



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ
ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΗΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ
ΣΤΟ ΣΥΝΔΙΑΣΜΟ «PERTINAX-ΛΑΔΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ 80°C»
ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ 250/2500 μ s
ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ «ΑΚΙΔΑ-ΠΛΑΚΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΟΥΚΟΥΝΑ Ι. ΜΑΡΙΑ

Επιβλέπων : Κ. Γ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2010



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

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ
ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΗΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ
ΣΤΟ ΣΥΝΔΙΑΣΜΟ «PERTINAΧ-ΛΑΔΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ 80°C»
ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ 250/2500 μs
ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ «ΑΚΙΔΑ-ΠΛΑΚΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΟΥΚΟΥΝΑ Ι. ΜΑΡΙΑ

Επιβλέπων : Κ. Γ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 2^η Ιουλίου 2010

.....
Κ. Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Θεοδώρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μ. Ιωαννίδου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2010

.....

Μαρία Ι. Κούκουνα

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

Copyright © Μαρία Ι. Κούκουνα, 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων.

Κατά τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας συνέβαλαν σημαντικά ορισμένοι άνθρωποι προσφέροντας την πολύτιμη βοήθειά τους.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Κ.Γ. Καραγιαννόπουλο για την καθοριστική καθοδήγηση και επίβλεψη που μου παρείχε, το πραγματικό ενδιαφέρον που επέδειξε και την αμέριστη υποστήριξη του.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τον Καθηγητή κ. Π.Δ. Μπούρκα για την ανεκτίμητη βοήθεια και συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειας αυτής. Χάρη στις γνώσεις και την εμπειρία του κατέστη εφικτή η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερα τους Καθηγητές Ν. Θεοδώρου και Μ. Ιωαννίδου για τη πολύτιμη συνεισφορά τους και την άψογη συνεργασία μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η γήρανση και η διάσπαση των μονωτικών υλικών αποτελεί σημαντικό φαινόμενο, το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται οι παράγοντες που οδηγούν στη γήρανση και τη διάσπαση των ανωτέρων υλικών.

Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας γίνεται αναφορά στις ιδιότητες των ηλεκτρομονωτικών υλικών, καθώς και στα κριτήρια επιλογής τους για τις διάφορες ηλεκτροτεχνικές κατασκευές. Αναλύονται εκτενώς τα στερεά μονωτικά, τα οποία αποτελούν και το κύριο υλικό έρευνας της παρούσας εργασίας και γίνεται ερμηνεία των φαινομένων που εμφανίζονται πριν και κατά την διάρκεια της διάσπασής τους, σύμφωνα με τη μακροσκοπική και την κβαντομηχανική θεωρία.

Στο πειραματικό τμήμα, πραγματοποιείται η στατιστική ανάλυση της έναρξης των μερικών εκκενώσεων και του προκαλούμενου ρεύματος διαρροής στο συνδυασμό pertinax-λάδι μετασχηματιστών, σε θερμοκρασία 80°C και υπό την επίδραση κρουστικής τάσης χειρισμών ($\pm 250/2500$ μs). Η ανωτέρω ανάλυση σχετίζεται με τη μέτρηση, τον υπολογισμό και τη γραφική αποτύπωση, βασικών ηλεκτρικών μεγεθών ανάλογα με το πάχος του δοκιμίου ($d=1\text{mm}$, $d=2\text{mm}$) και την πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης (+/-). Τέλος, γίνεται προσπάθεια ερμηνείας της μορφής των χαρακτηριστικών που προκύπτουν, σύμφωνα με τα αναφερόμενα στη θεωρία, σχετικά με τα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά τη γήρανση και διάσπαση του εξεταζόμενου μονωτικού υλικού και εξάγονται συμπεράσματα.

Σκοπός της παραπάνω διαδικασίας είναι η κατανόηση και ανάλυση του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων, το οποίο αποτελεί και τον κύριο παράγοντα διάσπασης των μονωτικών υλικών. Επιπρόσθετα, διερευνάται η επίδραση άλλων παραγόντων, που συμβάλλουν σημαντικά στο παραπάνω φαινόμενο.

Λέξεις κλειδιά: Μονωτικά υλικά, Γήρανση υλικών, Διάσπαση μόνωσης, Μερικές εκκενώσεις, Ανομοιογένειες υλικού, Δυνάμεις Coulomb, Κρουστική τάση.

ABSTRACT

Ageing and Break of insulators is an important phenomenon, which is of particular scientific interest. This diploma thesis studied the factors leading to Ageing and Break of such materials.

The theoretical part of this thesis refers to the properties of insulators and the selection criteria for their use in various electrical engineering constructions. The solid insulators, which constitute the main material of this research work, are analyzed in detail, and the phenomena, before and during the Break, are interpreted according to the macroscopic and quantum-mechanic theory.

In the experimental section, takes place the statistical analysis of the partial discharges and current leakage in the combination “ pertinax-transformer’s oil ” at the temperature of 80 ° C and under the influence of impact stress $\pm 250/2500 \mu\text{s}$. The above analysis relates to the measurement, calculation and graphic presentation of basic electrical quantities, depending on the thickness of the specimen ($d=1\text{mm}$, $d =2\text{mm}$) and the polarity of the applied voltage (+/-). It is attempted to interpret the format of the graphic presentations, as the theory indicates about the phenomena that occur during Ageing and Break of the test insulator. Finally, conclusions are drawn.

The purpose of this process is to understand the phenomenon and analyze the partial discharges, which are the main factor leading to the Break of insulators. Additionally, the influence of other factors, that contributes significantly to the above phenomenon, is investigated.

Keywords: Insulators, Ageing, Break, Partial discharge, Coulomb’s force, Material’s incongruity, Impact voltage.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

0. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1. ΒΑΣΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	19
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	25
2.1. ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ.....	25
2.1.1. ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ.....	26
2.1.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ.....	28
2.1.3. ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΛΟΓΩ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ (ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ Η΄ ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ).....	33
2.1.4. ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ.....	42
2.1.5. ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ	43
2.1.6. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ.....	63
2.1.7. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΣΤΕΡΕΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ.....	70
2.2. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΚΑΙ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗ	71
2.3. ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ.....	72
2.3.1. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	73
2.3.2. ΦΑΣΜΑ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ	80
2.3.3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ ΜΕ ΚΡΟΥΣΕΙΣ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ	82
2.3.4. ΦΑΣΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ	84
2.4. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ	88
3. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	93
3.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ	94
3.2. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ.....	95
3.3. ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	199
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	201

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

0. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται στις ηλεκτροτεχνικές κατασκευές για τον ηλεκτρικό διαχωρισμό μεταξύ ρευματοφόρων μερών, καθώς και ρευματοφόρων μερών προς γη, κατά τρόπο ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό. Ανάλογα με το είδος της κατασκευής και τις ιδιότητες κάθε υλικού χρησιμοποιούνται στερεά, υγρά και αέρια μονωτικά υλικά ή συνδυασμός τους. Η μελέτη της συμπεριφοράς των μονωτικών υλικών κατά την καταπόνηση τους με διάφορες μορφές τάσεων, συντελεί καθοριστικά στη βελτίωση της ποιότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται και κατ' επέκταση στην αξιοπιστία και την ασφάλεια των κατασκευών.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των φαινομένων που παρουσιάζονται κατά την **γήρανση και διάσπαση των μονωτικών υλικών**. Βασική πηγή πληροφοριών για την ανάλυση των φαινομένων αυτών αποτελούν τα συγγράμματα «Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά» Π.Δ.Μπούρκας, Κ.Γ.Καραγιαννόπουλος και «Εφαρμογές κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων» Π.Δ.Μπούρκας.

Στις διάφορες πρακτικές εφαρμογές υψηλών τάσεων συναντώνται συχνότατα χωρικά φορτία μεταξύ των ηλεκτροδίων. Σε μια δεδομένη διάταξη δυο ηλεκτροδίων τα χωρικά φορτία συγκεντρώνονται προ του ηλεκτροδίου με την αντίθετη προς αυτά πολικότητα και σχηματίζουν έτσι ένα νέφος. Το πεδίο είναι ηλεκτροστατικό όταν τα χωρικά φορτία του νέφους είναι αμετακίνητα. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι μέχρι μια τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης συμβαίνει μια κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των εξασκούμενων δυνάμεων Coulomb, ώστε το πεδίο να εξακολουθεί να είναι χωρικό. Όταν μετά την παραπάνω τιμή εφαρμοζόμενου πεδίου καταστρέφεται η κατάσταση ισορροπίας (χωρίς να συμβαίνει διάσπαση), τότε εκδηλώνονται περιορισμένης έκτασης εκκενώσεις, που ονομάζονται **μερικές εκκενώσεις**. 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**).

Με τον όρο **διάσπαση** εννοούμε την αγωγήμη σύνδεση μεταξύ δύο μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μονωτικών (π.χ. αέρας–πορσελάνη, βακελίτης–

μονωτικό λάδι), τότε ονομάζεται **επιφανειακή διάσπαση**. Η διάσπαση στο περιβάλλον μέσο ενός στερεού μονωτικού, λόγω μείωσης της απόστασης μόνωσης από ξένες επικαθήσεις στην επιφάνεια του υλικού (π.χ. ρυπασμένοι μονωτήρες) ονομάζεται **υπερπήδηση**. Η διάσπαση δια του όγκου ενός μονωτικού υλικού καλείται **διάτρηση**, ενώ η διάσπαση σε περιορισμένο μήκος του μονωτικού υλικού ονομάζεται **μερική εκκένωση**.

Έχει διαπιστωθεί ότι τα **υγρά μονωτικά υλικά** έχουν μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή απ' ό,τι τα αέρια σε ατμοσφαιρική πίεση. Παραδείγματος χάριν, η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι 21kV/cm ενώ η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών είναι 60-200kV/cm. Η σημασία τους στις πρακτικές εφαρμογές είναι μεγάλη γιατί έχουν τα παρακάτω γνωρίσματα:

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

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

Από έρευνες, που έχουν γίνει για τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στα στερεά μονωτικά υλικά μπορεί κανείς να ομαδοποιήσει τις μεθόδους που εφαρμόζονται, σε δύο βασικές θεωρίες : την κβαντομηχανική θεωρία και τη μακροσκοπική θεωρία.

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

Σύμφωνα με τη **μακροσκοπική θεωρία**, τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται σε κάποιο **ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα**, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση ακουστικών και φωτεινών φαινομένων, καθώς και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού. Οι δυο θεωρίες αναλύονται εκτενώς στο κεφάλαιο 2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

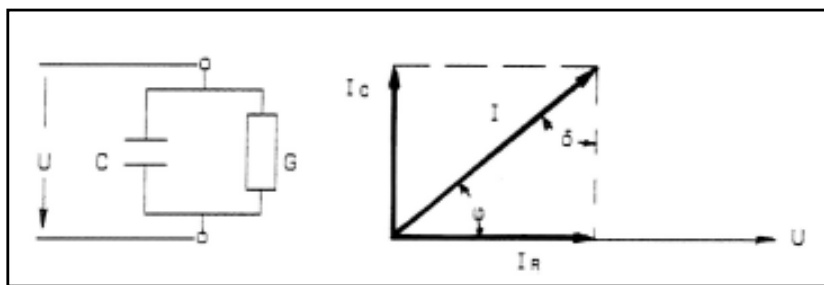
ΒΑΣΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1. ΒΑΣΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

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

Τα κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών υλικών είναι:

- ✂ **η διηλεκτρική αντοχή (E_d)** : δηλαδή η ελάχιστη τιμή της πεδιακής έντασης για τη διάσπαση εντός ομογενούς πεδίου και η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της ελάχιστης τιμής της τάσης για τη διάσπαση προς την απόσταση των ηλεκτροδίων (d). Για λάδι μετασχηματιστή, με καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50Hz είναι $E_d=60\div 200$ kV/cm.
- ✂ **η σχετική διηλεκτρική σταθερά ($\epsilon_r=\epsilon/\epsilon_0$ με $\epsilon_0=8,854\mu\text{C/Vm}$)** : δηλαδή το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μιας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα και η οποία εξαρτάται από την στατιστικότητα των ανομοιογενειών στο υλικό. Για το pertinax στους 20°C: $\epsilon_r=4,8-5,4$ $\mu\text{C/Vm}$. Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών, που συνθέτουν μια μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών και μονώσεις καλωδίων), θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο, ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειες τους, για να μην διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.
- ✂ **ο συντελεστής απωλειών $\text{tg}\delta$** : ο οποίος εκφράζει τις απώλειες ενέργειας που υπάρχουν σε όλα τα μονωτικά με σκοπό τη δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου. Στο σχήμα 1.1 δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με ομοιογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητας του G).



Σχήμα 1.1: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας του G του διηλεκτρικού του.

$$\text{Ισχύει η σχέση : } \boxed{\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega \cdot C}} \quad (1-1) ,$$

όπου I_C : το χωρητικό ρεύμα του μονωτή και I_R : το ρεύμα διαρροής που οφείλεται στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά. Οι απώλειες Joule (P_w) στην αγωγιμότητα G είναι:

$$\boxed{P_w = I_R \cdot U = G \cdot U^2 = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg}\delta = P_B \cdot \operatorname{tg}\delta} \quad (1-2) ,$$

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

$$\text{είναι: } \boxed{P_w = \omega \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta \cdot \int \left(\frac{U}{d}\right)^2 \cdot dV = \omega \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta \cdot \int E^2 \cdot dV} \quad (1-3) ,$$

όπου V : ο όγκος του διηλεκτρικού. Από την παραπάνω σχέση μπορεί εύκολα να υπολογιστούν οι απώλειες Joule μιας μόνωσης.

✂ **η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ)** : η οποία εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς και υπάρχει σε όλα τα μονωτικά. Για θερμική καταπόνηση του

$$\text{διηλεκτρικού ισχύει η σχέση: } \boxed{\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-W/kT} = \sigma_0 \cdot e^{\beta\theta}} \quad (1-4)$$

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

σ : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα,

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

k : η σταθερά Boltzmann ($1,37 \cdot 10^{-23} \text{ W*s/ } ^\circ\text{K}$),

T : η απόλυτη θερμοκρασία,

β : ένας συντελεστής του υλικού (π.χ. για το presspan $\beta \approx 0.02$).

Από έρευνες σε οργανικά στερεά μονωτικά συμπεραίνεται, ότι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνει απότομα με την ενέργεια των μερικών εκκενώσεων. Έχει διαπιστωθεί ότι η τιμή της πεδιακής έντασης είναι καθοριστική για την τιμή σ . Μια τιμή πεδιακής έντασης χαρακτηρίζεται ως χαμηλή όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις ή έστω όταν οι μερικές εκκενώσεις συμμετέχουν μόνο στην 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 και ότι δεν ισχύει η σχέση (1-4).

Για την αύξηση της τιμής σ , από τις απώλειες του διηλεκτρικού και τις μερικές

εκκενώσεις, έχει διατυπωθεί η σχέση:
$$\sigma = \sigma_0 \cdot \frac{e^{\beta 0}}{(1 - \delta \cdot E)^2} \quad (1-5)$$

όπου E : η πεδιακή ένταση στο τμήμα 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.

✘ ο συντελεστής $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$: ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση
$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (1-6).$$
 Ο

συνδυασμός αυτού του τύπου με τη σχέση (1-4) και θεωρώντας σταθερό το ε , δίνει εκθετική μεταβολή του $\operatorname{tg} \delta$ με τη θερμοκρασία. Για λάδι μετασχηματιστή στους 20 °C είναι : $\varepsilon \operatorname{tg} \delta = 0,004 \div 0,0046$.

- ✧ **η επιφανειακή αγωγιμότητα** : η οποία συμμετέχει στα φαινόμενα που εκδηλώνονται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών κατά την ηλεκτρική καταπόνηση τους (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και μερικές εκκενώσεις), σε πάχος μέχρι 30Å. Επειδή οι παράγοντες, που προκαλούν αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας ποικίλουν (ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας), η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα δεν είναι κάποια σταθερά των στερεών μονωτικών. Η επιφανειακή αγωγιμότητα έχει συσχετιστεί με έννοιες, που αφορούν την αντοχή των στερεών μονωτικών από τις καταπονήσεις στην επιφάνεια τους (όπως: αντοχή σε ρεύμα διαρροής, αντοχή σε ηλεκτρικό τόξο, δυνατότητα απομάκρυνσης των επικαθίσεων κατά τη βροχή κ.λ.π.), που ενδιαφέρουν στην πράξη για την κατασκευή π.χ. μονωτήρων και φλογοθαλάμων διακοπών.
- ✧ **ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ)** : ο οποίος συμβαδίζει με την ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα. 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 την λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ. απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπών, κ.λ.π.).
- ✧ **η μηχανική αντοχή** : η οποία συχνά ενδιαφέρει σε πλήρεις κατασκευές, που περιλαμβάνουν στερεά μονωτικά, όταν ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από την εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης, όπως συμβαίνει κατά το βραχυκύκλωμα (π.χ.: πίνακες μέσης τάσης, μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστές μέτρησης στο δίκτυο υψηλών τάσεων, διακόπτες υψηλών τάσεων, κ.λ.π.). Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να γίνουν αιτία καταστροφής της κατασκευής, όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή κατά το βραχυκύκλωμα. Η μόνωση π.χ. ενός διακόπτη υψηλής τάσης δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης, προς δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου, όταν η επιδίωξη αυτή δεν συνδυάζεται με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, που θα διασφαλίζει την ικανότητα μόνωσης μέχρι να διακοπεί το βραχυκύκλωμα από το μέσο προστασίας του δικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1. ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ

Από μετρήσεις που έχουν γίνει σε διάφορα στερεά μονωτικά (κυρίως μετρήσεις της τάσης διάσπασης σε σχέση με το χρόνο και τη μορφή της τάσης), σε συνδυασμό με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής που προκαλείται προ της διάσπασης και κατά την διάτρησή τους, θεωρείται ότι υπάρχουν οι παρακάτω βασικοί παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων τους :

- οι απώλειες Joule,
- οι δυνάμεις Coulomb,
- οι μερικές εκκενώσεις και
- η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στην πράξη βέβαια οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται και υποβοηθούνται από διάφορες τοπικές συνθήκες λειτουργίας έτσι, ώστε η αλλαγή της μοριακής δομής να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμα τους. Ως σημαντικότερος παράγοντας γήρανσης του υλικού θεωρούνται οι μερικές εκκενώσεις .

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

- η θερμική διάτρηση,
- η ηλεκτρική διάτρηση (που διακρίνεται στη δένδροειδή και στην ηλεκτρομηχανική),
- η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση),
- η θερμοχημική διάτρηση.

2.1.1. ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

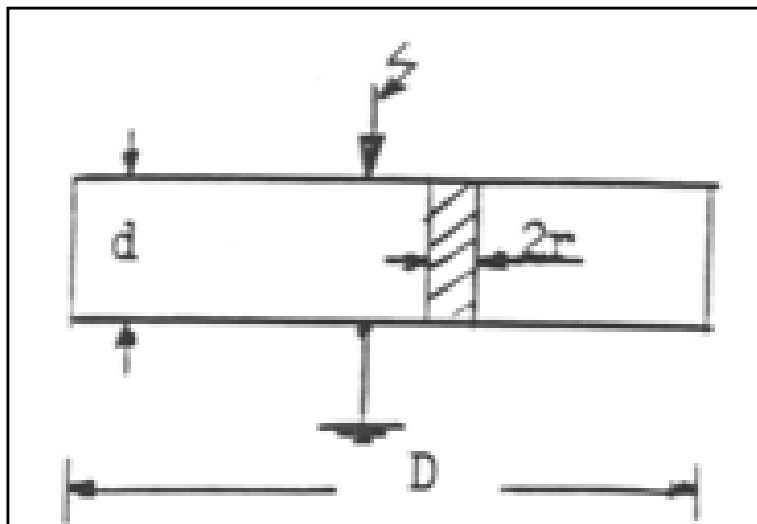
Η μορφή της διάτρησης αυτής συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule (π.χ. κακή απαγωγή θερμότητας από τη μόνωση του καλωδίου λόγω σκόνης και ύγρανσης). Η εικόνα που παρουσιάζει το θερμικά καταπονούμενο υλικό είναι συνήθως η απανθράκωση και η τήξη του, στην περιοχή όπου οι απώλειες Joule είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Ο οχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 , οπότε έχουμε σύμφωνα με προηγούμενη σχέση (1.4) :

$$\sigma_1 = \sigma_0 \cdot e^{\beta\theta} \quad (2.1.1-1)$$

Με την προϋπόθεση σταθερής διατομής (A) του οχετού διάτρησης (σχήμα 2.1.1.1) και ειδική αγωγιμότητα σ_1 , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι:

$$P = U^2 \cdot G = \frac{U^2 \cdot \sigma_0 \cdot e^{\beta\theta} \cdot A}{d} \quad (2.1.1-2)$$

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



Σχήμα 2.1.1.1: Απλοποιημένη παράσταση του οχετού διάτρησης λόγω των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού.

D : διάμετρος δοκιμίου

d : πάχος του μονωτικού

2r: διάμετρος του οχετού διάτρησης.

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

$$P = P_a + C_0 \cdot (d\theta/dt) \quad (2.1.1-3)$$

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

$$P_a = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (2.1.1-4)$$

όπου κ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

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

$$\frac{U^2 \cdot \sigma_0 \cdot e^{\beta\theta} \cdot A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (2.1.1-5)$$

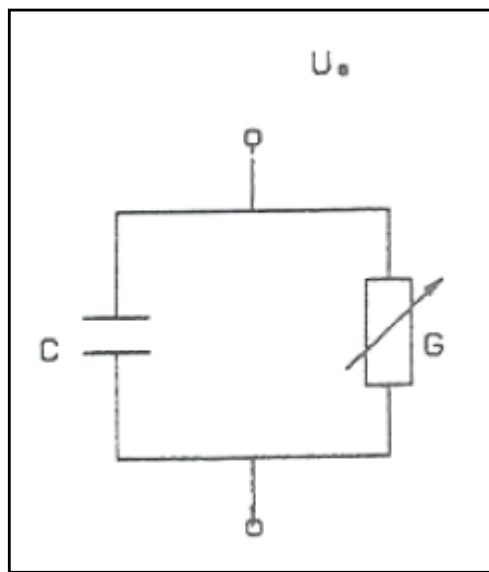
Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δύο συναρτήσεις της θερμοκρασίας ($P=f(\theta)$ και $P_a=f(\theta)$). Για το λόγο αυτό, η οριακή τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση (U_θ) δίνεται όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι, από τη διαφορίση ως προς θ , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης (2.1.1-5), έχουμε:

$$\frac{\beta \cdot U_\theta^2 \cdot \sigma_0 \cdot e^{\beta\theta} \cdot A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \quad (2.1.1-6)$$

Από τις σχέσεις (2.1.1-5) και (2.1.1-6) φαίνεται ότι:

$$\beta \cdot \theta = 1 \quad (2.1.1-7) \quad \text{και} \quad U_\theta = d \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{e \cdot \beta \cdot \sigma_0 \cdot r}} \quad (2.1.1-8)$$

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_θ μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα 2.1.1.2, όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μία μεταβλητή αγωγιμότητα G . Η διάτρηση στην τιμή U_θ συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ_0 στην τιμή σ_1), μία οριστική τιμή G_{max} .



Σχήμα 2.1.1.2: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule.

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

G_0 :αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή.

G_{\max} :αγωγιμότητα για τη διάτρηση.

C :χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή.

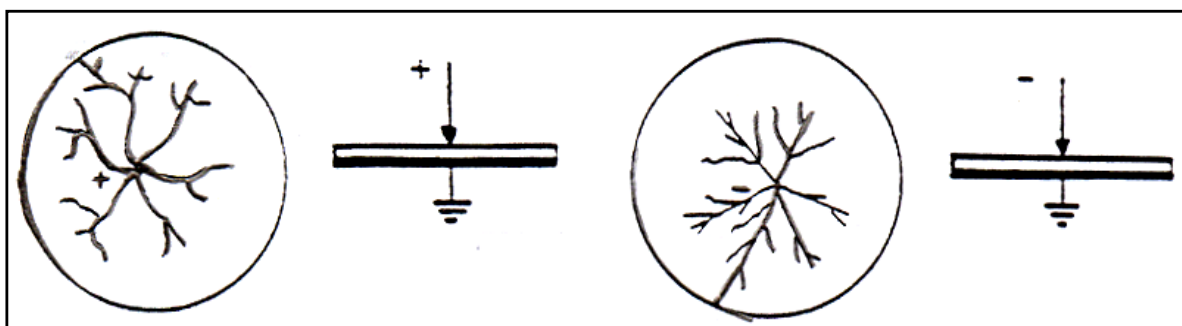
2.1.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

Για εφαρμοζόμενη ενεργό τιμή της τάσης μεγαλύτερη από εκείνη της θερμικής διάτρησης, προκύπτει μεγαλύτερη τιμή πεδίου, 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 :

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

A. Η δένδροειδής (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) μορφή, η οποία 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 δένδριτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μία διακλάδωση του δένδριτη ολοκληρώνει την πλήρη αγώγιμη σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 2.1.2.1 δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δένδριτη, ανάλογα με την πολικότητα της τάσης, για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (δηλαδή την περίπτωση ηλεκτροδίων τύπου ακίδας-πλάκας).



Σχήμα 2.1.2.1: Η μορφή οχετού κατά τη διεύθυνση του πεδίου.

Στην περίπτωση της θετικής ακίδας ο δένδριτης 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.

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

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

Λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας για την ηλεκτρική διάτρηση και επειδή τα στερεά μονωτικά είναι και μονωτές θερμότητας όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμότητα που απάγεται μόλις πριν από τη διάτρηση είναι αμελητέα ($P_a=0$). Επομένως, κατά τις σχέσεις (2.1.1-2 και 2.1.1-3) και για έναν οχετό διατομής $A=\pi r^2$ (κατά το σχήμα 2.1.1.1) ισχύει μόλις προ της διάτρησης ότι:

$$U_n^2 \cdot \sigma_2 \cdot \frac{A}{d} = C_0 \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.1.2-1)$$

όπου: σ_2 : η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια ανομοιογένεια (λόγω της οποίας η πεδιακή ένταση έγινε ιδιαίτερα μεγάλη στην περιοχή εκείνη του υλικού),

U_n : η ενδεικνύμενη τιμή της τάσης για την ηλεκτρική διάσπαση του υλικού στην παραπάνω περιοχή.

Αν υποθέσουμε ότι λόγω του μικρού διατιθέμενου χρόνου είναι $d\theta/dt = \theta/T_\delta$ όπου T_δ ο χρόνος για την ηλεκτρική διάτρηση, τότε από τη σχέση (2.1.2-1) έχουμε:

$$U_n = \sqrt{d} \cdot \sqrt{\frac{C_0 \cdot \theta}{\sigma_2 \cdot A \cdot T_\delta}} \quad (2.1.2-2)$$

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

$$U_{kn} = \sqrt{d} \cdot \sqrt{\frac{C_0 \cdot \theta}{\sigma_2 \cdot A \cdot T_s}} \quad (2.1.2-3)$$

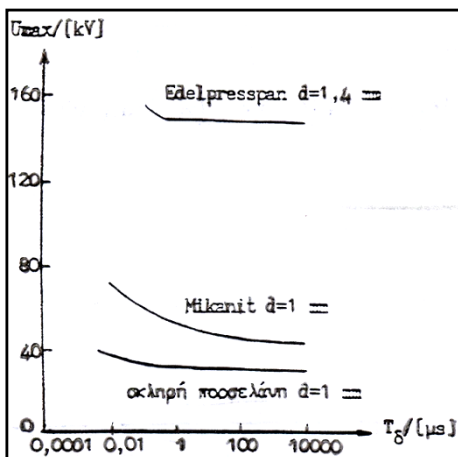
όπου T_s : η διάρκεια του μετώπου της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν μια ικανοποιητική ερμηνεία σε πειράματα που έχουν γίνει. Πράγματι, όσο αυξάνει ο χρόνος T_s μιας κρουστικής τάσης, τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή (βλ. πίνακα 2.1.2.1). Κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση ισχύει περίπου η αναλογία $U_n = f(1/\sqrt{T_s})$ (βλ. σχήμα 2.1.2.2).

Πίνακας 2.1.2.1: Τιμές της τάσης διάσπασης του στερεού μονωτικού pertinax H1270 (πάχους 1mm και 2mm) κατά την καταπόνησή του με διάφορες μορφές κρουστικών τάσεων σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών.

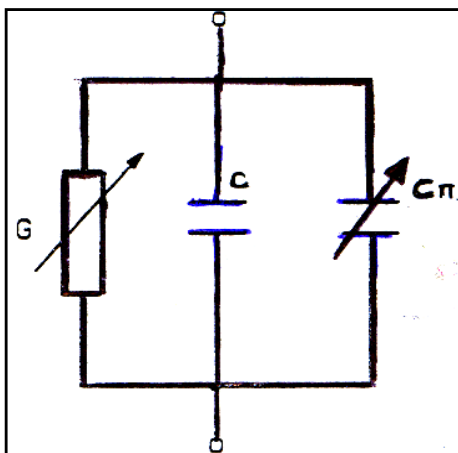
(Διάμετρος δοκιμίων: 150mm, Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα, Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: R=0,9mm.)

d (mm)	κρουστική τάση		\hat{U}_k 50% [kV]	περιοχή τιμών \hat{U}_k για τη διάσπαση [kV]
	Μορφή [μ s]	Πολικότητα		
1	1,2/50	Θετική	80	78...90
	1,2/50	Αρνητική	86	81...95
	10/200	Θετική	74	69...78
	10/200	Αρνητική	77	71...79
	250/2500	Θετική	66	63...69
	250/2500	Αρνητική	68	65...70
2	1,2/50	Θετική	135	126...151
	1,2/50	Αρνητική	148	132...165
	10/200	Θετική	74	69...80
	10/200	Αρνητική	70	67,5...71



Σχήμα 2.1.2.2: Διάσπαση διαφόρων στερεών μονωτικών σε σχέση με το χρόνο καταπόνησης. Για πολύ μικρούς χρόνους, ισχύει η αναλογία : $U_{max} = f(1/\sqrt{T_d})$, όπου U_{max} : τιμή εφαρμοζόμενης εναλλασσόμενης τάσης.

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



Σχήμα 2.1.2.3: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα.

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

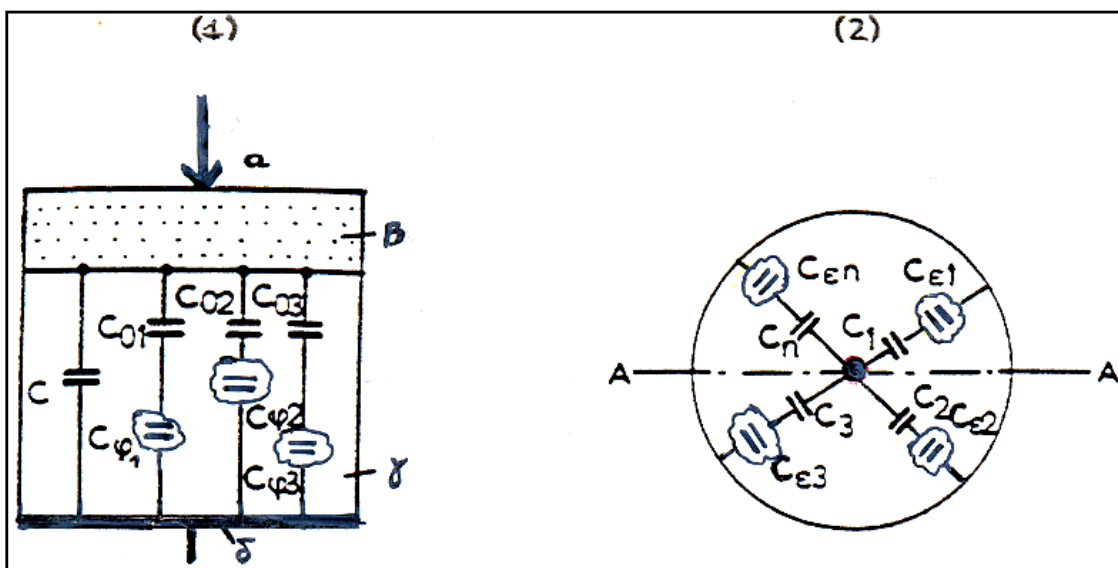
$G=0...G_{max}$: αγωγιμότητα λόγω αύξησης των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στη θέση όπου θα συμβεί η διάτρηση.

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 το φαινόμενο της πόλωσης του υλικού που παρατηρείται (δηλαδή ο προσανατολισμός των ελαστικών μετακινήσεων ηλεκτρικών φορτίων του διηλεκτρικού στη διεύθυνση του πεδίου), είναι αρκετό 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 (Σχ. 2.1.2.3), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_{π} (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Όταν η αγωγιμότητα G και ο πυκνωτής C_{π} έχουν αποκτήσει μόλις προ της διάτρησης τις τιμές G_{\max} και C_{\max} (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα σ_2 , λόγω κάποιας ανομοιογένειας), τότε συμβαίνει η διάτρηση.

2.1.3. ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΛΟΓΩ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ (ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ Η΄ ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ)

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 2.1.3.1. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές $C_{\epsilon 1} \dots C_{\epsilon n}$ και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$. Οι πυκνωτές $C_1 \dots C_n$ και $C_{01} \dots C_{0n}$ 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 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,

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

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης,

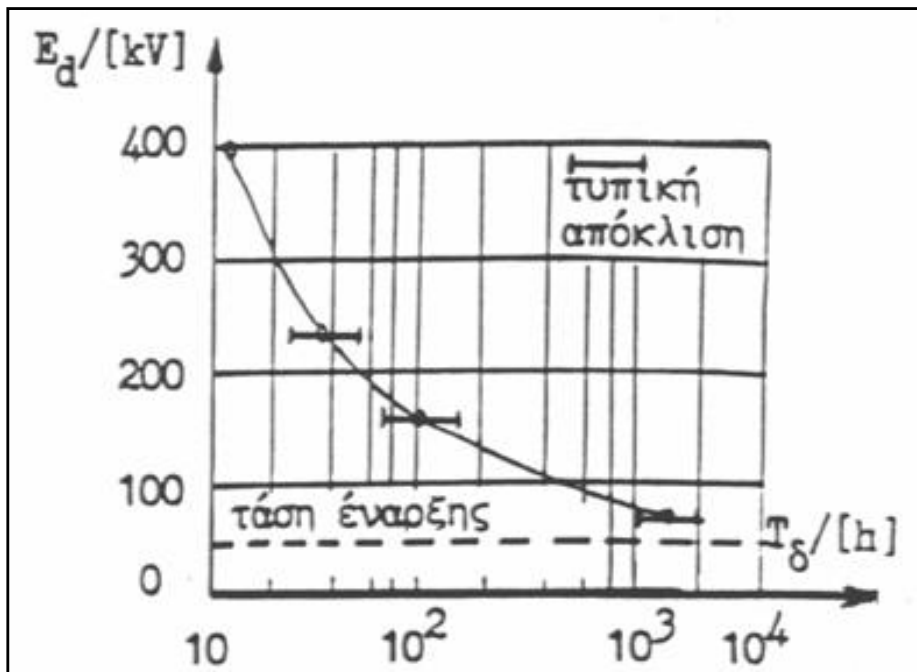
$C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$: πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων),

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

Η έναρξη των μερικών εκκενώσεων σηματοδοτεί συνήθως σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του στερεού μονωτικού, ιδιαίτερα έντονη σε περιορισμένο τμήμα του όπου έτυχε οι θέσεις ανομοιογένειας να είναι περισσότερο αγώγιμες. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού.

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμα, γι' αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού.

Στο σχήμα 2.1.3.2 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



Σχήμα 2.1.3.2 : Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχος 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, συνεχή ή κρουστική), 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 δε μπορεί να είναι διαφορετικοί από τους πραγματικούς. Ένα κριτήριο αξιολόγησης που έχει προταθεί, βασισμένο στην έναρξη της τεχνητής γήρανσης, είναι ο φαινόμενος συντελεστής ανομοιογενειών. Ο συντελεστής αυτός έχει οριστεί ως το πηλίκο της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων προς την τάση της διηλεκτρικής

δοκιμής που προβάλλεται στις προδιαγραφές, ανάλογα με την ονομαστική τάση και τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης.

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

$$\mu_{\varepsilon} = U_{\varepsilon} / U \quad (2.1.3-1)$$

όπου U : η προβλεπόμενη τάση δοκιμής

(π.χ.: 55kV επί 1 min για ονομαστική τάση 20 kV).

U_{ε} : η τάση κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη μερική εκκένωση.

Κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ισχύει αντίστοιχα:

$$\mu_0 = \hat{U}_{κε} / \hat{U}_κ \quad (2.1.3-2)$$

όπου $\hat{U}_{κε}$: η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης, κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη μερική εκκένωση.

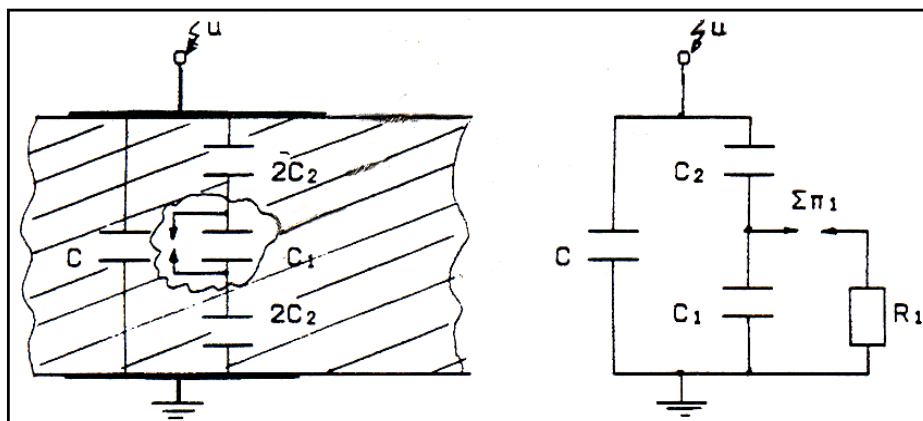
$\hat{U}_κ$: η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης που προβλέπεται από τις

προδιαγραφές για τη διηλεκτρική δοκιμή υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s.

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 χωρητικοτήτων του κυκλώματος μέτρησης κατά το διαχωρισμό των απωλειών αγωγιμότητας και πόλωσης από εκείνες λόγω μερικών εκκενώσεων.

Η ανάγκη για τη φυσική εξήγηση και τη μαθηματική ανάλυση του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων μέσα στον όγκο του στερεού μονωτικού, οδήγησε τους Gemant και Philipoff στο ισοδύναμο κύκλωμα του (σχήμα 2.1.3.3), γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου.



Σχήμα 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,

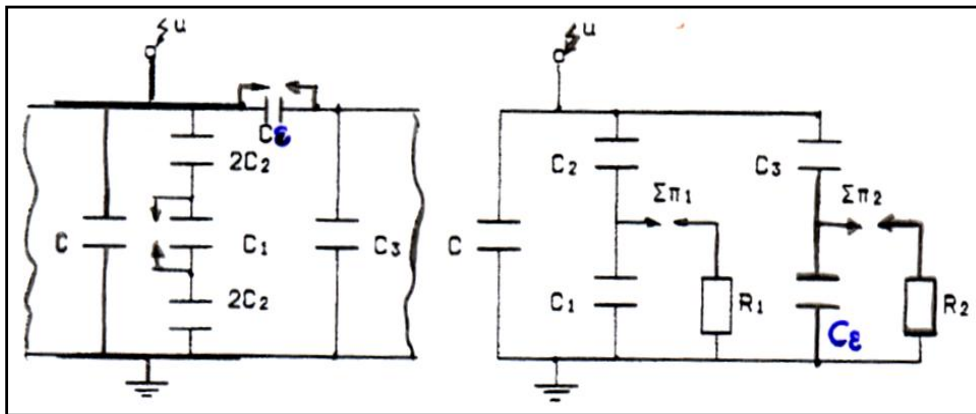
C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης,

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 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_ϵ). 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_ϵ).



Σχήμα 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,

C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας

C_ϵ : χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

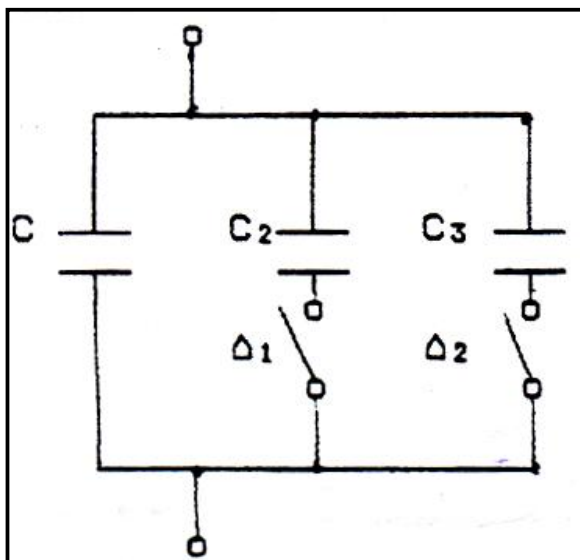
C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού,

C_3 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ,

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

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

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 2.1.3.5.



Σχήμα 2.1.3.5: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff).

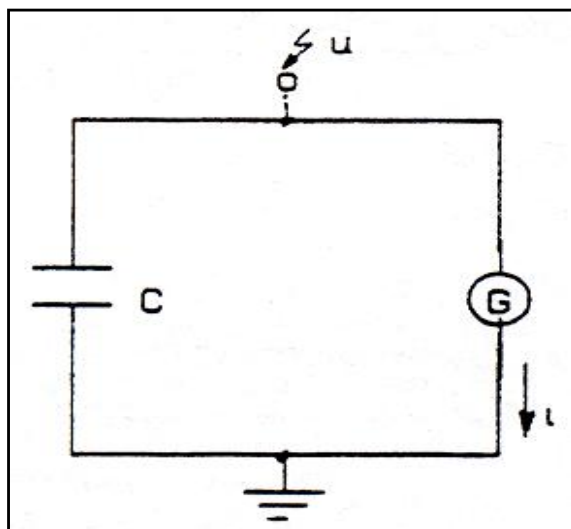
C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης,

C_2 : χωρητικότητα του υγιούς τμήματος στον όγκο του μονωτικού,

C_3 : χωρητικότητα του υγιούς τμήματος στην επιφάνεια του μονωτικού,

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

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φυσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κ.λ.π. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει επίσης μία ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (Σχ. 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 2.1.3.6: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann.

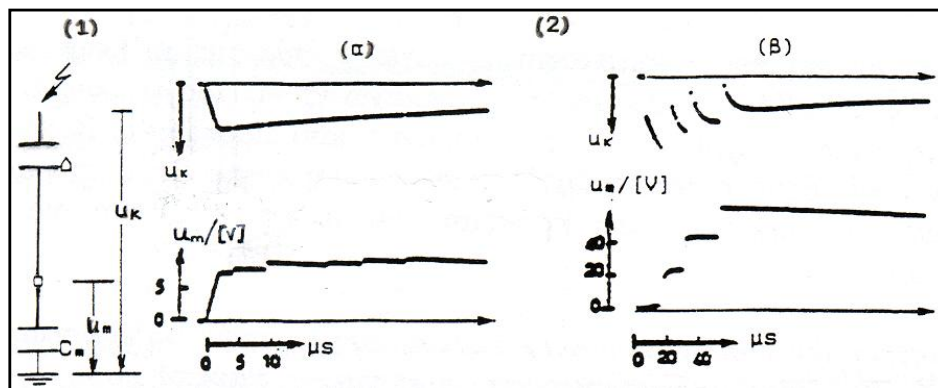
C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

G : γεννήτρια μερικών εκκενώσεων.

δ) Παράδειγμα ερμηνείας παλμογραφημάτων των μερικών εκκενώσεων μέσω των ισοδυνάμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων:

Στο σχήμα 2.1.3.7 δίνεται απλοποιημένα το κύκλωμα για τη μέτρηση των μερικών εκκενώσεων. Σύμφωνα με αυτό, δοκίμια στερεών μονωτικών, πάχους 1mm (Δ), κατά DIN 7735, καταπονούνται με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200μs, υπό διάταξη ηλεκτροδίων “ακίδα-πλάκα” και με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm. Το παλμογράφημα (α) αφορά τη γήρανση του βακελίτη και το παλμογράφημα (β) τη διάτρηση του pertinax. Η διακεκομμένη γραμμή, που έχει σχεδιαστεί στο παλμογράφημα (α), δείχνει την ιδανική συμπεριφορά (όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις) κατά την οποία ισχύει η σχέση καταμερισμού:

$$u_m = \frac{C_\delta}{C_m} \cdot u_\kappa(t) \quad (2.1.3-3) .$$



Σχήμα 2.1.3.7: Τυπικά παλμογραφήματα κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών.

1) Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης,

u_k : στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης, Δ: δοκίμιο,

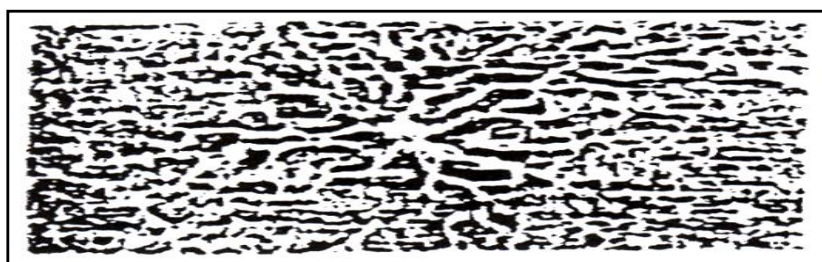
u_m : τάση στον πυκνωτή μέτρησης C_m ,

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

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

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

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι, μετά από μια τιμή $\hat{U}_k \approx 45kV$ (όπου \hat{U}_k η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται, κατά τη γήρανση, επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται (στην επιφάνεια του μονωτικού) μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 2.1.3.8).



Σχήμα 2.1.3.8: Αλλαγή της μοριακή δομής στην επιφάνεια του μονωτικού pertinax κατά την εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη (μετά από πολλές κρούσεις 10/200μs, μέγιστης τιμής 75kV).

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

Ερμηνεία:

- ❖ από το παλμογράφημα της γήρανσης (σχήμα 2.1.3.7α) φαίνεται ότι εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού, τα οποία προκαλούνται, κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.1.3.4, από τη σταδιακή διάσπαση διαφόρων θέσεων διαταραχής (C_1 , C_ϵ). Μπορούμε να υποθέσουμε, ότι στην περίπτωση αυτή, ισχύει για τη σχέση καταμερισμού μεταξύ χωρητικότητας του δοκιμίου C_δ και του πυκνωτή μέτρησης C_m :

$$u_m(t) = \frac{C_\delta + \Delta C_\delta}{C_m} \cdot u_k(t) \quad (2.1.3-4)$$

όπου ΔC_δ : η αύξηση της χωρητικότητας, λόγω εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων.

- ❖ Ο δενδρίτης μπορεί να ερμηνευθεί από τα παραπάνω ισοδύναμα κυκλώματα ως επέκταση του ίχνους της ακίδας μέχρι τις θέσεις διαταραχής, που διασπώνται. Η διάτρηση φαίνεται ότι συμβαίνει στη θέση διαταραχής, όπου η πεδιακή ένταση έχει τη μέγιστη τιμή της. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι πρόκειται για ηλεκτρομηχανική διάτρηση (βλέπετε §2.1.2).

2.1.4. ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη όπως προκύπτει και από τις σχέσεις : $\epsilon \cdot \text{tg}\delta = \frac{\sigma_0}{\omega} \cdot e^{\beta\theta}$ και $\epsilon \cdot \text{tg}\delta = \frac{\sigma_0 \cdot e^{\beta\theta}}{\omega \cdot (1 - \delta \cdot E)^2}$

, στις οποίες αναφερθήκαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως η ενέργεια εξόδου των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από το πλέγμα των μορίων είναι μικρότερη.

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

Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής και δίνεται από τον τύπο:

$$U_{\alpha} = \sqrt{\alpha \cdot \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma_0}} \quad (2.1.4-1)$$

όπου α : σταθερά του υλικού και εξαρτάται από τη μορφή της τάσης

($\alpha=2,83$ για συνεχή τάση και $\alpha=1,88$ για εναλλασσόμενη τάση).

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

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

2.1.5. ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

Με βάση τα αναφερόμενα στην παράγραφο 2.1, οι παράγοντες γήρανσης και διάτρησης συνδυάζονται στην πράξη με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού. Πιο αναλυτικά έχουμε:

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

Όπως είναι γνωστό, οι διεθνείς προδιαγραφές προσδιορίζουν τα ανώτερα όρια υπερθέρμανσης των ηλεκτρολογικών κατασκευών υψηλής τάσης, βάσει των οποίων καθορίζεται το ονομαστικό ρεύμα (δοκιμή υπερθέρμανσης ή ανύψωση θερμοκρασίας). Έτσι, έχει γίνει αποδεκτό κάποιο όριο θέρμανσης, που είναι π.χ. της τάξης των $40-50^{\circ}\text{C}$ στο λάδι, λόγω του οποίου, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η οριακή θερμοκρασία λειτουργίας να είναι της τάξης των $80-90^{\circ}\text{C}$. Όταν, όμως, συντρέχουν

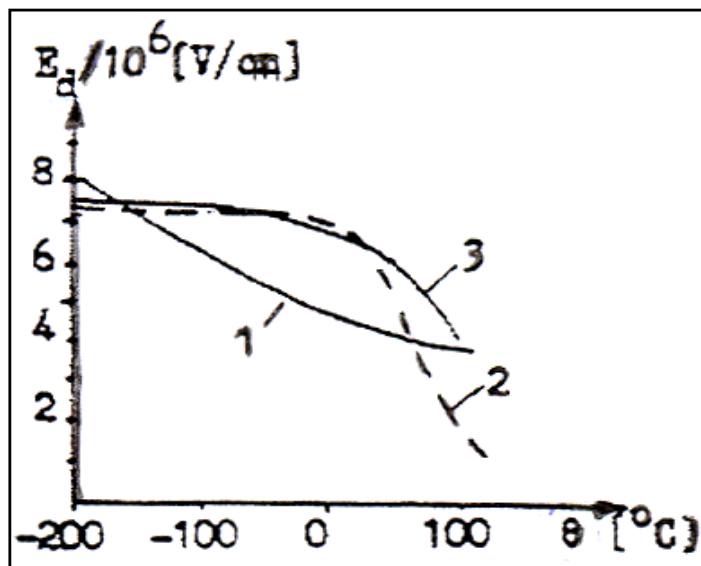
λόγοι μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής από άλλους παράγοντες, η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως το ρόλο τους, διότι :

- ✓ Αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα (ισχύει $\sigma = \sigma_o \cdot e^{-W/kT} = \sigma_o \cdot e^{\beta\theta}$).
- ✓ Διευκολύνεται η εξάσκηση δυνάμεων Coulomb, γιατί οι δεσμοί στο πλέγμα των μορίων των πολυμερών υλικών γίνονται ασθενέστεροι.
- ✓ Ενισχύεται ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων, λόγω μεγαλύτερης ευκινησίας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κυρίως στις φυσαλίδες αερίου (ισχύει

$$\sigma = \sigma_o \cdot \frac{e^{\beta\theta}}{(1 - \delta \cdot E)^2}.$$

Έτσι, αυξάνει διαχρονικά η $tg\delta$ και μειώνεται η διάρκεια ζωής του στερεού μονωτικού και των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών γενικότερα. Η καταπόνηση, που υφίσταται το στερεό μονωτικό, ανάλογα με τη θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου του, φαίνεται ότι προκαλεί μείωση της τάσης για τη θερμική διάτρηση, λόγω αύξησης της αγωγιμότητάς του (σχήμα 2.1.1.2). Επίσης, με την παραδοχή ότι στα στερεά μονωτικά εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις κατά την δένδροειδή ή την ηλεκτρομηχανική διάτρηση (§2.1.2), μπορούμε να υποθέσουμε ότι ισχύει μια αντίστοιχη σχέση προς αυτή των αερίων, σύμφωνα με την οποία η αύξηση της θερμοκρασίας σημαίνει μείωση του μέσου ελεύθερου μήκους (λ) των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), δηλαδή της απόστασης που δυνάμουν μέχρι την επόμενη κρούση. Γι' αυτό, η αύξηση της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου φαίνεται ότι προκαλεί μείωση και της τιμής της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση.

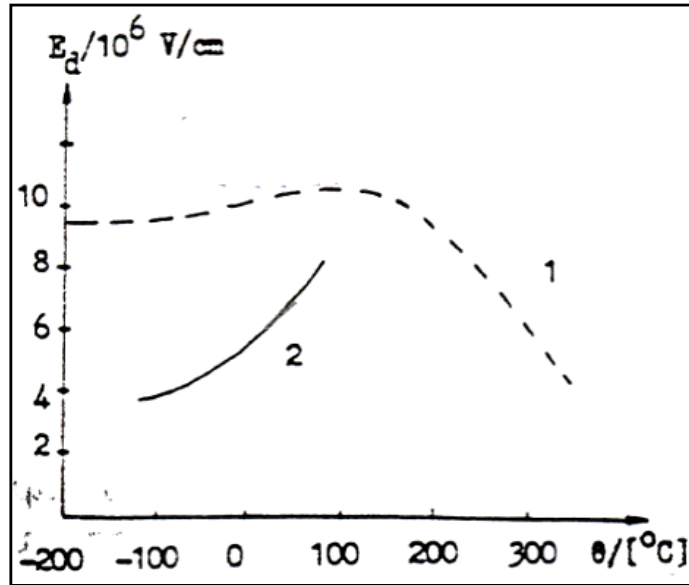
Στο σχήμα 2.1.5.1 δίνονται παραδείγματα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής διαφόρων μονωτικών υλικών, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, η οποία μπορεί να ερμηνευτεί από τον παραπάνω συνδυασμό της επίδρασης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος με τους υπόλοιπους παράγοντες γήρανσης και διάσπασης.



Σχήμα 2.1.5.1: Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στερεών μονωτικών κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου.

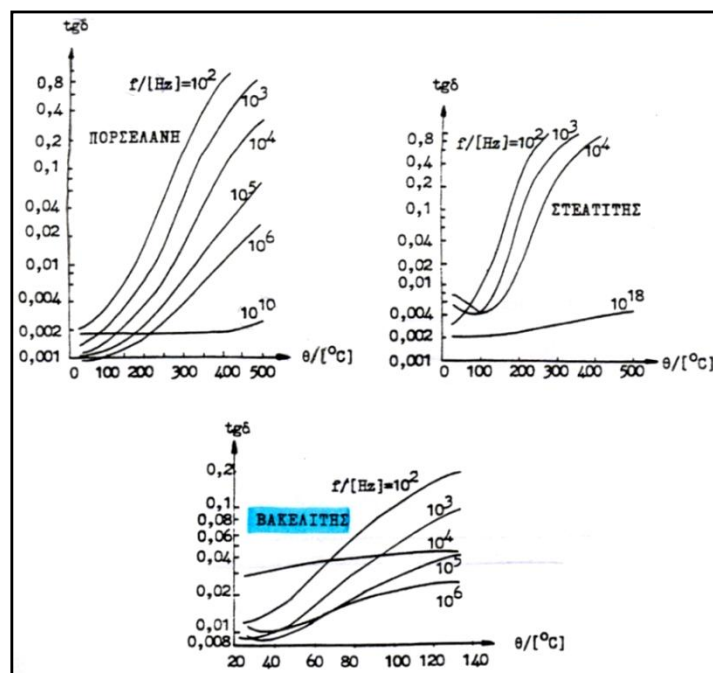
- 1 : Βακελίτης,
- 2 : Πολυαιθυλένιο,
- 3 : Πολυστετυρόλη

Υπάρχουν, όμως, περιπτώσεις στερεών μονωτικών υλικών που η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος δεν οδηγεί σε μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, τουλάχιστον σε κάποια περιοχή τους (βλ. Σχ. 2.1.5.2) λόγω της αλληλοεξουδετέρωσης των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Αποτέλεσμα της παραπάνω εξουδετέρωσης, φαίνεται ότι είναι η μείωση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας, και κατά συνέπεια, η αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής. Στη μίκα παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό μεταξύ -200 έως 100°C , ενώ στο χαλαζία εκδηλώνεται μόνο αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής για τις θερμοκρασίες που δίνονται στο σχήμα.



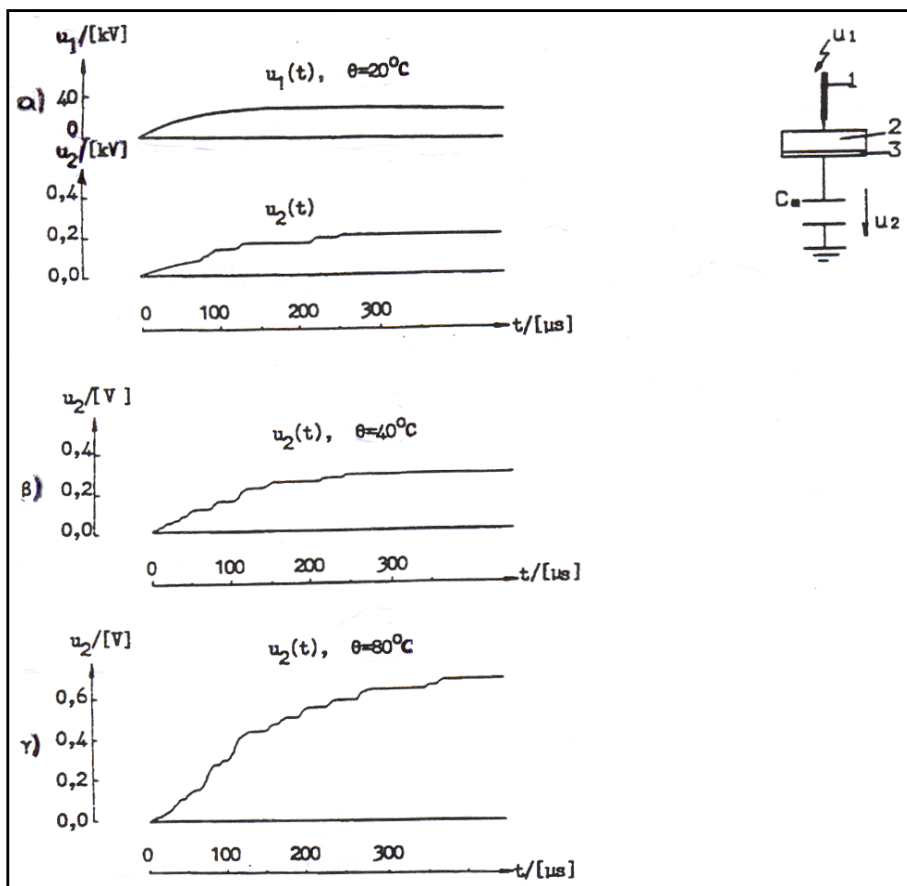
Σχήμα 2.1.5.2: Διηλεκτρική αντοχή της μίκας (1) και του κρυστάλλου χαλαζία (2) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι χαρακτηριστικές $\text{tg}\delta=f(\theta)$ διαφόρων στερεών μονωτικών (Σχ. 2.1.5.3), κατά τη βιβλιογραφία, δείχνουν επίσης την αύξηση των συνολικών απωλειών με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, λόγω των οποίων μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή. Η μείωση των απωλειών που παρατηρείται σε κάποια περιοχή ορισμένων χαρακτηριστικών του σχήματος 2.1.5.3, κατά την αύξηση της θερμοκρασίας και της συχνότητας, μπορεί ίσως να αποδοθεί σε επανασύνδεση των παραγόμενων φορέων.



Σχήμα 2.1.5.3: $\text{tg}\delta=f(\theta)$ σε διάφορα στερεά μονωτικά.

Πρόσφατες μετρήσεις με κρουστικές τάσεις σε στερεά μονωτικά, κατά την καταπόνησή τους σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (20°C, 40°C και 80°C), οδηγούν επίσης στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας (και επομένως η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής) είναι δεδομένη, όσο αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτό φαίνεται πολύ παραστατικά στα παλμογραφήματα του σχήματος 2.1.5.4, όπου οι μερικές εκκενώσεις γίνονται ισχυρότερες, όταν αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.1.5.4: Αύξηση των μερικών εκκενώσεων λόγω μεγαλύτερης θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσω α) $\theta=20^{\circ}\text{C}$, β) $\theta=40^{\circ}\text{C}$, γ) $\theta=80^{\circ}\text{C}$.

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

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

3: Ηλεκτρόδιο πλάκα (διαμέτρου 150mm).

Μορφή της κρουστικής τάσης: 250/2500μs.

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

u_1 : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης.

u_2 : άλματα δυναμικού σ' ένα πυκνωτή μέτρησης.

$C_m=1000\text{nF}$ σε σειρά με τα δοκίμιο (συγκρίνατε με τη διάσπαση των θέσεων διαταραχής κατά το σχήμα 2.1.3.4 ή 2.1.3.5).

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

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

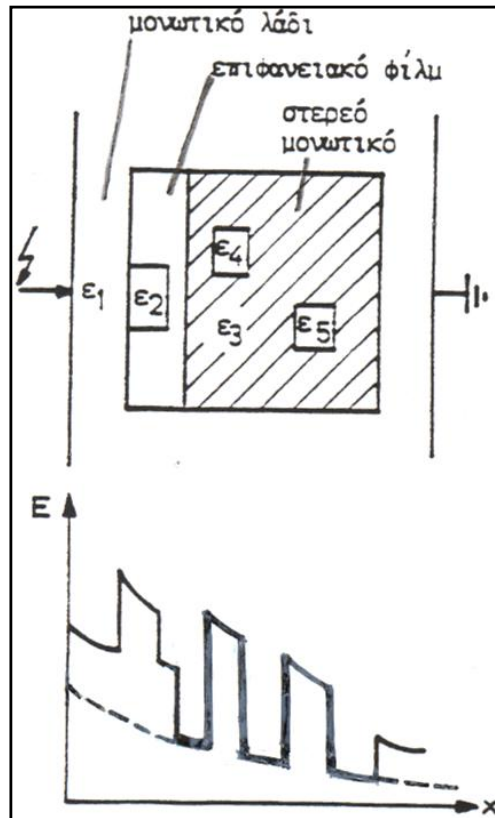
α) Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule:

Στην παράγραφο 2.1.1 θεωρήθηκε ότι η θερμική διάτρηση αρχίζει σε μια θέση του μονωτικού υλικού, όπου αρχικά, λόγω κάποιας ανομοιογένειας, υπάρχει η αιτία για τοπική αύξηση της αγωγιμότητας. Για να μελετηθεί ειδικά η θερμική διάτρηση, δεν λήφθηκε υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις, που εμφανίζονται λόγω της μικρότερης διηλεκτρικής αντοχής, στην ανομοιογένεια του υλικού.

Προς κατανόηση της συμμετοχής των θέσεων διαταραχής, στον όγκο και στην επιφάνεια του στερεού μονωτικού, έχει σχεδιαστεί στο σχήμα 2.1.5.5 η χαρακτηριστική $E=f(x)$ του στερεού μονωτικού, όταν αυτό καταλαμβάνει όλο το χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων και δεν έχει ανομοιογένειες στον όγκο του, συγκριτικά με εκείνη του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού με περιβάλλον μέσο το μονωτικό λάδι. Παρατηρούμε ότι στις θέσεις ανομοιογένειας, όπου η αγωγιμότητα είναι αυξημένη έναντι του υπόλοιπου “υγιούς” τμήματος του συνδυασμού των δύο μονωτικών (στερεό μονωτικό – μονωτικό λάδι), η πεδιακή ένταση έχει μεγαλύτερες τιμές από ότι αν δεν υπάρχουν ανομοιογένειες.

Τη συμμετοχή αυτή των ανομοιογενειών στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής μπορεί να λάβει κανείς υπ' όψη σαν να πρόκειται για αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας του υπόλοιπου “υγιούς τμήματος” του μονωτικού από την πεδιακή ένταση

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



Σχήμα 2.1.5.5: Αύξηση της πεδιακής έντασης στις θέσεις ανομοιογενειών του στερεού μονωτικού.

ϵ_1 έως ϵ_5 : διηλεκτρικές σταθερές,

ϵ_1 : Μονωτικό λάδι,

ϵ_2 : Ανομοιογένειες στο επιφανειακό φίλμ ($\epsilon_1 < \epsilon_2$)

ϵ_3 : Στερεό μονωτικό ($\epsilon_3 > \epsilon_1$),

ϵ_4, ϵ_5 : ανομοιογένειες στον όγκο του στερεού μονωτικού ($\epsilon_3 > \epsilon_4$ και $\epsilon_3 > \epsilon_5$),

----: Χαρακτηριστική του στερεού μονωτικού, όταν δεν καταλαμβάνει όλο το χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων και δεν έχει θέσεις διαταραχής στον όγκο του,

___: Χαρακτηριστική με θέσεις διαταραχής και περιβάλλον το μονωτικό λάδι.

Για το ανομοιογενές στερεό μονωτικό έχουμε, κατά τη σχέση (2.1.1-3):

$$\frac{U^2 \cdot \sigma_0 \cdot e^{\beta \cdot \theta} \cdot A}{(1 - \delta \cdot E)^2 \cdot d} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \kappa \cdot d\theta + C_0 \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.1.5-1)$$

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

$$\frac{U_{\theta\epsilon}^2 \cdot \sigma_0 \cdot e^{\beta \cdot \theta} \cdot A}{(1 - \delta \cdot E)^2 \cdot d} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \kappa \cdot d\theta \Rightarrow \theta = \frac{U_{\theta\epsilon}^2 \cdot \sigma_0 \cdot \beta \cdot e^{\beta \cdot \theta} \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \kappa (1 - \delta \cdot E)^2 \cdot d} \quad (2.1.5-2)$$

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

$$1 = \frac{U_{\theta\epsilon}^2 \cdot \sigma_0 \cdot \beta \cdot e^{\beta \cdot \theta} \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \kappa (1 - \delta \cdot E)^2 \cdot d} \quad (2.1.5-3)$$

Από τις σχέσεις (2.1.5-2) και (2.1.5-3) φαίνεται ότι $\beta\theta=1$ και επομένως, η οριακή τιμή της τάσης διάσπασης είναι:

$$U_{\theta\epsilon} = (1 - \delta \cdot E) \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\sigma_0 \cdot \beta \cdot e \cdot r}} \quad (2.1.5-4)$$

Σε συνδυασμό με τη σχέση (2.1.1-8), η μείωση της τάσης για τη θερμική διάτρηση (ΔU_1), λόγω συμμετοχής των μερικών εκκενώσεων είναι:

$$\Delta U_1 = U_{\theta} - U_{\theta\epsilon} = \delta \cdot E \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\sigma_0 \cdot \beta \cdot e \cdot r}} \quad (2.1.5-5)$$

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, που ερμηνεύεται ικανοποιητικά από τις σχέσεις (2.1.5-4) και (2.1.5-5), έχει δοθεί ήδη στο σχήμα 2.1.1.2.

β) η μείωση της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση, λόγω εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων:

Αν πάρει κανείς υπ' όψη στη σχέση (2.1.2-1) την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις στη θέση όπου εκδηλώνεται η μερική εκκένωση, τότε με την παραδοχή ότι η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι πρακτικά μηδενική (βλέπετε §2.1.2) ισχύει:

$$\frac{u^2 \cdot \sigma \cdot A}{(1 - \delta \cdot E)^2 \cdot d} = C_0 \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.1.5-6)$$

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

$$U_{\eta\epsilon} = (1 - \delta \cdot E) \cdot \sqrt{d} \cdot \sqrt{\frac{C_0 \cdot \theta}{\sigma \cdot A \cdot T_{\delta}}} \quad (2.1.5-7)$$

Η τάση διάτρησης μειώνεται δηλαδή κατά την τιμή ΔU_2 :

$$\Delta U_2 = U_n - U_{ne} = \delta \cdot E \cdot \sqrt{d} \cdot \sqrt{\frac{C_0 \cdot \theta}{\sigma \cdot A \cdot T_\delta}} \quad (2.1.5-8)$$

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

Αν πάρει κανείς υπ' όψη στη σχέση (2.1.4-1) την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων, τότε η θερμική τάση ανατροπής U_{xe} (λόγω του συνδυασμού της θερμότητας του περιβάλλοντος με τις μερικές εκκενώσεις) θα είναι:

$$U_{xe} = (1 - \delta \cdot E) \cdot \sqrt{\frac{a \cdot \kappa \cdot \theta}{\sigma_0}} \quad (2.1.5-9)$$

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

$$\Delta U_3 = U_x - U_{xe} = \delta \cdot E \cdot \sqrt{\frac{a \cdot \kappa_\theta \cdot \theta}{\sigma_0}} \quad (2.1.5-10)$$

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

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

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

Το θερμικό φαινόμενο θεωρείται ότι είναι μια τεχνητή γήρανση (§2.1.3-β) μέχρι προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω του οποίου το υλικό απέκτησε σε μία περιοχή του (όπου εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις) την ειδική αγωγιμότητα:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\beta m \theta m} \quad (2.1.5-11)$$

όπου : θ_m η θερμοκρασία και β_m ένας συντελεστής του υλικού. Και τα δύο αυτά μεγέθη εξαρτώνται από την τιμή \hat{U}_k , τη συχνότητα των κρούσεων (χρόνος μεταξύ των διαδοχικών κρούσεων) και τη μορφή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Στην περιοχή, δηλαδή, όπου συμβαίνουν οι μερικές εκκενώσεις, το υλικό άλλαξε, λόγω των χημικών διεργασιών, τις φυσικές του ιδιότητες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής του, ώστε τελικά να πρόκειται για ένα “άλλο” μονωτικό, το οποίο πλέον διασπάται ηλεκτρομηχανικά στην $m^{\text{η}}$ κρούση (όπως στην περίπτωση β, που αναφέρθηκε παραπάνω). Κατά αντιστοιχία, επομένως, προς τη σχέση (2.1.2-1) ισχύει:

$$\frac{u^2 \cdot \sigma_0 \cdot e^{\beta_m \cdot \theta_m} \cdot A}{(1 - \delta \cdot E)^2 \cdot d} = C_m \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.1.5-12)$$

όπου : C_m η θερμοχωρητικότητα, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, η οποία εξαρτάται επίσης από τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν για τις τιμές θ_m και β_m . Έτσι, για τη διάσπαση στην τιμή \hat{U}_k έχουμε (αντίστοιχα προς τη σχέση 2.1.2-2):

$$\hat{U}_k = (1 - \delta \cdot E) \cdot \sqrt{d \frac{C_m \cdot \theta_m}{\sigma \cdot A \cdot T_s}} \quad (2.1.5-13)$$

όπου T_s χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης.

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

$$\Delta u = \delta \cdot E \cdot \sqrt{d \frac{C_m \cdot \theta_m}{\sigma \cdot A \cdot T_s}} \quad (2.1.5-14)$$

Σύμφωνα με την προηγούμενη θεωρία φαίνεται, ότι μέχρι την $m-1$ κρούση, η ενέργεια, που παρέχεται στο στερεό μονωτικό, μετατρέπεται στη θερμότητα που παραμένει στη θέση της προσεχούς διάτρησης και σε εκείνη που μεταδίδεται στο υπόλοιπο υλικό (ανάλογα με τη συχνότητα των κρούσεων). Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι κατά την εφαρμογή της τελευταίας κρούσης (m), η θερμοκρασία στη συγκεκριμένη θέση του υλικού έχει αποκτήσει την κρίσιμη, για τη διάτρηση, τιμή της. Για το μέρος της ενέργειας, επομένως, που παρέχεται επί m φορές στο στερεό μονωτικό, ισχύει:

$$(m-1) \cdot a \cdot \hat{U}_k^2 + \gamma \cdot \hat{U}_k^2 = \sum_{i=1}^{m-1} W_{a_i} + \sum_{i=1}^m \frac{W_{\theta_i}}{(1-\delta \cdot E)^2} + \beta \cdot \hat{U}_k^2 \quad (2.1.5-15)$$

όπου :

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

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

: η θερμότητα, που μεταδίδεται μέχρι προ της εφαρμογής της m_{ης} κρούσης,

: η θερμότητα, που έχει παραμείνει στη συγκεκριμένη θέση προ της διάτρησης, και

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

Επειδή κατά τη διάτρηση είναι:

$$\frac{W_{\theta_m}}{(1-\delta \cdot E)^2} + \beta \cdot \hat{U}_k^2 = \gamma \cdot \hat{U}_k^2 \quad (2.1.5-16)$$

από τη σχέση (2.1.5-15), έπεται ότι:

$$(m-1) \cdot a \cdot \hat{U}_k^2 = \sum_{i=1}^{m-1} W_{a_i} + \sum_{i=1}^{m-1} \frac{W_{\theta_i}}{(1-\delta \cdot E)^2} \Rightarrow$$

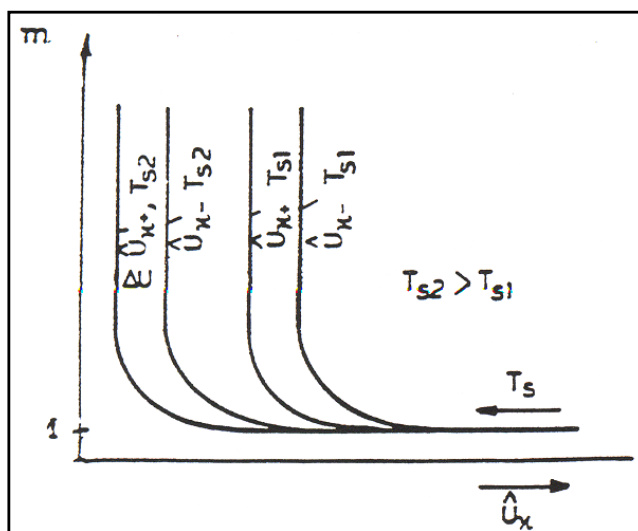
$$m = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{m-1} W_{a_i}}{a \cdot \hat{U}_k^2} + \frac{\sum_{i=1}^{m-1} W_{\theta_i}}{(1-\delta \cdot E)^2 \cdot a \cdot \hat{U}_k^2} \quad (2.1.5-17)$$

δηλαδή:

$$m = 1 + \frac{a_1}{\hat{U}_k^2} + \frac{a_2}{\hat{U}_k^2} = 1 + \frac{a_3}{\hat{U}_k^2} \quad (2.1.5-18)$$

όπου a_1 , a_2 , a_3 συντελεστές, που εξαρτώνται από την τιμή \hat{U}_k , τη συχνότητα των κρούσεων, τη μορφή της τάσης και το πάχος του υλικού (το οποίο είναι καθοριστικό για την τιμή της πεδιακής έντασης).

Αν λάβει κανείς υπ' όψη τη σημασία της πολικότητας της ακίδας, όπου η τάση διάσπασης έχει μεγαλύτερη τιμή κατά τη θετική πολικότητα της ακίδας έναντι της αρνητικής, καθώς και τη μείωση του χρόνου διάσπασης με την αύξηση της διάρκειας του μετώπου της κρουστικής τάσης (βλέπετε σχέση 2.1.2-3), τότε οι χαρακτηριστικές $m = f(|\hat{U}_k|, T_s)$ έχουν την μορφή, που δίνεται στο σχήμα 2.1.5.6:



Σχήμα 2.1.5.6: Χαρακτηριστικές $m = f(|\hat{U}_k|, T_s)$,

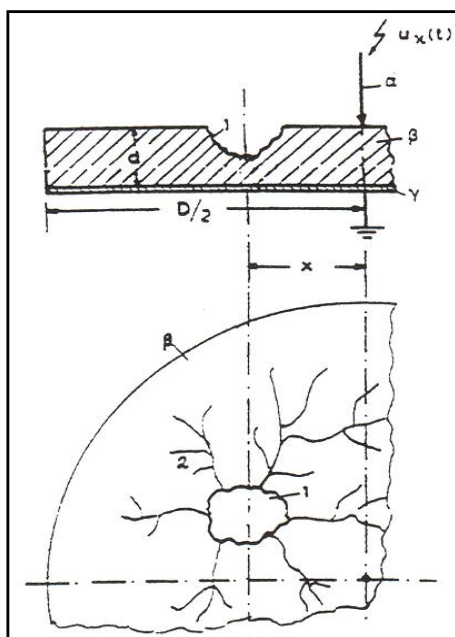
m : Αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση,,

T_s : Χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης,

\hat{U}_k : Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης.

Κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού, που αναλύθηκε προηγουμένως, θεωρήθηκε ότι η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη για τη διάτρηση με μία κρούση. Από πειράματα, που έχουν γίνει με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs και 10/200μs, σε τιμές \hat{U}_k πλησίον της περιοχής διάτρησης (πίνακας 2.1.2.1), έχει διαπιστωθεί ότι εκτός από τη θερμική καταπόνηση, δημιουργούνται μικρά θραύσματα στη θέση προσεχούς διάσπασης. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι στην περίπτωση αυτή συμμετέχουν στην τεχνητή γήρανση του υλικού (από κρούση σε κρούση) και οι δυνάμεις Coulomb. Η εικόνα, που παρουσιάζει το δοκίμιο κατά τη γήρανση, δίνεται στο σχήμα 2.1.5.7 και ονομάζεται εικόνα επιφανειακών διαταραχών. Πρόκειται για μία μόνιμη παραμόρφωση του υλικού, η οποία σχετίζεται με την εκδήλωση φωτεινής ακτινοβολίας (υπό μορφή δενδρίτη), που παρατηρεί κανείς κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Τα σπήλαια και ο κρατήρας έχουν αποδοθεί στην θερμική καταπόνηση του μονωτικού, γιατί φαίνεται ότι είναι αποτέλεσμα κάποιας τήξης του υλικού στα ίχνη του

επιφανειακού δένδριτη. Τα θραύσματα, που προαναφέρθηκαν, δημιουργούνται κυρίως στην περιοχή του κρατήρα, η οποία είναι και η θέση, όπου θα συμβεί η διάτρηση. Πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχουν δείξει ότι η εικόνα επιφανειακών διαταραχών συρρικνώνεται, όσο αυξάνει η διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης (υπό σταθερή τιμή \dot{U}_k η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών είναι π.χ. μεγαλύτερη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50\mu s$, ως προς εκείνη με κρουστική τάση $10/200\mu s$. Έχει επίσης διαπιστωθεί, ότι η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών περιορίζεται, όσο μειώνεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης της διάταξη των ηλεκτροδίων.

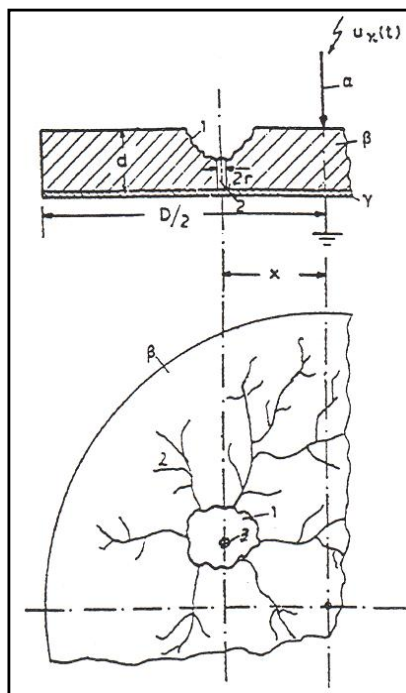


Σχήμα 2.1.5.7: Παράδειγμα εικόνας επιφανειακών διαταραχών κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50\mu s$, για τιμή \dot{U}_k πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση.

α : ακίδα ($R \approx 1mm$), β : στερεό μονωτικό, γ : πλάκα ,

1 : κρατήρας, 2 : σπήλαια

Όταν τελικά συμβεί η διάτρηση μετά από m κρούσεις, τότε παρατηρεί κανείς μία μικρή τρύπα διάτρησης (με διάμετρο μικρότερη από $0,1mm$), ως προέκταση του κρατήρα (Σχ. 2.1.5.8).

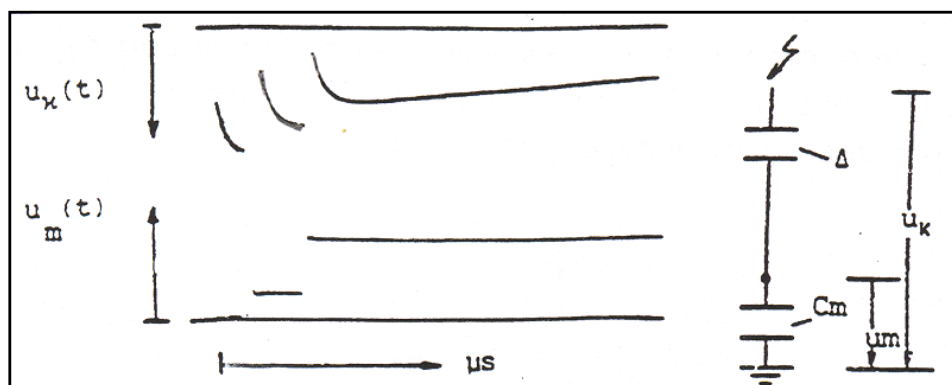


Σχήμα 2.1.5.8: Παράδειγμα της εικόνας διάτρησης μετά από την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$, για τιμή \dot{U}_k πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση.

α : ακίδα ($R \approx 1\text{mm}$), β : στερεό μονωτικό, γ : πλάκα,

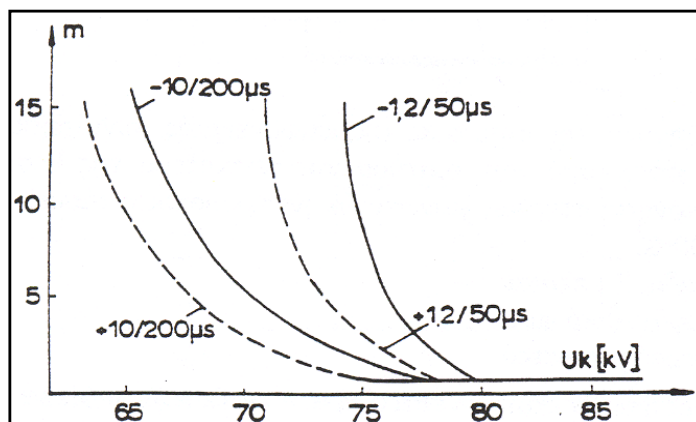
1 : κρατήρας, 2: σπήλαια, 3: σπή διάτρησης.

Στο σχήμα 2.1.5.9 δίνεται ένα παράδειγμα διάτρησης του βακελίτη (πάχος 1mm) σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό διάταξη “ακίδα-πλάκα”, κατά την καταπόνησή του με κρουστική τάση της μορφής $10/200\mu\text{s}$, με μέγιστη τιμή πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση (πίνακας 2.1.2.1). Παρατηρεί κανείς ότι το παλμογράφημα αυτό είναι της ίδιας μορφής με εκείνο της ηλεκτρομηχανικής διάτρησης του σχήματος 2.1.3.7-β.



Σχήμα 2.1.5.9: Διάτρηση του βακελίτη (πάχους 1mm) με κρουστική τάση της μορφής $10/200\mu\text{s}$. $\dot{U}_k = 72\text{kV}$.

Επίσης, οι πειραματικές χαρακτηριστικές του σχήματος 2.1.5.10 (για το στερεό μονωτικό pertinax πάχους 1mm) εξηγούνται ικανοποιητικά από τις θεωρητικές του σχήματος 2.1.5.6:



Σχήμα 2.1.5.10: $m=f(|\hat{U}_k|, T_s)$ για το μονωτικό pertinax.

Ηλεκτρόδια: ακίδα – πλάκα.

Δοκίμιο: pertinax πάχους 1mm εντός μονωτικού ελαίου.

m : αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση.

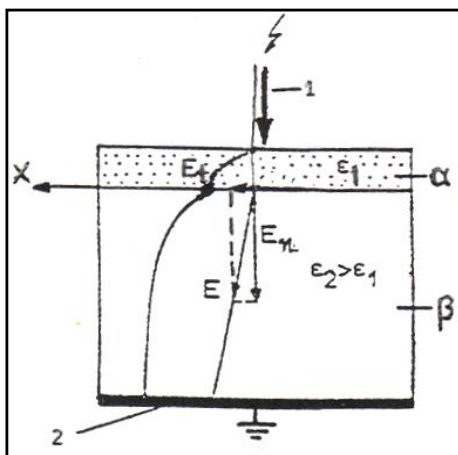
+ : θετική πολικότητα της ακίδας.

- : αρνητική πολικότητα της ακίδας.

Όπως φαίνεται στα σχήματα 2.1.5.7 και 2.1.5.8, ο κρατήρας και η τρύπα διάτρησης σχηματίζονται σε μία απόσταση x από την ακίδα (συνήθως μερικά mm), αν και η μέγιστη τιμή του πεδίου είναι στην κορυφή της ακίδας. Η ίδια παρατήρηση ισχύει για την τρύπα διάτρησης, όταν η διάτρηση συμβαίνει μόνο με μία κρούση. Αυτό φαίνεται ότι οφείλεται:

α) στην στατιστικότητα του φαινομένου (είναι στατιστικά αδύνατο να βρísκεται ακριβώς κάτω από την ακίδα η επικρατέστερη θέση διαταραχής) και

β) σε πολύ μικρή απόσταση από την ακίδα μετακινούνται, υπό την επίδραση της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης, οι ετερώνυμοι προς αυτήν ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς του επιφανειακού φιλμ, με αποτέλεσμα να δημιουργείται, πρακτικά, επέκταση του ίχνους της ακίδας (σχήμα 2.1.5.11).



Σχήμα 2.1.5.11 : Επεξήγηση της σημασίας της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης στον καθορισμό του κρατήρα και γενικότερα της θέσης διάτρησης, κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs και 10/200μs.

1 : ακίδα, 2: πλάκα.

α) επιφανειακό φιλμ.

β) στερεό μονωτικό.

• : θέση όπου εκδηλώνεται ο κρατήρας και γενικότερα η διάτρηση.

Η παραπάνω παρατήρηση για τη θέση της τρύπας διάτρησης ισχύει, επίσης, κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή κρουστικής τάσης 250/2500μs), καθώς και εκείνη με εναλλασσόμενη ή συνεχή τάση. Από έρευνες, που έχουν γίνει με τις παραπάνω μορφές τάσης (με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm ή 1mm), δεν έχει διαπιστωθεί κατά την τεχνητή γήρανση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm ή 2mm) η εκδήλωση κρατήρα ή σπηλαίων, ούτε έχει παρατηρηθεί η εκδήλωση επιφανειακού δένδριτη (ανεξαρτήτως της τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης). Η διαφορά αυτή, ως προς την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών που παρουσιάζεται κατά την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs και 10/200μs, είναι μία σημαντική παρατήρηση, που έχει οδηγήσει (σε συνδυασμό με μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών) στο διαχωρισμό μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης, στο στερεό μονωτικό, τάσης. Το θέμα αυτό εξετάζεται αναλυτικά στην παράγραφο 2.1.6.

iii) Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης:

Το αποτέλεσμα του συνδυασμού των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb, μερικές εκκενώσεις και θερμότητα του περιβάλλοντος) εξαρτάται από το πώς αυτοί εκδηλώνονται διαχρονικά. Αν θεωρηθεί π.χ., ότι πρόκειται για γήρανση του υλικού, τότε η καταπόνηση είναι κυρίως θερμική, οπότε από τις σχέσεις (2.1.1-3) και (1-5) έχουμε:

$$\frac{u^2 \cdot A \cdot e^{\beta\theta}}{d \cdot (1 - \delta \cdot E)^2} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \delta \cdot \kappa + C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (2.1.5-19)$$

όπου u : η στιγμιαία τιμή της τάσης για τη διάτρηση,

θ : η διαφορά θερμοκρασίας ως προς το περιβάλλον.

Από την παραπάνω σχέση και την σχέση (2.1.1-8), ο χρόνος διάτρησης είναι:

$$t = \frac{C_0 \cdot \beta}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa} \int \frac{d\theta}{\left(\frac{U}{U_0}\right)^2 \cdot e^{\beta\theta} - \beta \cdot \theta} \quad (2.1.5-20)$$

Αν θεωρηθεί, ότι λόγω προηγούμενης γήρανσης, συμβαίνει τελικά η διάτρηση για $U > U_0$

(ηλεκτρική διάτρηση) και τότε: $\beta \cdot \theta \ll \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 \cdot e^{\beta\theta} - 1$, τότε από τη σχέση (2.1.5-20) έχουμε:

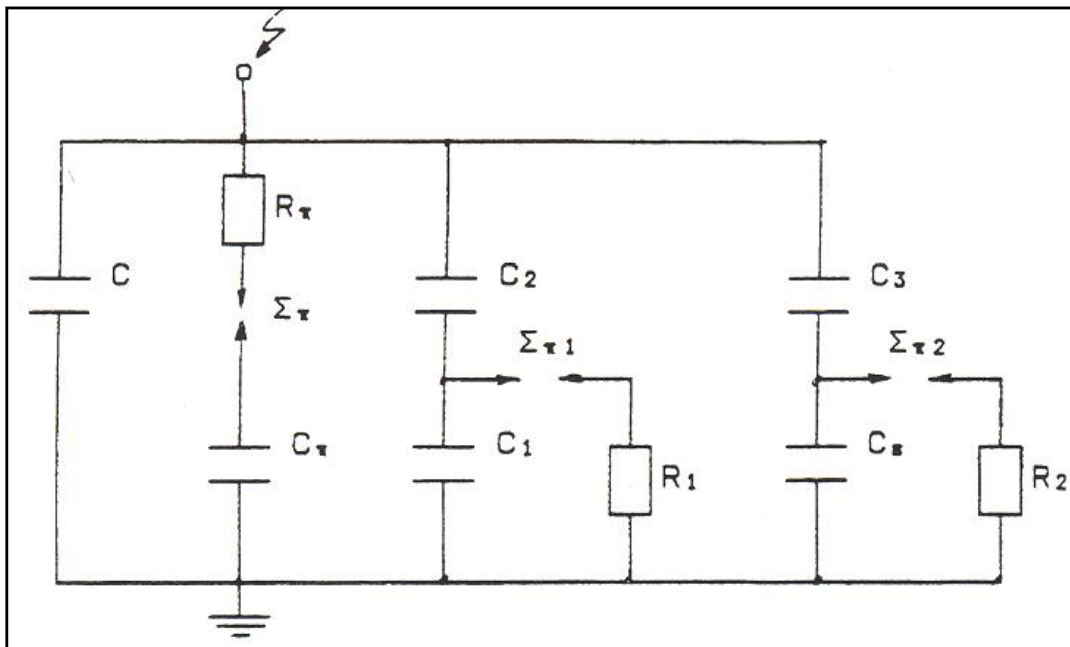
$$t \approx \frac{C_0 \cdot e}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \beta} \left(\frac{U_0}{U}\right)^2 \approx \frac{\alpha}{U^2} \quad (2.1.5-21)$$

όπου α : ένας συντελεστής του υλικού.

Η παραπάνω σχέση δίνει μια πιθανή ερμηνεία για τη διάτρηση των στερεών μονωτικών, σε καταπονήσεις μικρής χρονικής διάρκειας. Πράγματι, η σχέση (2.1.5-9) για τη διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων (βλ. χαρακτηριστικές των σχημάτων 2.1.5.6 και 2.1.5.10 φαίνεται ότι εναρμονίζεται με τη σχέση (2.1.5-21), γιατί ο αριθμός των κρούσεων (m) σχετίζεται με τον χρόνο καταπόνησης.

Από πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχει προταθεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που αποδίδει ικανοποιητικά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση και τις μερικές εκκενώσεις (Σχ. 2.1.5.12). Όπως φαίνεται, πρόκειται ουσιαστικά για μια παράλληλη σύνδεση ενός πυκνωτή C_{π} , προς το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff. Ο πυκνωτής αυτός εκφράζει την πόλωση του υλικού, λόγω της οποίας συμβαίνει η μηχανική τάυσή του από

τις δυνάμεις του πεδίου. Η διαδρομή εκκένωσης εκφράζεται στην περίπτωση αυτή με τον σπινθηριστή $\Sigma\pi$ και την αντίσταση του τόξου R_{π} (υποτίθεται ότι ο $\Sigma\pi$ διασπάται ταυτόχρονα με τον πυκνωτή C_{π}).



Σχήμα 2.1.5.12: Βελτίωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff, ώστε να αποδίδεται από αυτό η γήρανση και η ηλεκτρομηχανική διάτρηση.

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

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

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

C_{ϵ} : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών.

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

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

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

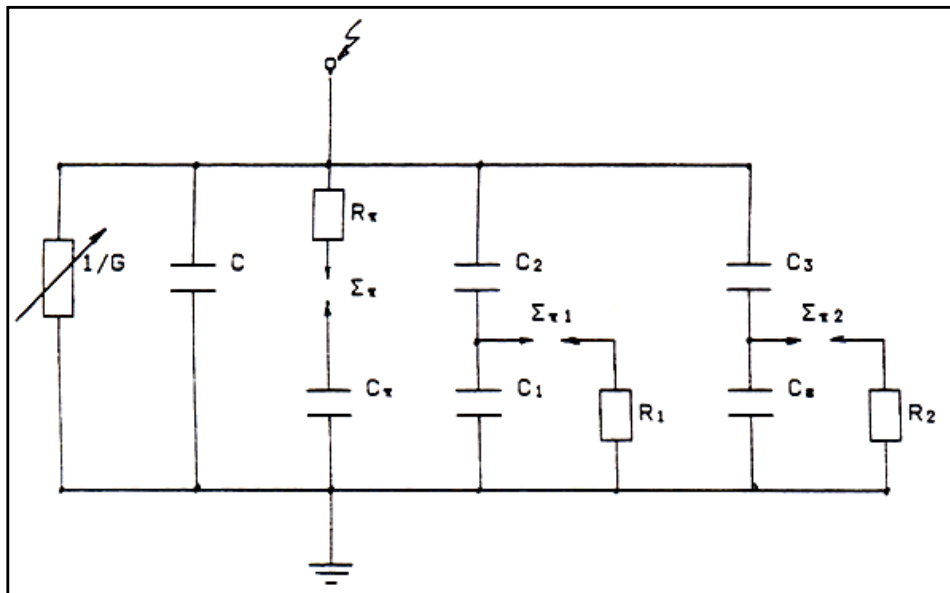
R_2 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_2$.

R_{π} , $\Sigma\pi$: Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του C_{π} ,

(R_{π} : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi$).

Για να αποδίδει το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα το συνδυασμό όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης (κατά τη μακροσκοπική θεωρία), φαίνεται ότι θα πρέπει να γίνει

η παράλληλη σύνδεση μιας μεταβλητής αγωγιμότητας, που θα εκφράζει τις θερμικές απώλειες (απώλειες Joule και ενίσχυσή τους από τις μερικές εκκενώσεις) και την καταπόνηση του υλικού από τη θερμότητα του περιβάλλοντος (Σχ. 2.1.5.13).



Σχήμα 2.1.5.13: Ένα ισοδύναμο κυκλώματος συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

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

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

$C_ε$: Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών.

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

$C_π$: Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου.

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

R_2 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_2$.

$R_π, \Sigma\pi$: Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του $C_π$ ($R_π$: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi$).

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

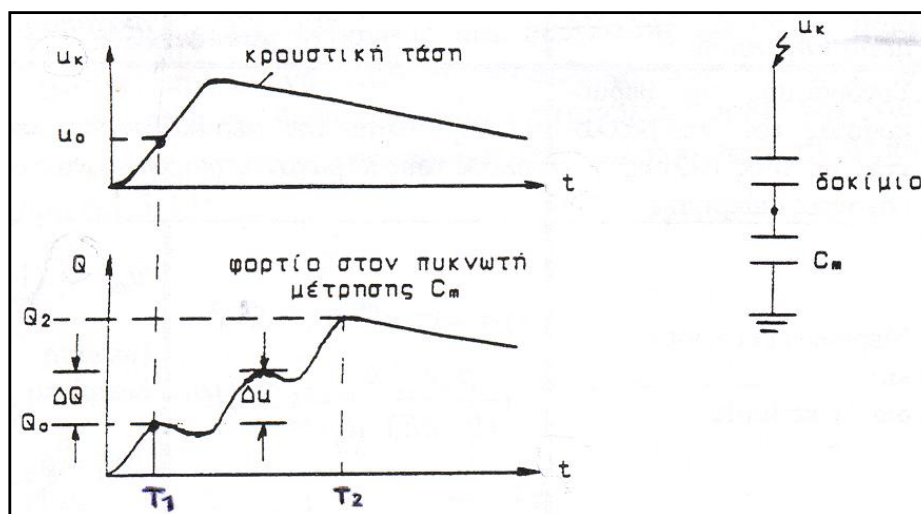
Στον πίνακα 2.1.5.1 δίνονται συνοπτικά οι βασικές περιπτώσεις συνδυασμού των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης, που εξετάστηκαν στην παράγραφο αυτή. Οι θεωρητικές σχέσεις του πίνακα 2.1.5.1 δε δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού της τάσης διάτρησης (γιατί περιλαμβάνουν αρκετές άγνωστες τιμές, που πρέπει να βρεθούν με μετρήσεις), δίνουν όμως τη δυνατότητα κατανόησης των φαινομένων, όταν οι μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών συνδυάζονται με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής.

Πίνακας 2.1.5.1: Βασικές αρχές μιας θεωρητικής ερμηνείας για τη γήρανση και τη διάτρηση των στερεών μονωτικών (* : μερικές εκκενώσεις, απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμοκρασία περιβάλλοντος).

α/α	Παράγοντες που συμμετέχουν στην αλλαγή της μοριακής δομής	Θεμελιώδεις σχέσεις	Οριακή τιμή της τάσης για τη διάτρηση
1	Συνδυασμός της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος με τους άλλους παράγοντες διάτρησης	Η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως όλους τους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.	
2	Μερικές εκκενώσεις και απώλειες Joule	1) $\sigma = \sigma_0 e^{\beta\theta} / (1 - \delta E)^2$ 2) $\frac{\sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1 - \delta E)^2 d} = \kappa 2\pi d\theta$	$u_{\theta\epsilon} = d(1 - \delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0}}$ (μείωση της τάσης για τη διάτρηση : $\Delta u_1 = u_\theta - u_{\theta\epsilon} = \delta E d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0}})$
3	Μερικές εκκενώσεις και δυνάμεις Coulomb	1) $\sigma = \sigma_0 e^{\beta\theta} / (1 - \delta E)^2$ 2) $\frac{u^2 \sigma A}{(1 - \delta E)^2 d} = C_0 \frac{d\theta}{dt}$	$U_{\eta\epsilon} = (1 - \delta E) \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_\delta}}$ (μείωση της τάσης για τη διάτρηση : $\Delta u_3 = \delta E \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_\delta}})$
4	Μερικές εκκενώσεις και θερμοκρασία περιβάλλοντος	1) $u_a = \sqrt{a \frac{\kappa\theta}{\sigma}}$ 2) $\sigma = \sigma_0 e^{\beta\theta} / (1 - \delta E)^2$	$U_{a\epsilon} = (1 - \delta E) \sqrt{a \frac{\kappa\theta}{\sigma_0}}$ (μείωση της τάσης για τη διάτρηση : $\Delta u_4 = u_a - u_{a\epsilon} = \delta E \sqrt{\frac{\kappa\theta}{\sigma_0}})$
5	Συνδυασμός των τεσσάρων* βασικών παραγόντων διάτρησης	$u^2 \frac{A}{d} \frac{e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2} =$ $= 2\pi r d \kappa \theta + C_0 \frac{d\theta}{dt}$	Εξαρτάται από τον παράγοντα που υπερिशχύει κατά τη διάτρηση

2.1.6. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων των κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως π.χ. στο σχήμα 2.1.6.1 για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελώντας τμήμα της πειραματικής έρευνας των μερικών εκκενώσεων, υλοποιήθηκε με βάση μετρήσεις των προτεινόμενων εννοιών για επιβολή κρουστικής τάσης χειρισμών.



Σχήμα 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.

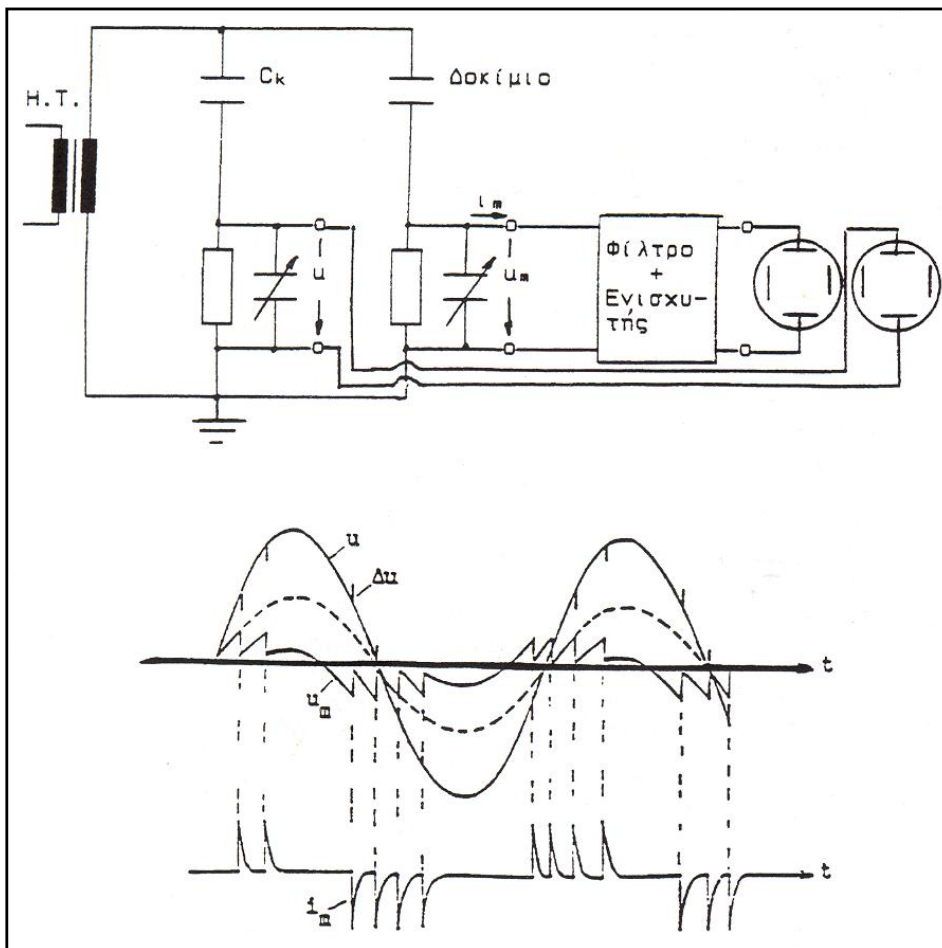
u_k : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

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

Δu : Άλμα δυναμικού.

ΔQ : Αύξηση φορτίου.

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, Σχ. 2.1.6.2.).



Σχήμα 2.1.6.2: Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω “ωμικού-χωρητικού” τετραπόλου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50Hz.

H.T.: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

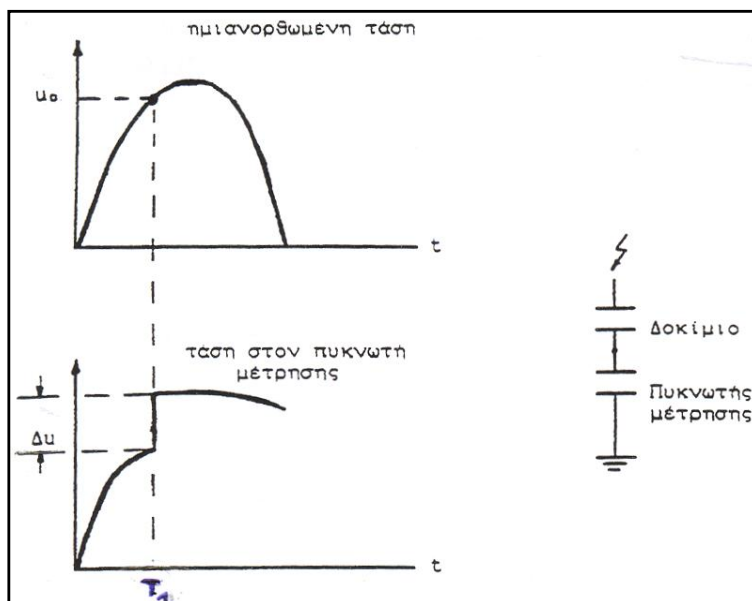
U : Στιγμιαία τιμή της εναλλασσόμενης τάσης (η οποία μετράται σ’ ένα ωμικό-χωρητικό τετράπολο).

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.

Στο σχήμα π.χ. 2.1.6.3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



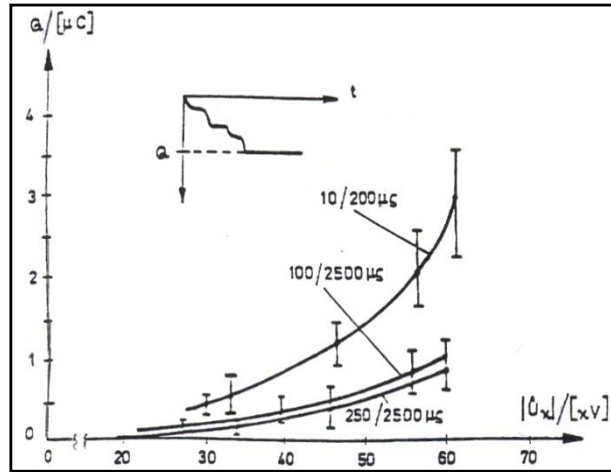
Σχήμα 2.1.6.3: Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

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 $Q=f(|\dot{U}_k|)$, η χαρακτηριστική $u_0=f(|\dot{U}_k|)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με τη μέγιστη τιμή της τάσης, κλπ. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q=f(|\dot{U}_k|)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (Σχ. 2.1.6.4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs ή 10/200μs (§2.1.5,δ), όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων.



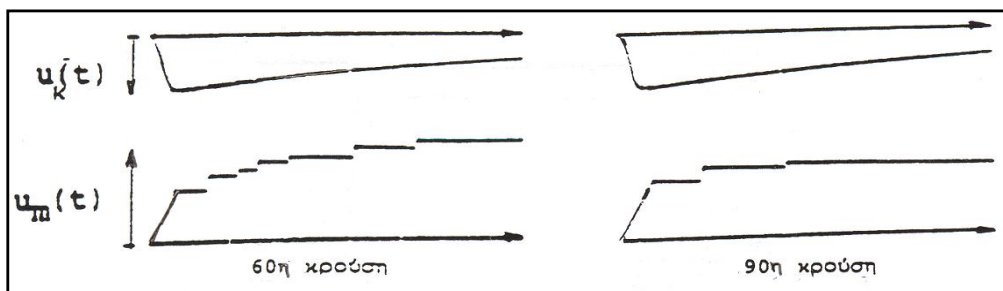
Σχήμα 2.1.6.4: Χαρακτηριστική $Q_2 = f(|\dot{U}_\kappa|)$ για τον βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.

$C_m = 1000nF$.

Στο σχήμα 2.1.6.5 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, απ' 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 2.1.6.5: Άλμα δυναμικού κατά την 60^η και την 90^η κρούση στο pertinax (πάχους 2mm).

Μορφή τάσης : 1,2/50μs ($\dot{U}_\kappa = 99,7kV$).

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.

$C_m = 210nF$.

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

- ✓ *οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή μηδενισμού της τάσης ή γενικότερα στην περιοχή της μέγιστης χρονικής μεταβολής της,*
- ✓ *οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή, όπου δε μηδενίζεται η τάση.*

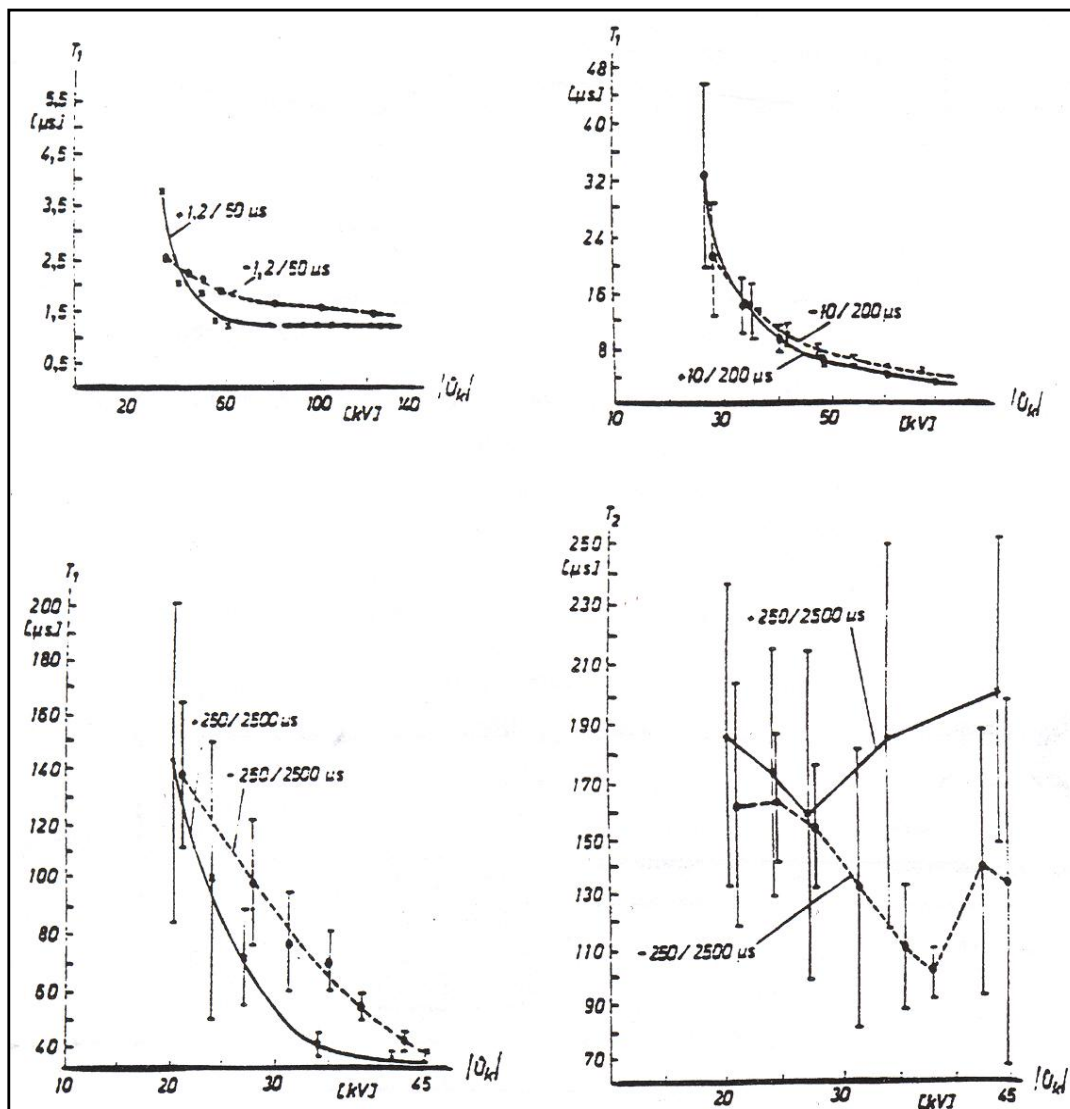
Τα παραπάνω σημαίνουν π.χ. για καταπονήσεις με κρουστικές τάσεις, ότι: οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης, ενώ οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις κατά τη διάρκεια της ουράς της κρουστικής τάσης.

Μία πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού, μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, έχει δοθεί από παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού σε στερεά οργανικά μονωτικά, με κρουστικές τάσεις διάφορων μορφών (σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα), που συνδυάστηκαν με ταυτόχρονες οπτικές παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών κατά το σχήμα 2.1.5.7. Στον πίνακα 2.1.6.1 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 $1,2/50\mu s$) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

Πίνακας 2.1.6.1: Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

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 1,2/50μs)	στην ουρά και στο μέτωπο	εξωτερικές και εσωτερικές μερικές εκκενώσεις
250/2500	ΟΧΙ	ΟΧΙ	στο μέτωπο	εσωτερικές μερικές εκκενώσεις

Μια άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, ως προς το χρόνο εκδήλωσής τους (υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης), έχει βασιστεί σε χαρακτηριστικές $T_1=f(|\hat{U}_k|)$ και $T_2=f(|\hat{U}_k|)$ (Σχ. 2.1.6.6) σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο χρόνος έναρξης (T_1) των μερικών εκκενώσεων (στα μονωτικά υλικά και το είδος της καταπόνησης που προαναφέρθηκαν), καθώς και ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (T_2), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs, ώστε σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις του πίνακα 2.1.6.1 για την εικόνα των επιφανειακών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.



Σχήμα 2.1.6.6: 1) Χαρακτηριστική $T_1 = f(|\dot{I}_k|)$ κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2mm και $\epsilon_r \approx 2,5-4,5$) με κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs , 10/200 μs και 250/2500 μs .

2) Χαρακτηριστική $T_2 = f(|\dot{I}_k|)$ κατά την καταπόνηση των υλικών αυτών με κρουστικές τάσεις 250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.

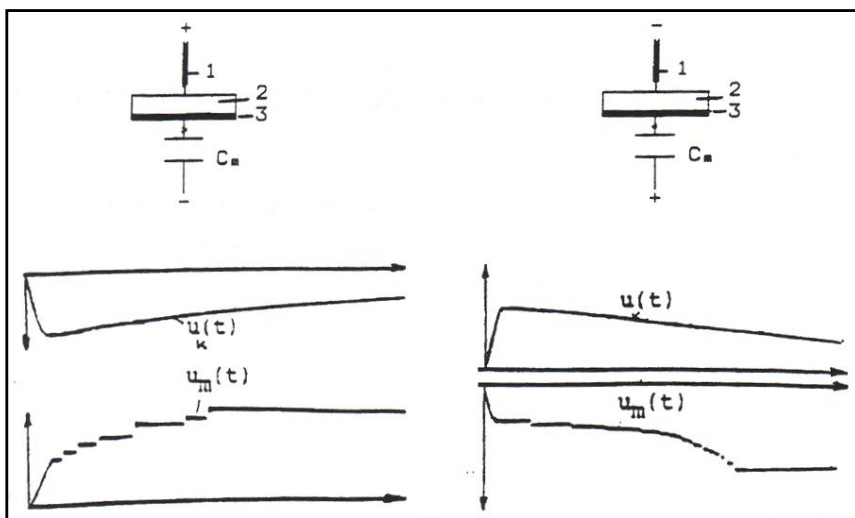
I : 2 φορές η τυπική απόκλιση.

2.1.7. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΣΤΕΡΕΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ

Η τιμή της τάσης για τη διάσπαση εξαρτάται από την πολικότητα της ακίδας, μπροστά στην οποία συγκεντρώνονται ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς αντίθετης πολικότητας. Οι θετικοί φορείς είναι πιο δυσκίνητοι, εξουδετερώνονται δυσκολότερα, οπότε παρουσιάζεται μικρότερη αρχική τιμή πεδίου και απαιτείται μεγαλύτερη τάση για τη διάσπαση στην περίπτωση της αρνητικής απ' ότι της θετικής ακίδας.

Από τη μέση καμπύλη των χαρακτηριστικών του σχήματος 2.1.6.6, γίνεται φανερό η εκδήλωση του φαινομένου της πολικότητας, όπως και κατά τη διάρρηξη (βλέπετε πίνακα 2.1.2.1). Οι επικαλύψεις τιμών, που παρατηρούνται, μπορούν να αποδοθούν στη διαφορετική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο (τα οργανικά στερεά μονωτικά είναι ανομοιογενή και δεν είναι δυνατόν να υπάρχει συμμετρική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο).

Πάντως, το φαινόμενο της πολικότητας γίνεται φανερό στα άλματα δυναμικού από την κύρτωση (παρέκκλιση) της $u_m(t)$ προς τον άξονα του χρόνου (σχήμα 2.1.7.1).



Σχήμα 2.1.7.1: Τυπικά παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις μορφής $1,2/50\mu s$.

1: Ηλεκτρόδιο ακίδα, 2: Δοκίμιο, 3: Ηλεκτρόδιο πλάκα

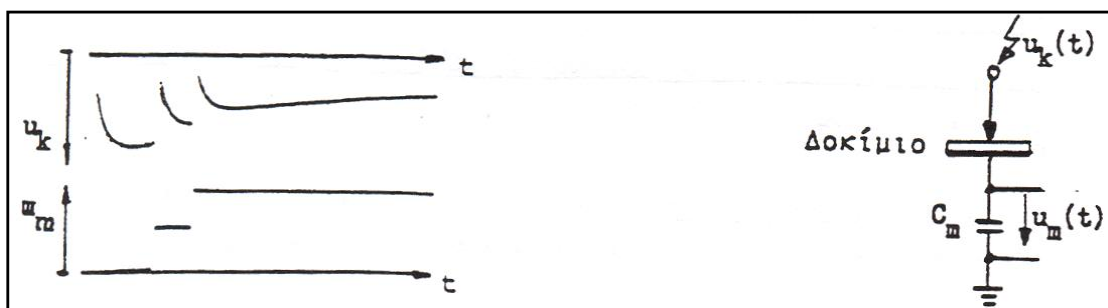
C_m : πυκνωτής μέτρησης.

2.2. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΚΑΙ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗ

Η εκδήλωση των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στη διαχωριστική επιφάνεια του συνδυασμού “στερεό μονωτικό-υγρο μονωτικό”, θα οδηγήσει σε επιφανειακή διάσπαση, όταν μία ομάδα ελεύθερων ηλεκτρονίων (δηλαδή οπτικά μια διαδρομή δενδροειδούς φωτεινής ακτινοβολίας) θα προκαλέσει μείωση της απόστασης μόνωσης, ώστε 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 επιφάνεια σε βάθος μέχρι 30\AA . Έτσι, εκτός από τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις (λόγω ξένων επικαθίσεων), με κυρίαρχο ρόλο στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στην επιφάνεια), μπορεί κανείς να υποθέσει ότι εκδηλώνονται και οι άλλοι παράγοντες όπως κατά τη διάτρηση. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.1.5.12, όπου όμως οι μερικές εκκενώσεις στο επιφανειακό φιλμ (δηλαδή στο συνδυασμό “επιφάνεια του στερεού μέχρι βάθος 30\AA -περιβάλλον μέσο”) είναι συνήθως ο κυρίαρχος παράγοντας για την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση.

Πειραματικές έρευνες σε στερεά μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών με κρουστικές τάσεις, δείχνουν ομοιότητα των παλμογραφημάτων της διάτρησης ως προς εκείνα της επιφανειακής διάσπασης, με τη διαφορά ότι η επιφανειακή διάσπαση εκδηλώνεται στην ουρά της κρουστικής τάσης (συγκρίνατε Σχ. 2.2.1 με τα Σχ. 2.1.3.7 και Σχ. 2.1.5.9). Περισσότερες πληροφορίες για την επιφανειακή διάσπαση δίνονται στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 2.2.1: Τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση 10/200μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. $C_m = 1835\text{nF}$, $\dot{U}_k = 70\text{kV}$.

2.3. ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στα κεφάλαια 2.1 και 2.2, η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών οφείλονται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες (**απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb, μερικές εκκενώσεις και θερμότητα του περιβάλλοντος**). Οι παράγοντες αυτοί δεν περιλαμβάνουν, όμως, στοιχεία για φαινόμενα, που δε μπορεί κανείς να ακούσει ή να παρατηρήσει, όπως:

- ✓ **ο ιονισμός με κρούσεις**, που πιστεύεται ότι εκδηλώνεται στα στερεά μονωτικά, και
- ✓ **το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας** και η συσχέτισή του με φωτεινά φαινόμενα και καταπονήσεις, που παρατηρούνται στο υλικό (θερμικές ή μηχανικές ή και τα δύο: π.χ. κατά τα σχήματα 2.1.5.7 και 2.1.5.8), που θα έδινε περισσότερες πληροφορίες για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής.

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

- στις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις (δηλαδή από παλμογραφήματα όπως εκείνα των σχημάτων: 2.1.3.7, 2.1.5.4, 2.1.5.9, 2.1.6.1 και 2.1.7.1),
- στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (ή το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης (ως στοιχείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε δηλαδή μια αντίσταση, αντί του πυκνωτή μέτρησης: βλέπετε σχήμα 2.3.1.5),
- στην ανίχνευση του μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση),
- στην ικανοποιητική πειραματική και θεωρητική ταύτιση του μηχανισμού παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η **ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων** (κυρίως ηλεκτρόνια). Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την ενέργεια Fermi των ηλεκτρονίων, διευκολύνει στη διεξαγωγή συμπερασμάτων για το μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

Τα βασικότερα συμπεράσματα από τη θεωρία αυτή είναι τα εξής :

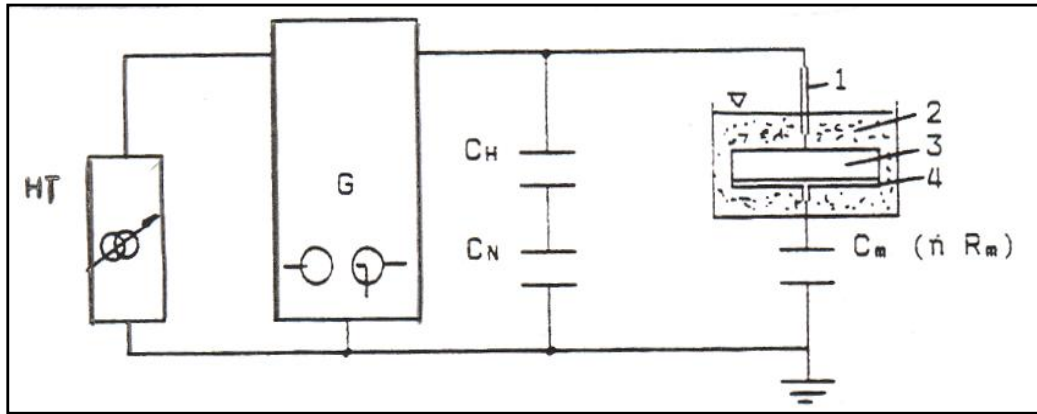
- ✘ Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό, και πιο συγκεκριμένα, κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες, ενώ κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα).
- ✘ Καθοριστικός παράγοντας για τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με $\epsilon_r \approx 2,5-4,5$) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου $0,2\text{MV/cm}$.
- ✘ Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου $0,5\text{MV/cm}$ αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση (1-4), $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-W/kT}$.
- ✘ Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση (1-4). 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.

Παρακάτω εξετάζονται αναλυτικά τα προαναφερόμενα, με βάση τυπικά παραδείγματα.

2.3.1. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

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

Για την τεχνητή γήρανση στερεών πολυμερών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου χρησιμοποιήθηκε διάταξη μέτρησης σχεδιασμένη απλοποιημένα στο σχήμα 2.3.1.1. Στα σχήματα 2.3.1.2 ως 2.3.1.4, δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα ενώ στο σχήμα 2.3.1.5 δίνεται ένα παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου.



Σχήμα 2.3.1.1: Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης των αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

H.T. : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης,

G : Γεννήτρια κρουστικών τάσεων,

C_H και C_N : Καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης,

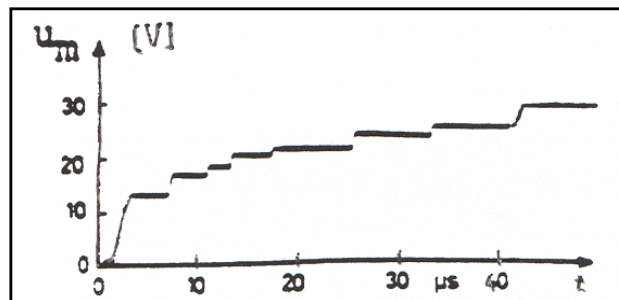
1: Ηλεκτρόδιο ακίδα, 2: Μονωτικό λάδι,

3: Δοκίμιο (πάχος 1mm),

4: Ηλεκτρόδιο πλάκα,

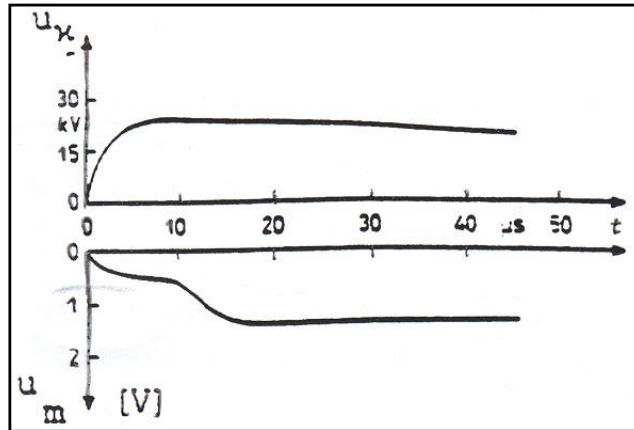
C_m : πυκνωτής μέτρησης των αλμάτων δυναμικού,

R_m : αντίσταση μέτρησης των κρούσεων φορτίου (δηλαδή του ρεύματος).

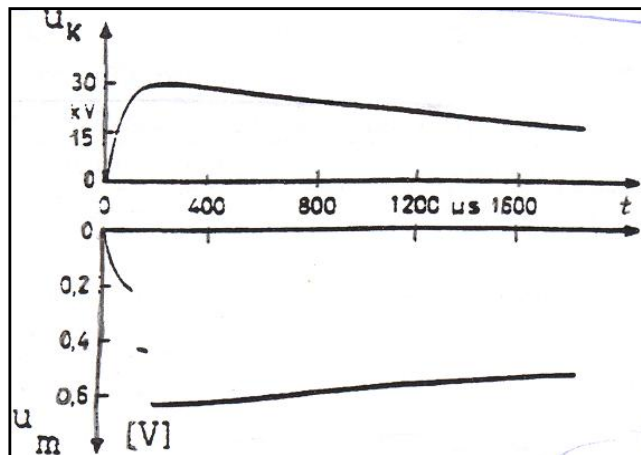


Σχήμα 2.3.1.2 : Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

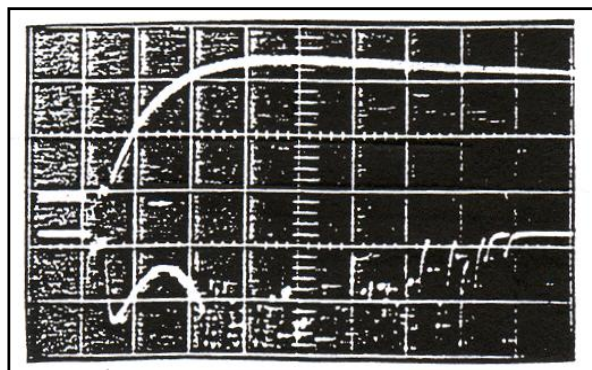
$C_m = 210\text{nF}$, $\dot{U}_k = 100\text{kV}$, $E = 0,8\text{MV/cm}$.



Σχήμα 2.3.1.3: Πρώτο άλμα δυναμικού υπό κρουστική τάση 10/200 μ s. $C_m=210$ nF, $\hat{U}_k=26,6$ kV, $E=0,38$ MV/cm.

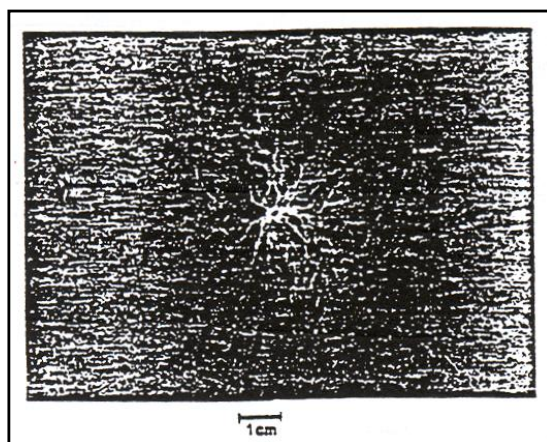


Σχήμα 2.3.1.4: Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 250/2500 μ s. $C_m = 1000$ nF, $\hat{U}_k = 32$ kV, $E = 0,31$ MV/cm.



Σχήμα 2.3.1.5: Κρούσεις φορτίου υπό κρουστική τάση 10/200 μ s. Κλίμακα χρόνου : 5 μ s/div, Κλίμακα ρεύματος : 1,3A/div, $\hat{U}_k = 81$ kV, $E = 0,86$ MV/cm.

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές, διαπιστώθηκε ότι μετά από μία τιμή $\dot{U}_k \approx 45\text{kV}$, κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$ ή $10/200\mu\text{s}$, εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται, στην επιφάνεια του μονωτικού, μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 2.3.1.6). Υπό σταθερή τιμή της τάσης, ο δενδρίτης, καθώς και η αντίστοιχη, προς αυτόν, αλλαγή της μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις. Σε αντίθεση, κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $250/2500\mu\text{s}$ δεν παρατηρήθηκε, υπό σταθερή τιμή της τάσης (που δεν οδηγεί στη διάσπαση), η εκδήλωση του παραπάνω δενδρίτη, ούτε προκλήθηκε αλλαγή της μοριακής δομής.



Σχήμα 2.3.1.6: Εικόνα επιφανειακών διαταραχών υπό κρουστική τάση $1,2/50\mu\text{s}$.
 $\dot{U}_k = 85\text{kV}$, $E = 0,8\text{MV/cm}$.

Για λόγους σύγκρισης των συμπερασμάτων, μεταξύ μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης στα στερεά μονωτικά, εξετάζονται (με τα παραπάνω δεδομένα) και οι δύο αυτές περιπτώσεις:

α) Μακροσκοπική ερμηνεία: Αν οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνευτούν με τη μακροσκοπική θεωρία, όπως έγινε σε άλλο παράδειγμα στην παράγραφο 2.1.3, τότε καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα του πίνακα 2.1.6.1. Η εκδήλωση των αλμάτων δυναμικού (ή των κρούσεων φορτίου) κατά τη θεωρία αυτή ερμηνεύονται από το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (σχήματα 2.1.3.4 ως 2.1.3.6).

β) Κβαντομηχανική ερμηνεία: 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, από τη σχέση $W=0,5 \cdot q_e \cdot \Delta u$, 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 το ηλεκτρόδιο γείωσης.

Για $R>0$ θα πρέπει να λάβει κανείς υπ' όψη το μεταβατικό φαινόμενο, με σταθερά χρόνου: $\tau = R \cdot C_m$ (2.3.1-1)

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από τη σχέση: $W = \frac{0,5 \cdot \Delta u}{1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}}$ (2.3.1-2)

όπου Δu σε V, W σε eV και

t : ο χρόνος φόρτισης του C_m κατά τη διάρκεια μιας μερικής εκκένωσης (κατά τη βιβλιογραφία περίπου 100ns).

Για μια αντίσταση $R=0,5\Omega$, ο συντελεστής: $f = 1/[1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}]$ (2.3.1-3)

δίνεται στον πίνακα 2.3.1.1, για χωρητικά τετράπολα μέτρησης, που συνήθως χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις αυτές. Επομένως, για τους πυκνωτές του πίνακα αυτού και για $R=0,5\Omega$ ισχύει:

Πίνακας 2.3.1.1: Τιμές του συντελεστή f για $R=0,5\Omega$.

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

και $W = 0,5 \cdot f \cdot \Delta u$ (2.3.1-4)

όπου Δu σε V και W σε eV.

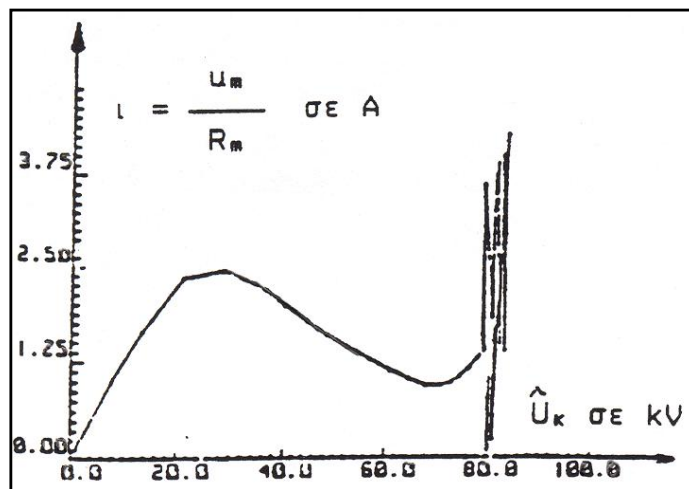
Στον πίνακα 2.3.1.2 έχουν υπολογιστεί με την παραπάνω σχέση οι τιμές της ενέργειας W για το πρώτο άλμα δυναμικού των παλμογραφημάτων των σχημάτων 2.3.1.2, 2.3.1.3 και 2.3.1.4. Από τις τιμές αυτές φαίνεται, ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών σχετίζεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που μπορεί να περιλαμβάνει υπεριώδεις και υπέρυθρες ακτίνες.

Πίνακας 2.3.1.2: Τιμές ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πρώτο άλμα δυναμικού.

Μορφή τάσης	Σχήμα	W σε eV
1,2/50μs	2.3.1-2	≈10,50
10/200μs	2.3.1-3	≈1,60
250/2500μs	2.3.1-4	≈0,16

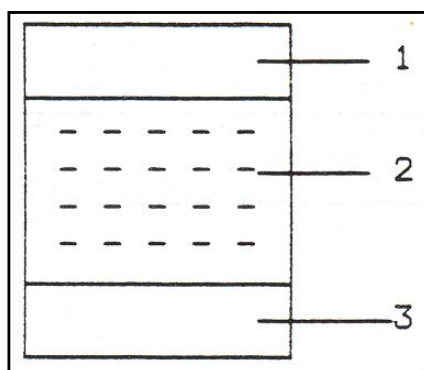
Σύμφωνα με τα παραπάνω από τις τιμές της ενέργειας κατά τον πίνακα 2.3.1.2, από τη φωτεινή ακτινοβολία που παρατηρείται στην πράξη σε αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων (και η οποία με υπολογισμό της ενέργειας W , εύκολα διαπιστώνεται σε άλματα δυναμικού του παλμογραφήματος του σχήματος 2.3.1.2) και τέλος από τις ραδιοφωνικές παρεμβολές και τα ακουστικά κύματα που συχνά προκαλούν οι μερικές εκκενώσεις, μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών σχετίζεται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται σε αυτά, το φάσμα της οποίας είναι: από ακουστικά κύματα μέχρι και υπεριώδεις ακτίνες.

Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γήρανσης έχουν δοθεί από παλμογραφήματα των κρούσεων φορτίου. Πράγματι, από τα παλμογραφήματα που προκύπτουν από το σχήμα 2.3.1.1, φαίνεται ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις. Έτσι, όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσειμα της ενέργειάς τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (πίνακας 2.3.1.2). Ο δενδρίτης που παρατηρείται, επομένως, είναι το ορατό φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας. Μπορούμε να υποθέσουμε, ότι αντίστοιχες εκπομπές, δενδροειδούς μορφής, συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου (Σχ. 2.3.1.1) φαίνεται, επίσης, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης (κατά την αύξηση της τάσης, παρατηρείται μείωση του ρεύματος). Η αντίσταση αυτή, που προηγείται του ιονισμού με κρούσεις, δίνεται αναλυτικότερα στη χαρακτηριστική “ρεύματος - τάσης” του σχήματος 2.3.1.7.



Σχήμα 2.3.1.7: Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης κατά το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου του σχήματος 2.3.1.5.

Από τα παραπάνω, μπορεί να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα, ότι μια διαδρομή της δενδροειδούς μορφής εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αντιστοιχεί σε μια 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 (Σχ. 2.3.1.8). Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος Gemant και Philipoff (Σχ. 2.1.3.4). Από τις στάθμες διαταραχής, συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης, οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 2.3.1.8: Διάγραμμα των ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

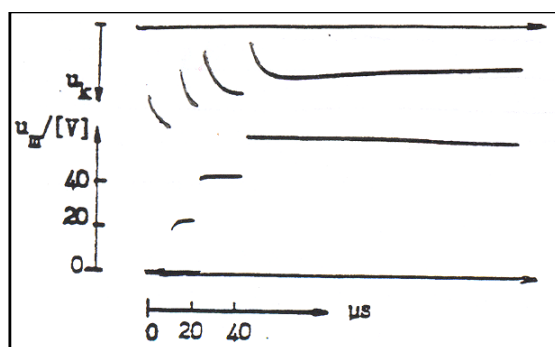
- 1 : ζώνη αγωγιμότητας.
- 2 : στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη.
- 3 : ζώνη σθένους.

Από πρόσφατες έρευνες, που έχουν γίνει κατά τη γήρανση στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, υπό εναλλασσόμενη (ή συνεχή) τάση καταπόνησης, διαπιστώνεται επίσης η εκπομπή του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που έχει προαναφερθεί για την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις καταπόνησης, ο υπολογισμός της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (πάνω από την ενέργεια Fermi) μπορεί να γίνει κατά την εκδήλωση αλμάτων δυναμικού, κατά τη σχέση (2.3.1-2).

2.3.2. ΦΑΣΜΑ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

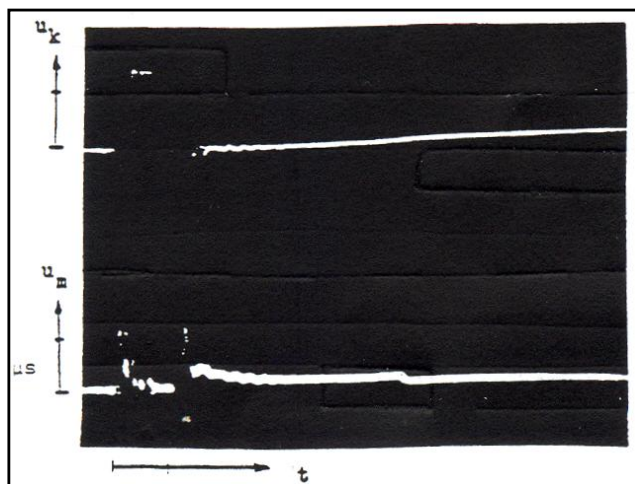
Η διάτρηση έχει διερευνηθεί με καταπονήσεις στερεών μονωτικών, με σχετική διηλεκτρική σταθερά περίπου 2,5÷4,5 (διάφορα χαρτιά μετασχηματιστών, πεπιεσμένο χαρτί, βακελίτης, pertinax, πανίτης, κλπ). Οι τάσεις δοκιμής, που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κβαντομηχανική ερμηνεία του μηχανισμού διάτρησης, είναι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

Παρακάτω εξετάζεται ένα παράδειγμα με κρουστικές τάσεις, ώστε να υπάρχουν συγκρίσιμες μετρήσεις με εκείνες της γήρανσης κατά την προηγούμενη παράγραφο. Για το λόγο αυτό, οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με τη διάταξη πειραματισμού του σχήματος 2.3.1.1. Τυπικά παλμογράφημα του φαινομένου δίνονται στα σχήματα 2.3.2.1 και 2.3.2.2. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων (W) μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (2.3.1-2), όπως και κατά τη γήρανση. Έτσι, για το πρώτο π.χ. άλμα δυναμικού και $R=0,5\Omega$ (που ήταν η αντίσταση από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης) η τιμή W υπολογίζεται ότι είναι περίπου 105eV. Μπορούμε, επομένως, να υποθέσουμε ότι η **διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων X**.



Σχήμα 2.3.2.1: Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου.

Κρουστική τάση : 1,2/50μs, $C_m=1835\text{nF}$, $\dot{U}_k=85\text{kV}$, $E = 1,2\text{MV/cm}$.



Σχήμα 2.3.2.2: Τυπικό παλμογράφημα κρούσεων φορτίου κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών ($d=1\text{mm}$) εντός μονωτικού ελαίου.

Κρουστική τάση: $1,2/50\mu\text{s}$, $R_m=150\Omega$, $\dot{U}_k=85\text{kV}$, $E=1,2\text{MV/cm}$, $R \approx 1\text{mm}$, $u_m = 20\text{V/div}$, $t: 2\mu\text{s/div}$.

Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου παρατηρεί κανείς την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Ο αριθμός των κρούσεων περιορίζεται ως προς εκείνον κατά τη γήρανση, αλλά η τιμή του ρεύματος αυξάνει σημαντικά (συγκρίνατε με το παλμογράφημα του σχήματος 2.3.1.4). Μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι ο μηχανισμός της διάτρησης έχει τα ίδια γνωρίσματα με αυτόν της γήρανσης.

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

2.3.3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ ΜΕ ΚΡΟΥΣΕΙΣ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ

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

$$Q = Q_0 \exp[A(E^2 - E_0^2) / E_0^2] \quad (2.3.3-1)$$

όπου (κατά το σχήμα 2.1.6.1):

E_0 : η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($E > 0,2 \text{ MV/cm}$).

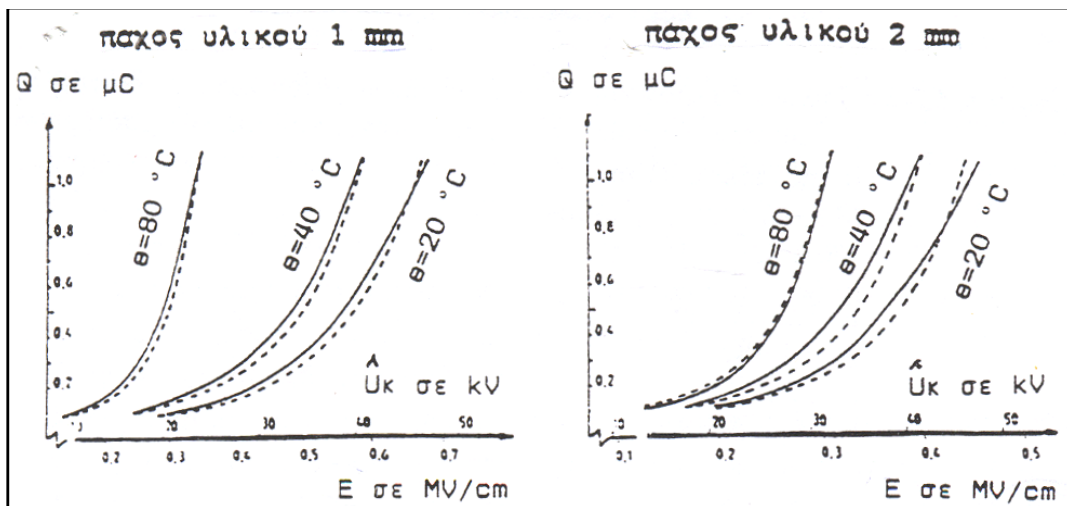
Q_0 : το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

E : η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση, λόγω της οποίας το φορτίο αποκτά την τιμή Q .

A : ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από το χρόνο.

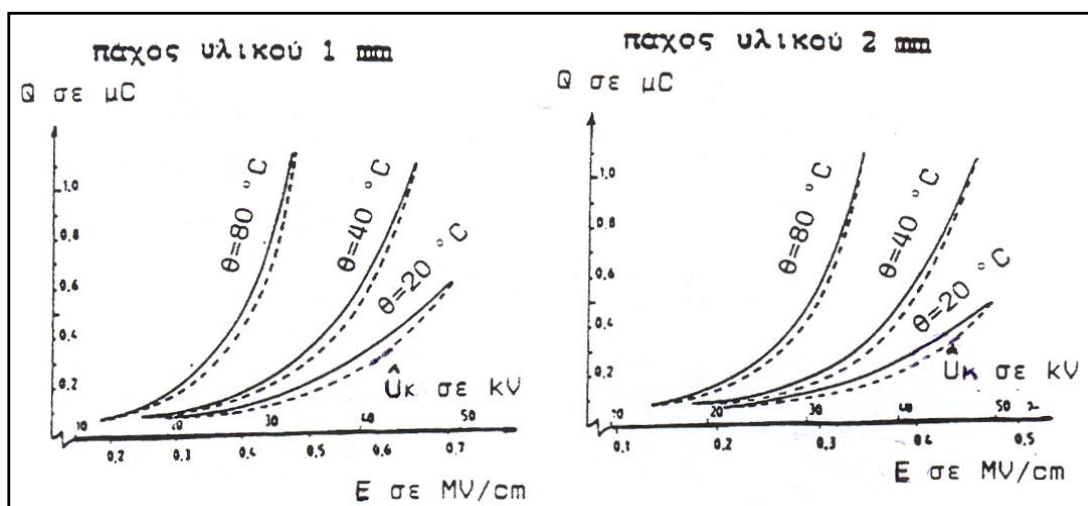
Με βάση τη σχέση αυτή, έχει γίνει μια προσέγγιση πειραματικών χαρακτηριστικών $Q=f(|\dot{U}_k|)$ κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm ή 2mm) με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή 250/2500μs), η οποία κατά τον πίνακα 2.1.6.1 προκαλεί μόνο εσωτερικές μερικές εκκενώσεις. Η πειραματική διάταξη δίνεται απλοποιημένα στο σχήμα 2.3.1.1. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (20°C, 40°C και 80°C), ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, και να εναρμονίζονται οι μετρήσεις με τα παραδεκτά όρια λειτουργίας του μονωτικού ελαίου των μετασχηματιστών, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη.

Στα παρακάτω σχήματα (2.3.3.1 και 2.3.3.2) δίνονται οι πειραματικές χαρακτηριστικές για δύο μονωτικά, καθώς και οι θεωρητικές χαρακτηριστικές κατά τη σχέση (2.3.3-1), (με προσδιορισμό του συντελεστή A για κάθε υλικό).



Σχήμα 2.3.3.1: Χαρακτηριστικές $Q = f(|\dot{U}_k|)$ για το pertinax (εντός μονωτικού ελαίου), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα, $A = 0,48$.



Σχήμα 2.3.3.2: Χαρακτηριστικές $Q = f(|\dot{U}_k|)$ για τον βακελίτη (εντός μονωτικού ελαίου), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα, $A = 0,44$.

Όπως φαίνεται, υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ θεωρίας και πειραμάτων. Η θεωρητική προσέγγιση έδειξε ότι:

- ✓ οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμές πεδίου περίπου $E=0,2MV/cm$.
- ✓ για τιμές πεδίου περίπου μέχρι $0,5MV/cm$, η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας διέπεται από τη σχέση (1-4).

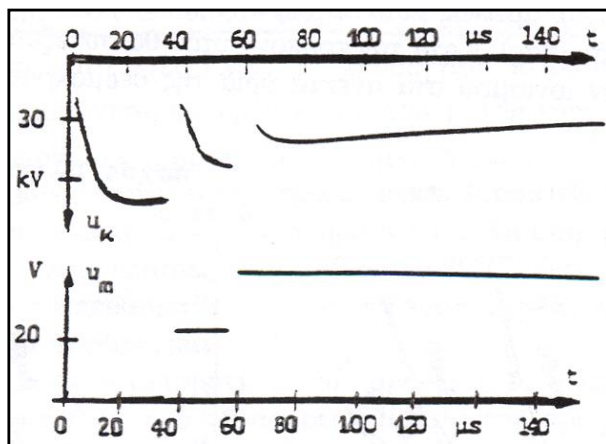
- ✓ για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, ισχύει η σχέση (2.3.3-1), με αποτέλεσμα να μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις.
- ✓ Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ενισχύει σημαντικά τα φαινόμενα ιονισμού. Φαίνεται, ότι η σχέση που διέπει το συνδυασμό των μερικών εκκενώσεων με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, είναι η (2.3.3-1).

Από τη μεγάλη αύξηση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων με τη θερμοκρασία του μονωτικού ελαίου, που στην πράξη γίνεται αντιληπτή σε συνδυασμούς “στερεό-υγρό μονωτικό” με την αρκετά μεγάλη $tg\delta$, φαίνεται ότι θα πρέπει να γίνει μια βελτίωση των προδιαγραφών ως προς τη δοκιμή θέρμανσης. Με τυπικό παράδειγμα τους μετασχηματιστές ελαίου (και ιδιαίτερα τους μετασχηματιστές έντασης του δικτύου μεταφοράς, που ως γνωστόν από την πράξη, παρουσιάζουν προβλήματα κατά την αύξηση της $tg\delta$), κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιούνται οι διηλεκτρικές δοκιμές, αμέσως μετά το πέρας της δοκιμής υπερθέρμανσης (ή δοκιμής ανύψωσης της θερμοκρασίας). Με τον τρόπο αυτό, θα συνεξετάζεται δηλαδή, η πιθανή εκδήλωση φαινομένων ιονισμού στα ανεκτά όρια της θερμοκρασιακής κατάστασης του μετασχηματιστή ($\approx 80^\circ\text{C}$).

2.3.4. ΦΑΣΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ

Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι ισχύει ό,τι και προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης. Παρακάτω εξετάζεται (για λόγους σύγκρισης με τα 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 (βλ. σχήμα 2.3.1.1). Δε θα γίνει αναφορά στα παλμογράφημα της γήρανσης, γιατί είναι προφανές ότι τα φαινόμενα δεν εξαρτώνται, από το αν θα ακολουθήσει η διάτρηση ή επιφανειακή διάσπαση.

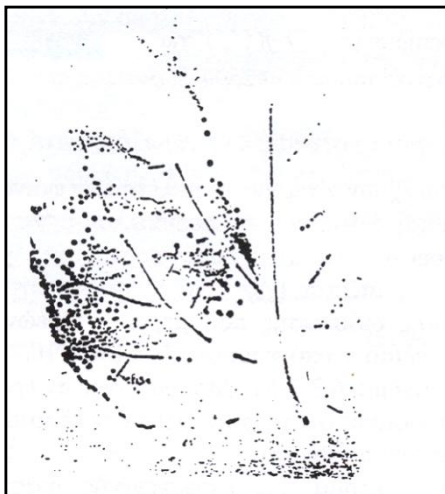
Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος 2.3.4.1, υπολογίζεται με τη σχέση (2.3.1-2), η ενέργεια W των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η ενέργεια αυτή για το πρώτο και το τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα: 122eV και 96,5eV. Όπως φαίνεται, η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτίνων X .



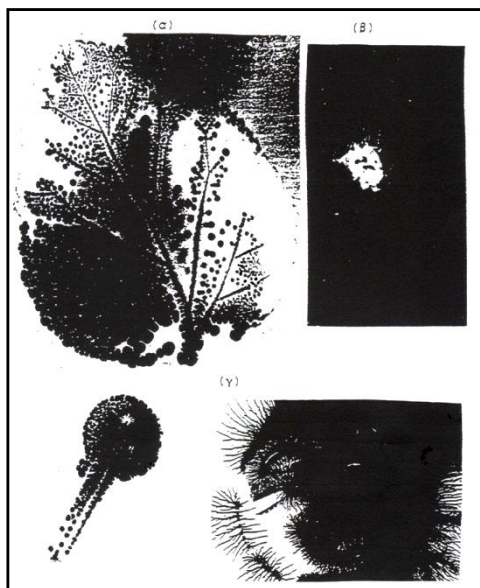
Σχήμα 2.3.4.1: Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pertinax (πάχος 2mm, διάμετρος 150mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου.

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 το σκοπό αυτό, φαίνεται ότι προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και απεικονίζονται αντικείμενα, καθώς και βιολογικοί οργανισμοί. Στα σχήματα 2.3.4.2, 2.3.4.3 και 2.3.4.5 δίνονται ορισμένες από τις φωτογραφίες αυτές. Επίσης, στα σχήματα 2.3.4.4 και 2.3.4.5 δίνονται φωτογραφίες επιφανειακών δενδριτών, που αφορούν αντίστοιχα τη γήρανση και τη διάσπαση. Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2mm, διαμέτρου 150mm), υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. Οι φωτογραφίες σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, καθώς και εκείνες της διάτρησης (στον αέρα ή στο λάδι), οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα.



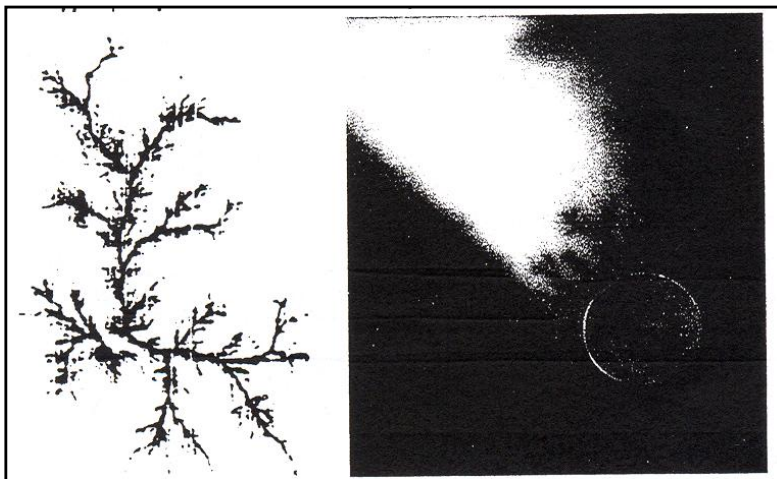
Σχήμα 2.3.4.2: Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την καταπόνηση πολυμερούς στερεού μονωτικού, πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs. (φωτογράφιση ενός φύλλου δένδρου).



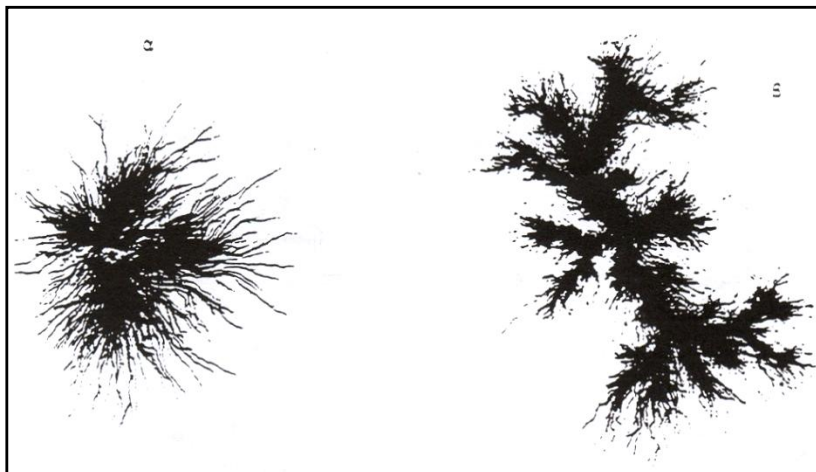
Σχήμα 2.3.4.3: Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερούς στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.

α) φωτογράφιση φύλλου δένδρου, β) φωτογραφία βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι), γ) φωτογραφίες μεταλλικών αντικειμένων.



Σχήμα 2.3.4.4: Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση, στον αέρα, πολυμερών στερεών μονωτικών, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα).



Σχήμα 2.3.4.5: Φωτογραφίες δενδριτών κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών, στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα).

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

β) Δενδρίτης κατά την επιφανειακή διάσπαση.

Σχετικά με την απεικόνιση των δενδριτών στο φωτογραφικό φιλμ, μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο δενδρίτης του σχήματος 2.3.4.4 σχετίζεται με την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ εκείνος του σχήματος 2.3.4.5 με υπεριώδεις ακτίνες και ακτίνες Χ. Έτσι, δίνεται μία φυσική ερμηνεία για τις γνωστές εικόνες Lichtenberg. Επίσης διαπιστώνεται, ότι ο φωτεινός δενδρίτης και ο οχετός διάσπασης, που παρατηρούνται κατά την ηλεκτρική καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού, αφορούν το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στο υλικό.

2.4. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 2.3 φαίνεται, ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα υλικά αυτά κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους. Οι πληροφορίες αυτές δε μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεώρηση των παραπάνω φαινομένων. Πλεονέκτημα, όμως, της μακροσκοπικής θεωρίας, για τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, φαίνεται ότι είναι ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης. Ο διαχωρισμός αυτός των μερικών εκκενώσεων δε μπορεί να δοθεί από τη θεωρία του ιονισμού με κρούσεις, γιατί ο συντελεστής A (σχέση 2.3.3-1) αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του, και η τιμή του θα πρέπει να εξαρτάται από τη διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Αν π.χ. πραγματοποιήσει κανείς τα πειράματα της παραγράφου 2.3.3, με κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$ (ή με $10/200\mu\text{s}$), και προσεγγίσει ακολούθως τις πειραματικές χαρακτηριστικές $Q=f(\dot{U}_k)$ με τη σχέση (2.3.3-1), θα διαπιστώσει ότι ο συντελεστής A έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $250/2500\mu\text{s}$. Η διαφορετική αυτή τιμή του συντελεστή A (κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$ ή $10/200\mu\text{s}$) μπορεί να θεωρηθεί μόνο ως μία ένδειξη ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, χωρίς όμως να καθορίζεται η περιοχή εκδήλωσής του (στον όγκο του μονωτικού, ή στην επιφάνειά του, ή στον όγκο και στην επιφάνεια του μονωτικού). Γι' αυτό, δε μπορεί κανείς να καταλήξει, μέσω της κβαντομηχανικής θεώρησης των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, στο διαχωρισμό των μερικών εκκενώσεων στα παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού.

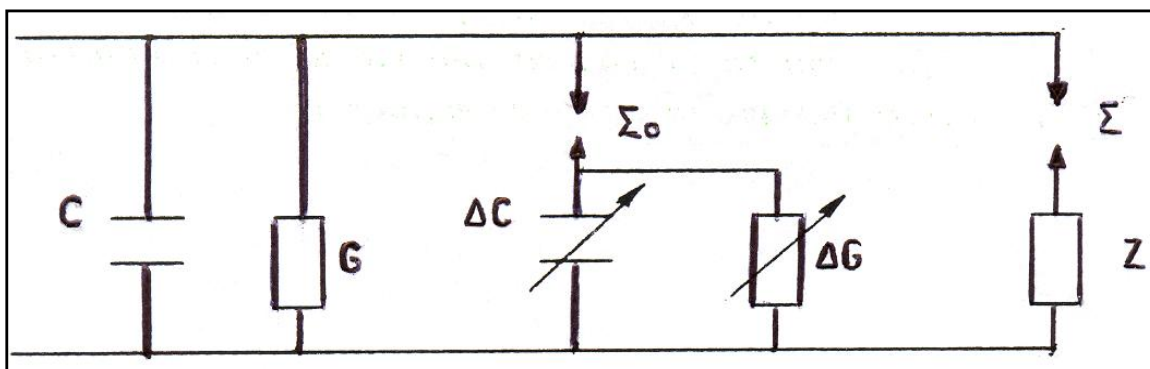
Από τα παραπάνω φαίνεται, ότι για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, χρειάζεται να συνδυαστούν οι δύο θεωρίες, ώστε να δίνουν περισσότερες πληροφορίες για την πράξη. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που έχει προταθεί για το σκοπό αυτό, δίνεται στο σχήμα 2.4.1. Πρόκειται, ουσιαστικά, για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος Gemant-Philippoff (σχήμα 2.1.3.4), όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσει κανείς, ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει στην τιμή της πεδιακής E_0 (κατά την παράγραφο 2.3.3 περίπου $0,2\text{MV/cm}$), τότε, τα φαινόμενα,

που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.4-1 ως ακολούθως:

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

$$Q = Q_0 \exp[A(E^2 - E_0^2) / E_0^2].$$

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



Σχήμα 2.4.1: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα.

G : ιδανική αγωγιμότητα.

ΔC: αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων.

ΔG: αύξηση της αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων.

Z : αρνητική διαφορική αντίσταση.

Σ₀ : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

Σ : σπινθηριστής εκδήλωσης της Z.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στα πλαίσια της έρευνας για τη γήρανση και διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών, και πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε με βάση τη μακροσκοπική θεωρία για τη στατιστική ανάλυση της έναρξης των μερικών εκκενώσεων και της προκαλούμενης διαρροής ρεύματος, στο συνδυασμό του στερεού μονωτικού pertinax σε περιβάλλον μέσο λάδι μετασχηματιστών στους 80°C, υπό κρουστική τάση χειρισμών, με διάταξη ηλεκτροδίων «ακίδα-πλάκα». Κατ' αυτό τον τρόπο γίνεται προσπάθεια διερεύνησης των φαινομένων που σχετίζονται με την ικανότητά του υλικού αυτού να παρέχει μόνωση.

Η στατιστική ανάλυση βασίζεται στις μετρήσεις των εξής βασικών ηλεκτρικών μεγεθών:

- * της μέγιστης στιγμιαίας τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης,
- * της στιγμιαίας τιμής της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,
- * της στιγμιαίας τιμής του χρόνου έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και
- * του φορτίου έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων .

Οι μετρήσεις αυτές αφορούν εφαρμοζόμενες τάσεις θετικής και αρνητικής πολικότητας, πάχη υλικού $d=1\text{mm}$ και $d=2\text{mm}$, ακτίνα καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$. Από τις μετρήσεις γίνεται υπολογισμός επιπλέον απαραίτητων μεγεθών για τη μελέτη όπως : των αντίστοιχων ρευμάτων που οφείλονται στα μετρούμενα φορτία , της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων , του πεδίου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και της έντασης του πεδίου που οφείλεται στην μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης. Στη συνέχεια ακολουθεί χάραξη και σχολιασμός των χαρακτηριστικών καμπυλών που προκύπτουν από τα παραπάνω μεγέθη .

3.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Κατά την διεξαγωγή του πειράματος έγιναν μετρήσεις των μεγεθών \hat{U}_k , u_{EV} , t_1 , t_2 , q_1 , q_2 όπου:

- ↺ \hat{U}_k : η μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,
- ↺ u_{EV} : η στιγμιαία κρουστική τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων,
- ↺ t_1 : ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,
- ↺ t_2 : ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,
- ↺ q_1 : η στιγμιαία τιμή του φορτίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων,
- ↺ q_2 : η στιγμιαία τιμή του φορτίου κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων.

Σε κάθε επίπεδο τάσης η μέτρηση που καταγράφηκε αποτελείται από τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση 50 μετρήσεων. Μέσω αυτών των τιμών καθορίζονται επίσης τα μεγέθη:

- ↺ $u_1 = q_1/C_m$: η στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων,
- ↺ $u_2 = q_2/C_m$: η στιγμιαία τιμή της u_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων,
- ↺ $\Delta t = t_2 - t_1$: η χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων
(όπου $\Delta t_{\min} = t_{2,\min} - t_{1,\max}$, $\Delta t_{\max} = t_{2,\max} - t_{1,\min}$),
- ↺ $\Delta q = q_2 - q_1$: η μεταβολή του φορτίου κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων
(όπου $\Delta q_{\min} = q_{2,\min} - q_{1,\max}$, $\Delta q_{\max} = q_{2,\max} - q_{1,\min}$),
- ↺ $\Delta u = u_2 - u_1$: η μεταβολή της τάσης κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων
(όπου $\Delta u_{\min} = u_{2,\min} - u_{1,\max}$, $\Delta u_{\max} = u_{2,\max} - u_{1,\min}$),
- ↺ $\Delta W_e = 0,5 * (u_2 - u_1)$: η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi (όπου $\Delta W_{e,\min} = 0,5 * \Delta u_{\min}$, $\Delta W_{e,\max} = 0,5 * \Delta u_{\max}$),
- ↺ $i_1 = q_1/t_1$: η στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων,
- ↺ $i_2 = q_2/t_2$: η στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων,
- ↺ $\Delta i = \Delta q / \Delta t$: η στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω του φορτίου Δq
(όπου $\Delta i_{\min} = \Delta q_{\min} / \Delta t_{\max}$, $\Delta i_{\max} = \Delta q_{\max} / \Delta t_{\min}$),
- ↺ $\hat{E}_k = 2\hat{U}_k / R * \ln(4d/R)$: η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης, που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης \hat{U}_k .
- ↺ $E_{EV} = 2u_{EV} / R * \ln(4d/R)$: η τιμή της πεδιακής έντασης που αντιστοιχεί στην u_{EV} .

3.2. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Για πάχος μονωτικού $d=1\text{mm}$ και εφαρμοζόμενη κρουστική τάση της μορφής $+250/2500\ \mu\text{s}$ έχουμε :

Πίνακας 1: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή του χρόνου έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και της χρονικής διάρκειας τους για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και $d=1\text{mm}$:

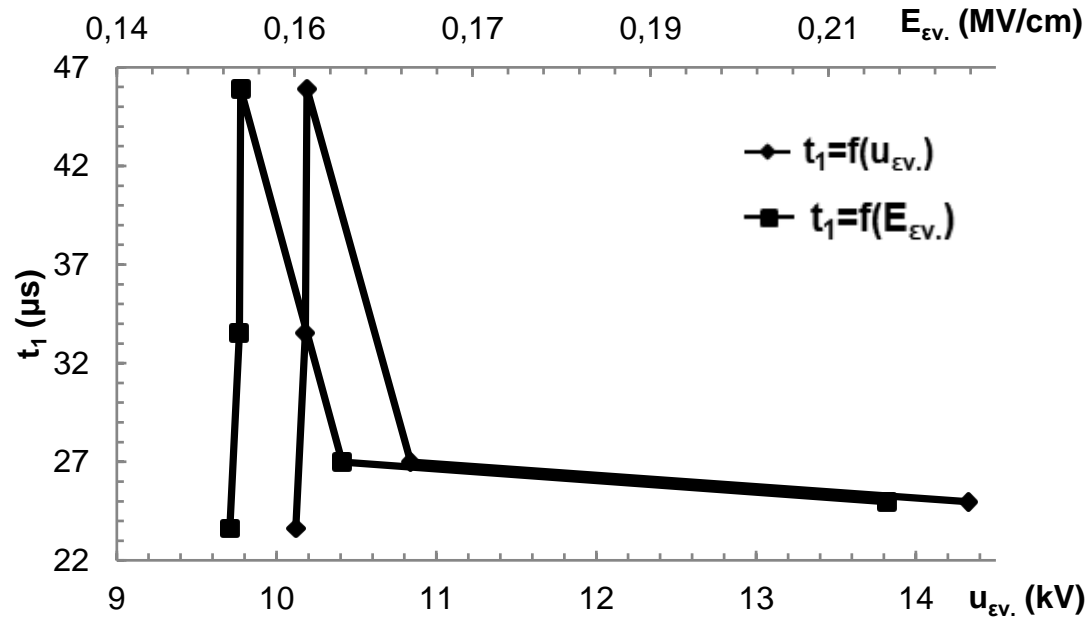
\hat{U}_k (kV)	\hat{E}_k (kV/cm)	u_{EV} (kV)	σ_{UEV} (kV)	$u_{EV.min}$ (kV)	$u_{EV.max}$ (kV)	E_{EV} (kV/cm)	σ_{EEV} (kV/cm)	$E_{EV.min}$ (kV/cm)	$E_{EV.max}$ (kV/cm)	t_1 (μs)	σ_{t1} (μs)	$t_{1,min}$ (μs)	$t_{1,max}$ (μs)	t_2 (μs)	σ_{t2} (μs)	$t_{2,min}$ (μs)	$t_{2,max}$ (μs)	Δt (μs)	Δt_{min} (μs)	Δt_{max} (μs)
10,02	0,1493	-	-	-	-	-	-	-	-	111,37	-	-	-	310,5	-	-	-	199,13	-	-
20,16	0,3004	10,12	1,55	8,57	11,67	0,1508	0,0231	0,1277	0,1739	23,62	3,01	20,61	26,63	403,65	46,25	357,4	449,9	380,03	330,77	429,29
16,95	0,2526	10,18	0,62	9,56	10,8	0,1517	0,0092	0,1425	0,1610	33,54	10,46	23,08	44	319,95	58,15	261,8	378,1	286,41	217,8	355,02
13,4	0,1997	10,19	0,72	9,47	10,91	0,1519	0,0107	0,1411	0,1626	45,9	7,87	38,03	53,77	336,15	56,3	279,85	392,45	290,25	226,08	354,42
23,41	0,3489	10,84	0,95	9,89	11,79	0,1615	0,0142	0,1474	0,1757	26,99	3,69	23,3	30,68	378,9	48,8	330,1	427,7	351,91	299,42	404,4
26,8	0,3994	14,33	1,01	13,32	15,34	0,2136	0,0151	0,1985	0,2286	24,97	5,05	19,92	30,02	409,04	43,2	365,84	452,24	384,07	335,82	432,32
30,5	0,4545	Διάσπαση																		

Πίνακας 2: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή του φορτίου και του ρεύματος έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και των αντίστοιχων μεταβολών τους για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση +250/2500μs και d=1mm:

q_1 (μC)	σ_{q1} (μC)	$q_{1,min}$ (μC)	$q_{1,max}$ (μC)	q_2 (μC)	σ_{q2} (μC)	$q_{2,min}$ (μC)	$q_{2,max}$ (μC)	Δq (μC)	Δq_{min} (μC)	Δq_{max} (μC)	i_1 (μA)	$i_{1,max}$ (μA)	$i_{1,min}$ (μA)	I_2 (μA)	$i_{2,max}$ (μA)	$i_{2,min}$ (μA)	Δi (μA)	Δi_{max} (μA)	Δi_{min} (μA)
0,064	0,006	0,058	0,07	0,074	-	-	-	0,01	-	-	-	-	-	238,33	-	-	-	-	-
0,056	0,002	0,054	0,058	0,583	0,013	0,57	0,596	0,527	0,512	0,542	2370,87	2814,17	2027,79	1444,32	1667,60	1266,95	1386,73	1638,60	1192,67
0,059	0,013	0,046	0,072	0,319	0,018	0,301	0,337	0,26	0,229	0,291	1759,09	3119,58	1045,45	997,03	1287,24	796,09	907,79	1336,09	645,03
0,049	0,006	0,043	0,055	0,182	0,017	0,165	0,199	0,133	0,11	0,156	1067,54	1446,23	799,70	541,42	711,10	420,44	458,23	690,02	310,37
0,068	0,016	0,052	0,084	1,032	0,11	0,922	1,142	0,964	0,838	1,09	2519,45	3605,15	1694,92	2723,67	3459,56	2155,72	2739,34	3640,37	2072,21
0,068	0,01	0,058	0,078	1,605	0,061	1,544	1,666	1,537	1,466	1,608	2723,27	3915,66	1932,05	3923,82	4553,90	3414,12	4001,87	4788,28	3391,01
Διάσπαση																			

Πίνακας 3: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της τάσης έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και της μεταβολής της στο δοκίμιο και μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αντίστοιχης ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση +250/2500μs και d=1mm:

C_m (nF)	u_1 (V)	σ_{u1} (V)	$u_{1, \min}$ (V)	$u_{1, \max}$ (V)	u_2 (V)	σ_{u2} (V)	$u_{2, \min}$ (V)	$u_{2, \max}$ (V)	Δu (V)	Δu_{\min} (V)	Δu_{\max} (V)	ΔW_e (eV)	$\Delta W_{e \min}$ (eV)	$\Delta W_{e \max}$ (eV)
1000	0,064	0,006	0,058	0,07	0,074	-	-	-	0,01	-	-	0,005	-	-
1000	0,056	0,002	0,054	0,058	0,583	0,013	0,57	0,596	0,527	0,512	0,542	0,264	0,256	0,271
1000	0,059	0,013	0,046	0,072	0,319	0,018	0,301	0,337	0,26	0,229	0,291	0,13	0,115	0,146
1000	0,049	0,006	0,043	0,055	0,182	0,017	0,165	0,199	0,133	0,11	0,156	0,067	0,055	0,078
1000	0,068	0,016	0,052	0,084	1,032	0,11	0,922	1,142	0,964	0,838	1,09	0,482	0,419	0,545
1000	0,068	0,01	0,058	0,078	1,605	0,061	1,544	1,666	1,537	1,466	1,608	0,769	0,733	0,804
1000	Διάσπαση													



Σχήμα 3.2.1: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $t_1=f(u_{ev})$, \blacksquare $t_1=f(E_{ev})$

όπου : u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

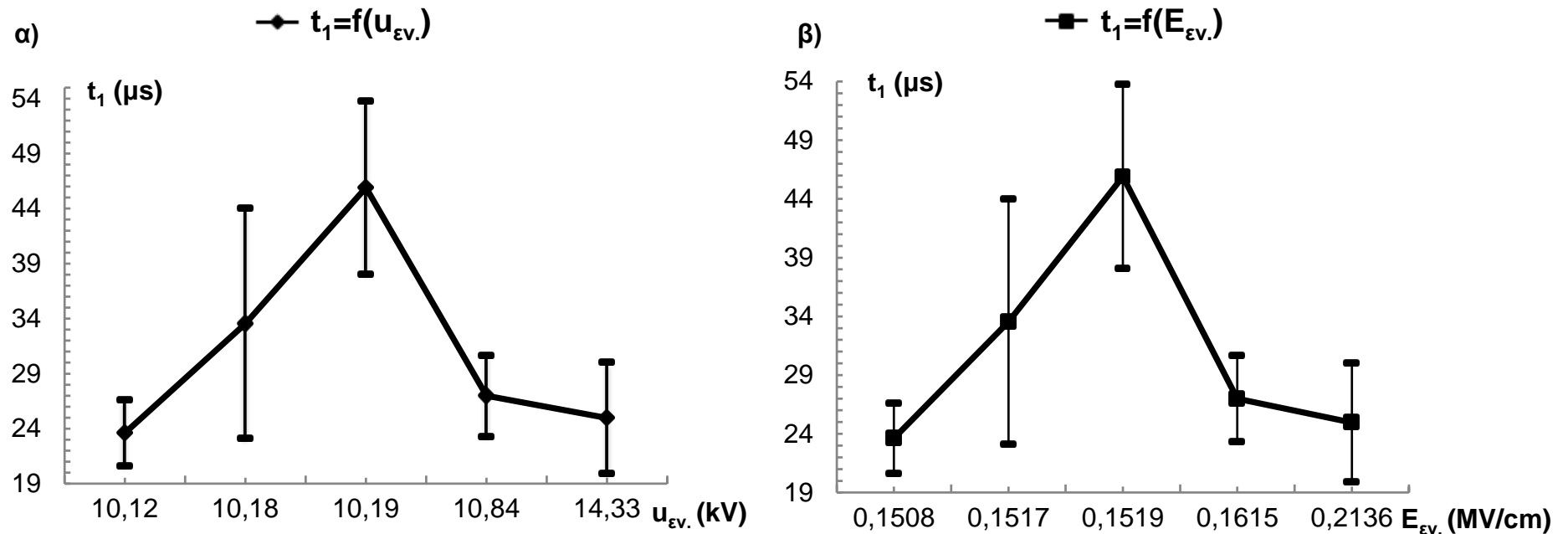
t_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm και ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.2: Χαρακτηριστικές: α) $t_1 = f(u_{ev})$, β) $t_1 = f(E_{ev})$

α) χαρακτηριστική $t_1 = f(u_{ev})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $t_1 = f(E_{ev})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

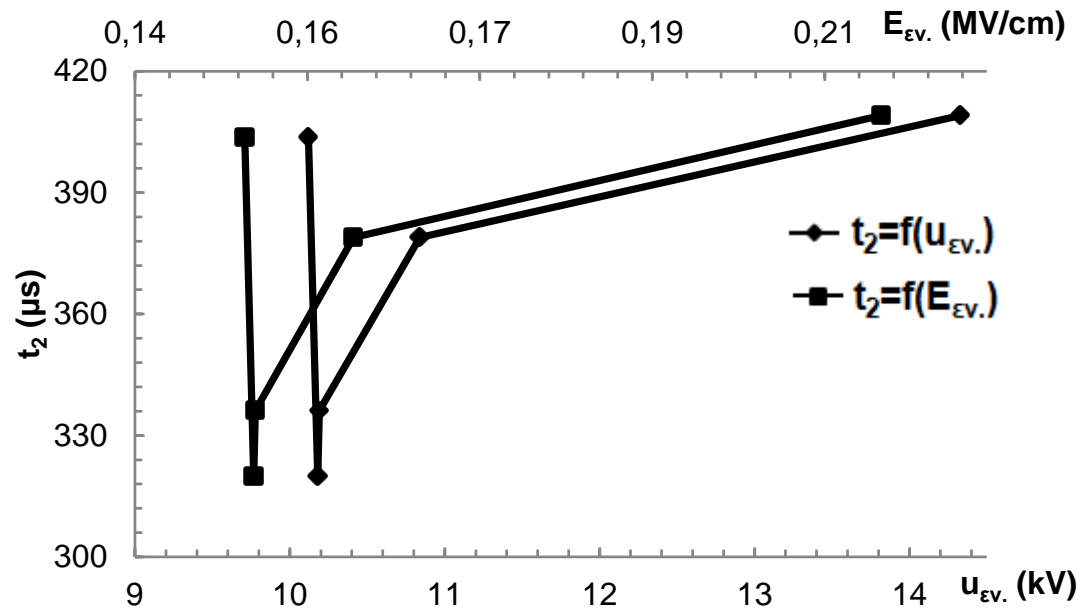
t_1 : η στιγμιαία τιμή του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.3: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $t_2=f(u_{Ev})$, \blacksquare $t_2=f(E_{Ev})$

όπου : u_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{Ev} ,

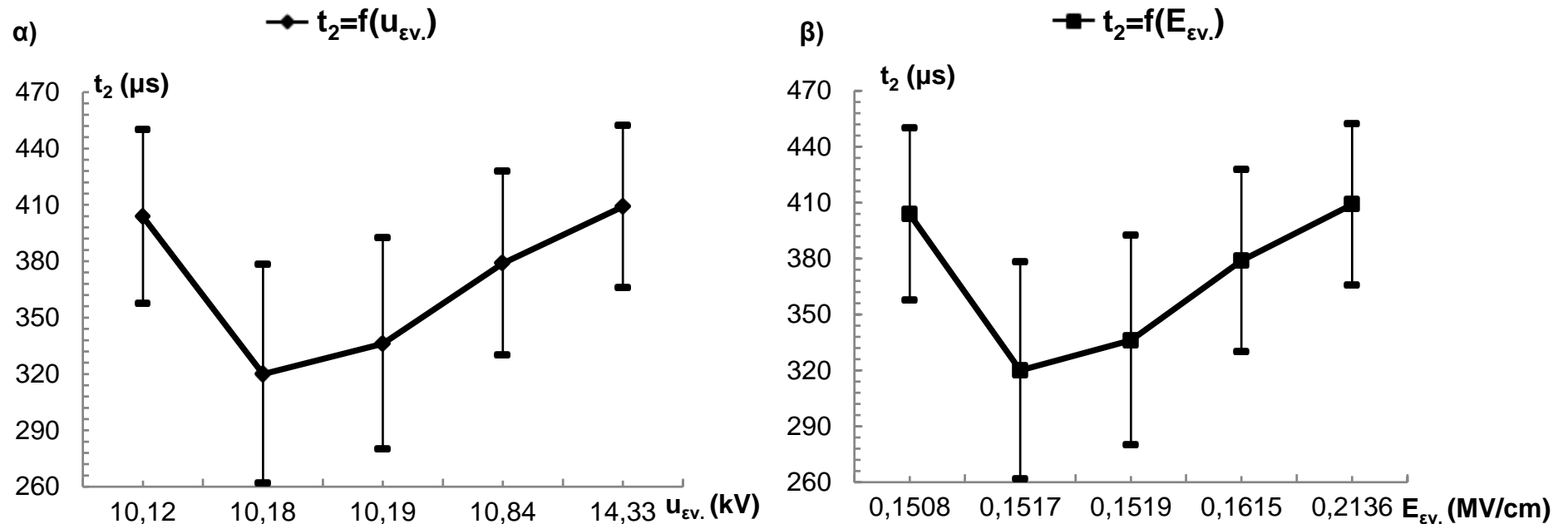
t_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.4: Χαρακτηριστικές: α) $t_2=f(u_{ev})$, β) $t_2=f(E_{ev})$

α) χαρακτηριστική $t_2=f(u_{ev})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $t_2=f(E_{ev})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

t_2 : η στιγμιαία τιμή του χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

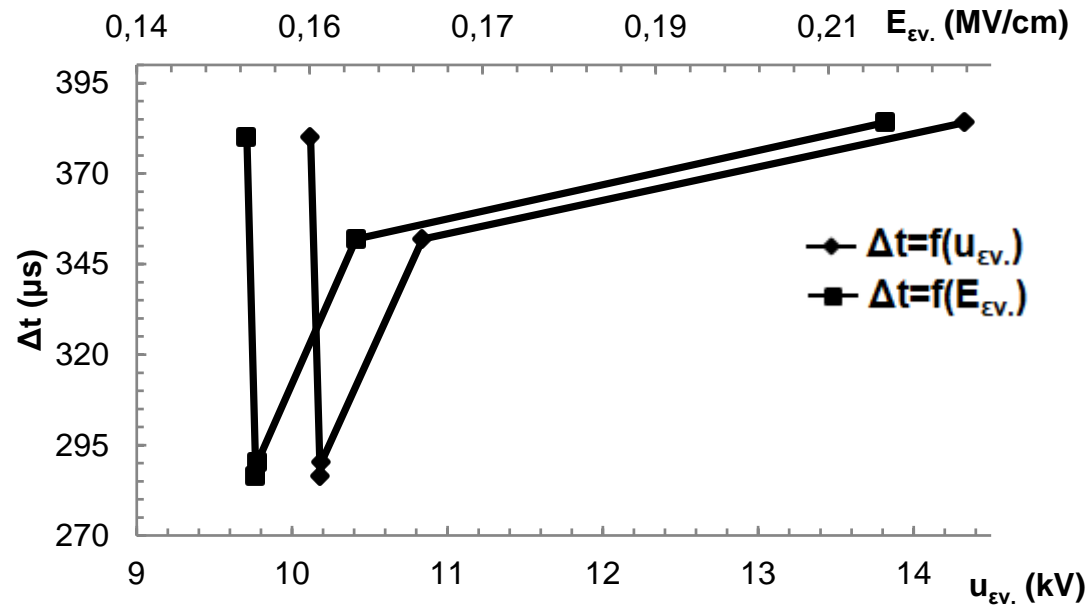
κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και

$C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.5: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $\Delta t=f(u_{EV})$, \blacksquare $\Delta t=f(E_{EV})$

όπου : u_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{EV} ,

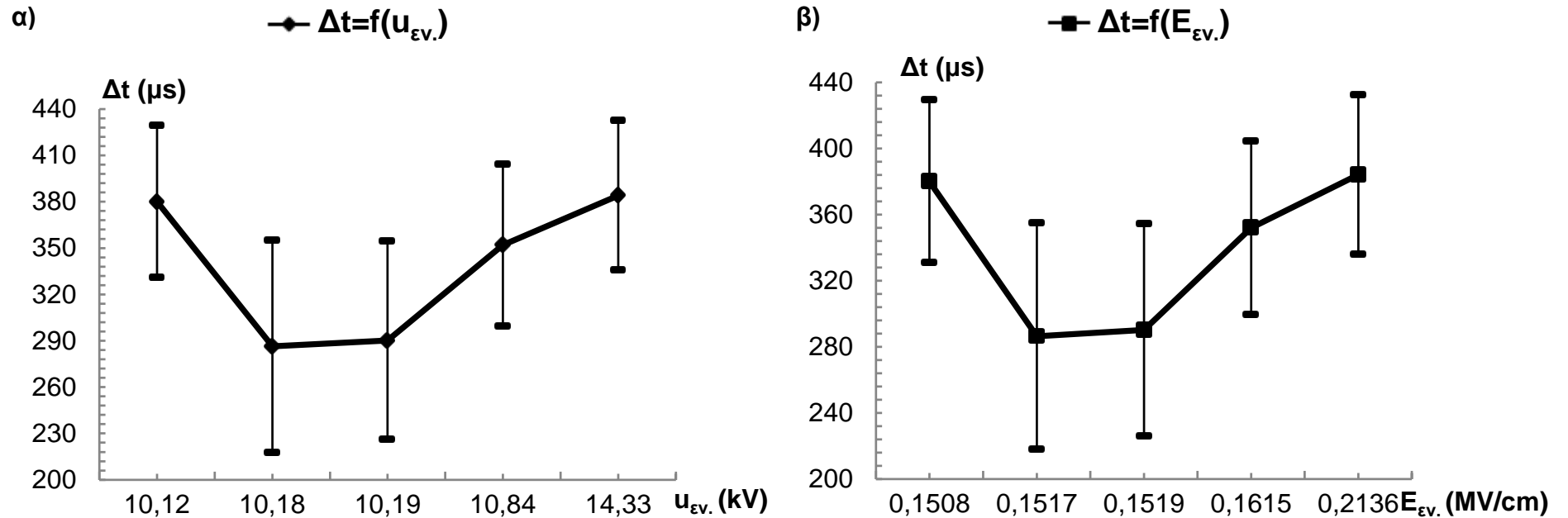
Δt : η μέση τιμή της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.6: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta t = f(u_{EV})$, β) $\Delta t = f(E_{EV})$

α) χαρακτηριστική $\Delta t = f(u_{EV})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $-$

β) χαρακτηριστική $\Delta t = f(E_{EV})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $-$, όπου :

u_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{EV} ,

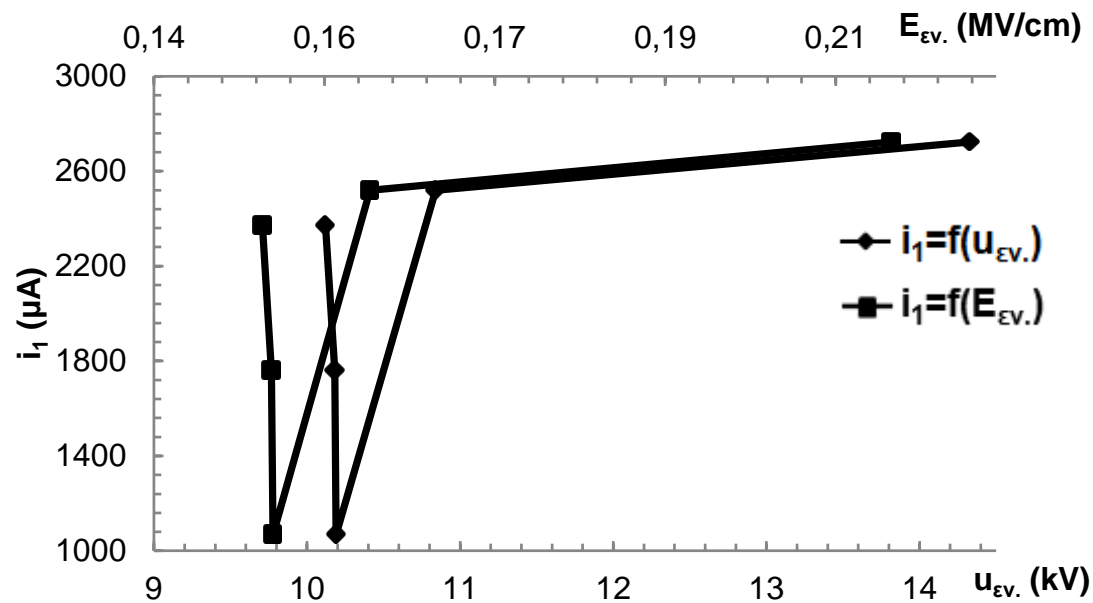
Δt : η χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.7: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $i_1=f(u_{Ev.})$, \blacksquare $i_1=f(E_{Ev.})$

όπου : $u_{Ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{Ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{Ev.}$,

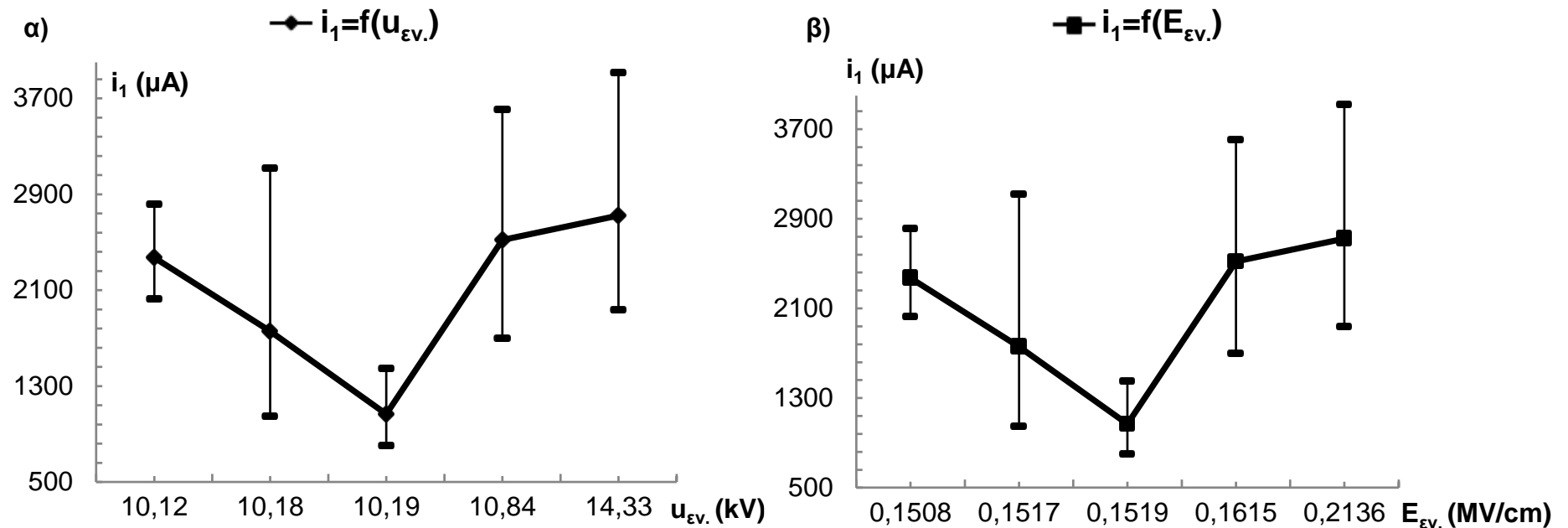
i_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.8: Χαρακτηριστικές: α) $i_1=f(u_{ev.})$, β) $i_1=f(E_{ev.})$

α) χαρακτηριστική $i_1=f(u_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $i_1=f(E_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

$u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,

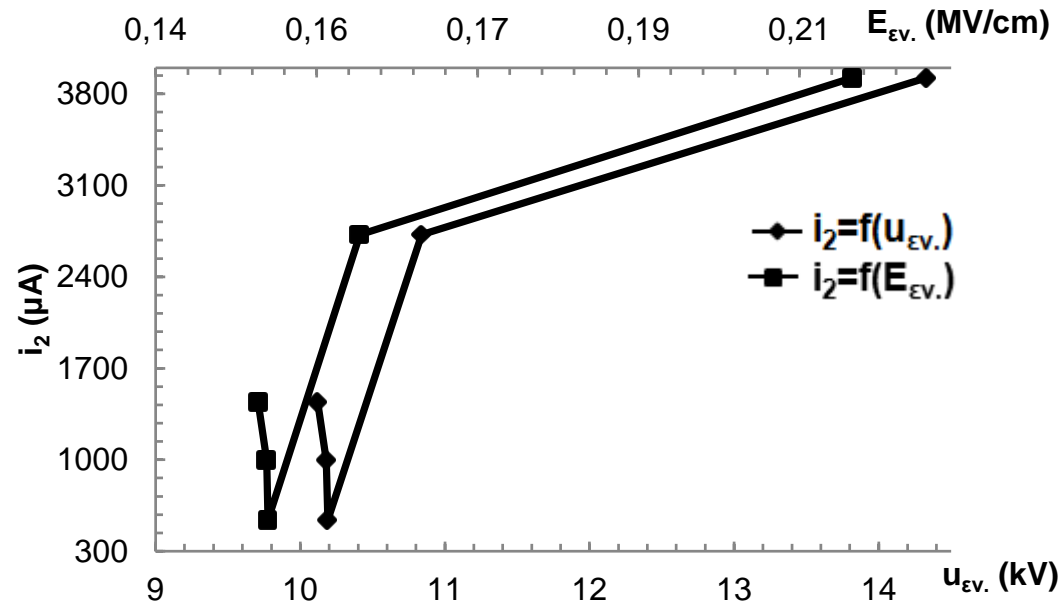
i_1 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $+250/2500 \mu\text{s}$.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.9: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $i_2=f(u_{Ev})$, \blacksquare $i_2=f(E_{Ev})$

όπου : u_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{Ev} ,

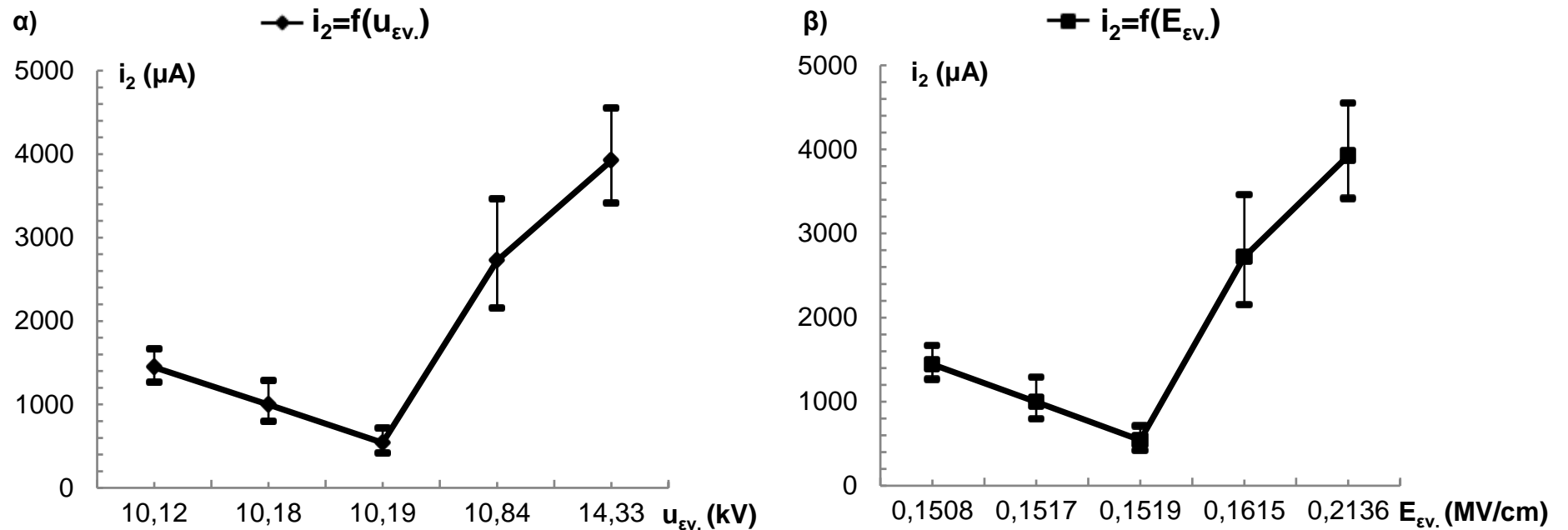
i_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

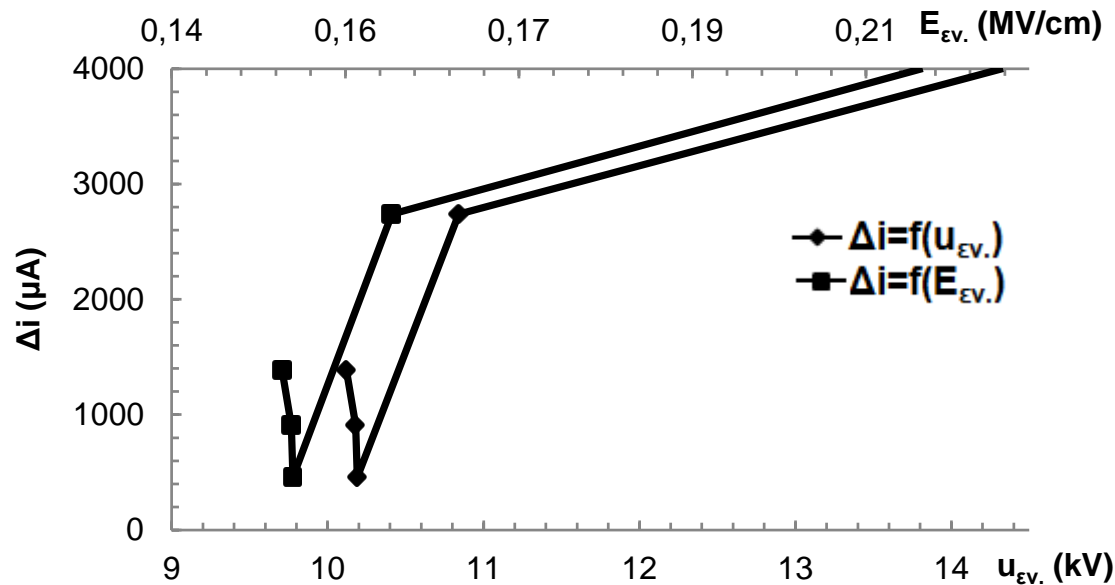
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.10: Χαρακτηριστικές: α) $i_2=f(u_{EV})$, β) $i_2=f(E_{EV})$
 α) χαρακτηριστική $i_2=f(u_{EV})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση \pm
 β) χαρακτηριστική $i_2=f(E_{EV})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση \pm , όπου :
 u_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,
 E_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{EV} ,
 i_2 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις $+250/2500 \mu s$.
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.11: Χαρακτηριστικές: $\blacklozenge \Delta i=f(u_{ev})$, $\blacksquare \Delta i=f(E_{ev})$

όπου : u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

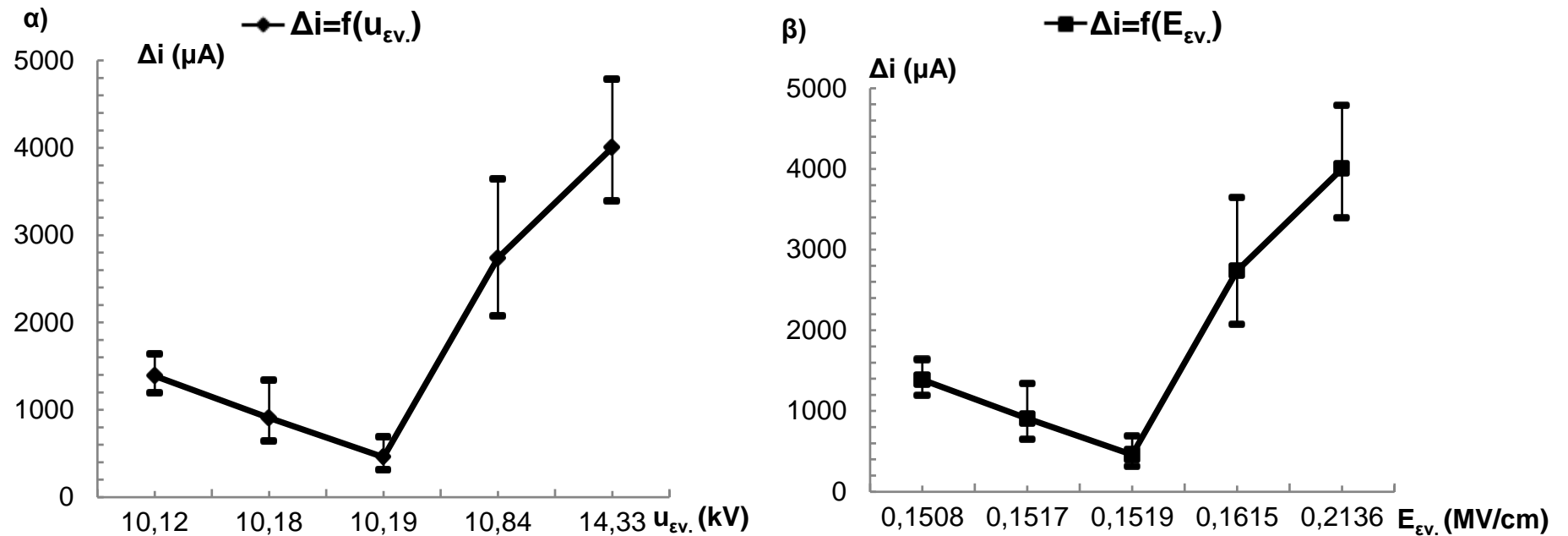
Δi : η μέση τιμή της μεταβολής του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

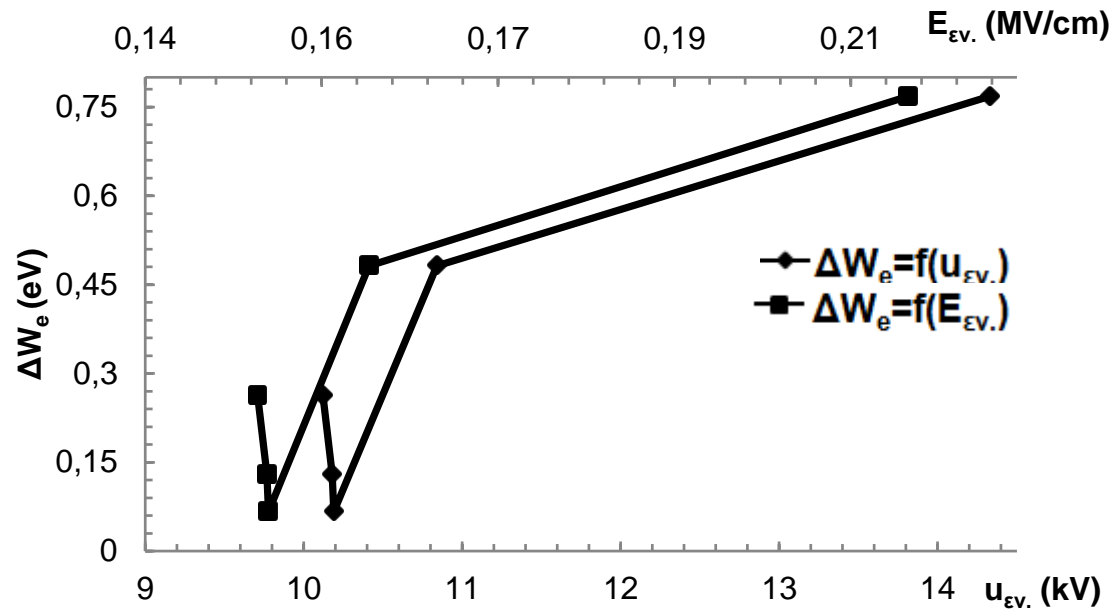
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.12: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta i=f(u_{ev.})$, β) $\Delta i=f(E_{ev.})$
 α) χαρακτηριστική $\Delta i=f(u_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---
 β) χαρακτηριστική $\Delta i=f(E_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :
 $u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,
 $E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,
 Δi : η μεταβολή του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.13: Χαρακτηριστικές: $\blacklozenge \Delta W_e = f(u_{EV})$, $\blacksquare \Delta W_e = f(E_{EV})$
 όπου : u_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{EV} ,

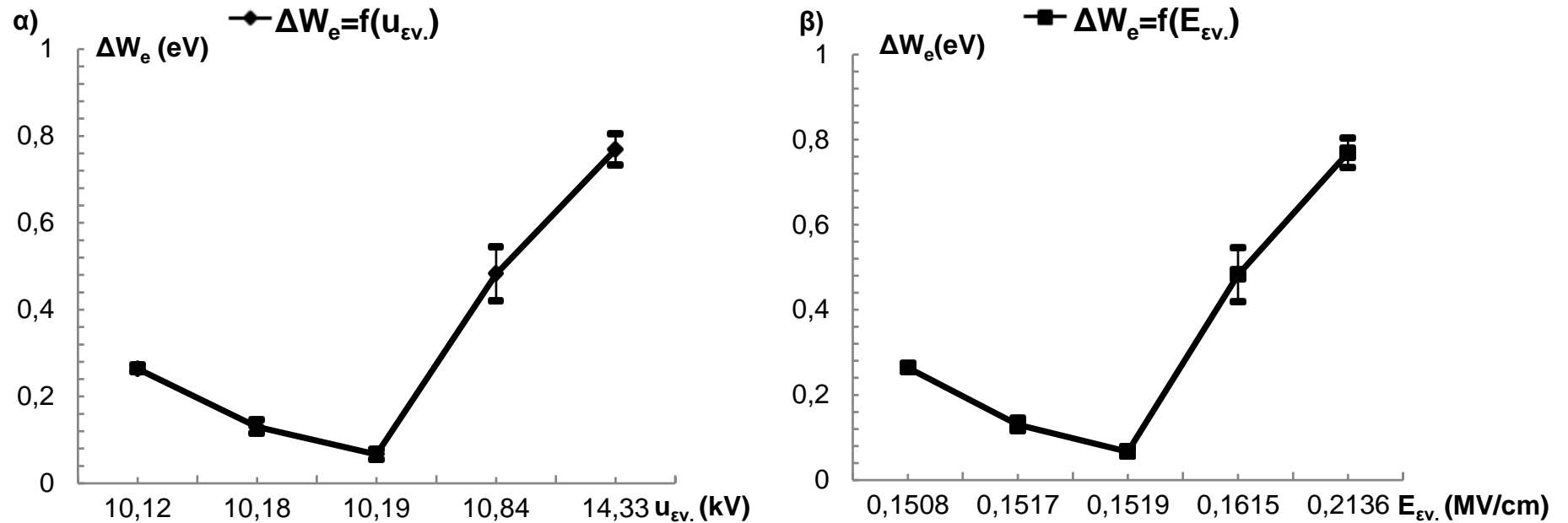
ΔW_e : η μέση ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.14: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta W_e = f(u_{ev.})$, β) $\Delta W_e = f(E_{ev.})$

α) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(u_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(E_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

$u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,

ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και

$C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

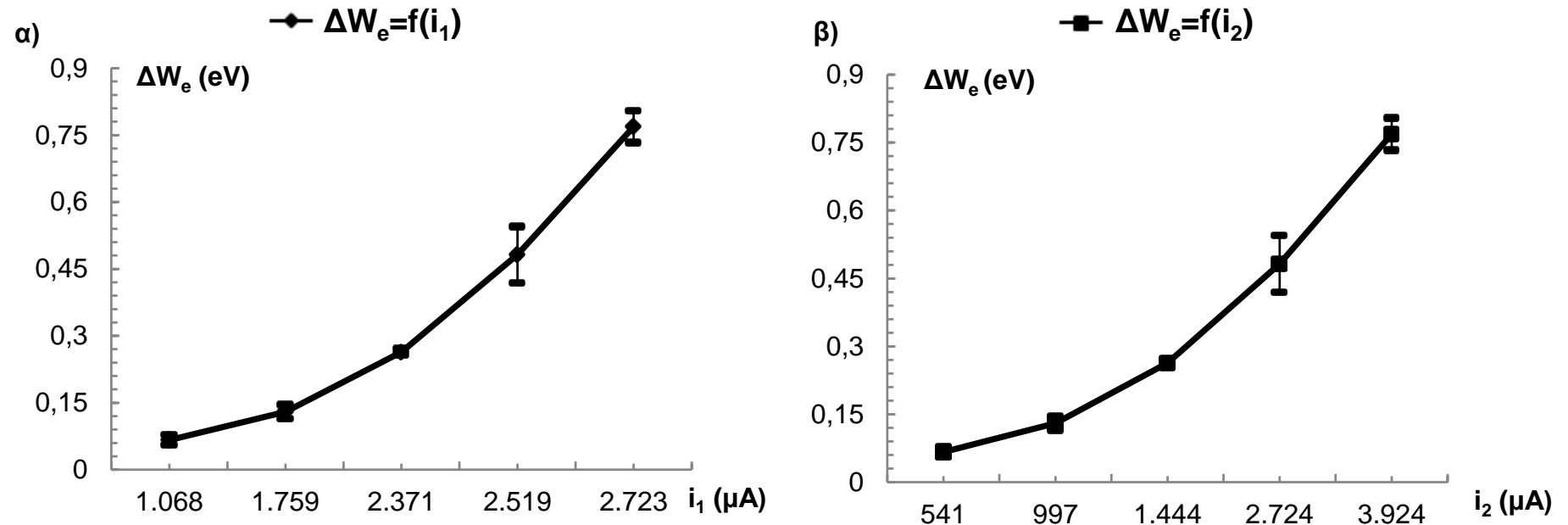
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..

Πίνακας 4: Μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης και του αντίστοιχου πεδίου, μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή του ρεύματος έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και της μεταβολής του και μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αντίστοιχης ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση +250/2500μs και d=1mm:

\hat{U}_k (kV)	\hat{E}_k (kV/cm)	i_1 (μA)	$i_{1,max}$ (μA)	$i_{1,min}$ (μA)	I_2 (μA)	$i_{2,max}$ (μA)	$i_{2,min}$ (μA)	Δi (μA)	Δi_{max} (μA)	Δi_{min} (μA)	ΔW_e (eV)	$\Delta W_{e,max}$ (eV)	$\Delta W_{e,min}$ (eV)
10,02	0,1493	-	-	-	238,33	-	-	-	-	-	0,005	-	-
13,4	0,1997	1067,54	1446,23	799,70	541,42	711,10	420,44	458,23	690,02	310,37	0,0665	0,078	0,055
16,95	0,2526	1759,09	3119,58	1045,45	997,03	1287,24	796,09	907,79	1336,09	645,03	0,13	0,1455	0,1145
20,16	0,3004	2370,87	2814,17	2027,79	1444,32	1667,60	1266,95	1386,73	1638,60	1192,67	0,2635	0,271	0,256
23,41	0,3489	2519,45	3605,15	1694,92	2723,67	3459,56	2155,72	2739,34	3640,37	2072,21	0,482	0,545	0,419
26,8	0,3994	2723,27	3915,66	1932,05	3923,82	4553,90	3414,12	4001,87	4788,28	3391,01	0,7685	0,804	0,733
30,5	0,4545	Διάσπαση											



Σχήμα 3.2.15: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta W_e = f(i_1)$, β) $\Delta W_e = f(i_2)$

α) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_1)$ των μέσων τιμών ΔW_e , με τυπική απόκλιση σ

β) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_2)$ των μέσων τιμών ΔW_e , με τυπική απόκλιση σ , όπου :

i_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

i_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.,

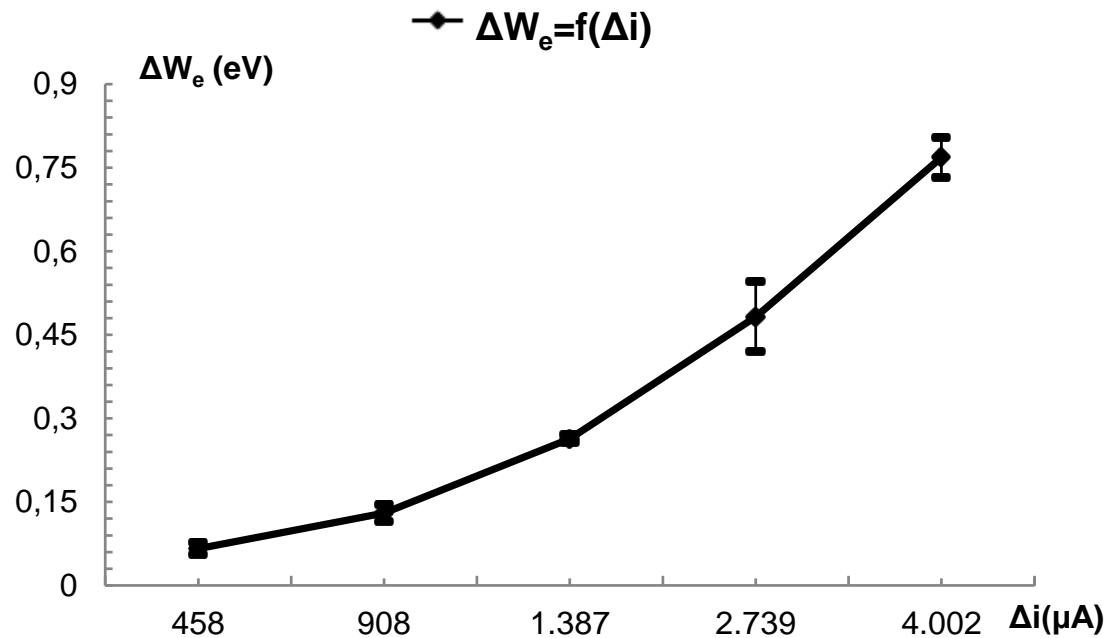
ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

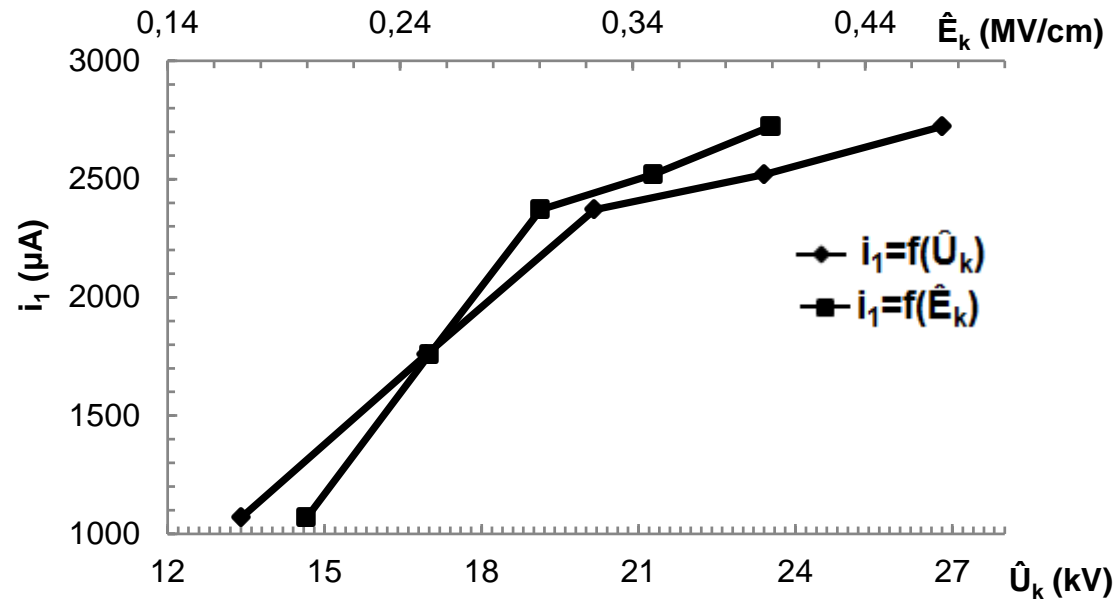
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.16: Χαρακτηριστική: $\Delta W_e = f(\Delta i)$ με τυπική απόκλιση σ όπου: Δi : η μέση τιμή της μεταβολής του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων, ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi, κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs . Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι. Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα. ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.17: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $i_1=f(\hat{U}_k)$, \blacksquare $i_1=f(\hat{E}_k)$

όπου : \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

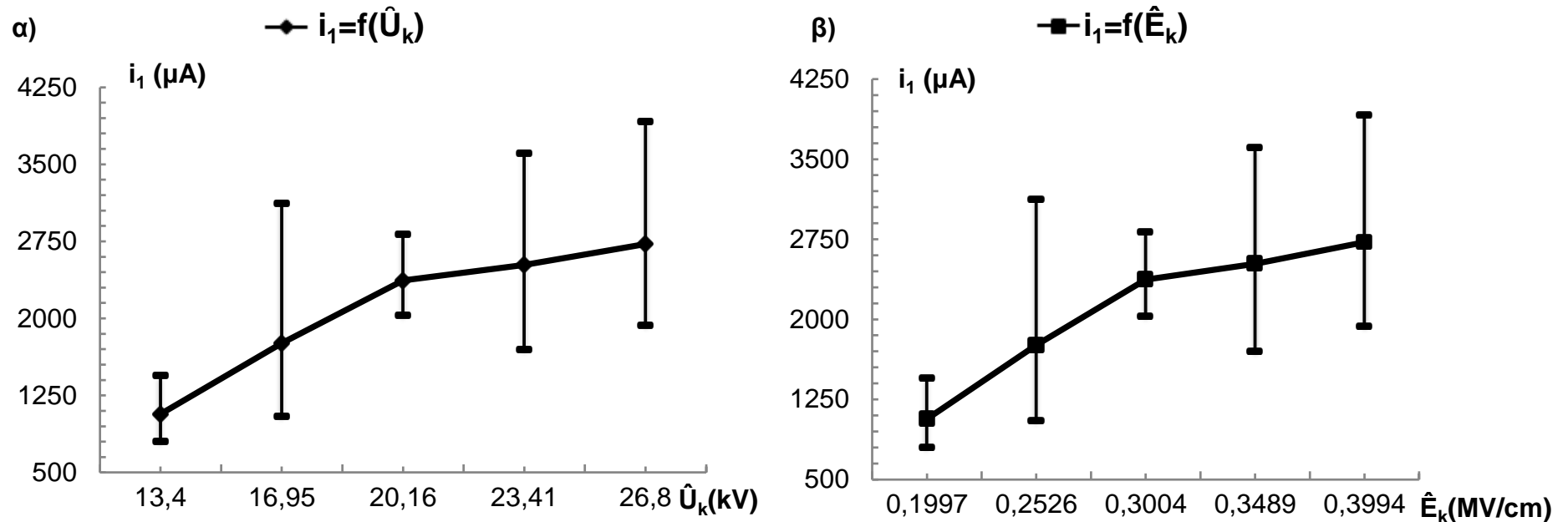
i_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.18: Χαρακτηριστικές: α) $i_1 = f(\hat{U}_k)$, β) $i_1 = f(\hat{E}_k)$

α) χαρακτηριστική $i_1 = f(\hat{U}_k)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $\bar{\sigma}$
 β) χαρακτηριστική $i_1 = f(\hat{E}_k)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $\bar{\sigma}$, όπου:
 \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

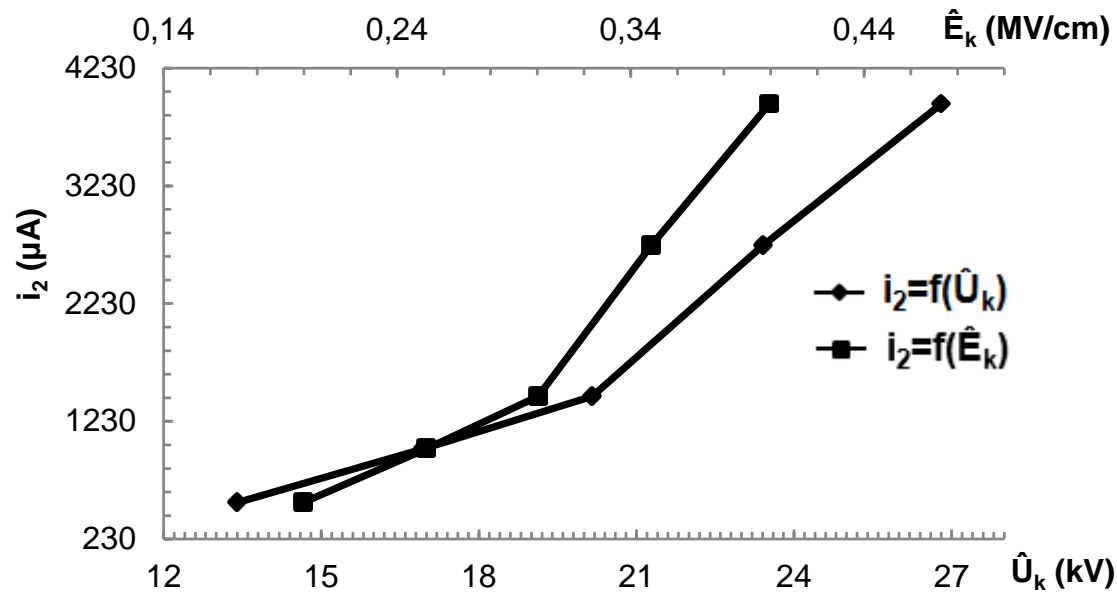
i_1 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις $+250/2500 \mu s$.

Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.19: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $i_2=f(\hat{U}_k)$, \blacksquare $i_2=f(\hat{E}_k)$

όπου : \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

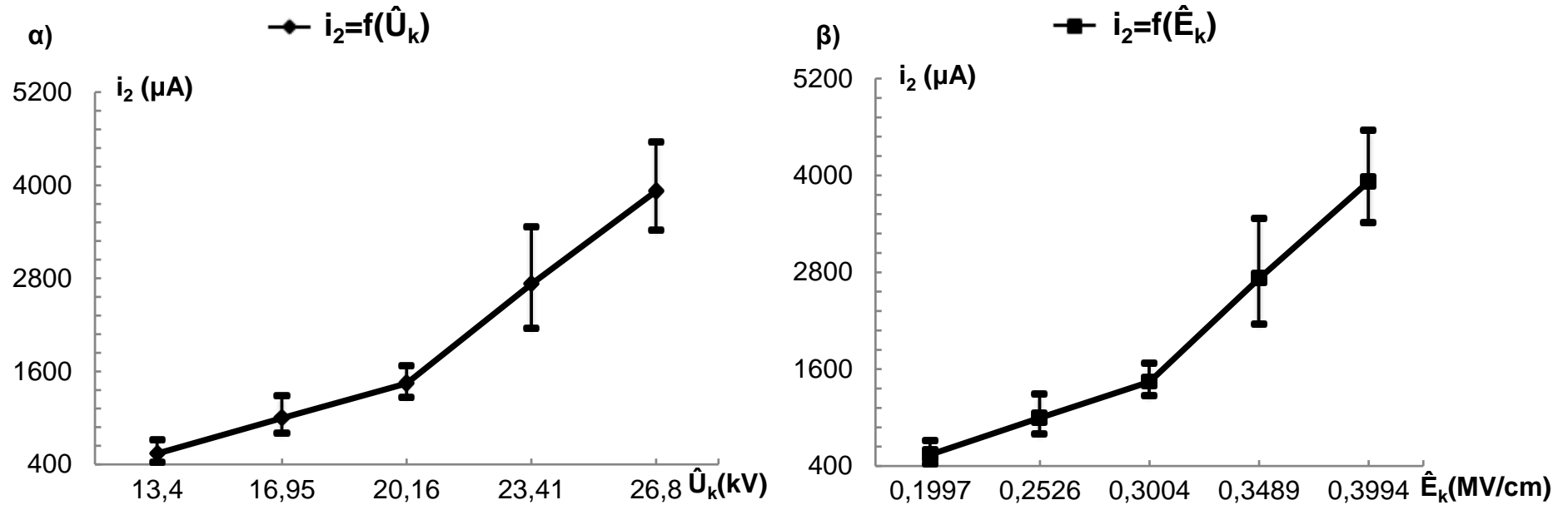
i_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs.

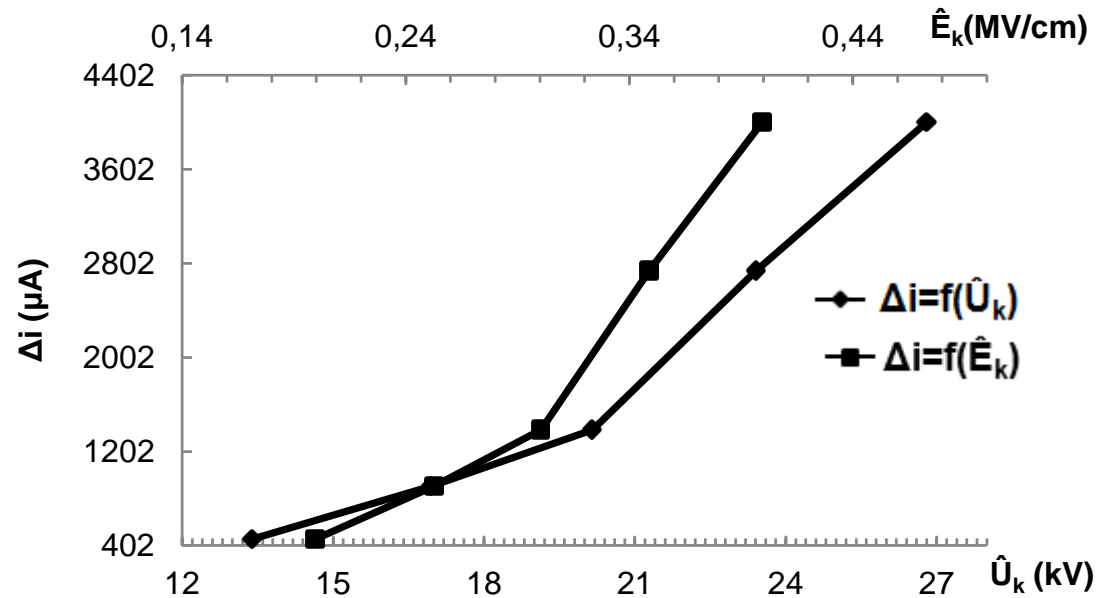
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.20: Χαρακτηριστικές: α) $i_2 = f(\hat{U}_k)$, β) $i_2 = f(\hat{E}_k)$
 α) χαρακτηριστική $i_2 = f(\hat{U}_k)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $\bar{\sigma}$
 β) χαρακτηριστική $i_2 = f(\hat{E}_k)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $\bar{\sigma}$, όπου:
 \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,
 \hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,
 i_2 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαιώσεως των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού *perlinax*, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις $+250/2500 \mu s$.
 Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.21: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $\Delta i=f(\hat{U}_k)$, \blacksquare $\Delta i=f(\hat{E}_k)$

όπου : \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

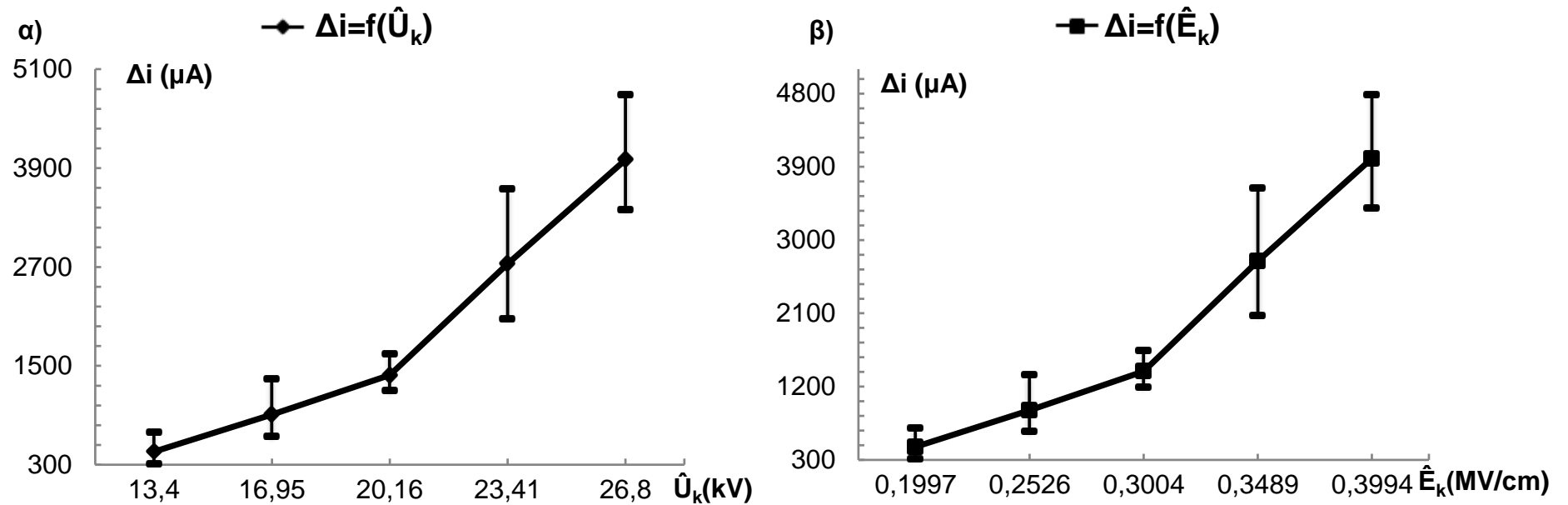
Δi : η μέση τιμή της μεταβολής του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.22: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta i = f(\hat{U}_k)$, β) $\Delta i = f(\hat{E}_k)$
 α) χαρακτηριστική $\Delta i = f(\hat{U}_k)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $-$
 β) χαρακτηριστική $\Delta i = f(\hat{E}_k)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $-$, όπου :
 \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,
 \hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,
 Δi : η μεταβολή του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού *perlinax*, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις $+250/2500 \mu s$.
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..

Για πάχος μονωτικού $d=1\text{mm}$ και εφαρμοζόμενη κρουστική τάση της μορφής $-250/2500\ \mu\text{s}$ έχουμε :

Πίνακας 5: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή του χρόνου έναρξης, περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και της χρονικής διάρκειας τους για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και $d=1\text{mm}$:

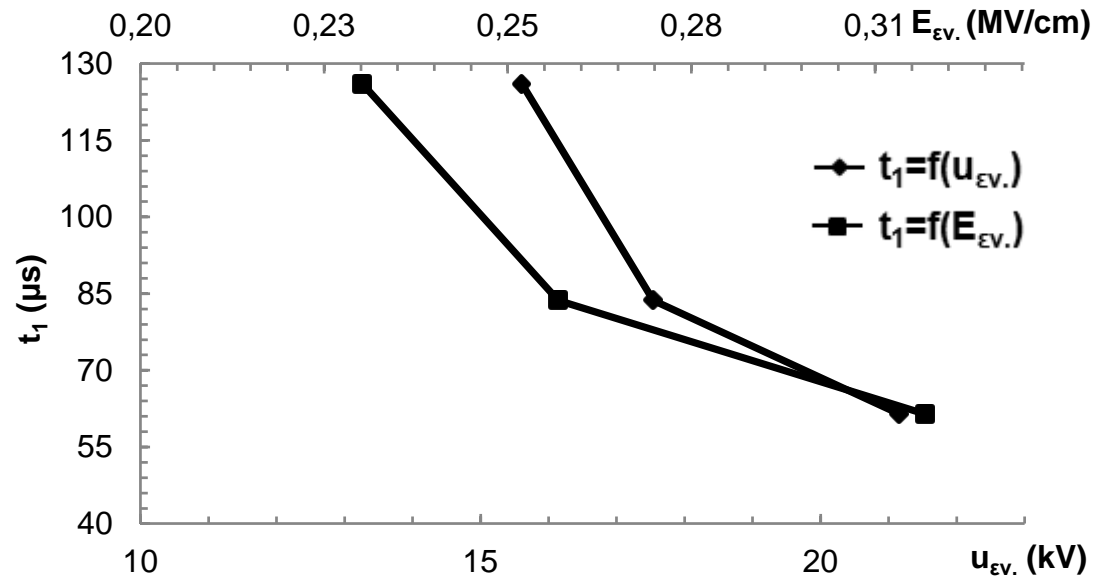
\hat{U}_k (kV)	\hat{E}_k (kV/cm)	$u_{Ev.}$ (kV)	$\sigma_{uEv.}$ (kV)	$u_{Ev.min}$ (kV)	$u_{Ev.max}$ (kV)	$E_{Ev.}$ (kV/cm)	$\sigma_{E_{Ev.}}$ (kV/cm)	$E_{Ev. min}$ (kV/cm)	$E_{Ev.max}$ (kV/cm)	t_1 (μs)	σ_{t_1} (μs)	$t_{1,min}$ (μs)	$t_{1,max}$ (μs)	t_2 (μs)	σ_{t_2} (μs)	$t_{2,min}$ (μs)	$t_{2,max}$ (μs)	Δt (μs)	Δt_{min} (μs)	Δt_{max} (μs)
10,5	0,1565	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13,78	0,2054	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17,17	0,2559	15,61	0,28	15,33	15,89	0,2326	0,0042	0,2285	0,2368	126	3,18	122,82	129,18	177,75	41,73	136,02	219,48	6,84	39,36	96,66
21,24	0,3165	17,54	1,61	15,93	19,15	0,2614	0,024	0,2374	0,2854	83,7	16,31	67,39	100,01	183,6	30	153,6	213,6	53,59	53,59	146,21
24,46	0,3645	21,16	0,85	20,31	22,01	0,3154	0,0127	0,3027	0,328	61,42	13,22	48,2	74,64	215,99	29,26	186,73	245,25	112,09	112,09	197,05
27,9	0,4158	Διασπαση																		

Πίνακας 6: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή του φορτίου και του ρεύματος έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και των αντίστοιχων μεταβολών τους για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση -250/2500μs και d=1mm:

q_1 (μC)	σ_{q1} (μC)	$q_{1,\min}$ (μC)	$q_{1,\max}$ (μC)	q_2 (μC)	σ_{q2} (μC)	$q_{2,\min}$ (μC)	$q_{2,\max}$ (μC)	Δq (μC)	Δq_{\min} (μC)	Δq_{\max} (μC)	i_1 (μA)	$i_{1,\max}$ (μA)	$i_{1,\min}$ (μA)	i_2 (μA)	$i_{2,\max}$ (μA)	$i_{2,\min}$ (μA)	Δi (μA)	Δi_{\max} (μA)	Δi_{\min} (μA)
0,059	0,001	0,058	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,175	0,004	0,171	0,179	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,1968	0,07	0,1268	0,2668	0,163	0,01	0,153	0,173	-0,034	-0,114	0,0462	1561,90	2172,28	981,58	917,02	1271,87	697,10	-	-	-
0,126	0,01	0,116	0,136	0,356	0,05	0,306	0,406	0,23	0,17	0,29	1505,38	2018,10	1159,88	1939,00	2643,23	1432,58	2302,30	5411,46	1162,71
0,132	0,016	0,116	0,148	0,931	0,2	0,731	1,131	0,799	0,583	1,015	2149,14	3070,54	1554,13	4310,38	6056,87	2980,63	5169,18	9055,22	2958,64
Διασπαση																			

Πίνακας 7: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της τάσης έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και της μεταβολής της στο δοκίμιο και μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αντίστοιχης ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση -250/2500μs και d=1mm:

C_m (nF)	u_1 (V)	σ_{u1} (V)	$u_{1, \min}$ (V)	$u_{1, \max}$ (V)	u_2 (V)	σ_{u2} (V)	$u_{2, \min}$ (V)	$u_{2, \max}$ (V)	Δu (V)	Δu_{\min} (V)	Δu_{\max} (V)	ΔW_e (eV)	$\Delta W_{e \min}$ (eV)	$\Delta W_{e \max}$ (eV)
1000	0,059	0,001	0,058	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1000	0,175	0,004	0,171	0,179	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1000	0,1968	0,07	0,1268	0,2668	0,163	0,01	0,153	0,173	-0,034	-0,114	0,0462	-	-	-
1000	0,126	0,01	0,116	0,136	0,356	0,05	0,306	0,406	0,23	0,17	0,29	0,115	0,085	0,145
1000	0,132	0,016	0,116	0,148	0,931	0,2	0,731	1,131	0,799	0,583	1,015	0,3995	0,2915	0,5075
1000	Διασπαση													



Σχήμα 3.2.23: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $t_1=f(u_{ev})$, \blacksquare $t_1=f(E_{ev})$

όπου : u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

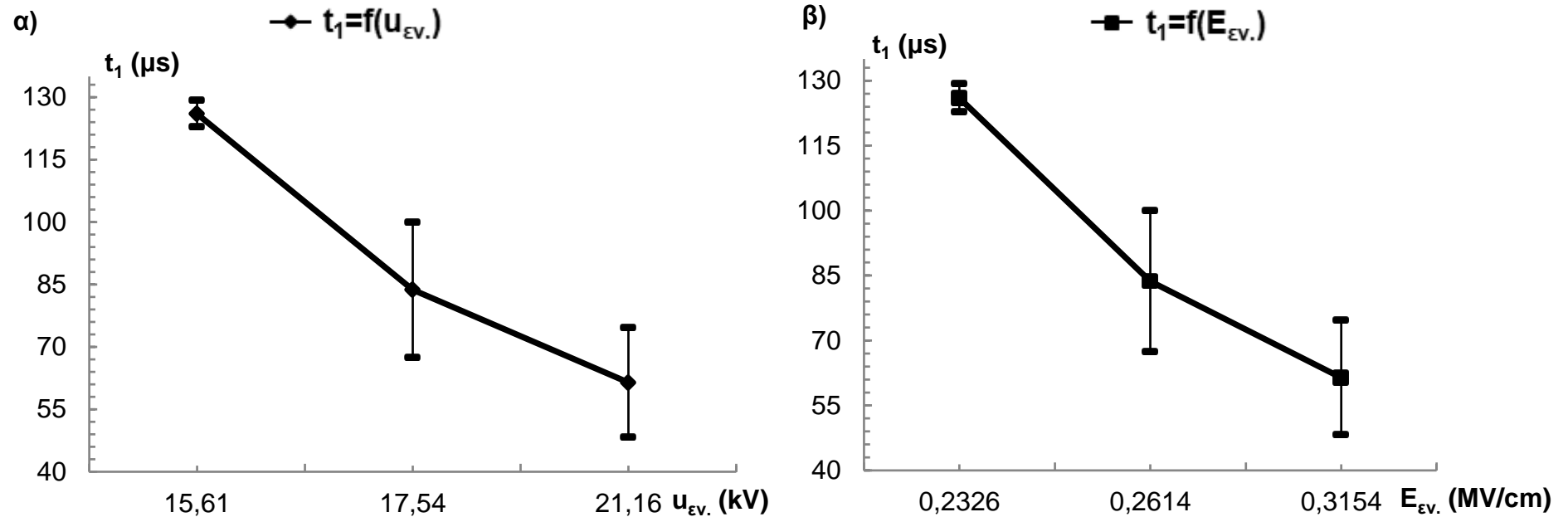
t_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.24: Χαρακτηριστικές: α) $t_1=f(u_{ev.})$, β) $t_1=f(E_{ev.})$

α) χαρακτηριστική $t_1=f(u_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $t_1=f(E_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

$u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,

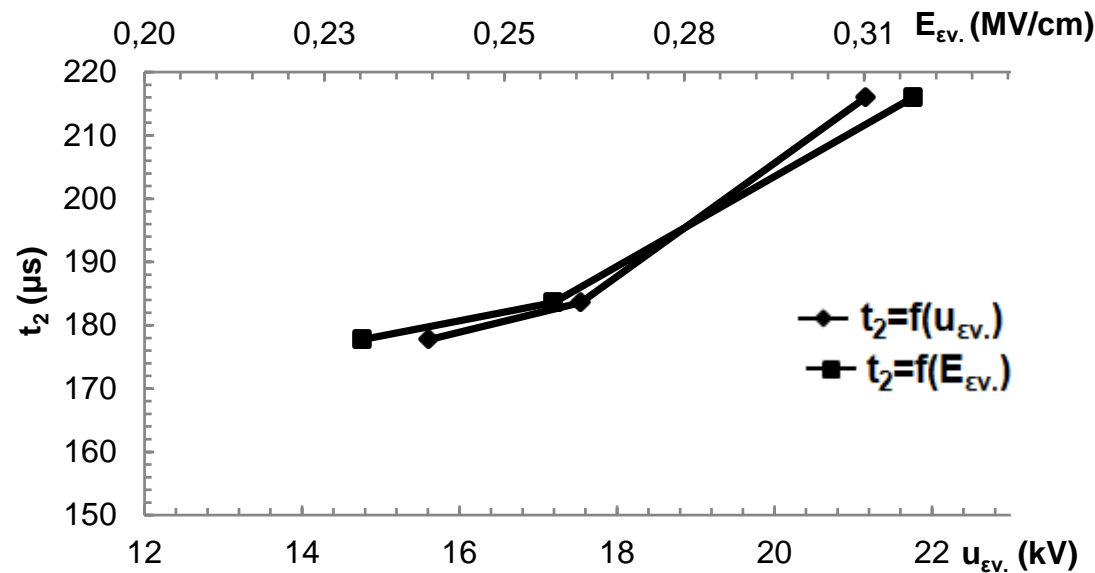
t_1 : η στιγμιαία τιμή του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.25: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $t_2=f(u_{ev})$, \blacksquare $t_2=f(E_{ev})$

όπου : u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

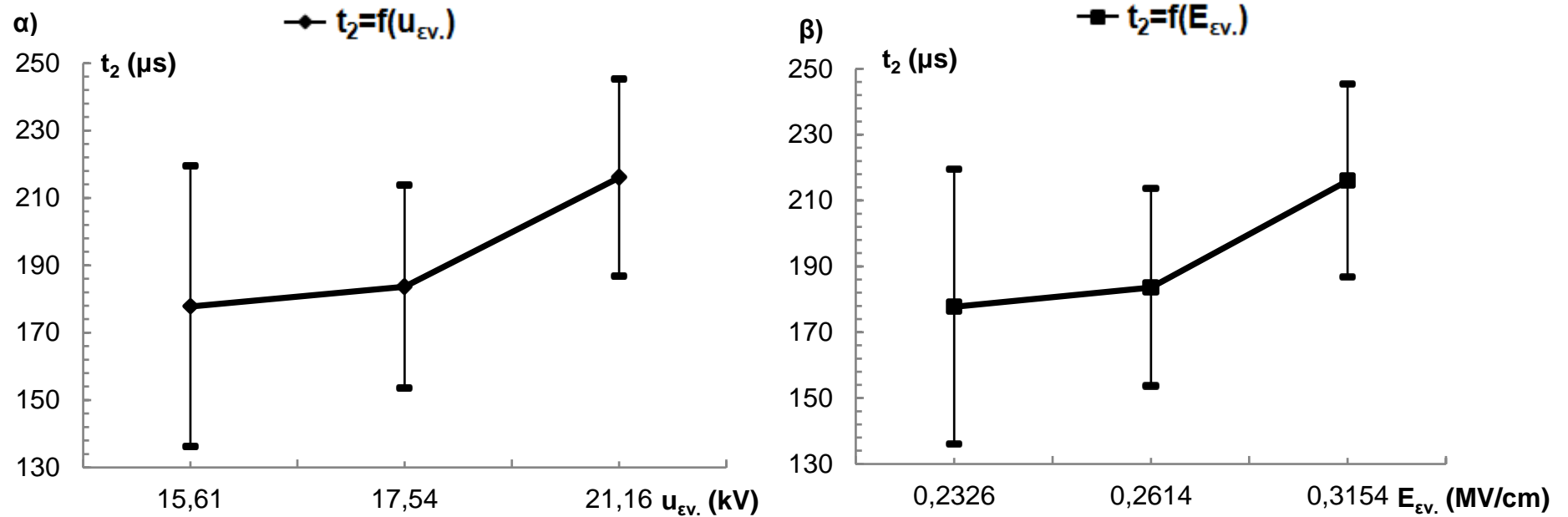
t_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του χρόνου περαιώσεως των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.26: Χαρακτηριστικές: α) $t_2=f(u_{Ev})$, β) $t_2=f(E_{Ev})$

α) χαρακτηριστική $t_2=f(u_{Ev})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $t_2=f(E_{Ev})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

u_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{Ev} ,

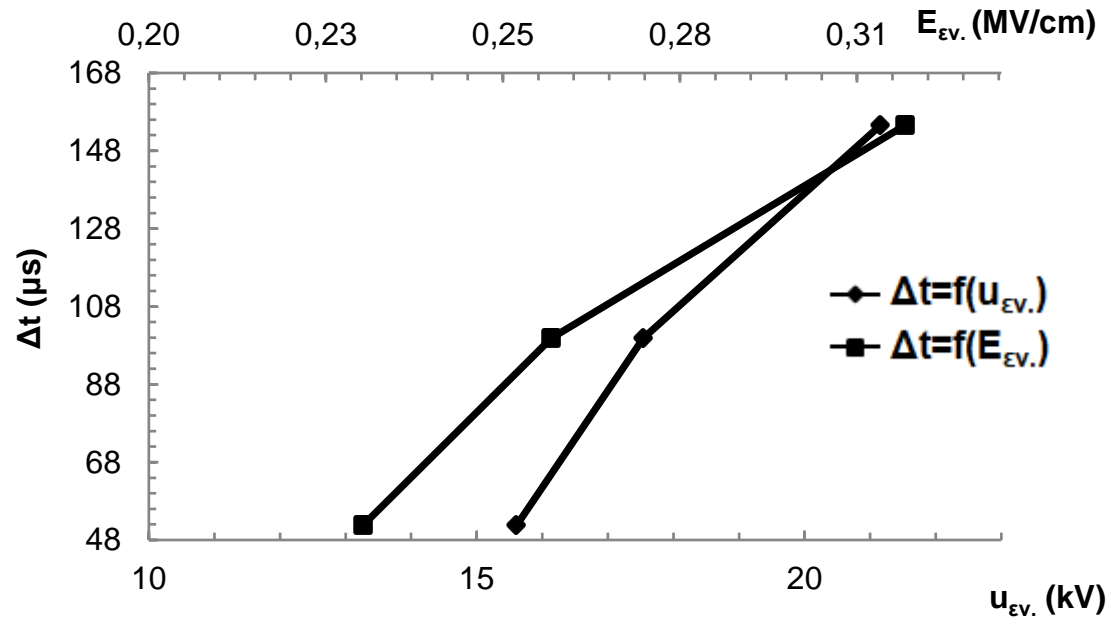
t_2 : η στιγμιαία τιμή του χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.27: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $\Delta t=f(u_{EV})$, \blacksquare $\Delta t=f(E_{EV})$

όπου : u_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{EV} ,

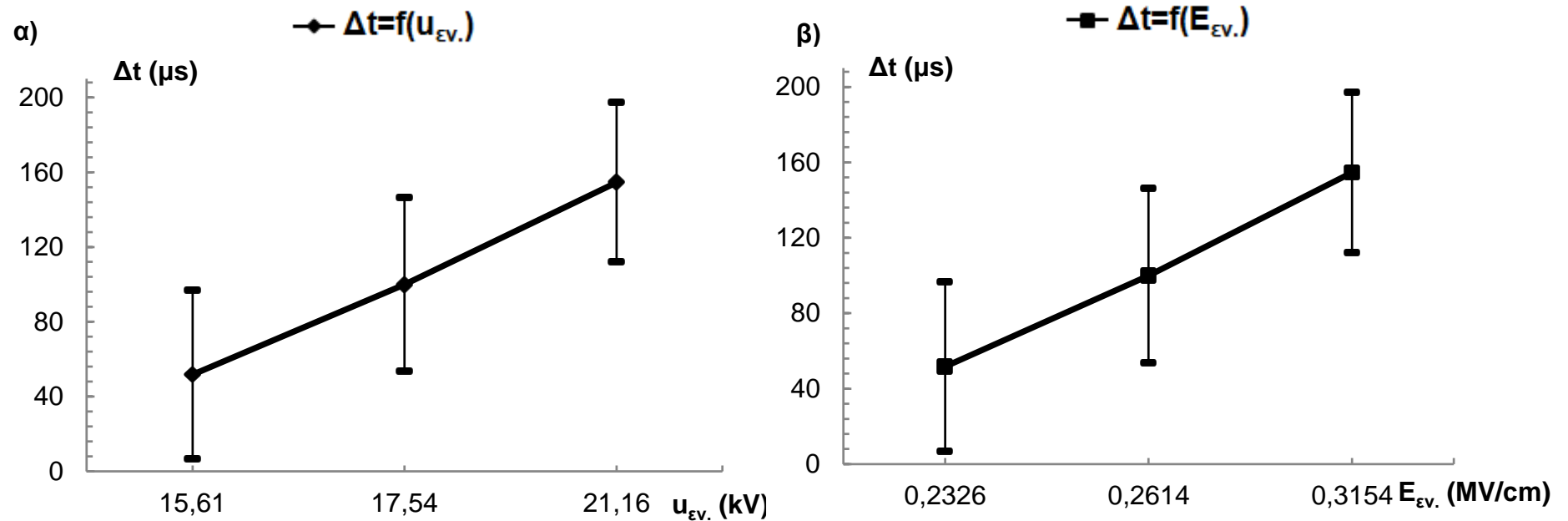
Δt : η μέση τιμή της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.28: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta t=f(u_{ev.})$, β) $\Delta t=f(E_{ev.})$

α) χαρακτηριστική $\Delta t=f(u_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $-$

β) χαρακτηριστική $\Delta t=f(E_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $-$, όπου :

$u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,

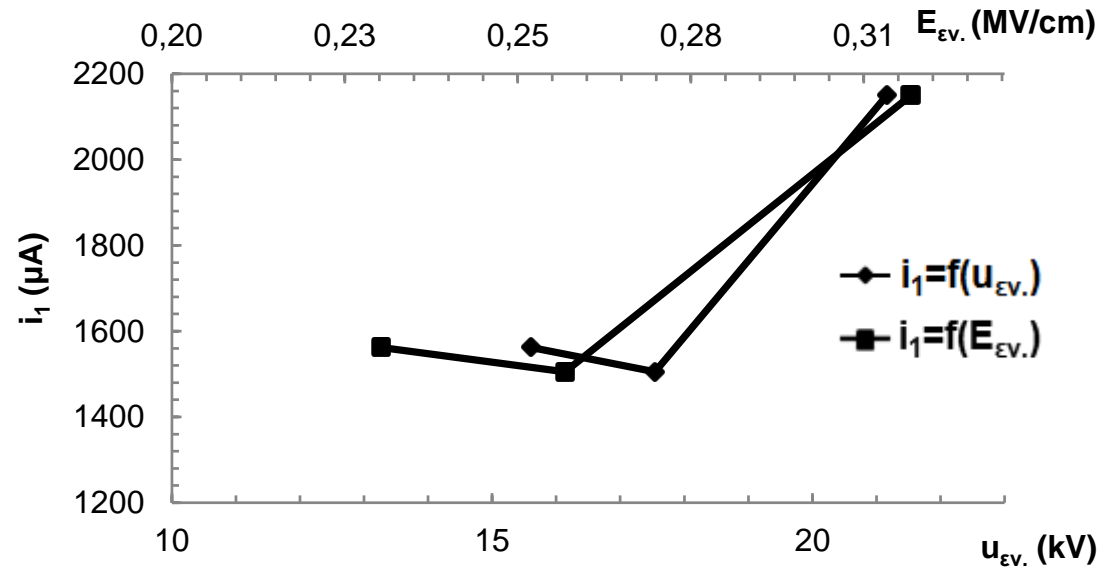
Δt : η χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu\text{s}$.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.29: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $i_1=f(u_{Ev.})$, \blacksquare $i_1=f(E_{Ev.})$

όπου : $u_{Ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{Ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{Ev.}$,

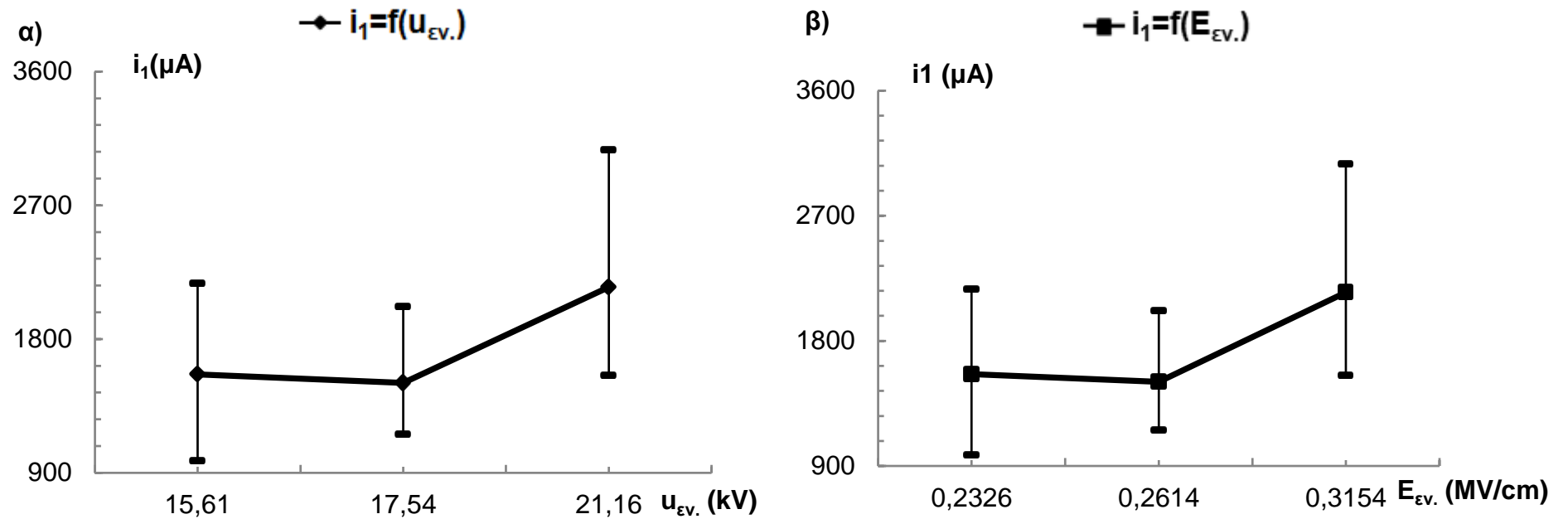
i_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.30: Χαρακτηριστικές: α) $i_1=f(u_{ev.})$, β) $i_1=f(E_{ev.})$

α) χαρακτηριστική $i_1=f(u_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $i_1=f(E_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

$u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,

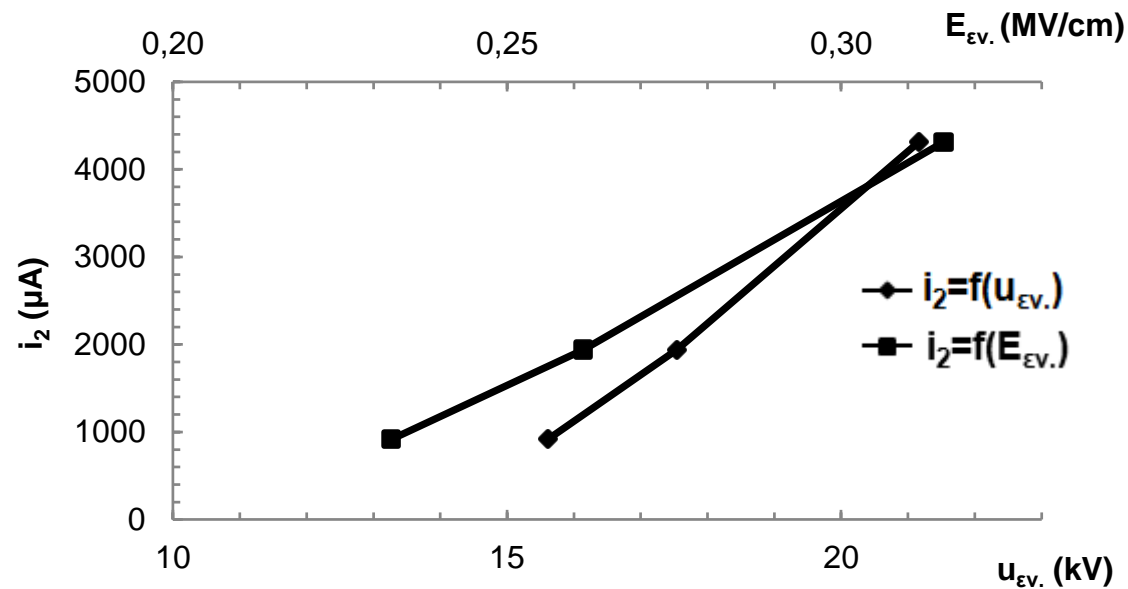
i_1 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu\text{s}$.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.31: Χαρακτηριστικές: $\blacklozenge i_2=f(u_{Ev})$, $\blacksquare i_2=f(E_{Ev})$

όπου : u_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{Ev} ,

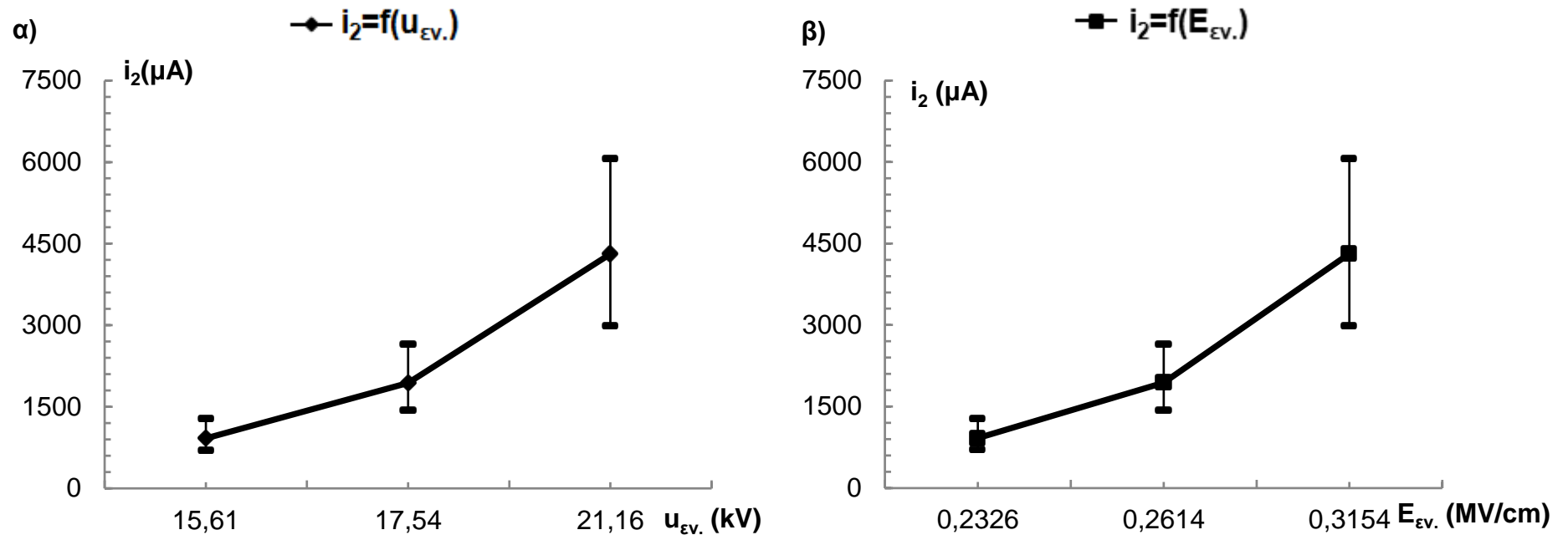
i_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

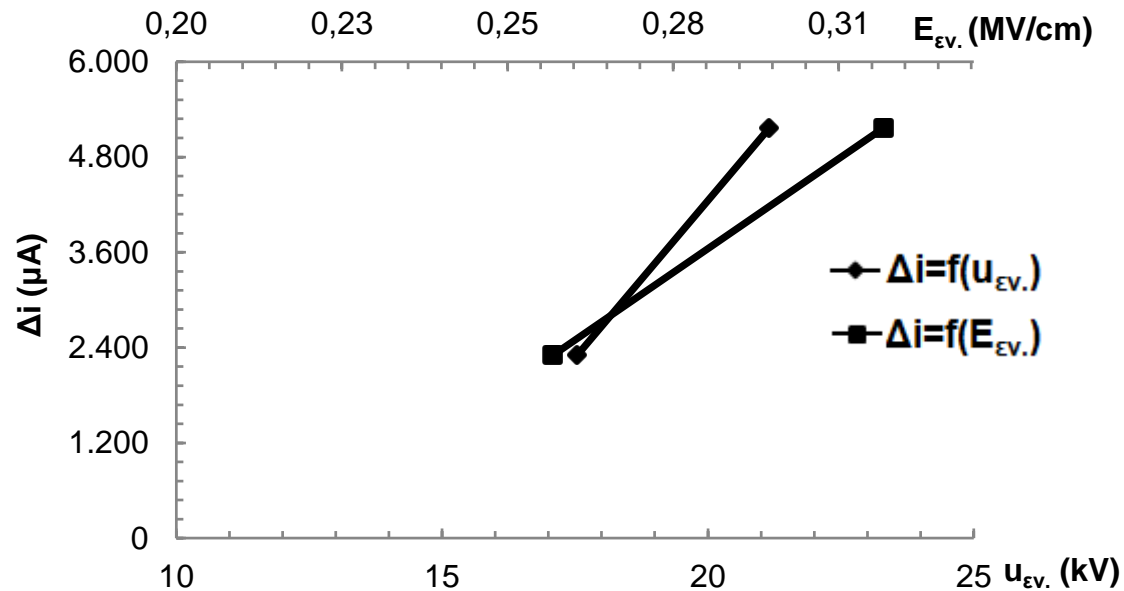
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.32: Χαρακτηριστικές: α) $i_2=f(u_{ev.})$, β) $i_2=f(E_{ev.})$
 α) χαρακτηριστική $i_2=f(u_{ev.})$ των μέσων τιμών i_2 , με τυπική απόκλιση σ
 β) χαρακτηριστική $i_2=f(E_{ev.})$ των μέσων τιμών i_2 , με τυπική απόκλιση σ , όπου:
 $u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,
 $E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,
 i_2 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu\text{s}$.
 Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.33: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $\Delta i=f(u_{EV.})$, \blacksquare $\Delta i=f(E_{EV.})$

όπου : $u_{EV.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

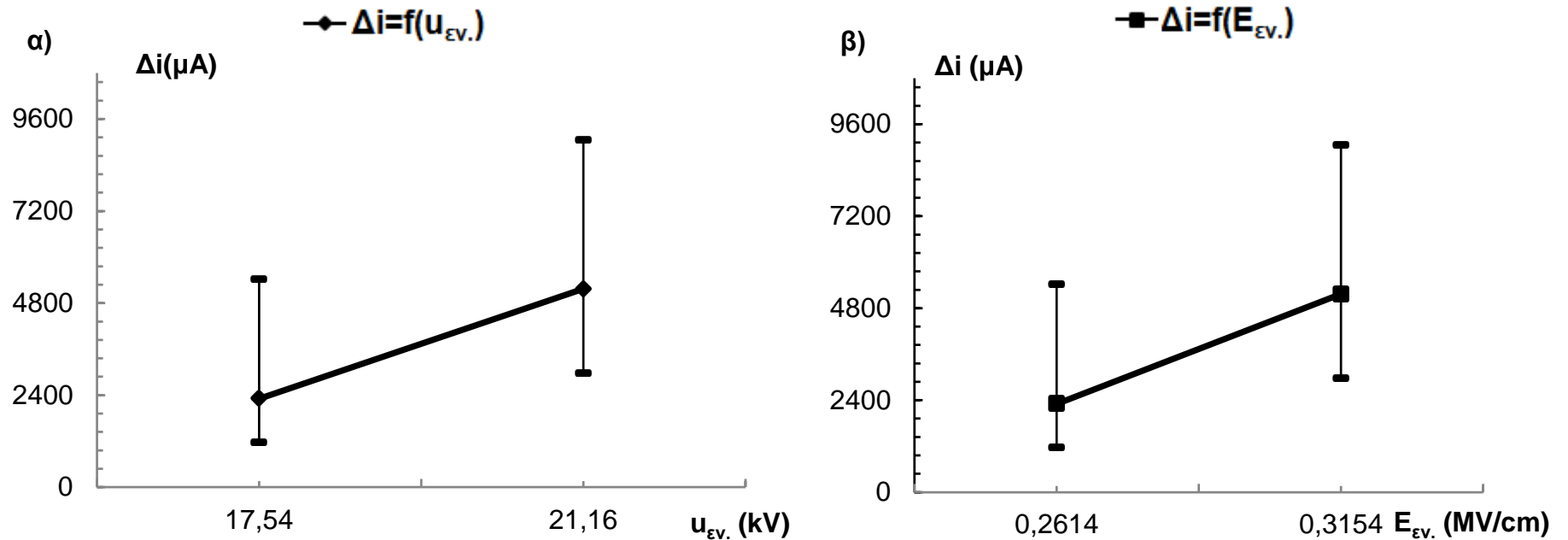
$E_{EV.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{EV.}$,

Δi : η μέση τιμή της μεταβολής του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων, κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.34: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta i = f(u_{ev})$, β) $\Delta i = f(E_{ev})$

α) χαρακτηριστική $\Delta i = f(u_{ev})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $\Delta i = f(E_{ev})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

Δi : η μεταβολή του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,

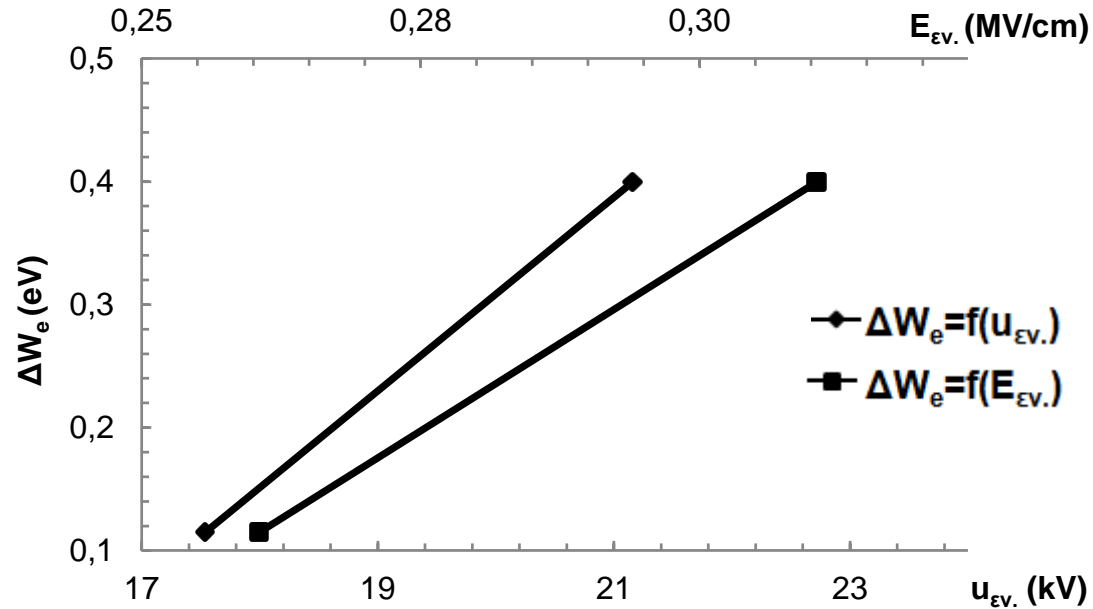
κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και

$C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu\text{s}$.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.35: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $\Delta W_e = f(u_{EV})$, \blacksquare $\Delta W_e = f(E_{EV})$

όπου : u_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{EV} ,

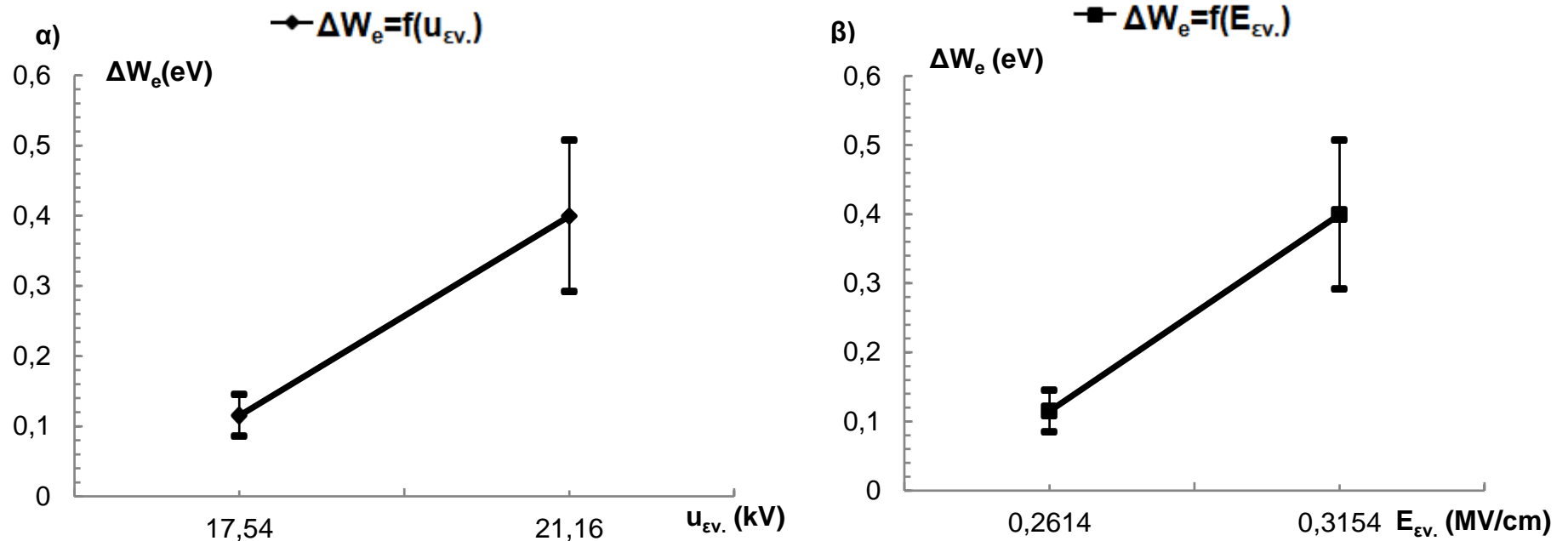
ΔW_e : η μέση τιμή της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu\text{s}$.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.36: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta W_e = f(u_{ev.})$, β) $\Delta W_e = f(E_{ev.})$

α) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(u_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(E_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

$u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,

ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500$ μs .

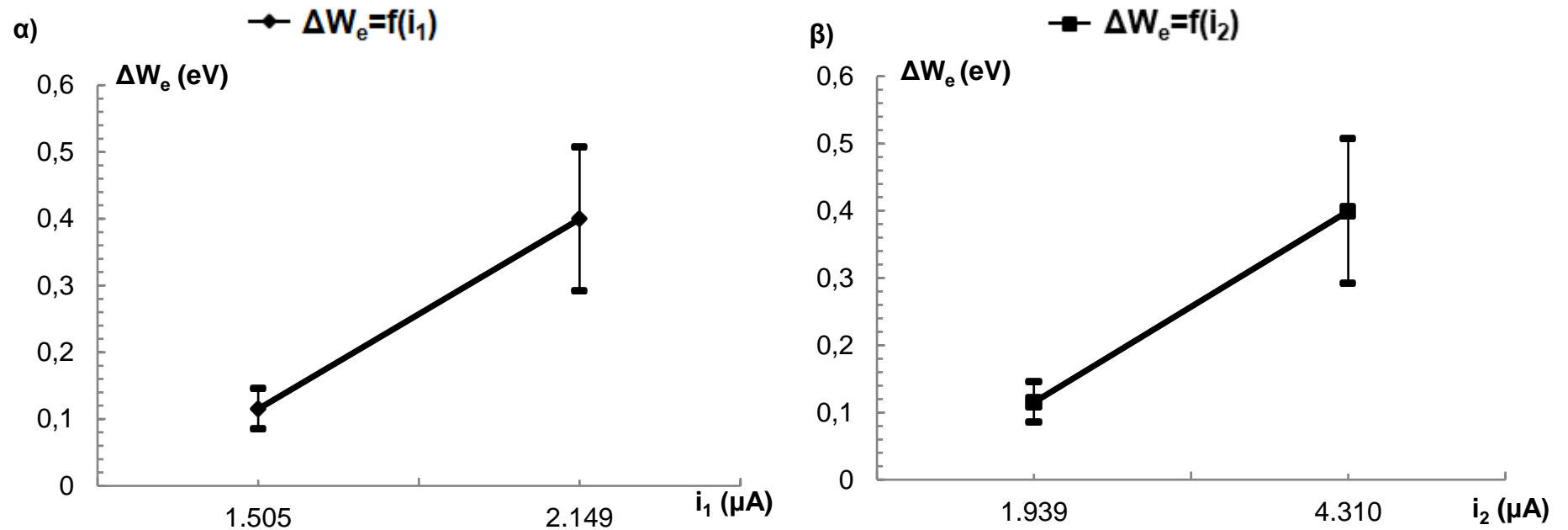
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..

Πίνακας 8: Μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης και του αντίστοιχου πεδίου , μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή του ρεύματος έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και της μεταβολής του και μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αντίστοιχης ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση -250/2500μs και d=1mm:

\hat{U}_k (kV)	\hat{E}_k (kV/cm)	i_1 (μA)	$i_{1,max}$ (μA)	$i_{1,min}$ (μA)	I_2 (μA)	$i_{2,max}$ (μA)	$i_{2,min}$ (μA)	Δi (μA)	Δi_{max} (μA)	Δi_{min} (μA)	ΔW_e (eV)	$\Delta W_{e min}$ (eV)	$\Delta W_{e max}$ (eV)
10,5	0,1565	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13,78	0,2054	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17,17	0,2559	1561,90	2172,28	981,58	917,02	1271,87	697,10	-	6754,39	-	-	-	-
21,24	0,3165	1505,38	2018,10	1159,88	1939,00	2643,23	1432,58	2302,30	5411,46	1162,71	0,115	0,085	0,145
24,46	0,3645	2149,14	3070,54	1554,13	4310,38	6056,87	2980,63	5169,18	9055,22	2958,64	0,3995	0,2915	0,5075
27,9	0,4158	Διάσπαση											



Σχήμα 3.2.37: Χαρακτηριστικές:α) $\Delta W_e = f(i_1)$,β) $\Delta W_e = f(i_2)$

α) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_1)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_2)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- ,όπου :

i_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

i_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.,

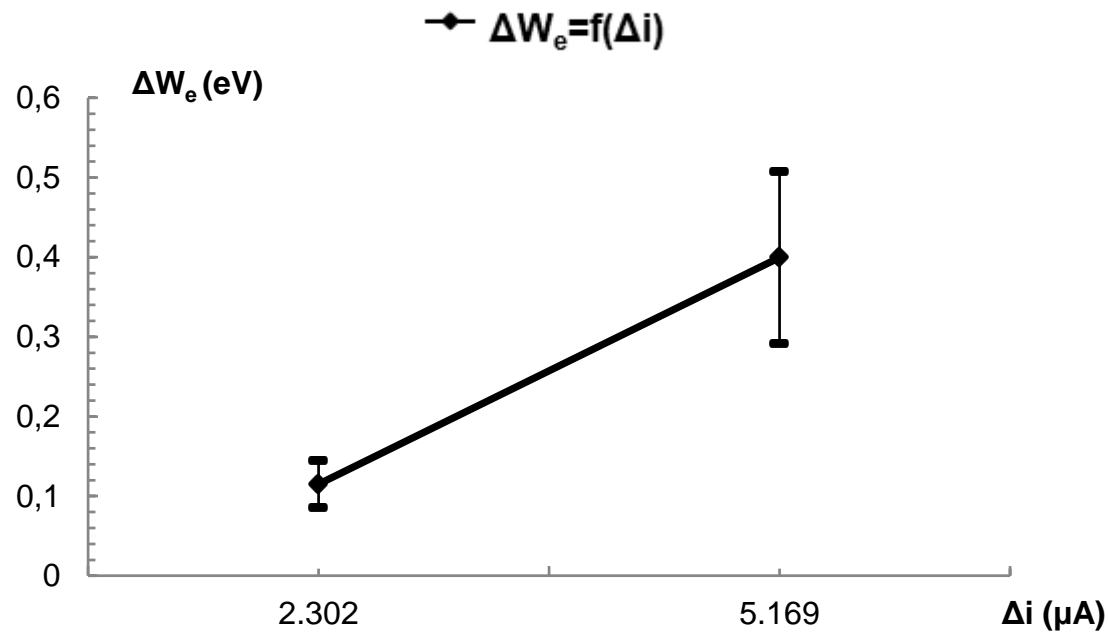
ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm , ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu\text{s}$.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..

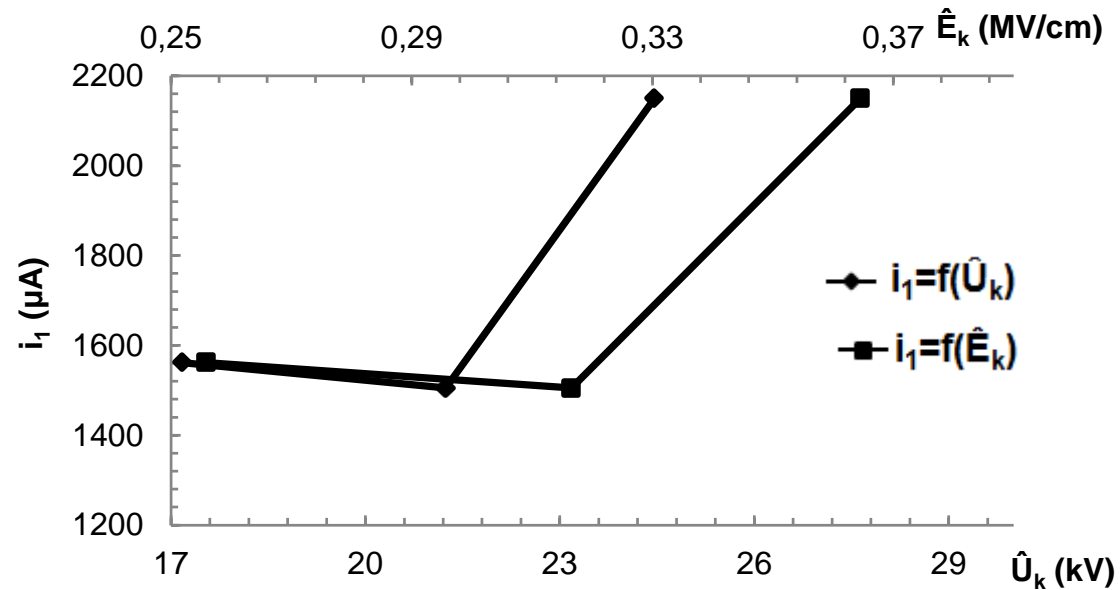


Σχήμα 3.2.38: Χαρακτηριστική: $\Delta W_e = f(\Delta i)$ με τυπική απόκλιση σ όπου: Δi : η μέση τιμή της μεταβολής του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων, ΔW_e η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi, κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu s$.

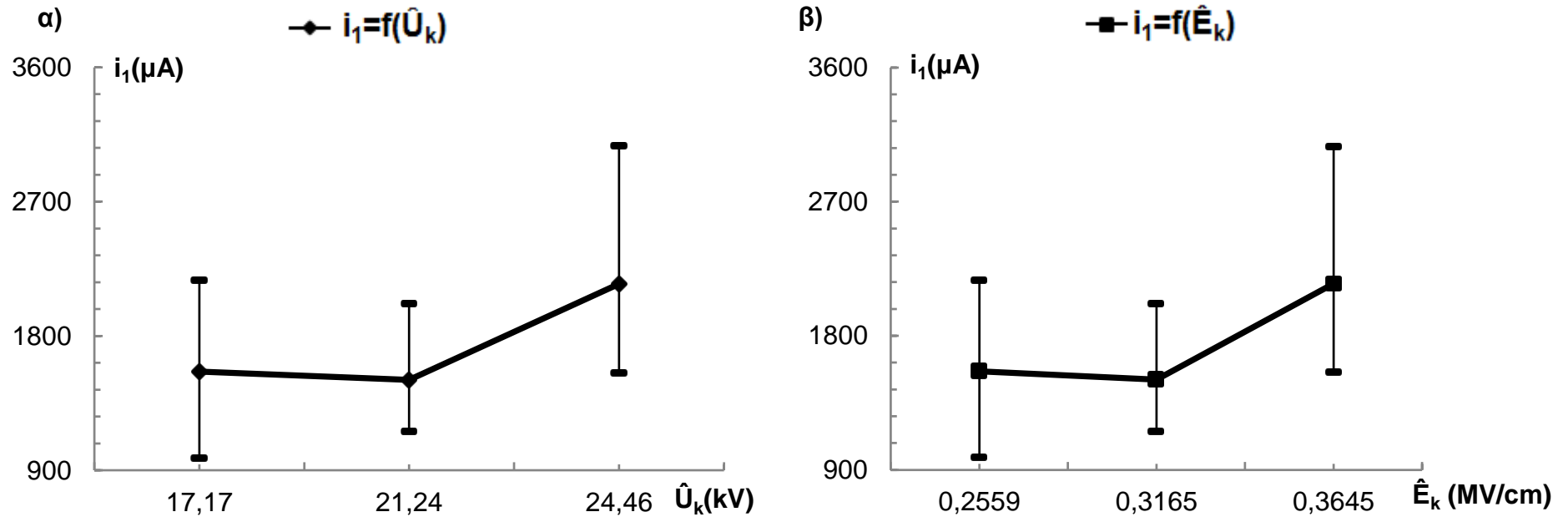
Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.39: Χαρακτηριστικές: $\blacklozenge i_1=f(\hat{U}_k)$, $\blacksquare i_1=f(\hat{E}_k)$
 όπου : \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,
 \hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,
 i_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu\text{s}$.
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.40: Χαρακτηριστικές: α) $i_1 = f(\hat{U}_k)$, β) $i_1 = f(\hat{E}_k)$

α) χαρακτηριστική $i_1 = f(\hat{U}_k)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $\bar{\sigma}$

β) χαρακτηριστική $i_1 = f(\hat{E}_k)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $\bar{\sigma}$, όπου :

\hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

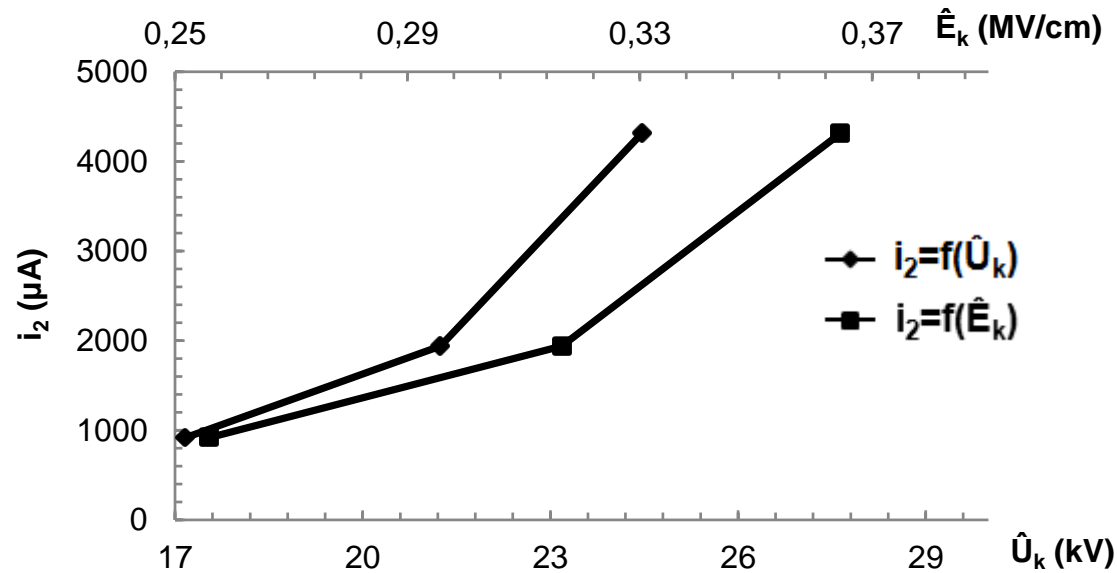
i_1 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού *retinax*, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu\text{s}$.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.41: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $i_2=f(\hat{U}_k)$, \blacksquare $i_2=f(\hat{E}_k)$

όπου : \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

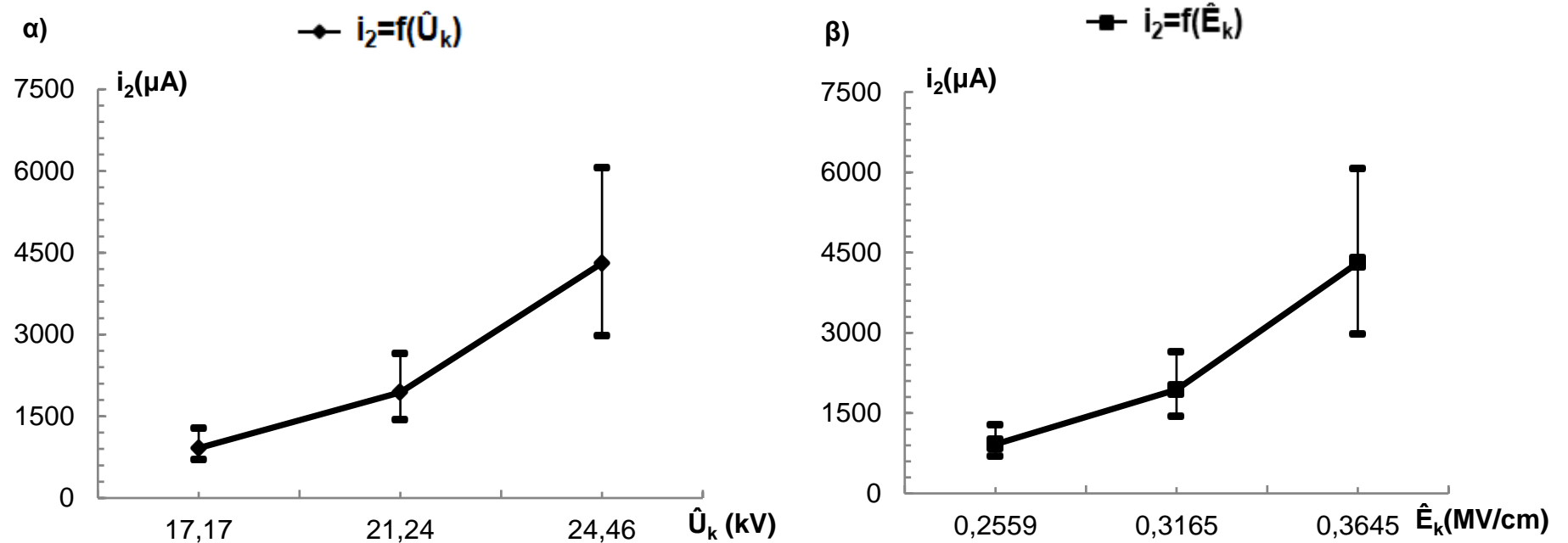
i_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9$ mm και $C_m=1000$ nF, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μ s.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.42: Χαρακτηριστικές: α) $i_2=f(\hat{U}_k)$, β) $i_2=f(\hat{E}_k)$

α) χαρακτηριστική $i_2=f(\hat{U}_k)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $\bar{\quad}$

β) χαρακτηριστική $i_2=f(\hat{E}_k)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $\bar{\quad}$, όπου :

\hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

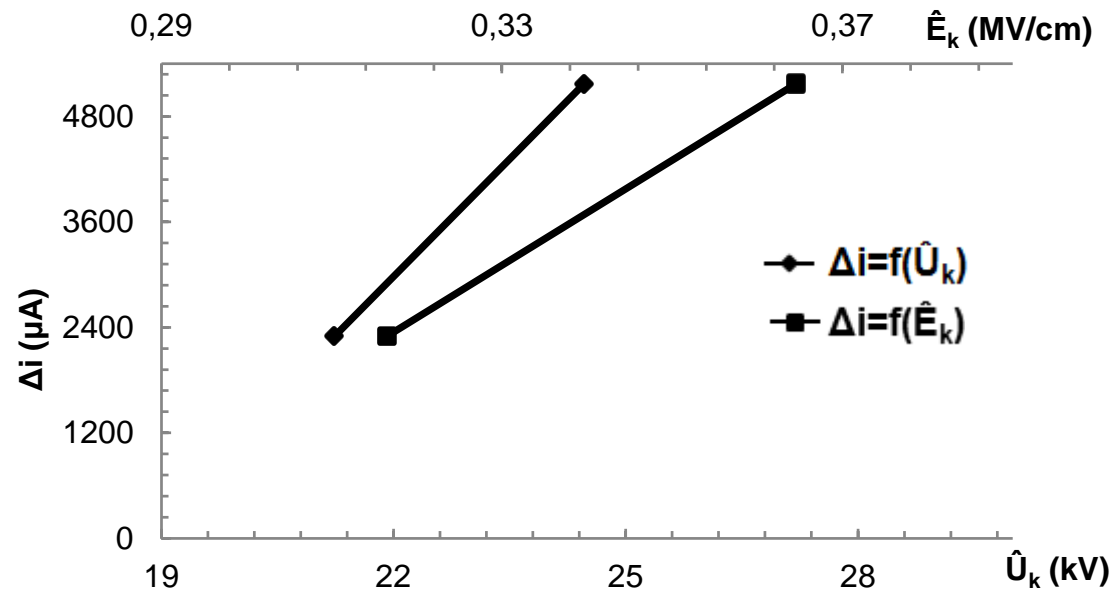
i_2 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού *perlinax*, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu\text{s}$.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.43: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $\Delta i=f(\hat{U}_k)$, \blacksquare $\Delta i=f(\hat{E}_k)$

όπου : \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

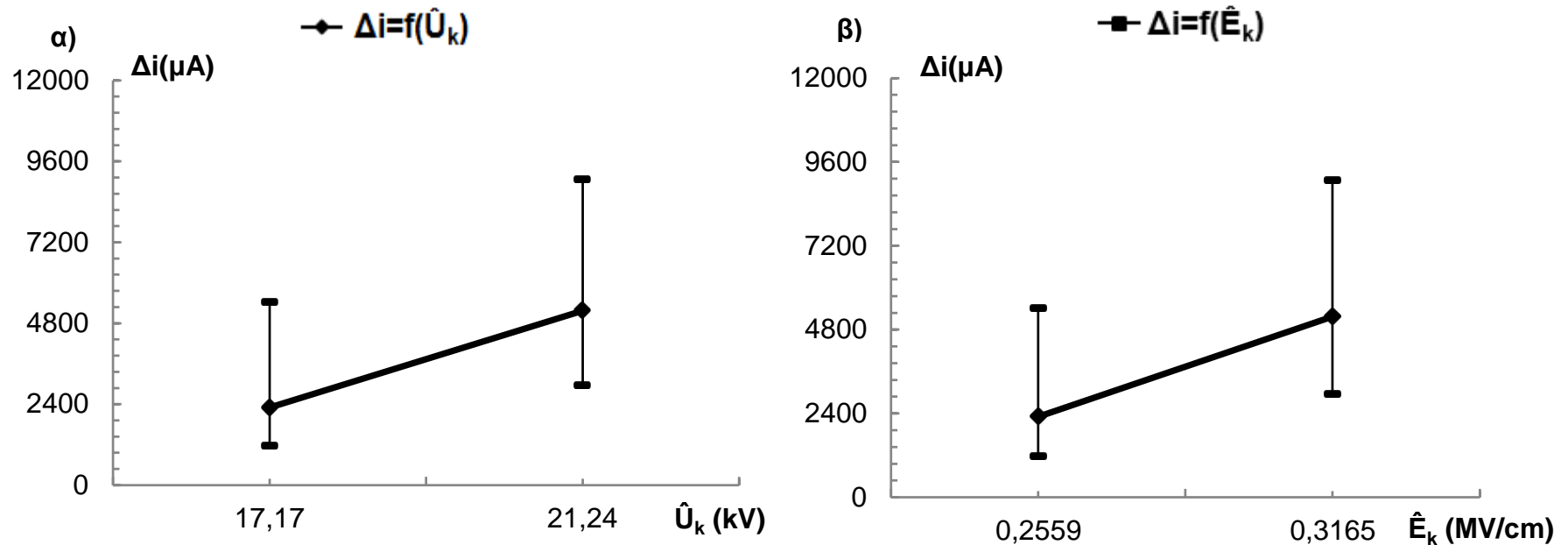
\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

Δi : η μέση τιμή της μεταβολής του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων, κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.44: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta i = f(\hat{U}_k)$, β) $\Delta i = f(\hat{E}_k)$
 α) χαρακτηριστική $\Delta i = f(\hat{U}_k)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $-$
 β) χαρακτηριστική $\Delta i = f(\hat{E}_k)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $-$, όπου :
 \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,
 \hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,
 Δi : η μεταβολή του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 1mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu s$.
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..

Για πάχος μονωτικού $d=2\text{mm}$ και εφαρμοζόμενη κρουστική τάση της μορφής $+250/2500 \mu\text{s}$ έχουμε :

Πίνακας 9: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή του χρόνου έναρξης, περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και της χρονικής διάρκειας τους για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και $d=2\text{mm}$:

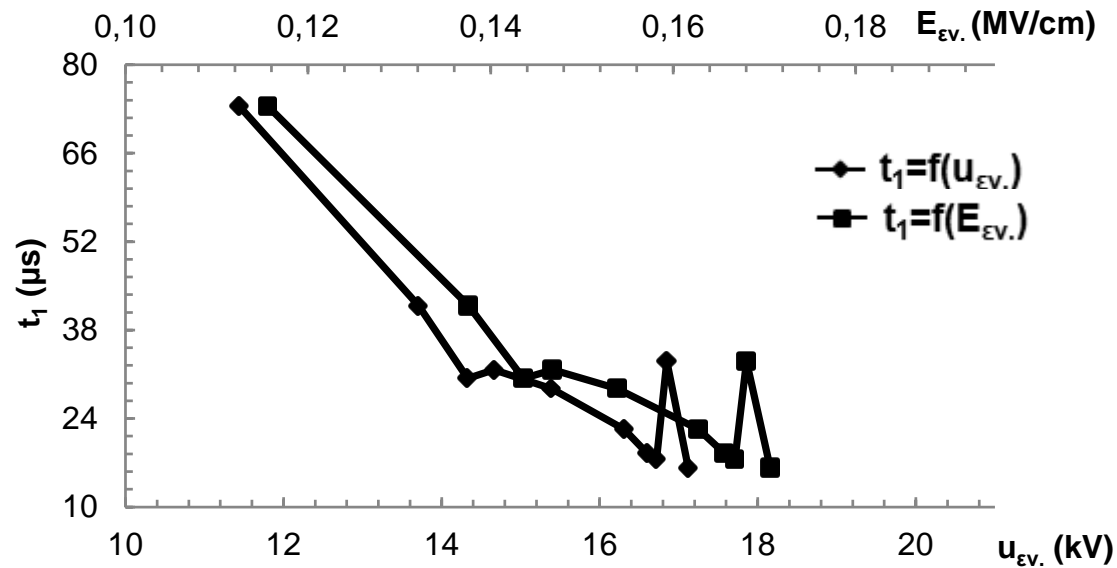
\hat{U}_k (kV)	\hat{E}_k (kV/cm)	u_{EV} (kV)	σ_{UEV} (kV)	$u_{EV,max}$ (kV)	$u_{EV,min}$ (kV)	E_{EV} (kV/cm)	σ_{EEV} (kV/cm)	$E_{EV,max}$ (kV/cm)	$E_{EV,min}$ (kV/cm)	t_1 (μs)	σ_{t1} (μs)	$t_{1,max}$ (μs)	$t_{1,min}$ (μs)	t_2 (μs)	σ_{t2} (μs)	$t_{2,max}$ (μs)	$t_{2,min}$ (μs)	Δt (μs)	Δt_{max} (μs)	Δt_{min} (μs)
10,35	0,1053	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14,1	0,1434	11,44	1,65	13,09	9,79	0,1164	0,0168	0,1332	0,0996	73,44	10,08	83,52	63,36	280,8	32,68	313,48	248,12	207,36	250,12	164,6
17,45	0,1775	13,71	0,86	14,57	12,85	0,1395	0,0087	0,1482	0,1307	41,85	5,07	46,92	36,78	371,2	42,02	413,22	329,18	329,35	376,44	282,26
21	0,2136	14,33	0,4	14,73	13,93	0,1458	0,0041	0,1498	0,1417	30,37	2,52	32,89	27,85	394,5	28,03	422,53	366,47	364,13	394,68	333,58
23,83	0,2424	14,66	2,5	17,16	12,16	0,1491	0,0254	0,1746	0,1237	31,72	8,43	40,15	23,29	346,95	35,1	382,05	311,85	315,23	358,76	271,7
27,4	0,2787	15,39	1,37	16,76	14,02	0,1566	0,0139	0,1705	0,1426	28,75	6,07	34,82	22,68	400,95	41,25	442,2	359,7	372,2	419,52	324,88
31,05	0,3159	16,31	0,81	17,12	15,5	0,1659	0,0082	0,1742	0,1577	22,27	1,65	23,92	20,62	373,95	34,31	408,26	339,64	351,68	387,64	315,72
34,5	0,351	16,6	1,28	17,88	15,32	0,1689	0,0130	0,1819	0,1558	18,49	3,85	22,34	14,64	363,15	58,44	421,59	304,71	344,66	406,95	282,37
41,64	0,4236	16,72	0,7	17,42	16,02	0,1701	0,0071	0,1772	0,1630	17,55	5,4	22,95	12,15	446,85	8,95	455,8	437,9	429,3	443,65	414,95
37,78	0,3843	16,85	1,38	18,23	15,47	0,1714	0,0140	0,1855	0,1574	33,07	12,87	45,94	20,2	437,39	30,01	467,4	407,38	404,32	447,2	361,44
44,72	0,4549	17,12	0,88	18	16,24	0,1742	0,0090	0,1831	0,1652	16,2	3,3	19,5	12,9	464,4	13,08	477,48	451,32	448,2	464,58	431,82

Πίνακας 10: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή του φορτίου και του ρεύματος έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και των αντίστοιχων μεταβολών τους για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση +250/2500μs και d=2mm.

q_1 (μC)	σ_{q1} (μC)	$q_{1,max}$ (μC)	$q_{1,min}$ (μC)	q_2 (μC)	σ_{q2} (μC)	$q_{2,max}$ (μC)	$q_{2,min}$ (μC)	Δq (μC)	Δq_{min} (μC)	Δq_{max} (μC)	i_1 (μA)	$i_{1,max}$ (μA)	$i_{1,min}$ (μA)	i_2 (μA)	$i_{2,max}$ (μA)	$i_{2,min}$ (μA)	Δi (μA)	Δi_{max} (μA)	Δi_{min} (μA)
0,0168	0,001	0,018	0,016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,02	0,001	0,021	0,019	0,04	0,001	0,041	0,039	0,020	0,018	0,022	272,33	331,44	227,49	142,45	165,24	124,41	96,45	133,66	71,97
0,018	0,002	0,020	0,016	0,069	0,002	0,071	0,067	0,051	0,047	0,055	430,11	543,77	341,01	185,88	215,69	162,14	154,85	194,86	124,85
0,014	0,001	0,015	0,013	0,104	0,004	0,108	0,100	0,090	0,085	0,095	460,98	538,60	395,26	263,62	294,70	236,67	247,16	284,79	215,36
0,031	0,069	0,100	-0,038	0,293	0,012	0,305	0,281	0,262	0,181	0,343	977,30	4293,69	-	844,50	978,03	735,51	831,14	-	504,52
0,066	0,022	0,088	0,044	0,702	0,029	0,731	0,673	0,636	0,585	0,687	2295,65	3880,07	1263,64	1750,84	2032,25	1521,94	1708,76	2114,63	1394,45
0,059	0,008	0,067	0,051	1,046	0,076	1,122	0,970	0,987	0,903	1,071	2649,30	3249,27	2132,11	2797,17	3303,50	2375,94	2806,53	3392,25	2329,48
0,07	0,018	0,088	0,052	1,45	0,052	1,502	1,398	1,380	1,310	1,450	3785,83	6010,93	2327,66	3992,84	4929,28	3316,02	4003,95	5135,11	3219,07
0,116	0,01	0,126	0,106	2,433	0,08	2,513	2,353	2,317	2,227	2,407	6609,69	10370,37	4618,74	5444,78	5738,75	5162,35	5397,16	5800,70	5019,72
0,231	0,11	0,341	0,121	1,7	0,081	1,781	1,619	1,469	1,278	1,660	6985,18	16881,19	2633,87	3886,69	4371,84	3463,84	3633,26	4592,74	2857,78
0,094	0,01	0,104	0,084	3,28	0,081	3,361	3,199	3,186	3,095	3,277	5802,47	8062,02	4307,69	7062,88	7447,04	6699,76	7108,43	7588,81	6661,93

Πίνακας 11: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της τάσης έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και της μεταβολής της στο δοκίμιο και της αντίστοιχης ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση +250/2500 μ s και d=2mm.

C_m (nF)	u_1 (V)	σ_{u1} (V)	$u_{1,max}$ (V)	$u_{1,min}$ (V)	u_2 (V)	σ_{u2} (V)	$u_{2,max}$ (V)	$u_{2,min}$ (V)	Δu (V)	Δu_{min} (V)	Δu_{max} (V)	ΔW_e (eV)	$\Delta W_{e min}$ (eV)	$\Delta W_{e max}$ (eV)
1000	0,0168	0,001	0,018	0,016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1000	0,02	0,001	0,021	0,019	0,04	0,001	0,041	0,039	0,020	0,018	0,022	0,0100	0,0090	0,0110
1000	0,018	0,002	0,020	0,016	0,069	0,002	0,071	0,067	0,051	0,047	0,055	0,0255	0,0235	0,0275
1000	0,014	0,001	0,015	0,013	0,104	0,004	0,108	0,100	0,090	0,085	0,095	0,0450	0,0425	0,0475
1000	0,031	0,069	0,100	-0,038	0,293	0,012	0,305	0,281	0,262	0,181	0,343	0,1310	0,0905	-
1000	0,066	0,022	0,088	0,044	0,702	0,029	0,731	0,673	0,636	0,585	0,687	0,3180	0,2925	0,3435
1000	0,059	0,008	0,067	0,051	1,046	0,076	1,122	0,970	0,987	0,903	1,071	0,4935	0,4515	0,5355
1000	0,07	0,018	0,088	0,052	1,45	0,052	1,502	1,398	1,380	1,310	1,450	0,6900	0,6550	0,7250
1000	0,116	0,01	0,126	0,106	2,433	0,08	2,513	2,353	2,317	2,227	2,407	1,1585	1,1135	1,2035
1000	0,231	0,11	0,341	0,121	1,7	0,081	1,781	1,619	1,469	1,278	1,660	0,7345	0,6390	0,8300
1000	0,094	0,01	0,104	0,084	3,28	0,081	3,361	3,199	3,186	3,095	3,277	1,5930	1,5475	1,6385



Σχήμα 3.2.45: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $t_1=f(u_{ev})$, \blacksquare $t_1=f(E_{ev})$

όπου : u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

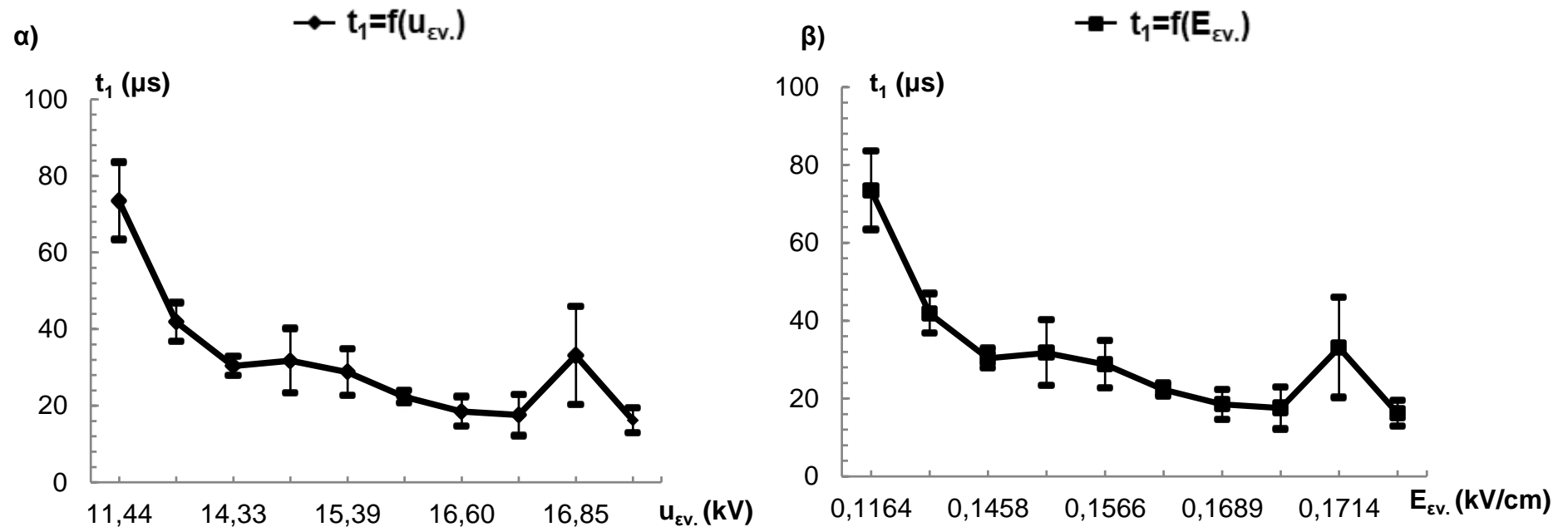
t_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα .1.6.1.



Σχήμα 3.2.46: Χαρακτηριστικές: α) $t_1=f(u_{ev})$, β) $t_1=f(E_{ev})$

α) χαρακτηριστική $t_1=f(u_{ev})$ των μέσων τιμών t_1 , με τυπική απόκλιση σ

β) χαρακτηριστική $t_1=f(E_{ev})$ των μέσων τιμών t_1 , με τυπική απόκλιση σ , όπου :

u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

t_1 : η στιγμιαία τιμή του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

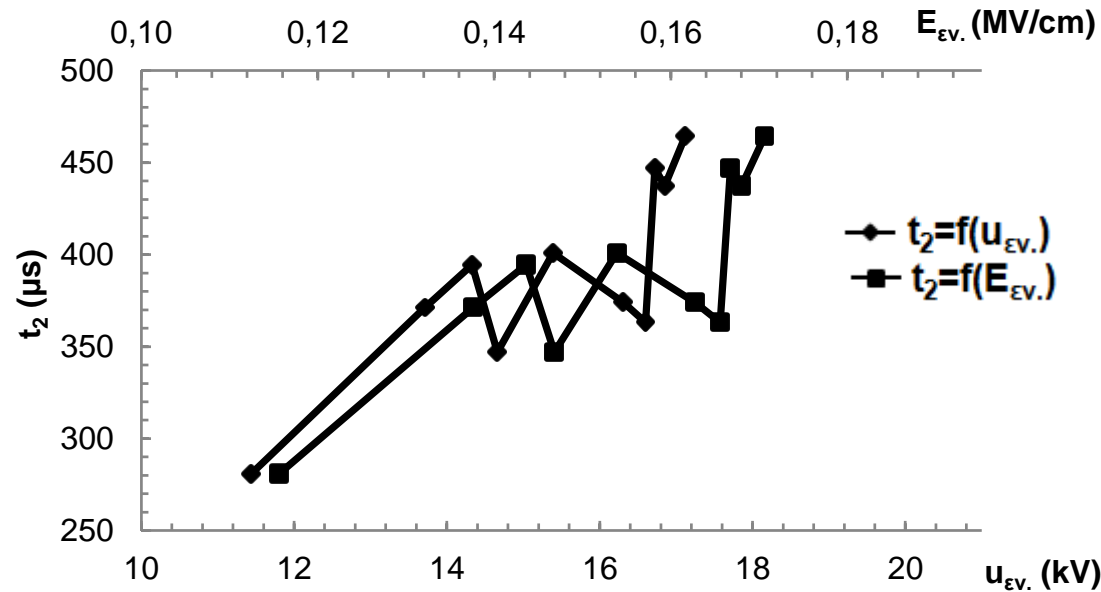
κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και

$C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.47: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $t_2=f(u_{ev})$, \blacksquare $t_2=f(E_{ev})$

όπου : u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

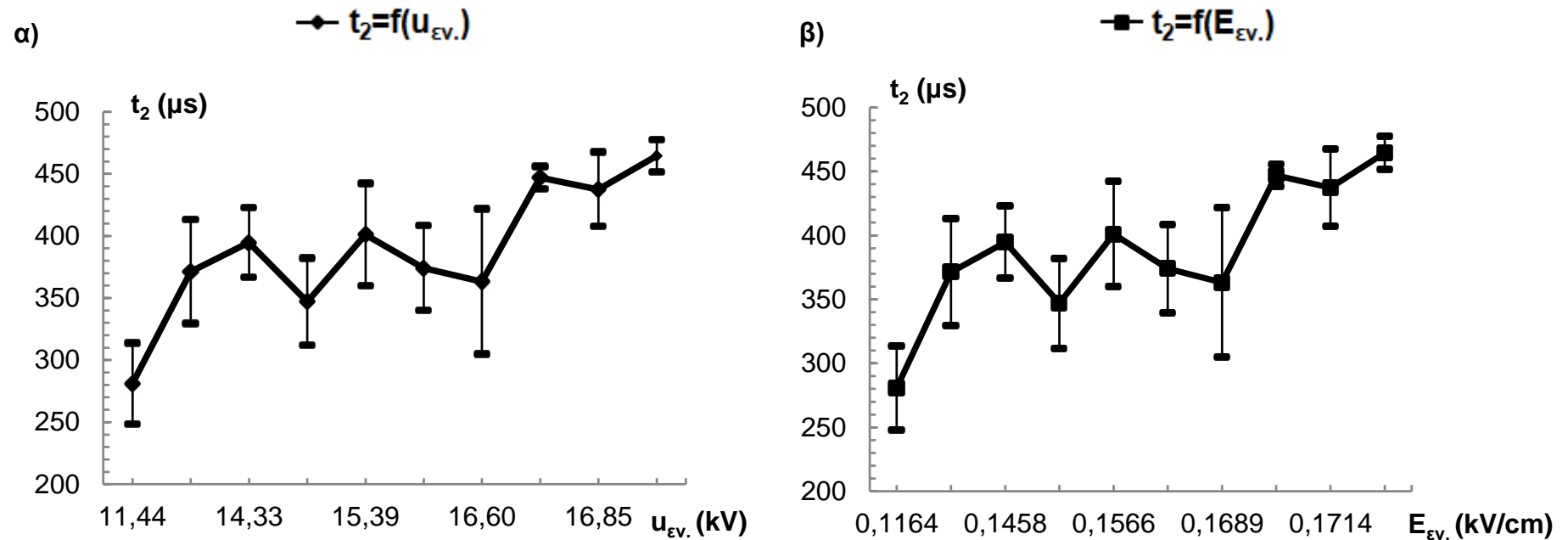
t_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.48: Χαρακτηριστικές: α) $t_2 = f(u_{ev})$, β) $t_2 = f(E_{ev})$

α) χαρακτηριστική $t_2 = f(u_{ev})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $t_2 = f(E_{ev})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

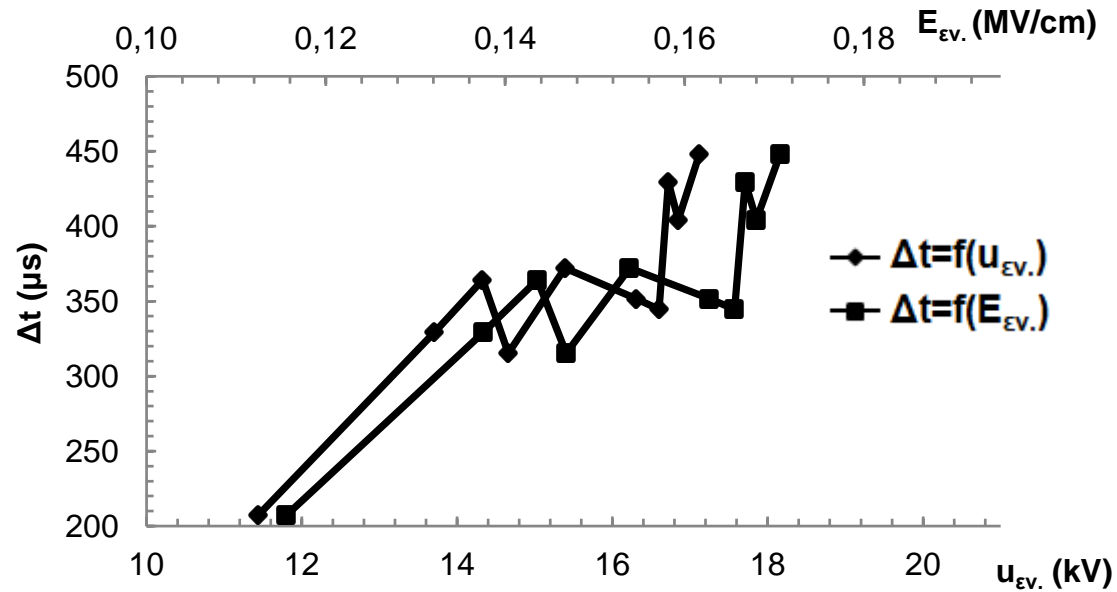
t_2 : η στιγμιαία τιμή του χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.49: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $\Delta t=f(u_{EV})$, \blacksquare $\Delta t=f(E_{EV})$

όπου : u_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{EV} ,

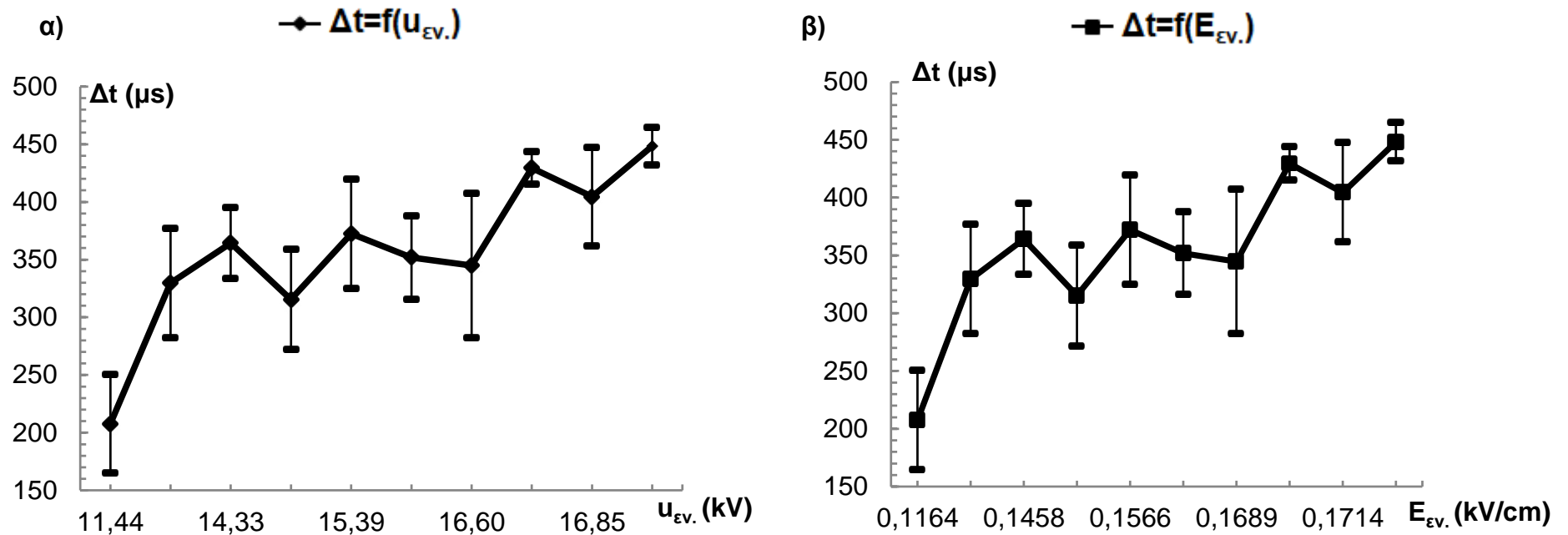
Δt : η μέση τιμή της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.50: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta t = f(u_{ev})$, β) $\Delta t = f(E_{ev})$

α) χαρακτηριστική $\Delta t = f(u_{ev})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $-$

β) χαρακτηριστική $\Delta t = f(E_{ev})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $-$, όπου :

u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

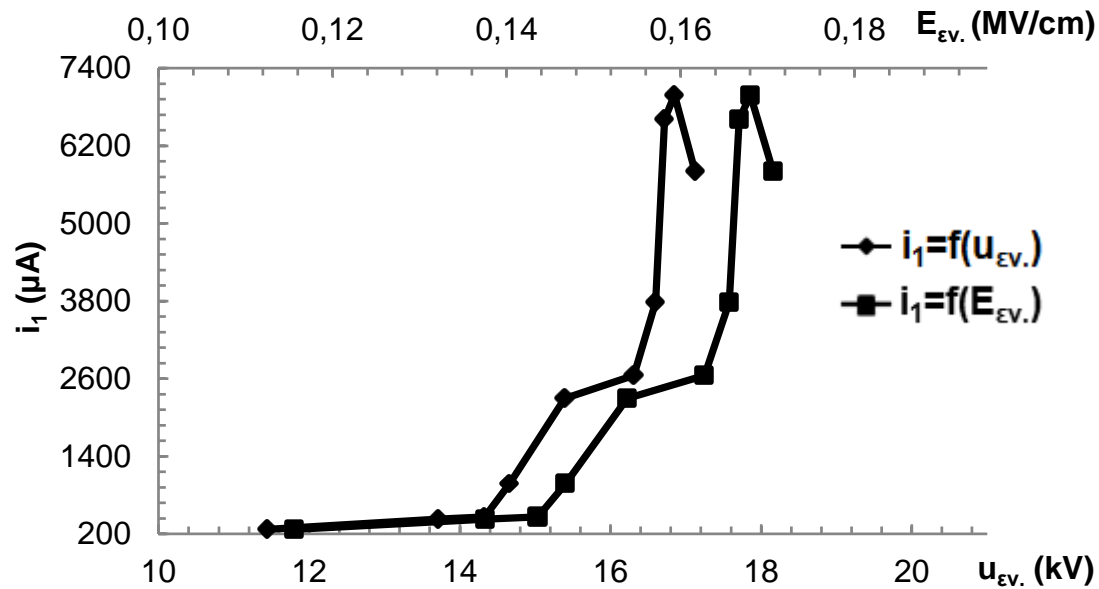
Δt : η χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.51: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $i_1=f(u_{Ev})$, \blacksquare $i_1=f(E_{Ev})$

όπου : u_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{Ev} ,

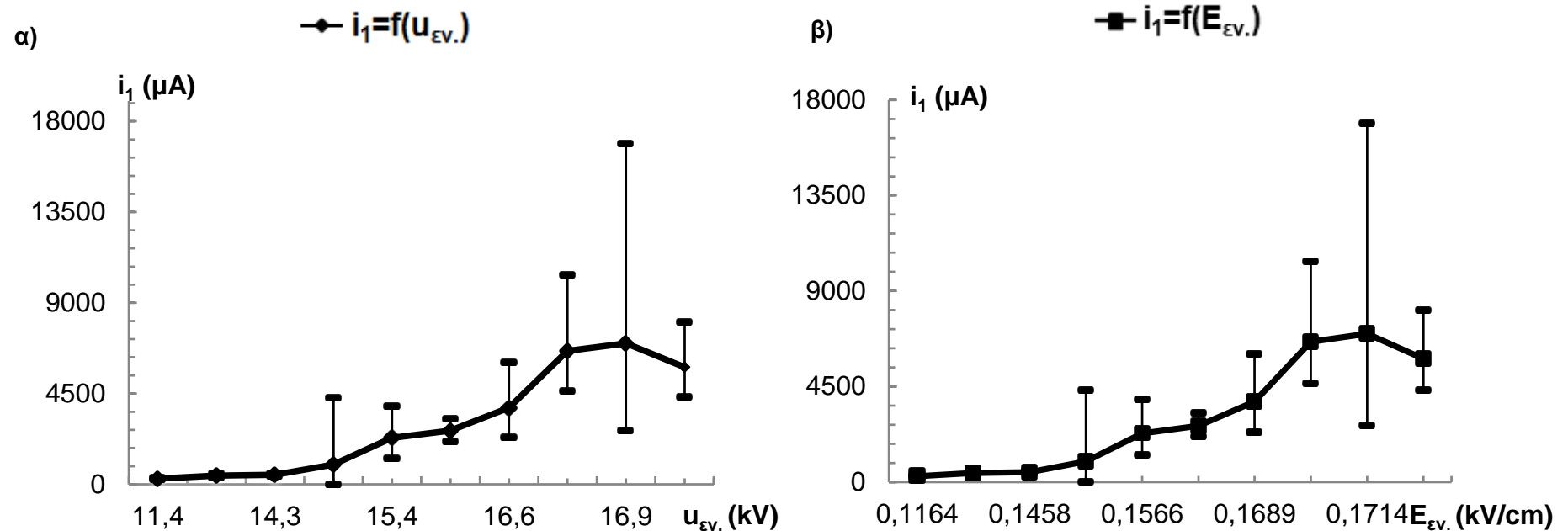
i_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.52: Χαρακτηριστικές: α) $i_1=f(u_{EV})$, β) $i_1=f(E_{EV})$

α) χαρακτηριστική $i_1=f(u_{EV})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $i_1=f(E_{EV})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

u_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{EV} ,

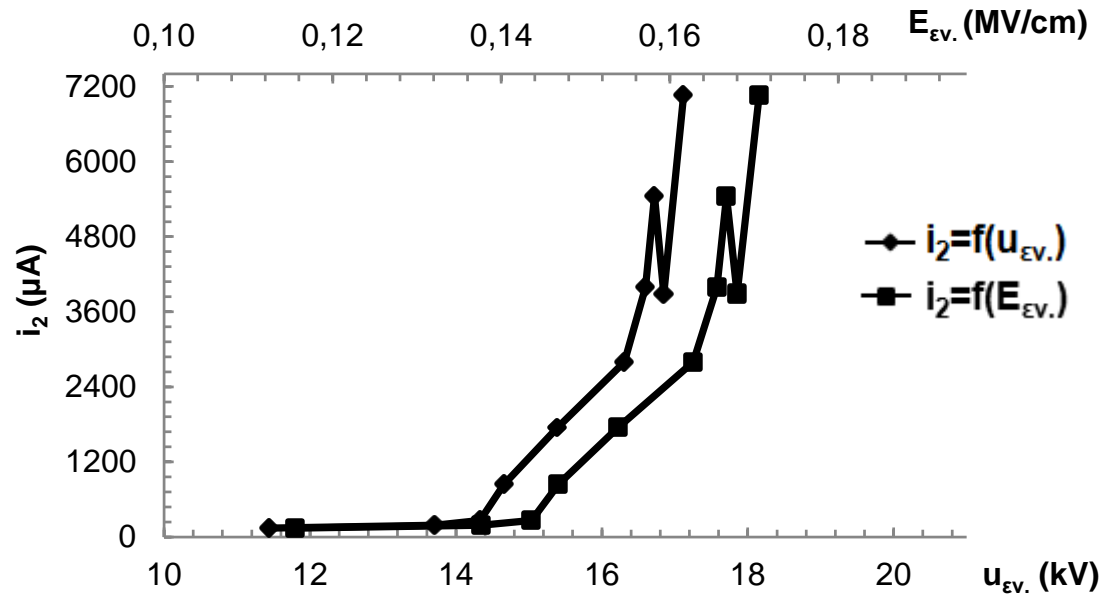
i_1 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.53 Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $i_2=f(u_{ev})$, \blacksquare $i_2=f(E_{ev})$

όπου : u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

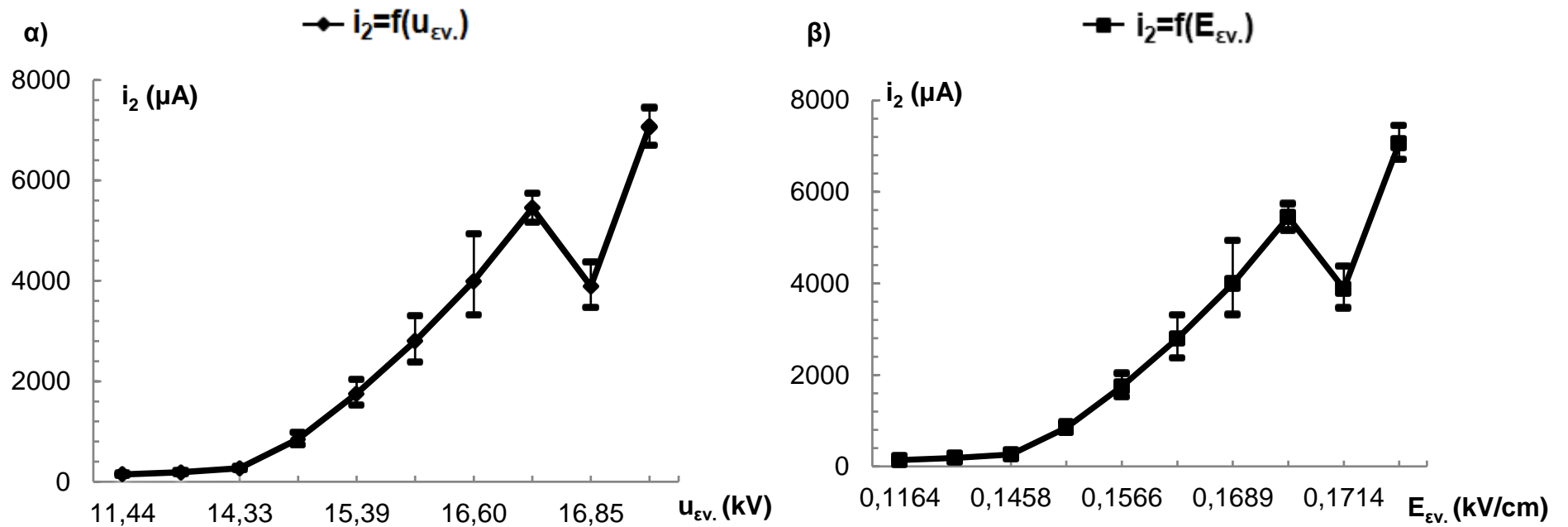
i_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.54: Χαρακτηριστικές: α) $i_2=f(u_{Ev})$, β) $i_2=f(E_{Ev})$

α) χαρακτηριστική $i_2=f(u_{Ev})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $i_2=f(E_{Ev})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

u_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{Ev} ,

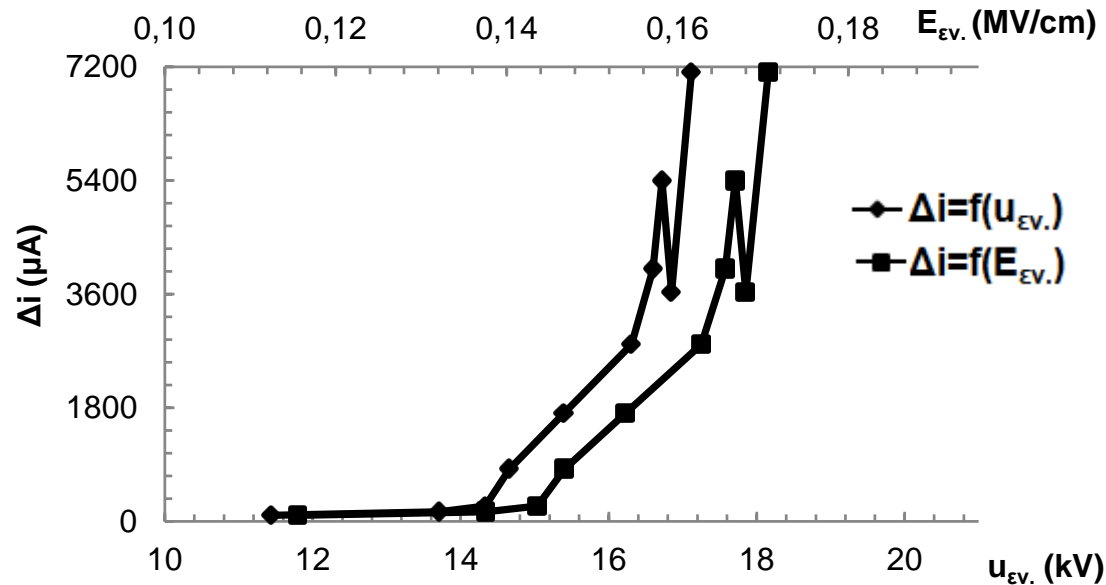
i_2 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.55: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $\Delta i=f(u_{ev.})$, \blacksquare $\Delta i=f(E_{ev.})$

όπου : $u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,

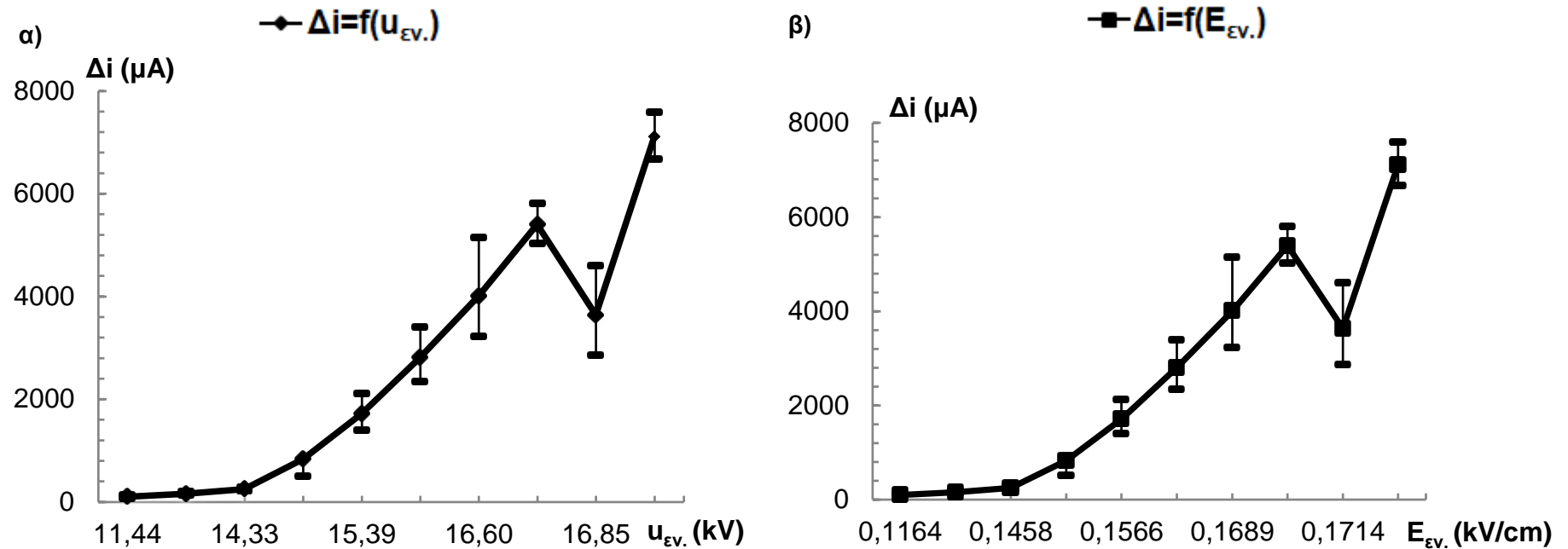
Δi : η μέση τιμή της μεταβολής του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.56: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta i=f(u_{ev.})$, β) $\Delta i=f(E_{ev.})$

α) χαρακτηριστική $\Delta i=f(u_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $\Delta i=f(E_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

$u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,

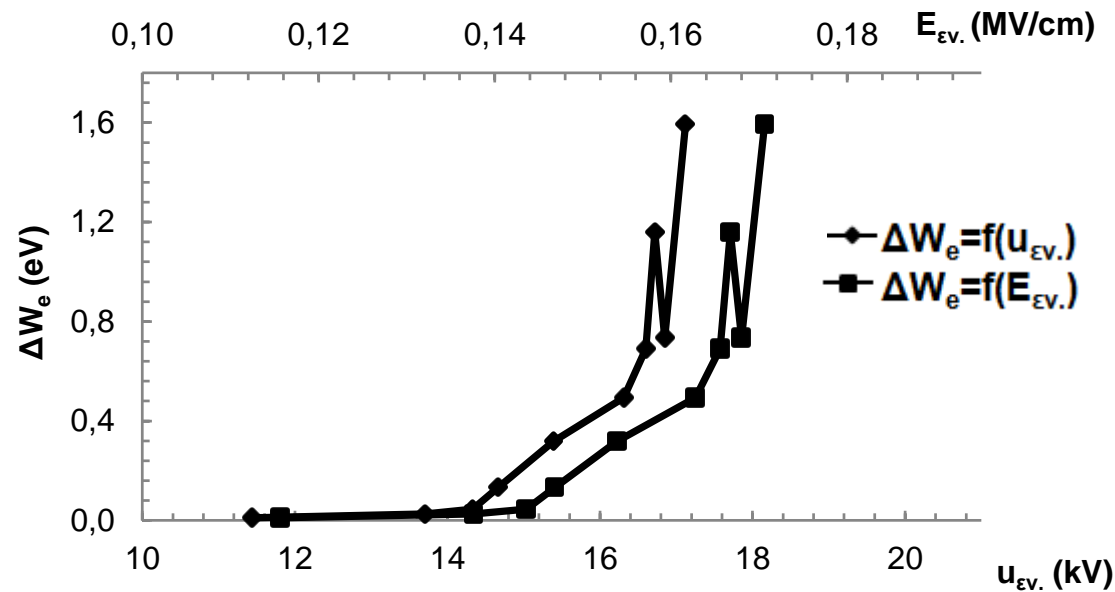
Δi : η μεταβολή του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.57: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $\Delta W_e = f(u_{ev})$, \blacksquare $\Delta W_e = f(E_{ev})$

όπου : u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

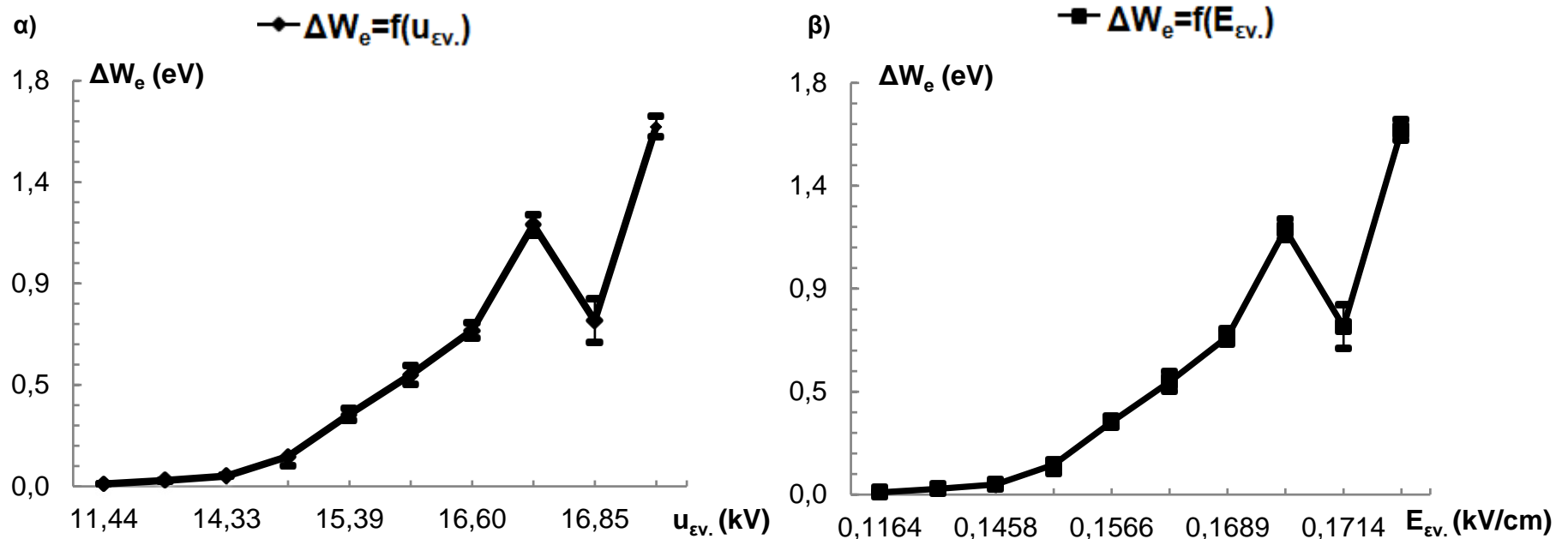
E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi, κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.258: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta W_e = f(u_{EV})$, β) $\Delta W_e = f(E_{EV})$

α) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(u_{EV})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(E_{EV})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

u_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{EV} ,

ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

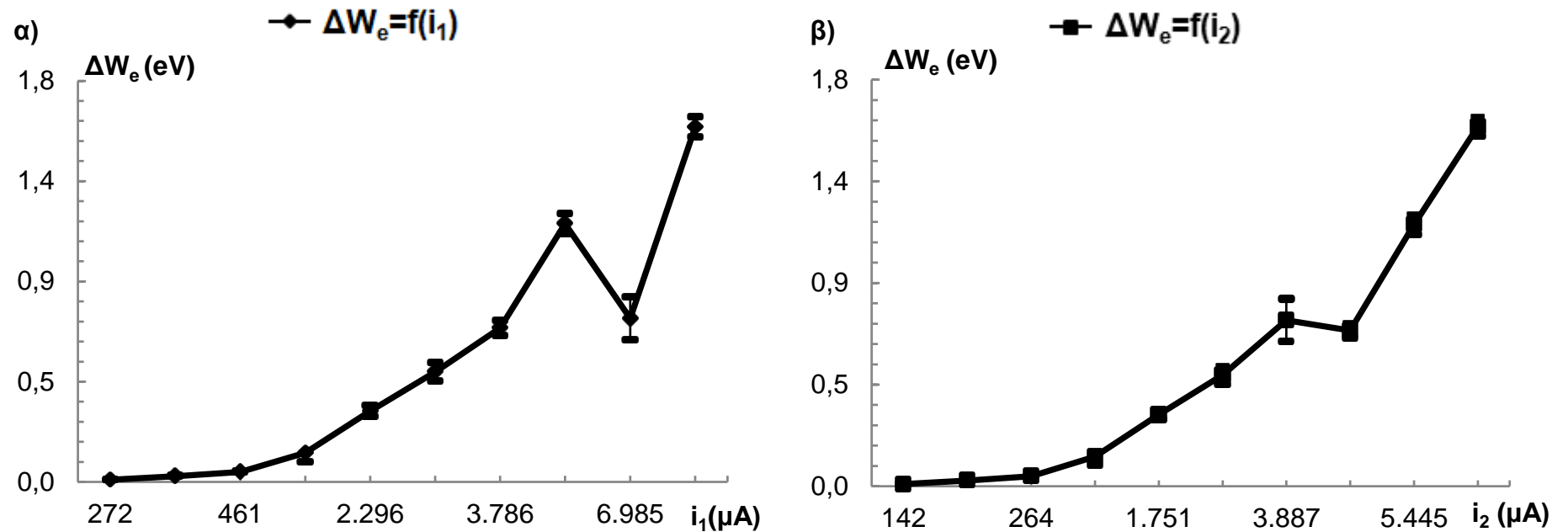
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

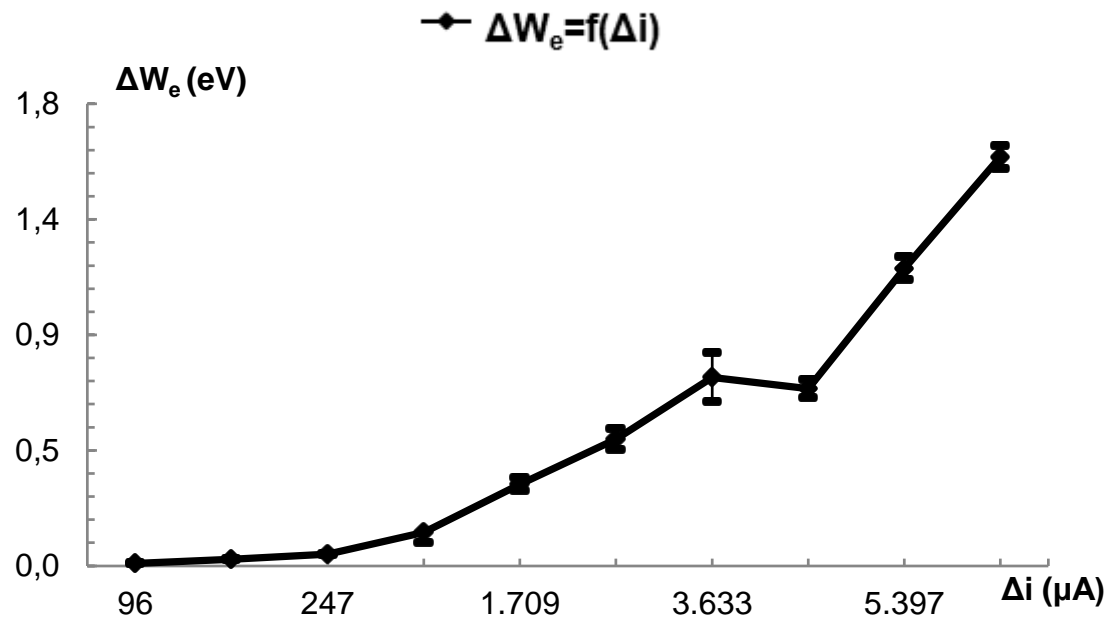
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..

Πίνακας 12: Μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαπτομένης τάσης και του αντίστοιχου πεδίου, μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή του ρεύματος έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και της μεταβολής του, μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αντίστοιχης ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση +250/2500μs και d=2mm:

\hat{U}_k (kV)	\hat{E}_k (kV/cm)	i_1 (μA)	$i_{1,max}$ (μA)	$i_{1,min}$ (μA)	I_2 (μA)	$I_{2,max}$ (μA)	$i_{2,min}$ (μA)	Δi (μA)	Δi_{max} (μA)	Δi_{min} (μA)	ΔW_e (eV)	$\Delta W_{e,max}$ (eV)	$\Delta W_{e,min}$ (eV)
10,35	0,1053	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14,1	0,1434	272,33	331,44	227,49	142,45	165,24	124,41	96,45	133,66	71,97	0,01	0,011	0,009
17,45	0,1775	430,11	543,77	341,01	185,88	215,69	162,14	154,85	194,86	124,85	0,0255	0,0275	0,0235
21	0,2136	460,98	538,60	395,26	263,62	294,70	236,67	247,16	284,79	215,36	0,045	0,0475	0,0425
23,83	0,2424	977,30	4293,69	-	844,50	978,03	735,51	831,14	-	504,52	0,131	-	0,0905
27,4	0,2787	2295,65	3880,07	1263,64	1750,84	2032,25	1521,94	1708,76	2114,63	1394,45	0,318	0,3435	0,2925
31,05	0,3159	2649,30	3249,27	2132,11	2797,17	3303,50	2375,94	2806,53	3392,25	2329,48	0,4935	0,5355	0,4515
34,5	0,351	3785,83	6010,93	2327,66	3992,84	4929,28	3316,02	4003,95	5135,11	3219,07	0,7345	0,83	0,639
37,78	0,3843	6985,18	16881,19	2633,87	3886,69	4371,84	3463,84	3633,26	4592,74	2857,78	0,69	0,725	0,655
41,64	0,4236	6609,69	10370,37	4618,74	5444,78	5738,75	5162,35	5397,16	5800,70	5019,72	1,1585	1,2035	1,1135
44,72	0,4549	5802,47	8062,02	4307,69	7062,88	7447,04	6699,76	7108,43	7588,81	6661,93	1,593	1,6385	1,5475



Σχήμα 3.259: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta W_e = f(i_1)$, β) $\Delta W_e = f(i_2)$
 α) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_1)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---
 β) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_2)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου:
 i_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,
 i_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,
 ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .
 Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..

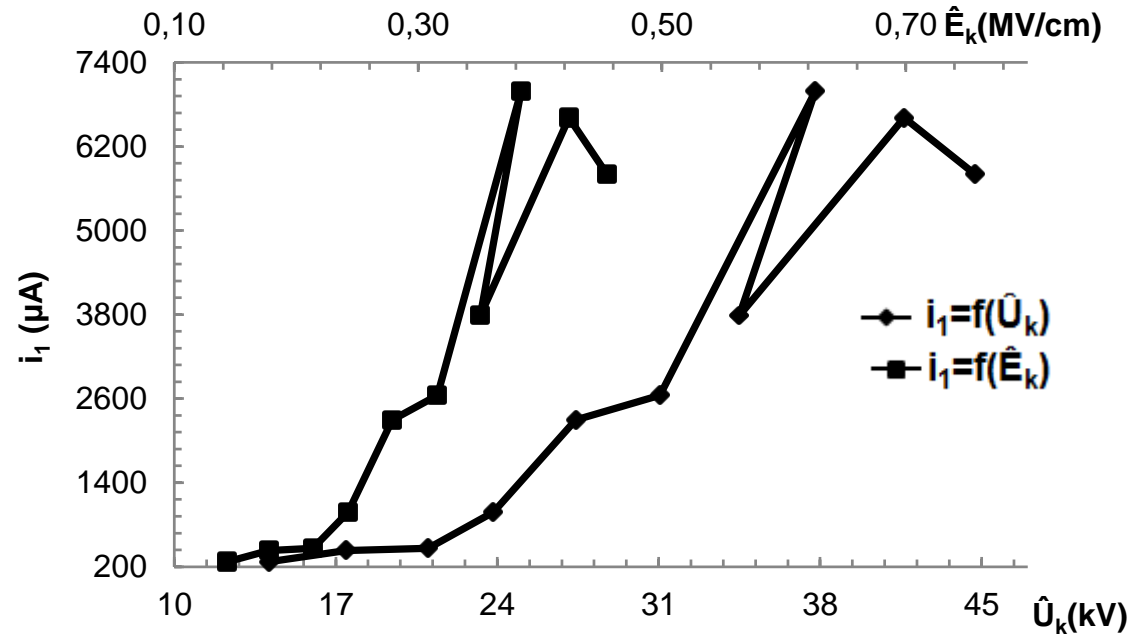


Σχήμα 3.2.60: Χαρακτηριστική: $\Delta W_e = f(\Delta i)$ με τυπική απόκλιση σ όπου: Δi : η μέση τιμή της μεταβολής του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων, ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi, κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

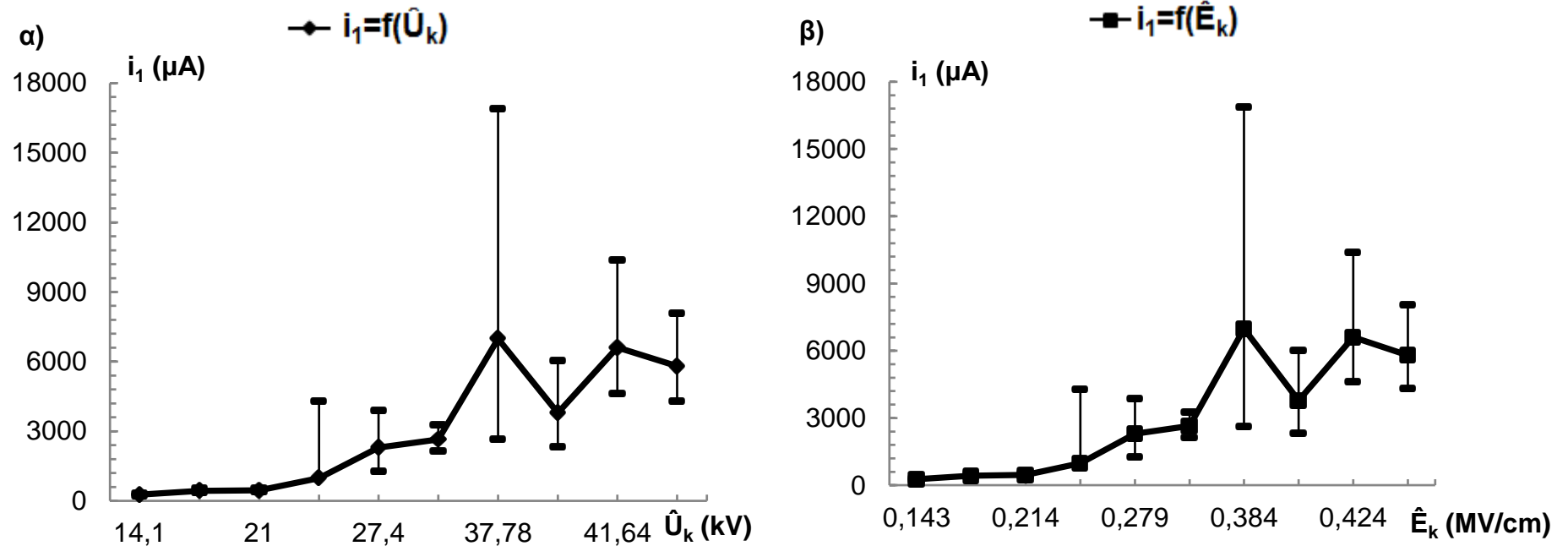
Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.61: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $i_1=f(\hat{U}_k)$, \blacksquare $i_1=f(\hat{E}_k)$
 όπου : \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,
 \hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,
 i_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας
 καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.62: Χαρακτηριστικές: α) $i_1=f(\hat{U}_k)$, β) $i_1=f(\hat{E}_k)$

α) χαρακτηριστική $i_1=f(\hat{U}_k)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $i_1=f(\hat{E}_k)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

\hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

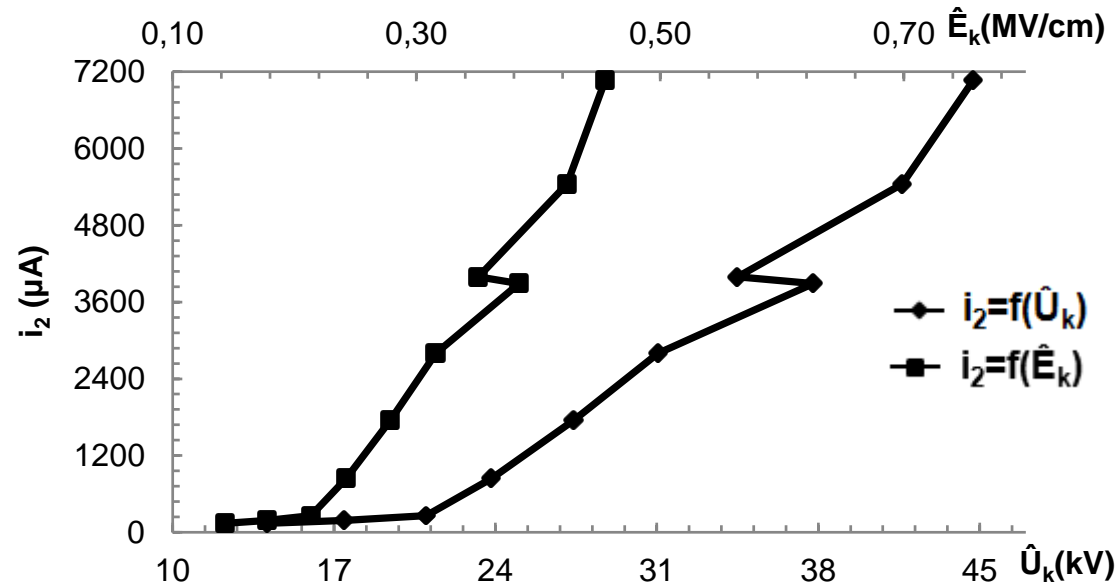
i_1 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.63: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $i_2=f(\hat{U}_k)$, \blacksquare $i_2=f(\hat{E}_k)$

όπου : \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

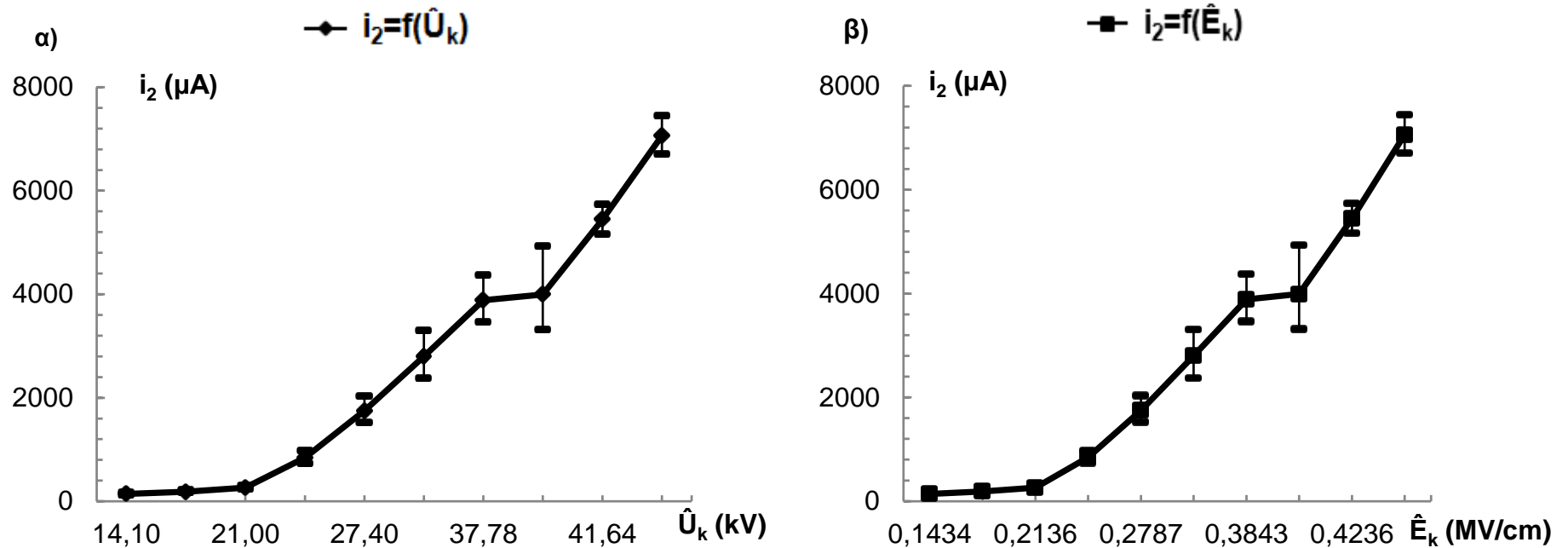
i_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.64: Χαρακτηριστικές: α) \blacklozenge $i_2=f(\hat{U}_k)$, β) \blacksquare $i_2=f(\hat{E}_k)$

α) χαρακτηριστική $i_2=f(\hat{U}_k)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση \pm

β) χαρακτηριστική $i_2=f(\hat{E}_k)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση \pm , όπου :

\hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

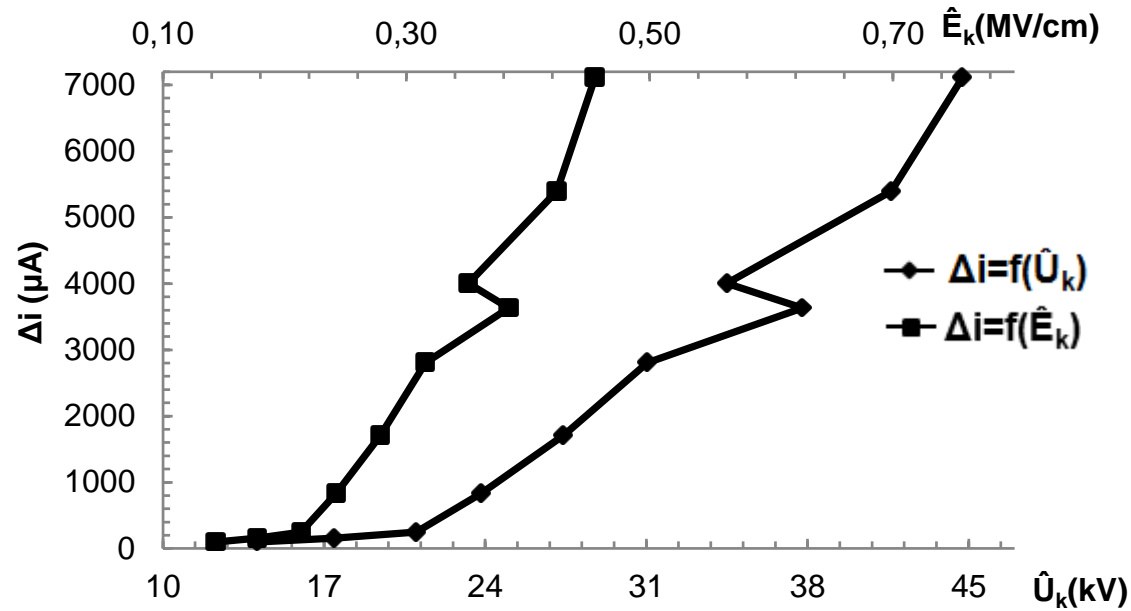
i_2 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού *perlinax*, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .

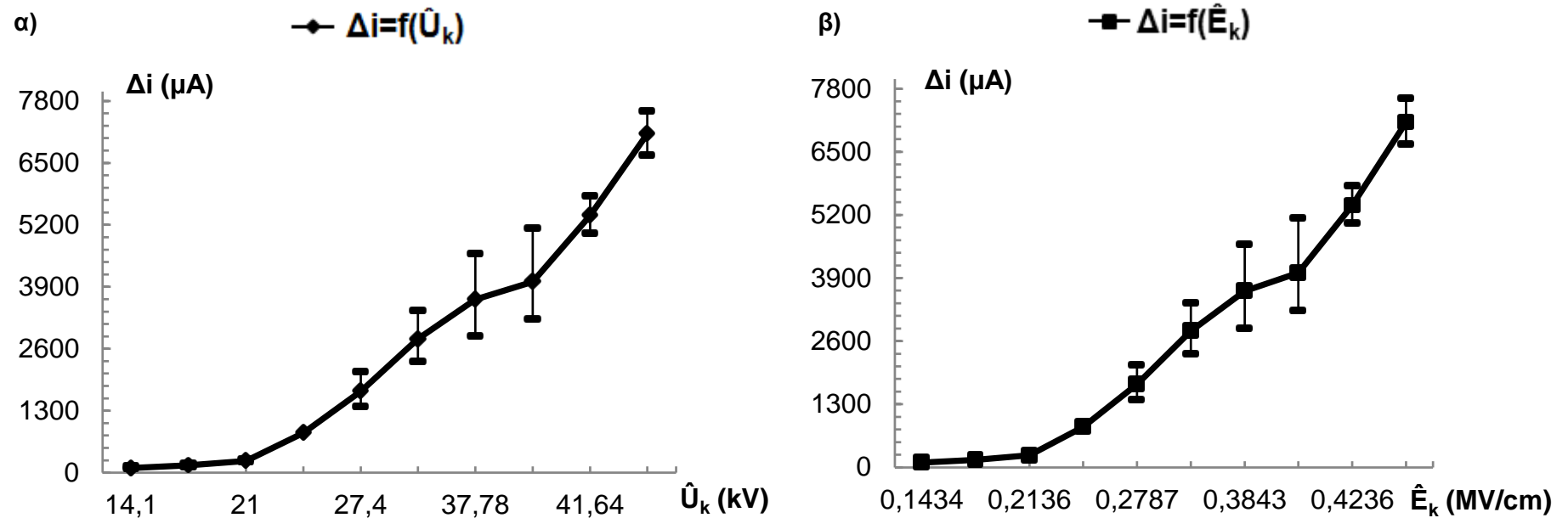
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.65: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $\Delta i=f(\hat{U}_k)$, \blacksquare $\Delta i=f(\hat{E}_k)$
 όπου : \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,
 \hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,
 Δi : η μέση τιμή της μεταβολής του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας
 καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.66: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta i = f(\hat{U}_k)$, β) $\Delta i = f(\hat{E}_k)$
 α) χαρακτηριστική $\Delta i = f(\hat{U}_k)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $-$
 β) χαρακτηριστική $\Delta i = f(\hat{E}_k)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $-$, όπου :
 \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,
 \hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,
 Δi : η μεταβολή του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις +250/2500 μs .
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..

Για πάχος μονωτικού **d=2mm** και εφαρμοζόμενη κρουστική τάση της μορφής **-250/2500 μs** έχουμε :

Πίνακας 13: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή του χρόνου έναρξης, περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και της χρονικής διάρκειας τους για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση -250/2500μs και d=2mm:

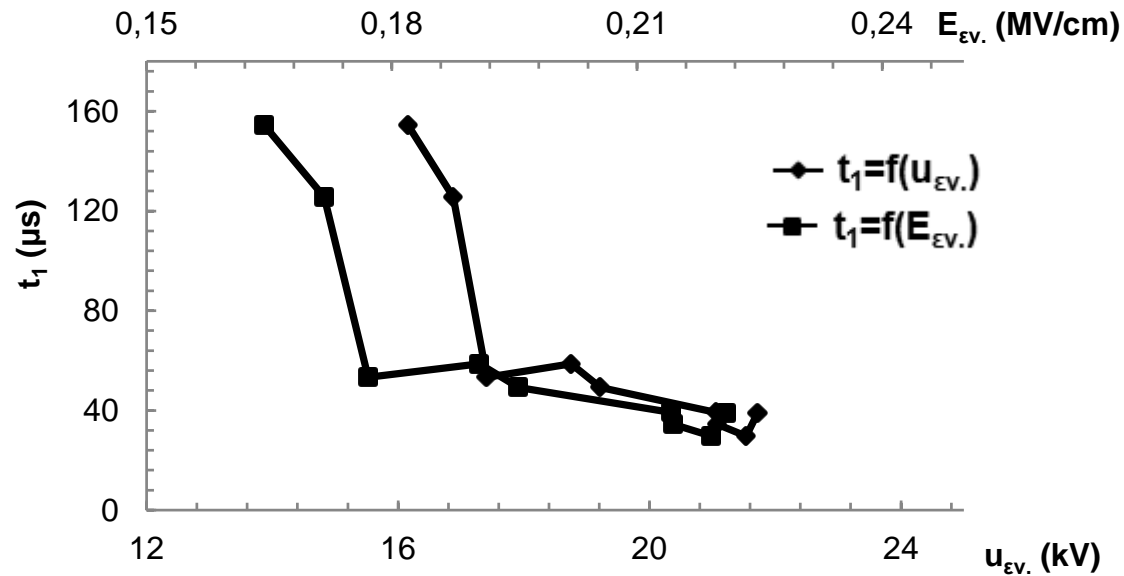
\hat{U}_k (kV)	\hat{E}_k (kV/cm)	u_{EV} (kV)	σ_{UEV} (kV)	$u_{EV,max}$ (kV)	$u_{EV,min}$ (kV)	E_{EV} (kV/cm)	σ_{EEV} (kV/cm)	$E_{EV,max}$ (kV/cm)	$E_{EV,min}$ (kV/cm)	t_1 (μs)	σ_{t1} (μs)	$t_{1,max}$ (μs)	$t_{1,min}$ (μs)	t_2 (μs)	σ_{t2} (μs)	$t_{2,max}$ (μs)	$t_{2,min}$ (μs)	Δt (μs)	Δt_{max} (μs)	Δt_{min} (μs)
17,22	0,1752	16,16	1,08	17,24	15,08	0,1644	0,011	0,1754	0,1534	154,4	38,95	193,35	115,45	268,3	70,69	338,99	197,61	113,9	223,54	4,26
21,03	0,2139	16,88	1,26	18,14	15,62	0,1717	0,0128	0,1845	0,1589	125,55	32,11	157,66	93,44	259,2	57,05	316,25	202,15	133,65	222,81	44,49
27,88	0,2836	17,41	3,14	20,55	14,27	0,1771	0,0319	0,2091	0,1452	53,32	7,81	61,13	45,51	296,59	63,05	359,64	233,54	243,27	314,13	172,41
24,11	0,2453	18,75	0,32	19,07	18,43	0,1907	0,0033	0,194	0,1875	58,72	2,7	61,42	56,02	363,15	32,8	395,95	330,35	304,43	339,93	268,93
29,74	0,3025	19,22	0,96	20,18	18,26	0,1955	0,0098	0,2053	0,1858	49,25	5,4	54,65	43,85	315,9	61,18	377,08	254,72	266,65	333,23	200,07
34,95	0,3555	21,06	2,28	23,34	18,78	0,2142	0,0232	0,2374	0,191	39,14	4,57	43,71	34,57	299,7	58,31	358,01	241,39	260,56	323,44	197,68
41,82	0,4254	21,08	0,2	21,28	20,88	0,2144	0,002	0,2165	0,2124	34,42	2,52	36,94	31,9	306,4	73,89	380,29	232,51	271,98	348,39	195,57
45,43	0,4622	21,54	0,77	22,31	20,77	0,2191	0,0078	0,227	0,2113	29,69	3,93	33,62	25,76	310,5	69,49	379,99	241,01	280,81	354,23	207,39
38,94	0,3961	21,72	0,64	22,36	21,08	0,221	0,0065	0,2275	0,2144	39,1	3,44	42,54	35,66	280,8	39,95	320,75	240,85	241,7	285,09	198,31

Πίνακας 14: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή του φορτίου και του ρεύματος έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και των αντίστοιχων μεταβολών τους για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση -250/2500μs και d=2mm.

q_1 (μC)	σ_{q1} (μC)	$q_{1,max}$ (μC)	$q_{1,min}$ (μC)	q_2 (μC)	σ_{q2} (μC)	$q_{2,max}$ (μC)	$q_{2,min}$ (μC)	Δq (μC)	Δq_{max} (μC)	Δq_{min} (μC)	i_1 (μA)	$i_{1,max}$ (μA)	$i_{1,min}$ (μA)	i_2 (μA)	$i_{2,max}$ (μA)	$i_{2,min}$ (μA)	Δi (μA)	Δi_{max} (μA)	Δi_{min} (μA)
0,092	0,007	0,099	0,085	0,107	0,009	0,116	0,098	0,015	0,031	-0,001	595,85	857,51	439,62	398,81	587,01	289,09	131,69	7277,00	-
0,098	0,003	0,101	0,095	0,163	0,019	0,182	0,144	0,065	0,087	0,043	780,57	1080,91	602,56	628,86	900,32	455,34	486,34	1955,50	192,99
0,102	0,014	0,116	0,088	0,525	0,039	0,564	0,486	0,423	0,476	0,370	1912,98	2548,89	1439,56	1770,12	2415,00	1351,35	1738,81	2760,86	1177,86
0,088	0,004	0,092	0,084	0,317	0,01	0,327	0,307	0,229	0,243	0,215	1498,64	1642,27	1367,63	872,92	989,86	775,35	752,23	903,58	632,48
0,128	0,025	0,153	0,103	0,796	0,045	0,841	0,751	0,668	0,738	0,598	2598,98	3489,17	1884,72	2519,78	3301,66	1991,62	2505,16	3688,71	1794,56
0,103	0,021	0,124	0,082	1,107	0,054	1,161	1,053	1,004	1,079	0,929	2631,58	3586,93	1876,00	3693,69	4809,64	2941,26	3853,24	5458,32	2872,25
0,148	0,036	0,184	0,112	1,835	0,11	1,945	1,725	1,687	1,833	1,541	4299,83	5768,03	3031,94	5988,90	8365,23	4536,01	6202,66	9372,60	4423,20
0,145	0,035	0,18	0,11	2,835	0,17	3,005	2,665	2,690	2,895	2,485	4883,80	6987,58	3271,86	9130,43	12468,36	7013,34	9579,43	13959,21	7015,22
0,109	0,03	0,139	0,079	1,504	0,05	1,554	1,454	1,395	1,475	1,315	2787,72	3897,92	1857,08	5356,13	6452,15	4533,13	5771,62	7437,85	4612,58

Πίνακας 15: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της τάσης έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και της μεταβολής της στο δοκίμιο και μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αντίστοιχης ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση -250/2500 μ s και d=2mm.

C_m (nF)	u_1 (V)	σ_{u1} (V)	$u_{1,max}$ (V)	$u_{1,min}$ (V)	u_2 (V)	σ_{u2} (V)	$u_{2,max}$ (V)	$u_{2,min}$ (V)	Δu (V)	Δu_{max} (V)	Δu_{min} (V)	ΔW_e (eV)	$\Delta W_{e max}$ (eV)	$\Delta W_{e min}$ (eV)
1000	0,092	0,007	0,099	0,085	0,107	0,009	0,116	0,098	0,015	0,031	-0,001	0,0075	0,0155	-
1000	0,098	0,003	0,101	0,095	0,163	0,019	0,182	0,144	0,065	0,087	0,043	0,0325	0,0435	0,0215
1000	0,102	0,014	0,116	0,088	0,525	0,039	0,564	0,486	0,423	0,476	0,370	0,2115	0,238	0,185
1000	0,088	0,004	0,092	0,084	0,317	0,01	0,327	0,307	0,229	0,243	0,215	0,1145	0,1215	0,1075
1000	0,128	0,025	0,153	0,103	0,796	0,045	0,841	0,751	0,668	0,738	0,598	0,334	0,369	0,299
1000	0,103	0,021	0,124	0,082	1,107	0,054	1,161	1,053	1,004	1,079	0,929	0,502	0,5395	0,4645
1000	0,148	0,036	0,184	0,112	1,835	0,11	1,945	1,725	1,687	1,833	1,541	0,8435	0,9165	0,7705
1000	0,145	0,035	0,18	0,11	2,835	0,17	3,005	2,665	2,690	2,895	2,485	1,345	1,4475	1,2425
1000	0,109	0,03	0,139	0,079	1,504	0,05	1,554	1,454	1,395	1,475	1,315	0,6975	0,7375	0,6575



Σχήμα 3.2.67: Χαρακτηριστικές: α) $t_1=f(u_{EV})$, β) $t_1=f(E_{EV})$

α) χαρακτηριστική $t_1=f(u_{EV})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση σ

β) χαρακτηριστική $t_1=f(E_{EV})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση σ , όπου :

u_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{EV} ,

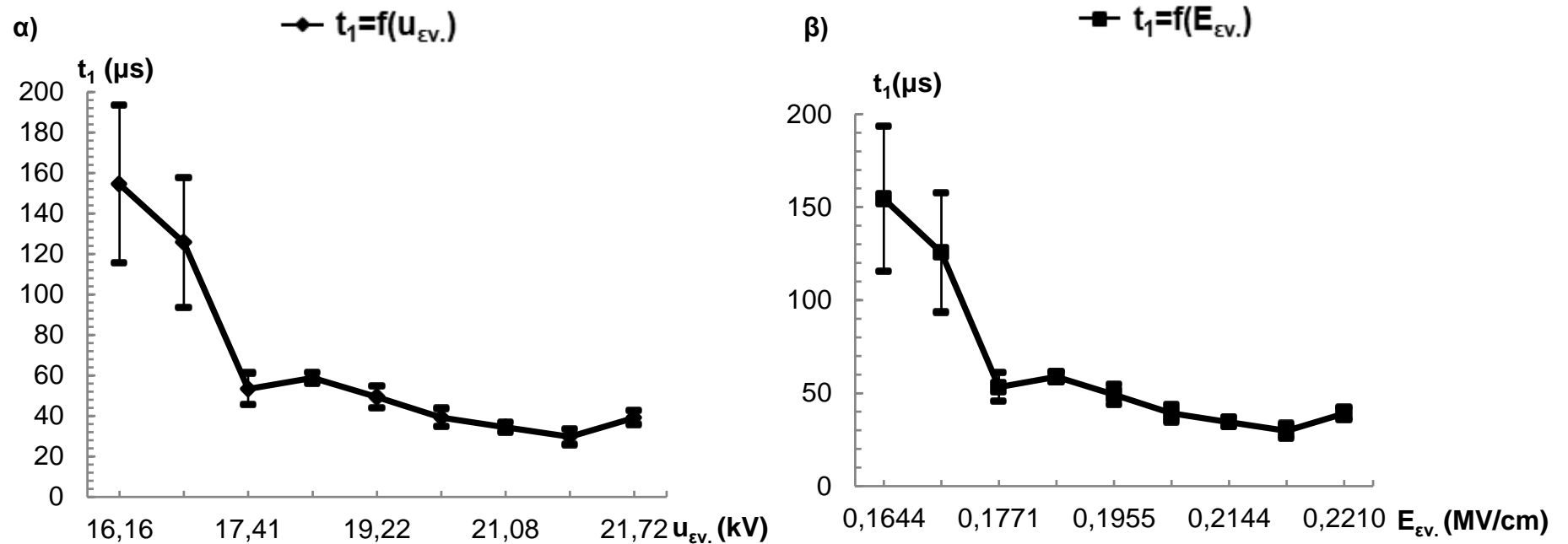
t_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.68: Χαρακτηριστικές: α) $t_1=f(u_{EV.})$, β) $t_1=f(E_{EV.})$

α) χαρακτηριστική $t_1=f(u_{EV.})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $t_1=f(E_{EV.})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

$u_{EV.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{EV.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{EV.}$,

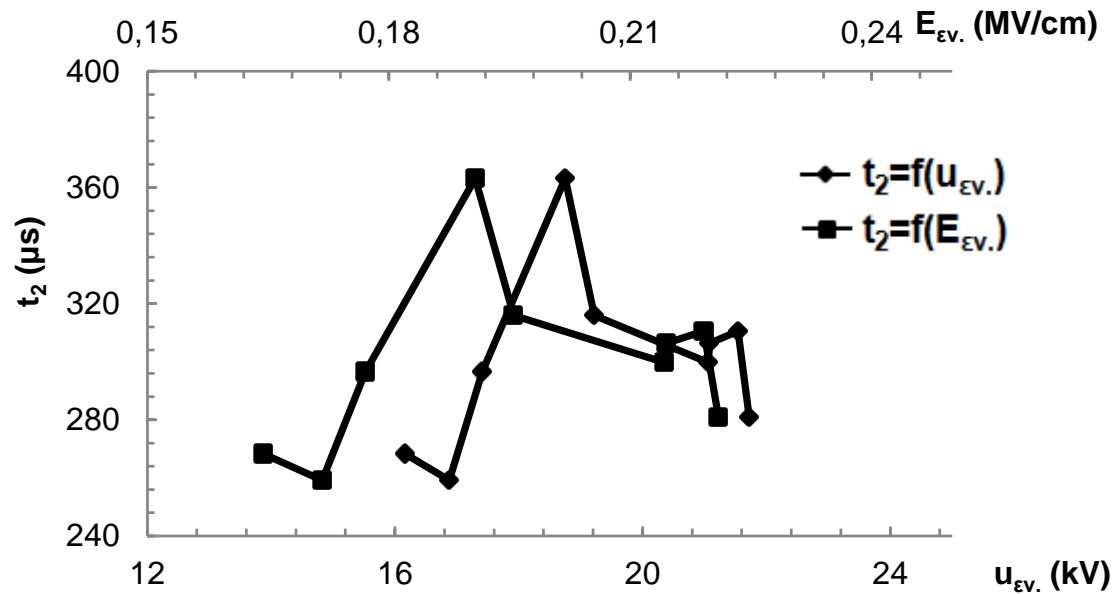
t_1 : η στιγμιαία τιμή του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu s$.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.69: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $t_2=f(u_{ev})$, \blacksquare $t_2=f(E_{ev})$

όπου : u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

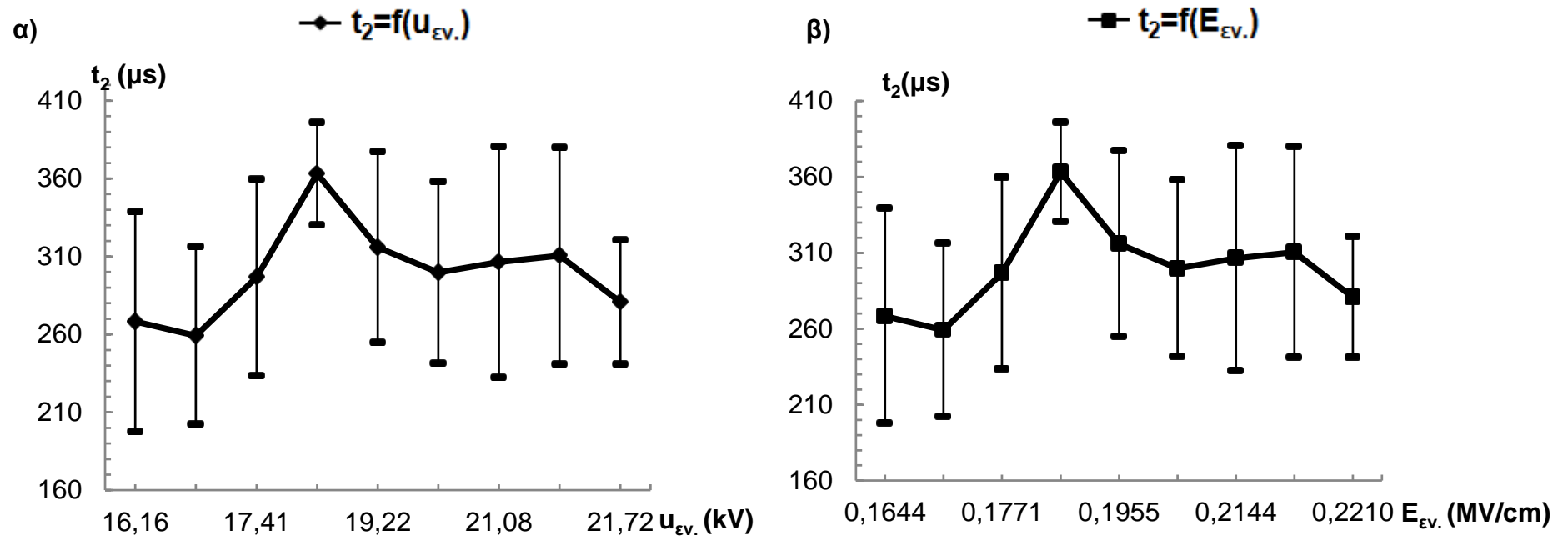
t_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.70: Χαρακτηριστικές: α) $t_2=f(u_{ev.})$, β) $t_2=f(E_{ev.})$

α) χαρακτηριστική $t_2=f(u_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $t_2=f(E_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

$u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,

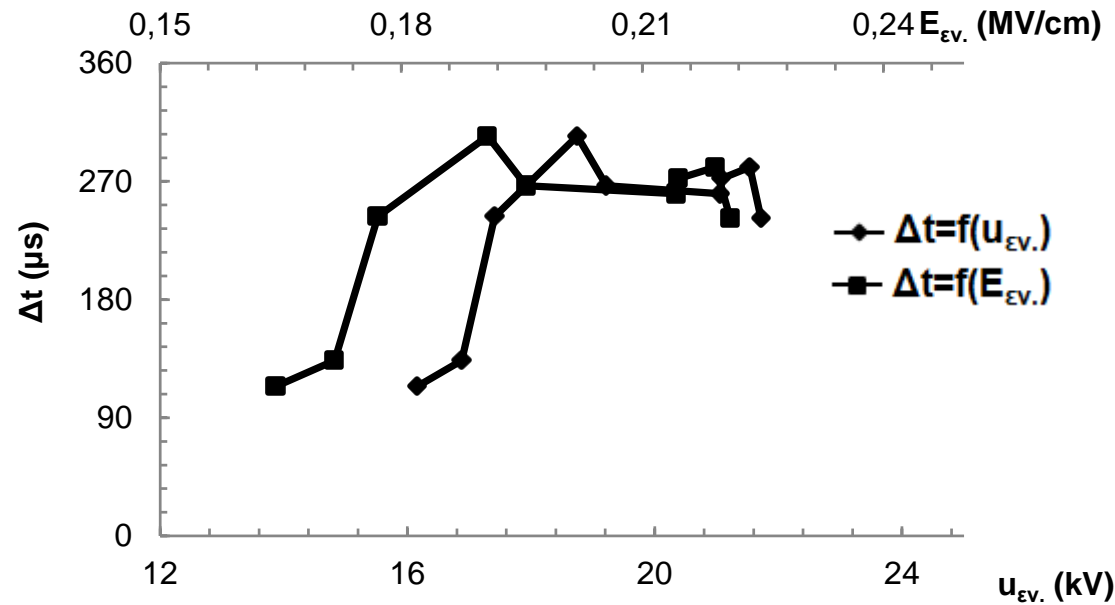
t_2 : η στιγμιαία τιμή του χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu\text{s}$.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.71: Χαρακτηριστικές: $\blacklozenge \Delta t=f(u_{EV})$, $\blacksquare \Delta t=f(E_{EV})$

όπου : u_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{EV} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{EV} ,

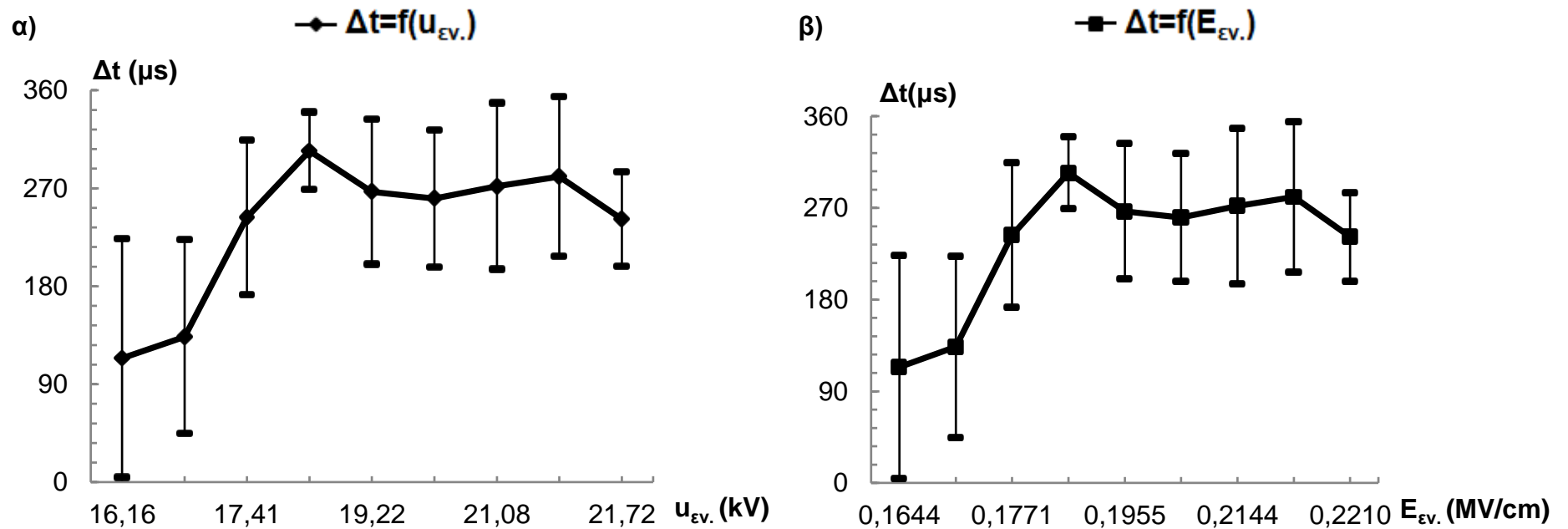
Δt : η μέση τιμή της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.72: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta t=f(u_{ev.})$, β) $\Delta t=f(E_{ev.})$

α) χαρακτηριστική $\Delta t=f(u_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $-$

β) χαρακτηριστική $\Delta t=f(E_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $-$, όπου :

$u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,

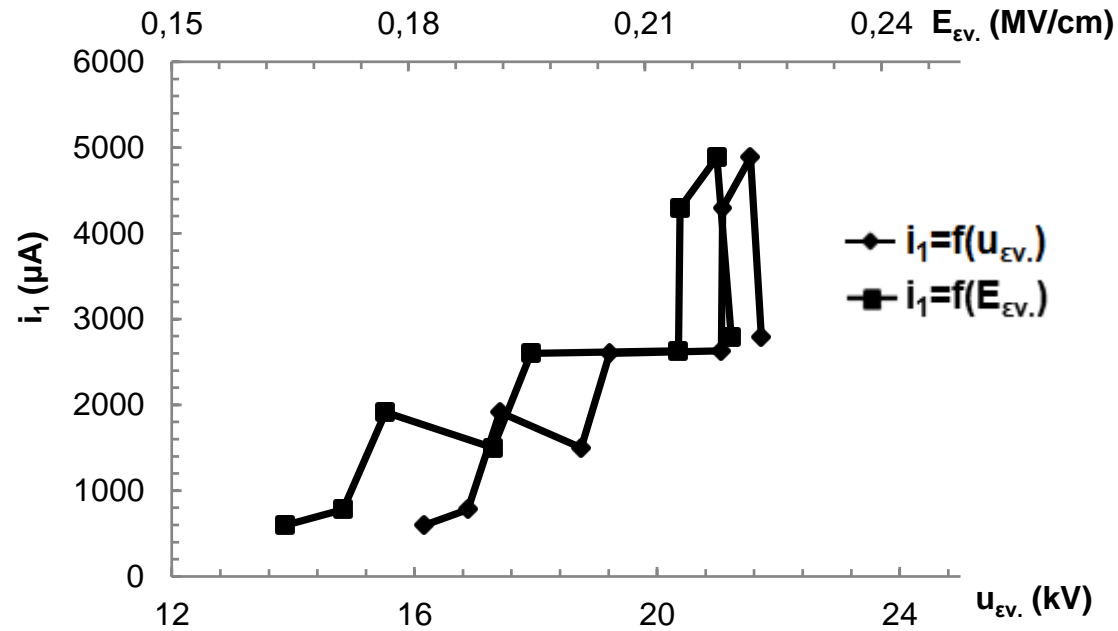
Δt : η χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.73: Χαρακτηριστικές: $\blacklozenge i_1=f(u_{Ev})$, $\blacksquare i_1=f(E_{Ev})$

όπου : u_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{Ev} ,

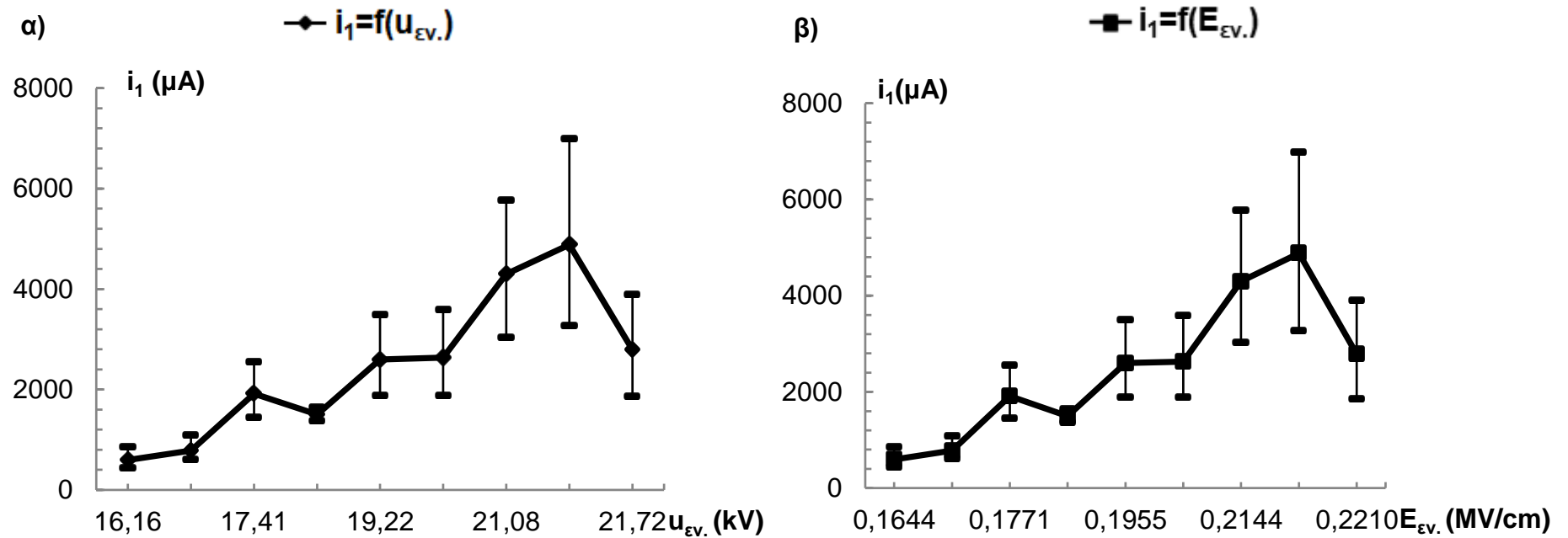
i_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.74: Χαρακτηριστικές: α) $i_1=f(u_{ev.})$, β) $i_1=f(E_{ev.})$

α) χαρακτηριστική $i_1=f(u_{ev.})$ των μέσων τιμών i_1 , με τυπική απόκλιση σ

β) χαρακτηριστική $i_1=f(E_{ev.})$ των μέσων τιμών i_1 , με τυπική απόκλιση σ , όπου :

$u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,

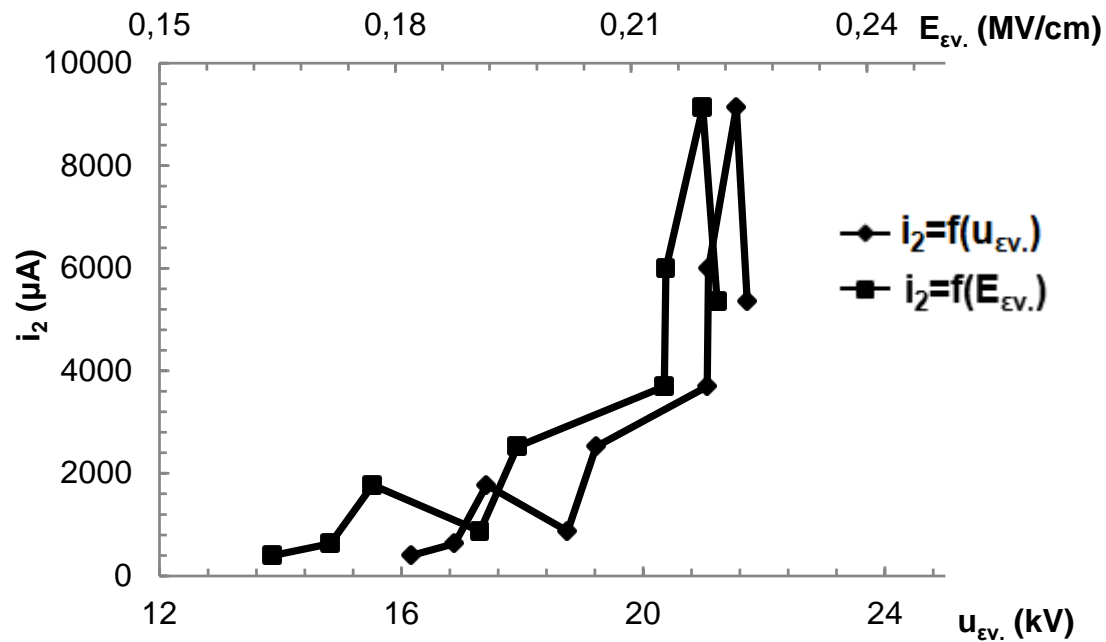
i_1 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu\text{s}$.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.75: Χαρακτηριστικές: $\blacklozenge i_2=f(u_{Ev})$, $\blacksquare i_2=f(E_{Ev})$

όπου : u_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{Ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{Ev} ,

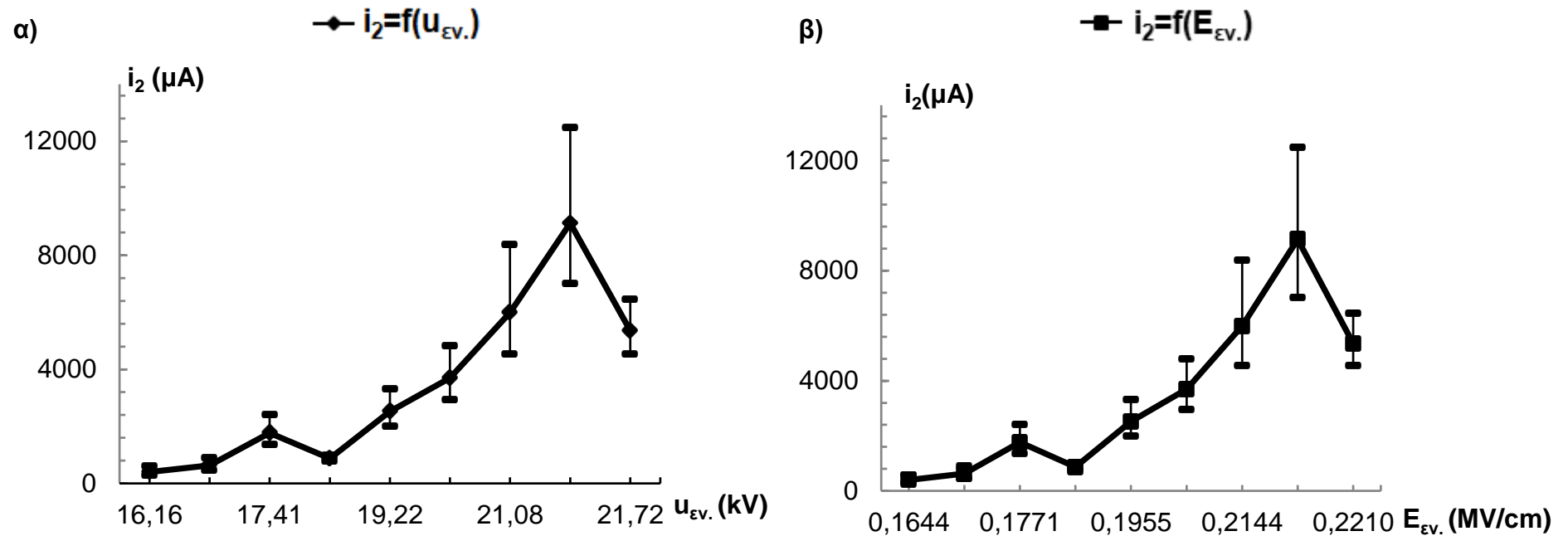
i_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

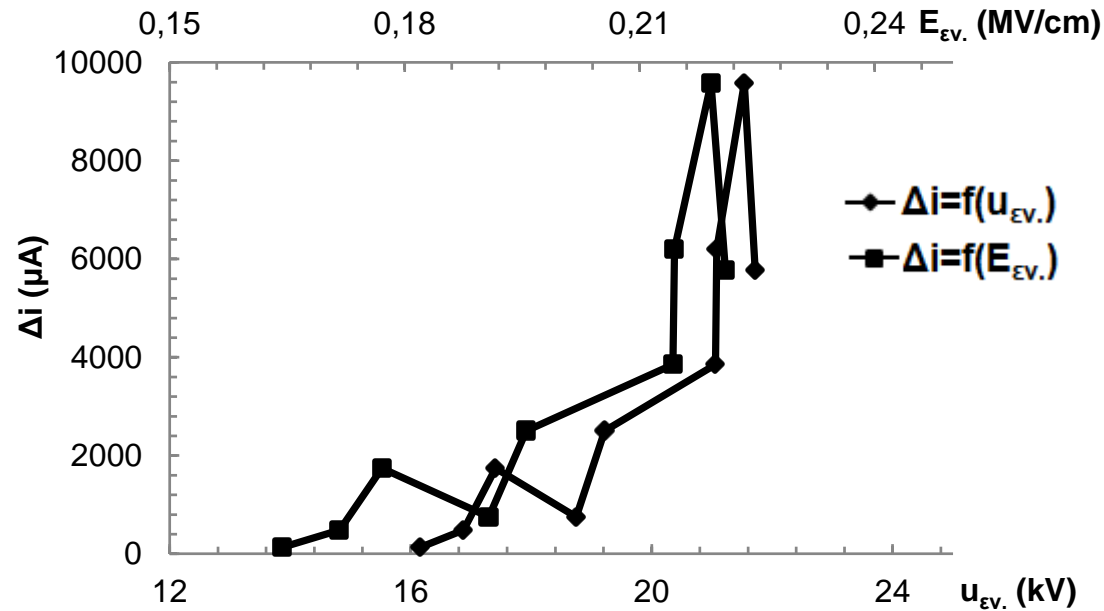
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.276: Χαρακτηριστικές: α) $i_2 = f(u_{Ev.})$, β) $i_2 = f(E_{Ev.})$
 α) χαρακτηριστική $i_2 = f(u_{Ev.})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση \pm
 β) χαρακτηριστική $i_2 = f(E_{Ev.})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση \pm , όπου :
 $u_{Ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,
 $E_{Ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{Ev.}$,
 i_2 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.77: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $\Delta i=f(u_{ev})$, \blacksquare $\Delta i=f(E_{ev})$

όπου : u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

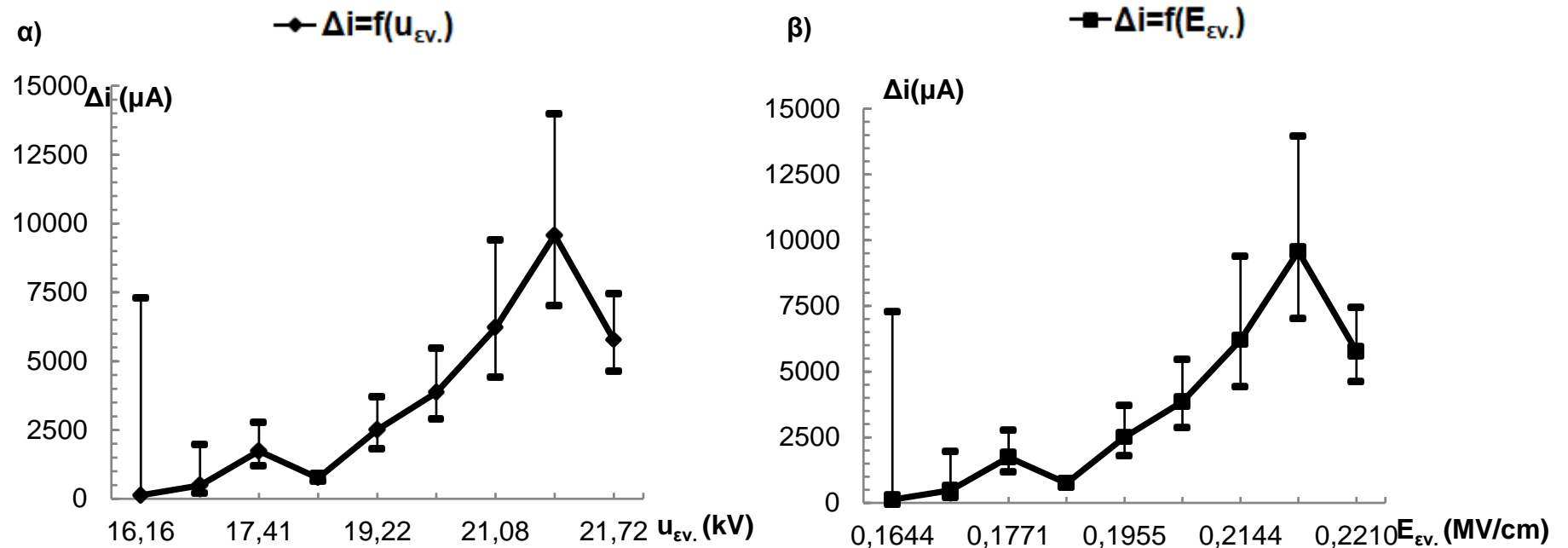
Δi : η μέση τιμή της μεταβολής του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

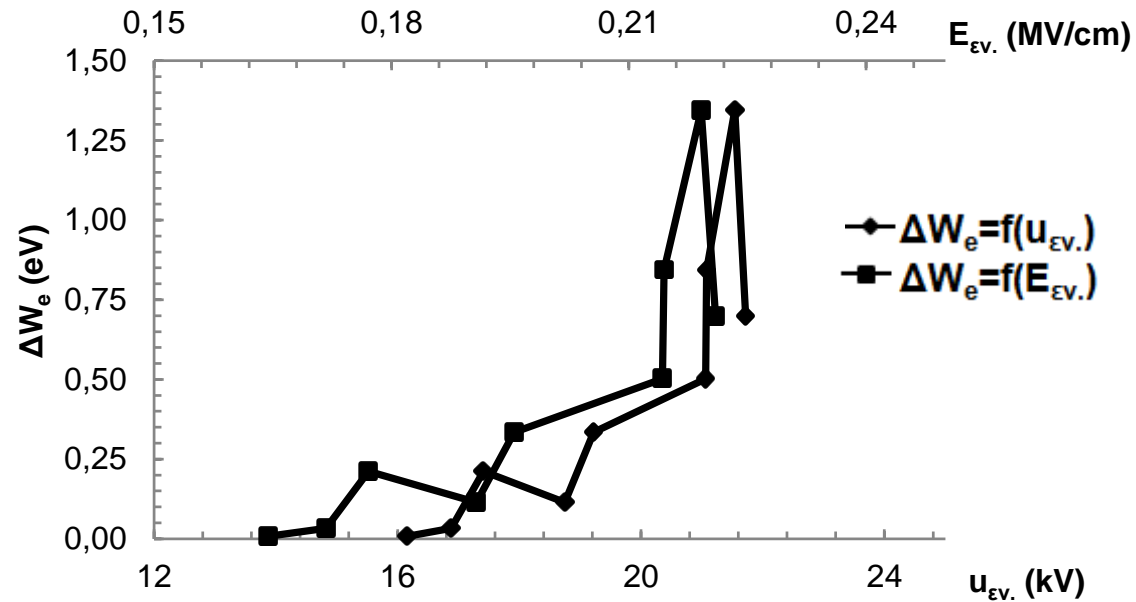
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.278: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta i=f(u_{ev})$, β) $\Delta i=f(E_{ev})$
 α) χαρακτηριστική $\Delta i=f(u_{ev})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $-$
 β) χαρακτηριστική $\Delta i=f(E_{ev})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $-$, όπου:
 u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,
 E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,
 Δi : η μεταβολή του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .
 Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.79: Χαρακτηριστικές: $\blacklozenge \Delta W_e = f(u_{ev})$, $\blacksquare \Delta W_e = f(E_{ev})$

όπου : u_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

E_{ev} : η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην u_{ev} ,

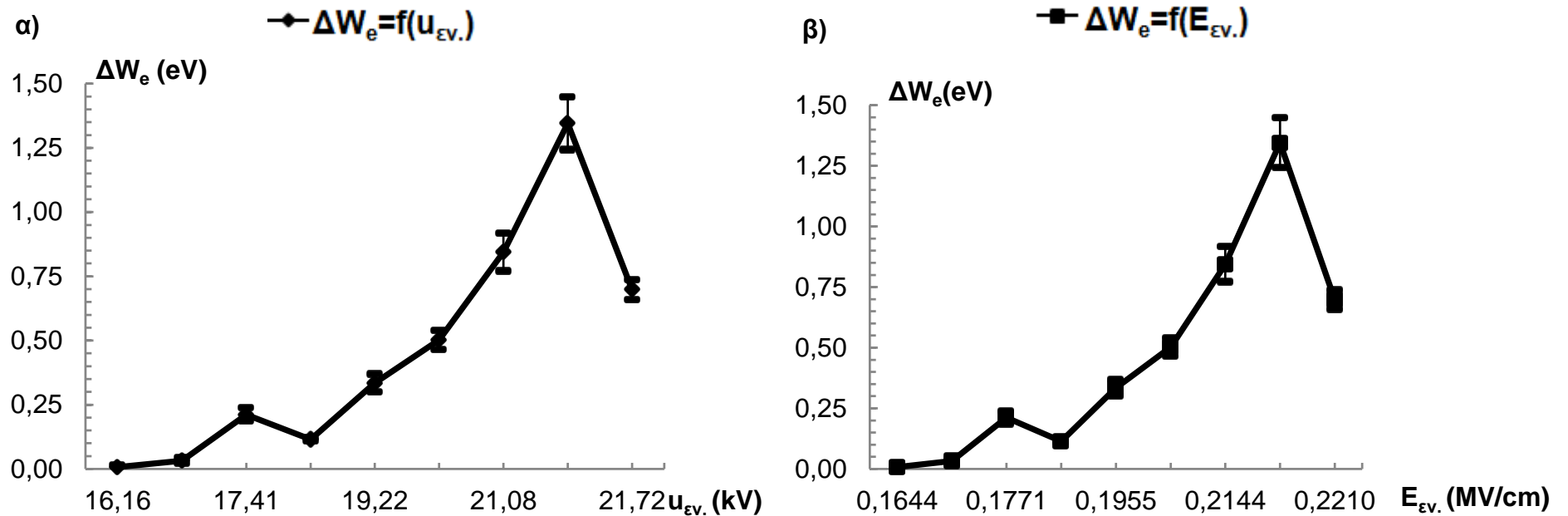
ΔW_e : η μέση τιμή της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.80: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta W_e = f(u_{ev.})$, β) $\Delta W_e = f(E_{ev.})$

α) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(u_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση ---

β) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(E_{ev.})$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση --- , όπου :

$u_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

$E_{ev.}$: η μέση στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην $u_{ev.}$,

ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

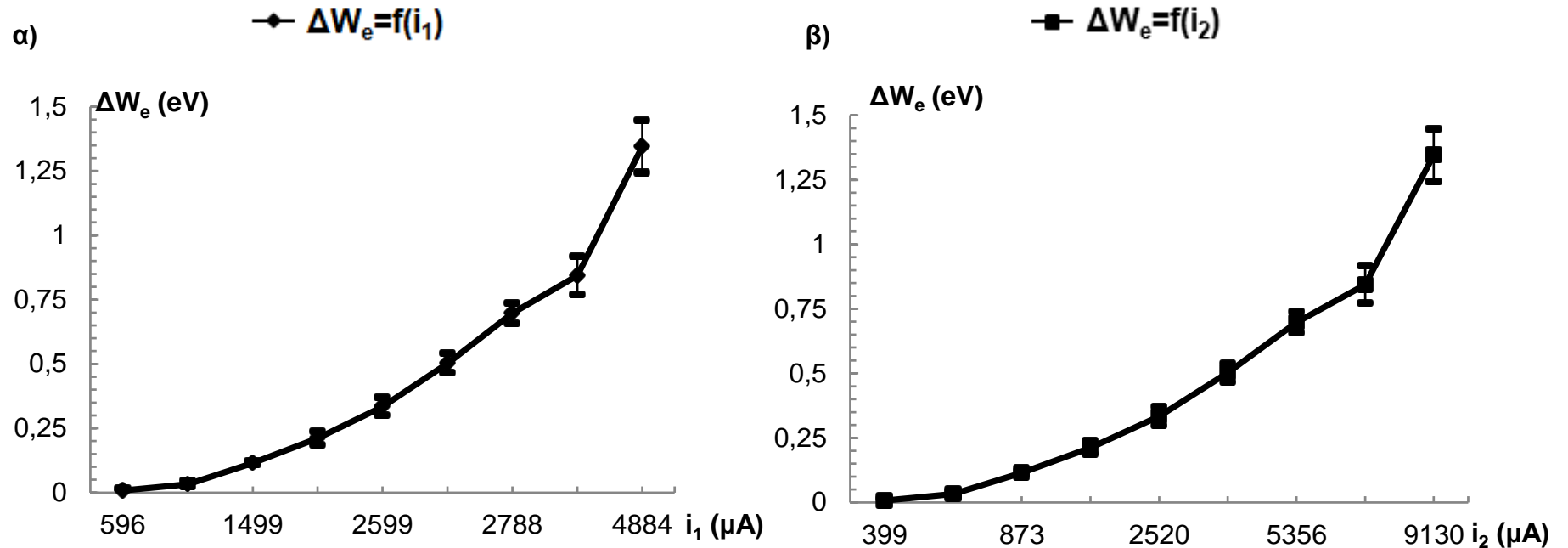
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

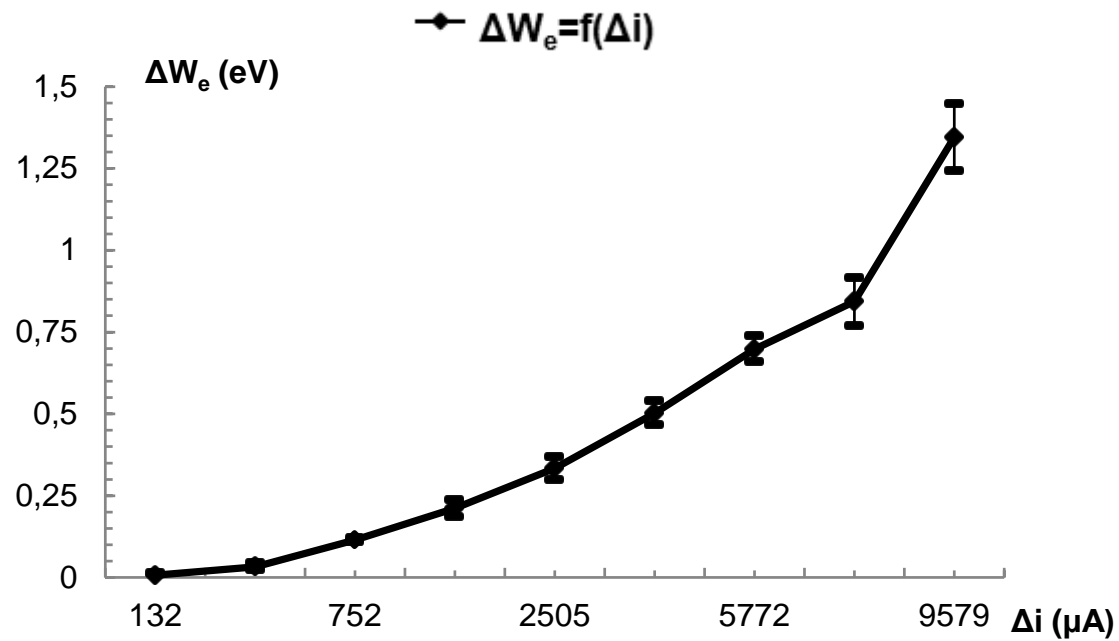
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..

Πίνακας 16: Μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης και του αντίστοιχου πεδίου και μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή του ρεύματος έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων και της μεταβολής του, μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αντίστοιχης ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, για εφαρμοζόμενη κρουστική τάση -250/2500μs και d=2mm.

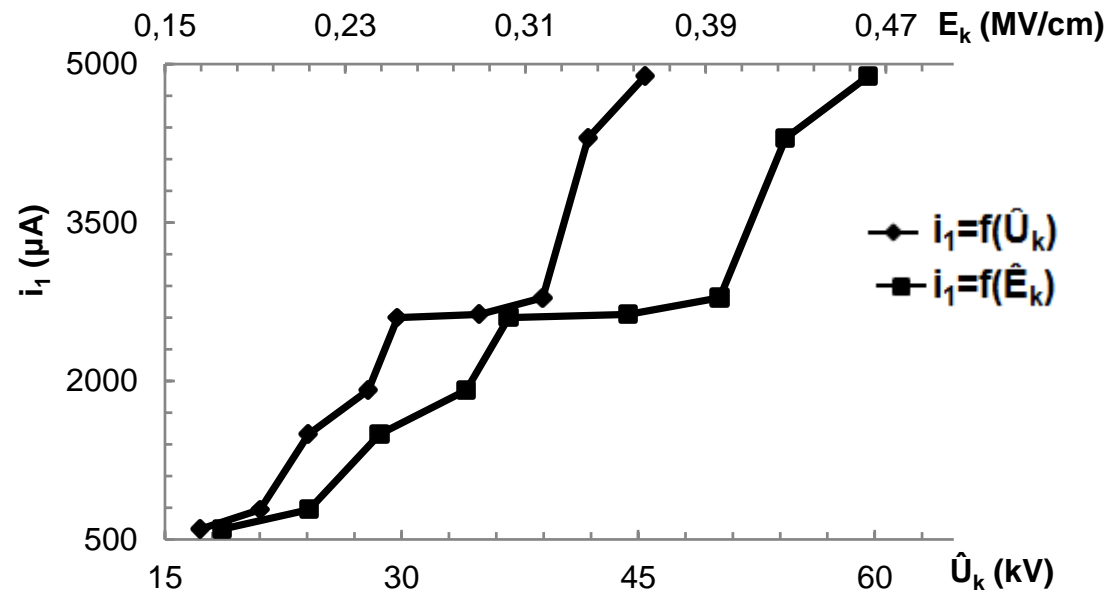
\hat{U}_k (kV)	\hat{E}_k (kV/cm)	i_1 (μA)	$i_{1,max}$ (μA)	$i_{1,min}$ (μA)	I_2 (μA)	$i_{2,max}$ (μA)	$i_{2,min}$ (μA)	Δi (μA)	Δi_{max} (μA)	Δi_{min} (μA)	ΔW_e (eV)	$\Delta W_{e,max}$ (eV)	$\Delta W_{e,min}$ (eV)
17,22	0,1752	595,85	857,51	439,62	398,81	587,01	289,09	131,69	7277,00	-	0,0075	0,0155	
21,03	0,2139	780,57	1080,91	602,56	628,86	900,32	455,34	486,34	1955,50	192,99	0,0325	0,0435	0,0215
24,11	0,2453	1498,64	1642,27	1367,63	872,92	989,86	775,35	752,23	903,58	632,48	0,1145	0,1215	0,1075
27,88	0,2836	1912,98	2548,89	1439,56	1770,12	2415,00	1351,35	1738,81	2760,86	1177,86	0,2115	0,238	0,185
29,74	0,3025	2598,98	3489,17	1884,72	2519,78	3301,66	1991,62	2505,16	3688,71	1794,56	0,334	0,369	0,299
34,95	0,3555	2631,58	3586,93	1876,00	3693,69	4809,64	2941,26	3853,24	5458,32	2872,25	0,502	0,5395	0,4645
38,94	0,3961	2787,72	3897,92	1857,08	5356,13	6452,15	4533,13	5771,62	7437,85	4612,58	0,6975	0,7375	0,6575
41,82	0,4254	4299,83	5768,03	3031,94	5988,90	8365,23	4536,01	6202,66	9372,60	4423,20	0,8435	0,9165	0,7705
45,43	0,4622	4883,80	6987,58	3271,86	9130,43	12468,36	7013,34	9579,43	13959,21	7015,22	1,345	1,4475	1,2425



Σχήμα 3.2.81: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta W_e = f(i_1)$, β) $\Delta W_e = f(i_2)$
 α) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_1)$ των μέσων τιμών ΔW_e , με τυπική απόκλιση σ
 β) χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_2)$ των μέσων τιμών ΔW_e , με τυπική απόκλιση σ , όπου:
 i_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,
 i_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.,
 ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu s$.
 Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.82: Χαρακτηριστική: $\Delta W_e = f(\Delta i)$ με τυπική απόκλιση σ όπου: Δi : η μέση τιμή της μεταβολής του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων, ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων πάνω από την ενέργεια Fermi, κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu\text{s}$.
 Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.83: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $i_1=f(\hat{U}_k)$, \blacksquare $i_1=f(\hat{E}_k)$

όπου : \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

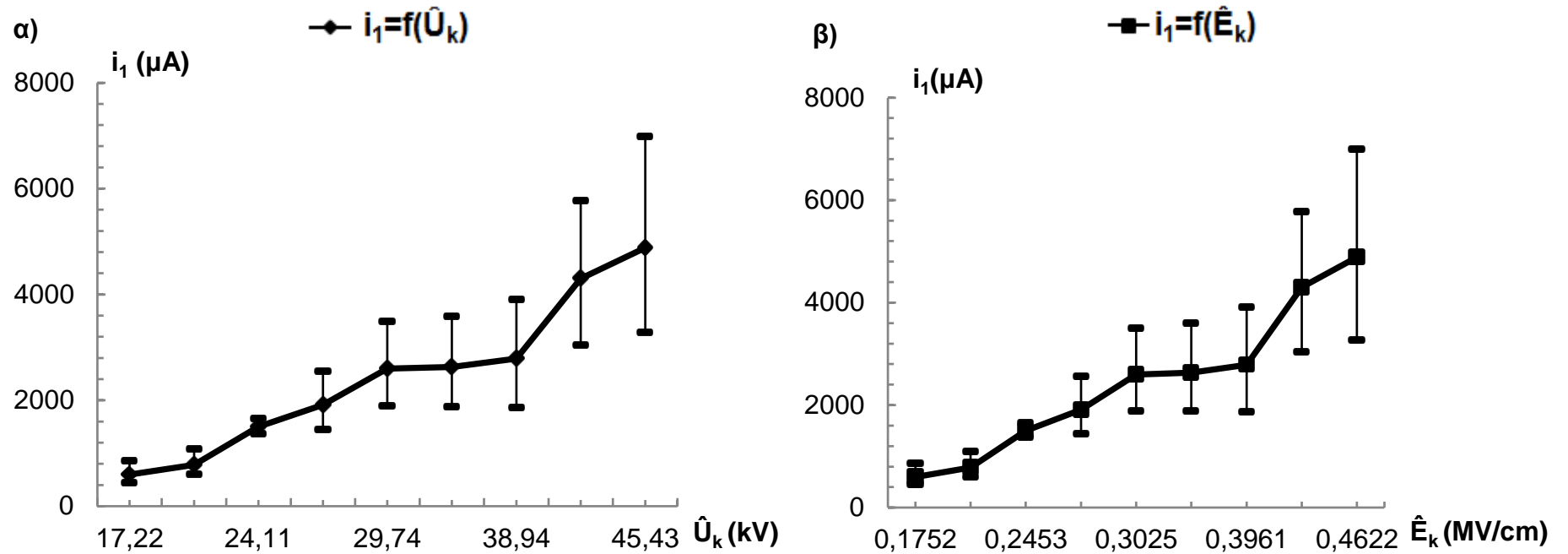
i_1 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.84: Χαρακτηριστικές: α) $i_1=f(\hat{U}_k)$, β) $i_1=f(\hat{E}_k)$

α) χαρακτηριστική $i_1=f(\hat{U}_k)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $\bar{}$

β) χαρακτηριστική $i_1=f(\hat{E}_k)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $\bar{}$, όπου :

\hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

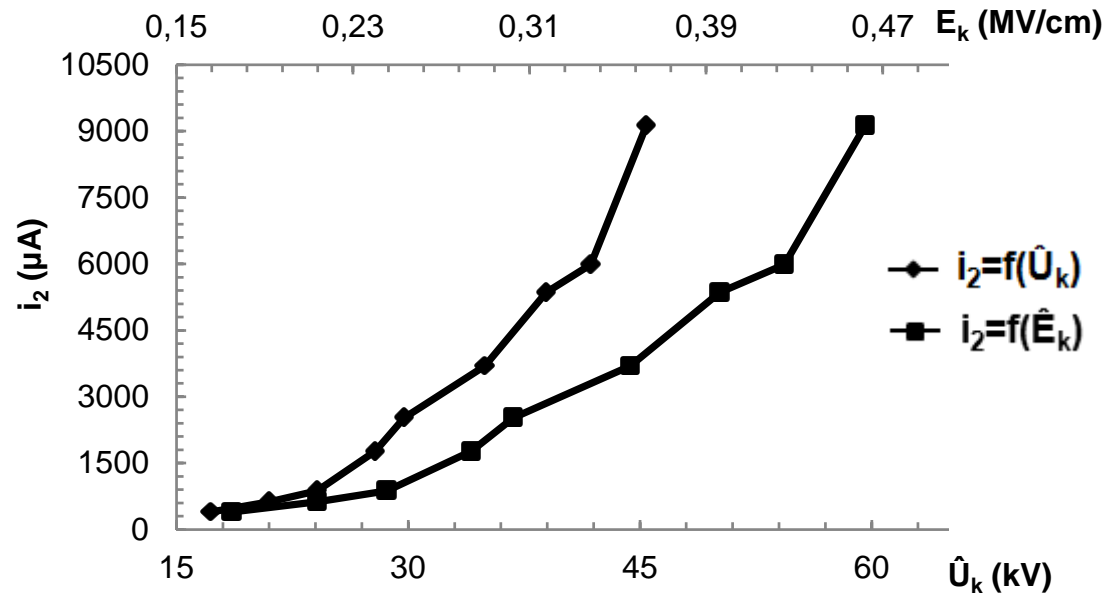
i_1 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.85: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $i_2=f(\hat{U}_k)$, \blacksquare $i_2=f(\hat{E}_k)$

όπου : \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

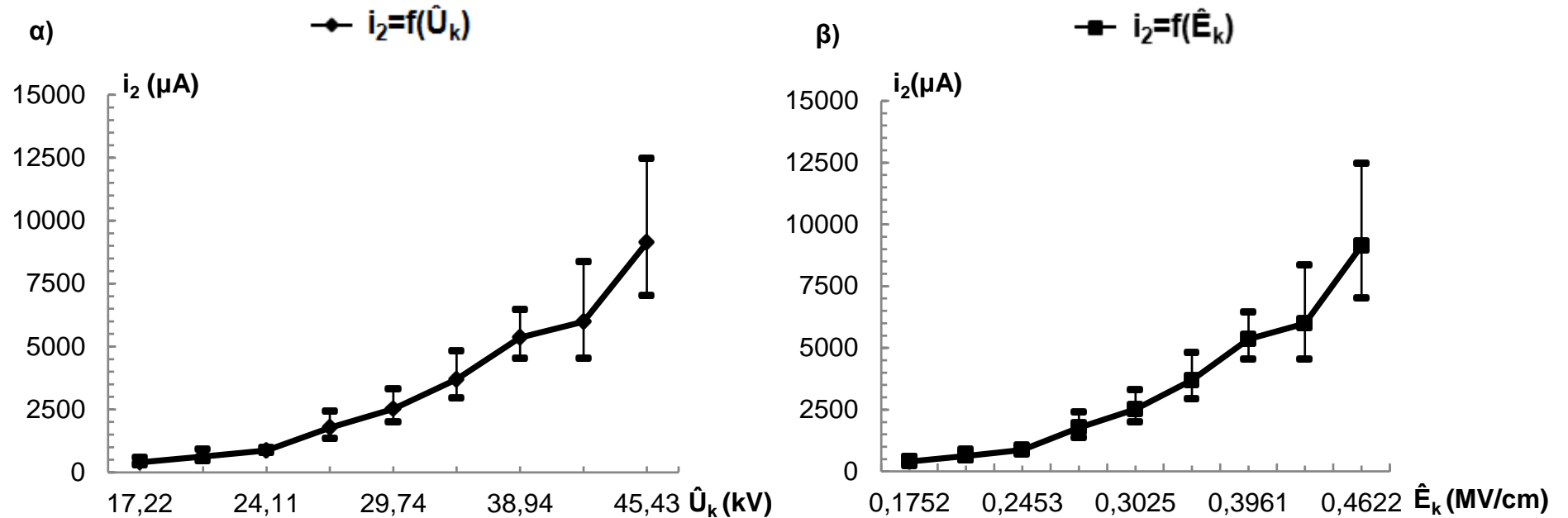
i_2 : η μέση στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.86: Χαρακτηριστικές: α) \blacklozenge $i_2=f(\hat{U}_k)$, β) \blacksquare $i_2=f(\hat{E}_k)$

α) χαρακτηριστική $i_2=f(\hat{U}_k)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $-$

β) χαρακτηριστική $i_2=f(\hat{E}_k)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $-$, όπου :

\hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,

\hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,

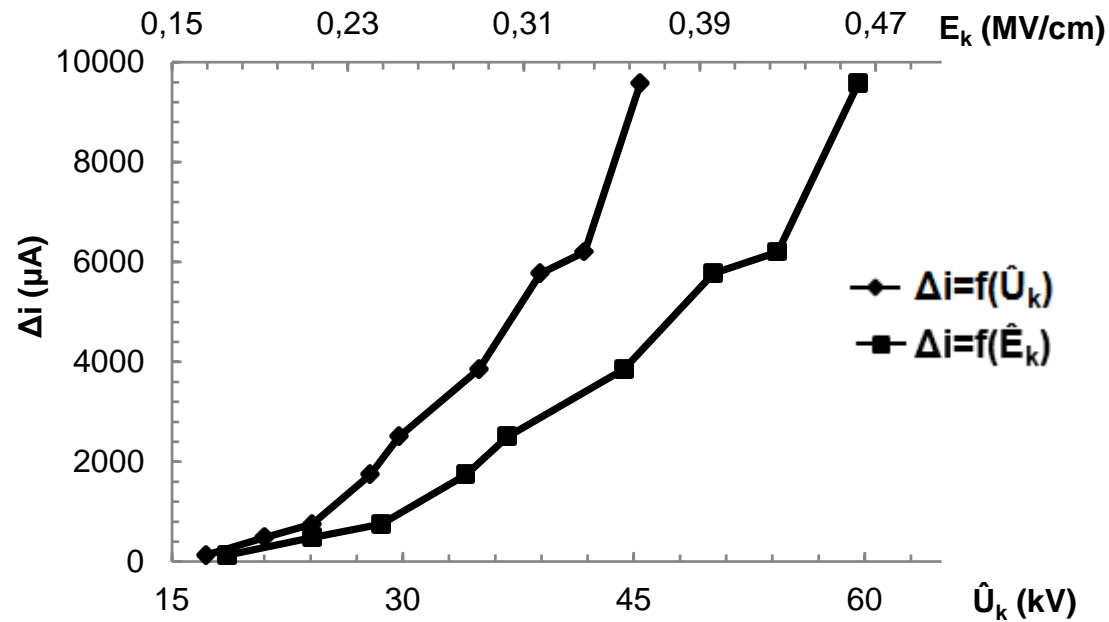
i_2 : η στιγμιαία τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων,

κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και $C_m=1000\text{nF}$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu\text{s}$.

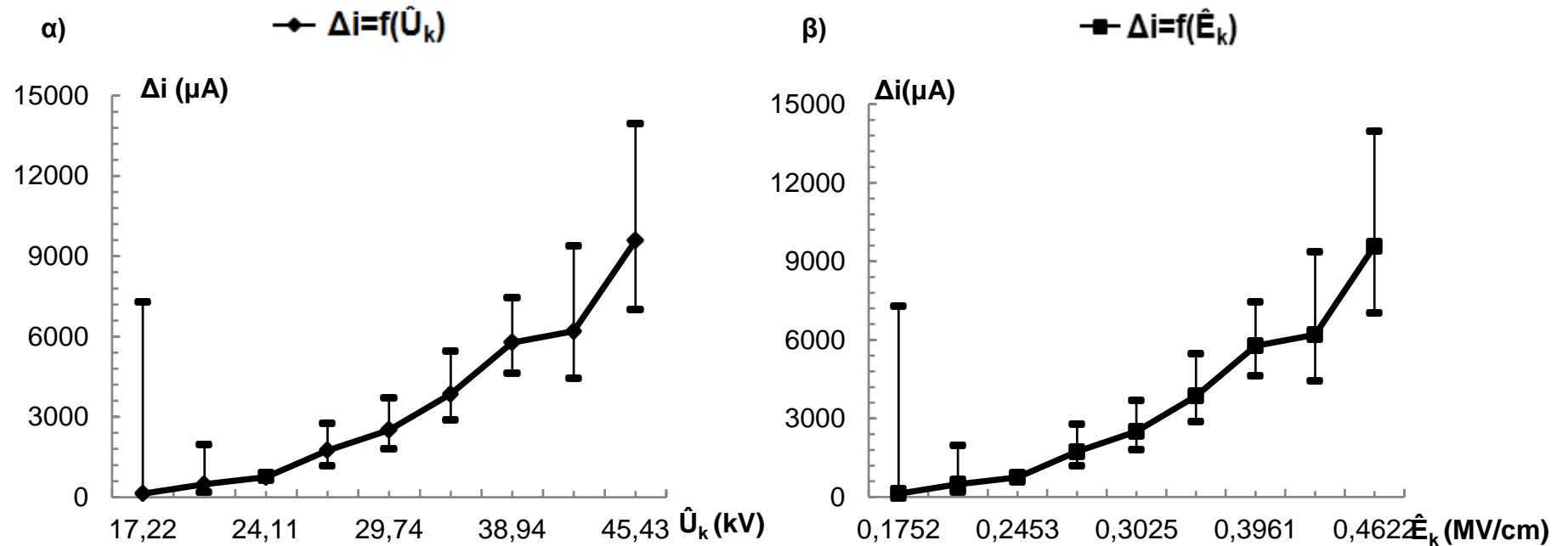
Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..



Σχήμα 3.2.87: Χαρακτηριστικές: \blacklozenge $\Delta i=f(\hat{U}_k)$, \blacksquare $\Delta i=f(\hat{E}_k)$
 όπου : \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,
 \hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,
 Δi : η μέση τιμή της μεταβολής του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας
 καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις -250/2500 μs .
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ.παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1.



Σχήμα 3.2.88: Χαρακτηριστικές: α) $\Delta i=f(\hat{U}_k)$, β) $\Delta i=f(\hat{E}_k)$
 α) χαρακτηριστική $\Delta i=f(\hat{U}_k)$ των μέσων τιμών \blacklozenge , με τυπική απόκλιση $-$
 β) χαρακτηριστική $\Delta i=f(\hat{E}_k)$ των μέσων τιμών \blacksquare , με τυπική απόκλιση $-$, όπου:
 \hat{U}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης,
 \hat{E}_k : η μέγιστη στιγμιαία τιμή του πεδίου που οφείλεται στην \hat{U}_k ,
 Δi : η μεταβολή του ρεύματος λόγω των μερικών εκκενώσεων,
 κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού pertinax, πάχους 2mm, ακτίνας καμπυλότητας $R=0,9mm$ και $C_m=1000nF$, με κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu s$.
 Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα.
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τον ορισμό των παραπάνω μεγεθών βλ. παράγραφο 2.1 σχήμα 2.1.6.1..

3.3. ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις μετρήσεις και τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές, μπορεί κανείς να καταλήξει στα παρακάτω συμπεράσματα:

☒ Οι χαρακτηριστικές $t_1=f(u_{εν.}, E_{εν.})$, $t_2=f(u_{εν.}, E_{εν.})$ και $\Delta t=f(u_{εν.}, E_{εν.})$ δείχνουν ότι αυξάνοντας την επιβαλλόμενη τάση, απαιτείται μικρότερος χρόνος για την έναρξη των μερικών εκκενώσεων και το φαινόμενο έχει μεγαλύτερη χρονική διάρκεια.

☒ Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν στη θεωρία στο κεφάλαιο 2, η γήρανση και διάσπαση των στερεών μονωτικών οφείλεται στο συνδυασμό τεσσάρων παραγόντων που είναι: η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, οι απώλειες Joule, οι δυνάμεις Coulomb και οι μερικές εκκενώσεις. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου πειράματος, η συμμετοχή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και των απωλειών Joule είναι αμελητέα, καθώς για την ερμηνεία των καμπυλών θεωρείται ότι οι μετρήσεις έγιναν υπό σταθερή θερμοκρασία 80°C, ενώ η χρονική διάρκεια των καταπονήσεων ήταν μικρή ώστε να μην πραλάβει να αυξηθεί η θερμοκρασία του δοκιμίου. Συνεπώς οι χαρακτηριστικές ερμηνεύονται μόνο με βάση τις δυνάμεις Coulomb και τις μερικές εκκενώσεις. **Η εμφάνιση των δυνάμεων Coulomb υποδηλώνεται με μείωση του φορτίου, ενώ των μερικών εκκενώσεων με αύξηση του φορτίου.** Έτσι μέσω της μεταβολής του φορτίου καθορίζεται και η μεταβολή των άλλων ηλεκτρικών μεγεθών που σχετίζονται μ' αυτό. Όπως φαίνεται και από τις διακυμάνσεις των τιμών στις χαρακτηριστικές $\Delta i=f(u_{εν.}, E_{εν.})$ και $\Delta W_e=f(u_{εν.}, E_{εν.})$, στα σχήματα 3.2.11, 3.2.12, 3.2.13, 3.2.14, 3.2.55, 3.2.56, 3.2.57, 3.2.58, 3.2.77, 3.2.78, 3.2.79 και 3.2.80, συμβαίνει μια διαδοχική εναλλαγή στον κυρίαρχο ρόλο των δυο παραγόντων της γήρανσης και διάσπασης (μερικές εκκενώσεις και δυνάμεις Coulomb).

Σύμφωνα με την κβαντομηχανική θεωρία, αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης έχει ως συνέπεια την αύξηση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και πιστεύεται ότι στα στερεά μονωτικά εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις. Οι χαρακτηριστικές $i_2 = f(u_{εν.}, E_{εν.})$, $\Delta i = f(u_{εν.}, E_{εν.})$, $\Delta W_e = f(u_{εν.}, E_{εν.})$ και $i_2 = f(\hat{U}_κ, \hat{E}_κ)$, $\Delta i = f(\hat{U}_κ, \hat{E}_κ)$, όπως φαίνεται, μπορούν να προσεγγιστούν με εκθετικές και να θεωρηθεί ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις. Όμοια μπορούν να ερμηνευτούν και οι $i_1 = f(u_{εν.}, E_{εν.})$ και $i_1 = f(\hat{U}_κ, \hat{E}_κ)$ διότι αφορούν φαινόμενα αγωγιμότητας λόγω γήρανσης.

Θεωρητικά, ιονισμός με κρούσεις συμβαίνει κατά την εκδήλωση μόνο μερικών εκκενώσεων, όμως, στις πρακτικές εφαρμογές λόγω της επίδρασης εξωτερικών συνθηκών, συμμετέχουν και οι άλλοι τρεις παράγοντες γήρανσης και διάσπασης που

αναφέρθηκαν παραπάνω. Η απόκλιση της μορφής των χαρακτηριστικών από την εκθετική οφείλεται στη στατιστικότητα του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων λόγω των διαφορετικών θέσεων διαταραχής κάθε δοκιμίου και στο συνδυασμό όλων μαζί των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι διαδοχικές εφαρμογές κρουστικής τάσης μπορούν να προκαλέσουν απώλεια μέρους των ιδιοτήτων του μονωτικού, με αποτέλεσμα την αλλαγή της αναμενόμενης συμπεριφοράς του υλικού.

☞ Καταλήγοντας, διαπιστώνεται ότι το πάχος του υλικού συμβάλλει στην διηλεκτρική αντοχή του, καθώς για $d=1\text{mm}$ τα φαινόμενα είναι πιο έντονα και γίνεται διάσπαση, ενώ για $d=2\text{mm}$ εκδηλώνονται ηπιότερα φαινόμενα και προκύπτουν πιο ομαλές χαρακτηριστικές. Αυξάνοντας το πάχος του υλικού, αυξάνεται η απόσταση μόνωσης οπότε και η διηλεκτρική του αντοχή. Κατ' αυτόν τον τρόπο, καθυστερούν να εμφανιστούν οι μερικές εκκενώσεις ($t_{1,d=1\text{mm}} < t_{1,d=2\text{mm}}$ για παρόμοια επίπεδα τάσης).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δέρβος Κ.Θ., “Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2008.
- [2] Δέρβος Κ.Θ., Μπούρκας Π.Δ., “Εισαγωγή στα ηλεκτρομονωτικά υλικά”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1991.
- [3] Θεοδώρου Ν., “Ηλεκτρικές μετρήσεις”, Τόμος 1 και 2, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004.
- [4] Καραμουλά Χ.Ε., “Στατιστική ανάλυση της διηλεκτρικής συμπεριφοράς του βακελίτη υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50μs”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2005.
- [5] Μούρκος Θ.Δ., “Ρεύματα λόγω μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά υλικά πάχους $d=1\text{mm}$ υπό κρουστικές τάσεις χειρισμών (250/2500μs)”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2009.
- [6] Μπούρκας Π.Δ., “Εφαρμογές Κτιριακών - Βιομηχανικών Μελετών και Εγκαταστάσεων”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1990.
- [7] Μπούρκας Π.Δ., Καραγιαννόπουλος Κ.Γ., “Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2003.
- [8] Σταθόπουλος Ι.Α., Μπούρκας Π.Δ., Τοπαλής Φ.Β., “Μετρήσεις και δοκιμές υψηλών τάσεων”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1991.
- [9] Σταθόπουλος Ι.Α., “Υψηλές Τάσεις”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1995.
- [10] Dervos C., Bourkas P.D, Kayafas E.A., “Potential profile of dielectrics during impulse application”, Physica Status Solidi (a) Vol. 122, 123, p.p 123-130, 1989.

- [11] Kazap S.O., “Αρχές ηλεκτρονικών υλικών και διατάξεων”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2004.
- [12] Kuffel E., “High voltage engineering fundamentals”, W.S. Zaengl Pergamon Press, Oxford, 1984.