



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

**ΑΓΩΓΙΜΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ
ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΟΥ PERTINAX ΕΝΤΟΣ ΕΛΑΙΟΥ
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ 20°C ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ
±250/2500μs ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ «ΑΚΙΔΑ-ΠΛΑΚΑ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΔΕΔΕΣ

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2010



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

**ΑΓΩΓΙΜΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ
ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΟΥ PERTINAX ΕΝΤΟΣ ΕΛΑΙΟΥ
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ 20°C ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ
±250/2500μs ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ «ΑΚΙΔΑ-ΠΛΑΚΑ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΔΕΔΕΣ

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9^η Σεπτεμβρίου 2010

.....
Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Ι. Θεοδώρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μ. Γ. Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2010

.....

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΔΕΔΕΣ

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

Copyright © Κωνσταντίνος Γ. Δέδες, 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Πρόλογος

Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Κωνσταντίνου Καραγιαννόπουλου και αφορά στην μελέτη της αγωγίμης συμπεριφοράς του στερεού ηλεκτρομονωτικού Pertinax εντός ελαίου μετασχηματιστών 20°C υπό κρουστικές τάσεις $\pm 250/2500$ μs και διάταξη ηλεκτροδίων «ακίδα-πλάκα».

Συγκεκριμένα, διεξήχθησαν στο εργαστήριο μια σειρά από μετρήσεις με στόχο τον υπολογισμό διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών, πάνω σε δοκίμια 1mm και 2 mm του στερεού ηλεκτρομονωτικού Pertinax. Τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων για την αγωγή συμπεριφορά του συγκεκριμένου ηλεκτρομονωτικού υλικού. Πρόκειται για μετρήσεις αλμάτων δυναμικού που εμφανίζονται πριν τις μερικές εκκενώσεις και μετά το πέρας αυτών, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει και η στατιστική ανάλυση αυτών. Απώτερος στόχος της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι αφενός να μπορεί ο αναγνώστης να έχει άμεση εποπτική εικόνα της μεταβολής αυτών των μεγεθών ανάλογα με την πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης αλλά και του πάχους του εξεταζόμενου δοκιμίου, και αφετέρου να εξαχθούν συμπεράσματα που θα βοηθήσουν ακόμα περισσότερο στην κατανόηση του φαινομένου της γήρανσης και της διάτρησης των στέρων μονωτικών υλικών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές Κ. Γ Καραγιαννόπουλο και Π. Δ. Μπούρκα για την πολύτιμη βοήθεια τους για την περάτωση της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1 Στερεά μονωτικά.....	13
1.1.1 Γενικά.....	13
1.1.2 Φαινόμενα προ και κατά την διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών.....	13
1.1.3 Μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.....	14
1.1.3.1 Η θερμική διάτρηση.....	14
1.1.3.2 Η ηλεκτρική διάτρηση.....	16
1.1.3.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης).....	19
1.1.3.4 Θερμοχημική διάτρηση.....	23
1.1.3.5 Συνδυασμοί παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.....	24
1.1.3.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων.....	38
1.1.4 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών.....	43
1.1.5 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση.....	45
1.1.6 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση.....	46
1.1.7 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών.....	50
2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	51
3. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ	
3.1 Πάχος δοκιμίου d=1mm, θετική πολικότητα +250/2500.....	55
3.2 Πάχος δοκιμίου d=1mm, αρνητική πολικότητα -250/2500.....	66
3.3 Πάχος δοκιμίου d=2mm, θετική πολικότητα +250/2500.....	77
3.4 Πάχος δοκιμίου d=2mm, αρνητική πολικότητα -250/2500.....	88
4. ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ	
4.1 Πάχος δοκιμίου d=1mm, θετική πολικότητα +250/2500.....	99
4.2 Πάχος δοκιμίου d=1mm, αρνητική πολικότητα -250/2500.....	108
4.3 Πάχος δοκιμίου d=2mm, θετική πολικότητα +250/2500.....	117
4.4 Πάχος δοκιμίου d=2mm, αρνητική πολικότητα -250/2500.....	126
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	135

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Κωνσταντίνου Καραγιαννόπουλου και αφορά στην μελέτη της αγωγίμης συμπεριφοράς του στερεού ηλεκτρομονωτικού Pertinax εντός ελαίου μετασχηματιστών 20°C υπό κρουστικές τάσεις $\pm 250/2500$ μs και διάταξη ηλεκτροδίων «ακίδα-πλάκα».

Η εργασία είναι χωρισμένη σε τρία μέρη. Στο πρώτο και θεωρητικό, γίνεται αναφορά στα φαινόμενα προ και κατά την διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών, ενώ περιέχεται και συνοπτική ανάλυση αυτών. Επίσης, παρουσιάζεται και η διαδικασία της στατιστικής ανάλυσης των μερικών εκκενώσεων.

Στο δεύτερο μέρος, γίνεται αναλυτική αναφορά στη διαδικασία διεξαγωγής των μετρήσεων και δίνεται ο ορισμός και οι μαθηματικοί τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών μεγεθών.

Στο τρίτο μέρος, παρουσιάζονται όλες οι χαρακτηριστικές των μετρούμενων και των υπολογισθέντων μεγεθών, ούτως ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω μελέτη και έρευνα.

Τέλος, στο τέταρτο μέρος, παρουσιάζονται όλες οι χαρακτηριστικές των μετρούμενων και των υπολογισθέντων μεγεθών με την αντίστοιχη μαθηματική τους προσέγγιση και γίνεται σχολιασμός επί αυτών.

Τα στοιχεία για το θεωρητικό μέρος αυτής της εργασίας, αντλήθηκαν κυρίως από το βιβλίο του καθηγητή Π. Δ. Μπούρκα και Κ. Γ. Καραγιαννόπουλου «Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά». Άλλες πηγές αναφέρονται συνοπτικά στο τέλος της εργασίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μερικές εκκενώσεις, Στατιστική ανάλυση, Μονωτικά υλικά, Ιονισμός, Αγωγή συμπεριφορά, Κρουστικές τάσεις, Pertinax, Απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb

SUMMARY

This thesis was conducted at the Department of Industrial Electric Devices and Decision Systems under the supervision of Professor Constantine Karagiannopoulos and involves the study of the conductive behavior of Pertinax solid electrical insulation in oil transformers 20°C under impact voltages $\pm 250/2500\mu\text{s}$ with an arrangement of electrodes in «spike-plate» form.

This thesis is divided into three parts. The first and theoretical, is referred to the events before and during the decomposition of solid insulating materials and contains a brief analysis of them. Also the process of statistical analysis of partial discharges is presented.

The second part is a detailed reference to the process of measurements and the definition and formulas that are used to calculate the given electrical quantities.

The third section presents all the diagrams of measured and calculated quantities, so they can be used for further study and research.

Finally, the fourth section presents all the diagrams of measured and calculated quantities with their mathematical approach and commentary on them.

The data for the theoretical part of this work, was drawn primarily from the book of Professor P. D. Bourkas and K. G. Karagiannopoulos «Industrial electrical devices and materials». Other sources are summarized at the end of the thesis.

KEY WORDS

Partial discharges, Statistical analysis, Insulating materials, Ionization, Conductive behavior, Impact voltages, Pertinax, Joule's losses, Coulomb's forces.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στερεά μονωτικά

1.1.1 Γενικά

Τα στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά εξαιτίας της σταθερότητας της μοριακής τους δομής δεν έχουν τη δυνατότητα να επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση ύστερα από μία διάσπαση. Η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη και η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σ' αυτά (κάψιμο, τήξη, μηχανικές κακώσεις, κ.λ.π.). Επίσης, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των στερεών μονωτικών, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται κατά τη διάσπαση ή να αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες (λόγω επιφανειακής διάσπασης, υπερπήδησης και μερικών εκκενώσεων) είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού της γήρανσης, της διάσπασής τους.

Τα στερεά μονωτικά χρησιμεύουν στις μονώσεις ηλεκτρικών μηχανών, σε καλώδια, για την κατασκευή μονωτήρων κάθε είδους (όπως μονωτήρες εναέριων γραμμών, διακοπών κ.λ.π.). Επίσης, χρησιμοποιούνται ως διηλεκτρικά υλικά στην κατασκευή των πυκνωτών. Τέλος, πολλές φορές συνδυάζονται με υγρά μονωτικά, όπως ο συνδυασμός χαρτί-λάδι. Ο συνδυασμός στερεού με υγρό μονωτικό αποσκοπεί κυρίως στον εμποτισμό του στερεού μονωτικού με το υγρό, ώστε να αποφεύγονται οι θύλακες αέρα.

1.1.2 Φαινόμενα προ και κατά την διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών

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 :

- Τη μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών
- 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, όπως για το εξαφθοριούχο θείο.

1.1.3 Μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση 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:

- Οι απώλειες Joule
- Οι δυνάμεις Coulomb
- Οι μερικές εκκενώσεις
- Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

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

- Η θερμική διάτρηση
- Η ηλεκτρική διάτρηση
- Η ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση)
- 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.

1.1.3.1 Η θερμική διάτρηση

Η μορφή της διάτρησης αυτής συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule. Η εικόνα που παρουσιάζει το θερμικά καταπονούμενο υλικό είναι συνήθως η απανθράκωση και η τήξη του, στην περιοχή όπου οι απώλειες Joule είναι ιδιαίτερα αυξημένες.

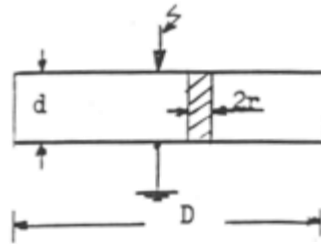
Ο σχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 , οπότε έχουμε:

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.1.3.1 - 1)$$

Με την προϋπόθεση σταθερής διατομής (A) του σχετού διάτρησης (σχήμα 1.1.3.1-1) και ειδική αγωγιμότητα σ_1 , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι :

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} \quad (1.1.3.1 - 2)$$

όπου η ενδεικνυμένη τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια.



Σχήμα 1.1.3.1-1: Απλοποιημένη παράσταση του οχετού διάτρησης λόγω των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού .

D : διάμετρος δοκιμίου

d : πάχος του μονωτικού

$2r$: διάμετρος του οχετού διάτρησης.

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

$$P = P_\alpha + C_0(d\theta/dt) \quad (1.1.3.1 - 3)$$

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

$$P_\alpha = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot k \cdot \theta \quad (1.1.3.1 - 4)$$

όπου k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

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

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot k \cdot \theta \quad (1.1.3.1 - 5)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δύο συναρτήσεις της θερμοκρασίας ($P=f(\theta)$ και $P_\alpha=f(\theta)$). Για το λόγο αυτό, η οριακή τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση (U_θ) δίνεται όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι, από τη διαφόριση ως προς θ , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης (1.1.3.1-5), έχουμε:

$$\frac{\beta U_\theta^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot k \quad (1.1.3.1 - 6)$$

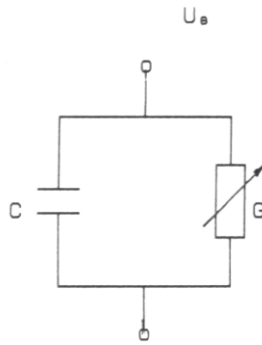
Από τις σχέσεις 1.1.3.1-5 και 1.1.3.1-6 έχουμε ότι:

$$\beta \cdot \theta = 1 \quad (1.1.3.1 - 7)$$

$$U_\theta = d \sqrt{\frac{2\kappa}{\epsilon\beta\sigma_0 r}} \quad (1.1.3.1 - 8)$$

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_{θ} μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα 1.1.3.1-2, όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μία μεταβλητή αγωγιμότητα G .

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



Σχήμα 1.1.3.1-2: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule.

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

G_0 : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή

G_{max} : αγωγιμότητα για τη διάτρηση

C : χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή

1.1.3.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

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

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

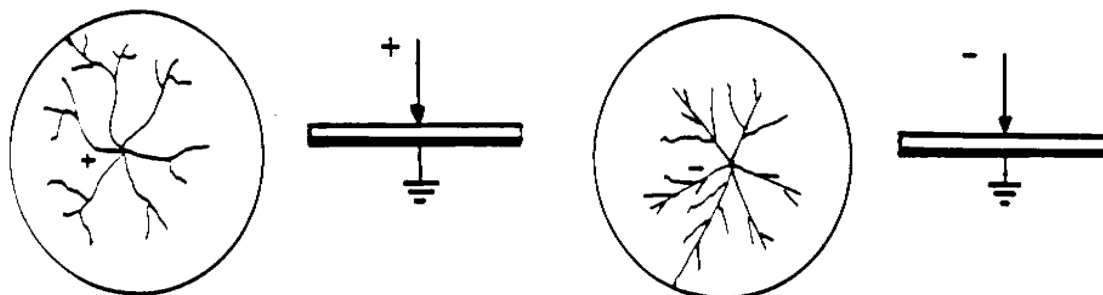
- 1) Αυτοσυντηρούμενο ιονισμό.
- 2) Μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου).
- 3) Συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

Η μορφή της διάτρησης αυτής ονομάζεται ηλεκτρική και διακρίνεται ανάλογα με την εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση. Έτσι υπάρχει:

- Η δενδροειδής (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) μορφή.
- Η μορφή οχέτου κατά τη διεύθυνση του πεδίου.

Η **δενδροειδής διάτρηση** είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, γιατί λόγω της μεγαλύτερης τιμής της έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά τη διάτρηση σχετίζεται με θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μία διακλάδωση του

δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγωγή σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 1.1.3.2-1 δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη, ανάλογα με την πολικότητα της τάσης, για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (δηλαδή την περίπτωση ηλεκτροδίων τύπου ακίδας-πλάκας).



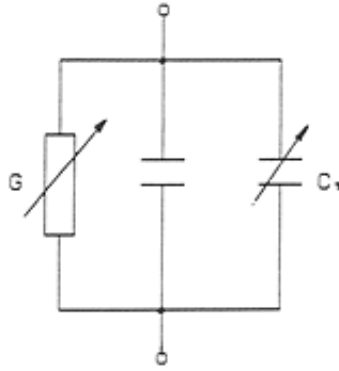
Σχήμα 1.1.3.2-1: Επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη

Στην περίπτωση της θετικής ακίδας ο δενδρίτης έχει, λόγω των δυνάμεων Coulomb που εξασκούνται μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων κατά την κίνησή τους προς την ακίδα, αρκετές διακλαδώσεις, κατά κανόνα μη ευθύγραμμες. Όταν όμως η ακίδα είναι αρνητική, οι δυνάμεις απομάκρυνσης μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων είναι, λόγω της μεγάλης ακτίνας, μικρότερες και έτσι οι διαδρομές είναι περίπου οι ακτίνες του κύκλου, των οποίων όμως η λαμπρότητα μειώνεται προς την περιφέρειά του.

Η **διάτρηση υπό μορφή οχετού** (ή **ηλεκτρομηχανική διάτρηση**) οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από ότι κατά τη δενδροειδή διάτρηση. Στα πολυμερή υλικά διαχωρίζονται τα μόρια σε αρνητικούς και θετικούς φορείς. Η διάτρηση συμβαίνει κυρίως από τις δυνάμεις Coulomb, που εξασκούνται μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η χρονική διάρκεια του φαινομένου είναι μερικά μs . Η εικόνα που παρουσιάζει το υλικό είναι κυρίως το αποτέλεσμα μιας ακαριαίας εξάσκησης δυνάμεων, στην περιοχή όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα μεγάλη (μηχανική τάνυση υπό την επίδραση των δυνάμεων του πεδίου).

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις, έχει διαπιστωθεί, ότι πάνω από μία μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης $U_{k_{\min}}$, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, συμβαίνει η διάτρηση με μία κρούση υπό μορφή οχετού, αν και η τιμή της πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης. Η μορφή της διάτρησης αυτής χαρακτηρίζεται επίσης ως ηλεκτρομηχανική. Το φαινόμενο έχει αποδοθεί στην απότομη μεταβολή της πεδιακής έντασης, λόγω της οποίας δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα την ηλεκτρομηχανική διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ του αρνητικού ηλεκτροδίου και των θετικών ηλεκτρικών φορέων, που συγκρατούνται στο πλέγμα των μορίων.

Μία ερμηνεία της ηλεκτρικής διάτρησης, μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος, μπορεί να δοθεί ως ακολούθως :



Σχήμα 1.1.3.2-2: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα.

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

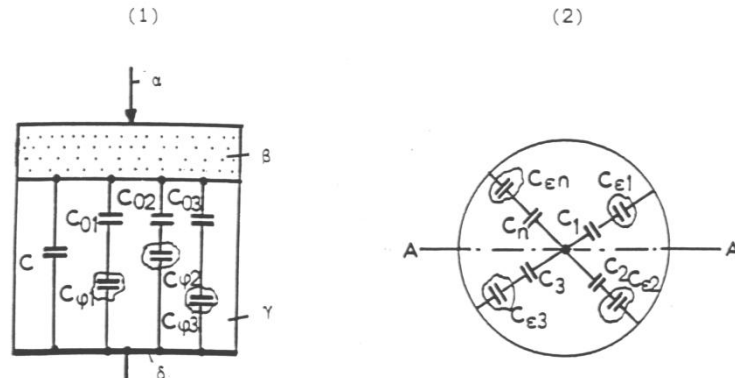
$G=0...G_{max}$: αγωγιμότητα λόγω αύξησης των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στη θέση όπου θα συμβεί η διάτρηση.

Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μία κρίσιμη για το υλικό τιμή σ_2 τότε η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα (σχήμα 1.1.3.2-2), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_{π} (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Όταν η αγωγιμότητα G και ο πυκνωτής C_{π} έχουν αποκτήσει μόλις προ της διάτρησης τις τιμές G_{max} και C_{max} (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα σ_2 , λόγω κάποιας ανομοιογένειας), τότε συμβαίνει η διάτρηση.

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

1) Γενικά περί μερικών εκκενώσεων

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (εσωτερικές μερικές εκκενώσεις), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνειά του (εξωτερικές εκκενώσεις). Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίνεται στο σχήμα 1.1.3.3-1. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές $C_{ε1}...C_{εn}$ και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές $C_{φ1}...C_{φn}$. Οι πυκνωτές $C_1...C_n$ και $C_{01}...C_{0n}$ παριστάνουν αντίστοιχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (κάθε ένας από αυτούς δίνει την ολική χωρητικότητα δύο πυκνωτών, εκ των οποίων ο ένας είναι η χωρητικότητα μεταξύ ακίδας και της θέσης διαταραχής και ο άλλος η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας και της θέσης διαταραχής).



Σχήμα 1.1.3.3-1: Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής σε στερεό μονωτικό εντός μονωτικού ελαίου

(1) Τομή A-A της διάταξης πειραματισμού :

α : ηλεκτρόδιο ακίδα.

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

γ : στερεό μονωτικό.

δ : ηλεκτρόδιο πλάκα

(2) Κάτοψη της διάταξης πειραματισμού :

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

$C_{ε1}...C_{εn}$: πυκνωτές επιφανειακών (εξωτερικών) θέσεων διαταραχής

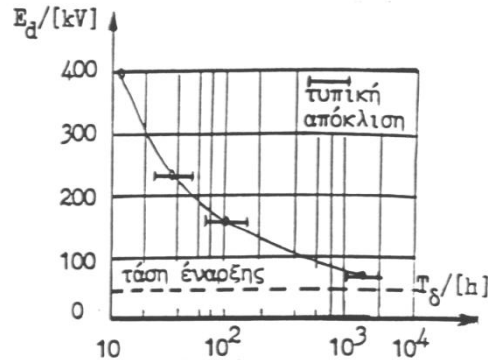
C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

$C_{φ1}...C_{φn}$: πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων)

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

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

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού. Στο σχήμα 1.1.3.3-2 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



Σχήμα 1.1.3.3-2 : Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχους 0,125mm, λόγω μερικών εκκενώσεων.

Αριθμός δοκιμών : 10 ανά σημείο μέτρησης.

T_δ : χρόνος διάσπασης.

2) Η τεχνητή γήρανση

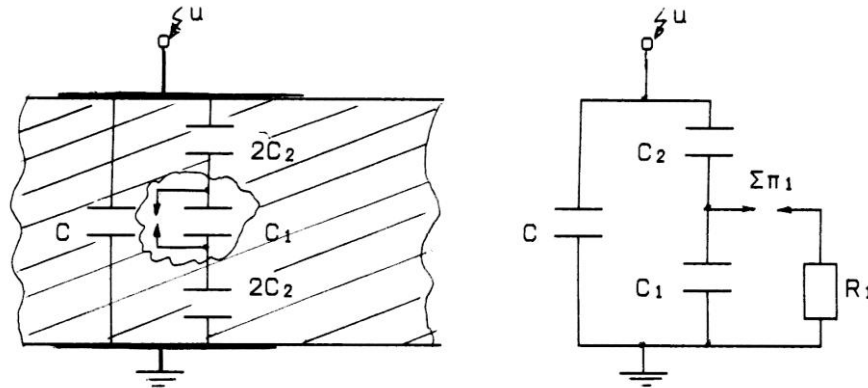
Κατά την καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού υλικού με κάποια μορφή τάσης (εναλλασσόμενη, κρουστική ή συνεχή), διαπιστώνει κανείς ότι μετά από κάποια τιμή της τάσης (ανάλογα με τη μορφή της) εμφανίζονται μερικές εκκενώσεις.

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

3) Ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων

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

Η ανάγκη για τη φυσική εξήγηση και τη μαθηματική ανάλυση του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων μέσα στον όγκο του στερεού μονωτικού, οδήγησε τους Gemant και Philipoff στο ισοδύναμο κύκλωμα του (σχήμα 1.1.3.3-3), γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου.



Σχήμα 1.1.3.3-3: Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του (κατά Gemant και Philipoff).

α : σχηματική παράσταση

β : ισοδύναμο κύκλωμα

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

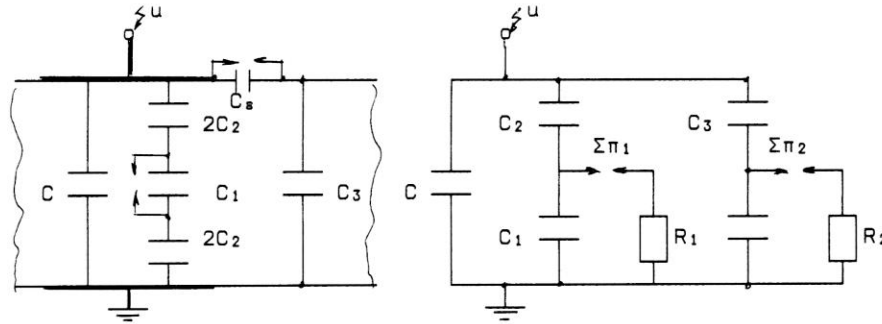
C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας

C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

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

Στο επόμενο σχήμα 1.1.3.3-4 έχει συμπληρωθεί το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο και για τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C_1) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (C_e). Με τον τρόπο δηλαδή αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού (C_2 και C_3 αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Οι σπινθήρες $\Sigma\pi_1$ και $\Sigma\pi_2$ στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R_1 , R_2) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C_1 , C_e).

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη. Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς συχνά στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα 1.1.3.3-5.



Σχήμα 1.1.3.3-4: Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής.

α : σχηματική παράσταση

β : ισοδύναμο κύκλωμα

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας

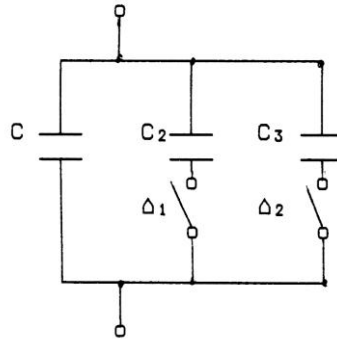
C_6 : χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

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

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



Σχήμα 1.1.3.3-5: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff).

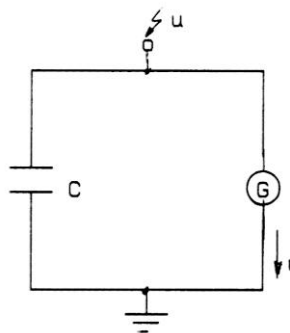
C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_2 : χωρητικότητα του υγιούς στον όγκο του μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υγιούς στην επιφάνεια του μονωτικού

Δ_1 και Δ_2 : διακόπτες, που όταν κλείνουν συμβολίζουν την διάσπαση αντίστοιχα των εσωτερικών και των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φυσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κλπ. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει επίσης μία ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 1.1.3.3-6). Σύμφωνα με αυτό, οι θέσεις διαταραχής αποδίδονται ως μία γεννήτρια μερικών εκκενώσεων G . Έτσι, όταν διεγείρεται η γεννήτρια G συμβαίνει αύξηση του δυναμικού στους ακροδέκτες της διάταξης.



Σχήμα 1.1.3.3-6 : Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann
C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
G : γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

1.1.3.4 Θερμοχημική διάτρηση

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη (σχέση 1.1.5-1 και σχέση 1.1.5-2). Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως η ενέργεια εξόδου των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από το πλέγμα των μορίων είναι μικρότερη.

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

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

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

Στην διπλωματική αυτή εργασία δεν λαμβάνεται υπόψη η θερμοχημική διάσπαση, ακριβώς γιατί θεωρείται πως μέσα στο εργαστήριο επικρατεί σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος.

1.1.3.5 Συνδυασμοί παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Τα φαινόμενα προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών μπορούν να αποδοθούν σε τέσσερις βασικούς παράγοντες αποσταθεροποίησης των μορίων (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb μερικές εκκενώσεις και θερμότητα του περιβάλλοντος), οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως παράγοντες γήρανσης και διάτρησης. Οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται στην πράξη με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού.

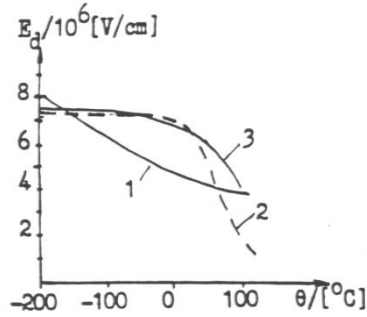
1) Ο συνδυασμός της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης

Όπως είναι γνωστό, οι διεθνείς προδιαγραφές προσδιορίζουν τα ανώτερα όρια υπερθέρμανσης των ηλεκτρολογικών κατασκευών υψηλής τάσης, βάσει των οποίων καθορίζεται το ονομαστικό ρεύμα (δοκιμή υπερθέρμανσης ή ανύψωσης θερμοκρασίας). Έτσι, έχει γίνει αποδεκτό κάποιο όριο θέρμανσης, που είναι π.χ. της τάξης των $40\div 50^{\circ}\text{C}$ στο λάδι, λόγω του οποίου, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η οριακή θερμοκρασία λειτουργίας να είναι της τάξης των $80\div 90^{\circ}\text{C}$. Όταν όμως συντρέχουν λόγοι μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής από άλλους παράγοντες, η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως το ρόλο τους, γιατί :

- Αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα
- Διευκολύνεται η εξάσκηση δυνάμεων Coulomb, γιατί οι δεσμοί στο πλέγμα των μορίων των πολυμερών υλικών γίνονται ασθενέστεροι
- Ενισχύεται ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων, λόγω μεγαλύτερης ευκινησίας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κυρίως στις φυσαλίδες αερίου

Έτσι, αυξάνει διαχρονικά η t_{gd} και μειώνεται η διάρκεια ζωής του στερεού μονωτικού και των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών γενικότερα. Η καταπόνηση, που υφίσταται το στερεό μονωτικό, ανάλογα με τη θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου του φαίνεται ότι προκαλεί μείωση της τάσης για την θερμική διάτρηση, λόγω αύξησης της αγωγιμότητάς του. Επίσης, με την παραδοχή ότι στα στερεά μονωτικά εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις κατά τη δένδροειδή ή την ηλεκτρομηχανική διάτρηση, μπορούμε να υποθέσουμε ότι μια σχέση εδώ ανάλογη με ότι ισχύει για τα αέρια, όπου η αύξηση της θερμοκρασίας σημαίνει μείωση του μέσου ελεύθερου μήκους (λ) των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια). Γι' αυτό, η αύξηση της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου φαίνεται ότι προκαλεί μείωση και της τιμής της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση.

Στο σχήμα 1.1.3.5-1 δίνονται παραδείγματα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής διαφόρων μονωτικών υλικών, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, η οποία μπορεί να ερμηνευθεί από τον παραπάνω συνδυασμό της επίδρασης της θερμότητας του περιβάλλοντος με τους υπόλοιπους παράγοντες γήρανσης και διάσπασης.

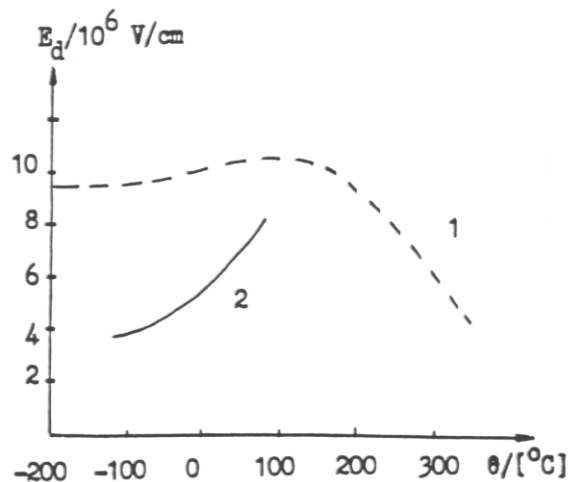


Σχήμα 1.1.3.5-1: Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στερεά μονωτικά κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου.

1 : Βακελίτης, 2 : Πολυαιθυλένιο, 3 : Πολυστετυρόλη

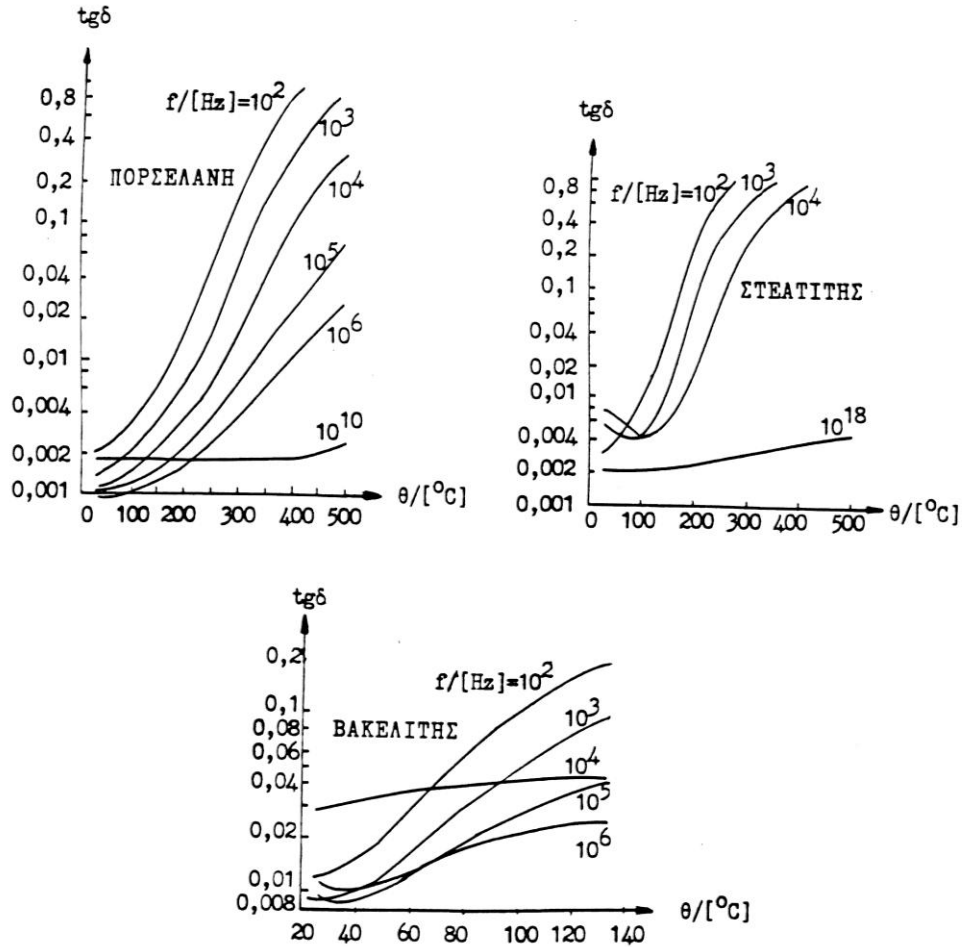
Υπάρχουν όμως περιπτώσεις στερεών μονωτικών υλικών όπου η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος δεν οδηγεί σε μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, τουλάχιστον σε κάποια περιοχή τους. Στο σχήμα 1.1.3.5-2 φαίνονται δύο παραδείγματα που ανήκουν στην περίπτωση αυτή. Μία ερμηνεία, για τη διαφορετική αυτή ανασύνδεση της μίκας (Glimmer) και του χαλαζία (Quarz) μπορεί να αποδοθεί σε αλληλοεξουδετέρωση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

Αποτέλεσμα της παραπάνω εξουδετέρωσης φαίνεται ότι είναι η μείωση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και κατά συνέπεια η αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής. Στη μίκας παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό μεταξύ -200 έως 100°C, ενώ στο χαλαζία εκδηλώνεται μόνο αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής για τις θερμοκρασίες που δίνονται στο σχήμα.



Σχήμα 1.1.3.5-2 : Διηλεκτρική αντοχή της μίκας (1) και του κρυστάλλου χαλαζία (2) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

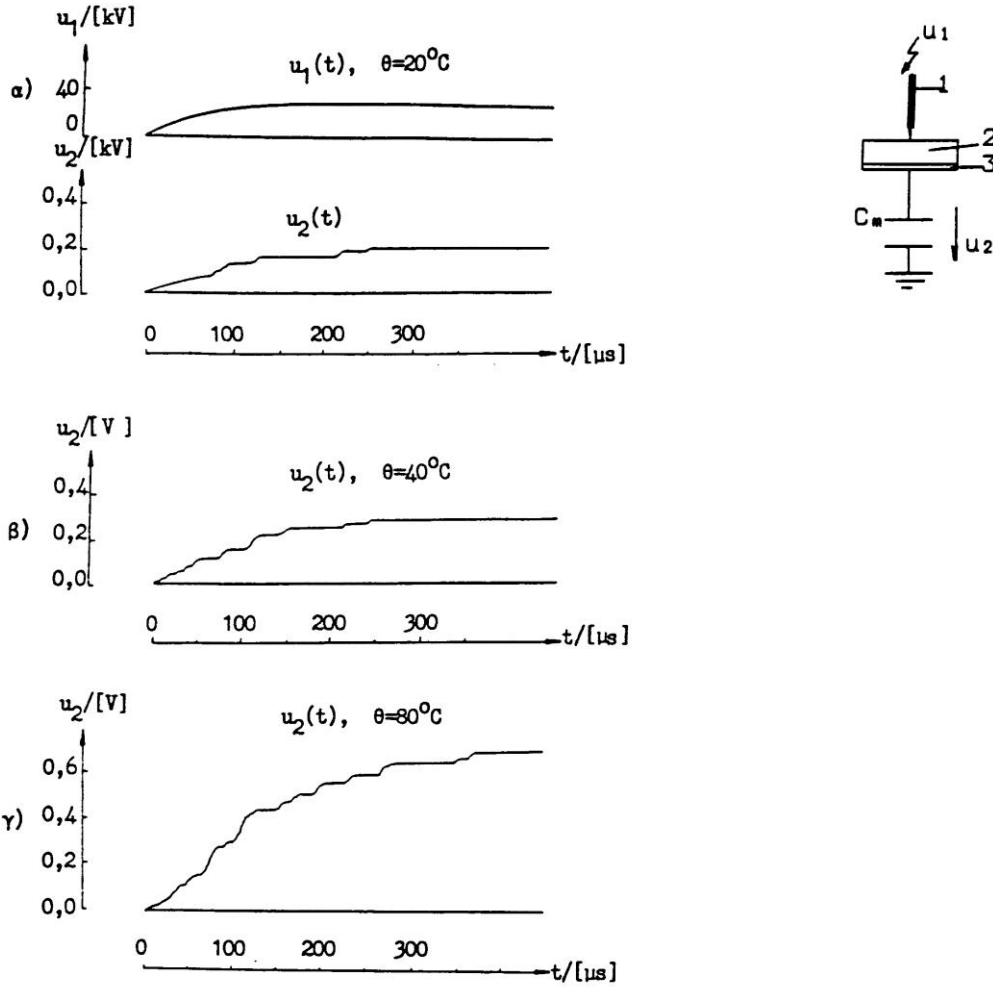
Οι χαρακτηριστικές $tg\delta=f(\theta)$ διαφόρων στερεών μονωτικών (σχήμα 1.1.3.5-3), κατά τη βιβλιογραφία, δείχνουν επίσης την αύξηση των συνολικών απωλειών με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, λόγω των οποίων μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή.



Σχήμα 1.1.3.5-3 : $tg\delta=f(\theta)$ σε διάφορα στερεά μονωτικά.

Η μείωση των απωλειών που παρατηρείται σε κάποια περιοχή ορισμένων χαρακτηριστικών του σχήματος 1.1.3.5-3, κατά την αύξηση της θερμοκρασίας και της συχνότητας, μπορεί ίσως να αποδοθεί σε επανασύνδεση των παραγόμενων φορέων.

Πρόσφατες μετρήσεις με κρουστικές τάσεις σε στερεά μονωτικά, κατά την καταπόνηση τους σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (20°C, 40°C και 80°C), οδηγούν επίσης στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας (και επομένως η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής) είναι δεδομένη, όσο αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτό φαίνεται πολύ παραστατικά στα παλμογραφήματα του σχήματος 1.1.3.5-4, όπου οι μερικές εκκενώσεις ισχυρότερες με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.



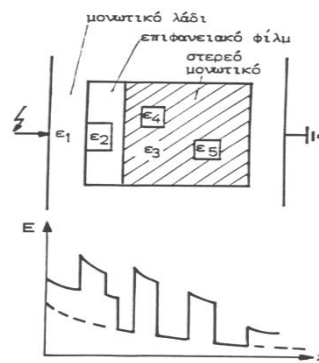
Σχήμα 1.1.3.5-4: Αύξηση των μερικών εκκενώσεων λόγω μεγαλύτερης θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο. α) $\theta=20^\circ\text{C}$, β) $\theta=40^\circ\text{C}$ και γ) $\theta=80^\circ\text{C}$.
 1: Ηλεκτρόδιο ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$).
 2: Δοκίμιο: Pertinax (πάχους 1mm και διαμέτρου 150mm).
 3: Ηλεκτρόδιο πλάκα (διαμέτρου 150mm).
 Μορφή της κρουστικής τάσης: $250/2500\mu\text{s}$.
 Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης: $U_k=28,8\text{kV}$.
 u_1 : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης.
 u_2 : άλματα δυναμικού σε έναν πυκνωτή μέτρησης $C_m=1000\mu\text{F}$ σε σειρά με το δοκίμιο

2) Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης

Οι μερικές εκκενώσεις θεωρείται ότι είναι ο κυρίαρχος παράγοντας γήρανσης και διάσπασης των μονώσεων στην πράξη. Μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών μερικών εκκενώσεων, προεξέχοντα ρόλο έχουν οι τελευταίες, γιατί σχετίζονται με χημικές μεταβολές στον όγκο του υλικού (οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις από ξένες επικαθίσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν με προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης). Λόγω της μεγάλης σπουδαιότητας των μερικών εκκενώσεων, εξετάζονται παρακάτω διάφορες περιπτώσεις συνεργασίας τους με τους άλλους παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής.

α) Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule

Η θερμική διάτρηση αρχίζει σε μία θέση του μονωτικού υλικού, όπου αρχικά, λόγω κάποιας ανομοιογένειας, υπάρχει η αιτία για τοπική αύξηση της αγωγιμότητας. Για να μελετηθεί ειδικά η θερμική διάτρηση, δεν πάρθηκε υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις, που εμφανίζονται λόγω της μικρότερης διηλεκτρικής αντοχής, στην ανομοιογένεια του υλικού. Προς κατανόηση της συμμετοχής των θέσεων διαταραχής, στον όγκο και την επιφάνεια του στερεού μονωτικού, έχει σχεδιαστεί στο σχήμα 1.1.3.5-5 η χαρακτηριστική $E=f(x)$ του στερεού μονωτικού, όταν αυτό καταλαμβάνει όλο το χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων και δεν έχει ανομοιογένειες στον όγκο του, συγκριτικά με εκείνη του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού με περιβάλλον μέσο το μονωτικό λάδι. Παρατηρούμε ότι στις θέσεις ανομοιογένειας, όπου η αγωγιμότητα είναι αυξημένη έναντι του υπόλοιπου "υγιούς" τμήματος του συνδυασμού των δύο μονωτικών (στερεό μονωτικό-μονωτικό λάδι), η πεδιακή ένταση έχει μεγαλύτερες τιμές από ότι αν δεν υπάρχουν ανομοιογένειες. Τη συμμετοχή αυτή των ανομοιογενειών στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής μπορεί να λάβει κανείς υπ' όψη σαν να πρόκειται για αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού από την πεδιακή ένταση.



Σχήμα 1.1.3.5-5: Αύξηση πεδιακής έντασης στις θέσεις ανομοιογενειών του στερεού μονωτικού.

ϵ_1 : Μονωτικό λάδι

ϵ_2 : Ανομοιογένειες στο επιφανειακό φιλμ ($\epsilon_1 < \epsilon_2$).

ϵ_3 : Στερεό μονωτικό ($\epsilon_3 > \epsilon_1$).

ϵ_4, ϵ_5 : ανομοιογένειες στον όγκο του στερεού μονωτικού ($\epsilon_3 > \epsilon_4$ και $\epsilon_3 > \epsilon_5$).

- - -: Χαρακτηριστική του στερεού μονωτικού όταν δεν καταλαμβάνει όλο τον χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων χωρίς θέσεις διαταραχής στον όγκο του.

—: Χαρακτηριστική με θέσεις διαταραχής και περιβάλλον το μονωτικό λάδι.

Για το ανομοιογενές στερεό μονωτικό έχουμε:

$$\frac{U_{\theta\epsilon}^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{\langle -\delta E \rangle d} = 2\pi r k d \theta + C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.3.5-1)$$

και στην περίπτωση της διάτρησης (στην τιμή $U_{\theta\epsilon}$):

$$\frac{U_{\theta\epsilon}^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{\langle -\delta E \rangle} = 2\pi r k d \theta \quad (1.1.3.5-2)$$

ή

$$\theta = \frac{U_{\theta\epsilon}^2 \sigma_0 \beta e^{\beta\theta} A}{2\pi r^2 k d \langle -\delta E \rangle} \quad (1.1.3.5-3)$$

Η οριακή τιμή δίνεται από τη διαφοράριση του αριστερού και του δεξιού τμήματος της παραπάνω σχέσης ως προς θ :

$$1 = \frac{U_{\theta\epsilon}^2 \sigma_0 \beta e^{\beta\theta} A}{2\pi r^2 k d \langle -\delta E \rangle} \quad (1.1.3.5-4)$$

Από τις σχέσεις 1.1.3.5-3 και 1.1.3.5-4 φαίνεται ότι $\beta\theta=1$ και επομένως η οριακή τιμή της τάσης διάσπασης είναι :

$$U_{\theta\epsilon} = d(1 - \delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.1.3.5-5)$$

Σε συνδυασμό με τη σχέση 1.1.3.1-8, η μείωση της τάσης για τη θερμική διάτρηση (ΔU_1), λόγω συμμετοχής των μερικών εκκενώσεων είναι:

$$\Delta U_1 = U_{\theta} - U_{\theta\epsilon} = \delta E d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.1.3.5-6)$$

β) η μείωση της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση, λόγω εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων

Με την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις στην θέση όπου εκδηλώνεται η μερική εκκένωση και με την παραδοχή ότι η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι πρακτικά μηδενική ισχύει :

$$\frac{u^2 \sigma A}{\langle -\delta E \rangle d} = C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.3.5-7)$$

και για τη διάτρηση στην τιμή $U_{\eta\epsilon}$ (λόγω συνδυασμού μεταξύ των δυνάμεων Coulomb και των μερικών εκκενώσεων) :

$$U_{\eta\epsilon} = \langle -\delta E \rangle \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_{\delta}}} \quad (1.1.3.5-8)$$

Η τάση διάτρησης μειώνεται δηλαδή κατά την τιμή ΔU_2 :

$$\Delta U_2 = U_{\eta} - U_{\eta\epsilon} = \delta E \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_{\delta}}} \quad (1.1.3.5-9)$$

γ) Η μείωση της θερμικής τάσης ανατροπής από τις μερικές εκκενώσεις

Αν πάρει κανείς υπόψη στη θερμική τάση ανατροπής την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων, τότε η θερμική τάση ανατροπής U_{xe} (λόγω του συνδυασμού της θερμότητας του περιβάλλοντος με τις μερικές εκκενώσεις) θα είναι :

$$U_{xe} = (1 - \delta E) \sqrt{\frac{ak\theta}{\sigma_0}} \quad (1.1.3.5-10)$$

Για τη μείωση της τιμής της θερμικής τάσης ανατροπής λόγω μερικών εκκενώσεων ισχύει επομένως :

$$\Delta U_3 = U_x - U_{xe} = \delta E \sqrt{\frac{ak_0\theta}{\sigma_0}} \quad (1.1.3.5-11)$$

δ) Η διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων (συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule και τις δυνάμεις Coulomb)

Ο συνδυασμός αυτός των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης, κατά την καταπόνηση στερεών πολυμερών μονωτικών υλικών (εντός μονωτικού ελαίου) με ένα αριθμό κρούσεων m (της μορφής 1,2/50μs, ή 10/200μs, ή 250/2500μs), που έχουν αρκετά μικρότερη μέγιστη τιμή από εκείνη για τη διάτρηση με μία κρούση, έχει αποδοθεί σε δύο φαινόμενα :

- Το θερμικό φαινόμενο (μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις).
- Την ηλεκτρομηχανική διάτρηση κατά την τελευταία κρούση (m) στην τιμή \hat{U}_k ή πολύ πλησίον αυτής.

Το θερμικό φαινόμενο θεωρείται ότι είναι μία τεχνητή γήρανση, μέχρι προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω του οποίου το υλικό απέκτησε σε μία περιοχή του (όπου εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις) την ειδική αγωγιμότητα :

$$\sigma = \sigma_0 e^{\beta_m \theta_m} \quad (1.1.3.5-12)$$

(όπου : θ_m η θερμοκρασία και β_m ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτώνται από την τιμή \hat{U}_k , τη συχνότητα των κρούσεων (χρόνος μεταξύ των διαδοχικών κρούσεων) και τη μορφή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης).

Στην περιοχή δηλαδή, όπου συμβαίνουν οι μερικές εκκενώσεις, το υλικό άλλαξε, λόγω των χημικών διεργασιών, τις φυσικές του ιδιότητες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής του, ώστε τελικά να πρόκειται για ένα "άλλο" μονωτικό, το οποίο πλέον διασπάται ηλεκτρομηχανικά στη $m^{\text{η}}$ κρούση (όπως στην περίπτωση β, που αναφέρθηκε παραπάνω). Επομένως ισχύει:

$$u^2 \frac{\sigma_0 e^{\beta_m \theta_m}}{(1 - \delta E)^2} \frac{A}{d} = C_m \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.3.5-13)$$

(όπου C_m η θερμοχωρητικότητα, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, η οποία εξαρτάται επίσης από τους παράγοντες, που προαναφέρθηκαν για τις τιμές β_m και θ_m). Έτσι, για τη διάσπαση στην τιμή U_k έχουμε:

$$\hat{U}_k = (1 - \delta E) \sqrt{d \frac{C_m \theta_m}{\sigma A T_s}} \quad (1.1.3.5-14)$$

όπου T_s ο χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης.

Επομένως, η μείωση της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης για τη διάτρηση (συγκριτικά προς εκείνη κατά τη διάτρηση χωρίς προηγούμενη τεχνητή γήρανση) είναι :

$$\Delta u = \delta E \sqrt{d \frac{C_m \theta_m}{\sigma A T_s}} \quad (1.1.3.5-15)$$

Σύμφωνα με την προηγούμενη θεωρία φαίνεται, ότι μέχρι τη m-1 κρούση η ενέργεια, που παρέχεται στο στερεό μονωτικό, μετατρέπεται στη θερμότητα που παραμένει στη θέση της προσεχούς διάτρησης και σε εκείνη που μεταδίδεται στο υπόλοιπο υλικό (ανάλογα με τη συχνότητα των κρούσεων). Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι κατά την εφαρμογή της τελευταίας κρούσης (m) η θερμοκρασία στη συγκεκριμένη θέση του υλικού έχει αποκτήσει την κρίσιμη για τη διάτρηση τιμή της. Για το μέρος της ενέργειας επομένως, που παρέχεται επί m φορές στο στερεό μονωτικό ισχύει :

$$(m-1)a\hat{U}_\kappa^2 + \gamma\hat{U}_\kappa^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{a_i} + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{\theta_i}}{(1-\delta E)^2} + \beta\hat{U}_\kappa^2 \quad (1.1.3.5-16)$$

όπου:

$(m-1)a\hat{U}_\kappa^2$: το μέρος της ενέργειας, που παρέχεται στο υλικό μέχρι τη m-1 κρούση,

$\gamma\hat{U}_\kappa^2$: το μέρος της ενέργειας που παρέχεται στο μονωτικό μόλις προ της διάτρησης κατά τη mⁿ κρούση,

$\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{a_i}$: η θερμότητα, που μεταδίδεται μέχρι προ της εφαρμογής της m_{ης} κρούσης,

$\sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{\theta_i}}{(1-\delta E)^2}$: η θερμότητα, που έχει παραμείνει στη συγκεκριμένη θέση προ της διάτρησης,

και

$\beta\hat{U}_\kappa^2$: η ενέργεια κατά τη διάτρηση.

Επειδή κατά τη διάτρηση είναι :

$$\frac{W_{\theta_m}}{(1-\delta E)^2} + \beta\hat{U}_\kappa^2 = \gamma\hat{U}_\kappa^2 \quad (1.1.3.5-17)$$

από την σχέση 1.1.3.5-16 έπεται ότι :

$$(m-1)a\hat{U}_\kappa^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{a_i} + \sum_{i=1}^{i=m-1} \frac{W_{\theta_i}}{(1-\delta E)^2} \quad (1.1.3.5-18)$$

ή

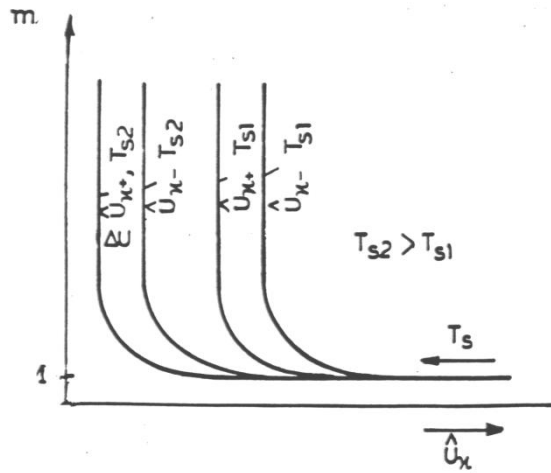
$$m = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{a_i}}{a\hat{U}_\kappa^2} + \frac{\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{\theta_i}}{(1-\delta E)^2 a\hat{U}_\kappa^2}$$

δηλαδή :

$$m = 1 + \frac{a_1}{\hat{U}_\kappa^2} + \frac{a_2}{\hat{U}_\kappa^2} = 1 + \frac{a_3}{\hat{U}_\kappa^2} \quad (1.1.3.5-19)$$

όπου a_1 , a_2 και a_3 συντελεστές, που εξαρτώνται από την τιμή \hat{U}_κ , τη συχνότητα των κρούσεων, τη μορφή της τάσης και το πάχος του υλικού (το οποίο είναι καθοριστικό για την τιμή της πεδιακής έντασης). Αν λάβει κανείς υπ' όψη τη σημασία της πολικότητας της ακίδας και τη

μείωση του χρόνου διάσπασης με την αύξηση της διάρκειας του μετώπου της κρουστικής τάσης, τότε οι χαρακτηριστικές $m = f(\hat{U}_k, T_s)$ έχουν τη μορφή, που δίνεται στο σχήμα 1.1.3.5-6.

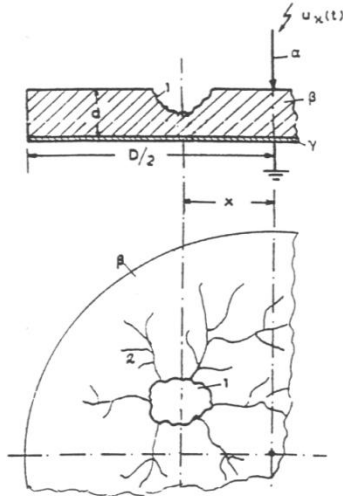


Σχήμα 1.1.3.5-6 : Χαρακτηριστικές $m = f(\hat{U}_k, T_s)$.

- m : Αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση
- T_s : Χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης
- \hat{U}_k : Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

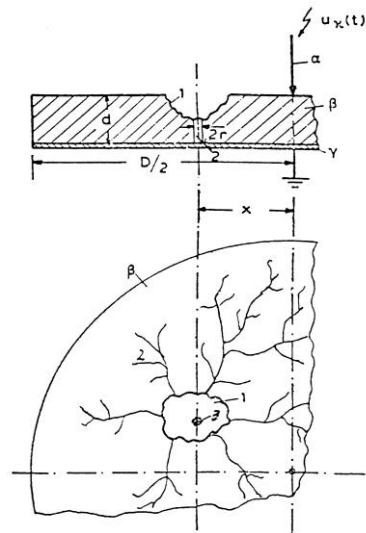
Κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού, που αναλύθηκε προηγουμένως θεωρήθηκε, ότι η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη για τη διάτρηση με μία κρούση. Από πειράματα, που έχουν γίνει με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs και 10/200μs, σε τιμές \hat{U}_k πλησίον της περιοχής διάτρησης, έχει διαπιστωθεί ότι, εκτός από τη θερμική καταπόνηση, δημιουργούνται μικρά θραύσματα στη θέση προσεχούς διάσπασης. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι στην περίπτωση αυτή συμμετέχουν στην τεχνητή γήρανση του υλικού (από κρούση σε κρούση) και οι δυνάμεις Coulomb. Η εικόνα, την οποία παρουσιάζει το δοκίμιο κατά τη γήρανση δίνεται στο σχήμα 1.1.3.5-7 και ονομάζεται **εικόνα επιφανειακών διαταραχών**. Πρόκειται για μία μόνιμη παραμόρφωση του υλικού, η οποία σχετίζεται με την εκδήλωση φωτεινής ακτινοβολίας (υπό μορφή δενδρίτη), που παρατηρεί κανείς κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Τα σπήλαια και ο κρατήρας έχουν αποδοθεί στη θερμική καταπόνηση του μονωτικού, γιατί φαίνεται ότι είναι αποτέλεσμα κάποιας τήξης του υλικού στα ίχνη του επιφανειακού δενδρίτη. Τα θραύσματα, που προαναφέρθηκαν, δημιουργούνται κυρίως στην περιοχή του κρατήρα, η οποία είναι και η θέση, όπου θα συμβεί η διάτρηση. Πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχουν δείξει ότι η εικόνα επιφανειακών διαταραχών συρρικνώνεται όσο αυξάνει η διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης (υπό σταθερή τιμή \hat{U}_k η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών είναι π.χ. μεγαλύτερη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση της μορφής 1,2/50μs, ως προς εκείνη με κρουστική τάση 10/200μs. Έχει επίσης διαπιστωθεί, ότι η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών περιορίζεται, όσο μειώνεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων.

Όταν τελικά συμβεί η διάτρηση μετά από m κρούσεις, τότε παρατηρεί κανείς μία μικρή τρύπα διάτρησης (με διάμετρο μικρότερη από 0,1mm), ως προέκταση του κρατήρα (σχήμα 1.1.3.5-8).



Σχήμα 1.1.3.5-7: Παράδειγμα εικόνας επιφανειακών διαταραχών κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$ για τιμή \tilde{U}_k πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση

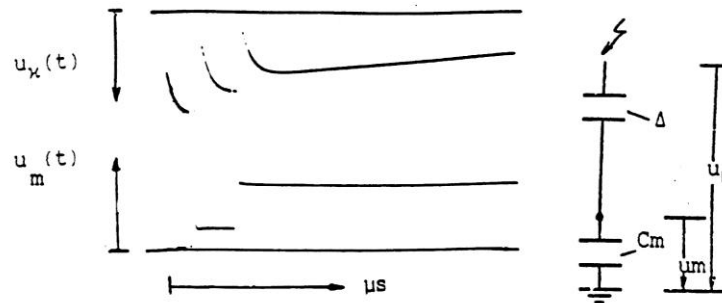
- α : ακίδα ($R \approx 1\text{mm}$)
- β : στερεό μονωτικό
- γ : πλάκα
- 1 : κρατήρας
- 2 : σπήλαια



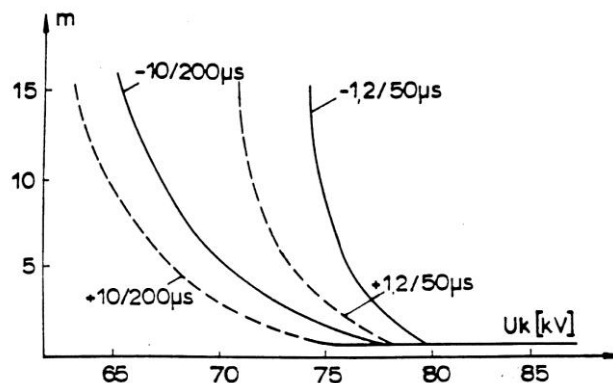
Σχήμα 1.1.3.5-8: Παράδειγμα της εικόνας διάτρησης μετά από την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$ για τιμή \tilde{U}_k πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση

- α : ακίδα ($R \approx 1\text{mm}$)
- β : στερεό μονωτικό
- γ : πλάκα
- 1 : κρατήρας
- 2 : σπήλαια
- 3 : σπή διάτρησης

Στο σχήμα 1.1.3.5-9 δίνεται ένα παράδειγμα διάτρησης του βακελίτη (πάχος 1mm) σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό διάταξη "ακίδα-πλάκα", κατά την καταπόνησή του με κρουστική τάση της μορφής 10/200μs, με μέγιστη τιμή πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση. Επίσης, οι πειραματικές χαρακτηριστικές του σχήματος 1.1.3.5-10 (για το στερεό μονωτικό pertinax πάχους 1mm) εξηγούνται ικανοποιητικά από τις θεωρητικές του σχήματος 1.1.3.5-6.



Σχήμα 1.1.3.5-9: Διάτρηση του βακελίτη (πάχους 1mm) με κρουστική τάση της μορφής 10/200μs. $\bar{U}_k = 72kV$



Σχήμα 1.1.3.5-10 : $m = f(U_k, T_s)$ για το στερεό μονωτικό Pertinax.

Ηλεκτρόδια : ακίδα- πλάκα

Δοκίμιο : pertinax πάχους 1 mm εντός μονωτικού ελαίου

m : αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση

+ : θετική πολικότητα της ακίδας

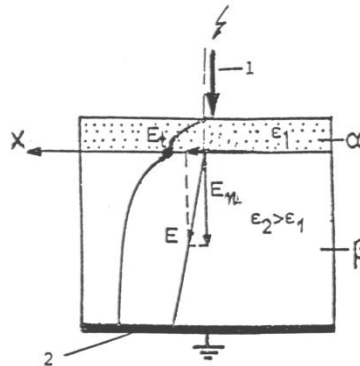
- : αρνητική πολικότητα της ακίδας

Όπως δείχνεται στο σχήματα 1.1.3.5-7 και 1.1.3.5-8 ο κρατήρας και η τρύπα διάτρησης σχηματίζονται σε μία απόσταση x από την ακίδα (συνήθως μερικά mm), αν και η μέγιστη τιμή του πεδίου είναι στην κορυφή της ακίδας. Η ίδια παρατήρηση ισχύει για την τρύπα διάτρησης, όταν η διάτρηση συμβαίνει με μία μόνο κρούση. Αυτό φαίνεται ότι οφείλεται :

α) στην στατιστικότητα του φαινομένου (είναι στατιστικά αδύνατο να βρισκεται ακριβώς κάτω από την ακίδα η επικρατέστερη θέση διαταραχής, και

β) σε πολύ μικρή απόσταση από την ακίδα μετακινούνται, υπό την επίδραση της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης οι ετερόνυμοι προς αυτήν ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς του επιφανειακού φιλμ, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρακτικά επέκταση του ίχνους της ακίδας (σχήμα 1.1.3.5-11).

Η παραπάνω παρατήρηση για τη θέση της τρύπας διάτρησης ισχύει επίσης κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή κρουστικής τάσης 250/2500μs), καθώς και εκείνη με εναλλασσόμενη ή συνεχή τάση. Από έρευνες, που έχουν γίνει με τις παραπάνω μορφές τάσης (με ακτίνα καμπυλότητα της ακίδας 0,9mm ή 1mm) δεν έχει διαπιστωθεί κατά την τεχνητή γήρανση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm ή 2mm) η εκδήλωση κρατήρα ή σπηλαίων, ούτε έχει παρατηρηθεί η εκδήλωση επιφανειακού δένδριτη (ανεξαρτήτως της τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης). Η διαφορά αυτή ως προς την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών, που παρουσιάζεται κατά την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs και 10/200μs, είναι μία σημαντική παρατήρηση, που έχει οδηγήσει (σε συνδυασμό με μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών) στο διαχωρισμό μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης στο στερεό μονωτικό τάσης.



Σχήμα 1.1.3.5-11 : Επεξήγηση της σημασίας της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης στον καθορισμό του κρατήρα και γενικότερα της θέσης διάτρησης, κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs και 10/200μs.

1 : ακίδα, 2 : πλάκα

α) επιφανειακό φιλμ

β) στερεό μονωτικό

•: θέση όπου εκδηλώνεται ο κρατήρας (και γενικότερα η διάτρηση)

3) Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Το αποτέλεσμα του συνδυασμού των τεσσάρων παραγόντων γήρανσης και διάτρησης (απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος) εξαρτάται από το πώς αυτοί εκδηλώνονται διαχρονικά.

Αν θεωρηθεί π.χ., ότι πρόκειται για γήρανση του υλικού, τότε η καταπόνηση είναι κυρίως θερμική, οπότε από τη σχέση 1.1.3.1-3 και 1.1.4-2 έχουμε :

$$\frac{u^2 A}{d} \frac{e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2} = 2\pi r \cdot d \cdot \kappa + C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.3.5-20)$$

όπου u η στιγμιαία τιμή της τάσης για τη διάτρηση και θ η διαφορά θερμοκρασίας ως προς το περιβάλλον. Από την παραπάνω σχέση και την σχέση 1.1.3.1-8 ο χρόνος διάτρησης είναι:

$$t = \frac{C_0 \beta}{2\pi r \cdot d \cdot \kappa} \int \frac{d\theta}{\left(\frac{U}{U_0}\right)^2 e^{\beta\theta} - \beta\theta} \quad (1.1.3.5-21)$$

Αν θεωρηθεί, ότι λόγω προηγούμενης γήρανσης, συμβαίνει τελικά η διάτρηση για $U > U_\theta$ (ηλεκτρική διάτρηση) και ότι :

$$\beta\theta \ll \left(\frac{U}{U_\theta}\right)^2 e^{\beta\theta-1}$$

τότε, από την σχέση 1.1.3.5-21 έχουμε :

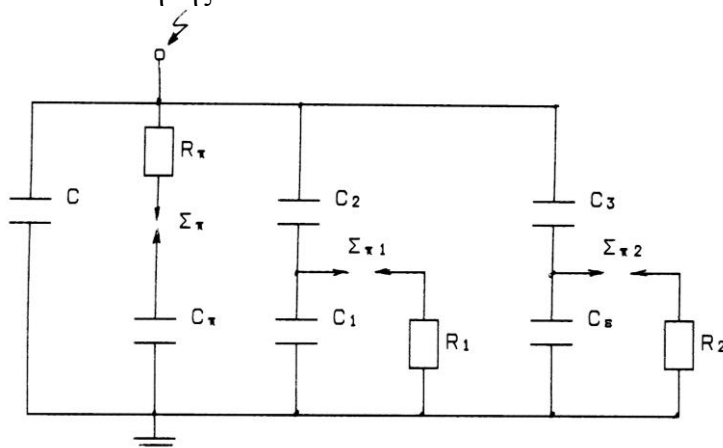
$$t \approx \frac{C_0 e}{2\pi r \cdot d \cdot \kappa \cdot \beta} \cdot \left(\frac{U_\theta}{U}\right)^2 \quad (1.1.3.5-22)$$

ή

$$t \approx \frac{a}{U^2} \quad (1.1.3.5-23)$$

όπου a ένας συντελεστής του υλικού.

Η παραπάνω σχέση δίνει μία πιθανή ερμηνεία για τη διάτρηση των στερεών μονωτικών, σε καταπονήσεις μικρής χρονικής διάρκειας. Πράγματι, η σχέση 1.1.3.5-10 για τη διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων (βλέπετε χαρακτηριστικές των σχημάτων 1.1.3.5-6 και 1.1.3.5-10) φαίνεται ότι εναρμονίζεται με την σχέση 1.1.3.5-23, γιατί ο αριθμός των κρούσεων (m) σχετίζεται με τον χρόνο καταπόνησης.



Σχήμα 1.1.3.5-12 : Βελτίωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff, ώστε να αποδίδεται από αυτό η γήρανση και η ηλεκτρομηχανική διάτρηση.

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

C_1 : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών (κυρίως φουσαλίδες αερίων).

C_2 : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του στερεού μονωτικού.

C_ϵ : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών.

C_3 : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του επιφανειακού φιλμ.

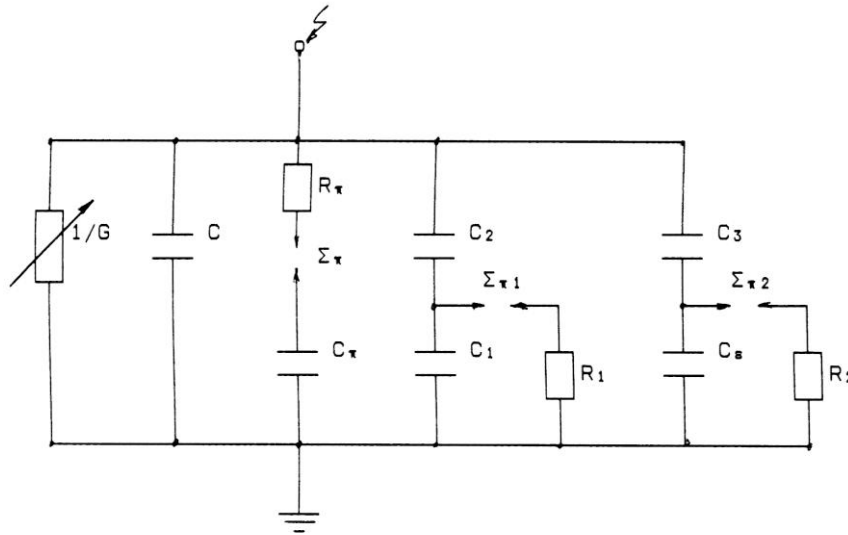
C_π : Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου.

R_1 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ π_1 .

R_2 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ π_2 .

R_π , Σ π : Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του C_π (R_π αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ π).

Από πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχει προταθεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που αποδίδει ικανοποιητικά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση και τις μερικές εκκενώσεις (σχήμα 1.1.3.5-13). Όπως φαίνεται πρόκειται ουσιαστικά για μία παράλληλη σύνδεση ενός πυκνωτή C_{π} , προς το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff. Ο πυκνωτής αυτός εκφράζει την πόλωση του υλικού, λόγω της οποίας συμβαίνει η μηχανική τάνυσή του από τις δυνάμεις του πεδίου. Η διαδρομή εκκένωσης εκφράζεται στην περίπτωση αυτή με τον σπινθηριστή Σ_{π} και την αντίσταση του τόξου R_{π} (υποτίθεται ότι ο Σ_{π} διασπάται ταυτόχρονα με τον πυκνωτή C_{π}). Για να αποδίδει το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα το συνδυασμό όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης (κατά τη μακροσκοπική θεωρία), φαίνεται ότι θα πρέπει να γίνει η παράλληλη σύνδεση μίας μεταβλητής αγωγιμότητας, που θα εκφράζει τις θερμικές απώλειες (απώλειες Joule και ενίσχυσή τους από τις μερικές εκκενώσεις) και την καταπόνηση του υλικού από τη θερμότητα του περιβάλλοντος (σχήμα 1.1.3.5-13).



Σχήμα 1.1.3.5-13 : Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

C_1 : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών (κυρίως φυσαλίδες αερίων).

C_2 : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του στερεού μονωτικού.

C_e : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών.

C_3 : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του επιφανειακού φιλμ.

C_{π} : Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου.

R_1 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma_{\pi 1}$.

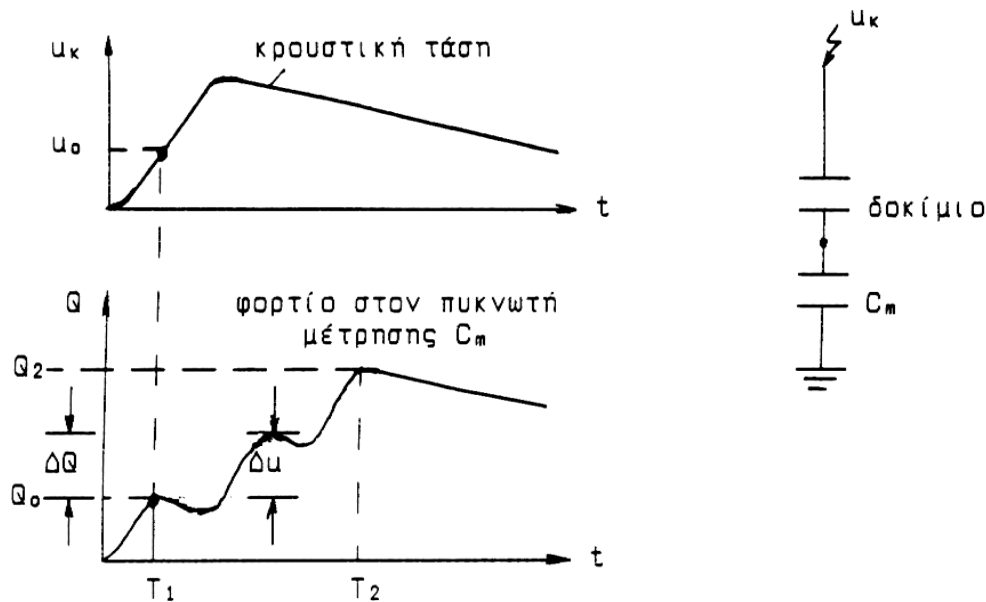
R_2 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma_{\pi 2}$.

R_{π} , Σ_{π} : Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του C_{π} (R_{π} αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_{π}).

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

1.1.3.6 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 1.1.3.6-1 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 1.1.3.6-2). Στο σχήμα π.χ. 1.1.3.6-3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



Σχήμα 1.1.3.6-1: 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.

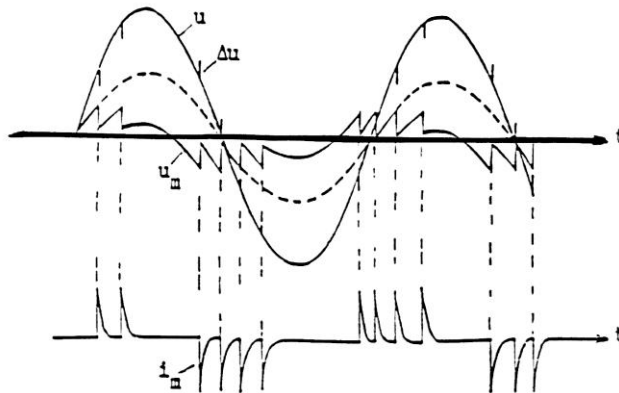
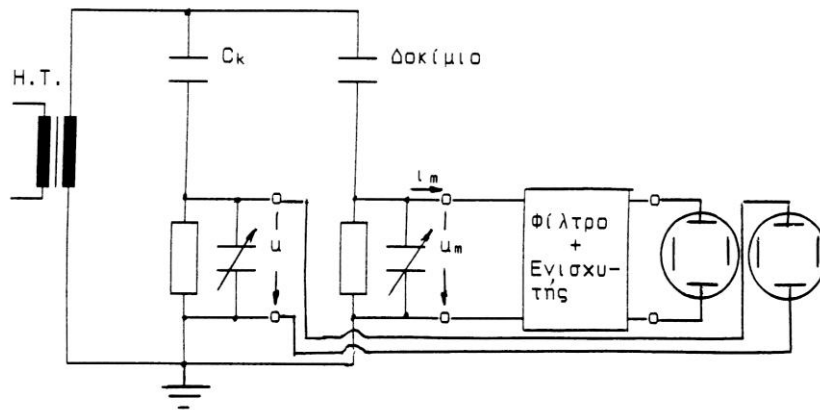
Q_2 : Φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

$U_κ$: Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

$U_ο$: Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).

ΔU : Άλμα δυναμικού.

ΔQ : Αύξηση φορτίου.



Σχήμα 1.1.3.6-2 : 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.

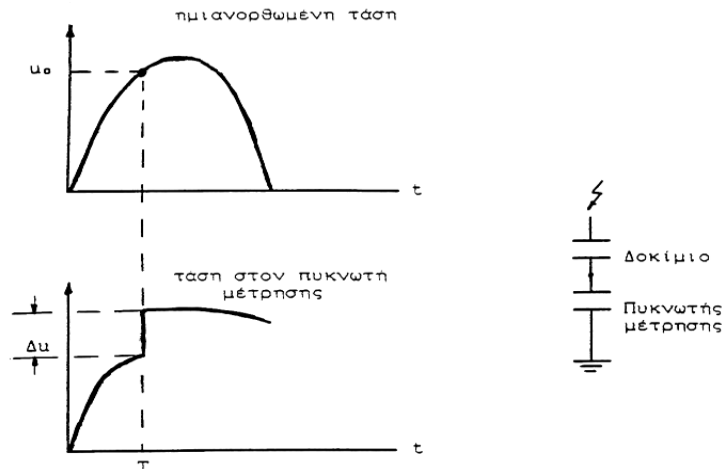
C_k : Πυκνωτής υψηλής τάσης.

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.



Σχήμα 1.1.3.6-3 : Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

T_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

U_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).

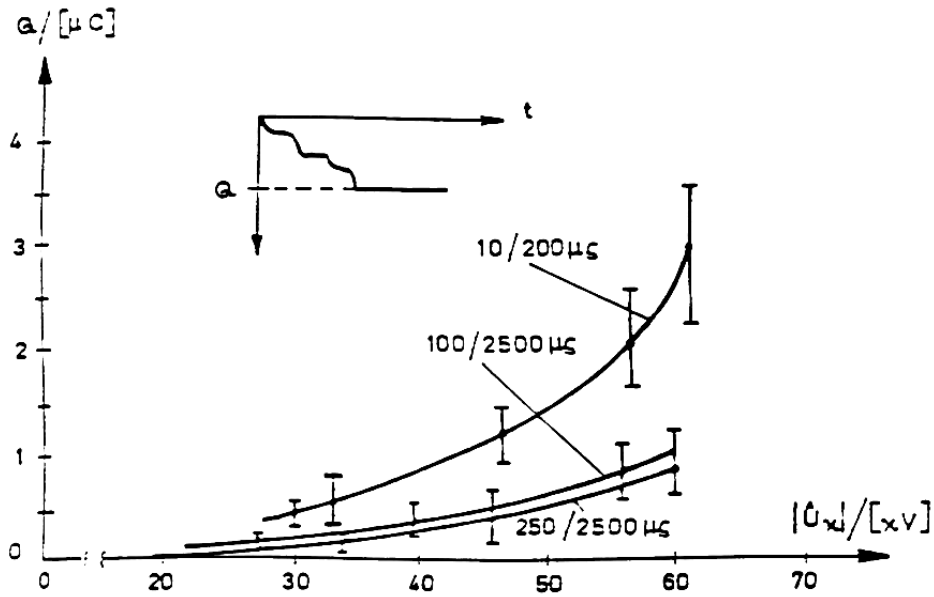
Δu : άλμα δυναμικού.

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως : η χαρακτηριστική $Q=f(\bar{U}_k)$, η χαρακτηριστική $u_0=f(\bar{U}_k)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της τάσης, κ.λ.π. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q=f(\bar{U}_k)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 1.1.3.6-4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών, 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 1.1.3.6-5 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.

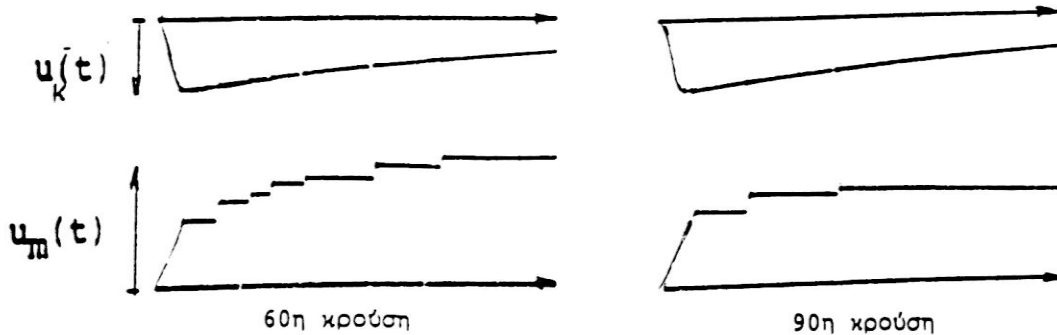
Ένα σημαντικό αποτέλεσμα των ερευνών του είδους αυτού είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης στο στερεό μονωτικό. Έχει διαπιστωθεί ότι:

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

Τα παραπάνω σημαίνουν 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 1.1.3.6-4 : Χαρακτηριστική $Q_2=f(\bar{U}_k)$ 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 1.1.3.6-5 : Άλματα δυναμικού κατά την 60^η και την 90^η κρούση στο pertinax (πάχους 2mm).
 Μορφή τάσης : 1,2/50μs ($\bar{U}_k=99,7kV$).
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.
 C_m : 210nF.

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 διαταραχών.

Στον πίνακα 1.1.3.6-1 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \approx 2,5-4,5$, από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που προαναφέρθηκε. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης 1,2/50μs) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

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

Πίνακας 1.1.3.6-1 : Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

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

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, 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,
- **το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας**, που εκπέμπεται κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων στα ηλεκτρόδια.

Τα δύο τελευταία φαινόμενα συσχετίζονται με τις καταπονήσεις και τα φωτεινά φαινόμενα, που παρατηρούνται στα στερεά μονωτικά δίνοντας έτσι περισσότερες πληροφορίες για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής τους.

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

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

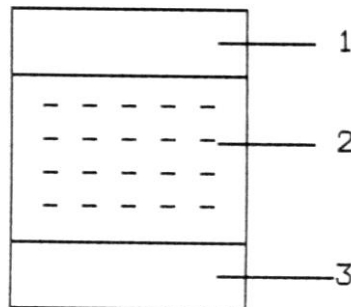
Στη κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η **ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων** (κυρίως ηλεκτρονία). Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την ενέργεια Fermi των ηλεκτροδίων διευκολύνει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Τα βασικότερα συμπεράσματα 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 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση (1.1.4.-1).
- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση (1.1.4-1). Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια.

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 $W = 0,5q_e\Delta u$, 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.

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 1.1.4-1). Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff (σχήμα 1.1.3.3-4). Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 1.1.4-1 : Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

1 : ζώνη αγωγιμότητας

2 : στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη

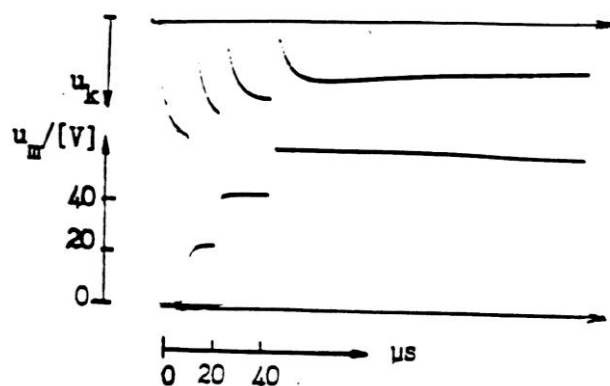
3: ζώνη σθένους

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.

1.1.5 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση

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

Ένα τυπικό παλμογράφημα του φαινομένου δίνεται στο σχήμα 1.1.5-1. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων (W) υπολογίζεται ότι είναι περίπου 105eV. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε, ότι η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων X.



Σχήμα 1.1.5-1 : Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου.

Κρουστική τάση : 1,2/50μs.

R της ακίδας ≈1mm.

\bar{U}_k : 85kV.

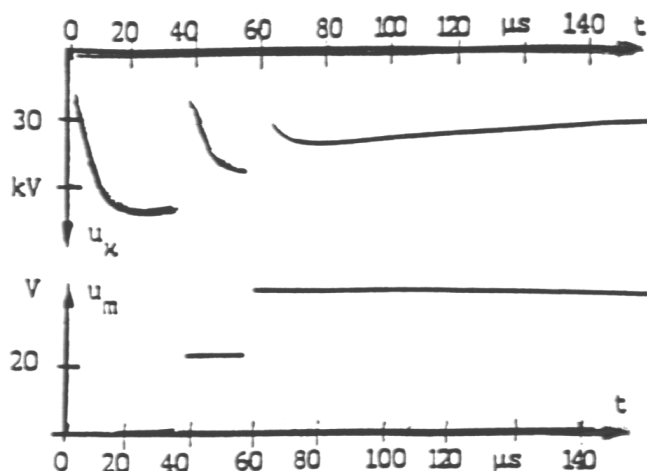
E : 1,2 MV/cm.

C_m : 1835nF.

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

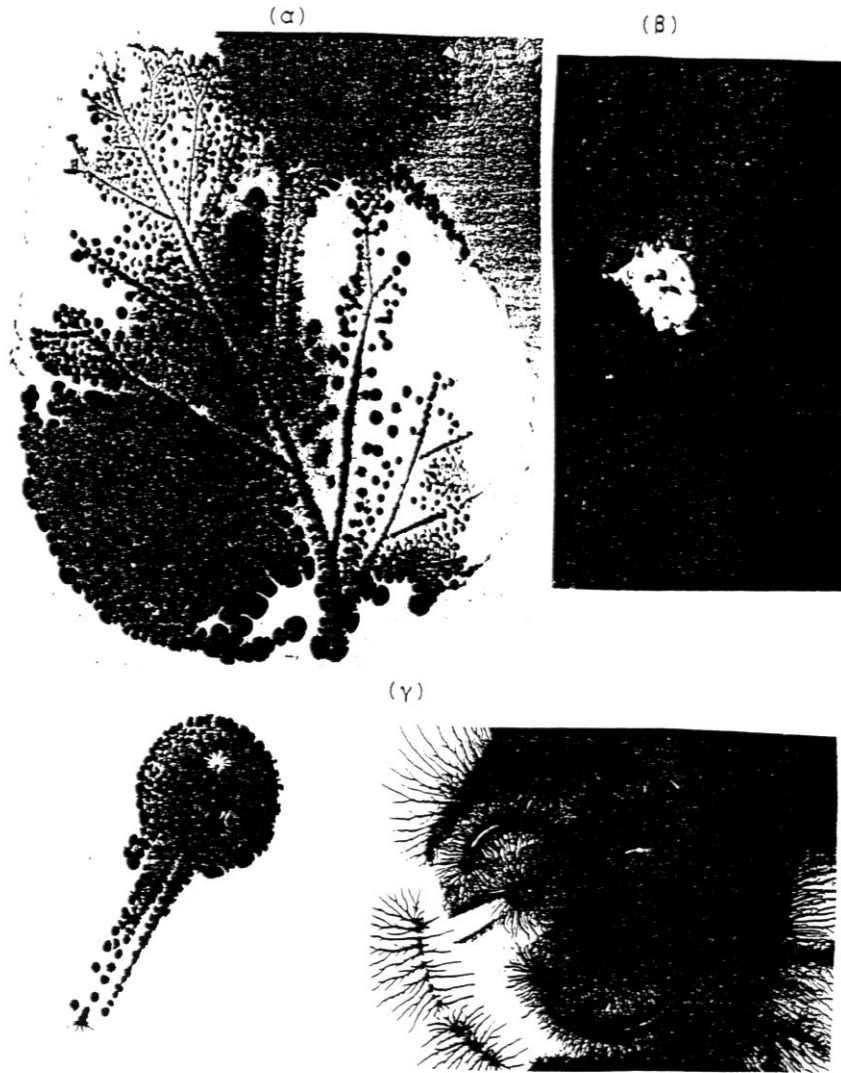
1.1.6 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση

Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι ισχύει ότι και προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης. Παρακάτω εξετάζεται (για λόγους σύγκρισης με τη διάτρηση) ένα τυπικό παράδειγμα επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών πάχους 2mm σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος 1.1.6-1 υπολογίζεται η ενέργεια W των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η ενέργεια αυτή για το πρώτο και το τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα : 122eV και 96,5eV. Όπως φαίνεται η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτίνων X.



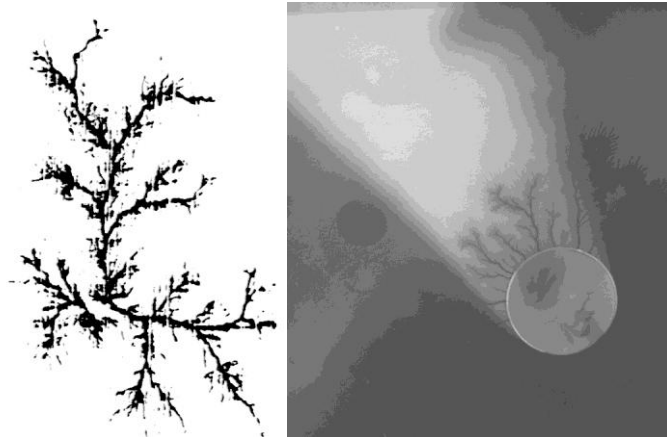
Σχήμα 1.1.6-1 : Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του *peritinax* (πάχους 2mm και με διάμετρο της επιφάνειάς του 150mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου. Ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης : «ακίδα-πλάκα».

Αν τελικά συμβαίνει εκπομπή ακτίνων X κατά τη διάτρηση και την επιφανειακή διάσπαση, τότε θα πρέπει να προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και να απεικονίζονται αντικείμενα (όπως π.χ. συμβαίνει με τις λυχνίες των ακτινολογικών μηχανημάτων). Το ίδιο θα πρέπει να ισχύει και κατά την εκπομπή υπερϊώδους ακτινοβολίας (τουλάχιστον σε τιμές πεδίου πλησίον της διάσπασης, όπου αυτή να είναι αρκετά eV). Από πειράματα που έγιναν για τον σκοπό αυτό, φαίνεται ότι προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και απεικονίζονται αντικείμενα, καθώς και βιολογικοί οργανισμοί. Στο σχήμα 1.1.6-2 δίνονται ορισμένες από τις φωτογραφίες αυτές.

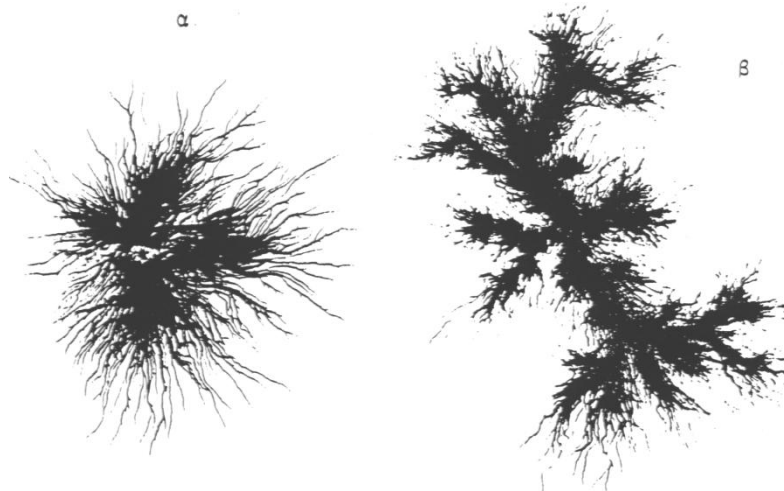


Σχήμα 1.1.6-2 : Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερούς στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.
 α) Φωτογράφιση φύλλου δένδρου
 β) Φωτογραφία βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι).
 γ) Φωτογραφία μεταλλικών αντικειμένων.

Επίσης, στο σχήμα 1.1.6-3 δίνονται φωτογραφίες επιφανειακών δενδριτών, που αφορούν αντίστοιχα τη γήρανση και τη διάσπαση. Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2mm και διαμέτρου 150mm), υπό κρουστικές τάσης 1,2/50μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα.



Σχήμα 1.1.6-3 : Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερών στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση $1,2/50\mu\text{s}$ (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα).



Σχήμα 1.1.6-4 : Φωτογραφίες δενδριτών κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών στον αέρα, υπό κρουστική τάση $1,2/50\mu\text{s}$ (διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα).
 α) Δενδρίτης σε τιμές πεδίου πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση).
 β) Δενδρίτης κατά την επιφανειακή διάσπαση.

Οι φωτογραφίες σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, καθώς και εκείνες της διάτρησης (στον αέρα ή στο λάδι), οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα. Σχετικά με την απεικόνιση των δενδριτών στο φωτογραφικό φιλμ μπορούμε να υποθέσουμε, ότι ο δενδρίτης στη φωτογραφία του σχήματος 1.1.6-3 σχετίζεται με την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ εκείνος του σχήματος 1.1.6-4 με υπεριώδεις ακτίνες και ακτίνες X. Κατά τον τρόπο αυτό δίνεται μία φυσική ερμηνεία για τις γνωστές εικόνες Lichtenberg. Μπορεί επίσης να συμπεράνει κανείς, ότι ο φωτεινός δενδρίτης και ο σχετός διάσπασης, που παρατηρούνται κατά την ηλεκτρική καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού, αφορούν το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

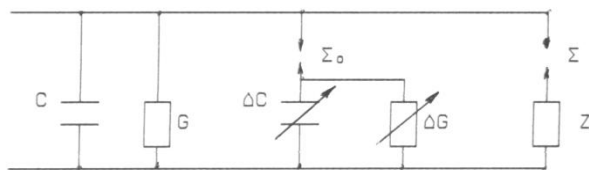
1.1.7 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών

Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 1.1.6 φαίνεται, ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα υλικά αυτά κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους. Οι πληροφορίες αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεώρηση των παραπάνω φαινομένων. Πλεονέκτημα όμως της μακροσκοπικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών μονωτικών φαίνεται ότι είναι ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη. Ο διαχωρισμός αυτός των μερικών εκκενώσεων δεν μπορεί να δοθεί από την θεωρία του ιονισμού με κρούσεις, γιατί ο συντελεστής A στον τύπο $Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2}$ αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του και η τιμή της θα πρέπει να εξαρτάται από την διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών χρειάζεται να συνδυαστούν οι δύο θεωρίες, ώστε να δίνουν περισσότερες πληροφορίες για την πράξη. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που έχει προταθεί για τον σκοπό αυτό, δίνεται στο σχήμα 1.1.7-1. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant-Philipoff (σχήμα 1.1.3.3-4), όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσει κανείς, ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει στην τιμή της πεδιακής E_0 (περίπου 0,2MV/cm), τότε, τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.1.7-1 ως ακολούθως :

- 1) Για $E < E_0$: Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δεν διασπώνται οι σπινθηριστές Σ_0, Σ).
- 2) Για $E > E_0$: Εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (διασπάται ο Σ_0) και η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διέπεται από την σχέση : $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$.
- 3) Για $E \gg E_0$: Εμφανίζεται αρνητική διαφορική αντίσταση και εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις. Δεν ισχύει η σχέση $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$, αλλά η σχέση :

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

Το φάσμα της ακτινοβολίας, που εκπέμπεται, εξαρτάται από την τιμή E . Για τιμές $W > 20\text{eV}$ συμβαίνει η διάτρηση



Σχήμα 1.1.7-1 : Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα

G : ιδανική αγωγιμότητα

ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

ΔG : αύξηση της αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

Z : αρνητική διαφορική αντίσταση

Σ_0 : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Σ : σπινθηριστής εκδήλωσης της Z

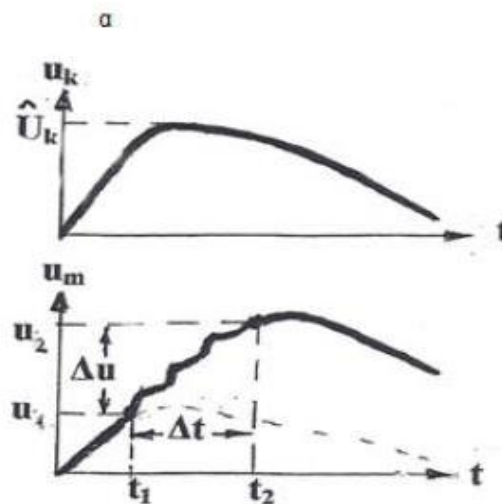
2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό, την μελέτη και την στατιστική ανάλυση των ηλεκτρικών φαινομένων που συνοδεύουν τις μερικές εκκενώσεις ενός βιομηχανικού υλικού με την ονομασία Pertinax και την διερεύνηση φαινομένων που σχετίζονται με την ικανότητά του να παρέχει μόνωση. Οι μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται σε δοκίμια πάχους 1mm και 2mm εντός ελαίου μετασχηματιστών 20°C υπό κρουστικές τάσεις $\pm 250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, η οποία αποτελεί την δυσμενέστερη δυνατή περίπτωση, καθώς η πλάκα συμβολίζει την γη και η ακίδα την οποιαδήποτε καταπόνηση του υλικού.

Συγκεκριμένα, ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η παρατήρηση των ηλεκτρικών φαινομένων που εκδηλώνονται πριν και κατά τη στιγμή της διάσπασης του ηλεκτρομονωτικού υλικού μέσα από τις μετρήσεις, ο υπολογισμός των ηλεκτρικών μεγεθών που θα ορισθούν παρακάτω, η κατανόηση της συμπεριφοράς του ηλεκτρομονωτικού υλικού και η γενικότερη κατανόηση των φαινομένων των μερικών εκκενώσεων που παρατηρούνται στα διάφορα ηλεκτρομονωτικά βιομηχανικά υλικά.

Τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν από την μελέτη θα βοηθήσουν στην περαιτέρω κατανόηση φαινομένων που παρατηρούνται στα διάφορα ηλεκτρομονωτικά βιομηχανικά υλικά. Συνεπώς η επιλογή των υλικών θα γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια όπως και η αξιολόγησή τους για την χρησιμοποίησή τους σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε κατασκευής.

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων των κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού - ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις :



Σχήμα 2.1 : Καθορισμός εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων.

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt : t_1-t_2

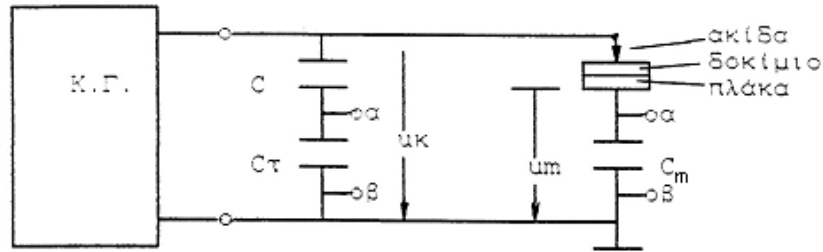
u_1 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

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

Δu : u_2-u_1

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

Η εργαστηριακή διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 2.2 : Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης

Κ.Γ. : γεννήτρια κρουστικών τάσεων

C, C_τ : καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης (u_κ)

C_m : πυκνωτής μέτρησης των αλμάτων δυναμικού (u_κ)

α, β : προς παλμογράφο

Η παρουσία των μερικών εκκενώσεων έγινε αισθητή με την εκδήλωση αλμάτων δυναμικού στα παλμογραφήματα και έτσι έγινε δυνατή η μέτρηση ορισμένων μεγεθών. Συγκεκριμένα, μετρήθηκαν τα μεγέθη \hat{U}_k (μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης μετρούμενη σε kV), q_1 (στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων μετρούμενη σε μC), q_2 (στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων μετρούμενη σε μC), t_1 (χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων μετρούμενος σε μs) και t_2 (χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων μετρούμενος σε μs).

Η διεξαγωγή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ηλεκτρικών μετρήσεων και υψηλών τάσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων. Οι μετρήσεις αυτές επαναλήφθηκαν σε δέκα νέα δοκίμια, ανά επίπεδο τάσης, ούτως ώστε να υπολογιστεί η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των φορτίων.

Επίσης, εκτός από τα ηλεκτρικά μεγέθη που μετρήθηκαν, υπολογίσθηκαν και κάποια επιπλέον για την εξαγωγή κατάλληλων συμπερασμάτων της αγωγίμης συμπεριφοράς που παρουσιάζει το ηλεκτρομονωτικό υλικό. Οι σχέσεις από τις οποίες έγινε ο υπολογισμός των ηλεκτρικών αυτών μεγεθών παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Η πεδιακή ένταση για διάταξη ηλεκτροδίων ακίδας-πλάκας, δίνεται από:

$$\hat{E}_k = \frac{2 \cdot \hat{U}_k}{\{R \cdot \ln(4d/R)\}} \quad (2-1)$$

2. Η σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων:

$$i_1 = \frac{Q_1}{t_1} = \frac{C_m u_1}{t_1} \rightarrow Z_1 = \frac{u_1}{i_1} = \frac{u_1}{(C_m u_1)/t_1} \rightarrow Z_1 = \frac{t_1}{C_m} \quad (2-2)$$

3. Η σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων :

$$i_2 = \frac{Q_2}{t_2} = \frac{C_m u_2}{t_2} \rightarrow Z_2 = \frac{u_2}{i_2} = \frac{u_2}{(C_m u_2)/t_2} \rightarrow Z_2 = \frac{t_2}{C_m} \quad (2-3)$$

4. Η διαφορά της αντίστασης κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων:

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 \quad (2 - 4)$$

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

$$W_1 = u_1 i_1 t_1 = u_1 \{(C_m u_1)/t_1\} t_1 \rightarrow W_1 = u_1^2 C_m \quad (2 - 5)$$

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

$$W_2 = u_2 i_2 t_2 = u_2 \{(C_m u_2)/t_2\} t_2 \rightarrow W_2 = u_2^2 C_m \quad (2 - 6)$$

7. Η διαφορά της στιγμιαίας τιμής ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων :

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad (2 - 7)$$

8. Η στιγμιαία τιμή ισχύος στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων:

$$P_1 = \frac{W_1}{t_1} \quad (2 - 8)$$

9. Η στιγμιαία τιμή ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων:

$$P_2 = \frac{W_2}{t_2} \quad (2 - 9)$$

10. Η διαφορά της στιγμιαίας τιμής ισχύος στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων:

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (2 - 10)$$

11. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων :

$$\Delta W_e = 0,5 \Delta u \quad (2 - 11)$$

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι μετρούμενες τιμές και τα αποτελέσματα των υπολογισμών των ηλεκτρικών μεγεθών καθώς και οι χαρακτηριστικές αυτών χωρίς κανένα σχόλιο.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές με την μαθηματική τους προσέγγιση και γίνεται σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων.

3. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των υπολογισμών που έγιναν καθώς και οι χαρακτηριστικές αυτών χωρίς σχόλια. Τα σχόλια επί των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.

3.1 Pertinax, d=1mm υπό κρουστική τάση +250/2500 μ s και σε θερμοκρασία $\theta=20^\circ\text{C}$

\hat{U}_k kV	\hat{E}_k MV/cm	C_m nF	q_1 μC	q_2 μC	u_1 V	u_2 V	Δu V	t_1 s	t_2 s	Δt s
10,1	0,150467	1000	0,015	-	0,015	-	-0,015	-	-	-
10,1	0,150467	1000	0,002	-	0,002	-	-0,002	-	-	-
13,4	0,199629	1000	0,019	0,028	0,019	0,028	0,009	200,9	260,1	59,2
13,4	0,199629	1000	0,001	0,001	0,001	0,001	0	68,73	49,71	-19,02
16,8	0,250281	1000	0,025	0,059	0,025	0,059	0,034	104,6	190,7	86,1
16,8	0,250281	1000	0,002	0,006	0,002	0,006	0,004	17,72	76,61	58,89
20,1	0,299444	1000	0,024	0,096	0,024	0,096	0,072	76,9	272,7	195,8
20,1	0,299444	1000	0,003	0,01	0,003	0,01	0,007	22,59	76,32	53,73
23,4	0,348606	1000	0,054	0,33	0,054	0,33	0,276	55,4	251,8	196,4
23,4	0,348606	1000	0	0,08	0	0,08	0,08	11,7	46,37	34,67
26,7	0,397769	1000	0,067	0,74	0,067	0,74	0,673	42,2	268	225,8
26,7	0,397769	1000	0	0,06	0	0,06	0,06	5,9	51,75	45,85
30,2	0,44991	1000	0,067	1,03	0,067	1,03	0,963	41,2	288,2	247
30,2	0,44991	1000	0	0,12	0	0,12	0,12	6,37	91,9	85,53
33,5	0,499073	1000	0,067	1,51	0,067	1,51	1,443	36,8	251,1	214,3
33,5	0,499073	1000	0	0,17	0	0,17	0,17	6,12	74,79	68,67
36,9	0,549725	1000	0,067	1,99	0,067	1,99	1,923	32,1	243,7	211,6
36,9	0,549725	1000	0	0,26	0	0,26	0,26	4,05	50,09	46,04
40,2	0,598887	1000	0,13	3,14	0,13	3,14	3,01	30	215	185
40,2	0,598887	1000	0	0,5	0	0,5	0,5	2,78	48,72	45,94
43,6	0,64954	1000	0	4,1	0	4,1	4,1	24,6	253,8	229,2
43,6	0,64954	1000	0	0,41	0	0,41	0,41	2,65	49,35	46,7

Πίνακας 3.1-1α: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στις σχέσεις (2-1) έως (2-11).

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

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

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

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

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

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

Δu : $u_2 - u_1$

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt : $t_1 - t_2$

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

\hat{U}_k kV	Z_1 Ω	Z_2 Ω	ΔZ Ω	W_1 Ws	W_2 Ws	ΔW Ws	P_1 W	P_2 W	ΔP W	ΔWe eV
10,1	-	-	-	$2,25 \cdot 10^{-10}$	-	$-2,3 \cdot 10^{-10}$	-	-	-	-0,0075
10,1	-	-	-	$4 \cdot 10^{-12}$	-	$-4 \cdot 10^{-12}$	-	-	-	-0,001
13,4	200,9	260,1	59,2	$3,61 \cdot 10^{-10}$	$7,84 \cdot 10^{-10}$	$4,23 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$3,01 \cdot 10^{-6}$	$1,22 \cdot 10^{-6}$	0,0045
13,4	68,73	49,71	-19,02	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12}$	0	$1,45 \cdot 10^{-8}$	$2,01 \cdot 10^{-8}$	$5,57 \cdot 10^{-9}$	0
16,8	104,6	190,7	86,1	$6,25 \cdot 10^{-10}$	$3,481 \cdot 10^{-9}$	$2,86 \cdot 10^{-9}$	$5,98 \cdot 10^{-6}$	$1,83 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$	0,017
16,8	17,72	76,61	58,89	$4 \cdot 10^{-12}$	$3,6 \cdot 10^{-11}$	$3,2 \cdot 10^{-11}$	$2,26 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-7}$	$2,44 \cdot 10^{-7}$	0,002
20,1	76,9	272,7	195,8	$5,76 \cdot 10^{-10}$	$9,216 \cdot 10^{-9}$	$8,64 \cdot 10^{-9}$	$7,49 \cdot 10^{-6}$	$3,38 \cdot 10^{-5}$	$2,63 \cdot 10^{-5}$	0,036
20,1	22,59	76,32	53,73	$9 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$9,1 \cdot 10^{-11}$	$3,98 \cdot 10^{-7}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$	$9,12 \cdot 10^{-7}$	0,0035
23,4	55,4	251,8	196,4	$2,916 \cdot 10^{-9}$	$1,089 \cdot 10^{-7}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$	$5,26 \cdot 10^{-5}$	0,000432	0,00038	0,138
23,4	11,7	46,37	34,67	0	$6,4 \cdot 10^{-9}$	$6,4 \cdot 10^{-9}$	0	0,000138	0,000138	0,04
26,7	42,2	268	225,8	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$5,476 \cdot 10^{-7}$	$5,43 \cdot 10^{-7}$	0,000106	0,002043	0,001937	0,3365
26,7	5,9	51,75	45,85	0	$3,6 \cdot 10^{-9}$	$3,6 \cdot 10^{-9}$	0	$6,96 \cdot 10^{-5}$	$6,96 \cdot 10^{-5}$	0,03
30,2	41,2	288,2	247	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$1,0609 \cdot 10^{-6}$	$1,06 \cdot 10^{-6}$	0,000109	0,003681	0,003572	0,4815
30,2	6,37	91,9	85,53	0	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$	0	0,000157	0,000157	0,06
33,5	36,8	251,1	214,3	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$2,2801 \cdot 10^{-6}$	$2,28 \cdot 10^{-6}$	0,000122	0,00908	0,008958	0,7215
33,5	6,12	74,79	68,67	0	$2,89 \cdot 10^{-8}$	$2,89 \cdot 10^{-8}$	0	0,000386	0,000386	0,085
36,9	32,1	243,7	211,6	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$3,9601 \cdot 10^{-6}$	$3,96 \cdot 10^{-6}$	0,00014	0,01625	0,01611	0,9615
36,9	4,05	50,09	46,04	0	$6,76 \cdot 10^{-8}$	$6,76 \cdot 10^{-8}$	0	0,00135	0,00135	0,13
40,2	30	215	185	$1,69 \cdot 10^{-8}$	$9,8596 \cdot 10^{-6}$	$9,84 \cdot 10^{-6}$	0,000563	0,045859	0,045295	1,505
40,2	2,78	48,72	45,94	0	0,00000025	$2,5 \cdot 10^{-7}$	0	0,005131	0,005131	0,25
43,6	24,6	253,8	229,2	0	0,00001681	$1,68 \cdot 10^{-5}$	0	0,066233	0,066233	2,05
43,6	2,65	49,35	46,7	0	$1,681 \cdot 10^{-7}$	$1,68 \cdot 10^{-7}$	0	0,003406	0,003406	0,205

Πίνακας 3.1-1β : Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στις σχέσεις (2-1) έως (2-11). (συνέχεια πίνακα 3.1-1α)

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

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

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

ΔZ : $Z_2 - Z_1$

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

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

ΔW : $W_2 - W_1$

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

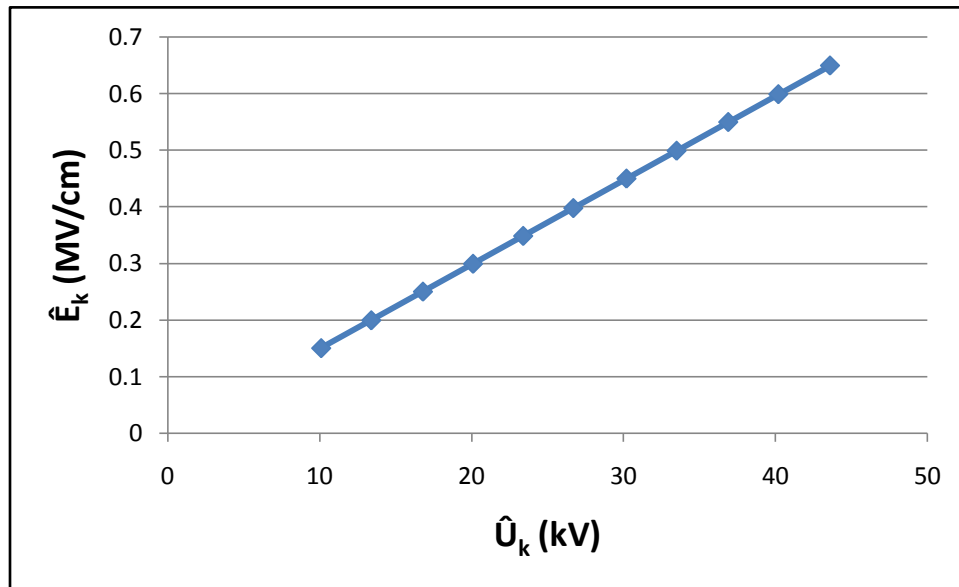
P_2 : στιγμιαία τιμή ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΔP : $P_2 - P_1$

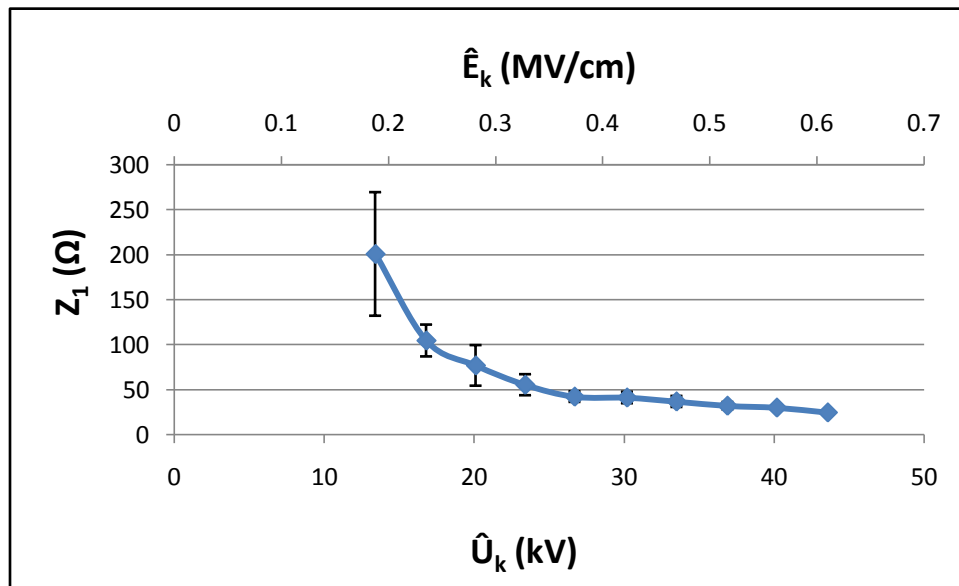
ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

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

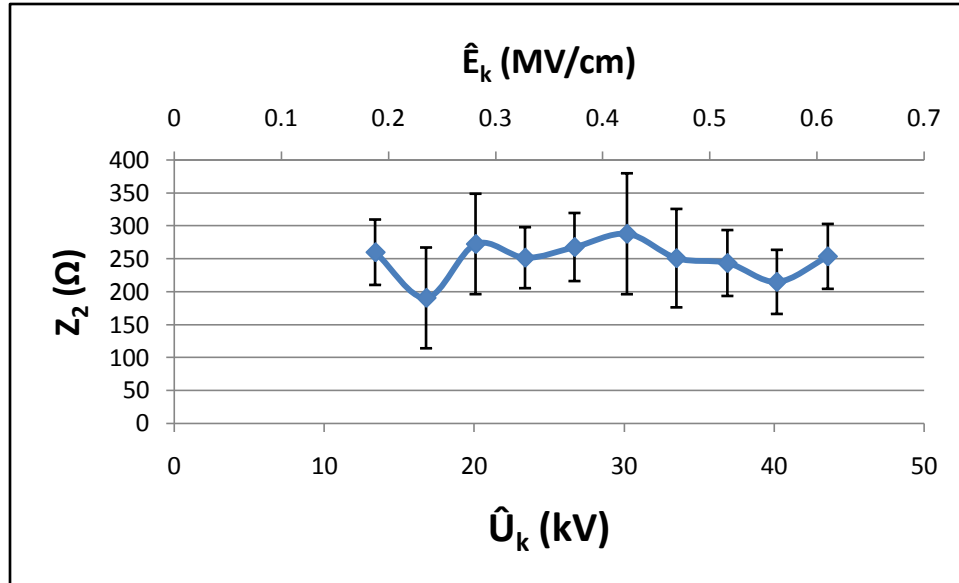
Χαρακτηριστικές για d=1mm υπό κρουστική τάση +250/2500 μs



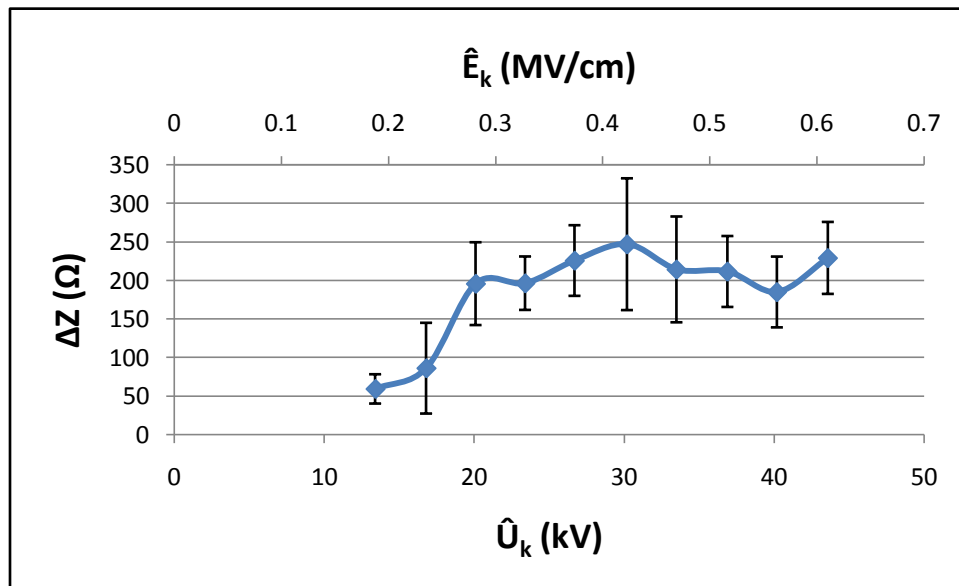
Σχήμα 3.1-1: Χαρακτηριστική της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (\hat{E}_k) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



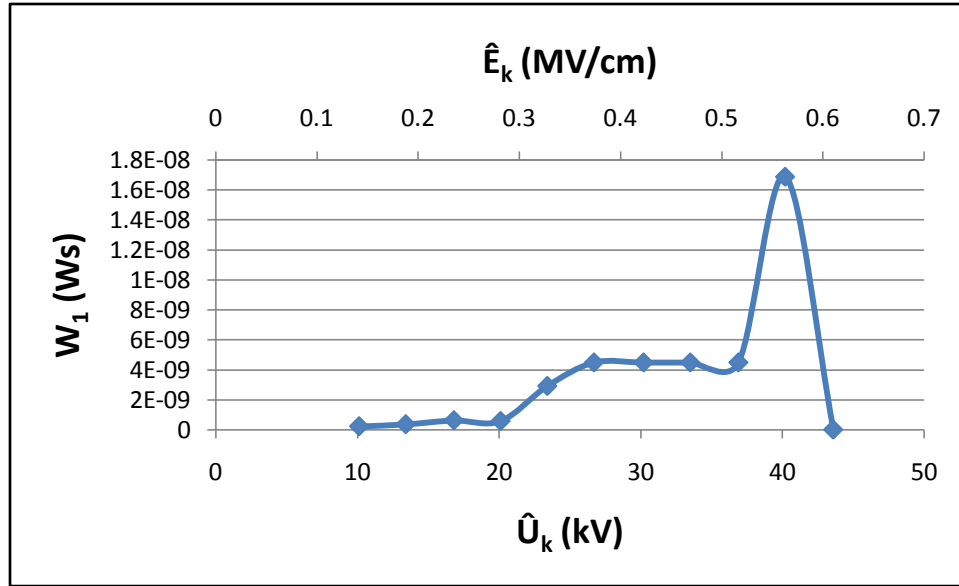
Σχήμα 3.1-2: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



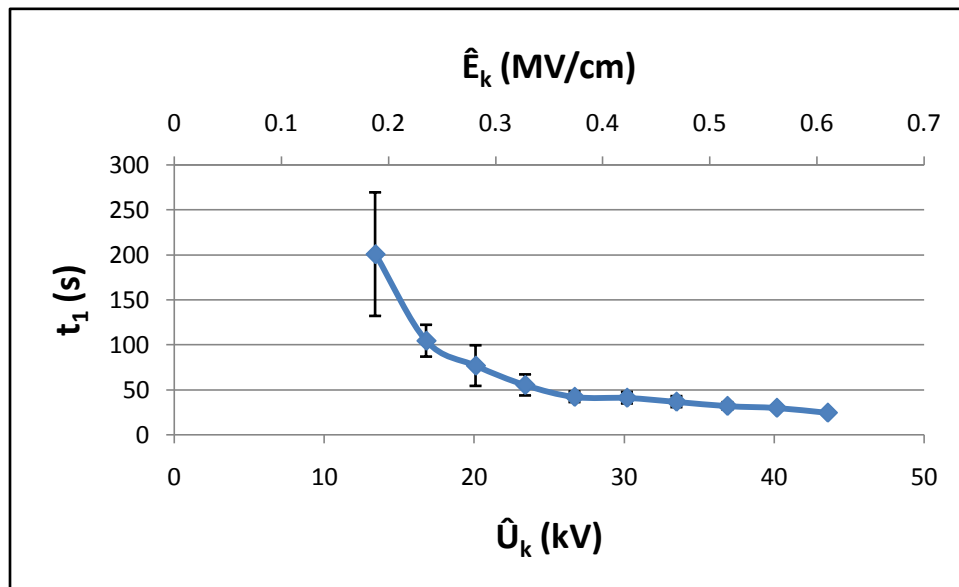
Σχήμα 3.1-3: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_2) στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



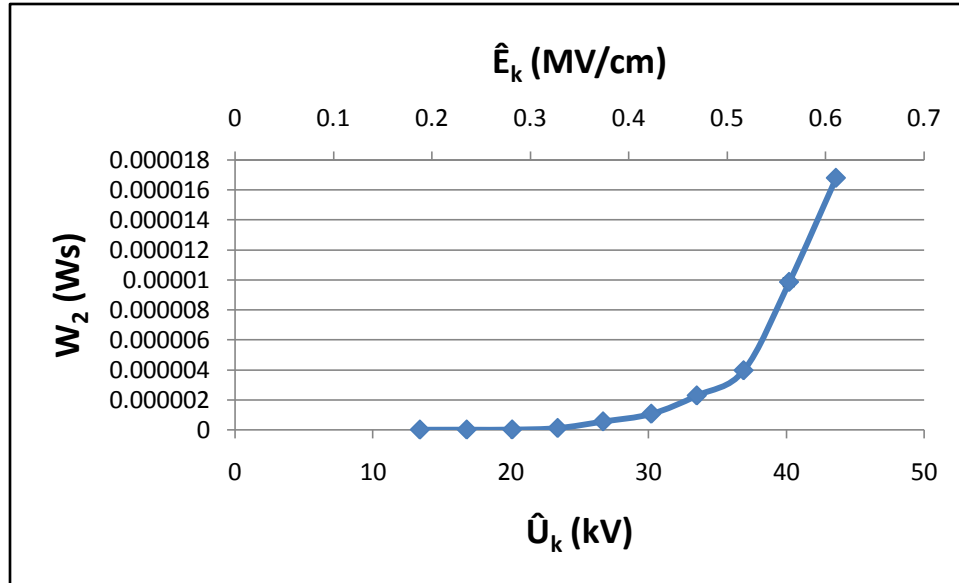
Σχήμα 3.1-4: Χαρακτηριστική της διαφοράς της σύνθετης αντίστασης (ΔZ) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



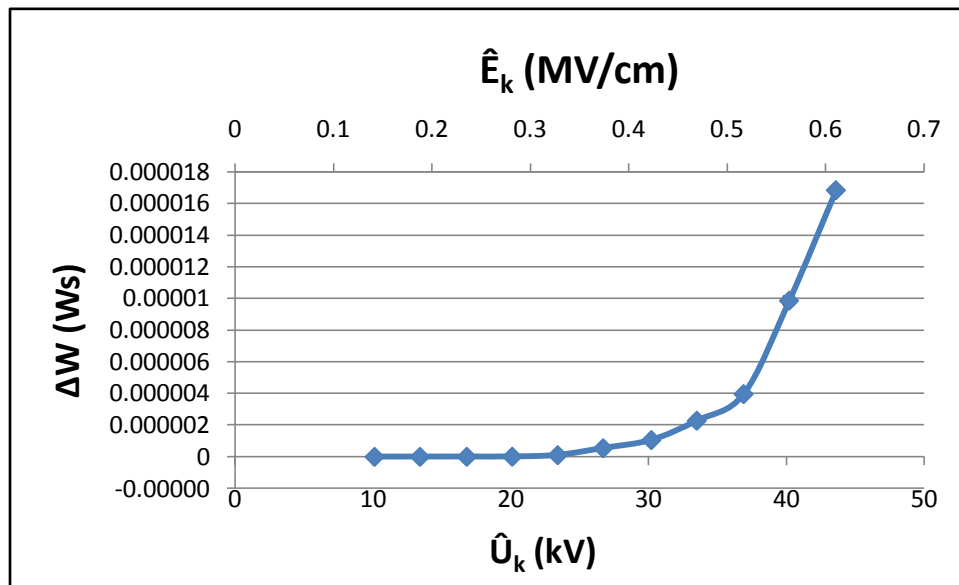
Σχήμα 3.1-5: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



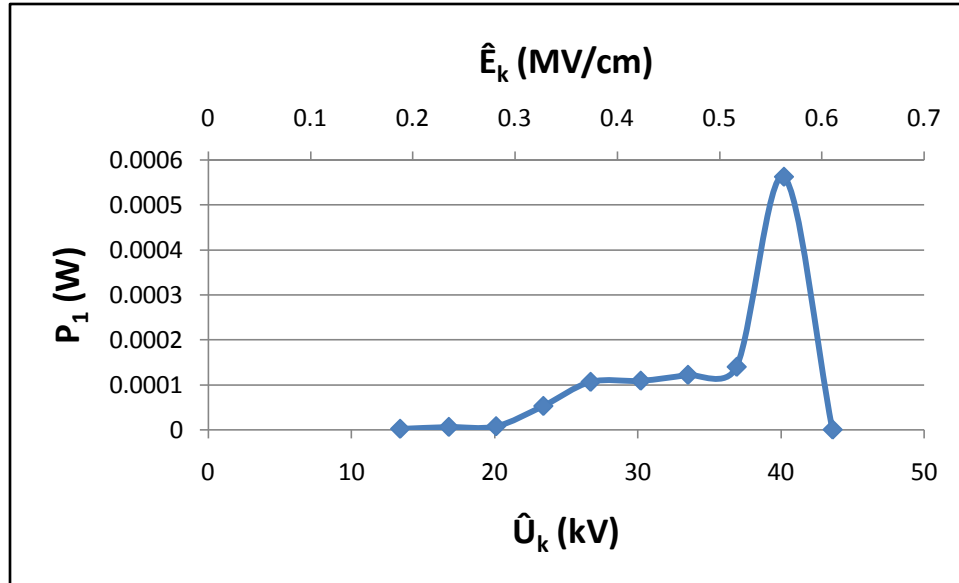
Σχήμα 3.1-6: Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης (t_1) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



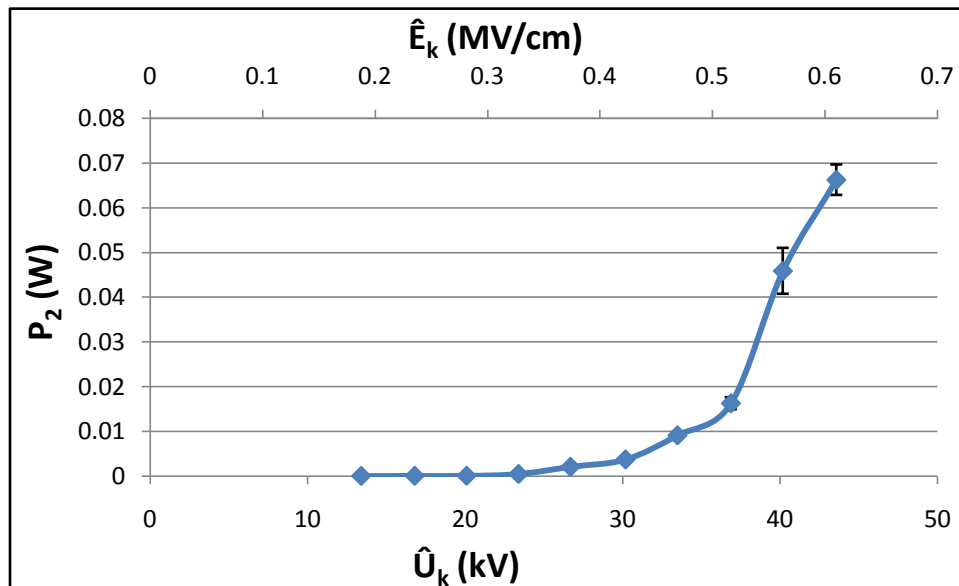
Σχήμα 3.1-7: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



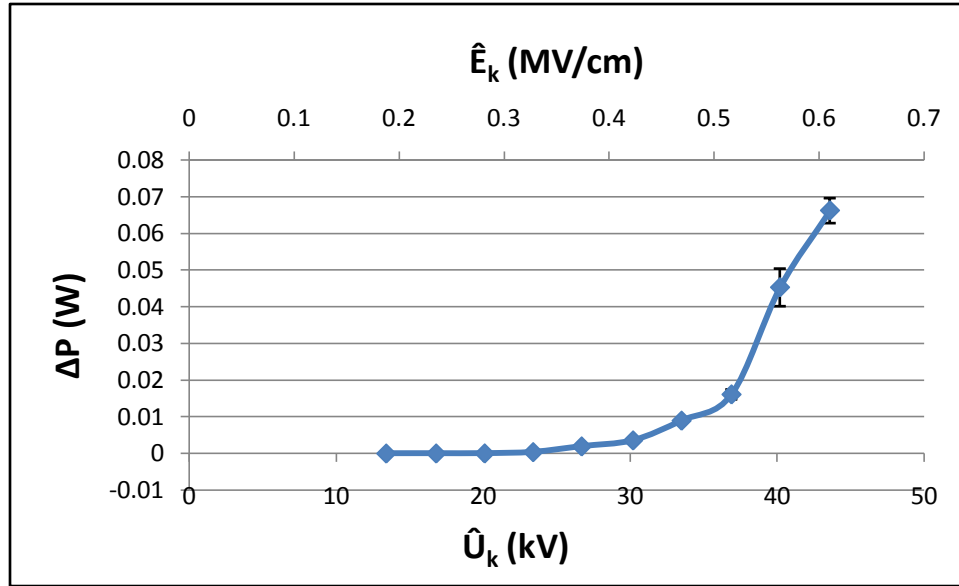
Σχήμα 3.1-8: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (ΔW) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



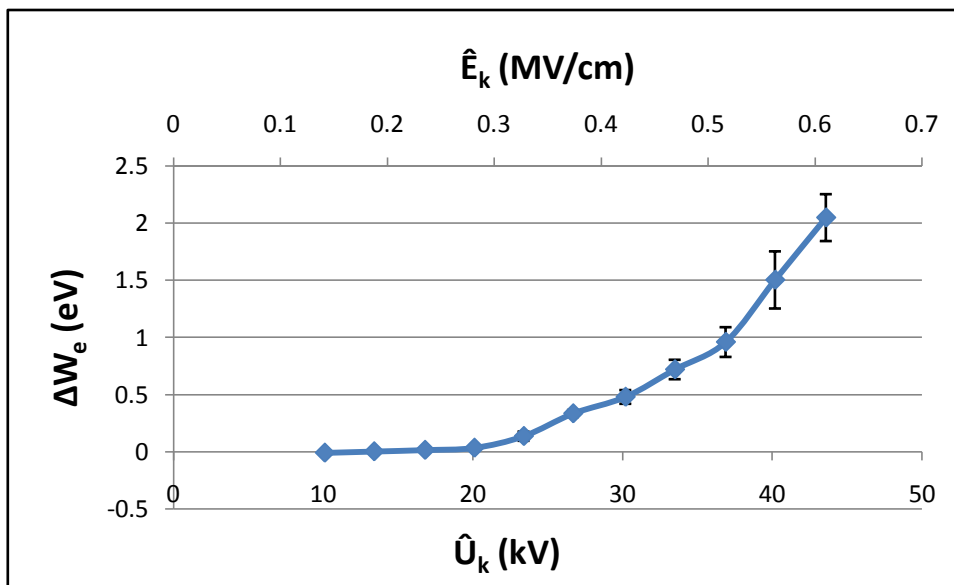
Σχήμα 3.1-9: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



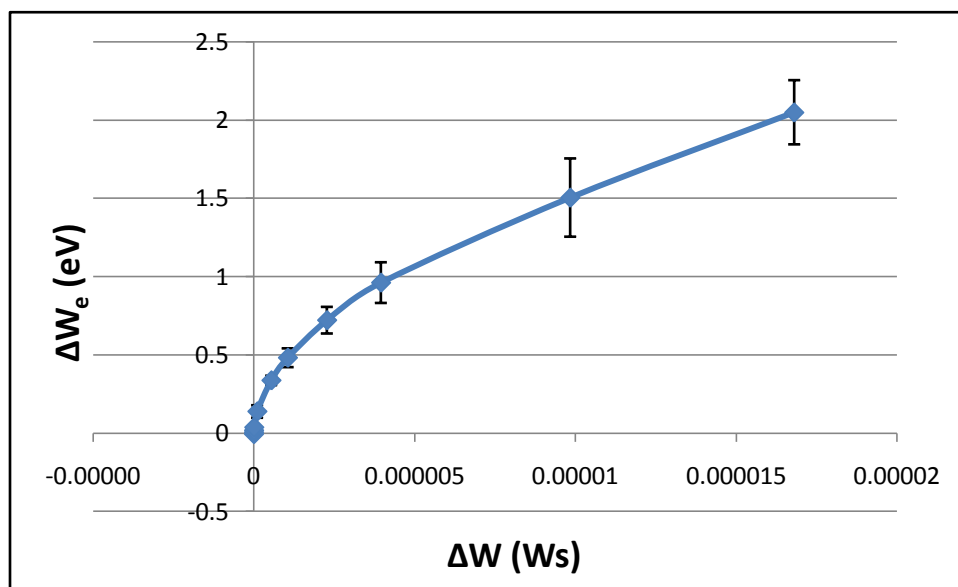
Σχήμα 3.1-10: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_2) στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



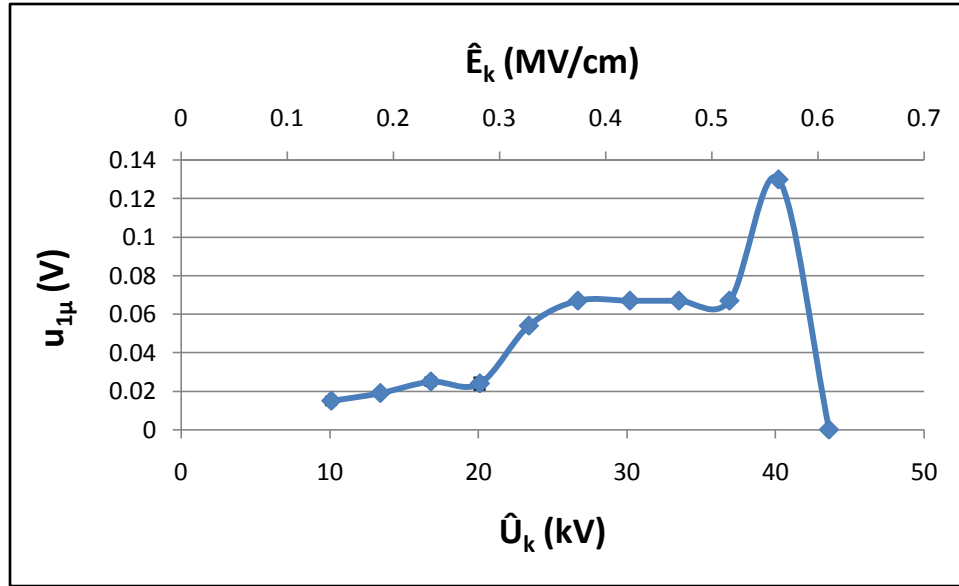
Σχήμα 3.1-11: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ισχύος (ΔP) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



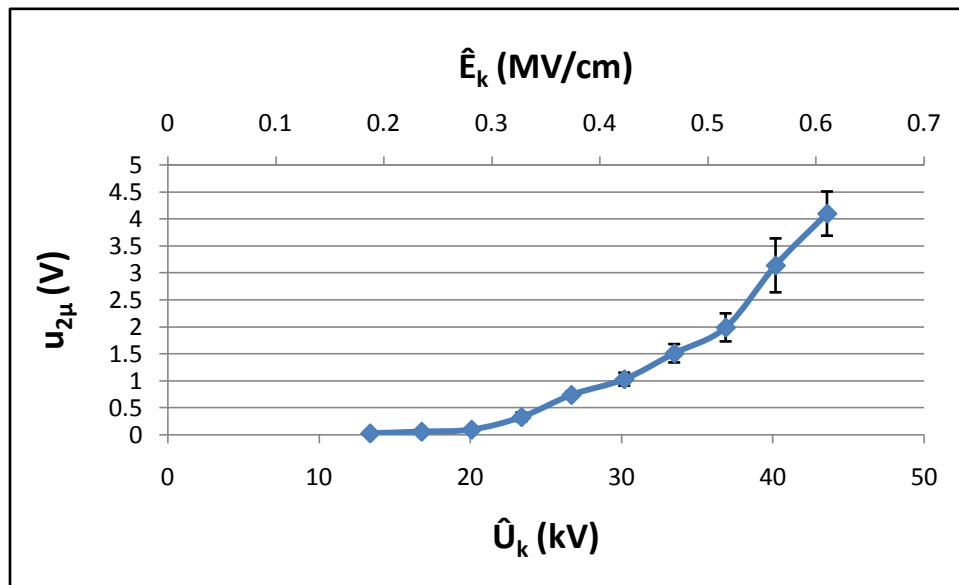
Σχήμα 3.1-12: Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (ΔW_e) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



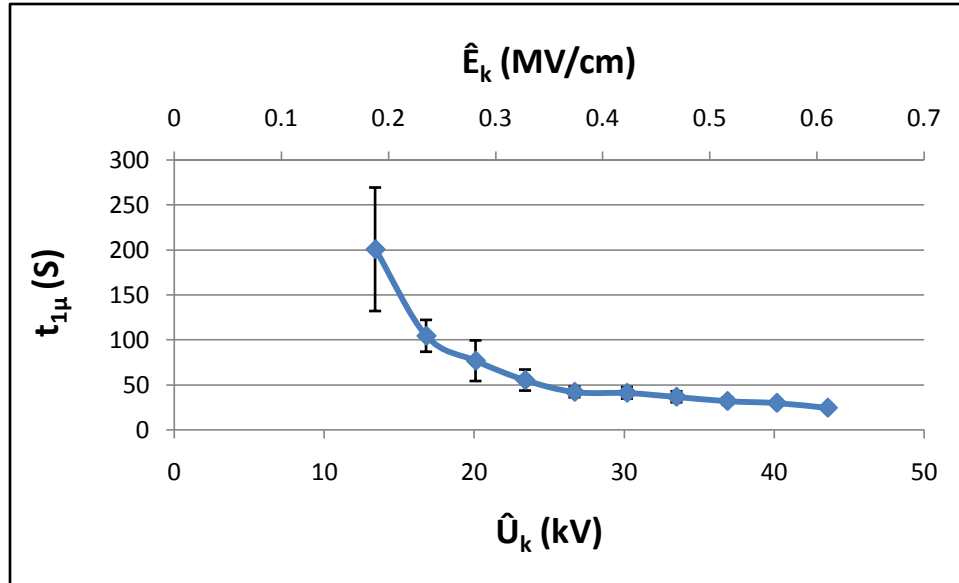
Σχήμα 3.1-13: Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (ΔW_e) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής της ενέργειας και την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



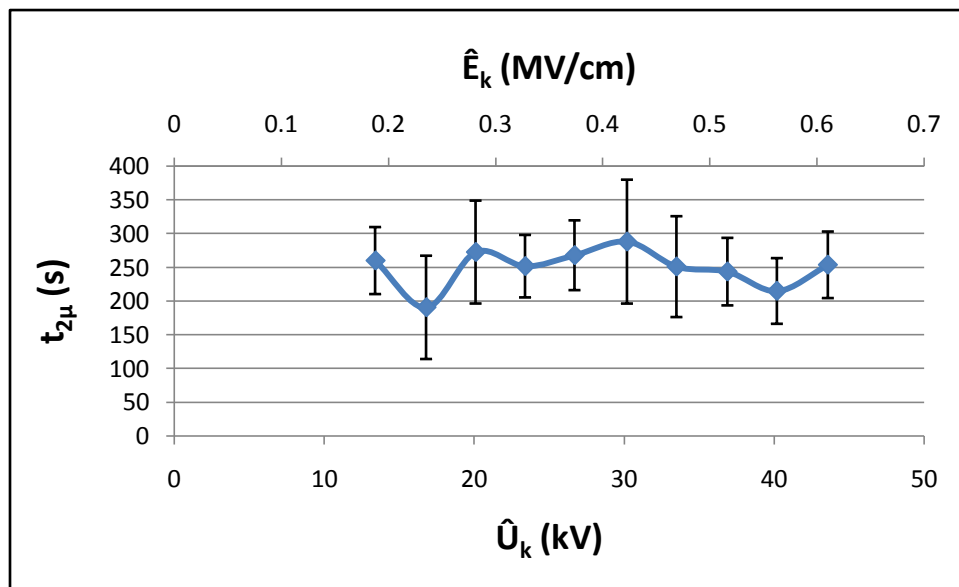
Σχήμα 3.1-14: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής της ($u_{1\mu}$) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



Σχήμα 3.1-15: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής της ($u_{2\mu}$) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



Σχήμα 3.1-16: Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης ($t_{1\mu}$) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



Σχήμα 3.1-17: Χαρακτηριστική του χρόνου περαίωσης ($t_{2\mu}$) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

3.2 Pertinax, d=1mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μs και σε θερμοκρασία $\theta=20^\circ\text{C}$

\hat{U}_k kV	\hat{E}_k MV/cm	C_m nF	q_1 μC	q_2 μC	u_1 V	u_2 V	Δu V	t_1 s	t_2 s	Δt s
-20,7	-0,30838	1000	0,079	0,13	0,079	0,13	0,051	110,9	129,6	18,7
-20,7	-0,30838	1000	0,009	0,02	0,009	0,02	0,011	25,6	20,43	-5,17
-24,2	-0,36052	1000	0,083	0,24	0,083	0,24	0,157	87,1	142,4	55,3
-24,2	-0,36052	1000	0,008	0,07	0,008	0,07	0,062	13,64	65,19	51,55
-27,6	-0,41118	1000	0,067	0,38	0,067	0,38	0,313	76,3	113,1	36,8
-27,6	-0,41118	1000	0	0,09	0	0,09	0,09	15,92	26,09	10,17
-31,1	-0,46332	1000	0,1	0,48	0,1	0,48	0,38	54,5	128,2	73,7
-31,1	-0,46332	1000	0	0,14	0	0,14	0,14	7,59	63,94	56,35
-34,5	-0,51397	1000	0,067	0,82	0,067	0,82	0,753	50,9	163,7	112,8
-34,5	-0,51397	1000	0	0,32	0	0,32	0,32	5,32	105,11	99,79
-37,9	-0,56462	1000	0,067	1,89	0,067	1,89	1,823	44,2	217	172,8
-37,9	-0,56462	1000	0	0,55	0	0,55	0,55	5,73	104,25	98,52
-41,4	-0,61676	1000	0	2,29	0	2,29	2,29	41,8	187,6	145,8
-41,4	-0,61676	1000	0	0,51	0	0,51	0,51	4,04	72,69	68,65
-44,8	-0,66742	1000	0	2,24	0	2,24	2,24	37,1	145,1	108
-44,8	-0,66742	1000	0	0,57	0	0,57	0,57	3,04	63,61	60,57

Πίνακας 3.2-1α: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στις σχέσεις (2-1) έως (2-11).

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

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

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

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

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

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

Δu : $u_2 - u_1$

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt : $t_1 - t_2$

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

\hat{U}_k kV	Z_1 Ω	Z_2 Ω	ΔZ Ω	W_1 Ws	W_2 Ws	ΔW Ws	P_1 W	P_2 W	ΔP W	ΔWe eV
-20,7	110,9	129,6	18,7	$6,241 \cdot 10^{-9}$	$1,69 \cdot 10^{-8}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$	0,00013	$7,41 \cdot 10^{-5}$	0,0255
-20,7	25,6	20,43	-5,17	$8,1 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$3,19 \cdot 10^{-10}$	$3,16 \cdot 10^{-6}$	$1,96 \cdot 10^{-5}$	$1,64 \cdot 10^{-5}$	0,0055
-24,2	87,1	142,4	55,3	$6,889 \cdot 10^{-9}$	$5,76 \cdot 10^{-9}$	$5,07 \cdot 10^{-8}$	$7,91 \cdot 10^{-5}$	0,000404	0,000325	0,0785
-24,2	13,64	65,19	51,55	$6,4 \cdot 10^{-11}$	$4,9 \cdot 10^{-9}$	$4,84 \cdot 10^{-9}$	$4,69 \cdot 10^{-6}$	$7,52 \cdot 10^{-5}$	$7,05 \cdot 10^{-5}$	0,031
-27,6	76,3	113,1	36,8	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$1,444 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$5,88 \cdot 10^{-5}$	0,001277	0,001218	0,1565
-27,6	15,92	26,09	10,17	0	$8,1 \cdot 10^{-9}$	$8,1 \cdot 10^{-9}$	0	0,00031	0,00031	0,045
-31,1	54,5	128,2	73,7	0,00000001	$2,304 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	0,000183	0,001797	0,001614	0,19
-31,1	7,59	63,94	56,35	0	$1,96 \cdot 10^{-8}$	$1,96 \cdot 10^{-8}$	0	0,000307	0,000307	0,07
-34,5	50,9	163,7	112,8	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$6,724 \cdot 10^{-7}$	$6,68 \cdot 10^{-7}$	$8,82 \cdot 10^{-5}$	0,004108	0,004019	0,3765
-34,5	5,32	105,11	99,79	0	$1,024 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$	0	0,000974	0,000974	0,16
-37,9	44,2	217	172,8	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$3,572 \cdot 10^{-6}$	$3,57 \cdot 10^{-6}$	0,000102	0,016461	0,01636	0,9115
-37,9	5,73	104,25	98,52	0	$3,025 \cdot 10^{-7}$	$3,03 \cdot 10^{-7}$	0	0,002902	0,002902	0,275
-41,4	41,8	187,6	145,8	0	$5,244 \cdot 10^{-6}$	$5,24 \cdot 10^{-6}$	0	0,027954	0,027954	1,145
-41,4	4,04	72,69	68,65	0	$2,601 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	0	0,003578	0,003578	0,255
-44,8	37,1	145,1	108	0	$5,018 \cdot 10^{-6}$	$5,02 \cdot 10^{-6}$	0	0,03458	0,03458	1,12
-44,8	3,04	63,61	60,57	0	$3,249 \cdot 10^{-7}$	$3,25 \cdot 10^{-7}$	0	0,005108	0,005108	0,285

Πίνακας 3.2-1β : Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στις σχέσεις (2-1) έως (2-11). (συνέχεια πίνακα 3.2-1α)

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

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

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

ΔZ : $Z_2 - Z_1$

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

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

ΔW : $W_2 - W_1$

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

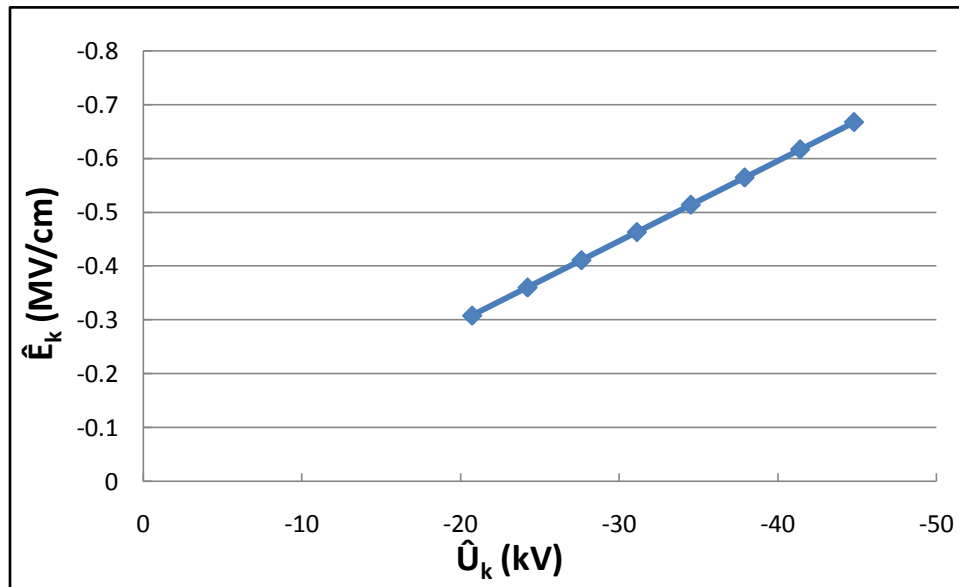
P_2 : στιγμιαία τιμή ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΔP : $P_2 - P_1$

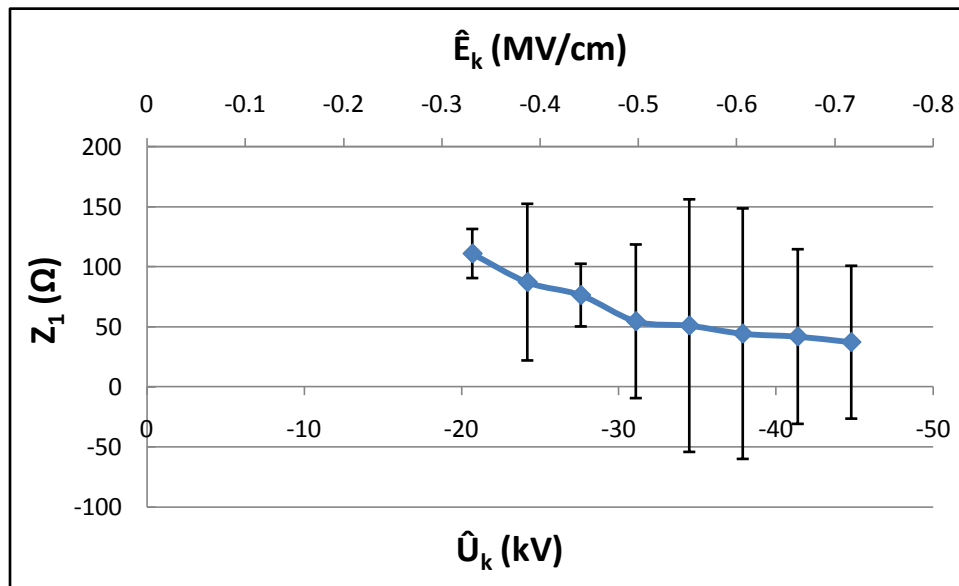
ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

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

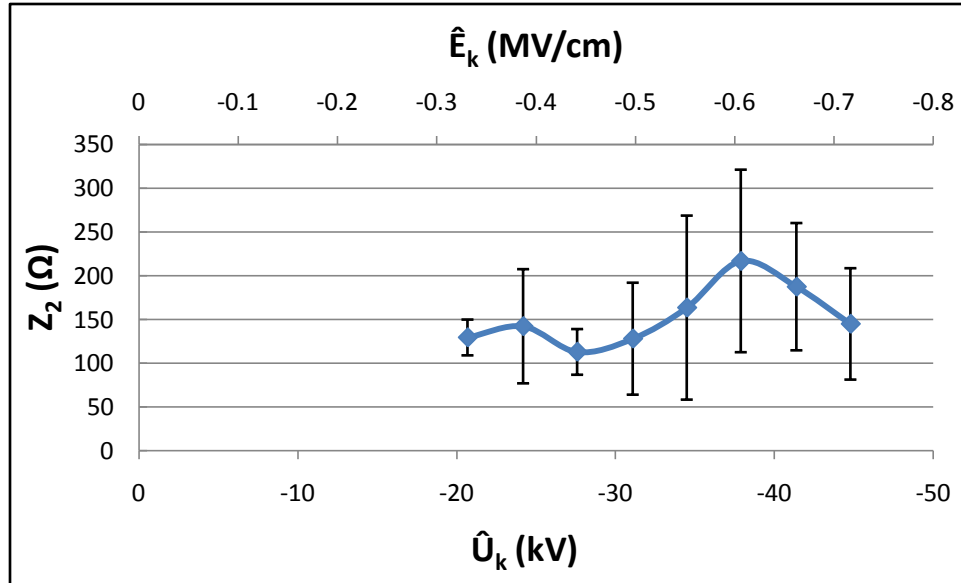
Χαρακτηριστικές για d=1mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μ s



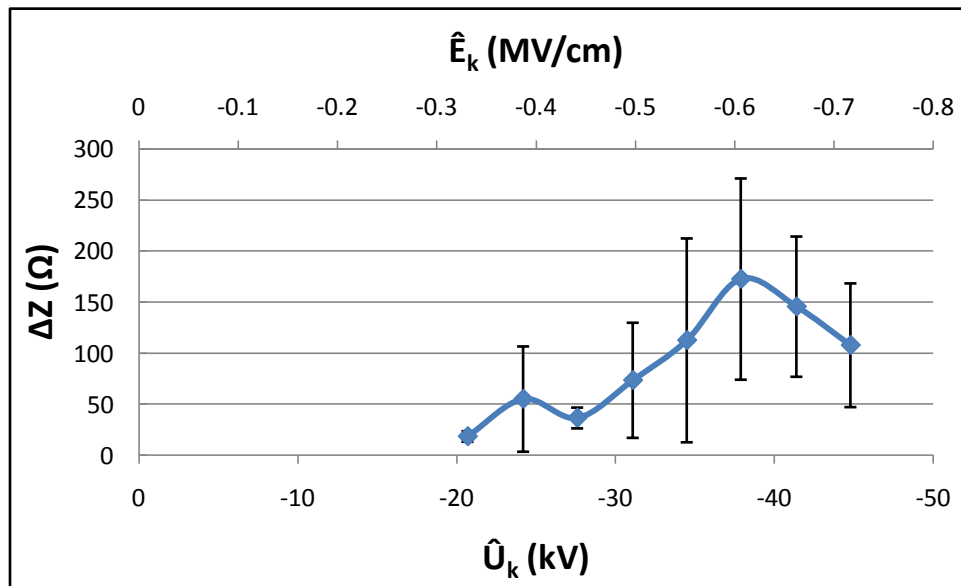
Σχήμα 3.2-1: Χαρακτηριστική της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (\hat{E}_k) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μ s.



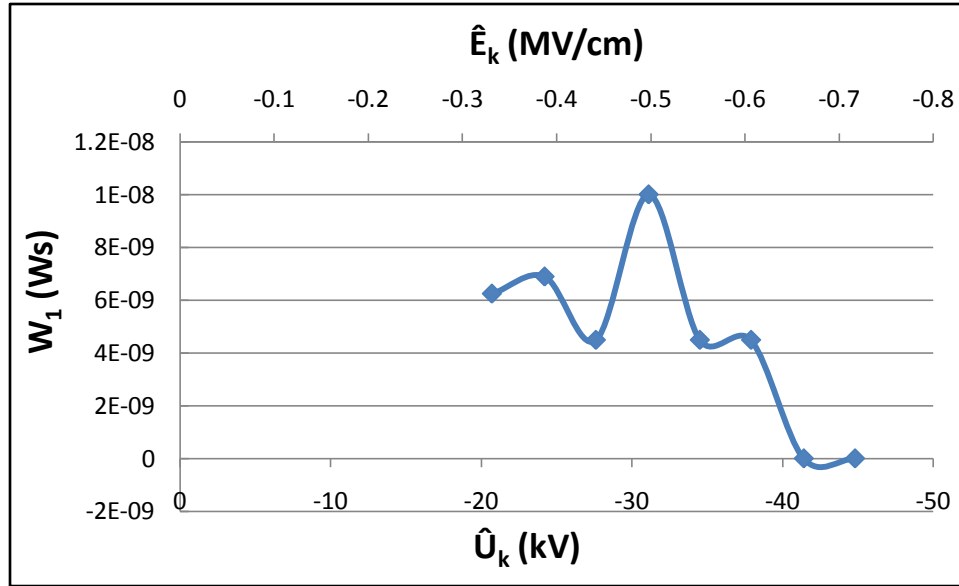
Σχήμα 3.2-2: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μ s.



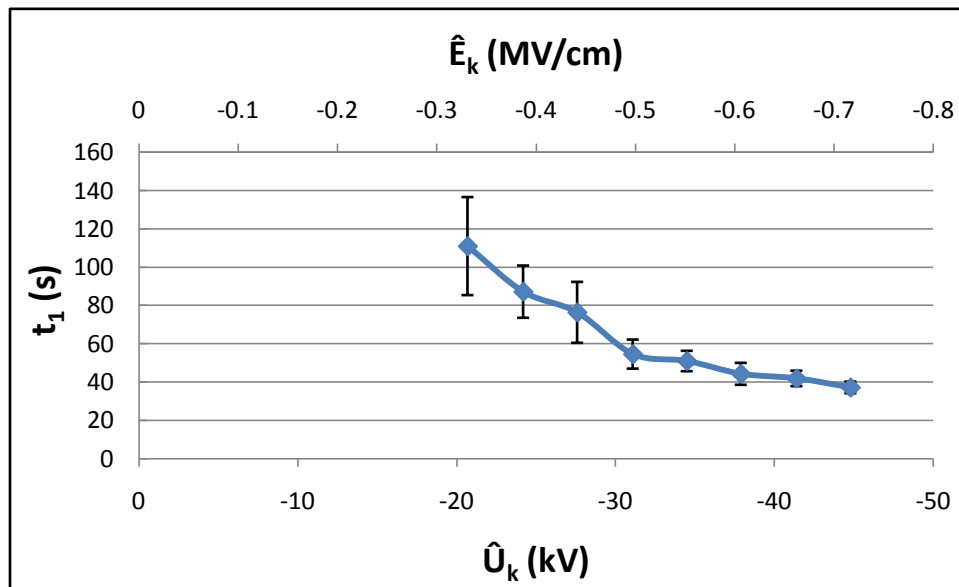
Σχήμα 3.2-3: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu s$.



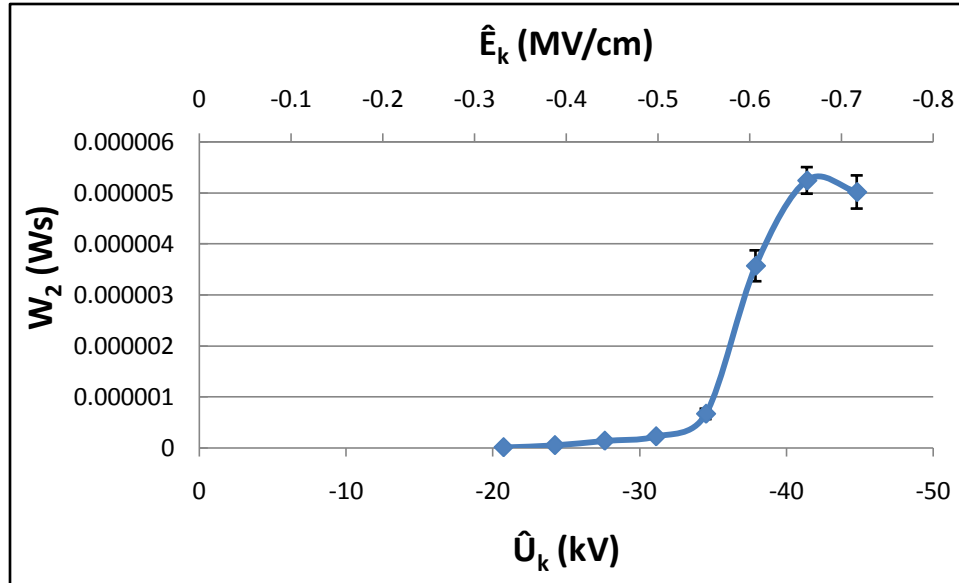
Σχήμα 3.2-4: Χαρακτηριστική της διαφοράς της σύνθετης αντίστασης (ΔZ) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu s$.



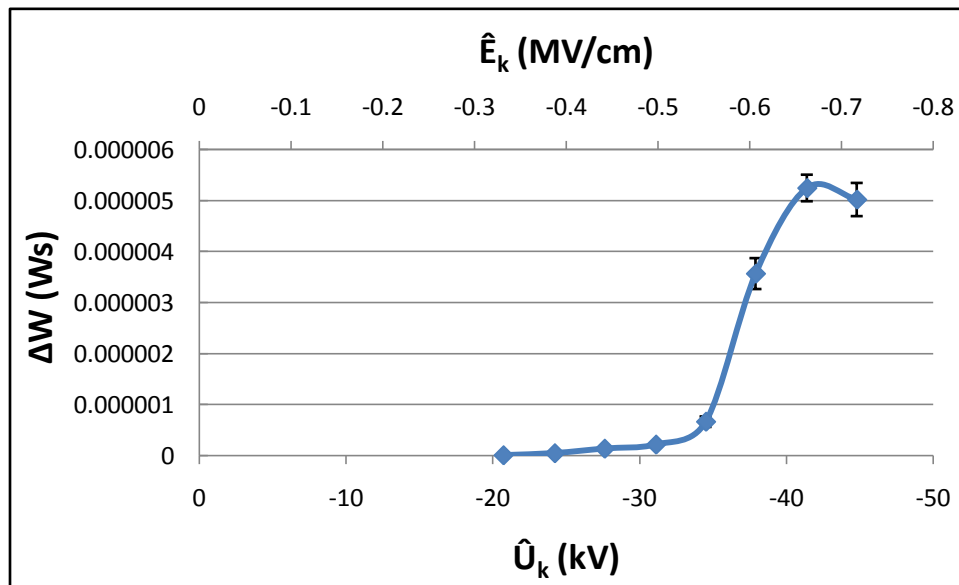
Σχήμα 3.2-5: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



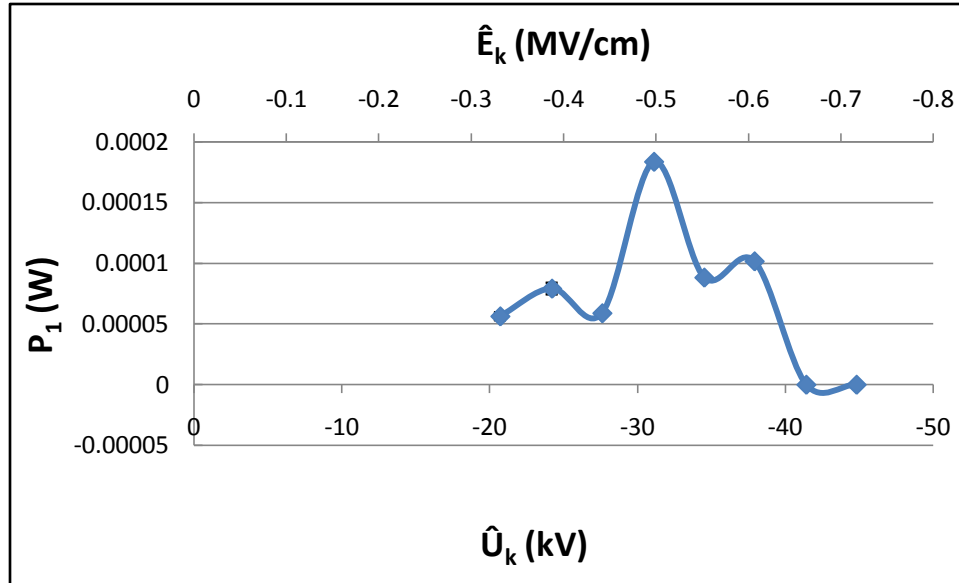
Σχήμα 3.2-6: Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης (t_1) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



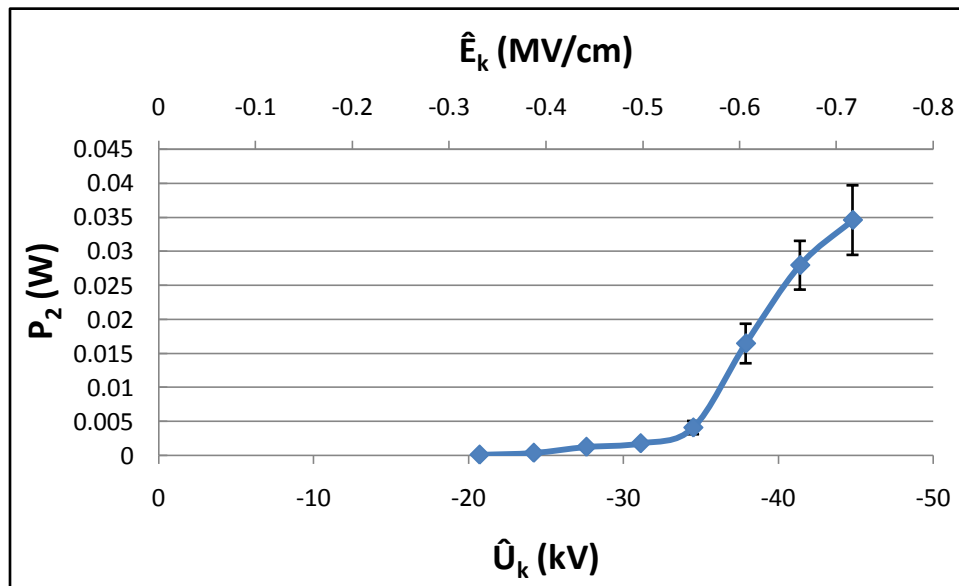
Σχήμα 3.2-7: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



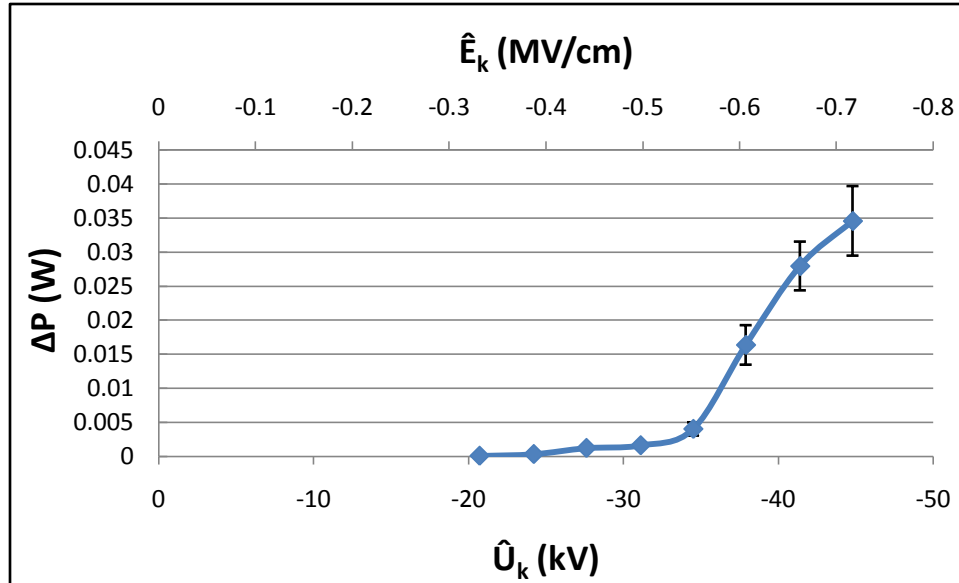
Σχήμα 3.2-8: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (ΔW) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



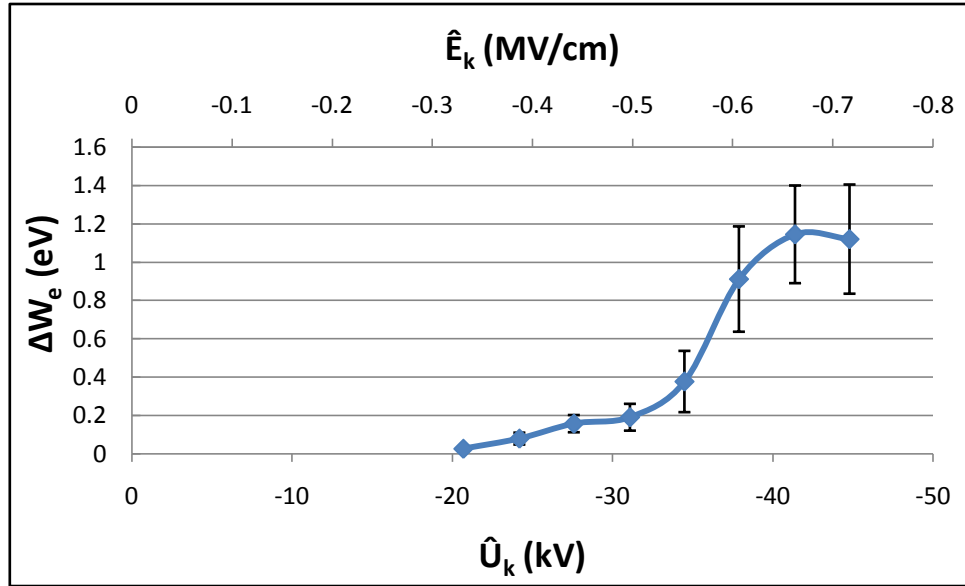
Σχήμα 3.2-9: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



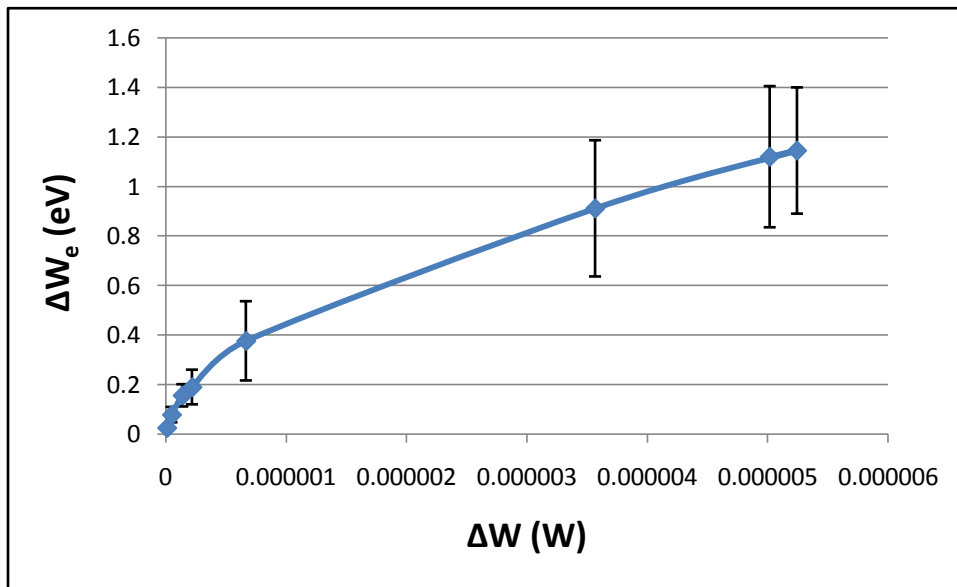
Σχήμα 3.2-10: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_2) στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



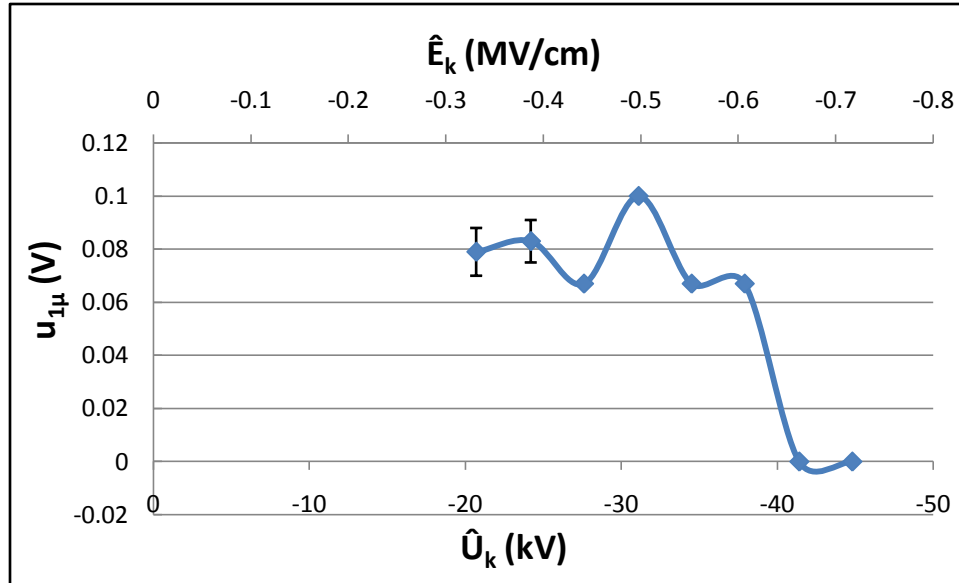
Σχήμα 3.2-11: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ισχύος (ΔP) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



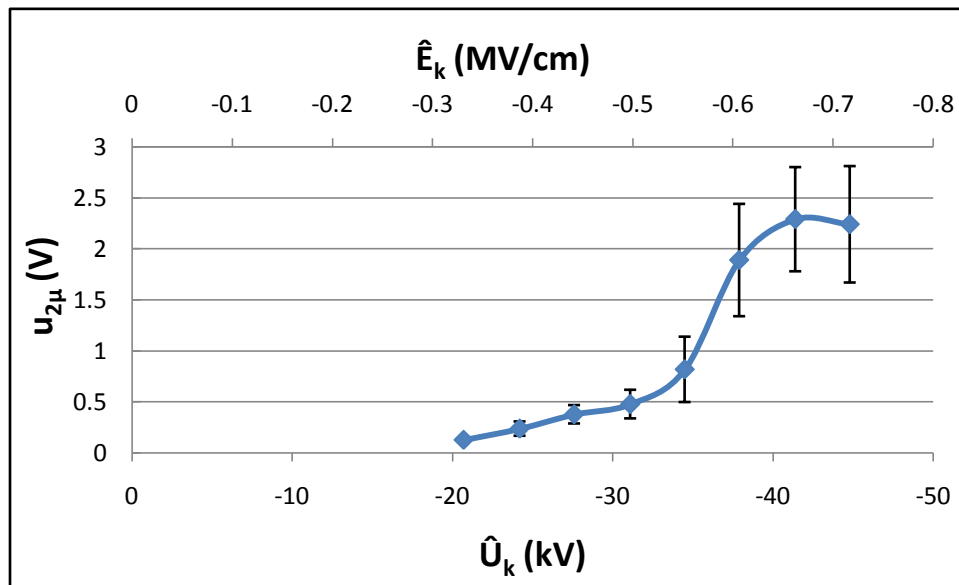
Σχήμα 3.2-12: Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (ΔW_e) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



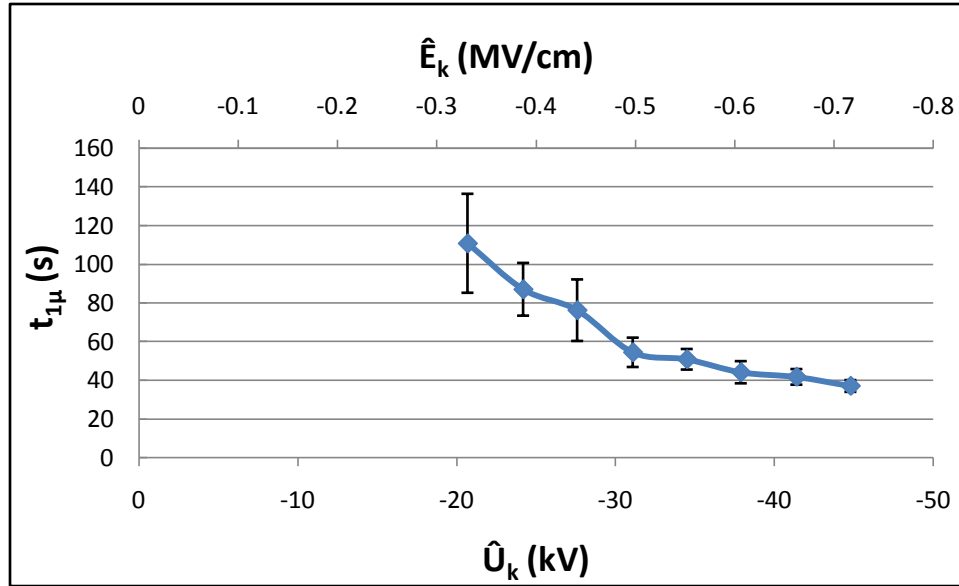
Σχήμα 3.2-13: Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (ΔW_e) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής της ενέργειας και την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



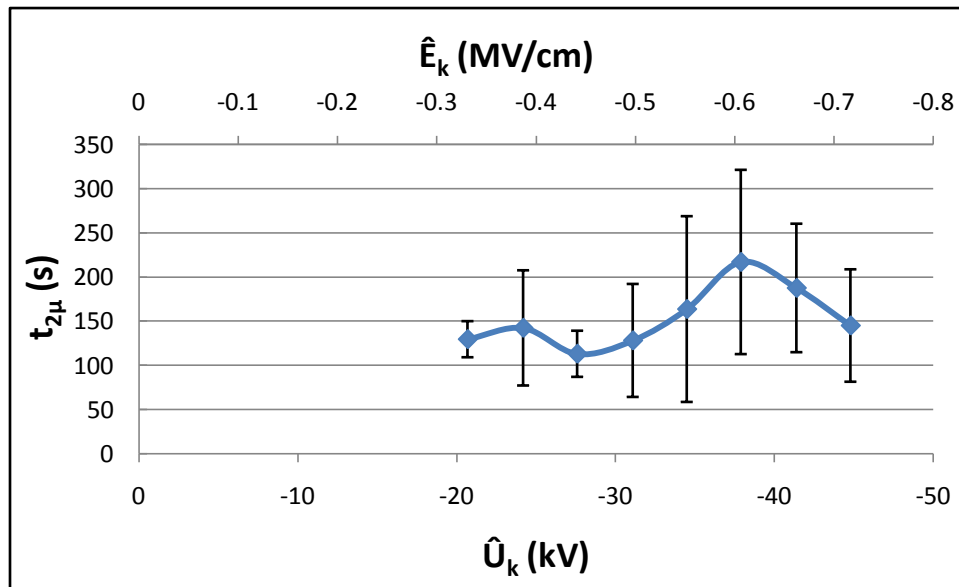
Σχήμα 3.2-14: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής της (u_{1m}) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



Σχήμα 3.2-15: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής της (u_{2m}) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



Σχήμα 3.2-16: Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης ($t_{1\mu}$) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax Imm* υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



Σχήμα 3.2-17: Χαρακτηριστική του χρόνου περαίωσης ($t_{2\mu}$) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax Imm* υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

3.3 Pertinax, d=2mm υπό κρουστική τάση +250/2500 μs και σε θερμοκρασία $\theta=20^\circ\text{C}$

\hat{U}_k kV	\hat{E}_k MV/cm	C_m nF	q_1 μC	q_2 μC	u_1 V	u_2 V	Δu V	t_1 s	t_2 s	Δt s
20,8	0,309872	1000	0,082	0,13	0,082	0,13	0,048	141,7	186,3	44,6
20,8	0,309872	1000	0,009	0,01	0,009	0,01	0,001	59,47	55,33	-4,14
24,1	0,359034	1000	0,074	0,12	0,074	0,12	0,046	99,6	173,5	73,9
24,1	0,359034	1000	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	44,8	86,87	42,07
27,7	0,412666	1000	0,081	0,18	0,081	0,18	0,099	71,5	157,9	86,4
27,7	0,412666	1000	0	0,05	0	0,05	0,05	6,87	61,96	55,09
31,1	0,463318	1000	0,067	0,34	0,067	0,34	0,273	45,2	235,6	190,4
31,1	0,463318	1000	0	0,06	0	0,06	0,06	5,26	65,88	60,62
34,5	0,513971	1000	0,067	0,39	0,067	0,39	0,323	41,5	185,6	144,1
34,5	0,513971	1000	0	0,09	0	0,09	0,09	10,68	71,05	60,37
37,8	0,563133	1000	0,067	0,64	0,067	0,64	0,573	36,4	233,5	197,1
37,8	0,563133	1000	0	0,14	0	0,14	0,14	8,1	97,16	89,06
41,4	0,616765	1000	0,1	0,78	0,1	0,78	0,68	36,4	199,1	162,7
41,4	0,616765	1000	0	0,15	0	0,15	0,15	10,86	85,34	74,48
44,6	0,664437	1000	0,067	0,75	0,067	0,75	0,683	36,1	201,8	165,7
44,6	0,664437	1000	0	0,17	0	0,17	0,17	6,23	54,53	48,3

Πίνακας 3.3-1α: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στις σχέσεις (2-1) έως (2-11).

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

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

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

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

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

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

Δu : $u_2 - u_1$

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt : $t_1 - t_2$

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

\hat{U}_k kV	Z_1 Ω	Z_2 Ω	ΔZ Ω	W_1 Ws	W_2 Ws	ΔW Ws	P_1 W	P_2 W	ΔP W	ΔWe eV
20,8	141,7	186,3	44,6	$6,724 \cdot 10^{-9}$	$1,69 \cdot 10^{-8}$	$1,02 \cdot 10^{-8}$	$4,75 \cdot 10^{-5}$	$9,07 \cdot 10^{-5}$	$4,33 \cdot 10^{-5}$	0,024
20,8	59,47	55,33	-4,14	$8,1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$1,81 \cdot 10^{-6}$	$4,45 \cdot 10^{-7}$	0,0005
24,1	99,6	173,5	73,9	$5,476 \cdot 10^{-9}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$8,92 \cdot 10^{-9}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	0,023
24,1	44,8	86,87	42,07	$1 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$2,23 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$2,37 \cdot 10^{-6}$	0,005
27,7	71,5	157,9	86,4	$6,561 \cdot 10^{-9}$	$3,24 \cdot 10^{-8}$	$2,58 \cdot 10^{-8}$	$9,18 \cdot 10^{-5}$	0,000205	0,000113	0,0495
27,7	6,87	61,96	55,09	0	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	0	$4,03 \cdot 10^{-5}$	$4,03 \cdot 10^{-5}$	0,025
31,1	45,2	235,6	190,4	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$1,156 \cdot 10^{-7}$	$1,11 \cdot 10^{-7}$	$9,93 \cdot 10^{-5}$	0,000491	0,000391	0,1365
31,1	5,26	65,88	60,62	0	$3,6 \cdot 10^{-9}$	$3,6 \cdot 10^{-9}$	0	$5,46 \cdot 10^{-5}$	$5,46 \cdot 10^{-5}$	0,03
34,5	41,5	185,6	144,1	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$1,521 \cdot 10^{-7}$	$1,48 \cdot 10^{-7}$	0,000108	0,00082	0,000711	0,1615
34,5	10,68	71,05	60,37	0	$8,1 \cdot 10^{-9}$	$8,1 \cdot 10^{-9}$	0	0,000114	0,000114	0,045
37,8	36,4	233,5	197,1	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$4,096 \cdot 10^{-7}$	$4,05 \cdot 10^{-7}$	0,000123	0,001754	0,001631	0,2865
37,8	8,1	97,16	89,06	0	$1,96 \cdot 10^{-8}$	$1,96 \cdot 10^{-8}$	0	0,000202	0,000202	0,07
41,4	36,4	199,1	162,7	0,00000001	$6,084 \cdot 10^{-7}$	$5,98 \cdot 10^{-7}$	0,000275	0,003056	0,002781	0,34
41,4	10,86	85,34	74,48	0	$2,25 \cdot 10^{-8}$	$2,25 \cdot 10^{-8}$	0	0,000264	0,000264	0,075
44,6	36,1	201,8	165,7	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$5,625 \cdot 10^{-7}$	$5,58 \cdot 10^{-7}$	0,000124	0,002787	0,002663	0,3415
44,6	6,23	54,53	48,3	0	$2,89 \cdot 10^{-8}$	$2,89 \cdot 10^{-8}$	0	0,00053	0,00053	0,085

Πίνακας 3.3-1β : Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στις σχέσεις (2-1) έως (2-11). (συνέχεια πίνακα 3.3-1α)

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

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

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

ΔZ : $Z_2 - Z_1$

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

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

ΔW : $W_2 - W_1$

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

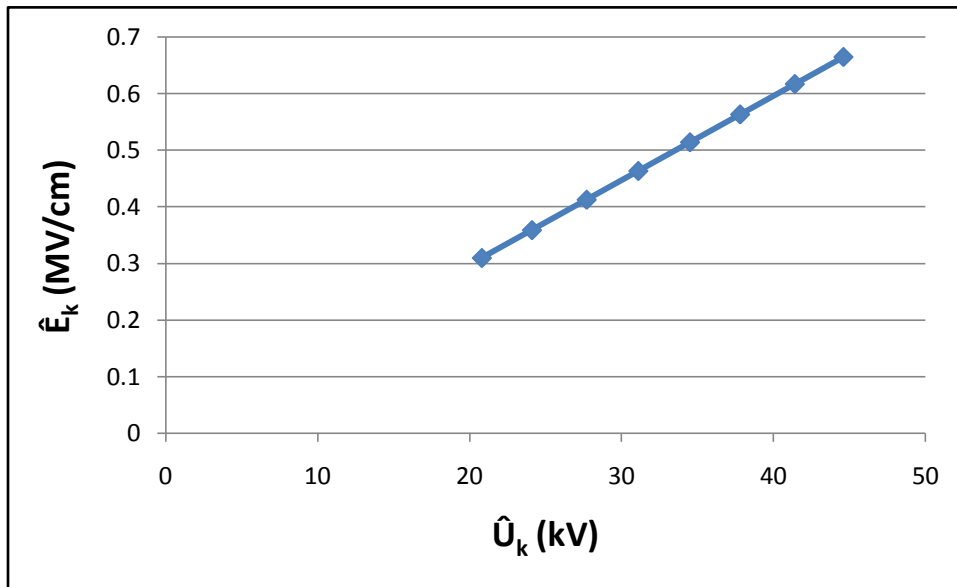
P_2 : στιγμιαία τιμή ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΔP : $P_2 - P_1$

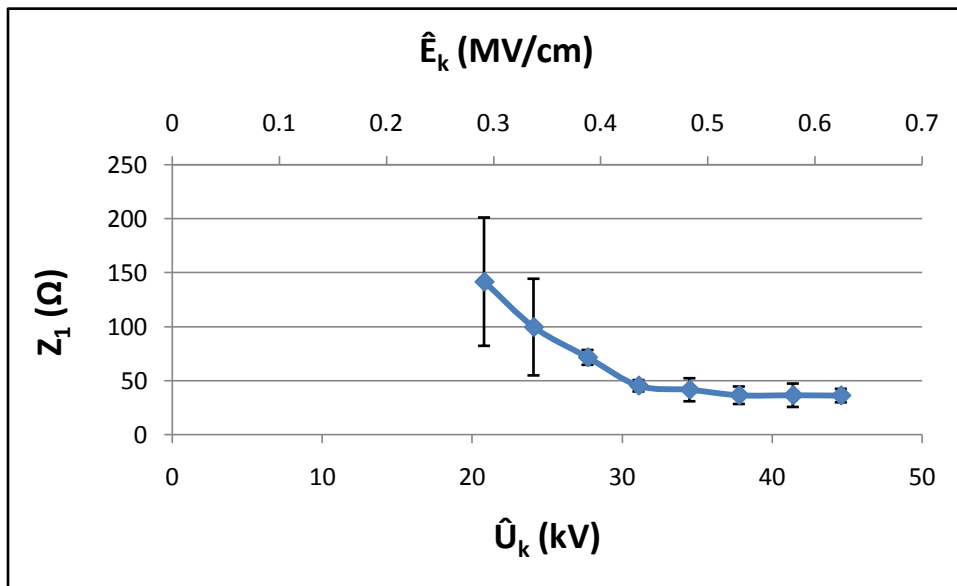
ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

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

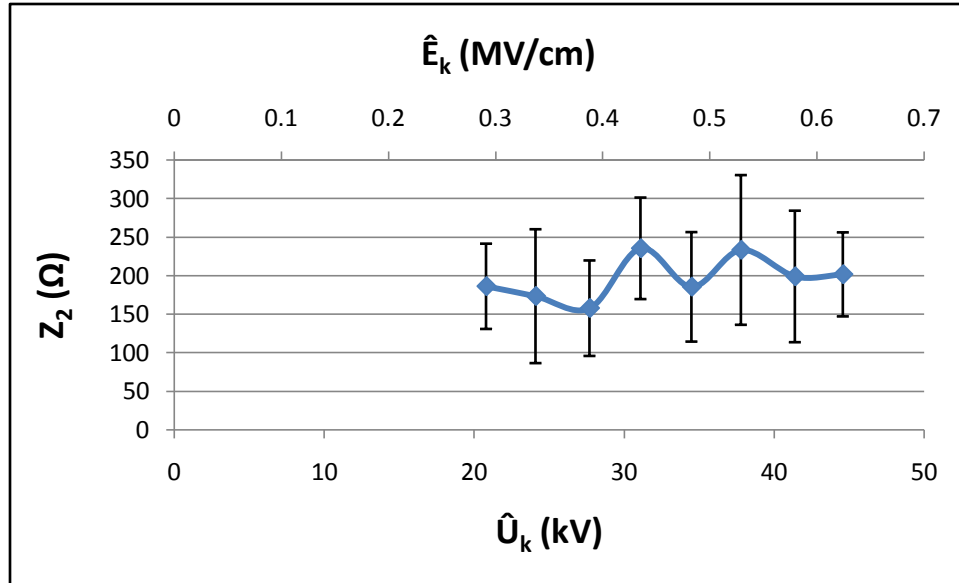
Χαρακτηριστικές για d=2mm υπό κρουστική τάση +250/2500 μ s



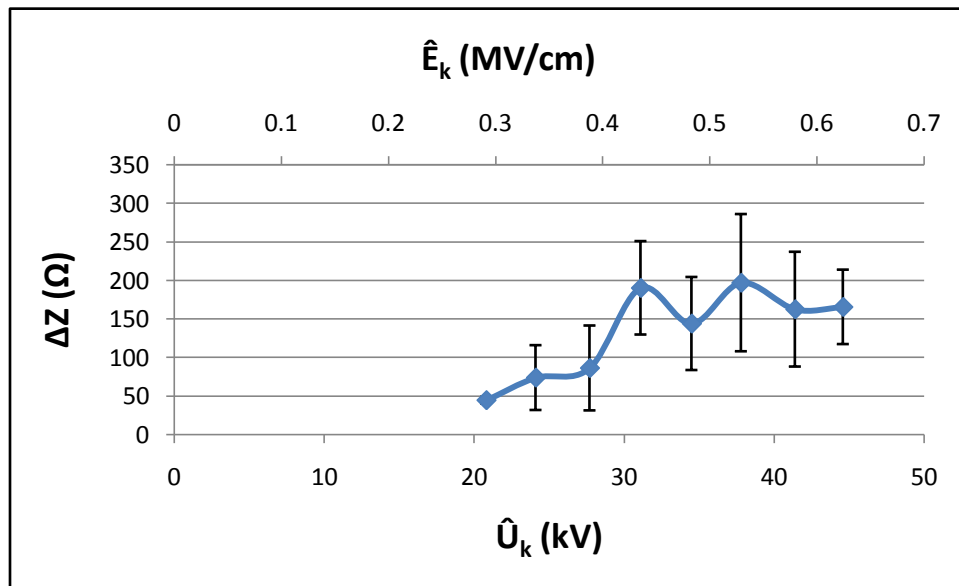
Σχήμα 3.3-1: Χαρακτηριστική της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (\hat{E}_k) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500 μ s.



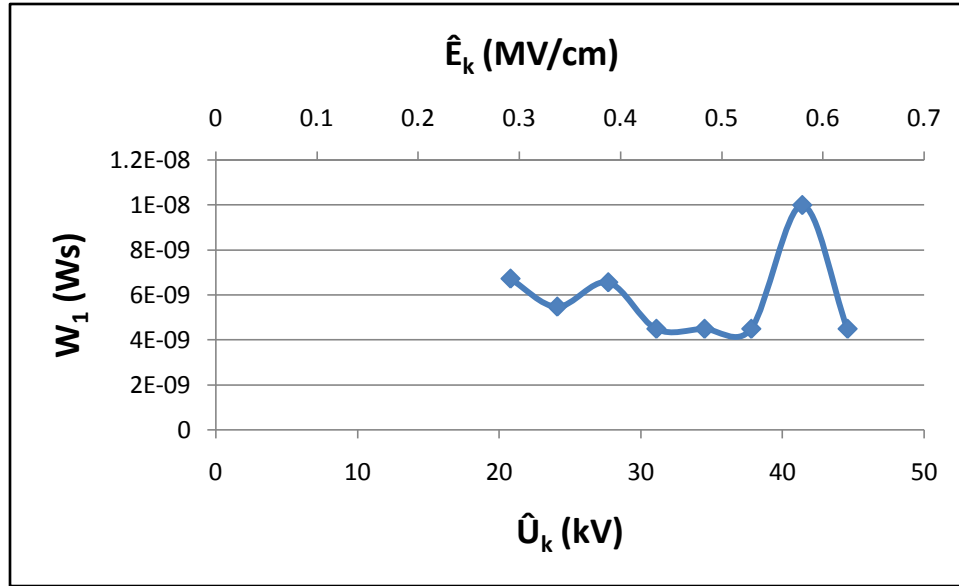
Σχήμα 3.3-2: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500 μ s.



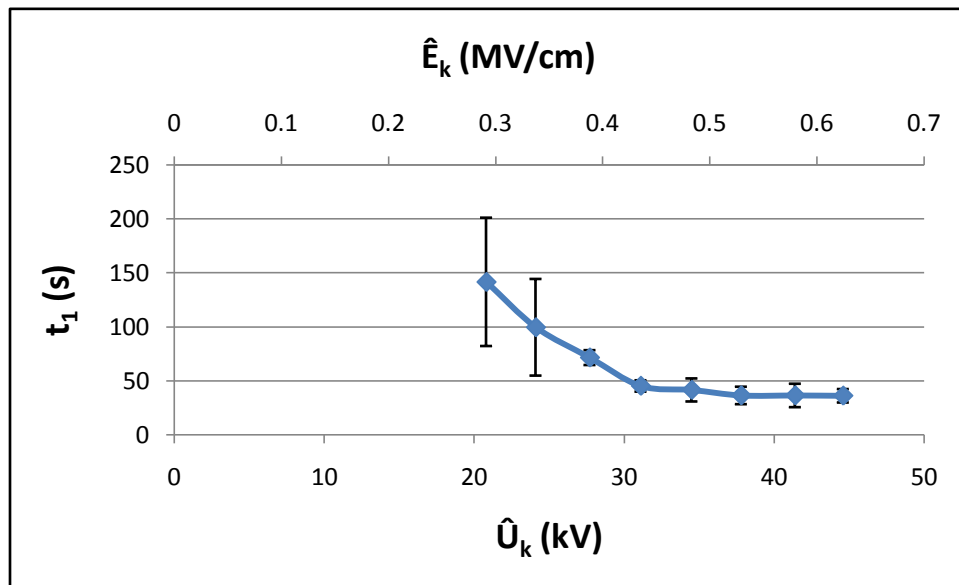
Σχήμα 3.3-3: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



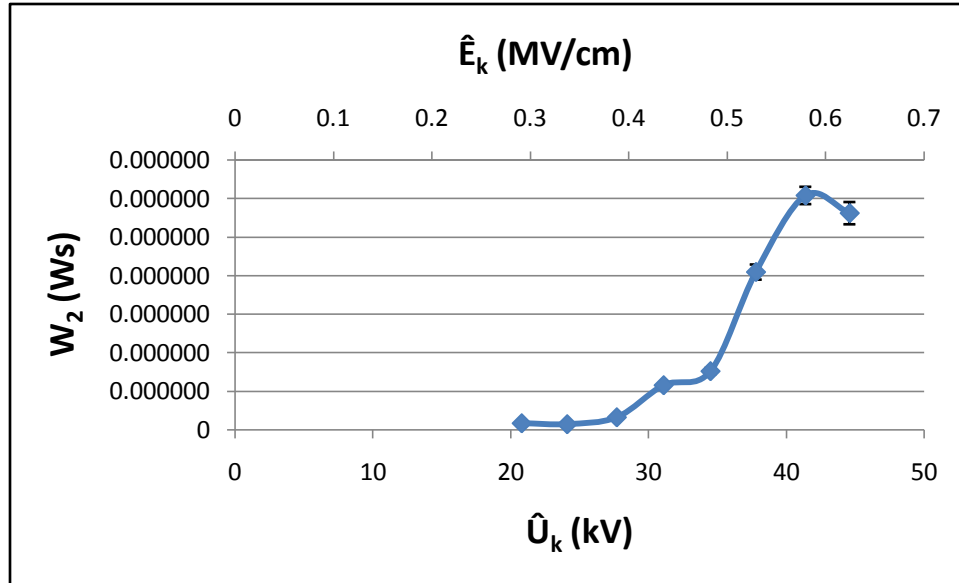
Σχήμα 3.3-4: Χαρακτηριστική της διαφοράς της σύνθετης αντίστασης (ΔZ) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



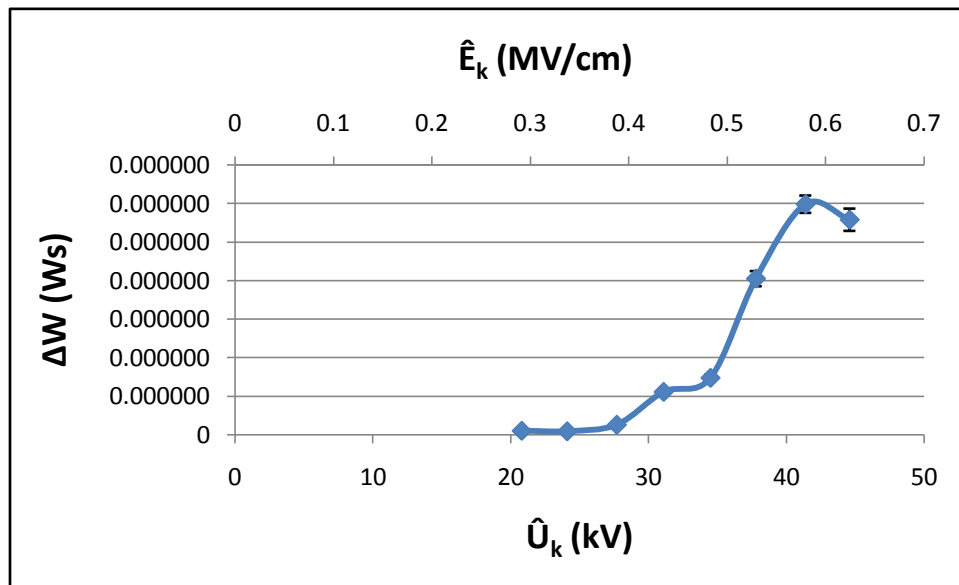
Σχήμα 3.3-5: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



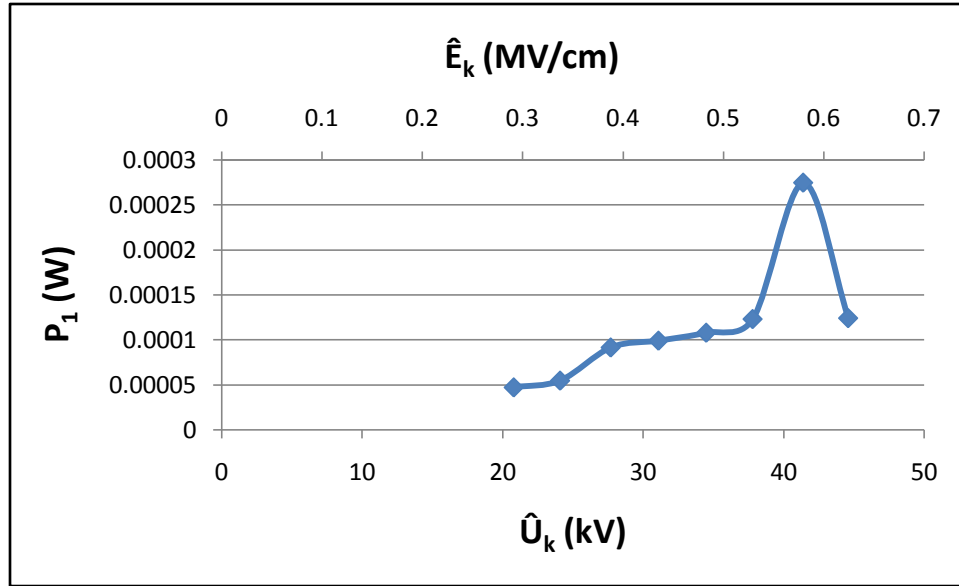
Σχήμα 3.3-6: Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης (t_1) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



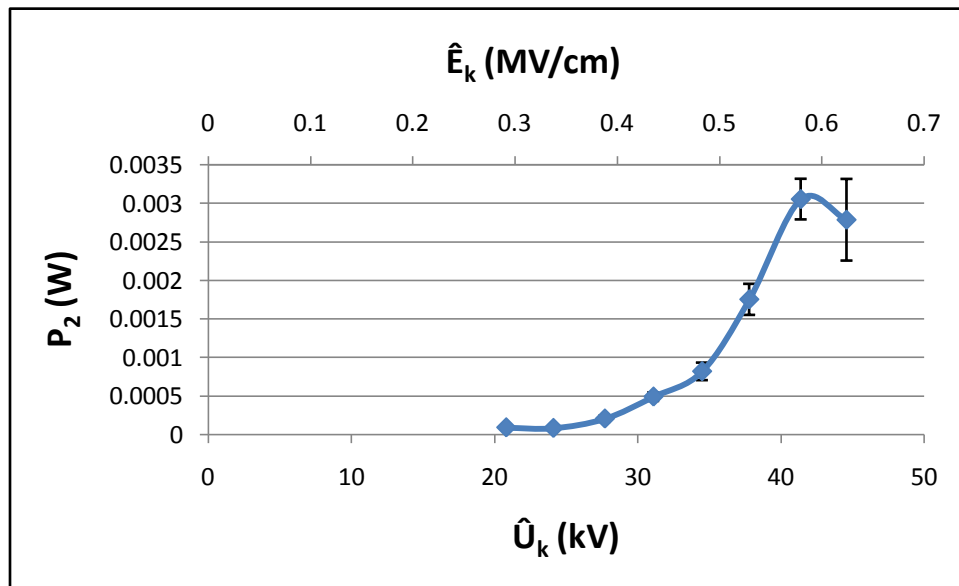
Σχήμα 3.3-7: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_2) στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



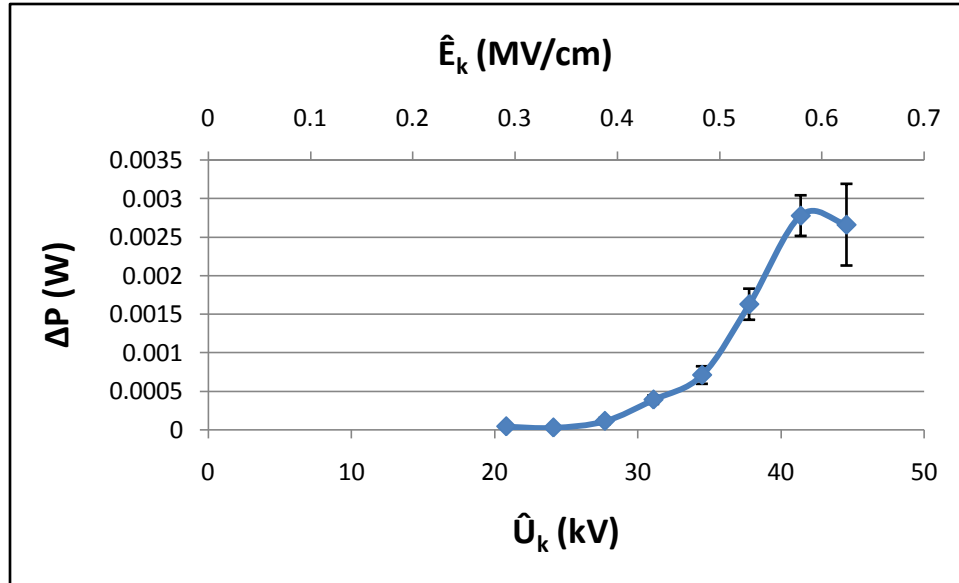
Σχήμα 3.3-8: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (ΔW) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



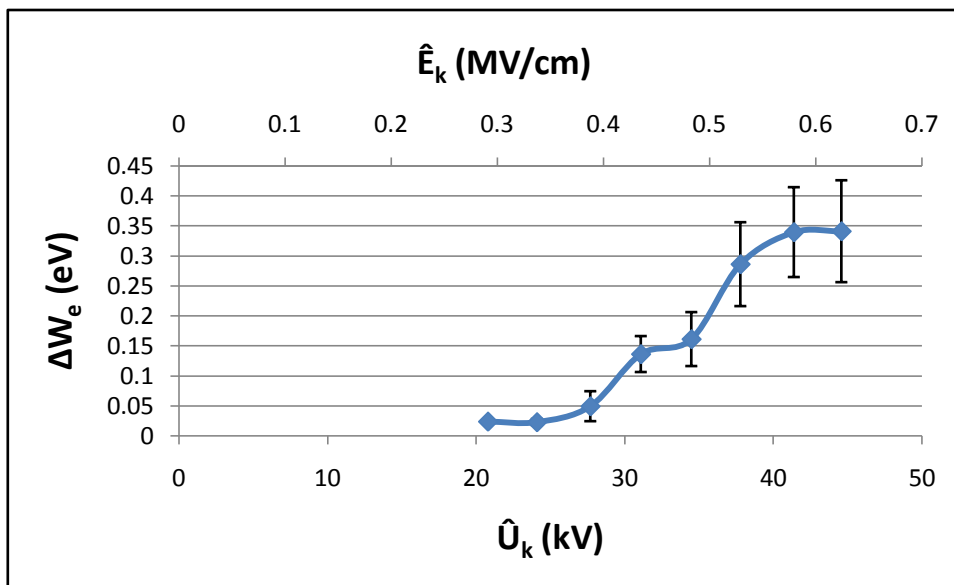
Σχήμα 3.3-9: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



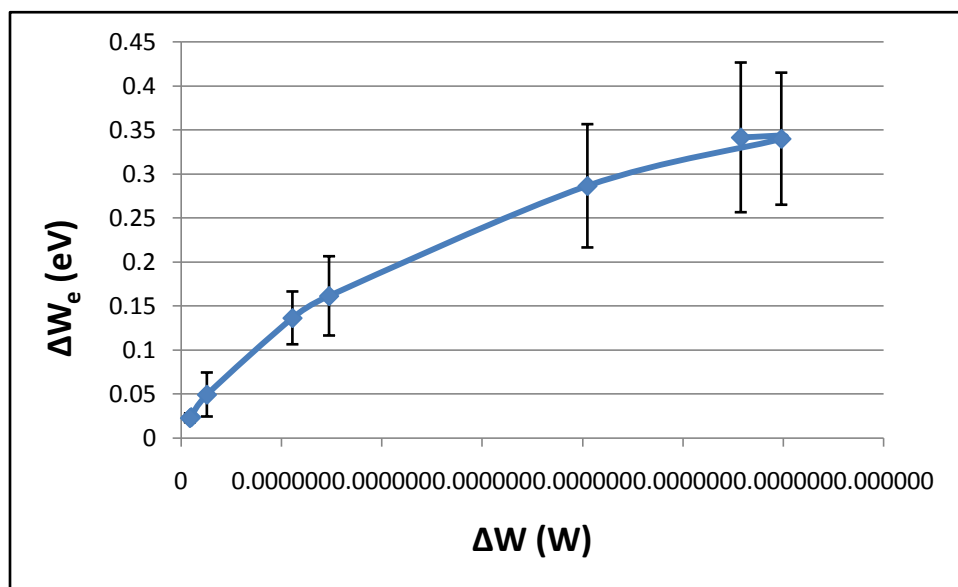
Σχήμα 3.3-10: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_2) στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



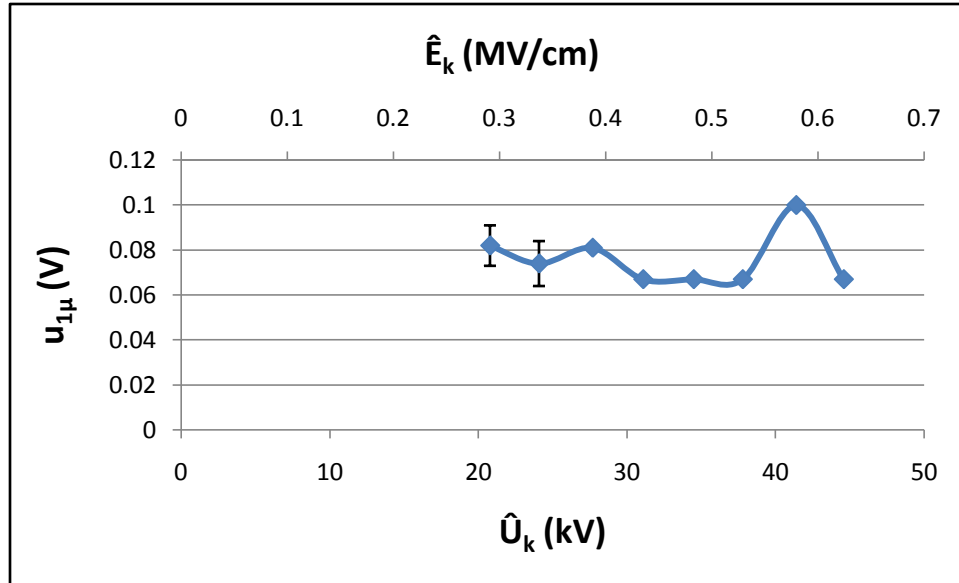
Σχήμα 3.3-11: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ισχύος (ΔP) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax* 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



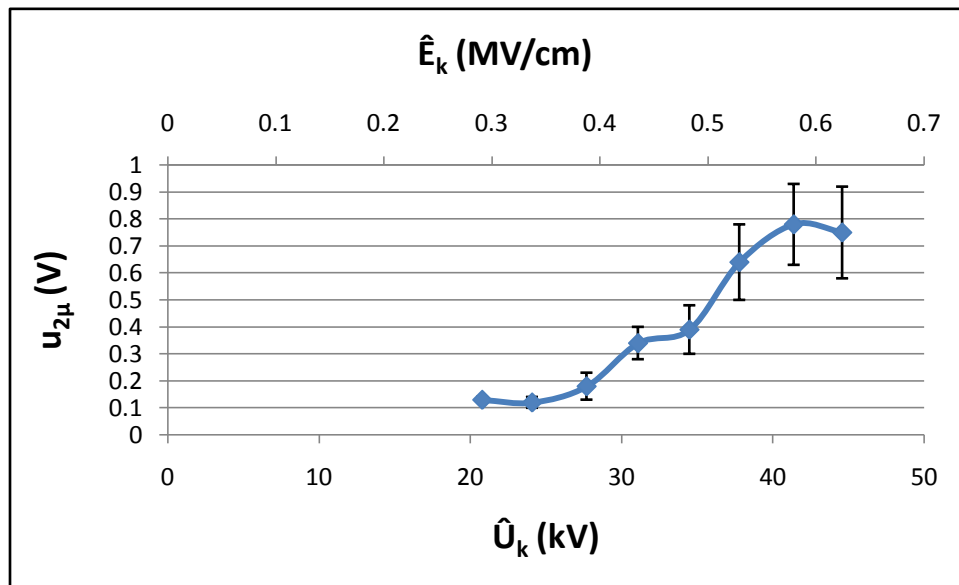
Σχήμα 3.3-12: Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (ΔW_e) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



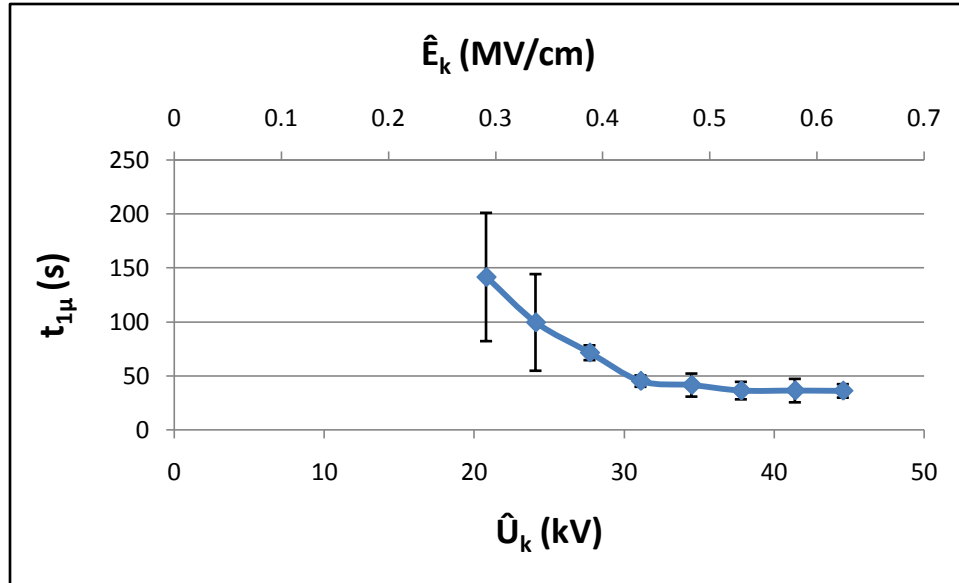
Σχήμα 3.3-13: Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (ΔW_e) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής της ενέργειας και την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



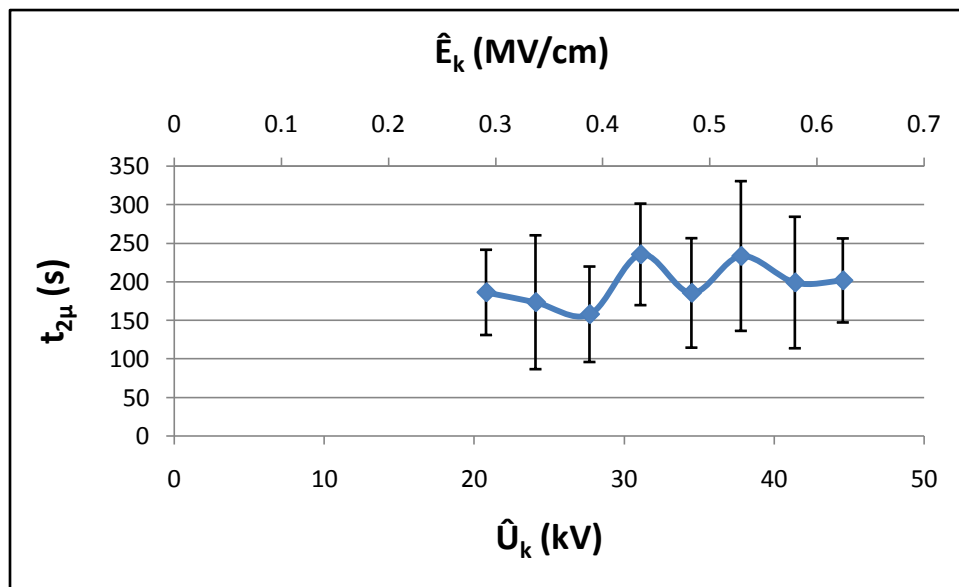
Σχήμα 3.3-14: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής της ($u_{1\mu}$) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



Σχήμα 3.3-15: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής της ($u_{2\mu}$) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



Σχήμα 3.3-16: Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης ($t_{1\mu}$) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



Σχήμα 3.3-17: Χαρακτηριστική του χρόνου περαίωσης ($t_{2\mu}$) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

3.4 Pertinax, d=2mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μs και σε θερμοκρασία $\theta=20^\circ\text{C}$

\hat{U}_k kV	\hat{E}_k MV/cm	C_m nF	q_1 μC	q_2 μC	u_1 V	u_2 V	Δu V	t_1 s	t_2 s	Δt s
-21,2	-0,31583	1000	0,085	0,1	0,085	0,1	0,015	139,7	159,9	20,2
-21,2	-0,31583	1000	0,004	0,004	0,004	0,004	0	49,17	50,85	1,68
-24,6	-0,36648	1000	0,089	0,15	0,089	0,15	0,061	135	162	27
-24,6	-0,36648	1000	0,008	0,01	0,008	0,01	0,002	22,25	26,74	4,49
-28,3	-0,4216	1000	0,094	0,16	0,094	0,16	0,066	98,2	152,5	54,3
-28,3	-0,4216	1000	0	0,03	0	0,03	0,03	24,16	80,34	56,18
-31,8	-0,47375	1000	0,081	0,24	0,081	0,24	0,159	77,6	130,9	53,3
-31,8	-0,47375	1000	0	0,05	0	0,05	0,05	10,57	56,82	46,25
-35,1	-0,52291	1000	0,087	0,34	0,087	0,34	0,253	72,2	111,7	39,5
-35,1	-0,52291	1000	0,006	0,08	0,006	0,08	0,074	9,91	21,68	11,77
-38,6	-0,57505	1000	0,067	0,42	0,067	0,42	0,353	55,3	100,6	45,3
-38,6	-0,57505	1000	0	0,13	0	0,13	0,13	8,56	22	13,44
-42,4	-0,63166	1000	0,067	0,88	0,067	0,88	0,813	44,2	140,4	96,2
-42,4	-0,63166	1000	0	0,44	0	0,44	0,44	3,5	50,67	47,17
-44,8	-0,66742	1000	0,067	0,79	0,067	0,79	0,723	39,8	136,3	96,5
-44,8	-0,66742	1000	0	0,32	0	0,32	0,32	5,6	71,67	66,07

Πίνακας 3.4-1α: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στις σχέσεις (2-1) έως (2-11).

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

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

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

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

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

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

Δu : $u_2 - u_1$

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt : $t_1 - t_2$

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

\hat{U}_k kV	Z_1 Ω	Z_2 Ω	ΔZ Ω	W_1 Ws	W_2 Ws	ΔW Ws	P_1 W	P_2 W	ΔP W	ΔWe eV
-21,2	139,7	159,9	20,2	$7,225 \cdot 10^{-9}$	0,00000001	$2,78 \cdot 10^{-9}$	$5,17 \cdot 10^{-5}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	0,0075
-21,2	49,17	50,85	1,68	$1,6 \cdot 10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$	0	$3,25 \cdot 10^{-7}$	$3,15 \cdot 10^{-7}$	$-1,1 \cdot 10^{-8}$	0
-24,6	135	162	27	$7,921 \cdot 10^{-9}$	$2,25 \cdot 10^{-8}$	$1,46 \cdot 10^{-8}$	$5,87 \cdot 10^{-5}$	0,000139	$8,02 \cdot 10^{-5}$	0,0305
-24,6	22,25	26,74	4,49	$6,4 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$3,6 \cdot 10^{-11}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$3,74 \cdot 10^{-6}$	$8,63 \cdot 10^{-7}$	0,001
-28,3	98,2	152,5	54,3	$8,836 \cdot 10^{-9}$	$2,56 \cdot 10^{-8}$	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-5}$	0,000168	$7,79 \cdot 10^{-5}$	0,033
-28,3	24,16	80,34	56,18	0	$9 \cdot 10^{-10}$	$9 \cdot 10^{-10}$	0	$1,12 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	0,015
-31,8	77,6	130,9	53,3	$6,561 \cdot 10^{-9}$	$5,76 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-8}$	$8,45 \cdot 10^{-5}$	0,00044	0,000355	0,0795
-31,8	10,57	56,82	46,25	0	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	0	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	0,025
-35,1	72,2	111,7	39,5	$7,569 \cdot 10^{-9}$	$1,156 \cdot 10^{-7}$	$1,08 \cdot 10^{-7}$	0,000105	0,001035	0,00093	0,1265
-35,1	9,91	21,68	11,77	$3,6 \cdot 10^{-11}$	$6,4 \cdot 10^{-9}$	$6,36 \cdot 10^{-9}$	$3,63 \cdot 10^{-6}$	0,000295	0,000292	0,037
-38,6	55,3	100,6	45,3	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$1,764 \cdot 10^{-7}$	$1,72 \cdot 10^{-7}$	$8,12 \cdot 10^{-5}$	0,001753	0,001672	0,1765
-38,6	8,56	22	13,44	0	$1,69 \cdot 10^{-8}$	$1,69 \cdot 10^{-8}$	0	0,000768	0,000768	0,065
-42,4	44,2	140,4	96,2	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$7,744 \cdot 10^{-7}$	$7,7 \cdot 10^{-7}$	0,000102	0,005516	0,005414	0,4065
-42,4	3,5	50,67	47,17	0	$1,936 \cdot 10^{-7}$	$1,94 \cdot 10^{-7}$	0	0,003821	0,003821	0,22
-44,8	39,8	136,3	96,5	$4,489 \cdot 10^{-9}$	$6,241 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^{-7}$	0,000113	0,004579	0,004466	0,3615
-44,8	5,6	71,67	66,07	0	$1,024 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$	0	0,001429	0,001429	0,16

Πίνακας 3.4-1β : Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στις σχέσεις (2-1) έως (2-11). (συνέχεια πίνακα 3.4-1α)

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

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

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

ΔZ : $Z_2 - Z_1$

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

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

ΔW : $W_2 - W_1$

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

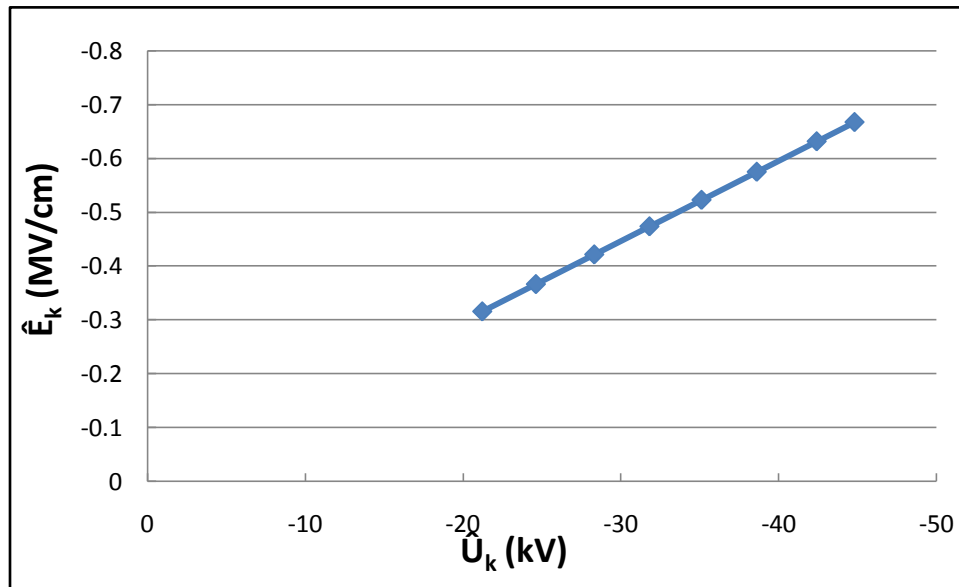
P_2 : στιγμιαία τιμή ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΔP : $P_2 - P_1$

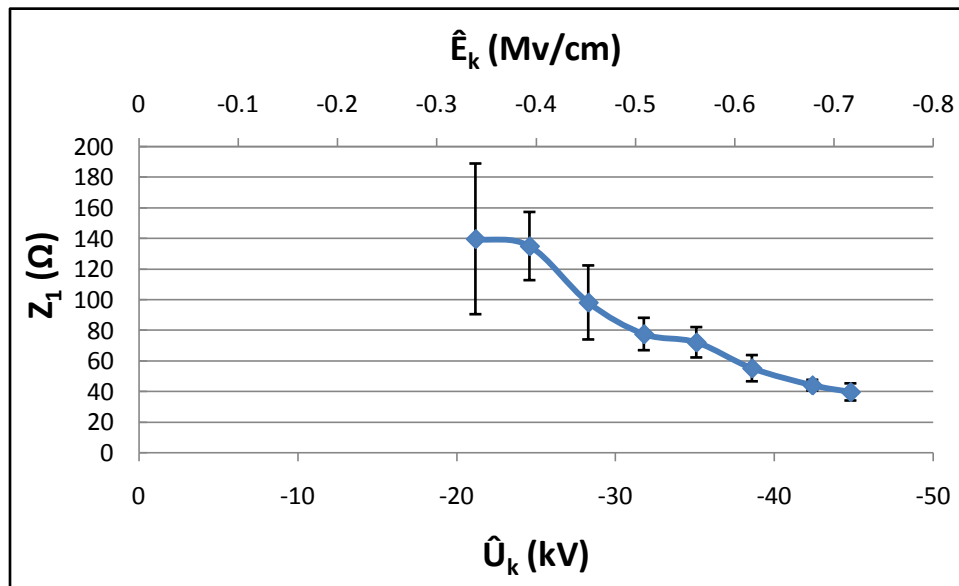
ΔWe : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

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

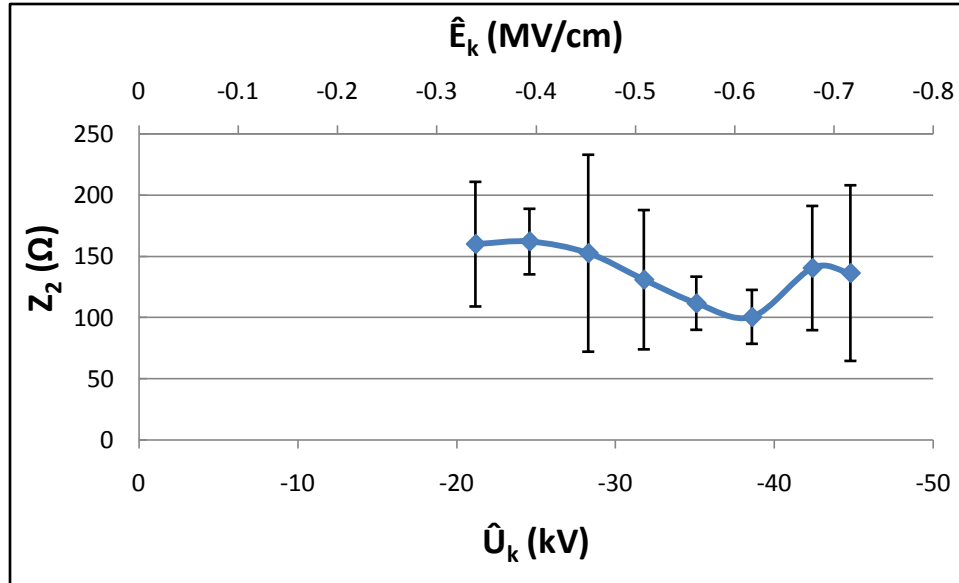
Χαρακτηριστικές για d=2mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μ s



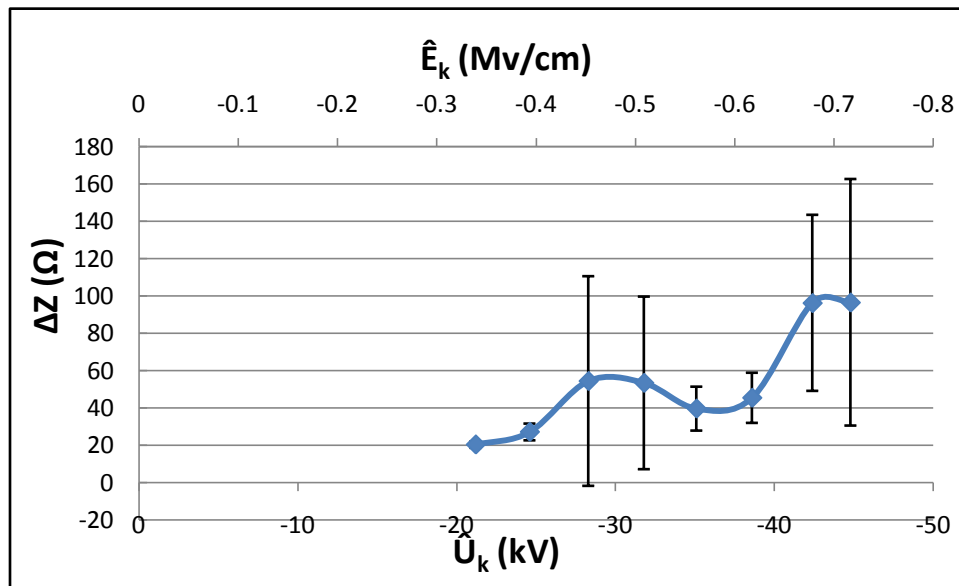
Σχήμα 3.4-1: Χαρακτηριστική της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (\hat{E}_k) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μ s.



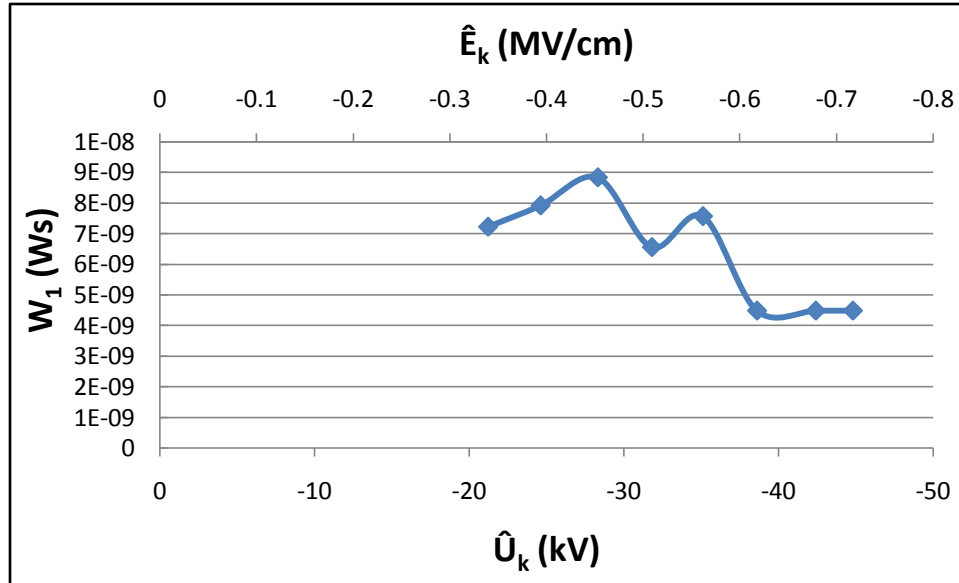
Σχήμα 3.4-2: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μ s.



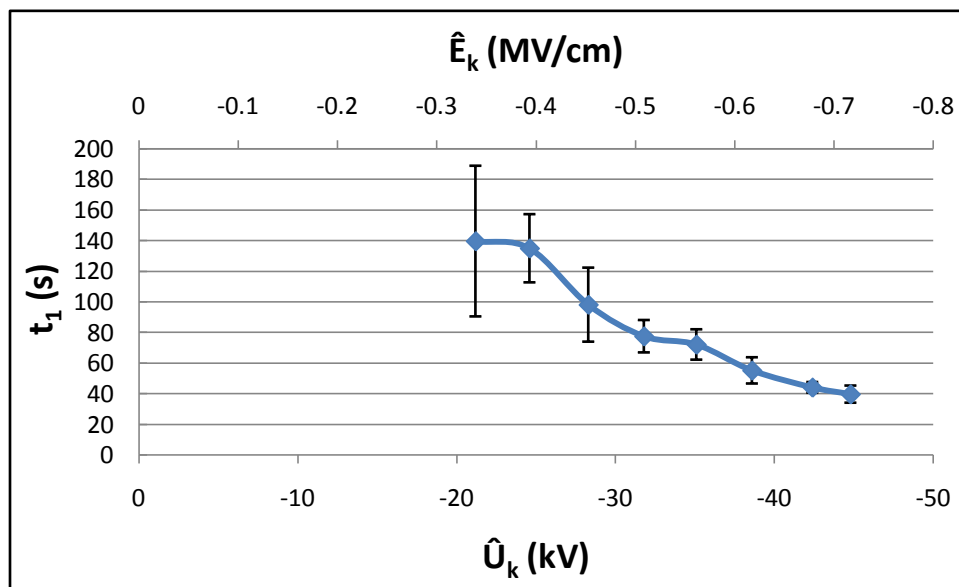
Σχήμα 3.4-3: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



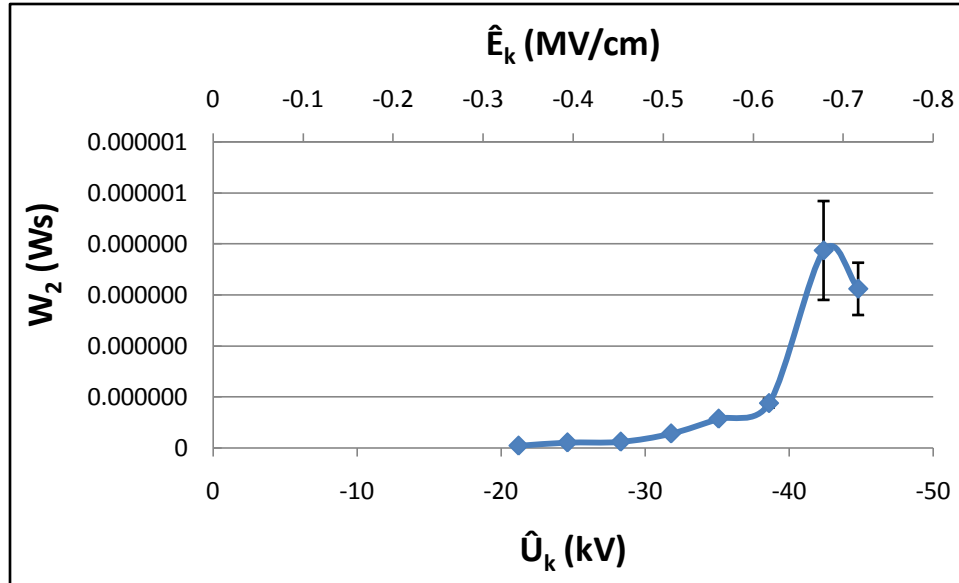
Σχήμα 3.4-4: Χαρακτηριστική της διαφοράς της σύνθετης αντίστασης (ΔZ) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



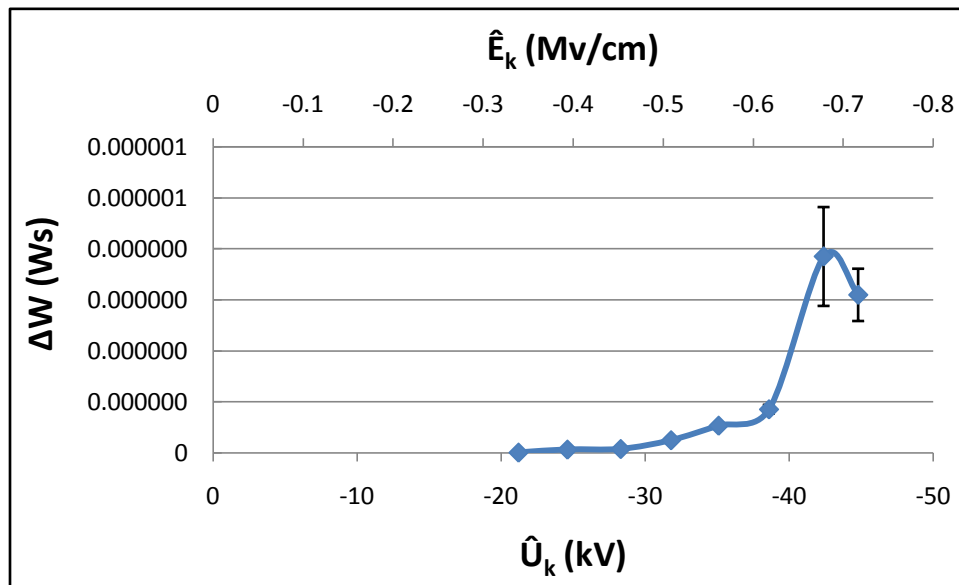
Σχήμα 3.4-5: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



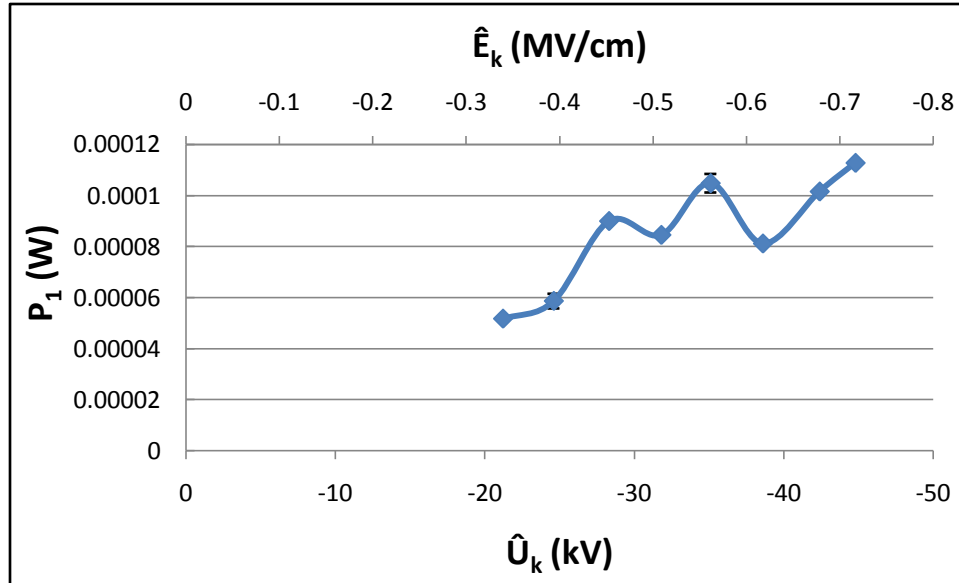
Σχήμα 3.4-6: Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης (t_1) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



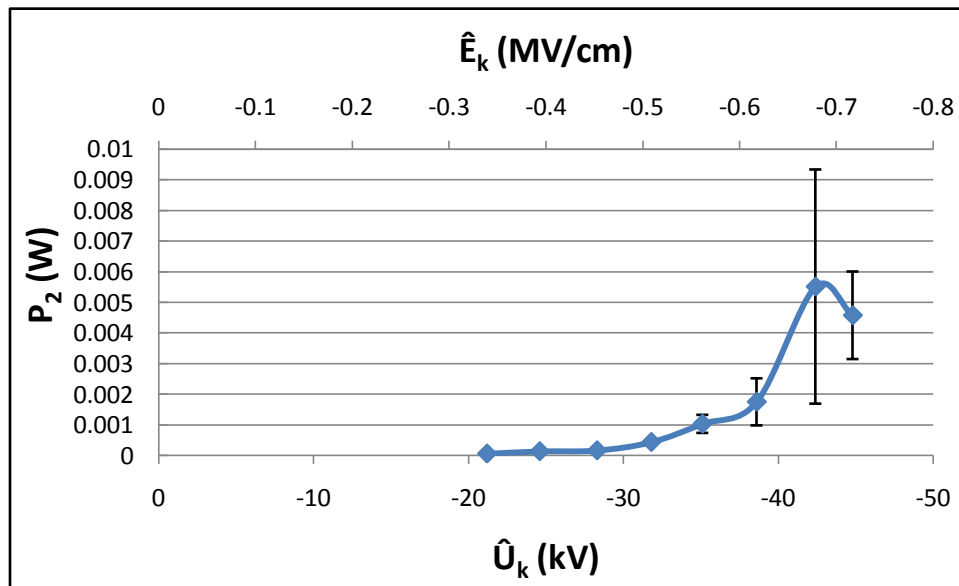
Σχήμα 3.4-7: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



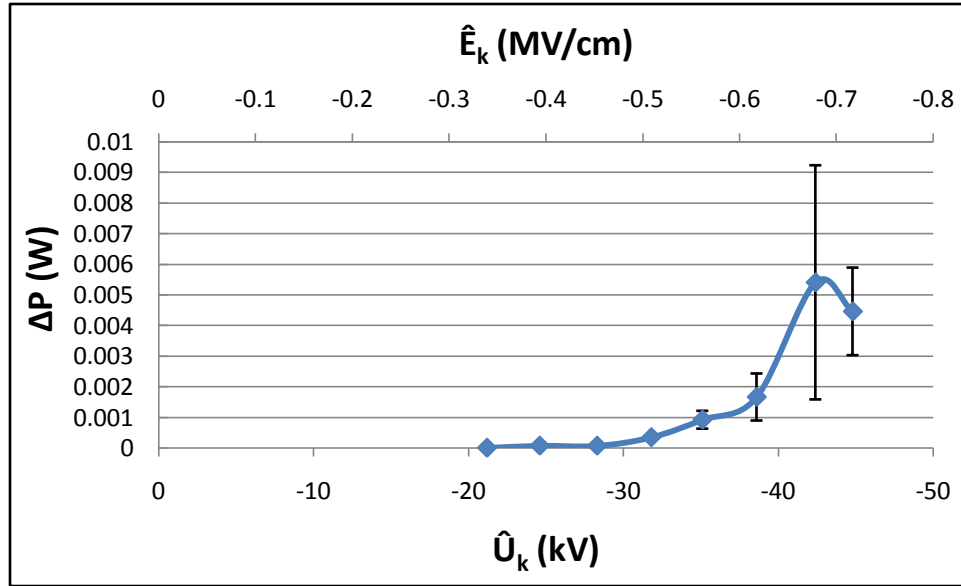
Σχήμα 3.4-8: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (ΔW) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



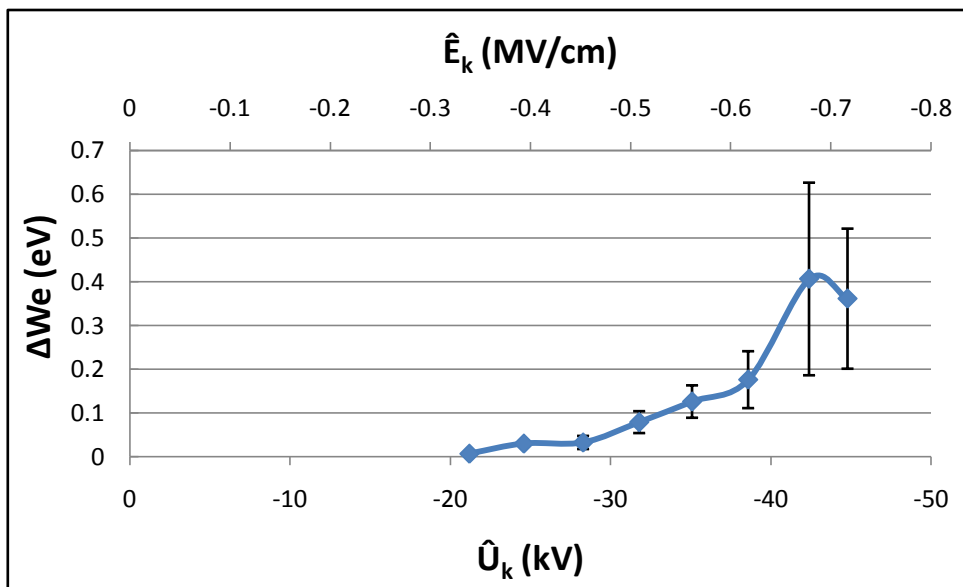
Σχήμα 3.4-9: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



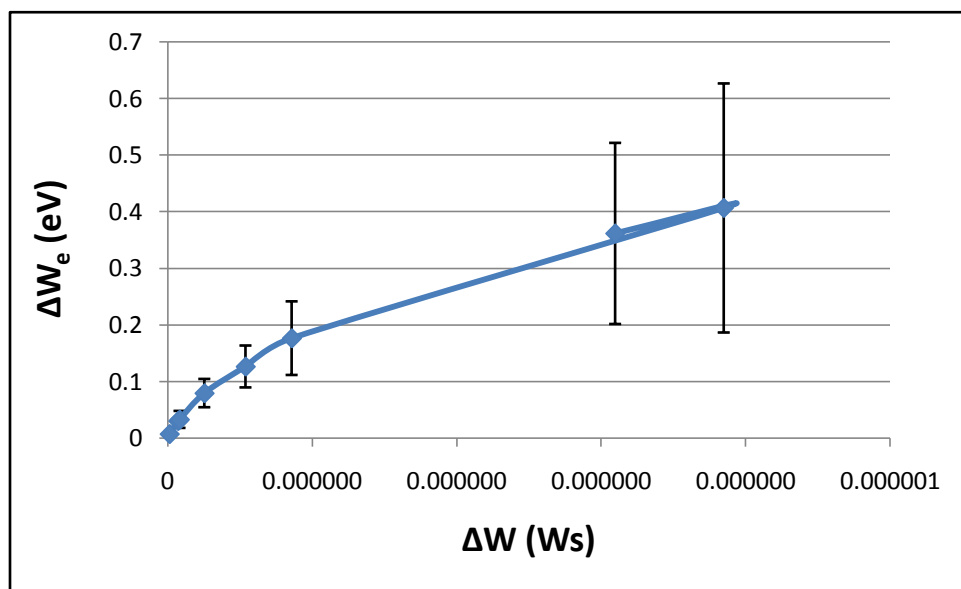
Σχήμα 3.4-10: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_2) στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



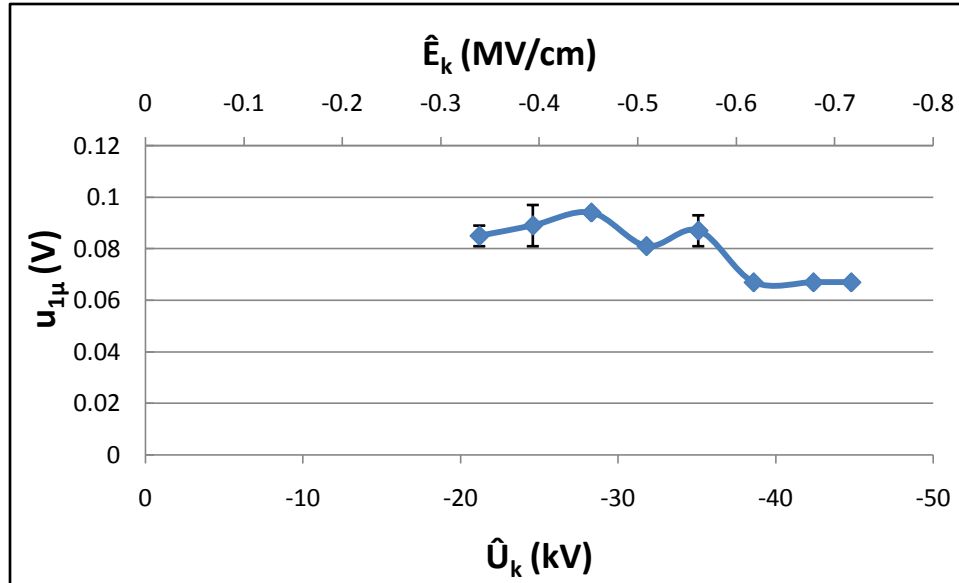
Σχήμα 3.4-11: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ισχύος (ΔP) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



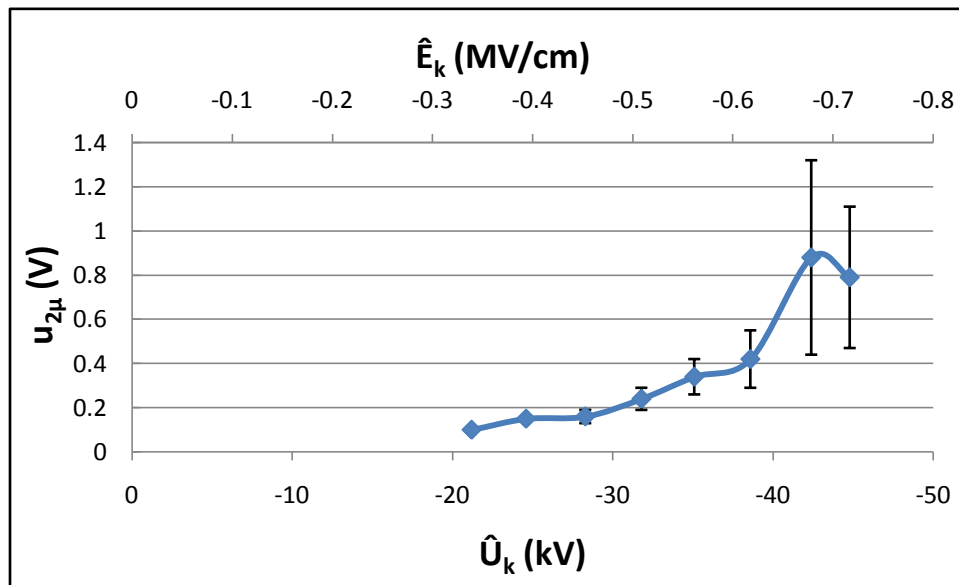
Σχήμα 3.4-12: Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (ΔW_e) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



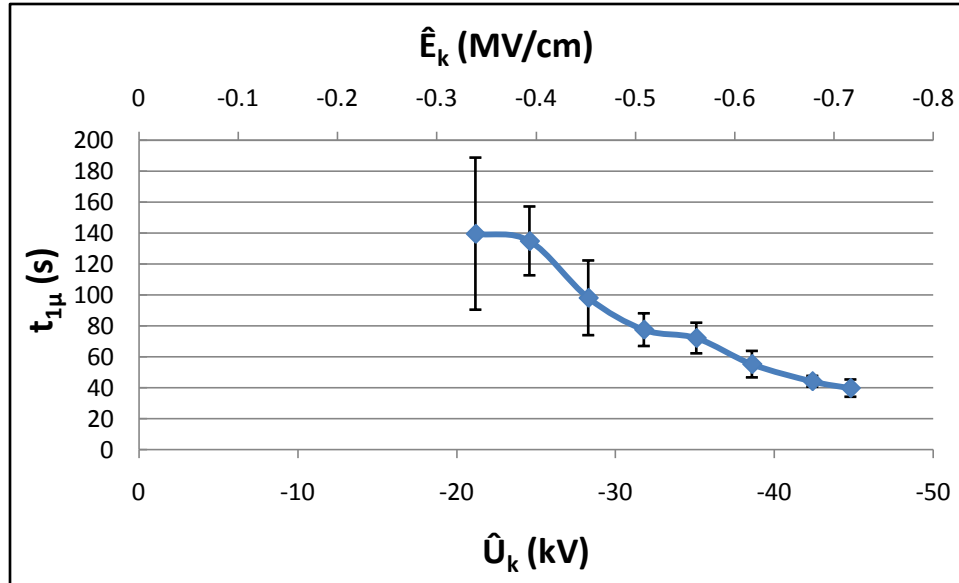
Σχήμα 3.4-13: Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (ΔW_e) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής της ενέργειας και την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



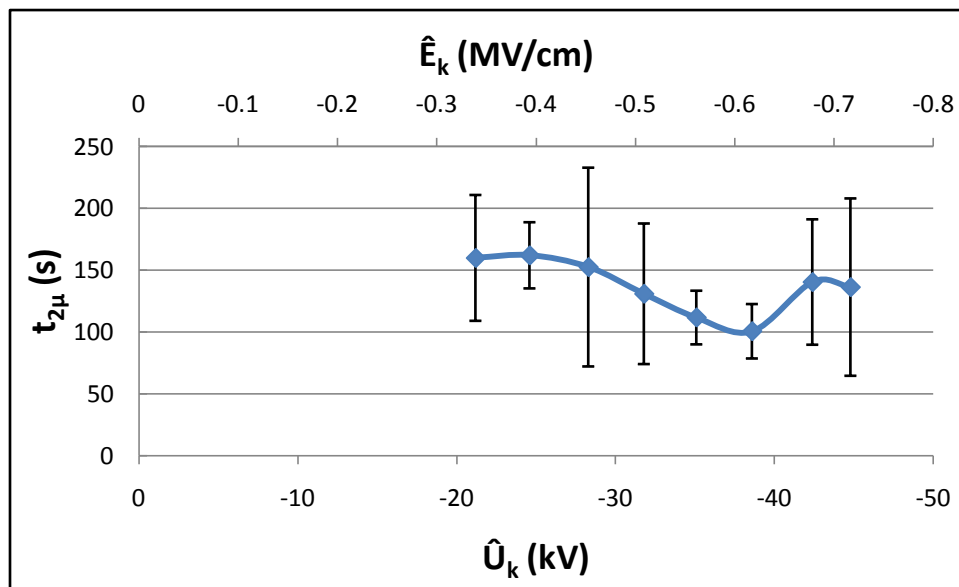
Σχήμα 3.4-14: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής της ($u_{1\mu}$) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



Σχήμα 3.4-15: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής της ($u_{2\mu}$) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



Σχήμα 3.4-16: Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης ($t_{1\mu}$) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

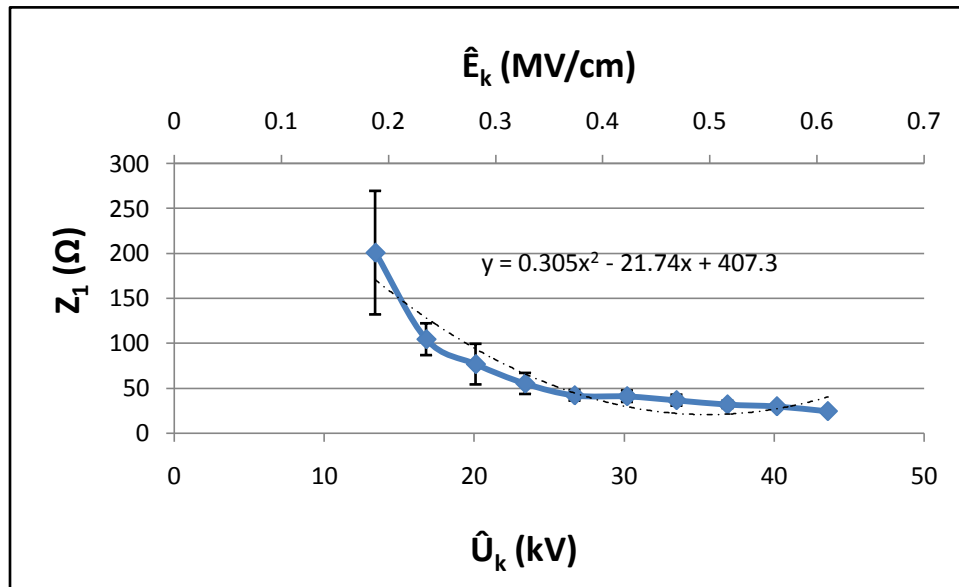


Σχήμα 3.4-17: Χαρακτηριστική του χρόνου περαίωσης ($t_{2\mu}$) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

4. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

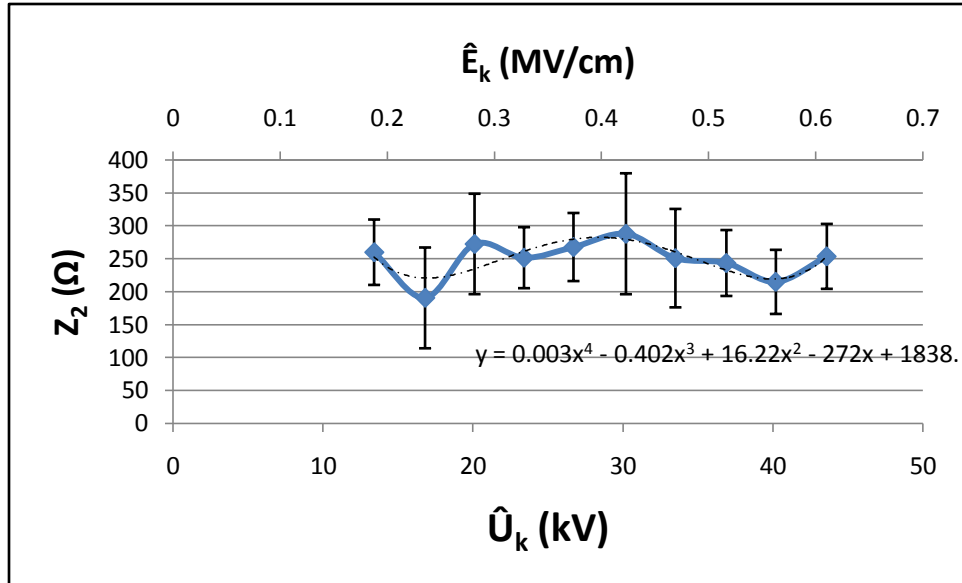
Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται οι μαθηματικές προσεγγίσεις των χαρακτηριστικών που υπολογίσθηκαν στο κεφάλαιο 3, ενώ παρατίθενται και τα αντίστοιχα σχόλια.

4.1 Pertinax, d=1mm υπό κρουστική τάση +250/2500 μ s και σε θερμοκρασία $\theta=20^\circ\text{C}$



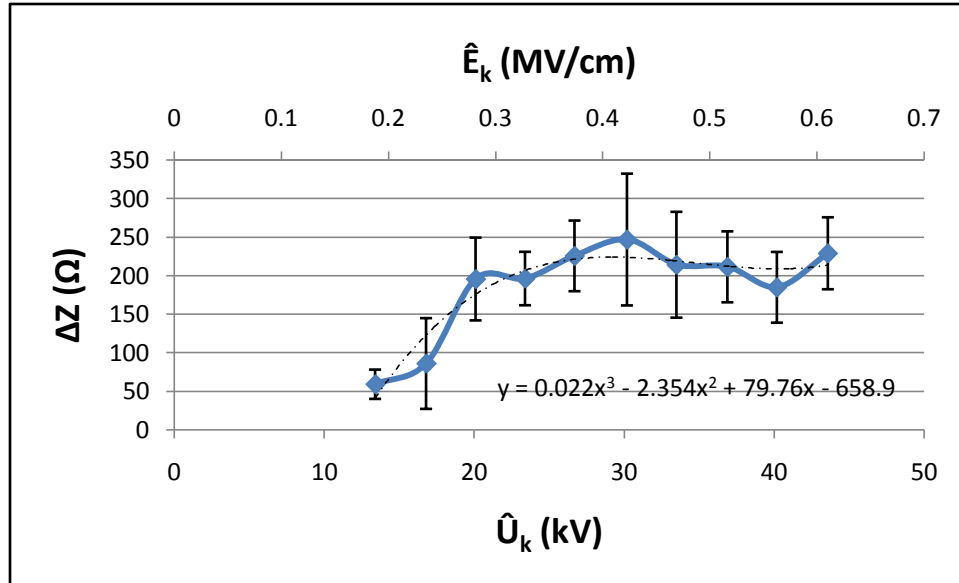
Σχήμα 4.1-1: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500 μ s.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης, μειώνεται η τιμή της αντίστασης. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της κρουστικής τάσης, η οποία προκαλεί αύξηση του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων, οπότε αυξάνεται η αγωγιμότητα του υλικού και συνεπώς μειώνεται η αντίστασή του.



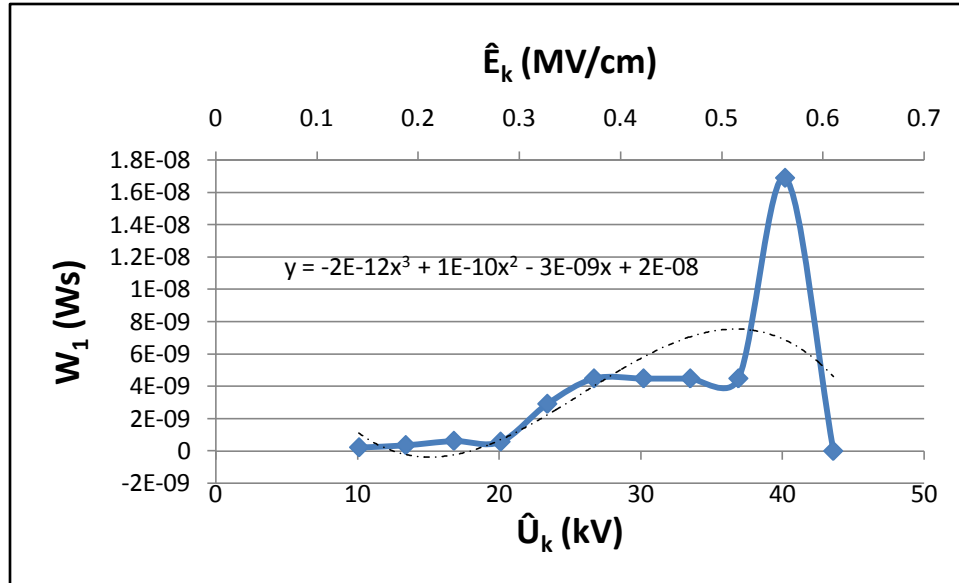
Σχήμα 4.1-2: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση +250/2500 μ s.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται μια σχετική διακύμανση, η οποία οφείλεται στους δυο παράγοντες γήρανσης. Συγκεκριμένα, όταν υπερτερούν οι μερικές εκκενώσεις προκαλείται αύξηση της αγωγιμότητας, ενώ όταν υπερτερούν οι δυνάμεις Coulomb, προκαλείται μείωση αγωγιμότητας γιατί η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται για την μηχανική καταπόνηση του δοκιμίου.

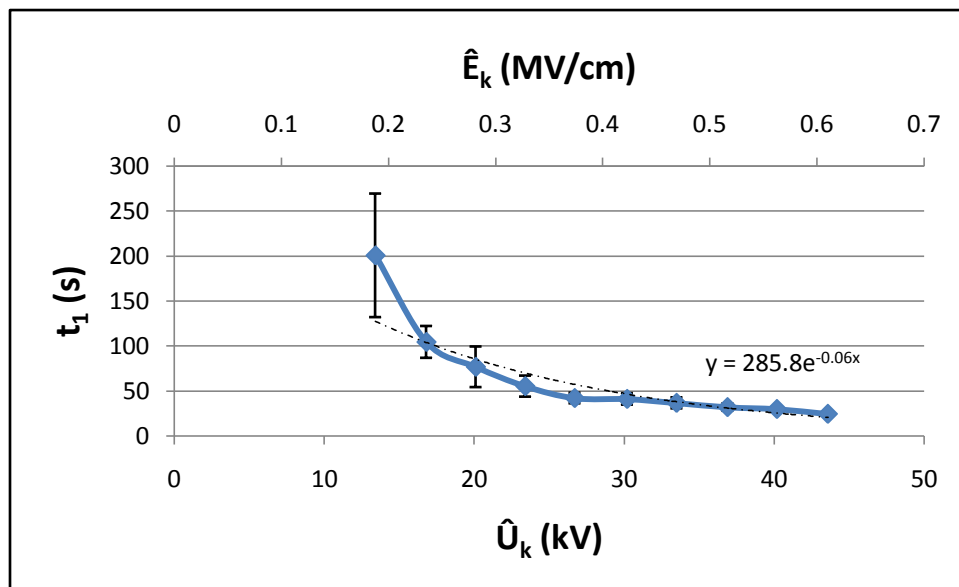


Σχήμα 4.1-3: Χαρακτηριστική της διαφοράς της σύνθετης αντίστασης (ΔZ) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax 1mm* υπό κρουσική τάση +250/2500 μ s.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται μια σχετική διακύμανση, η οποία οφείλεται στους δυο παράγοντες γήρανσης. Συγκεκριμένα, όταν υπερτερούν οι μερικές εκκενώσεις προκαλείται αύξηση της αγωγιμότητας, ενώ όταν υπερτερούν οι δυνάμεις Coulomb, προκαλείται μείωση αγωγιμότητας γιατί η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται για την μηχανική καταπόνηση του δοκιμίου.

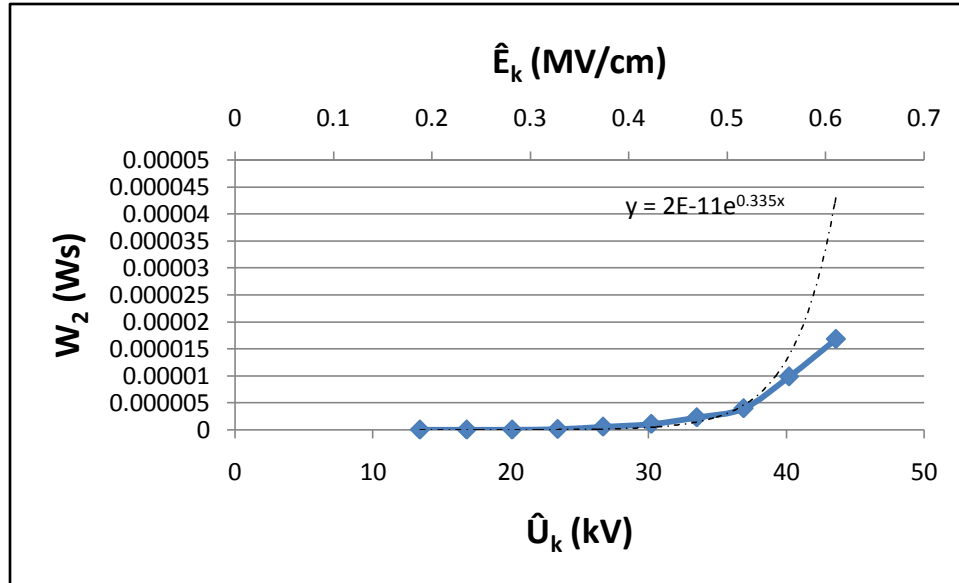


Σχήμα 4.1-4: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

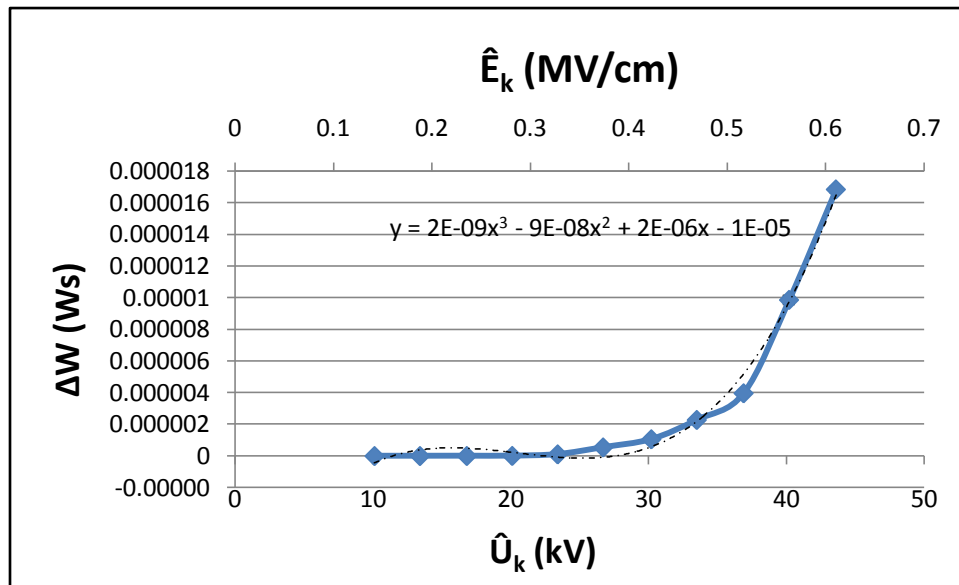


Σχήμα 4.1-5: Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης (t_1) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

Στις παραπάνω δυο χαρακτηριστικές παρατηρείται ότι κατά την αύξηση της κλίσης της κρουστικής τάσης λόγω αύξησης της τιμής της, η απαιτούμενη ενέργεια για την έναρξη των μερικών εκκενώσεων γίνεται μεγαλύτερη γιατί μειώνεται ο διαθέσιμος χρόνος έναρξης τους.

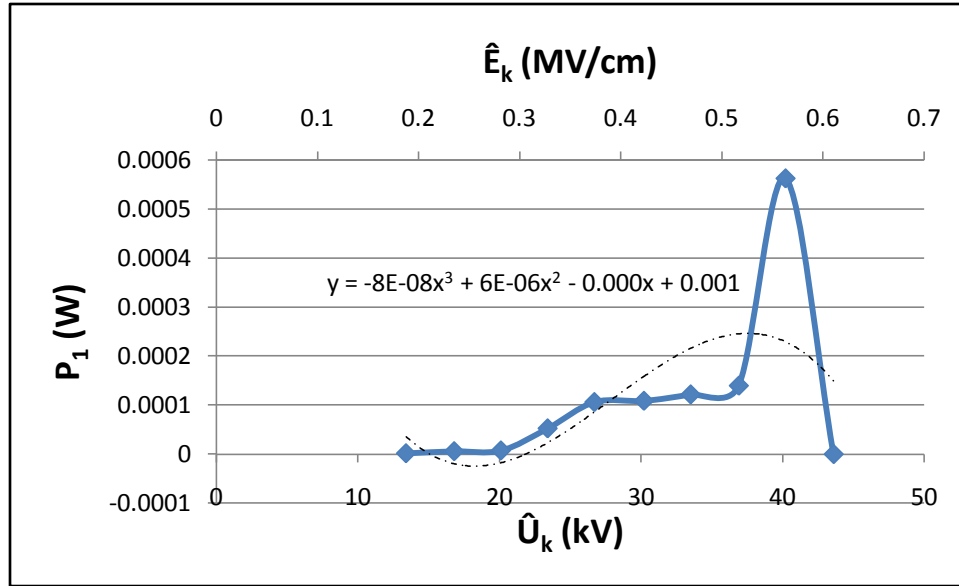


Σχήμα 4.1-6: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

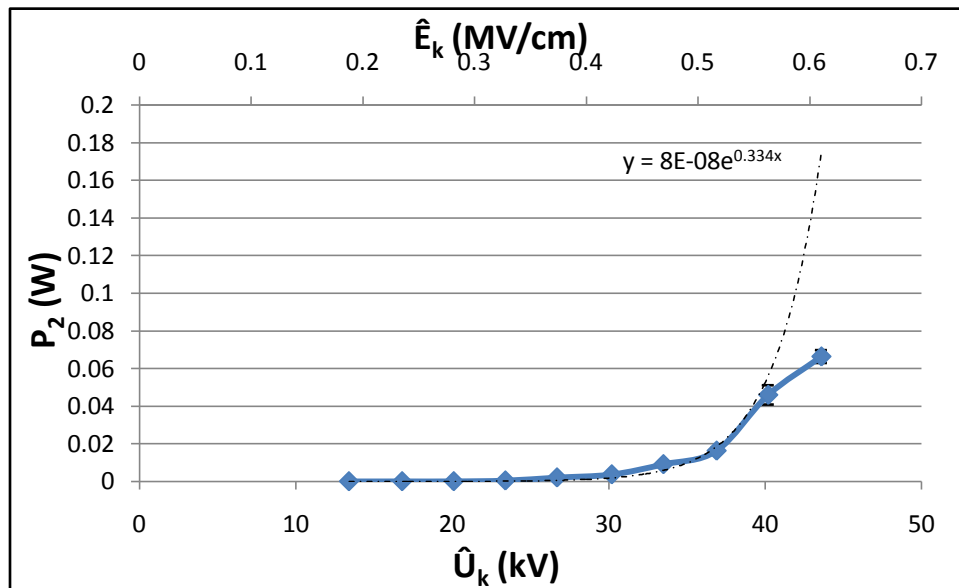


Σχήμα 4.1-7: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (ΔW) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

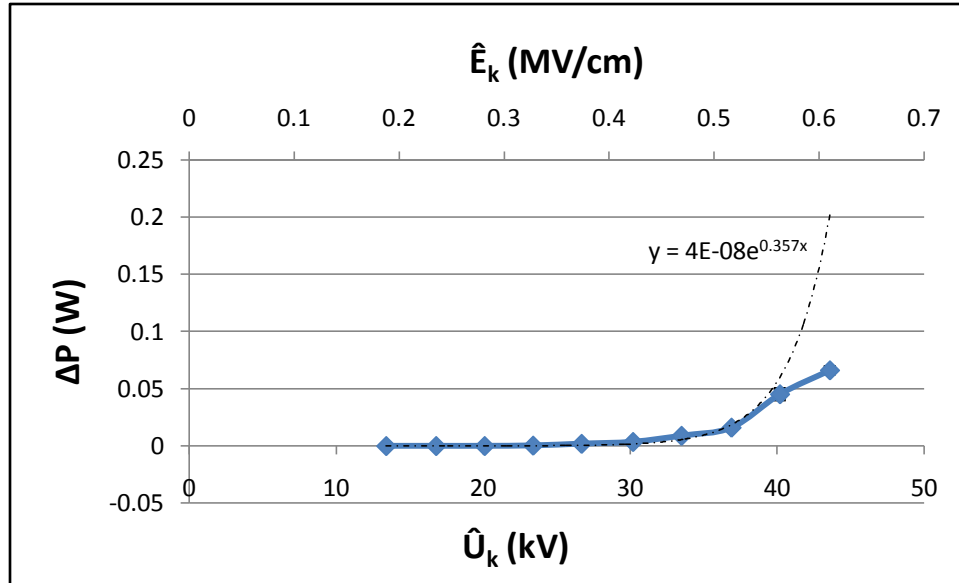
Στις παραπάνω δυο χαρακτηριστικές παρατηρείται ότι με την αύξηση της κρουστικής τάσης, παρουσιάζεται και αύξηση της W_2 και της ΔW , όπως αναμενόταν σύμφωνα και με τις σχέσεις (2-6) και (2-7).



Σχήμα 4.1-8: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

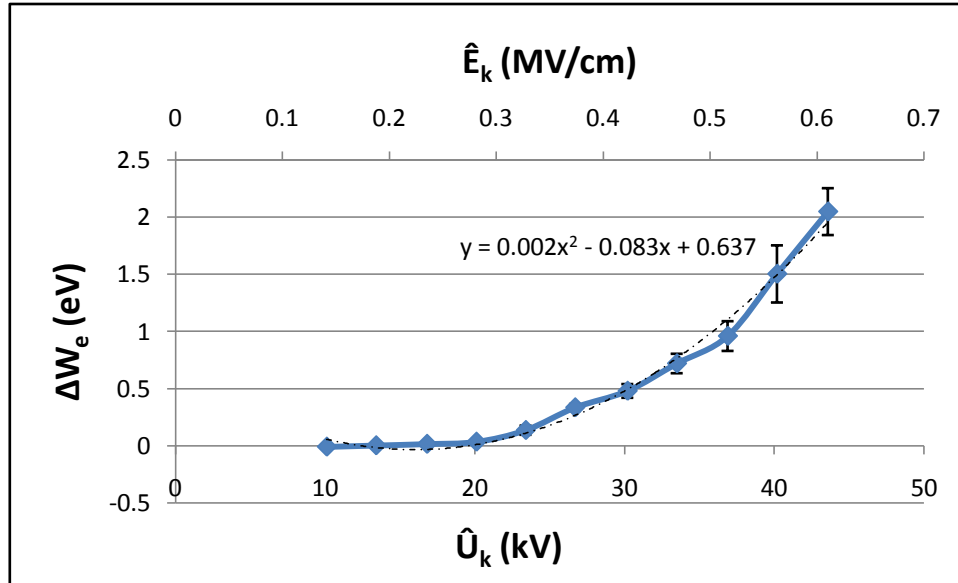


Σχήμα 4.1-9: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_2) στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



Σχήμα 4.1-10: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ισχύος (ΔP) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

Στις χαρακτηριστικές 4.1-8 έως και 4.1-10, παρατηρείται ότι η ισχύς ακολουθεί ακριβώς το ίδιο μοτίβο με την στιγμιαία ενέργεια κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων, καθώς πρόκειται για μεγέθη ανάλογα, όπως συμπεραίνεται και από τις σχέσεις (2-8), (2-9) και (2-10).



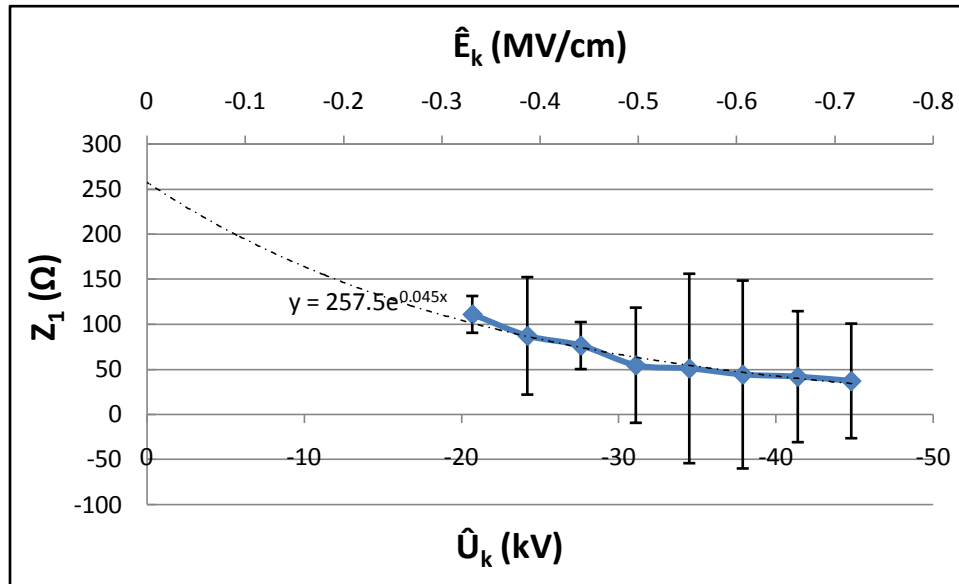
Σχήμα 4.1-11: Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (ΔW_e) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης, αυξάνεται η τιμή της ενέργειας των ελευθέρων ηλεκτρονίων. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της κρουστικής τάσης, η οποία προκαλεί αύξηση του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων, οπότε αυξάνεται η ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων και συνεπώς αυξάνεται η αγωγιμότητα του υλικού.

Παρακάτω δίνεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των μαθηματικών προσεγγίσεων των παραπάνω χαρακτηριστικών για δοκίμιο τύπου Pertinax πάχους 1mm υπό κρουστική τάση +250/2500 μs και σε θερμοκρασία $\theta=20^{\circ}\text{C}$.

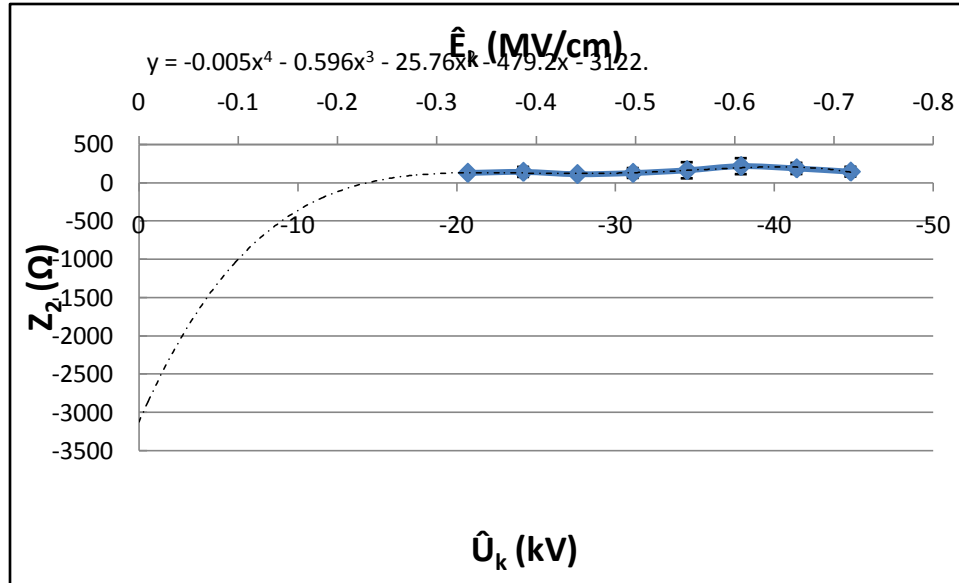
Χαρακτηριστική	Μαθηματική Προσέγγιση
$Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Z_1 = 0,3057\hat{U}_k^2 - 21,741\hat{U}_k + 407,34$
$Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Z_2 = 0,0035\hat{U}_k^4 - 0,4023\hat{U}_k^3 + 16,22\hat{U}_k^2 - 272\hat{U}_k + 1838,6$
$\Delta Z = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta Z = 0,0226\hat{U}_k^3 - 2,3548\hat{U}_k^2 + 79,76\hat{U}_k - 658,93$
$W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$W_1 = -2 \cdot 10^{-12}\hat{U}_k^3 + 10^{-10}\hat{U}_k^2 - 3 \cdot 10^{-9}\hat{U}_k + 2 \cdot 10^{-8}$
$t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$t_1 = 285,8 \cdot e^{-0,06\hat{U}_k}$
$W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$W_2 = 2 \cdot 10^{-11} \cdot e^{0,335\hat{U}_k}$
$\Delta W = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta W = 2 \cdot 10^{-9}\hat{U}_k^3 - 9 \cdot 10^{-8}\hat{U}_k^2 + 2 \cdot 10^{-6}\hat{U}_k - 10^{-5}$
$P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$P_1 = -8 \cdot 10^{-8}\hat{U}_k^3 + 6 \cdot 10^{-6}\hat{U}_k^2 - 0,0002\hat{U}_k + 0,0012$
$P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$P_2 = 8 \cdot 10^{-8} \cdot e^{0,334\hat{U}_k}$
$\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta P = 4 \cdot 10^{-8} \cdot e^{0,3572\hat{U}_k}$
$\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta W_e = 0,0026\hat{U}_k^2 - 0,0835\hat{U}_k + 0,6374$

4.2 Pertinax, d=1mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μ s και σε θερμοκρασία $\theta=20^\circ\text{C}$



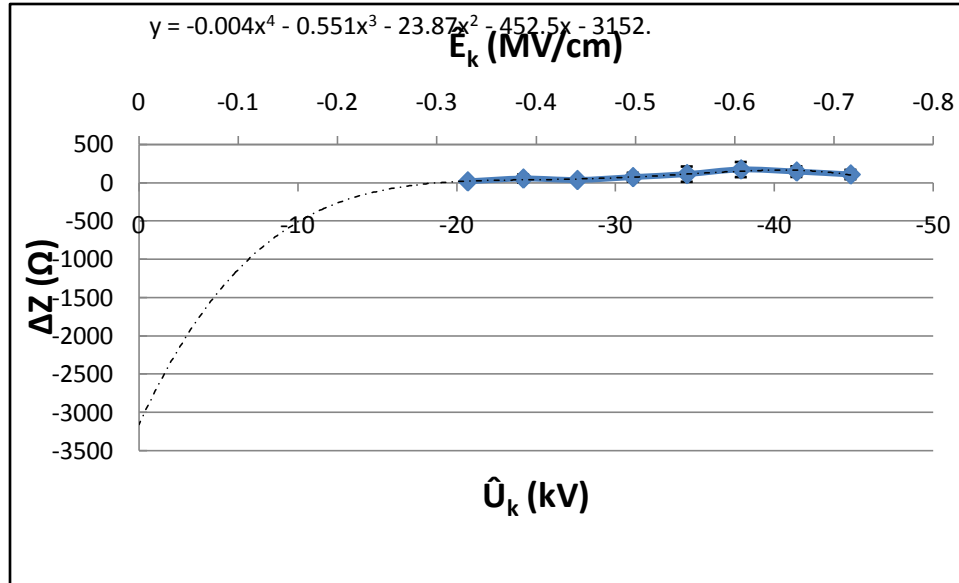
Σχήμα 4.2-1: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μ s.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης, μειώνεται η τιμή της αντίστασης. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της κρουστικής τάσης, η οποία προκαλεί αύξηση του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων, οπότε αυξάνεται η αγωγιμότητα του υλικού και συνεπώς μειώνεται η αντίστασή του.



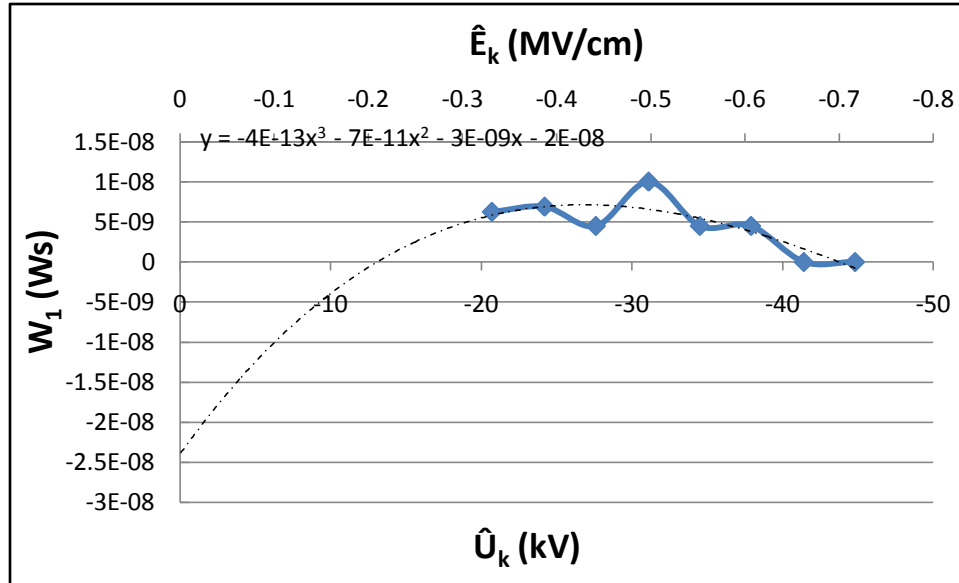
Σχήμα 4.2-2: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μ s.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται μια σχετική διακύμανση, η οποία οφείλεται στους δυο παράγοντες γήρανσης. Συγκεκριμένα, όταν υπερτερούν οι μερικές εκκενώσεις προκαλείται αύξηση της αγωγιμότητας, ενώ όταν υπερτερούν οι δυνάμεις Coulomb, προκαλείται μείωση αγωγιμότητας γιατί η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται για την μηχανική καταπόνηση του δοκιμίου.

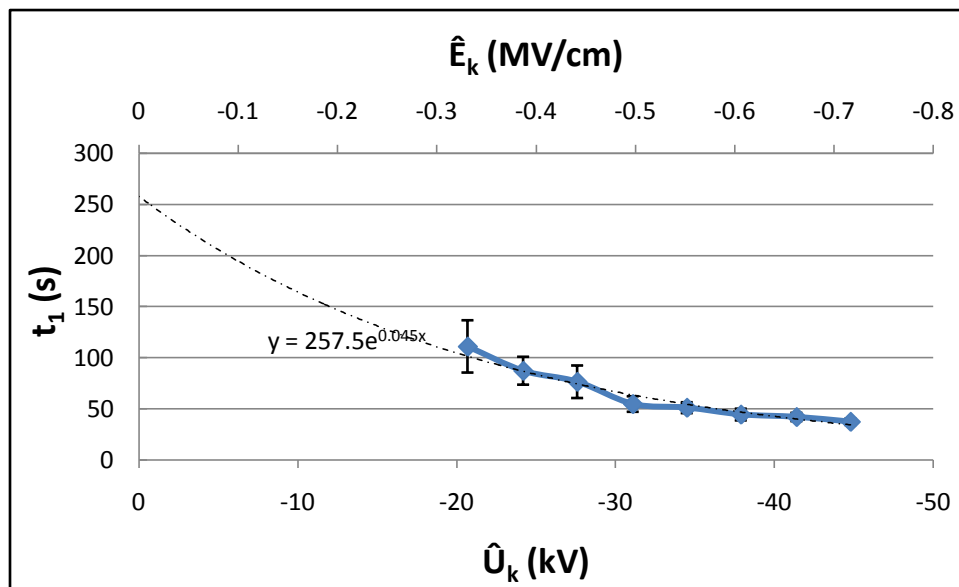


Σχήμα 4.2-3: Χαρακτηριστική της διαφοράς της σύνθετης αντίστασης (ΔZ) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση -250/2500 μ s.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται μια σχετική διακύμανση, η οποία οφείλεται στους δυο παράγοντες γήρανσης. Συγκεκριμένα, όταν υπερτερούν οι μερικές εκκενώσεις προκαλείται αύξηση της αγωγιμότητας, ενώ όταν υπερτερούν οι δυνάμεις Coulomb, προκαλείται μείωση αγωγιμότητας γιατί η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται για την μηχανική καταπόνηση του δοκιμίου.

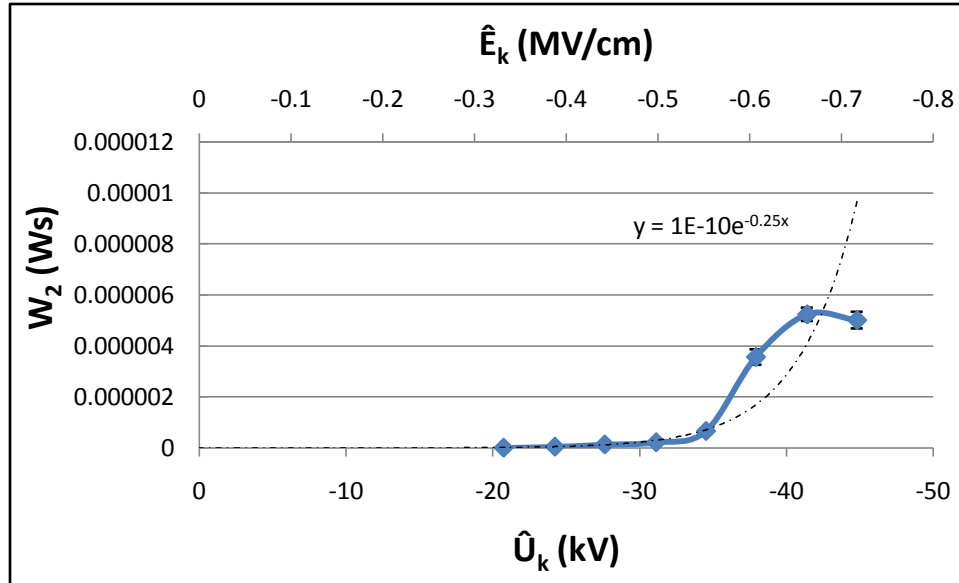


Σχήμα 4.2-4: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

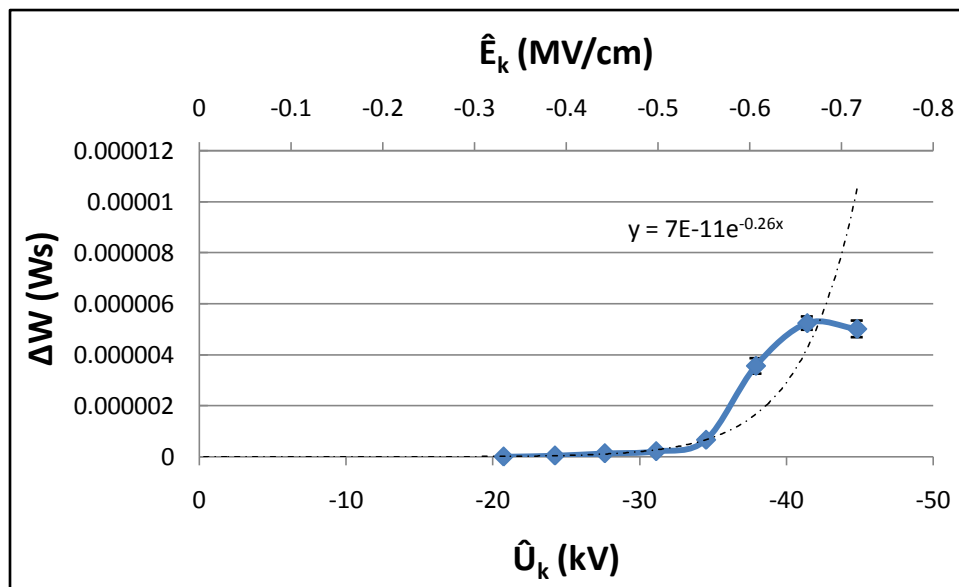


Σχήμα 4.2-5: Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης (t_1) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

Στις παραπάνω δυο χαρακτηριστικές παρατηρείται ότι κατά την αύξηση της κλίσης της κρουστικής τάσης λόγω αύξησης της τιμής της, η απαιτούμενη ενέργεια για την έναρξη των μερικών εκκενώσεων γίνεται μεγαλύτερη γιατί μειώνεται ο διαθέσιμος χρόνος έναρξης τους.

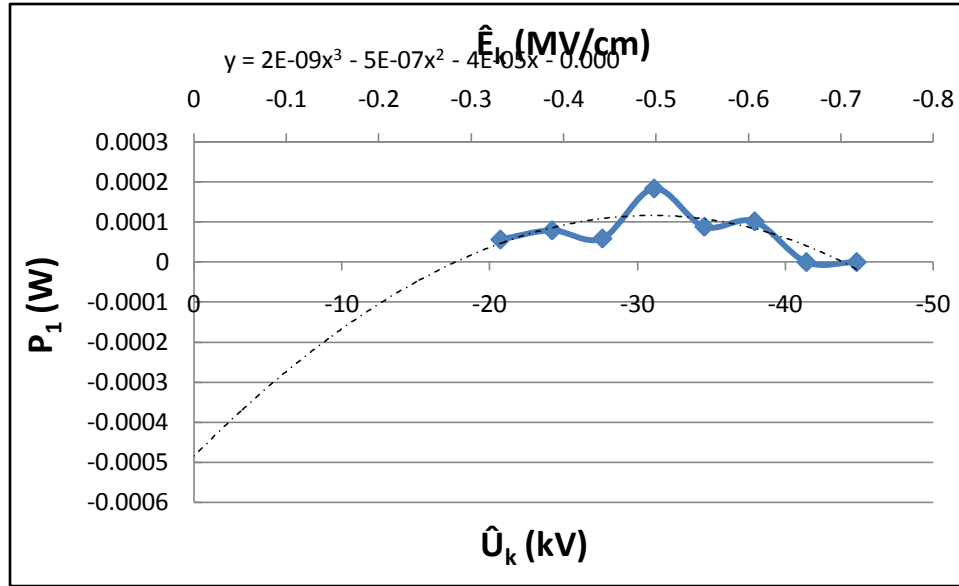


Σχήμα 4.2-6: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

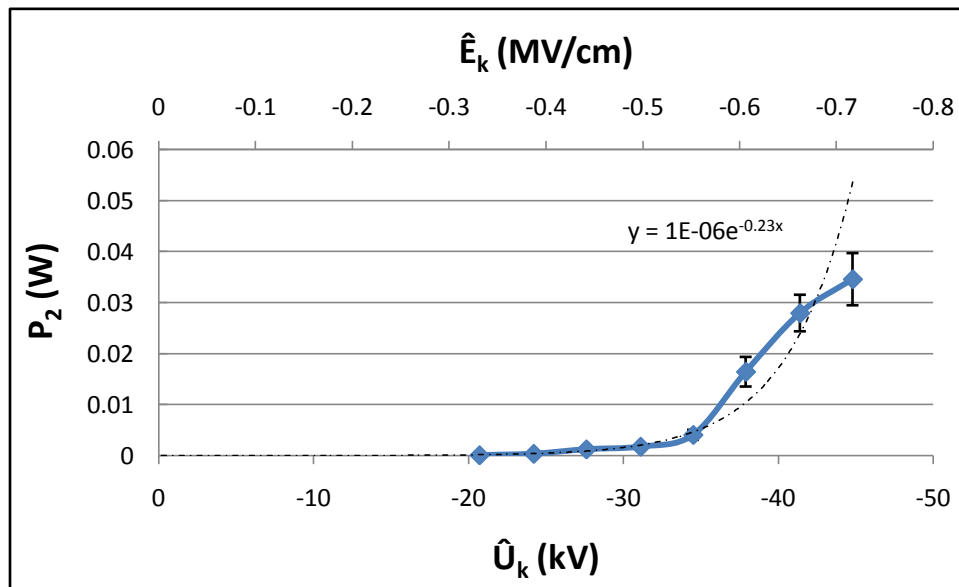


Σχήμα 4.2-7: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (ΔW) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

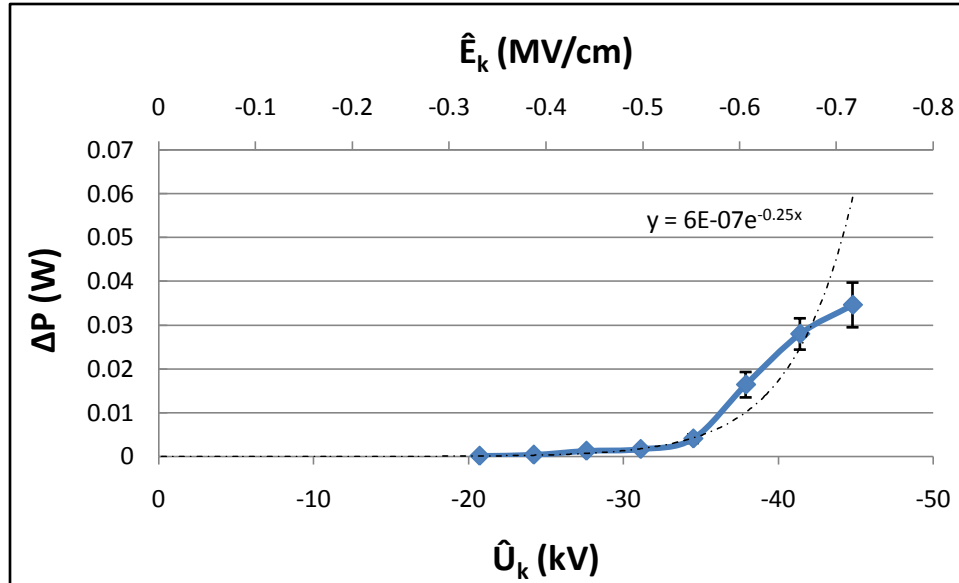
Στις παραπάνω δυο χαρακτηριστικές παρατηρείται ότι με την αύξηση της κρουστικής τάσης, παρουσιάζεται και αύξηση της W_2 και της ΔW , όπως αναμενόταν σύμφωνα και με τις σχέσεις (2-6) και (2-7).



Σχήμα 4.2-8: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

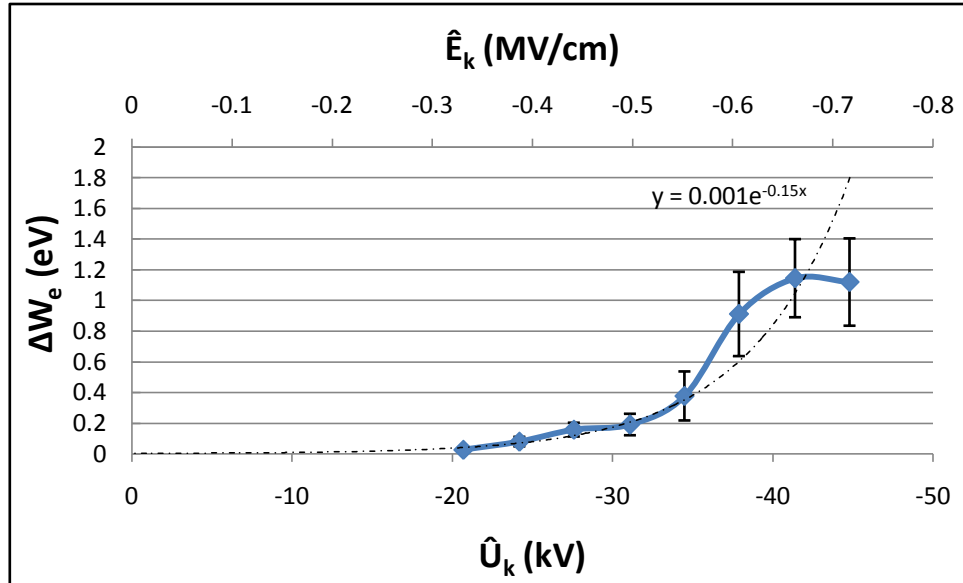


Σχήμα 4.2-9: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_2) στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



Σχήμα 4.2-10: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ισχύος (ΔP) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

Στις χαρακτηριστικές 4.2-8 έως και 4.2-10, παρατηρείται ότι η ισχύς ακολουθεί ακριβώς το ίδιο μοτίβο με την στιγμιαία ενέργεια κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων, καθώς πρόκειται για μεγέθη ανάλογα, όπως συμπεραίνεται και από τις σχέσεις (2-8), (2-9) και (2-10).



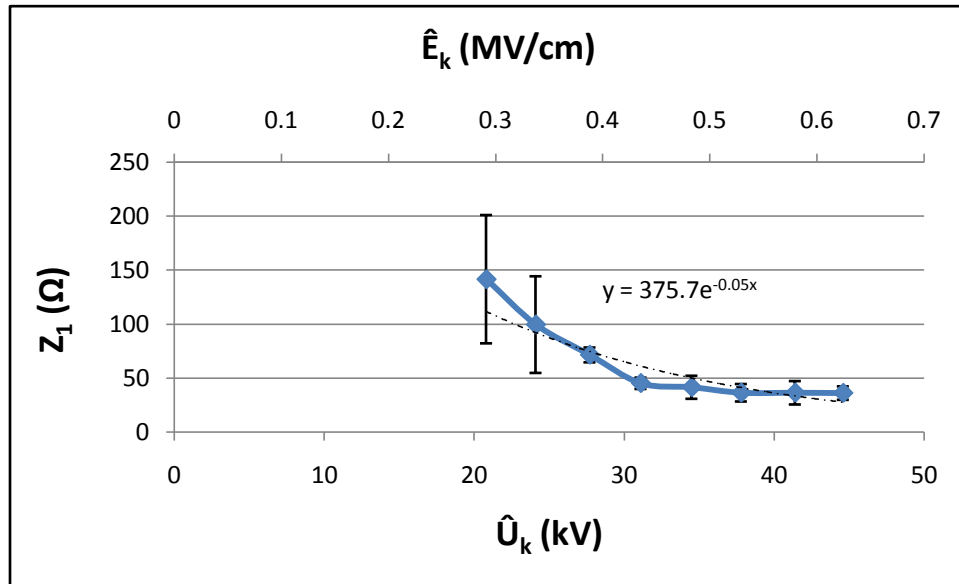
Σχήμα 4.2-11: Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (ΔW_e) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu s$.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης, αυξάνεται η τιμή της ενέργειας των ελευθέρων ηλεκτρονίων. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της κρουστικής τάσης, η οποία προκαλεί αύξηση του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων, οπότε αυξάνεται η ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων και συνεπώς αυξάνεται η αγωγιμότητα του υλικού.

Παρακάτω δίνεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των μαθηματικών προσεγγίσεων των παραπάνω χαρακτηριστικών για δοκίμιο τύπου Pertinax πάχους 1mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μs και σε θερμοκρασία $\theta=20^{\circ}\text{C}$.

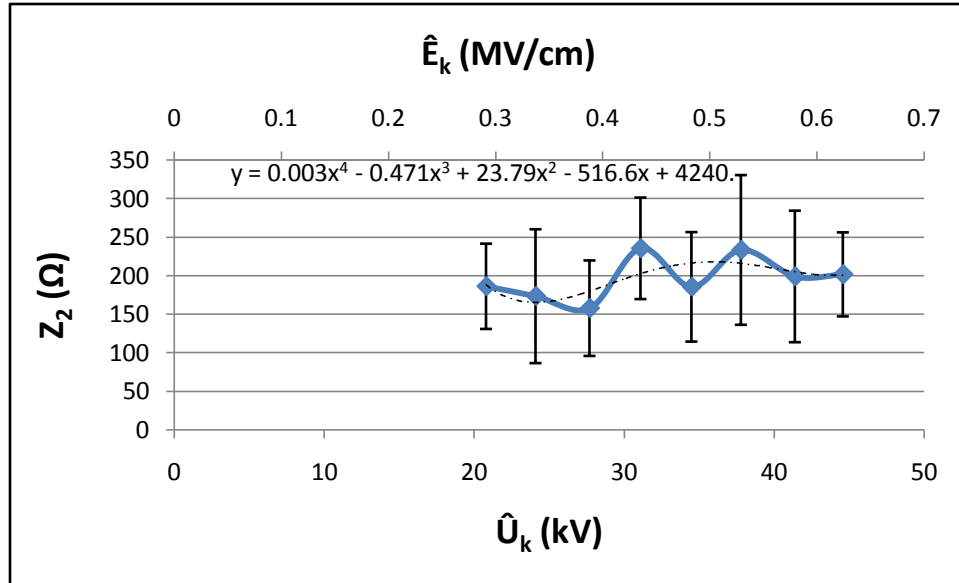
Χαρακτηριστική	Μαθηματική Προσέγγιση
$Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Z_1 = 257,59 \cdot e^{0,0451 \hat{U}_k}$
$Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Z_2 = -0,005 \hat{U}_k^4 - 0,5967 \hat{U}_k^3 - 25,76 \hat{U}_k^2 - 479,2 \hat{U}_k - 3122,1$
$\Delta Z = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta Z = -0,0046 \hat{U}_k^4 - 0,5511 \hat{U}_k^3 - 23,871 \hat{U}_k^2 - 452,5 \hat{U}_k - 3152,7$
$W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$W_1 = -4 \cdot 10^{-13} \hat{U}_k^3 - 7 \cdot 10^{-11} \hat{U}_k^2 - 3 \cdot 10^{-9} \hat{U}_k - 2 \cdot 10^{-8}$
$t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$t_1 = 257,59 \cdot e^{0,0451 \hat{U}_k}$
$W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$W_2 = 10^{-10} \cdot e^{-0,253 \hat{U}_k}$
$\Delta W = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta W = 7 \cdot 10^{-11} \cdot e^{-0,267 \hat{U}_k}$
$P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$P_1 = 2 \cdot 10^{-9} \hat{U}_k^3 - 5 \cdot 10^{-7} \hat{U}_k^2 - 4 \cdot 10^{-5} \hat{U}_k - 0,0005$
$P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$P_2 = 10^{-6} \cdot e^{-0,238 \hat{U}_k}$
$\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta P = 6 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-0,256 \hat{U}_k}$
$\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta W_e = 0,0015 \cdot e^{-0,159 \hat{U}_k}$

4.3 Pertinax, d=2mm υπό κρουστική τάση +250/2500 μ s και σε θερμοκρασία $\theta=20^\circ\text{C}$



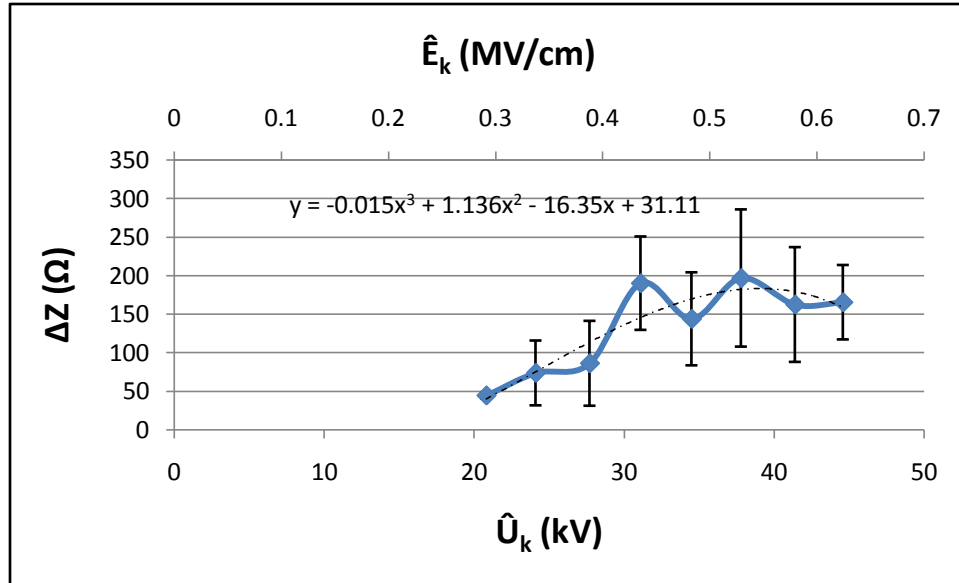
Σχήμα 4.3-1: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500 μ s.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης, μειώνεται η τιμή της αντίστασης. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της κρουστικής τάσης, η οποία προκαλεί αύξηση του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων, οπότε αυξάνεται η αγωγιμότητα του υλικού και συνεπώς μειώνεται η αντίστασή του.



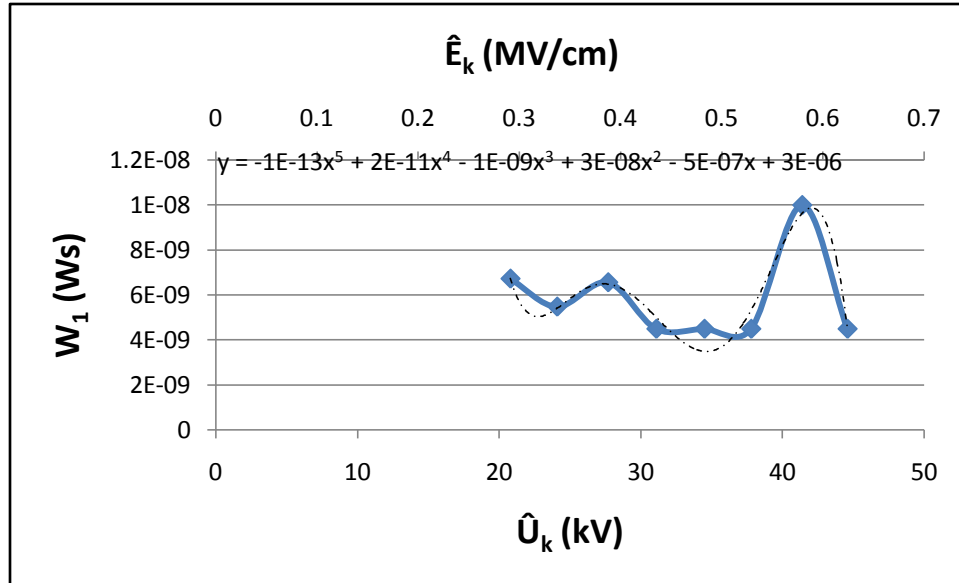
Σχήμα 4.3-2: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax* 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται μια σχετική διακύμανση, η οποία οφείλεται στους δυο παράγοντες γήρανσης. Συγκεκριμένα, όταν υπερτερούν οι μερικές εκκενώσεις προκαλείται αύξηση της αγωγιμότητας, ενώ όταν υπερτερούν οι δυνάμεις Coulomb, προκαλείται μείωση αγωγιμότητας γιατί η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται για την μηχανική καταπόνηση του δοκιμίου.

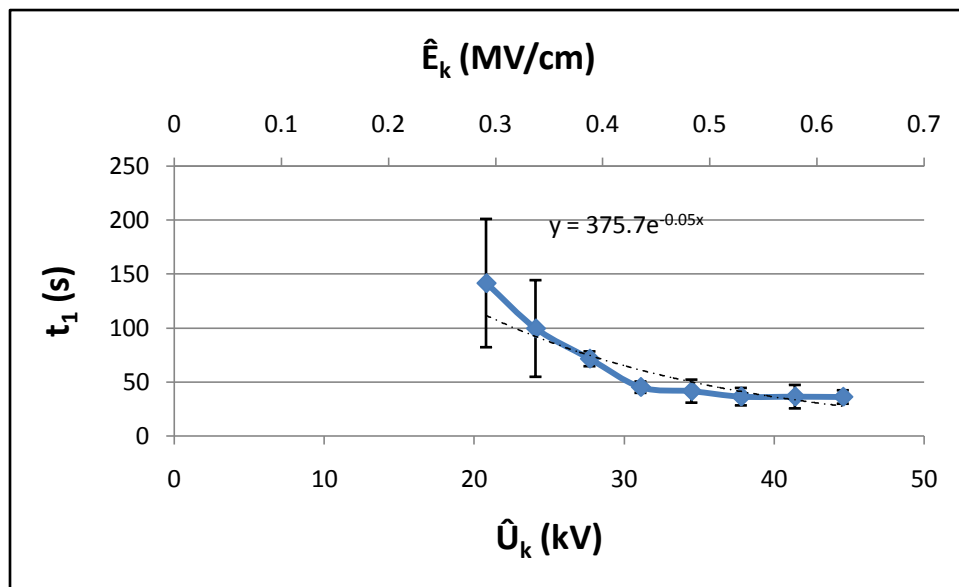


Σχήμα 4.3-3: Χαρακτηριστική της διαφοράς της σύνθετης αντίστασης (ΔZ) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση +250/2500 μ s.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται μια σχετική διακύμανση, η οποία οφείλεται στους δυο παράγοντες γήρανσης. Συγκεκριμένα, όταν υπερτερούν οι μερικές εκκενώσεις προκαλείται αύξηση της αγωγιμότητας, ενώ όταν υπερτερούν οι δυνάμεις Coulomb, προκαλείται μείωση αγωγιμότητας γιατί η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται για την μηχανική καταπόνηση του δοκιμίου.

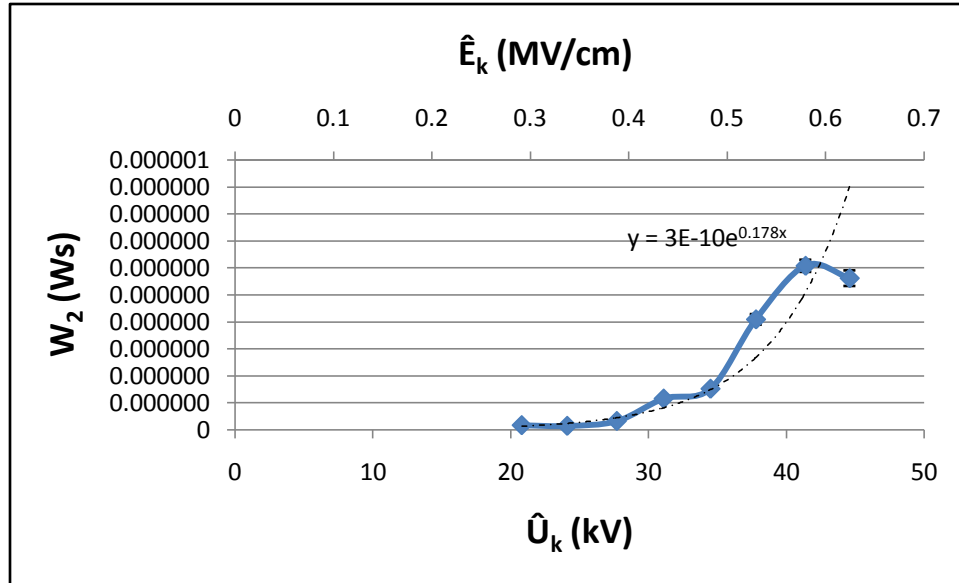


Σχήμα 4.3-4: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

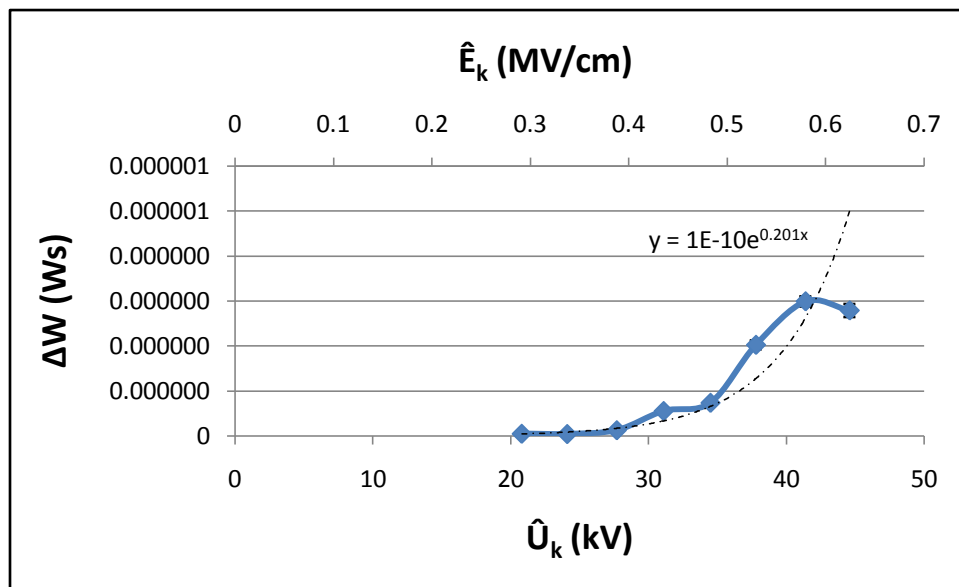


Σχήμα 4.3-5: Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης (t_1) των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

Στις παραπάνω δυο χαρακτηριστικές παρατηρείται ότι κατά την αύξηση της κλίσης της κρουστικής τάσης λόγω αύξησης της τιμής της, η απαιτούμενη ενέργεια για την έναρξη των μερικών εκκενώσεων γίνεται μεγαλύτερη γιατί μειώνεται ο διαθέσιμος χρόνος έναρξης τους.

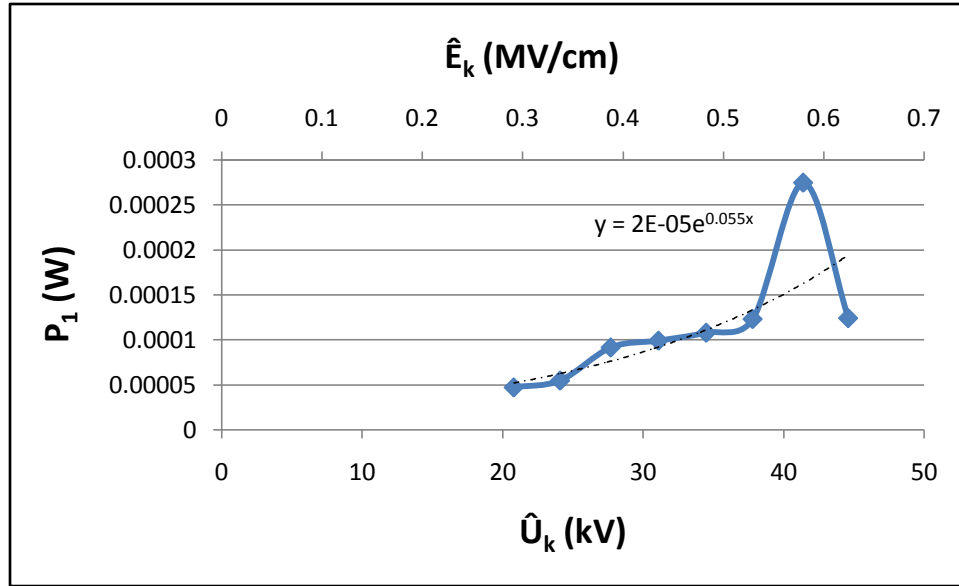


Σχήμα 4.3-6: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

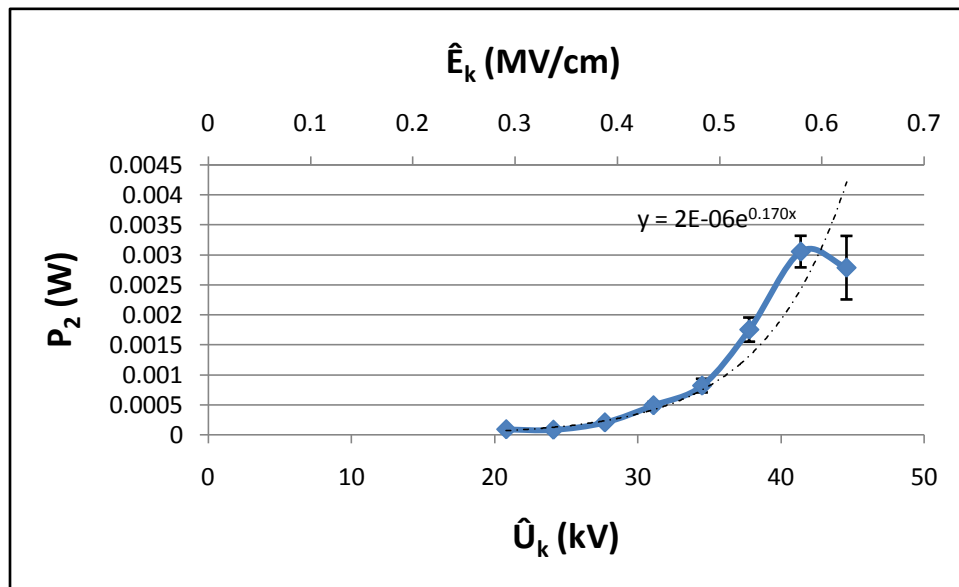


Σχήμα 4.3-7: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (ΔW) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

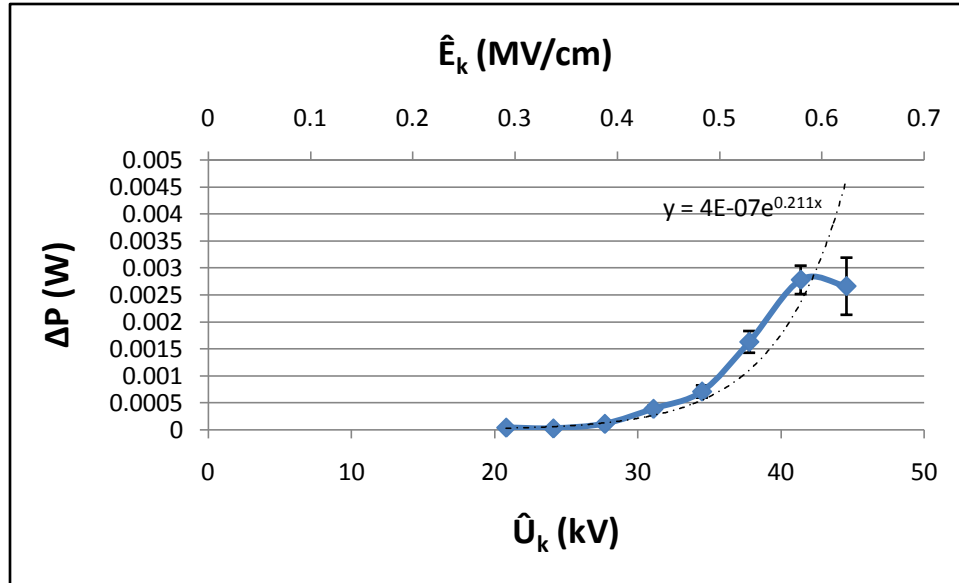
Στις παραπάνω δυο χαρακτηριστικές παρατηρείται ότι με την αύξηση της κρουστικής τάσης, παρουσιάζεται και αύξηση της W_2 και της ΔW , όπως αναμενόταν σύμφωνα και με τις σχέσεις (2-6) και (2-7).



Σχήμα 4.3-8: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

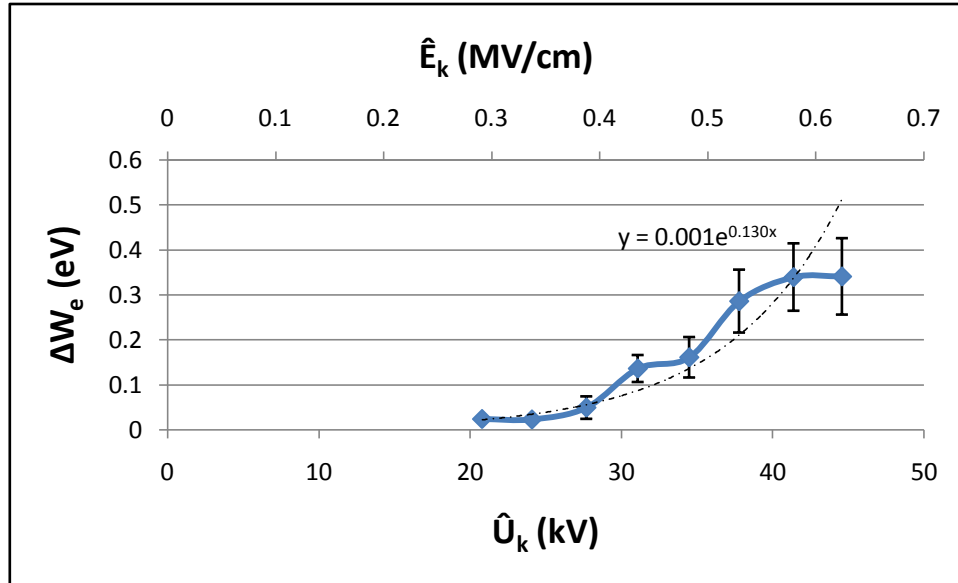


Σχήμα 4.3-9: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_2) στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.



Σχήμα 4.3-10: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ισχύος (ΔP) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax* 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

Στις χαρακτηριστικές 4.3-8 έως και 4.3-10, παρατηρείται ότι η ισχύς ακολουθεί ακριβώς το ίδιο μοτίβο με την στιγμιαία ενέργεια κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων, καθώς πρόκειται για μεγέθη ανάλογα, όπως συμπεραίνεται και από τις σχέσεις (2-8), (2-9) και (2-10).



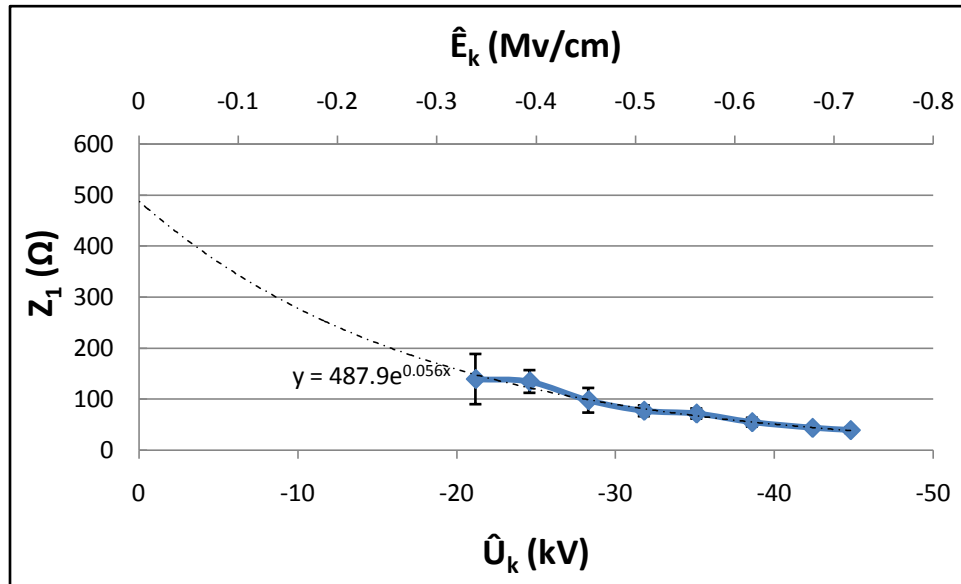
Σχήμα 4.3-11: Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (ΔW_e) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση +250/2500μs.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης, αυξάνεται η τιμή της ενέργειας των ελευθέρων ηλεκτρονίων. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της κρουστικής τάσης, η οποία προκαλεί αύξηση του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων, οπότε αυξάνεται η ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων και συνεπώς αυξάνεται η αγωγιμότητα του υλικού.

Παρακάτω δίνεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των μαθηματικών προσεγγίσεων των παραπάνω χαρακτηριστικών για δοκίμιο τύπου Pertinax πάχους 2mm υπό κρουστική τάση +250/2500 μs και σε θερμοκρασία $\theta=20^{\circ}\text{C}$.

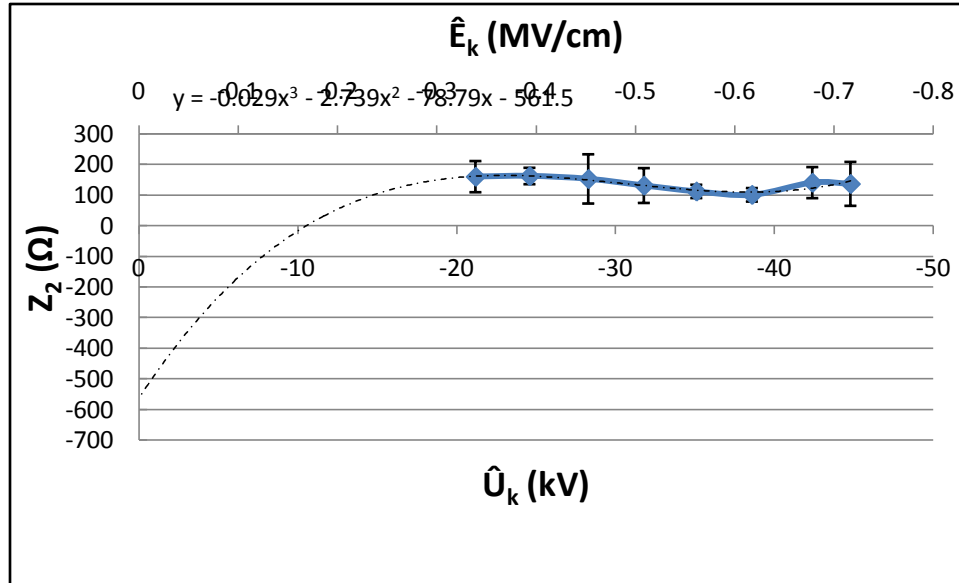
Χαρακτηριστική	Μαθηματική Προσέγγιση
$Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Z_1 = 375,74 \cdot e^{-0,058 \hat{U}_k}$
$Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Z_2 = 0,0034 \hat{U}_k^4 - 0,471 \hat{U}_k^3 + 23,797 \hat{U}_k^2 - 516,67 \hat{U}_k + 4240,8$
$\Delta Z = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta Z = -0,0158 \hat{U}_k^3 + 1,1362 \hat{U}_k^2 - 16,35 \hat{U}_k + 31,113$
$W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$W_1 = -10^{-13} \hat{U}_k^5 + 2 \cdot 10^{-11} \hat{U}_k^4 - 10^{-9} \hat{U}_k^3 + 3 \cdot 10^{-8} \hat{U}_k^2 - 5 \cdot 10^{-7} \hat{U}_k + 3 \cdot 10^{-6}$
$t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$t_1 = 375,74 \cdot e^{-0,058 \hat{U}_k}$
$W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$W_2 = 3 \cdot 10^{-10} \cdot e^{0,1785 \hat{U}_k}$
$\Delta W = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta W = 10^{-10} \cdot e^{0,2011 \hat{U}_k}$
$P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$P_1 = 2 \cdot 10^{-5} \cdot e^{0,0552 \hat{U}_k}$
$P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$P_2 = 2 \cdot 10^{-6} \cdot e^{0,1709 \hat{U}_k}$
$\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta P = 4 \cdot 10^{-7} \cdot e^{0,211 \hat{U}_k}$
$\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta W_e = 0,0015 \cdot e^{0,1309 \hat{U}_k}$

4.4 Pertinax, d=2mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μ s και σε θερμοκρασία $\theta=20^\circ\text{C}$



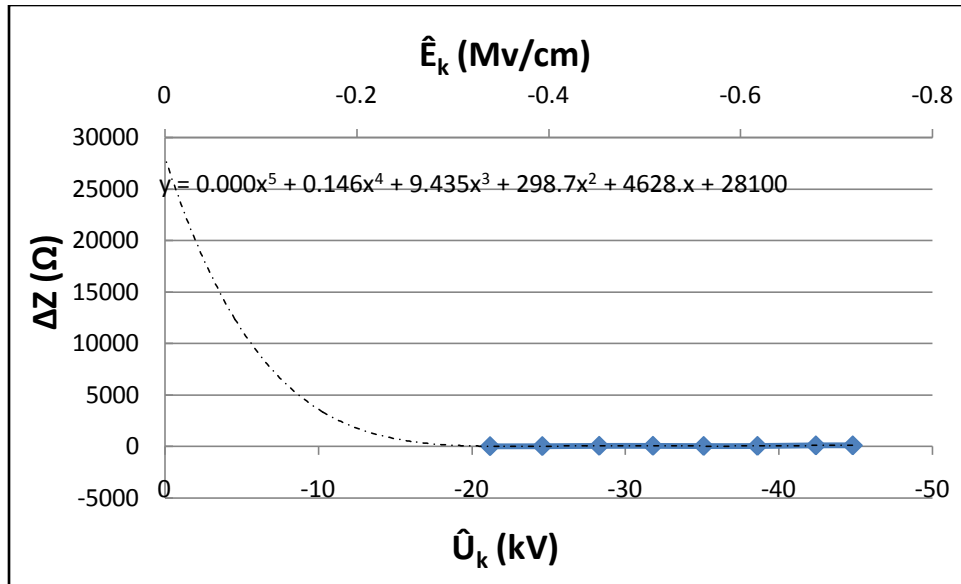
Σχήμα 4.4-1: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μ s.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης, μειώνεται η τιμή της αντίστασης. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της κρουστικής τάσης, η οποία προκαλεί αύξηση του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων, οπότε αυξάνεται η αγωγιμότητα του υλικού και συνεπώς μειώνεται η αντίστασή του.



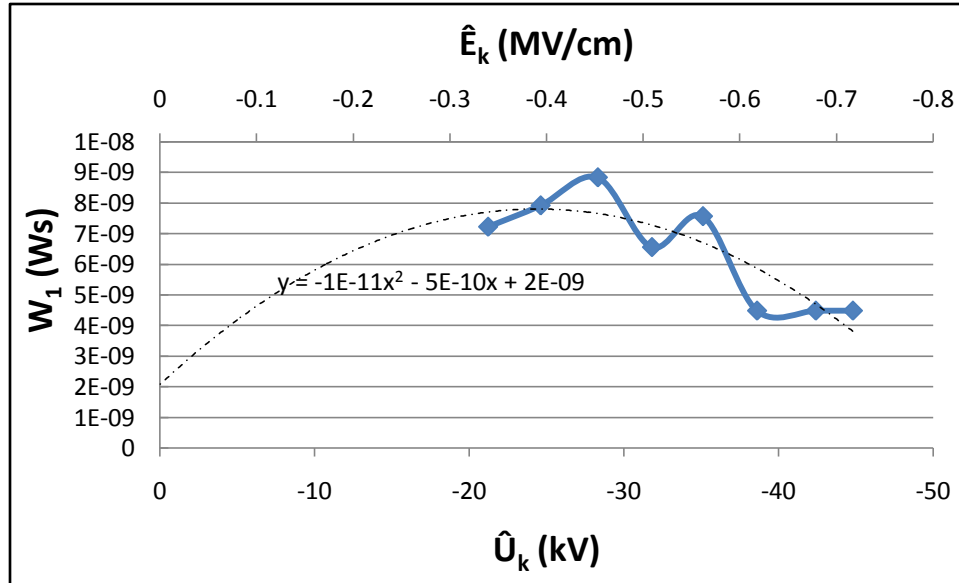
Σχήμα 4.4-2: Χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης (Z_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax* 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται μια σχετική διακύμανση, η οποία οφείλεται στους δυο παράγοντες γήρανσης. Συγκεκριμένα, όταν υπερτερούν οι μερικές εκκενώσεις προκαλείται αύξηση της αγωγιμότητας, ενώ όταν υπερτερούν οι δυνάμεις Coulomb, προκαλείται μείωση αγωγιμότητας γιατί η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται για την μηχανική καταπόνηση του δοκιμίου.

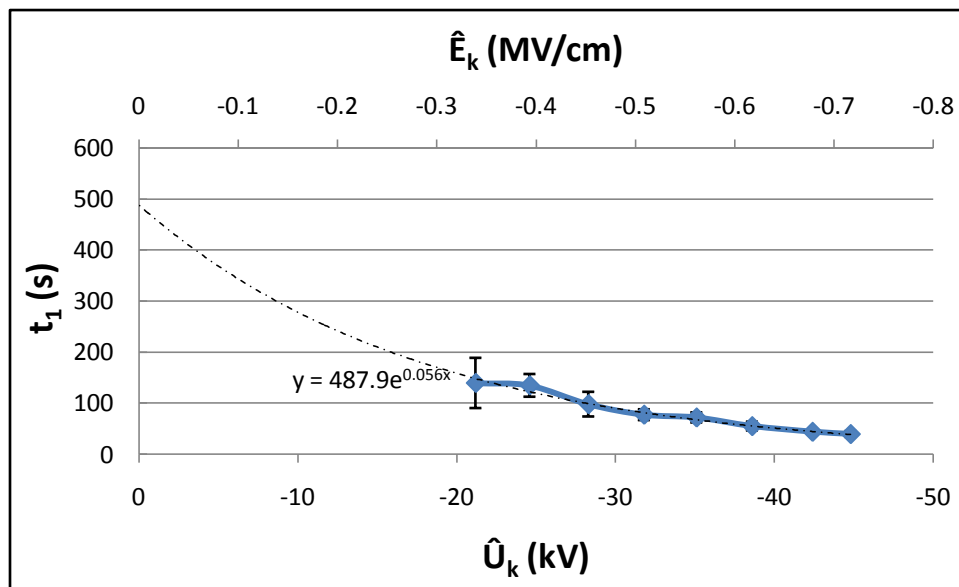


Σχήμα 4.4-3: Χαρακτηριστική της διαφοράς της σύνθετης αντίστασης (ΔZ) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax* 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται μια σχετική διακύμανση, η οποία οφείλεται στους δυο παράγοντες γήρανσης. Συγκεκριμένα, όταν υπερτερούν οι μερικές εκκενώσεις προκαλείται αύξηση της αγωγιμότητας, ενώ όταν υπερτερούν οι δυνάμεις Coulomb, προκαλείται μείωση αγωγιμότητας γιατί η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται για την μηχανική καταπόνηση του δοκιμίου.

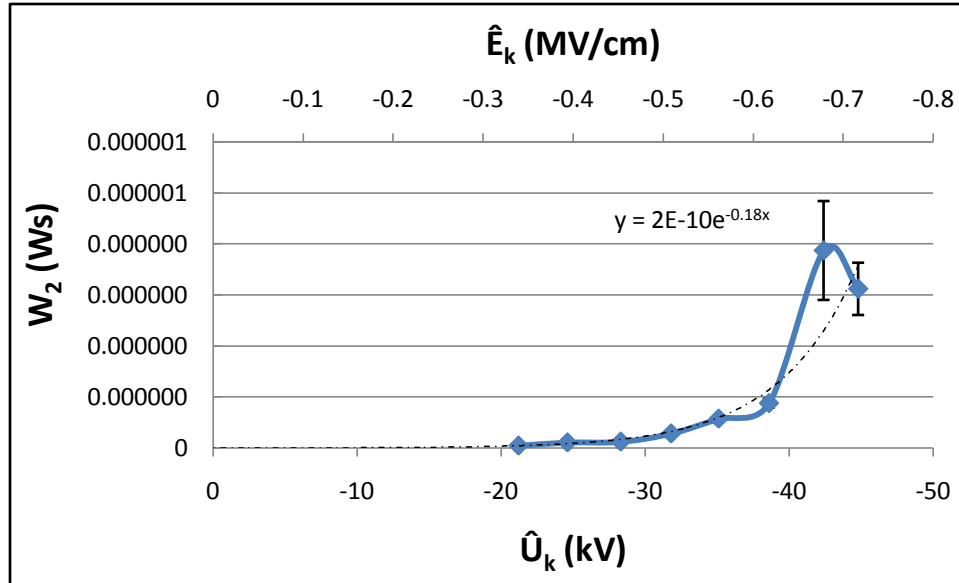


Σχήμα 4.4-4: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

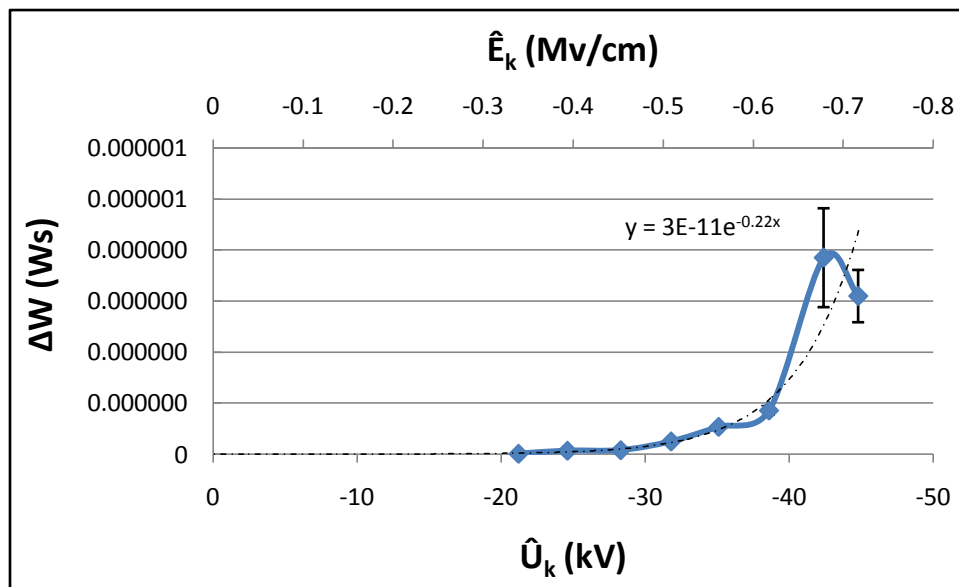


Σχήμα 4.4-5: Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων (t_1) συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

Στις παραπάνω δυο χαρακτηριστικές παρατηρείται ότι κατά την αύξηση της κλίσης της κρουστικής τάσης λόγω αύξησης της τιμής της, η απαιτούμενη ενέργεια για την έναρξη των μερικών εκκενώσεων γίνεται μεγαλύτερη γιατί μειώνεται ο διαθέσιμος χρόνος έναρξης τους.

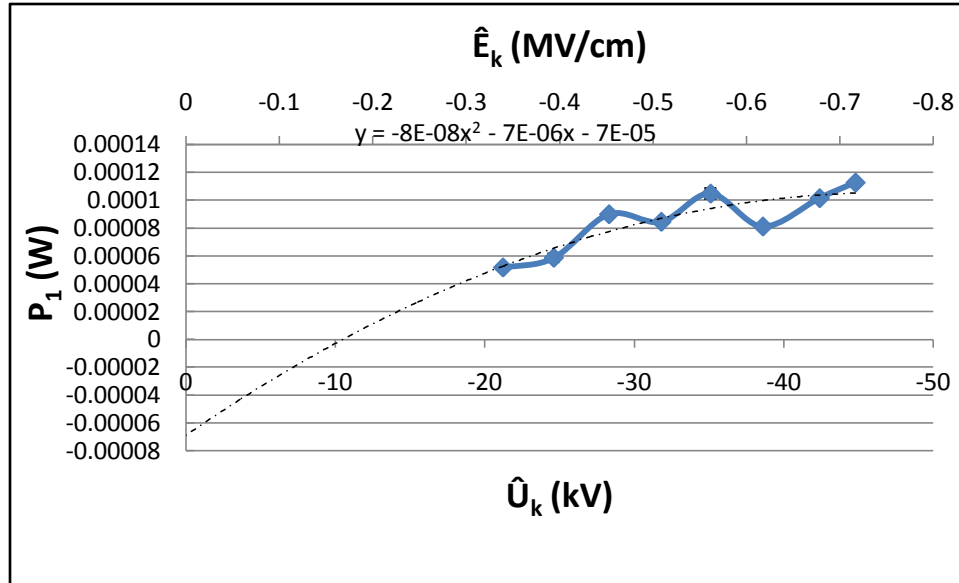


Σχήμα 4.4-6: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (W_2) στον C_m κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

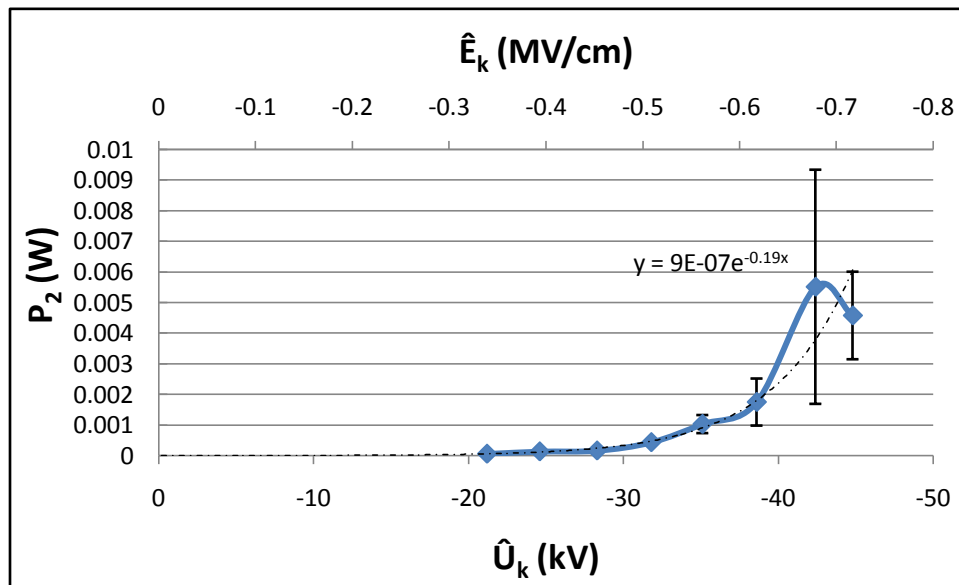


Σχήμα 4.4-7: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ενέργειας (ΔW) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

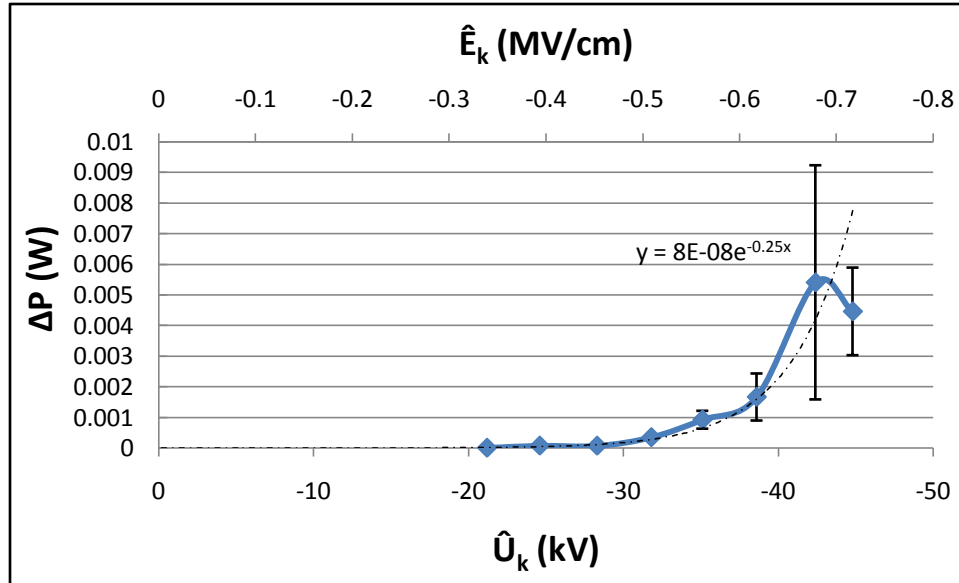
Στις παραπάνω δυο χαρακτηριστικές παρατηρείται ότι με την αύξηση της κρουστικής τάσης, παρουσιάζεται και αύξηση της W_2 και της ΔW , όπως αναμενόταν σύμφωνα και με τις σχέσεις (2-6) και (2-7).



Σχήμα 4.4-8: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_1) στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

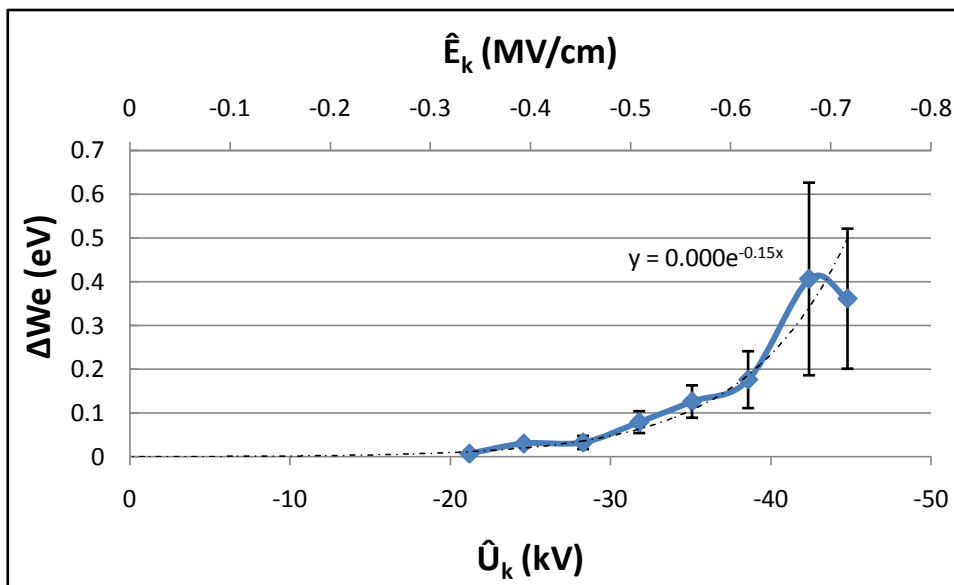


Σχήμα 4.4-9: Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ισχύος (P_2) στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.



Σχήμα 4.4-10: Χαρακτηριστική της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής ισχύος (ΔP) στον C_m κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax* 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500μs.

Στις χαρακτηριστικές 4.4-8 έως και 4.4-10, παρατηρείται ότι η ισχύς ακολουθεί ακριβώς το ίδιο μοτίβο με την στιγμιαία ενέργεια κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων, καθώς πρόκειται για μεγέθη ανάλογα, όπως συμπεραίνεται και από τις σχέσεις (2-8), (2-9) και (2-10).



Σχήμα 4.4-11: Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (ΔW_e) κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (\hat{U}_k) και της αντίστοιχης πεδιακής έντασης (\hat{E}_k), με πάχος δοκιμίου τύπου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu s$.

Στην παραπάνω χαρακτηριστική παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης, αυξάνεται η τιμή της ενέργειας των ελευθέρων ηλεκτρονίων. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της κρουστικής τάσης, η οποία προκαλεί αύξηση του αριθμού των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων, οπότε αυξάνεται η ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων και συνεπώς αυξάνεται η αγωγιμότητα του υλικού.

Παρακάτω δίνεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των μαθηματικών προσεγγίσεων των παραπάνω χαρακτηριστικών για δοκίμιο τύπου Pertinax πάχους 2mm υπό κρουστική τάση -250/2500 μs και σε θερμοκρασία $\theta=20^\circ\text{C}$.

Χαρακτηριστική	Μαθηματική Προσέγγιση
$Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Z_1 = 487,95 \cdot e^{0,0561 \hat{U}_k}$
$Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$Z_2 = -0,0298 \hat{U}_k^3 - 2,7395 \hat{U}_k^2 - 78,79 \hat{U}_k - 561,58$
$\Delta Z = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta Z = 0,0009 \hat{U}_k^5 + 0,1461 \hat{U}_k^4 + 9,4359 \hat{U}_k^3 + 298,71 \hat{U}_k^2 + 4628,8 \hat{U}_k + 28100$
$W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$W_1 = -10^{-11} \hat{U}_k^2 - 5 \cdot 10^{-10} \hat{U}_k + 2 \cdot 10^{-9}$
$t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$t_1 = 487,95 \cdot e^{0,0561 \hat{U}_k}$
$W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$W_2 = 2 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-0,185 \hat{U}_k}$
$\Delta W = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta W = 3 \cdot 10^{-11} \cdot e^{-0,228 \hat{U}_k}$
$P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$P_1 = -8 \cdot 10^{-8} \hat{U}_k^2 - 7 \cdot 10^{-6} \hat{U}_k - 7 \cdot 10^{-5}$
$P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$P_2 = 9 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-0,196 \hat{U}_k}$
$\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta P = 8 \cdot 10^{-8} \cdot e^{-0,255 \hat{U}_k}$
$\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$\Delta W_e = 0,0004 \cdot e^{-0,159 \hat{U}_k}$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- I. Π. Δ. Μπούρκας - Κ. Γ. Καραγιάννοπουλος :
«Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά» Αθήνα 2003
- II. Π. Δ Μπούρκας
«Εφαρμογές κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων» Αθήνα 1998
- III. Ι. Αθ. Σταθόπουλος :
«Υψηλές Τάσεις Ι»