



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

Στατιστική Ανάλυση της
Μεταβολής της Σύνθετης Αντίστασης και της Ενέργειας λόγω
Μερικών Εκκενώσεων στο συνδυασμό «Βακελίτης-Λάδι
Μετασχηματιστών» υπό Κρουστικές Τάσεις
 $\pm 1,2/50\mu\text{s}$ εντός Ανομοιογενούς Ηλεκτρικού Πεδίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΚΑΡΑΧΑΛΙΑ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΥ

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

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2010



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

**Στατιστική Ανάλυση της
Μεταβολής της Σύνθετης Αντίστασης και της Ενέργειας λόγω
Μερικών Εκκενώσεων στο συνδυασμό «Βακελίτης-Λάδι
Μετασχηματιστών» υπό Κρουστικές Τάσεις
 $\pm 1,2/50\mu\text{s}$ εντός Ανομοιογενούς Ηλεκτρικού Πεδίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΚΑΡΑΧΑΛΙΑ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΥ

**Επιβλέπων : Καραγιαννόπουλος Κωσταντίνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30/6/2010.

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

.....
Ν. Ι. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μ.Π. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2010

.....

Ελευθέριος Δ. Καραχάλιας

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

Copyright © Ελευθέριος Δ. Καραχάλιας, 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.

**ΣΤΟΝ ΑΔΕΡΦΟ ΜΟΥ
ΚΑΡΑΧΑΛΙΑ ΓΕΩΡΓΙΟ**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ερευνητικών δραστηριοτήτων, στην περιοχή των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης των ηλεκτρομονωτικών υλικών, που γίνονται στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Π.Δ. Μπούρκα.

Από τη θέση αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Κ.Γ. Καραγιαννόπουλο για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερα, ωστόσο, θα πρέπει να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Π.Δ. Μπούρκα για την πολύτιμη βοήθειά του και την άριστη συνεργασία μας, καθ' όλη τη διάρκεια της διεξαγωγής της εργασίας αυτής.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	8
Abstract.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	10
1.1 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών υλικών	10
1.1.1 Η θερμική διάτρηση.....	11
1.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση.....	12
1.1.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης)	14
1.1.4 Η θερμοχημική διάτρηση.....	16
1.1.5 Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης...17	
1.1.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων.....	18
1.1.7 Το φαινόμενο της πολικότητας σε πολυμερή στερεά μονωτικά κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.....	19
1.2 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών.....	19
1.3 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	25
2.1 Διάταξη	25
2.2 Περιγραφή διεξαγωγής των μετρήσεων.....	26
2.3 Απαραίτητες σχέσεις για την επεξεργασία των μετρήσεων.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ.....	29
3.1 Κρουστική τάση θετικής πολικότητας +1,2/50μs σε πάχος δοκιμίου d=1mm.....	30
3.2 Κρουστική τάση αρνητικής πολικότητας -1,2/50μs σε πάχος δοκιμίου d=1mm.....	36
3.3 Κρουστική τάση θετικής πολικότητας +1,2/50μs σε πάχος δοκιμίου d=2mm.....	42
3.4 Κρουστική τάση αρνητικής πολικότητας -1,2/50μs σε πάχος δοκιμίου d=2mm.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ.....	54
4.1 Σύνθετη αντίσταση Z.....	56
4.1.1 Σύνθετη αντίσταση Z_1 κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.....	56
4.1.2 Σύνθετη αντίσταση Z_2 κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων.....	61
4.1.3 Μεταβολή της σύνθετης αντίστασης ΔZ κατά το φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων.....	64
4.2 Ενέργεια W.....	65
4.2.1 Η ενέργεια W_1 στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.....	65

4.2.2	Χρόνος έναρξης μερικών εκκενώσεων t_1	70
4.2.3	Η ενέργεια W_2 στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων.....	75
4.2.4	Η συνολική μεταβολή της ενέργειας ΔW στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων.....	77
4.3	Ισχύς P	78
4.3.1	Η ισχύς P_1 στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.....	78
4.3.2	Η ισχύς P_2 στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων.....	81
4.3.3	Η συνολική μεταβολή της ισχύος ΔP στον πυκνωτή μέτρησης κατά το φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων.....	84
4.4	Ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων.....	86
4.4.1	Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.....	86
4.4.2	Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με τη μεταβολή της ενέργειας του πεδίου.....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....94

5.1	Διαπιστώσεις και προτάσεις στον τομέα της έρευνας.....	94
5.2	Διαπιστώσεις και προτάσεις στον τομέα των πρακτικών εφαρμογών: Κριτήρια ποιότητας μονωτικής συμπεριφοράς.....	95
5.2.1	Η σύνθετη αντίσταση Z_1 κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.....	95
5.2.2	Χρόνος έναρξης μερικών εκκενώσεων t_1	96
5.2.3	Η ενέργεια W_1 στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.....	97
5.2.4	Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.....	98

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....99

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της στατιστικής έρευνας των μερικών εκκενώσεων στο βακελίτη, υπό κρουστικές τάσεις και σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου.

Αρχικά γίνεται μία περιγραφή των κυριότερων χαρακτηριστικών των στερεών μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές εφαρμογές, καθώς και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάσπαση αυτών υπό υψηλή τάση. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι εργαστηριακές διατάξεις και ο τρόπος που γίνονται οι μετρήσεις των διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών, προκειμένου να διερευνηθεί ο μηχανισμός γήρανσης – καταστροφής των μονωτικών υλικών. Έπειτα, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις όλων των μετρούμενων μεγεθών συναρτήσει της ηλεκτρικής έντασης.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε, ότι τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης οφείλονται στην εκδήλωση δύο βασικών παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, οι οποίοι είναι οι μερικές εκκενώσεις και οι δυνάμεις Coulomb.

Στη συνέχεια, μετά τη θεωρητική προσέγγιση των ανωτέρω χαρακτηριστικών από καμπύλες εκθετικής και λογαριθμικής μορφής, έγινε προσπάθεια εκτίμησης της διηλεκτρικής συμπεριφοράς του βακελίτη με τη βοήθεια των συντελεστών αυτών των προσεγγιστικών συναρτήσεων.

Συμπερασματικά, η απαραίτητη αλλαγή του πυκνωτή μέτρησης για λόγους που αφορούν στις μετρήσεις επηρεάζει τους υπολογισμούς και καθιστά δύσκολη την εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων σε κάποιες περιοχές της έντασης του πεδίου. Για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία προτείνεται η χρήση ενός συντελεστή σε κάθε περίπτωση. Επίσης, συνίσταται η καθιέρωση τυποποιημένων δοκιμών που θα βασίζονται στη σύγκριση των καμπυλών και των συντελεστών των προσεγγιστικών συναρτήσεων των μεγεθών της σύνθετης αντίστασης, του χρόνου και της ενέργειας κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για την αξιολόγηση κάθε ηλεκτρομονωτικού υλικού και γενικότερα για κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή.

ABSTRACT

This thesis is based on the study and the statistical analysis of the electrical phenomena that accompany the partial discharges just before the break-down of an industrial material called bakelite in an environment of oil insulator, under impulse voltage.

First of all, the principal characteristics of solid insulating materials which are used today in a variety of applications, as well as the effects that take place at the split of these, under impulse voltage, are described. After the presentation of the laboratory apparatus, the way that the measurements of various electrical quantities are taken is described, in order to investigate the mechanism of ageing and destruction of insulating materials. Then, the graphic representations of all quantities that were measured as functions of the electric field are presented.

The results have shown that the phenomena of the ageing and the breakdown are caused by the onset of two basic factors, which reduce the dielectric strength, the partial discharges and the Coulomb forces.

Furthermore, the curves of the measured quantities are approximated by exponential or logarithmic functions and there has been a try to evaluate the insulating performance of the bakelite through the parameters of these approximation functions.

In conclusion, the necessary change of the capacitor, for reasons concerning the measurements, affects the calculations in a way that makes the derivation of qualitative results, in some areas of the intensity of the electric field, difficult. In order to overcome this difficulty, the use of a coefficient is suggested in each case. Additionally, the use of standard tests which will be based on the comparison between the curves as well as between the parameters of the approximation functions of the impedance, time and energy at the beginning of the partial discharges is proposed for the evaluation of every insulating material, and generally for every electrotechnical construction.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

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.

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

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

Σύμφωνα με τη “ μακροσκοπική θεωρία ”, τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση 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 μια συσχέτιση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση, με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται.

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

Οι βασικοί παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων των ηλεκτρομονωτικών υλικών είναι οι εξής:

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

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

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

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

1.1.1 Η θερμική διάτρηση

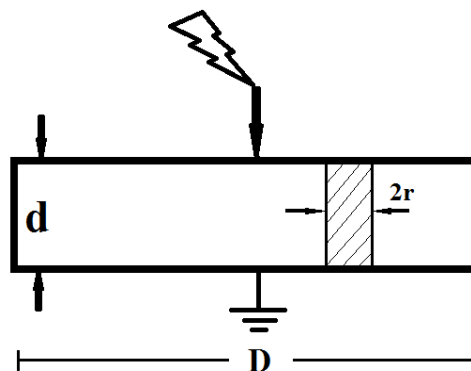
Η μορφή της διάτρησης αυτής συναντάται κυρίως σε χαμηλές τάσεις, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule (π.χ. κακή απαγωγή θερμότητας από τη μόνωση ενός καλωδίου λόγω σκόνης και ύγρανσης). Η εικόνα που παρουσιάζει το θερμικά καταπονούμενο υλικό είναι συνήθως η απανθράκωση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

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

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.1.1-1)$$

όπου σ_0 : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

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



Σχήμα 1.1.1-1 : Απλοποιημένη παράσταση του οχετού διάτρησης λόγω των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού.

D : διάμετρος δοκιμίου

d : πάχος του μονωτικού

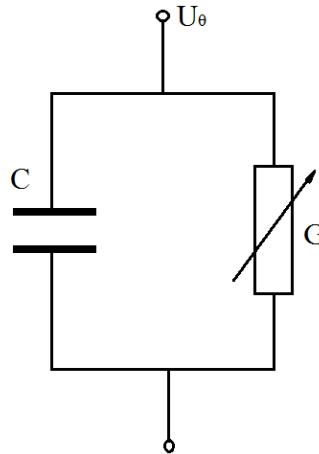
$2r$: διάμετρος του οχετού διάτρησης

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_{θ} ,

$$U_{\theta} = d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.1.1-2)$$

όπου κ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα (1.1.1-2), όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μια 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 : σχέση 1.1.1-1) μια οριστική τιμή G_{\max} .



Σχήμα 1.1.1-2 : 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

1.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

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

- α) αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις, ή
- β) μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή
- γ) συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

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

Η **δενδροειδής διάτρηση** είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, γιατί, λόγω της μεγαλύτερης τιμής της τάσης και επομένως της πεδιακής έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά τη διάτρηση σχετίζεται με θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μια διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγωγή σύνδεση των ηλεκτροδίων.

Η **διάτρηση υπό μορφή οχετού (ή ηλεκτρομηχανική διάτρηση)** οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από ότι κατά την δενδροειδή διάτρηση. Στα πολυμερή υλικά, τα μόρια διαχωρίζονται 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 το αποτέλεσμα μιας ακαριαίας εξάσκησης δυνάμεων, στην περιοχή όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα μεγάλη (μηχανική τάση, 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_{kmin} , που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, συμβαίνει η διάτρηση με μία κρούση υπό μορφή οχετού, αν και η τιμή της πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης. Η μορφή της διάτρησης αυτής χαρακτηρίζεται επίσης ως ηλεκτρομηχανική. Το φαινόμενο έχει αποδοθεί στην απότομη μεταβολή της πεδιακής έντασης, λόγω της οποίας δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα την ηλεκτρομηχανική διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ του αρνητικού ηλεκτροδίου και των θετικών ηλεκτρικών φορέων, που συγκρατούνται στο πλέγμα των μορίων.

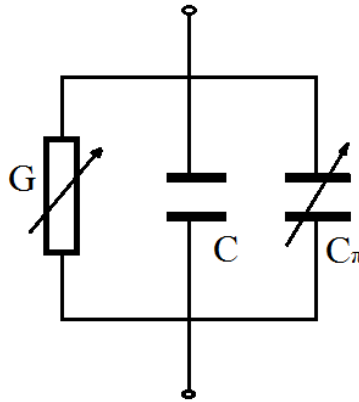
Για τη διάτρηση στη μέγιστη τιμή \hat{U}_{kn} μιας κρουστικής τάσης ισχύει αντίστοιχα:

$$\hat{U}_{kn} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_s}} \quad (1.1.2-1)$$

όπου σ_2 : η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια ανομοιογένεια (λόγω της οποίας η πεδιακή ένταση έγινε ιδιαίτερα μεγάλη στην περιοχή εκείνη του υλικού)
 T_s : η διάρκεια του μετώπου της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Η παραπάνω σχέση δίνει μια ικανοποιητική ερμηνεία σε πειράματα που έχουν γίνει. Πράγματι, όσο αυξάνει ο χρόνος T_s μιας κρουστικής τάσης, τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή. Κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση ισχύει περίπου η αναλογία $U_n = f(1/\sqrt{T_s})$.

Μια ερμηνεία της ηλεκτρικής διάτρησης, μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος, μπορεί να δοθεί στο σχήμα 1.1.2-1. Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μια κρίσιμη για το υλικό τιμή σ_2 , η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί στο παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα, ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_π (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C .



Σχήμα 1.1.2-1 : Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα

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

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

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

Σε μια δεδομένη διάταξη δύο ηλεκτροδίων τα χωρικά φορτία συγκεντρώνονται προ του ηλεκτροδίου με την αντίθετη προς αυτά πολικότητα και σχηματίζουν έτσι ένα νέφος χωρικών φορτίων. Το πεδίο είναι ηλεκτροστατικό όταν τα χωρικά φορτία του νέφους είναι αμετακίνητα. Υποθέτουμε ότι μέχρι μια τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (ή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης) συμβαίνει μια κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των εξασκούμενων δυνάμεων Coulomb, ώστε το πεδίο να εξακολουθεί να είναι χωρικό. Όταν μετά την παραπάνω τιμή του πεδίου καταστρέφεται η κατάσταση ισορροπίας (χωρίς να συμβαίνει η διάσπαση) τότε εκδηλώνονται περιορισμένης έκτασης εκκενώσεις, που ονομάζονται μερικές εκκενώσεις. Οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού χαρακτηρίζονται ως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις και εκείνες στην επιφάνεια του ως εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

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). 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).

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 αγώγιμες. Πρόκειται για ένα **ηλεκτροχημικό φαινόμενο**, που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού. Στην περιοχή, δηλαδή, όπου συμβαίνουν οι μερικές εκκενώσεις, το υλικό αλλάζει, λόγω των χημικών διεργασιών, τις φυσικές του ιδιότητες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής του, ώστε τελικά να πρόκειται για ένα “άλλο” μονωτικό.

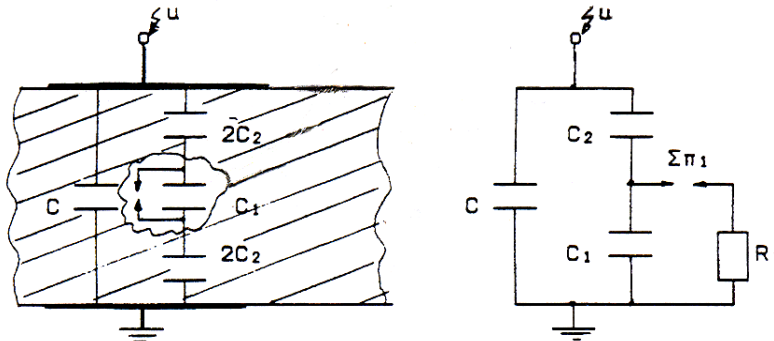
Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί **βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής**, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη. Γι’ αυτό ονομάζεται και **γήρανση** του μονωτικού υλικού. Από πειράματα, που έχουν γίνει με κρουστικές τάσεις της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$ και $10/200\mu\text{s}$, σε τιμές \hat{U}_k πλησίον της περιοχής διάτρησης, έχει διαπιστωθεί ότι εκτός από τη θερμική καταπόνηση, δημιουργούνται μικρά θραύσματα στη θέση προσεχούς διάσπασης.

2) Η τεχνητή γήρανση

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

Η γήρανση του μονωτικού υλικού στο εργαστήριο με τιμές της τάσης μεγαλύτερες από την τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων χαρακτηρίζεται **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 δε μπορεί να είναι διαφορετικοί από τους πραγματικούς.

3) Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 1.1.3-1 : 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

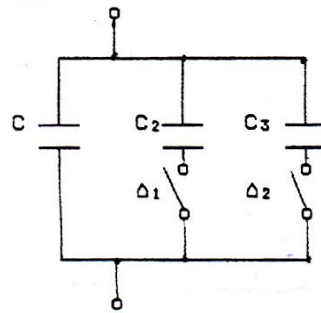
R_1 : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_1$

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 σχήματος 1.1.3-1, γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου.

Η ύπαρξη των εσωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C_1). Με τον

τρόπο αυτό, δηλαδή, γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου “υγιούς τμήματος” του μονωτικού (C_2) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Ο σπινθηριστής Σ_1 στο ισοδύναμο κύκλωμα διασπάται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R_1) γίνεται η εκφόρτιση του πυκνωτή διαταραχής (C_1).

Η εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα 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 1.1.3-2 (όπου έχουν ληφθεί υπόψη και οι επιφανειακές μερικές εκκενώσεις).



Σχήμα 1.1.3-2 : Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδυναμού κυκλώματος 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 τη διάσπαση αντίστοιχα των εσωτερικών και των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων.

1.1.4 Η θερμοχημική διάτρηση

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη. Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως η ενέργεια εξόδου των ελευθέρων 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 μια τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με αύξηση του πάχους της μόνωσης. Η τάση αυτή ονομάζεται *θερμική τάση ανατροπής* και ισούται με:

$$U_a = \sqrt{a \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma_0}}$$

(1.1.4-1)

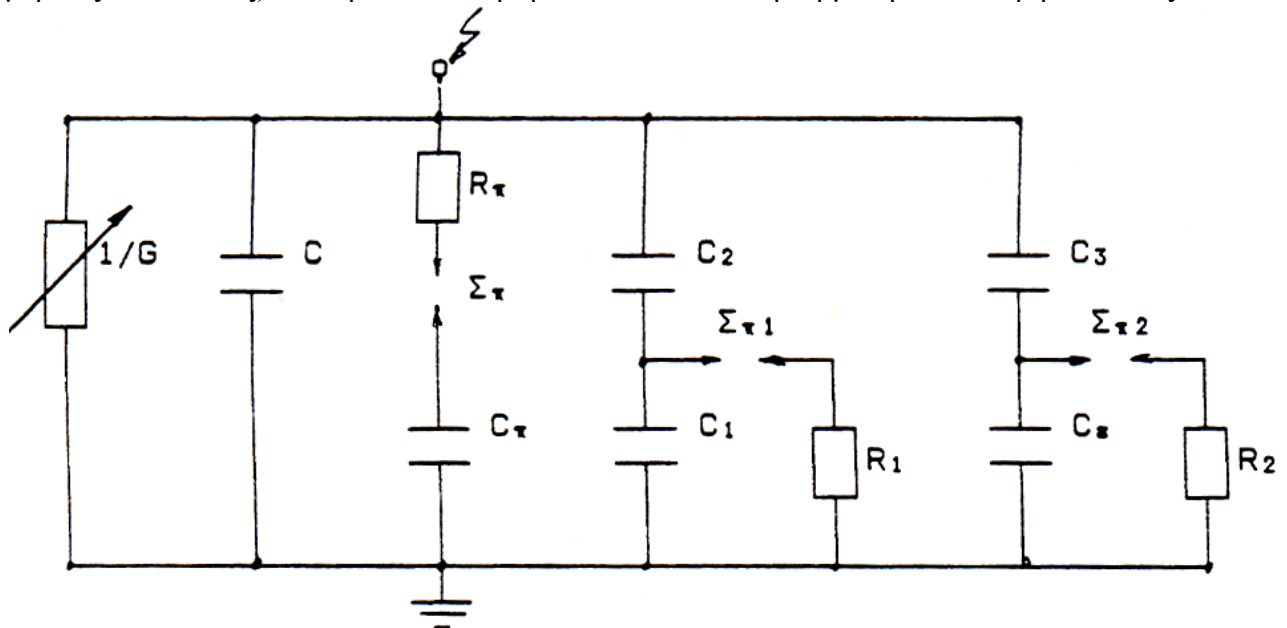
όπου a σταθερά του υλικού που εξαρτάται από τη μορφή της τάσης. Η σταθερά a έχει την τιμή 2,83 για καταπόνηση με συνεχή τάση, ενώ για εναλλασσόμενη τάση είναι 1,88.

Η θερμική τάση ανατροπής αποτελεί το κριτήριο για το τεχνικοοικονομικό πάχος των στερεών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές (όπως μετασχηματιστές, καλώδια κλπ). Η τιμή είναι για τα

περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz, της τάξης του 1MV.

1.1.5 Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Από πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχει προταθεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που αποδίδει ικανοποιητικά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση και τις μερικές εκκενώσεις (σχήμα 1.1.5-1). Όπως φαίνεται, πρόκειται ουσιαστικά για μια 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 μιας 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 1.1.5-1 : Ένα ισοδύναμο κυκλώματος συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

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_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 $\Sigma_{\pi 2}$.

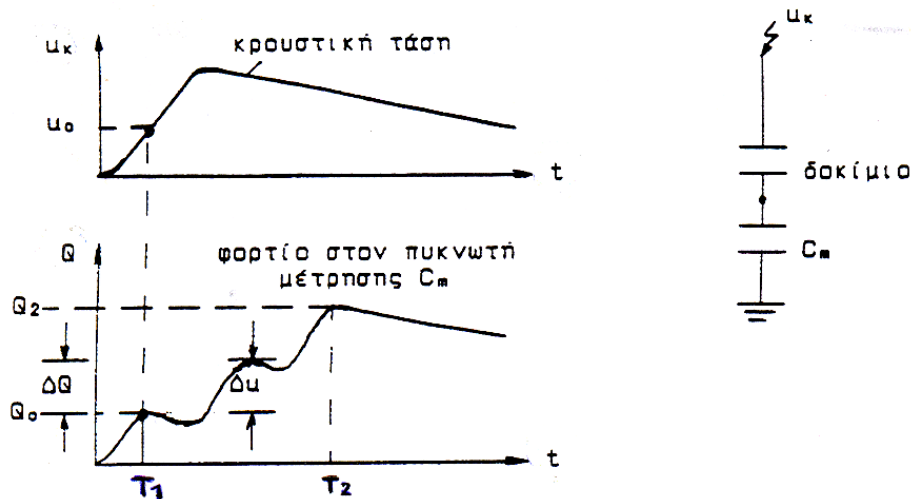
R_{π}, Σ_{π} : Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του C_{π}

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.

1.1.6 Στατιστικές μετρήσεις 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 1.1.6-1 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 1.1.6-1 : 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.

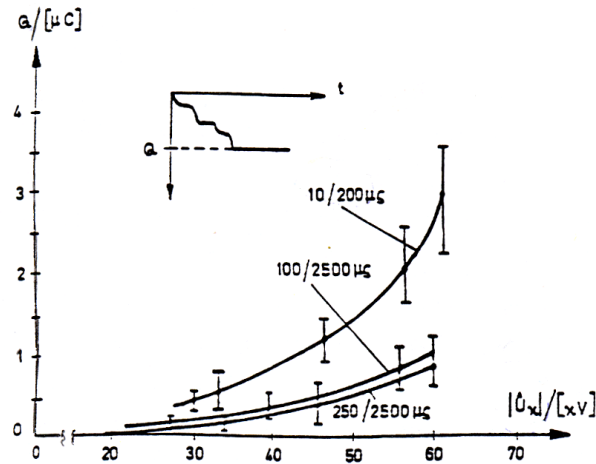
u_k : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

u_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).

Δu : Άλμα δυναμικού.

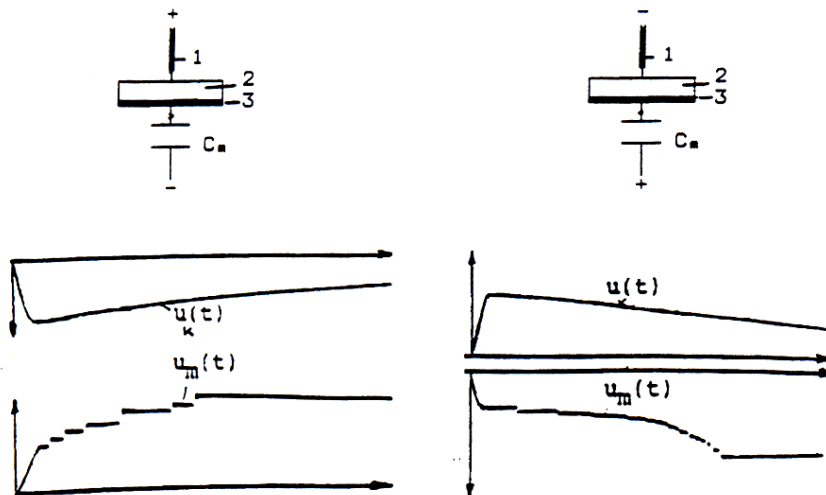
ΔQ : Αύξηση φορτίου.

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως : η χαρακτηριστική $Q=f(|\hat{U}_k|)$, η χαρακτηριστική $u_0=f(|\hat{U}_k|)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με τη μέγιστη τιμή της τάσης, κλπ. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q=f(|\hat{U}_k|)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 1.1.6-2), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών (τα οργανικά στερεά μονωτικά είναι ανομοιογενή και δεν είναι δυνατόν να υπάρχει συμμετρική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο), 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. 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.



Σχήμα 1.1.6-4 : Χαρακτηριστική $Q_2=f(|\hat{U}_\kappa|)$ για τον βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs.
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα
 $C_m = 1000\text{nF}$

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



Σχήμα 1.1.7-1 : Τυπικά παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs.
 (1: Ηλεκτρόδιο ακίδα, 2: Δοκίμιο, 3: Ηλεκτρόδιο πλάκα, C_m : πυκνωτής μέτρησης).

Το φαινόμενο της πολικότητας γίνεται φανερό στα άλματα δυναμικού από την κύρτωση (παρέκκλιση) της $u_m(t)$ προς τον άξονα του χρόνου (σχήμα 1.1.7-1).

1.2 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών

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

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

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

- στις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις,
- στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (ή το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης (ως στοιχείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε δηλαδή μια 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

Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η **ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων** (κυρίως ηλεκτρόνια). Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την ενέργεια Fermi των ηλεκτρονίων, διευκολύνει στη διεξαγωγή συμπερασμάτων για το μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Τα βασικότερα συμπεράσματα από τη θεωρία αυτή είναι:

- 1) Η γήρανση και η διάσπαση, ταυτίζονται 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 τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με $\epsilon_r \approx 2,5-4,5$) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2MV/cm.
- 3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT) \quad (1.2-1)$$

- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η προηγούμενη σχέση. Στην περίπτωση αυτή, η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι **ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό**. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής

ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια.

Κατά την κβαντομηχανική ερμηνεία, 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, από τη σχέση:

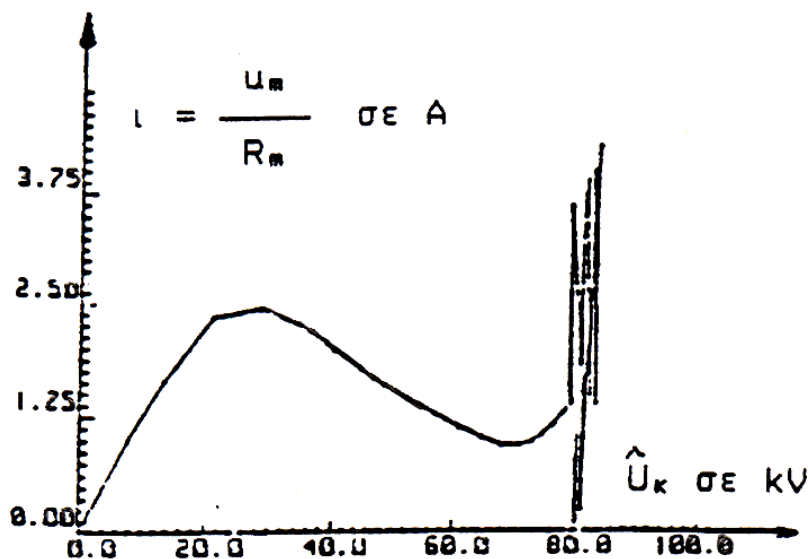
$$W=0,5q_e\Delta u, \quad (1.2-2)$$

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 το ηλεκτρόδιο γείωσης.

Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γήρανσης έχουν δοθεί από παλμογράφηματα των κρούσεων φορτίου όπου φαίνεται ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις. Έτσι, όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσειμα της ενέργειάς τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Φαίνεται, επίσης, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης (κατά την αύξηση της τάσης, παρατηρείται μείωση του ρεύματος). Η αντίσταση αυτή, που προηγείται του ιονισμού με κρούσεις, δίνεται αναλυτικότερα στη χαρακτηριστική “ρεύματος - τάσης” του σχήματος 1.2-1.



Σχήμα 1.2-1 : Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης σύμφωνα με παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου

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

$$Q = Q_0 \exp[A(E^2 - E_0^2) / E_0^2] \quad (1.2-3)$$

όπου (κατά το σχήμα 1.1.6-1):

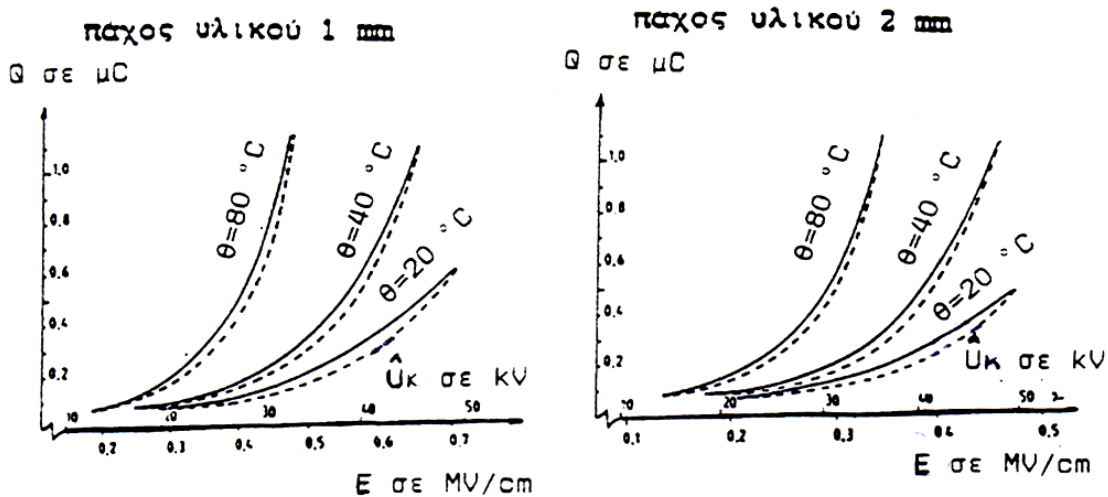
- E_0 η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($E > 0,2 \text{ MV/cm}$) και Q_0 το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.
- E η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση, λόγω της οποίας το φορτίο αποκτά την τιμή Q .

- Α ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από το χρόνο.

Με βάση τη σχέση αυτή, έχει γίνει μια προσέγγιση πειραματικών χαρακτηριστικών $Q=f(|\dot{U}_k|)$ κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm ή 2mm) με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή 250/2500μs), η οποία προκαλεί μόνο εσωτερικές μερικές εκκενώσεις.

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι πειραματικές χαρακτηριστικές για τον βακελίτη (εντός μονωτικού ελαίου), καθώς και οι θεωρητικές χαρακτηριστικές κατά τη σχέση (1.2-3), με προσδιορισμό του συντελεστή A για κάθε υλικό. Όπως φαίνεται, υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ θεωρίας και πειραμάτων. Η θεωρητική προσέγγιση έδειξε ότι:

- 1) οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμές πεδίου περίπου $E=0,2\text{MV/cm}$.
- 2) για τιμές πεδίου περίπου μέχρι $0,5\text{MV/cm}$, η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας διέπεται από τη σχέση 1.2-1.
- 3) για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγούμενως, ισχύει η σχέση 1.2-3, με αποτέλεσμα να μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις.
- 4) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ενισχύει σημαντικά τα φαινόμενα ιονισμού.



Σχήμα 1.3.3-1 : Χαρακτηριστικές $Q=f(|\dot{U}_k|)$ για τον βακελίτη (εντός μονωτικού ελαίου), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα, $A = 0,44$.

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

Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 1.2 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 δε μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεώρηση των παραπάνω φαινομένων. Πλεονέκτημα, όμως, της μακροσκοπικής

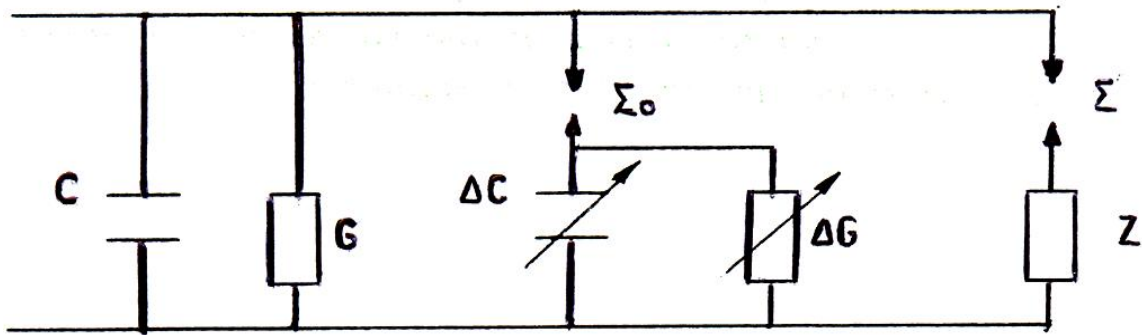
θεωρίας, για τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, φαίνεται ότι είναι ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης. Ο διαχωρισμός αυτός των μερικών εκκενώσεων δε μπορεί να δοθεί από τη θεωρία του ιονισμού με κρούσεις, γιατί ο συντελεστής A (στη σχέση 1.2-3) αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του, και η τιμή του θα πρέπει να εξαρτάται από τη διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Αν π.χ. πραγματοποιήσει κανείς τα πειράματα της παραγράφου 1.2, με κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$ (ή με $10/200\mu\text{s}$), και προσεγγίσει ακολούθως τις πειραματικές χαρακτηριστικές $Q=f(\dot{U}_k)$ με τη σχέση 1.2-3, θα διαπιστώσει ότι ο συντελεστής A έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $250/2500\mu\text{s}$. Η διαφορετική αυτή τιμή του συντελεστή A (κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$ ή $10/200\mu\text{s}$) μπορεί να θεωρηθεί μόνο ως μία ένδειξη ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, χωρίς όμως να καθορίζεται η περιοχή εκδήλωσής του (στον όγκο του μονωτικού, ή στην επιφάνειά του, ή στον όγκο και στην επιφάνεια του μονωτικού). Γι' αυτό, δε μπορεί κανείς να καταλήξει, μέσω της κβαντομηχανικής θεώρησης των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, στο διαχωρισμό των μερικών εκκενώσεων στα παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού.

Από τα παραπάνω φαίνεται, ότι 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 το σκοπό αυτό, δίνεται στο σχήμα 1.3-1. Πρόκειται, ουσιαστικά, για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος Gemant-Philipoff (σχήμα 1.1.3-1), 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 $0,2\text{MV/cm}$), τότε, τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.3-1 ως ακολούθως:

- 1) Για $E < E_0$: Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δε διασπώνται οι σπινθηριστές Σ_0 και Σ).
- 2) Για $E > E_0$: Εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (διασπάται ο Σ_0) και η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διέπεται από τη 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:

$$Q = Q_0 \exp[A(E^2 - E_0^2) / E_0^2]$$

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



Σχήμα 1.3-1 : 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

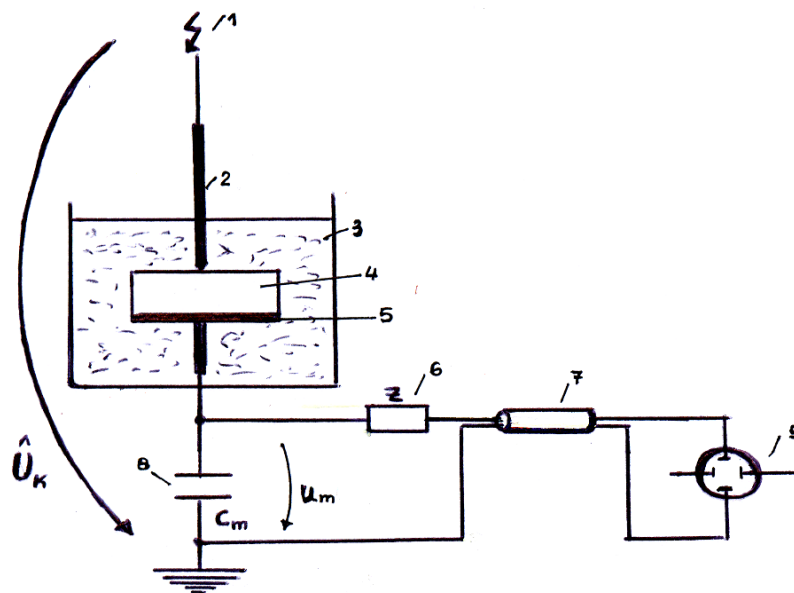
Σ : σπινθηριστής εκδήλωσης της Z

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η θεωρητική επεξήγηση των φαινομένων τεχνητής γήρανσης του στερεού μονωτικού υλικού βακελίτη, μέσω στατιστικής ανάλυσης, έτσι ώστε να προσδιοριστούν κριτήρια αξιολόγησης αυτών, και γενικότερα, των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών μέσα από τη χρήση εύχρηστων συντελεστών που περιγράφουν τη συμπεριφορά των μονωτικών.

Στα πλαίσια αυτά, αναλύεται στατιστικά η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης και της ενέργειας λόγω μερικών εκκενώσεων στο συνδυασμό «βακελίτης- λάδι μετασχηματιστών» υπό κρουστικές τάσεις $\pm 1,2/50\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς ηλεκτρικού πεδίου.

2.1 Διάταξη



Σχήμα 2.1-1 : Το κύκλωμα μέτρησης

- 1: Κρουστική τάση με μέγιστη τιμή $\hat{U}_κ$, που παράγεται από κρουστική γεννήτρια
- 2: Ακίδα
- 3: Μονωτικό λάδι
- 4: Δοκίμιο βακελίτη
- 5: Πλάκα
- 6: Αντίσταση προσαρμογής
- 7: Ομοαξονικό καλώδιο
- 8: Πυκνωτής μέτρησης
- 9: Παλμογράφος

Στο σχήμα 2.2-1, δίνεται η απλοποιημένη διάταξη μέτρησης των αλμάτων δυναμικού σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

Ο λόγος καταμερισμού είναι:

$$k = (C_{\Delta\kappa} + C_m) / C_{\Delta\kappa} \quad (2.1-1)$$

ενώ, στην ιδανική περίπτωση που $C_{\Delta\kappa} \ll C_m$, ισχύει:

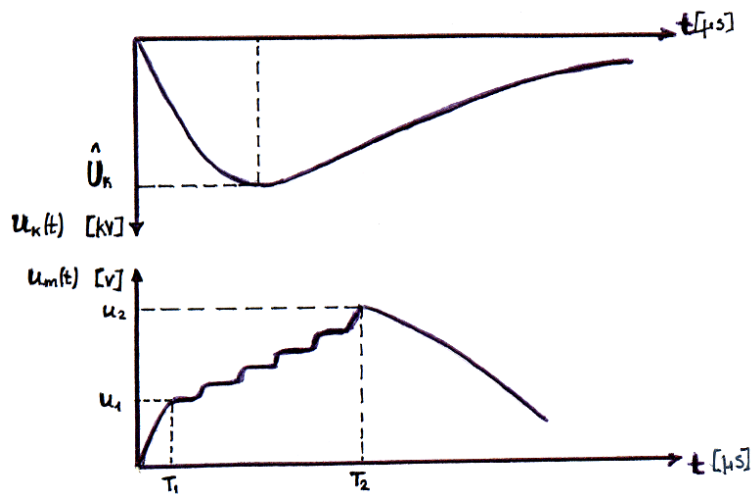
$$k = C_m / C_{\Delta k} \quad (2.1-2)$$

και:

$$u_m = \hat{U}_k \cdot C_{\Delta k} / C_m \quad (2.1-3)$$

2.2 Περιγραφή διεξαγωγής μετρήσεων

Στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μετρήσεων και Υψηλών Τάσεων του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, του Τομέα Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων, χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια βακελίτη (Δ), πάχους (d) 1mm και 2mm, διαμέτρου (Φ) 150mm, τα οποία τοποθετήθηκαν σε διάταξη ηλεκτροδίων “ακίδα-πλάκα”, με ακτίνα καμπυλότητας (R) 0,9mm. Επελέγη η διάταξη αυτή των ηλεκτροδίων, διότι είναι η δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών.



Σχήμα 2.2-1 : Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού

u_1 : η τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή) σε [V]

u_2 : η τάση λήξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή) σε [V]

T_1 : η χρονική στιγμή έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε [μ s]

T_2 : η χρονική στιγμή λήξης των μερικών εκκενώσεων σε [μ s]

\hat{U}_k : η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε [kV]

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1-1, η διάταξη των ηλεκτροδίων μαζί με το δοκίμιο του βακελίτη είναι βυθισμένα σε μονωτικό λάδι, έτσι ώστε να είναι εφικτή η εφαρμογή κρουστικών τάσεων μεγαλύτερης μέγιστης τιμής. Για την καταγραφή των μεγεθών που ενδιαφέρουν (σχήμα 2.2-1), χρησιμοποιήθηκε χωρητικός καταμεριστής, τοποθετώντας τη διάταξη με το δοκίμιο στη θέση του πυκνωτή υψηλής τάσης. Στη συνέχεια, συνδέθηκε ο παλμογράφος, μέσω αντίστασης προσαρμογής και ομοαξονικού καλωδίου (για την εξάλειψη των παρασίτων) στα άκρα του πυκνωτή μέτρησης C_m , ο οποίος παίζει το ρόλο του πυκνωτή χαμηλής τάσης. Έτσι, μ' αυτόν τον τρόπο μπορεί να δει κανείς στον παλμογράφο, τι συμβαίνει στο δοκίμιο κάθε φορά που εφαρμόζεται κρουστική τάση, και “διαβάζοντας” τα παλμογραφήματα που εμφανίζονται, καταγράφονται τα μεγέθη που ενδιαφέρουν. Ωστόσο, σε κάθε επίπεδο τάσης είναι γνωστή η τιμή του πυκνωτή μέτρησης C_m , καθώς και η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης \hat{U}_k , που παράγεται από την κρουστική γεννήτρια.

Για τη λήψη της πρώτης ομάδας μετρήσεων τοποθετήθηκε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και εφαρμόστηκε, υπό διάταξη ηλεκτροδίων “ακίδα-πλάκα”, κρουστική τάση $+1,2/50\mu\text{s}$.

Για τη λήψη της δεύτερης ομάδας μετρήσεων τοποθετήθηκε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και εφαρμόστηκε, υπό διάταξη ηλεκτροδίων “ακίδα-πλάκα”, κρουστική τάση $-1,2/50\mu\text{s}$.

Για τη λήψη της τρίτης ομάδας μετρήσεων τοποθετήθηκε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και εφαρμόστηκε, υπό διάταξη ηλεκτροδίων “ακίδα-πλάκα”, κρουστική τάση $+1,2/50\mu\text{s}$.

Για τη λήψη της τέταρτης ομάδας μετρήσεων τοποθετήθηκε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και εφαρμόστηκε, υπό διάταξη ηλεκτροδίων “ακίδα-πλάκα”, κρουστική τάση $-1,2/50\mu\text{s}$.

Σε κάθε επίπεδο τάσης, τοποθετήθηκαν 10 δοκίμια βακελίτη, έτσι ώστε σε κάθε κρούση να υπάρχει καινούργιο δοκίμιο, το οποίο δεν έχει καταπονηθεί, και κατά συνέπεια, οι μετρήσεις να’ ναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Σημειώνεται, ότι σε κάθε επίπεδο τάσης, η μέτρηση που καταγράφηκε, τελικά, είναι η μέση τιμή των 10 αυτών μετρήσεων, με σκοπό το αποτέλεσμα να’ ναι στατιστικά ορθότερο.

Στόχος ήταν, ανεβάζοντας σταδιακά τη μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης που εφαρμόζεται στην ανωτέρω διάταξη των ηλεκτροδίων, να δει κανείς πώς θα συμπεριφερθεί το δοκίμιο του βακελίτη, σε όλους τους συνδυασμούς του πάχους του δοκιμίου (1mm και 2mm) και της πολικότητας της κρουστικής τάσης ($\pm 1,2/50\mu\text{s}$). Ουσιαστικά, προκλήθηκε η τεχνητή γήρανσή του, αφού εφαρμόστηκαν κρουστικές τάσεις πάνω από την τιμή έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

2.3 Απαραίτητες σχέσεις για την επεξεργασία των μετρήσεων

Χρησιμοποιώντας τα μεγέθη u_1 , u_2 , t_1 , t_2 , \hat{U}_k , C_m και με τη βοήθεια των παρακάτω τύπων, συμπληρώθηκαν οι πίνακες 3.1.1-1, 3.2.1-1, 3.3.1-1 και 3.4.1-1.

- Η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης στο άκρο της ακίδας δίνεται, προσεγγιστικά (κατά Zeller), από τη σχέση:

$$\hat{E}_k = 2\hat{U}_k / [R \cdot \ln(4d/R)] \quad , \text{ σε [MV/cm]} \quad (2.3-1)$$

Όπου: \hat{U}_k σε [MV] η μέγιστη της τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

\hat{E}_k μέγιστη αναπτυσσόμενη τιμή έντασης ηλεκτρικού πεδίου στο μονωτικό σε [MV/cm]
 R , d σε [cm] η ακτίνα καμπυλότητας και η απόσταση ηλεκτροδίων αντίστοιχα

- Το φορτίο στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων και κατά τη λήξη τους δίνεται, αντίστοιχα, από τους τύπους:

$$q_1 = C_m \cdot u_1 \quad , \text{ σε } [\mu\text{C}] \quad (2.3-2)$$

$$q_2 = C_m \cdot u_2 \quad , \text{ σε } [\mu\text{C}] \quad (2.3-3)$$

όπου C_m σε [μF] και u_1 , u_2 σε [V].

- Η διάρκεια των μερικών εκκενώσεων:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad , \text{ σε } [\mu\text{s}] \quad (2.3-4)$$

Όπου: t_1 , t_2 σε [μs] οι χρόνοι έναρξης και λήξης των μερικών εκκενώσεων.

- Η διαφορά δυναμικού λόγω των μερικών εκκενώσεων:

$$\Delta u = u_2 - u_1 \quad , \text{σε [V]} \quad (2.3-5)$$

Όπου: u_1, u_2 σε [V] οι τάσεις στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη και λήξη των μερικών εκκενώσεων.

- Η σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη και λήξη των μερικών εκκενώσεων και η συνολική μεταβολή της:

$$Z_1 = t_1 / C_m \quad , \text{σε } [\Omega] \quad (2.3-6)$$

$$Z_2 = t_2 / C_m \quad , \text{σε } [\Omega] \quad (2.3-7)$$

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 \quad , \text{σε } [\Omega] \quad (2.3-8)$$

- Η ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη και λήξη των μερικών εκκενώσεων και η συνολική μεταβολή της:

$$W_1 = u_1^2 \cdot C_m \quad , \text{σε [Joules]} \quad (2.3-9)$$

$$W_2 = u_2^2 \cdot C_m \quad , \text{σε [Joules]} \quad (2.3-10)$$

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad , \text{σε [Joules]} \quad (2.3-11)$$

- Η ισχύς στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη και λήξη των μερικών εκκενώσεων και η συνολική μεταβολή της:

$$P_1 = W_1 / t_1 \quad , \text{σε [W]} \quad (2.3-12)$$

$$P_2 = W_2 / t_2 \quad , \text{σε [W]} \quad (2.3-13)$$

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad , \text{σε [W]} \quad (2.3-14)$$

- Η αύξηση της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων:

$$\Delta W = \Delta u / 2 \quad , \text{σε [eV]} \quad (2.3-15)$$

όπου Δu σε [V].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τέσσερις ενότητες μετρήσεων και γραφικών παραστάσεων. Καθεμιά από αυτές αντιστοιχεί σ' ένα συνδυασμό πάχους του δοκιμίου και πολικότητας της κρουστικής τάσης.

Κάθε ενότητα αποτελείται από έναν πίνακα, στον οποίο εκτίθενται συνοπτικά οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα από την επεξεργασία τους, καθώς και από 12 γραφικές παραστάσεις.

Αναλυτικά:

- $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $\Delta Z = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$
- $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $\Delta W = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$
 $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$
- $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$
- $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$, $\Delta W_e = f(\Delta W)$

3.1. Κρουστικές τάσεις +1,2/50μs θετικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=1mm

\hat{U}_k [kV]	\hat{E}_k [MV/cm]	C_m [nF]	t_1 [μs]	t_2 [μs]	u_1 [V]	u_2 [V]	Δu [V]	q_1 [μC]	q_2 [μC]	Δq [μC]
28,6	0,426	10	3,00	8,00	8,00	20,00	12,00	0,08	0,20	0,12
35,4	0,527	10	1,50	11,10	10,00	35,00	25,00	0,10	0,35	0,25
43	0,641	20	1,20	13,00	5,50	36,00	30,50	0,11	0,72	0,61
50,5	0,752	20	0,90	18,50	6,50	60,00	53,50	0,13	1,20	1,07
57,2	0,852	210	0,60	22,20	1,00	10,48	9,52	0,20	2,20	2,00
64,2	0,953	210	0,55	26,50	1,10	10,95	9,90	0,22	2,30	2,08
71,4	1,064	210	0,52	29,00	1,10	14,29	13,14	0,24	3,00	2,76

Πίνακας 3.1-1 :Μετρήσεις και υπολογισμοί για την περίπτωση 3.1 κρουστικών τάσεων +1,2/50μs θετικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=1mm.

\hat{U}_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε [kV]

\hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k σε [MV/cm]

C_m : χωρητικότητα πυκνωτή μέτρησης σε [nF]

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε [μs]

t_2 : χρόνος λήξης των μερικών εκκενώσεων σε [μs]

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης u_m του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [V]

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης u_m του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [V]

Δu : η διαφορά της τάσης u_m του πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [V]

q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [μC]

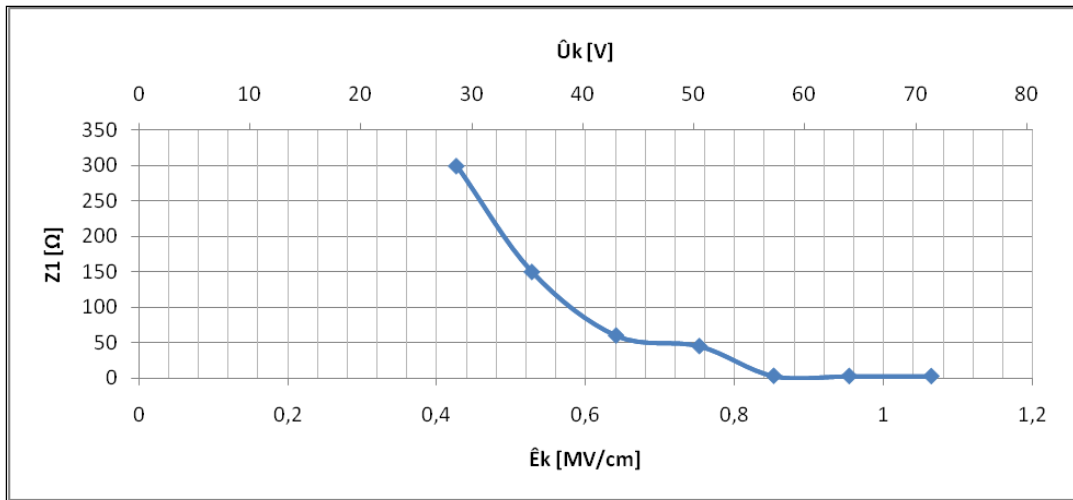
q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [μC]

Δq : η διαφορά του φορτίου του πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [μC]

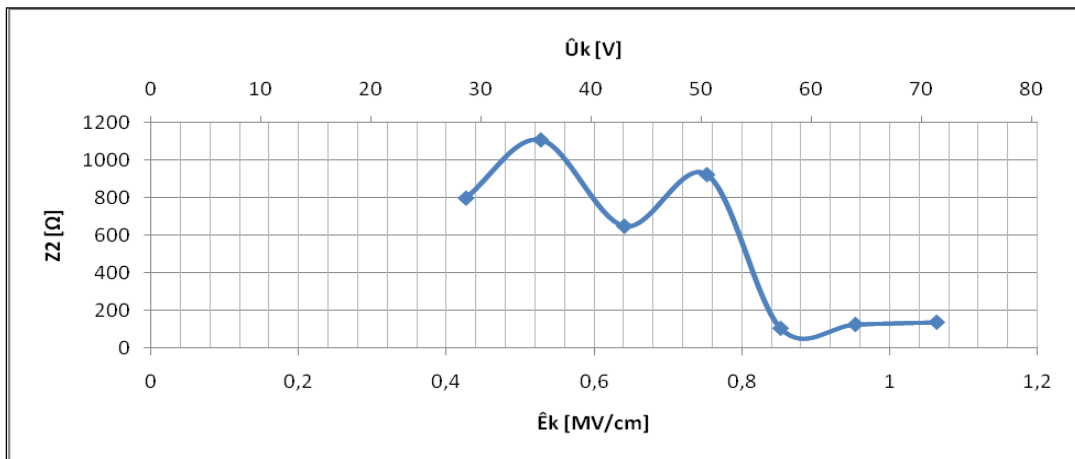
Z_1 [Ω]	Z_2 [Ω]	ΔZ [Ω]	W_1 [J]	W_2 [J]	ΔW [J]	P_1 [W]	P_2 [W]	ΔP [W]	ΔW_e [eV]
300,0	800,0	500,0	6,4E-07	4E-06	3,36E-06	0,21	0,50	0,29	6,00
150,0	1110,0	960,0	1E-06	1,2E-05	1,13E-05	0,67	1,10	0,44	12,50
60,0	650,0	590,0	6,1E-07	2,6E-05	2,53E-05	0,50	1,99	1,49	15,25
45,0	925,0	880,0	8,5E-07	7,2E-05	7,12E-05	0,94	3,89	2,95	26,75
2,9	105,7	102,9	1,9E-07	2,3E-05	2,29E-05	0,32	1,04	0,72	4,77
2,6	126,2	123,6	2,3E-07	2,5E-05	2,49E-05	0,42	0,95	0,53	4,95
2,5	138,1	135,6	2,7E-07	4,3E-05	4,26E-05	0,52	1,48	0,95	6,58

Πίνακας 3.1-2 : Μετρήσεις και υπολογισμοί για την περίπτωση 3.1 κρουστικών τάσεων +1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=1mm (συνέχεια του πίνακα 3.1-1).

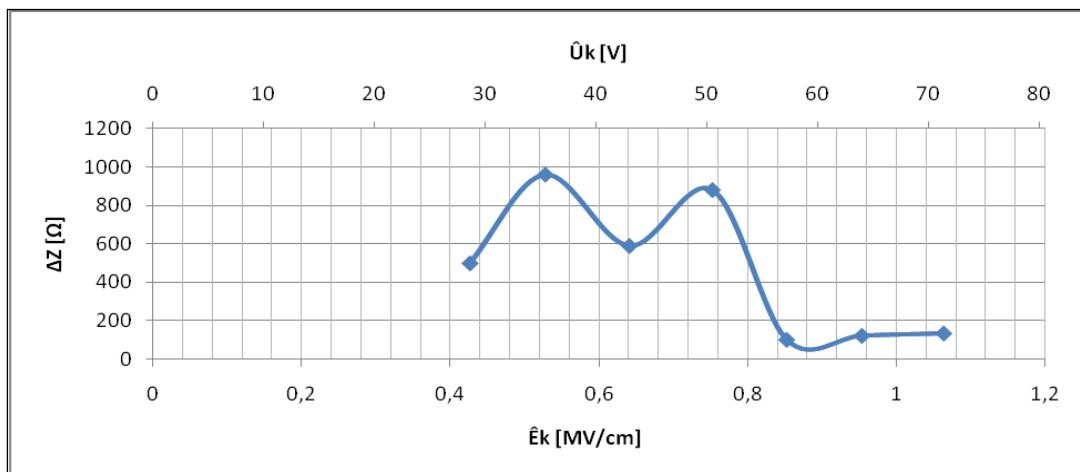
- Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [Ω]
- Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [Ω]
- ΔZ : η διαφορά της σύνθετης αντίστασης του πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [Ω]
- W_1 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [J]
- W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [J]
- ΔW : η διαφορά της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [J]
- P_1 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [W]
- P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [W]
- ΔP : η διαφορά της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [W]
- ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [eV]



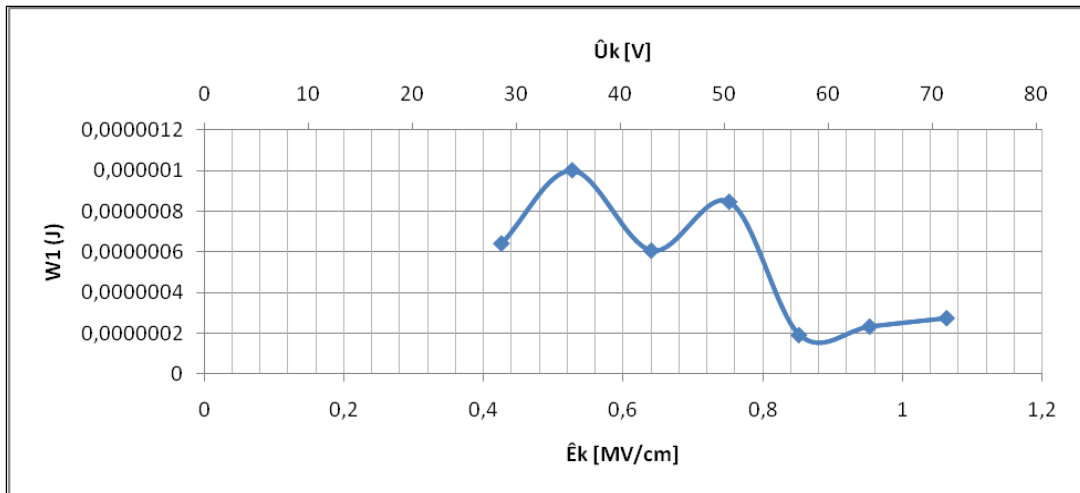
Σχήμα 3.1-1: Η σύνθετη αντίσταση $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



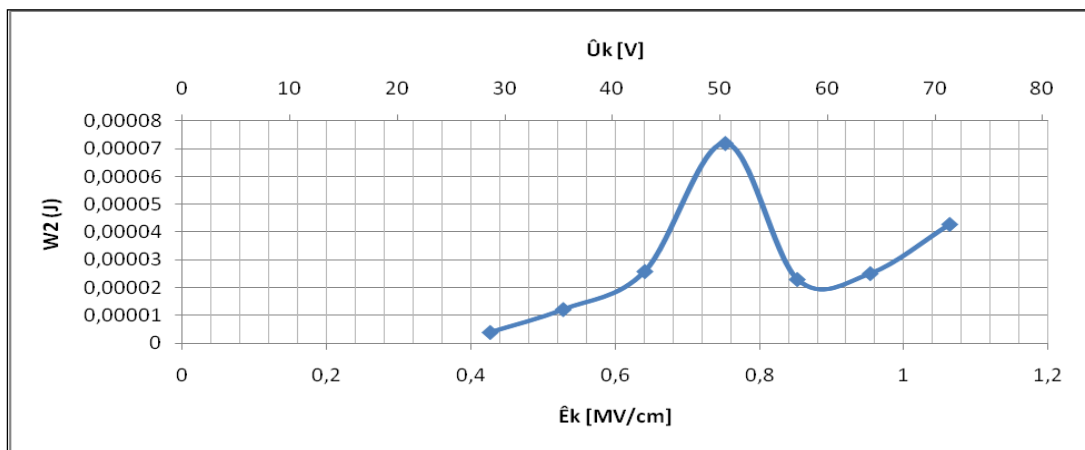
Σχήμα 3.1-2: Η σύνθετη αντίσταση $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



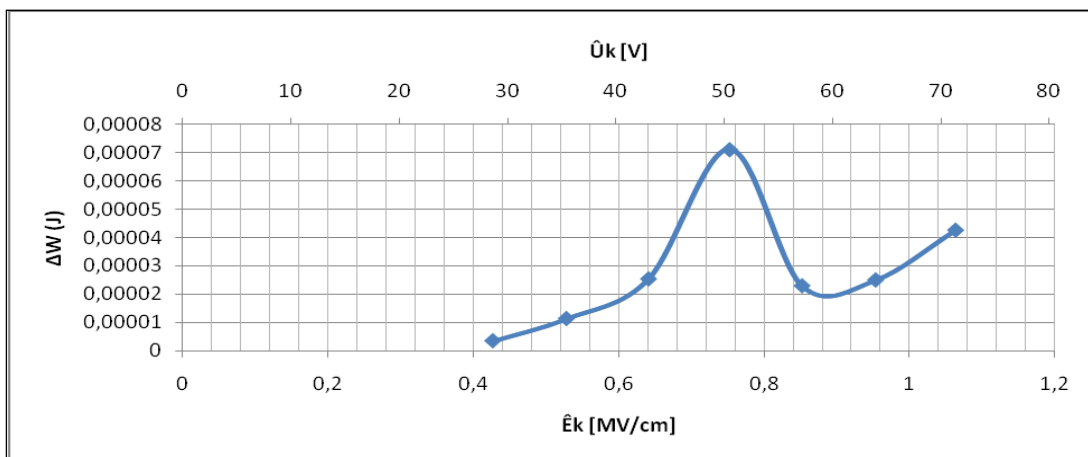
Σχήμα 3.1-3: Η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης ΔZ κατά τις μερικές εκκενώσεις για $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



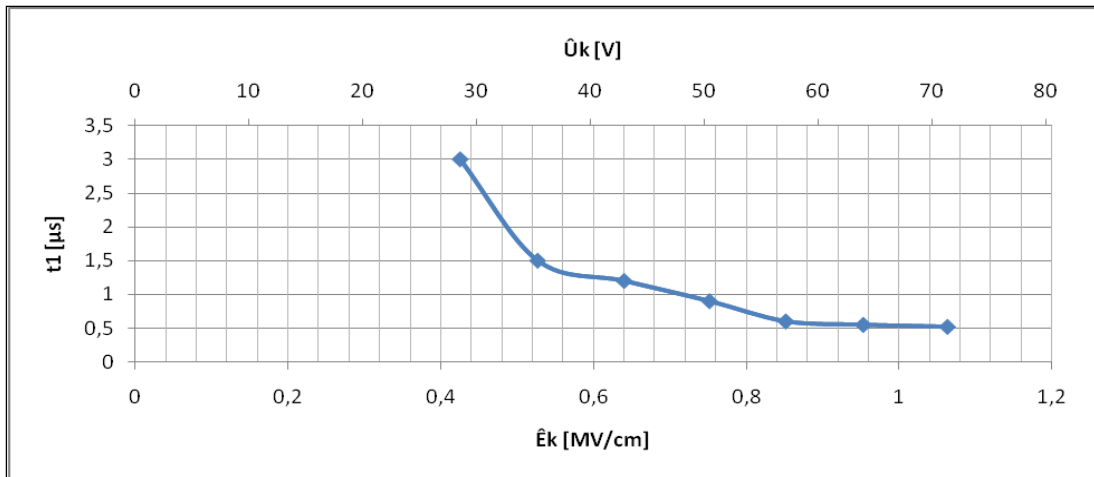
Σχήμα 3.1-4: Η ενέργεια $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



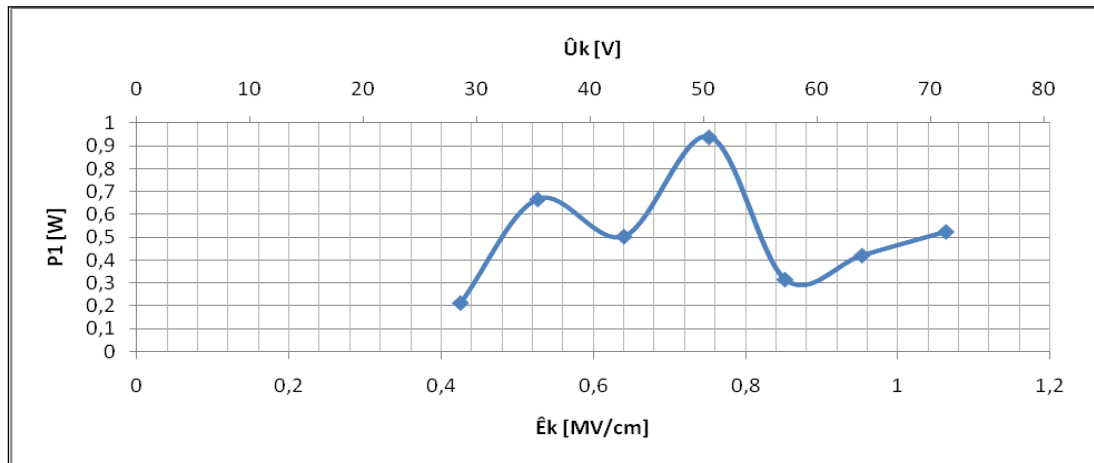
Σχήμα 3.1-5: Η ενέργεια $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



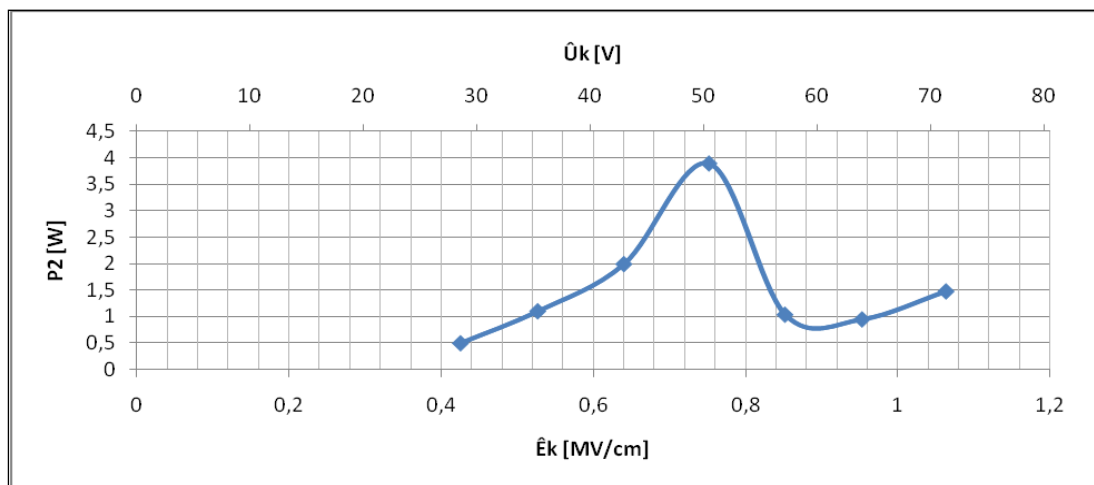
Σχήμα 3.1-6: Η συνολική μεταβολή της ενέργειας ΔW στον πυκνωτή μέτρησης κατά τις μερικές εκκενώσεις για $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



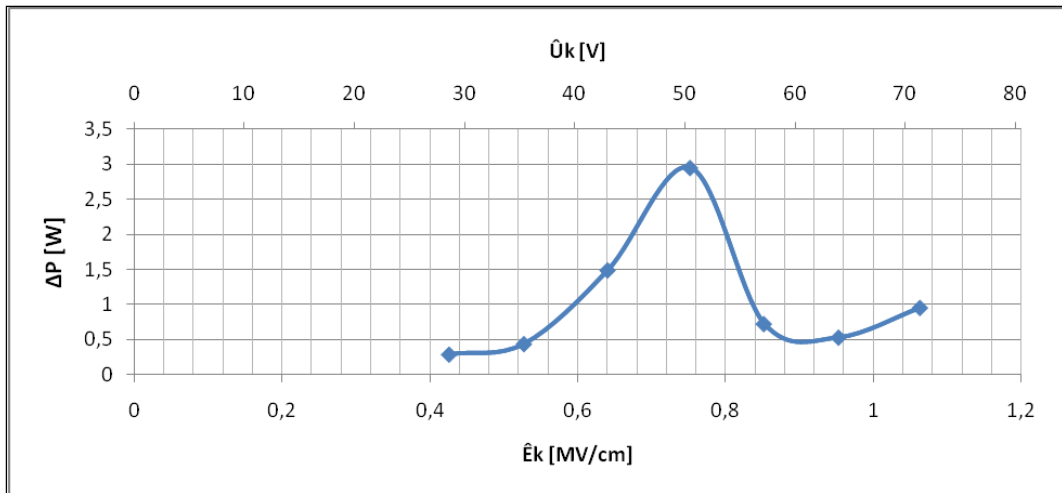
Σχήμα 3.1-7: Ο χρόνος έναρξης $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



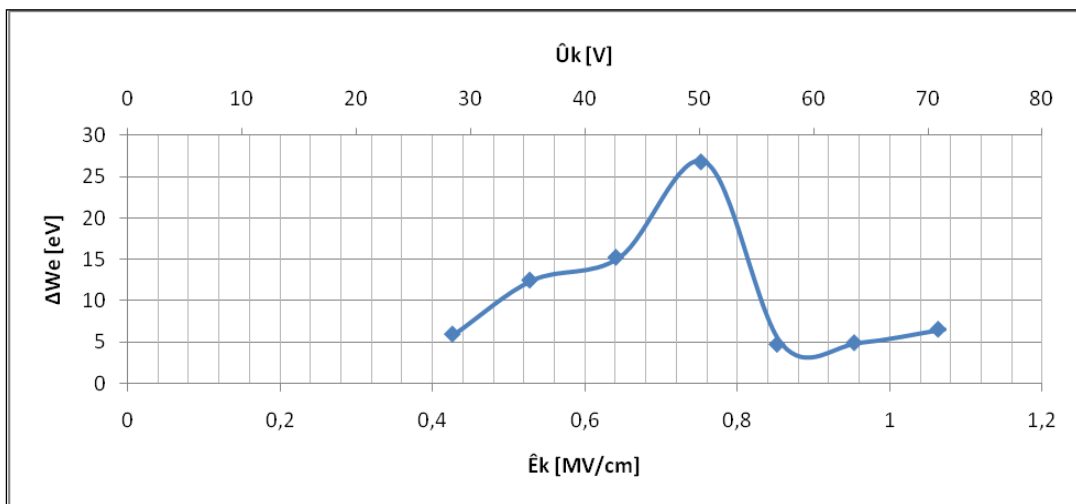
Σχήμα 3.1-8: Η ισχύς $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



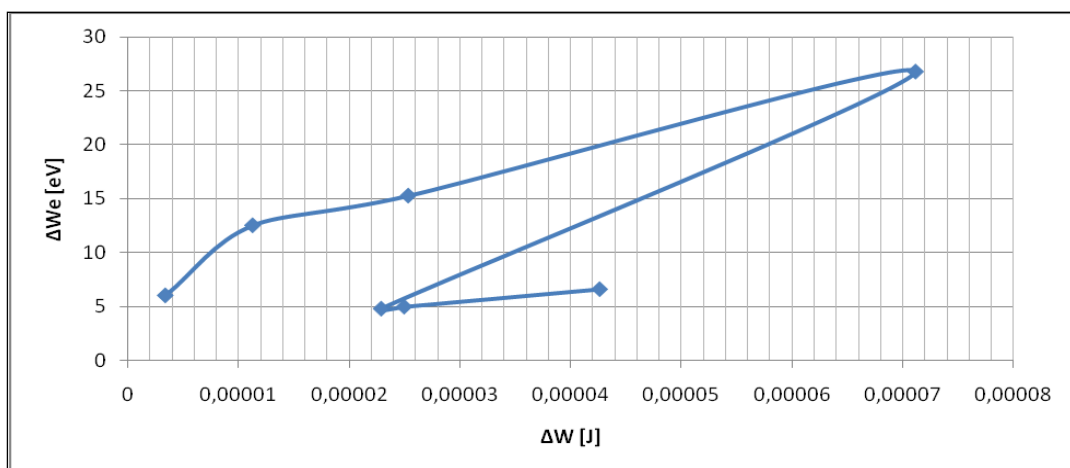
Σχήμα 3.1-9: Η ισχύς $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 3.1-10: Η μεταβολή της ισχύος $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τις μερικές εκκενώσεις για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 3.1-11: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 3.1-12: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\Delta W)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$

3.2. Κρουστικές τάσεις -1,2/50μs αρνητικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=1mm

\hat{U}_k [kV]	\hat{E}_k [MV/cm]	C_m [nF]	t_1 [μs]	t_2 [μs]	u_1 [V]	u_2 [V]	Δu [V]	q_1 [μC]	q_2 [μC]	Δq [μC]
29,1	0,434	10	3,30	15,00	11,00	22,00	11,00	0,11	0,22	0,11
36,7	0,547	10	1,70	16,50	13,00	45,00	32,00	0,13	0,45	0,32
44,1	0,657	20	1,60	19,50	8,50	47,50	39,00	0,17	0,95	0,78
51,5	0,767	20	1,50	24,50	10,50	65,00	54,50	0,21	1,30	1,09
58,2	0,867	210	1,40	27,50	1,14	10,24	9,10	0,24	2,15	1,91
66,4	0,989	210	1,20	32,00	1,24	14,29	13,05	0,26	3,00	2,74
72,1	1,074	210	1,00	34,30	1,29	19,05	17,76	0,27	4,00	3,73
78,1	1,164	210	0,85	40,00	1,38	29,05	27,67	0,29	6,10	5,81

Πίνακας 3.2-1 : Μετρήσεις και υπολογισμοί για την περίπτωση 3.2 κρουστικών τάσεων -1,2/50μs αρνητικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=1mm.

\hat{U}_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε [kV]

\hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k σε [MV/cm]

C_m : χωρητικότητα πυκνωτή μέτρησης σε [nF]

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε [μs]

t_2 : χρόνος λήξης των μερικών εκκενώσεων σε [μs]

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης u_m του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [V]

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης u_m του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [V]

Δu : η διαφορά της τάσης u_m του πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [V]

q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [μC]

q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [μC]

Δq : η διαφορά του φορτίου του πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [μC]

Z_1 [Ω]	Z_2 [Ω]	ΔZ [Ω]	W_1 [J]	W_2 [J]	ΔW [J]	P_1 [W]	P_2 [W]	ΔP [W]	ΔW_e [eV]
330,0	1500,0	1170,0	1,21E-06	4,8E-06	3,6E-06	0,37	0,32	-0,04	5,50
170,0	1650,0	1480,0	1,69E-06	2E-05	1,9E-05	0,99	1,23	0,23	16,00
80,0	975,0	895,0	1,45E-06	4,5E-05	4,4E-05	0,90	2,31	1,41	19,50
75,0	1225,0	1150,0	2,21E-06	8,5E-05	8,2E-05	1,47	3,45	1,98	27,25
6,7	131,0	124,3	2,73E-07	2,2E-05	2,2E-05	0,19	0,80	0,61	4,55
5,7	152,4	146,7	3,23E-07	4,3E-05	4,3E-05	0,27	1,34	1,07	6,53
4,8	163,3	158,6	3,49E-07	7,6E-05	7,6E-05	0,35	2,22	1,87	8,88
4,0	190,5	186,4	4E-07	0,00018	0,00018	0,47	4,43	3,96	13,84

Πίνακας 3.2-2 : Μετρήσεις και υπολογισμοί για την περίπτωση 3.2 κρουστικών τάσεων -1,2/50μs αρνητικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=1mm (συνέχεια του πίνακα 3.2-1).

Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [Ω]

Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [Ω]

ΔZ : η διαφορά της σύνθετης αντίστασης του πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [Ω]

W_1 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [J]

W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [J]

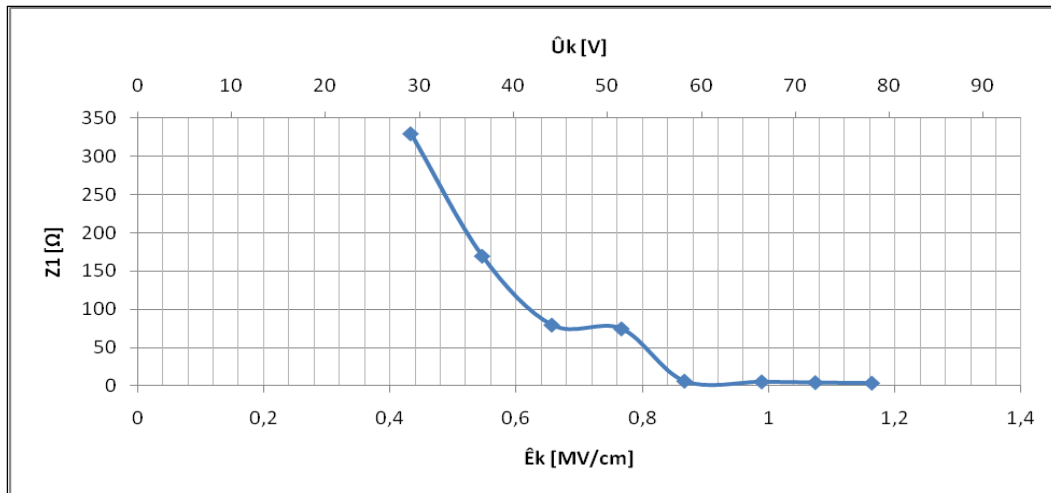
ΔW : η διαφορά της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [J]

P_1 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [W]

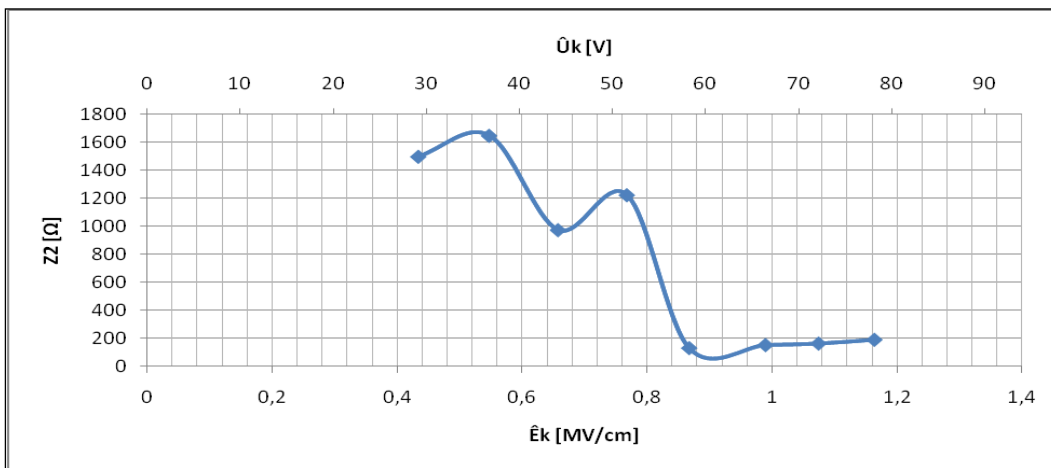
P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [W]

ΔP : η διαφορά της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [W]

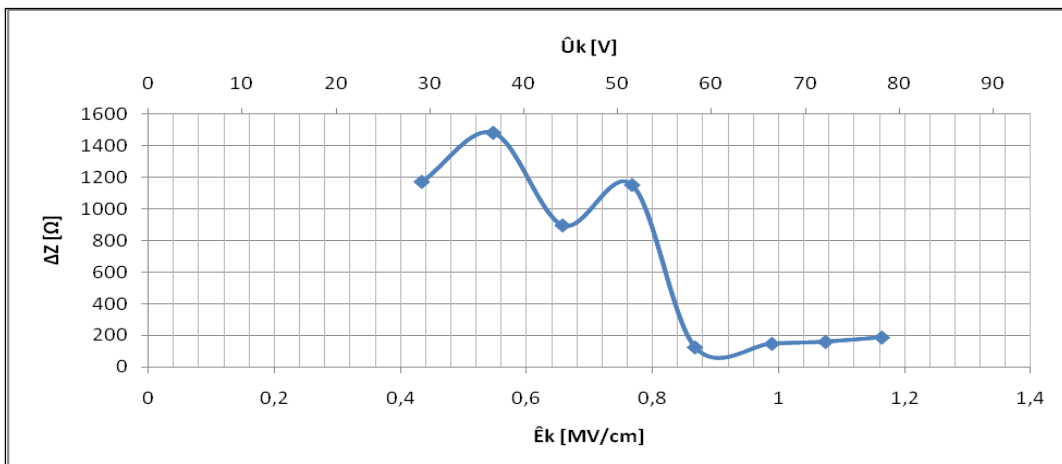
ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [eV]



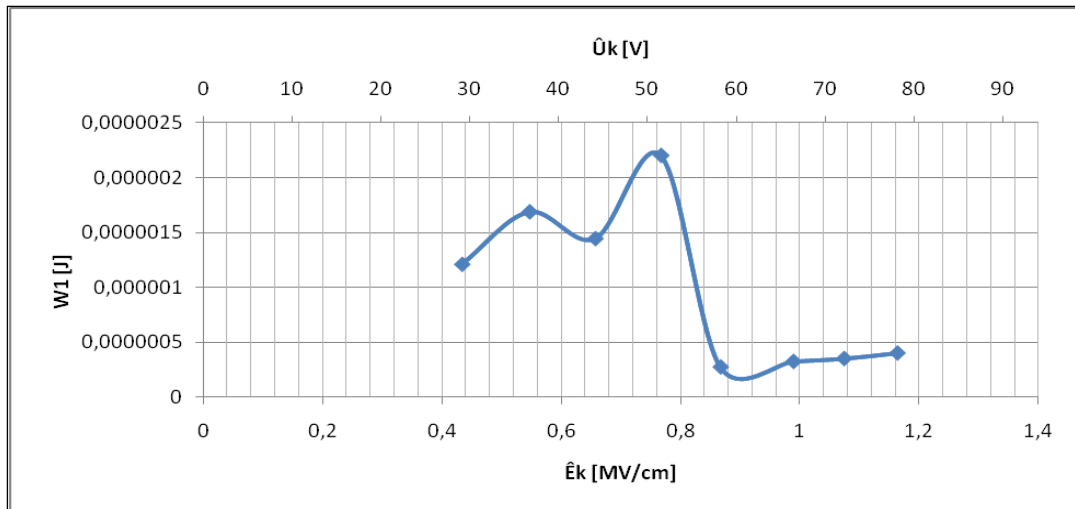
Σχήμα 3.2-1: Η σύνθετη αντίσταση $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



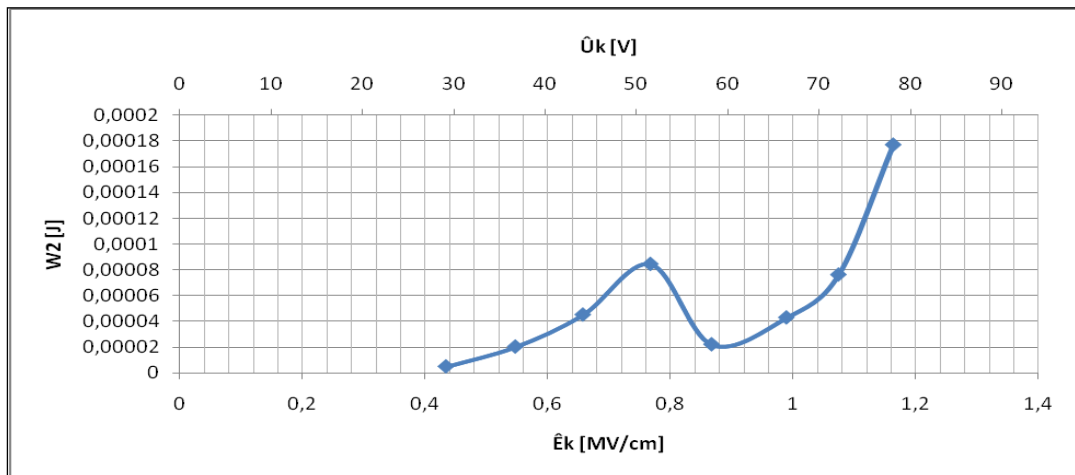
Σχήμα 3.2-2: Η σύνθετη αντίσταση $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



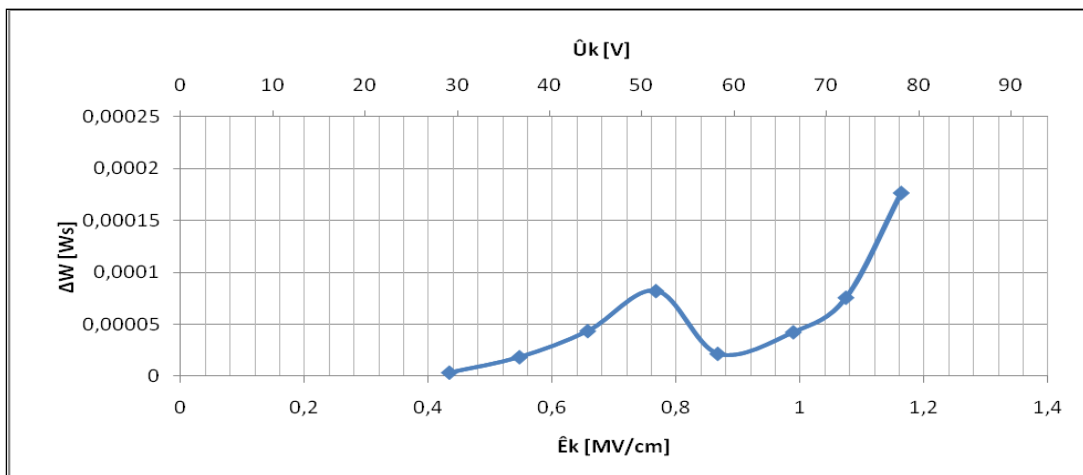
Σχήμα 3.2-3: Η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης ΔZ κατά τις μερικές εκκενώσεις για $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



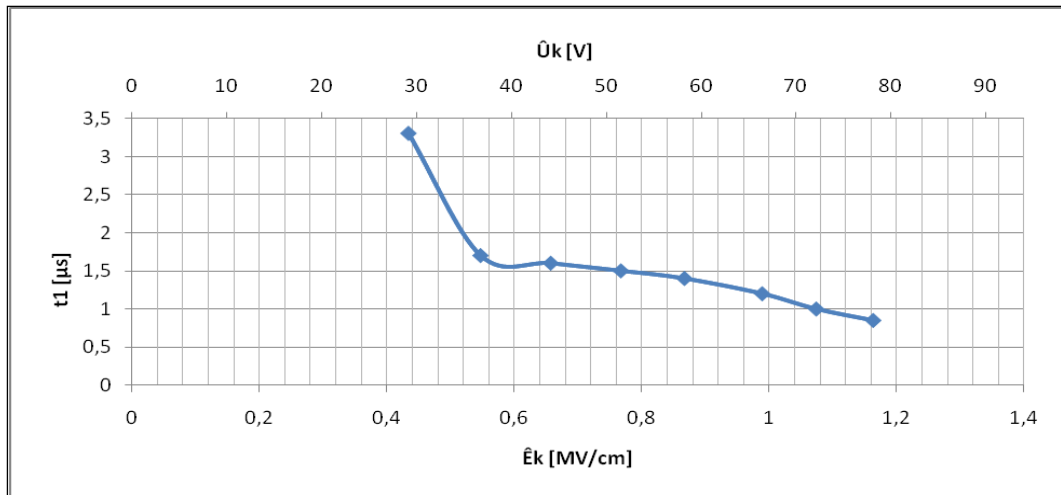
Σχήμα 3.2-4: Η ενέργεια $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



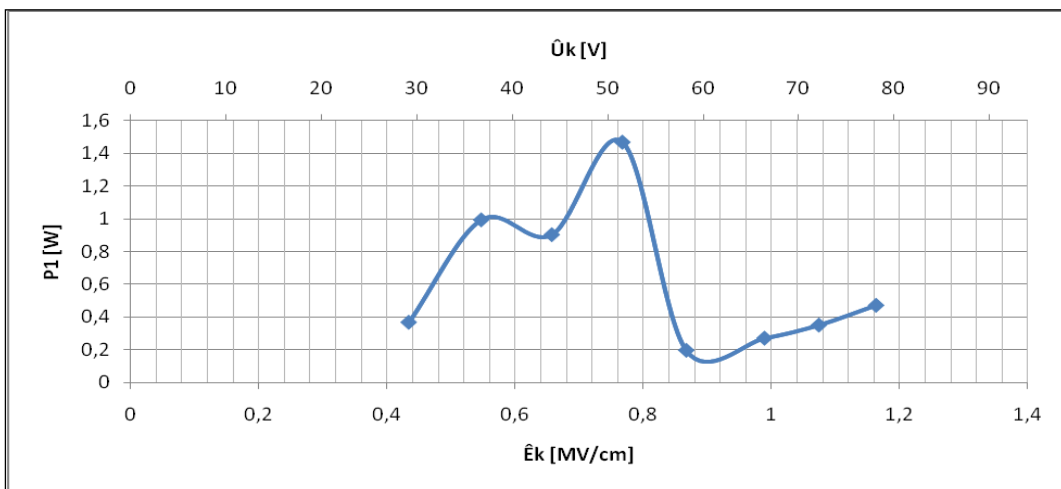
Σχήμα 3.2-5: Η ενέργεια $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



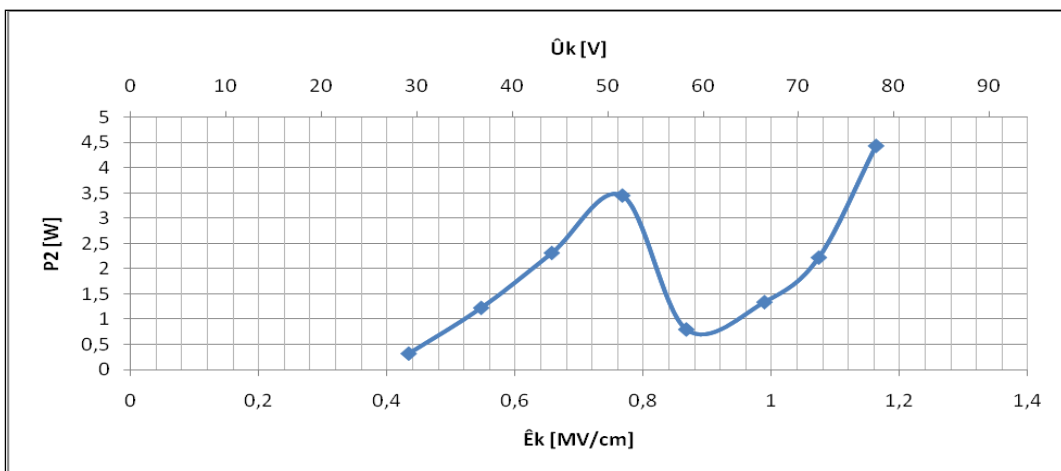
Σχήμα 3.2-6: Η συνολική μεταβολή της ενέργειας ΔW στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων για $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



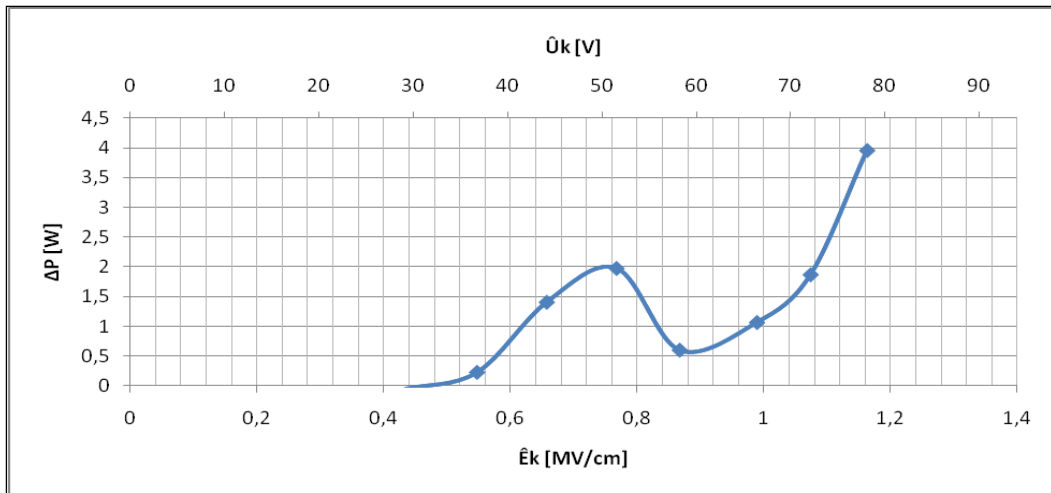
Σχήμα 3.2-7: Ο χρόνος έναρξης $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



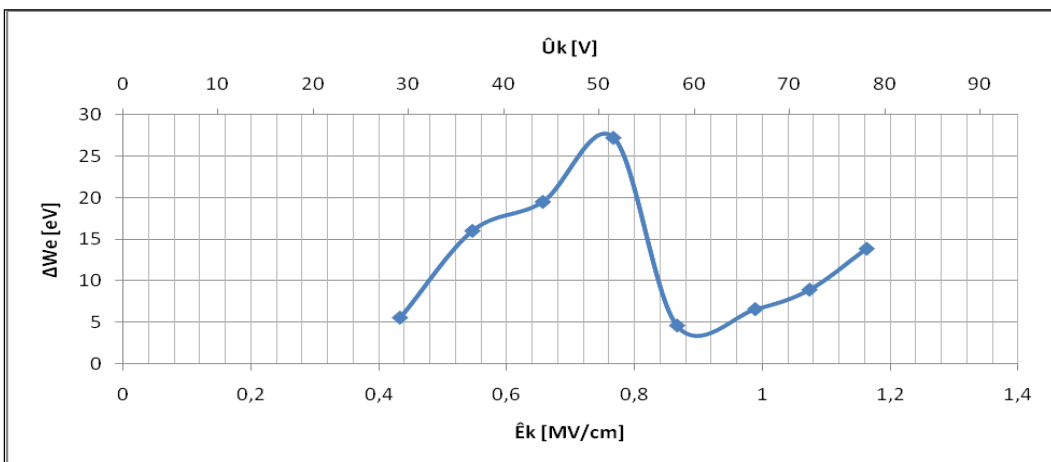
Σχήμα 3.2-8: Η ισχύς $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



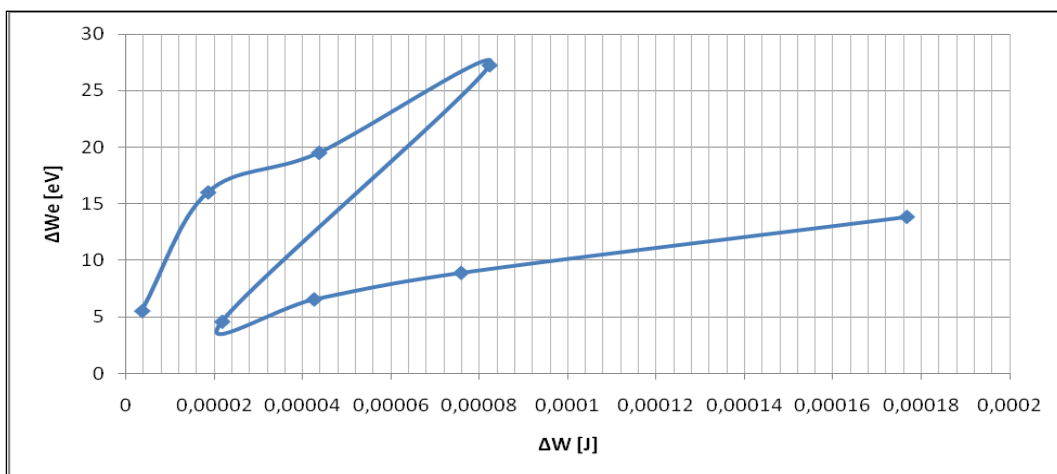
Σχήμα 3.2-9: Η ισχύς $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 3.2-10: Η μεταβολή της ισχύος $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τις μερικές εκκενώσεις για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 3.2-11: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 3.2-12: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\Delta W)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$

3.3. Κρουστικές τάσεις +1,2/50μs θετικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=2mm

\hat{U}_k [kV]	\hat{E}_k [MV/cm]	C_m [nF]	t_1 [μs]	t_2 [μs]	u_1 [V]	u_2 [V]	Δu [V]	q_1 [μC]	q_2 [μC]	Δq [μC]
35,4	0,36	10	3,40	12,10	10,00	21,00	11,00	0,10	0,21	0,11
43,8	0,446	10	2,10	14,50	11,00	35,00	24,00	0,11	0,35	0,24
50,2	0,511	10	1,70	15,00	12,00	40,00	28,00	0,12	0,40	0,28
57	0,58	10	1,42	19,50	16,00	65,00	49,00	0,16	0,65	0,49
65	0,661	20	1,18	20,50	10,00	49,00	39,00	0,20	0,98	0,78
71,4	0,726	20	1,18	25,50	11,50	60,00	48,50	0,23	1,20	0,97
86,5	0,88	210	1,18	27,10	4,19	8,71	4,52	0,88	1,83	0,95
94,3	0,959	210	1,18	26,50	5,71	10,48	4,76	1,20	2,20	1,00
99,7	1,014	210	1,18	35,10	5,95	14,76	8,81	1,25	3,10	1,85
107,8	1,096	210	1,18	34,20	8,10	16,67	8,57	1,70	3,50	1,80
113,8	1,157	210	1,18	33,30	10,29	18,76	8,48	2,16	3,94	1,78
121,2	1,233	210	1,18	25,20	4,76	14,29	9,52	1,00	3,00	2,00
126	1,282	210	1,18	18,20	5,71	13,10	7,38	1,20	2,75	1,55
132,7	1,35	210	1,18	24,20	5,95	16,67	10,71	1,25	3,50	2,25

Πίνακας 3.3-1 : Μετρήσεις και υπολογισμοί για την περίπτωση 3.3 κρουστικών τάσεων +1,2/50μs θετικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=2mm.

\hat{U}_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε [kV]

\hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k σε [MV/cm]

C_m : χωρητικότητα πυκνωτή μέτρησης σε [nF]

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε [μs]

t_2 : χρόνος λήξης των μερικών εκκενώσεων σε [μs]

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης u_m του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [V]

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης u_m του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [V]

Δu : η διαφορά της τάσης u_m του πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [V]

q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [μC]

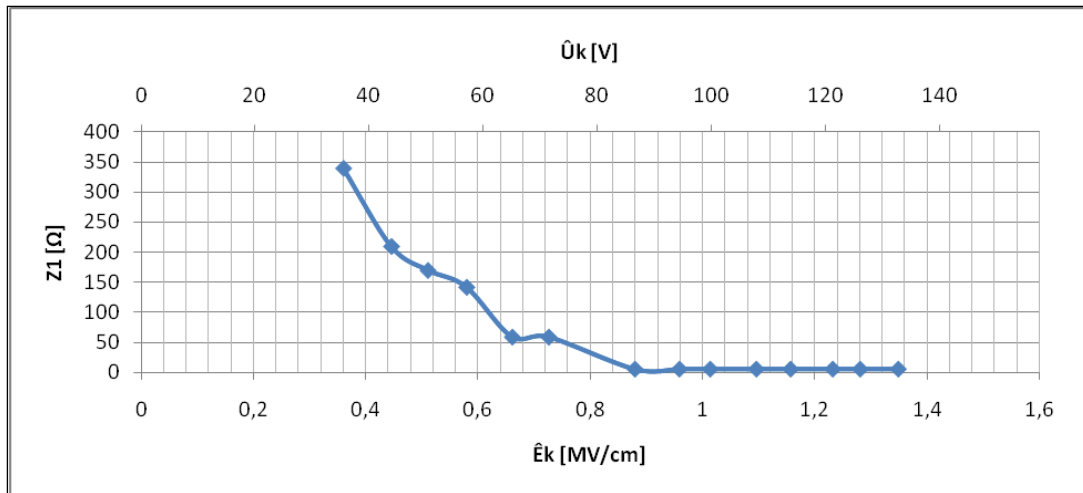
q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [μC]

Δq : η διαφορά του φορτίου του πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [μC]

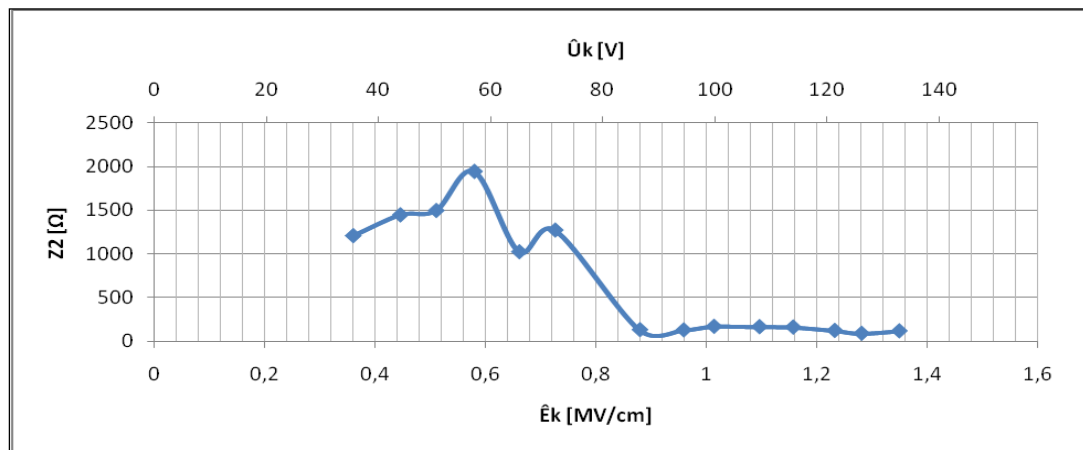
Z_1 [Ω]	Z_2 [Ω]	ΔZ [Ω]	W_1 [J]	W_2 [J]	ΔW [J]	P_1 [W]	P_2 [W]	ΔP [W]	ΔW_e [eV]
340,0	1210,0	870,0	1E-06	4,4E-06	3,4E-06	0,29	0,36	0,07	5,50
210,0	1450,0	1240,0	1,2E-06	1,2E-05	1,1E-05	0,58	0,84	0,27	12,00
170,0	1500,0	1330,0	1,4E-06	1,6E-05	1,5E-05	0,85	1,07	0,22	14,00
142,0	1950,0	1808,0	2,6E-06	4,2E-05	4E-05	1,80	2,17	0,36	24,50
59,0	1025,0	966,0	2E-06	4,8E-05	4,6E-05	1,69	2,34	0,65	19,50
59,0	1275,0	1216,0	2,6E-06	7,2E-05	6,9E-05	2,24	2,82	0,58	24,25
5,6	129,0	123,4	3,7E-06	1,6E-05	1,2E-05	3,12	0,59	-2,54	2,26
5,6	126,2	120,6	6,8E-06	2,3E-05	1,6E-05	5,80	0,87	-4,93	2,39
5,6	167,1	161,5	7,4E-06	4,6E-05	3,8E-05	6,30	1,30	-5,00	4,41
5,6	162,9	157,2	1,4E-05	5,8E-05	4,5E-05	11,68	1,71	-9,97	4,29
5,6	158,6	153,0	2,2E-05	7,4E-05	5,2E-05	18,84	2,22	-16,62	4,24
5,6	120,0	114,4	4,8E-06	4,3E-05	3,8E-05	4,03	1,70	-2,33	4,77
5,6	86,7	81,0	6,8E-06	3,6E-05	2,9E-05	5,80	1,98	-3,82	3,70
5,6	115,2	109,6	7,4E-06	5,8E-05	5,1E-05	6,30	2,41	-3,89	5,36

Πίνακας 3.3-2 : Μετρήσεις και υπολογισμοί για την περίπτωση 3.3 κρουστικών τάσεων +1,2/50μs θετικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=2mm (συνέχεια του πίνακα 3.3-1).

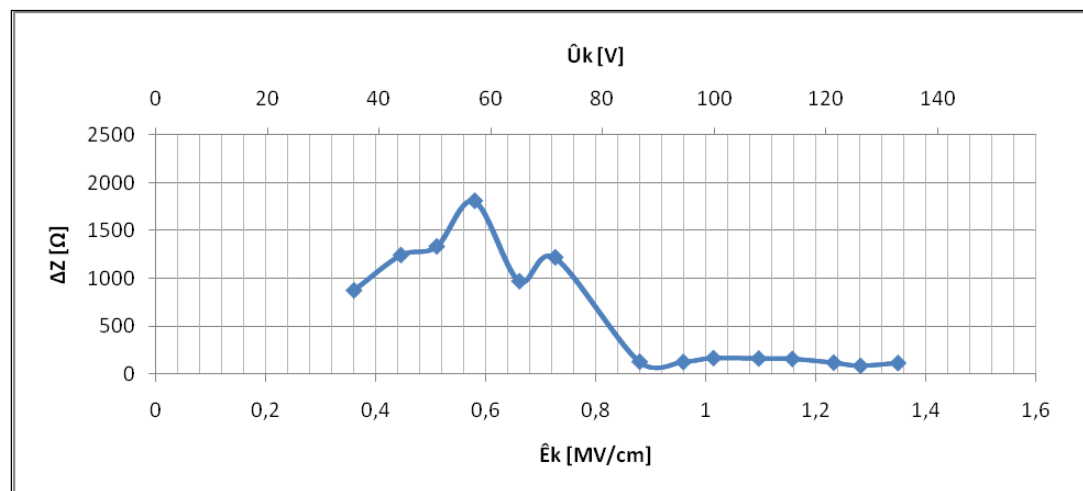
- Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [Ω]
- Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [Ω]
- ΔZ : η διαφορά της σύνθετης αντίστασης του πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [Ω]
- W_1 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [J]
- W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [J]
- ΔW : η διαφορά της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [J]
- P_1 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [W]
- P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [W]
- ΔP : η διαφορά της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [W]
- ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [eV]



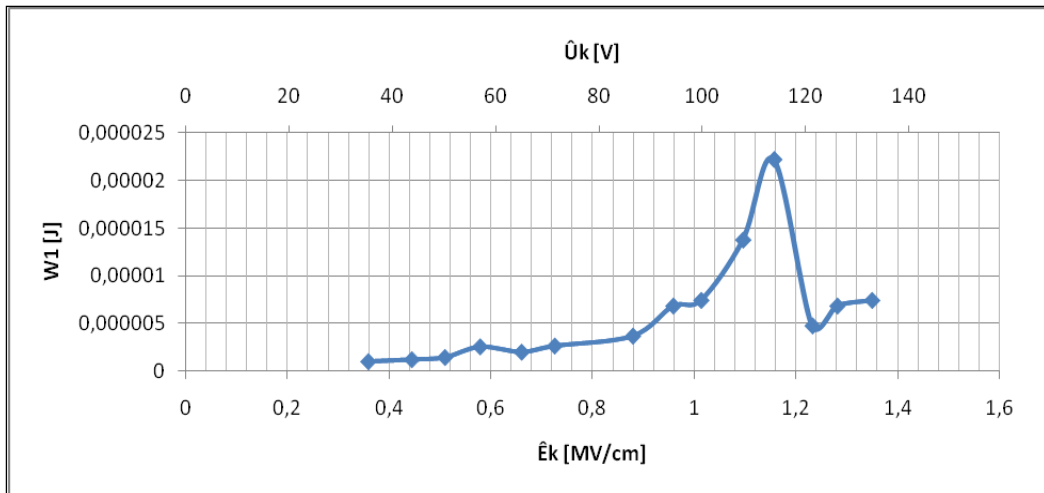
Σχήμα 3.3-1: Η σύνθετη αντίσταση $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



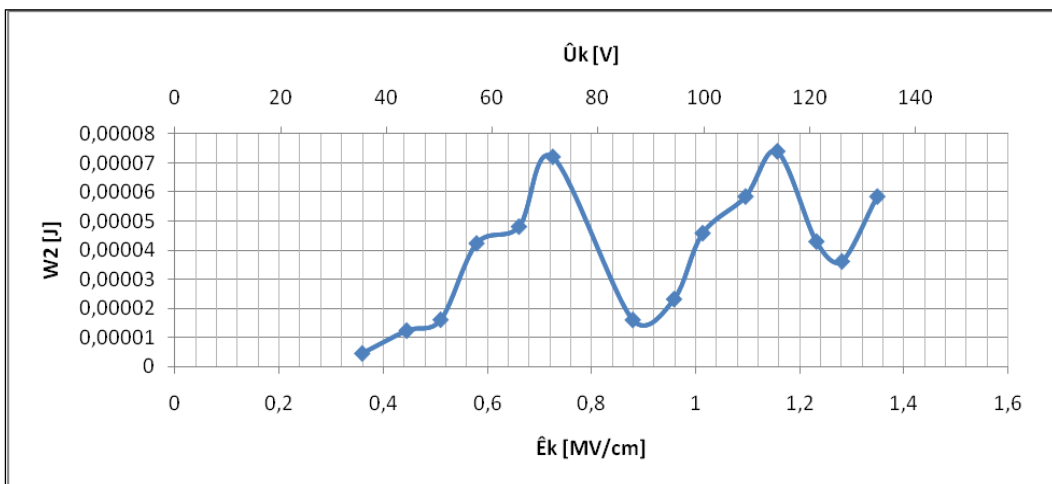
Σχήμα 3.3-2: Η σύνθετη αντίσταση $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



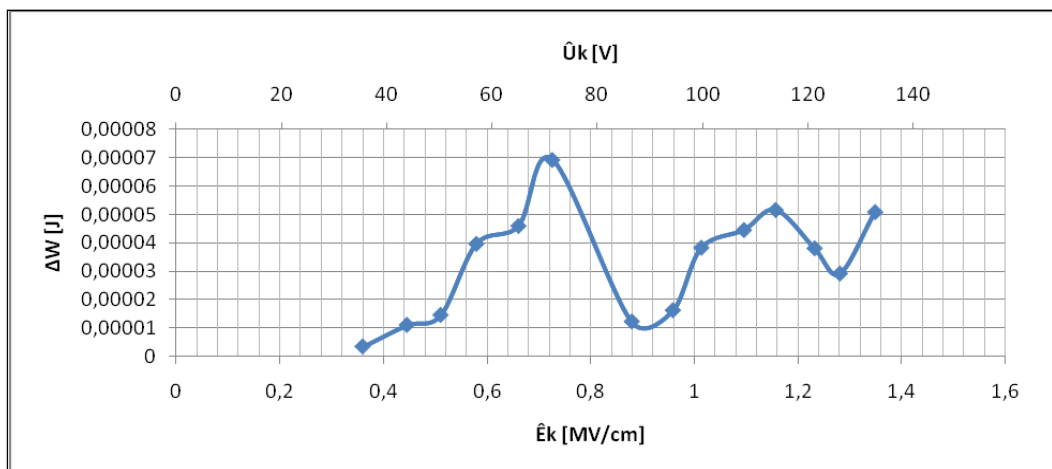
Σχήμα 3.3-3: Η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης ΔZ κατά τις μερικές εκκενώσεις για $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



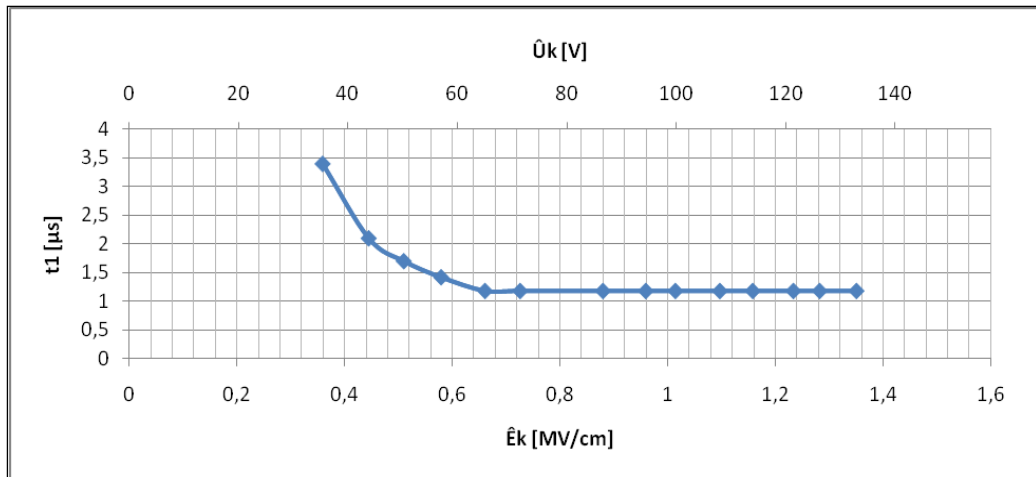
Σχήμα 3.3-4: Η ενέργεια $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



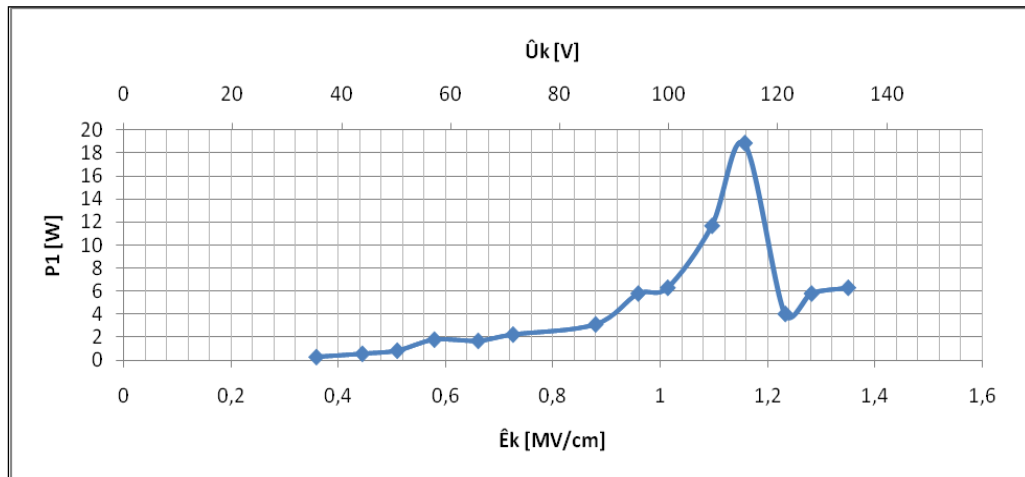
Σχήμα 3.3-5: Η ενέργεια $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



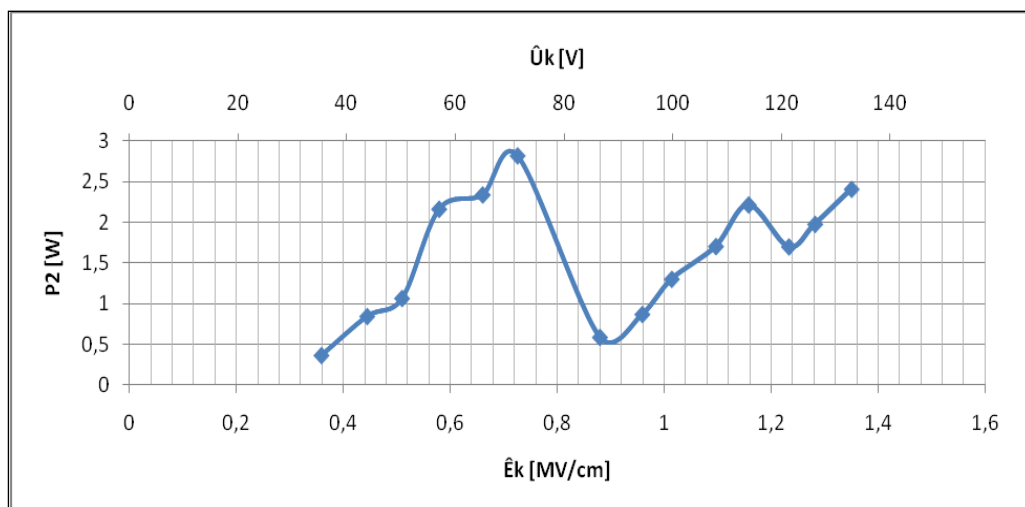
Σχήμα 3.3-6: Η συνολική μεταβολή της ενέργειας ΔW στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων για $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



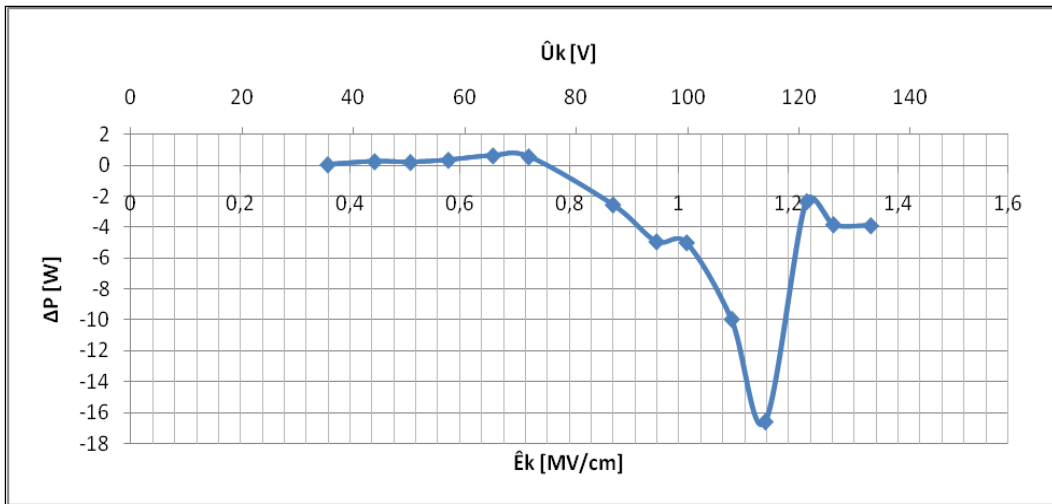
Σχήμα 3.3-7: Ο χρόνος έναρξης $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



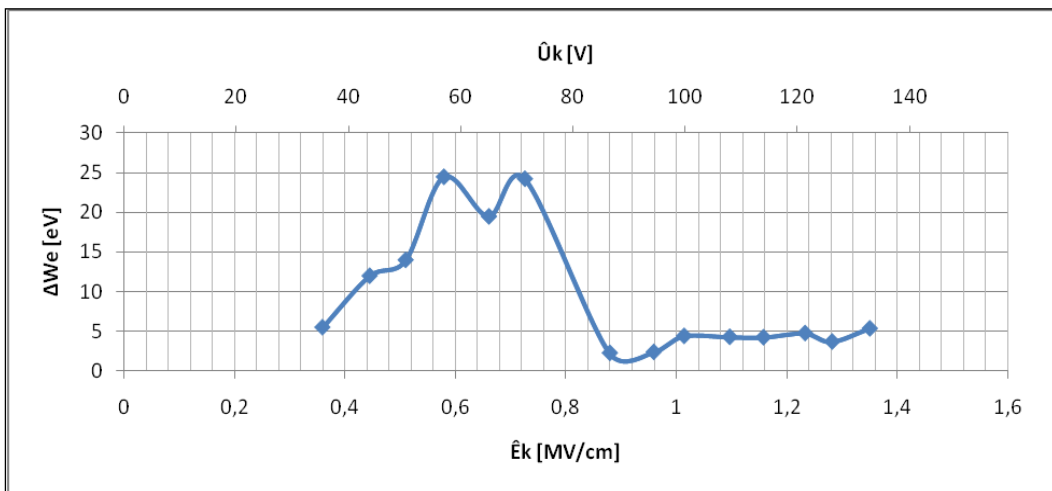
Σχήμα 3.3-8: Η ισχύς $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



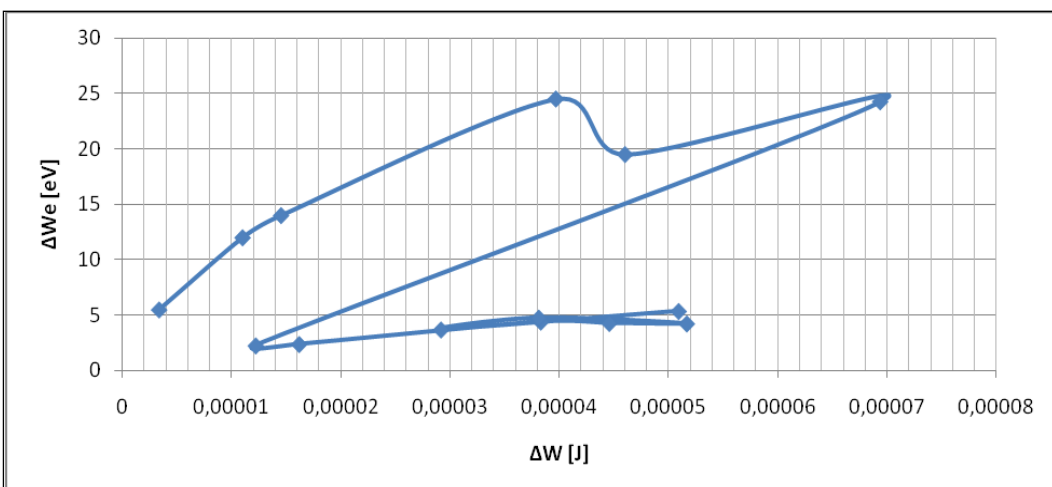
Σχήμα 3.3-9: Η ισχύς $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 3.3-10: Η μεταβολή της ισχύος $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τις μερικές εκκενώσεις για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 3.3-11: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 3.3-12: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\Delta W)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$

3.4. Κρουστικές τάσεις -1,2/50μs αρνητικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=2mm

\hat{U}_k [kV]	\hat{E}_k [MV/cm]	C_m [nF]	t_1 [μs]	t_2 [μs]	u_1 [V]	u_2 [V]	Δu [V]	q_1 [μC]	q_2 [μC]	Δq [μC]
36,2	0,368	10	2,50	15,50	15,00	23,00	8,00	0,15	0,23	0,08
44,5	0,453	10	2,20	19,20	21,00	42,00	21,00	0,21	0,42	0,21
51,2	0,521	10	2,00	21,60	24,00	52,00	28,00	0,24	0,52	0,28
57,2	0,582	20	1,80	24,00	16,00	43,00	27,00	0,32	0,86	0,54
64,7	0,658	20	1,70	27,00	18,00	50,00	32,00	0,36	1,00	0,64
73,1	0,744	210	1,65	30,00	1,86	7,71	5,86	0,39	1,62	1,23
80,1	0,815	210	1,62	36,00	2,57	10,48	7,90	0,54	2,20	1,66
92	0,936	210	1,60	34,00	2,81	11,19	8,38	0,59	2,35	1,76
99,7	1,014	210	1,56	42,00	1,67	6,43	4,76	0,35	1,35	1,00
106,4	1,082	210	1,55	29,00	5,00	12,86	7,86	1,05	2,70	1,65
115,9	1,179	1000	1,50	36,00	1,20	3,10	1,90	1,20	3,10	1,90
121,2	1,233	1000	1,21	40,10	1,80	3,82	2,02	1,80	3,82	2,02
126,6	1,288	1000	1,21	34,50	2,00	4,20	2,20	2,00	4,20	2,20
134,7	1,37	1000	1,21	32,50	2,40	4,40	2,00	2,40	4,40	2,00

Πίνακας 3.4-1 : Μετρήσεις και υπολογισμοί για την περίπτωση 3.4 κρουστικών τάσεων -1,2/50μs αρνητικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=2mm.

\hat{U}_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης σε [kV]

\hat{E}_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στη \hat{U}_k σε [MV/cm]

C_m : χωρητικότητα πυκνωτή μέτρησης σε [nF]

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε [μs]

t_2 : χρόνος λήξης των μερικών εκκενώσεων σε [μs]

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης u_m του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [V]

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης u_m του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [V]

Δu : η διαφορά της τάσης u_m του πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [V]

q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [μC]

q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [μC]

Δq : η διαφορά του φορτίου του πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [μC]

Z_1 [Ω]	Z_2 [Ω]	ΔZ [Ω]	W_1 [J]	W_2 [J]	ΔW [J]	P_1 [W]	P_2 [W]	ΔP [W]	ΔW_e [eV]
250,0	1550,0	1300,0	2,3E-06	5,3E-06	3E-06	0,90	0,34	-0,56	4,00
220,0	1920,0	1700,0	4,4E-06	1,8E-05	1,3E-05	2,00	0,92	-1,09	10,50
200,0	2160,0	1960,0	5,8E-06	2,7E-05	2,1E-05	2,88	1,25	-1,63	14,00
90,0	1200,0	1110,0	5,1E-06	3,7E-05	3,2E-05	2,84	1,54	-1,30	13,50
85,0	1350,0	1265,0	6,5E-06	0,00005	4,4E-05	3,81	1,85	-1,96	16,00
7,9	142,9	135,0	7,3E-07	1,2E-05	1,2E-05	0,44	0,42	-0,02	2,93
7,7	171,4	163,7	1,4E-06	2,3E-05	2,2E-05	0,86	0,64	-0,22	3,96
7,6	161,9	154,3	1,7E-06	2,6E-05	2,5E-05	1,04	0,77	-0,26	4,19
7,4	200,0	192,6	5,9E-07	8,7E-06	8,1E-06	0,38	0,21	-0,17	2,38
7,4	138,1	130,7	5,3E-06	3,5E-05	2,9E-05	3,39	1,20	-2,19	3,93
1,5	36,0	34,5	1,4E-06	9,6E-06	8,2E-06	0,96	0,27	-0,69	0,95
1,2	40,1	38,9	3,2E-06	1,5E-05	1,1E-05	2,68	0,36	-2,31	1,01
1,2	34,5	33,3	4E-06	1,8E-05	1,4E-05	3,31	0,51	-2,79	1,10
1,2	32,5	31,3	5,8E-06	1,9E-05	1,4E-05	4,76	0,60	-4,16	1,00

Πίνακας 3.4-2 :Μετρήσεις και υπολογισμοί για την περίπτωση 3.4 κρουστικών τάσεων -1,2/50μs αρνητικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=2mm (συνέχεια του πίνακα 3.4-1).

Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [Ω]

Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [Ω]

ΔZ : η διαφορά της σύνθετης αντίστασης του πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [Ω]

W_1 :στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [J]

W_2 :στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [J]

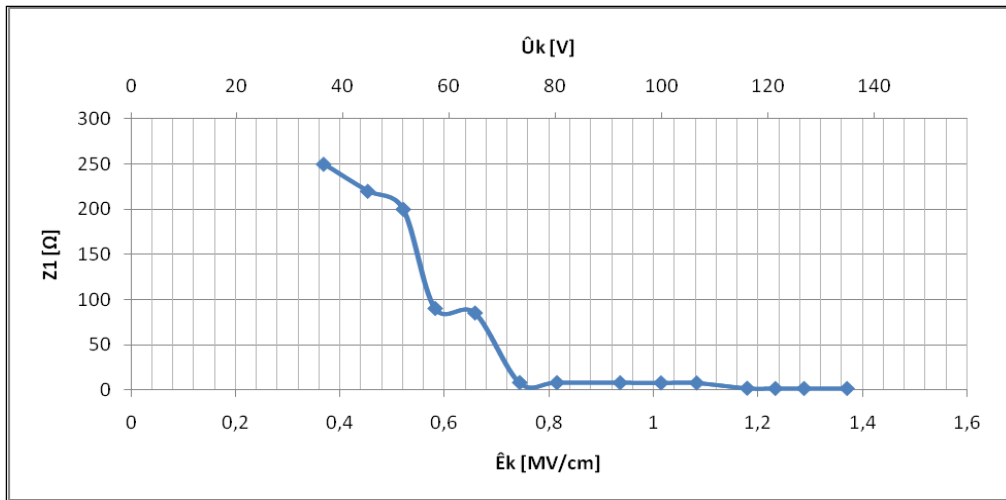
ΔW : η διαφορά της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [J]

P_1 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [W]

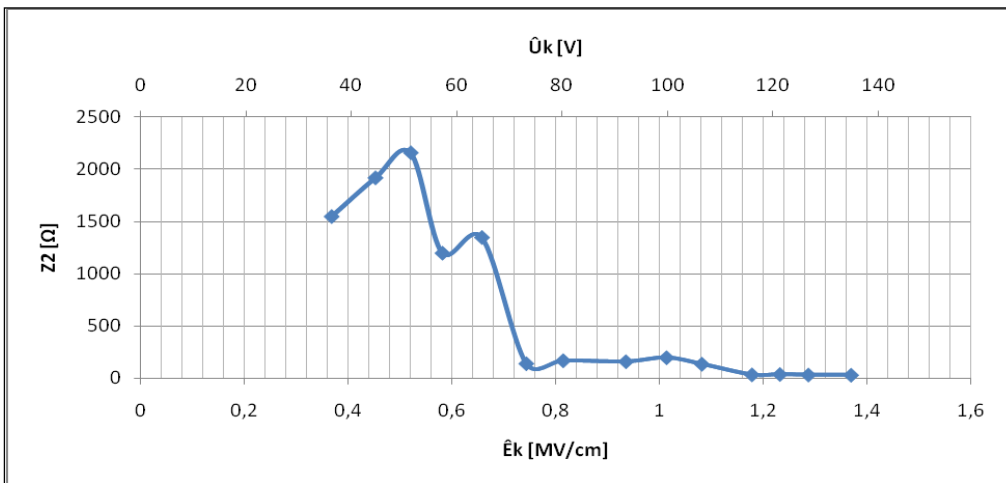
P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [W]

ΔP : η διαφορά της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης ανάμεσα στη λήξη και την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε [W]

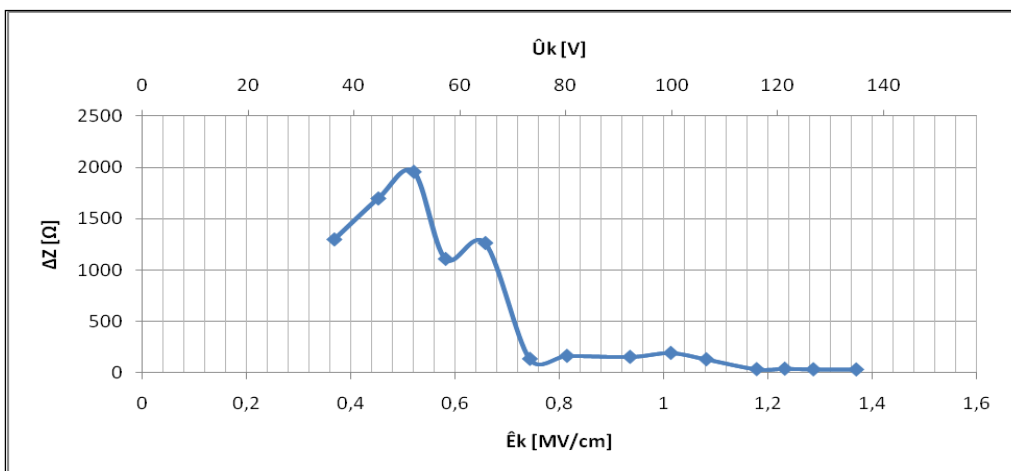
ΔW_e : η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε [eV]



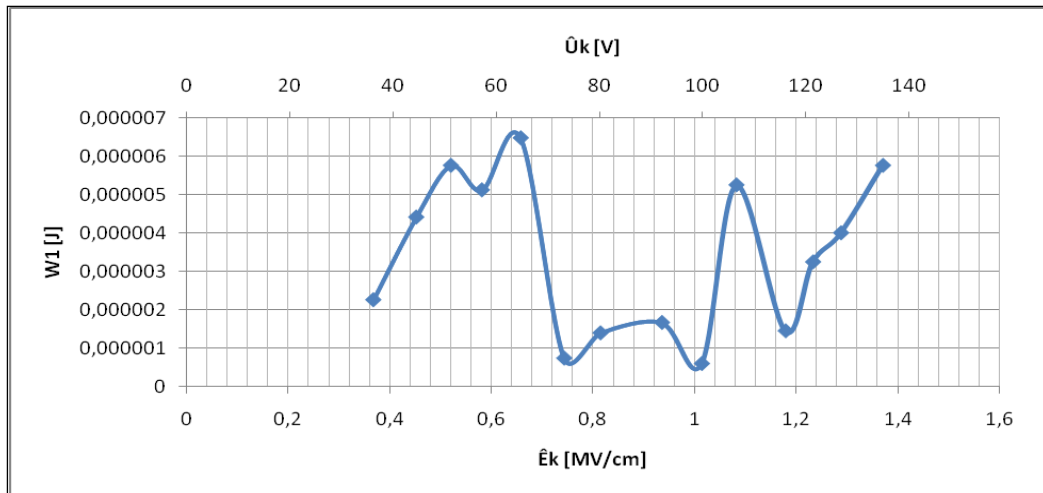
Σχήμα 3.4-1: Η σύνθετη αντίσταση $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



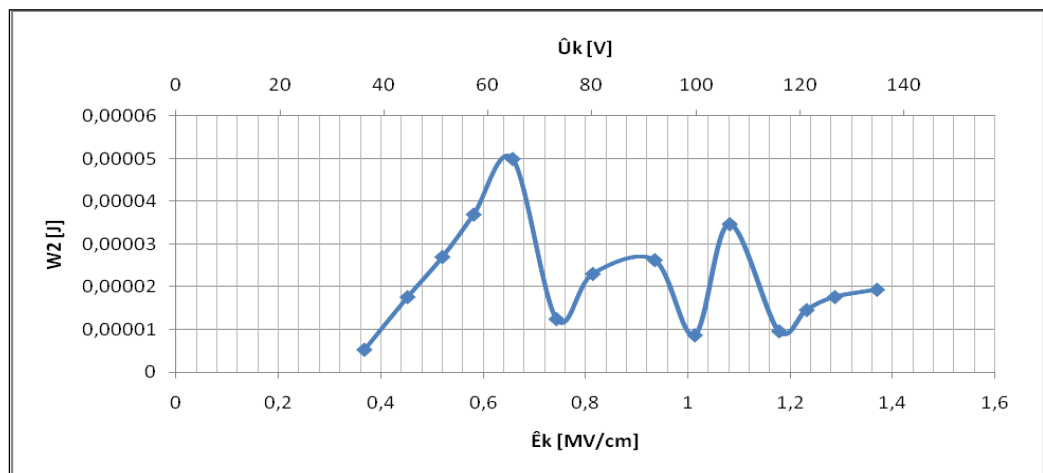
Σχήμα 3.4-2: Η σύνθετη αντίσταση $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



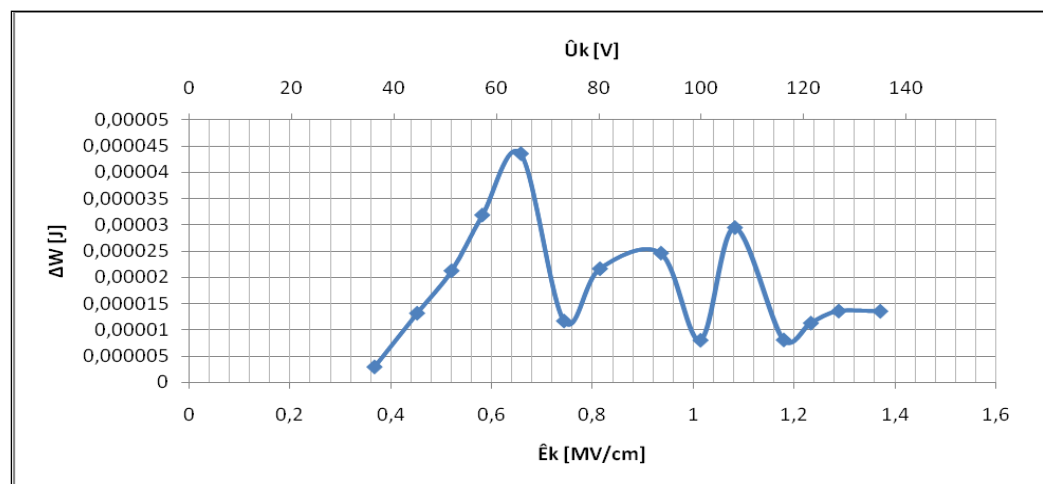
Σχήμα 3.4-3: Η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης ΔZ κατά τις μερικές εκκενώσεις για $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



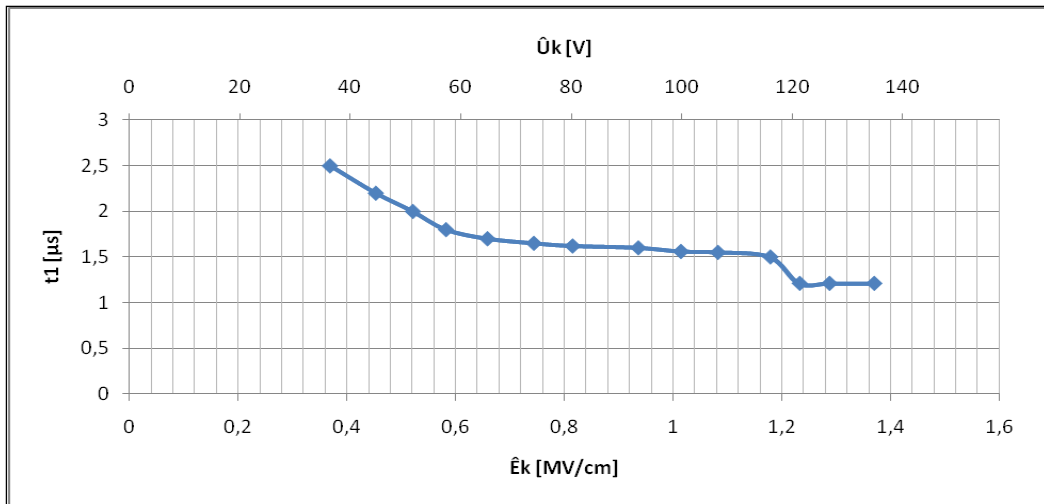
Σχήμα 3.4-4: Η ενέργεια $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



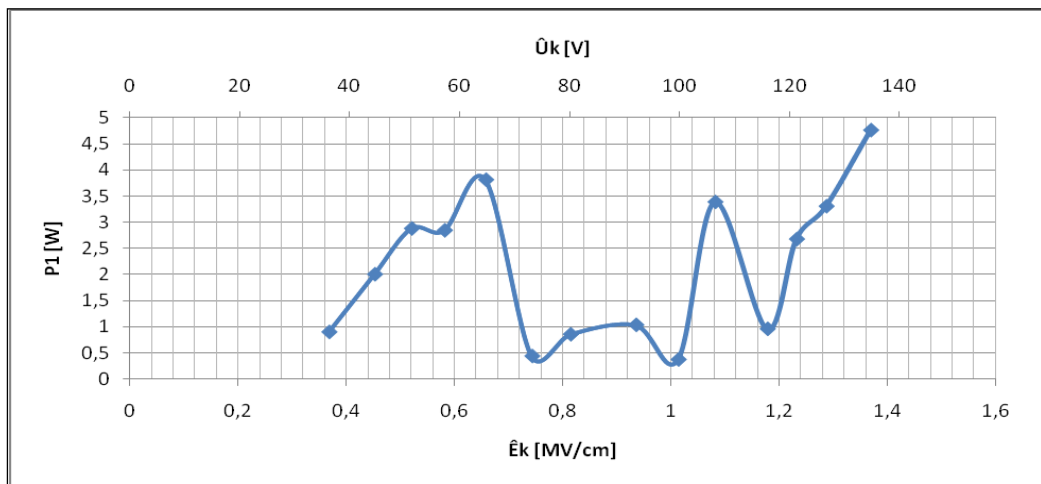
Σχήμα 3.4-5: Η ενέργεια $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



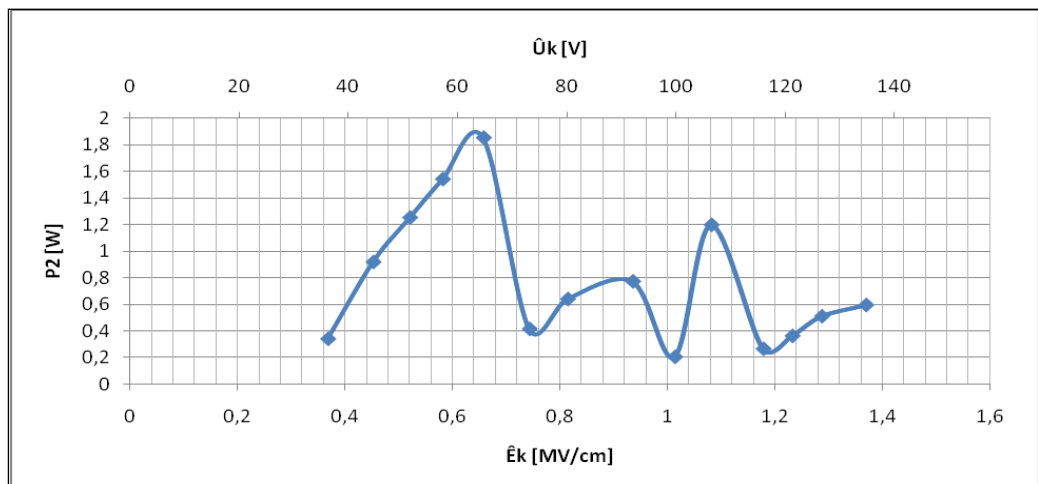
Σχήμα 3.4-6: Η συνολική μεταβολή της ενέργειας ΔW στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων για $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



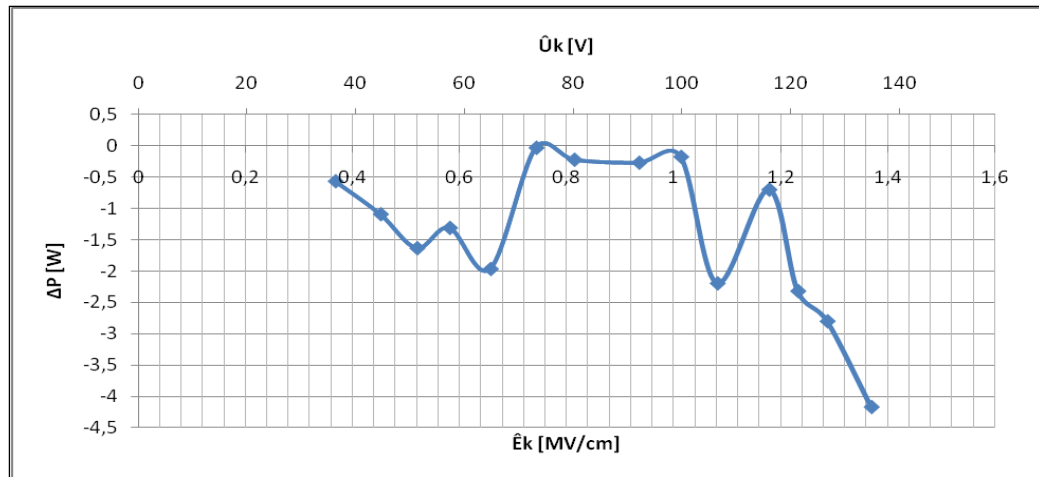
Σχήμα 3.4-7: Ο χρόνος έναρξης $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



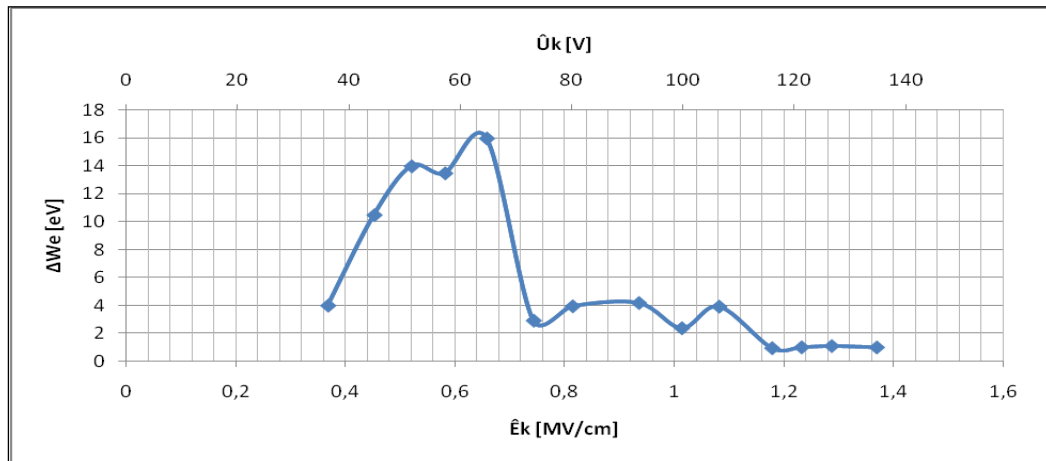
Σχήμα 3.4-8: Η ισχύς $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



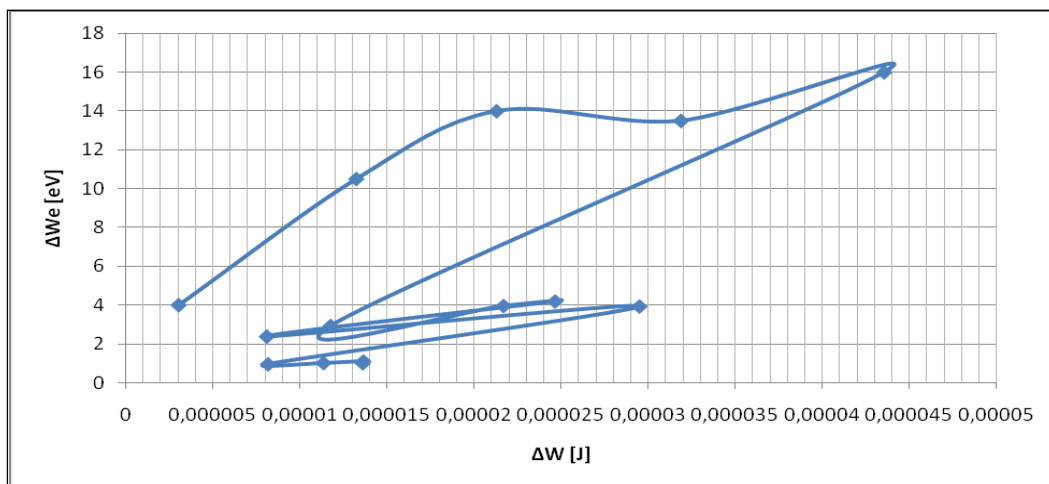
Σχήμα 3.4-9: Η ισχύς $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 3.4-10: Η μεταβολή της ισχύος $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τις μερικές εκκενώσεις για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 3.4-11: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 3.4-12: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\Delta W)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Λόγω της σχέσης 2.1-3 ($u_m = \hat{U}_k \cdot C_{\Delta k} / C_m$) προκύπτει ότι η τάση στον πυκνωτή μέτρησης u_m είναι ανάλογη/ αντίστοιχη της κρουστικής τάσης \hat{U}_k που εφαρμόζεται. Επίσης λόγω της υψηλής τιμής της χωρητικότητας $C_m \gg C_{\Delta k}$, η u_m είναι πολύ μικρότερη της κρουστικής \hat{U}_k ώστε να μπορεί να μετρηθεί από τον παλμογράφο αλλά και να θεωρηθεί ότι σχεδόν όλη η κρουστική τάση \hat{U}_k εφαρμόζεται πάνω στο δοκίμιο (είναι της τάξης των kV) αφού ένα μικρό μόνο μέρος αυτής (η u_m είναι της τάξης των V) εφαρμόζεται πάνω στον πυκνωτή μέτρησης (οι δύο χωρητικότητες βρίσκονται σε σειρά άρα η τάση \hat{U}_k καταμερίζεται). Αυτός είναι και ο λόγος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί η \hat{U}_k (που εφαρμόζεται συνολικά στη διάταξη) ώστε να προσδιοριστεί η ένταση \hat{E}_k μέσα στο δοκίμιο μέσω της σχέσης 2.3-1. Επίσης, για τον ίδιο λόγο, η συμπεριφορά της u_m γενικά υποδεικνύει τη συμπεριφορά της \hat{U}_k . Τέλος, το γεγονός ότι οι δύο χωρητικότητες (δοκίμιο και πυκνωτής μέτρησης) βρίσκονται σε σειρά, υποδηλώνει ότι διαρρέονται και από το ίδιο ρεύμα.

Αφού λοιπόν τα μεγέθη τάσης και έντασης ρεύματος που μετρώνται μέσω του πυκνωτή μέτρησης είναι σε πλήρη αντιστοιχία με εκείνα του δοκιμίου συνεπάγεται ότι και όλα τα παράγωγα μεγέθη που προσδιορίζονται σε αυτή την εργασία μέσω του πυκνωτή μέτρησης (σύνθετη αντίσταση, ενέργεια, ισχύς) είναι ενδεικτικά των αντίστοιχων μεγεθών του δοκιμίου ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν στη συμπεριφορά του μονωτικού υλικού-δοκιμίου.

Τα μεγέθη σχολιάζονται και συγκρίνονται για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν:

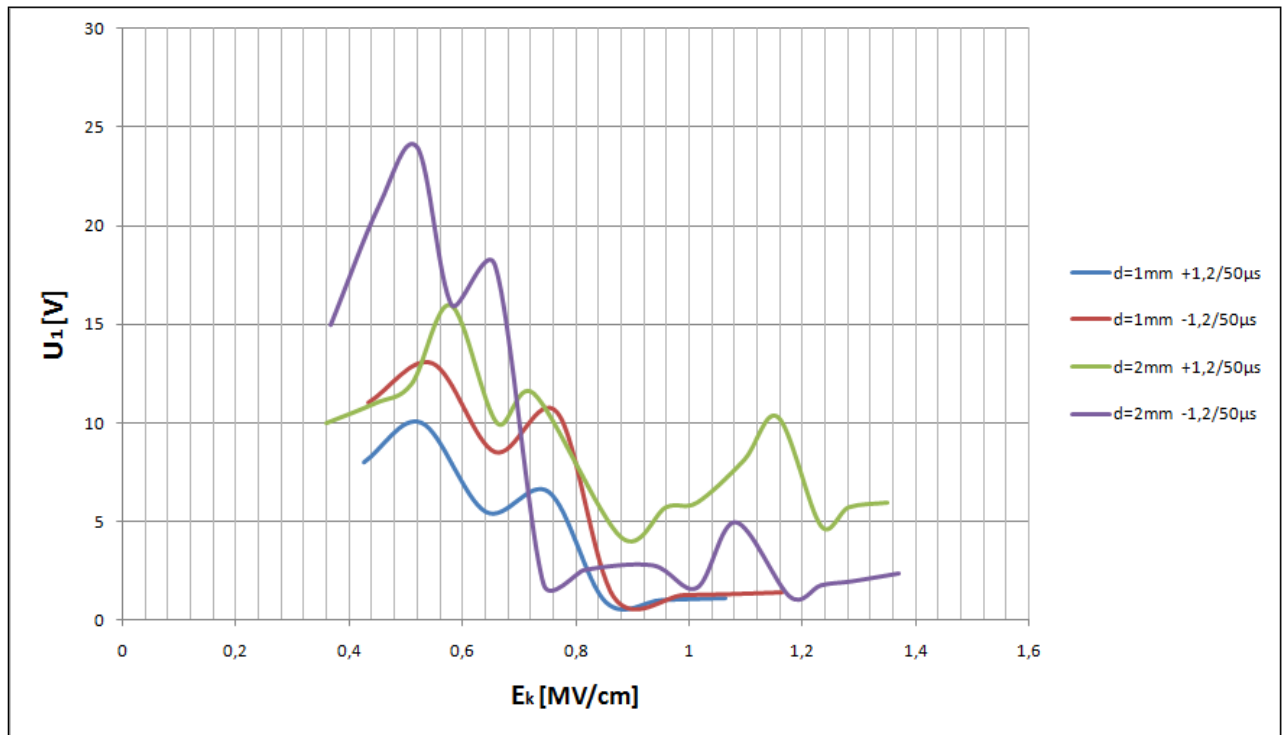
- 3.1. Κρουστική τάση +1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=1mm
- 3.2. Κρουστική τάση -1,2/50 μ s αρνητικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=1mm
- 3.3. Κρουστική τάση +1,2/50 μ s θετικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=2mm
- 3.4. Κρουστική τάση -1,2/50 μ s αρνητικής πολικότητας σε πάχος δοκιμίου d=2mm

Σημειώνεται ότι πρέπει να αποκλειστούν από τους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή, οι απώλειες Joule και η μεταβολή της θερμοκρασία του περιβάλλοντος, καθώς αυτοί δεν υφίστανται στις συνθήκες των μετρήσεων. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος δεν επιδρά, γιατί ήταν σταθερή σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων (20°C). Από την άλλη, οι απώλειες Joule αποκλείονται, γιατί η χρονική διάρκεια της κρουστικής καταπόνησης είναι μικρή και δεν προλαβαίνει να υπάρξει θερμική καταπόνηση. Συνεπώς απομένουν δύο παράγοντες με βάση τους οποίους ερμηνεύονται οι γραφικές παραστάσεις, οι δυνάμεις Coulomb και οι μερικές εκκενώσεις. Η εναλλαγή των δύο παραγόντων της γήρανσης (μερικές εκκενώσεις και οι δυνάμεις Coulomb), με την υπέρσχυση πότε του ενός και πότε του άλλου έχει σαν αποτέλεσμα τις αυξομειώσεις στην τιμή της χωρητικότητας της διάταξης και σε αυτή την περίπτωση, η κατανάλωση της ενέργειας του πεδίου εναλλάσσεται μεταξύ των μερικών εκκενώσεων και στην κατανάλωσή της από τις δυνάμεις Coulomb στη μηχανική καταπόνηση του υλικού. Στη στατιστική παρουσία ανομοιογενειών στη σύσταση του υλικού οφείλονται οι θετικές/αρνητικές αποκλίσεις των τιμών από τις καμπύλες προσέγγισης που ακολουθούν.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθούν και τα εξής: μπορεί μεν το βασικό κριτήριο (ανεξάρτητη μεταβλητή) να θεωρείται στα ακόλουθα η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \hat{E}_k αλλά θα πρέπει να παρατηρηθεί πως για την επίτευξη της ίδιας τιμής έντασης πεδίου, στην περιοχή του μονωτικού, στην περίπτωση δοκιμίου μεγαλύτερου πάχους, απαιτείται εφαρμογή μεγαλύτερης κρουστικής

τάσης \hat{U}_k το οποίο (πέρα από ποιοτικά αναμενόμενο) επιβεβαιώνεται και από τη σχέση 2.3-1. Επίσης, καθώς αυξάνεται η ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πυκνωτές μέτρησης μεγαλύτερης χωρητικότητας C_m . Όμως η χωρητικότητα C_m επιδρά πολύ στον υπολογισμό των μεγεθών που εξετάζονται όπως φαίνεται και από τις σχέσεις 2.3-2 έως 2.3-15. Αυτό επηρεάζει σημαντικά και τα γραφήματα στα σημεία αλλαγής της C_m χωρίς φυσικά εκεί να μπορεί να διαπιστωθεί με βεβαιότητα η εκδήλωση κάποιου φαινομένου. Όταν ωστόσο η C_m είναι σταθερή και παρατηρηθεί κάποια απότομη αλλαγή της κανονικής συμπεριφοράς του μεγέθους που εξετάζεται, τότε πρέπει να αναζητηθούν τα αίτια στην εκδήλωση κάποιου εσωτερικού φαινομένου στο μονωτικό υλικό που σχετίζεται με την καταπόνησή του.

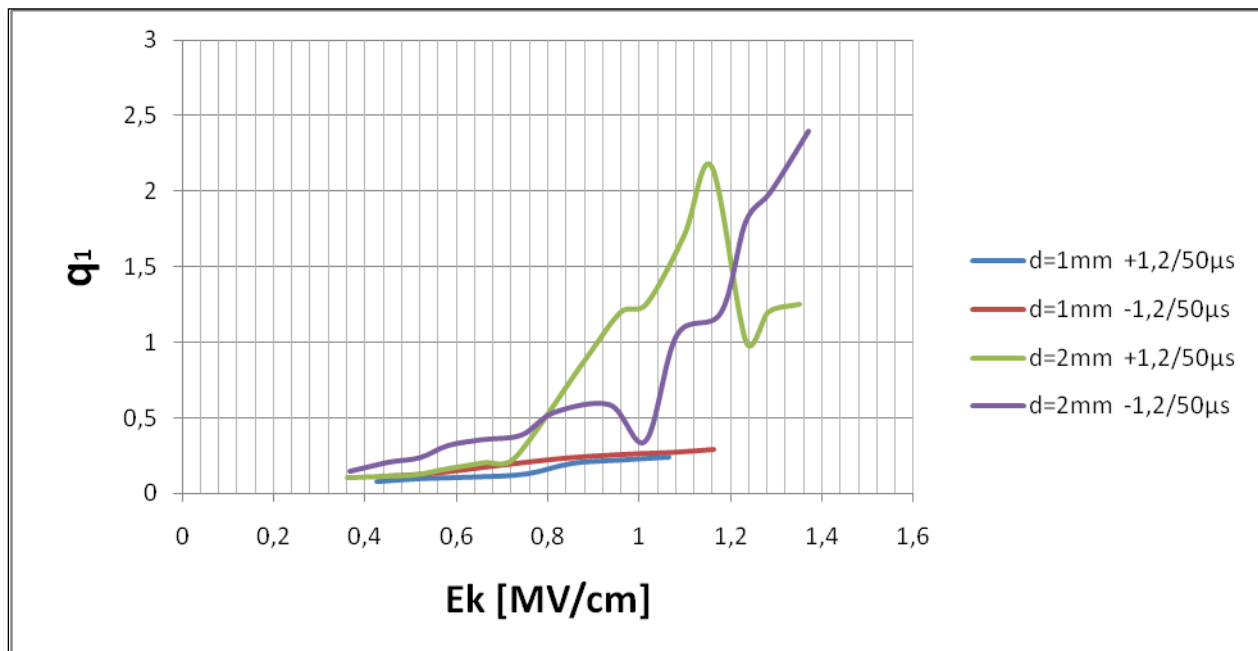
Πριν την ανάλυση των μεγεθών που ενδιαφέρουν την παρούσα εργασία (σύνθετη αντίσταση, ενέργεια-ισχύς στον πυκνωτή μέτρησης, ενέργεια ηλεκτρονίων) θα γίνει αναφορά στη συμπεριφορά δύο μεγεθών που παίζουν σημαντικό ρόλο και στις μετρήσεις αλλά και στην ποιοτική συμπεριφορά του μονωτικού υλικού: στη μετρούμενη τάση στον πυκνωτή μέτρησης (που επιδρά σημαντικά στον υπολογισμό των μεγεθών) και στο φορτίο του (που σχετίζεται με την εμφάνιση δυναμικών Coulomb που καταπονούν το υλικό).



Σχήμα 4-1: Η τάση στον πυκνωτή μέτρησης τη στιγμή έναρξης των μερικών εκκενώσεων για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν

Πέρα από το γεγονός ότι στα δοκίμια μεγαλύτερου πάχους, οι μερικές εκκενώσεις ξεκινούν με υψηλότερες τιμές τάσης του πυκνωτή μέτρησης (και συνεπώς με την εφαρμογή ισχυρότερων κρουστικών τάσεων) διαπιστώνεται ότι στις περιοχές της έντασης του πεδίου όπου χρησιμοποιείται η ίδια χωρητικότητα C_m , η τάση έναρξης των εκκενώσεων αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου ενώ στην αλλαγή (αύξηση) της χωρητικότητας C_m παρατηρείται βύθιση της τάσης. Αυτό συμβαίνει διότι μπορεί μεν να εφαρμόζεται μεγαλύτερη κρουστική τάση αλλά η σημαντική αύξηση της C_m (όπως από 20nF σε 210nF ή από 210nF σε 1000nF) μειώνει σημαντικά τη σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή μέτρησης και έτσι αυτός «αναλαμβάνει» πολύ μικρότερο ποσοστό της κρουστικής τάσης \hat{U}_k λόγω καταμερισμού. Παρόμοια συμπεριφορά ως προς την ένταση \hat{E}_k και χωρητικότητα C_m παρουσιάζει και η τάση του

πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων αν και οι τιμές της είναι σημαντικά μεγαλύτερες (σε σχέση με την τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων) καθώς τα άλματα δυναμικού (στην εκάστοτε περίπτωση) αυξάνουν την τάση του πυκνωτή μέχρι το πέρας των μερικών εκκενώσεων. Να σημειωθεί πως η τιμή της τάσης για τη διάσπαση εξαρτάται από την πολικότητα της ακίδας. Ισχύει ο κανόνας ότι η τάση διάσπασης έχει μεγαλύτερη τιμή κατά τη θετική πολικότητα της ακίδας, ως προς την αρνητική πολικότητά της. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας συγκεντρώνονται μπροστά της ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς αντίθετης πολικότητας. Επειδή όμως οι θετικοί φορείς είναι περισσότερο δυσκίνητοι από τους αρνητικούς και επομένως εξουδετερώνονται δυσκολότερα, είναι φανερό ότι στην περίπτωση της αρνητικής ακίδας απαιτείται μεγαλύτερη τάση για τη διάσπαση. Η συγκέντρωση των δυσκίνητων θετικών ιόντων προ της αρνητικής ακίδας φαίνεται ότι είναι ο λόγος της μικρότερης τιμής του αρχικού πεδίου, ως προς εκείνη κατά τη θετική πολικότητα.



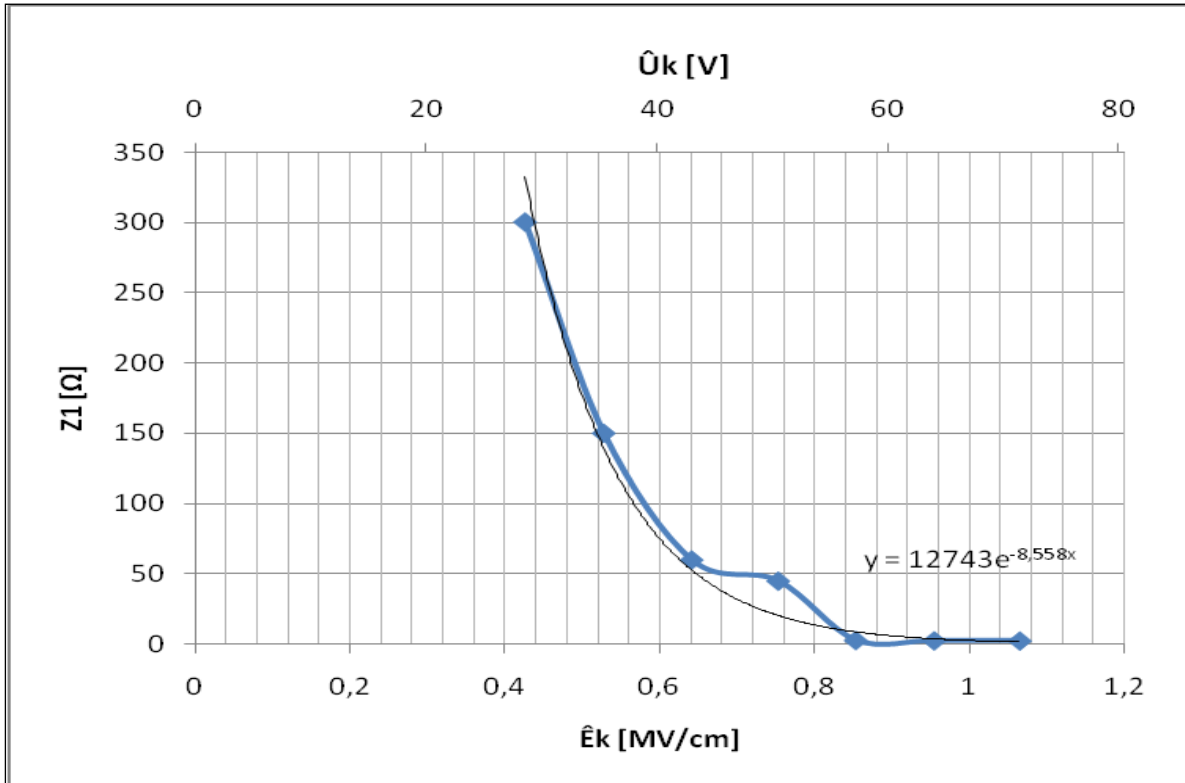
Σχήμα 4-2: Το φορτίο στον πυκνωτή μέτρησης τη στιγμή έναρξης των μερικών εκκενώσεων για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν

Όσον αφορά στο φορτίο του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων επιβεβαιώνεται η εκθετική συμπεριφορά κατά τη σχέση 1.2-3 και φυσικά η φόρτιση για τα δοκίμια μεγαλύτερου πάχους κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων είναι μεγαλύτερη. Ωστόσο, θα πρέπει να παρατηρηθεί μια βύθιση του παραγόμενου φορτίου που παρατηρείται σε υψηλή τιμή έντασης για την περίπτωση ($d=2\text{mm}$, $+1,2/50\mu\text{s}$). Η αιτία γι' αυτό είναι κατανάλωση ενέργειας από τη μηχανική καταπόνηση του μονωτικού λόγω των αναπτυσσόμενων δυνάμεων Coulomb ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και τους φορείς φορτίου που αναπτύσσονται στο υλικό καθώς και μεταξύ των φορέων αυτών (εσωτερικές μηχανικές τάσεις). Το φαινόμενο αυτό θα αναφερθεί εκτενέστερα και παρακάτω καθώς επηρεάζει σημαντικά τη μορφή των καμπυλών. Παρόμοια (εκθετική) συμπεριφορά παρουσιάζει και το φορτίο στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων με τιμές όμως σημαντικά μεγαλύτερες λόγω της περαιτέρω φόρτισης του πυκνωτή λόγω των αλμάτων δυναμικού.

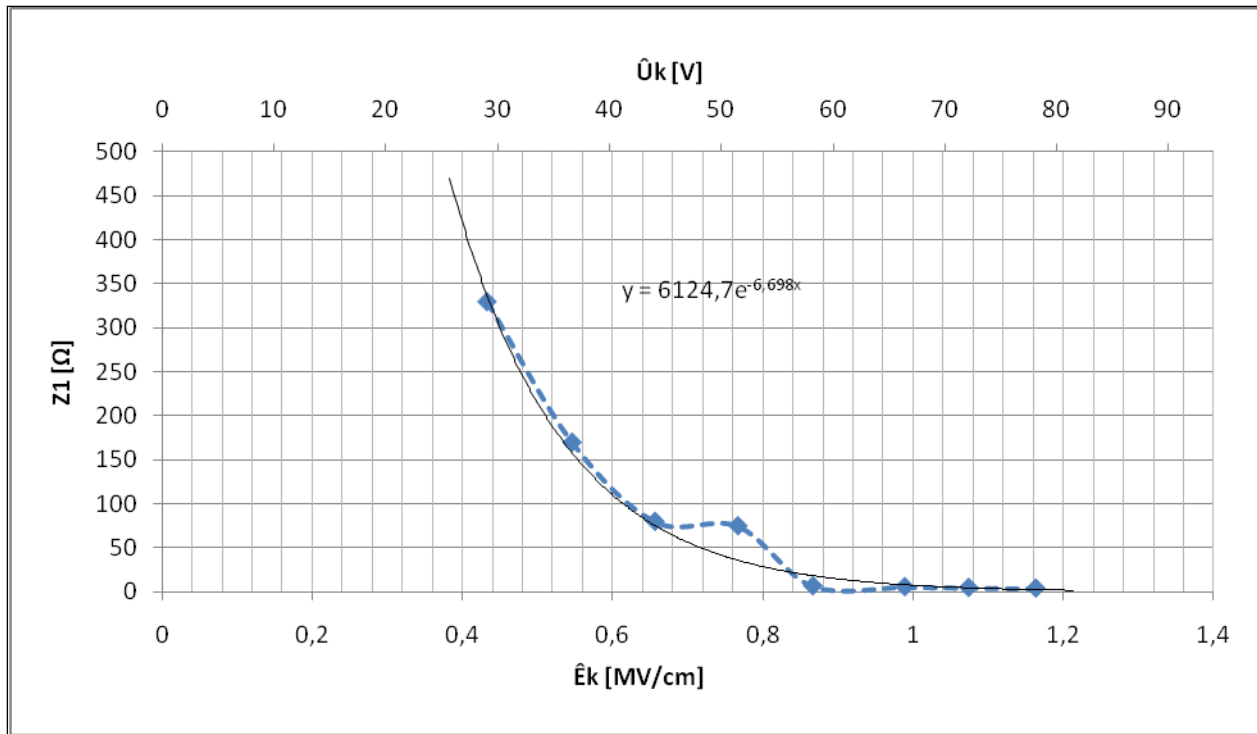
4.1 Σύνθετη αντίσταση Z

4.1.1. Σύνθετη αντίσταση Z_1 κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

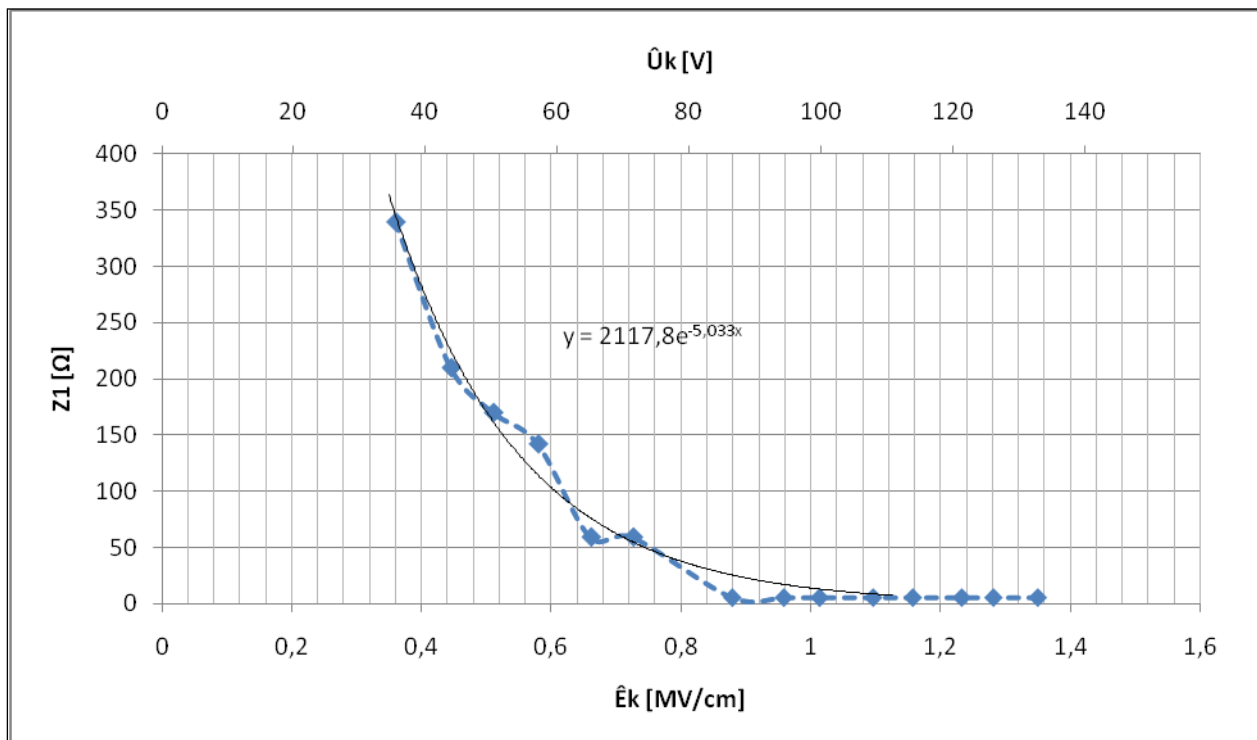
Η σύνθετη αντίσταση Z_1 κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε όλες τις περιπτώσεις ακολουθεί φθίνουσα πορεία με την αύξηση της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης και συνεπώς με την αύξηση της εφαρμοζόμενης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου όπως διαπιστώνεται από τις μετρήσεις στους πίνακες 3.1-2, 3.2-2, 3.3-2, 3.4-2 και δίνεται στα επόμενα σχήματα.



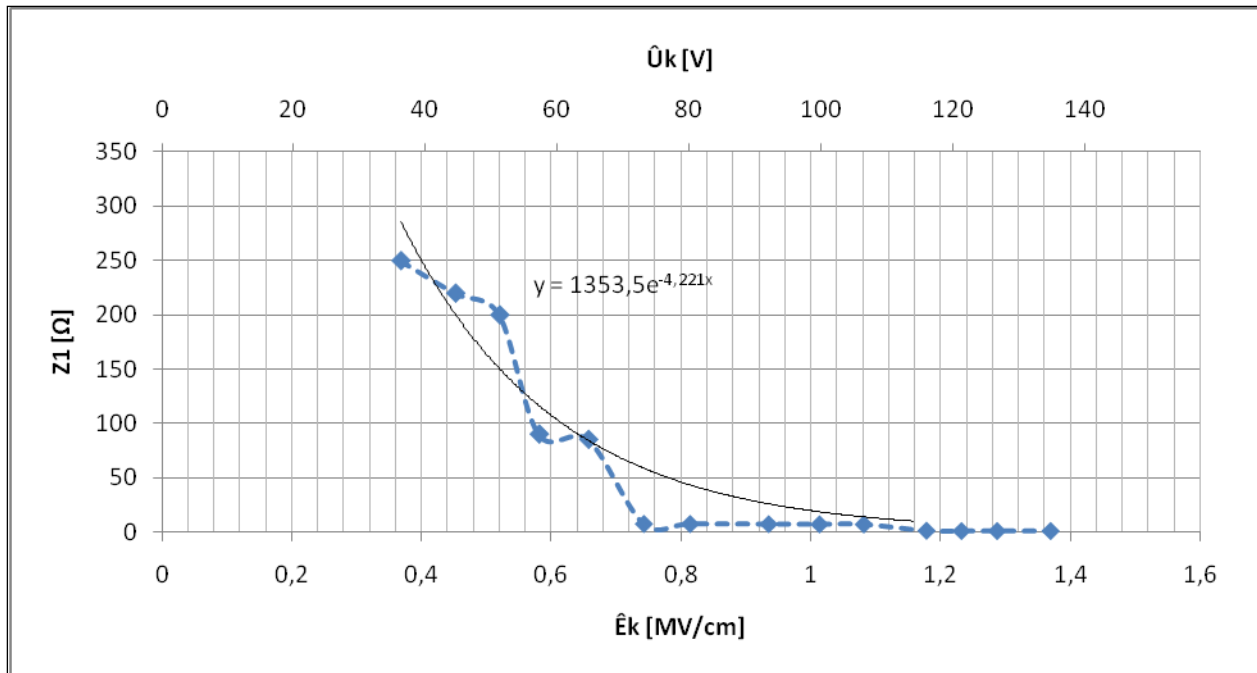
Σχήμα 4.1.1-1: Η σύνθετη αντίσταση $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για πάχος δοκιμίου $d=1\text{mm}$ και κρουστική τάση $+1,2/50\mu\text{s}$ θετικής πολικότητας



Σχήμα 4.1.1-2: Η σύνθετη αντίσταση $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για πάχος δοκιμίου $d=1\text{mm}$ και κρουστική τάση $-1,2/50\mu\text{s}$ αρνητικής πολικότητας



Σχήμα 4.1.1-3: Η σύνθετη αντίσταση $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και κρουστική τάση $+1,2/50\mu\text{s}$ θετικής πολικότητας



Σχήμα 4.1.1-4: Η σύνθετη αντίσταση $Z_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και κρουστική τάση $-1,2/50\mu\text{s}$ αρνητικής πολικότητας

Σαν γενικότερη παρατήρηση θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γενικότερα φθίνουσα (ως προς την \hat{E}_k) συμπεριφορά της σύνθετης αντίστασης ήταν αναμενόμενη τόσο από μαθηματικής όσο και από ποιοτικής σκοπιάς.

Από τη μαθηματική σκοπιά, η σύνθετη αντίσταση δίνεται από τη σχέση 2.3-6 ($Z_1 = t_1 / C_m$). Σε αυτή τη σχέση, ο παρονομαστής (η χωρητικότητα C_m) αυξήθηκε μετά από κάποιες μετρήσεις λόγω της μεγαλύτερης τιμής της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης. Επιπλέον, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων (t_1) στον αριθμητή φθίνει (και μάλιστα αυτή η μείωση μπορεί να προσεγγιστεί εκθετικά (η συμπεριφορά αυτού του μεγέθους θα αναλυθεί εκτενώς παρακάτω) με την αύξηση της ηλεκτρικής έντασης δηλαδή οι μερικές εκκενώσεις ξεκινούν ταχύτερα καθώς εφαρμόζονται υψηλότερες τιμές έντασης πεδίου. Από τα παραπάνω συνεπάγεται, λοιπόν, ότι από μαθηματικής σκοπιάς αναμένεται φθίνουσα συμπεριφορά της $Z_1 = f(\hat{E}_k)$.

Η ποιοτική ερμηνεία μπορεί να βασιστεί στα εξής: καθώς εφαρμόζονται υψηλότερες τιμές κρουστικής τάσης και έντασης ηλεκτρικού πεδίου και δεδομένου ότι ο χρόνος μετώπου παραμένει σταθερός αφού χρησιμοποιούνται κρουστικές τάσεις ίδιας μορφής (1,2/50), προκύπτει ότι σταδιακά η κλίση του μετώπου αυξάνεται ενώ από τη μείωση του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων (t_1) ο διαθέσιμος χρόνος κίνησης των ελεύθερων φορέων γίνεται μικρότερος για να συμβούν συγκρούσεις (αυτή είναι η φυσική σημασία της αντίστασης). Επιπλέον, κατά την εκδήλωση του φαινομένου της γήρανσης, που οφείλεται κυρίως στις μερικές εκκενώσεις (εντονότερες κατά την εφαρμογή ισχυρότερων ηλεκτρικών πεδίων), αυξάνεται απότομα η χωρητικότητα στο υλικό, λόγω της διάσπασης των θέσεων διαταραχής. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η μείωση της σύνθετης αντίστασης του υλικού.

Θα πρέπει επίσης να παρατηρηθεί και το εξής: ενώ η σύνθετη αντίσταση του δοκιμίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε μικρές τιμές έντασης πεδίου ($\approx 0,4\text{MV/cm}$) ξεκινά από υψηλές τιμές (ενδείξεις για τη σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή μέτρησης $> 300\Omega$) μετά από κάποια τιμή της έντασης του πεδίου ($\approx 0,8\text{MV/cm}$), η τιμή της ελαχιστοποιείται και τελικά

σταθεροποιείται σε μια σχετικά μικρή τιμή (αντίστοιχη ένδειξη για τη σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή μέτρησης $\approx 1-5\Omega$). Δηλαδή διαπιστώνεται ότι πέρα από κάποια τιμή της ηλεκτρικής έντασης, το δοκίμιο παρουσιάζει σταθερή (και αρκετά μικρότερη της αρχικής) αντίσταση έναρξης μερικών εκκενώσεων και αυτό συμβαίνει με παρόμοιο τρόπο και στις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Να σημειωθεί βέβαια πως σημαντικό ρόλο (από την υπολογιστική σκοπιά) παίζει και το γεγονός ότι οι μετρήσεις επηρεάζονται και από την τιμή της χωρητικότητας C_m . Αυτή η τιμή επιλέγεται να είναι σημαντικά μεγαλύτερη (210nF ή 1000nF σε σχέση με 10nF ή 20nF που χρησιμοποιούνται για μικρές \hat{E}_k) στις υψηλές τιμές πεδίου με αποτέλεσμα να αυξάνεται πολύ ο παρονομαστής της σχέσης 2.3-6 που δίνει τη Z_1 .

Αυτή η φθίνουσα συμπεριφορά που φαίνεται στα παραπάνω διαπιστώνεται και από τα γραφήματα 4.1.1-1, 4.1.1-2, 4.1.1-3, 4.1.1-4 όπου η σχέση $Z_1 = f(\hat{E}_k)$ προσεγγίζεται ικανοποιητικά με φθίνουσες εκθετικές συναρτήσεις:

$$(3.1): Z_1 = 12743 \cdot e^{-8,558 \cdot E_k} \quad (4.1.1-1)$$

$$(3.2): Z_1 = 6125 \cdot e^{-6,698 \cdot E_k} \quad (4.1.1-2)$$

$$(3.3): Z_1 = 2118 \cdot e^{-5,033 \cdot E_k} \quad (4.1.1-3)$$

$$(3.4): Z_1 = 1354 \cdot e^{-4,221 \cdot E_k} \quad (4.1.1-4)$$

Συγκεντρωτικά οι παράμετροι A , α των εκθετικών σχέσεων της μορφής $y = A \cdot e^{-\alpha x}$ παρουσιάζονται ακολούθως:

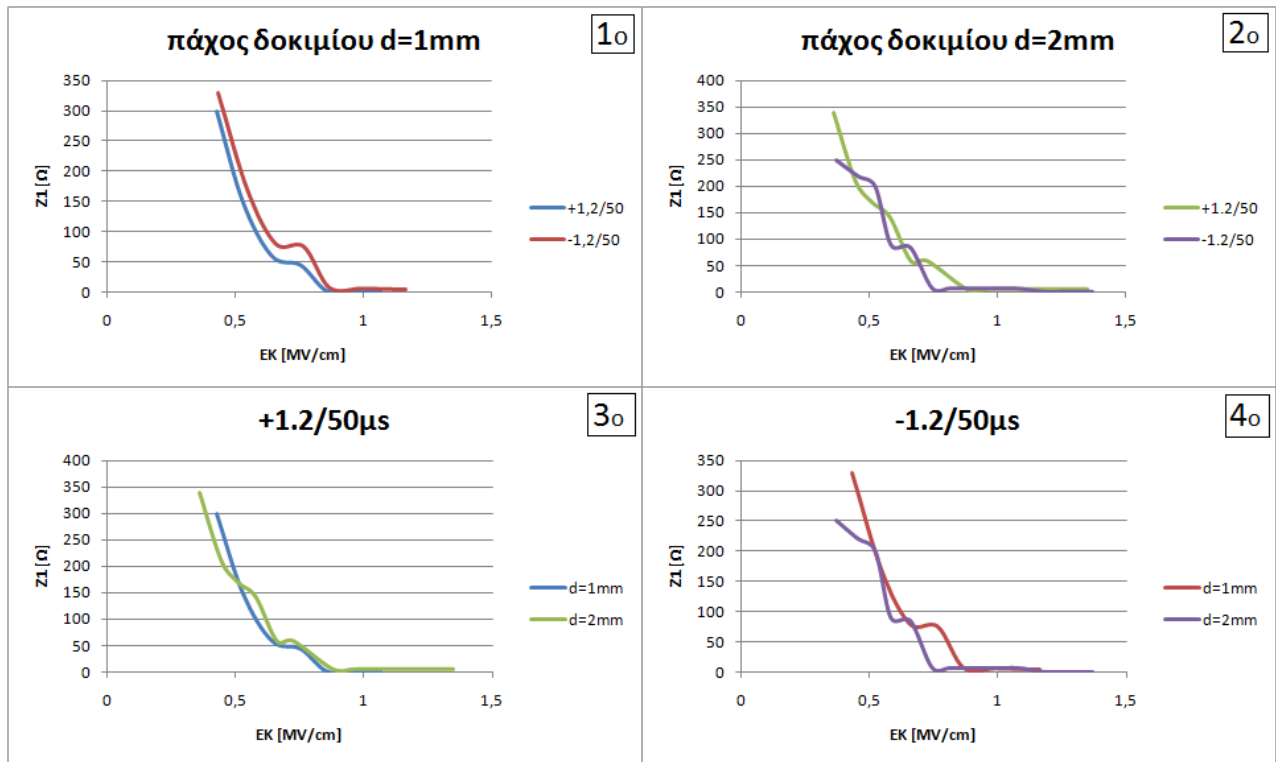
	A	α
d=1mm +1,2/50 μ s	12743	8,558
d=1mm -1,2/50 μ s	6125	6,698
d=2mm +1,2/50 μ s	2118	5,033
d=2mm -1,2/50 μ s	1354	4,221

Πίνακας 4.1.1-1: Οι συντελεστές της εκθετικής προσεγγιστικής σχέσης της σύνθετης αντίστασης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν

A : ο αρχικός παράγοντας της εκθετικής σχέσης $Z_1 = A \cdot e^{-\alpha \cdot E_k}$
 α : ο εκθετικός συντελεστής της σχέσης $Z_1 = A \cdot e^{-\alpha \cdot E_k}$

Από τις τιμές των εκθετικών συντελεστών α , διαπιστώνεται ότι όταν χρησιμοποιείται πιο παχύ δοκίμιο ή/και όταν εφαρμόζεται κρουστική τάση αρνητικής πολικότητας (σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση θετικής πολικότητας) η σύνθετη αντίσταση του δοκιμίου μειώνεται λιγότερο απότομα με την αύξηση της έντασης του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Ακολούθως παρατίθενται τέσσερα συγκριτικά γραφήματα όπου είτε λαμβάνεται σταθερό το πάχος δοκιμίου και εξετάζεται την διαφορά στη Z_1 με την αλλαγή της πολικότητας είτε θεωρείται δεδομένη η πολικότητα των εφαρμοζόμενων κρουστικών τάσεων και εξετάζεται η διαφορά στη Z_1 όταν χρησιμοποιείται δοκίμιο διαφορετικού πάχους.



Σχήμα 4.1.1-5 : Η σύνθετη αντίσταση $Z_1 = f(\hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων σε συγκριτική παρουσίαση για τις τέσσερις περιπτώσεις

Από τα παραπάνω γραφήματα σαφή συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από το 1^ο και το 4^ο γράφημα.

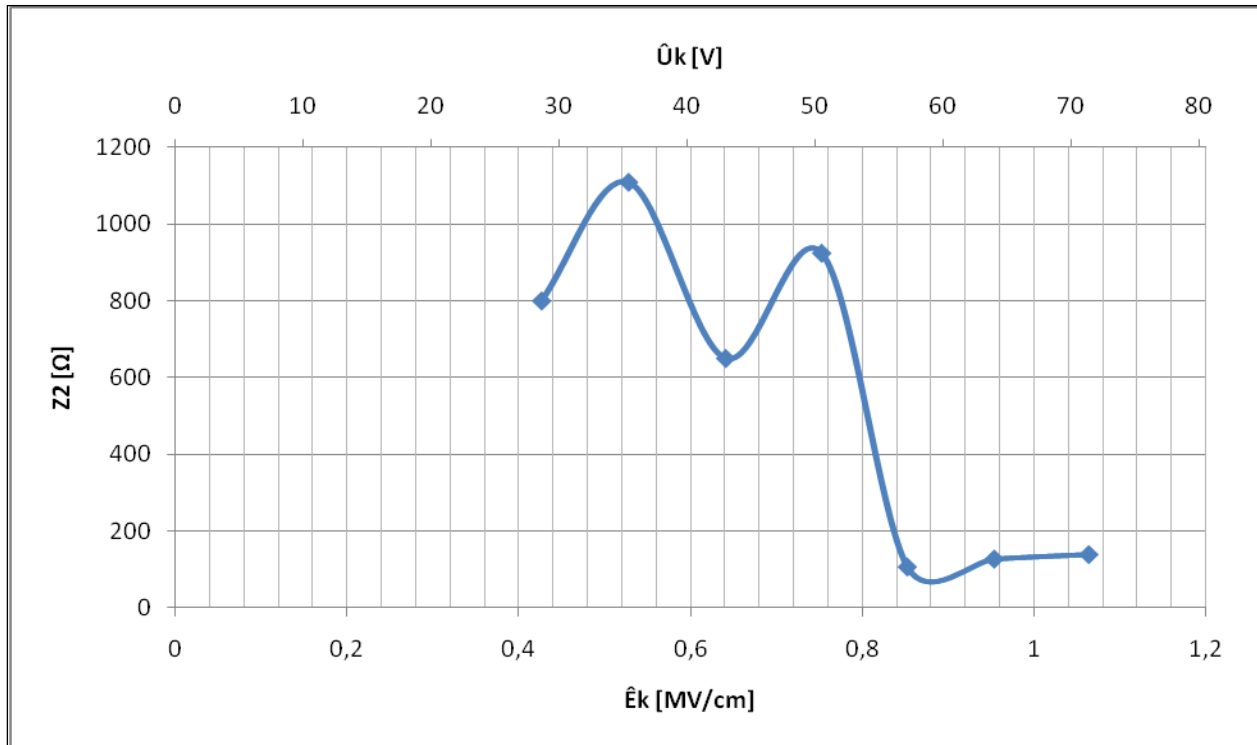
Στο 1^ο διαπιστώνεται ότι δεδομένου του πάχους $d=1\text{mm}$, το δοκίμιο βακελίτη παρουσιάζει μεγαλύτερη σύνθετη αντίσταση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων από κρουστικές τάσεις αρνητικής πολικότητας (σε σχέση με τις κρουστικές τάσεις θετικής πολικότητας) σε όλες τις τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό αιτιολογείται ως εξής: Ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας συγκεντρώνονται μπροστά της ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς αντίθετης πολικότητας. Κατά τη μείωση της αγωγιμότητας του δοκιμίου στο φαινόμενο της αρνητικής πολικότητας τα θετικά ιόντα που συγκεντρώνονται προ της ακίδας φαινομενικά αυξάνουν την ακτίνα καμπυλότητάς της. Επίσης, οι θετικοί φορείς είναι περισσότερο δυσκίνητοι από τους αρνητικούς και επομένως εξουδετερώνονται δυσκολότερα. Γίνεται φανερό, λοιπόν, ότι στην περίπτωση της αρνητικής ακίδας απαιτείται μεγαλύτερη τάση για τη διάσπαση και συνεπώς το μονωτικό παρουσιάζει αυξημένη αντίσταση.

Στο 4^ο διαπιστώνεται ότι δεδομένης της αρνητικής πολικότητας, το δοκίμιο βακελίτη παρουσιάζει μεγαλύτερη σύνθετη αντίσταση όταν το πάχος δοκιμίου είναι μικρότερο $d=1\text{mm}$ (ενώ το αντίστροφο διαφαίνεται -όχι όμως με τόσο προφανή τρόπο- από το 3^ο γράφημα).

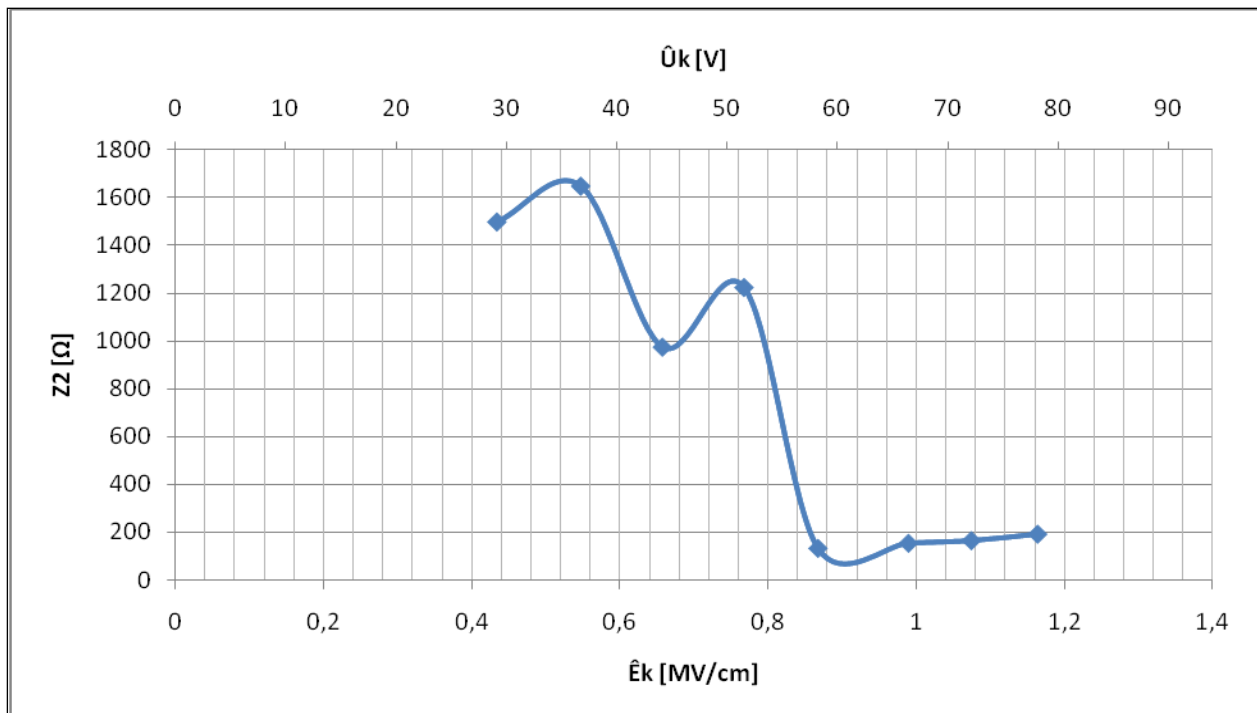
4.1.2. Σύνθετη αντίσταση Z_2 κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων

Η σύνθετη αντίσταση Z_2 κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων δίνεται από τη σχέση 2.3-7 ($Z_2 = t_2 / C_m$). Δεδομένου ότι ο χρόνος λήξης των μερικών εκκενώσεων (t_2) αυξάνεται με την αύξηση της εφαρμοζόμενης ηλεκτρικής έντασης, αν θεωρηθεί σταθερή η τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή μέτρησης τότε αυξάνεται και η σύνθετη αντίσταση Z_2 . Αν όμως αυξηθεί η τιμή της χωρητικότητας (όπως γίνεται στις υψηλότερες κρουστικές τάσεις) τότε η C_m επηρεάζει πολύ το

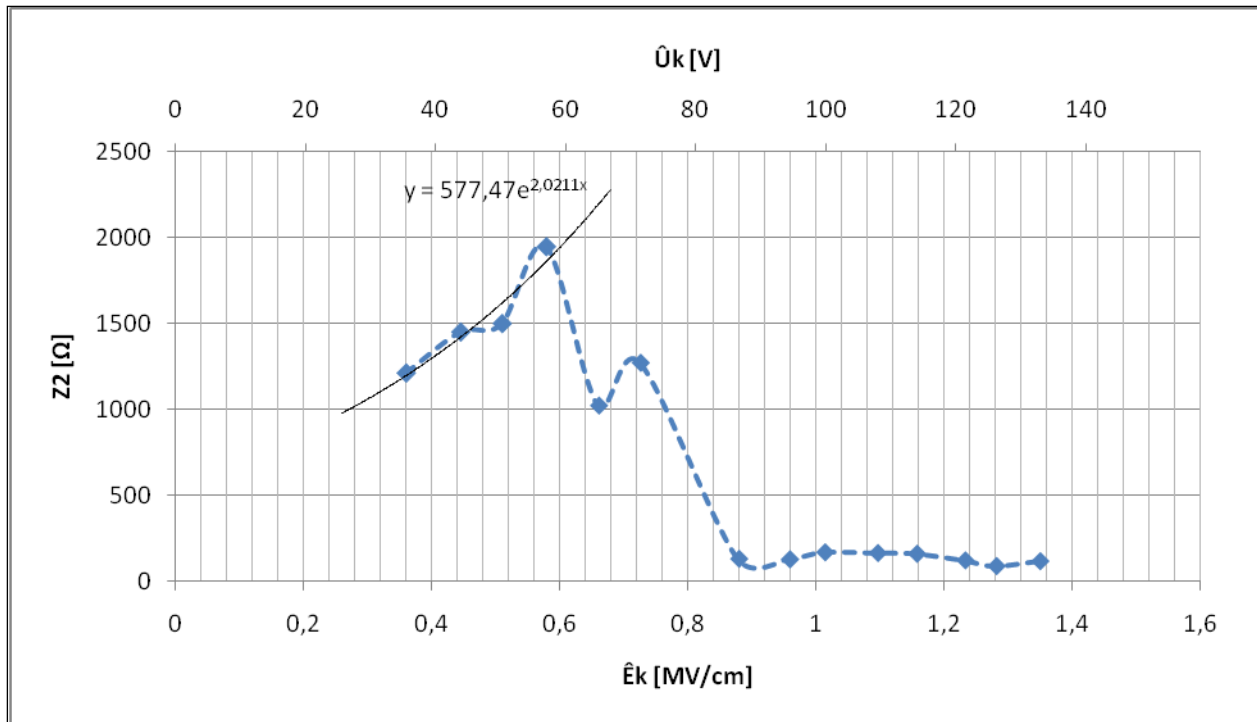
κλάσμα της σχέσης 2.3-7 με αποτέλεσμα τη μείωση της σύνθετης αντίστασης Z_2 . Οι δύο παραπάνω παρατηρήσεις επιβεβαιώνονται από τα γραφήματα 4.1.2-1, 4.1.2-1, 4.1.2-1, 4.1.2-1 όπου μάλιστα σε κάθε αύξηση της χωρητικότητας C_m παρατηρείται απότομη βύθιση.



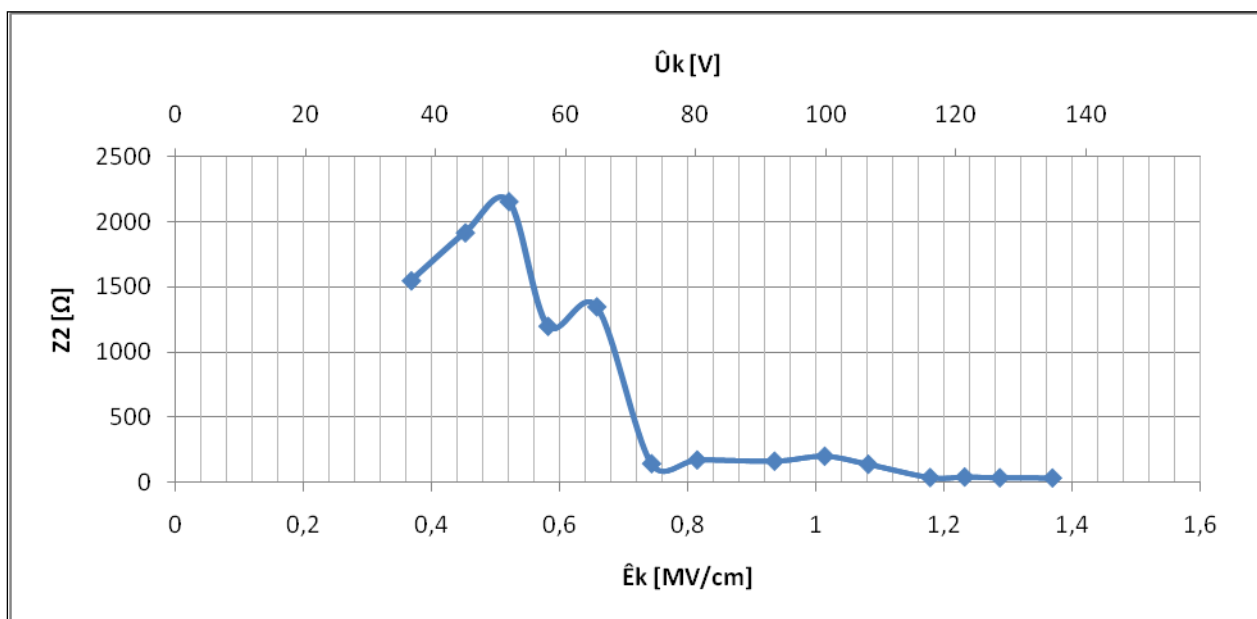
Σχήμα 4.1.2-1: Η σύνθετη αντίσταση $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για πάχος δοκιμίου $d=1\text{mm}$ και κρουστική τάση $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.1.2-2: Η σύνθετη αντίσταση $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για πάχος δοκιμίου $d=1\text{mm}$ και κρουστική τάση $-1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.1.2-3: Η σύνθετη αντίσταση $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και κρουστική τάση $+1,2/50\mu\text{s}$ θετικής πολικότητας

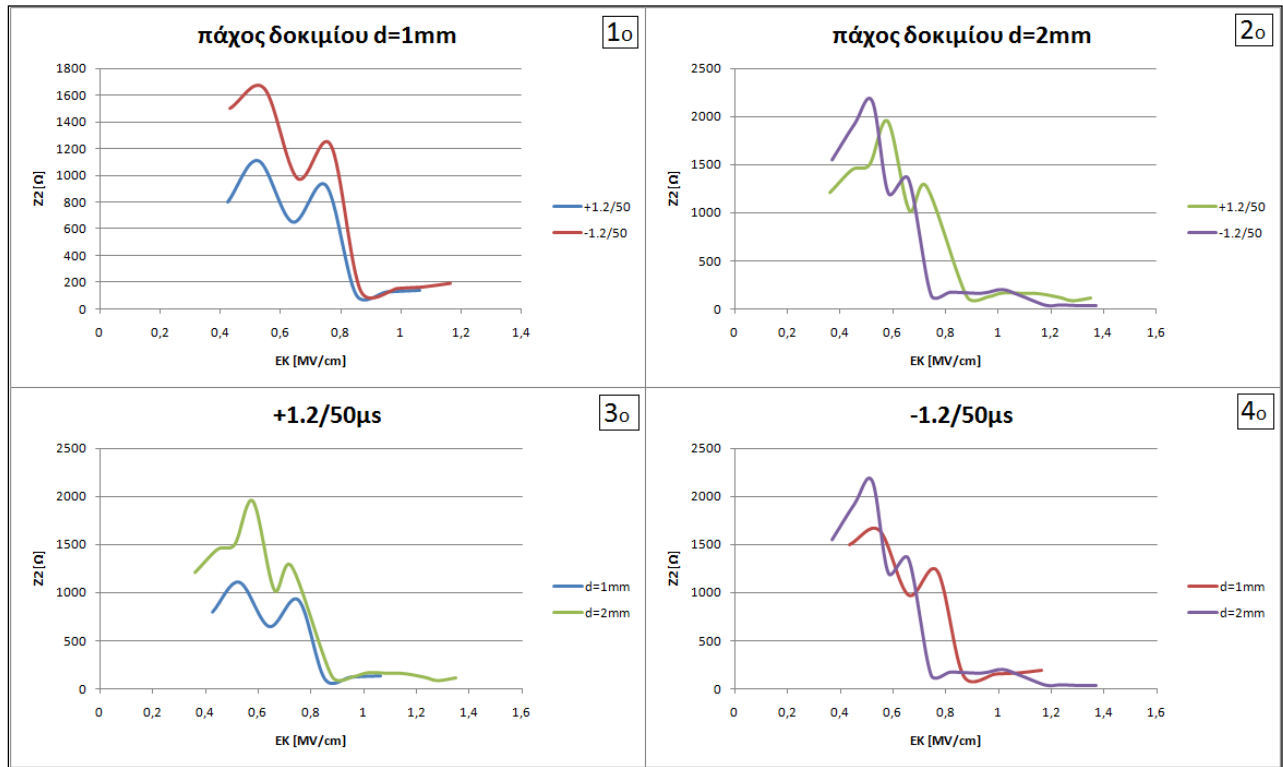


Σχήμα 4.1.2-4: Η σύνθετη αντίσταση $Z_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και κρουστική τάση $-1,2/50\mu\text{s}$ αρνητικής πολικότητας

Ωστόσο, αν εξεταστεί το μέγεθος μόνο ως προς την ένταση του πεδίου, αδιαφορώντας για την επίδραση της τιμής της χωρητικότητας στους υπολογισμούς, διαπιστώνεται μια φθίνουσα συμπεριφορά της σύνθετης αντίστασης κατά το πέρας των εκκενώσεων ως προς την \hat{E}_k . Και εδώ παρατηρείται μια σταθεροποίηση σε μικρή τιμή (από τιμές της τάξης των 1,1-2,2k Ω για $\hat{E}_k \approx 0,4$ -

0,6MV/cm σε τιμές της τάξης των 30-200Ω μετά από κάποια τιμή της έντασης του πεδίου ($\approx 0,8\text{MV/cm}$)).

Ακολουθώς παρατίθενται τέσσερα συγκριτικά γραφήματα όπου είτε θεωρείται σταθερό το πάχος του δοκιμίου και εξετάζεται η διαφορά στη Z_2 με την αλλαγή της πολικότητας είτε θεωρείται δεδομένη η πολικότητα των εφαρμοζόμενων κρουστικών τάσεων και εξετάζεται η διαφορά στη Z_2 όταν χρησιμοποιείται δοκίμιο διαφορετικού πάχους.



Σχήμα 4.1.2-1 Η σύνθετη αντίσταση $Z_2 = f(\vec{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων σε συγκριτική παρουσίαση για τις τέσσερις περιπτώσεις

Από τα παραπάνω γραφήματα, σαφή συμπεράσματα μπορούμε να βγάλουμε από το 1^ο και το 3^ο γράφημα.

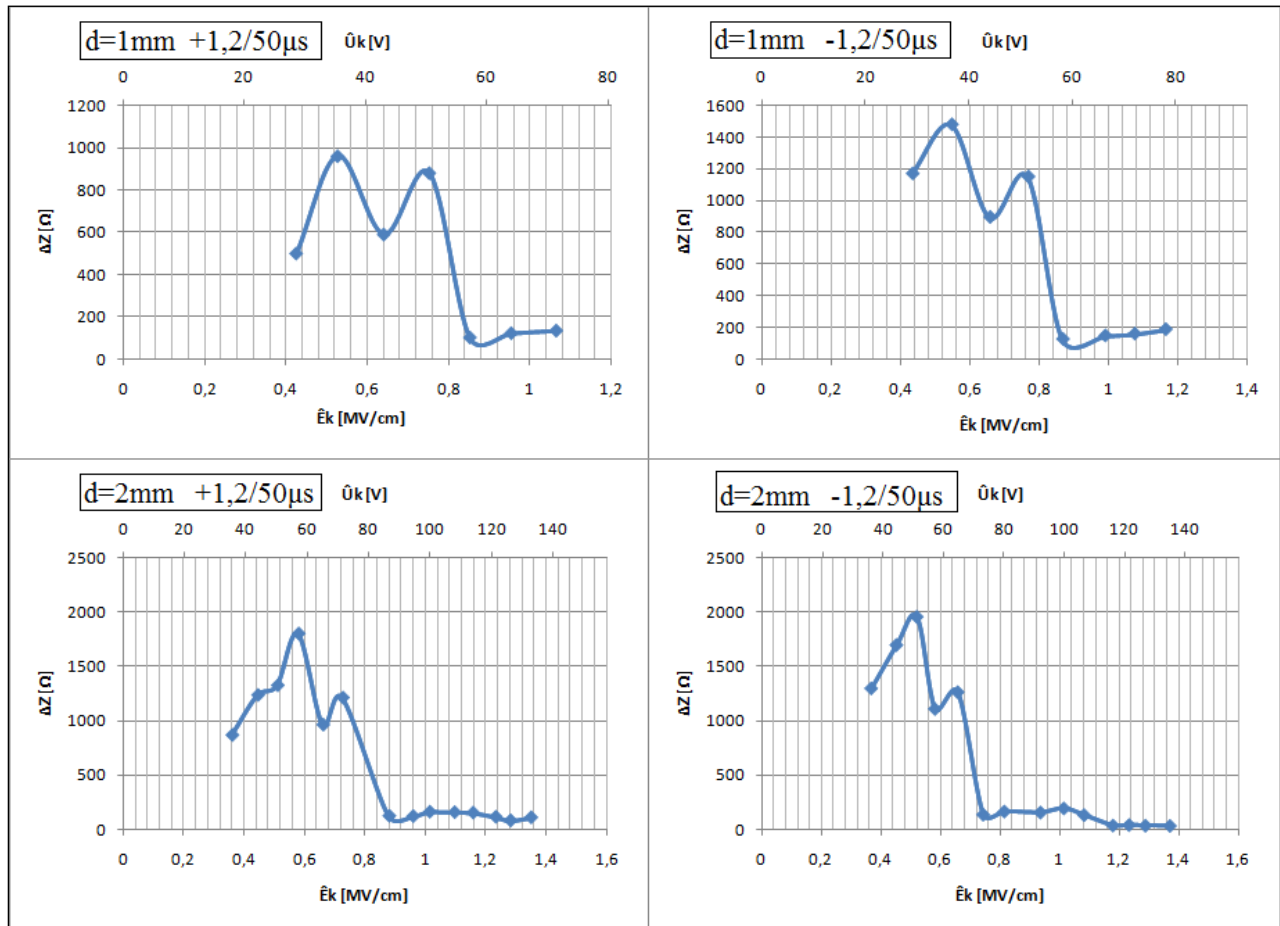
Στο 1^ο διαπιστώνεται ότι δεδομένου του πάχους $d=1\text{mm}$, το δοκίμιο βακελίτη παρουσιάζει μεγαλύτερη σύνθετη αντίσταση κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων σε κρουστικές τάσεις αρνητικής πολικότητας (σε σχέση με τις κρουστικές τάσεις θετικής πολικότητας) σε όλες τις τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Φαίνεται, δηλαδή, η εκδήλωση του φαινομένου της πολικότητας.

Στο 3^ο διαπιστώνεται ότι δεδομένης της θετικής πολικότητας, το δοκίμιο βακελίτη παρουσιάζει μεγαλύτερη σύνθετη αντίσταση όταν το πάχος δοκιμίου είναι μεγαλύτερο $d=2\text{mm}$.

4.1.3. Μεταβολή της σύνθετης αντίστασης ΔZ κατά το φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων

Η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ κατά το φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων παριστάνει την αύξηση της αντίστασης του δοκιμίου μέχρι να ολοκληρωθεί το φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων και επειδή όπως φαίνεται και από τους πίνακες 3.1-2, 3.2-2, 3.3-2, 3.4-2 ισχύει ότι $Z_2 \gg Z_1$, τελικά η $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ ακολουθεί τη συμπεριφορά της Z_2 καθώς

αυξάνεται η ένταση του πεδίου. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι δεδομένου του C_m , αύξηση της \hat{E}_k οδηγεί σε μεγαλύτερη απόκλιση τις τιμές της σύνθετης αντίστασης του δοκιμίου ανάμεσα στην αρχή και το τέλος των μερικών εκκενώσεων ενώ σε υψηλές τιμές της έντασης του πεδίου αυτή η απόκλιση είναι πάρα πολύ μικρότερη (δε μεταβάλλεται τόσο πολύ η σύνθετη αντίσταση του δοκιμίου).



Σχήμα 4.1.3-1: Η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης ΔZ κατά το φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων στις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν

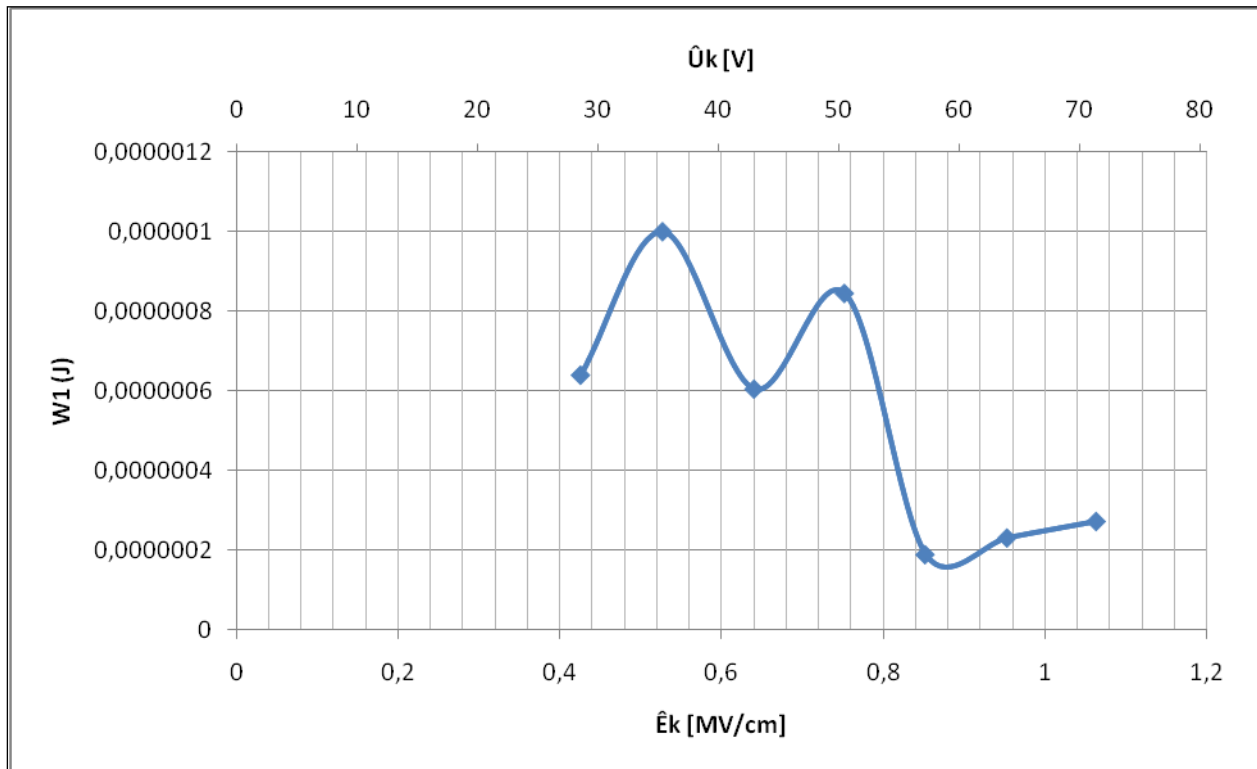
4.2 Ενέργεια W

4.2.1 Η ενέργεια W_1 στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

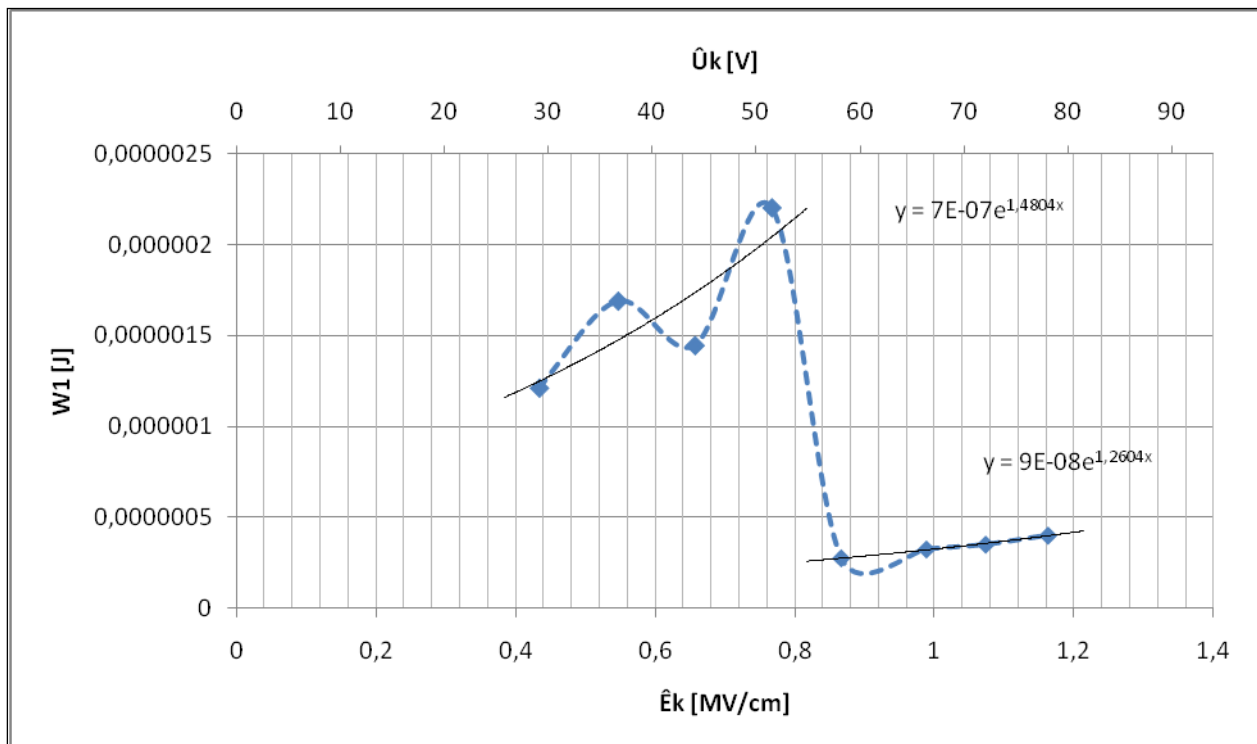
Η ενέργεια W_1 στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων δίνεται από τη σχέση 2.3-9 ($W_1 = u_1^2 \cdot C_m$) και όπως φαίνεται επηρεάζεται πολύ από την τάση έναρξης μερικών εκκενώσεων λόγω της αναλογίας με το τετράγωνο αυτής. Επειδή αυτή είναι ανάλογη της κρουστικής τάσης που εφαρμόζεται στο δοκίμιο συμπεραίνουμε ότι το μέγεθος W_1 είναι ενδεικτικό της ενέργειας στο δοκίμιο τη στιγμή της έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

Στην περίπτωση του δοκιμίου πάχους $d=1\text{mm}$, δεδομένης της χωρητικότητας C_m του πυκνωτή μέτρησης ή τουλάχιστον για κοντινές τιμές αυτής (10,20nF), η W_1 είναι αύξουσα συνάρτηση της έντασης του πεδίου η οποία μάλιστα για την περίπτωση της αρνητικής

πολικότητας επιδιώχθηκε να προσεγγιστεί εκθετικά (σχήμα 4.2.1-2) για κάθε περιοχή τιμών του C_m (μία για 10,20nF και μία για 210 nF) που σημαίνει για κάθε περιοχή της έντασης του πεδίου.



Σχήμα 4.2.1-1: Η ενέργεια $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$

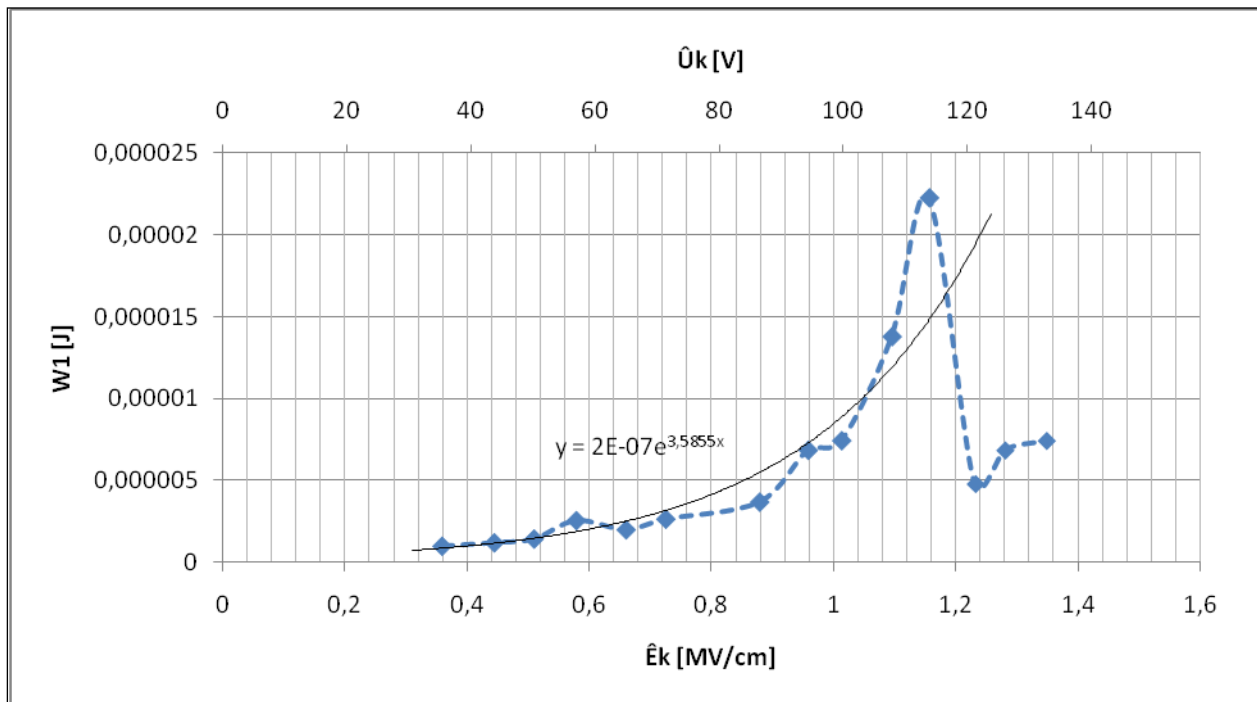


Σχήμα 4.2.1-2: Η ενέργεια $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$

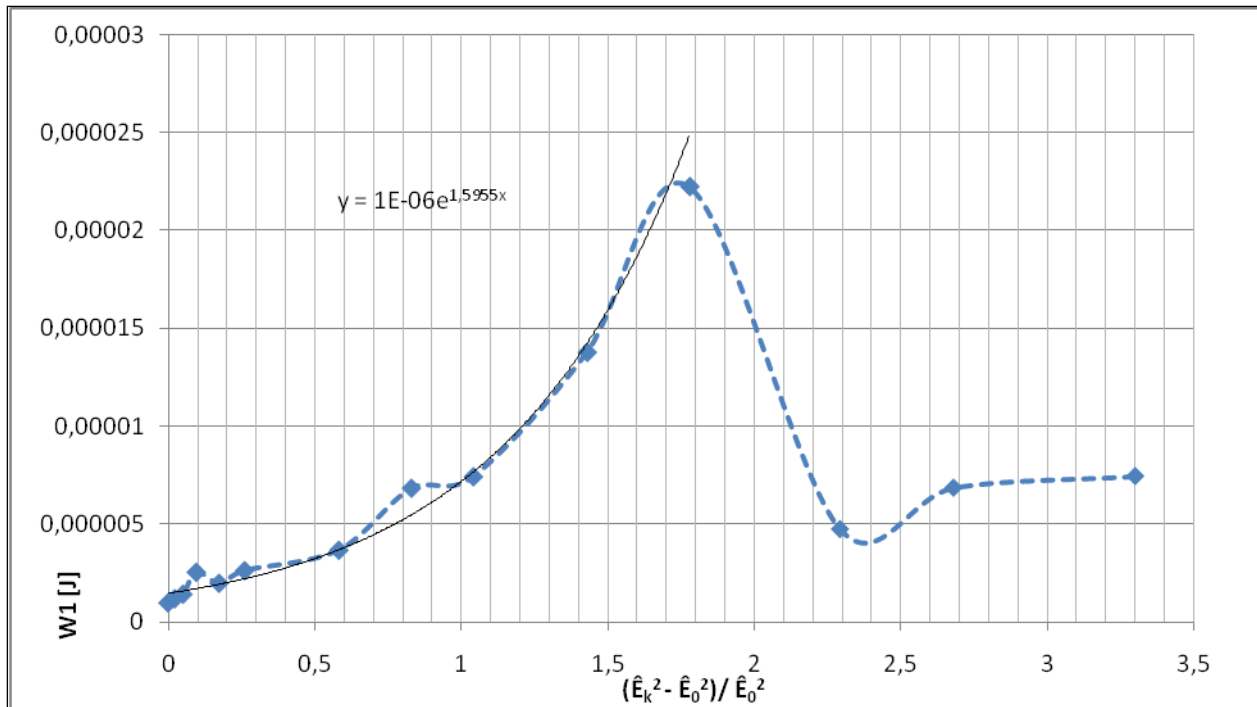
Το γεγονός ότι οι δύο προσεγγίσεις έχουν παραπλήσιο εκθετικό συντελεστή (1,4804 και 1,2604) υποδηλώνει ότι η ενέργεια στο δοκίμιο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων αυξάνεται σταθερά με την αύξηση της έντασης του πεδίου (και στα δύο διαστήματα έντασης εξελίσσεται το ίδιο ποιοτικά φαινόμενο) ενώ η βύθιση που παρατηρείται στα γραφήματα δεν έχει να κάνει με την εκδήλωση κάποιου εσωτερικού φαινομένου στο υλικό αλλά είναι καθαρά θέμα υπολογιστικό και επιλογής διάταξης (δηλαδή η ενέργεια αυξάνεται σταθερά με την αύξηση της έντασης πεδίου).

Συγκεκριμένα, σε υψηλότερες τιμές κρουστικής τάσης επιλέγονται πυκνωτές μέτρησης μεγαλύτερης χωρητικότητας που καθιστούν μικρότερη τη σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή μέτρησης με αποτέλεσμα αυτός να αναλαμβάνει μικρότερο ποσοστό τάσης από τον καταμεριστή. Αυτό οδηγεί σε μείωση της τάσης u_m και με βάση τη σχέση 2.3-9 ($W_1 = u_1^2 \cdot C_m$) μειώνεται η W_1 παρά την αύξηση της C_m που δεν επηρεάζει τόσο πολύ τη W_1 όσο το τετράγωνο της τάσης. Αυτή η συμπεριφορά της u_1 φαίνεται καθαρά στους πίνακες 3.1-2, 3.2-2, 3.3-2, 3.4-2.

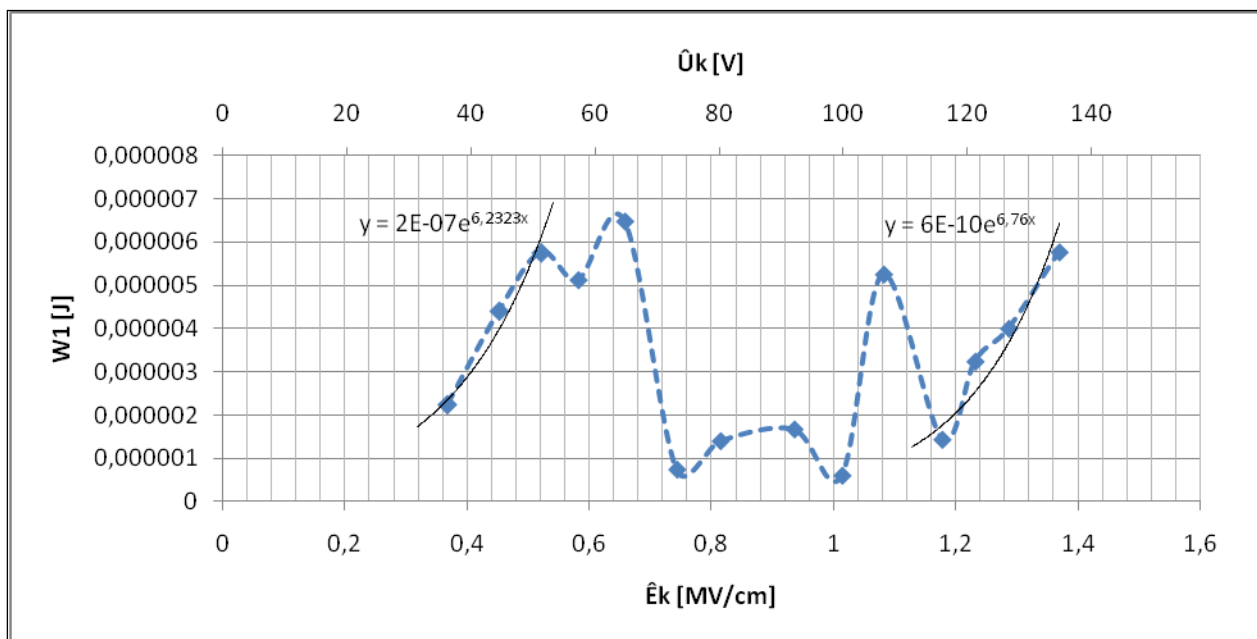
Η περίπτωση του δοκίμιου πάχους $d=2\text{mm}$ παρουσιάζει ενδιαφέρον ενώ οι περισσότερες τιμές δίνουν και τη δυνατότητα καλύτερων προσεγγίσεων.



Σχήμα 4.2.1-3: Η ενέργεια $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.2.1-4: Η ενέργεια $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$ ως συνάρτηση της μεταβλητής $x = (\hat{E}_k^2 - \hat{E}_0^2) / \hat{E}_0^2$



Σχήμα 4.2.1-5: Η ενέργεια $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$

Στο γράφημα 4.2.1-3, η ενέργεια W_1 προσεγγίζεται εκθετικά και μάλιστα παρουσιάζει σταθερά αύξουσα συμπεριφορά ως προς την ένταση του πεδίου ανεξάρτητα από μεταβολές στην επιλεγόμενη χωρητικότητα του πυκνωτή μέτρησης. Παρολαυτά, μια μη αναμενόμενη βύθιση παρουσιάζεται όταν η ένταση του πεδίου έχει λάβει την υψηλή τιμή $1,2\text{MV/cm}$ ενώ στη συνέχεια η ενέργεια πεδίου αυξάνεται και πάλι σταδιακά. Σε αυτή την τιμή δε διαφοροποιείται η

χωρητικότητα C_m ούτε κάποια άλλη παράμετρος οπότε προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μεταβολή αυτή οφείλεται σε κάποιο εσωτερικό φαινόμενο στο μονωτικό που οδηγεί σε απότομη μείωση της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου και το οποίο μπορεί να ερμηνευθεί ως εξής: σε χαμηλές τιμές έντασης του πεδίου, η γήρανση του υλικού οφείλεται στις μερικές εκκενώσεις. Καθώς αυξάνεται η ένταση του πεδίου εφαρμόζοντας κρουστικές τάσεις υψηλότερης τιμής, το δοκίμιο φορτίζεται ισχυρά με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δυνάμεων Coulomb. Όταν λόγω των ισχυρών αυτών δυνάμεων επακολουθήσει μηχανική καταπόνηση με τάνυση του υλικού, τότε μέρος της ενέργειας του πεδίου διατίθεται για τη μηχανική αυτή καταπόνηση, παρατηρείται βύθιση της ενέργειας του πεδίου και το φαινόμενο το μερικών εκκενώσεων ξεκινά και πάλι οδηγώντας σταδιακά ξανά σε αύξηση της ενέργειας W_1 .

Στο γράφημα 4.2.1-4 η ενέργεια W_1 παραστάθηκε όχι ως προς την ένταση του πεδίου αλλά ως προς τη μεταβλητή $x = (\hat{E}_k^2 - \hat{E}_0^2) / \hat{E}_0^2$ δηλαδή ως προς το τετράγωνο της έντασης πεδίου. Ο λόγος που προστέθηκε αυτή την παράσταση είναι ο εξής:

Είναι γνωστό πως η ενέργεια του πυκνωτή δίνεται γενικά από τη σχέση:

$$W = \frac{QU}{2} = \frac{Q^2}{2C_m}$$

Επίσης, με βάση τη θεωρία, το φορτίο αυξάνεται εκθετικά ως προς τη μεταβλητή $x = (\hat{E}_k^2 - \hat{E}_0^2) / \hat{E}_0^2$ δηλαδή εκθετικά με το τετράγωνο της έντασης του πεδίου \hat{E}_k .

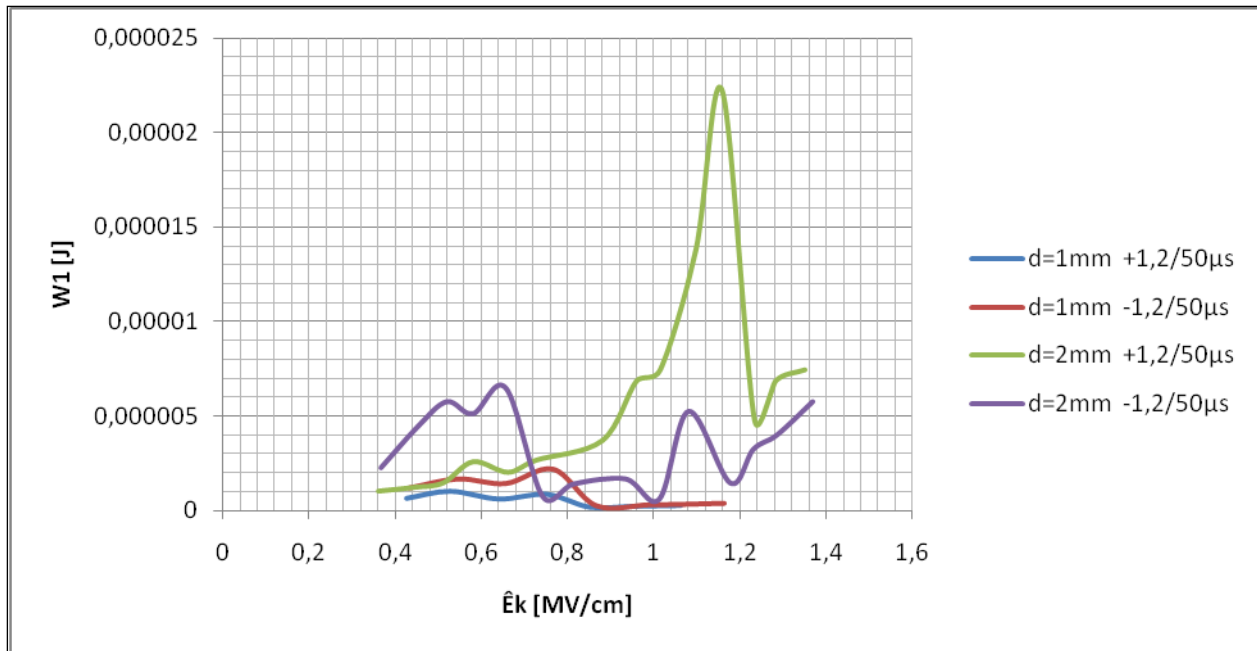
Συνεπώς, αναμένεται εκθετικά αυξανόμενη συμπεριφορά και για την ενέργεια του πυκνωτή. Η αναμενόμενη καλύτερη προσέγγιση φαίνεται πως επιβεβαιώνεται από το γράφημα 4.2.1-4.

Η ίδια συμπεριφορά της $W_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ διαπιστώνεται και στην περίπτωση αρνητικής πολικότητας στο σχήμα (4.2.1-5). Σε κάθε αύξηση της χωρητικότητας του πυκνωτή μέτρησης παρατηρείται και μια βύθιση στο γράφημα που είναι, όπως αναφέρθηκε, όμως θέμα καθαρά υπολογισμών και επιλογής διάταξης και όχι απαραίτητα ποιοτικό αποτέλεσμα στην ενέργεια. Προσεγγίζοντας εκθετικά τις τρεις πρώτες μετρήσεις για $C_m=10\text{nF}$ και τις 4 τελευταίες για $C_m=1000\text{nF}$ προκύπτουν οι σχέσεις:

$$W_1 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot e^{6,2323 \cdot E_k} \quad (4.2.1-1)$$

$$W_1 = 2 \cdot 10^{-10} \cdot e^{6,76 \cdot E_k} \quad (4.2.1-2)$$

Το γεγονός ότι οι δύο προσεγγίσεις χαρακτηρίζονται από παραπλήσιο εκθετικό συντελεστή (6,2323 και 6,76) υποδηλώνει την ομοιόμορφη συμπεριφορά (αύξηση κατά όμοιο τρόπο) της ενέργειας καθώς αυξάνεται η ένταση του πεδίου. Το ίδιο παρατηρείται και στην περιοχή εντάσεων για $C_m=20\text{nF}$. Ωστόσο, στην περιοχή εντάσεων 0,76-1,08MV/cm (όπου χρησιμοποιείται ο ίδιος πυκνωτής μέτρησης $C_m=210\text{nF}$) παρατηρείται σημαντική απόκλιση (και βύθιση) της ενέργειας πεδίου, πιο συγκεκριμένα στην περιοχή εντάσεων 0,9-1MV/cm. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί και πάλι στη μηχανική καταπόνηση του υλικού από τις δυνάμεις Coulomb.



Σχήμα 4.2.1-6: Η ενέργεια $W_1 = f(\hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν σε από κοινού παράσταση ως προς την ένταση του πεδίου

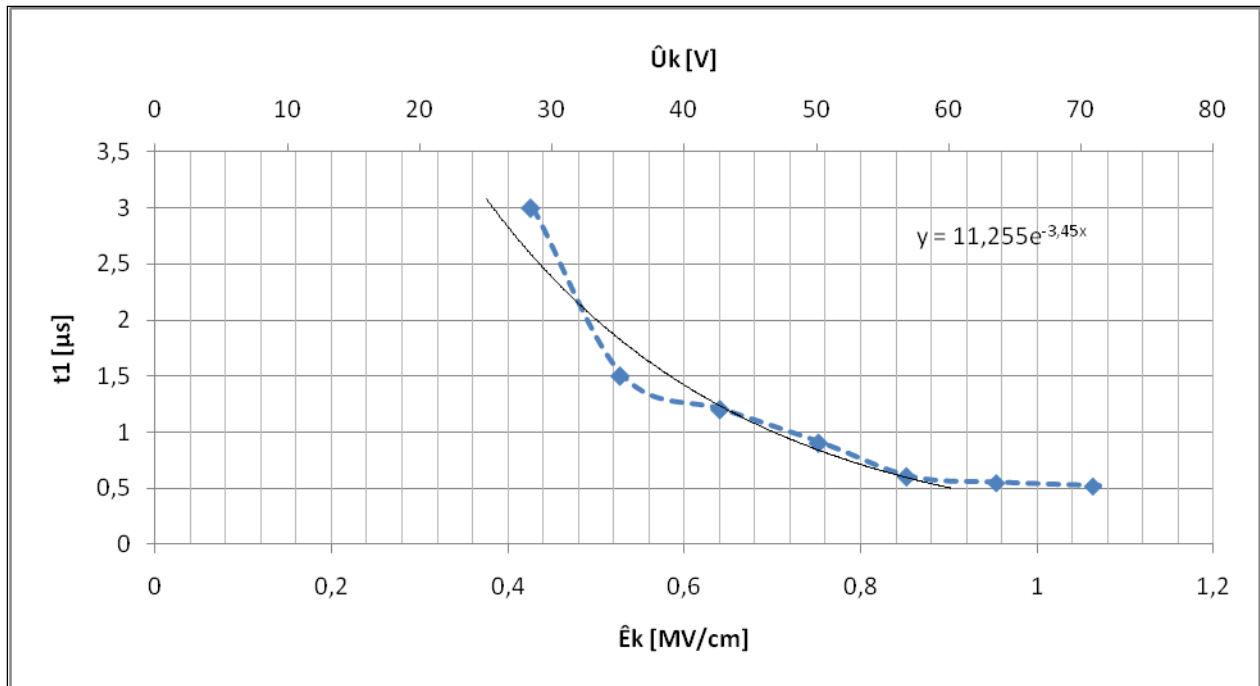
Προκειμένου να εξαχθούν κάποια γενικά συμπεράσματα από τη σύγκριση των καμπυλών $W_1 = f(\hat{E}_k)$ όταν αλλάζει το πάχος του δοκιμίου ή η πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης, γίνονται οι εξής παρατηρήσεις στο σχήμα (4.2.1-6):

- 1) Για πάχος δοκιμίου $d=1\text{mm}$, η απαιτούμενη ενέργεια έναρξης των μερικών εκκενώσεων είναι μικρότερη στην περίπτωση της εφαρμογής τάσεων θετικής πολικότητας σε σύγκριση με την αντίστοιχη απαιτούμενη στην περίπτωση τάσεων αρνητικής πολικότητας.
Για πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$, η απαιτούμενη ενέργεια έναρξης των μερικών εκκενώσεων είναι μικρότερη στην περίπτωση της εφαρμογής τάσεων θετικής πολικότητας όταν $\hat{E}_k < 0,72\text{MV/cm}$ ενώ αυτό αντιστρέφεται για $\hat{E}_k > 0,72\text{MV/cm}$.
- 2) Δεδομένου του πάχους δοκιμίου, οι καμπύλες $W_1 = f(\hat{E}_k)$ για τάσεις θετικής και αρνητικής πολικότητας παρουσιάζουν μέγιστο και ελάχιστο σχεδόν στις ίδιες τιμές έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (δηλαδή παρουσιάζουν την ίδια μονοτονία στα διάφορα διαστήματα της έντασης \hat{E}_k).
- 3) Όταν αυξάνεται το πάχος d του χρησιμοποιούμενου δοκιμίου, αυξάνεται και η ενέργεια έναρξης των μερικών εκκενώσεων (ανεξάρτητα της πολικότητας της εφαρμοζόμενης τάσης) για όλες τις τιμές της έντασης του πεδίου (με εξαίρεση ίσως μια μικρή βύθιση της περίπτωσης $d=2\text{mm} -1,2/50\mu\text{s}$ όταν $\hat{E}_k > 0,76\text{MV/cm}$)

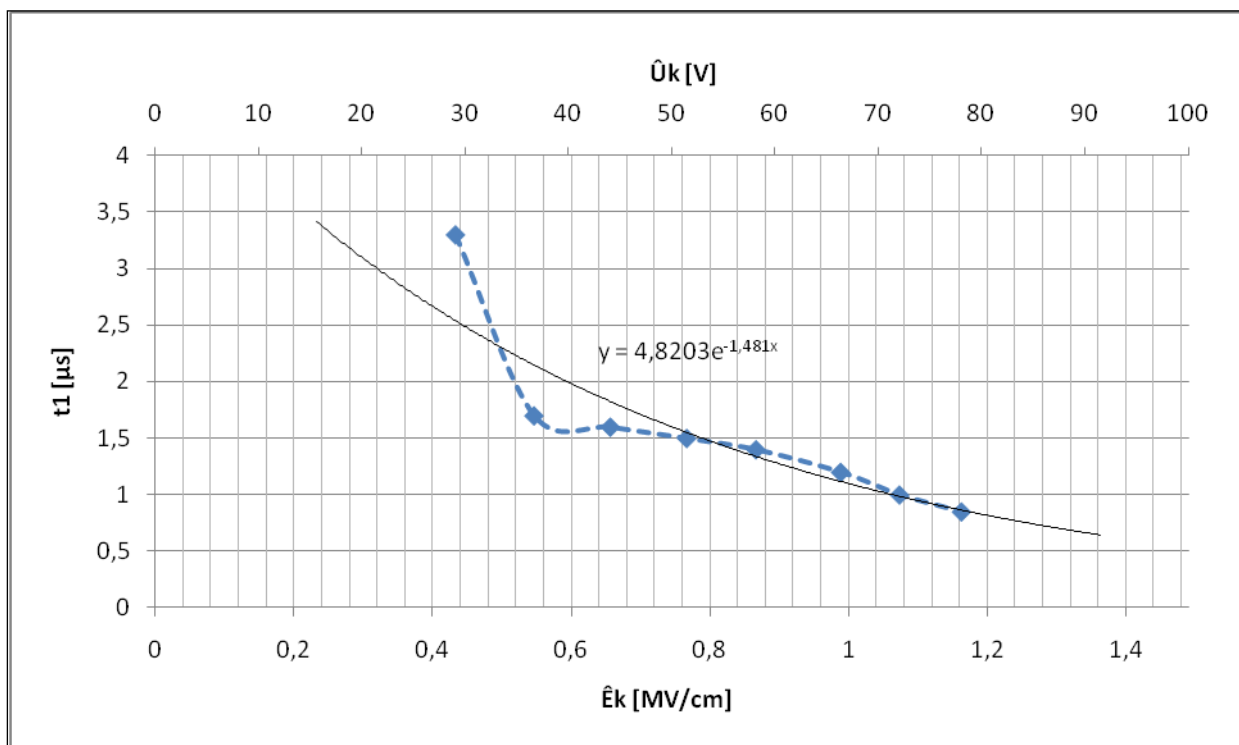
Σε αυτό το σημείο, θα παρεμβληθεί ο σχολιασμός του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων προκειμένου να συσχετισθεί με τη συμπεριφορά της ενέργειας του πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων ως προς την ηλεκτρική ένταση.

4.2.2 Χρόνος έναρξης μερικών εκκενώσεων t_1

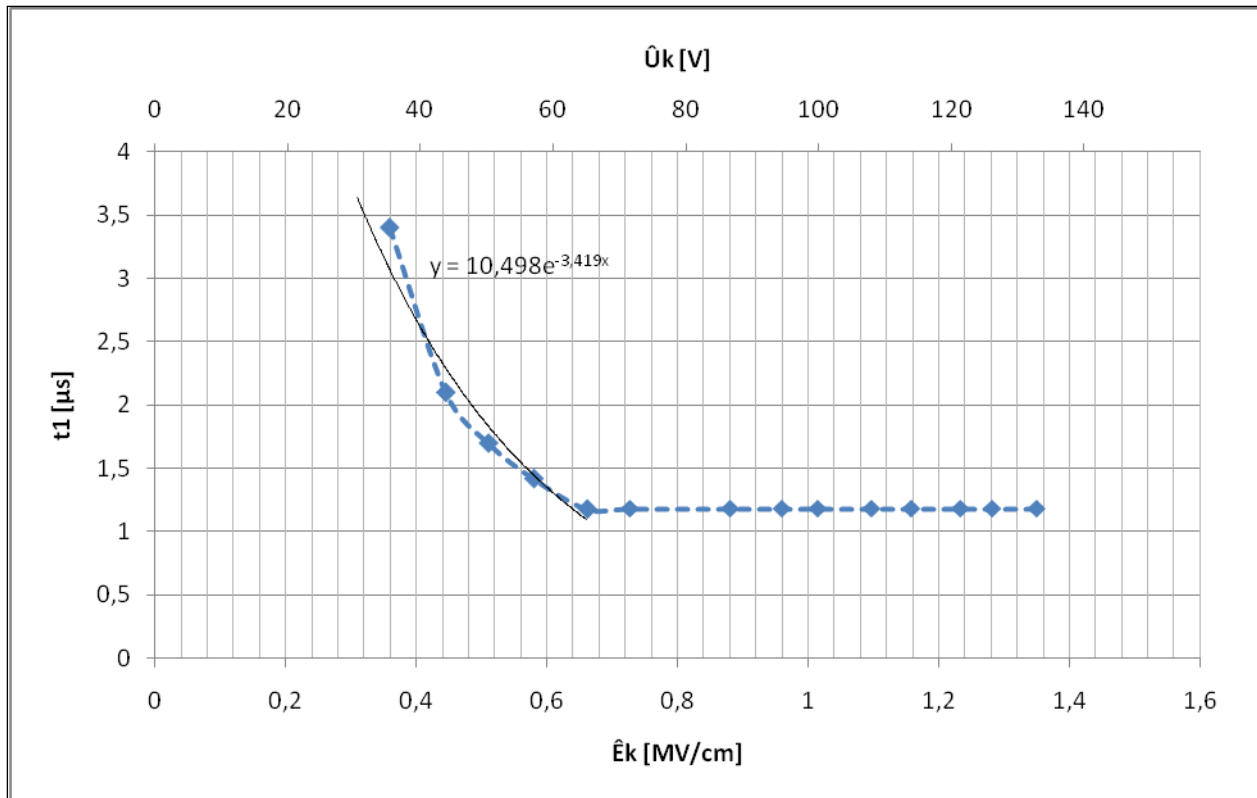
Από τα γραφήματα (3.1-5), (3.2-5), (3.3-5), (3.4-5) διαπιστώνεται ότι με την αύξηση της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης, μειώνεται ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.



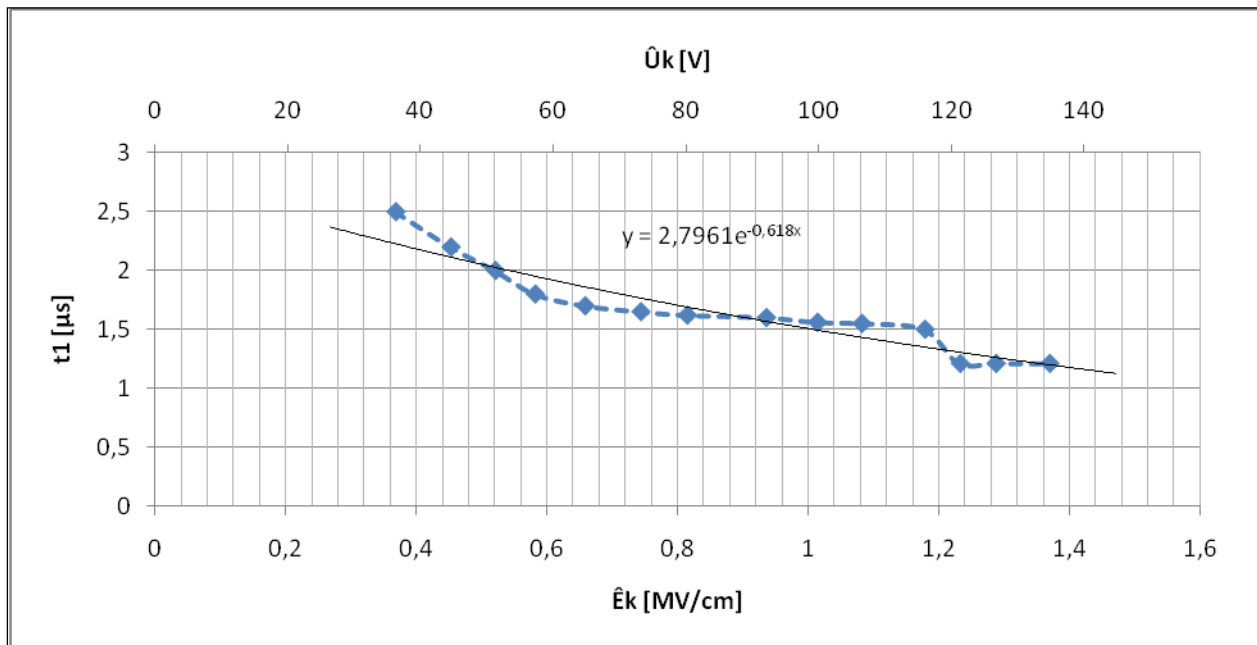
Σχήμα 4.2.2-1: Ο χρόνος έναρξης $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.2.2-2: Ο χρόνος έναρξης $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.2.2-3: Ο χρόνος έναρξης $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.2.2-4: Ο χρόνος έναρξης $t_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$

Αυτή η μείωση μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι με την εφαρμογή κρουστικών τάσεων μεγαλύτερης τιμής με ίδιο βέβαια χρόνο μετάπου, η κλίση της έντασης πεδίου στο μέτωπο είναι μεγαλύτερη και έτσι «ενεργοποιούνται» ταχύτερα και ευκολότερα τα φαινόμενα ιονισμού στις

διάφορες θέσεις ανομοιογένειας (μερικές εκκενώσεις). Μάλιστα αυτή η μείωση μπορεί να προσεγγιστεί πολύ ικανοποιητικά με τις ακόλουθες εκθετικές συναρτήσεις για την κάθε περίπτωση:

$$(3.1): t_1 = 11,255 \cdot e^{-3,45 \cdot E_k} \quad (4.2.2-1)$$

$$(3.2): t_1 = 4,8203 \cdot e^{-1,481 \cdot E_k} \quad (4.2.2-2)$$

$$(3.3): t_1 = 10,498 \cdot e^{-3,419 \cdot E_k} \quad (4.2.2-3)$$

$$(3.4): t_1 = 2,7961 \cdot e^{-0,618 \cdot E_k} \quad (4.2.2-4)$$

Συγκεντρωτικά οι παράμετροι A , α των εκθετικών σχέσεων της μορφής $y=A \cdot e^{-\alpha x}$ παρουσιάζονται ακολούθως:

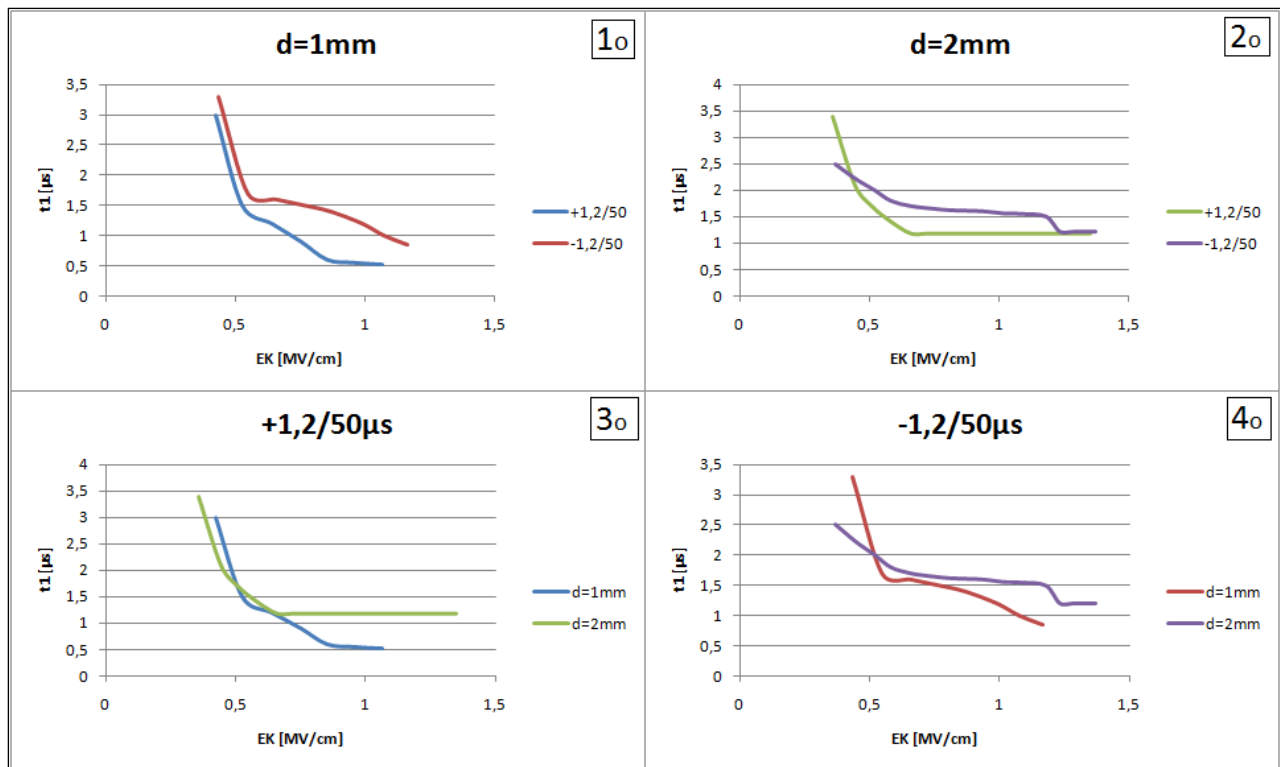
	A	α
d=1mm +1,2/50 μ s	11,255	3,45
d=1mm -1,2/50 μ s	4,8203	1,481
d=2mm +1,2/50 μ s	10,498	3,419
d=2mm -1,2/50 μ s	2,7961	0,618

Πίνακας 4.2.2-1: Οι συντελεστές της εκθετικής προσεγγιστικής σχέσης του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν

A : ο αρχικός παράγοντας της εκθετικής σχέσης $t_1 = A \cdot e^{-\alpha \cdot E_k}$
 α : ο εκθετικός συντελεστής της σχέσης $t_1 = A \cdot e^{-\alpha \cdot E_k}$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση του δοκιμίου d=2mm με εφαρμογή κρουστικών θετικής πολικότητας η προσέγγιση αφορά στο πρώτο μισό των τιμών γιατί πέρα από την ένταση $E_k > 0,64 \text{ MV/cm}$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σταθεροποιείται σε μια ελάχιστη τιμή $t_1 = 1,18 \mu\text{s}$, είναι δηλαδή πλέον ανεξάρτητος από την τιμή της έντασης πεδίου E_k . Σε παρόμοιο συμπέρασμα καταλήγει κανείς και για τις άλλες τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.2.2-5 που ακολουθεί, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων προσεγγίζει μια ελάχιστη σταθερή τιμή για μεγάλες τιμές της έντασης του πεδίου.

Ακολούθως παρατίθενται τέσσερα συγκριτικά γραφήματα όπου είτε θεωρείται σταθερό το πάχος δοκιμίου και εξετάζεται η διαφορά στο t_2 με την αλλαγή της πολικότητας είτε θεωρείται δεδομένη η πολικότητα των εφαρμοζόμενων κρουστικών τάσεων και εξετάζεται η διαφορά στο t_2 όταν χρησιμοποιείται δοκίμιο διαφορετικού πάχους.



Σχήμα 4.2.2-5 : Ο χρόνος $t_1 = f(\hat{E}_k)$ έναρξης των μερικών εκκενώσεων για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν σε από κοινού παράσταση ως προς την ένταση του πεδίου.

Από τα παραπάνω τέσσερα γραφήματα διαπιστώνονται τα εξής:

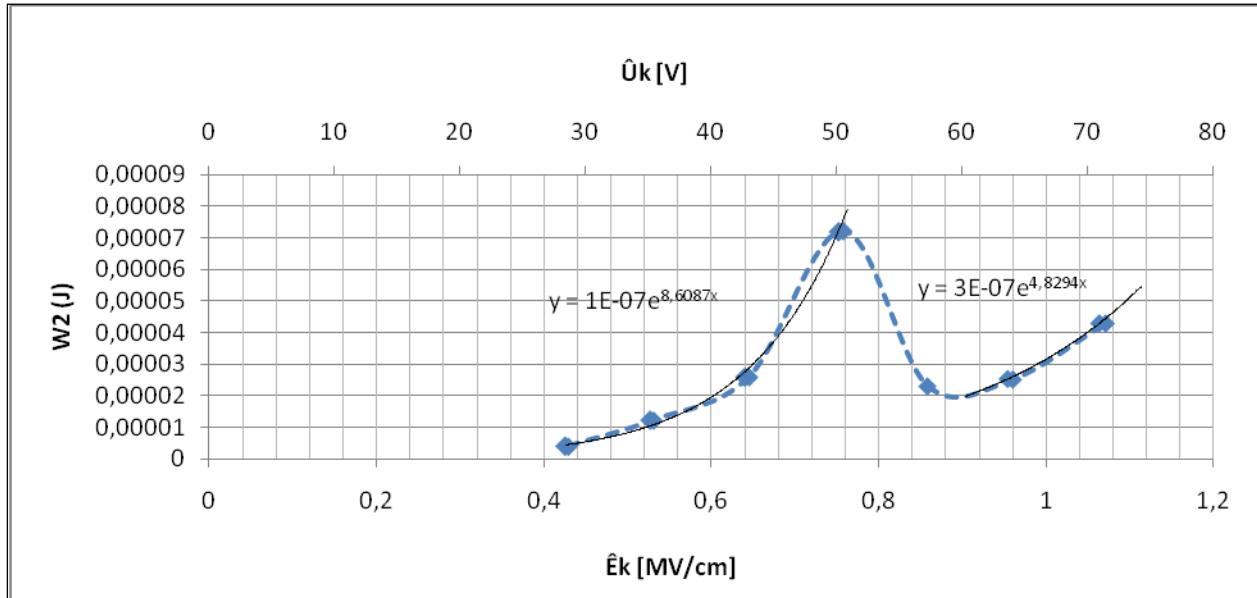
Στο 1^ο διαπιστώνεται ότι δεδομένου του πάχους $d=1\text{mm}$, το δοκίμιο βακελίτη παρουσιάζει μεγαλύτερο χρόνο έναρξης μερικών εκκενώσεων σε κρουστικές τάσεις αρνητικής πολικότητας (σε σχέση με τις κρουστικές τάσεις θετικής πολικότητας) σε όλες τις τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Το ίδιο ακριβώς παρατηρείται και στο 2^ο γράφημα για πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ για εντάσεις πεδίου όμως $E_k > 0,4\text{MV/cm}$. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας συγκεντρώνονται μπροστά της ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς αντίθετης πολικότητας. Επειδή όμως οι θετικοί φορείς είναι περισσότερο δυσκίνητοι από τους αρνητικούς και επομένως εξουδετερώνονται δυσκολότερα, είναι φανερό ότι στην περίπτωση της αρνητικής ακίδας απαιτείται μεγαλύτερη τάση για τη διάσπαση και συνεπώς είναι μεγαλύτερος και ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

Στο 3^ο διαπιστώνεται ότι δεδομένης της εφαρμογής κρουστικών τάσεων θετικής πολικότητας, το δοκίμιο μεγαλύτερου πάχους $d=2\text{mm}$ παρουσιάζει μεγαλύτερο χρόνο έναρξης μερικών εκκενώσεων για εντάσεις πεδίου $E_k > 0,5\text{MV/cm}$ ενώ το ίδιο παρατηρείται και στο 4^ο γράφημα αρνητικής πολικότητας.

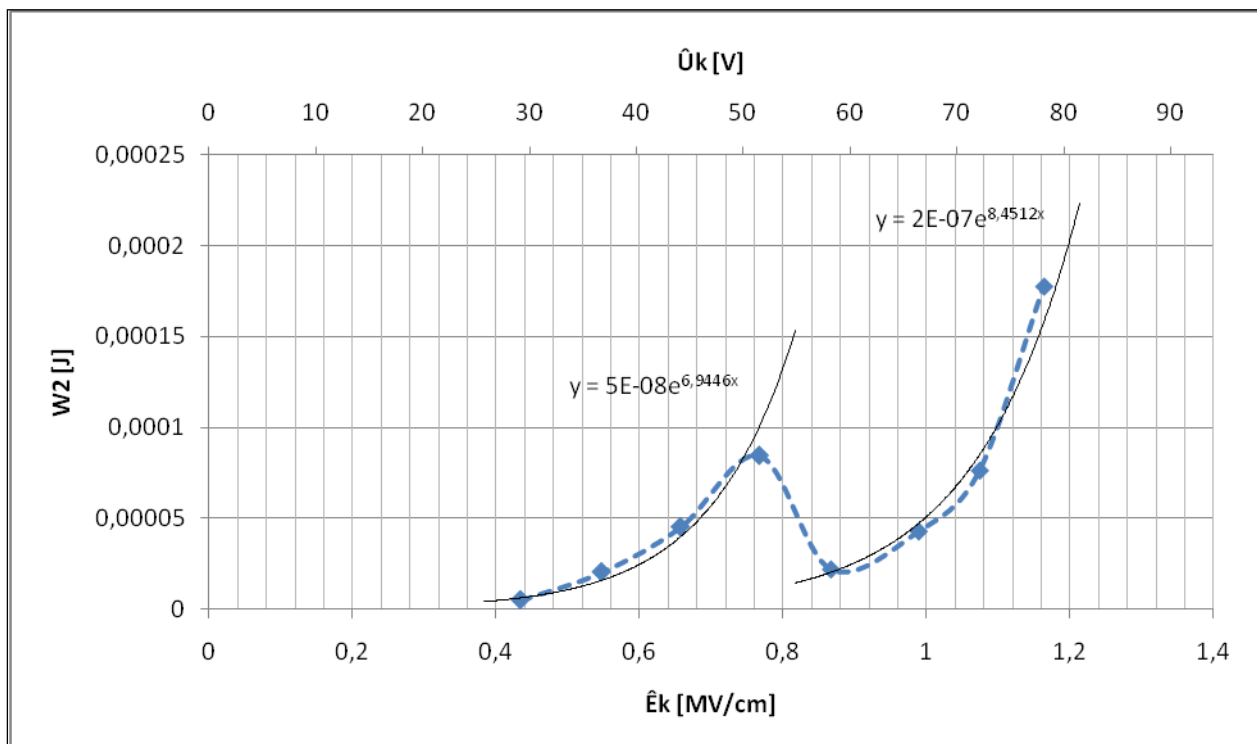
Προκειμένου να συσχετισθεί η ενέργεια W_1 έναρξης μερικών εκκενώσεων με το χρόνο t_1 , παρατηρείται ότι καθώς μειώνεται ο διαθέσιμος χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων t_1 (με την αύξηση της έντασης του πεδίου), η απαιτούμενη ενέργεια για την έναρξή τους γίνεται μεγαλύτερη εξαιτίας της αύξησης της κλίσης της κρουστικής τάσης (λόγω αύξησης της τιμής της \hat{U}_k). Αυτό διαπιστώθηκε και προηγουμένως στην ενότητα 4.2.1 όπου αναλύθηκε η αύξουσα συμπεριφορά των γραφημάτων $W_1 = f(\hat{E}_k)$.

4.2.3 Η ενέργεια W_2 στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων.

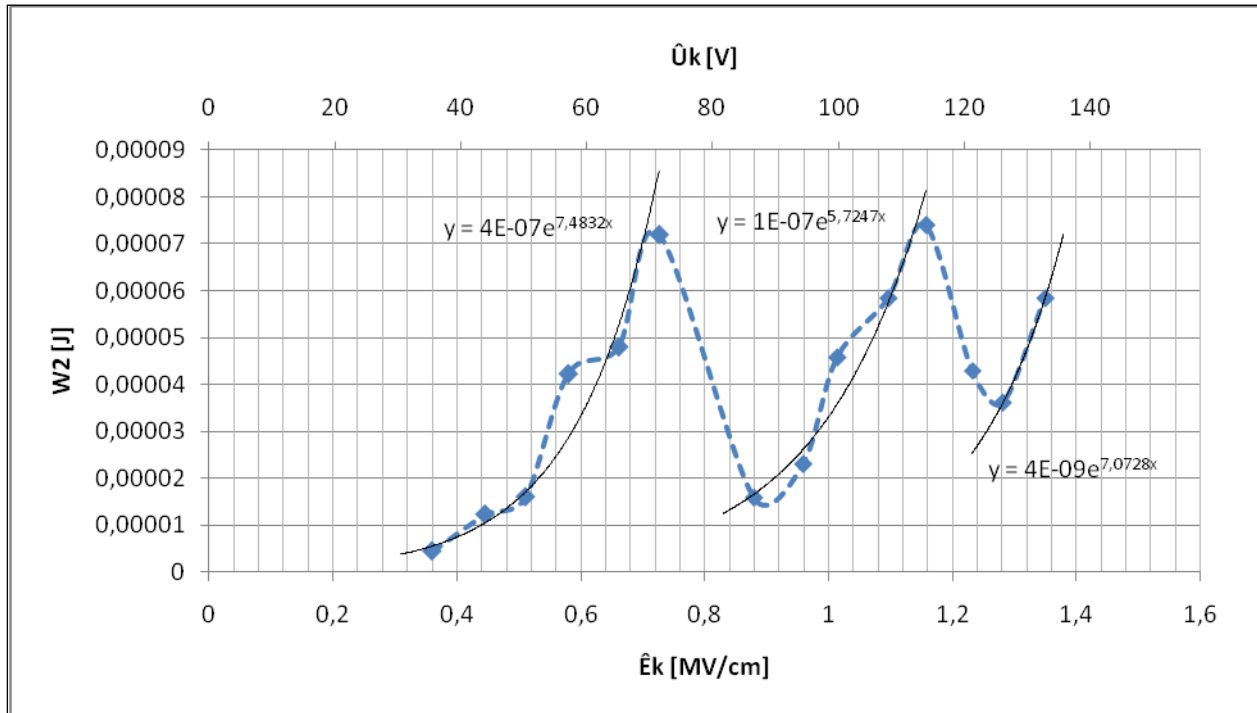
Παρόμοια συμπεριφορά με την W_1 ως προς την ένταση του πεδίου παρουσιάζει και η ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης W_2 (που αντιπροσωπεύει και την ενέργεια πεδίου στο δοκίμιο) κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων.



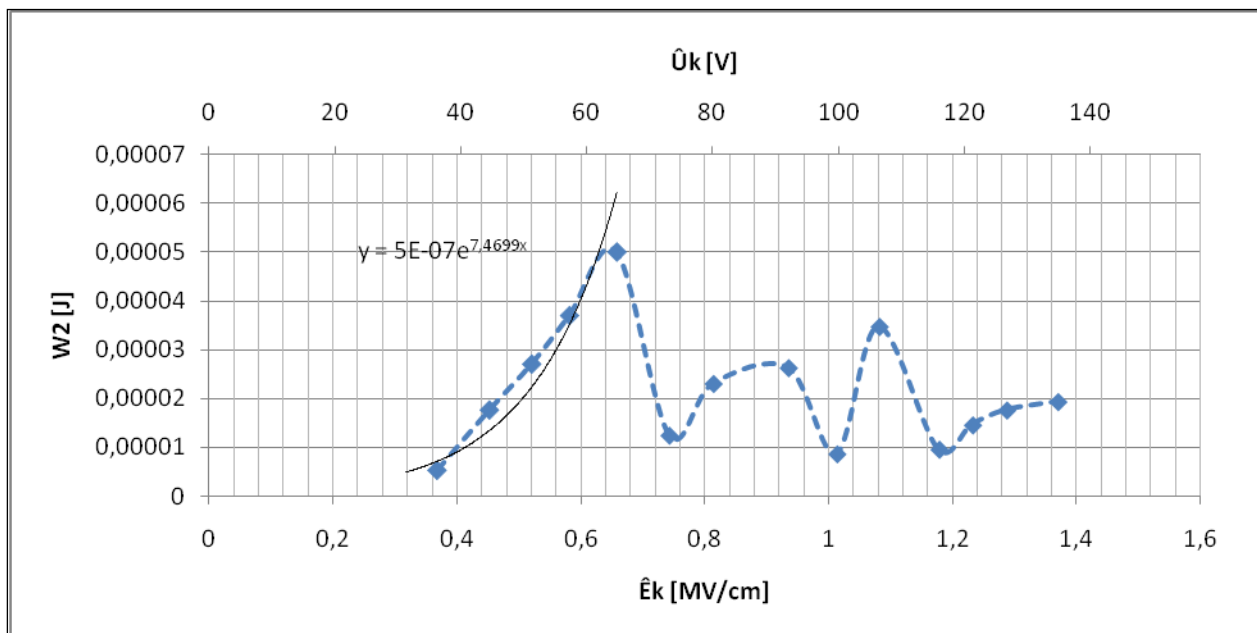
Σχήμα 4.2.3-1: Η ενέργεια $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.2.3-2: Η ενέργεια $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.2.3-3: Η ενέργεια $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.2.3-4: Η ενέργεια $W_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$

Τα αντίστοιχα γραφήματα 4.2.3-1, 4.2.3-2, 4.2.3-3, 4.2.3-4 επιβεβαιώνουν ότι είναι και πάλι δυνατό η εκάστοτε καμπύλη να προσεγγιστεί εκθετικά κατά τμήματα ανάλογα με την περιοχή εντάσεων και τη χρησιμοποιούμενη χωρητικότητα στον πυκνωτή μέτρησης:

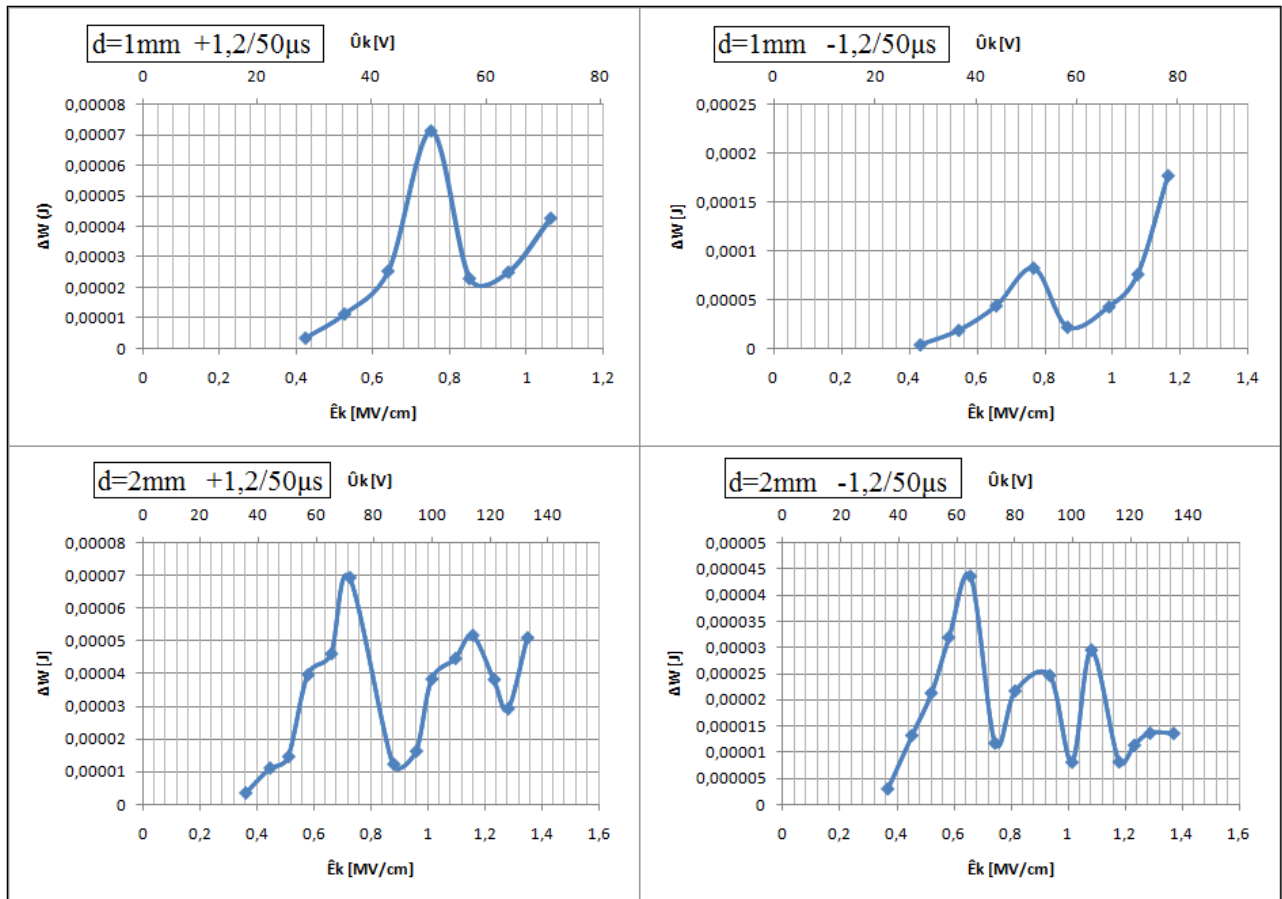
E_k [MV/cm]	0.4-0.8	0.8-1.2	1.2-1.4
d=1mm +1,2/50μs	$W_2=10^{-7} \cdot e^{8.6087 \cdot E_k}$	$W_2=3 \cdot 10^{-7} \cdot e^{4.8294 \cdot E_k}$	Δεν έχουν ληφθεί μετρήσεις σε αυτό το διάστημα
d=1mm -1,2/50μs	$W_2=5 \cdot 10^{-8} \cdot e^{6.9446 \cdot E_k}$	$W_2=2 \cdot 10^{-7} \cdot e^{8.4512 \cdot E_k}$	Δεν έχουν ληφθεί μετρήσεις σε αυτό το διάστημα
d=2mm +1,2/50μs	$W_2=4 \cdot 10^{-7} \cdot e^{7.4832 \cdot E_k}$	$W_2=10^{-7} \cdot e^{5.7247 \cdot E_k}$	$W_2=4 \cdot 10^{-9} \cdot e^{7.0728 \cdot E_k}$
d=2mm -1,2/50μs	$W_2=10^{-7} \cdot e^{8.6087 \cdot E_k}$	Απότομη βύθιση στο 1MV/cm λόγω δυνάμεων Coulomb	Αύξουσα συμπεριφορά με απόκλιση από την εκθετική

Πίνακας 4.2.3-1: Συγκεντρωτικός πίνακας με τη μαθηματική ή ποιοτική περιγραφή της συμπεριφοράς της ενέργειας του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων ως προς την ένταση του πεδίου $W_2 = f(\hat{E}_k)$ για κάθε περίπτωση από τις τέσσερις που εξετάστηκαν και σε κάθε διάστημα έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

Όπου παρατηρείται εγγύτητα των εκθετικών συντελεστών υποδηλώνεται η εξέλιξη του ίδιου ποιοτικά φαινομένου δηλαδή της αύξησης της ενέργειας W_2 με την αύξηση της έντασης του πεδίου ακόμα και μετά από κάποια βύθιση λόγω χρήσης άλλου πυκνωτή μέτρησης ή λόγω μηχανικής καταπόνησης από τις δυνάμεις Coulomb.

4.2.4 Η συνολική μεταβολή της ενέργειας ΔW στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων.

Ισχύει $\Delta W = W_2 - W_1$ και επειδή $W_2 \gg W_1$ τελικά η μεταβολή της ενέργειας του πεδίου εναρμονίζεται με τη συμπεριφορά της ενέργειας του πεδίου τη στιγμή της λήξης των μερικών εκκενώσεων. Έτσι μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι με την αύξηση της έντασης του πεδίου (όταν εφαρμόζονται ισχυρότερες κρουστικές τάσεις) κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων, αυξάνεται αντίστοιχα και η θετική μεταβολή (αυξάνεται η αύξηση) της ενέργειας του πεδίου-από τη στιγμή της έναρξης μέχρι το πέρας του φαινομένου.

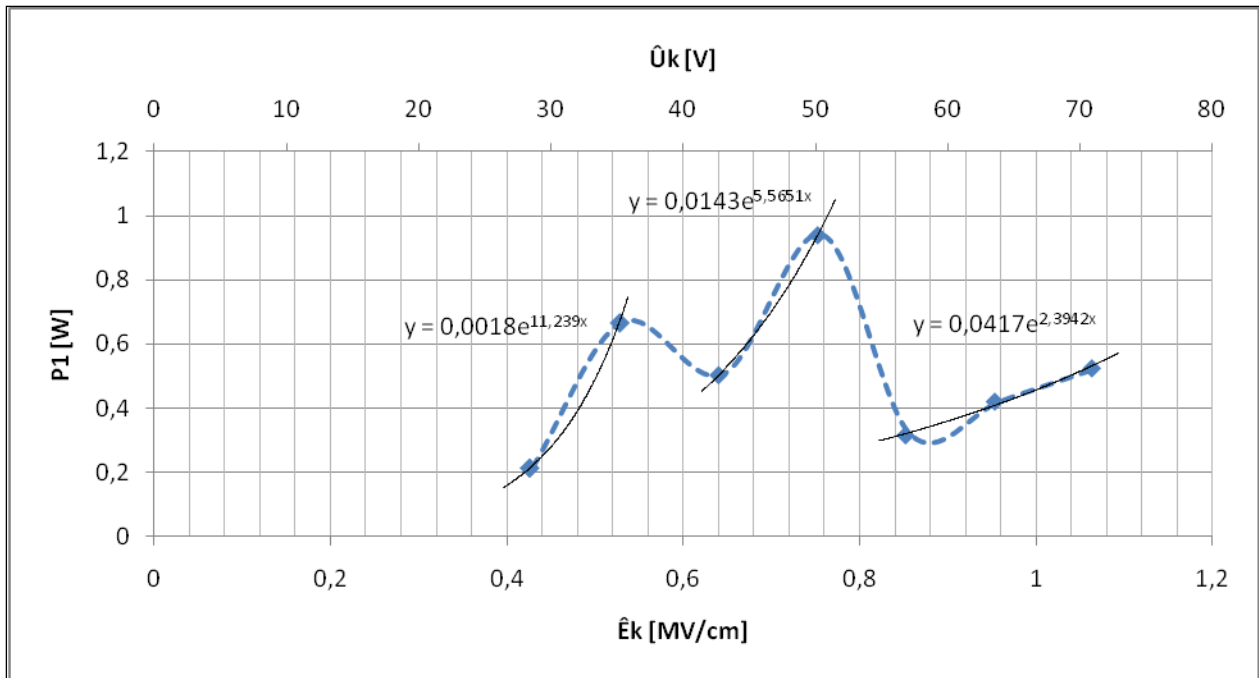


Σχήμα 4.2.4-1: Η συνολική μεταβολή της ενέργειας ΔW στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη διάρκεια των μερικών εκκενώσεων στις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν

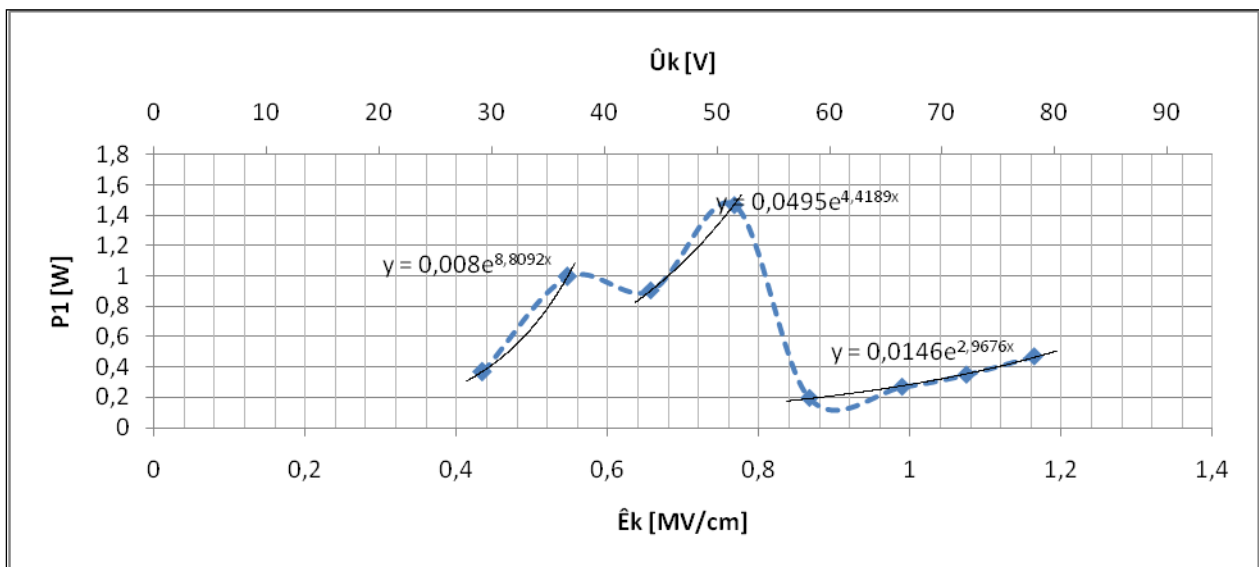
4.3 Ισχύς P

4.3.1 Η ισχύς P_1 στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

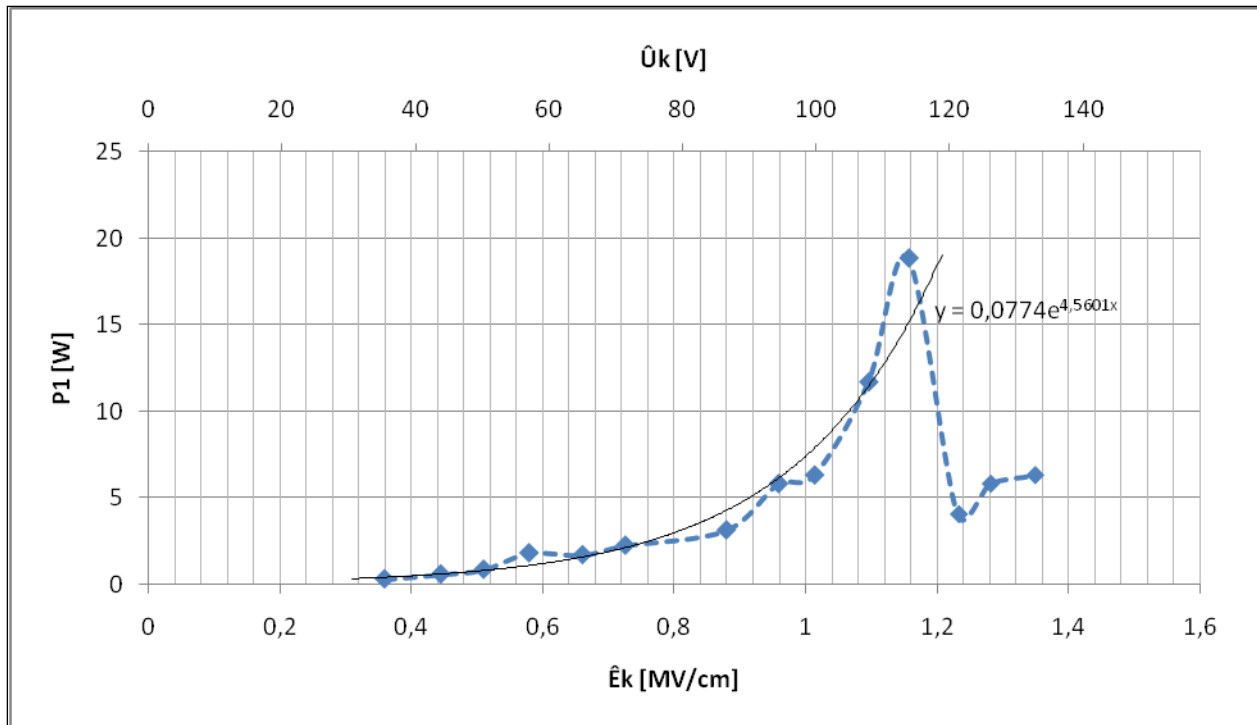
Επειδή η ισχύς P_1 στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων δίνεται από τη σχέση 2.3-12 ($P_1 = W_1 / t_1$) αναμένεται να ακολουθεί τη συμπεριφορά της ενέργειας W_1 καθώς εφαρμόζονται ισχυρότερες κρουστικές τάσεις με τη διαφορά ότι διαιρείται κατά ένα παράγοντα t_1 ο οποίος όπως αναφέρθηκε μειώνεται εκθετικά. Επειδή όμως το εύρος των χρόνων t_1 είναι πολύ μικρό (1-3μs) αναμένεται να προκύψουν σχεδόν ταυτόσημες (με εκείνες της ενέργειας) χαρακτηριστικές $P_1 = f(\hat{E}_k)$ ως προς τη μορφή. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τα γραφήματα 4.3.1-1, 4.3.1-2, 4.3.1-3, 4.3.1-4 :



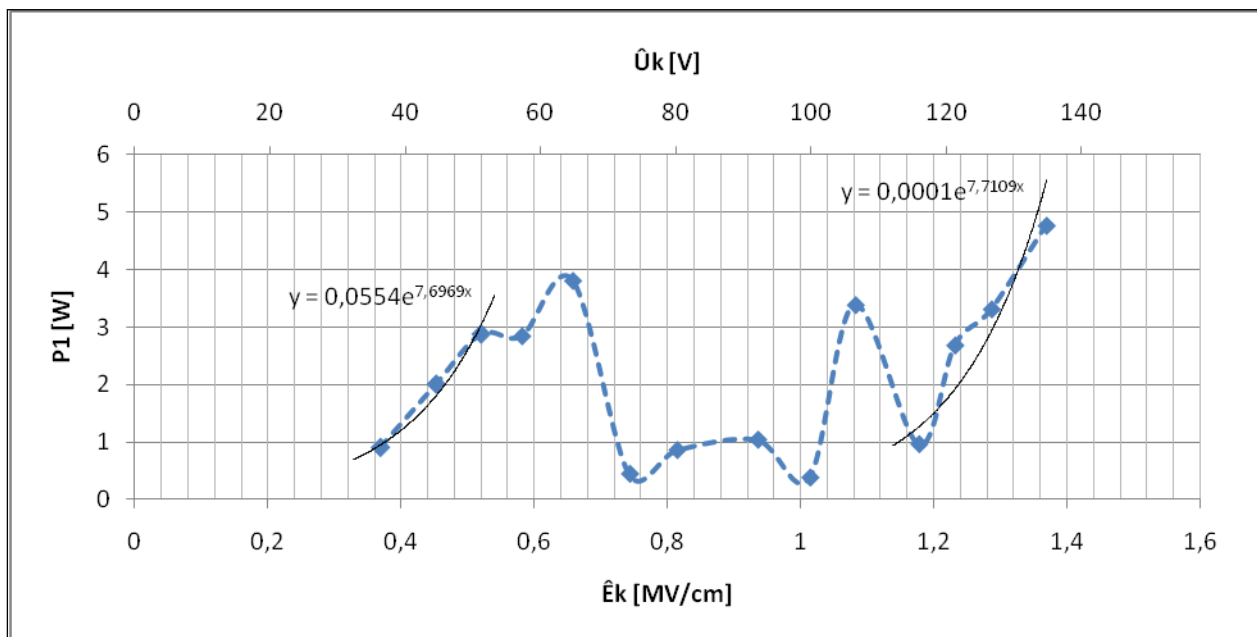
Σχήμα 4.3.1-1: Η ισχύς $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.3.1-2: Η ισχύς $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.3.1-3: Η ισχύς $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.3.1-4: Η ισχύς $P_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$

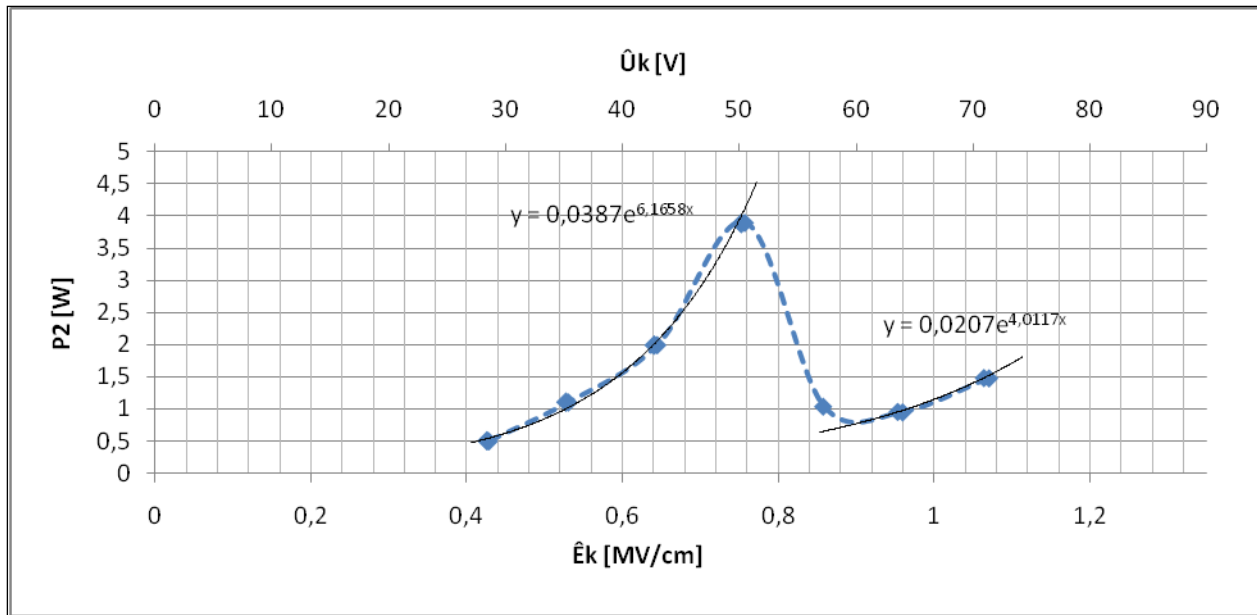
Οι καμπύλες προσεγγίστηκαν και πάλι εκθετικά κατά τμήματα, και αυτές οι προσεγγίσεις παρουσιάζονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα:

E_k [MV/cm]	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1.2	1.2-1.4
d=1mm +1,2/50μs	$P_1=0,0018 \cdot e^{11,239 \cdot E_k}$	$P_1=0,0143 \cdot e^{5,5651 \cdot E_k}$	$P_1=0,0417 \cdot e^{2,3942 \cdot E_k}$	Δεν έχουν ληφθεί μετρήσεις σε αυτό το διάστημα
d=1mm -1,2/50μs	$P_1=0,008 \cdot e^{8,8092 \cdot E_k}$	$P_1=0,0495 \cdot e^{4,4189 \cdot E_k}$	$P_1=0,0146 \cdot e^{2,9676 \cdot E_k}$	Δεν έχουν ληφθεί μετρήσεις σε αυτό το διάστημα
d=2mm +1,2/50μs	$P_1=0,0077 \cdot e^{4,5601 \cdot E_k}$			Απότομη βύθιση στο 1,2MV/cm λόγω δυνάμεων Coulomb και μετά πάλι αύξουσα
d=2mm -1,2/50μs	$P_1=0,0554 \cdot e^{7,6969 \cdot E_k}$	Απότομη βύθιση στο 1MV/cm λόγω δυνάμεων Coulomb		$P_1=10^{-4} \cdot e^{7,7109 \cdot E_k}$

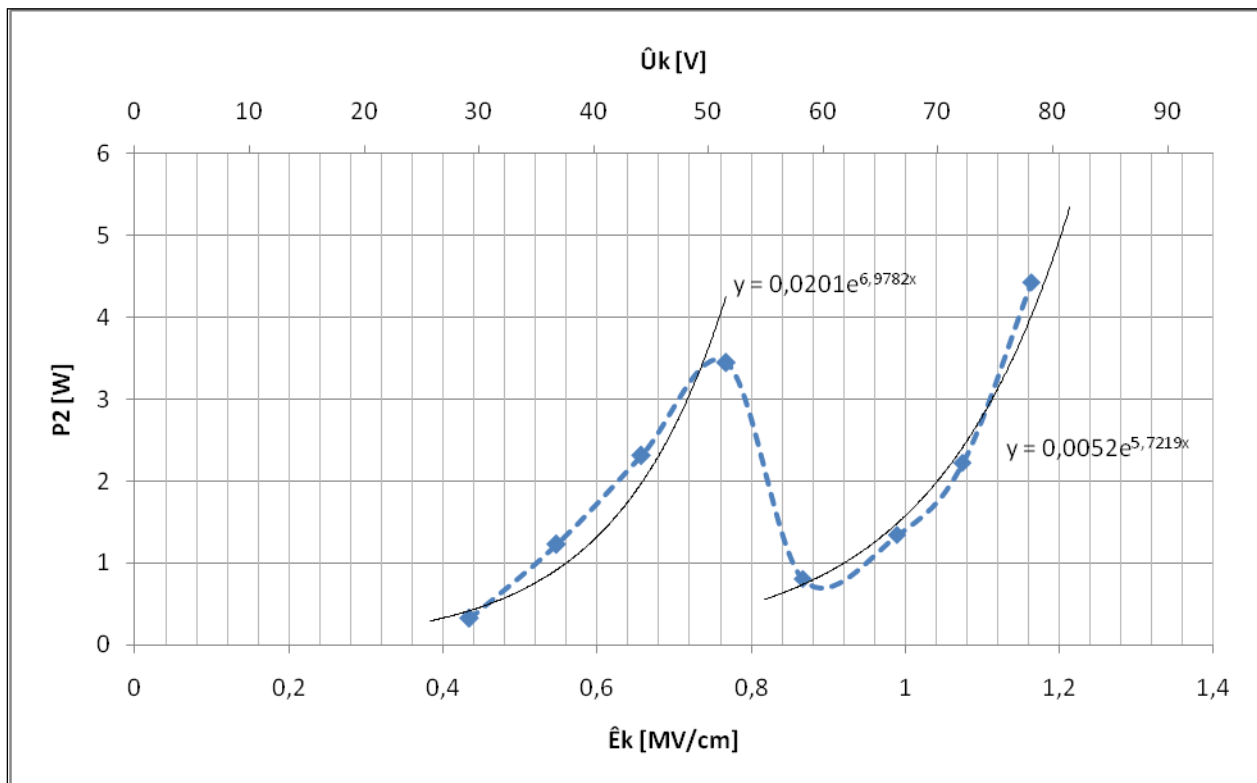
Πίνακας 4.3.1-1: Συγκεντρωτικός πίνακας με τη μαθηματική ή ποιοτική περιγραφή της συμπεριφοράς της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων ως προς την ένταση του πεδίου $P_1 = f(\hat{E}_k)$ για κάθε περίπτωση από τις τέσσερις που εξετάστηκαν και σε κάθε διάστημα έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

4.3.2 Η ισχύς P_2 στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων.

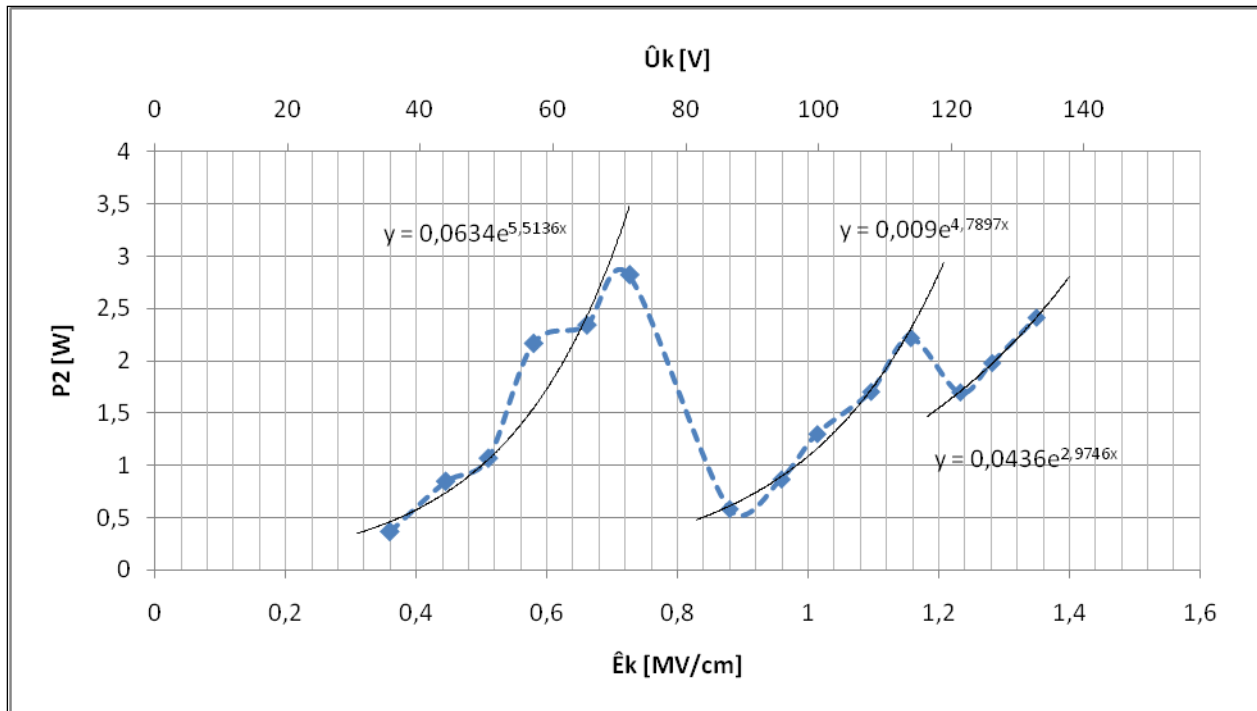
Επειδή η ισχύς P_2 στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων δίνεται από τη σχέση 2.3-13 ($P_2 = W_2 / t_2$) αναμένεται να ακολουθεί τη συμπεριφορά της ενέργειας W_2 καθώς εφαρμόζονται ισχυρότερες κρουστικές τάσεις με τη διαφορά ότι γίνεται διαίρεση κατά ένα παράγοντα t_2 ο οποίος αυξάνεται κυμαινόμενος από 10-40μs. Συνεπώς, οι χαρακτηριστικές $P_2 = f(\hat{E}_k)$ και $W_2 = f(\hat{E}_k)$ μοιάζουν ως προς τη μορφή. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τα γραφήματα 3.1-9, 3.2-9, 3.3-9, 3.4-9



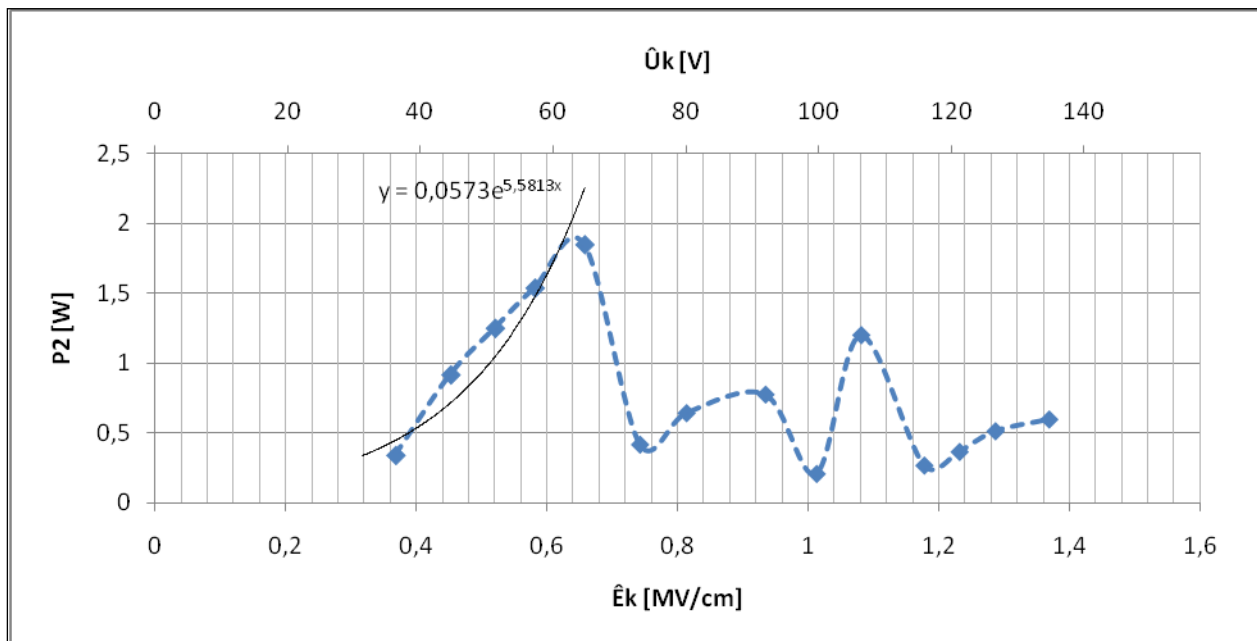
Σχήμα 4.3.2-1: Η ισχύς $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.3.2-2: Η ισχύς $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.3.2-3: Η ισχύς $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.3.2-4: Η ισχύς $P_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$

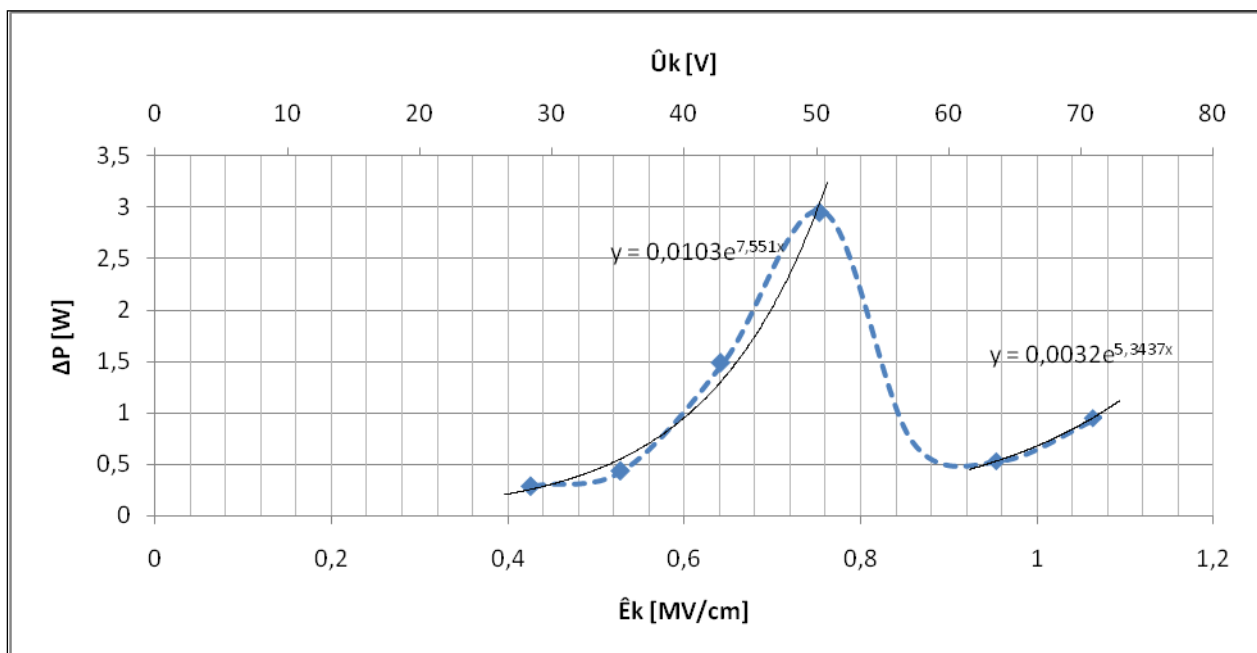
Στον παρακάτω πίνακα γίνεται εκθετική προσέγγιση των χαρακτηριστικών $P_2 = f(\hat{E}_k)$:

E_k [MV/cm]	0.4-0.8	0.8-1.2	1.2-1.4
d=1mm +1,2/50μs	$P_2=0,0387 \cdot e^{6,1658 \cdot E_k}$	$P_2=0,0207 \cdot e^{4,0117 \cdot E_k}$	Δεν έχουν ληφθεί μετρήσεις σε αυτό το διάστημα
d=1mm -1,2/50μs	$P_2=0,0201 \cdot e^{6,9782 \cdot E_k}$	$P_2=0,0052 \cdot e^{5,7219 \cdot E_k}$	Δεν έχουν ληφθεί μετρήσεις σε αυτό το διάστημα
d=2mm +1,2/50μs	$P_2=0,0634 \cdot e^{5,5136 \cdot E_k}$	$P_2=0,009 \cdot e^{4,7897 \cdot E_k}$ και απότομη βύθιση στο 1,2MV/cm λόγω δυνάμεων Coulomb	$P_2=0,0436 \cdot e^{2,9746 \cdot E_k}$
d=2mm -1,2/50μs	$P_2=0,0573 \cdot e^{5,5813 \cdot E_k}$	απότομη βύθιση στο 1MV/cm λόγω δυνάμεων Coulomb	Αύξουσα με απόκλιση από εκθετική

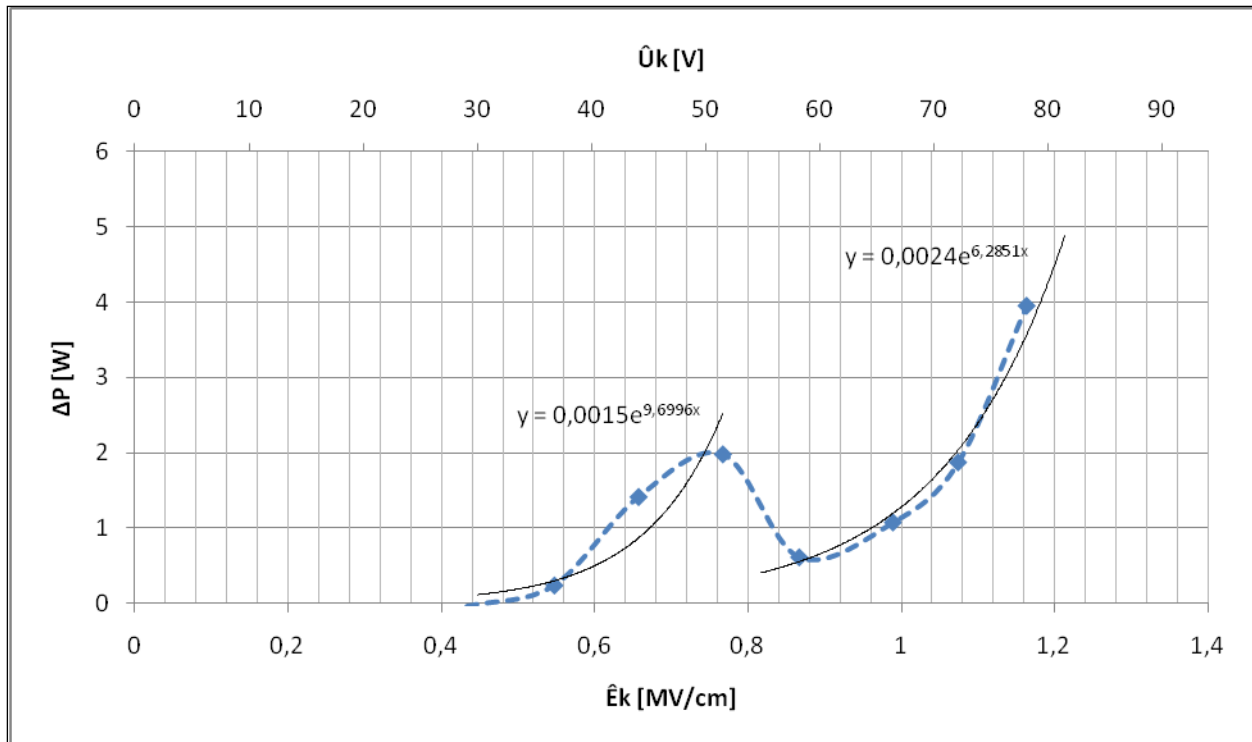
Πίνακας 4.3.2-1: Συγκεντρωτικός πίνακας με τη μαθηματική ή ποιοτική περιγραφή της συμπεριφοράς της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων ως προς την ένταση του πεδίου $P_2 = f(\hat{E}_k)$ για κάθε περίπτωση από τις τέσσερις που εξετάστηκαν και σε κάθε διάστημα έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

4.3.3 Η συνολική μεταβολή της ισχύος ΔP στον πυκνωτή μέτρησης κατά το φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων.

Για πάχος δοκιμίου $d=1\text{mm}$ οι καμπύλες και για τις δύο περιπτώσεις πολικότητας προσεγγίζονται εκθετικά κατά τμήματα. Φαίνεται η εγγύτητα των εκθετικών συντελεστών σε κάθε διάστημα της έντασης πεδίου. Η φαινομενική βύθιση στα 0,8MV/cm οφείλεται, όπως έχει προαναφερθεί, στη χρήση πυκνωτή μέτρησης με μεγάλη χωρητικότητα για λόγους μετρήσεων.



Σχήμα 4.3.3-1: Η μεταβολή της ισχύος $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τις μερικές εκκενώσεις για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις +1,2/50μs

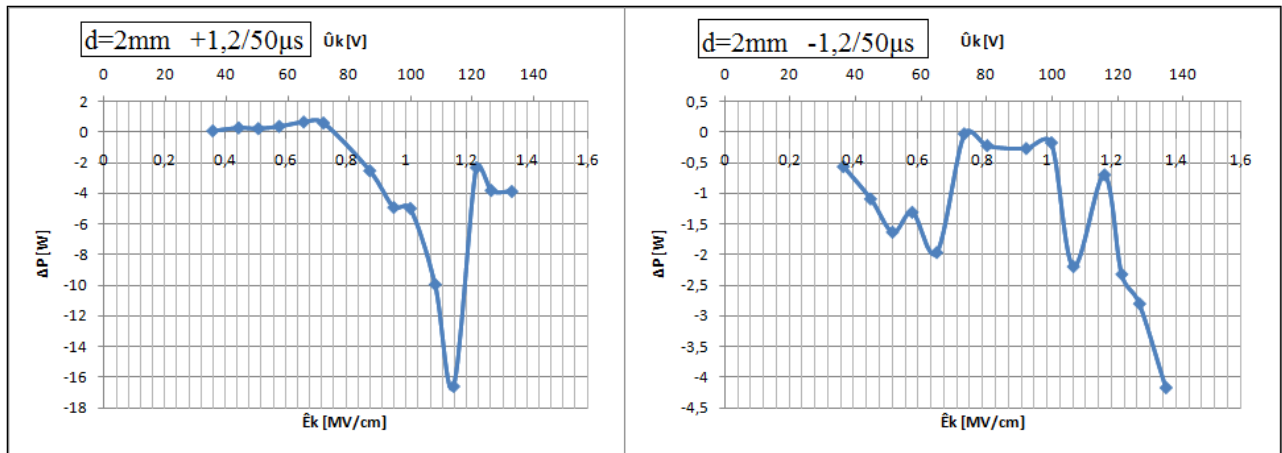


Σχήμα 4.3.3-2: Η μεταβολή της ισχύος $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά τις μερικές εκκενώσεις για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$

E_k [MV/cm]	0.4-0.8	0.8-1.2
$d=1\text{mm}$ $+1,2/50\mu\text{s}$	$\Delta P = 0,0103 \cdot e^{7,551 \cdot E_k}$	$\Delta P = 0,032 \cdot e^{5,3437 \cdot E_k}$
$d=1\text{mm}$ $-1,2/50\mu\text{s}$	$\Delta P = 0,0015 \cdot e^{9,6996 \cdot E_k}$	$\Delta P = 0,0024 \cdot e^{6,2851 \cdot E_k}$

Πίνακας 4.3.3-1: Συγκεντρωτικός πίνακας με τις εκθετικές προσεγγίσεις της μεταβολής της ισχύος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τις μερικές εκκενώσεις ως προς την ένταση του πεδίου $\Delta P = f(\hat{E}_k)$ για δοκίμια πάχους $d=1\text{mm}$ στις περιπτώσεις θετικής και αρνητικής πολικότητας σε κάθε διάστημα έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Για πάχος δοκιμίου $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις θετικής πολικότητας δεν υπάρχει πρακτικά διαφορά στην ισχύ ανάμεσα στην αρχή και το τέλος των μερικών εκκενώσεων για $E_k < 0,8\text{MV/cm}$. Για μεγαλύτερες τιμές έντασης η ΔP γίνεται αρνητική με μεγάλες τιμές κατά απόλυτη τιμή (για $E_k = 1,16\text{MV/cm} \rightarrow \Delta P_{\min} = -16\text{W}$) δηλαδή η ισχύς κατά την έναρξη των εκκενώσεων είναι σημαντικά μεγαλύτερη απ' ό,τι στο τέλος τους. Όταν η πολικότητα είναι αρνητική, τότε $P_2 < P_1$ για όλες τις τιμές έντασης αν και στο διάστημα $0,76 \dots 1\text{MV/cm}$ η διαφορά τους είναι ελάχιστη.

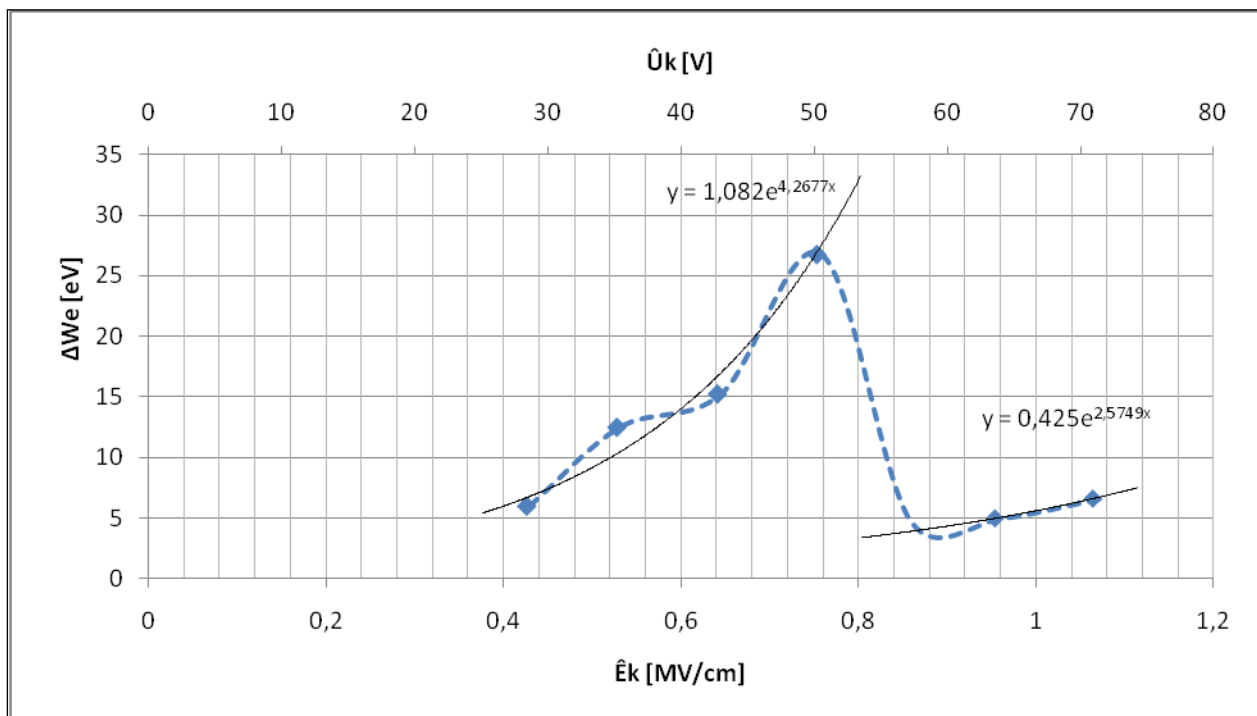


Σχήμα 4.3.3-3: Η μεταβολή της ισχύος $\Delta P = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ του πυκνωτή μέτρησης κατά το φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$ και $-1,2/50\mu\text{s}$

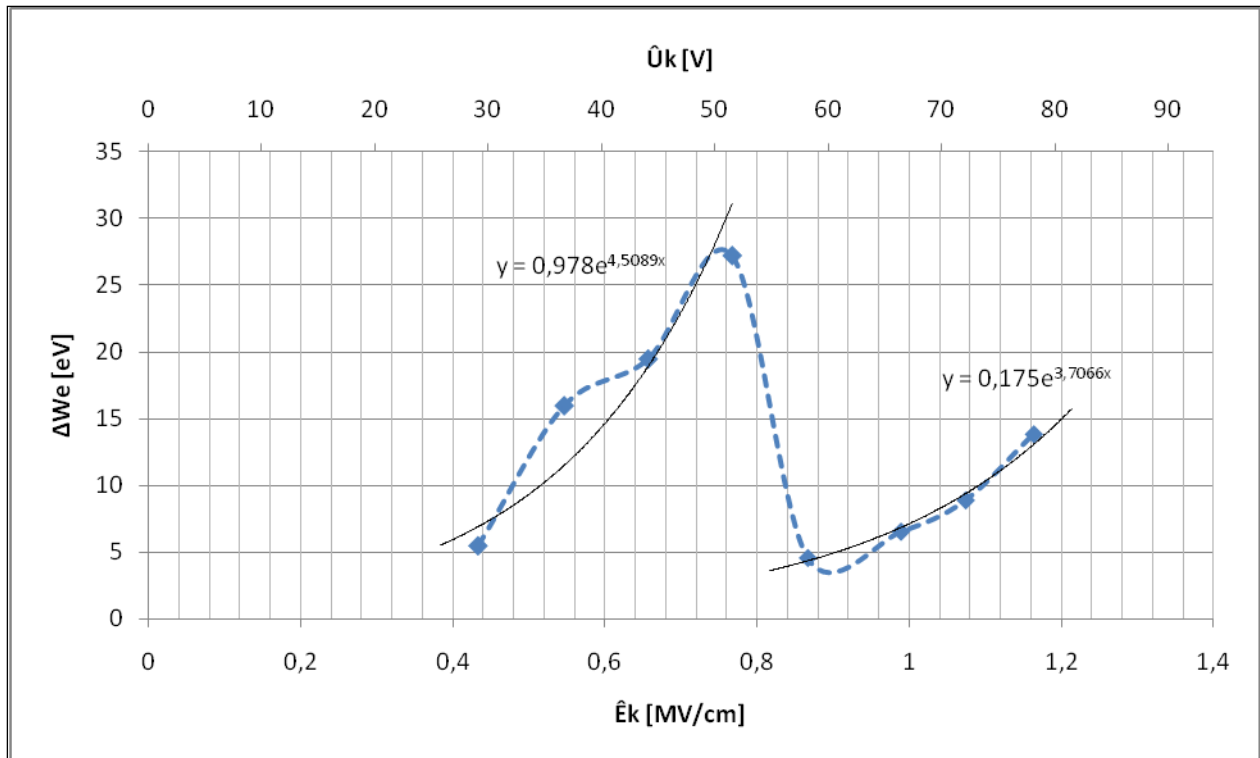
4.4. Ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων

4.4.1 Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

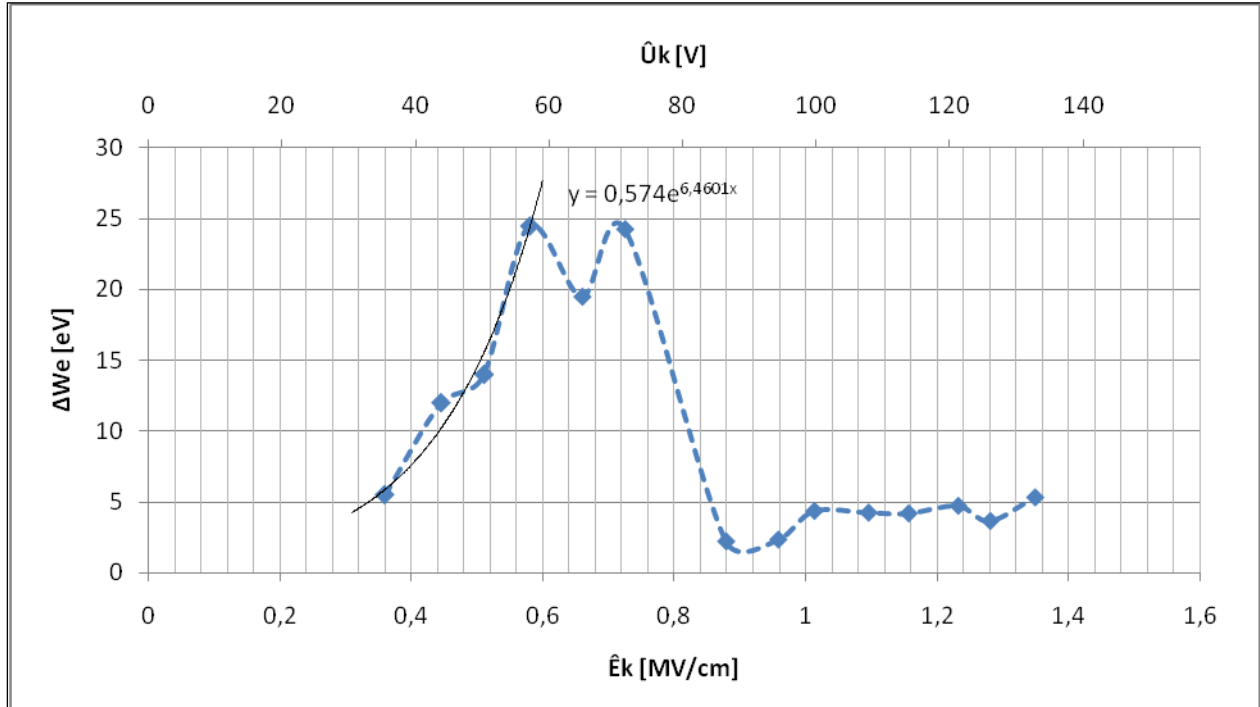
Στα γραφήματα 4.4.1-1, 4.4.1-2, 4.4.1-3, 4.4.1-4 προσεγγίζονται εκθετικά οι καμπύλες κατά τμήματα και για τις δύο περιπτώσεις πολικότητας όπου, φυσικά, η προσέγγιση μπορεί να γίνει χωρίς σημαντικό σφάλμα.



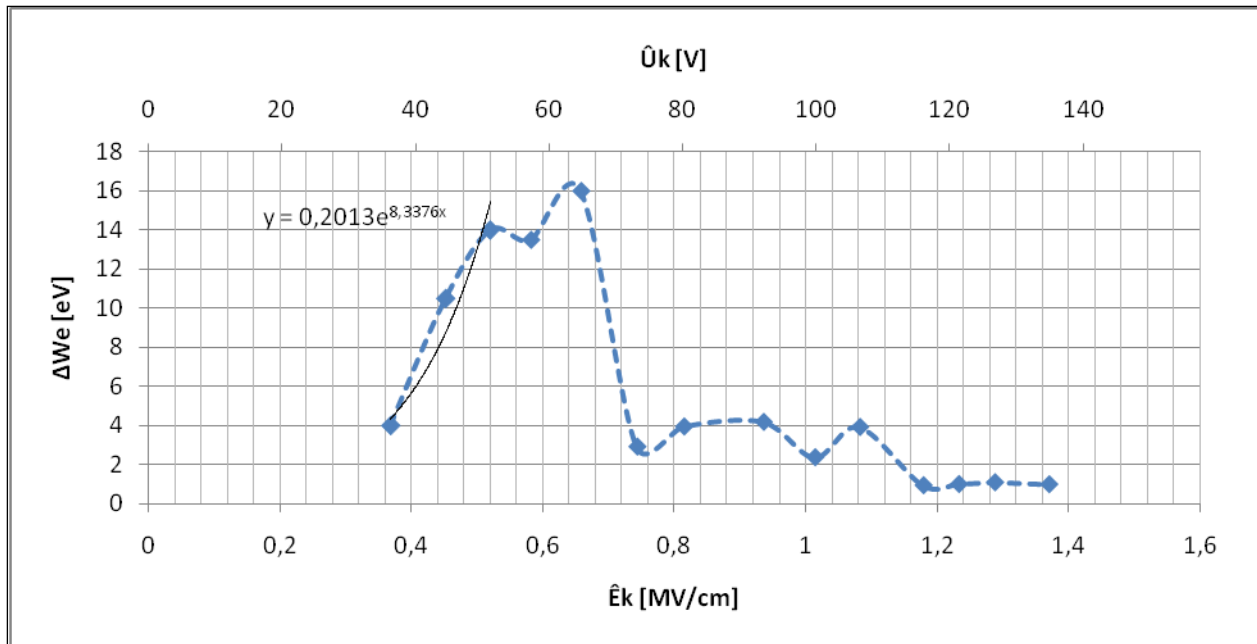
Σχήμα 4.4.1-1: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.4.1-2: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu s$



Σχήμα 4.4.1-3: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu s$



Σχήμα 4.4.1-4: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$

Η φαινομενική βύθιση στα $0,8\text{MV/cm}$ οφείλεται, όπως έχει προαναφερθεί, στη χρήση πυκνωτή μέτρησης με μεγάλη χωρητικότητα για λόγους μέτρησης. Εξαιτίας της μεγάλης χωρητικότητας, μειώνεται πολύ η σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή μέτρησης και συνεπώς μειώνεται και η τάση u_m σε αυτόν λόγω καταμερισμού της κρουστικής. Για παράδειγμα, όταν αντί για $C_m=20\text{nF}$ χρησιμοποιηθεί $C_m=210\text{nF}$ τότε αν εφαρμοστεί η ίδια κρουστική τάση στη διάταξη, ο πυκνωτής μέτρησης θα δεχθεί στα άκρα του 10 φορές μικρότερη τάση και αυτή θα μετρηθεί στον παλμογράφο. Ωστόσο, μετά τη βύθιση στο γράφημα η πλεονάζουσα ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων συνεχίζει κανονικά την αύξουσα συμπεριφορά της αλλά επειδή πλέον το φαινόμενο εισέρχεται σε διάστημα έντασης πεδίου υψηλών τιμών, ο ρυθμός αύξησης είναι σημαντικά μικρότερος όπως φαίνεται και από τους εκθετικούς συντελεστές.

Θεωρητικά, με την περαιτέρω αύξηση της έντασης του πεδίου πάνω από $0,8\text{MV/cm}$ θα έπρεπε να αυξάνεται η ενέργεια των ηλεκτρονίων αλλά παραμένει μικρή σε σχέση με τις τιμές που είχε για ένταση μικρότερη από $0,8\text{MV/cm}$, πράγμα που προκαλείται από το φαινόμενο του **ιονισμού με κρούσεις** για τη δημιουργία των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

E_k [MV/cm]	0.4-0.8	0.8-1.2	1.2-1.4
d=1mm +1,2/50μs	$\Delta W_e = 1,082 \cdot e^{4,2677 \cdot E_k}$	$\Delta W_e = 0,425 \cdot e^{2,5749 \cdot E_k}$	Δεν έχουν ληφθεί μετρήσεις σε αυτό το διάστημα
d=1mm -1,2/50μs	$\Delta W_e = 0,978 \cdot e^{4,5089 \cdot E_k}$	$\Delta W_e = 0,175 \cdot e^{3,7066 \cdot E_k}$	Δεν έχουν ληφθεί μετρήσεις σε αυτό το διάστημα
d=2mm +1,2/50μs	$\Delta W_e = 0,574 \cdot e^{6,4601 \cdot E_k}$	Μετά τα 0,8MV/cm τάση για εκθετική αύξηση αλλά σταθεροποιείται σε μικρή τιμή μετά το 1MV/cm	Παραμένει σε μικρή τιμή αλλά βύθιση στα 1,3MV/cm λόγω δυνάμεων Coulomb
d=2mm -1,2/50μs	$\Delta W_e = 0,2013 \cdot e^{8,3376 \cdot E_k}$	Μετά τα 0,76MV/cm αυξητική τάση αλλά σταθεροποιείται σε μικρή τιμή μετά το 0,8MV/cm. Βύθιση λόγω δυνάμεων Coulomb στο 1MV/cm.	Σταθεροποίηση σε ακόμη χαμηλότερη τιμή λόγω υψηλής E και αφού βάλαμε $C_m = 1000nF$

Πίνακας 4.4.1-1: Συγκεντρωτικός πίνακας με τη μαθηματική ή ποιοτική περιγραφή της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων ως προς την ένταση του πεδίου $\Delta W_e = f(\hat{E}_k)$ για κάθε περίπτωση από τις τέσσερις που εξετάστηκαν και σε κάθε διάστημα έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Όσον αφορά στην πλεονάζουσα ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων παρατίθεται ο ακόλουθος συγκεντρωτικός πίνακας:

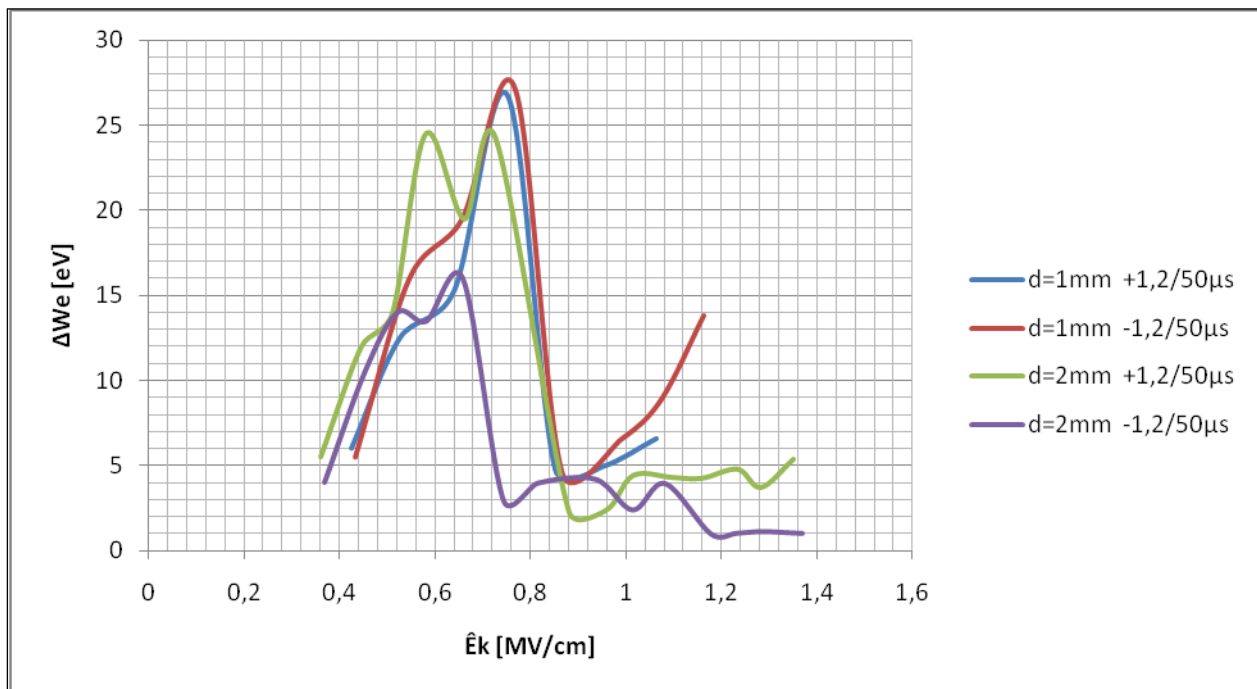
E_k [MV/cm]	0.4-0.8	0.8-1.2	1.2-1.4
d=1mm +1,2/50μs	$\Delta W_e = 5 \dots 25eV$ (υπεριώδεις)	$\Delta W_e = 5 \dots 27 eV$ (υπεριώδεις)	Δεν έχουν ληφθεί μετρήσεις σε αυτό το διάστημα
d=1mm -1,2/50μs	$\Delta W_e = 5 \dots 27eV$ (υπεριώδεις)	$\Delta W_e = 4 \dots 15eV$ (υπεριώδεις)	Δεν έχουν ληφθεί μετρήσεις σε αυτό το διάστημα
d=2mm +1,2/50μs	$\Delta W_e = 5 \dots 25eV$ (υπεριώδεις)	$\Delta W_e = 2 \dots 5 eV$ (ορατό)	
d=2mm -1,2/50μs	$\Delta W_e = 4 \dots 16eV$ (υπεριώδεις)	$\Delta W_e = 4 \dots 1eV$ (ορατό)	

Πίνακας 4.4.1-2: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα διαστήματα όπου εκτείνεται η ενέργεια ΔW_e των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων για κάθε περίπτωση από τις τέσσερις που εξετάστηκαν και σε κάθε διάστημα έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- 1) Στις περιπτώσεις που το πάχος δοκιμίου είναι μεγαλύτερο ($d=2mm$) και για υψηλές τιμές έντασης πεδίου $\hat{E}_k > 0,8MV/cm$, τα φωτόνια που θα εκπεμφθούν κατά την επιβράδυνση των ηλεκτρονίων στο ηλεκτρόδιο, θα βρίσκονται στην περιοχή της ορατής ακτινοβολίας. Αυτό προέκυψε με βάση το γεγονός ότι όλες οι πλεονάζουσες ενέργειες είναι μικρότερες από 5eV.

- 2) Όταν το πάχος του δοκιμίου είναι μικρότερο ($d=1\text{mm}$) για όλες τις τιμές έντασης πεδίου αλλά και στο πιο παχύ δοκίμιο στις χαμηλές τιμές έντασης προκύπτει ότι τα φωτόνια που θα εκπεμφθούν κατά την επιβράδυνση των ηλεκτρονίων στο ηλεκτρόδιο θα βρίσκονται στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας αφού σε αυτές της περιπτώσεις το πλεόνασμα ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερο.
- 3) Όταν το μόνο κριτήριο είναι η ένταση του πεδίου (δηλαδή ανεξάρτητα του πάχους του δοκιμίου ή της πολικότητας της εφαρμοζόμενης τάσης) τότε σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται ότι μετά το κατώφλι των $0,8\text{MV/cm}$ της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, μειώνεται δραματικά το πλεόνασμα ενέργειας των ηλεκτρονίων πάνω από τη στάθμη Fermi με αποτέλεσμα να εκπέμπονται φωτόνια μικρότερης ενέργειας και μεγαλύτερου μήκους κύματος, δηλαδή προς την περιοχή του ορατού φάσματος.

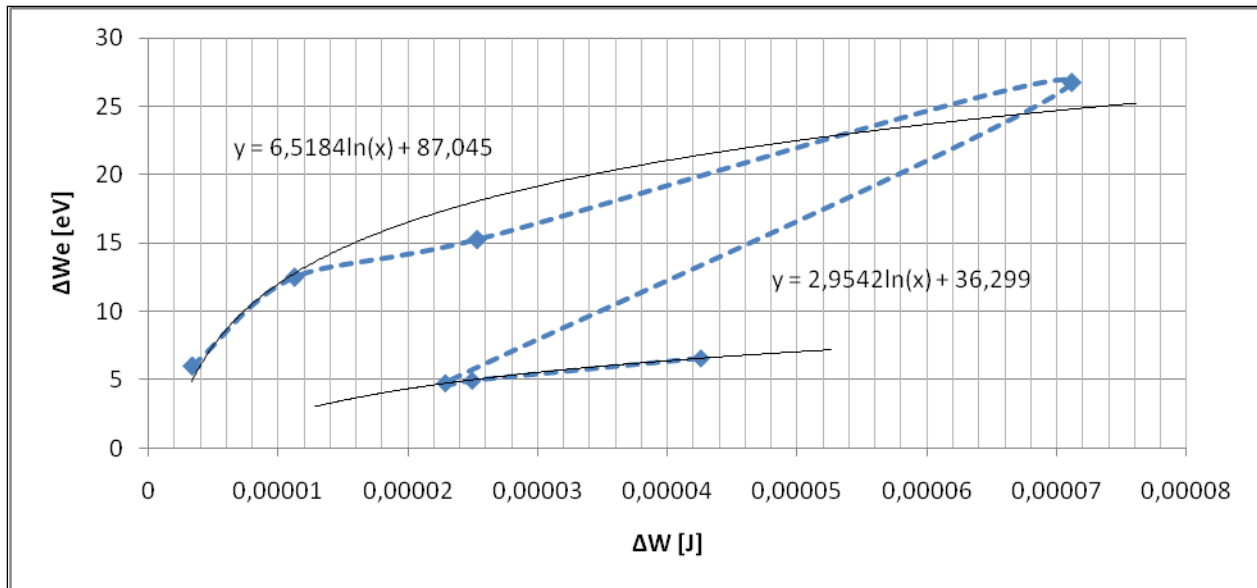


Σχήμα 4.4.1-5: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάζουμε σε από κοινού παράσταση ως προς την ένταση του πεδίου

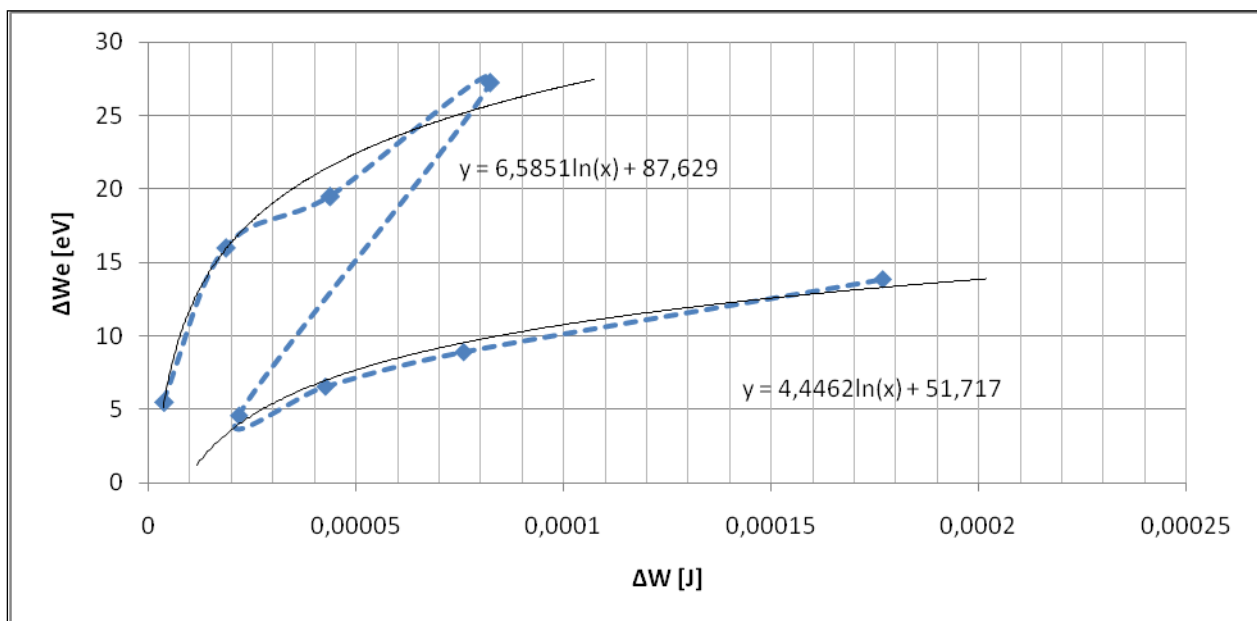
Από τη συγκριτική γραφική παράσταση των $\Delta W_e = f(\hat{E}_k)$ του σχήματος 4.4.1-5 για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάζονται, παρατηρείται ότι για πάχος δοκιμίου $d=1\text{mm}$, η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη για $d=2\text{mm}$ όταν $\hat{E}_k > 0,7\text{MV/cm}$ και αυτό γίνεται ακόμα πιο έντονο για $\hat{E}_k > 0,9\text{MV/cm}$.

4.4.2 Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με τη μεταβολή της ενέργειας του πεδίου

Αρχικά εξετάζονται τα γραφήματα 4.4.2-1, 4.4.2-2 για το δοκίμιο μικρότερου πάχους ($d=1\text{mm}$). Η συμπεριφορά των μεγεθών ΔW_e και ΔW έχει περιγραφεί και στα προηγούμενα αλλά χωριστά και το καθένα σε συνάρτηση με την ένταση του πεδίου.



Σχήμα 4.4.2-1: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



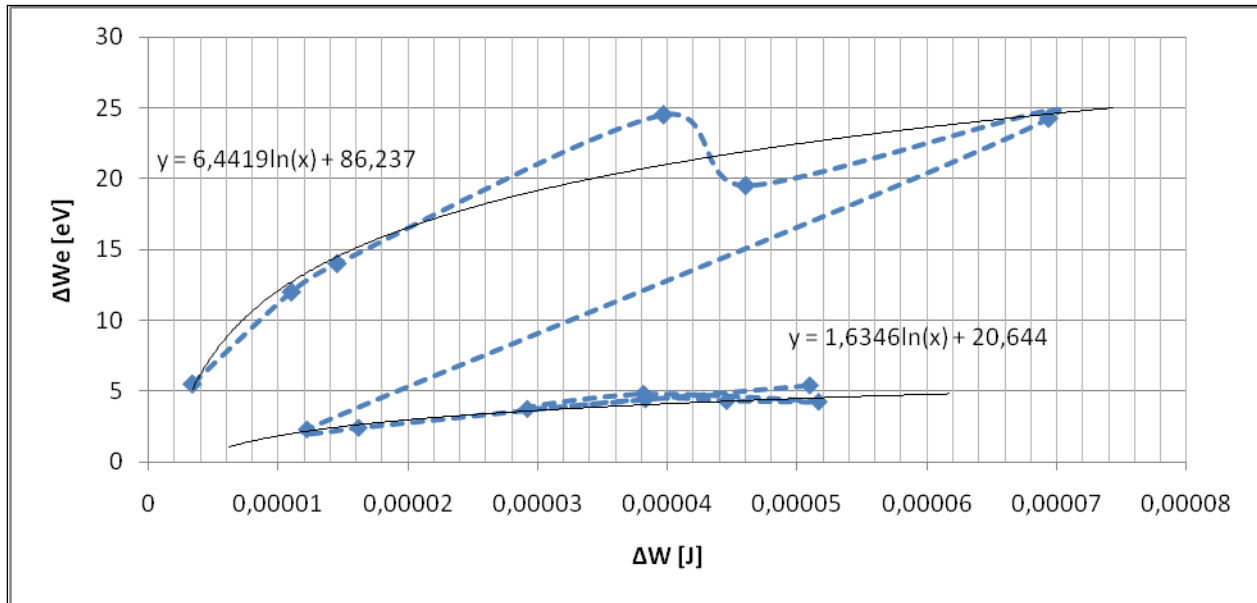
Σχήμα 4.4.2-2: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$

Καθώς, λοιπόν, (παράγραφοι 4.2.3 και 4.2.4), αυξάνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, γίνεται μεγαλύτερη η $\Delta W = W_2 - W_1 \approx W_2$ αφού $W_2 \gg W_1$ και ενώ η W_2 είναι αύξουσα συνάρτηση. Αντίστοιχα, στην παράγραφο 4.4.1 διαπιστώθηκε ότι με την αύξηση της πεδιακής έντασης αυξάνεται και η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Η παραπάνω αύξουσα συμπεριφορά των δύο μεγεθών ερμηνεύει και την αύξουσα καμπύλη πάνω στην οποία βρίσκονται οι τέσσερις πρώτες τιμές των δύο γραφημάτων.

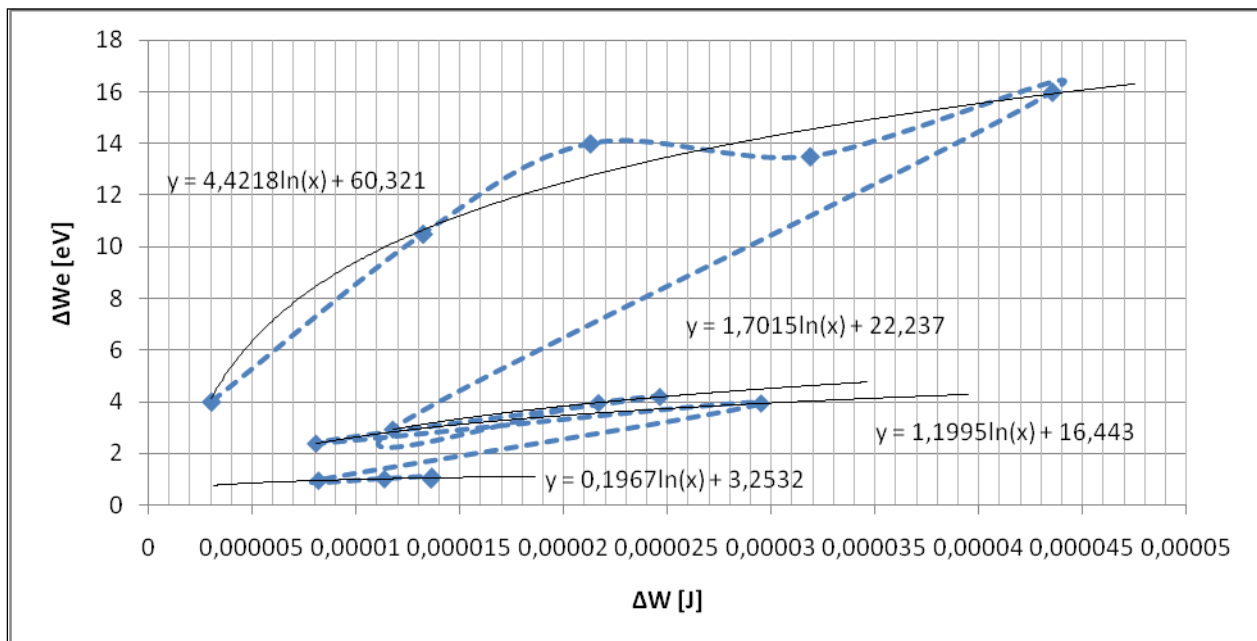
Μετά από αυτό το σημείο παρατηρείται μια βύθιση και των δύο μεγεθών που σχετίζεται με την επιλογή μεγαλύτερης χωρητικότητας στον πυκνωτή μέτρησης όπως εξηγήθηκε στις παραγράφους 4.2.3, 4.2.4 και 4.4.1. Αυτή η βύθιση είναι φαινομενική, όπως εξηγήθηκε, και δε

σχετίζεται με την εκδήλωση κάποιου διαφορετικού φαινομένου μέσα στο υλικό. Εξάλλου, τα δύο μεγέθη που εξετάζονται συνεχίζουν κανονικά την αύξουσα πορεία που είχαν.

Τα ίδια ακριβώς ισχύουν και για τα αντίστοιχα γραφήματα για το δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ με τη διαφορά ότι με την αύξηση της έντασης πέρα από κάποια τιμή ($0,8\text{MV/cm}$) η εναλλαγή της επίδρασης των μερικών εκκενώσεων και των δυνάμεων Coulomb, ο ιονισμός με κρούσεις, η ανάγκη για χρήση αυξημένων χωρητικοτήτων στον πυκνωτή μέτρησης και η στατιστική (χωρικά) παρουσία ανομοιογενειών έχει σαν αποτέλεσμα στις υψηλές εντάσεις που εφαρμόζονται στο πιο παχύ δοκίμιο, να παρουσιάζονται αυτές οι «παλινδρομήσεις» τιμών που φαίνονται στα σχήματα.



Σχήμα 4.4.2-3: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $+1,2/50\mu\text{s}$



Σχήμα 4.4.2-4: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων για δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$ και κρουστικές τάσεις $-1,2/50\mu\text{s}$

Ανάλογα με το διάστημα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, το κάθε γράφημα μπορεί να προσεγγιστεί τμηματικά με λογαριθμικές συναρτήσεις που συνοπτικά παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

E_k [MV/cm]	0.4-0.8	0.8-1	1-1.2	1.2-1.4
d=1mm +1,2/50μs	$\Delta W_e=6,5184 \cdot \ln(\Delta W)+87,045$	$\Delta W_e=2,9542 \cdot \ln(\Delta W)+36,299$	Δεν υπάρχουν μετρήσεις γι' αυτό το διάστημα εντάσεων	
d=1mm -1,2/50μs	$\Delta W_e=6,5851 \cdot \ln(\Delta W)+87,629$	$\Delta W_e=4,446 \cdot \ln(\Delta W)+51,717$		Δεν υπάρχουν μετρήσεις γι' αυτό το διάστημα εντάσεων
d=2mm +1,2/50μs	$\Delta W_e=6,4419 \cdot \ln(\Delta W)+86,237$	$\Delta W_e=1,364 \cdot \ln(\Delta W)+20,644$		Οι τιμές αυτού του διαστήματος δεν προσεγγίζονται ικανοποιητικά
d=2mm -1,2/50μs	$\Delta W_e=4,4218 \cdot \ln(\Delta W)+60,321$	$\Delta W_e=1,7015 \cdot \ln(\Delta W)+22,237$	$\Delta W_e=1,1995 \cdot \ln(\Delta W)+16,443$	$\Delta W_e=0,1967 \cdot \ln(\Delta W)+3,2532$ Περίπου σταθερό=3,25eV

Πίνακας 4.4.2-1: Συγκεντρωτικός πίνακας με τη μαθηματική ή ποιοτική περιγραφή της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων ως προς τη μεταβολή της ενέργειας στον πυκνωτή μέτρησης $\Delta W_e = f(\Delta W)$ για κάθε περίπτωση από τις τέσσερις που εξετάστηκαν και σε κάθε διάστημα έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1 Διαπιστώσεις και προτάσεις στον τομέα της έρευνας

Από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, η συμβολή της εργασίας αυτής στην έρευνα έδωσε τα παρακάτω δύο χρήσιμα αποτελέσματα:

1. Φαίνεται ότι η ηλεκτρική καταπόνηση (τεχνητή γήρανση) του συνδυασμού «βακελίτης-λάδι μετασχηματιστών» με κεραυνικές κρουστικές τάσεις έχει ως αποτέλεσμα την εκδήλωση δύο σημαντικών παραγόντων γήρανσης και διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών, που είναι: οι μερικές εκκενώσεις και οι δυνάμεις Coulomb. Μπορεί κανείς να υποθέσει ότι λόγω των μερικών εκκενώσεων προκαλούνται άλματα δυναμικού στο δοκίμιο και εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις.
2. Σε ότι αφορά τη διαδικασία των μετρήσεων, θα πρέπει ο πυκνωτής μέτρησης (C_m) να είναι ο ίδιος σε όλα τα επίπεδα τάσης (δηλαδή να έχει την ίδια τιμή), γιατί η αύξηση του μεγέθους του C_m σε μεγαλύτερες τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης (που έγινε αναγκαστικά για λόγους αλλαγής της κλίμακας των μετρήσεων στον παλμογράφο) δε διευκολύνει τη διερεύνηση των φαινομένων σε σχέση με τον κυρίαρχο ρόλο των μερικών εκκενώσεων ή των δυνάμεων Coulomb αναλόγως της τιμής του εφαρμοζόμενου πεδίου. Για το θέμα αυτό προτείνεται στις περιπτώσεις αύξησης του μεγέθους του πυκνωτή ($C_{m2} > C_{m1}$) να γίνει διόρθωση των ήδη υπάρχουσών μετρήσεων των αλμάτων δυναμικού (τιμές u_1 , u_2 και Δu) και των αντίστοιχων προς αυτές τιμών φορτίου (q_1 , q_2 και Δq) να διορθωθούν ως ακολούθως:
 - Αν u^* , q^* είναι οι μετρούμενες τιμές με πυκνωτή μέτρησης C_m , και
 - U , q είναι οι μετρούμενες τιμές με πυκνωτή μέτρησης $C_M > C_m$,
 - Τότε επειδή $W = 0,5 u^* q^* = 0,5 u q$, ισχύει $u^* q^* = u q$,
 - ή : $u^{*2} C_m = u^2 C_M \rightarrow u^{*2} = u (C_M / C_m)^{1/2}$

δηλαδή για $C_M > C_m$ ισχύουν οι σχέσεις διόρθωσης:

$$u_1^* = u_1 \sqrt{C_M / C_m} \quad (5.1-1)$$

$$q_1^* = u_1 \sqrt{C_M C_m} \quad (5.1-2)$$

$$u_2^* = u_2 \sqrt{C_M / C_m} \quad (5.1-3)$$

$$q_2^* = u_2 \sqrt{C_M C_m} \quad (5.1-4)$$

$$\Delta u^* = \Delta u \sqrt{C_M / C_m} \quad (5.1-5)$$

$$\Delta q^* = \Delta u \sqrt{C_M C_m} \quad (5.1-6)$$

Σε ότι αφορά στις πρακτικές εφαρμογές προτείνεται η τιμή u_1 (ή η τιμή W_1) κατά την εκδήλωση ενός και μοναδικού άλματος δυναμικού, να είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης μεταξύ ίδιων δοκιμίων (π.χ. μετασχηματιστών διανομής με τα ίδια ονομαστικά στοιχεία, κ.λ.π.).

5.2 Διαπιστώσεις και προτάσεις στον τομέα των πρακτικών εφαρμογών: Κριτήρια ποιότητας μονωτικής συμπεριφοράς

Στην παρούσα εργασία αναλύθηκε η συμπεριφορά των μεγεθών της σύνθετης αντίστασης, της ενέργειας και της ισχύος καθώς και της περίσσειας της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων πάνω από τη στάθμη Fermi κατά την έναρξη και λήξη των μερικών εκκενώσεων (που θεωρείται από τους βασικότερους παράγοντες γήρανσης των μονωτικών) καθώς αυξάνεται η εφαρμοζόμενη κρουστική τάση στο δοκίμιο βακελίτη για περιπτώσεις διαφορετικού πάχους και διαφορετικής πολικότητας των ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

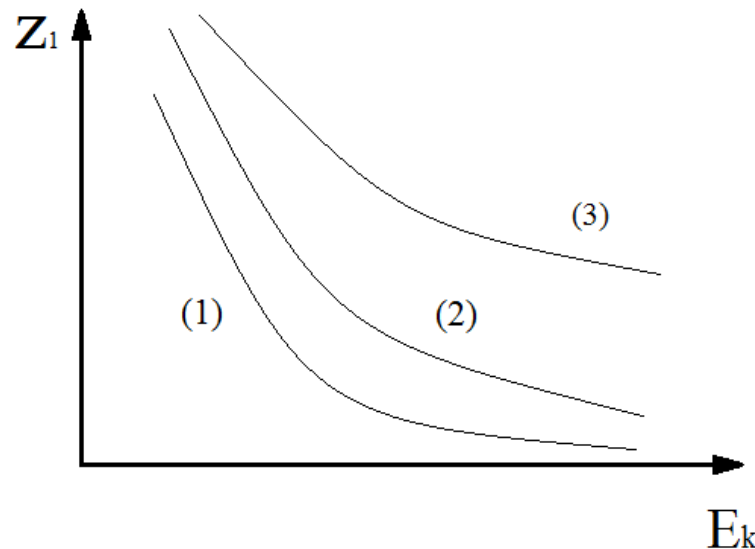
Το συγκεκριμένο μονωτικό υλικό (βακελίτης) συμμετέχει στην κατασκευή διάφορων ηλεκτρομηχανολογικών κατασκευών συνεπώς τα μεγέθη που αναλύονται σε αυτή την εργασία μπορούν να περιγράψουν τη μονωτική συμπεριφορά κατασκευών που χρησιμοποιούν στη μόνωσή τους το βακελίτη αλλά και άλλα στερεά μονωτικά αφού και αυτά θα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά από ποιοτικής πλευράς και η συμπεριφορά τους θα ερμηνεύεται από τα ίδια φαινόμενα με βάση την επιστημονική θεωρία.

Συνεπώς, μέσα από τις μαθηματικές προσεγγίσεις (κυρίως εκθετικών και λογαριθμικών συναρτήσεων) που έγιναν καθώς και μέσα από τα γραφήματα που προέκυψαν με βάση τις μετρήσεις, επιδιώκεται η εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων και κριτηρίων (μέσα από συγκριτικά γραφήματα ή σύγκριση των παραμέτρων των προσεγγιστικών συναρτήσεων) ώστε να είναι κανείς σε θέση να χαρακτηρίσει και να αξιολογήσει τη μονωτική συμπεριφορά μιας ηλεκτρομηχανολογικής κατασκευής (πχ μετασχηματιστής, ηλεκτρικός πίνακας, μονωτικό καλώδιο) ή τμημάτων αυτής έναντι μιας άλλης μέσα από τυποποιημένες δοκιμές. Αυτές οι δοκιμές θα μπορούσαν κάλλιστα να βασίζονται στην εφαρμογή κρουστικών τάσεων (αντίστοιχων αυτών που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη των δεδομένων αυτής της εργασίας) και να εξετάζουν τη συμπεριφορά των μεγεθών της αντίστασης και της ενέργειας κατά τις μερικές εκκενώσεις για την εξαγωγή συγκριτικών συμπερασμάτων ηλεκτρομονωτικής ποιότητας συσκευών.

Θεωρείται αυτονόητο πως το όφελος από μια τέτοια σύγκριση (που θα βασιστεί στην παραπάνω μεθοδολογία) θα αφορά τόσο στην ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής αλλά και της γενικότερης εγκατάστασης όσο και στην ορθότερη αξιολόγηση μιας κατασκευαστικής επένδυσης που θα βασίζεται στην πιο συμφέρουσα ισορροπία κόστους-ποιότητας.

5.2.1 Η σύνθετη αντίσταση Z_1 κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Όπως διαπιστώθηκε στην υποενότητα 4.1.1. κατά την εφαρμογή μεγαλύτερων κρουστικών τάσεων (άρα και υψηλότερων τιμών έντασης ηλεκτρικού πεδίου) το μονωτικό παρουσιάζει φθίνουσα τιμή σύνθετης αντίστασης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων. Μάλιστα, αυτή η φθίνουσα συμπεριφορά προσεγγίστηκε εκθετικά πολύ ικανοποιητικά. Δεδομένου ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων σηματοδοτεί την έναρξη της γήρανσης του μονωτικού υλικού, είναι προφανώς επιθυμητό, η μόνωση να παρουσιάζει αυξημένη αντίσταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων.



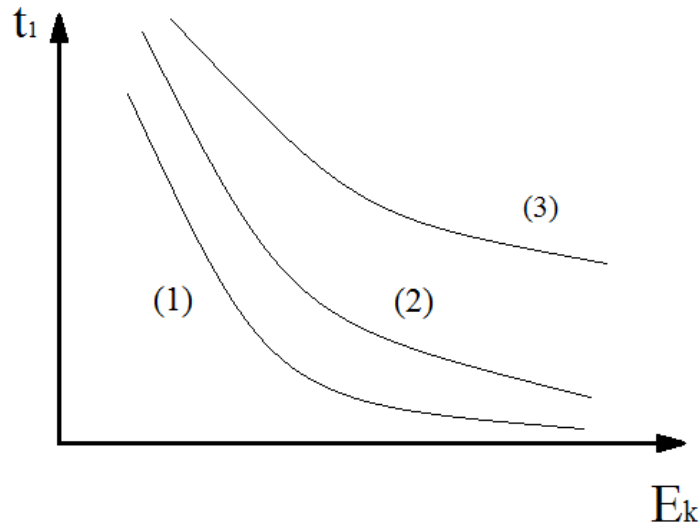
Σχήμα 5.2.1-1: Φθίνουσα συμπεριφορά αντίστασης έναρξης μερικών εκκενώσεων ως προς την ένταση του πεδίου $Z_1 = f(\hat{E}_k)$ για τρεις περιπτώσεις μονωτικών.

Από το σχήμα 5.1-1 προτιμάται σαφώς το μονωτικό (2) έναντι του (1) καθώς η καμπύλη που το περιγράφει βρίσκεται ψηλότερα και συνεπώς χαρακτηρίζεται από αυξημένη αντίσταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων. Επίσης, προτιμώνται μονωτικά με καμπύλη $Z_1 = f(\hat{E}_k)$ που παρουσιάζουν μικρότερο εκθετικό συντελεστή, δηλαδή φθίνουν πιο αργά (η αντίσταση έναρξης μερικών εκκενώσεων μειώνεται πιο αργά) καθώς αυξάνεται η ένταση του πεδίου όπως η περίπτωση του μονωτικού (3).

5.2.2 Χρόνος έναρξης μερικών εκκενώσεων t_1

Παρόμοια συμπεράσματα με την ενότητα 5.1 προκύπτουν και για το χρόνο έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

Όπως διαπιστώθηκε στην υποενότητα 4.2.2. κατά την εφαρμογή μεγαλύτερων κρουστικών τάσεων (άρα και υψηλότερων τιμών έντασης ηλεκτρικού πεδίου) το μονωτικό παρουσιάζει φθίνουσα τιμή χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων. Μάλιστα, αυτή η φθίνουσα συμπεριφορά προσεγγίστηκε εκθετικά πολύ ικανοποιητικά. Δεδομένου ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων σηματοδοτεί την έναρξη της γήρανσης του μονωτικού υλικού, είναι προφανώς επιθυμητό, η μόνωση να παρουσιάζει αυξημένη τιμή χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

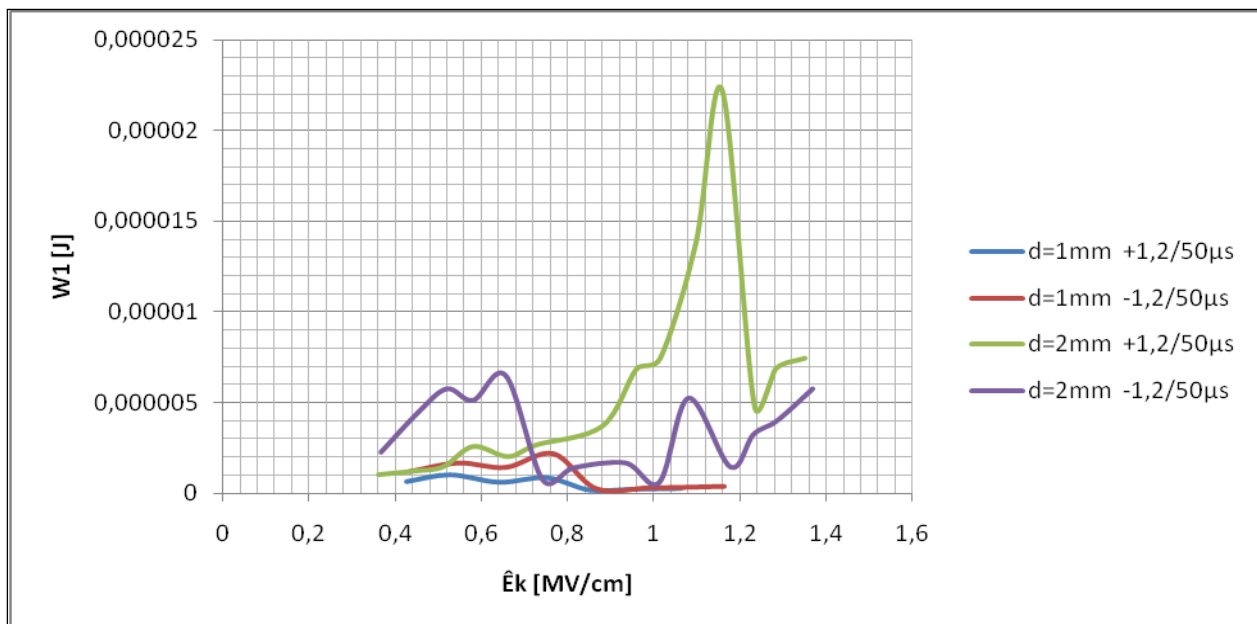


Σχήμα 5.2.2-1: Φθίνουσα συμπεριφορά χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων ως προς την ένταση του πεδίου $t_1 = f(\hat{E}_k)$ για τρεις περιπτώσεις μονωτικών.

Από το σχήμα 5.1-1 προτιμάται σαφώς το μονωτικό (2) έναντι του (1) καθώς η καμπύλη που το περιγράφει βρίσκεται ψηλότερα και συνεπώς χαρακτηρίζεται από αυξημένο χρόνο έναρξης των μερικών εκκενώσεων. Επίσης, προτιμώνται μονωτικά με καμπύλη $Z_1 = f(\hat{E}_k)$ που παρουσιάζουν μικρότερο εκθετικό συντελεστή, δηλαδή φθίνουν πιο αργά (ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων μειώνεται πιο αργά) καθώς αυξάνεται η ένταση του πεδίου όπως η περίπτωση του μονωτικού (3).

5.2.3 Η ενέργεια W_1 στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

Στην υποενότητα 4.2.1. παρουσιάστηκαν οι καμπύλες $W_1 = f(\hat{E}_k)$ απ' όπου διαπιστώνεται πως τα υλικά με καλύτερη μόνωση (όπως εκείνα που έχουν μεγαλύτερο πάχος) παρουσιάζουν αυξημένη τιμή της απαιτούμενης ενέργειας στο δοκίμιο για την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.



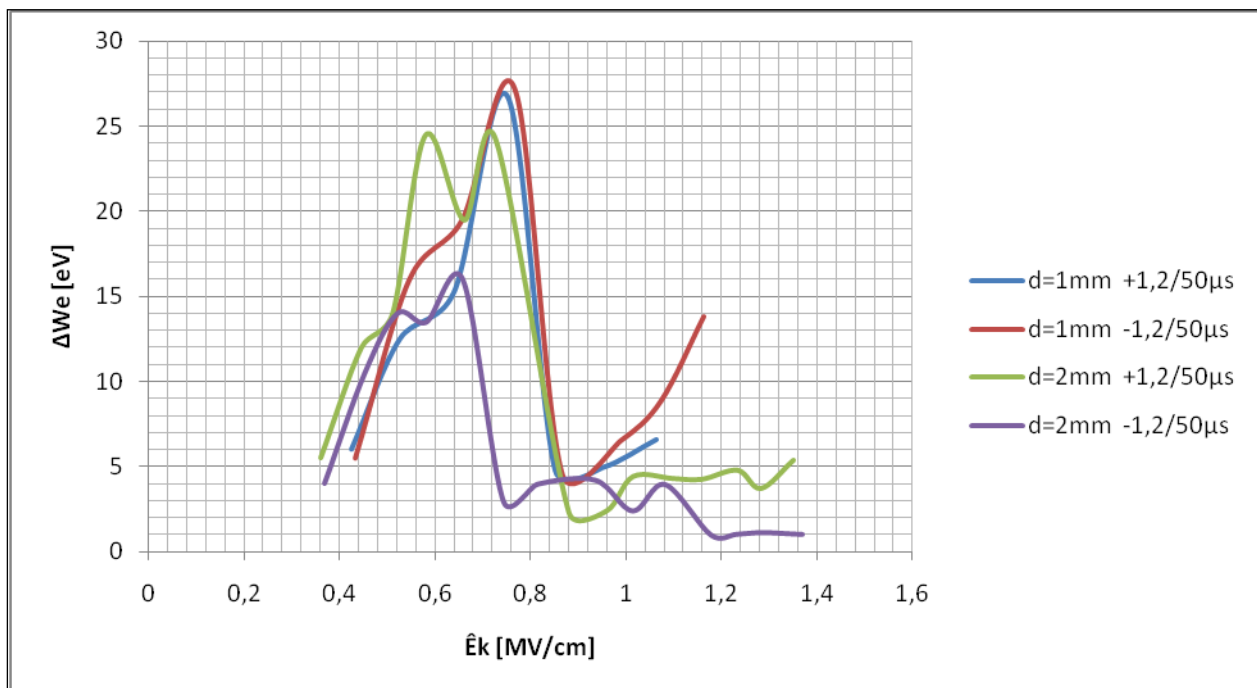
Σχήμα 5.2.3-1: Ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης (ενδεικτική της ενέργειας στο δοκίμιο) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων ως προς την ένταση του πεδίου $W_1 = f(\hat{E}_k)$.

Θα μπορούσε, λοιπόν, να θεωρηθεί πως κάποιο μονωτικό υλικό (ή αντίστοιχα η συσκευή όπου αυτό χρησιμοποιείται ή τμήμα αυτής) υπερέχει κάποιου άλλου όταν η αντίστοιχη καμπύλη του $W_1 = f(\hat{E}_k)$ βρίσκεται ψηλότερα. Επίσης, θεωρώντας ότι η ενέργεια αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της έντασης του πεδίου (όπως παρατηρήθηκε και στην παρούσα εργασία να συμβαίνει κατά διαστήματα στον άξονα της έντασης πεδίου) τότε προτιμάται το υλικό με αυξημένο εκθετικό συντελεστή δηλαδή εκείνο το υλικό που απαιτεί ακόμα περισσότερη ενέργεια έναρξης των μερικών εκκενώσεων όταν θεωρηθεί μια δεδομένη αύξηση της έντασης του πεδίου.

5.2.4 Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Καθώς αυξάνεται η εφαρμοζόμενη τάση και συνεπώς η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μονωτικού υλικού, αυξάνεται και η ενέργεια των ηλεκτρονίων ως προς τη στάθμη Fermi. Η αύξηση της κινητικότητάς τους καθώς αυξάνεται η προσφερόμενη ενέργεια στο υλικό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας που είναι σαφώς ανεπιθύμητη για ένα μονωτικό. Αναμένεται, λοιπόν, τα υλικά και οι διατάξεις που έχουν καλύτερη μονωτική συμπεριφορά να παρουσιάζουν καμπύλες $\Delta W_e = f(\hat{E}_k)$ που βρίσκονται πιο χαμηλά σε σύγκριση με εκείνες άλλων υλικών και διατάξεων που δεν έχουν την ίδια ποιότητα μόνωσης.

Επίσης, θεωρώντας ότι η ενέργεια των ηλεκτρονίων ΔW_e αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της έντασης του πεδίου (όπως παρατηρήθηκε και στην παρούσα εργασία να συμβαίνει κατά διαστήματα στον άξονα της έντασης πεδίου) τότε προτιμάται το υλικό με μικρότερο εκθετικό συντελεστή δηλαδή εκείνο το υλικό του οποίου τα ηλεκτρόνια αποκτούν μικρότερο πλεόνασμα ενέργειας (ως προς τη στάθμη Fermi) όταν θεωρηθεί μια δεδομένη αύξηση της έντασης του πεδίου.



Σχήμα 5.2.4 -1: Η αύξηση της ενέργειας $\Delta W_e = f(\hat{E}_k)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων λόγω των μερικών εκκενώσεων ως προς την ένταση του πεδίου

Βιβλιογραφία

- [1] Μπούρκας Π.Δ., Καραγιαννόπουλος Κ.Γ., Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και υλικά, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003.
- [2] Μπούρκας Π.Δ. : Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων, Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Αθήνα 1998.
- [3] Bourkas P.D.: Radiation emission phenomena in a metal-dielectric-metal model under high electric fields, *International Journal of power and Energy systems*, Vol. 15, No. 2, p.p. 37-41, 1995.
- [4] Moronis A. X., Boyrkas P. D. : Impact ionization effects at interfaces between solid dielectrics and insulation oil or air, during high voltage pulse applications, *International Journal Interface Science*, Vol. 2, p.p. 281-287, 1994.
- [5] Δέρβος Κ.Θ., Μπούρκας Π.Δ. : Εισαγωγή στα Ηλεκτρομονωτικά Υλικά, Εκδόσεις Σπουδαστικής Μέριμνας, Ε.Μ.Π., Αθήνα 1991.
- [6] Σταθόπουλος Ι.Α., Μπούρκας Π.Δ., Τοπάλης Φ.Β. : Μετρήσεις και δοκιμές Υψηλών τάσεων, Ε.Μ.Π. 1991.
- [7] Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A., Stathopoulos I.A. : Enhanced partial discharges due to temperature increase in the combined system of a solid-liquid dielectric, *IEEE Trans. Elec. Insul.*, Vol. 25, No. 3, 1990, p.p. 469-474.
- [8] Σταθόπουλος Ι. Α.: Υψηλές τάσεις, Αθήνα 1988.
- [9] Kuffel E., Zaengl W.S. : *High Voltage Engineering Fundamentals*, Pergamon Press, Oxford 1984.
- [10] Sparks M., Mills D.L., Warren R., Holstein T., Maradudin A., Sham L.J., King D.F. : Theory of electron-avalanche breakdown in solids, *Phys. Rev. B.*, Vol. 24, No. 5, 1981, p.p. 3519-3536

