



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

**Σύνθετη αντίσταση και ενέργεια στο συνδυασμό "Pertinax-λάδι
μετασχηματιστών" εντός ανομοιογενούς πεδίου
υπό κρουστικές τάσεις $\pm 1,2/100\mu\text{s}$**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ζαχαρίας Ν. Λούπης

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2010



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

**Σύνθετη αντίσταση και ενέργεια στο συνδυασμό "Pertinax-λάδι
μετασχηματιστών" εντός ανομοιογενούς πεδίου
υπό κρουστικές τάσεις $\pm 1,2/100\mu\text{s}$**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ζαχαρίας Ν. Λούπης

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 2010

.....
Κ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π. Μπούρκας
Ομότιμος καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

.....
Ζαχαρίας Ν. Λούπης

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

Copyright © Ζαχαρίας Ν. Λούπης, 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μέτρηση και ο υπολογισμός ηλεκτρικών μεγεθών στο συνδυασμό "pertinax-λάδι μετασχηματιστή" εντός ανομοιογενούς πεδίου υπό κρουστικές τάσεις $\pm 1,2/100\mu\text{s}$. Η διάταξη ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκε ήταν ακίδα-πλάκα με μάχη δοκιμίων 1mm και 2mm.

Αρχικά, στην εισαγωγή, παρουσιάζονται κάποια θεωρητικά στοιχεία για τα στερεά μονωτικά υλικά και τις ιδιότητές τους. Επίσης, αναλύονται τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών σύμφωνα με τη μακροσκοπική και κβαντομηχανική θεωρία.

Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων και επεξεργασία τους. Υπολογίστηκαν διάφορα ηλεκτρικά μεγέθη και χαράχθηκαν οι γραφικές παραστάσεις αυτών. Στη συνέχεια έγινε μαθηματική προσέγγιση των καμπυλών αυτών λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία του ιονισμού με κρούσεις. Τέλος, παρουσιάζονται συμπεράσματα και σχόλια που εξήχθησαν από την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

Λέξεις κλειδιά

Στερεά μονωτικά υλικά, διάσπαση, μερικές εκκενώσεις, pertinax, λάδι μετασχηματιστών, κρουστική τάση, στατιστικές μετρήσεις, κβαντομηχανική θεωρία, μακροσκοπική θεωρίας, ιονισμός με κρούσεις.

Abstract

The scope of this thesis is the measurement and the calculation of electrical elements at the combination "pentinax-transformer oil" inside inhomogeneous electric field under impulse voltages $\pm 1,2/100\mu\text{s}$. The electrode provision used was pin-plate with specimens' thickness 1mm and 2mm.

First of all, some theoretical elements about solid insulators and their properties are presented. Moreover, the phenomena before and during the electric breakdown of solid insulators are analyzed according to both macroscopic and quantum-mechanics theory.

In the next chapters, the recording and the elaboration of measurements have been carried out. The electric elements have been calculated and their corresponding graphs have been drawn. The mathematical approach of these graphs has also been done considering the ionization in collisions. Finally, conclusions and comments based on this thesis are been presented.

Keywords

Solid insulators, electric breakdown, partial discharge, pertinax, transformer oil, insulator oil, impulse voltage, statistic measurements, quantum-mechanics theory, macroscopic theory, ionization in collisions.

Ευχαριστίες

Κατ' αρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ Κ. Καραγιαννόπουλο για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης ευχαριστώ θερμά και τον κ. Π. Μπούρκα για την πολύτιμη βοήθειά του και τις χρήσιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| 1. Εισαγωγή | 11 |
| 1.1 Γενικά για τα μονωτικά υλικά | 11 |
| 1.1.1 Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών | 11 |
| 1.2 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών | 16 |
| 1.2.1 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών | 16 |
| 1.2.2 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων | 17 |
| 1.2.3 Το φαινόμενο της πολικότητας σε πολυμερή στερεά μονωτικά κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων | 22 |
| 1.2.4 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση | 23 |
| 1.2.5 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών | 24 |
| 1.2.5.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών | 25 |
| 1.2.5.2 Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών | 30 |
| 1.3 Κρουστικές τάσεις | 32 |
| 2. Σκοπός της εργασίας | 33 |
| 3. Μετρήσεις, υπολογισμοί και διαγράμματα | 35 |
| 3.1 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm) | 35 |
| 3.2 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm) | 49 |
| 3.3 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm) | 63 |
| 3.4 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm) | 77 |
| 3.5 Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών | 91 |
| 4. Σχόλια - Συμπεράσματα | 93 |
| 5. Βιβλιογραφία | 95 |

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά για τα μονωτικά υλικά

Σκοπός των μονώσεων σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των ρευματοφόρων μερών καθώς και των ρευματοφόρων μερών προς γη, κατά τρόπο ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό. Η ανάγκη για την εκπλήρωση του σκοπού αυτού και η μελέτη των φαινομένων, που προκαλούν ολική ή μερική αναίρεση του ηλεκτροστατικού πεδίου σε μία κατασκευή, οδήγησαν στον καθορισμό ορισμένων εννοιών. Έτσι, σε αντιστοιχία προς την μηχανική αντοχή των υλικών, έχει αναπτυχθεί μία εξειδικευμένη περιοχή της ηλεκτρολογίας, που αφορά την ηλεκτρική (ή διηλεκτρική) αντοχή των μονώσεων.

Με τον όρο διάσπαση εννοεί κανείς την αγώγιμη σύνδεση δύο μεταξύ τους μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση επί της επιφάνειας ενός στερεού μονωτικού ονομάζεται επιφανειακή διάσπαση. Η διάσπαση στο περιβάλλον μέσο ενός στερεού μονωτικού, λόγω μείωσης της απόστασης μόνωσης του στερεού μονωτικού από αγώγιμες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνειά του (όπως π.χ. συμβαίνει σε ρυπασμένους μονωτήρες) χαρακτηρίζεται ως υπερπήδηση. Η διάσπαση μέσω του όγκου ενός στερεού μονωτικού υλικού καλείται διάτρηση.

1.1.1 Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών

Η ανάγκη για την αξιόπιστη διαχρονική συμπεριφορά των διαφόρων μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή υψηλών τάσεων έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους, τα οποία δεν αφορούν μόνο τις ηλεκτρικές (ή διηλεκτρικές) ιδιότητές τους, αλλά και άλλες ιδιότητες, που πρέπει να έχουν, ανάλογα με την κατασκευή, όπως π.χ.: η θερμική αντοχή κατά την απαγωγή των απωλειών Joule των αγωγών, η ψυκτική ικανότητα κατά τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου σε διακόπτες, η μηχανική αντοχή των μονωτήρων (π.χ. λόγω του βάρους της γραμμής), η αντοχή κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος, κλπ. Τα κριτήρια αυτά είναι:

1. Η διηλεκτρική αντοχή
2. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά
3. Ο συντελεστής απωλειών ($\tan\delta$)
4. Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα
5. Ο συντελεστής $\epsilon \tan\delta$
6. Η επιφανειακή αγωγιμότητα
7. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
8. Η μηχανική αντοχή

Διηλεκτρική αντοχή

Ως διηλεκτρική αντοχή (E_d) ενός μονωτικού υλικού εντός ομογενούς πεδίου έχει οριστεί το πηλίκο της ελάχιστης τιμής της τάσης για τη διάσπαση προς την απόσταση των ηλεκτροδίων. Είναι δηλαδή ένας ορισμός για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών, μέσω της ελάχιστης τιμής της πεδιακής έντασης για τη διάσπαση εντός ομογενούς πεδίου. Η τιμή E_d είναι ένα κριτήριο για την επιλογή των διαφόρων μονωτικών σε μία κατασκευή.

Σχετική διηλεκτρική σταθερά

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) δίνει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μίας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα.

Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών, που συνθέτουν μία μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών και μονώσεις καλωδίων), θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο, ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειές τους, για να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.

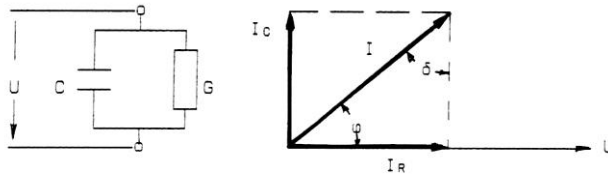
Συντελεστής απωλειών $\text{tg}\delta$

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

α) στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής των δίπολων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης, και

β) στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά.

Έτσι, ο 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, όπως συμβαίνει π.χ. κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων, και τη θερμική καταπόνηση του μονωτή από τις απώλειες των αγωγών.

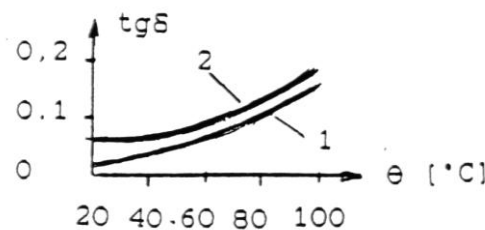


Σχήμα 1.1.1-1: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας G του διηλεκτρικού του

Ο συντελεστής απωλειών:

$$\text{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C} \quad (1.1.1-1)$$

είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μιας μονωτικής διάταξης γενικότερα) γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του (σχήμα 1.1.1-2). Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό η $\text{tg}\delta$ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 1.1.1-2: $\text{tg}\delta$ ορισμένων διηλεκτρικών

1: σκληρό χαρτί

2: πορσελάνη

Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

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

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

$$\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.1.1-2)$$

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 (π.χ. για το presspan $\beta \approx 0,02$)

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

Για μεγαλύτερες τιμές της πεδιακής έντασης από προηγουμένως, η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας οφείλεται κυρίως στις μερικές εκκενώσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι στην περίπτωση αυτή συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, όπως στα ιονισμένα αέρια και δεν ισχύει η σχέση 1.1.1-2.

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

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\exp(\beta\theta)}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.1.1-3)$$

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

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

Συντελεστής $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$

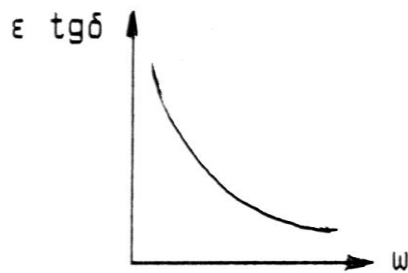
Για έναν πυκνωτή επίπεδων πλακών έχουμε

$$\varepsilon_r \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \quad (1.1.1-4)$$

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

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.1.1-5)$$

Στο σχήμα 1.1.1-3 δίνεται η γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής κατά την παραπάνω σχέση. Το γινόμενο $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών



Σχήμα 1.1.1-3: $\varepsilon \operatorname{tg}\delta = f(\omega)$ για το ομοιογενές μονωτικό υλικό.
(Υποτίθεται ότι η τιμή σ είναι σταθερή με τη θερμοκρασία)

Από τις σχέσεις 1.1.1-2 και 1.1.1-5 έπεται ότι ο συντελεστής $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ του ομοιογενούς στερεού μονωτικού υλικού (ή γενικότερα του στερεού διηλεκτρικού όταν δεν εκδηλώνονται σε αυτό μερικές εκκενώσεις, π.χ. λόγω $U < U_a$) αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία:

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma_0}{\omega} e^{\beta\theta} \quad (1.1.1-6)$$

Αν θεωρήσουμε την τιμή ε ως σταθερή, τότε από την παραπάνω σχέση έπεται ότι η αύξηση της $\operatorname{tg}\delta$ είναι εκθετική (σχήμα 1.1.1-2).

Για την αύξηση της τιμής $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ στην περιοχή του στερεού μονωτικού, όπου οι μερικές εκκενώσεις συντελούν στην αύξηση των απωλειών Joule, έχουμε αντίστοιχα (από τις σχέσεις 1.1.1-3 και 1.1.1-5):

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma_0 \exp(\beta\theta)}{\omega (1 - \delta E)^2} \quad (1.1.1-7)$$

Επιφανειακή αγωγιμότητα

Η διηλεκτρική αντοχή των στερεών μονωτικών μειώνεται, όταν η επιφάνειά τους περιλαμβάνει ξένες επικαθίσεις (σκόνη, υγρασία, κλπ.). Το ίδιο συμβαίνει όταν καταπονηθεί θερμικά η επιφάνεια. Έχει διαπιστωθεί, ότι στα φαινόμενα που εκδηλώνονται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και μερικές εκκενώσεις), συμμετέχει η επιφάνειά τους σε πάχος μέχρι 30Å. Γι' αυτό, η επιφανειακή αγωγιμότητα είναι ένα κριτήριο για την προδιάθεση των διαφόρων στερεών διηλεκτρικών στην εκδήλωση των παραπάνω φαινομένων. Επειδή οι παράγοντες, που προκαλούν αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας ποικίλουν (ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας), η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα δεν είναι κάποια σταθερά των στερεών μονωτικών.

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

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

Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις θέσεις, όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως π.χ. ανομοιογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο λάδι). Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντοτε κατά τη λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ. απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπών). Επειδή γενικά ισχύει, ότι η θερμική ειδική αγωγιμότητα (λ) συμβαδίζει με την ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα, η τιμή λ είναι (όπως και η τιμή σ) ένα κριτήριο για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών.

Στις προδιαγραφές IEC και VDE γίνεται μία διαβάθμιση των στερεών μονωτικών ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Πρόκειται για κατηγορίες (ή κλάσεις) των υλικών αυτών, που διευκολύνουν στην πράξη για τη διάρκεια ζωής τους.

Μηχανική αντοχή

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

Συχνά ενδιαφέρει η μηχανική αντοχή σε πλήρεις κατασκευές, που περιλαμβάνουν στερεά μονωτικά, όταν αυτή ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από την εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης, όπως συμβαίνει κατά το βραχυκύκλωμα (π.χ. πίνακες μέσης τάσης, μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής,

μετασηματιστές μέτρησης στο δίκτυο υψηλών τάσεων, διακόπτες υψηλών τάσεων). Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να γίνουν αιτία καταστροφής της κατασκευής, όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή κατά το βραχυκύκλωμα. Η μόνωση π.χ. ενός διακόπτη υψηλής τάσης δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης, προς δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου, όταν η επιδίωξη αυτή δεν συνδυάζεται με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, που θα διασφαλίζει την ικανότητα μόνωσης μέχρι να διακοπεί το βραχυκύκλωμα από το μέσο προστασίας του δικτύου.

1.2 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών

Στα στερεά μονωτικά, η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη σε σύγκριση με τα αέρια και η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σε αυτά (κάψιμο, τήξη, μηχανικές κακώσεις, κλπ). Επίσης, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των στερεών μονωτικών υλικών, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται κατά τη διάσπαση ή να αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες (λόγω επιφανειακής διάσπασης, υπερπήδησης και μερικών εκκενώσεων) είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού της γήρανσης της διάσπασής τους.

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

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

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

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

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

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

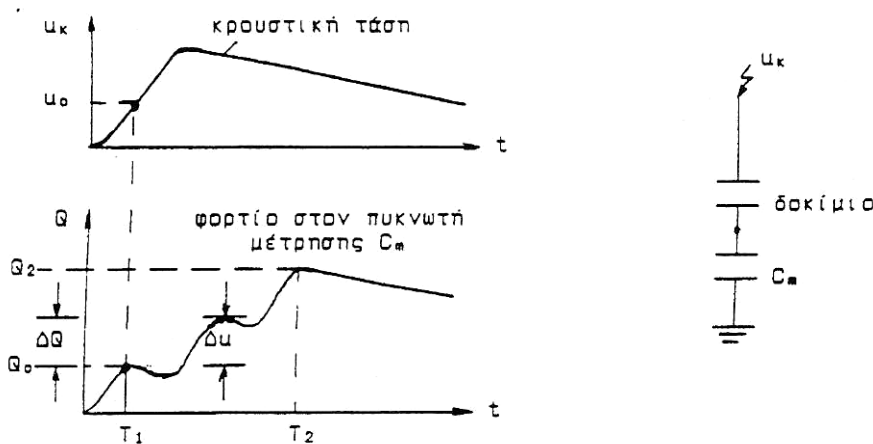
Οι αντίστοιχες προς τους παραπάνω παράγοντες θεωρητικές μορφές της διάτρησης είναι:

- α) η θερμική διάτρηση,
- β) η ηλεκτρική διάτρηση (που διακρίνεται στη δενδροειδή και την ηλεκτρομηχανική),
- γ) η ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση), και
- δ) η θερμοχημική διάτρηση.

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

1.2.2 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων των κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως π.χ. στο σχήμα 1.2.2-1 για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Με παρόμοιες σκέψεις, μπορεί κανείς να καθορίσει μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση με άλλες μορφές τάσεων, καθώς και με άλλα τετράπολα μέτρησης (συνήθως ωμική αντίσταση, αντί του πυκνωτή, ή συνδυασμός των δύο αυτών στοιχείων μέτρησης, σχήμα 1.2.2-2). Στο σχήμα π.χ. 1.2.2-3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



Σχήμα 1.2.2-1: 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.

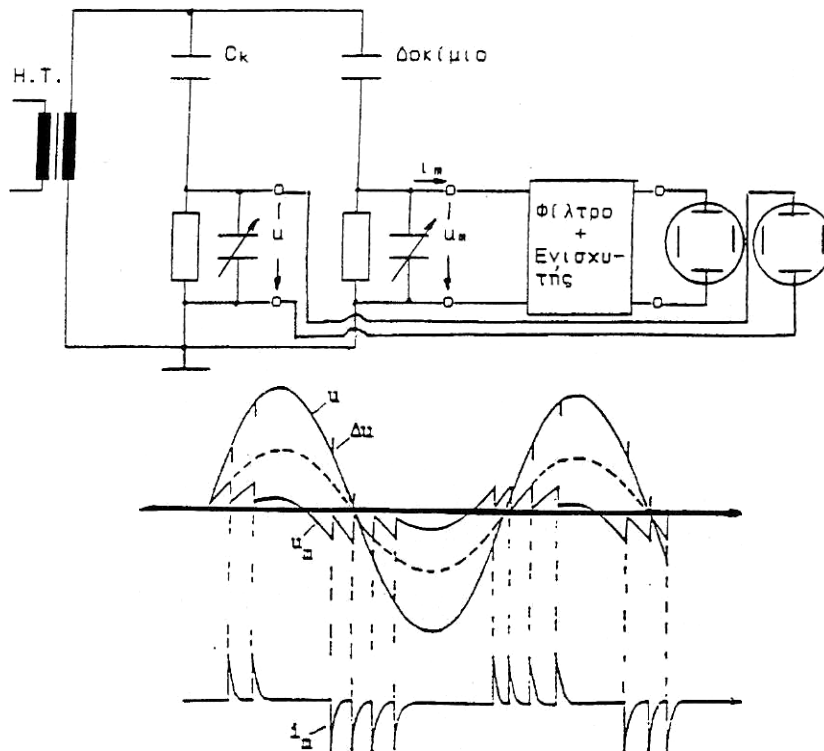
ΔQ : Αύξηση φορτίου.

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως: η χαρακτηριστική $Q=f(|\dot{U}_k|)$, η χαρακτηριστική $u_0=f(|\dot{U}_k|)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της τάσης, κλπ. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q=f(\dot{U}_k)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 1.2.2-4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs ή 10/200μs, όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Στο σχήμα 1.2.2-5 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90^η κρούση, ως προς την 60^η. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών, εύκολα διαπιστώνεται, ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου Q στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις (θραύσματα) στην επιφάνεια του μονωτικού.

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

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

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



Σχήμα 1.2.2-2: Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω "ωμικού-χωρητικού" τετράπολου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz.

H.T.: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

C_k: Πυκνωτής υψηλής τάσης.

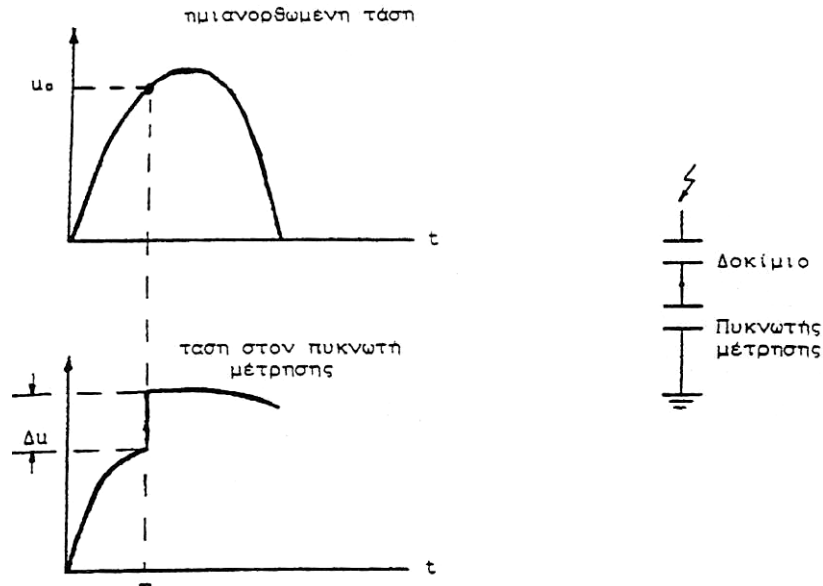
u: Στιγμιαία τιμή της εναλλασσόμενης τάσης (η οποία μετράται σε ένα ωμικό-χωρητικό τετράπολο).

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

i_m: Στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων.

Δu: Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων.

Μία πειραματική προσέγγιση του παραπάνω διαχωρισμού, μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, έχει δοθεί από παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού σε στερεά οργανικά μονωτικά, με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών (σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα), που συνδυάστηκαν με ταυτόχρονες οπτικές παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών. Στον πίνακα 1.2.2-1 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$ από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που προαναφέρθηκε. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης 1,2/50μs) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

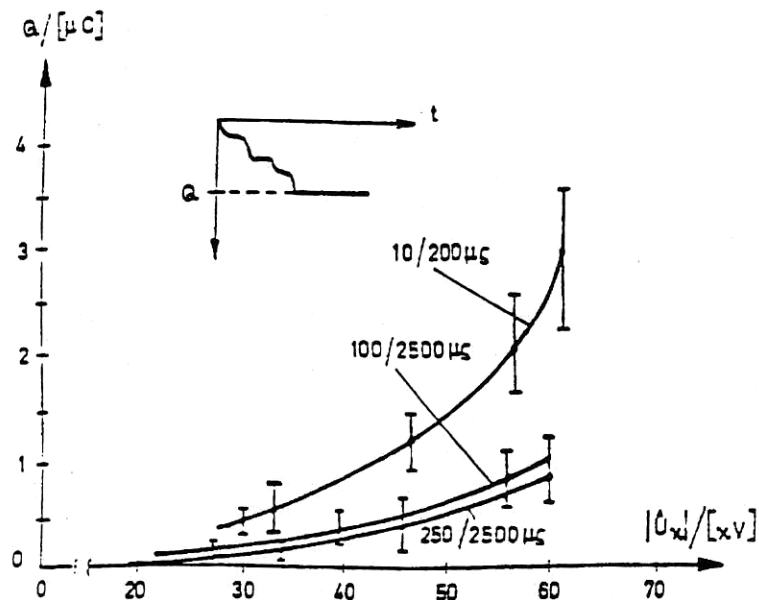


Σχήμα 1.2.2-3: Παράδειγμα Καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

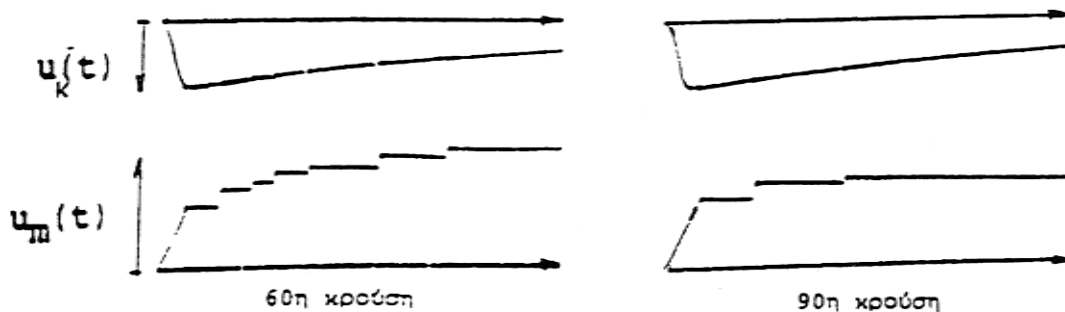
T₁: Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

U₀: Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).

Δu: άλμα δυναμικού



Σχήμα 1.2.2-4: Χαρακτηριστική $Q_2=f(\hat{U}_\kappa)$ για τον βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs.
 Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα
 C_m : 1000nF

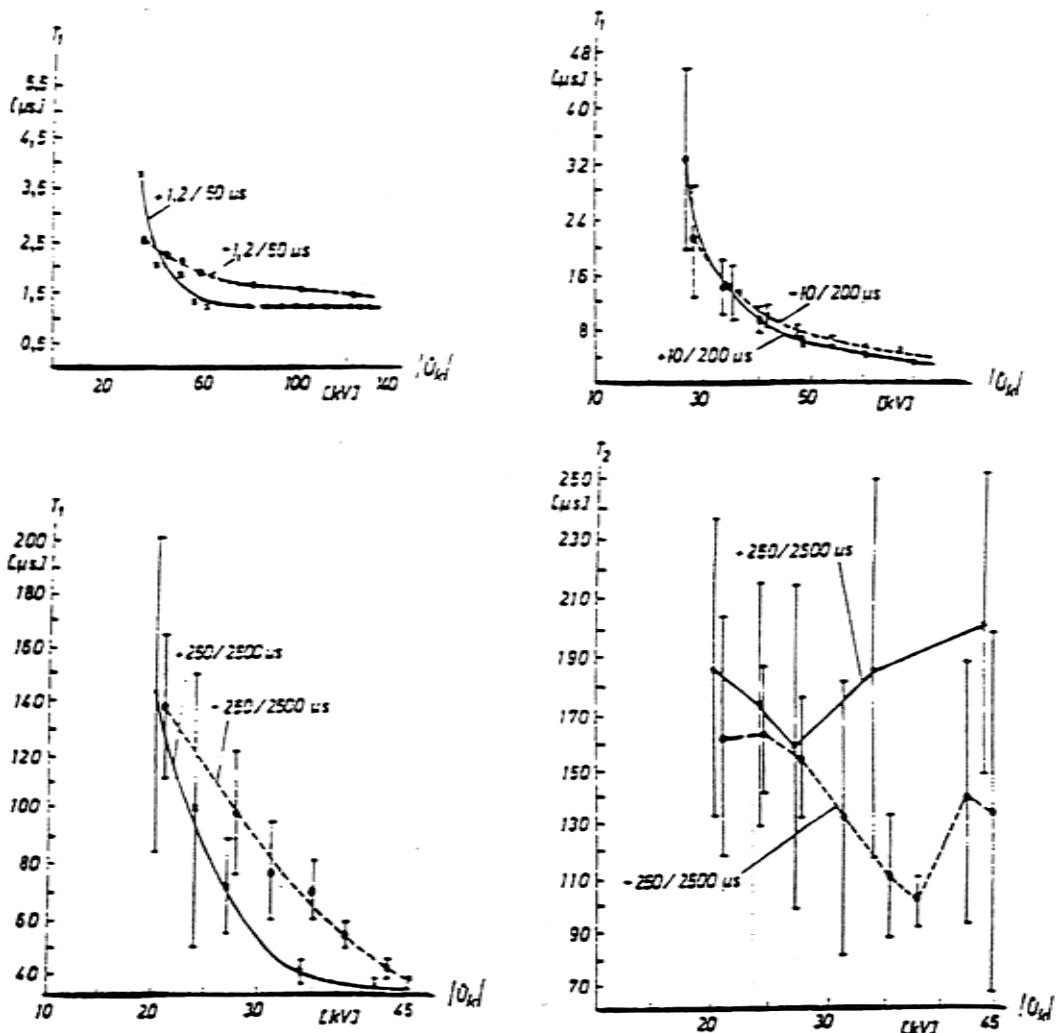


Σχήμα 1.2.2-5: Άλματα δυναμικού κατά την 60η και την 90η κρούση στο pertinax (πάχους 2mm).
 Μορφή τάσης: 1,2/50μs ($\hat{U}_\kappa = 99,7kV$).
 Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα.
 C_m : 210nF.

| 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 μs) | ΝΑΙ (αλλά μικρότερη από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50 μs) | στην ουρά και στο μέτωπο | εξωτερικές και εσωτερικές μερικές εκκενώσεις |
| 250/2500 | ΟΧΙ | ΟΧΙ | στο μέτωπο | εσωτερικές μερικές εκκενώσεις |

Πίνακας 1.2.2-1: Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

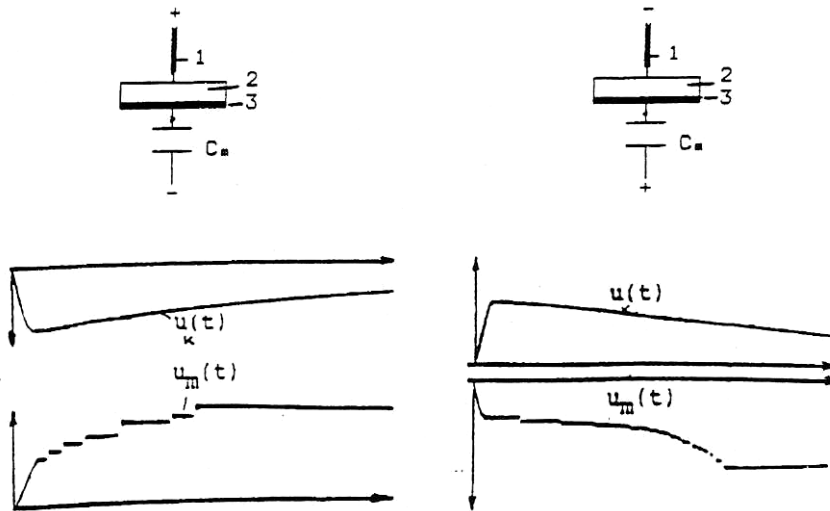
Μία άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, ως προς τον χρόνο εκδήλωσής τους (υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης), έχει βασιστεί σε χαρακτηριστικές $T_1=f(|\dot{U}_k|)$ και $T_2=f(|\dot{U}_k|)$ σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών. Στο σχήμα 1.2.2-6 φαίνεται ο χρόνος έναρξης (T_1) των μερικών εκκενώσεων (στα μονωτικά υλικά και το είδος της καταπόνησης, που προαναφέρθηκαν), καθώς και ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (T_2), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500 μs), ώστε σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις του πίνακα 1.2.2-1 για την εικόνα των επιφανειακών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.



Σχήμα 1.2.2-6: 1) Χαρακτηριστική $T_1=f(|\hat{U}_k|)$ κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2mm και $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$) με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, 10/200μs και 250/2500μs.
 2) Χαρακτηριστική $T_2=f(|\hat{U}_k|)$ κατά την καταπόνηση των υλικών αυτών με κρουστικές τάσεις 250/2500μs.
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα.
 I: 2 φορές η τυπική απόκλιση.

1.2.3 Το φαινόμενο της πολικότητας σε πολυμερή στερεά μονωτικά κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων

Από την μέση καμπύλη των χαρακτηριστικών του σχήματος 1.2.2-6 γίνεται επίσης φανερή η εκδήλωση του φαινομένου της πολικότητας, όπως και κατά τη διάτρηση. Οι επικαλύψεις τιμών, που παρατηρούνται μπορούν να αποδοθούν στη διαφορετική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο (τα οργανικά στερεά μονωτικά είναι ανομοιογενή και δεν είναι δυνατό να υπάρχει συμμετρική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο). Πάντως, το φαινόμενο της πολικότητας γίνεται φανερό στα άλματα δυναμικού από την κύρτωση (παρέκκλιση) της $u_m(t)$ προς τον άξονα του χρόνου (σχήμα 1.2.3-1).

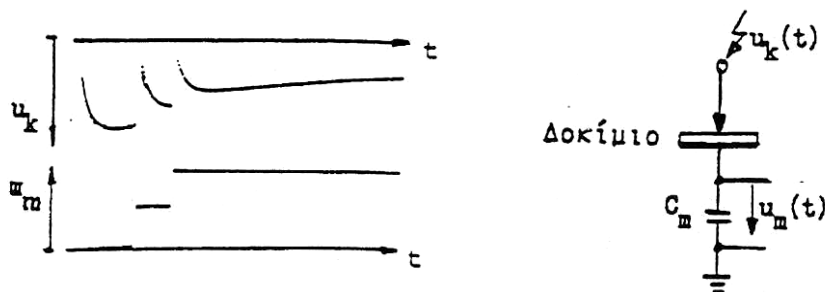


Σχήμα 1.2.3-1: Τυπικά παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$.

- 1: Ηλεκτρόδιο ακίδα,
- 2: Δοκίμιο,
- 3: Ηλεκτρόδιο πλάκα,
- C_m : Πυκνωτής μέτρησης.

1.2.4 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση

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



Σχήμα 1.2.4-1: Τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση $10/200\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

C_m : 1835nF, \hat{U}_k : 70kV.

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 30Å. Έτσι, εκτός από τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις (οι οποίες οφείλονται σε ξένες επικαθίσεις και έχουν συνήθως τον κυρίαρχο ρόλο στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στην επιφάνεια), μπορεί κανείς να υποθέσει ότι εκδηλώνονται και οι άλλοι παράγοντες (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος), όπως κατά τη διάτρηση.

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

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

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

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

- στις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις (δηλαδή από παλμογράφηματά όπως εκείνα των σχημάτων 1.2.2-1 και 1.2.3-1),
- στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης (ως στοιχείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε δηλαδή μία αντίσταση, αντί του πυκνωτή μέτρησης),
- στην ανίχνευση του μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση)
- στην ικανοποιητική πειραματική και θεωρητική ταύτιση του μηχανισμού παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

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

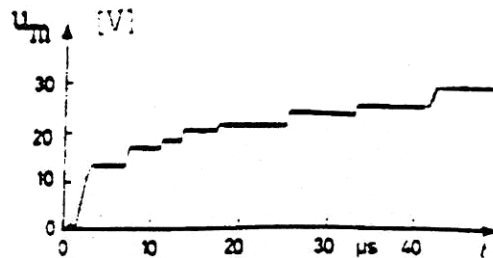
- 1) Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί, ότι:
 - α) το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.
 - β) Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα)
- 2) Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 2,5-4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2MV/cm.

- 3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου $0,5\text{MV/cm}$ αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση 1.1.1-2 ($\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$).
- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγούμενες, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση 1.1.1-2. Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια.

1.2.5.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών

Ένα τυπικό παράδειγμα κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης σε στερεά μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών είναι το παρακάτω:

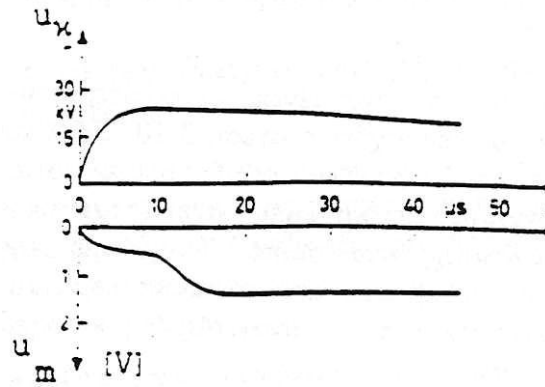
Στα σχήματα 1.2.5.1-1 έως 1.2.5.1-3 δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα της τεχνητής γήρανσης στερεών πολυμερών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και στο σχήμα 1.2.5.1-4 ένα παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου. Η διάταξη μέτρησης έχει σχεδιαστεί απλοποιημένα στο σχήμα 1.2.5.1-5. Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώθηκε ότι:



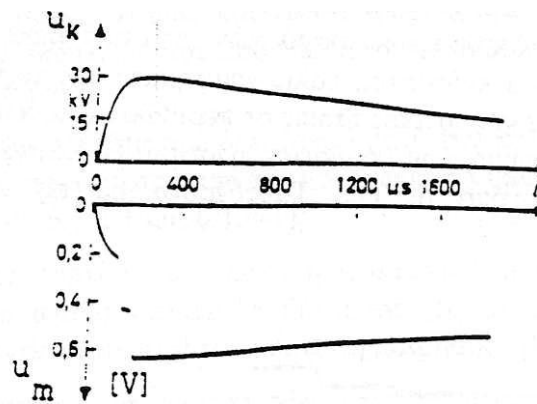
Σχήμα 1.2.5.1-1: Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση $1,2/50\mu\text{s}$.
 \dot{U}_k : 100kV .
 E : $0,8\text{ MV/cm}$.
 C_m : 210nF .

- α) μετά από μία τιμή $\dot{U}_k \approx 45\text{kV}$, κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$ ή $10/200\mu\text{s}$, εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 1.2.5.1-6). Υπό σταθερή τιμή της τάσης ο δενδρίτης, καθώς και η αντίστοιχη προς αυτόν αλλαγή της μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις
- β) κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $250/2500\mu\text{s}$ δεν παρατηρήθηκε, υπό σταθερή τιμή της τάσης (που δεν οδηγεί στη διάσπαση), η εκδήλωση του παραπάνω δενδρίτη, ούτε προκλήθηκε αλλαγή της μοριακής δομής

Για λόγους σύγκρισης των συμπερασμάτων, μεταξύ μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης στα στερεά μονωτικά, εξετάζονται (με τα παραπάνω δεδομένα) και οι δύο αυτές περιπτώσεις:



Σχήμα 1.2.5.1-2: Πρώτο άλμα δυναμικού υπό κρουστική τάση 10/200μs
 \hat{U}_k : 26,6kV.
 E: 0,38MV/cm.
 C_m : 210nF.



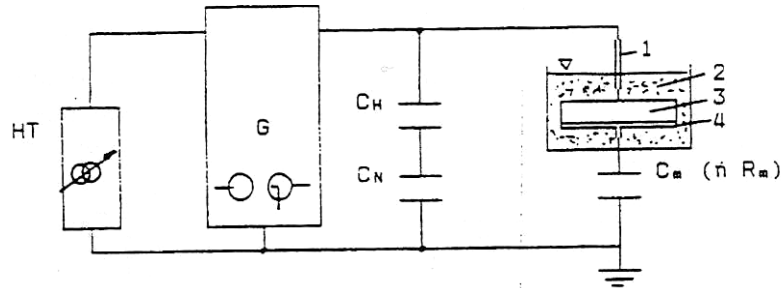
Σχήμα 1.2.5.1-3: Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 250/2500ps.
 \hat{U}_k : 32 kV.
 E: 0,31 MV/cm.
 C_m : 1000nF.



Σχήμα 1.2.5.1-4: Κρούσεις φορτίου υπό κρουστική τάση 10/200μs.
 Κλίμακα χρόνου: 5 μs/div.
 Κλίμακα ρεύματος: 1,3 A/div.
 \hat{U}_k : 81kV, E: 0,86 MV/cm.

α) Μακροσκοπική ερμηνεία

Αν οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνευτούν με τη μακροσκοπική θεωρία, τότε καταλήγει κανείς στα συμπεράσματα του πίνακα 1.2.2-1. Η εκδήλωση των αλμάτων δυναμικού (ή των κρούσεων φορτίου) κατά τη θεωρία αυτή ερμηνεύονται από το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 1.2.5.1-5: Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης των αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

H.T.: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

G : Γεννήτρια κρουστικών τάσεων.

C_H και C_N : Καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης.

1: Ηλεκτρόδιο ακίδα,

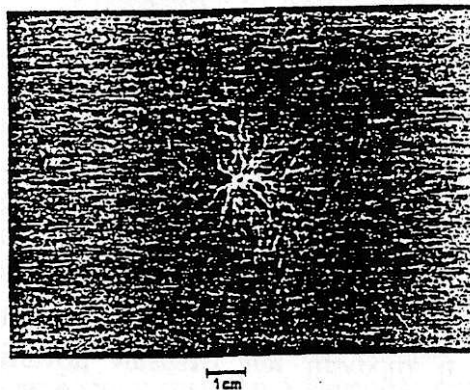
2: Μονωτικό λάδι,

3: Δοκίμιο (πάχος 2mm),

4: Ηλεκτρόδιο πλάκα.

C_m : πυκνωτής μέτρησης των αλμάτων δυναμικού

R_m : αντίσταση μέτρησης των κρούσεων φορτίου (δηλαδή του ρεύματος).



Σχήμα 1.2.5.1-6: Εικόνα επιφανειακών διαταραχών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs
 \hat{U}_k : 85kV,
E: 0,8MV/cm.

β) Κβαντομηχανική ερμηνεία:

Κατά τη θεωρία αυτή ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και όχι ο διαχωρισμός των τελευταίων σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης C_m ανά άλμα δυναμικού, με την σχέση

$$W=0,5q_e\Delta u \quad (1.2.5.1-1)$$

όπου: q_e : το φορτίο του ηλεκτρονίου και
 Δu : το άλμα δυναμικού).

Η σχέση αυτή ισχύει για μηδενική τιμή της ωμικής αντίστασης R από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης. Για $R>0$ θα πρέπει να πάρει κανείς υπ όψη το μεταβατικό φαινόμενο με σταθερά χρόνου :

$$\tau = R \cdot C_m \quad (1.2.5.1-2)$$

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από την σχέση:

$$W = 0,5\Delta u / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \quad (1.2.5.1-3)$$

όπου: Δu σε V και
 t : ο χρόνος φόρτισης του C_m κατά τη διάρκεια μίας μερικής εκκένωσης (κατά τη βιβλιογραφία περίπου 100ns).

Για μία αντίσταση $R=0,5\Omega$, ο συντελεστής:

$$f = 1 / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \quad (1.2.5.1-4)$$

δίνεται στον πίνακα 1.2.5.1-1, για χωρητικά τετράπολα μέτρησης, που συνήθως χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις αυτές. Για τους πυκνωτές του πίνακα αυτού και για $R=0,5\Omega$, ισχύει επομένως :

| | | | | | |
|-------------|----|----|------|------|------|
| C_m σε nF | 10 | 20 | 210 | 1000 | 1835 |
| f | 1 | 1 | 1,62 | 5,51 | 9,6 |

Πίνακας 1.2.5.1-1: Τιμές του συντελεστή f για $R=0,5\Omega$

$$W = 0,5 \cdot f \cdot \Delta u \text{ σε eV} \quad (1.2.5.1-5)$$

όπου Δu σε V.

Στον πίνακα 1.2.5.1-2 έχουν υπολογιστεί με την παραπάνω σχέση οι τιμές της ενέργειας W για το πρώτο άλμα δυναμικού των παλμογραφημάτων των σχημάτων 1.2.5.1-1, 1.2.5.1-2 και 1.2.5.1-3. Από τις τιμές αυτές φαίνεται, ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών σχετίζεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που μπορεί να περιλαμβάνει υπεριώδεις ακτίνες και υπέρυθρες ακτίνες. Έτσι:

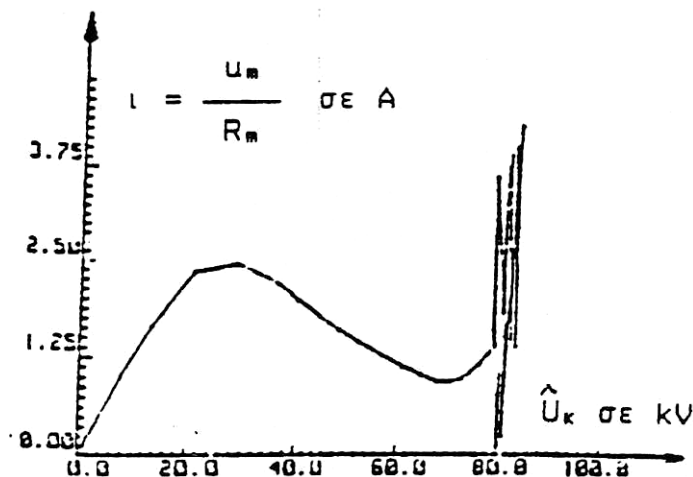
1. από τις τιμές της ενέργειας κατά τον πίνακα 1.2.5.1-2,
2. τη φωτεινή ακτινοβολία, που παρατηρείται στην πράξη σε αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων (και η οποία με υπολογισμό της ενέργειας W εύκολα διαπιστώνεται σε άλματα δυναμικού του παλμογραφήματος του σχήματος 1.2.5.1-1), και
3. τις ραδιοφωνικές παρεμβολές και τα ακουστικά κύματα, που συχνά προκαλούν οι μερικές εκκενώσεις,

μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών σχετίζεται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται σε αυτά, το φάσμα της οποίας είναι: από ακουστικά κύματα μέχρι και υπεριώδεις ακτίνες

| Μορφή τάσης | Σχήμα | W σε eV |
|-------------|-----------|---------|
| 1,2/50μs | 1.2.5.1-1 | ≈ 10,50 |
| 10/200μs | 1.2.5.1-2 | ≈ 1,60 |
| 250/2500μs | 1.2.5.1-4 | ≈ 0,16 |

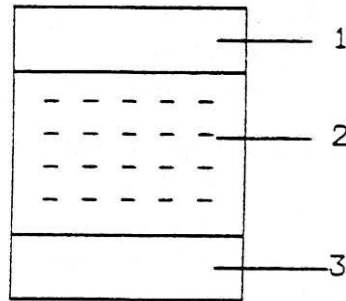
Πίνακας 1.2.5.1-2: Τιμές ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πρώτο άλμα δυναμικού.

Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γήρανσης έχουν δοθεί από παλμογραφήματα των κρούσεων φορτίου. Πράγματι από το παλμογράφημα του σχήματος 1.2.5.1-5 φαίνεται ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις. Έτσι, όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσειμα της ενέργειάς τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (πίνακας 1.2.5.1-2). Ο δενδρίτης επομένως, που παρατηρείται, είναι το ορατό φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι αντίστοιχες δενδροειδούς μορφής εκπομπές συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου (σχήμα 1.2.5.1-5) φαίνεται επίσης, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης (κατά την αύξηση της τάσης παρατηρείται μείωση του ρεύματος). Η αντίσταση αυτή, που προηγείται του ιονισμού με κρούσεις, δίνεται αναλυτικότερα στην χαρακτηριστική "ρεύματος-τάσης" του σχήματος 1.2.5.1-7.



Σχήμα 1.2.5.1-7: Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης κατά το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου του σχήματος 1.2.5.1-4

Από τα παραπάνω μπορεί να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα ότι μία διαδρομή της δενδροειδούς μορφής εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αντιστοιχεί σε μία 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). Μπορούμε να υποθέσουμε, λόγω του εύρους της παραπάνω ακτινοβολίας, ότι υπάρχουν στο υλικό διάφορες **ενεργειακές στάθμες διαταραχής** μέσα στην απαγορευμένη ζώνη, που είναι καθοριστικής σημασίας για την εκδήλωση του ιονισμού (σχήμα 1.2.5.1-8). Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 1.2.5.1-8: Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

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

Από πρόσφατες έρευνες, που έχουν γίνει κατά τη γήρανση στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, υπό εναλλασσόμενη (ή συνεχή) τάση καταπόνησης, διαπιστώνεται επίσης η εκπομπή του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που έχει προαναφερθεί για την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις καταπόνησης ο υπολογισμός της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (πάνω από την ενέργεια Fermi) μπορεί να γίνει, κατά την εκδήλωση αλμάτων δυναμικού, με την σχέση 1.2.5.1-3.

1.2.5.2 Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών

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

$$Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2} \quad (1.2.5.2-1)$$

όπου (κατά το σχήμα 1.2.2-1):

- E_0 η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($E > 0,2 \text{ MV/cm}$) και 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 μία προσέγγιση πειραματικών χαρακτηριστικών $Q=f(\dot{U}_κ)$ κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm ή 2mm) με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή 250/2500μs), η οποία (ως γνωστό από τον πίνακα

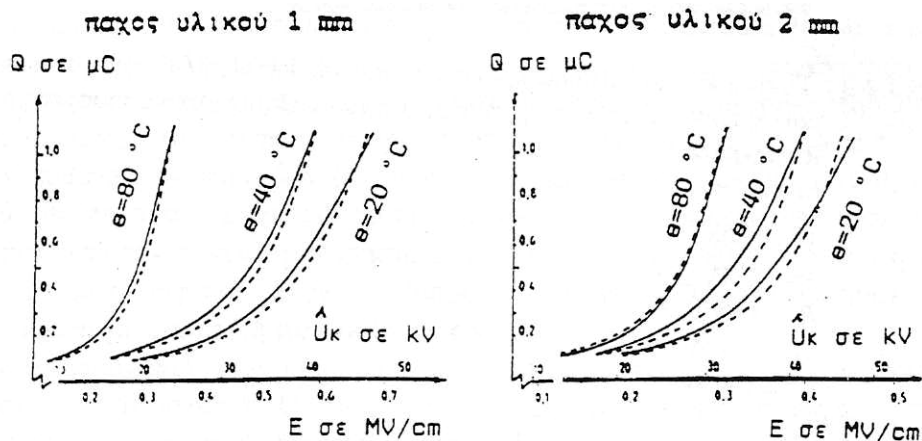
1.2.2-1) προκαλεί μόνο εσωτερικές μερικές εκκενώσεις. Η διάταξη, που έγιναν τα πειράματα, έχει δοθεί απλοποιημένα στο σχήμα 1.2.5.1-5. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (20°C, 40°C και 80°C), ώστε :

α) να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, και

β) να εναρμονίζονται οι μετρήσεις με τα παραδεκτά όρια λειτουργίας του μονωτικού ελαίου των μετασχηματιστών, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη.

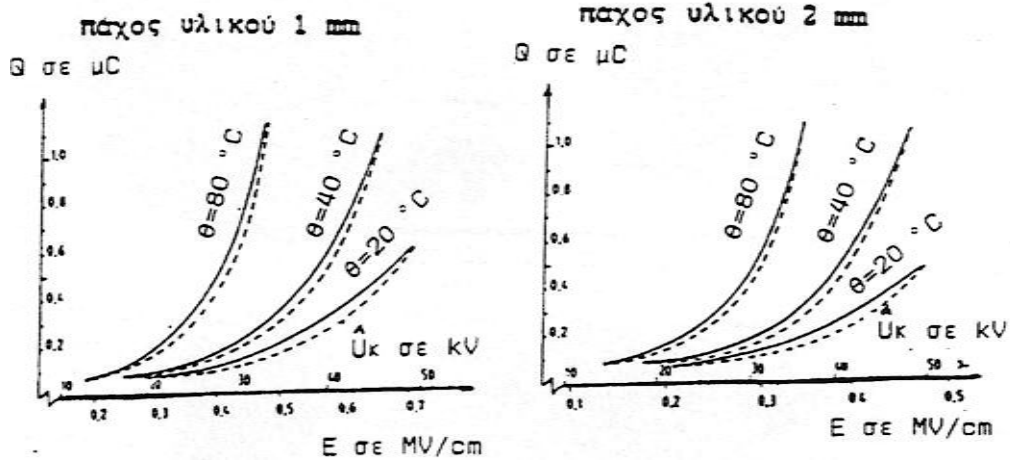
Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι πειραματικές χαρακτηριστικές για δύο μονωτικά καθώς και οι θεωρητικές χαρακτηριστικές κατά την σχέση 1.2.5.2-1, (με προσδιορισμό του συντελεστή A για κάθε υλικό). Όπως φαίνεται, υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ θεωρίας και πειραμάτων. Η θεωρητική προσέγγιση έδειξε ότι :

1. οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμές πεδίου περίπου $E=0,2\text{MV/cm}$.
2. για τιμές πεδίου περίπου μέχρι $0,5\text{ MV/cm}$ η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας διέπεται από την σχέση 3-10 ($\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$).
3. για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως ισχύει η σχέση 1.2.5.2-1, με αποτέλεσμα να μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις.
4. η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ενισχύει σημαντικά τα φαινόμενα ιονισμού. Φαίνεται ότι η σχέση, που διέπει τον συνδυασμό των μερικών εκκενώσεων με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, είναι η 1.2.5.2-1.
- 5.



Σχήμα 1.2.5.2-1: Χαρακτηριστικές $Q=f(\hat{U}_κ)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. $A=0,48$.

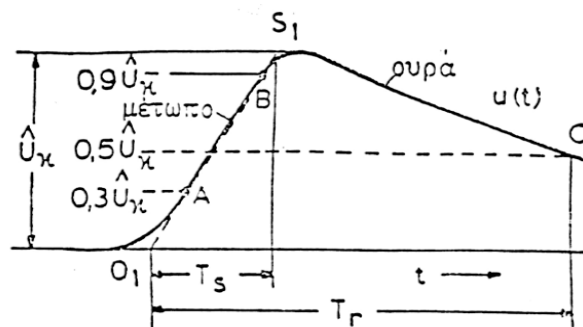
Από την μεγάλη αύξηση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων με τη θερμοκρασία του μονωτικού ελαίου, που στη πράξη γίνεται αντιληπτή σε συνδυασμούς "στερεό-υγρό μονωτικό" με την αρκετά μεγάλη tgδ, φαίνεται ότι θα πρέπει να γίνει μία βελτίωση των προδιαγραφών ως προς τη δοκιμή υπερθέρμανσης. Με τυπικό παράδειγμα τους μετασχηματιστές ελαίου (και ιδιαίτερα τους μετασχηματιστές έντασης του δικτύου μεταφοράς, που ως γνωστό από την πράξη παρουσιάζουν προβλήματα κατά την αύξηση της tgδ), κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιούνται οι διηλεκτρικές δοκιμές, αμέσως μετά το πέρας της δοκιμής υπερθέρμανσης (ή δοκιμής ανύψωσης της θερμοκρασίας). Κατά τον τρόπον αυτόν θα συνεξετάζεται δηλαδή η πιθανή εκδήλωση φαινομένων ιονισμού στα ανεκτά όρια της θερμοκρασιακής κατάστασης του μετασχηματιστή ($\approx 80^\circ\text{C}$).



Σχήμα 1.2.5.2-2: Χαρακτηριστικές $Q=f(\hat{U}_K)$ για τον βακελίτη εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 250/2500 μs . Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. $A=0,44$.

1.3 Κρουστικές τάσεις

Μεγάλη σημασία για την μελέτη της ηλεκτρικής αντοχής των μονώσεων έχει η καταγραφή των φαινομένων προ και κατά τη διάσπασή τους, ως προς τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης. Το γεγονός αυτό είναι προφανές αν αναλογιστεί κανείς πως χρειάζονται πληροφορίες για την αξιοπιστία των μονώσεων έναντι των διαφόρων μορφών υπερτάσεων, που μπορεί να δεχτεί ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Οι υπερτάσεις διακρίνονται κυρίως σε κεραυνικές υπερτάσεις και υπερτάσεις χειρισμών (δηλαδή υπερτάσεις που δημιουργούνται κατά τους χειρισμούς των διακοπών στο δίκτυο). Ως κρουστικές εννοεί κανείς υπερτάσεις, οι τυποποιημένες μορφές των οποίων έχουν τη μορφή που δίνεται στο σχήμα 1.3-1.



Σχήμα 1.3-1: Χαρακτηρισμός των μεγεθών μίας κρουστικής τάσης.

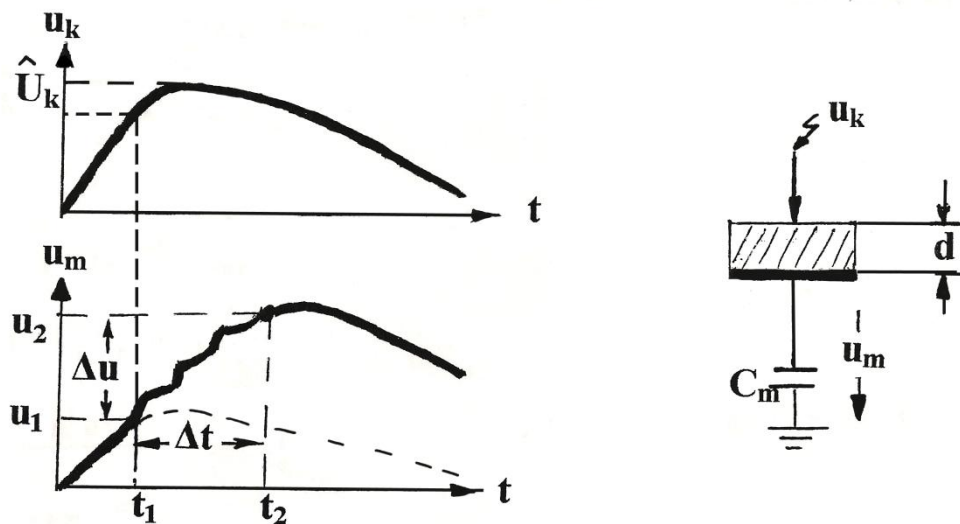
- \hat{U}_K : Μέγιστη τιμή
- T_s : Διάρκεια μετώπου
- T_r : Διάρκεια ημίσεος εύρους

Οι κρουστικές τάσεις συμβολίζονται με τον χρόνο μετώπου (T_s) και τον χρόνο ουράς (T_r). Η κεραυνική τάση είναι μία κρουστική τάση της μορφής 1,2/50 μs , που σημαίνει ότι $T_s=1,2 \mu\text{s}$ και $T_r=50\mu\text{s}$. Ως τυποποιημένη κρουστική τάση χειρισμών θεωρείται η 250/2500 μs .

Κεφάλαιο 2

Σκοπός της εργασίας

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η στατιστική ανάλυση διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών στο συνδυασμό "Pertinax-λάδι μετασχηματιστών" εντός ανομοιογενούς πεδίου υπό κρουστικές τάσεις $\pm 1,2/100 \mu\text{s}$. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι ακίδα-πλάκα με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας $R=0,9\text{mm}$ και πάχος υλικού $d=1\text{mm}$ και $d=2\text{mm}$. Ο ορισμός των διαφόρων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά φαίνεται στο σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1: Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

t_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

t_2 : Χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

u_k : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Δu : Άλμα δυναμικού.

C_m : πυκνωτής μέτρησης.

u_m : τάση του πυκνωτή μέτρησης.

d : πάχος δοκιμίου.

Πιο συγκεκριμένα, θα υπολογιστούν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, η σύνθετη αντίσταση, η τάση στον πυκνωτή μέτρησης, η ενέργεια, η ισχύς και η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων, με βάση το τυπολόγιο που παρατίθεται παρακάτω, θα σχεδιαστούν οι χαρακτηριστικές των μεγεθών αυτών και θα γίνει μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών αυτών.

Τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν αναμένεται να μας βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση των ηλεκτρικών φαινομένων που παρατηρούνται στα βιομηχανικά ηλεκτρομονωτικά υλικά. Τα συμπεράσματα αυτά θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες ηλεκτρικές βιομηχανικές κατασκευές, όπως μετασχηματιστές.

Τυπολόγιο

Από τη διαδικασία του πειράματος καταγράφηκαν οι τιμές ορισμένων μεγεθών και στη συνέχεια με βάση αυτές υπολογίστηκαν άλλα μεγέθη με βάση το παρακάτω τυπολόγιο.

Τα μεγέθη που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία ήταν η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης \hat{U}_k , τα φορτία q_1 και q_2 καθώς και οι χρόνοι t_1 και t_2 . Επίσης γνωστή ήταν και η χωρητικότητα C_m του πυκνωτή μέτρησης. Χρησιμοποιώντας τους παρακάτω τύπους υπολογίστηκαν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \hat{E}_k , η στιγμιαία τιμή της τάσης u του πυκνωτή, η σύνθετη αντίσταση Z , η ενέργεια W , η ισχύς P και η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων ΔWe .

Σημείωση: Οι δείκτες $_1$ και $_2$ στα μεγέθη αναφέρονται σε τιμές τους κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων αντίστοιχα.

$$i_1 = \frac{q_1}{t_1} = \frac{C_m \cdot u_1}{t_1} \quad (2-1)$$

$$Z_1 = \frac{u_1}{i_1} = \frac{u_1}{(C_m \cdot u_1)/t_1} = \frac{t_1}{C_m} \quad (2-2)$$

$$Z_2 = \frac{u_2}{i_2} = \frac{u_2}{(C_m \cdot u_1)/t_1} = \frac{t_2}{C_m} \quad (2-3)$$

$$\frac{q_1}{t_1} = \frac{C_m \cdot u_1}{t_1} \Leftrightarrow u_1 = \frac{q_1}{C_m} \quad (2-4)$$

$$u_2 = \frac{q_2}{C_m} \quad (2-5)$$

$$W_1 = u_1 \cdot i_1 \cdot t_1 = u_1 \frac{C_m \cdot u_1}{t_1} t_1 = u_1^2 \cdot C_m \quad (2-6)$$

$$W_2 = u_2^2 \cdot C_m \quad (2-7)$$

$$\Delta We = 0,5 \cdot \Delta u = 0,5 \cdot (u_2 - u_1) \quad (2-8)$$

$$\hat{E}_k = \frac{2\hat{U}_k}{R \cdot \ln(4d/R)} \quad (2-9)$$

όπου $R=0.9mm$: η ακτίνα καμπυλότητας
 d : το πάχος του δοκιμίου σε mm

Τέλος για την αξιολόγηση της μέσης των μεγεθών u_1 , u_2 , t_1 και t_2 υπολογίστηκε η διακύμανση δ της μέσης τιμής σε περίπτωση επανάληψης των μετρήσεων:

$$\delta = S/\sqrt{n} \quad (2-10)$$

όπου S : η τυπική απόκλιση

n : ο αριθμός των μετρήσεων ανά επίπεδο τάσης, $n=10$

Έτσι $u_{1\mu} = u_1 \pm \delta_{u1}$

$u_{2\mu} = u_2 \pm \delta_{u2}$

$t_{1\mu} = t_1 \pm \delta_{t1}$

$t_{2\mu} = t_2 \pm \delta_{t2}$

Κεφάλαιο 3

Μετρήσεις, υπολογισμοί και διαγράμματα

3.1 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm)

| \hat{U}_k [kV] | \hat{E}_k [MV/cm] |
|------------------|---------------------|
| 32,22 | 0,480 |
| 40,27 | 0,600 |
| 48,33 | 0,720 |
| 56,38 | 0,840 |
| 69,00 | 1,028 |

Πίνακας 3.1-1: Ένταση \hat{E}_k του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης \hat{U}_k για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

| C_m [nF] | q_1 [μC] | | q_2 [μC] | | u_1 [V] | | | u_2 [V] | | | Δu [V] | |
|---------------|------------|----------|------------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|----------|
| | AV | σ | AV | σ | AV | σ | δ | AV | σ | δ | AV | σ |
| 210 | 0,39 | 0,03 | 2,23 | 0,14 | 1,86 | 0,14 | 0,05 | 10,62 | 0,67 | 0,21 | 8,76 | 0,68 |
| 210 | 0,61 | 0,02 | 4,90 | 0,08 | 2,90 | 0,10 | 0,03 | 23,33 | 0,38 | 0,12 | 20,43 | 0,39 |
| 210 | 0,94 | 0,01 | 5,20 | 0,04 | 4,48 | 0,05 | 0,02 | 24,76 | 0,19 | 0,06 | 20,29 | 0,20 |
| 1000 | 1,18 | 0,01 | 6,30 | 0,02 | 1,18 | 0,01 | 0,00 | 6,30 | 0,02 | 0,01 | 5,12 | 0,02 |
| 1000 | 1,88 | 0,08 | 12,50 | 0,00 | 1,88 | 0,08 | 0,03 | 12,50 | 0,00 | 0,00 | 10,62 | 0,08 |

Πίνακας 3.1-2: Στατιστική ανάλυση της στιγμιαίας τιμής της u_m για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u = u_2 - u_1$

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

δ : διακύμανση της μέσης τιμής σε περίπτωση επανάληψη των μετρήσεων

| C_m [nF] | t_1 [μs] | | | t_2 [μs] | | | Z_1 [Ω] | | Z_2 [Ω] | | ΔZ [Ω] | |
|---------------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------------|----------|
| | AV | Σ | δ | AV | σ | δ | AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 210 | 4,90 | 0,08 | 0,03 | 22,50 | 1,42 | 0,45 | 23,33 | 0,38 | 107,14 | 6,76 | 83,81 | 6,77 |
| 210 | 3,43 | 0,06 | 0,02 | 15,20 | 1,64 | 0,52 | 16,33 | 0,29 | 72,38 | 7,81 | 56,05 | 7,81 |
| 210 | 1,71 | 0,05 | 0,02 | 17,00 | 1,96 | 0,62 | 8,14 | 0,24 | 80,95 | 9,33 | 72,81 | 9,34 |
| 1000 | 1,35 | 0,02 | 0,01 | 21,11 | 2,85 | 0,90 | 1,35 | 0,02 | 21,11 | 2,85 | 19,76 | 2,85 |
| 1000 | 1,23 | 0,01 | 0,00 | 26,40 | 3,54 | 1,12 | 1,23 | 0,01 | 26,40 | 3,54 | 25,17 | 3,54 |

Πίνακας 3.1-3: Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης Z για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

C_m : πυκνωτής μέτρησης

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Z_1 : σύνθετη αντίσταση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Z_2 : σύνθετη αντίσταση κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

δ : διακύμανση της μέσης τιμής σε περίπτωση επανάληψη των μετρήσεων

| C_m [nF] | u_1 [V] | | u_2 [V] | | W_1 [Ws] | | W_2 [Ws] | |
|---------------|-----------|----------|-----------|----------|------------|----------|------------|----------|
| | AV | σ | AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 210 | 1,86 | 0,14 | 10,62 | 0,67 | 7,24E-07 | 7,88E-08 | 2,37E-05 | 2,10E-06 |
| 210 | 2,90 | 0,10 | 23,33 | 0,38 | 1,77E-06 | 8,22E-08 | 1,14E-04 | 2,64E-06 |
| 210 | 4,48 | 0,05 | 24,76 | 0,19 | 4,21E-06 | 6,33E-08 | 1,29E-04 | 1,40E-06 |
| 1000 | 1,18 | 0,01 | 6,30 | 0,02 | 1,39E-06 | 1,67E-08 | 3,97E-05 | 1,78E-07 |
| 1000 | 1,88 | 0,08 | 12,50 | 0,00 | 3,53E-06 | 2,13E-07 | 1,56E-04 | 0,00E+00 |

Πίνακας 3.1-4: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας W για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

C_m : πυκνωτής μέτρησης

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

W_1 : ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

W_2 : ενέργεια κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| W ₁ [Ws] | | W ₂ [Ws] | | ΔW [Ws] | |
|---------------------|----------|---------------------|----------|----------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 7,24E-07 | 7,88E-08 | 2,37E-05 | 2,10E-06 | 2,30E-05 | 2,10E-06 |
| 1,77E-06 | 8,22E-08 | 1,14E-04 | 2,64E-06 | 1,13E-04 | 2,64E-06 |
| 4,21E-06 | 6,33E-08 | 1,29E-04 | 1,40E-06 | 1,25E-04 | 1,40E-06 |
| 1,39E-06 | 1,67E-08 | 3,97E-05 | 1,78E-07 | 3,83E-05 | 1,79E-07 |
| 3,53E-06 | 2,13E-07 | 1,56E-04 | 0,00E+00 | 1,53E-04 | 2,13E-07 |

Πίνακας 3.1-5: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας W για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

W₁: ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

W₂: ενέργεια κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΔW=W₂-W₁

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ: τυπική απόκλιση του μεγέθους

| t ₁ [μs] | | W ₁ [Ws] | | P ₁ [W] | |
|---------------------|------|---------------------|----------|--------------------|-------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 4,90 | 0,08 | 7,24E-07 | 7,88E-08 | 0,148 | 0,016 |
| 3,43 | 0,06 | 1,77E-06 | 8,22E-08 | 0,517 | 0,026 |
| 1,71 | 0,05 | 4,21E-06 | 6,33E-08 | 2,461 | 0,081 |
| 1,35 | 0,02 | 1,39E-06 | 1,67E-08 | 1,031 | 0,020 |
| 1,23 | 0,01 | 3,53E-06 | 2,13E-07 | 2,873 | 0,174 |

Πίνακας 3.1-6: Στατιστική ανάλυση της ισχύος P για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

t₁: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

W₁: ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

P₁: ισχύς κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ: τυπική απόκλιση του μεγέθους

| t_2 [μs] | | W_2 [Ws] | | P_2 [W] | |
|-------------------------|----------|------------|----------|-----------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 22,50 | 1,42 | 2,37E-05 | 2,10E-06 | 1,052 | 0,115 |
| 15,20 | 1,64 | 1,14E-04 | 2,64E-06 | 7,522 | 0,830 |
| 17,00 | 1,96 | 1,29E-04 | 1,40E-06 | 7,574 | 0,877 |
| 21,11 | 2,85 | 3,97E-05 | 1,78E-07 | 1,880 | 0,254 |
| 26,40 | 3,54 | 1,56E-04 | 0,00E+00 | 5,919 | 0,794 |

Πίνακας 3.1-7: Στατιστική ανάλυση της ισχύος P για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100 μs . Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

W_2 : ενέργεια κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

P_2 : ισχύς κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| P_1 [W] | | P_2 [W] | | ΔP [W] | |
|-----------|----------|-----------|----------|----------------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 0,148 | 0,016 | 1,052 | 0,115 | 0,905 | 0,116 |
| 0,517 | 0,026 | 7,522 | 0,830 | 7,005 | 0,830 |
| 2,461 | 0,081 | 7,574 | 0,877 | 5,114 | 0,881 |
| 1,031 | 0,020 | 1,880 | 0,254 | 0,849 | 0,255 |
| 2,873 | 0,174 | 5,919 | 0,794 | 3,045 | 0,813 |

Πίνακας 3.1-8: Στατιστική ανάλυση της ισχύος P για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100 μs . Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

P_1 : ισχύς κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

P_2 : ισχύς κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta P = P_2 - P_1$

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| Δu [V] | | ΔWe [eV] | |
|----------------|----------|------------------|----------|
| AV | σ | AV | σ |
| 8,76 | 0,68 | 4,38 | 0,34 |
| 20,43 | 0,39 | 10,21 | 0,20 |
| 20,29 | 0,20 | 10,14 | 0,10 |
| 5,12 | 0,02 | 2,56 | 0,01 |
| 10,62 | 0,08 | 5,31 | 0,04 |

Πίνακας 3.1-9: Στατιστική ανάλυση της ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων ΔWe για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

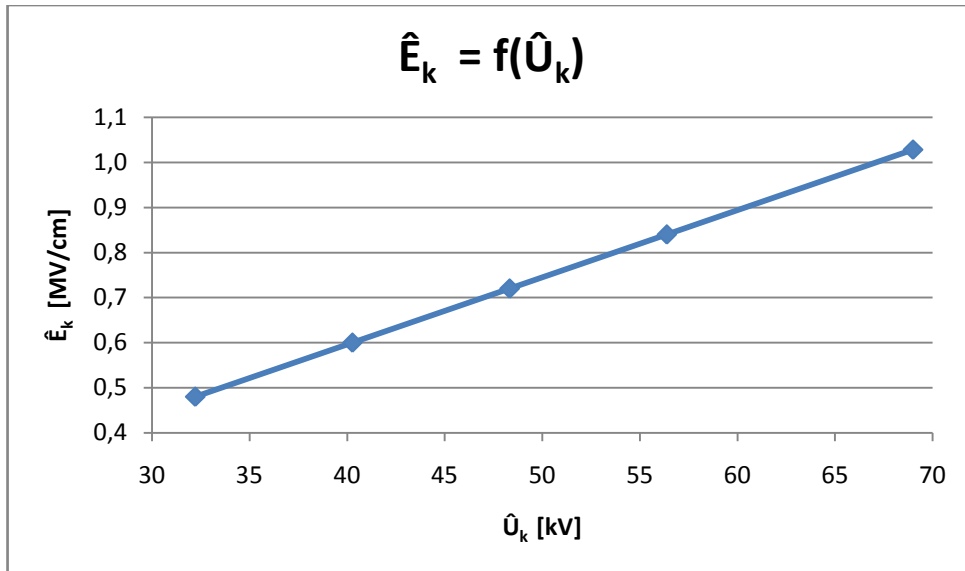
u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

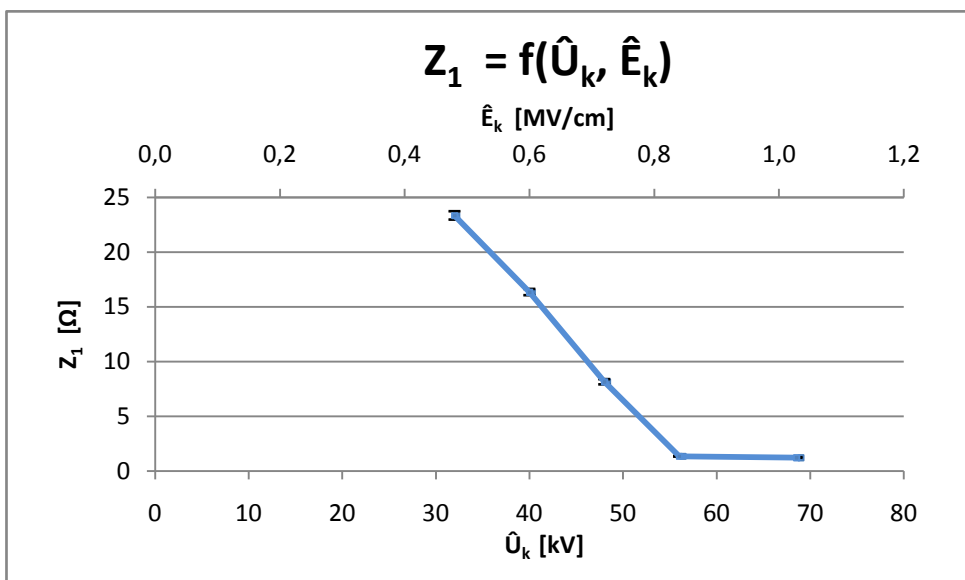
ΔWe : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

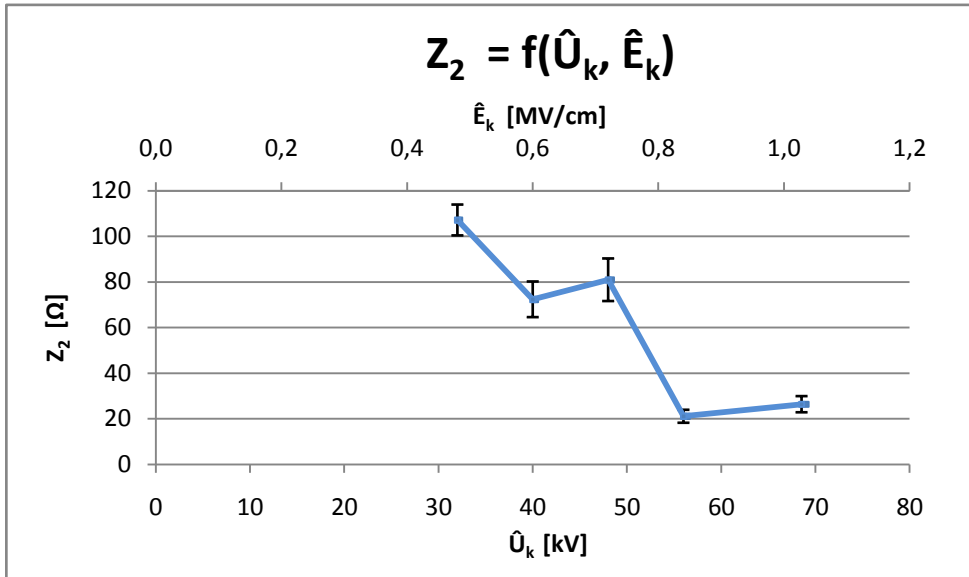
σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους



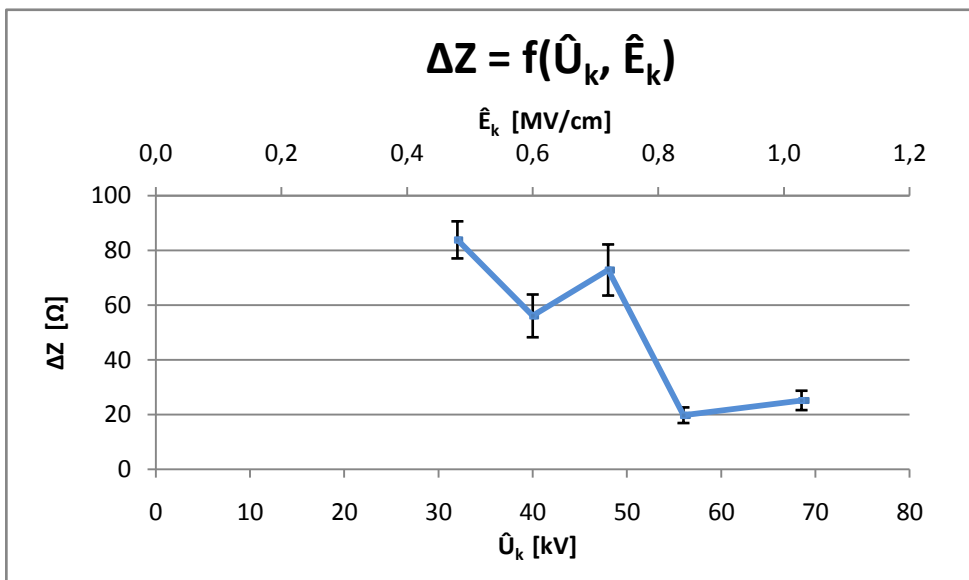
Σχήμα 3.1-1: Χαρακτηριστική $\hat{E}_k = f(\hat{U}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



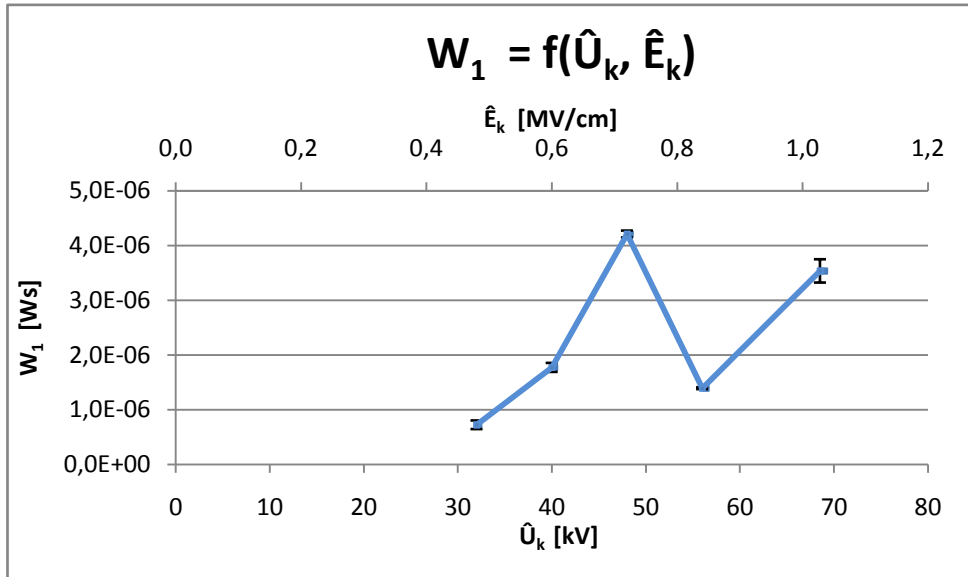
Σχήμα 3.1-2: Χαρακτηριστική $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).
 Z_1 : σύνθετη αντίσταση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



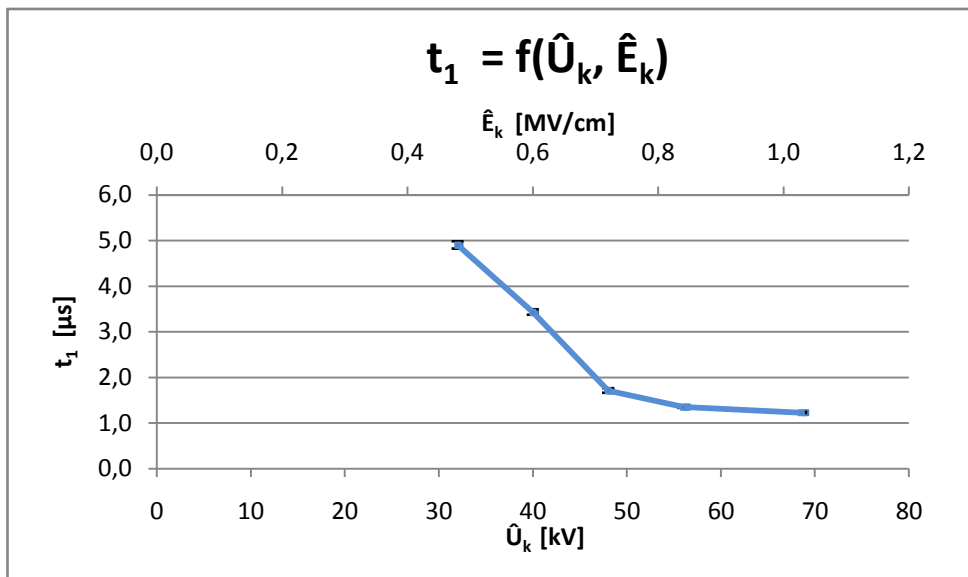
Σχήμα 3.1-3: Χαρακτηριστική $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 Z_2 : σύνθετη αντίσταση κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



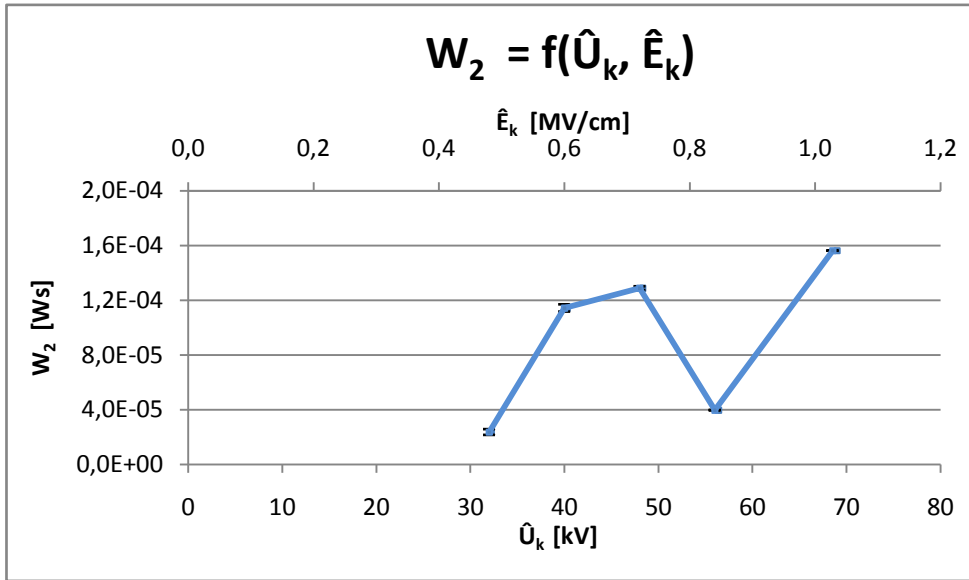
Σχήμα 3.1-4: Χαρακτηριστική $\Delta Z = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 $\Delta Z = Z_2 - Z_1$
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



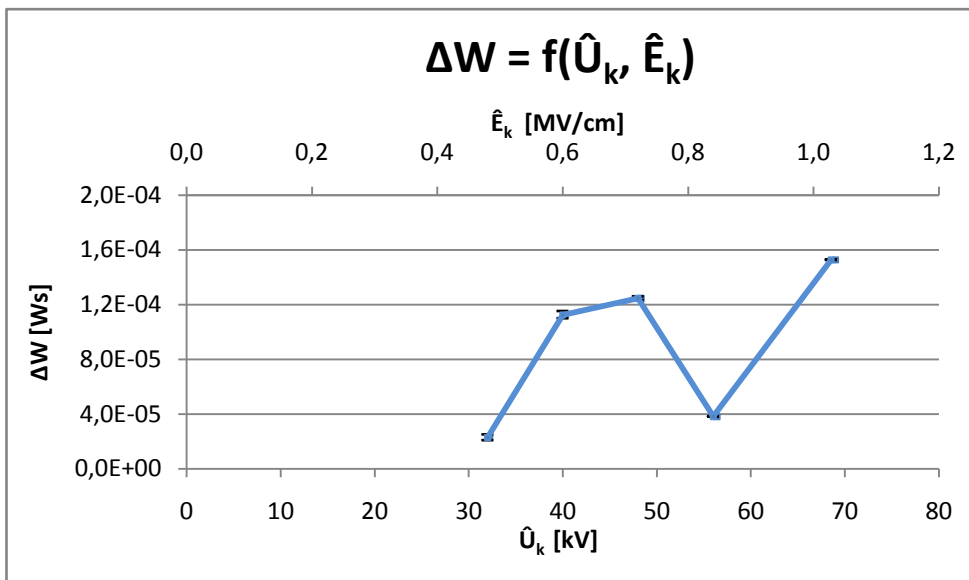
Σχήμα 3.1-5: Χαρακτηριστική $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 W_1 : ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



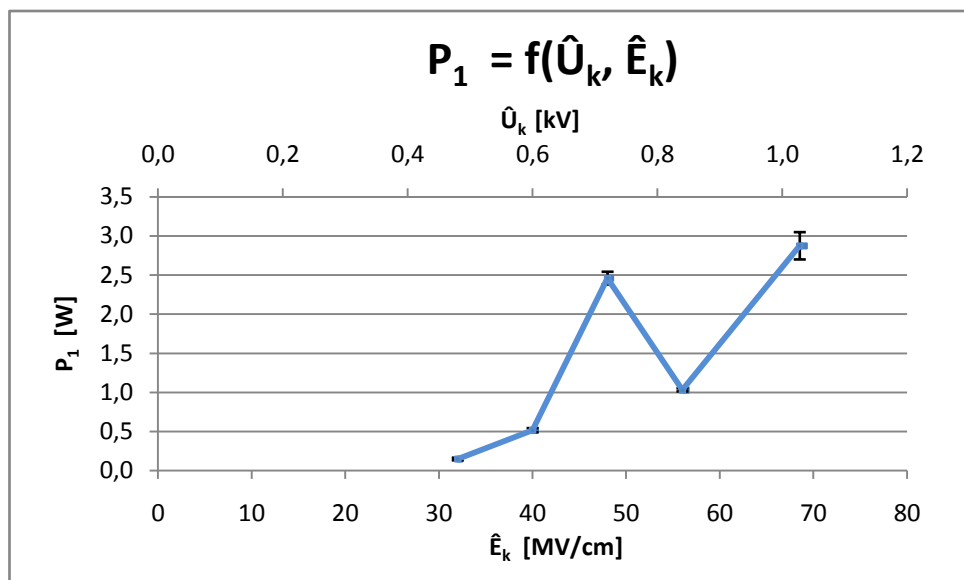
Σχήμα 3.1-6: Χαρακτηριστική $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



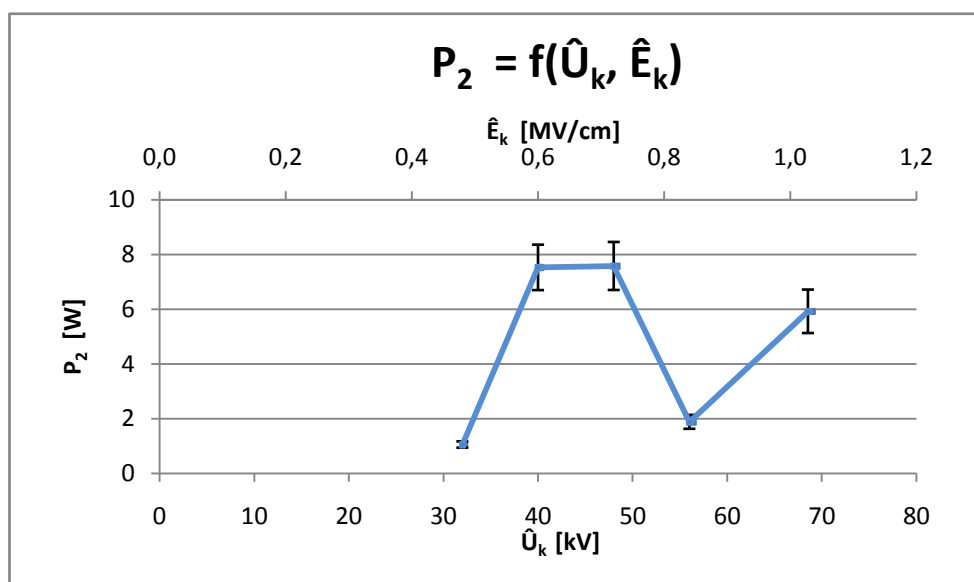
Σχήμα 3.1-7: Χαρακτηριστική $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 W_2 : ενέργεια κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



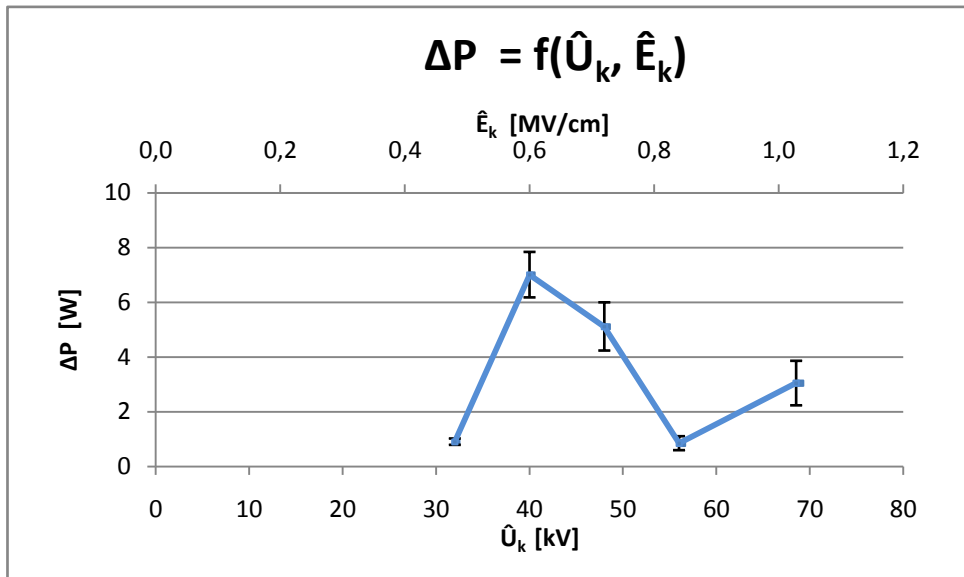
Σχήμα 3.1-8: Χαρακτηριστική $\Delta W = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 $\Delta W = W_2 - W_1$
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.1-9: Χαρακτηριστική $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).
 P_1 : ισχύς κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.1-10: Χαρακτηριστική $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).
 P_2 : ισχύς κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

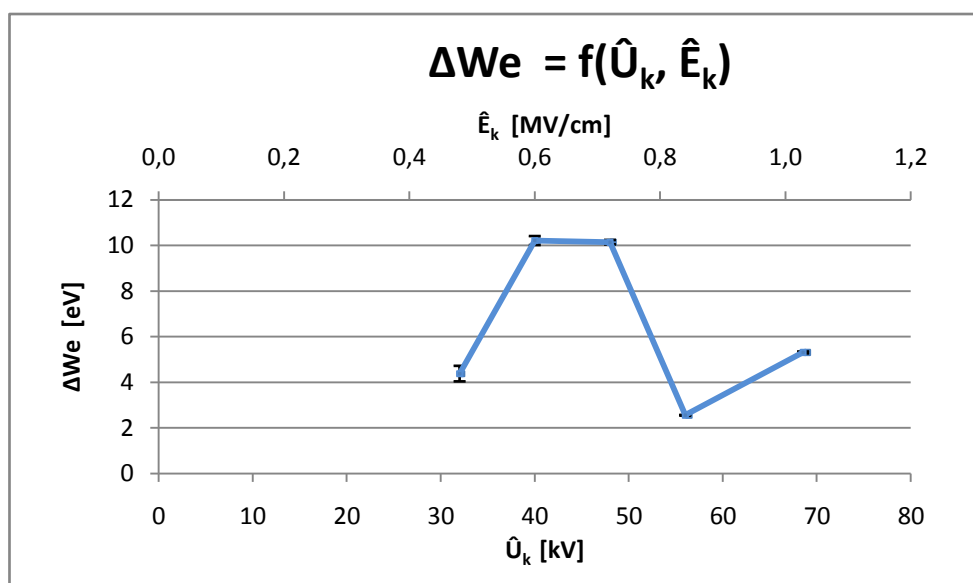


Σχήμα 3.1-11: Χαρακτηριστική $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

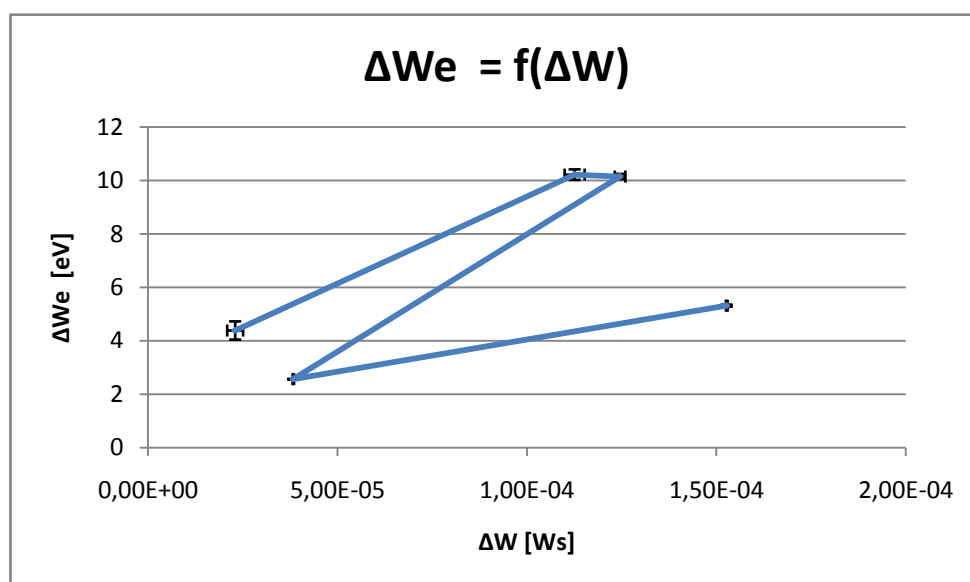
$$\Delta P = P_2 - P_1$$

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

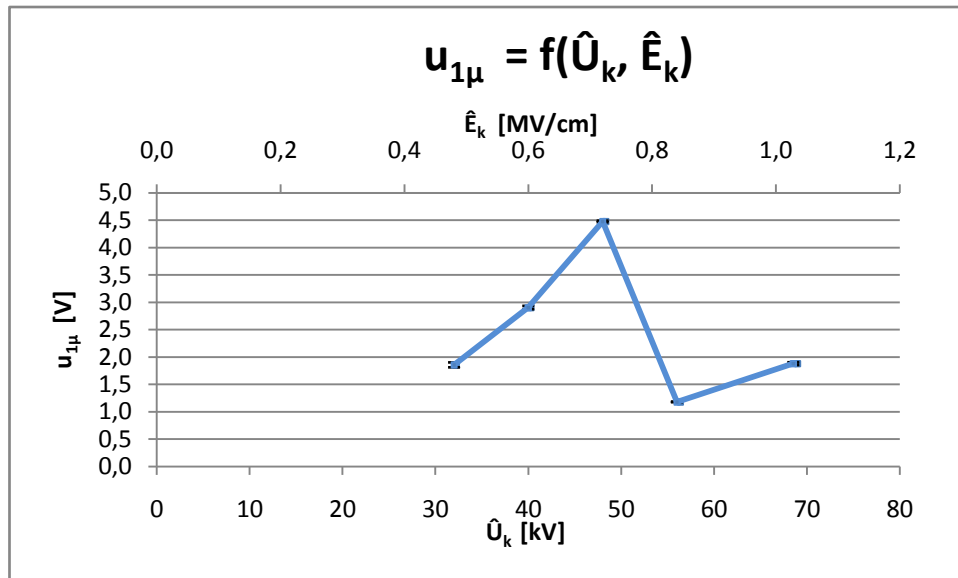
\hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



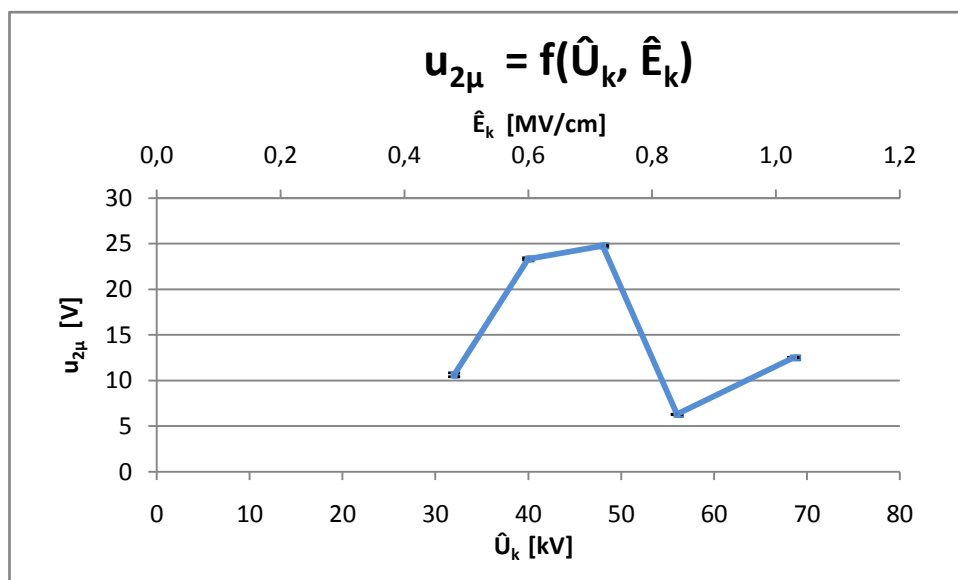
Σχήμα 3.1-12: Χαρακτηριστική $\Delta We = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).
 ΔWe : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



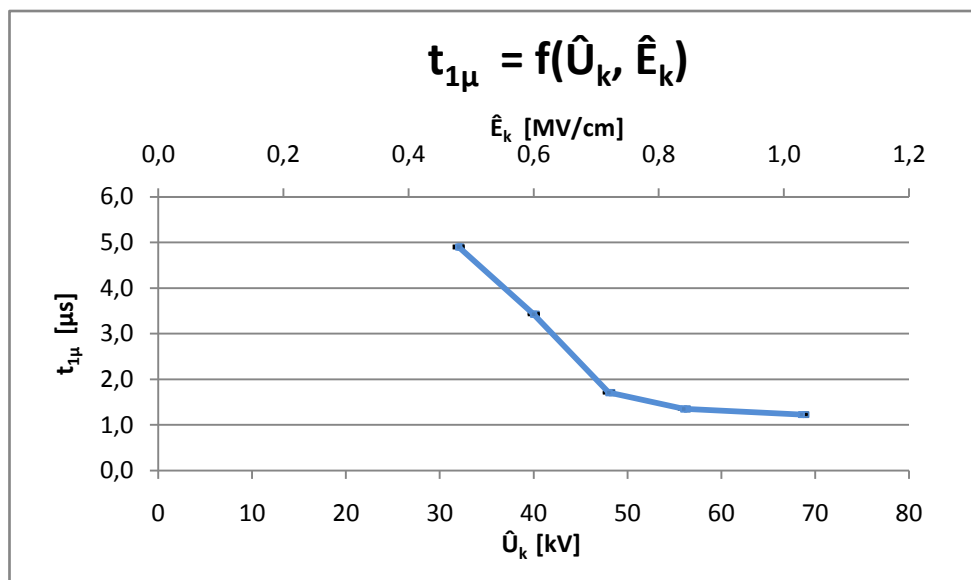
Σχήμα 3.1-13: Χαρακτηριστική $\Delta We = f(\Delta W)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).
 ΔWe : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων
 $\Delta W = W_2 - W_1$



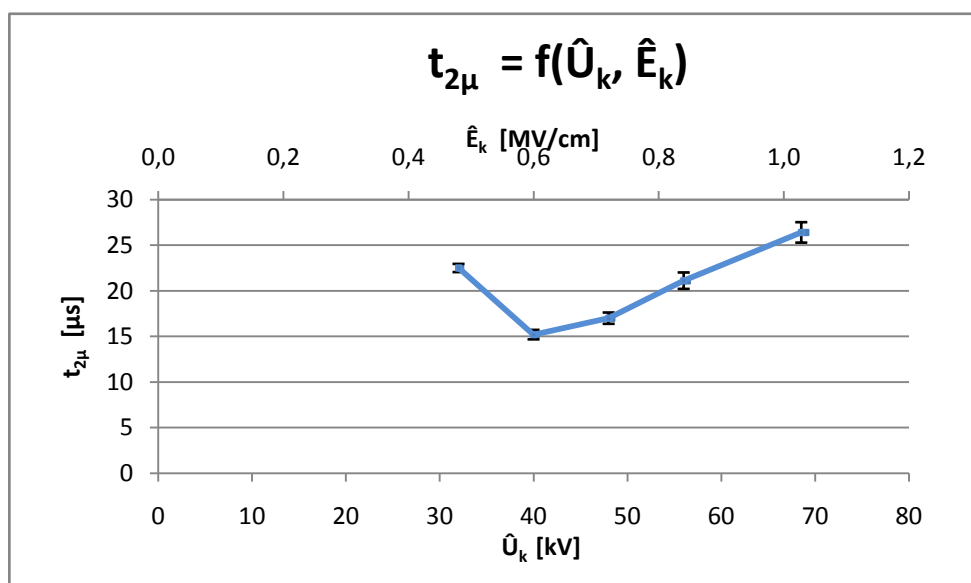
Σχήμα 3.1-14: Χαρακτηριστική $u_{1\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 $u_{1\mu}$: στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.1-15: Χαρακτηριστική $u_{2\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 $u_{2\mu}$: στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.1-16: Χαρακτηριστική $t_{1\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100 μ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1$ mm).
 $t_{1\mu}$: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.1-17: Χαρακτηριστική $t_{2\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100 μ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1$ mm).
 $t_{2\mu}$: χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

3.2 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm)

| \hat{U}_k [kV] | \hat{E}_k [MV/cm] |
|------------------|---------------------|
| 32,22 | 0,480 |
| 40,27 | 0,600 |
| 48,33 | 0,720 |
| 56,38 | 0,840 |
| 64,44 | 0,960 |
| 72,50 | 1,080 |

Πίνακας 3.2-1: Ένταση \hat{E}_k του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης \hat{U}_k για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

| C_m [nF] | q_1 [μ C] | | q_2 [μ C] | | u_1 [V] | | | u_2 [V] | | | Δu [V] | |
|---------------|------------------|----------|------------------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|----------|
| | AV | σ | AV | σ | AV | σ | δ | AV | σ | δ | AV | σ |
| 210 | 0,19 | 0,05 | 1,80 | 0,07 | 0,90 | 0,24 | 0,08 | 8,57 | 0,33 | 0,11 | 7,67 | 0,41 |
| 210 | 1,30 | 0,06 | 5,81 | 0,50 | 6,19 | 0,29 | 0,09 | 27,67 | 2,38 | 0,75 | 21,48 | 2,40 |
| 210 | 1,68 | 0,13 | 10,66 | 0,27 | 8,00 | 0,62 | 0,20 | 50,76 | 1,29 | 0,41 | 42,76 | 1,43 |
| 1000 | 2,12 | 0,12 | 12,75 | 0,64 | 2,12 | 0,12 | 0,04 | 12,75 | 0,64 | 0,20 | 10,63 | 0,65 |
| 1000 | 3,13 | 0,40 | 19,87 | 1,21 | 3,13 | 0,40 | 0,13 | 19,87 | 1,21 | 0,38 | 16,74 | 1,27 |
| 1000 | 3,75 | 0,00 | 42,08 | 3,60 | 3,75 | 0,00 | 0,00 | 42,08 | 3,60 | 1,14 | 38,33 | 3,60 |

Πίνακας 3.2-2: Στατιστική ανάλυση της στιγμιαίας τιμής της u_m για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u = u_2 - u_1$

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

δ : διακύμανση της μέσης τιμής σε περίπτωση επανάληψη των μετρήσεων

| C_m [nF] | t_1 [μs] | | | t_2 [μs] | | | Z_1 [Ω] | | Z_2 [Ω] | | ΔZ [Ω] | |
|---------------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------------|----------|
| | AV | σ | δ | AV | σ | δ | AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 210 | 4,39 | 0,07 | 0,02 | 14,22 | 0,52 | 0,16 | 20,90 | 0,33 | 67,71 | 2,48 | 46,81 | 2,50 |
| 210 | 3,04 | 0,83 | 0,26 | 34,50 | 0,73 | 0,23 | 14,48 | 3,95 | 164,29 | 3,48 | 149,81 | 5,26 |
| 210 | 2,61 | 0,02 | 0,01 | 22,50 | 1,77 | 0,56 | 12,43 | 0,10 | 107,14 | 8,43 | 94,71 | 8,43 |
| 1000 | 1,88 | 0,05 | 0,02 | 27,00 | 1,74 | 0,55 | 1,88 | 0,05 | 27,00 | 1,74 | 25,12 | 1,74 |
| 1000 | 1,60 | 0,01 | 0,00 | 34,88 | 1,40 | 0,44 | 1,60 | 0,01 | 34,88 | 1,40 | 33,28 | 1,40 |
| 1000 | 1,24 | 1,02 | 0,32 | 42,50 | 0,00 | 0,00 | 1,24 | 1,02 | 42,50 | 0,00 | 41,26 | 1,02 |

Πίνακας 3.2-3: Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης Z για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).

C_m : πυκνωτής μέτρησης

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Z_1 : σύνθετη αντίσταση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Z_2 : σύνθετη αντίσταση κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

δ : διακύμανση της μέσης τιμής σε περίπτωση επανάληψη των μετρήσεων

| C_m [nF] | u_1 [V] | | u_2 [V] | | W_1 [Ws] | | W_2 [Ws] | |
|---------------|-----------|----------|-----------|----------|------------|----------|------------|----------|
| | AV | σ | AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 210 | 0,90 | 0,24 | 8,57 | 0,33 | 0,11 | 6,40E-08 | 1,54E-05 | 8,49E-07 |
| 210 | 6,19 | 0,29 | 27,67 | 2,38 | 0,75 | 5,25E-07 | 1,61E-04 | 1,96E-05 |
| 210 | 8,00 | 0,62 | 50,76 | 1,29 | 0,41 | 1,47E-06 | 5,41E-04 | 1,94E-05 |
| 1000 | 2,12 | 0,12 | 12,75 | 0,64 | 0,20 | 3,60E-07 | 1,63E-04 | 1,15E-05 |
| 1000 | 3,13 | 0,40 | 19,87 | 1,21 | 0,38 | 1,77E-06 | 3,95E-04 | 3,40E-05 |
| 1000 | 3,75 | 0,00 | 42,08 | 3,60 | 1,14 | 0,00E+00 | 1,77E-03 | 2,14E-04 |

Πίνακας 3.2-4: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας W για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).

C_m : πυκνωτής μέτρησης

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

W_1 : ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

W_2 : ενέργεια κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| W_1 [Ws] | | W_2 [Ws] | | ΔW [Ws] | |
|------------|----------|------------|----------|-----------------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 1,72E-07 | 6,40E-08 | 1,54E-05 | 8,49E-07 | 1,53E-05 | 8,51E-07 |
| 8,05E-06 | 5,25E-07 | 1,61E-04 | 1,96E-05 | 1,53E-04 | 1,96E-05 |
| 1,34E-05 | 1,47E-06 | 5,41E-04 | 1,94E-05 | 5,28E-04 | 1,94E-05 |
| 4,49E-06 | 3,60E-07 | 1,63E-04 | 1,15E-05 | 1,58E-04 | 1,15E-05 |
| 9,80E-06 | 1,77E-06 | 3,95E-04 | 3,40E-05 | 3,85E-04 | 3,40E-05 |
| 1,41E-05 | 0,00E+00 | 1,77E-03 | 2,14E-04 | 1,76E-03 | 2,14E-04 |

Πίνακας 3.2-5: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας W για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).

W_1 : ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

W_2 : ενέργεια κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta W=W_2-W_1$

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| t_1 [μs] | | W_1 [Ws] | | P_1 [W] | |
|-------------------|----------|------------|----------|-----------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 4,39 | 0,07 | 1,72E-07 | 6,40E-08 | 0,039 | 0,015 |
| 3,04 | 0,83 | 8,05E-06 | 5,25E-07 | 2,647 | 0,743 |
| 2,61 | 0,02 | 1,34E-05 | 1,47E-06 | 5,149 | 0,565 |
| 1,88 | 0,05 | 4,49E-06 | 3,60E-07 | 2,391 | 0,202 |
| 1,60 | 0,01 | 9,80E-06 | 1,77E-06 | 6,123 | 1,107 |
| 1,24 | 1,02 | 1,41E-05 | 0,00E+00 | 11,341 | 9,329 |

Πίνακας 3.2-6: Στατιστική ανάλυση της ισχύος P για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

W_1 : ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

P_1 : ισχύς κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| t_2 [μs] | | W_2 [Ws] | | P_2 [W] | |
|-------------------------|----------|------------|----------|-----------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 14,22 | 0,52 | 1,54E-05 | 8,49E-07 | 1,085 | 0,072 |
| 34,50 | 0,73 | 1,61E-04 | 1,96E-05 | 4,659 | 0,576 |
| 22,50 | 1,77 | 5,41E-04 | 1,94E-05 | 24,050 | 2,079 |
| 27,00 | 1,74 | 1,63E-04 | 1,15E-05 | 6,021 | 0,577 |
| 34,88 | 1,40 | 3,95E-04 | 3,40E-05 | 11,319 | 1,075 |
| 42,50 | 0,00 | 1,77E-03 | 2,14E-04 | 41,664 | 5,041 |

Πίνακας 3.2-7: Στατιστική ανάλυση της ισχύος P για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100 μs . Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

W_2 : ενέργεια κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

P_2 : ισχύς κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| P_1 [W] | | P_2 [W] | | ΔP [W] | |
|-----------|----------|-----------|----------|----------------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 0,039 | 0,015 | 1,085 | 0,072 | 1,046 | 0,073 |
| 2,647 | 0,743 | 4,659 | 0,576 | 2,012 | 0,940 |
| 5,149 | 0,565 | 24,050 | 2,079 | 18,900 | 2,154 |
| 2,391 | 0,202 | 6,021 | 0,577 | 3,630 | 0,611 |
| 6,123 | 1,107 | 11,319 | 1,075 | 5,196 | 1,544 |
| 11,341 | 9,329 | 41,664 | 5,041 | 30,323 | 10,603 |

Πίνακας 3.2-8: Στατιστική ανάλυση της ισχύος P για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100 μs . Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

P_1 : ισχύς κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

P_2 : ισχύς κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta P = P_2 - P_1$

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| Δu [V] | | ΔWe [eV] | |
|----------------|----------|------------------|----------|
| AV | σ | AV | σ |
| 7,67 | 0,41 | 3,83 | 0,20 |
| 21,48 | 2,40 | 10,74 | 1,20 |
| 42,76 | 1,43 | 21,38 | 0,71 |
| 10,63 | 0,65 | 5,32 | 0,33 |
| 16,74 | 1,27 | 8,37 | 0,64 |
| 38,33 | 3,60 | 19,17 | 1,80 |

Πίνακας 3.2-9: Στατιστική ανάλυση της ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων ΔWe για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

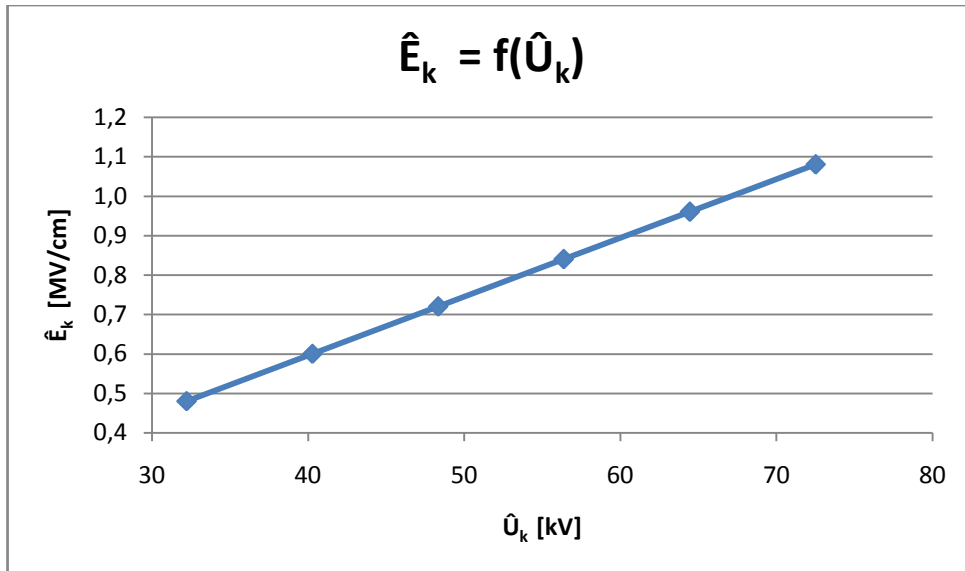
u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

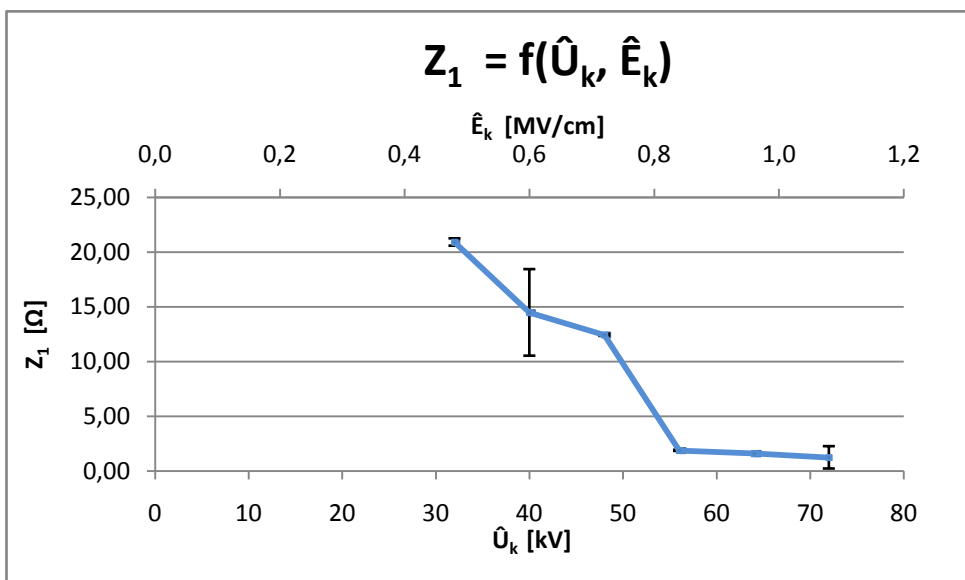
ΔWe : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

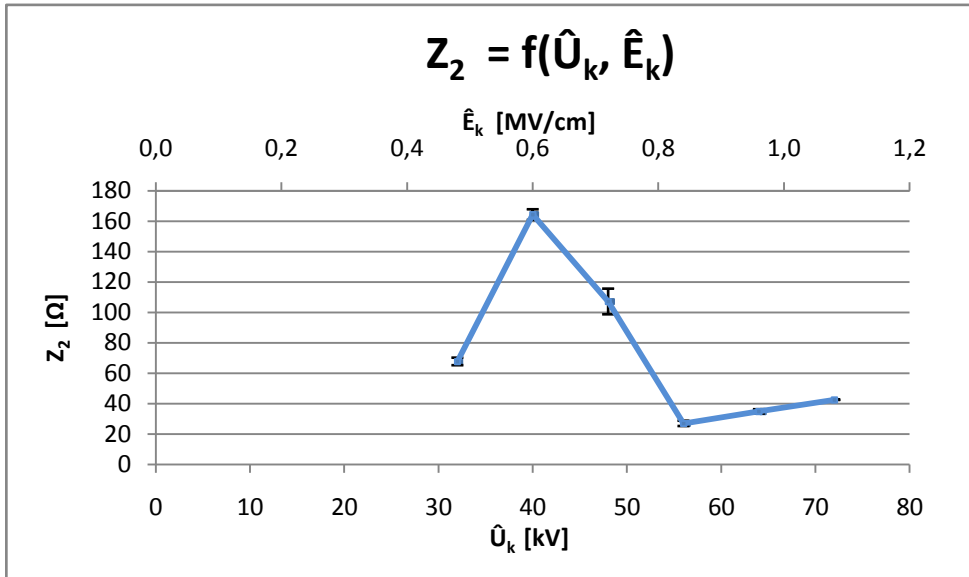
σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους



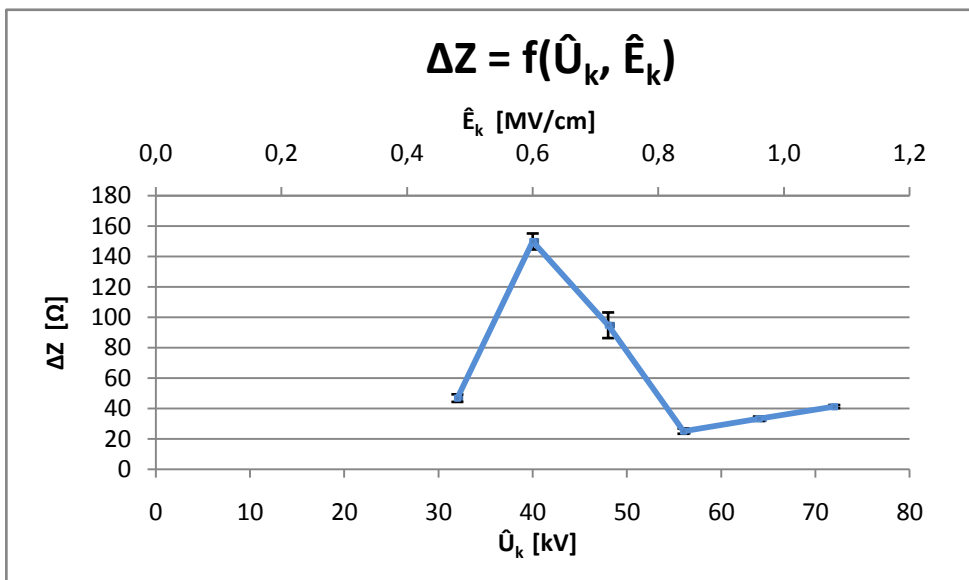
Σχήμα 3.2-1: Χαρακτηριστική $\hat{E}_k = f(\hat{U}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



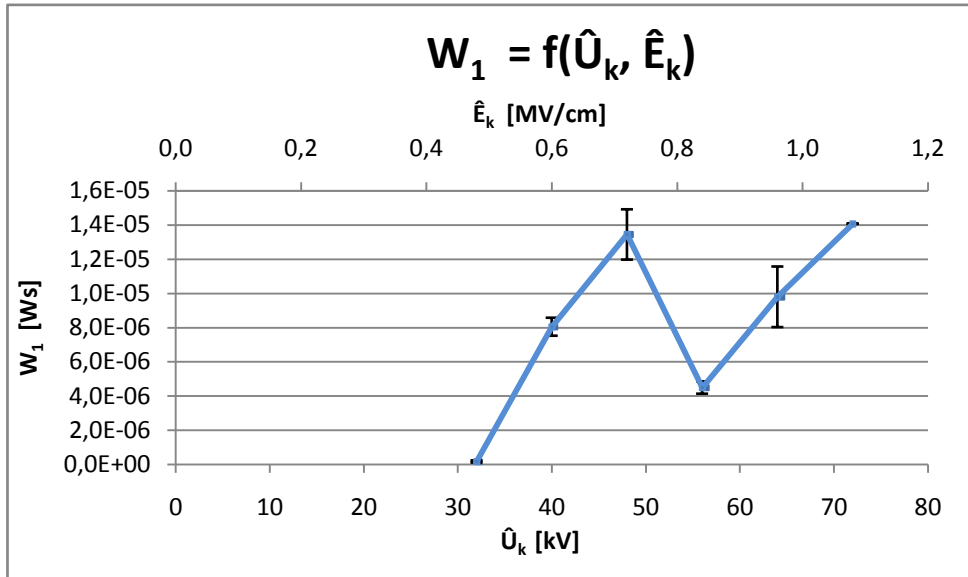
Σχήμα 3.2-2: Χαρακτηριστική $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 Z_1 : σύνθετη αντίσταση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



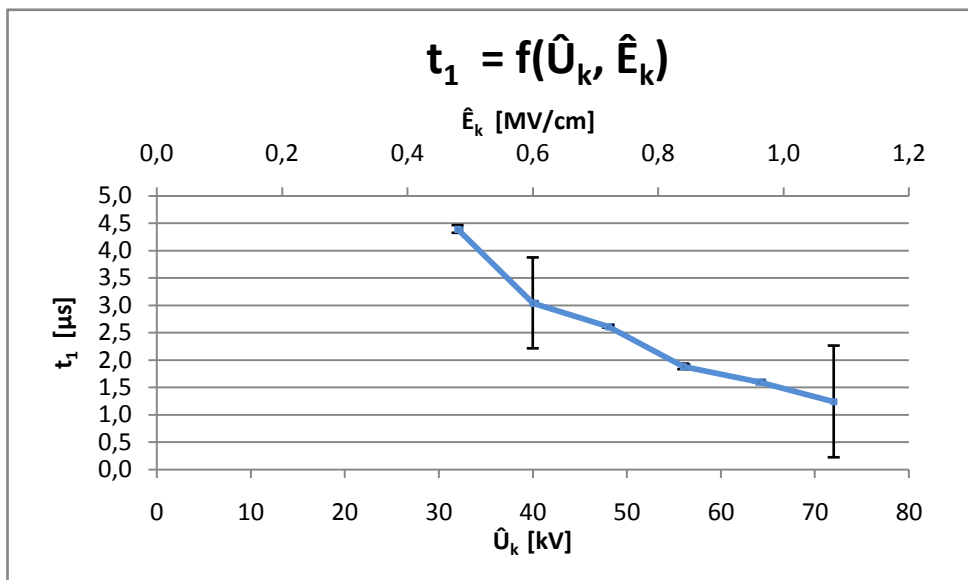
Σχήμα 3.2-3: Χαρακτηριστική $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 Z_2 : σύνθετη αντίσταση κατά το πέρασμα των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



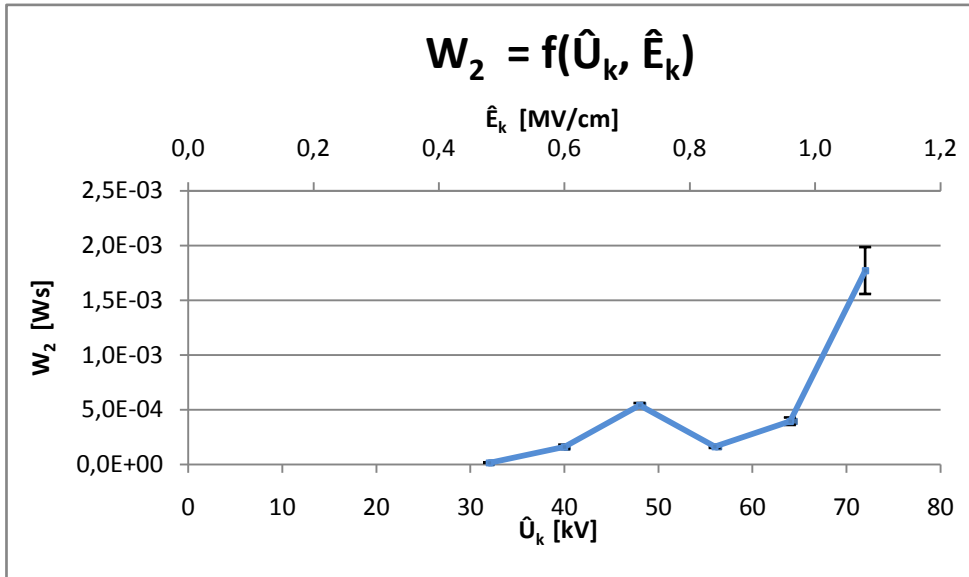
Σχήμα 3.2-4: Χαρακτηριστική $\Delta Z = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 $\Delta Z = Z_2 - Z_1$
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



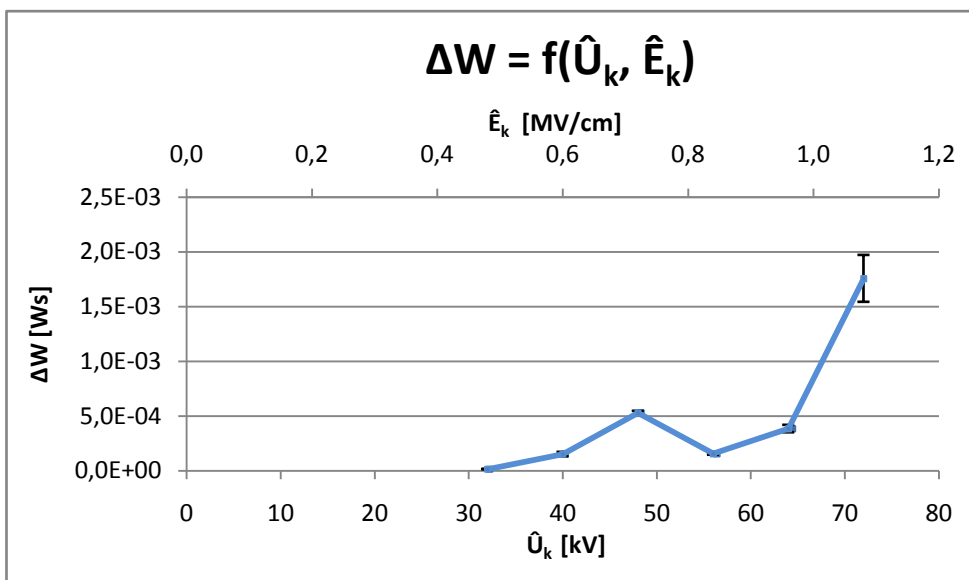
Σχήμα 3.2-5: Χαρακτηριστική $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 W_1 : ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



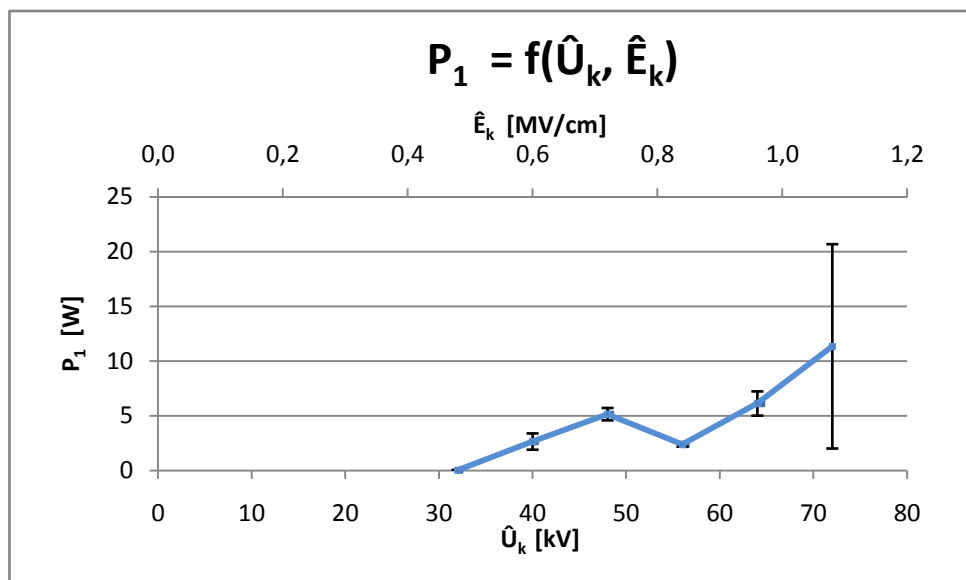
Σχήμα 3.2-6: Χαρακτηριστική $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



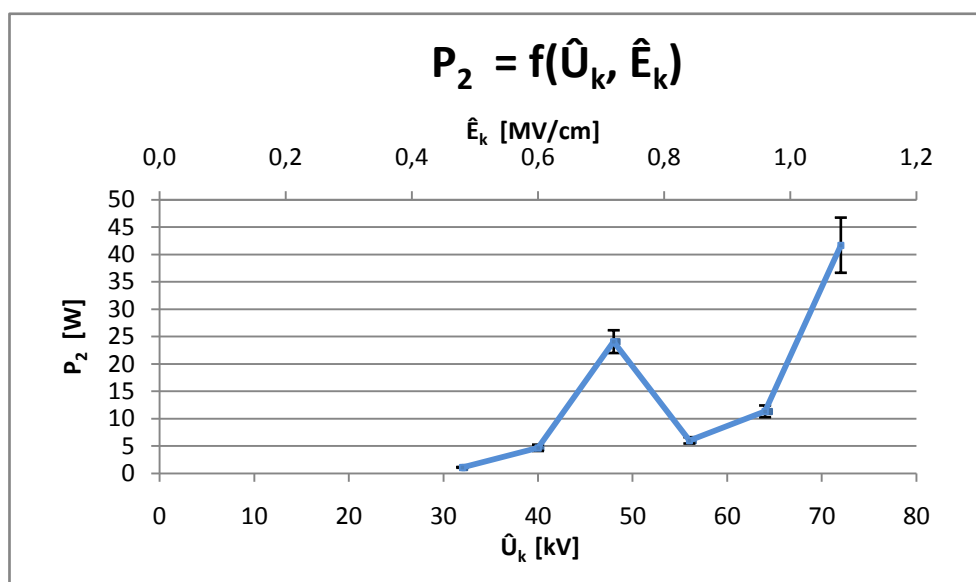
Σχήμα 3.2-7: Χαρακτηριστική $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).
 W_2 : ενέργεια κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



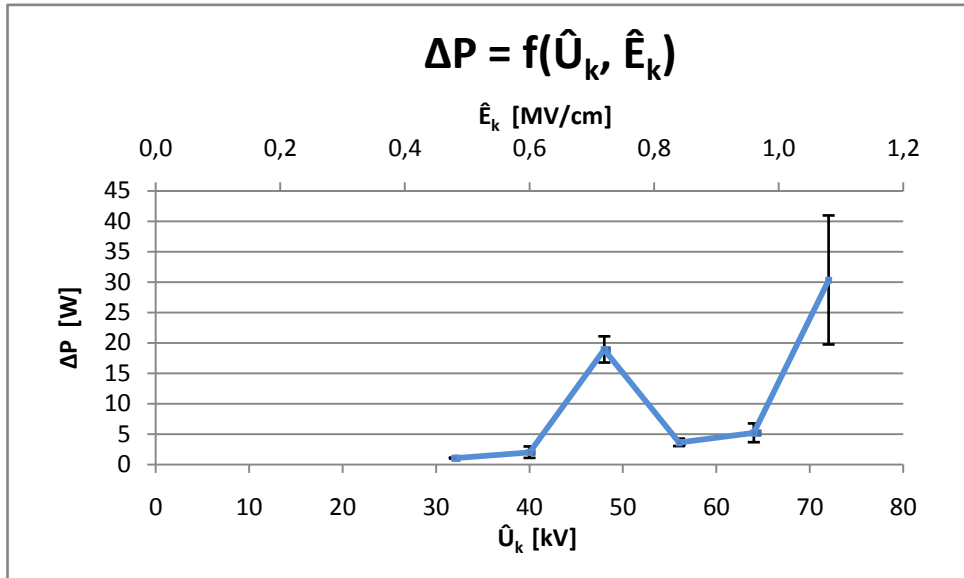
Σχήμα 3.2-8: Χαρακτηριστική $\Delta W = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).
 $\Delta W = W_2 - W_1$
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.2-9: Χαρακτηριστική $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).
 P_1 : ισχύς κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.2-10: Χαρακτηριστική $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).
 P_2 : ισχύς κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

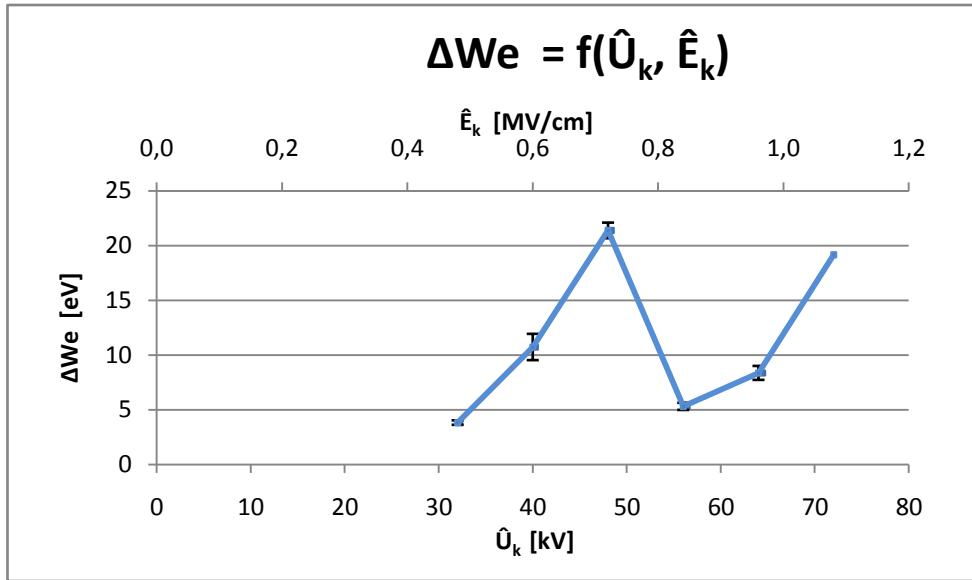


Σχήμα 3.2-11: Χαρακτηριστική $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1mm$).

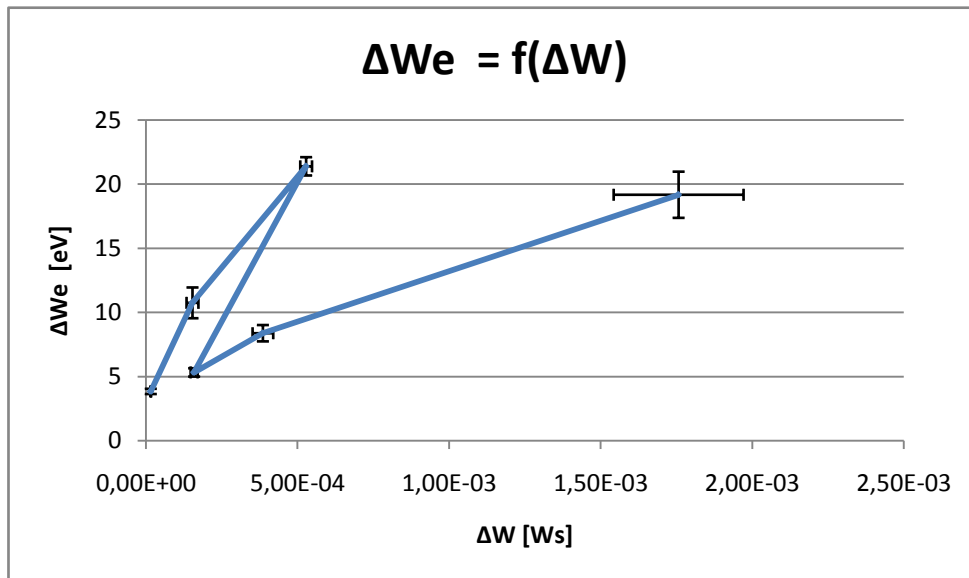
$$\Delta P = P_2 - P_1$$

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

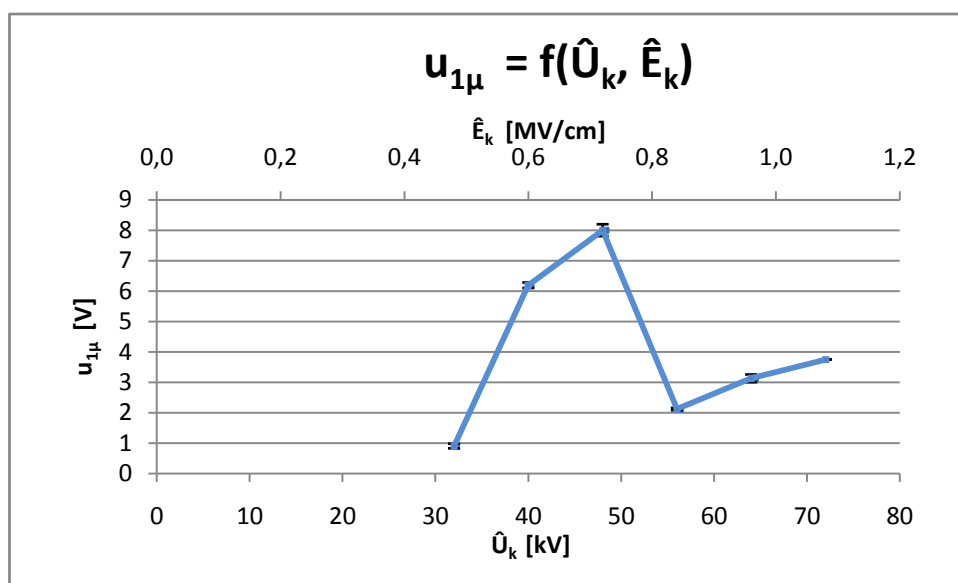
\hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



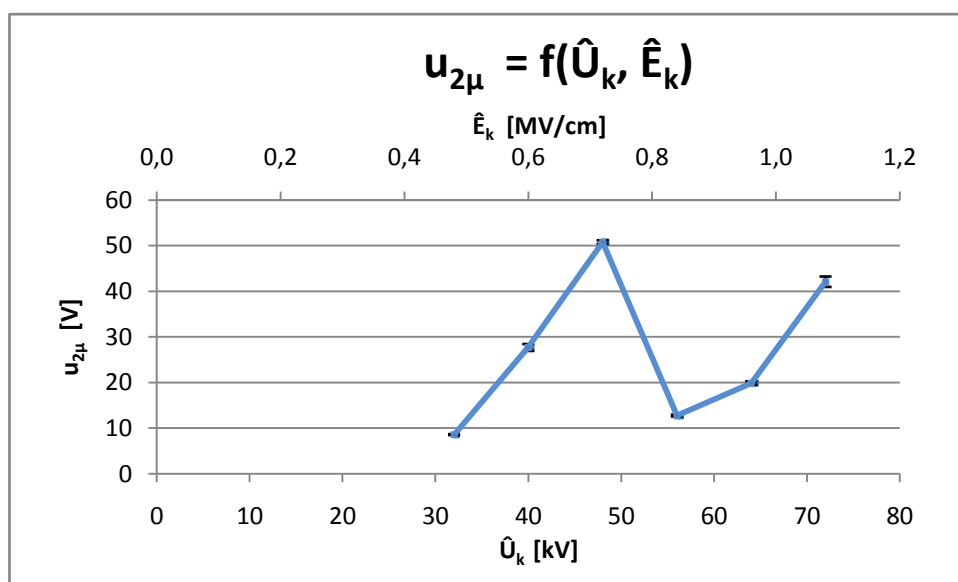
Σχήμα 3.2-12: Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



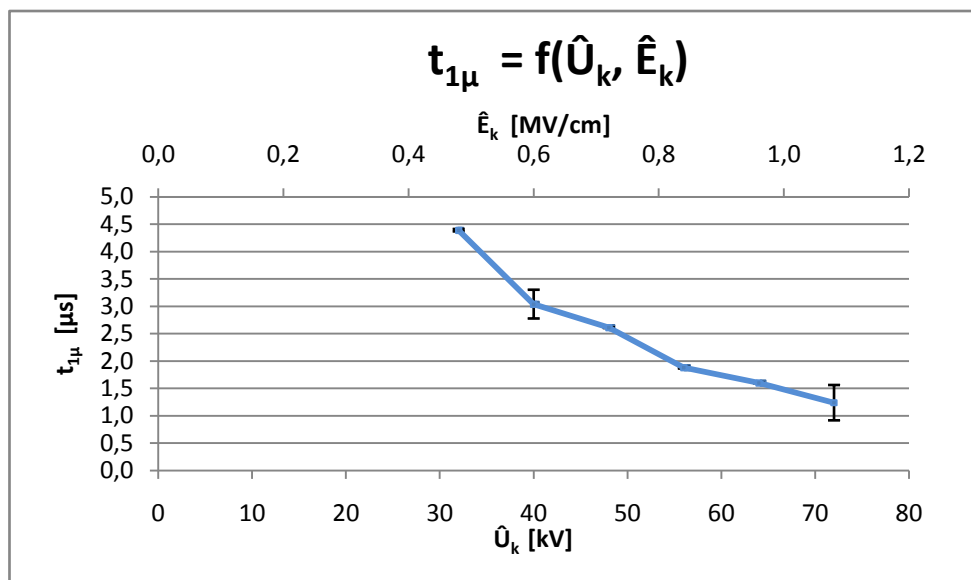
Σχήμα 3.2-13: Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(\Delta W)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων
 $\Delta W = W_2 - W_1$



Σχήμα 3.2-14: Χαρακτηριστική $u_{1\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 $u_{1\mu}$: στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.2-15: Χαρακτηριστική $u_{2\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).
 $u_{2\mu}$: στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

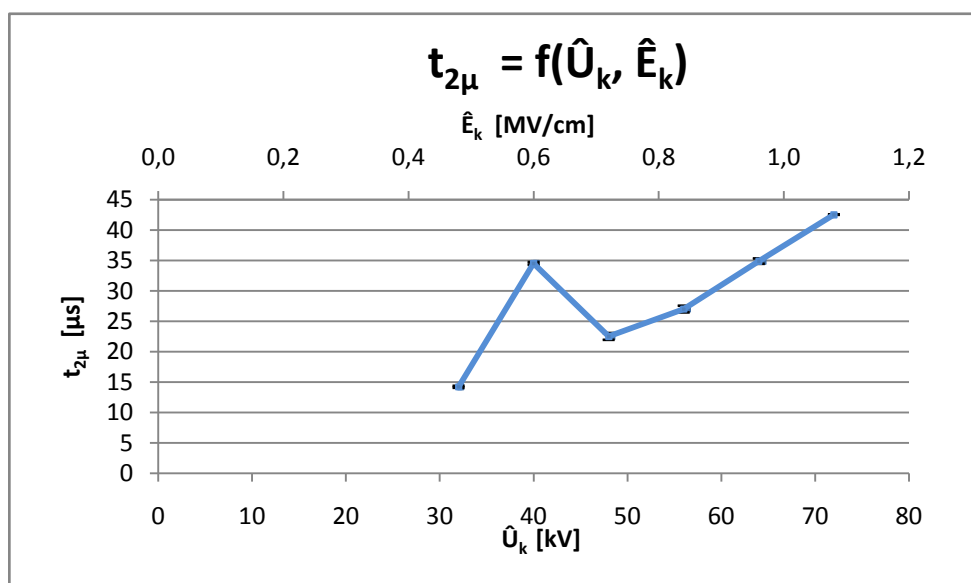


Σχήμα 3.2-16: Χαρακτηριστική $t_{1\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu$ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

$t_{1\mu}$: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

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

\hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.2-17: Χαρακτηριστική $t_{2\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu$ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=1\text{mm}$).

$t_{2\mu}$: χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

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

\hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

3.3 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm)

| \hat{U}_k [kV] | \hat{E}_k [MV/cm] |
|------------------|---------------------|
| 40,27 | 0,410 |
| 44,30 | 0,451 |
| 48,33 | 0,492 |
| 56,38 | 0,573 |
| 64,44 | 0,655 |
| 72,50 | 0,737 |

Πίνακας 3.3-1: Ένταση \hat{E}_k του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης \hat{U}_k εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

| C_m [nF] | q_1 [μC] | | q_2 [μC] | | u_1 [V] | | | u_2 [V] | | | Δu [V] | |
|---------------|------------|----------|------------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|----------|
| | AV | σ | AV | σ | AV | σ | δ | AV | σ | δ | AV | σ |
| 210 | 0,12 | 0,00 | 0,21 | 0,01 | 0,57 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,05 | 0,02 | 0,43 | 0,05 |
| 210 | 0,13 | 0,00 | 0,30 | 0,04 | 0,62 | 0,00 | 0,00 | 1,43 | 0,19 | 0,06 | 0,81 | 0,19 |
| 210 | 0,13 | 0,00 | 0,41 | 0,03 | 0,62 | 0,00 | 0,00 | 1,95 | 0,14 | 0,05 | 1,33 | 0,14 |
| 210 | 0,18 | 0,02 | 0,50 | 0,09 | 0,86 | 0,10 | 0,03 | 2,38 | 0,43 | 0,14 | 1,52 | 0,44 |
| 1000 | 0,23 | 0,02 | 0,57 | 0,07 | 0,23 | 0,02 | 0,01 | 0,57 | 0,07 | 0,02 | 0,34 | 0,07 |
| 1000 | 0,29 | 0,01 | 0,67 | 0,02 | 0,29 | 0,01 | 0,00 | 0,67 | 0,02 | 0,01 | 0,38 | 0,02 |

Πίνακας 3.3-2: Στατιστική ανάλυση της στιγμιαίας τιμής της u_m εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u = u_2 - u_1$

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

δ : διακύμανση της μέσης τιμής σε περίπτωση επανάληψη των μετρήσεων

| C_m [nF] | t_1 [μs] | | | t_2 [μs] | | | Z_1 [Ω] | | Z_2 [Ω] | | ΔZ [Ω] | |
|---------------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------------|----------|
| | AV | σ | δ | AV | σ | δ | AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 210 | 4,23 | 0,05 | 0,02 | 7,29 | 0,44 | 0,14 | 20,14 | 0,24 | 34,71 | 2,10 | 14,57 | 2,11 |
| 210 | 3,11 | 0,06 | 0,02 | 8,17 | 1,50 | 0,47 | 14,81 | 0,29 | 38,90 | 7,14 | 24,10 | 7,15 |
| 210 | 2,50 | 0,02 | 0,01 | 8,97 | 1,44 | 0,46 | 11,90 | 0,10 | 42,71 | 6,86 | 30,81 | 6,86 |
| 210 | 2,20 | 0,06 | 0,02 | 13,05 | 1,16 | 0,37 | 10,48 | 0,29 | 62,14 | 5,52 | 51,67 | 5,53 |
| 1000 | 1,63 | 0,03 | 0,01 | 13,60 | 0,18 | 0,06 | 1,63 | 0,03 | 13,60 | 0,18 | 11,97 | 0,18 |
| 1000 | 1,25 | 0,00 | 0,00 | 13,10 | 0,63 | 0,20 | 1,25 | 0,00 | 13,10 | 0,63 | 11,85 | 0,63 |

Πίνακας 3.3-3: Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης Z εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).

C_m : πυκνωτής μέτρησης

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Z_1 : σύνθετη αντίσταση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Z_2 : σύνθετη αντίσταση κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

δ : διακύμανση της μέσης τιμής σε περίπτωση επανάληψη των μετρήσεων

| C_m [nF] | u_1 [V] | | u_2 [V] | | W_1 [Ws] | | W_2 [Ws] | |
|---------------|-----------|----------|-----------|----------|------------|----------|------------|----------|
| | AV | σ | AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 210 | 0,57 | 0,00 | 1,00 | 0,05 | 6,86E-08 | 0,00E+00 | 2,10E-07 | 1,41E-08 |
| 210 | 0,62 | 0,00 | 1,43 | 0,19 | 8,05E-08 | 0,00E+00 | 4,29E-07 | 8,08E-08 |
| 210 | 0,62 | 0,00 | 1,95 | 0,14 | 8,05E-08 | 0,00E+00 | 8,00E-07 | 8,28E-08 |
| 210 | 0,86 | 0,10 | 2,38 | 0,43 | 1,54E-07 | 2,42E-08 | 1,19E-06 | 3,03E-07 |
| 1000 | 0,23 | 0,02 | 0,57 | 0,07 | 5,29E-08 | 6,51E-09 | 3,25E-07 | 5,64E-08 |
| 1000 | 0,29 | 0,01 | 0,67 | 0,02 | 8,41E-08 | 4,10E-09 | 4,49E-07 | 1,90E-08 |

Πίνακας 3.3-4: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας W εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).

C_m : πυκνωτής μέτρησης

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

W_1 : ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

W_2 : ενέργεια κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| W_1 [Ws] | | W_2 [Ws] | | ΔW [Ws] | |
|------------|----------|------------|----------|-----------------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 6,86E-08 | 0,00E+00 | 2,10E-07 | 1,41E-08 | 1,41E-07 | 1,41E-08 |
| 8,05E-08 | 0,00E+00 | 4,29E-07 | 8,08E-08 | 3,48E-07 | 8,08E-08 |
| 8,05E-08 | 0,00E+00 | 8,00E-07 | 8,28E-08 | 7,20E-07 | 8,28E-08 |
| 1,54E-07 | 2,42E-08 | 1,19E-06 | 3,03E-07 | 1,04E-06 | 3,04E-07 |
| 5,29E-08 | 6,51E-09 | 3,25E-07 | 5,64E-08 | 2,72E-07 | 5,68E-08 |
| 8,41E-08 | 4,10E-09 | 4,49E-07 | 1,90E-08 | 3,65E-07 | 1,94E-08 |

Πίνακας 3.3-5: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας W εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $+1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

W_1 : ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

W_2 : ενέργεια κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta W=W_2-W_1$

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| t_1 [μs] | | W_1 [Ws] | | P_1 [W] | |
|-------------------|----------|------------|----------|-----------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 4,23 | 0,05 | 6,86E-08 | 0,00E+00 | 0,016 | 0,000 |
| 3,11 | 0,06 | 8,05E-08 | 0,00E+00 | 0,026 | 0,000 |
| 2,50 | 0,02 | 8,05E-08 | 0,00E+00 | 0,032 | 0,000 |
| 2,20 | 0,06 | 1,54E-07 | 2,42E-08 | 0,070 | 0,011 |
| 1,63 | 0,03 | 5,29E-08 | 6,51E-09 | 0,032 | 0,004 |
| 1,25 | 0,00 | 8,41E-08 | 4,10E-09 | 0,067 | 0,003 |

Πίνακας 3.3-6: Στατιστική ανάλυση της ισχύος P εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $+1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

W_1 : ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

P_1 : ισχύς κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| t_2 [μs] | | W_2 [Ws] | | P_2 [W] | |
|-------------------------|----------|------------|----------|-----------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 7,29 | 0,44 | 2,10E-07 | 1,41E-08 | 0,029 | 0,003 |
| 8,17 | 1,50 | 4,29E-07 | 8,08E-08 | 0,052 | 0,014 |
| 8,97 | 1,44 | 8,00E-07 | 8,28E-08 | 0,089 | 0,017 |
| 13,05 | 1,16 | 1,19E-06 | 3,03E-07 | 0,091 | 0,025 |
| 13,60 | 0,18 | 3,25E-07 | 5,64E-08 | 0,024 | 0,004 |
| 13,10 | 0,63 | 4,49E-07 | 1,90E-08 | 0,034 | 0,002 |

Πίνακας 3.3-7: Στατιστική ανάλυση της ισχύος P εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100 μs . Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 W_2 : ενέργεια κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 P_2 : ισχύς κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους
 σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| P_1 [W] | | P_2 [W] | | ΔP [W] | |
|-----------|----------|-----------|----------|----------------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 0,016 | 0,000 | 0,029 | 0,003 | 0,013 | 0,003 |
| 0,026 | 0,000 | 0,052 | 0,014 | 0,027 | 0,014 |
| 0,032 | 0,000 | 0,089 | 0,017 | 0,057 | 0,017 |
| 0,070 | 0,011 | 0,091 | 0,025 | 0,021 | 0,027 |
| 0,032 | 0,004 | 0,024 | 0,004 | -0,009 | 0,006 |
| 0,067 | 0,003 | 0,034 | 0,002 | -0,033 | 0,004 |

Πίνακας 3.3-8: Στατιστική ανάλυση της ισχύος P εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100 μs . Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 P_1 : ισχύς κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 P_2 : ισχύς κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 $\Delta P=P_2-P_1$
Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους
 σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| Δu [V] | | ΔWe [eV] | |
|----------------|----------|------------------|----------|
| AV | σ | AV | σ |
| 0,43 | 0,05 | 0,21 | 0,02 |
| 0,81 | 0,19 | 0,40 | 0,10 |
| 1,33 | 0,14 | 0,67 | 0,07 |
| 1,52 | 0,44 | 0,76 | 0,22 |
| 0,34 | 0,07 | 0,17 | 0,04 |
| 0,38 | 0,02 | 0,19 | 0,01 |

Πίνακας 3.3-9: Στατιστική ανάλυση της ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων ΔWe εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $+1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

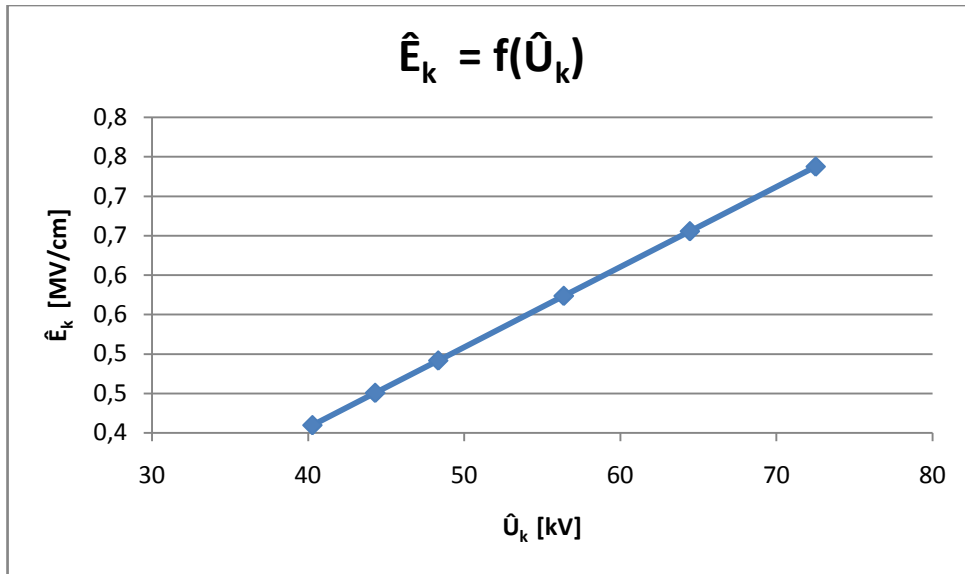
u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

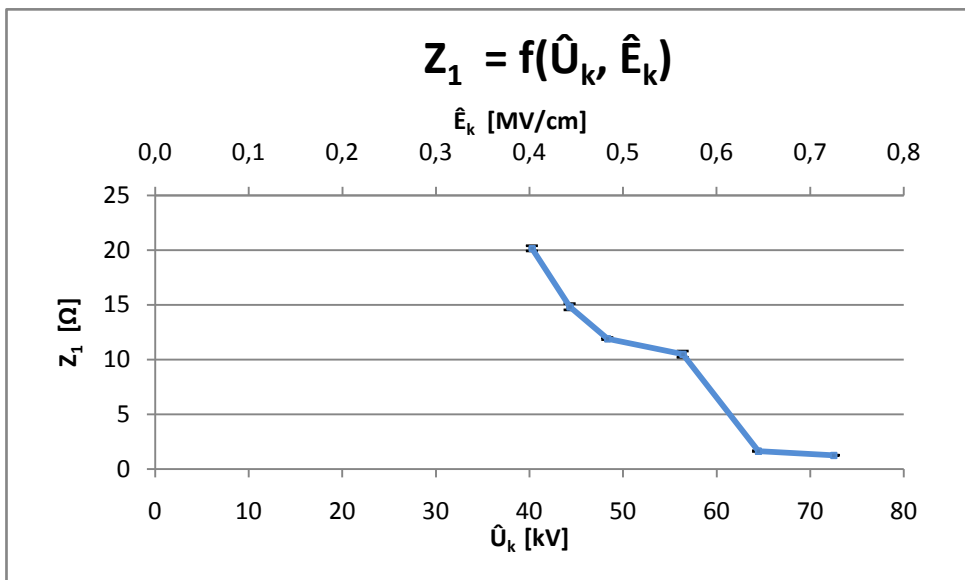
ΔWe : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

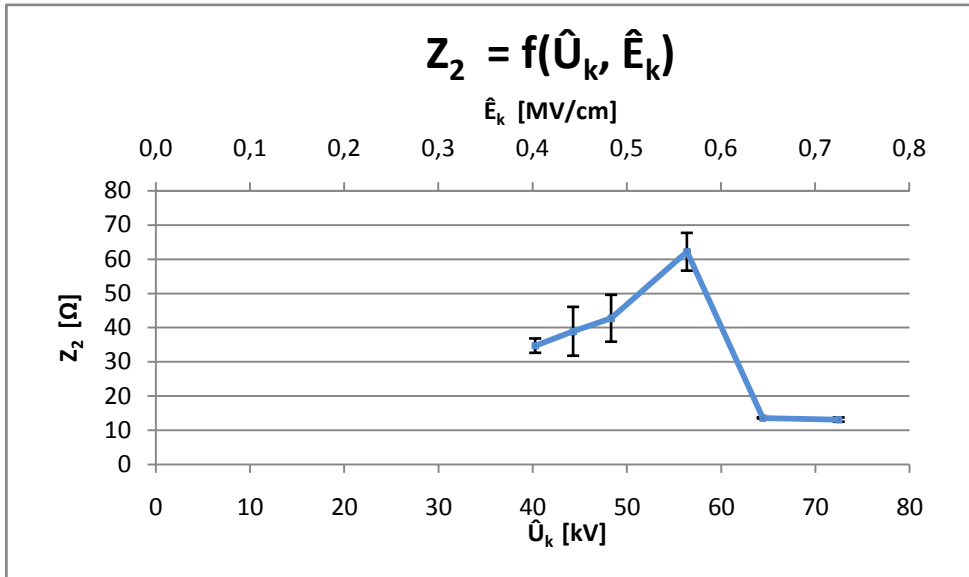
σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους



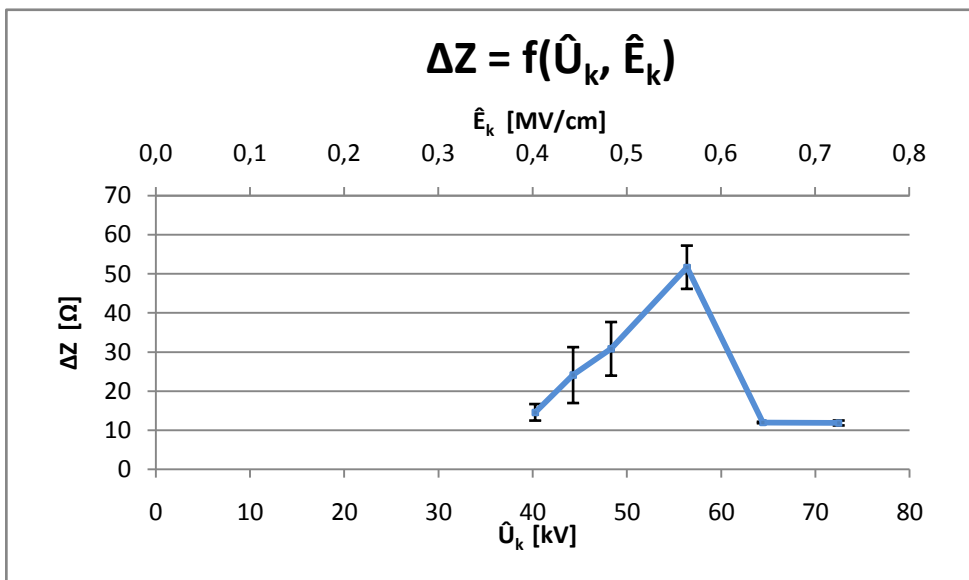
Σχήμα 3.3-1: Χαρακτηριστική $\hat{E}_k = f(\hat{U}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



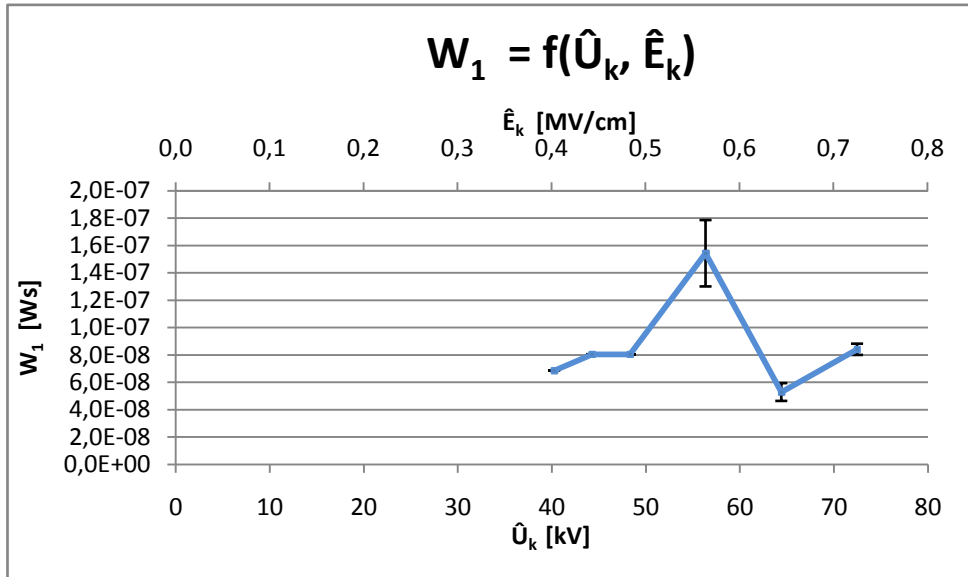
Σχήμα 3.3-2: Χαρακτηριστική $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 Z_1 : σύνθετη αντίσταση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



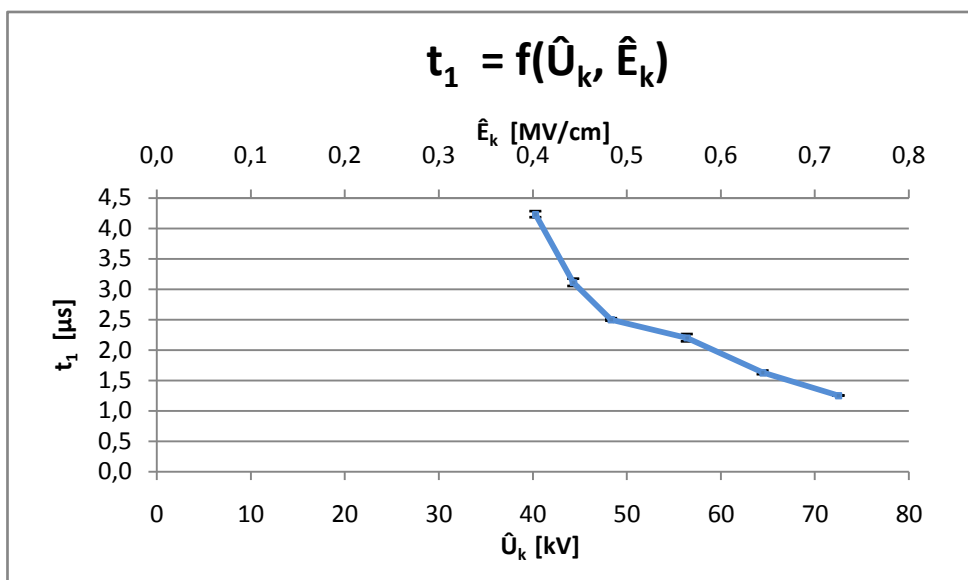
Σχήμα 3.3-3: Χαρακτηριστική $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 Z_2 : σύνθετη αντίσταση κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



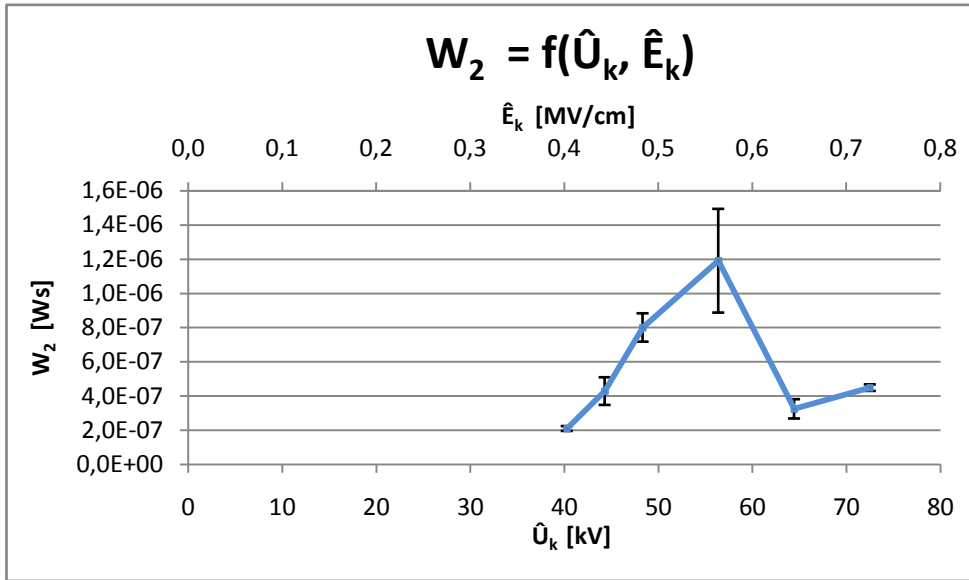
Σχήμα 3.3-4: Χαρακτηριστική $\Delta Z = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 $\Delta Z = Z_2 - Z_1$
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



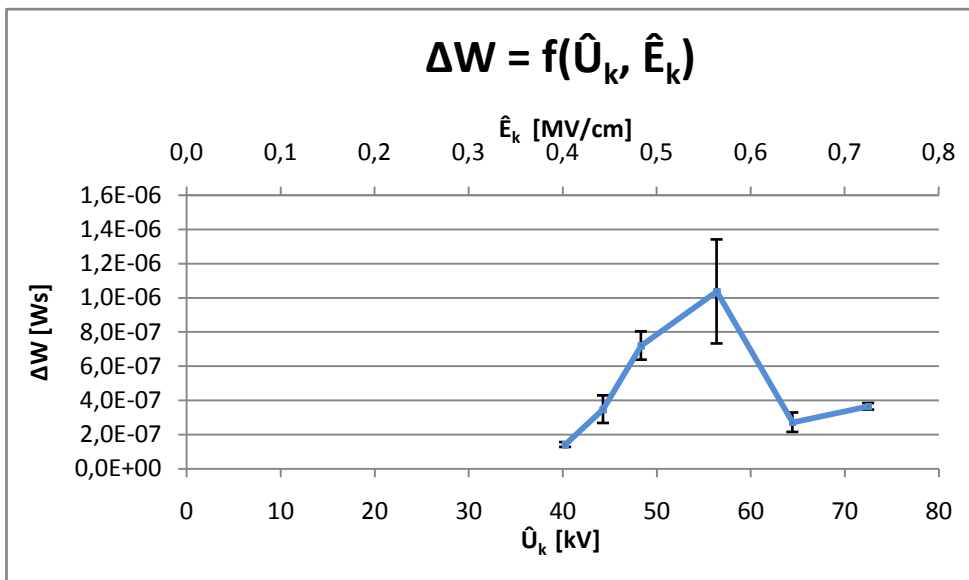
Σχήμα 3.3-5: Χαρακτηριστική $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 W_1 : ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



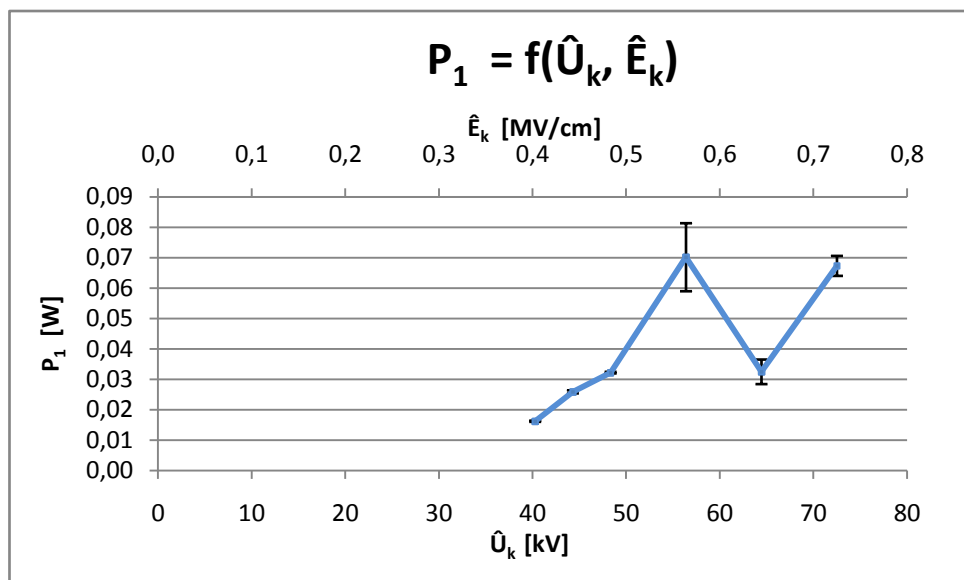
Σχήμα 3.3-6: Χαρακτηριστική $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



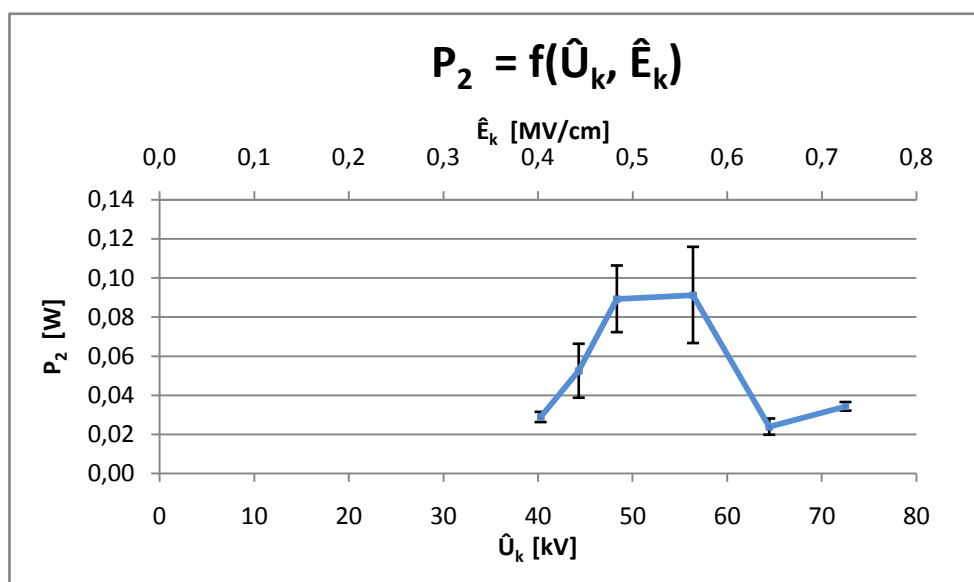
Σχήμα 3.3-7: Χαρακτηριστική $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 W_2 : ενέργεια κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



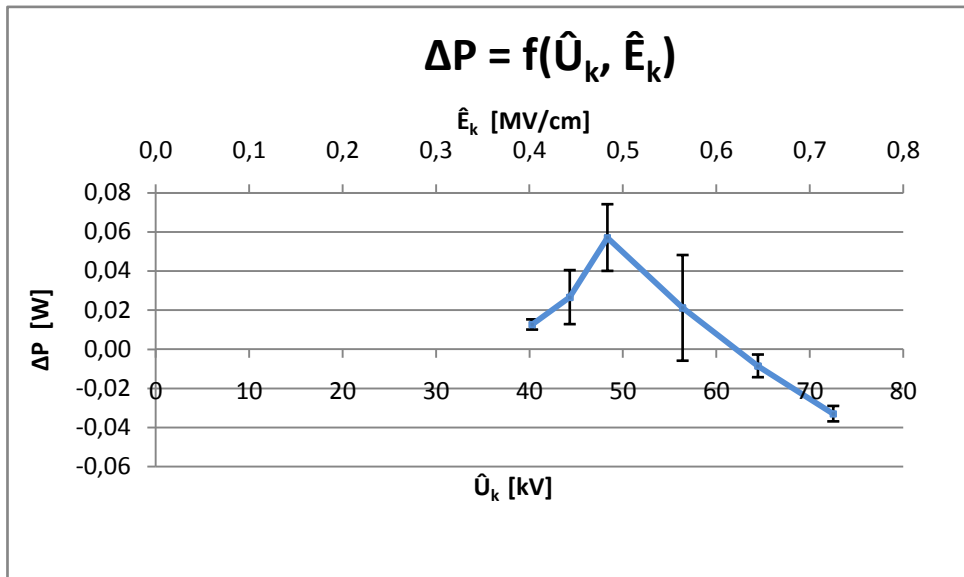
Σχήμα 3.3-8: Χαρακτηριστική $\Delta W = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 $\Delta W = W_2 - W_1$
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.3-9: Χαρακτηριστική $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 P_1 : ισχύς κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.3-10: Χαρακτηριστική $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 P_2 : ισχύς κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

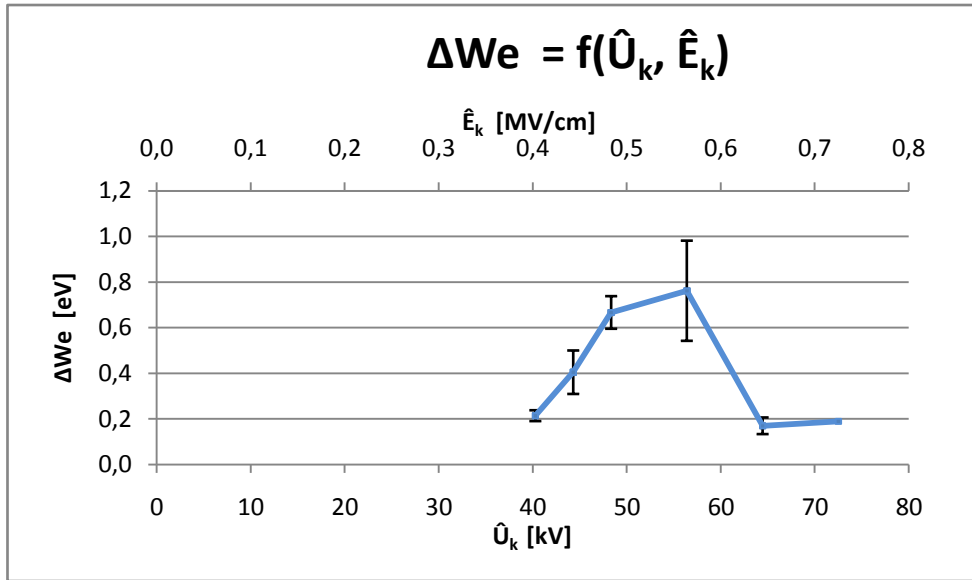


Σχήμα 3.3-11: Χαρακτηριστική $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

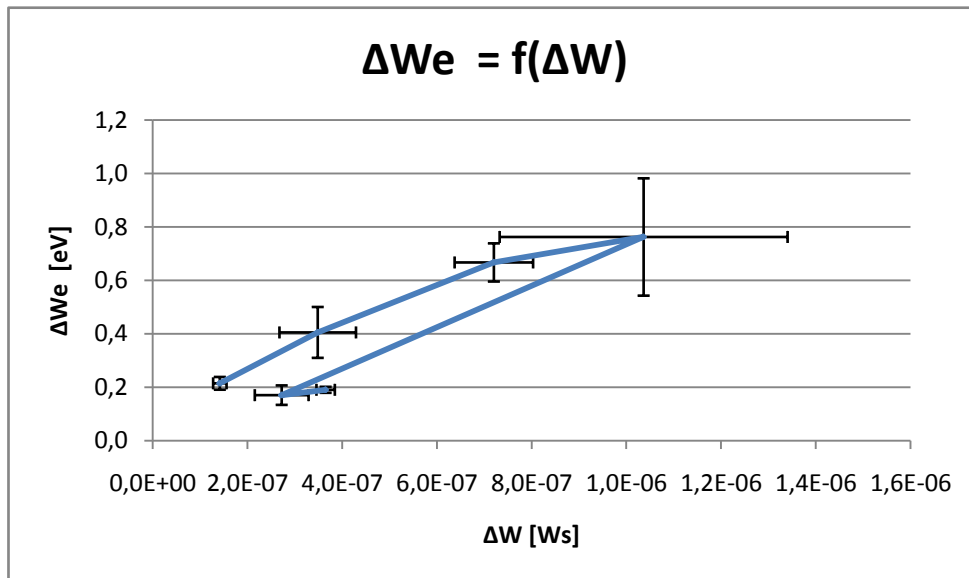
$$\Delta P = P_2 - P_1$$

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

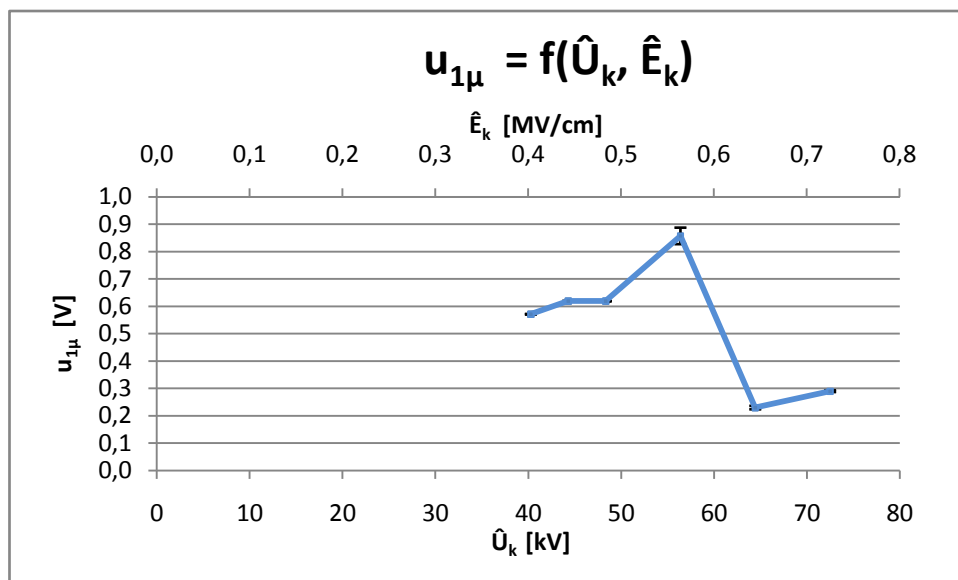
\hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



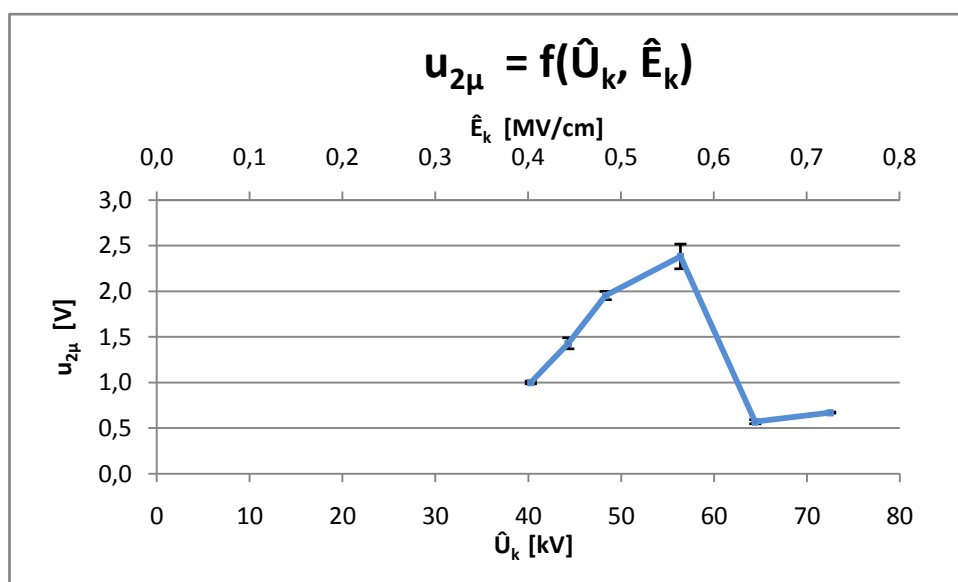
Σχήμα 3.3-12: Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



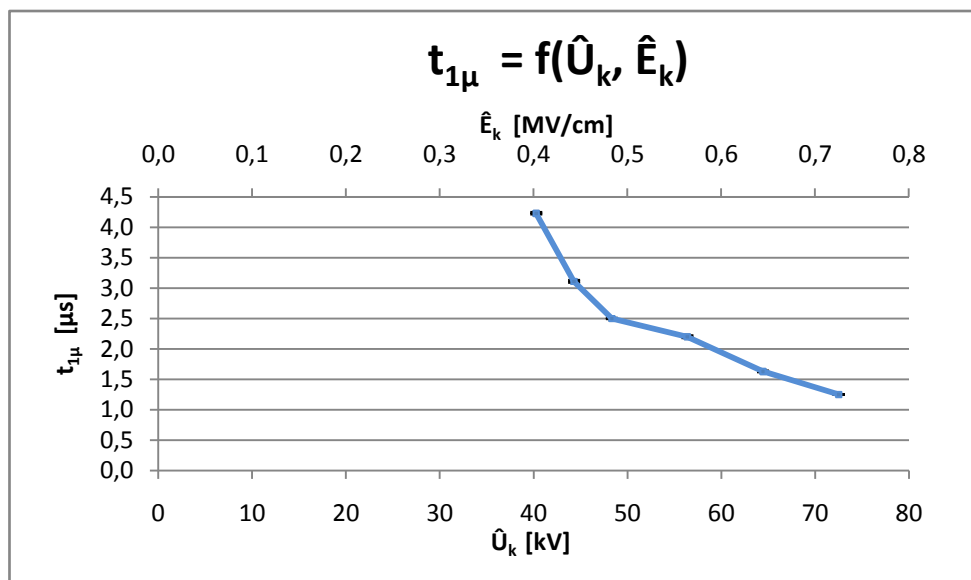
Σχήμα 3.3-13: Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(\Delta W)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων
 $\Delta W = W_2 - W_1$



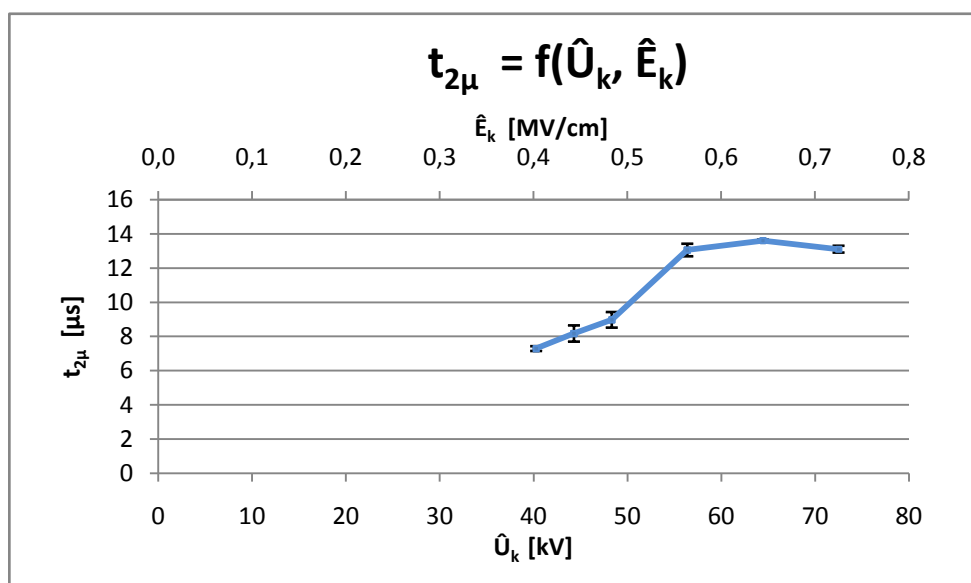
Σχήμα 3.3-14: Χαρακτηριστική $u_{1\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 $u_{1\mu}$: στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.3-15: Χαρακτηριστική $u_{2\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 $u_{2\mu}$: στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.3-16: Χαρακτηριστική $t_{1\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 $t_{1\mu}$: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.3-17: Χαρακτηριστική $t_{2\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).
 $t_{2\mu}$: χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

3.4 Πίνακες και διαγράμματα για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm)

| \hat{U}_k [kV] | \hat{E}_k [MV/cm] |
|------------------|---------------------|
| 40,27 | 0,410 |
| 48,33 | 0,492 |
| 56,38 | 0,573 |
| 64,44 | 0,655 |
| 72,50 | 0,737 |

Πίνακας 3.4-1: Ένταση \hat{E}_k του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης \hat{U}_k εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

| C_m [nF] | q_1 [μC] | | q_2 [μC] | | u_1 [V] | | | u_2 [V] | | | Δu [V] | |
|---------------|------------|----------|------------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|----------|
| | AV | σ | AV | σ | AV | σ | δ | AV | σ | δ | AV | σ |
| 210 | 0,97 | 0,05 | 2,13 | 0,17 | 4,62 | 0,24 | 0,08 | 10,14 | 0,81 | 0,26 | 5,52 | 0,84 |
| 210 | 1,26 | 0,64 | 4,75 | 0,28 | 6,00 | 3,05 | 0,96 | 22,62 | 1,33 | 0,42 | 16,62 | 3,33 |
| 1000 | 1,45 | 0,06 | 6,80 | 0,29 | 1,45 | 0,06 | 0,02 | 6,80 | 0,29 | 0,09 | 5,35 | 0,30 |
| 1000 | 1,72 | 0,16 | 9,06 | 0,22 | 1,72 | 0,16 | 0,05 | 9,06 | 0,22 | 0,07 | 7,34 | 0,27 |
| 1000 | 2,12 | 0,12 | 12,87 | 0,23 | 2,12 | 0,12 | 0,04 | 12,87 | 0,23 | 0,07 | 10,75 | 0,26 |

Πίνακας 3.4-2: Στατιστική ανάλυση της στιγμιαίας τιμής της u_m εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u = u_2 - u_1$

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

δ : διακύμανση της μέσης τιμής σε περίπτωση επανάληψη των μετρήσεων

| C_m [nF] | t_1 [μs] | | | t_2 [μs] | | | Z_1 [Ω] | | Z_2 [Ω] | | ΔZ [Ω] | |
|---------------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------------|----------|
| | AV | σ | δ | AV | σ | δ | AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 210 | 4,52 | 0,06 | 0,02 | 13,90 | 1,42 | 0,45 | 21,52 | 0,29 | 66,19 | 6,76 | 44,67 | 6,77 |
| 210 | 3,23 | 0,02 | 0,01 | 20,38 | 1,22 | 0,39 | 15,38 | 0,10 | 97,05 | 5,81 | 81,67 | 5,81 |
| 1000 | 2,60 | 0,02 | 0,01 | 25,50 | 1,21 | 0,38 | 2,60 | 0,02 | 25,50 | 1,21 | 22,90 | 1,21 |
| 1000 | 1,63 | 0,01 | 0,00 | 27,50 | 1,77 | 0,56 | 1,63 | 0,01 | 27,50 | 1,77 | 25,87 | 1,77 |
| 1000 | 1,28 | 0,00 | 0,00 | 33,75 | 1,58 | 0,50 | 1,28 | 0,00 | 33,75 | 1,58 | 32,47 | 1,58 |

Πίνακας 3.4-3: Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης Z εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

C_m : πυκνωτής μέτρησης

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Z_1 : σύνθετη αντίσταση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Z_2 : σύνθετη αντίσταση κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

δ : διακύμανση της μέσης τιμής σε περίπτωση επανάληψη των μετρήσεων

| C_m [nF] | u_1 [V] | | u_2 [V] | | W_1 [Ws] | | W_2 [Ws] | |
|---------------|-----------|----------|-----------|----------|------------|----------|------------|----------|
| | AV | σ | AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 210 | 4,62 | 0,24 | 10,14 | 0,81 | 4,48E-06 | 3,27E-07 | 2,16E-05 | 2,44E-06 |
| 210 | 6,00 | 3,05 | 22,62 | 1,33 | 7,56E-06 | 5,43E-06 | 1,07E-04 | 8,96E-06 |
| 1000 | 1,45 | 0,06 | 6,80 | 0,29 | 2,10E-06 | 1,23E-07 | 4,62E-05 | 2,79E-06 |
| 1000 | 1,72 | 0,16 | 9,06 | 0,22 | 2,96E-06 | 3,89E-07 | 8,21E-05 | 2,82E-06 |
| 1000 | 2,12 | 0,12 | 12,87 | 0,23 | 4,49E-06 | 3,60E-07 | 1,66E-04 | 4,19E-06 |

Πίνακας 3.4-4: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας W εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

C_m : πυκνωτής μέτρησης

u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

W_1 : ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

W_2 : ενέργεια κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| W ₁ [Ws] | | W ₂ [Ws] | | ΔW [Ws] | |
|---------------------|----------|---------------------|----------|----------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 4,48E-06 | 3,27E-07 | 2,16E-05 | 2,44E-06 | 1,71E-05 | 2,46E-06 |
| 7,56E-06 | 5,43E-06 | 1,07E-04 | 8,96E-06 | 9,99E-05 | 1,05E-05 |
| 2,10E-06 | 1,23E-07 | 4,62E-05 | 2,79E-06 | 4,41E-05 | 2,79E-06 |
| 2,96E-06 | 3,89E-07 | 8,21E-05 | 2,82E-06 | 7,91E-05 | 2,85E-06 |
| 4,49E-06 | 3,60E-07 | 1,66E-04 | 4,19E-06 | 1,61E-04 | 4,20E-06 |

Πίνακας 3.4-5: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας W εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

W₁: ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

W₂: ενέργεια κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΔW=W₂-W₁

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ: τυπική απόκλιση του μεγέθους

| t ₁ [μs] | | W ₁ [Ws] | | P ₁ [W] | |
|---------------------|------|---------------------|----------|--------------------|-------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 4,52 | 0,06 | 4,48E-06 | 3,27E-07 | 0,991 | 0,073 |
| 3,23 | 0,02 | 7,56E-06 | 5,43E-06 | 2,341 | 1,681 |
| 2,60 | 0,02 | 2,10E-06 | 1,23E-07 | 0,809 | 0,048 |
| 1,63 | 0,01 | 2,96E-06 | 3,89E-07 | 1,815 | 0,239 |
| 1,28 | 0,00 | 4,49E-06 | 3,60E-07 | 3,511 | 0,281 |

Πίνακας 3.4-6: Στατιστική ανάλυση της ισχύος P εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

t₁: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

W₁: ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

P₁: ισχύς κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

σ: τυπική απόκλιση του μεγέθους

| t_2 [μs] | | W_2 [Ws] | | P_2 [W] | |
|-------------------------|----------|------------|----------|-----------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 13,90 | 1,42 | 2,16E-05 | 2,44E-06 | 1,554 | 0,237 |
| 20,38 | 1,22 | 1,07E-04 | 8,96E-06 | 5,272 | 0,541 |
| 25,50 | 1,21 | 4,62E-05 | 2,79E-06 | 1,813 | 0,139 |
| 27,50 | 1,77 | 8,21E-05 | 2,82E-06 | 2,985 | 0,218 |
| 33,75 | 1,58 | 1,66E-04 | 4,19E-06 | 4,908 | 0,261 |

Πίνακας 3.4-7: Στατιστική ανάλυση της ισχύος P εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 W_2 : ενέργεια κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 P_2 : ισχύς κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους
 σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| P_1 [W] | | P_2 [W] | | ΔP [W] | |
|-----------|----------|-----------|----------|----------------|----------|
| AV | σ | AV | σ | AV | σ |
| 0,991 | 0,073 | 1,554 | 0,237 | 0,563 | 0,248 |
| 2,341 | 1,681 | 5,272 | 0,541 | 2,931 | 1,766 |
| 0,809 | 0,048 | 1,813 | 0,139 | 1,005 | 0,147 |
| 1,815 | 0,239 | 2,985 | 0,218 | 1,170 | 0,323 |
| 3,511 | 0,281 | 4,908 | 0,261 | 1,397 | 0,384 |

Πίνακας 3.4-8: Στατιστική ανάλυση της ισχύος P εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 P_1 : ισχύς κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 P_2 : ισχύς κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 $\Delta P=P_2-P_1$
Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους
 σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους

| Δu [V] | | ΔWe [eV] | |
|----------------|----------|------------------|----------|
| AV | σ | AV | σ |
| 5,52 | 0,84 | 2,76 | 0,42 |
| 16,62 | 3,33 | 8,31 | 1,66 |
| 5,35 | 0,30 | 2,68 | 0,15 |
| 7,34 | 0,27 | 3,67 | 0,14 |
| 10,75 | 0,26 | 5,38 | 0,13 |

Πίνακας 3.4-9: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων ΔWe εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

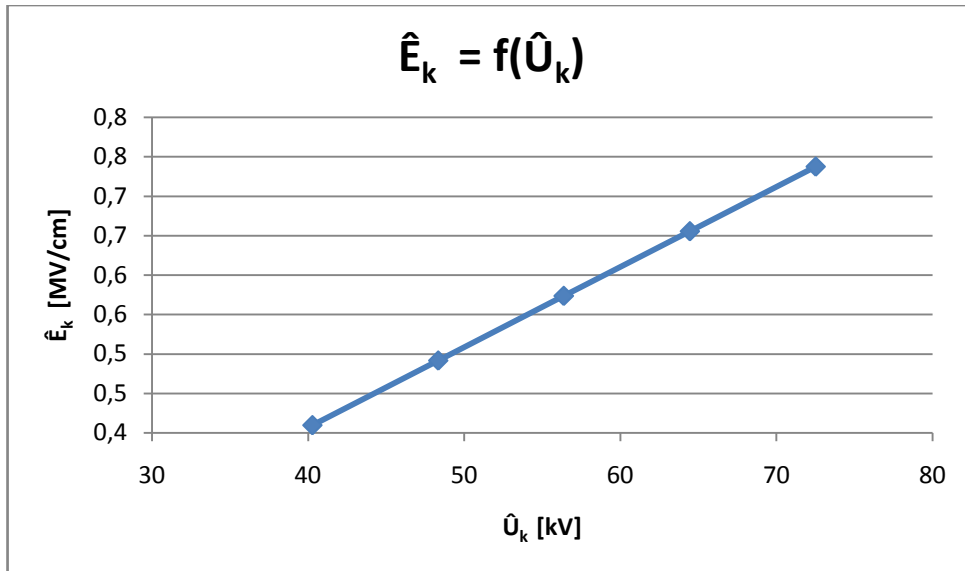
u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

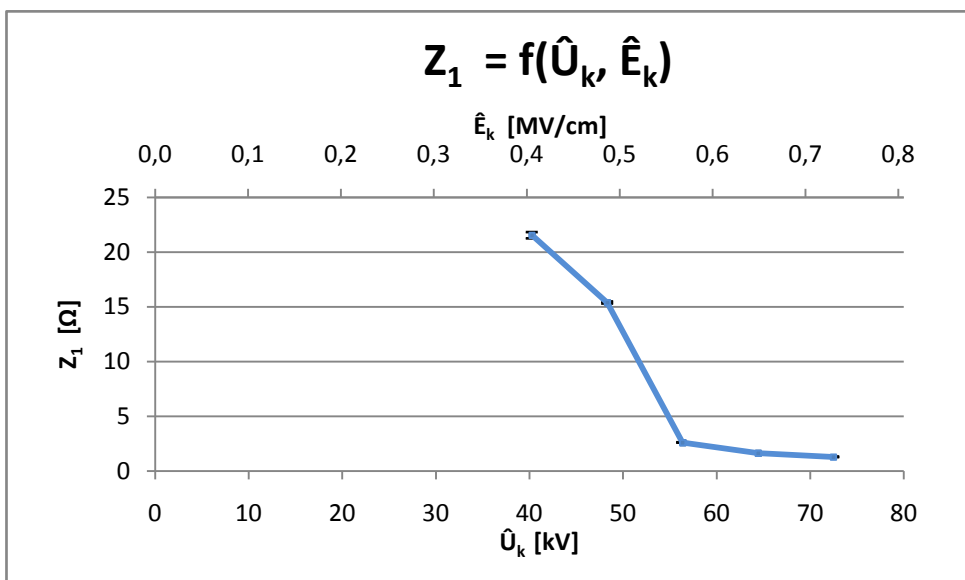
ΔWe : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων

Σημείωση: AV: μέση τιμή του μεγέθους

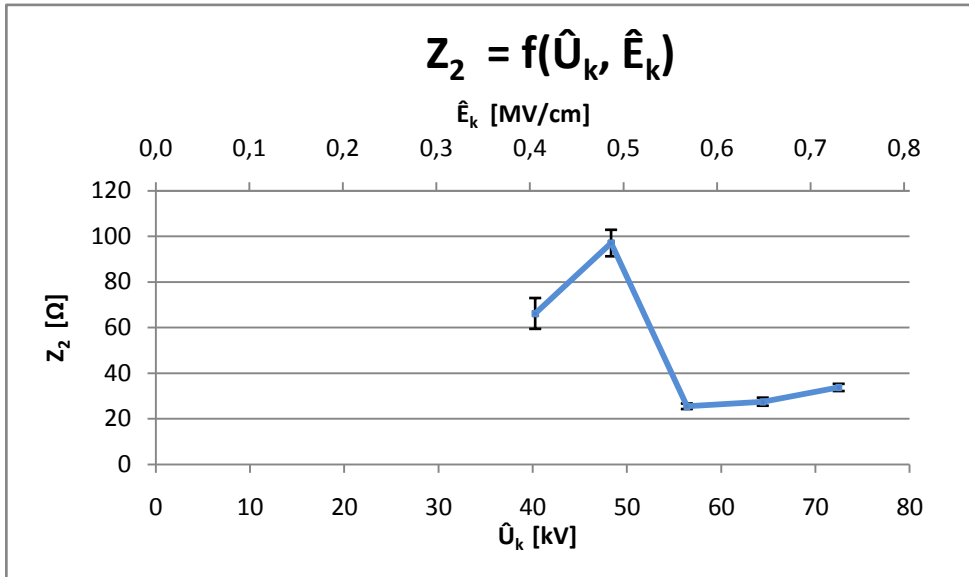
σ : τυπική απόκλιση του μεγέθους



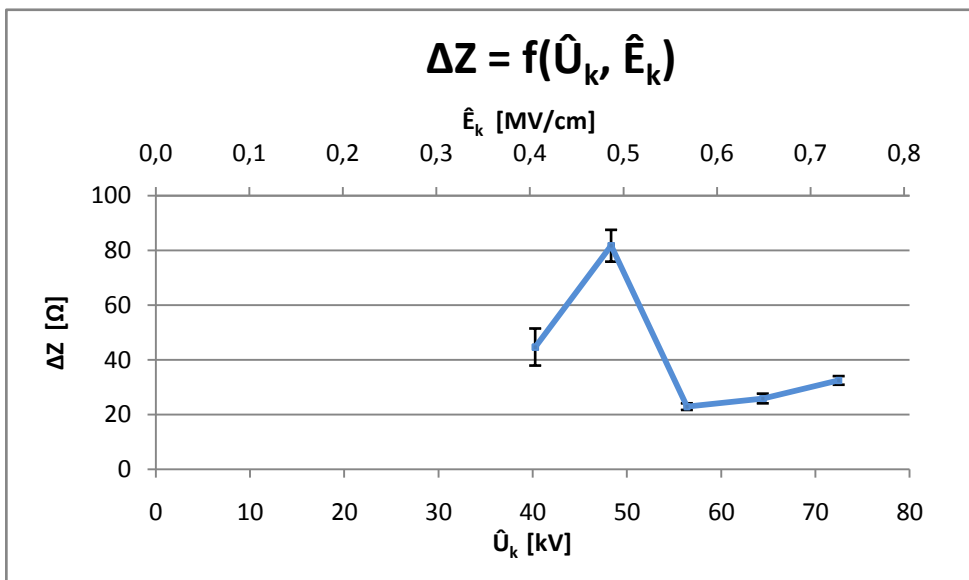
Σχήμα 3.4-1: Χαρακτηριστική $\hat{E}_k = f(\hat{U}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



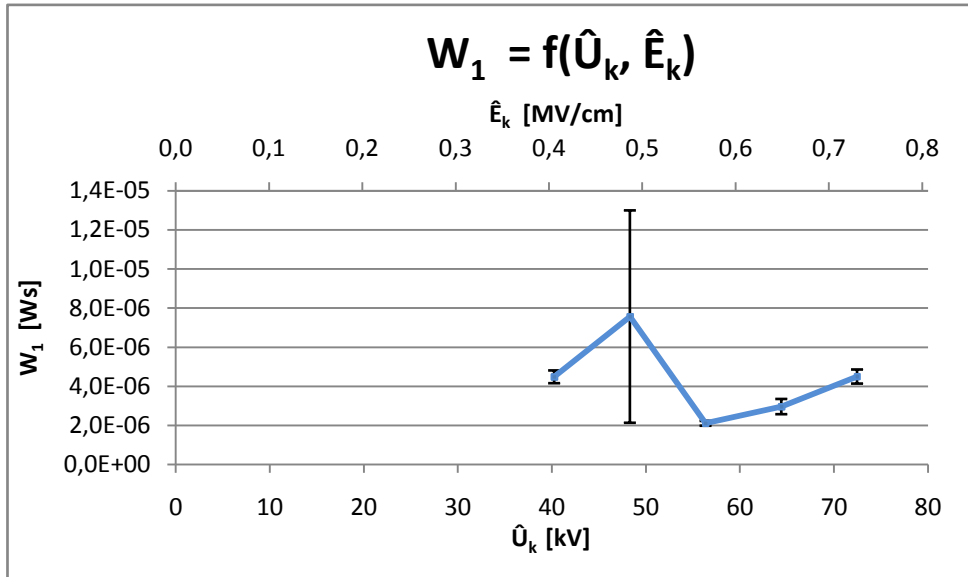
Σχήμα 3.4-2: Χαρακτηριστική $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 Z_1 : σύνθετη αντίσταση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



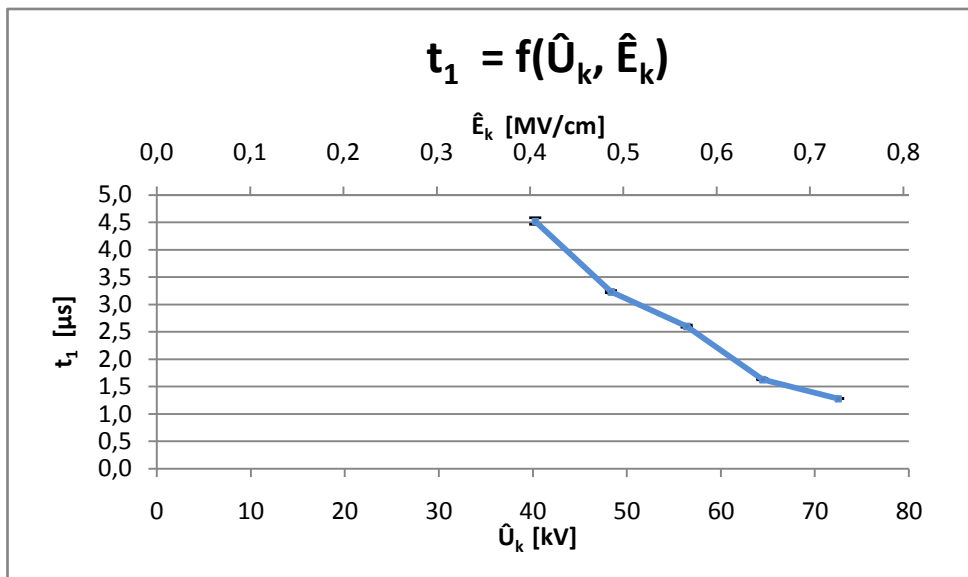
Σχήμα 3.4-3: Χαρακτηριστική $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 Z_2 : σύνθετη αντίσταση κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



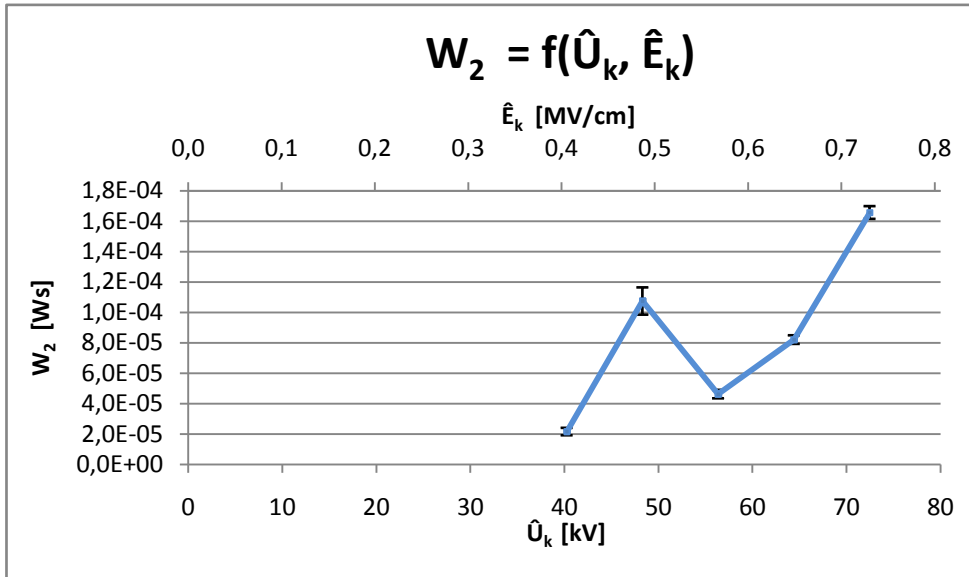
Σχήμα 3.4-4: Χαρακτηριστική $\Delta Z = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 $\Delta Z = Z_2 - Z_1$
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



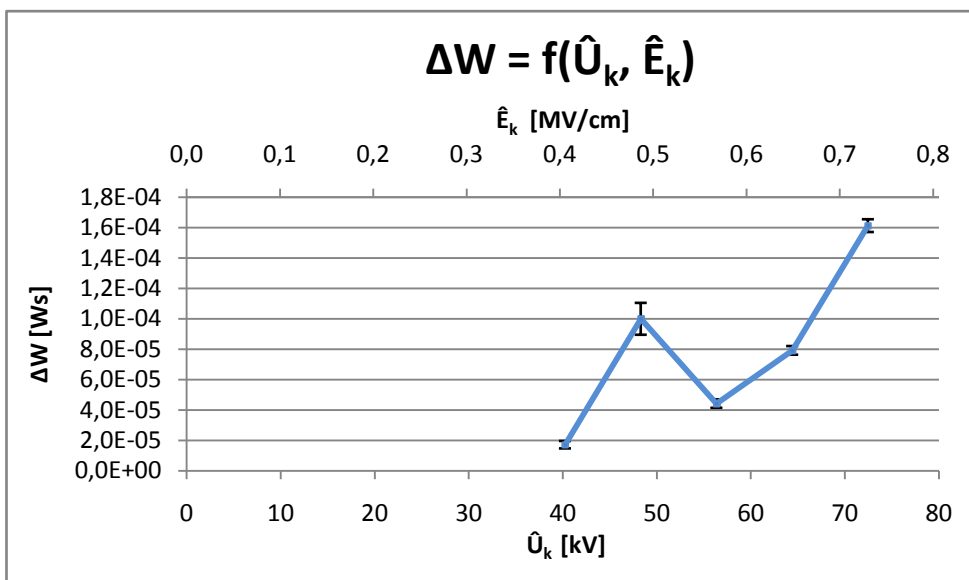
Σχήμα 3.4-5: Χαρακτηριστική $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 W_1 : ενέργεια κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



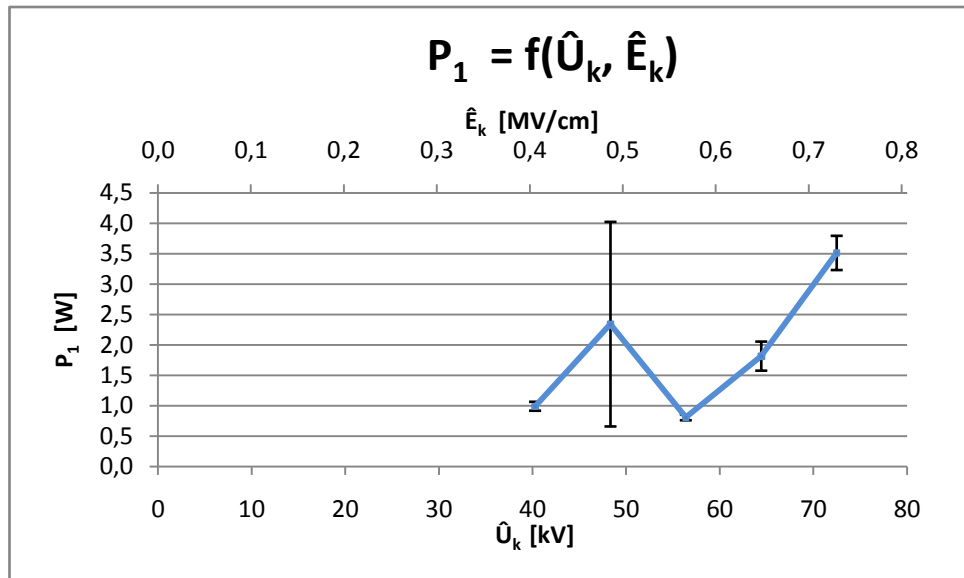
Σχήμα 3.4-6: Χαρακτηριστική $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



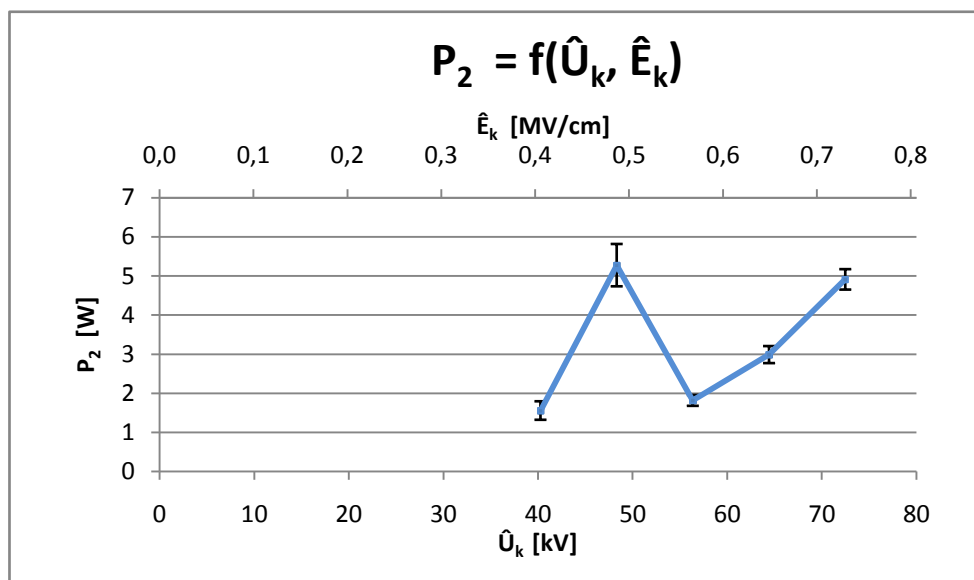
Σχήμα 3.4-7: Χαρακτηριστική $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 W_2 : ενέργεια κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



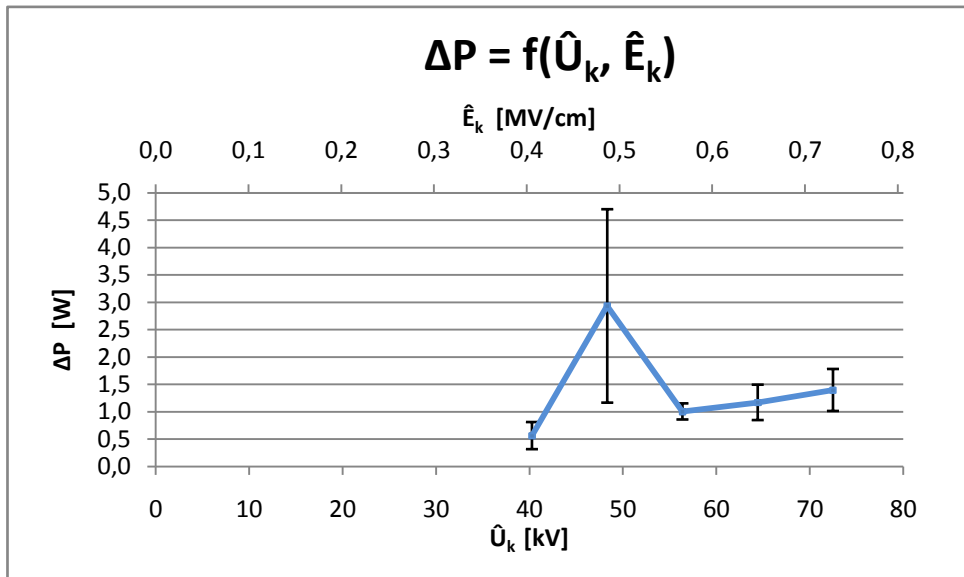
Σχήμα 3.4-8: Χαρακτηριστική $\Delta W = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 $\Delta W = W_2 - W_1$
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



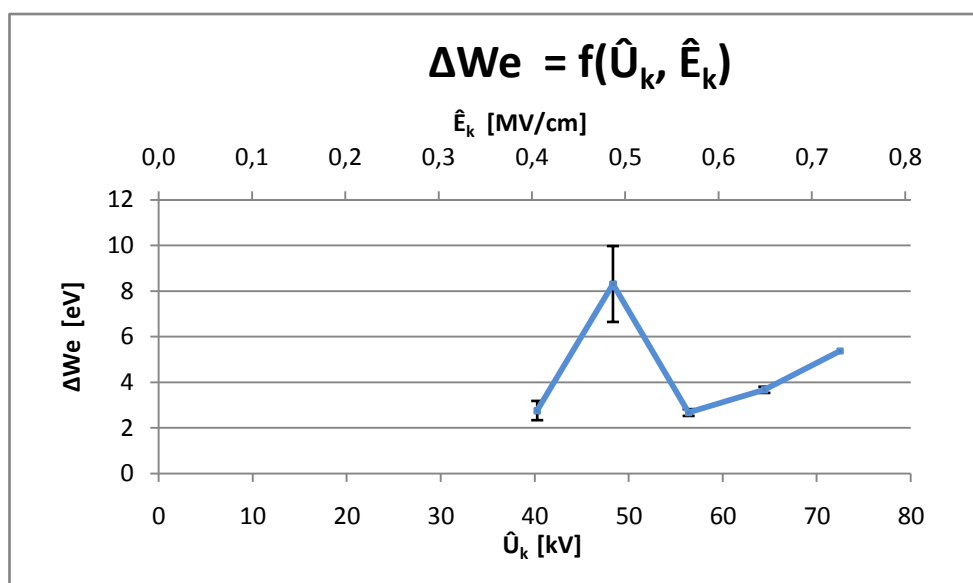
Σχήμα 3.4-9: Χαρακτηριστική $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).
 P_1 : ισχύς κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



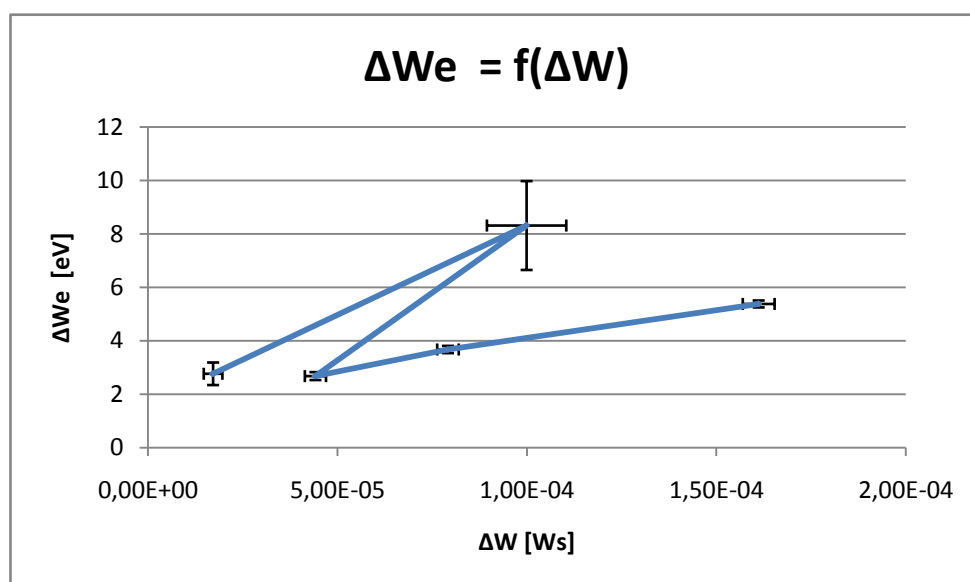
Σχήμα 3.4-10: Χαρακτηριστική $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).
 P_2 : ισχύς κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



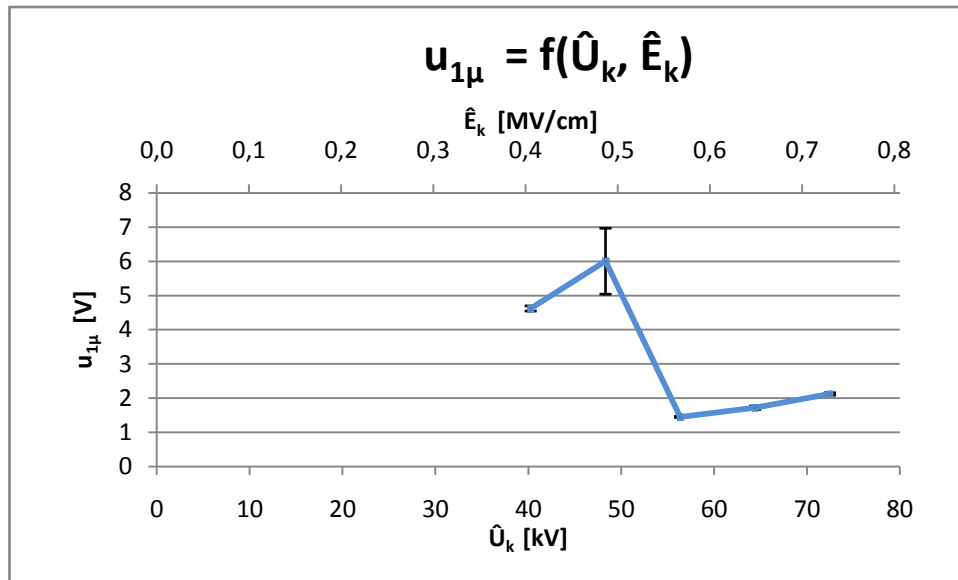
Σχήμα 3.4-11: Χαρακτηριστική $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).
 $\Delta P = P_2 - P_1$
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



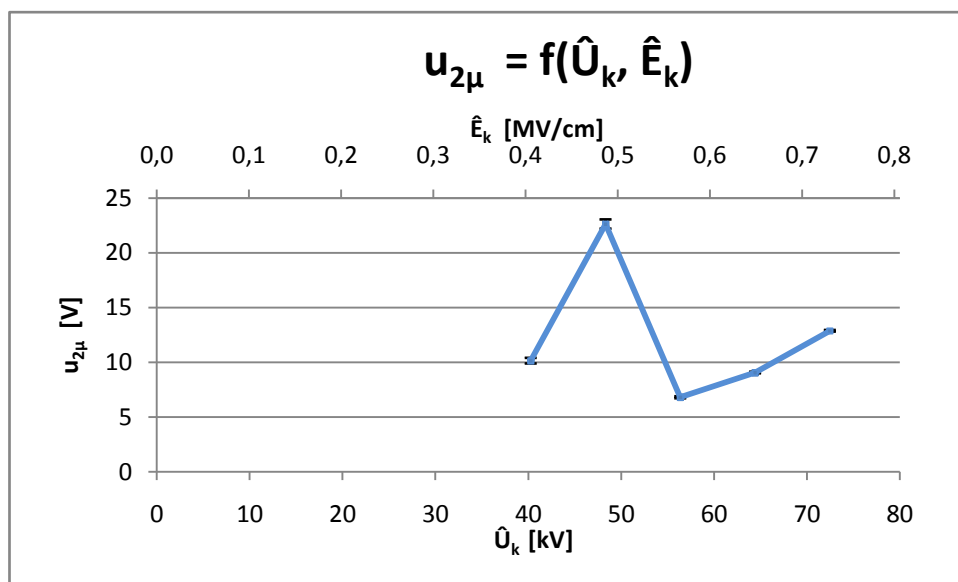
Σχήμα 3.4-12: Χαρακτηριστική $\Delta We = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).
 ΔWe : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



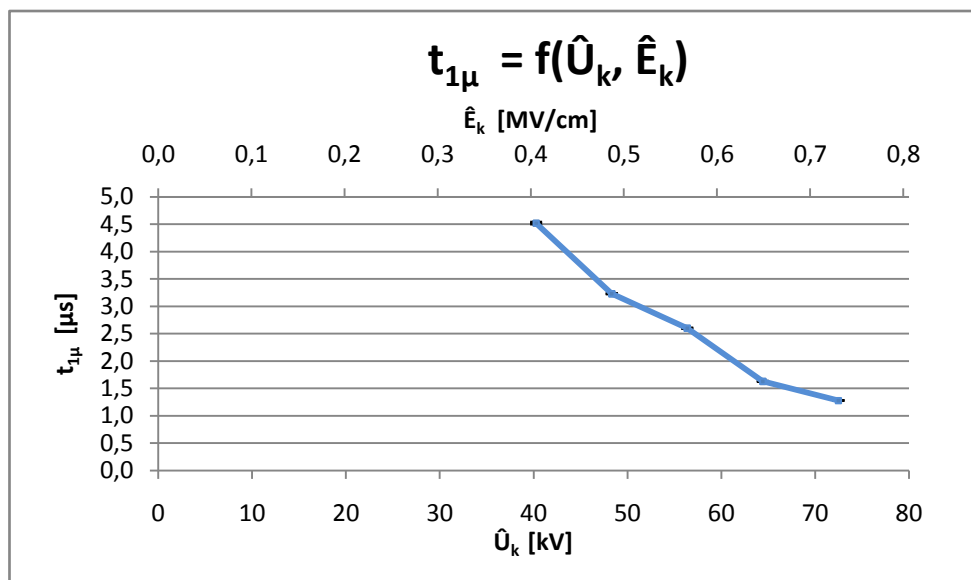
Σχήμα 3.4-13: Χαρακτηριστική $\Delta We = f(\Delta W)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2mm$).
 ΔWe : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων
 $\Delta W = W_2 - W_1$



Σχήμα 3.4-14: Χαρακτηριστική $u_{1\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 $u_{1\mu}$: στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.4-15: Χαρακτηριστική $u_{2\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu\text{s}$. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).
 $u_{2\mu}$: στιγμιαία τιμή της u_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 \hat{U}_k : μέγιστη ένταση της κρουστικής τάσης
 \hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

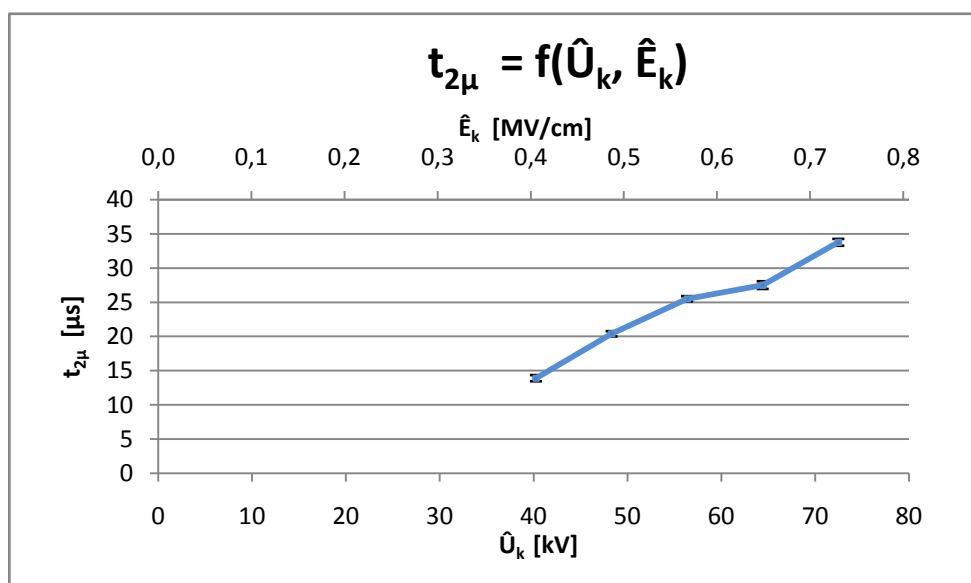


Σχήμα 3.4-16: Χαρακτηριστική $t_{1\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu$ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).

$t_{1\mu}$: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

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

\hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k



Σχήμα 3.4-17: Χαρακτηριστική $t_{2\mu} = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση $-1,2/100\mu$ s. Διάταξη ακίδα-πλάκα ($d=2\text{mm}$).

$t_{2\mu}$: χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

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

\hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k

3.5 Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι μαθηματικές προσεγγίσεις των χαρακτηριστικών που υπολογίστηκαν στις ενότητες 3.1 έως 3.4.

| Σχήμα | Χαρακτηριστική | Μαθηματική Προσέγγιση |
|--------|---------------------------------------|---|
| 3.1-2 | $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $Z_1 = 84,28 \hat{E}_k^2 - 170,1 \hat{E}_k + 86,48$ |
| 3.1-3 | $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $Z_2 = 37115 \hat{E}_k^4 - 10876 \hat{E}_k^3 + 11657 \hat{E}_k^2 - 54319 \hat{E}_k + 9379$ |
| 3.1-4 | $\Delta Z = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta Z = 36997 \hat{E}_k^4 - 10870 \hat{E}_k^3 + 11676 \hat{E}_k^2 - 54439 \hat{E}_k + 9370$ |
| 3.1-5 | $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $W_1 = 3,90E-07e^{2,18 \hat{E}_k}$ |
| 3.1-6 | $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $t_1 = 18,65 \hat{E}_k^2 - 34,95 \hat{E}_k + 17,45$ |
| 3.1-7 | $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $W_2 = 1,59E-05e^{2,09 \hat{E}_k}$ |
| 3.1-8 | $\Delta W = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta W = 1,55E-05e^{2,09 \hat{E}_k}$ |
| 3.1-9 | $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $P_1 = 66,9 \hat{E}_k^3 - 153,1 \hat{E}_k^2 + 116,8 \hat{E}_k - 28,3$ |
| 3.1-10 | $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $P_2 = 614 \hat{E}_k^3 - 1417 \hat{E}_k^2 + 1052 \hat{E}_k - 246$ |
| 3.1-11 | $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta P = 548 \hat{E}_k^3 - 1264 \hat{E}_k^2 + 935 \hat{E}_k - 217$ |
| 3.1-12 | $\Delta We = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta We = 651 \hat{E}_k^3 - 1505 \hat{E}_k^2 + 1113 \hat{E}_k - 256$ |

Πίνακας 3.5-1: Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

| Σχήμα | Χαρακτηριστική | Μαθηματική Προσέγγιση |
|--------|---------------------------------------|--|
| 3.2-2 | $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $Z_1 = 46,42 \hat{E}_k^2 - 107,5 \hat{E}_k + 62,43$ |
| 3.2-3 | $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $Z_2 = -22002 \hat{E}_k^4 + 74544 \hat{E}_k^3 - 92194 \hat{E}_k^2 + 48960 \hat{E}_k - 9268$ |
| 3.2-4 | $\Delta Z = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta Z = -22256 \hat{E}_k^4 + 75154 \hat{E}_k^3 - 92717 \hat{E}_k^2 + 49192 \hat{E}_k - 9334$ |
| 3.2-5 | $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $W_1 = 8,75E-08e^{5,12 \hat{E}_k}$ |
| 3.2-6 | $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $t_1 = 6,88 \hat{E}_k^2 - 15,69 \hat{E}_k + 10,22$ |
| 3.2-7 | $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $W_2 = 2,14E-06e^{6,00 \hat{E}_k}$ |
| 3.2-8 | $\Delta W = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta W = 2,06E-06e^{6,02 \hat{E}_k}$ |
| 3.2-9 | $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $P_1 = 231,39 \hat{E}_k^3 - 519,21 \hat{E}_k^2 + 386,08 \hat{E}_k - 91,38$ |
| 3.2-10 | $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $P_2 = 5511 \hat{E}_k^4 - 15973 \hat{E}_k^3 + 16815 \hat{E}_k^2 - 7580 \hat{E}_k + 1238$ |
| 3.2-11 | $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta P = 5498 \hat{E}_k^4 - 16161 \hat{E}_k^3 + 17285 \hat{E}_k^2 - 7942 \hat{E}_k + 1325$ |
| 3.2-12 | $\Delta We = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta We = 1910 \hat{E}_k^4 - 5116 \hat{E}_k^3 + 4799 \hat{E}_k^2 - 1822 \hat{E}_k + 237$ |

Πίνακας 3.5-2: Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=1mm).

| Σχήμα | Χαρακτηριστική | Μαθηματική Προσέγγιση |
|--------|---------------------------------------|---|
| 3.3-2 | $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $Z_1 = 22821 \hat{E}_k^4 - 51958 \hat{E}_k^3 + 43770 \hat{E}_k^2 - 16224 \hat{E}_k + 2250$ |
| 3.3-3 | $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $Z_2 = 13890 \hat{E}_k^4 - 31191 \hat{E}_k^3 + 25752 \hat{E}_k^2 - 92661 \hat{E}_k + 12310$ |
| 3.3-4 | $\Delta Z = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta Z = 11608 \hat{E}_k^4 - 25995 \hat{E}_k^3 + 21375 \hat{E}_k^2 - 76437 \hat{E}_k + 10060$ |
| 3.3-5 | $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $W_1 = 3,58E-04 \hat{E}_k^4 - 8,06E-04 \hat{E}_k^3 + 6,68E-04 \hat{E}_k^2 - 2,42E-04 \hat{E}_k + 3,23E-05$ |
| 3.3-6 | $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $t_1 = 1659 \hat{E}_k^4 - 3984 \hat{E}_k^3 + 3557 \hat{E}_k^2 - 1405 \hat{E}_k + 210$ |
| 3.3-7 | $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $W_2 = 2,78E-03 \hat{E}_k^4 - 6,18E-03 \hat{E}_k^3 + 5,05E-03 \hat{E}_k^2 - 1,79E-03 \hat{E}_k + 2,34E-04$ |
| 3.3-8 | $\Delta W = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta W = 2,42E-03 \hat{E}_k^4 - 5,38E-03 \hat{E}_k^3 + 4,38E-03 \hat{E}_k^2 - 1,55E-03 \hat{E}_k + 2,01E-04$ |
| 3.3-9 | $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $P_1 = 168,0 \hat{E}_k^4 - 376,2 \hat{E}_k^3 + 310,2 \hat{E}_k^2 - 111,5 \hat{E}_k + 14,8$ |
| 3.3-10 | $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $P_2 = 166,4 \hat{E}_k^4 - 361,6 \hat{E}_k^3 + 287,1 \hat{E}_k^2 - 98,6 \hat{E}_k + 12,4$ |
| 3.3-11 | $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta P = 10,73x \hat{E}_k^3 - 19,89 \hat{E}_k^2 + 11,81 \hat{E}_k - 2,23$ |
| 3.3-12 | $\Delta We = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta We = 1493 \hat{E}_k^4 - 3278 \hat{E}_k^3 + 2633 \hat{E}_k^2 - 916 \hat{E}_k + 117$ |

Πίνακας 3.5-3: Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

| Σχήμα | Χαρακτηριστική | Μαθηματική Προσέγγιση |
|--------|---------------------------------------|---|
| 3.4-2 | $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $Z_1 = 248,8 \hat{E}_k^2 - 351,6 \hat{E}_k + 124,9$ |
| 3.4-3 | $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $Z_2 = 16144 \hat{E}_k^3 - 27517 \hat{E}_k^2 + 15100 \hat{E}_k - 2608$ |
| 3.4-4 | $\Delta Z = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta Z = 15045 \hat{E}_k^3 - 25874 \hat{E}_k^2 + 14392 \hat{E}_k - 2540$ |
| 3.4-5 | $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $W_1 = 1,4E-03 \hat{E}_k^3 - 2,4E-03 \hat{E}_k^2 + 1,3E-03 \hat{E}_k - 2,3E-04$ |
| 3.4-6 | $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $t_1 = 16,38 \hat{E}_k^2 - 28,65 \hat{E}_k + 13,47$ |
| 3.4-7 | $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $W_2 = 4,75E-06e^{4,64 \hat{E}_k}$ |
| 3.4-8 | $\Delta W = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta W = 3,20E-06e^{5,19 \hat{E}_k}$ |
| 3.4-9 | $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $P_1 = 540,4 \hat{E}_k^3 - 895,4 \hat{E}_k^2 + 486,9 \hat{E}_k - 85,3$ |
| 3.4-10 | $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $P_2 = -14500 \hat{E}_k^4 + 34464 \hat{E}_k^3 - 30238 \hat{E}_k^2 + 11596 \hat{E}_k - 1635$ |
| 3.4-11 | $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta P = 659 \hat{E}_k^3 - 1158 \hat{E}_k^2 + 662 \hat{E}_k - 122$ |
| 3.4-12 | $\Delta We = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ | $\Delta We = 1800 \hat{E}_k^3 - 3108 \hat{E}_k^2 + 1748 \hat{E}_k - 315$ |

Πίνακας 3.5-4: Μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση -1,2/100μs. Διάταξη ακίδα-πλάκα (d=2mm).

Κεφάλαιο 4

Σχόλια - Συμπεράσματα

Κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις εκδηλώνονται ουσιαστικά δυο παράγοντες γήρανσης και διάσπασης, που είναι οι μερικές εκκενώσεις και οι δυνάμεις Coulomb. Η αύξηση του φορτίου λόγω μερικών εκκενώσεων εξηγείται από τη βιβλιογραφία με την εκθετική σχέση 1.2.5.2-1. Η όποια απόκλιση στη συγκεκριμένη περίπτωση από την εκθετική μορφή που πρέπει να έχει το φορτίο και τα ανάλογα προς αυτό μεγέθη (u , W) μπορεί να αποδοθεί μόνο στις δυνάμεις Coulomb.

Αυτός είναι ο λόγος που οι χαρακτηριστικές $u_1=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ και $u_2=f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ (βλ. σχήματα 3.1-14, 3.1-15, 3.2-14, 3.2-15, 3.3-14, 3.3-15, 3.4-14, 3.4-15) παρουσιάζουν μείωση της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης, γιατί η ενέργεια του πεδίου καταναλώθηκε από τις δυνάμεις Coulomb.

Βιβλιογραφία

- [1] Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος: Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά, Αθήνα 2003
- [2] Ι.Α. Σταθόπουλος, Υψηλές Τάσεις, εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1995
- [3] Ν. Θεοδώρου, Ηλεκτρικές Μετρήσεις, Τόμος 1 και 2, Αθήνα 2004