



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Η. ΠΡΕΚΕΤΕΣ

Επιβλέπων : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Η. ΠΡΕΚΕΤΕΣ

Επιβλέπων : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή.

.....
Π. Δ. Μπούρκας
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Ι. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος .
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

.....
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΡΕΚΕΤΕΣ

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

Copyright © Κωνσταντίνος Η. Πρεκετές 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Είναι ευνόητο ότι κάθε τεχνική κατασκευή και εφαρμογή στη βιομηχανία ή και σε οποιονδήποτε άλλο τομέα, που χρησιμοποιεί τον ηλεκτρισμό, προϋποθέτει την χρήση κατάλληλων ηλεκτρομονωτικών υλικών, τόσο για τη σωστή λειτουργία των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων και την προστασία τους, όσο και για την προστασία των χειριστών τους. Αντίστροφα, οι ιδιότητες των διαθέσιμων αυτών υλικών προδιαγράφουν τα όρια των εφαρμογών και τις δυνατότητες για την παραπέρα πρόοδο της τεχνολογίας. Με τις δύο παραπάνω προφανείς διαπιστώσεις γίνεται φανερό ότι οι ιδιότητες των ηλεκτρομονωτικών υλικών είναι πολύ σημαντικές και αξίζει κανείς να τις μελετήσει και να τις κατανοήσει.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μέτρηση και ο υπολογισμός ηλεκτρικών μεγεθών στο συνδυασμό "pertinax-λάδι μετασχηματιστή" εντός ανομοιογενούς πεδίου υπό κρουστικές τάσεις $\pm 1,2/50\mu s$. Η διάταξη ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκε ήταν ακίδα-πλάκα με πάχη δοκιμίων 1mm και 2mm.

Στην εισαγωγή, παρουσιάζονται κάποια θεωρητικά στοιχεία για τα στερεά μονωτικά υλικά και τις ιδιότητές τους. Επίσης, αναλύονται τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών σύμφωνα με τη μακροσκοπική και κβαντομηχανική θεωρία.

Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων και επεξεργασία τους. Υπολογίστηκαν διάφορα ηλεκτρικά μεγέθη και χαράχθηκαν οι γραφικές παραστάσεις αυτών. Στη συνέχεια έγινε μαθηματική προσέγγιση των καμπυλών αυτών λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία του ιονισμού με κρούσεις. Τέλος, παρουσιάζονται συμπεράσματα και σχόλια που εξήχθησαν από την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

Στο σημείο αυτό **θα ήθελα να ευχαριστήσω** τους ανθρώπους, που συνέβαλλαν στην περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας . Ευχαριστώ τον καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. κ Κ. Καραγιαννόπουλο για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Π. Μπούρκα για την πολύτιμη καθοδήγηση, που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια ολοκλήρωσης της διπλωματικής εργασίας.

Λέξεις κλειδιά

Μονωτικά υλικά, γήρανση και διάσπαση, μερικές εκκενώσεις, pertinax, κρουστική τάση, στατιστικές μετρήσεις, κβαντομηχανική θεωρία, μακροσκοπική θεωρία, ιονισμός με κρούσεις.

Abstract

It is obvious that each technical manufacture and application in the industry or even in any other sector, that uses the electricity, presuppose the use of suitable electroinsulant materials, so much for the right operation of electrical installations and their protection, what for the protection of their operators. Reversely, the attributes of this available materials work out the limits of applications and the possibilities for the further progress of technology. With the two previous obvious ascertainments it becomes obvious that the attributes of electroinsulant materials are very important and deserves to study and comprehend them.

The scope of this thesis is the measurement and the calculation of electrical elements at the combination "pertinax-transformer oil" inside inhomogeneous electric field under impulse voltages $\pm 1,2/50 \mu s$. The electrode provision used was pin-plate with specimens' thickness 1mm and 2mm.

First of all, some theoretical elements about solid insulators and their properties are presented. Moreover, the phenomena before and during the electric breakdown of solid insulators are analyzed according to both macroscopic and quantum-mechanics theory.

In the next chapters, the recording and the elaboration of measurements have been carried out. The electric elements have been calculated and their corresponding graphs have been drawn. The mathematical approach of these graphs has also been done considering the ionization in collisions. Finally, conclusions and comments based on this thesis are been presented.

In this point **I would like to thank** the persons, that contributed in the finalisation of my thesis. I thank the professor of department of Electrical and Computers Engineers of E.M.P. Mr. K. Karagiannopoulos for the entrusting of this thesis. Also, I would want to thank mr. P. Mpourkas for the precious guidance.

Keywords

Solid insulators, electric breakdown, partial discharge, pertinax, impulse voltage, statistic measurements, quantum-mechanics theory, macroscopic theory, ionization in collisions.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΜΕΡΟΣ 1

1. Θεωρητική εισαγωγή	9
1.1 Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών	10
1.1.1. Η διηλεκτρική αντοχή	10
1.1.2. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά	10
1.1.3. Ο συντελεστής απωλειών	11
1.1.4. Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα	12
1.1.5. Ο συντελεστής $\epsilon \tan \delta$	13
1.1.6. Η επιφανειακή αγωγιμότητα	13
1.1.7. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	14
1.1.8. Η μηχανική αντοχή	14
1.2 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών	15
1.2.1 Μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών	16
1.2.1.1. Η θερμική διάτρηση	17
1.2.1.2. Η ηλεκτρική διάτρηση	17
1.2.1.3. Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση)	19
1.2.1.4. Η θερμοχημική διάτρηση	23
1.2.1.5. Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση	24
1.2.1.6. Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων	25
1.3 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών	30
1.3.1 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση	32
1.3.2 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση	33
1.4 Παραγωγή και μέτρηση κρουστικών τάσεων	36

ΜΕΡΟΣ 2

Σκοπός της εργασίας	37
----------------------------	----

ΜΕΡΟΣ 3

Μετρήσεις, υπολογισμοί και διαγράμματα	41
-----------------------------------------------	----

3.1 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50 μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm)	41
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

3.2 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/50 μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm)	53
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

3.3 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm)	65
3.4 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm)	78
<u>ΜΕΡΟΣ 4</u>	91
4.1 Σχόλια – Συμπεράσματα	91
4.2 Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών	92
<u>Βιβλιογραφία</u>	96

ΜΕΡΟΣ 1:

1. Θεωρητική εισαγωγή

Μονωτικά υλικά ονομάζονται τα υλικά που δεν έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα στην περίπτωση που βρίσκονται εντός ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι, η ύπαρξη μονώσεων σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή απαιτείται για τον ηλεκτρικό διαχωρισμό μεταξύ ρευματοφόρων μερών, καθώς και ρευματοφόρων μερών προς τη γη με τέτοιο τρόπο, ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό. Άλλη μια πολύ σημαντική εφαρμογή των μονωτικών είναι η χρήση τους ως διηλεκτρικών υλικών, ανάμεσα στις πλάκες των πυκνωτών. Γενικά με την χρήση μονώσεων ελαχιστοποιούμε την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της διάσπασης.

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, τότε η διάσπαση ονομάζεται **επιφανειακή διάσπαση**. Η διάσπαση στο περιβάλλον μέσο ενός στερεού μονωτικού, λόγω μείωση της απόστασης μόνωσης από ξένες επικαθίσεις στην επιφάνεια του υλικού (π.χ. ρυπασμένοι μονωτήρες) ονομάζεται **υπερπήδηση**. Η διάσπαση δια του όγκου ενός μονωτικού υλικού καλείται **διάτρηση**.

Σε μια απλή διάταξη δύο ηλεκτροδίων τα χωρικά φορτία συγκεντρώνονται προ του ηλεκτροδίου με την αντίθετη προς αυτά πολικότητα, σχηματίζοντας έτσι ένα νέφος χωρικών φορτίων. Το πεδίο αυτό ονομάζεται **ηλεκτροστατικό** για όσο τα χωρικά αυτά φορτία είναι αμετακίνητα. Αυτή η κατάσταση ισορροπίας των εξασκούμενων δυνάμεων Coulomb συμβαίνει μέχρι μια τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης. Όταν μετά από την τιμή αυτή του εφαρμοζόμενου πεδίου καταστραφεί η κατάσταση ισορροπίας, χωρίς να συμβεί η συνολική διάσπαση, τότε εκδηλώνονται εκκενώσεις σε περιορισμένο μήκος του μονωτικού, που 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.). Όταν οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στον όγκο ενός στερεού μονωτικού ονομάζονται **εσωτερικές μερικές εκκενώσεις** και οι αντίστοιχες στην επιφάνειά του, **εξωτερικές μερικές εκκενώσεις**. Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν την ξεχωριστή ονομασία **στεμματοειδείς μερικές εκκενώσεις** (ή **εκκενώσεις korona**).

1.1 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 :

1.1.1 Η διηλεκτρική αντοχή

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

$$E_d = \frac{U_{d \min}}{d} \quad (\text{σε MV/cm}) \quad (1.1.1)$$

1.1.2 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 ($C = \epsilon_r \cdot C_0$). Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διάφορων 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 1.1.2 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	5-16	Πορσελάνη	5,5-6
Γυαλί	5-16	Presspan	2,5-3,4
Θερμοπλαστικά συνθετικά	2-5	Ρητίνη	2,2
Λάδι μετασχηματιστών	2-2,5	SF ₆	1,002049
Λάστιχο	2,8-6,5	Στεατίτης	6,4
Εύλο	2,5-6,5	Χαλαζίας	3-7

Πίνακας 1.1.2: Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20 °C.

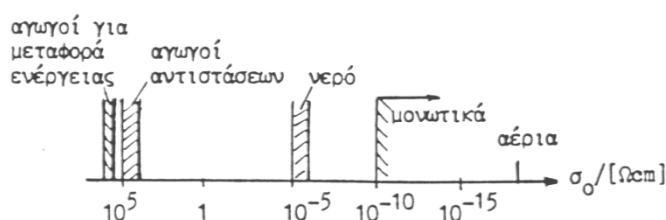
1.1.3 Ο συντελεστής απωλειών

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 ροπής των διπόλων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης,

β) στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά (σχήμα 1.1.3-1).

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.

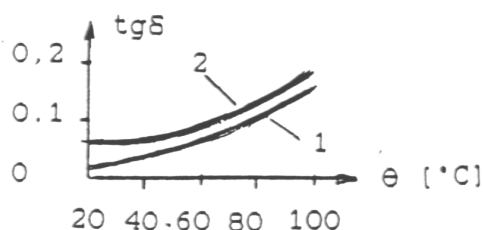


Σχήμα 1.1.3-1 : Τάξη μεγέθους της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διαφόρων κατηγοριών υλικών.

Ο συντελεστής απωλειών δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$tg\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C} \quad (1.1.3-1)$$

και είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μίας μονωτικής διάταξης γενικότερα), γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1.3-2 η $tg\delta$ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 1.1.3-2 : $tg\delta$ ορισμένων διηλεκτρικών
1 : σκληρό χαρτί, 2 : πορσελάνη.

1.1.4 Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μία πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σχήμα 1.1.3-1), που εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή της πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία, κ.λ.π.). Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι επομένως ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των διηλεκτρικών, γιατί εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς.

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

$$\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.1.4-1)$$

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.

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

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

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\exp(\beta\theta)}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.1.4-2)$$

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

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

1.1.5 Ο συντελεστής $\varepsilon \cdot \text{tg}\delta$

Για ένα πυκνωτή επίπεδων πλακών έχουμε :

$$\varepsilon_r \cdot \text{tg}\delta = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \quad (1.1.5-1)$$

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

$$\varepsilon \cdot \text{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.1.5-2)$$

Από τις σχέσεις (1.1.5-2) και (1.1.4-1) έπεται ότι ο συντελεστής $\varepsilon \cdot \text{tg}\delta$ του ομοιογενούς στερεού μονωτικού υλικού (ή γενικότερα του στερεού διηλεκτρικού όταν δεν εκδηλώνονται σε αυτό μερικές εκκενώσεις , π.χ. λόγω $U < U_a$) αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία :

$$\varepsilon \cdot \text{tg}\delta = \frac{\sigma_0}{\omega} e^{\beta\theta} \quad (1.1.5-3)$$

Αν θεωρήσουμε την τιμή ε ως σταθερή, τότε από την παραπάνω σχέση έπεται ότι η αύξηση της $\text{tg}\delta$ είναι εκθετική.

Για την αύξηση της τιμής $\varepsilon \cdot \text{tg}\delta$ στην περιοχή του στερεού μονωτικού, όπου οι μερικές εκκενώσεις συντελούν στην αύξηση των απωλειών Joule, έχουμε αντίστοιχα (από τις σχέσεις 1.1.4-2 και 1.1.5-2) :

$$\varepsilon \cdot \text{tg}\delta = \frac{\sigma_0}{\omega} \frac{e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.1.5-4)$$

1.1.6 Η επιφανειακή αγωγιμότητα

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

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

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

1.1.7 Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις θέσεις, όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως π.χ. ανομοιογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο λάδι). Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντοτε κατά τη λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ. απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπών).

1.1.8 Η μηχανική αντοχή

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

1.2 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Σε οποιαδήποτε όμως περίπτωση, κρίνεται σημαντικό να μπορούμε βλέποντας την όποια αλλοίωση στο μονωτικό υλικό, να εξάγουμε συμπεράσματα για τα αίτιά της. Τότε μπορούμε να προβούμε σε κατάλληλα μέτρα για αποφυγή παραπέρα αλλοίωσης ή ακόμα πιο σημαντικό να προλάβουμε την έναρξη του δυσμενούς αυτού φαινομένου. Έτσι, αν παρατηρήσουμε πως το μονωτικό έχει λιώσει αντιλαμβανόμαστε πως έχει υποστεί θερμική καταπόνηση λόγω του φαινομένου Joule. Αν όμως αντιληφθούμε μηχανική καταπόνηση στο μονωτικό, τότε η αλλοίωση του μονωτικού οφείλεται σε δυνάμεις Coulomb, οπότε και θα πρέπει να λάβουμε και τα ανάλογα μέτρα. Περισσότερες λεπτομέρειες για κάθε μία από τις καταπονήσεις – διατρήσεις παρατίθενται στη συνέχεια.

1.2.1.1 Η θερμική διάτρηση

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

1.2.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

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

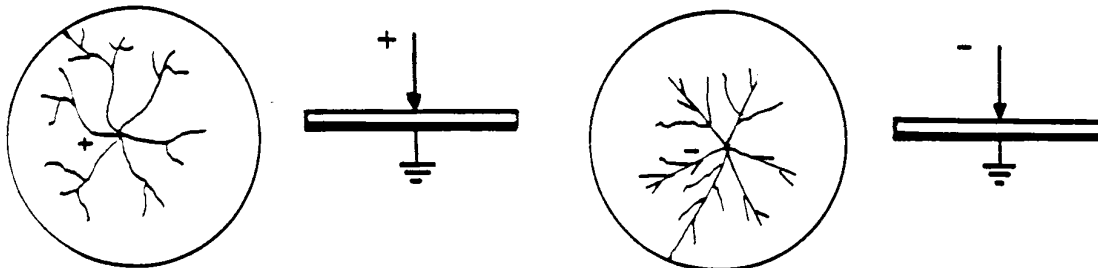
Από μία τιμή της τάσης και μετά η διάτρηση του υλικού αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb. Θεωρείται, ότι η διάτρηση οφείλεται σε :

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

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

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

Η **δενδροειδής διάτρηση** είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, γιατί λόγω της μεγαλύτερης τιμής της έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά τη διάτρηση σχετίζεται με θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μία διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγώγιμη σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 1.2.1.2-1 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 ακίδας-πλάκας).



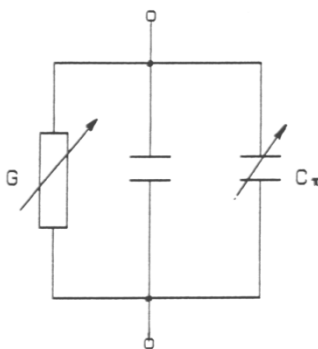
Σχήμα 1.2.1.2-1 : Επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη.

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.

Η **διάτρηση υπό μορφή οχετού** (ή **ηλεκτρομηχανική διάτρηση**) οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από ότι κατά τη δενδροειδή διάτρηση. Στα πολυμερή υλικά διαχωρίζονται τα μόρια σε αρνητικούς και θετικούς φορείς. Η διάτρηση συμβαίνει κυρίως από τις δυνάμεις Coulomb, που εξασκούνται μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η χρονική διάρκεια του φαινομένου είναι μερικά μs. Η εικόνα που παρουσιάζει το υλικό είναι κυρίως το αποτέλεσμα μιας ακαριαίας εξάσκησης δυνάμεων, στην περιοχή όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα μεγάλη (μηχανική τάνυση υπό την επίδραση των δυνάμεων του πεδίου).

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις, έχει διαπιστωθεί, ότι πάνω από μία μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης $U_{κ_{min}}$, 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.

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



Σχήμα 1.2.1.2-2: 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 θα συμβεί η διάτρηση.

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

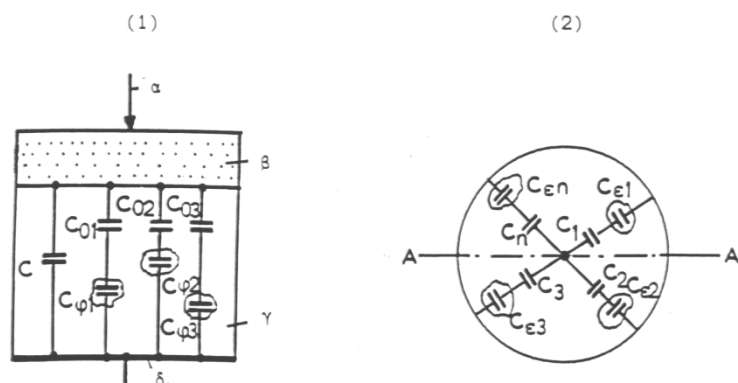
Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μία κρίσιμη για το υλικό τιμή σ_2 τότε η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η

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 1.2.1.2-2), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_{π} (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Όταν η αγωγιμότητα G και ο πυκνωτής C_{π} έχουν αποκτήσει μόλις προ της διάτρησης τις τιμές G_{\max} και C_{\max} (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα σ_2 , λόγω κάποιας ανομοιογένειας), τότε συμβαίνει η διάτρηση.

1.2.1.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση).

α) Γενικά περί μερικών εκκενώσεων

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (**εσωτερικές μερικές εκκενώσεις**), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνειά του (**εξωτερικές εκκενώσεις**). Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίνεται στο σχήμα 1.2.1.3-1. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές $C_{\varepsilon 1} \dots C_{\varepsilon n}$ και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές $C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$. 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 ακίδας και της θέσης διαταραχής και ο άλλος η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας και της θέσης διαταραχής).



Σχήμα 1.2.1.3-1: 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.

$C_{\varepsilon 1} \dots C_{\varepsilon n}$: πυκνωτές επιφανειακών (εξωτερικών) θέσεων διαταραχής

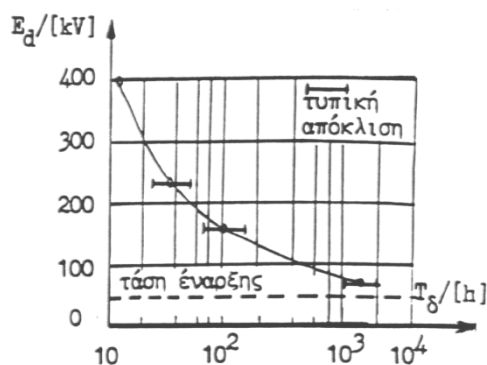
C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

$C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$: πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων).

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

Από τη στιγμή της έναρξης των μερικών εκκενώσεων προκαλείται συνήθως σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του στερεού μονωτικού, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε περιορισμένο τμήμα του, όπου δηλαδή έτυχε οι θέσεις ανομοιογένειας να είναι περισσότερο αγωγίμες. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού.

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού. Στο σχήμα 1.2.1.3-2 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



Σχήμα 1.2.1.3-2 : Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχους 0,125mm, λόγω μερικών εκκενώσεων.

Αριθμός δοκιμών : 10 ανά σημείο μέτρησης.

T_d : χρόνος διάσπασης.

β) Η τεχνητή γήρανση

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

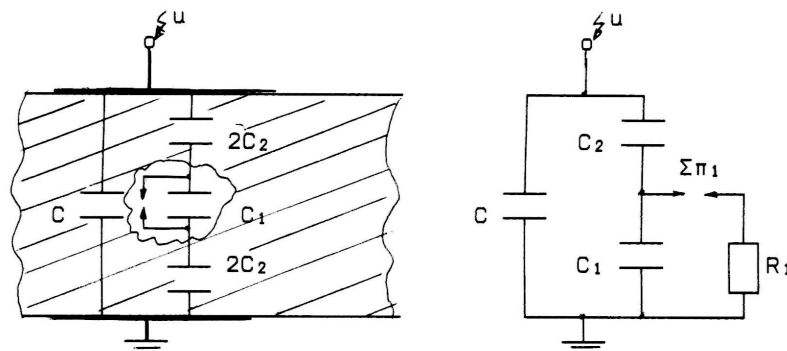
Η γήρανση του μονωτικού υλικού στο εργαστήριο με τιμές της τάσης μεγαλύτερες από την τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων χαρακτηρίζεται τεχνητή γήρανση. Η τεχνητή αυτή γήρανση του στερεού μονωτικού δεν ανταποκρίνεται βέβαια στην πραγματική κατάσταση, που δημιουργείται με την πάροδο του χρόνου (όταν το 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.

γ) Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων

Όπως είναι γνωστό, με τη γέφυρα Schering μετρά κανείς το σύνολο των απωλειών ενός μονωτικού υλικού ή μιας διάταξης υψηλής τάσης, δηλαδή τις απώλειες αγωγιμότητας, πόλωσης και εκείνες λόγω εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων. Όταν άρχισε να γίνεται αντιληπτό το φαινόμενο της γήρανσης των μονωτικών υλικών εμφανίστηκε η πρώτη μέθοδος ανίχνευσης των μερικών εκκενώσεων.

Πρόκειται για τη μέθοδο Callender, η οποία είναι παραλλαγή της γέφυρας Schering και με την οποία κατορθώθηκε η εξουδετέρωση των παράσιτων χωρητικότητων 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 (σχήμα 1.2.1.3-3), γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου.



Σχήμα 1.2.1.3-3: 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.

C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας.

C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού.

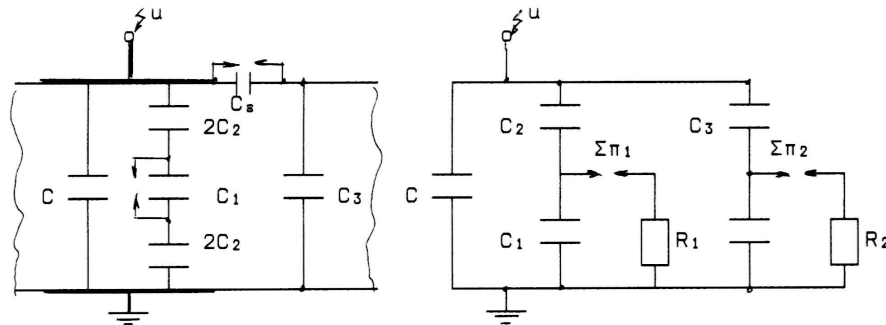
R_1 : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_1$.

Στο επόμενο σχήμα 1.2.1.3-4 έχει συμπληρωθεί το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο και για τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C_1) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (C_e). Με τον τρόπο δηλαδή αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού (C_2 και C_3 αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C. Οι σπινθήρες $\Sigma\pi_1$ και $\Sigma\pi_2$ στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R_1 , R_2) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C_1 , C_e).

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό

που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη.

Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς συχνά στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα 1.2.1.3-5.



Σχήμα 1.2.1.3-4: 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

C₁: χωρητικότητα της φυσαλίδας

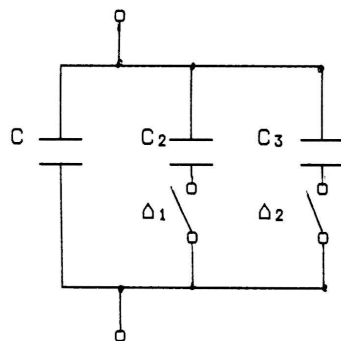
C_ε: χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

C₂: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C₃: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

R₁: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ₁

R₂: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ₂



Σχήμα 1.2.1.3-5: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff).

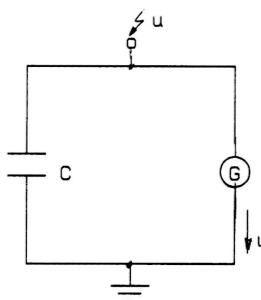
C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C₂: χωρητικότητα του υγιούς στον όγκο του μονωτικού

C₃: χωρητικότητα του υγιούς στην επιφάνεια του μονωτικού

Δ₁ και Δ₂ : διακόπτες, που όταν κλείνουν συμβολίζουν την διάσπαση αντίστοιχα των εσωτερικών και των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων.

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φουσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κ.λ.π. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει επίσης μία ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 1.2.1.3-6). 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 1.2.1.3-6: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann.

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

G : γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

1.2.1.4 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 1.1.5-3 και σχέση 1.1.5-4). 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. Η τάση αυτή αποτελεί το κριτήριο για το τεχνικοοικονομικό πάχος των στερεών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές (όπως μετασχηματιστές, καλώδια κ.λ.π.). Η τιμή της για τα περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση 50Hz, είναι της τάξης του 1MV.

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

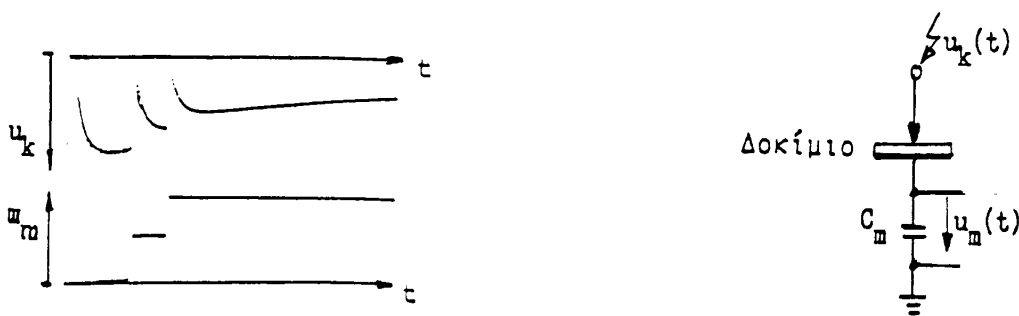
Στην διπλωματική αυτή εργασία δεν λαμβάνεται υπόψη η θερμοχημική διάσπαση, ακριβώς γιατί θεωρείται πως μέσα στο εργαστήριο επικρατεί σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος.

1.2.1.5 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση

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

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

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



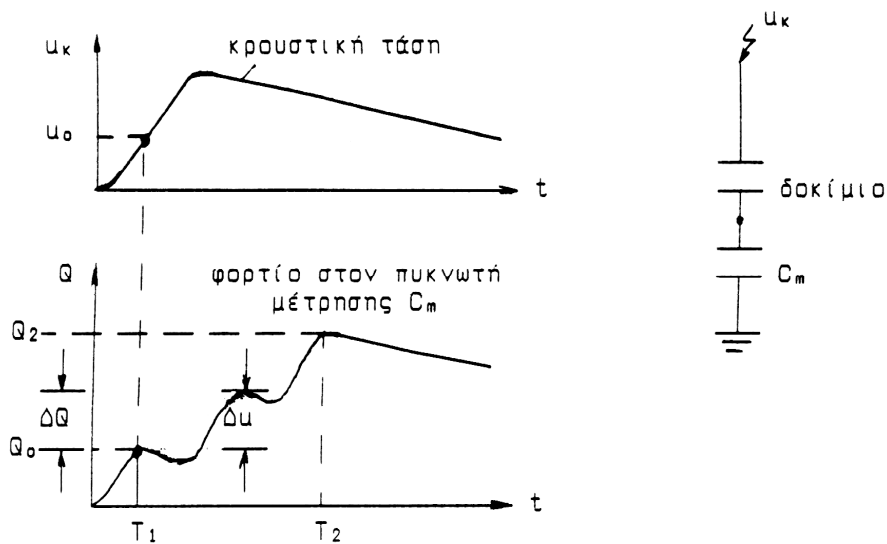
Σχήμα 1.2.1.5 : Τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση 10/200 μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα –πλάκα.

C_m : 1835 nF

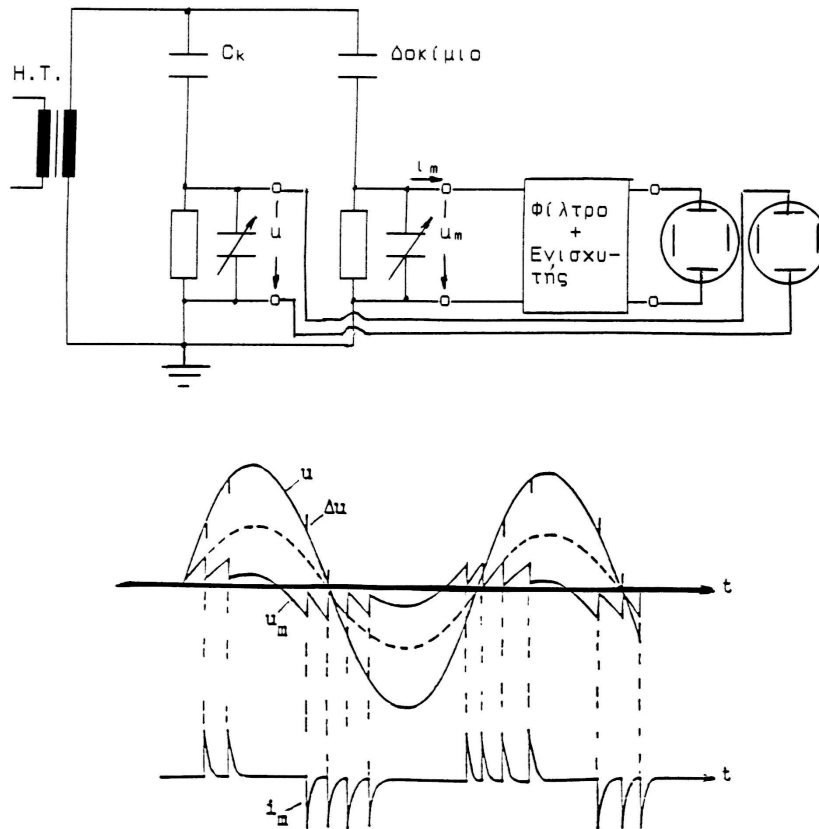
U_k : 70kV

1.2.1.6 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 1.2.1.6-1 για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Με παρόμοιες σκέψεις, μπορεί κανείς να καθορίσει μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση με άλλες μορφές τάσεων, καθώς και με άλλα τετράπολα μέτρησης (συνήθως ωμική αντίσταση, αντί του πυκνωτή, ή συνδυασμός των δύο αυτών στοιχείων μέτρησης, σχήμα 1.2.1.6-2). Στο σχήμα π.χ. 1.2.1.6-3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



Σχήμα 1.2.1.6-1: 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 1.2.1.6-2 : Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω «ωμικού-χωρητικού» τετράπολου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz.

H.T.: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

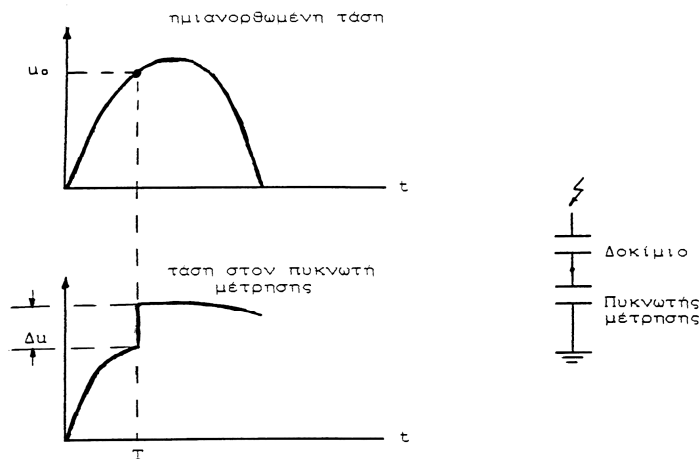
C_k : Πυκνωτής υψηλής τάσης.

U : Στιγμιαία τιμή της εναλλασσόμενης τάσης (η οποία μετράται σε ένα ωμικό-χωρητικό τετράπολο).

U_m : Στιγμιαία τιμή της τάσης στο ωμικό-χωρητικό τετράπολο μέτρησης των μερικών εκκενώσεων.

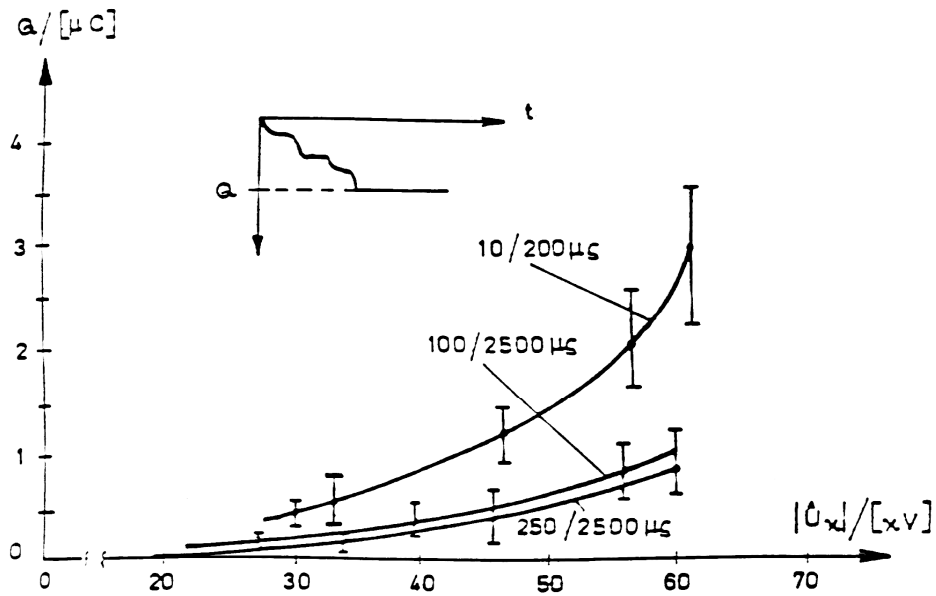
I_m : Στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων.

ΔU : Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων.

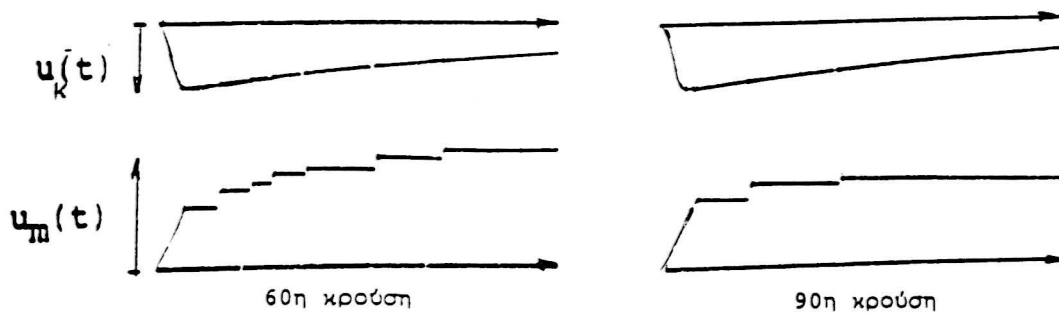


Σχήμα 1.2.1.6-3 : Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.
 T_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.
 U_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).
 Δu : άλμα δυναμικού.

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως : η χαρακτηριστική $Q=f(|\hat{U}_κ|)$, η χαρακτηριστική $u_0=f(|\hat{U}_κ|)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της τάσης, κ.λ.π. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q=f(\hat{U}_κ)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 1.2.1.6-4), 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 1.2.1.6-5 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90^η κρούση, ως προς την 60^η. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών, εύκολα διαπιστώνεται, ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου Q στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις (θραύσματα) στην επιφάνεια του μονωτικού.



Σχήμα 1.2.1.6-4 : Χαρακτηριστική $Q_2=f(\hat{U}_κ)$ για τον βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs. Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι. Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα. C_m : 1000nF.



Σχήμα 1.2.1.6-5 : Άλματα δυναμικού κατά την 60^η και την 90^η κρούση στο pertinax (πάχους 2mm). Μορφή τάσης : 1,2/50μs ($\hat{U}_κ=99,7kV$). Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι. Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα. C_m : 210nF.

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

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

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

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

Στον πίνακα 1.2.1.6 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \approx 2,5-4,5$, από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που προαναφέρθηκε. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης 1,2/50μs) 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 1.2.1.6: Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

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

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

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

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

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

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

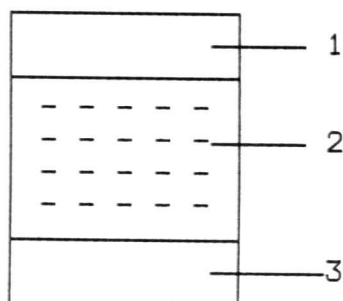
Στη κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η **ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων** (κυρίως ηλεκτρόνια). Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την ενέργεια Fermi των ηλεκτροδίων διευκολύνει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Τα βασικότερα συμπεράσματα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

- 1) Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί ότι :
 - α) το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.
 - β) Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα),

- 2) Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 2,5-4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2MV/cm.
- 3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση (1.1.4-1).
- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση (1.1.4-1). Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια.

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

Μία διαδρομή της δενδροειδούς μορφής εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αντιστοιχεί σε μία κρούση φορτίου, η οποία περιλαμβάνει ελεύθερα ηλεκτρόνια, που είχαν την ίδια ενεργειακή στάθμη (κατά την άφιξή τους στην άνοδο προκάλεσαν εκπομπή του ίδιου μήκους κύματος). Μπορούμε να υποθέσουμε, λόγω του εύρους της παραπάνω ακτινοβολίας, ότι υπάρχουν στο υλικό διάφορες ενεργειακές στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη, που είναι καθοριστικής σημασίας για την εκδήλωση του ιονισμού (σχήμα 1.3). Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff (σχήμα 1.2.1.3-5). Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



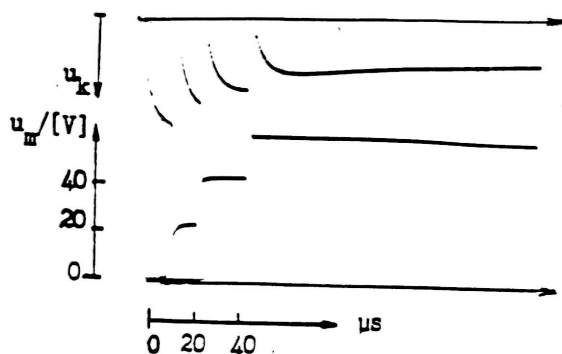
Σχήμα 1.3 : Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.
 1 : ζώνη αγωγιμότητας
 2 : στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη
 3: ζώνη σθένους

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

1.3.1 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, pectinax, πανίτης, κ.λ.π.). Οι τάσεις δοκιμής, που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κβαντομηχανική ερμηνεία του μηχανισμού διάτρησης, είναι κυρίως κρουστικής μορφής (1,2/50μs, 10/200μs, 250/2500μs, κ.λ.π.). Πειράματα έχουν γίνει επίσης με εναλλασσόμενες και ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

Ένα τυπικό παλμογράφημα του φαινομένου δίνεται στο σχήμα 2.3.4-1. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων (W) υπολογίζεται ότι είναι περίπου 105eV. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε, ότι **η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων X**.



Σχήμα 1.3.1-1 : Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου.

Κρουστική τάση : 1,2/50μs.

R της ακίδας ≈ 1 mm.

\hat{U}_k : 85kV.

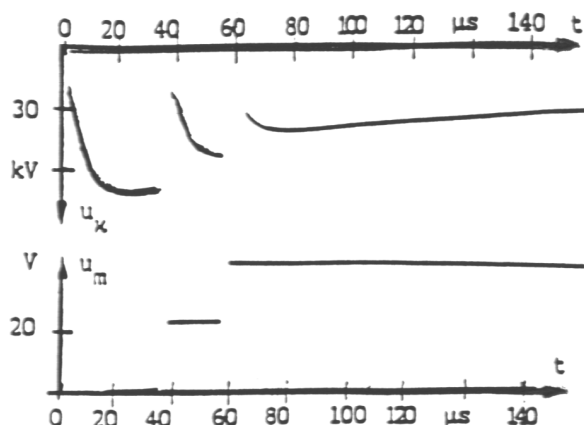
E : 1,2 MV/cm.

C_m : 1835nF.

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

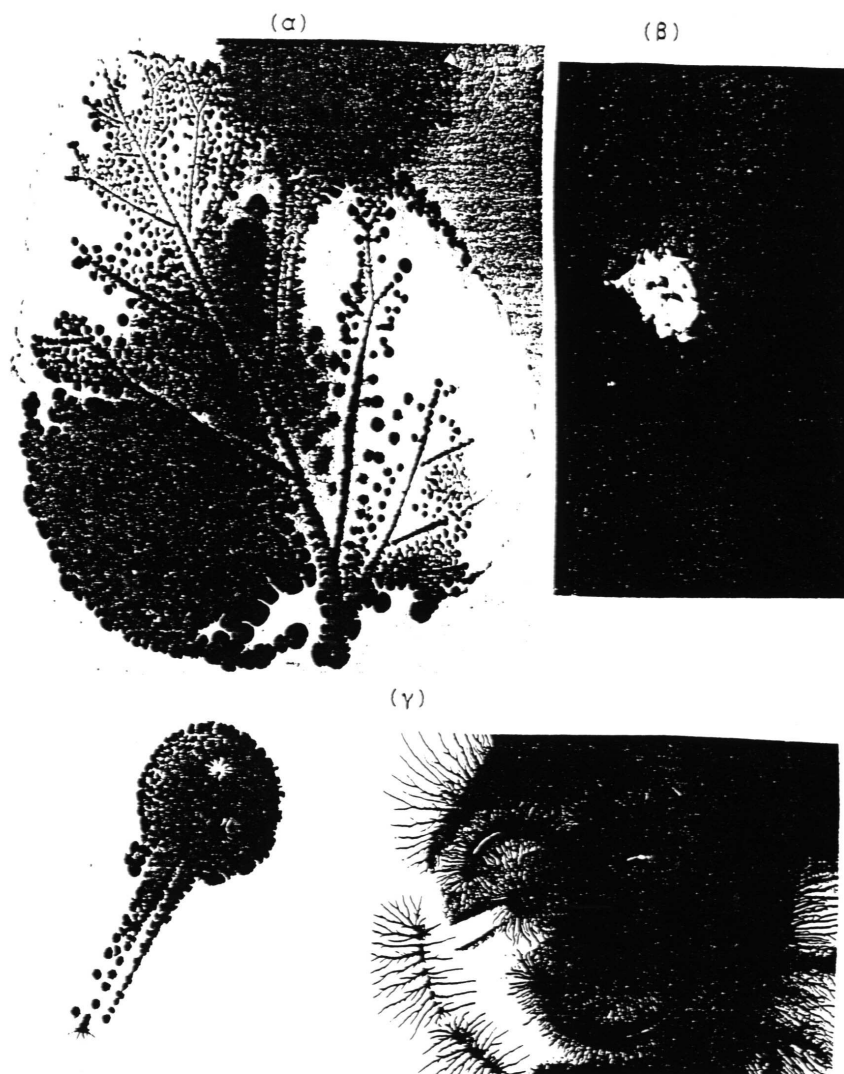
1.3.2 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση

Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι ισχύει ότι και προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης. Παρακάτω εξετάζεται (για λόγους σύγκρισης με τη διάτρηση) ένα τυπικό παράδειγμα επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών πάχους 2mm σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος 2.3.5-1 υπολογίζεται η ενέργεια W των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η ενέργεια αυτή για το πρώτο και το τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα : 122eV και 96,5eV. Όπως φαίνεται η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτίνων X.



Σχήμα 1.3.2-1 : Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pertinax (πάχους 2mm και με διάμετρο της επιφάνειάς του 150mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου.
Ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης : «ακίδα-πλάκα».

Αν τελικά συμβαίνει εκπομπή ακτίνων X κατά τη διάτρηση και την επιφανειακή διάσπαση, τότε θα πρέπει να προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και να απεικονίζονται αντικείμενα (όπως π.χ. συμβαίνει με τις λυχνίες των ακτινολογικών μηχανημάτων). Το ίδιο θα πρέπει να ισχύει και κατά την εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας (τουλάχιστον σε τιμές πεδίου πλησίον της διάσπασης, όπου αυτή να είναι αρκετά eV). Από πειράματα που έγιναν για τον σκοπό αυτό, φαίνεται ότι προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και απεικονίζονται αντικείμενα, καθώς και βιολογικοί οργανισμοί. Στο σχήμα 1.3.2-2 δίνονται ορισμένες από τις φωτογραφίες αυτές.



Σχήμα 1.3.2-2 : Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερούς στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

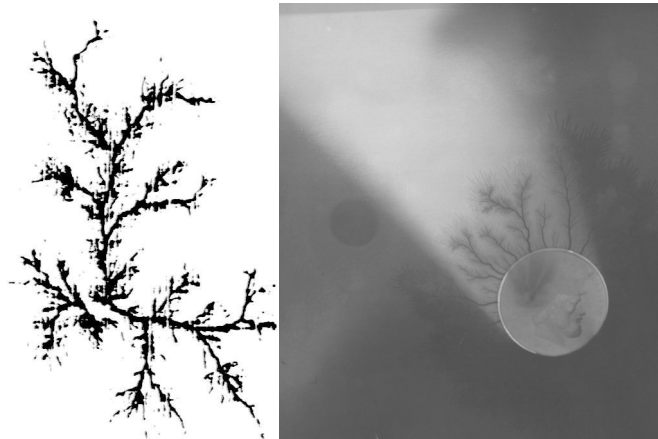
Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.

α) Φωτογράφιση φύλλου δένδρου

β) Φωτογραφία βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι).

γ) Φωτογραφία μεταλλικών αντικειμένων.

Επίσης, στο σχήμα 1.3.2-3 δίνονται φωτογραφίες επιφανειακών δενδριτών, που αφορούν αντίστοιχα τη γήρανση και τη διάσπαση. Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2mm και διαμέτρου 150mm), υπό κρουστικές τάσης 1,2/50μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα.

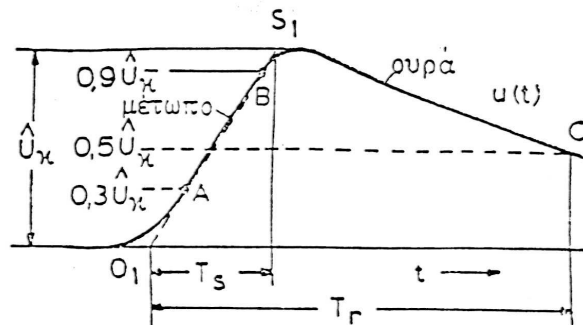


Σχήμα 1.3.2-3 : Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερών στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα).

1.4 Παραγωγή και μέτρηση κρουστικών τάσεων

Μεγάλη σημασία για την μελέτη της ηλεκτρικής αντοχής των μονώσεων έχει η καταγραφή των φαινομένων προ και κατά τη διάσπασή τους, ως προς τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης. Το γεγονός αυτό είναι προφανές αν αναλογιστεί κανείς πως χρειάζονται πληροφορίες για την αξιοπιστία των μονώσεων έναντι των διαφόρων μορφών υπερτάσεων, που μπορεί να δεχτεί ένα ηλεκτρικό δίκτυο.

Οι υπερτάσεις διακρίνονται κυρίως σε κεραυνικές υπερτάσεις και υπερτάσεις χειρισμών (δηλαδή υπερτάσεις που δημιουργούνται κατά τους χειρισμούς των διακοπών στο δίκτυο). Ως κρουστικές τάσεις ονομάζονται οι υπερτάσεις που έχουν μία συγκεκριμένη και τυποποιημένη μορφή, η οποία δίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 1.4: Χαρακτηρισμός των μεγεθών μίας κρουστικής τάσης.

$\hat{U}_κ$: Μέγιστη τιμή.

T_s : Διάρκεια μετώπου.

T_r : Διάρκεια ημίσεος εύρους της ουράς.

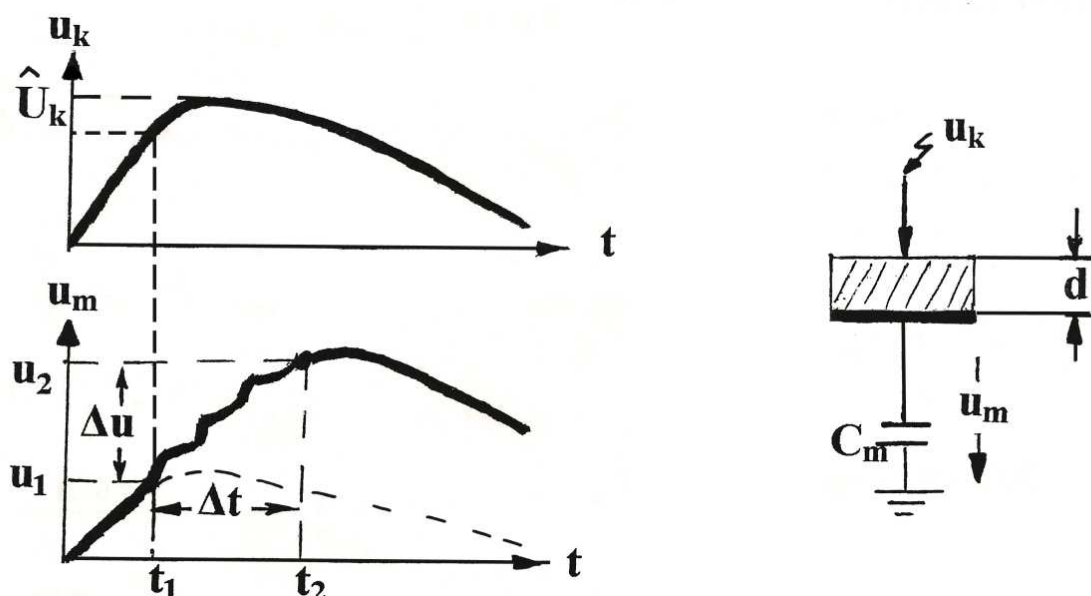
Οι κρουστικές τάσεις συμβολίζονται με τον χρόνο μετώπου (T_s) και τον χρόνο ουράς (T_r). Η κεραυνική τάση είναι μία κρουστική τάση της μορφής 1,2/50 μs , που σημαίνει ότι $T_s=1,2 \mu s$ και $T_r=50\mu s$. Αντίστοιχα, ως τυποποιημένη κρουστική τάση χειρισμών θεωρείται η 250/2500 μs . Στην παρούσα διπλωματική εργασία η τάση που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των εργαστηριακών μετρήσεων είναι της μορφής 1,2/50 μs .

Για την παραγωγή υψηλών μέγιστων τιμών $\hat{U}_κ$ χρησιμοποιούνται πολυβάθμιες γεννήτριες. Η αρχή λειτουργίας των γεννητριών αυτών στηρίζεται στην παράλληλη φόρτιση των πυκνωτών φόρτισης όλων των βαθμίδων και ακολούθως στην σε σειρά εκφόρτισή τους, μέσω αντίστοιχων σπινθηριστών σφαιρών.

ΜΕΡΟΣ 2

Σκοπός της εργασίας

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η στατιστική ανάλυση διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών στο συνδυασμό "Pertinax-λάδι μετασχηματιστών" εντός ανομοιογενούς πεδίου υπό κρουστικές τάσεις $\pm 1,2/50 \mu\text{s}$. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι ακίδα-πλάκα με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας $R=0,9\text{mm}$ και πάχος υλικού $d=1\text{mm}$ και $d=2\text{mm}$. Ο ορισμός των διαφόρων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά φαίνεται στο σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1: Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

t_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

t_2 : Χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

u_k : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Δu : Άλμα δυναμικού.

C_m : πυκνωτής μέτρησης.

u_m : τάση του πυκνωτή μέτρησης.

d : πάχος δοκιμίου.

Πιο συγκεκριμένα, θα υπολογιστούν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος και η κρουστική τάση κατά την έναρξη και το πέρας των εκκενώσεων, η τάση στον πυκνωτή μέτρησης, η ενέργεια των ηλεκτρικών φορέων και ο αριθμός των ηλεκτρονίων και των αλμάτων τους με βάση το τυπολόγιο που παρατίθεται παρακάτω.

Θα σχεδιαστούν οι χαρακτηριστικές των μεγεθών αυτών και θα γίνει μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών αυτών.

Τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν αναμένεται να μας βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση των ηλεκτρικών φαινομένων που παρατηρούνται στα βιομηχανικά ηλεκτρομονωτικά υλικά. Τα συμπεράσματα αυτά θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες ηλεκτρικές βιομηχανικές κατασκευές, όπως μετασχηματιστές.

Τυπολόγιο

Από τη διαδικασία του πειράματος καταγράφηκαν οι τιμές ορισμένων μεγεθών και στη συνέχεια με βάση αυτές υπολογίστηκαν άλλα μεγέθη με βάση το παρακάτω τυπολόγιο.

Τα μεγέθη που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία ήταν η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης \hat{U}_k , η στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων u_{ke} , τα φορτία q_1 και q_2 καθώς και οι χρόνοι t_1 και t_2 . Επίσης γνωστή ήταν και η χωρητικότητα C_m του πυκνωτή μέτρησης. Χρησιμοποιώντας τους παρακάτω τύπους υπολογίστηκαν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \hat{E}_k , η στιγμιαία τιμή της τάσης u του πυκνωτή, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος i , η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων ΔWe και ο αριθμός των ηλεκτρονίων Ne καθώς και ο αριθμός αλμάτων ηλεκτρονίων Na .

Σημείωση: Οι δείκτες $_1$ και $_2$ στα μεγέθη αναφέρονται σε τιμές τους κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων αντίστοιχα.

$$i_1 = \frac{q_1}{t_1} = \frac{[(C)_m \cdot u_1]}{t_1}$$

$$i_2 = \frac{q_2}{t_2} = \frac{[(C)_m \cdot u_2]}{t_2}$$

$$\Delta i = \Delta q \cdot \Delta t = \frac{[(C)_m \cdot \Delta u]}{\Delta t}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

$$\Delta q = q_2 - q_1$$

$$\Delta t \text{ min} = \bar{t}_2 - \sigma t_2 - \bar{t}_1 - \sigma t_1$$

$$\Delta t \text{ max} = \bar{t}_2 + \sigma t_2 - \bar{t}_1 + \sigma t_1$$

$$\Delta q \text{ min} = \bar{q}_2 - \sigma q_2 - \bar{q}_1 - \sigma q_1$$

$$\Delta q \text{ max} = \bar{q}_2 + \sigma q_2 - \bar{q}_1 + \sigma q_1$$

$$\Delta i \text{ min} = \Delta q \text{ min} / \Delta t \text{ max}$$

$$\Delta i \text{ max} = \Delta q \text{ max} / \Delta t \text{ min}$$

$$\Delta W_e = 0,5 \cdot \Delta u = 0,5 \cdot (u_2 - u_1)$$

$$N_e = \Delta q \bar{q}_e$$

$$N_a = \Delta t / 0,1$$

$$\frac{q_1}{\bar{t}_1} = \frac{C_m \cdot u_1}{\bar{t}_1} \Leftrightarrow u_1 = \frac{q_1}{C_m}$$

$$\frac{q_2}{\bar{t}_2} = \frac{C_m \cdot u_2}{\bar{t}_2} \Leftrightarrow u_2 = \frac{q_2}{C_m}$$

$$\bar{E}_k = \frac{2\bar{U}_k}{R \cdot \ln\left(\frac{4d}{R}\right)}$$

όπου $R=0.9mm$: η ακτίνα καμπυλότητας

d : το πάχος του δοκιμίου σε mm

ΜΕΡΟΣ 3

Μετρήσεις , υπολογισμοί και διαγράμματα

3.1 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50 μ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm)

\hat{U}_k [kV]	\hat{E}_k [MV/cm]	u_{KE} [kV]		E_{KE} [MV/cm]	
		av	σ	av	σ
28,60	0,43	27,50	0,90	0,41	0,01
35,40	0,53	34,30	0,00	0,51	0,00
43,00	0,64	41,50	0,00	0,62	0,00
50,50	0,75	48,80	0,00	0,73	0,00
57,30	0,85	55,20	0,00	0,82	0,00
64,00	0,95	61,70	0,00	0,92	0,00
71,40	1,06	64,00	0,00	0,95	0,00

Πίνακας 3.1-1: \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k
 u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

C_m [nF]	t_1 [μ s]		t_2 [μ s]		q_1 [μ C]		q_2 [μ C]		Δt [μ s]	Δq [μ C]
	av	σ	av	σ	av	σ	av	σ		
10,00	2,80	2,60	14,00	2,80	0,10	0,00	0,20	0,00	11,20	0,10
10,00	1,20	0,00	11,20	3,00	0,10	0,00	0,40	0,00	10,00	0,30
20,00	1,20	0,00	16,60	2,80	0,10	0,00	0,80	0,00	15,40	0,70
20,00	1,10	0,00	18,80	2,70	0,10	0,00	1,20	0,10	17,70	1,10
210,00	0,70	0,00	22,50	3,00	0,20	0,00	2,00	0,40	21,80	1,80
210,00	0,60	0,00	27,70	4,00	0,20	0,00	2,80	0,40	27,10	2,60
210,00	0,60	0,60	29,50	2,40	0,30	0,00	2,90	0,50	28,90	2,60

Πίνακας 3.1-2: 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
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 Δt : $t_2 - t_1$
 Δq : $q_2 - q_1$
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

$\Delta t \text{ min}$ [μs]	$\Delta t \text{ max}$ [μs]	$\Delta q \text{ min}$ [μC]	$\Delta q \text{ max}$ [μC]
5,80	16,60	0,10	0,10
7,00	13,00	0,30	0,30
12,60	18,20	0,70	0,70
15,00	20,40	1,00	1,20
18,80	24,80	1,40	2,20
23,10	31,10	2,20	3,00
25,90	31,90	2,10	3,10

Πίνακας 3.1-3: $\Delta t \text{ min}: t_{2 \text{ min}} - t_{1 \text{ max}}$
 $\Delta t \text{ max}: t_{2 \text{ max}} - t_{1 \text{ min}}$
 $\Delta q \text{ min}: q_{2 \text{ min}} - q_{1 \text{ max}}$
 $\Delta q \text{ max}: q_{2 \text{ max}} - q_{1 \text{ min}}$

u_1 [kV]		u_2 [kV]		Δu [kV]		ΔWe [keV]	
av	σ	av	σ	av	σ	av	σ
0,01000	0,00000	0,02000	0,00000	0,01000	0,00000	0,005	0,000
0,01000	0,00000	0,04000	0,00000	0,03000	0,00000	0,015	0,000
0,00500	0,00000	0,04000	0,00000	0,03500	0,00000	0,018	0,000
0,00500	0,00000	0,06000	0,00500	0,05500	0,00500	0,028	0,003
0,00095	0,00000	0,00952	0,00190	0,00857	0,00190	0,004	0,001
0,00095	0,00000	0,01333	0,00190	0,01238	0,00190	0,006	0,001
0,00143	0,00000	0,01381	0,00238	0,01238	0,00238	0,006	0,001

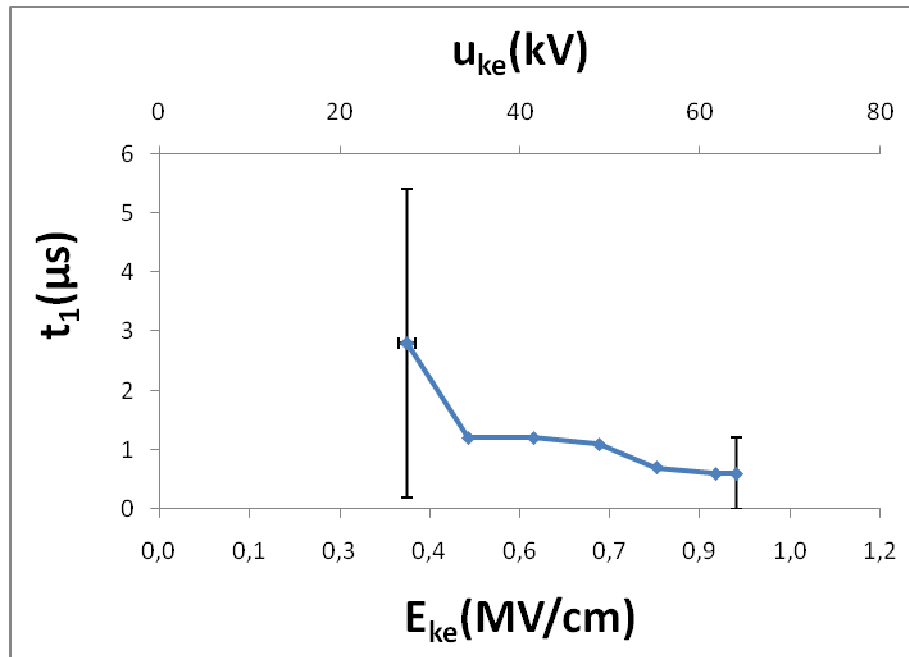
Πίνακας 3.1-4: u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 Δu : $u_2 - u_1$
 ΔWe : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

Ne		Na	
av	σ	av	σ
6,2422E+17	0	112,00	38,21
1,8727E+18	0	100,00	30,00
4,3695E+18	0	154,00	28,00
6,8664E+18	6,2422E+17	177,00	27,00
1,1236E+19	2,49688E+18	218,00	30,00
1,623E+19	2,49688E+18	271,00	40,00
1,623E+19	3,1211E+18	289,00	24,74

Πίνακας 3.1-5: Na: αριθμός αλμάτων ηλεκτρονίων
Ne: αριθμός ηλεκτρονίων
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

i_1 [A]		i_2 [A]		Δi [A]	$\Delta i \text{ min}$ [A]	$\Delta i \text{ max}$ [A]
av	σ	av	σ			
0,04	0,03	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02
0,08	0,00	0,04	0,01	0,03	0,02	0,04
0,08	0,00	0,05	0,01	0,05	0,04	0,06
0,09	0,00	0,06	0,01	0,06	0,05	0,08
0,29	0,00	0,09	0,02	0,08	0,06	0,12
0,33	0,00	0,10	0,02	0,10	0,07	0,13
0,50	0,50	0,10	0,02	0,09	0,07	0,12

Πίνακας 3.1-6: i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq
 $\Delta i \text{ min}$: ελάχιστη τιμή του Δi
 $\Delta i \text{ max}$: μέγιστη τιμή του Δi
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

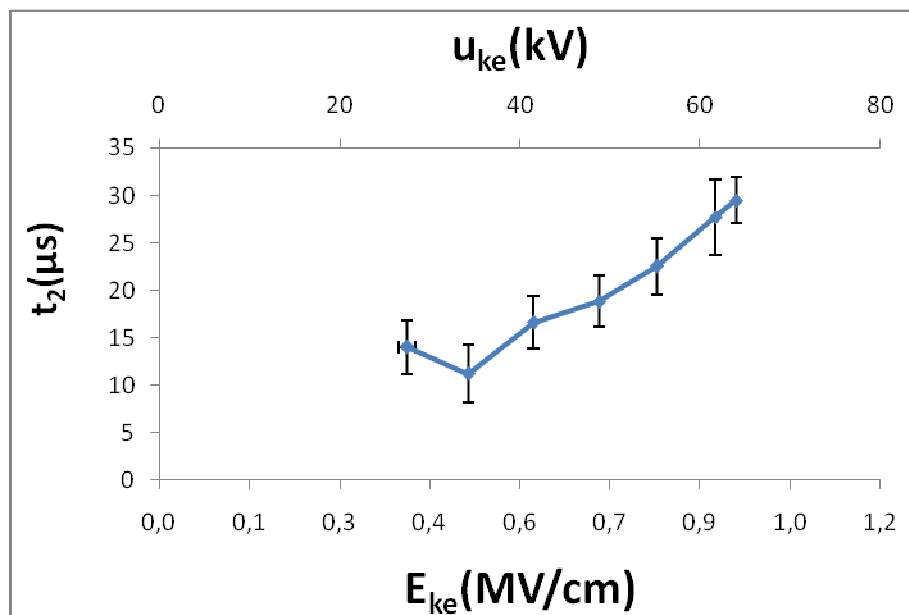


Σχήμα 3.1-1: Χαρακτηριστική $t_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50 μ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1$ mm).

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

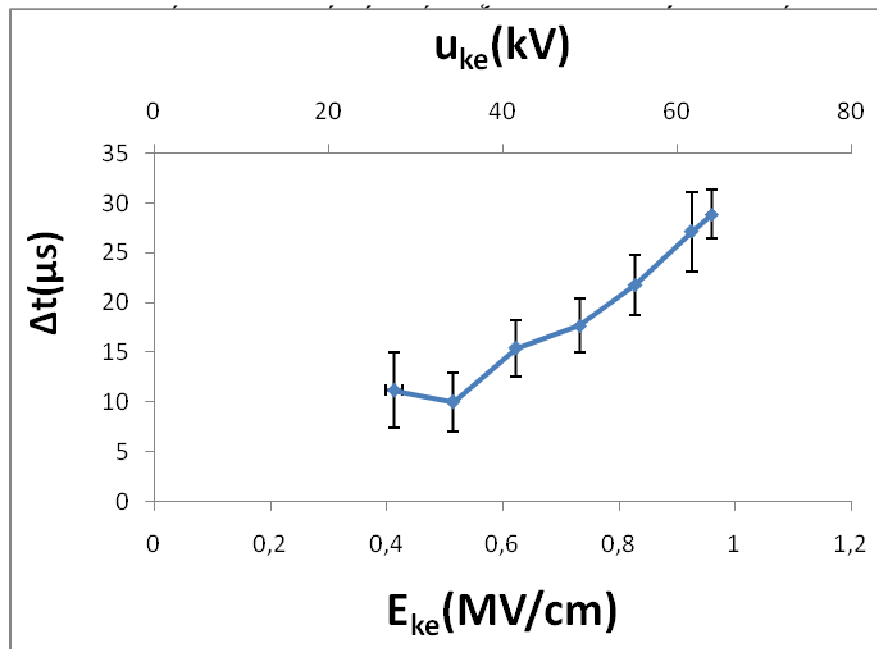
u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}



Σχήμα 3.1-2: Χαρακτηριστική $t_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50 μ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1$ mm).

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

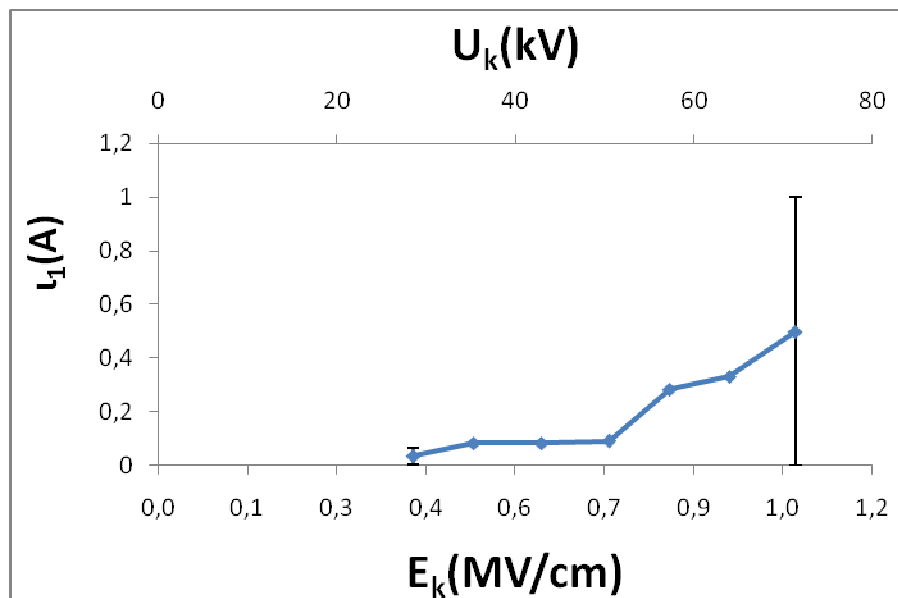


Σχήμα 3.1-3: Χαρακτηριστική $\Delta t = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $+1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).

Δt : χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

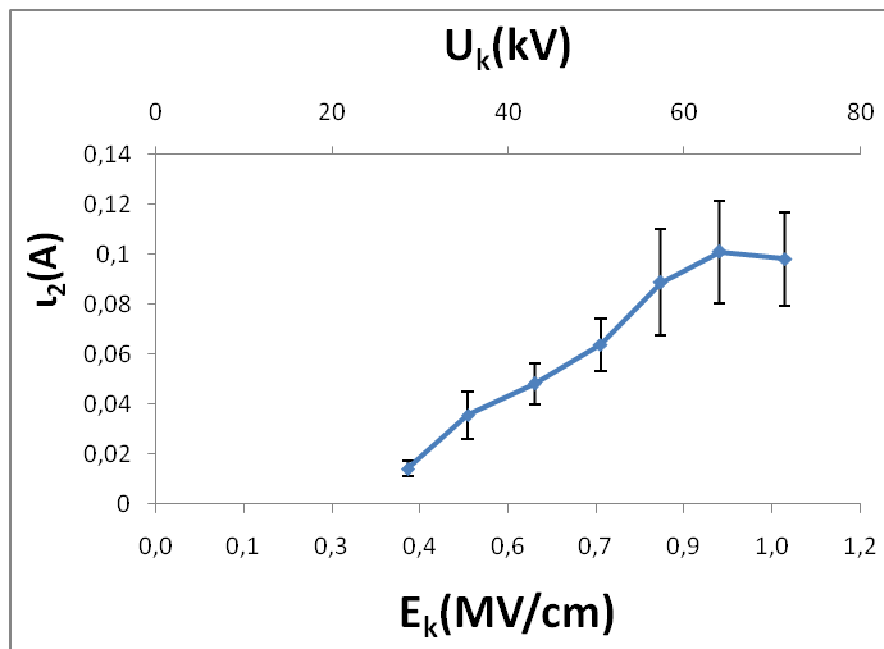
E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}



Σχήμα 3.1-4: Χαρακτηριστική $i_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $+1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).

i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

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

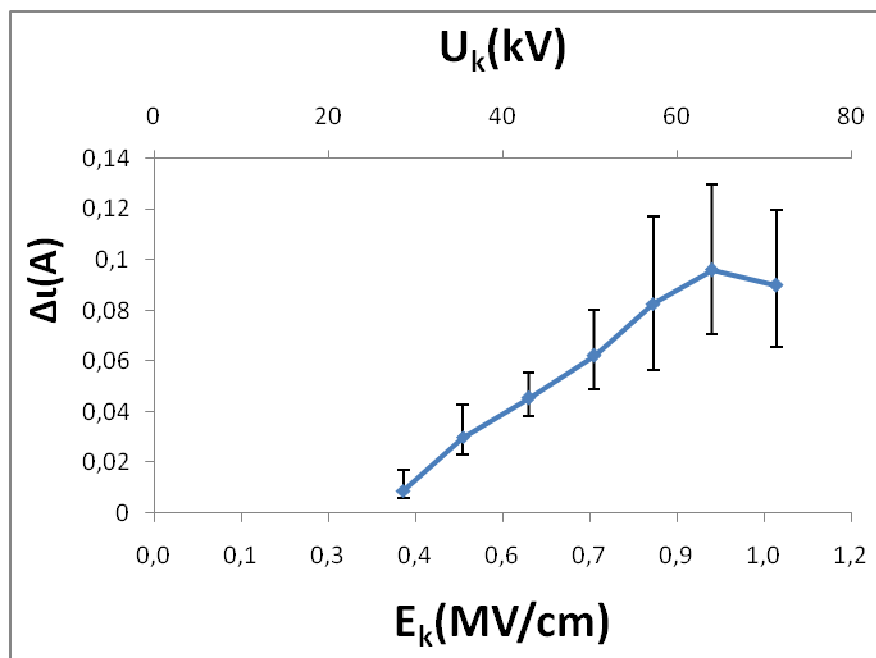


Σχήμα 3.1-5: Χαρακτηριστική $I_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

I_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

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

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

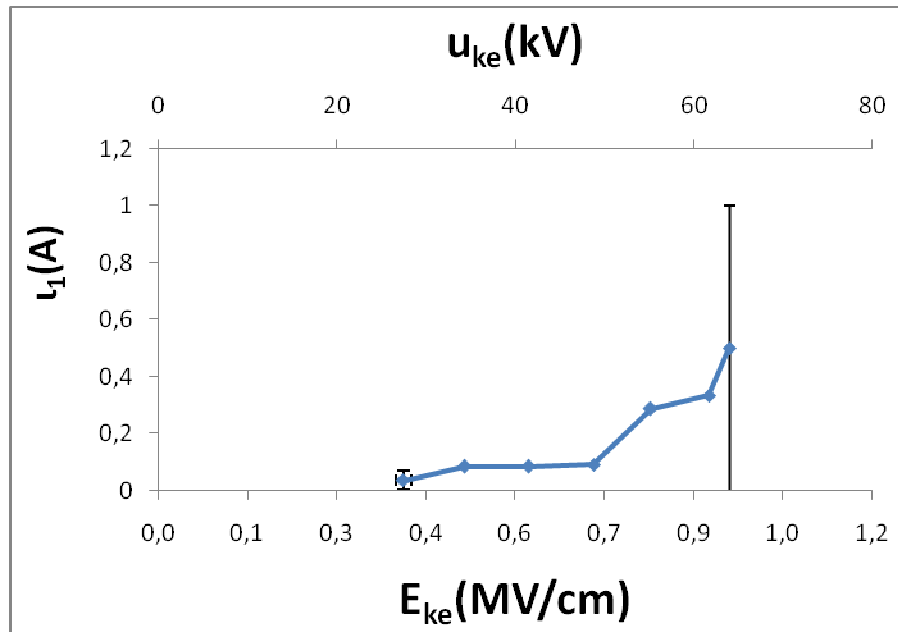


Σχήμα 3.1-6: Χαρακτηριστική $\Delta i = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq

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

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

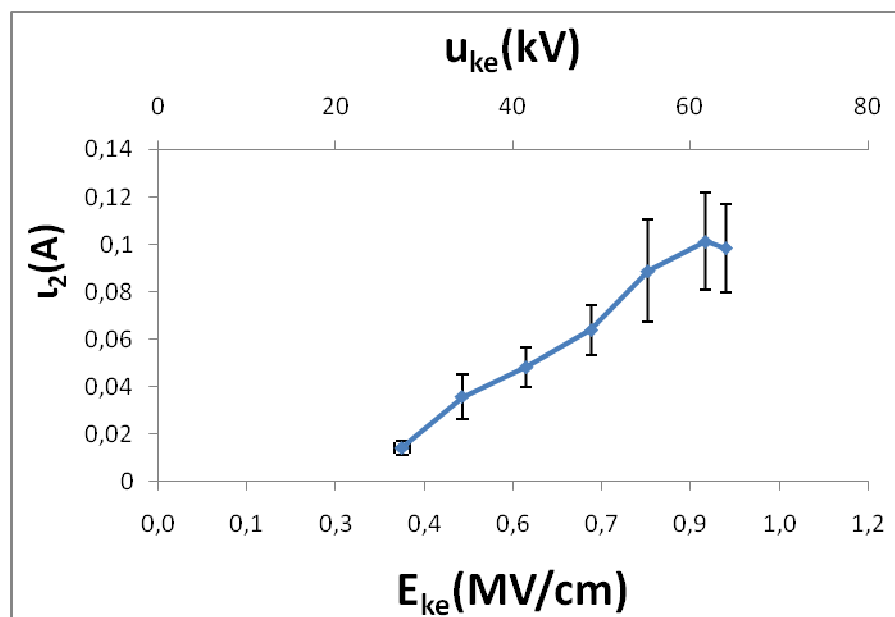


Σχήμα 3.1-7: Χαρακτηριστική $i_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

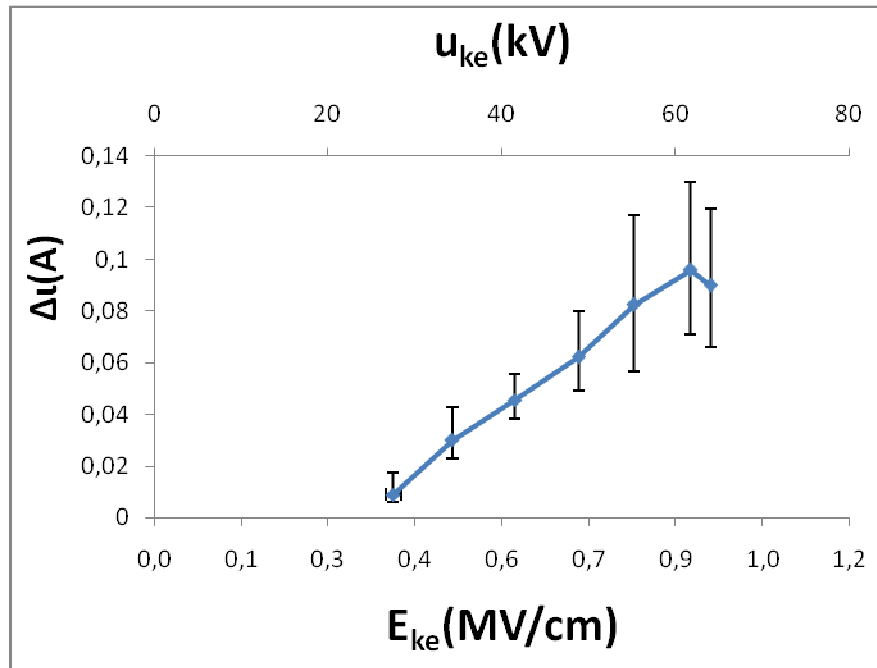


Σχήμα 3.1-8: Χαρακτηριστική $i_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

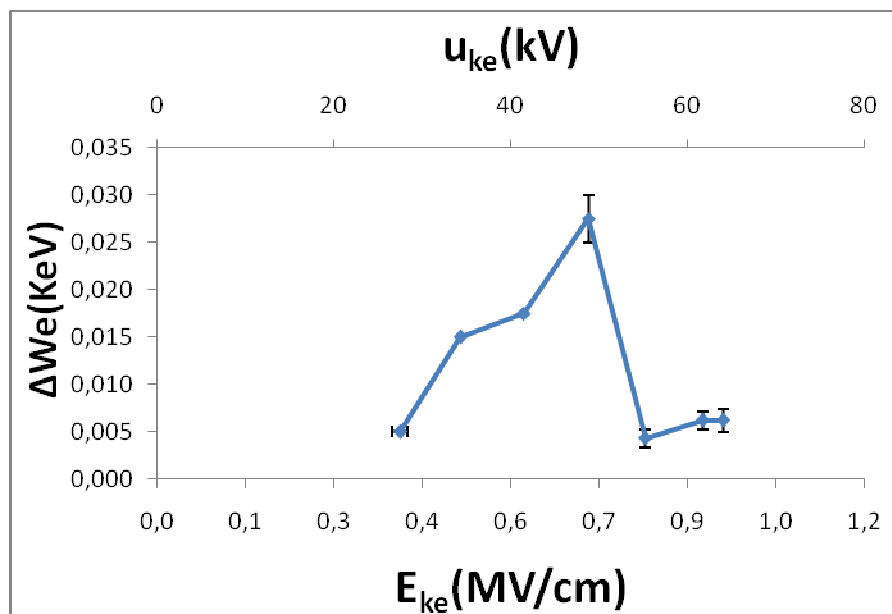


Σχήμα 3.1-9: Χαρακτηριστική $\Delta i = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50 μ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1$ mm).

Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

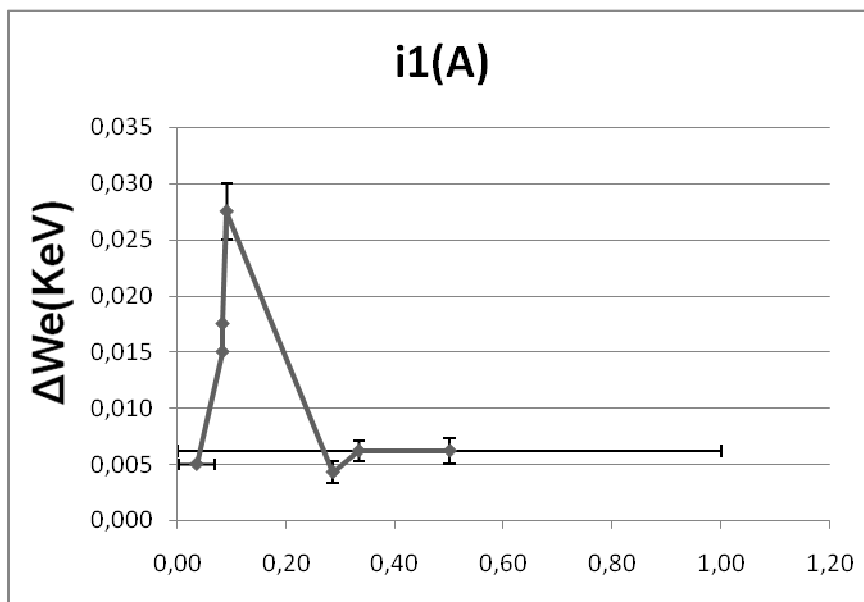


Σχήμα 3.1-10: Χαρακτηριστική $\Delta We = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50 μ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1$ mm).

ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

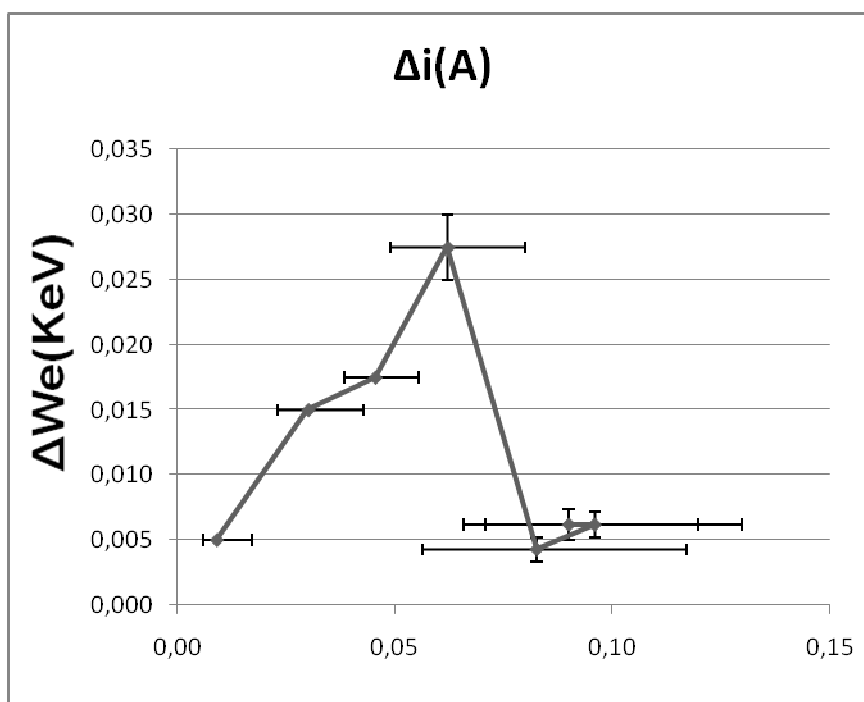
u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}



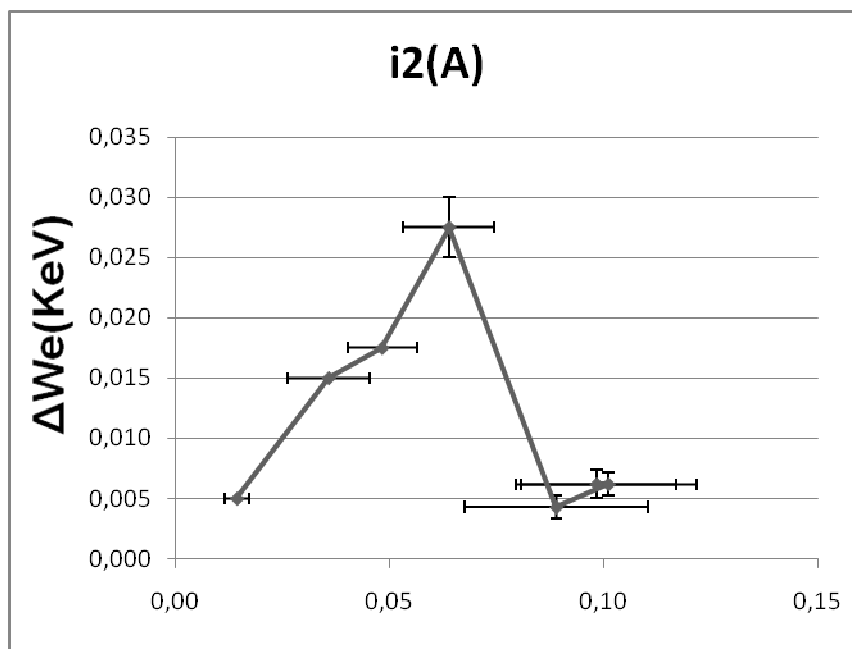
Σχήμα 3.1-11: Χαρακτηριστική $\Delta W_e=f(i_1)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

ΔW_e : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων
 i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



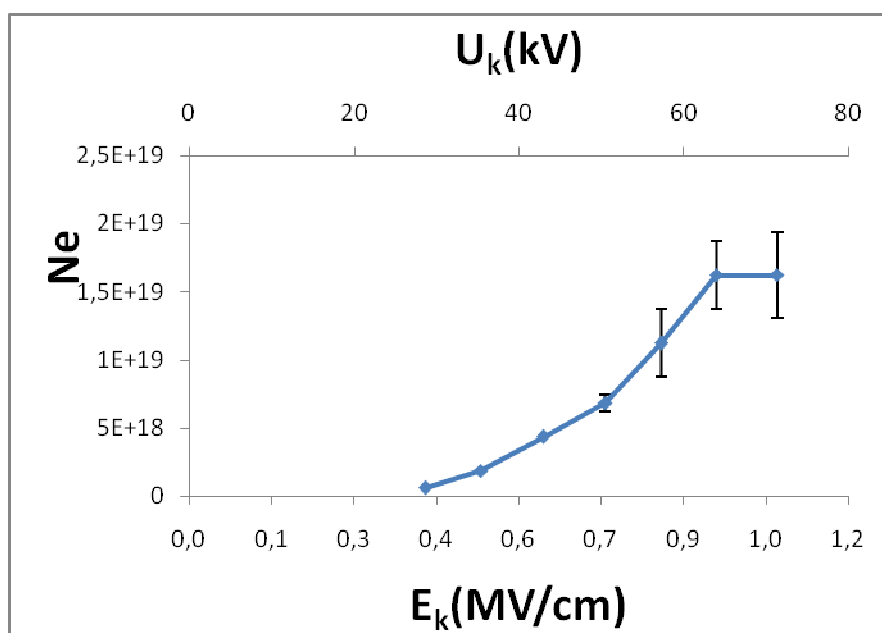
Σχήμα 3.1-12: Χαρακτηριστική $\Delta W_e=f(\Delta i)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

ΔW_e : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων
 Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq



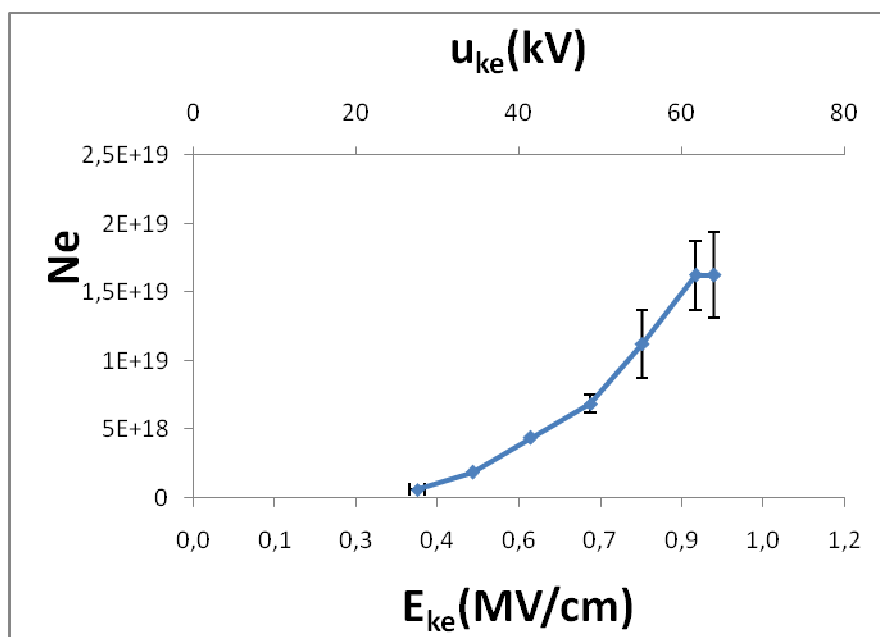
Σχήμα 3.1-13: Χαρακτηριστική $\Delta We=f(i_2)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50 μ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1$ mm).

ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων
 i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.1-14: Χαρακτηριστική $N_e=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50 μ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1$ mm).

N_e : αριθμός ηλεκτρονίων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

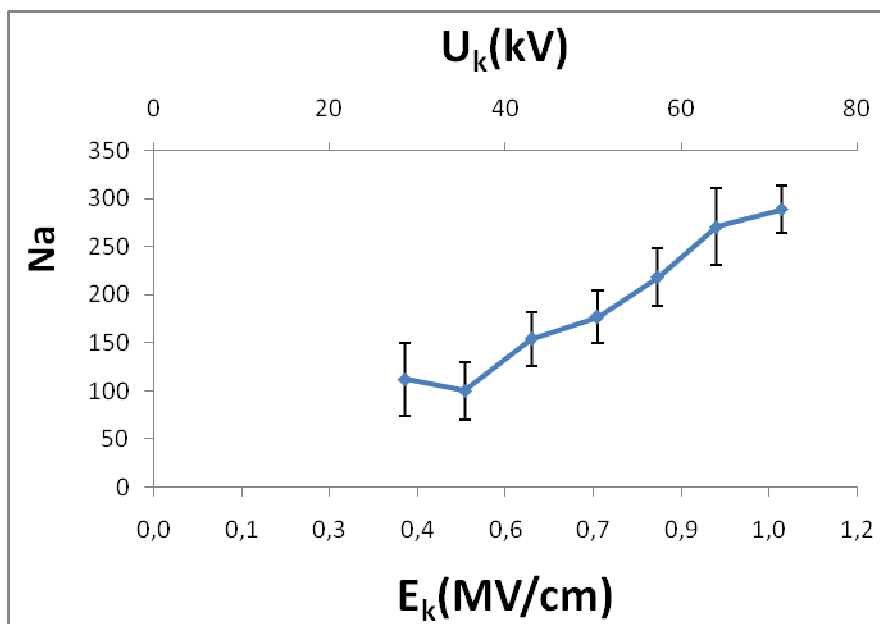


Σχήμα 3.1-15: Χαρακτηριστική $N_e=f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

N_e : αριθμός ηλεκτρονίων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

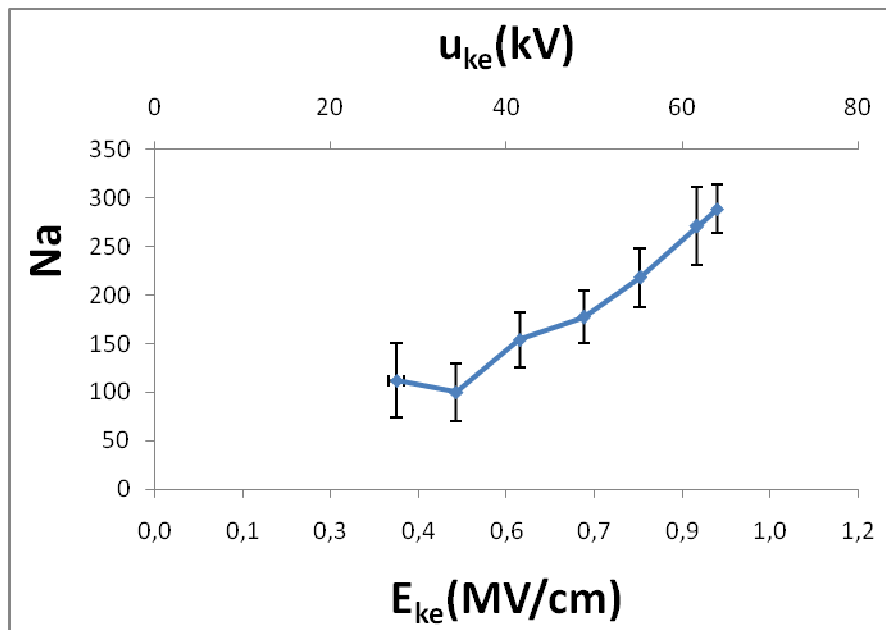


Σχήμα 3.1-16: Χαρακτηριστική $N_a=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

N_a : αριθμός αλμάτων ηλεκτρονίων

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

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



Σχήμα 3.1-17: Χαρακτηριστική $Na=f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $+1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).

Na: αριθμός αλάτων ηλεκτρονίων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

3.2 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/50 μ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm)

\hat{U}_k [kV]	\hat{E}_k [MV/cm]	u_{KE} [kV]		E_{KE} [MV/cm]	
		av	σ	av	σ
29,10	0,43	27,50	1,40	0,41	0,02
36,70	0,55	35,00	0,00	0,52	0,00
44,10	0,66	42,20	0,00	0,63	0,00
51,50	0,77	49,50	0,00	0,74	0,00
58,30	0,87	55,70	0,00	0,83	0,00
66,40	0,99	63,80	0,00	0,95	0,00
72,10	1,07	69,20	0,00	1,03	0,00
78,10	1,16	75,10	0,00	1,12	0,00

Πίνακας 3.2-1: \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k
 u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

C_m [nF]	t_1 [μ s]		t_2 [μ s]		q_1 [μ C]		q_2 [μ C]		Δt [μ s]	Δq [μ C]
	av	σ	av	σ	av	σ	av	σ		
10,00	3,00	0,90	14,40	1,70	0,10	0,10	0,20	0,00	11,40	0,10
10,00	1,80	0,00	16,60	1,60	0,10	0,10	0,40	0,00	14,80	0,30
20,00	1,60	0,00	19,50	1,60	0,15	0,15	0,90	0,00	17,90	0,75
20,00	1,50	0,00	24,60	2,50	0,20	0,20	1,20	0,20	23,10	1,00
210,00	1,40	0,00	27,00	2,00	0,25	0,25	2,10	0,30	25,60	1,85
210,00	1,20	0,00	31,80	2,30	0,26	0,26	2,60	0,60	30,60	2,34
210,00	1,00	0,00	34,30	2,20	0,27	0,27	3,80	0,80	33,30	3,53
210,00	0,90	0,00	39,50	5,00	0,29	0,29	6,00	0,30	38,60	5,71

Πίνακας 3.2-2: 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
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 Δt : $t_2 - t_1$
 Δq : $q_2 - q_1$
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

Δt min [μs]	Δt max [μs]	Δq min [μC]	Δq max [μC]
8,80	14,00	0,00	0,20
13,20	16,40	0,20	0,40
16,30	19,50	0,60	0,90
20,60	25,60	0,60	1,40
23,60	27,60	1,30	2,40
28,30	32,90	1,48	3,20
31,10	35,50	2,46	4,60
33,60	43,60	5,12	6,30

Πίνακας 3.2-3: Δt min: $t_{2\text{min}} - t_{1\text{max}}$
 Δt max: $t_{2\text{max}} - t_{1\text{min}}$
 Δq min: $q_{2\text{min}} - q_{1\text{max}}$
 Δq max: $q_{2\text{max}} - q_{1\text{min}}$

u_1 [kV]		u_2 [kV]		Δu [kV]		ΔWe [keV]	
av	σ	av	σ	av	σ	av	σ
0,01000	0,01000	0,02000	0,00000	0,01000	0,01000	0,005	0,005
0,01000	0,01000	0,04000	0,00000	0,03000	0,01000	0,015	0,005
0,00750	0,00750	0,04500	0,00000	0,03750	0,00750	0,019	0,004
0,01000	0,01000	0,06000	0,01000	0,05000	0,01414	0,025	0,007
0,00119	0,00119	0,01000	0,00143	0,00881	0,00186	0,004	0,001
0,00124	0,00124	0,01238	0,00286	0,01114	0,00311	0,006	0,002
0,00129	0,00129	0,01810	0,00381	0,01681	0,00402	0,008	0,002
0,00138	0,00138	0,02857	0,00143	0,02719	0,00199	0,014	0,001

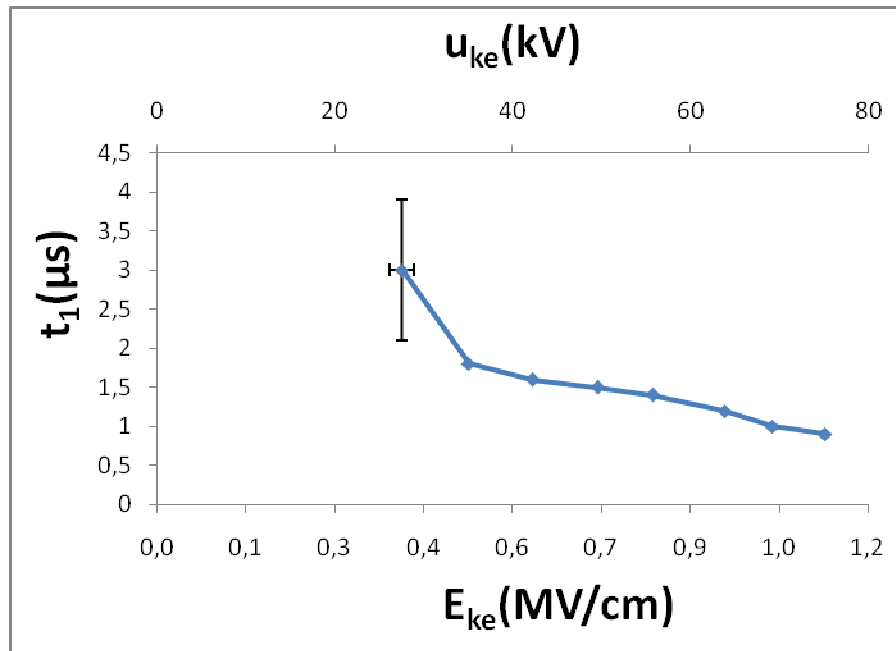
Πίνακας 3.2-4: u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 Δu : $u_2 - u_1$
 ΔWe : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

Ne		Na	
av	σ	av	σ
6,2422E+17	6,2422E+17	114,00	19,24
1,8727E+18	6,2422E+17	148,00	16,00
4,6816E+18	9,3633E+17	179,00	16,00
6,2422E+18	1,76556E+18	231,00	25,00
1,1548E+19	2,43766E+18	256,00	20,00
1,4607E+19	4,08184E+18	306,00	23,00
2,2035E+19	5,2705E+18	333,00	22,00
3,5643E+19	2,60458E+18	386,00	50,00

Πίνακας 3.2-5: Na: αριθμός αλάτων ηλεκτρονίων
Ne: αριθμός ηλεκτρονίων
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

i_1 [A]		i_2 [A]		Δi [A]	$\Delta i \text{ min}$ [A]	$\Delta i \text{ max}$ [A]
αv	σ	αv	σ			
0,03	0,03	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02
0,06	0,06	0,02	0,00	0,02	0,01	0,03
0,09	0,09	0,05	0,00	0,04	0,03	0,06
0,13	0,13	0,05	0,01	0,04	0,02	0,07
0,18	0,18	0,08	0,01	0,07	0,05	0,10
0,22	0,22	0,08	0,02	0,08	0,04	0,11
0,27	0,27	0,11	0,02	0,11	0,07	0,15
0,32	0,32	0,15	0,02	0,15	0,12	0,19

Πίνακας 3.2-6: i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq
 $\Delta i \text{ min}$: ελάχιστη τιμή του Δi
 $\Delta i \text{ max}$: μέγιστη τιμή του Δi
 αv : μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

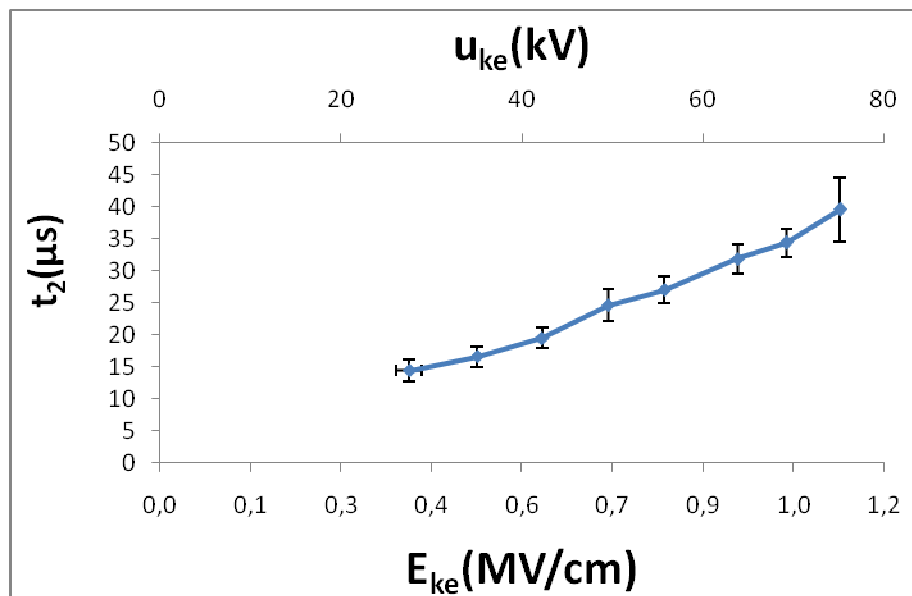


Σχήμα 3.2-1: Χαρακτηριστική $t_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu$ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

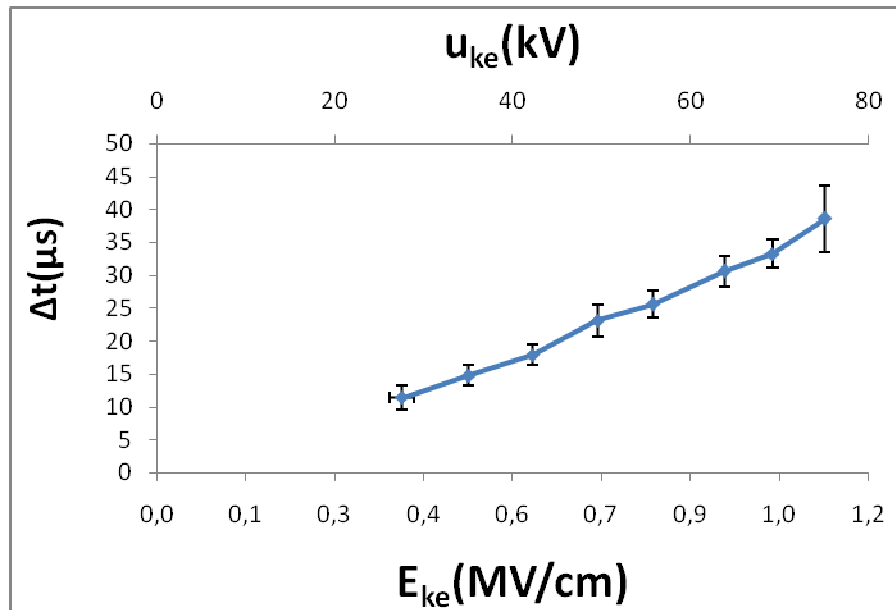


Σχήμα 3.2-2: Χαρακτηριστική $t_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu$ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

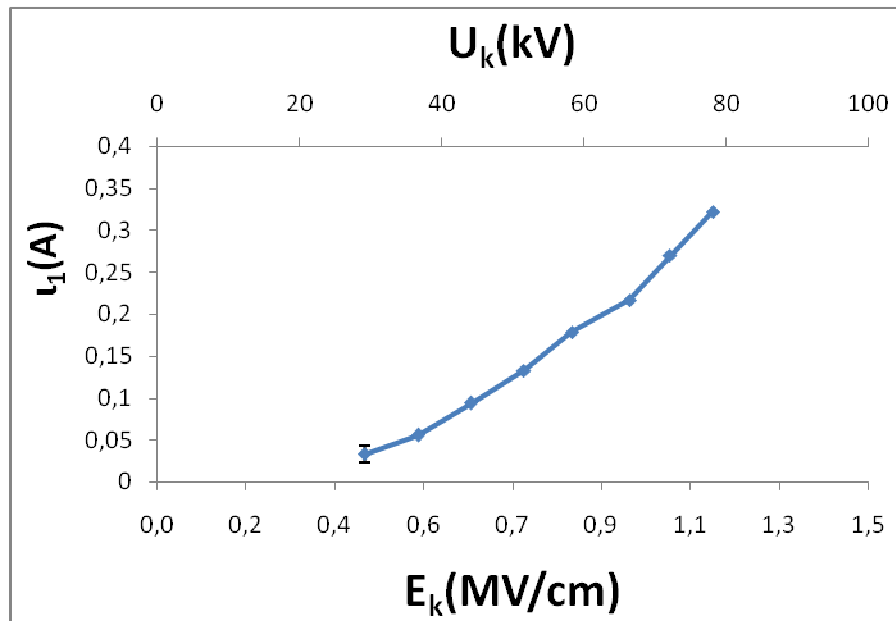


Σχήμα 3.2-3: Χαρακτηριστική $\Delta t = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{ mm}$).

Δt : χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

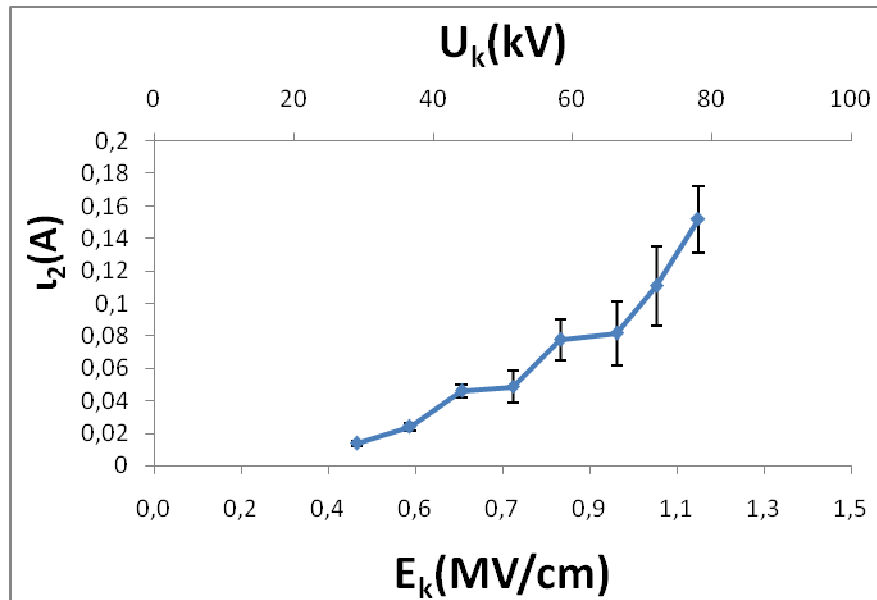


Σχήμα 3.2-4: Χαρακτηριστική $i_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{ mm}$).

i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

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

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

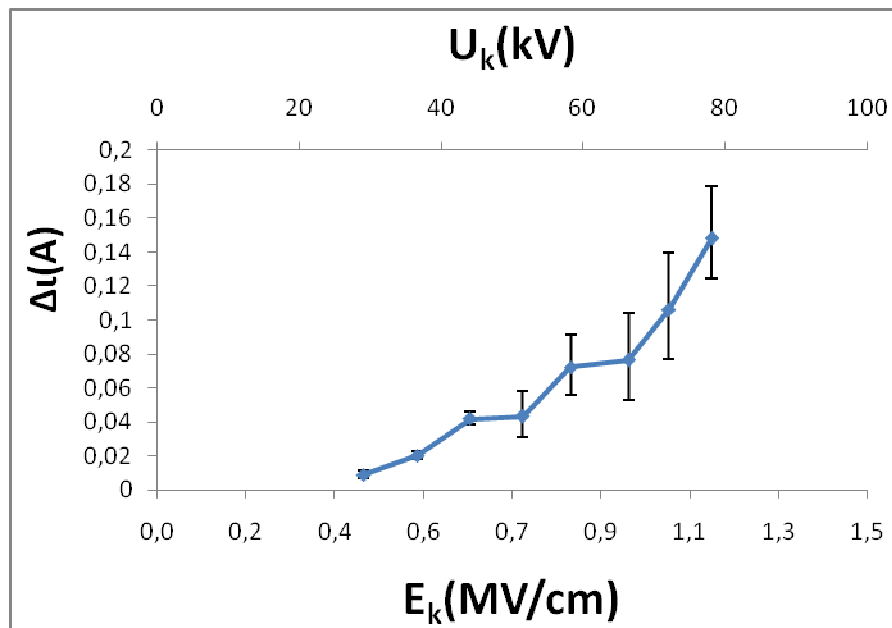


Σχήμα 3.2-5: Χαρακτηριστική $I_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

I_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

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

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

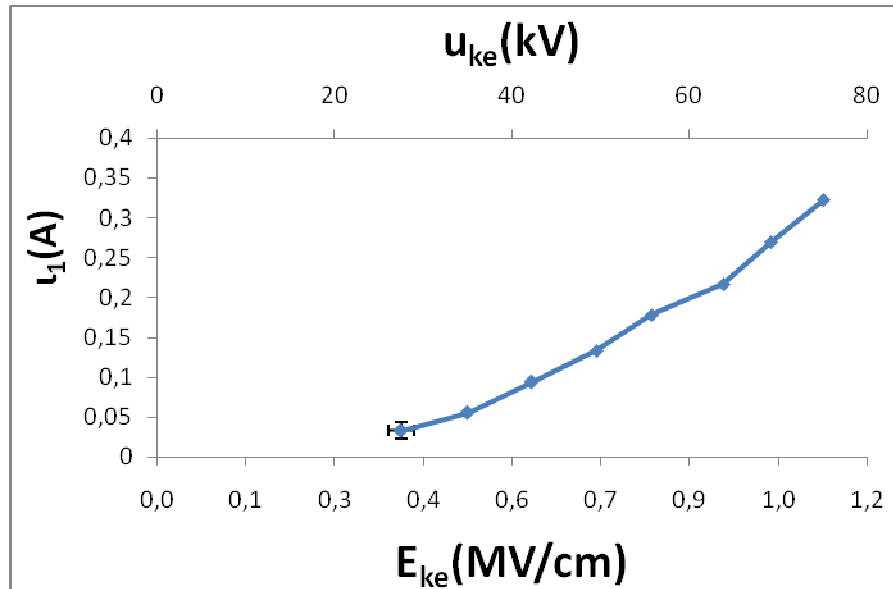


Σχήμα 3.2-6: Χαρακτηριστική $\Delta I = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

ΔI : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq

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

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

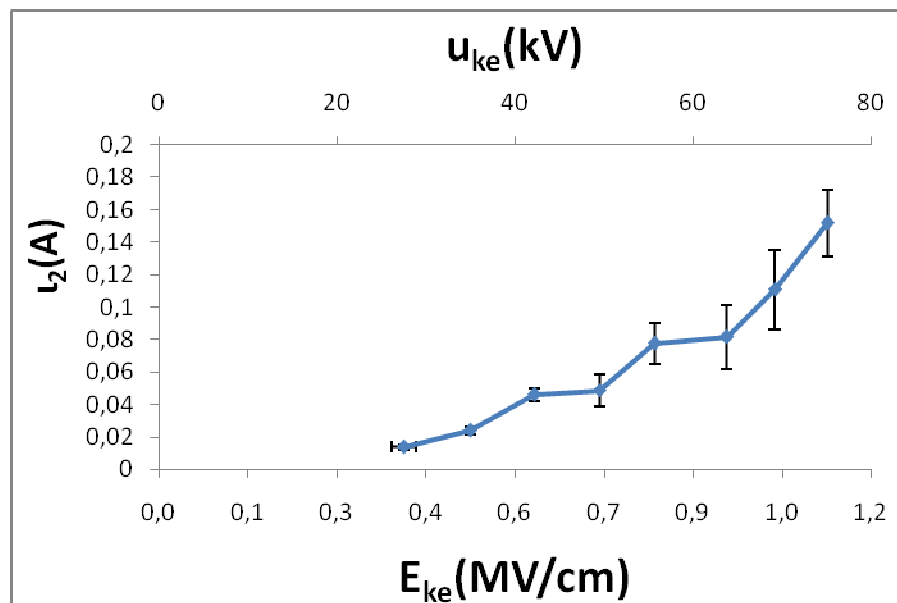


Σχήμα 3.2-7: Χαρακτηριστική $i_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

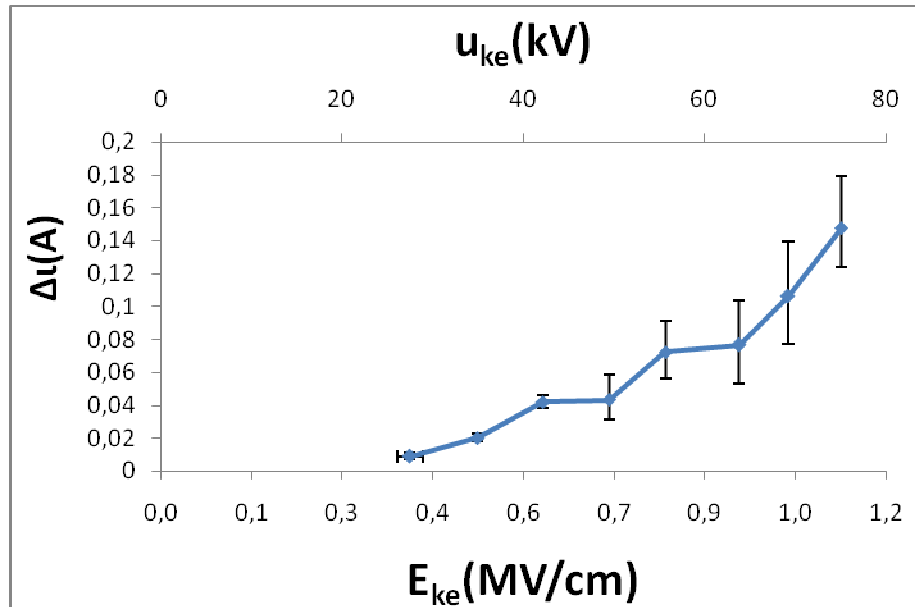


Σχήμα 3.2-8: Χαρακτηριστική $i_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

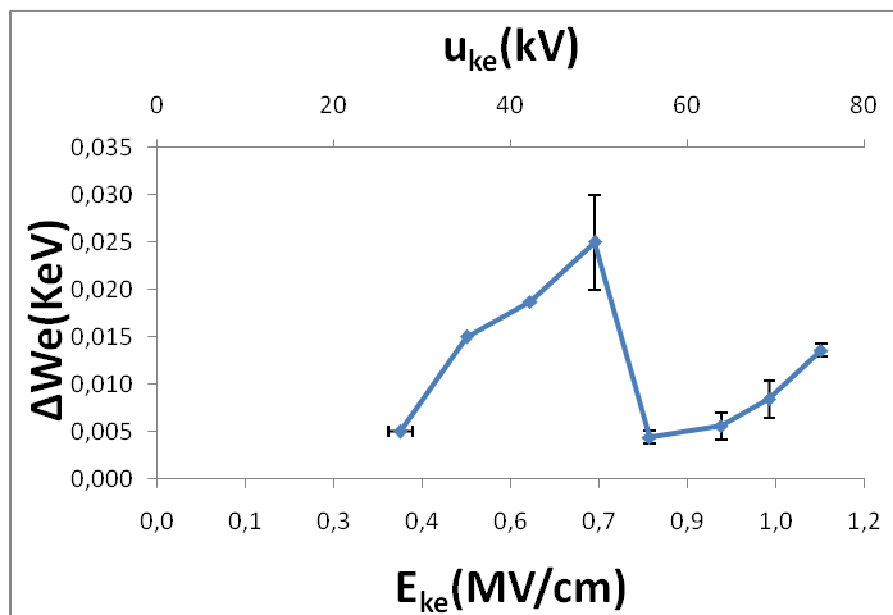


Σχήμα 3.2-9: Χαρακτηριστική $\Delta i = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).

Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

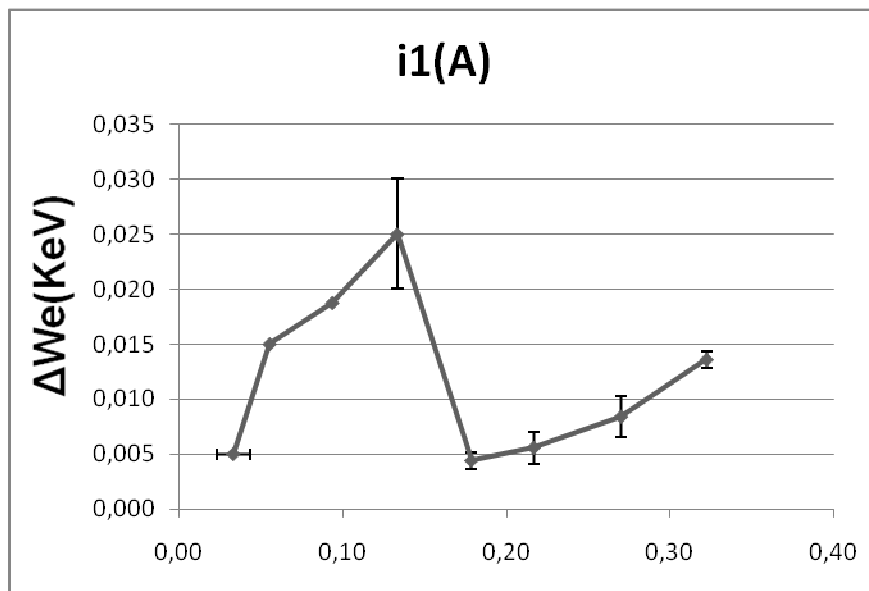


Σχήμα 3.2-10: Χαρακτηριστική $\Delta We = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).

ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

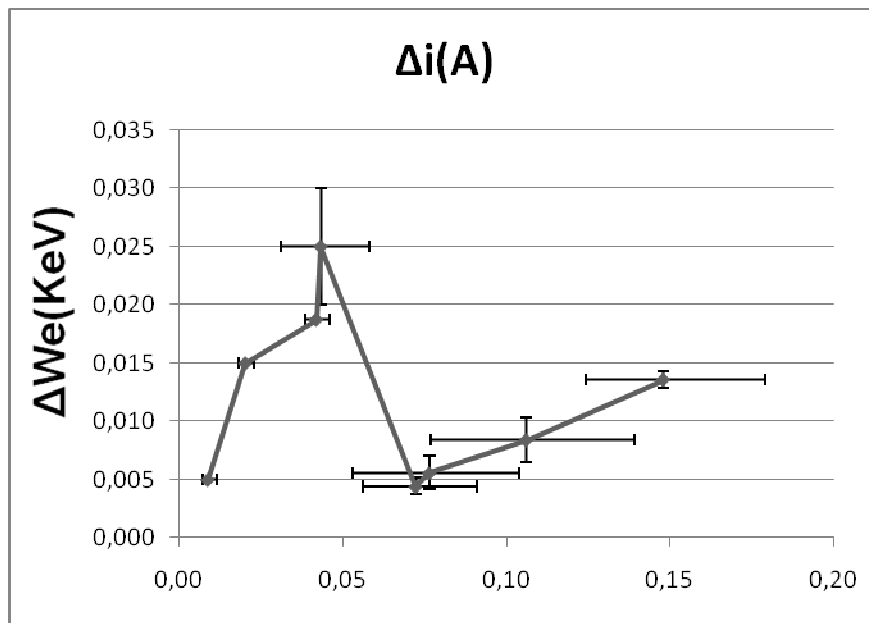
E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}



Σχήμα 3.2-11: Χαρακτηριστική $\Delta W_e=f(i_1)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

ΔW_e : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

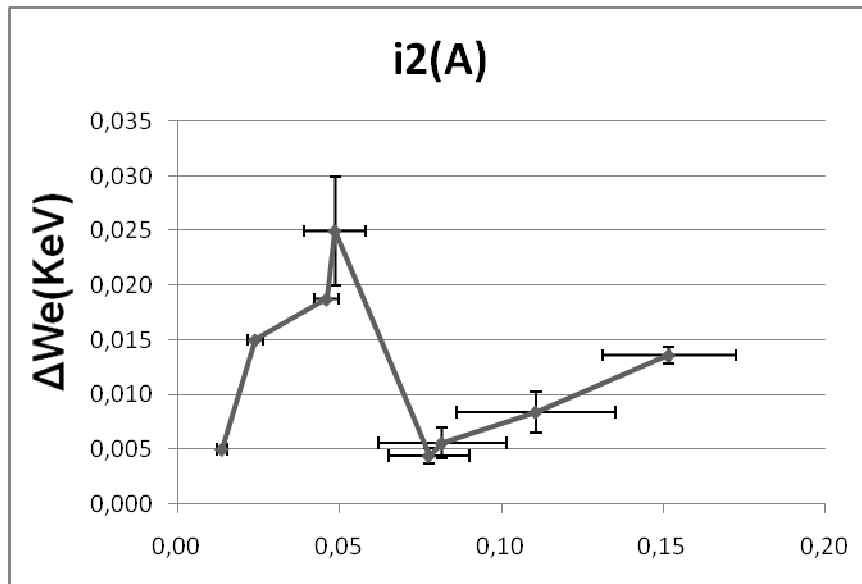
i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.2-12: Χαρακτηριστική $\Delta W_e=f(\Delta i)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

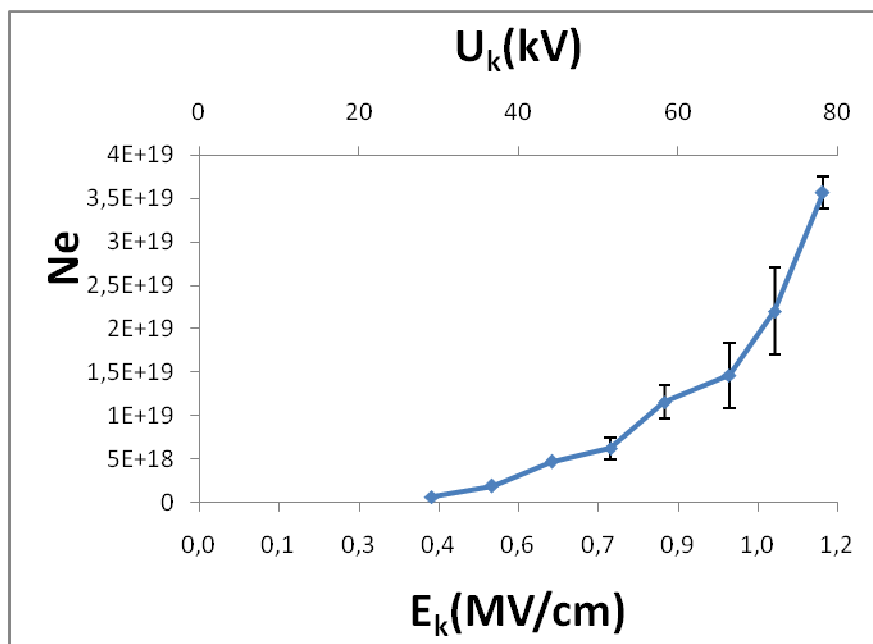
ΔW_e : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq



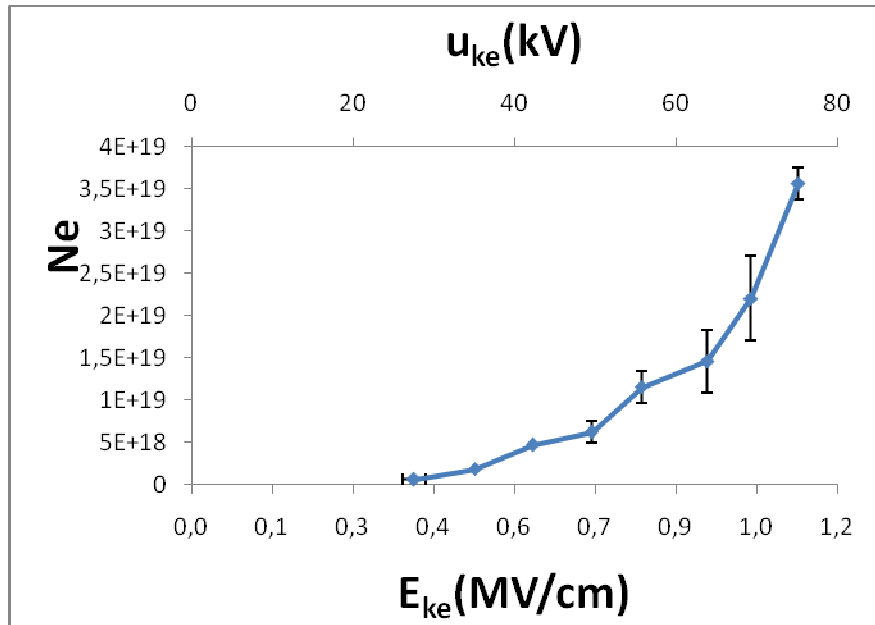
Σχήμα 3.2-13: Χαρακτηριστική $\Delta We=f(i_2)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων
 i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.2-14: Χαρακτηριστική $N_e=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

N_e : αριθμός ηλεκτρονίων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

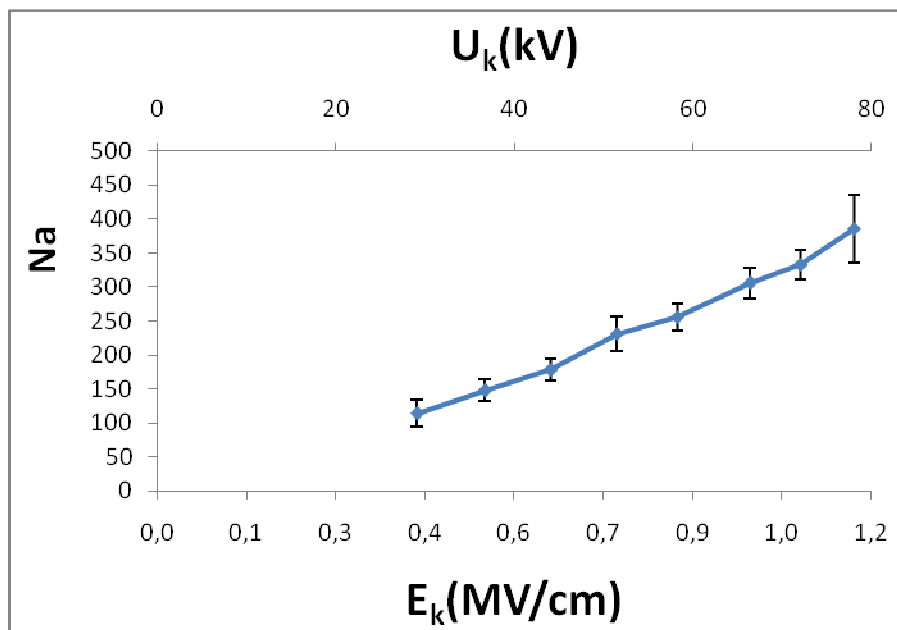


Σχήμα 3.2-15: Χαρακτηριστική $N_e=f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).

N_e : αριθμός ηλεκτρονίων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

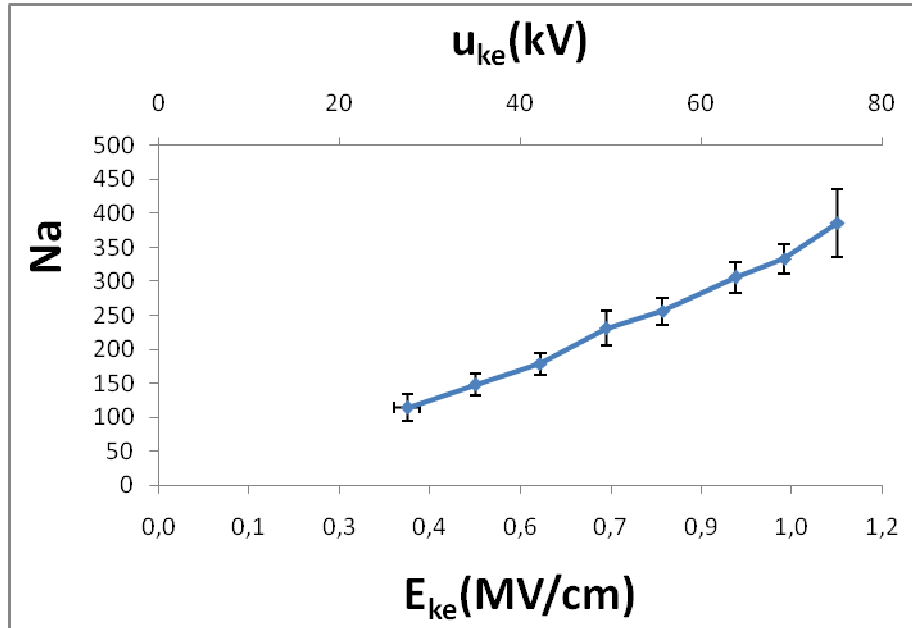


Σχήμα 3.2-16: Χαρακτηριστική $N_a=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).

N_a : αριθμός αλμάτων ηλεκτρονίων

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

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



Σχήμα 3.2-17: Χαρακτηριστική $Na=f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

Na: αριθμός αλμάτων ηλεκτρονίων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

3.3 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm)

\hat{U}_k [kV]	\hat{E}_k [MV/cm]	u_{KE} [kV]		E_{KE} [MV/cm]	
		av	σ	av	σ
35,40	0,36	34,00	1,70	0,35	0,03
43,80	0,45	42,40	0,00	0,43	0,00
50,20	0,51	48,70	0,00	0,50	0,00
56,90	0,58	55,40	0,00	0,56	0,00
64,70	0,66	63,10	0,00	0,64	0,00
71,40	0,73	69,80	0,00	0,71	0,00
86,60	0,88	84,90	0,00	0,86	0,00
94,30	0,96	92,60	0,00	0,94	0,00
99,70	1,01	97,90	0,00	1,00	0,00
113,80	1,16	112,00	0,00	1,14	0,00
121,20	1,23	118,30	0,00	1,20	0,00
126,00	1,28	123,00	0,00	1,25	0,00
132,70	1,35	129,50	0,00	1,32	0,00

Πίνακας 3.3-1: \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k
 u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

C _m [nF]	t ₁ [μs]		t ₂ [μs]		q ₁ [μC]		q ₂ [μC]		Δt [μs]	Δq [μC]
	av	σ	av	σ	av	σ	av	σ		
3,30	3,60	3,50	15,80	3,50	0,10	0,00	0,20	0,00	12,20	0,10
10,00	2,00	0,00	14,30	3,70	0,12	0,00	0,33	0,04	12,30	0,21
10,00	1,80	0,00	15,40	4,00	0,13	0,00	0,38	0,07	13,60	0,25
10,00	1,40	0,00	19,70	3,50	0,16	0,00	0,61	0,11	18,30	0,45
20,00	1,20	0,00	20,70	3,30	0,20	0,00	0,96	0,16	19,50	0,76
20,00	1,20	0,00	25,70	4,00	0,24	0,00	1,16	0,23	24,50	0,92
210,00	1,20	0,00	27,20	9,10	0,85	0,16	1,81	0,40	26,00	0,96
210,00	1,20	0,00	26,60	11,20	1,21	0,14	2,17	0,50	25,40	0,96
210,00	1,20	0,00	35,00	5,00	1,20	0,20	3,00	0,60	33,80	1,80
210,00	1,20	0,00	33,00	9,10	2,00	0,50	3,84	0,65	31,80	1,84
210,00	1,20	0,00	24,10	12,80	0,92	0,20	2,00	0,60	22,90	1,08
210,00	1,20	0,00	19,20	11,50	1,10	0,30	2,52	0,70	18,00	1,42
210,00	1,20	0,00	23,90	13,30	1,20	0,30	3,50	1,50	22,70	2,30

Πίνακας 3.3-2: C_m: πυκνωτής μέτρησης

q₁: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q₂: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

t₁: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t₂: χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt: t₂-t₁

Δq: q₂-q₁

av: μέση τιμή

σ: τυπική απόκλιση

Δt min [μs]	Δt max [μs]	Δq min [μC]	Δq max [μC]
5,20	19,20	0,10	0,10
8,60	16,00	0,17	0,25
9,60	17,60	0,18	0,32
14,80	21,80	0,34	0,56
16,20	22,80	0,60	0,92
20,50	28,50	0,69	1,15
16,90	35,10	0,40	1,52
14,20	36,60	0,32	1,60
28,80	38,80	1,00	2,60
22,70	40,90	0,69	2,99
10,10	35,70	0,28	1,88
6,50	29,50	0,42	2,42
9,40	36,00	0,50	4,10

Πίνακας 3.3-3: Δt min: t_{2 min}-t_{1 max}

Δt max: t_{2 max}-t_{1 min}

Δq min: q_{2 min}-q_{1 max}

Δq max: q_{2 max}-q_{1 min}

u_1 [kV]		u_2 [kV]		Δu [kV]		ΔWe [keV]	
av	σ	av	σ	av	σ	av	σ
0,03030	0,00000	0,06061	0,00000	0,03030	0,00000	0,015	0,000
0,01200	0,00000	0,03300	0,00400	0,02100	0,00400	0,011	0,002
0,01300	0,00000	0,03800	0,00700	0,02500	0,00700	0,013	0,004
0,01600	0,00000	0,06100	0,01100	0,04500	0,01100	0,023	0,006
0,01000	0,00000	0,04800	0,00800	0,03800	0,00800	0,019	0,004
0,01200	0,00000	0,05800	0,01150	0,04600	0,01150	0,023	0,006
0,00405	0,00076	0,00862	0,00190	0,00457	0,00205	0,002	0,001
0,00576	0,00067	0,01033	0,00238	0,00457	0,00247	0,002	0,001
0,00571	0,00095	0,01429	0,00286	0,00857	0,00301	0,004	0,002
0,00952	0,00238	0,01829	0,00310	0,00876	0,00391	0,004	0,002
0,00438	0,00095	0,00952	0,00286	0,00514	0,00301	0,003	0,002
0,00524	0,00143	0,01200	0,00333	0,00676	0,00363	0,003	0,002
0,00571	0,00143	0,01667	0,00714	0,01095	0,00728	0,005	0,004

Πίνακας 3.3-4: u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 Δu : $u_2 - u_1$
 ΔWe : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

Ne		Na	
av	σ	av	σ
6,2422E+17	0	122,00	49,50
1,3109E+18	2,49688E+17	123,00	37,00
1,5605E+18	4,36954E+17	136,00	40,00
2,809E+18	6,86642E+17	183,00	35,00
4,7441E+18	9,98752E+17	195,00	33,00
5,7428E+18	1,43571E+18	245,00	40,00
5,9925E+18	2,68922E+18	260,00	91,00
5,9925E+18	3,24114E+18	254,00	112,00
1,1236E+19	3,94791E+18	338,00	50,00
1,1486E+19	5,11898E+18	318,00	91,00
6,7416E+18	3,94791E+18	229,00	128,00
8,8639E+18	4,75392E+18	180,00	115,00
1,4357E+19	9,54873E+18	227,00	133,00

Πίνακας 3.3-5: Na: αριθμός αλμάτων ηλεκτρονίων
Ne: αριθμός ηλεκτρονίων
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

i_1 [A]		i_2 [A]		Δi [A]	$\Delta i \text{ min}$ [A]	$\Delta i \text{ max}$ [A]
av	σ	av	σ			
0,03	0,03	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02
0,06	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03
0,07	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03
0,11	0,00	0,03	0,01	0,02	0,02	0,04
0,17	0,00	0,05	0,01	0,04	0,03	0,06
0,20	0,00	0,05	0,01	0,04	0,02	0,06
0,71	0,13	0,07	0,03	0,04	0,01	0,09
1,01	0,12	0,08	0,04	0,04	0,01	0,11
1,00	0,17	0,09	0,02	0,05	0,03	0,09
1,67	0,42	0,12	0,04	0,06	0,02	0,13
0,77	0,17	0,08	0,05	0,05	0,01	0,19
0,92	0,25	0,13	0,09	0,08	0,01	0,37
1,00	0,25	0,15	0,10	0,10	0,01	0,44

Πίνακας 3.3-6: i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

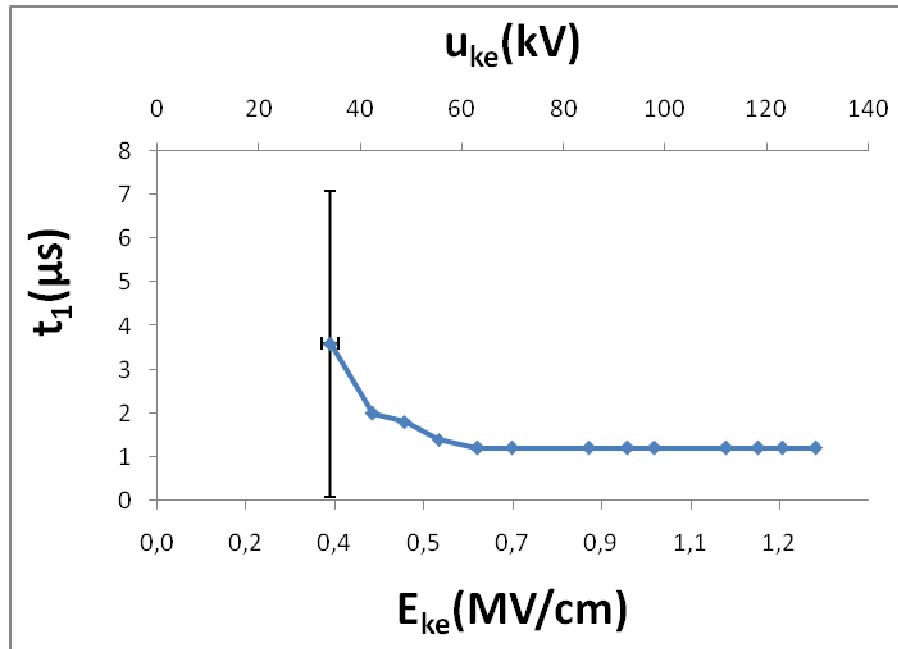
Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq

$\Delta i \text{ min}$: ελάχιστη τιμή του Δi

$\Delta i \text{ max}$: μέγιστη τιμή του Δi

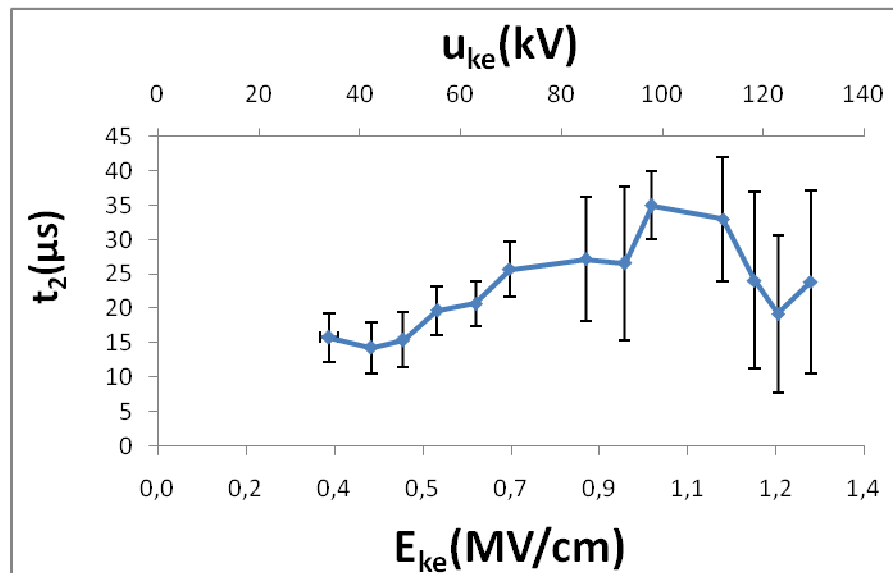
av: μέση τιμή

σ : τυπική απόκλιση



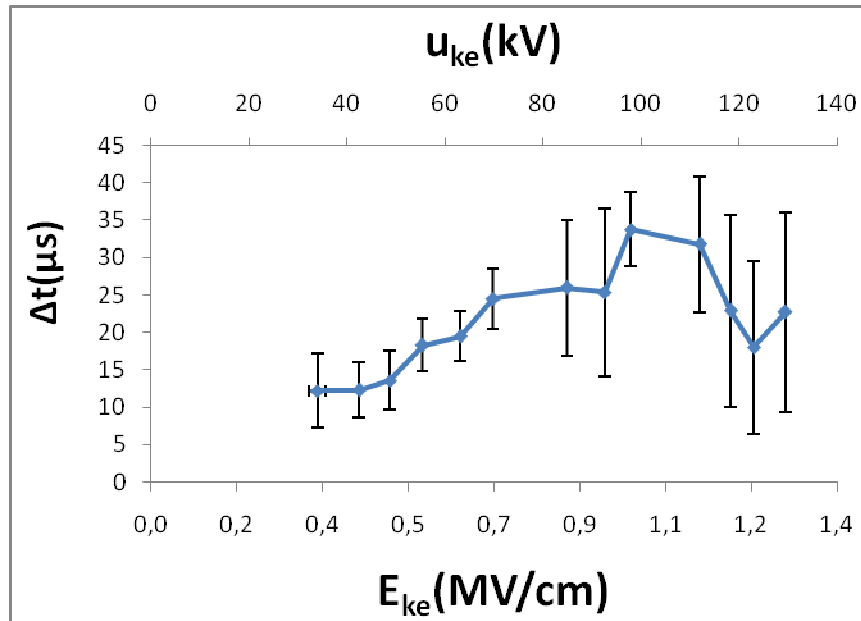
Σχήμα 3.3-1: Χαρακτηριστική $t_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $+1,2/50\mu$ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}



Σχήμα 3.3-2: Χαρακτηριστική $t_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $+1,2/50\mu$ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

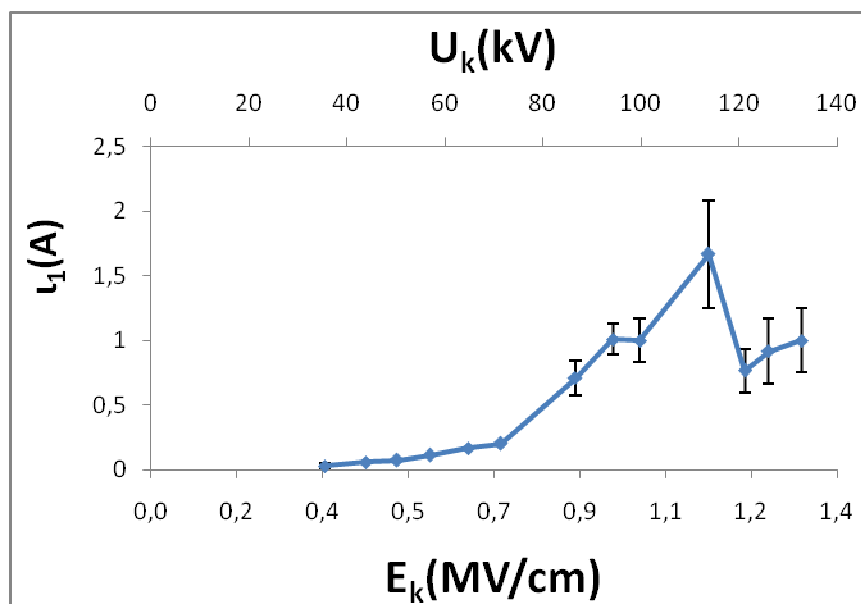


Σχήμα 3.3-3: Χαρακτηριστική $\Delta t = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $+1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

Δt : χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

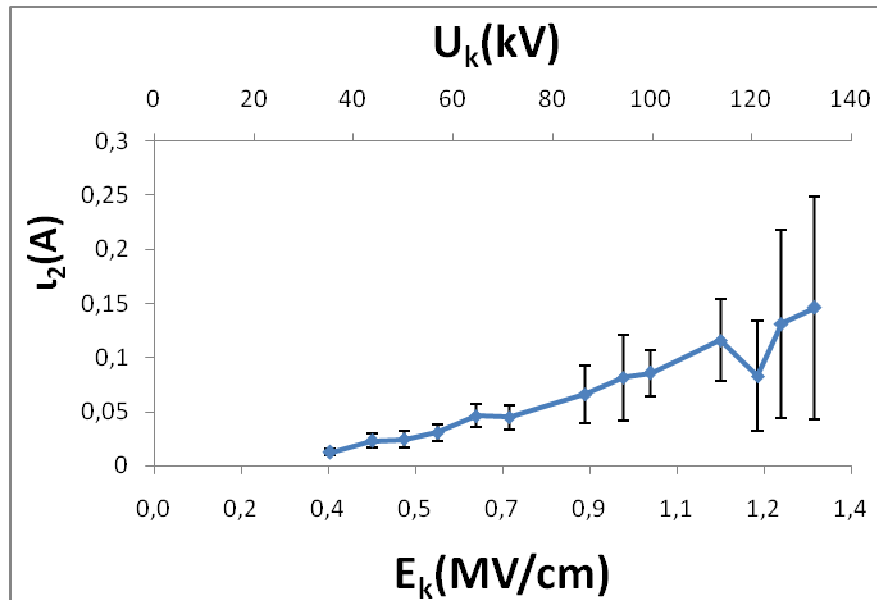


Σχήμα 3.3-4: Χαρακτηριστική $i_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $+1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

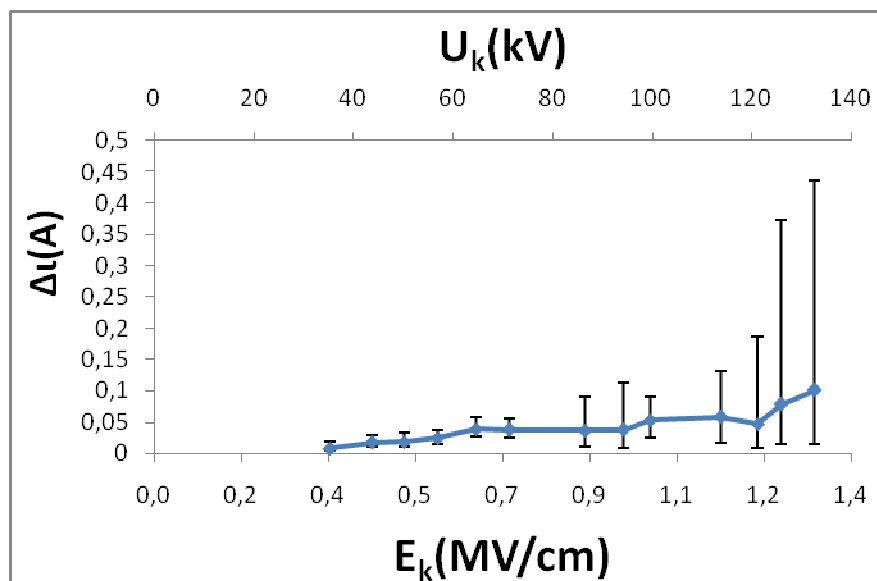
\hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης

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



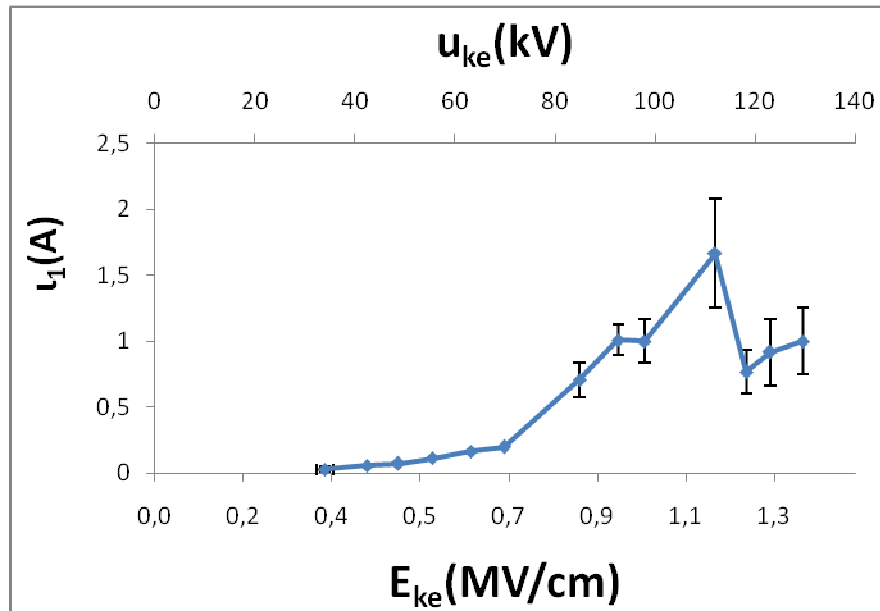
Σχήμα 3.3-5: Χαρακτηριστική $i_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.3-6: Χαρακτηριστική $\Delta i = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

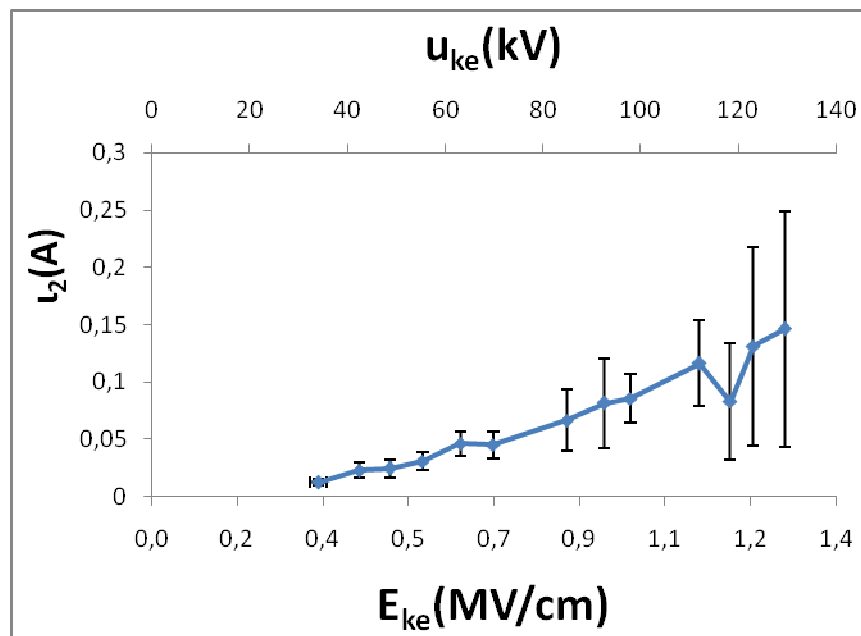


Σχήμα 3.3-7: Χαρακτηριστική $i_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).

i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

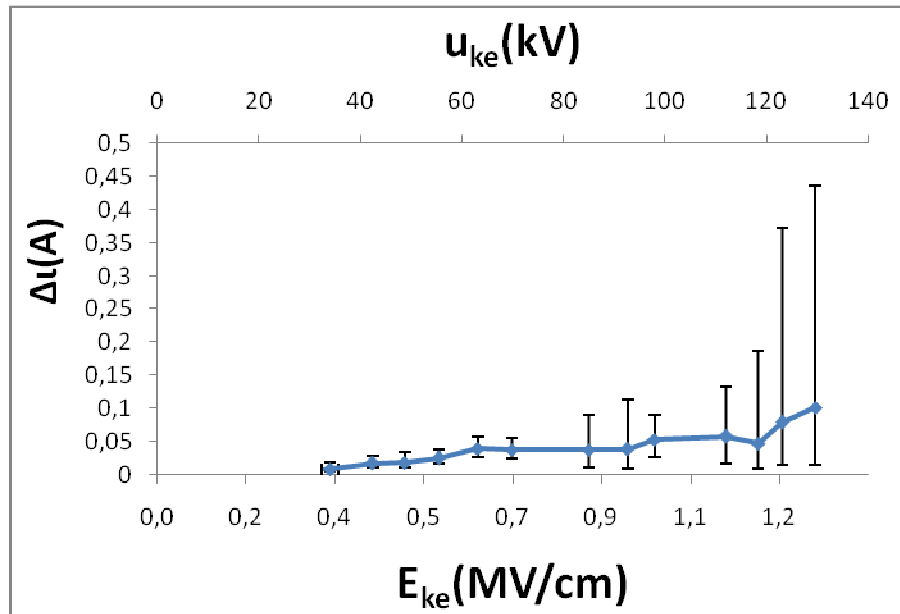


Σχήμα 3.3-8: Χαρακτηριστική $i_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).

i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

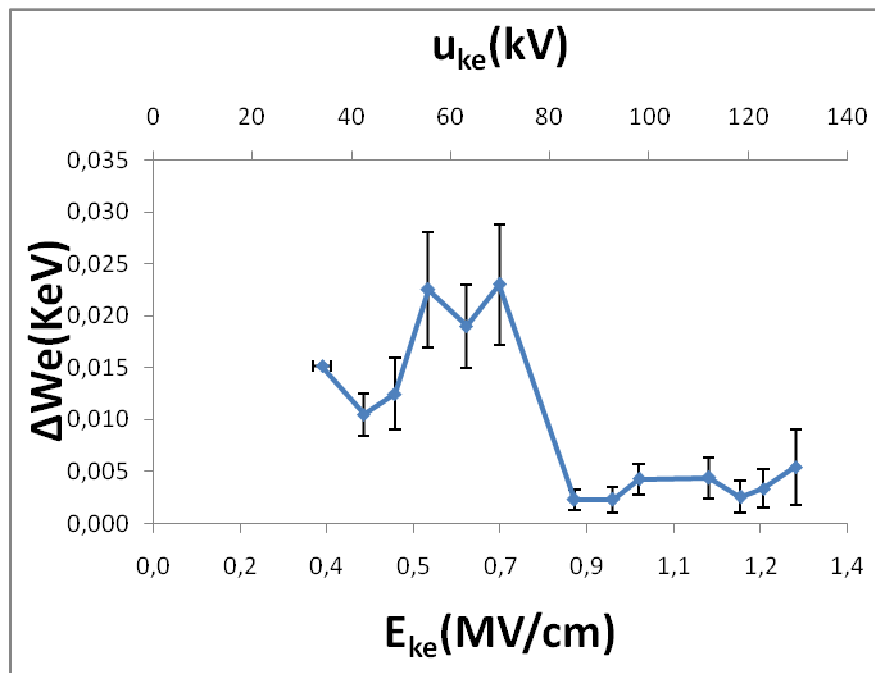


Σχήμα 3.3-9: Χαρακτηριστική $\Delta i = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

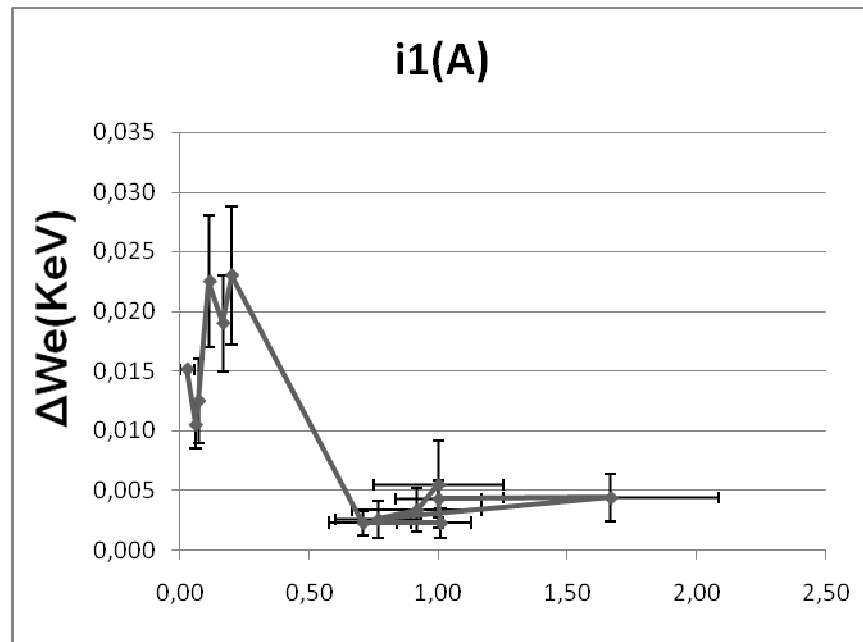


Σχήμα 3.3-10: Χαρακτηριστική $\Delta We = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

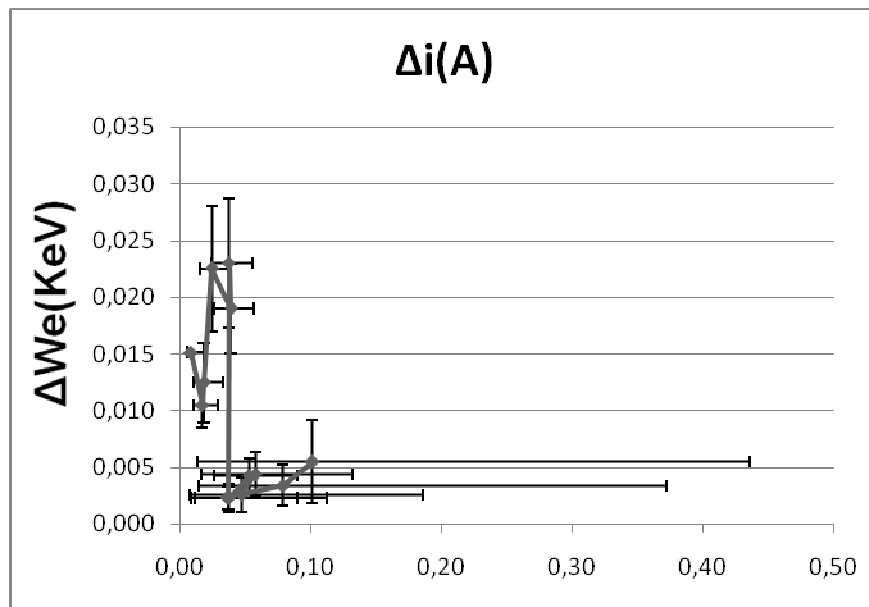
u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}



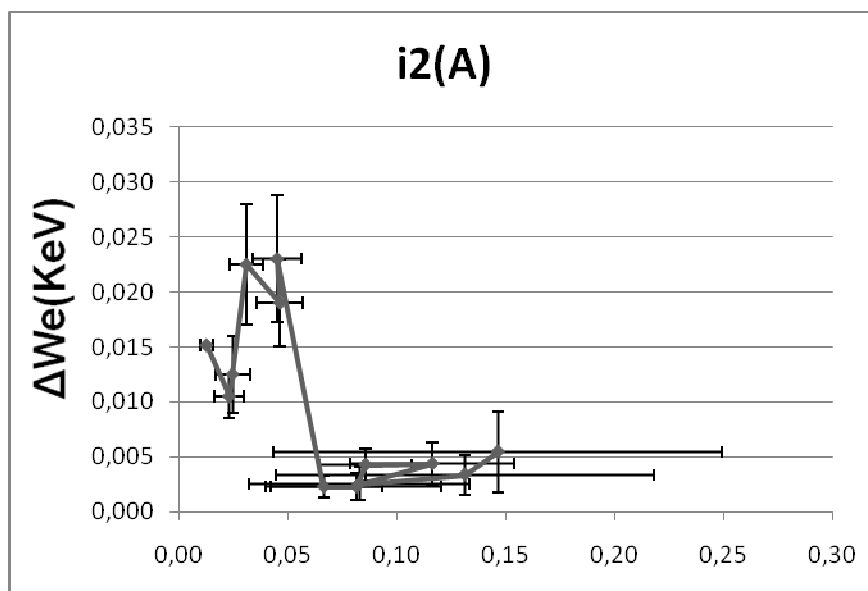
Σχήμα 3.3-11: Χαρακτηριστική $\Delta We=f(i_1)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).

ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων
 i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



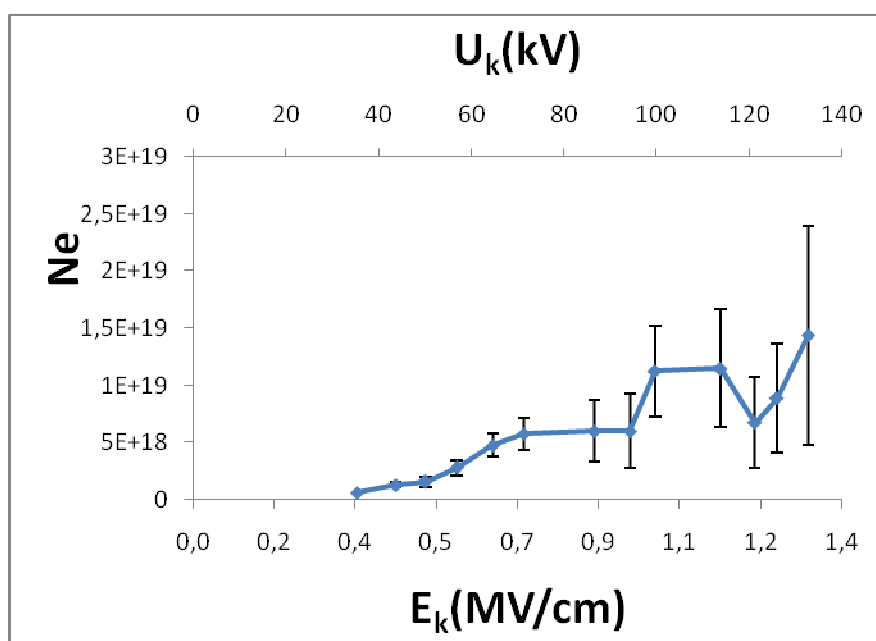
Σχήμα 3.3-12: Χαρακτηριστική $\Delta We=f(\Delta i)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).

ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων
 Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq



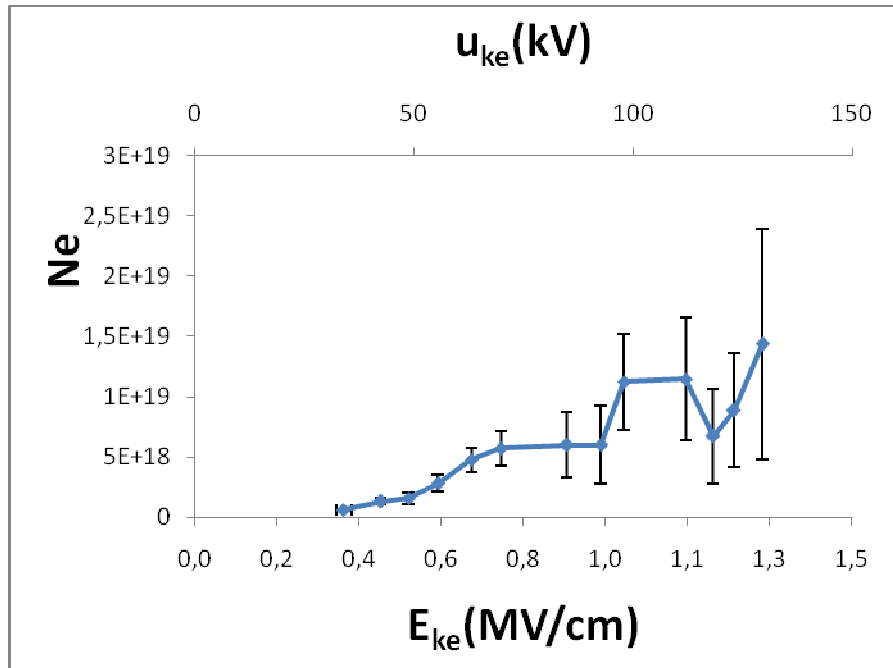
Σχήμα 3.3-13: Χαρακτηριστική $\Delta We=f(i_2)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50 μ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2$ mm).

ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων
 i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.3-14: Χαρακτηριστική $Ne=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50 μ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2$ mm).

Ne : αριθμός ηλεκτρονίων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

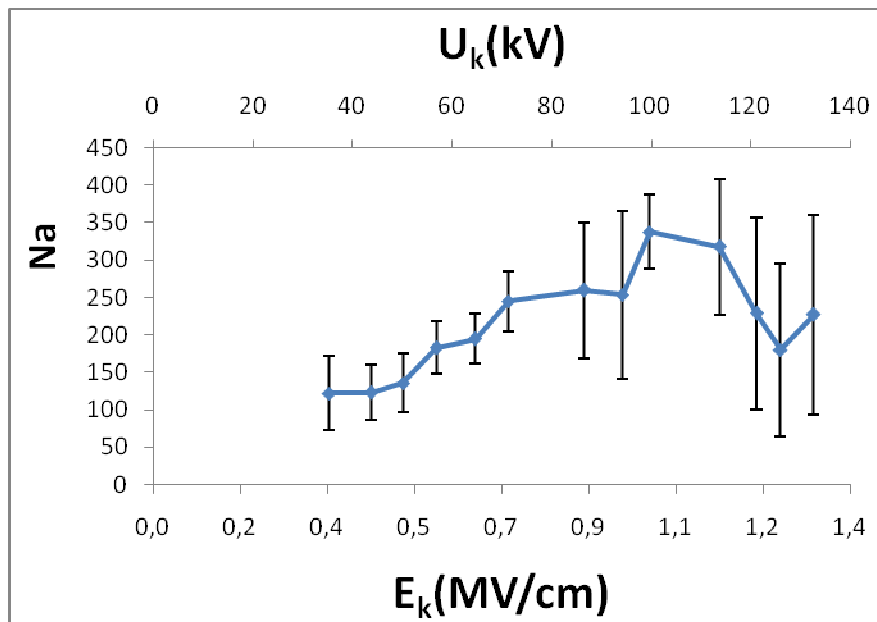


Σχήμα 3.3-15: Χαρακτηριστική $N_e=f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $+1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

N_e : αριθμός ηλεκτρονίων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

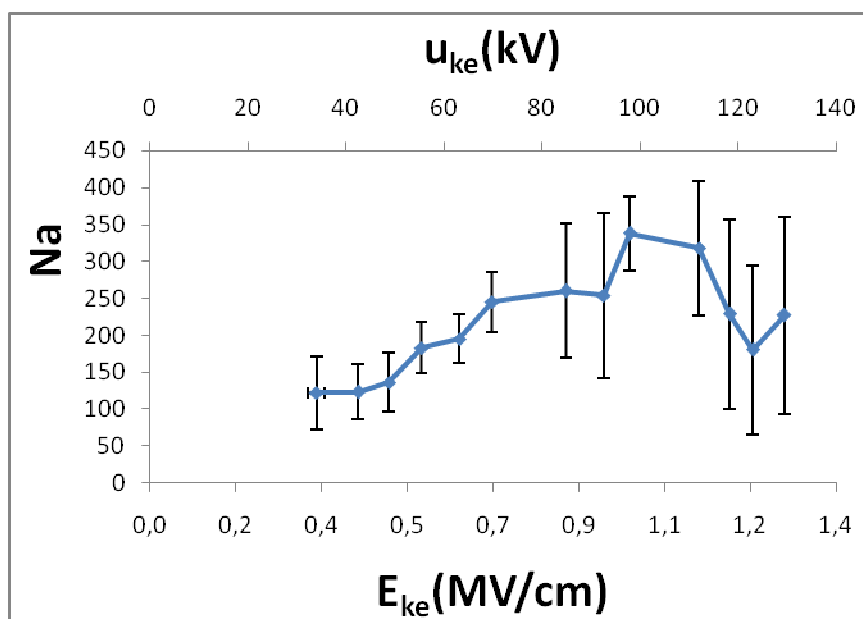


Σχήμα 3.3-16: Χαρακτηριστική $N_a=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $+1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

N_a : αριθμός αλμάτων ηλεκτρονίων

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

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



Σχήμα 3.3-17: Χαρακτηριστική $Na=f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinaX εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $+1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

Na: αριθμός αλμάτων ηλεκτρονίων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

3.4 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm)

\hat{U}_k [kV]	\hat{E}_k [MV/cm]	u_{KE} [kV]		E_{KE} [MV/cm]	
		av	σ	av	σ
36,20	0,37	35,00	0,00	0,36	0,00
44,50	0,45	43,10	0,00	0,44	0,00
51,20	0,52	48,10	0,00	0,49	0,00
57,30	0,58	55,30	0,00	0,56	0,00
64,70	0,66	63,10	0,00	0,64	0,00
73,00	0,74	71,10	0,00	0,72	0,00
80,20	0,82	77,20	0,00	0,79	0,00
92,00	0,94	88,60	0,00	0,90	0,00
99,70	1,01	97,20	0,00	0,99	0,00
106,40	1,08	102,90	0,00	1,05	0,00
115,90	1,18	113,10	0,00	1,15	0,00
121,20	1,23	117,40	0,00	1,19	0,00
126,60	1,29	123,10	0,00	1,25	0,00
134,70	1,37	130,60	0,00	1,33	0,00

Πίνακας 3.4-1: \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k
 u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

C _m [nF]	t ₁ [μs]		t ₂ [μs]		q ₁ [μC]		q ₂ [μC]		Δt [μs]	Δq [μC]
	av	σ	av	σ	av	σ	av	σ		
10,00	2,70	0,00	15,40	1,40	0,14	0,00	0,22	0,00	12,70	0,08
10,00	2,20	0,00	19,15	1,80	0,20	0,00	0,41	0,00	16,95	0,21
10,00	2,00	0,00	21,60	2,15	0,24	0,00	0,55	0,00	19,60	0,31
20,00	1,80	0,00	23,80	2,10	0,32	0,00	0,84	0,13	22,00	0,52
20,00	1,70	0,00	26,50	2,50	0,36	0,00	1,00	0,20	24,80	0,64
210,00	1,67	0,00	29,00	4,20	0,39	0,00	1,60	0,40	27,33	1,21
210,00	1,65	0,00	33,50	2,60	0,42	0,00	1,93	0,50	31,85	1,51
210,00	1,60	0,00	33,85	9,40	0,58	0,00	2,24	0,64	32,25	1,66
210,00	1,57	0,00	41,15	3,30	0,31	0,00	1,25	0,30	39,58	0,94
210,00	1,50	0,00	28,70	18,00	1,00	0,00	2,68	1,10	27,20	1,68
1000,00	1,48	0,00	35,80	17,00	1,20	0,00	3,10	1,10	34,32	1,90
1000,00	1,20	0,00	40,40	12,00	1,80	0,00	3,74	1,00	39,20	1,94
1000,00	1,20	0,00	34,50	18,60	2,00	0,00	4,20	1,00	33,30	2,20
1000,00	1,20	0,00	32,40	21,40	2,40	0,00	4,40	1,20	31,20	2,00

Πίνακας 3.4-2: C_m: πυκνωτής μέτρησης

q₁: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q₂: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

t₁: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t₂: χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt: t₂-t₁

Δq: q₂-q₁

av: μέση τιμή

σ: τυπική απόκλιση

Δt min [μs]	Δt max [μs]	Δq min [μC]	Δq max [μC]
11,30	14,10	0,08	0,08
15,15	18,75	0,21	0,21
17,45	21,75	0,31	0,31
19,90	24,10	0,39	0,65
22,30	27,30	0,44	0,84
23,13	31,53	0,81	1,61
29,25	34,45	1,01	2,01
22,85	41,65	1,02	2,30
36,28	42,88	0,64	1,24
9,20	45,20	0,58	2,78
17,32	51,32	0,80	3,00
27,20	51,20	0,94	2,94
14,70	51,90	1,20	3,20
9,80	52,60	0,80	3,20

Πίνακας 3.4-3: Δt min: t_{2 min}-t_{1 max}

Δt max: t_{2 max}-t_{1 min}

Δq min: q_{2 min}-q_{1 max}

Δq max: q_{2 max}-q_{1 min}

u_1 [kV]		u_2 [kV]		Δu [kV]		ΔWe [keV]	
av	σ	av	σ	av	σ	av	σ
0,01400	0,00000	0,02200	0,00000	0,00800	0,00000	0,004	0,000
0,02000	0,00000	0,04100	0,00000	0,02100	0,00000	0,011	0,000
0,02400	0,00000	0,05500	0,00000	0,03100	0,00000	0,016	0,000
0,01600	0,00000	0,04200	0,00650	0,02600	0,00650	0,013	0,003
0,01800	0,00000	0,05000	0,01000	0,03200	0,01000	0,016	0,005
0,00186	0,00000	0,00762	0,00190	0,00576	0,00190	0,003	0,001
0,00200	0,00000	0,00919	0,00238	0,00719	0,00238	0,004	0,001
0,00276	0,00000	0,01067	0,00305	0,00790	0,00305	0,004	0,002
0,00148	0,00000	0,00595	0,00143	0,00448	0,00143	0,002	0,001
0,00476	0,00000	0,01276	0,00524	0,00800	0,00524	0,004	0,003
0,00120	0,00000	0,00310	0,00110	0,00190	0,00110	0,001	0,001
0,00180	0,00000	0,00374	0,00100	0,00194	0,00100	0,001	0,001
0,00200	0,00000	0,00420	0,00100	0,00220	0,00100	0,001	0,001
0,00240	0,00000	0,00440	0,00120	0,00200	0,00120	0,001	0,001

Πίνακας 3.4-4: u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 Δu : $u_2 - u_1$
 ΔWe : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

Ne		Na	
av	σ	av	σ
4,9938E+17	0	127,00	14,00
1,3109E+18	0	169,50	18,00
1,9351E+18	0	196,00	21,50
3,2459E+18	8,11486E+17	220,00	21,00
3,995E+18	1,24844E+18	248,00	25,00
7,5531E+18	2,49688E+18	273,30	42,00
9,4257E+18	3,1211E+18	318,50	26,00
1,0362E+19	3,99501E+18	322,50	94,00
5,8677E+18	1,87266E+18	395,80	33,00
1,0487E+19	6,86642E+18	272,00	180,00
1,186E+19	6,86642E+18	343,20	170,00
1,211E+19	6,2422E+18	392,00	120,00
1,3733E+19	6,2422E+18	333,00	186,00
1,2484E+19	7,49064E+18	312,00	214,00

Πίνακας 3.4-5: Na: αριθμός αλμάτων ηλεκτρονίων
Ne: αριθμός ηλεκτρονίων
av: μέση τιμή
 σ : τυπική απόκλιση

i_1 [A]		i_2 [A]		Δi [A]	$\Delta i \text{ min}$ [A]	$\Delta i \text{ max}$ [A]
av	σ	av	σ			
0,03	0,03	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02
0,06	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03
0,07	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03
0,11	0,00	0,03	0,01	0,02	0,02	0,04
0,17	0,00	0,05	0,01	0,04	0,03	0,06
0,20	0,00	0,05	0,01	0,04	0,02	0,06
0,71	0,13	0,07	0,03	0,04	0,01	0,09
1,01	0,12	0,08	0,04	0,04	0,01	0,11
1,00	0,17	0,09	0,02	0,05	0,03	0,09
1,67	0,42	0,12	0,04	0,06	0,02	0,13
0,77	0,17	0,08	0,05	0,05	0,01	0,19
0,92	0,25	0,13	0,09	0,08	0,01	0,37
1,00	0,25	0,15	0,10	0,10	0,01	0,44

Πίνακας 3.4-6: i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

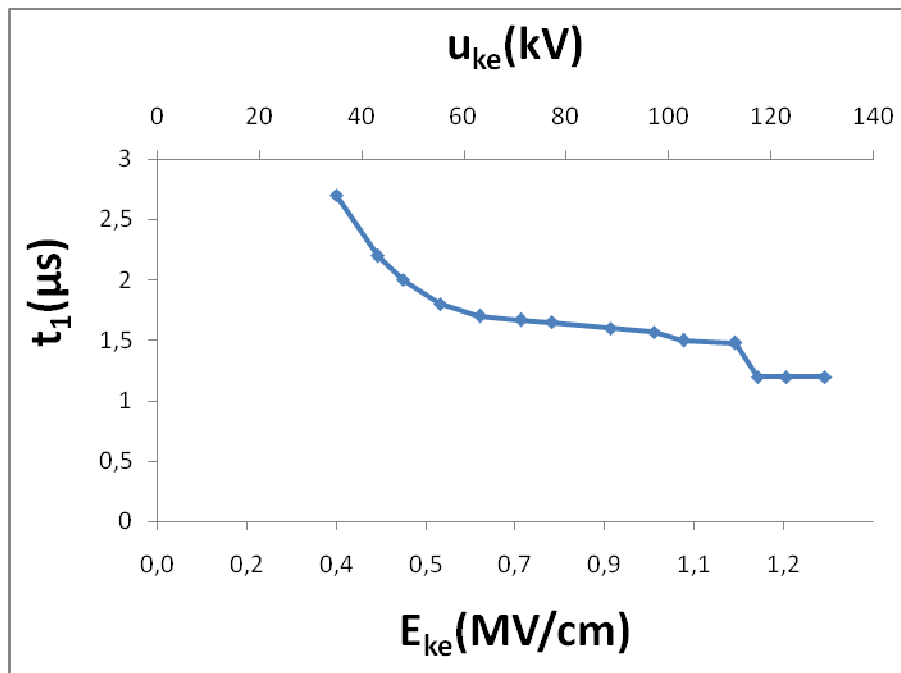
Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq

$\Delta i \text{ min}$: ελάχιστη τιμή του Δi

$\Delta i \text{ max}$: μέγιστη τιμή του Δi

av: μέση τιμή

σ : τυπική απόκλιση

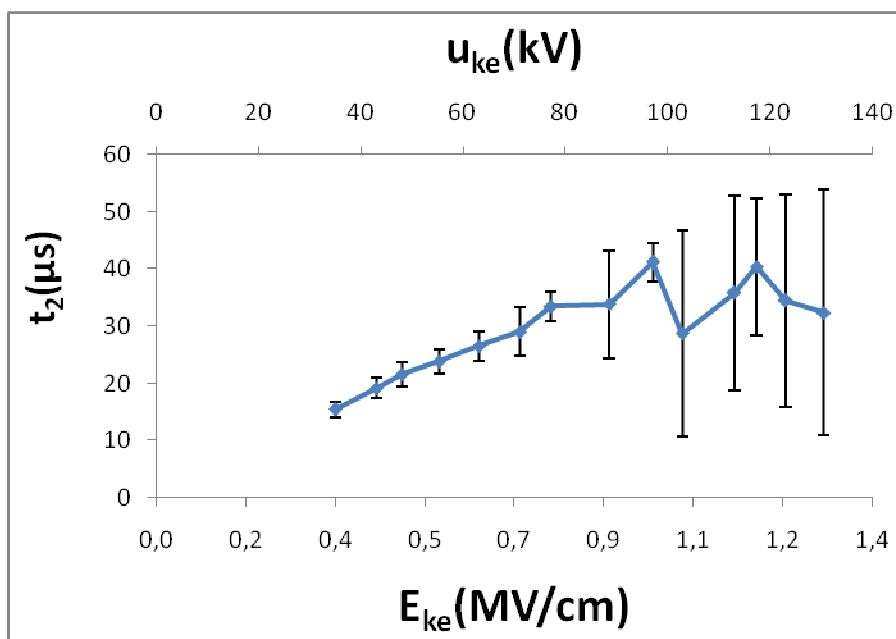


Σχήμα 3.4-1: Χαρακτηριστική $t_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

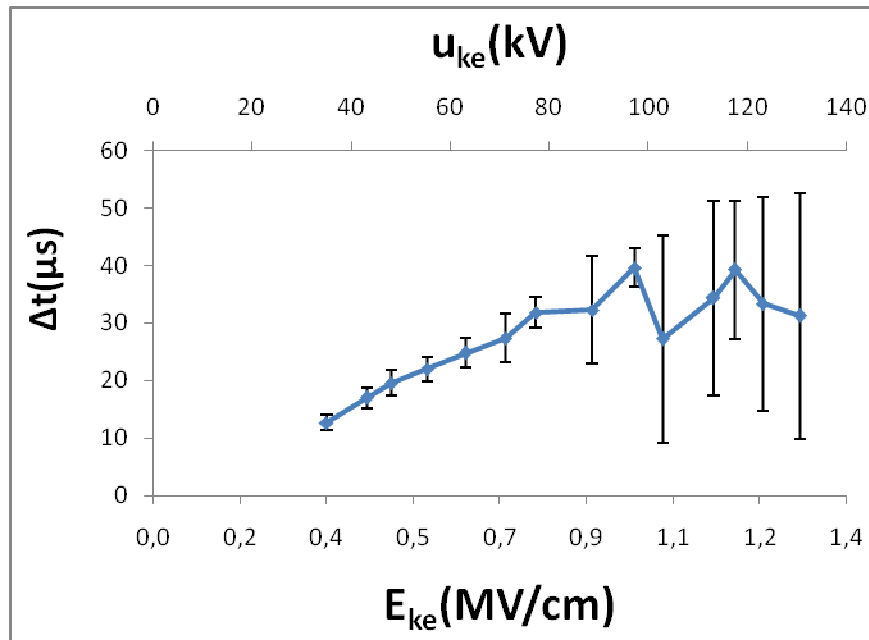


Σχήμα 3.4-2: Χαρακτηριστική $t_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

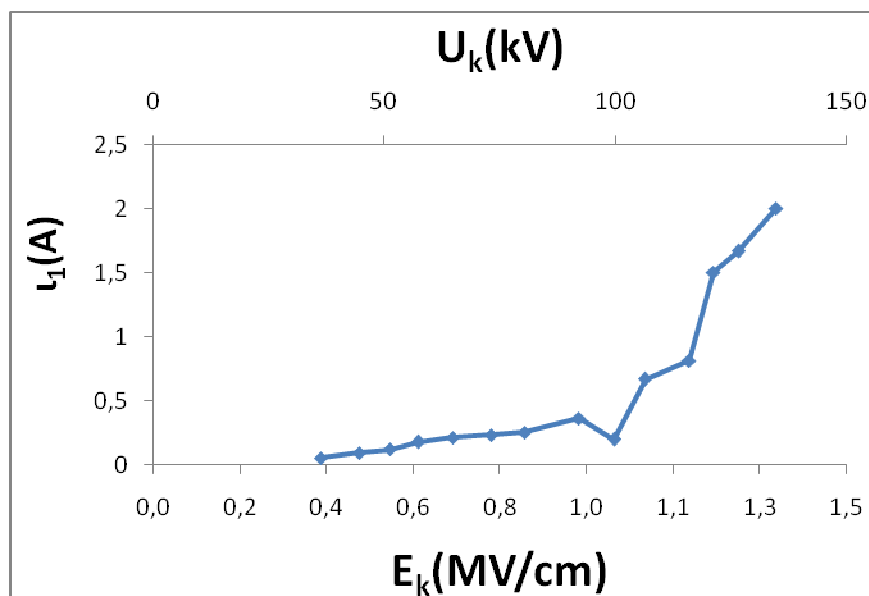


Σχήμα 3.4-3: Χαρακτηριστική $\Delta t = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

Δt : χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

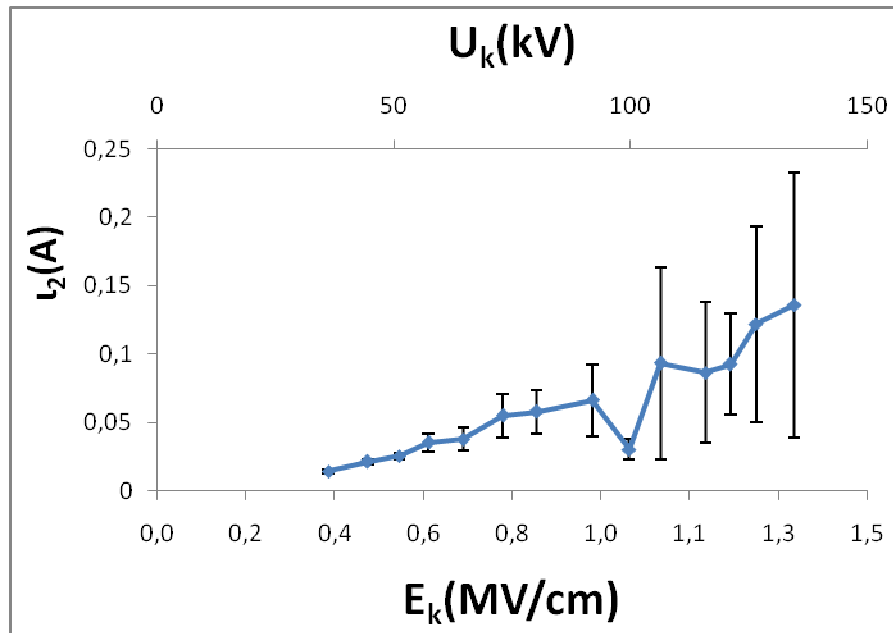


Σχήμα 3.4-4: Χαρακτηριστική $i_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

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

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

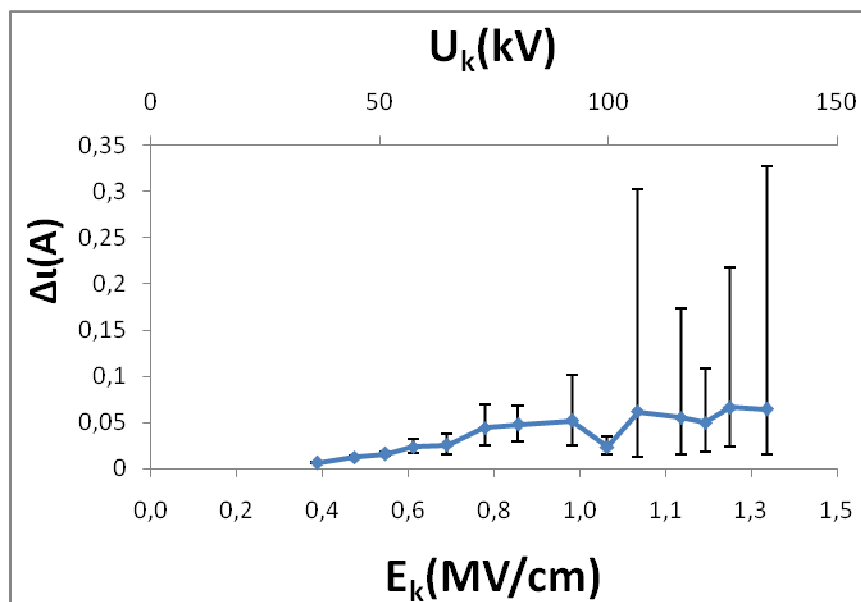


Σχήμα 3.4-5: Χαρακτηριστική $i_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

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

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

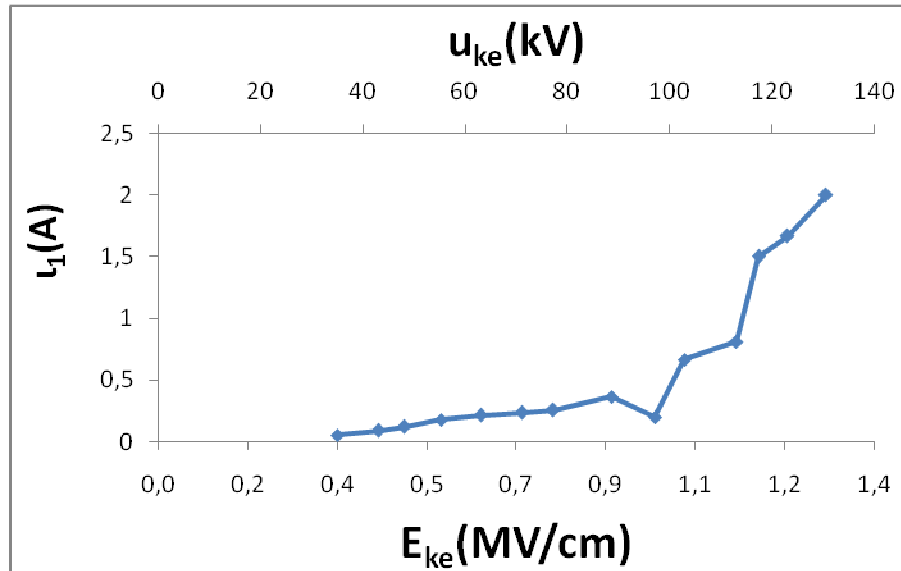


Σχήμα 3.4-6: Χαρακτηριστική $\Delta i = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq

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

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

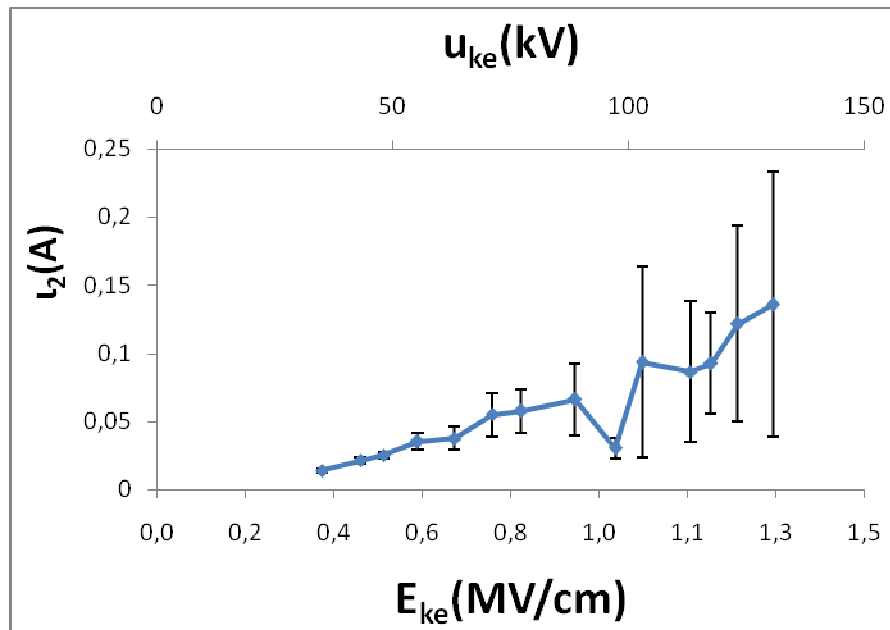


Σχήμα 3.4-7: Χαρακτηριστική $i_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

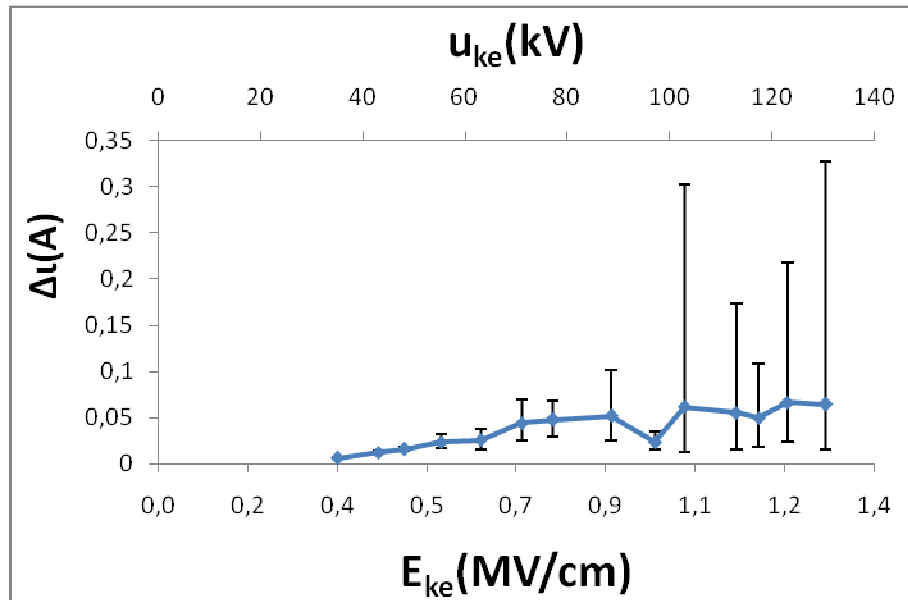


Σχήμα 3.4-8: Χαρακτηριστική $i_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

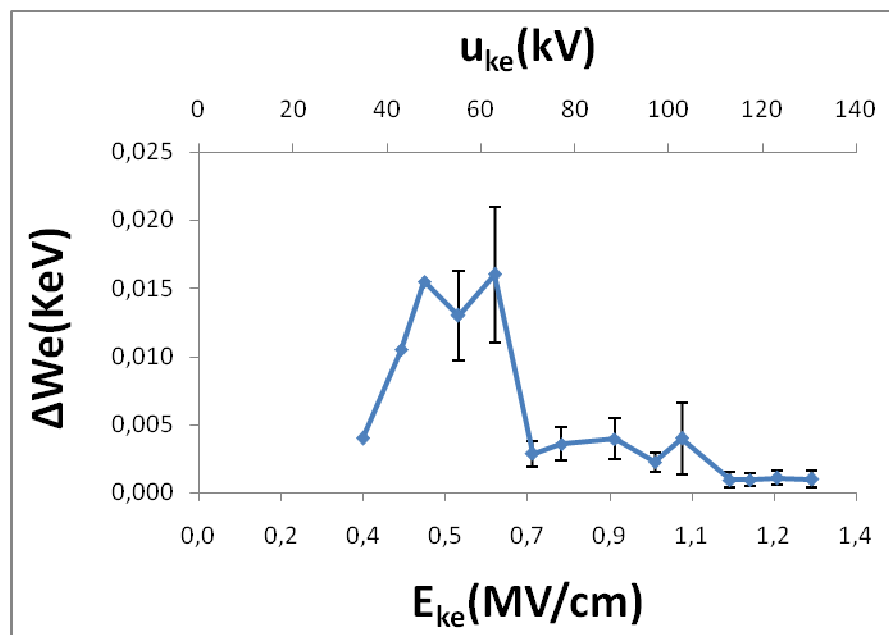


Σχήμα 3.4-9: Χαρακτηριστική $\Delta i = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

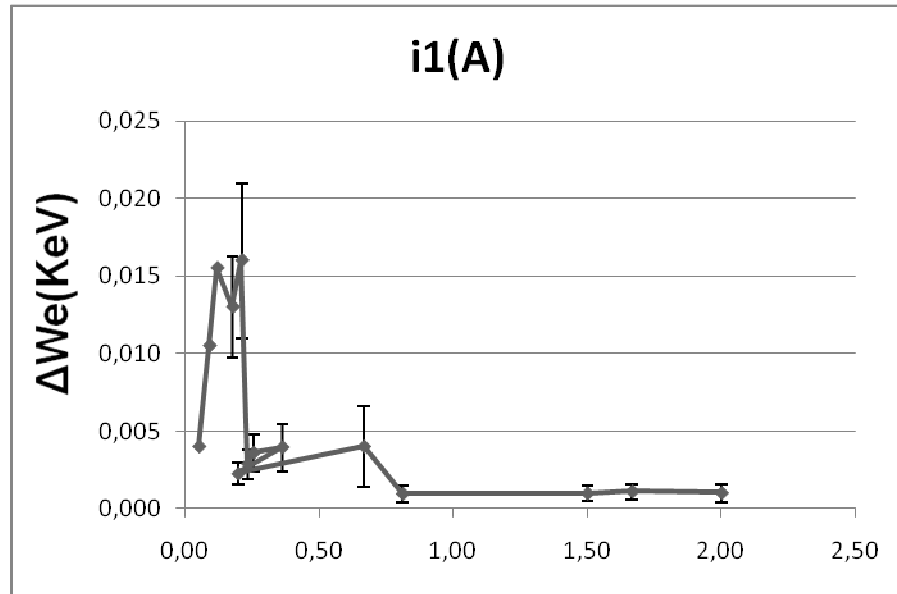


Σχήμα 3.4-10: Χαρακτηριστική $\Delta We = f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

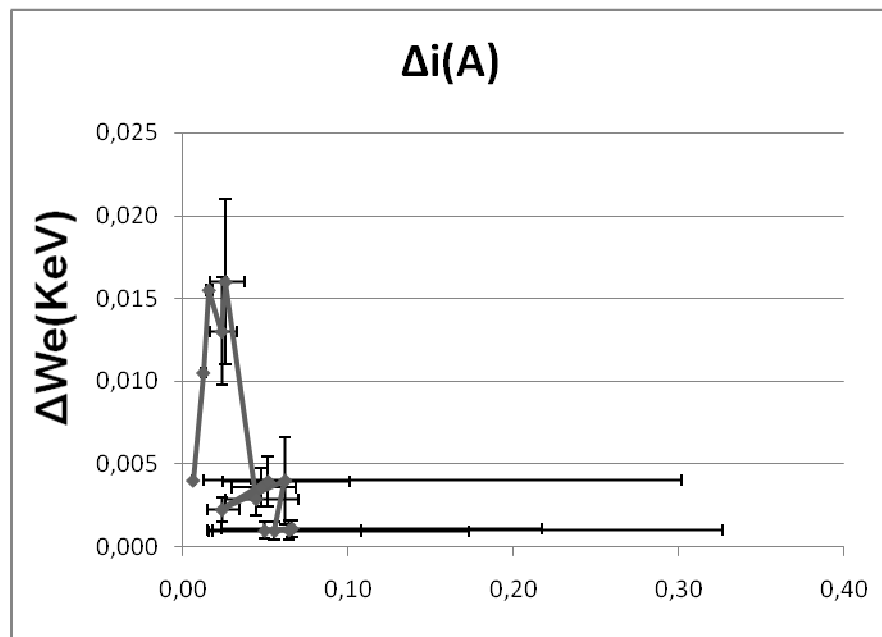
E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}



Σχήμα 3.4-11: Χαρακτηριστική $\Delta We=f(i_1)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

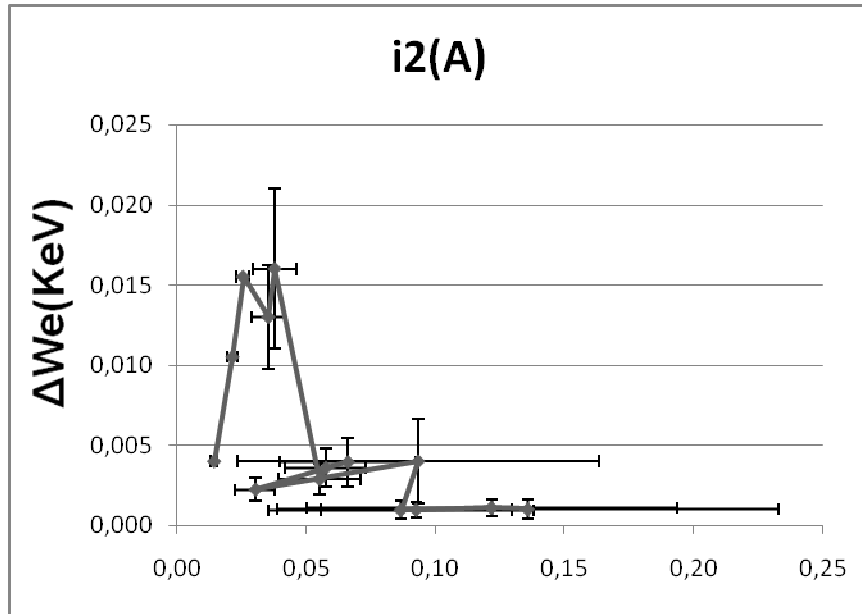
i_1 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.4-12: Χαρακτηριστική $\Delta We=f(\Delta i)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

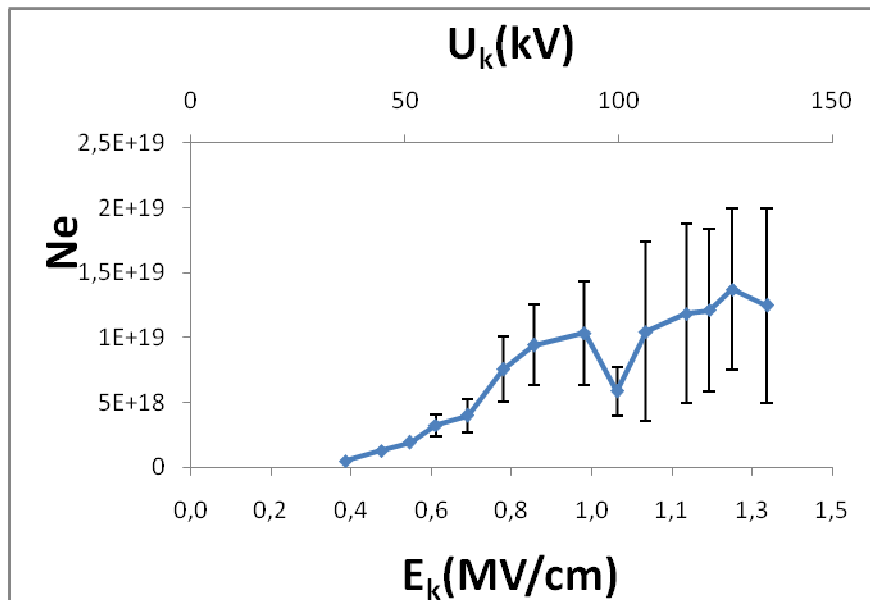
ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

Δi : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq



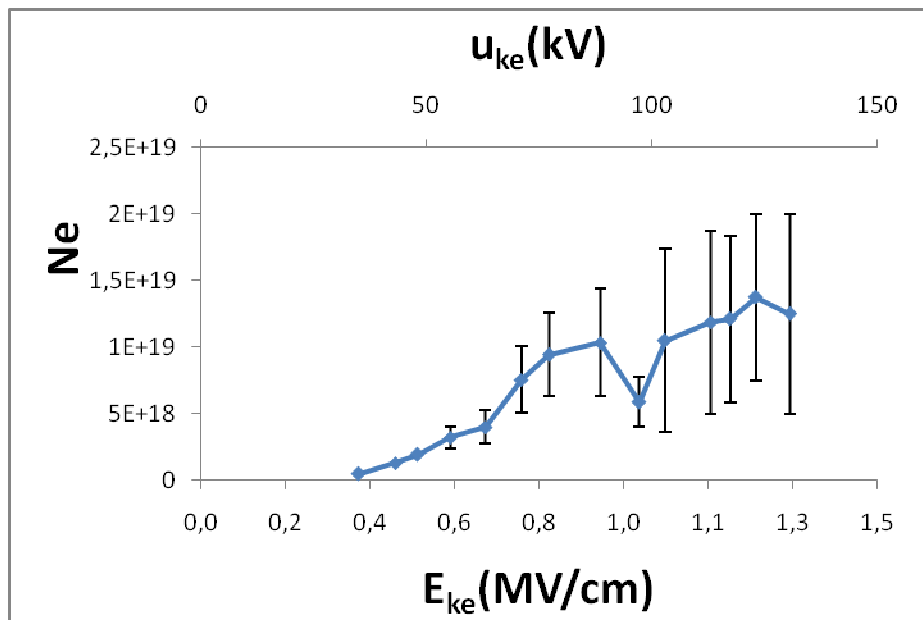
Σχήμα 3.4-13: Χαρακτηριστική $\Delta W_e=f(i_2)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

ΔW_e : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων
 i_2 : στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.4-14: Χαρακτηριστική $N_e=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

N_e : αριθμός ηλεκτρονίων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

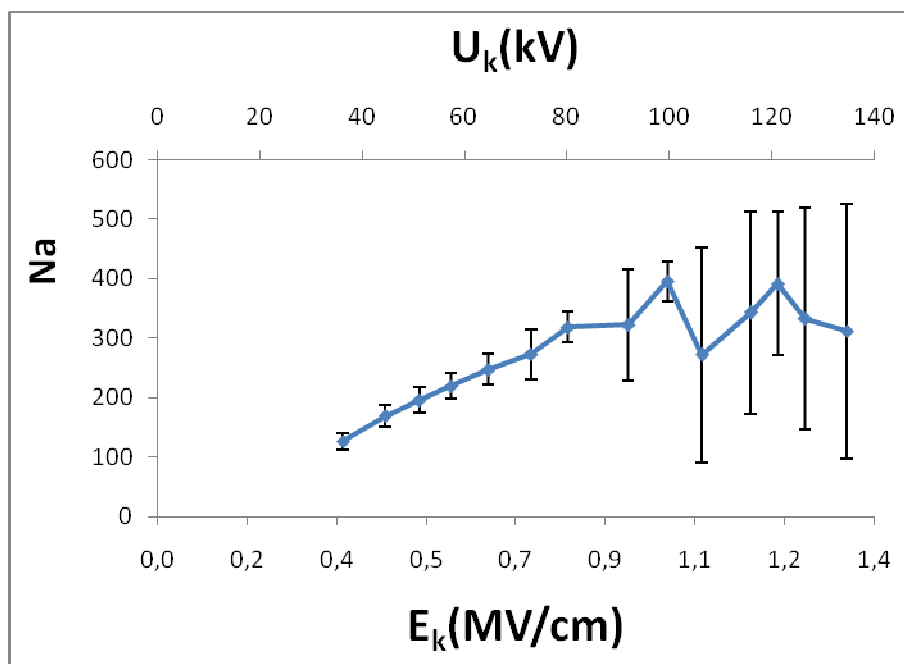


Σχήμα 3.4-15: Χαρακτηριστική $Ne=f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

Ne: αριθμός ηλεκτρονίων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

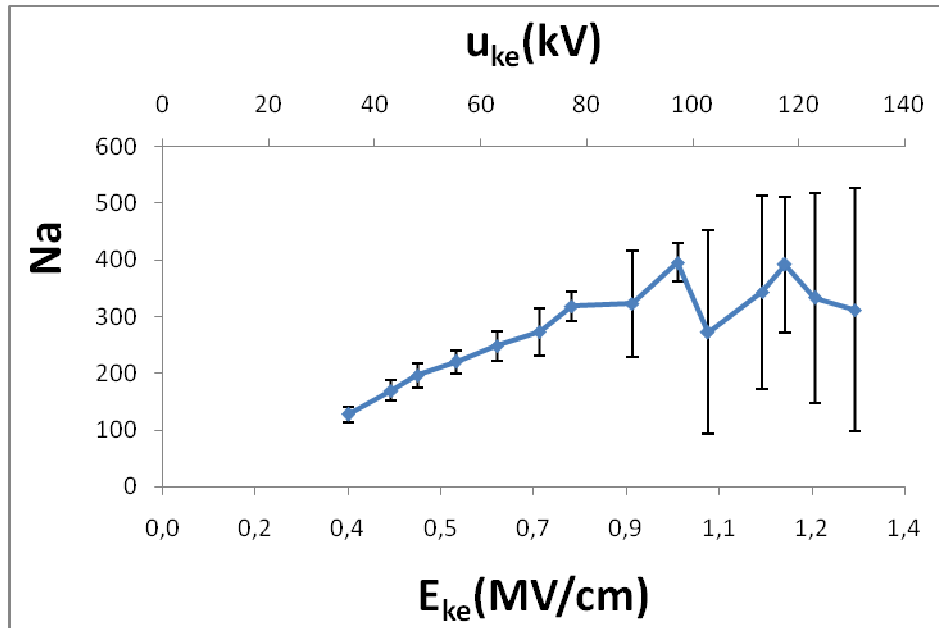


Σχήμα 3.4-16: Χαρακτηριστική $Na=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

Na: αριθμός αλμάτων ηλεκτρονίων

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

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



Σχήμα 3.4-17: Χαρακτηριστική $Na=f(u_{ke}, E_{ke})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

Na : αριθμός αλάτων ηλεκτρονίων

u_{ke} : στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

E_{ke} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη u_{ke}

ΜΕΡΟΣ 4

4.1 Σχόλια - Συμπεράσματα

Όπως αναφέρθηκε εισαγωγικά η γήρανση και διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών οφείλεται στον ιονισμό με κρούσεις για τον οποίο ισχύει η σχέση $q = q_1 \exp[A(E_k^2 - E_{k1}^2) / E_{k1}^2]$.

Συνεπώς κάθε μέγεθος που είναι ανάλογο του φορτίου όπως στην υπό εξέταση περίπτωση το ρεύμα και ο αριθμός ηλεκτρονίων πρέπει να έχουν εκθετική μορφή. Επειδή οι μετρήσεις έγιναν με κρουστική τάση υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος οι απώλειες Joule είναι ουσιαστικά αμελητέες. Άρα το φαινόμενο που εκδηλώνεται στο στερεό μονωτικό και το οποίο μελετήθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής, οφείλεται κατά τη μακροσκοπική θεωρία σε δύο παράγοντες, τις μερικές εκκενώσεις και τις δυνάμεις Coulomb, οι οποίοι συνδυάζονται μεταξύ τους για την καταπόνηση του δοκιμίου. Γι αυτό οι όποιες αποκλίσεις από την εκθετική μορφή του ρεύματος και του αριθμού ηλεκτρονίων συναρτήσει της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όπως φαίνεται στις χαρακτηριστικές 4,5,6,7,8,9 και 14,15 των ενοτήτων 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, οφείλονται σε κατανάλωση του πεδίου και προς όφελος των δυνάμεων Coulomb. Επομένως δεν έχει νόημα να δοθεί κάποια μαθηματική προσέγγιση των μετρούμενων μεγεθών που είναι ανάλογα του φορτίου και συναρτήσει της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου γιατί δεν μπορεί να είναι εκθετική. Για τον λόγω αυτό οι προσεγγίσεις δίνονται παρακάτω.

4.2 Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι μαθηματικές προσεγγίσεις των χαρακτηριστικών που υπολογίστηκαν στις ενότητες 3.1 έως 3.4.

Σχήμα	Χαρακτηριστική	Μαθηματική Προσέγγιση
3.1-1	$t_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_1 = 352,8 E_{ke}^4 - 1009 E_{ke}^3 + 1061 E_{ke}^2 - 487,8 E_{ke} + 83,92$
3.1-2	$t_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_2 = 1430 E_{ke}^4 - 4006 E_{ke}^3 + 4151 E_{ke}^2 - 1849 E_{ke} + 310,0$
3.1-3	$\Delta t = f(u_{ke}, E_{ke})$	$\Delta t = 1078 E_{ke}^4 - 2997 E_{ke}^3 + 3089 E_{ke}^2 - 1361 E_{ke} + 226,1$
3.1-4	$t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$t_1 = 0,007e^{3,988E_k}$
3.1-5	$t_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$t_2 = 0,006e^{2,849 E_k}$
3.1-6	$\Delta t = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta t = 0,004e^{3,313 E_k}$
3.1-7	$t_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_1 = 0,006e^{4,427 E_{ke}}$
3.1-8	$t_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_2 = 0,005e^{3,257 E_{ke}}$
3.1-9	$\Delta t = f(u_{ke}, E_{ke})$	$\Delta t = 0,003e^{3,803 E_{ke}}$
3.1-10	$\Delta We = f(u_{ke}, E_{ke})$	$\Delta We = 5,741 E_{ke}^4 - 15,15 E_{ke}^3 + 14,32 E_{ke}^2 - 5,714 E_{ke} + 0,822$
3.1-11	$\Delta We = f(t_1)$	$\Delta We = -16,67 t_1^4 + 18,93 t_1^3 - 7,140 t_1^2 + 0,978 t_1 - 0,022$
3.1-12	$\Delta We = f(\Delta t)$	$\Delta We = 9270 \Delta t^4 - 1959 \Delta t^3 + 127,7 \Delta t^2 - 2,547 \Delta t + 0,01$
3.1-13	$\Delta We = f(t_2)$	$\Delta We = 10739 t_2^4 - 2480 t_2^3 + 184,4 t_2^2 - 4,747 t_2 + 0,042$
3.1-14	$Ne = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Ne = 1E + 17e^{5,056 E_k}$
3.1-15	$Ne = f(u_{ke}, E_{ke})$	$Ne = 9E + 16e^{5,753 E_{ke}}$
3.1-16	$Na = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Na = -1333 \hat{E}_k^3 + 3185 \hat{E}_k^2 - 2105 \hat{E}_k + 530,7$
3.1-17	$Na = f(u_{ke}, E_{ke})$	$Na = -672,5 E_{ke}^3 + 1870 E_{ke}^2 - 1231 E_{ke} + 344,5$

Πίνακας 4.2-1: Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

Σχήμα	Χαρακτηριστική	Μαθηματική Προσέγγιση
3.2-1	$t_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_1 = 66,87 E_{ke}^4 - 223,7 E_{ke}^3 + 273,8 E_{ke}^2 - 146,4 E_{ke} + 30,52$
3.2-2	$t_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_2 = 16,12 E_{ke}^2 + 10,56 E_{ke} + 7,085$
3.2-3	$\Delta t = f(u_{ke}, E_{ke})$	$\Delta t = 12,09 E_{ke}^2 + 19,10 E_{ke} + 1,551$
3.2-4	$t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$t_1 = 0,011e^{3,020E_k}$
3.2-5	$t_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$t_2 = 0,004e^{3,007E_k}$
3.2-6	$\Delta t = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta t = 0,002e^{3,443E_k}$
3.2-7	$t_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_1 = 0,011e^{3,118 E_{ke}}$
3.2-8	$t_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_2 = 0,004e^{3,103 E_{ke}}$
3.2-9	$\Delta t = f(u_{ke}, E_{ke})$	$\Delta t = 0,003e^{3,555 E_{ke}}$
3.2-10	$\Delta We = f(u_{ke}, E_{ke})$	$\Delta We = 0,569 E_{ke}^4 - 1,172 E_{ke}^3 + 0,571 E_{ke}^2 + 0,107 E_{ke} - 0,070$
3.2-11	$\Delta We = f(t_1)$	$\Delta We = -49,09 t_1^4 + 44,21 t_1^3 - 13,27 t_1^2 + 1,472 t_1 - 0,031$
3.2-12	$\Delta We = f(\Delta t)$	$\Delta We = -2078 \Delta t^4 + 708,5 \Delta t^3 - 79,21 \Delta t^2 + 3,158 \Delta t - 0,018$
3.2-13	$\Delta We = f(t_2)$	$\Delta We = -2159 t_2^4 + 776,5 t_2^3 - 93,05 t_2^2 + 4,125 t_2 - 0,037$
3.2-14	$Ne = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Ne = 1E + 17e^{5,066E_k}$
3.2-15	$Ne = f(u_{ke}, E_{ke})$	$Ne = 1E + 17e^{5,230E_{ke}}$
3.2-16	$Na = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Na = 110,7 \hat{E}_k^2 + 187,3 \hat{E}_k + 12,33$
3.2-17	$Na = f(u_{ke}, E_{ke})$	$Na = 120,9 E_{ke}^2 + 191,0 E_{ke} + 15,51$

Πίνακας 4.2-2: Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

Σχήμα	Χαρακτηριστική	Μαθηματική Προσέγγιση
3.3-1	$t_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_1 = -12,95 E_{ke}^3 + 37,2 E_{ke}^2 - 34,28 E_{ke} + 11,27$
3.3-2	$t_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_2 = 145,3 E_{ke}^4 - 575,4 E_{ke}^3 + 755,3 E_{ke}^2 - 369,2 E_{ke} + 74,71$
3.3-3	$\Delta t = f(u_{ke}, E_{ke})$	$\Delta t = 121,3 E_{ke}^4 - 483,5 E_{ke}^3 + 625,9 E_{ke}^2 - 290,3 E_{ke} + 55,93$
3.3-4	$t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$t_1 = 0,013e^{3,707E_k}$
3.3-5	$t_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$t_2 = 0,008e^{2,154E_k}$
3.3-6	$\Delta t = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta t = 0,007e^{1,847E_k}$
3.3-7	$t_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_1 = 0,013e^{3,784E_{ke}}$
3.3-8	$t_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_2 = 0,008e^{2,194E_{ke}}$
3.3-9	$\Delta t = f(u_{ke}, E_{ke})$	$\Delta t = 0,007e^{1,880E_{ke}}$
3.3-10	$\Delta We = f(u_{ke}, E_{ke})$	$\Delta We = 0,165 E_{ke}^3 - 0,419 E_{ke}^2 + 0,31 E_{ke} - 0,052$
3.3-11	$\Delta We = f(t_1)$	$\Delta We = -0,135 t_1^4 + 0,451 t_1^3 - 0,463 t_1^2 + 0,143 t_1 + 0,007$
3.3-12	$\Delta We = f(\Delta t)$	$\Delta We = -2457 \Delta t^4 + 632,1 \Delta t^3 - 52,17 \Delta t^2 + 1,361 \Delta t + 0,004$
3.3-13	$\Delta We = f(t_2)$	$\Delta We = -1088 t_2^4 + 398,5 t_2^3 - 48,01 t_2^2 + 1,989 t_2 - 0,007$
3.3-14	$Ne = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Ne = 5E + 17e^{2,511E_k}$
3.3-15	$Ne = f(u_{ke}, E_{ke})$	$Ne = 5E + 17e^{2,561E_{ke}}$
3.3-16	$Na = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Na = 765,6 \hat{E}_k^3 + 1488 \hat{E}_k^2 - 601,6 \hat{E}_k + 171,6$
3.3-17	$Na = f(u_{ke}, E_{ke})$	$Na = -826,7 E_{ke}^3 + 1577 E_{ke}^2 - 635,5 E_{ke} + 178,0$

Πίνακας 4.2-3: Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/50μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

Σχήμα	Χαρακτηριστική	Μαθηματική Προσέγγιση
3.4-1	$t_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_1 = -5,415 E_{ke}^3 + 14,88 E_{ke}^2 - 13,84 E_{ke} + 5,904$
3.4-2	$t_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_2 = -19,13 E_{ke}^4 + 39,04 E_{ke}^3 - 50,27 E_{ke}^2 + 71,45 E_{ke} - 5,132$
3.4-3	$\Delta t = f(u_{ke}, E_{ke})$	$\Delta t = -30,29 E_{ke}^4 + 82,11 E_{ke}^3 - 110,1 E_{ke}^2 + 107,7 E_{ke} - 14,91$
3.4-4	$t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$t_1 = 0,019e^{3,272E_k}$
3.4-5	$t_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$t_2 = 0,009e^{1,906 E_k}$
3.4-6	$\Delta t = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta t = 0,006e^{1,859 E_k}$
3.4-7	$t_1 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_1 = 0,019e^{3,347 E_{ke}}$
3.4-8	$t_2 = f(u_{ke}, E_{ke})$	$t_2 = 0,009e^{1,949 E_{ke}}$
3.4-9	$\Delta t = f(u_{ke}, E_{ke})$	$\Delta t = 0,006e^{1,900 E_{ke}}$
3.4-10	$\Delta We = f(u_{ke}, E_{ke})$	$\Delta We = -0,376 E_{ke}^4 + 1,374 E_{ke}^3 - 1,787 E_{ke}^2 + 0,956 E_{ke} - 0,166$
3.4-11	$\Delta We = f(t_1)$	$\Delta We = -0,004 t_1^4 + 0,017 t_1^3 - 0,013 t_1^2 - 0,009 t_1 + 0,010$
3.4-12	$\Delta We = f(\Delta t)$	$\Delta We = -18421 \Delta t^4 + 3074 \Delta t^3 - 175,5 \Delta t^2 + 3,703 \Delta t - 0,013$
3.4-13	$\Delta We = f(t_2)$	$\Delta We = -1538 t_2^4 + 485,4 t_2^3 - 51,29 t_2^2 + 1,968 t_2 - 0,013$
3.4-14	$Ne = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Ne = 5E + 17e^{2,698 E_k}$
3.4-15	$Ne = f(u_{ke}, E_{ke})$	$Ne = 5E + 17e^{2,760 E_{ke}}$
3.4-16	$Na = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Na = -183,5 \hat{E}_k^3 + 111,0 \hat{E}_k^2 + 461,4 \hat{E}_k - 48,09$
3.4-17	$Na = f(u_{ke}, E_{ke})$	$Na = -200,7 E_{ke}^3 + 120,5 E_{ke}^2 + 468,6 E_{ke} - 43,81$

Πίνακας 4.2-4: Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/50\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

Βιβλιογραφία

1. Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος: Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά, Αθήνα 2003
2. Ι.Α. Σταθόπουλος, Υψηλές Τάσεις, εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1995
3. Ν. Θεοδώρου, Ηλεκτρικές Μετρήσεις, Τόμος 1 και 2, Αθήνα 2004