλεκτροδίων και δεν έχει ανομοιογένειες στον όγκο του.

— Χαρακτηριστική με θέσεις διαταραχής και περιβάλλον

μονωτικό λάδι.

Η οριακή τιμή δίνεται από τη διαφόριση του αριστερού και του δεξιού τμήματος της παραπάνω σχέσης ως προς θ :

$$1 = \frac{U_{\theta\epsilon}^2 \sigma_o e^{\beta\theta} A}{d\kappa 2\pi r^2 (1 - \delta E)^2 d} \quad (3.1.5.2-4)$$

Από τις σχέσεις 3.1.5.2-3 και 3.1.5.2-4 φαίνεται ότι $\beta\theta = 1$ και επομένως η οριακή τιμή της τάσης διάσπαση είναι:

$$U_{\theta\epsilon \min} = d(1 - \delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_o r}} \quad (3.1.5.2-5)$$

Σε συνδυασμό με τη σχέση 3.1.1-8, η μείωση της τάσης για τη θερμική διάτρηση (ΔU_1), λόγω συμμετοχής των μερικών εκκενώσεων είναι:

$$\Delta U_1 = U_{\theta} - U_{\theta\epsilon \min} = d\delta E \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_o r}} \quad (3.1.5.2-6)$$

3.1.5.2.2 Η ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ, ΛΟΓΩ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ

Αν πάρει κανείς υπ' όψη στη σχέση 3.1.2-1 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις στη θέση όπου εκδηλώνεται η μερική εκκένωση (σχέση 2.4-6), τότε, με την παραδοχή ότι η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι πρακτικά μηδενική ισχύει:

$$\frac{u^2 \sigma A}{(1 - \delta E)^2} = C_o \frac{d\theta}{dt}$$

$$(3.1.5.2-7)$$

και για την διάτρηση στην τιμή U_{ns} , λόγω του συνδυασμού μεταξύ των δυνάμεων Coulomb και των μερικών εκκενώσεων, είναι :

$$U_{ns} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_o \theta}{\sigma A T_{\delta}}} \quad (3.1.5.2-8)$$

Η τάση διάτρησης μειώνεται δηλαδή κατά την τιμή ΔU_2 :

$$\Delta U_2 = U_n - U_{ns} = \sqrt{d} \delta E \sqrt{\frac{C_o \theta}{\sigma A T_{\delta}}} \quad (3.1.5.2-9)$$

3.1.5.2.3 Η ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΜΕΡΙΚΕΣ ΕΚΚΕΝΩΣΕΙΣ

Αν πάρει κανείς υπ' όψη στη σχέση 3.1.4-1 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας λόγω των μερικών εκκενώσεων (σχέση 2.4-6), τότε η θερμική τάση ανατροπής U_{xs} , λόγω του συνδυασμού της θερμότητας του περιβάλλοντος με τις μερικές εκκενώσεις, θα είναι:

$$U_{xs} = (1 - \delta E) \sqrt{\frac{\alpha k \theta}{\sigma_o}} \quad (3.1.5.2-10)$$

Για τη μείωση της θερμικής τάση ανατροπής λόγω μερικών εκκενώσεων

ισχύει επομένως:
$$\Delta U_3 = U_x - U_{xs} = \delta E \sqrt{\frac{\alpha k \theta}{\sigma_o}} \quad (3.1.5.2-11)$$

3.1.5.2.4 Η ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΑΝ ΑΡΙΘΜΟ ΚΡΟΥΣΕΩΝ (ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ, ΜΕ ΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ JOULE ΚΑΙ ΤΙΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ COULOMB)

Ο συνδυασμός αυτός των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης, κατά την καταπόνηση στερεών πολυμερών μονωτικών υλικών, εκτός μονωτικού ελαίου, με έναν αριθμό κρούσεων m (της μορφής 1,2/50 μς, ή 10/200 μς, ή 250/2500 μς), που έχουν αρκετά μικρότερη μέγιστη τιμή από εκείνη για τη διάτρηση με μια κρούση, έχει αποδοθεί σε δυο φαινόμενα:

- Το θερμικό φαινόμενο: μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις.
- Την ηλεκτρομηχανική διάτρηση κατά την τελευταία κρούση (m) στην τιμή U_k ή πολύ κοντά σε αυτή.

Το θερμικό φαινόμενο θεωρείται ότι είναι μια τεχνητή γήρανση (βλέπετε παράγραφο 3.1.3.2) μέχρι προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω του οποίου το υλικό απέκτησε σε μια περιοχή του (όπου εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις) την ειδική αγωγιμότητα:

$$\sigma = \sigma_o e^{\beta_m \theta_m} \quad (3.1.5.2-12)$$

όπου θ_m η θερμοκρασία και β_m ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτώνται από τη τιμή U_k , τη συχνότητα των κρούσεων (ο χρόνος μεταξύ των διαδοχικών κρούσεων) και τη μορφή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Στην περιοχή δηλαδή, όπου συμβαίνουν οι μερικές εκκενώσεις, το υλικό άλλαξε, λόγω των χημικών διεργασιών, τις φυσικές του ιδιότητες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής του, ώστε τελικά να πρόκειται για ένα “άλλο” μονωτικό, το οποίο πλέον διασπάται ηλεκτρομηχανικά στη $m^{\text{η}}$ κρούση (όπως στην περίπτωση 2, που αναφέρθηκε παραπάνω). Κατά αντιστοιχία επομένως προς την σχέση 3.1.2-1 ισχύει:

$$u^2 \frac{\sigma_o e^{\beta_m \theta_m} A}{(1 - \delta E)^2 d} = C_m \frac{d\theta}{dt} \quad (3.1.5.2-13)$$

όπου C_m η θερμοχωρητικότητα, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, η οποία εξαρτάται επίσης από τους παράγοντες, που προαναφέρθηκαν για τις τιμές β_m και θ_m . Έτσι, για τη διάσπαση στην τιμή U_k έχουμε αντίστοιχα με τη σχέση 3.1.2-2):

$$U_k = (1 - \delta E) \sqrt{d \frac{C_m \theta_m}{\sigma A T_s}} \quad (3.1.5.2-14)$$

όπου T_s ο χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης.

Επομένως, η μείωση της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης για τη διάτρηση (συγκριτικά προς εκείνη κατά τη διάτρηση χωρίς προηγούμενη τεχνητή γήρανση) είναι:

$$\Delta u = \delta E \sqrt{d \frac{C_m \theta_m}{\sigma A T_s}}$$

(3.1.5.2-15)

Σύμφωνα με την προηγούμενη θεωρία φαίνεται, ότι μέχρι τη $m-1$ κρούση η ενέργεια, που παρέχεται στο στερεό μονωτικό, μετατρέπεται στη θερμότητα που παραμένει στη θέση

της προσεχούς διάτρησης και σε εκείνη που μεταδίδεται στο υπόλοιπο υλικό (ανάλογα με τη συχνότητα των κρούσεων). Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι κατά την εφαρμογή της τελευταίας κρούσης (m) η θερμοκρασία στη συγκεκριμένη θέση του υλικού έχει αποκτήσει την κρίσιμη για τη διάτρηση τιμή της. Για το μέρος της ενέργειας επομένως, που παρέχεται επί m φορές στο στερεό μονωτικό ισχύει:

$$(m-1)a\hat{U}_\kappa^2 + \gamma\hat{U}_\kappa^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai} + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{ai}}{(1-\delta E)^2} + \beta\hat{U}_\kappa^2 \quad (3.1.5.2-16)$$

όπου:

$(m-1)a\hat{U}_\kappa^2$: το μέρος της ενέργειας, που παρέχεται στο υλικό μέχρι τη m-1 κρούση,

$\gamma\hat{U}_\kappa^2$: το μέρος της ενέργειας, που παρέχεται στο μονωτικό μόλις προ της διάτρησης κατά τη mⁿ κρούση,

$\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai}$: η θερμότητα, που μεταδίδεται μέχρι προ της εφαρμογής m^{ns} κρούση,

$\sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{ai}}{(1-\delta E)^2}$: η θερμότητα, που έχει παραμείνει στη συγκεκριμένη θέση προ της διάτρησης,

$\beta\hat{U}_\kappa^2$: η ενέργεια κατά τη διάτρησης.

Επειδή κατά τη διάτρηση είναι:

$$\frac{W_{ai}}{(1-\delta E)^2} + \beta\hat{U}_\kappa^2 = \gamma\hat{U}_\kappa^2 \quad (3.1.5.2-17)$$

από την σχέση 3.1.5.2-16 έπεται ότι:

$$(m-1)a\hat{U}_\kappa^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai} + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{ai}}{(1-\delta E)^2} \quad (3.1.5.2-18)$$

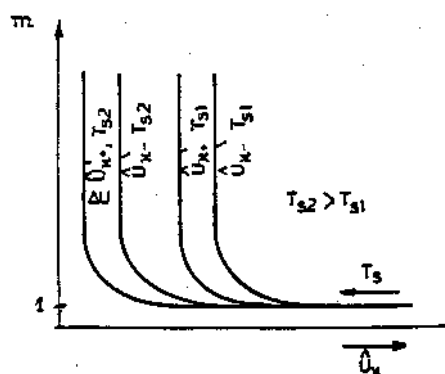
άρα έχουμε:

$$\mu = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai}}{a\hat{U}_\kappa^2} + \frac{\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai}}{a\hat{U}_\kappa^2 (1-\delta E)^2} \quad (3.1.5.2-19)$$

Δηλαδή:

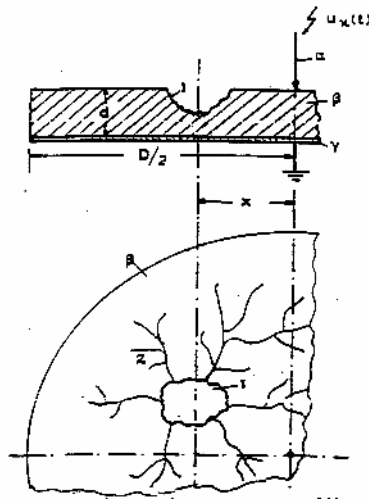
$$\mu = 1 + \frac{\alpha_1}{\hat{U}_\kappa^2} + \frac{\alpha_2}{\hat{U}_\kappa^2} = 1 + \frac{\alpha_3}{\hat{U}_\kappa^2} \quad (3.1.5.2-20)$$

όπου α_1 και α_3 συντελεστές, που εξαρτώνται από την τιμή U_k , τη συχνότητα των κρούσεων, τη μορφή της τάσεις και το πάχος του υλικού, το οποίο είναι καθοριστικό για την τιμή της πεδριακής έντασης. Αν λάβει κανείς υπ' όψη τη σημασία της πολικότητας της ακίδας και τη μείωση του χρόνου διάσπασης με την αύξηση της διάρκειας του μετώπου της κρουστικής τάσης, τότε οι χαρακτηριστικές $m=f(\hat{U}_k)$ έχουν τη μορφή, που δίνεται στο σχήμα 3.1.5.2-2.



Σχήμα 3.1.5.2-2: Χαρακτηριστικές $m=f(\hat{U}_k, T_s)$
 m : Αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση
 T_s : Χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης
 \hat{U}_k : Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

Κατά τη καταπόνηση του στερεού μονωτικού, που αναλύθηκε προηγούμενος θεωρήθηκε, ότι η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη για τη διάτρηση με μια κρούση. Από τα πειράματα, που έχουν γίνει με κρουστικές τάσης της μορφής 1,2/50 μς σε τιμές U_k πλησίον της περιοχής διάτρησης (πίνακας 3.1.2-1), έχει διαπιστωθεί ότι, εκτός από τη θερμική καταπόνηση, δημιουργούνται μικρά θραύσματα στη θέση προσεχούς διάσπασης. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι στη περίπτωση αυτή συμμετέχουν στην τεχνίτη γήρανση του υλικού (από κρούση σε κρούση) και οι δυνάμεις Coulomb. Η εικόνα, την οποία παρουσιάζει το δοκίμιο κατά τη γήρανση δίνεται στο σχήμα 3.1.5.2-3 και ονομάζεται εικόνα επιφανειακών διαταραχών.

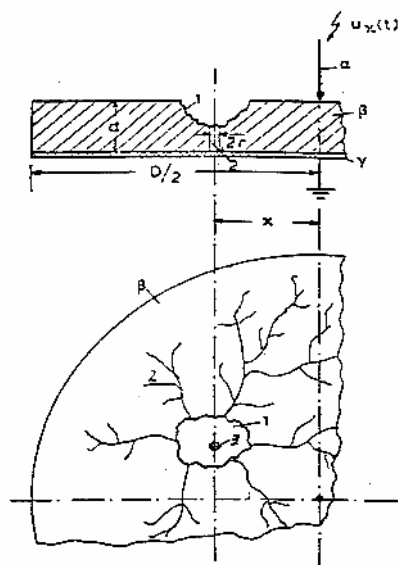


Σχήμα 3.1.5.2-3: Παράδειγμα εικόνα επιφανειακών διαταραχών κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών υλικών με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50 \mu\text{s}$, για τιμή U_k πλησίον της περιοχής για τη διάτρηση
 α: ακίδα ($R \approx 1 \text{ mm}$)
 β: στερεό μονωτικό
 γ: πλάκα
 1: κρατήρας
 2: σπήλαια

Πρόκειται για μια μόνιμη παραμόρφωση του υλικού, η οποία σχετίζεται με την εκδήλωση φωτεινής ακτινοβολίας (υπό μορφή δένδριτη), που παρατηρεί κανείς κατά την πραγματοποίηση πειραμάτων. Τα σπήλαια & ο κρατήρας έχουν αποδοθεί στη θερμική καταπόνηση του μονωτικού, γιατί φαίνεται ότι είναι αποτέλεσμα κάποιας τήξης του υλικού στα ίχνη του επιφανειακού δένδριτη. Τα θραύσματα, που προαναφέρθηκαν, δημιουργούνται κυρίως στη περιοχή του κρατήρα, τα οποία είναι και η θέση, όπου θα συμβεί και η διάτρηση. Πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχουν δείξει ότι η εικόνα επιφανειακών διαταραχών συρρικνώνεται όσο αυξάνει η διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης (υπό σταθερή τιμή U_k) η εικόνα επιφανειακών διαταραχών είναι π.χ. μεγαλύτερη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50 \mu\text{s}$, ως προς εκείνη με κρουστική τάση $10/200 \mu\text{s}$.

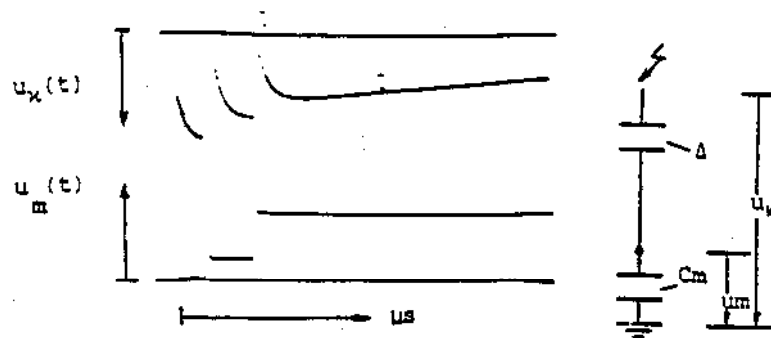
Έχει επίσης διαπιστωθεί, ότι η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών περιορίζεται, όσο μειώνεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων.

Όταν τελικά συμβεί η διάτρηση μετά από m κρούσεις, τότε παρατηρεί κανείς μια μικρή τρύπα διάτρησης (με διάμετρο μικρότερη από 0,1 mm, ως προέκταση του κρατήρα (σχήμα 3.1.5.2-4).

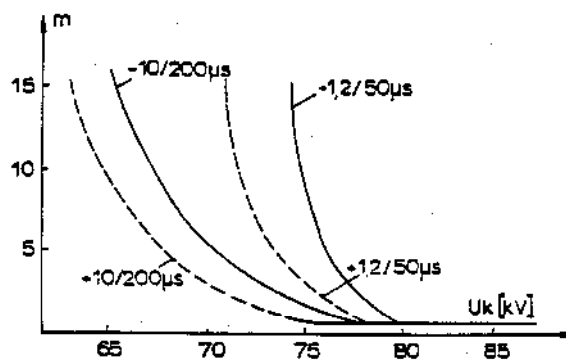


Σχήμα 3.1.5.2-4: Παράδειγμα της εικόνας διάτρησης μετά από την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών υλικών με κρουστική τάση της μορφής 1,2/50 μς, για τιμή U_k πλησίον της περιοχής για τη διάτρηση
 α: ακίδα ($R \approx 1$ mm)
 β: στερεό μονωτικό
 γ: πλάκα
 1: κρατήρας
 2: σπήλαια
 3: οπή διάτρησης

Στο σχήμα 3.1.5.2-5 δίνεται ένα παράδειγμα διάτρησης του βακελίτη (πάχους 1 mm) σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό διάταξη “ακίδα - πλάκα”, κατά την καταπόνηση του με κρουστική τάση της μορφής 10/200 μς, με μέγιστη τιμή πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση (πίνακας 3.1.2-1). Παρατηρεί κανείς ότι το παλμογράφημα αυτό είναι της ίδιας μορφής με εκείνο της ηλεκτρομηχανικής διάτρησης του σχήματος 3.1.3.4-1β. Επίσης, οι πειραματικές χαρακτηριστικές του σχήματος 3.1.5.2-6 (για το στερεό μονωτικό pertinax πάχους 1 mm) εξηγούνται ικανοποιητικά από τις θεωρητικές του σχήματος 3.1.5.2-2



Σχήμα 3.1.5.2-5: Διάτρηση του βακελίτη (πάχους 1 mm) με κρουστική τάση της μορφής 10/200μs.
 $U_k = 72 \text{ kV}$.



Σχήμα 3.1.5.2-6: $m=f(|\dot{U}_k|, T_s)$ για το στερεό μονωτικό pertinax.

Ηλεκτρόδια : ακίδα – πλάκα.

Δοκίμιο : pertinax πάχους 1 mm εντός μονωτικού ελαίου

m : αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση

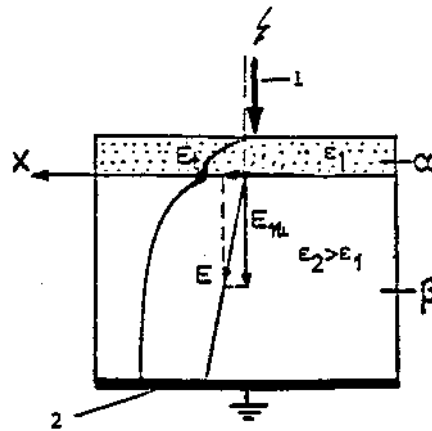
+ : θετική πολικότητα της ακίδας

- : αρνητική πολικότητα της ακίδας

Όπως δείχνεται στα σχήματα 3.1.5.2-3 και 3.1.5.2-4 ο κρατήρας και η τρύπα διάτρηση σχηματίζονται σε μια απόσταση x από την ακίδα (συνήθως μερικά mm), αν και η μέγιστη τιμή του πεδίου είναι στην κορυφή της ακίδας. Η ίδια παρατήρηση ισχύει για την τρύπα διάτρησης, όταν η διάτρηση συμβαίνει με μια μόνο κρούση. Αυτό φαίνεται ότι οφείλεται:

1. στην στατιστικότητα του φαινομένου (είναι στατιστικά αδύνατο να βρίσκεται ακριβώς κάτω από την ίδια ακίδα η επικρατέστερη θέση διαταραχής), και
2. σε πολύ μικρή απόσταση από την ακίδα μετακινούνται, υπό την επίδραση της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης οι

ετερώνυμοι προς αυτήν ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς του επιφανειακού φιλμ, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρακτικά επέκταση του ίχνους της ακίδας (σχήμα 3.1.5.2-7).



Σχήμα 3.1.5.2-7: Επεξήγηση της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης στον καθορισμό του κρατήρα και γενικότερα της θέσης διάτρησης, κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50 μς και 10/200 μς

- 1: ακίδα
- 2: πλάκα
- α) επιφανειακό φιλμ
- β) στερεό μονωτικό

Η παραπάνω παρατήρηση για τη θέση της τρύπας διάτρησης ισχύει επίσης κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφής κρουστικής τάσης 25/2500 μς), καθώς και εκείνη με εναλλασσόμενη ή συνεχή τάση. Από έρευνες, που έχουν γίνει με τις παραπάνω μορφές τάσεις (με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9 mm ή 1 mm) δεν έχει διαπιστωθεί κατά την τεχνητή γήρανση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1 mm ή 2 mm) η εκδήλωση κρατήρα ή σπηλαίων, ούτε έχει παρατηρηθεί η εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη (ανεξαρτήτως της τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης). Η διαφορά αυτή ως προς την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών, που παρουσιάζεται κατά την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις 1,2/50 μς και 10/200 μς, είναι μια σημαντική παρατήρηση, που έχει οδηγήσει (σε συνδυασμό με μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών) στο διαχωρισμό μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης στο στερεό μονωτικό τάσης.

3.1.5.2.5 Ο ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

Το αποτέλεσμα του συνδυασμού των τεσσάρων παραγόντων γήρανσης και διάτρησης (απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος) εξαρτάται, από το πώς αυτοί εκδηλώνονται διαχρονικά. Αν θεωρηθεί π.χ. ότι πρόκειται για γήρανση του υλικού, τότε η καταπόνηση είναι κυρίως θερμική, όποτε από τις σχέσεις 3.1.1-3 και 2.4-2 έχουμε:

$$\frac{u^2 A}{d} \frac{e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2} = 2\pi r d\kappa + C_o \frac{d\theta}{dt} \quad (3.1.5.2-21)$$

όπου u η στιγμιαία τιμή της τάσης για τη διάτρηση και θ η διαφορά θερμοκρασίας ως προς το περιβάλλον. Από τη παραπάνω σχέση και την σχέση 3.1.1-8 ο χρόνος διάτρησης είναι:

$$t = \frac{C_o \beta}{2\pi r d\kappa} \int \frac{d\theta}{\left[\frac{U}{U_s}\right]^2 e^{\beta\theta} - \beta\theta}$$

(3.1.5.2-22)

Αν θεωρηθεί, ότι λόγω προηγούμενης γήρανσης, συμβαίνει τελικά η διάτρηση

για $U > U_s$ (ηλεκτρική διάτρηση) και ότι:

$$\beta\theta \ll \left[\frac{U}{U_s}\right]^2 e^{\beta\theta-1}$$

(3.1.5.2-23)

τότε, από την σχέση 3.1.5.2-22 έχουμε:

$$t \approx \frac{C_o e}{2\pi r d\kappa \beta} \left[\frac{U_s}{U}\right]^2$$

(3.1.5.2-24)

ή τελικά:

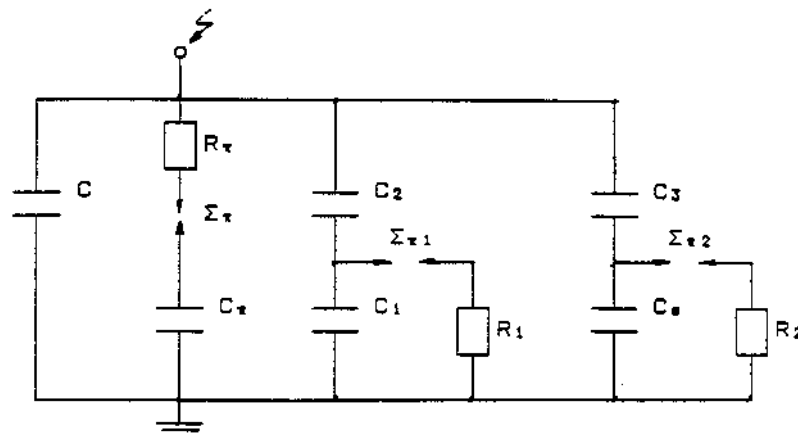
$$t = \frac{a}{U^2}$$

(3.1.5.2-25)

όπου a ένας συντελεστής του υλικού.

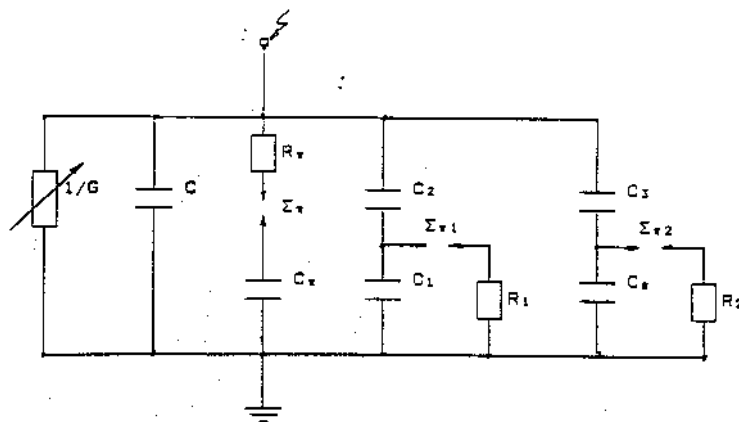
Η παραπάνω σχέση δίνει μια πιθανή ερμηνεία για τη διάτρηση στερεών μονωτικών, σε καταπονήσεις μικρής χρονικής διάρκειας. Πράγματι, η σχέση 3.1.5.2-10 για τη διάτρηση μετά από ένα αριθμό κρούσεων (βλέπετε χαρακτηριστικές των σχημάτων 3.1.5.2-2 και 3.1.5.2-6) φαίνεται ότι εναρμονίζεται με την σχέση 3.1.5.2-25, γιατί ο αριθμός των κρούσεων (m) σχετίζεται με τον χρόνο καταπόνησης.

Από πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχει προταθεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που αποδίδει ικανοποιητικά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση και τις μερικές εκκενώσεις (σχήμα 3.1.5.2-8). Όπως φαίνεται πρόκειται ουσιαστικά για μια παράλληλη σύνδεση ενός πυκνωτή C_{π} , προς το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff. Ο πυκνωτής αυτός εκφράζει την πόλωση του υλικού, λόγω της οποίας συμβαίνει η μηχανική τάνυση του από τις δυνάμεις του πεδίου. Η διαδρομή εκκένωσης εκφράζεται στην περίπτωση αυτή με τον σπινθηριστή Σ_{π} και την αντίσταση του τόξου R_{π} (υποτίθεται ότι ο Σ_{π} διασπάται ταυτόχρονα με τον πυκνωτή C_{π}). Για να αποδίδει το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα το συνδυασμό όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης (κατά τη μακροσκοπική θεωρία), φαίνεται τι θα πρέπει να γίνει η παράλληλη σύνδεση μιας μεταβλητής αγωγιμότητας, που θα εκφράζει τις θερμικές απώλειες (απώλειες Joule και ενίσχυσης τους από τις μερικές εκκενώσεις) και την καταπόνηση του υλικού από τη θερμότητα του περιβάλλοντος (σχήμα 3.1.5.2-9).



Σχήμα 3.1.5.2-8: Βελτίωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff, ώστε να αποδίδεται από αυτό η γήρανση και η ηλεκτρομηχανική διάτρηση.

- C: Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
- C₁: Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών (κυρίως φυσαλίδες αερίων).
- C₂: Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του στερεού μονωτικού.
- C₂: Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών
- C₃: Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του επιφανειακού φιλμ.
- C_π: Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου.
- R₁: Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_{π1}
- R₂: Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_{π2}
- R_π, Σ_π : Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του C_π (R_π, αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_π).



Σχήμα 3.1.5.2-8: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

- C: Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
- C₁: Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών (κυρίως φυσαλίδες αερίων).
- C₂: Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του στερεού μονωτικού.
- C₂: Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών
- C₃: Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του επιφανειακού φιλμ.

C_{π} : Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου.

R_1 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma_{\pi 1}$

R_2 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma_{\pi 2}$

R_{π}, Σ_{π} : Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του C_{π} (R_{π} , αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_{π}).

G: αγωγιμότητα λόγω των απωλειών του διηλεκτρικού καθώς και την ενίσχυση τους από τις μερικές εκκενώσεις και τη θερμότητα του περιβάλλοντος.

Στον πίνακα 3.1.5.2 δίνονται συνοπτικά οι βασικές περιπτώσεις συνδυασμού των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης, που εξετάστηκαν στην παράγραφο αυτή. Οι θεωρητικές σχέσεις του πίνακα 3.1.5.2 δεν δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού της τάσης διάτρησης (γιατί περιλαμβάνουν αρκετές άγνωστες τιμές, που πρέπει να βρεθούν με μετρήσεις), δίνουν όμως τη δυνατότητα κατανόησης των φαινομένων, όταν οι μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών συνδυάζονται με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής.

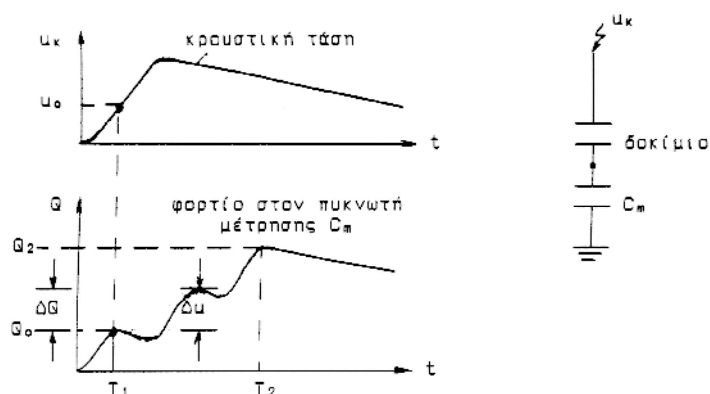
α/α	Παράγοντες που συμμετέχουν στην αλλαγή της μοριακής δομής	Θεμελιώδεις σχέσεις	Οριακή τιμή της τάσης για τη διάτρησης.
1	Συνδυασμός της θερμοκρασία του περιβάλλοντος με τους άλλους παράγοντες γήρανσης & διάτρησης	Η θερμότητα του περιβάλλοντος ενισχύει όλους τους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης	

2	Μερικές εκκενώσεις και απώλειες Joule	$1) \sigma = \frac{\sigma_o e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2}$ $2) \frac{\sigma_o e^{\beta\theta} A}{(1-\delta E)^2} = 2\pi r d \kappa \theta$	$u_{es} = d(1-\delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_o}}$ <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση:</p> $\Delta u_1 = dE \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_o}}$
3	Μερικές εκκενώσεις και απώλειες Coulomb	$1) \sigma = \frac{\sigma_o e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2}$ $2) \frac{u^2 \sigma A}{(1-\delta E)^2} = C_o \frac{d\theta}{dt}$	$u_{ns} = (1-\delta E) \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_o \theta}{\sigma A T_\delta}}$ <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση:</p> $\Delta u_2 = \delta E \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_o \theta}{\sigma A T_\delta}}$
4	Μερικές εκκενώσεις και θερμοκρασία του περιβάλλοντος	$1) u_x = \sqrt{a \frac{\kappa\theta}{\sigma}}$ $2) \sigma = \frac{\sigma_o e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2}$	$u_{xs} = (1-\delta E) \sqrt{a \frac{\kappa\theta}{\sigma}}$ <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση:</p> $\Delta u_3 = \delta E \sqrt{a \frac{\kappa\theta}{\sigma}}$
5	Συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων*	$\frac{u^2 e^{\beta\theta} A}{d(1-\delta E)^2} = 2\pi f \kappa \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)$	Εξαρτάται κυρίως από τον παράγοντα που υπερισχύει.

Πίνακας 3.1.5.2: Βασικές σχέσεις μιας θεωρητικής ερμηνείας για τη γήρανση και διάτρηση των στερεών μονωτικών. * : μερικές εκκενώσεις, απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

3.1.6 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ

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 3.1.6-1 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 3.1.6-2). Στο σχήμα π.χ. 3.1.6-3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση



καταπόνησης.

Σχήμα 3.1.6-1 : 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.

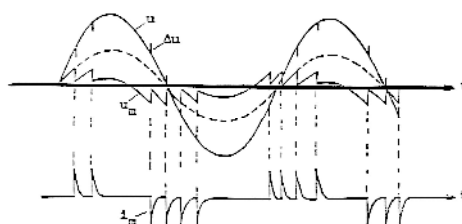
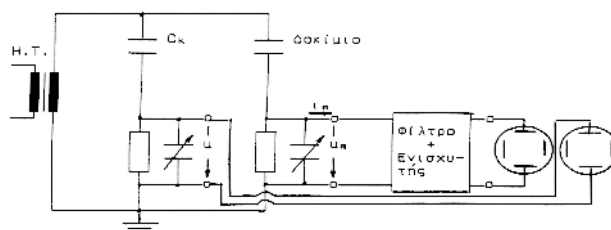
ΔQ : Αύξηση φορτίου.

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, κλπ. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμών. Ιδιαίτερη

σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q=f(\hat{U}_κ)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 3.1.6-4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, 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 3.1.6-5 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.

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:

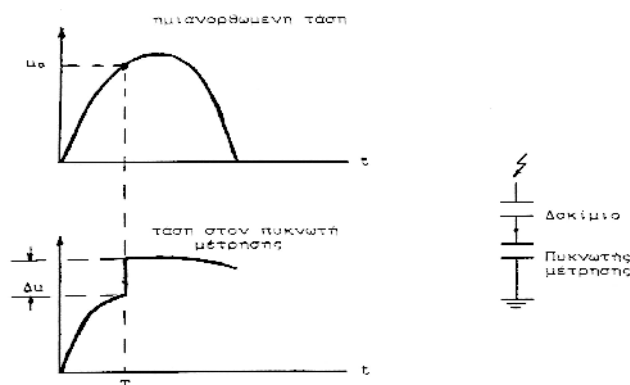
- 1) οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή μηδενισμού της τάσης, ή γενικότερα στην περιοχή της μέγιστης χρονικής μεταβολής της.
- 2) οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή, όπου δεν μηδενίζεται η τάση.



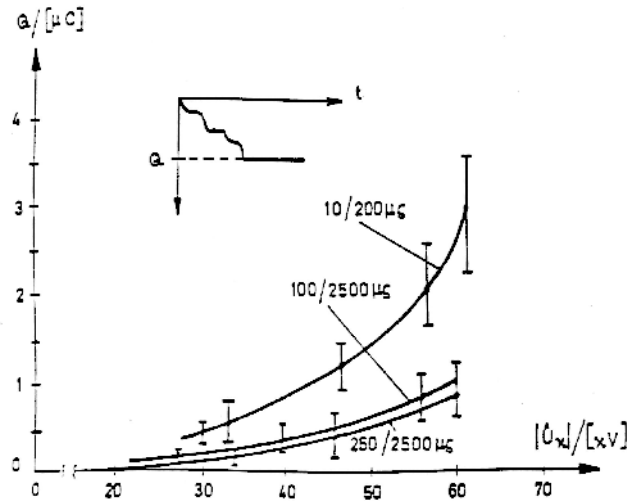
Σχήμα 3.1.6-2 : Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω "ωμικού-χωρητικού" τετράπολου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz.
 Η.Τ.: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.
 C_k : Πυκνωτής υψηλής τάσης.
 u : Στιγμιαία τιμή της εναλλασσόμενης τάσης (η οποία μετράται σε ένα ωμικό-χωρητικό τετράπολο).
 u_m : Στιγμιαία τιμή της τάσης στο ωμικό-χωρητικό τετράπολο μέτρησης των μερικών εκκενώσεων.
 I_m : Στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων.
 Δu : Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων.

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.

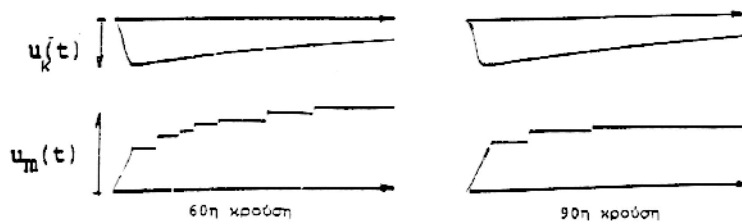
Μία πειραματική προσέγγιση του παραπάνω διαχωρισμού, μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, έχει δοθεί από παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού σε στερεά οργανικά μονωτικά, με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών (σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα), που συνδυάστηκαν με ταυτόχρονες οπτικές παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών κατά το σχήμα 3.1.5-7. Στον πίνακα 3.1.6-1 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$, 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 1,2/50μs) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.



Σχήμα 3.1.6-3 : Παράδειγμα Καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης. Δu : άλμα δυναμικού. T_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων. U_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμασιαία τιμή).



Σχήμα 3.1.6-4 : Χαρακτηριστική $Q_2=f(\hat{U}_κ)$ 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 3.1.6-5 : Άλματα δυναμικού κατά την 60^η και την 90^η κρούση στο pertinax (πάχους 2mm).

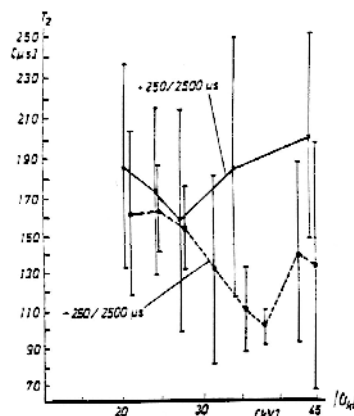
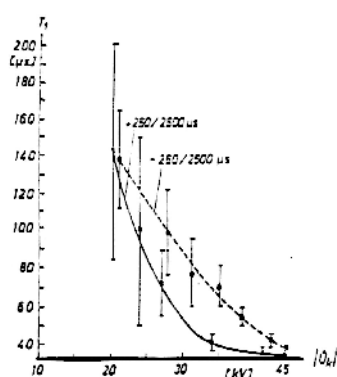
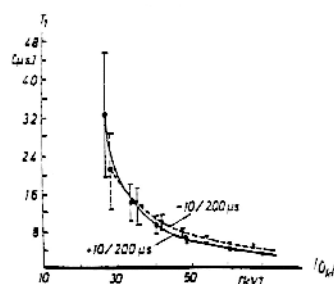
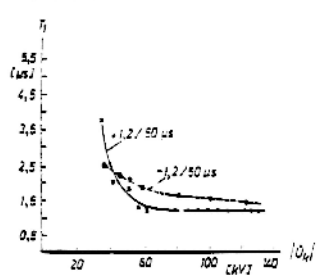
Μορφή τάσης : 1,2/50μs ($\hat{U}_κ = 99,7kV$).
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.
 C_m : 210nF.

Μορφή τάσης σε μs	Δενδρίτης	Εικόνα επιφανειακών διαταραχών	Άλματα Δυναμικού	Συμπεράσματα για τις μερικές εκκενώσεις εξωτερικές
1,2/50	ΝΑΙ	ΝΑΙ	στην ουρά	εξωτερικές

				μερικές εκκενώσεις
10/200	ΝΑΙ (αλλά μικρότερος από εκείνον κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50μs	ΝΑΙ (αλλά μικρότερη από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50 μs	στην ουρά και στο μέτωπο	εξωτερικές και εσωτερικές μερικές εκκενώσεις
250/2500	ΟΧΙ	ΟΧΙ	στο μέτωπο	εσωτερικές μερικές εκκενώσεις

Πίνακας 3.1.6-1 : Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

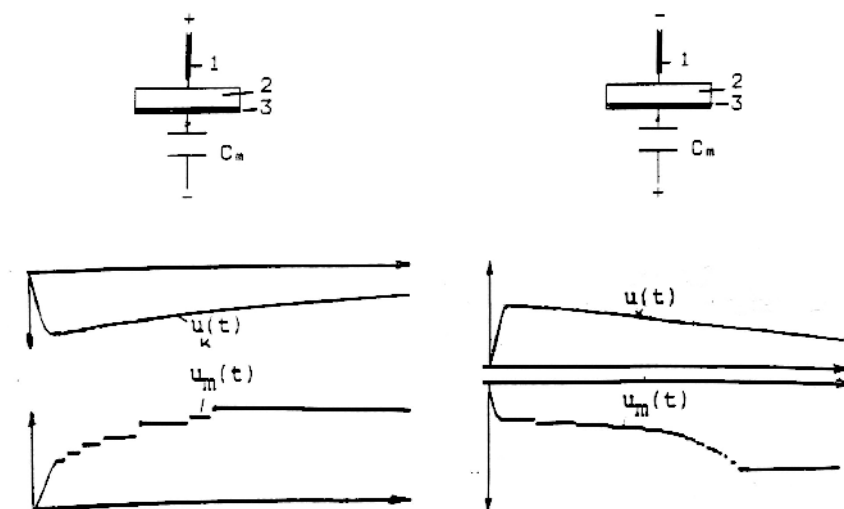
Μία άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, ως προς τον χρόνο εκδήλωσής τους (υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης), έχει βασιστεί σε χαρακτηριστικές $T_1=f(|\hat{U}_κ|)$ και $T_2=f(|\hat{U}_κ|)$ σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών. Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ο χρόνος έναρξης (T_1) των μερικών εκκενώσεων (στα μονωτικά υλικά και το είδος της καταπόνησης, που προαναφέρθηκαν), καθώς και ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (T_2), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs), ώστε σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις του πίνακα 3.1.6-7 για την εικόνα των επιφανειακών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.



Σχήμα 3.1.6-6 : 1) Χαρακτηριστική $T_1=f(|\hat{U}_κ|)$ κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2mm και $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$) με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, 10/200μs και 250/2500μs.
 2) Χαρακτηριστική $T_2=f(|\hat{U}_κ|)$ κατά την καταπόνηση των υλικών αυτών με κρουστικές τάσεις 250/2500μs.
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.
 I : 2 φορές η τυπική απόκλιση.

3.1.7 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΣΤΕΡΕΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ

Από την μέση καμπύλη των χαρακτηριστικών του σχήματος 3.1.6-6 γίνεται επίσης φανερή η εκδήλωση του φαινομένου της πολικότητας όπως και κατά τη διάτρηση (βλέπετε πίνακα 3.1.2-1). Οι επικαλύψεις τιμών, που παρατηρούνται μπορούν να αποδοθούν στη διαφορετική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο (τα οργανικά στερεά μονωτικά είναι ανομοιογενή και δεν είναι δυνατό να υπάρχει συμμετρική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο). Πάντως, το φαινόμενο της πολικότητας γίνεται φανερό στα άλματα δυναμικού από την κύρτωση



(παρέκκλιση) της $u_m(t)$ προς τον άξονα του χρόνου (σχήμα 6.1.7-1).

Σχήμα 3.1.7-1 : Τυπικά παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs.

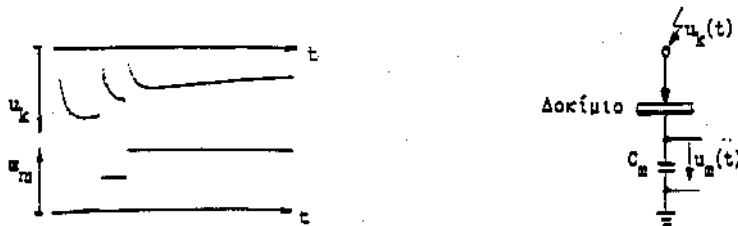
(1: Ηλεκτρόδιο ακίδα, 2: Δοκίμιο, 3: Ηλεκτρόδιο πλάκα, C_m : Πυκνωτής μέτρησης).

3.2 Η ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΚΑΙ Η ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗ

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 μια ομάδα ελεύθερων ηλεκτρονίων (η οποία, με βάση τις οπτικές παρατηρήσεις, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μια διαδρομή της δενδροειδούς 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 άλλοι παράγοντες (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος), όπως κατά τη διάτρηση. Μπορεί επομένως να θεωρηθεί, ότι ισχύει το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.1.5.2-8, όπου όμως οι μερικές εκκενώσεις στο επιφανειακό φιλμ (δηλαδή στο συνδυασμό “επιφάνεια του στερεού μέχρι βάθος 30\AA - περιβάλλον μέσο”) είναι συνήθως ο κυρίαρχος παράγοντας για την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση.

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 διαφορά ότι η επιφανειακή διάσπαση εκδηλώνεται στην ουρά της κρουστικής τάσης



Σχήμα 3.2-1: Τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2 mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση της μορφής 10/200 μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα - πλάκα
 C_m : 1835 nF
 U_k : 70 kV.

3.3 Η ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 3.1 και 3.2, 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, και
- το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και η συσχέτισή του με φωτεινά φαινόμενα και καταπονήσεις, που παρατηρούνται στο υλικό (θερμικές, ή μηχανικές, ή και τα δύο), που θα έδινε περισσότερες πληροφορίες για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής.

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 (δηλαδή από παλμογραφήματα όπως εκείνα των σχημάτων: 3.1.3.4-1, 3.1.5.1-4 και 3.1.5.2-5),

- στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης (ως στοιχείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε δηλαδή μια αντίσταση, αντί του πυκνωτή μέτρησης: βλέπετε σχήμα 3.3.1-5),
- στην ανίχνευση το μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και 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 :

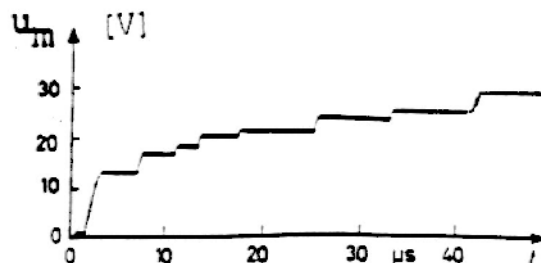
- 1) Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί, ότι :
 - α) το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.
 - β) Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί μέχρι τις ακτίνες Χ (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 $2,5 \div 4,5$) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου $0,2 \text{ MV/cm}$.
- 3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου $0,5 \text{ MV/cm}$ αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση 1.1-2 ($\sigma = \sigma_0 \exp(-W / kT)$).
- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση 2.4-1. 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

3.3.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ένα τυπικό παράδειγμα κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης σε στερεά μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών είναι το παρακάτω :

Στα σχήματα 3.3.1-1 ως 3.3.1-3 δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα της τεχνητής γήρανσης στερεών πολυμερών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και στο σχήμα 3.3.1-4 ένα παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου. Η διάταξη μέτρησης έχει σχεδιαστεί απλοποιημένα στο σχήμα 3.3.1-5. Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώθηκε ότι :



Σχήμα 3.3.1-1 : Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs .

$$\hat{U}_k : 100\text{kV}.$$

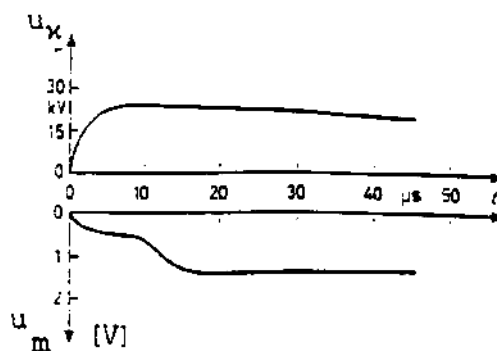
$$E : 0,8 \text{ MV/cm}.$$

$$C_m : 210\text{nF}.$$

- μετά από μία τιμή $\hat{U}_k \approx 45\text{kV}$, κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs ή 10/200 μs , εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 3.3.1-6). Υπό σταθερή τιμή της τάσης ο δενδρίτης, καθώς και η αντίστοιχη προς αυτόν αλλαγή της

μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις

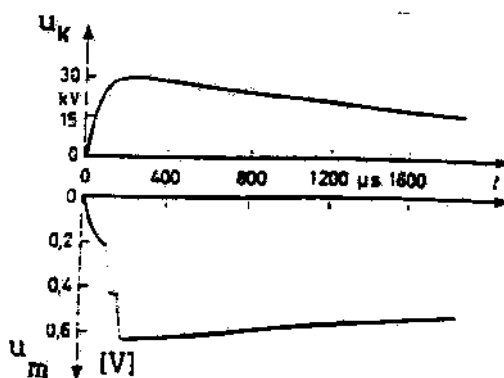
- κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs δεν παρατηρήθηκε, υπό σταθερή τιμή της τάσης (που δεν οδηγεί στη διάσπαση), η εκδήλωση του παραπάνω δενδρίτη, ούτε προκλήθηκε αλλαγή της μοριακής δομής.



Σχήμα 3.3.1-2 : Πρώτο άλμα δυναμικού υπό κρουστική τάση 10/200μs.

$$\hat{U}_k : 26,6\text{kV.}$$

$$E: 0,38\text{MV/cm. } C_m: 210\text{nF}$$

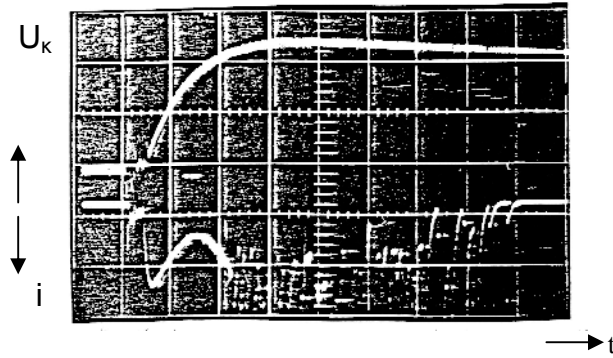


Σχήμα 3.3.1-3 : Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 250/2500μs.

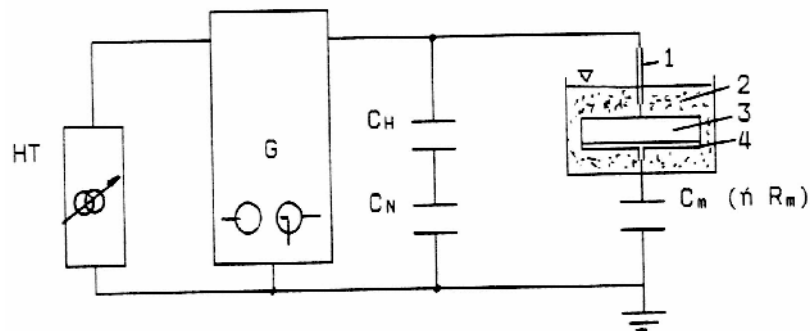
$$\hat{U}_k : 32\text{ kV.}$$

$$E: 0,31\text{ MV/cm.}$$

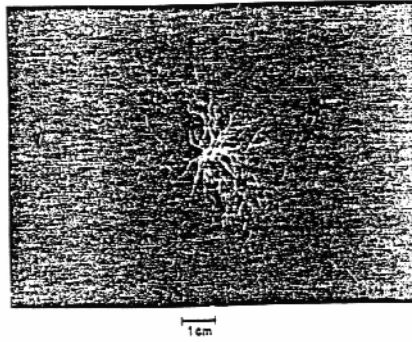
$$C_m: 1000\text{nF.}$$



Σχήμα 3.3.1-4 : Κρούσεις φορτίου υπό κρουστική τάση 10/200μs.
 Κλίμακα χρόνου : 5 μs/div.
 Κλίμακα ρεύματος : 1,3 A/div.
 $\hat{U}_κ$: 81kV, E : 0,86 MV/cm.



Σχήμα 3.3.1-5 : Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης των αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.
 Η.Τ. : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.
 G : Γεννήτρια κρουστικών τάσεων.
 C_H και C_N : Καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης.
 1 : Ηλεκτρόδιο ακίδα, 2 : Μονωτικό λάδι, 3 : Δοκίμιο (πάχος 2mm),
 4 : Ηλεκτρόδιο πλάκα.
 C_m : πυκνωτής μέτρησης των αλμάτων δυναμικού
 R_m : αντίσταση μέτρησης των κρούσεων φορτίου (δηλαδή του ρεύματος).



Σχήμα 3.3.1-6 : Εικόνα επιφανειακών διαταραχών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs

$$\hat{U}_κ : 85kV, E : 0,8MV/cm.$$

Στη κβαντομηχανική ερμηνεία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια του ελεύθερου ηλεκτρονίου κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. Η ενέργεια αυτή πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης C_m ανά άλμα δυναμικού σύμφωνα με τη σχέση:

$$W = 0,5q_e \Delta u \quad (3.3.1-1)$$

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. Για $R > 0$ θα πρέπει να πάρει κανείς υπ' όψη το μεταβατικό φαινόμενο με σταθερά χρόνου :

$$(3.3.1-2) \quad \tau = R \cdot C_m$$

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από την σχέση :

$$W = (0,5\Delta u) / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \text{ σε eV}$$

$$(3.3.1-3)$$

όπου : Δu σε V και t ο χρόνος φόρτισης του C_m κατά τη διάρκεια μίας μερικής εκκένωσης (κατά τη βιβλιογραφία περίπου 100ns).

Ορίζοντας ως συντελεστή διόρθωσης f :

$$f = 1 / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)})$$

$$(3.3.1-4)$$

προκύπτει ότι $W = 0,5 \cdot f \cdot \Delta u$ σε eV

$$(3.3.1-5)$$

όπου Δu σε V.

Εκτός από την ενέργεια W για το πρώτο άλμα δυναμικού μπορεί να υπολογιστεί ο συνολικός αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων (N) ως ακολούθως :

Το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο κατά την εκδήλωση ενός ή περισσοτέρων αλμάτων δυναμικού (με συνολική αύξηση του δυναμικού κατά Δu) είναι :

$$Q_m = C_m \cdot \Delta u$$

(3.3.1-6)

Έτσι, ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων δίνεται από τη σχέση :

$$N = \frac{Q_m}{q_e} = \frac{C_m \cdot \Delta u}{q_e}$$

(3.3.1-7)

Στον πίνακα 3.3.1-1 έχουν υπολογιστεί με τη σχέση 3.3.1-5 οι τιμές της ενέργειας W για το πρώτο άλμα δυναμικού των παλμογραφημάτων των σχημάτων 3.3.1-1, 3.3.1-2 και 3.3.1-3. Από τις τιμές αυτές φαίνεται, ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών σχετίζεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που μπορεί να περιλαμβάνει υπεριώδεις ακτίνες και υπέρυθρες ακτίνες. Έτσι :

- 1) από τις τιμές της ενέργειας κατά τον πίνακα 3.3.1-1,
- 2) τη φωτεινή ακτινοβολία, που παρατηρείται στην πράξη σε αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων (και η οποία με υπολογισμό της ενέργειας W εύκολα διαπιστώνεται σε άλματα δυναμικού του παλμογραφήματος του σχήματος 3.3.1-1), και
- 3) τις ραδιοφωνικές παρεμβολές και τα ακουστικά κύματα, που συχνά προκαλούν οι μερικές εκκενώσεις,

μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών σχετίζεται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται σε αυτά, το φάσμα της οποίας είναι : από ακουστικά κύματα μέχρι και υπεριώδεις ακτίνες.

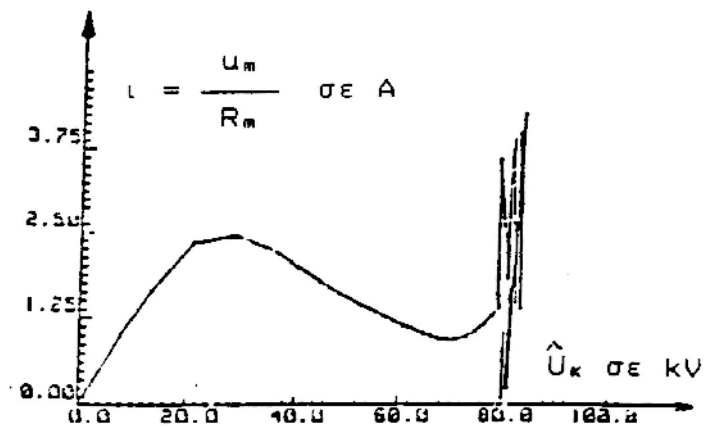
Μορφή τάσης	Σχήμα	W σε eV
1,2/50μs	3.3.1-1	10,50
10/200μs	3.3.1-2	1,60
250/2500μs	3.3.1-4	0,16

Πίνακας 3.3.1-1 : Τιμές της ενέργειας (W) των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πρώτο άλμα δυναμικού.

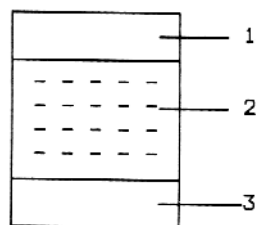
Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γήρανσης έχουν δοθεί από παλμογραφήματα των κρούσεων φορτίου. Πράγματι από το παλμογράφημα του σχήματος 3.3.1-5 φαίνεται ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις. Έτσι, όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσειμά της ενέργειάς τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (πίνακας 3.3.1-1). Ο δενδρίτης επομένως, που παρατηρείται, είναι το ορατό φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας. Μπορούμε, να υποθέσουμε, ότι αντίστοιχες δενδροειδούς μορφής εκπομπές συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου (σχήμα 3.3.1-5) φαίνεται επίσης, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης (κατά την αύξηση της τάσης παρατηρείται μείωση του ρεύματος). Η αντίσταση αυτή, που προηγείται του ιονισμού με κρούσεις, δίνεται αναλυτικότερα στην χαρακτηριστική "ρεύματος-τάσης" του σχήματος 3.3.1-7.

Από τα παραπάνω μπορεί να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα ότι 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 3.3.1-8). Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν

στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff. Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 3.3.1-7 : Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης κατά το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου του σχήματος 3.3.1-4



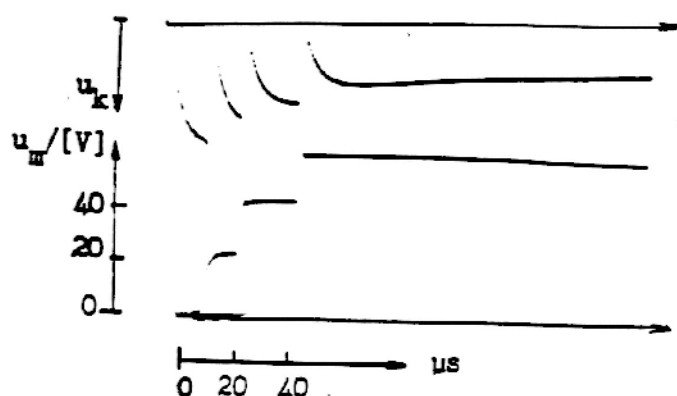
Σχήμα 3.3.1-8 : Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

- 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. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις καταπόνησης ο υπολογισμός της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (πάνω από την ενέργεια Fermi) μπορεί να γίνει, μέσω της εκδήλωσης των αλμάτων δυναμικού, με την σχέση 3.3.1-3.

3.3.2 ΤΟ ΦΑΣΜΑ ΤΗΣ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

Η διάτρηση έχει διερευνηθεί με καταπονήσεις στερεών μονωτικών με σχετική διηλεκτρική σταθερά περίπου 2,5÷4,5. Οι τάσεις δοκιμής, που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κβαντομηχανική ερμηνεία του μηχανισμού διάτρησης, είναι κυρίως κρουστικής μορφής (1,2/50μs, 10/200μs, 250/2500μs, κλπ). Πειράματα έχουν γίνει επίσης με εναλλασσόμενες και ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.



Σχήμα 3.3.2-1: Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου.

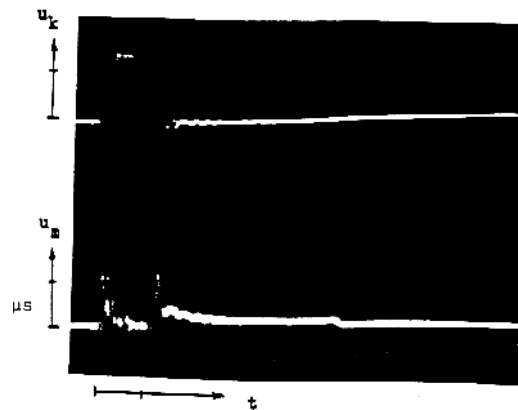
Κρουστική τάση : 1,2/50μs.

R της ακίδας ≈1mm.

$\hat{U}_κ$: 85kV.

E : 1,2 MV/cm.

C_m : 1835nF.



Σχήμα 3.3.2-2: Τυπικό παλμογράφημα κρούσεων φορτίου κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση.

R της ακίδας ≈1 mm.

Μορφή τάσης 1,2/50μs. $R_m = 150\Omega$ $u_m : 20V/div$ $t : 2 \mu s/div$

$\hat{U}_κ = 85kV$

E=1,2MV/cm

Παρακάτω εξετάζεται ένα παράδειγμα από τη βιβλιογραφία με κρουστικές τάσεις, ώστε να υπάρχουν συγκρίσιμες μετρήσεις με εκείνες της γήρανσης κατά την προηγούμενη παράγραφο. Για το λόγο αυτό, οι μετρήσεις έχουν γίνει (σύμφωνα με τη βιβλιογραφία) με τη διάταξη πειραματισμού του σχήματος 3.3.1-5. Τυπικά παλμογραφήματα του φαινομένου δίνονται στα σχήματα 3.3.2-1 και 3.3.2-2. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων (W) έχει υπολογιστεί από την σχέση 3.3.1-5, όπως και κατά την γήρανση. Έτσι, για το πρώτο π.χ. άλμα δυναμικού και $R=0,5\Omega$ (που ήταν η αντίσταση από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης) η τιμή W υπολογίζεται

ότι είναι περίπου 105eV. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε, ότι η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτινών Χ.

Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου (σχήμα 3.3.2-2) παρατηρεί κανείς την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Ο αριθμός των κρούσεων περιορίζεται ως προς εκείνον κατά τη γήρανση, αλλά η τιμή του ρεύματος αυξάνει σημαντικά. Μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι ο μηχανισμός της διάτρησης έχει τα ίδια γνωρίσματα με εκείνον της γήρανσης.

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 $\approx 1\text{mm}$), τότε (όπως έχει διαπιστωθεί πειραματικά) η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επεκτείνεται μέχρι το ορατό τμήμα της.

3.3.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ ΜΕ ΚΡΟΥΣΕΙΣ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ

Ένα σημαντικότατο συμπέρασμα, από την θεωρητική μελέτη του ιονισμού με κρούσεις στα στερεά μονωτικά δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2}$$

(3.3.3-1)

όπου E_0 είναι η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($E > 0,2\text{MV/cm}$), Q_0 το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, E η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση, λόγω της οποίας το φορτίο αποκτά την τιμή Q και A ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από τον χρόνο.

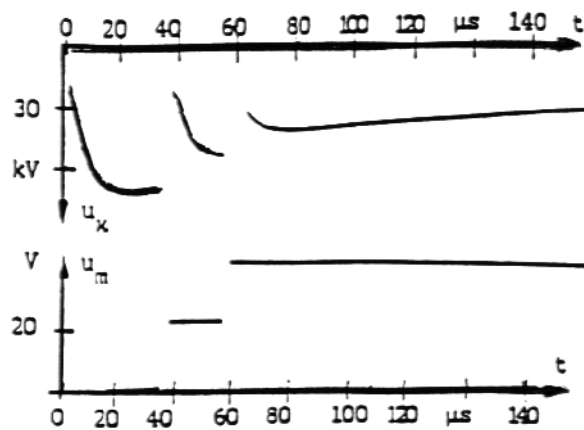
Με βάση την σχέση αυτή έχει γίνει μία πολύ ικανοποιητική προσέγγιση πειραματικών χαρακτηριστικών $Q=f(\hat{U}_κ)$ κατά την καταπόνηση στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών υπό διάφορες μορφές τάσης.

3.3.4 ΦΑΣΜΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ

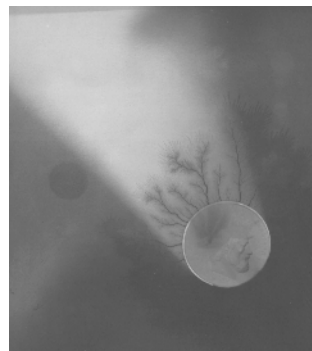
Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι ισχύει ότι και προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης. Συγκεκριμένα, αναφέρεται το παρακάτω παράδειγμα.

Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος 3.3.4-1 υπολογίζεται με την σχέση 3.3.3-1 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 ακτινών X.

Αν τελικά συμβαίνει εκπομπή ακτινών 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 υπεριώδους ακτινοβολίας (τουλάχιστον σε τιμές πεδίου πλησίον της διάσπασης). Από πειράματα που έχουν γίνει κατά τη βιβλιογραφία για τον σκοπό αυτό, φαίνεται ότι προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και απεικονίζονται αντικείμενα, καθώς και βιολογικοί οργανισμοί. Στο σχήμα 3.3.4-2 δίνεται κατά τη βιβλιογραφία μία από τις φωτογραφίες αυτές. Επίσης, στο ίδιο σχήμα δίνεται και η φωτογραφία ενός επιφανειακού δενδρίτη, που αφορά επιφανειακή διάσπαση. Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2mm και διαμέτρου 150mm), υπό κρουστικές τάσης 1,2/50μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. Οι φωτογραφίες στο σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, καθώς και εκείνες της διάτρησης (στον αέρα ή στο λάδι), οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα.



Σχήμα 3.3.4-1: Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pectinax (πάχους 2mm και με διάμετρο της επιφάνειάς του 150mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου. Ηλεκτροδία εφαρμογής της τάσης : "ακίδα-πλάκα".



Σχήμα 3.3.4-2: Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερών στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα).

Τέλος, ο φωτεινός δενδρίτης και ο οχετός διάσπασης, που παρατηρούνται κατά την ηλεκτρική καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού, αφορούν κατά τη βιβλιογραφία το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στο υλικό.

3.4 ΈΝΑΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 3 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 της 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 στην σχέση 3.3.3-1 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. Αν π.χ. πραγματοποιήσει κανείς τα πειράματα της παραγράφου 3.3.3 με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs (ή με 10/200μs) και προσεγγίσει ακολούθως τις πειραματικές χαρακτηριστικές $Q=f(\hat{U}_k)$ με την σχέση 3.3.3-1, θα διαπιστώσει ότι ο συντελεστής A έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Η διαφορετική αυτή τιμή του συντελεστή A (κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, ή 10/200μs) μπορεί να θεωρηθεί μόνο ως μία ένδειξη ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, χωρίς όμως να καθορίζεται η περιοχή εκδήλωσής του (στον όγκο του μονωτικού, ή στην επιφάνειά του, ή στον όγκο και στην επιφάνεια του μονωτικού). Γι' αυτό, δεν μπορεί να καταλήξει κανείς, μέσω της κβαντομηχανικής θεώρησης των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, στον διαχωρισμό των μερικών εκκενώσεων στα παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού.

Από το παραπάνω φαίνεται, ότι 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 τον σκοπό αυτό, δίνεται στο σχήμα 3.4-1. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant-Philippoff, 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 έντασης E_0 (περίπου 0,2MV/cm), τότε, τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.4-1 ως ακολούθως :

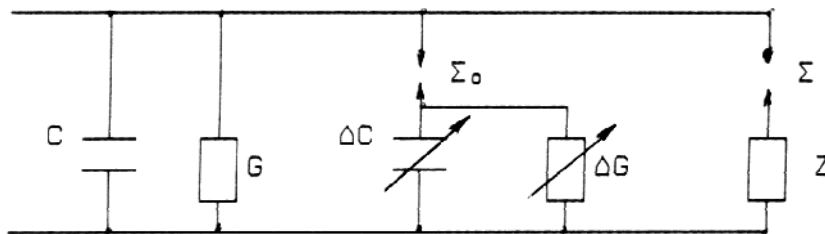
- 1) Για $E < E_0$: Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δεν διασπώνται οι σπινθηριστές Σ_0, Σ).
- 2) Για $E > E_0$: Εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (διασπάται ο Σ_0) και η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διέπεται από την σχέση :

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-W / kT) .$$

- 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 :

$$Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2) / E_0^2}$$

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



Σχήμα 3.4-1 : Ένα ισοδύναμο κύκλωμα του συνδυασμού της 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

3.4.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένα παραδείγματα των πρακτικών εφαρμογών, από τα οποία φαίνεται η χρησιμότητα της θεωρίας, που προαναφέρθηκε.

Παράδειγμα 1 : Η θερμική καταπόνηση των μονώσεων των καλωδίων κατά την ομαδοποιημένη εγκατάστασή τους, όταν δεν εφαρμόζονται οι σχετικοί κανονισμοί :

Η ομαδοποιημένη εγκατάσταση των καλωδίων (στο έδαφος ή στον αέρα) θα πρέπει να γίνεται με μεθόδους, που να διευκολύνουν την απαγωγή της θερμότητας. Σε διαφορετική περίπτωση θα αυξηθεί η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα των διαφόρων μονωτικών υλικών ως ακολούθως :

α) για $E < E_0$: $\sigma_1 = \sigma_0 \exp(-W / kT)$

β) για $E > E_0$: $\sigma_2 \gg \sigma_1$, γιατί ισχύει $Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2) / E_0^2}$

Η πρώτη περίπτωση αφορά κυρίως τα καλώδια χαμηλής τάσης. Για τη μείωση της θερμικής καταπόνησης των καλωδίων θα πρέπει να εφαρμόζονται οι προδιαγραφές ομαδοποίησής τους (π.χ.: VDE 0100, BS 6004, κλπ).

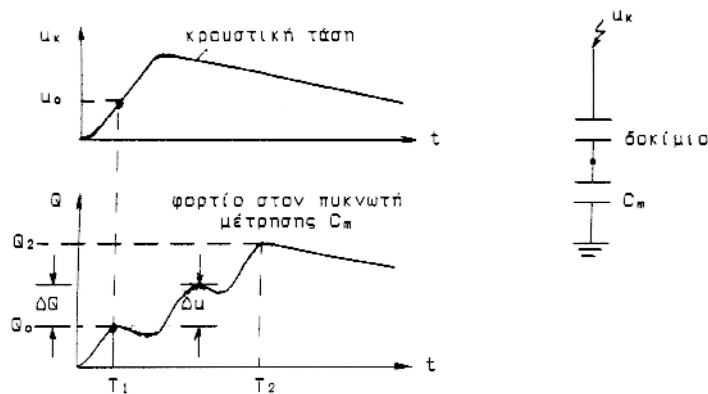
Παράδειγμα 2 : Στο εργαστήριο δοκιμών ενός εργοστασίου πινάκων μέσης τάσης διαπιστώθηκε σε έναν πίνακα διακόπτη φορτίου η επιτυχής διεξαγωγή των διηλεκτρικών δοκιμών υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50μs. Σε επόμενη παραγγελία του ίδιου τύπου πίνακα η παραπάνω δοκιμή μεταξύ φάσεων προς γη ήταν ανεπιτυχής (ένα παλμογράφημα έδειξε αποκοπή στην ουρά της κρουστικής τάσης). Σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών, είναι πολύ πιθανή η παρακάτω ερμηνεία για την αναζήτηση της βλάβης :

Τα αποτελέσματα των ερευνών για την χρονική εκδήλωση των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της κρουστικής τάσης, έχουν δείξει ότι : οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται κατά την διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης, ενώ οι εξωτερικές κατά τη διάρκεια της ουράς της. Γι' αυτό η αποκοπή στην ουρά της κρουστικής τάσης είναι πολύ πιθανό να σχετίζεται με κατασκευαστικές ατέλειες εκτός του όγκου των μονωτικών υλικών. Υπό την προϋπόθεση ότι δεν συντρέχουν λόγοι ξένων επικαθίσεων στα μονωτικά υλικά, η βλάβη θα πρέπει να οφείλεται σε κατασκευαστική ατέλεια, που προκαλεί μείωση των αποστάσεων μόνωσης στον αέρα. Σε μία τυποποιημένη κατασκευή των μεταλλικών μερών του πίνακα, η μείωση των αποστάσεων μόνωσης θα μπορούσε π.χ. να οφείλεται σε κάποιον λυόμενο σύνδεσμο μεταξύ των ζυγών, ο οποίος προκαλεί μείωση της απόστασης μόνωσης προς γη.

Παράδειγμα 3 : Σε μία ρυπασμένη ατμόσφαιρα το μήκος ερπυσμού των μονωτήρων είναι, λόγω του αυξημένου ρόλου των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, μεγαλύτερο από ότι συνήθως.

4. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά υλικά πάχους 2mm κατά την καταπόνησή τους υπό κρουστικές τάσεις χειρισμών (250/2500μs) και η προσέγγιση των φαινομένων που αναπτύσσονται. Η διάταξη των μετρήσεων φαίνεται στο σχήμα 3.1.6-1 (επαναλαμβάνεται παρακάτω ενώ και η θεωρητική ανάλυση καταγράφεται στην παράγραφο 3.1.6)



Σχήμα 3.1.6-1 : 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.

Μετά από μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο σε στερεά μονωτικά υλικά πάχους $d=2\text{mm}$, κατά την καταπόνησή τους με κρουστικές τάσεις χειρισμών 250/2500 μs , υπό διάταξη ηλεκτρονίων ακίδα-πλάκα, προσδιορίστηκαν τα παρακάτω μεγέθη, τόσο για αρνητική όσο και για θετική πολικότητα της ακίδας :

U_- : τάση φόρτισης της γεννήτριας

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

T_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

T_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Q_1 : φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Q_2 : φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$T=T_2-T_1$: χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

$Q=Q_2-Q_1$: διαφορά φορτίου περαίωσης από το φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

$I_1=Q_1/T_1$: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

$I_2=Q_2/T_2$: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$I=Q/T= Q_2 - Q_1/T_2-T_1$: ρεύμα λόγω του φορτίου Q

$E=2\hat{U}_k/R \cdot \ln(4d/R)$: μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης, που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης \hat{U}_k όπου :

$R=0,9\text{mm}$ η ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας,

$d=2\text{mm}$ το πάχος του δοκιμίου και

\hat{U}_k το μέτρο της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Τα αποτελέσματα και η στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων παρουσιάζονται στους συγκεντρωτικούς πίνακες και τις χαρακτηριστικές που ακολουθούν, τόσο για θετική όσο και για αρνητική πολικότητα ακίδας με τη βοήθεια των παρακάτω μαθηματικών σχέσεων. Σημειώνεται ότι η διπλωματική αυτή εργασία εντάσσεται στην μακροσκοπική θεώρηση των φαινομένων κατά την ηλεκτρική καταπόνηση βιομηχανικών μονωτικών με κρουστικές τάσεις χειρισμού.

$$i_1 = \frac{Q_1}{T_1} \text{ σε } \mu\text{A} \quad (4.1-1)$$

$$i_2 = \frac{Q_2}{T_2} \text{ σε } \mu\text{A} \quad (4.1-2)$$

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \text{ σε } \mu\text{A} \quad (4.1-3)$$

$$E = \frac{2 \cdot U_k}{R \cdot \ln(4d/R)} \text{ σε } \text{MV/cm} \quad (4.1-4)$$

$$Z = \frac{\Delta u_m}{I} = \frac{\Delta Q / C_m}{\Delta Q / T} = \frac{\Delta T}{C_m} \text{ σε } \text{K}\Omega \quad (4.1-5)$$

$$u_{m1} = \frac{Q_1}{C_m} \text{ σε } \text{V} \quad (4.1-6)$$

$$u_{m2} = \frac{Q_2}{C_m} \text{ σε } \text{V} \quad (4.1-7)$$

$$E_1 = \frac{2 \cdot U_{m1}}{R \cdot \ln(4d/R)} \text{ σε } \text{V/cm} \quad (4.1-8)$$

$$E_2 = \frac{2 \cdot U_{m2}}{R \cdot \ln(4d/R)} \text{ σε } \text{V/cm} \quad (4.1-9)$$

Από τη σχέση 1.4-4 προκύπτει:

$$A = \frac{\ln\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)}{\left[\frac{(E_2^2 - E_1^2)}{E_1^2}\right]} \quad (4.1-10)$$

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

5.1 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 2 \text{ mm}$

Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας

Πίνακας 5.1-1

U- (KV)	U _k (KV)	E (MV/cm)	T1 (μs)	T2 (μs)	Q1 (μC)	Q2 (μC)	T (μs)	q (μC)	I1=q1/T1 (μA)	I2=q2/T2 (μA)	I=q/T (μA)
20	13,8	0,140346	-	-	0,062	-	-	-	-	-	-
25	17,3	0,175941	-	-	0,077	-	-	-	-	-	-
30	20,8	0,211536	141,7	186,3	0,082	0,13	44,6	0,048	578,69	697,80	1076,23
35	24,1	0,245097	99,6	173,5	0,074	0,12	73,9	0,046	742,97	691,64	622,46
40	27,7	0,281709	71,5	157,9	0,081	0,18	86,4	0,099	1132,87	1139,96	1145,83
45	31,1	0,316287	45,2	235,6	0,067	0,34	190,4	0,273	1482,30	1443,12	1433,82
50	34,5	0,350865	41,5	185,6	0,067	0,39	144,1	0,323	1614,46	2101,29	2241,50
55	37,8	0,384426	36,4	233,5	0,067	0,64	197,1	0,573	1840,66	2740,90	2907,15
60	41,4	0,421038	36,4	199,1	0,1	0,78	162,7	0,68	2747,25	3917,63	4179,47
65	44,6	0,453582	36,1	201,8	0,067	0,85	165,7	0,783	1855,96	4212,09	4725,41

Πίνακας 5.1-2

U _k (KV)	Q1 (μC)	Q2 (μC)	T (μs)	C _m (nF)	Z (K Ω)	U _{m1} (V)	U _{m2} (V)	E1 (MV/cm)	E2 (MV/cm)	A
13,8	0,062	-	-	1000	-	-	-	-	-	-
17,3	0,077	-	-	1000	-	-	-	-	-	-
20,8	0,082	0,13	44,6	1000	44,6	0,082	0,13	0,8339	1,3221	0,4378
24,1	0,074	0,12	73,9	1000	73,9	0,074	0,12	0,7526	1,2204	0,5238
27,7	0,081	0,18	86,4	1000	86,4	0,081	0,18	0,8238	1,8306	0,2988
31,1	0,067	0,34	190,4	1000	190,4	0,067	0,34	0,6814	3,4578	0,1413
34,5	0,067	0,39	144,1	1000	144,1	0,067	0,39	0,6814	3,9663	0,1154
37,8	0,067	0,64	197,1	1000	197,1	0,067	0,64	0,6814	6,5088	0,0539
41,4	0,1	0,78	162,7	1000	162,7	0,1	0,78	1,0170	7,9326	0,0332
44,6	0,067	0,85	165,7	1000	165,7	0,067	0,85	0,6814	8,6445	0,0342

5.2 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 2 \text{ mm}$

Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας

Πίνακας 5.2-1

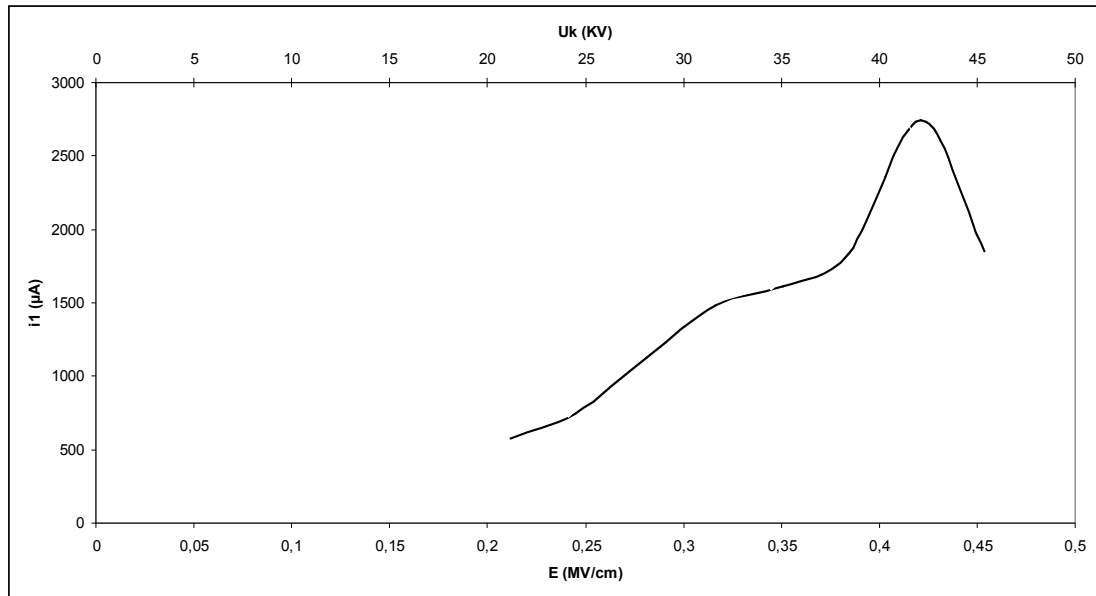
U- (KV)	U _k (KV)	E (MV/cm)	T1 (μs)	T2 (μs)	Q1 (μC)	Q2 (μC)	T (μs)	q (μC)	I1=q1/T1 (μA)	I2=q2/T2 (μA)	I=q/T (μA)
-20	-14	-0,14238	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-
-25	-17,4	-0,176958	-	-	0,071	-	-	-	-	-	-
-30	-21,2	-0,215604	139,7	159,9	0,085	0,1	20,2	0,015	608,4467	625,3909	742,5743
-35	-24,6	-0,250182	135	162	0,089	0,15	27	0,061	659,2593	925,9259	2259,2592
-40	-28,3	-0,287811	98,2	152,5	0,094	0,16	54,3	0,066	957,2301	1049,1803	1215,4696
-45	-31,8	-0,323406	77,6	130,9	0,081	0,24	53,3	0,159	1043,8144	1833,4607	2983,1144
-50	-35,1	-0,356967	72,2	111,7	0,087	0,34	39,5	0,253	1204,9862	3043,8675	6405,0632
-55	-38,6	-0,392562	55,3	100,6	0,067	0,42	45,3	0,353	1211,5732	4174,9503	7792,4944
-60	-42,4	-0,431208	44,2	140,4	0,067	0,88	96,2	0,813	1515,8371	6267,8063	8451,1434
-65	-44,8	-0,455616	39,8	136,3	0,067	0,79	96,5	0,723	1683,4179	5796,0382	7492,2279

Πίνακας 5.2-2

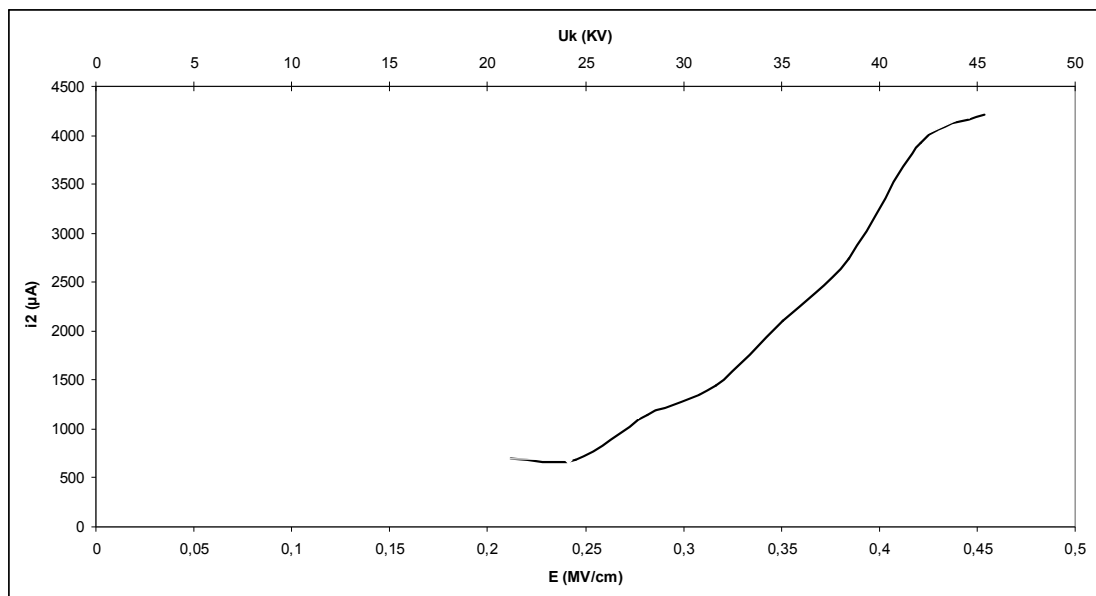
U _k (KV)	Q1 (μC)	Q2 (μC)	T (μs)	C _m (nF)	Z (KΩ)	U _{m1} (V)	U _{m2} (V)	E1 (MV/cm)	E2 (MV/cm)	A
-14	0,1	-	-	1000	-	-	-	-	-	-
-17,4	0,071	-	-	1000	-	-	-	-	-	-
-21,2	0,085	0,1	20,2	1000	20,2	0,085	0,1	0,8645	1,017	0,5662
-24,6	0,089	0,15	27	1000	27	0,089	0,15	0,9051	1,5255	0,3462
-28,3	0,094	0,16	54,3	1000	54,3	0,094	0,16	0,9560	1,6272	0,3068
-31,8	0,081	0,24	53,3	1000	53,3	0,081	0,24	0,8238	2,4408	0,2058
-35,1	0,087	0,34	39,5	1000	39,5	0,087	0,34	0,8848	3,4578	0,122
-38,6	0,067	0,42	45,3	1000	45,3	0,067	0,42	0,6814	4,2714	0,1032
-42,4	0,067	0,88	96,2	1000	96,2	0,067	0,88	0,6814	8,9496	0,0323
-44,8	0,067	0,79	96,5	1000	96,5	0,067	0,79	0,6814	8,0343	0,0385

5.3 Διαγράμματα

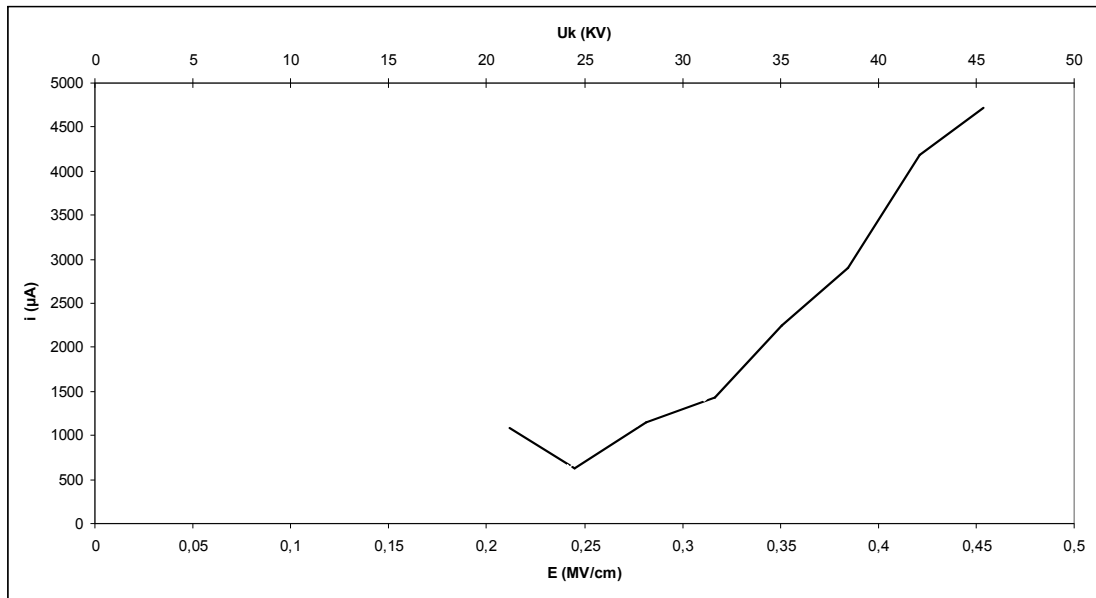
ι. Θετική Πολικότητα



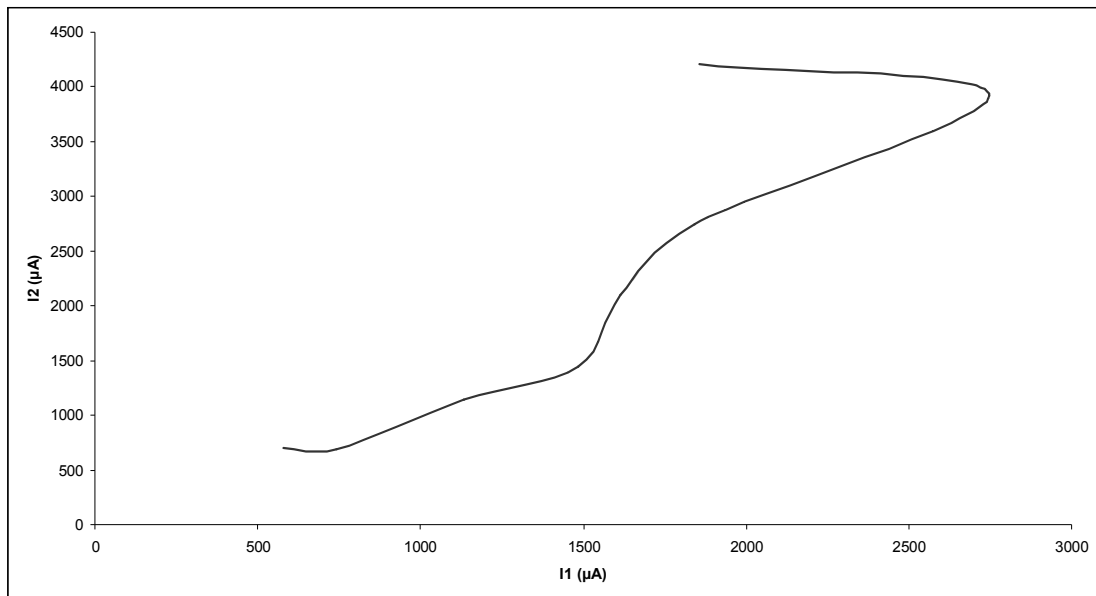
Διάγραμμα 5.3-1: $I_1 = f(U_k, E)$ Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων (I_1) συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα.



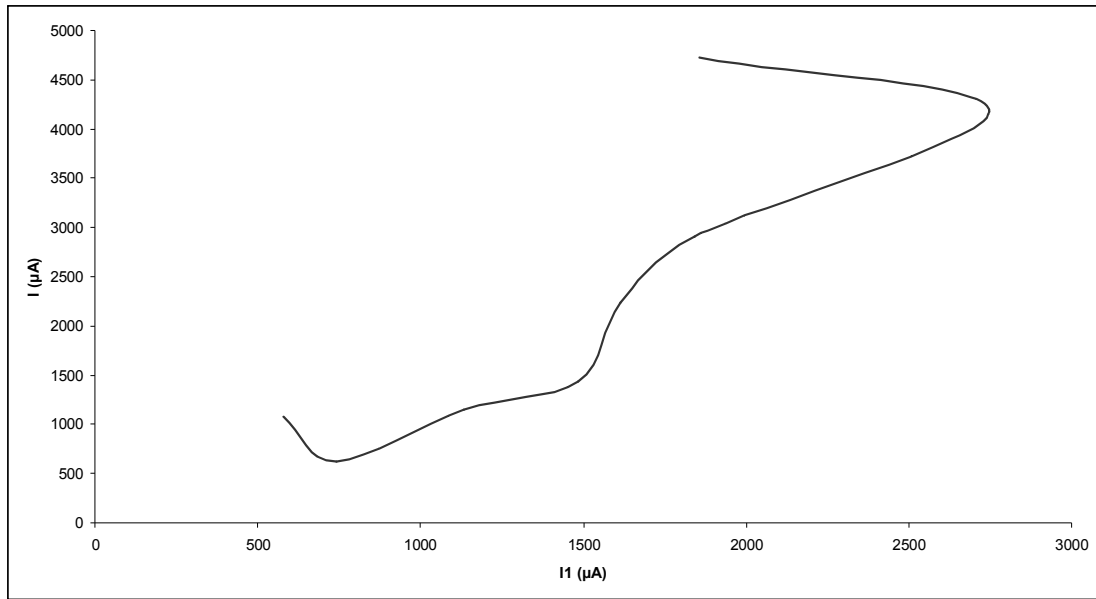
Διάγραμμα 5.3-2: $I_2 = f(U_k, E)$ Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (I_2) συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα.



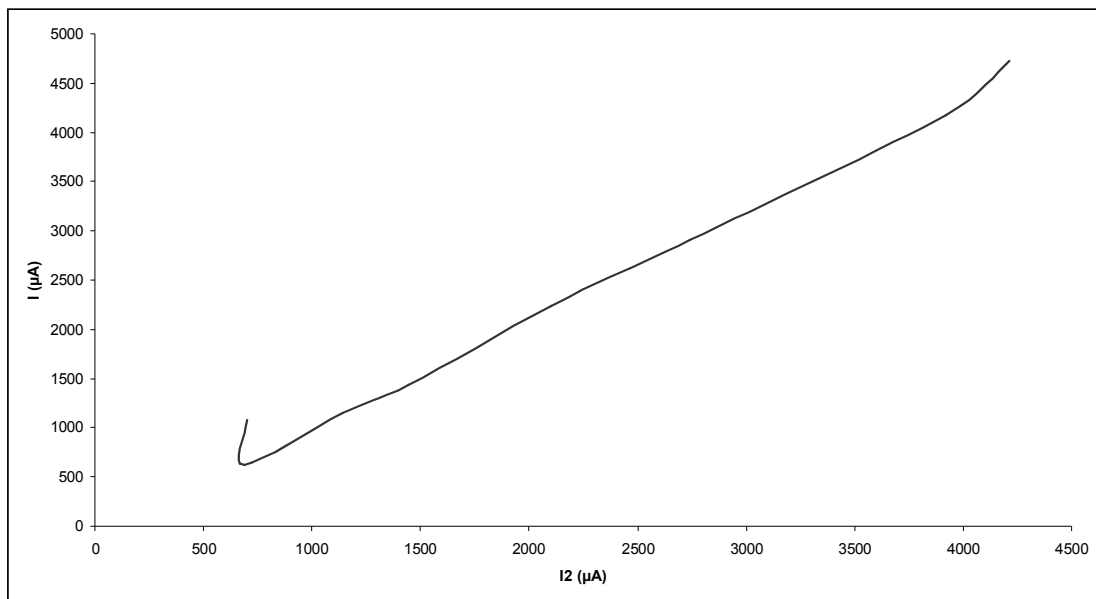
Διάγραμμα 5.3-3: $I = f(U_k, E)$ Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω του φορτίου Q (I) συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα.



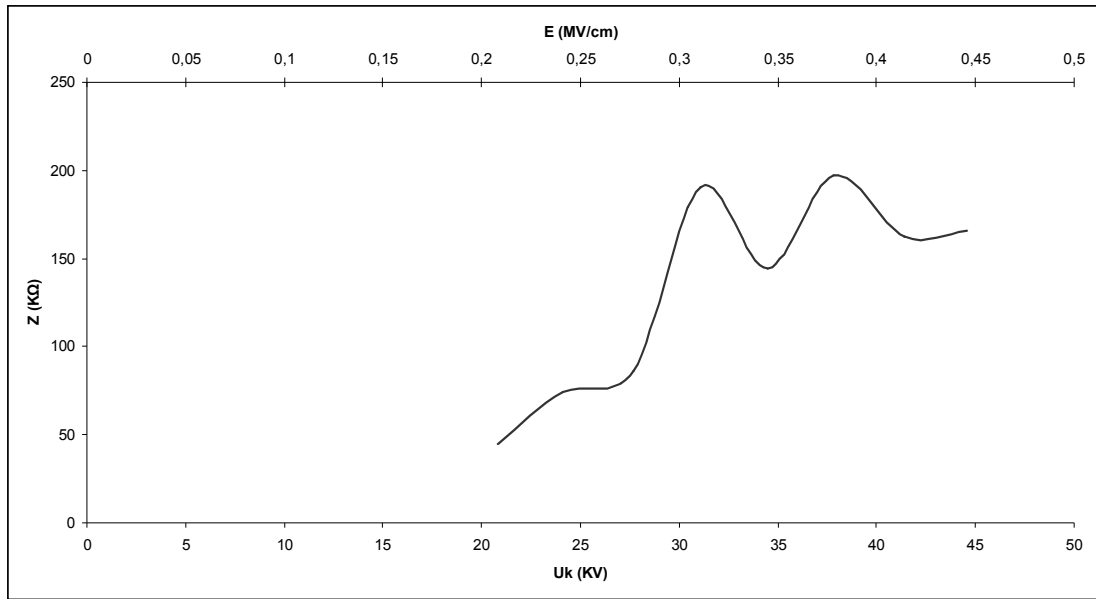
Διάγραμμα 5.3-4: $I_2 = f(I_1)$ Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (I_2) συναρτήσει του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων (I_1) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα.



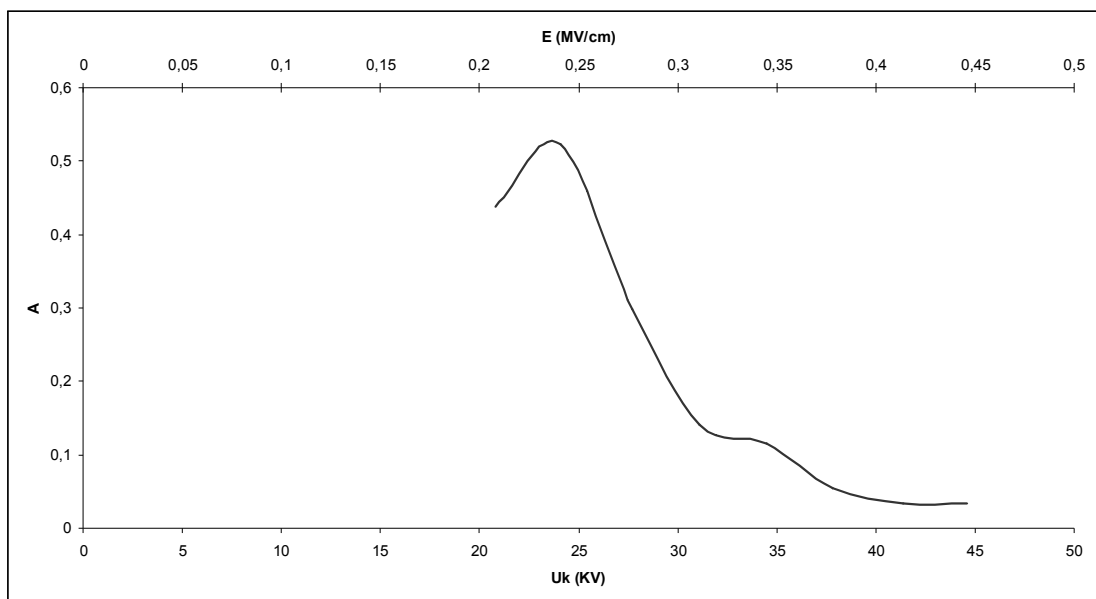
Διάγραμμα 5.3-5: $I = f(I_1)$ Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω του φορτίου Q (I) συναρτήσει του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων (I_1) με παχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετικη πολικότητα.



Διάγραμμα 5.3-6: $I = f(I_2)$ Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω του φορτίου Q (I) συναρτήσει του ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (I_2) με παχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετικη πολικότητα.

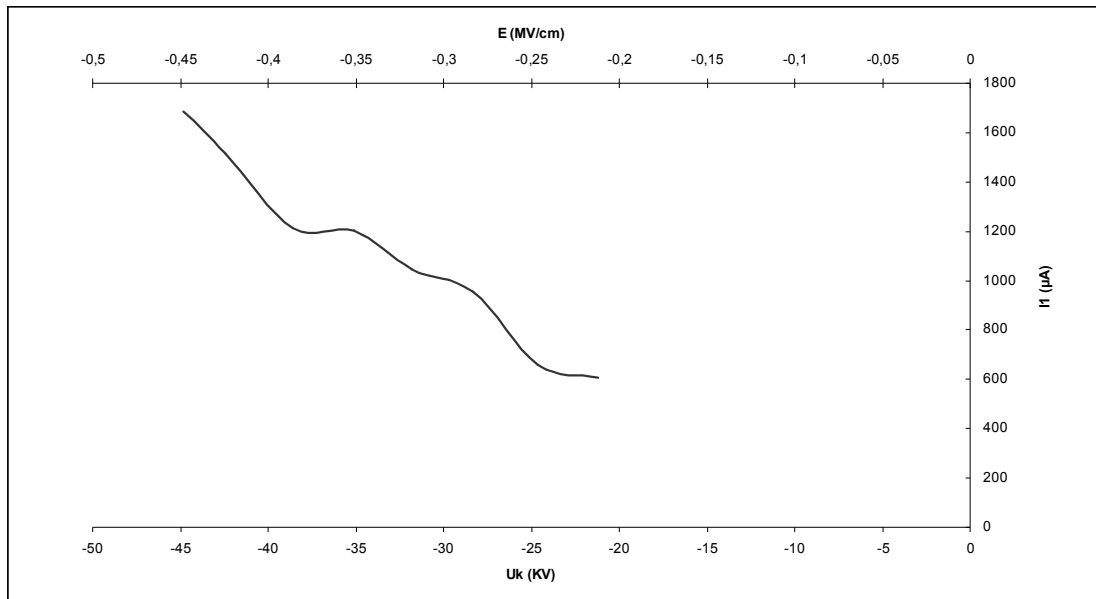


Διάγραμμα 5.3-7: $Z = f(U_k, E)$ Χαρακτηριστική σύνθετης αντίστασης (Z) συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα.

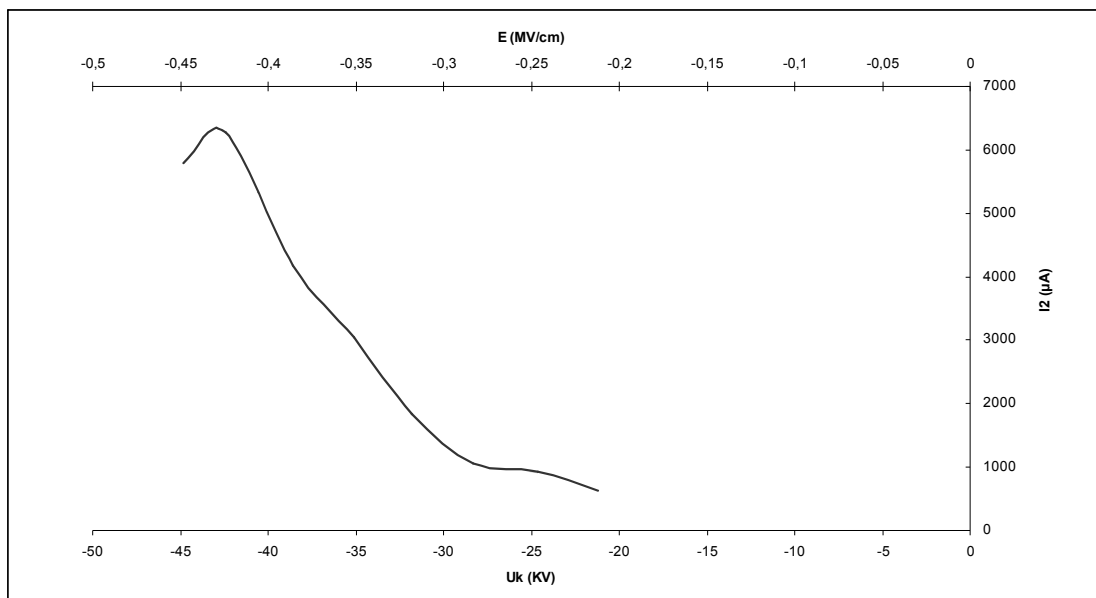


Διάγραμμα 5.3-8: $A = f(U_k, E)$ Χαρακτηριστική συντελεστή A του υλικού συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα.

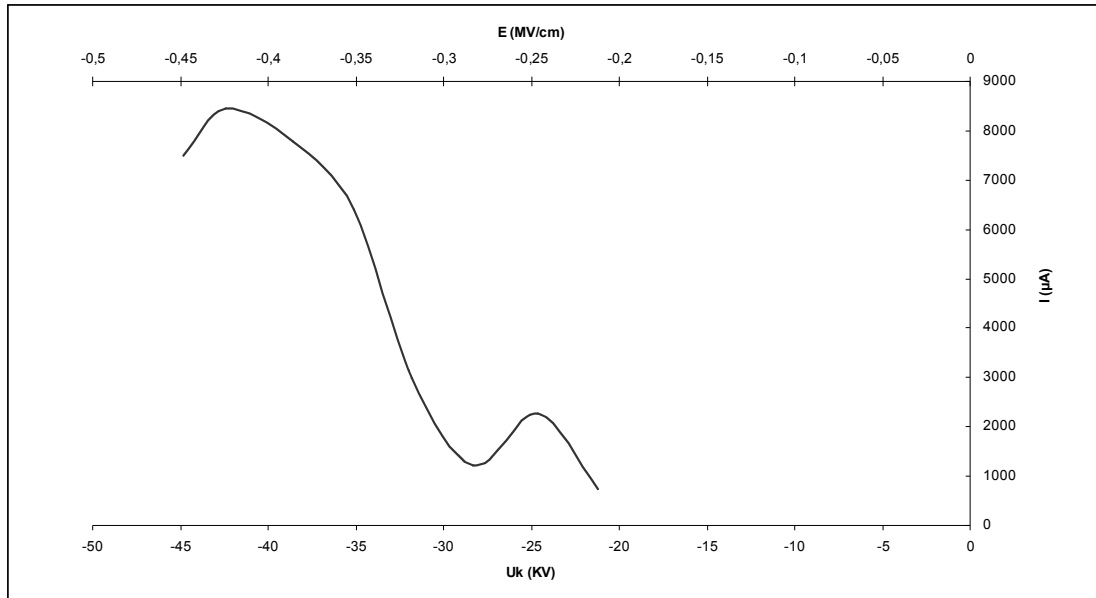
ii. Αρνητική Πολικότητα



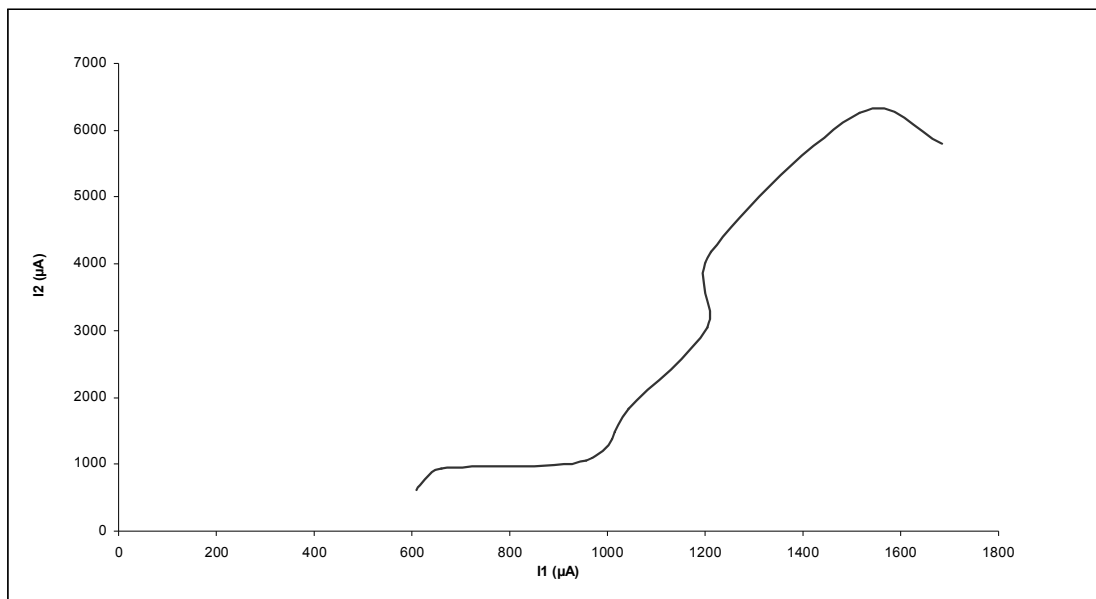
Διάγραμμα 5.3-9: $I_1 = f(U_k, E)$ Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων (I_1) συναρτήσεως της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα



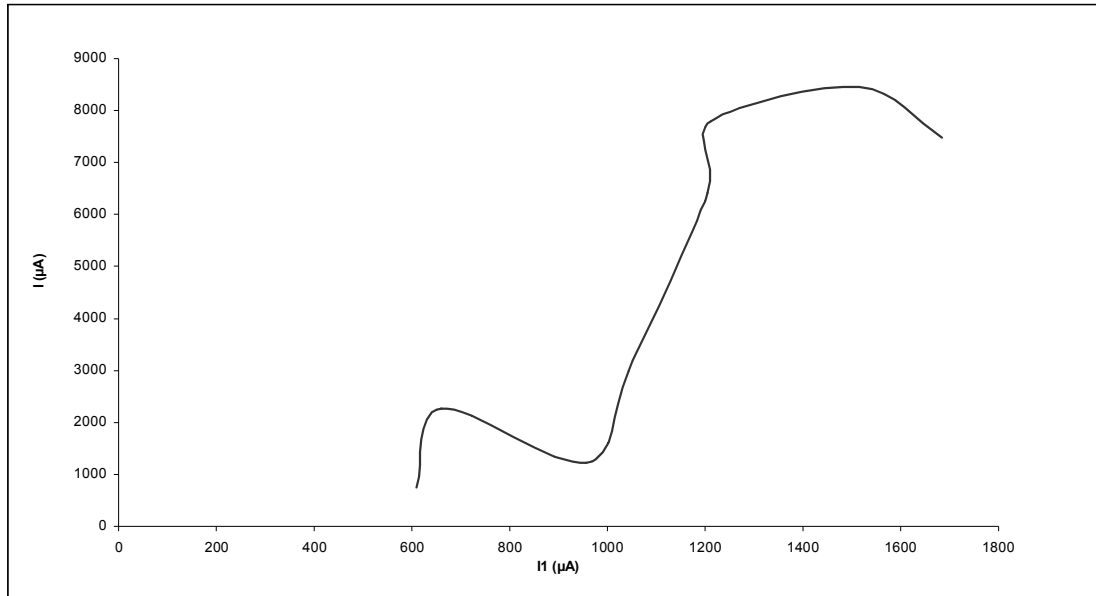
Διάγραμμα 5.3-10: $I_2 = f(U_k, E)$ Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (I_2) συναρτήσεως της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα.



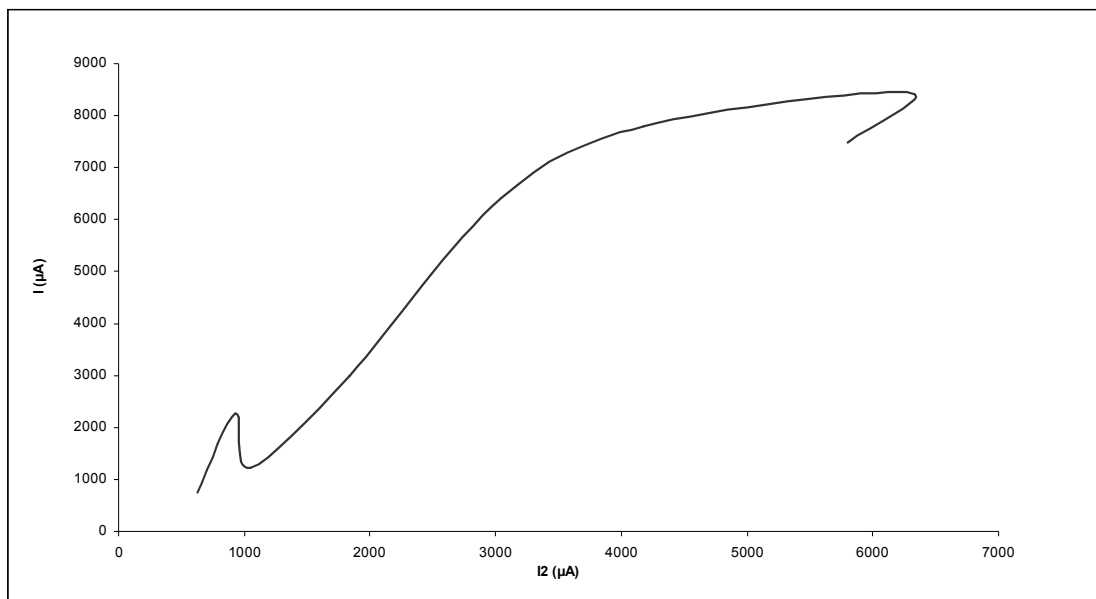
Διάγραμμα 5.3-11: $I = f(U_k, E)$ Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω του φορτίου Q (I) συναρτήσεως της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα



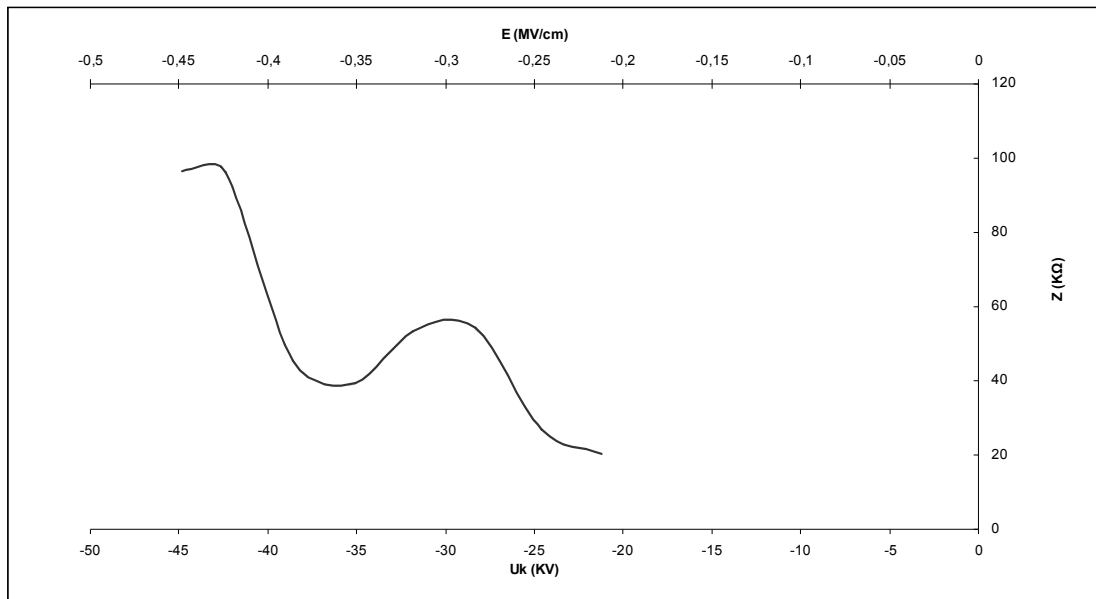
Διάγραμμα 5.3-12: $I_2 = f(I_1)$ Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (I_2) συναρτήσεως του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων (I_1) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα.



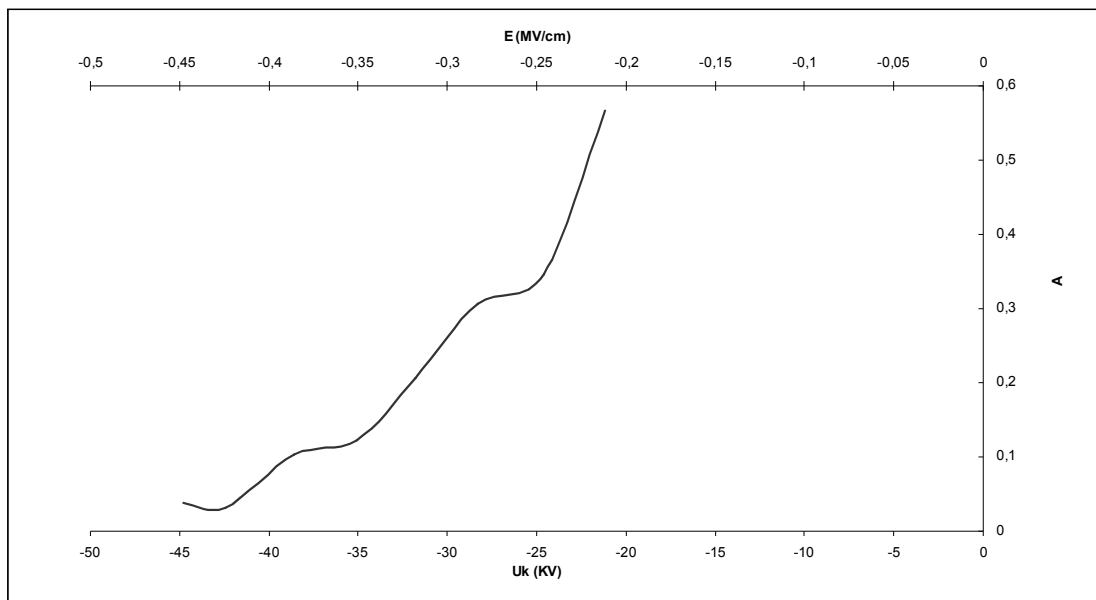
Διάγραμμα 5.3-13: $I = f(I_1)$ Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω του φορτίου Q (I) συναρτήσει του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων (I_1) με παχος δοκιμιου d=2mm και αρνητική πολικότητα.



Διάγραμμα 5.3-14: $I = f(I_2)$ Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω του φορτίου Q (I) συναρτήσει του ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (I_2) με παχος δοκιμιου d=2mm και αρνητική πολικότητα.



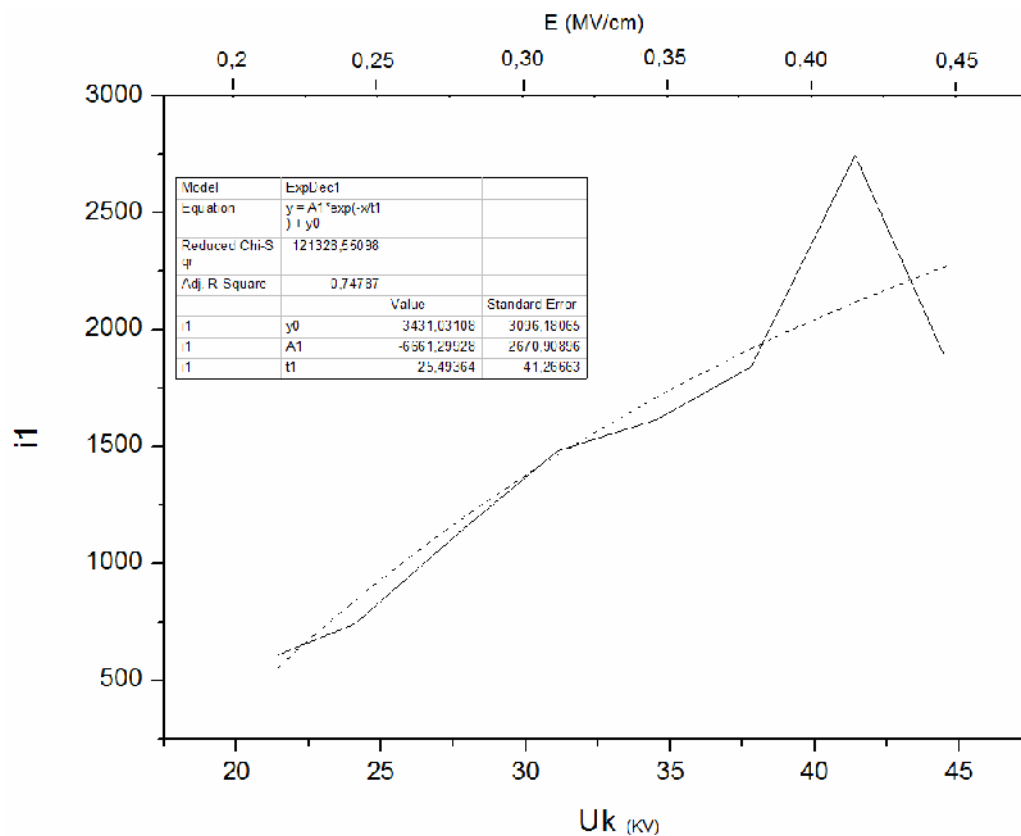
Διάγραμμα 5.3-15: $Z = f(U_k, E)$ Χαρακτηριστική σύνθετης αντίστασης (Z) συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα.



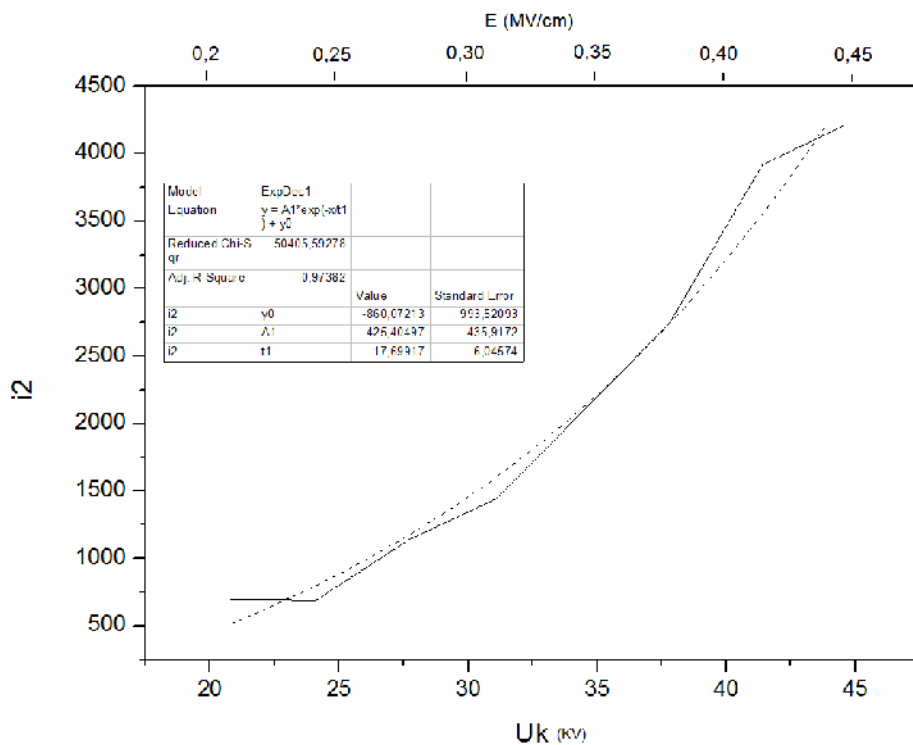
Διάγραμμα 5.3-16: $A = f(U_k, E)$ Χαρακτηριστική συντελεστή A του υλικού συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα

6. ΕΚΘΕΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

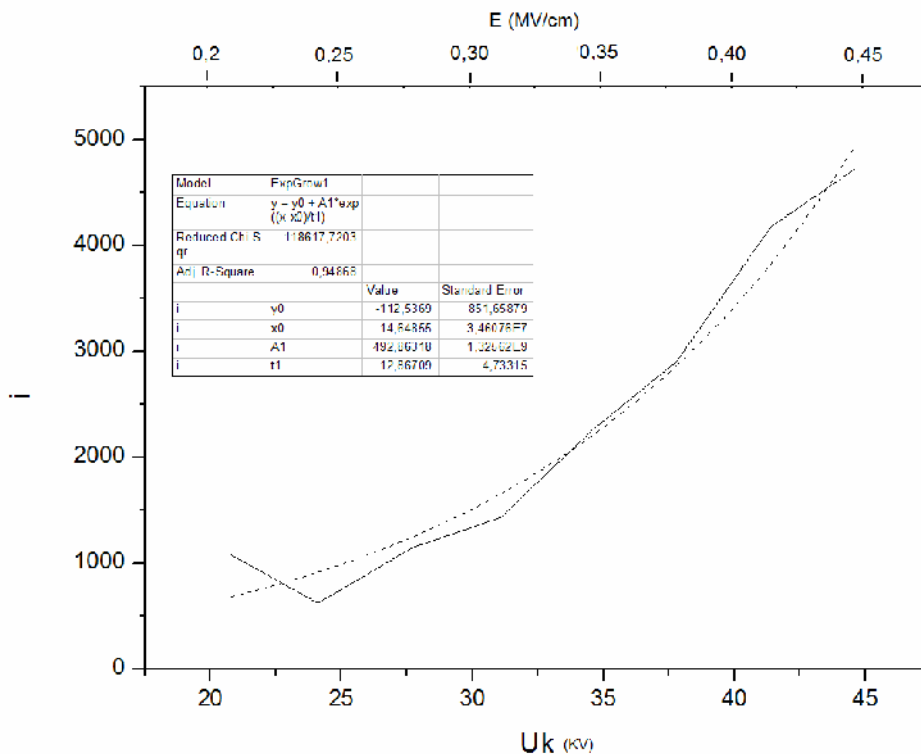
Στο κεφάλαιο αυτό οι πραγματικές καμπύλες που παρουσιάστηκαν παραπάνω αντιστοιχίζονται κατά προσέγγιση με εκθετικές καμπύλες. Στα παρακάτω διαγράμματα κάθε πραγματική καμπύλη (συνεχής γραμμή) αντιστοιχεί σε μια εκθετική καμπύλη (διακεκομμένη γραμμή με όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση).



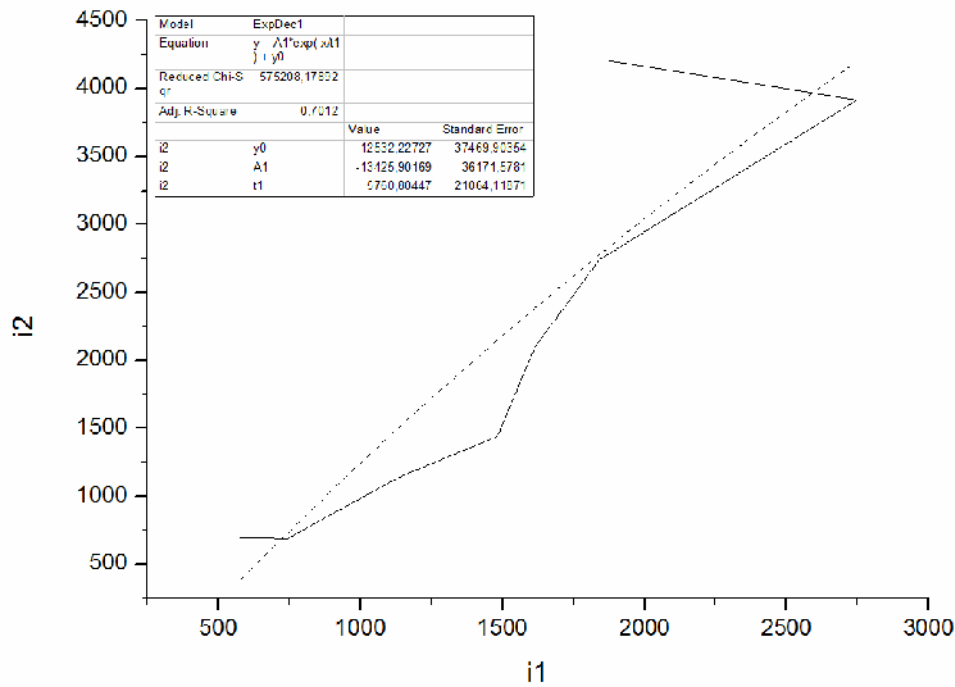
Διάγραμμα 6.1-1: $I_1 = f(U_k, E)$ Εκθετική προσέγγιση της χαρακτηριστικής ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων (I_1) συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής εντάσης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα.



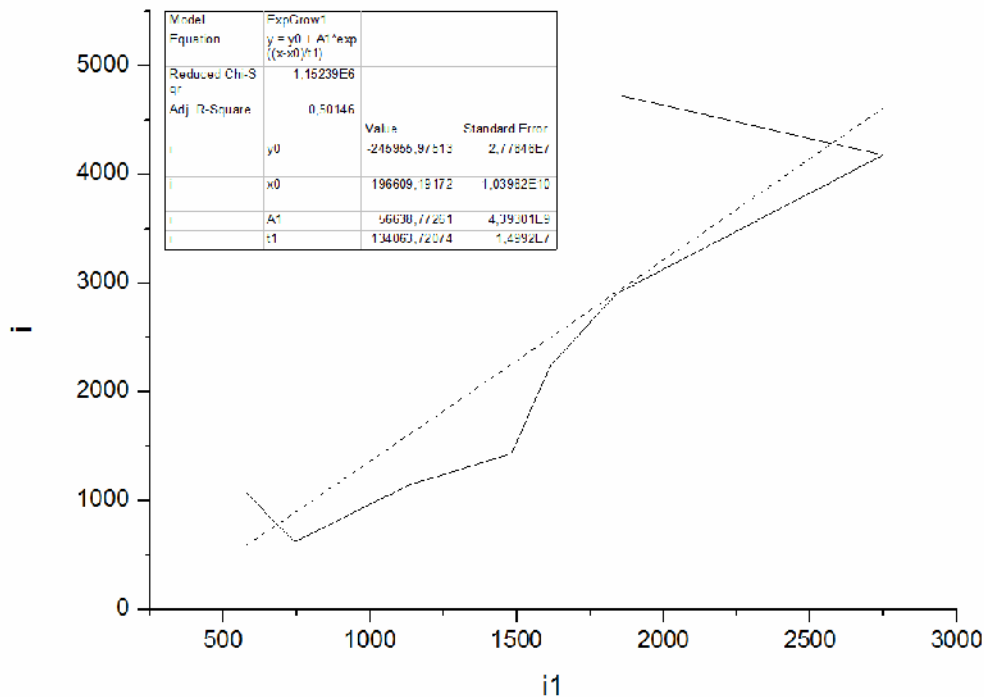
Διάγραμμα 6.1-2: $I_2 = f(U_k, E)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής ρεύματος λόγω περαιώσης των μερικών εκκενώσεων (I_2) συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής εντάσης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα.



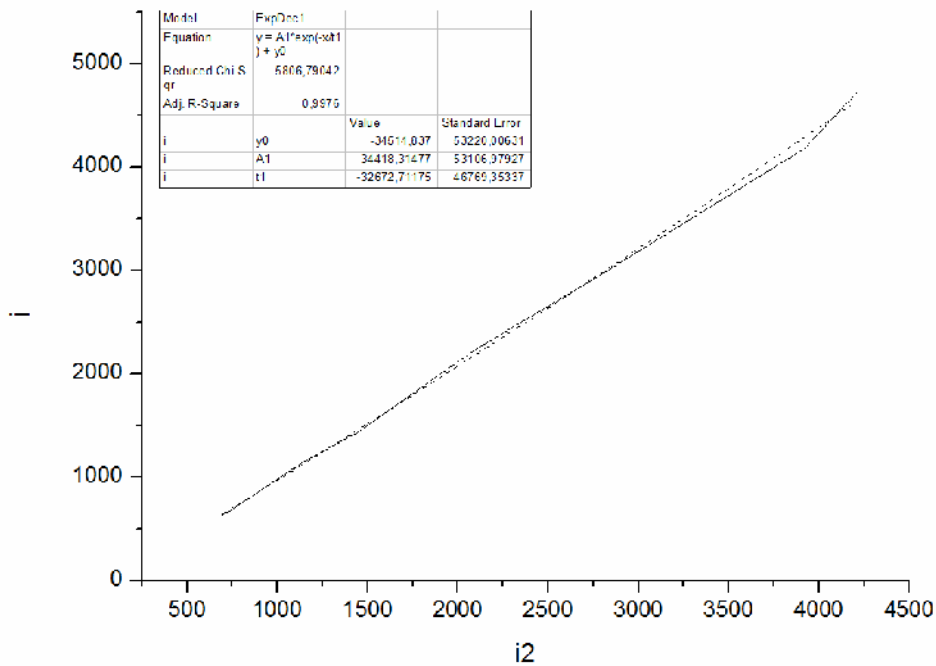
Διάγραμμα 6.1-3: $I = f(U_k, E)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής ρεύματος λόγω του φορτίου Q (I) συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής εντάσης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα.



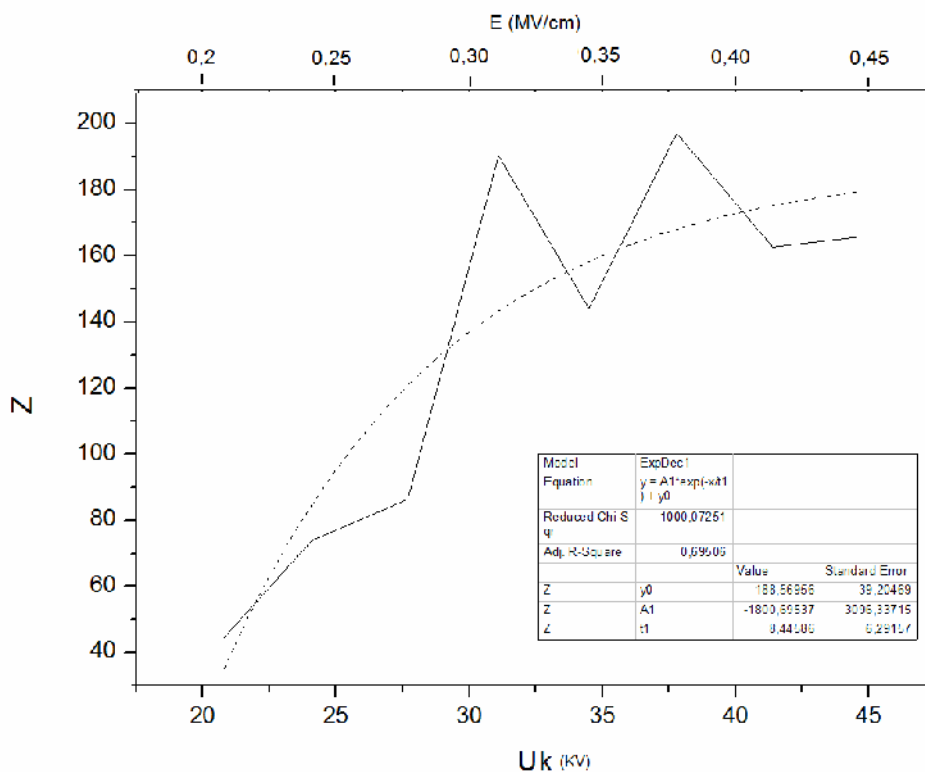
Διάγραμμα 6.1-4: $I_2 = f(I_1)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (I_2) συναρτήσει του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων (I_1) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα



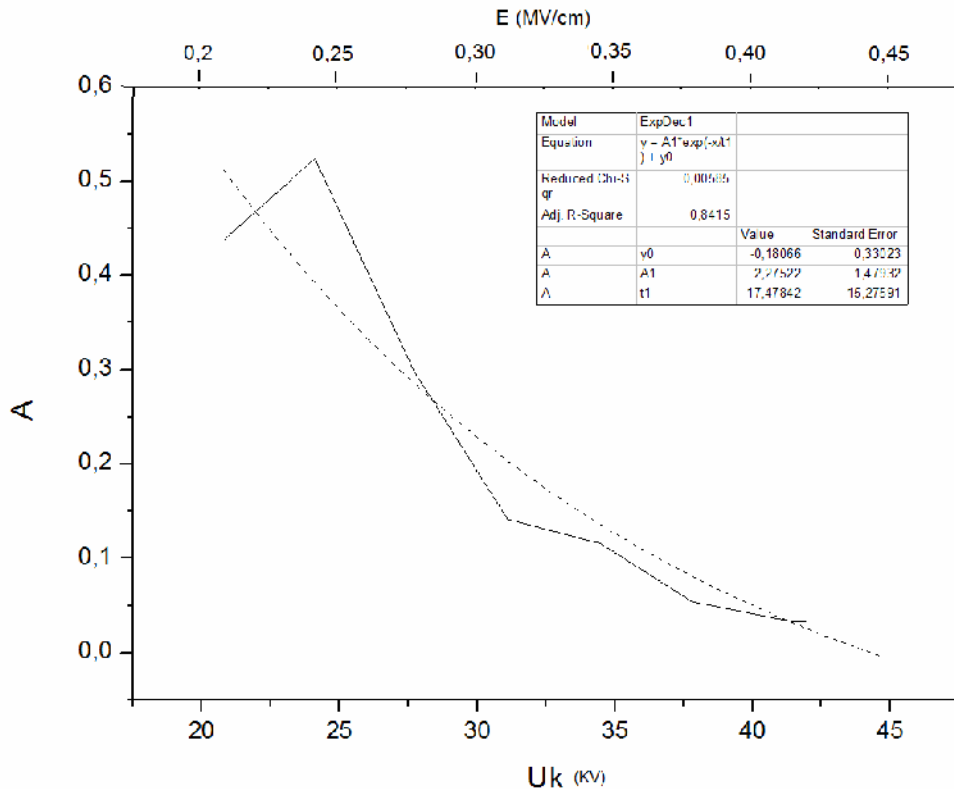
Διάγραμμα 6.1-5: $I = f(I_1)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής ρεύματος λόγω του φορτίου $Q(I)$ συναρτήσει του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων (I_1) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα.



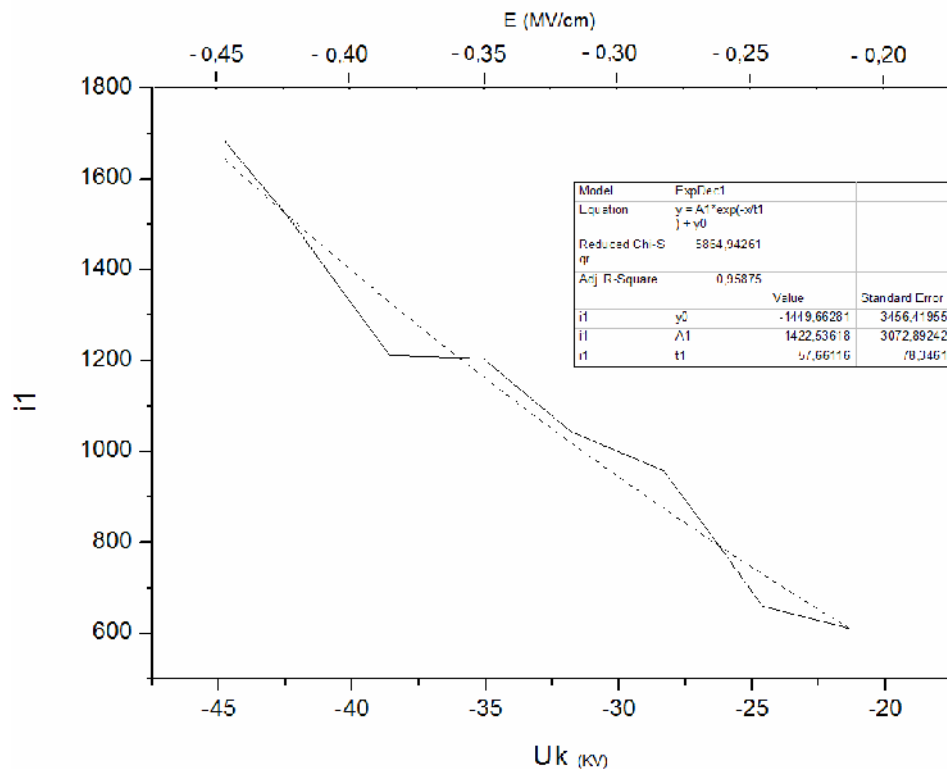
Διάγραμμα 6.1-6: $I = f(i_2)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής ρεύματος λόγω του φορτίου Q (I) συναρτήσει του ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (i_2) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα.



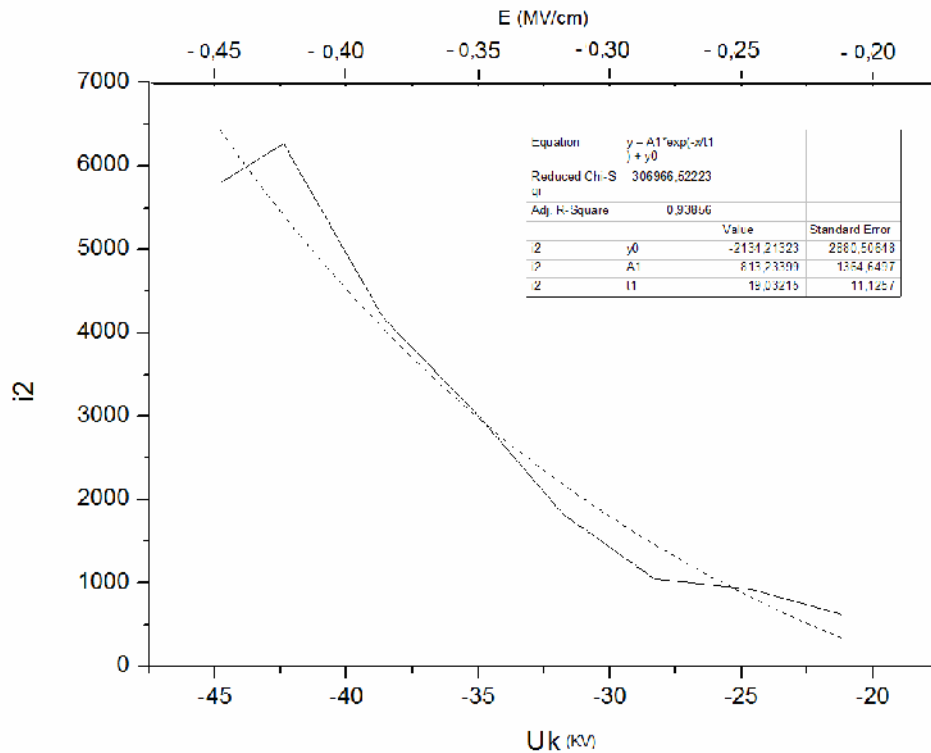
Διάγραμμα 6.1-7: $Z = f(U_k, E)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης (Z) συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα.



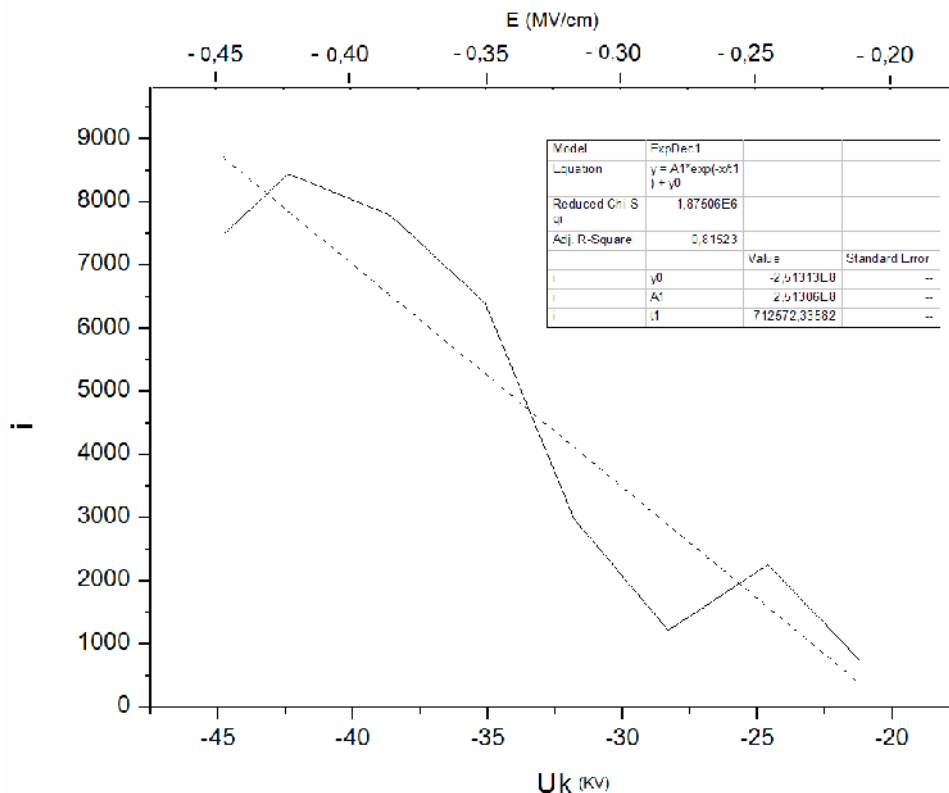
Διάγραμμα 6.1-8: $A = f(U_k, E)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής συντελεστή A του υλικού συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής εντάσης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και θετική πολικότητα.



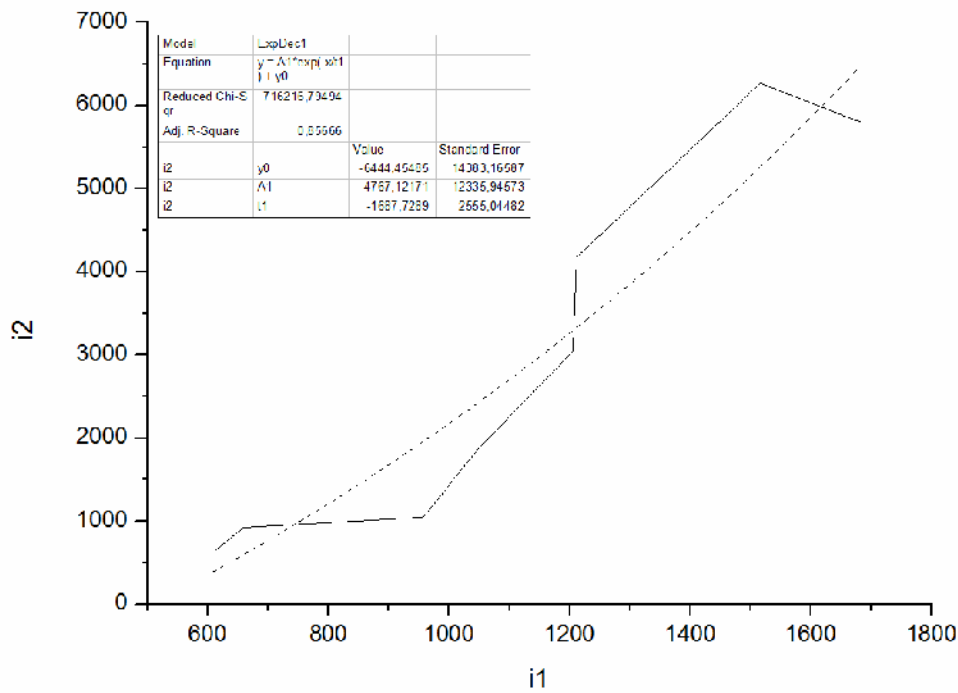
Διάγραμμα 6.1-9: $I_1 = f(U_k, E)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων (I_1) συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής εντάσης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα



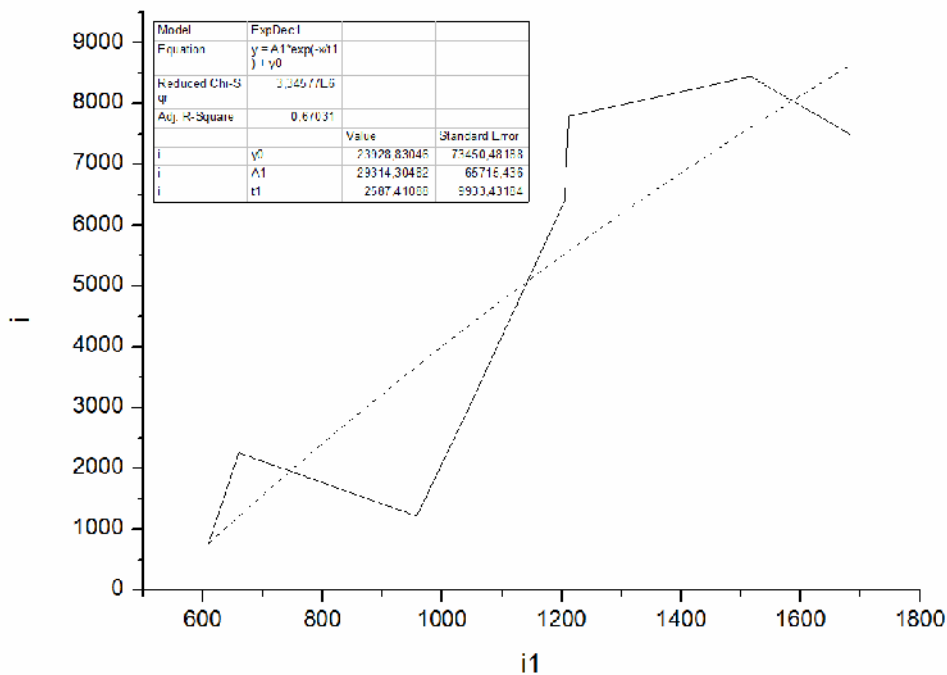
Διάγραμμα 6.1-10: $I_2 = f(U_k, E)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (I_2) συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής εντάσης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα



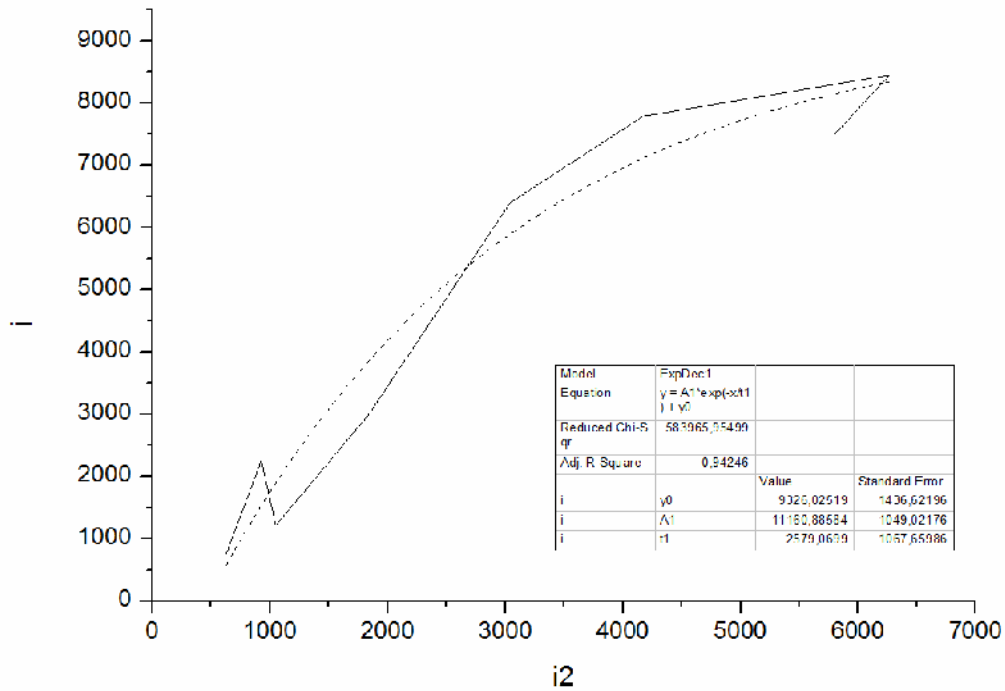
Διάγραμμα 6.1-11: $I = f(U_k, E)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής ρεύματος λόγω του φορτίου Q (I) συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής εντάσης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα



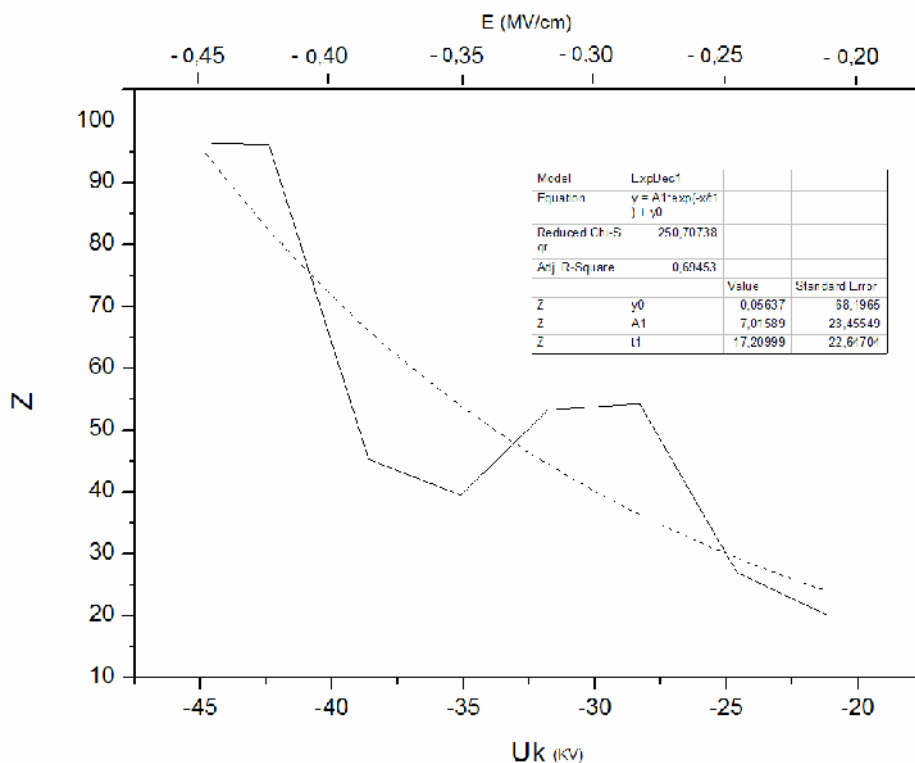
Διάγραμμα 6.1-12: $I_2 = f(I_1)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (I_2) συναρτήσεως του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων (I_1) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα



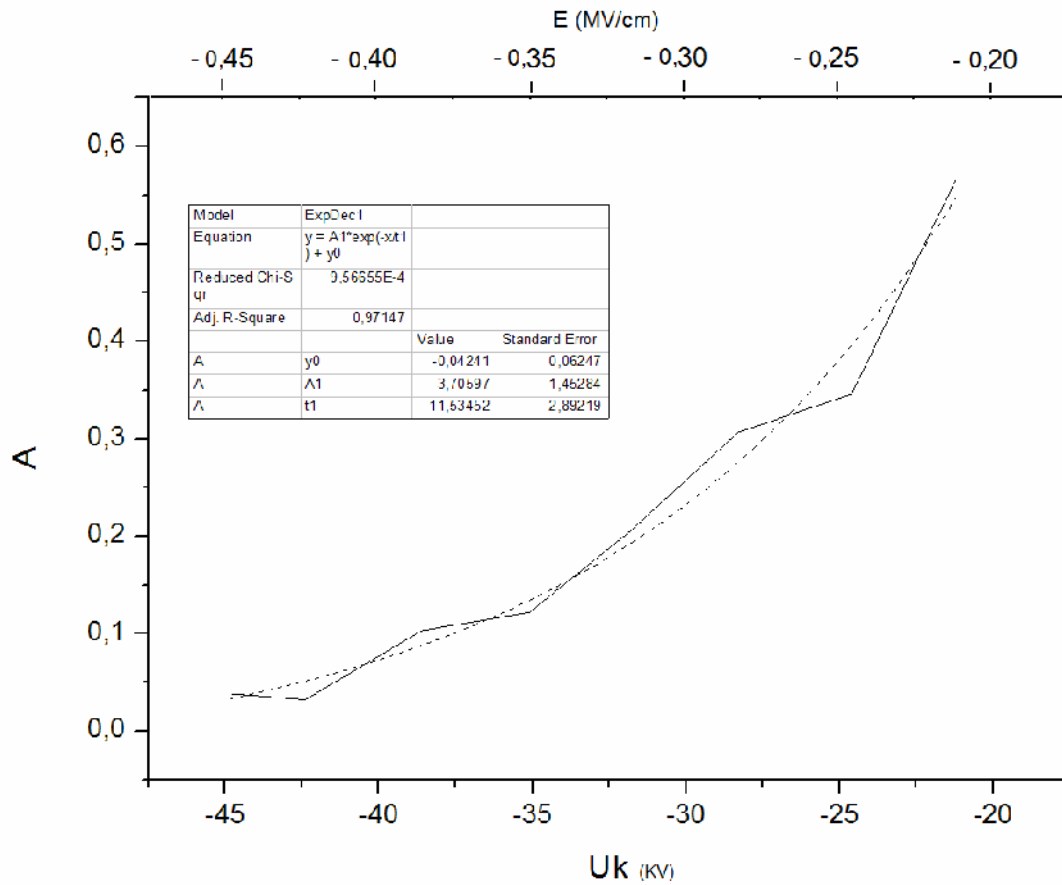
Διάγραμμα 6.1-13: $I = f(I_1)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής ρεύματος λόγω του φορτίου $Q(I)$ συναρτήσεως του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων (I_1) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα



Διάγραμμα 6.1-14: $I = f(I_2)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής ρεύματος λόγω του φορτίου Q (I) συναρτήσεως του ρεύματος λόγω περαιώσεως των μερικών εκκενώσεων (I_2) με παχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα.



Διάγραμμα 6.1-15: $Z = f(U_k, E)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης (Z) συναρτήσεως της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (που αντιστοιχεί στην U_k) με παχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα.



Διάγραμμα 6,1-16: $A = f(U_k, E)$ Εκθετική προσέγγιση χαρακτηριστικής συντελεστή A του υλικού συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (U_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (που αντιστοιχεί στην U_k) με πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και αρνητική πολικότητα

6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΕΚΘΕΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ

Για κάθε πραγματική καμπύλη αντιστοιχίσαμε μια εκθετική καμπύλη όπως φαίνεται στις προηγούμενες σελίδες. Στο σημείο αυτό παρουσιάζουμε τις μαθηματικές εξισώσεις που προσδιορίζουν την εκθετική καμπύλη, για κάθε διάγραμμα, καθώς και τις τιμές των παραμέτρων που εμφανίζονται στις εξισώσεις. Έχει γίνει προσπάθεια να προσδιοριστούν οι εκθετικές καμπύλες με κοινές μορφές εκθετικών εξισώσεων με σκοπό την απευθείας σύγκριση των καμπύλων, συγκρίνοντας μόνο τις τιμές των παραμέτρων.

Α/Α ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ	ΕΚΘΕΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1	$I_1 = f(U_k, E)$	$y = y_0 + A_1 * \exp(-x/t_1)$	$A_1 = -6661,3$ $y_0 = 3431,03$ $t_1 = 25,49$
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2	$I_2 = f(U_k, E)$	$y = y_0 + A_1 * \exp(-x/t_1)$	$A_1 = -425,40$ $y_0 = -860,07$ $t_1 = -17,70$
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3	$I = f(U_k, E)$	$y = y_0 + A_1 * \exp((x - x_0)/t_1)$	$A_1 = -492,86$ $x_0 = 14,65$ $y_0 = -112,54$ $t_1 = 12,87$
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4	$I_2 = f(I_1)$	$y = y_0 + A_1 * \exp(-x/t_1)$	$A_1 = -13425,90$ $y_0 = 12532,23$ $t_1 = 5760,80$
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5	$I = f(I_1)$	$y = y_0 + A_1 * \exp((x - x_0)/t_1)$	$A_1 = -56638,77$ $x_0 = -196609,19$ $y_0 = -245955,98$ $t_1 = 134063,72$
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6	$I = f(I_2)$	$y = y_0 + A_1 * \exp(-x/t_1)$	$A_1 = -34418,31$ $y_0 = -34514,84$ $t_1 = -32672,71$
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7	$Z = f(U_k, E)$	$y = y_0 + A_1 * \exp(-x/t_1)$	$A_1 = -1800,70$ $y_0 = 188,57$ $t_1 = 8,45$
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8	$A = f(U_k, E)$	$y = y_0 + A_1 * \exp(-x/t_1)$	$A_1 = 2,28$ $y_0 = -0,18$ $t_1 = 17,48$
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9	$I_1 = f(U_k, E)$	$y = y_0 + A_1 * \exp(-x/t_1)$	$A_1 = -1422,54$ $y_0 = 188,57$ $t_1 = 8,45$
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10	$I_2 = f(U_k, E)$	$y = y_0 + A_1 * \exp(-x/t_1)$	$A_1 = -813,23$ $y_0 = -2132,21$ $t_1 = 19,03$

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11	$I = f(U_k, E)$	$y = y_0 + A_1 \cdot \exp(-x/t_1)$	A1=-2,51 y0=-2,51 t1=712572,34
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12	$I_2 = f(I_1)$	$y = y_0 + A_1 \cdot \exp(-x/t_1)$	A1=-4767,12 y0=-6444,45 t1=-1687,73
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13	$I = f(I_1)$	$y = y_0 + A_1 \cdot \exp(-x/t_1)$	A1=-29314,30 y0=23928,83 t1=2587,41
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14	$I = f(I_2)$	$y = y_0 + A_1 \cdot \exp(-x/t_1)$	A1=-11160,59 y0=9326,03 t1=2579,07
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15	$Z = f(U_k, E)$	$y = y_0 + A_1 \cdot \exp(-x/t_1)$	A1=-7,02 y0=0,06 t1=17,21
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16	$A = f(U_k, E)$	$y = y_0 + A_1 \cdot \exp(-x/t_1)$	A1=-3,71 y0=-0,04 t1=-11,53

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑ

Στα κεφάλαια 5 και 6 παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα των μεγεθών που υπολογίστηκαν με βάση τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν καθώς και τους τύπους από το τυπολόγιο. Στο τελευταίο κεφάλαιο έγινε προσπάθεια να προσεγγιστούν οι καμπύλες εκθετικά με βάση ανάλογο που περιγράφεται από την αντίστοιχη εκθετική συνάρτηση.

Ο αναγνώστης μπορεί από τα σχήματα να συγκρίνει άμεσα την πραγματική καμπύλη του κάθε μεγέθους με την εκθετική προσέγγιση που βρίσκεται στο ίδιο διάγραμμα. Αξίζει να αναφερθούμε σε δύο πράγματα.

Το πρώτο αφορά στις αποκλίσεις που μπορεί να παρουσιάζονται στις πραγματικές παραστάσεις των μεγεθών συγκρίνοντας αυτές με τις θεωρητικές καμπύλες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Πάντα όταν δημιουργούμε γραφικές παραστάσεις από πραγματικές μετρήσεις οι μικρές αποκλίσεις σε τμήματα των γραφικών αυτών παραστάσεων είναι αναπόφευκτες. Και σε αυτό συντελούν πολλοί παράγοντες, διαφορετικοί κάθε φορά.

Από τους σημαντικότερους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν ένα πείραμα (όπως είναι οι μερικές εκκενώσεις που προκλήθηκαν από την εφαρμογή των κρουστικών τάσεων είναι οι συνθήκες του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. Ένα μεγάλο μέρος λοιπόν των αποκλίσεων που παρατηρούμε πάντα μεταξύ πραγματικών και θεωρητικών μετρήσεων ή παραστάσεων οφείλεται στην ποικιλία των εξωτερικών συνθηκών που επικρατούν.

Ένας άλλος παράγοντας, από τους πλέον σημαντικούς σε τέτοιου είδους πειράματα είναι τα χαρακτηριστικά του υλικού το οποίο υποβάλλεται στο πείραμα. Μετά από διαδοχικές εφαρμογές κρουστικών τάσεων σε ένα υλικό το τελευταίο είναι πιθανό να χάσει μεγάλο μέρος από τις ιδιότητες του με αποτέλεσμα να εμφανίσει διαφορετική συμπεριφορά από την αναμενόμενη.

Το δεύτερο σημαντικό γεγονός που πρέπει να σχολιάσουμε είναι κατά πόσον η εκθετική μορφή των καμπυλών, που χρησιμοποιήθηκε για την προσέγγιση, αποτελεί πάντα την ακριβέστερη. Είναι φανερό ότι για ορισμένες καμπύλες η προσέγγιση ίσως αποδίδεται καλύτερα με πολυωνυμική ή άλλη συνάρτηση. Όμως επειδή σύμφωνα με την βιβλιογραφία τα φαινόμενα πριν και κατά την διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών αποδίδονται κατά κύριο λόγο στον ιονισμό με κρούσεις, έγινε εκθετική προσέγγιση των χαρακτηριστικών του φορτίου συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης (ή του ηλεκτρικού πεδίου). Οι διακυμάνσεις των μετρήσεων περί την εκθετική θεωρητική μορφή οφείλονται στην στατιστικότητα του φαινομένου επειδή το υλικό είναι ανομοιογενές. Ισχύει δηλαδή ότι το φαινόμενο εξελίσσεται κάθε φορά από θέση σε θέση του υλικού (όπου δεν είναι ακριβώς το ίδιο).

Τέλος, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, επιλέχθηκε μεταξύ διάφορων τύπων εκθετικών μορφών, να χρησιμοποιηθεί η ίδια γενική μορφή για όλα τα μεγέθη ούτως ώστε η διαφορετικότητα των μεγεθών να αποτυπώνεται από τη διαφορετική τιμή των συντελεστών της εκθετικής συνάρτησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος: “Βιομηχανικές διατάξεις και υλικά”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2003
2. Μπούρκας Π.: Εφαρμογές Κτιριακών – Βιομηχανικών Μελετών και Εγκαταστάσεων, Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα 1990
3. Δέρβος Κ.Θ., Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων, εκδόσεις Ε.Μ.Π. 1997
4. Δέρβος Κ.Θ., Μπούρκας Π.Δ., Εισαγωγή στα ηλεκτρομονωτικά υλικά, εκδόσεις Ε.Μ.Π. 1991
5. Θεοδώρου Ν., “Ηλεκτρικές μετρήσεις”, τόμος 1 και 2, εκδόσεις Ε.Μ.Π.
6. Σταθόπουλος Ι.Α., Μπούρκας Π.Δ., Τοπαλής Φ.Β., “Μετρήσεις και δοκιμές υψηλών τάσεων”, εκδόσεις Ε.Μ.Π. 1991
7. Ι. Σταθόπουλος: Υψηλές Τάσεις, Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα, 1995
8. Bourkas P.D, Dervos C., Eleftheriou M., Kagarakis C.: Ionisationsvorgänge beim Gleitdurchschlag der festen organischen Isolierstoffen, *Physica Scripta*, Vol. 42, p.p 737-740, 1990
9. Dervos C., Bourkas P.D, Kayafas E.A, Stathopoulos I.A: Enhanced partial discharges due to temperature increase in the combined system of a solid-liquid dielectric, *IEEE Trans, on Electrical Insulation*, Vol 25, No 3, June 1990.
10. Bourkas P.D., Machias A.V., Stathopoulos I.A., Topalis F.V.: No-load Medium Voltage Switches Design for Industrial Applications, 4TH International Conference on High Technology in the Power Industry, June 4-7, 1989.
11. Dervos C., Bourkas P.D, Kayafas E.A.: High frequency current oscillations in solid, *J. Physics D.-Applied Physics*, Vol. 22 p.p 316-322, 1989.
12. Dervos C., Bourkas P.D, Kayafas E.A.: Potential profile of dielectrics during impulse application, *Physica Status Solidi (a)* Vol. 122, 123, p.p 123-130, 1989.
13. Dervos C., Bourkas P.D, Kayafas E.A, Stathopoulos I.A. : Eine mögliche Esklarung der Glimmentladungen in festen Isolierstoffen bei Stosspannungsbeanspruchung, *etz-Archiv*, Bd. 11, H. 5 S. 163-165, 1988.

14. Sparks M. Mills D.L., Warren R. Holstein T., Maradudin A.A., Sham L.J King D.F.: Theory of electron-avalanche breakdown in solids, Phys. Rev. B. Vol. 24, No 6 p.p. 3519-3536, 1987.
15. Zeller H.R.: Breakdown and prebreakdown phenomena in solid dielectrics, IEEE Trans, Electr. Insul. EI-22, Vol. 2 115-122, 1987
16. Cartier E., Pfluger P.: Detection of hot electron-induced radiation damage in organic dielectrics by exoelectron emission from thin films IEEE Trans. Electr. Insul. EI-22 Vol. 2, p.p 123-128, 1987.
17. Himba T., Zeller H.R.: Direct measurement of spacecharge injection from a needle electrode into dielectrics J. App. Phy. Vol. 59 p.p 1614-1620, 1986
18. Kuffel E. High voltage engineering fundamentals W.S. Zaengl Pergamon Press Oxford 1984