



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**<<Διερεύνηση της έναρξης και της περάτωσης των μερικών εκκενώσεων
σε πολυμερή στερεά μονωτικά υλικά υπό κεραυνικές τάσεις
καταπόνησης 1.2/50μs.>>**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταύρος Α.Φίλης

Επιβλέπων: Κ.Γ.Καραγιαννόπουλος
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
Α.ΜΕΡΟΣ-ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1. ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ.....	6
2. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	7
2.1 Τα κριτήρια αξιολόγησης.....	7
2.2 Η διηλεκτρική αντοχή.....	7
2.3 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά.....	7
2.4 Ο συντελεστής απωλειών ($\tan\delta$).....	8
2.5 Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	9
2.6 Η επιφανειακή αγωγιμότητα.....	10
2.7 Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.....	11
2.8 Η μηχανική αντοχή.....	12
3. ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΦΥΣΗ ΤΟΥΣ.....	13
3.1 Η διάσπαση των αερίων.....	14
3.2 Τα υγρά μονωτικά.....	16
3.3 Τα στερεά μονωτικά.....	18
3.3.1 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών....	18
3.3.2 Μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών υλικών.....	19
3.3.2.1 Η θερμική διάτρηση.....	20
3.3.2.2 Η ηλεκτρική διάτρηση.....	22
3.3.2.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική Διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης).....	24
3.3.2.4 Η θερμοχημική διάτρηση.....	28

3.3.3 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων.....	30
3.3.4 Η επιφανειακή διάσπαση και υπερπήδηση.....	36
3.3.5 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών.....	37
3.3.5.1 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση.....	38
3.3.5.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση.....	39
B.ΜΕΡΟΣ.....	42
1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	42
2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ ΣΕ ΣΤΕΡΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ 1,2/50μs.....	45
3. ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	74
Βιβλιογραφία.....	75

Copyright © Σταύρος Α.Φίλης 2010.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Πρόλογος

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π κατά το ακαδημαϊκό έτος 2009-2010.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ.Περικλή Μπούρκα που μου εμπιστεύτηκε την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας και μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με έναν τόσο ενδιαφέροντα τομέα όπως είναι οι υψηλές τάσεις, καθώς επίσης και για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ'όλη τη διάρκεια της ολοκλήρωσης της.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τα αδέρφια μου κυρίως για την υπομονή τους και την αμέριστη στηριξή τους.

Περίληψη

Η εργασία αυτή χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, που αποτελεί και την εισαγωγή της εργασίας γίνεται μία εκτενή αναφορά στις βασικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών υλικών και παρουσιάζονται τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης τους. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της διάσπασης των μονωτικών υλικών (αέρια, υγρά, στερεά) και πως αυτή επηρεάζει τις ιδιότητες τους. Η μεταβολή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων κυρίως αλλά και των μηχανικών, των ηλεκτρομονωτικών υλικών ανάλογα με την τάση και την πεδιακή ένταση που εφαρμόζεται, είναι ένας πάρα πολύ σημαντικός παράγοντας και θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στο σχεδιασμό και στη κατασκευή μιας ηλεκτρικής διάταξης.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται αρχικά ο σκοπός της εργασίας. Επίσης σημειώνονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των στερεών μονωτικών υλικών που θα εξεταστούν καθώς και η μεταβολή αυτών συναρτήσει της μέγιστης κρουστικής τάσης και της μέγιστης πεδιακής έντασης.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι συγκεντρωτικοί πίνακες των μεγεθών που μετρήθηκαν ή υπολογίστηκαν και οι χαρακτηριστικές αυτών που θα βοηθήσουν στην πιο άμεση παρουσίαση τους αλλά και στη πιο εύκολη κατανόηση τους.

Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα παλμογραφήματα και κατά πόσο αυτά συμφωνούν με τη μαθηματική προσεγγισή των φαινομένων. Στο τέλος της εργασίας υπάρχει αναφορά στη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε ή είναι σχετική με το θέμα της εργασίας.

Να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο κομμάτι του θεωρητικού μέρους της εργασίας προέρχεται από το βιβλίο <<Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις Και Υλικά>> των καθηγητών Π.Δ Μπούρκα και Κ.Γ Καραγιαννόπουλου.

A.ΜΕΡΟΣ-ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ

Μονωτικά υλικά ή **μονωτές** χαρακτηρίζονται γενικά τα υλικά τα οποία έχουν πρακτικά μηδενική ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σχετικά ασθενή ηλεκτρικά πεδία συνεχούς ρεύματος.Όσον αφορά τη χημική τους σύνθεση οι μονωτές είναι σώματα ιοντικής,ομοιοπολικής ή μοριακής δομής.Ανάλογα βέβαια με το είδος του υλικού τα ιόντα των σωμάτων αυτών είναι αρκετά δυσκίνητα ή η ισχύς των ομοιοπολικών δεσμών είναι μεγάλη ή τα μοριά τους είναι σταθερά, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν στα ανωτέρω υλικά ευκίνητοι φορείς σε αξιόλογη ποσότητα που θα οδηγούσαν στην εκδήλωση μιας ουσιαστικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας.Σε πολλές περιπτώσεις ωστόσο και ανάλογα πάντα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος είναι δυνατόν ένα μονωτικό υλικό να παρουσιάσει ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Η ιδιότητα αυτή των μονωτικών υλικών να παρουσιάζουν μηδενική ή ελάχιστη ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι άκρως σημαντική και βρίσκει εφαρμογή σε όλες τις ηλεκτροτεχνικές διατάξεις και εγκαταστάσεις.Διαχωρίζουν με αποτελεσματικότητα ρευματοφόρους αγωγούς μεταξύ τους αλλά και με τη γη αποτρέποντας έτσι βραχυκυκλώματα τα οποία θα ήταν καταστροφικά σε κάθε περίπτωση.Για το λόγο αυτό ολόκληρες έρευνες έχουν αναπτυχθεί πάνω στα μονωτικά υλικά και στις ιδιοτητές τους καθώς και στο πως αυτές επηρεάζονται από τις εκάστοτε συνθήκες περιβάλλοντος.Μάλιστα σε αντιστοιχία προς την μηχανική αντοχή των υλικών έχει αναπτυχθεί μία εξειδικευμένη περιοχή της ηλεκτρολογίας ,που αφορά την ηλεκτρική αντοχή των μονώσεων.

Παρόλα αυτά όμως είναι δυνατόν όπως αναφέραμε και παραπάνω το μονωτικό υλικό να μην αντέξει και να επέλθει διάσπαση.Με τον όρο **διάσπαση** εννοεί κανείς την αγωγή σύνδεση δύο μεταξύ τους μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης.Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση επί της επιφάνειας ενός στερεού μονωτικού ονομάζεται **επιφανειακή διάσπαση**.Η διάσπαση στο περιβάλλον μέσω ενός στερεού μονωτικού,λόγω μείωσης της απόστασης μόνωσης του στερεού μονωτικού από αγωγίμες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνεια του (όπως π.χ συμβαίνει σε ρυπασμένους μονωτήρες) χαρακτηρίζεται ως **υπερπήδηση**.Η διάσπαση μέσω του όγκου ενός στερεού μονωτικού υλικού καλείται **διάτρηση**.Όταν η τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης δεν ξεπερνά μια ορισμένη τιμή τότε υπάρχει μία κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των εξασκούμενων δυνάμεων Coulomb και το πεδίο εξακολουθεί να είναι χωρικό.Αν όμως η τάση ξεπεράσει αυτήν την τιμή τότε καταστρέφεται η κατάσταση ισορροπίας και εκδηλώνονται περιορισμένης έκτασης εκκενώσεις,που ονομάζονται **μερικές εκκενώσεις**.Οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού χαρακτηρίζονται **εσωτερικές μερικές εκκενώσεις** ενώ εκείνες στην επιφάνεια ονομάζονται **εξωτερικές μερικές εκκενώσεις**.Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν την ξεχωριστή ονομασία **στεματοειδείς μερικές εκκενώσεις** (ή **Korona**).

Ένα βασικό κριτήριο για την επιλογή των διαφόρων μονωτικών υλικών είναι η διηλεκτρική αντοχή **Ed**. Πρόκειται για το πηλίκο της ελάχιστης τιμής της τάσης (U_d) που απαιτείται για να επέλθει διάσπαση προς την απόσταση των ηλεκτροδίων d σε ομογενές ηλεκτρικό.

$$E_d = U_d/d \quad (\text{σε kV/cm}). \quad (1.1)$$

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

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

2. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 Τα κριτήρια αξιολόγησης.

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

2.2 Η διηλεκτρική αντοχή

Στην διηλεκτρική αντοχή (E_d) έγινε αναφορά και πιο πάνω. Είναι ένας ορισμός για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών, μέσω της ελάχιστης τιμής της πεδιακής έντασης για τη διάσπαση ενός ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου.

2.3 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) δίνει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μιας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα. Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών, που συνθέτουν μια

μόνωση (π.χ περιελίξεις μετασχηματιστών και μονώσεις καλωδίων), θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο , ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειες τους για να μην διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.Ο συνδυασμός του χαρτιού με το μονωτικό λάδι είναι μία μόνωση, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην πράξη διότι:

- α) τα δύο αυτά μονωτικά υλικά έχουν την ίδια περίπου διηλεκτρική σταθερά
- β) το λάδι εμποτίζει το χαρτί και έτσι αποκλείει την ύπαρξη αέρα ο οποίος θα δημιουργούσε προβλήματα λόγω της μικρής διηλεκτρικής του αντοχής.

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

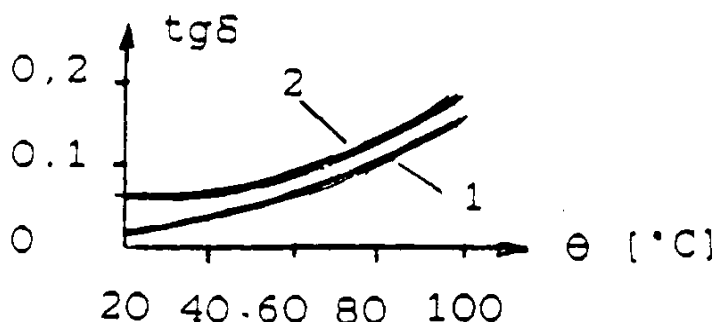
Πίνακας 2.3.1: Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20°C.

2.4 Ο συντελεστής απωλειών (tgδ)

Ο συντελεστής απωλειών είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού ή μιας μονωτικής διάταξης γενικότερα γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητα του. Ο συντελεστής απωλειών δίνεται απο τη σχέση:

$$tg\delta = IR/IC = G/\omega \quad (2.3.1)$$

Στην πράξη το ρεύμα **IR** αυξάνει γιατί η αγωγιμότητα του μονωτή γίνεται μεγαλύτερη, όπως συμβαίνει π.χ όταν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις ή όταν ο μονωτής καταπονείται θερμικά από τις απώλειες των αγωγών.Μάλιστα όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα η **tgδ** αυξάνει εκθετικά με την θερμοκρασία.



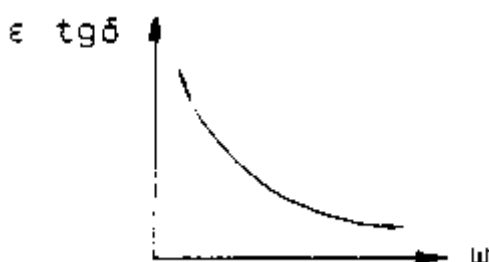
Σχήμα 2.4.1 tgδ ορισμένων διηλεκτρικών: 1) χαρτί 2) πορσελάνη

Περισσότερο εύχρηστος είναι όμως ο συντελεστής $\epsilon \cdot \text{tg}\delta$. Το γινόμενο αυτό χρησιμοποιείται επίσης για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές του γινομένου αυτού για διάφορα υλικά ανάλογα πάχους της μόνωσης.

Υλικό	Πάχος μόνωσης σε mm	$\epsilon \cdot \text{tg}\delta$
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

Πίνακας 2.4.1: Τάξη μεγέθους των τιμών $\epsilon \cdot \text{tg}\delta$ για ορισμένα διηλεκτρικά σε θερμοκρασία 20°C.

Επίσης στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή αυτού συναρτήσει της συχνότητας ω .



Σχήμα 2.4.2: $\epsilon \cdot \text{tg}\delta = f(\omega)$ για το ομοιογενές μονωτικό υλικό. (Υποτίθεται ότι η σ είναι σταθερή με την θερμοκρασία)

2.5 Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μία πολύ μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα που εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (πεδιακή ένταση, θερμοκρασία, υγρασία). Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι επομένως ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης επειδή εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς. Η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα στερεά μονωτικά σε τιμές πεδίου, που η καταπόνηση του διηλεκτρικού μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μόνο θερμική δίνεται από την σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-W/kT) = \sigma_0 \cdot \exp(\beta \cdot \theta) \quad (2.4-1)$$

όπου:

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

σ : η αρχική ηλεκτρική αγωγιμότητα

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

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

T: απόλυτη θερμοκρασία

β: ένας συντελεστής του υλικού

Από έρευνες που έχουν γίνει σε στερεά μονωτικά υλικά συμπαιρένεται ότι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνει απότομα με την ενέργεια των μερικών εκκενώσεων. Έχει διαπιστωθεί ότι η τιμή της πεδριακής έντασης είναι καθοριστική για την τιμή σ . Τέλος έχει επίσης αποδειχθεί ότι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός υλίου αυξάνει όταν αυτό προσβάλεται από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ειδικά η ακτινοβολία X είναι ικανή να μετατρέψει έναν μονωτή σε αγωγό.

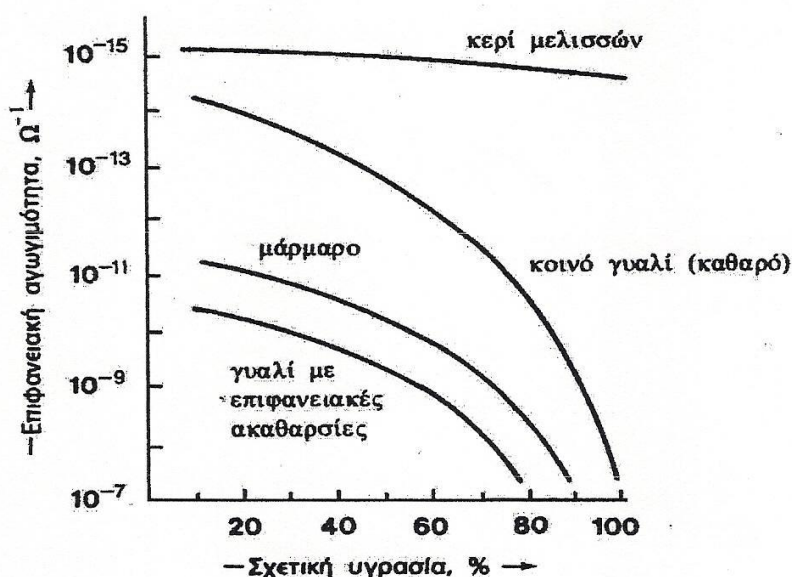
2.6 Η επιφανειακή αγωγιμότητα

Στα στερεά μονωτικά υλικά παρουσιάζεται μία ιδιομορφία όσον αφορά την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα. Εκτός από την ηλεκτρική αγωγιμότητα δια μέσου του όγκου τους παρουσιάζουν και μία επιφανειακή αγωγιμότητα με μετακίνηση φορέων κατά μήκος της επιφάνειας τους έξω από το κυρίως σώμα τους. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί αγωγιμότητας είναι ανεξάρτητοι ο ένας από τον άλλον. Για διάκριση η αγωγιμότητα δια μέσου του όγκου ονομάζεται ειδική αγωγιμότητα (σ) ενώ δια μέσου της επιφάνειας λέγεται ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα (σ_e). Έχουν μάλιστα και διαφορετικές μονάδες μέτρησης καθώς η ειδική αγωγιμότητα μετρείται σε $\Omega^{-1} \cdot m$ ενώ η επιφανειακή αγωγιμότητα σε Ω^{-1} .

Στα περισσότερα μονωτικά υλικά η ειδική αγωγιμότητα διαμέσου του όγκου τους είναι σχετικά πολύ μικρή και έτσι η επιφανειακή αγωγιμότητα παίζει πρωτεύοντα ρόλο. Η τιμή της μάλιστα στα στερεά μονωτικά υλικά αυξάνεται σημαντικά όταν στην επιφάνειά τους συγκεντρωθούν ξένες επικαθήσεις όπως σκόνες, υγρασία κλπ. Το ίδιο συμβαίνει και όταν η επιφάνεια καταπονεθεί θερμικά από τις απώλειες Joule κυρίως. Ειδικά η υγρασία είναι πάρα πολύ σημαντικός παράγοντας και αυξάνει κατακόρυφα την επιφανειακή αγωγιμότητα. Έχει παρατηρηθεί ότι η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα του γυαλιού για παράδειγμα όταν αυτο βρεθεί σε περιβάλλον με έντονη υγρασία και ακαθαρσίες αυξάνει περίπου εκατό χιλιάδες φορές.

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

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής επιφανειακής αγωγιμότητας κάποιων υλικών συναρτήσει της υγρασίας του περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.6.1 Μεταβολή της ειδική επιφανειακής αγωγιμότητας συναρτήσει της υγρασίας του περιβάλλοντος.[βιβλ.5]

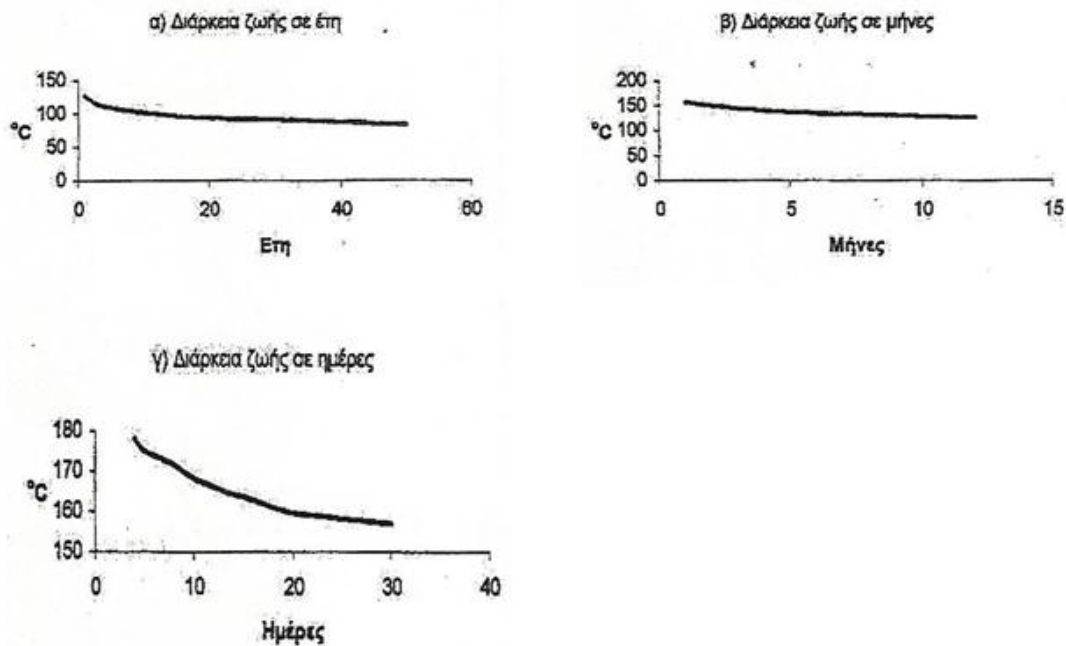
2.7 Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Ένα επίσης σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των μονωτικών υλικών είναι και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ). Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις θέσεις όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη. Τέτοιες θέσεις μπορεί να είναι ανομοιογένειες στον όγκο ή και στην επιφάνεια του μονωτικού ή ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο λάδι. Η απαιτούμενη θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντοτε κατά τη λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπών, κλπ). Γενικά η θερμική ειδική αγωγιμότητα συμβαδίζει με την ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές του συντελεστή λ για διάφορα διηλεκτρικά.

Μονωτικό Υλικό	Πάχος d [mm]	λ [W·cm/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
Χαρτί στο λάδι	<2	0,003
Σκληρό ελαστικό	<3	0,001
Ξύλο	<3	0,003
Glimmer	0,01...0,1	0,014-0,03

Πίνακας 2.7.1: Τιμές του συντελεστή λ για ορισμένα μονωτικά υλικά

Όπως καταλαβαίνει κανείς είναι ιδιαίτερα σημαντική η επίδραση της θερμοκρασίας στην διάρκεια ζωής των μονωτικών υλικών και έχουν γίνει αρκετές έρευνες πάνω στο θέμα αυτό. Στα παρακάτω διαγράμματα φένεται η διάρκεια ζωής του χαρτιού ανάλογα με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 2.7.1: Διάρκεια ζωής του χαρτιού ανάλογα με τη θερμοκρασία.

2.8 Η μηχανική αντοχή

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μηχανική αντοχή των υλικών λόγω των μεγάλων δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά (δυνάμεις ηλεκτρικού πεδίου και μηχανικές δυνάμεις). Στην περίπτωση αυτή το στερεό μονωτικό αντιμετωπίζεται ως ένα μηχανολογικό εξάρτημα και υπόκειται στους κανόνες της μηχανικής αντοχής.

3. ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΦΥΣΗ ΤΟΥΣ

Από τα εκατομμύρια χιλιόμετρα των εναέριων γραμμών γίνεται φανερό ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι το περισσότερο χρησιμοποιούμενο μονωτικό υλικό της κατηγορίας αυτής. Αποτελεί επίσης τη μόνωση ενός πολύ μεγάλου αριθμού ηλεκτροτεχνικών κατασκευών όπως : διακόπτες μέσης τάσης (αποζεύκτες, γειωτές, διακόπτες φορτίου και ασφαλειαποζεύκτες), πίνακες μέσης τάσης, αυτόματοι διακόπτες του δικτύου μεταφοράς της ενέργειας (διακόπτες υπό πίεση 20 ατμόσφαιρων), κλπ. Τα αέρια μονωτικά έχουν την ιδιαιτερότητα ότι μετά το τέλος της διάσπασης τους αποκτούν και πάλι την μονωτική τους ικανότητα. Το γεγονός αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των στερεών μονωτικών, των οποίων η διάσπαση συνοδεύεται από παραμορφώσεις ανάλογα βέβαια με την καταπόνηση του όπως κάψιμο, διάτρηση κλπ. Παρ' όλα αυτά όμως έχει συγκριτικά με τα άλλα μονωτικά υλικά, χαμηλή διηλεκτρική αντοχή και κατά συνέπεια απαιτούνται μεγάλα διάκενα αέρος για να αποφευχθούν οι διασπάσεις πράγμα που γίνεται αντιληπτό στις εφαρμογές υψηλών τάσεων κυρίως. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές έρευνες με σκοπό την ανάπτυξη αερίων μονωτικών με χαρακτηριστικά καλύτερα από εκείνα του ατμοσφαιρικού αέρα.

Η διηλεκτρική αντοχή του αέρα μεταβάλλεται σε συνδυασμό με την εκάστωτε επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία ενά εξαρτάται άμεσα από την πυκνότητα του. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς βρίσκει εφαρμογή σε συστήματα διακοπών ισχύος τα οποία χρησιμοποιούν αέριο μόνωσης υψηλής πυκνότητας προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση των ελευθερών αποστάσεων μόνωσης καθώς επίσης η σβέση του τόξου. Ένα τέτοιο σπουδαίο αέριο είναι το εξαφθοριούχο θείο SF₆ που χρησιμοποιείται κυρίως σε διακόπτες και πίνακες υψηλής τάσης ως μονωτικό και ψυκτικό μέσο. Είναι άχρωμο, άοσμο, άφλεκτο, χημικά αδρανές και μη τοξικό. Υπό τη δράση του ηλεκτρικού τόξου, το SF₆ αποσυντίθεται σε αέρια και σε στερεά προϊόντα υπό μορφή σκόνης. Τα αέρια προϊόντα είναι εν μέρει διαβρωτικά, όταν υπάρχει υγρασία, αλλά τόσο η καθαρότητα του αερίου όσο και ειδικά φίλτρα εκμηδενίζουν τον κίνδυνο διάβρωσης.

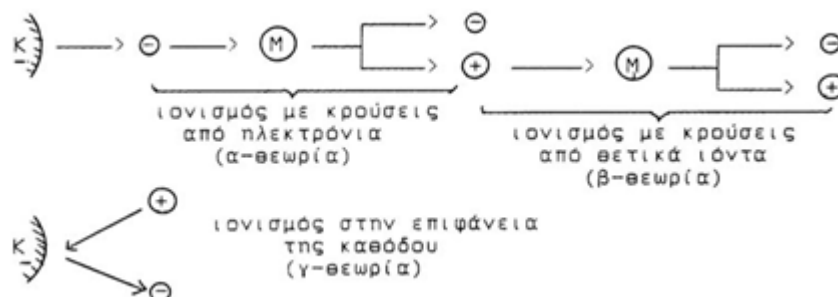
Στην ατμοσφαιρική πίεση, η διηλεκτρική αντοχή του SF₆ είναι περίπου τριπλάσια από την αντίστοιχη του αέρα ή του αζώτου. Σε σχέση βέβαια με τα μονωτικά έλαια μειονεκτεί στην ατμοσφαιρική πίεση αλλά υπερτερεί σε υψηλότερες πιέσεις. Τέλος το αέριο αυτό είναι εξαιρετικό για τη σβέση τόξων γιατί αφ' ενός διευκολύνει τη διακοπή τους και αφ' ετέρου δεν επιτρέπει την επαναφή τους.

Βέβαια επειδή τα αέρια δεν παρέχουν μηχανική υποστήριξη χρησιμοποιούνται πάντα σε συνδυασμό με κάποιο στερεό μονωτικό υλικό. Η επιφάνεια μεταξύ του στερεού και του αερίου μονωτικού θα πρέπει να εξεταστεί με ιδιαίτερη προσοχή καθ' ότι οι αδυναμίες της περιοχής αυτής είναι δυνατόν να επηρεάσουν τη λειτουργία της διάταξης με πιθανά αποτελέσματα τις μερικές εκκενώσεις, την υπερπήδηση και τη διάσπαση των μονωτικών. Όση βέβαια προσοχή

και να δοθεί στη σχεδίαση η διάσπαση μπορεί να συμβεί όταν η διάταξη βρεθεί κάτω από αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα η ρύπανση, σε συνδυασμό με την υγρασία.

3.1 Η διάσπαση των αερίων

Η διάσπαση των αερίων για μικρά διάκενα ερμηνεύεται από τη θεωρία του Thowsend και το νόμο του Paschen. Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τη θεωρία Thowsend παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.1.1 Μακροσκοπικό μοντέλο για τις περιπτώσεις ιονισμού με κρούσεις κατά τη θεωρία Thowsend.

K : κάθοδος

- : ηλεκτρόνιο

+ : θετικό ιόν

M : μόριο

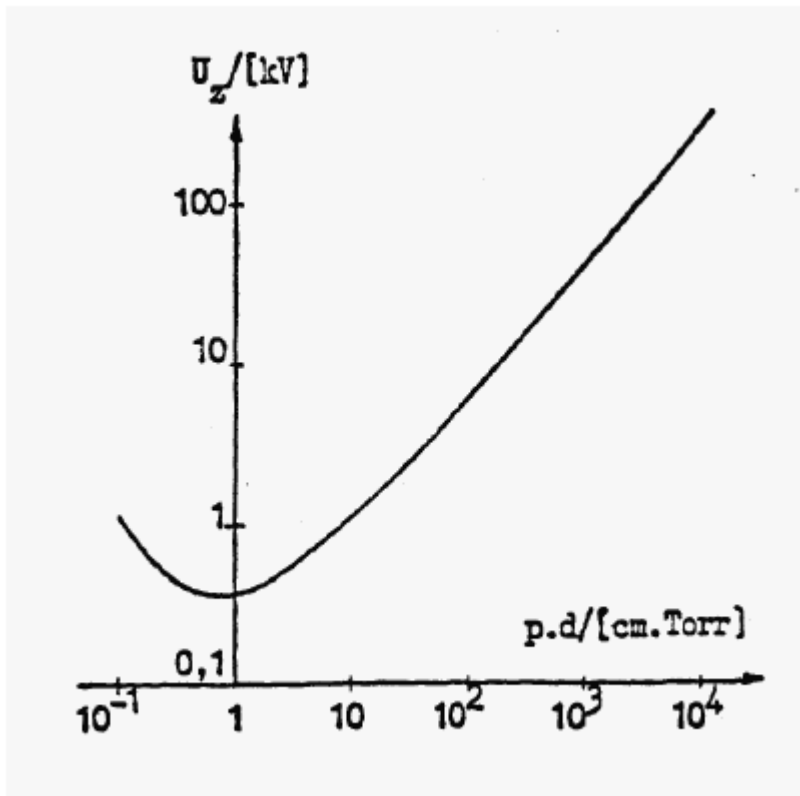
Σύμφωνα με αυτό η δημιουργία των ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται τρεις δυνατότητες ιονισμού:

- Ιονισμός με κρούσεις
- Ιονισμός με κρούσεις από θετικά ιόντα
- Ιονισμός στην επιφάνεια της καθόδου

Κατά το νόμο του Paschen η τάση έναυσης (U_z : τάση αυτοσυντήρησης του ιονισμού) διέπεται από τη σχέση :

$$U_z = f(p \cdot d) \quad (3.1-1)$$

όπου p είναι η πίεση του αερίου και d η απόσταση των ηλεκτροδίων. Η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης για τον αέρα σε ομογενές πεδίο δίνεται στο παρακάτω σχήμα.

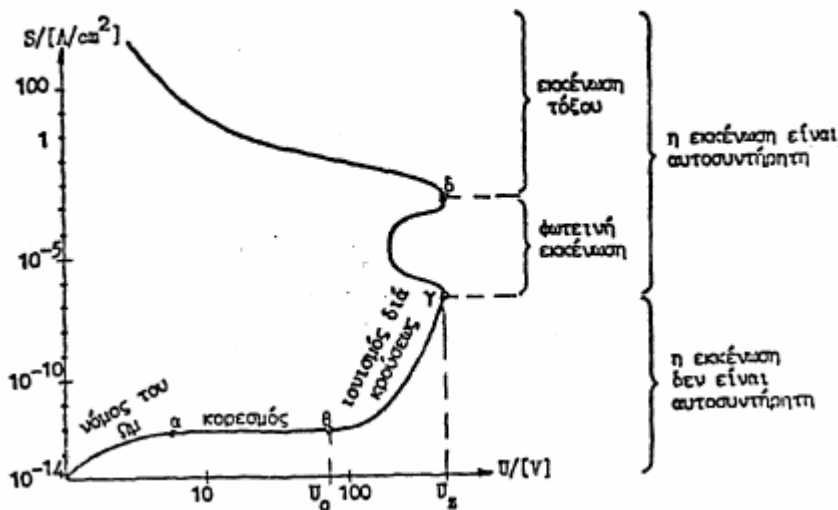


Σχήμα 3.1.2 $U_z = f(p \cdot d)$ για τον αέρα σε κανονική θερμοκρασία

Από τις μετρήσεις που έχουν γίνει για την ερμηνεία των φαινομένων, τα οποία εκδηλώνονται προ και κατά τη διάσπαση των αερίων μονωτικών, έχει ιδιαίτερη σημασία η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης, κατά την καταπόνηση με αναλλασόμενη τάση (υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας). Η χαρακτηριστική αυτή δίνεται κατά τον G. Oberdorffer στο παρακάτω σχήμα για την πυκνότητα ροής S ανάλογα με την ενεργό τιμή της εκφραζόμενης τάσης U . Στη χαρακτηριστική $S=f(U)$ επισημαίνονται δύο βασικές περιοχές της εκκένωσης (μη αυτοσυντηρούμενη εκκένωση και αυτοσυντηρούμενη) καθώς και διάφορες υποπεριοχές τους (νόμος του Ohm, ιονισμός με κρούσεις, κορεσμός, φωτεινή εκκένωση και εκκένωση τόξου).

Ο όρος **μη αυτοσυντηρούμενη εκκένωση** αναφέρεται στην απαίτηση για εξωτερική επίδραση στο ηλεκτρομονωτικό αέριο, ώστε να συμβεί από ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς μια ροή ρεύματος. Κατά την **αυτοσυντηρούμενη** δεν ισχύει η απαίτηση αυτή.

Ο μηχανισμός διάσπασης μεγάλων διακένων αποδίδεται στη δημιουργία διαδοχικών οχετών. Στην περίπτωση αυτή δεν ισχύει ο νόμος του Paschen. Η θεωρία της διάσπασης με διαδοχικούς οχετούς βασίζεται στον ιονισμό, που εκδηλώνεται αρχικά στην περιοχή της ανόδου, με αποτέλεσμα να προκαλείται πρακτικά μείωση της απόστασης του διακένου και να διευκολύνεται η εκδήλωση διαδοχικών οχετών, ανάλογα με τη μορφή του πεδίου και την απόσταση των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 3.1.3 Χαρακτηριστική “τάσης-πυκνότητας ροής” των αερίων υπό κανονικές συνθήκες, κατά τον G.Oberdorffer.

U_0 : αρχική τάση

U_z : τάση έναυσης

S : πυκνότητα ροής

3.2 Τα υγρά μονωτικά

Τα υγρά μονωτικά έχουν αρκετά μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τα αέρια σε ατμοσφαιρική πίεση : διηλεκτρική αντοχή του αέρα 21kV/cm και διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού μετασχηματιστών 60 έως 200kV/cm. Η σημασία του στις πρακτικές εφαρμογές είναι μεγάλη διότι έχουν τα παρακάτω γνωρίσματα :

α) Μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με αποτέλεσμα να διευκολύνουν την απαγωγή θερμότητας, η οποία δημιουργείται στους αγωγούς, τις επαφές διακοπών και τους σιδηροπυρήνες μετασχηματιστών.

β) Ο συνδυασμός τους με στερεά μονωτικά δεν επιτρέπει την ύπαρξη του αέρα, ο οποίος προκαλεί βλάβες στις επιφάνειες των μονωτικών. Αυτό επιτυγχάνεται όταν η πλήρωση του χώρου, που καταλαμβάνει το υγρό μονωτικό, γίνεται υπό συνθήκες κενού σε ορισμένη θερμοκρασία. Τυπικό παράδειγμα της διαδικασίας αυτής είναι η πλήτωση των δοχείων των μετασχηματιστών υψηλών τάσεων με λάδι. Ειδικά ο συνδυασμός χαρτί-λάδι έχει μεγάλη εφαρμογή λόγω της περίπου ίδιας σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς που έχουν τα συγκεκριμένα υλικά.

Το κυρίως χρησιμοποιούμενο υγρο μονωτικό, σε μετασχηματιστές, καλώδια, διακόπτες και πυκνωτές είναι το μονωτικό λάδι. Παράγεται σαν κλάσμα του πετρελαίου αλλά η χημική του σύσταση διαφέρει από αυτήν του πετρελαίου. Τα μονωτικά λάδια διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1) **Τα μεθανέλαια** : Στα λάδια αυτά κυριαρχούν κεκορεσμένοι υδρογονάνθρακες τύπου παραφίνης ενώ από γεωλογικής άποψης είναι τα παλαιότερα λάδια.

2) **Τα ναφθανέλαια** : Κυριαρχούν ακόρεστοι υδρογονάνθρακες τύπου ναφθαλίνης.

3) **Τα ναφθαλμεθανέλαια** : Είναι μίγμα των δύο προηγούμενων, χωρίς όμως να κυριαρχεί κανένας από τους δύο υδρογονάνθρακες.

Η θερμοκρασία ανάφλεξης του μονωτικού ελαίου είναι 130 με 150 °C. Γι'αυτό, ως μέγιστη θερμοκρασία λειτουργείας τους καθορίζεται στις προδιαγραφές (VDE.IEC κλπ) η θερμοκρασία των 90 °C.

Τα μονωτικά λάδια δεν έχουν τοξικές ουσίες και είναι ακίνδυνα για το προσωπικό κατά τις διάφορες εργασίες κατασκευών και συντήρησης (εκτός βέβαια από εργασίες που μπορούν να προκαλέσουν τιμές της θερμοκρασίας στην περιοχή ανάφλεξης).

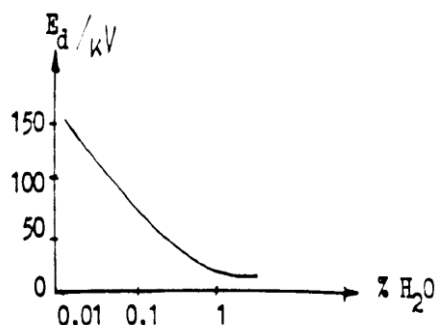
Τα μονωτικά λάδια οξειδώνονται από τον αέρα με αποτέλεσμα να μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή τους. Γι'αυτό η παρουσία αέρα αποκλείεται στις κατασκευές που χρησιμοποιείται το μονωτικό λάδι. Επίσης η υγρασία προκαλεί δραστική μείωση στη διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ελαίου. Η διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών ελαίων εξαρτάται, όπως εκείνη των αερίων και των στερεών μονωτικών από τη διάταξη των ηλεκτροδίων και τη μορφή της τάσης. Γενικά ισχύει:

1) Όσο ανομοιογενές είναι το πεδίο τόσο μειώνεται η τάση διάσπασης.

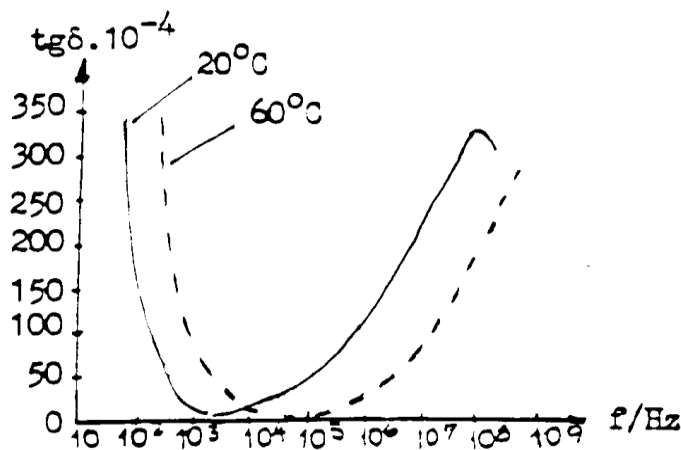
2) Η διηλεκτρική αντοχή υπό κρουστική τάση είναι μεγαλύτερη από ότι με εναλλασσόμενη τάση

3) Η διηλεκτρική αντοχή υπό συνεχή τάση είναι μεγαλύτερη από ότι με εναλλασσόμενη τάση.

4) Η τάση διάσπασης κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις είναι μεγαλύτερη κατά την αρνητική πολικότητα από ότι κατά την θετική (φαινόμενο πολικότητας).



Σχήμα 3.2.1 Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού ελαίου ανάλογα με το ποσοστό το νερού



Σχήμα 3.2.2 Μεταβολή της $\text{tg}\delta$ των μονωτικών ελαίων ανάλογα με τη θερμοκρασία και τη συχνότητα.

3.3 Τα στερεά μονωτικά

Τα στερεά μονωτικά υλικά εξαιτίας της σταθερότητας της μοριακής τους δομής δεν έχουν τη δυνατότητα να επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση μετά από μία διάσπαση. Η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη και η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη. Επίσης τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των στερεών μονωτικών, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού γήρανσης, της διάσπασης τους.

Τα στερεά μονωτικά χρησιμεύουν στις μονώσεις ηλεκτρικών μηχανών, σε καλώδια, για την κατασκευή μονωτήρων κάθε είδους κλπ. Επίσης χρησιμοποιούνται ως μονωτικά υλικά στην κατασκευή πυκνωτών. Πολλές φορές συνδυάζονται με τα υγρά μονωτικά όπως βέβαια ο συνδυασμός χαρτί-λάδι. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός αποσκοπεί κυρίως στον εμποτισμό του στερεού μονωτικού με το υγρό, ώστε να αποφεύγονται οι θύλακες αερίου.

3.3.1 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών

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

Από τις έρευνες που έχουν γίνει για τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης

των στερεών μονωτικών υλικών μπορεί κανείς να ομαδοποιήσει τις μεθόδους, που εφαρμόζονται, σε δύο βασικές κατηγορίες :

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

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

Σύμφωνα με την μακροσκοπική θεωρία τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση των ακουστικών και φωτεινών φαινομένων, καθώς και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού. Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κυρίως ηλεκτρόνια κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση τους στα ηλεκτρόδια. Πρόκειται δηλαδή για μία συσχέτιση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση, με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται.

3.3.2 Μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών

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

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

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

- α) η θερμική διάτρηση**
- β) η ηλεκτρική διάτρηση (δενδροειδής και ηλεκτρομηχανική)**
- γ) η ηλεκτροχημική διάτρηση ή γήρανση**
- δ) η θερμοχημική διάτρηση**

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

3.3.2.1 Θερμική διάτρηση

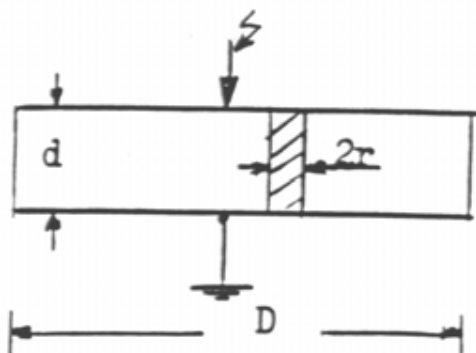
Η μορφή της διάτρησης αυτής συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule (π.χ κακή απαγωγή θερμότητας από την μόνωση ενός καλωδίου λόγω σκόνης και ύγρανσης). Η εικόνα που παρουσιάζει το θερμικά καταπονούμενο υλικό είναι συνήθως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

$$\sigma_1 = \sigma_0 \cdot e^{\beta\theta} \quad (3.3.2.1-1)$$

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

$$P = U^2/R = (U^2 \cdot \sigma_0 \cdot e^{\beta\theta} \cdot A)/d \quad (3.3.2.1-2)$$

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



Σχήμα 3.3.2.1-1 Απλοποιημένη παράσταση του οχετού διάτρησης λόγω των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού

D : διάμετρος δοκιμίου

d : πάχος του μονωτικού

2r: διάμετρος του οχετού διάτρησης

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

$$P = P_\alpha + C_0(d\theta/dt) \quad (3.3.2.1-3)$$

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

$$P_{\alpha} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot k \cdot \theta \quad (3.3.2.1-4)$$

όπου k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

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

$$U^2/R = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot k \cdot \theta \quad (3.3.2.1-5)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δύο συναρτήσεις της θερμοκρασίας ($P=f(\theta)$ και $P_{\alpha}=f(\theta)$). Για το λόγο αυτό η οριακή τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι από τη διαφόριση ως προς θ , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης (3.3.2.1-4) έχουμε:

$$(\beta \cdot U^2 \cdot \sigma_0 \cdot e^{\beta\theta} \cdot A)/d = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot k \cdot \theta \quad (3.3.3.1-6)$$

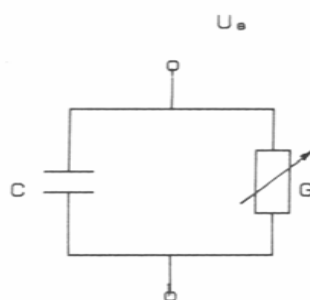
Άπό τις δύο παραπάνω σχέσεις φαίνεται ότι :

$$\beta \cdot \theta = 1 \quad (3.3.2.1-7)$$

$$\text{και επίσης } U_{\theta} = d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{e \cdot \beta \cdot \sigma_0 \cdot r}} \quad (3.3.2.1-8)$$

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_{θ} μπορεί να αναπαραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μία αγωγιμότητα G .

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



Σχήμα 3.3.2.1-2 Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule.

G_0 : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή

G_{\max} : αγωγιμότητα για τη διάτρηση

C : χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή

3.3.2.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

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

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

α) αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις (όπως στα αέρια μονωτικά)

β) μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και

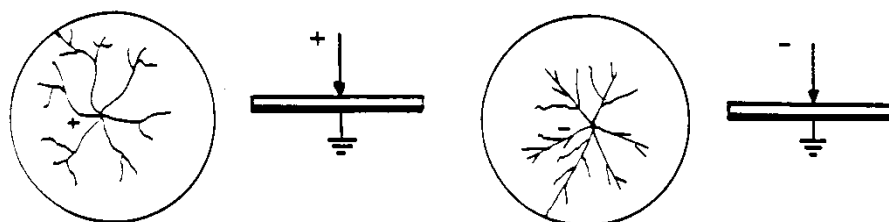
θετικούς φορείς, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού

πεδίου), ή

γ) συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων

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

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



Σχήμα 3.3.2.2-1 Προς επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη

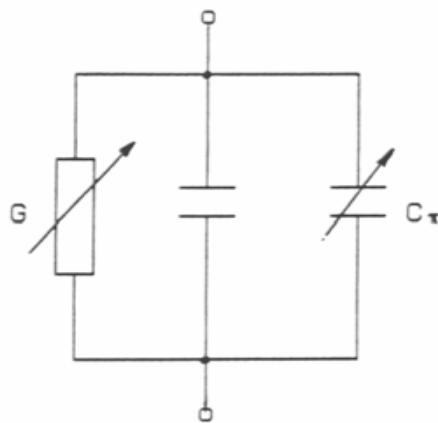
Στην περίπτωση της θετικής ακίδας ο δενδρίτης έχει λόγω των δυνάμεων Coulomb που εξασκούνται μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων κατά την κίνηση τους προς την ακίδα, αρκετές διακλαδώσεις (κατά κανόνα μη ευθέγραμμες).

Όταν όμως η ακίδα είναι αρνητική, οι δυνάμεις απομάκρυνσης μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων είναι λόγω της μεγάλης ακτίνας

μικρότερες και έτσι οι διαδρομές είναι περίπου οι ακτίνες κύκλου, των οποίων όμως η λαμπρότητα μειώνεται προς την περιφέρεια του. Έχουμε δηλαδή ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας, ομοιότητα με τις εικόνες Lichtenberg κατά τη μέτρηση κεραυνών.

Η διάτρηση υπό μορφή **οχετού ή ηλεκτρομηχανική** οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από ότι κατά τη δενδροειδή διάτρηση. Στα πολυμερή υλικά διαχωρίζονται τα μόρια σε αρνητικού και σε θετικούς φορείς. Η διάτρηση συμβαίνει κυρίως από τις δυνάμεις Coulomb που εξασκούνται μεταξύ των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η χρονική διάρκεια του φαινομένου είναι μερικά μs. Η εικόνα που παρουσιάζει το υλικό είναι κυρίως το αποτέλεσμα μιας ακαριαίας εξάσκησης δυνάμεων υπό την επίδραση των δυνάμεων πεδίου. Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις έχει διαπιστωθεί ότι πάνω από μία μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης U_{kmin} , που εφαρμόζεται στο δοκίμιο συμβαίνει η διάτρηση με μία κρούση υπό μορφή οχετού, αν και η τιμή της πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης. Η μορφή της διάτρησης αυτής χαρακτηρίζεται επίσης ως ηλεκτρομηχανική. Το φαινόμενο έχει αποδοθεί στην απότομη μεταβολή της πεδιακής έντασης, λόγω της οποίας δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα την ηλεκτρομηχανική διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ του αρνητικού ηλεκτροδίου και των θετικών ηλεκτρικών φορέων που συγκρατούνται στο πλέγμα των μορίων.

Μία ερμηνεία της ηλεκτρικής μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος μπορεί να δοθεί από το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.3.2.2-2 Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση

C : ιδανική χωρητικότητα.

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

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

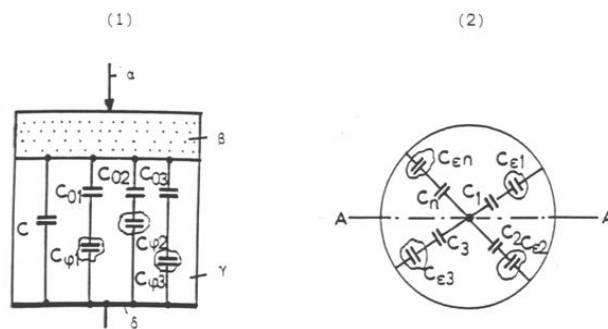
Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές) η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μια κρίσιμη για το υλικό τιμή σ_2 η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση μπορεί να παρασταθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα σαν το παραπάνω ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_π (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C .

Όταν η αγωγιμότητα G και ο πυκνωτής C_π έχουν αποκτήσει μόλις προ της διάτρησης τις τιμές G_{\max} και C_{\max} (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα σ_2 , λόγω κάποιας ανομοιογένειας) τότε συμβαίνει η διάτρηση.

3.3.2.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης.

1) Γενικά περί μερικών εκκενώσεων

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει στις περισσότερες περιπτώσεις την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυασλίδες αερίων ή γενικά σε θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (εσωτερικές μερικές εκκενώσεις), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθήσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνεια του (εξωτερικές εκκενώσεις). Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίνεται στο σχήμα (3.3.2.3-1). Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές $C_{\epsilon 1} \dots C_{\epsilon n}$ και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$. Οι πυκνωτές $C_1 \dots C_n$ και $C_{01} \dots C_{0n}$ παριστάνουν αντιστοίχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (κάθε ένας από αυτούς δίνει τη ολική χωρητικότητα δύο πυκνωτών εκ των οποίων ο ένας είναι η χωρητικότητα μεταξύ ακίδας και της θέσης διαταραχής και ο άλλος η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας και της θέσης διαταραχής).



Σχήμα 3.3.2.3-1 Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής σε στερεό μονωτικό εντός μονωτικού ελαίου.

1) Τομή A-A της διάταξης πειραματισμού :

α : ηλεκτρόδιο ακίδα

β: επιφανειακό φιλμ του μονωτικού ελαίου και επιφάνεια του στερεού μονωτικού.

γ : στερεό μονωτικό.

δ : ηλεκτρόδιο πλάκα

(2) Κάτοψη της διάταξης πειραματισμού :

$C_1 \dots C_n$: πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος της επιφάνειας του στερεού μονωτικού και του επιφανειακού φιλμ ελαίου.

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

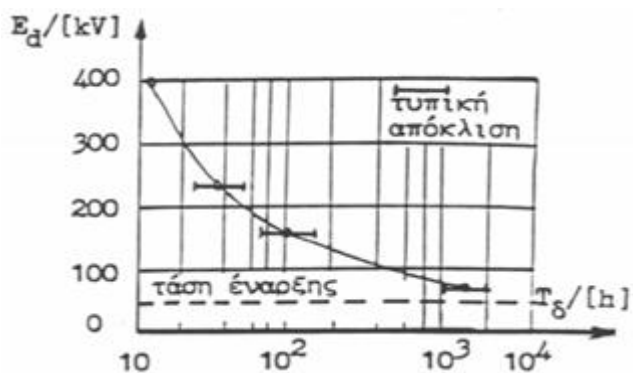
C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

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

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

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

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



Σχήμα 3.3.2.3-2: Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχος 0,125mm, λόγω μερικών εκκενώσεων.

Αριθμός δοκιμών : 10 σημεία μέτρησης
 T_d : χρόνος διάσπασης.

2) Η τεχνητή γήρανση.

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

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

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

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

$$\mu_\varepsilon = U_\varepsilon / U \quad (3.3.2.3-1)$$

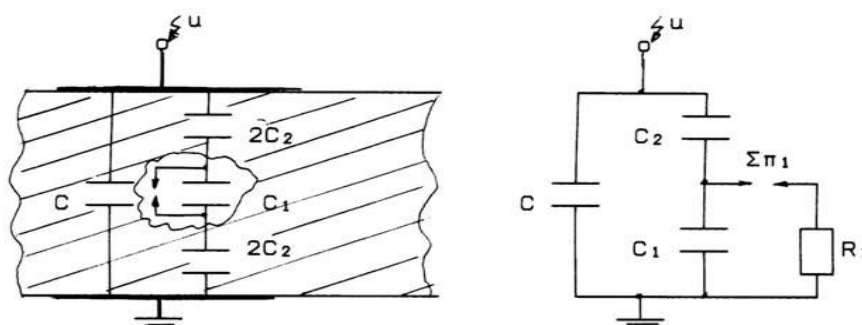
όπου U η προβλεπόμενη τάση δοκιμής (π.χ 55kV επί 1 min για ονομαστική τάση 20kV) και U_ε εκείνη κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη μερική εκκένωση. Κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ισχύει αντίστοιχα:

$$\mu_0 = U_{κε} / U_K \quad (3.3.2.3-2)$$

όπου $U_{κε}$ η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης, κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη μερική εκκενώση και $U_κ$ η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης που προβλέπεται από τις προδιαγραφές για τη διηλεκτρική δοκιμή υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

3) Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων

Όπως είναι γνωστό, με τη γέφυρα Schering μετρά κανείς το σύνολο των απωλειών ενός μονωτικού υλικού ή μιας διάταξης υψηλής τάσης, δηλαδή τις απώλειες αγωγιμότητας, πόλωσης και εκείνης λόγω εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων. Όταν άρχισε να γίνεται αντιληπτό το φαινόμενο της γήρανσης των μονωτικών υλικών εμφανίστηκε η πρώτη μέθοδος ανίχνευσης των μερικών εκκενώσεων. Πρόκειται για τη μέθοδο Callender, η οποία είναι παραλλαγή της γέφυρας Schering και με την οποία κατορθώθηκε η εκουδετέρωση των παράσιτων χωρητικοτήτων του κυκλώματος μέτρησης κατά το διαχωρισμό των απωλειών αγωγιμότητας και πόλωσης από εκείνες λόγω μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.3.2.3-3 Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του (κατά Gemant και Philipoff).

α): σχηματική παράσταση

β): ισοδύναμο κύκλωμα

C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C1: χωρητικότητα της φυσαλίδας.

C2: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

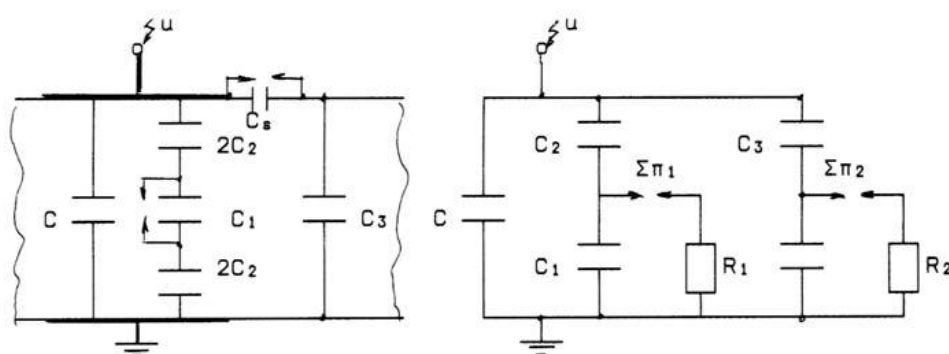
R1: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_1$.

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

Στο επόμενο σχήμα (3.3.2.3-4) έχει συμπληρωθεί το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο και για τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της

χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C_1) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (C_ε). Με τον τρόπο δηλαδή αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού (C_2 και C_3 αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Οι σπινθήρες $\Sigma\pi_1$ και $\Sigma\pi_2$ στα ισοδύναμο κύκλωμα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R_1, R_2) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C_1, C_ε).

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη. Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς συχνά στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα (3.3.2.3-5).



Σχήμα 3.3.2.3-4 Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής

α: σχηματική παράσταση

β: ισοδύναμο κύκλωμα

C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας

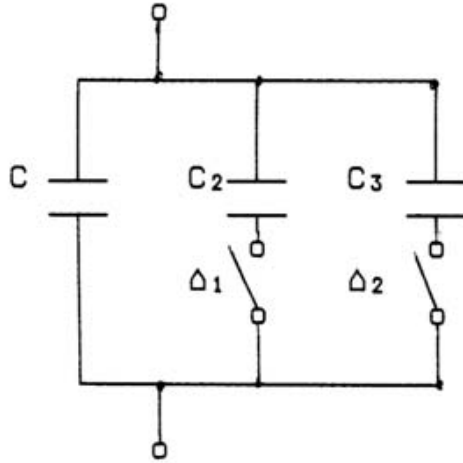
C_ε : χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

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

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



Σχήμα 3.3.2.3-5 Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff)

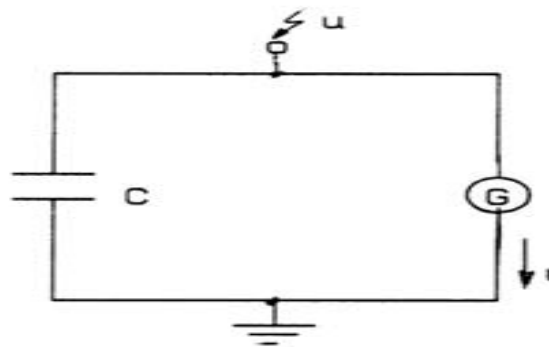
C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C₂: χωρητικότητα του υγιούς στον όγκο του μονωτικού

C₃: χωρητικότητα του υγιούς στην επιφάνεια του μονωτικού

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

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φουσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κ.λ.π. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει επίσης μία ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 3.3.2.3-6). Σύμφωνα με αυτό, οι θέσεις διαταραχής αποδίδονται ως μία γεννήτρια μερικών εκκενώσεων **G**. Έτσι, όταν διεγείρεται η γεννήτρια **G** συμβαίνει αύξηση του δυναμικού στους ακροδέκτες της διάταξης.



Σχήμα 3.3.2.3-6 Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

G : γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

3.3.2.4 Η θερμοχημική διάτρηση

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

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

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

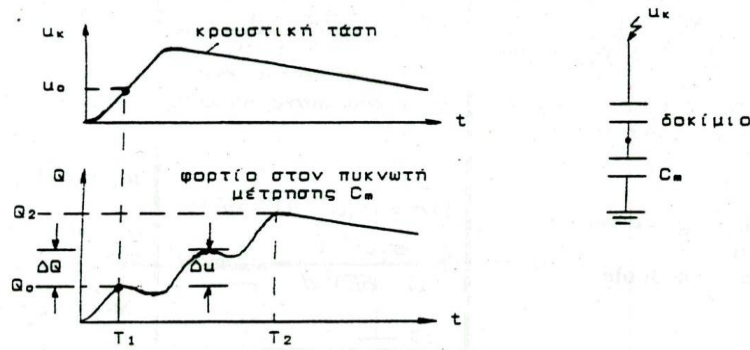
$$U_a = \sqrt{\alpha \cdot \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma \theta}} \quad (3.3.2.4-1)$$

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

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

3.3.3 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων των κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως π.χ. στο σχήμα (3.3.3-1) για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Με παρόμοιες σκέψεις, μπορεί κανείς να καθορίσει μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση με άλλες μορφές τάσεων, καθώς και με άλλα τετράπολα μέτρησης (συνήθως ωμική αντίσταση, αντί του πυκνωτή, ή συνδυασμός των δύο αυτών στοιχείων μέτρησης, σχήμα 3.3.3-2). Στο συγκεκριμένο σχήμα δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



Σχήμα 3.3.3-1 Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

T₁: Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

T₂: Χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Q₀: Φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Q₁: Φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

u_k: Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

u₀: Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή)

Δu: Άλμα δυναμικού

ΔQ: Αύξηση φορτίου

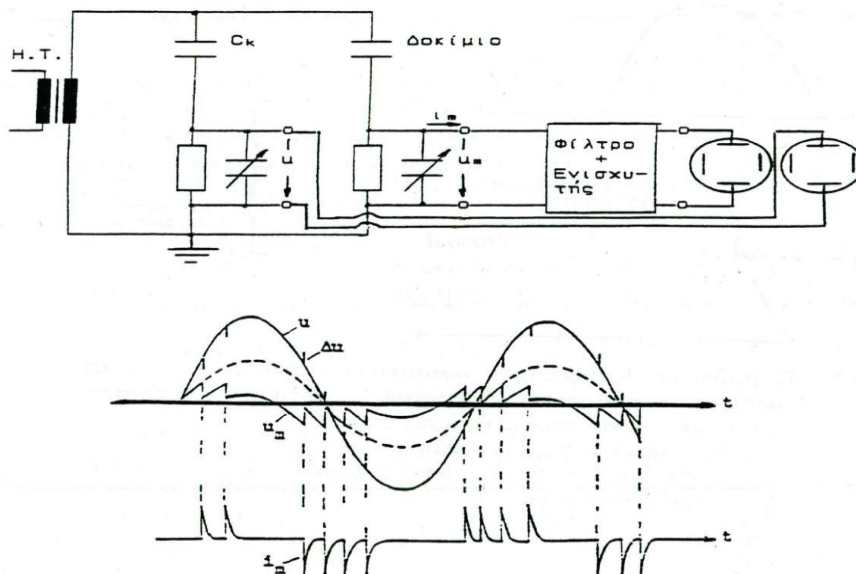
Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως η χαρακτηριστική $Q=f(|U_k|)$, η χαρακτηριστική $u_0=f(|U_k|)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της τάσης, κλπ. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμών. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q=f(|U_k|)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής σχήμα (3.3.3-4) με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στην στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2 / 50 μs ή 10 / 200 μs,, όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Στο σχήμα (3.3.3-5) δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90^η κρούση ως προς την 60^η. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών, εύκολα διαπιστώνεται, ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου Q στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις (θραύσματα) στην επιφάνεια του μονωτικού.

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 μεταβολής της.
- 2) οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή, όπου δεν μηδενίζεται η τάση.

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



Σχήμα 3.3.3-2 Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω “ωμικού –χωρητικού” τετράπολου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz.

H.T: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης

Ck: Πυκνωτής υψηλής τάσης

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

um: Στιγμιαία τιμή της τάσης η οποία μετράται στο ωμικό –χωρητικό τετράπολο των μερικών εκκενώσεων

im: Στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων

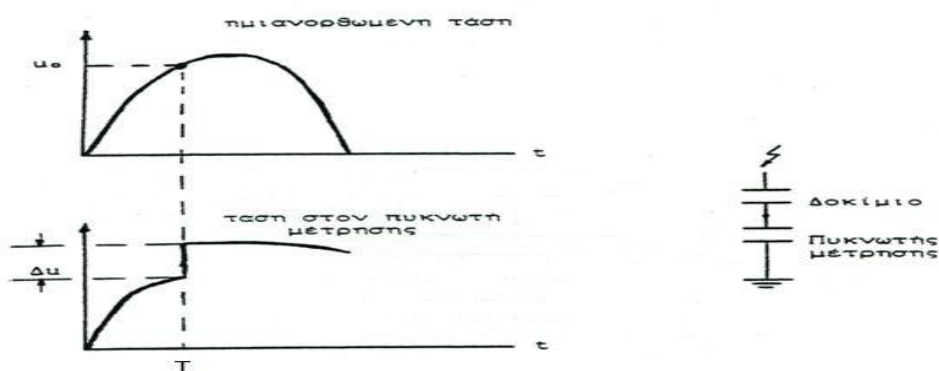
Δu: Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων.

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

Στον πίνακα (3.3.3-1) δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \approx 2,5-4,5$, από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που προαναφέρθηκε. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης 1,2/50μs) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

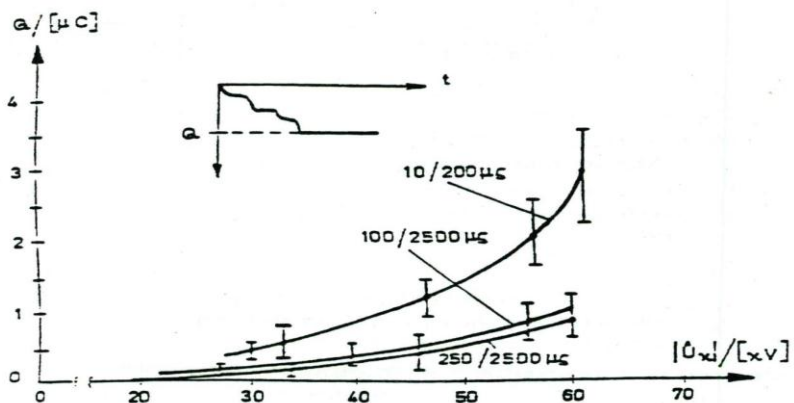
Μορφή τάσης σε μs	Δενδρίτης	Εικόνα επιφανειακών διαταραχών	Άλματα Δυναμικού	Συμπεράσματα για τις μερικές εκκενώσεις
1,2/50	ΝΑΙ	ΝΑΙ	στην ουρά	εξωτερικές μερικές εκκενώσεις
10/200	ΝΑΙ (αλλά μικρότερος από εκείνον κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50μs)	ΝΑΙ (αλλά μικρότερη από εκείνη κατά την καταπόνηση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

Πίνακας 3.3.3-1 Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών



Σχήμα 3.3.3-3 Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης

T: Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 U_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή)
 Δu : Άλμα δυναμικού

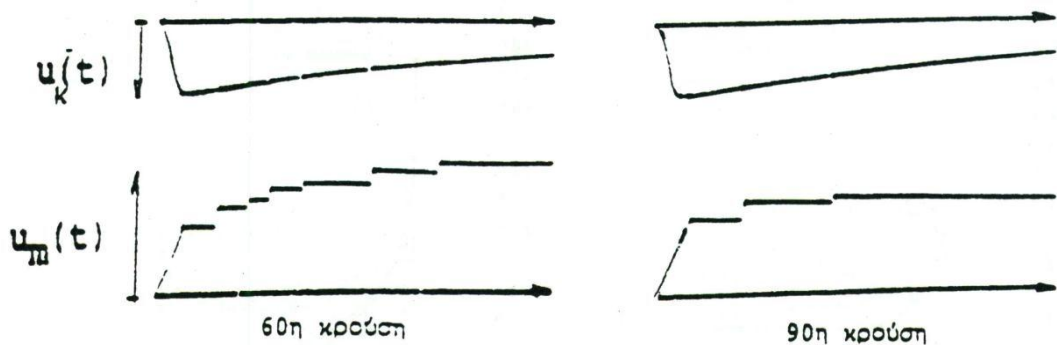


Σχήμα 3.3.3-4 Χαρακτηριστική $Q_2=f(U_k)$ για τον βακελίτη (πάχους 2mm) υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs, 250/2500μs.

Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα,

C_m : 1000 nF



Σχήμα 3.3.3-5 Άλματα δυναμικού κατά την 60η και την 90η κρούση στο pertinax (πάχους 2 mm).

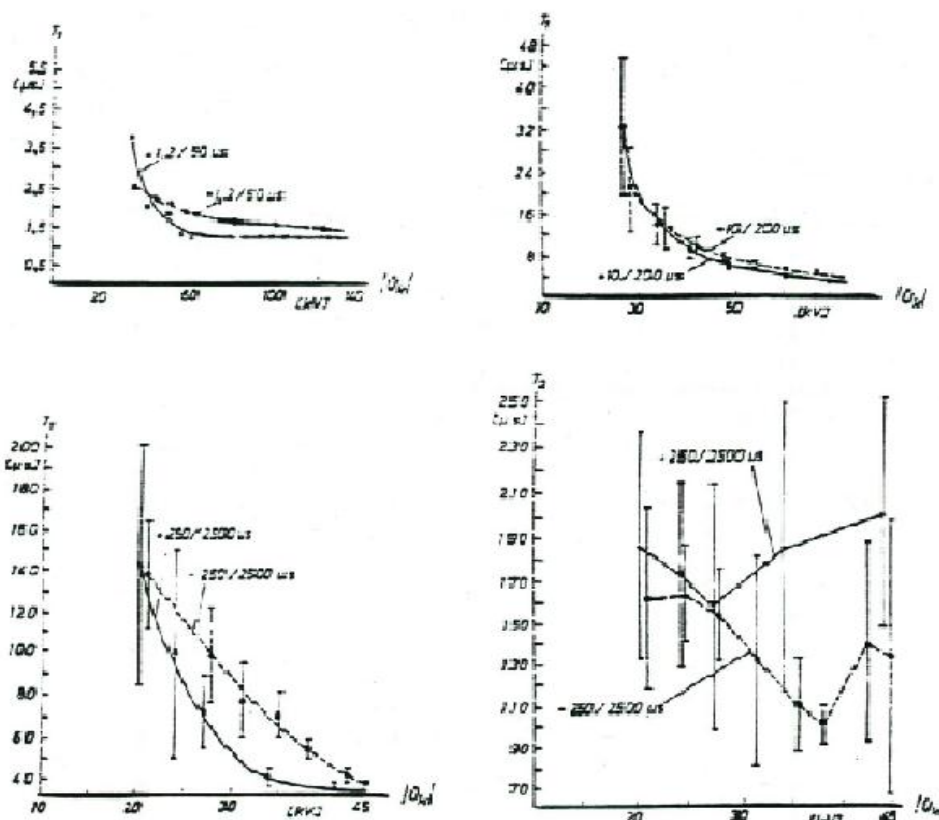
Μορφή τάσης : 1,2 / 50 μs ($U_k=99,7kV$)

Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα

C_m : 210 nF

Μια άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων, ως προς τον χρόνο εκδήλωσης τους (υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης), έχει βασιστεί σε χαρακτηριστικές $T_1=f(U_k)$ και $T_2=f(U_k)$ 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 250 / 2500 μs), ώστε σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις του πίνακα (3.3.3-1) για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.

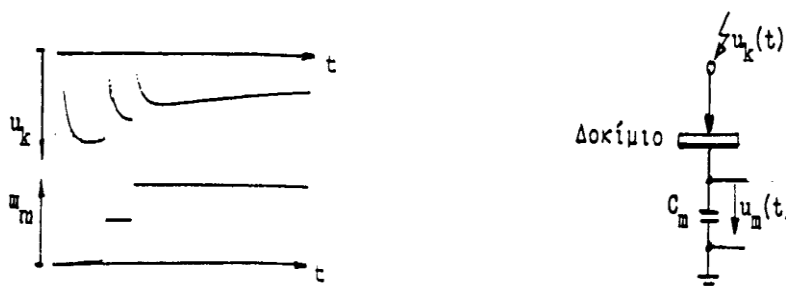


Σχήμα 3.3.3-6 1) Χαρακτηριστική $T_1=f(U_k)$ κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2mm και $\epsilon_r=2,5\div 4,5$) με κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs , 10/200 μs και 250/2500 μs .
2) Χαρακτηριστική $T_2=f(U_k)$ κατά την καταπόνηση των υλικών αυτών με κρουστικές τάσεις 250/2500 μs

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

3.3.4 Η επιφανειακή διάσπαση και υπερπήδηση

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



Σχήμα 3.3.4-1 Τυπικό παρμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2mm) εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση 10/200μs και διάταξης ηλεκτροδίων ακίδα πλάκα
 $C_m : 1835 \text{ nF}$, $U_k : 70 \text{ kV}$

Από πειράματα είναι γνωστό, ότι στα φαινόμενα παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών συμμετέχει και η ίδια η επιφάνεια σε βάθος μέχρι 30\AA . Έτσι, εκτός από τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις (οι οποίες οφείλονται σε ξένες επικαθίσεις και έχουν συνήθως τον κυρίαρχο ρόλο στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στην επιφάνεια), μπορεί κανείς να υποθέσει ότι εκδηλώνονται και οι άλλοι παράγοντες (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος), όπως κατά τη διάτρηση Μπορεί επομένως να θεωρηθεί, ότι ισχύει το ισοδύναμο κύκλωμα του προηγούμενου σχήματος, όπου όμως οι μερικές εκκενώσεις στο επιφανειακό φιλμ (δηλαδή στο συνδυασμό "επιφάνεια του στερεού μέχρι βάθος 30\AA -περιβάλλον μέσω") είναι συνήθως ο κυρίαρχος παράγοντας για την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση.

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

3.3.5 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών.

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

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

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

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

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

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

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

β) Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατόν να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η κπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την επεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα).

2) Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική

διηλεκτρική σταθερά 2,5-4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2MV/cm.

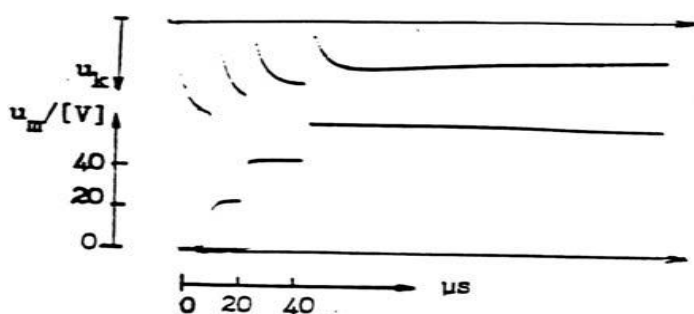
3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση ($\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-W/kT)$).

4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η παραπάνω σχέση. Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια.

3.3.5.1 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση

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

Ένα τυπικό παλμογράφημα του φαινομένου δίνεται στο σχήμα 3.3.5.1-1. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων (W) υπολογίζεται ότι είναι περίπου 105eV. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε ότι η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτινών X.



Σχημα 3.3.5.1-1 Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου.

Κρουστική τάση: 1,2/50μs

R της ακίδας \approx 1mm

$\hat{U}_k = 85$ kV

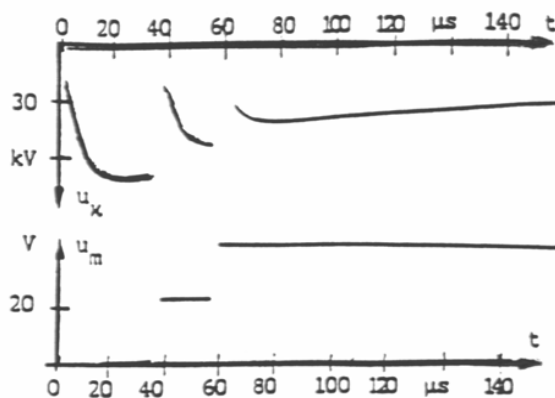
E: 1,2MV/cm

C_m: 1835nF

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

3.3.5.2 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση.

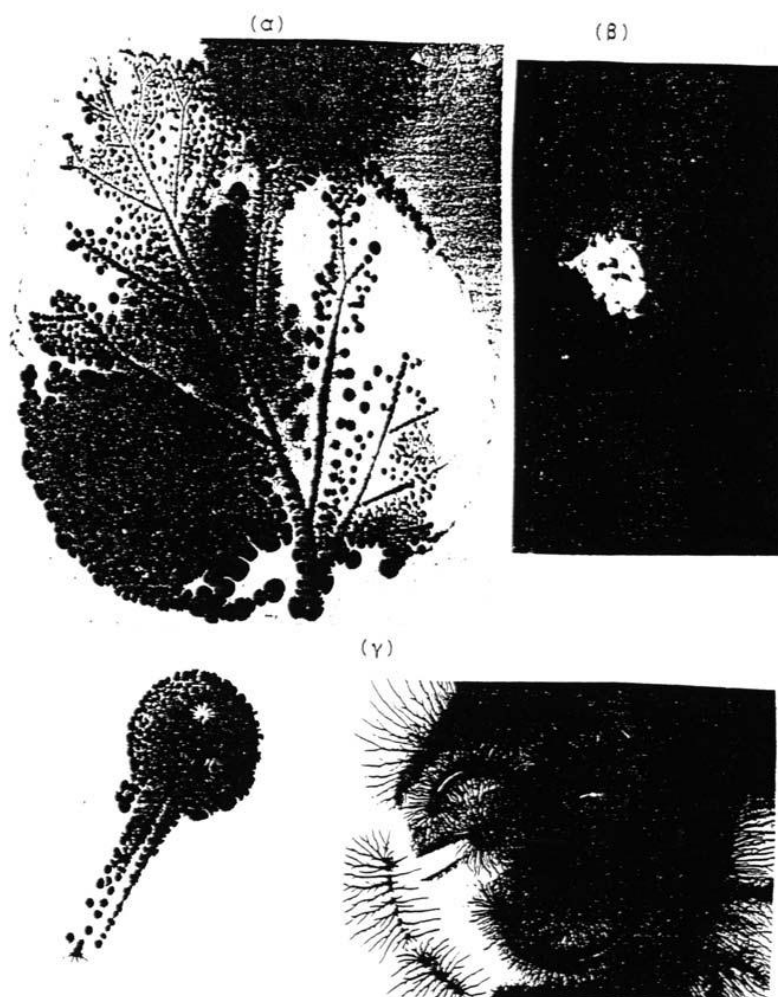
Από πειράματα που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι ισχύει ότι και προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης. Παρακάτω εξετάζεται (για λόγους σύγκρισης με τη διάτρηση) ένα τυπικό παράδειγμα επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών πάχους 2mm σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό κρουτικές τάσεις 10/200μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος 3.3.5.2-1 υπολογίζεται η ενέργεια W των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η ενέργεια αυτή για το πρώτο και τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα : 122eV και 96,5eV. Όπως φαίνεται η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτίνων X.



Σχημα 3.3.5.2-1 Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pertinax (πάχους 2mm και με διάμετρο της επιφάνειάς του 150mm), υπό κρουτικές τάσεις 10/200μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου.
Ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης : «ακίδα-πλάκα».

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

προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και απεικονίζονται αντικείμενα, καθώς και βιολογικοί οργανισμοί. Στο σχήμα 3.3.5.2-2 δίνονται ορισμένες από τις φωτογραφίες αυτές.



Σχήμα 3.3.5.2-2 Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερούς στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

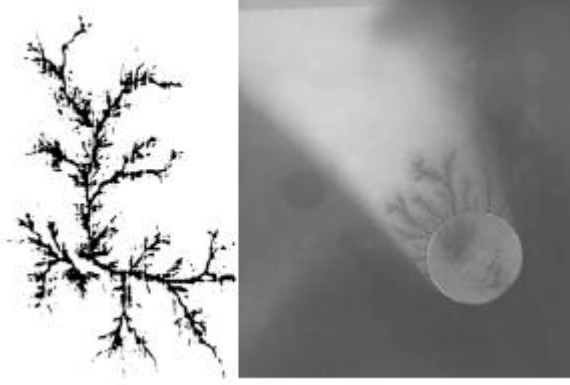
Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.

α) Φωτογράφιση φύλλου δένδρου

β) Φωτογραφία βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι).

γ) Φωτογραφία μεταλλικών αντικειμένων.

Επίσης, στο σχήμα 3.3.5.2-3 δίνονται φωτογραφίες επιφανειακών δενδριτών, που αφορούν αντίστοιχα τη γήρανση και τη διάσπαση. Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2mm και διαμέτρου 150mm), υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα.



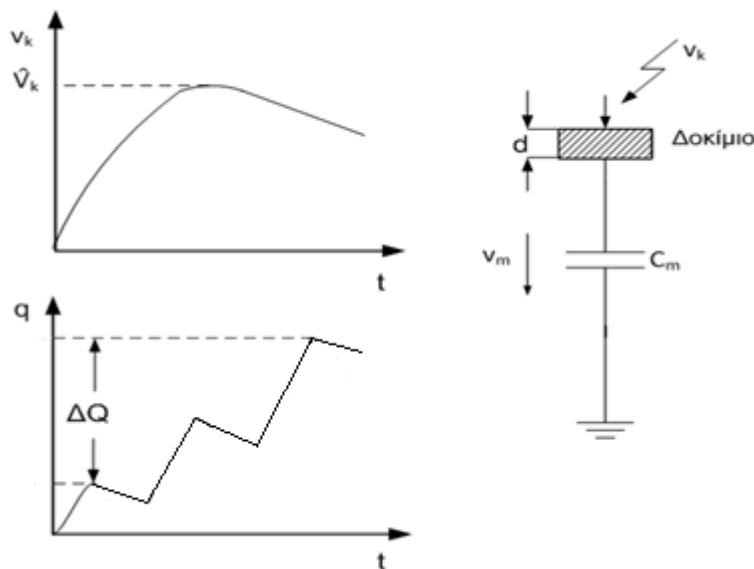
Σχήμα 3.3.5.2-3 Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερών στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση $1,2/50\mu\text{s}$ (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα).

B.ΜΕΡΟΣ

1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση της έναρξης και της περαίωσης των μερικών εκκενώσεων σε πολυμερή στερεά μονωτικά υλικά τα οποία υποβάλλονται σε κεραυνικές τάσεις καταπόνησης. Το μονωτικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι <<peritinax-λάδι>> και η κρουστική τάση που εφαρμόστηκε η 1,2/50μs θετικής και αρνητικής πολικότητας.

Πολλά από τα χαρακτηριστικά των στερεών μονωτικών υλικών που αναφέρθηκαν παραπάνω υπολογίστηκαν απευθείας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και τα υπόλοιπα προέκυψαν συναρτήση αυτών μέσα από κατάλληλες σχέσεις που αναφέρονται παρακάτω. Τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των στατιστικών μετρήσεων είναι ιδιαίτερα σημαντικά καθώς θα μας δώσουν πολύ χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες των στερεών μονωτικών υλικών καθώς και για τον τρόπο με τον οποίο αυτές μεταβάλλονται όταν αλλάζει η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k). Συγκεκριμένα από έναν αριθμό μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο στερεό μονωτικό υλικό που αναφέραμε, πάχους 1mm και 2mm υπό κρουστική τάση 1,2/50μs μετρήθηκε η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και από τα παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων υπολογίστηκε η μεταβολή του φορτίου (ΔQ) από το πρώτο μέχρι και το τελευταίο άλμα δυναμικού.



Σχήμα 1.1 Ένοιας κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά υλικά υπό κρουστικές τάσεις.

v_k : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης

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

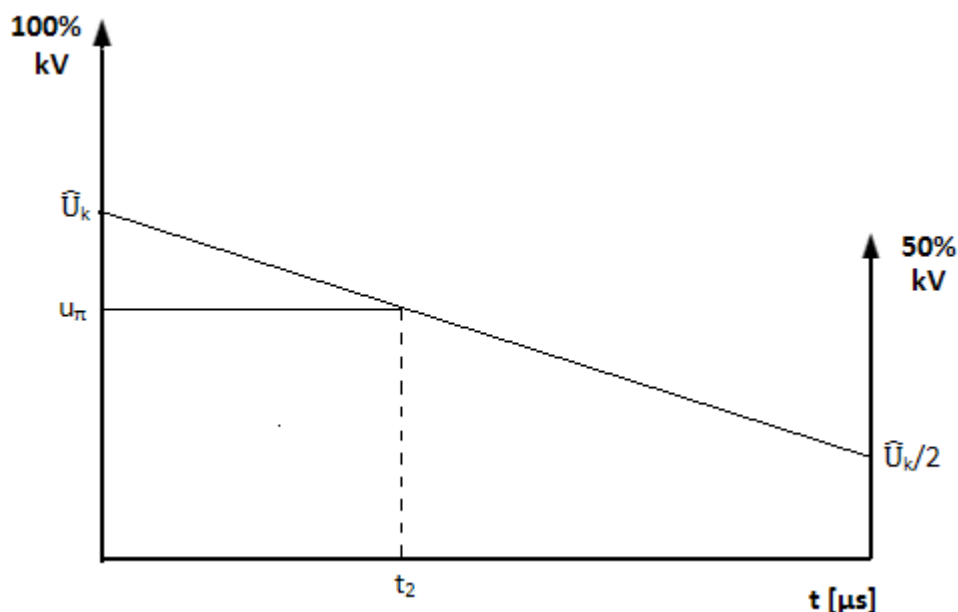
d : πάχος δοκιμίου

C_m : πυκνωτής μέτρησης

ΔQ : αύξηση του φορτίου στον C_m

v_m : πτώση τάσης στον C_m

Επίσης μετρήθηκε η τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (u_{π}) ενώ η τάση περάτωσης αυτών (u_{π}) υπολογίστηκε γραφικά από τον χρόνο t_2 (χρόνος περάτωσης των μερικών εκκενώσεων). Το φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων εκδηλώνεται στην ουρά της χαρακτηριστικής. Στην περιοχή αυτή η τάση μειώνεται σχεδόν γραμμικά σε σχέση με το χρόνο. Έτσι γνωρίζοντας το χρόνο t_2 από το παρακάτω διάγραμμα μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την τάση περάτωσης των μερικών εκκενώσεων. Πραγματοποιούμε την ίδια διαδικασία και υπολογίζουμε για κάθε τιμή της μέγιστης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) την αντίστοιχη τιμή της τάσης περάτωσης των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 1.2 Διάγραμμα υπολογισμού της τάσης περάτωσης των μερικών εκκενώσεων.

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

u_{π} : τάση περάτωσης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περάτωσης των μερικών εκκενώσεων

Από την τιμή \hat{U}_k μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της μέγιστης πεδιακής έντασης από τον παρακάτω τύπο:

$$\hat{E} = \frac{2 \cdot \hat{U}_k}{R \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot d}{R}\right)} \quad (1.2)$$

Όπου R: ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας και είναι ίση με 0,9mm

d: πάχος του δοκιμίου

Από την ίδια σχέση προκύπτουν οι τιμές της πεδιακής έντασης κατά την έναρξη (E_{ev}) και την περάτωση (E_{π}) των μερικών εκκενώσεων.

Όταν η ταχύτητα κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων που φτάνουν στην άνοδο είναι μεγαλύτερη από 0,2c (όπου $c=300\text{m}/\mu\text{s}$) τότε χρησιμοποιούμε τους τύπους της σχετικιστικής φυσικής του Einstein για τον υπολογισμό της μάζας του

ηλεκτρονίου, της ενέργειας του, της ταχύτητας της κινητικότητας κτλ. Ισχύει $v > 0,2c$ όταν $\Delta\phi > 10,25\text{KV}$ όπου $\Delta\phi$ η διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου-καθόδου. Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω προκύπτουν τα εξής:

- ταχύτητα v_1 των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$$v_1 = c \cdot \sqrt{1 - 1 / \left(\frac{q_e \cdot u_{\epsilon v}}{m_0 \cdot c^2} + 1 \right)^2} \quad (1.3)$$

όπου c : η ταχύτητα του φωτός ($300\text{m}/\mu\text{s}$)
 q_e : το φορτίο του ηλεκτρονίου ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{A} \cdot \text{s}$)
 m_0 : η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου ($9,1 \cdot 10^{-31} \text{kg}$)
 $u_{\epsilon v}$: τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

- ταχύτητα v_2 των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

$$v_2 = c \cdot \sqrt{1 - 1 / \left(\frac{q_e \cdot u_{\pi}}{m_0 \cdot c^2} + 1 \right)^2} \quad (1.4)$$

- κινητικότητα b_1 των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$$b_1 = v_1 / E_{\epsilon v} \quad (1.5)$$

- κινητικότητα b_2 των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων.

$$b_2 = v_2 / E_{\pi} \quad (1.6)$$

- ειδική αγωγιμότητα σ_1 κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$$\sigma_1 = \frac{q_1}{E_{\epsilon v}} \cdot \sqrt{1 - 1 / \left(\frac{q_e \cdot u_{\epsilon v}}{m_0 \cdot c^2} + 1 \right)^2} \quad (1.7)$$

- ειδική αγωγιμότητα σ_2 κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

$$\sigma_2 = \frac{\Delta q}{E_{\pi}} \cdot \sqrt{1 - 1 / \left(\frac{q_e \cdot u_{\pi}}{m_0 \cdot c^2} + 1 \right)^2} \quad (1.8)$$

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι πολύ σημαντικά για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του μονωτικού υλικού έναντι των υπερτάσεων. Η μεταβολή τους σε σχέση με την μέγιστη κρουστική τάση (\hat{U}_k) και την πεδιακή ένταση (E) θα γίνει ακόμα καλύτερα αντιληπτή από τα διάγραμματα που ακολουθούν παρακάτω.

2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ ΣΕ ΣΤΕΡΕΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ 1,2/50μs.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι συγκεντρωτικοί πίνακες και οι γραφικές παραστάσεις συναρτήσεων της μέγιστης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της μέγιστης πεδιακής έντασης (E_k) των μεγεθών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στον πρώτο πίνακα κάθε περίπτωσης δίνονται τα μεγέθη που μετρήθηκαν στο εργαστήριο (μέγιστη κρουστική τάση \hat{U}_k , χωρητικότητα c_m , μέγιστη πεδιακή ένταση E_k , τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων $u_{εν}$, τάση περάτωσης των μερικών εκκενώσεων $u_{π}$, πεδιακή ένταση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων $E_{εν}$, πεδιακή ένταση κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων $E_{π}$, χρόνος περάτωσης των μερικών εκκενώσεων t_2 , και τα φορτία q_1 και q_2 κατά την έναρξη και την περάτωση αντίστοιχα των μερικών εκκενώσεων).

Στον δεύτερο πίνακα κάθε περίπτωσης δίνονται οι τιμές των μεγεθών όπως αυτές υπολογίστηκαν από τις μαθηματικές σχέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Συγκεκριμένα Δq η μεταβολή του φορτίου, v_1 και v_2 η ταχύτητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη και την περάτωση των μερικών εκκενώσεων, σ_1 και σ_2 η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη και την περάτωση των μερικών εκκενώσεων και b_1, b_2 η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη και περάτωση των μερικών εκκενώσεων αντίστοιχα.

Οι χαρακτηριστικές που δίνονται σε αυτό το κεφάλαιο είναι οι ακόλουθες:

$$u_{εν} = f(\hat{U}_k, E_k)$$

$$u_{π} = f(\hat{U}_k, E_k)$$

$$v_1 = f(\hat{U}_k, E_k)$$

$$v_2 = f(\hat{U}_k, E_k)$$

$$\sigma_1 = f(\hat{U}_k, E_k)$$

$$\sigma_2 = f(\hat{U}_k, E_k)$$

$$b_1 = f(\hat{U}_k, E_k)$$

$$b_2 = f(\hat{U}_k, E_k)$$

Οι χαρακτηριστικές αυτές προέκυψαν από μετρήσεις που έγιναν σε δοκίμια <<Pertinax-λάδι>> πάχους 1mm και 2mm υπό κρουστική τάση 1,2/50μs αρνητικής και θετικής πολικότητας.

U_k [kV]	C_m [nF]	E_k [MV/cm]	$u_{εν}$ [kV]	$E_{εν}$ [MV/cm]	$u_{π}$ [kV]	$E_{π}$ [MV/cm]	t_2 [μs]	q_1 [μc]	q_2 [μc]
28.6	10	0.426261271	27.5	0.409866607	24	0.357701766	14.05	0.1	0.2
35.4	10	0.527610105	34.3	0.511215441	32	0.476935688	11.23	0.1	0.4
43	20	0.640882331	41.5	0.618525971	36	0.536552649	16.55	0.1	0.8
50.5	20	0.752664133	48.8	0.727326925	43	0.640882331	18.84	0.1	1.2
57.3	210	0.854012967	55.2	0.822714062	46	0.685595052	22.5	0.2	2
64	210	0.953871376	61.7	0.919591624	48	0.715403532	27.65	0.2	2.8
71.4	210	1.064162754	64	0.953871376	52	0.775020493	29.47	0.3	2.9

Πίνακας 2.1: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών : $u_{εν}, u_{π}, v_1, v_2, \sigma_1, \sigma_2, b_1$ και b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό <<Pertinax-μονωτικό λάδι>> εντός ανομοιογενούς πεδίου (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0.9 mm-πλάκα) υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs

Πάχος δοκιμίου: d=1mm

Πολικότητα θετική

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : πυκνωτής μέτρησης

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

t_2 : χρόνος περάτωσης των μερικών εκκενώσεων

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

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

$u_{εν}$: τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

$u_{π}$: τάση περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$E_{εν}$: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$E_{π}$: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

Δq [μc]	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	σ_1 [m ² /Ω]	σ_2 [m ² /Ω]	b_1 [m ² /kVs]	b_2 [m ² /kVs]
0.1	12235483.07	11998166.19	44492.66569	49992.35911	4.449266569	4.999235911
0.3	13610538.66	13397728.19	39680.87074	125603.7018	3.968087074	4.186790059
0.3	14998089.05	14734654.4	36139.97361	122788.7867	3.613997361	4.092959556
0.7	16250860.86	15975582.03	33300.94438	260067.6144	3.330094438	3.715251634
1.1	17307869.84	16988527.08	62709.67333	406247.3867	3.135483666	3.693158061
1.8	18289123.16	17958383.68	59284.02968	673439.3882	2.964201484	3.741329934
2.6	19314433.86	18289123.16	90536.40872	914456.1578	3.017880291	3.517139068

Πίνακας 2.2: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών : $u_{εν}, u_{π}, v_1, v_2, \sigma_1, \sigma_2, b_1$ και b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό <<Pertinax-μονωτικό λάδι>> εντός ανομοιογενούς πεδίου (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0.9 mm-πλάκα) υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs

Πάχος δοκιμίου: d=1mm

Πολικότητα θετική

Δq: $\Delta q = q_2 - q_1$

v₁: ταχύτητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

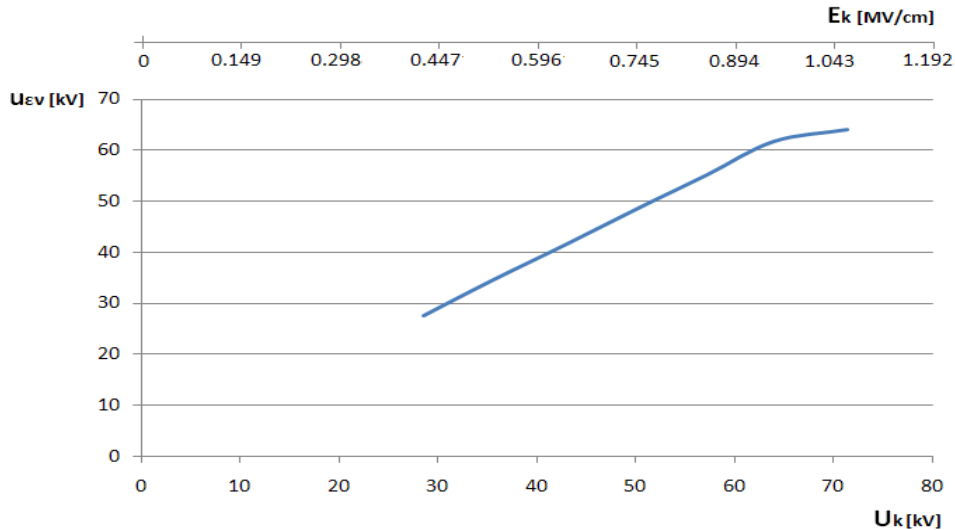
v₂: ταχύτητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

σ₁: ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

σ₂: ειδική αγωγιμότητα κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

b₁: κινητικότητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

b₂: κινητικότητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 2.1: Χαρακτηριστική $u_{ev}=f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

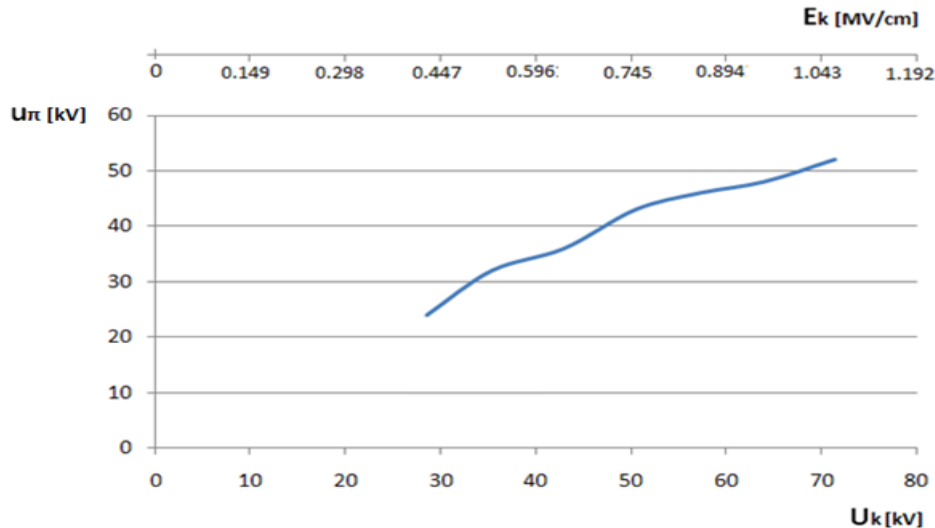
u_{ev} : τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε kV

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχήμα 2.2: Χαρακτηριστική $u_{\pi}=f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

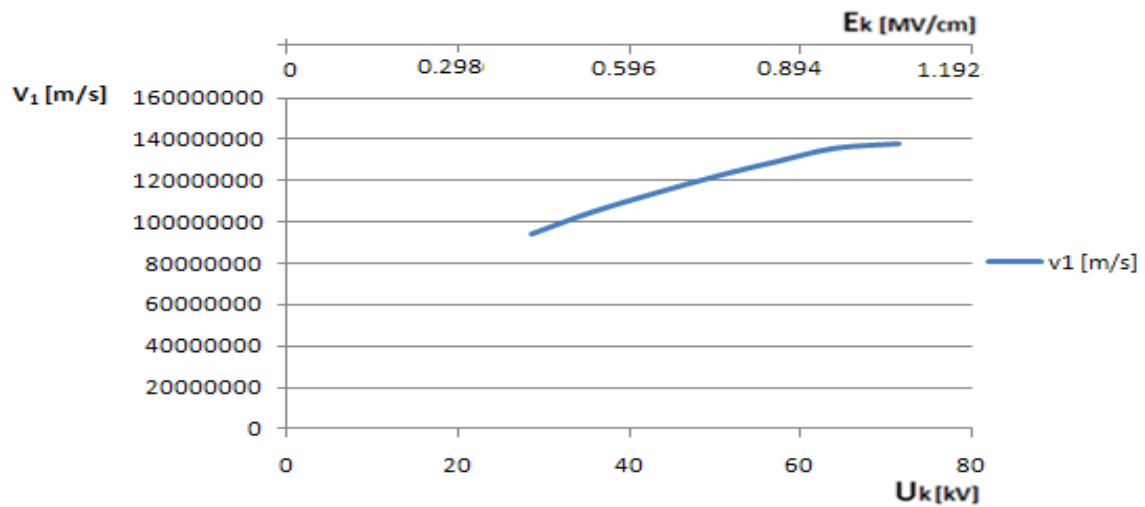
u_{π} : τάση περαίωσης των μερικών εκκενώσεων σε kV

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχημα 2.3 Χαρακτηριστική $v_1 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

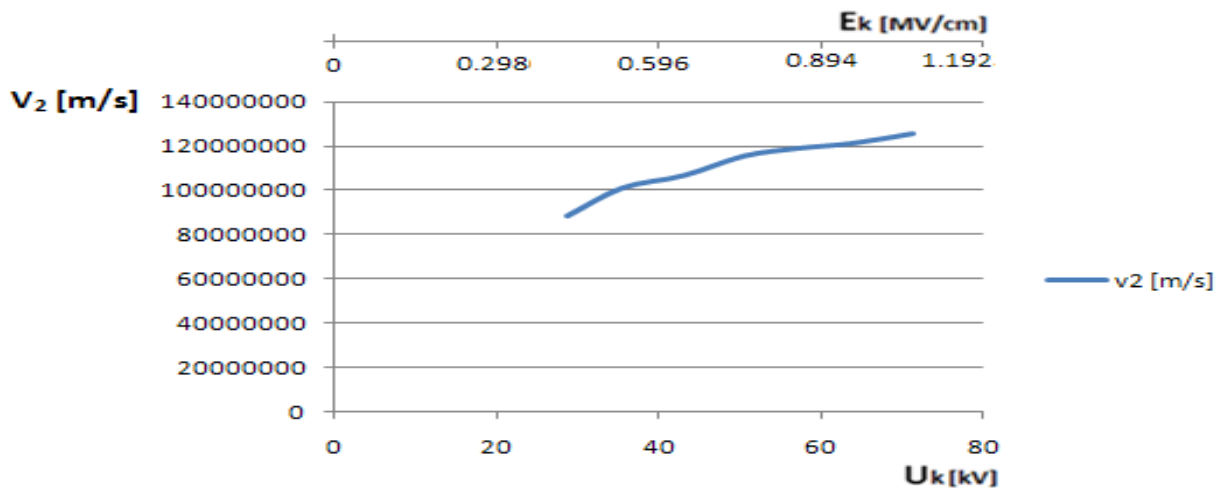
v_1 : ταχύτητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχημα 2.4 Χαρακτηριστική $v_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

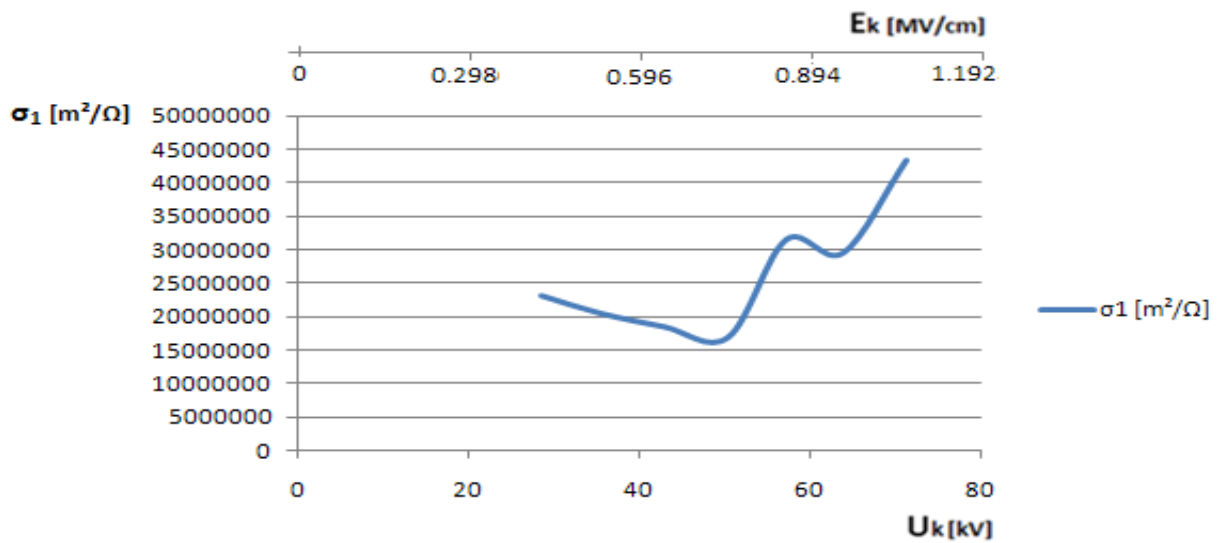
v_2 : ταχύτητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχήμα 2.5 Χαρακτηριστική $\sigma_1 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

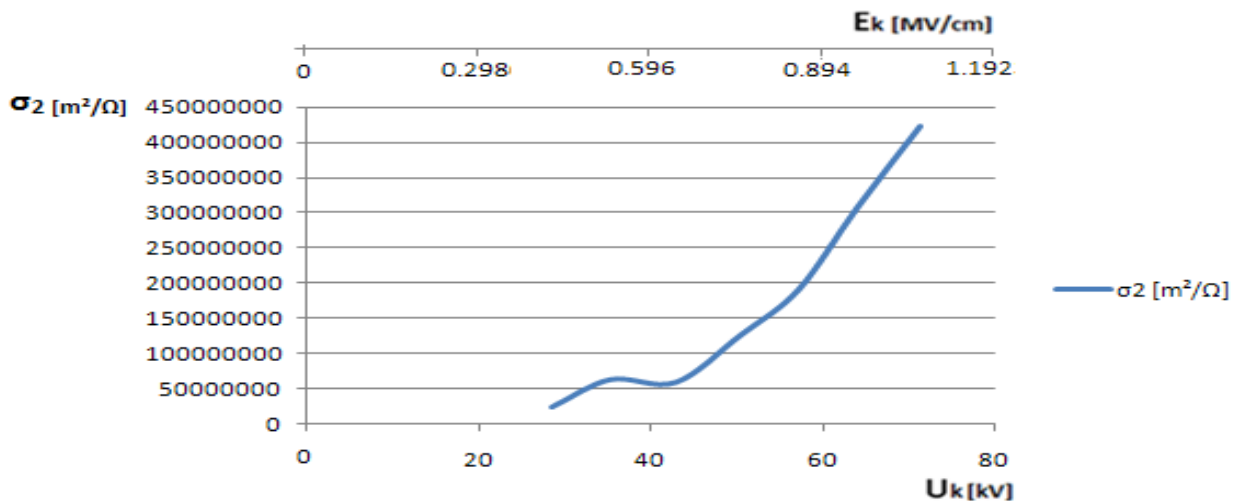
σ_1 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχήμα 2.6 Χαρακτηριστική $\sigma_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

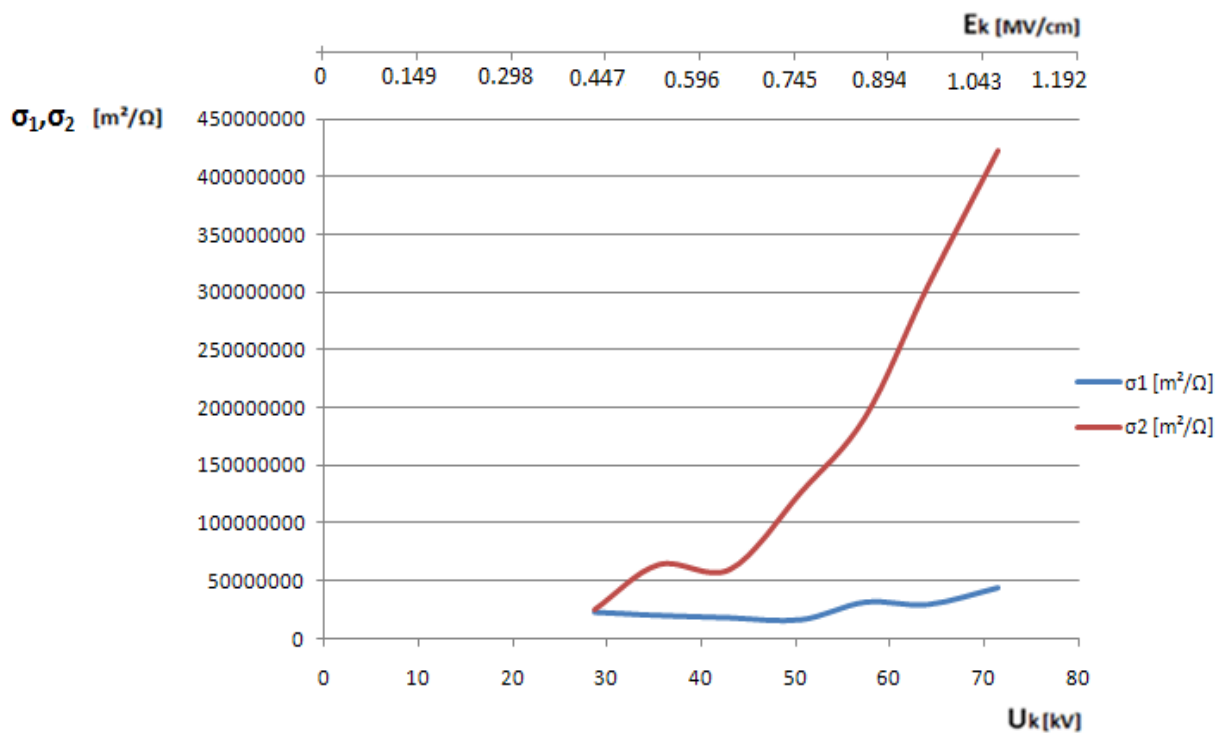
σ_2 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

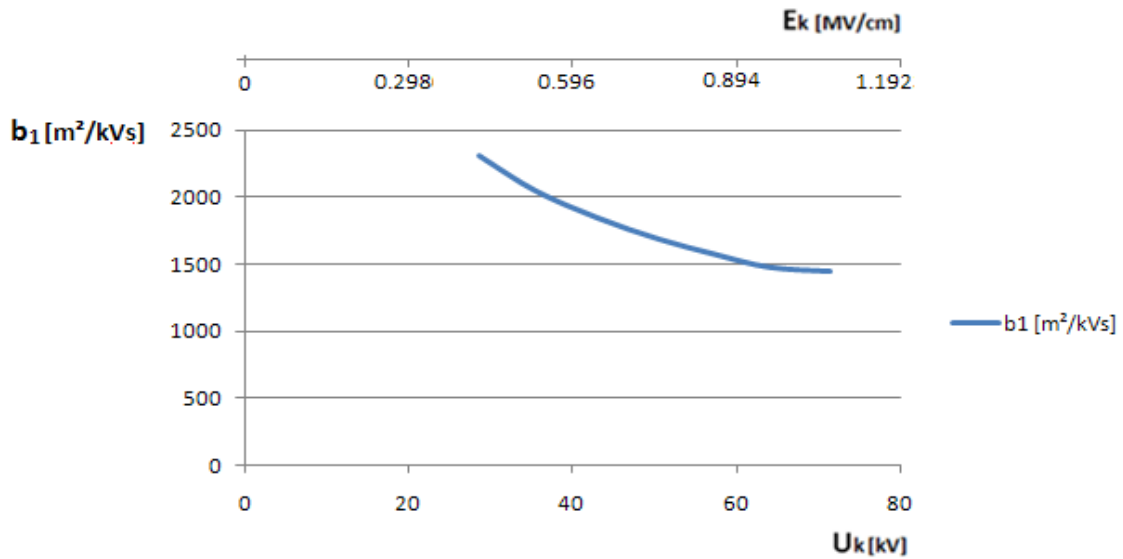
E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχήμα2.7 Χαρακτηριστική $\sigma_1, \sigma_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.
 σ_1 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω
 σ_2 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV
 E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm
 Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχήμα 2.8 Χαρακτηριστική $b_1 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1mm$.

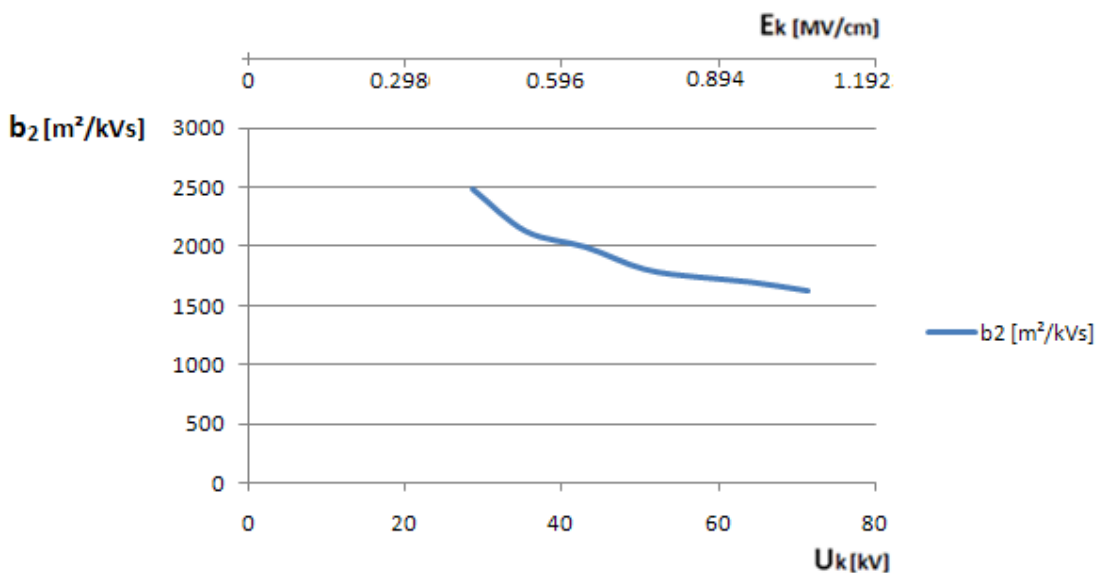
b_1 : η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχήμα 2.9 Χαρακτηριστική $b_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1mm$.

b_2 : η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα

U_k [kV]	C_m [nF]	E_k [MV/cm]	u_{EV} [kV]	E_{EV} [MV/cm]	u_{π} [kV]	E_{π} [MV/cm]	t_2 [μs]	q_1 [μc]	q_2 [μc]
29.1	10	0.433713391	27.5	0.409866607	26	0.387510247	14.4	0.1	0.2
36.7	10	0.546985617	35	0.521648409	31	0.462031448	16.6	0.1	0.4
44.1	20	0.657276995	42.2	0.628958939	38	0.56636113	19.5	0.15	0.9
51.5	20	0.767568373	49.5	0.737759893	44	0.655786571	24.6	0.2	1.2
58.3	210	0.868917207	55.7	0.830166182	46	0.685595052	27	0.25	2.1
66.4	210	0.989641553	63.8	0.950890528	49	0.730307773	31.8	0.26	2.6
72.1	210	1.074595722	69.2	1.031373426	51	0.760116253	34.3	0.27	3.8
78.9	210	1.175944556	75.1	1.119308443	53	0.789924734	39.5	0.29	6

Πίνακας 2.3: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών : $u_{EV}, u_{\pi}, v_1, v_2, \sigma_1, \sigma_2, b_1$ και b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό <<Pertinax-μονωτικό λάδι>> εντός ανομοιογενούς πεδίου (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0.9 mm-πλάκα) υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs

Πάχος δοκιμίου: d=1mm

Πολικότητα αρνητική

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : πυκνωτής μέτρησης

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

t_2 : χρόνος περάτωσης των μερικών εκκενώσεων

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

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

u_{EV} : τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{π} : τάση περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

E_{EV} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

E_{π} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

Δq [μc]	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	σ_1 [m ² /Ω]	σ_2 [m ² /Ω]	b_1 [m ² /kVs]	b_2 [m ² /kVs]
0.1	94569216.94	92144519.83	23073169.49	23778602.15	2307.316949	2377.860215
0.3	105600000	99925660.2	20243520	64882375.85	2024.352	2162.745862
0.75	114835811.1	109587296.4	27387116.38	145120256.3	1825.807759	1934.936751
1	123174621	116978282.5	33391519.99	178378587.8	1669.575999	1783.785878
1.85	129606523	119290104.3	39030294.71	321890731.8	1561.211788	1739.949902
2.34	137271013.7	122631622.4	37533724.96	392927484.9	1443.604806	1679.177286
3.53	141984932.2	124780898.8	37169788.1	579485797.3	1376.658818	1641.602825
5.71	146821895	126871558.7	38039871.67	917095729.8	1311.719713	1606.122119

Πίνακας 2.4 Στατιστική ανάλυση των μεγεθών : $u_{εν}, u_{πν}, v_1, v_2, \sigma_1, \sigma_2, b_1$ και b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό <<Pertinax-μονωτικό λάδι>> εντός ανομοιογενούς πεδίου (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0.9 mm-πλάκα) υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs
Πάχος δοκιμίου: d=1mm
Πολικότητα αρνητική

Δq: $\Delta q = q_2 - q_1$

v₁: ταχύτητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

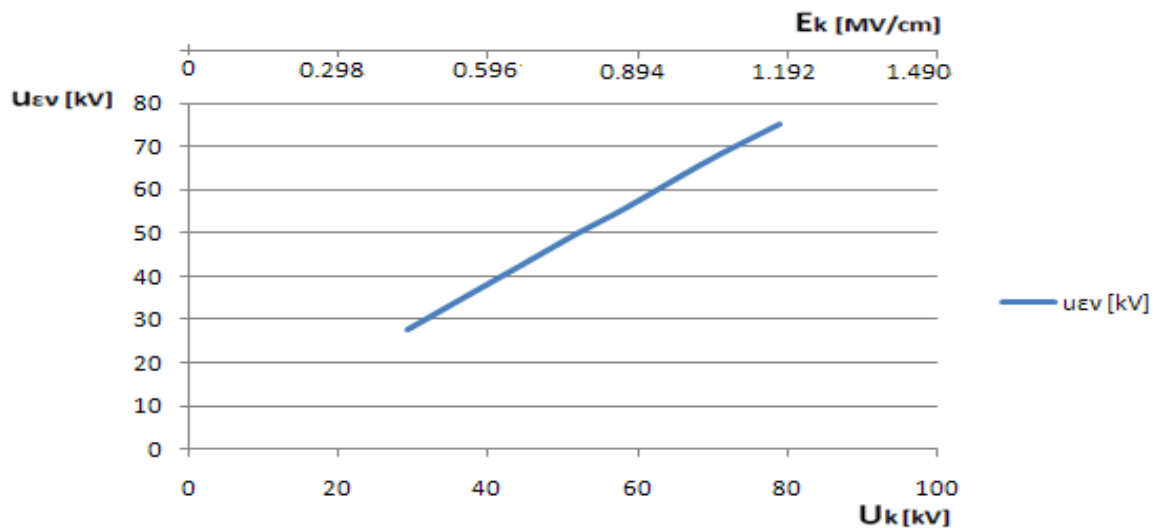
v₂: ταχύτητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

σ₁: ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

σ₂: ειδική αγωγιμότητα κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

b₁: κινητικότητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

b₂: κινητικότητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 2.10 Χαρακτηριστική $u_{ev}=f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

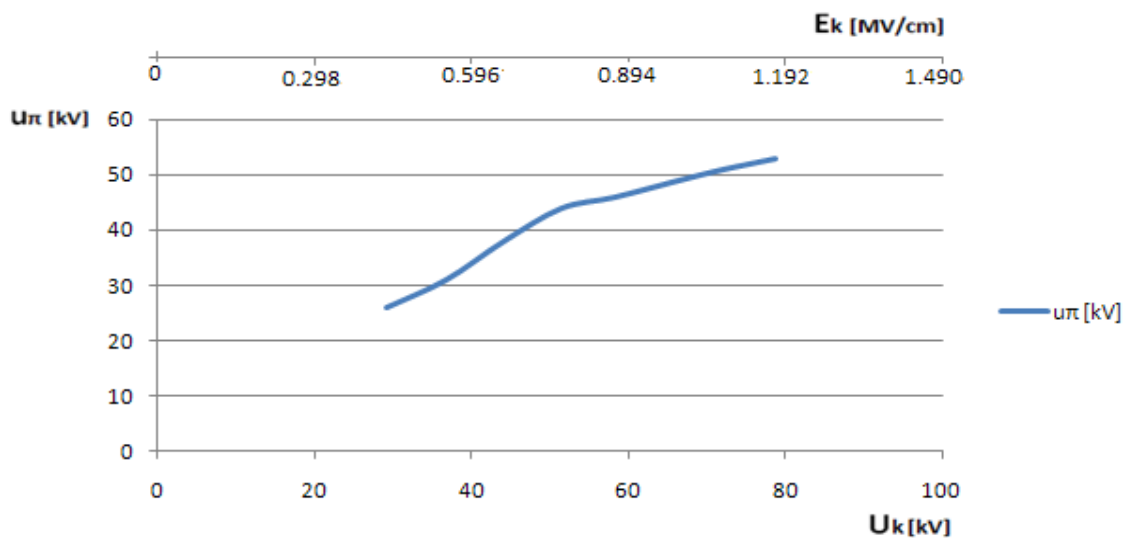
u_{ev} : τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε kV

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχήμα 2.11 Χαρακτηριστική $u_{\pi}=f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

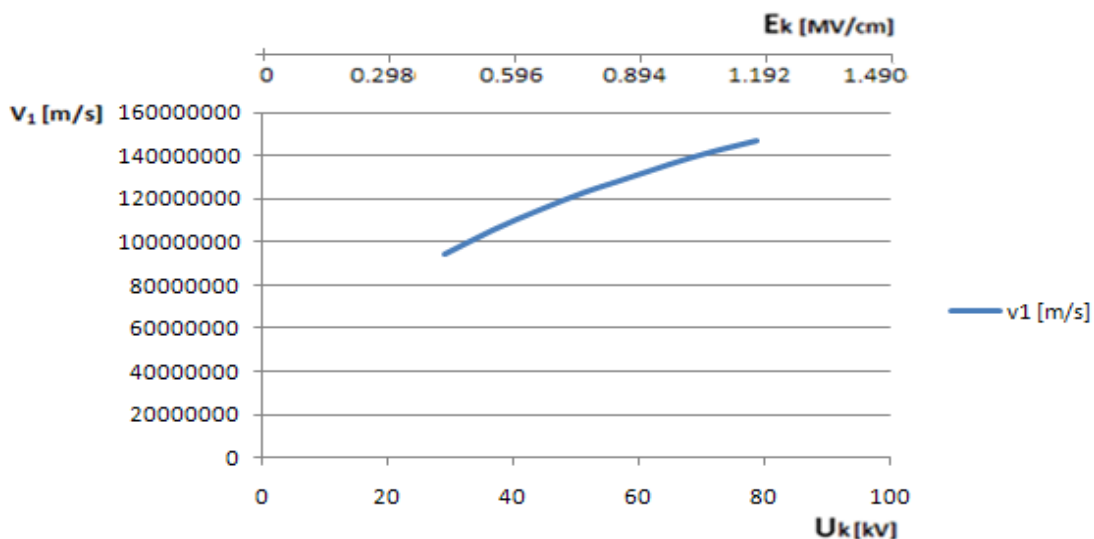
u_{π} : τάση περαίωσης των μερικών εκκενώσεων σε kV

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχημα 2.12 Χαρακτηριστική $v_1 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1$ mm.

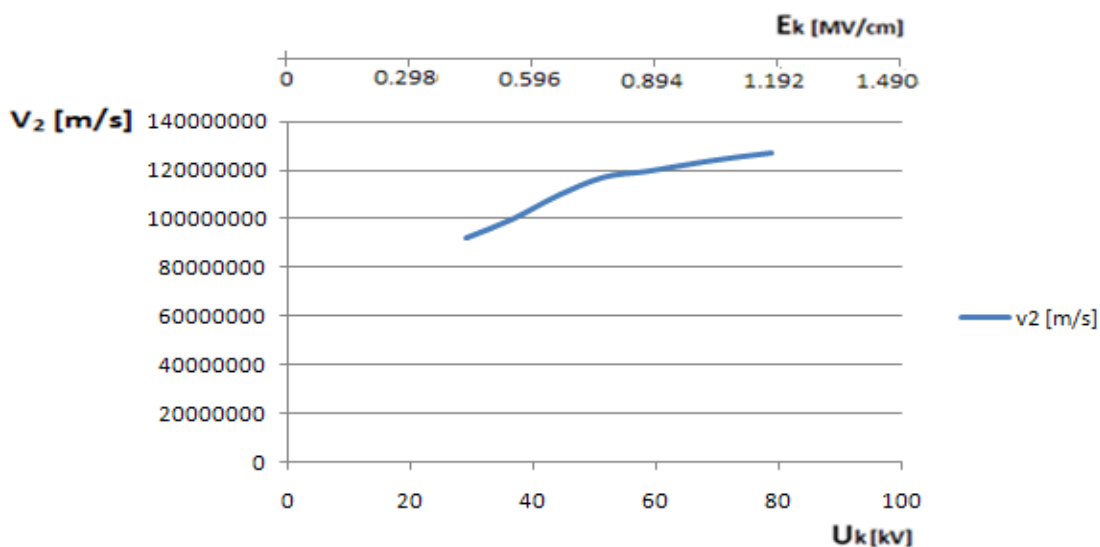
v_1 : ταχύτητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχημα 2.13 Χαρακτηριστική $v_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1$ mm.

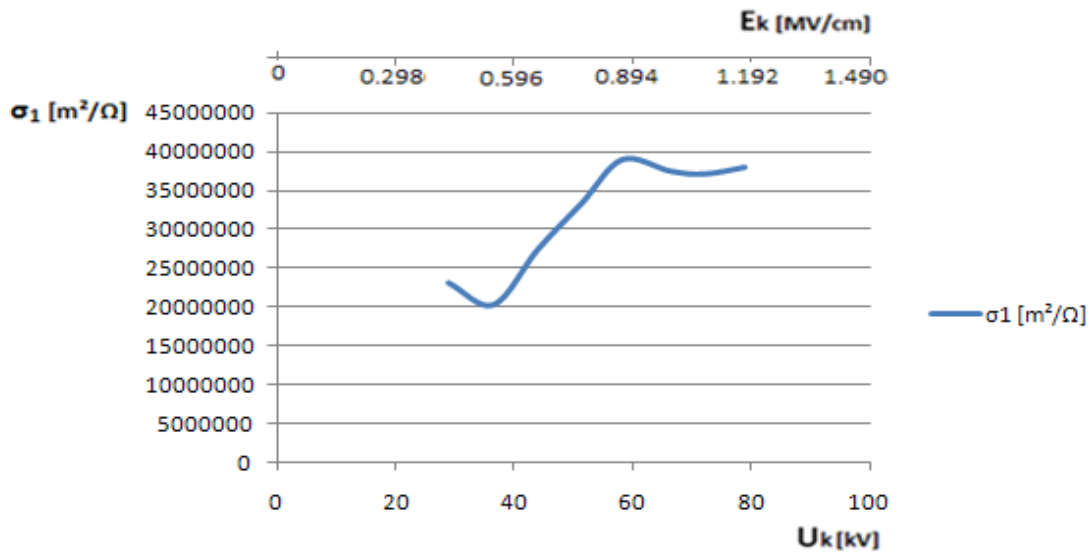
v_2 : ταχύτητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχήμα 2.14 Χαρακτηριστική $\sigma_1 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

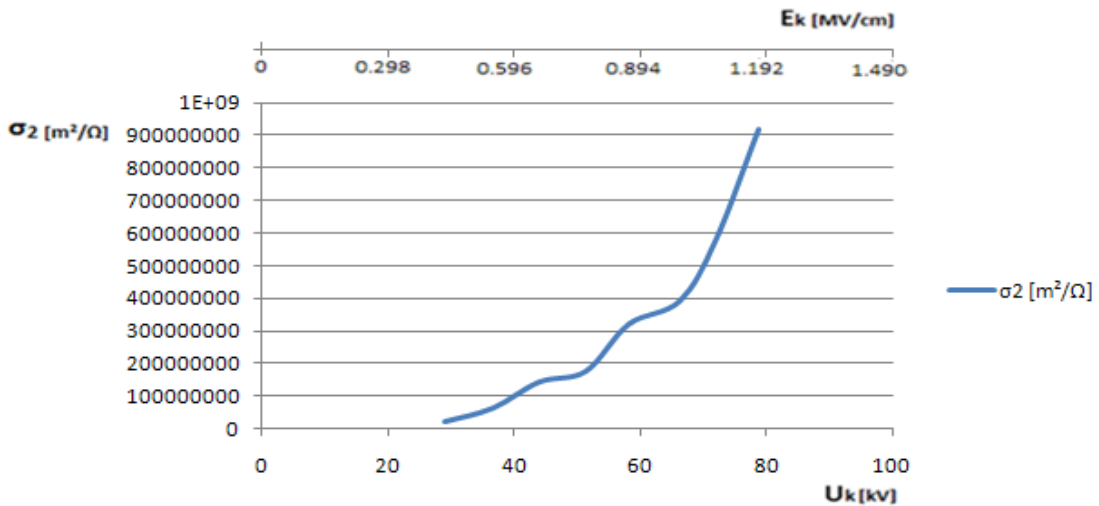
σ_1 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχήμα 2.15 Χαρακτηριστική $\sigma_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

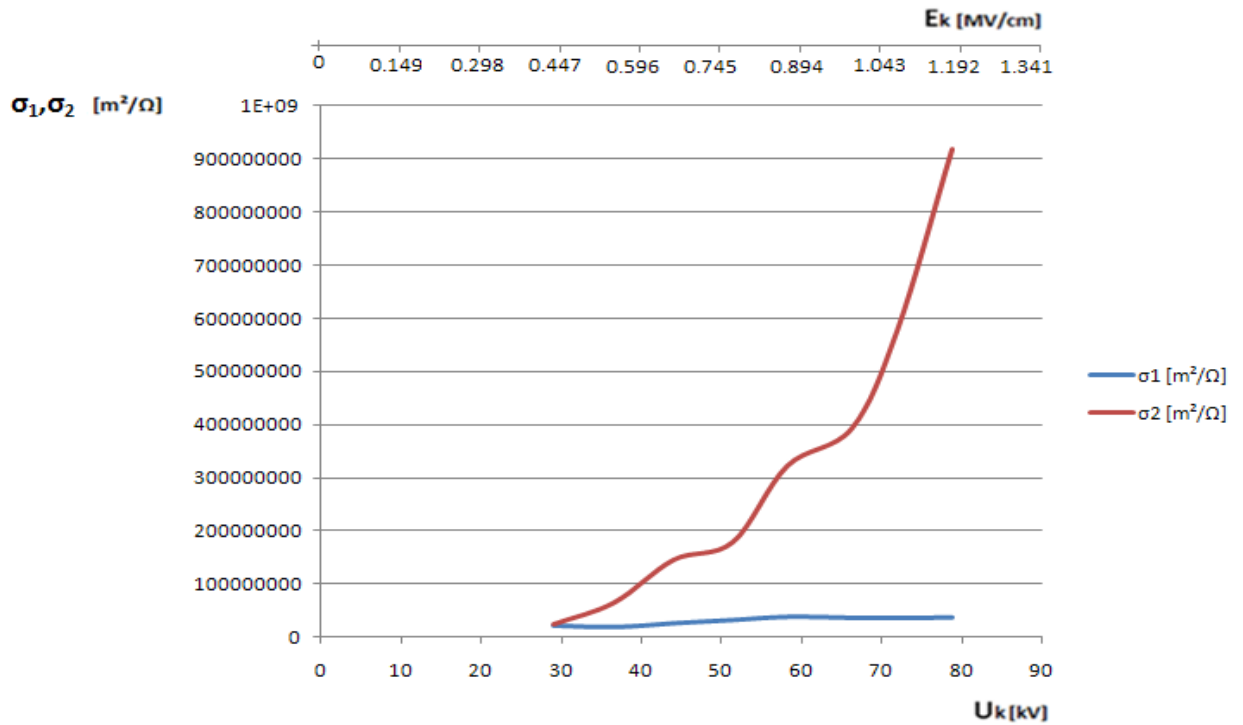
σ_2 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχήμα 2.16

Χαρακτηριστική $\sigma_1, \sigma_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1mm$.

σ_1 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

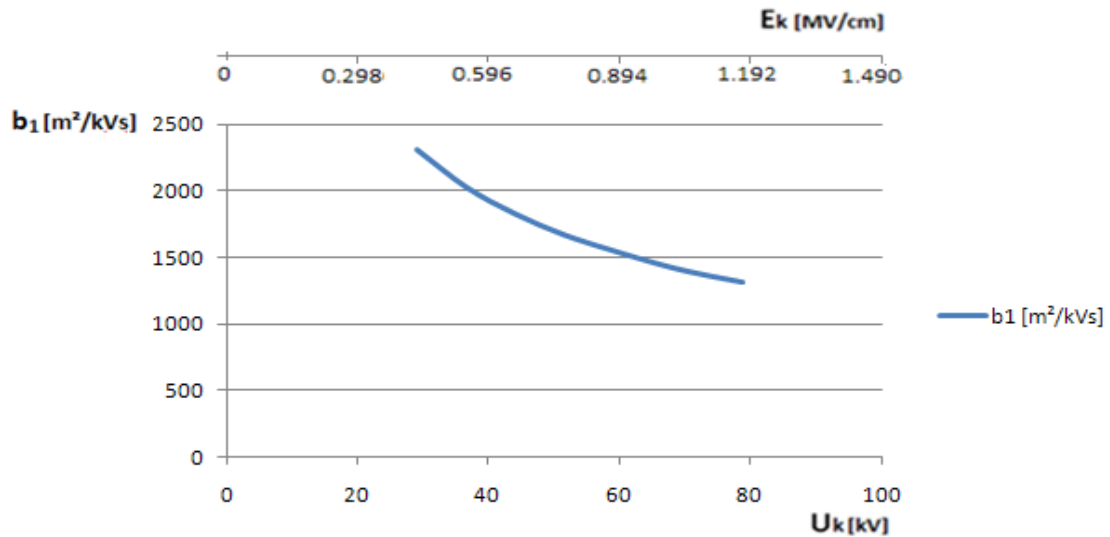
σ_2 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχήμα 2.17 Χαρακτηριστική $b_1 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

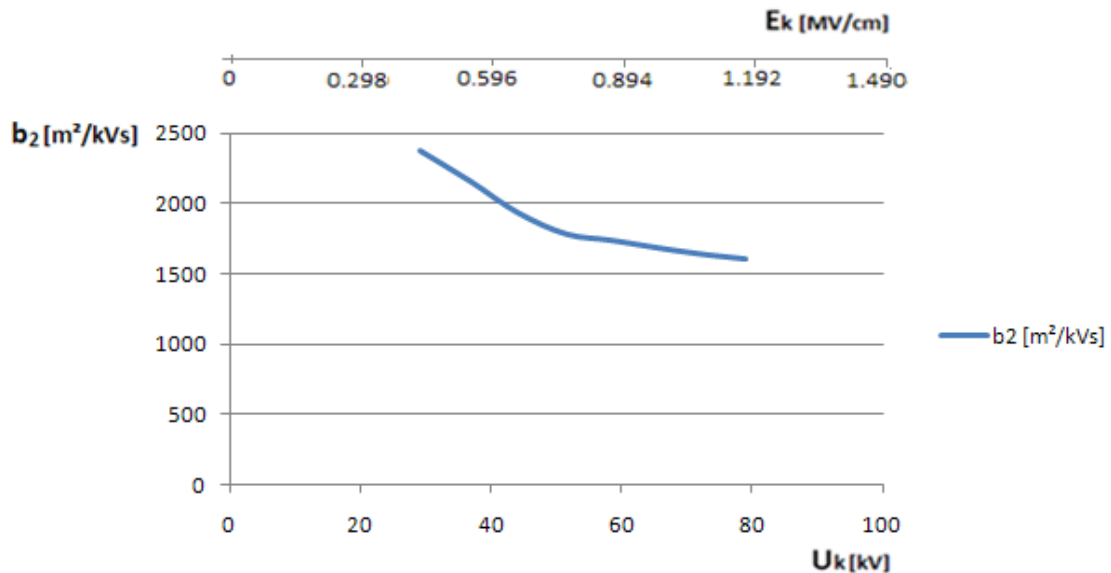
b_1 : η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχήμα 2.18 Χαρακτηριστική $b_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

b_2 : η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα

U_k [kV]	C_m [nF]	E_k [MV/cm]	$u_{εν}$ [kV]	$E_{εν}$ [MV/cm]	$u_{π}$ [kV]	$E_{π}$ [MV/cm]	t_2 [μs]	q_1 [μc]	q_2 [μc]
35.4	3.3	0.527610105	34	0.506744169	30	0.447127208	15.8	0.1	0.2
43.8	10	0.652805723	42.4	0.631939787	38	0.56636113	14.3	0.12	0.33
50.2	10	0.748192861	48.7	0.7258365	46	0.685595052	15.4	0.13	0.38
56.9	10	0.848051271	55.4	0.82569491	48	0.715403532	19.7	0.16	0.61
64.7	20	0.964304345	63.1	0.94045756	53	0.789924734	20.7	0.2	0.96
71.4	20	1.064162754	69.8	1.04031597	56	0.834637454	25.7	0.24	1.16
86.6	210	1.290707206	84.9	1.265369998	66	0.983679857	27.2	0.85	1.81
94.3	210	1.405469856	92.6	1.380132648	73	1.088009539	26.6	1.21	2.17
99.7	210	1.485952754	97.9	1.459125121	69	1.028392578	35	1.2	3
113.8	210	1.696102541	112	1.669274909	81	1.207243461	33	2	3.84
121.2	210	1.806393919	118.3	1.763171622	95	1.415902824	24.1	0.92	2
126	210	1.877934272	123	1.833221552	104	1.550040987	19.2	1.1	2.52
132.7	210	1.977792682	129.5	1.930099113	105	1.564945227	23.9	1.2	3.5

Πίνακας 2.5: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών : $u_{εν}, u_{π}, v_1, v_2, σ_1, σ_2, b_1$ και b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό <<Pertinax-μονωτικό λάδι>> εντός ανομοιογενούς πεδίου (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0.9 mm-πλάκα) υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs

Πάχος δοκιμίου: d=2mm

Πολικότητα θετική

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : πυκνωτής μέτρησης

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

t_2 : χρόνος περάτωσης των μερικών εκκενώσεων

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

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

$u_{εν}$: τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

$u_{π}$: τάση περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$E_{εν}$: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$E_{π}$: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

Δq [μc]	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	σ_1 [m^2/Ω]	σ_2 [m^2/Ω]	b_1 [m^2/kVs]	b_2 [m^2/kVs]
0.1	104221909.4	98435456.81	20566967.68	22015089.92	2056.696768	2201.508992
0.21	115076871.9	109587296.4	21852120.9	40633671.78	1821.010075	1934.936751
0.25	122303964.9	119290104.3	21905092.17	43498747.54	1685.00709	1739.949902
0.45	129307406.2	121533930.6	25056694.35	76446741.34	1566.043397	1698.816474
0.76	136638088.3	126871558.7	29057789.34	122065281	1452.889467	1606.122119
0.92	142491149.5	129904478.8	32872585.7	143190459.4	1369.691071	1556.418037
0.96	154227461	139226772.3	103600798.3	135875204.2	1218.832921	1415.36671
0.96	159569025.4	145135431.4	139898524.3	128059552	1156.186151	1333.953667
1.8	163031553.2	141815441.8	134078881.2	248220184.3	1117.32401	1379.001024
1.84	171503921.9	151367497.7	205483136.5	230704248.9	1027.415682	1253.82744
1.08	174982660.8	161157430.5	91303674.5	122925120.2	992.4312446	1138.195558
1.42	177467960.8	166821402.1	106487269.2	152825888.5	968.0660836	1076.238651
2.3	180761461	167423962.3	112384774.3	246062997.4	936.5397859	1069.839119

Πίνακας 2.6: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών : $u_{\text{εν}}, u_{\text{π}}, v_1, v_2, \sigma_1, \sigma_2, b_1$ και b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό <<Pertinax-μονωτικό λάδι>> εντός ανομοιογενούς πεδίου (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0.9 mm-πλάκα) υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs

Πάχος δοκιμίου: d=2mm

Πολικότητα θετική

Δq : $\Delta q = q_2 - q_1$

v_1 : ταχύτητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

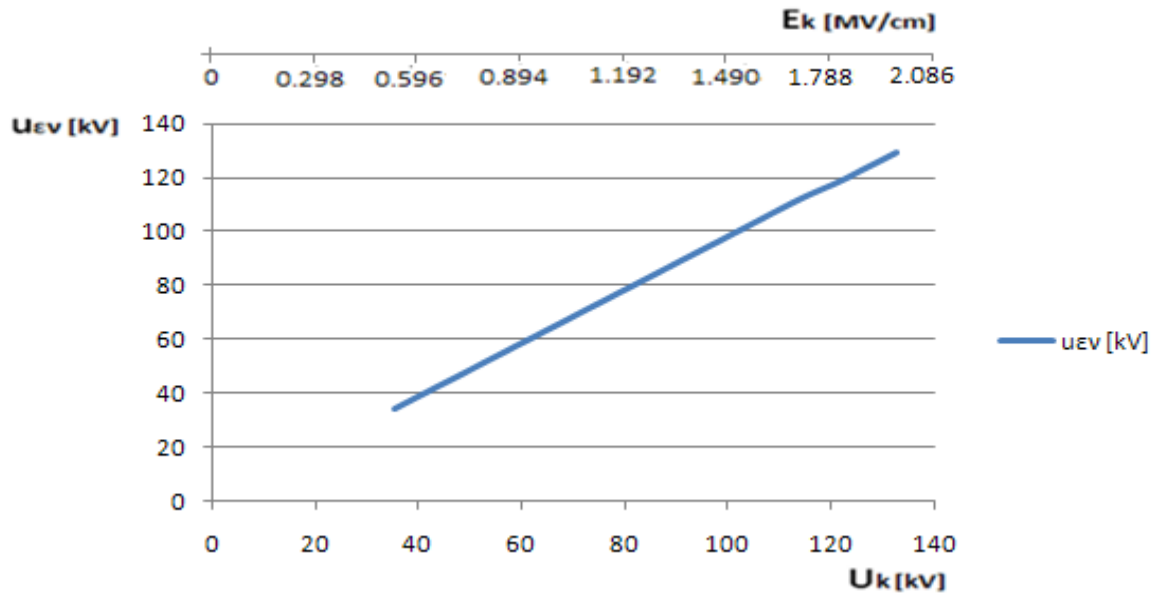
v_2 : ταχύτητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

σ_1 : ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

σ_2 : ειδική αγωγιμότητα κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

b_1 : κινητικότητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

b_2 : κινητικότητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 2.19 Χαρακτηριστική $u_{EV}=f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.

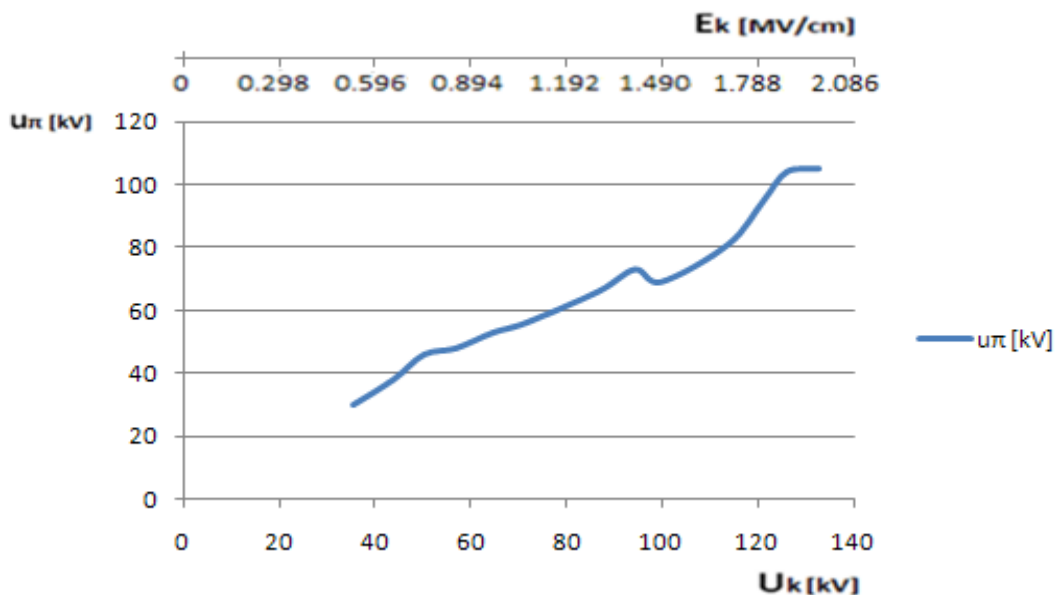
u_{EV} : τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε kV

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχήμα 2.20 Χαρακτηριστική $u_{PI}=f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.

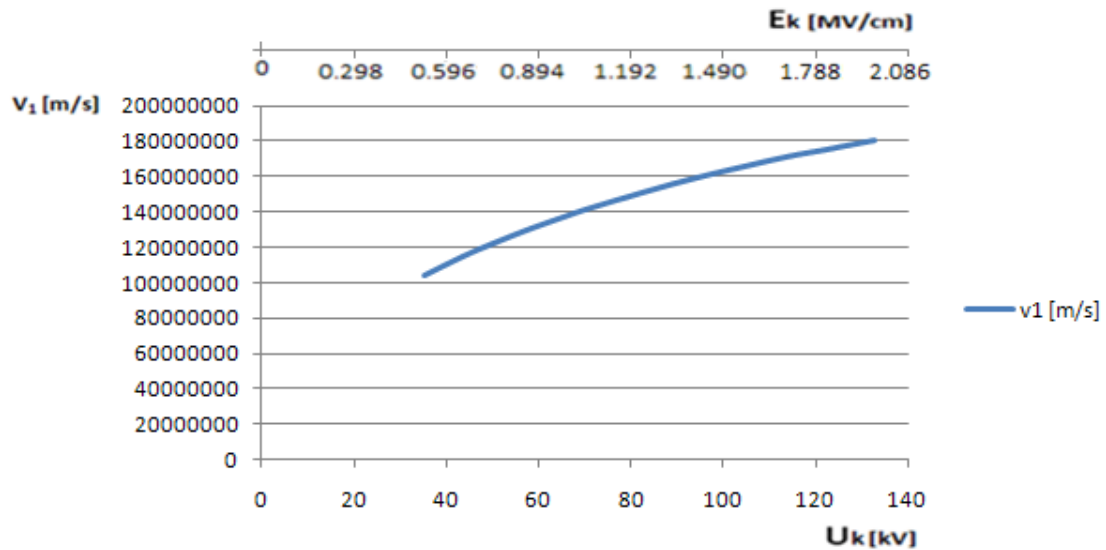
u_{PI} : τάση περαίωσης των μερικών εκκενώσεων σε kV

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχημα 2.21 Χαρακτηριστική $v_1 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.

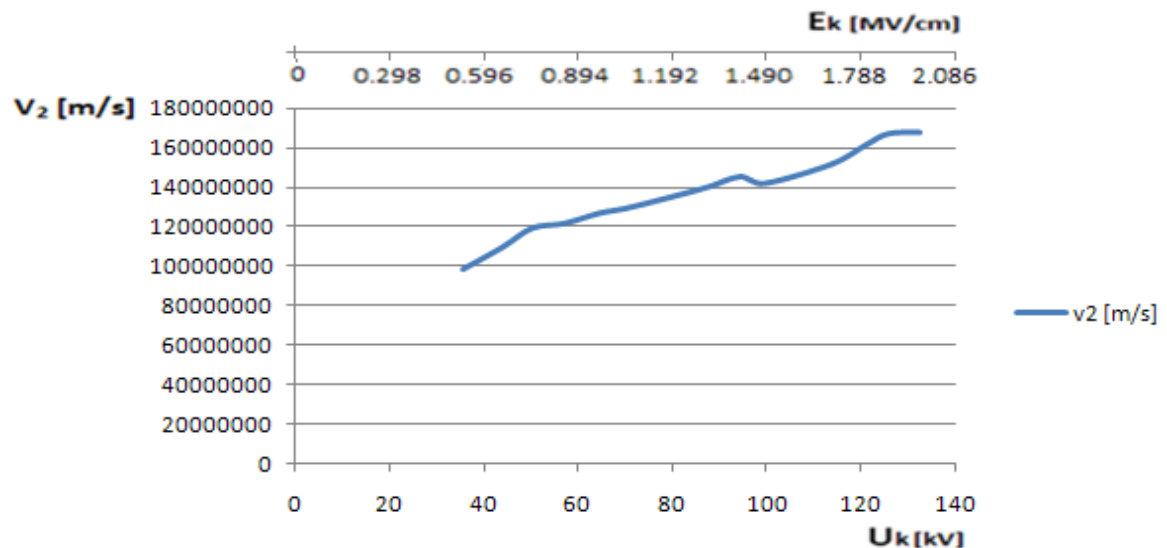
v_1 : ταχύτητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχημα 2.22 Χαρακτηριστική $v_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.

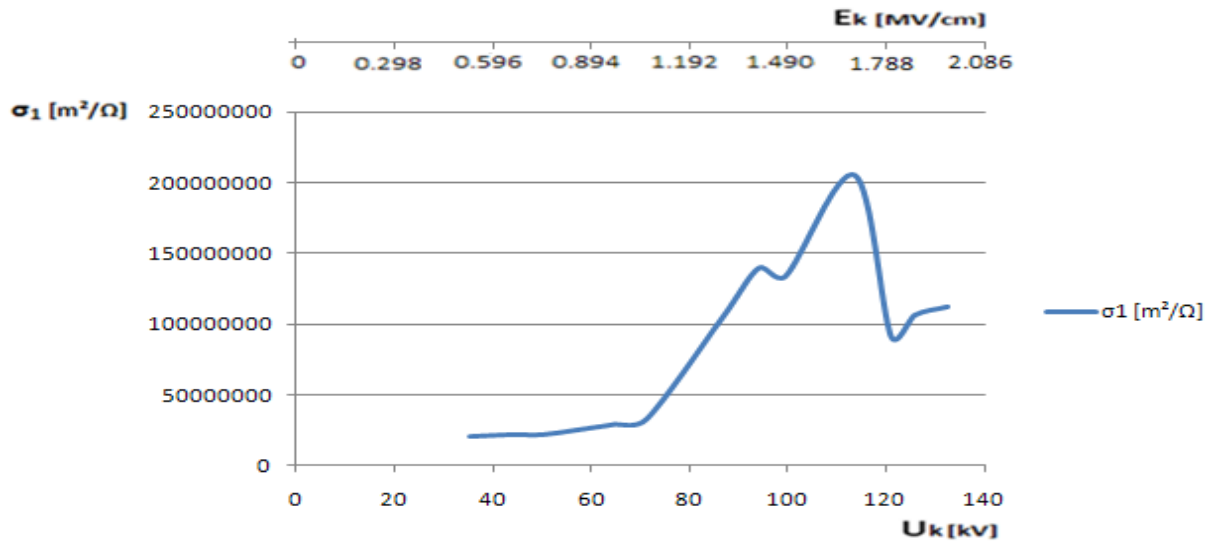
v_2 : ταχύτητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχήμα 2.23 Χαρακτηριστική $\sigma_1 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.

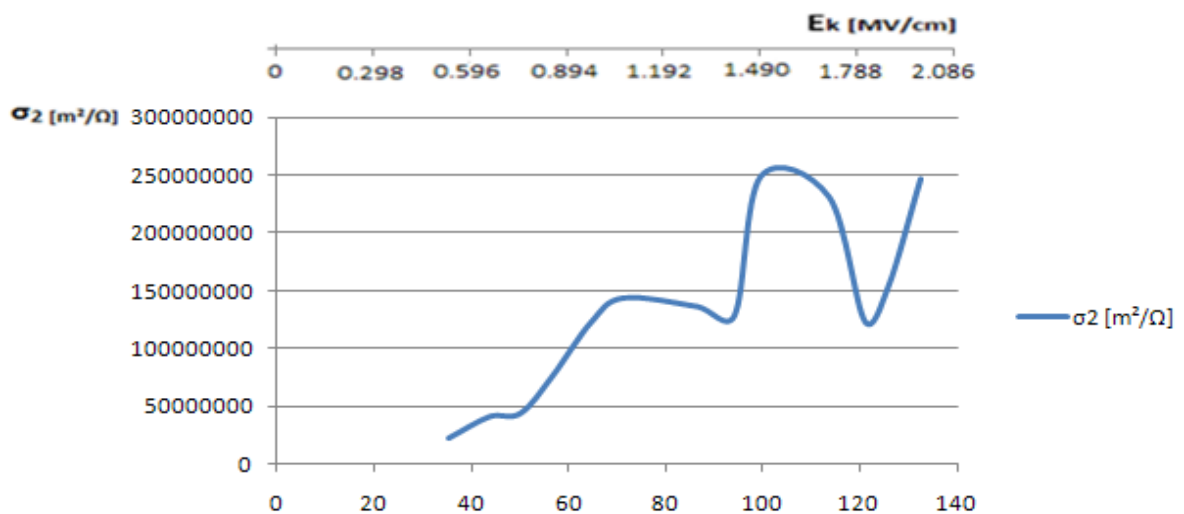
σ_1 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχήμα 2.24 Χαρακτηριστική $\sigma_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.

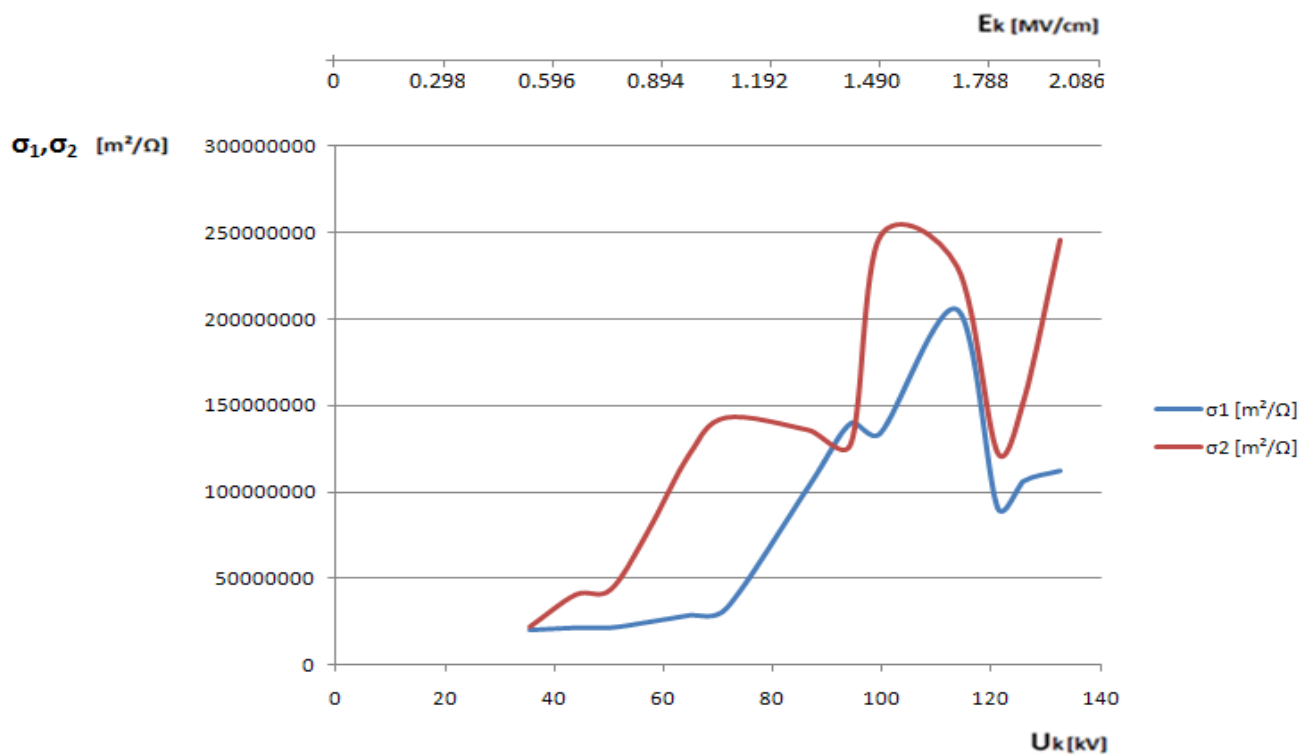
σ_2 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

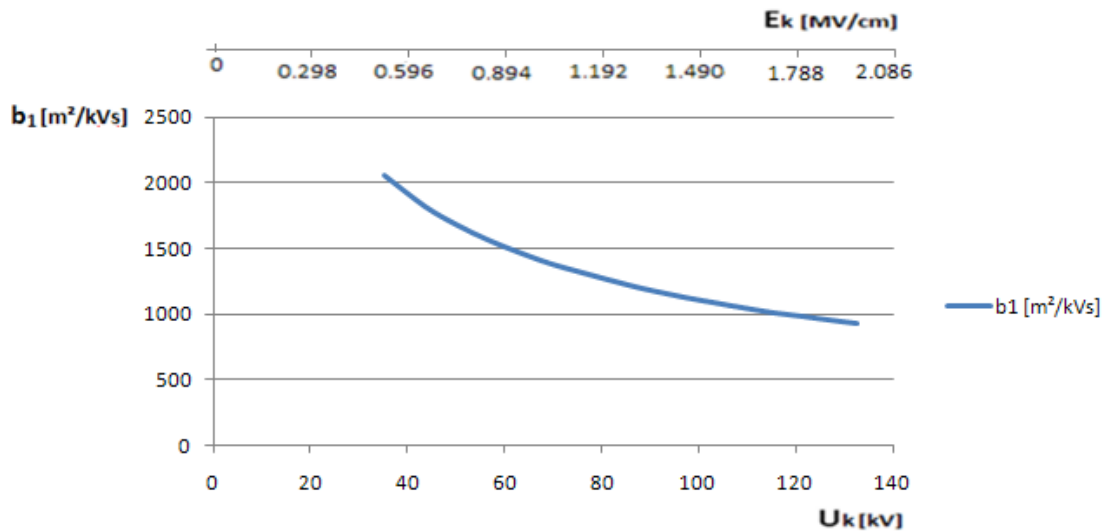
E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχήμα2.25 Χαρακτηριστική $\sigma_1, \sigma_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.
 σ_1 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω
 σ_2 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV
 E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm
 Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχήμα 2.26 Χαρακτηριστική $b_1 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2mm$.

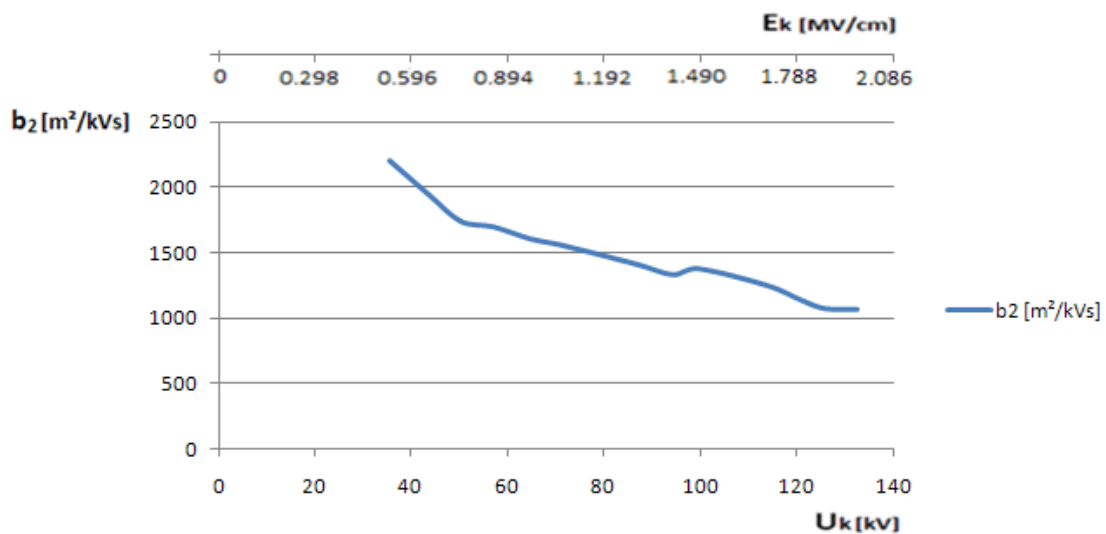
b_1 : η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχήμα 2.27 Χαρακτηριστική $b_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2mm$.

b_2 : η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα

U_k [kV]	C_m [nF]	E_k [MV/cm]	$u_{εν}$ [kV]	$E_{εν}$ [MV/cm]	$u_{π}$ [kV]	$E_{π}$ [MV/cm]	t_2 [μs]	q_1 [μc]	q_2 [μc]
36.2	10	0.539533497	35	0.521648409	31	0.462031448	15.4	0.14	0.22
44.5	10	0.663238691	43.1	0.642372755	36	0.536552649	19.15	0.2	0.41
51.2	10	0.763097101	48.1	0.716893956	41	0.611073851	21.6	0.24	0.55
57.3	20	0.854012967	55.3	0.824204486	45	0.670690812	23.8	0.32	0.84
64.7	20	0.964304345	63.1	0.94045756	49	0.730307773	26.5	0.36	1
73	210	1.088009539	71.1	1.059691482	54	0.804828974	29	0.39	1.6
80.2	210	1.195320069	77.2	1.150607348	57	0.849541695	33.5	0.42	1.93
92	210	1.371190104	88.6	1.320515687	63	0.938967136	33.85	0.58	2.24
99.7	210	1.485952754	97.2	1.448692153	61	0.909158656	41.15	0.31	1.25
106.4	210	1.585811163	102.9	1.533646322	78	1.16253074	28.7	1	2.68
115.9	1000	1.727401446	113.1	1.685669573	77	1.1476265	35.8	1.2	3.1
121.2	1000	1.806393919	117.4	1.749757806	76	1.132722259	40.4	1.8	3.74
126.6	1000	1.886876816	123.1	1.834711976	84	1.251956182	34.5	2	4.2
134.7	1000	2.007601163	130.6	1.946493777	94	1.400998584	32.4	2.4	4.4

Πίνακας 2.7: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών : $u_{εν}, u_{π}, v_1, v_2, σ_1, σ_2, b_1$ και b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό <<Pertinax-μονωτικό λάδι>> εντός ανομοιογενούς πεδίου (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0.9 mm-πλάκα) υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs

Πάχος δοκιμίου: d=2mm

Πολικότητα αρνητική

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : πυκνωτής μέτρησης

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

t_2 : χρόνος περάτωσης των μερικών εκκενώσεων

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

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

$u_{εν}$: τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων

$u_{π}$: τάση περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$E_{εν}$: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$E_{π}$: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

Δq [μs]	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	σ_1 [m^2/Ω]	σ_2 [m^2/Ω]	b_1 [m^2/kVs]	b_2 [m^2/kVs]
0.08	105600000	99925660.2	28340928	17301966.89	2024.352	2162.745862
0.21	115914602.6	106952941.7	36089513.98	41860044.46	1804.475699	1993.33545
0.31	121644411.2	113373108.7	40723817.56	57514592.81	1696.825732	1855.309445
0.52	129207441	118142961.8	50165197.85	91598601.11	1567.662433	1761.51156
0.64	136638088.3	122631622.4	52304020.81	107467346.3	1452.889467	1679.177286
1.21	143576524.2	127895906	52840704.46	192281902.5	1354.889858	1589.106633
1.51	148471505	130889393.7	54195753.42	232646597.3	1290.375081	1540.705943
1.66	156842557.2	136547241.6	68888756.16	241401868.4	1187.737175	1454.228123
0.94	162583599.4	134707300	34790632.16	139276969.1	1122.278457	1481.669884
1.68	166152643	149090542.6	108338305	215454183.7	1083.38305	1282.465379
1.9	172124025.7	148315946.3	122532217.6	245550532.4	1021.101813	1292.371223
1.94	174496287.7	147533295.8	179506739.1	252678528.6	997.2596615	1302.466642
2.2	177519867	153577152.9	193512517.9	269873452	967.5625896	1226.697509
2	181303155.9	160499797.2	223544292.4	229121997.8	931.4345516	1145.609989

Πίνακας 2.8: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών : $u_{\text{εν}}, u_{\text{π}}, v_1, v_2, \sigma_1, \sigma_2, b_1$ και b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό <<Pertinax-μονωτικό λάδι>> εντός ανομοιογενούς πεδίου (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0.9 mm-πλάκα) υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs

Πάχος δοκιμίου: d=2mm

Πολικότητα αρνητική

Δq : $q_2 - q_1$

v_1 : ταχύτητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

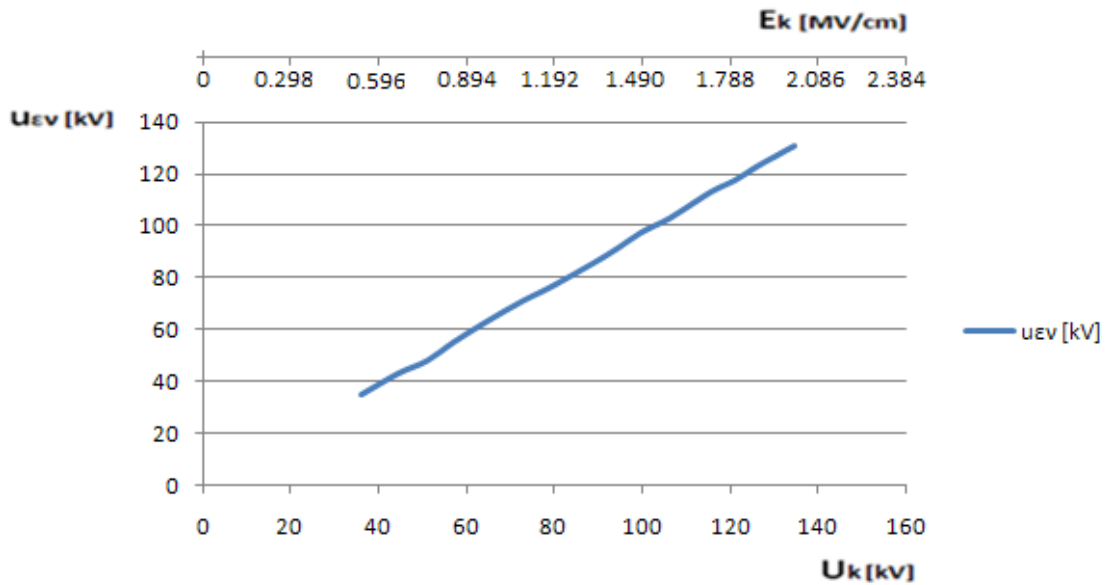
v_2 : ταχύτητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

σ_1 : ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

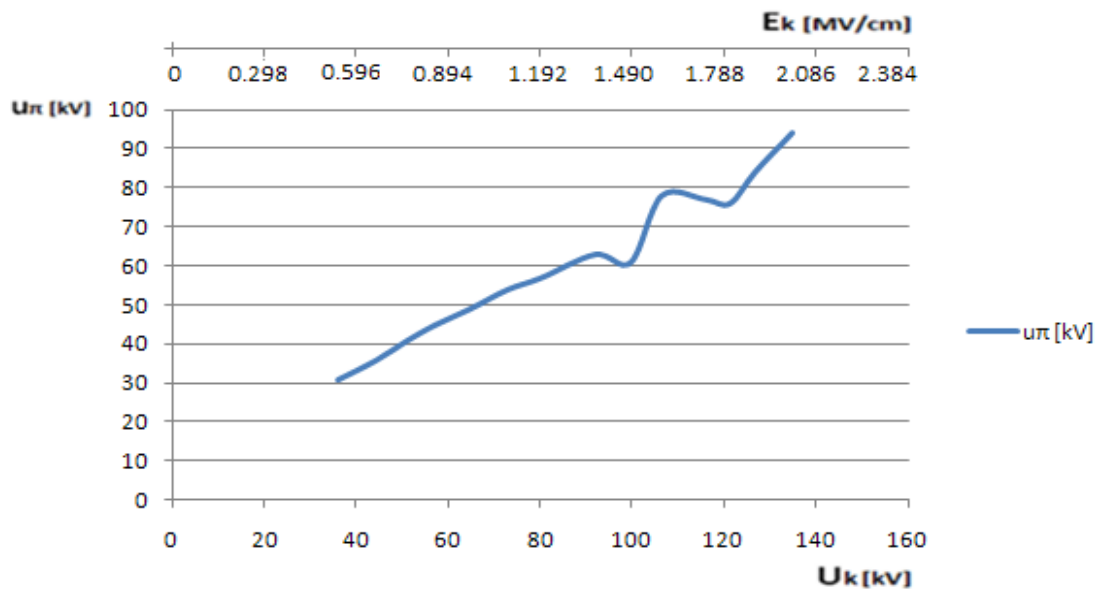
σ_2 : ειδική αγωγιμότητα κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων

b_1 : κινητικότητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

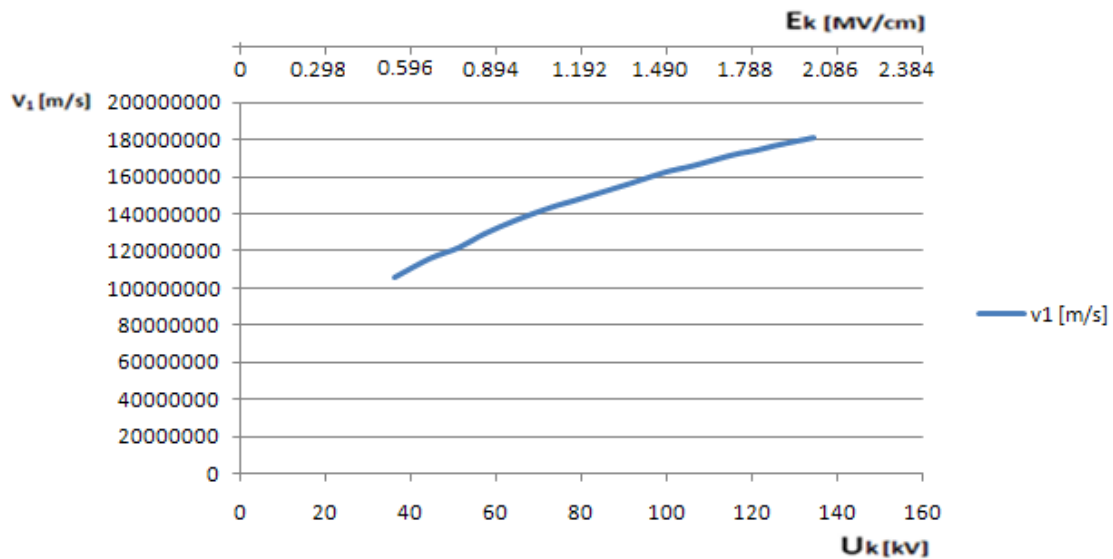
b_2 : κινητικότητα των ελευθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων



Σχῆμα 2.28 Χαρακτηριστική $u_{EV}=f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2$ mm.
 u_{EV} : τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε kV
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV
 E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm
 Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχῆμα 2.29 Χαρακτηριστική $u_{PI}=f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2$ mm.
 u_{PI} : τάση περαίωσης των μερικών εκκενώσεων σε kV
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV
 E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm
 Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχημα 2.30 Χαρακτηριστική $v_1 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.

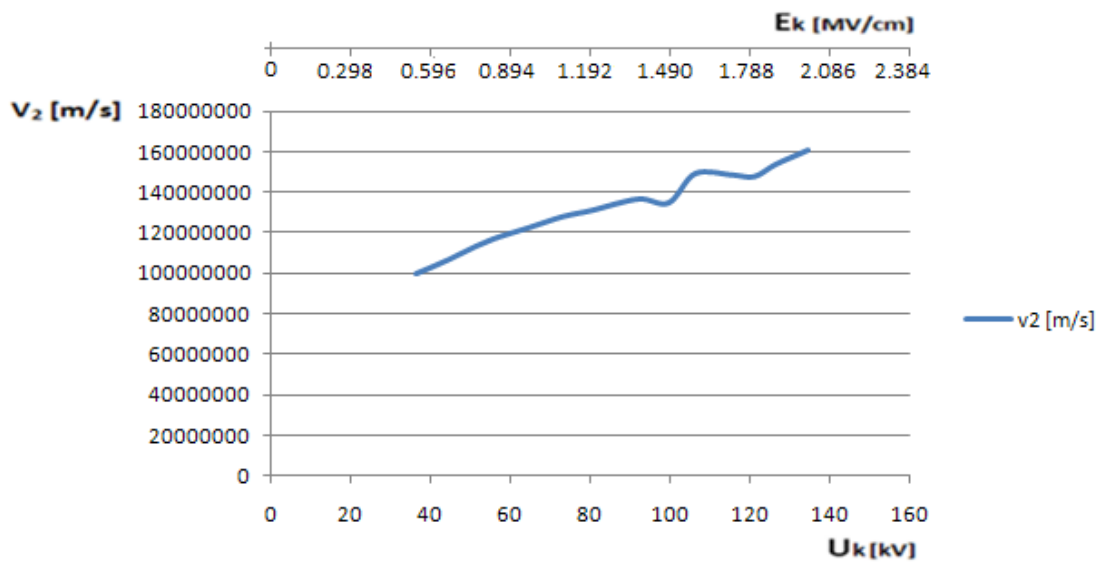
v_1 : ταχύτητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχημα 2.31 Χαρακτηριστική $v_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.

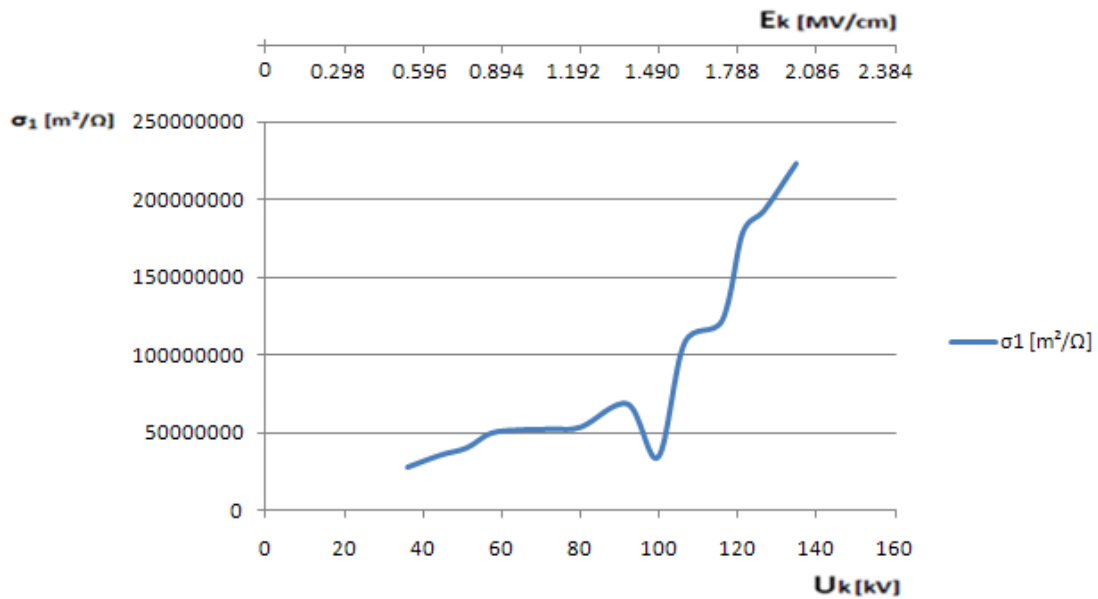
v_2 : ταχύτητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχήμα 2.32 Χαρακτηριστική $\sigma_1 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.

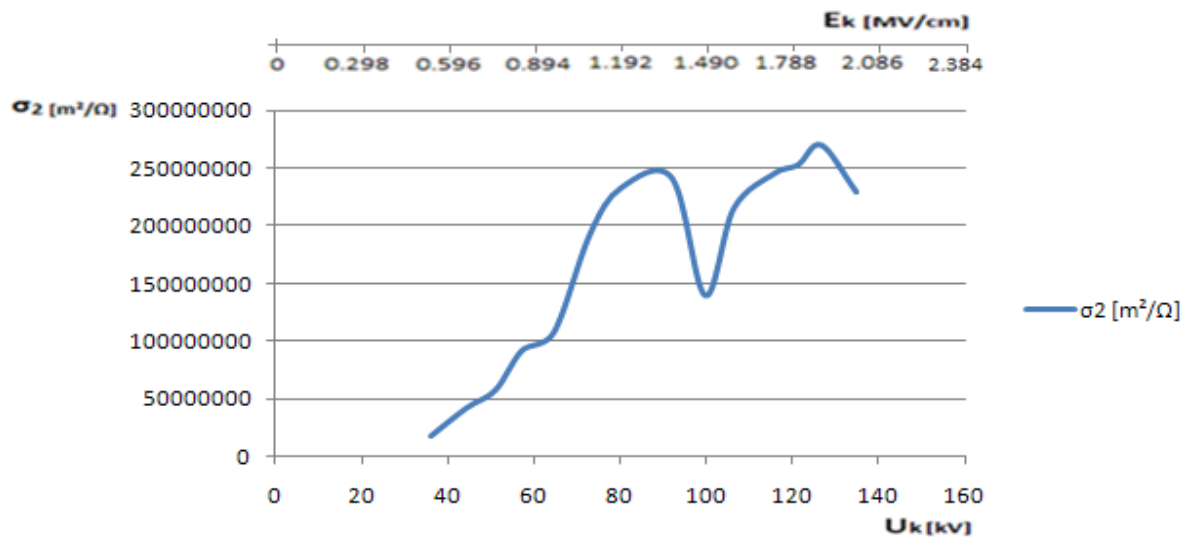
σ_1 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχήμα 2.33 Χαρακτηριστική $\sigma_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μ s αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.

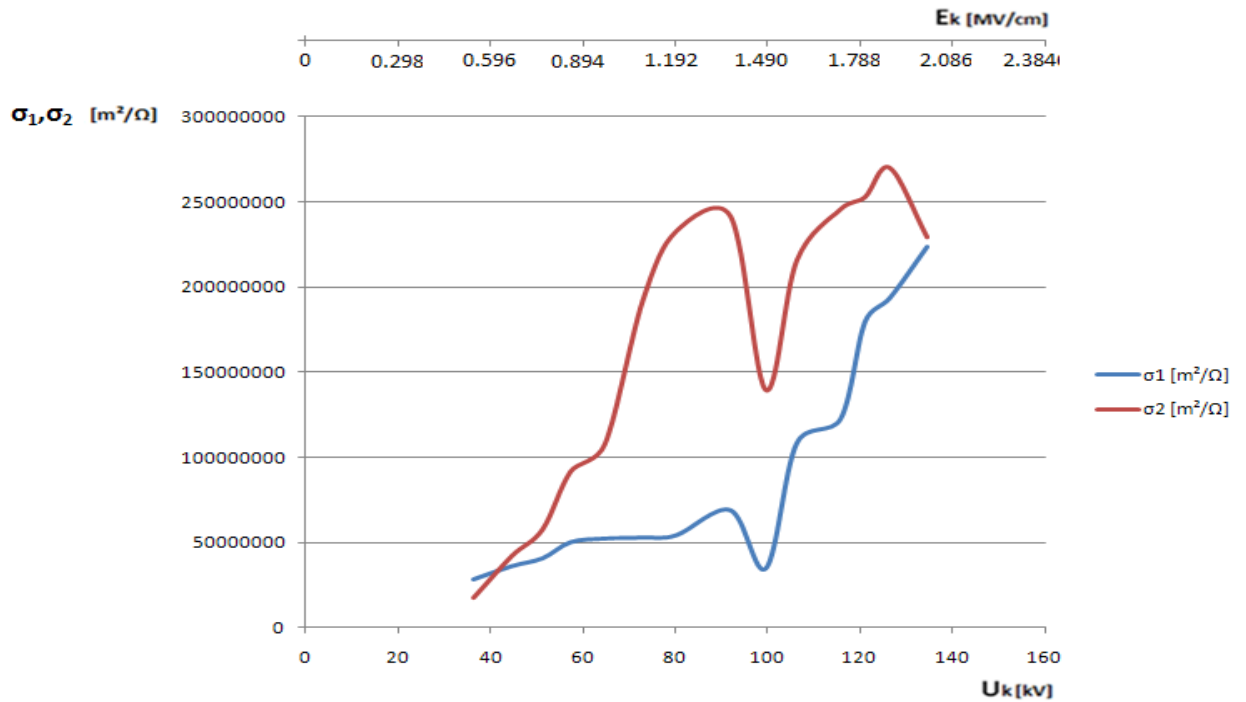
σ_2 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

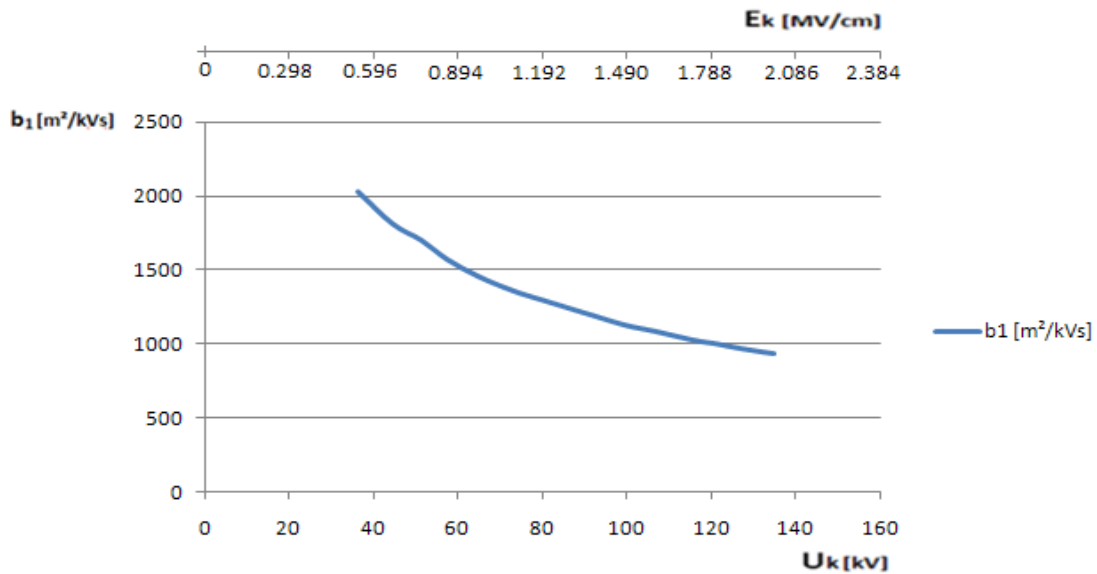
E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχήμα 2.34 Χαρακτηριστική $\sigma_1, \sigma_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.
 σ_1 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω
 σ_2 : η ειδική αγωγιμότητα κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων σε m^2/Ω
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV
 E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm
 Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα



Σχήμα 2.35 Χαρακτηριστική $b_1 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους d=2mm.

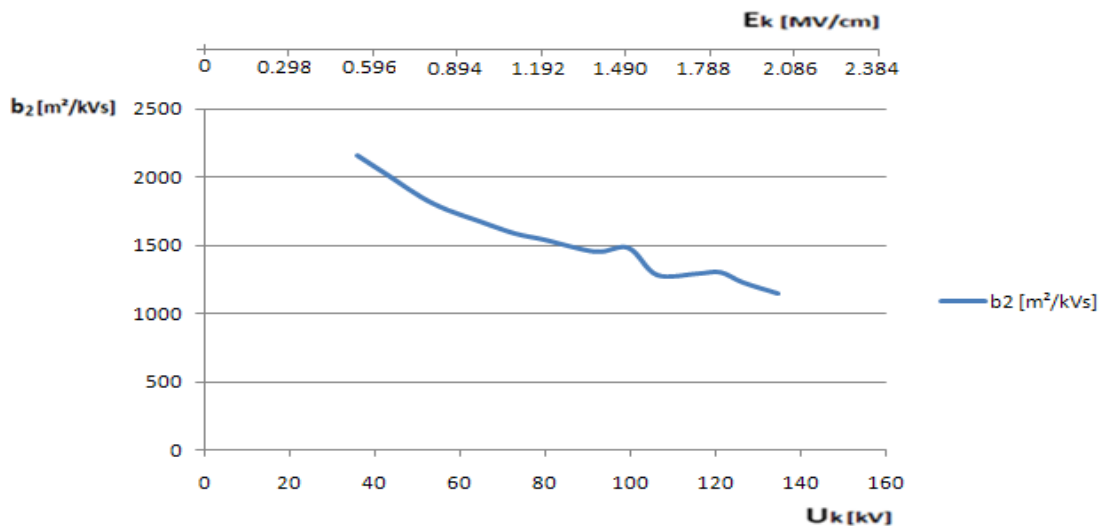
b_1 : η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε m²/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα.



Σχήμα 2.36 Χαρακτηριστική $b_2 = f(U_k, E_k)$ με επιβαλλόμενη κρουστική τάση 1,2/50 μs αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους d=2mm.

b_2 : η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων σε m²/Ω

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε kV

E_k : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε MV/cm

Δοκίμιο: <<Pertinax-μονωτικό λάδι>>

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm)-πλάκα

3. ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Εξετάζοντας κάποιος τα διαγράμματα που προέκυψαν, παρατηρεί καταρχήν την εκθετική μεταβολή των μεγεθών, που είναι ανάλογα του φορτίου, συναρτήσει την μέγιστης κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) ή της μέγιστης πεδιακής έντασης (E_k) αντίστοιχα, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο όπως είναι γνωστό από την βιβλιογραφία. Οι χαρακτηριστικές αυτές παρουσιάζουν κάποια απόκλιση από τις θεωρητικές καμπύλες. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [2], αυτό οφείλεται σε 4 παράγοντες που αναφέρθηκαν και παραπάνω και είναι οι απώλειες Joule, οι δυνάμεις Coulomb, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και οι μερικές εκκενώσεις. Από τους τέσσερις αυτούς παράγοντες η θερμοκρασία και οι απώλειες Joule αποκλείονται. Η μεν θερμοκρασία γιατί παρέμενε σταθερή καθ'όλη τη διάρκεια των πειραμάτων και οι δε απώλειες Joule γιατί η διάρκεια της διάσπασης είναι πολύ μικρή και δεν προλαβαίνει το υλικό να καταπονεθεί θερμικά. Η απόκλιση επομένως από τις θεωρητικές καμπύλες οφείλεται κυρίως στις μερικές εκκενώσεις και στις δυνάμεις Coulomb. Έτσι όταν ενισχύεται ο ρόλος των δυνάμεων Coulomb μειώνεται η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρονίων με υπαιτιότητα των μερικών εκκενώσεων.

Η αύξηση της κρουστικής τάσης από μία συγκεκριμένη τιμή και πάνω (u_{ev}), προκαλεί τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, ένα φαινόμενο που ονομάζεται ιονισμός με κρούσεις [2]. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση του φορτίου, παράγοντας ο οποίος συμβάλει καθοριστικά στην εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων. Ένα εντυπωσιακό φαινόμενο είναι η υπερβολική αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας κατά την περάτωση των μερικών εκκενώσεων, όπως φαίνεται από το κοινό διάγραμμα της ειδικής αγωγιμότητας κατά την έναρξη και την περάτωση των μερικών εκκενώσεων (σ_1 και σ_2) συναρτήσει της μέγιστης κρουστικής τάσης. Αυτή η υπέρμετρη αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας του μονωτή οφείλεται όπως προαναφέρθηκε στην δημιουργία των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (ιονισμός).

Τέλος κατά την εφαρμογή της αρνητικής πολικότητας παρατηρείται από μία τιμή της τάσης και πάνω μία μείωση των αλμάτων δυναμικού. Αυτό οφείλεται στην εξομάλυνση του πεδίου λόγω συγκεντρωσης θετικών ηλεκτρικών φορέων στην αρνητική ακίδα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ**
Π.Δ. Μπούρκας
Εκδόσεις Ε.Μ.Π
Αθήνα 1998
- 2. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ**
Π.Δ. Μπούρκας-Κ.Γ.Καραγιαννόπουλος
Εκδόσεις Ε.Μ.Π
Αθήνα 2003
- 3. ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ**
Κ.Θ. Δέρβος
Εκδόσεις Ε.Μ.Π
Αθήνα 2007
- 4. Διπλωματική Εργασία: Θερμική καταπόνηση λόγω μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 80 °C.**
Χατζηχαραλάμπους Σ.Αναστάσης
Αθήνα 2009
- 5. Διπλωματική Εργασία: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων σε βιομηχανικά ηλεκτρομονωτικά υλικά υπό κρουστικές τάσεις χειρισμών και υπό κεραυνικές τάσεις.**
Δέσποινα Δ.Δημητριάδου.
Αθήνα 2004