



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

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ
ΣΤΟ ΒΑΚΕΛΙΤΗ ΕΝΤΟΣ ΕΛΑΙΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΣΕ
ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΠΕΔΙΟ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ
 $\pm 1,2/50\mu\text{s}$**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΝΗ Θ. ΜΑΝΟΥΣΑΚΑ

Επιβλέπων : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2010



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

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ
ΣΤΟ ΒΑΚΕΛΙΤΗ ΕΝΤΟΣ ΕΛΑΙΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΣΕ
ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΠΕΔΙΟ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ
 $\pm 1,2/50\mu\text{s}$**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΝΗ Θ. ΜΑΝΟΥΣΑΚΑ

Επιβλέπων : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2^η Ιουνίου 2010.

.....
Κ.Γ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν.Ι. ΘΕΟΔΩΡΟΥ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μ.Γ. ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2010

.....
ΕΛΕΝΗ Θ. ΜΑΝΟΥΣΑΚΑ

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

Copyright © Ελένη Θ. Μανούσακα, 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων και είναι απαραίτητα για τη σωστή λειτουργία τους, αλλά και για την προστασία των χειριστών τους. Η μελέτη των ιδιοτήτων συγκεκριμένων ηλεκτρομονωτικών υλικών οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία τους και τη σωστή χρήση τους. Επομένως, θεωρείται σκόπιμη η μελέτη και κατανόηση της συμπεριφοράς αυτών των υλικών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων και αφορά τη μελέτη και στατιστική ανάλυση των ηλεκτρικών φαινομένων, που συνοδεύουν τις μερικές εκκενώσεις, οι οποίες εκδηλώνονται σε ένα συγκεκριμένο ηλεκτρομονωτικό υλικό, εντός μονωτικού ελαίου, όταν σε αυτό ασκείται κρουστική τάση $\pm 1,2/50\mu\text{s}$. Το υλικό αυτό είναι ο βακελίτης, υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα στις μονώσεις. Στα πλαίσια, λοιπόν, αυτής της εργασίας, γίνεται δυνατή η κατανόηση των ιδιοτήτων δοκιμίων βακελίτη και μελετάται η συμπεριφορά τους όταν βρίσκονται μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από ηλεκτρόδια “ακίδα-πλάκα”. Επομένως, έτσι είναι δυνατή η επιλογή του σωστού υλικού για κάθε μόνωση, αλλά παράλληλα ενισχύεται και η περαιτέρω πρόοδος της τεχνολογίας.

Αναφέρεται εδώ ότι η θεωρητική προσέγγιση βασίζεται κυρίως στο βιβλίο Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και Υλικά των καθηγητών Ε.Μ.Π., Π.Δ. Μπούρκα και Κ.Γ. Καραγιαννόπουλου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εισαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζεται όλο το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση και μελέτη των ιδιοτήτων των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά, διευκρινίζονται κάποιες βασικές έννοιες που θα χρειαστούν στη συνέχεια. Έπειτα, παρουσιάζεται η μορφή της κρουστικής τάσης που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία. Στη συνέχεια, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των ηλεκτρομονωτικών υλικών που αποτελούν τα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους και στο τέλος αναλύονται εκτενώς τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών. Διακρίνονται δύο βασικές θεωρίες για τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης: η μακροσκοπική και η κβαντομηχανική θεωρία. Σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεωρία υπάρχουν τέσσερις μορφές διάτρησης: η θερμική διάτρηση που οφείλεται στις απώλειες Joule, η ηλεκτρική διάτρηση (δενδροειδής και ηλεκτρομηχανική) που οφείλεται στις δυνάμεις Coulomb, η ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση) που προκαλείται από τις μερικές εκκενώσεις και τέλος, η θερμοχημική διάτρηση λόγω της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Στην πράξη, η διάτρηση των υλικών είναι αποτέλεσμα συνδυασμού των παραπάνω παραγόντων. Στην εργασία αυτή κυρίαρχο ρόλο παίζουν οι μερικές εκκενώσεις. Η κβαντομηχανική θεωρία βασίζεται κυρίως στην ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και περιλαμβάνει και τη θεωρία του ιονισμού με κρούσεις.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και στατιστική ανάλυση των ηλεκτρικών φαινομένων, που συνοδεύουν τις μερικές εκκενώσεις, οι οποίες εκδηλώνονται σε δοκίμια βακελίτη πάχους 1mm και 2mm αντίστοιχα, εντός ελαίου μετασχηματιστών, όταν σε αυτά ασκείται κεραυνική κρουστική τάση, μορφής $\pm 1,2/50\mu\text{s}$.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις και από την επεξεργασία των μετρήσεων. Υπολογίζονται χρήσιμα ηλεκτρικά μεγέθη και σχεδιάζονται οι κατάλληλες χαρακτηριστικές.

Τέλος, στο 4^ο κεφάλαιο, γίνεται μία προσέγγιση των χαρακτηριστικών του 3^{ου} κεφαλαίου με μαθηματικές εκφράσεις και με τη βοήθεια της θεωρίας του ιονισμού με κρούσεις. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα και την επεξεργασία των μετρήσεων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μονωτικά υλικά, Μερικές εκκενώσεις, Διάσπαση, Διάτρηση, Γήρανση, Απώλειες Joule, Δυνάμεις Coulomb, Θερμοκρασία περιβάλλοντος, Κρουστική τάση, Ανομοιογένειες υλικού, Ιονισμός.

ABSTRACT

In the introduction of this thesis, it is presented the necessary theoretical base in order to understand and study the properties of solid nonconductive materials. Particularly, in the beginning, are made clear some basic meanings which will be used afterwards. Moreover, it is presented the shape of impact voltage. Furthermore, are mentioned the principal characteristics of insulating materials, which act as simple measures of valuation. At the end, there is an analysis of phenomena before and after the breakdown of the solid insulating materials. There are two basic theories which deal with the phenomena of ageing and breakdown of materials: Macroscopic and Quantum Mechanics Theory. According to Macroscopic Theory, there are four breakdown types: the thermal breakdown due to Joule's losses, the electrical breakdown due to Coulomb's forces, the electrochemical breakdown (or ageing) which is caused due to partial discharges and the thermochemical breakdown due to environment's temperature. Practically, the breakdown of materials is a combination of all these factors. This thesis, mainly, deals with partial discharges. Quantum Mechanics Theory is based on the energy of free electrons and contains the theory of ionization with impacts.

The aim of this thesis is the study and statistical analysis of the electrical phenomena that accompany the partial discharges and come out to pieces of bakelite with $d=1\text{mm}$ and $d=2\text{mm}$ respectively, in insulating oil, under impact voltage $\pm 1,2/50\mu\text{s}$.

At the 3rd chapter are presented the results that arise from the measurements and their analysis. Furthermore, are calculated necessary electrical magnitudes and are drawn their plots.

Finally, at the 4th chapter, the plots of 3rd chapter are approached with mathematic expressions with the aim of the theory of ionization with impacts. Moreover, are presented the conclusions that are exported from the results that arise from the measurements and their analysis.

KEYWORDS

Insulating materials, partial discharges, breakdown, perforation, ageing, Joule's losses, Coulomb's forces, environment's temperature, impact voltage, material's incongruity, ionization.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Καθορισμός βασικών εννοιών.....	11
1.2 Κρουστική τάση.....	12
1.3 Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών.....	14
1) Η διηλεκτρική αντοχή.....	14
2) Η σχετική διηλεκτρική σταθερά.....	15
3) Ο συντελεστής απωλειών ($\tan\delta$).....	16
4) Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	18
5) Ο συντελεστής $\epsilon \cdot \tan\delta$	19
6) Η επιφανειακή αγωγιμότητα.....	20
7) Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.....	21
8) Η μηχανική αντοχή.....	21
1.4 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών.....	23
1.4.1 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών.....	24
1.4.1.1 Η θερμική διάτρηση.....	24
1.4.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση.....	26
1.4.1.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης).....	30
1) Γενικά περί μερικών εκκενώσεων.....	30
2) Η τεχνητή γήρανση.....	32
3) Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων.....	33
4) Παράδειγμα ερμηνείας παλμογραφημάτων των μερικών εκκενώσεων μέσω ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων.....	36
1.4.1.4 Η θερμοχημική διάτρηση.....	37
1.4.1.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.....	38
1) Ο συνδυασμός της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.....	38
2) Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.....	42
α) Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule.....	42
β) Η μείωση της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση, λόγω εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων.....	44
γ) Η μείωση της θερμικής τάσης ανατροπής από τις μερικές εκκενώσεις.....	44
δ) Η διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων (συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule και τις δυνάμεις Coulomb).....	45
3) Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.....	50
1.4.1.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων.....	55
1.4.1.7 Το φαινόμενο της πολικότητας σε πολυμερή στερεά μονωτικά κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων.....	61
1.4.2 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση.....	62
1.4.3 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών.....	63
1.4.3.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών.....	64
α) Μακροσκοπική ερμηνεία.....	67

β) Κβαντομηχανική ερμηνεία.....	67
1.4.3.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση.....	70
1.4.3.3 Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών.....	72
1.4.3.4 Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση.....	73
1.4.4 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών.....	77
1.5 Βακελίτης.....	78
2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	79
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	82
3.1 Θετική πολικότητα +1,2/50μs- Πάχος δοκιμίου d=1mm.....	82
3.2 Αρνητική πολικότητα -1,2/50μs- Πάχος δοκιμίου d=1mm.....	93
3.3 Θετική πολικότητα +1,2/50μs- Πάχος δοκιμίου d=2mm.....	104
3.3 Αρνητική πολικότητα -1,2/50μs- Πάχος δοκιμίου d=2mm.....	115
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	126
5. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	129
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	130

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Καθορισμός βασικών εννοιών

Μονωτής (ή **διηλεκτρικό**) είναι κάθε υλικό το οποίο δεν επιτρέπει την ελεύθερη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου από τη μάζα του. Τέλειοι μονωτές που να απαγορεύουν εντελώς τη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου από τη μάζα τους δεν υπάρχουν, αλλά μερικά υλικά προσεγγίζουν αρκετά καλά αυτή τη συμπεριφορά. Σκοπός των μονώσεων σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των ηλεκτροφόρων μερών, καθώς και των ρευματοφόρων μερών προς γη, έτσι ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό.

Με τον όρο **διάσπαση** εννοούμε την αγωγή σύνδεση δύο μεταξύ τους μονωμένων ηλεκτροδίων, μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μονωτικών (π.χ. αέρας–πορσελάνη, βακελίτης–μονωτικό λάδι), τότε ονομάζεται **επιφανειακή διάσπαση**. Η διάσπαση στο περιβάλλον μέσο ενός στερεού μονωτικού, λόγω μείωσης της απόστασης μόνωσης του στερεού μονωτικού από ξένες επικαθίσεις στην επιφάνεια του υλικού (π.χ. ρυπασμένοι μονωτήρες), ονομάζεται **υπερπήδηση**. Η διάσπαση μέσω του όγκου ενός μονωτικού υλικού καλείται **διάτρηση**.

Στις διάφορες πρακτικές εφαρμογές υψηλών τάσεων συναντώνται συχνότατα χωρικά φορτία μεταξύ των ηλεκτροδίων. Σε μία διάταξη δύο ηλεκτροδίων, τα χωρικά φορτία συγκεντρώνονται στο ηλεκτρόδιο με την αντίθετη προς αυτά πολικότητα και έτσι σχηματίζουν ένα νέφος χωρικών φορτίων. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι μέχρι κάποια τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (ή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης) το πεδίο είναι **χωρικό** (ή ηλεκτροστατικό), δηλαδή τα χωρικά φορτία του νέφους είναι αμετακίνητα. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει μία κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των εξασκούμενων δυνάμεων Coulomb.

Όταν, μετά την παραπάνω τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου, καταστρέφεται η κατάσταση ισορροπίας (χωρίς να συμβαίνει διάσπαση), τότε εκδηλώνονται περιορισμένης έκτασης εκκενώσεις. Αυτές ονομάζονται **μερικές εκκενώσεις**. Οι μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε θέσεις ανομοιογένειας στον όγκο ή στην επιφάνεια του υλικού (κυρίως φυσαλίδες αερίων στον όγκο του υλικού και διάφορες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνειά του όπως σκόνη, υγρασία, κ.λ.π.). Οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού ονομάζονται **εσωτερικές μερικές εκκενώσεις**, ενώ αυτές που εκδηλώνονται στην επιφάνεια του χαρακτηρίζονται ως **εξωτερικές μερικές εκκενώσεις**. Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν την ξεχωριστή ονομασία **στεμματοειδείς μερικές εκκενώσεις** (ή **εκκενώσεις Korona**).

Η ενεργός τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (U_a), κατά την οποία αρχίζει η έναρξη των μερικών εκκενώσεων ονομάζεται **τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων** (ή **αρχική τάση**). Η τιμή της πεδιακής έντασης E_a για την έναρξη των μερικών εκκενώσεων χαρακτηρίζεται ως **πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων** (ή **αρχική πεδιακή ένταση**). Επίσης, αναφέρεται και ως **πεδίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων**. Γενικά, η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση μεταξύ των ηλεκτροδίων αποκαλείται εφαρμοζόμενο πεδίο.

1.2. Κρουστική τάση

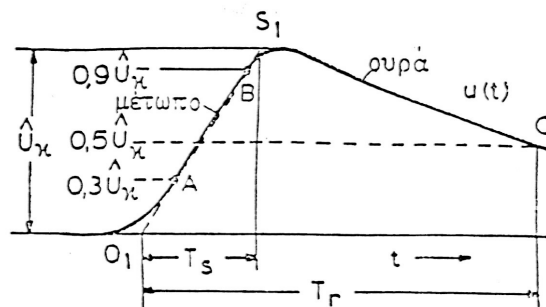
Μεγάλη σημασία για την ηλεκτρική αντοχή των μονώσεων έχει η μελέτη προ και κατά τη διάσπαση των μονωτικών υλικών (και των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών υψηλών τάσεων γενικότερα), ως προς τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης. Αυτό είναι λογικό, αν σκεφτεί κανείς ότι οι μονώσεις πρέπει να διατηρούν την αξιοπιστία τους όταν συμβαίνουν υπερτάσεις στο δίκτυο. Γενικά, οι τάσεις δοκιμής είναι εναλλασσόμενες, συνεχείς, κρουστικές και αποσβεννύμενες ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας (οι τελευταίες δε συνηθίζονται πλέον).

Οι κρουστικές τάσεις (ως κρουστική τάση χαρακτηρίζεται ένας μοναδιαίος και ενιαίως πολικότητας παλμός τάσης) χρησιμοποιούνται κατά τη διεξαγωγή τεχνικών δοκιμών υψηλών τάσεων, με στόχο την προσομοίωση των διηλεκτρικών καταπονήσεων που υφίστανται οι εγκατεστημένες στα ηλεκτρικά δίκτυα διατάξεις και στοιχεία κατά την ανάπτυξη επί των δικτύων εσωτερικών και εξωτερικών υπερτάσεων και επίσης, κατά τη βασική έρευνα την αφορώσα στη μελέτη της διάσπασης μονωτικών υλικών.

Οι κρουστικές τάσεις χωρίζονται σε ορθογωνικές, σφηνοειδείς και διπλοεκθετικές. Οι δύο πρώτες μορφές χρησιμοποιούνται σε ερευνητικές εργασίες, ενώ για τη διεξαγωγή δοκιμών χρησιμοποιούνται προτυποποιημένες διπλοεκθετικές κρουστικές τάσεις. Κρουστικές τάσεις με διάρκεια μετώπου της τάξης του 1 μ s και ημίσεως εύρους μερικές δεκάδες μ s, προσομοιώνουν τις υπό κεραυνών δημιουργούμενες υπερτάσεις, ενώ σημαντικά μεγαλύτερης διάρκειας κρουστικές τάσεις προσομοιώνουν τις υπερτάσεις που ακολουθούν τους διάφορους χειρισμούς ζεύξης και απόζευξης σε ένα δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Διακρίνουμε πλήρεις και αποκεκομμένες κρουστικές τάσεις (στο μέτωπο, στην κορυφή ή στην ουρά). Οι αποκεκομμένες κρουστικές τάσεις δημιουργούνται όταν συμβεί διάσπαση στο δοκίμιο. Έτσι εμφανίζεται απότομος μηδενισμός της τάσης, ο οποίος συνεπάγεται εμφάνιση ταλάντωσης τάσης (μεταβατικό φαινόμενο).

Η μορφή της κεραυνικής κρουστικής τάσης (ή κρουστικής τάσης μικρής διάρκειας) δίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.2-1).



Σχήμα 1.2-1: Χαρακτηρισμός των μεγεθών μίας κρουστικής τάσης.

\hat{U}_k : Μέγιστη τιμή.

T_s : Διάρκεια μετώπου.

T_r : Διάρκεια ημίσεως εύρους

Χαρακτηρίζεται από το χρόνο μετώπου (T_s) και το χρόνο ουράς (T_r). Η συνήθης κεραυνική τάση είναι μία κρουστική τάση της μορφής 1,2/50μs, που σημαίνει $T_s=1,2\mu s$ και $T_r=50\mu s$. Ως τυποποιημένη κρουστική τάση χειρισμών θεωρείται αντίστοιχα η 250/2500μs. Επίσης, χαρακτηριστικό μέγεθος μίας κρουστικής τάσης αποτελεί και η μέγιστη τιμή της (\hat{U}_k).

Οι κρουστικές τάσεις χειρισμών (ή κρουστικές τάσεις μεγάλης διάρκειας) έχουν χαρακτηριστικό μέγεθος το χρόνο μεγίστου (t_m), αντί του χρόνου μετώπου.

Κατά κανόνα οι κρουστικές τάσεις παράγονται μέσω της εκφόρτισης πυκνωτών υψηλής τάσης, διαμέσου σπινθηριστών έναυσης, σε ένα κύκλωμα αντιστάσεων και χωρητικότητων. Η μέγιστη τιμή των κρουστικών τάσεων μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια σπινθηριστών μέτρησης και οργάνων μέτρησης σε συνδυασμό με καταμεριστές τάσης. Η χρονική μεταβολή μίας κρουστικής τάσης λαμβάνεται μέσω ηλεκτρονικού παλμογράφου ή αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα, συνδυαζομένων πάντα με καταμεριστή τάσης.

1.3. Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών

Η ανάγκη για την αξιόπιστη διαχρονική συμπεριφορά των διαφόρων μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή υψηλών τάσεων έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους, τα οποία δεν αφορούν μόνο τις ηλεκτρικές (ή διηλεκτρικές) ιδιότητές τους, άλλα 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 αυτά είναι:

1) Η διηλεκτρική αντοχή

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

$$E_d = \frac{U_{dmin}}{d} \quad (\text{συνήθως σε kV/cm}) \quad (1.3.1-1)$$

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές για τη διηλεκτρική αντοχή μερικών μονωτικών υλικών (σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50 Hz και για μικρό χρόνο καταπόνησης).

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

Πίνακας 1.3.1: Διηλεκτρική αντοχή E_d για καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας ορισμένων μονωτικών υλικών σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50 Hz.

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

$$E_d = \frac{\sqrt{2}U_d}{d} \quad (1.3.1-2)$$

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης (ή βαθμός ομοιογένειας) ενός ανομοιογενούς πεδίου, $0 < \eta < 1$, ορίζεται ως:

$$\eta = \frac{E_{\mu}}{E_{max}} \quad (1.3.1-3)$$

όπου E_{μ} η μέση πεδιακή ένταση:

$$E_{\mu} = \frac{U}{d} \quad (1.3.1-4)$$

Με τη βοήθεια του συντελεστή χρησιμοποίησης, η πεδιακή ένταση για τη διάσπαση ενός μονωτικού υλικού στη μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης τάσης καταπόνησης του $\sqrt{2} U_{da}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου, είναι:

$$E_{da} = \frac{\sqrt{2} U_{da}}{\eta d} \quad (1.3.1-5)$$

2) Η σχετική διηλεκτρική σταθερά

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) εκφράζει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μίας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα ($C = \epsilon_r \cdot C_0$) και $\epsilon_r > 1$. 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 επιφάνειές τους, για να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. Ο πίνακας 1.3.2 παρουσιάζει τις τιμές της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς για τα πιο γνωστά υλικά.

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

Πίνακας 1.3.2: Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20 °C.

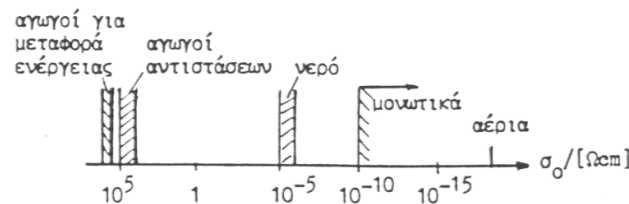
Ένας πολύ συνηθισμένος συνδυασμός μονωτικών είναι ο συνδυασμός του χαρτιού με το μονωτικό λάδι, καθώς έχουν περίπου την ίδια σχετική διηλεκτρική σταθερά με αποτέλεσμα να μη συμβαίνει ουσιαστικά διάθλαση γραμμών στη διαχωριστική επιφάνεια και επιπλέον το λάδι εμποτίζει το χαρτί ώστε να αποκλείεται η ύπαρξη αέρα.

3) Ο συντελεστής απωλειών ($\text{tg}\delta$)

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

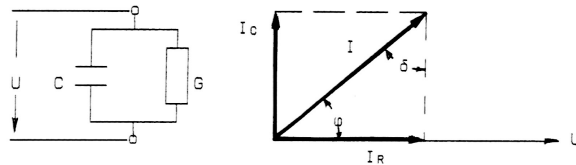
- α) στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροής των διπόλων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης,
- β) στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά (σχήμα 1.3.3-1).

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



Σχήμα 1.3.3-1: Τάξη μεγέθους της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διαφόρων κατηγοριών υλικών.

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με ομοιογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητάς του G).

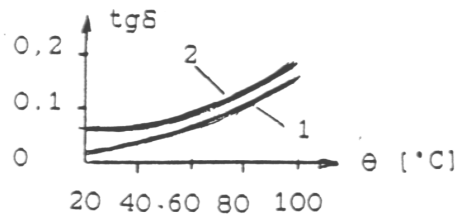


Σχήμα 1.3.3-2: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας G του διηλεκτρικού του.

Ο συντελεστής απωλειών δίνεται από τον τύπο:

$$tg\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C} \quad (1.3.3-1)$$

και είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μίας μονωτικής διάταξης γενικότερα), γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του (σχήμα 1.3.3-3). Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό η $tg\delta$ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 1.3.3-3: $tg\delta$ ορισμένων διηλεκτρικών
1: σκλήρο χαρτί, 2: πορσελάνη.

Οι απώλειες Joule (P_w) στην αγωγιμότητα G είναι:

$$P_w = I_R U = GU^2 = U^2 \omega C \cdot tg\delta = P_B tg\delta \quad (1.3.3-2)$$

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

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

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1.3.3-3)$$

Για την αγωγιμότητα G του παραπάνω πυκνωτή ισχύει η σχέση:

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (1.3.3-4)$$

όπου σ η ειδική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού. Για τις απώλειες του πυκνωτή αυτού ισχύει σύμφωνα με τις σχέσεις 1.3.3-2 και 1.3.3-3:

$$P_w = U^2 \omega \cdot \epsilon \frac{A}{d} \cdot tg\delta \quad (1.3.3-5)$$

ή πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με d :

$$P_w = (U/d)^2 \omega \cdot \epsilon \cdot tg\delta \cdot (Ad) = (U/d)^2 \omega \cdot \epsilon \cdot tg\delta \cdot V \quad (1.3.3-6)$$

όπου V ο όγκος του διηλεκτρικού.

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

$$P_w = \omega \cdot \varepsilon \cdot tg \delta \cdot \int (U/d)^2 dV = \omega \cdot \varepsilon \cdot tg \delta \cdot \int E^2 dV \quad (1.3.3-7)$$

4) Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3.3-1, έχουν μία πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή της πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία κλπ.). Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς.

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

$$\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.3.4-1)$$

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

σ : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

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

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

T : η απόλυτη θερμοκρασία

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

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

Αν η πεδιακή ένταση έχει μεγαλύτερη τιμή από προηγουμένως, η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας οφείλεται κυρίως στις μερικές εκκενώσεις και συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις. Σε αυτή την περίπτωση δεν ισχύει η σχέση 1.3.4-1.

Για την αύξηση του σ , από τις απώλειες του διηλεκτρικού και τις μερικές εκκενώσεις, ισχύει η σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\exp(\beta\theta)}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.3.4-2)$$

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

Η αγωγιμότητα τέλος των μονωτικών υλικών αυξάνει όταν προσβάλλονται με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία X 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.

5) Ο συντελεστής $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$

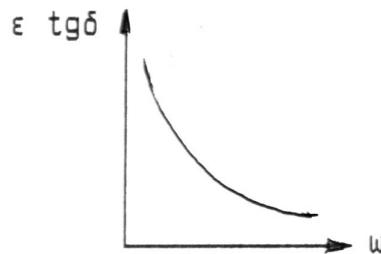
Για έναν πυκνωτή επίπεδων πλακών, από τις σχέσεις 1.3.3-1, 1.3.3-3 και 1.3.3-4, έχουμε:

$$\varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \quad (1.3.5-1)$$

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

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.3.5-2)$$

Η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης είναι η ακόλουθη.



Σχήμα 1.3.5-1: $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = f(\omega)$ για το ομοιογενές μονωτικό υλικό. (Υποτίθεται ότι η τιμή σ είναι σταθερή με τη θερμοκρασία).

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τις τιμές $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ για ορισμένα διηλεκτρικά.

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	0,01...0,1	0,009...0,012

Πίνακας 1.3.5: Τάξη μεγέθους των τιμών $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ για ορισμένα διηλεκτρικά σε θερμοκρασία 20°C.

Από τις σχέσεις (1.3.5-2) και (1.3.4-1) έπεται ότι ο συντελεστής $\varepsilon \cdot tg\delta$ του ομοιογενούς στερεού μονωτικού υλικού (ή γενικότερα του στερεού διηλεκτρικού όταν δεν εκδηλώνονται σε αυτό μερικές εκκενώσεις, π.χ. λόγω $U < U_w$) αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία:

$$\varepsilon \cdot tg\delta = \frac{\sigma_0}{\omega} e^{\beta\theta} \quad (1.3.5-3)$$

Αν θεωρήσουμε την τιμή ε ως σταθερή, τότε από την παραπάνω σχέση έπεται ότι η αύξηση της $tg\delta$ είναι εκθετική (σχήμα 1.3.3-3).

Για την αύξηση της τιμής $\varepsilon \cdot tg\delta$ στην περιοχή του στερεού μονωτικού, όπου οι μερικές εκκενώσεις συντελούν στην αύξηση των απωλειών Joule, έχουμε αντίστοιχα (από τις σχέσεις 1.3.4-2 και 1.3.5-2):

$$\varepsilon \cdot tg\delta = \frac{\sigma_0}{\omega} \frac{e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.3.5-4)$$

6) Η επιφανειακή αγωγιμότητα

Η διηλεκτρική αντοχή των στερεών μονωτικών μειώνεται όταν η επιφάνεια τους περιλαμβάνει ξένες επικαθίσεις (σκόνη, υγρασία κλπ.). Το ίδιο συμβαίνει και όταν καταπονείται θερμικά η επιφάνεια. Έχει διαπιστωθεί, ότι στα φαινόμενα που εκδηλώνονται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και μερικές εκκενώσεις), συμμετέχει η επιφάνειά τους σε πάχος μέχρι 30Å. Γι' αυτό, η επιφανειακή αγωγιμότητα είναι ένα κριτήριο για την προδιάθεση των διαφόρων στερεών διηλεκτρικών στην εκδήλωση των παραπάνω φαινομένων. Η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα δεν είναι κάποια σταθερά των στερεών μονωτικών, αφού οι παράγοντες, που προκαλούν αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας, ποικίλουν (ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας).

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

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

7) Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών έχει σχέση με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις θέσεις όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως π.χ. ανομοιογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο λάδι). Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντα κατά τη λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ. απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπών κλπ.). Επειδή γενικά ισχύει, ότι η θερμική ειδική 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. Στον πίνακα 1.3.7 δίνονται τιμές του συντελεστή λ για διάφορα διηλεκτρικά.

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

Στις προδιαγραφές IEC και VDE γίνεται μία διαβάθμιση των στερεών μονωτικών, σε κατηγορίες (ή κλάσεις), ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας τους.

8) Η μηχανική αντοχή

Πολλές φορές ενδιαφέρουν και οι μηχανικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών υλικών (εκτός από τις ηλεκτρικές ιδιότητες), όπως τα πλαστικά μέρη του μηχανισμού περιστροφής ενός ασφαλειοπέδη σε ένα πίνακα μέσης τάσης, η αντοχή σε εφελκυσμό ενός μονωτικού, η δύναμη τάνυσης σε μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς κλπ. Σε αυτές τις περιπτώσεις το στερεό μονωτικό θεωρείται ως ένα “μηχανολογικό εξάρτημα”, οπότε ισχύουν οι κανόνες μηχανικής αντοχής των υλικών.

Συχνά ενδιαφέρει η μηχανική αντοχή σε πλήρεις κατασκευές, που περιλαμβάνουν στερεά μονωτικά, όταν αυτή ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από την εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης, όπως συμβαίνει κατά το βραχυκύκλωμα (π.χ. πίνακες μέσης τάσης, μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστές μέτρησης στο δίκτυο υψηλών τάσεων, διακόπτες υψηλών τάσεων κλπ.). Όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή

κατά το βραχυκύκλωμα, οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να οδηγήσουν στην καταστροφή της συσκευής. Για παράδειγμα, η μόνωση ενός διακόπτη υψηλής τάσης δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης. Πρέπει αυτή να συνδυάζεται με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, η οποία θα εξασφαλίσει την ικανότητα μόνωσης μέχρι να διακοπεί το βραχυκύκλωμα από την προστασία του δικτύου.

1.4. Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά χωρίζονται με βάση τη φυσική τους κατάσταση σε τρεις κατηγορίες: τα αέρια, τα υγρά και τα στερεά μονωτικά υλικά. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα εξεταστούν εκτενώς τα φαινόμενα που διέπουν τους μηχανισμούς διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς το υλικό που εξετάζεται στην πειραματική διαδικασία είναι ένα στερεό μονωτικό, ο βακελίτης.

Τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών αερίων έχουν εξεξηγηθεί ικανοποιητικά. Αυτό οφείλεται στη μικρή σταθερότητα των μορίων τους, ως προς εκείνη των υγρών και κυρίως των στερεών μονωτικών, με αποτέλεσμα το αέριο να επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση μετά τη διάσπαση (ή την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων). Η ικανότητα της δημιουργίας ιόντων στα στερεά μονωτικά είναι πολύ μικρότερη και η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη (κάψιμο, τήξη, μηχανικές κακώσεις κλπ.). Επιπλέον, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των στερεών μονωτικών, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται κατά τη διάσπαση ή να αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες (λόγω επιφανειακής διάσπασης, υπερπήδησης και μερικών εκκενώσεων), είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού γήρανσης της διάσπασής τους.

Μπορεί κανείς να ομαδοποιήσει τις μεθόδους που εφαρμόζονται για τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των στερεών μονωτικών σε δύο 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 τη μακροσκοπική θεωρία, τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται (ή αποσκοπούν) σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση ακουστικών φωτεινών φαινομένων, καθώς και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού.

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

Στη συνέχεια, θα εξεταστούν αυτές οι δύο θεωρίες καθώς και ο συνδυασμός τους. Επίσης, θα εξεταστούν ξεχωριστά η διάτρηση, από την επιφανειακή διάσπαση και την υπερπήδηση.

1.4.1 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών

Όπως προαναφέρθηκε, τα στερεά μονωτικά αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες προ της διάσπασης και καταστρέφονται κατά τη διάτρηση. 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:

- α) οι απώλειες Joule,
- β) οι δυνάμεις Coulomb,
- γ) οι μερικές εκκενώσεις, και
- δ) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

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

- α) η θερμική διάτρηση,
- β) η ηλεκτρική διάτρηση (που διακρίνεται στη δένδροειδή και την ηλεκτρομηχανική)
- γ) η ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση), και
- δ) η θερμοχημική διάτρηση.

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

1.4.1.1 Η θερμική διάτρηση

Η μορφή αυτής της διάτρησης 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). Το θερμικά καταπονούμενο υλικό υφίσταται συνήθως απανθράκωση και τήξη στην περιοχή όπου οι απώλειες Joule είναι ιδιαίτερα αυξημένες.

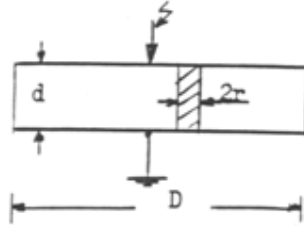
Ο σχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 , οπότε έχουμε σύμφωνα με προηγούμενη σχέση (1.3.4-1):

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.4.1.1-1)$$

Με την προϋπόθεση σταθερής διατομής (A) του σχετού διάτρησης (σχήμα 1.4.1.1-1) και ειδική αγωγιμότητα σ_1 , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} \quad (1.4.1.1-2)$$

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



Σχήμα 1.4.1.1-1: Απλοποιημένη παράσταση του οχετού διάτρησης λόγω των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού.

D: διάμετρος δοκιμίου

d: πάχος του μονωτικού

2r: διάμετρος του οχετού διάτρησης.

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

$$P = P_a + C_0(d\theta/dt) \quad (1.4.1.1-3)$$

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

$$P_a = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (1.4.1.1-4)$$

όπου κ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

Στην περίπτωση όμως της θερμικής διάτρησης ισχύει, ότι η θερμική ισχύς που παράγεται ισούται με την απαγόμενη θερμική ισχύ, δηλαδή ότι:

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (1.4.1.1-5)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δύο συναρτήσεις της θερμοκρασίας ($P=f(\theta)$ και $P_a=f(\theta)$). Για το λόγο αυτό, η οριακή τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση (U_θ) δίνεται όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι, από τη διαφόριση ως προς θ , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης (1.4.1.1-5), έχουμε:

$$\frac{\beta U_\theta^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \quad (1.4.1.1-6)$$

Από τις σχέσεις (1.4.1.1-5) και (1.4.1.1-6) φαίνεται ότι:

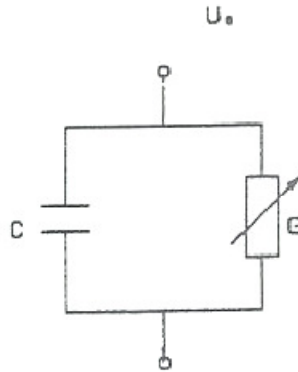
$$\beta \cdot \theta = 1 \quad (1.4.1.1-7)$$

$$\text{και } U_\theta = d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.4.1.1-8)$$

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_θ μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα

ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα 1.4.1.1-2, όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μία μεταβλητή αγωγιμότητα G .

Η διάτρηση στην τιμή U_0 συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ_0 στην τιμή σ_1), μία οριστική τιμή G_{\max} .



Σχήμα 1.4.1.1-2: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule.

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

G_0 : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή.

G_{\max} : αγωγιμότητα για τη διάτρηση.

C : χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή.

1.4.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

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.

Μετά από κάποια τιμή της τάσης θεωρείται ότι η διάτρηση του υλικού οφείλεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb. Η διάτρηση αποδίδεται σε:

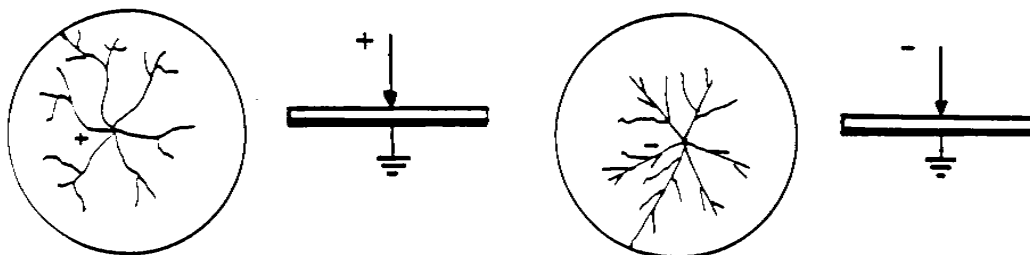
- α) αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις (όπως στα αέρια μονωτικά)
- β) μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή
- γ) συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

Η μορφή αυτής της διάτρησης ονομάζεται ηλεκτρική και διακρίνεται ανάλογα με τη μορφή που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση σε:

- δενδροειδή (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) και
- ηλεκτομηχανική (διάτρηση υπό μορφή οχέτου κατά τη διεύθυνση του πεδίου).

Η **δενδροειδής διάτρηση** είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, γιατί λόγω της μεγαλύτερης τιμής της έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά τη διάτρηση σχετίζεται με θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μία διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγωγή σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 1.4.1.2-1 δίνεται ένα παράδειγμα για

τη μορφή του δενδρίτη, ανάλογα με την πολικότητα της τάσης, για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (δηλαδή την περίπτωση ηλεκτροδίων τύπου ακίδα-πλάκας).



Σχήμα 1.4.1.2-1: Επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη.

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

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

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

Λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας για την ηλεκτρική διάτρηση και επειδή τα στερεά μονωτικά είναι και μονωτές θερμότητας, υποθέτουμε ότι η θερμότητα που απάγεται μόλις πριν από τη διάτρηση είναι αμελητέα. Σύμφωνα με τη σχέση 1.4.1.1-3 και για έναν οχετό διατομής $A=\pi r^2$ (σχήμα 1.4.1.1-1) ισχύει μόλις προ της διάτρησης:

$$U_n^2 \sigma_2 \frac{A}{d} = \sigma_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.4.1.2-1)$$

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 ενδεικνύμενη 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 1.4.1.2-1 έχουμε:

$$U_n = \sqrt{d} \sqrt{\frac{c_0 \theta}{\sigma_2 A T_\delta}} \quad (1.4.1.2-2)$$

Για τη διάτρηση στη μέγιστη τιμή \hat{U}_{kn} μίας κρουστικής τάσης ισχύει αντίστοιχα:

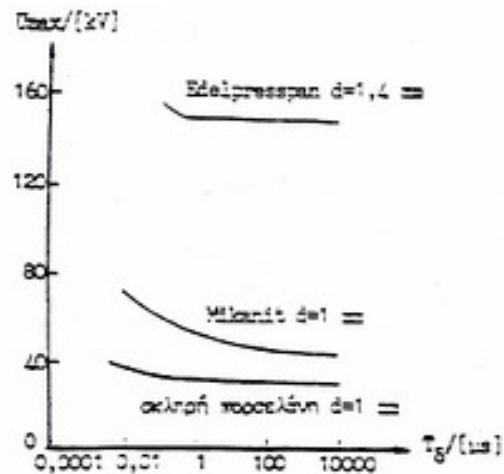
$$\hat{U}_{kn} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{c_0 \theta}{\sigma_2 A T_s}} \quad (1.4.1.2-3)$$

όπου T_s η διάρκεια του μετώπου της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης. Τα πειράματα που έχουν γίνει επαληθεύουν την παραπάνω σχέση. Πράγματι, όσο αυξάνεται ο χρόνος μετώπου, τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή (Πίνακας 1.4.1.2-1).

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
2	250/2500	θετική	66	63...69
	250/2500	αρνητική	68	65...70
	1,2/50	θετική	135	126...151
	1,2/50	αρνητική	148	132...165
	10/200	θετική	74	69...80
	10/200	αρνητική	70	67,5...71

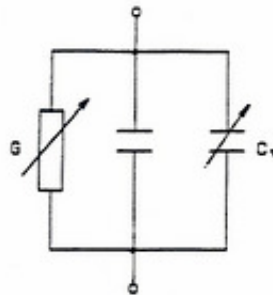
Πίνακας 1.4.1.2-1: Τιμές της τάσης διάσπασης του στερεού μονωτικού pertinax H1270 (πάχους 1mm και 2mm) κατά την καταπόνησή του με διάφορες μορφές κρουστικών τάσεων σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών.
Διάμετρος δοκιμίων: 150mm
Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα
Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: R=0,9mm

Κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση ισχύει περίπου η αναλογία $U_n=f(1/\sqrt{T_\delta})$ (σχήμα 1.4.1.2-2).



Σχήμα 1.4.1.2-2: Διάσπαση διαφόρων στερεών μονωτικών σε σχέση με το χρόνο καταπόνησης. Για πολύ μικρούς χρόνους ισχύει η αναλογία: $U_{max}=f(1/\sqrt{T_\delta})$
 U_{max} : η τιμή της εφαρμοζόμενης εναλλασσόμενης τάσης.

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



Σχήμα 1.4.1.2-3: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.
 C : ιδανική χωρητικότητα.
 $C_\pi=0...C_{max}$: χωρητικότητα, που συμβολίζει την πόλωση του στερεού μονωτικού στη θέση που θα συμβεί η διάτρηση.
 $G=0...G_{max}$: αγωγιμότητα λόγω αύξησης των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στη θέση όπου θα συμβεί η διάτρηση.

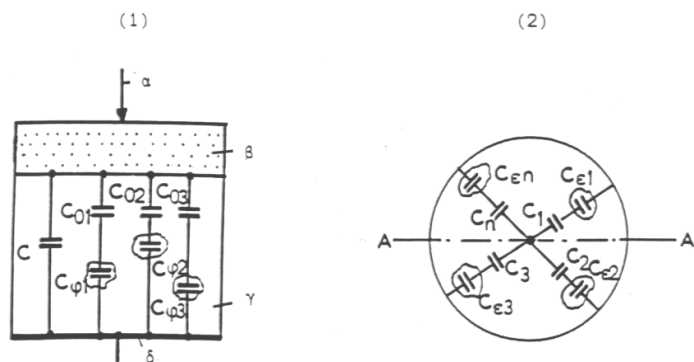
Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μία κρίσιμη για το υλικό τιμή σ_2 , τότε η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και

ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα (σχήμα 1.4.1.2-3), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_{π} (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Όταν η αγωγιμότητα G και ο πυκνωτής C_{π} έχουν αποκτήσει μόλις προ της διάτρησης τις τιμές G_{\max} και C_{\max} (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα σ_2 , λόγω κάποιας ανομοιογένειας), τότε συμβαίνει η διάτρηση.

1.4.1.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης)

1) Γενικά περί μερικών εκκενώσεων

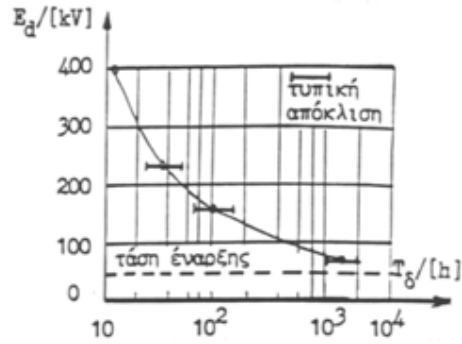
Οι μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και τον όγκο των στερεών μονωτικών αποτελούν πολύ συχνά την αιτία για τη διάσπασή τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (**εσωτερικές μερικές εκκενώσεις**), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνειά του (**εξωτερικές εκκενώσεις**). Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίνεται στο σχήμα 1.4.1.3-1. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές $C_{e1} \dots C_{en}$ και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$. Οι πυκνωτές $C_1 \dots C_n$ και $C_{01} \dots C_{0n}$ παριστάνουν αντίστοιχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (κάθε ένας από αυτούς δίνει την ολική χωρητικότητα δύο πυκνωτών, εκ των οποίων ο ένας είναι η χωρητικότητα μεταξύ της ακίδας και της θέσης διαταραχής και ο άλλος η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας και της θέσης διαταραχής).



Σχήμα 1.4.1.3-1: Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής σε στερεό μονωτικό εντός μονωτικού ελαίου
 (1) Τομή A-A της διάταξης πειραματισμού:
 α: ηλεκτρόδιο ακίδα
 β: επιφανειακό φιλμ του μονωτικού ελαίου και επιφάνεια του στερεού μονωτικού
 γ: στερεό μονωτικό
 δ: ηλεκτρόδιο πλάκα
 (2) Κάτοψη της διάταξης πειραματισμού:
 $C_1 \dots C_n$: πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος της επιφάνειας του στερεού μονωτικού και του επιφανειακού φιλμ ελαίου.
 $C_{\epsilon 1} \dots C_{\epsilon n}$: πυκνωτές επιφανειακών (εξωτερικών) θέσεων διαταραχής
 C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.
 $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$: πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων).
 $C_{01} \dots C_{0n}$: πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος του στερεού μονωτικού.

Όταν αρχίζει η εμφάνιση μερικών εκκενώσεων αλλάζει σταδιακά η μοριακή δομή του στερεού μονωτικού, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε περιορισμένο τμήμα του, όπου οι θέσεις ανομοιογένειας 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 μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού. Στο σχήμα 1.4.1.3-2 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



Σχήμα 1.4.1.3-2: Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχους 0,125mm, λόγω μερικών εκκενώσεων.
 Αριθμός δοκιμών: 10 ανά σημείο μέτρησης.
 T_d : χρόνος διάσπασης.

2) Η τεχνητή γήρανση

Όταν ένα στερεό μονωτικό καταπονείται με κάποια μορφή τάσης (εναλλασσόμενη, κρουστική ή συνεχή), μετά από κάποια τιμή της τάσης (ανάλογα με τη μορφή της) εμφανίζονται μερικές εκκενώσεις.

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

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

Ο φαινόμενος συντελεστής ανομοιογενειών για εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης είναι:

$$\mu_\varepsilon = U_\varepsilon / U \quad (1.4.1.3-1)$$

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

Κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ισχύει αντίστοιχα:

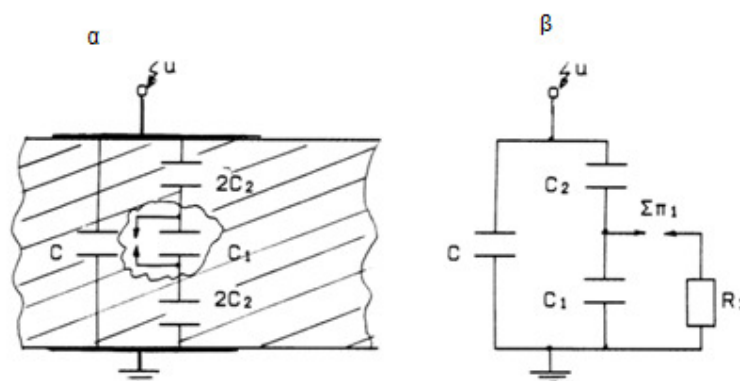
$$\mu_0 = \hat{U}_{κε} / \hat{U}_κ \quad (1.4.1.3-2)$$

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

3) Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων

Όπως είναι γνωστό, με τη γέφυρα Schering μετρά κανείς το σύνολο των απωλειών ενός μονωτικού υλικού ή μίας διάταξης υψηλής τάσης, δηλαδή τις απώλειες αγωγιμότητας, πόλωσης και εκείνες λόγω εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων. Η πρώτη μέθοδος ανίχνευσης των μερικών εκκενώσεων είναι η μέθοδος Callender, η οποία είναι παραλλαγή της γέφυρας Schering και με την οποία κατορθώθηκε η εξουδετέρωση των παράσιτων χωρητικοτήτων του κυκλώματος μέτρησης κατά το 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 του σχήματος 1.4.1.3-3, γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου.



Σχήμα 1.4.1.3-3: 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.

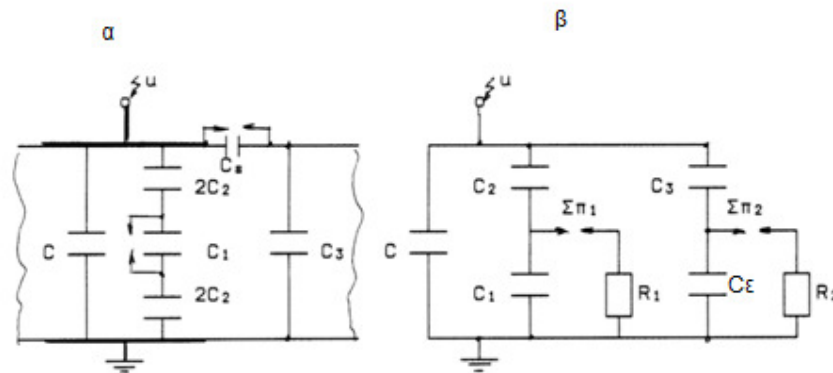
C₂: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού.

R₁: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ₁.

Στο σχήμα 1.4.1.3-4 φαίνεται το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο συμπληρωμένο με τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C₁) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (C_ε). Με τον τρόπο δηλαδή αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού (C₂ και C₃ αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C. Οι σπινθήρες Σπ₁ και Σπ₂ στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής.

Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R_1, R_2) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C_1, C_ε).

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη. Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς συχνά στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα 1.4.1.3-5.



Σχήμα 1.4.1.3-4: Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής.

α : σχηματική παράσταση

β : ισοδύναμο κύκλωμα

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας

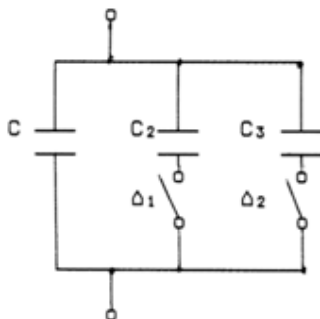
C_ε : χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

R_1 : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_1$

R_2 : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_2$



Σχήμα 1.4.1.3-5: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff).

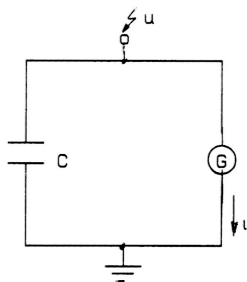
C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_2 : χωρητικότητα του υγιούς στον όγκο του μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υγιούς στην επιφάνεια του μονωτικού

Δ_1 και Δ_2 : διακόπτες, που όταν κλείνουν συμβολίζουν την διάσπαση αντίστοιχα των εσωτερικών και των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων.

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff υπάρχουν και άλλα κυκλώματα που επεξηγούν το φαινόμενο της γήρανσης. Στα κυκλώματα αυτά λαμβάνεται υπόψη η αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φυσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κλπ. Ένα άλλο μοντέλο είναι το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.4.1.3-6. Σύμφωνα με αυτό οι θέσεις διαταραχής αποδίδονται ως μία γεννήτρια μερικών εκκενώσεων G . Έτσι, όταν διεγείρεται η γεννήτρια G συμβαίνει αύξηση του δυναμικού στους ακροδέκτες της διάταξης.



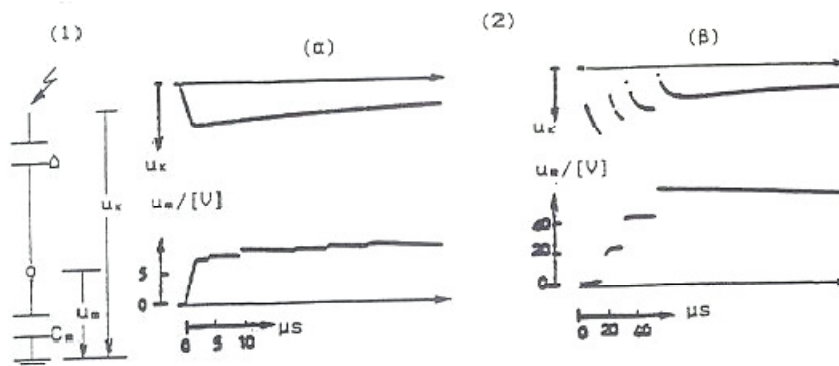
Σχήμα 1.4.1.3-6: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann.

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

G : γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

4) Παράδειγμα ερμηνείας παλμογραφημάτων των μερικών εκκενώσεων μέσω των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Στο σχήμα 1.4.1.3-7 δίνεται απλοποιημένα το κύκλωμα για τη μέτρηση των μερικών εκκενώσεων. Σύμφωνα με αυτό δοκίμια στερεών μονωτικών πάχους 1mm (Δ), κατά DIN 7735, καταπονούνται με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 μ s, υπό διάταξη ηλεκτροδίων “ακίδα-πλάκα” (με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm). Το παλμογράφημα (α) αφορά τη γήρανση του βακελίτη και το παλμογράφημα (β) τη διάτρηση του pertinax.



Σχήμα 1.4.1.3-7: Τυπικά παλμογραφήματα κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών.

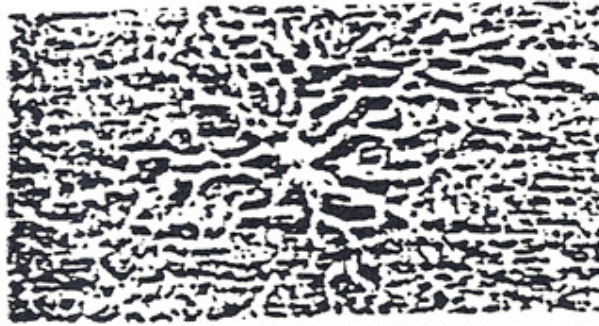
1) Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης (u_k : στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης, Δ : δοκίμιο, u_m : τάση στον πυκνωτή μέτρησης C_m).

2) Μετρήσεις με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 μ s:

(α) γήρανση: (τιμή πεδίου 1,11MV/cm, $\hat{U}_k=77,5$ kV, $C_m=210$ nF, υλικό: βακελίτης)

(β) διάτρηση: (τιμή πεδίου 1,20MV/cm, $\hat{U}_k=85$ kV, $C_m=210$ nF, υλικό: pertinax)

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι, μετά από μια τιμή $\hat{U}_k \approx 45$ kV (όπου \hat{U}_k η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται κατά τη γήρανση επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 1.4.1.3-8).



Σχήμα 1.4.1.3-8: Αλλαγή της μοριακής δομής στην επιφάνεια του μονωτικού pertinax κατά την εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη (μετά από πολλές κρούσεις 10/200μs, μέγιστης τιμής 75kV).

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

Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται ως ακολούθως:

Από το παλμογράφημα της γήρανσης (σχήμα 1.4.1.3-7α) φαίνεται ότι εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού, τα οποία προκαλούνται κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4.1.3-4, από τη σταδιακή διάσπαση διαφόρων θέσεων διαταραχής (C_1, C_e). Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι στην περίπτωση αυτή ισχύει η σχέση καταμερισμού, μεταξύ της χωρητικότητας του δοκιμίου C_δ και του πυκνωτή μέτρησης C_m :

$$u_m(t) = \frac{C_\delta + \Delta C_\delta}{C_m} u_k(t) \quad (1.4.1.3-3)$$

όπου ΔC_δ η αύξηση της χωρητικότητας, λόγω των μερικών εκκενώσεων. Ο δενδρίτης μπορεί να ερμηνευθεί 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.

1.4.1.4 Η θερμοχημική διάτρηση

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη (σχέση 1.3.5-3 και σχέση 1.3.5-4). Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως η ενέργεια εξόδου των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από το πλέγμα των μορίων είναι μικρότερη.

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

Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής και δίνεται από τη σχέση:

$$U_{\alpha} = \sqrt{\alpha \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma_0}} \quad (1.4.1.4-1)$$

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

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

1.4.1.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Οι τέσσερις βασικοί παράγοντες αποσταθεροποίησης των μορίων (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb, μερικές εκκενώσεις και θερμότητα του περιβάλλοντος), που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ονομάζονται παράγοντες γήρανσης και διάτρησης. Αυτοί, στην πράξη, συνδυάζονται με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού.

1) Ο συνδυασμός της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης

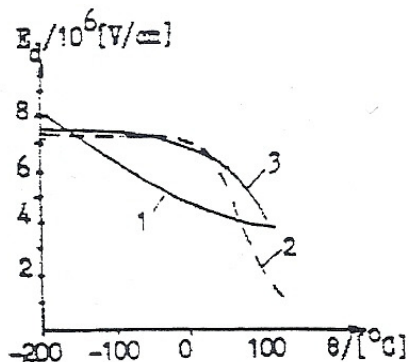
Οι διεθνείς προδιαγραφές προσδιορίζουν τα ανώτατα όρια θέρμανσης των ηλεκτρολογικών κατασκευών υψηλής τάσης, βάση των οποίων καθορίζεται το ονομαστικό ρεύμα. Όταν όμως συντρέχουν λόγοι μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής από άλλους παράγοντες, η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως το ρόλο τους, γιατί:

- 1) Αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα (σχέση 1.3.4-1).
- 2) Διευκολύνεται η εξάσκηση δυνάμεων Coulomb, γιατί οι δεσμοί στο πλέγμα των μορίων των πολυμερών υλικών γίνονται ασθενέστεροι.
- 3) Ενισχύεται ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων, λόγω μεγαλύτερης ευκινησίας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κυρίως στις φυσαλίδες αερίου (σχέση 1.3.4-2).

Έτσι αυξάνει διαχρονικά η t_{gd} και μειώνεται η διάρκεια ζωής του στερεού μονωτικού. Η καταπόνηση, που υφίσταται το μονωτικό, λόγω της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου, φαίνεται ότι προκαλεί μείωση της τάσης για τη θερμική διάτρηση, λόγω αύξησης της αγωγιμότητάς του (σχήμα 1.4.1.1-2). Επίσης, η αύξηση της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου φαίνεται ότι προκαλεί μείωση και της τιμής

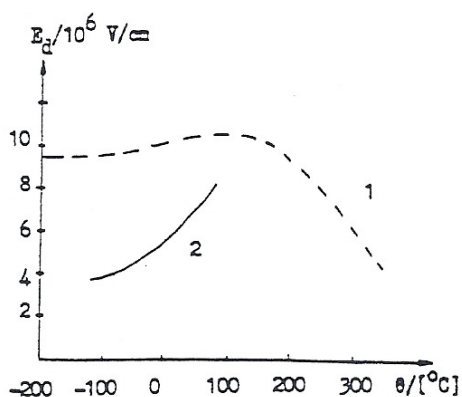
της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση, καθώς μειώνεται το μέσο ελεύθερο μήκος (λ) των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

Στο σχήμα 1.4.1.5-1 δίνονται παραδείγματα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής διαφόρων μονωτικών υλικών, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου.



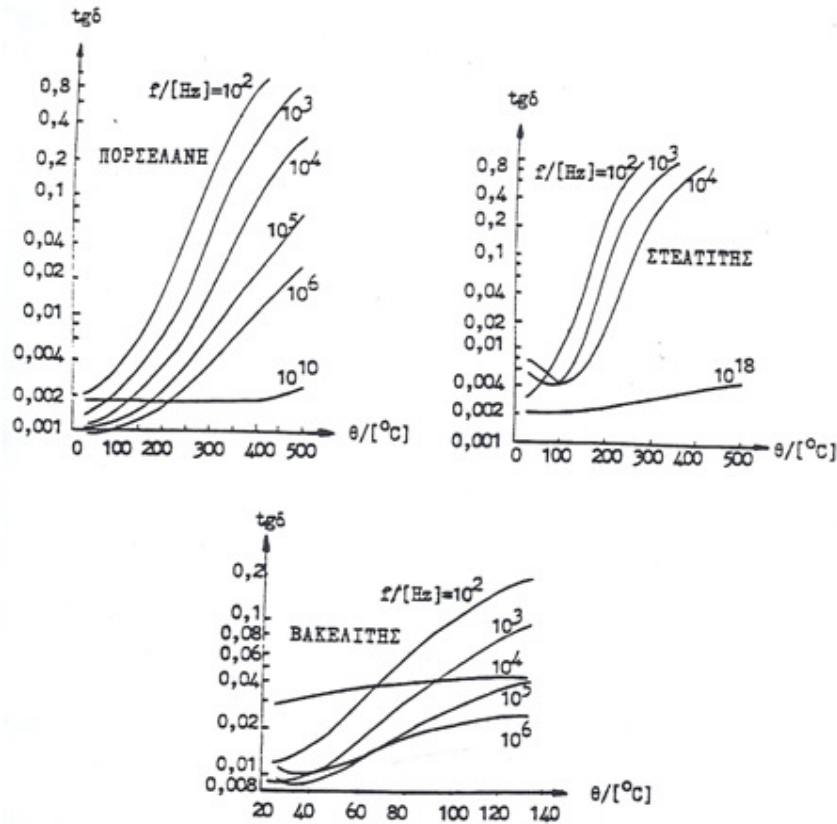
Σχήμα 1.4.1.5-1: Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής σε στερεά μονωτικά κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου.
1: Βακελίτης, 2: Πολυαιθυλένιο, 3: Πολυστετυρόλη

Υπάρχουν όμως περιπτώσεις στερεών μονωτικών υλικών όπου η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος δεν οδηγεί σε μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, τουλάχιστον σε κάποια περιοχή τους (σχήμα 1.4.1.5-2). Μία ερμηνεία για αυτό το φαινόμενο στη μίκα (Glimmer) και το χαλαζία (Quarz) μπορεί να αποδοθεί σε αλληλοεξουδετέρωση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Αποτέλεσμα αυτής της εξουδετέρωσης είναι η μείωση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και κατά συνέπεια η αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής.



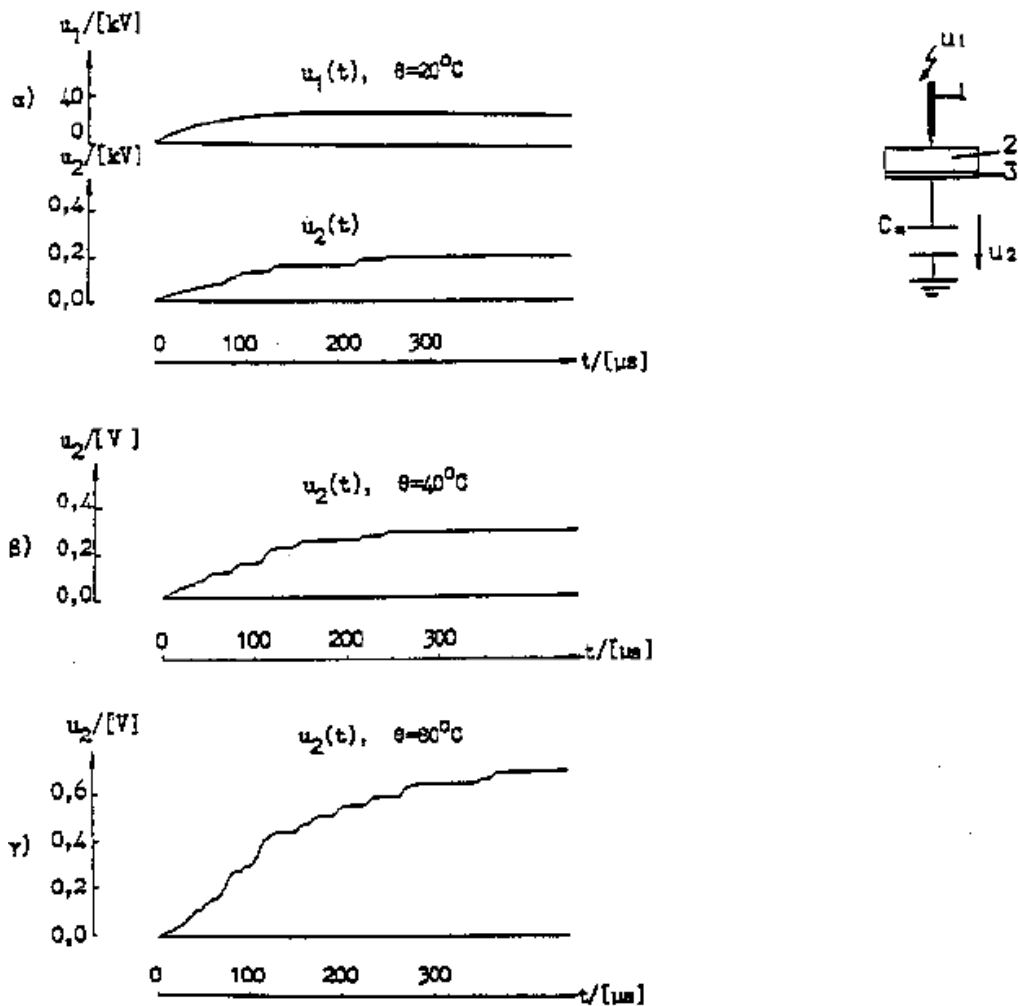
Σχήμα 1.4.1.5-2: Διηλεκτρική αντοχή της μίκας (1) και του κρυστάλλου χαλαζία (2) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στο σχήμα 1.4.1.5-3 φαίνεται η αύξηση των συνολικών απωλειών με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η μείωση των απωλειών που παρατηρείται σε κάποια περιοχή ορισμένων χαρακτηριστικών μπορεί να αποδοθεί σε επανασύνδεση των παραγόμενων φορέων.



Σχήμα 1.4.1.5-3: $\text{tg}\delta=f(\theta)$ σε διάφορα στερεά μονωτικά.

Μετρήσεις με κρουστικές τάσεις σε στερεά μονωτικά, κατά την καταπόνησή τους σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (20°C , 40°C και 80°C), οδηγούν επίσης στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας (και επομένως μείωση της διηλεκτρικής αντοχής) είναι δεδομένη, όσο αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτό φαίνεται πολύ παραστατικά στα παλμογραφήματα του σχήματος 1.4.1.5-4, όπου οι μερικές εκκενώσεις γίνονται ισχυρότερες όταν αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 1.4.1.5-4: Αύξηση των μερικών εκκενώσεων λόγω μεγαλύτερης θερμοκρασίας 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: $\hat{U}_k = 28,8 \text{ kV}$.

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.

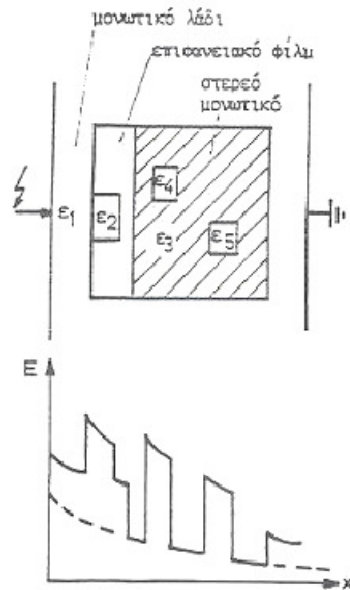
2) Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης

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

α) Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule

Στην παράγραφο 1.4.1.1 αναφέρθηκε ότι η θερμική διάτρηση αρχίζει σε μία θέση του μονωτικού υλικού, όπου λόγω κάποιας ανομοιογένειας, υπάρχει αύξηση της αγωγιμότητας. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχει αύξηση της αγωγιμότητας και λόγω των μερικών εκκενώσεων στην ανομοιογένεια του υλικού.

Στο σχήμα 1.4.1.5-5 δίνεται η χαρακτηριστική $E=f(x)$ ενός στερεού μονωτικού, όταν αυτό καταλαμβάνει όλο το χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων και δεν έχει ανομοιογένειες στον όγκο του, συγκριτικά με εκείνη του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού με περιβάλλον μέσο το μονωτικό λάδι. Παρατηρούμε ότι στις θέσεις ανομοιογένειας, όπου η αγωγιμότητα είναι αυξημένη, η πεδιακή ένταση έχει μεγαλύτερες τιμές από ότι αν δεν υπάρχουν ανομοιογένειες.



Σχήμα 1.4.1.5-5: Αύξηση της πεδιακής έντασης στις θέσεις ανομοιογενειών του στερεού μονωτικού
 ϵ_1 ως ϵ_5 : διηλεκτρικές σταθερές
 ϵ_1 : μονωτικό λάδι
 ϵ_2 : ανομοιογένειες στο επιφανειακό φιλμ ($\epsilon_1 < \epsilon_2$)
 ϵ_3 : στερεό μονωτικό ($\epsilon_3 > \epsilon_1$)
 ϵ_4, ϵ_5 : ανομοιογένειες στον όγκο του στερεού μονωτικού ($\epsilon_3 > \epsilon_4$ και $\epsilon_3 > \epsilon_5$)
 - - -: Χαρακτηριστική του στερεού μονωτικού όταν καταλαμβάνει όλο το χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων και δεν έχει θέσεις διαταραχής στον όγκο του.
 - : Χαρακτηριστική με θέσεις διαταραχής και περιβάλλον το μονωτικό λάδι

Για το ανομοιογενές στερεό μονωτικό έχουμε επομένως κατά τη σχέση 1.4.1.1-3:

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1-\delta E)^2 d} = 2\pi r k d \theta + C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.4.1.5-1)$$

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

$$\frac{U_{\theta e}^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1-\delta E)^2} = 2\pi r k d \theta \quad (1.4.1.5-2)$$

$$\text{ή: } \theta = \frac{U_{\theta e}^2 \sigma_0 \beta e^{\beta\theta} A}{2\pi r^2 k d (1-\delta E)^2} \quad (1.4.1.5-3)$$

Η οριακή τιμή δίνεται από τη διαφορίση της παραπάνω σχέσης ως προς θ :

$$1 = \frac{U_{\theta\varepsilon}^2 \sigma_0 \beta^2 e^{\beta\theta} A}{2\pi r^2 \kappa d (1-\delta E)^2} \quad (1.4.1.5-4)$$

Από τις σχέσεις 1.4.1.5-3 και 1.4.1.5-4 φαίνεται ότι $\beta\theta=1$ και επομένως η οριακή τιμή της τάσης διάσπασης είναι:

$$U_{\theta\varepsilon} = d(1-\delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.4.1.5-5)$$

Σε συνδυασμό με τη σχέση 1.4.1.1-8, η μείωση της τάσης για τη θερμική διάτρηση (ΔU_1), λόγω συμμετοχής των μερικών εκκενώσεων είναι:

$$\Delta U_1 = U_{\theta} - U_{\theta\varepsilon} = \delta E d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.4.1.5-6)$$

β) Η μείωση της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση, λόγω εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων

Αν πάρει κανείς υπόψη στη σχέση 1.4.1.2-1 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις στη θέση όπου εκδηλώνεται η μερική εκκένωση, τότε με την παραδοχή ότι η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι πρακτικά μηδενική ισχύει:

$$\frac{u^2 \sigma A}{(1-\delta E)^2 d} = C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.4.1.5-7)$$

και για τη διάτρηση στην τιμή $U_{\eta\varepsilon}$ (λόγω συνδυασμού μεταξύ των δυνάμεων Coulomb και των μερικών εκκενώσεων):

$$U_{\eta\varepsilon} = (1-\delta E) \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T \delta}} \quad (1.4.1.5-8)$$

Η τάση διάτρησης μειώνεται δηλαδή κατά την τιμή ΔU_2 :

$$\Delta U_2 = U_{\eta} - U_{\eta\varepsilon} = \delta E \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T \delta}} \quad (1.4.1.5-9)$$

γ) Η μείωση της θερμικής τάσης ανατροπής από τις μερικές εκκενώσεις

Αν λάβει κανείς υπόψη στη σχέση 1.4.1.4-1 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων (σχέση 1.3.5-4), τότε η θερμική τάση ανατροπής $U_{\kappa\varepsilon}$ (λόγω του συνδυασμού της θερμότητας του περιβάλλοντος με τις μερικές εκκενώσεις) θα είναι:

$$U_{xe}=(1-\delta E)\sqrt{\frac{\alpha\kappa\theta}{\sigma_0}} \quad (1.4.1.5-10)$$

Για τη μείωση της θερμικής τάσης ανατροπής λόγω μερικών εκκενώσεων ισχύει:

$$\Delta U_3=U_x-U_{xe}=\delta E\sqrt{\frac{\alpha\kappa\theta}{\sigma_0}} \quad (1.4.1.5-11)$$

δ) Η διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων (συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule και τις δυνάμεις Coulomb)

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

- 1) Το θερμικό φαινόμενο (μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις).
- 2) Την ηλεκτρομηχανική διάτρηση κατά την τελευταία κρούση m στην τιμή \hat{U}_κ ή πολύ πλησίον αυτής.

Το θερμικό φαινόμενο θεωρείται ότι είναι μια τεχνητή γήρανση (βλέπετε παράγραφο 1.4.1.3,2) μέχρι προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω του οποίου το υλικό απέκτησε σε μια περιοχή του (όπου εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις) την ειδική αγωγιμότητα:

$$\sigma=\sigma_0\cdot e^{\beta m\theta m} \quad (1.4.1.5-12)$$

όπου θ_m η θερμοκρασία και β_m ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτώνται από την τιμή \hat{U}_κ , τη συχνότητα των κρούσεων (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 εις βάρος της διηλεκτρικής αντοχής του, ώστε τελικά να πρόκειται για ένα "άλλο" μονωτικό, το οποίο πλέον διασπάται ηλεκτρομηχανικά στην $m^{\text{η}}$ κρούση (όπως στην περίπτωση β που αναφέρθηκε παραπάνω). Κατά αντιστοιχία επομένως προς τη σχέση 1.4.1.2-1 ισχύει:

$$u^2 \frac{\sigma_0 e^{\beta m\theta m} A}{(1-\delta E)^2} \frac{d}{a} = C_m \frac{d\theta}{dt} \quad (1.4.1.5-13)$$

(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 \hat{U}_κ έχουμε (αντίστοιχα με τη σχέση 1.4.1.1-2):

$$\hat{U}_\kappa=(1-\delta E)\sqrt{d \frac{C_m\theta_m}{\sigma AT_s}} \quad (1.4.1.5-14)$$

όπου T_s ο χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης.

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

$$\Delta u = \delta E \sqrt{d \frac{c_m \theta_m}{\sigma A T_s}} \quad (1.4.1.5-15)$$

Σύμφωνα με την προηγούμενη θεωρία φαίνεται, ότι μέχρι την $m-1$ 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 :

$$(m-1)\alpha \hat{U}_\kappa^2 + \gamma \hat{U}_\kappa^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai} + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{\theta i}}{(1-\delta E)^2} + \beta \hat{U}_\kappa^2 \quad (1.4.1.5-16)$$

όπου :

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

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

$\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai}$: η θερμότητα, που μεταδίδεται μέχρι προ της εφαρμογής της $m_{\text{ης}}$ κρούσης,

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

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

Επειδή κατά τη διάτρηση είναι:

$$\frac{W_{\theta m}}{(1-\delta E)^2} + \beta \hat{U}_\kappa^2 = \gamma \hat{U}_\kappa^2 \quad (1.4.1.5-17)$$

από τη σχέση 1.4.1.5-16 έπεται ότι :

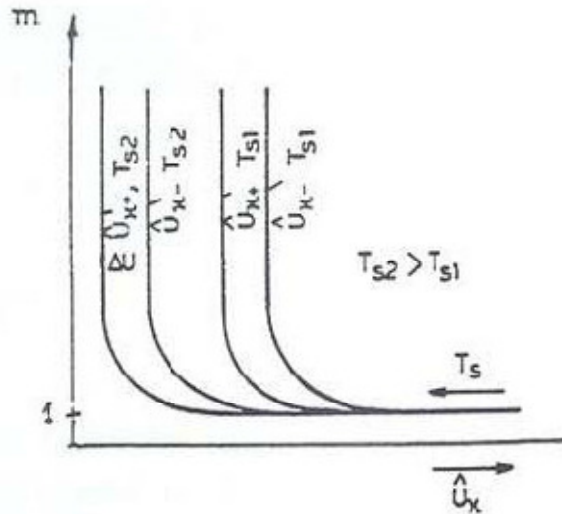
$$(m-1)\alpha \hat{U}_\kappa^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai} + \sum_{i=1}^{i=m-1} \frac{W_{\theta i}}{(1-\delta E)^2} \quad (1.4.1.5-18)$$

$$\text{ή } m=1 + \frac{\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai}}{\alpha \hat{U}_\kappa^2} + \frac{\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{\theta i}}{(1-\delta E)^2 \alpha \hat{U}_\kappa^2}$$

$$\text{δηλαδή : } m=1 + \frac{\alpha_1}{\hat{U}_\kappa^2} + \frac{\alpha_2}{\hat{U}_\kappa^2} = 1 + \frac{\alpha_3}{\hat{U}_\kappa^2} \quad (1.4.1.5-19)$$

όπου α_1 , α_2 και α_3 οι συντελεστές, που εξαρτώνται από την τιμή \hat{U}_κ , τη συχνότητα των κρούσεων, τη μορφή της τάσης και το πάχος του υλικού (το οποίο είναι καθοριστικό για την τιμή της πεδιακής έντασης). Αν λάβει κανείς υπόψη τη σημασία

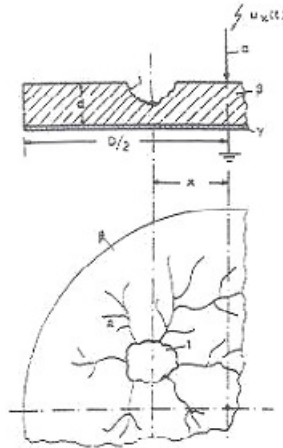
της πολικότητας της ακίδας και τη μείωση του χρόνου διάσπασης με την αύξηση της διάρκειας του μετώπου της κρουστικής τάσης (βλέπετε σχέση 1.4.1.2-3), τότε οι χαρακτηριστικές $m=f(|\hat{U}_k|, T_s)$ έχουν τη μορφή που δίνεται στο σχήμα 1.4.1.5-6.



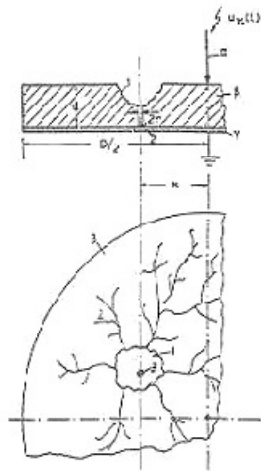
Σχήμα 1.4.1.5-6: Χαρακτηριστικές $m=f(|\hat{U}_k|, T_s)$
 m :Αριθμός κρούσεων κατά τη διάτρηση
 T_s :Χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης
 \hat{U}_k :Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

Από πειράματα που έχουν γίνει με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs και 10/200μs, σε τιμές \hat{U}_k πλησίον της περιοχής διάτρησης (πίνακας 1.4.1.2-1), έχει διαπιστωθεί ότι, εκτός από τη θερμική καταπόνηση, δημιουργούνται και μικρά θραύσματα στη θέση προσεχούς διάσπασης. Μπορεί κανείς να υποθέσει ότι σε αυτή την περίπτωση συμμετέχουν και οι δυνάμεις Coulomb στην τεχνητή γήρανση του υλικού (από κρούση σε κρούση). Η εικόνα που παρουσιάζει το δοκίμιο κατά τη γήρανση δίνεται στο σχήμα 1.4.1.5-7 και ονομάζεται **εικόνα επιφανειακών διαταραχών**. Πρόκειται για μία μόνιμη παραμόρφωση του υλικού, η οποία σχετίζεται με την εκδήλωση φωτεινής ακτινοβολίας (υπό μορφή δενδρίτη). Τα σπήλαια και ο κρατήρας έχουν αποδοθεί στη θερμική καταπόνηση του μονωτικού, γιατί φαίνεται ότι είναι αποτέλεσμα κάποιας τήξης του υλικού στα ίχνη του επιφανειακού δενδρίτη. Τα θραύσματα, που προαναφέρθηκαν, δημιουργούνται κυρίως στην περιοχή του κρατήρα, όπου θα συμβεί και η διάτρηση. Πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχουν δείξει ότι η εικόνα επιφανειακών διαταραχών συρρικνώνεται όσο αυξάνει η διάρκεια μετώπου της κρουστικής τάσης (υπό σταθερή τιμή \hat{U}_k η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών είναι π.χ. μεγαλύτερη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση της μορφής 1,2/50μs, ως προς εκείνη με κρουστική τάση 10/200μs). Έχει επίσης διαπιστωθεί, ότι η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών περιορίζεται, όσο μειώνεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων.

Όταν συμβεί η διάτρηση μετά από m κρούσεις, τότε παρατηρεί κανείς μία τρύπα διάτρησης (με διάμετρο μικρότερη από 0,1mm), ως προέκταση του κρατήρα (σχήμα 1.4.1.5-8).



Σχήμα 1.4.1.5-7: Παράδειγμα εικόνας επιφανειακών διαταραχών κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$ για τιμή \hat{U}_k πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση.
 α: ακίδα ($R \approx 1\text{mm}$)
 β: στερεό μονωτικό
 γ: πλάκα
 1: κρατήρας
 2: σπήλαιο

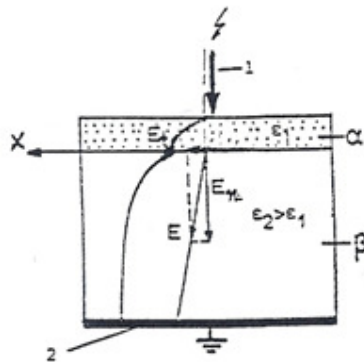


Σχήμα 1.4.1.5-8: Παράδειγμα εικόνας διάτρησης μετά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$ για τιμή \hat{U}_k πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση.
 α: ακίδα ($R=1\text{mm}$)
 β: στερεό μονωτικό
 γ: πλάκα
 1: κρατήρας
 2: σπήλαιο
 3: οπή διάτρησης

Όπως φαίνεται από τα σχήματα 1.4.5.1-7 και 1.4.1.5-8 ο κρατήρας και η τρύπα διάτρησης 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 μόνο με μια κρούση. Αυτό οφείλεται:

- 1) στη στατιστικότητα του φαινομένου δηλαδή στο ότι είναι στατιστικά αδύνατο να βρίσκεται ακριβώς κάτω από την ακίδα η επικρατέστερη θέση της διαταραχής, και
- 2) σε πολύ μικρή απόσταση από την ακίδα μετακινούνται, υπό την επίδραση της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης οι ετερόνυμοι προς αυτή ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς του επιφανειακού φιλμ, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρακτικά επέκταση του ίχνους της ακίδας (σχήμα 1.4.5.1-9).

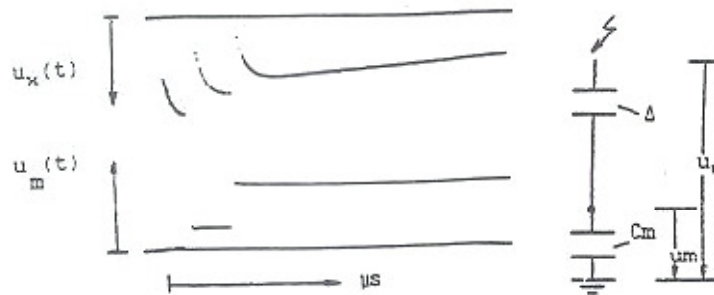
Η παραπάνω παρατήρηση για τη θέση της τρύπας διάτρησης ισχύει επίσης και κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις χειρισμών (250/2500μs), καθώς και εκείνη με εναλλασσόμενη ή συνεχή τάση. Από έρευνες που έχουν διεξαχθεί με τις παραπάνω μορφές τάσης (με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm ή 1mm), δεν έχει διαπιστωθεί κατά την τεχνητή γήρανση πολυμερών στερεών μονωτικών με πάχος 1mm ή 2mm η εκδήλωση κρατήρα ή σπηλαίων, ούτε έχει παρατηρηθεί η εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη. Η διαφορά αυτή ως προς την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών, που παρουσιάζεται κατά την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs και 10/200μs σε συνδυασμό με μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών, έχει οδηγήσει στο διαχωρισμό μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης στο στερεό μονωτικό τάσης.



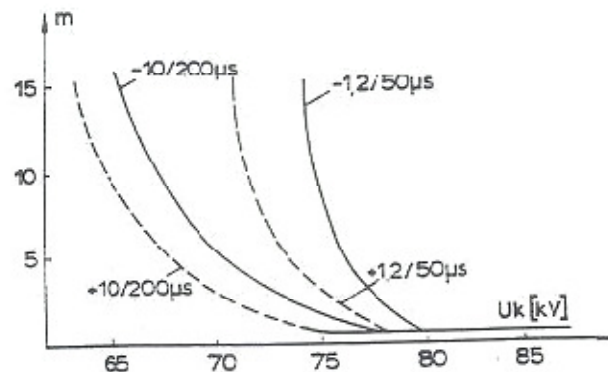
Σχήμα 1.4.1.5.-9: Επεξήγηση της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης στον καθορισμό του κρατήρα και γενικότερα της θέσης διάτρησης, κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50 μs και 10/200 μs
 1: ακίδα
 2: πλάκα
 α) επιφανειακό φιλμ
 β) στερεό μονωτικό
 ● : θέση όπου εκδηλώνεται ο κρατήρας (και γενικότερα η διάτρηση)

Στο σχήμα 1.4.1.5-10 δίνεται ένα παράδειγμα διάτρησης του βακελίτη πάχους 1mm σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό διάταξη “ακίδα-πλάκα”, κατά την καταπόνησή του με κρουστική τάση της μορφής 10/200μs, με μέγιστη τιμή πλησίον

της τιμών για τη διάτρηση βάσει του πίνακα 1.4.1.2-1. Παρατηρεί κανείς ότι το παλμογράφημα αυτό είναι ίδιας μορφής με εκείνο της ηλεκτρομηχανικής διάτρησης του σχήματος 1.4.1.3-7,β. Επίσης, οι πειραματικές χαρακτηριστικές του σχήματος 1.4.1.5-11 για το στερεό μονωτικό pertinax ερμηνεύονται ικανοποιητικά από τις θεωρητικές του σχήματος 1.4.1.5-6.



Σχήμα 1.4.1.5-10: Διάτρηση του βακελίτη (πάχους 1mm) με κρουστική τάση της μορφής 10/200μs.
 $\hat{U}_k = 72\text{kV}$



Σχήμα 1.4.1.5-11: $m=f(|\hat{U}_k|, T_s)$ για το στερεό μονωτικό pertinax
 Ηλεκτρόδια: ακίδα-πλάκα
 Δοκίμιο: pertinax πάχους 1mm εντός μονωτικού ελαίου
 m: αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση
 +: θετική πολικότητα της ακίδας
 -: αρνητική πολικότητα της ακίδας

3) Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Το αποτέλεσμα του συνδυασμού των τεσσάρων παραγόντων γήρανσης και διάτρησης εξαρτάται από το πώς αυτοί εκδηλώνονται διαχρονικά.

Αν θεωρηθεί ότι πρόκειται για γήρανση του υλικού, τότε η καταπόνηση είναι κυρίως θερμική, οπότε από τις σχέσεις 1.4.1.1-3 και 1.3.4-2 έχουμε:

$$\frac{u^2 A}{d} \frac{e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2} = 2\pi r \cdot d \cdot \kappa + C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.4.1.5-20)$$

όπου u η στιγμιαία τιμή της τάσης για τη διάτρηση και θ η διαφορά θερμοκρασίας ως προς το περιβάλλον. Από την παραπάνω σχέση και τη σχέση 1.4.1.1-8, ο χρόνος διάτρησης είναι:

$$t = \frac{C_0 \beta}{2\pi r \cdot d \cdot \kappa} \int \frac{d\theta}{\left(\frac{U}{U_\theta}\right)^2 e^{\beta\theta} - \beta\theta} \quad (1.4.1.5-21)$$

Αν θεωρηθεί ότι λόγω προηγούμενης γήρανσης, συμβαίνει τελικά η διάτρηση για $U > U_\theta$ (ηλεκτρική διάτρηση) και ότι:

$$\beta\theta \ll \left(\frac{U}{U_\theta}\right)^2 e^{\beta\theta-1}$$

τότε, από τη σχέση 1.4.1.5-21 έχουμε:

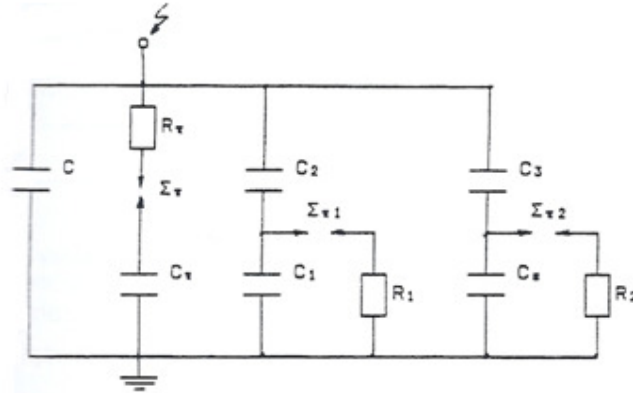
$$t \approx \frac{C_0 e}{2\pi r \cdot d \cdot \kappa \cdot \beta} \cdot \left(\frac{U_\theta}{U}\right)^2 \quad (1.4.1.5-22)$$

$$\text{ή: } t \approx a/U^2 \quad (1.4.1.5-23)$$

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 1.4.1.5-10 για τη διάτρηση μετά από ένα αριθμό κρούσεων (βλέπετε χαρακτηριστικές των σχημάτων 1.4.1.5-6 και 1.4.1.5-11) φαίνεται ότι εναρμονίζεται με τη σχέση 1.4.1.5-23, 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 1.4.1.5-12). 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 $\Sigma\pi$ και την αντίσταση του τόξου R_π (υποτίθεται ότι ο $\Sigma\pi$ 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 ότι 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 1.4.1.5-13).



Σχήμα 1.4.1.5-12: Βελτίωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff, ώστε να αποδίδεται από αυτό η γήρανση και η ηλεκτρομηχανική διάτρηση.

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_1 : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών (κυρίως φυσαλίδες αερίων).

C_2 : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του στερεού μονωτικού.

C_ϵ : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών

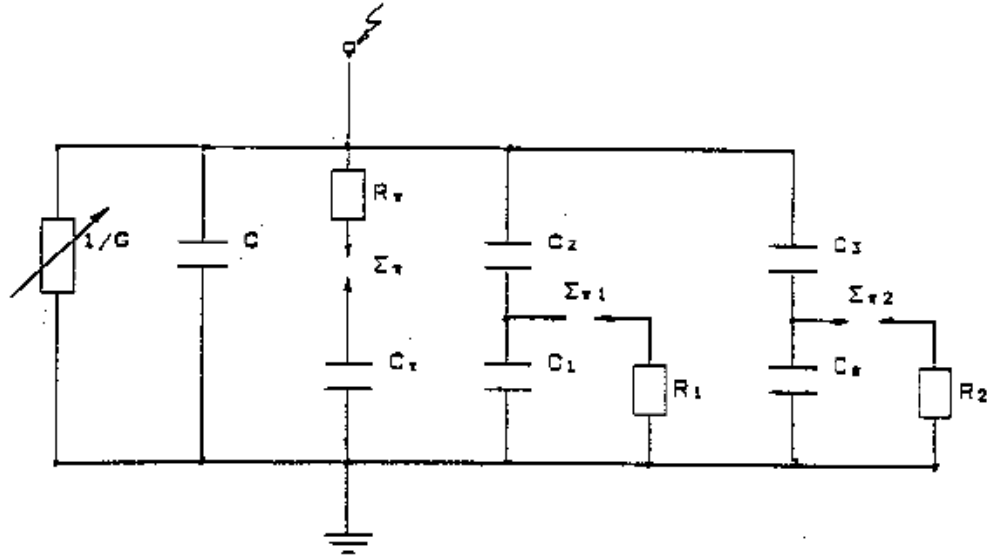
C_3 : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του επιφανειακού φιλμ.

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).



Σχήμα 1.4.1.5-13: 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.

C_ε: 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 Σπ₁

R₂: Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ₂

R_π, Σπ: Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του C_π (R_π, αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ).

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

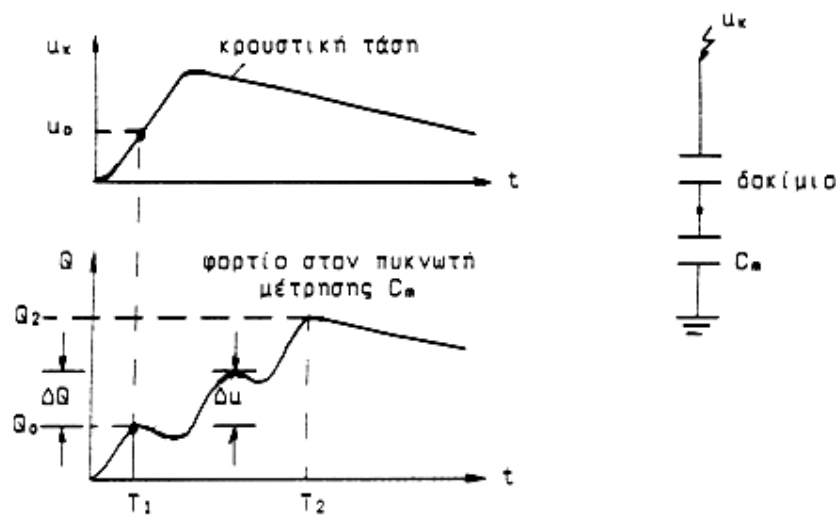
Στον πίνακα 1.4.1.5-1 δίνονται συνοπτικά οι βασικές περιπτώσεις συνδυασμού των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης, που εξετάστηκαν στην παράγραφο αυτή. Οι θεωρητικές σχέσεις του πίνακα 1.4.1.5-1 δε δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού της τάσης διάτρησης (γιατί περιλαμβάνουν αρκετές άγνωστες τιμές, που πρέπει 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.

<i>α/α</i>	<i>Παράγοντες που συμμετέχουν στην αλλαγή της μοριακής δομής</i>	<i>Θεμελιώδεις σχέσεις</i>	<i>Οριακή τιμή της τάσης για τη διάτρηση</i>
1	Συνδυασμός της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης	Η θερμότητα του περιβάλλοντος ενισχύει όλους τους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης	
2	Μερικές εκκενώσεις και απώλειες Joule	$1) \sigma = \frac{\sigma_0 e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2}$ $2) \frac{\sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1-\delta E)^2 d} = \kappa 2\pi r d\theta$	$u_{\theta\epsilon} = d(1-\delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0}}$ <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση:</p> $\Delta u_1 = \delta dE \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0}})$
3	Μερικές εκκενώσεις και δυνάμεις Coulomb	$1) \sigma = \frac{\sigma_0 e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2}$ $2) \frac{u^2 \sigma A}{(1-\delta E)^2 d} = C_0 \frac{d\theta}{dt}$	$U_{\eta\epsilon} = (1-\delta E) \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_\delta}}$ <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση:</p> $\Delta u_2 = \delta E \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_\delta}}$
4	Μερικές εκκενώσεις και θερμοκρασία περιβάλλοντος	$1) u_a = \sqrt{\alpha \frac{\kappa \theta}{\sigma}}$ $2) \sigma = \frac{\sigma_0 e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2}$	$U_{\alpha\epsilon} = (1-\delta E) \sqrt{\alpha \frac{\kappa \theta}{\sigma}}$ <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση:</p> $\Delta u_3 = \delta E \sqrt{\frac{\kappa \theta}{\sigma_0}}$
5	Συνδυασμός των τεσσάρων* βασικών παραγόντων διάτρησης	$u^2 e^{\beta\theta} A / d(1-\delta E)^2 =$ $2\pi r d \kappa \theta + C_0 \left(\frac{d\theta}{dt} \right)$	Εξαρτάται κυρίως από τον παράγοντα που υπερισχύει

Πίνακας 1.4.1.5-1: Βασικές σχέσεις μίας θεωρητικής ερμηνείας για τη γήρανση και τη διάτρηση των στερεών μονωτικών.
*: Μερικές εκκενώσεις, απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

1.4.1.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων των κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως π.χ. στο σχήμα 1.4.1.6-1 για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Ομοίως, μπορεί κανείς να καθορίσει μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση με άλλες μορφές τάσεων, καθώς και με άλλα τετράπολα μέτρησης (συνήθως ωμική αντίσταση, αντί του πυκνωτή, ή συνδυασμός των δύο αυτών στοιχείων μέτρησης, σχήμα 1.4.1.6-2). Στο σχήμα π.χ. 1.4.1.6-3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



Σχήμα 1.4.1.6-1: 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.

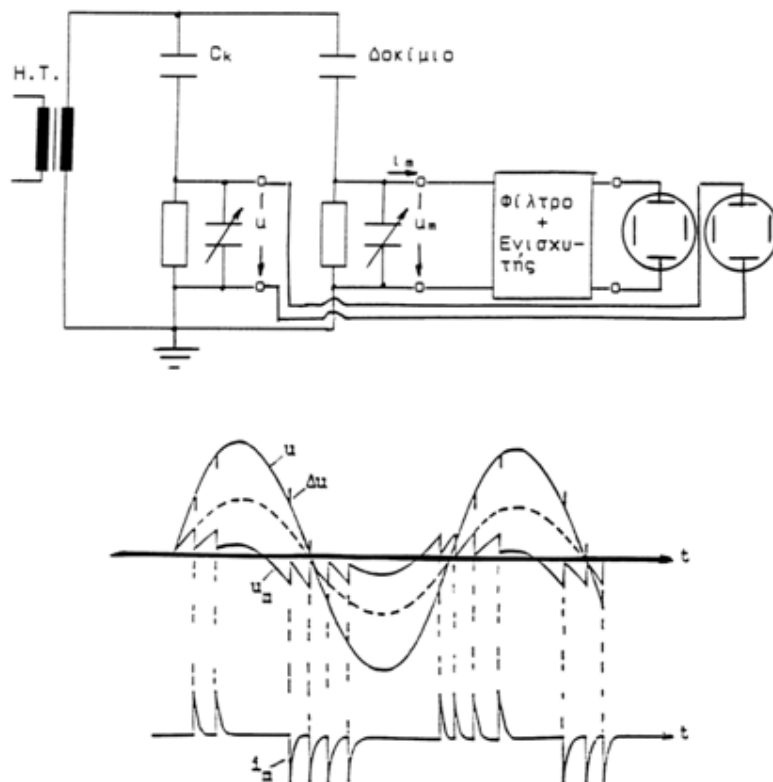
Q_2 : Φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

u_k : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

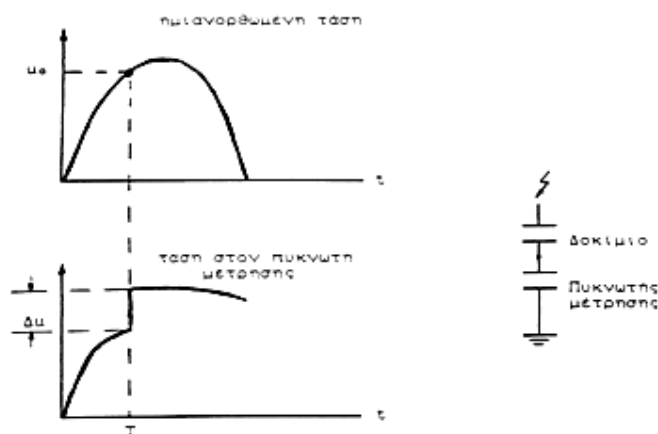
u_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).

Δu : Άλμα δυναμικού.

ΔQ : Αύξηση φορτίου.

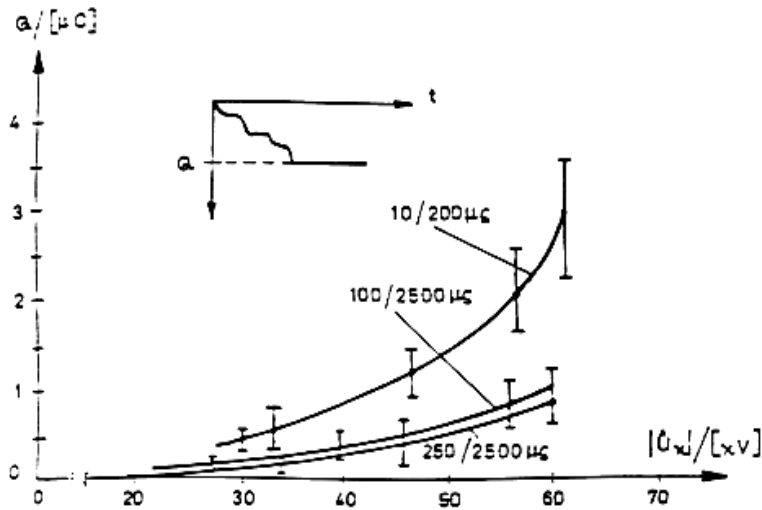


Σχήμα 1.4.1.6-2: Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω “ωμικού-χωρητικού” τετραπόλου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50Hz.
H.T.: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.
C_k: Πυκνωτής υψηλής τάσης.
u: Στιγμαία τιμή της εναλλασσόμενης τάσης (η οποία μετράται με ένα ωμικό-χωρητικό τετράπολο).
u_m: Στιγμαία τιμή της τάσης στο ωμικό-χωρητικό τετράπολο μέτρησης των μερικών εκκενώσεων.
i_m: Στιγμαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων.
Δu: Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων.

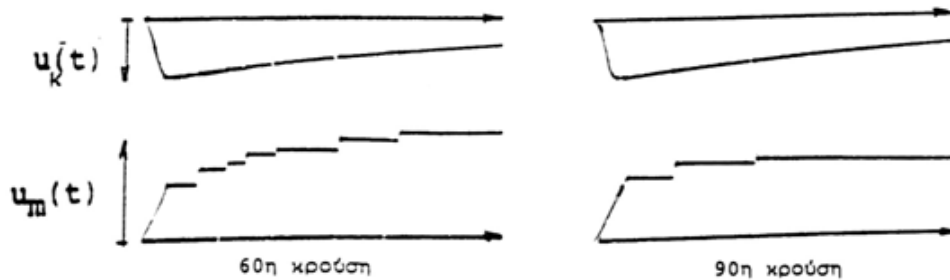


Σχήμα 1.4.1.6-3: Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.
 T: Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.
 U₀: Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμαία τιμή).
 Δu: άλμα δυναμικού.

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως: η χαρακτηριστική $Q=f(|\bar{U}_k|)$, η χαρακτηριστική $u_0=f(|\bar{U}_k|)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με τη μέγιστη τιμή της τάσης, κλπ. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q=f(\bar{U}_k)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 1.4.1.6-4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs ή 10/200μs, όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Στο σχήμα 1.4.1.6-4 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90^η κρούση, ως προς την 60^η. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών, εύκολα διαπιστώνεται, ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου Q στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις (θραύσματα) στην επιφάνεια του μονωτικού.



Σχήμα 1.4.1.6-4: Χαρακτηριστική $Q_2=f(\hat{U}_\kappa)$ για τον βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs. Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι. Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα. C_m : 1000nF.



Σχήμα 1.4.1.6-5: Άλματα δυναμικού κατά την 60^η και την 90^η κρούση στο pertinax (πάχους 2mm).
Μορφή τάσης: 1,2/50μs ($\hat{U}_\kappa=99,7kV$).
Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.
Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα.
 C_m : 210nF.

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

- 1) οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή μηδενισμού της τάσης, ή γενικότερα στην περιοχή της μέγιστης χρονικής μεταβολής της.

2) οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή, όπου δε μηδενίζεται η τάση.

Επομένως, για καταπονήσεις με κρουστικές τάσεις ισχύει 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.

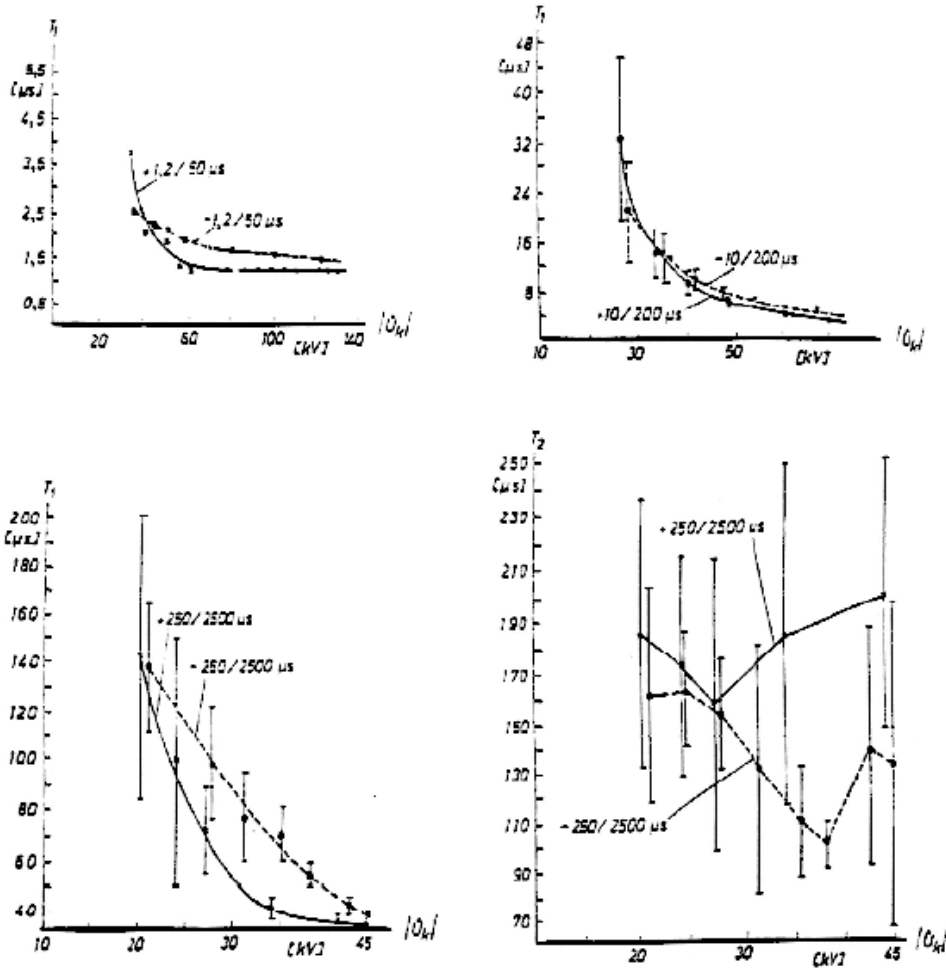
Μία πειραματική προσέγγιση του παραπάνω διαχωρισμού, μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, έχει δοθεί από παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού σε στερεά μονωτικά, με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών (σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα), που συνδυάστηκαν με ταυτόχρονες οπτικές παρατηρήσεις της εικόνας των διαταραχών κατά το σχήμα 1.4.1.5-7. Στον πίνακα 1.4.1.6-1 δίνονται τα 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. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (1,2/50μs) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

Μορφή τάσης σε μs	Δενδρίτης	Εικόνα επιφανειακών διαταραχών	Άλματα Δυναμικού	Συμπεράσματα για τις μερικές εκκενώσεις
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 1.4.1.6-1: Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ της 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 $T_1=f(|\bar{U}_k|)$ και $T_2=f(|\bar{U}_k|)$ σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών. Στο παρακάτω 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 1.4.1.6-1 για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.

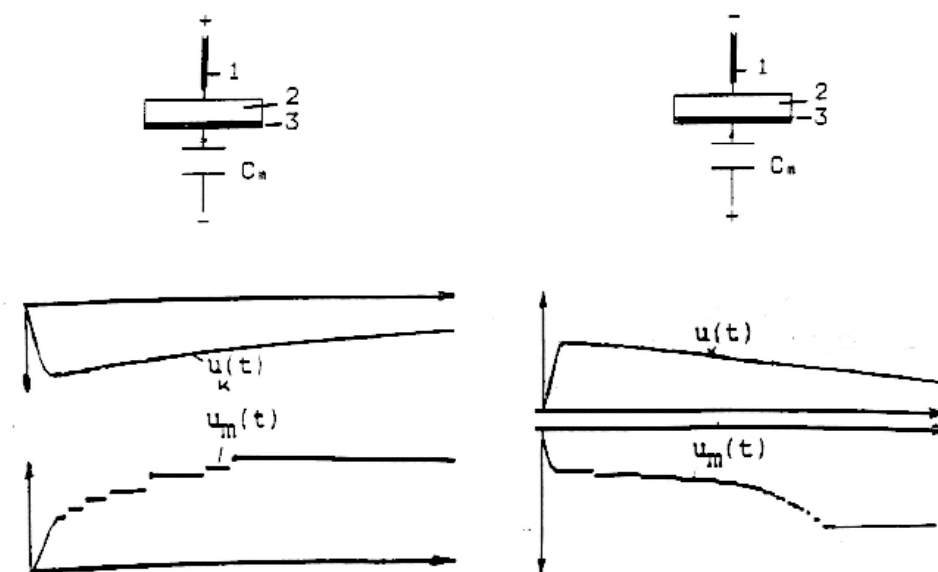


Σχήμα 1.4.1.6-6 : 1) Χαρακτηριστική $T_1=f(|\hat{U}_{κ}|)$ κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2mm και $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$) με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, 10/200μs και 250/2500μs.
 2) Χαρακτηριστική $T_2=f(|\hat{U}_{κ}|)$ κατά την καταπόνηση των υλικών αυτών με κρουστικές τάσεις 250/2500μs.
 Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα.
 I: 2 φορές η τυπική απόκλιση.

1.4.1.7 Το φαινόμενο της πολικότητας σε πολυμερή στερεά μονωτικά κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων

Σύμφωνα με το φαινόμενο της πολικότητας, η τιμή της τάσης για τη διάσπαση εξαρτάται από την πολικότητα της ακίδας. Ισχύει ο κανόνας ότι η τάση διάσπασης έχει μικρότερη τιμή κατά τη θετική πολικότητα της ακίδας, ως προς την αρνητική πολικότητά της. Μία ερμηνεία του φαινομένου αυτού μπορεί να δοθεί ως ακολούθως: Ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας συγκεντρώνονται μπροστά της ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς αντίθετης πολικότητας. Επειδή όμως οι θετικοί φορείς είναι περισσότερο δυσκίνητοι από τους αρνητικούς και επομένως εξουδετερώνονται δυσκολότερα, στην περίπτωση της αρνητικής ακίδας απαιτείται μεγαλύτερη τάση για τη διάσπαση. Η συγκέντρωση γενικά αυτή των δυσκίνητων θετικών ιόντων προ της ακίδας φαίνεται ότι είναι ο λόγος της μικρότερης τιμής του αρχικού πεδίου, ως προς εκείνη κατά τη θετική πολικότητα.

Από τη μέση καμπύλη των χαρακτηριστικών του σχήματος 1.4.1.6-6 φαίνεται η εκδήλωση του φαινομένου της πολικότητας, όπως και κατά τη διάτρηση (πίνακας 1.4.1.2-1). Οι επικαλύψεις των 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 δυνατόν 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 1.4.1.7-1).



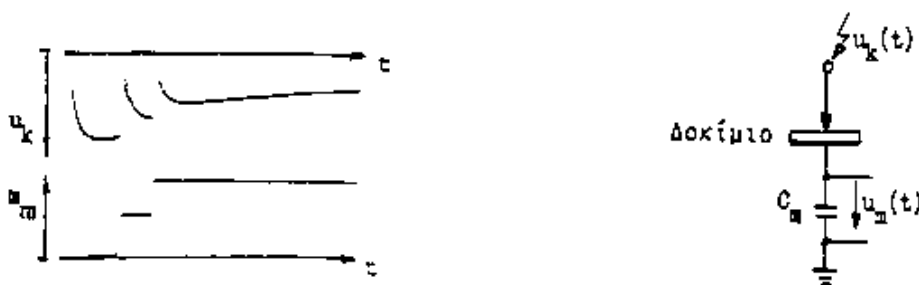
Σχήμα 1.4.1.7-1: Τυπικά παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$.
(1: Ηλεκτρόδιο ακίδα, 2: Δοκίμιο, 3: Ηλεκτρόδιο πλάκα, C_m : Πυκνωτής μέτρησης).

1.4.2 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση

Η εκδήλωση των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στη διαχωριστική επιφάνεια του συνδυασμού “στερεό μονωτικό-αέριο μονωτικό” ή του συνδυασμού “στερεό μονωτικό-υγρό μονωτικό” θα οδηγήσει σε επιφανειακή διάσπαση, όταν μία ομάδα ελεύθερων ηλεκτρονίων (η οποία με βάση τις οπτικές παρατηρήσεις, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μία διαδρομή της δενδροειδούς φωτεινής ακτινοβολίας που εκδηλώνεται) θα προκαλέσει μείωση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων (δηλαδή μείωση της απόστασης μόνωσης), ώστε τελικά να συμβεί 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 επιφάνεια σε βάθος μέχρι 30\AA . Έτσι, εκτός από τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις (οι οποίες οφείλονται σε ξένες επικαθίσεις και έχουν συνήθως τον κυρίαρχο ρόλο στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στην επιφάνεια), μπορεί κανείς να υποθέσει ότι εκδηλώνονται και οι άλλοι παράγοντες (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος), όπως κατά τη διάτρηση. Οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ισχύει το κύκλωμα του σχήματος 1.4.1.5-12, όπου όμως οι μερικές εκκενώσεις στο επιφανειακό φιλμ (συνδυασμός “επιφάνεια του στερεού μονωτικού 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 τη διαφορά ότι η επιφανειακή διάσπαση εκδηλώνεται στην ουρά της κρουστικής τάσης.



Σχήμα 1.4.2-1: Τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση 10/200 μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα –πλάκα. C_m : 1835nF, \hat{U}_k : 70kV.

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

Στις παραγράφους 1.4.1 και 1.4.2 αναφέρθηκε ότι η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών οφείλεται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες (**απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου**). Όμως οι παράγοντες αυτοί δεν περιλαμβάνουν 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 συσχέτιση του με φωτεινά φαινόμενα και καταπονήσεις, που παρατηρούνται στο υλικό (θερμικές, μηχανικές ή και τα δύο), που θα έδινε περισσότερες πληροφορίες για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής.

Τα φαινόμενα αυτά εξηγούνται με την κβαντομηχανική θεωρία, η οποία βασίζεται κυρίως:

- στις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστική τάση
- στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης (ως στοιχείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε δηλαδή μία αντίσταση, αντί του πυκνωτή μέτρησης: βλέπετε σχήμα 1.4.3.1-5)
- στην ανίχνευση του μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση)
- στην ικανοποιητική πειραματική και θεωρητική ταύτιση του μηχανισμού παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

Στην 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 την εξαγωγή συμπερασμάτων για το 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 εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα).
- 2) Καθοριστικός παράγοντας για τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2MV/cm.
- 3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα σύμφωνα με τη σχέση 1.3.4-1 ($\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta}$).

- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση 1.3.4-1. Σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ότι γίνεται ιονισμός 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 την περίσσεια ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση τους στα ηλεκτρόνια.

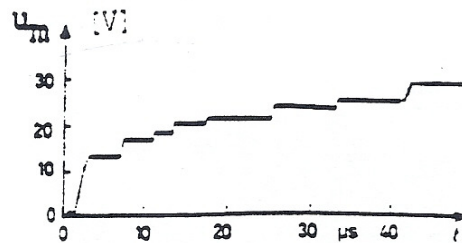
1.4.3.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης σε στερεά μονωτικά.

Στα σχήματα 1.4.3.1-1, 1.4.3.1-2, 1.4.3.1-3 δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα της τεχνητής γήρανσης στερεών πολυμερών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και στο σχήμα 1.4.3.1-4 ένα παλμογράφημα κρούσεων φορτίου. Η διάταξη μέτρησης έχει σχεδιαστεί απλοποιημένα στο σχήμα 1.4.3.1-5.

Διαπιστώθηκε ότι:

- α) 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 1.4.3.1-6). Υπό σταθερή τιμή της τάσης ο δενδρίτης, καθώς και η αντίστοιχη αλλαγή της μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις.
- β) κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500 μs δεν παρατηρήθηκε, υπό σταθερή τιμή της τάσης (που δεν οδηγεί στη διάσπαση), η εκδήλωση δενδρίτη, ούτε προκλήθηκε αλλαγή της μοριακής δομής.

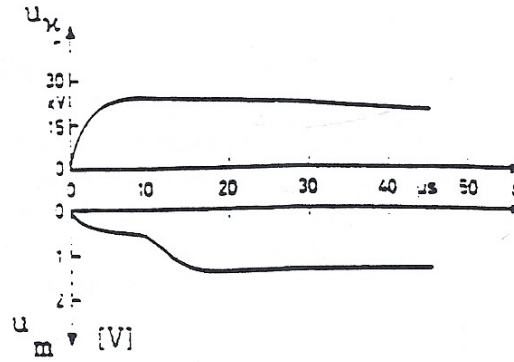


Σχήμα 1.4.3.1-1: Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs .

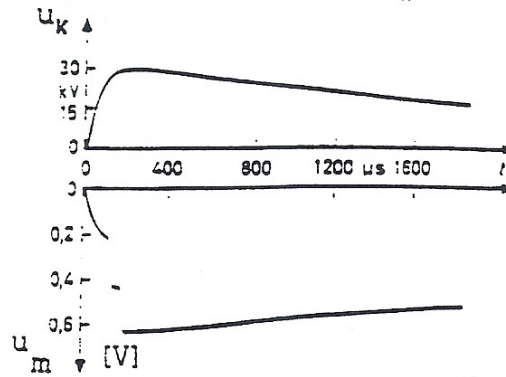
\hat{U}_k : 100kV

E: 0,8MV/cm

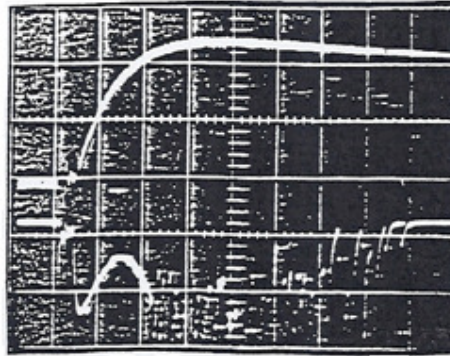
C_m : 210nF



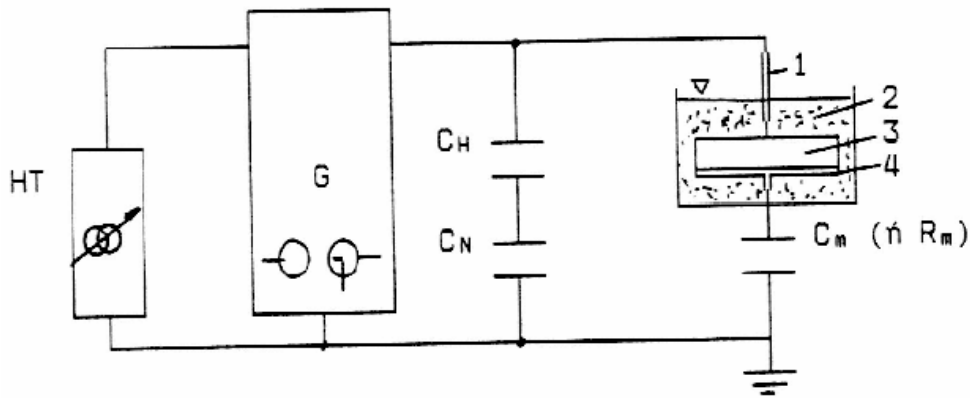
Σχήμα 1.4.3.1-2: Πρώτο άλμα δυναμικού υπό κρουστική τάση 10/200μs.
 \hat{U}_k : 26,6kV
 E: 0,38MV/cm
 C_m : 210nF



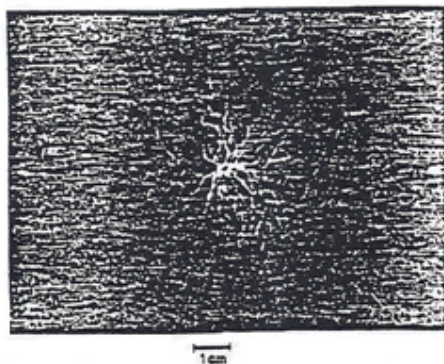
Σχήμα 1.4.3.1-3: Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 250/2500μs.
 \hat{U}_k : 32kV
 E: 0,31MV/cm
 C_m : 1000nF



Σχήμα 1.4.3.1-4: Κρούσεις φορτίου υπό κρουστική τάση 10/200μs.
 Κλίμακα χρόνου: 5μs/div
 Κλίμακα ρεύματος: 1,3A/div
 $\hat{U}_κ$: 81kV, E: 0,86MV/cm



Σχήμα 1.4.3.1-5: Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης των αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.
 H.T. : 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 1.4.3.1-6: Εικόνα επιφανειακών διαταραχών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.
 \dot{U}_k : 85kV, E: 0,8MV/cm

Ακολούθως, εξετάζονται, για λόγους σύγκρισης, η μακροσκοπική και η κβαντομηχανική ερμηνεία των φαινομένων γήρανσης στα στερεά μονωτικά.

α) Μακροσκοπική ερμηνεία

Με τη μακροσκοπική ερμηνεία καταλήγει κανείς στα συμπεράσματα του πίνακα 1.4.1.6-1. Η εκδήλωση αλμάτων δυναμικού (ή κρούσεων φορτίου) ερμηνεύονται από το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (σχήματα 1.4.1.3-4 έως 1.4.1.3-6).

β) Κβαντομηχανική ερμηνεία

Κατά τη θεωρία αυτή ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων και όχι ο διαχωρισμός των εκκενώσεων σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης C_m ανά άλμα δυναμικού, με τη σχέση:

$$W=1/2q_e\Delta u \quad (1.4.3.1.-1)$$

όπου q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου και Δu το άλμα δυναμικού.
 Με Δu σε V η τιμή της ενέργειας W είναι:

$$W=1/2\Delta u \text{ σε eV} \quad (1.4.3.1-2)$$

Η σχέση αυτή ισχύει για μηδενική τιμή της ωμικής αντίστασης από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης. Για $R>0$ θα πρέπει να λάβει κανείς υπόψη το μεταβατικό φαινόμενο με σταθερά χρόνου:

$$\tau=R \cdot C_m \quad (1.4.3.1-3)$$

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$W=(0,5\Delta u)/(1-e^{-t/(RC_m)}) \text{ σε eV} \quad (1.4.3.1-4)$$

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

Για μία αντίσταση $R=0,5\Omega$, ο συντελεστής $f=1/(1-e^{-t/(RC_m)})$ δίνεται στον πίνακα 1.4.3.1-1 για συνήθη χωρητικά τετράπολα μέτρησης.

C_m σε nF	10	20	210	1000	1835
f	1	1	1,62	5,51	9,6

Πίνακας 1.4.3.1-1: Τιμές του συντελεστή f για $R=0,5\Omega$.

Επομένως, σε αυτή την περίπτωση ισχύει:

$$W=0,5 \cdot f \cdot \Delta u \text{ σε eV} \quad (1.4.3.1-5)$$

όπου Δu σε V.

Στον πίνακα 1.4.3.1-2 έχουν υπολογιστεί με την παραπάνω σχέση οι τιμές της ενέργειας για το πρώτο άλμα δυναμικού των παλμογραφημάτων των σχημάτων 1.4.3.1-1, 1.4.3.1-2, 1.4.3.1-3.

Μορφή τάσης	Σχήμα	W σε eV
1,2/50 μs	4.3.1-1	$\approx 10,50$
10/200 μs	4.3.1-2	$\approx 1,60$
250/2500 μs	4.3.1-3	$\approx 0,16$

Πίνακας 1.4.3.1-2: Τιμές ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πρώτο άλμα δυναμικού.

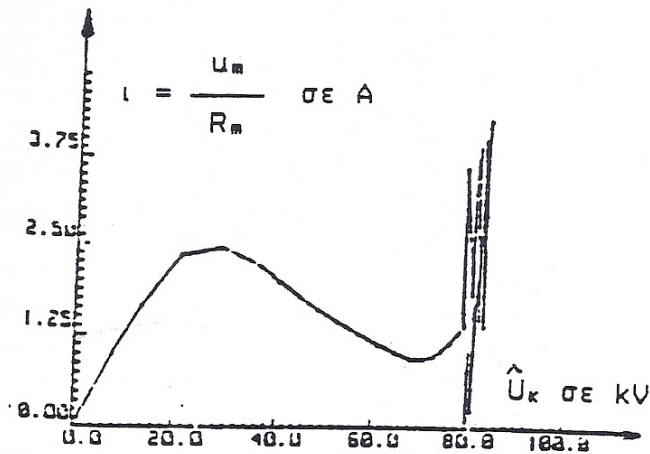
Από τις τιμές αυτές, φαίνεται ότι η γήρανση σχετίζεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που μπορεί να περιλαμβάνει υπεριώδεις και υπέρυθρες ακτίνες. Έτσι:

- 1) από τις τιμές ενέργειας του πίνακα 1.4.3.1-2,
- 2) τη φωτεινή ακτινοβολία, που παρατηρείται στην πράξη σε αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων 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.

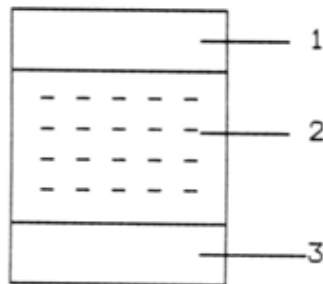
Από τα παλμογραφήματα των κρούσεων φορτίου παίρνουμε περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γήρανσης. Φαίνεται ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις. Έτσι όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσειμα της ενέργειάς τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (πίνακας 1.4.3.1-2). Επομένως, ο δενδρίτης 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 ακτινοβολίας. Στο σχήμα 1.4.3.1-7 φαίνεται ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης (κατά την αύξηση της τάσης παρατηρείται μείωση του ρεύματος).



Σχήμα 1.4.3.1-7: Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης κατά το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου του σχήματος 1.4.3.1-4.

Μπορεί κανείς να θεωρήσει 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 άφιξη τους προκάλεσαν εκπομπή του ίδιου μήκους κύματος). Επιπλέον, μπορούμε να υποθέσουμε ότι λόγω του εύρους της παραπάνω ακτινοβολίας, υπάρχουν στο υλικό διάφορες **ενεργειακές στάθμες διαταραχής** μέσα στην απαγορευμένη ζώνη (σχήμα 1.4.3.1-8). Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Germant και Philipoff (σχήμα 1.4.1.3-4). Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 1.4.3.1-8: Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

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

Από έρευνες, έχει διαπιστωθεί ότι το φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά τη γήρανση του στερεού μονωτικού υπό κρουστική τάση, είναι όμοιο με εκείνο που εκπέμπεται υπό εναλλασσόμενη ή συνεχή τάση καταπόνησης. Ο υπολογισμός της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων μπορεί να γίνει με τη σχέση 1.4.3.1-4.

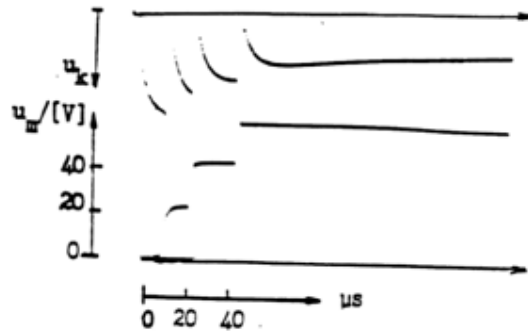
1.4.3.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση

Η διάτρηση έχει διερευνηθεί με καταπονήσεις στερεών μονωτικών με σχετική διηλεκτρική σταθερά περίπου $2,5 \div 4,5$ (διάφορα χαρτιά μετασχηματιστών, πεπιεσμένο χαρτί, βακελίτης, pertinax, πανίτης κλπ.). Οι τάσεις δοκιμής είναι κυρίως κρουστικής μορφής (1,2/50μs, 10/200μs, 250/2500μs κλπ.). Πειράματα έχουν γίνει και με εναλλασσόμενες και ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

Στη συνέχεια, εξετάζεται ένα παράδειγμα με κρουστικές τάσεις και οι μετρήσεις γίνονται με τη διάταξη του σχήματος 1.4.3.1-5. Τυπικά παλμογραφήματα του φαινομένου δίνονται στα σχήματα 1.4.3.2-1 και 1.4.3.2-2. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων (W) μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση 1.4.3.1-4. Για παράδειγμα, για το πρώτο άλμα δυναμικού και $R=0,5\Omega$, η W υπολογίζεται περίπου 105eV. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε ότι **η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων X.**

Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου 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.

Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται κατά τη γήρανση και τη διάτρηση εξαρτάται σημαντικά από το συντελεστή χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων. Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο, τόσο μειώνεται το εύρος της παραπάνω ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, όταν η ακίδα έχει ακτίνα καμπυλότητας 0,3mm (αντί 1mm περίπου), τότε η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επεκτείνεται μέχρι το ορατό τμήμα της.



Σχήμα 1.4.3.2-1: Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου.

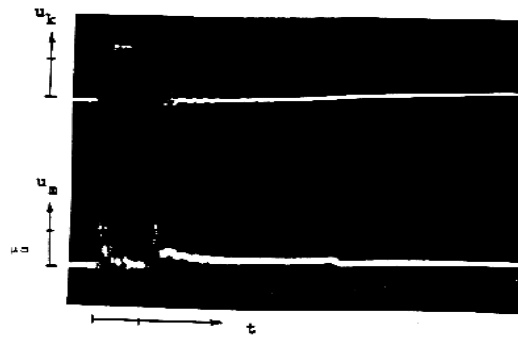
Κρουστική τάση: 1,2/50μs.

R της ακίδας \approx 1mm.

$\hat{U}_κ$: 85kV.

E: 1,2 MV/cm.

C_m : 1835nF.



Σχήμα 1.4.3.2-2: Τυπικό παλμογράφημα κρούσεων φορτίου κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση.

R της ακίδας \approx 1 mm.

Μορφή τάσης 1,2/50μs

$\hat{U}_κ = 85kV$

E=1,2MV/cm

$R_m = 150\Omega$

u_m : 20V/div

t: 2 μs/div

1.4.3.3 Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών

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

$$Q=Q_0 e^{A(E^2-E_0^2)/E_0^2} \quad (1.4.3.3-1)$$

όπου (κατά το σχήμα 1.4.1.6-1):

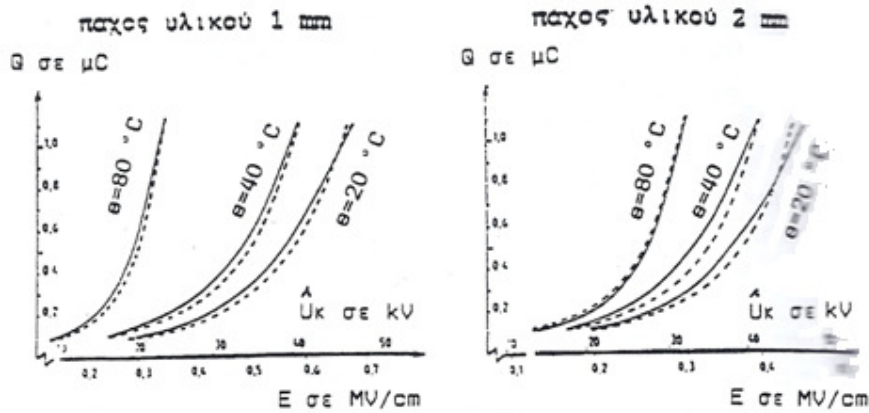
- E_0 η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($E > 0,2 \text{ MV/cm}$) και Q_0 το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.
- E η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση, λόγω της οποίας το φορτίο αποκτά την τιμή Q .
- A ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από το χρόνο.

Με βάση τη σχέση αυτή έχει γίνει μία προσέγγιση πειραματικών χαρακτηριστικών $Q=f(\dot{U}_κ)$ κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm ή 2mm) με κρουστικές τάσεις χειρισμών, οι οποίες προκαλούν μόνο εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (πίνακας 1.4.1.6-1). Η διάταξη, που έγιναν τα πειράματα, έχει δοθεί απλοποιημένα στο σχήμα 1.4.3.1-5. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (20°C , 40°C και 80°C), ώστε:

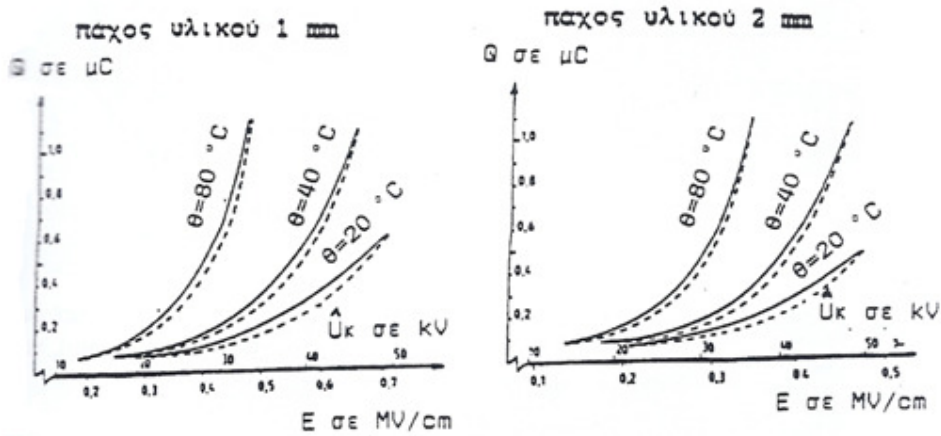
- α) να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, και
- β) να εναρμονίζονται οι μετρήσεις με τα παραδεκτά όρια λειτουργίας του μονωτικού ελαίου των μετασχηματιστών, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη.

Στα σχήματα 1.4.3.3-1 και 1.4.3.3-2 δίνονται οι πειραματικές χαρακτηριστικές για το pertinax και το βακελίτη, καθώς και οι θεωρητικές χαρακτηριστικές κατά τη σχέση 1.4.3.3-1 (με προσδιορισμό του συντελεστή A για κάθε υλικό). Όπως φαίνεται από τις καμπύλες, υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ θεωρίας και πειραμάτων. Η θεωρητική προσέγγιση έδειξε ότι:

- 1) οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμές πεδίου περίπου $E=0,2 \text{ MV/cm}$,
 - 2) για τιμές πεδίου περίπου μέχρι $0,5 \text{ MV/cm}$, η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας διέπεται από τη σχέση 1.3.4-1 ($\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta}$),
 - 3) για τιμές πεδίου μεγαλύτερες από $0,5 \text{ MV/cm}$, ισχύει η σχέση 1.4.3.3-1, επομένως μπορεί κανείς να υποθέσει ότι γίνεται ιονισμός με κρούσεις,
 - 4) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ενισχύει σημαντικά τα φαινόμενα ιονισμού.
- Φαίνεται ότι η σχέση 1.4.3.3-1, είναι η σχέση που διέπει το συνδυασμό των μερικών εκκενώσεων με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 1.4.3.3-1: Χαρακτηριστικές $Q=f(\bar{U}_κ)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. $A=0,48$.



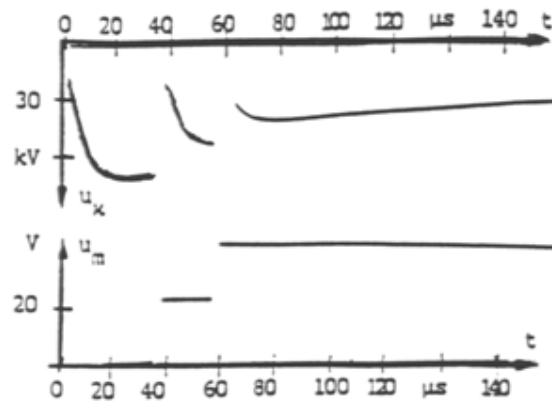
Σχήμα 1.4.3.3-2: Χαρακτηριστικές $Q=f(\bar{U}_κ)$ για το βακελίτη εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. $A=0,44$.

1.4.3.4 Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση

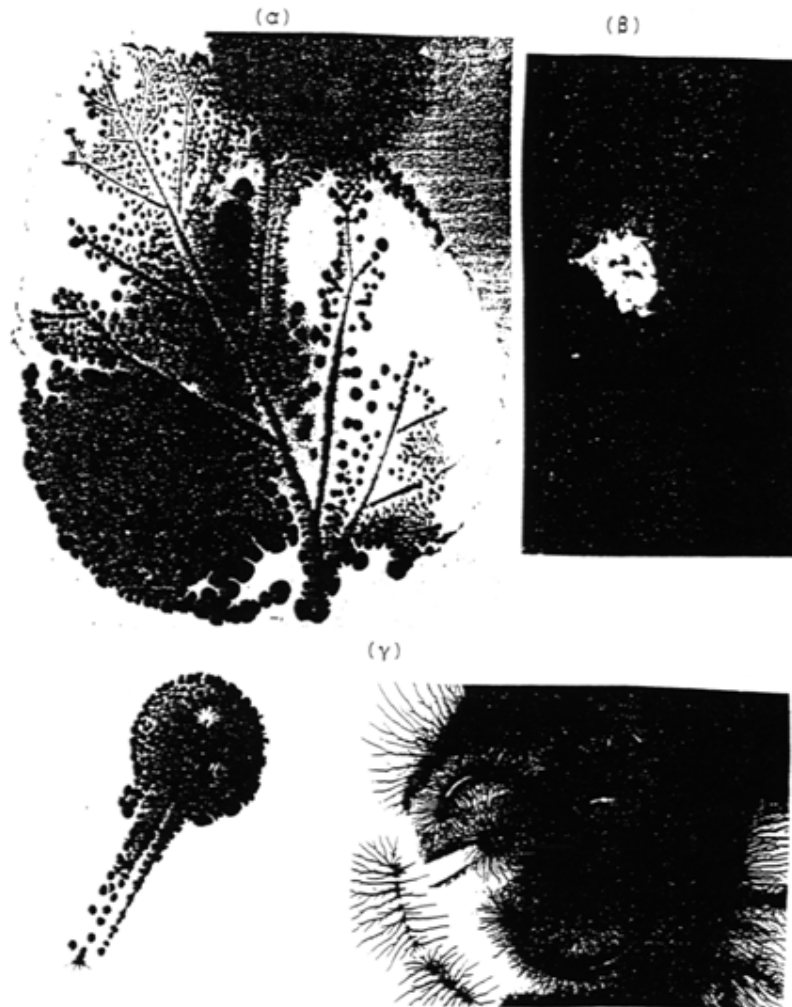
Από πειράματα, διαπιστώνεται ότι τα φαινόμενα που εμφανίζονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση είναι όμοια με αυτά κατά τη γήρανση και τη διάτρηση. Στο σχήμα 1.4.3.4-1 φαίνεται το παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του pertinax. Η ενέργεια W των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων υπολογίζεται από τη σχέση 1.4.3.1-4. Η ενέργεια αυτή για το πρώτο και το τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα: 122eV και 96,5eV. Όπως φαίνεται η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτίνων X.

Η εκπομπή ακτίνων X προσβάλλει το φωτογραφικό φιλμ και έτσι απεικονίζονται αντικείμενα καθώς, και βιολογικοί οργανισμοί. Το ίδιο ισχύει και κατά την εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας (τουλάχιστον σε τιμές πεδίου πλησίον της διάσπασης, όπου αυτή είναι αρκετά eV). Τα πειράματα που έγιναν επαληθεύουν τα συμπεράσματα αυτά. Στα σχήματα 1.4.3.4-2 και 1.4.3.4-3 δίνονται ορισμένες φωτογραφίες αντικειμένων κατά την επιφανειακή διάσπαση. Επίσης, στα σχήματα 1.4.3.4-3 και 1.4.3.4-4 δίνονται φωτογραφίες επιφανειακών δενδριτών, κατά τη γήρανση και τη διάσπαση αντίστοιχα. Οι φωτογραφίες αυτές αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2mm και διαμέτρου 150mm), υπό κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$ σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα.

Μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο δενδρίτης στη φωτογραφία 1.4.3.4-3 σχετίζεται με υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ εκείνος στο σχήμα 1.4.3.4-4 με υπεριώδεις ακτίνες και ακτίνες X. Έτσι, δίνεται μία φυσική ερμηνεία για τις γνωστές εικόνες Lichtenberg. Μπορεί επίσης να συμπεράνει κανείς, ότι ο φωτεινός δενδρίτης και ο σχετός διάσπασης, που παρατηρούνται κατά την ηλεκτρική καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού, αφορούν το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό.



Σχήμα 1.4.3.4-1: Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pertinax (πάχους 2mm και με διάμετρο της επιφάνειάς του 150mm), υπό κρουστικές τάσεις $10/200\mu\text{s}$ σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου. Ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης: “ακίδα-πλάκα”.



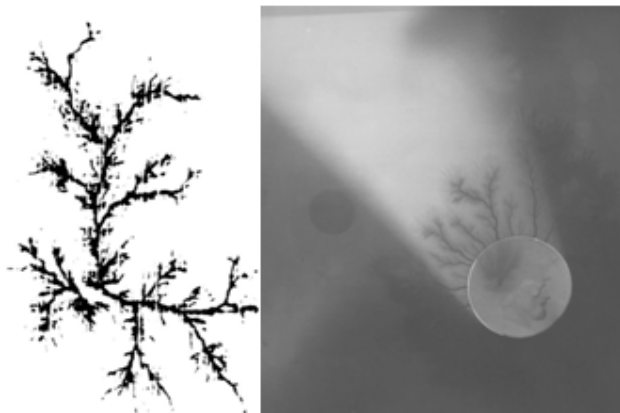
Σχήμα 1.4.3.4-2: Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερούς στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα.

α) Φωτογράφιση φύλλου δένδρου

β) Φωτογραφία βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι).

γ) Φωτογραφία μεταλλικών αντικειμένων.



Σχήμα 1.4.3.4-3: Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερών στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα).



Σχήμα 1.4.3.4-4: Φωτογραφίες δενδριτών κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα).

- α) Δενδρίτης σε τιμές πεδίου πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση.
- β) Δενδρίτης κατά την επιφανειακή διάσπαση.

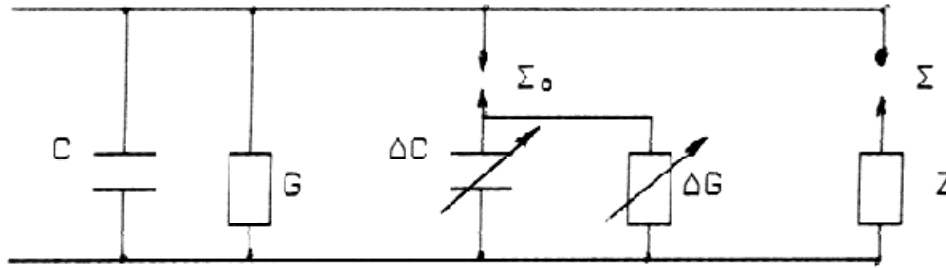
1.4.4 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών

Από όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, φαίνεται ότι η κβαντομηχανική θεωρία δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας, που παράγεται στα υλικά κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους. Αυτές οι πληροφορίες δεν μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεωρία. Όμως με τη μακροσκοπική θεωρία, γίνεται η διάκριση των μερικών εκκενώσεων σε εσωτερικές και εξωτερικές στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης. Ο διαχωρισμός αυτός δεν μπορεί να δοθεί από τη θεωρία του ιονισμού με κρούσεις, γιατί ο συντελεστής A στη σχέση 1.4.3.3-1 αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του και η τιμή του θα πρέπει να εξαρτάται από τη διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Αν π.χ. πραγματοποιήσει κανείς τα πειράματα της παραγράφου 1.4.3.3 με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs (ή 10/200μs) και προσεγγίσει τις πειραματικές χαρακτηριστικές $Q=f(\dot{U}_κ)$ με τη σχέση 1.4.3.3-1, θα διαπιστώσει ότι ο συντελεστής A έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Αυτή η διαφορετική τιμή 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 την επιφάνειά του).

Επομένως, 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. Στο σχήμα 1.4.4-1 δίνεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που έχει προταθεί για το σκοπό αυτό. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant-Philipoff (σχήμα 1.4.1.3-4), όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσει κανείς, ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει στην τιμή της πεδιακής έντασης E_0 (περίπου 0,2MV/cm), τότε τα φαινόμενα που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4.4-1 ως ακολούθως:

- 1) Για $E < E_0$: Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δε διασπώνται οι σπινθηριστές Σ_0 και Σ).
- 2) Για $E > E_0$: Εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (διασπάται ο Σ_0) και η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διέπεται από τη σχέση: $\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta}$.
- 3) Για $E \gg E_0$: Εμφανίζεται αρνητική διαφορική αντίσταση και εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις. Δεν ισχύει η σχέση $\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT}$, 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 διάτρηση.



Σχήμα 1.4.4-1 : 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

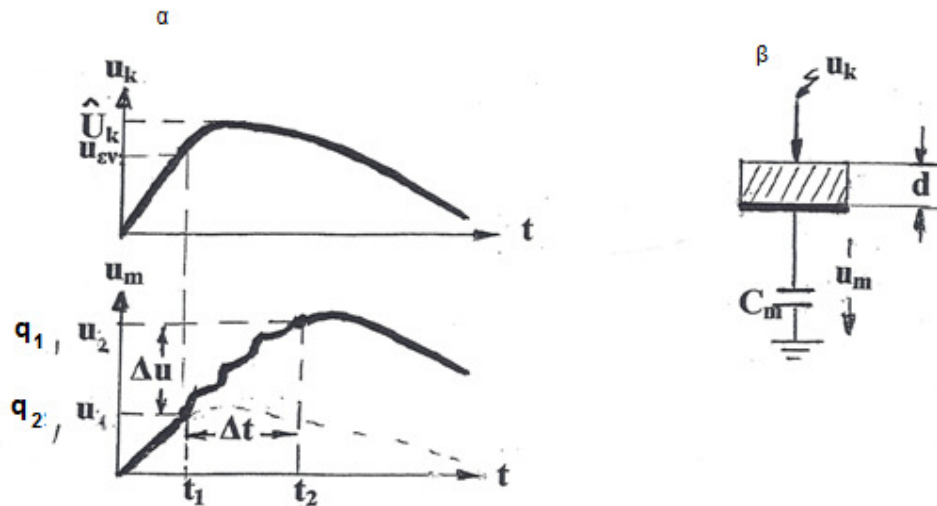
1.5. Βακελίτης

Το μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται στην πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι ο βακελίτης. Ο βακελίτης είναι τεχνητή ρητίνη και παίρνεται από τη συμπύκνωση μίας φαινόλης με φορμαλδεΐδη. Όταν θερμαίνεται μία φαινόλη ή μία κρεζόλη με φορμαλδεΐδη και με τη βοήθεια καταλύτη, παράγεται ένα παχύρρευστο υγρό. Αυτό ονομάζεται βακελίτης Α και είναι διαλυτός στην αλκοόλη, στην ακετόνη και τα αλκάλια. Με τη θέρμανση του υγρού αυτού στους 100°C παίρνουμε το βακελίτη Β. Αυτός όταν είναι ψυχρός, είναι σκληρός, ενώ όταν είναι θερμός είναι εύπλαστος. Ο βακελίτης Β δε διαλύεται στα διάφορα διαλυτικά μέσα, αλλά μόνο διογκώνεται. Με παρατεταμένη θέρμανση, παίρνουμε το βακελίτη Γ, ο οποίος είναι ανθεκτικός στις υψηλές θερμοκρασίες.

Πολλά αντικείμενα καλύπτονται επιφανειακά από τον υγρό βακελίτη Α (επάλειψη με πινέλο). Κατόπιν, με κατάλληλη κατεργασία η επένδυση αυτή παίρνει τη σκληρότητα και την αντοχή που χρειάζεται. Ο βακελίτης, σε υγρή μορφή διαλυμένος με οινόπνευμα χρησιμοποιείται ως μονωτικό βερνίκι σε πηνία, ελάσματα μετασχηματιστών κλπ. Τα φύλλα βακελίτη είναι φύλλα χαρτιού, υφάσματος ή υαλοβάμβακα εμποτισμένα με υγρό βακελίτη. Τα φύλλα αυτά συμπιέζονται σε υψηλή θερμοκρασία και σχηματίζονται οι πλάκες βακελίτη που χρησιμοποιούνται ως βάσεις στήριξης των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων στα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Ο τυποποιημένος βακελίτης παρασκευάζεται από τον υγρό βακελίτη με ειδική κατεργασία και στερεοποιείται μέσα στα καλούπια που του δίνουν την επιθυμητή μορφή. Χρησιμοποιείται σε διακόπτες, φις, θερμοστάτες, βάσεις λυχνιών κλπ. Ο βακελίτης πήρε το όνομά του από το Βέλγο χημικό Leo Baekeland, που τον εφηύρε.

2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και στατιστική ανάλυση των ηλεκτρικών φαινομένων, που συνοδεύουν τις μερικές εκκενώσεις, οι οποίες εκδηλώνονται σε δοκίμια βακελίτη πάχους 1mm και 2mm αντίστοιχα, εντός ελαίου μετασχηματιστών, όταν σε αυτά ασκείται κεραυνική κρουστική τάση, μορφής $\pm 1,2/50\mu\text{s}$. Οι μετρήσεις προέκυψαν από πειράματα που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο, με τη βοήθεια της διάταξης μέτρησης, που φαίνεται στο σχήμα 2-1β. Η κρουστική τάση ασκείται στο δοκίμιο, με διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: $R=0,9\text{mm}$. Η μέτρηση της τάσης γίνεται με τη βοήθεια ενός πυκνωτή μέτρησης, του οποίου γνωρίζουμε τη χωρητικότητα.



Σχήμα 2-1: α. Καθορισμός εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων.

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt : χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

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

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

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

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

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

β. Διάταξη μέτρησης.

Η παρουσία των μερικών εκκενώσεων έγινε αισθητή με την εκδήλωση αλμάτων δυναμικού, τα οποία φαίνονταν στα παλμογραφήματα που λήφθηκαν. Έτσι έγινε δυνατή η μέτρηση ορισμένων μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκαν:

- η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k),
- η στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (u_{ev}),
- η στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (u_1),
- η στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων (u_2),
- ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων (t_1), και
- ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (t_2).

Για την εξαγωγή των απαραίτητων συμπερασμάτων, κρίθηκε σκόπιμος ο υπολογισμός κάποιων επιπλέον ηλεκτρικών μεγεθών, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια. Ο υπολογισμός των μεγεθών αυτών έγινε με τη βοήθεια του σχήματος 2-1 και των ακόλουθων σχέσεων.

- Για τη διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, που θεωρείται η δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών, ισχύει προσεγγιστικά (κατά Zeller) η παρακάτω σχέση για τη μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης:

$$\hat{E}_k = \frac{2\hat{U}_k}{R \ln\left(\frac{4d}{R}\right)} \quad (2-1)$$

- Αντίστοιχα για την πεδιακή ένταση που αντιστοιχεί στην τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων:

$$E_{ev} = \frac{2u_{ev}}{R \ln\left(\frac{4d}{R}\right)} \quad (2-2)$$

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

$$q_1 = C_m \cdot u_1 \quad (2-3)$$

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

$$q_2 = C_m \cdot u_2 \quad (2-4)$$

- Το συνολικό άλμα δυναμικού:

$$\Delta u = u_2 - u_1 \quad (2-5)$$

- Η αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου λόγω μερικών εκκενώσεων:

$$\Delta q = C_m \cdot \Delta u \quad (2-6)$$

- Η χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (2-7)$$

- Η στιγμιαία τιμή ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων:

$$i_1 = q_1 / t_1 \quad (2-8)$$

- Η στιγμιαία τιμή ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων:

$$i_2 = q_2 / t_2 \quad (2-9)$$

- $\Delta i = \Delta q / \Delta t$ (2-10)

- Το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους από την άνοδο:

$$\Delta W_e = 0,5 \cdot \Delta u \quad (\text{με } \Delta u \text{ σε V είναι } \Delta W_e \text{ σε eV}) \quad (2-11)$$

αλλά επαναλαμβάνουμε εδώ, για λόγους πληρότητας, τη σχέση 1.4.3.1-2 που αναφέρθηκε παραπάνω.

- Ο αριθμός των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων:

$$N_e = \Delta q / q_e, \text{ όπου } q_e \text{ το φορτίο του ηλεκτρονίου } 1,602 \times 10^{-19} \text{C.} \quad (2-12)$$

- Ο μέγιστος αριθμός αλμάτων δυναμικού:

$$N_a = \Delta t / 0,1 \text{ (}\Delta t \text{ σε } \mu\text{s)} \quad (2-13)$$

όπως έχει αναφερθεί και στην εισαγωγή (παράγραφος 1.4.3.1-β) η διάρκεια μίας μερικής εκκένωσης κατά τη βιβλιογραφία είναι 100ns=0,1μs.

Η επεξεργασία των μετρήσεων και οι γραφικές παραστάσεις, που γίνονται με τη βοήθεια του excel, οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία του βακελίτη ως μονωτικό υλικό και την αντοχή του σε κρουστικές τάσεις της μορφής $\pm 1,2/50\mu\text{s}$.

Στην παράγραφο 3, παρουσιάζονται τα μεγέθη που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς και οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις χωρίς κανένα σχόλιο.

Στα συμπεράσματα (παράγραφος 4), παρουσιάζονται οι μαθηματικές εκφράσεις των χαρακτηριστικών που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων. Ακόμα, γίνεται μία προσπάθεια για την ερμηνεία αυτών των χαρακτηριστικών με τη βοήθεια της θεωρίας του ιονισμού με κρούσεις (σχέση 1.4.3.3-1) και εξάγονται αντίστοιχα συμπεράσματα.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.1 ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ +1,2/50 μ s - ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ d=1mm

\hat{U}_k (kV)	\hat{E}_k (MV/cm)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	C_m (nF)	q_1 (μ C)	q_2 (μ C)	Δq (μ C)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)
28,6	0,4261	27,5 0,80	0,4097	10	0,08	0,2	0,12	8	20	12
35,4	0,5274	34,3 0,00	0,5110	10	0,1	0,35	0,25	10	35	25
43	0,6406	41,5 0,00	0,6183	20	0,11	0,72	0,61	5,5	36	30,5
50,5	0,7523	48,8 0,00	0,7270	20	0,13	1,2	1,07	6,5	60	53,5
57,2	0,8521	55,2 0,00	0,8224	210	0,1995	2,2008	2,0013	0,95	10,48	9,53
64	0,9535	62 0,00	0,9237	210	0,2205	2,2995	2,079	1,05	10,95	9,9
71,4	1,0637	64 0,00	0,9535	210	0,2394	3,0009	2,7615	1,14	14,29	13,15

Πίνακας 3.1-1

\hat{U}_k (kV)	t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	Δt (μ s)	i_1 (A)	i_2 (A)	Δi (A)	ΔW_e (eV)	N_e ($\times 10^{12}$)	N_a
28,6	3	8	5	0,0267	0,0250	0,0240	6	0,749064	50
35,4	1,5	11,1	9,6	0,0667	0,0315	0,0260	12,5	1,56055	96
43	1,2	13	11,8	0,0917	0,0554	0,0517	15,25	3,80774	118
50,5	0,9	18,5	17,6	0,1444	0,0649	0,0608	26,75	6,67915	176
57,2	0,6	22,2	21,6	0,3325	0,0991	0,0927	4,765	12,4925	216
64	0,55	26,5	25,95	0,4009	0,0868	0,0801	4,95	12,9775	259,5
71,4	0,52	29	28,48	0,4604	0,1035	0,0970	6,575	17,2378	284,8

Πίνακας 3.1-2

Πίνακες 3.1-1, 3.1-2: Στατιστική ανάλυση της έναρξης των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2-1÷2-13.

Υλικό: βακελίτης εντός μονωτικού ελαίου

Πάχος δοκιμίου: $d=1\text{mm}$

Μορφή επιβαλλόμενης τάσης: $+1,2/50\mu\text{s}$

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

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

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

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

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

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

$\Delta q=C_m \cdot \Delta u$, αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου λόγω μερικών εκκενώσεων

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-1) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-1) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u=u_2-u_1$, συνολικό άλμα δυναμικού

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$\Delta t=t_2-t_1$, χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

i_1 : στιγμιαία τιμή ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

i_2 : στιγμιαία τιμή ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta i=\Delta q/\Delta t$

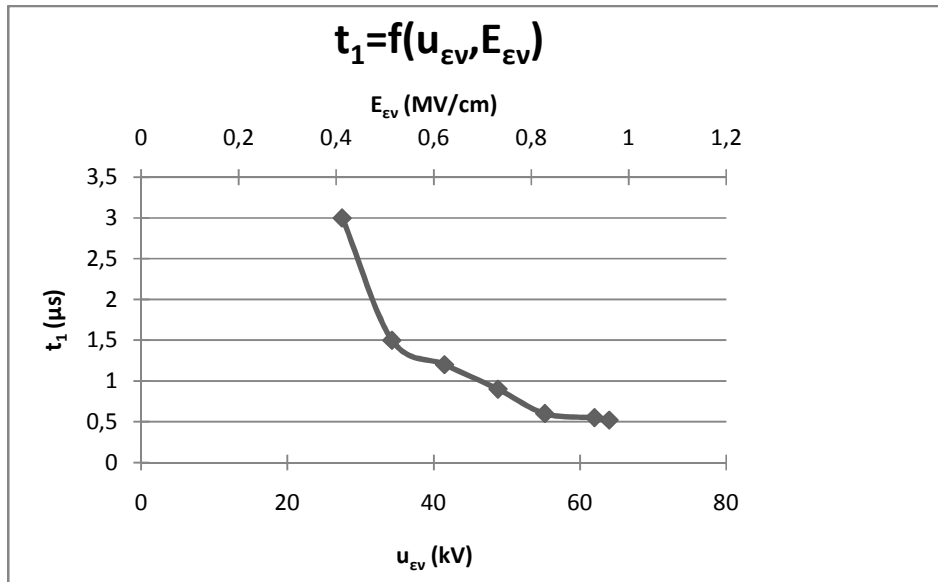
ΔW_e : περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο

N_e : αριθμός των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων

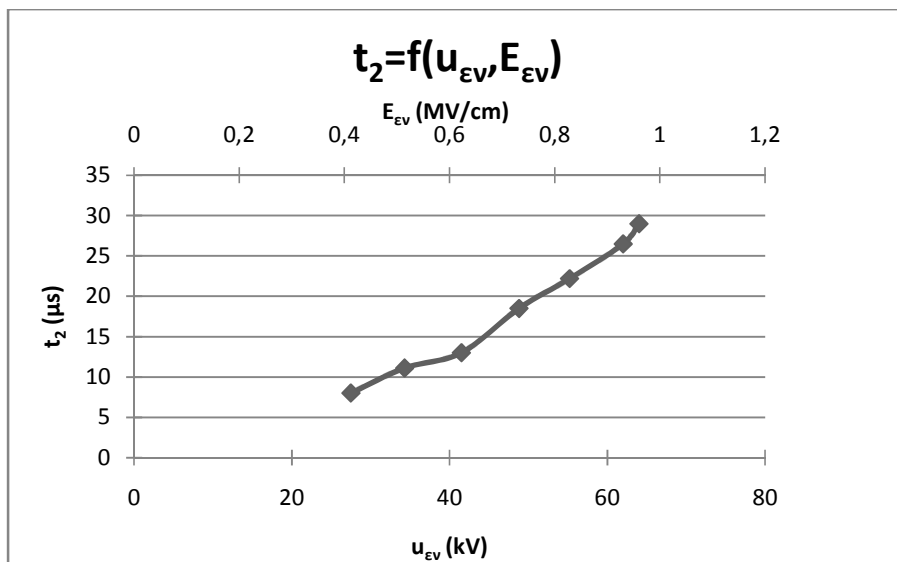
N_a : μέγιστος αριθμός αλμάτων δυναμικού

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.

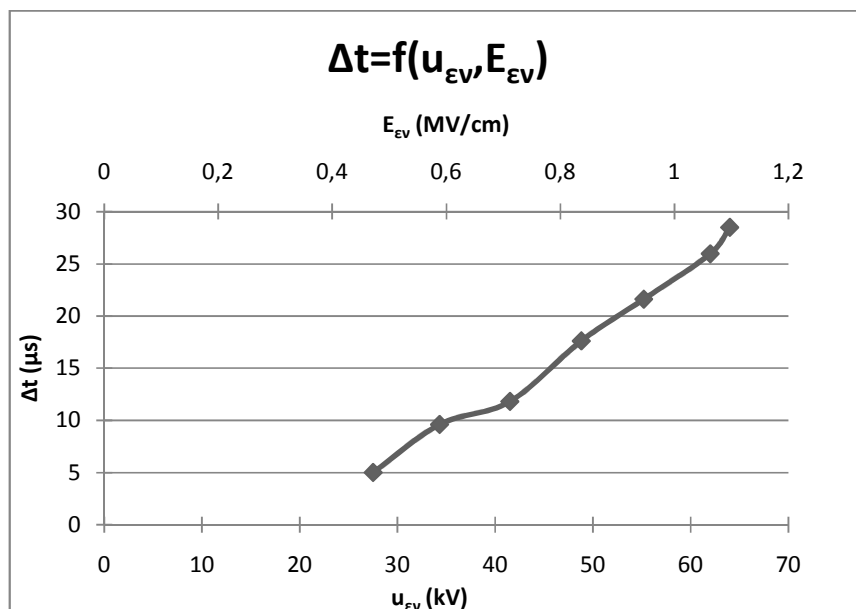
Διαγράμματα



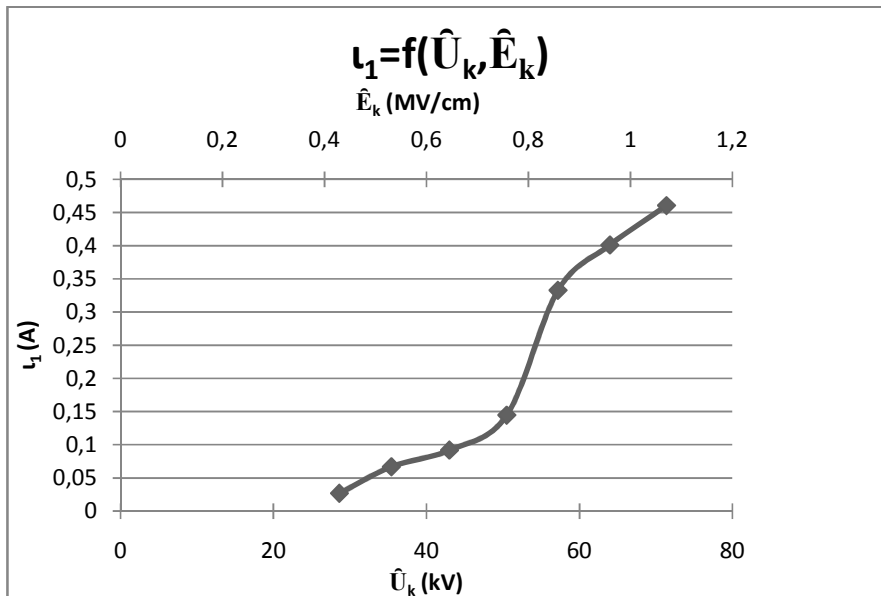
Σχήμα 3.1-1: Χαρακτηριστική χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων (t_1) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{EV}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{EV}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50 μs .



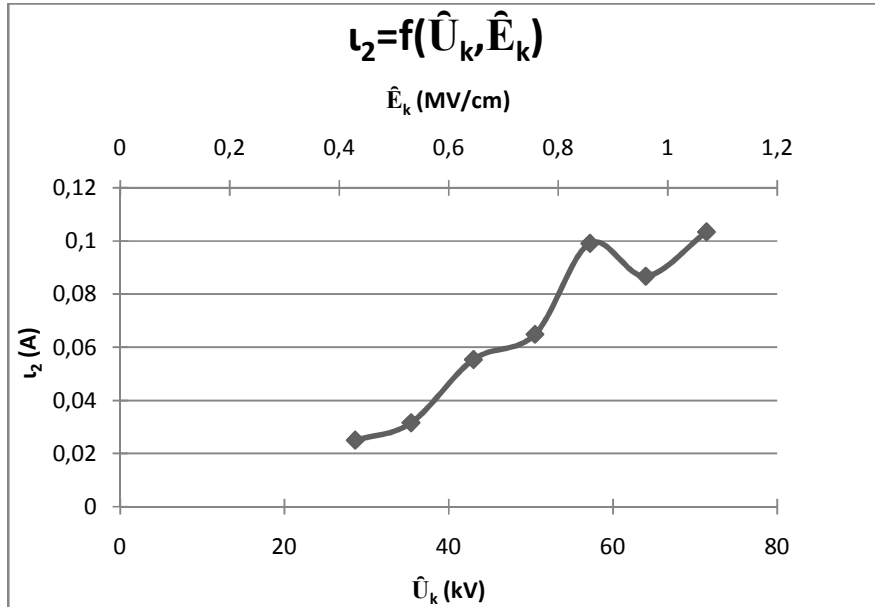
Σχήμα 3.1-2: Χαρακτηριστική χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (t_2) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{EV}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{EV}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50 μs .



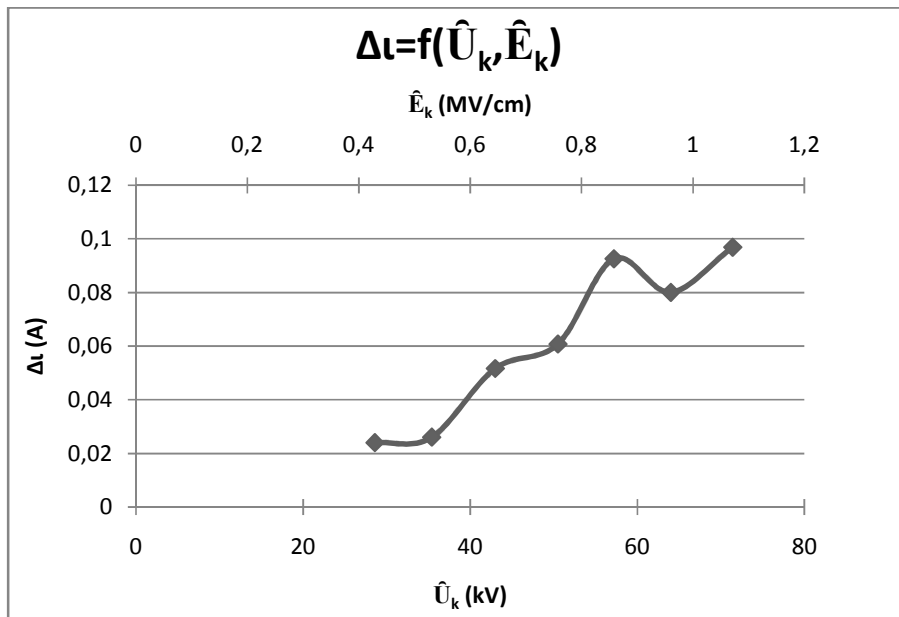
Σχήμα 3.1-3: Χαρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων (Δt) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($u_{\epsilon\nu}$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης ($E_{\epsilon\nu}$), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50 μs .



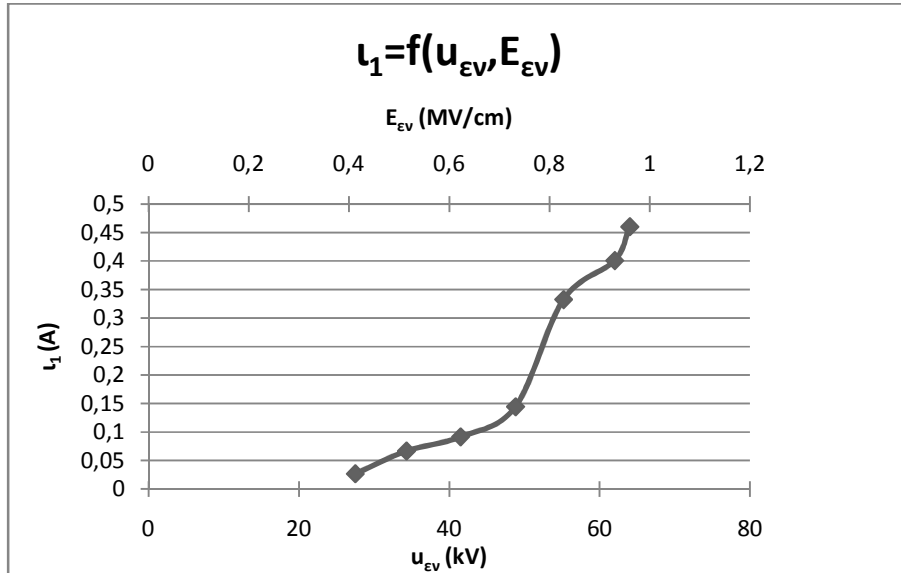
Σχήμα 3.1-4: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (i_1) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50 μs .



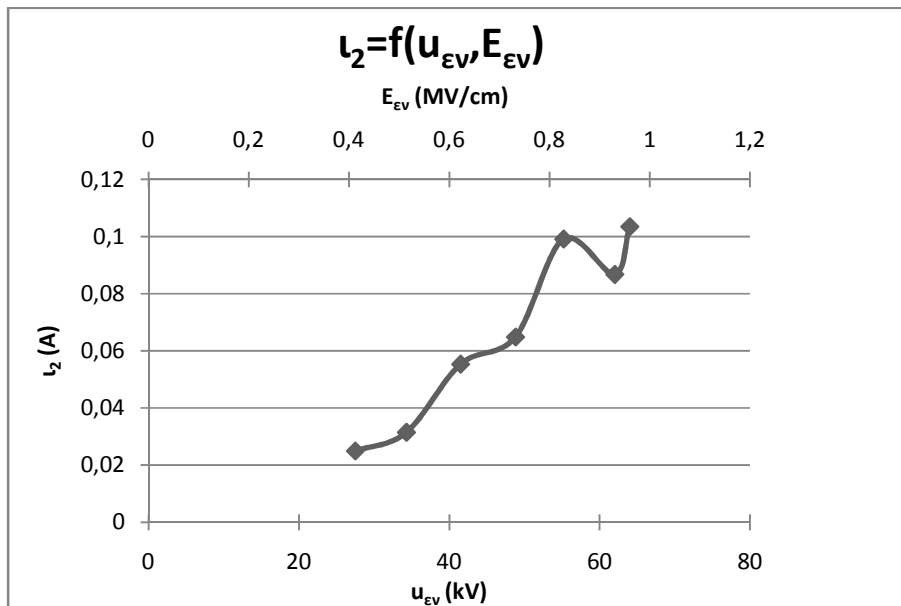
Σχήμα 3.1-5: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων (I_2) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



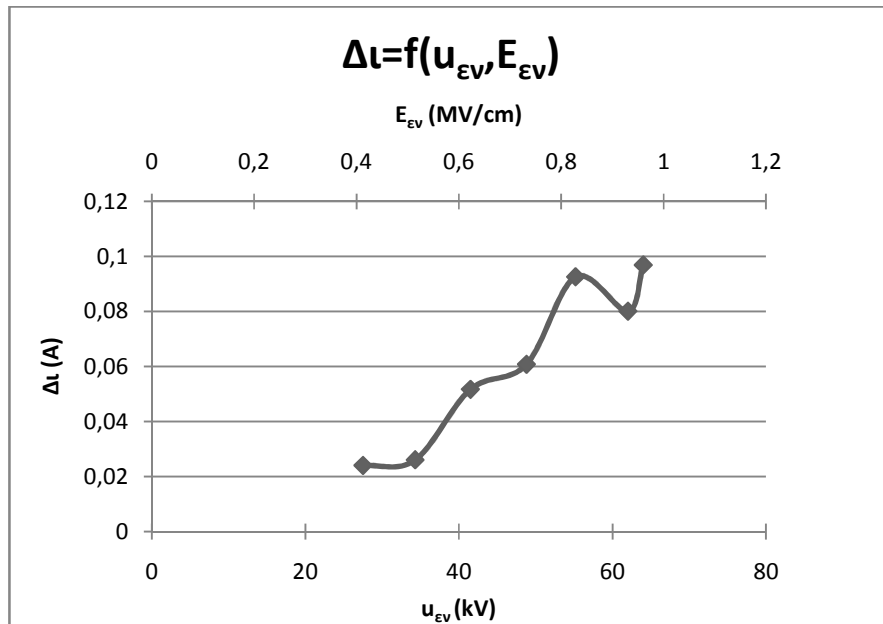
Σχήμα 3.1-6: Χαρακτηριστική του ρεύματος κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (ΔI) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



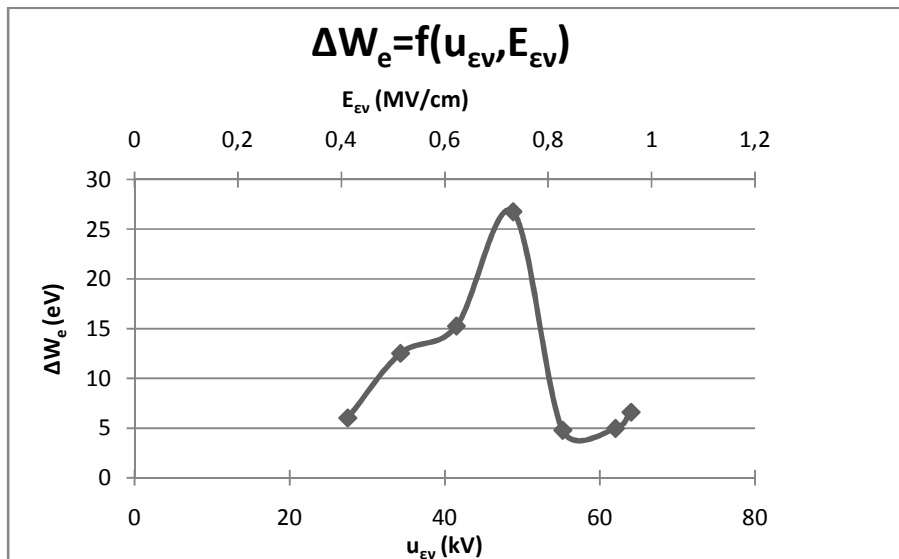
Σχήμα 3.1-7: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (i_1) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{EV}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{EV}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



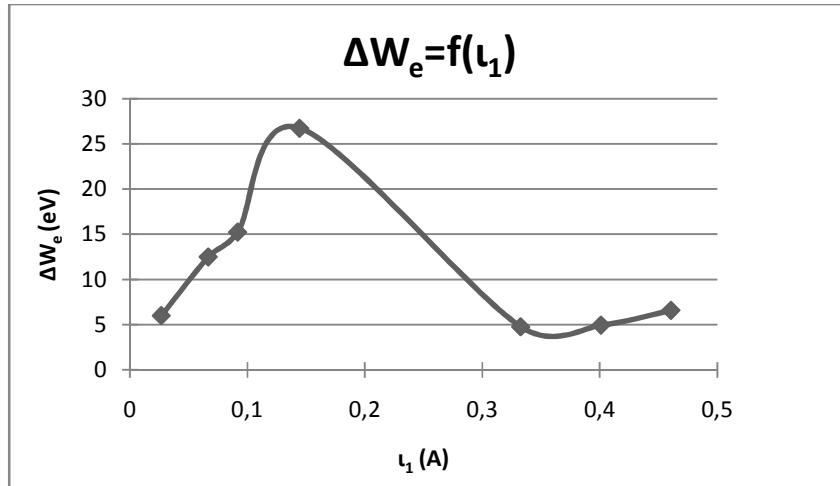
Σχήμα 3.1-8: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων (i_2) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{EV}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{EV}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



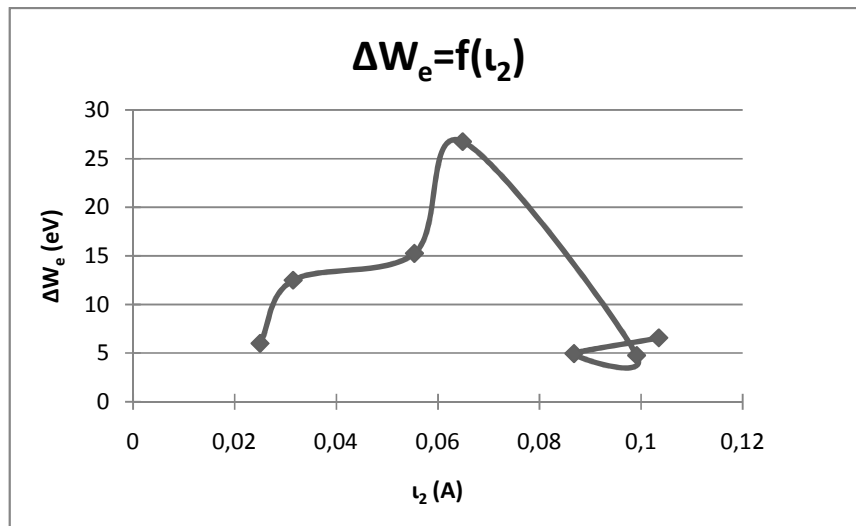
Σχήμα 3.1-9: Χαρακτηριστική του ρεύματος κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (Δi) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{EV}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{EV}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



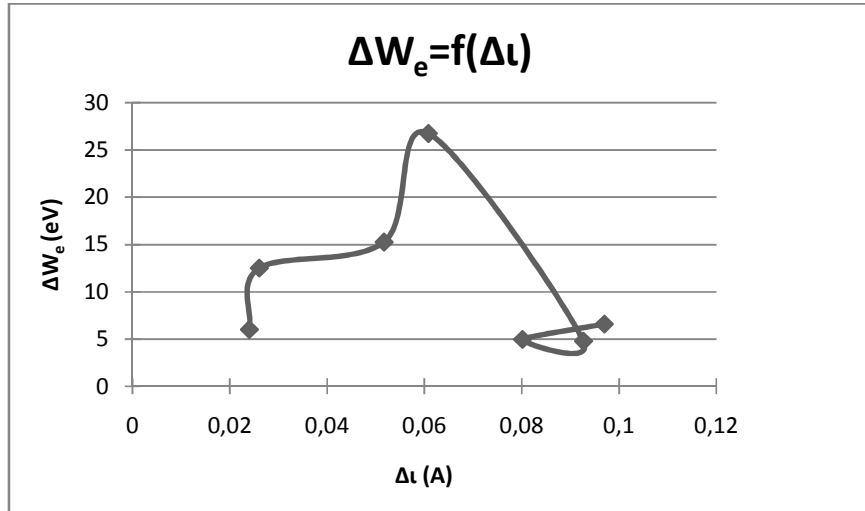
Σχήμα 3.1-10: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{EV}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{EV}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



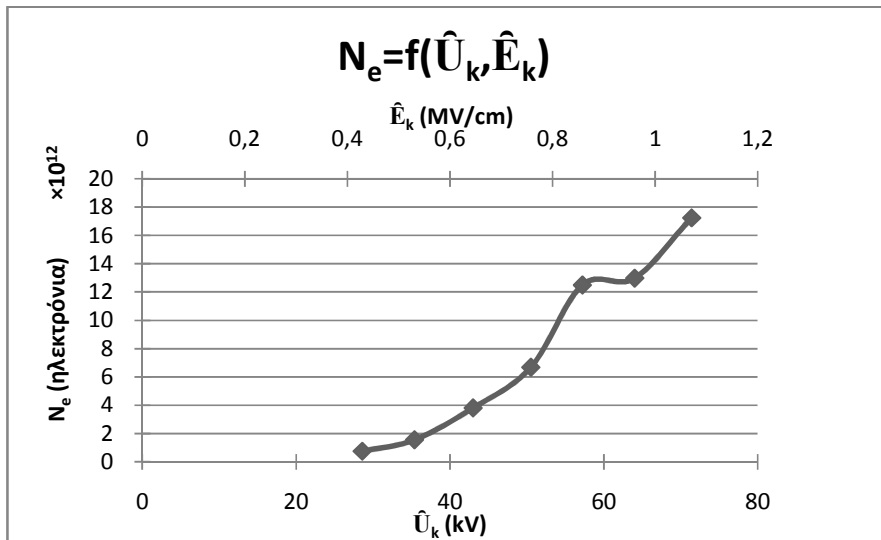
Σχήμα 3.1-11: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της τιμής του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (I_1), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



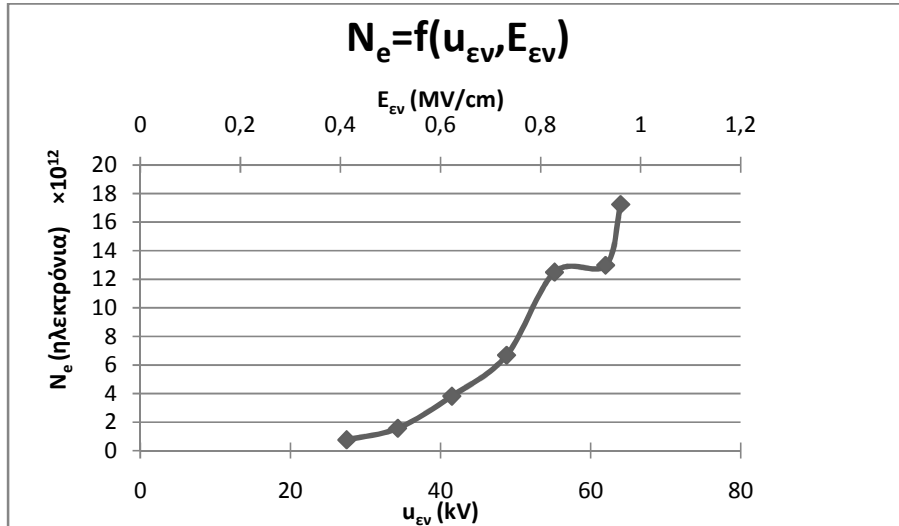
Σχήμα 3.1-12: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της τιμής του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων (I_2), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



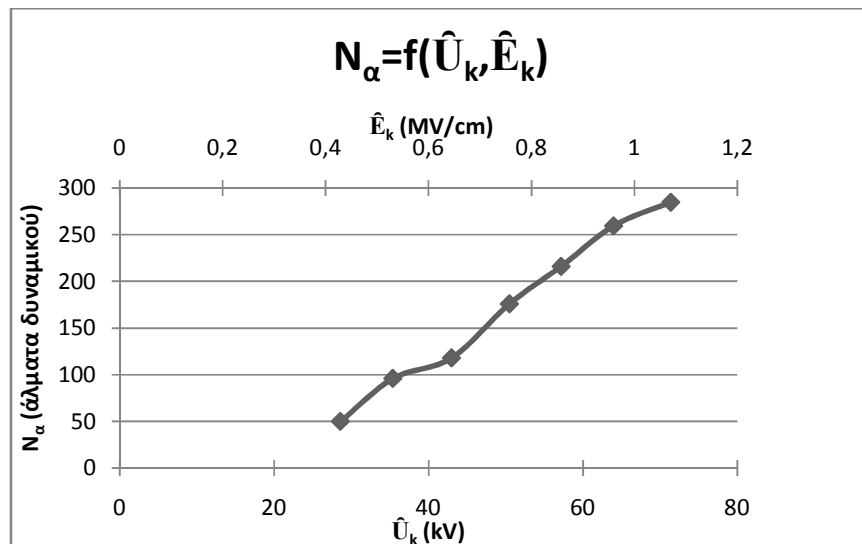
Σχήμα 3.1-13: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσσει της τιμής του ρεύματος κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (ΔI), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



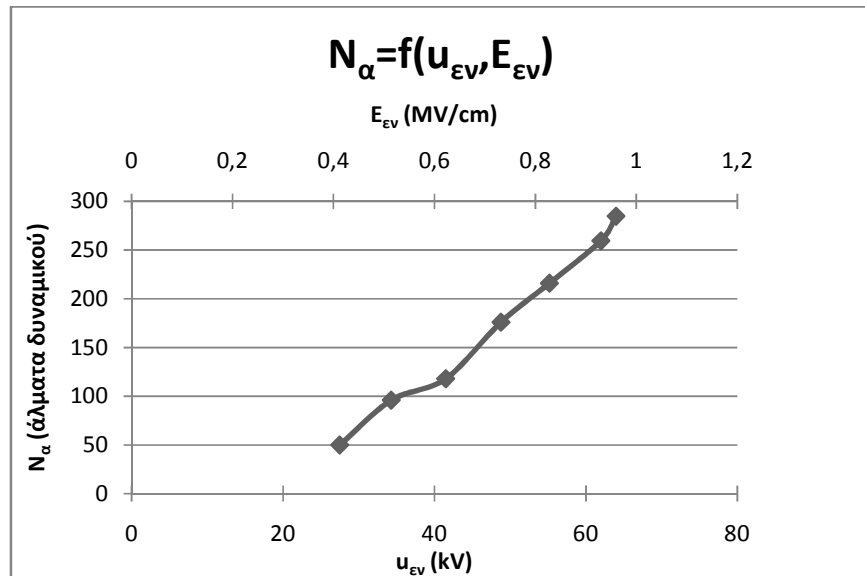
Σχήμα 3.1-14: Χαρακτηριστική του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων (N_e) συναρτήσσει της μέγιστης τιμής της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



Σχήμα 3.1-15: Χαρακτηριστική του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων (N_e) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{Ev}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{Ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



Σχήμα 3.1-16: Χαρακτηριστική του μέγιστου αριθμού αλμάτων δυναμικού (N_a) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



Σχήμα 3.1-17: Χαρακτηριστική του μέγιστου αριθμού αλμάτων δυναμικού (N_{α}) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{EV}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{EV}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.

3.2 ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ -1,2/50 μ s -ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ d=1mm

$ \hat{U}_k $ (kV)	\hat{E}_k (MV/cm)	$lu_{ev} $ (kV)	E_{ev} (MV/cm)	C_m (nF)	q_1 (μ C)	q_2 (μ C)	Δq (μ C)	$lu_1 $ (V)	$lu_2 $ (V)	$ \Delta u $ (V)
29,1	0,4335	27,5 1,40	0,4097	10	0,11	0,2200	0,11	11	22	11
36,7	0,5467	35 0,00	0,5214	10	0,13	0,4500	0,32	13	45	32
44,1	0,6570	42,2 0,00	0,6287	20	0,17	0,9500	0,78	8,5	47,5	39
51,5	0,7672	49,5 0,00	0,7374	20	0,21	1,3000	1,09	10,5	65	54,5
58,2	0,8670	55,7 0,00	0,8298	210	0,2394	2,1504	1,911	1,14	10,24	9,1
66,4	0,9892	64 0,00	0,9535	210	0,2604	3,0009	2,7405	1,24	14,29	13,05
72,1	1,0741	69,2 0,00	1,0309	210	0,2709	4,0005	3,7296	1,29	19,05	17,76
78,1	1,1635	72,2 0,00	1,0749	210	0,2898	6,1005	5,8107	1,38	29,05	27,67

Πίνακας 3.2-1

$ \hat{U}_k $ (kV)	t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	Δt (μ s)	i_1 (A)	i_2 (A)	Δi (A)	ΔW_e (eV)	N_e ($\times 10^{12}$)	N_a
29,1	3,3	15	11,7	0,0333	0,0147	0,0094	5,5	0,686642	117
36,7	1,7	16,5	14,8	0,0765	0,0273	0,0216	16	1,9975	148
44,1	1,6	19,5	17,9	0,1063	0,0487	0,0436	19,5	4,86891	179
51,5	1,5	24,5	23	0,1400	0,0531	0,0474	27,25	6,804	230
58,2	1,4	27,5	26,1	0,1710	0,0782	0,0732	4,55	11,9288	261
66,4	1,2	32	30,8	0,2170	0,0938	0,0890	6,525	17,1067	308
72,1	1	34,3	33,3	0,2709	0,1166	0,1120	8,88	23,2809	333
78,1	0,85	40	39,15	0,3409	0,1525	0,1484	13,835	36,2715	391,5

Πίνακας 3.2-2

Πίνακες 3.2-1, 3.2-2: Στατιστική ανάλυση της έναρξης των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2-1÷2-13.

Υλικό: βακελίτης εντός μονωτικού ελαίου

Πάχος δοκιμίου: $d=1\text{mm}$

Μορφή επιβαλλόμενης τάσης: $-1,2/50\mu\text{s}$

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

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

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

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

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

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

$\Delta q=C_m \cdot \Delta u$, αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου λόγω μερικών εκκενώσεων

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-1) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-1) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u=u_2-u_1$, συνολικό άλμα δυναμικού

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$\Delta t=t_2-t_1$, χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

i_1 : στιγμιαία τιμή ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

i_2 : στιγμιαία τιμή ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta i=\Delta q/\Delta t$

ΔW_e : περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο

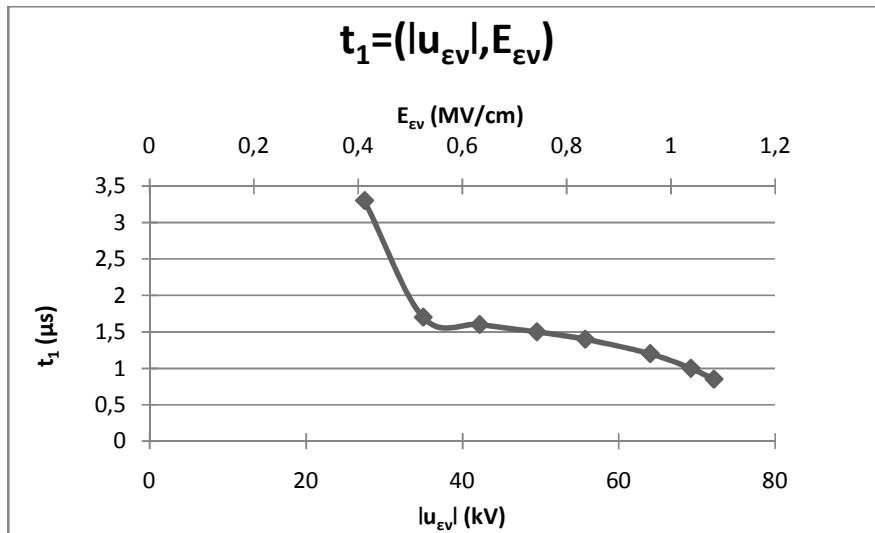
N_e : αριθμός των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων

N_a : μέγιστος αριθμός αλμάτων δυναμικού

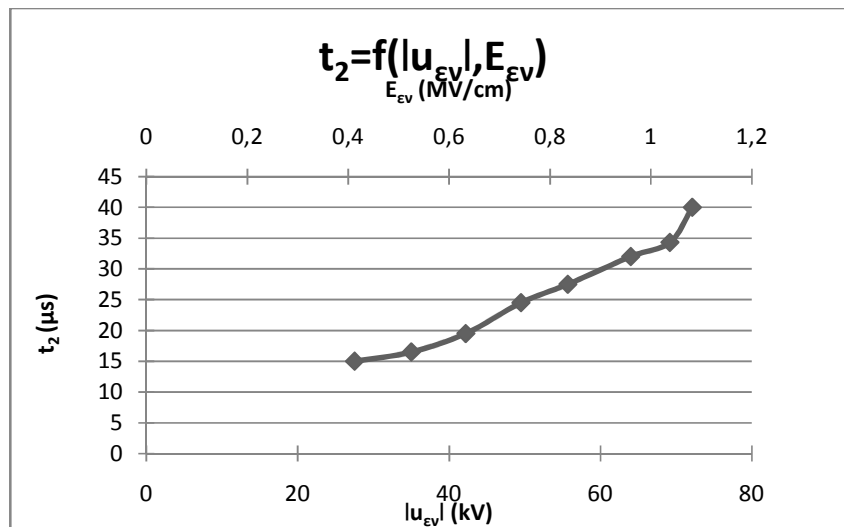
Σημείωση 1: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.

Σημείωση 2: Στους πίνακες και στα διαγράμματα χρησιμοποιούμε απόλυτες τιμές τάσης.

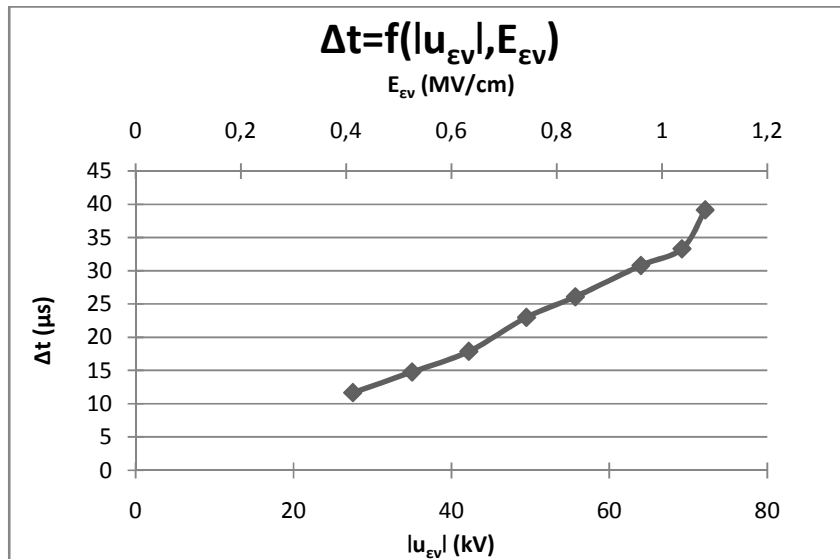
Διαγράμματα



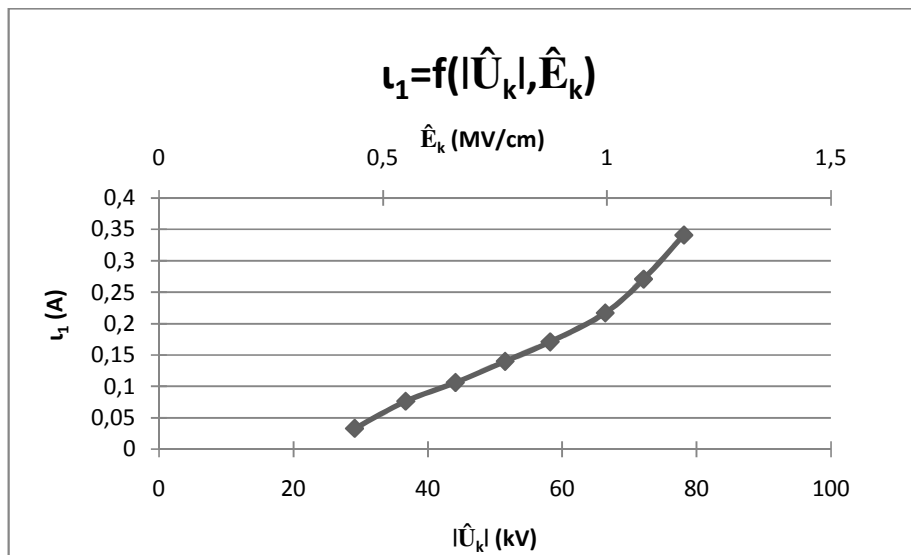
Σχήμα 3.2-1: Χαρακτηριστική χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων (t_1) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{ev}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu\text{s}$.



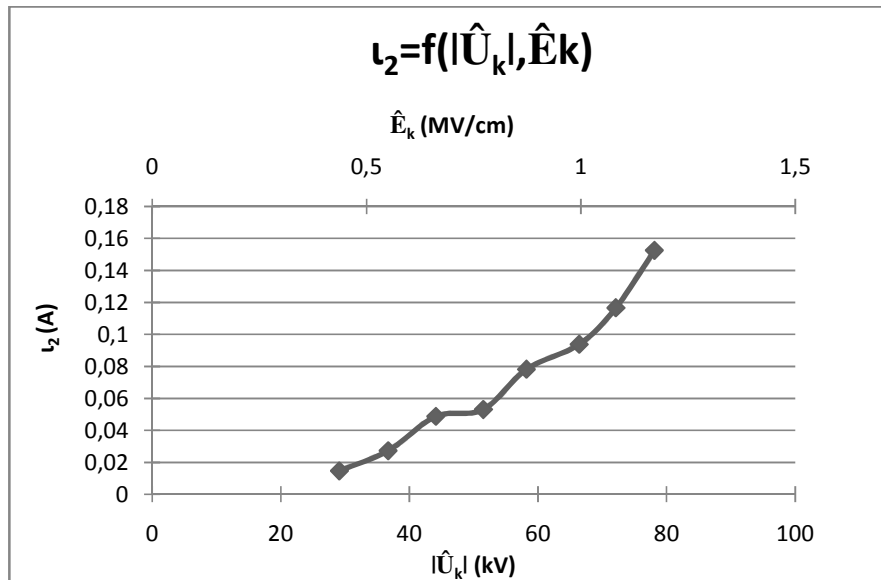
Σχήμα 3.2-2: Χαρακτηριστική χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (t_2) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{ev}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu\text{s}$.



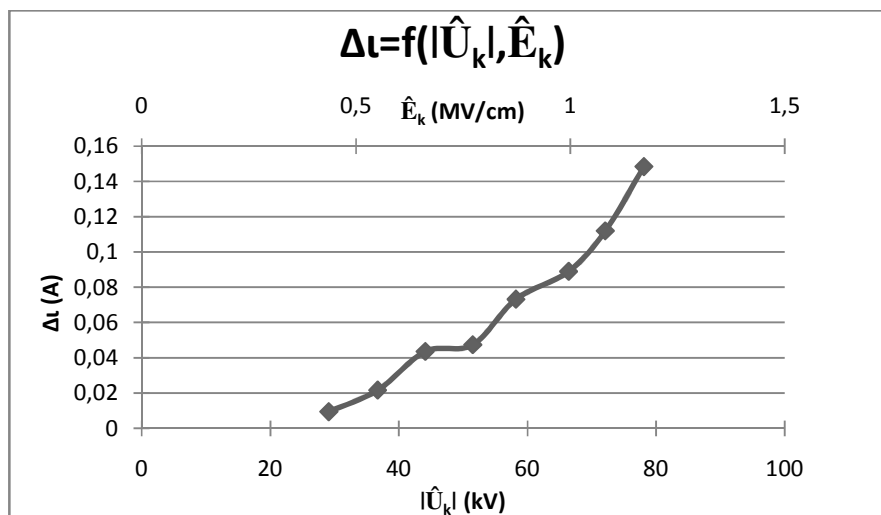
Σχήμα 3.2-3: Χαρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων (Δt) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{ev}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



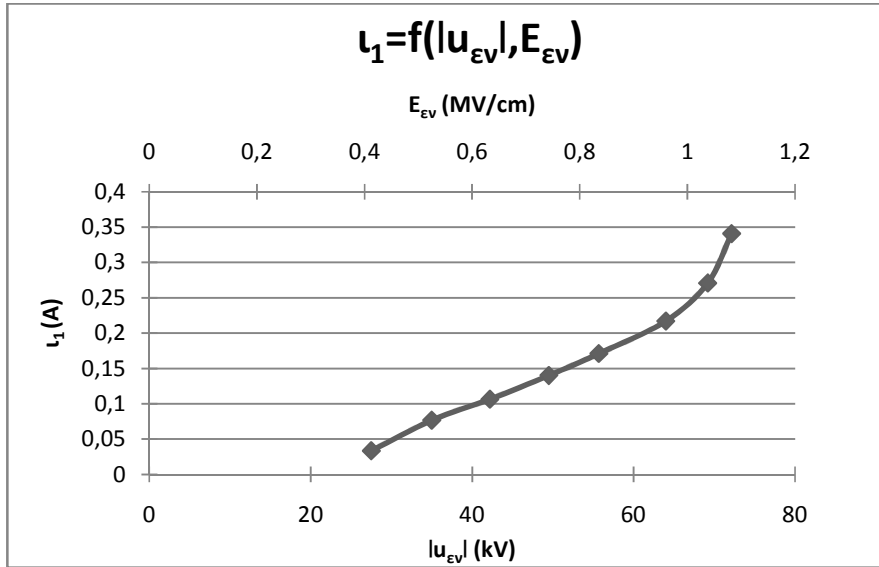
Σχήμα 3.2-4: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (i_1) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της μέγιστης επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης ($|U_k|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



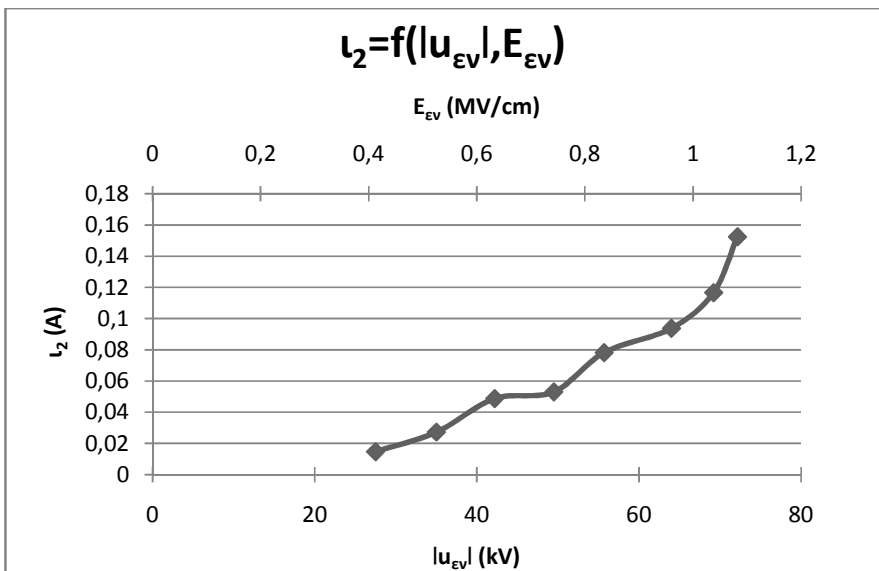
Σχήμα 3.2-5: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων (I_2) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της μέγιστης επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης ($|\hat{U}_k|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



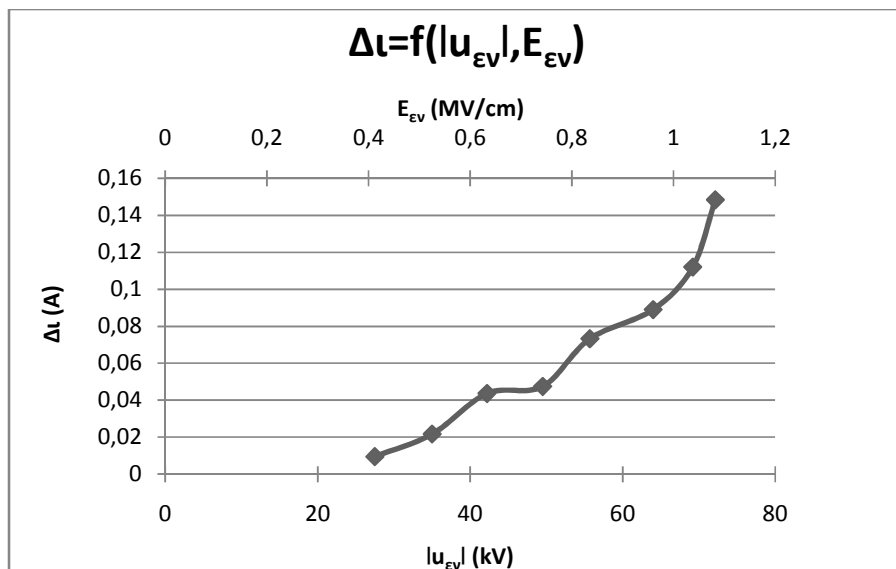
Σχήμα 3.2-6: Χαρακτηριστική του ρεύματος κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (ΔI) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της μέγιστης επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης ($|\hat{U}_k|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



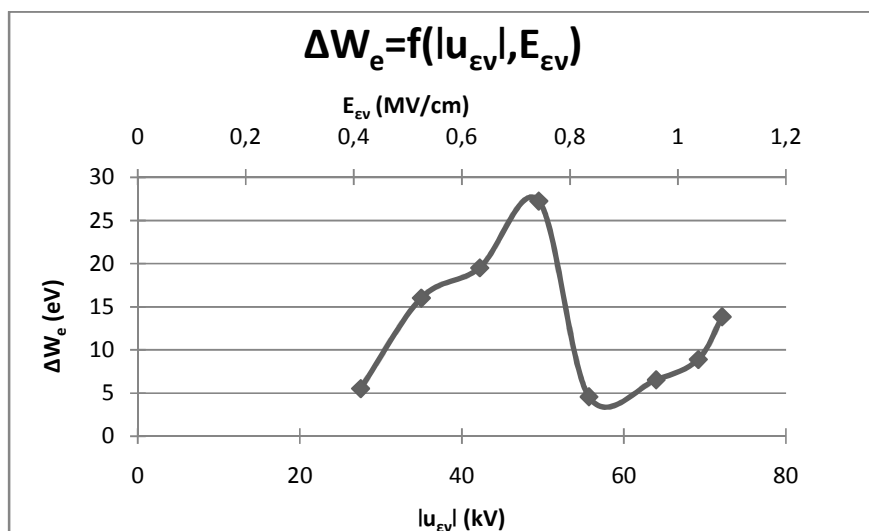
Σχήμα 3.2-7: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (I_1) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{EV}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{EV}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



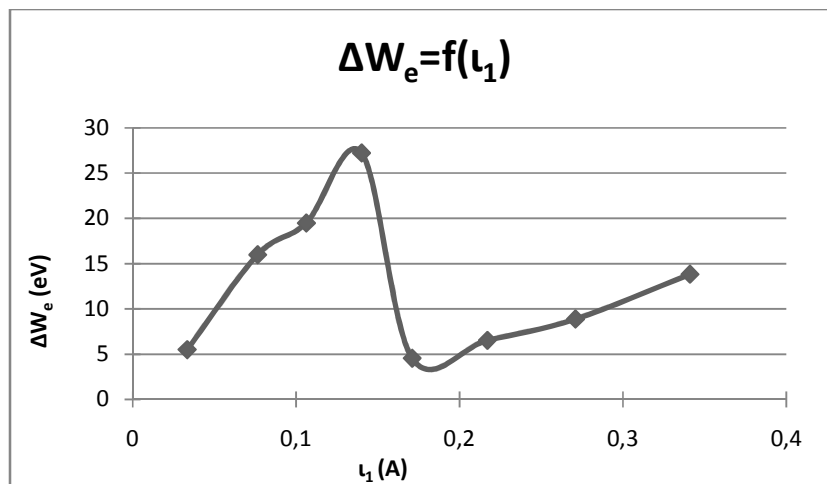
Σχήμα 3.2-8: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων (I_2) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{EV}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{EV}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



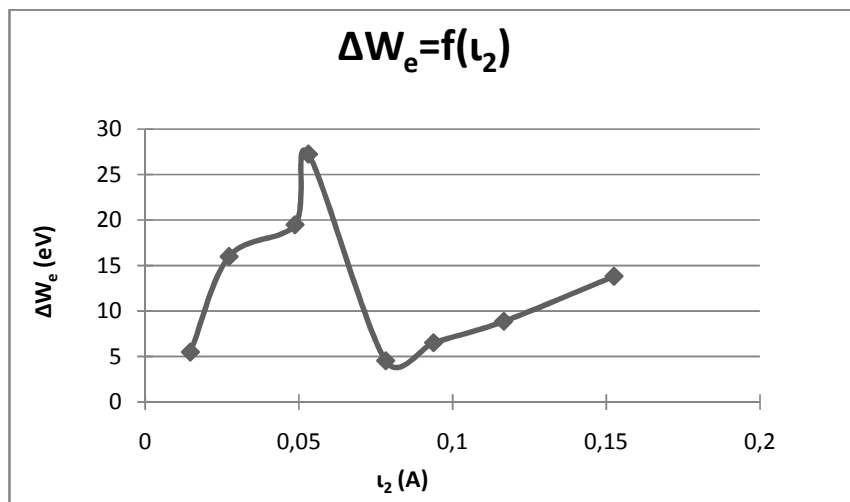
Σχήμα 3.2-9: Χαρακτηριστική του ρεύματος κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (Δi) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{\epsilon\nu}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης ($E_{\epsilon\nu}$), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



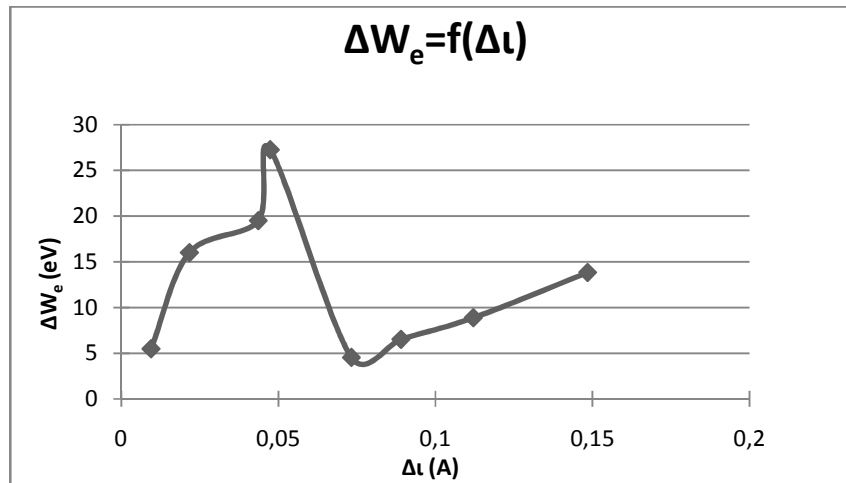
Σχήμα 3.2-10: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{\epsilon\nu}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης ($E_{\epsilon\nu}$), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



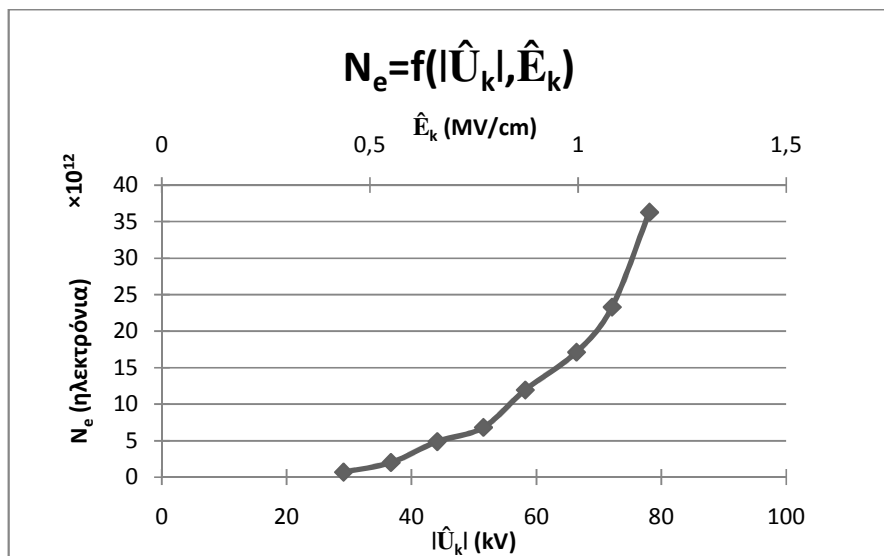
Σχήμα 3.2-11: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της τιμής του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (I_1), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.



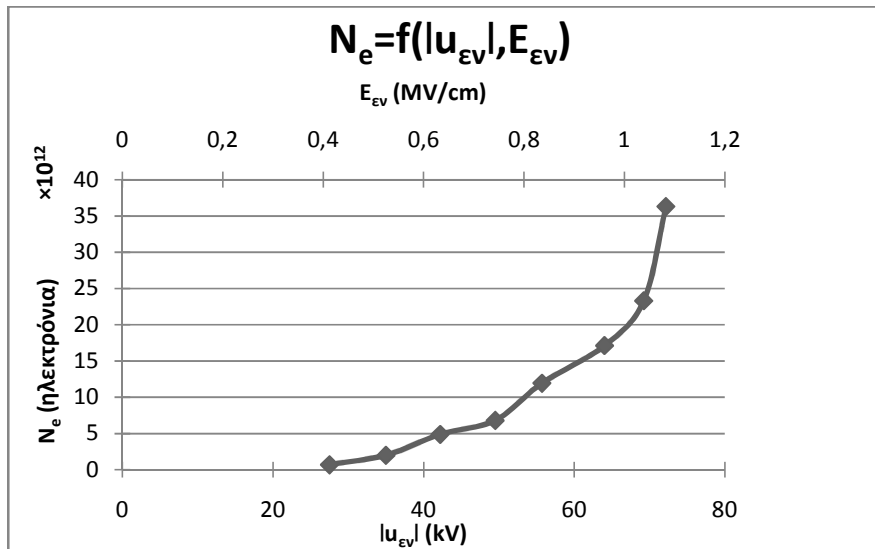
Σχήμα 3.2-12: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της τιμής του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων (I_2), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.



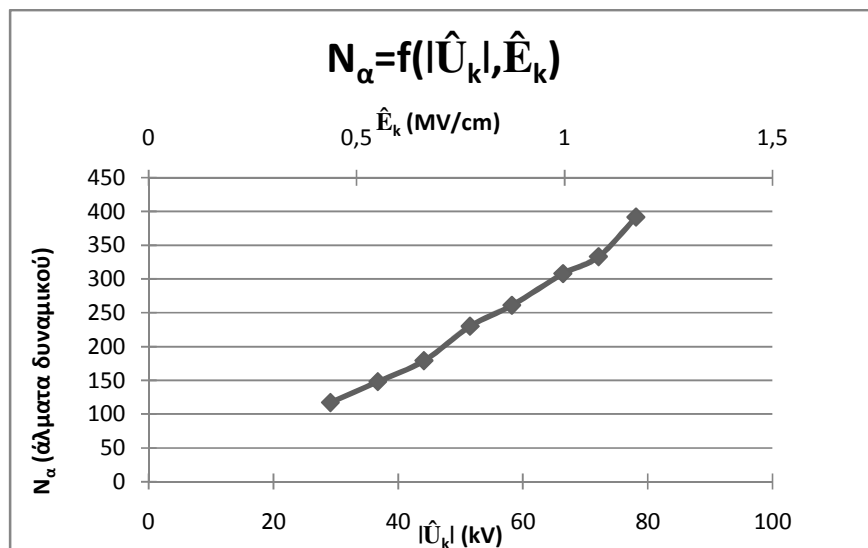
Σχήμα 3.2-13: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της τιμής του ρεύματος κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (ΔI), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.



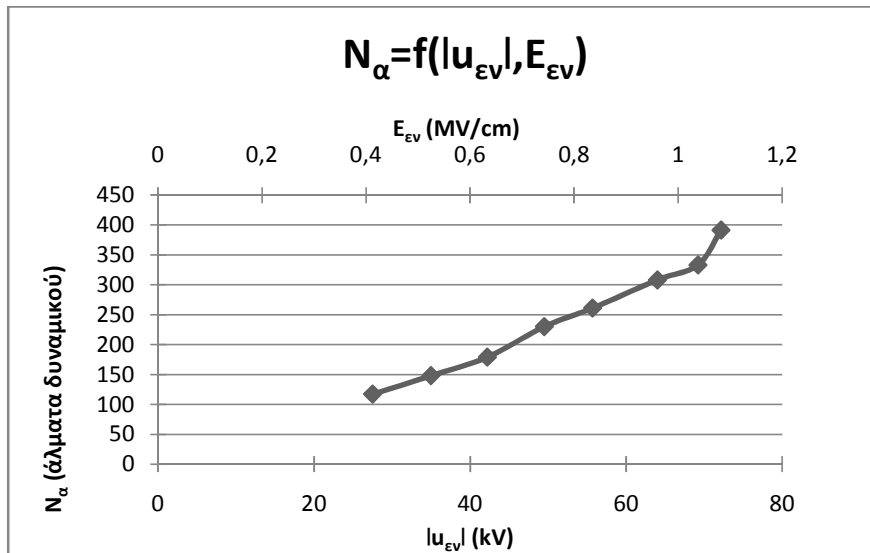
Σχήμα 3.2-14: Χαρακτηριστική του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων (N_e) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της μέγιστης επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης ($|U_k|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.



Σχήμα 3.2-15: Χαρακτηριστική του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων (N_e) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{ev}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



Σχήμα 3.2-16: Χαρακτηριστική του μέγιστου αριθμού αλμάτων δυναμικού (N_a) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της μέγιστης επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



Σχήμα 3.2-17: Χαρακτηριστική του μέγιστου αριθμού αλμάτων δυναμικού (N_{α}) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{\epsilon v}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης ($E_{\epsilon v}$), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.

**3.3 ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ +1,2/50 μ s -ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ
d=2mm**

\hat{U}_k (kV)	\hat{E}_k (MV/cm)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	C_m (nF)	q_1 (μ C)	q_2 (μ C)	Δq (μ C)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)
35,4	0,3601	34 1,74	0,3458	10	0,1	0,21	0,11	10	21	11
43,8	0,4455	42,4 0,00	0,4313	10	0,11	0,35	0,24	11	35	24
50,2	0,5106	48,7 0,00	0,4953	10	0,12	0,4	0,28	12	40	28
57	0,5798	55,4 0,00	0,5635	10	0,16	0,65	0,49	16	65	49
65	0,6611	63,1 0,00	0,6418	20	0,2	0,98	0,78	10	49	39
71,4	0,7262	69,9 0,00	0,7110	20	0,23	1,2	0,97	11,5	60	48,5
86,5	0,8798	84,9 0,00	0,8635	210	0,8799	1,8291	0,9492	4,19	8,71	4,52
94,3	0,9592	92,6 0,00	0,9419	210	1,1991	2,2008	1,0017	5,71	10,48	4,77
99,7	1,0141	97,9 0,00	0,9958	210	1,2495	3,0996	1,8501	5,95	14,76	8,81
113,8	1,1575	112 0,00	1,1392	210	2,1609	3,9396	1,7787	10,29	18,76	8,47
121,2	1,2328	118,3 0,00	1,2033	210	0,9996	3,0009	2,0013	4,76	14,29	9,53
126	1,2816	123 0,00	1,2511	210	1,1991	2,751	1,5519	5,71	13,1	7,39
132,7	1,3497	129,5 0,00	1,3172	210	1,2495	3,5007	2,2512	5,95	16,67	10,72

Πίνακας 3.3-1

\hat{U}_k (kV)	t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	Δt (μ s)	i_1 (A)	i_2 (A)	Δi (A)	ΔW_e (eV)	N_e ($\times 10^{12}$)	N_a
35,4	3,4	12,1	8,7	0,0294	0,0174	0,0126	5,5	0,68664	87
43,8	2,1	14,5	12,4	0,0524	0,0241	0,0194	12	1,49813	124
50,2	1,7	15	13,3	0,0706	0,0267	0,0211	14	1,74782	133
57	1,42	19,5	18,08	0,1127	0,0333	0,0271	24,5	3,05868	180,8
65	1,18	20,5	19,32	0,1695	0,0478	0,0404	19,5	4,86891	193,2
71,4	1,18	25,5	24,32	0,1949	0,0471	0,0399	24,25	6,05493	243,2
86,5	1,18	27,1	25,92	0,7457	0,0675	0,0366	2,26	5,92509	259,2
94,3	1,18	26,5	25,32	1,0162	0,0830	0,0396	2,385	6,25281	253,2
99,7	1,18	35,1	33,92	1,0589	0,0883	0,0545	4,405	11,5487	339,2
113,8	1,18	33,3	32,12	1,8313	0,1183	0,0554	4,235	11,103	321,2
121,2	1,18	25,2	24,02	0,8471	0,1191	0,0833	4,765	12,4925	240,2
126	1,18	18,2	17,02	1,0162	0,1512	0,0912	3,695	9,68727	170,2
132,7	1,18	24,2	23,02	1,0589	0,1447	0,0978	5,36	14,0524	230,2

Πίνακας 3.3-2

Πίνακες 3.3-1, 3.3-2: Στατιστική ανάλυση της έναρξης των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2-1÷2-13.

Υλικό: βακελίτης εντός μονωτικού ελαίου

Πάχος δοκιμίου: $d=2\text{mm}$

Μορφή επιβαλλόμενης τάσης: $+1,2/50\mu\text{s}$

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

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

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

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

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

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

$\Delta q=C_m \cdot \Delta u$, αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου λόγω μερικών εκκενώσεων

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-1) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-1) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u=u_2-u_1$, συνολικό άλμα δυναμικού

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$\Delta t=t_2-t_1$, χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

i_1 : στιγμιαία τιμή ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

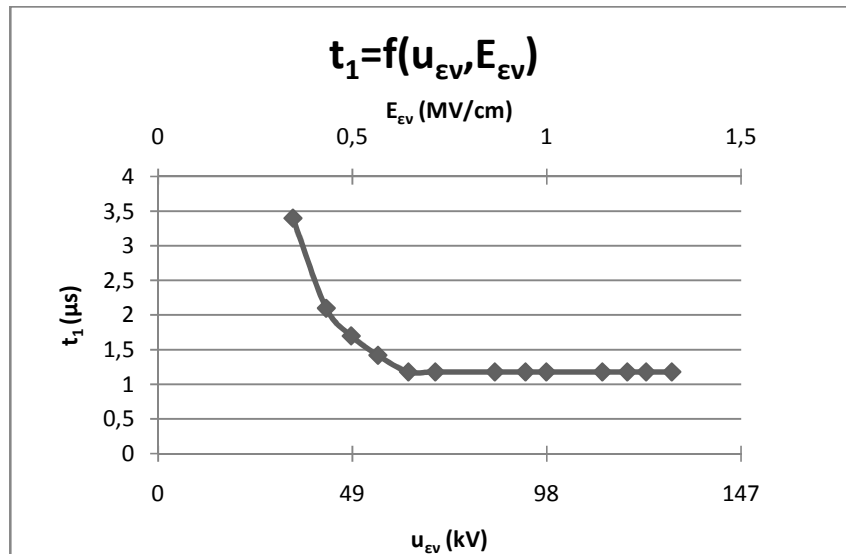
i_2 : στιγμιαία τιμή ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta i=\Delta q/\Delta t$

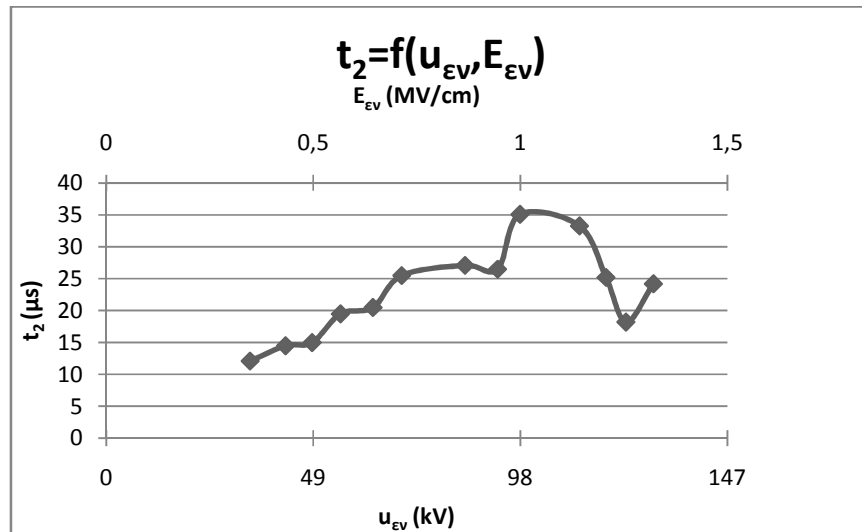
ΔW_e : περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους από την άνοδο
 N_e : αριθμός των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων
 N_a : μέγιστος αριθμός αλμάτων δυναμικού

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.

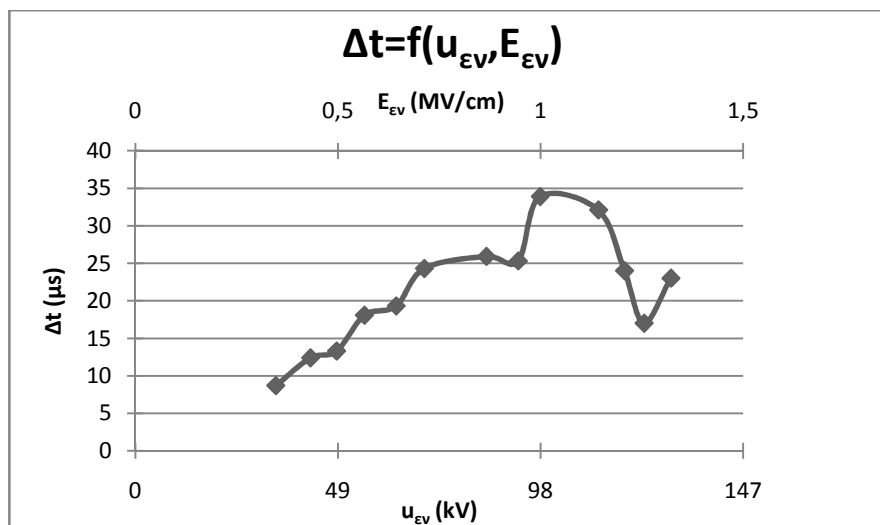
Διαγράμματα



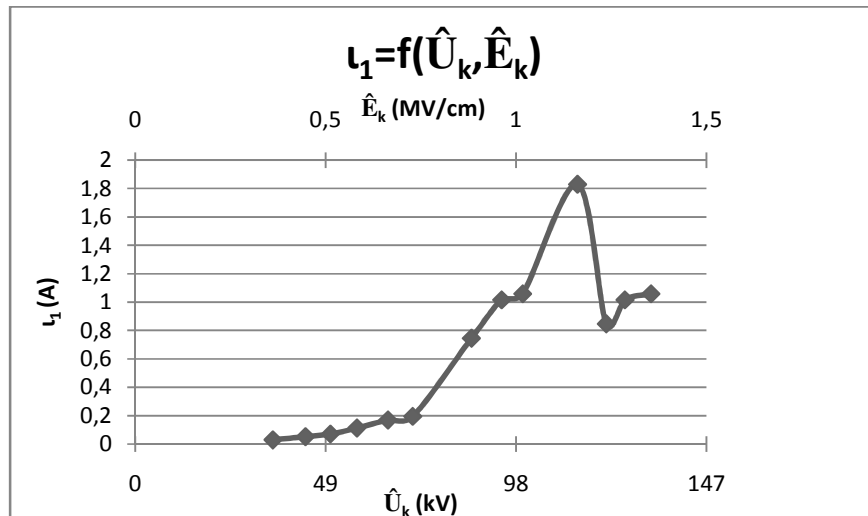
Σχήμα 3.3-1: Χαρακτηριστική χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων (t_1) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{Ev}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{Ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50 μs .



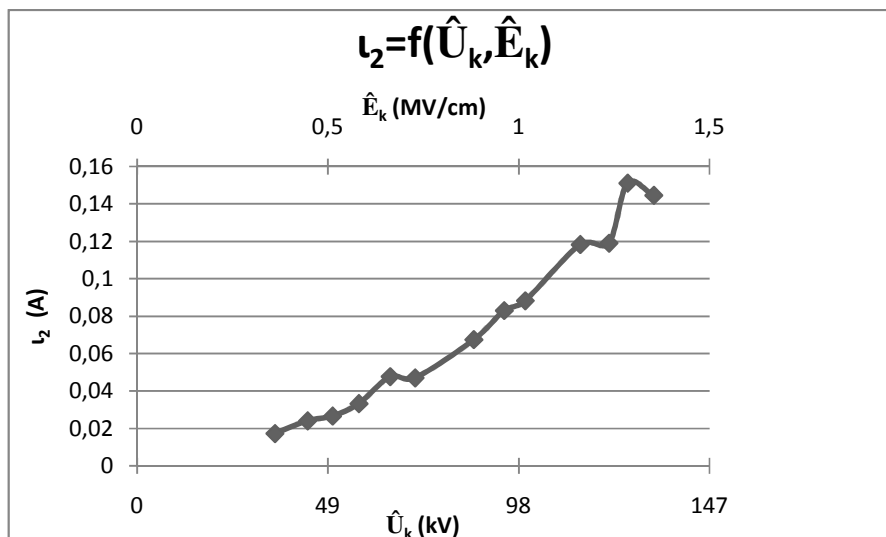
Σχήμα 3.3-2: Χαρακτηριστική χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (t_2) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{EV}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{EV}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



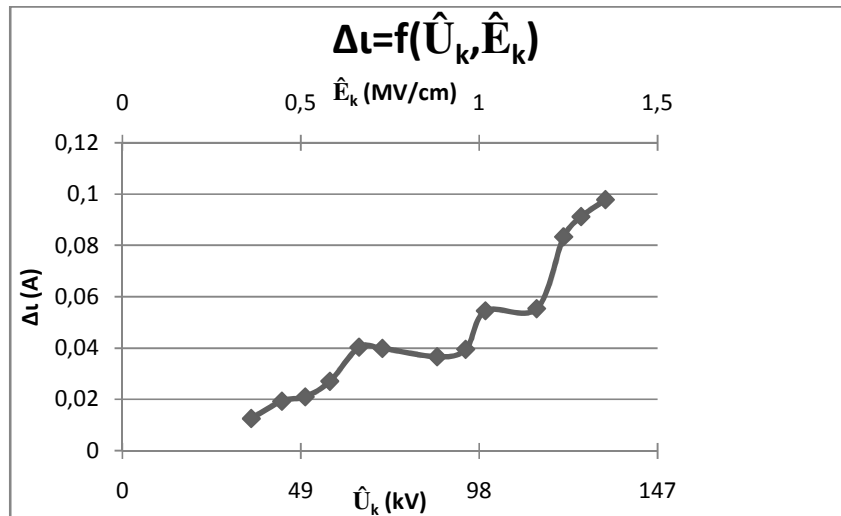
Σχήμα 3.3-3: Χαρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων (Δt) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{EV}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{EV}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



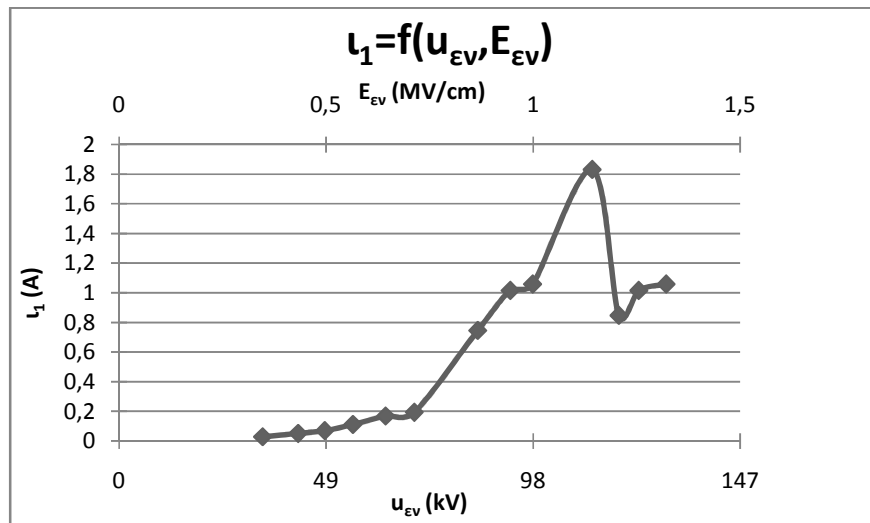
Σχήμα 3.3-4: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (i_1) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



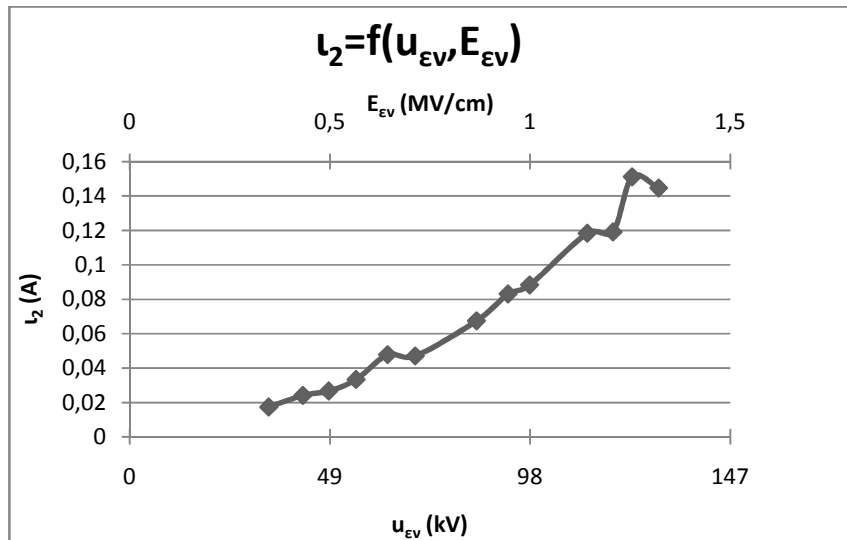
Σχήμα 3.3-5: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων (i_2) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



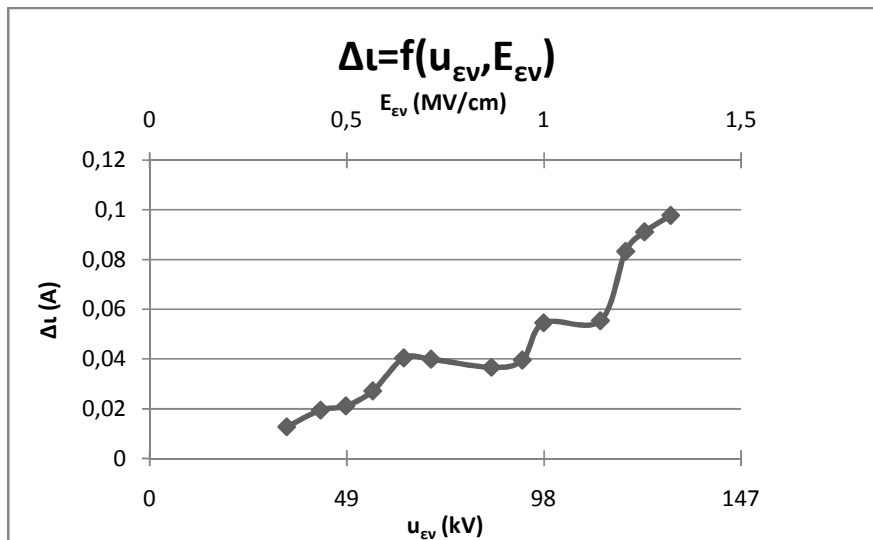
Σχήμα 3.3-6: Χαρακτηριστική του ρεύματος κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (Δi) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



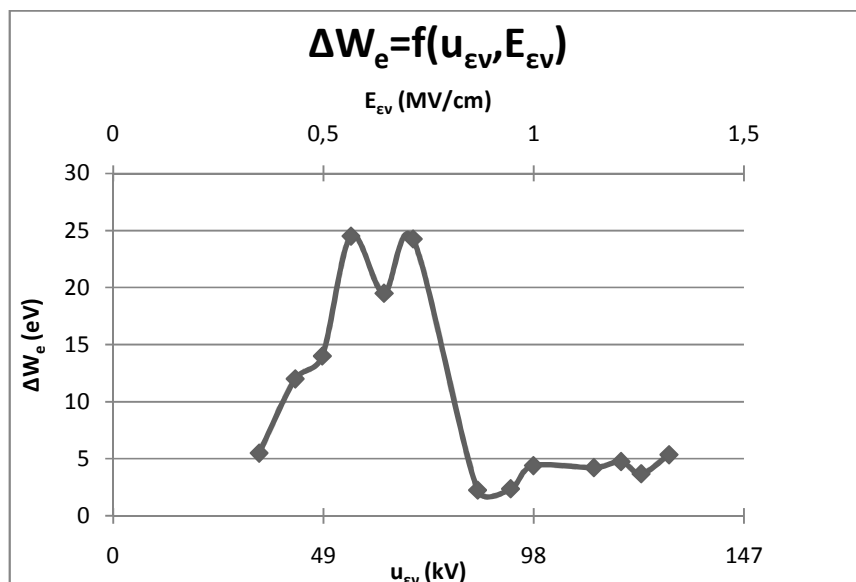
Σχήμα 3.3-7: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (I_1) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{Ev}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{Ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



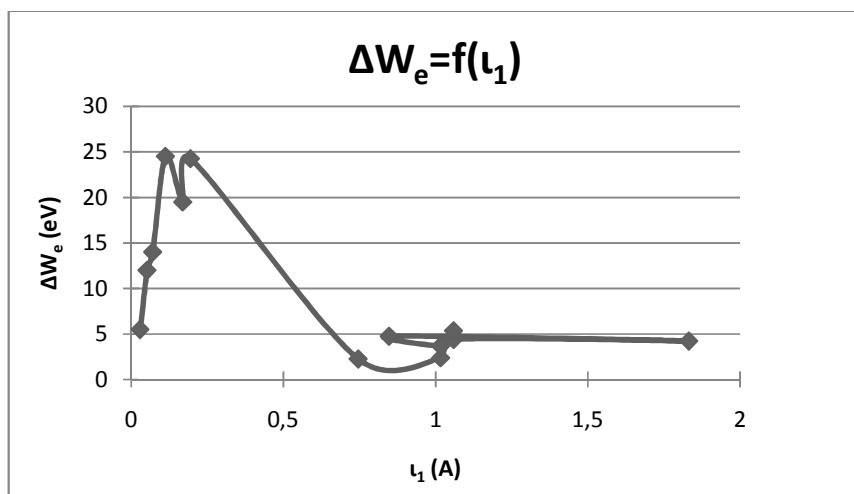
Σχήμα 3.3-8: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων (I_2) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{Ev}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{Ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



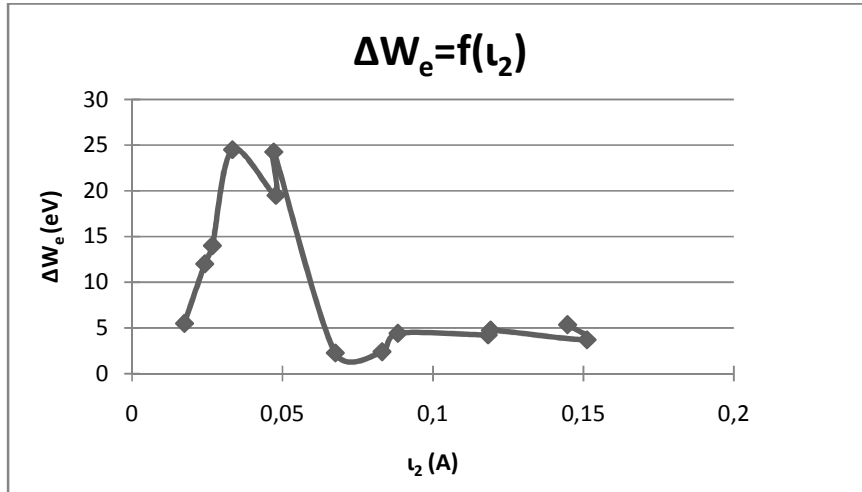
Σχήμα 3.3-9: Χαρακτηριστική του ρεύματος κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (ΔI) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{Ev}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{Ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



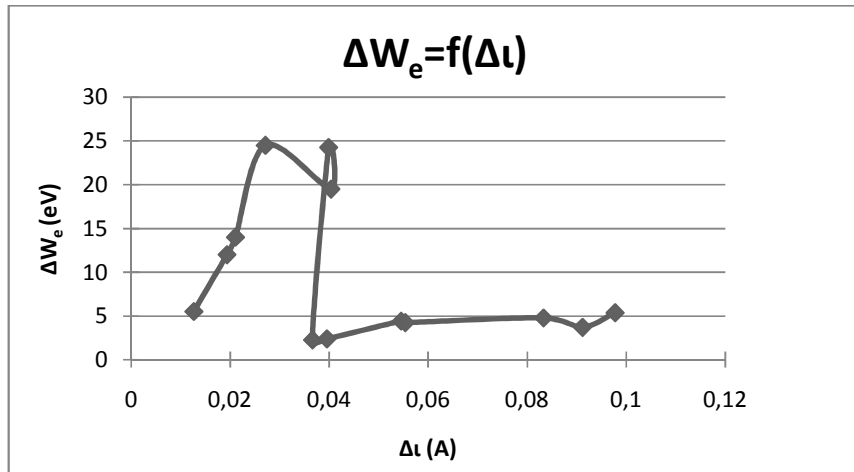
Σχήμα 3.3-10: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{ev}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



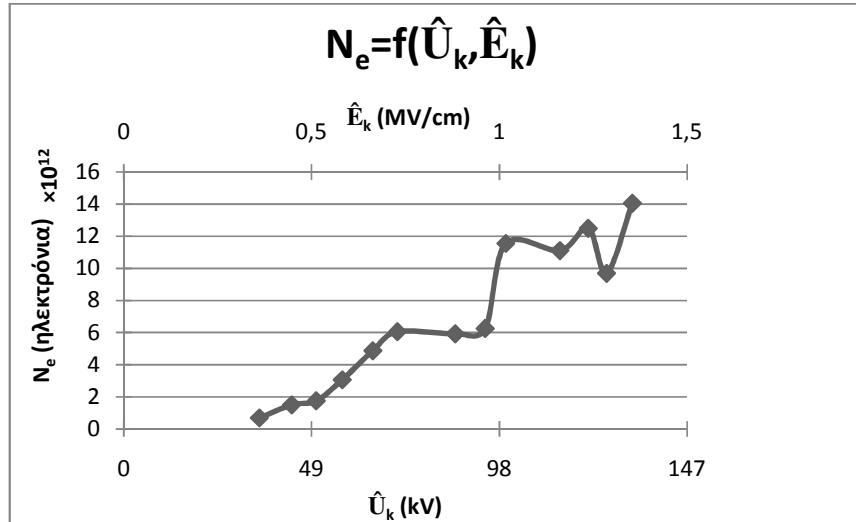
Σχήμα 3.3-11: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της τιμής του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (I_1), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



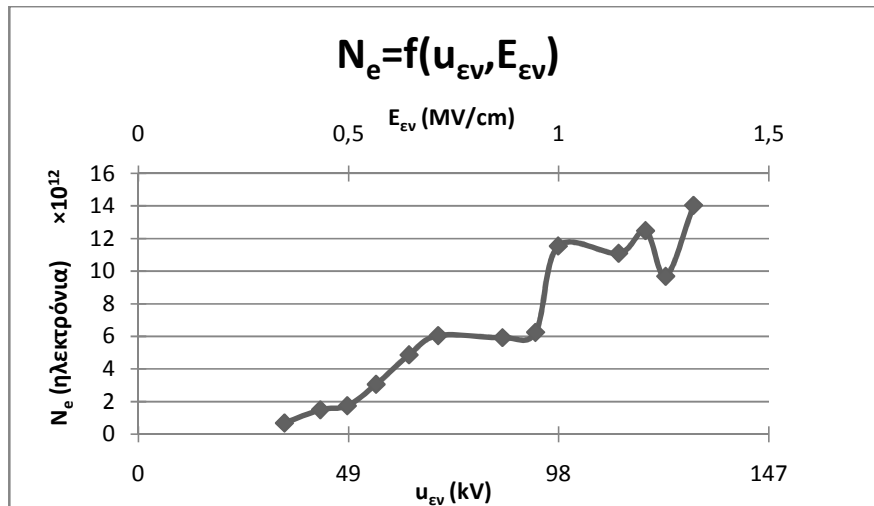
Σχήμα 3.3-12: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της τιμής του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων (I_2), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



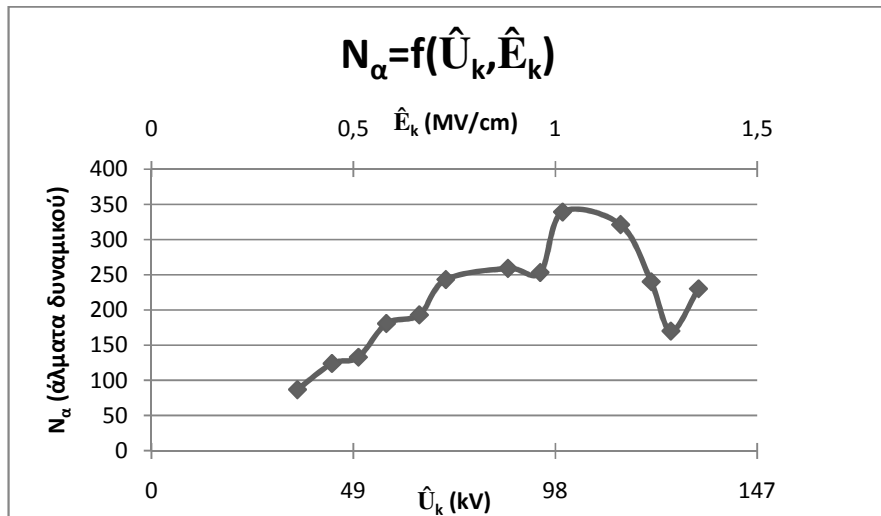
Σχήμα 3.3-13: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της τιμής του ρεύματος κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (ΔI), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



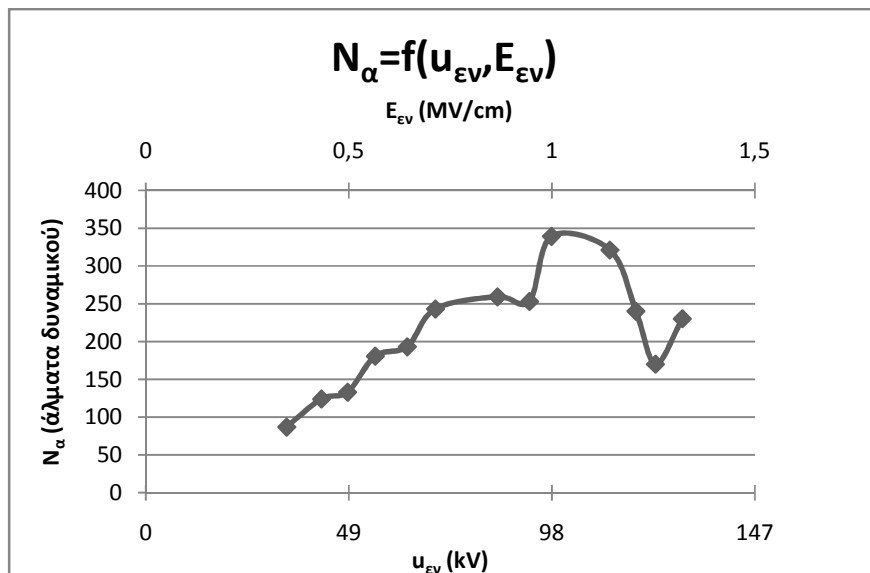
Σχήμα 3.3-14: Χαρακτηριστική του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων (N_e) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



Σχήμα 3.3-15: Χαρακτηριστική του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων (N_e) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{ev}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



Σχήμα 3.3-16: Χαρακτηριστική του μέγιστου αριθμού αλμάτων δυναμικού (N_α) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.



Σχήμα 3.3-17: Χαρακτηριστική του μέγιστου αριθμού αλμάτων δυναμικού (N_α) συναρτήσει της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{ev}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής +1,2/50μs.

**3.4 ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ -1,2/50 μ s -ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ
d=2mm**

$ \hat{U}_k $ (kV)	\hat{E}_k (MV/cm)	$ u_{ev} $ (kV)	E_{ev} (MV/cm)	C_m (nF)	q_1 (μ C)	q_2 (μ C)	Δq (μ C)	$ u_1 $ (V)	$ u_2 $ (V)	$ \Delta u $ (V)
36,2	0,3682	35 0,00	0,3560	10	0,15	0,23	0,08	15	23	8
44,5	0,4526	43,1 0,00	0,4384	10	0,21	0,42	0,21	21	42	21
51,2	0,5208	48,1 0,00	0,4892	10	0,24	0,52	0,28	24	52	28
57,2	0,5818	55,3 0,00	0,5625	20	0,32	0,86	0,54	16	43	27
64,7	0,6581	63,1 0,00	0,6418	20	0,36	1	0,64	18	50	32
73,1	0,7435	71,1 0,00	0,7232	210	0,3906	1,6191	1,2285	1,86	7,71	5,85
80,1	0,8147	77,2 0,00	0,7852	210	0,5397	2,2008	1,6611	2,57	10,48	7,91
92	0,9358	88,6 0,00	0,9012	210	0,5901	2,3499	1,7598	2,81	11,19	8,38
99,7	1,0141	97,2 0,00	0,9886	210	0,3507	1,3503	0,9996	1,67	6,43	4,76
106,4	1,0822	103 0,00	1,0476	210	1,05	2,7006	1,6506	5	12,86	7,86
115,9	1,1789	113 0,00	1,1494	1000	1,2	3,1	1,9	1,2	3,1	1,9
121,2	1,2328	117,5 0,00	1,1951	1000	1,8	3,82	2,02	1,8	3,82	2,02
126,6	1,2877	123 0,00	1,2511	1000	2	4,2	2,2	2	4,2	2,2
134,7	1,3701	131 0,00	1,3324	1000	2,4	4,4	2	2,4	4,4	2

Πίνακας 3.4-1

$ \hat{U}_k $ (kV)	t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	Δt (μ s)	i_1 (A)	i_2 (A)	Δi (A)	ΔW_e (eV)	N_e ($\times 10^{12}$)	N_a
36,2	2,5	15,5	13	0,0600	0,0148	0,0062	4	0,499376	130
44,5	2,2	19,2	17	0,0955	0,0219	0,0124	10,5	1,31086	170
51,2	2	21,6	19,6	0,1200	0,0241	0,0143	14	1,74782	196
57,2	1,8	24	22,2	0,1778	0,0358	0,0243	13,5	3,37079	222
64,7	1,7	27	25,3	0,2118	0,0370	0,0253	16	3,99501	253
73,1	1,65	30	28,35	0,2367	0,0540	0,0433	2,925	7,66854	283,5
80,1	1,62	36	34,38	0,3331	0,0611	0,0483	3,955	10,3689	343,8
92	1,6	34	32,4	0,3688	0,0691	0,0543	4,19	10,985	324
99,7	1,56	42	40,44	0,2248	0,0322	0,0247	2,38	6,2397	404,4
106,4	1,55	29	27,45	0,6774	0,0931	0,0601	3,93	10,3034	274,5
115,9	1,5	36	34,5	0,8000	0,0861	0,0551	0,95	11,8602	345
121,2	1,21	40,1	38,89	1,4876	0,0953	0,0519	1,01	12,6092	388,9
126,6	1,21	34,5	33,29	1,6529	0,1217	0,0661	1,1	13,7328	332,9
134,7	1,21	32,5	31,29	1,9835	0,1354	0,0639	1	12,4844	312,9

Πίνακας 3.4-2

Πίνακες 3.4-1, 3.4-2: Στατιστική ανάλυση της έναρξης των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2-1÷2-13.

Υλικό: βακελίτης εντός μονωτικού ελαίου

Πάχος δοκιμίου: $d=2\text{mm}$

Μορφή επιβαλλόμενης τάσης: $-1,2/50\mu\text{s}$

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

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

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

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

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

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

$\Delta q=C_m \cdot \Delta u$, αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου λόγω μερικών εκκενώσεων

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-1) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-1) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u=u_2-u_1$, συνολικό άλμα δυναμικού

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$\Delta t=t_2-t_1$, χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

i_1 : στιγμιαία τιμή ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

i_2 : στιγμιαία τιμή ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

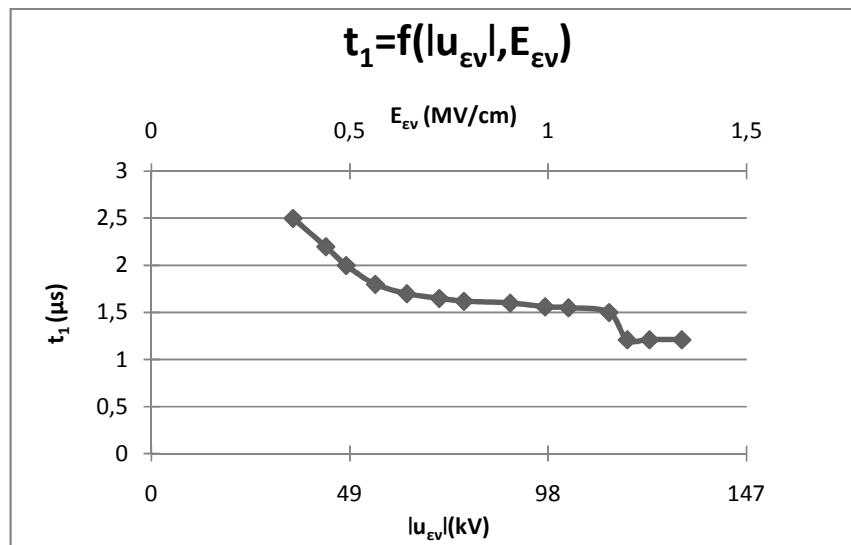
$\Delta i=\Delta q/\Delta t$

ΔW_e : περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο
 N_e : αριθμός των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων
 N_a : μέγιστος αριθμός αλμάτων δυναμικού

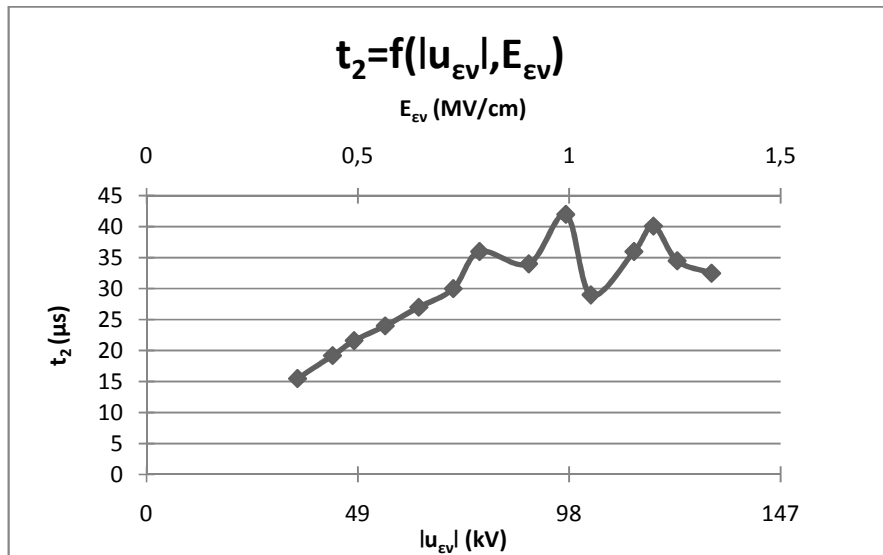
Σημείωση 1: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.

Σημείωση 2: Στους πίνακες και στα διαγράμματα χρησιμοποιούμε απόλυτες τιμές της τάσης.

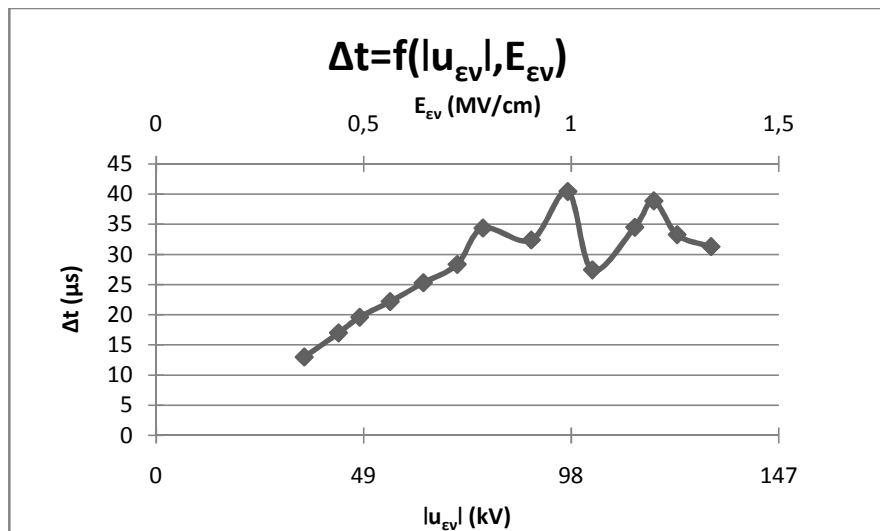
Διαγράμματα



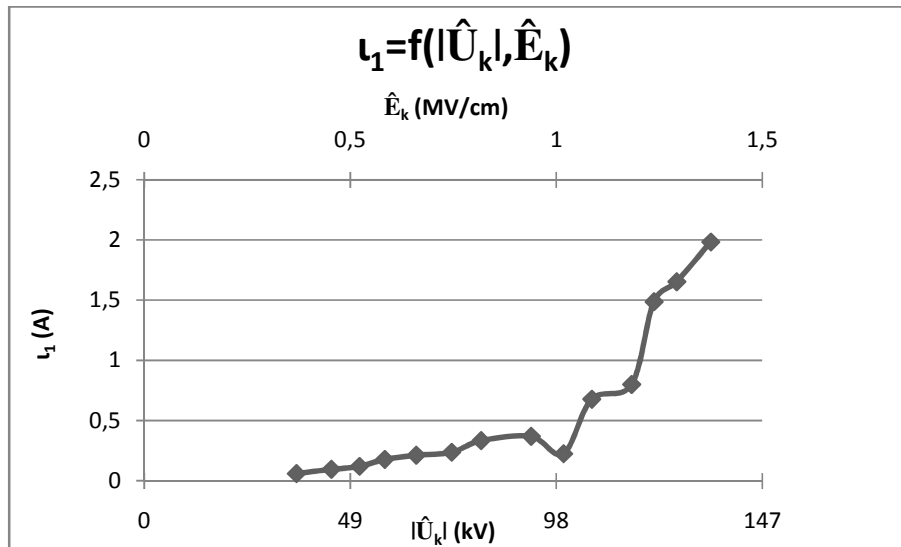
Σχήμα 3.4-1: Χαρακτηριστική χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων (t_1) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{ev}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



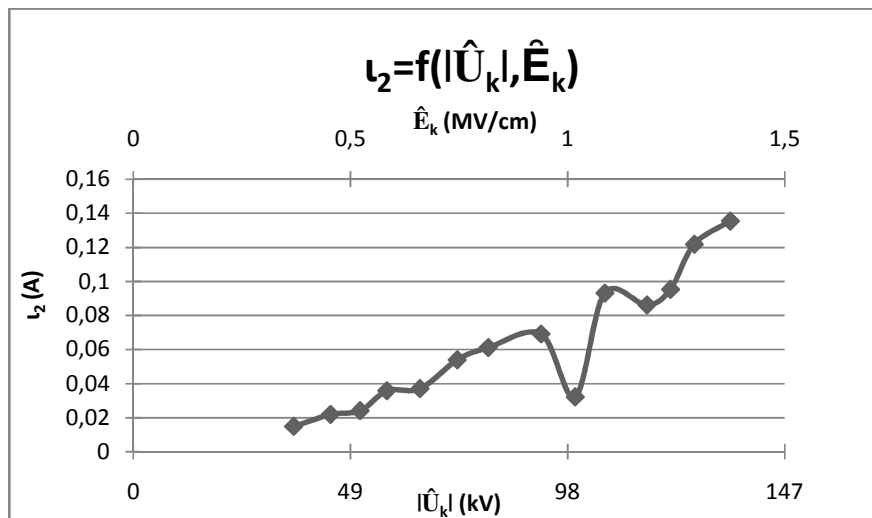
Σχήμα 3.4-2: Χαρακτηριστική χρόνου περαιώσης των μερικών εκκενώσεων (t_2) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{Ev}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{Ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



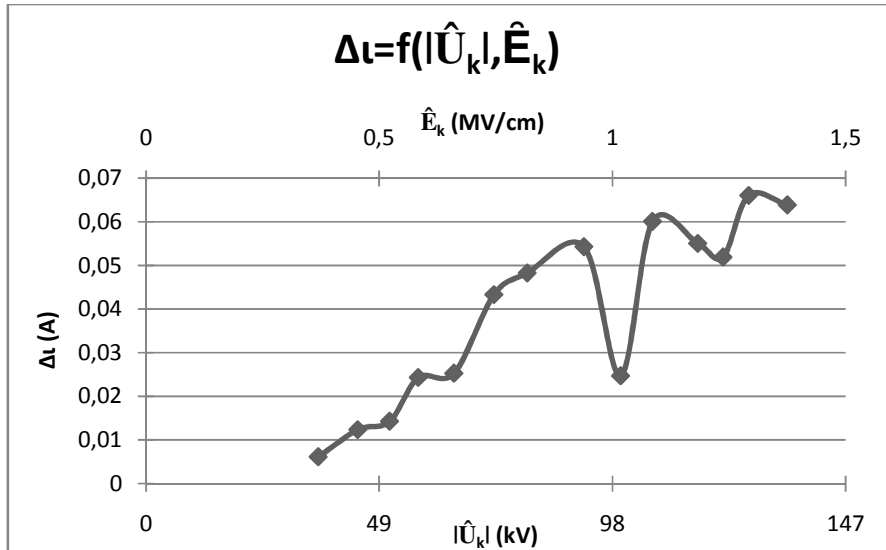
Σχήμα 3.4-3: Χαρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων (Δt) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{Ev}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{Ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



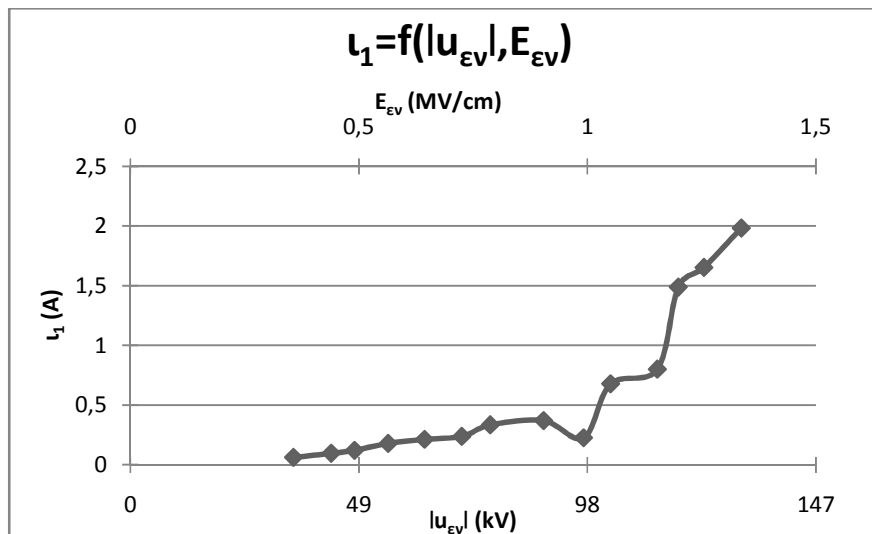
Σχήμα 3.4-4: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (i_1) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της μέγιστης επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης ($|\hat{U}_k|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.



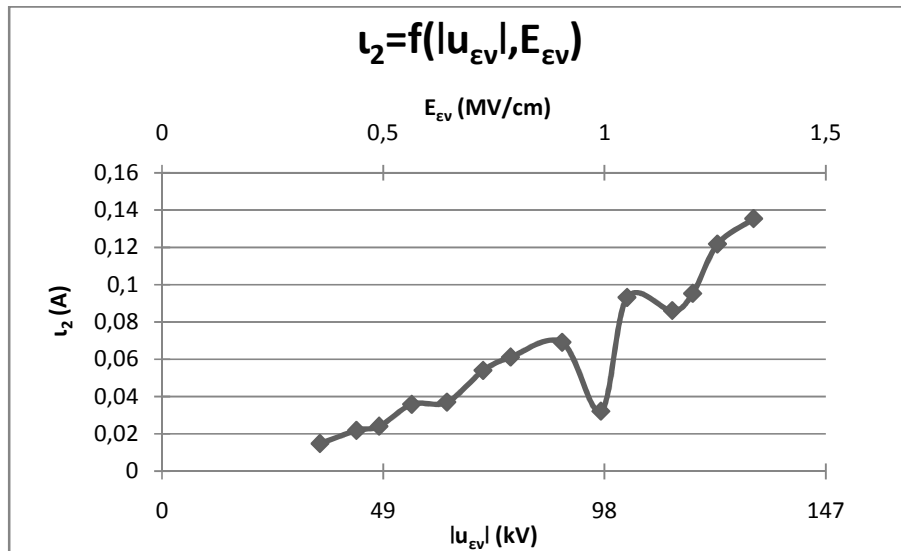
Σχήμα 3.4-5: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων (i_2) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της μέγιστης επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης ($|\hat{U}_k|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.



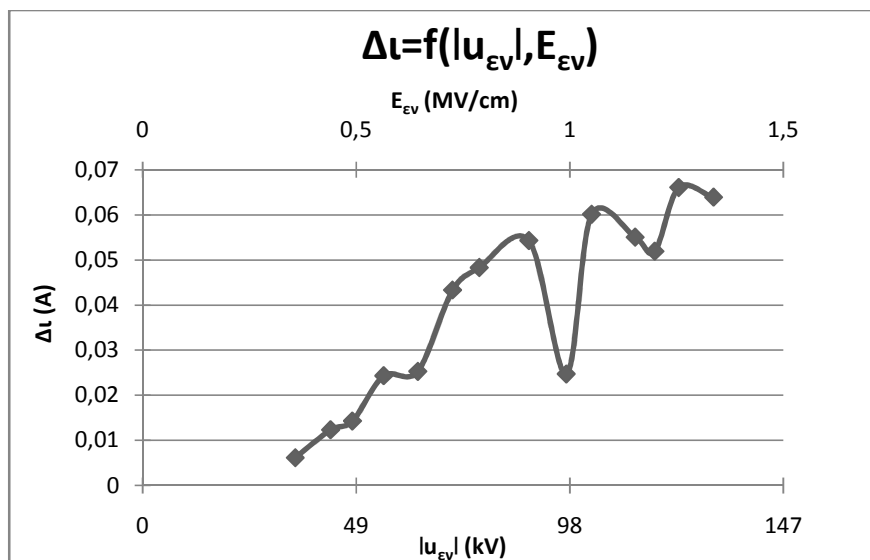
Σχήμα 3.4-6: Χαρακτηριστική του ρεύματος κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (Δi) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της μέγιστης επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης ($|U_k|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.



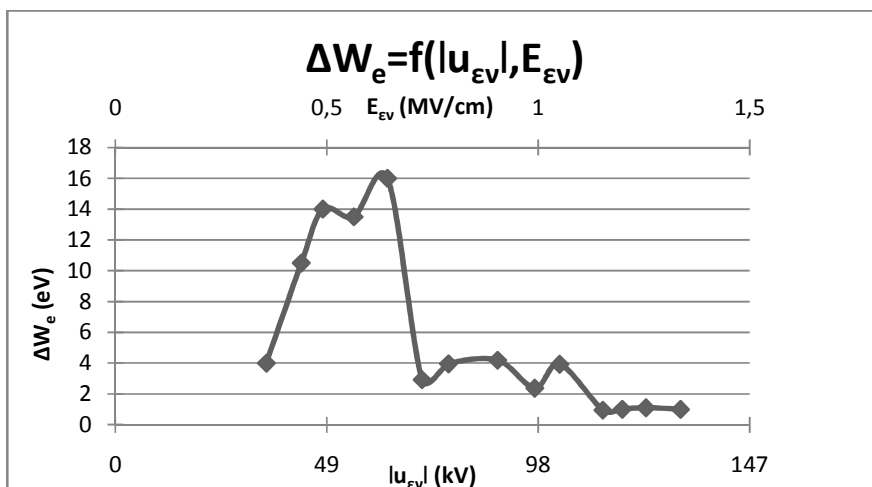
Σχήμα 3.4-7: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (i_1) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{ev}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.



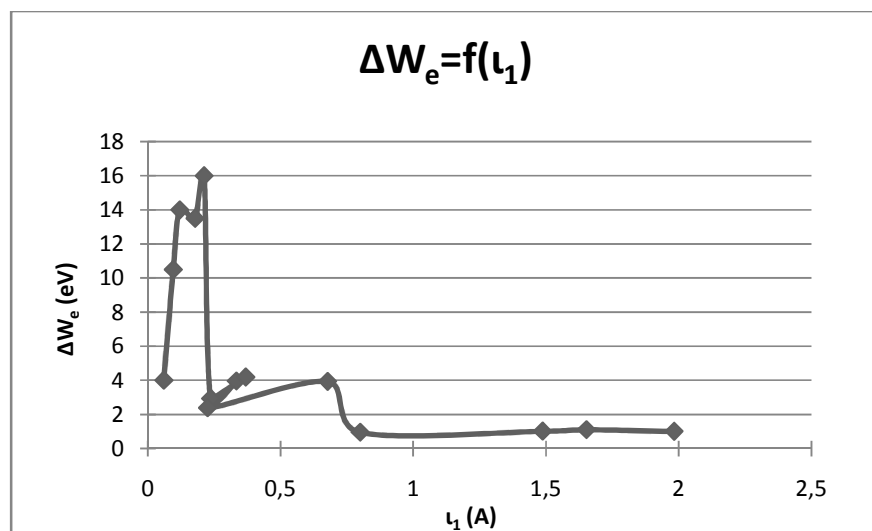
Σχήμα 3.4-8: Χαρακτηριστική του στιγμιαίου ρεύματος κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων (I_2) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{Ev}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{Ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



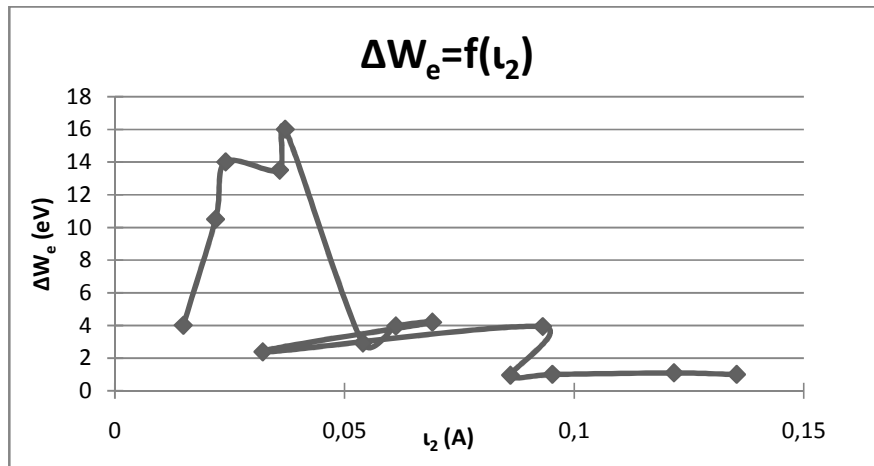
Σχήμα 3.4-9: Χαρακτηριστική του ρεύματος κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (Δi) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{Ev}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{Ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



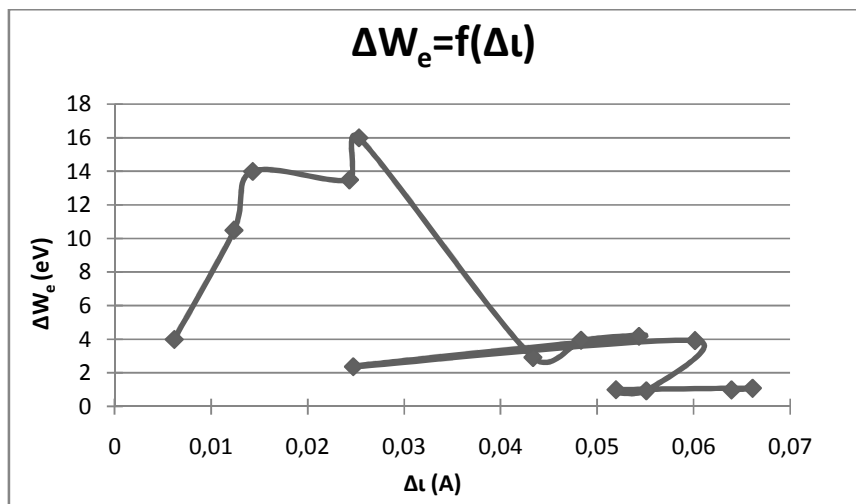
Σχήμα 3.4-10: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{eV}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{eV}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



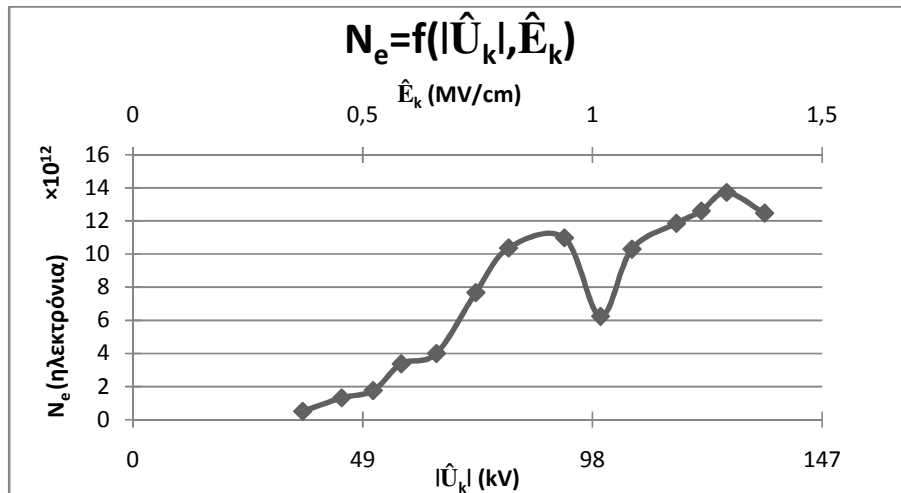
Σχήμα 3.4-11: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της τιμής του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (I_1), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu s$.



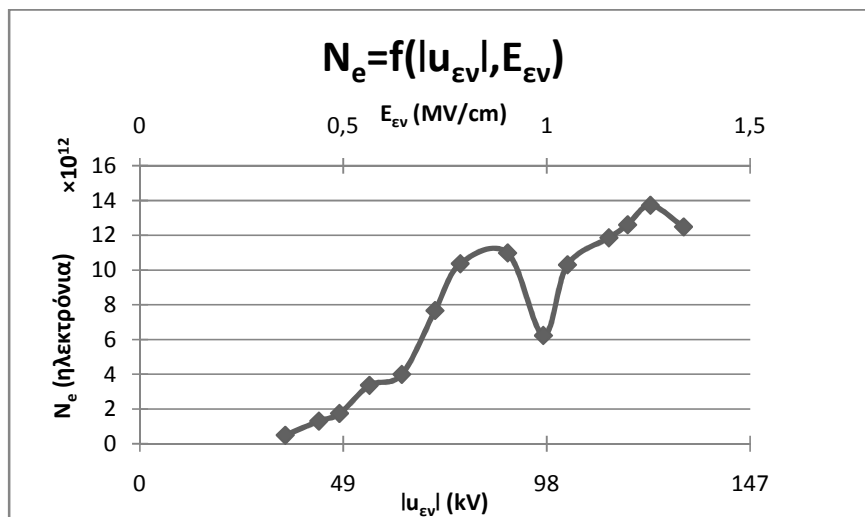
Σχήμα 3.4-12: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της τιμής του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων (I_2), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.



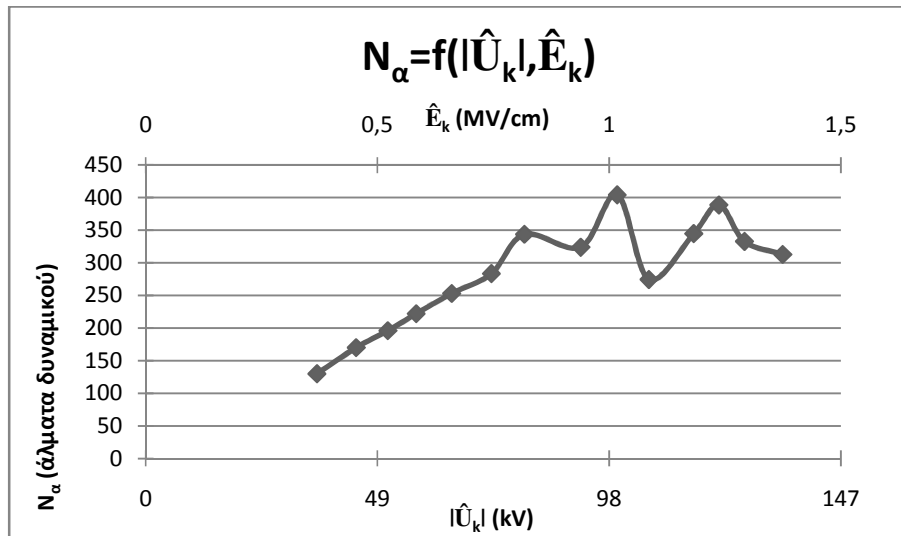
Σχήμα 3.4-13: Χαρακτηριστική της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους στην άνοδο (ΔW_e) συναρτήσει της τιμής του ρεύματος κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (ΔI), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.



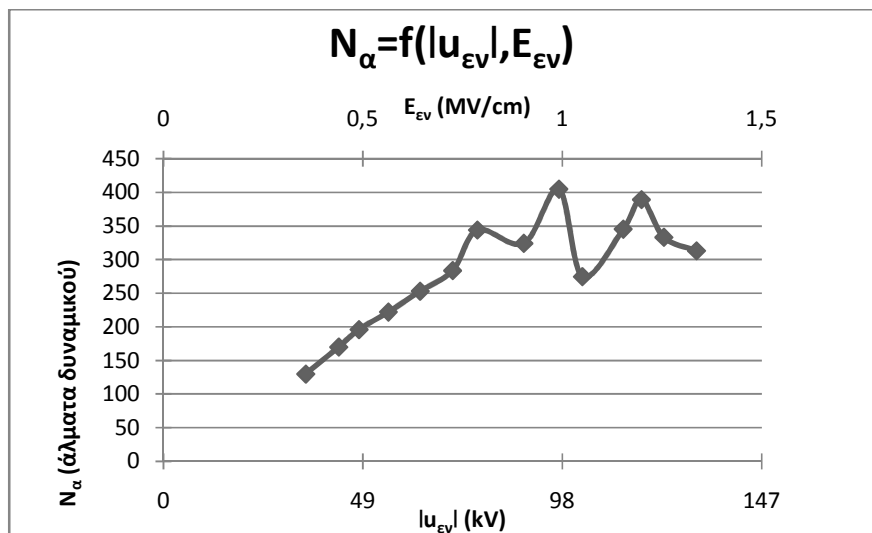
Σχήμα 3.4-14: Χαρακτηριστική του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων (N_e) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της μέγιστης επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης ($|\hat{U}_k|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.



Σχήμα 3.4-15: Χαρακτηριστική του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων (N_e) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($|u_{ev}|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.



Σχήμα 3.4-16: Χαρακτηριστική του μέγιστου αριθμού αλμάτων δυναμικού (N_α) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της μέγιστης επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης ($|\hat{U}_k|$) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.



Σχήμα 3.4-17: Χαρακτηριστική του μέγιστου αριθμού αλμάτων δυναμικού (N_α) συναρτήσει της απόλυτης τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{ev}) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (E_{ev}), με πάχος δοκιμίου βακελίτη 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής -1,2/50μs.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας που περιλαμβάνει τις μαθηματικές εκφράσεις, που προσεγγίζουν καλύτερα, τις χαρακτηριστικές που δόθηκαν στην παράγραφο 3. Στη συνέχεια, γίνεται μία προσπάθεια για την ερμηνεία της μορφής αυτών των χαρακτηριστικών καθώς και ορισμένων φαινομένων που εκδηλώνονται κατά την καταπόνηση των δοκιμών με κρουστική τάση $\pm 1,2/50\mu\text{s}$.

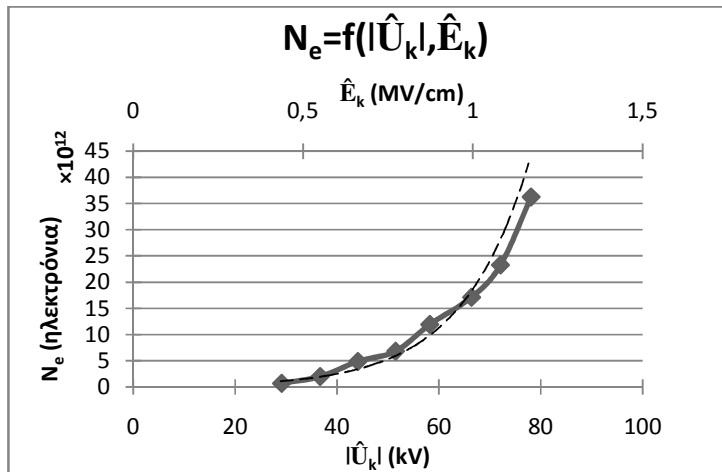
	d=1mm +1,2/50μs	d=1mm -1,2/50μs	d=2mm +1,2/50μs	d=2mm -1,2/50μs
$t_1=f(u_{ev})$	$y=10^{-5}x^4-0,002x^3+0,15x^2-4,766x+57,8$	$y=5\cdot 10^{-6}x^4-0,001x^3+0,88x^2-3,118x+42,18$	$y=2\cdot 10^{-7}x^4-8\cdot 10^{-5}x^3+0,011x^2-0,7x+16,81$	$y=7\cdot 10^{-8}x^4-3\cdot 10^{-5}x^3+0,003x^2-0,243x+7,366$
$t_1=f(E_{ev})$	$y=220,2x^4-634,4x^3+677,3x^2-319,9x+57,8$	$y=98,44x^4-326,8x^3+396,5x^2-209,3x+42,18$	$y=19,87x^4-77,49x^3+110,8x^2-68,83x+16,81$	$y=6,224x^4-25,44x^3+37,29x^2-23,89x+7,366$
$t_2=f(u_{ev})$	$y=3,241e^{0,034x}$	$y=8,011e^{0,021x}$	$y=-8\cdot 10^{-5}x^3+0,014x^2-0,525x+15,87$	$y=-0,004x^2+0,924x-12,56$
$t_2=f(E_{ev})$	$y=3,241e^{2,312x}$	$y=8,011e^{1,46x}$	$y=-77,42x^3+143,7x^2-51,67x+15,87$	$y=-42,15x^2+90,88x-12,56$
$\Delta t=f(u_{ev})$	$y=1,82e^{0,044x}$	$y=6,024e^{0,025x}$	$y=-7\cdot 10^{-5}x^3+0,011x^2-0,203x+5,303$	$y=0,004x^2+0,951x-15,7$
$\Delta t=f(E_{ev})$	$y=1,82e^{2,958x}$	$y=6,024e^{1,724x}$	$y=-65,57x^3+109,6x^2-19,98x+5,303$	$y=-43,08x^2+93,52x-15,7$
$u_1=f(\hat{U}_k)$	$y=0,14\cdot 10^{-3}x^2-0,03x-0,006$	$y=3\cdot 10^{-6}x^3-0,44\cdot 10^{-3}x^2+0,024x-0,0386$	$y=-6\cdot 10^{-8}x^4+10^{-5}x^3-0,028x+0,965$	$y=0,021e^{0,032x}$
$u_1=f(\hat{E}_k)$	$y=0,645x^2-0,219x-0,006$	$y=0,962x^3-2,007x^2+1,657x-0,386$	$y=-5,624x^4+10,63x^3-2,049x^2-2,841x+0,965$	$y=0,021e^{3,198x}$
$u_2=f(\hat{U}_k)$	$y=0,092\ln x-0,289$	$y=0,05e^{0,044x}$	$y=0,009e^{0,021x}$	$y=0,009e^{0,019x}$
$u_2=f(\hat{E}_k)$	$y=0,092\ln x+0,097$	$y=0,005e^{2,95x}$	$y=0,009e^{2,31x}$	$y=0,009e^{1,911x}$
$\Delta u=f(\hat{U}_k)$	$y=0,086\ln x-0,274$	$y=0,003e^{0,051x}$	$y=0,008e^{0,018x}$	$y=0,044\ln x-0,156$
$\Delta u=f(\hat{E}_k)$	$y=0,086\ln x+0,091$	$y=0,003e^{3,421x}$	$y=0,008e^{1,773x}$	$y=0,44\ln x+0,048$
$u_1=f(u_{ev})$	$y=0,004e^{0,075x}$	$y=0,013e^{0,045x}$	$y=-8\cdot 10^{-8}x^4+2\cdot 10^{-5}x^3-0,001x+0,486$	$y=0,022e^{0,033x}$
$u_1=f(E_{ev})$	$y=0,004e^{5,065x}$	$y=0,013e^{3,025x}$	$y=-7,41x^4+15,74x^3-7,52x^2-0,175x+0,486$	$y=0,022e^{3,268x}$
$u_2=f(u_{ev})$	$y=8\cdot 10^{-5}x^{1,733}$	$y=0,005e^{0,046x}$	$y=0,009e^{0,022x}$	$y=0,009e^{0,019x}$
$u_2=f(E_{ev})$	$y=0,114x^{1,733}$	$y=0,005e^{3,148x}$	$y=0,009e^{2,167x}$	$y=0,009e^{1,952x}$
$\Delta u=f(u_{ev})$	$y=6\cdot 10^{-5}x^{1,765}$	$y=0,003e^{0,054x}$	$y=0,008e^{0,018x}$	$y=0,044\ln x-0,153$
$\Delta u=f(E_{ev})$	$y=0,107x^{1,765}$	$y=0,003e^{3,655x}$	$y=0,008e^{1,799x}$	$y=0,044\ln x+0,05$
$N_e=f(\hat{U}_k)$	$y=10^{11}e^{0,074x}$	$y=10^{11}e^{0,075x}$	$y=-6\cdot 10^7x^2+10^{11}x-4\cdot 10^{12}$	$y=10^{13}\ln x-4\cdot 10^{13}$
$N_e=f(\hat{E}_k)$	$y=10^{11}e^{4,994x}$	$y=10^{11}e^{5,038x}$	$y=-6\cdot 10^{11}x^2$	$y=10^{13}\ln x+10^{13}$

			$+10^{13}x-4\cdot 10^{12}$	
$N_e=f(u_{ev})$	$y=9\cdot 10^{10}e^{0,083x}$	$y=10^{11}e^{0,08x}$	$y=-10^7x^2+10^{11}x-4\cdot 10^{12}$	$y=10^{13}\ln x-9\cdot 10^{13}$
$N_e=f(E_{ev})$	$y=9\cdot 10^{10}e^{5,623x}$	$y=10^{11}e^{5,38x}$	$y=-10^{11}x^2+10^{13}x-4\cdot 10^{12}$	$y=10^{13}\ln x+10^{13}$
$N_a=f(\hat{U}_k)$	$y=20,97e^{0,039x}$	$y=61,45e^{0,024x}$	$y=-0,64\cdot 10^{-3}x^3+0,107x^2-1,835x+46,57$	$y=-0,042x^2+9,33x-162,6$
$N_a=f(\hat{E}_k)$	$y=20,97e^{2,626x}$	$y=61,45e^{1,617x}$	$y=610x^3+1036x^2-180,4x+46,57$	$y=-410,2x^2+917,3x-162,6$
$N_a=f(u_{ev})$	$y=18,2e^{0,044x}$	$y=60,24e^{0,025x}$	$y=-0,69\cdot 10^{-3}x^3+0,113x^2-2,032x+53,03$	$y=-0,044x^2+9,512x-157$
$N_a=f(E_{ev})$	$y=18,2e^{2,958x}$	$y=60,24e^{1,724x}$	$y=-655,7x^3+1096x^2-199,8x+53,03$	$y=-430,8x^2+935,2x-157$

Πίνακας 4-1: Μαθηματικές εκφράσεις για τις χαρακτηριστικές που παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.

Σύμφωνα με τη θεωρία του ιονισμού με κρούσεις ισχύει η σχέση 1.4.3.3-1 ($Q=Q_0e^{A(E^2-E_0^2)/E_0^2}$), η οποία σημαίνει ότι οι καμπύλες $q=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ και $q=f(u_{ev}, E_{ev})$ θα πρέπει να έχουν εκθετική μορφή. Επιπλέον, και οι καμπύλες $N_e=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $N_e=f(u_{ev}, E_{ev})$ θα πρέπει να έχουν εκθετική μορφή γιατί ισχύει η σχέση $N_e=\Delta q/q_e$, δηλαδή ο αριθμός των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω μερικών εκκενώσεων είναι ανάλογος της αύξησης του ηλεκτρικού φορτίου λόγω μερικών εκκενώσεων.

Παρατηρούμε λοιπόν, ότι κάποιες χαρακτηριστικές έχουν εκθετική μορφή. Για παράδειγμα, για $d=1\text{mm}$, οι καμπύλες $N_e=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $N_e=f(u_{ev}, E_{ev})$, $N_a=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $N_a=f(u_{ev}, E_{ev})$ και $\Delta t=f(u_{ev}, E_{ev})$ προσεγγίζονται ικανοποιητικά από εκθετικές καμπύλες, ενώ για $d=2\text{mm}$ αυτό δε συμβαίνει. Για $d=2\text{mm}$, λόγω μεγάλου πάχους δοκιμίου, δε συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις. Στο σχήμα 4-1 δίνονται, για $d=1\text{mm}$ και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu\text{s}$, η πειραματική χαρακτηριστική καθώς και η θεωρητική χαρακτηριστική του $N_e=f(|\hat{U}_k|, \hat{E}_k)$, για λόγους σύγκρισης.



Σχήμα 4-1: Πειραματική (συνεχής γραμμή) και θεωρητική (διακεκομμένη γραμμή) καμπύλη για δοκίμιο βακελίτη με $d=1\text{mm}$, εντός μονωτικού ελαίου, και επιβαλλόμενη τάση μορφής $-1,2/50\mu\text{s}$.

Η απόκλιση της πειραματικής από τη θεωρητική καμπύλη οφείλεται στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών του δοκιμίου, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb, όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Επίσης, υπάρχουν σφάλματα λόγω οπτικής παρατήρησης καθώς και σφάλματα του οργάνου. Αυτά τα σφάλματα αφορούν όλες τις μετρήσεις.

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή (παράγραφος 1.4.1.6), οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης και οφείλονται σε θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού, ενώ οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της ουράς της κρουστικής τάσης και οφείλονται σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις στην επιφάνεια του υλικού. Επομένως, από τις μετρήσεις του χρόνου έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, καθώς επίσης και από τα διαγράμματα $t_1=f(u_{ev}, E_{ev})$ και $t_2=f(u_{ev}, E_{ev})$, συμπεραίνουμε ότι όταν καταπονούνται, με κρουστικές τάσεις $\pm 1,2/50\mu\text{s}$, δοκίμια βακελίτη πάχους 1mm , εντός μονωτικού ελαίου, εκδηλώνονται τόσο εσωτερικές όσο και εξωτερικές μερικές εκκενώσεις. Το ίδιο συμβαίνει και για $d=2\text{mm}$ και τάση καταπόνησης $+1,2/50\mu\text{s}$. Ενώ για $d=2\text{mm}$ και τάση καταπόνησης $-1,2/50\mu\text{s}$, επικρατούν οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

Επίσης, φαίνεται ότι γενικά ισχύει το φαινόμενο της πολικότητας, που αναλύθηκε στην εισαγωγή (παράγραφος 1.4.1.7). Δηλαδή, όταν ασκείται τάση με θετική πολικότητα, η έναρξη των μερικών εκκενώσεων αρχίζει σε τιμή τάσης μικρότερη από την αντίστοιχη για αρνητική πολικότητα.

Επιπλέον, εξάγεται το συμπέρασμα ότι με την αύξηση της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης, για $d=1\text{mm}$, αυξάνονται η χρονική διάρκεια εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων (Δt), το ηλεκτρικό φορτίο (Δq) και κατά συνέπεια και ο αριθμός των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων (N_e), καθώς επίσης και ο μέγιστος αριθμός αλμάτων δυναμικού (N_a). Για $d=2\text{mm}$, αυτά τα μεγέθη ενώ γενικά αυξάνονται, για μεγάλες τιμές της επιβαλλόμενης τάσης παρουσιάζουν μία μείωση. Το ρεύμα που παράγεται κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (Δi) παρουσιάζει γενικά μία αυξητική τάση.

Από τις τιμές της περίσσειας ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη συλλογή τους από την άνοδο (ΔW_e) και με τη βοήθεια του πίνακα 4-2, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται. Έτσι συμπεραίνουμε ότι όταν καταπονούμε ένα δοκίμιο βακελίτη, με πάχος 1mm, εντός μονωτικού ελαίου, με τάση μορφής $\pm 1,2/50\mu s$, εκπέμπεται υπεριώδης ακτινοβολία. Όταν καταπονούμε ένα δοκίμιο βακελίτη, με πάχος 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, με τάση μορφής $+1,2/50\mu s$, εκπέμπεται υπεριώδης και ορατή ακτινοβολία. Ενώ όταν καταπονούμε ένα δοκίμιο βακελίτη, με πάχος 2mm, εντός μονωτικού ελαίου, με τάση μορφής $-1,2/50\mu s$, εκπέμπεται υπεριώδης, ορατή και υπέρυθη ακτινοβολία.

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	Ενέργεια E (eV)	Μήκος κύματος λ (μm)
Υπέρυθρη	$10^{-3} < E < 2$	$10^3 > \lambda > 0,77$
Ορατή	$2 < E < 3$	$0,77 > \lambda > 0,39$
Υπεριώδης	$3 < E < 10^3$	$0,39 > \lambda > 0,01$
Ακτίνες X	$10^2 < E < 10^6$	$0,1 > \lambda > 10^{-7}$

Πίνακας 4-2: Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συναρτήσει της εκπεμπόμενης ενέργειας και του μήκους κύματος.

5. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία προσπάθεια έρευνας των ιδιοτήτων δοκιμίων βακελίτη και των ηλεκτρικών φαινομένων που συνοδεύουν τις μερικές εκκενώσεις που εκδηλώνονται σε αυτά τα δοκίμια, όταν αυτά βρίσκονται εντός μονωτικού ελαίου και καταπονούνται με κρουστική τάση $\pm 1,2/50\mu s$. Τα δοκίμια που μελετώνται έχουν πάχος 1mm και 2mm. Η εργασία αυτή μπορεί να συμβάλει στην παράγραφο 1.4.1.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων, της εισαγωγής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος: Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και Υλικά, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003
2. Π.Δ. Μπούρκας: Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1998
3. Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος: Υψηλές Τάσεις Ι, Εκδόσεις Συμεών
4. Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος: Συμπληρωματικές Σημειώσεις για το μάθημα Παραγωγή Υψηλών Τάσεων, Αθήνα 2008
5. <http://www.livepedia.gr/index.php/%CE%92%CE%B1%CE%BA%CE%B5%CE%BB%CE%AF%CF%84%CE%B7%CF%82>
6. <http://www.hlektronika.gr/dictionary/index.php?a=term&d=1&t=94>
7. <http://www.siliconfareast.com/emspectrum.htm>