



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Τμήμα
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Βιομηχανικών Ηλεκτρικών Διατάξεων και Συστημάτων
Αποφάσεων

Διπλωματική Εργασία



ΘΕΜΑ: « Ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστικές τάσεις $1,2/50 \mu s$ σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $20^\circ C$ »

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ξ. ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ

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

Αθήνα, Μάιος 2009



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Τμήμα
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Βιομηχανικών Ηλεκτρικών Διατάξεων και Συστημάτων
Αποφάσεων

**ΕΝΤΑΣΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ
ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΣΕ ΣΤΕΡΕΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ
ΕΝΤΟΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ
ΤΑΣΕΙΣ 1,2/50 μ s ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
20°C**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ξ. ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ

A.M: 03102317

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την

Π.Δ. Μπούρκας Ν. Θεοδώρου Κ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π. Καθηγητής Ε.Μ.Π. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2009

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των μερικών εκκενώσεων και οι επιπτώσεις αυτών, σε βιομηχανικά μονωτικά υλικά υπό κρουστική τάση της μορφής 1,2/50 μ s. Η προαναφερθείσα μελέτη πραγματοποιείται με τη βοήθεια μετρήσεων αλμάτων δυναμικού, λόγω μερικών εκκενώσεων, σε δοκίμια πεπιεσμένου χαρτιού πάχους $d=1$ mm και $d=2$ mm σε θερμοκρασία 20° C, και στατιστικής μελέτης των μετρήσεων αυτών.

Αρχικά, στο θεωρητικό κομμάτι της εργασίας, γίνεται μια περιγραφή των κυριότερων χαρακτηριστικών των μονωτικών υλικών (στερεά, υγρά, αέρια) που χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές εφαρμογές, αναφέροντας ειδικά τις βασικές ιδιότητες αυτών. Στη συνέχεια, αναφέρονται κάποια στοιχεία για τη διάσπαση των αέριων μονωτικών, τη γήρανση και τη διάσπαση του ηλεκτρομονωτικού ελαίου. Στο τέλος του πρώτου κεφαλαίου γίνεται εκτενής αναφορά στα φαινόμενα πριν και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.

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

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

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

Τελειώνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Ε.Μ.Π Περικλή Δ. Μπούρκα για την ανάθεση της παρούσης εργασίας, και την πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της. Άλλωστε η θεωρητική ανάλυση που ακολουθεί προέρχεται κυρίως από τα βιβλία «Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά» των καθηγητών Π.Δ. Μπούρκα- Κ.Γ. Καραγιάννη και «Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων» του καθηγητή Κ.Θ.Δέρβου.

ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

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

*Copyright © Δημοπουλος Γεωργιος 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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των μερικών εκκενώσεων και οι επιπτώσεις αυτών, σε βιομηχανικά μονωτικά υλικά υπό κρουστική τάση της μορφής 1,2/50 μ s. Η προαναφερθείσα μελέτη πραγματοποιείται με τη βοήθεια μετρήσεων αλμάτων δυναμικού, λόγω μερικών εκκενώσεων, σε δοκίμια πεπιεσμένου χαρτιού πάχους $d=1$ mm και $d=2$ mm σε θερμοκρασία 40° C, και στατιστικής μελέτης των μετρήσεων αυτών.

Αρχικά, στο θεωρητικό κομμάτι της εργασίας, γίνεται μια περιγραφή των κυριότερων χαρακτηριστικών των μονωτικών υλικών (στερεά, υγρά, αέρια) που χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές εφαρμογές, αναφέροντας ειδικά τις βασικές ιδιότητες αυτών. Στη συνέχεια, αναφέρονται κάποια στοιχεία για τη διάσπαση των αέριων μονωτικών, τη γήρανση και τη διάσπαση του ηλεκτρομονωτικού ελαίου. Στο τέλος του πρώτου κεφαλαίου γίνεται εκτενής αναφορά στα φαινόμενα πριν και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.

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

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

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

Λέξεις κλειδιά

Μονωτικά υλικά, Διάσπαση μόνωσης, Μερικές εκκενώσεις, Γήρανση υλικών, Κρουστική τάση, Ανομοιογένειες υλικού.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ.

1.1	Βασικές ιδιότητες των μονωτικών υλικών	σελ.	7
1.2	Η διάσπαση των αερίων μονωτικών	σελ.	15
1.2.1	Θεωρία του Thowsend	σελ.	15
1.2.2	Ο νόμος του Paschen	σελ.	16
1.3	Γήρανση και διάσπαση του ηλεκτρομονωτικού ελαίου	σελ.	19
1.4	Φαινόμενα πριν και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών	σελ.	22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

2.1	Πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων	σελ.	30
2.2	Αναφορά στις χρησιμοποιούμενες έννοιες	σελ.	31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της εργασίας	σελ.	37
---------------------	------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΝΤΟΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ +1,2/50 και -1,2/50 μs.

4.1	Τυπολόγιο	σελ.	38
4.2	Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 1\text{ mm}$	σελ.	41
4.3	Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 2\text{ mm}$	σελ.	47
4.4	Γραφικές παραστάσεις και οι εκθετικές τους προσεγγίσεις	σελ.	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΧΟΛΙΑ

σελ. 85

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

σελ. 86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ (το κεφ.1 της παρούσης διπλωματικής εργασίας προέρχεται από την βιβλιογραφία [1,2,3,4,5])

1.1 Βασικές ιδιότητες των μονωτικών υλικών

Ως **μονωτικά υλικά** ή **μονωτές** χαρακτηρίζονται τα υλικά που πρακτικά δεν έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σχετικά ασθενή πεδία συνεχούς ρεύματος. Στη χημική τους σύνθεση οι μονωτές είναι σώματα ιοντικής, ομοιοπολικής ή μοριακής κατασκευής. Καθώς μάλιστα τα ιόντα των σωμάτων αυτών είναι δυσκίνητα, ή η ισχύς των ομοιοπολικών δεσμών είναι μεγάλη, ή τα μόριά τους είναι σταθερά, δηλαδή δεν διασπώνται εύκολα σε φορτισμένες ρίζες, δεν υπάρχουν στα παραπάνω σώματα ευκίνητοι φορείς σε αξιόλογη ποσότητα, και έτσι δεν έχουν την δυνατότητα της εκδήλωσης μιας ουσιαστικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Πάντως είναι πρακτικά αναπόφευκτη η ύπαρξη, σε κάθε σώμα, ενός κάποιου πλήθους προσμίξεων, ακαθαρσιών, διεγέρσεων και διασπάσεων που δημιουργούν έναν μικρό αριθμό φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος.

Αποτέλεσμα της έλλειψης αξιόλογης ηλεκτρικής αγωγιμότητας, τα μονωτικά σώματα είναι κατάλληλα για να εμποδίζουν τη δημιουργία ηλεκτρικών ρευμάτων δια μέσου της μάζας τους, και για να διατηρούν τις διαφορές δυναμικού στα διάφορα τμήματα των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων και εγκαταστάσεων. Σκοπός των μονώσεων σε μια ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο ηλεκτρικός διαχωρισμός μεταξύ ρευματοφόρων μερών καθώς και των ρευματοφόρων μερών προς τη γη. Έτσι βρίσκουν πολύ σημαντικές χρήσεις, κυρίως ως ηλεκτρικές μονώσεις σε όλες τις ηλεκτρικές εφαρμογές, και ως διηλεκτρικά υλικά στην κατασκευή των πυκνωτών

Με τον όρο **διάσπαση** εννοούμε την αγωγή σύνδεση δύο, μεταξύ τους μονωμένων, ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μονωτικών (π.χ: αέρας-πορσελάνη, βακελίτης-μονωτικό λάδι) τότε ονομάζεται **επιφανειακή διάσπαση** (ή **υπερπήδηση**). Η διάσπαση διά του όγκου ενός μονωτικού υλικού καλείται **διάτρηση**. Η διάσπαση σε περιορισμένο μήκος του μονωτικού ονομάζεται **μερική εκκένωση**. Οι μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε θέσεις ανομοιογένειας στον όγκο ή στην επιφάνεια του υλικού (κυρίως φυσαλίδες αερίων στον όγκο του υλικού και διάφορες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνεια του: σκόνη, υγρασία, κ.λ.π). οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού ονομάζονται **εσωτερικές μερικές εκκενώσεις** και εκείνες στην επιφάνεια του **εξωτερικές μερικές εκκενώσεις**. Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν την ξεχωριστή ονομασία **Korona (στεματοειδείς μερικές εκκενώσεις)**.

Η ανάγκη για την αξιόπιστη, διαχρονική συμπεριφορά των μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής αυτών. Αυτά είναι η διηλεκτρική αντοχή, η σχετική διηλεκτρική σταθερά, ο συντελεστής απωλειών και η ειδική αγωγιμότητα. Σε πολλές εφαρμογές ενδιαφέρον παρουσιάζει η αντοχή των μονωτικών υλικών σε μηχανικές καταπονήσεις καθώς και η επιφανειακή ειδική αγωγιμότητα. Παρακάτω αναλύονται τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών υλικών.

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

$$E_d = U_{dmin} / d \quad (\text{συνήθως σε kV/cm}) \quad (1.1-1)$$

Για μια δεδομένη διάταξη των ηλεκτροδίων η τιμή E_d αποτελεί ένα πρώτο κριτήριο για την επιλογή των μονωτικών. Οι τιμές που δίνονται στον παρακάτω πίνακα για τη διηλεκτρική αντοχή μερικών μονωτικών (σε ομογενές πεδίο, συχνότητας 50 Hz και για μικρό χρονικό διάστημα καταπόνησης) δείχνουν τη δυνατότητα αυτή.

Πίνακας 1.1-1 : E_d για καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας ορισμένων μονωτικών υλικών σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50 Hz

Μονωτικό υλικό	d (mm)	E_d (kV/cm)
αέρας		21
λάδι μετασχηματιστών		60 ... 200
πορσελάνη	0,5 ... 3	340 ... 380
στεατίτης	0,5 ... 3	200 ... 300
γαλί	< 1	160 ... 450
χαρτόνι	0,5 ... 1,5	300 ... 450
χαρτί στο λάδι	< 2	200 ... 400
σκληρό ελαστικό	< 3	300 ... 500
ξύλο	< 3	30 ... 50
Glimmer	0,01 ... 0,1	500 ... 1000

Η διηλεκτρική αντοχή μετριέται με επιβολή ημιτονικής εναλλασσόμενης τάσης σε δοκίμιο πάχους 1 mm, και είναι η ενεργός τιμή της τάσης στην οποία εκδηλώνεται ακαριαία η διάσπαση του υλικού. Στις εφαρμογές όμως ενδιαφέρει η μακροχρόνια και όχι η στιγμιαία συμπεριφορά των υλικών. Επειδή λοιπόν όταν η τάση επιβάλλεται για μεγάλο χρονικό διάστημα προκαλείται εξασθένηση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού, λόγω κυρίως των μερικών εκκενώσεων, στους υπολογισμούς των μονωτικών υλικών θεωρείται συνήθως ότι η διηλεκτρική αντοχή τους είναι πρακτικά περίπου 10% της τιμής που μετριέται στις δοκιμές.

Η **σχετική διηλεκτρική σταθερά** ϵ_r , ή απλούστερα διηλεκτρική σταθερά (ή επιτρεπτότητα ή διαπερατότητα) ενός υλικού είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και

εκφράζει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μιας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό.

Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών υλικών, που συνθέτουν μία μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών, μονώσεις καλωδίων) θα πρέπει να επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειές τους, ώστε να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που ο συνδυασμός του μονωτικού λαδιού και του χαρτιού βρίσκει πολλές πρακτικές εφαρμογές. Τα δύο μονωτικά υλικά έχουν την ίδια περίπου σχετική διηλεκτρική σταθερά με αποτέλεσμα να μην συμβαίνει διάθλαση των πεδιακών γραμμών στη διαχωριστική επιφάνειά τους. Επιπλέον το λάδι εμποτίζει το χαρτί, ώστε να αποκλείεται η ύπαρξη του αέρα ο οποίος μόνο προβλήματα θα μπορούσε να δημιουργήσει λόγω της μικρής του διηλεκτρικής αντοχής, σύμφωνα με τον Πίνακα 1.1-2.

Πίνακας 1.1-2 : Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20 °C

Μονωτικό υλικό	ϵ_r	Μονωτικό υλικό	ϵ_r
αέρας	1,000594	Mikanit	4 ... 6
αέρας (κανονικές συνθήκες)	1,5	πάγος	2 ... 3
απεσταγμένο νερό	8	Petrinax	4,8 ... 5,4
βακελίτης	3,5 ... 8,2	PVC	4 ... 6
Condense	4 ... 8	Plexiglas	2,6 ... 3,5
Glimmer	4 ... 8	πορσελάνη	5,5 ... 6
Γυαλί	5 ... 16	Presspan	2,5 ... 3,4
θερμοπλαστικά συνθετικά	2 ... 5	ρητίνη	2,2
λάδι μετασχηματιστών	2,0 ... 2,5	στεατίτης	6,4
λάστιχο	218 ... 6,5	χαλαζίας	3 ... 7
Ξύλο	215 ... 6,5	χαρτί	1,8 ... 2,6

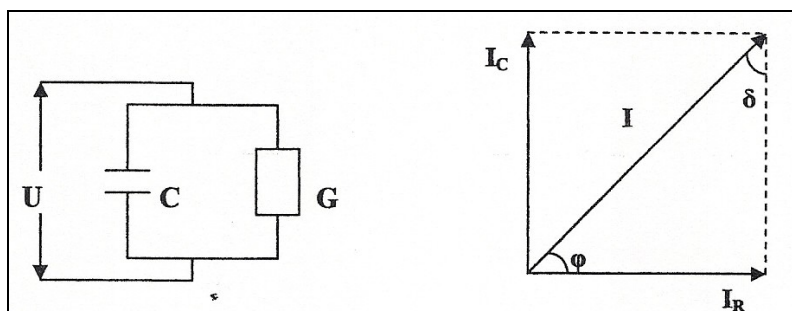
Όταν τα μονωτικά υλικά βρίσκονται κάτω από την επίδραση ηλεκτρικών πεδίων, αναπτύσσονται διάφοροι μηχανισμοί οι οποίοι απορροφούν ενέργεια από τα πεδία. Δηλαδή έχουμε ανεπιθύμητη απώλεια ενέργειας. Το φαινόμενο είναι επιπρόσθετα δυσάρεστο, διότι η ενέργεια που απορροφάται στα υλικά μετατρέπεται κυρίως σε θερμότητα, η οποία αν δεν αποβάλλεται προς το περιβάλλον με αρκετά ταχύ ρυθμό, προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών με αποτέλεσμα την κακή λειτουργία, τις βλάβες και την πρόωρη καταστροφή των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων.

Ειδικότερα, κάτω από συνεχή τάση η απορρόφηση της ενέργειας οφείλεται στη δημιουργία του ρεύματος διαρροής στο μονωτικό σώμα, εξαιτίας της όποιας αγωγιμότητας όγκου ή και της επιφανειακής του αγωγιμότητας. Δηλαδή η θέρμανση του υλικού οφείλεται στο φαινόμενο Joule. Στα εναλλασσόμενα πεδία εμφανίζεται επιπλέον μία συνήθως πολύ μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας και θέρμανση του σώματος, που προκαλείται από τις περιοδικές πολώσεις και αποπολώσεις του, σύμφωνα με τους διάφορους μηχανισμούς πόλωσης. Στην περίπτωση αυτή η απώλεια

ενέργειας ανά περίοδο και ανά μονάδα όγκου του σώματος δίνεται από τη σχέση :

$$W = \pi E_m^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta \quad (1.1-2)$$

όπου $\operatorname{tg} \delta$ ο συντελεστής απωλειών και E_m η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης.



Σχήμα 1.1-1 : Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας G

Ο συντελεστής απωλειών :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C} \quad (1.1-3)$$

είναι κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού, ή μιας μονωτικής διάταξης γενικότερα, γιατί παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αγωγιμότητά του.

Οι απώλειες Joule (P_w) στην αγωγιμότητα είναι :

$$P_w = I_R U = GU^2 = U^2 \nu C \operatorname{tg} \delta = P_B \operatorname{tg} \delta \quad (1.1-4)$$

όπου P_w η άεργος ισχύς στη χωρητικότητα C.

Αν υποθέσουμε, ότι ο παραπάνω πυκνωτής αποτελείται από δύο επίπεδες πλάκες διατομής A σε απόσταση d και ότι ο μεταξύ τους χώρος καταλαμβάνεται από ένα μονωτικό υλικό χωρητικότητας C τότε θα είναι :

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (1.1-5)$$

Για την αγωγιμότητα G του παραπάνω πυκνωτή ισχύει ότι :

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (1.1-6)$$

όπου σ η ειδική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού. Για τις απώλειες του πυκνωτή, σύμφωνα με τις σχέσεις (1.4 -2) και (1.4 -3) θα είναι :

$$P_w = U^2 \omega \varepsilon \frac{A}{d} \operatorname{tg} \delta \quad (1.1-7)$$

και πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με την απόσταση d :

$$P_w = \left(\frac{U}{d}\right)^2 \omega \varepsilon \operatorname{tg} \delta (A d) = \left(\frac{U}{d}\right)^2 \omega \varepsilon \operatorname{tg} \delta V \quad (1.1-8)$$

όπου V ο όγκος του διηλεκτρικού.

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

$$P_w = \omega \varepsilon \operatorname{tg} \delta \int \left(\frac{U}{d}\right)^2 dv = \varepsilon \operatorname{tg} \delta \int E^2 dv \quad (1.1-9)$$

Από την παραπάνω σχέση μπορεί εύκολα να υπολογιστούν οι απώλειες Joule μιας μόνωσης.

Για ένα ομοιογενές μονωτικό υλικό σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο ισχύει ότι :

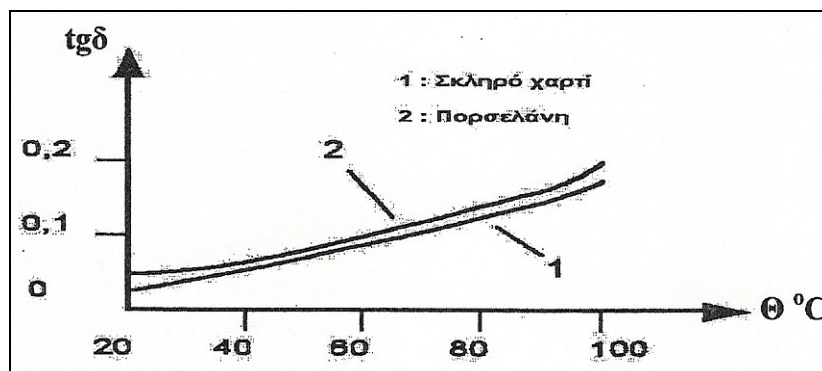
$$\varepsilon \operatorname{tg} \delta = \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta = \sigma / \omega \quad (1.1-10)$$

όπου $\varepsilon_0 = 8,857 \text{ pF/m}$ και ω η κυκλική συχνότητα. Στην πράξη χρησιμοποιείται συννηθέστερα το γινόμενο $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών. Στον πίνακα 1.1-3 δίνονται οι τιμές $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ για ορισμένα υλικά.

Πίνακας 1.1-3 : Τάξη μεγέθους της τιμής $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ για ορισμένα μονωτικά υλικά στους 20°C

Μονωτικό υλικό	Πάχος μόνωσης σε mm	$\varepsilon \operatorname{tg} \delta$
Λάδι μετασχηματιστών		0,004 ... 0,046
Πορσελάνη	0,5 ... 3	0,085 ... 0, 16
Στεατίτης	0,5 ... 3	0,006 ... 0,02
Γυαλί	< 1	0,003 ... 0, 1
Χαρτόνι	0,5 ... 1,5	0,01
Glimmer	0,01 ... 0,1	0,009 ... 0,012

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2-2 ο συντελεστής απωλειών εξαρτάται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος του μονωτικού υλικού.



Σχήμα 1.1-2 : Αύξηση του συντελεστή απωλειών συναρτήσει της θερμοκρασίας

Ένα κριτήριο αξιολόγησης της διηλεκτρικής συμπεριφοράς στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών (π.χ από ξένες επικαθίσεις, ή από μεταβολές της επιφάνειας λόγω θερμικής καταπόνησης κ.λ.π) είναι η **επιφανειακή ειδική αγωγιμότητα**.

Στα στερεά μονωτικά υλικά, ειδικότερα, παρουσιάζεται μια ιδιομορφία ως προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Δηλαδή έκτος από την αγωγιμότητα διαμέσου της μάζας τους εκδηλώνεται και μια επιφανειακή αγωγιμότητα με μετακίνηση φορέων κατά μήκος της εξωτερικής τους επιφάνειας, έξω από το κυρίως σώμα. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί αγωγιμότητας είναι ανεξάρτητοι ο ένας από τον άλλο. Για διάκριση, οι αντίστοιχες ειδικές αγωγιμότητες ονομάζονται ειδική αγωγιμότητα όγκου (σ), και ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα (σ_e). Η δεύτερη ορίζεται ως η αγωγιμότητα μεταξύ δύο ηλεκτροδίων τοποθετημένων παράλληλα πάνω στην επιφάνεια του σώματος, που βρίσκονται σε απόσταση ίση με το μήκος τους. Η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα (σ_e) εκφράζεται σε μονάδες Ω^{-1} , και όχι σε $\Omega^{-1}\text{m}$ όπως η σ .

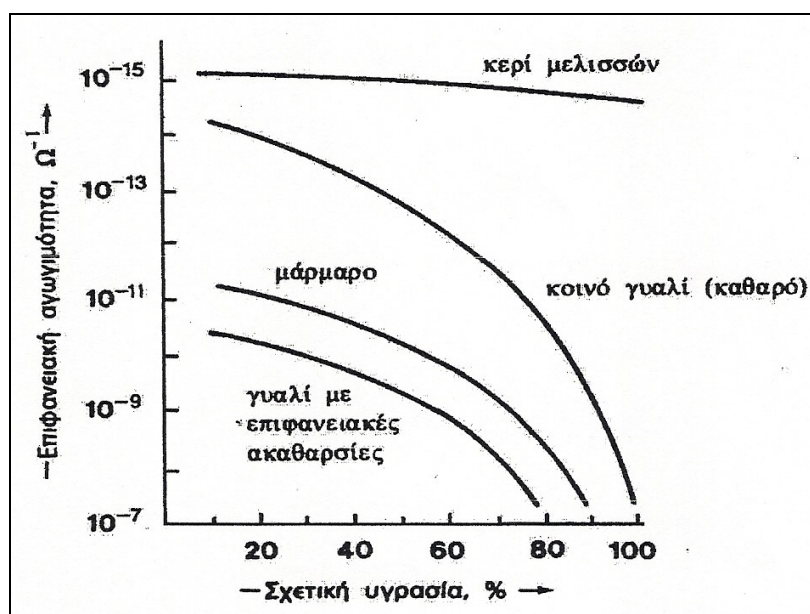
Στα περισσότερα μονωτικά υλικά η αγωγιμότητα όγκου είναι πολύ μικρή, και έτσι η επιφανειακή τους αγωγιμότητα αποκτά συχνά κυρίαρχη σημασία, ιδίως όταν ευνοείται από το γεωμετρικό του σχήμα. Η επιφανειακή αγωγιμότητα επηρεάζεται σημαντικά από την υγρασία του περιβάλλοντος και από τη ρύπανση της επιφάνειας του σώματος. Όταν η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας είναι μεγαλύτερη από 70-80%, η επιφανειακή αγωγιμότητα των περισσότερων σωμάτων αποκτά αξιόλογες τιμές. π.χ. σε ξηρή ατμόσφαιρα με περίπου 20% σχετική υγρασία, το κοινό γυαλί έχει ασημαντη επιφανειακή αγωγιμότητα, της τάξης του $10^{-13} \Omega^{-1}$. Σε υγρασία όμως 70% η επιφανειακή αγωγιμότητα του γυαλιού ανεβαίνει στο $10^{-11} \Omega^{-1}$ όταν η επιφάνειά του είναι καθαρή και στο $10^{-8} \Omega^{-1}$ περίπου όταν είναι ακάθαρτη, δηλαδή εκατό χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από του καθαρού γυαλιού σε ξηρή ατμόσφαιρα.

Η αύξηση αυτή της επιφανειακής αγωγιμότητας οφείλεται στα ιόντα που συγκεντρώνονται στη λευκή υδάτινη στοιβάδα που σχηματίζεται στην επιφάνεια των σωμάτων, όταν βρίσκονται σε υγρή ατμόσφαιρα. Τα ιόντα προέρχονται ή από τις ακαθαρσίες που επικάθονται στην επιφάνεια των στερεών, ή από τη χημική δομή του σώματος, όπως π.χ. τα ιόντα νατρίου του κοινού γυαλιού. Το επιφανειακό στρώμα ενός αντιπροσωπευτικά ρυπαρού μονωτήρα θα περιέχει αδρανή ορυκτή ύλη, ηλεκτρικά αγωγήμη σκόνη όπως άνθρακα ή οξειδία μετάλλου, διαλυτά άλατα στο νερό και υγρασία. Αυτό το στρώμα θα συμπεριφέρεται σαν ένας μεταβλητός, μη γραμμικός αντιστάτης, ασταθής στις περισσότερες περιπτώσεις στην εμφάνιση ηλεκτρικών πεδίων. Το ρεύμα διαρροής θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας, των ηλεκτροχημικών προϊόντων ηλεκτρόλυσης και των ηλεκτρικών μερικών εκκενώσεων. Οι δευτερογενείς επιπτώσεις μπορούν να ποικίλουν από την ηλεκτροχημική διάβρωση μέχρι την δημιουργία μερικών εκκενώσεων, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στην υπερπήδηση του μονωτήρα και το σχηματισμό ηλεκτρικού τόξου στο περιβάλλον μέσο. Το ρεύμα διαρροής και οι επιπτώσεις του καθορίζουν το σχεδιασμό ενός μονωτήρα, ειδικά στις κατηγορίες των μονωτήρων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε εξωτερικούς χώρους, εκτεθειμένους σε ατμοσφαιρική υγρασία και ρύπανση.

Η επίδραση της υγρασίας είναι μικρότερη σε μη διαβρέξιμα σώματα, όπως το κερί διότι δεν σχηματίζεται εύκολα μιας συνεχής στοιβάδα νερού στην επιφάνεια τους.

Αντίθετα, είναι εντονότερη στα πορώδη σώματα, όπως το μάρμαρο, διότι η απορρόφηση υγρασίας στους πόρους τους, διευκολύνει τον σχηματισμό της επιφανειακής στοιβάδας του νερού. Ειδικότερα, στην περίπτωση του μαρμάρου, στην αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας συμβάλλουν και τα ευδιάλυτα ιόντα όπως τα Fe^{+2} και Mg^{+2} , από τις προσμίξεις που εγκλείονται συνήθως στους πόρους του.

Στο σχήμα 1.1-3 φαίνεται η μεταβολή της επιφανειακής αγωγιμότητας ορισμών υλικών συναρτήσει της υγρασίας και της καθαρότητας της επιφάνειάς τους.



Σχήμα 1.1-3 : Η μεταβολή της ειδικής επιφανειακής αγωγιμότητας ορισμένων μονωτικών υλικών I σε συνάρτηση με την καθαρότητα της επιφάνειάς τους και τη σχετική υγρασία του αέρα στο περιβάλλον

Επειδή οι παράγοντες, που προκαλούν την αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας των στερεών μονωτικών ποικίλουν, η επιφανειακή ειδική αγωγιμότητα έχει συσχετιστεί με έννοιες όπως: αντοχή σε ρεύμα διαρροής, αντοχή σε ηλεκτρικό τόξο κ.λ.π.

Σε αρκετές κατασκευές ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η **μηχανική αντοχή των μονωτικών υλικών**, λόγω των μεγάλων δυνάμεων που εξασκούνται σε αυτά (δυνάμεις του ηλεκτρικού πεδίου και μηχανικές δυνάμεις). Στις περιπτώσεις αυτές οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τους κανόνες της μηχανικής αντοχής των υλικών. Τυπικό παράδειγμα είναι η αντοχή των μονωτήρων υψηλών τάσεων σε μηχανικές και ηλεκτρικές δυνάμεις (δυναμική καταπόνηση από το ρεύμα βραχυκύκλωσης).

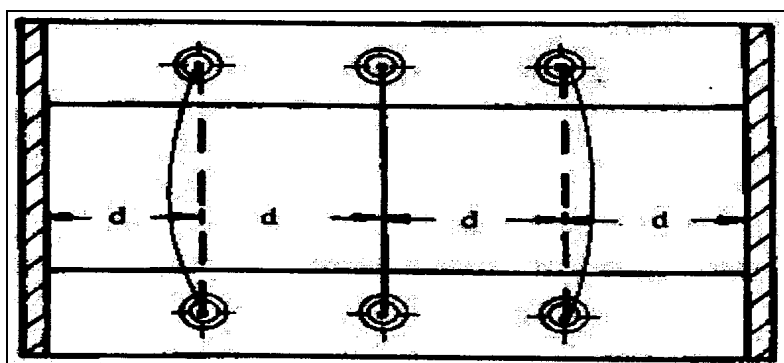
Εξαιτίας της αύξησης των τάσεων μεταφοράς και της εισαγωγής πολλαπλών αγωγών ανά φάση, τα μηχανικά φορτία που πρέπει να στηριχθούν από τους μονωτήρες εναέριων γραμμών υπερέβησαν το κατωφλικό επίπεδο των 40 τόνων, που προξενεί

θραύση σε έναν απλό δίσκο πορσελάνης λογικού βάρους και όγκου. Για το λόγο αυτό αναζητήθηκαν νέα υλικά και σχήματα των μονωτήρων ώστε να καλύπτουν τόσο τις απαιτήσεις ηλεκτρικής μόνωσης όσο και τις μηχανικές από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από το βάρος των αγωγών .

Σε πολλές κατασκευές (πίνακες μέσης τάσης, μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής, διακοπές υψηλών τάσεων) τα μονωτικά υλικά εξετάζονται και ως προς την μηχανική τους αντοχή σε δυνάμεις ηλεκτρικής προέλευσης, όπως αυτές αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια χειρισμών ή ενός βραχυκυκλώματος. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να γίνουν αιτία καταστροφής της κατασκευής, όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή κατά το βραχυκύκλωμα.

Η μόνωση π.χ. ενός διακόπτη υψηλής τάσης δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης, προς τη δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου, όταν η επιδίωξη αυτή δεν συνδυάζεται με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, που θα εξασφαλίζει την ικανότητα μόνωσης μέχρι να διακοπεί το βραχυκύκλωμα από τα μέσα προστασίας του δικτύου.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η καταπόνηση που έχουν υποστεί οι ζυγοί ενός πίνακα μετά από τριφασικό βραχυκύκλωμα.



Σχήμα 1.1-4 : Παραμόρφωση των ζυγών ενός πίνακα κατά τη δοκιμή υπό τριφασικό βραχυκύκλωμα.

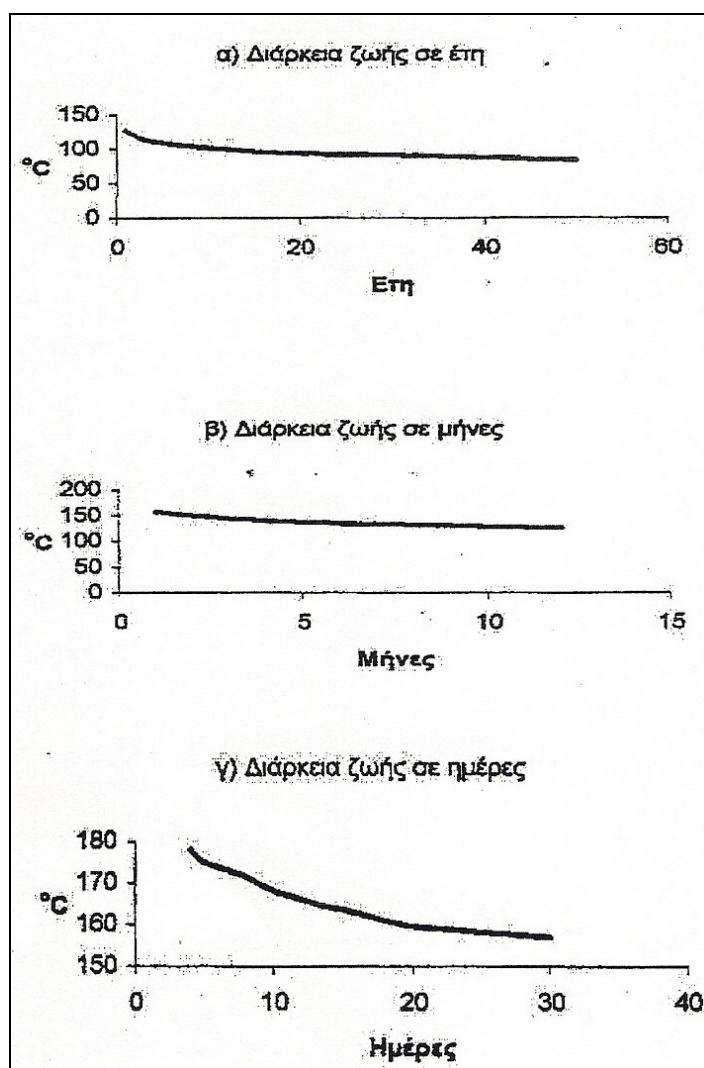
Στα κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών υλικών συγκαταλέγεται και ο **συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ)**. Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις περιοχές όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως π.χ. ανομοιογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών , ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο μονωτικό λάδι, παρουσία υγρασίας στην περίπτωση αέριου μονωτικού). Γενικά ισχύει ο κανόνας ότι όσο πιο καλός μονωτής είναι ένα υλικό τόσο καλύτερες είναι οι θερμομονωτικές του ιδιότητες. Στον πίνακα 1.1 -4 δίνονται τιμές του συντελεστής λ για ορισμένα μονωτικά υλικά.

Πίνακας 1.1-4 : Τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ορισμένων μονωτικών υλικών

Μονωτικό υλικό	Πάχος μόνωσης σε mm	λ σε $\frac{Wcm}{cm^2 grad}$
Πορσελάνη	0,5 ... 3	0,008 ... 0,015
Στεατίτης	0,5 ... 3	0,02 ... 0,026
Γυαλί	<1	0,0075 ... 0,012
Εύλο	<3	0,001 ... 0,002
Χαρτόνι	0,3 ... 1,5	0,003
Σκληρό ελαστικό	<3	0,001
Glimmer	<0,5	0,003
Χαρτί στο λάδι	<2	0,014 ... 0,03

Σε πολλές προδιαγραφές γίνεται διαβάθμιση των στερεών μονωτικών ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Για την επίδραση της θερμοκρασίας στη διάρκεια ζωής των στερεών μονωτικών υλικών έχουν γίνει αρκετές έρευνες με χρήσιμες πληροφορίες για την έγκαιρη συντήρηση -αντικατάσταση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού σε μια κατασκευή.

Στα γραφήματα (α), (β) και (γ) του σχήματος 1.1-5 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας στη μείωση του χρόνου ζωής του μονωτικού υλικού.



Σχήμα 1.1-5 : Διάρκεια ζωής του χαρτιού ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας

1.2 Η διάσπαση των αερίων μονωτικών

Η διάσπαση των αερίων μονωτικών για μικρά διάκενα ερμηνεύεται ικανοποιητικά από το νόμο του Paschen και τη θεωρία του Thowsend.

1.2.1 Θεωρία του Thowsend

Κατά την ηλεκτρική διάσπαση με τον μηχανισμό Townsend η πρώτη χιονοστιβάδα των ηλεκτρονίων ενεργοποιείται συνήθως από κάποιο εξωτερικό παράγοντα, όπως π.χ. προϋπάρχουσα ακτινοβολία η οποία έχει εισάγει ένα σχετικά μικρό αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων στον όγκο του αερίου μονωτικού. Οι διαδοχικοί ιονισμοί που προξενούνται από αυτή την χιονοστιβάδα ενεργοποιούν μία ή περισσότερες χιονοστιβάδες που ονομάζονται δευτερεύουσες, και οι οποίες με τη σειρά τους ενεργοποιούν άλλες δευτερεύουσες χιονοστιβάδες. Μία συνεχής αλυσίδα από χιονοστιβάδες δημιουργεί μία αυτοσυντηρούμενη ηλεκτρική εκκένωση (ηλεκτρικό τόξο).

Τα αρχικά ηλεκτρόνια που ενεργοποιούν τις δευτερεύουσες χιονοστιβάδες είναι δυνατόν να δημιουργηθούν από πολλές διαφορετικές αιτίες. Για παράδειγμα, μπορούν να δημιουργηθούν στην κάθοδο από προσκρούσεις θετικών ιόντων ή φωτονίων ή τέλος από προσκρούσεις μορίων που βρίσκονται σε μετασταθή κατάσταση και τα οποία έχουν ικανοποιητικά μεγάλο χρόνο ζωής και διαχέονται προς την κάθοδο πριν επανέλθουν στη θεμελιώδη τους κατάσταση. Λόγω της στατιστικής φύσεως του φαινομένου, το κάθε εξωτερικά δημιουργούμενο ηλεκτρόνιο δεν έχει την δυνατότητα να ενεργοποιήσει μία αυτοσυντηρούμενη ηλεκτρική εκκένωση. Όταν όμως το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο παραμένει αρκετά ισχυρό (δηλαδή 0,1 MV/cm) η έναρξη μιας αυτοσυντηρούμενης ηλεκτρικής εκκένωσης είναι πλέον καθαρά θέμα χρόνου.

Σαν αποτέλεσμα του γρήγορου και επαναλαμβανόμενου φαινομένου της χιονοστιβάδας ο αριθμός των φορτισμένων σωματιδίων αυξάνει με το χρόνο και η περαιτέρω εξέλιξη του φαινομένου ελέγχεται από το "χωρικό πεδίο", το οποίο ανά πάσα στιγμή καθορίζεται από τη συγκεκριμένη θέση που καταλαμβάνουν τα φορτισμένα σωματίδια μέσα στον όγκο του αερίου μονωτικού. Για ένα αρχικά ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, η εισαγωγή των ευκίνητων ηλεκτρικών φορτίων συνήθως καταλήγει σε μία ασταθή κατάσταση όπου το ρεύμα αυξάνει πολύ γρήγορα ενώ η εφαρμοζόμενη τάση σταδιακά καταρρέει (αρνητική διαφορική αντίσταση). Όταν το πεδίο γύρω από τα ηλεκτρόδια γίνει κατά τόπους πολύ ισχυρό, (έντονα ανομοιογενές πεδίο) τότε τα συσσωρευμένα ιόντα γύρω από τα μεταλλικά ηλεκτρόδια δημιουργούν ένα είδος ηλεκτροστατικής θωράκισης και ενδέχεται να αναστείλουν την εμφάνιση της αυτοσυντηρούμενης ηλεκτρικής εκκένωσης ή ακόμα και να προξενήσουν σβέση

σε μία ήδη υπάρχουσα. Στην περίπτωση αυτή, η προκύπτουσα εκκένωση χαρακτηρίζεται ως στεματοειδής και το συνολικό ρεύμα που την χαρακτηρίζει να είναι είτε παλμικής είτε συνεχούς μορφής με μέση τιμή εντάσεως που ενδέχεται να φθάσει σημαντικά ποσοστά του ενός ampere.

1.2.2 Ο νόμος του Paschen

- *Χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων χωρίς τον μηχανισμό ανασύνδεσης*

Για την περίπτωση ιονισμού με κρούσεις ορίζουμε τον συντελεστή α έτσι ώστε, όταν μια χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων εξελίσσεται στο μήκος της διαδρομής της κατά το στοιχειώδες διάστημα dx , ο αριθμός των ιονισμών με κρούσεις ανά ηλεκτρόνιο να είναι (αdx) . Αν η χιονοστιβάδα περιλαμβάνει $n_e(x)$ ηλεκτρόνια στο σημείο x , τότε ο αριθμός αυτός αυξάνει κατά $dn_e(x)$ καθώς η χιονοστιβάδα εξελίσσεται από το σημείο x στο σημείο $(x+dx)$, επομένως :

$$dn_e(x) = n_e(x) \alpha dx \quad (1.2-1)$$

Αν η χιονοστιβάδα έχει ως αφετηρία το σημείο $x=0$ τότε ο αριθμός των ηλεκτρονίων που θα περιλαμβάνει όταν φθάσει στο σημείο $x=s$ θα παρέχεται με τροποποίηση και ολοκλήρωση της σχέσης 1.2 -1.

$$n_e(s) = n_e(0) \exp \int_0^s \alpha dx \quad (1.2-2)$$

Θεωρώντας $s=d$ το μήκος του διάκενου μεταξύ της ανόδου και της καθόδου, τότε θα ισχύει : $n_e(0) = n_0$ και $n_e(d) = M n_0$. Έτσι η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$M = \exp \int_0^d \alpha dx \quad (1.2-3)$$

Στην περίπτωση που το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι ομογενές, η σχέση 1.2-4 γίνεται :

$$M = \exp (\alpha d) \quad (1.2-4)$$

- *Χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων με μηχανισμό ανασύνδεσης*

Στην περίπτωση αυτή γίνεται η παραδοχή ότι σχηματίζονται μόνο ευσταθή αρνητικά ιόντα, δηλαδή δεν παρουσιάζονται φαινόμενα αποσύνδεσης μεταξύ των ιόντων αυτών.

Κατ' αναλογία προς τον συντελεστή α ορίζεται και ο συντελεστής ανασύνδεσης n . Κάθε σύγκρουση που προξενεί ιονισμό τείνει να αυξήσει τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά ένα, ενώ κάθε σύγκρουση που καταλήγει σε ανασύνδεση οδηγεί στην μείωση του αριθμού αυτών επίσης κατά ένα. Όπως και για τη σχέση 1.2 -1, έχουμε:

$$dn_e(x) = n_e(x) \alpha^* dx \quad (1.2-5)$$

όπου $\alpha^* = \alpha - n$

Ανάλογα με τη σχέση 1.2 -2, θεωρώντας ότι $s = d$, για την γενική περίπτωση θα έχουμε:

$$n_e(d) = n_e(0) \exp \int_0^d \alpha^* dx \quad (1.2-6)$$

ενώ για την περίπτωση ομογενούς πεδίου θα έχουμε:

$$n_e(d) = n_e(0) \exp(\alpha^* d) \quad (1.2 -7)$$

Προκειμένου να συνεκτιμηθεί ο παράγοντας M , θα πρέπει να εξετασθεί ο συνολικός αριθμός των ηλεκτρικών φορτίων που συλλέγονται από την άνοδο (ελεύθερα ηλεκτρόνια και αρνητικά ιόντα). Για την περίπτωση ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου καταλήγουμε σε μία σχέση της μορφής:

$$M = \alpha / \alpha^* \exp[(\alpha^* d) - (n / \alpha^*)] \quad (1.2-8)$$

Για δεδομένο αέριο, η τιμή του συντελεστή α πρέπει προφανώς να εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι εάν δεχθούμε ότι ο ιονισμός με κρούση περιλαμβάνει μόνον δύο σωματίδια, τότε η ποσότητα (α/N) θα είναι μόνον συνάρτηση του (E/N) , όπου E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και N η πυκνότητα του αερίου.

Για ένα αέριο σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, στο οποίο δεν λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της ανασύνδεσης, μπορούμε να συνδυάσουμε τις σχέσεις 1.2 -7 και 1.2 -8 και να γράψουμε το κριτήριο για την ηλεκτρική διάσπαση ως εξής:

$$\gamma [\exp(\alpha d) - 1] = 1 \quad (1.2-9)$$

Γράφοντας:

$$\alpha/N = f(E/N) \quad (1.2 -10)$$

και εκφράζοντας τον συντελεστή γ ως συνάρτηση του λογού (E/N) , δηλαδή:

$$\gamma = g(E/N) \quad (1.2 -11)$$

τότε, το κριτήριο για την ηλεκτρική διάσπαση γίνεται:

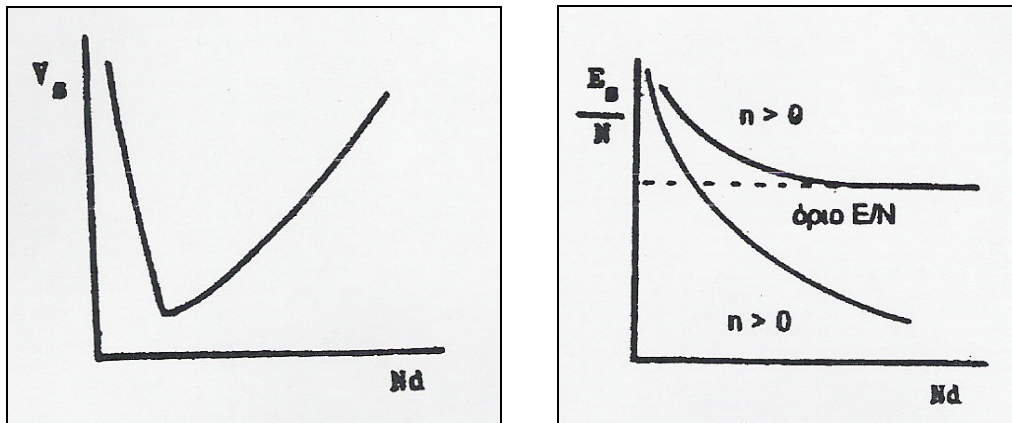
$$g(V_s / Nd) \{ \exp[Nd f(V_s / Nd)] - 1 \} = 1 \quad (1.2 -12)$$

όπου V_s είναι η εφαρμοζόμενη τάση κατά την ηλεκτρική διάσπαση.

Η συμβολή της σχέσης 1.2 -4 στην περιγραφή της διάσπασης των αερίων μονωτικών υλικών εκφράζεται ως εξής: για οποιαδήποτε τιμή του γινομένου Nd υπάρχει μία μόνο τιμή της τάσης V_s που ικανοποιεί το κριτήριο. Με άλλα λόγια, η τάση της ηλεκτρικής διάσπασης V_s εξαρτάται αποκλειστικά από την πυκνότητα του αερίου και το μήκος του διάκενου. Αυτός είναι ο **νόμος του Paschen**, ο οποίος ισχύει επίσης και για αέρια υλικά στα οποία υπάρχουν και φαινόμενα ανασύνδεσης.

Η τάση διάσπασης για αέρια εντός ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να παρασταθεί σε ένα διάγραμμα $V_s - Nd$. Αυτό το διάγραμμα λέγεται καμπύλη του

Paschen και έχει τη γενική μορφή που φαίνεται στο σχήμα 1.2 -1 (α). Αφού κάθε τιμή του Nd παρέχει μία μοναδική τιμή τη τάσης V_s , θα αντιστοιχεί επίσης και σε μία μοναδική τιμή της ποσότητας (V_s/Nd). Αυτή η ποσότητα είναι ίση με E/N (όπου E_s η ένταση του πεδίου κατά την ηλεκτρική διάσπαση) και η καμπύλη Paschen μπορεί ισοδύναμα να παρασταθεί σε ένα διάγραμμα $E_s/N - Nd$. Το διάγραμμα Paschen αυτή τη φορά θα έχει τη μορφή του σχήματος 1.2 -1 (β). Εδώ η περίπτωση των αερίων με φαινόμενα ανασύνδεσης διακρίνεται με την εμφάνιση μιας τιμής E/N κάτω από την οποία η ηλεκτρική διάσπαση είναι αδύνατη για ένα οποιαδήποτε πεπερασμένο διάκενο.



Σχήμα 1.2-1 : Μορφές της καμπύλης Paschen

Το όριο E/N υπάρχει στα αέρια με φαινόμενα ανασύνδεσης επειδή υπάρχει μία τιμή του λόγου αυτού, κάτω από την οποία η διαδικασία της ανασύνδεσης επικρατεί της διαδικασίας του ιονισμού με κρούσεις, με αποτέλεσμα ο σχηματισμός της χιονοστιβάδας να είναι αδύνατος. Σε ένα αέριο το οποίο σχηματίζει μόνο ευσταθή αρνητικά ιόντα, το όριο E/N αντιστοιχεί στην τιμή E/N για την οποία ισχύει $\alpha = \pi$.

Σε ένα ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο η ηλεκτρική εκκένωση γίνεται αυτοσυντηρούμενη για μία τιμή της τάσης V_{si} , και μπορεί να καταλήξει είτε σε ολοκληρωτική διάσπαση είτε σε στεματοειδής εκκένωση. Εδώ ο νόμος του Paschen θα πρέπει να αντικατασταθεί με μία πιο γενική έκφραση, την αρχή της ομοιομορφίας, σύμφωνα με την οποία η τάση V_{si} είναι συνάρτηση του όρου Nd υπό την προϋπόθεση ότι οι μεταβολές σε απόσταση d συνοδεύονται από ανάλογες μεταβολές για όλες τις άλλες θέσεις του διάκενου.

Στις περιπτώσεις που η ανομοιογένεια του πεδίου είναι σημαντική, η έναρξη της αυτοσυντηρούμενης εκκένωσης καθορίζεται από γεγονότα που λαμβάνουν χώρα σε μια μικρή περιοχή του χώρου στην οποία τυγχάνει η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου να είναι ισχυρότερη. Στις περιπτώσεις αυτές, ο νόμος του Paschen μπορεί να θεωρηθεί μόνον σαν μια χρήσιμη προσεγγιστική σχέση στην οποία υπεισέρχεται το μέγεθος E_{si} . Το οποίο είναι συνάρτηση του παράγοντα Nr , όπου E_{si} είναι η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης στο διάκενο όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι V_{si} και r είναι η επιφανειακή ακτίνα καμπυλότητας του ηλεκτροδίου στο σημείο που εμφανίζει την ισχυρότερη ένταση ηλεκτρικού πεδίου. Τα συμπεράσματα αυτά πηγάζουν από την αρχή της ομοιομορφίας και ισχύουν μόνο όταν αλλαγές στην τιμή του r συνοδεύονται από ανάλογες μεταβολές σε όλες τις άλλες διαστάσεις του διάκενου.

1.3 Γήρανση και διάσπαση του ηλεκτρομονωτικού ελαίου

Τα υγρά μονωτικά υλικά έχουν αρκετά μεγάλη διηλεκτρική αντοχή συγκρινόμενα με τα αέρια σε ατμοσφαιρική πίεση. Έτσι ενώ η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι 21 kV/cm, η διηλεκτρική αντοχή του λαδιού που χρησιμοποιείται στους μετασχηματιστές, είναι 60...200 kV/cm. Η σημασία των υγρών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές είναι μεγάλη διότι έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

α) Μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα να διευκολύνουν την απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας λόγω των απωλειών Joule. Στους μετασχηματιστές εφαρμόζεται συνήθως η κυκλοφορία μονωτικού ορυκτέλαιου ώστε να επιτυγχάνεται ψύξη των τυλιγμάτων. Πάντως η θερμότητα και οι εκκενώσεις προκαλούν αλλοιώσεις στο ορυκτέλαιο, που συνοδεύονται με την έκλυση αερίων, όπως το υδρογόνο και το μεθάνιο, τα οποία μπορεί να σχηματίσουν εκρηκτικά μίγματα με τον αέρα.

β) Ο συνδυασμός τους με στερεά μονωτικά δεν επιτρέπει την ύπαρξη αέρα, ο οποίος προκαλεί βλάβες στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών και επιπλέον οξειδώνει το υγρό μονωτικό. Αυτό επιτυγχάνεται όταν η πλήρωση του χώρου, που καταλαμβάνει το υγρό μονωτικό γίνεται υπό συνθήκες κενού σε ορισμένη θερμοκρασία. Τυπικό παράδειγμα της διαδικασίας αυτής είναι η πλήρωση των δοχείων των μετασχηματιστών υψηλών τάσεων με λάδι.

Το μονωτικό λάδι: Το κυρίως χρησιμοποιούμενο μονωτικό υγρό, σε μετασχηματιστές, καλώδια, διακόπτες και πυκνωτές, είναι το μονωτικό λάδι. Στις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται είτε ορυκτέλαια είτε συνθετικά μονωτικά λάδια ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις.

Τα ζωικά έλαια δεν είναι κατάλληλα για ηλεκτρολογικές εφαρμογές διότι είτε είναι μεγάλου ιξώδους, είτε τείνουν να σχηματίσουν λιπαρά οξέα, τα οποία προσβάλλουν ινώδη υλικά, όπως το χαρτί. Αλλά και τα φυτικά έλαια (κυρίως ρητινώδη) δεν είναι κατάλληλα διότι παρουσιάζουν αστάθεια στην ποιότητά τους, και όπως συμβαίνει και με τα ζωικά έλαια, τείνουν να σχηματίσουν καταστροφικά λιπαρά οξέα. Κατάλληλα για ηλεκτροτεχνικούς σκοπούς είναι τα ορυκτέλαια, τα οποία προκύπτουν ως κλάσμα της απόσταξης του πετρελαίου, και η χημική τους σύσταση διαφέρει, ανάλογα με την προέλευση του πετρελαίου.

Για την αποφυγή των κινδύνων έκρηξης (από τη συγκέντρωση των αερίων προϊόντων της αλλοίωσης του ορυκτέλαιου) ή ανάφλεξης του λαδιού και των προϊόντων του, χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις συνθετικά μονωτικά λάδια που είναι αρκετά σταθερότερα στην επίδραση της θερμότητας και των εκκενώσεων. Συνήθως είναι χλωριωμένα παράγωγα του διφαινυλίου ($C_6H_5-C_6H_5$) και κυκλοφορούν στο εμπόριο με διάφορες ονομασίες, όπως Clophene, Aroclor, Askarel, Pyranol, Inerteen, Clorextol, Permitol, Afcolin κλπ. Τα μονωτικά αυτά έχουν διπλάσια ως τριπλάσια διηλεκτρική αντοχή συγκρινόμενα με το ορυκτέλαιο. Συνήθως χαρακτηρίζονται ως «άκαυστα έλαια» κάτι το οποίο δεν είναι απόλυτο. Η χρήση των χλωριωμένων υδρογονανθράκων τα τελευταία χρόνια τείνει να εξαιρεθεί διότι περιέχουν τοξικές ουσίες οι οποίες είναι λίαν επικίνδυνες για το προσωπικό συντήρησης των διαφόρων ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων. Επιπλέον δεν έχει

καταστεί εφικτή η καταστροφή αυτών με μια διαδικασία ακίνδυνη για το προσωπικό και φιλική προς το περιβάλλον .

Μια άλλη κατηγορία μονωτικών υγρών είναι οι σιλικονούχοι υδρογονάνθρακες. Πρόκειται για υδρογονάνθρακες που περιέχουν πυρίτιο και χαρακτηρίζονται από υψηλό σημείο αναφλέξεως. Η εφαρμογή τους όμως είναι περιορισμένη λόγω του μεγάλου κόστους παραγωγής τους.

Τεχνικά χαρακτηριστικά των υγρών μονωτικών υλικών: Κατά την εκλογή ενός μονωτικού ελαίου σε μια ηλεκτροτεχνική εφαρμογή θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα κάτωθι χαρακτηριστικά :

α) Ιξώδες

Το ιξώδες προσδιορίζει την ικανότητα ψύξεως και μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας. Για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας σε έναν μετασχηματιστή, όπου υπάρχουν μικρά διάκενα μεταξύ των τυλιγμάτων του, είναι απαραίτητο το μονωτικό λάδι να χαρακτηρίζεται από χαμηλό ιξώδες, έτσι ώστε να ρέει ευκολότερα ανάμεσα στα τυλίγματα.

β) Μονωτική ικανότητα

Σχεδόν όλα τα μονωτικά λάδια στο σύνολό τους είναι κάλοι μονωτές. Εντούτοις, σε μεγάλο βαθμό ενδιαφέρει η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του ελαίου, λόγω της παρουσίας υγρασίας, η οποία θα πρέπει να αποφεύγεται αυστηρώς. Μια πολύ μικρή ποσότητα υγρασίας, εντός του ελαίου, μειώνει σε μεγάλο βαθμό την αξία του μονωτικού, ενώ η παρουσία σκόνης και μικρών ινών τείνει να δημιουργήσει οδούς μεγάλης αγωγιμότητας.

γ) Σημείο αναφλέξεως

Είναι η θερμοκρασία στην οποία το μονωτικό έλαιο, θερμαινόμενο εντός ειδικής συσκευής (Pensky -Martens), αναδίδει ατμούς, σε ποσότητα τέτοια ώστε αναμειγνύομενο με τον ατμοσφαιρικό αέρα να σχηματίζουν εύφλεκτο μίγμα και με την παρουσία σπινθήρα να αναφλέγονται αυτοστιγμεί. Για λόγους ασφαλείας και αξιοπιστίας του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού το σημείο αναφλέξεως θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο προς 130°C.

δ) Σημείο καύσεως

Είναι η θερμοκρασία στην οποία το έλαιο, θερμαινόμενο υπό κανονικές συνθήκες δοκιμής, αναδίδει ατμούς επάρκειας τέτοιας, ώστε να αναφλεγεί και να συνεχίσει καιγόμενο. Η θερμοκρασία αυτή είναι περίπου 25% υψηλότερα του σημείου αναφλέξεως.

ε) Καθαρότητα

Το έλαιο δεν πρέπει να περιλαμβάνει προσμίξεις όπως είναι το θείο και ενώσεις αυτού. Η παρουσία θείου προκαλεί διάβρωση των μεταλλικών τμημάτων και επιταχύνει την παραγωγή ιζήματος (λάσπης).

στ) Σχηματισμός ιζήματος

Η ευκολία με την οποία σχηματίζεται ίζημα αποτελεί μεγάλης σημασίας χαρακτηριστικό, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μετασχηματιστών . Πρόκειται

για τον βραδύ σχηματισμό ημιστερεών υδρογονανθράκων, ενίοτε οξειδωμένης μορφής, οι οποίοι επικάθονται επί των τυλιγμάτων και των τοιχωμάτων του δοχείου του μετασχηματιστή. Ο σχηματισμός του ιζήματος συνδέεται άμεσα με την θερμοκρασία και την οξείδωση του λαδιού. Το ίζημα σχηματιζόμενο, καθιστά το σύνολο του μετασχηματιστή θερμότερο, όσο δε αυξάνει η θερμοκρασία μεταβάλλει προς το χειρότερο την κατάσταση από απόψεως ιζήματος, έως ότου αποφραχθούν τελικώς οι σωληνώσεις ψύξεως και ο μετασχηματιστής καταστεί ακατάλληλος προς χρήση, λόγω υπερθέρμανσης. Η εμπειρία δείχνει ότι το ίζημα σχηματίζεται ταχύτερα εκεί που υπάρχουν στιλπνές επιφάνειες χαλκού.

ζ) Οξύτητα

Μεταξύ των παραγόμενων προϊόντων οξείδωσης του λαδιού είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), πτητικά οργανικά και ανόργανα οξέα διαλυτά στο νερό και νερό. Τα παραπάνω προϊόντα σε συνδυασμό δύναται να προσβάλουν και να διαβρώσουν τα μεταλλικά τμήματα του μετασχηματιστή. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν ειδικές διατάξεις που εμποδίζουν την είσοδο του υγρού αέρα στο δοχείο λαδιού και επιπλέον απομακρύνουν τα ανεπιθύμητα προϊόντα οξείδωσης.

η) Δυνατότητα εμπλουτισμού του ελαίου

Η αλλοίωση του ελαίου κατά τη διάρκεια της χρησιμοποίησής του είναι δυνατόν να επιβραδυνθεί με εμπλουτισμό του, κατά την κατεργασία του, με αντιοξειδωτικά μέσα (oxidation inhibitors). Τα αντιοξειδωτικά αυτά, τα οποία συνήθως είναι τύπου φαινόλης ή αμίνης, μετατρέπουν τα εις το έλαιο σχηματισμένα μοριακά συγκροτήματα σε αδρανή μόρια, καταναλισκόμενα βαθμιαία κατά τη λειτουργία. Οι αντιοξειδωτικές ουσίες εμπλουτισμού αυξάνουν σημαντικά την διάρκεια χρησιμοποίησεως του ελαίου, αφού ο σχηματισμός οξέων και ιζήματος είναι κατ' ουσία μηδενικός.

Πίνακας 1.3-1 : Τεχνικές ιδιότητες ορισμένων υγρών μονωτικών υλικών

	Πυκνότητα gr/cm ³	Ειδική αντίσταση Ω cm	Διηλεκτρική αντοχή KV/cm	Διηλεκτρική σταθερά	Συντελεστής απωλειών	Τημέριο ανάφλεξης °C	Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία
Ορυκτέλαιο	<0,89	10 ¹⁴	110	2,2	10 ⁻³	300	90 °C
Βαζελίνη (>55°C)	0,90	10 ¹⁵	300	2,2	10 ⁻⁴	130	90 °C
Πολυισοβουτυλένιο	0,85	10 ¹⁴	150	2,2	10 ⁻³	200	85 °C
Έλαιο σιλικόνης	0,96	10 ¹⁵	100	2,8	10 ⁻⁴	300	150 °C

Προκειμένου να διατηρηθεί η μονωτική ικανότητα του λαδιού σε ικανοποιητικά επίπεδα κατά περίπτωση, κρίνεται αναγκαίος ο περιοδικός έλεγχος αυτού, έτσι ώστε να αποφευχθούν ατυχήματα και καταστροφή του εξοπλισμού. Στην περίπτωση που διαπιστωθεί στο μονωτικό λάδι υπάρχουν προσμίξεις, αέρας, υγρασία ή μικροσωματίδια, τότε είναι δυνατή η συμβατική αναγέννηση του λαδιού. Με τον όρο συμβατική αναγέννηση εννοούμε τον μηχανικό καθαρισμό του λαδιού με διύλιση, την αφυδάτωση (ξήρανση) σε κενό, την απαέρωση σε δοχείο κενού.

Κατά τη διύλιση απομακρύνονται προϊόντα γήρανσης, τα οποία εμφανίζονται υπό μορφή ιζήματος, ίνες μονωτικών υλικών και νερό. Κατά κανόνα το μονωτικό λάδι θα πρέπει να διυλίζεται εντελώς ψυχρό διότι ορισμένα προϊόντα γήρανσης και το νερό διαλύονται εύκολα στο θερμό λάδι.

Η αφυδάτωση υπό κενό και η απαέρωση λαμβάνουν χώρα σε ειδικές συσκευές κενού, έτσι ώστε να αποκλειστεί η πιθανότητα επαφής του λαδιού με τον αέρα και διάφορα σωματίδια.

Γήρανση και διάσπαση του ηλεκτρομονωτικού ελαίου: Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης του ηλεκτρομονωτικού ελαίου θεωρείται ότι οφείλονται στους παράγοντες που αναφέρονται στην παράγραφο 1.4 για τα στερεά μονωτικά. Εκτός από αυτό στη γήρανση και διάσπαση του ηλεκτρομονωτικού ελαίου συμμετέχουν τα αιωρούμενα σε αυτά ξένα σωματίδια (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) γιατί σχηματίζουν υπό την επίδραση του πεδίου αγώγιμες γέφυρες. Η διηλεκτρική αντοχή του ηλεκτρομονωτικού ελαίου μειώνεται απότομα με την αύξηση του ποσοστού νερού (υγρασίας) σε αυτό.

1.4 Φαινόμενα πριν και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών

Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στα στερεά βιομηχανικά μονωτικά υλικά ερμηνεύονται με μεθόδους, οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο θεωρίες:

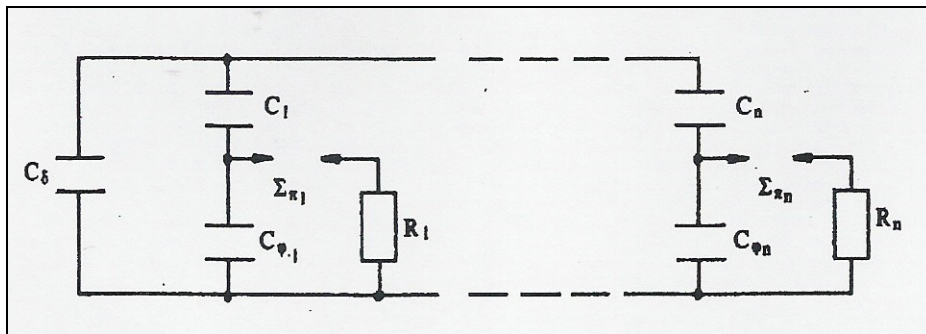
- Τη **μακροσκοπική θεωρία της διάσπασης**, και
- Τη **κβαντομηχανική θεωρία της διάσπασης**.

Σύμφωνα με την μακροσκοπική θεωρία, τα αποτελέσματα των ερευνών αποσκοπούν (ή βασίζονται) σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα από γραμμικά στοιχεία, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με τις οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση φωτεινών φαινομένων και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού. Κατά τη θεωρία αυτή, η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών οφείλεται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες:

- τις απώλειες Joule
- τις μερικές εκκενώσεις
- τις δυνάμεις Coulomb, και
- την θερμότητα του περιβάλλοντος.

Οι παραπάνω παράγοντες υποβοηθούνται βέβαια στην πράξη από διάφορες τοπικές συνθήκες λειτουργίας έτσι, ώστε η γήρανση και η διάσπαση του στερεού μονωτικού να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμα τους.

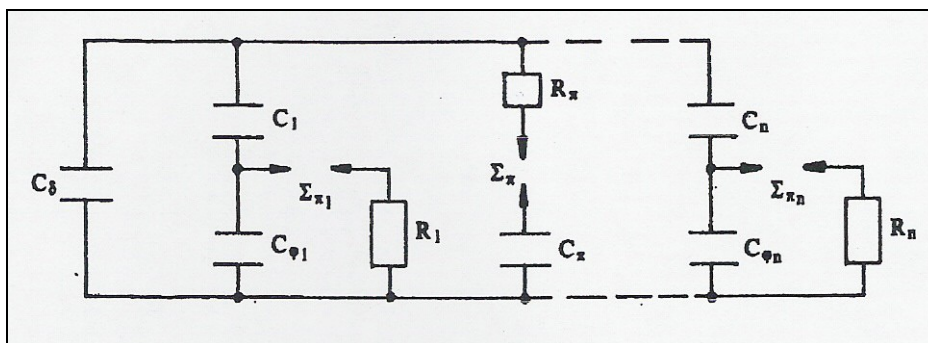
Ως σημαντικότερος παράγοντας γήρανσης του υλικού θεωρούνται οι μερικές εκκενώσεις, οι οποίες διακρίνονται σε εσωτερικές και εξωτερικές. Ένα από τα περισσότερο γνωστά ισοδύναμα κυκλώματα για τις μερικές εκκενώσεις, κατά την παραπάνω μακροσκοπική θεωρία, φαίνεται στο σχήμα 1.4 -1. Σύμφωνα με αυτό η διάσπαση των επί μέρους θέσεων διαταραχής ($C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση των πυκνωτών $C_1 \dots C_n$, οι οποίοι συμβολίζουν το υπόλοιπο υγιές τμήμα του υλικού.



Σχήμα 1.4-1: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Germant και Philipoff.

- C_{δ} : χωρητικότητα της διάταξης
- $C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$: φυσαλίδες αερίων και άλλες ανομοιογένειες
- $\Sigma\pi_1 \dots \Sigma\pi_n$: σπινθηριστές που συμβολίζουν τη διάσπαση των $C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$
- $R_1 \dots R_n$: αντίσταση του τόξου κατά τη διάσπαση $C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$
- $C_1 \dots C_n$: πυκνωτές που συμβολίζουν το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού

Από τον συνδυασμό ηλεκτρικών μετρήσεων και οπτικών παρατηρήσεων, κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών (κυρίως φορτίο λόγω μερικών εκκενώσεων, μετρήσεις ρεύματος, εκδήλωση επιφανειακού δένδριτη και εικόνα επιφανειακών διαταραχών), έχουν προταθεί διάφορα ισοδύναμα κυκλώματα, ώστε να αποδίδονται από αυτά και άλλοι παράγοντες γήρανσης και διάσπασης. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σχήμα 1.4 -2 είναι μια βελτίωση του προηγούμενου, γιατί διευκολύνει στη διάκριση μεταξύ της διάσπασης λόγω μερικών εκκενώσεων (**ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση**) και εκείνης από τις δυνάμεις Coulomb (**ηλεκτρομηχανική διάσπαση**: δένδροειδής ή υπό μορφή οχετού), σε μία ιδιαίτερα πολωμένη περιοχή του υλικού (πυκνωτής C_{π}). Η αντίσταση R_{π} και ο σπινθηριστής $\Sigma\pi$ συμβολίζουν τον οχετό διάσπασης.



Σχήμα 1.4-2 : Ισοδύναμο κύκλωμα για την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και τη διάσπαση λόγω των δυνάμεων Coulomb.

C_{π} : ιδιαίτερα πολωμένη περιοχή του υλικού

$\Sigma\pi$ και R_{π} : διαδρομή εκκένωσης λόγω διάσπασης του C_{π}

$C_{\delta}, C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}, \Sigma\pi 1 \dots \Sigma\pi_n, C_1 \dots C_n$ και $R_1 \dots R_n$ όπως στο σχήμα 4.5 -1

Εκτός από τις παραπάνω μορφές διάσπασης γίνεται διάκριση και σε άλλες δύο: τη **θερμική διάσπαση**, από τις απώλειες Joule και τη **θερμοχημική διάσπαση**, από τη μεγάλη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Το μικρής έντασης ρεύμα που διαρρέει το μονωτικό σώμα λόγω της αγωγιμότητας όγκου ή της επιφανειακής του αγωγιμότητας, κάτω από την επίδραση του επιβαλλόμενου πεδίου, η επαφή του με θερμά εξαρτήματα, και κυρίως η απορρόφηση ενέργειας με τους μηχανισμούς πόλωσης σε εναλλασσόμενα πεδία, μπορούν συχνά να προκαλέσουν μία σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας του. Στις συνθήκες αυτές διευκολύνεται ο βομβαρδισμός των ατόμων από τα επιταχυνόμενα ελεύθερα ηλεκτρόνια και η διάσπαση πραγματοποιείται σε πολύ χαμηλότερη πεδιακή ένταση, σε σύγκριση με τις κανονικές συνθήκες ή το στατικό πεδίο. Αν δεν υπήρχε η θέρμανση από τους μηχανισμούς πόλωσης, θα έπρεπε η διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών υλικών σε εναλλασσόμενο πεδίο να είναι μεγαλύτερη από του συνεχούς πεδίου, αφού η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων προς κάθε κατεύθυνση διαρκεί μόνο στο μισό της περιόδου. Αντίθετα τα μονωτικά υλικά παρουσιάζουν αυξημένη διηλεκτρική αντοχή στις σύντομες κρουστικές τάσεις, σε σύγκριση με το συνεχές πεδίο, διότι έτσι παρέχεται αρκετός χρόνος για την απαλλαγή του σώματος από τη θερμότητα, που θα είχε προέλθει π.χ. από ένα ρεύμα διαρροής. Πάντως έχει παρατηρηθεί ότι η διηλεκτρική αντοχή των υλικών αυξάνει σε πολύ μεγάλες συχνότητες π.χ. πάνω από 1 MHz. Η αιτία δεν είναι μόνο ότι όσο μεγαλώνει η συχνότητα τόσο λιγότεροι είναι οι μηχανισμοί πόλωσης που διεγείρονται, με αποτέλεσμα να μειώνεται η θέρμανση του σώματος, αλλά επίσης διότι η ταχεία εναλλαγή του πεδίου εμποδίζει τη μετακίνηση των φορτισμένων σωματιδίων σε όλο το μήκος της διαδρομής διαμέσου του πάχους του μονωτικού σώματος.

Από πειράματα, που έχουν γίνει σε διάφορα στερεά μονωτικά, φαίνεται ότι η ενεργός τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη για την ηλεκτρομηχανική διάτρηση. Η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος προκαλεί μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, γιατί ενισχύεται ο ρόλος των υπολοίπων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και της ισχύος των μερικών εκκενώσεων).

Οι διάφορες μαθηματικές ερμηνείες της μακροσκοπικής θεωρίας βασίζονται κυρίως στη θερμοδυναμική σχέση:

$$P = P_a + C_o (d\theta/dt) \quad (1.4-1)$$

όπου:

P η ηλεκτρική ισχύς,

P_a η επαγόμενη θερμική ισχύς,
 C_o η θερμοχωρητικότητα του υλικού,
 θ η αύξηση της θερμοκρασίας και
 t ο χρόνος.

Η μεταβολή της ειδικής αγωγιμότητας του υλικού δίνεται από την σχέση:

$$\sigma = \sigma_o e^{\beta\theta} / (1 - \delta E)^2 \quad (1.4 - 2)$$

όπου:

σ_o η τιμή της ειδικής αγωγιμότητας προ της καταπόνησης,
 σ η τιμή της μετά την καταπόνηση,
 θ η αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού και
 E η πεδιακή ένταση.

Το β είναι ένας συντελεστής του υλικού ο οποίος εξαρτάται από την τιμή και την μορφή της τάσης, το χρόνο καταπόνησης, της συνθήκης του περιβάλλοντος και τη διάταξη των ηλεκτροδίων εφαρμογής της τάσης. Το δ είναι ένας συντελεστής του υλικού για την συμμετοχή των μερικών εκκενώσεων στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής και εξαρτάται από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν για τον συντελεστή β .

Με τη βοήθεια των παραπάνω σχέσεων μπορούν να διατυπωθούν μαθηματικές σχέσεις, τόσο για τις θεωρητικές μορφές διάσπασης όσο και για διάφορους συνδυασμούς τους. Αν και οι σχέσεις αυτές δεν εξυπηρετούν, χωρίς τη συμβολή πειραματικών αποτελεσμάτων, σε κάποιους υπολογισμούς, συμπληρώνουν την ερμηνεία των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης, που δίνονται από τα διάφορα ισοδύναμα κυκλώματα.

Στη κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως **η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων** (κυρίως ηλεκτρόνια). Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την ενέργεια Fermi, των ηλεκτροδίων διευκολύνει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για το μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η γήρανση και η διάσπαση, κατά τη θεωρία αυτή, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί ότι **το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες. Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές αρκετά μεγαλύτερες από 20 eV.** Καθοριστικός παράγοντας για τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 3,5...4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου περίπου 0,2 MV/cm.

Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0,5 MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση:

$$\sigma = \sigma_o e^{(-W/kT)} \quad (1.4-3)$$

όπου:

k η σταθερά Boltzmann,
 T η απόλυτη θερμοκρασία και

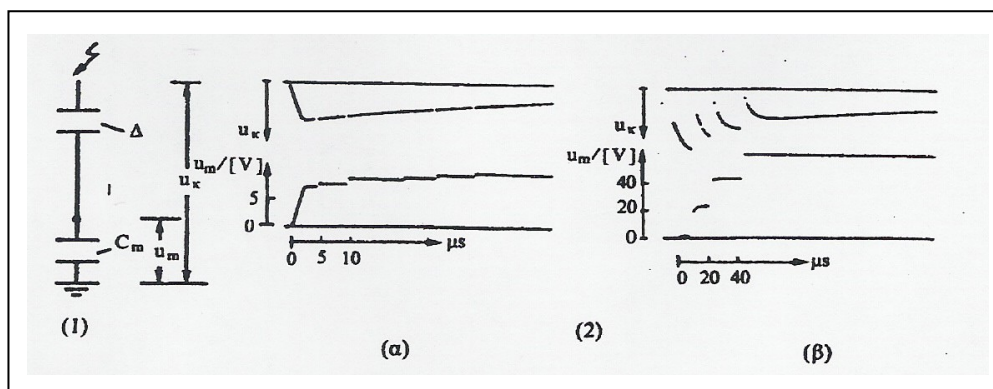
W η ενέργεια ενεργοποίησης των ηλεκτρονίων.

Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση (1.4 -3). 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**, λόγω της οποίας γίνεται η συλλογή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από τα ηλεκτρόδια υπό μορφή ομάδων . Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση τους στα ηλεκτρόδια. Για τον ιονισμό με κρούσεις στα στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά έχει αποδειχθεί ότι ισχύει η σχέση:

$$Q=Q_0 e^{A\left(\frac{E^2-E_0^2}{E_0}\right)} \quad (1.4-4)$$

όπου Q_0 είναι το παραγόμενο στο υλικό ηλεκτρικό φορτίο κατά την εκδήλωση ενός και μοναδικού άλματος άλματος δυναμικού σε τιμή πεδιακής έντασης E_0 , Q το παραγόμενο στο υλικό φορτίο σε τιμή πεδίου $E>E_0$ και A είναι ένας συντελεστής του υλικού που εξαρτάται από το χρόνο καταπόνησης και τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης.

Ένα τυπικό παράδειγμα της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης σε στερεά οργανικά μονωτικά φαίνεται στο σχήμα 1.4-3 όπου δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα, για τη γήρανση και τη διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου (παλμογράφημα α : γήρανση του βακελίτη, παλμογράφημα β : διάσπαση του Pertinax)

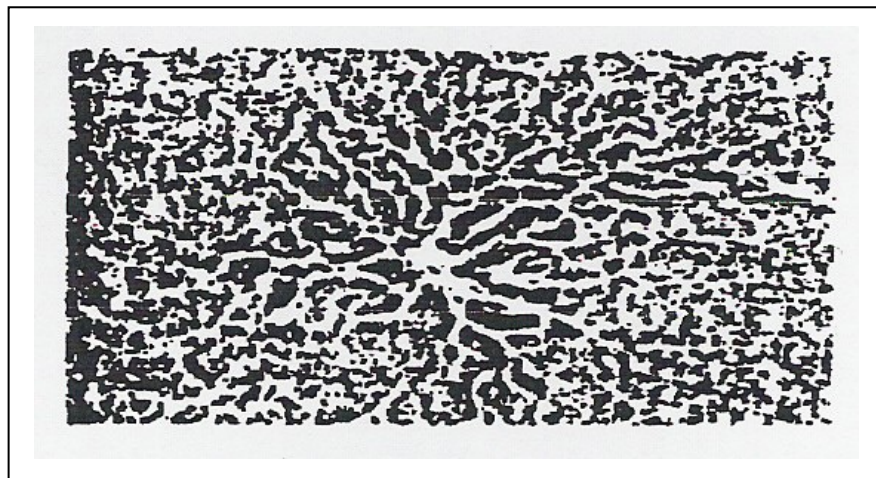


Σχήμα 1.4 -3 : Τυπικά παλμογραφήματα κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών.

- 1) απλοποιημένη διάταξη μέτρησης (U_k στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης, Δ δοκίμιο, U_m τάση στον πυκνωτή μέτρησης C_m)
- 2) Μετρήσεις με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 μs

- (α) γήρανση (τιμή πεδίου 1,11 MV/cm, $U_K = 77.5$ kV, $C_m = 210$ nF
υλικό: βακελίτης)
(β) διάτρηση (τιμή πεδίου 1,20 MV/cm, $U_K = 85,0$ kV, $C_m = 210$ nF
υλικό: pertinax)

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι, μετά από μια τιμή $U_K \sim 45$ kV (όπου U_K η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται κατά τη γήρανση επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται, στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 1.4 -4). Κατά τη διάτρηση δεν εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, αλλά ηλεκτρικό τόξο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η εικόνα, που παρουσιάζουν τα δοκίμια μετά τη διάτρηση, είναι μια μικρή τρύπα (μικρότερη από 1mm) πλησίον της ακίδας.



Σχήμα 1.4-4 : Αλλαγή της μοριακής δομής στην επιφάνεια του μονωτικού pertinax κατά την εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη (μετά από πολλές κρούσεις 10/200 μ s, μέγιστης τιμής 75 kV).

Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται από τις δύο θεωρίες, που προαναφέρθηκαν, ως ακολούθως:

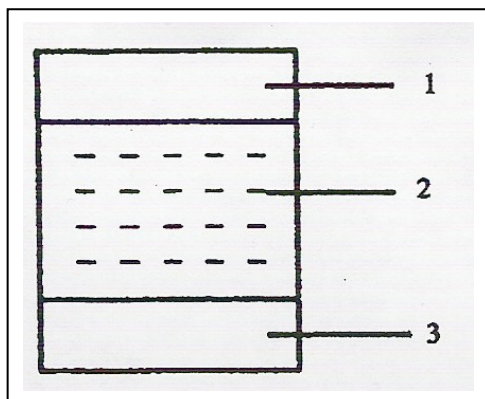
α) Μακροσκοπική ερμηνεία

Από το παλμογράφημα της γήρανσης (σχήμα 1.4-3, α) φαίνονται ότι εκδηλώνονται εσωτερικές και εξωτερικές μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού (στο μέτωπο και στην ουρά της κρουστικής τάσης αντίστοιχα), τα οποία προκαλούνται, κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4-1 (ή του σχήματος 1.4-2), από τη σταδιακή διάσπαση των πυκνωτών $C_{φ1} \dots C_{φn}$. Ο δενδρίτης μπορεί να ερμηνευτεί από τα παραπάνω ισοδύναμα κυκλώματα ως επέκταση του ίχνους της ακίδας μέχρι τις θέσεις διαταραχής, που διασπώνται. Η διάτρηση φαίνεται ότι συμβαίνει στη θέση διαταραχής, όπου η πεδιακή ένταση έχει τη μέγιστη τιμή της.

β) Κβαντομηχανική ερμηνεία

Κατά τη θεωρία αυτή ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και όχι ο διαχωρισμός των

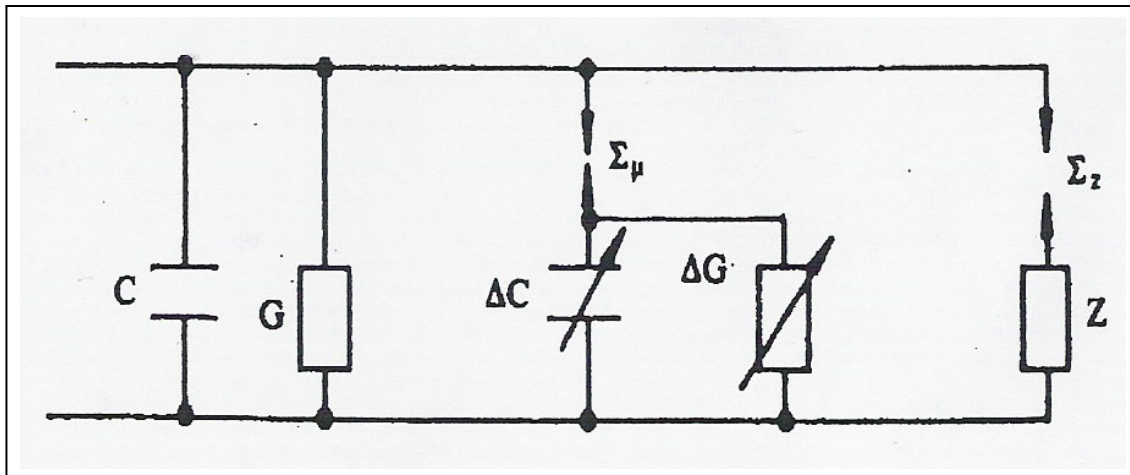
τελευταίων σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον C_m , ανά άλμα δυναμικού. Η τιμή αυτή για το πρώτο άλμα δυναμικού κατά το σχήμα 1.4 -3, είναι περίπου 0,56 eV κατά τη γήρανση και 21,5 eV κατά τη διάτρηση. Από τις τιμές αυτές φαίνεται ότι η γήρανση και η διάτρηση των δοκιμίων σχετίζονται με ακτινοβολίες, που δεν μπορούν να ανιχνευθούν με μακροσκοπικές μεθόδους. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι θέσεις διαταραχής (κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4 -1 ή του σχήματος 1.4 -2, οι πυκνωτές $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$ αντιστοιχούν σε ενεργειακές ζώνες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη του υλικού (σχήμα 1.4 -4)



Σχήμα 1.4-5 : Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού

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

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό, ότι για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση χρειάζεται συνδυασμός των δύο θεωριών, που προαναφέρθηκαν. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, το οποίο συνδυάζει τις παραπάνω θεωρίες δίνεται στο σχήμα 1.4 -6. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Germant-Philipoff (σχήμα 1.4 -1) όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων.



Σχήμα 1.4-6: Ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα

G: ιδανική αγωγιμότητα

ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω των μερικών εκκενώσεων

ΔG : αύξηση της αγωγιμότητας λόγω των μερικών εκκενώσεων

Z : αρνητική διαφορική αντίσταση

Σ_{μ} : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Σ_z : σπινθηριστής εκδήλωσης της Z

Αν υποθέσουμε ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει για κάποια τιμή του πεδίου E_{μ} , τότε τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο στερεό μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4 -5 ως ακολούθως:

- 1) Για $E < E_{\mu}$: η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δεν διασπώνται οι σπινθηριστές Σ_{μ} και Σ_z).
- 2) Για $E > E_{\mu}$: εκδήλωση μερικών εκκενώσεων (διασπάται ο Σ_{μ})
- 3) Για $E \gg E_{\mu}$: οι μερικές εκκενώσεις προκαλούν την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Το φάσμα της ακτινοβολίας, που εκπέμπεται, εξαρτάται από την τιμή E_{μ} . Για τιμές > 20 eV συμβαίνει η διάτρηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

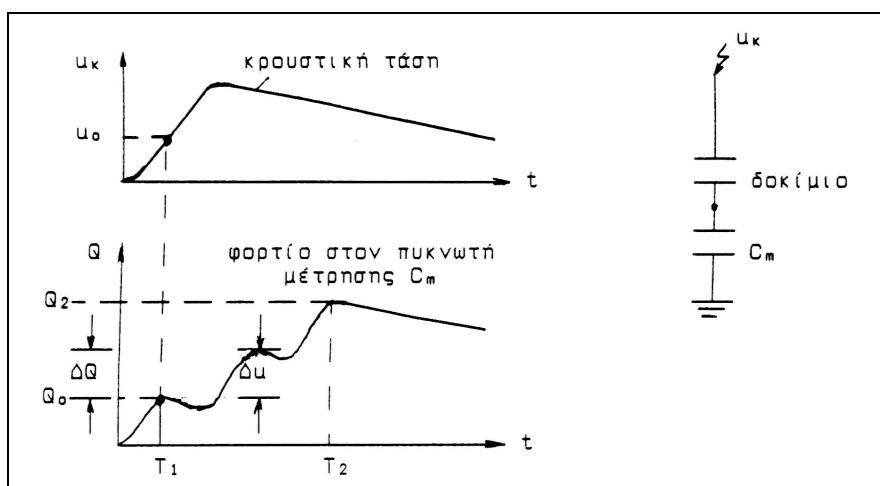
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

(το κεφ.2 της παρούσης διπλωματικής εργασίας
προέρχεται απο την βιβλιογραφία [1,2])

2.1 Πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων

Η μέτρηση των αλμάτων δυναμικού σε στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά υπό την επίδραση υψηλών τάσεων έχει δώσει τη δυνατότητα μελέτης των υλικών αυτών μέσω στατιστικών μετρήσεων. Η μέτρηση π.χ. του φορτίου έναρξης των μερικών εκκενώσεων Q_0 σε πενήντα δοκίμια ενός και του αυτού είδους υλικού, δίνει τη δυνατότητα του καθορισμού μιας μέσης τιμής του φορτίου αυτού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα στη σχέση (1.4-4) για τον υπολογισμό του φορτίου Q .

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων ... των κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού - ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 -1, για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Με ανάλογο τρόπο μπορούν να καθοριστούν και άλλα μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση των μονωτικών υλικών με διαφορετικές μορφές τάσης.

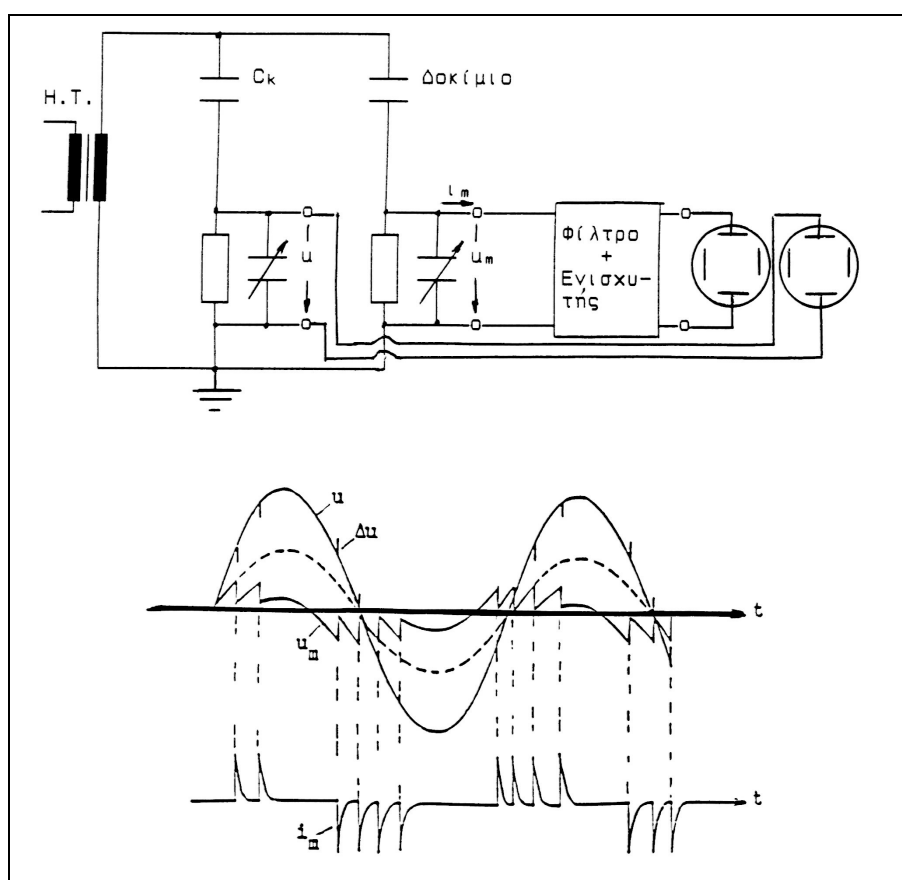


Σχήμα 2.1-1 : Παράδειγμα καθορισμού εννοιών για την μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά υλικά, υπό κρουστική τάση καταπόνησης.

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 στην επιφάνεια του μονωτικού.

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

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



Σχήμα 2.2-1 : Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω "ωμικού-χωρητικού" τετράπολου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz.

H.T. : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

C_k : Πυκνωτής υψηλής τάσης.

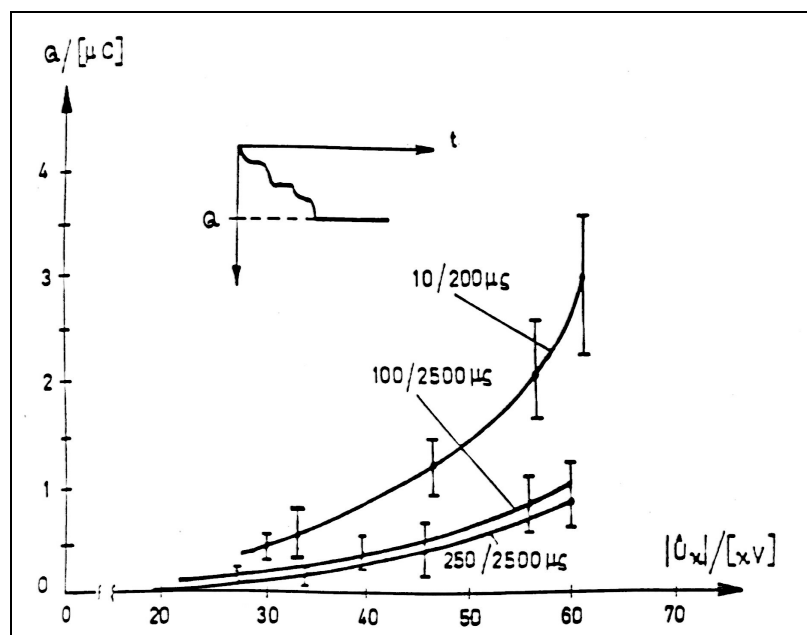
u : Στιγμιαία τιμή της εναλλασσόμενης τάσης (η οποία μετράται σε ένα ωμικό-χωρητικό τετράπολο).

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

I_m : Στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων.
 Δu : Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων.

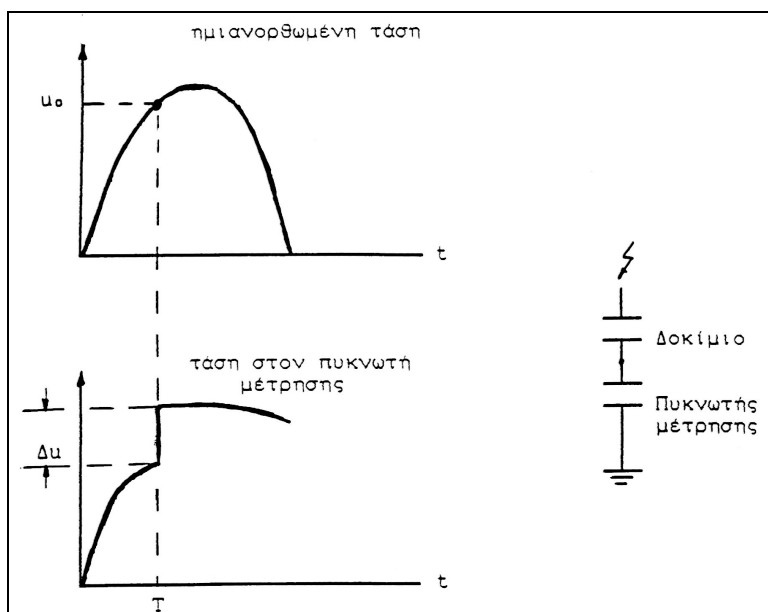
Τα παραπάνω σημαίνουν π.χ. για καταπονήσεις με κρουστικές τάσεις, ότι : οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης, ενώ οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις κατά τη διάρκεια της ουράς της κρουστικής τάσης.

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 2.2-4. Στον πίνακα 2.2-1 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$, από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που προαναφέρθηκε. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης 1,2/50μs) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.



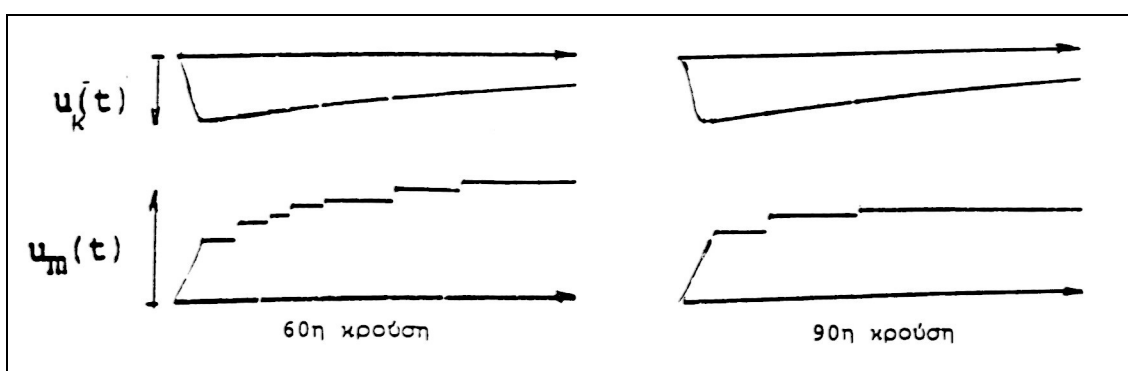
Σχήμα 2.2-2 : Παράδειγμα Καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

T_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.
 U_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).
 Δu : άλμα δυναμικού



Σχήμα 2.2-3 : Χαρακτηριστική $Q_2=f(\hat{U}_c)$ για τον βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα
 C_m : 1000nF



Σχήμα 2.2-4 : Άλματα δυναμικού κατά την 60^η και την 90^η κρούση στο pertinax (πάχους 2mm).

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

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

Πίνακας 2.2-1 : Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

Μορφή τάσης σε μs	Δενδρίτης	Εικόνα επιφανειακών διαταραχών	Άλματα Δυναμικού	Συμπεράσματα για τις μερικές εκκενώσεις
1,2/50	NAI	NAI	στην ουρά	εξωτερικές μερικές εκκενώσεις
10/200	NAI (αλλά μικρότερος από εκείνον κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50μs	NAI (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	OXI	OXI	στο μέτωπο	εσωτερικές μερικές εκκενώσεις

Μία άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, ως προς τον χρόνο εκδήλωσής τους (υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης), έχει βασιστεί σε χαρακτηριστικές $T_1=f(|\mathcal{E}_A|)$ και $T_2=f(|\mathcal{E}_A|)$ σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών. Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ο χρόνος έναρξης (T_1) των μερικών εκκενώσεων (στα μονωτικά υλικά και το είδος της καταπόνησης, που προαναφέρθηκαν), καθώς και ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (T_2), υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50μs), ώστε σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις του πίνακα 2.2-1 για την εικόνα των επιφανειακών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο κεφάλαιο 2 έγινε αναφορά στη διάταξη που έγιναν οι μετρήσεις. Πρόκειται για διάταξη ακίδα-πλάκα πάνω στο οποίο εφαρμόζεται κρουστική τάση της μορφής 1,2/50 μs σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C. Η ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας είναι $R=0,9\text{mm}$ και το πάχος d παίρνει αντίστοιχα τιμές $d=1\text{mm}$ και $d=2\text{mm}$.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 40 °C που αναλύεται σε επιμέρους ενέργειες:

1. εξαγωγή μετρήσεων για το επίπεδο της κρουστικής τάσης που εφαρμόζεται και συμπλήρωση των αντίστοιχων πινάκων
2. εξαγωγή τιμών φορτίου Q_1 και Q_2
3. προσδιορισμός εντάσεων πεδίου, εντάσεων των ρευμάτων σύνθετης αντίστασης, συντελεστή A και των άλλων μεγεθών με βάση τους τύπους που αναφέρονται στην παράγραφο 4.1
4. χάραξη γραφικών παραστάσεων και μαθηματική προσέγγιση αυτών
5. εξαγωγή συμπερασμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΝΤΟΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ +1,2/50 ΚΑΙ – 1,2/50 μs .

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται όλοι οι πίνακες και όλα τα διαγράμματα που προαναφέρθηκαν στο σκοπό της εργασίας όπως φαίνεται στις επόμενες σελίδες.

Αυτό έγινε ώστε ο αναγνώστης να είναι δυνατό να εξάγει τα δικά του συμπεράσματα χωρίς να επηρεάζεται από τη γνώμη του συγγραφέα. Για το λόγο αυτό τα συμπεράσματα δίνονται στο κεφάλαιο 5.

Έτσι στις επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου θα δούμε κατά σειρά, τους πίνακες με τις τιμές που μετρήθηκαν ή υπολογίσθηκαν τα μεγέθη καθώς και τις πραγματικές παραστάσεις που προέκυψαν. Στην αρχή του κεφαλαίου (παράγραφος 4.1 γίνεται μια αναφορά στους τύπους που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό κάποιων μεγεθών

4.1 Τυπολόγιο

Όπως θα δούμε και στους πίνακες των τιμών (παράγραφος 4.2) κάποια μεγέθη προέκυψαν από την εργαστηριακή διάταξη και κάποια άλλα με υπολογίσθηκαν με κάποιους τύπους.

Με τη βοήθεια της εργαστηριακής διάταξης λαμβάνουμε τιμές για την κρουστική τάση U_k σε kV, τα φορτία Q_1 και Q_2 σε μC (οπότε και υπολογίζουμε το φορτίο ΔQ που οφείλεται στις μερικές εκκενώσεις). Στη συνέχεια, με τη βοήθεια των παρακάτω μαθηματικών σχέσεων υπολογίζουμε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E , τις εντάσεις των ρευμάτων i_1, i_2 και i , τη σύνθετη αντίσταση Z , το συντελεστή A του υλικού τις μετρούμενες τάσεις στα άκρα του πυκνωτή U_{m1} και U_{m2} για τα φορτία Q_1 και Q_2 αντίστοιχα καθώς και τις πεδιακές εντάσεις για τις τάσεις αυτές:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Από τη σχέση 1.4-4 προκύπτει:

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

- Πυκνωτής μετρήσεων: C_m
- Πάχος δοκιμίου d σε mm
- Ακτίνα καμπυλότητας ακίδας : $R = 0.9$ mm

4.2 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για δείγμα Πάχους $d=1\text{mm}$

Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας

U- (KV)	U _k (KV)	T1 (μs)	T2 (μs)	Q1 (μC)	Q2 (μC)	ΔT (μs)	ΔQ (μC)	i1 (A)	i2 (A)	i (A)
15	21,89	-	-	0,075	-	-	-	-	-	-
20	28,62	2,81	14,05	0,09	0,22	11,24	0,13	0,032	0,016	0,012
25	35,36	1,20	11,23	0,11	0,39	10,03	0,28	0,092	0,035	0,028
30	42,94	1,16	16,55	0,12	0,76	15,39	0,64	0,103	0,046	0,042
35	50,51	1,12	18,84	0,14	1,18	17,72	1,04	0,125	0,063	0,059
40	57,25	0,74	22,50	0,21	2,07	21,76	1,86	0,284	0,092	0,086
45	63,99	0,58	27,65	0,23	2,78	27,07	2,55	0,397	0,101	0,094
50	71,39	0,56	29,47	0,25	2,91	28,91	2,66	0,446	0,099	0,092

Πίνακας 4.2-1. α) : Υπολογισμός τιμών κατά την καταπόνηση δοκιμίων πολυμερούς στερεού μονώτικου πάχους 1mm υπο κρουστικές τάσεις +1,2/50 μs

U- : Η τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή)

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

T 1 : Ο χρόνος έναρξης των μερικών

T 2 : Ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Q1 : Το φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Q2 : Το φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

ΔT : Χρονική διάρκεια μερικών εκκενώσεων

ΔQ : Η αύξηση φορτίου λόγω μερικών εκκενώσεων

i 1 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη

i 2 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση

U _k (KV)	ΔT (μs)	C _m (nF)	Z (Ω)
21,89	-	10	-
28,62	11,24	10	1124
35,36	10,03	10	1003
42,94	15,39	20	769,50
50,51	17,72	20	886
57,25	21,76	210	103,62
63,99	27,07	210	128,9
71,39	28,91	210	137,67

Πίνακας 4.2-1. β) : Υπολογισμός τιμών κατά την καταπόνηση δοκιμίων πολυμερούς στερεού μονώτικου πάχους 1mm υπο κρουστικές τάσεις +1,2/50 μs

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

ΔT: Χρονική διάρκεια μερικών εκκενώσεων

C_m : Πυκνωτής μετρήσεων

Z : Αντίσταση δοκιμίου πολυμερούς στερεού μονωτικού

U _k (KV)	E (MV/cm)	Q1 (μ C)	Q2 (μ C)	C _m (nF)	U _{m1} (V)	U _{m2} (V)	E1 (KV/cm)	E2 (KV/cm)	A
21,89	0,326	0,075	-	10	7,5	-	0,106	-	-
28,62	0,426	0,09	0,22	10	9	22	0,127	0,310	0,1796
35,36	0,527	0,11	0,39	10	11	39	0,155	0,550	0,1094
42,94	0,640	0,12	0,76	20	6	38	0,085	0,536	0,0472
50,51	0,753	0,14	1,18	20	7	59	0,099	0,832	0,0304
57,25	0,853	0,21	2,07	210	1	9,86	0,014	0,139	0,0238
63,99	0,953	0,23	2,78	210	1,09	13,24	0,015	0,187	0,0171
71,39	1,064	0,25	2,91	210	1,19	13,86	0,017	0,195	0,0183

Πίνακας 4.2-1. γ) : Υπολογισμός τιμών κατά την καταπόνηση δοκιμίων πολυμερούς στερεού μονώτικου πάχους 1mm υπο κρουστικές τάσεις +1,2/50 μ s

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

Q1 : Το φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Q2 : Το φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

C_m : Πυκνωτής μετρήσεων

U_{m1} : Άλμα δυναμικού κατά την έναρξη

U_{m2} : Άλμα δυναμικού κατά την περάτωση

E1 : Πεδιακή ένταση έναρξης

E2 : Πεδιακή ένταση περάτωσης

A : Συντελεστής (βλ. τυπολόγιο παρ. 4.1)

Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας

U- (KV)	U _k (KV)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	Q ₁ (μC)	Q ₂ (μC)	ΔT (μs)	ΔQ (μC)	i ₁ (A)	i ₂ (A)	i (A)
-15	-22,23	-	-	0,079	-	-	-	-	-	-
-20	-29,13	3,05	14,43	0,10	0,19	11,38	0,09	0,033	0,013	0,008
-25	-36,71	1,80	16,64	0,12	0,43	14,84	0,31	0,067	0,026	0,021
-30	-44,12	1,60	19,46	0,16	0,91	17,86	0,75	0,100	0,047	0,042
-35	-51,53	1,50	24,61	0,22	1,22	23,11	1,00	0,147	0,050	0,043
-40	-58,26	1,40	27,01	0,24	2,11	25,61	1,87	0,171	0,078	0,073
-45	-66,34	1,20	31,80	0,26	2,59	30,60	2,33	0,217	0,081	0,076
-50	-72,07	0,98	34,28	0,27	3,83	33,30	3,56	0,276	0,112	0,107
-55	-78,13	0,86	39,50	0,29	6,09	38,64	5,80	0,337	0,154	0,150

Πίνακας 4.2-2.α) : Υπολογισμός τιμών κατά την καταπόνηση δοκιμίων πολυμερούς στερεού μονώτικου πάχους 1mm υπο κρουστικές τάσεις -1,2/50 μs

U- : Η τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή)

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

T₁ : Ο χρόνος έναρξης των μερικών

T₂ : Ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Q₁ : Το φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Q₂ : Το φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

ΔT: Χρονική διάρκεια μερικών εκκενώσεων

ΔQ : Η αύξηση φορτίου λόγω μερικών εκκενώσεων

i₁ : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη

i₂ : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση

Uk (KV)	ΔT (μs)	Cm (nF)	Z (Ω)
-22,23	-	10	-
-29,13	11,38	10	1138
-36,71	14,84	10	1484
-44,12	17,86	20	893
-51,53	23,11	20	1155,50
-58,26	25,61	210	121,95
-66,34	30,60	210	145,71
-72,07	33,30	210	158,57
-78,13	38,64	210	184

Πίνακας 4.2-2.β) : Υπολογισμός τιμών κατά την καταπόνηση δοκιμίων πολυμερούς στερεού μονώτικου πάχους 1mm υπο κρουστικές τάσεις -1,2/50 μs

Uk : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

ΔT : Χρονική διάρκεια μερικών εκκενώσεων

Cm : Πυκνωτής μετρήσεων

Z : Αντίσταση δοκιμίου πολυμερούς στερεού μονωτικού

Uk (KV)	E (MV/cm)	Q1 (μC)	Q2 (μC)	Cm (nF)	Um1 (V)	Um2 (V)	E1 (KV/cm)	E2 (KV/cm)	A
-22,23	-0,331	0,079	-	10	7,9	-	0,118	-	-
-29,13	-0,434	0,10	0,19	10	10	19	0,149	0,283	0,2459
-36,71	-0,547	0,12	0,43	10	12	43	0,179	0,641	0,1078
-44,12	-0,657	0,16	0,91	20	8	45,50	0,119	0,678	0,0554
-51,53	-0,768	0,22	1,22	20	11	61	0,164	0,909	0,0576
-58,26	-0,868	0,24	2,11	210	1,14	10,05	0,017	0,150	0,0283
-66,34	-0,988	0,26	2,59	210	1,24	12,33	0,018	0,184	0,0235
-72,07	-1,074	0,27	3,83	210	1,28	18,24	0,019	0,272	0,0131
-78,13	-1,164	0,29	6,09	210	1,38	29	0,021	0,432	0,0069

Πίνακας 4.2-2.γ) : : Υπολογισμός τιμών κατά την καταπόνηση δοκιμίων πολυμερούς στερεού μονώτικου πάχους 1mm υπο κρουστικές τάσεις -1,2/50 μs

Uk : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη Uk

Q1 : Το φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Q2 : Το φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Cm : Πυκνωτής μετρήσεων

Um1 : Άλμα δυναμικού κατά την έναρξη

Um2 : Άλμα δυναμικού κατά την περάτωση

E1 : Πεδιακή ένταση έναρξης

E2 : Πεδιακή ένταση περάτωσης

A : Συντελεστής (βλ. τυπολόγιο παρ. 4.1)

4.3 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για δείγμα Πάχους $d=2mm$

Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας

U- (KV)	U _k (KV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)	Q1 (μ C)	Q2 (μ C)	Δ T (μ s)	Δ Q (μ C)	i1 (A)	i2 (A)	i (A)
20	28,63	-	-	0,089	-	-	-	-	-	-
25	35,36	3,56	15,84	0,10	0,19	12,28	0,09	0,028	0,01 2	0,007
30	43,78	2,00	14,31	0,12	0,33	12,31	0,21	0,060	0,02 3	0,017
35	50,18	1,80	15,44	0,13	0,38	13,64	0,25	0,072	0,02 7	0,018
40	56,91	1,40	19,71	0,16	0,61	18,31	0,45	0,114	0,03 1	0,026
45	64,66	1,20	20,72	0,20	0,96	19,52	0,76	0,167	0,04 6	0,039
50	71,39	1,20	25,71	0,24	1,16	24,51	0,92	0,200	0,04 5	0,038
55	79,48	1,20	27,27	0,26	1,07	26,07	0,81	0,217	0,03 9	0,031
60	86,55	1,20	27,15	0,85	1,81	25,95	0,96	0,708	0,06 7	0,037
65	94,29	1,20	26,63	1,21	2,17	25,43	0,96	1,008	0,08 1	0,038
70	99,68	1,20	35,01	1,22	3,03	33,81	1,81	1,017	0,08 7	0,054
75	107,77	1,20	35,01	1,61	3,41	33,81	1,80	1,342	0,09 7	0,053
80	113,82	1,20	33,02	2,06	3,84	31,82	1,78	1,717	0,116	0,056
85	121,24	1,20	24,11	0,92	2,03	22,91	1,11	0,767	0,08 4	0,048
90	125,95	1,20	19,17	1,12	2,52	17,97	1,40	1,017	0,13 1	0,078
95	132,68	1,20	23,86	1,23	3,44	22,66	2,21	1,025	0,14 4	0,096

Πίνακας 4.3-1. α): Υπολογισμός τιμών κατά την καταπόνηση δοκιμίων πολυμερούς στερεού μονώτικου πάχους 2mm υπο κρουστικές τάσεις +1,2/50 μ s

U- : Η τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή)

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

T 1 : Ο χρόνος έναρξης των μερικών

T 2 : Ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Q1 : Το φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Q2 : Το φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δ T: Χρονική διάρκεια μερικών εκκενώσεων

Δ Q : Η αύξηση φορτίου λόγω μερικών εκκενώσεων

i 1: Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη

i 2: Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση

U _k (KV)	Δ T (μ s)	C _m (nF)	Z (Ω)
28,63	-	3,3	-
35,36	12,28	3,3	3721,21
43,78	12,31	10	1231
50,18	13,64	10	1364
56,91	18,31	10	1831
64,66	19,52	20	976
71,39	24,51	20	1225,50
79,48	26,07	210	124,14
86,55	25,95	210	123,57
94,29	25,43	210	121,09
99,68	33,81	210	161
107,77	33,81	210	161
113,82	31,88	210	151,52
121,24	22,91	210	109,09
125,95	17,97	210	85,57
132,68	22,66	210	107,91

Πίνακας 4.3-1. β): Υπολογισμός τιμών κατά την καταπόνηση δοκιμίων πολυμερούς στερεού μονώτικου πάχους 2mm υπο κρουστικές τάσεις +1,2/50 μ s

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Δ T: Χρονική διάρκεια μερικών εκκενώσεων

C_m : Πυκνωτής μετρήσεων

Z : Αντίσταση δοκιμίου πολυμερούς στερεού μονωτικού

U _k (KV)	E (MV/cm)	Q1 (μ C)	Q2 (μ C)	C _m (nF)	Um1 (V)	Um2 (V)	E1 (KV/cm)	E2 (KV/cm)	A
28,63	0,292	0,089	-	3,3	26,97	-	0,275	-	-
35,56	0,363	0,10	0,19	3,3	30,30	57,57	0,309	0,587	0,2459
43,78	0,447	0,12	0,33	10	12	33	0,122	0,337	0,1541
50,18	0,512	0,13	0,38	10	13	38	0,133	0,388	0,1421
56,91	0,580	0,16	0,61	10	16	61	0,163	0,622	0,0989
64,66	0,660	0,20	0,96	20	10	48	0,102	0,490	0,0712
71,39	0,728	0,24	1,16	20	12	58	0,122	0,592	0,0704
79,48	0,811	0,26	1,07	210	1,24	5,09	0,013	0,052	0,0893
86,55	0,883	0,85	1,81	210	4,05	8,62	0,041	0,088	0,2141
94,29	0,962	1,21	2,17	210	5,76	10,33	0,059	0,105	0,2635
99,68	1,017	1,22	3,03	210	5,81	14,43	0,060	0,147	0,1759
107,77	1,099	1,61	3,41	210	7,66	16,24	0,078	0,166	0,2147
113,82	1,161	2,06	3,84	210	9,81	18,28	0,100	0,186	0,2519
121,24	1,237	0,92	2,03	210	4,38	9,67	0,045	0,099	0,2043
125,95	1,285	1,12	2,52	210	5,33	12	0,054	0,122	0,1993
132,68	1,353	1,23	3,44	210	5,86	16,38	0,060	0,167	0,1406

Πίνακας 4.3-1. γ): Υπολογισμός τιμών κατά την καταπόνηση δοκιμίων πολυμερούς στερεού μονώτικου πάχους 2mm υπο κρουστικές τάσεις +1,2/50 μ s

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

Q1 : Το φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Q2 : Το φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

C_m : Πυκνωτής μετρήσεων

Um1 : Άλμα δυναμικού κατά την έναρξη
Um2 : Άλμα δυναμικού κατά την περάτωση
E1 : Πεδιακή ένταση έναρξης
E2 : Πεδιακή ένταση περάτωσης
A : Συντελεστής (βλ. τυπολόγιο παρ. 4.1)

Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας

U- (KV)	Uk (KV)	T1 (μs)	T2 (μs)	Q1 (μC)	Q2 (μC)	ΔT (μs)	ΔQ (μC)	I1 (A)	i2 (A)	i (A)
-20	-28,63	-	-	0,097	-	-	-	-	-	-
-25	-36,20	2,70	15,38	0,14	0,22	12,68	0,08	0,044	0,014	0,006
-30	-44,45	2,20	19,15	0,20	0,41	16,95	0,21	0,091	0,021	0,012
-35	-51,18	2,00	21,55	0,24	0,55	19,55	0,31	0,120	0,026	0,016
-40	-57,25	1,80	23,80	0,32	0,84	22,00	0,52	0,178	0,035	0,024
-45	-64,66	1,70	26,50	0,36	0,99	24,80	0,63	0,212	0,037	0,025
-50	-73,07	1,67	29,05	0,39	1,61	27,38	1,22	0,234	0,055	0,045
-55	-80,15	1,65	33,51	0,42	1,93	31,86	1,51	0,255	0,058	0,047
-60	-86,21	1,62	35,05	0,53	2,10	33,43	1,57	0,327	0,060	0,047
-65	-91,94	1,60	33,86	0,58	2,24	32,26	1,66	0,363	0,066	0,051
-70	-99,68	1,57	41,16	0,31	1,25	39,59	0,94	0,197	0,030	0,024
-75	-106,41	1,50	28,68	1,05	2,68	27,18	1,63	0,700	0,093	0,060
-80	-115,85	1,48	35,77	1,20	3,09	34,29	1,89	0,811	0,086	0,055
-85	-121,24	1,20	40,34	1,80	3,74	39,14	1,94	1,500	0,093	0,050
-90	-126,62	1,20	34,51	2,00	4,15	33,31	2,15	1,667	0,120	0,065
-95	-134,71	1,20	32,42	2,40	4,34	31,22	1,94	2,000	0,134	0,062
-100	-127,97	1,20	43,78	1,04	1,96	42,58	0,92	0,867	0,045	0,022

Πίνακας 4.3-2. α): Πίνακας 4.3-1. α): Υπολογισμός τιμών κατά την καταπόνηση δοκιμίων πολυμερούς στερεού μονώτικου πάχους 2mm υπο κρουστικές τάσεις -1,2/50 μ s

U- : Η τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή)

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

T 1 : Ο χρόνος έναρξης των μερικών

T 2 : Ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Q1 : Το φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Q2 : Το φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δ T: Χρονική διάρκεια μερικών εκκενώσεων

Δ Q : Η αύξηση φορτίου λόγω μερικών εκκενώσεων

i 1: Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη

i 2: Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση

U _k (KV)	Δ T (μ s)	C _m (nF)	Z (Ω)
-28,63	-	10	-
-36,20	12,68	10	1268
-44,45	16,95	10	1695
-51,18	19,55	10	1955
-57,25	22	20	1100
-64,66	24,8	20	1240
-73,07	27,38	210	130,38
-80,15	31,86	210	151,71
-86,21	33,43	210	159,19
-91,94	32,26	210	153,62
-99,68	39,59	210	188,52
-106,41	27,18	210	129,43
-115,85	34,29	1000	34,29
-121,24	39,14	1000	39,14
-126,62	33,31	1000	33,31
-134,71	31,22	1000	31,22
-127,97	42,58	1000	42,58

Πίνακας 4.3-2. β): Υπολογισμός τιμών κατά την καταπόνηση δοκιμίων πολυμερούς στερεού μονώτικου πάχους 2mm υπο κρουστικές τάσεις -1,2/50 μ s

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

Δ T: Χρονική διάρκεια μερικών εκκενώσεων

C_m : Πυκνωτής μετρήσεων

Z : Αντίσταση δοκιμίου πολυμερούς στερεού μονωτικού

U _k (KV)	E (MV/cm)	Q1 (μ C)	Q2 (μ C)	C _m (nF)	U _{m1} (V)	U _{m2} (V)	E1 (KV/cm)	E2 (KV/cm)	A
-28,63	-0,292	0,097	-	10	9,70	-	0,099	-	-
-36,20	-0,369	0,14	0,22	10	14	22	0,143	0,224	0,3109
-44,45	-0,453	0,20	0,41	10	20	41	0,204	0,418	0,2244
-51,18	-0,522	0,24	0,55	10	24	55	0,245	0,561	0,1954
-57,25	-0,584	0,32	0,84	20	16	42	0,163	0,428	0,1637
-64,66	-0,660	0,36	0,99	20	18	49,50	0,184	0,505	0,1549
-73,07	-0,745	0,39	1,61	210	1,86	7,67	0,019	0,078	0,0894
-80,15	-0,818	0,42	1,93	210	2	9,19	0,020	0,094	0,0723
-86,21	-0,879	0,53	2,10	210	2,52	10	0,026	0,102	0,0957
-91,94	-0,938	0,58	2,24	210	2,76	10,67	0,028	0,109	0,0955
-99,68	-1,017	0,31	1,25	210	1,48	5,95	0,015	0,061	0,0897
-106,41	-1,085	1,05	2,68	210	5	12,76	0,051	0,130	0,1704
-115,85	-1,182	1,20	3,09	1000	1,20	3,09	0,012	0,032	0,1548
-121,24	-1,236	1,80	3,74	1000	1,80	3,74	0,018	0,038	0,2116
-126,62	-1,292	2,00	4,15	1000	2	4,15	0,020	0,042	0,2141
-134,71	-1,374	2,40	4,34	1000	2,40	4,34	0,024	0,044	0,2509
-127,97	-1,305	1,04	1,96	1000	1,04	1,96	0,011	0,020	0,2748

Πίνακας 4.3-2. γ): Υπολογισμός τιμών κατά την καταπόνηση δοκιμίων πολυμερούς στερεού μονώτικου πάχους 2mm υπο κρουστικές τάσεις -1,2/50 μ s

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

Q1 : Το φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Q2 : Το φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

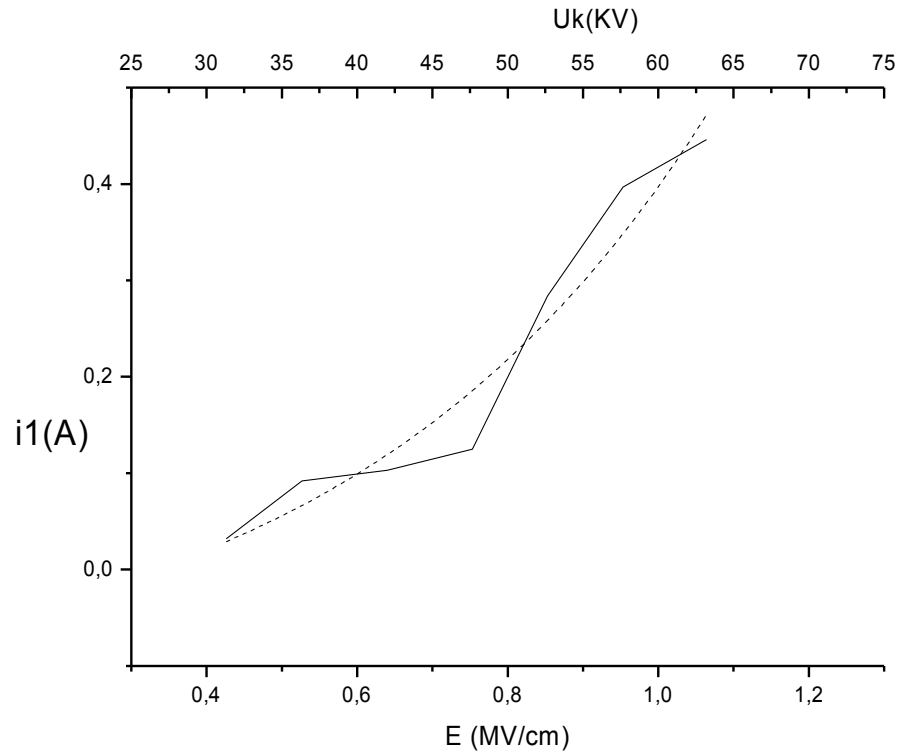
C_m : Πυκνωτής μετρήσεων
U_{m1} : Άλμα δυναμικού κατά την έναρξη
U_{m2} : Άλμα δυναμικού κατά την περάτωση
E1 : Πεδιακή ένταση έναρξης
E2 : Πεδιακή ένταση περάτωσης
A : Συντελεστής (βλ. τυπολόγιο παρ. 4.1)

4.4 Γραφικές παραστάσεις και οι εκθετικές τους προσεγγίσεις

Στις παρακάτω υποπαραγράφους παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες(συνεχής γραμμή) διαφόρων συναρτήσεων σύμφωνα με τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο,καθώς και οι εκθετικές τους προσεγγίσεις(διακεκομμένη γραμμή) αντιστοιχημένες σε κάθε μία ξεχωριστά.

4.4-1: Δείγμα Πάχους $d=1\text{mm}$

α)Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας $+1,2/50 \mu\text{s}$

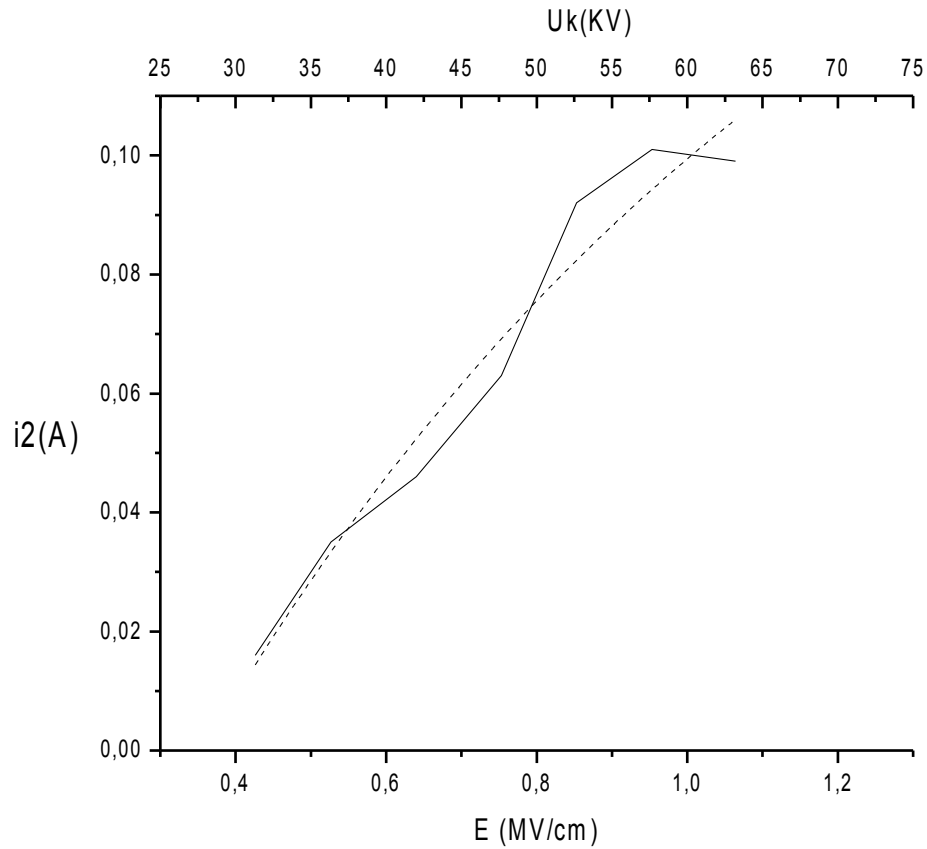


Διάγραμμα 1. $i1 = f(Uk, E)$

$i1$: Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη

Uk : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη Uk

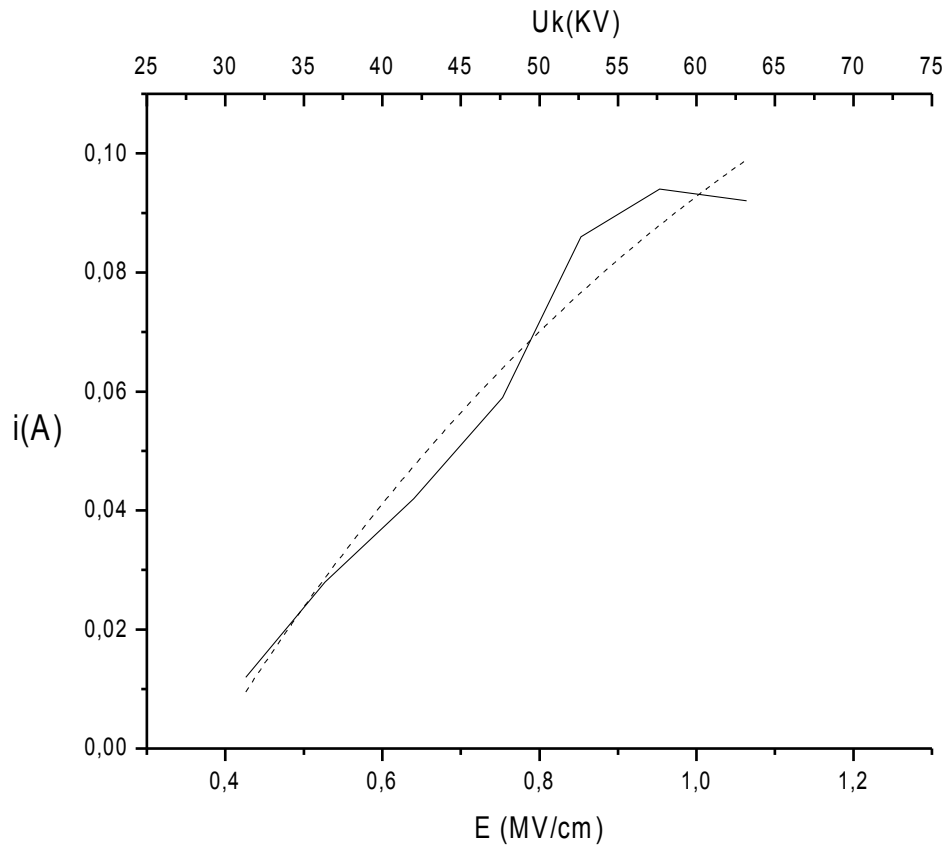


Διάγραμμα 2. $i_2 = f(U_k, E)$

i_2 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

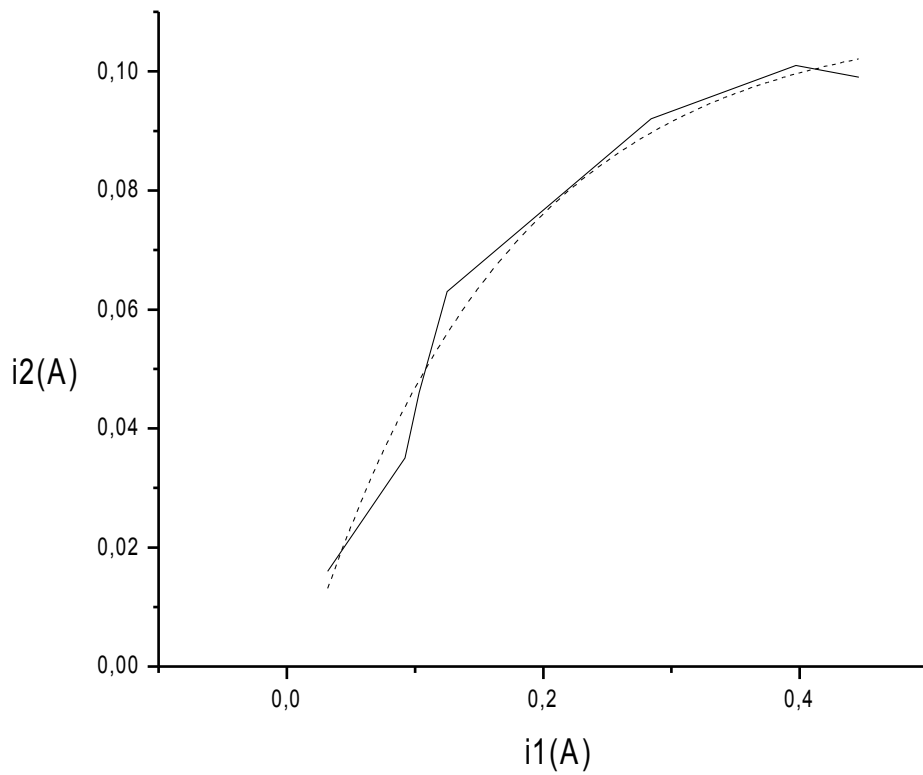


Διάγραμμα 3. $i = f(U_k, E)$

$i = i_2 - i_1$

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

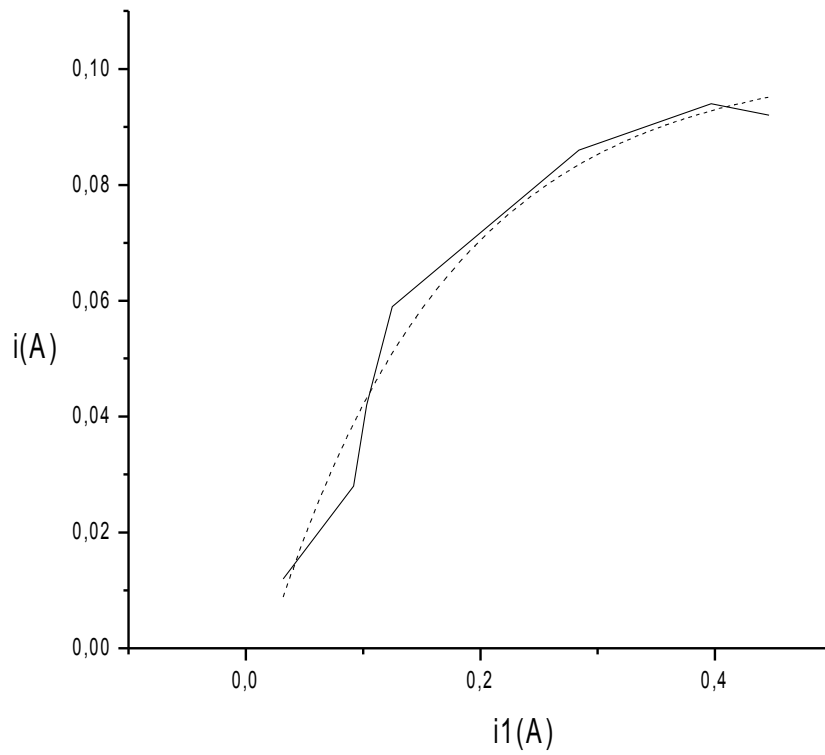
E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k



Διάγραμμα 4. $i_2 = f(i_1)$

i_1 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη

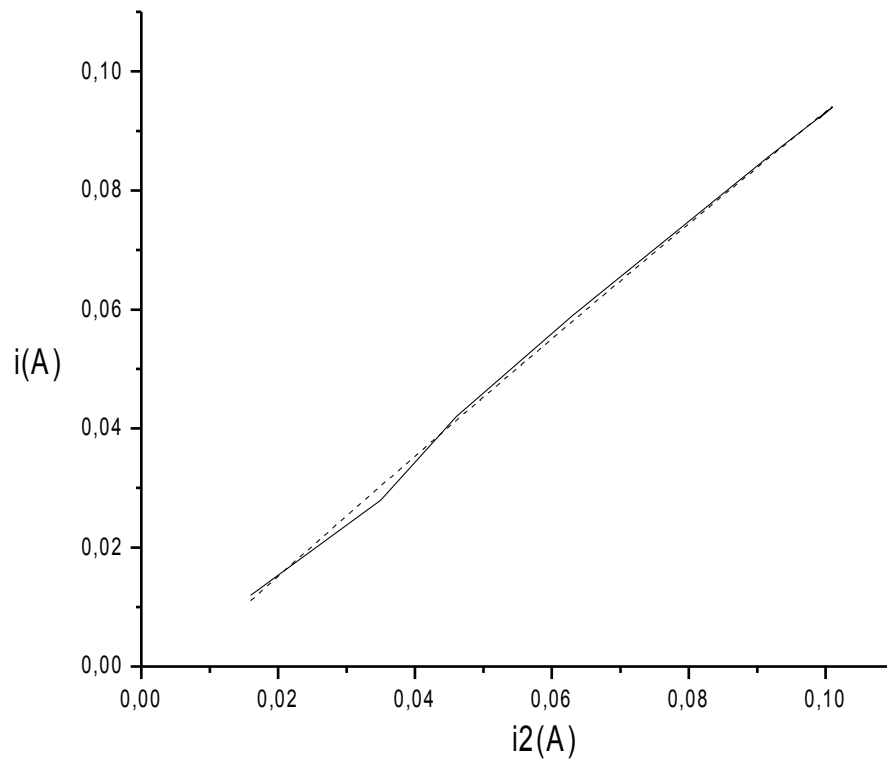
i_2 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση



Διάγραμμα 5. $i = f(i_1)$

$i = i_2 - i_1$

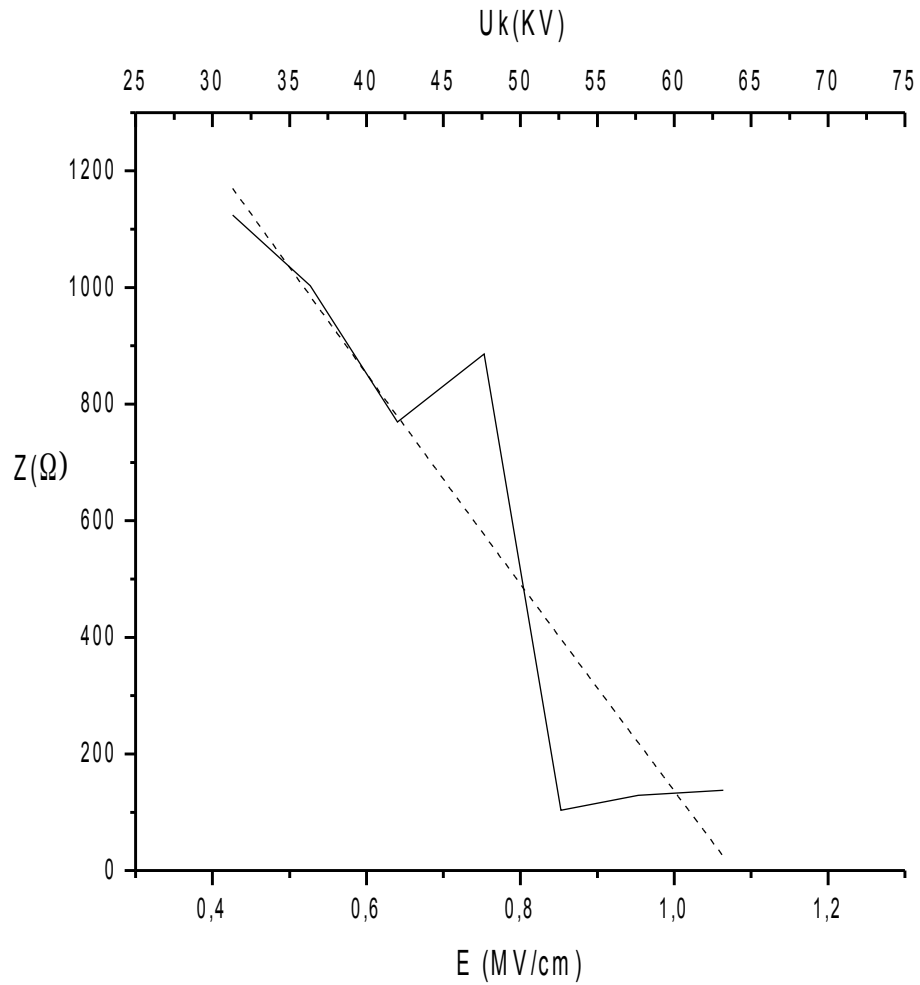
i_1 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη



Διάγραμμα 6. $i = f(i_2)$

$$i = i_2 - i_1$$

i_2 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση

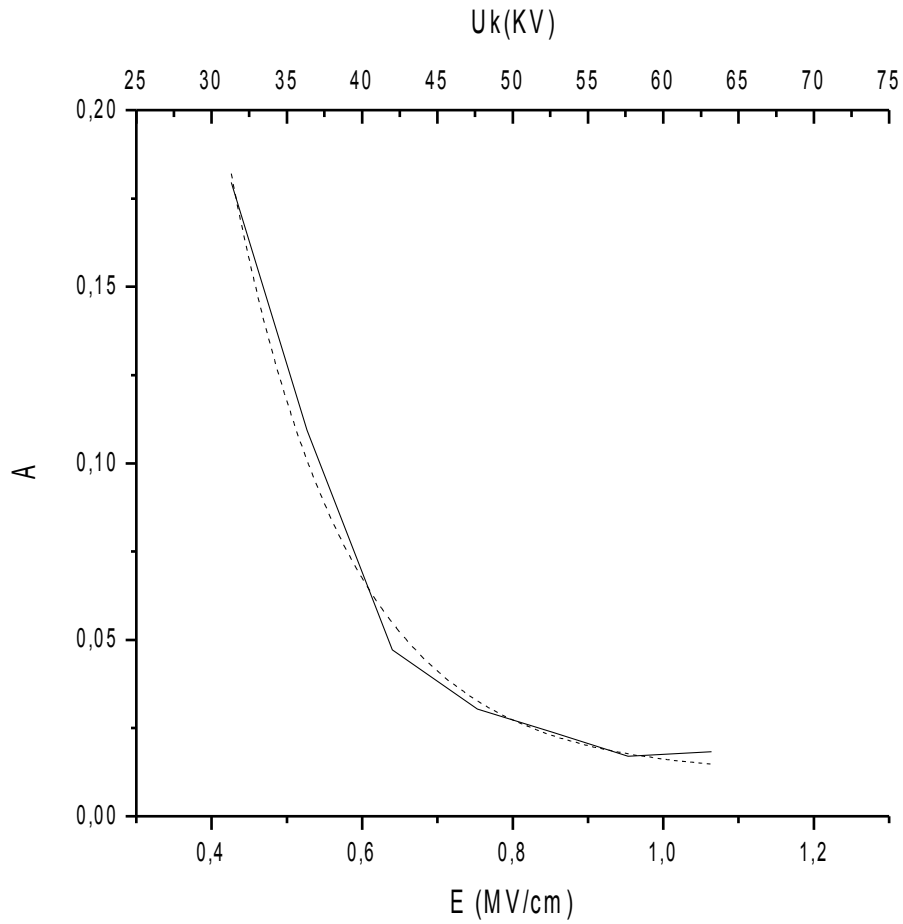


Διάγραμμα 7. $Z=f(U_k, E)$

Z : Αντίσταση δοκιμίου πολυμερούς στερεού μονωτικού

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k



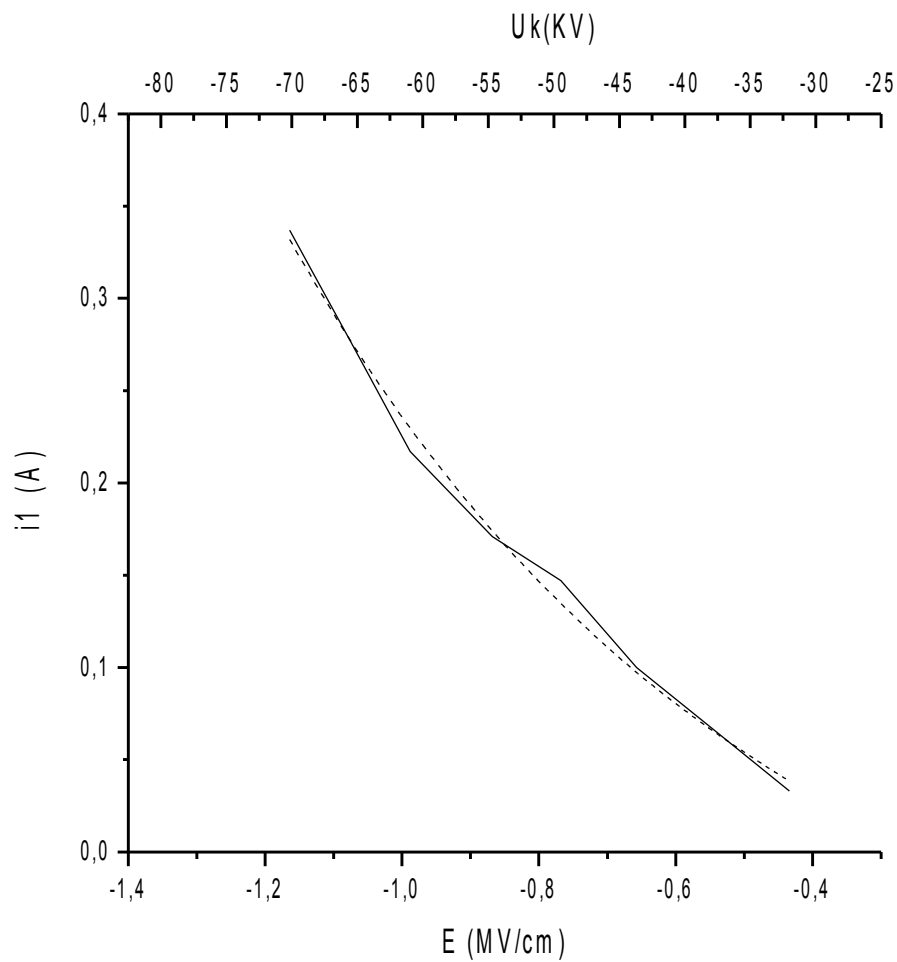
Διάγραμμα 8. $A = f(U_k, E)$

A : Συντελεστής (βλ. τυπολόγιο παρ. 4.1)

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

β) Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας -1,2/50 μs

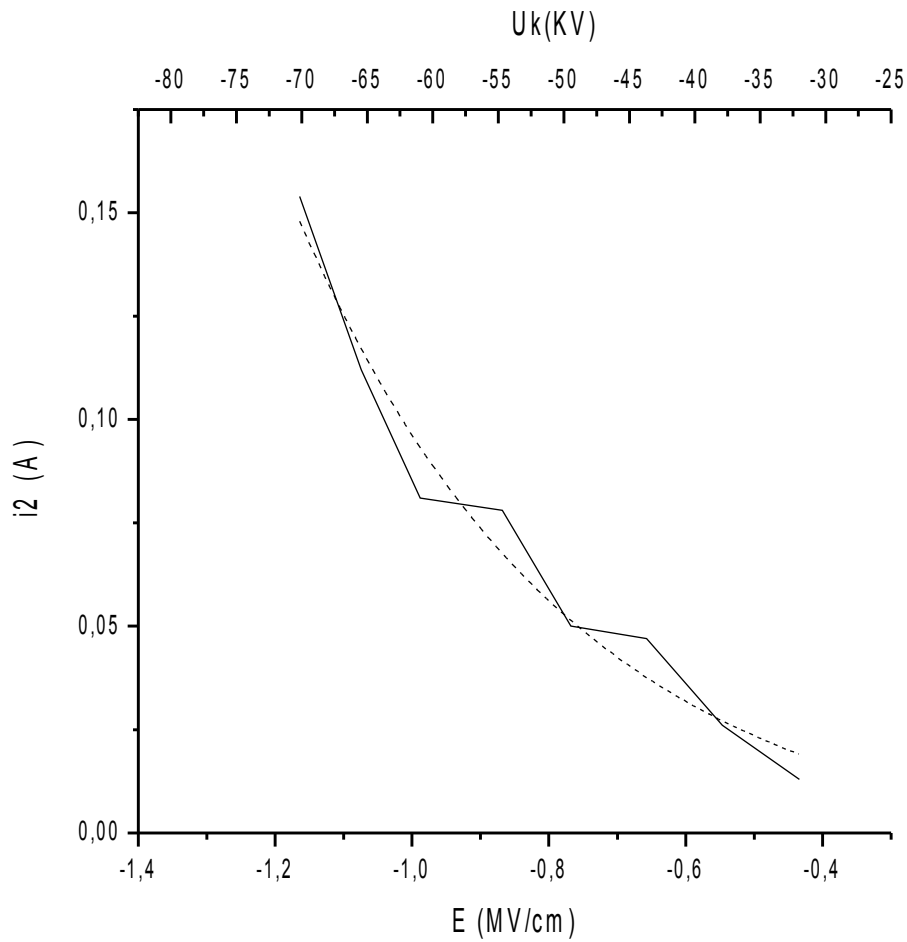


Διάγραμμα 9. $i_1 = f(U_k, E)$

i_1 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

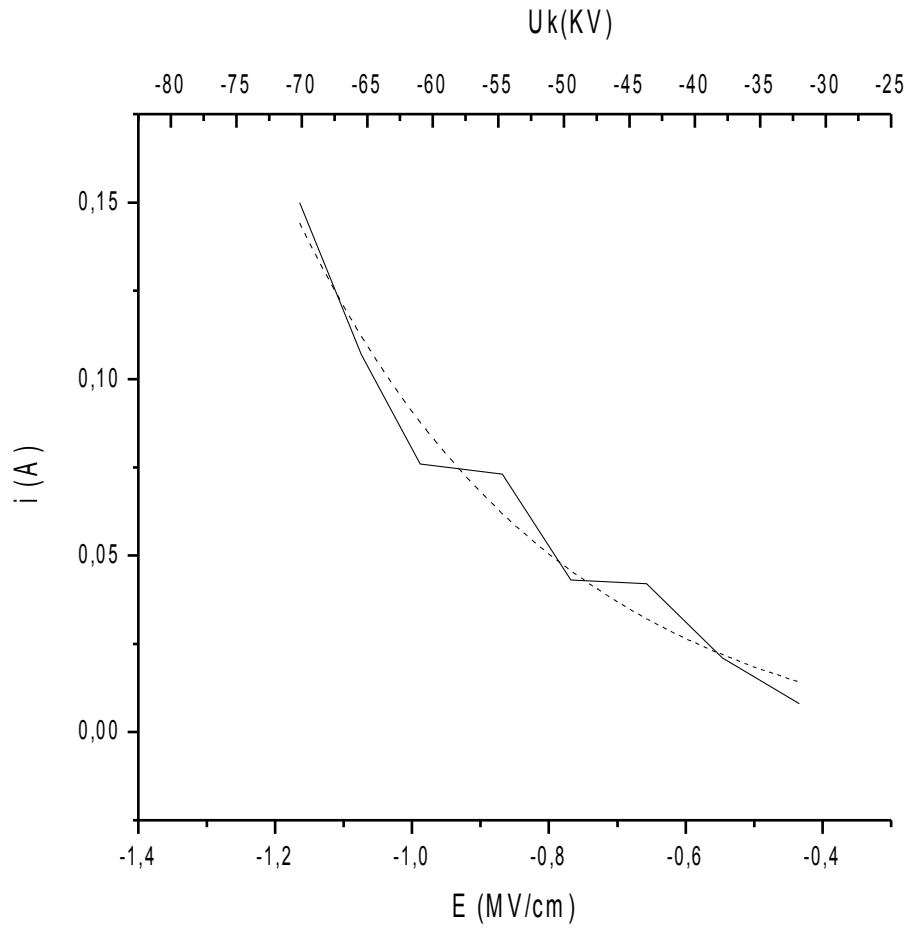


Διάγραμμα 10. $i_2 = f(U_k, E)$

i_2 : Η Στιγμαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

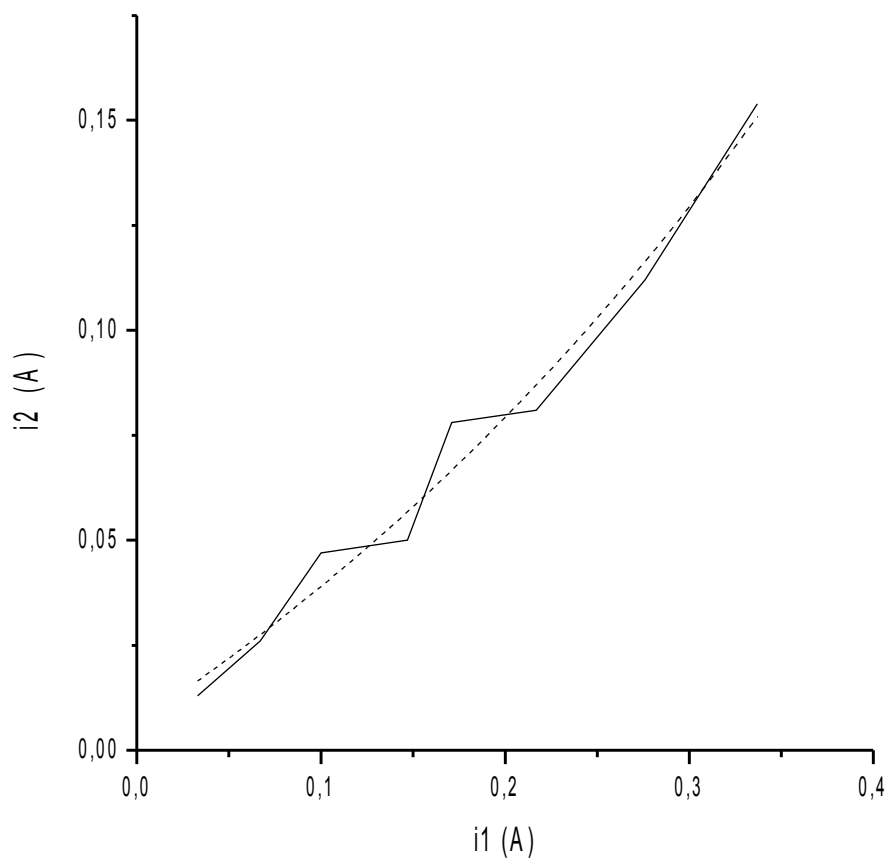


Διάγραμμα 11. $i = f(U_k, E)$

$i = i_2 - i_1$

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

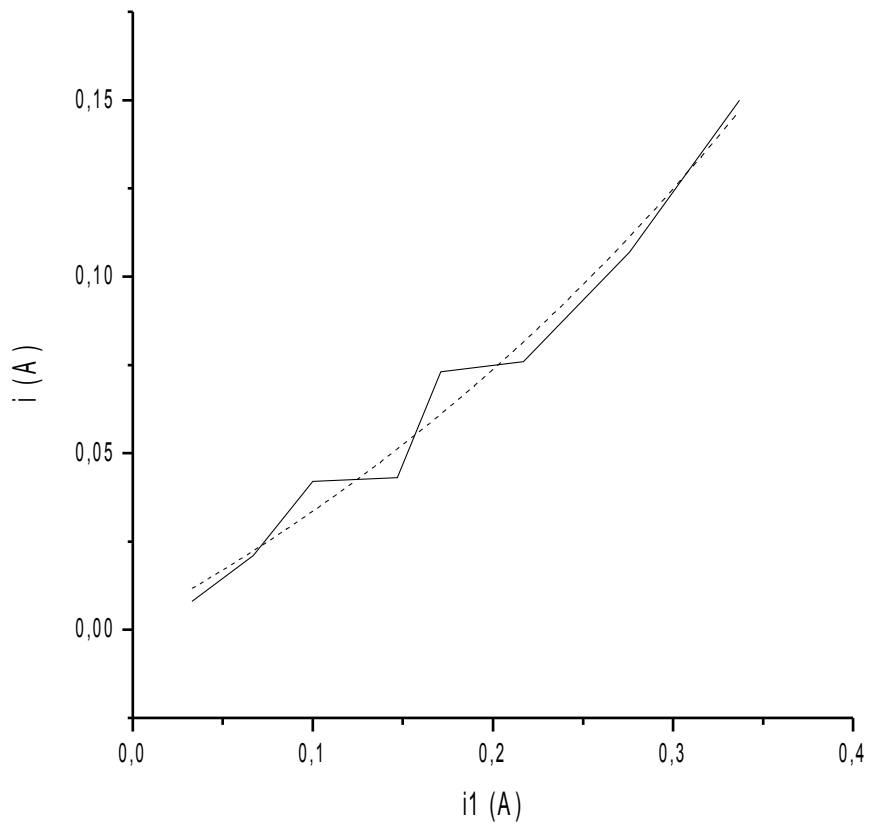
E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k



Διάγραμμα 12. $i_2 = f(i_1)$

i_1 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη

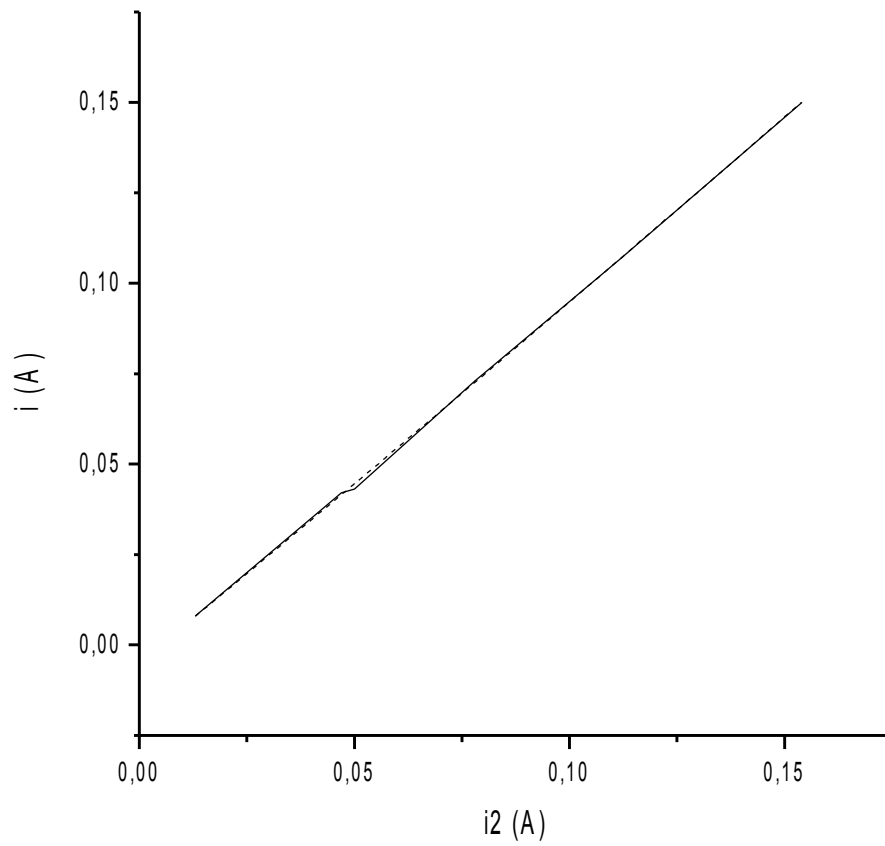
i_2 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση



Διάγραμμα 13. $i = f(i_1)$

$i = i_2 - i_1$

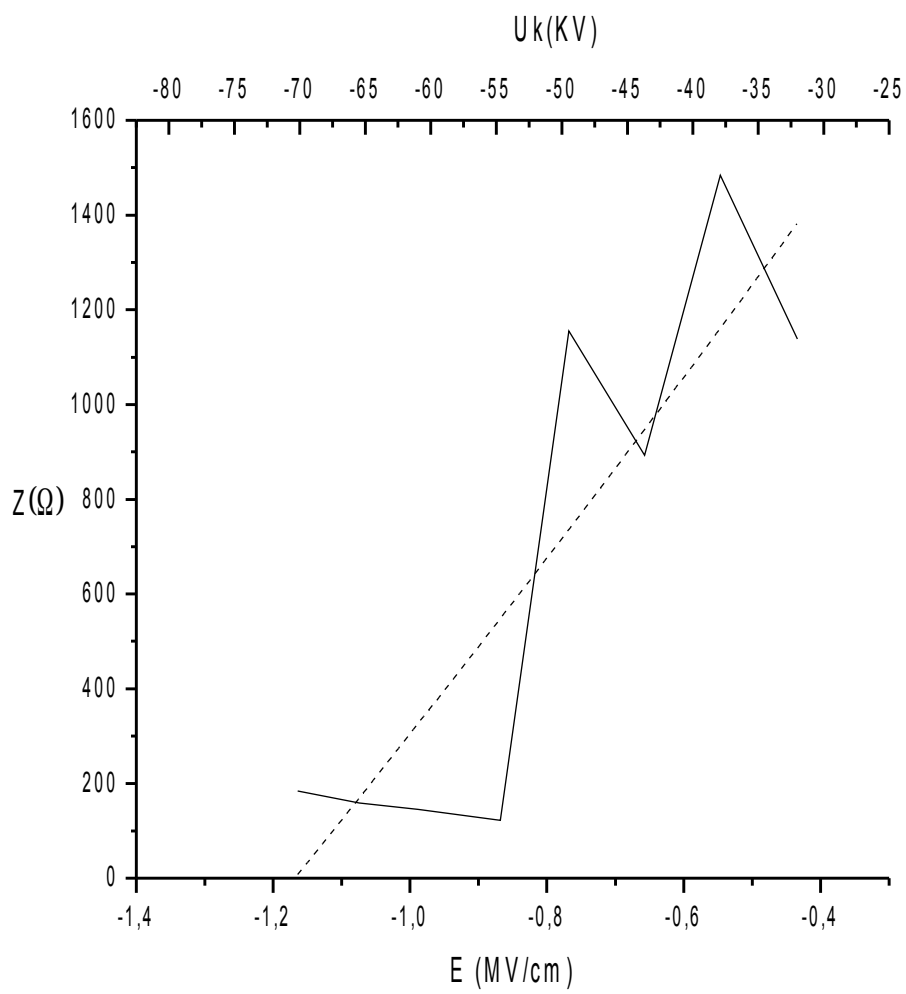
i_1 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη



Διάγραμμα 14. $i = f(i_2)$

$$i = i_2 - i_1$$

i_2 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση

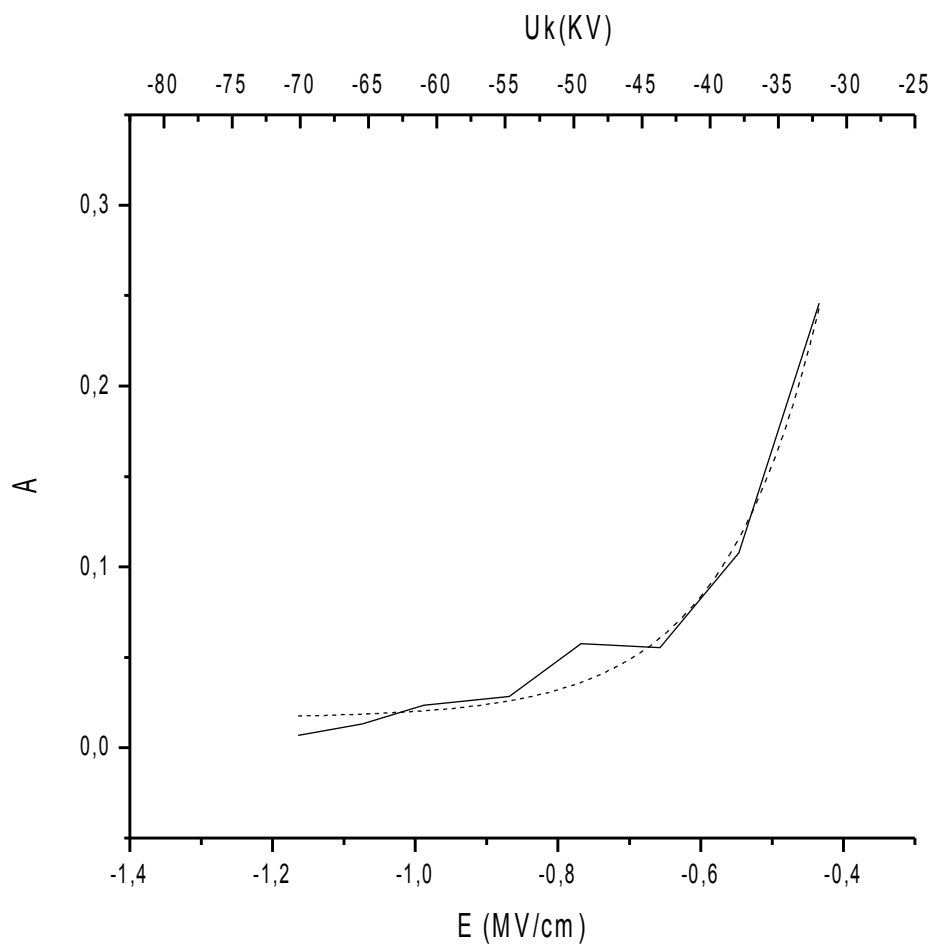


Διάγραμμα 15. $Z=f(U_k, E)$

Z : Αντίσταση δοκιμίου πολυμερούς στερεού μονωτικού

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k



Διάγραμμα 16. $A=f(Uk, E)$

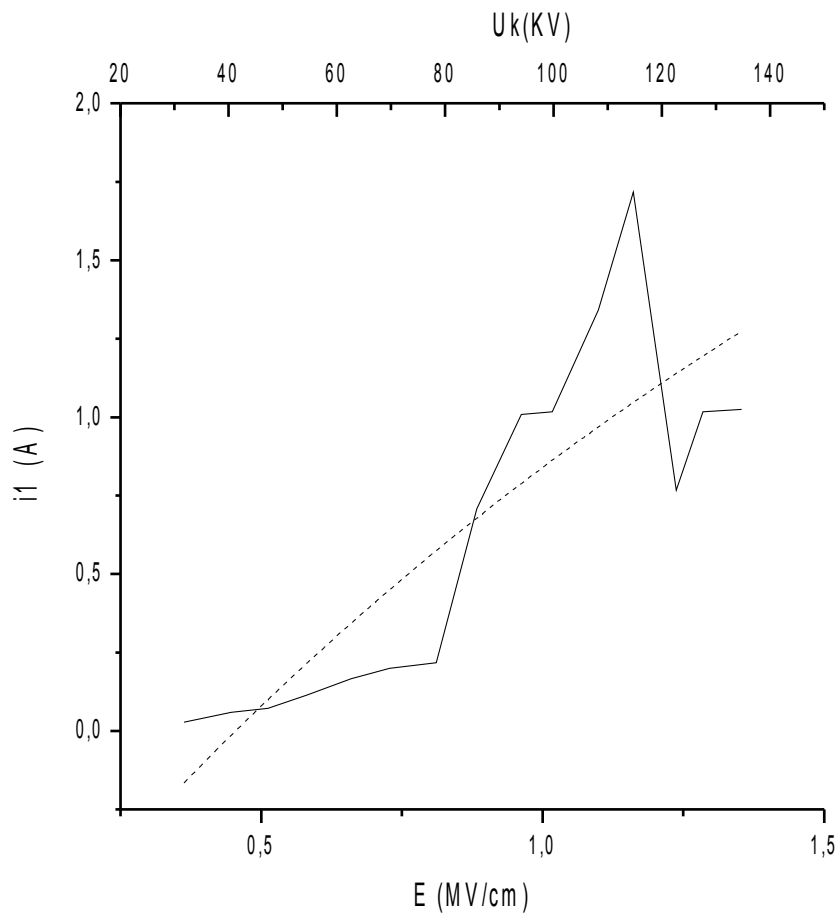
A : Συντελεστής (βλ. τυπολόγιο παρ. 4.1)

Uk : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

4.4-2: Δείγμα Πάχους $d=2\text{mm}$

α)Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας $+1,2/50\mu\text{s}$

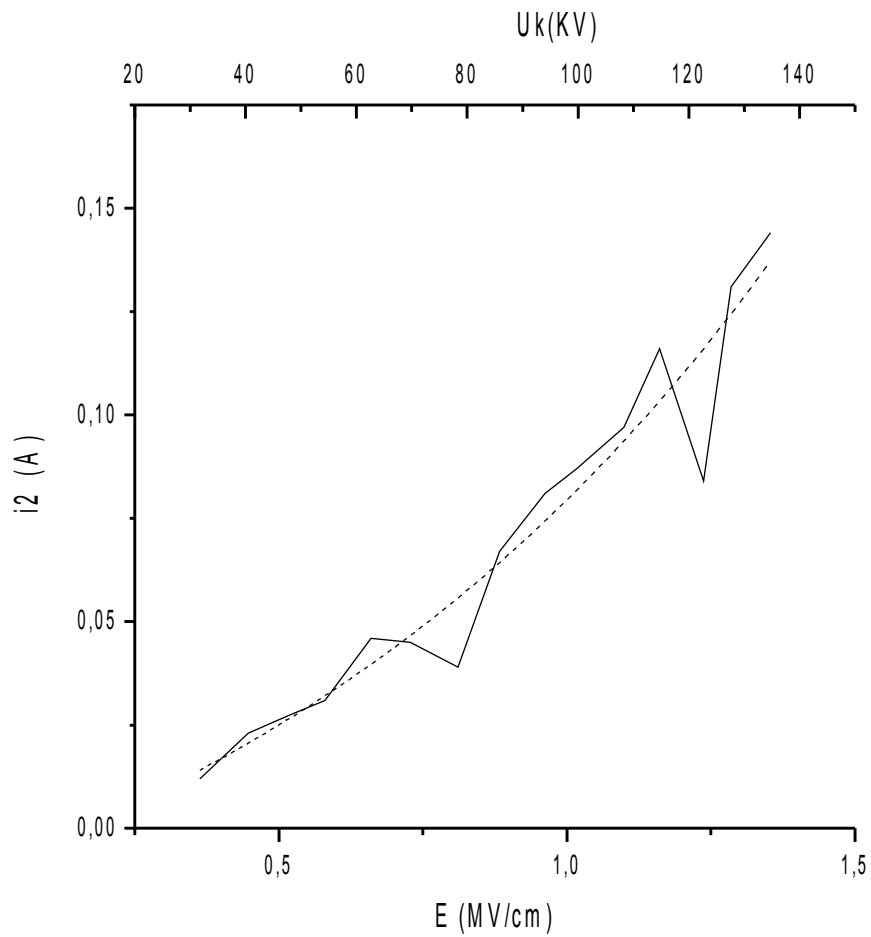


Διάγραμμα 17. $i_1 = f(U_k, E)$

i_1 : Η Στιγμαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

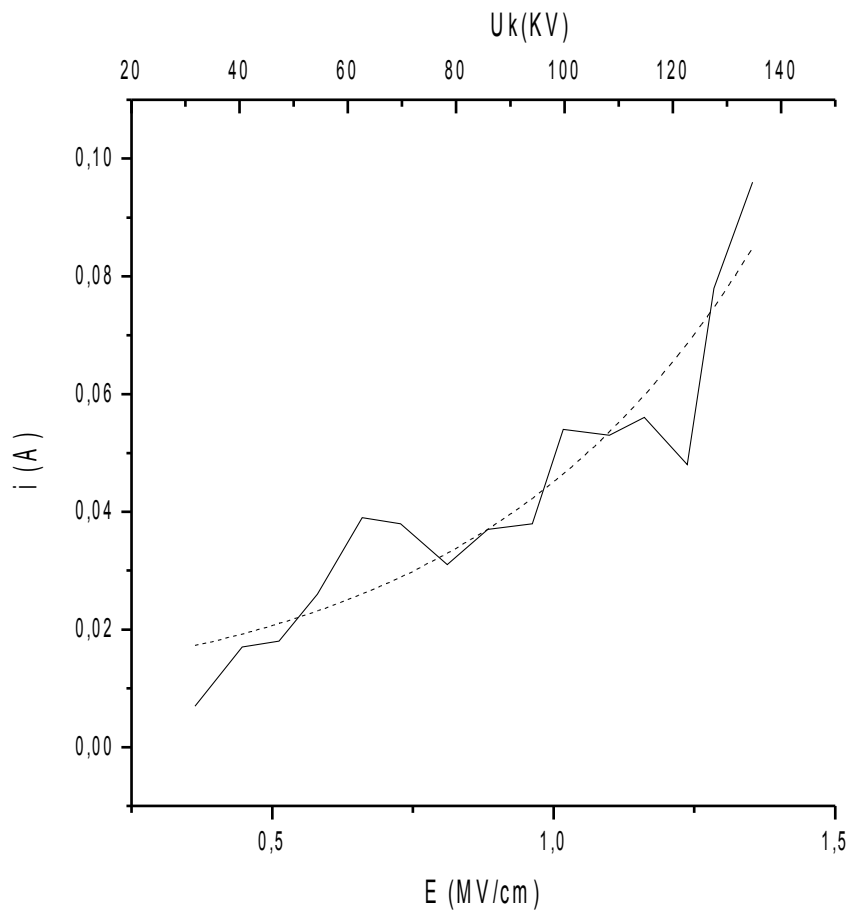


Διάγραμμα 18. $i_2 = f(U_k, E)$

i_2 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

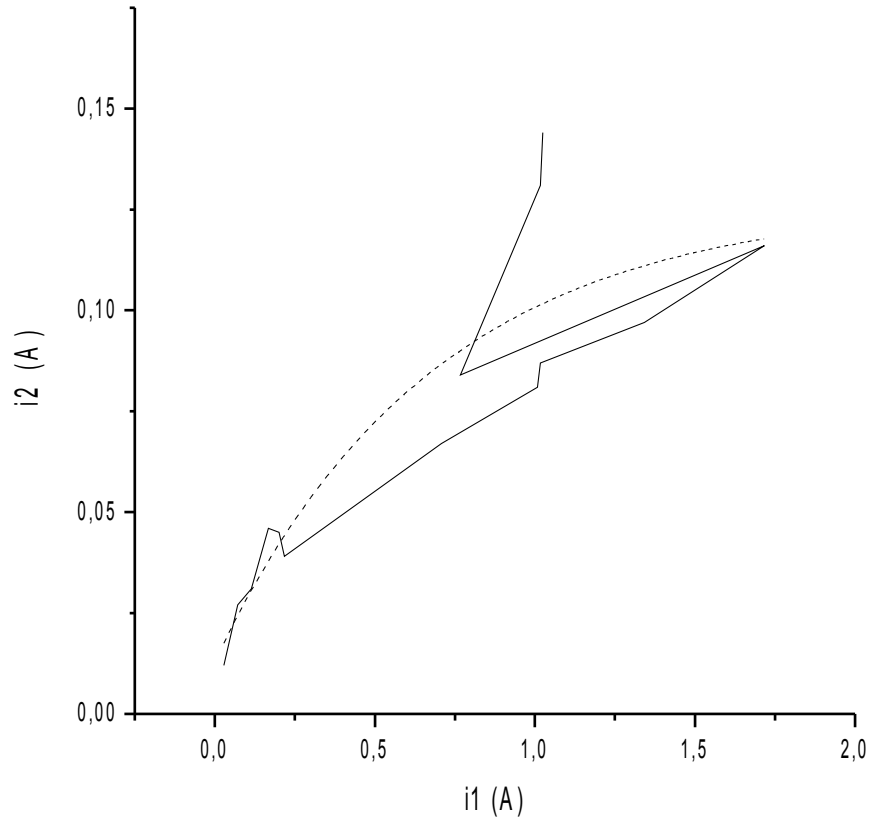


Διάγραμμα 19. $i = f(U_k, E)$

$i = i_2 - i_1$

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

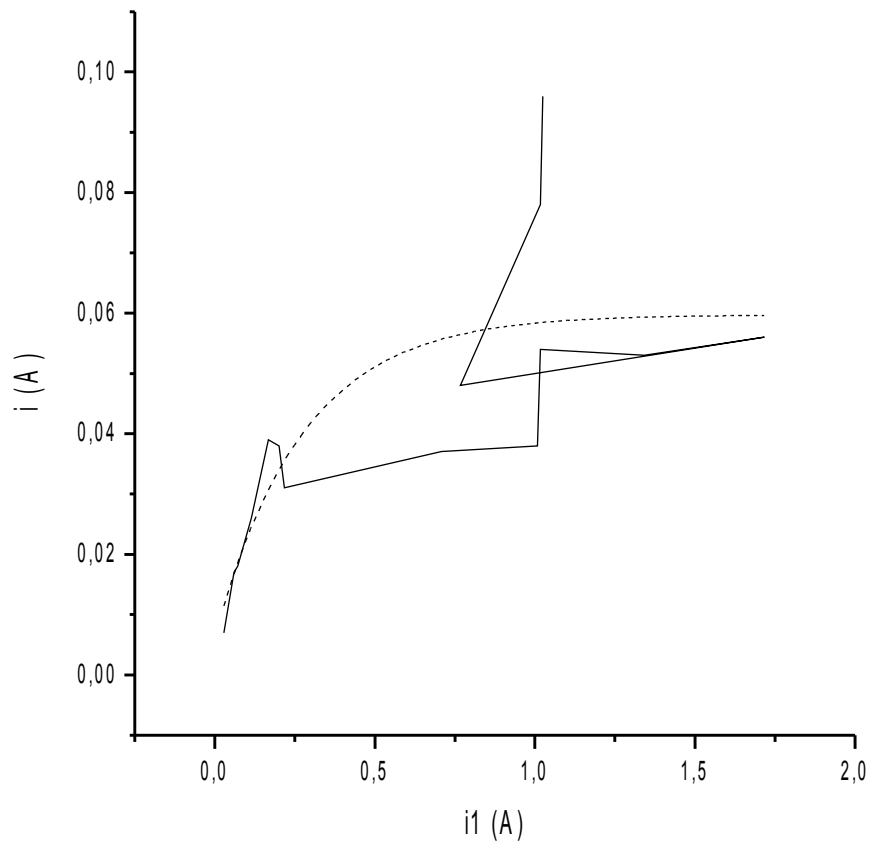
E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k



Διάγραμμα 20. $i_2 = f(i_1)$

i_1 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη

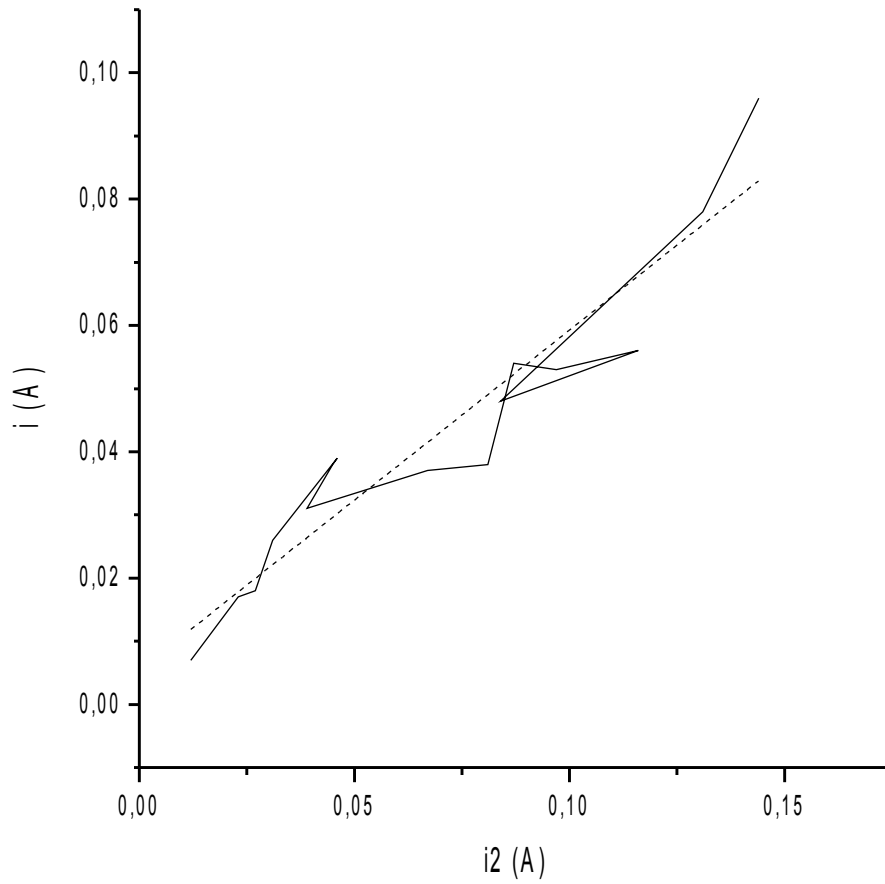
i_2 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση



Διάγραμμα 21. $i = f(i_1)$

$i = i_2 - i_1$

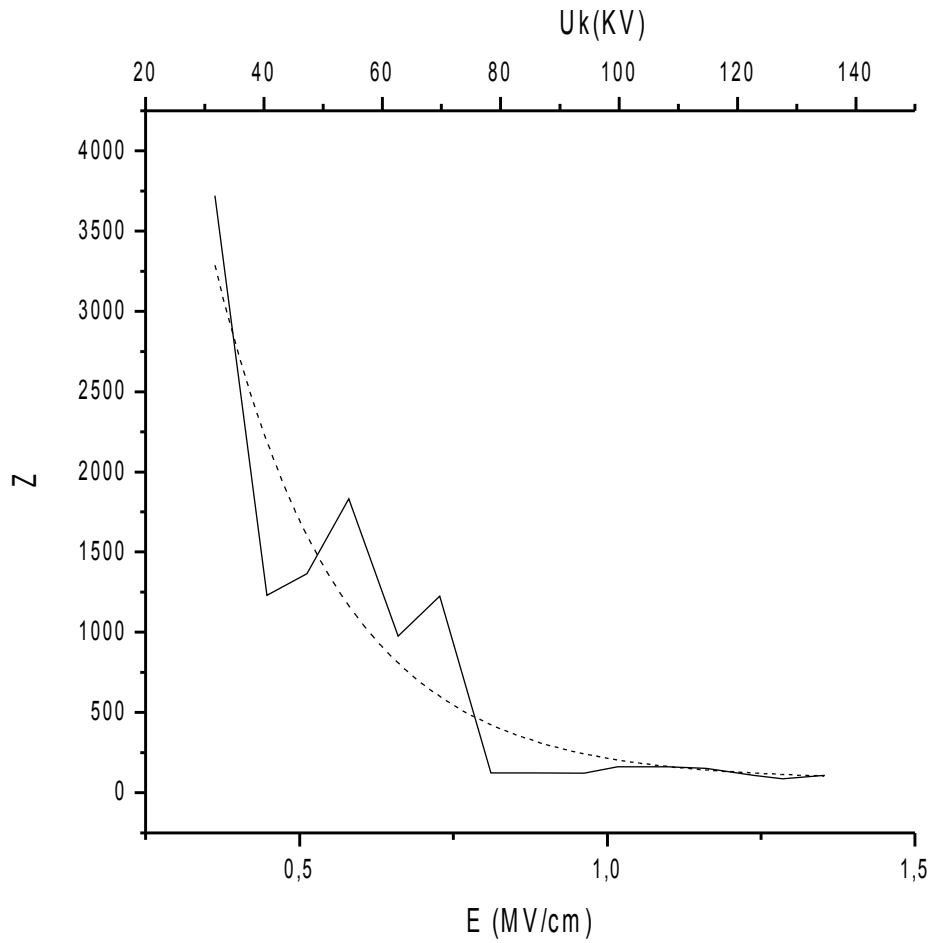
i_1 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη



Διάγραμμα 22. $i = f(i_2)$

$i = i_2 - i_1$

i_2 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση

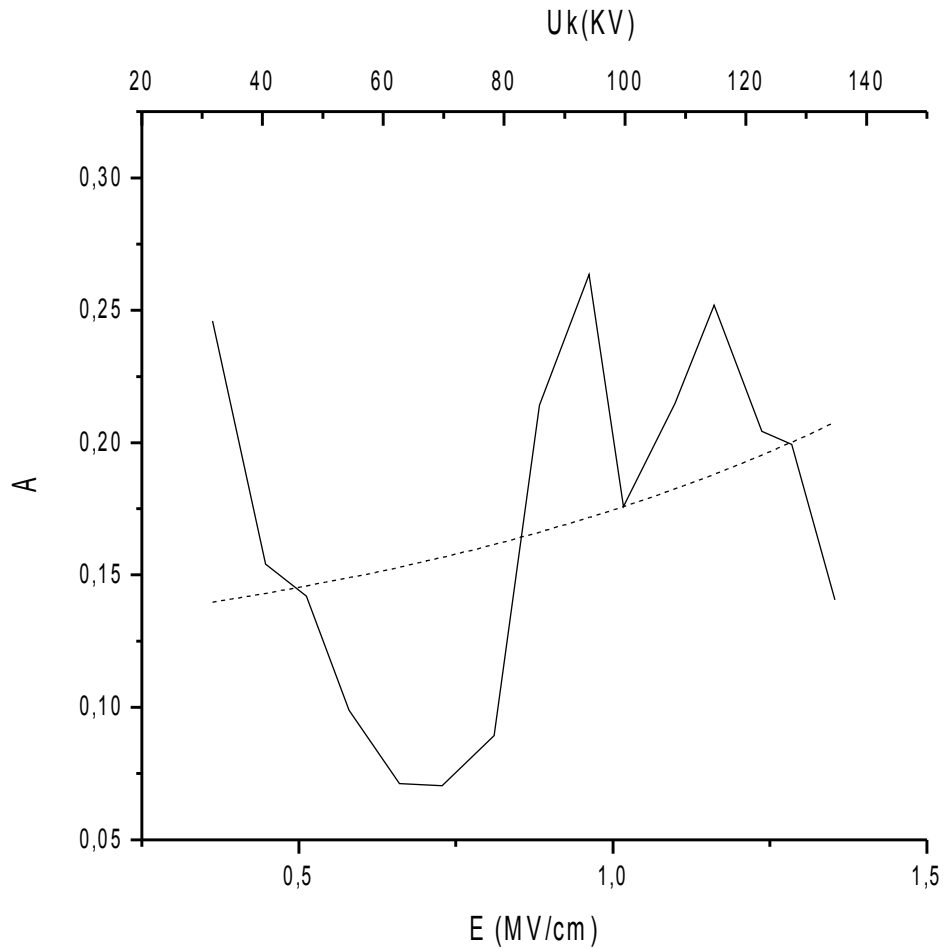


Διάγραμμα 23. $Z=f(U_k, E)$

Z : Αντίσταση δοκιμίου πολυμερούς στερεού μονωτικού

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k



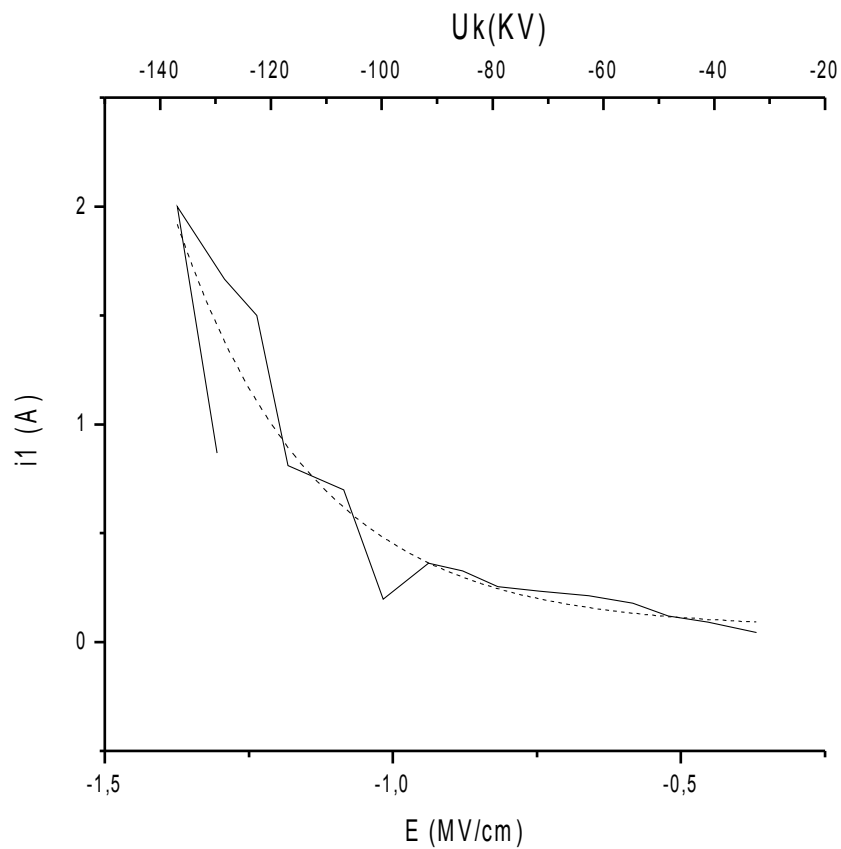
Διάγραμμα 24. $A=f(U_k, E)$

A : Συντελεστής (βλ. τυπολόγιο παρ. 4.1)

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

β) Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας -1,2/50μs

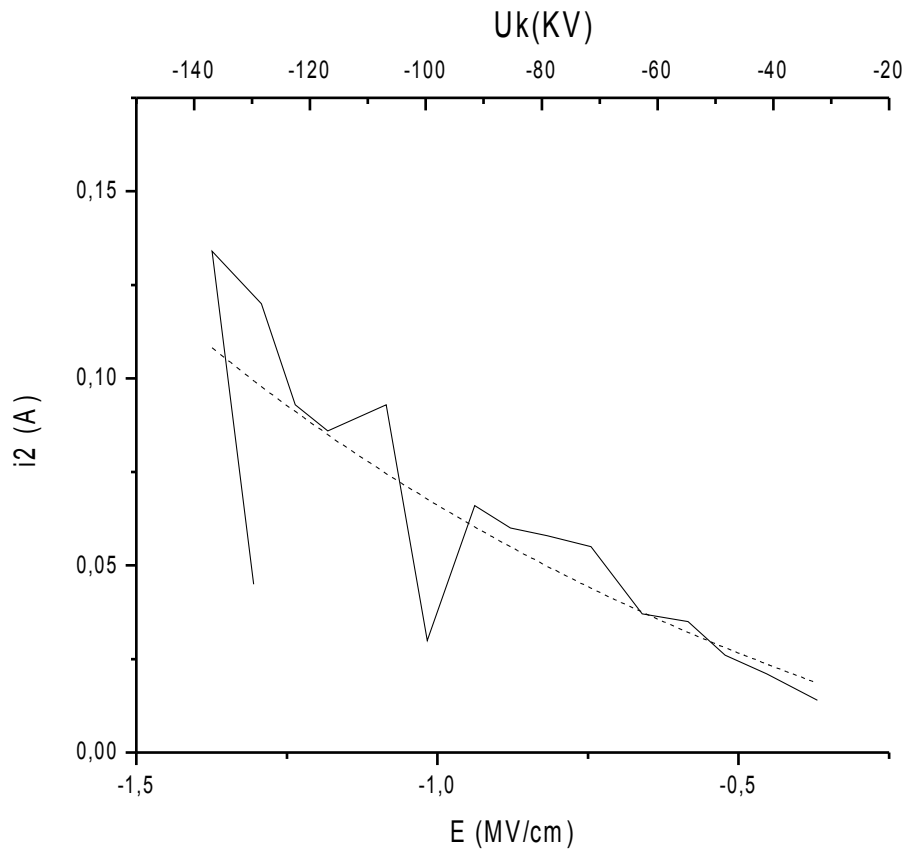


Διάγραμμα 25. $i_1 = f(U_k, E)$

i_1 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

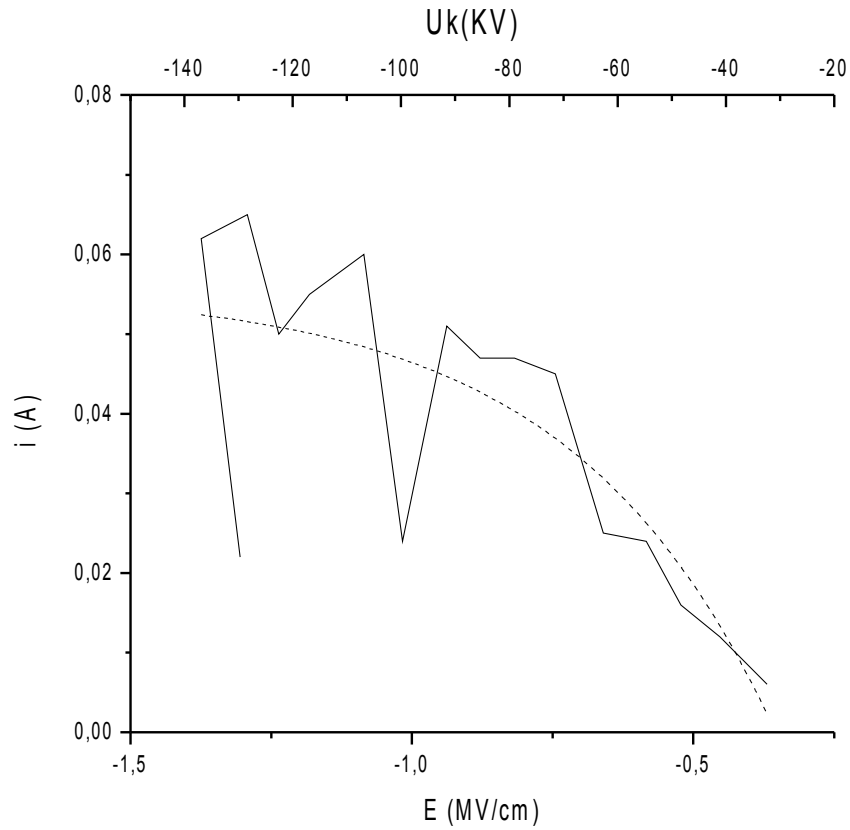


Διάγραμμα 26. $i_2 = f(U_k, E)$

i_2 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

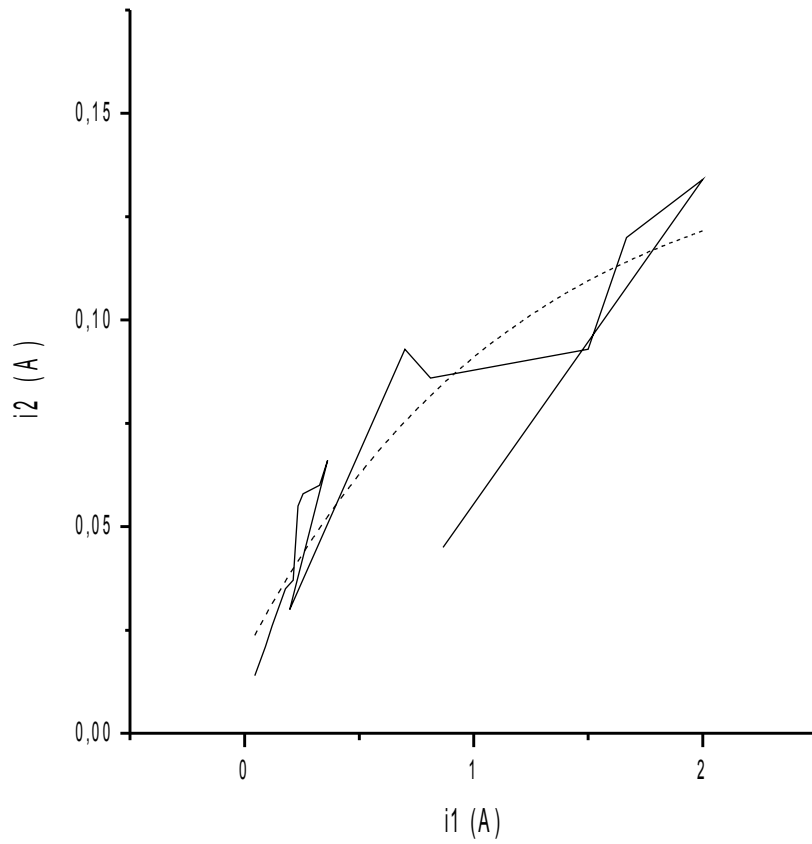


Διάγραμμα 27. $i = f(U_k, E)$

$i = i_2 - i_1$

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

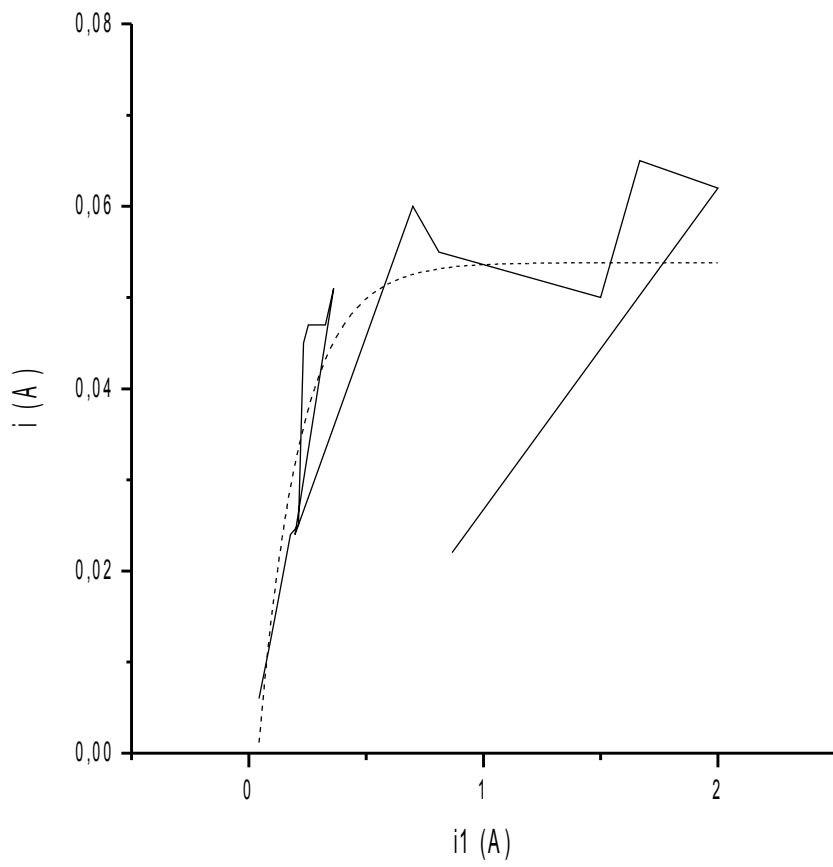
E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k



Διάγραμμα 28. $i_2 = f(i_1)$

i_1 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη

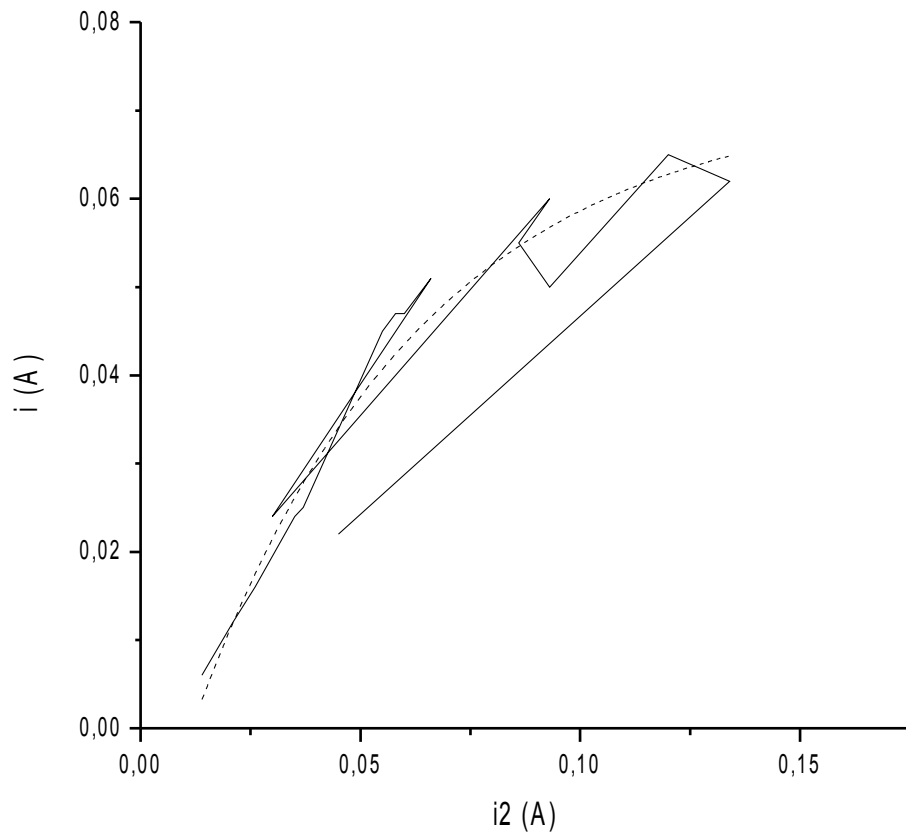
i_2 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση



Διάγραμμα 29. $i = f(i_1)$

$i = i_2 - i_1$

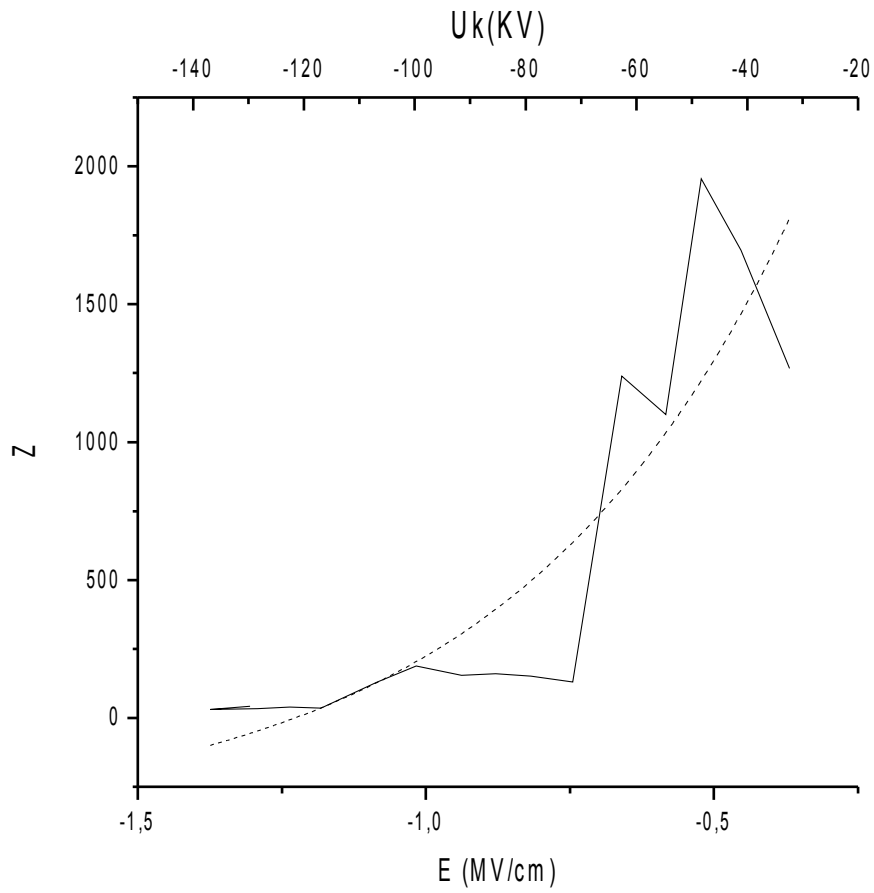
i_1 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έναρξη



Διάγραμμα 30. $i = f(i_2)$

$i = i_2 - i_1$

i_2 : Η Στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περαίωση

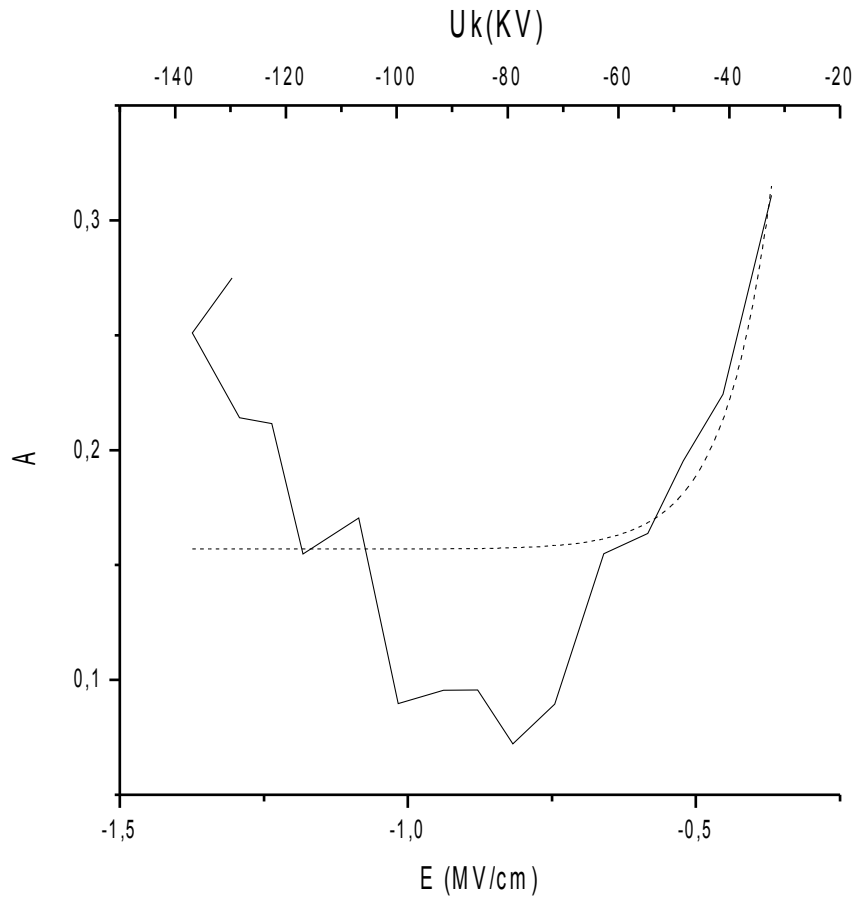


Διάγραμμα 31. $Z=f(U_k, E)$

Z : Αντίσταση δοκιμίου πολυμερούς στερεού μονωτικού

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k



Διάγραμμα 32. $A=f(U_k, E)$

A : Συντελεστής (βλ. τυπολόγιο παρ. 4.1)

U_k : Η στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E : Τιμή πεδίου που αντιστοιχεί στη U_k

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑ

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκαν οι καμπύλες των μεγεθών που υπολογίστηκαν με βάση τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν καθώς και τους τύπους που παρατίθενται στο αντίστοιχο τυπολόγιο. Σ' αυτό το κεφάλαιο της εργασίας έγινε προσπάθεια να προσεγγιστούν οι καμπύλες αυτές με βάση ένα εκθετικό ανάλογο που υπολογίστηκε βάση του συγκεκριμένου προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε.

Αξίζει να αναφερθούμε σε δύο συγκεκριμένα γεγονότα:

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

Από τους σημαντικότερους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν ένα πείραμα (όπως είναι οι μερικές εκκενώσεις που προκλήθηκαν από την εφαρμογή των κρουστικών τάσεων) είναι οι συνθήκες του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. Ένα μεγάλο μέρος λοιπόν των αποκλίσεων που παρατηρούμε πάντα μεταξύ πραγματικών και θεωρητικών μετρήσεων ή παραστάσεων οφείλεται στην ποικιλία των εξωτερικών συνθηκών που επικρατούν. Ένας άλλος παράγοντας, από τους πλέον σημαντικούς σε τέτοιου είδους πειράματα είναι τα χαρακτηριστικά του υλικού το οποίο υποβάλλεται στο πείραμα. Μετά από διαδοχικές εφαρμογές κρουστικών τάσεων σε ένα υλικό το τελευταίο είναι πιθανό να χάσει μεγάλο μέρος από τις ιδιότητες του με αποτέλεσμα να εμφανίσει διαφορετική συμπεριφορά από την αναμενόμενη.

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

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

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

Π.Δ. Μπούρκας και Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος
Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
Αθήνα 2004

2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Π.Δ. Μπούρκας
Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
Αθήνα 1998

3. ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΣΕΙΣ Ι

Ι.ΑΘ. Σταθόπουλος
Εκδόσεις Συμεών

4. Διπλωματική εργασία : <<Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων σε βιομηχανικά ηλεκτρομονωτικά υλικά υπο κρουστικές τάσεις χειρισμού και υπο κεραυνικές τάσεις>>.
Δ.Δ. Δημητριάδου

5. Διπλωματική εργασία : <<Μελέτη Μερικών Εκκενώσεων σε Βιομηχανικό Υλικό τύπου Pertinax υπο Κρουστική τάση σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα>>.
Α.Ε. Τσικουρλής
Αθήνα 2007

6. Bourkas P.D., Machias A.V., Stathopoulos I.A., Topalis F.V.: No-load Medium Voltage Switches Design for Industrial Applications, 4TH International Conference on High Technology in the Power Industry, June 4-7, 1989.

7. Dervos C., Bourkas P.D, Kayafas E.A.: High frequency current oscillations in solid, J. Physics D.-Applied Physics, Vol. 22 p.p 316-322, 1989.

8. Dervos C., Bourkas P.D, Kayafas E.A.: Potential profile of dielectrics during impulse application, Physica Status Solidi (a) Vol. 122, 123, p.p 123-130, 1989.

9. Dervos C., Bourkas P.D, Kayafas E.A, Stathopoulos I.A. : Eine mogliche Esklarung der Glimmentladungen in festen Isolierstoffen bei Stossspannungsbeanspruchung, etz-Archiv, Bd. 11, H. 5 S. 163-165, 1988.