

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚών ΔΙΑΤΑΞΕών ΚΑΙ Σύχτηματών Αποφάσεων

# ΡΕΥΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΣΕ ΣΤΕΡΕΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΠΑΧΟΥΣ d=1mmΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΧΕΙΡΙΣΜΩΝ (250/2500μs)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΟΦΑΝΗΣ Δ. ΜΟΥΡΚΟΣ

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

Αθήνα, Ιούλιος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚών ΔΙΑΤΑΞΕών ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤών Αποφάσεων

# ΡΕΥΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΣΕ ΣΤΕΡΕΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΠΑΧΟΥΣ d=1mm ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΧΕΙΡΙΣΜΩΝ (250/2500μs)

# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ΘEOΦANHΣ Δ. ΜΟΥΡΚΟΣ

Επιβλέπων: ΠΕΡΙΚΛΗΣ Δ. ΜΠΟΥΡΚΑΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31<sup>η</sup> Μήνα Έτος.

Π.Δ. ΜΠΟΥΡΚΑΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π Ν. ΘΕΟΔΩΡΟΥ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

Ν. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2009

.....

ΘΕΟΦΑΝΗΣ Δ. ΜΟΥΡΚΟΣ

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

Copyright © Θεοφάνης Δ. Μούρκος , 2009

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## <u>Πρόλογος</u>

Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων υπό την επίβλεψη του καθηγητή Περικλή Μπούρκα και αφορά στη μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά υλικά πάχους d=1mm κατά την καταπόνησή τους με κρουστικές τάσεις χειρισμών (250/2500 μs), υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, για θετική και αρνητική πολικότητα ακίδας.

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κύριο Περικλή Μπούρκα για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Χάρη στις υποδείξεις του και φυσικά χάρη στο χρόνο που μου αφιέρωσε ήταν δυνατή η υλοποίησή της.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου που με στηρίζουν και με βοηθούν σε κάθε περίοδο της ζωής μου.

## <u>Περίληψη</u>

Τα φαινόμενα γήρανσης και διάτρησης στα στερεά οργανικά μονωτικά υλικά ερμηνεύονται με μεθόδους, οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο θεωρίες : τη μακροσκοπική και τη κβαντομηχανική.

Σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεωρία, τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα από γραμμικά στοιχεία, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με τις οπτικές πατατηρήσεις για την εκδήλωση φωτεινών φαινομένων και την αλλαγή της μοριακής δομής. Κατά τη θεωρία αυτή, η γήρανση και η διάτρηση οφείλονται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες (απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb και θερμοκρασία περιβάλλοντος), οι οποίοι υποβοηθούνται στην πράξη από διάφορες τοπικές συνθήκες λειτουργίας έτσι, ώστε η αλλαγή της μοριακής δομής να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμά τους. Ως σημαντικότερος παράγοντας γήρανσης του υλικού θεωρούνται οι μερικές εκκενώσεις, οι οποίες διακρίνονται σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η διπλωματική αυτή εργασία αφορά στη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά υλικά. Παρουσιάζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων και εξετάζεται ο συνδυασμός τους με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.Επιπλέον ορίζονται χρήσιμα ηλεκτρικά μεγέθη για τη στατιστική επεξεργασία των μερικών εκκενώσεων.

Κατά την κβαντική θεωρία, ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, από την τιμή της οποίας συμπεραίνεται ο μηχανισμός παραγωγής τους. Η αλλαγή της μοριακής δομής, κατά τη θεωρία αυτή, συνοδεύεται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται από το υλικό. Έχει διαπιστωθεί ότι η γήρανση συνοδεύεται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που μπορεί να περιλαμβάνει από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.Καθοριστικός παράγοντας για τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου Ε.

Οι δύο θεωρίες που προαναφέρθηκαν θα βοηθήσουν στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και των φαινομένων που εμφανίζονται.

Το τελευταίο μέρος της διπλωματικής εργασίας αφορά την επεξεργασία των μετρήσεων. Αρχικά δίνονται οι σχέσεις με τις οποίες υπολογίζονται τα ζητούμενα προς μελέτη μεγέθη που είναι η χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων (T),το φορτίο λόγω μερικών εκκενώσεων (Q), το ρεύμα έναρξης των μερικών εκκενώσεων (I<sub>1</sub>), το ρέυμα κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων (I<sub>2</sub>), και το ρεύμα που οφείλεται στο φορτίο Q (I=Q/ T). Τα αποτελέσματα παρατίθενται σε συγκεντρωτικούς πίνακες. Στη συνέχεια σχεδιάζονται οι χαρακτηριστικές : I<sub>1</sub>=f(Ûκ, E), I<sub>2</sub>=f(Ûκ, E), I=f(Ûκ, E), I<sub>2</sub>=f(I<sub>1</sub>), I=f(I<sub>1</sub>), όπου Ε η τιμή της πεδιακής έντασης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης, η οποία ήταν της μορφής 250/2500μs.

#### ABSTRACT

The scope of this thesis was the disquisition of partial discharges and the repercussions of these, in solid dielectric materials under impulse voltage of form  $250/2500 \ \mu s$ .

At first becomes a description of prebreakdown and breakdown phenomena, which happen in solid dielectrics and the presentation of the factors that cause these phenomena. The biggest part of the thesis concerns the examination of partial discharges, as most important factor of prebreakdown and breakdown phenomena.

Furthermore is described the theory of ionization in solid dielectrics, during impulse voltage. Finaly, are calculated the measurements of various electric sizes and presented the graphic representation of the electric sizes that were measured, in order to come up with some conclusions.

#### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών
- 1.1 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών
- 1.1.1 Η θερμική διάτρηση
- 1.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση
- 1.1.3 Η θερμοχημική διάτρηση
- 1.1.4 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση)
- 1.1.4.1 Γενικά περί μερικών εκκενώσεων
- 1.1.4.1α Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων
- 1.1.4.1β Παράδειγμα ερμηνείας παλμογραφημάτων των μερικών εκκενώσεων μέσω των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων
- 1.1.4.2 Η τεχνητή γήρανση
- 1.1.4.3 Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης
- 1.1.4.3α Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule
- 1.1.4.3β Η μείωση της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση, λόγω μερικών εκκενώσεων
- 1.1.4.3γ Η μείωση της θερμικής τάσης ανατροπής από τις μερικές εκκενώσεις
- 1.1.4.3δ Η διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων (συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule και τις δυνάμεις Coulomb)
- 1.1.4.4 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων
- 1.1.4.5 Το φαινόμενο της πολικότητας σε πολυμερή στερεά μονωτικά κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων
- 1.2 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών

- 1.2.1 Ένα τυπικό παράδειγμα ερμηνείας των φαινομένων μέσω της μακροσκοπικής και της κβαντικής θεωρίας
- 1.2.2 Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών
- 1.3 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών
- 2 Σκοπός της εργασίας
- 3 Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των μετρήσεων
- 4 Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### 1. <u>Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών</u> <u>υλικών</u>

Τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο αυτό προέρχονται από τα βιβλία του καθηγητή Π.Δ. Μπούρκα. Στα στερεά μονωτικά η ικανότητα δημιουργίας ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τα ηλεκτρομονωτικά αέρια και η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σε αυτά (κάψιμο, τήξη, μηχανικές κακώσεις). Επίσης τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών.

Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των στερεών μονωτικών υλικών, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται κατά τη διάσπαση ή να αποκτούν μόνιμες βλάβες (λόγω επιφανειακής διάσπασης και μερικών εκκενώσεων) είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού της γήρανσης της διάσπασής τους.

Από τις διάφορες έρευνες που έχουν γίνει για τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών οι μέθοδοι που εφαρμόζονται μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες :

1)Τη μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών

2)Την κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών

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

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

#### 1.1. <u>Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση</u> <u>των στερεών μονωτικών</u>

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

α) οι απώλειες Joule

β)οι δυνάμεις Coulomb

γ)οι μερικές εκκενώσεις

δ)η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

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

α)η θερμική διάτρηση

β)η ηλεκτρική διάτρηση (που διακρίνεται στη δενδροειδή και την ηλεκτρομηχανική)

γ)η ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση)

δ)η θερμοχημική διάτρηση

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

### 1.1.1. Η θερμική διάτρηση

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

Ο οχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ<sub>1</sub>,οπότε έχουμε :

$$\sigma_1 = \sigma_0 \cdot e^{\beta \theta} \tag{1.1.1-1}$$

Με την προϋπόθεση ότι ο οχετός διάτρησης έχει σταθερή διατομή Α και ειδική αγωγιμότητα σ<sub>1</sub>, η θερμική ισχύς που παράγεται είναι :

$$P=U^{2}/R=U^{2}\sigma_{0} \cdot e^{\beta\theta} \cdot A/d \qquad (1.1.1-2)$$

όπου U η ενδεικνύμενη τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια. Αν Ρ<sub>α</sub> είναι η τιμή της απαγώμενης θερμικής ισχύος, C₀ η θερμοχωρητικότητα και t ο χρόνος, ισχύει γενικά ότι :

$$\mathsf{P} = \mathsf{P}_{\alpha} + \mathsf{C}_{0} \cdot (\mathsf{d}\theta / \mathsf{d}t) \tag{1.1.1-3}$$

Η απαγώμενη θερμική ισχύς είναι ( για d>>r) :

P<sub>α</sub>= 2πrdκθ

όπου κ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

Όμως η θερμική ισχύς που παράγεται είναι ίση με εκείνη που απάγεται στην περίπτωση της θερμικής διάτρησης. Δηλαδή :

(1.1.1-4)

(1.1.1-7)

$$U^{2}\sigma_{0} \cdot e^{\beta\theta} \cdot A/d = 2\pi r d\kappa\theta \qquad (1.1.1-5)$$

Βλέπουμε ότι η παραπάνω σχέση αποτελείται από δύο συναρτήσεις της θερμοκρασίας,αφού P=f(θ) και P<sub>α</sub>=f(θ). Άρα η οριακή τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση (U<sub>θ</sub>) δίνεται όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι από τη διαφόριση της προηγούμενης σχέσης ως προς θ έχουμε :

1	$31l^2\sigma_0 e^{\beta\theta} \cdot \Delta / d=2\pi r d\kappa$	(1 1 1-6)
	$5000^{\circ}e^{-3}A/d=2110k$	(1.1.1-0)

Από τις σχέσεις 1.1.1-5 και 1.1.1-6 προκύπτει ότι :

β•θ=1 και		
-----------	--	--

 $U_{\theta}=d\cdot\sqrt{(2\kappa/\epsilon\beta\sigma_0 r)}$ 

Στο σχήμα 1.1.1-2 παριστάνεται η αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U<sub>θ</sub>. Η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μια μεταβλητή αγωγιμότητα G. Η διάτρηση στην τιμή U<sub>θ</sub> συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ<sub>0</sub> σε σ<sub>1</sub>), μια οριστική τιμή G<sub>max</sub>.



Σχήμα 1.1.1-1 : Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule.

> G=G<sub>0</sub>...G<sub>max</sub> G<sub>0</sub> : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή G<sub>max</sub>: αγωγιμότητα για τη διάτρηση C : χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή

(1.1.1-8)

## 1.1.2. <u>Η ηλεκτρική διάτρηση</u>

Όταν η σταθερή ενεργός τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη για τη θερμική διάτρηση, τότε η πεδιακή ένταση αυξάνεται και επομένως μπορεί να αυξηθεί και η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων μέσα στο στερεό μονωτικό υλικό. Από μια τιμή της τάσης και μετά η διάτρηση του υλικού αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb.Η διάτρηση οφείλεται σε :

α) αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις

β) μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου)

γ) συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

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

Η δενδροειδής διάτρηση είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, γιατί, λόγω της μεγαλύτερης τιμής της τάσης και επομένως της πεδιακής έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά τη διάτρηση σχετίζεται με θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μια διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγώγιμη σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 1.1.2-1 δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη (ανάλογα με την πολικότητα της τάσης) για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (ηλεκτρόδια ακίδα-πλάκα).

Στην περίπτωση της θετικής ακίδας ο δενδρίτης έχει, λόγω των δυνάμεων Coulomb που εξασκούνται μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) κατά την 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. Έχουμε δηλαδή,ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας, ομοιότητα με τις εικόνες Lichtenberg κατά τη μέτρηση κεραυνών.



Σχήμα 1.1.2-1 : Προς επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη

Η ηλεκτρομηχανική διάτρηση οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης σε σχέση με τη δενδροειδή διάτρηση. Η διάτρηση συμβαίνει κυρίως λόγω των δυνάμεων Coulomb που ασκούνται μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η χρονική διάρκεια του φαινομένου είναι μερικά μs. Η εικόνα που παρουσιάζει το υλικό ειναι κυρίως το αποτέλεσμα μιας ακαριαίας εξάσκησης δυνάμεων, στην περιοχή όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα μεγάλη (μηχανική τάνυση υπό την επίδραση δυνάμεων του πεδίου).

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις έχει διαπιστωθεί ότι πάνω από μια μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης U<sub>kmin</sub>, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, συμβαίνει η διάτρηση με μια κρούση υπό μορφή οχετού, αν και η τιμή της πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης. 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, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμότητα που απάγεται μόλις πριν από τη διάτρηση είναι αμελητέα. Κατά τη σχέση επομένως 1.1.2-1 και για έναν οχετό διατομής A=πr<sup>2</sup> ισχύει μόλις προ της διάτρησης ότι :

$$U_n^2 \cdot \sigma_2 \cdot A / d = \sigma_0 \cdot d\theta / dt$$

(1.1.2-1)

όπου σ<sub>2</sub> η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια ανομοιογένεια (λόγω της οποίας η πεδιακή ένταση έγινε ιδιαίτερα μεγάλη στην περιοχή εκείνη του υλικού) και U<sub>n</sub> η ενδεικνύμενη τιμή της τάσης για την ηλεκτρική διάσπαση του υλικού στην παραπάνω περιοχή. Αν υποθέσουμε ότι, λόγω του μικρού διατιθέμενου χρόνου είναι dθ/d=θ/T<sub>δ</sub>, όπου T<sub>δ</sub> ο χρόνος για την ηλεκτρική διάτρηση, τότε από τη σχέση 1.1.2-1 έχουμε :

 $U_n = \sqrt{d} \sqrt{(C_0 \theta / \sigma_2 A T_{\delta})}$ 

(1.1.2-2)

	κρουστική τάση			Περιοχή τιμών	
			Ûk 50%	Uκ για τη	
d [mm]	Μορφή [µs]	Πολικότητα	[kV]	διάσπαση	
				[kV]	
	1,2/50	θετική	80	7890	
1	1,2/50	αρνητική	86	8195	
	10/200	θετική	74	6978	
	10/200	αρνητική	77	7179	
	250/2500	θετική	66	6369	
	250/2500	αρνητική	68	6570	
	1,2/50	θετική	135	126151	
	1,2/50	αρνητική	148	132165	
2	10/200	θετική	74	6980	
	10/200	αρνητική	70	67,571	

Πίνακας 1.1.2-1: Τιμές της τάσης διάσπασης του στερεού μονωτικού pertinax H120 (πάχους 1mm και 2mm) κατά την καταπόνησή του με διάφορες μορφές κρουστικών τάσεων σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών.

> Διάμετρος δοκίμιων:150mm Διάταξη ηλεκτροδίων:ακίδα-πλάκα Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας:R=0,9mm

Για τη διάτρηση στη μέγιστη τιμή Û<sub>kn</sub> μιας κρουστικής τάσης ισχύει αντίστοιχα :

 $\hat{U}_{kn} = \sqrt{d} \cdot \sqrt{C_0 \theta} \sigma_2 A T_s$ 

(1.1.2-3)

όπου T<sub>s</sub> 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<sub>s</sub> μιας κρουστικής τάσης, τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή όπως φαίνεται από τον πίνακα 1.1.2-1.

Μια ερμηνεία της ηλεκτρικής διάτρησης, μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος, μπορεί να δοθεί με το παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 1.1.2-2 : Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση

C: ιδανική χωρητικότητα

C<sub>π</sub>=0...C<sub>max</sub> : χωρητικότητα, που συμβολίζει την πόλωση του στερεού μονωτικού στη θέση που θα συμβεί η διάτρηση G=0...G<sub>max</sub> : αγωγιμότητα λόγω αύξησης των ηλεκτρικών φορέων στη θέση που θα συμβεί η διάτρηση

Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας αφού δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές, η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μια κρίσιμη για το υλικό τιμή σ<sub>2</sub>, η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα (σχήμα 1.1.2-2), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C<sub>π</sub>, που συμβολίζει την πόλωση, προς την ιδανική χωρητικότητα C. Όταν η αγωγιμότητα G και ο πυκνωτής C<sub>π</sub> έχουν αποκτήσει μόλις προ της διάτρησης τις τιμές G<sub>max</sub> και C<sub>max</sub>, που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα σ<sub>2</sub>, λόγω κάποιας ανομοιογένειας, τότε συμβαίνει η διάτρηση.

#### 1.1.3. <u>Η θερμοχημική διάτρηση</u>

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, εξαιτίας της αύξησης της παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. 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 μια τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης. Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής και δίνεται από τη σχέση :

#### $U_{\alpha} = \sqrt{(\alpha \kappa \theta \sigma_0)}$

(1.1.3-1)

όπου α η σταθερά του υλικού που εξαρτάται από τη μορφή της τάσης. Η σταθερή α έχει την τιμή 2,83 για καταπόνηση με συνεχή τάση και 1,88 για καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση. Η θερμική τάση ανατροπής αποτελεί το κριτήριο για το τεχνοοικονομικό πάχος των στερεών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές (όπως μετασχηματιστές,καλώδια κλπ.). Η τιμή είναι για τα περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20<sup>0</sup> C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση 50Hz, της τάξης του 1MV.

Πρόσφατες έρευνες σε στερεά μονωτικά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου του στερεού μονωτικού ενισχύει τις μερικές εκκενώσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται, εξαιτίας της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, σε μικρότερες τιμές της τάσης απ'ότι σε κανονική θερμοκρασία (20<sup>0</sup> C), με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός με κρούσεις σε αρκετα μικρότερες τιμές του πεδίου απ'ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20<sup>0</sup> C.

## 1.1.4. <u>Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση</u> <u>ή γήρανση)</u>

Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γηρανση της μόνωσης) είναι η θεωρητική μορφή διάτρησης των στερεών μονωτικών υλικών, στην οποία δίνεται ιδιαίτερη σημασία, και γι' αυτό εξετάζεται αναλυτικά ακολούθως.

## 1.1.4.1. Γενικά περί μερικών εκκενώσεων

Σε μια δεδομένη διάταξη δύο ηλεκτροδίων τα χωρικά φορτία συγκεντρώνονται προ του ηλεκτροδίου με την αντίθετη προς αυτά πολικότητα και σχηματίζουν έτσι ένα νέφος χωρικών φορτίων. Το πεδίο είναι ηλεκτροστατικό όταν τα χωρικά φορτία του νέφους είναι αμετακίνητα. Υποθέτουμε ότι μέχρι μια τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (ή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης) συμβαίνει μια κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των εξασκούμενων δυνάμεων Coulomb, ώστε το πεδίο να εξακολουθεί να είναι χωρικό. Όταν μετά την παραπάνω τιμή του πεδίου καταστρέφεται η κατάσταση ισορροπίας (χωρίς να συμβαίνει η διάσπαση) τότε εκδηλώνονται περιορισμένης έκτασης εκκενώσεις, που ονομάζονται μερικές εκκενώσεις. Οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού χαρακτηρίζονται ως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις και εκείνες στην επιφάνεια του ως εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών 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). Μια μακροσκοπική παράσταση των θέσεων δίνεται στο σχήμα 1.1.4.1-1. (1)





- (1): τομή Α-Α της διάταξης πειραματισμού :
  - α : ηλεκτρόδιο ακίδα
  - β : επιφανειακό φιλμ του μονωτικού ελαίου
  - γ : στερεό μονωτικό
  - δ : ηλεκτρόδιο πλάκα
- (2): κάτοψη της διάταξης πειραματισμού :

C<sub>1</sub>...C<sub>n</sub>: πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος του στερεού μονωτκού και του επιφανειακού φιλμ ελαίου C<sub>ε1</sub>...C<sub>εn</sub>: πυκνωτές επιφανειακών (εξωτερικών) θέσεων διαταραχής C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης C<sub>φ1</sub>...C<sub>φn</sub>: πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων)

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

Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις της διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές  $C_{ε1}...C_{εn}$  και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές  $C_{φ1}...C_{φn}$ .Οι πυκνωτές  $C_{1}...C_{n}$  και  $C_{01}...C_{0n}$  παριστάνουν αντίστοιχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (καθένας 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).

Από τη στιγμή της έναρξης των μερικών εκκενώσεων προκαλείται συνήθως σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του στερεού μονωτικού, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε περιορισμένο τμήμα του, όπου δηλαδή έτυχε οι θέσεις ανομοιογένειας να ειναι περισσότερο αγώγιμες. Πρόκειται για ενα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, που σε 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 ειναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού. Στο σχήμα 1.1.4.1-2 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων της διαταραχής.



Σχήμα 1.1.4.1-2 : Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχους 0,125mm λόγω μερικών εκκενώσεων.

Αριθμός δοκιμίων : 10 ανά σημείο μέτρησης

Τδ : χρόνος διάσπασης

#### 1.1.4.1α. 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 εκείνης 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.



Σχήμα 1.1.4.1-3 : Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του (κατά Gemant και Philipoff)

- α :σχηματική παράσταση
- β :ισοδύναμο κύκλωμα
- C :ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
- C1:χωρητικότητα της φυσαλίδας
- C<sub>2</sub>:χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού
- R1:αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ1

Η ανάγκη για τη φυσική εξήγηση και τη μαθηματική ανάλυση του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων μέσα στον όγκο του στερεού μονωτικού, οδήγησε τους Gemant και Philipoff στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.1.4.1-3, γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου. Στο σχήμα 1.1.4.1-4 έχει συμπληρωθεί το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο και για τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C1) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (Cε). Με τόν τρόπο δηλαδή αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού (C2 και C3 αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C. Οι σπινθήρες Σπ1και Σπ2 στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R1, R2) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C1, Cε).

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη. Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς συχνά στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα 1.1.4.1-5.



Σχήμα 1.1.4.1-4 : 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 διάταξης
- C<sub>1</sub>: χωρητικότητα της φυσαλίδας
- Cε: χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής
- C<sub>2</sub>: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού
- C<sub>3</sub>: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ
- R1: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ1
- $R_2$ : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ $_2$



- Σχήμα 1.1.4.1-5 : Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff)
  - C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

 $C_2$ : χωρητικότητα του υγιούς στον όγκο του μονωτικού  $C_3$ : χωρητικότητα του υγιούς στην επιφάνεια του μονωτικού  $\Delta_1$  και  $\Delta_2$ : διακόπτες, που όταν κλείνουν συμβολίζουν τη 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 μονωηκών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας σης πλευρές της φυσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κλπ. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει επίσης μία ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 1.1.4.1-6). 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 διαταξης.



#### Σχήμα 1.1.4.1-6: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

G : γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

## 1.1.4.1β. <u>Παράδειγμα ερμηνείας παλμογραφημάτων των μερικών</u> <u>εκκενώσεων μέσω των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων</u>

Στο σχήμα 1.1.4.1-7 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" (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 :



Σχήμα 1.1.4.1-7 : Τυπικά παλμογραφήματα κατά τη γήρανση και τη διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών

- απλοποιημένη διάταξη μέτρησης ( u<sub>κ</sub> : στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης, Δ :δοκίμιο, u<sub>m</sub> : τάση στον πυκνωτή μέτρησης C<sub>m</sub> ).
- 2) μετρήσεις με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200μs :
  - (α) γήρανση : (τιμή πεδίου 1,11 MV/cm,  $\hat{U}_{\kappa}$ =77,5 kV, C<sub>m</sub>=210 nF, υλικό : βακελίτης )
  - (β) διάτρηση : (τιμή πεδίου 1,20MV/cm, Ûκ=85kV , C<sub>m</sub>=210ηF, υλικό : pertinax )

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι, μετά από μια τιμή  $\hat{U}_{\kappa}$  =45 kV (όπου  $\hat{U}_{\kappa}$  η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται κατά τη γήρανση επιανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής. Κατά τη διάτρηση δεν εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, αλλα ηλεκτρικό τόξο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η εικόνα, που παρουσιάζουν τα δοκίμια μετά τη διάτρηση, είναι μία μικρή τρύπα (μικρότερη από 0,1mm) πλησίον της ακίδας.Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται ως ακολούθως :

Από το παλμογράφημα της γήρανσης (σχήμα1.1.4.1-7α) φαίνεται ότι εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού, τα οποία προκαλούνται, κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.1.4.1-4 (ή του σχήματος 1.1.4.1-1), από τη σταδιακή διάσπαση διαφόρων θέσεων διαταραχής (C<sub>1</sub>, C<sub>ε</sub>). Μπορούμε να υποθέσουμε ότι στην περίπτωση αυτή ισχύει για την σχέση καταμερισμού μεταξύ χωρηηκότητας του δοκιμίου C και του πυκνωτή μέτρησης C<sub>m</sub>:

 $U_{m}(t) = [(C_{\delta} + \Delta C_{\delta}) / C_{m}] \cdot u_{\kappa}(t)$ (1.1.4.1-1)

όπου ΔC<sub>δ</sub> 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.

## 1.1.4.2. Η τεχνητή γήρανση

Κατά την καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού υλικού με κάποια μορφή τάσης (συνεχή, εναλλασσόμενη ή κρουστική), διαπιστώνουμε ότι μετά από κάποια τιμή της τάσης 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 τεχνήτη αυτή γήρανση δεν ανταποκρίνεται βέβαια στην πραγματική κατάσταση, που δημιουργείται με την πάροδο του χρόνου (όταν το υλικό εργάζεται υπό ονομαστικά μεγέθη στο δίκτυο), δίνει όμως τη δυνατότητα ανίχνευσης των παραγόντων διάσπασης, που τελικά δεν μπορεί να είναι διαφορετικοί από τους πραγματικούς.

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

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

με=Uε/U

(1.1.4.2-1)

όπου U η προβλεπόμενη τάση δοκιμής και U<sub>ε</sub> εκείνη κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη μερική εκκένωση.

Κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις, που μας ενδιαφέρει και στην περίπτωσή μας, ισχύει αντίστοιχα :  $\mu_0 = \hat{U}_{\kappa\epsilon} / \hat{U}_{\kappa}$ 

όπου Û<sub>κε</sub> η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη μερική εκκένωση και Û<sub>κ</sub> η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης που προβλέπεται από τις προδιαγραφές για τη διηλεκτρική δοκιμή υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

### 1.1.4.3. <u>Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τους άλλους</u> <u>παράγοντες</u> γήρανσης και διάτρησης

Οι μερικές εκκενώσεις θεωρείται ότι είναι ο κυρίαρχος παράγοντας γήρανσης και διάσπασης 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.

#### 1.1.4.3α. Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule

Θεωρήθηκε ότι η θερμική διάτρηση αρχίζει σε μια θέση του μονωτικού υλικού, όπου αρχικά, λόγω κάποιας ανομοιογένειας, υπάρχει αιτία για τοπική αύξηση της αγωγιμότητας. Για να μελετηθεί ειδικά η θερμική διάτρηση, δεν πάρθηκε 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 την επιφάνεια του στερεού μονωτικού, έχει σχεδιαστεί στο σχήμα 1.1.4.3-1 η χαρακτηριστική E=f(x) του στερεού μονωτικού, όταν αυτό καταλαμβάνει όλο το χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων και δεν έχει ανομοιογένειες στον ογκο του, συγκριτικά με τη χαρακτηριστική 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 αυτών 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 που δίνεται από τη σχέση :

 $\epsilon \cdot tg\delta = (\sigma_0 / \omega) \cdot \{e^{\beta \theta} / (1 - \delta E)^2\}$ 

(1.1.4.3-1)



- Σχήμα 1.1.4.3-1 : Αύξηση της πεδιακής έντασης στις θέσεις ανομοιογενειών του στερεού μονωτικού
  - ε1 ως ε5 : διηλεκτρικές σταθερές
  - ε1: μονωτικό λάδι
  - ε2: ανομοιογένειες στο επιφανειακό φιλμ (ε1<ε2)
  - ε3: στερεό μονωτικό (ε3>ε1)
  - ε4,ε5: ανομοιογένειες στον όγκο του στερεού μονωτικού ( ε3>ε4 και ε3>ε5)
  - - -: 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 επομένως σύμφωνα με τη σχέση (1.1.1-3):

$$U^{2}\sigma_{0} \cdot e^{\beta\theta} \cdot A / (1 - \delta E)^{2} \cdot d = 2\pi r \kappa d\theta + C_{0} \cdot d\theta / dt \qquad (1.1.4.3-2)$$

και στην περίπτωση της διάτρησης (στην τιμή U<sub>θε</sub>) :

$$U_{\theta\epsilon}^{2}\sigma_{0} \cdot e^{\beta\theta} \cdot A / (1 \cdot \delta E)^{2} = 2\pi r \kappa d\theta$$
(1.1.4.3-3)

$$\dot{\eta} : \theta = U_{\theta \epsilon}^2 \sigma_0 \beta \cdot e^{\beta \theta} \cdot A / 2 \pi r^2 \kappa d \cdot (1 - \delta E)^2$$
(1.1.4.3-4)

Η οριακή τιμή δίνεται από τη διαφόριση του αριστερού και του δεξιού τμήματος της παραπάνω σχέσης ως προς θ (βλέπετε παράγραφο 1.1.1) :

$$1 = U_{\theta \varepsilon}^{2} \sigma_{0} \beta \cdot e^{\beta \theta} \cdot A / 2\pi r^{2} \kappa d \cdot (1 - \delta E)^{2}$$
(1.1.4.3-5)

Από τις σχέσεις 1.1.4.3-4 και 1.1.4.3-5 φαίνεται ότι βθ=1 και επομένως η οριακή τιμή της τάσης διάσπασης είναι :

$$U_{\theta \varepsilon} = d \cdot (1 - \delta E) \cdot \sqrt{(2\kappa / \varepsilon \beta \sigma_0 r)}$$

(1.1.4.3-6)

Σε συνδυασμό με τη σχέση 1.1.1-8, η μείωση της τάσης για τη θερμική διάτρηση ΔU<sub>1</sub>, λόγω συμμετοχής των μερικών εκκενώσεων είναι :

 $\Delta U_1 = U_{\theta} - U_{\theta \varepsilon} = \delta E \cdot d \cdot \sqrt{(2\kappa / \varepsilon \beta \sigma_0 r)}$ 

## (1.1.4.3-7)

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, που ερμηνεύεται ικανοποιητικά από τις σχέσεις 1.1.4.3-6 και 1.1.4.3-7 είναι αυτό που είδαμε στο σχήμα 1.1.1-1.

### 1.1.4.3β. <u>η μείωση της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση, λόγω εκδήλωσης</u> μερικών εκκενώσεων

Αν πάρει κανείς υπ'όψη στη σχέση 1.1.2-1 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις στη θέση όπου εκδηλώνεται η μερική εκκένωση, τότε, με την παραδοχή οτι η απαγώμενη θερμική ισχύς ειναι πρακτικά μηδενική ισχύει :

$$u^{2}\sigma A/d \cdot (1-\delta E)^{2} = C_{0} \cdot d\theta/dt$$
 (1.1.4.3-8)

και για τη διάτρηση στην τιμή U<sub>ηε</sub> (λόγω συνδυασμού μεταξύ των δυνάμεων Coulomb και των μερικών εκκενώσεων) :

$$U_{\eta\epsilon} = (1 - \delta E) \cdot \sqrt{d} \cdot \sqrt{(C_0 \theta / \sigma A T_{\delta})}$$
(1.1.4.3-9)

Η τάση διάτρησης μειώνεται δηλαδή κατά την τιμή ΔU<sub>2</sub> :

 $\Delta U_{2=} U_{\eta} - U_{\eta \epsilon} = \delta E \cdot \sqrt{d} \cdot \sqrt{(C_0 \theta / \sigma A T_{\delta})}$ (1.1.4.3-10)

#### 1.1.4.3γ. <u>Η μείωση της θερμικής τάσης ανατροπής από τις μερικές</u> εκκενώσεις

Αν λάβει κανείς υπ'όψη στη σχέση 1.1.3-1 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας λόγω μερικων εκκενωσεων (σύμφωνα με τη σχέση 1.1.4.3-1), τότε η θερμική τάση ανατροπής U<sub>χε</sub>, που οφείλεται στο συνδυασμό της θερμότητας του περιβάλλοντος με τις μερικές εκκενώσεις, θα είναι :

$$U_{\chi\epsilon} = (1 - \delta E) \cdot \sqrt{(\alpha \kappa \theta / \sigma_0)}$$
(1.1)

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

.4.3-11)

 $\Delta U_3 = U_{\chi^-} U_{\chi\epsilon} = \delta E \cdot \sqrt{(\alpha \kappa \theta / \sigma_0)}$ (1.1.4.3-12)

## 1.1.4.3δ. <u>Η διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων (συνδυασμός των</u> μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule και τις δυνάμεις Coulomb)

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

1) Το θερμικό φαινόμενο (μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις).

 Την ηλεκτρομηχανική διάτρηση κατά την τελευταία κρούση m στην τιμή Û<sub>κ</sub> ή πολύ πλησίον αυτής.

Το θερμικό φαινόμενο θεωρείται ότι είναι μια τεχνητή γήρανση (βλέπετε παράγραφο 1.1.4.2) μέχρι προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω του οποίου το υλικό απέκτησε σε μια περιοχή του (όπου εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις)την ειδική αγωγιμότητα:

 $\sigma = \sigma_0 \bullet e^{\beta m \theta m}$ 

(1.1.4.3-13)

όπου θ<sub>m</sub> η θερμοκρασία και β<sub>m</sub> ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτώνται από την τιμή Û<sub>κ</sub>, τη συχνότητα των κρούσεων (χρόνος μεταξύ των διαδοχικών κρούσεων) και τη μορφή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Στην περιοχή δηλαδή, όπου συμβαίνουν οι μερικές εκκενώσεις, το υλικό άλλαξε,λόγω των χημικών διεργασιών, τις φυσικές του ιδιότητες εις βάρος της διηλεκτρικής αντοχής του, ώστε τελικά να πρόκειται για ένα "άλλο" μονωτικό, το οποίο πλέον διασπάται ηλεκτρομηχανικά στη m<sup>n</sup> κρούση (όπως στην περίπτωση β που αναφέρθηκε παραπάνω). Κατά αντιστοιχία επομένως προς τη σχέση 1.1.2-1 ισχύει:

 $u^{2}\sigma_{0} \cdot e^{\beta m \theta m} \cdot A / d \cdot (1 - \delta E)^{2} = C_{m} \cdot d\theta / dt$  (1.1.4.3-14)

(όπου  $C_m$  η θερμοχωρητικότητα, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, η οποία εξαρτάται επίσης από τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν για τις τιμές  $\beta_m$  και  $\theta_m$ ). Έτσι, για τη διάσπαση στην τιμή  $\hat{U}_{\kappa}$  έχουμε (αντίστοιχα με τη σχέση 1.1.2-2):

$$\hat{U}_{\kappa} = (1 - \delta E) \cdot \sqrt{(dC_m \theta_m / \sigma AT_s)}$$
(1.1.4.3-15)

όπου T<sub>s</sub> ο χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης. Επομένως, η μείωση της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης για τη διάτρηση (συγκριτικά προς εκείνη χωρίς προηγούμενη τεχνητή γήρανση) είναι :  $\Delta u = \delta E \cdot \sqrt{(dC_m \theta_m / \sigma AT_s)}$  (1.1.4.3-16) Σύμφωνα με την προηγούμενη θεωρία φαίνεται, ότι μέχρι τη m-1 κρούση η ενέργεια, που παρέχεται στο στερεό μονωτικό, μετατρέπεται στη θερμότητα που παραμένει στη θέση της προσεχούς διάτρησης και σε εκείνη που μεταδίδεται στο υπόλοιπο υλικό (ανάλογα με τη συχνότητα των κρούσεων). Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι κατά την εφαρμογή της τελευταίας κρούσης (m) η θερμοκρασία στη συγκεκριμένη θέση του υλικού έχει αποκτήσει την κρίσιμη για τη διάτρηση τιμή της. Για το μέρος της ενέργειας επομένως, που παρέχεται επί m φορές στο στερεό μονωτικό ισχύει :

$$(m-1)\alpha U_{\kappa}^{2} + \gamma U_{\kappa}^{2} = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{\alpha i} + \sum_{i=1}^{i=m} W_{\theta i} / (1-\delta E)^{2} + \beta U_{\kappa}^{2}$$
(1.1.4.3-17)

όπου :

(m-1)αU<sub>κ</sub><sup>2</sup> : το μέρος της ενέργειας, που παρέχεται στο υλικό μέχρι τη m-1 κρούση,

γU<sub>κ</sub><sup>2</sup> : το μέρος της ενέργειας που παρέχεται στο μονωτικό μόλις προ της διάτρησης κατά τη m<sup>n</sup> κρούση,

<sup>i=m-1</sup> ΣW<sub>αi</sub>: η θερμότητα, που μεταδίδεται μέχρι προ της εφαρμογής της m<sub>ης</sub> κρούσης, <sup>i=1</sup>

<sup>i=m</sup> ΣW<sub>θi</sub>/(1-δE)<sup>2</sup>: η θερμότητα, που έχει παραμείνει στη συγκεκριμένη θέση προ της <sub>i=1</sub> διάτρησης.

βU<sup>2</sup>: η ενέργεια κατά τη διάτρηση.

Επειδή κατά τη διάτρηση είναι :

$$W_{\theta m} / (1 - \delta E)^{2} + \beta U_{\kappa}^{2} = \gamma U_{\kappa}^{2}$$
(1.1.4.3-18)

από τη σχέση 1.1.4.3-17 έπεται ότι :

$$(m-1)\alpha U_{\kappa}^{2} = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{\alpha i} + \sum_{i=1}^{i=m} \{W_{\theta i} / (1-\delta E)^{2}\}$$
(1.1.4.3-19)

$$ή m=1+(\sum_{i=1}^{i=m-1})/αU_{\kappa}^{2}+(\sum_{i=1}^{i=m}W_{\theta i})/(1-\delta E)^{2}αU_{\kappa}^{2}$$

 $δηλαδή : m=1+α_1/U_{\kappa}^2 + α_2/U_{\kappa}^2 = 1 + α_3/U_{\kappa}^2$ (1.1.4.3-20)

όπου α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub> και α<sub>3</sub> οι συντελεστές, που εξαρτώνται από την τιμή Û<sub>κ</sub>, 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 και τη μείωση του χρόνου διάσπασης με την αύξηση της διάρκειας του μετώπου της κρουστικής τάσης (βλέπετε σχέση 1.1.2.3), τότε οι χαρακτηριστικές m=f( $| Û_{\kappa} |$ , T<sub>s</sub>) έχουν τη μορφή που δίνεται στο σχήμα 1.1.4.3-2.



Σχήμα 1.1.4.3-2: Χαρακτηριστικές m=f( | Û<sub>κ</sub> | ,T<sub>s</sub>) m :Αριθμός κρούσεων κατά τη διάτρηση T<sub>s</sub> :Χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης Ûκ :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 μια κρούση. Από πειράματα, που έχουν γίνει με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs και 10/200μs, σε τιμές Û<sub>κ</sub> πλησίον της περιοχής διάτρησης, 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, την οποία παρουσιάζει το δοκίμιο κατά τη γήρανση δίνεται στο σχήμα 1.1.4.3-3 και ονομάζεται εικόνα επιφανειακών διαταραχών.

Πρόκειται για μια 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 στη θερμική καταπόνηση του μονωτικού, γιατί φαίνεται ότι είναι αποτέλεσμα κάποιας τήξης του υλικού στα ίχνη του επιφανειακού δενδρίτη.Τα θραύσματα, που προαναφέρθηκαν, δημιουργούνται κυρίως στην περιοχή του κρατήρα, 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 Ú<sub>κ</sub> η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών είναι π.χ. μεγαλύτερη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση της μορφής 1,2/50μs ως προς εκείνη με κρουστική τάση 10/200μs). Έχει επίσης διαπιστωθεί, ότι η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών περιορίζεται, όσο μειώνεται ο συντελεστής

χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων. Όταν τελικά συμβεί η διάτρηση μετά από m κρούσεις, τότε παρατηρεί κανείς μια μικρή τρύπα διάτρησης (με διάμετρο μικρότερη από 0,1mm), ως προέκταση του κρατήρα (σχήμα 1.1.4.3-4).



Σχήμα 1.1.4.3-3 : παράδειγμα εικόνας επιφανειακών διαταραχών κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής 1,2/50μs για τιμή Û<sub>κ</sub> πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση.

- α : ακίδα (R=1mm)
- β : στερεό μονωτικό
- γ : πλάκα
- 1 : κρατήρας
- 2 : σπήλαιο



Σχήμα 1.1.4.3-4: παράδειγμα εικόνας διάτρησης μετά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής 1,2/50μs για τιμή Û<sub>κ</sub> πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση.

- α : ακίδα (R=1mm)
- β : στερεό μονωτικό
- γ : πλάκα
- 1 : κρατήρας
- 2 : σπήλαιο
- 3 : οπή διάτρησης

Όπως φαίνεται από τα σχήματα 1.1.4.3-3 και 1.1.4.3-4 ο κρατήρας και η τρύπα διάτρησης σχηματίζονται σε μια απόσταση χ από την ακίδα (συνήθως mm), αν και η μέγιστη τιμή του πεδίου είναι στην κορυφή της ακίδας. Η ίδια παρατήρηση ισχύει για την τρύπα διάτρησης, όταν η διάτρηση συμβαίνει μόνο με μια κρούση. Αυτό οφείλεται:

- στη στατιστικότητα του φαινομένου δηλαδή στο ότι είναι στατιστικά αδύνατο να βρίσκεται ακριβως κάτω απο την ακίδα η επικρατέστερη θέση της διαταραχής.
- 2) σε πολύ μικρή απόσταση από την ακίδα μετακινούνται, υπό την επίδραση της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης οι ετερώνυμοι προς αυτή ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς του επιφανειακού φιλμ, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρακτικά επέκταση του ίχνους της ακίδας.
Η παραπάνω παρατήρηση για τη θέση της τρύπας διάτρησης ισχύει επίσης και κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις χειρισμών (250/2500μs). Από έρευνες που έχουν διεξαχθεί με την παραπάνω μορφή κρουστικής τάσης (με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm ή 1mm) δεν έχει διαπιστωθεί κατά την τεχνητή γήρανση πολυμερών στερεών μονωτικών με πάχος 1mm ή 2mm η εκδήλωση κρατήρα ή σπηλαίων , ούτε έχει παρατηρηθεί η εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη. Η διαφορά αυτή ως προς την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών, που παρουσιάζεται κατά την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs και 10/200μs σε συνδυασμό με μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών, έχει οδηγήσει στο διαχωρισμό μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης στο στερεό μονωτικό τάσης.

Στο σχήμα 1.1.4.3-5 δίνεται ένα παράδειγμα διάτρησης του βακελίτη πάχους 1mm σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό διάταξη ακίδα – πλάκα, κατά την καταπόνησή του με κρουστική τάση της μορφής 10/200μs, με μέγιστη τιμή πλησίον της τιμών για τη διάτρηση βάσει του πίνακα 1.1.2-1. Παρατηρεί κανείς ότι το παλμογράφημα αυτό είναι ίδιας μορφής με εκείνο της ηλεκτρομηχανικής διάτρησης του σχήματος 1.1.4.1-8. Επίσης, οι πειραματικές χαρακτηριστικές του σχήματος 1.1.4.3-6 για το στερεό μονωτικό pertinax ερμηνεύονται ικανοποιητικά από τις θεωρητικές του σχήματος 1.1.4.3-2.





Û<sub>κ</sub> =72kV





#### 1.1.4.4. Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων των κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες.Στο σχήμα 1.1.4.4-1 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού κάποιων μεγεθών για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις. Η πειραματική διάταξη δοκίμιο - πυκνωτής μέτρησης, που περιγράφεται στο σχήμα αυτό, είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων στο εργαστήριο.



Σχήμα 1.1.4.4-1 : Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

- Τ1: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
- Τ<sub>2</sub> : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Q<sub>0</sub> : φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

- Q<sub>2</sub> : φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
  - u<sub>κ</sub> : στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης
  - u<sub>0</sub> : τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων
  - Δι : άλμα δυναμικού
- ΔQ : αύξηση φορτίου

Σύμφωνα με τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως : η χαρακτηριστική Q=f( $|\hat{U}_{\kappa}|$ ), η χαρακτηριστική u<sub>0</sub>=f( $|\hat{U}_{\kappa}|$ ), 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( $\hat{U}_{\kappa}$ ), η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 1.1.4.4-2), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs ή 10/200μs όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων.

Στο σχήμα 1.1.4.4-3 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90η κρούση ως προς την 60η. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών, εύκολα διαπιστώνεται, ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου Q στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις (θραύσματα) στην επιφάνεια του μονωτικού.

Ένα σημαντικό αποτέλεσμα της έρευνας είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης στο στερεό μονωτικό υλικό. Εχει 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 δεν μηδενίζεται η τάση.

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



Σχήμα 1.1.4.4-2 : Χαρακτηριστική Q<sub>2</sub> =f(Û<sub>κ</sub>) για τον βακελίτη (πάχους 2mm) υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα–πλάκα C<sub>m</sub> : 1000nF





Μορφή τάσης : 1,2/50μs (Û<sub>κ</sub>=99,7kV) Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα C<sub>m</sub>=210nF

Μια πειραματική προσέγγιση του παραπάνω διαχωρισμού, μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, έχει δοθεί από παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού σε στερεά οργανικά μονωτικά, με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών (σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα—πλάκα), που συνδυάστηκαν με ταυτόχρονες οπτικές παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών κατά το σχήμα 1.1.4.4-2.

Στον πίνακα 1.1.4.4-1 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με ε<sub>r</sub> =2,5-4,5, από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που προαναφέρθηκε. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης 1,2/50μs) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

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

# Πίνακας 1.1.4.4-1 :Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

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 T1=f(|Ûκ|) και T2=f(|Úκ|) σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο χρόνος έναρξης (T1) των μερικών εκκενώσεων (στα μονωτικά υλικά και το είδος της καταπόνησης που προαναφέρθηκαν), καθώς και ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (T2) υπό κρουστικές τάσεις χειρισμών 250/2500μs, ώστε σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις του πίνακα 1.1.4.4-1 για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.



**Σχήμα 1.1.4.4-4 :** 1) Χαρακτηριστική  $T_1=f(|\hat{U}_{\kappa}|)$  κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών πάχους 2mm και ε<sub>r</sub>=2,5-4.5 με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs,10/200μs και 250/2500μs.

2) Χαρακτηριστική  $T_2=f(|\hat{U}_{\kappa}|)$  κατά την καταπόνηση των υλικών αυτών με κρουστικές τάσεις 250/2500µs.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα–πλάκα 1:2 φορές η τυπική απόκλιση

### 1.1.4.5. <u>Το φαινόμενο της πολικότητας σε πολυμερή στερεά μονωτικά κατά</u> <u>την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων</u>

Από τη μέση καμπύλη των χαρακτηριστικών του σχήματος 1.1.4.4-4 γίνεται επίσης φανερή η εκδήλωση του φαινομένου της πολικότητας. Η τιμή της τάσης για τη διάσπαση εξαρτάται από την πολικότητα της ακίδας. Ισχύει ο κανόνας ότι η τάση διάσπασης έχει μεγαλύτερη τιμή κατά τη θετική πολικότητα της ακίδας, ως προς την αρνητική πολικότητά της. Μια ερμηνεία του φαινομένου είναι η εξής :

Ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας συγκεντρώνονται μπροστά της ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς αντίθετης πολικότητας. Επειδή όμως οι θετικοί φορείς είναι περισσότερο δυσκίνητοι από τους αρνητικούς και επομένως εξουδετερώνονται δυσκολότερα, είναι φανερό ότι στην περίπτωση της αρνητικής ακίδας απαιτείται μεγαλύτερη τάση για τη διάσπαση. Η συγκέντρωση των δυσκίνητων θετικών ιόντων προ της αρνητικής ακίδας φαίνεται ότι είναι ο λόγος της μικρότερης τιμής του αρχικού πεδίου, ως προς εκείνη κατά τη θετική πολικότητα.

Οι επικαλύψεις τιμών που παρατηρούνται μπορούν να αποδοθούν στη διαφορετική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο (τα οργανικά στερεά μονωτικά είναι ανομοιογενή και δεν είναι δυνατό να υπάρχει συμμετρική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο).

### 1.2. <u>Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των</u> <u>στερεών μονωτικών</u>

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

-ο ιονισμός με κρούσεις, που πιστευέται οτι εκδηλώνεται στα στερεά μονωτικά

-το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και η συσχέτισή του με φωτεινά φαινόμενα και καταπονήσεις, που παρατηρούνται στο υλικό (θερμικές, μηχανικές ή και τα δύο :π.χ. κατά τα σχήματα 1.1.4.3-3 και 1.1.4.3-4), 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 1.1.4.1-7, 1.1.4.3-5 και 1.1.4.4-3),

-στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης (ως στοιχείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε δηλαδή μια αντίσταση, αντί του πυκνωτή μέτρησης),

-στην ανίχνευση του μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση),

-στην ικανοποιητική πειραματική και θεωρητική ταύτιση του μηχανισμού παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

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

1) Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί ότι :

 α) το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες

β) το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα)

2) Καθοριστικός παράγοντας για τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 2,5 – 4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2 MV/cm.

 Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση σ=σ<sub>0</sub>•exp(-W/kT).

4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η προαναφερθείσα σχέση

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 περίσσευμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια. Παρακάτω εξετάζονται αναλυτικά τα προαναφερόμενα, με βάση τυπικά παραδείγματα, τα περισσότερα των οποίων είναι ήδη γνωστά από τη βιβλιογραφία.

#### 1.2.1 <u>Ένα τυπικό παράδειγμα ερμηνείας των φαινομένων προ της</u> διάσπασης των στερεων μονωτικών υλικών μέσω της μακροσκοπικής και της κβαντικής θεωρίας

Ένα τυπικό παράδειγμα κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης σε στερεά μονωτικά υλικά των πρακτικών εφαρμογών είναι : Μετά από μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, 10/200μs και 250/2500μs, εξήχθησαν ενδεικτικά παλμογραφήματα της τεχνητής γήρανσης και ένα παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου. Η διάταξη μέτρησης φαίνεται στο σχήμα 1.2.1-1. Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώθηκε ότι :

α) μετά από μια τιμή Û<sub>k</sub>=45kV, κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs ή 10/200μs, εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής. Υπό σταθερή τιμή της τάσης ο δενδρίτης, καθώς και η αντίστοιχη προς αυτόν αλλαγή της μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις

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

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 :



Σχήμα 1.2.1-1 : Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης των αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης

- Η.Τ. : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης
- G : Γεννήτρια κρουστικών τάσεων
- C<sub>H</sub> και C<sub>N</sub> : Καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης
- 1 : Ηλεκτρόδιο ακίδα
- 2 : Μονωτικό λάδι
- 3 : Δοκίμιο πάχους 2mm
- 4 : Ηλεκτρόδιο πλάκα
- C<sub>m</sub> : Πυκνωτής μέτρησης των αλμάτων δυναμικού
- R<sub>m</sub> : Αντίσταση μέτρησης των κρούσεων φορτίου (δηλαδή του ρεύματος)

#### α) Μακροσκοπική ερμηνεία

Αν οι μετρήσεις που εξήχθησαν παραπάνω και οι οπτικές παρατηρήσεις ερμηνευτούν με τη μακροσκοπική θεωρία, τότε καταλήγει κανείς στα συμπεράσματα του πίνακα 1.1.1-1. Η εκδήλωση των αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου κατά τη θεωρία αυτή ερμηνεύονται από το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων, που απεικονίζεται στα σχήματα 1.1.4.1-4 έως 1.1.4.1-6.

### β) <u>Κβαντομηχανική ερμηνεία</u>

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<sub>m</sub> ανά άλμα δυναμικού, σύμφωνα με τη σχέση : W=0,5\*q<sub>e</sub>\*Δu, όπου q<sub>e</sub> 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 πρέπει να ληφθεί υπ'όψη το μεταβατικό φαινόμενο με σταθερά χρόνου :

τ=R•C<sub>m</sub> οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από τη σχέση :

W=0,5∆u∕f

(1.2.1-1)

σε eV όπου Δu σε V, t ο χρόνος φόρτισης του C<sub>m</sub> κατά τη διάρκεια μιας μερικής εκκένωσης (περίπου 100ηs) και f ένας συντελεστής που δίνεται από τη σχέση :

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

(1.2.1-2)

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι τιμές του συντελεστή f για χωρητικά τετράπολα μέτρησης, που συνήθως χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις αυτές για μια αντίσταση R=0,5Ω :

Cm σε ηF	10	20	210	1000	1835
f	1	1	1,62	5,51	9,6

Πίνακας 1.2.1-1 : Τιμές του συντελεστή f για R=0,5Ω

Επομένως ισχύει :

W=0,5f•Δu σε eV

(1.2.1-3)

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση έχουν υπολογιστεί οι τιμές της ενέργειας W για το πρώτο αλμα δυναμικού των παλμογραφημάτων υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, 10/200μs και 250/2500μs. Έχει διαπιστωθεί, με βάση τις τιμές αυτές, ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών σχετίζεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που μπορεί να περιλαμβάνει από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες. Επομένως από τις τιμές της ενέργειας W, τη φωτεινή ακτινοβολία που παρατηρείται στην πράξη σε αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων και 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, της οποίας το φάσμα είναι από ακουστικά κύματα μέχρι και υπεριώδεις ακτίνες.

Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γηήρανσης έχουν δοθεί από παλμογραφήματα των κρούσεων φορτίου. Πράγματι από τα παλμογραφήματα αυτά 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 φθάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσευμα της ενέργειάς τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Ο δενδρίτης επομένως που παρατηρείται είναι το ορατό φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι αντίστοιχες δενδροειδούς μορφής εκπομπές συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου 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 προηγείται του ιονισμού με κρούσεις.

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 δηλαδή κατά την άφιξή τους στην άνοδο προκάλεσαν εκπομπή ίδιου μήκους κύματος. Μπορούμε να υποθέσουμε λόγω του εύρους της παραπάνω ακτινοβολίας ότι υπάρχουν στο υλικό διάφορες ενεργειακές στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη, που είναι καθοριστικής σημασίας για την εκδήλωση του ιονισμού (σχήμα 1.2.1-2)

. Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Rhilipoff (σχήμα 1.1.4.1-4). Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στα στερεά μονωτικά κατά τα πειράματα γήρανσης, εξαρτάται σημαντικά από το συντελεστή χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων. Όσο περισσότερο ανομοιογενές εέναι το πεδίο, τόσο μειώνεται το εύρος της ακτινοβολίας. Όπως έχει διαπιστωθεί πειραματικά όταν η ακίδα έχει π.χ. ακτίνα καμπυλότητας 0,3mm αντί για 1mm, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επεκτείνεται μέχρι το ορατό τμήμα της.



**Σχήμα 1.2.1-2** : Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού

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

Από πρόσφατες έρευνες που έχουν γίνει για τη γήρανση των 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 μπορεί να γίνει, κατά την εκδήλωση αλμάτων δυναμικού, σύμφωνα με τη σχέση 2.1-1.

#### 1.2.2. <u>Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη</u> <u>διάτρηση στερεών μονωτικών</u>

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

(1.2.2-1)

E<sub>0</sub> η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (E>0,2MV/cm).
Q<sub>0</sub> το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.
E η εφαρμοζόμενη ένταση, λόγω της οποίας το φορτίο αποκτά την τιμή Q.

Α ένας συντελεστής του υλικού,που εξαρτάται από το χρόνο. Από μετρήσεις που έγιναν σε οργανικά στερεά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 3,5-4,5) έχει διαπιστωθεί ότι : 1) οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμές πεδίου περίπου E=0,2MV/cm.

2) για τιμές πεδίου περίπου 0,5MV/cm η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας διέπεται από τη σχέση σ=σ<sub>0</sub>•exp(-W/kT), όπου σ<sub>0</sub> η ειδική αγωγιμότητα προ της καταπόνησης, σ η τιμή της λόγω της καταπόνησης, k η σταθερά Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία και W η ενέργεια ενεργοποίησης των ηλεκτρονίων.

 για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από 0,5MV/cm ισχύει η σχέση 1.2.2-1, με αποτέλεσμα να μπορεί να υποθέσει κανείς ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις.

4) 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 1.2.2-1.

#### 1.3 <u>Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής</u> θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών

Από όσα έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια φαίνεται, ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα υλικά αυτά κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους. Οι πληροφορίες αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεώρηση των παραπάνω φαινομένων. Πλονέκτημα 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 τασης, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη.

Ο διαχωρισμός αυτός των μερικών εκκενώσεων δεν μπορεί να δοθεί από τη θεωρία του ιονισμού με κρούσεις, γιατί ο συντελεστής Α στη σχέση 1.2.2-1 αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του και η τιμή του θα πρέπει να εξαρτάται απο τη διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Αν π.χ. πραγματοποιήσει κανείς τα πειράματα της παραγράφου 1.2.2 με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs ή με 10/200μs και προσεγγίσει ακολούθως τις πειραματικές χαρακτηριστικές Q=f(Û<sub>κ</sub>) με τη σχέση 1.2.2-1, θα διαπιστώσει οτι ο συντελεστής Α έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs.

Η διαφορετική αυτή τιμή του συντελεστή Α (κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs ή 10/200μs) μπορεί να θεωρηθεί μόνο ως μια ένδειξη ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, χωρίς όμως να καθορίζεται η περιοχή εκδήλωσής του (στον όγκο του μονωτικού, ή στην επιφάνειά του, ή στον όγκο και στην επιφάνεια του μονωτικού). Γι' αυτό δεν μπορεί να καταλήξει κανείς, μέσω της κβαντομηχανικής θεώρησης των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, 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 1.3-1. Πρόκειται ουσιαστικά για μια συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant – Philipoff (σχήμα 1.1.4.1-4), όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσει κανείς, ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει στην τιμή της πεδιακής έντασης Ε<sub>0</sub> (κατά την παράγραφο 1.2.2 περίπου 0,2 MV/cm), τότε, τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.3-1 ως ακολούθως :

- Για Ε < Ε<sub>0</sub> : Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δεν διασπώνται οι σπινθηριστές Σ<sub>0</sub> και Σ).
- 2) Για Ε > E<sub>0</sub> : Εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (διασπάται ο Σ<sub>0</sub>) και η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διέπεται από τη σχέση :

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

3) Για Ε >> Ε<sub>0</sub> : Εμφανίζεται αρνητική διαφορική αντίσταση και εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις. Δεν ισχύει η σχέση σ=σ<sub>0</sub>\*exp (-W/kT), αλλά η σχέση :

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

Το φάσμα της ακτινοβολίας, που εκπέμπεται, εξαρτάται από την τιμή Ε.Για τιμές W >20eV συμβαίνει η διάτρηση.



**Σχήμα 1.3-1** : 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
- Ζ : αρνητική διαφορική αντίσταση
- Σ<sub>0</sub> : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων
- Σ : σπινθηριστης εκδήλωσης της Ζ

#### 2. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά υλικά πάχους 1mm κατά την καταπόνησή τους υπό κρουστικές τάσεις χειρισμών (250/2500μs) και η προσέγγιση των φαινομένων γήρανσης που αναπτύσσονται.Η διάταξη των μετρήσεων φαίνεται στο σχήμα 1.1.4.4-1.

Μετά από μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο σε στερεά μονωτικά υλικά πάχους d=1mm, κατά την καταπόνησή τους με κρουστικές τάσεις χειρισμών 250/2500 μs, υπό διάταξη ηλεκτρονίων ακίδα-πλάκα,προσδιορίστηκαν τα παρακάτω μεγέθη, τόσο για αρνητική όσο και για θετική πολικότητα της ακίδας :

U\_ : τάση φόρτισης της γεννήτριας

Û<sub>κ</sub> : μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

- Τ1: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
- Τ2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
- Q1 : φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων
- Q2 : φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

T=T<sub>2</sub>-T<sub>1</sub> : χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

Q=Q<sub>2</sub>-Q<sub>1</sub> : διαφορά φορτίου περαίωσης από το φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

I1=Q1/T1 : ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

I2=Q2/T2 : ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

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

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

R=0,9mm η ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας, d=1mm το πάχος του δοκιμίου και Û<sub>κ</sub> το μέτρο της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Τα αποτελέσματα και η στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων παρουσιάζονται στους συγκεντρωτικούς πίνακες και τις χαρακτηριστικές που ακολουθούν, τόσο για θετική όσο και για αρνητική πολικότητα ακίδας.

### 3. Τα αποτελέσματα και η στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων

Στους πίνακες 3-1 έως 3-10 που ακολουθούν παρατίθενται τα προς μελέτη μεγέθη που προαναφέρθηκαν τόσο για θετική όσο και για αρνητική πολικότητα ακίδας. Στη συνέχεια σχεδιάζονται οι ζητούμενες χαρακτηριστικές.

U_ [kV]	Û <sub>k</sub> [kV]	T₁ [µs]	Τ <sub>2</sub> [μs]	Q <sub>1</sub> [µC]	Q <sub>2</sub> [µC]	T [µs]	Q [µC]	E [MV/ cm]	I₁ [mA]	Ι <sub>2</sub> [mA]	l [mA]
15	10,1	-	-	0,015	-	-	-0,015	0,150	-	-	-
20	13,4	200,9	260,1	0,019	0,028	59,2	0,009	0,200	0,095	0,108	0,152
25	16,8	104,6	190,7	0,025	0,059	86,1	0,034	0,250	0,239	0,309	0,395
30	20,1	76,9	272,7	0,024	0,096	195,8	0,072	0,299	0,312	0,352	0,368
35	23,4	55,4	251,8	0,054	0,33	196,4	0,276	0,349	0,975	1,311	1,405
40	26,7	42,2	268	0,067	0,74	225,8	0,673	0,398	1,588	2,761	2,981
45	30,2	41,2	288,2	0,067	1,03	247	0,963	0,450	1,626	3,574	3,899
50	33,5	36,8	251,1	0,067	1,51	214,3	1,443	0,499	1,821	6,014	6,734
55	36,9	32,1	243,7	0,067	1,99	211,6	1,923	0,550	2,087	8,166	9,088
60	40,2	30	215	0,13	3,14	185	3,01	0,599	4,333	14,605	16,270
65	43,6	24,6	253,8	0	4,1	229,2	4,1	0,650	0	16,154	17,888

Πίνακας 3-1 : Μέση τιμή των ρευμάτων έναρξης, περαίωσης και λόγω του φορτίου Q Ι<sub>1</sub>, Ι<sub>2</sub> και Ι αντίστοιχα και της μέγιστης τιμής της πεδιακής έντασης κατά τη θετική πολικότητα 250/2500μs και πάχος δοκιμίου d=1mm.

Με βάση τα δεδομένα του πίνακα 3-1 εξήχθησαν οι διάφορες προς μελέτη χαρακτηριστικές :

 $I_1 = Q_1 / T_1 = f(\hat{U}_{\kappa}, E) \qquad I_2 = Q_2 / T_2 = f(\hat{U}_{\kappa}, E) \qquad I = Q / T = f(\hat{U}_{\kappa}, E)$ 

 $I_2 = f(I_1) \qquad I = f(I_1)$ 



- Σχήμα 3-1 : Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης
  - I1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων
  - $\hat{\mathbf{U}}_{\mathbf{\kappa}}$ : μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης



Σχήμα 3-2 : Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

 $I_1$ : ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Ε : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



- Σχήμα 3-3: Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης
  - I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
  - **Û**<sub>κ</sub>: μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης



# Σχήμα 3-4 : Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

- I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
- Ε: μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



- Σχήμα 3-5: Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω του φορτίου Q των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης
  - Ι: ρεύμα λόγω του φορτίου Q των μερικών εκκενώσεων
  - **Û**<sub>κ</sub>: μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης



- Σχήμα 3-6 : Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω του φορτίου Q των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου
  - Ι: ρεύμα λόγω του φορτίου Q των μερικών εκκενώσεων
  - Ε : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



- Σχήμα 3-7: Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων
  - I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
  - I1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων



- Σχήμα 3-8 : Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω του φορτίου Q των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων
  - Ι: ρεύμα λόγω του φορτίου Q των μερικών εκκενώσεων
  - I1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3-9 : Χαρακτηριστικές ρευμάτων λόγω έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης σε κοινό διάγραμμα

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>2</sub>=f(Û<sub>κ</sub>)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : I<sub>1</sub>=f(Û<sub>κ</sub>)

I1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

**Û**<sub>κ</sub> : μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Πάχος δοκιμίου : d=1mm

Στη συνέχεια εξετάζεται πως μεταβάλλονται τα παραπάνω διαγράμματα όταν εισέρχεται στις μετρήσεις η τυπική απόκλιση, κάτι το οποίο ειναι απόλυτα λογικό μετά από μετρήσεις σε έναν ικανοποιητικό αριθμό δοκιμίων πάχους d=1mm στο εργαστήριο και καταλήξαμε στους πίνακες3-2, 3-3, 3-4 και 3-5 :

U_ [kV]	Û <sub>κ</sub> [kV]	T₁ [µs]	Τ <sub>2</sub> [μs]	Q₁ [µC]	Q <sub>2</sub> [μC]	T <sub>1max</sub> [µs]	T <sub>2max</sub> [µs]	Q <sub>1min</sub> [µC]	Q <sub>2min</sub> [µC]	I <sub>1min</sub> [mA]	I <sub>2min</sub> [mA]
15	10.1	-	-	0,015	-			0.012			
15	10,1	-	-	0,002	-	-	-	0,013	-	-	-
20	12.4	200,9	260,1	0,019	0,028	260.63	200.91	0.019	0.027	0.067	0,087
20	13,4	68,73	49,71	0,001	0,001	209,03	309,01	0,010	0,027	0,007	
25	16.9	104,6	190,7	0,025	0,059	100.00	267.21	0.022	0.052	0 100	0 109
20	10,0	17,72	76,61	0,002	0,006	122,32	207,31	0,023	0,055	0,100	0,190
20	20.1	76,9	272,7	0,024	0,096	00.40	240.02	0,021	0.000	0.011	0.246
30	20,1	22,59	76,32	0,003	0,01	99,49	349,02		0,000	0,211	0,246
25	22.4	55,4	251,8	0,054	0,33	67.1	209.17	0,054	0,25	0,805	0,838
35 2	23,4	11,7	46,37	0	0,08	07,1	290,17				
40	26.7	42,2	268	0,067	0,74	10.1	210.75	0.067	0.69	1 202	0 107
40	20,7	5,9	51,75	0	0,06	40,1	519,75	0,007	0,00	1,393	
45	20.2	41,2	288,2	0,067	1,03	47.57	290.1	0.067	0.01	1 409	2 204
40	30,2	6,37	91,9	0	0,12	47,37	360,1	0,007	0,91	1,400	2,394
50	22.5	36,8	251,1	0,067	1,51	42.02	325 80	0.067	1 24	1 561	1 112
50	55,5	6,12	74,79	0	0,17	42,92	525,69	0,007	1,34	1,501	4,112
55	36.0	32,1	243,7	0,067	1,99	36 15	203 70	0.067	1 73	1 853	5 880
55	30,9	4,05	50,09	0	0,26	50,15	295,79	0,007	1,75	1,000	5,009
60	40.2	30	215	0,13	3,14	22.79	262 72	0.12	0.04	3 066	10,011
00	40,2	2,78	48,72	0	0,5	52,70	203,72	0,15	2,04	3,900	
65	12.6	24,6	253,8	0	4,1	27.25	202 15	0	3,69	0	10 170
65	43,6	2,65	49,35	0	0,41	27,25	303,15	U		0	12,172

Πίνακας 3-2 :ελάχιστη κατά μέτρο τιμή των ρευμάτων λόγω έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων Ι<sub>1min</sub> και Ι<sub>2min</sub> αντίστοιχα κατά τη θετική πολικότητα 250/2500μs και πάχος δοκιμίου d=1mm

U_ [kV]	Û <sub>κ</sub> [kV]	T₁ [µs]	Τ <sub>2</sub> [μs]	Q₁ [µC]	Q <sub>2</sub> [μC]	T <sub>1min</sub> [µs]	T <sub>2min</sub> [µs]	Q <sub>1max</sub> [µC]	Q <sub>2max</sub> [µC]	I <sub>1max</sub> [mA]	I <sub>2max</sub> [mA]
15	10.1	-	-	0,015	-			0.017			
15	10,1	-	-	0,002	-	-	-	0,017	-	-	-
20	12 /	200,9	260,1	0,019	0,028	122 17	210 20	0.02	0 020	0 151	0 1 2 9
20	13,4	68,73	49,71	0,001	0,001	132,17	210,39	0,02	0,029	0,131	0,150
25	16.9	104,6	190,7	0,025	0,059	96.99	114.00	0.027	0.065	0 211	0.570
20	10,0	17,72	76,61	0,002	0,006	00,00	114,09	0,027	0,005	0,311	0,570
30	20.1	76,9	272,7	0,024	0,096	54 31	106.29	0.027	0 106	0.407	0.540
30	20,1	22,59	76,32	0,003	0,01	54,51	190,30	0,027	0,100	0,497	0,540
25	22.4	55,4	251,8	0,054	0,33	42.7	205 42	0,054	0,41	1 226	1,996
- 55	23,4	11,7	46,37	0	0,08	43,7	203,43			1,230	
40	26.7	42,2	268	0,067	0,74	26.2	216.25	0.067	0.0	1 8/6	3,699
40	20,7	5,9	51,75	0	0,06	30,3	210,25	0,007	0,0	1,040	
45	30.2	41,2	288,2	0,067	1,03	34.83	106.3	0.067	1 15	1 02/	5 858
40	50,2	6,37	91,9	0	0,12	54,05	190,5	0,007	1,15	1,924	5,656
50	22.5	36,8	251,1	0,067	1,51	30.68	176 21	0.067	1.69	2 1 9 4	0.520
50	55,5	6,12	74,79	0	0,17	50,00	170,51	0,007	1,00	2,104	9,529
55	36.0	32,1	243,7	0,067	1,99	28.05	103 61	0.067	2.25	2 380	11 621
55	50,9	4,05	50,09	0	0,26	20,00	193,01	0,007	2,25	2,309	11,021
60	40.2	30	215	0,13	3,14	27.22	166 28	0.13	3.64	4 776	21,891
60	40,2	2,78	48,72	0	0,5	21,22	100,20	0,13	5,04	4,770	
65	13.6	24,6	253,8	0	4,1	21.05	204 45	0	4,51		00.050
65	43,6	2,65	49,35	0	0,41	21,95	204,40	U		U	22,009

Πίνακας 3-3 :μέγιστη κατά μέτρο τιμή των ρευμάτων λόγω έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων Ι<sub>1max</sub> και Ι<sub>2max</sub> αντίστοιχα κατά τη θετική πολικότητα 250/2500μs και πάχος δοκιμίου d=1mm

U_ [kV]	Û <sub>k</sub> [kV]	T₁ [µs]	Τ <sub>2</sub> [μs]	Q <sub>1</sub> [μC]	Q <sub>2</sub> [µC]	T <sub>2max</sub> [µs]	T <sub>1min</sub> [µs]	T <sub>max</sub> [µs]	Q <sub>2min</sub> [µC]	Q <sub>1max</sub> [µC]	Q <sub>min</sub> [µC]	I <sub>min</sub> [mA]
15	10.1	-	-	0,015	-					0.017	0.017	
15	10,1	-	-	0,002	-	-	-	-	-	0,017	-0,017	-
20	13.4	200,9	260,1	0,019	0,028	309 81	132 17	177 64	0 027	0.02	0 007	0.039
	,.	68,73	49,71	0,001	0,001		,	,	0,01	0,01	0,001	0,000
25	16.8	104,6	190,7	0,025	0,059	267 31	86 88	180 43	0.053	0.027	0.026	0 144
20	10,0	17,72	76,61	0,002	0,006	207,01	00,00	100,40	0,000	0,027	0,020	0,144
30	20.1	76,9	272,7	0,024	0,096	349 02	54 31	294 71	0.086	0.027	0.059	0 200
00	20,1	22,59	76,32	0,003	0,01	040,02	04,01	204,71	0,000	0,021	0,000	0,200
35	23.4	55,4	251,8	0,054	0,33	298,17	43.7	254.47	0.25	0.054	0.196	0.770
	,.	11,7	46,37	0	0,08		,	,		,		, 
40	26.7	42,2	268	0,067	0,74	319.75	36.3	283.45	0.68	0.067	0.613	2,163
	_0,1	5,9	51,75	0	0,06		00,0		0,00	,	-,	· ·
45	30.2	41,2	288,2	0,067	1,03	380.1	34.83	345.27	0.91	0.067	0.843	2.442
	00,1	6,37	91,9	0	0,12		01,00	0.0,2.	0,01	0,001	0,010	_,
50	33.5	36,8	251,1	0,067	1,51	325 89	30.68	295 21	1.34	0.067	1 273	4 312
	00,0	6,12	74,79	0	0,17	020,00	00,00	200,21	1,04	0,007	1,273	7,012
55	36.9	32,1	243,7	0,067	1,99	293 79	28.05	265 74	173	0.067	1 663	6 258
00	00,0	4,05	50,09	0	0,26	200,10	20,00	200,14	1,70	0,007	1,000	0,200
60	40.2	30	215	0,13	3,14	263 72	27.22	236.5	2 64	0.13	2 51	10 613
	10,2	2,78	48,72	0	0,5	200,12	21,22	200,0	2,04	0,13	2,01	10,010
65	43.6	24,6	253,8	0	4,1	303 15	21.95	281.2	3 60	0	3.69	13 122
65 43,6	2,65	49,35	0	0,41	505,15	21,90	201,2	3,69	U	3,69	13,122	

Πίνακας 3-4 : ελάχιστη κατά μέτρο τιμή του ρεύματος Ι των μερικών εκκενώσεων κατά τη θετική πολικότητα 250/2500μs και πάχος δοκιμίου d=1mm

U_ [kV]	Û <sub>k</sub> [kV]	Τ <sub>1</sub> [μs]	Τ₂ [μs]	Q <sub>1</sub> [μC]	Q <sub>2</sub> [μC]	T <sub>2min</sub> [µs]	T <sub>1max</sub> [µs]	T <sub>min</sub> [µs]	Q <sub>2max</sub> [µC]	Q <sub>1min</sub> [µC]	Q <sub>max</sub> [µC]	I <sub>max</sub> [mA]
15	10.1	-	-	0,015	-					0.012	0.012	
15	10,1	-	-	0,002	-	-	-	-	-	0,013	-0,013	-
20	13.4	200,9	260,1	0,019	0,028	210.39	269.63	59.24	0.029	0.018	0.011	0,186
	,.	68,73	49,71	0,001	0,001	,			0,010	0,010	0,011	0,100
25	16.8	104,6	190,7	0,025	0,059	114 09	122 32	8.23	0.065	0.023	0.042	5 103
20	10,0	17,72	76,61	0,002	0,006	114,00	122,02	0,20	0,000	0,020	0,042	0,100
30	20.1	76,9	272,7	0,024	0,096	196 38	99 49	96 89	0 106	0.021	0.085	0.877
00	20,1	22,59	76,32	0,003	0,01	100,00	00,40	00,00	0,100	0,021	0,000	0,077
35	23.4	55,4	251,8	0,054	0,33	205,43	67.1	138.33	0.41	0.054	0.356	2.574
	_0, :	11,7	46,37	0	0,08		,-	,	,	,	,	,
40	26.7	42,2	268	0,067	0,74	216,25	48.1	168.15	0.8	0.067	0.733	4.359
	-,	5,9	51,75	0	0,06		-,	, -	- , -	-,	-,	,
45	30.2	41,2	288,2	0,067	1,03	196.3	47.57	148.73	1,15	0.067	1.083	7.282
	,_	6,37	91,9	0	0,12	,.	,		.,	-,	.,	,
50	33.5	36,8	251,1	0,067	1,51	176 31	42 92	133 39	1 68	0.067	1 613	12 092
	00,0	6,12	74,79	0	0,17	110,01	,02	100,00	1,00	0,007	.,010	12,002
55	36.9	32,1	243,7	0,067	1,99	193 61	36 15	157 46	2 25	0.067	2 183	13 864
	00,0	4,05	50,09	0	0,26	100,01	00,10	101,10	2,20	0,001	2,100	10,001
60	40.2	30	215	0,13	3,14	166.28	32.78	133.5	3.64	0.13	3.51	26,292
60 40,2	,_	2,78	48,72	0	0,5	,	0_,	,.	0,01	0,10	0,01	
65	43.6	24,6	253,8	0	4,1	204 45	27.25	177.2	1 51	0	4 51	25 451
65 43,6	2,65	49,35	0	0,41	207,70	21,20		4,51	U	1,01	20,401	

Πίνακας 3-5 : μέγιστη κατά μέτρο τιμή του ρεύματος Ι των μερικών εκκενώσεων κατά τη θετική πολικότητα 250/2500μs και πάχος δοκιμίου d=1mm

Με βάση τα δεδομένα των πινάκων 3-1, 3-2, 3-3, 3-4 και 3-5 προκύπτουν οι παρακάτω χαρακτηριστικές:



Σχήμα 3-10: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία :  $I_{1min}=f(\hat{U}_{\kappa})$ 

**Κ**αμπύλη με κυκλικά σημεία :  $I_1=f(\hat{U}_{\kappa})$ 

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία :  $I_{1max}=f(\hat{U}_{\kappa})$ 

Ι1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

 $\hat{\mathbf{U}}_{\mathbf{\kappa}}$ : μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-11: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>1min</sub>=f(E)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : I<sub>1</sub>=f(E)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία : I<sub>1max</sub>=f(E)

I1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Ε : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-12: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία :  $I_{2min}=f(\hat{U}_{\kappa})$ 

Καμπύλη με κυκλικά σημεία :  $I_2=f(\hat{U}_{\kappa})$ 

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία :  $I_{2max}=f(\hat{U}_{\kappa})$ 

I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

**Û**<sub>κ</sub>: μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-13: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>2min</sub>=f(E)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : I<sub>2</sub>=f(E)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία : I<sub>2max</sub>=f(E)

I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Ε : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Πάχος δοκιμίου : d=1mm


Σχήμα 3-14: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη, ελάχιστη και χωρίς τυπική απόκλιση τιμή του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>2min</sub>=f(I<sub>1min</sub>)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : l<sub>2</sub>=f(l<sub>1</sub>)

**Κ**αμπύλη με τριγωνικά σημεία :  $I_{2max}=f(I_{1max})$ 

I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Ι1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-15: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>min</sub>=f(Û<sub>κ</sub>)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : I=f(Û<sub>κ</sub>)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία :  $I_{max}=f(\hat{U}_{\kappa})$ 

Ι: ρεύμα που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων

**Û**<sub>κ</sub>: μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-16: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>min</sub>=f(E)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : I=f(E)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία : I<sub>max</sub>=f(E)

Ι: ρεύμα που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων

Ε : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-17: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη, ελάχιστη και χωρίς τυπική απόκλιση τιμή του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>min</sub>=f(I<sub>1min</sub>)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : l=f(l<sub>1</sub>)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία :  $I_{max}=f(I_{1max})$ 

Ι: ρεύμα που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων

I1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-18: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με τις χωρίς τυπική απόκλιση τιμές του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>2min</sub>=f(I<sub>1</sub>)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : l<sub>2</sub>=f(l<sub>1</sub>)

**Κ**αμπύλη με τριγωνικά σημεία :  $I_{2max}=f(I_1)$ 

I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Ι1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



**Σχήμα 3-19:** Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με τις χωρίς τυπική απόκλιση τιμές του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>min</sub>=f(I<sub>1</sub>)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : I=f(I<sub>1</sub>)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία : I<sub>max</sub>=f(I<sub>1</sub>)

Ι: ρεύμα που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων

I1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Πάχος δοκιμίου : d=1mm

ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	-250/2500µs	ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ d=1mm

U_ [kV]	Û <sub>k</sub> [kV]	U <sub>k</sub>   [kV]	T <sub>1</sub> [µs]	Τ <sub>2</sub> [μs]	Q <sub>1</sub> [μC]	Q <sub>2</sub> [µC]	T [µs]	Q [µC]	E [MV/ cm]	I₁ [mA]	Ι <sub>2</sub> [mA]	I [mA]
-20	-13,8	13,8	-	-	0,069	-	-	- 0,069	0,206	-	-	-
-25	-17,2	17,2	-	-	0,083	-	-	- 0,083	0,256	-	-	-
-30	-20,7	20,7	110,9	129,6	0,079	0,13	18,7	0,051	0,308	0,712	1,003	2,727
-35	-24,2	24,2	87,1	142,4	0,083	0,24	55,3	0,157	0,361	0,953	1,685	2,839
-40	-27,6	27,6	76,3	113,1	0,067	0,38	36,8	0,313	0,411	0,878	3,360	8,505
-45	-31,1	31,1	54,5	128,2	0,1	0,48	73,7	0,38	0,463	1,835	3,744	5,156
-50	-34,5	34,5	50,9	163,7	0,067	0,82	112,8	0,753	0,514	1,316	5,009	6,676
-55	-37,9	37,9	44,2	217	0,067	1,89	172,8	1,823	0,565	1,516	8,710	10,550
-60	-41,4	41,4	41,8	187,6	0	2,29	145,8	2,29	0,617	0	12,207	15,706
-65	-44,8	44,8	37,1	145,1	0	2,24	108	2,24	0,667	0	15,438	20,741

Πίνακας 3-6: Μέση τιμή ρευμάτων λόγω έναρξης, περαίωσης και λόγω του φορτίου Q I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> και Ι αντίστοιχα καθώς και της μέγιστης τιμής της πεδιακής έντασης Ε κατά την αρνητική πολικότητα 250/2500μs και πάχος δοκιμίου d=1mm

Με βάση τα δεδομένα του πίνακα 3-6 εξήχθησαν οι διάφορες προς μελέτη χαρακτηριστικές :

 $I_{1}=Q_{1}/T_{1}=f(\left|\left.\hat{U}_{\kappa}\right|\right.,E) \quad I_{2}=Q_{2}/T_{2}=f(\left|\left.\hat{U}_{\kappa}\right|\right.,E) \quad I=Q/T=f(\left|\left.\hat{U}_{\kappa}\right|\right.,E) \quad I_{2}=f(I_{1}) \quad I=f(I_{1})$ 



Σχήμα 3-20 : Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Ι1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

 $\hat{\mathbf{U}}_{\mathbf{\kappa}}$ : μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικήα τάσης

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



**Σχήμα 3-21**: Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

- $\mathbf{I}_1$ : ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων
- Ε : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



- **Σχήμα 3-22:** Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης
  - I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
  - $\hat{\mathbf{U}}_{\mathbf{\kappa}}$ : μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



- Σχήμα 3-23: Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου
  - I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
  - Ε : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



**Σχήμα 3-24:** Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω του φορτίου Q των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Ι: ρεύμα λόγω του φορτίου Q των μερικών εκκενώσεων

**Û**<sub>κ</sub>: μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-25 : Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω του φορτίου Q των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

- Ι: ρεύμα λόγω του φορτίου Q των μερικών εκκενώσεων
- Ε: μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-26: Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

- I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
- I1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



- Σχήμα 3-27 : Χαρακτηριστική ρεύματος λόγω του φορτίου Q των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων
  - Ι: ρεύμα λόγω του φορτίου Q των μερικών εκκενώσεων
  - I1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-28 : Χαρακτηριστικές ρευμάτων λόγω έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης σε κοινό διάγραμμα

Καμπύλη με κυκλικά σημεία :  $I_2=f(\hat{U}_{\kappa})$ 

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>1</sub>=f(Û<sub>κ</sub>)

I1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

**Û**<sub>κ</sub>: μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Πάχος δοκιμίου : d=1mm

Στη συνέχεια εξετάσαμε πως μεταβάλλονται τα παραπάνω διαγράμματα όταν εισέρχεται στις μετρήσεις η τυπική απόκλιση, κάτι το οποίο ειναι απόλυτα λογικό μετά από έναν ικανοποιητικό αριθμό δοκιμών στο εργαστήριο και καταλήξαμε στους πίνακες 3-7, 3-8, 3-9 και 3-10:

U_ [kV]	Û <sub>k</sub> [kV]	T₁ [µs]	Τ <sub>2</sub> [μs]	Q <sub>1</sub> [μC]	Q <sub>2</sub> [µC]	T <sub>1max</sub> [µs]	T <sub>2max</sub> [µs]	Q <sub>1min</sub> [µC]	Q <sub>2min</sub> [µC]	I <sub>1min</sub> [mA]	I <sub>2min</sub> [mA]
	12.0	-	-	0,069	-			0.060			
-20	-13,0	-	-	0,007	-	-	-	0,062	-	-	-
25	17.0	-	-	0,083	-			0.070			
-20	-17,2	-	-	0,004	-	-	-	0,079	-	-	-
-30	-20.7	110,9	129,6	0,079	0,13	136.5	150.03	0.07	0 11	0 513	0 733
-30	-20,7	25,6	20,43	0,009	0,02	130,5	130,03	0,07	0,11	0,313	0,733
-35	-24.2	87,1	142,4	0,083	0,24	100 74	207,59	0,075	0,17	0,744	0,819
-00	-27,2	13,64	65,19	0,008	0,07	100,74					
-40	-27,6	76,3	113,1	0,067	0,38	92,22	139,19	0,067	0,29	0,727	2,083
		15,92	26,09	0	0,09						
-45	-31,1	54,5	128,2	0,1	0,48	62,09	192,14	0.1	0,34	1,611	1,770
10		7,59	63,94	0	0,14			-,-			
-50	-34,5	50,9	163,7	0,067	0,82	56 22	268 81	0.067	0.5	1 102	1 860
		5,32	105,11	0	0,32	00,22	200,01	0,007	0,0	1,102	1,000
-55	-37.9	44,2	217	0,067	1,89	49 93	321 25	0.067	1 34	1 342	4 171
	01,0	5,73	104,25	0	0,55	10,00	021,20	0,007	1,04	1,012	.,
-60	-41.4	41,8	187,6	0	2,29	45 84	260.29	0	1.78	0	6.839
	,.	4,04	72,69	0	0,51	,	200,29	Ŭ	1,70		0,000
-65	-44,8	37,1	145,1	0	2,24	40.14	208.71	0	1,67	0	8 002
-05		3,04	63,61	0	0,57	40,14	200,71				0,002

Πίνακας 3-7 :ελάχιστη κατά μέτρο τιμή των ρευμάτων λόγω έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων Ι<sub>1min</sub> και Ι<sub>2min</sub> αντίστοιχα κατά την αρνητική πολικότητα 250/2500μs και πάχος δοκιμίου d=1mm

U_ [kV]	Û <sub>k</sub> [kV]	T₁ [µs]	Τ <sub>2</sub> [μs]	Q <sub>1</sub> [μC]	Q₂ [μC]	T₁min [µs]	T₂min [µs]	Q <sub>1max</sub> [µC]	Q <sub>2max</sub> [µC]	I <sub>1max</sub> [mA]	I <sub>2max</sub> [mA]
00 40.0	12.0	-	-	0,069	-			0.076			
-20	-13,0	-	-	0,007	-	-	-	0,070	-	-	-
-25	-17 2	-	-	0,083	-	_	_	0.087	_	_	_
20	17,2	-	-	0,004	-			0,007			
-30	-20.7	110,9	129,6	0,079	0,13	85.3	109.17	0.088	0.15	1 032	1.374
	-,	25,6	20,43	0,009	0,02	,-	,	-,	-, -	,	, -
-35	-24.2	87,1	142,4	0,083	0,24	73.46	77,21	0,091	0,31	1,239	4,015
	,_	13,64	65,19	0,008	0,07	,					
-40	-27,6	76,3	113,1	0,067	0,38	60,38	87,01	0,067	0,47	1,110	5,402
		15,92	26,09	0	0,09						
-45	-31,1	54,5	128,2	0,1	0,48	46,91	64,26	0,1	0,62	2,132	9.648
		7,59	63,94	0	0,14					,	
-50	-34,5	50,9	163,7	0,067	0,82	45.58	58.59	0.067	1,14	1.470	19,457
	- ,-	5,32	105,11	0	0,32	-,	,	-,	.,	, -	
-55	-37.9	44,2	217	0,067	1,89	38.47	112.75	0.067	2.44	1.742	21.641
	,-	5,73	104,25	0	0,55	,	,	-,	_,	.,	,
-60	-41,4	41,8	187,6	0	2,29	37 76	114,91	0	2,8	0	24,367
	,	4,04	72,69	0	0,51	-,-	,•1	-	_,0	Ŭ	
-65	-44,8	37,1	145,1	0	2,24	34,06	81,49	0	2,81	0	34,483
00	,0	3,04	63,61	0	0,57	-					

Πίνακας 3-8 :μέγιστη κατά μέτρο τιμή των ρευμάτων λόγω έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων Ι<sub>1max</sub> και Ι<sub>2max</sub> αντίστοιχα κατά την αρνητική πολικότητα 250/2500μs και πάχος δοκιμίου d=1mm

U_ [kV]	Û <sub>k</sub> [kV]	T₁ [µs]	Τ <sub>2</sub> [μs]	Q <sub>1</sub> [μC]	Q <sub>2</sub> [µC]	T <sub>2max</sub> [µs]	T <sub>1min</sub> [µs]	T <sub>max</sub> [µs]	Q <sub>2min</sub> [µC]	Q <sub>1max</sub> [µC]	Q <sub>min</sub> [µC]	I <sub>min</sub> [mA]
	40.0	-	-	0,069	-						0.070	
-20	-13,8	-	-	0,007	-	-	-	-	-	0,076	-0,076	-
25	17.0	-	-	0,083	-					0.097	0.007	
-25	-17,2	-	-	0,004	-	-	-	-	-	0,007	-0,087	-
-30	-20.7	110,9	129,6	0,079	0,13	150.03	85.3	64 73	0 11	0 088	0,022	0 340
-30	-20,7	25,6	20,43	0,009	0,02	150,05	00,0	04,73	0,11	0,000		0,040
-35	-24.2	87,1	142,4	0,083	0,24	207 59	73 46	134 13	0,17	0,091	0,079	0,589
00	27,2	13,64	65,19	0,008	0,07	207,00	70,40	104,10				
-40	-27.6	76,3	113,1	0,067	0,38	139 19	60,38	78,81	0,29	0,067	0,223	2,830
10	21,0	15,92	26,09	0	0,09	,						
-45	-31.1	54,5	128,2	0,1	0,48	192,14	46,91	145,23	0.34	0,1	0,24	1,653
	01,1	7,59	63,94	0	0,14				0,01			
-50	-34.5	50,9	163,7	0,067	0,82	268 81	45 58	223.23	0.5	0.067	0 433	1,940
	01,0	5,32	105,11	0	0,32	200,01	10,00	220,20	0,0	0,001	0,100	
-55	-37.9	44,2	217	0,067	1,89	321.25	38.47	282.78	1.34	0.067	1.273	4.502
	01,0	5,73	104,25	0	0,55	021,20	00,11	202,10	1,01	0,007	1,275	1,002
-60	-41.4	41,8	187,6	0	2,29	260.29	37.76	222.53	1.78	0	1.78	7,999
	,.	4,04	72,69	0	0,51		0.,.0	,	.,. •		1,70	.,
-65	-44.8	37,1	145,1	0	2,24	208.71	34.06	174.65	1 67	0	1.67	9.562
-03	- <b>-</b> ,0	3,04	63,61	0	0,57	200,71	51,00		.,	Ŭ	1,07	5,002

Πίνακας 3-9: ελάχιστη κατά μέτρο τιμή του ρεύματος Ι των μερικών εκκενώσεων κατά την αρνητική πολικότητα 250/2500μs και πάχος δοκιμίου d=1mm

U_ [kV]	Û <sub>k</sub> [kV]	T₁ [µs]	Τ <sub>2</sub> [μs]	Q₁ [µC]	Q <sub>2</sub> [µC]	T <sub>2min</sub> [µs]	T <sub>1max</sub> [µs]	T <sub>min</sub> [µs]	Q <sub>2max</sub> [µC]	Q <sub>1min</sub> [µC]	Q <sub>max</sub> [µC]	I <sub>max</sub> [mA]
20 42.0	12.0	-	-	0,069	-					0.000	0.062	
-20	-13,0	-	-	0,007	-	-	-	-	-	0,002	-0,002	-
25	17.2	-	-	0,083	-					0.070	0.070	
-23	-17,2	-	-	0,004	-	-	-	-	-	0,079	-0,079	-
-30	-20.7	110,9	129,6	0,079	0,13	109.17	136.5	27.33	0.15	0.07	0.08	2 927
	_0,:	25,6	20,43	0,009	0,02	,	,.		0,.0	0,01	0,00	_,•_:
-35	-24.2	87,1	142,4	0,083	0,24	77.21	100.74	23,53	0,31	0,075	0,235	9,987
		13,64	65,19	0,008	0,07		100,11					
-40	-27.6	76,3	113,1	0,067	0,38	87,01	92,22	5,21	0,47	0,067	0,403	77,351
	,•	15,92	26,09	0	0,09							
-45	-31.1	54,5	128,2	0,1	0,48	64,26	62,09	2,17	0,62	0,1	0,52	239,631
	0.,.	7,59	63,94	0	0,14							
-50	-34.5	50,9	163,7	0,067	0,82	58 59	56 22	2 37	1 14	0.067	1 073	452,743
	,-	5,32	105,11	0	0,32	,	,	_,	.,	-,	.,	
-55	-37.9	44,2	217	0,067	1,89	112.75	49.93	62.82	2.44	0.067	2.373	37.775
	- ,-	5,73	104,25	0	0,55	, -	-,	- ,-	_,	0,007	,	
-60	-41,4	41,8	187,6	0	2,29	114 91	45,84	69,07	2,8	0	2,8	40,539
	,	4,04	72,69	0	0,51	, -	, -	,-	_,•	Ŭ	_,0	
-65	-44,8	37,1	145,1	0	2,24	81,49	40,14	41,35	2,81	0	2,81	67,956
	,.	3,04	63,61	0	0,57	,	,	,	_,	-	_,	,

Πίνακας 3-10 : μέγιστη κατά μέτρο τιμή του ρεύματος Ι των μερικών εκκενώσεων κατά την αρνητική πολικότητα 250/2500μs και πάχος δοκιμίου d=1mm

Με βάση τα δεδομένα των πινάκων 3-6, 3-7, 3-8, 3-9, και 3-10 προκύπτουν οι παρακάτω χαρακτηριστικές:



Σχήμα 3-29: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : Ι<sub>1min</sub>=f(Û<sub>κ</sub>)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : I<sub>1</sub>=f(Û<sub>κ</sub>)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία : I<sub>1max</sub>=f(Û<sub>κ</sub>)

Ι1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

**Û**<sub>κ</sub>: μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-30: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>1min</sub>=f(E)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : I<sub>1</sub>=f(E)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία : I<sub>1max</sub>=f(E

Ι1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Ε : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-31: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία :  $I_{2min}=f(\hat{U}_{\kappa})$ 

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : I<sub>2</sub>=f(Û<sub>κ</sub>)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία : I<sub>2max</sub>=f(Û<sub>κ</sub>)

I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

**Û**<sub>κ</sub>: μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-32: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>2min</sub>=f(E)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : I<sub>2</sub>=f(E)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία : I<sub>2max</sub>=f(E)

I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Ε : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-33: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη, ελάχιστη και χωρίς τυπική απόκλιση τιμή του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>2min</sub>=f(I<sub>1min</sub>)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : l<sub>2</sub>=f(l<sub>1</sub>)

**Καμπύλη με τριγωνικά σημεία :**  $I_{2max}=f(I_{1max})$ 

I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

I1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-34: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>min</sub>=f(Û<sub>κ</sub>)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : l=f(Û<sub>κ</sub>)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία : I<sub>max</sub>=f(Û<sub>κ</sub>)

Ι: ρεύμα που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων

Û<sub>κ</sub>: μέγιστη τιμή της στιγμιαίας εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-35: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>min</sub>=f(E)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : I=f(E)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία : I<sub>max</sub>=f(E)

Ι: ρεύμα που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων

Ε : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-36: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη, ελάχιστη και χωρίς τυπική απόκλιση τιμή του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>min</sub>=f(I<sub>1min</sub>)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : I=f(I<sub>1</sub>)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία : I<sub>max</sub>=f(I<sub>1max</sub>)

Ι: ρεύμα που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων

Ι1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-37: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με τις χωρίς τυπική απόκλιση τιμές του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : I<sub>2min</sub>=f(I<sub>1</sub>)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : l<sub>2</sub>=f(l<sub>1</sub>)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία : I<sub>2max</sub>=f(I<sub>1</sub>)

I2: ρεύμα λόγω περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

I1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Πάχος δοκιμίου : d=1mm



Σχήμα 3-38: Χαρακτηριστικές μέγιστης, ελάχιστης και χωρίς τυπική απόκλιση τιμής του ρεύματος που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με τις χωρίς τυπική απόκλιση τιμές του ρεύματος λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Καμπύλη με τετραγωνικά σημεία : Imin=f(I1)

Καμπύλη με κυκλικά σημεία : l=f(l<sub>1</sub>)

Καμπύλη με τριγωνικά σημεία : I<sub>max</sub>=f(I<sub>1</sub>)

Ι: ρεύμα που οφείλεται στο φορτίο Q των μερικών εκκενώσεων

Ι1: ρεύμα λόγω έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Πάχος δοκιμίου : d=1mm

## 4. Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

Από τις χαρακτηριστικές  $I_2=f(\hat{U}_{\kappa}, E)$  και τις χαρακτηριστικές  $I=f(\hat{U}\kappa, E)$ διαπιστώνεται μια εκθετική αύξηση του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων.Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η τιμή του ρεύματος είναι ανάλογη του φορτίου λόγω μερικών εκκενώσεων με αποτέλεσμα να συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις σύμφωνα με τη σχέση :

Q=Q<sub>0</sub>• $e^{A(E^2-E_0^2)/E_0^2}$  ή κατά τη σχέση :

 $I=I_0 \cdot e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2}$ .

Η απόκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τη θεωρητική εκθετική μορφή των χαρακτηριστικών I<sub>2</sub>=f(Û<sub>κ</sub>, E) και I=f(Ûκ, E) μπορεί να αποδοθεί στην εναλλαγή του πρωτεύοντα ρόλου των παραγόντων γήρανσης που παρατηρείται αυξάνοντας την τιμή Û<sub>κ</sub>.

Έτσι, όταν λόγω μερικών εκκενώσεων απομακρύνονται ηλεκτρικοί φορείς από το υλικό, προκαλείται ακολούθως μηχανική καταπόνηση του υλικού λόγω της εξάσκησης δυνάμεων Coulomb μεταξύ ηλεκτροδίων και υλικού καθώς και μεταξύ διαφόρων θέσεων επί του υλικού. Ακολούθως, αφού μειώνεται τοπικά η διηλεκτρική αντοχή, αυξάνει πάλι η τιμή του ρεύματος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων Ι<sub>2</sub> για να συμβεί στη συνέχεια και πάλι μηχανική καταπόνηση του υλικού από τις δυνάμεις Coulomb.

Οι χαρακτηριστικές I<sub>1</sub>=f(Û<sub>κ</sub>, E) μπορούν επίσης να αξιολογηθούν ως ανωτέρω γιατί αφορούν φαινόμενα αγωγιμότητας λόγω των παραγόντων γήρανσης.

Οι χαρακτηριστικές I<sub>2</sub>=f(I<sub>1</sub>) δεν μπορούν να εξηγηθούν με βάση τη θεωρία του ιονισμού με κρούσεις και θα πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω.

## <u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

- 1) Zeller H.R. : Breakdown and prebreakdown phenomenna in solid dielectrics, IEEE Trans. Electr. Insul. El-22 (1987) Vol.2, p.p 115-122.
- 2) Μπούρκας Π.Δ., Καγιάφας Ε.Α. : Σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής στερεών μονωτικών οργανικής σύνθεσης, Τεχνικά Χρονικά, Β 1987, Τομ.7, Τεύχος 2, σελ.29-57.
- 3) Μπούρκας Π.Δ., Καγιάφας Ε.Α. : Συντελεστές ηλεκτρικής ανομοιογένειας στερεών μονωτικών, Τεχνικά Χρονικά, Β 1987, Τομ.7, Τεύχος 7, σελ. 57-68.
- 4) Μπούρκας Π.Δ., Δέρβος Κ., Καγιάφας Ε.Α. : Φαινόμενα γήρανσης στο συνδυασμό " βακελίτης-μονωτικό λάδι" κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ζεύξης, Τεχνικά Χρονικά, Β 1988, Τομ.8, Τεύχος 4, σελ.29-42.
- 5) Bourkas P.D., Kayafas E.A., Machias A.V. : Specified current in emergency load switches, IEE Vol. 135, Pt. C, No. 4, July 1988.
- Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A. :High frequency current oscillations in solid dielectrics, J. Physics D-Applied Physics, Vol.22, 1989, p.p 316-322.
- 7) Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A. : Potential profile of dielectrics during impulse application, Physika Status Solidi (a), Vol. 112, 1989, p.p 123-130.
- Bourkas P.D., Stathopoulos I.A., Topalis F.V. : Breakdown of the pressboardoil insulation under repeated strew by impulse voltages, International Journal of Energy Systems, Vol.10, No. 1, 1990, p.p 24-27.
- Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A., Stathopoulos I.A. : Enthanced partial discharges due to temperature increase in the combined system of a solidliquid dielectric, IEEE Trans. Elec. Insul. Vol.25, No. 3, 1990, p.p 469-474.
- Σταθόπουλος Ι.Α., Μπούρκας Π.Δ., Τοπαλής Φ.Β. : Μετρήσεις και δοκιμές Υψηλών τάσεων, Ε.Μ.Π. 1991.
- Δέρβος Κ.Θ., Μπούρκας Π.Δ. :Εισαγωγή στα Ηλεκτρομονωτικά Υλικά, Εκδόσεις Σπουδαστικής Μέριμνας, Ε.Μ.Πολυτεχνείο, Αθήνα 1991.
- 12) Karagiannopoulos C.G., Bourkas P.D., Dervos C.T., Kagarakis C.A. : Physical interpretations concerning non-linear conductivity phenomena across no-load switsching contacts, IEE Trans. on Compon., Hybrids and Mannf. Tech., Vol. 14, No. 1, p.p 137-141, 1991.

- 13) Moronis A.X., Bourkas P.D. : Impact ionization effects at interfaces between solid dielectrics and insulation oil or air, during high voltage pulse applications, International Journal Interface Science, Vol.2, p.p 281-287,1994.
- 14) Bourkas P.D. : Radiation emission phenomena in metal-dielectric-metal model under high electric fields, International Journal of Power and Energy Systems, Vol.15, No.2, p.p 37-41, 1995.
- 15) Μπούρκας Π.Δ. : Εφαρμογές κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 1998.
- 16) Μπούρκας Π.Δ., Καραγιαννόπουλος Κ.Γ. : Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και Υλικά, Μέρος 1, σελ.103-151, Αθήνα 2003.