



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

**Σύνθετη αντίσταση και ενέργεια δοκιμίων Pertinax εντός
ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές
τάσεις ζεύξης και διάταξη ηλεκτροδίων «ακίδα-πλάκα».**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλεξάνδρα Ε. Λαλαίου

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010



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

**Σύνθετη αντίσταση και ενέργεια δοκιμίων Pertinax εντός
ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές
τάσεις ζεύξης και διάταξη ηλεκτροδίων «ακίδα-πλάκα».**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλεξάνδρα Ε. Λαλαίου

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ν.Ι. Θεοδώρου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Μ.Γ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

.....
Αλεξάνδρα Ε. Λαλαίου

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

Copyright© Αλεξάνδρα Ε. Λαλαίου, 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου 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.

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της μεταβολής της σύνθετης αντίστασης και της ενέργειας δοκιμίων Pertinax εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις ζεύξης και διάταξη ηλεκτροδίων « ακίδα-πλάκα ». Αρχικά, γίνεται αναφορά σε βασικά θεωρητικά θέματα για την καλύτερη κατανόηση των φαινομένων που αναπτύσσονται προ και κατά τη διάρκεια διάτρησης στερεών μονωτικών υλικών. Μελετήθηκε τόσο η μακροσκοπική όσο και η κβαντομηχανική θεωρία για την ερμηνεία των φαινομένων. Στη συνέχεια καταγράφονται όλες οι πειραματικές μετρήσεις που πάρθηκαν καθώς και οι προκύπτουσες πειραματικές καμπύλες. Έγιναν τέσσερα πειράματα με πάχη δοκιμίων 1mm και 2mm υπό κρουστικές τάσεις και των δύο πολικότητων ($\pm 250/2500\mu\text{s}$). Επιπρόσθετα, βρέθηκαν οι θεωρητικές προσεγγίσεις των καμπυλών και οι αντίστοιχοι μαθηματικοί τύποι για τα μεγέθη της σύνθετης αντίστασης, της ενέργειας και της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων καθώς και η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων. Στο τέλος της εργασίας παρατίθενται τα συμπεράσματα και η χρησιμότητα της παρούσας εργασίας στην έρευνα και τις πρακτικές εφαρμογές. Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής μας δείχνουν τις μεταβολές που υφίσταται το υλικό κατά τη διάρκεια των φαινομένων λόγω των μερικών εκκενώσεων και των δυνάμεων Coulomb που αναπτύσσονται.

Λέξεις κλειδιά

Στερεά μονωτικά, pertinax, διηλεκτρική αντοχή, διάτρηση, μακροσκοπική θεωρία, κβαντομηχανική θεωρία, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb, στατιστικές μετρήσεις, σύνθετη αντίσταση, ενέργεια, κρουστικές τάσεις ζεύξης

Abstract

The scope of this thesis is to study the changes of the impedance and the energy, pertinax specimens within 40°C temperature insulating oil, undergo, under high voltage switching pulses and electrodes shaped «point-plate». First of all, fundamental theories are being mentioned for a better understanding of the phenomena developed before and during the breakdown of the solid insulator. Both Macroscopic and Quantum Mechanics theories have been studied for the interpretation of the phenomena. Moreover, all the experimental measurements have been noted down, along with the resulting experimental graphs. Four experiments have been carried out, with specimens of 1mm and 2mm thickness, and high voltage switching pulses of both polarities ($\pm 250/2500 \mu\text{s}$). Furthermore, the theoretic approximations of the graphs have been made and the formulas for the impedance, the energy and the power measured at the measuring capacitor during the start and after the end of the partial discharges, along with the energy of the free electrons after the end of the partial discharges, have been found and noted down. Lastly, the conclusions are listed and the importance of this thesis in research and in practice is noted. The outcome of this thesis shows to us the changes the insulator undergoes during the phenomena caused by the partial discharges and the coulomb forces that are being developed.

Keywords

Solid insulators, pertinax, dielectric strength, breakdown, macroscopic theory, quantum mechanics theory, partial discharges, coulomb forces, statistic measurements, impedance, energy, high voltage switching pulses

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την μελέτη της σύνθετης αντίστασης και της ενέργειας δοκιμίων Pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις ζεύξης, για την κατανόηση των φαινομένων που αναπτύσσονται κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών από τις μερικές εκκενώσεις και τις δυνάμεις Coulomb, καθώς και την μελέτη των μεταβολών των μονωτικών ιδιοτήτων του διηλεκτρικού.

Στην εισαγωγή γίνεται αναφορά στη μακροσκοπική και κβαντομηχανική ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά την διάρκεια διάτρησης των στερεών μονωτικών υλικών. Αναφέρονται όλες οι πιθανές μορφές διάτρησης, οι αιτίες τους και τα πιθανά αποτελέσματα επί του όγκου ή της επιφάνειας του μονωτικού υλικού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο καταγράφονται οι μετρήσεις που πάρθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων καθώς και οι προκύπτουσες πειραματικές καμπύλες. Έγιναν τέσσερις σειρές πειραμάτων, από δύο για δοκίμια πάχους 1mm και 2mm, σε κρουστικές τάσεις $\pm 250/2500\mu s$. Καταγράφηκαν τα μεγέθη της τάσεως, του χρόνου έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων καθώς και του φορτίου που μετρούνταν στη θέση του πυκνωτή μέτρησης. Από τα μεγέθη αυτά μελετήθηκε η σύνθετη αντίσταση, η ενέργεια και η ισχύς στον πυκνωτή μέτρησης καθώς η μεταβολές των μεγεθών αυτών στην αρχή και στο πέρας των μερικών εκκενώσεων. Επίσης, καταγράφηκε η μεταβολή της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων μετά το πέρας των εκκενώσεων.

Στο τρίτο κεφάλαιο έγινε προσομοίωση των πειραματικών καμπυλών από θεωρητικές και καταγραφή των μαθηματικών σχέσεων που αντιστοιχούν στις προκύπτουσες θεωρητικές καμπύλες. Επιπρόσθετα, παρατίθενται μια σειρά συμπερασμάτων που εξάγονται από την μελέτη των ανωτέρω γραφικών παραστάσεων.

Η εργασία τελειώνει με μερικές αναφορές στην χρησιμότητα της εργασίας στην έρευνα και τις πρακτικές εφαρμογές των στερεών μονωτικών υλικών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Κωνσταντίνο Γ. Καραγιαννόπουλο, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας καθώς και τον κύριο Περικλή Δ. Μπούρκα για την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας εργασίας αλλά και τις χρήσιμες συμβουλές και επισημάνσεις του.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

Αλεξάνδρα Ε. Λαλαίου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Διηλεκτρική αντοχή μονωτικών υλικών.....	11
1.2 Διάσπαση στερεών μονωτικών υλικών.....	12
1.2.1 Μακροσκοπική θεωρία.....	13
1.2.1.1 Θερμική διάτρηση.....	14
1.2.1.2 Ηλεκτρική διάτρηση.....	17
1.2.1.3 Ηλεκτροχημική διάτρηση.....	22
1.2.1.4 Θερμοχημική διάτρηση.....	26
1.2.1.5 Συνδυασμός παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.....	27
1.2.2 Κβαντομηχανική θεωρία.....	34
1.2.2.1 Ιονισμός με κρούσεις.....	35
1.2.2.2 Φάσμα Η/Μ ακτινοβολίας κατά την διάτρηση στερεού μονωτικού υλικού.....	37
1.2.3 Επιφανειακή διάσπαση και υπερπήδηση.....	38
1.2.4 Συνδυασμός μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής θεωρίας.....	38
1.3 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων.....	40
2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	43
3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ PERTINAX ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΝΑΡΞΗ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΑΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ.....	47
3.1 Δοκίμια pertinax πάχους 1 mm εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό	

κρουστικές τάσεις +250/2500μs.....	49
3.2 Δοκίμια pertinax πάχους 1 mm εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.....	62
3.3 Δοκίμια pertinax πάχους 2 mm εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.....	75
3.4 Δοκίμια pertinax πάχους 2 mm εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.....	88
4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	101
4.1 Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών που υπολογίστηκαν.....	103
4.1.1 Δοκίμια pertinax πάχους 1 mm εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.....	103
4.1.2 Δοκίμια pertinax πάχους 1 mm εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.....	109
4.1.3 Δοκίμια pertinax πάχους 2 mm εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.....	115
4.1.4 Δοκίμια pertinax πάχους 2 mm εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.....	121
4.2 Φυσική ερμηνεία των χαρακτηριστικών.....	128
5. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	130
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	131

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Διηλεκτρική αντοχή μονωτικών υλικών.

Τα μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως ως διαχωριστικά μέσα μεταξύ αγωγών που βρίσκονται σε διαφορετική τάση και αποτρέπουν τον ιονισμό του αέρος και τη δημιουργία ηλεκτρικών εκφορτίσεων μεταξύ των αγωγών. Η χαμηλή τους αγωγιμότητα αποτρέπει τη μεταφορά φορτίων δια μέσου του όγκου τους, με αποτέλεσμα το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό τους να είναι ηλεκτροστατικό. Η τάση όμως που ασκείται σε ένα μονωτικό, και επομένως, και το πεδίο στο εσωτερικό του, δεν μπορούν να αυξάνονται απεριόριστα. Μόλις το ηλεκτρικό πεδίο μέσα σε ένα μονωτή υπερβεί μια κρίσιμη τιμή, τότε το μέσο υφίσταται διηλεκτρική κατάρρευση (διάσπαση μονωτικού) και διαρρέεται από ένα πολύ μεγάλο ρεύμα αποφόρτισης. Η διάσπαση μέσω του όγκου ενός στερεού μονωτικού υλικού καλείται *διάτρηση* και οδηγεί αναπόφευκτα στη δημιουργία ενός *μόνιμου* αγωγίμου διαύλου, κάτι που αποτελεί *μόνιμη βλάβη* του μονωτικού.

Ως *διηλεκτρική αντοχή* (E_d) ορίζεται η ελάχιστη τιμή της πεδιακής έντασης που προκαλεί τη διάσπαση μονωτικού εντός ομογενούς πεδίου. Αποτελεί ένα κριτήριο για την επιλογή διαφόρων μονωτικών σε μια κατασκευή.

Όταν η διηλεκτρική αντοχή αναφέρεται στην ελάχιστη απόσταση μόνωσης (d) υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης ενεργούς τιμής U_d , τότε ισχύει :

$$E_d = \frac{\sqrt{2}U_d}{d} \quad (1.1-1)$$

Για τη διάσπαση ενός μονωτικού υλικού στη *μέγιστη* εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης ($\sqrt{2} * U_{da}$) εντός *ανομοιογενούς* πεδίου, ισχύει η σχέση:

$$E_{da} = \frac{\sqrt{2}U_{da}}{\eta d} \quad (1.1-2)$$

όπου η : συντελεστής χρησιμοποίησης ανομοιογενών πεδίων.¹

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις είναι προφανές ότι ισχύει : $E_{da} < E_d$ και $U_{da} < U_d$.

¹ Σε ένα ανομοιογενές πεδίο το διάνυσμα της πεδιακής έντασης δεν έχει παντού την ίδια διεύθυνση και την ίδια απόλυτη τιμή. Κάθε ανομοιογενές πεδίο χαρακτηρίζεται από μια μέγιστη τιμή πεδιακής έντασης (E_{max}), η οποία έχει ιδιαίτερη σημασία στην πράξη καθώς εκφράζει την μέγιστη δύναμη που ασκείται από το πεδίο. Ως συντελεστής χρησιμοποίησης ορίζεται το πηλίκο: $\eta = \frac{E_{\mu}}{E_{max}}$ όπου E_{μ} η μέση πεδιακή ένταση $E_{\mu} = U/d$. Ισχύει ότι $0 < \eta < 1$.

Ακολουθεί πίνακας με τιμές διηλεκτρικής αντοχής ορισμένων μονωτικών υλικών, σε ομογενές πεδίο των 50 Hz.

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

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

Η διηλεκτρική αντοχή των στερεών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες πέραν της μοριακής δομής του υλικού. Εξαρτάται από τις προσμίξεις του υλικού, τις ατέλειες της μικροδομής (π.χ. μικροκενά), τη γεωμετρία του δοκιμίου, τη φύση των ηλεκτροδίων, τη θερμοκρασία, τις συνθήκες περιβάλλοντος (π.χ. ύπαρξη υγρασίας) καθώς και από τη διάρκεια της εφαρμογής και από τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου πεδίου. Η διηλεκτρική αντοχή είναι διαφορετική ανάλογα με το αν οι συνθήκες λειτουργίας είναι dc ή ac. Υπάρχουν επίσης φαινόμενα γήρανσης, τα οποία προκαλούν την προοδευτική υποβάθμιση των ιδιοτήτων του μονωτή, μειώνοντας σταδιακά και την διηλεκτρική αντοχή. Το πεδίο διάσπασης εξαρτάται επίσης και από το πάχος του μονωτικού. Ένα παχύτερο μονωτικό στρώμα έχει περισσότερο όγκο και άρα μεγαλύτερη πιθανότητα να εμπεριέχει κάποια ατέλεια μικροδομής (π.χ. μια μικροκοιλότητα), από την οποία μπορεί να ξεκινήσει η διάσπαση του διηλεκτρικού.

1.2 Διάσπαση στερεών μονωτικών υλικών.

Στα στερεά μονωτικά υλικά, η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι πολύ μικρή και η διάτρησή τους έχει ως αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σε αυτά (κάψιμο, τήξη, μηχανικές κακώσεις κλπ.). Επίσης, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών, αλλά και κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδησή τους, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών. Επομένως, ένα βασικό χαρακτηριστικό των στερεών μονωτικών είναι η ιδιότητά τους να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση αλλά να καταστρέφονται είτε τμηματικώς ή εξολοκλήρου.

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί που μπορούν να οδηγήσουν στη διάσπαση ενός στερεού μονωτικού. Στην πράξη οι μηχανισμοί αυτοί εμφανίζονται συνδυαστικά. Το ποιός μηχανισμός όμως θα επικρατήσει κάθε φορά εξαρτάται από την κατάσταση του μονωτικού υλικού αλλά και από εξωγενείς παράγοντες όπως οι συνθήκες περιβάλλοντος(π.χ. απορρόφηση υγρασίας, ασκούμενη πίεση). Από τις διάφορες έρευνες που έχουν γίνει για τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών, μπορεί κανείς να ομαδοποιήσει τους μηχανισμούς που αναπτύσσονται σε δύο βασικές θεωρίες:

- Τη μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά την διάρκεια της διάσπασης των στερεών μονωτικών.
- Τη κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά την διάρκεια της διάσπασης των στερεών μονωτικών.

1.2.1 Μακροσκοπική θεωρία.

Σύμφωνα με την μακροσκοπική θεωρία , τα αποτελέσματα των ερευνών αποσκοπούν (ή βασίζονται) σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα από γραμμικά στοιχεία. Το κύκλωμα αυτό πηγάζει συνήθως από συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση ακουστικών και φωτεινών φαινομένων, καθώς και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού. Έτσι , από μετρήσεις που έχουν γίνει σε διάφορα στερεά μονωτικά υλικά(κυρίως μετρήσεις της τάσεως διάσπασης σε σχέση τον χρόνο και τη μορφή της τάσης), οι οποίες έχουν συνδυαστεί με παρατηρήσεις σχετικά με τις αλλαγές στην μοριακή δομή των υλικών, θεωρείται ότι η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών οφείλεται στους εξής βασικούς παράγοντες:

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

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

- η θερμική διάτρηση
- η ηλεκτρική διάτρηση(που διακρίνεται σε δενδροειδή και ηλεκτρομηχανική)
- η ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση)
- η θερμοχημική διάτρηση.

Στην πράξη ωστόσο, οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται μεταξύ τους και υποβοηθούνται από διάφορες ειδικές συνθήκες που επικρατούν (μορφή ηλεκτρικού πεδίου, περιβάλλον μέσο

κλπ), έτσι ώστε η αλλαγή της μοριακής τους δομής να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμα τους.

1.2.1.1 Θερμική διάτρηση.

Η μορφή της διάτρησης αυτής εμφανίζεται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά από τις απώλειες Joule (π.χ. κακή απαγωγή της θερμότητας από τη μόνωση ενός καλωδίου λόγω σκόνης και υγρασίας). Η μειωμένη αγωγιμότητα των μονωτικών μέσων συνεπάγεται ότι εντός του στερεού θα εκλύεται θερμότητα. Πρόκειται για την ενέργεια που χάνεται στο διηλεκτρικό μέσο, όταν τα δίπολα προσανατολίζονται, ενάντια στις τυχαίες συγκρούσεις, προς τη μια ή την άλλη μεριά του μέσου από το πεδίο.

Υπάρχουν όμως δύο παράγοντες που αντιτίθεται στην άμεση ευθυγράμμιση των διπόλων με το πεδίο. Πρώτον, η θερμική διέγερση έχει μια στοχαστική επίδραση στον προσανατολισμό των διπόλων. Στα στερεά μονωτικά, αυτό οφείλεται στα ξαφνικά και τυχαία τινάγματα λόγω των πλεγματικών ταλαντώσεων. Δεύτερον, λόγω της ισχυρής αλληλεπίδρασης των μορίων με τα γειτονικά τους μόρια στα στερεά μονωτικά, αποτρέπεται η άμεση απόκριση των διπόλων στις μεταβολές του πεδίου. Αν το πεδίο μεταβάλλεται πολύ γρήγορα, τότε τα δίπολα δεν μπορούν να το ακολουθήσουν και παραμένουν προσανατολισμένα με τυχαίο τρόπο. Επομένως, στις υψηλές συχνότητες η πολωσιμότητα θα είναι μηδενική και το πεδίο δεν θα μπορεί να επάγει διπολική ροπή. Στις χαμηλές συχνότητες όμως, τα δίπολα μπορούν να αποκρίνονται σχετικά άμεσα στο πεδίο και να ευθυγραμμίζονται από αυτό.

Στις υψηλές συχνότητες ωστόσο, οι διηλεκτρικές απώλειες θα είναι αυξημένες. Για τις διηλεκτρικές απώλειες ισχύει ότι:

$$W = \omega E^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \tan \delta \quad (1.2.1.1-1)$$

Επομένως, η μεταφορά φορτίου και οι διηλεκτρικές απώλειες παράγουν θερμότητα μέσα στο διηλεκτρικό. Αν η θερμότητα αυτή δεν απομακρυνθεί από το στερεό γρήγορα τότε η θερμοκρασία του μονωτικού θα αυξηθεί. Η αύξηση όμως της θερμοκρασίας αυξάνει και την αγωγιμότητα ενός μονωτή. Η αύξηση της αγωγιμότητας έχει ως συνέπεια περισσότερη θέρμανση λόγω Joule με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας. Αν δεν είναι δυνατή η απομάκρυνση της θερμότητας τότε το αποτέλεσμα θα είναι η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας και του ηλεκτρικού ρεύματος μέχρις ότου να πραγματοποιηθεί εκφόρτιση σε διάφορες περιοχές του υλικού. Λόγω της ανομοιογένειας του δοκιμίου, ορισμένα τμήματά του υπερθερμαίνονται ανεξέλεγκτα (γίνονται θερμά σημεία και πραγματοποιείται τοπική τήξη του υλικού που οδηγεί στη φυσική και χημική του διάβρωση). Η τοπική διάσπαση σε διάφορα θερμά σημεία οδηγεί στη δημιουργία ενός αγωγίμου διαύλου που συνδέει τα απέναντι ηλεκτρόδια και οδηγεί επομένως στη διάσπαση του διηλεκτρικού. 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.

Ειδικότερα, ο σχετός διάτρησης δημιουργείται όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 , οπότε έχουμε:

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.2.1.1-2)$$

όπου σ_1 : οριακή τιμή ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας για την διάτρηση

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

β : ένας συντελεστής του υλικού

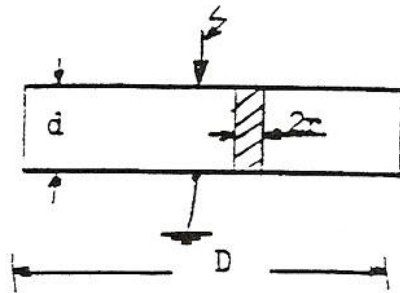
Με την προϋπόθεση σταθερής διατομής (A) του σχετού διάτρησης και ειδική αγωγιμότητα σ_1 , η θερμική ισχύ που παράγεται (κατά την διάτρηση) είναι:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} \quad (1.2.1.1-3)$$

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

d: πάχος του μονωτικού

A: διατομή της τρύπας σχετού διάτρησης



Σχήμα 1.2.1.1-1: Απλοποιημένη παράσταση του σχετού διάτρησης λόγω των απωλειών Joule

του στερεού μονωτικού.

D:διάμετρος δοκιμίου

d: πάχος μονωτικού

2r: διάμετρος σχετού

Αν P_a είναι η τιμή της απαγόμενης θερμικής ισχύος, C_0 η θερμοχωρητικότητα² και t ο χρόνος, ισχύει γενικά ότι:

$$P = P_a + C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.2.1.1-4)$$

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

$$P_a = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot k \cdot \theta \quad (1.2.1.1-5)$$

όπου k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού.

Κατά την θερμική διάτρηση όμως, η θερμική ισχύς που παράγεται είναι ίση με εκείνη που απάγεται, δηλαδή ότι:

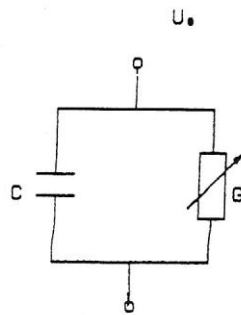
$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot k \cdot \theta \quad (1.2.1.1-6)$$

Παρατηρούμε ότι τόσο η παραγόμενη όσο και η απαγόμενη θερμική ισχύς εξαρτώνται από την θερμοκρασία. Η οριακή τιμή της τάσης για την θερμική διάτρηση (U_θ) δίνεται όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Από την διαφόριση ως προς θ και του αριστερού και του δεξιού τμήματος της (1.2.1.1-6) προκύπτει ότι $\beta\theta=1$ και :

$$U_\theta = d \sqrt{\frac{2k}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.2.1.1-7)$$

Η αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_θ , μπορεί να παρασταθεί με ένα ισοδύναμο κύκλωμα όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μια μεταβλητή αγωγιμότητα G . Η διάτρηση στη τιμή U_θ γίνεται όταν η ειδική αγωγιμότητα αυξηθεί από σ_0 σε σ_1 , και άρα και η αγωγιμότητα G φτάσει την μέγιστη τιμή της G_{\max} .

²Η θερμοχωρητικότητα ενός στερεού ισούται με την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του αντίστοιχου κρυστάλλου ανά μονάδα αύξησης της θερμοκρασίας. Η αύξηση της εσωτερικής ενέργειας οφείλεται στην αύξηση της ενέργειας των πλεγματικών ταλαντώσεων. Αυτό ισχύει εν γένει σε όλα τα στερεά εκτός από τα μέταλλα σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες όπου η αύξηση της εσωτερικής ενέργειας οφείλεται στη διέγερση των ηλεκτρονίων που βρίσκονται κοντά στην ενέργεια Fermi και τη μετάβασή τους σε ανώτερες ενεργειακές στάθμες.



Σχήμα 1.2.1.1-2: Ισοδύναμο κύκλωμα στερεού μονωτικού λόγω αύξησης απωλειών Joule.

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

G_0 : αγωγιμότητα ιδανικού μονωτή

G_{\max} : αγωγιμότητα για τη διάτρηση

C: χωρητικότητα ιδανικού μονωτή

1.2.1.2 Ηλεκτρική διάτρηση.

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

- αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις
- μηχανική τάνυση του υλικού
- συνδυασμό των δύο παραπάνω παραγόντων

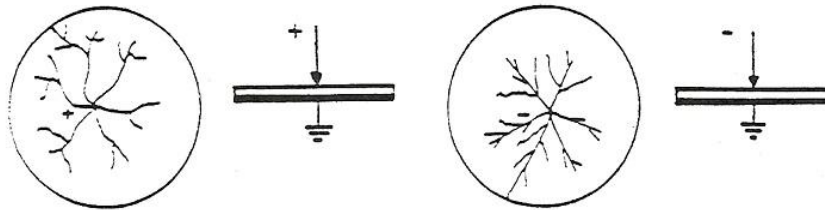
Αυτή η διάτρηση ονομάζεται *ηλεκτρική* και ανάλογα με την μορφή του ηλεκτρικού τόξου *κατά την διάτρηση* διακρίνεται σε *δενδροειδής* (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) και σε *ηλεκτρομηχανική* (υπό μορφή οχετού κατά τη διεύθυνση του πεδίου).

Η *δενδροειδής διάτρηση* είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, γιατί λόγω της μεγαλύτερης τιμής της τάσης και άρα και της πεδιακής έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μια διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγωγή σύνδεση των ηλεκτροδίων. Η εικόνα που παρουσιάζει το υλικό μετά την διάτρηση σχετίζεται με την θερμική καταπόνησή του στα ίχνη του δενδρίτη. Στο σχήμα 1.2.1.2-1 αναπαρίσταται η μορφή του δημιουργούμενου στο δοκίμιο δενδρίτη ανάλογα με τη πολικότητα της εφαρμοζόμενης

τάσης για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (ηλεκτρόδια ακίδα-πλάκα).

Στην περίπτωση της θετικής ακίδας ο δενδρίτης έχει , λόγω των δυνάμεων Coulomb που εξασκούνται μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων κατά την κίνησή τους προς την ακίδα , αρκετές διακλαδώσεις-μη ευθύγραμμες.

Στην αρνητική ακίδα, οι δυνάμεις απομάκρυνσης μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων είναι , λόγω της μεγάλης ακτίνας , μικρότερες και έτσι οι διαδρομές είναι περίπου οι ακτίνες του κύκλου.



Σχήμα 1.2.1.2-1: Προς επεξήγηση της μορφής του ηλεκτρικού δενδρίτη.

Η πολικότητα της ακίδας επηρεάζει και την τιμή της τάσης για τη διάσπαση (φαινόμενο της πολικότητας). Ισχύει γενικά ότι η τάση διάσπασης έχει μεγαλύτερη τιμή κατά την αρνητική πολικότητα της ακίδας από ότι κατά την θετική πολικότητά της. Αυτό διότι ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας συγκεντρώνονται μπροστά της ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς αντίθετης πολικότητας. Επειδή όμως οι θετικοί φορείς είναι στο σύνολό τους περισσότερο δυσκίνητοι από τους αρνητικούς και άρα εξουδετερώνονται δυσκολότερα, στην περίπτωση της αρνητικής ακίδας απαιτείται μεγαλύτερη τάση για την διάσπαση. Επίσης, η συγκέντρωση αυτή των δυσκίνητων θετικών ιόντων προ της αρνητικής ακίδας φαίνεται να είναι και ο λόγος της μικρότερης τιμής του αρχικού πεδίου, ως προς εκείνη κατά τη θετική πολικότητα. Το φαινόμενο της πολικότητας μπορεί να διαπιστωθεί και από τις ακόλουθες πειραματικές τιμές που έχουν καταγραφεί.

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

Πίνακας 1.2.1.2-1: Τιμές της τάσης διάσπασης του στερεού μονωτικού pertinax H1270

(πάχους 1 mm και 2 mm) κατά την καταπόνησή του με διάφορες μορφές κρουστικών τάσεων σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών.

Διάμετρος δοκιμίων: 150 mm

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα

Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: R=0,9 mm

Η ηλεκτρομηχανική διάτρηση (ή διάτρηση υπό μορφή οχετού) οφείλεται στη πολύ μεγαλύτερη τιμή πεδιακής έντασης από ότι κατά την δένδροειδή διάτρηση. Οφείλεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb που εξασκούνται μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η χρονική διάρκεια του φαινομένου είναι μερικά μ s. Συγκεκριμένα, ένα διηλεκτρικό μέσο που βρίσκεται μεταξύ δύο αντίθετα φορτισμένων ηλεκτροδίων υφίσταται θλιπτικές δυνάμεις λόγω έλξης των φορτίων +Q και -Q. Καθώς αυξάνεται η τάση, αυξάνεται επίσης και το φορτίο συμπίεσης που ασκείται στο διηλεκτρικό. Εξαιτίας του αυξημένου φορτίου, το διηλεκτρικό συμπιέζεται και το πάχος του d γίνεται μικρότερο. Σε κάθε επίπεδο συμπίεσης, η αύξηση του θλιπτικού φορτίου εξισορροπείται από την ελαστική παραμόρφωση του μονωτικού σε μικρότερο πάχος. Αν όμως το μέτρο της ελαστικότητας του μονωτικού είναι μικρό, τότε τα θλιπτικά φορτία δεν μπορούν να εξισορροπηθούν από την ελαστικότητα του στερεού και προκαλείται ανεξέλεγκτη μηχανική παραμόρφωση. Ειδικότερα, η μείωση του πάχους d που προκαλείται από το θλιπτικό φορτίο, δημιουργεί ακόμα μεγαλύτερο πεδίο ($E=V/d$) και προκαλεί τη συσσώρευση περισσότερων φορτίων στα ηλεκτρόδια ($Q=CV$, $C=\epsilon_0\epsilon_r A/d$). Οι μεταβολές αυτές δημιουργούν ακόμα μεγαλύτερο θλιπτικό φορτίο το οποίο προκαλεί περαιτέρω μείωση του d . Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου η διατμητική τάση εντός του μονωτικού να προκαλέσει την πλαστική διαρροή του υλικού. Κάποια στιγμή το υλικό καταρρέει. Επιπρόσθετα, η αύξηση του E με τη μείωση του d έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της θέρμανσης Joule και της θέρμανσης λόγω διηλεκτρικών απωλειών. Η

επιτάχυνση αυτή αυξάνει τη θερμοκρασία, γεγονός που προκαλεί τη μείωση του μέτρου της ελαστικότητας και του ιξώδους, υποβαθμίζοντας τη μηχανική σταθερότητα του υλικού. Κατά την μηχανική καταπόνηση του στερεού είναι επίσης δυνατό, το πεδίο να γίνει ίσο με αυτό της θερμικής διάτρησης. Στην περίπτωση αυτή η αστοχία του υλικού δεν θα οφείλεται στο μηχανισμό μηχανικής παραμόρφωσης *αν και εκκινεί* από αυτόν. Μια άλλη δυνατότητα είναι η ανάπτυξη εσωτερικών ρωγμών λόγω της επιβολής εσωτερικών τάσεων σε μη ομογενείς περιοχές του υλικού. Σε όλα τα υλικά, όσο τέλεια σχηματισμένα και αν είναι, υπάρχουν κρυσταλλικές ατέλειες, περιέχονται προσμίξεις και διάφοροι ευκίνητοι φορείς φορτίου όπως ηλεκτρόνια που προέρχονται από προσμίξεις δοτών, οπές ή ιοντισμένα ιόντα της μητρικής δομής ή ιόντα προσμίξεων. Έτσι μια ατέλεια ή μια μικρή κοιλότητα, υφίσταται διατμητικές τάσεις και δημιουργείται έτσι τοπικά, ένα μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο. Η συνδυασμένη επίδραση μεγάλων διατμητικών τάσεων και μεγάλων ηλεκτρικών πεδίων, προκαλεί τη διάδοση των ρωγμών και κατά συνέπεια την μηχανική και άρα και διηλεκτρική αστοχία του υλικού. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται ενίοτε *ηλεκτροθραύση*.

Η μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης επηρεάζει τη τιμή της οριακής τάσης διάτρησης. Έτσι έχει διαπιστωθεί ότι κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με *κρουστικές* τάσεις πάνω από μια μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης U_{kmin} , συμβαίνει η διάτρηση με *μία* κρούση *υπό μορφή οχετού* σε τιμή πεδιακής έντασης *μικρότερη* από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάσπαση υπό *εναλλασσόμενη* τάση καταπόνησης. Η μορφή αυτής της διάτρησης θεωρείται επίσης ηλεκτρομηχανική. Το φαινόμενο έχει αποδοθεί στην απότομη μεταβολή της πεδιακής έντασης λόγω της οποίας δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με αποτέλεσμα τη διάτρηση λόγω δυνάμεων Coulomb μεταξύ του αρνητικού ηλεκτροδίου και των θετικών ηλεκτρικών φορέων, που συγκρατούνται στο πλέγμα των μορίων.

Λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας για την ηλεκτρική διάτρηση και επειδή τα στερεά μονωτικά είναι και μονωτές θερμότητας, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμότητα που *απάγεται* μόλις πριν από τη διάτρηση είναι αμελητέα. Προκύπτει προσεγγιστικά ότι η ενδεικνύμενη τιμή της τάσης για την ηλεκτρική διάσπαση του υλικού σε κάποια περιοχή ανομοιογένειας (για εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης), είναι:

$$U_n = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_\delta}} \quad (1.2.1.2-1)$$

όπου d: το πάχος του δοκιμίου

σ_2 : η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια ανομοιογένεια λόγω της οποίας η πεδιακή ένταση έγινε ιδιαίτερα μεγάλη στη περιοχή εκείνη του υλικού

θ : διαφορά θερμοκρασίας ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος

A: διατομή του οχετού

T_δ : ο χρόνος για την ηλεκτρική διάτρηση

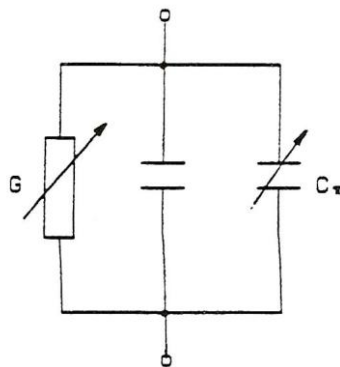
C_0 : θερμοχωρητικότητα

Κατά την εφαρμογή κρουστικής τάσης καταπόνησης, η διάτρηση του υλικού γίνεται στη μέγιστη τιμή της:

$$U_{kn} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_s}} \quad (1.2.1.2-2)$$

όπου T_s η διάρκεια του μετώπου της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν μια ικανοποιητική ερμηνεία σε πειράματα που έχουν γίνει. Πράγματι, όσο αυξάνει ο χρόνος T_s μιας κρουστικής τάσης, τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή, όπως φαίνεται και από τον πίνακα 1.2.1.2-1.



Σχήμα 1.2.1.2-2: Ισοδύναμο κύκλωμα στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα

$C_\pi=0 \dots C_{\max}$: χωρητικότητα που συμβολίζει την πόλωση του στερεού μονωτικού στη θέση της διάτρησης

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

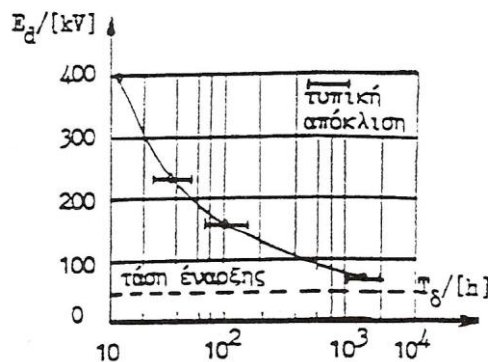
Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας, η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μια κρίσιμη τιμή σ_2 , η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από δυνάμεις Coulomb μεταξύ των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα (σχήμα 1.2.1.2-2) ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_π (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Όταν η αγωγιμότητα G και ο πυκνωτής C_π έχουν αποκτήσει μόλις προ της διάτρησης τις μέγιστες τιμές τους (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη αγωγιμότητα σ_2 λόγω κάποιας ανομοιογένειας), τότε συμβαίνει η διάτρηση.

1.2.1.3 Ηλεκτροχημική διάτρηση.

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει στις περισσότερες περιπτώσεις την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο των υλικών. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (πλεγματικά κενά, ρωγμές ή πόροι του διηλεκτρικού όπου το αέριο που είναι κάθε φορά κλεισμένο, συνήθως αέρας, έχει μικρότερη διηλεκτρική αντοχή - εσωτερικές εκκενώσεις), καθώς και θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθήσεις στην επιφάνειά του (εξωτερικές εκκενώσεις).

Από τη στιγμή της έναρξης των μερικών εκκενώσεων προκαλείται συνήθως σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του στερεού μονωτικού, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε ορισμένα τμήματά του, όπου έτυχε οι θέσεις ανομοιογένειας να είναι περισσότερο αγωγίμες. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο και σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στην διάτρηση του μονωτικού.

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάτρησης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί *βαθμιαία μείωση της διηλεκτρικής αντοχής* ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής (είναι συνήθως μακροπρόθεσμη) και για αυτό το λόγο ονομάζεται και *γήρανση* του μονωτικού υλικού. Η γήρανση είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την γενικότερη υποβάθμιση των ιδιοτήτων του μονωτικού υλικού. Με την γήρανση καθορίζεται επίσης ο χρόνος ζωής του υλικού. Στο σχήμα 1.2.1.3-1 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής λόγω γήρανσης του υλικού από την μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



Σχήμα 1.2.1.3-1: Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχους 0,125mm, λόγω μερικών εκκενώσεων.

Αριθμός δοκιμών : 10 ανά σημείο μέτρησης

T_d : χρόνος διάσπασης

Υπάρχουν όμως πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες και την επίδοση ενός υλικού που χρησιμοποιείται στην πράξη. Ακόμα και απουσία ηλεκτρικού πεδίου το υλικό

υπόκειται σε φυσική και χημική γήρανση αφού οι φυσικές και χημικές του ιδιότητες μεταβάλλονται αισθητά. Ένα μονωτικό που υφίστανται θερμοκρασιακές διακυμάνσεις ή στο οποίο επιβάλλονται μεταβλητές μηχανικές τάσεις, αναπτύσσει δομικές ατέλειες όπως μικρορωγμές , που μπορεί να είναι καταστρεπτικές για την διηλεκτρική του αντοχή. Επίσης, η χημική δομή και οι ιδιότητες του μονωτικού υλικού ενδέχεται να υποβαθμίζονται μέσω διαφόρων χημικών διαδικασιών που ενδεχομένως να οφείλονται στην ακτινοβολήση , είτε σε έκθεση σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως υγρασία , όζον και διάφορες άλλες εξωτερικές συνθήκες. Οι διαδικασίες της χημικής γήρανσης επιταχύνονται εν γένει με τη θερμοκρασία.

Κατά την λειτουργία των διατάξεων , οι ιδιότητες της μόνωσης υφίστανται και ηλεκτρική γήρανση λόγω της επίδρασης του πεδίου. Τα πεδία dc μπορούν για παράδειγμα να προκαλέσουν την αποκόλληση των ιόντων της δομής και τη μεταφορά τους σε άλλα σημεία, μεταβάλλοντας έτσι με αργούς ρυθμούς τη δομή και τις ιδιότητες του μονωτικού υλικού. Η ηλεκτρική γήρανση προκαλεί και την ανάπτυξη ηλεκτρικών δενδριτών. Η ανάπτυξή τους οφείλεται στην επιβολή ac πεδίου.(Η περίπτωση αυτή θα μελετηθεί λεπτομερέστερα στο επόμενο κεφάλαιο: *συνδυασμός παραγόντων γήρανσης και διάτρησης*). Επίσης, κατά την καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού υλικού με κάποια μορφή τάσης (εναλλασσόμενη, συνεχής ή κρουστική), διαπιστώνει κανείς ότι μετά από κάποια τιμή της τάσης (ανάλογα με τη μορφή της) εμφανίζονται μερικές εκκενώσεις.

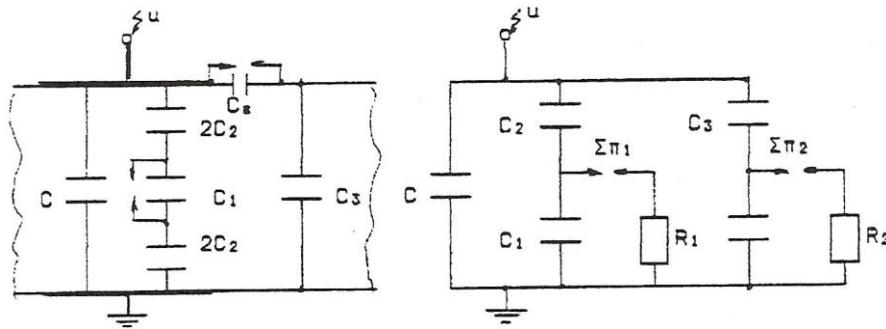
Η γήρανση του μονωτικού υλικού στο εργαστήριο με τιμές της τάσης μεγαλύτερες από την τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων χαρακτηρίζεται ως *τεχνητή γήρανση*. Αυτή η γήρανση δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική κατάσταση , που δημιουργείται με την πάροδο του χρόνου (όταν το υλικό εργάζεται υπό ονομαστικά μεγέθη στο δίκτυο) , δίνει όμως τη δυνατότητα ανίχνευσης των παραγόντων διάσπασης, που τελικά δεν διαφέρουν από τους πραγματικούς.

Με τη γέφυρα Schering μετρά κανείς το σύνολο των απωλειών ενός μονωτικού υλικού ή μιας διάταξης υψηλής τάσης, δηλαδή τις απώλειες αγωγιμότητας, πόλωσης και εκείνης λόγω εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων. Η πρώτη μέθοδος ανίχνευσης των μερικών εκκενώσεων είναι η μέθοδος Callender , η οποία είναι παραλλαγή της γέφυρας Schering και με την οποία κατορθώθηκε η εξουδετέρωση των παράσιτων χωρητικοτήτων του κυκλώματος μέτρησης κατά τον διαχωρισμό των απωλειών αγωγιμότητας και πόλωσης από εκείνες των μερικών εκκενώσεων.

Η ανάγκη για τη φυσική εξήγηση και τη μαθηματική ανάλυση του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων μέσα στον όγκο του υλικού , οδήγησε τους Gemant και Philipoff σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα βασιζόμενοι στην άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου. Στο σχήμα 1.2.1.3-2 περιέχονται και οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας , η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C_1) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων ($C_ε$) . Με τον τρόπο αυτό

γίνεται σύνδεση του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του μονωτικού (C_2 και C_3 αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Οι σπινθηριστές στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R_1, R_2) γίνεται εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C_1 και C_e).

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής.



Σχήμα 1.2.1.3-2: Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με

φουσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής.

α: σχηματική παράσταση

β: ισοδύναμο κύκλωμα

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_1 : χωρητικότητα της φουσαλίδας

C_e : χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

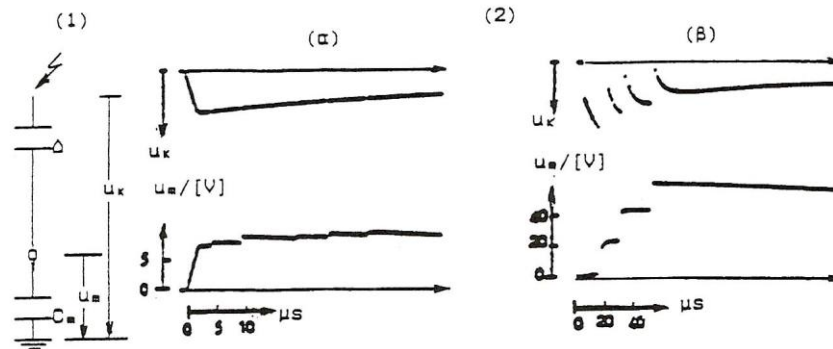
R_1 : αντίσταση τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_1$

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

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπόψη η αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φουσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κλπ.

Ας δώσουμε ένα παράδειγμα παλμογραφημάτων και πώς ερμηνεύονται οι μερικές εκκενώσεις μέσω των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

Θεωρούμε δοκίμια στερεών μονωτικών πάχους 1mm, κατά DIN 7735, κρουστική τάση καταπόνησης της μορφής 10/200μs, υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0.9mm. Το παλμογράφημα (α) αφορά τη γήρανση του βακελίτη και το παλμογράφημα (β) τη διάτρηση του pertinax.



Σχήμα 1.2.1.3-3: Τυπικά παλμογραφήματα κατά την γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών.

- 1) Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης (u_k : στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης, Δ : δοκίμιο, u_m : τάση στον πυκνωτή μέτρησης C_m)
- 2) Μετρήσεις με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200μs
 - (α) γήρανση βακελίτη : τιμή πεδίου 1,11MV/cm, $U_k=77,5kV$, $C_m=210nF$
 - (β) διάτρηση pertinax : τιμή πεδίου 1,20 MV/cm, $U_k=85kV$, $C_m=210nF$

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι, μετά από μια τιμή $U_k=45kV$ (μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται κατά τη γήρανση επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού, μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής. Κατά την διάτρηση δεν εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, αλλά ηλεκτρικό τόξο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η εικόνα που παρουσιάζουν τα δοκίμια μετά τη διάτρηση είναι μια μικρή τρύπα (μικρότερη από 0,1mm) πλησίον της ακίδας.

Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται ως ακολούθως:

Από το παλμογράφημα της γήρανσης (σχήμα 1.2.1.3-3 (α)) φαίνεται ότι εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού, τα οποία προκαλούνται, κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.2.1.3-2 από τη σταδιακή διάσπαση των διαφόρων θέσεων διαταραχής. Ο δενδρίτης μπορεί να ερμηνευθεί ως επέκταση του ίχνους της ακίδας μέχρι τις θέσεις διαταραχής που διασπώνται. Η διάτρηση φαίνεται ότι συμβαίνει στη θέση

διαταραχής, όπου η πεδιακή ένταση έχει τη μέγιστη τιμή της. Μπορεί κανείς να υποθέσει ότι πρόκειται για ηλεκτρομηχανική διάσπαση.

1.2.1.4 Θερμοχημική διάτρηση.

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μια πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα που εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή της πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία κλπ) . Η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα στερεά μονωτικά υλικά , σε τιμές πεδίου που η καταπόνηση του διηλεκτρικού μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μόνο θερμική, δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{W}{kT}} = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.2.1.4-1)$$

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 ($1,37 \cdot 10^{-23}$ Ws/°K)

T: η απόλυτη θερμοκρασία

β : ένας συντελεστής του υλικού

Από την παραπάνω σχέση γίνεται φανερό ότι η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη.

Η διάτρηση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος του στερεού μονωτικού μέσου, ονομάζεται θερμοχημική. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι μετά από μια τιμή της τάσης , η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης. Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής και δίνεται από τη σχέση:

$$U_a = \sqrt{a \frac{k\theta}{\sigma_0}} \quad (1.2.1.4-2)$$

όπου a σταθερά του υλικού που εξαρτάται από τη μορφή της τάσης. Έχει την τιμή 2,83 για συνεχή τάση και 1,88 για εναλλασσόμενη.

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

Η αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσω του στερεού μονωτικού έχει αποδειχθεί ότι 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 με κρούσεις σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου από ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C.

1.2.1.5 Συνδυασμός παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στις προηγούμενες παραγράφους, τα φαινόμενα προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών μπορούν να αποδοθούν σε 4 βασικούς παράγοντες αποσταθεροποίησης των μορίων: απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb, μερικές εκκενώσεις και θερμότητα του περιβάλλοντος. Οι παράγοντες αυτοί, στην πράξη, συνδυάζονται με διαφορετική βαρύτητα ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού. Ας δούμε μερικούς συνδυασμούς παραγόντων που δύναται να εμφανιστούν στην πράξη.

Είναι γνωστό ότι οι διεθνείς προδιαγραφές προσδιορίζουν τα ανώτερα όρια υπερθέρμανσης των ηλεκτρολογικών κατασκευών υψηλής τάσης, βάσει των οποίων καθορίζεται το ονομαστικό ρεύμα. Υπάρχει δηλαδή κάποιο όριο θέρμανσης που σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος δε πρέπει να ξεπερνάτε η οριακή θερμοκρασία λειτουργίας. Όταν όμως συντρέχουν λόγοι μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής από άλλους παράγοντες, η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσω ενισχύει τον ρόλο τους διότι:

- Αυξάνει την ειδική αγωγιμότητα.
- Διευκολύνει την εξάσκηση δυνάμεων Coulomb, καθώς οι δεσμοί στο πλέγμα των μορίων γίνονται ασθενέστεροι.
- Ενισχύει τον ρόλο των μερικών εκκενώσεων λόγω μεγαλύτερης ευκινησίας ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κυρίως στις φυσαλίδες αερίου.

Έτσι, αυξάνεται η $\tan\delta^3$ και μειώνεται η διάρκεια ζωής του στερεού μονωτικού.

Η καταπόνηση του υλικού που οφείλεται στην θερμότητα του περιβάλλοντος μέσω προκαλεί μείωση της τάσης για τη θερμική διάσπαση, λόγω αύξησης της αγωγιμότητας του.

Επίσης, με την παραδοχή ότι στα στερεά μονωτικά εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις κατά την δένδροειδή ή την ηλεκτρομηχανική διάτρηση, μπορούμε να πούμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το μέσο ελεύθερο μήκος των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Άρα η

αύξηση της θερμότητας του περιβάλλοντος προκαλεί μείωση και της τιμής της τάσης για την ηλεκτρική διάσπαση.

Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις στερεών μονωτικών όπου η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος δεν οδηγεί σε μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, τουλάχιστον σε κάποια περιοχή τους. Τέτοια υλικά είναι η μίκα (glimmer) και ο χαλαζίας (quartz). Αυτή τους η ιδιότητα μπορεί να αποδοθεί σε αλληλεξουδετέρωση των παραγόμενων ηλεκτρικών φορέων. Έτσι μειώνονται τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας και αυξάνεται η διηλεκτρική αντοχή.

³Σε μια μόνωση υπό ac τάση, υπάρχουν απώλειες ενέργειας οι οποίες οφείλονται :

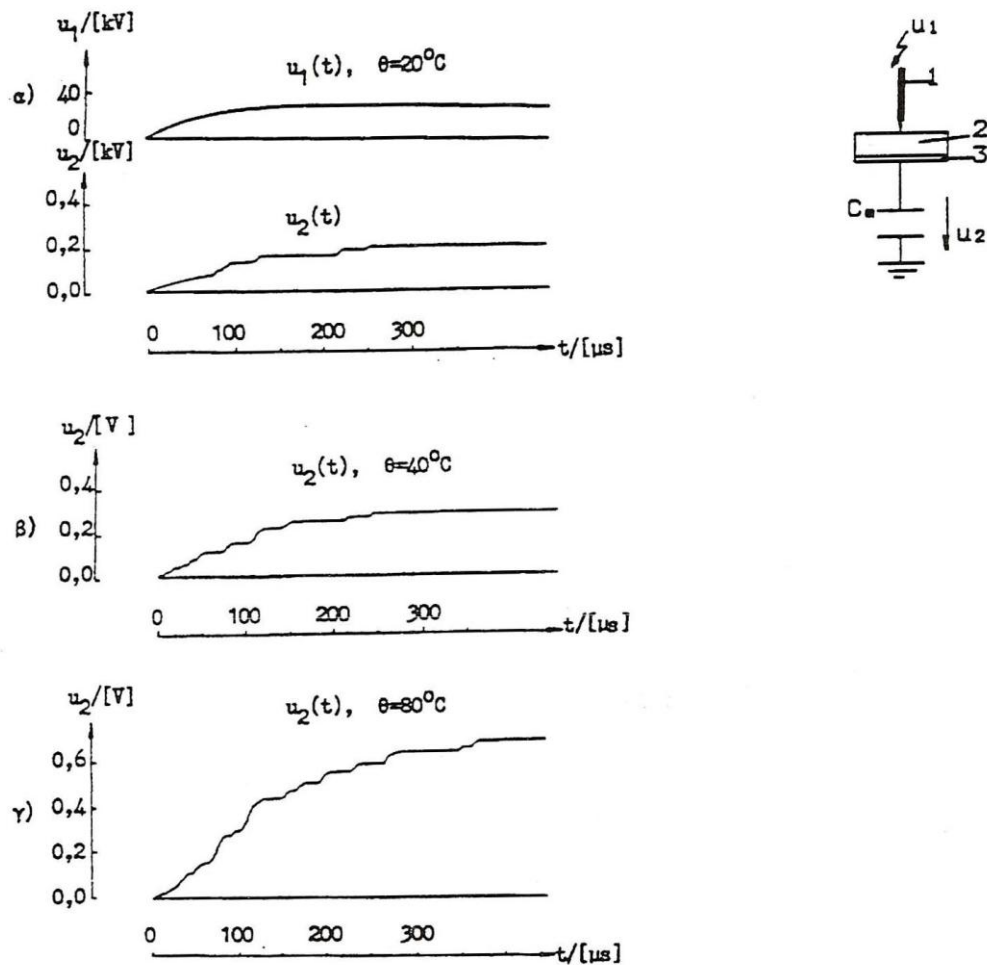
(α) στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροής των διπόλων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της ac τάσης και

(β) στην μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα των μονωτικών υλικών.

Έτσι, ένας μονωτής έχει εκτός από το χωρητικό ρεύμα I_C και ένα ρεύμα διαρροής I_R . Στην πράξη, το ρεύμα διαρροής αυξάνει, γιατί η αγωγιμότητα του μονωτή γίνεται μεγαλύτερη. Ορίζουμε ως συντελεστή απωλειών : $\tan \delta = \frac{I_R}{I_C}$. Η $\tan \delta$ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία. Υπενθυμίζουμε τον

τύπο (1.2.1.1-1) για τις διηλεκτρικές απώλειες: $W = \omega E^2 \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta$.

Αυξανόμενης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος ισχυροποιούνται οι μερικές εκκενώσεις. Αυτό φαίνεται παραστατικά από τα ακόλουθα παλμογραφήματα:



Σχήμα 1.2.1.5-1: Αύξηση των μερικών εκκενώσεων λόγω μεγαλύτερης θερμοκρασίας στο

περιβάλλον μέσο. α) $\theta=20^\circ\text{C}$, β) $\theta=40^\circ\text{C}$, γ) $\theta=80^\circ\text{C}$

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

2: Δοκίμιο pertinax πάχους 1mm και διαμέτρου 150mm

3: Ηλεκτρόδιο πλάκα διαμέτρου 150mm

Μορφή κρουστικής τάσης 250/2500 μs

Μέγιστη τιμή κρουστικής τάσης : $U_k=28,8\text{kV}$

u_1 :στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης

u_2 : άλματα δυναμικού σε έναν πυκνωτή μέτρησης

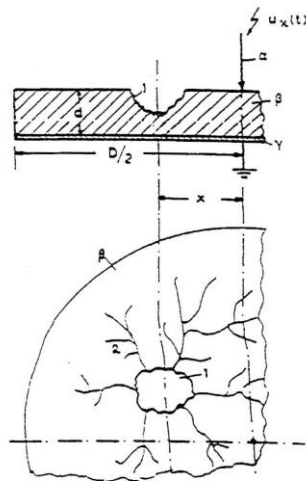
$C_m=1000\mu\text{F}$ σε σειρά με το δοκίμιο

Ο κυρίαρχος παράγοντας γήρανσης και διάτρησης στην πράξη θεωρείται ότι είναι οι μερικές εκκενώσεις. Προεξέχοντα ρόλο έχουν οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις γιατί σχετίζονται με χημικές μεταβολές στον όγκο του υλικού (σε αντίθεση με τις εξωτερικές εκκενώσεις που οφείλονται σε ξένες επικαθήσεις και μπορούν να περιοριστούν με προγραμματισμένες συνθήκες συντήρησης).

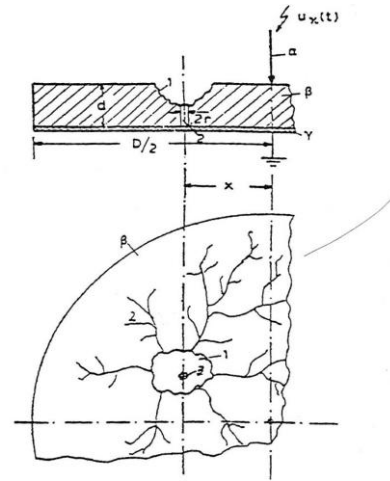
Οι εσωτερικές εκφορτίσεις λαμβάνουν χώρα στις ατέλειες της μικροδομής, όπως τα πλεγματικά κενά, τις ρωγμές, ή τους πόρους εντός του μονωτικού όπου το αέριο που είναι εγκλεισμένο (συνήθως αέρας) έχει μικρότερη διηλεκτρική αντοχή. Αρχικά το μέγεθος του πόρου ή το πλήθος των πόρων είναι μικρό και η μερική εκφόρτιση μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Με τη πάροδο όμως του χρόνου, η εκφόρτιση προκαλεί την διάβρωση των εσωτερικών επιφανειών του εγκλείσματος. Οι μερικές εκφορτίσεις μπορούν να τήξουν τοπικά τον μονωτή και να προκαλέσουν χημικούς μετασχηματισμούς. Τις περισσότερες φορές η διαδικασία καταλήγει στη δημιουργία ενός ηλεκτρικού δενδρίτη. Η διάβρωση του διηλεκτρικού λόγω των μερικών εκκενώσεων διαδίδεται σαν ένα διακλαδισμένο δένδρο. Τα "κλαδιά του δένδρου" είναι τα κανάλια διάβρωσης-νηματοειδή διαφόρων διαστάσεων. Στα κανάλια διάβρωσης πραγματοποιούνται οι εκκενώσεις αερίων. Είχαμε αναφέρει ότι ηλεκτρικούς δενδρίτες μπορεί να προκαλέσει και η ηλεκτρική γήρανση του υλικού υπό τάση. Ένας άλλος τύπος γήρανσης του υλικού είναι και η δημιουργία υδατικών δενδριτών. Η διαδικασία αυτή οδηγεί αναπόφευκτα στη δημιουργία ηλεκτρικών δενδριτών. Αν παρατηρήσουμε σε ένα οπτικό μικροσκόπιο ένα υδατικό δενδρίτη θα δούμε μια ανάπτυξη σε σχήμα θάμνου η οποία αποτελείται από εκατομμύρια εγκλείσματα ανά mm^3 , τα οποία περιέχουν νερό ή κάποιον υδατικό ηλεκτρολύτη. Η γήρανση αυτού του τύπου λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον με υγρασία. Τα εγκλείσματα αυτά δεν είναι τα ίδια αγωγίμα, γεγονός που σημαίνει ότι η ύπαρξή τους δεν οδηγεί σε μερικές εκφορτίσεις.

Επομένως, οι μερικές εκκενώσεις μειώνουν την τάση για την ηλεκτρική διάτρηση, τη θερμική διάτρηση καθώς και την θερμική τάση ανατροπής. Από πειράματα που έχουν γίνει με κρουστικές τάσεις της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$ και $10/200\mu\text{s}$, σε μέγιστες τιμές τάσεως πλησίον της περιοχής διάσπασης, έχει διαπιστωθεί ότι εκτός από την θερμική καταπόνηση δημιουργούνται μικρά θραύσματα στη θέση προσεχούς διάσπασης. Μπορεί κανείς να υποθέσει ότι στη περιοχή αυτή συμμετέχουν στην τεχνητή γήρανση του υλικού και οι δυνάμεις Coulomb. Η εικόνα την οποία παρουσιάζει το δοκίμιο κατά την γήρανση λέγεται εικόνα επιφανειακών διαταραχών και δίνεται στο σχήμα 1.2.1.5-1. Πρόκειται για μια μόνιμη παραμόρφωση του υλικού, η οποία σχετίζεται με την εκδήλωση φωτεινής ακτινοβολίας υπό μορφή δενδρίτη κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Τα σπήλαια και ο κρατήρας έχουν αποδοθεί στην θερμική καταπόνηση του υλικού, ως αποτέλεσμα κάποιας τήξης του στα ίχνη του επιφανειακού δενδρίτη. Τα θραύσματα δημιουργούνται κυρίως στη περιοχή του κρατήρα, η οποία είναι και η θέση όπου θα γίνει η διάτρηση. Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών συρρικνώνεται όσο αυξάνει η διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης.

Όταν τελικά γίνει η διάτρηση μετά από m κρούσεις, τότε παρατηρεί κανείς μια μικρή τρύπα με διάμετρο μικρότερη του $0,1\text{mm}$, ως προέκταση του κρατήρα.



σχήμα 1.2.1.5-2



σχήμα 1.2.1.5-3

Σχήμα 1.2.1.5-2: Παράδειγμα εικόνας επιφανειακών διαταραχών κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$ για μέγιστη τιμή U_k πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση.

α: ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 1mm

β: στερεό μονωτικό υλικό

γ: πλάκα

1: κρατήρας

2: σπήλαια

Σχήμα 1.2.1.5-3: Παράδειγμα της εικόνας διάτρησης μετά από την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$ για μέγιστη τιμή U_k πλησίον τιμών της περιοχής για τη διάτρηση.

α: ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας 1mm

β: στερεό μονωτικό υλικό

γ: πλάκα

1: κρατήρας

2: σπήλαια

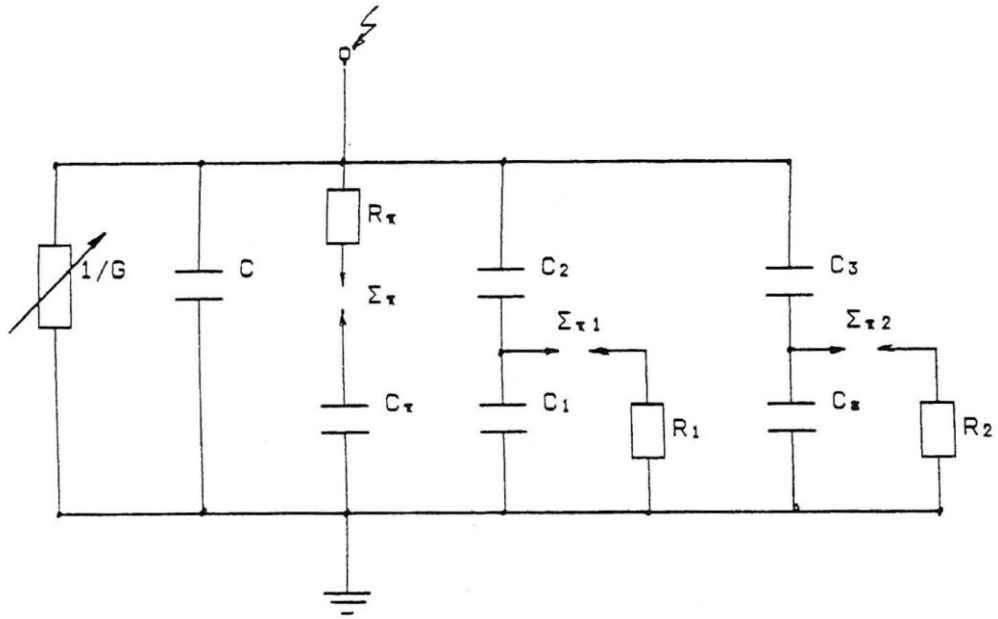
3: οπή διάτρησης

Παρατηρώντας κανείς τα προηγούμενα δύο σχήματα , βλέπει ότι ο κρατήρας και η τρύπα διάτρησης σχηματίζονται σε μια απόσταση χ από την ακίδα (μερικά mm) αν και η μέγιστη τιμή του πεδίου εμφανίζεται στην κορυφή της ακίδας. Αυτό οφείλεται :

- Στην στατιστικότητα του φαινομένου καθώς είναι στατιστικά αδύνατο να βρίσκεται ακριβώς κάτω από την ακίδα η επικρατέστερη θέση διαταραχής.
- Σε πολύ μικρή απόσταση από την ακίδα μετακινούνται, υπό την επίδραση της επιφανειακής συνιστώσας του πεδίου, οι ετερόνυμοι προς την ακίδα ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς του δοκιμίου, με αποτέλεσμα να δημιουργείται προέκταση του ίχνους της ακίδας.

Αυτή η παρατήρηση ισχύει και για τη θέση της τρύπας διάτρησης υπό κρουστικές τάσεις χειρισμών, εναλλασσόμενη τάση καθώς και συνεχής τάση. Η διαφορά είναι ότι σε αυτές τις τρεις περιπτώσεις δεν έχει παρατηρηθεί η εκδήλωση κρατήρα ή σπηλαίων , ούτε η εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη κατά την γήρανση πολυμερών στερεών μονωτικών.

Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης δίδεται στο σχήμα 1.2.1.5-4. Στο κύκλωμα αυτό η παράλληλη σύνδεση της μεταβλητής αγωγιμότητας εκφράζει τις θερμικές απώλειες (απώλειες Joule και ενίσχυσή τους από τις μερικές εκκενώσεις) και την καταπόνηση του υλικού από τη θερμότητα του περιβάλλοντος. Οι πυκνωτές C_{π} εκφράζουν την πόλωση του υλικού λόγω της οποίας συμβαίνει η μηχανική τάνυσή του από τις δυνάμεις του πεδίου. Η διαδρομή εκκένωσης εκφράζεται από τους σπινθηριστές Σ_{π} και οι αντιστάσεις των τόξων από τις R_{π} .



Σχήμα 1.2.1.5-4: Ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

C : ιδανική χωρητικότητα

C_1 : χωρητικότητα που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων)

C_2 : χωρητικότητα που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του στερεού μονωτικού

$C_ε$: χωρητικότητα που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών

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

C_3 : χωρητικότητα που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του επιφανειακού φιλμ

R_1 : αντίσταση τόξου του $\Sigma\pi_1$

R_2 : αντίσταση τόξου του $\Sigma\pi_2$

$R_π$: αντίσταση τόξου του $\Sigma\pi$

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

1.2.2 Κβαντομηχανική θεωρία.

Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων - κυρίως ηλεκτρόνια. Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την ενέργεια Fermi των ηλεκτροδίων διευκολύνει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον μηχανισμό παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η ενέργεια αυτή μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης C_m ανά άλμα δυναμικού μέσω της σχέσης (λαμβάνοντας υπόψη την αντίσταση R από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης):

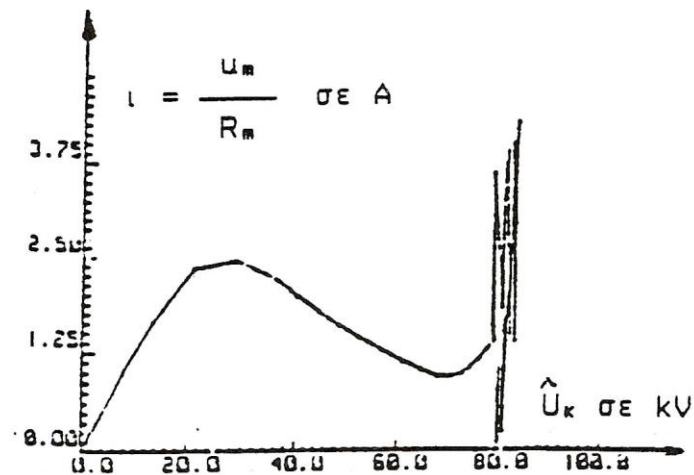
$$W = \frac{0,5\Delta u}{1 - e^{-\frac{t}{RC_m}}} \text{ σε eV} \quad (1.2.2-1)$$

όπου t : ο χρόνος εκφόρτισης του C_m κατά τη διάρκεια μιας μερικής εκκένωσης

Δu : το άλμα δυναμικού σε V

Η γήρανση και η διάσπαση κατά τη θεωρία αυτή σχετίζονται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί ότι το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά την γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες. Κατά την διάτρηση το φάσμα είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (αρκετά μεγαλύτερες από 20eV).

Καθοριστικός παράγοντας για τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά με διηλεκτρικές σταθερές 2,5-4,5, έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2MV/cm. Για τιμές πεδίου μέχρι 0,5 MV/cm η ειδική αγωγιμότητα αυξάνει κατά τη σχέση 1.2.1.4-1 ($\sigma = \sigma_0 e^{\frac{w}{kT}}$). Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου η σχέση δεν ισχύει. Η παραγωγή ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον *ιονισμό με κρούσεις*. Ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εμφάνιση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό (κατά την αύξηση της τάσης παρατηρείται μείωση του ρεύματος). Το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια. Ο δεινδρίτης που μπορεί να παρατηρηθεί είναι το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ενώ αντίστοιχες δεινδροειδούς μορφής εκπομπές συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της ακτινοβολίας.



Σχήμα 1.2.2-1: Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης όπου διακρίνεται η εμφάνιση αρνητικής διαφορικής αντίστασης.

Μια διαδρομή δενδροειδούς μορφής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας αντιστοιχεί σε μια κρούση φορτίου η οποία περιλαμβάνει ελεύθερα ηλεκτρόνια που είχαν την ίδια ενεργειακή στάθμη-κατά την άφιξή τους στην άνοδο προκάλεσαν εκπομπή του ίδιου μήκους κύματος. Λόγω του εύρους της παραπάνω ακτινοβολίας, μπορούμε να υποθέσουμε ότι υπάρχουν στο υλικό διάφορες ενεργειακές στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη, που είναι καθοριστικής σημασίας για την εκδήλωση του ιονισμού. Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας

1.2.2.1 Ιονισμός με κρούσεις.

Ο ιονισμός με κρούσεις είναι γνωστός και ως φαινόμενο χιονοστιβάδας. Παρουσία ενός ισχυρού πεδίου, ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στη ζώνη αγωγιμότητας ενός διηλεκτρικού μπορεί να επιταχυνθεί μέχρι να αποκτήσει επαρκώς μεγάλη ενέργεια ώστε όταν συγκρουστεί με ένα άτομο της μητρικής δομής του στερεού να το ιονίσει. Όταν το ηλεκτρόνιο έχει διανύσει απόσταση l ενώ του ασκείται δύναμη από το πεδίο, E , τότε η ενέργεια που αποκτά είναι eEl . Αν η ενέργεια αυτή είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο E_g , τότε το ηλεκτρόνιο μπορεί μέσω μιας σύγκρουσης με τις πλεγματικές ταλαντώσεις, να διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο και να προκαλέσει τη μετάβασή του από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, να προκαλέσει δηλαδή τη ρήξη ενός δεσμού. Τα δύο ηλεκτρόνια υπάρχουν πλέον ελεύθερα και μπορούν να ιονίσουν και άλλα άτομα της μητρικής δομής προκαλώντας με αυτό τον τρόπο το φαινόμενο της χιονοστιβάδας, του οποίου συνέπεια είναι η εμφάνιση ενός σημαντικού ρεύματος. Τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας από τα οποία ξεκίνησε αρχικά η χιονοστιβάδα, είτε υπήρχαν εκ των προτέρων στην ζώνη αγωγιμότητας είτε βρέθηκαν εκεί εγχέόμενα από τα ηλεκτρόδια του μετάλλου. Η έγχυση οφείλεται από την υποβοηθούμενη

από ισχυρό πεδίο θερμική εκπομπή από τη στάθμη Fermi του μετάλλου προς τη ζώνη αγωγιμότητας του διηλεκτρικού. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπως η διάσπαση ορισμένων λεπτών στρωμάτων πολυμερών σε μικρή χρονική διάρκεια, έχει προταθεί η λύση της έγχυσης ηλεκτρικών φορέων μέσω του φαινομένου της σήραγγας (για περιοχές του φράγματος δυναμικού μικρότερες από 50 Angstrom, οπότε και γίνεται δυνατή η απευθείας μεταφορά του φορέα μέσα από το φράγμα δυναμικού). Η αλματώδης αύξηση της έγχυσης ηλεκτρονίων από το μεταλλικό ηλεκτρόδιο προς το μονωτή μπορεί να αποτελέσει άλλον ένα μηχανισμό διάσπασης του διηλεκτρικού.

Από την θεωρητική μελέτη του ιονισμού με κρούσεις στα στερεά μονωτικά, προκύπτει η ακόλουθη σχέση για το φορτίο Q που αναπτύσσεται στον πυκνωτή μέτρησης.

$$Q = Q_0 e^{\frac{A(E^2 - E_0^2)}{E_0^2}} \quad (1.2.2.1-1)$$

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

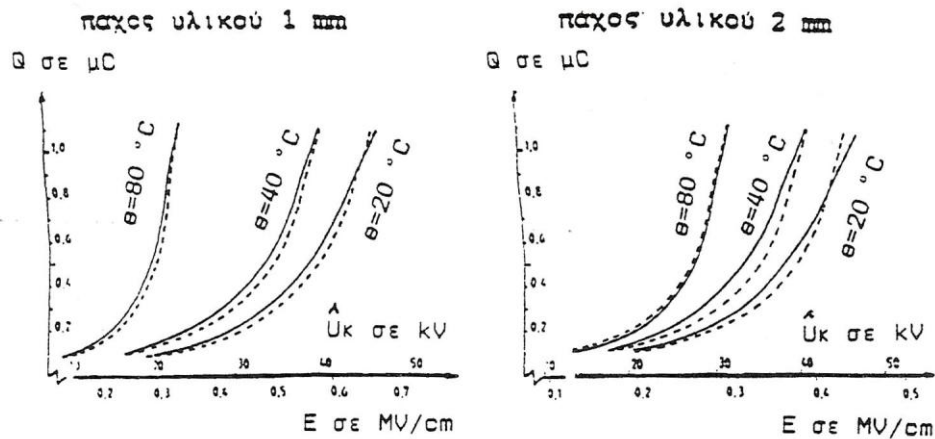
Q_0 το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

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

A ένας συντελεστής του υλικού που εξαρτάται από τον χρόνο

Με βάση τη σχέση αυτή έχει γίνει προσέγγιση πειραματικών χαρακτηριστικών $Q=f(U_{k,max})$ κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις χειρισμών μορφής 250/2500μs, η οποία τάση προκαλεί μόνο εσωτερικές μερικές εκκενώσεις. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες και τα αποτελέσματα αναπαρίστανται στις ακόλουθες γραφικές. Υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ θεωρίας (διακεκομμένη γραμμή) και πειραμάτων (συνεχής γραμμή). Η θεωρητική προσέγγιση έδειξε ότι:

- οι μερικές εκκενώσεις ξεκινούν σε τιμές πεδίου περίπου $E=0,2 \text{ MV/cm}$.
- για τιμές πεδίου μέχρι $0,5 \text{ MV/cm}$ η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας διέπεται από τη σχέση 1.2.1.4-1 ($\sigma = \sigma_0 e^{\frac{w}{kT}}$).
- για μεγαλύτερες τιμές πεδίου ισχύει η σχέση (1.2.2.1-1) δηλαδή
$$Q = Q_0 e^{\frac{A(E^2 - E_0^2)}{E_0^2}}$$
. Άρα συμβαίνει πλέον ιονισμός με κρούσεις.
- η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ενισχύει σημαντικά τα φαινόμενα ιονισμού.



Σχήμα 1.2.2.1-1: Χαρακτηριστικές $Q=f(U_{k,max})$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα και συντελεστή υλικού $A=0,48$.

1.2.2.2 Φάσμα H/M ακτινοβολίας κατά την διάτρηση στερεού μονωτικού.

Οι τάσεις δοκιμής που χρησιμοποιούνται για την κβαντομηχανική ερμηνεία του μηχανισμού διάτρησης είναι κυρίως κρουστικής μορφής. Πειράματα έχουν γίνει και με εναλλασσόμενες και ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (1.2.2-1) όπως και κατά την γήρανση. Μέσω της σχέσης αυτής και τιμές από παλμογραφήματα κρούσεων φορτίου μπορούμε να υποθέσουμε ότι η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων X.

Επίσης, από παλμογραφήματα μπορεί κανείς να παρατηρήσει την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Ο αριθμός των κρούσεων περιορίζεται ως προς εκείνον κατά την γήρανση αλλά η τιμή του ρεύματος αυξάνει σημαντικά. Μπορεί να υποθέσει κανείς ότι ο μηχανισμός της διάτρησης έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με εκείνον της γήρανσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το φάσμα της H/M ακτινοβολίας που παράγεται στα στερεά μονωτικά κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων γήρανσης και διάτρησης εξαρτάται σημαντικά από τον συντελεστή χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων. Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο, τόσο μειώνεται το εύρος της παραπάνω ακτινοβολίας. Όταν για παράδειγμα η ακίδα έχει ακτίνα καμπυλότητας 0,3mm αντί για 1mm, έχει βρεθεί πειραματικά ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκτείνεται ως το ορατό τμήμα της.

Η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται -όπως και η διάτρηση- με την εκπομπή μαλακών ακτίνων X. Ενώ ο φωτεινός δενδρίτης και ο σχετός διάσπασης που παρατηρούνται κατά την

ηλεκτρική καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού αφορούν το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό.

1.2.3 Επιφανειακή διάσπαση και 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 μια ομάδα ελεύθερων ηλεκτρονίων θα προκαλέσει τη 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 (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 Å. Έτσι, εκτός από τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις οι οποίες οφείλονται σε ξένες επικαθήσεις κυρίως και προκαλούν μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στην επιφάνεια, μπορούμε να υποθέσουμε ότι επικρατούν και άλλοι λόγοι όπως και κατά τη διάτρηση.

Πειράματα σε στερεά μονωτικά υπό 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*.

1.2.4 Συνδυασμός μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής θεωρίας.

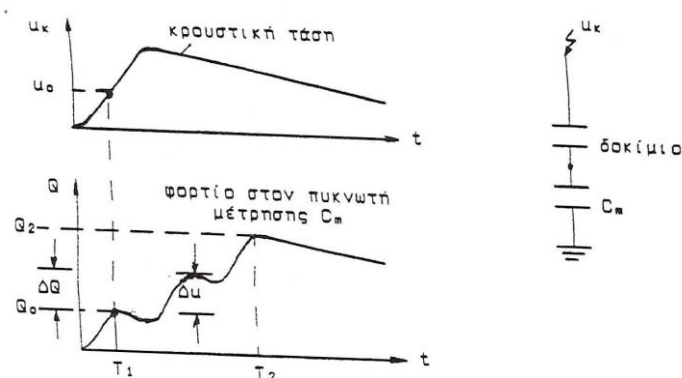
Η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών δίνει πληροφορίες για το *μη ορατό φάσμα* της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στα υλικά κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους. Οι πληροφορίες αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεώρηση. Αντιθέτως, η τελευταία επιτρέπει το διαχωρισμό των μερικών εκκενώσεων σε εσωτερικές και εξωτερικές κάτι που η κβαντομηχανική αδυνατεί να κάνει. Ο ιονισμός με κρούσεις δεν μπορεί να ερμηνεύσει το διαχωρισμό των μερικών εκκενώσεων διότι ο συντελεστής A στη σχέση (1.2.2.1-1) αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του. Αν για παράδειγμα γίνουν πειράματα με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs και βασιστούμε στη σχέση (1.2.2.1-1) για τη δημιουργία των πειραματικών χαρακτηριστικών θα δούμε ότι ο συντελεστής A παίρνει διαφορετική τιμή από ότι υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Αυτό όμως μπορεί να θεωρηθεί μόνο ως μια ένδειξη ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις χωρίς όμως να καθορίζεται η περιοχή εκδήλωσής του (στον όγκο ή στην επιφάνεια του μονωτικού ή και στις δύο περιοχές). Έτσι η κβαντομηχανική θεωρία δεν μπορεί να διαχωρίσει τις μερικές εκκενώσεις.

Για την καλύτερη ερμηνεία των φαινομένων απαιτείται να γίνει συνδυασμός των δύο θεωριών. Αν θεωρήσουμε ως E_0 τη τιμή της πεδιακής έντασης για την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (περίπου 0,2 MV/cm) τότε τα φαινόμενα που γίνονται στο υλικό μπορούν να αποδοθούν ως ακολούθως:

- Για $E < E_0$: Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική.
- Για $E > E_0$: Εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις και η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διέπεται από τη σχέση $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{W}{kT}}$.
- Για $E \gg E_0$: Εμφανίζεται αρνητική διαφορική αντίσταση και εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις. Δεν ισχύει η σχέση $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{W}{kT}}$, αλλά η σχέση $Q = Q_0 e^{\frac{A(E^2 - E_0^2)}{E_0^2}}$.
- Το φάσμα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται εξαρτάται από τη τιμή E . Για τιμές $W > 20\text{eV}$ συμβαίνει διάτρηση.

1.3 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων.

Για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων μέσω παλμογραφημάτων έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, οι κυριότερες από τις οποίες δίνονται στο ακόλουθο σχήμα για την περίπτωση των κρουστικών τάσεων.



Σχήμα 1.3-1: Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

T_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

T_2 : Χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

Q_0 : Φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

Q_2 : Φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

u_k : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

u_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή)

Δu : Άλμα δυναμικού.

ΔQ : Αύξηση φορτίου.

Με βάση τις έννοιες αυτές έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q=f(|U_{k,max}|)$ η οποία είναι εκθετικής μορφής με αποκλίσεις οι οποίες έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής όπως στις δυνάμεις Coulomb λόγω των μηχανικών βλαβών που παρατηρούνται στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών διαπιστώνεται ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου Q στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις στην επιφάνεια του μονωτικού.

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

- οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στη περιοχή μηδενισμού της τάσης ή γενικότερα στην περιοχή της μέγιστης χρονικής μεταβολής της.
- οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή όπου δεν μηδενίζεται η τάση.

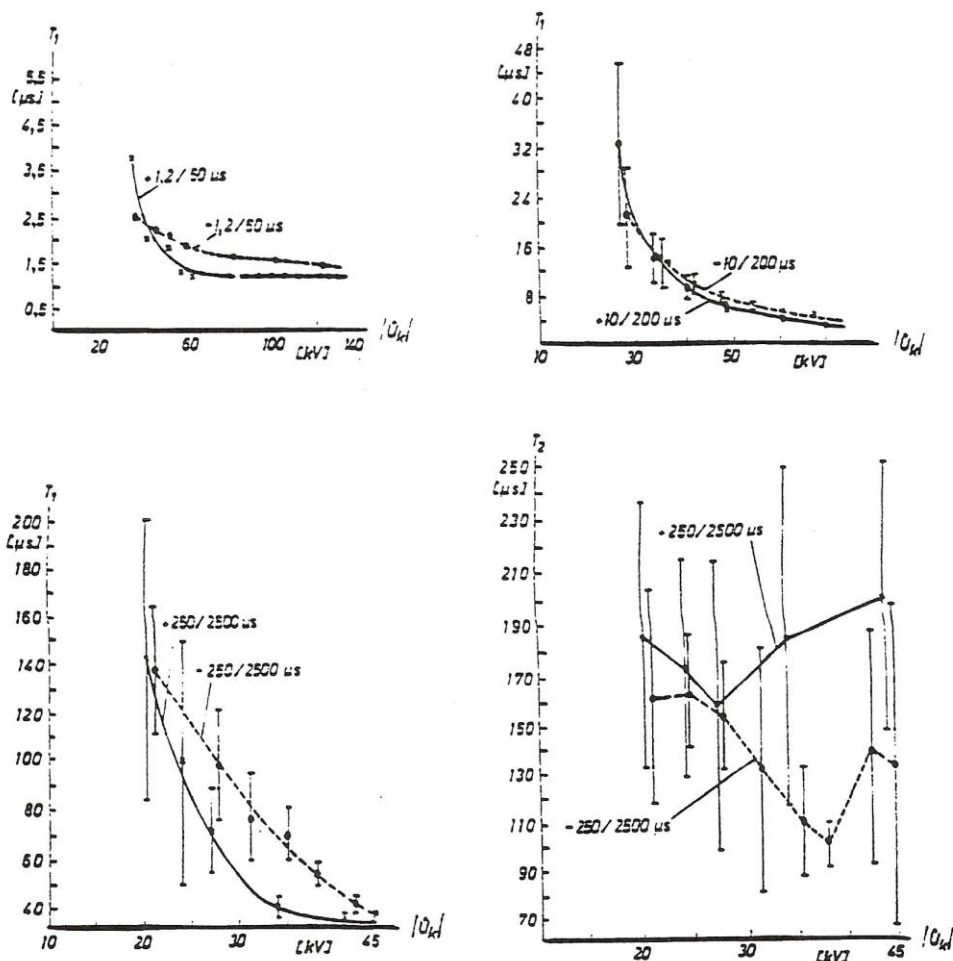
Τα παραπάνω σημαίνουν ότι για καταπονήσεις με κρουστικές τάσεις, οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης ενώ οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις κατά τη διάρκεια της ουράς της κρουστικής τάσης.

Μια πειραματική προσέγγιση του παραπάνω διαχωρισμού μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, έχει δοθεί από παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού σε στερεά οργανικά μονωτικά, με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών που συνδυάστηκαν με οπτικές παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών. Τα αποτελέσματα των στατιστικών μετρήσεων που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \sim 2,5 \div 4,5$, από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ των μερικών εκκενώσεων δίδονται στον πίνακα 1.3-1. Προκύπτει ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης $1,2/50\mu s$) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

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

Πίνακας 1.3-1: Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

Μια άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, ως προς τον χρόνο εκδήλωσής τους, έχει βασιστεί στις χαρακτηριστικές $T_1=f(|U_{k,max}|)$ και $T_2=f(|U_{k,max}|)$ σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών (όπου T_1 είναι ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων και T_2 ο χρόνος περαίωσής των). Και σε αυτή τη περίπτωση καταλήγει κανείς στα ίδια συμπεράσματα.



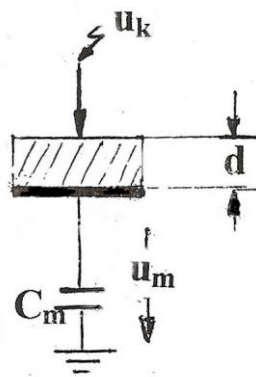
Σχήμα 1.3-2: 1) Χαρακτηριστική $T_1=f(|U_{k,max}|)$ κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2mm και $\epsilon_r \sim 2,5 \div 4,5$) με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, 10/200μs και 250/2500μs.
 2) Χαρακτηριστική $T_2=f(|U_{k,max}|)$ κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2mm και $\epsilon_r \sim 2,5 \div 4,5$) με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, 10/200μs και 250/2500μs.

Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα

2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της σύνθετης αντίστασης και της ενέργειας δοκιμίων *petinax* εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις ζεύξεως. Ειδικότερα έγιναν συνολικά 4 σειρές πειραμάτων για δύο δοκίμια πάχους ενός και δύο χιλιοστών. Κάθε ένα από τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκε σε κρουστικές τάσεις +250/2500μs και -250/2500μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου. Χρησιμοποιήθηκε διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Η ακίδα ήταν με ακτίνα καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$ και η χωρητικότητα του μετρητή μέτρησης $C_m=1000\text{nF}$. Κάθε φορά καταγραφόταν η μέγιστη τιμή κρουστικής τάσης $U_{k,max}$, οι χρόνοι έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων καθώς και οι στιγμιαίες τιμές φορτίου στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων. Για κάθε επίπεδο τάσεως πάρθηκαν δέκα μετρήσεις.



Σχήμα 2-1: Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Για την μελέτη των γραφημάτων (βλέπε σχήμα 2-2) που προκύπτουν από τις μετρήσεις μας αλλά και την ερμηνεία των φαινομένων, ορίζουμε τα ακόλουθα μεγέθη:

1. Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης:

$$\hat{E}_k = \frac{2U_k}{R \ln\left(\frac{4d}{R}\right)} \quad (2-1)$$

όπου U_k : μέγιστη τιμή κρουστικής τάσης

R : η ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας

d : το πάχος του δοκιμίου

2. Στιγμιαία τιμή της U_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων:

$$u_1 = \frac{q_1}{C_m} \quad (2-2)$$

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

C_m : πυκνωτής μέτρησης

3. Στιγμιαία τιμή της U_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων:

$$u_2 = \frac{q_2}{C_m} \quad (2-3)$$

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

C_m : πυκνωτής μέτρησης

4. Μεταβολή της στιγμιαίας τιμής της τάσης στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων:

$$\Delta u = u_2 - u_1 \quad (2-4)$$

5. Σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων:

$$Z_1 = \frac{t_1}{C_m} \quad (2-5)$$

όπου t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

Απόδειξη:
$$i_1 = \frac{q_1}{t_1} = \frac{C_m u_1}{t_1} \rightarrow Z_1 = \frac{u_1}{i_1} = \frac{u_1}{\left(\frac{C_m u_1}{t_1}\right)} \rightarrow Z_1 = \frac{t_1}{C_m}$$

6. Σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων:

$$Z_2 = \frac{t_2}{C_m} \quad (2-6)$$

όπου t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

Απόδειξη:
$$i_2 = \frac{q_2}{t_2} = \frac{C_m u_2}{t_2} \rightarrow Z_2 = \frac{u_2}{i_2} = \frac{u_2}{\left(\frac{C_m u_2}{t_2}\right)} \rightarrow Z_2 = \frac{t_2}{C_m}$$

7. Μεταβολή της σύνθετης αντίστασης στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων:

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 \quad (2-7)$$

8. Στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων:

$$W_1 = u_1^2 C_m \quad (2-8)$$

Απόδειξη: $W_1 = u_1 i_1 t_1 = u_1 \left(\frac{C_m u_1}{t_1} \right) t_1 \rightarrow W_1 = u_1^2 C_m$

9. Στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων:

$$W_2 = u_2^2 C_m \quad (2-9)$$

Απόδειξη: $W_2 = u_2 i_2 t_2 = u_2 \left(\frac{C_m u_2}{t_2} \right) t_2 \rightarrow W_2 = u_2^2 C_m$

10. Μεταβολή της στιγμιαίας τιμής της τάσης στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων:

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad (2-10)$$

11. Στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων:

$$P_1 = \frac{W_1}{t_1} \quad (2-11)$$

12. Στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων:

$$P_2 = \frac{W_2}{t_2} \quad (2-12)$$

13. Μεταβολή της ισχύος στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων:

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (2-13)$$

14. Ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων:

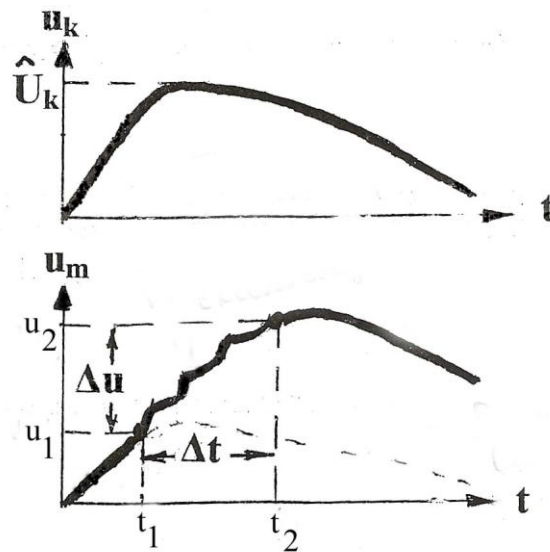
$$\Delta W_e = 0,5 * \Delta u \quad (2-14)$$

Για τον υπολογισμό των τυπικών αποκλίσεων βασιστήκαμε στον τύπο από τη θεωρία των σφαλμάτων:

$$S = \delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \theta} \delta \theta \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial v} \delta v \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \omega} \delta \omega \right)^2 + \dots} \quad (2-15)$$

για συνάρτηση $f=f(\theta, v, \omega, \dots)$.

Κάποια από τα προαναφερθέντα μεγέθη φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2-2: Χαρακτηριστικές $U_{k,max}=f(t)$ της μέγιστης τιμής της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης καθώς και της μετρηθείσας τιμής τάσεως στον C_m , για τον καθορισμό των εννοιών.

Εκτός των ανωτέρων μεγεθών παρατίθενται και γραφήματα της μέσης τιμής των μεγεθών u_1 , u_2 , t_1 και t_2 . Για την μελέτη αυτή βασιστήκαμε στους τύπους:

$$\delta = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2-16)$$

$$\text{Μέση τιμή} = \frac{\sum_{i=1}^n x}{n} \pm \delta \quad (2-17)$$

όπου S : τυπική απόκλιση

δ : διακύμανση της μέσης τιμής σε περίπτωση επανάληψης των μετρήσεων

n : αριθμός των μετρήσεων ανά επίπεδο τάσεως (στην περίπτωση μας $n=10$)

Συνεπώς, ορίζουμε:

$$\begin{aligned} u_{1\mu} &= u_1 \pm \delta_{u1} \\ u_{2\mu} &= u_2 \pm \delta_{u2} \\ t_{1\mu} &= t_1 \pm \delta_{t1} \\ t_{2\mu} &= t_2 \pm \delta_{t2} \end{aligned} \quad (2-18)$$

Στο επόμενο κεφάλαιο παρατίθενται οι προκύπτουσες πειραματικές καμπύλες.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΩΝ PERTINAX ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΝΑΡΞΗ
ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΑΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ
ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ.

3.1 Δοκίμια *pertinax* πάχους 1mm εντός μονωτικού ελαίου

θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

U _k kV	E _k MV/cm	C _m nF	q ₁ μC	q ₂ μC	u ₁ V	u ₂ V	Δu V	t ₁ μs	t ₂ μs	Δt μs
10,12	0,150	1000	0,013		0,013					
			0,0004		0,0004					
13,38	0,199	1000	0,018	0,024	0,018	0,024	0,006	261	326,2	65,2
			0,001	0,002	0,001	0,002	0,02	124,01	44,2	131,65
16,85	0,251	1000	0,021	0,044	0,021	0,044	0,023	120,6	231,18	110,58
			0,004	0,004	0,004	0,004	0,006	76,15	19,31	78,56
20,34	0,303	1000	0,021	0,085	0,021	0,085	0,064	56,7	210,6	153,9
			0,002	0,009	0,002	0,009	0,009	6,88	33,9	34,59
23,17	0,345	1000	0,025	0,188	0,025	0,188	0,163	62,77	270	207,23
			0,005	0,017	0,005	0,017	0,018	22,75	72,9	76,37
27,4	0,408	1000	0,028	0,235	0,028	0,235	0,207	49,95	294,5	244,55
			0,002	0,007	0,002	0,007	0,007	6,88	82,73	83,02
30,55	0,455	1000	0,026	0,383	0,026	0,383	0,357	51,97	310,48	258,51
			0,001	0,021	0,001	0,021	0,021	10,3	34,93	36,42
34,2	0,509	1000	0,044	0,6	0,044	0,6	0,556	40,5	233,55	193,05
			0,013	0,025	0,013	0,025	0,028	4,26	52,56	52,73
37,4	0,557	1000	0,03	0,836	0,03	0,836	0,806	39,15	291,6	252,45
			0,002	0,068	0,002	0,068	0,068	10,8	57,6	58,6
40,68	0,606	1000	0,041	1,03	0,041	1,03	0,989	30,37	286,2	255,83
			0,021	0,091	0,021	0,091	0,093	5,22	32,4	32,82
44,46	0,662	1000	0,051	1,14	0,051	1,14	1,089	25,65	295,6	269,95
			0,029	0,093	0,029	0,093	0,097	5,45	28,76	29,27

Πίνακας 3.1-1: Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης δοκιμών *pertinax* εντός μονωτικού

ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs, λόγω μερικών

εκκενώσεων, βάσει των μεγεθών στα σχήματα (2-1,2-2) και τις σχέσεις (2-1) με (2-4).

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m: πυκνωτής μέτρησης

u₁: στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u₂: στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

q₁: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q₂: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

t₁: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t₂: χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δu = u₂ - u₁, Δt = t₂ - t₁

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.

U_k kV	Z_1 Ω	Z_2 Ω	ΔZ Ω
10,12			
13,38	261 124,01	326,2 44,2	65,2 131,65
16,85	120,6 76,15	231,18 19,31	110,58 78,56
20,34	56,7 6,88	210,6 33,9	153,9 34,59
23,17	62,77 22,75	270 72,9	207,23 76,37
27,4	49,95 6,88	294,5 82,73	244,55 83,02
30,55	51,97 10,3	310,48 34,93	258,51 36,42
34,2	40,5 4,26	233,55 52,56	193,05 52,73
37,4	39,15 10,8	291,6 57,6	252,45 58,6
40,68	30,37 5,22	286,2 32,4	255,83 32,82
44,46	25,65 5,45	295,6 28,76	269,95 29,27

Πίνακας 3.1-2 : Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης των στερεων μονωτικών perlinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs, λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στα σχήματα (2-1), (2-2) και στις σχέσεις (2-5), (2-6) και (2-7).

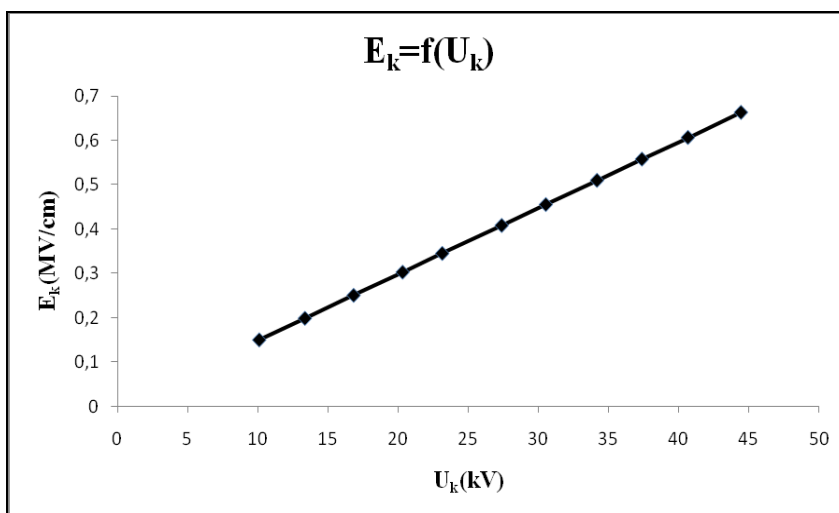
U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.



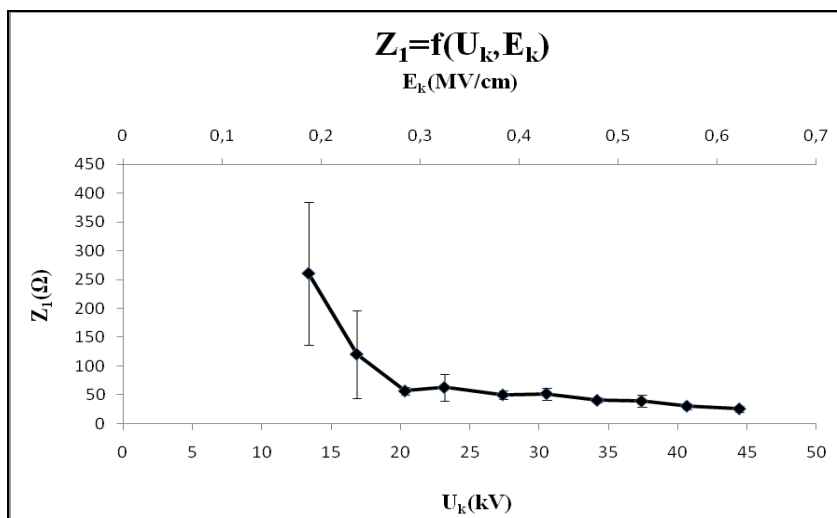
Σχήμα 3.1-1: Χαρακτηριστική $E_k=f(U_k)$ των στερεών μονωτικών πάχους 1mm και διαμέτρου 150mm.

Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα - πλάκα.

Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας $R=0,9\text{mm}$.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

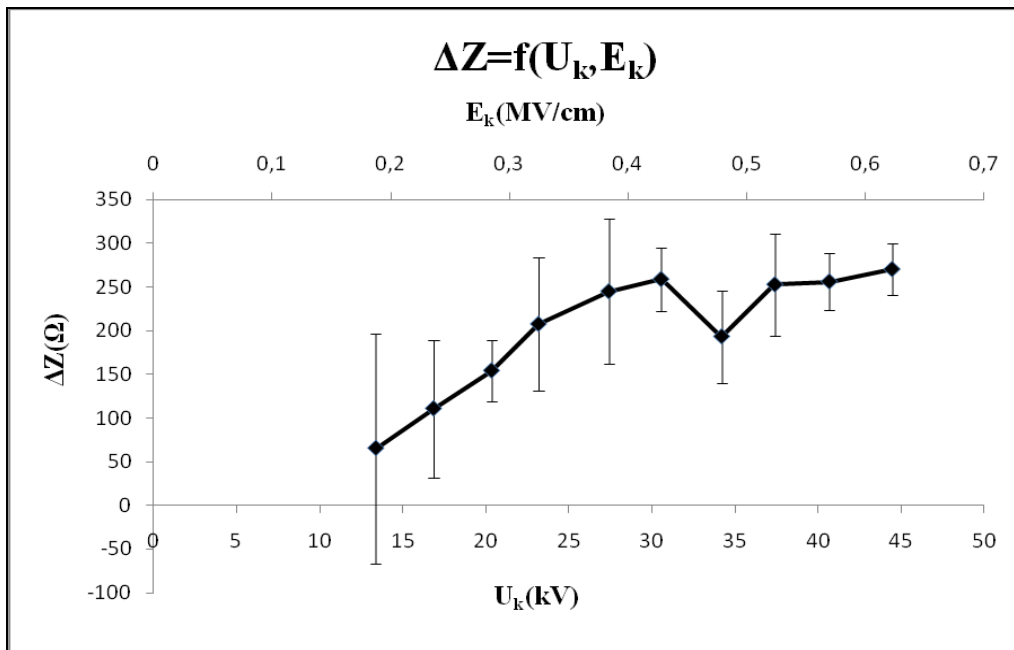
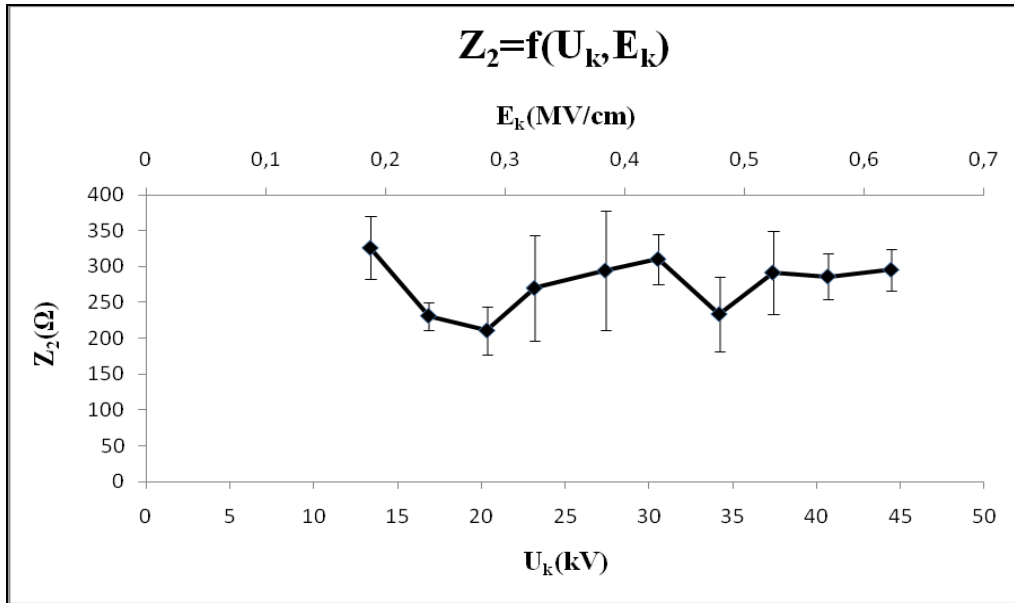


Σχήμα 3.1-2: Χαρακτηριστική $Z_1=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 1 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.1-3: Χαρακτηριστική $Z_2=f(U_k, E_k)$ και $\Delta Z=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 1 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$: μεταβολή της σύνθετης αντίστασης στον C_m

U_k kV	E_k MV/cm	C_m nF	q_1 μC	q_2 μC	u_1 V	u_2 V	Δu V	t_1 μs	t_2 μs	Δt μs
10,12	0,150	1000	0,013		0,013					
			0,0004		0,0004					
13,38	0,199	1000	0,018	0,024	0,018	0,024	0,006	261	326,2	65,2
			0,001	0,002	0,001	0,002	0,02	124,01	44,2	131,65
16,85	0,251	1000	0,021	0,044	0,021	0,044	0,023	120,6	231,18	110,58
			0,004	0,004	0,004	0,004	0,006	76,15	19,31	78,56
20,34	0,303	1000	0,021	0,085	0,021	0,085	0,064	56,7	210,6	153,9
			0,002	0,009	0,002	0,009	0,009	6,88	33,9	34,59
23,17	0,345	1000	0,025	0,188	0,025	0,188	0,163	62,77	270	207,23
			0,005	0,017	0,005	0,017	0,018	22,75	72,9	76,37
27,4	0,408	1000	0,028	0,235	0,028	0,235	0,207	49,95	294,5	244,55
			0,002	0,007	0,002	0,007	0,007	6,88	82,73	83,02
30,55	0,455	1000	0,026	0,383	0,026	0,383	0,357	51,97	310,48	258,51
			0,001	0,021	0,001	0,021	0,021	10,3	34,93	36,42
34,2	0,509	1000	0,044	0,6	0,044	0,6	0,556	40,5	233,55	193,05
			0,013	0,025	0,013	0,025	0,028	4,26	52,56	52,73
37,4	0,557	1000	0,03	0,836	0,03	0,836	0,806	39,15	291,6	252,45
			0,002	0,068	0,002	0,068	0,068	10,8	57,6	58,6
40,68	0,606	1000	0,041	1,03	0,041	1,03	0,989	30,37	286,2	255,83
			0,021	0,091	0,021	0,091	0,093	5,22	32,4	32,82
44,46	0,662	1000	0,051	1,14	0,051	1,14	1,089	25,65	295,6	269,95
			0,029	0,093	0,029	0,093	0,097	5,45	28,76	29,27

Πίνακας 3.1-3: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας των στερεών μονωτικών pertinax

εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs, λόγω μερικών εκκενώσεων, με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στα σχήματα (2-1), (2-2) και στις σχέσεις (2-1) με (2-4).

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m : πυκνωτής μέτρησης

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά το πέρας 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

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u = u_2 - u_1$, $\Delta t = t_2 - t_1$

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.

U_k kV	W_1 nWs	W_2 nWs	ΔW nWs	P_1 μW	P_2 μW	ΔP μW	ΔW_e eV
10,12	0,169						
	0,0104						
13,38	0,324	0,576	0,252	1,241	1,766	0,52	0,003
	0,036	0,096	0,103	0,606	0,379	0,71	0,0011
16,85	0,441	1,936	1,495	3,657	8,374	4,72	0,0115
	0,168	0,352	0,39	2,697	1,676	3,17	0,0028
20,34	0,441	7,225	6,784	7,778	34,307	26,53	0,032
	0,084	1,53	1,53	1,757	9,126	9,29	0,0046
23,17	0,625	35,344	34,719	9,957	130,904	120,95	0,0815
	0,25	6,392	6,4	5,375	42,540	42,88	0,0089
27,4	0,784	55,225	54,441	15,696	187,521	171,83	0,1035
	0,112	3,29	3,29	3,115	53,850	53,94	0,0036
30,55	0,676	146,69	146,01	13,008	472,459	459,45	0,1785
	0,052	16,086	16,09	2,765	74,226	74,28	0,0105
34,2	1,936	360	358,06	47,802	1541,426	1493,62	0,278
	1,144	30	30,02	28,691	369,914	371,00	0,0141
37,4	0,9	698,9	698	22,989	2396,763	2373,77	0,403
	0,12	113,7	113,7	7,044	613,332	613,40	0,034
40,68	1,681	1060,9	1059,2	55,351	3706,848	3651,50	0,4945
	1,722	187,46	187,47	57,493	777,895	780,00	0,0467
44,46	2,601	1299,6	1297	101,404	4396,482	4295,08	0,5445
	2,958	212,04	212,06	117,320	835,176	843,40	0,0487

Πίνακας 3.1-4: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας των στερεών μονωτικών perlinax

εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs, λόγω μερικών εκκενώσεων, με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στα σχήματα (2-1), (2-2) και στις σχέσεις (2-8) έως (2-14).

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

W_1 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

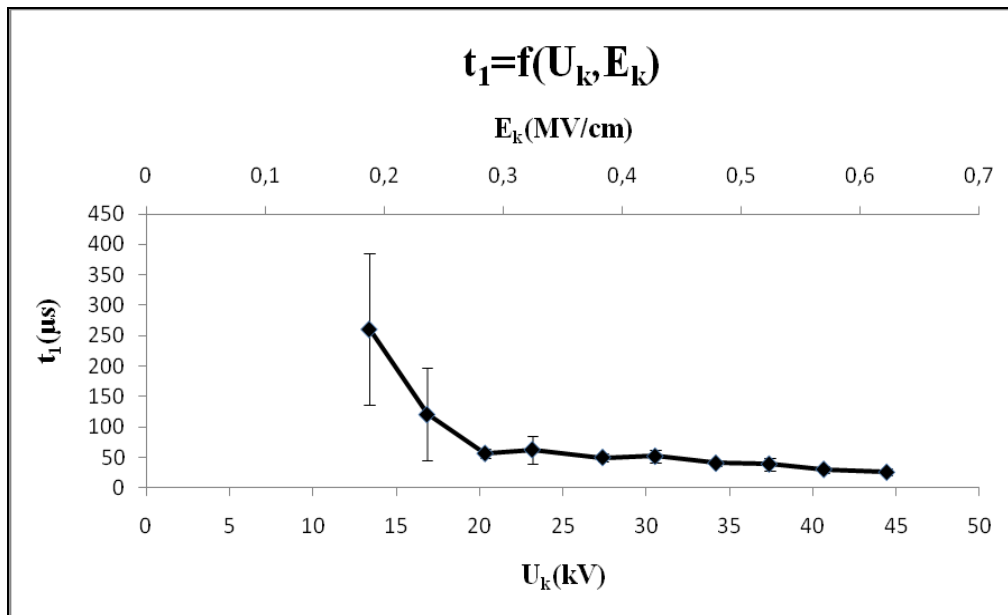
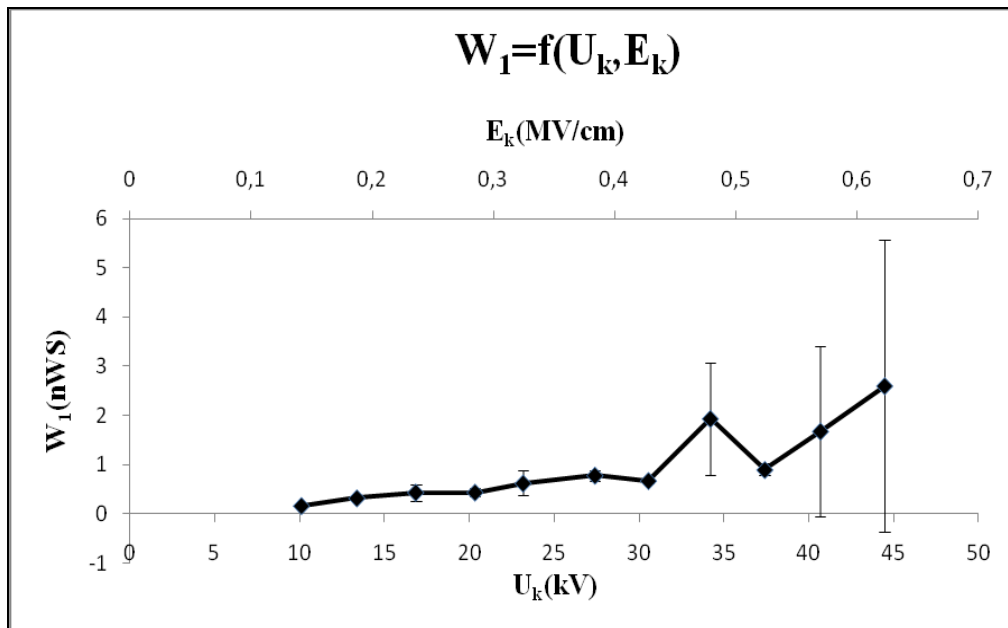
P_1 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta W = W_2 - W_1$, $\Delta P = P_2 - P_1$

ΔW_e : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.



Σχήμα 3.1-4: Χαρακτηριστική $W_1=f(U_k, E_k)$ και $t_1=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500 μ s.

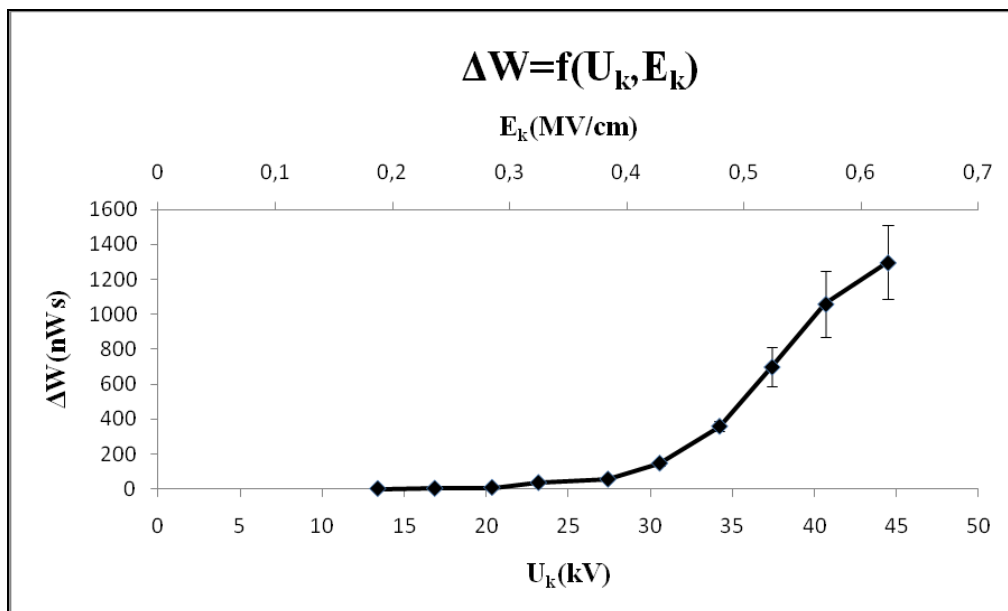
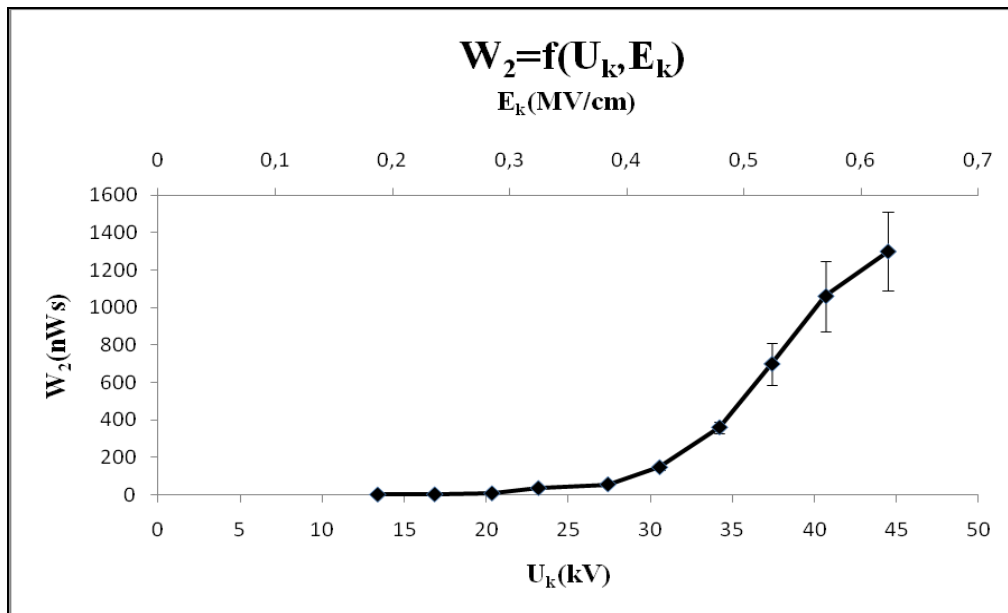
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

W_1 : ενέργεια στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

t_1 : χρόνος έναρξης μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.1-5: Χαρακτηριστική $W_2=f(U_k, E_k)$ και $\Delta W=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

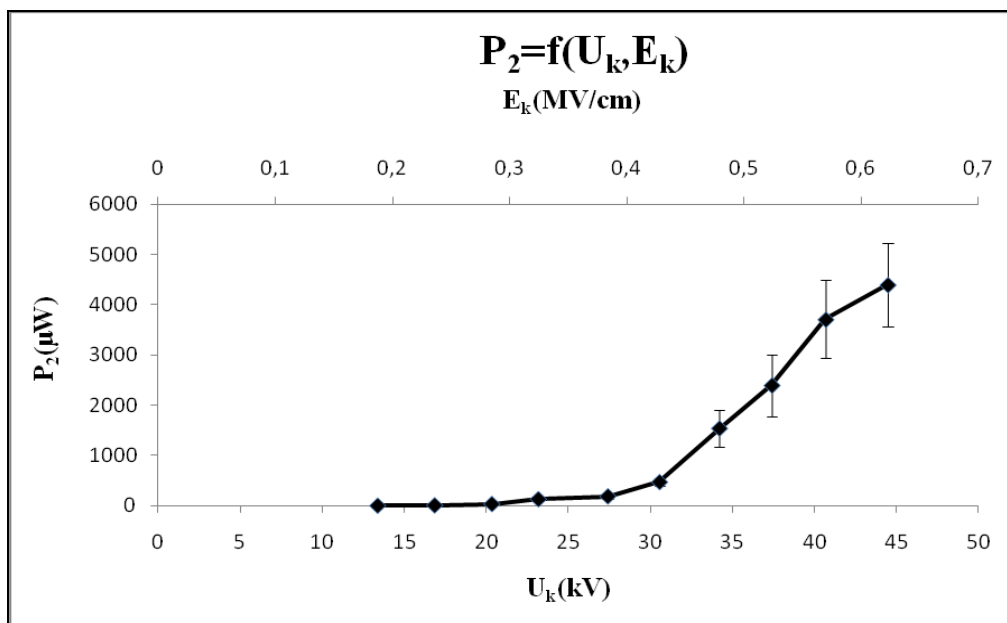
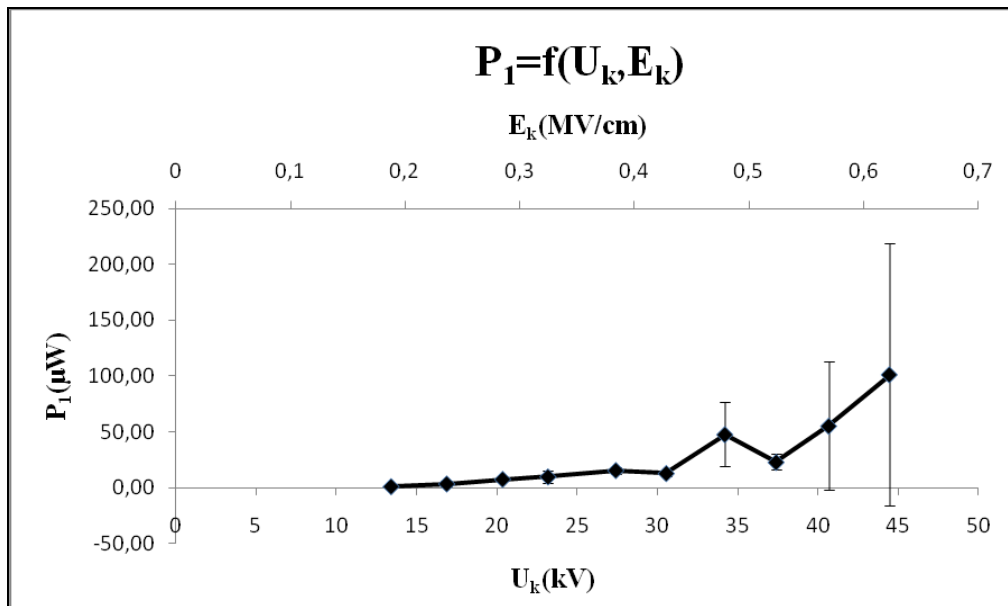
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 1 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΔW : μεταβολή της στιγμιαίας τιμής της ενέργειας στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.1-6: Χαρακτηριστική $P_1=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

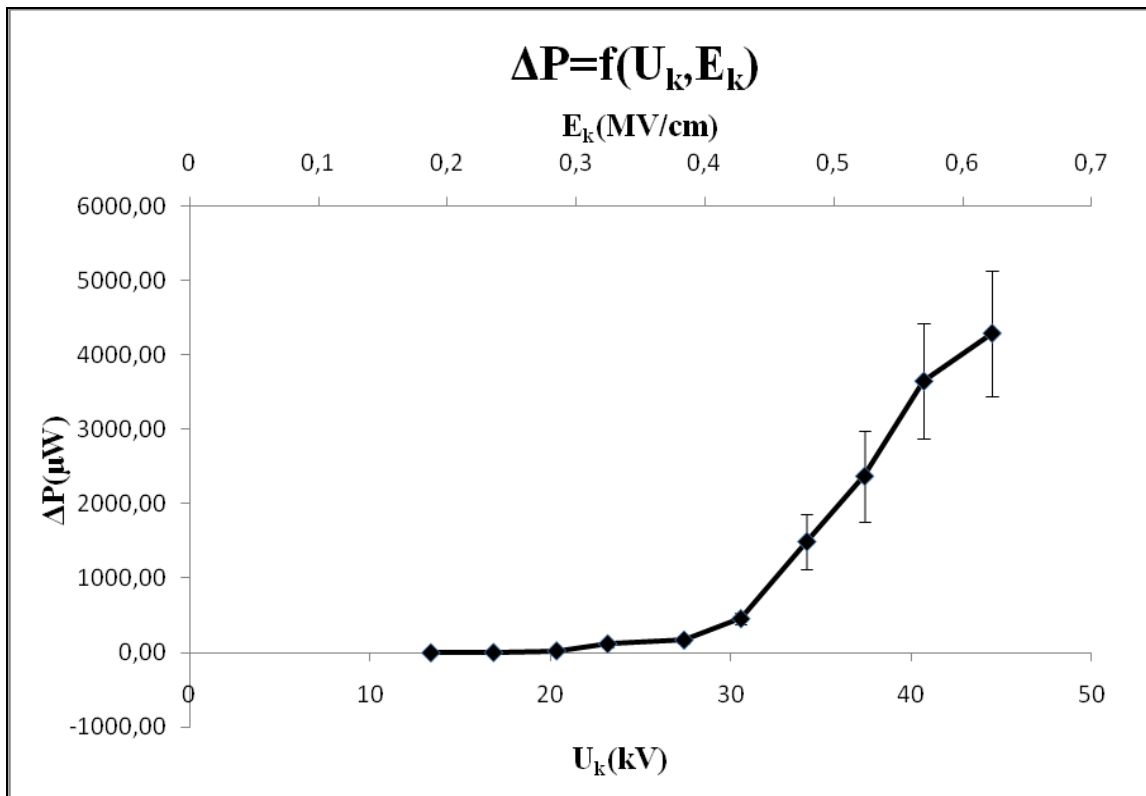
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 1 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

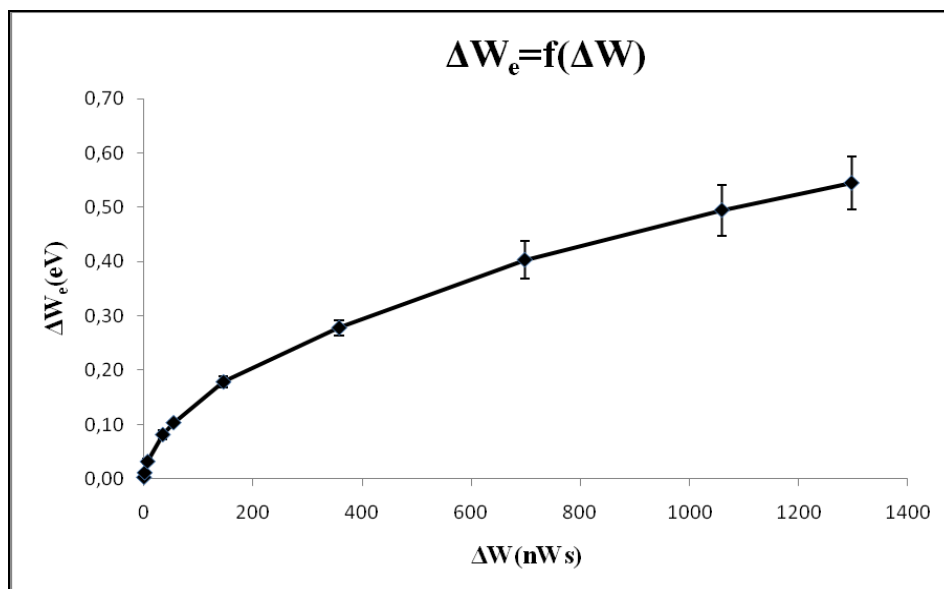
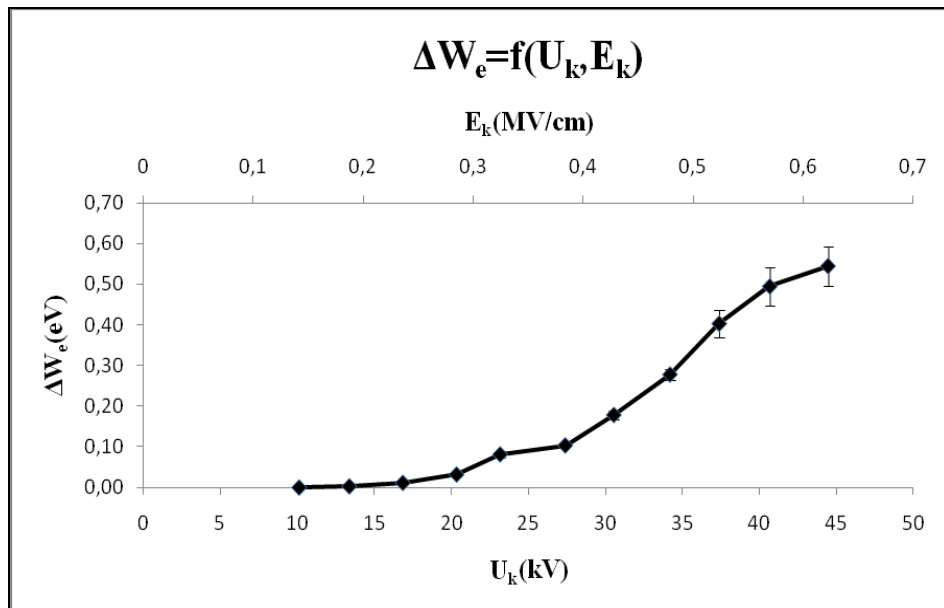
E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

P_1 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m , κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m , κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.1-7: Χαρακτηριστική $\Delta P = f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών perlinax εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας $40^\circ C$ υπό κρουστικές τάσεις $+250/2500 \mu s$.
 Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 1 mm.
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
 ΔP : μεταβολή της στιγμιαία τιμής της ισχύος στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.1-8: Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(U_k, E_k)$ και $\Delta W_e = f(\Delta W)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

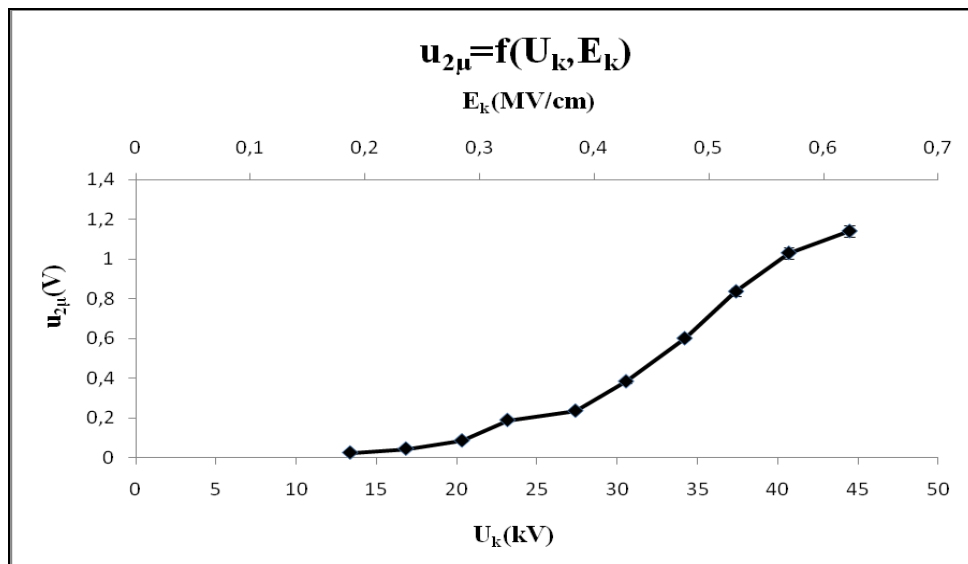
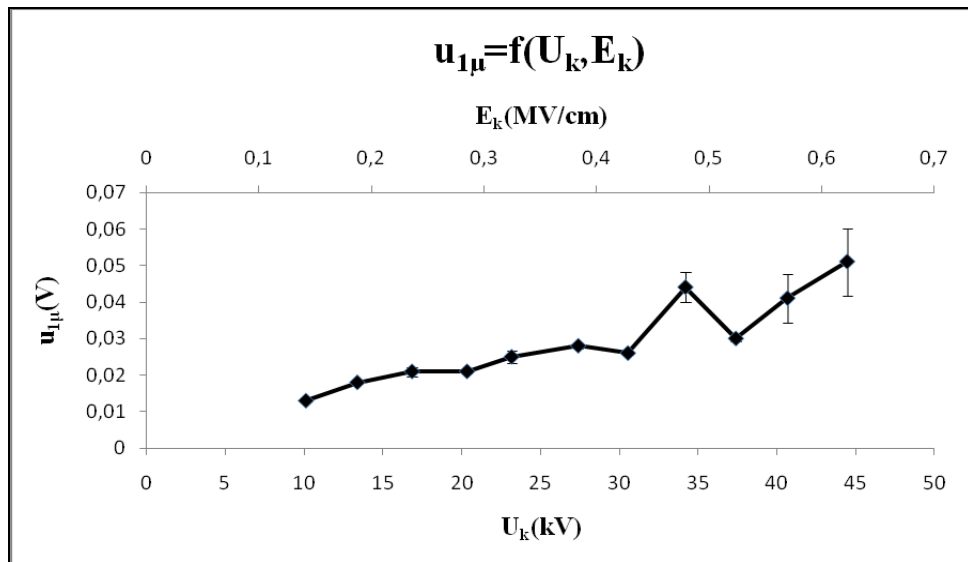
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

ΔW_e : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

ΔW : μεταβολή της ενέργειας στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.1-9: Χαρακτηριστική $u_{1\mu}=f(U_k, E_k)$ και $u_{2\mu}=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών *peritina*x εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

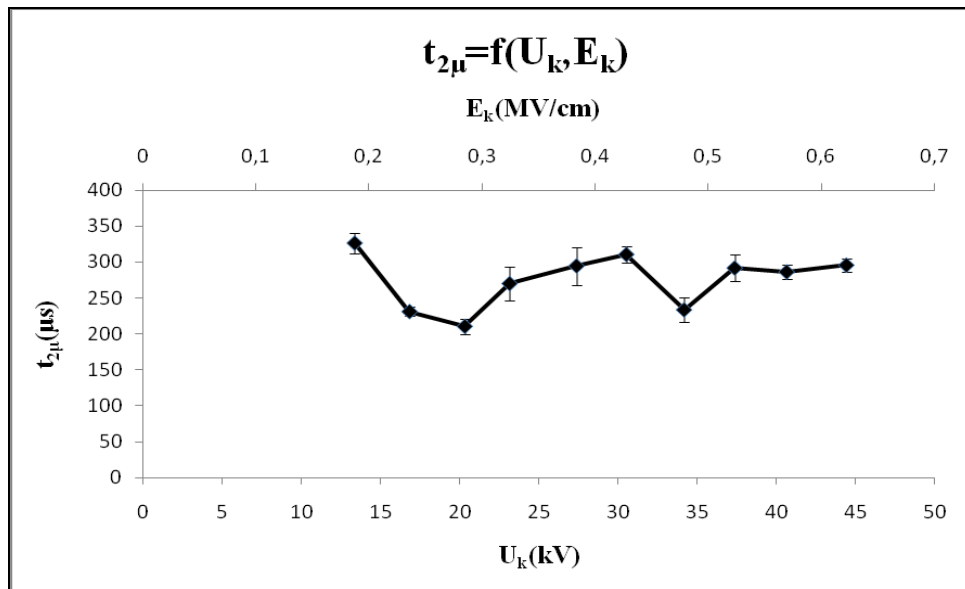
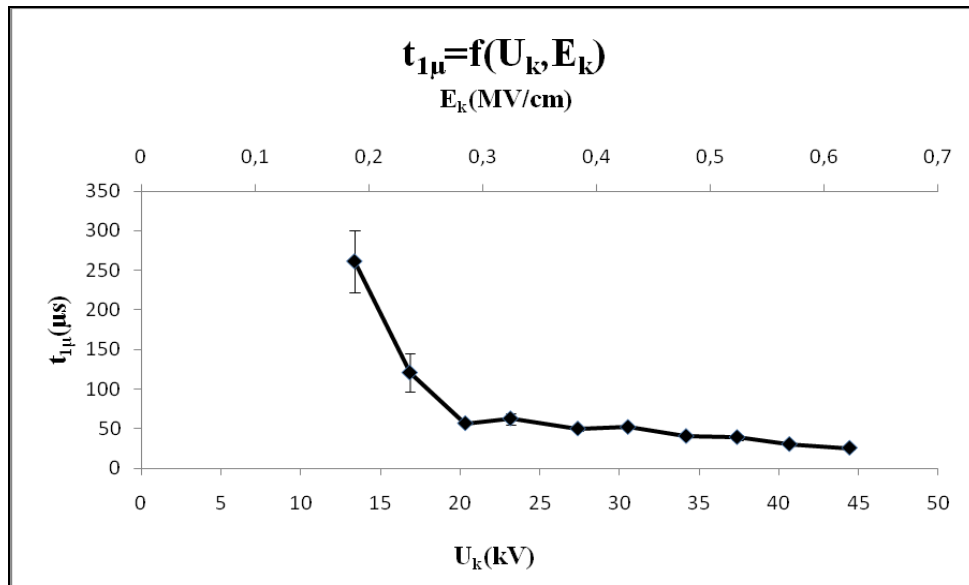
Πάχος $d=1\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

$u_{1\mu}$: μέση τιμή της τάσεως u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$u_{2\mu}$: μέση τιμή της τάσεως u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.1-10: Χαρακτηριστική $t_{1\mu} = f(U_k, E_k)$ και $t_{2\mu} = f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

Πάχος $d = 1 \text{ mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

$t_{1\mu}$: μέση τιμή του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

$t_{2\mu}$: μέση τιμή του χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

3.2 Δοκίμια *pertinax* πάχους 1mm εντός μονωτικού ελαίου

θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

U _k kV	E _k MV/cm	C _m nF	q ₁ μC	q ₂ μC	u ₁ V	u ₂ V	Δu V	t ₁ μs	t ₂ μs	Δt μs
10,35	0,154	1000	0,015		0,015					
					0					
13,82	0,205	1000	0,019		0,019					
					0					
17,45	0,259	1000	0,027	0,033	0,027	0,033	0,006	202,5	216	13,5
			0	0	0	0	0	0	0	0
20,4	0,303	1000	0,034	0,067	0,034	0,067	0,033	114,07	145,8	31,73
			0,001	0,004	0,001	0,004	0,004	17,9	17,39	24,96
23,97	0,357	1000	0,033	0,11	0,033	0,11	0,077	64,12	134,32	70,2
			0,005	0,013	0,005	0,013	0,014	10,01	22,42	24,55
27,98	0,416	1000	0,031	0,156	0,031	0,156	0,125	69,51	250,42	180,91
			0,004	0,018	0,004	0,018	0,018	12,9	94,31	95,19
31,23	0,465	1000	0,024	0,302	0,024	0,302	0,278	49,94	274,72	224,78
			0,002	0,038	0,002	0,038	0,038	3,3	90,6	90,66
34,5	0,513	1000	0,069	0,472	0,069	0,472	0,403	44,54	237,6	193,06
			0,005	0,085	0,005	0,085	0,085	2,52	30,66	30,76
37,69	0,561	1000	0,121	0,695	0,121	0,695	0,574	71,55	233,55	162
			0,014	0,058	0,014	0,058	0,06	31,82	39,49	50,72
40,86	0,608	1000	0,198	0,943	0,198	0,943	0,745	60,75	223,15	162,4
			0,003	0,093	0,003	0,093	0,093	10,45	43,95	45,18
44,85	0,668	1000	0,229	1,309	0,229	1,309	1,08	52,65	255,82	203,17
			0,002	0,17	0,002	0,17	0,17	10,8	49,4	50,57

Πίνακας 3.2-1: Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης δοκιμίων *pertinax* εντός μονωτικού

ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs, λόγω μερικών

εκκενώσεων, βάσει των μεγεθών στα σχήματα (2-1,2-2) και τις σχέσεις (2-1) με (2-4).

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m: πυκνωτής μέτρησης

u₁: στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u₂: στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

q₁: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q₂: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

t₁: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t₂: χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δu = u₂ - u₁, Δt = t₂ - t₁

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.

U_k kV	Z_1 Ω	Z_2 Ω	ΔZ Ω
10,35			
13,82			
17,45	202,5	216	13,5
20,4	114,07	145,8	31,73
	17,9	17,39	24,96
23,97	64,12	134,32	70,2
	10,01	22,42	24,55
27,98	69,51	250,42	180,91
	12,9	94,31	95,19
31,23	49,94	274,72	224,78
	3,3	90,6	90,66
34,5	44,54	237,6	193,06
	2,52	30,66	30,76
37,69	71,55	233,55	162
	31,82	39,49	50,71
40,86	60,75	223,15	162,4
	10,45	43,95	45,18
44,85	52,65	255,82	203,17
	10,8	49,4	50,57

Πίνακας 3.2-2 : Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης των στερεών μονωτικών pertinax εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs, λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στα σχήματα (2-10, (2-2) και στις σχέσεις (2-5) με (2-7).

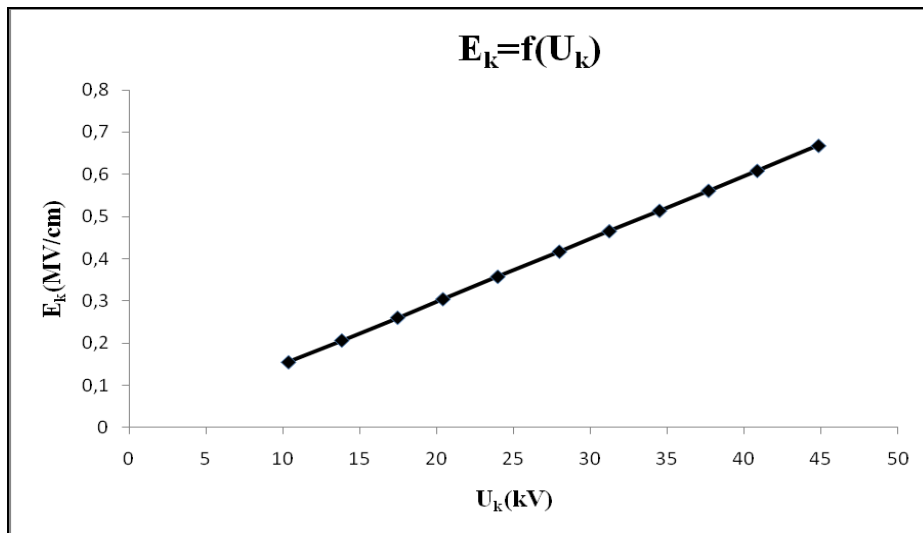
U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.



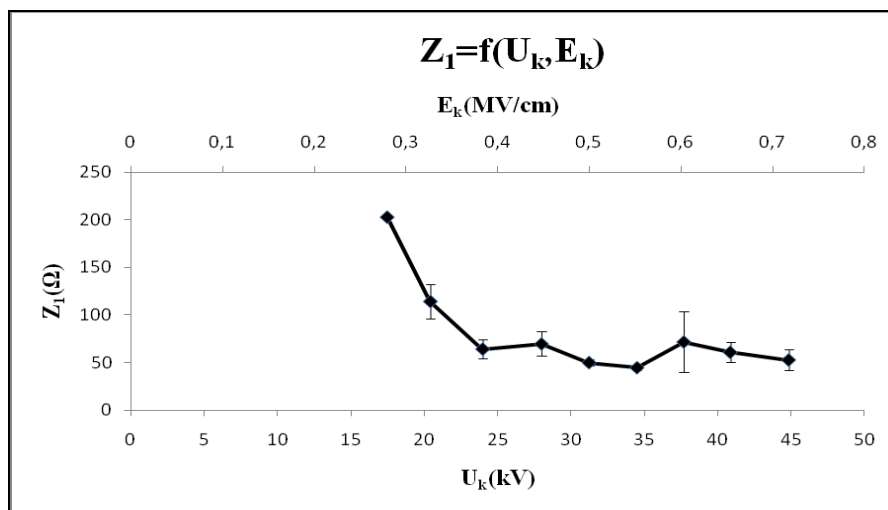
Σχήμα 3.2-1: Χαρακτηριστική $E_k=f(U_k)$ των στερεών μονωτικών πάχους 1 mm και διαμέτρου 150mm.

Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα - πλάκα.

Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας $R=0,9\text{mm}$.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



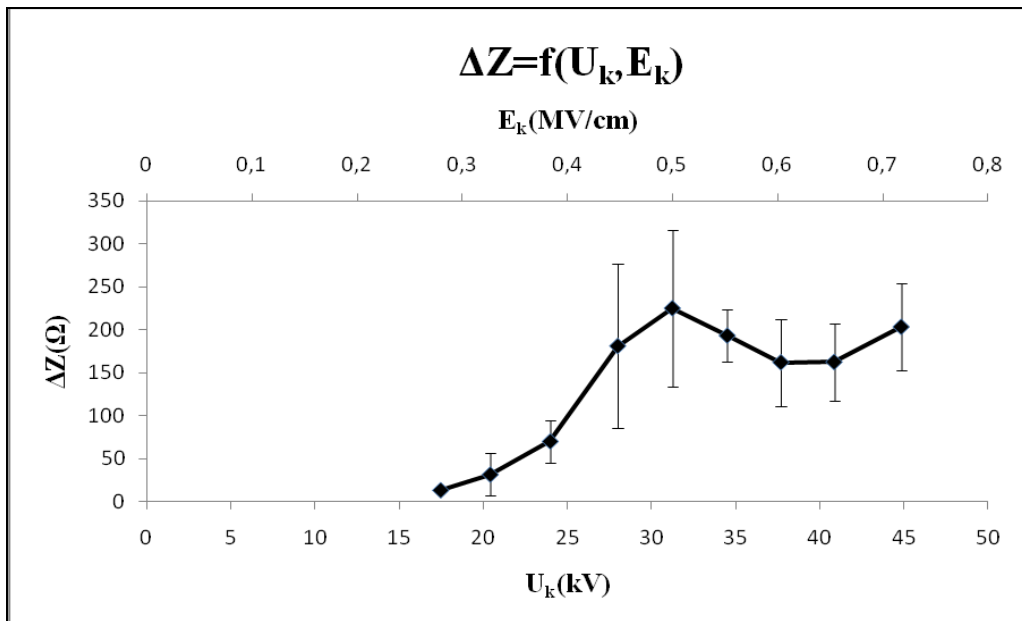
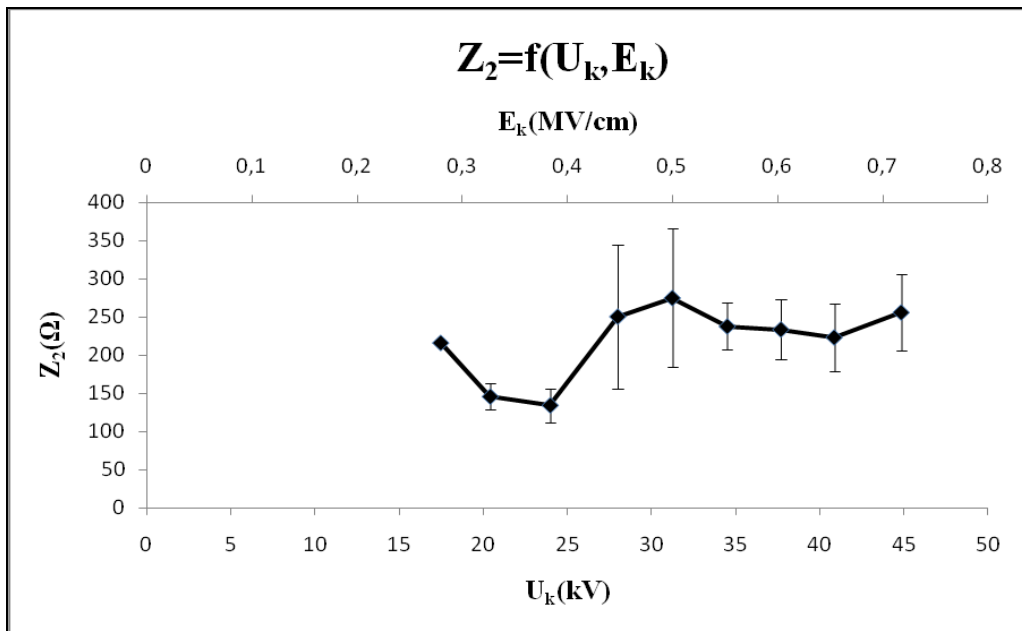
Σχήμα 3.2-2: Χαρακτηριστική $Z_1=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 1 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.2-3: Χαρακτηριστική $Z_2=f(U_k, E_k)$ και $\Delta Z=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις $-250/2500\mu\text{s}$.

Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 1 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$: μεταβολή της σύνθετης αντίστασης στον C_m

U_k kV	E_k MV/cm	C_m nF	q_1 μC	q_2 μC	u_1 V	u_2 V	Δu V	t_1 μs	t_2 μs	Δt μs
10,35	0,154	1000	0,015		0,015					
					0					
13,82	0,205	1000	0,019		0,019					
					0					
17,45	0,259	1000	0,027	0,033	0,027	0,033	0,006	202,5	216	13,5
			0	0	0	0	0	0	0	0
20,4	0,303	1000	0,034	0,067	0,034	0,067	0,033	114,07	145,8	31,73
			0,001	0,004	0,001	0,004	0,004	17,9	17,39	24,96
23,97	0,357	1000	0,033	0,11	0,033	0,11	0,077	64,12	134,32	70,2
			0,005	0,013	0,005	0,013	0,014	10,01	22,42	24,55
27,98	0,416	1000	0,031	0,156	0,031	0,156	0,125	69,51	250,42	180,91
			0,004	0,018	0,004	0,018	0,018	12,9	94,31	95,19
31,23	0,465	1000	0,024	0,302	0,024	0,302	0,278	49,94	274,72	224,78
			0,002	0,038	0,002	0,038	0,038	3,3	90,6	90,66
34,5	0,513	1000	0,069	0,472	0,069	0,472	0,403	44,54	237,6	193,06
			0,005	0,085	0,005	0,085	0,085	2,52	30,66	30,76
37,69	0,561	1000	0,121	0,695	0,121	0,695	0,574	71,55	233,55	162
			0,014	0,058	0,014	0,058	0,06	31,82	39,49	50,72
40,86	0,608	1000	0,198	0,943	0,198	0,943	0,745	60,75	223,15	162,4
			0,003	0,093	0,003	0,093	0,093	10,45	43,95	45,18
44,85	0,668	1000	0,229	1,309	0,229	1,309	1,08	52,65	255,82	203,17
			0,002	0,17	0,002	0,17	0,17	10,8	49,4	50,57

Πίνακας 3.2-3: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας των στερεών μονωτικών perlinax

εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις
-250/2500μs, λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν
στα σχήματα (2-1), (2-2) και στις σχέσεις (2-1) με (2-4).

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m : πυκνωτής μέτρησης

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά το πέρας 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

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u = u_2 - u_1$, $\Delta t = t_2 - t_1$

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.

U _k kV	W ₁ nWs	W ₂ nWs	ΔW nWs	P ₁ μW	P ₂ μW	ΔP μW	ΔW _e eV
10,35	0,225						
	0						
13,82	0,361						
	0						
17,45	0,729	1,089	0,36	3,6	5,0417	1,442	0,003
	0	0	0	0	0	0	0
20,4	1,156	4,489	3,333	10,134	30,789	20,65	0,0165
	0,068	0,536	0,54	1,698	5,196	5,466	0,002
23,97	1,089	12,1	11,011	16,984	90,083	73,1	0,0385
	0,33	2,86	2,88	5,789	26,07	26,7	0,007
27,98	0,961	24,336	23,375	13,825	97,181	83,36	0,0625
	0,248	5,616	5,62	4,395	42,92	43,14	0,009
31,23	0,576	91,204	90,628	11,534	331,99	320,5	0,139
	0,096	22,95	22,95	2,068	137,72	137,7	0,019
34,5	4,761	222,784	218,023	106,89	937,64	830,8	0,2015
	0,69	80,24	80,24	16,63	358,73	359,1	0,043
37,69	14,641	483,025	468,384	204,63	2068,2	1864	0,287
	3,388	80,62	80,69	102,58	491,38	502	0,03
40,86	39,204	889,249	850,045	645,33	3985	3340	0,3725
	1,188	175,4	175,4	112,72	1110,8	1117	0,047
44,85	52,441	1713,481	1661,04	996,03	6698	5702	0,54
	0,916	445,1	445,1	205	2168	2177	0,085

Πίνακας 3.2-4: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας των στερεών μονωτικών pertinax

εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις

-250/2500μs, λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα

μεγέθη που ορίστηκαν στα σχήματα (2-1), (2-2) και στις σχέσεις (2-8) με (2-14).

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

W₁: στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

W₂: στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

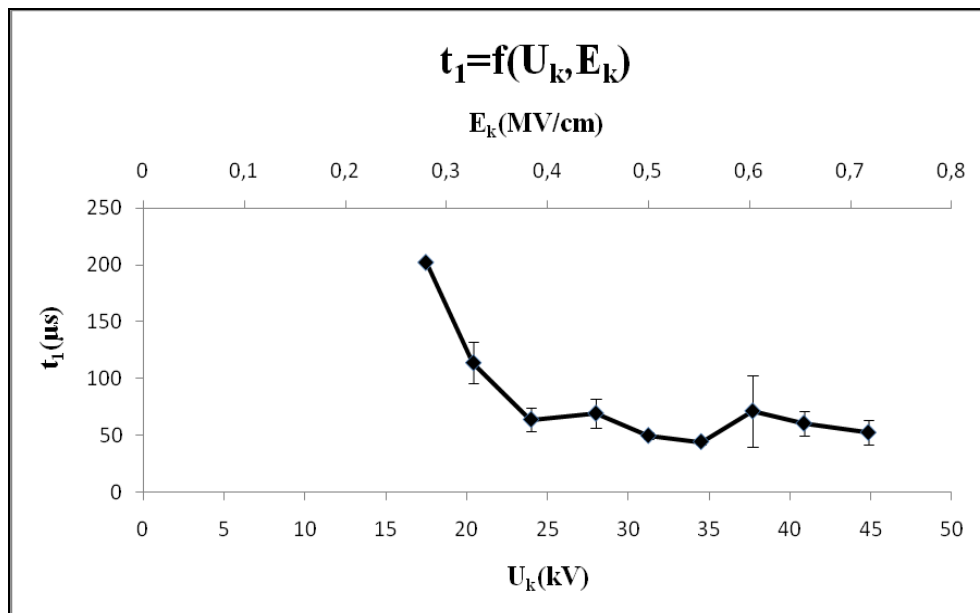
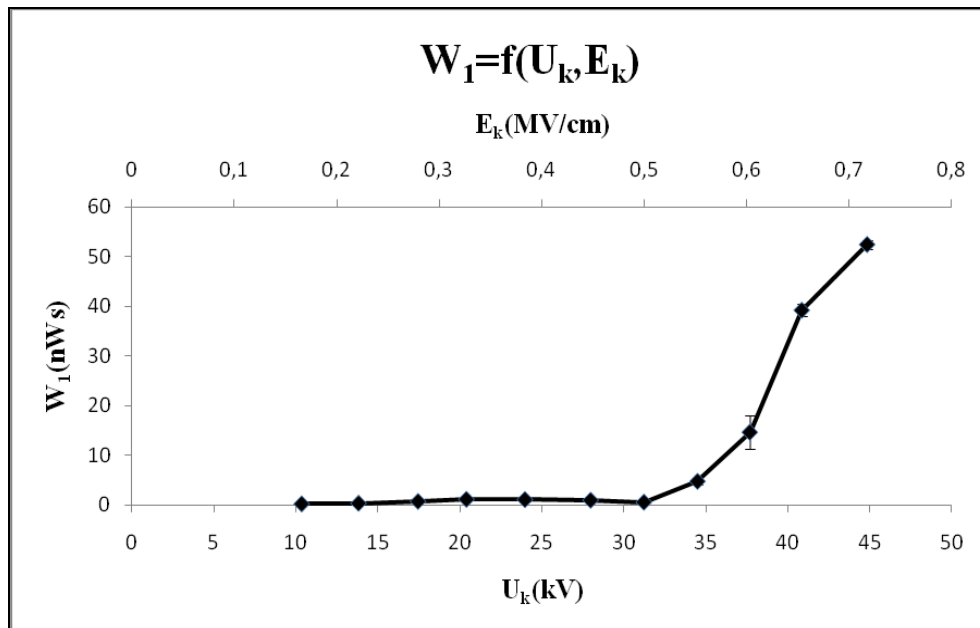
P₁: στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

P₂: στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

ΔW=W₂-W₁, ΔP=P₂-P₁

ΔW_e: ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.



Σχήμα 3.2-4: Χαρακτηριστική $W_1=f(U_k, E_k)$ και $t_1=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών *perlinax* εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs. Πάχος: 1mm.

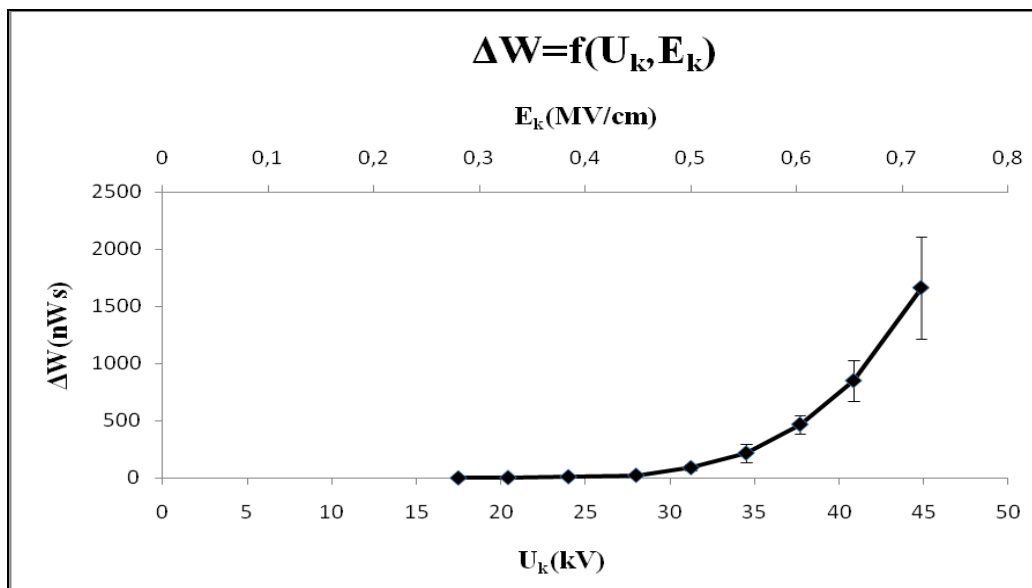
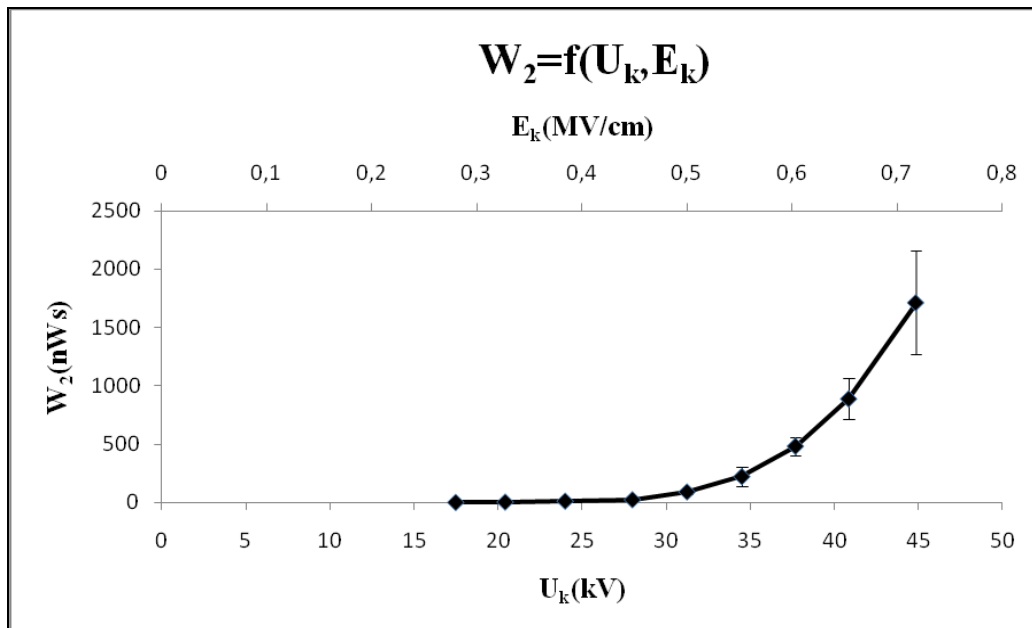
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

W_1 : ενέργεια στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

t_1 : χρόνος έναρξης μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.2-5: Χαρακτηριστική $W_2=f(U_k, E_k)$ και $\Delta W=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

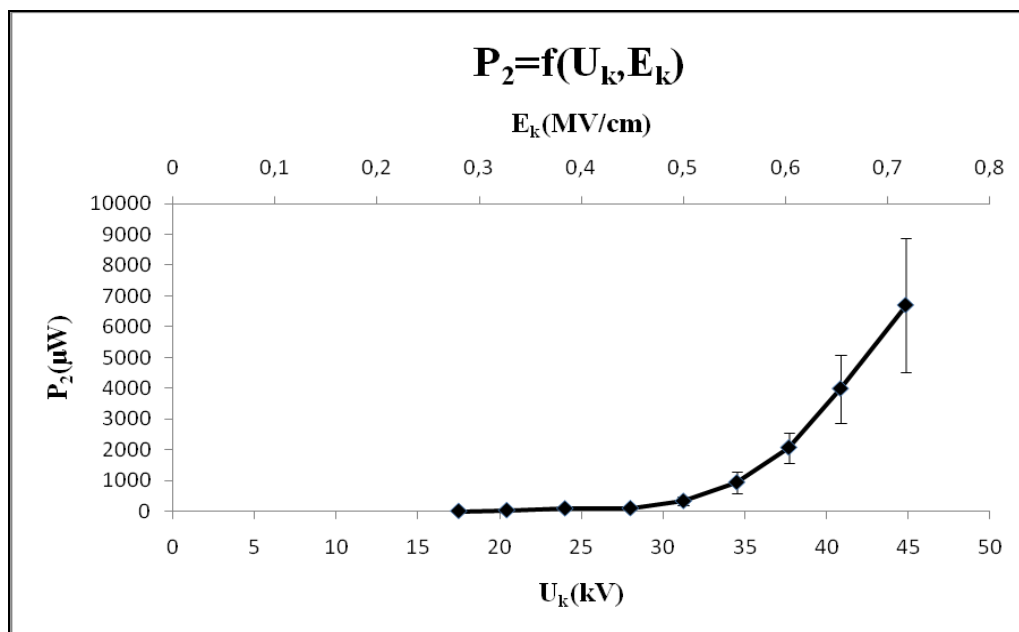
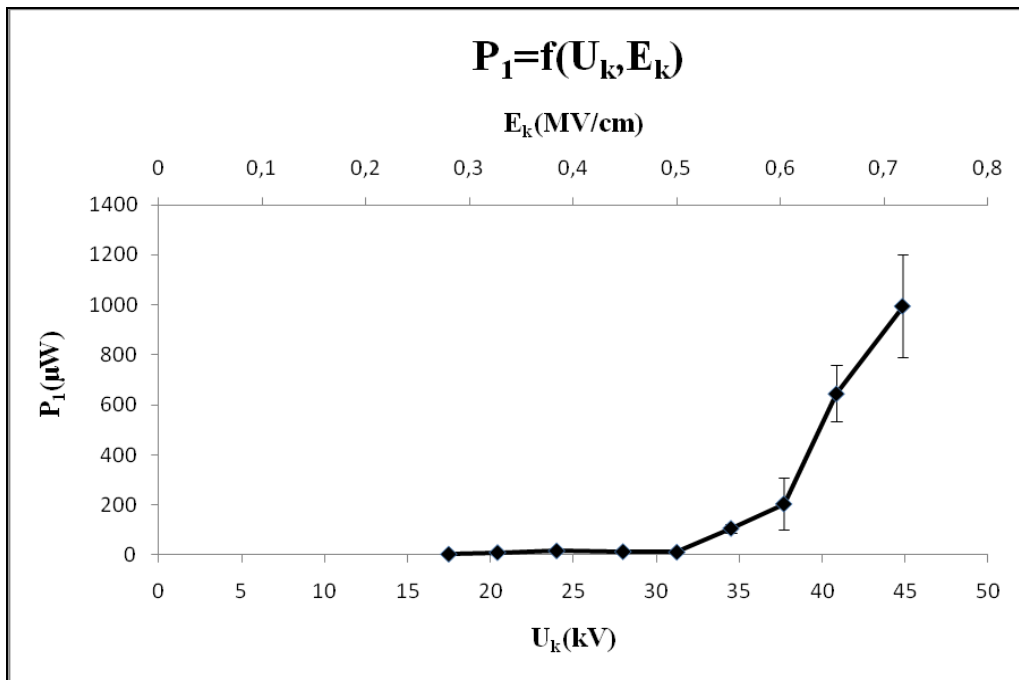
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 1 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΔW : μεταβολή της στιγμιαίας τιμής της ενέργειας στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.2-6: Χαρακτηριστική $P_1=f(U_k, E_k)$ και $P_2=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

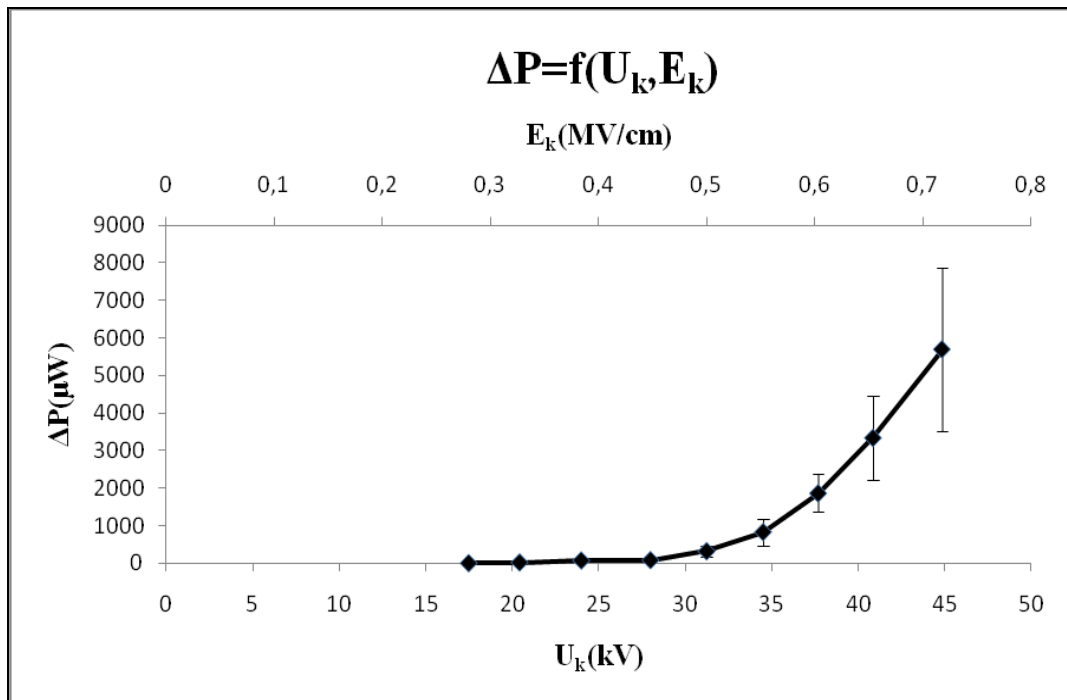
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 1 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

P_1 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m , κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m , κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.2-7: Χαρακτηριστική $\Delta P = f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού

ελαίου θερμοκρασίας $40^\circ C$ υπό κρουστικές τάσεις $-250/2500 \mu s$.

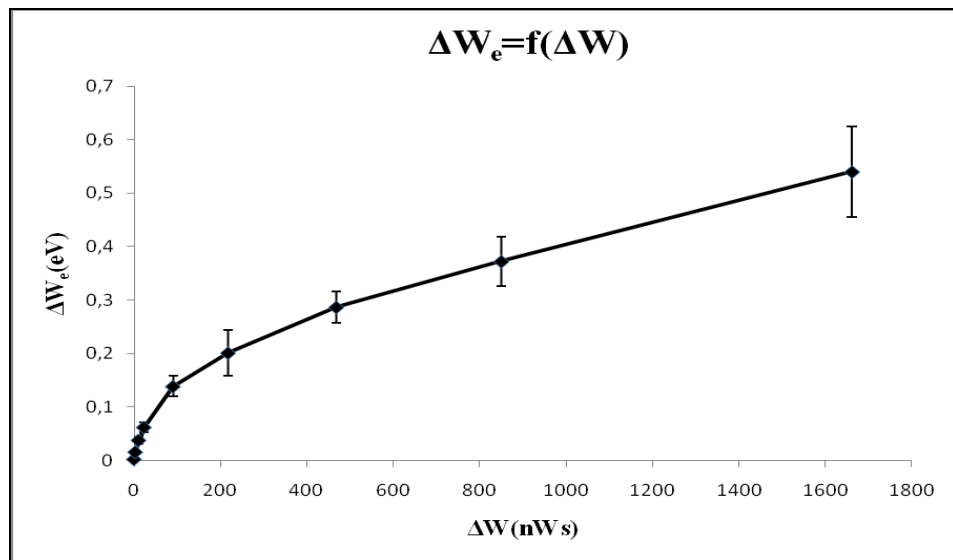
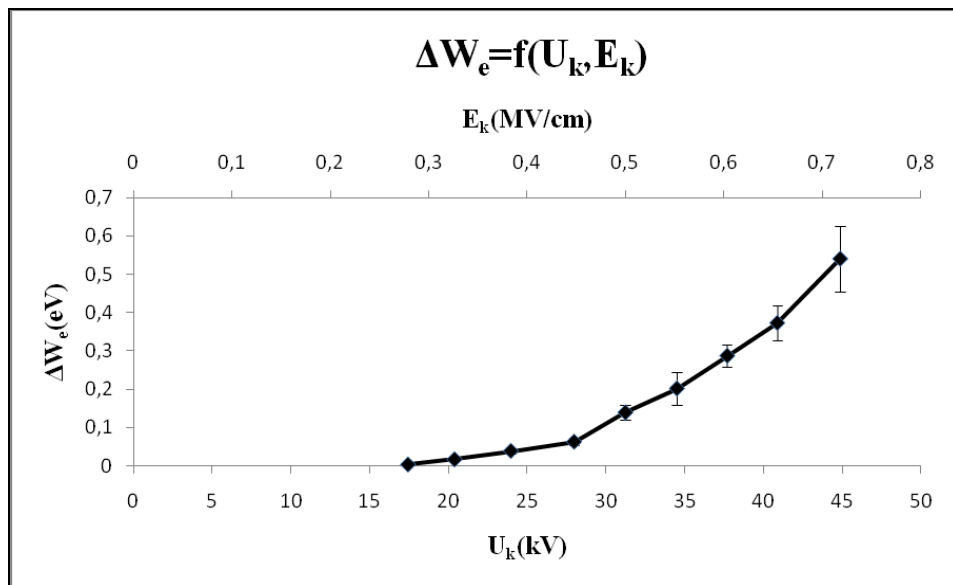
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 1 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

ΔP : μεταβολή της στιγμιαία τιμής της ισχύος στον C_m λόγω των μερικών

εκκενώσεων.



Σχήμα 3.2-8: Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(U_k, E_k)$ και $\Delta W_e = f(\Delta W)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs. Πάχος: 1mm.

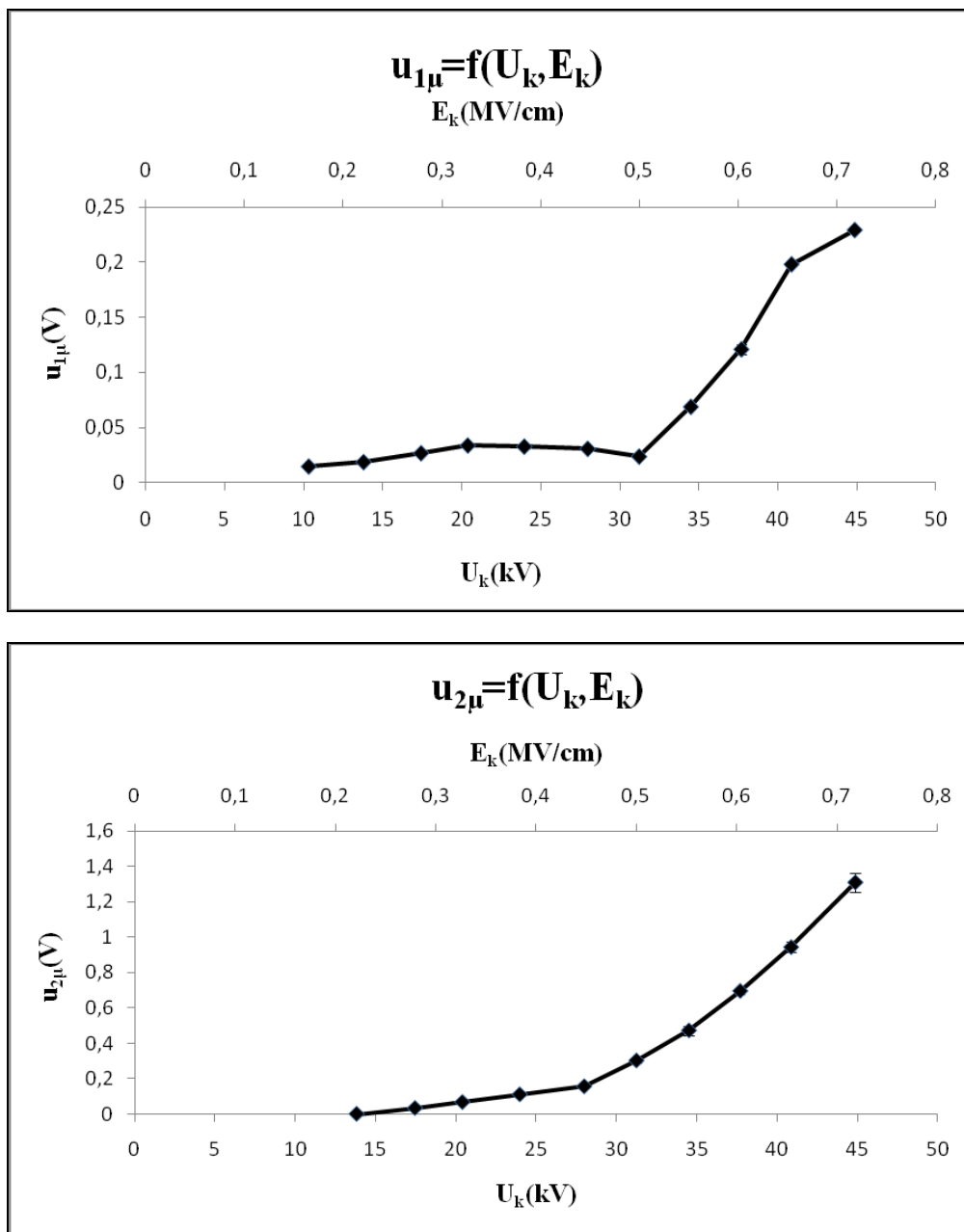
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

ΔW_e : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

ΔW : μεταβολή της ενέργειας στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.2-9: Χαρακτηριστική $u_{1\mu}=f(U_k, E_k)$ και $u_{2\mu}=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax

εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

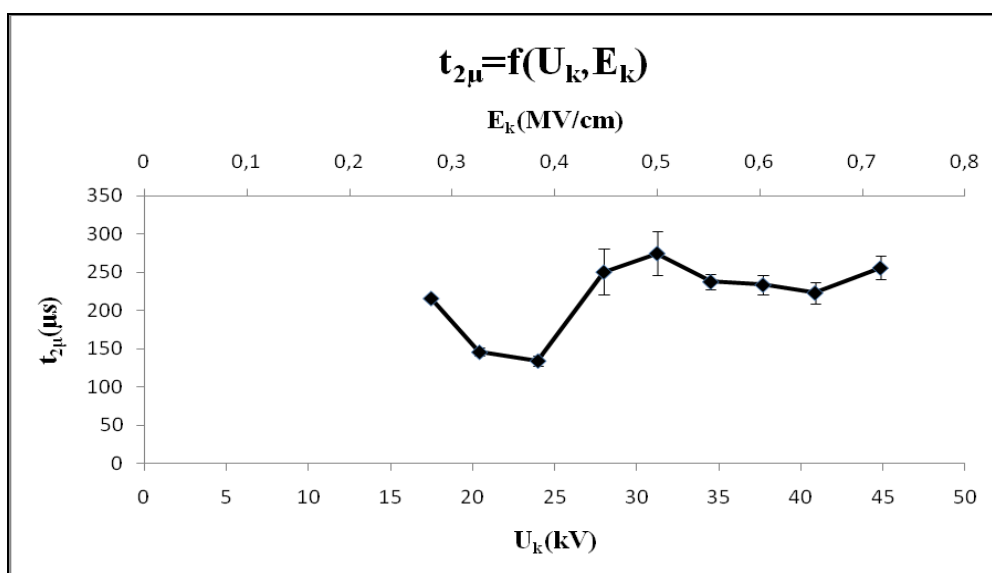
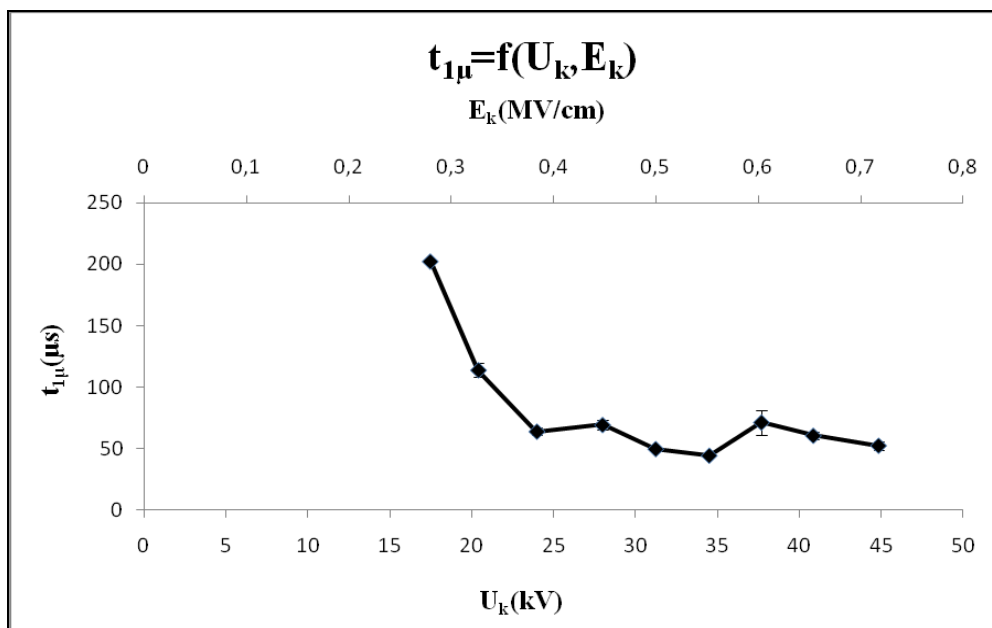
Πάχος d=1mm. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

$u_{1\mu}$: μέση τιμή της τάσεως u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$u_{2\mu}$: μέση τιμή της τάσεως u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.2-10: Χαρακτηριστική $t_{1\mu}=f(U_k, E_k)$ και $t_{2\mu}=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax

εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

Πάχος $d=1\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

$t_{1\mu}$: μέση τιμή του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

$t_{2\mu}$: μέση τιμή του χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

3.3 Δοκίμια *pertinax* πάχους 2mm εντός μονωτικού ελαίου

θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

U _k kV	E _k MV/cm	C _m nF	q ₁ μC	q ₂ μC	u ₁ V	u ₂ V	Δu V	t ₁ μs	t ₂ μs	Δt μs
10,2	0,103	1000	0,042		0,042					
			0,003		0,003					
13,88	0,141	1000	0,044	0,061	0,044	0,061	0,017	362,25	369	6,75
			0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	46,87	67,59	82,25
17,45	0,177	1000	0,076	0,114	0,076	0,114	0,038	229,5	243	13,5
			0	0	0,000	0	0	0	0	0
20,91	0,212	1000	0,094	0,114	0,094	0,114	0,02	236,5	254	17,5
			0	0	0,000	0	0	0	0	0
24,15	0,245	1000	0,088	0,239	0,088	0,239	0,151	93,5	261,9	168,4
			0,009	0,024	0,009	0,024	0,026	15,03	82,05	83,42
27,92	0,283	1000	0,08	0,304	0,080	0,304	0,224	44,55	245,7	201,15
			0,008	0,1	0,008	0,1	0,1	9,15	51,07	51,88
31,5	0,320	1000	0,072	0,491	0,072	0,491	0,419	35,1	305,1	270
			0,01	0,04	0,01	0,04	0,041	5,05	44,24	44,53
34,75	0,353	1000	0,075	0,585	0,075	0,585	0,51	32,4	271,35	238,95
			0,006	0,02	0,006	0,02	0,021	5,05	64,09	64,29
39,05	0,397	1000	0,076	0,87	0,076	0,87	0,794	29,7	243	213,3
			0,018	0,091	0,018	0,091	0,093	6,88	33,88	43,57
41,7	0,424	1000	0,067	1,207	0,067	1,207	1,14	31,05	301,05	270
			0	0,12	0	0,12	0,12	6,88	58,78	59,18
46,02	0,468	1000	0,078	1,39	0,078	1,39	1,312	41,82	303,44	261,62
			0,005	0,081	0,005	0,081	0,081	1,61	55,8	55,82

Πίνακας 3.3-1: Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης δοκιμίων *pertinax* εντός μονωτικού

ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs, λόγω μερικών εκκενώσεων, βάσει των μεγεθών στα σχήματα (2-1,2-2) και τις σχέσεις (2-1) με (2-4).

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m: πυκνωτής μέτρησης

u₁: στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u₂: στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

q₁: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q₂: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

t₁: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t₂: χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δu = u₂ - u₁, Δt = t₂ - t₁

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.

U_k kV	Z_1 Ω	Z_2 Ω	ΔZ Ω
10,2			
13,88	362,25	369	6,75
	46,87	67,59	82,25
17,45	229,5	243	13,5
	0	0	0
20,91	236,5	254	17,5
	0	0	0
24,15	93,5	261,9	168,4
	15,03	82,05	83,42
27,92	44,55	245,7	201,15
	9,15	51,07	51,88
31,5	35,1	305,1	270
	5,05	44,24	44,53
34,75	32,4	271,35	238,95
	5,05	64,09	64,29
39,05	29,7	243	213,3
	6,88	33,88	34,57
41,7	31,05	301,05	270
	6,88	58,78	59,18
46,02	41,82	303,44	261,62
	1,61	55,8	55,82

Πίνακας 3.3-2 : Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs, λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στα σχήματα (2-1), (2-2) και στις σχέσεις (2-5) με (2-7).

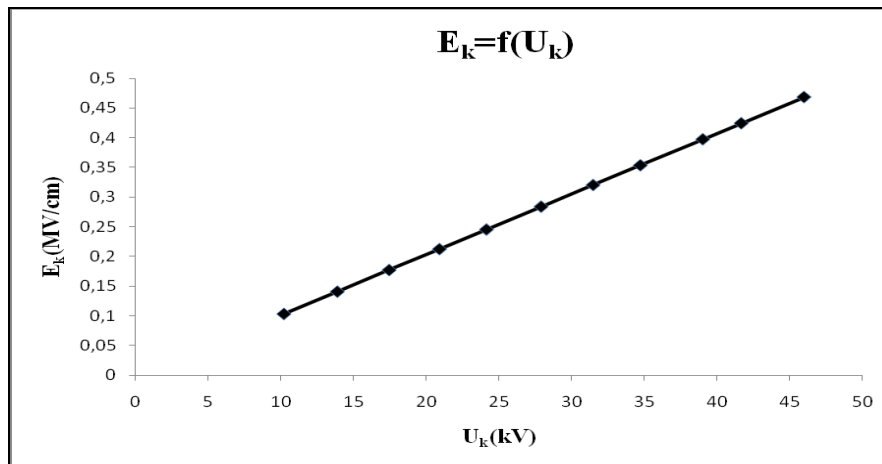
U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.



Σχήμα 3.3-1: Χαρακτηριστική $E_k=f(U_k)$ των στερεών μονωτικών πάχους 2mm και διαμέτρου 150mm.

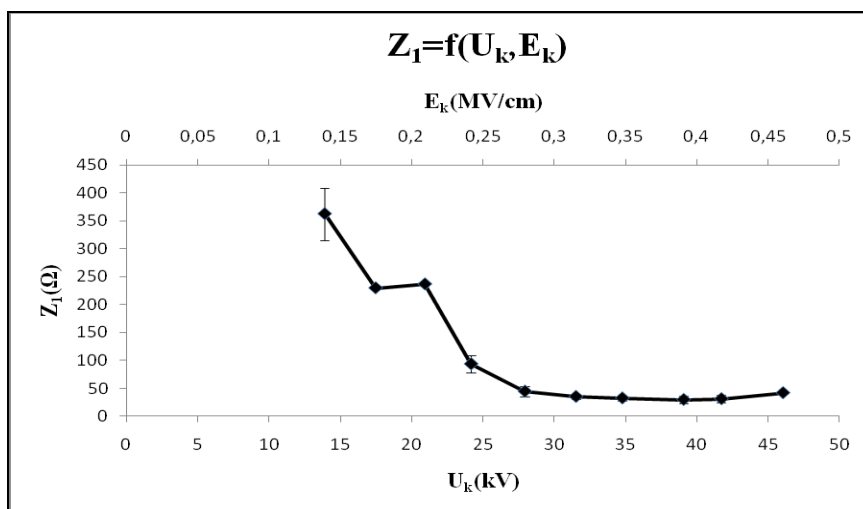
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα - πλάκα.

Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας $R=0,9\text{mm}$

Πάχος 2 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



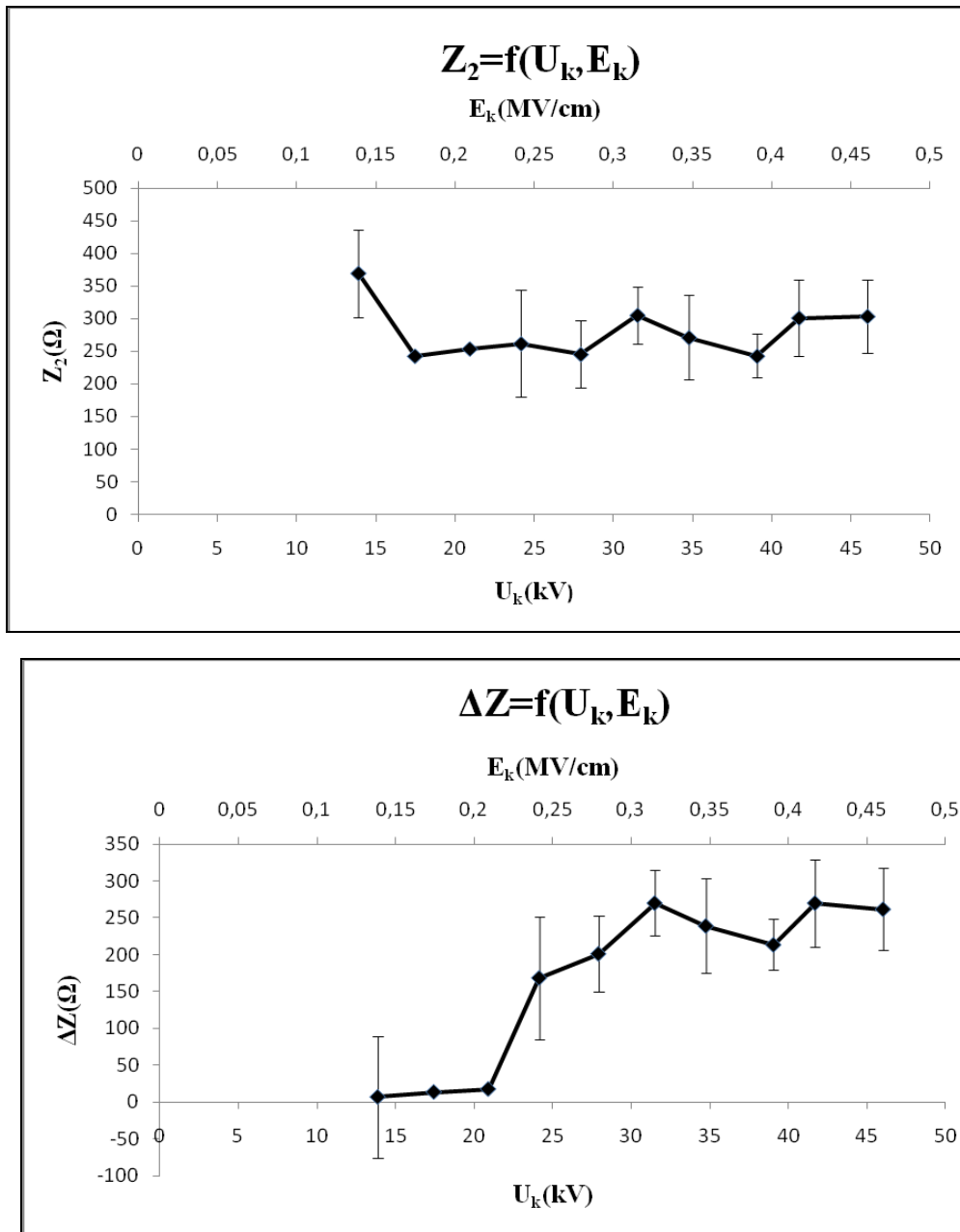
Σχήμα 3.3-2: Χαρακτηριστική $Z_1=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών perlinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs

Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 2 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.3-3: Χαρακτηριστική $Z_2=f(U_k, E_k)$ και $\Delta Z=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 2 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$: μεταβολή της σύνθετης αντίστασης στον C_m

U_k kV	E_k MV/cm	C_m nF	q_1 μC	q_2 μC	u_1 V	u_2 V	Δu V	t_1 μs	t_2 μs	Δt μs
10,2	0,103	1000	0,042		0,042					
			0,003		0,003					
13,88	0,141	1000	0,044	0,061	0,044	0,061	0,017	362,25	369	6,75
			0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	46,87	67,59	82,25
17,45	0,177	1000	0,076	0,114	0,076	0,114	0,038	229,5	243	13,5
			0	0	0,000	0	0	0	0	0
20,91	0,212	1000	0,094	0,114	0,094	0,114	0,02	236,5	254	17,5
			0	0	0,000	0	0	0	0	0
24,15	0,245	1000	0,088	0,239	0,088	0,239	0,151	93,5	261,9	168,4
			0,009	0,024	0,009	0,024	0,026	15,03	82,05	83,42
27,92	0,283	1000	0,08	0,304	0,080	0,304	0,224	44,55	245,7	201,15
			0,008	0,1	0,008	0,1	0,1	9,15	51,07	51,88
31,5	0,320	1000	0,072	0,491	0,072	0,491	0,419	35,1	305,1	270
			0,01	0,04	0,01	0,04	0,041	5,05	44,24	44,53
34,75	0,353	1000	0,075	0,585	0,075	0,585	0,51	32,4	271,35	238,95
			0,006	0,02	0,006	0,02	0,021	5,05	64,09	64,29
39,05	0,397	1000	0,076	0,87	0,076	0,87	0,794	29,7	243	213,3
			0,018	0,091	0,018	0,091	0,093	6,88	33,88	43,57
41,7	0,424	1000	0,067	1,207	0,067	1,207	1,14	31,05	301,05	270
			0	0,12	0	0,12	0,12	6,88	58,78	59,18
46,02	0,468	1000	0,078	1,39	0,078	1,39	1,312	41,82	303,44	261,62
			0,005	0,081	0,005	0,081	0,081	1,61	55,8	55,82

Πίνακας 3.3-3: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας των στερεών μονωτικών pertinax

εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500 μs , λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στα σχήματα (2-1), (2-2) και στις σχέσεις (2-1) με (2-4).

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m : πυκνωτής μέτρησης

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά το πέρας 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

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u = u_2 - u_1$, $\Delta t = t_2 - t_1$

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.

U_k kV	W_1 nWs	W_2 nWs	ΔW nWs	P_1 μW	P_2 μW	ΔP μW	ΔW_e eV
10,2	1,76						
	0,25						
13,88	1,94	3,72	1,79	5,34	10,08	4,74	0,009
	0,18	0,12	0,21	0,85	1,88	2,06	0,001
17,45	5,78	13,00	7,22	25,17	53,48	28,31	0,019
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
20,91	8,84	13,00	4,16	37,36	51,17	13,80	0,010
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
24,15	7,74	57,12	49,38	82,82	218,10	135,28	0,076
	1,58	11,47	11,58	21,55	81,16	83,97	0,013
27,92	6,40	92,42	86,02	143,66	376,13	232,47	0,112
	1,28	60,80	60,81	41,18	259,50	262,75	0,050
31,5	5,18	241,08	235,90	147,69	790,17	642,48	0,210
	1,44	39,28	39,31	46,20	172,35	178,43	0,021
34,75	5,63	342,23	336,60	173,61	1261,19	1087,58	0,255
	0,90	23,40	23,42	38,78	310,11	312,53	0,010
39,05	5,78	756,90	751,12	194,48	3114,81	2920,34	0,397
	2,74	158,34	158,36	102,67	783,00	789,70	0,046
41,7	4,49	1456,85	1452,36	144,57	4839,23	4694,65	0,570
	0,00	289,68	289,68	32,00	1348,60	1348,98	0,060
46,02	6,08	1932,10	1926,02	145,48	6367,32	6221,84	0,656
	0,78	225,18	225,18	19,47	1386,25	1386,39	0,041

Πίνακας 3.3-4: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας των στερεών μονωτικών pertinax

εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στα σχήματα (2-1), (2-2) και στις σχέσεις(2-8) με (2-14).

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

W_1 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

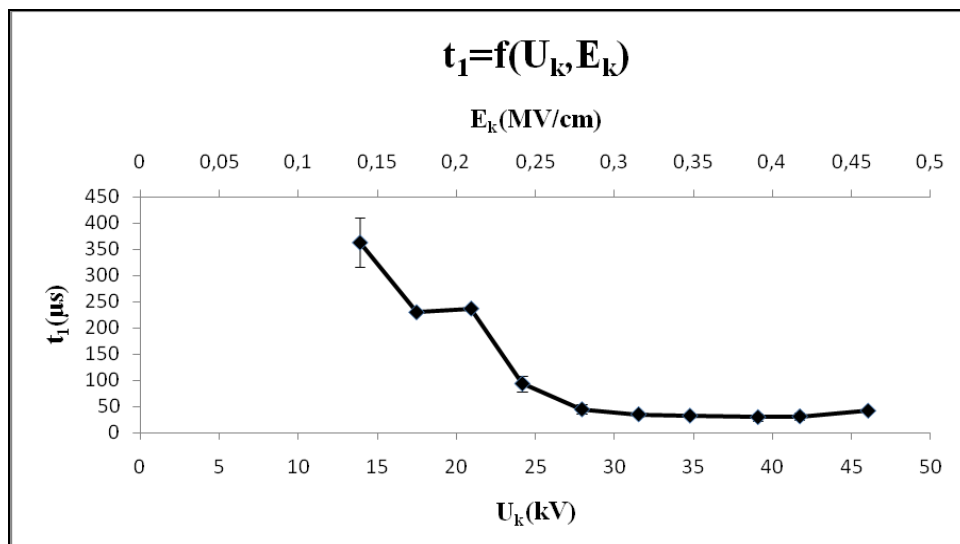
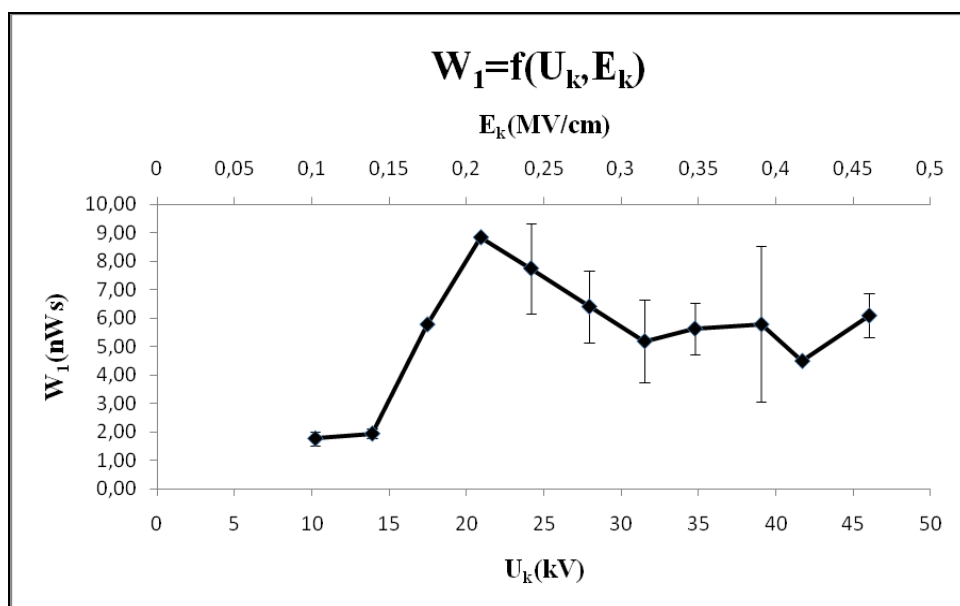
P_1 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

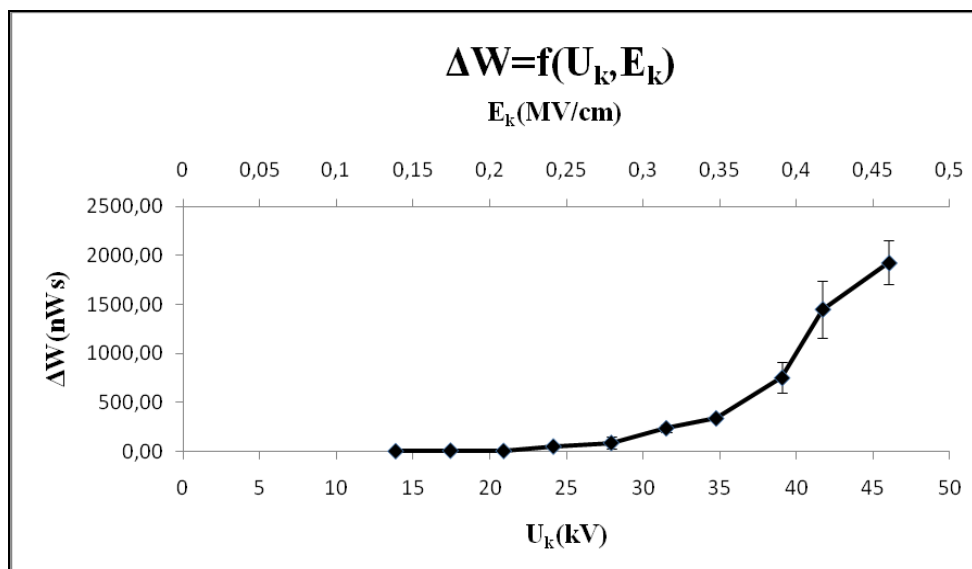
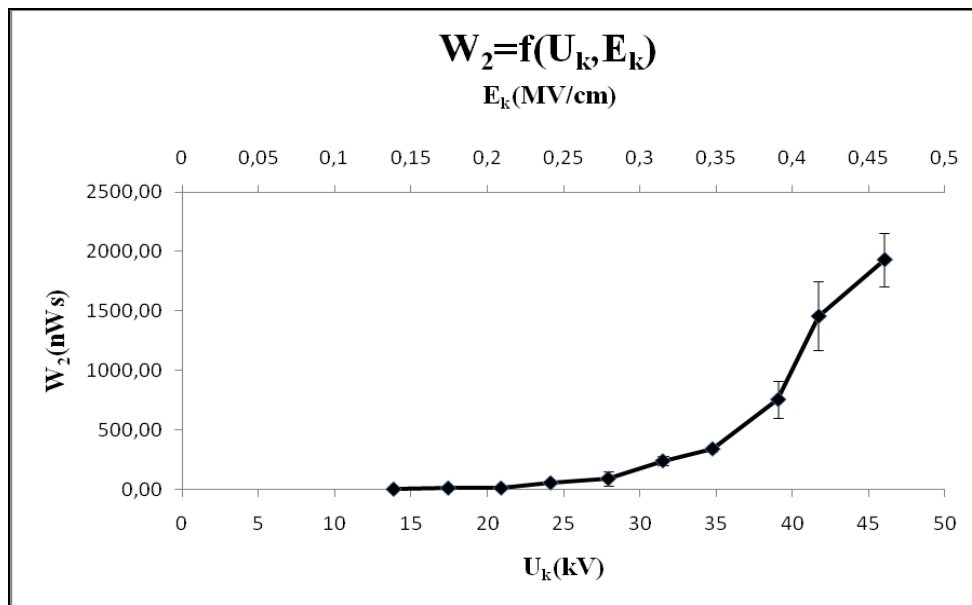
$\Delta W = W_2 - W_1$, $\Delta P = P_2 - P_1$

ΔW_e : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

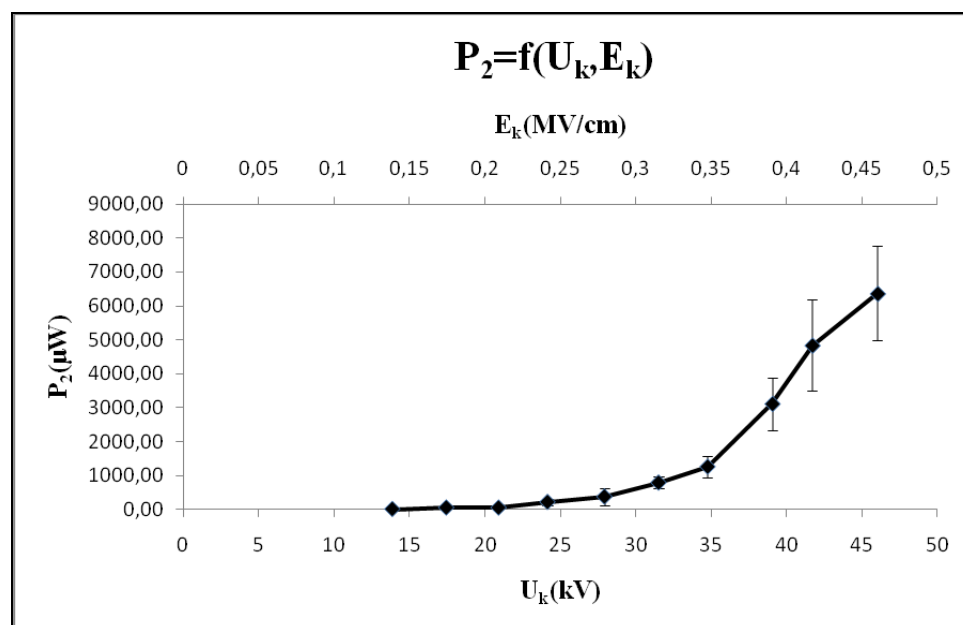
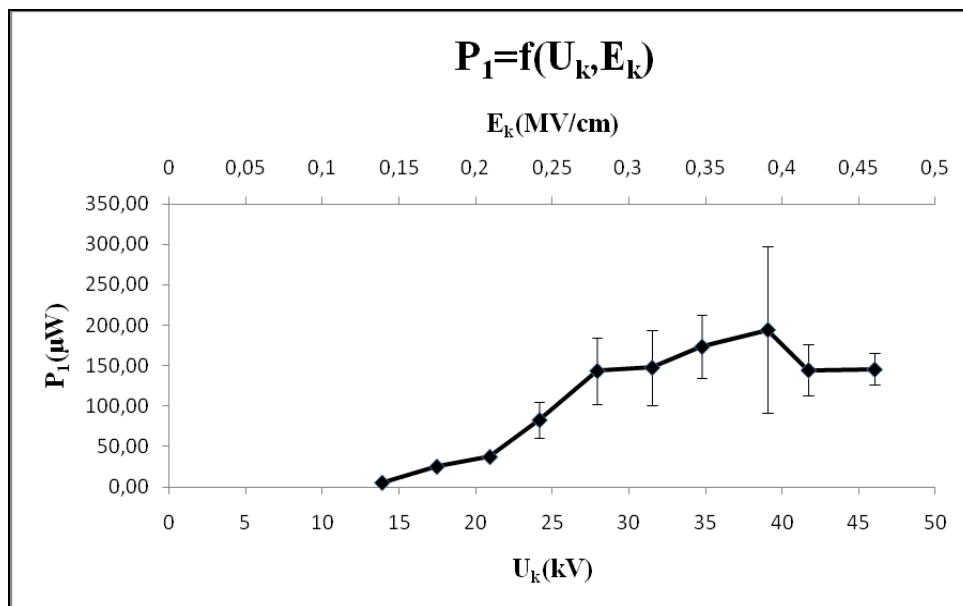
Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.



Σχήμα 3.3-4: Χαρακτηριστική $W_1=f(U_k, E_k)$ και $t_1=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών *perlinax* εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500 μ s. Πάχος: 2mm.
 Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
 W_1 : ενέργεια στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.
 t_1 : χρόνος έναρξης μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.3-5: Χαρακτηριστική $W_2=f(U_k, E_k)$ και $\Delta W=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.
 Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 2 mm.
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
 W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 ΔW : μεταβολή της στιγμιαίας τιμής της ενέργειας στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.3-6: Χαρακτηριστική $P_1=f(U_k, E_k)$ και $P_2=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

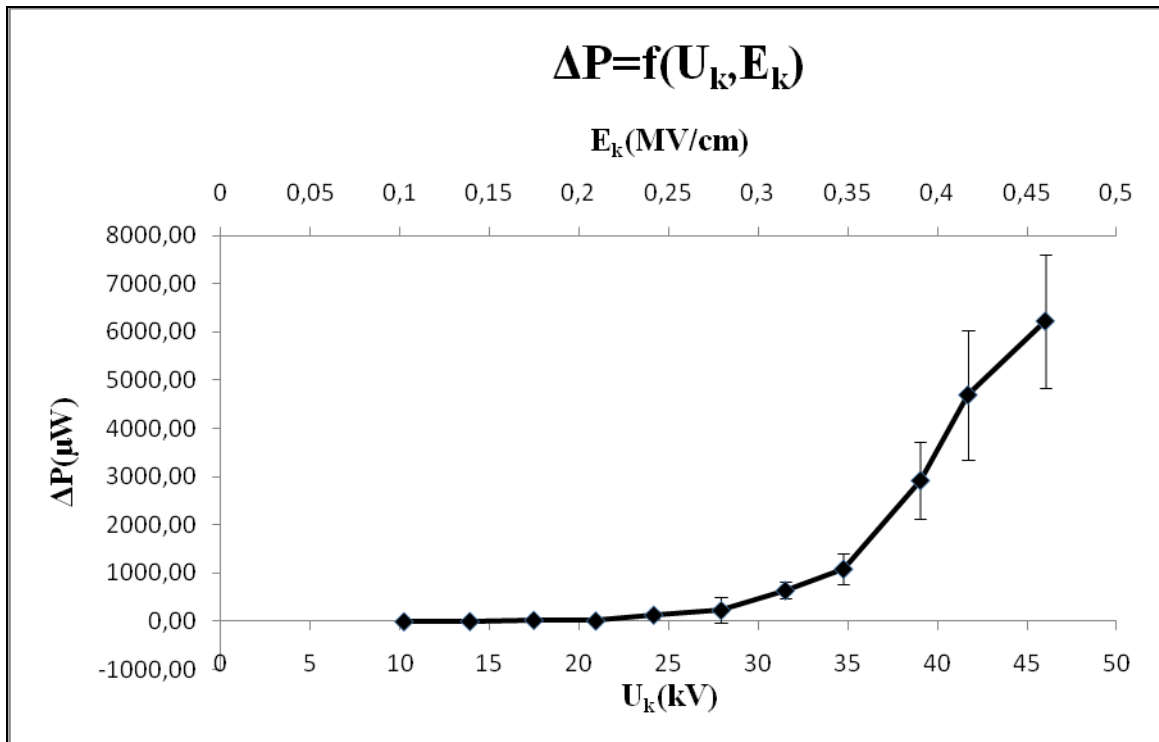
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 2 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

P_1 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m , κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m , κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.3-7: Χαρακτηριστική $\Delta P = f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών perlinax

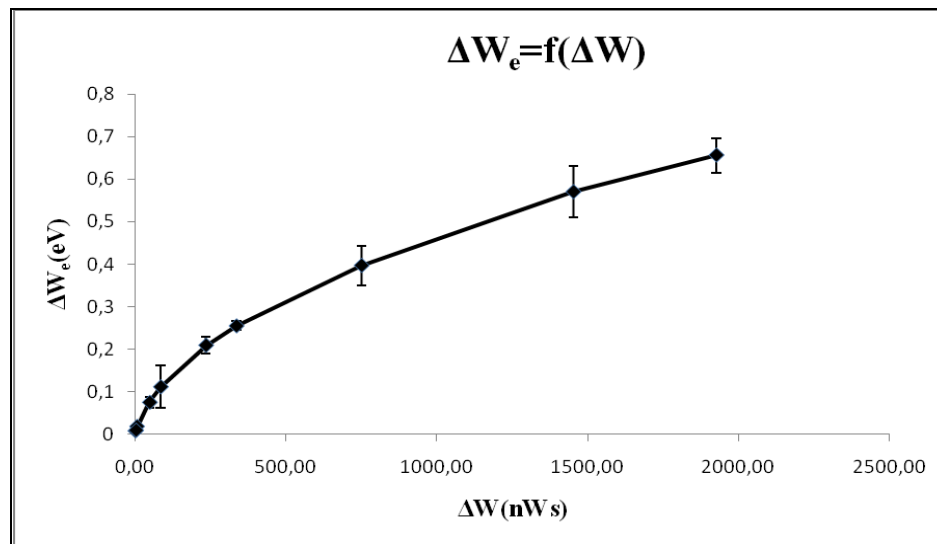
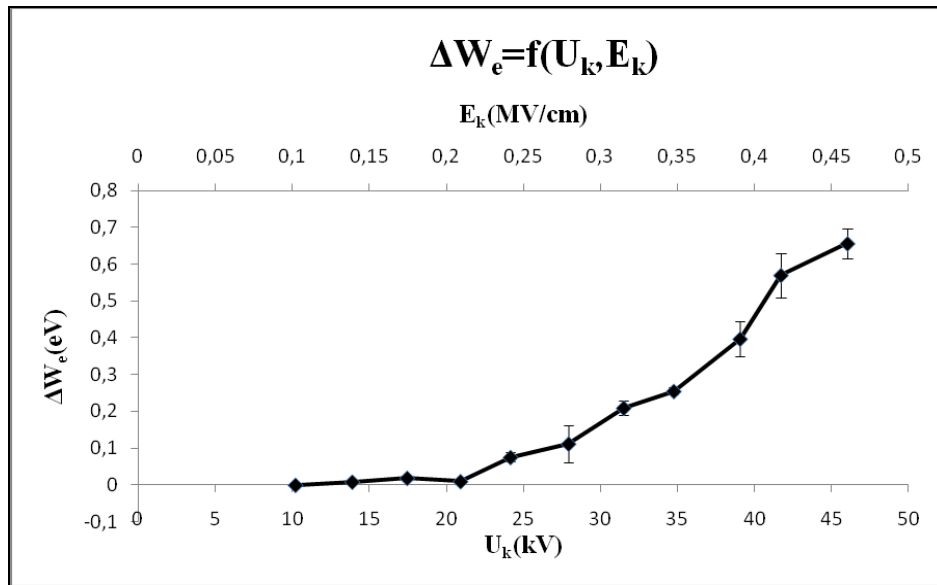
εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 2 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

ΔP : μεταβολή της στιγμιαία τιμής της ισχύος στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.3-8: Χαρακτηριστική $\Delta W_e=f(U_k, E_k)$ και $\Delta W_e=f(\Delta W)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

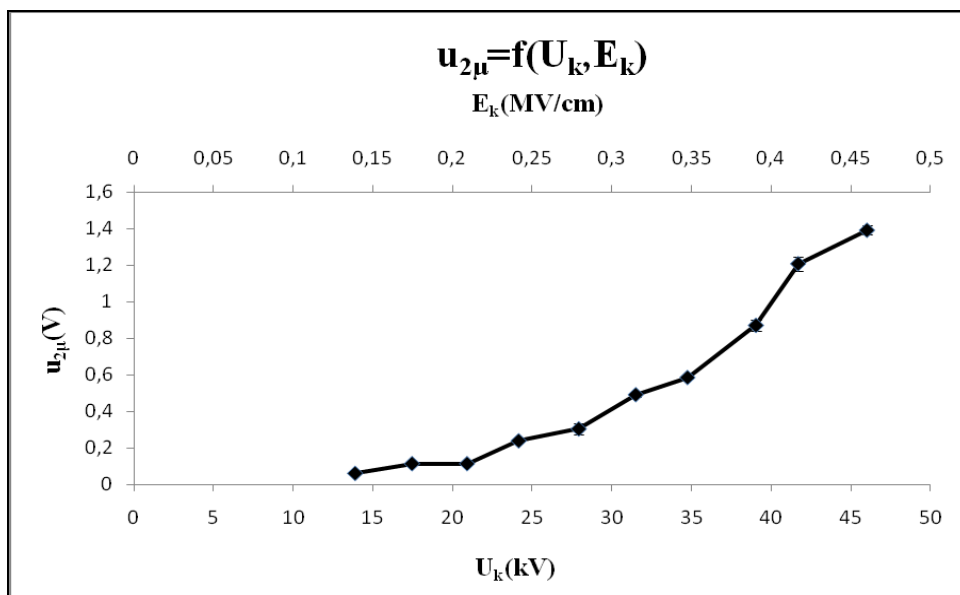
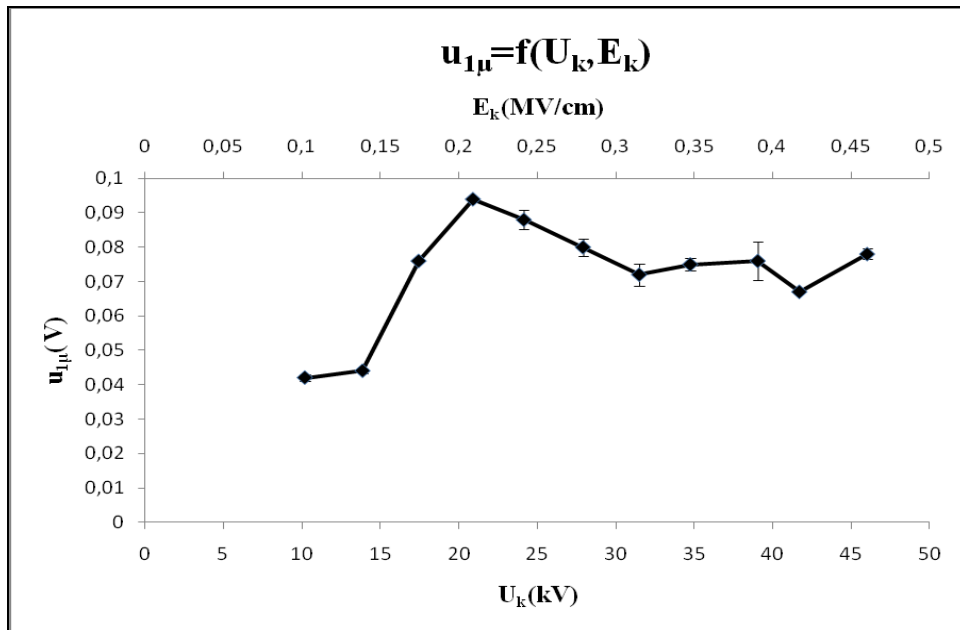
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος: 2mm

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

ΔW_e : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

ΔW : μεταβολή της ενέργειας στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.3-9: Χαρακτηριστική $u_{1\mu} = f(U_k, E_k)$ και $u_{2\mu} = f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

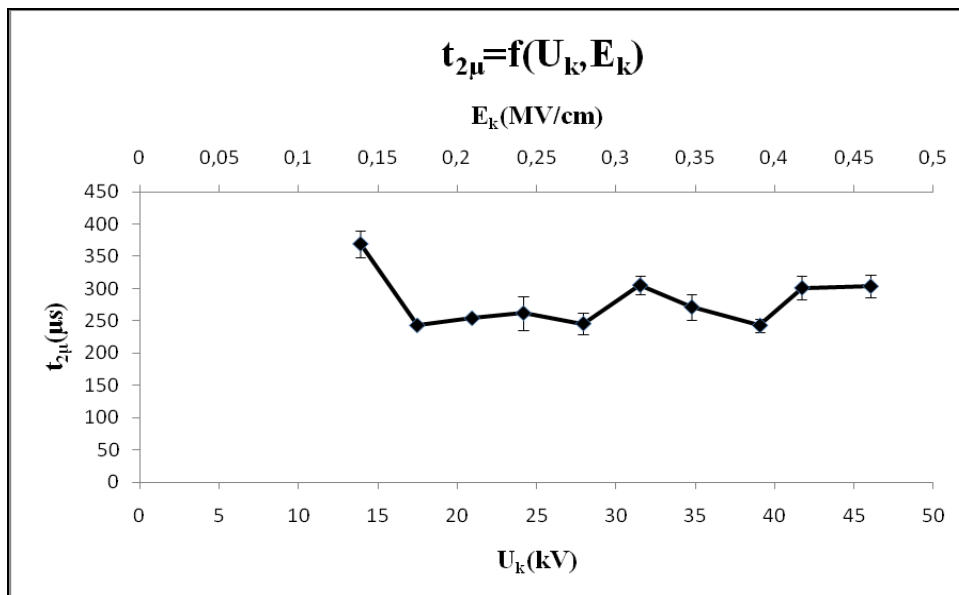
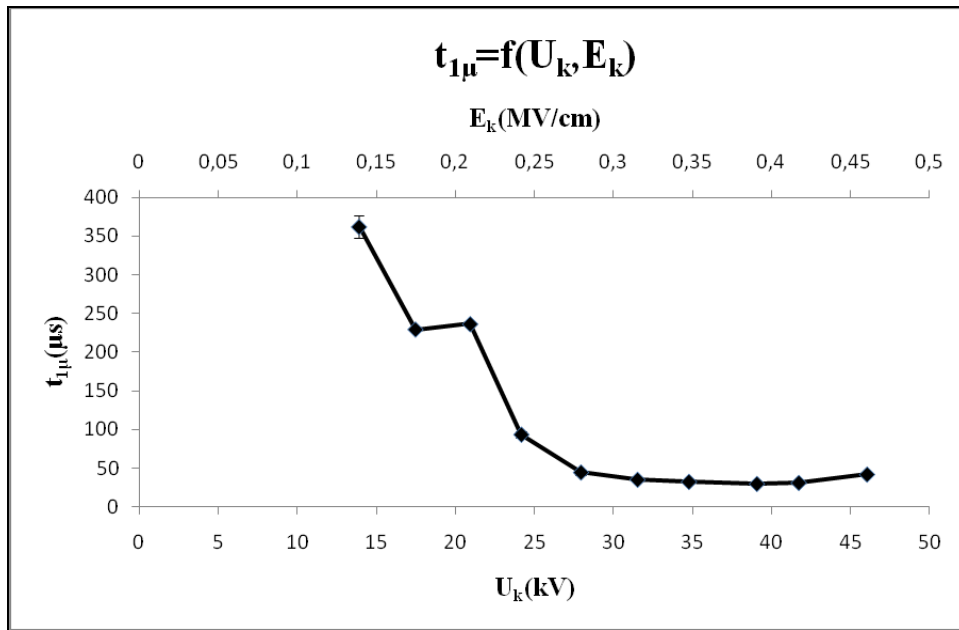
Πάχος $d=2\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

$u_{1\mu}$: μέση τιμή της τάσεως u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$u_{2\mu}$: μέση τιμή της τάσεως u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.3-10: Χαρακτηριστική $t_{1\mu}=f(U_k, E_k)$ και $t_{2\mu}=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

Πάχος $d=2\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

$t_{1\mu}$: μέση τιμή του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

$t_{2\mu}$: μέση τιμή του χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

3.4 Δοκίμια *pertinax* πάχους 2mm εντός μονωτικού ελαίου

θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

U _k kV	E _k MV/cm	C _m nF	q ₁ μC	q ₂ μC	u ₁ V	u ₂ V	Δu V	t ₁ μs	t ₂ μs	Δt μs
28,2	0,286	1000	0,099	0,256	0,099	0,256	0,157	108	235,57	127,57
			0,008	0,049	0,008	0,049	0,05	77,9	69,18	104,2
31,9	0,324	1000	0,102	0,41	0,102	0,41	0,308	56,7	210,6	153,9
			0,006	0,055	0,006	0,055	0,055	10,96	85,63	86,33
35,35	0,359	1000	0,097	0,642	0,097	0,642	0,545	48,59	247,05	198,46
			0,02	0,055	0,02	0,055	0,059	8,69	56,08	56,75
38,5	0,391	1000	0,126	0,944	0,126	0,944	0,818	49,95	288,85	238,9
			0,015	0,13	0,015	0,13	0,131	5,4	54,23	54,5
40,8	0,414	1000	0,098	1,336	0,098	1,336	1,238	33,74	260,5	226,76
			0,019	0,15	0,019	0,15	0,151	3,69	7,56	8,41
45,5	0,462	1000	0,148	1,552	0,148	1,552	1,404	54	209,25	155,25
			0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 3.4-1: Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης των στερεών μονωτικών *pertinax* εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs, λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στα σχήματα (2-1), (2-2) και στις σχέσεις (2-1) με (2-4).

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m: πυκνωτής μέτρησης

u₁: στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u₂: στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

q₁: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q₂: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

t₁: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t₂: χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δu = u₂ - u₁, Δt = t₂ - t₁

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση

U_k kV	Z_1 Ω	Z_2 Ω	ΔZ Ω
28,2	108	235,57	127,57
	77,9	69,18	104,18
31,9	56,7	210,6	153,9
	10,96	85,63	86,33
35,35	48,59	247,05	198,46
	8,69	56,08	56,75
38,5	49,95	288,85	238,9
	5,4	54,23	54,5
40,8	33,74	260,5	226,76
	3,69	7,56	8,41
45,5	54	209,25	155,25
	0	0	0

Πίνακας 3.4-2 : Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs, λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στα σχήματα (2-1), (2-2) και στις σχέσεις (2-5) με (2-7).

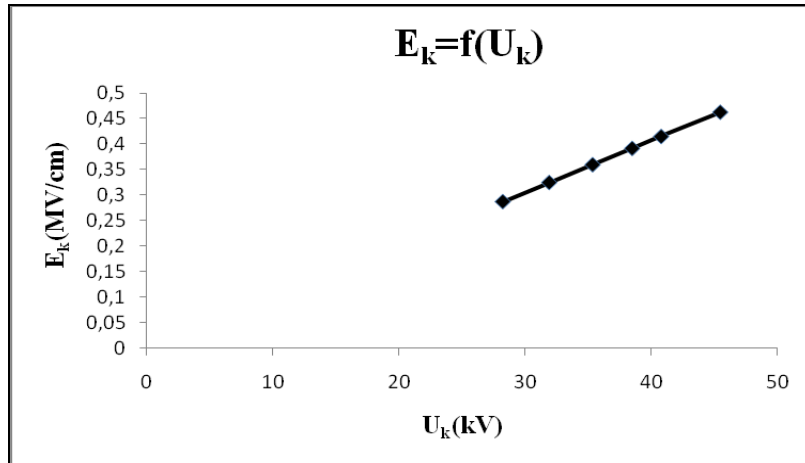
U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.



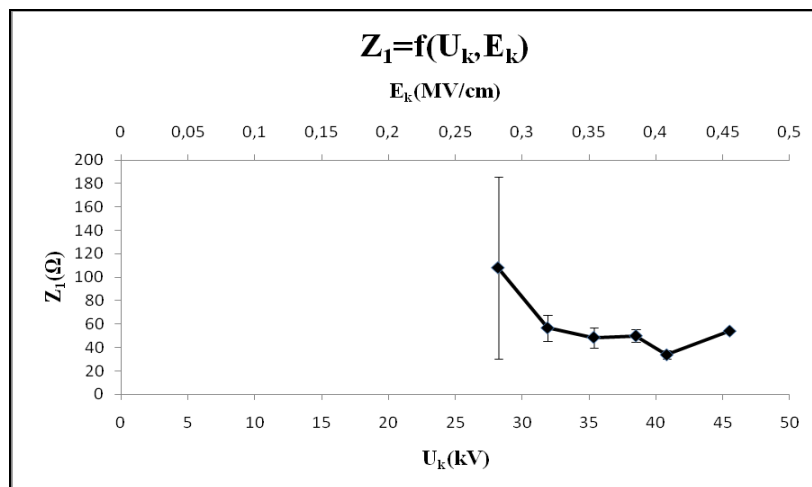
Σχήμα 3.4-1: Χαρακτηριστική $E_k=f(U_k)$ των στερεών μονωτικών πάχους 2mm και διαμέτρου 150mm.

Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα - πλάκα.

Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας $R=0,9\text{mm}$.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



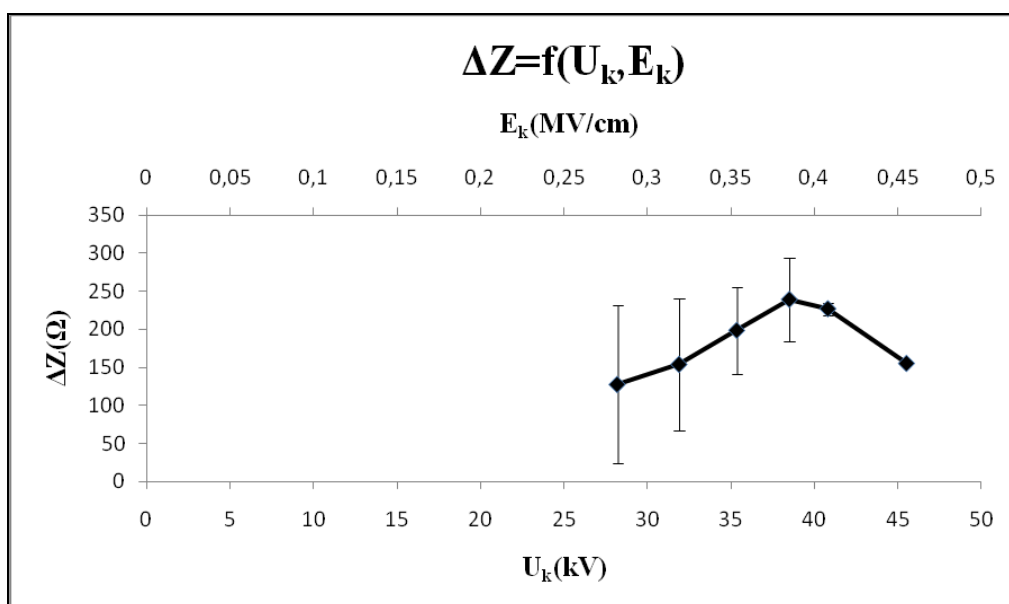
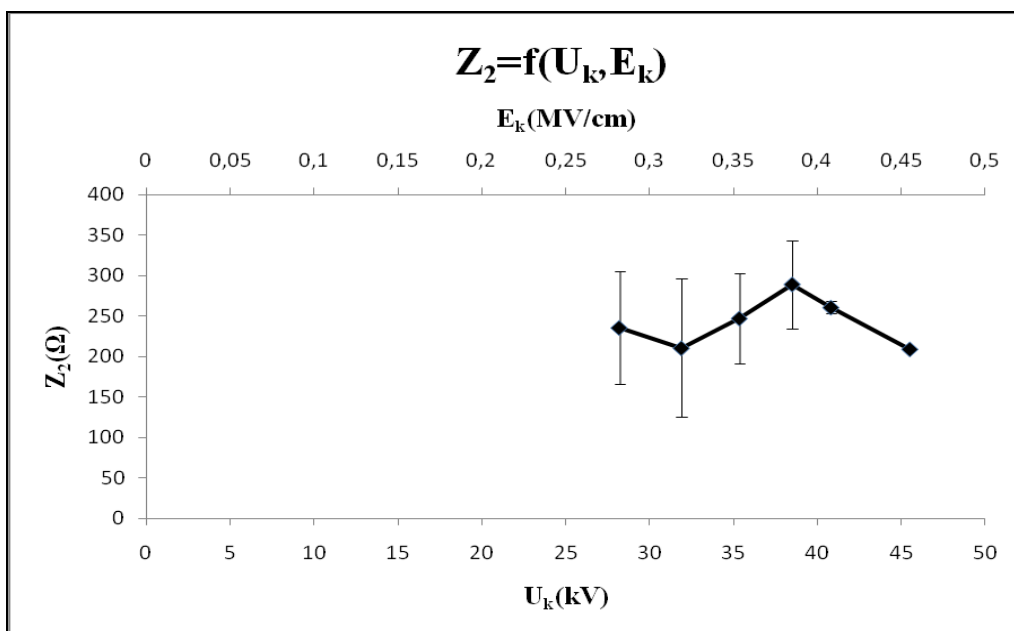
Σχήμα 3.4-2: Χαρακτηριστική $Z_1=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος 2 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.4-3: Χαρακτηριστική $Z_2=f(U_k, E_k)$ και $\Delta Z=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs

Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος: 2 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$: μεταβολή της σύνθετης αντίστασης στον C_m

U_k kV	E_k MV/cm	C_m nF	q_1 μC	q_2 μC	u_1 V	u_2 V	Δu V	t_1 μs	t_2 μs	Δt μs
28,2	0,286	1000	0,099	0,256	0,099	0,256	0,157	108	235,57	127,57
			0,008	0,049	0,008	0,049	0,05	77,9	69,18	104,2
31,9	0,324	1000	0,102	0,41	0,102	0,41	0,308	56,7	210,6	153,9
			0,006	0,055	0,006	0,055	0,055	10,96	85,63	86,33
35,35	0,359	1000	0,097	0,642	0,097	0,642	0,545	48,59	247,05	198,46
			0,02	0,055	0,02	0,055	0,059	8,69	56,08	56,75
38,5	0,391	1000	0,126	0,944	0,126	0,944	0,818	49,95	288,85	238,9
			0,015	0,13	0,015	0,13	0,131	5,4	54,23	54,5
40,8	0,414	1000	0,098	1,336	0,098	1,336	1,238	33,74	260,5	226,76
			0,019	0,15	0,019	0,15	0,151	3,69	7,56	8,41
45,5	0,462	1000	0,148	1,552	0,148	1,552	1,404	54	209,25	155,25
			0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 3.4-3: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στα σχήματα (2-1), (2-2) και στις σχέσεις(2-1) με (2-4).

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m : πυκνωτής μέτρησης

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m (βλ. σχήμα 2-2) κατά το πέρας 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

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u = u_2 - u_1$, $\Delta t = t_2 - t_1$

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση

U_k kV	W_1 nWs	W_2 nWs	ΔW nWs	P_1 μW	P_2 μW	ΔP μW	ΔW_e eV
28,2	9,801	65,536	55,735	90,75	278,2	187,45	0,0785
	1,584	25,088	25,138	67,08	134,23	150,06	0,025
31,9	10,404	168,1	157,696	183,49	798,2	614,7	0,154
	1,224	45,1	45,117	41,52	388,83	391,04	0,028
35,35	9,409	412,164	402,755	193,64	1668,3	1474,7	0,2725
	3,88	70,62	70,727	87,04	474,48	482,39	0,029
38,5	15,876	891,136	875,26	317,84	3085,1	2767,3	0,409
	3,78	245,44	245,47	83,11	1028,4	1031,7	0,065
40,8	9,604	1784,9	1775,292	284,65	6851,8	6567,2	0,619
	3,724	400,8	400,82	114,68	1551,4	1555,6	0,076
45,5	21,904	2408,7	2386,8	405,63	11511	11106	0,702
	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 3.4-4: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στα σχήματα (2-1),(2-2) και στις σχέσεις(2-8) με (2-14).Πάχος:2mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

W_1 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

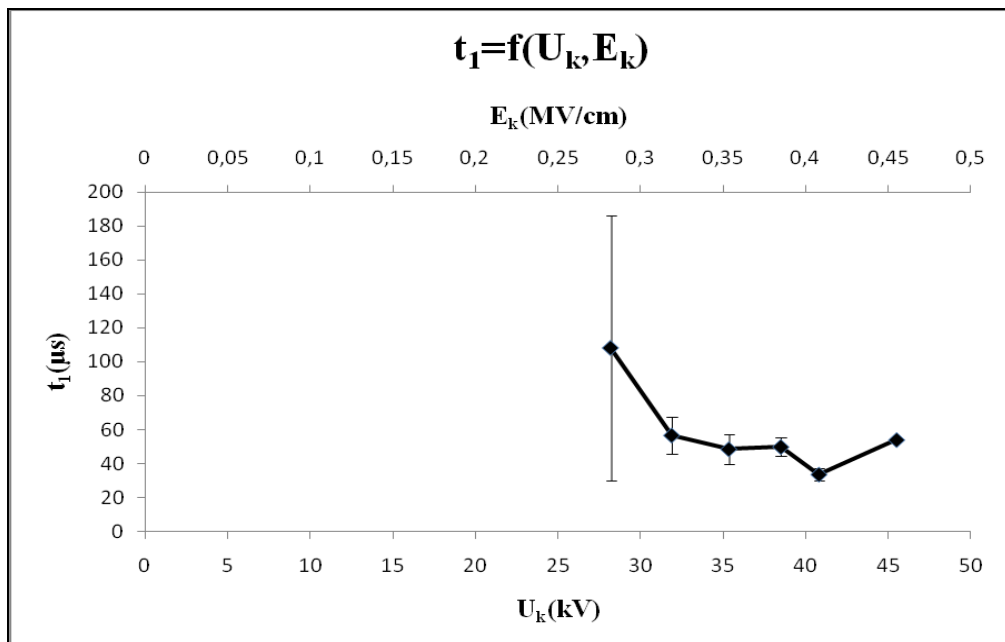
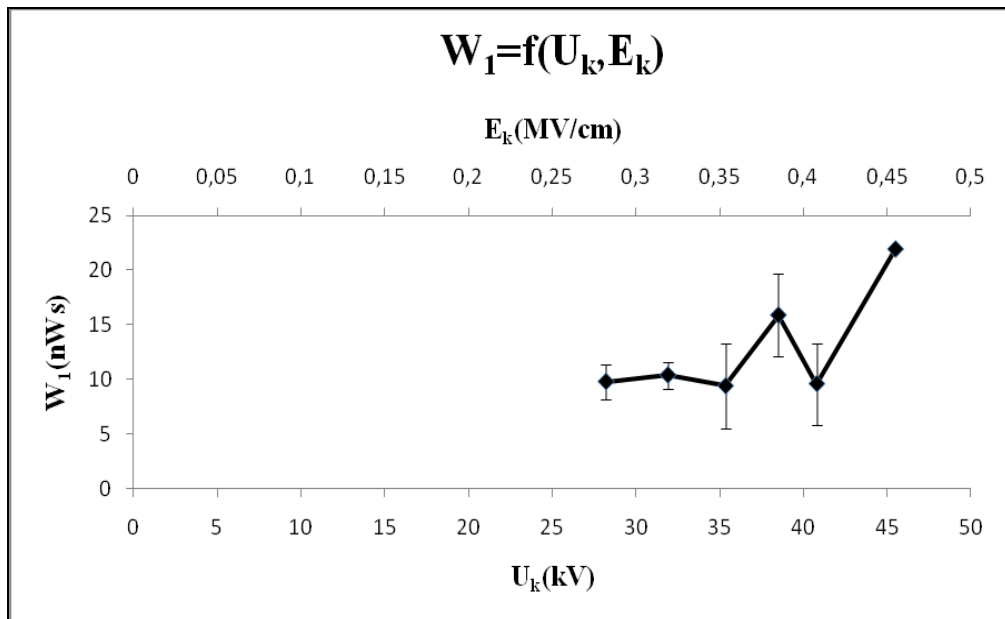
P_1 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta W=W_2-W_1$, $\Delta P=P_2-P_1$

ΔW_e : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης είναι η τυπική απόκλιση.



Σχήμα 3.4-4: Χαρακτηριστική $W_1=f(U_k, E_k)$ και $t_1=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών *perlinax* εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs. Πάχος: 2 mm.

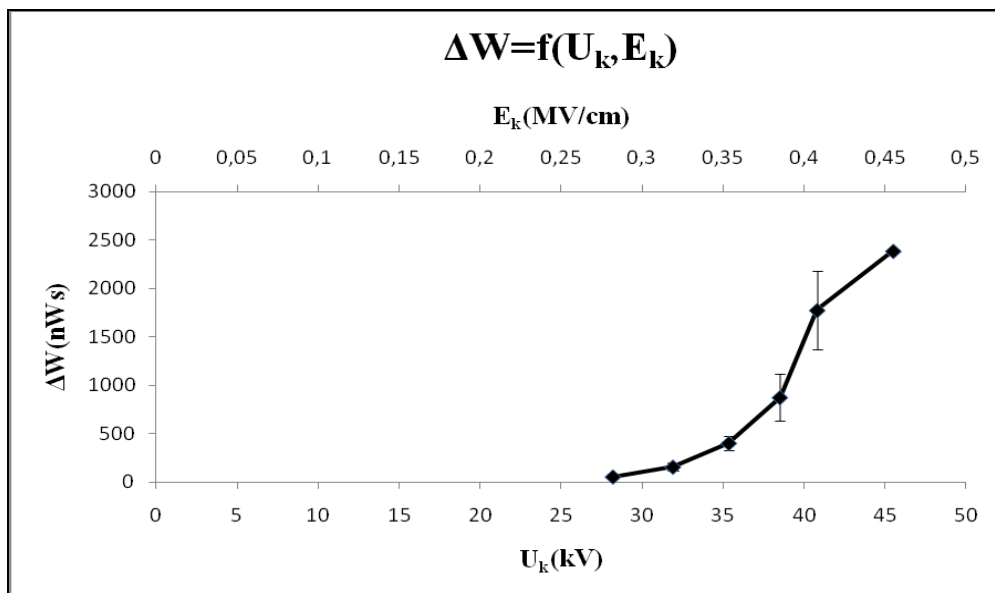
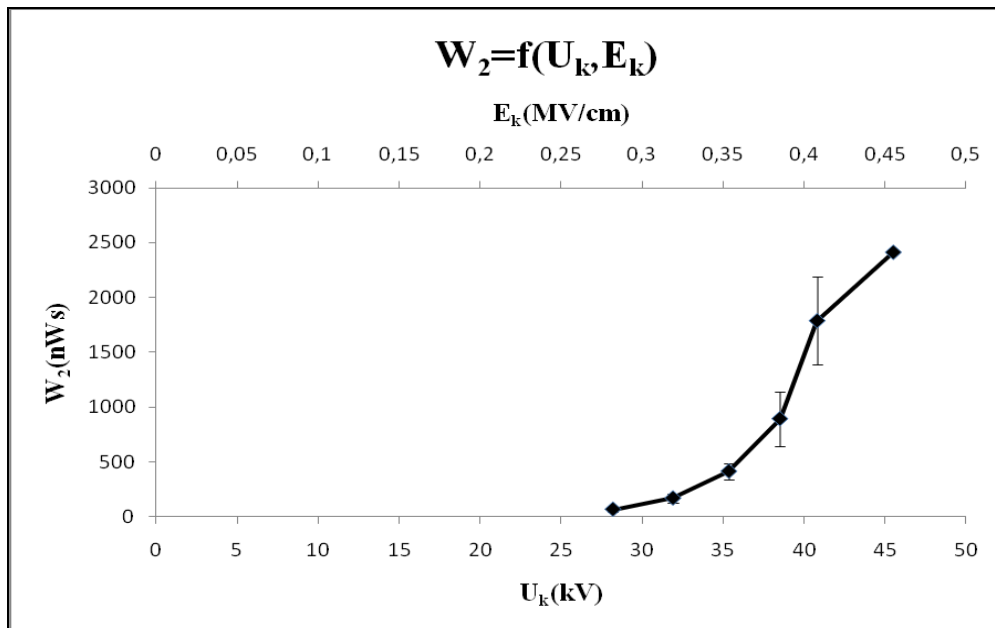
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

W_1 : ενέργεια στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

t_1 : χρόνος έναρξης μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.4-5: Χαρακτηριστική $W_2=f(U_k, E_k)$ και $\Delta W=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax

εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις $-250/2500\mu\text{s}$

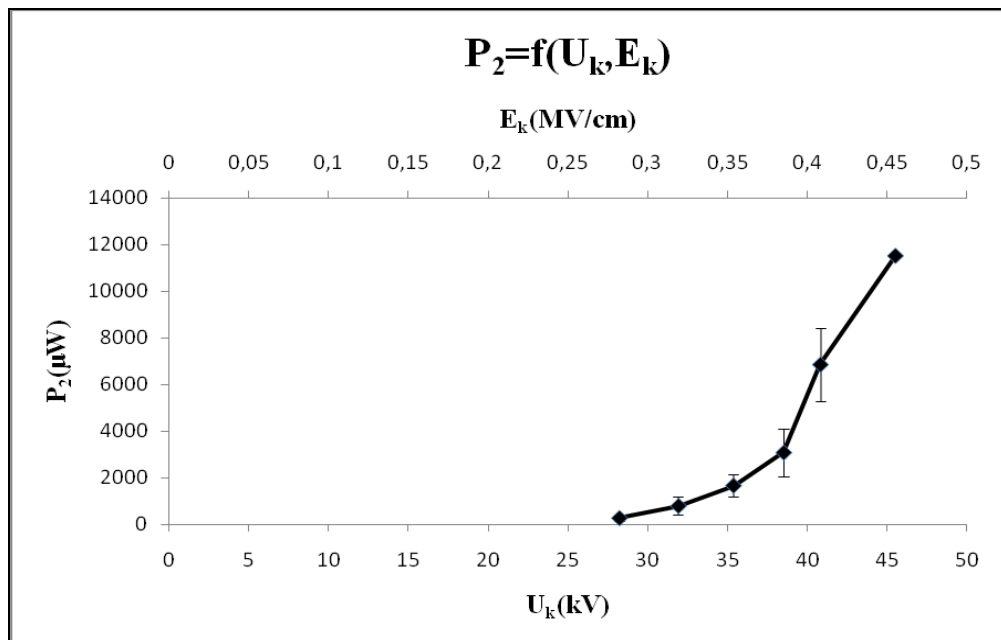
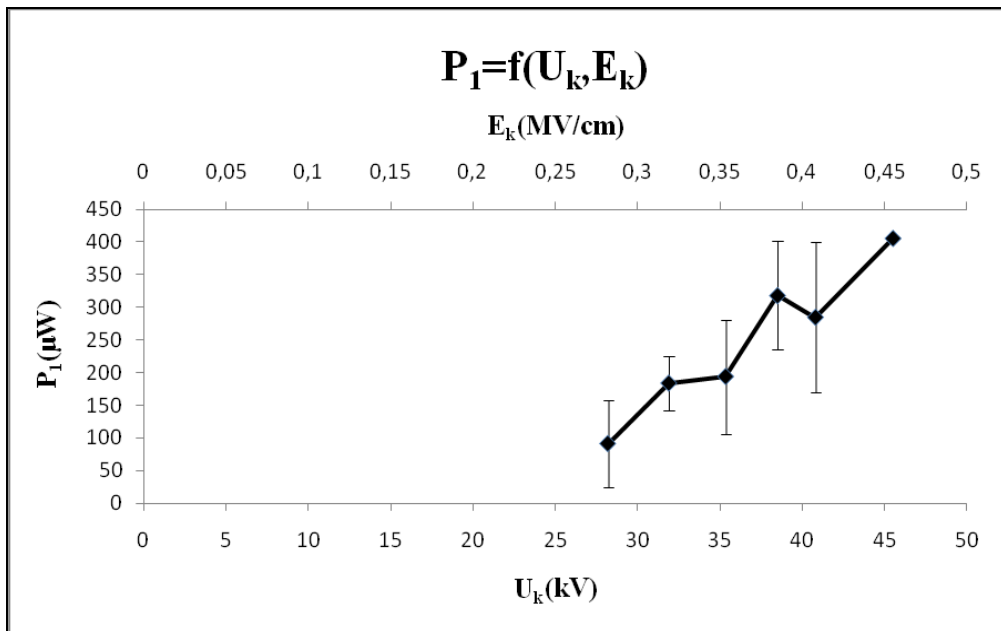
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος: 2 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΔW : μεταβολή της στιγμιαίας τιμής της ενέργειας στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.4-6: Χαρακτηριστική $P_1=f(U_k, E_k)$ και $P_2=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs

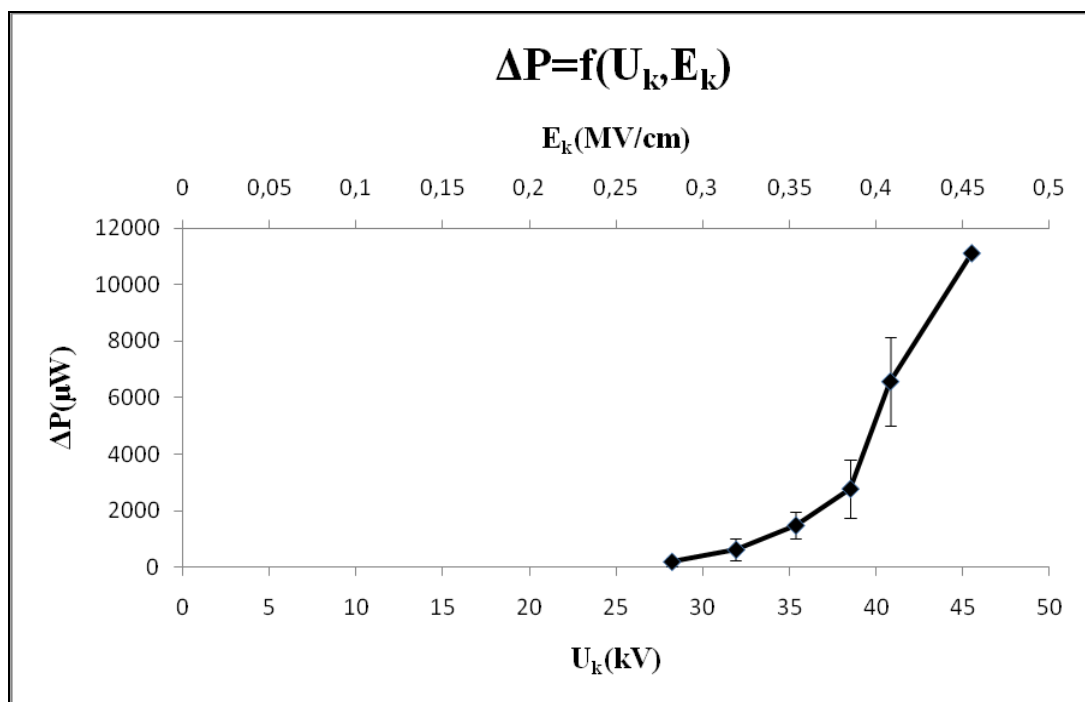
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος: 2 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

P_1 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m , κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m , κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.4-7: Χαρακτηριστική $\Delta P=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών perlinax

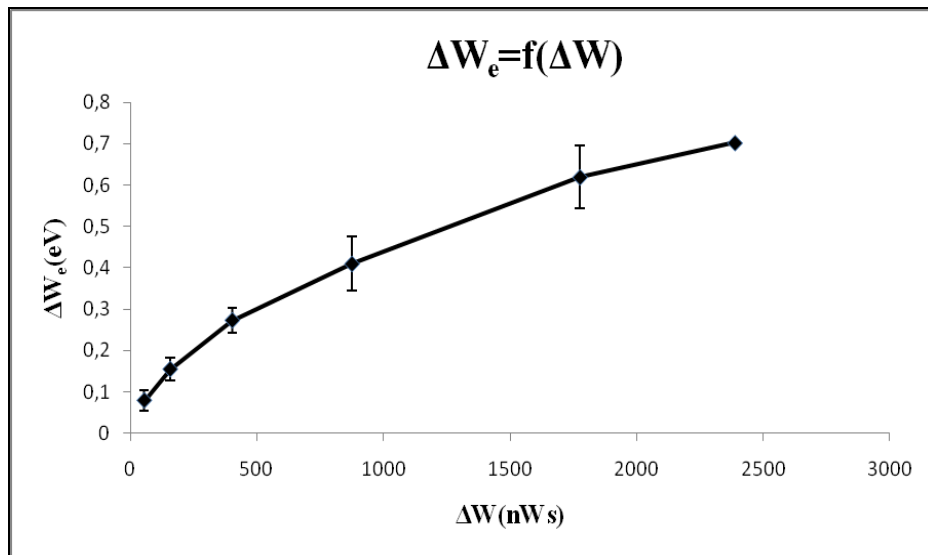
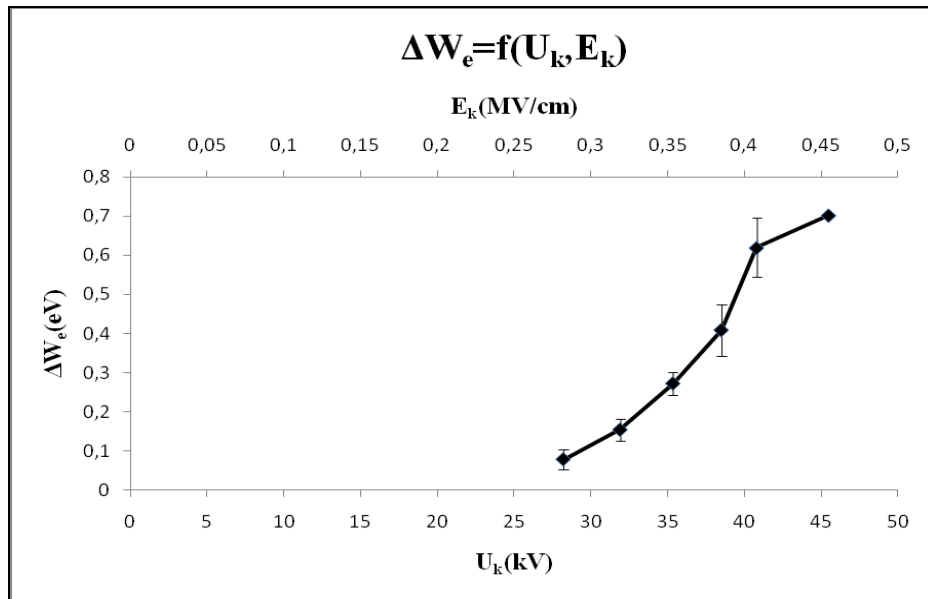
εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις
-250/2500μs

Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Πάχος: 2 mm.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

ΔP : μεταβολή της στιγμιαία τιμής της ισχύος στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.4-8: Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(U_k, E_k)$ και $\Delta W_e = f(\Delta W)$ των στερεών μονωτικών perlinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs. Πάχος: 2mm.

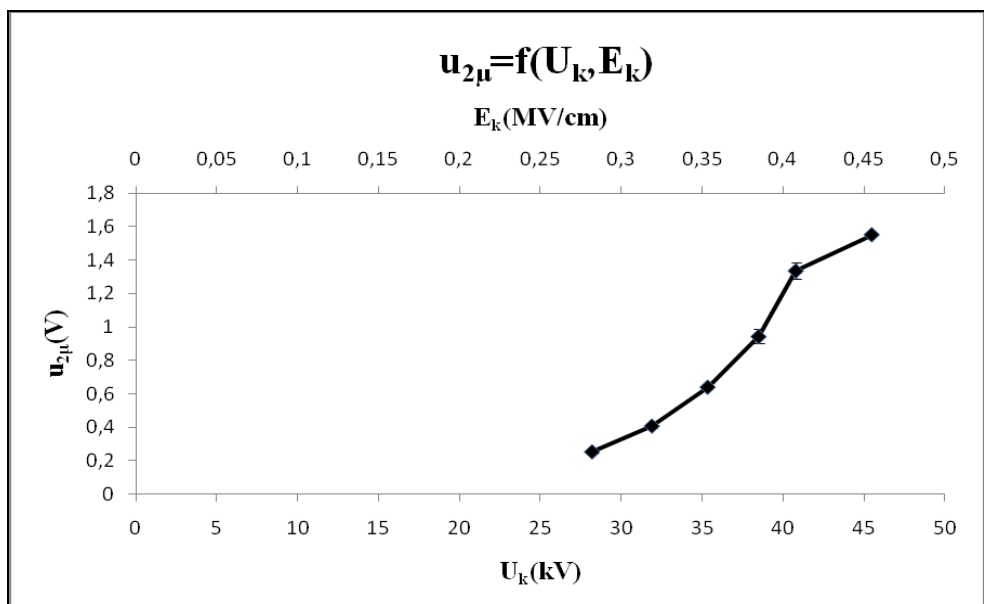
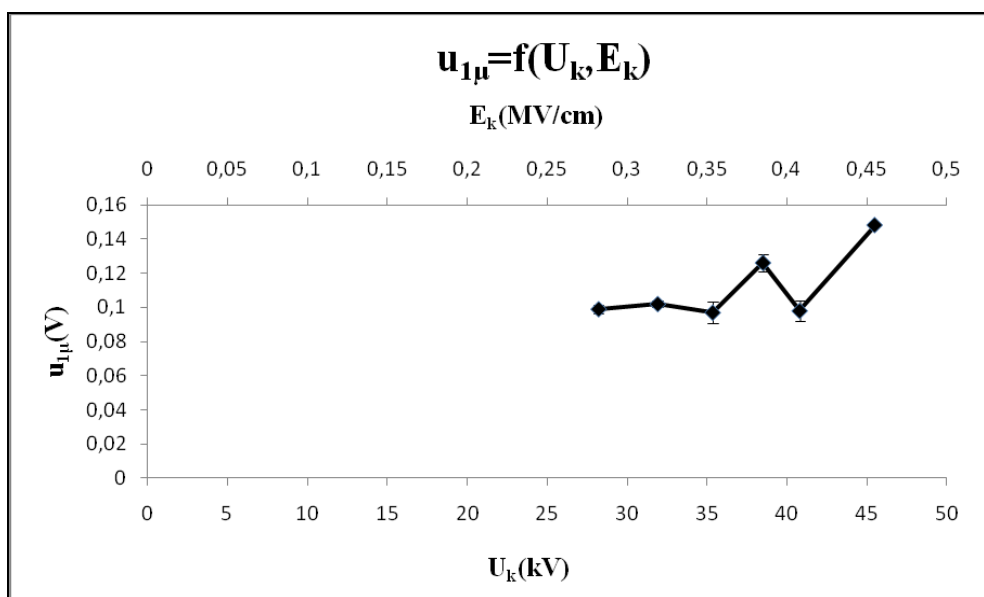
Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

ΔW_e : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

ΔW : μεταβολή της ενέργειας στον C_m λόγω των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.4-9 : Χαρακτηριστική $u_{1\mu}=f(U_k, E_k)$ και $u_{2\mu}=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

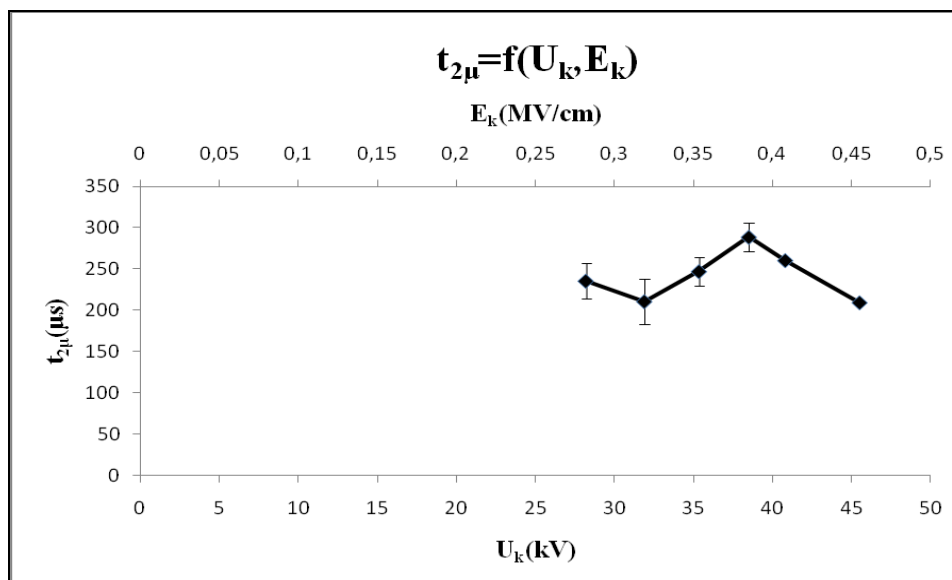
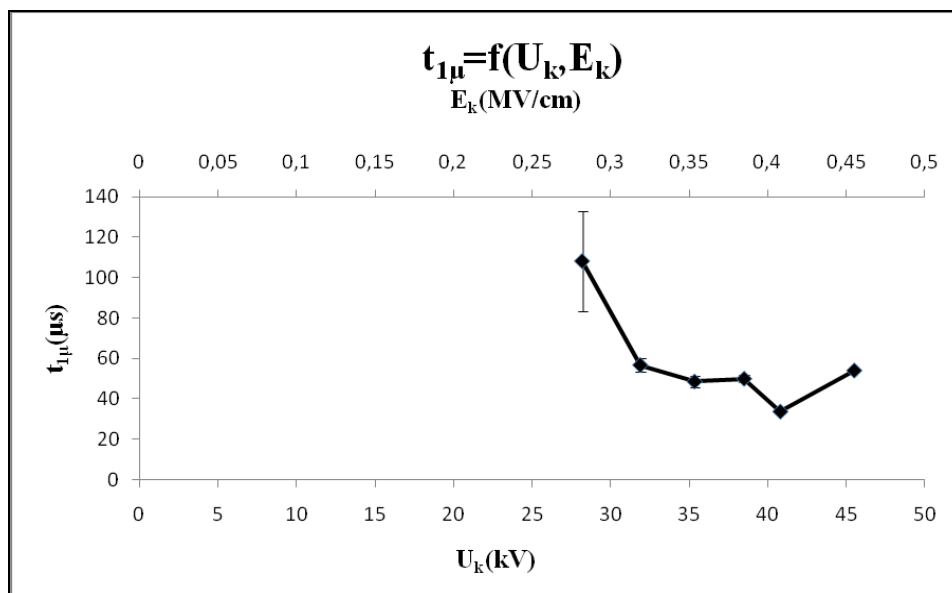
Πάχος $d=2\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

$u_{1\mu}$: μέση τιμή της τάσεως u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$u_{2\mu}$: μέση τιμή της τάσεως u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3.4-10: Χαρακτηριστική $t_{1\mu}=f(U_k, E_k)$ και $t_{2\mu}=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις $-250/2500\mu\text{s}$.

Πάχος $d=2\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

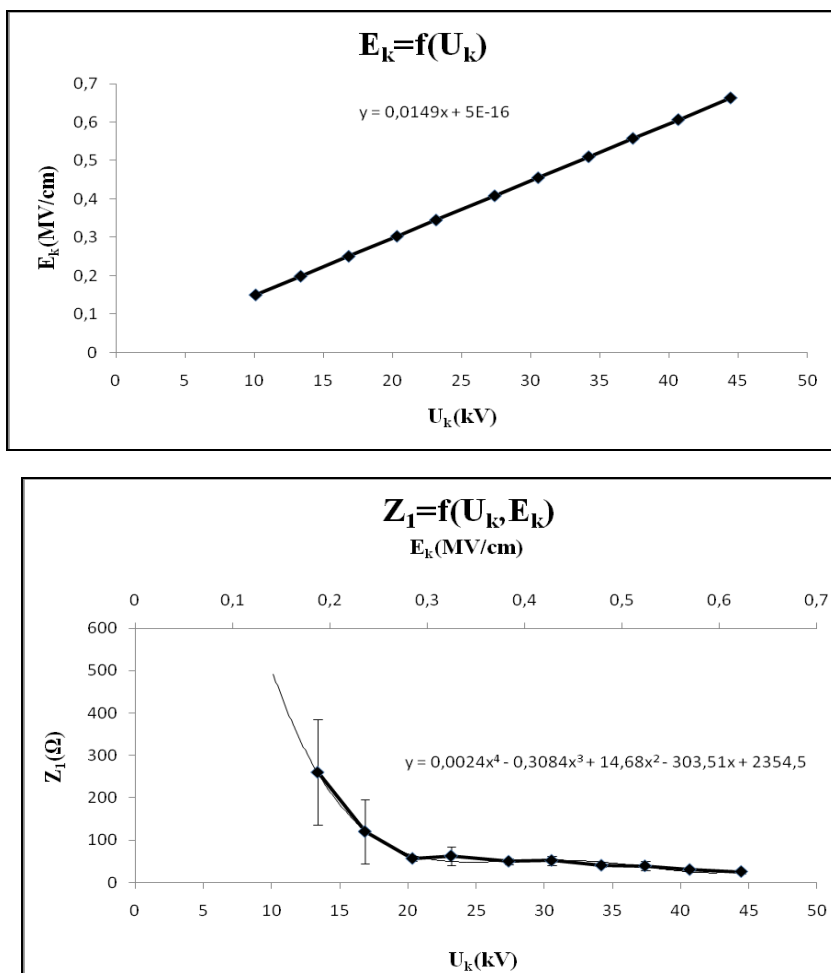
$t_{1\mu}$: μέση τιμή του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

$t_{2\mu}$: μέση τιμή του χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών που υπολογίστηκαν.

4.1.1 Δοκίμια pertinax πάχους 1mm εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.



Σχήμα 4.1.1-1: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $E_k=f(U_k)$ των στερεών μονωτικών πάχους 1mm και διαμέτρου 150mm και της $Z_1=f(U_k,E_k)$ των δοκιμών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα.

Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: $R=0,9\text{mm}$.

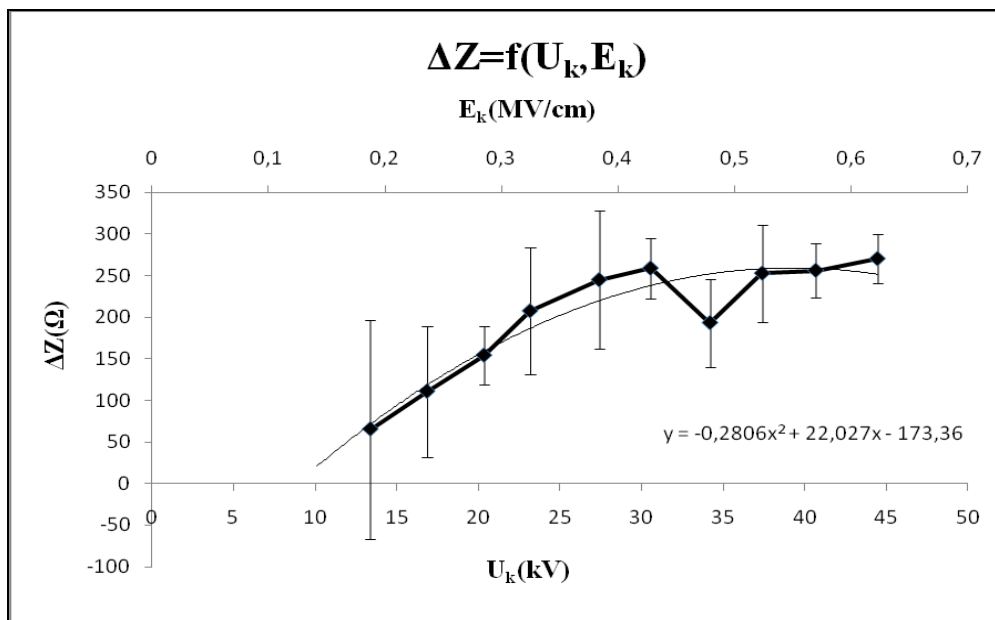
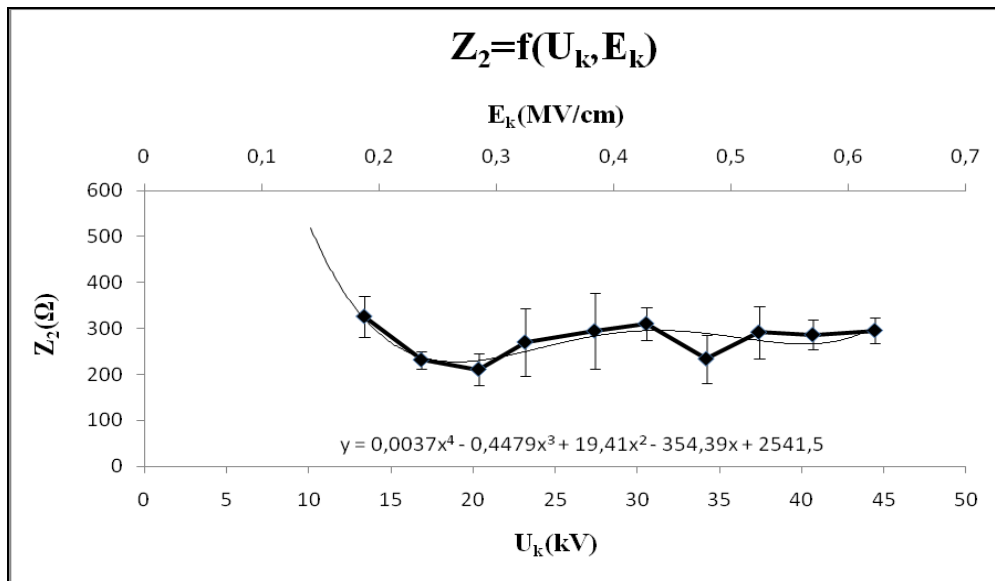
Μαθηματική προσέγγιση της $E_k=f(U_k)$: $y = 0,0149x + 5 \cdot 10^{-16}$

Μαθηματική προσέγγιση της $Z_1=f(U_k,E_k)$:

$$y = 0,0024x^4 - 0,3084x^3 + 14,68x^2 - 303,51x + 2354,5$$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.1-2: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $Z_2=f(U_k, E_k)$

και $\Delta Z=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

Πάχος d=1mm. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

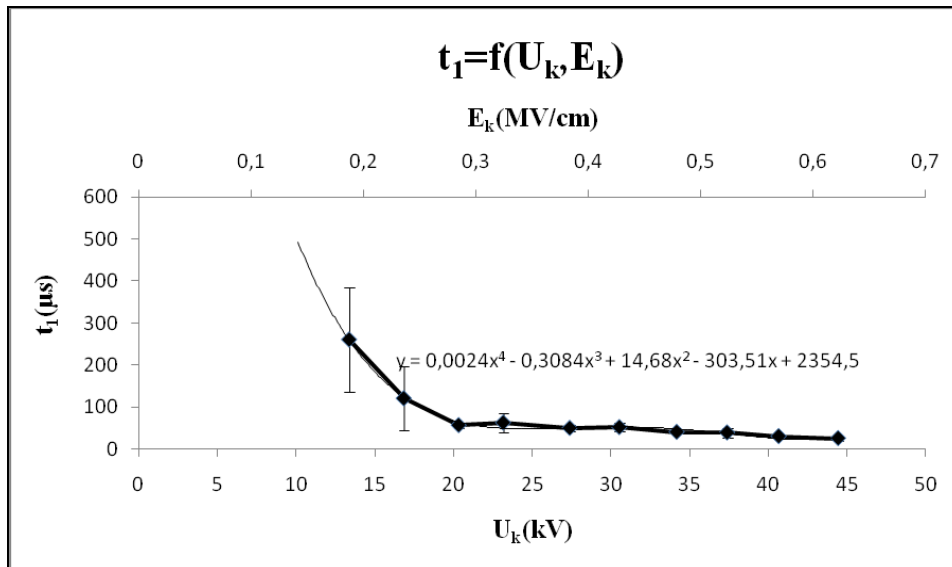
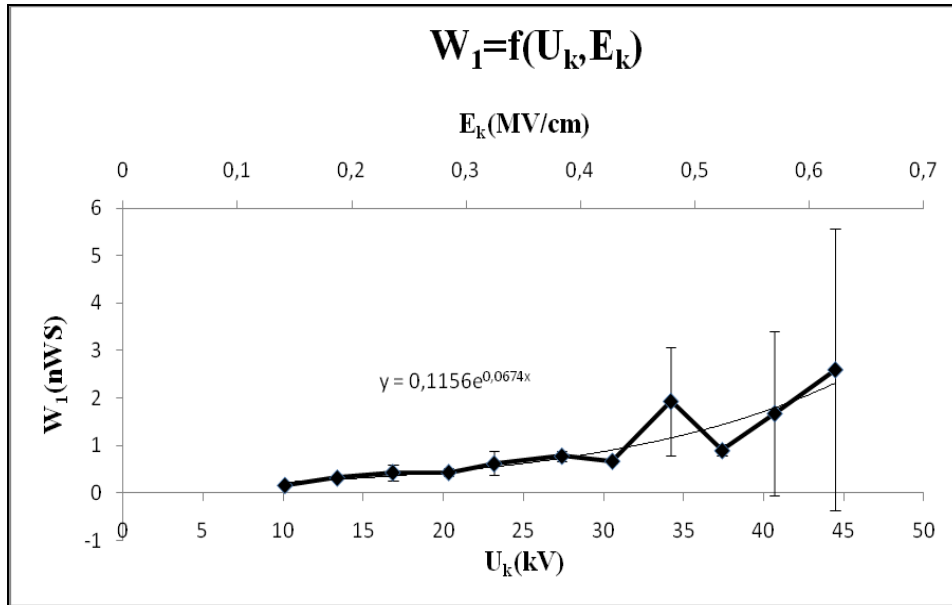
Μαθηματική προσέγγιση της $Z_2=f(U_k, E_k)$:

$$y = 0,0037x^4 - 0,4479x^3 + 19,41x^2 - 354,39x + 2541,5$$

Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta Z=f(U_k, E_k)$: $y = -0,2806x^2 + 22,027x - 173,36$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.1-3: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $W_1=f(U_k, E_k)$

και $t_1=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών *perlinax* εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

Πάχος $d=1\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

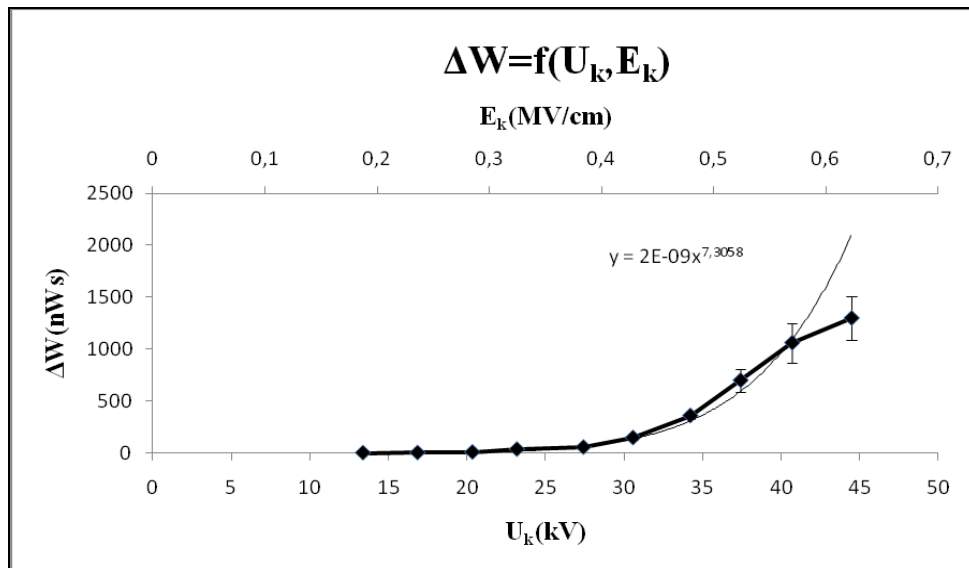
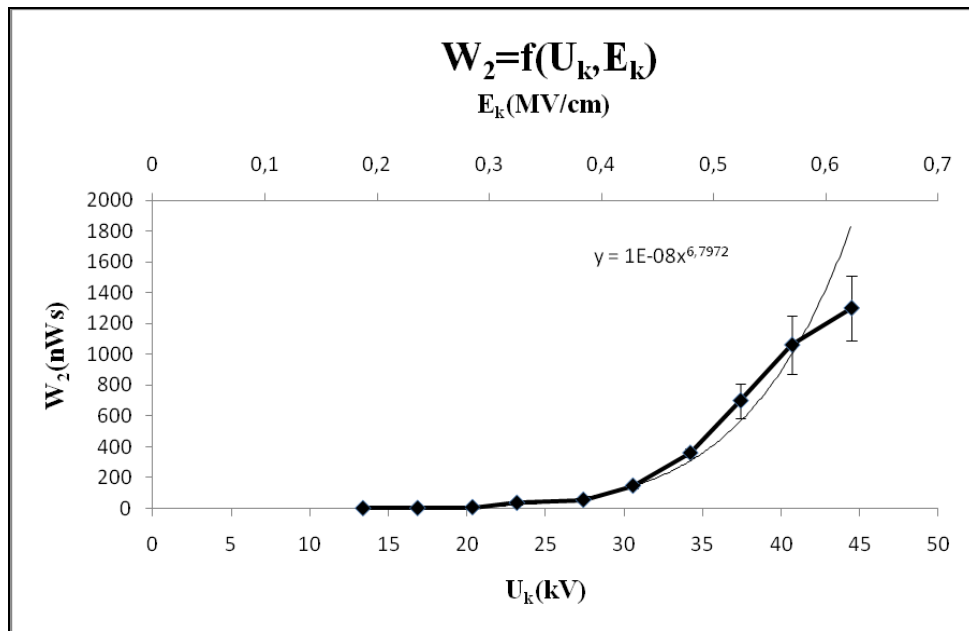
Μαθηματική προσέγγιση της $W_1=f(U_k, E_k)$: $y = 0,1156e^{0,0674x}$

Μαθηματική προσέγγιση της $t_1=f(U_k, E_k)$:

$$y = 0,0024x^4 - 0,3084x^3 + 14,68x^2 - 303,51x + 2354,5$$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.1-4: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $W_2=f(U_k, E_k)$

και $\Delta W=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

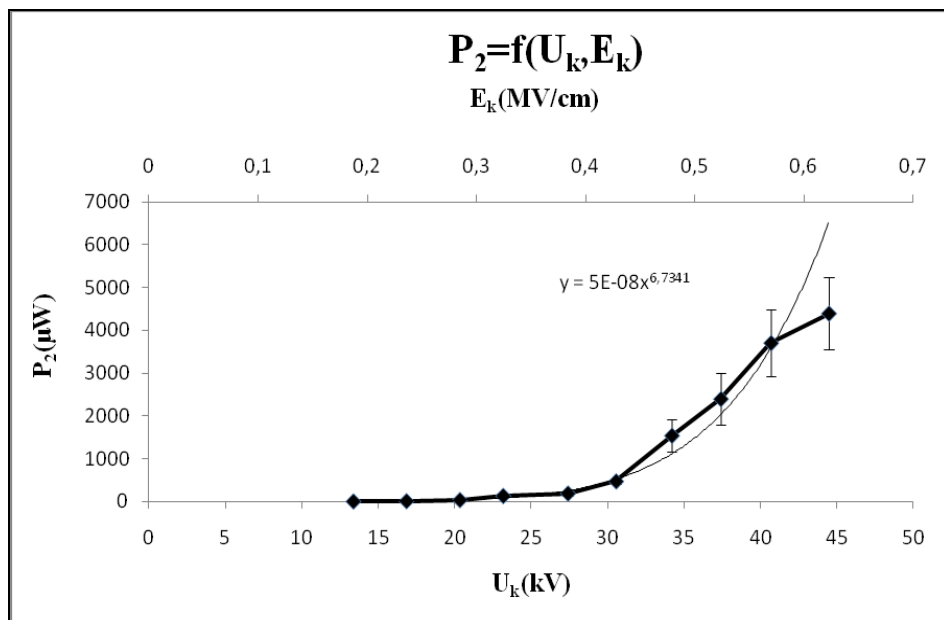
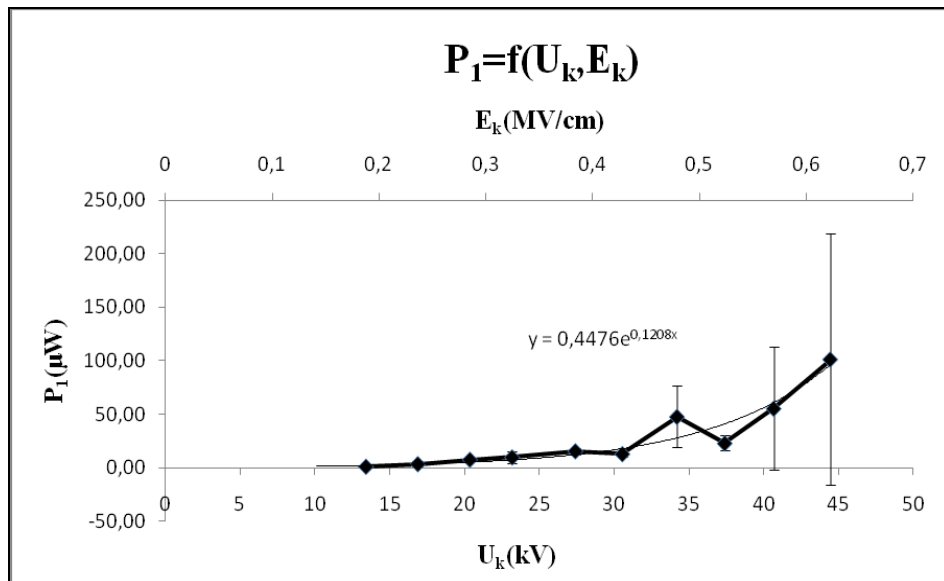
Πάχος d=1mm. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Μαθηματική προσέγγιση της $W_2=f(U_k, E_k)$: $y = 10^{-8} x^{6,7972}$

Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta W=f(U_k, E_k)$: $y = 2 * 10^{-9} x^{7,3058}$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.1-5: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $P_1=f(U_k, E_k)$

και $P_2=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

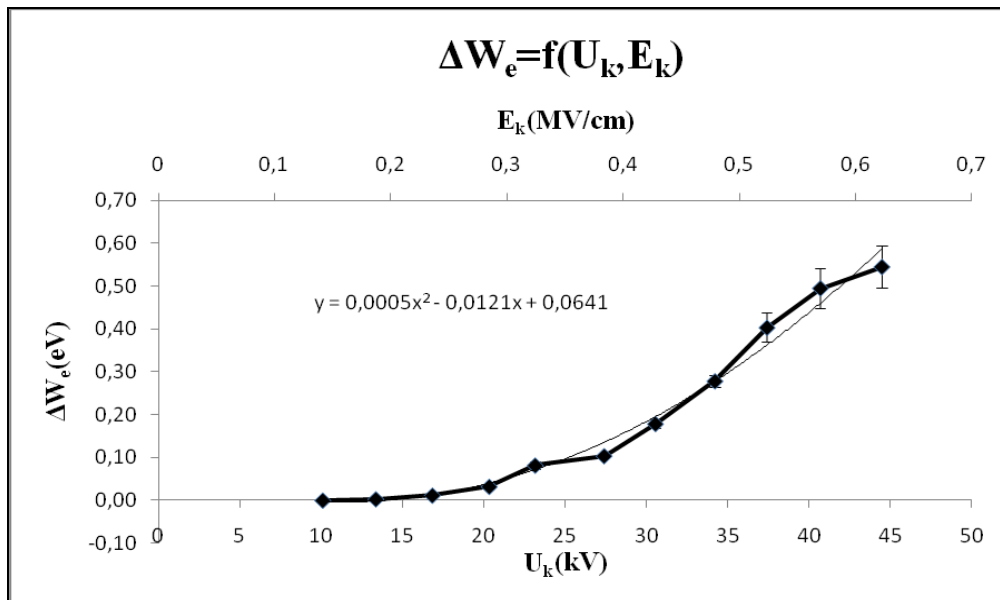
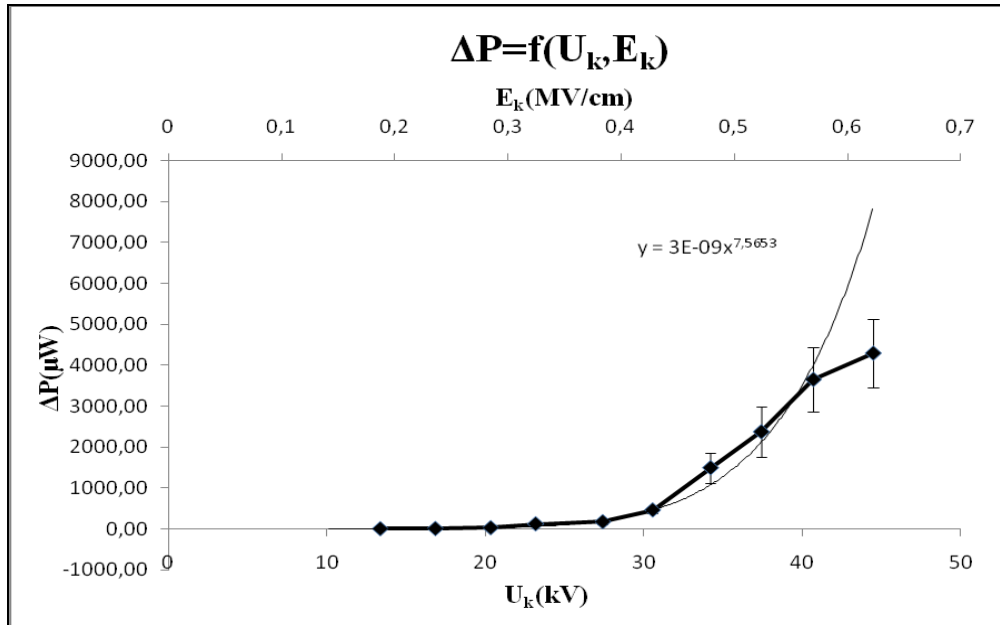
Πάχος $d=1$ mm. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Μαθηματική προσέγγιση της $P_1=f(U_k, E_k)$: $y = 0,4476e^{0,1208x}$

Μαθηματική προσέγγιση της $P_2=f(U_k, E_k)$: $y = 5 \cdot 10^{-8} x^{6,7341}$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.1-6: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $\Delta P = f(U_k, E_k)$

και $\Delta W_e = f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

Πάχος $d = 1\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

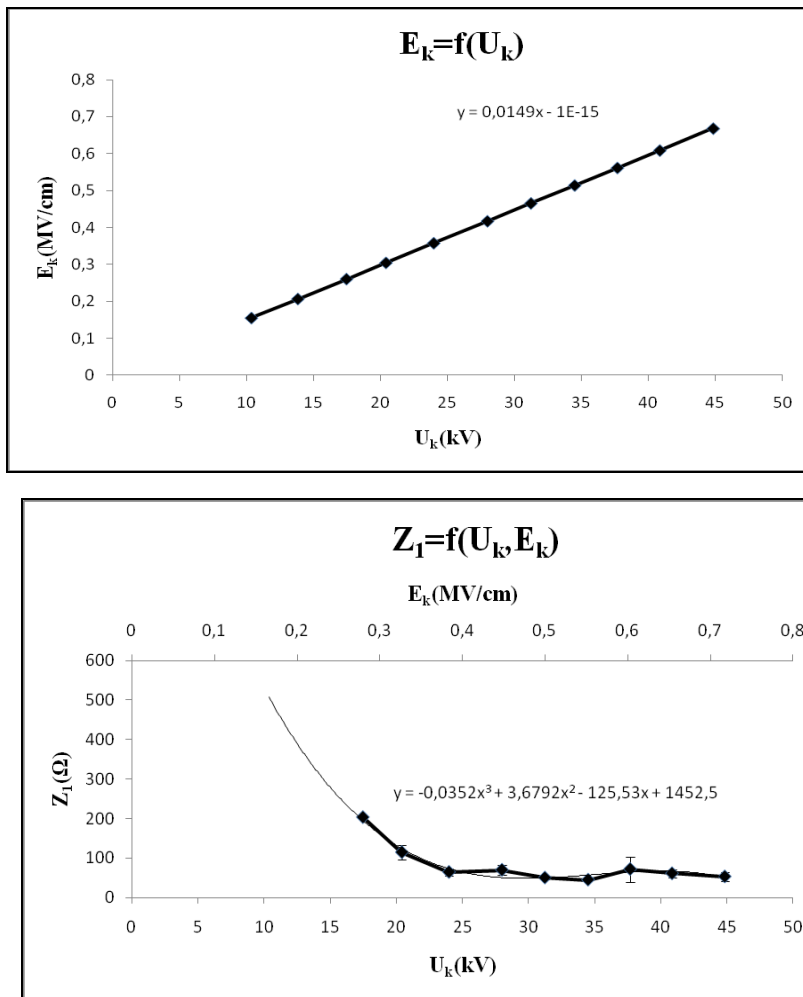
Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta P = f(U_k, E_k)$: $y = 3 * 10^{-9} x^{7,5653}$

Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta W_e = f(U_k, E_k)$: $y = 0,0005x^2 - 0,0121x + 0,0641$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

4.1.2 Δοκίμια pertinax πάχους 1mm εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.



Σχήμα 4.1.2-1: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $E_k=f(U_k)$ των στερεών μονωτικών πάχους 1mm και διαμέτρου 150mm και της $Z_1=f(U_k, E_k)$ των δοκιμών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα.

Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: $R=0,9\text{mm}$.

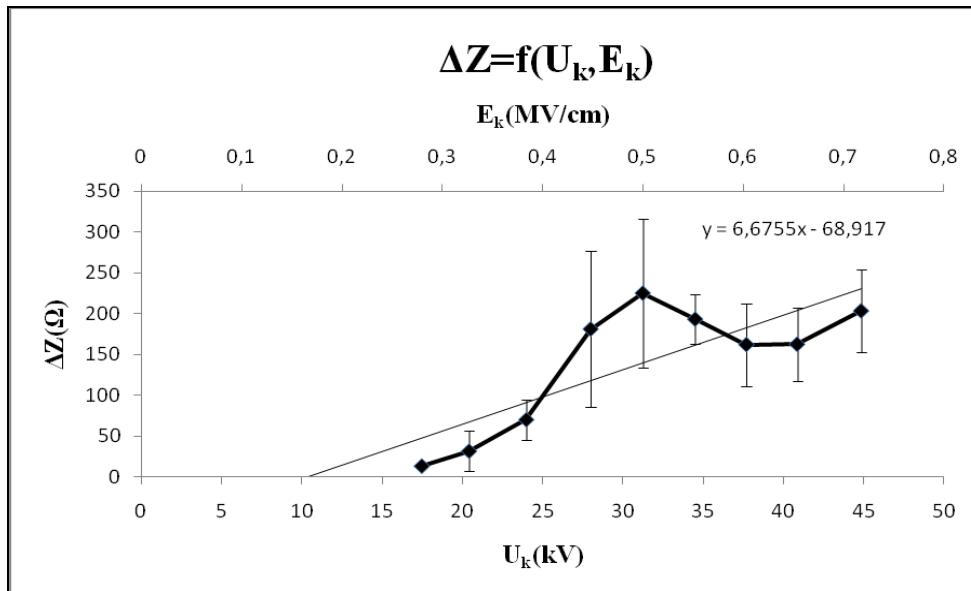
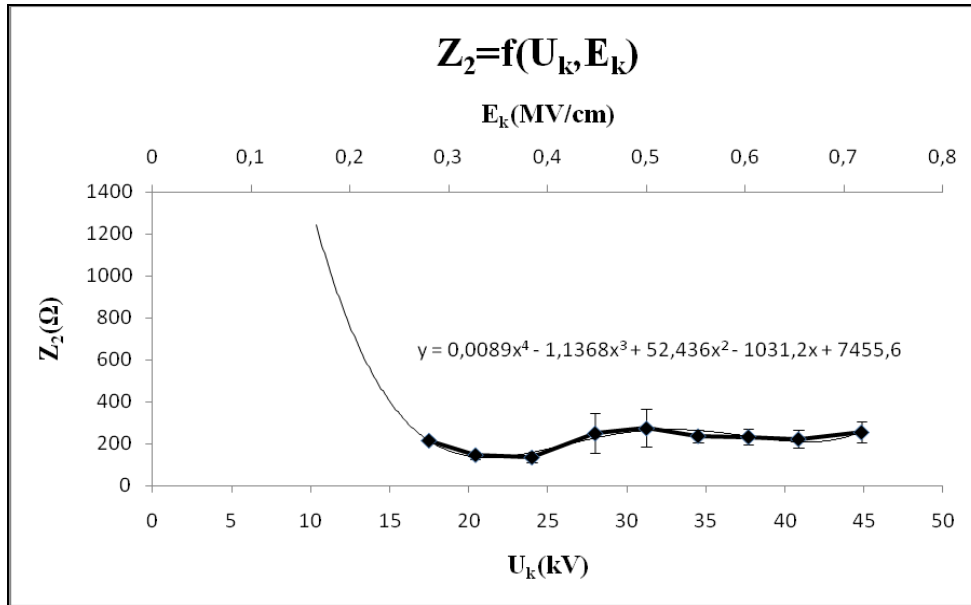
Μαθηματική προσέγγιση της $E_k=f(U_k)$: $y = 0,0149x - 10^{-15}$

Μαθηματική προσέγγιση της $Z_1=f(U_k, E_k)$:

$$y = -0,0352x^3 + 3,6792x^2 - 125,53x + 1452,5$$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.2-2: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $Z_2=f(U_k, E_k)$

και $\Delta Z=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

Πάχος d=1mm. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

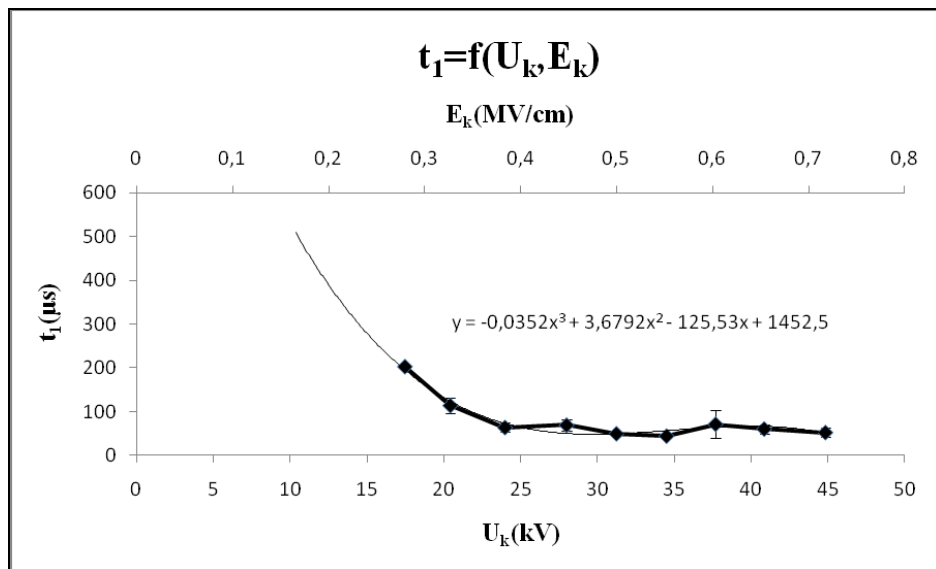
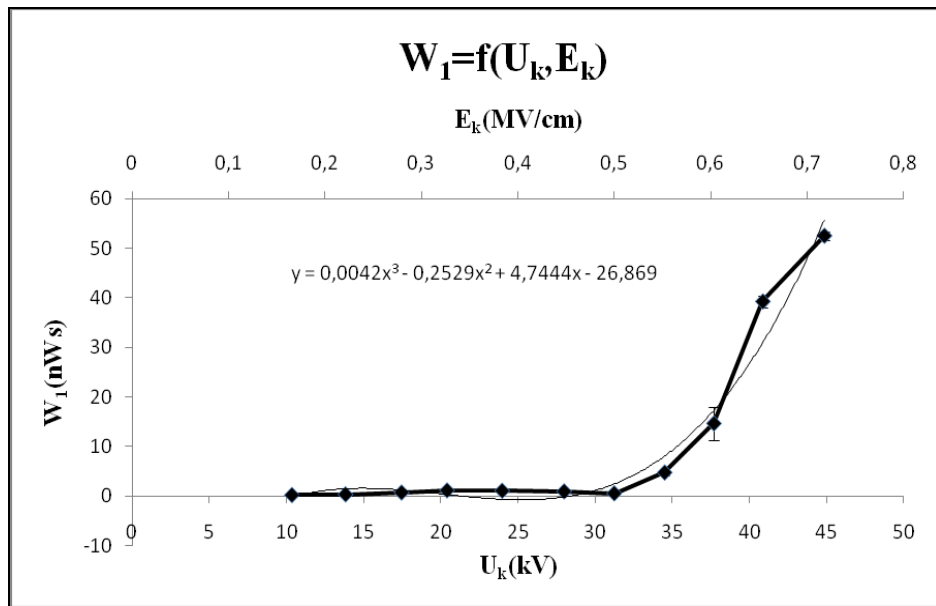
Μαθηματική προσέγγιση της $Z_2=f(U_k, E_k)$:

$$y = 0,0089x^4 - 1,1368x^3 + 52,436x^2 - 1031,2x + 7455,6$$

Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta Z=f(U_k, E_k)$: $y = 6,6755x - 68,917$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.2-3: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $W_1=f(U_k, E_k)$

και $t_1=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών *perlinax* εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

Πάχος $d=1\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Μαθηματική προσέγγιση της $W_1=f(U_k, E_k)$:

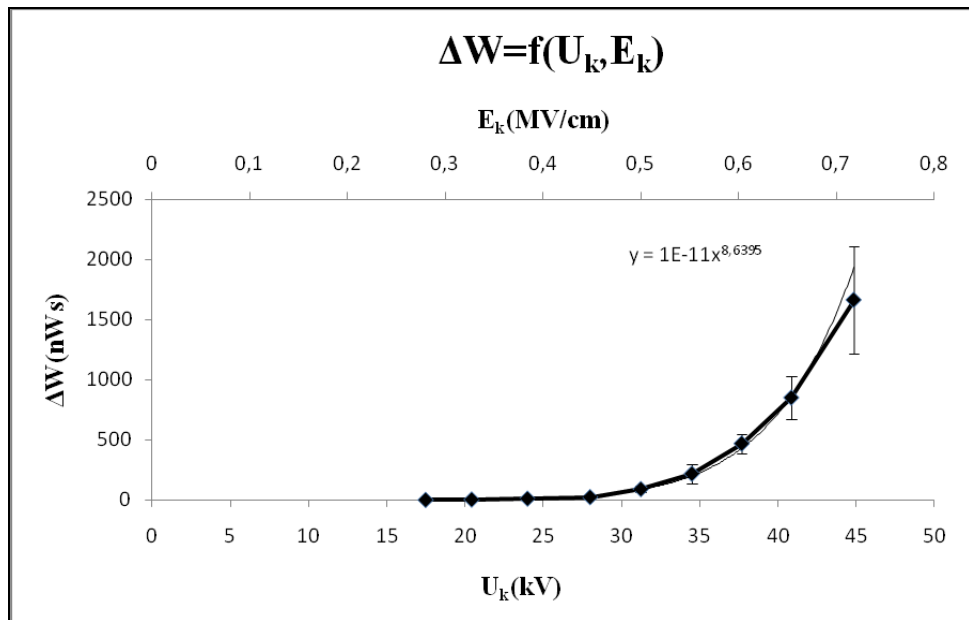
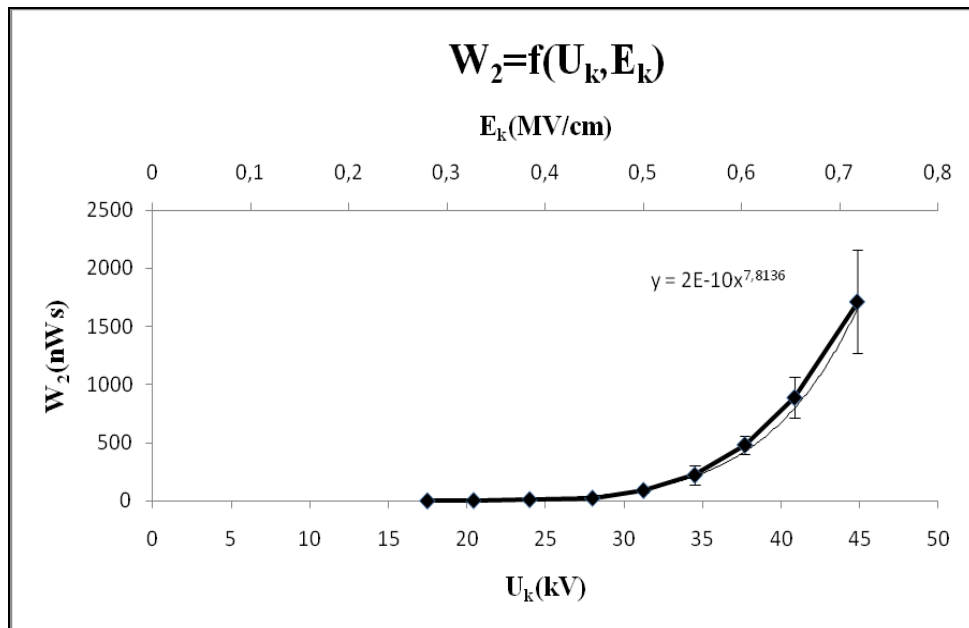
$$y = 0,0042x^3 - 0,2529x^2 + 4,7444x - 26,869$$

Μαθηματική προσέγγιση της $t_1=f(U_k, E_k)$:

$$y = -0,0352x^3 + 3,6792x^2 - 125,53x + 1452,5$$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.2-4: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $W_2=f(U_k, E_k)$

και $\Delta W=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

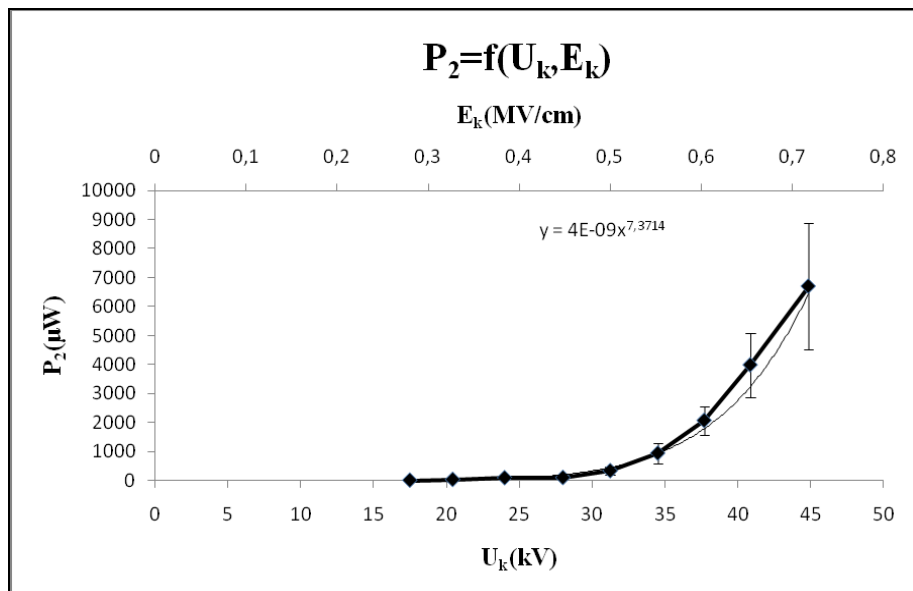
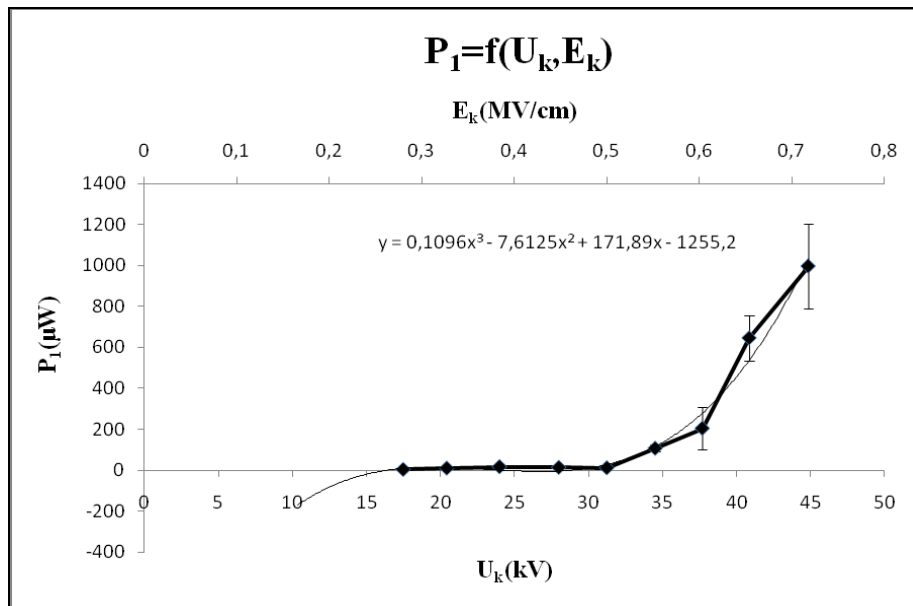
Πάχος $d=1\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Μαθηματική προσέγγιση της $W_2=f(U_k, E_k)$: $y = 2 * 10^{-10} x^{7,8136}$

Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta W=f(U_k, E_k)$: $y = 10^{-11} x^{8,6395}$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.2-5: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $P_1=f(U_k, E_k)$

και $P_2=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις $-250/2500\mu\text{s}$.

Πάχος $d=1\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

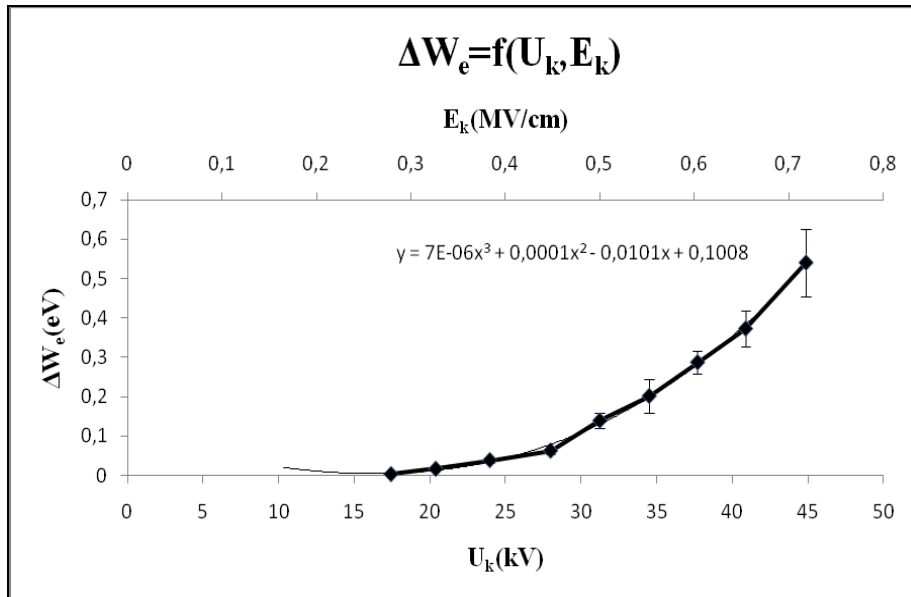
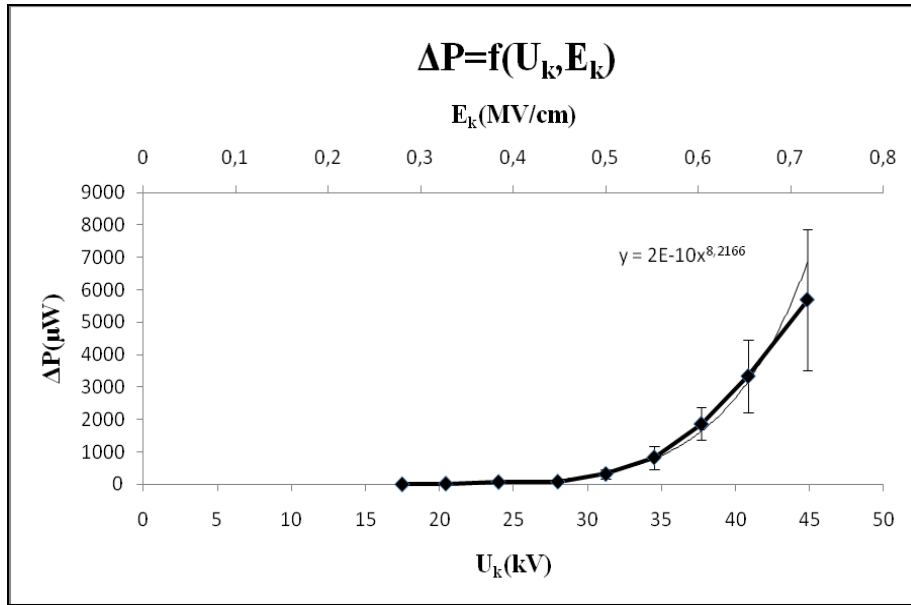
Μαθηματική προσέγγιση της $P_1=f(U_k, E_k)$:

$$y = 0,1096x^3 - 7,6125x^2 + 171,89x - 1255,2$$

Μαθηματική προσέγγιση της $P_2=f(U_k, E_k)$: $y = 4 * 10^{-9} x^{7,3714}$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.2-6: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $\Delta P = f(U_k, E_k)$

και $\Delta W_e = f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

Πάχος $d=1$ mm. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta P = f(U_k, E_k)$: $y = 2 * 10^{-10} x^{8.2166}$

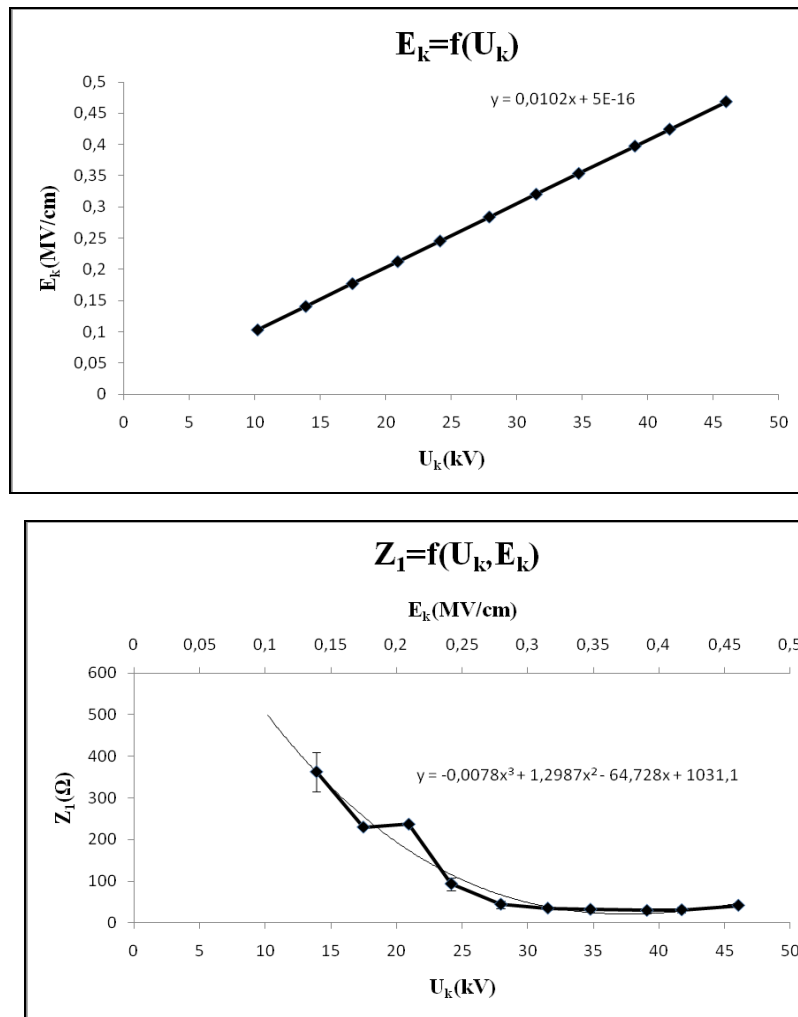
Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta W_e = f(U_k, E_k)$:

$$y = 7 * 10^{-6} x^3 + 0,0001x^2 - 0,0101x + 0,1008$$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

4.1.3 Δοκίμια pertinax πάχους 2mm εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.



Σχήμα 4.1.3-1: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $E_k=f(U_k)$ των στερεών μονωτικών πάχους 2 mm και διαμέτρου 150mm και της $Z_1=f(U_k, E_k)$ των δοκιμών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα.

Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: $R=0,9\text{mm}$.

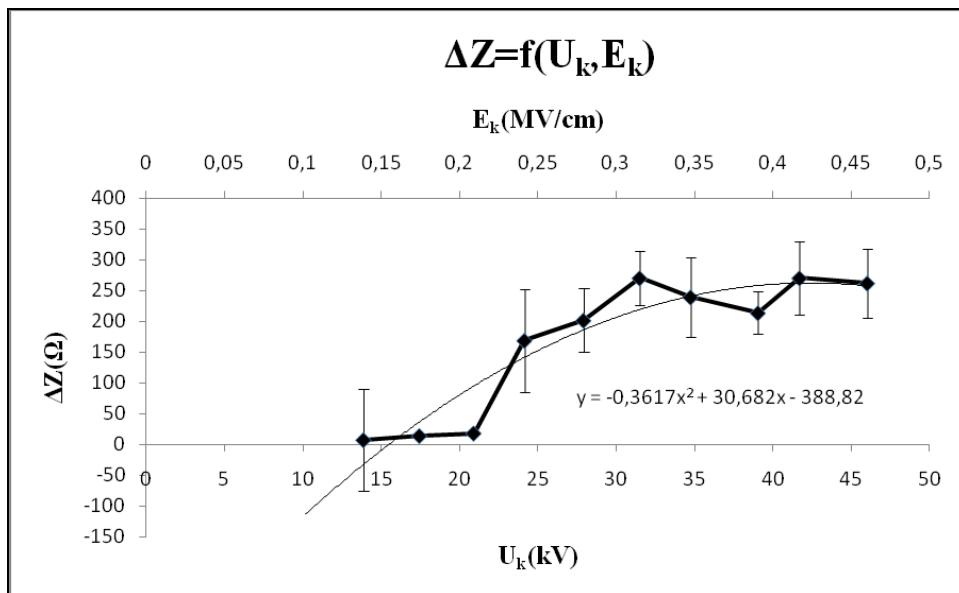
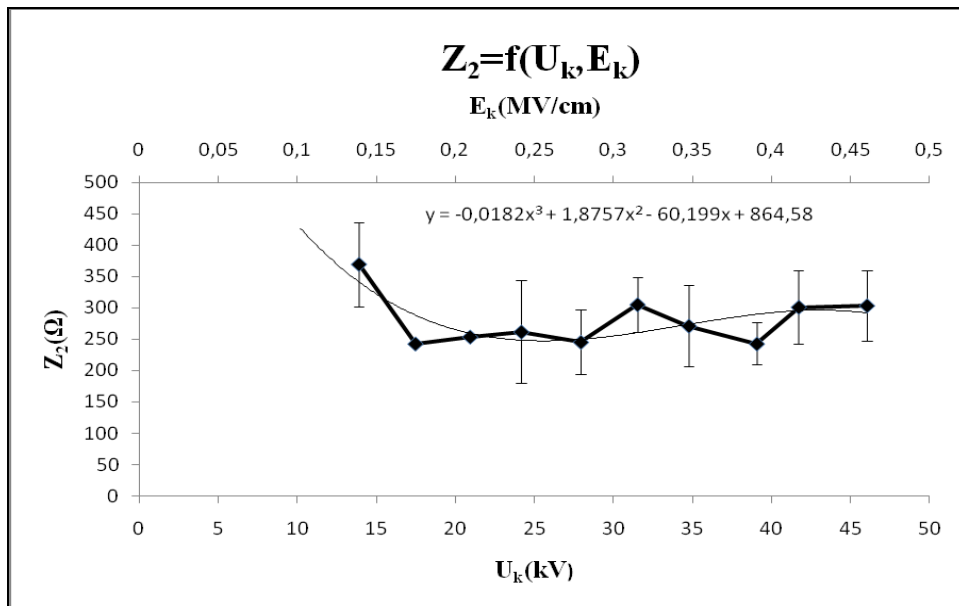
Μαθηματική προσέγγιση της $E_k=f(U_k)$: $y = 0,0102x + 5 \cdot 10^{-16}$

Μαθηματική προσέγγιση της $Z_1=f(U_k, E_k)$:

$$y = -0,0078x^3 + 1,2987x^2 - 64,728x + 1031,1$$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.3-2: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $Z_2=f(U_k, E_k)$

και $\Delta Z=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

Πάχος d=2mm. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Μαθηματική προσέγγιση της $Z_2=f(U_k, E_k)$:

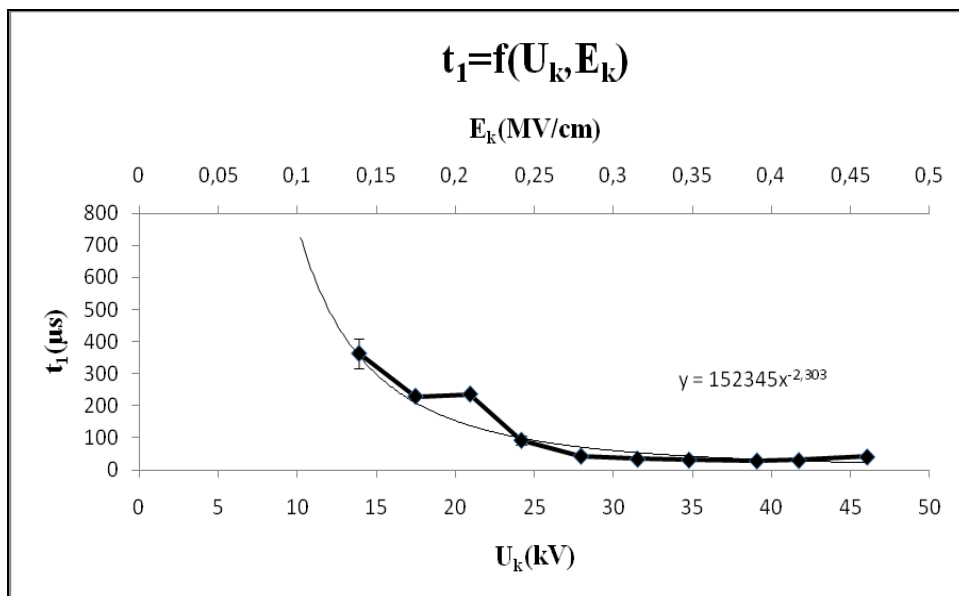
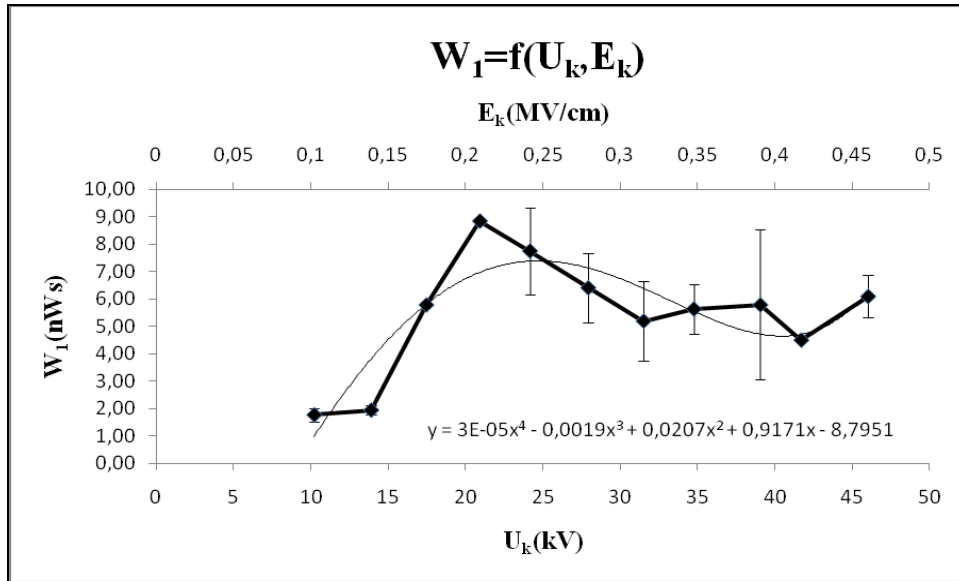
$$y = -0,0182x^3 + 1,8757x^2 - 60,199x + 864,58$$

Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta Z=f(U_k, E_k)$:

$$y = -0,3617x^2 + 30,682x - 388,82$$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.3-3: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $W_1=f(U_k, E_k)$

και $t_1=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών *perlinax* εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

Πάχος $d=2\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

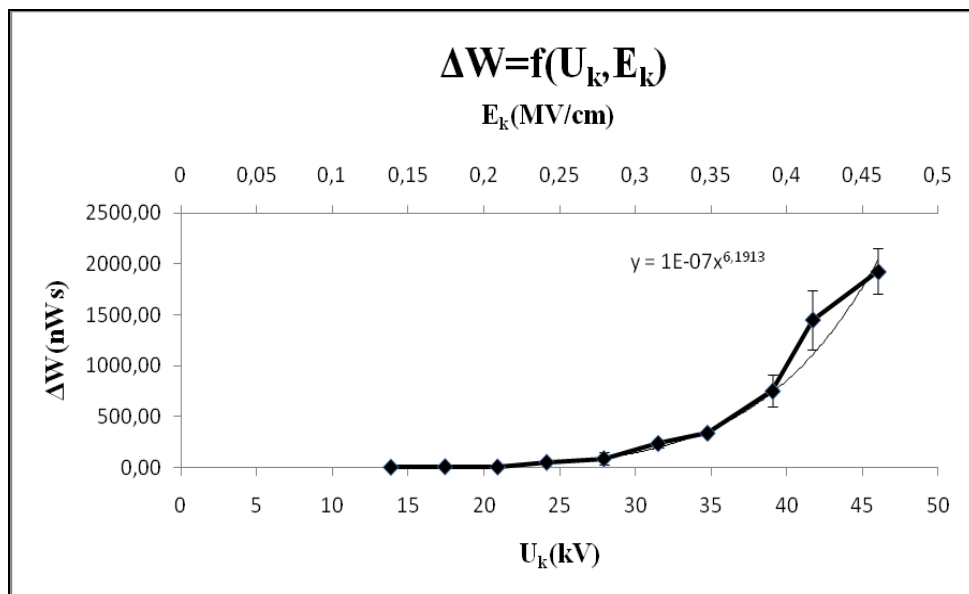
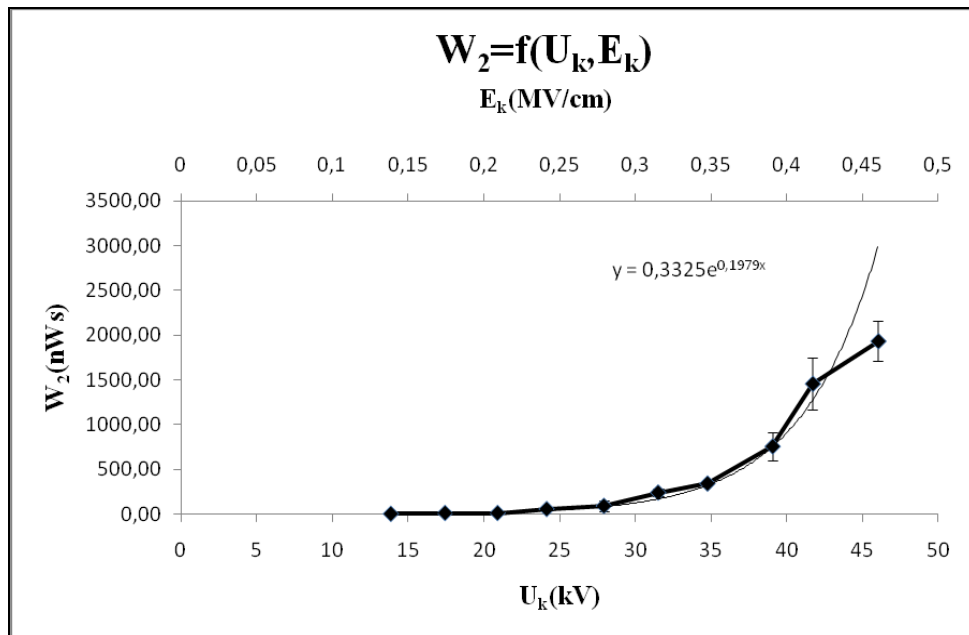
Μαθηματική προσέγγιση της $W_1=f(U_k, E_k)$:

$$y = 3 \cdot 10^{-5} x^4 - 0,0019x^3 + 0,0207x^2 + 0,9171x - 8,7951$$

Μαθηματική προσέγγιση της $t_1=f(U_k, E_k)$: $y = 152345x^{-2,303}$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.3-4: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $W_2=f(U_k, E_k)$

και $\Delta W=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

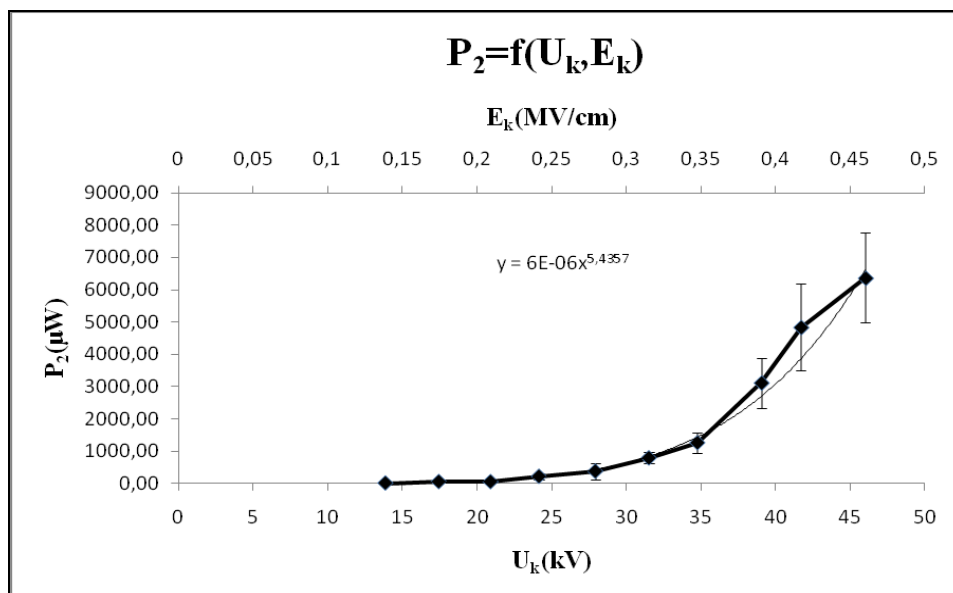
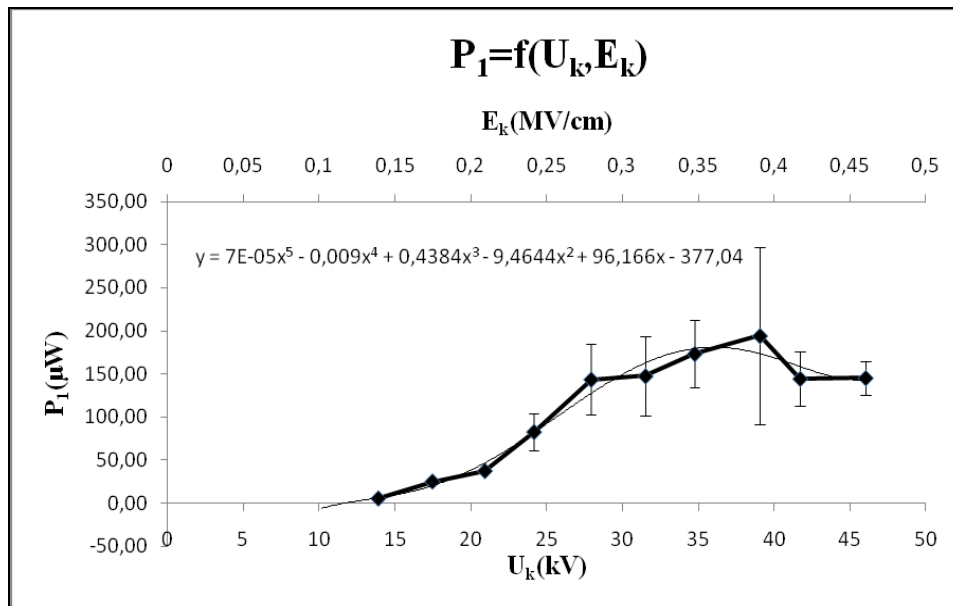
Πάχος $d=2\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Μαθηματική προσέγγιση της $W_2=f(U_k, E_k)$: $y = 0,3325e^{0,1979x}$

Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta W=f(U_k, E_k)$: $y = 10^{-7} x^{6,1913}$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.3-5: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $P_1=f(U_k, E_k)$

και $P_2=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

Πάχος $d=2\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

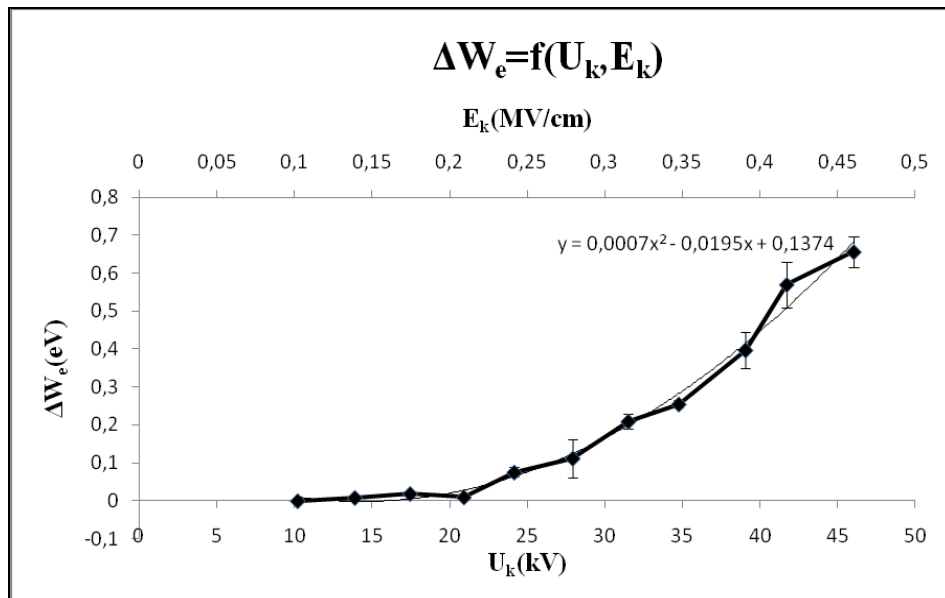
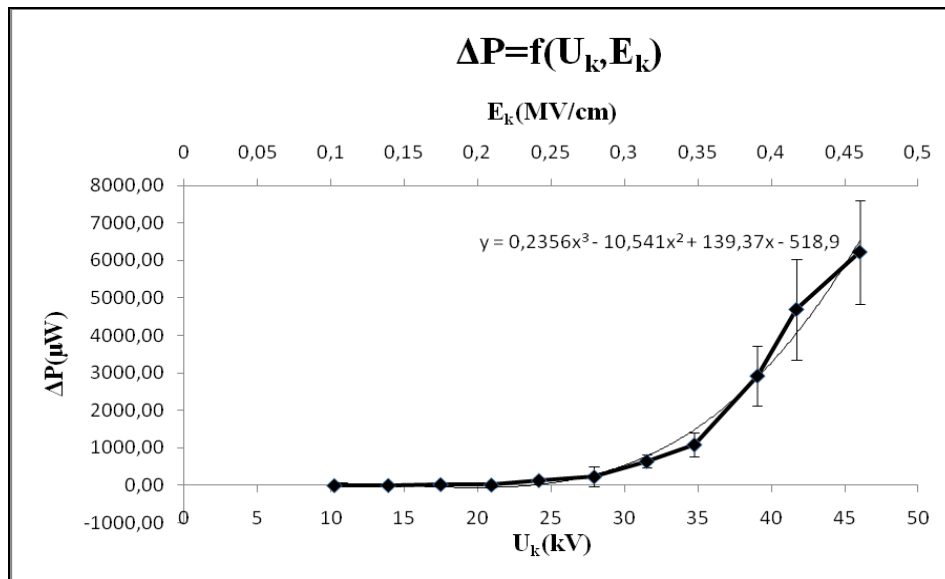
Μαθηματική προσέγγιση της $P_1=f(U_k, E_k)$:

$$y = 7 * 10^{-5} x^5 - 0,009x^4 + 0,4384x^3 - 9,4644x^2 + 96,166x - 377,04$$

Μαθηματική προσέγγιση της $P_2=f(U_k, E_k)$: $y = 6 * 10^{-6} x^{5,4357}$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.3-6: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $\Delta P = f(U_k, E_k)$

και $\Delta W_e = f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις +250/2500μs.

Πάχος d=2mm. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta P = f(U_k, E_k)$:

$$y = 0,2356x^3 - 10,541x^2 + 139,37x - 518,9$$

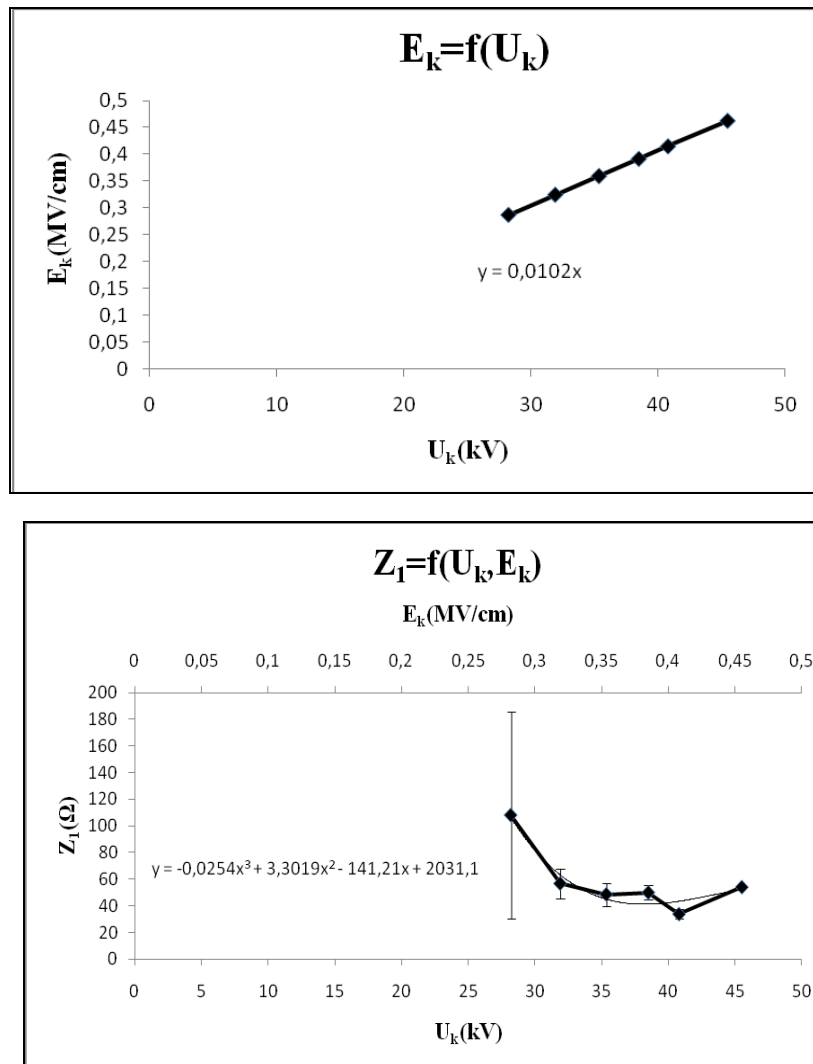
Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta W_e = f(U_k, E_k)$:

$$y = 0,0007x^2 - 0,0195x + 0,1374$$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

4.1.4 Δοκίμια pertinax πάχους 2mm εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.



Σχήμα 4.1.4-1: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $E_k=f(U_k)$ των στερεών μονωτικών πάχους 2 mm και διαμέτρου 150mm και της $Z_1=f(U_k, E_k)$ των δοκιμών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα.

Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: $R=0,9\text{mm}$.

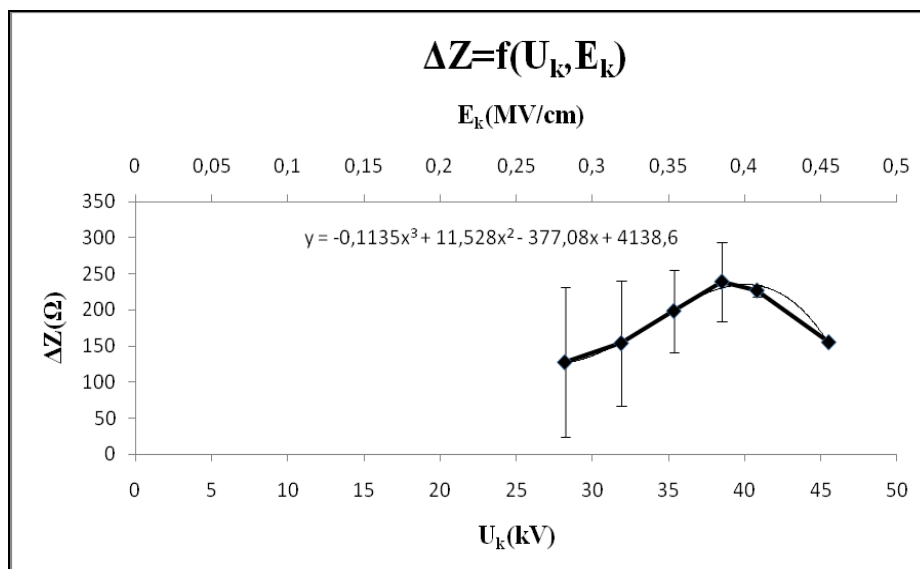
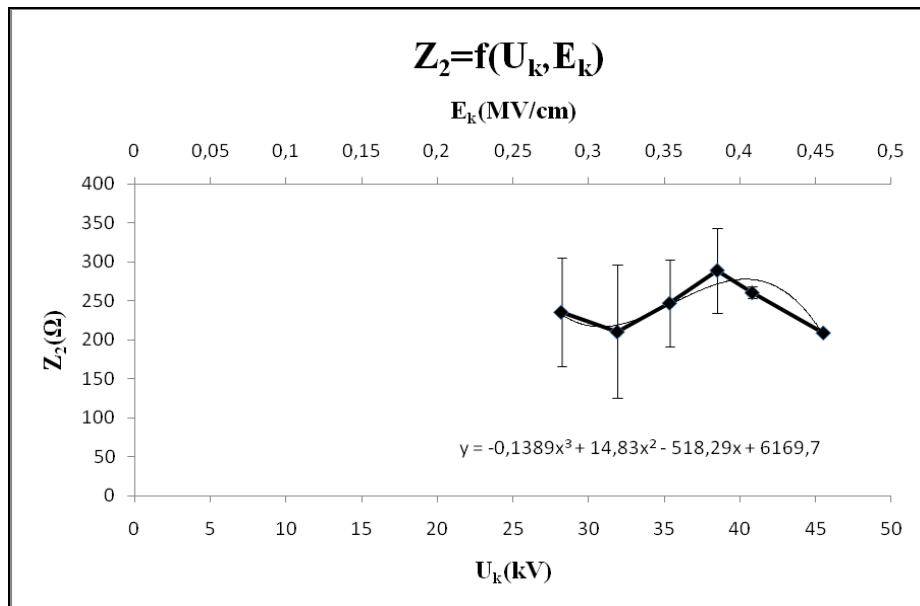
Μαθηματική προσέγγιση της $E_k=f(U_k)$: $y = 0,0102x$

Μαθηματική προσέγγιση της $Z_1=f(U_k, E_k)$:

$$y = -0,0254x^3 + 3,3019x^2 - 141,21x + 2031,1$$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.4-2: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $Z_2=f(U_k, E_k)$

και $\Delta Z=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

Πάχος $d=2\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Μαθηματική προσέγγιση της $Z_2=f(U_k, E_k)$:

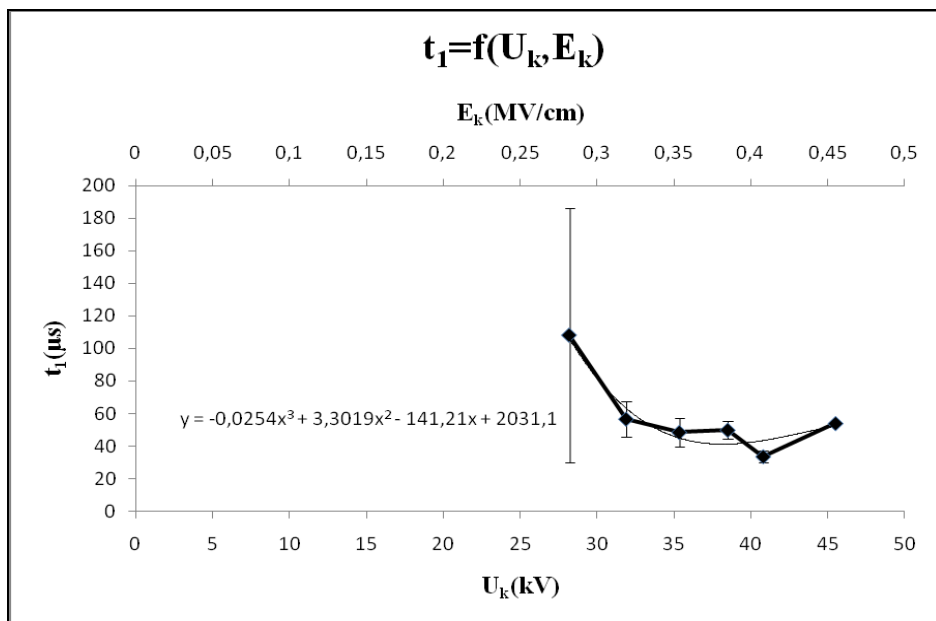
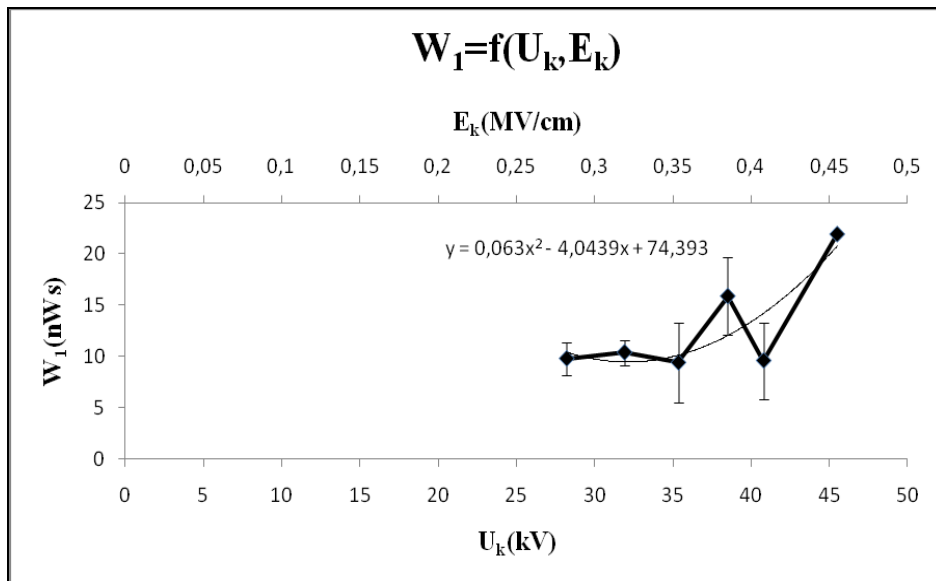
$$y = -0,1389x^3 + 14,83x^2 - 518,29x + 6169,7$$

Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta Z=f(U_k, E_k)$:

$$y = -1135x^3 + 11,528x^2 - 377,08x + 4138,6$$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.4-3: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $W_1=f(U_k, E_k)$

και $t_1=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

Πάχος d=2mm. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

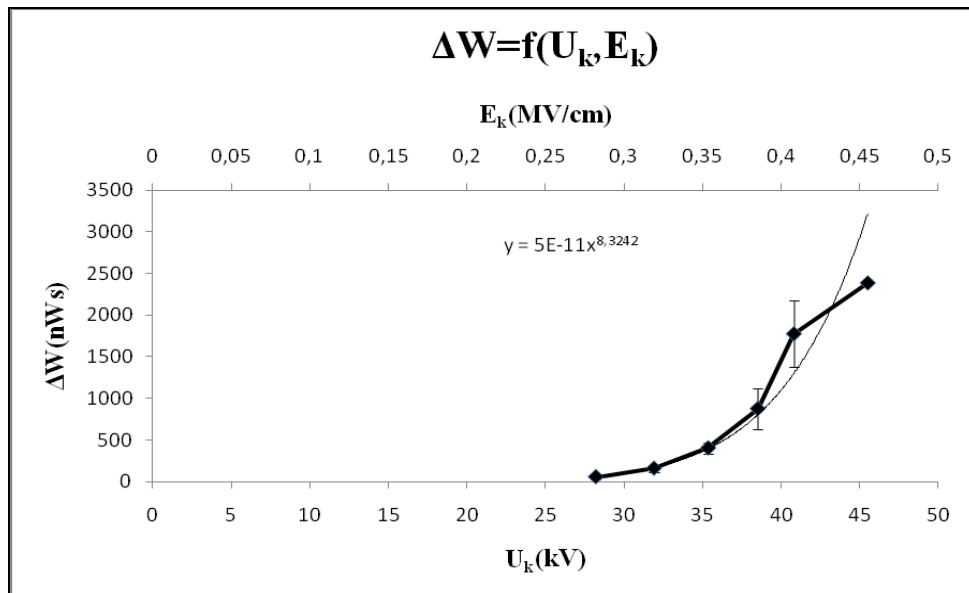
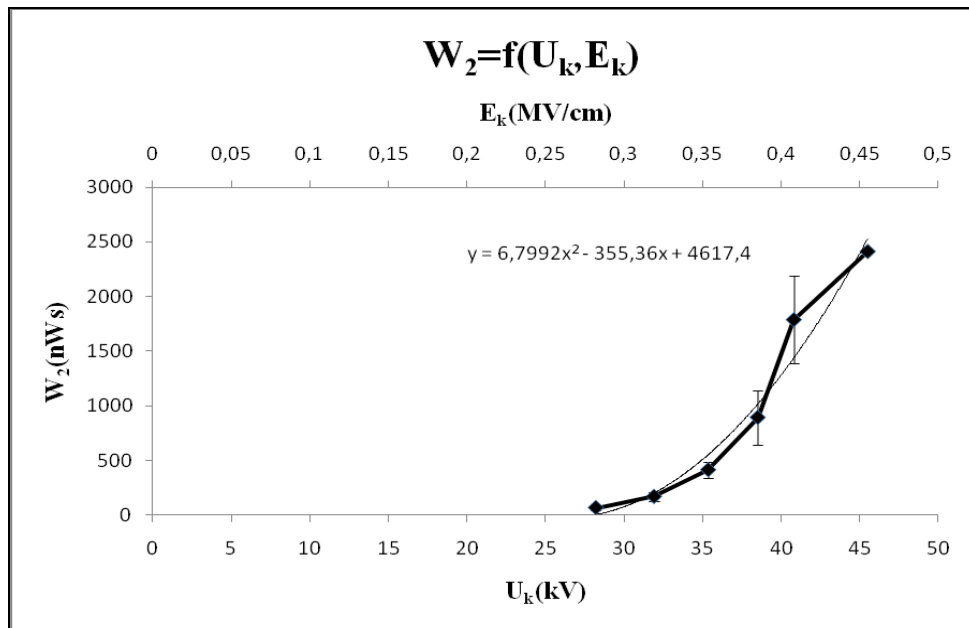
Μαθηματική προσέγγιση της $W_1=f(U_k, E_k)$: $y = 0,063x^2 - 4,0439x + 74,393$

Μαθηματική προσέγγιση της $t_1=f(U_k, E_k)$:

$$y = -0,0254x^3 + 3,3019x^2 - 141,21x + 2031,1$$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.4-4: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $W_2=f(U_k, E_k)$

και $\Delta W=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

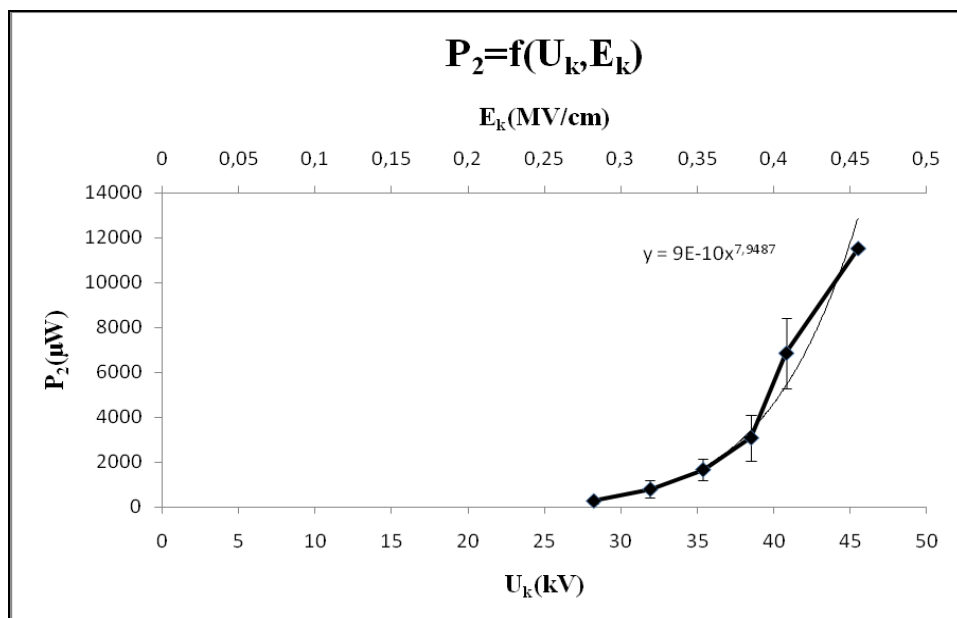
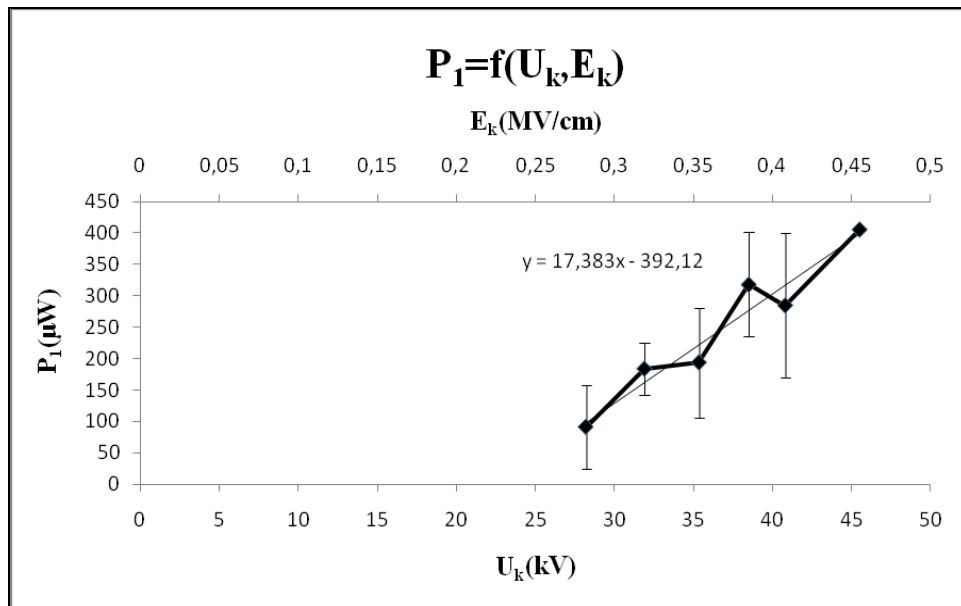
Πάχος d=2mm. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Μαθηματική προσέγγιση της $W_2=f(U_k, E_k)$: $y = 6,7992x^2 - 355,36x + 4617,4$

Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta W=f(U_k, E_k)$: $y = 5 * 10^{-11} x^{8,3242}$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.4-5: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $P_1=f(U_k, E_k)$

και $P_2=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών perlinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

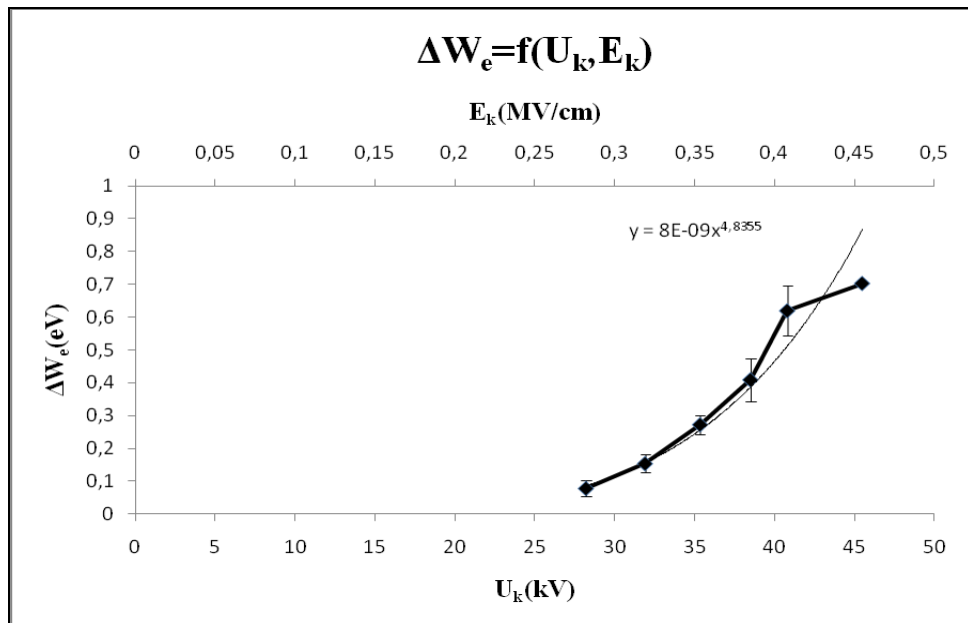
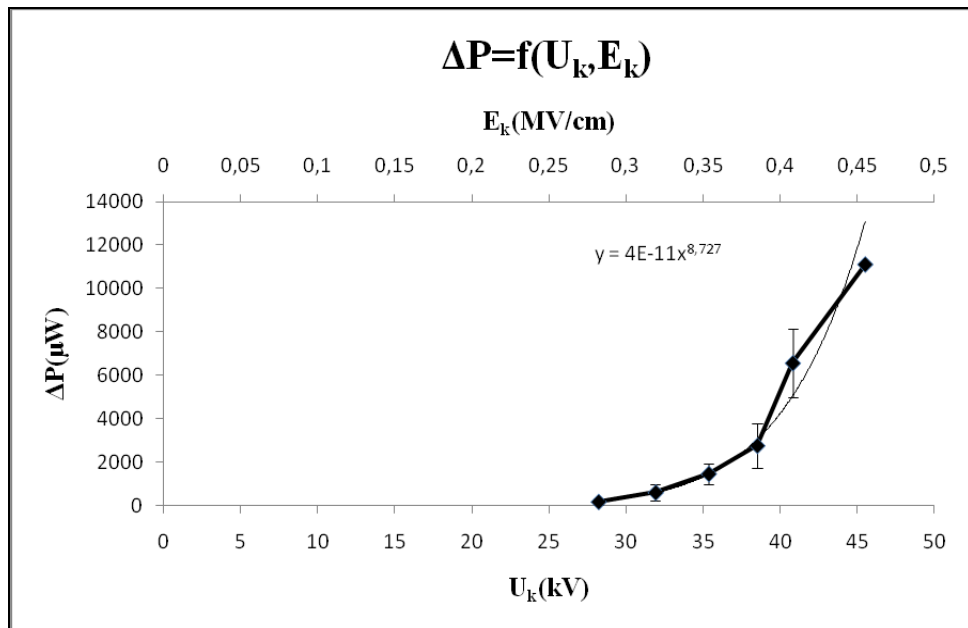
Πάχος $d=2\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Μαθηματική προσέγγιση της $P_1=f(U_k, E_k)$: $y = 17,383x - 392,12$

Μαθηματική προσέγγιση της $P_2=f(U_k, E_k)$: $y = 9 \cdot 10^{-10} x^{7,9487}$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 4.1.4-6: Πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της χαρακτηριστικής $\Delta P=f(U_k, E_k)$

και $\Delta W_e=f(U_k, E_k)$ των στερεών μονωτικών pertinax εντός μονωτικού ελαίου θερμοκρασίας 40°C υπό κρουστικές τάσεις -250/2500μs.

Πάχος $d=2\text{mm}$. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta P=f(U_k, E_k)$: $y = 4 * 10^{-11} x^{8.727}$

Μαθηματική προσέγγιση της $\Delta W_e=f(U_k, E_k)$: $y = 8 * 10^{-9} x^{4.8355}$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

Ακολούθως παρατίθενται ένας πίνακας με όλες τις ανωτέρω προκύπτουσες μαθηματικές εκφράσεις:

α/α σχήματος	Χαρακτηριστική	Μαθηματική Σχέση
4.1.1-1	$E_k=f(U_k)$	$y = 0,0149x + 5 * 10^{-16}$
4.1.1-1	$Z_1=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0024x^4 - 0,3084x^3 + 14,68x^2 - 303,51x + 2354,5$
4.1.1-2	$Z_2=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0037x^4 - 0,4479x^3 + 19,41x^2 - 354,39x + 2541,5$
4.1.1-2	$\Delta Z=f(U_k, E_k)$	$y = -0,2806x^2 + 22,027x - 173,36$
4.1.1-3	$W_1=f(U_k, E_k)$	$y = 0,1156e^{0,0674x}$
4.1.1-3	$t_1=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0024x^4 - 0,3084x^3 + 14,68x^2 - 303,51x + 2354,5$
4.1.1-4	$W_2=f(U_k, E_k)$	$y = 10^{-8} x^{6,7972}$
4.1.1-4	$\Delta W=f(U_k, E_k)$	$y = 2 * 10^{-9} x^{7,3058}$
4.1.1-5	$P_1=f(U_k, E_k)$	$y = 0,4476e^{0,1208x}$
4.1.1-5	$P_2=f(U_k, E_k)$	$y = 5 * 10^{-8} x^{6,7341}$
4.1.1-6	$\Delta P=f(U_k, E_k)$	$y = 3 * 10^{-9} x^{7,5653}$
4.1.1-6	$\Delta W_e=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0005x^2 - 0,0121x + 0,0641$
4.1.2-1	$E_k=f(U_k)$	$y = 0,0149x - 10^{-15}$
4.1.2-1	$Z_1=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0352x^3 + 3,6792x^2 - 125,53x + 1452,5$
4.1.2-2	$Z_2=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0089x^4 - 1,1368x^3 + 52,436x^2 - 1031,2x + 7455,6$
4.1.2-2	$\Delta Z=f(U_k, E_k)$	$y = 6,6755x - 68,917$
4.1.2-3	$W_1=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0042x^3 - 0,2529x^2 + 4,7444x - 26,869$
4.1.2-3	$t_1=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0352x^3 + 3,6792x^2 - 125,53x + 1452,5$
4.1.2-4	$W_2=f(U_k, E_k)$	$y = 2 * 10^{-10} x^{7,8136}$
4.1.2-4	$\Delta W=f(U_k, E_k)$	$y = 10^{-11} x^{8,6595}$
4.1.2-5	$P_1=f(U_k, E_k)$	$y = 0,1096x^3 - 7,6125x^2 + 171,89x - 1255,2$
4.1.2-5	$P_2=f(U_k, E_k)$	$y = 4 * 10^{-9} x^{7,3714}$
4.1.2-6	$\Delta P=f(U_k, E_k)$	$y = 2 * 10^{-10} x^{8,2166}$
4.1.2-6	$\Delta W_e=f(U_k, E_k)$	$y = 7 * 10^{-6} x^3 + 0,0001x^2 - 0,0101x + 0,1008$

α/α σχήματος	Χαρακτηριστική	Μαθηματική Σχέση
4.1.3-1	$E_k=f(U_k)$	$y = 0,0102x + 5 * 10^{-6}$
4.1.3-1	$Z_1=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0078x^3 + 1,2987x^2 - 64,728x + 1031,1$
4.1.3-2	$Z_2=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0182x^3 + 1,8757x^2 - 60,199x + 864,58$
4.1.3-2	$\Delta Z=f(U_k, E_k)$	$y = -0,3617x^2 + 30,682x - 388,82$
4.1.3-3	$W_1=f(U_k, E_k)$	$y = 3 * 10^{-5} x^4 - 0,0019x^3 + 0,0207x^2 + 0,9171x - 8,7951$
4.1.3-3	$t_1=f(U_k, E_k)$	$y = 152345x^{-2,303}$
4.1.3-4	$W_2=f(U_k, E_k)$	$y = 0,3325e^{0,1979x}$
4.1.3-4	$\Delta W=f(U_k, E_k)$	$y = 10^{-7} x^{6,1913}$
4.1.3-5	$P_1=f(U_k, E_k)$	$y = 7 * 10^{-5} x^5 - 0,009x^4 + 0,4384x^3 - 9,4644x^2 + 96,166x - 377,04$
4.1.3-5	$P_2=f(U_k, E_k)$	$y = 6 * 10^{-6} x^{5,4357}$
4.1.3-6	$\Delta P=f(U_k, E_k)$	$y = 0,2356x^3 - 10,541x^2 + 139,37x - 518,9$
4.1.3-6	$\Delta W_e=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0007x^2 - 0,0195x + 0,1374$
4.1.4-1	$E_k=f(U_k)$	$y = 0,0102x$
4.1.4-1	$Z_1=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0254x^3 + 3,3019x^2 - 141,21x + 2031,1$
4.1.4-2	$Z_2=f(U_k, E_k)$	$y = -0,1389x^3 + 14,83x^2 - 518,29x + 6169,7$
4.1.4-2	$\Delta Z=f(U_k, E_k)$	$y = -1135x^3 + 11,528x^2 - 377,08x + 4138,6$
4.1.4-3	$W_1=f(U_k, E_k)$	$y = 0,063x^2 - 4,0439x + 74,393$
4.1.4-3	$t_1=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0254x^3 + 3,3019x^2 - 141,21x + 2031,1$
4.1.4-4	$W_2=f(U_k, E_k)$	$y = 6,7992x^2 - 355,36x + 4617,4$
4.1.4-4	$\Delta W=f(U_k, E_k)$	$y = 5 * 10^{-11} x^{8,3242}$
4.1.4-5	$P_1=f(U_k, E_k)$	$y = 17,383x - 392,12$
4.1.4-5	$P_2=f(U_k, E_k)$	$y = 9 * 10^{-10} x^{7,9487}$
4.1.4-6	$\Delta P=f(U_k, E_k)$	$y = 4 * 10^{-11} x^{8,727}$
4.1.4-6	$\Delta W_e=f(U_k, E_k)$	$y = 8 * 10^{-9} x^{4,8355}$

4.2 Φυσική ερμηνεία των χαρακτηριστικών.

1. Η χαρακτηριστική $Z_1=f(U_k, E_k)$ είναι φθίνουσα γιατί με την αύξηση της U_k (ή της E_k) προκαλείται μεγαλύτερη ενεργοποίηση των φαινομένων αγωγιμότητας στο δοκίμιο.
2. Η χαρακτηριστική $Z_2=f(U_k, E_k)$ είναι αύξουσα γιατί φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη γίνεται η U_k (ή η E_k) τόσο περισσότερο καταναλώνεται η ενέργεια του πεδίου για τη μηχανική καταπόνηση του υλικού σε βάρος της αγωγιμότητάς του.
3. Επειδή $Z_2 > Z_1$ η χαρακτηριστική $\Delta Z=f(U_k, E_k)$ είναι αύξουσα όπως η $Z_2=f(U_k, E_k)$.
4. Οι χαρακτηριστικές $W_1=f(U_k, E_k)$ και $P_1=f(U_k, E_k)$ είναι επόμενο να είναι αύξουσες με την αύξηση της U_k (ή της E_k). Το ίδιο ισχύει και για τις χαρακτηριστικές $W_2=f(U_k, E_k)$

και $P_2=f(U_k, E_k)$ με την διαφορά ότι ο ρυθμός αύξησής τους είναι μικρότερος από τις προηγούμενες. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην μείωση των τιμών W_2 (ή P_2) λόγω κατανάλωσης της ενέργειας του πεδίου στη μηχανική καταπόνηση του δοκιμίου.

5. Επειδή $W_2 > W_1$ η χαρακτηριστική $\Delta W=f(U_k, E_k)$ είναι αύξουσα όπως σχεδόν η $W_2=f(U_k, E_k)$.
6. Η χαρακτηριστική $\Delta W_e=f(U_k, E_k)$ δίνει την εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κατά την εκδήλωση του ιονισμού με κρούσεις. Η απόκλιση από την θεωρητική εκθετική μορφή οφείλεται στην ταυτόχρονη εκδήλωση της μηχανικής καταπόνησης του δοκιμίου από τις δυνάμεις Coulomb.

5. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΤΙΣ

ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.

Από τις προκύπτουσες χαρακτηριστικές και συμπεράσματα γίνεται φανερό ότι είναι σημαντική η μελέτη του πρώτου άλματος δυναμικού. Ανάλογα με τις διαστάσεις του υλικού και τις υπάρχουσες συνθήκες αλλάζει η τιμή της τάσεως εμφάνισης του πρώτου άλματος. Είναι προτιμότερο να επιλέγονται στερεά μονωτικά με μεγαλύτερη τιμή έναρξης των μερικών εκκενώσεων και άρα με μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή. Επίσης, με το πέρας των φαινομένων το υλικό έχει υποστεί μόνιμες αλλοιώσεις. Είναι σημαντικό να μελετηθεί και η κατάσταση του υλικού μετά το πέρας των φαινομένων όπου θα εμφανίζει νέα μειωμένη αντίσταση (άρα αυξημένη αγωγιμότητα) με μειωμένες μονωτικές ικανότητες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Π.Δ. Μπούρκα, « Εφαρμογές κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων», Αθήνα 1998
2. Π.Δ.Μπούρκα, Γ. Κ. Καραγιαννόπουλος, « Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά », Αθήνα 2003
3. S.O.Kasap, « Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων », Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2004
4. O'Dwyer, John Joseph, « The theory of electrical conduction and breakdown in solid dielectrics », Clarendon Press, 1973
5. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας φυσικής-Γενικό τμήμα, « Εργαστηριακές ασκήσεις φυσικής», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1999