



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Στιγμαία τιμή της τάσης έναρξης και της τάσης περαίωσης
των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι
μετασχηματιστών» υπό κρουστικές τάσεις $\pm 1,2/100\mu\text{s}$ εντός
ανομοιογενούς πεδίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντωνοπούλου Ευαγγελία

Επιβλέπων : Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Στιγμαιαία τιμή της τάσης έναρξης και της τάσης περαίωσης
των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι
μετασχηματιστών» υπό κρουστικές τάσεις $\pm 1,2/100\mu\text{s}$ εντός
ανομοιογενούς πεδίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντωνοπούλου Ευαγγελία

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Φεβρουάριο 2011.

.....

Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ν. Ι. Θεοδώρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Π. Δ. Μπούρκας

Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

.....

Αντωνοπούλου Ευαγγελία

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

Copyright © ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ, 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.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
ABSTRACT.....	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	13
1.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	14
1.2.1 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r).....	15
1.2.2 Ο συντελεστής απωλειών ($\text{tg}\delta$).....	16
1.2.3 ο συντελεστής ($\epsilon \cdot \text{tg}\delta$).....	16
1.2.4 Επιφανειακή αγωγιμότητα.....	17
1.2.5 Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	18
1.2.6 Η διηλεκτρική αντοχή.....	19
1.2.7 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.....	19
1.2.8 Η μηχανική αντοχή.....	20
1.3 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	20
1.3.1 Αέρια μονωτικά.....	20
1.3.2 Τα υγρά μονωτικά.....	21
1.3.3 Στερεά μονωτικά.....	28
1.4 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών.....	29
1.4.1 Η θερμική διάτρηση.....	29
1.4.2 Η ηλεκτρική διάτρηση.....	29
1.4.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης).....	30
1.4.4 Η θερμοχημική διάτρηση.....	31
1.4.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.....	32
1.5 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση.....	33

1.6	Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών.....	34
1.6.1	Μακροσκοπική ερμηνεία.....	36
1.6.2	Κβαντομηχανική ερμηνεία.....	36
1.7	Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών.....	37
2	ΣΚΟΠΟΣ.....	39
2.1	Στατικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων.....	39
2.2	Ορισμοί- Μαθηματικές Σχέσεις.....	41
3	ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	45
3.1	Τάση καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs (d=1mm).....	46
3.2	Τάση καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs (d=2mm).....	54
3.3	Τάση καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs (d=1mm).....	62
3.4	Τάση καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs (d=2mm).....	70
3.5	Μαθηματική Προσέγγιση.....	79
3.5.1	$u_{εν}$: στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων.....	79
3.5.2	$u_{π}$: στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.....	81
3.5.3	v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.....	83
3.5.4	v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.....	85
3.5.5	b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.....	87
3.5.6	b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.....	89
3.5.7	σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.....	91
3.5.8	σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.....	93
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	95
5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	97

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διερεύνηση της ηλεκτρονικής συμπεριφοράς, τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των ηλεκτρομονωτικών υλικών εντός μονωτικού ελαίου υπό την επίδραση υψηλών τάσεων έχουν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης εξαιτίας της ευρείας χρήσης τους στη βιομηχανία. Η εργασία αυτή αφορά σε μετρήσεις που έγιναν στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματιστών» υπό κρουστική τάση $\pm 1,2/100$ μs εντός ανομοιογενούς πεδίου και διαρθρώνεται σε τέσσερα μέρη.

Στο πρώτο εισαγωγικό μέρος, η θεωρία του οποίου αναφέρεται κυρίως στο βιβλίο του Καθηγητή Ε.Μ.Π. Περικλή Μπούρκα: “Εφαρμογές Κτιριακών – Βιομηχανικών Μελετών και Εγκαταστάσεων”, περιγράφονται οι βασικές ιδιότητες των βιομηχανικών ηλεκτρομονωτικών υλικών, τα κριτήρια αξιολόγησης τους και οι κατηγορίες διάκρισης των μονωτικών υλικών ανάλογα με τη φυσική τους κατάσταση. Στη συνέχεια, εξετάζονται στα είδη καταπόνησης και τα είδη διάτρησης που αυτά υφίστανται. Τέλος στο ίδιο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι δύο βασικές θεωρίες για την ερμηνεία του φαινομένου της γήρανσης και διάσπασης: η μακροσκοπική θεωρία και η κβαντομηχανική θεωρία, οι οποίες αποτελούν και το βασικό εργαλείο επεξεργασίας των μετρήσεων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο δεύτερο μέρος γίνεται αναφορά στο σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων και ο καθορισμός των μετρούμενων μεγεθών. Παρατίθενται χρήσιμοι ορισμοί για σημαντικά ηλεκτρικά μεγέθη και μαθηματικές σχέσεις με τις οποίες θα αξιολογήσουμε τα μονωτικά υλικά.

Στο τρίτο μέρος παρατίθενται πίνακες που αναφέρονται στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Οι πίνακες αυτοί περιλαμβάνουν τόσο τα απευθείας μετρούμενα μεγέθη (επιβαλλόμενη τάση και φορτία έναρξης και περαίωσης), όσο και αυτά που υπολογίσαμε για την αξιολόγηση των υλικών (π.χ. κινητικότητα, ένταση πεδίου, ειδική αγωγιμότητα κ). Οι πίνακες συνοδεύονται από τις γραφικές παραστάσεις των κριτηρίων αξιολόγησης ως προς την επιβαλλόμενη τάση u_k και την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E_k . Ακολουθεί, η μαθηματική προσέγγιση των γραφικών παραστάσεων. Έτσι γίνεται αντιληπτή οπτικά και θεωρητικά η μεταξύ τους σχέση και παρατηρούμε την εξέλιξη φαινομένων με την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης ή της πεδιακής έντασης.

Η διπλωματική εργασία κλείνει, στο τέταρτο μέρος, με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις. Τα συμπεράσματα αυτά απορρέουν από τη μελέτη, την επεξεργασία και παρατήρηση μέσω του θεωρητικών εργαλείων, της στατιστικής ανάλυσης και των γραφικών παραστάσεων των υπολογιζόμενων μεγεθών και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου για την ανάθεση της εργασίας αυτής και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της πραγματοποίησής της.

Λέξεις κλειδιά

Ηλεκτρομονωτικά Υλικά, Κρουστικές Τάσεις, Γήρανση, Pertimax

ABSTRACT

The examination of the electronic attribute, the ageing and the degradation of electrical insulation material within insulating oil, has been extensively investigated due to their excessive use in the industrial sector. This thesis analyses the results of measurements which have been held in conjunction «Pertimax-oil transformers» applying impulse voltage $\pm 1,2 / 100 \mu\text{s}$ in a heterogeneous field.

The first introductory part, describes the main properties of industrial electrical insulation materials, their evaluation criteria and their division according to their physical condition. Additionally, this study presents the types of strain and perforation. Finally, in the same chapter, the macroscopic theory and the quantum mechanics theory are presented. The methodology of these two theories is used for the interpretation of the results. The theory of this first part is based on the book “Application of Building – Industrial Research and Installation” by P. Mpourkas, Professor in the National Technical University of Athens.

The second part refers to the purpose of this thesis, describes the procedure of the measurements and defines the measured magnitude and the mathematical fractions used for the results.

In the third part, the results of the measurements and the calculated magnitude are presented in tables. All these are illustrated in diagrams as a function to the implicated voltage u_k and the intensity of the electric field E_k . Moreover, these diagrams are approached by a mathematical perspective.

Finally, the fourth part is the conclusion of this study. The measurements are analyzed according to the theoretical tools of statistics analysis, the graphs and the phenomena that took place during the experimental procedure.

At this point, I would like to thank my supervisor Professor for appointing this thesis to me, and for his invaluable support and contribution during its implementation.

This thesis analyses the results of measurements which have been held in conjunction «Pertimax-oil transformers» applying impulse voltage $\pm 1,2 / 100 \text{ ms}$ in a heterogeneous field.

Key Words

Electro-insulator Materials, Impulse Voltage, Ageing, Pertimax

Στην οικογένειά μου Πάνο, Λίτσα,
Αλέξη, Νικολέττα, γιαγιά Λέττα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η ύπαρξη μονώσεων σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή απαιτείται για τον ηλεκτρικό διαχωρισμό μεταξύ ρευματοφόρων μερών, καθώς και ρευματοφόρων μερών προς τη γη, με τρόπο τέτοιο ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό. Με την χρήση μονώσεων μειώνουμε την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της διάσπασης.

Με τον όρο διάσπαση εννοούμε την αγωγή σύνδεση μεταξύ δύο μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μονωτικών (π.χ.: αέρας –πορσελάνη, βακελίτης– μονωτικό λάδι), τότε η διάσπαση ονομάζεται επιφανειακή διάσπαση. Όταν η διάσπαση συμβαίνει στο περιβάλλον μέσο του στερεού μονωτικού, εξαιτίας της μείωσης της απόστασης μόνωσης του στερεού μονωτικού από αγωγίμες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνειά του (όπως π.χ. συμβαίνει σε ρυπασμένους μονωτήρες) χαρακτηρίζεται ως υπερπήδηση. Η διάσπαση δια του όγκου ενός μονωτικού υλικού καλείται διάτρηση.

Όταν έπειτα από την εφαρμογή παραπάνω τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης (ή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης) σε ένα μονωτικό καταστρέφεται η κατάσταση ισορροπίας (χωρίς να συμβαίνει η διάσπαση), τότε εκδηλώνονται περιορισμένης έντασης εκκενώσεις, που χαρακτηρίζονται ως μερικές εκκενώσεις. (Η διάσπαση σε περιορισμένο μήκος του μονωτικού ονομάζεται μερική εκκένωση.) Οι μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε θέσεις ανομοιογένειας στον όγκο ή στην επιφάνεια του υλικού (κυρίως φυσαλίδες αερίων στον όγκο του υλικού και διάφορες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνειά του: σκόνη, υγρασία, κλπ.). Όταν οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στον όγκο ενός στερεού μονωτικού ονομάζονται εσωτερικές μερικές εκκενώσεις και οι αντίστοιχες στην επιφάνειά του, εξωτερικές μερικές εκκενώσεις. Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν την ξεχωριστή ονομασία Κορονα (στεμματοειδείς μερικές εκκενώσεις).

Ένα κριτήριο για την επιλογή των ηλεκτρομονωτικών σε μια κατασκευή είναι η τιμή της διηλεκτρικής αντοχής E_d αυτών. (Πίνακας 1.1-1). Ως διηλεκτρική αντοχή (E_d) ενός μονωτικού υλικού ορίζουμε το πηλίκο της ελάχιστης ενεργού τιμής της τάσης για τη διάσπαση ($U_{d \min}$) προς την απόσταση των ηλεκτροδίων (d) σε ομογενές πεδίο.

$$E_d = \frac{U_{d \min}}{d} \text{ (σε MV/cm)} \quad (1.1-1)$$

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

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1-1: Διηλεκτρική αντοχή (E_d) για καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας ορισμένων μονωτικών υλικών σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50 Hz.

Μεγάλη σημασία για την ηλεκτρική αντοχή των μονώσεων έχει η μελέτη των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των μονωτικών υλικών (και των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών υψηλών τάσεων γενικότερα), ως προς τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης. Απαραίτητες είναι οι πληροφορίες για την αξιοπιστία των μονώσεων έναντι των υπερτάσεων στο δίκτυο. Οι υπερτάσεις αυτές διακρίνονται κυρίως σε κεραυνικές υπερτάσεις και υπερτάσεις χειρισμών (υπερτάσεις που δημιουργούνται κατά τους χειρισμούς των διακόπτων στο δίκτυο).

1.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ο καθορισμός ορισμένων βασικών κριτηρίων αξιολόγησης των διαφόρων μονωτικών υλικών κρίνεται αναγκαίος για την αξιόπιστη και διαχρονική συμπεριφορά αυτών. Τα κριτήρια αυτά δεν αφορούν μόνο στις ηλεκτρικές ή διηλεκτρικές ιδιότητες των μονωτικών, αλλά και άλλες ιδιότητες που πρέπει αυτά να έχουν ανάλογα με την κατασκευή. Τέτοιες ιδιότητες είναι π.χ. η θερμική αντοχή κατά της απαγωγής των απωλειών Joule των αγωγών, η ψυκτική ικανότητα κατά τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου σε διακόπτες, η μηχανική αντοχή των μονωτήρων (π.χ. λόγω βάρους της γραμμής), η αντοχή κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος κλπ.

Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών υλικών είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r), η διηλεκτρική αντοχή (E_d), η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ), η επιφανειακή αγωγιμότητα, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, ο συντελεστής απωλειών (tgδ), ο συντελεστής $\epsilon \cdot \text{tg}\delta$ και η μηχανική αντοχή.

1.2.1 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r)

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά εκφράζει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μίας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα. Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διάφορων μονωτικών, που συνθέτουν μια μόνωση (πχ περιελίξεις μετασχηματιστών και μονώσεις καλωδίων) θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο, ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειές τους, για να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.

Ο συνδυασμός του χαρτιού με μονωτικό λάδι είναι μία μόνωση, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην πράξη, γιατί :

τα δύο αυτά μονωτικά έχουν την ίδια περίπου σχετική διηλεκτρική σταθερά (πίνακας 1.2-1) με αποτέλεσμα να μην συμβαίνει ουσιαστικά διάθλαση των γραμμών στη διαχωριστική επιφάνειά τους, και

το λάδι εμποτίζει το χαρτί, ώστε να αποκλείεται έτσι η ύπαρξη του αέρα, ο οποίος μόνο προβλήματα θα μπορούσε να δημιουργήσει, λόγω της μικρής του διηλεκτρικής αντοχής κατά τον πίνακα 1.1-1 (κυρίως βλάβες στην επιφάνεια του χαρτιού από μερικές εκκενώσεις ή διάσπασης σε φυσαλίδες του αέρα).

Ο πίνακας 1.2-1 παρουσιάζει κάποιες χαρακτηριστικές τιμές της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς για τα περισσότερα γνωστά υλικά.

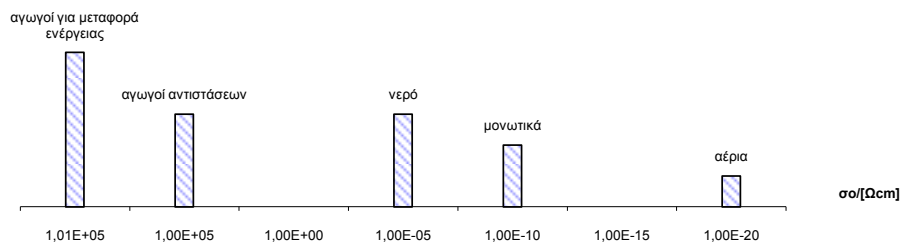
Υλικό	ϵ_r	Υλικό	ϵ_r
Αέρας (κανονικές συνθήκες)	1,000594	Mikanit	4-6
Αέρας υγρός	1,5	Πάγος	2-3
Απεσταγμένο νερό	8	Pertinax	4,8-5,4
Βακελίτης	3,5-8,2	PVC	4-6
Condense	4-8	Plexiglas	2,6-3,5
Glimmer	5-16	Πορσελάνη	5,5-6
Γυαλί	5-16	Presspan	2,5-3,4
Θερμοπλαστικά συνθετικά	2-5	Ρητίνη	2,2
Λάδι μετασχηματιστών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

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2-1: Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20 °C

1.2.2 Ο συντελεστής απωλειών (tgδ)

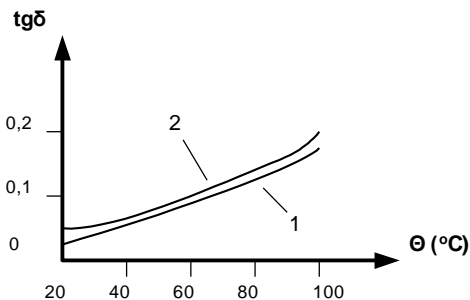
Σε μία μόνωση, που παρεμβάλλεται μεταξύ ηλεκτροδίων με σκοπό τη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας, οι οποίες υπό εναλλασσόμενη τάση οφείλονται:

- i. στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης, και
- ii. στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά (σχήμα 1.2-1).



Σχήμα 1.2-1: Τάξη μεγέθους της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διαφόρων κατηγοριών υλικών

Ο συντελεστής απωλειών είναι κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μίας μονωτικής διάταξης γενικότερα), καθώς δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό η tgδ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 1.2-2: tgδ ορισμένων διηλεκτρικών

1 : σκλήρο χαρτί

2 : πορσελάνη

1.2.3 ο συντελεστής (ε·tgδ)

Περισσότερο εύχρηστος για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών είναι όμως ο συντελεστής $\epsilon \cdot \text{tg}\delta$. Για ένα ομοιογενές ηλεκτρομονωτικό υλικό σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο ισχύει ότι:

Για ένα πυκνωτή επίπεδων πλακών :

$$\epsilon_r \text{ tg}\delta = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (1.2-1)$$

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

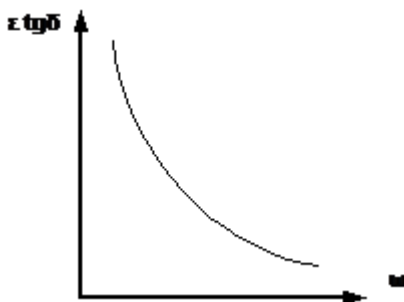
$$\varepsilon \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.2-2)$$

όπου $\varepsilon_0 = 8,857 \text{ Pf/m}$ και ω η κυκλική συχνότητα.

Ο πίνακας 1.2-2 αναφέρει κάποιες ενδεικτικές τιμές του συντελεστή αυτού, ενώ στο σχήμα 1.2-3 που ακολουθεί δίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη του παραπάνω συντελεστή σε σχέση με τη συχνότητα ω .

Υλικό	Πάχος μόνωσης σε mm	$\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta$
Λάδι μετασχηματιστών		0,004-0,046
Πορσελάνη	0,5-3	0,085-0,16
Στεατίτης	0,5-3	0.006-0,02
Γυαλί	<1	0,003-0,1
Χαρτόνι	0,5-1,5	0,01
Glimmer	0,01-0,1	0,009-0,012

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2-2: Τάξη μεγέθους των τιμών $\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta$ για ορισμένα διηλεκτρικά σε θερμοκρασία 20 °C



ΣΧΗΜΑ 1.2-3 $\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta = f(\omega)$ για το ομοιογενές μονωτικό υλικό

1.2.4 Επιφανειακή αγωγιμότητα

Η διηλεκτρική αντοχή των στερεών μονωτικών μειώνεται, όταν η επιφάνειά τους περιλαμβάνει ξένες επικαθήσεις (σκόνη, υγρασία). Το ίδιο συμβαίνει όταν καταπονηθεί θερμικά η επιφάνεια των στερεών μονωτικών κατά την ηλεκτρική καταπόνηση τους. Γι' αυτό η επιφανειακή αγωγιμότητα είναι ένα κριτήριο για την προδιάθεση των διάφορων στερεών διηλεκτρικών στην εκδήλωση παραπάνω φαινομένων. Επειδή οι παράγοντες, που προκαλούν αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας ποικίλουν (ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας), η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα δεν αποτελεί κάποια σταθερά των στερεών μονωτικών και δεν υπάρχει τρόπος να παραθέσουμε κάποιον πίνακα με ενδεικτικές τιμές, όπως στους δύο προηγούμενους συντελεστές.

Η επιφανειακή αγωγιμότητα έχει συσχετιστεί με έννοιες, που αφορούν την αντοχή των στερεών μονωτικών από τις καταπονήσεις στην επιφάνειά τους (όπως αντοχή σε ρεύμα διαρροής) που ενδιαφέρουν στην πράξη για την κατασκευή π.χ. μονωτήρων

και φλογοθαλάμων διακοπών. Με κριτήριο τη μείωση του ποσοστού της σκόνης συμπεραίνει κανείς, ότι οι μονωτήρες πορσελάνης χρησιμοποιούνται ως εξωτερικού χώρου έναντι των μονωτήρων ρητίνης, γιατί η επιφάνεια τους διευκολύνει περισσότερο την απομάκρυνση της σκόνης κατά τη βροχή.

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

1.2.5 Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

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

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

$$\sigma = \sigma_0 e^{-W/KT} = \sigma_0 e^{-\beta e} \quad (1.2-3)$$

Όπου

σ_0 : η ειδική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας e ως προς το περιβάλλον.

σ : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

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

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

T : η απόλυτη θερμοκρασία

β : ένας συντελεστής του υλικού

Από έρευνες σε οργανικά στερεά μονωτικά συμπεραίνεται, ότι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνει απότομα με την ενέργεια των μερικών εκκενώσεων. Έχει διαπιστωθεί ακόμα πως η τιμή της πεδιακής έντασης είναι καθοριστική για την τιμή σ . Μια τιμή πεδιακής έντασης χαρακτηρίζεται ως χαμηλή όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις, ή έστω όταν οι μερικές εκκενώσεις συμμετέχουν μόνο στην αύξηση των απωλειών Joule. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω π.χ. του μεγάλου πάχους του διηλεκτρικού ή της μικρής τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης.

Για μεγαλύτερες τιμές της πεδιακής έντασης από προηγουμένως, η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας οφείλεται κυρίως στις μερικές εκκενώσεις. Εκεί έχει διαπιστωθεί, ότι στην περίπτωση αυτή συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, όπως στα ιονισμένα αέρια και δεν ισχύει η προηγούμενη σχέση 1.2-3.

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

$$\sigma = \sigma_o \cdot \frac{e^{\beta\theta}}{(1 - \delta \cdot E)^2} \quad (1.2-4)$$

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

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

1.2.6 Η διηλεκτρική αντοχή

Κριτήριο αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών αποτελεί και η διηλεκτρική αντοχή, ο ορισμός της οποίας έχει δοθεί σε προηγούμενη παράγραφο (παράγραφος 1.1). Η διηλεκτρική αντοχή E_d κατέχει σημαντικό ρόλο μέσω της ελάχιστης τιμής της πεδιακής έντασης για τη διάσπαση εντός ομογενούς πεδίου.

1.2.7 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Στα κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών υλικών συγκαταλέγεται και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ . Ισχύει γενικά ο κανόνας ότι πιο καλός μονωτής είναι ένα υλικό τόσο καλύτερες είναι οι θερμομονωτικές του ιδιότητες. Στον πίνακα 1.2-3 δίνονται τιμές του συντελεστή λ για ορισμένα μονωτικά υλικά.

Μονωτικό Υλικό	Πάχος d [mm]	λ [$W \cdot cm/cm^2 \cdot grad$]
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

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2-3: Τιμές του συντελεστή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας, λ , για ορισμένα ηλεκτρομονωτικά υλικά.

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις θέσεις που η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως ανεπιθύμητα σωματίδια στο μονωτικό λάδι). Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντοτε κατά τη λειτουργία των διάφορων διαταραχών (π.χ. απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες στις επαφές των διακοπών κ.α.). Επειδή η θερμική ειδική αγωγιμότητα συμβαδίζει με ηλεκτρική αγωγιμότητα σ , η τιμή λ , όπως και η τιμή του σ , είναι ένα άριστο μέσο αξιολόγησης των μονωτικών υλικών.

1.2.8 Η μηχανική αντοχή

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

Συχνά ενδιαφέρει η μηχανική σε πλήρεις κατασκευές, που περιλαμβάνουν στερεά μονωτικά, όταν αυτή ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από την εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης, όπως συμβαίνει κατά το βραχυκύκλωμα (π.χ.: πίνακες μέσης τάσης, μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστές μέτρησης στο δίκτυο υψηλών τάσεων, διακόπτες υψηλών τάσεων, κ.λπ.). Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να γίνουν αιτία καταστροφής της κατασκευής, όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή κατά το βραχυκύκλωμα. Η μόνωση π.χ. ενός διακόπτη υψηλής τάσης δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης, προς τη δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου, όταν η επιδίωξη αυτή δεν συνδυάζεται με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, που θα εξασφαλίζει την ικανότητα μόνωσης μέχρι να διακοπεί το βραχυκύκλωμα από το μέσο προστασίας του δικτύου.

1.3 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Τα μονωτικά υλικά διακρίνονται, όπως αναμενόταν, σε τρεις κατηγορίες, με βάση τη φυσική τους κατάσταση, συνεπώς τα διακρίνουμε σε υγρά, αέρια και στερεά.

1.3.1 Αέρια μονωτικά

1.3.1.1 Γενικά για τα αέρια μονωτικά

Ο ατμοσφαιρικός αέρας συνιστά το πιο άφθονο διηλεκτρικό υλικό και χρησιμοποιείται πρακτικά σε μονωτικό υλικό σε όλο σχεδόν τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, αφού μόνο από τα εκατομμύρια χιλιόμετρα των εναέριων γραμμών γίνεται φανερό η έκταση της χρησιμοποίησής του. 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 ιδιαίτερα αντιληπτό στις εφαρμογές υψηλών τάσεων. Ωστόσο τα τελευταία τριάντα χρόνια έχει

γίνει αρκετή έρευνα με σκοπό την ανάπτυξη αερίων μονωτικών με καλύτερα χαρακτηριστικά από εκείνα του ατμοσφαιρικού αέρα.

Η διηλεκτρική αντοχή ενός αερίου είναι συνάρτηση της πυκνότητάς του. Το γεγονός αυτό βρίσκει εφαρμογή σε συστήματα διακοπών ισχύος τα οποία χρησιμοποιούν αέριο υψηλής πυκνότητας προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση των ελεύθερων αποστάσεων μόνωσης καθώς επίσης η σβέση του τόξου. Ένα τέτοιο σπουδαίο αέριο μονωτικό είναι το εξαφθοριούχο θείο (SF_6), χρησιμοποιείται κυρίως σε διακόπτες και πίνακες υψηλής τάσης ως μονωτικό και ψυκτικό μέσο. Στην ατμοσφαιρική πίεση έχει τη μισή διηλεκτρική αντοχή από τα μονωτικά έλαια, αλλά σε υψηλότερες πιέσεις υπερέρχει.

Επιπλέον επειδή τα αέρια δεν προσφέρουν μηχανική υποστήριξη χρησιμοποιούνται πάντα σε συνδυασμό με κάποια στερεά μονωτικά (μονωτήρες στήριξης). Η διεπιφάνεια μεταξύ αερίου-στερεού μονωτικού θα πρέπει να εξεταστεί με ιδιαίτερη προσοχή κατά την ηλεκτρική σχεδίαση μιας διάταξης, δεδομένου ότι οι αδυναμίες αυτής της περιοχής ενδέχεται να επηρεάσουν τη λειτουργία της διάταξης με πιθανά αποτελέσματα τις έρπουσες μερικές εκκενώσεις, την υπερπήδηση ή και τη διάσπαση των μονωτικών. Όμως, ακόμη και όταν έχουν χρησιμοποιηθεί οι καλύτερες αρχές σχεδίασης, η διάσπαση μπορεί να συμβεί κάτω από αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως για παράδειγμα ρύπανση, ομίχλη, υγρασία, πάγος.

1.3.1.2 Η διάσπαση των αερίων μονωτικών

Η διάσπαση των αερίων μονωτικών για μικρά διάκενα ερμηνεύεται ικανοποιητικά από τον νόμο Paschen και τη θεωρία του Thowsend. Σύμφωνα με τη θεωρία του Thowsend η δημιουργία εκκενώσεων στον αέρα (μερικές εκκενώσεις ή διάσπαση) οφείλονται στον ιονισμό με κρούσεις, ο οποίος, όπως θα δούμε αργότερα, θεωρείται ότι εκδηλώνεται τόσο κατά τη γήρανση όσο και κατά τη διάσπαση των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών.

1.3.2 Τα υγρά μονωτικά

Τα υγρά μονωτικά υλικά έχουν αρκετά μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από ότι τα αέρια σε ατμοσφαιρική πίεση (διηλεκτρική αντοχή του αέρα 21kV/cm και διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών 60-200kV/cm). Η σημασία τους στις πρακτικές εφαρμογές είναι μεγάλη γιατί έχουν τα παρακάτω γνωρίσματα:

1. Μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ($0,3 \cdot 10^{-3} \text{ cal/cms}^\circ\text{C}$), με αποτέλεσμα να διευκολύνουν την απαγωγή θερμότητας, η οποία δημιουργείται στους αγωγούς, στις επαφές διακοπών και τους σιδηροπυρήνες μετασχηματιστών.
2. Ο συνδυασμός τους με στερεά μονωτικά δεν επιτρέπει την ύπαρξη του αέρα, ο οποίος προκαλεί βλάβες στις επιφάνειες των στερεών μονωτικών. Αυτό επιτυγχάνεται όταν η πλήρωση του χώρου, που καταλαμβάνει το υγρό μονωτικό, γίνεται υπό συνθήκες κενού σε ορισμένη θερμοκρασία. Τυπικό παράδειγμα της διαδικασίας αυτής είναι η πλήρωση των δοχείων των μετασχηματιστών υψηλών τάσεων με λάδι.

Ο συνδυασμός, ειδικότερα χαρτί-λάδι έχει μεγάλη εφαρμογή, λόγω της περίπου ίδιας σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, που έχουν τα υλικά αυτά.

1.3.2.1 Μονωτικά λάδια

Το κυρίως χρησιμοποιούμενο υγρό μονωτικό σε μετασχηματιστές, καλώδια, διακόπτες και πυκνωτές είναι το μονωτικό λάδι. Τα μονωτικά λάδια παράγονται σαν κλάσμα της απόσταξης του πετρελαίου και η χημική του σύσταση διαφέρει με την προέλευση του πετρελαίου. Τα μονωτικά λάδια διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

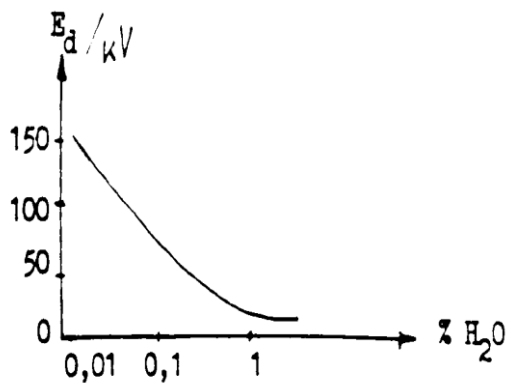
1. Τα μεθανέλαια: Στα λάδια αυτά κυριαρχούν κεκορεσμένοι υδρογονάνθρακες τύπου παραφίνης. Από τη γεωλογική άποψη είναι τα παλαιότερα λάδια.
2. Τα ναφθανέλαια: Κυριαρχούν ακόρεστοι υδρογονάνθρακες τύπου ναφθαλίνης.
3. Τα ναφθαλμεθανέλαια: Είναι μείγμα των δύο προηγούμενων, χωρίς όμως να κυριαρχεί κανένας από τους δύο τύπους υδρογονανθράκων.

Η θερμοκρασία ανάφλεξης του μονωτικού ελαίου είναι 130–250°C. Γι' αυτό ως μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας 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 της ανάφλεξης).

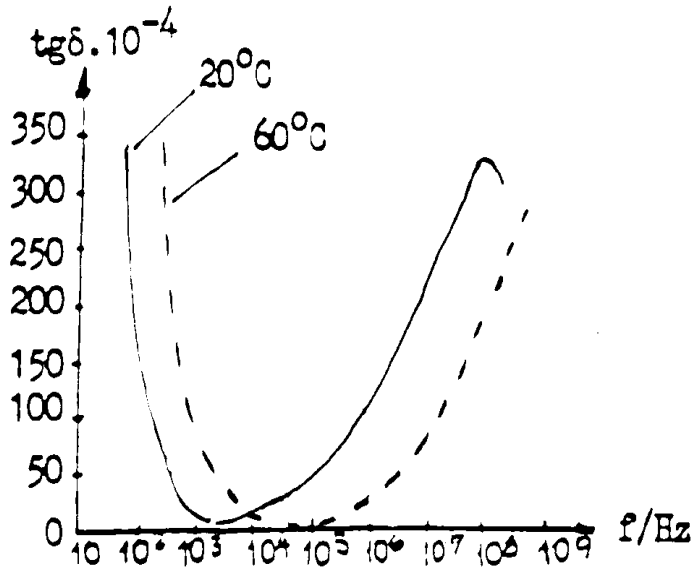
Τα μονωτικά λάδια οξειδώνονται από τον αέρα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή τους. Γι' αυτό η παρουσία του αέρα αποκλείεται στις κατασκευές που χρησιμοποιείται το μονωτικό λάδι.

Η υγρασία προκαλεί δραστική μείωση στη διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ελαίου, όπως φαίνεται στο 1.3-1



ΣΧΗΜΑ 1.3-1: Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού ελαίου ανάλογα με το ποσοστό του νερού

Η $\text{tg}\delta$ των μονωτικών ελαίων (για συχνότητα 50 Hz και 0,5-1V) πρέπει να είναι μικρότερη από 0,005. Η μεταβολή της $\text{tg}\delta$ με τη συχνότητα δίνεται από το σχήμα 1.3-2



ΣΧΗΜΑ 1.3-2: Μεταβολή της $\text{tg}\delta$ ανάλογα με τη θερμοκρασία και τη συχνότητα

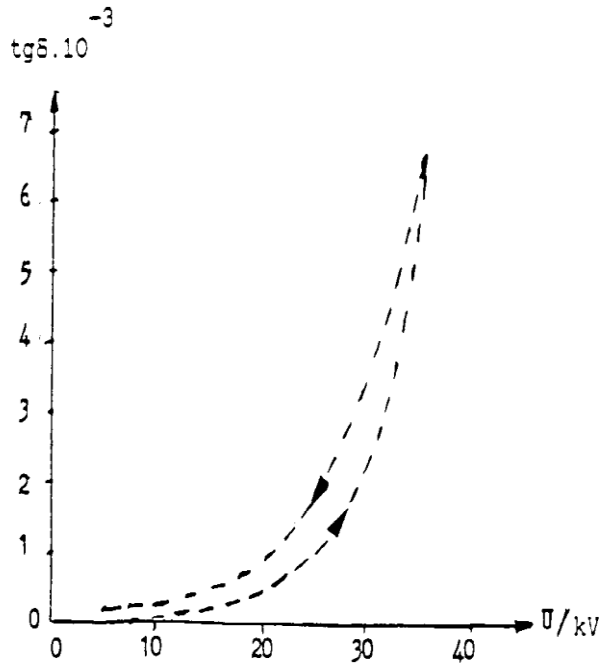
Η διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών ελαίων εξαρτάται, όπως εκείνη των αερίων και των στερεών μονωτικών, από τη διάταξη των ηλεκτροδίων και τη μορφή της τάσης. Ισχύει δηλαδή ότι:

1. Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο, τόσο μειώνεται η τάση διάσπασης.
2. Η διηλεκτρική αντοχή υπό κρουστική τάση είναι μεγαλύτερη από ότι με εναλλασσόμενη τάση 50Hz επί 1 min.
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 τη θετική (φαινόμενο πολικότητας).

Ο έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής των μονωτικών ελαίων γίνεται με ειδικές συσκευές. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, καθώς και η διαδικασία δοκιμής, καθορίζονται ανάλογα με τον κανονισμό που θα γίνουν οι δοκιμές (VDE 0370/10 66, B.S.S 148-195, A.S.T.M D870-49, C.E.I. 10-1 VI 1953). Γι' αυτό, όταν δίνονται τα αποτελέσματα ενός ελέγχου, είναι απαραίτητο να γίνεται αναφορά στον κανονισμό δοκιμών. Περισσότερες πληροφορίες για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής θα πρέπει να αναζητηθούν στις προδιαγραφές που προαναφέρθηκαν.

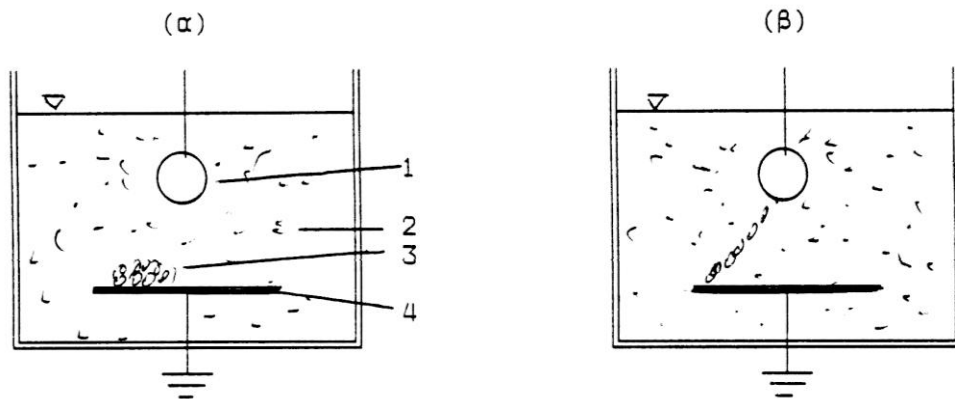
1.3.2.1.1 Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στο μονωτικό λάδι.

Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στο μονωτικό λάδι δεν έχουν ερμηνευτεί πλήρως. Έχει διατυπωθεί η άποψη, ότι οι παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής μπορεί να είναι οι ίδιοι με εκείνους κατά τη γήρανση και διάσπαση των στερεών μονωτικών. Η δυσκολία για τη μελέτη των παραπάνω παραγόντων στο λάδι, οφείλεται στην αλλαγή της μοριακής δομής του μετά από μία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης. Η αλλαγή αυτή διαπιστώνεται πειραματικά από την αύξηση της τιμής $\text{tg}\delta$ μετά από καταπόνηση (σχήμα 1.3-3)



ΣΧΗΜΑ 1.3-3 $\text{tg}\delta = f(U)$ στο λάδι μετασχηματιστών

Εκτός από τους παράγοντες αυτούς, που εξετάζονται στα στερεά μονωτικά, η γήρανση και η διάσπαση του μονωτικού ελαίου αποδίδεται κυρίως στα αιωρούμενα σε αυτό ξένα σωματίδια, τα οποία φαίνεται ότι μειώνουν τις αποστάσεις μόνωσης, γιατί σχηματίζουν αγώγιμες γέφυρες μεταξύ των ρευματοφόρων μερών με διαφορετικό δυναμικό. Το φαινόμενο αυτό μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί πειραματικά με τη διάταξη του σχήματος 1.3-4, όπου τα μικρά τεμάχια χαρτιού (3) διατάσσονται κατά την εφαρμογή της τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 1.3-4: Πειραματική απόδειξη για τη διάταξη των αιωρούμενων σωματιδίων στο μονωτικό λάδι, υπό μορφή γέφυρας μεταξύ των ηλεκτροδίων.

1, 4: ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης

2: μονωτικό λάδι

3: τεμάχια χαρτιού

α) Τεμάχια χαρτιού πάνω στο ηλεκτρόδιο πλάκα προ της εφαρμογής της τάσης.

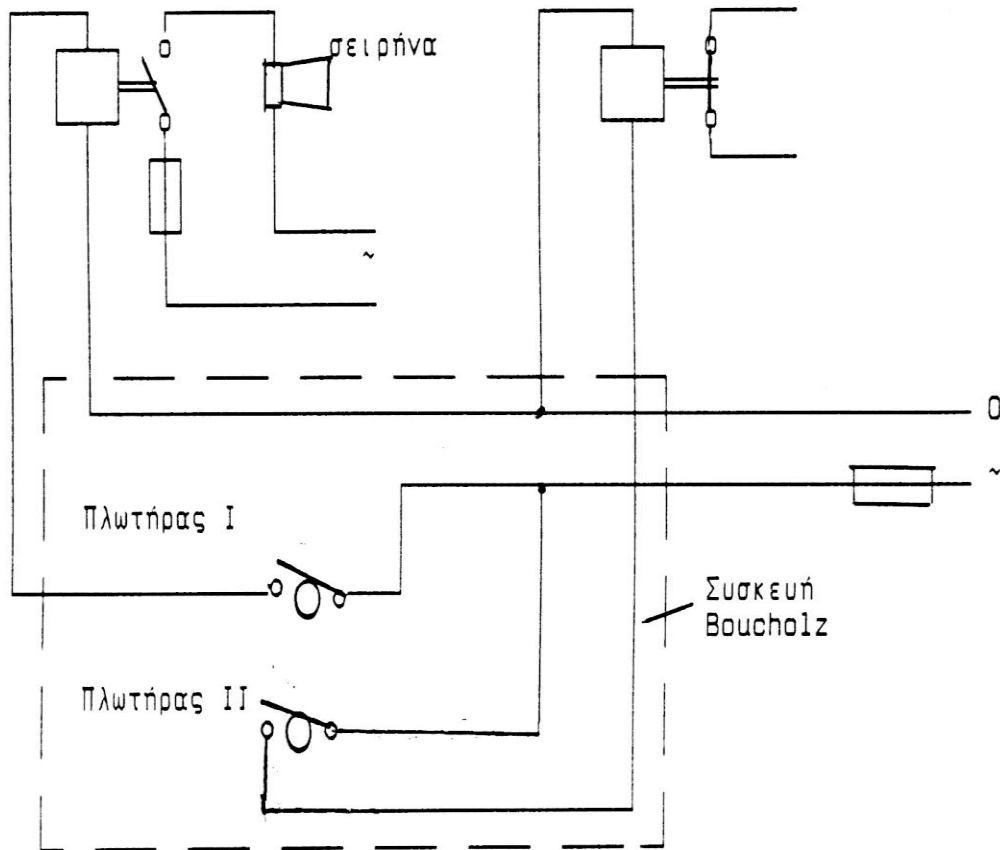
β) Διάταξη των τεμαχίων χαρτιού κατά την εφαρμογή της τάσης.

1.3.2.1.2 Μέσα ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών

Η υγρασία και τα αέρια, που δημιουργούνται κατά τη γήρανση του μονωτικού λαδιού, μειώνουν δραστικά τη διηλεκτρική αντοχή του. Για το λόγο αυτό προβλέπονται (κατά τη λειτουργία μετασχηματιστών) μέσα ελέγχου, που προειδοποιούν για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού. Προβλέπεται επίσης προστασία του μετασχηματιστή, όταν η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού είναι σημαντική. Πρόκειται για τον αφυγραντήρα και τη συσκευή Boucholz, που πρέπει να περιλαμβάνει ο μετασχηματιστής. Ο αφυγραντήρας τοποθετείται επί του δοχείου διαστολής του μετασχηματιστή. Περιέχει υλικό, που απορροφά την υγρασία. Από το γυάλινο μέρος του δοχείου του αφυγραντήρα παρακολουθεί κανείς το χρώμα του silicagel, που απορροφά την υγρασία. Όταν το χρώμα είναι γαλάζιο, τότε το υλικό έχει τη δυνατότητα απορρόφησης υγρασίας. Όταν το χρώμα έχει γίνει κόκκινο τότε το παραπάνω υλικό είναι κορεσμένο από υγρασία και πρέπει να υποβληθεί σε ξήρανση (3-6 ώρες σε θερμοκρασία 140°C το πολύ).

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής αυτής (σχήμα 1.3-5) βασίζεται στα αέρια, που παράγονται κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού. Τα αέρια διέρχονται από τη συσκευή Boucholz, η οποία έχει δύο πλωτήρες (I και II). Όταν ο χώρος του Boucholz καταλαμβάνεται μόνο από λάδι, τότε οι πλωτήρες αυτοί είναι ανοικτές επαφές. Κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού εισχωρούν τα παραγόμενα αέρια στο χώρο του Boucholz. Όταν το ποσοστό τους είναι μικρό κλείνει ο πλωτήρας I και ενεργοποιείται έτσι το κύκλωμα της σειρήνας. Για μεγαλύτερο ποσοστό αερίων κλείνει και ο πλωτήρας II, με αποτέλεσμα να τεθεί εκτός λειτουργίας ο αυτόματος διακόπτης. Η συσκευή Boucholz διαθέτει χειροκίνητη βαλβίδα

εξαερισμού, η οποία είναι απαραίτητη κατά την πρώτη εγκατάσταση (ή μετά την αλλαγή λαδιών). Έχει επίσης γυάλινο παραθυράκι για τον έλεγχο της θέσης των πλωτήρων.



ΣΧΗΜΑ 1.3-5: Κύκλωμα της προστασίας Buchholz

Μία μέθοδος διάγνωσης της ποιότητας του λαδιού, που εφαρμόζεται από τις εταιρείες παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, βασίζεται στα είδη των παραγόμενων αερίων (κυρίως υδρογόνο, μεθάνιο, αιθάνιο, αιθυλένιο και ακετυλένιο) και στις σχετικές ποσότητες τους, μέσω χρωματογράφου αερίων. Μια μικρή αποσύνθεση γίνεται φανερή σε κανονικές θερμοκρασίες λειτουργίας, όπου παράγονται κυρίως υδρογόνο και μεθάνιο. Η παραγωγή του αιθανίου και του αιθυλενίου θεωρείται ότι σχετίζεται με θέσεις αυξημένης θερμοκρασίας του μετασχηματιστή. Το ακετυλένιο γίνεται σημαντικό σε ποσότητα σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες, που οφείλονται κυρίως στην εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου και ισχυρών μερικών εκκενώσεων.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται βασικές οδηγίες για τη συντήρηση των μετασχηματιστών ελαίου, που πρέπει να εφαρμόζονται για να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία τους.

Χρονικό διάστημα	Είδος συντήρησης
Σε 3 μήνες (Μηνιαίως *)	Έλεγχος στάθμης λαδιού Έλεγχος θερμοκρασίας Έλεγχος υγρασίας από τον αφυγραντήρα Εξωτερικά μέρη και ειδικότερα οι μονωτήρες να καθαρίζονται από σκόνες κλπ. Καθαριότητα δαπέδου του χώρου Έλεγχος για τυχόν εξωτερικές σκουριές
Ετησίως (Σε 6 μήνες *)	Έλεγχος διηλεκτρικής αντοχής λαδιού (**) Έλεγχος της προστασίας του μετασχηματιστή Έλεγχος και σύσφιγξη λυομένων συνδέσμων Λίπανση κινητήρων αερισμού (αν υπάρχουν) Έλεγχος πυροσβεστήρων
Σε 2 έτη	Αλλαγή ρουλεμάν κινητήρων αερισμού (αν υπάρχουν)
Σε 5 έτη	Πλήρης έλεγχος του λαδιού και σε περίπτωση μη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων αλλαγή (ή αναγέννηση)

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3-1: Οδηγίες συντηρήσεις μετασχηματιστών

*: Σε τσιμεντοβιομηχανίες, λατομεία και γενικά σε περιβάλλον που προκαλεί δραστηκή μείωση της διηλεκτρικής αντοχής.

** : 1 λίτρο σε τελείως στεγνό και καθαρό δοχείο.

1.3.2.2 Άλλα μονωτικά υγρά.

Στα μονωτικά υγρά ανήκουν επίσης υδρογονάνθρακες οι οποίοι έχουν υποστεί χλωρίωση (το χλώριο έχει αντικαταστήσει μεμονωμένα άτομα υδρογόνου). Τα μονωτικά αυτά είναι άκαυστα και έχουν περίπου διπλάσια ως τριπλάσια διηλεκτρική σταθερά ως προς το μονωτικό έλαιο. Δεν χρησιμοποιούνται πλέον, γιατί περιέχουν τοξικά συστατικά, που μετατρέπονται βιολογικά στη φύση σε επικίνδυνες ουσίες .

Μια άλλη κατηγορία συνθετικών μονωτικών υγρών είναι υδροφονάνθρακες που έχουν υποστεί φθορίωση. Η διηλεκτρική σταθερά τους είναι μεγαλύτερη από εκείνη του μονωτικού ελαίου. Δεν προκαλούν φθορές στα στερεά μονωτικά και είναι άκαυστα υλικά. Η εφαρμογή τους είναι πρακτικά ανύπαρκτη λόγω του μεγάλου κόστους τους.

Ένα άλλο υγρό μονωτικό είναι το σιλικονούχο έλαιο (υδρογονάνθρακες που περιλαμβάνουν πυρίτιο). Είναι εύφλεκτο υλικό και γι' αυτό έχει πολύ περιορισμένη πρακτική εφαρμογή.

1.3.3 Στερεά μονωτικά

1.3.3.1 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών.

Τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών αερίων έχουν επεξηγηθεί ικανοποιητικά. Αυτό οφείλεται βασικά στη μικρή σταθερότητα των μορίων τους, ως προς εκείνη των υγρών και κυρίως των στερεών μονωτικών, με αποτέλεσμα να επανέρχεται το αέριο στην αρχική του κατάσταση. Στα στερεά μονωτικά, η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη και η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σ' 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, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται κατά τη διάσπαση ή να αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες (λόγω επιφανειακής διάσπασης, υπερπήδησης και μερικών εκκενώσεων) είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού της γήρανσης, της διάσπασής τους.

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

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

Σύμφωνα με τη «μακροσκοπική θεωρία», τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται (ή αποσκοπούν) σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση ακουστικών φωτεινών φαινομένων, καθώς και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού. Αυτήν την πορεία ακολουθήσαμε και εμείς. Πραγματοποιώντας ένα ισοδύναμο κύκλωμα στο εργαστήριο, με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και με άξονα τις παραπάνω οπτικές παρατηρήσεις προσπαθήσαμε να αντιληφθούμε και να ερμηνεύσουμε το φαινόμενο. Σε επόμενο κεφάλαιο αντιπαραθέτουμε τα παραπάνω αποτελέσματα με τα αντίστοιχα που προέρχονται από μετρήσεις με χρήση παλμογράφου, καθώς φαινόμενα, γεγονότα και συμπεράσματα για τα οποία γίνεται εκτενής αναφορά στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

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

1.4 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών

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

1. οι απώλειες Joule
2. οι δυνάμεις Coulomb
3. οι μερικές εκκενώσεις
4. η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

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

- i. η θερμική διάτρηση
- ii. η ηλεκτρική διάτρηση (που διακρίνεται στη δενδροειδή και την ηλεκτρομηχανική)
- iii. η ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση)
- iv. η θερμοχημική διάτρηση

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

1.4.1 Η θερμική διάτρηση

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

1.4.2 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 ηλεκτρικών φορέων μέσα στο μονωτικό υλικό.

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

1. αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις (όπως στα αέρια μονωτικά), ή
2. μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή
3. συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

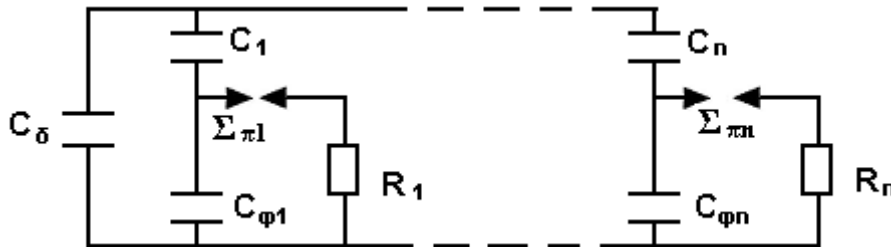
Η μορφή της διάτρησης αυτής ονομάζεται ηλεκτρική και διακρίνεται ανάλογα με την εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση, στη δενδροειδή (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) και εκείνη υπό μορφή οχτού κατά τη διεύθυνση του πεδίου (ηλεκτρομηχανική).

1.4.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης)

1.4.3.1 Γενικά περί των μερικών εκκενώσεων

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (εσωτερικές μερικές εκκενώσεις), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνεια του (εξωτερικές εκκενώσεις).

Ένα από τα περισσότερο γνωστά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα για τις μερικές εκκενώσεις, κατά την παραπάνω μακροσκοπική θεωρία, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.4-1.



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

$C_δ$: χωρητικότητα της διάταξης

$C_{φ1}...C_{φn}$: φυσαλίδες αερίων και άλλες ανομοιογένειες

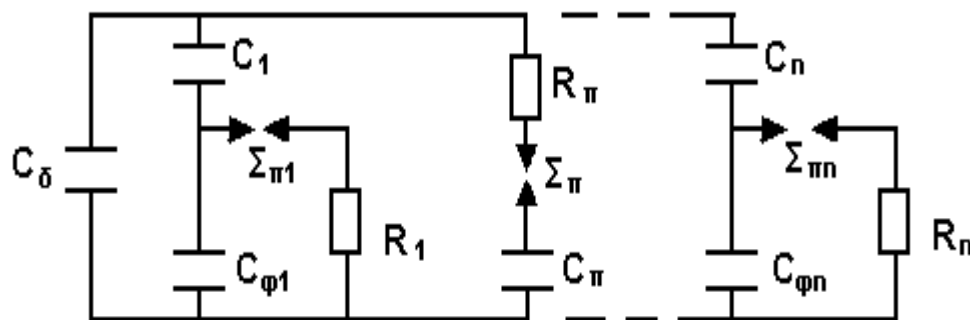
$Σ_{π1}...Σ_{πn}$: σπινθηριστές που συμβολίζουν τη διάσπαση των $C_{φ1}...C_{φn}$

$R_1...R_n$: αντίσταση του τόξου κατά τη διάσπαση των $C_{φ1}...C_{φn}$

$C_1...C_n$: πυκνωτές που συμβολίζουν το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού υλικού

Σύμφωνα με αυτό, η διάσπαση των επί μέρους θέσεων διαταραχής ($C_{φ1}...C_{φn}$) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση των πυκνωτών $C_1...C_n$, οι οποίοι συμβολίζουν το υπόλοιπο υγιές τμήμα του υλικού. Από τον συνδυασμό ηλεκτρικών μετρήσεων και οπτικών παρατηρήσεων, κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών (κυρίως φορτίο λόγω μερικών εκκενώσεων, μετρήσεις ρεύματος, εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη και εικόνα επιφανειακών διαταραχών), έχουν προταθεί διάφορα ισοδύναμα κυκλώματα, ώστε να αποδίδονται από αυτά και άλλοι παράγοντες γήρανσης και διάσπασης. Το ισοδύναμο

π.χ. κύκλωμα του σχήματος 1.4-2 είναι μια βελτίωση του παραπάνω σχήματος 1.4-1, γιατί διευκολύνει στη διάκριση μεταξύ της διάσπασης λόγω των μερικών εκκενώσεων (ηλεκτρομηχανική διάσπαση ή γήρανση) και εκείνης από τις δυνάμεις Coulomb (ηλεκτρομηχανική διάσπαση: δένδροειδής ή υπό μορφή οχετού), σε μια ιδιαίτερα πολωμένη περιοχή του υλικού (πυκνωτής C_{π}). Η αντίσταση R_{π} και ο σπινθηριστής Σ_{π} συμβολίζουν στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4-2 τον οχετό διάσπασης.



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

- C_{π} : πυκνωτής που συμβολίζει την πόλωση του υλικού
- $\Sigma_{\pi} \leftrightarrow R_{\pi}$: διαδρομή εκκένωσης λόγω διάσπασης του C_{π}
- C_{δ} : χωρητικότητα της διάταξης
- $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$: φυσαλίδες αερίων και άλλες ανομοιογένειες
- $\Sigma_{\pi 1} \dots \Sigma_{\pi n}$: σπινθηριστές που συμβολίζουν τη διάσπαση των $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$
- $R_1 \dots R_n$: αντίσταση του τόξου κατά τη διάσπαση των $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$
- $C_1 \dots C_n$: πυκνωτές που συμβολίζουν το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού υλικού

1.4.3.2 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 πραγματική κατάσταση, που δημιουργείται με την πάροδο του χρόνου (όταν το υλικό εργάζεται υπό ονομαστικά μεγέθη στο δίκτυο), δίνει όμως τη δυνατότητα ανίχνευσης των παραγόντων διάσπασης, που τελικά δεν μπορεί να είναι διαφορετικοί από τους πραγματικούς.

1.4.4 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.

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 από ότι σε κανονική θερμοκρασία (20°C), με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός δια κρούσεως σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου απ' ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C.

1.4.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Οι μερικές εκκενώσεις θεωρείται ότι είναι ο κυρίαρχος παράγοντας γήρανσης και διάσπασης των μονώσεων στην πράξη. Μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών μερικών εκκενώσεων, προεξέχοντα ρόλο έχουν οι τελευταίες, γιατί σχετίζονται με χημικές μεταβολές στον όγκο του υλικού (οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις από ξένες επικαθίσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν με προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης).

Σύμφωνα με τα όσα προαναφέραμε, τα φαινόμενα προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών δε μπορούν να αποδοθούν σε ένα μόνο από τους παραπάνω παράγοντες, αλλά ένα συνδυασμό αυτών. Οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται στην πράξη με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού. Η επίδραση όμως αυτών των παραγόντων εξαρτάται και από το πως αυτοί εκδηλώνονται διαχρονικά. Έτσι ο πιθανός συνδυασμός των παραγόντων μπορεί να είναι:

1. Συνδυασμός της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.
2. Συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης
3. Συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

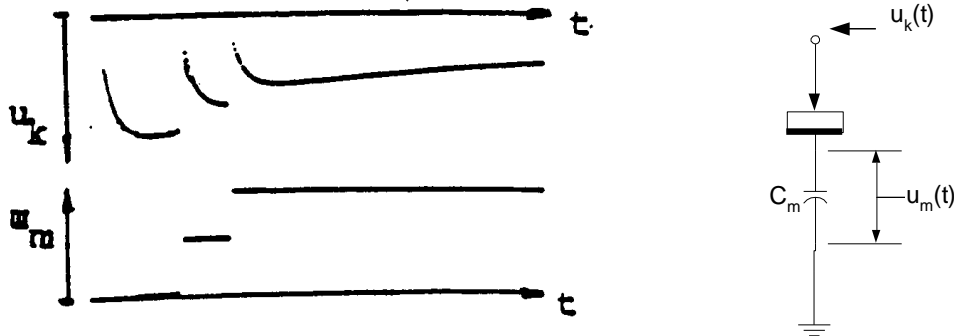
Καθώς αντικείμενο μελέτης αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων σε βιομηχανικά ηλεκτρομονωτικά υλικά, έχουμε κάθε λόγο να αναπτύξουμε το δεύτερο συνδυασμό παραγόντων. Για λόγους όμως πληρότητας και συνοχής θα αναπτυχθεί στη παράγραφο που αναφέρεται εκτενώς στις μερικές εκκενώσεις.

1.5 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση

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

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

Πειραματικές έρευνες σε στερεά μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών με κρουστικές τάσεις, δείχνουν 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 (παλμογράφημα του σχήματος 1.5-1).



Σχήμα 1.5-1: Τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2 mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση $10/200 \text{ \mu s}$ και διάταξη ακίδα - πλάκα.

$$C_m: 1835 \text{ nF}$$

$$\hat{U}_k: 70 \text{ kV}$$

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

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 1.4 η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών οφείλονται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες (απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος). Οι παράγοντες αυτοί δεν περιλαμβάνουν όμως στοιχεία για φαινόμενα, που δεν μπορεί κανείς να ακούσει, ή να παρατηρήσει, όπως:

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

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

- στις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις.
- 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:
 - i. το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.
 - ii. Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα).
2. Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 2,5-4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2 MV/cm.
3. Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0.5 MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 e^{(-W/kT)} = \sigma_0 e^{\beta W} \quad (1.6-1)$$

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

σ : Η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.

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

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

T: Η απόλυτη θερμοκρασία

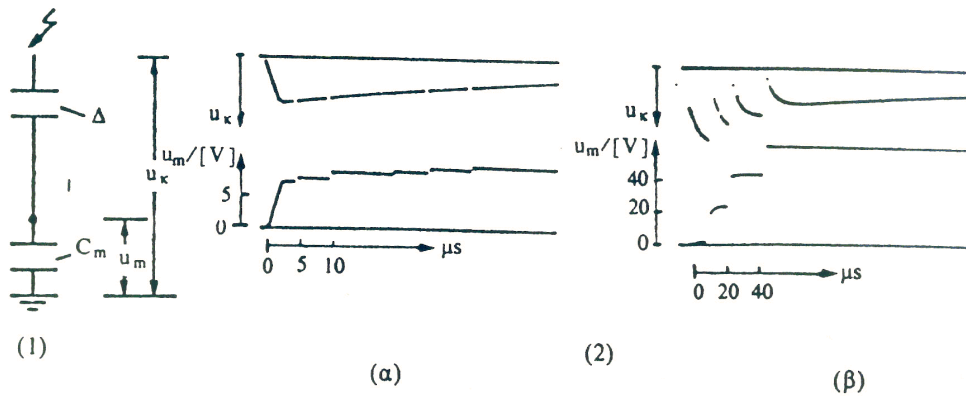
β : Ένας συντελεστής του υλικού (π.χ. για presspan $\beta \approx 0,02$).

Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση 1.6-1. Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση τους στα ηλεκτρόδια.

Παρακάτω εξετάζονται αναλυτικά τα προαναφερόμενα, με βάση τυπικά παραδείγματα, τα περισσότερα των οποίων είναι ήδη γνωστά από τη βιβλιογραφία.

Ένα τυπικό παράδειγμα της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης σε στερεά οργανικά μονωτικά φαίνεται στο σχήμα 1.6-1, όπου δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα, για τη γήρανση και τη διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου (παλμογράφημα α: γήρανση του βακελίτη, παλμογράφημα β: διάτρηση του Pertinax).

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι, μετά από μια τιμή U_k περίπου 45 kV (όπου U_k η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται κατά τη γήρανση επιφανειακός δένδριτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού υλικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής του. Κατά τη διάτρηση δεν εκδηλώνεται επιφανειακός δένδριτης, αλλά ηλεκτρικό τόξο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η εικόνα που παρουσιάζουν τα δοκίμια μετά τη διάτρηση, είναι μια μικρή τρύπα (μικρότερη από 1mm) πλησίον της ακίδας. Οι παρακάτω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται από τις δύο θεωρίες που προαναφέρθηκαν, ως ακολούθως:



Σχήμα 1.6-1: Τυπικά παλμογράφημα κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών
 1) Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης (u_k : στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης, Δ : δοκίμιο, u_m : τάση στον πυκνωτή μέτρησης C_m).
 2) Μετρήσεις με κρουστικές τάσης της μορφής 10/200 μ s:
 α) γήρανση: (τιμή πεδίου 1.11 MV/cm, $U_k = 77.5$ kV, $C_m = 210$ nF, υλικό: βακελίτης)
 β) διάτρηση: (τιμή πεδίου 1.20 MV/cm, $U_k = 85.0$ kV, $C_m = 210$ nF, υλικό: pertinax)

1.6.1 Μακροσκοπική ερμηνεία

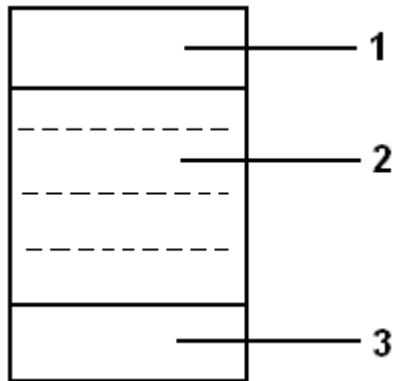
Από το παλμογράφημα της γήρανσης (σχήμα 1.6-1) φαίνεται ότι εκδηλώνονται εσωτερικές και εξωτερικές μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού (στο μέτωπο και την ουρά της κρουστικής τάσης αντίστοιχα), τα οποία προκαλούνται, κατά το i -

σοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4-1 (ή του σχήματος 1.4-2), από τη σταδιακή διάσπαση των πυκνωτών $C_{\phi_1}, \dots, C_{\phi_n}$. Ο δενδρίτης μπορεί να ερμηνευτεί από τα παραπάνω ισοδύναμα κυκλώματα ως επέκταση του ίχνους της ακίδας μέχρι τις θέσεις διαταραχής, που διασπώνται. Η διάτρηση φαίνεται ότι συμβαίνει στη θέση της διαταραχής, όπου η πεδιακή ένταση έχει τη μέγιστη τιμή της.

1.6.2 Κβαντομηχανική ερμηνεία

Κατά τη θεωρία αυτή ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και όχι ο διαχωρισμός των τελευταίων σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον C_m ανά άλμα δυναμικού. Η τιμή αυτή για το πρώτο άλμα δυναμικού κατά το σχήμα 1.4-3, είναι περίπου 0.56 eV κατά τη γήρανση και 21.5 eV κατά τη διάτρηση. Από τις τιμές αυτές φαίνεται ότι η γήρανση και η

διάτρηση των δοκιμίων σχετίζονται με ακτινοβολίες, που δεν μπορούν να ανιχνευθούν με μακροσκοπικές μεθόδους. Μπορούμε να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις διαταραχής (κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4-1 ή του σχήματος 1.4-2 οι πυκνωτές $C_{\varphi 1}, \dots, C_{\varphi n}$) αντιστοιχούν σε ενεργειακές ζώνες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη του υλικού (σχήμα 1.6-2)



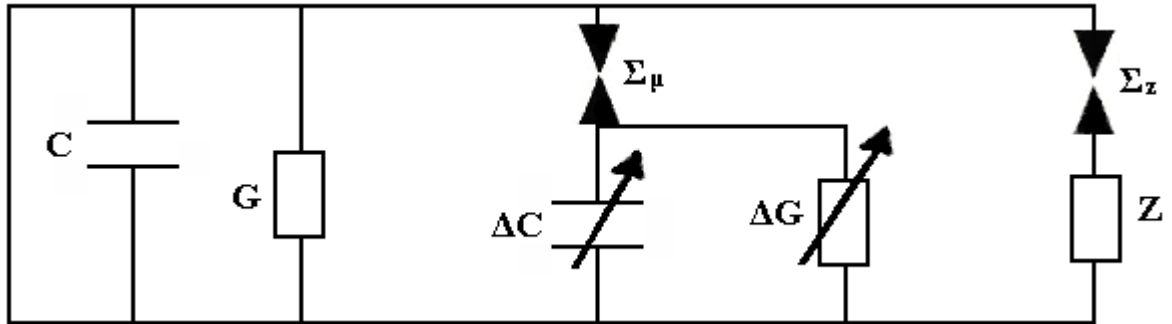
Σχήμα 1.6-2:

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

1.7 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών

Από το παραπάνω παράδειγμα φαίνεται ότι, για την ερμηνεία των φαινομένων πριν και κατά τη διάσπαση χρειάζεται συνδυασμός των δύο θεωριών, που προαναφέρθηκαν. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, το οποίο συνδυάζει τις δύο παραπάνω θεωρίες, δίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.7-1 πρόκειται ουσιαστικά για μια συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος Gemant-Philippoff (σχήμα 1.4-1), όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσουμε ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει σε κάποια τιμή του πεδίου E_{μ} , τότε τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο στερεό μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.7-1 ως εξής:

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



Σχήμα 1.7-1: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα

G : ιδανική αγωγιμότητα

ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

ΔG : αύξηση της αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

Z : αρνητική διαφορική αντίσταση

Σ_{μ} : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Σ_z : σπινθηριστής εκδήλωσης της Z

2 ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε βιομηχανικά μονωτικά υλικά. Συγκεκριμένα για τον σκοπό αυτό, γίνεται υπολογισμός, μέσω στατιστικής ανάλυσης, της στιγμιαίας τιμής της τάσης έναρξης και της τάσης περαίωσης, της πεδιακής έντασης, της ειδικής αγωγιμότητας, της ταχύτητας και της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων αντίστοιχα, κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων στο συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματιστών» υπό κρουστική τάση $\pm 1,2/100 \mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου.

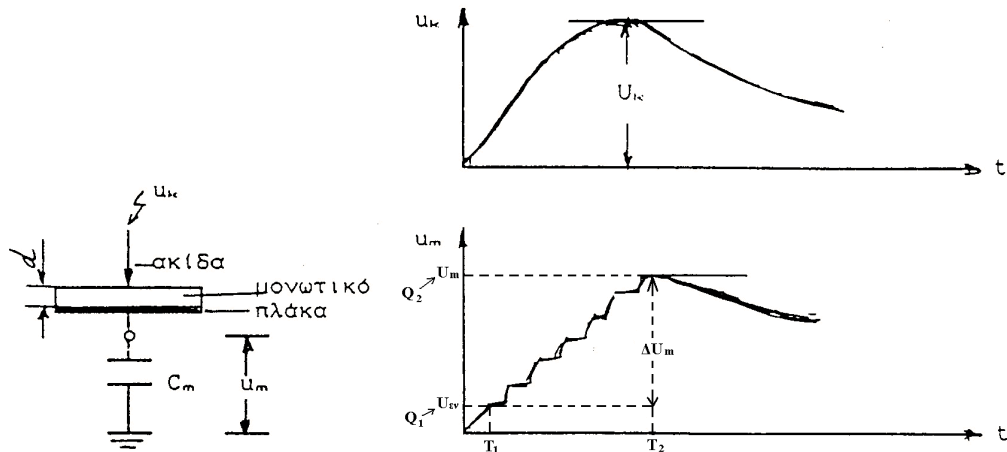
Η σειρά μετρήσεων των μερικών εκκενώσεων σε βιομηχανικά ηλεκτρομονωτικά υλικά, η οποία έγινε σε συνεργασία με τον καθηγητή κ. Π. Μπούρκα, πραγματοποιήθηκε στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματιστών», υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής $\pm 1,2/100\mu\text{s}$.

Το στερεό ηλεκτρομονωτικό υλικό Pertinax H 1270 είναι χαρτί εμποτισμένο με φαινόλη και χρησιμοποιείται σε εξοπλισμούς χαμηλής και μέσης τάσης. Ειδικότερα σε ηλεκτρομονώσεις μέσης τάσης χρησιμοποιείται κυρίως σε συνεργασία με το ηλεκτρομονωτικό έλαιο σε ανώτατο όριο θερμοκρασίας 110°C. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από Pertinax πάχους 1 και 2 mm. Από τη λήψη αριθμού παλμογραφημάτων, με τη χρήση κατάλληλου κυκλώματος και χρήση ηλεκτρονικού παλμογράφου, ο οποίος έχει μικρή ταχύτητα δειγματοληψίας, δίνεται η δυνατότητα επεξεργασίας των μετρούμενων μεγεθών.

2.1 Στατικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων

Η μέτρηση των αλμάτων δυναμικού σε στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά υπό την επίδραση υψηλών τάσεων έχει δώσει τη δυνατότητα μελέτης των υλικών αυτών μέσω στατιστικών μετρήσεων.

Από το εργαστηριακό μέρος της εργασίας, δίνεται η δυνατότητα καταγραφής μεγεθών όπως: η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης (u_k), ο χρόνος έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (t_1) και (t_2) αντίστοιχα, η στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά την έναρξη και κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων (q_1) και (q_2) καθώς και τη χωρητικότητα του πυκνωτή μέτρησης (c_m) όπως αυτά προσδιορίζονται από το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2-1: καθορισμός μεγεθών με βάση τα παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων

Με τη χρήση των παραπάνω ως δεδομένα, έγινε ο προσδιορισμός μεγεθών όπως η στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης (u_{ev}) και τάσης περαίωσης (u_{π}) των μερικών εκκενώσεων, οι αντίστοιχες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης C_m κατά την έναρξη και την περαίωση των μερικών εκκενώσεων. Επίσης, υπολογίζονται η ταχύτητα (v) και κινητικότητα (b) των ελεύθερων ηλεκτρονίων καθώς και η ειδική αγωγιμότητα στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου.

Ο υπολογισμός της τάσης περαίωσης (u_{π}) των μερικών εκκενώσεων, γίνεται γραφικά μέσω του διαγράμματος της χρονικής μεταβολής της κρουστικής τάσης. Αρχικά προσδιορίζεται η ευθεία που διέρχεται από τα σημεία $(0, u_k)$ και $(50, 0.5 u_k)$ και στη συνέχεια προσδιορίζεται η τάση περαίωσης (u_{π}) ως η τεταγμένη του σημείου τομής της παραπάνω ευθείας με την $x=t_2$ (όπου t_2 , ο χρόνος περάτωσης των μερικών εκκενώσεων). Τα υπόλοιπα μεγέθη υπολογίζονται από τις μαθηματικές σχέσεις της επόμενης παραγράφου (2.2).

Τα παραπάνω μεγέθη και η μεταξύ τους σχέσεις γίνονται πλήρως αντιληπτές μέσα από γραφικές παραστάσεις των συσχετιζόμενων μεγεθών. Η προσπάθεια μαθηματικής μοντελοποίησης μέσω των γραφικών παραστάσεων δίνει τη δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης και κατανόησης των μεγεθών.

Τα αποτελέσματα αυτά θα βοηθήσουν να εξαχθούν συμπεράσματα χρήσιμα για τη συμπεριφορά και την αξιοπιστία των ηλεκτρομονωτικών υλικών κατά την εφαρμογή τους σε διατάξεις υψηλών τάσεων και υπερτάσεων στο δίκτυο. Τα θεωρητικά στοιχεία που παρατίθενται, (είτε αφορούν στη μακροσκοπική είτε στη κβαντομηχανική θεωρία) θα δώσουν μια δυνατότητα εμβάθυνσης στα φαινόμενα που παρατηρούνται στα βιομηχανικά ηλεκτρομονωτικά υλικά. Με αυτό τον τρόπο θα παρέχεται μια δυνατότητα ερμηνείας των φαινομένων και κατά επέκταση μια δυνατότητα επιλογής των κατάλληλων μονωτικών.

2.2 Ορισμοί- Μαθηματικές Σχέσεις

Για μια διάταξη πειραματισμού: ηλεκτρόδια ακίδα-στερεό ηλεκτρομονωτικό υλικό-ηλεκτρόδιο πλάκα, οι τιμές της ηλεκτρικής πεδιακής έντασης E υπολογίζονται από τη σχέση, που δίνεται στη βιβλιογραφία:

$$E = \frac{2 \cdot u}{R \cdot \ln\left(\frac{4d}{R}\right)} \quad (2.2-1)$$

Όπου:

u : η επιβαλλόμενη τάση καταπόνησης ή η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ή η στιγμιαία τιμή της τάσης

R : η ακτίνα καμπυλότητας του ηλεκτροδίου ακίδας

d : Πάχος του στερεού ηλεκτρομονωτικού υλικού

Επομένως έχουμε:

$$E_k = \frac{2 \cdot u_k}{R \cdot \ln\left(\frac{4d}{R}\right)} \quad (2.2-2)$$

η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης (u_k)

$$E_{εν} = \frac{2 \cdot u_{εν}}{R \cdot \ln\left(\frac{4d}{R}\right)} \quad (2.2-3)$$

η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($u_{εν}$)

$$E_{\pi} = \frac{2 \cdot u_{\pi}}{R \cdot \ln\left(\frac{4d}{R}\right)} \quad (2.2-4)$$

η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (u_{π})

Η στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης C_m δίνεται από τη σχέση:

$$u = \frac{q}{C_m} \quad (2.2-5)$$

Από όπου υπολογίζεται η στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης C_m κατά την έναρξη (u_1) και την περαίωση (u_2) των μερικών εκκενώσεων.

Υπό την προϋπόθεση ότι τα παραχθέντα ελεύθερα ηλεκτρόνια (που παραήλθαν από διεργασίες ιονισμού κατά την καταπόνηση στερεού μονωτικού με υψηλή τάση) συλλέγονται πλέον ανεμπόδιστα από την άνοδο με ταχύτητα $v \leq 0,2c$ (όπου c η ταχύτητα του φωτός) ισχύει:

Η κινητική ενέργεια του φορέα για μία διαδρομή x με διαφορά δυναμικού $\Delta\phi$ (μεταξύ τέλους και αρχής της διαδρομής) είναι:

$$W_k = q \int^x E dx = \frac{m_0 v^2}{2} = q \Delta\phi \quad (2.2-6)$$

Όπου m_0 η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρικού φορτίου, q το ηλεκτρικό φορτίο v η ταχύτητα στο τέλος της διαδρομής. Από την παραπάνω σχέση ισχύει για την ταχύτητα του ελεύθερου ηλεκτρονίου:

$$v = \sqrt{\frac{2q_e \Delta\phi}{m_0}} \quad (2.2-7)$$

όπου: $m_0 = 9,1 \times 10^{-31}$ kg και $q_e = 1,6 \times 10^{-19}$ As. Έτσι η ταχύτητά του v στο τέλος της διαδρομής είναι:

$$v = 600 \sqrt{\Delta\phi} \quad \text{σε cm/s} \quad (2.2-8)$$

όπου $\Delta\phi$ σε V. Για ταχύτητα του ελεύθερου ηλεκτρονίου $v = 0,2 c$ είναι:

$$\Delta\phi = 10,25 \text{ kV.}$$

Όταν η ταχύτητα κίνησης του ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα είναι $v > 0,2c$ (όπου $c = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$) θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη στους υπολογισμούς η σχέση του Einstein:

$$m = m_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (2.2-9)$$

Στην περίπτωση αυτή η κινητική ενέργεια είναι:

$$W_k = q_e \cdot \Delta\phi = mc^2 - m_0 c^2 \quad (2.2-10)$$

και η ταχύτητα:

$$v = c \sqrt{1 - \frac{1}{\left(\frac{q_e \Delta \phi}{m_o c^2} + 1\right)^2}} \quad (2.2-11)$$

Η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων, υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου δίνεται από την σχέση:

$$b = \frac{v}{E} \quad (2.2-12)$$

Όπου E η ένταση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Συνεπώς, για το παραγόμενο ηλεκτρικό φορτίο ΔQ η ειδική αγωγιμότητα στο τέλος της διαδρομής δίνεται από την σχέση:

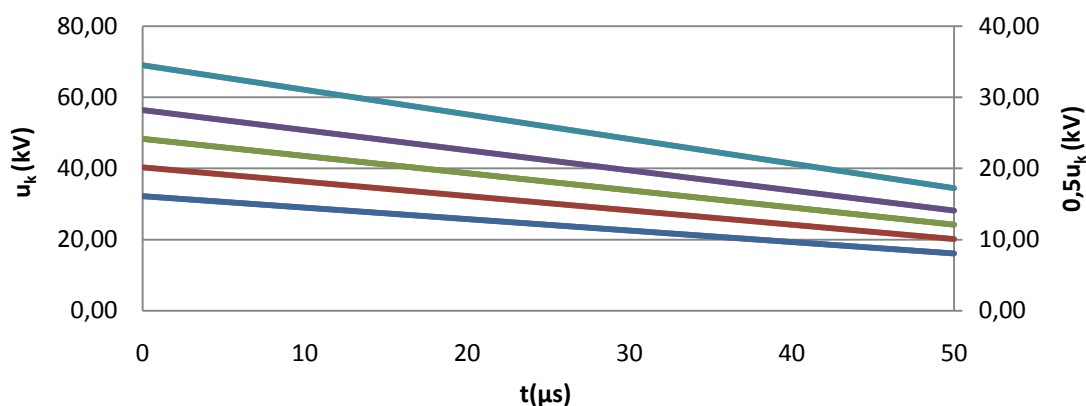
$$\sigma = \Delta Q \cdot b = \frac{\Delta Q \cdot v}{E} \quad (2.2-13)$$

ΣΚΟΠΟΣ

3 ΠΙΝΑΚΕΣ–ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

Παρακάτω παρατίθενται όλοι οι πίνακες και όλες οι γραφικές παραστάσεις που προαναφέρθηκαν στο σκοπό της εργασίας, χωρίς κανένα σχόλιο. Αυτό έγινε ώστε να είναι δυνατόν να εξάγει ο αναγνώστης τα δικά του συμπεράσματα, χωρίς να επηρεάζεται από τη γνώμη του συγγραφέα. Για το λόγο αυτό τα συμπεράσματα της εργασίας δίνονται μετά τις γραφικές παραστάσεις. (βλ. παράγραφο 4)

3.1 Τάση καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs (d=1mm)



Διάγραμμα 3.1-1: Χρονική μεταβολή της κρουστικής τάσης για τον υπολογισμό της στιγμιαίας τιμής της τάσης περαίωσης (u_{π}) των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

u_k (kV)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	C_m (nF)	$u_{εν}$ (kV)	u_{π} (kV)
32,22	4,90	22,50	0,39	2,23	210	30,6	24,97
40,27	3,43	15,20	0,61	4,90	210	37,72	34,15
48,33	1,71	17,00	0,94	5,20	210	45,5	40,11
56,38	1,35	21,11	1,18	6,30	1000	53,4	44,48
69,00	1,23	26,40	1,88	12,50	1000	59,5	50,78

Πινάκας 3.1-1: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , t_1 , t_2 , q_1 , q_2 , C_m , $u_{εν}$, u_{π} κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 t_2 : χρόνος περάτωσης των μερικών εκκενώσεων
 q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 c_m : πυκνωτής μέτρησης
 $u_{εν}$: στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

u_k (kV)	E_k (MV/cm)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	u_{π} (kV)	E_{π} (MV/cm)
32,22	0,48	30,6	0,46	24,97	0,37
40,27	0,60	37,72	0,56	34,15	0,51
48,33	0,72	45,5	0,68	40,11	0,60
56,38	0,84	53,4	0,80	44,48	0,66
69,00	1,03	59,5	0,89	50,78	0,76

Πινάκας 3.1-2: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , E_k , u_{ev} , E_{ev} , u_{π} , E_{π} , κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: d=1mm

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

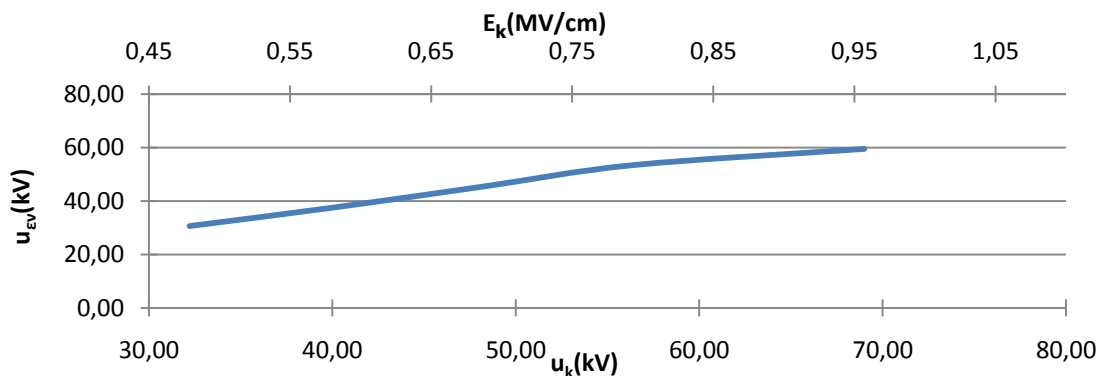
E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

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

u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

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



Διάγραμμα 3.1-2: Χαρακτηριστική καμπύλη $u_{ev}=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της τάσης έναρξης συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs

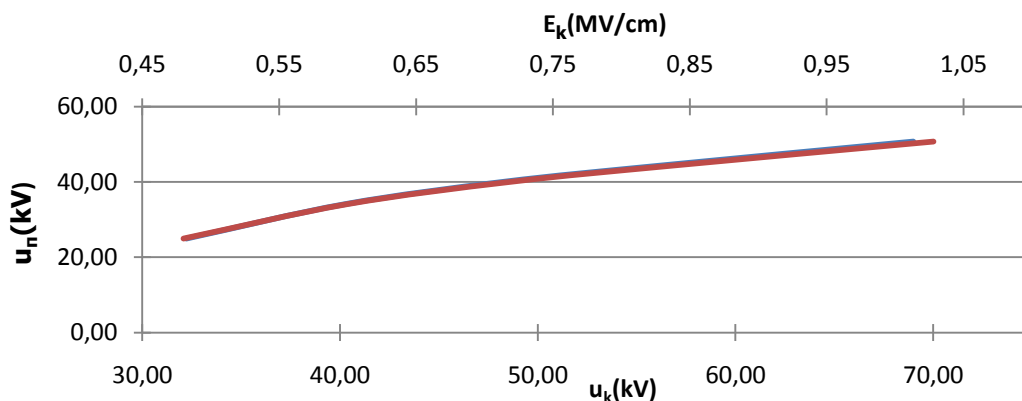
Πάχος δοκιμίου: d=1mm

u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Διάγραμμα 3.1-3: Χαρακτηριστική καμπύλη $u_{\pi}=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της τάσης περαιώσεως συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαιώσεως των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

u_k (kV)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	C_m (nF)	u_1 (V)	u_2 (V)
32,22	0,39	2,23	210	1,86	10,62
40,27	0,61	4,90	210	2,90	23,33
48,33	0,94	5,20	210	4,48	24,76
56,38	1,18	6,30	1000	1,18	6,30
69,00	1,88	12,50	1000	1,88	12,50

Πινάκας 3.1-3: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , q_1 , q_2 , C_m , u_1 , u_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 c_m : πυκνωτής μέτρησης
 u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης C_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

u_k (kV)	u_{ev} (kV)	u_{π} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	E_{π} (MV/cm)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	b_1 (m ² /kVs)	b_2 (m ² /kVs)
32,22	30,6	24,97	0,46	0,37	1,04E+08	9,37E+07	2275,49	2518,96
40,27	37,72	34,15	0,56	0,51	1,15E+08	1,10E+08	2049,51	2154,00
48,33	45,5	40,11	0,68	0,60	1,26E+08	1,19E+08	1866,08	1987,41
56,38	53,4	44,48	0,80	0,66	1,37E+08	1,25E+08	1722,52	1887,39
69,00	59,5	50,78	0,89	0,76	1,45E+08	1,34E+08	1631,84	1766,33

Πινάκας 3.1-4: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , u_{ev} , u_{π} , E_{ev} , E_{π} , v_1 , v_2 , b_1 , b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: d=1mm

u_k : μεγίστη τιμή της κρουστικής τάσης

u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

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

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

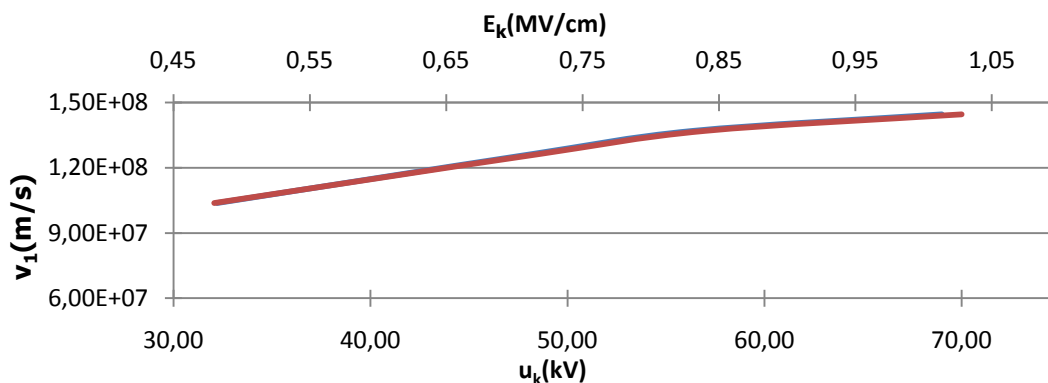
v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

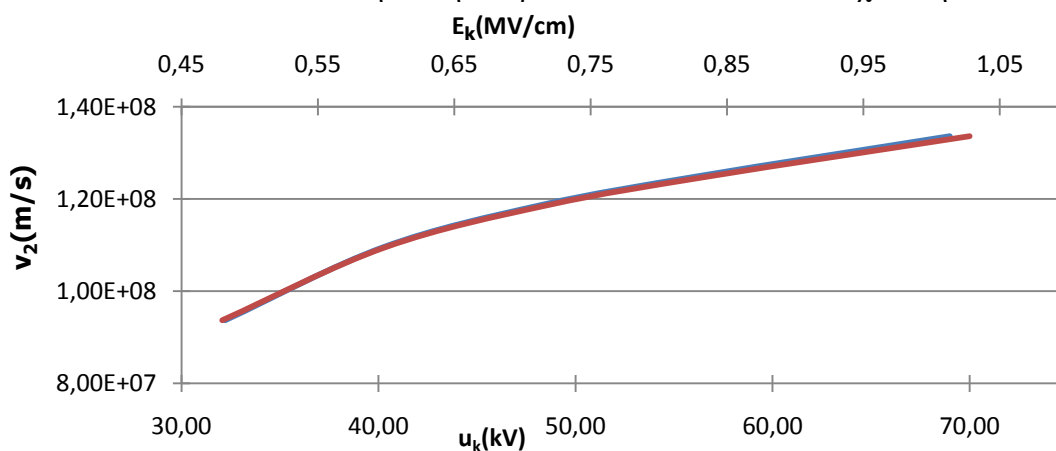
b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

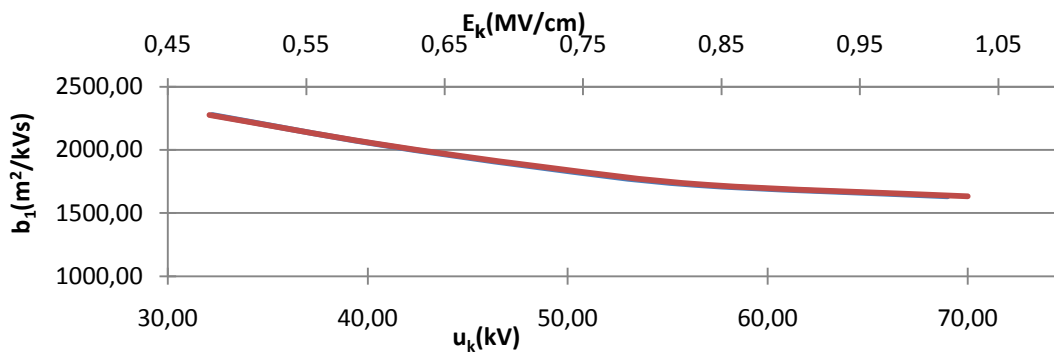


Διάγραμμα 3.1-4: Χαρακτηριστική καμπύλη $v_1=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: $d=1\text{mm}$
 v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.1-5: Χαρακτηριστική καμπύλη $v_2=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: $d=1\text{mm}$
 v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



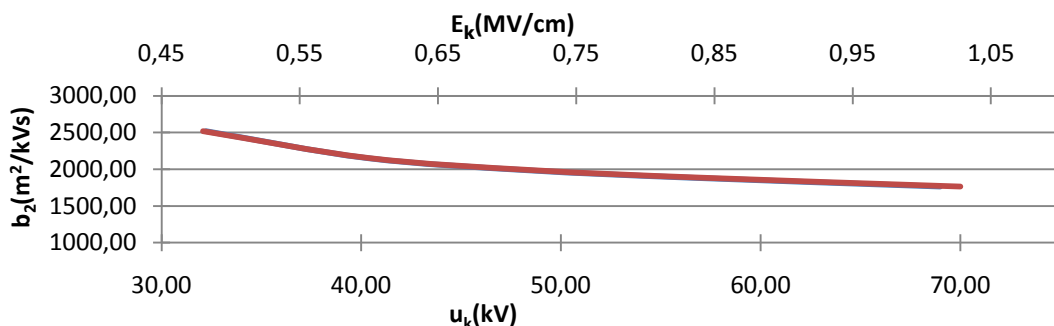
Διάγραμμα 3.1-6: Χαρακτηριστική καμπύλη $b_1=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της μείωσης της στιγμιαίας τιμής της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: $d=1\text{mm}$

b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.1-7: Χαρακτηριστική καμπύλη $b_2=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της μείωσης της στιγμιαίας τιμής της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: $d=1\text{mm}$

b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

u_k (kV)	q_1 (μ C)	q_2 (μ C)	Δq (μ C)	u_{ev} (kV)	u_{π} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	E_{π} (MV/cm)	σ_1 (m^2/Ω)	σ_2 (m^2/Ω)
32,22	0,39	2,23	1,84	30,6	24,97	0,46	0,37	8,874E-07	4,635E-06
40,27	0,61	4,90	4,29	37,72	34,15	0,56	0,51	1,250E-06	9,241E-06
48,33	0,94	5,20	4,26	45,5	40,11	0,68	0,60	1,754E-06	8,466E-06
56,38	1,18	6,30	5,12	53,4	44,48	0,80	0,66	2,033E-06	9,663E-06
69,00	1,88	12,50	10,62	59,5	50,78	0,89	0,76	3,068E-06	1,876E-05

Πινάκας 3.1-5: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , q_1 , q_2 , Δq , u_{ev} , u_{π} , E_{ev} , E_{π} , σ_1 , σ_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100 μ s

Πάχος δοκιμίου: d=1mm

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta q = q_1 - q_2$

u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

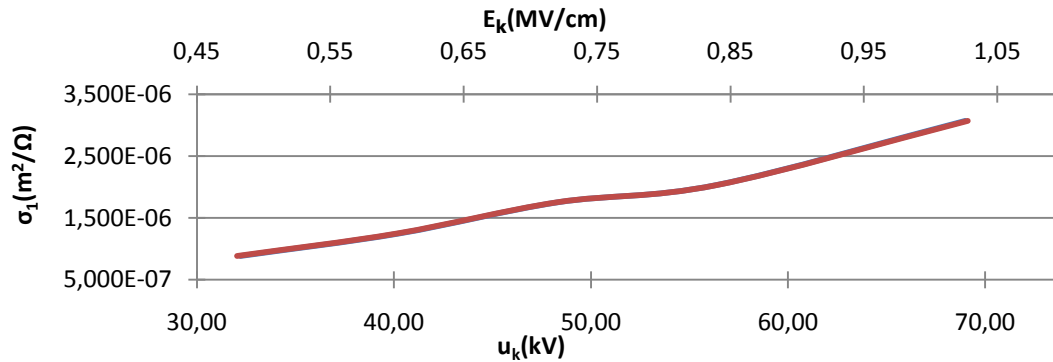
E_{ev} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

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

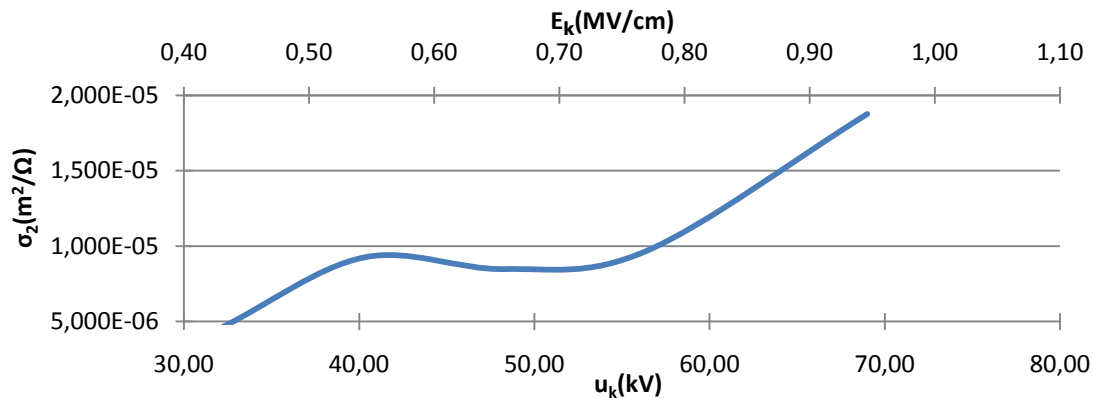
σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

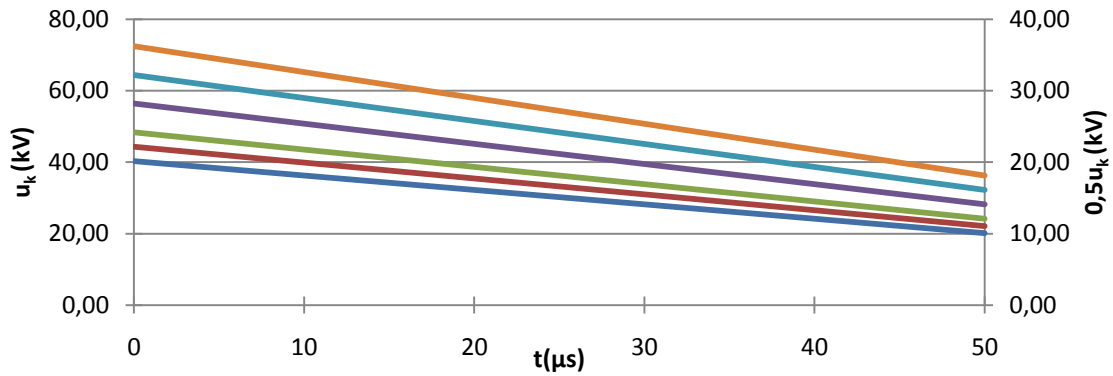


Διάγραμμα 3.1-8: Χαρακτηριστική καμπύλη $\sigma_1=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.1-9: Χαρακτηριστική καμπύλη $\sigma_2=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

3.2 Τάση καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs (d=2mm)



Διάγραμμα 3.2-1: Χρονική μεταβολή της κρουστικής τάσης για τον υπολογισμό της στιγμιαίας τιμής της τάσης περαίωσης (u_{π}) των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

u_k (kV)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	C_m (nF)	u_{ev} (kV)	u_{π} (kV)
40,27	4,23	7,25	0,12	0,21	210	36,23	37,35
44,30	3,11	8,17	0,13	0,30	210	43,50	40,68
48,33	2,50	8,97	0,13	0,41	210	46,35	43,99
56,38	2,20	13,05	0,18	0,50	210	53,68	49,02
64,44	1,63	13,60	0,23	0,57	1000	58,30	55,68
72,50	1,25	13,10	0,29	0,67	1000	68,25	63,00

Πινάκας 3.2-1: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , t_1 , t_2 , q_1 , q_2 , C_m , u_{ev} , u_{π} κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 t_2 : χρόνος περάτωσης των μερικών εκκενώσεων
 q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 c_m : πυκνωτής μέτρησης
 u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

u_k (kV)	E_k (MV/cm)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	u_{π} (kV)	E_{π} (MV/cm)
40,27	0,41	36,23	0,37	37,35	0,38
44,30	0,45	43,50	0,44	40,68	0,41
48,33	0,49	46,35	0,47	43,99	0,45
56,38	0,57	53,68	0,55	49,02	0,50
64,44	0,66	58,30	0,59	55,68	0,57
72,50	0,74	68,25	0,69	63,00	0,64

Πινάκας 3.2-2: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , E_k , u_{ev} , E_{ev} , u_{π} , E_{π} κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: d=2mm

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

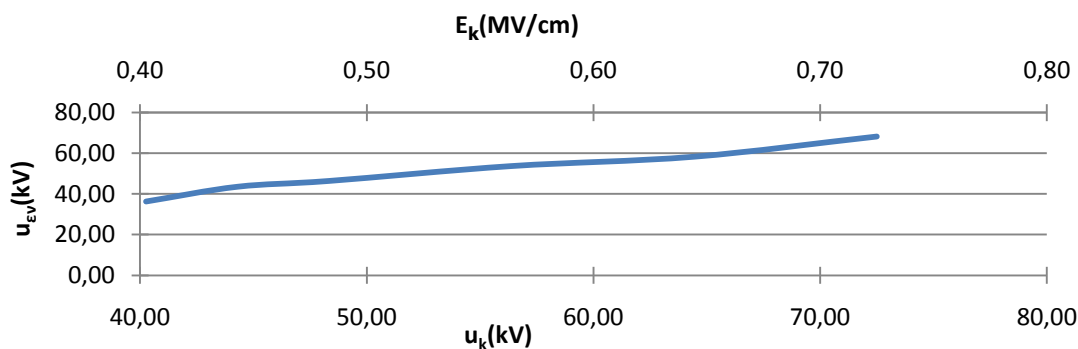
E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

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

u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

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



Διάγραμμα 3.2-2: Χαρακτηριστική καμπύλη $u_{ev}=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της τάσης έναρξης συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs

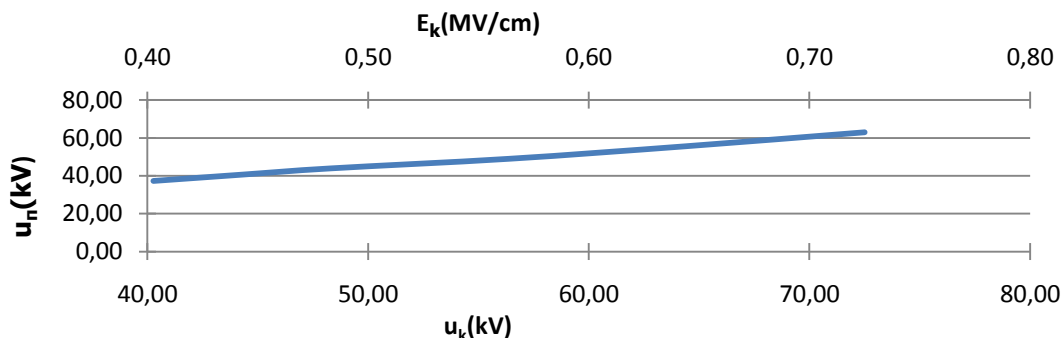
Πάχος δοκιμίου: d=2mm

u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Διάγραμμα 3.2-3: Χαρακτηριστική καμπύλη $u_{\pi}=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της τάσης περαιώσεως συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαιώσεως των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

u_k (kV)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	C_m (nF)	u_1 (V)	u_2 (V)
40,27	0,12	0,23	210	0,57	1,10
44,30	0,13	0,3	210	0,62	1,43
48,33	0,13	0,41	210	0,62	1,95
56,38	0,18	0,5	210	0,86	2,38
64,44	0,23	0,57	1000	0,23	0,57
72,50	0,29	0,67	1000	0,29	0,67

Πινάκας 3.2-3: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , q_1 , q_2 , C_m , u_1 , u_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 c_m : πυκνωτής μέτρησης
 u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης C_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

u_k (kV)	u_{ev} (kV)	u_{π} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	E_{π} (MV/cm)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	b_1 (m ² /kVs)	b_2 (m ² /kVs)
40,27	36,23	37,35	0,37	0,38	1,13E+08	1,15E+08	3062,98	3016,69
44,30	43,50	40,68	0,44	0,41	1,24E+08	1,20E+08	2795,34	2890,58
48,33	46,35	43,99	0,47	0,45	1,28E+08	1,24E+08	2708,03	2779,57
56,38	53,68	49,02	0,55	0,50	1,37E+08	1,31E+08	2516,36	2633,19
64,44	58,30	55,68	0,59	0,57	1,43E+08	1,40E+08	2414,60	2470,84
72,50	68,25	63,00	0,69	0,64	1,55E+08	1,49E+08	2231,66	2322,74

Πινάκας 3.2-4: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , u_{ev} , u_{π} , E_{ev} , E_{π} , v_1 , v_2 , b_1 , b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: d=2mm

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

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

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

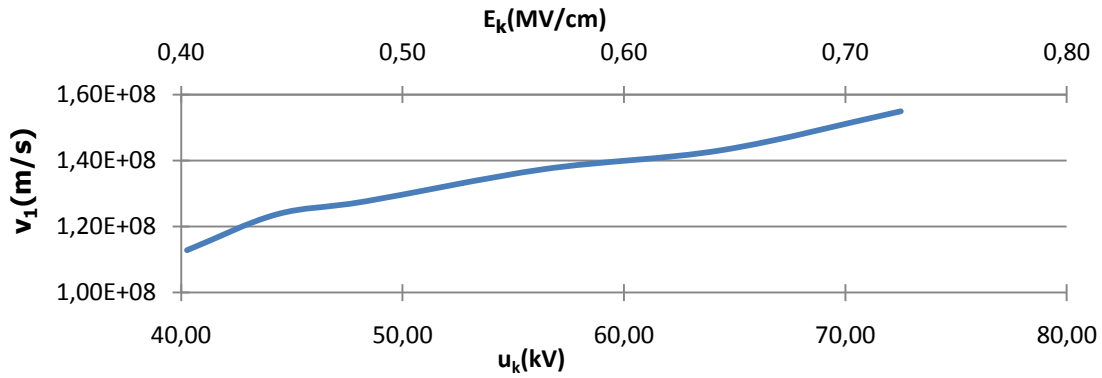
v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

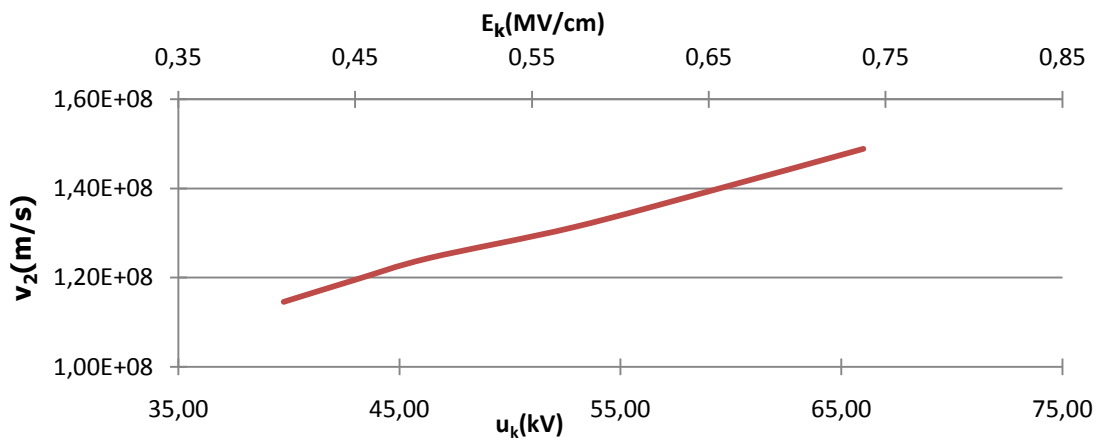
b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

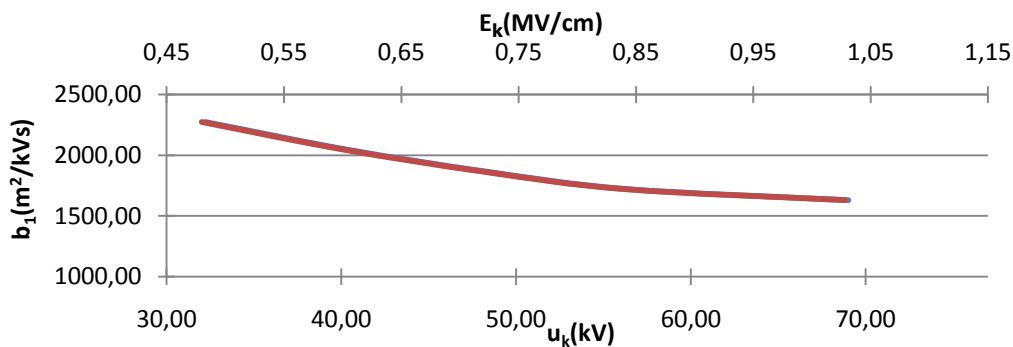


Διάγραμμα 3.2-4: Χαρακτηριστική καμπύλη $v_1=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

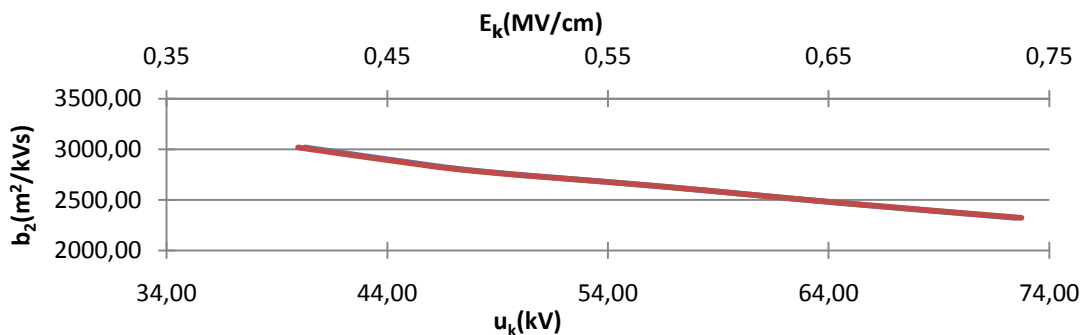


Διάγραμμα 3.2-5: Χαρακτηριστική καμπύλη $v_2=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Διάγραμμα 3.2-6: Χαρακτηριστική καμπύλη $b_1=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της μείωσης της στιγμιαίας τιμής της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.2-7: Χαρακτηριστική καμπύλη $b_2=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της μείωσης της στιγμιαίας τιμής της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

u_k (kV)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	Δq (μC)	u_{ev} (kV)	u_{π} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	E_{π} (MV/cm)	σ_1 (m^2/Ω)	σ_2 (m^2/Ω)
40,27	0,12	0,21	0,09	36,23	37,35	0,37	0,38	3,676E-07	2,715E-07
44,30	0,13	0,30	0,17	43,50	40,68	0,44	0,41	3,634E-07	4,914E-07
48,33	0,13	0,41	0,28	46,35	43,99	0,47	0,45	3,520E-07	7,783E-07
56,38	0,18	0,50	0,32	53,68	49,02	0,55	0,50	4,529E-07	8,426E-07
64,44	0,23	0,57	0,34	58,30	55,68	0,59	0,57	5,554E-07	8,401E-07
72,50	0,29	0,67	0,38	68,25	63,00	0,69	0,64	6,472E-07	8,826E-07

Πινάκας 3.2-5: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , q_1 , q_2 , Δq , u_{ev} , u_{π} , E_{ev} , E_{π} , σ_1 , σ_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Perlimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100 μs

Πάχος δοκιμίου: $d=2mm$

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta q=q_1-q_2$

u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

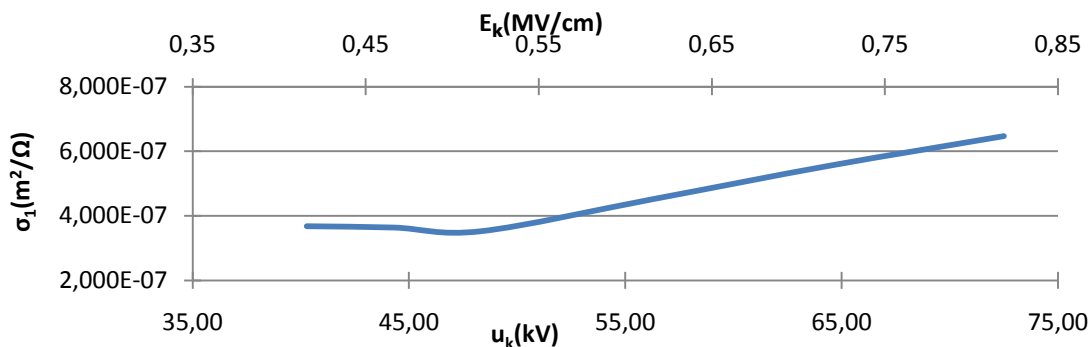
E_{ev} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

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

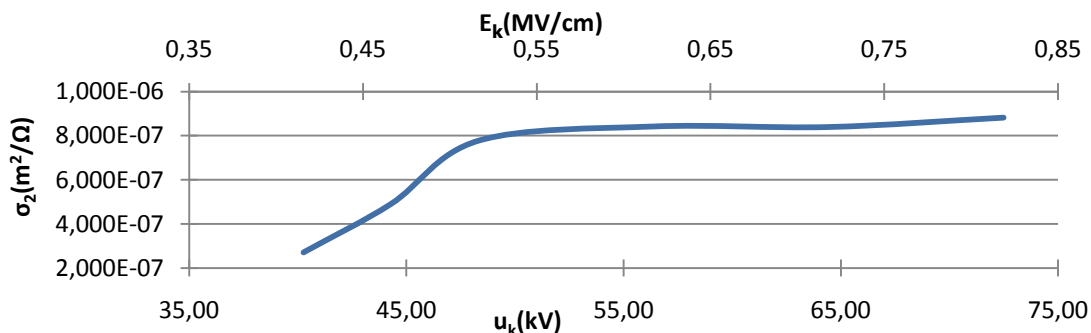
σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

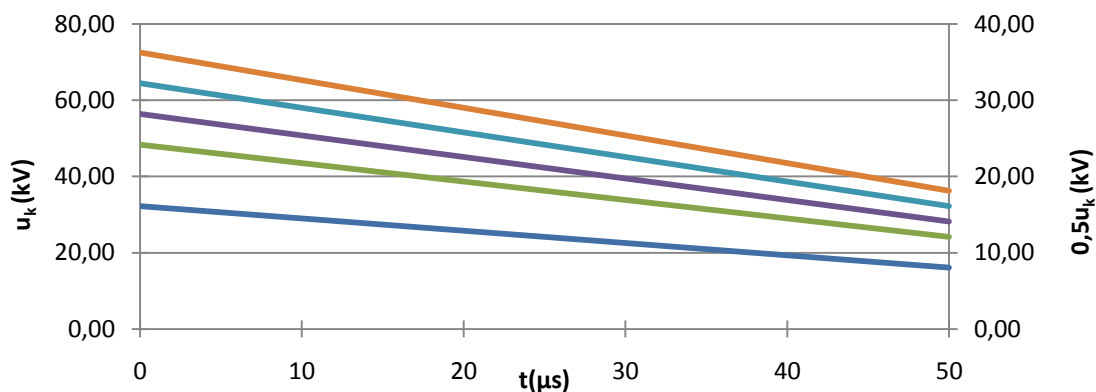


Διάγραμμα 3.2-8: Χαρακτηριστική καμπύλη $\sigma_1=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.2-9: Χαρακτηριστική καμπύλη $\sigma_2=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

3.3 Τάση καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs (d=1mm)



Διάγραμμα 3.3-1: Χρονική μεταβολή της κρουστικής τάσης για τον υπολογισμό της στιγμιαίας τιμής της τάσης περαίωσης (u_{π}) των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

u_k (kV)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	C_m (nF)	$u_{εν}$ (kV)	u_{π} (kV)
32,22	4,35	14,22	0,15	1,80	210	31,11	27,64
48,33	2,61	22,50	1,68	10,66	210	45,48	37,46
56,38	1,88	27,00	2,12	12,75	1000	51,25	41,16
64,44	1,60	34,88	3,13	19,87	1000	62,76	41,96
72,50	1,24	42,50	3,75	42,08	1000	70,45	41,69

Πινάκας 3.3-1: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , t_1 , t_2 , q_1 , q_2 , C_m , $u_{εν}$, u_{π} κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 t_2 : χρόνος περάτωσης των μερικών εκκενώσεων
 q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 c_m : πυκνωτής μέτρησης
 $u_{εν}$: στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

u_k (kV)	E_k (MV/cm)	$u_{εν}$ (kV)	$E_{εν}$ (MV/cm)	$u_π$ (kV)	$E_π$ (MV/cm)
32,22	0,48	31,11	0,46	27,64	0,41
48,33	0,72	45,48	0,68	37,46	0,56
56,38	0,84	51,25	0,76	41,16	0,61
64,44	0,96	62,76	0,93	41,96	0,63
72,50	1,08	70,45	1,05	41,69	0,62

Πινάκας 3.3-2: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , E_k , $u_{εν}$, $E_{εν}$, $u_π$, $E_π$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: d=1mm

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

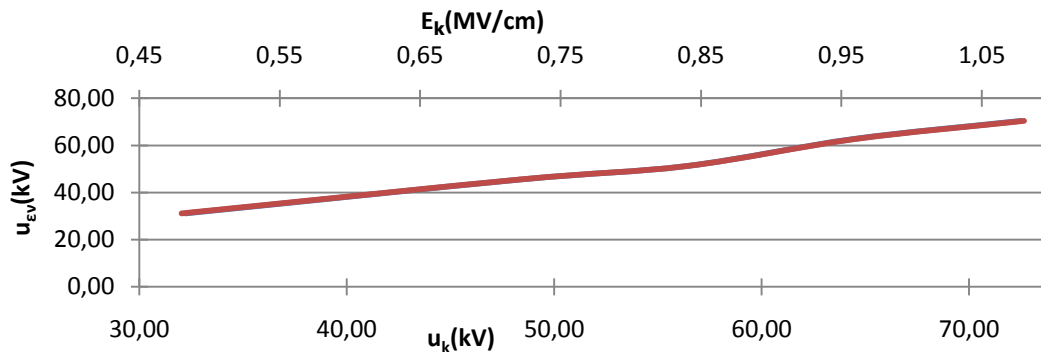
E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

$u_{εν}$: στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

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

$u_π$: στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$E_π$: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων



Διάγραμμα 3.3-2: Χαρακτηριστική καμπύλη $u_{εν}=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της τάσης έναρξης συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

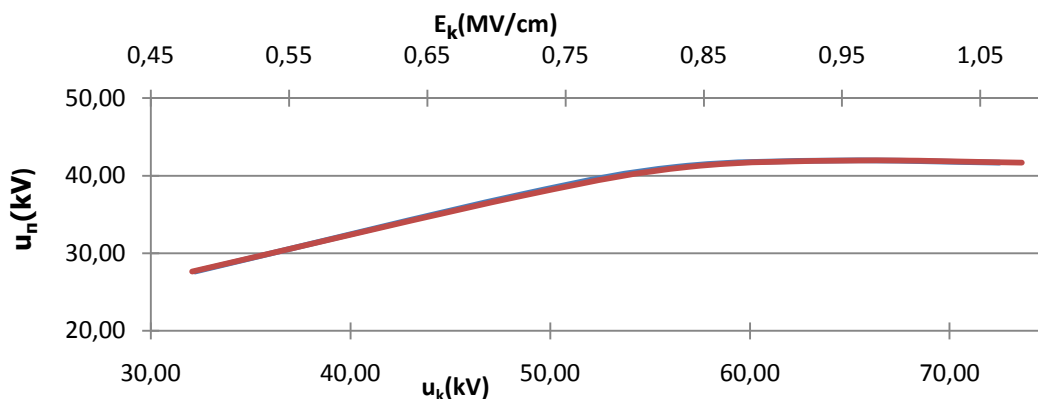
Πάχος δοκιμίου: d=1mm

$u_{εν}$: στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Διάγραμμα 3.3-3: Χαρακτηριστική καμπύλη $u_{\pi}=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της τάσης περαίωσης συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

u_k (kV)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	C_m (nF)	u_1 (V)	u_2 (V)
32,22	0,15	1,80	210	0,71	8,57
48,33	1,68	10,66	210	8,00	50,76
56,38	2,12	12,75	1000	2,12	12,75
64,44	3,13	19,87	1000	3,13	19,87
72,50	3,75	42,08	1000	3,75	42,08

Πινάκας 3.3-3: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , q_1 , q_2 , C_m , u_1 , u_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 c_m : πυκνωτής μέτρησης
 u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης C_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

u_k (kV)	u_{ev} (kV)	u_{π} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	E_{π} (MV/cm)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	b_1 (m ² /kVs)	b_2 (m ² /kVs)
32,22	31,11	27,64	0,46	0,41	1,05E+08	9,86E+07	2256,76	2394,30
48,33	45,48	37,46	0,68	0,56	1,26E+08	1,15E+08	1866,49	2056,72
56,38	51,25	41,16	0,76	0,61	1,34E+08	1,20E+08	1758,28	1962,06
64,44	62,76	41,96	0,93	0,63	1,36E+08	1,15E+08	1458,09	1832,33
72,50	70,45	41,69	1,05	0,62	1,43E+08	1,14E+08	1362,84	1839,06

Πινάκας 3.3-4: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , u_{ev} , u_{π} , E_{ev} , E_{π} , v_1 , v_2 , b_1 , b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: d=1mm

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

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

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

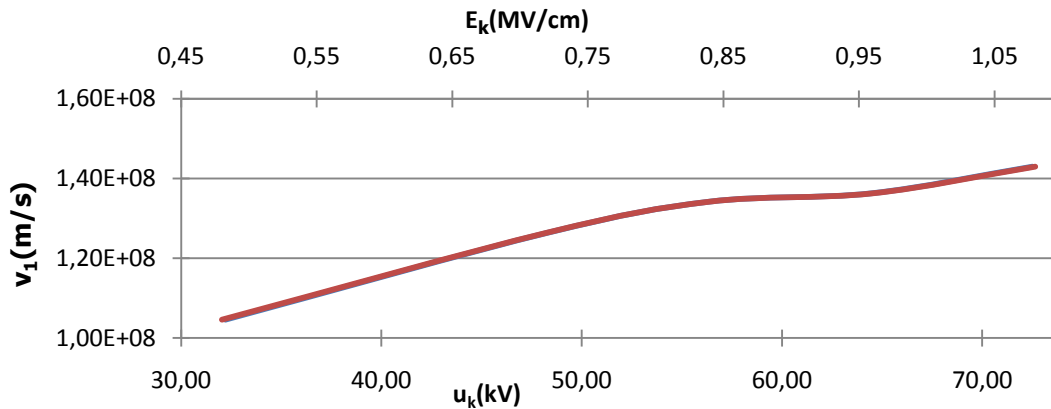
v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

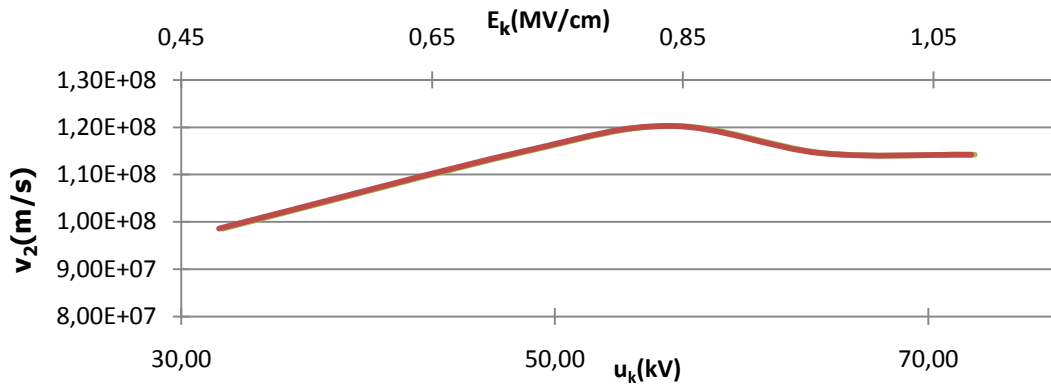
b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

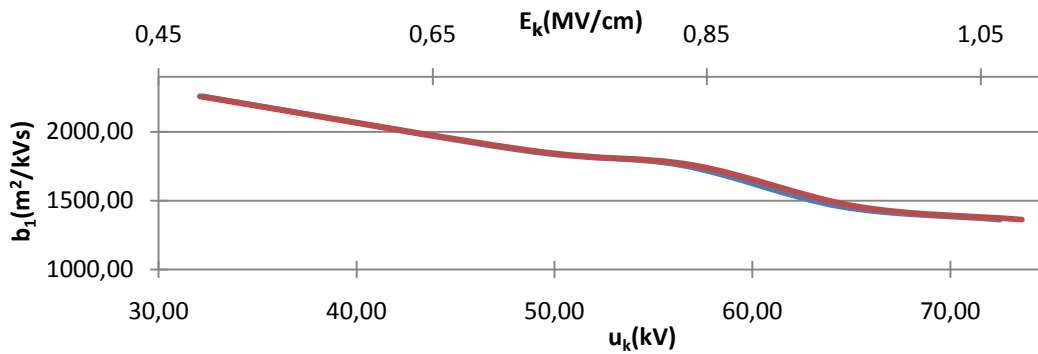


Διάγραμμα 3.3-4: Χαρακτηριστική καμπύλη $v_1=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.3-5: Χαρακτηριστική καμπύλη $v_2=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



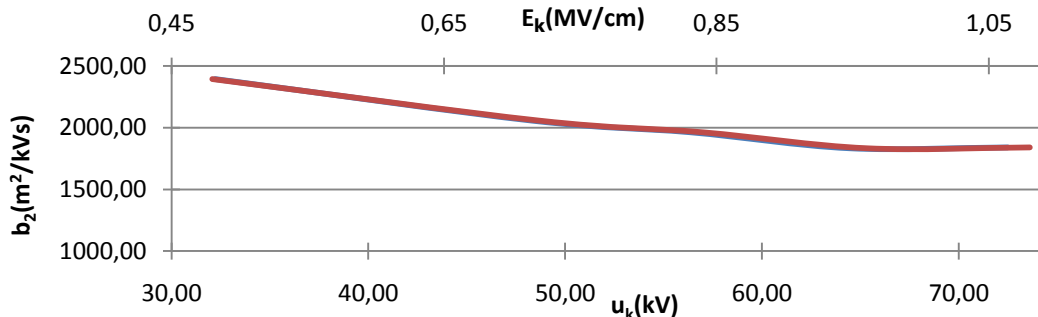
Διάγραμμα 3.3-6: Χαρακτηριστική καμπύλη $b_1=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της μείωσης της στιγμιαίας τιμής της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: $d=1mm$

b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.3-7: Χαρακτηριστική καμπύλη $b_2=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της μείωσης της στιγμιαίας τιμής της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: $d=1mm$

b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

u_k (kV)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	Δq (μC)	u_{ev} (kV)	u_{π} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	E_{π} (MV/cm)	σ_1 (m^2/Ω)	σ_2 (m^2/Ω)
32,22	0,15	1,80	1,65	31,11	27,64	0,46	0,41	3,385E-07	3,951E-06
48,33	1,68	10,66	8,98	45,48	37,46	0,68	0,56	3,136E-06	1,847E-05
56,38	2,12	12,75	10,63	51,25	41,16	0,76	0,61	3,728E-06	2,086E-05
64,44	3,13	19,87	16,74	62,76	41,96	0,93	0,63	4,564E-06	3,067E-05
72,50	3,75	42,08	38,33	70,45	41,69	1,05	0,62	5,111E-06	7,049E-05

Πινάκας 3.3-5: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , q_1 , q_2 , Δq , u_{ev} , u_{π} , E_{ev} , E_{π} , σ_1 , σ_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100 μs

Πάχος δοκιμίου: $d=1mm$

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta q=q_1-q_2$

u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

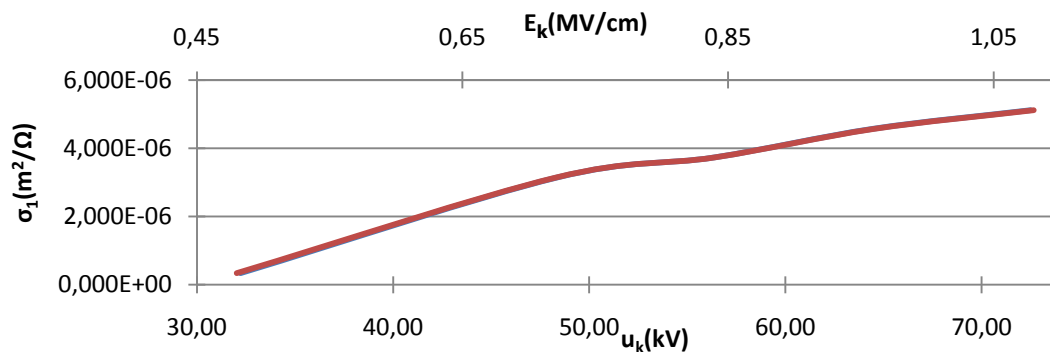
E_{ev} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

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

σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



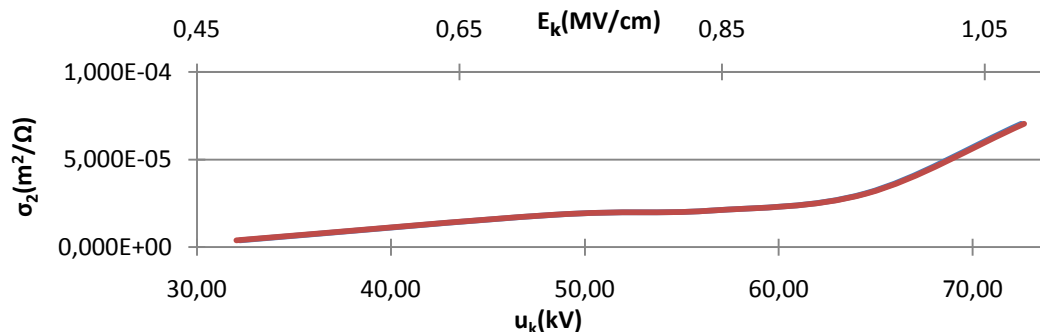
Διάγραμμα 3.3-8: Χαρακτηριστική καμπύλη $\sigma_1=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: d=1mm

σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.3-9: Χαρακτηριστική καμπύλη $\sigma_2=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

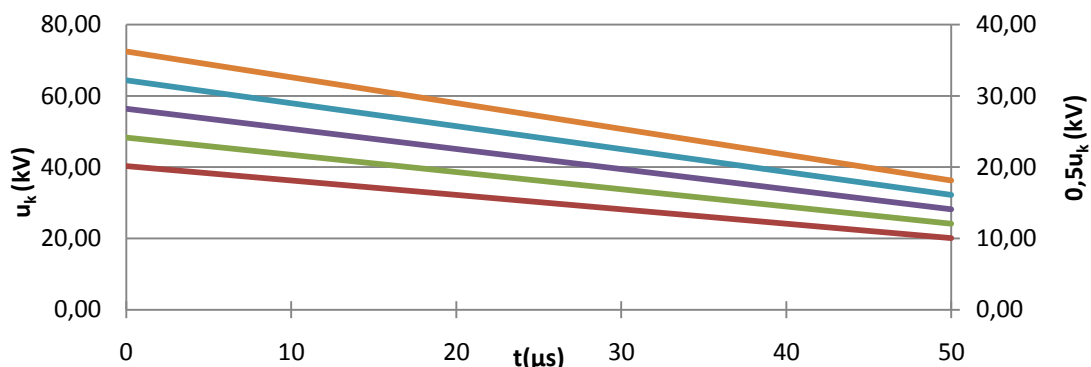
Πάχος δοκιμίου: d=1mm

σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

3.4 Τάση καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs (d=2mm)



Διάγραμμα 3.4-1: Χρονική μεταβολή της κρουστικής τάσης για τον υπολογισμό της στιγμιαίας τιμής της τάσης περαίωσης (u_{π}) των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

u_k (kV)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	C_m (nF)	$u_{εν}$ (kV)	u_{π} (kV)
32,22	-	-	-	-	-	31,11	-
40,27	4,52	13,50	0,97	2,13	210	38,12	34,83
48,33	3,23	20,38	1,26	4,75	210	44,31	38,48
56,38	2,60	25,50	1,45	6,80	1000	52,23	42,00
64,44	1,63	27,50	1,72	9,06	1000	60,44	46,72
72,50	1,28	33,75	2,12	12,87	1000	69,48	48,03

Πινάκας 3.4-1: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , t_1 , t_2 , q_1 , q_2 , C_m , $u_{εν}$, u_{π} κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 t_2 : χρόνος περάτωσης των μερικών εκκενώσεων
 q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 c_m : πυκνωτής μέτρησης
 $u_{εν}$: στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

u_k (kV)	E_k (MV/cm)	$u_{εν}$ (kV)	$E_{εν}$ (MV/cm)	$u_π$ (kV)	$E_π$ (MV/cm)
32,22	0,33	31,11	-	-	-
40,27	0,41	38,12	0,39	34,83	0,35
48,33	0,49	44,31	0,45	38,48	0,39
56,38	0,57	52,23	0,53	42,00	0,43
64,44	0,66	60,44	0,61	46,72	0,48
72,50	0,74	69,48	0,71	48,03	0,49

Πινάκας 3.4-2: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , E_k , $u_{εν}$, $E_{εν}$, $u_π$, $E_π$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: d=2mm

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

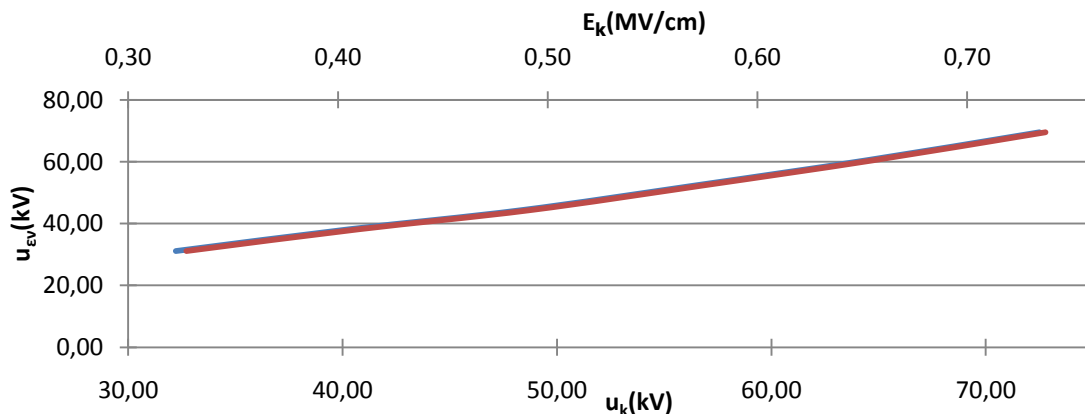
E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

$u_{εν}$: στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

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

$u_π$: στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$E_π$: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων



Διάγραμμα 3.4-2: Χαρακτηριστική καμπύλη $u_{εν}=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της τάσης έναρξης συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

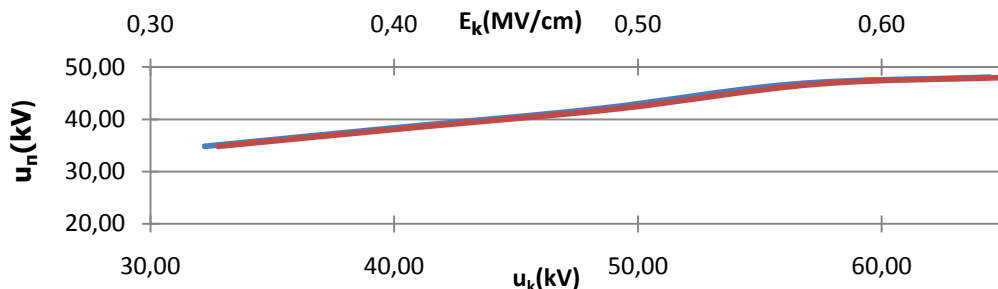
Πάχος δοκιμίου: d=2mm

$u_{εν}$: στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Διάγραμμα 3.4-3: Χαρακτηριστική καμπύλη $u_{\pi}=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της τάσης περαίωσης συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: d=2mm

u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

u_k (kV)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	C_m (nF)	u_1 (V)	u_2 (V)
32,22	-	-	-	-	-
40,27	0,97	2,13	210	4,62	10,14
48,33	1,26	4,75	210	6,00	22,62
56,38	1,45	6,80	1000	1,45	6,80
64,44	1,72	9,06	1000	1,72	9,06
72,50	2,12	12,87	1000	2,12	12,87

Πινάκας 3.4-3: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , q_1 , q_2 , C_m , u_1 , u_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: d=2mm

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

c_m : πυκνωτής μέτρησης

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης C_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

u_k (kV)	u_{ev} (kV)	u_π (kV)	E_{ev} (MV/cm)	E_π (MV/cm)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	b_1 (m ² /kVs)	b_2 (m ² /kVs)
32,22	31,11	-	-	-	1,05E+08	-	-	-
40,27	38,12	34,83	0,39	0,35	1,16E+08	1,11E+08	2986,09	3123,78
48,33	44,31	38,48	0,45	0,39	1,25E+08	1,16E+08	2769,67	2972,07
56,38	52,23	42,00	0,53	0,43	1,36E+08	1,22E+08	2551,05	2844,71
64,44	60,44	46,72	0,61	0,48	1,34E+08	1,20E+08	2182,74	2527,49
72,50	69,48	48,03	0,71	0,49	1,42E+08	1,22E+08	2012,47	2488,41

Πινάκας 3.4-4: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , u_{ev} , u_π , E_{ev} , E_π , v_1 , v_2 , b_1 , b_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: d=2mm

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_π : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

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

E_π : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

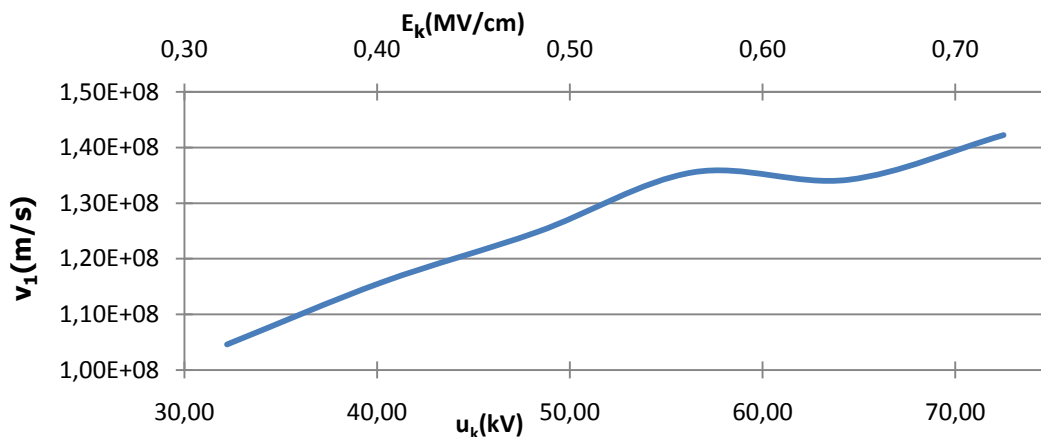
v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



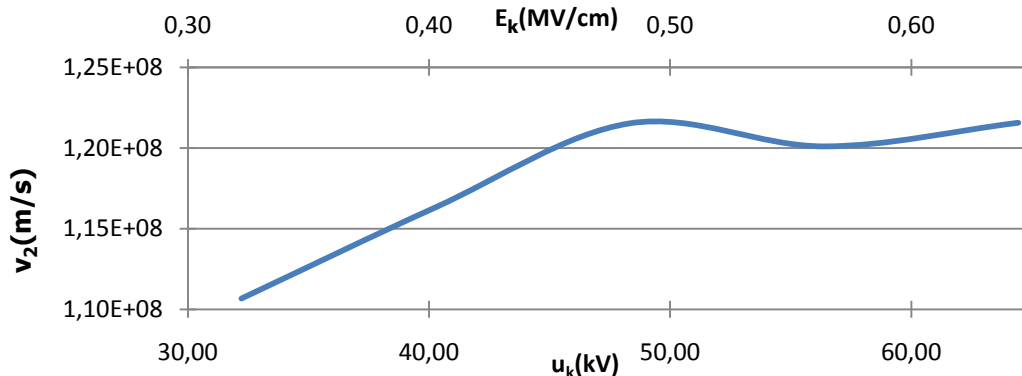
Διάγραμμα 3.4-4: Χαρακτηριστική καμπύλη $v_1=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: $d=2\text{mm}$

v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.4-5: Χαρακτηριστική καμπύλη $v_2=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

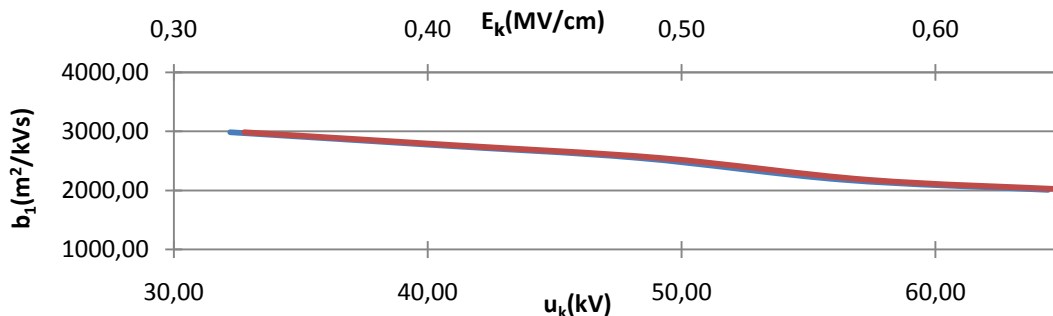
Πάχος δοκιμίου: $d=2\text{mm}$

v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



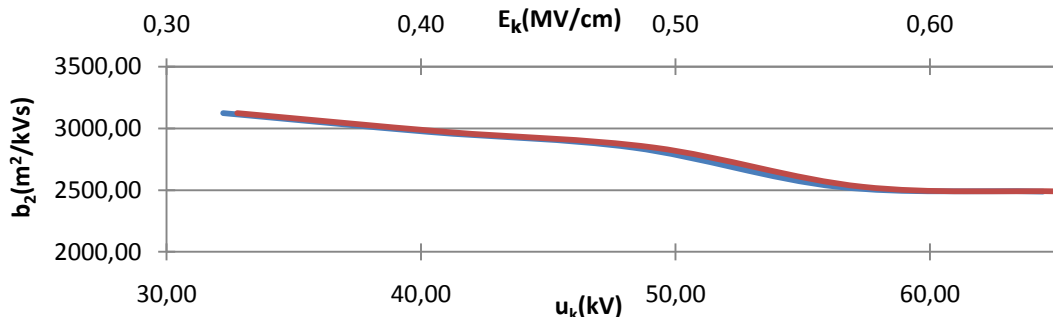
Διάγραμμα 3.4-6: Χαρακτηριστική καμπύλη $b_1=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της μείωσης της στιγμιαίας τιμής της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: $d=2\text{mm}$

b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.4-7: Χαρακτηριστική καμπύλη $b_2=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της μείωσης της στιγμιαίας τιμής της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: $d=2\text{mm}$

b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

u_k (kV)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	Δq (μC)	u_{ev} (kV)	u_{π} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	E_{π} (MV/cm)	σ_1 (m^2/Ω)	σ_2 (m^2/Ω)
32,22	-	-	-	31,11	-	-	-	-	-
40,27	0,97	2,13	1,16	38,12	34,83	0,39	0,35	2,897E-06	3,624E-06
48,33	1,26	4,75	3,49	44,31	38,48	0,45	0,39	3,490E-06	1,037E-05
56,38	1,45	6,80	5,35	52,23	42,00	0,53	0,43	3,699E-06	1,522E-05
64,44	1,72	9,06	7,34	60,44	46,72	0,61	0,48	3,754E-06	1,855E-05
72,50	2,12	12,87	10,75	69,48	48,03	0,71	0,49	4,266E-06	2,675E-05

Πινάκας 3.4-5: Στατιστική ανάλυση των μεγεθών: u_k , q_1 , q_2 , Δq , u_{ev} , u_{π} , E_{ev} , E_{π} , σ_1 , σ_2 κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100 μs

Πάχος δοκιμίου: $d=2mm$

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο c_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta q=q_1-q_2$

u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

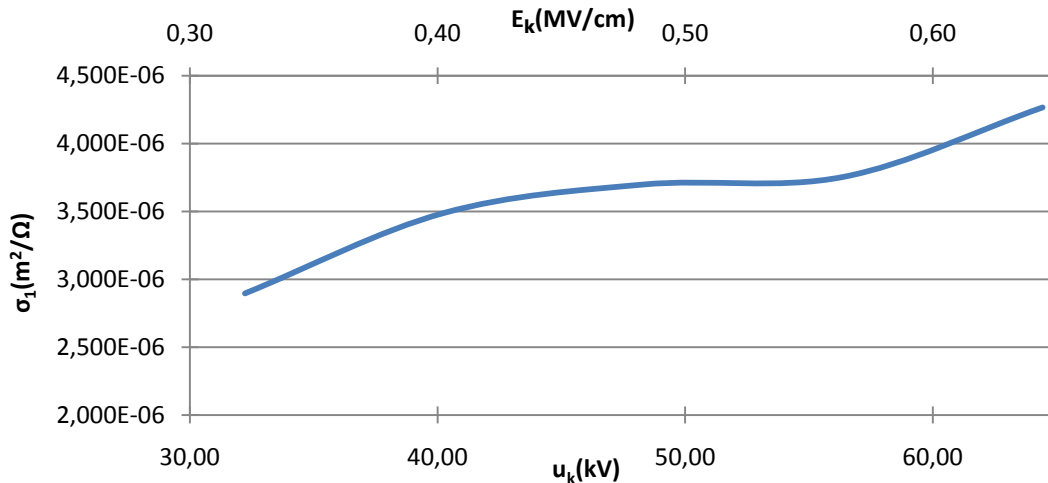
E_{ev} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

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

σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Διάγραμμα 3.4-8: Χαρακτηριστική καμπύλη $\sigma_1=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

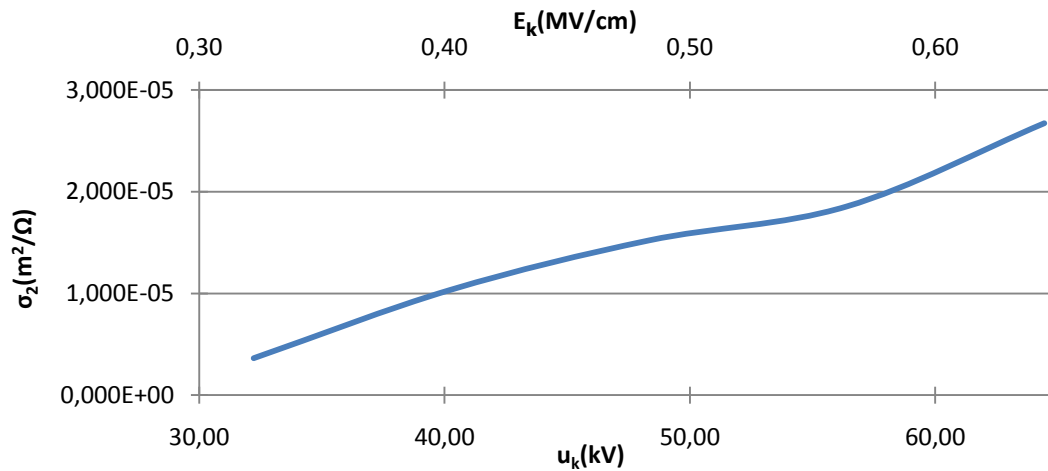
Πάχος δοκιμίου: $d=2\text{mm}$

σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Διάγραμμα 3.4-9: Χαρακτηριστική καμπύλη $\sigma_2=f(u_k, E_k)$ που παριστάνει τη μεταβολή της αύξησης της στιγμιαίας τιμής της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης (u_k) και της πεδιακής έντασης (E_k) κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: $d=2\text{mm}$

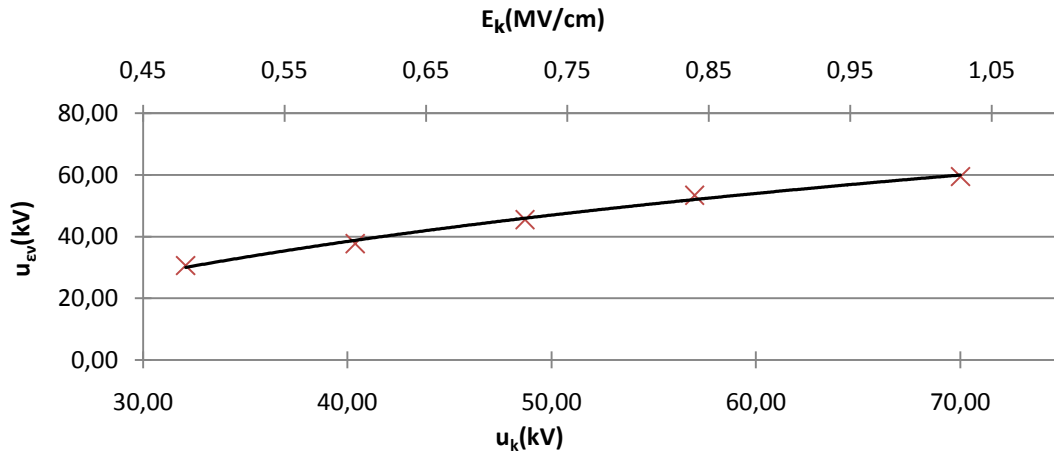
σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

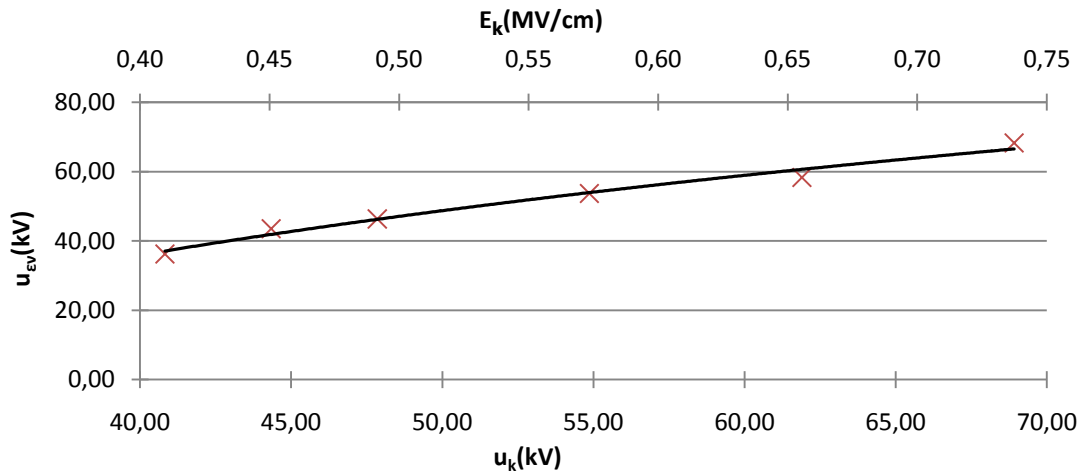
E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

3.5 Μαθηματική Προσέγγιση

3.5.1 u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων

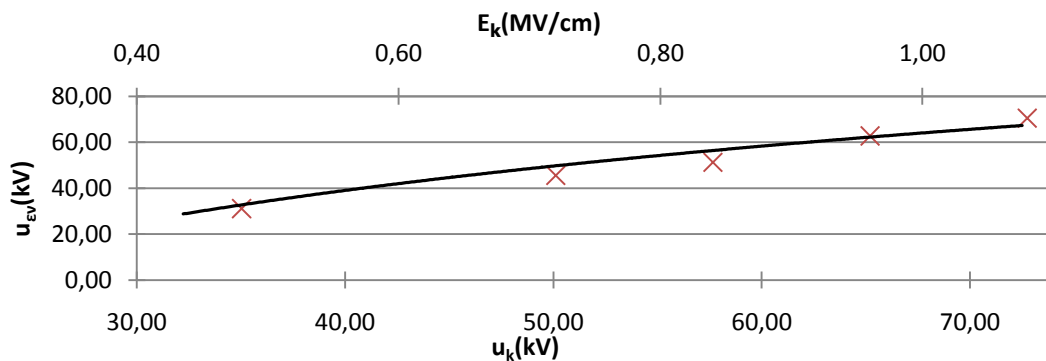


Διάγραμμα 3.5-1: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $u_{ev}=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

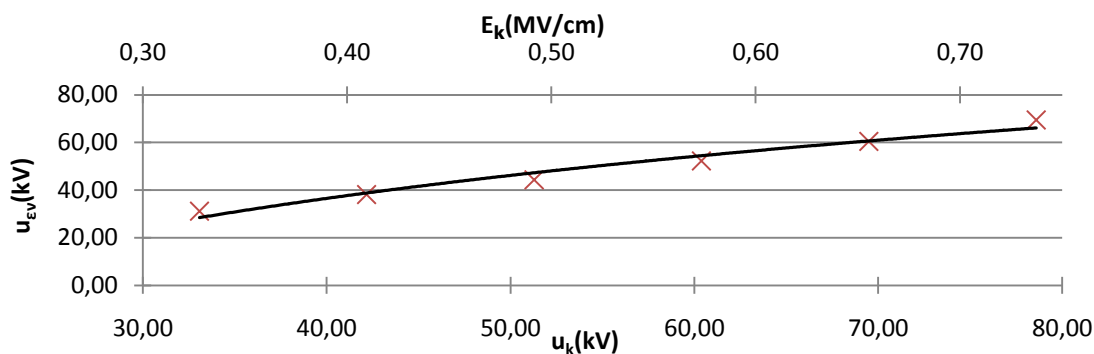


Διάγραμμα 3.5-2: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $u_{ev}=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Διάγραμμα 3.5-3: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $u_{ev}=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

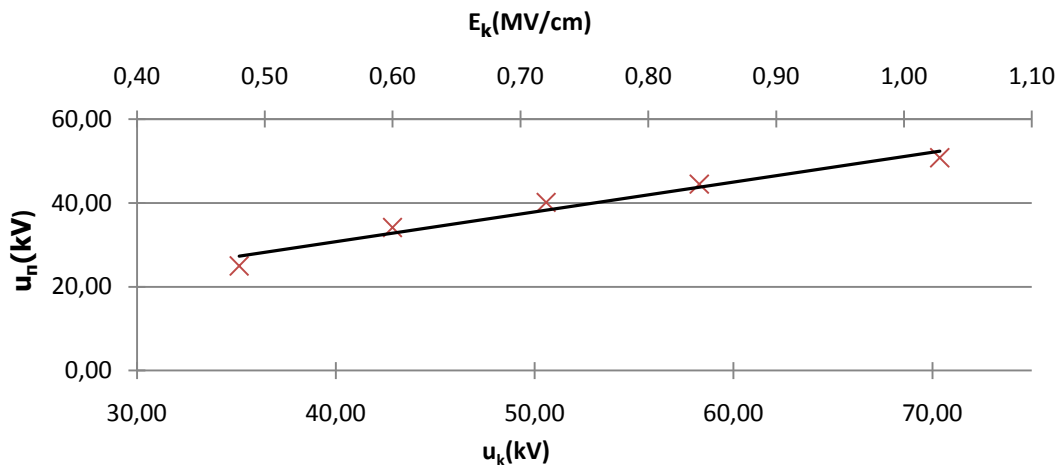


Διάγραμμα 3.5-4: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $u_{ev}=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 u_{ev} : στιγμιαία τιμή της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

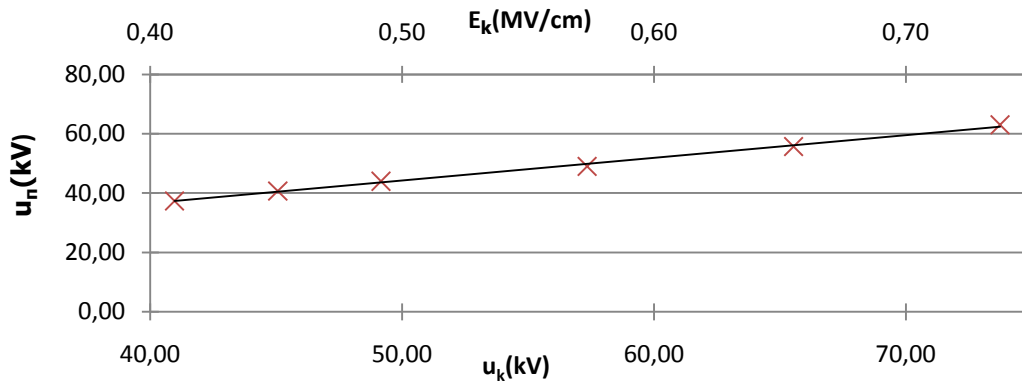
α/α	Χαρακτηριστική	Προσέγγιση
3.5-1	$u_{ev}=f(u_k, E_k)$	$u_{ev} = 39,34 \ln(u_k) + 58,879$
3.5-2		$u_{ev} = 50,066 \ln(u_k) + 81,784$
3.5-3		$u_{ev} = 47,536 \ln(u_k) - 136,34$
3.5-4		$u_{ev} = 46,47 \ln(u_k) + 80,277$

Πίνακας 3.5-1: Συγκεντρωτικός πίνακας της μαθηματικής προσέγγισης της χαρακτηριστικής καμπύλης $u_{ev}=f(u_k, E_k)$

3.5.2 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

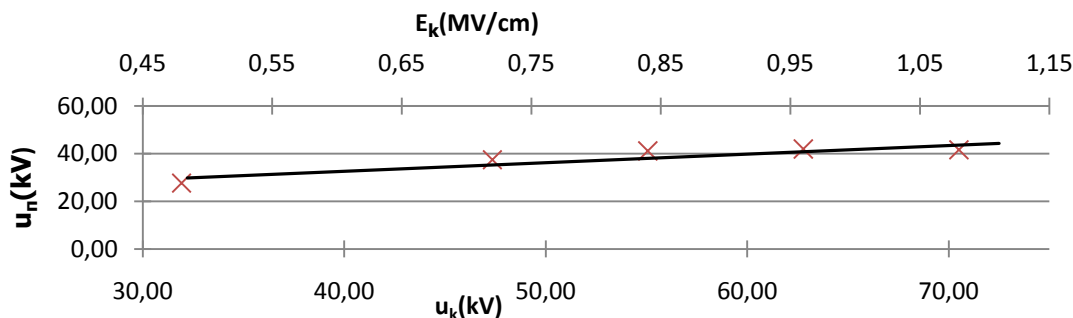


Διάγραμμα 3.5-5: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $u_{\pi}=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

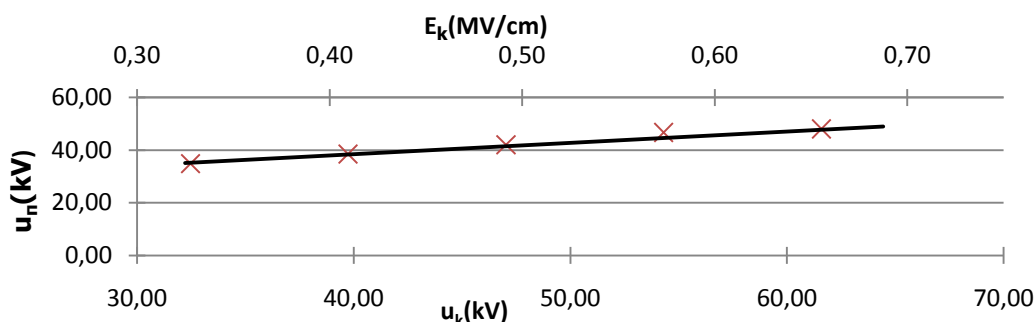


Διάγραμμα 3.5-6: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $u_{\pi}=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Διάγραμμα 3.5-7: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $u_{\pi}=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

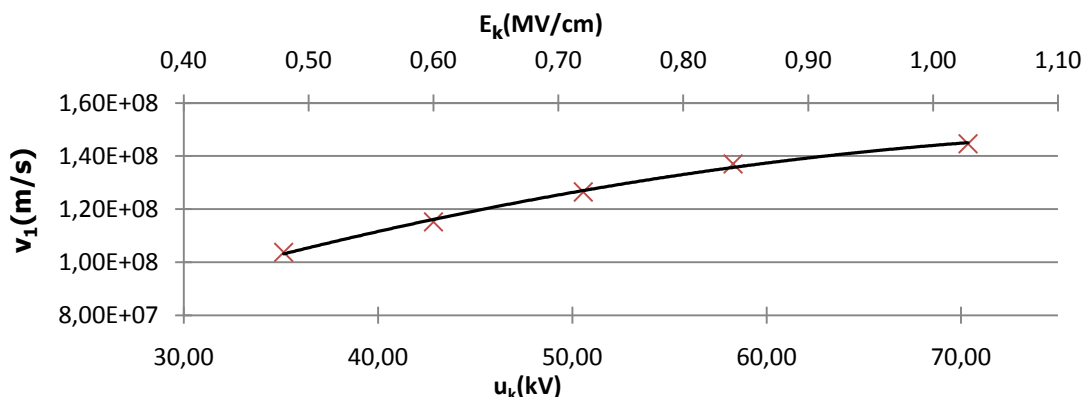


Διάγραμμα 3.5-8: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $u_{\pi}=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 u_{π} : στιγμιαία τιμή της τάσης περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

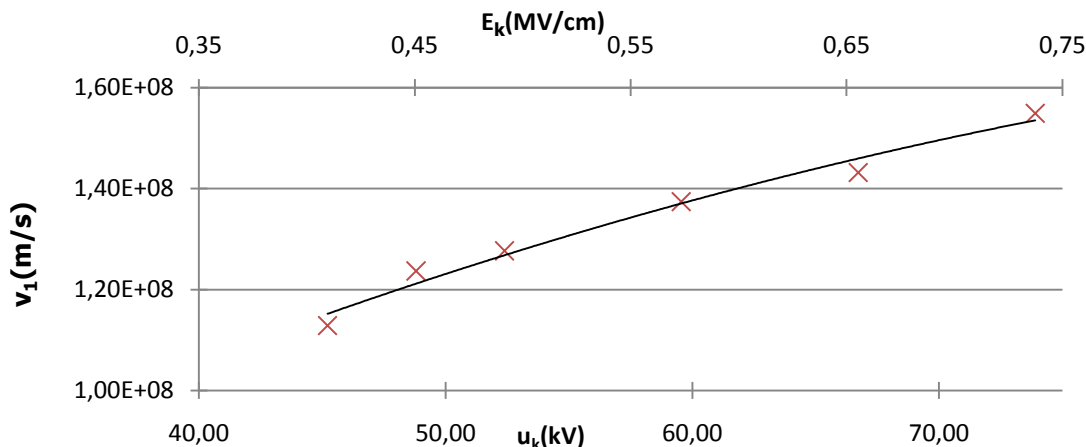
α/α	Χαρακτηριστική	Προσέγγιση
3.5-5	$u_{\pi}=f(u_k, E_k)$	$u_{\pi} = 0,681 u_k + 5,3667$
3.5-6		$u_{\pi} = 76,451 u_k + 6,00096$
3.5-7		$u_{\pi} = 0,3602 u_k + 18,251$
3.5-8		$u_{\pi} = 0,43 u_k + 21,234$

Πίνακας 3.5-2: Συγκεντρωτικός πίνακας της μαθηματικής προσέγγισης της χαρακτηριστικής καμπύλης $u_{\pi}=f(u_k, E_k)$

3.5.3 v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

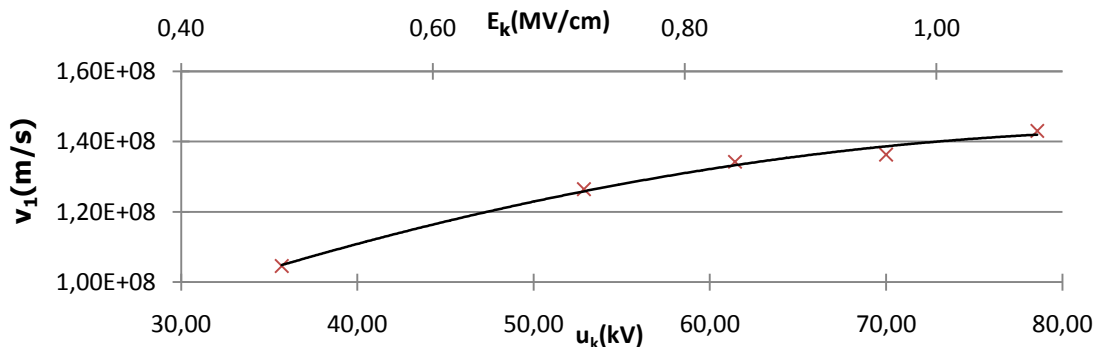


Διάγραμμα 3.5-9: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $v_1=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

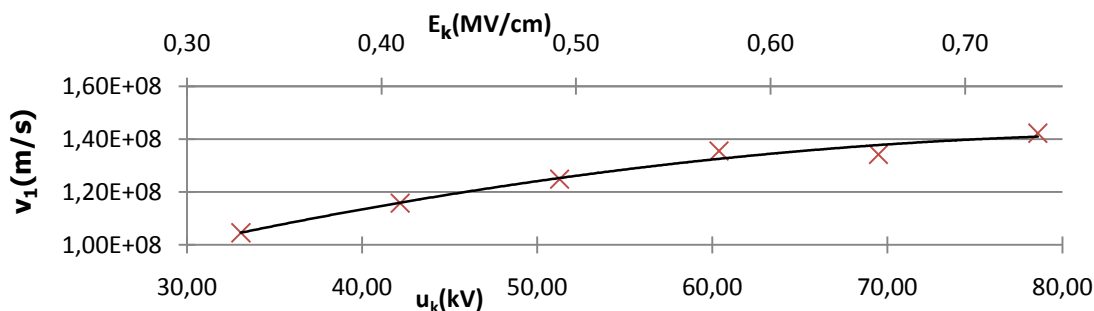


Διάγραμμα 3.5-10: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $v_1=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Διάγραμμα 3.5-11: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $v_1=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

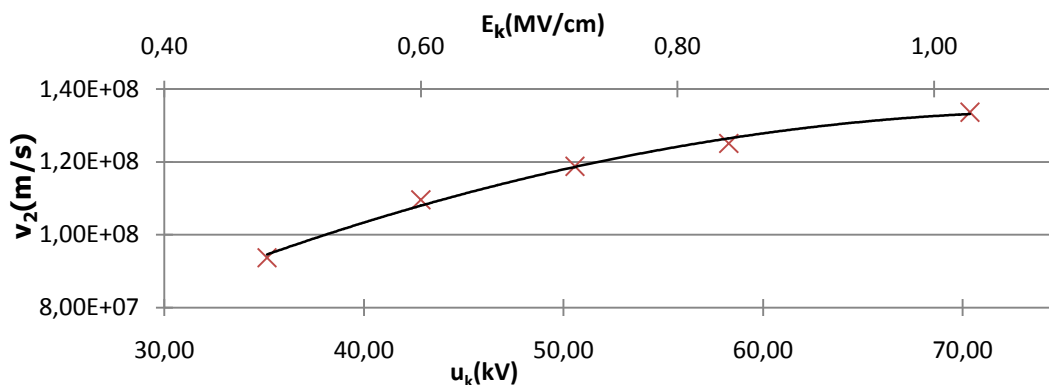


Διάγραμμα 3.5-12: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $v_1=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 v_1 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

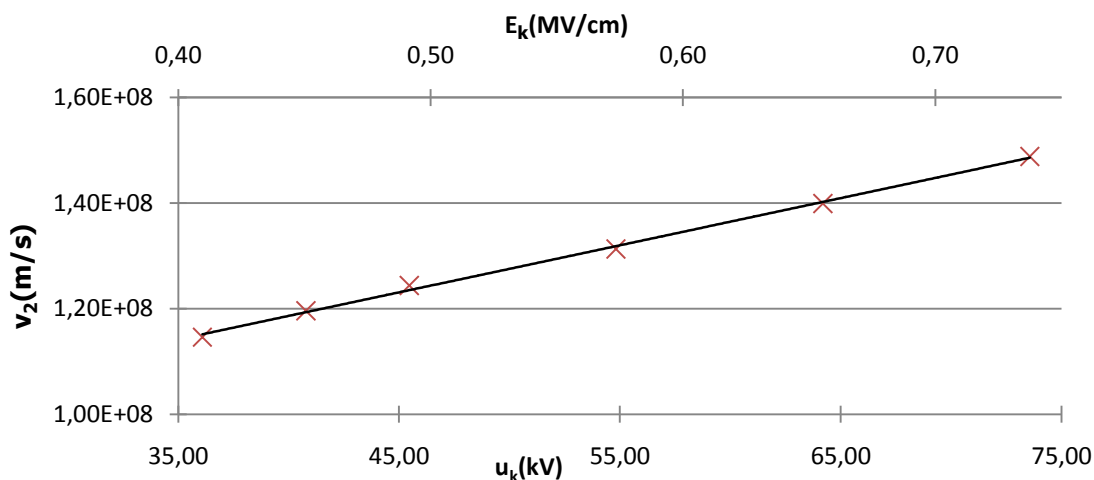
α/α	Χαρακτηριστική	Προσέγγιση
3.5-9	$v_1=f(u_k, E_k)$	$v_1 = -7E+07 u_k^2 + 2E+08 u_k + 3E+07$
3.5-10		$v_1 = -1E+08 u_k^2 + 2E+08 u_k + 4E+07$
3.5-11		$v_1 = -7E+07 u_k^2 + 2E+08 u_k + 4E+07$
3.5-12		$v_1 = -2E+08 u_k^2 + 3E+08 u_k + 4E+07$

Πίνακας 3.5-3: Συγκεντρωτικός πίνακας της μαθηματικής προσέγγισης της χαρακτηριστικής καμπύλης $v_1=f(u_k, E_k)$

3.5.4 v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων

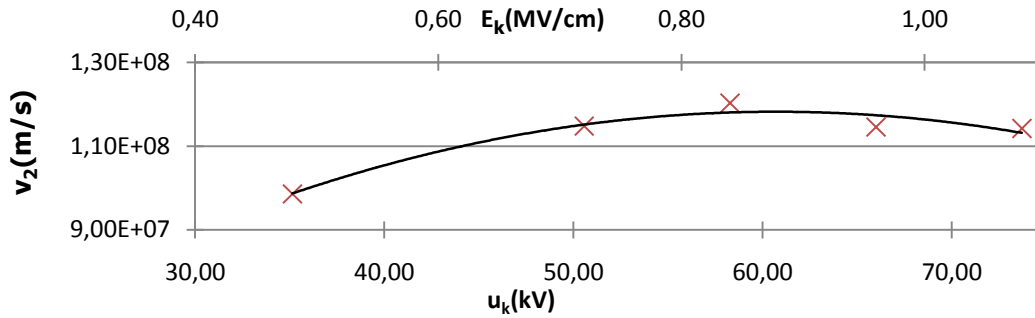


Διάγραμμα 3.5-13: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $v_2=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

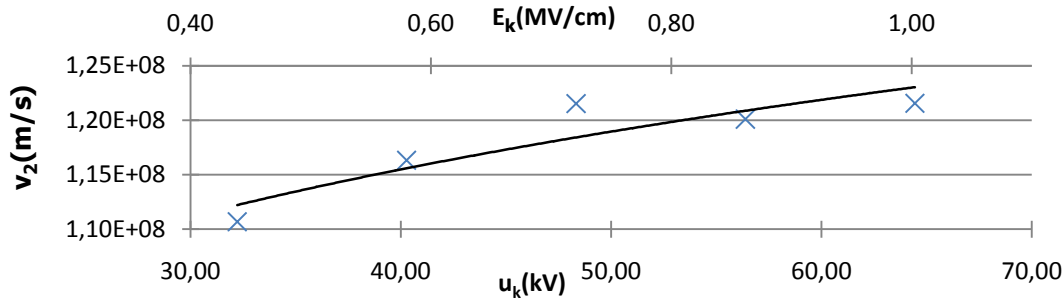


Διάγραμμα 3.5-14: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $v_2=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Διάγραμμα 3.5-15: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $v_2=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

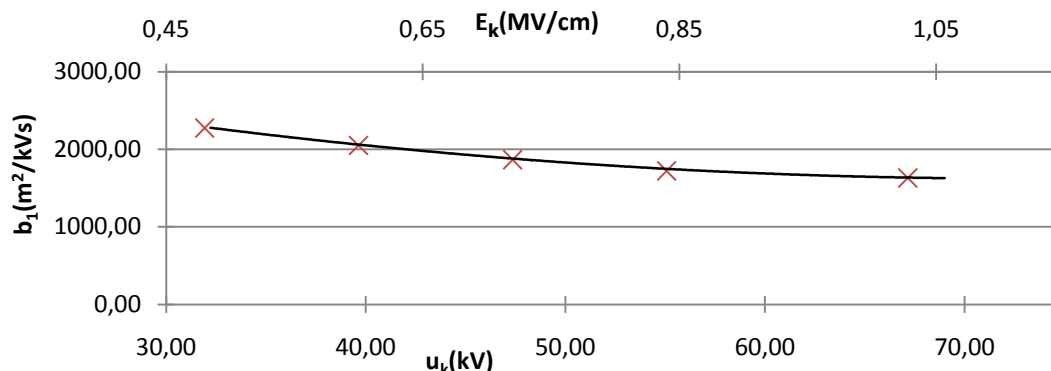


Διάγραμμα 3.5-16: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $v_2=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 v_2 : στιγμιαία τιμή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

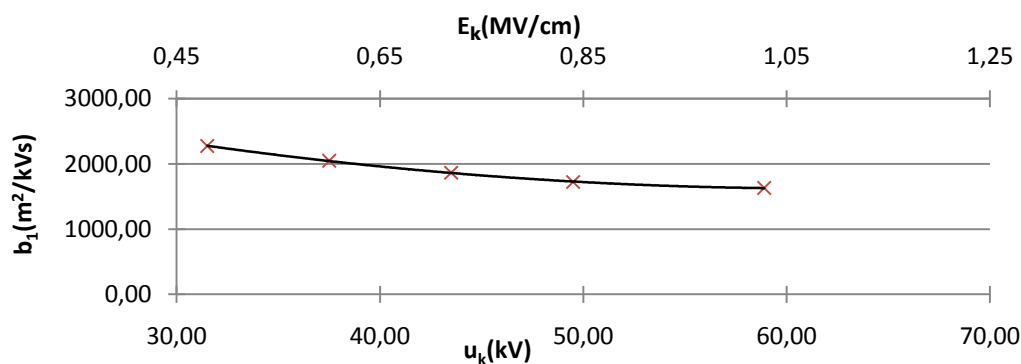
α/α	Χαρακτηριστική	Προσέγγιση
3.5-13	$v_2=f(u_k, E_k)$	$v_2 = -1E+08 u_k^2 + 2E+08 u_k + 1E+07$
3.5-14		$v_2 = 645809 u_k^2 + 1E+08 u_k + 7E+07$
3.5-15		$v_2 = -1E+08 u_k^2 + 2E+08 u_k + 2E+07$
3.5-16		$v_2 = -16523 u_k^2 + 2E+06 u_k + 7E+07$

Πίνακας 3.5-4: Συγκεντρωτικός πίνακας της μαθηματικής προσέγγισης της χαρακτηριστικής καμπύλης $v_2=f(u_k, E_k)$

3.5.5 b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

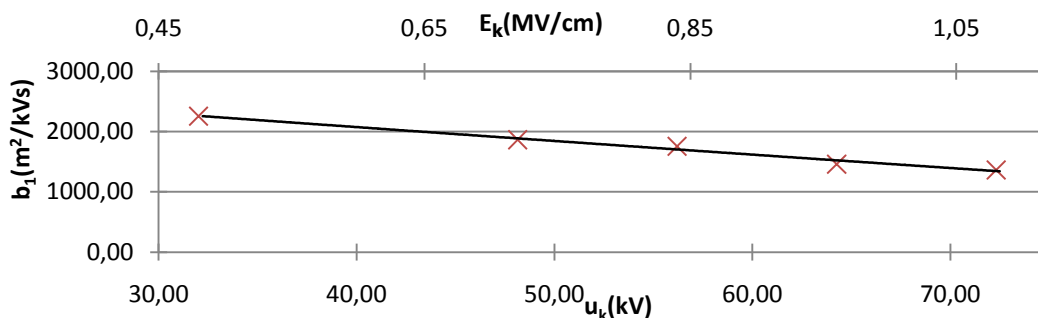


Διάγραμμα 3.5-17: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $b_1=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

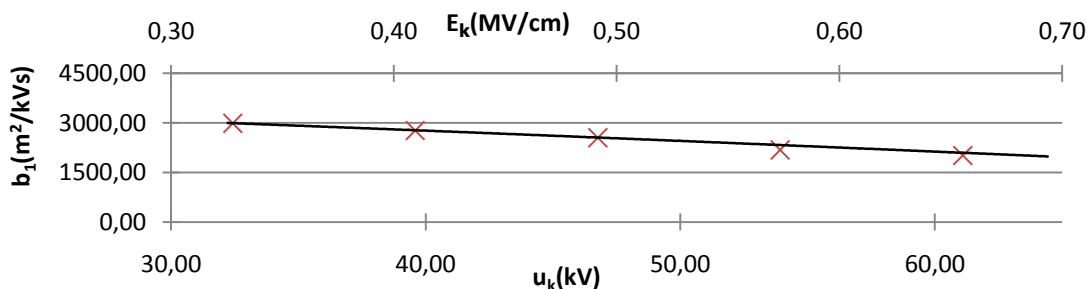


Διάγραμμα 3.5-18: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $b_1=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Διάγραμμα 3.5-19: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $b_1=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

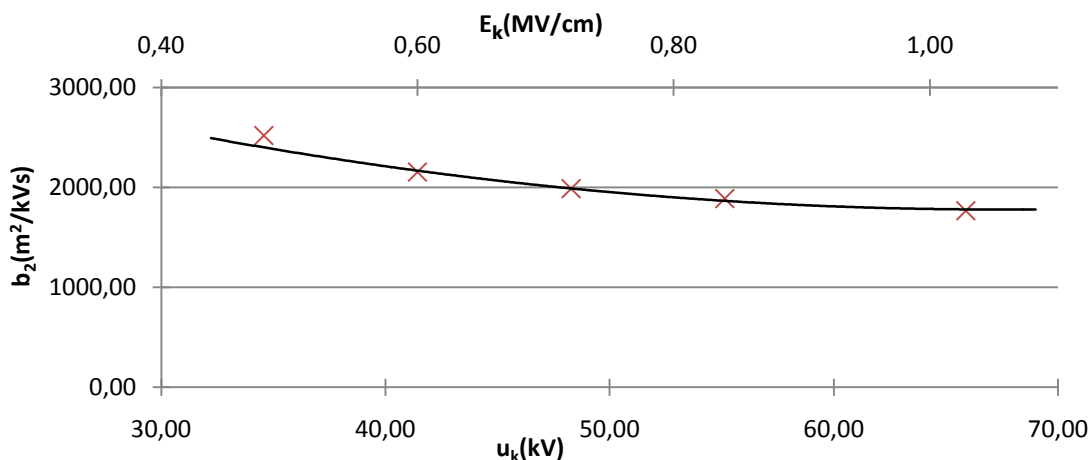


Διάγραμμα 3.5-20: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $b_1=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 b_1 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

a/a	Χαρακτηριστική	Προσέγγιση
3.5-17	$b_1=f(u_k, E_k)$	$b_1 = 0,3979 u_k^2 - 57,932 u_k + 3732,3$
3.5-18		$b_1 = 1792,7 u_k^2 - 3888,6 u_k + 3732,3$
3.5-19		$b_1 = 0,02 u_k^2 - 24,835 u_k + 3036,9$
3.5-20		$b_1 = -0,0627 u_k^2 - 25,398 u_k + 3882,5$

Πίνακας 3.5-5: Συγκεντρωτικός πίνακας της μαθηματικής προσέγγισης της χαρακτηριστικής καμπύλης $b_1=f(u_k, E_k)$

3.5.6 b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων



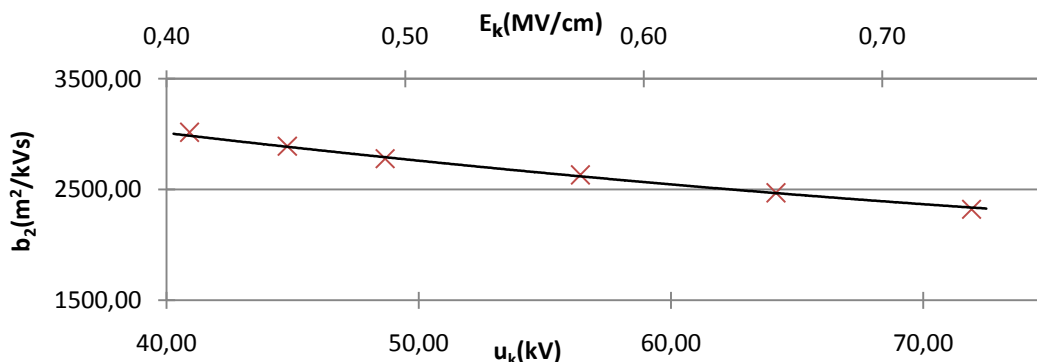
Διάγραμμα 3.5-21: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $b_2=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: $d=1\text{mm}$

b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.5-22: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $b_2=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs

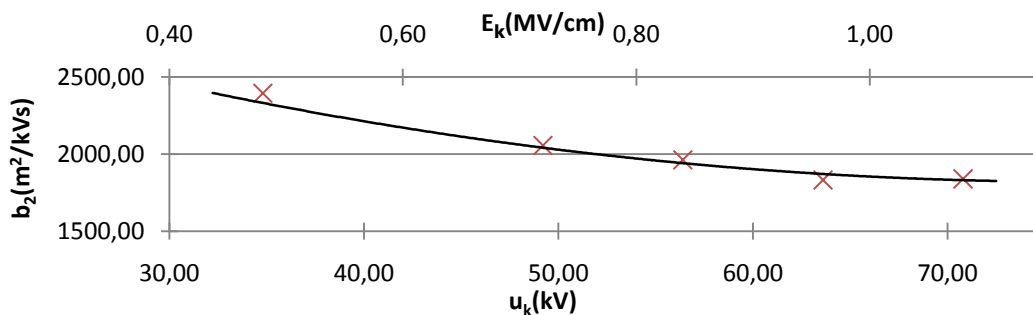
Πάχος δοκιμίου: $d=2\text{mm}$

b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



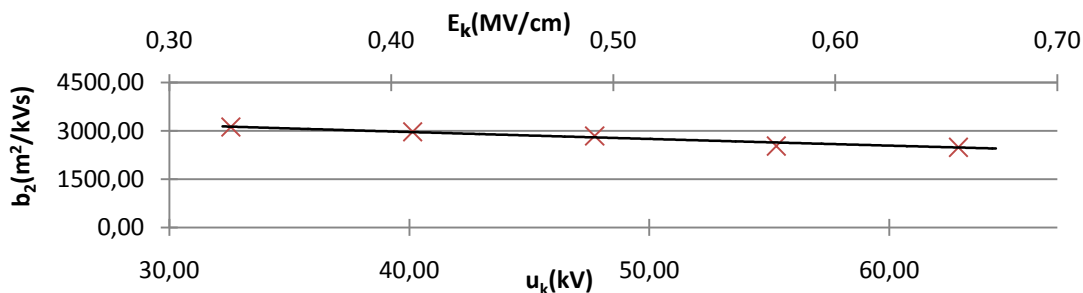
Διάγραμμα 3.5-23: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $b_2=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: $d=1\text{mm}$

b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.5-24: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $b_2=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: $d=2\text{mm}$

b_2 : στιγμιαία τιμή της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων

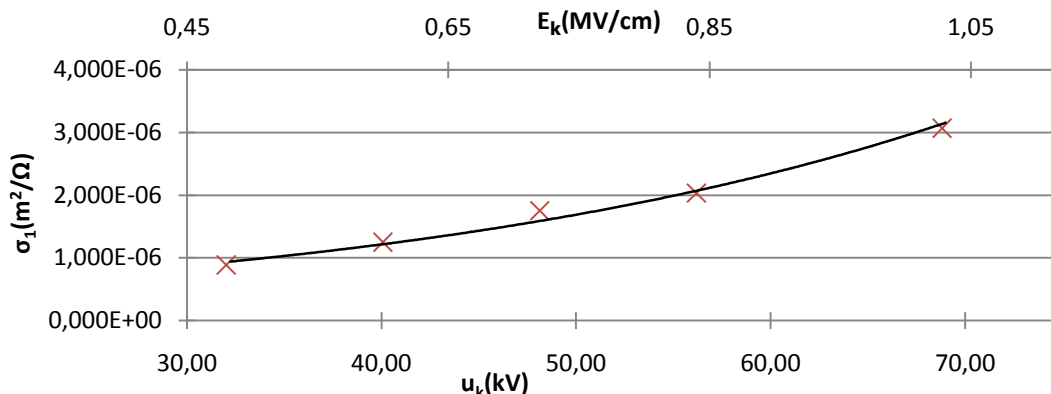
u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

a/a	Χαρακτηριστική	Προσέγγιση
3.5-21	$b_2=f(u_k, E_k)$	$b_2 = 0,5779 u_k^2 - 77,866 u_k + 4402$
3.5-22		$b_2 = 0,1764 u_k^2 - 40,797 u_k + 4359,8$
3.5-23		$b_2 = 0,2896 u_k^2 - 44,503 u_k + 3529,9$
3.5-24		$b_2 = 0,0393 u_k^2 - 25,096 u_k + 3907,2$

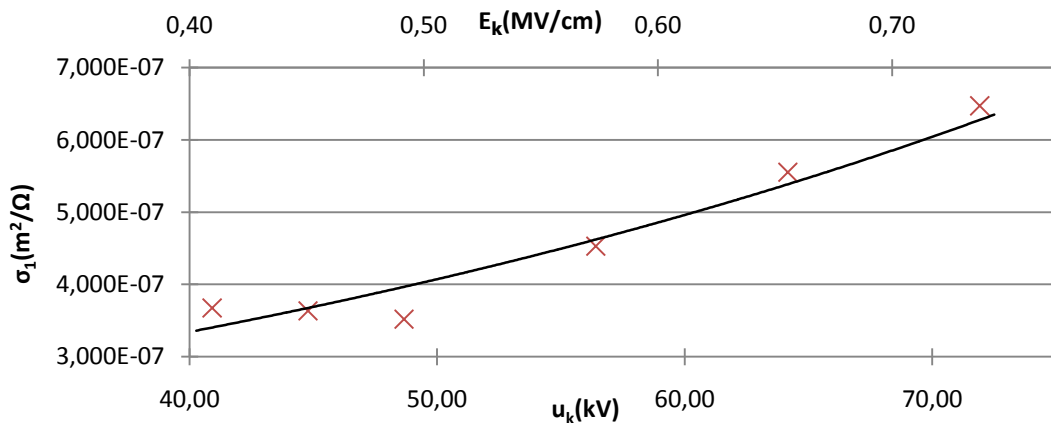
Πίνακας 3.5-6: Συγκεντρωτικός πίνακας της μαθηματικής προσέγγισης της χαρακτηριστικής καμπύλης $b_2=f(u_k, E_k)$

3.5.7 σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Διάγραμμα 3.5-25: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $\sigma_1=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
Πάχος δοκιμίου: d=1mm

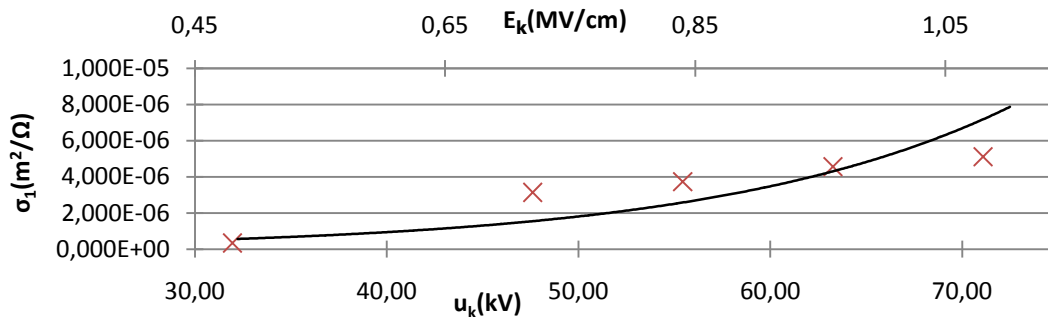
σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.5-26: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $\sigma_1=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100μs
Πάχος δοκιμίου: d=2mm

σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



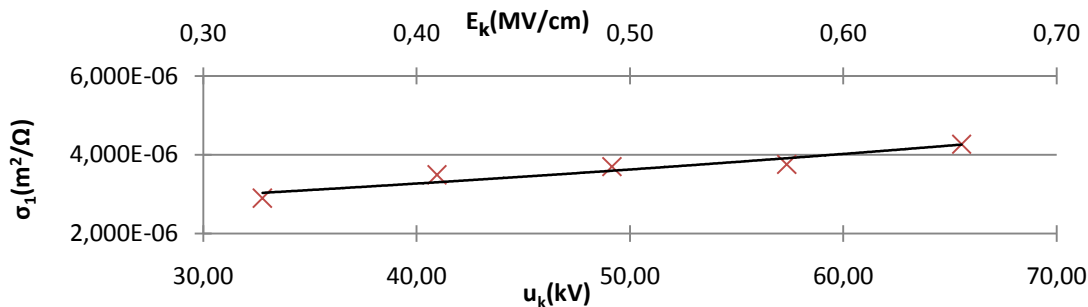
Διάγραμμα 3.5-27: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $\sigma_1=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: $d=1mm$

σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.5-28: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $\sigma_1=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs

Πάχος δοκιμίου: $d=2mm$

σ_1 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

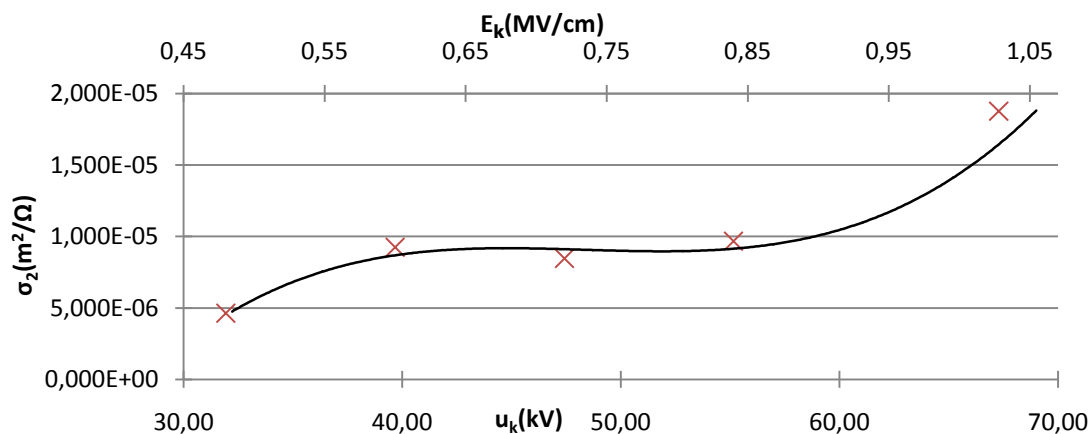
u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

a/a	Χαρακτηριστική	Προσέγγιση
3.5-25	$\sigma_1=f(u_k, E_k)$	$\sigma_1 = 3E-07e^{0,0329 u_k}$
3.5-26		$\sigma_1 = 2E-07e^{0,0197 u_k}$
3.5-27		$\sigma_1 = 7E-08e^{0,0654 u_k}$
3.5-28		$\sigma_1 = 2E-06e^{1,0346 u_k}$

Πίνακας 3.5-7: Συγκεντρωτικός πίνακας της μαθηματικής προσέγγισης της χαρακτηριστικής καμπύλης $\sigma_1=f(u_k, E_k)$

3.5.8 σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων



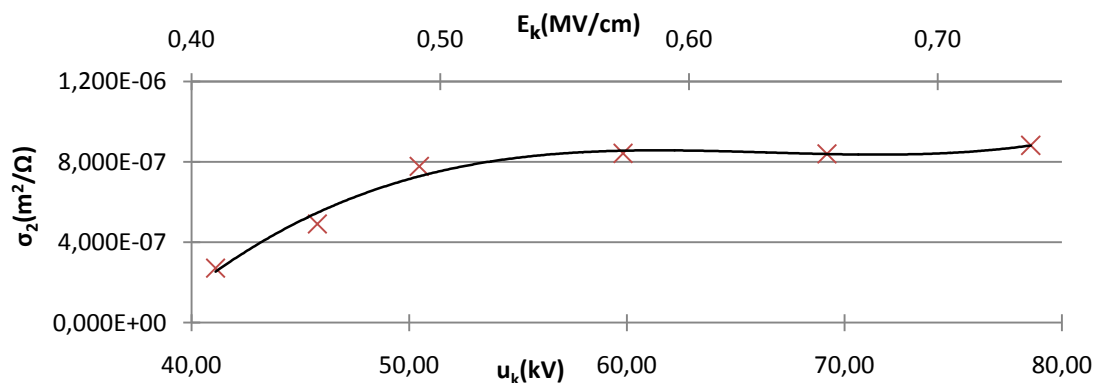
Διάγραμμα 3.5-29: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $\sigma_2=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100 μ s

Πάχος δοκιμίου: d=1mm

σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων

u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.5-30: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $\sigma_2=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής +1,2/100 μ s

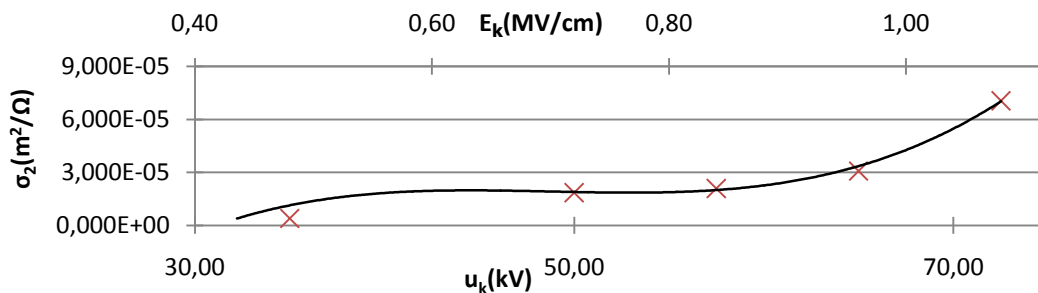
Πάχος δοκιμίου: d=2mm

σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων

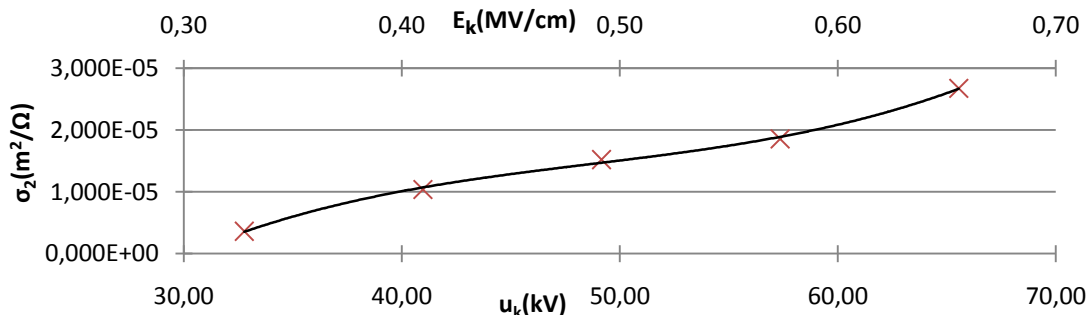
u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

ΠΙΝΑΚΕΣ-ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Διάγραμμα 3.5-31: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $\sigma_2=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=1mm
 σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k



Διάγραμμα 3.5-32: Μαθηματική προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $\sigma_2=f(u_k, E_k)$ κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «Pertimax-λάδι μετασχηματισμού» υπό διάταξη ηλεκτροδίων (ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm-πλάκα) και τάσεις καταπόνησης της μορφής -1,2/100μs
 Πάχος δοκιμίου: d=2mm
 σ_2 : στιγμιαία τιμή της ειδικής αγωγιμότητας στο τέλος της διαδρομής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

a/a	Χαρακτηριστική	Προσέγγιση
3.5-29	$\sigma_2=f(u_k, E_k)$	$\sigma_2 = 1E-09 u_k^3 - 2E-07 u_k^2 + 8E-06 u_k - 0,0001$
3.5-30		$\sigma_2 = 6E-05 u_k^3 - 0,0001 u_k^2 + 7E-05 u_k - 1E-05$
3.5-31		$\sigma_2 = 4E-09 u_k^3 - 6E-07 u_k^2 + 3E-05 u_k - 0,0005$
3.5-32		$\sigma_2 = 0,001 u_k^3 - 0,0015 u_k^2 + 0,0008 u_k - 0,0001$

Πίνακας 3.5-8: Συγκεντρωτικός πίνακας της μαθηματικής προσέγγισης της χαρακτηριστικής καμπύλης $\sigma_2=f(u_k, E_k)$

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για τη θεωρητική ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων θα πρέπει κανείς να κάνει σκέψεις με μεγέθη που είναι ανάλογα του παραγόμενου ηλεκτρικού φορτίου λόγω των παραγόμενων μερικών εκκενώσεων, το οποίο ως απόρροια του ιονισμού με κρούσεις αυξάνει εκθετικά με την εφαρμοζόμενη κρουστική τάση u_k ή το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο E_k . Ένα τέτοιο μέγεθος στην υπό εξέταση περίπτωση είναι η μεταβολή της ειδικής αγωγιμότητας λόγω των μερικών εκκενώσεων υπό την επίδραση της κρουστικής τάσης ή του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. (βλ. διαγράμματα από 3.5-25 ως 3.5-32).

Πράγματι, όπως προκύπτει από τη σχέση 2.2-13 το σ_2 είναι ανάλογο του q_2 με μια μείωση ανά σημείο μέτρησης λόγω της μειούμενης κινητικότητας. Δηλαδή είναι περίπου μια σχέση της μορφής:

$$\sigma_2 = q_2 \cdot A \quad 4-1$$

όπου A συντελεστής που μειώνεται με την αύξηση της τιμής του πεδίου

Βεβαίως, στις χαρακτηριστικές $\sigma_2 = f(u_k, E_k)$ παρουσιάζει με μια ή δύο περιοχές απόκλισης από την εκθετική μορφή (σαν να γονατίζει) κάτι που μπορεί να αποδοθεί στην εναλλαγή του πρωταρχικού ρόλου των δύο από τους τέσσερις βασικούς παράγοντες γήρανσης και διάσπασης που συνυπάρχουν στην υπό εξέταση περίπτωση, οι οποίοι είναι:

1. οι μερικές εκκενώσεις
2. οι δυνάμεις coulomb

Έτσι όταν υπαναχωρήσουν οι μερικές εκκενώσεις αναλαμβάνουν οι δυνάμεις coulomb και περιορίζεται δραστικά η τιμή του σ_2 γιατί η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται στην περίπτωση αυτή από τις δυνάμεις coulomb οι οποίες καταπονούν μηχανικά το δοκίμιο (το σκάβουν). Γι' αυτό όταν ήδη οι δυνάμεις coulomb έχουν μειώσει υπολογίσιμα το πάχος του υλικού επανέρχονται οι μερικές εκκενώσεις με μεγαλύτερη δράση (αύξηση φορτίου) γι' αυτό συμβαίνει και πάλι εκθετική αύξηση του φορτίου και επομένως και της ειδικής αγωγιμότητας.

Αντίστοιχα συμπεράσματα απορρέουν και από τις χαρακτηριστικές $\sigma_1 = f(u_k, E_k)$ (βλ. διαγράμματα 3.5-25 ως 3.5-28). Σε αυτή όμως την περίπτωση, εξαιτίας της μικρής διακύμανσης και του σχετικά μικρότερου εύρους των τιμών της κινητικότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συγκριτικά με αυτή κατά την περαίωση αυτών, οι χαρακτηριστικές προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό την εκθετική μορφή.

Για τις άλλες χαρακτηριστικές που έχουν σχεδιαστεί στα πλαίσια της εργασίας δεν υπάρχουν ανάλογα δεδομένα στις συγκεκριμένης βιβλιογραφίας ώστε να προσεγγιστούν θεωρητικά. Για το λόγο αυτό η προσέγγιση έγινε μόνο μαθηματικά μέσω του προγράμματος του excel. Έτσι όταν μετά από μετρήσεις και άλλων υλικών και με άλλες μορφές τάσεων προκύψουν παρόμοιες χαρακτηριστικές τότε θα είναι ίσως εφικτή και η θεωρητική τους προσέγγιση.

Είναι πχ λογικό οι χαρακτηριστικές της κινητικότητας (βλ. διαγράμματα 3.5-17 ως 3.5-24) τόσο κατά την έναρξη όσο και κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων να μειώνεται, εφόσον αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη της εφαρμοζόμενης κρουστικής

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

τάσης u_k ή του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου E_k σύμφωνα και με τη σχέση 2.2-12.

Όσον αφορά τις χαρακτηριστικές της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (βλ. διαγράμματα 3.5-9 ως 3.5-16) ενώ θεωρητικά με την αύξηση της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης u_k ή του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου E_k , η ταχύτητα έπρεπε να αυξάνει ανάλογα της τετραγωνικής ρίζας των μεγεθών αυτών σύμφωνα με τη σχέση 2.2-7 παρατηρείται ότι κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει με τις πειραματικές μετρήσεις. Ο λόγος αυτής της αναντιστοιχίας είναι η ενέργεια που καταναλώνεται στη μηχανική καταπόνηση του δοκιμίου κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων.

5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μπούρκας Π.Δ., Καραγιαννόπουλος Κ.Γ., Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και υλικά, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003
- [2] Μπούρκας Π.Δ., Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1998
- [3] Σαμοΐλης Β. Γ.: Μονωτικά λάδια (δοκιμές, μετρήσεις, καθαρισμός), Αθήνα 1986.
- [4] Δέρβος Κ.Θ., Μπούρκας Π.Δ.: Εισαγωγή στα Ηλεκτρομονωτικά Υλικά, Εκδόσεις Σπουδαστικής Μέριμνας, Ε.Μ.Πολυτεχνείο, Αθήνα 1991
- [5] Σταθόπουλος Ι.Α., Μπούρκας Π.Δ., Τοπαλής Φ.Β.: Μετρήσεις και Δοκιμες Υψηλων τάσεων, Ε.Μ.Π. 1991
- [6] Σταθόπουλος Ι.Α. : Υψηλές Τάσεις, Αθήνα 1988
- [7] Bourkas P.D.: Radiation emission phenomena in a metal-dielectric-metal model under high electric fields, International Journal of power and Energy systems, Vol. 15, No. 2, p.p. 37-41, 1995.
- [8] Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A., Stathopoulos I.A.: Enhanced partial discharges due to temperature increase in combined system of a solid-liquid dielectric, IEEE trans. Elec. Insul. Vol.25, No.3, 1990, p.p. 469-474
- [9] Moronis A. X., Bourkas P. D.: Impact ionization effects at interfaces between solid dielectrics and insulation oil or air, during high voltage pulse applications, International Journal Interface Science, Vol. 2, p.p. 281-287, 1994.