



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**«Μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την έναρξη και περαίωση τους στο συνδυασμό «στέρεο μονωτικό-λάδι μετασχηματιστών 20°C» εντός ανομοιογενούς πεδίου ύπο κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500 \mu s$ »**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Γ. Καρζής

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος,  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2010





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**«Μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την έναρξη και περαίωση τους στο συνδυασμό «στέρεο μονωτικό-λάδι μετασχηματιστών 20°C» εντός ανομοιογενούς πεδίου ύπο κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500 \mu s$ »**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Γ. Καρζής

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος,  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2010.

.....  
Π.Δ.Μπούρκας

.....  
Ν.Θεοδώρου

.....  
Κ.Καραγιαννόπουλος

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

.....  
Δημήτριος Γ. Καρζής

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

Copyright © Δημήτριος Γ. Καρζής, 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.

## **Εισαγωγή**

Στις μέρες μας, όπου η βιομηχανία έχει τον πρώτο ρόλο στα πλαίσια ανάπτυξης της ανθρώπινης δραστηριότητας και του πολιτισμού γενικότερα, γίνεται εύκολα κατανοητό το πόσο αναγκαία κρίνεται η διασφάλιση της αξιόπιστης και ορθής λειτουργίας των συστημάτων μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Συγκεκριμένα, μια λανθασμένη επιλογή ή αστοχία του μονωτικού μέσου σε έναν μετασχηματιστή μεταφοράς ή διανομής, μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα, με αλυσιδωτές αντιδράσεις. Παραδείγματος χάριν, η διακοπή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε μία τσιμεντοβιομηχανία ή σε ένα διυλιστήριο, ακόμα και για μικρό χρονικό διάστημα, όπως αυτό των λίγων ωρών, έχει μεγάλο οικονομικό κόστος. Επίσης, η ασφάλεια των εργαζομένων που έρχονται σε επαφή με ηλεκτρολογικές διατάξεις (πίνακες χειρισμών, εναέριες γραμμές κλπ.) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή της κατάλληλης μόνωσης.

Βάσει των παραπάνω, καταδεικνύεται η επιτακτική ανάγκη για τον εργαστηριακό έλεγχο των μονωτικών υλικών ούτως ώστε να εκτιμηθεί εκ των προτέρων ο χρόνος ζωής αυτών, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, και να προγραμματιστεί έγκαιρα η αντικατάστασή τους. Ο λόγος δεν είναι μόνον για την αποφυγή προβλημάτων που αυτομάτως σημαίνουν επιπλέον κόστος σε μια βιομηχανία ή ακόμα και πιθανή απώλεια ανθρώπινης ζωής, αλλά και για την βελτίωση των χαρακτηριστικών τους με την χρησιμοποίηση νέων υλικών στην κατασκευή τους, παρέχοντας βελτιωμένη θερμική και ηλεκτρική μόνωση κατά τη χρήση τους.

Σε εργαστηριακό επίπεδο, τόσο οι μετρήσεις κατά την διάρκεια πειραματικών εφαρμογών, όσο και η πράξη αυτή καθ'αυτή, αποτελούν την βάση για την βελτίωση των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών. Οι εργαστηριακές μετρήσεις έχουν ως προσανατολισμό την χρονική παράταση της εμφάνισης των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης των μονωτικών υλικών. Προϋποθέτουν όμως, τη γνώση των μέχρι τότε ερευνών που έχουν γίνει, καθώς και την εμπειρία στο εργαστήριο και τις πρακτικές εφαρμογές.

# Περιεχόμενα

1. Σκοπός.....	1
Ορισμοί λέξεων κλειδίων.....	1
2. Σχετικά με το πείραμα.....	2
2.1 Περιγραφή της διάταξης του πειράματος.....	2
2.2 Απαραίτητες σχέσεις για την επεξεργασία των μετρήσεων.....	3
3. Αποτελέσματα και στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων.....	4
3.1 Συγκεντρωτικοί πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d=1\text{mm}$ Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας.....	4
3.2 Συγκεντρωτικοί πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d=1\text{mm}$ Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας.....	19
3.3 Συγκεντρωτικοί πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d=2\text{mm}$ Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας.....	39
3.4 Συγκεντρωτικοί πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d=1\text{mm}$ Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας.....	49
4. Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών.....	64
4.1 Η θερμική διάτρηση.....	65
4.2 Η ηλεκτρική διάτρηση.....	67
4.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης.....	70
4.3.1 Γενικά περί μερικών εκκενώσεων.....	70
4.3.2 Η τεχνητή γήρανση.....	71
4.3.3 Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων.....	72
4.3.4 Παράδειγμα ερμηνείας παλμογραφημάτων των μερικών εκκενώσεων μέσω των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων.....	74
4.4 Η θερμοχημική διάτρηση.....	75
4.5 Συνδιασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.....	76
4.6 Ο συνδιασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.....	77
4.7 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων.....	79
5. Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών.....	85
5.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών.....	86
5.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση.....	89
5.3 Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση.....	91

5.4 Ένας συνδιασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών.....	93
6. Συμπεράσματα και σχόλια.....	96

# 1. Σκοπός

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν αντικείμενο την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων, κατά την έναρξη και την περαίωση τους, σε βιομηχανικό μονωτικό υλικό. Πιο συγκεκριμένα, για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε μια διάταξη ηλεκτροδίων τύπου «ακίδα-πλάκα» (ανομοιογενές πεδίο), με μονωτικό υλικό τον συνδυασμό «στέρεο ηλεκτρομονωτικό υλικό Pertinax – λάδι μετασχηματιστών στους 20°C». Καταπονούμε το μονωτικό με κρουστικές τάσεις της μορφής  $\pm 250/2500$  μs, για θετική και αρνητική πολικότητα ακίδας, προκειμένου να προκαλέσουμε την εμφάνιση των υπό εξέταση επιθυμητών μερικών εκκενώσεων. Οι κρουστικές υψηλές τάσεις είναι το σημαντικότερο είδος εργαστηριακά παραγόμενων τάσεων γιατί μέσω αυτών γίνονται οι εργαστηριακές δοκιμές για αντοχή στις υπερτάσεις που εμφανίζονται στα δίκτυα.

Οι υπο επεξεργασία μετρήσεις, έχουν προκύψει έπειτα απο συστηματικά πειράματα που έχουν γίνει επι σειρά ετών υπό την επίβλεψη του επιβλέποντα μου καθηγητή κυρίου Π.Δ.Μπούρκα.

Η θεωρητική ανάλυση που ακολουθεί προέρχεται από το βιβλίο «Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά» των καθηγητών Π.Δ. Μπούρκα- Κ.Γ. Καραγιαννόπουλου. Ειδικότερα, αφορά περιεχόμενο του κεφαλαίου 6 «Μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων».

Απο τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κύριο Περικλή Μπούρκα για την ανάθεση της εργασίας και την παρεχόμενη βοήθεια καθ'όλη όλη τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας.

## Ορισμοί λέξεων-κλειδιά

- **Διάσπαση** είναι η αγώγιμη σύνδεση μεταξύ δύο μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση επί της επιφάνειας ενός στερεού μονωτικού λέγεται επιφανειακή διάσπαση.
- **Υπερπήδηση** είναι η διάσπαση στο περιβάλλον μέσω ενός στερεού μονωτικού, λόγω μείωσης της απόστασης μόνωσης του στερεού μονωτικού από αγώγιμες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνειά του (όπως π.χ. συμβαίνει σε ρυπασμένους μονωτήρες).
- **Διάτρηση** είναι η διάσπαση μέσω του όγκου ενός στερεού μονωτικού υλικού.
- **Διηλεκτρική αντοχή (Ed)** ενός μονωτικού υλικού εντός ομογενούς πεδίου είναι το πηλίκο της ελάχιστης τιμής της τάσης για τη διάσπαση προς την απόσταση των ηλεκτροδίων.
- Όταν το εφαρμοζόμενο πεδίο σε μια διάταξη ηλεκτροδίων, ξεπεράσει κάποια τιμή τάσης, τότε παύει να υπάρχει ισορροπία μεταξύ των εσκούμενων δυνάμεων Coulomb και εκδηλώνονται περιορισμένης έκτασης εκκενώσεις, που ονομάζονται **μερικές εκκενώσεις**.
- **Κρουστική τάση** είναι τάση κεραυνικής μορφής: 250/2500μs.
- **Μονωτικά υλικά** είναι τα υλικά που παρέχουν θερμική και ηλεκτρική μόνωση κατά τη χρήση τους.



## 2. Σχετικά με το πείραμα

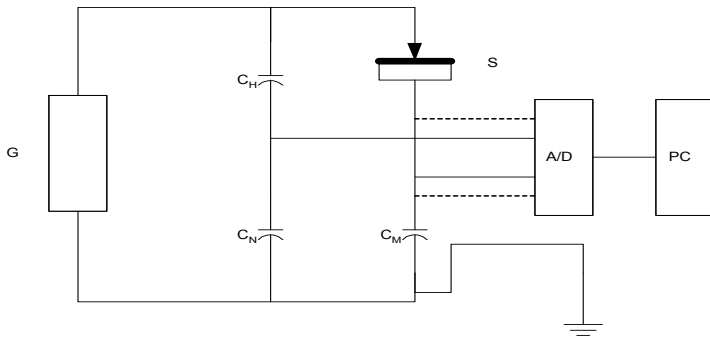
### 2.1 Περιγραφή της διάταξης του πειράματος

Χρησιμοποιήσαμε σα δοκίμιο το βιομηχανικό μονωτικό υλικό Pertinax, το οποίο είναι πετυεσμένο χαρτί εμποτισμένο σε φαινόλη, σε δύο διαφορετικά πάχη,  $d= 1\text{mm}$  και  $d= 2\text{mm}$ . Αποτελεί κοινό βιομηχανικό υλικό και χρησιμοποιείται ευρέως σε ηλεκτροτεχνικές κατασκευές υψηλών τάσεων, γι' αυτό και η μελέτη συμπεριφοράς του κάτω από διάφορες καταπονήσεις είναι ενδιαφέρον πεδίο έρευνας.

Εφαρμόσαμε στο δοκίμιο κρουστικές τάσεις για να καταγράψουμε την μονωτική του ικανότητα, γιατί είναι η πιο συνηθισμένη μορφή τάσης (π.χ. κεραυνοί). Οι κρουστικές τάσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι της μορφής 250/2500μs.

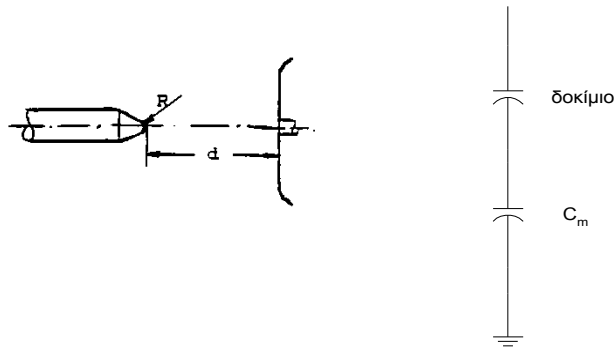
Η διάταξη των ηλεκτροδίων καθορίζει την επίδραση της μορφής του πεδίου στο φαινόμενο που εξετάζεται. Μία συχνά χρησιμοποιούμενη διάταξη μέτρησης μονωτικών υλικών είναι ένας πυκνωτής με ηλεκτρόδια ακίδα-πλάκα. Με τον τύπο αυτόν, εξασφαλίζεται η καλύτερη κατά το δυνατόν προσομοίωση των δυσμενέστερων συνθηκών που επικρατούν στην πράξη και η μεγαλύτερη ανομοιογένεια στο ηλεκτροστατικό πεδίο. Η ακτίνα έχει ακτίνα καμπυλότητας  $R= 0,9\text{mm}$ . Όσο μικρότερη είναι η ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας, τόσο αυξάνει η τιμή του πεδίου.

Πάντως, στις έρευνες που έχουν γίνει, χρησιμοποιούνται & άλλα είδη ηλεκτροδίων, όπως: ακίδα-ακίδα, πλάκα-πλάκα, κ.λ.π. Τα δύο ακόλουθα απλοποιημένα σχηματικά διαγράμματα παρουσιάζουν, το πρώτο την ολοκληρωμένη διάταξη του πειράματος και το δεύτερο αναλυτικότερα την διάταξη των ηλεκτροδίων αυτού.



Σχήμα 6.1 Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα της διάταξης κατά την καταπόνηση των στερεών ηλεκτρομαγνητικών υλικών.

- G : Γεννήτρια κρουστικών ή εναλλασσόμενων τάσεων.  
C<sub>H</sub>, C<sub>N</sub> : Χωρητικός καταμεριστής της εφαρμοζόμενης υψηλής τάσης.  
S : Το δοκίμιο τοποθετημένο μεταξύ των ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.  
C<sub>m</sub> : Πυκνωτής μέτρησης.  
A/D : Αναλογικός ψηφιακός μετατροπέας.



**Σχήμα 6-2:** Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα – πλάκα  
d: απόσταση ακίδας – πλάκας  
R : ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας

## 2.2 Απαραίτητες σχέσεις για την επεξεργασία των μετρήσεων

Στην επεξεργασία των μετρήσεων πρέπει να πούμε ότι

Υπολογισμός της ενέργειας ελεύθερων ηλεκτρονίων:

$$\Delta W = (0.5 \cdot \Delta V) / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \text{ σε eV}$$

Όμως, για τιμές πυκνωτή  $C_m \approx 10nF$  και σύμφωνα με τη σχέση 7.1-4, με τιμή για τον συντελεστή ίση με τη μονάδα, έχω:

$$W = 0.5 \cdot \Delta V \text{ σε eV}$$

,όπου  $\Delta V$  είναι η τάση εξόδου σε V.

Εδώ πρέπει να πούμε ότι γράφουμε  $\Delta V$  και όχι  $V_{max}$ , που κανονικά είναι, γιατί δεν θέλουμε τη DC συνιστώσα που πιθανόν να έχουμε βάλει στην κυματομορφή για να φαίνεται καλά στην οθόνη του παλμογράφου.

Υπολογισμός της πεδιακής έντασης E:

$$E = 2 \cdot U / [R \cdot \ln(4 \cdot d / R)] \text{ [MV/cm]}$$

,όπου U μπορεί να είναι είτε η στιγμιαία τιμή κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, είτε η μέγιστη τιμή αυτής, R η ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας ίση με 0,9mm και d το πάχος του υλικού το οποίο λαμβάνει δύο τιμές, 1mm και 2mm.

### 3. Αποτελέσματα και στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων

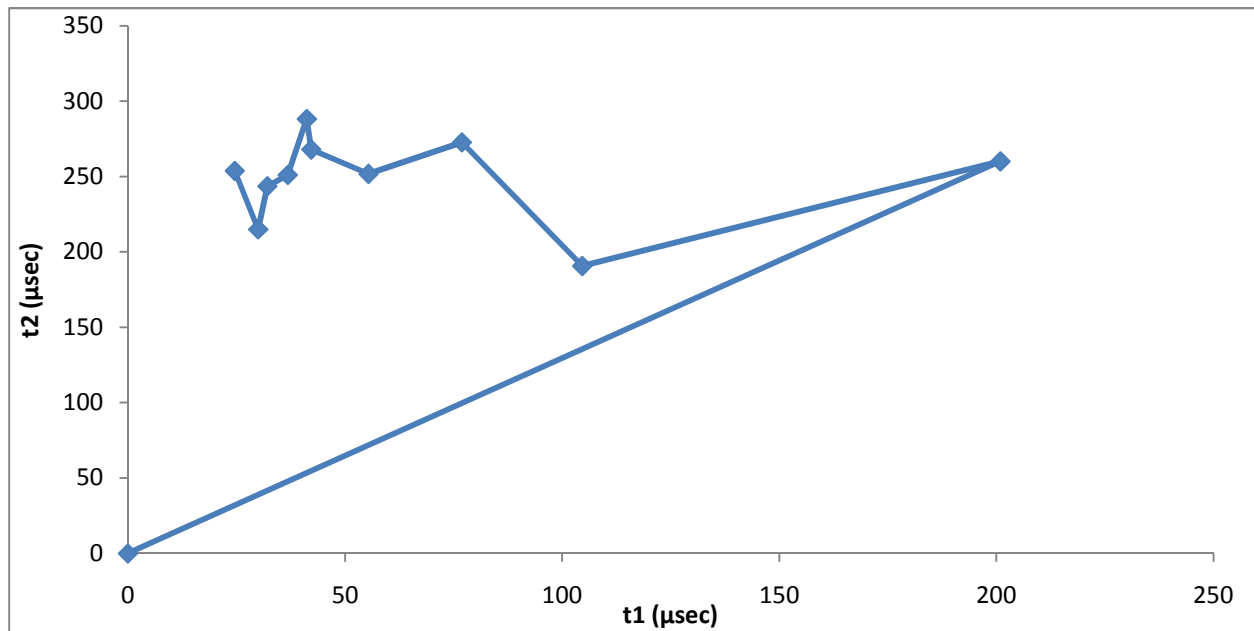
#### 3.1 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 1 \text{ mm}$ Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας

Πίνακας 3.1-1

Uk kV	Ek MV/cm	Cm nF	u1 V	u2 V	Δu V	t1 μs	t2 μs	Δt μs
10,1	0,150467	1000	0,015	0	-0,015	0	0	0
13,4	0,199629	1000	0,019	0,028	0,009	200,9	260,1	59,2
16,8	0,250281	1000	0,025	0,059	0,034	104,6	190,7	86,1
20,1	0,299444	1000	0,024	0,096	0,072	76,9	272,7	195,8
23,4	0,348606	1000	0,054	0,330	0,276	55,4	251,8	196,4
26,7	0,397769	1000	0,067	0,740	0,673	42,2	268	225,8
30,2	0,449910	1000	0,067	1,030	0,963	41,2	288,2	247
33,5	0,499073	1000	0,067	1,510	1,443	36,8	251,1	214,3
36,9	0,549725	1000	0,067	1,990	1,923	32,1	243,7	211,6
40,2	0,598887	1000	0,130	3,140	3,010	30	215	185
43,6	0,649540	1000	0,000	4,100	4,100	24,6	253,8	229,2

Πίνακας 3.1-2

q1 μC	q2 μC	Δq μC	i1 A	i2 A	Δi A	uεν kV	Eεν MV/cm	ΔWe eV	Ne	Na
0,015	-	-0,02	-	-	-	0	-	-0,0075	-93750000	0
0,019	0,028	0,01	0,000095	0,000108	0,000013	13,1	0,195160	0,0045	56250000	592
0,025	0,059	0,03	0,000239	0,000309	0,000070	14,6	0,217506	0,0170	212500000	861
0,024	0,096	0,07	0,000312	0,000352	0,000040	15,2	0,226445	0,0360	450000000	1958
0,054	0,330	0,28	0,000975	0,001311	0,000336	15,8	0,235384	0,1380	1725000000	1964
0,067	0,740	0,67	0,001588	0,002761	0,001174	15,6	0,232404	0,3365	4206250000	2258
0,067	1,030	0,96	0,001626	0,003574	0,001948	16,6	0,247302	0,4815	6018750000	2470
0,067	1,510	1,44	0,001821	0,006014	0,004193	18,8	0,280077	0,7215	9018750000	2143
0,067	1,990	1,92	0,002087	0,008166	0,006079	18,3	0,272628	0,9615	12018750000	2116
0,130	3,140	3,01	0,004333	0,014605	0,010271	20,1	0,299444	1,5050	18812500000	1850
0,000	4,100	4,1	0,000000	0,016154	0,016154	18,2	0,271138	2,0500	25625000000	2292



**Σχήμα 3.1.1:** Χαρακτηριστική  $t_2 = f(t_1)$

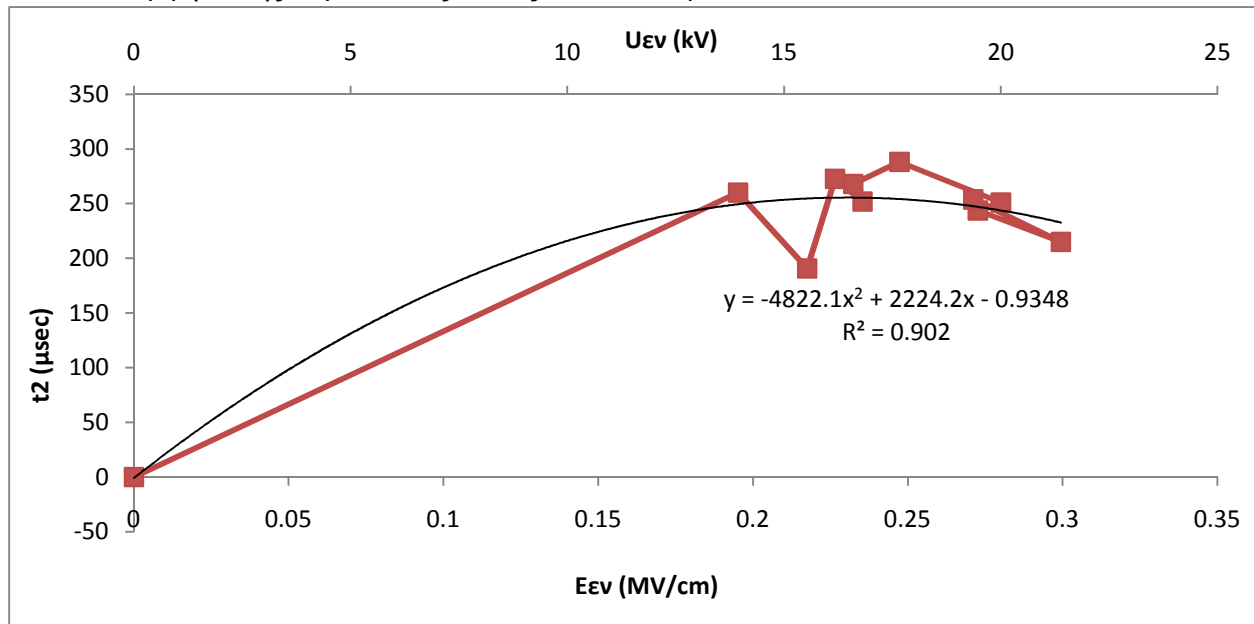
$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.2:** Χαρακτηριστική  $t_2 = f(u_{εν}, E_{εν})$

$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

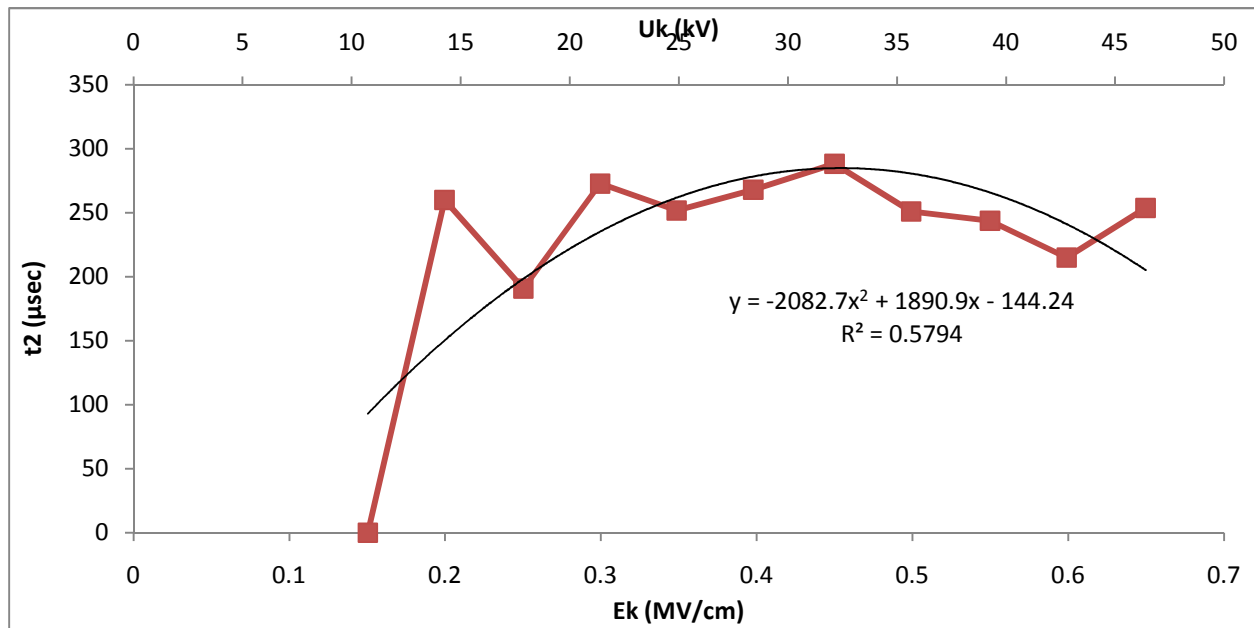
$u_{εν}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{εν}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{εν}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.3:** Χαρακτηριστική  $t_2 = f(U_k, E_k)$

$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

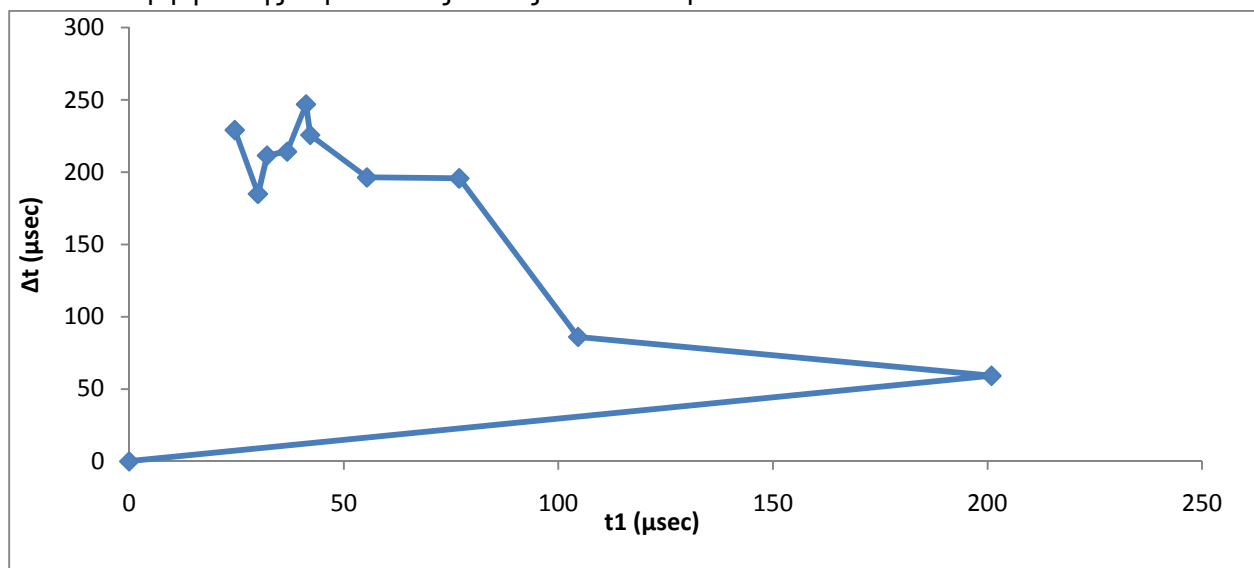
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.4:** Χαρακτηριστική  $\Delta t = f(t_1)$

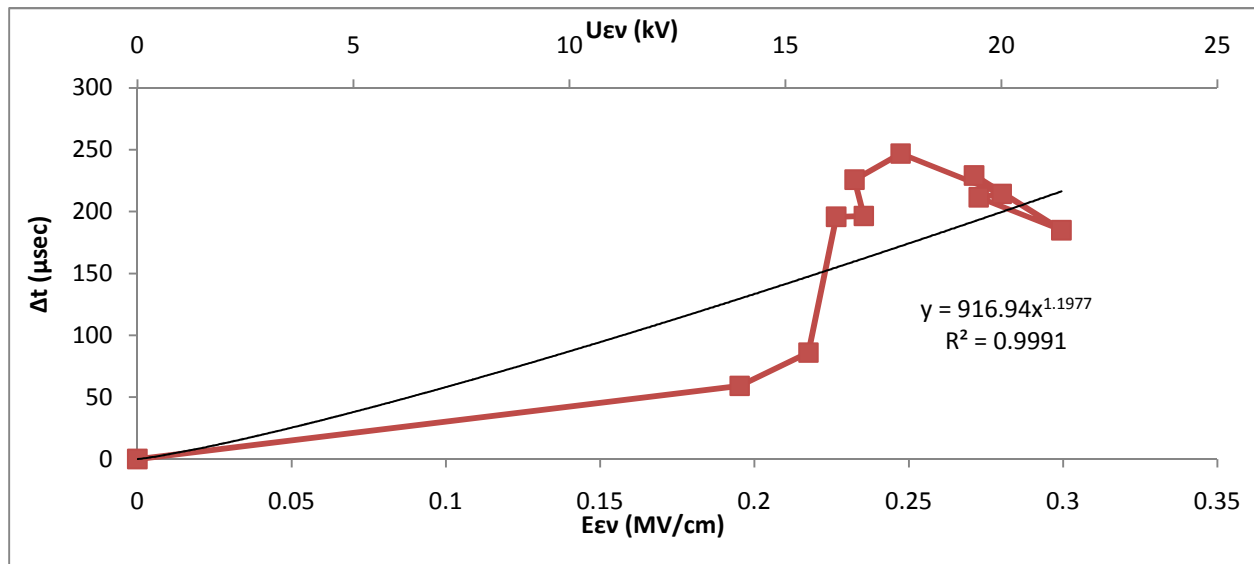
$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και  $t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.5:** Χαρακτηριστική  $\Delta t = f(u_{EV}, E_{EV})$

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και  $t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

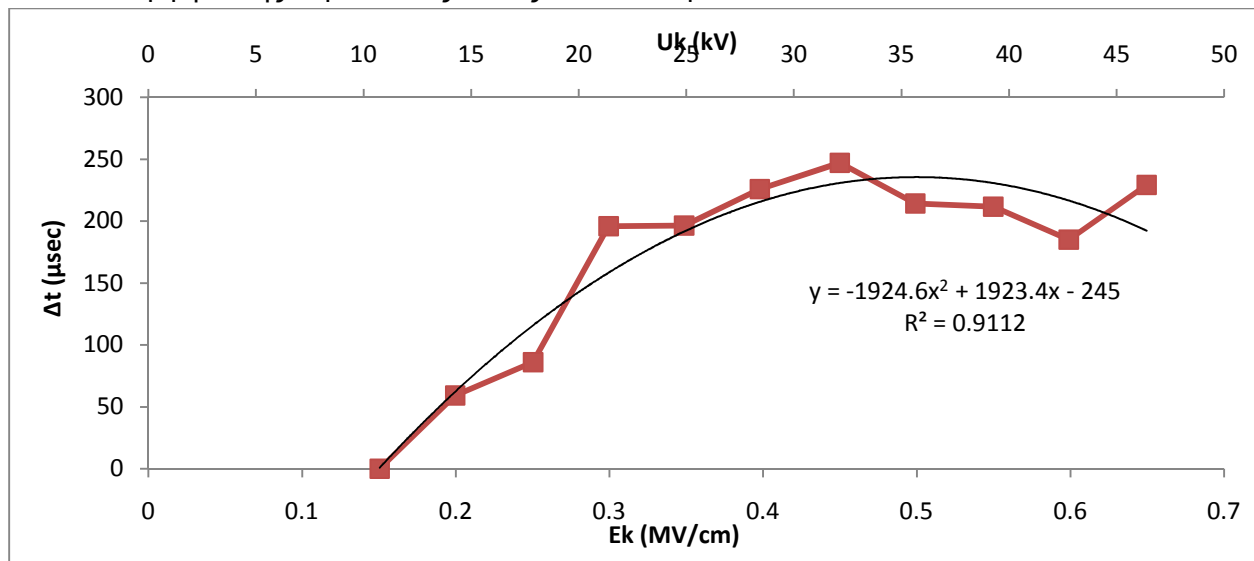
$u_{EV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{EV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{EV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.6:** Χαρακτηριστική  $\Delta t = f(U_k, E_k)$

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και  $t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

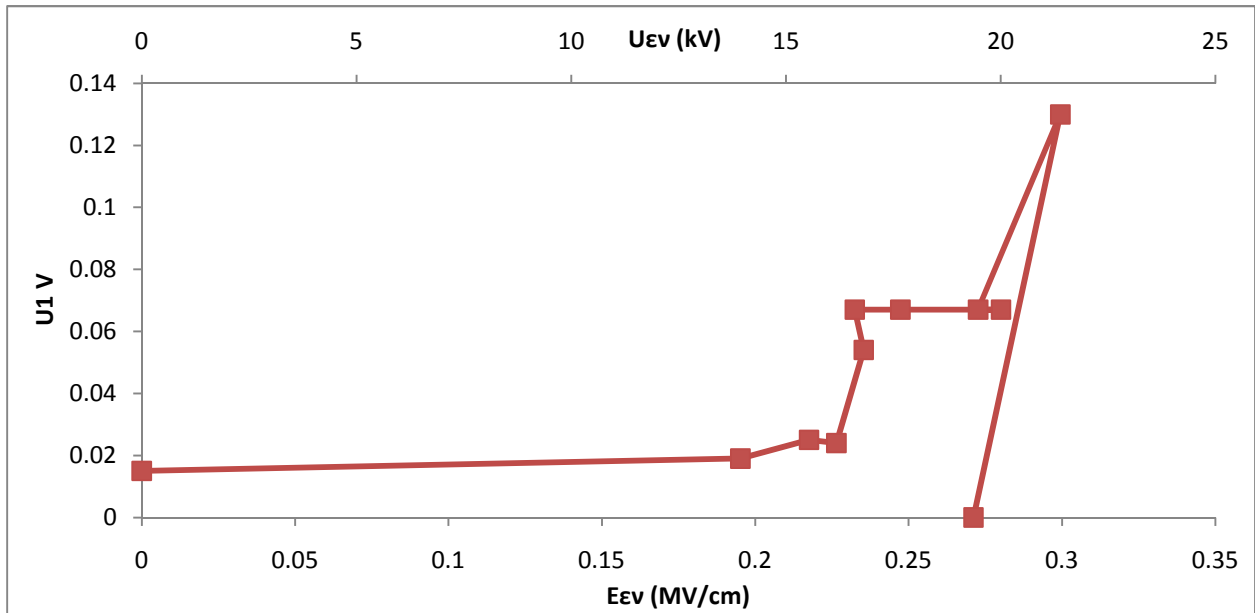
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.7:** Χαρακτηριστική  $u_1 = f(u_{EV}, E_{EV})$

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

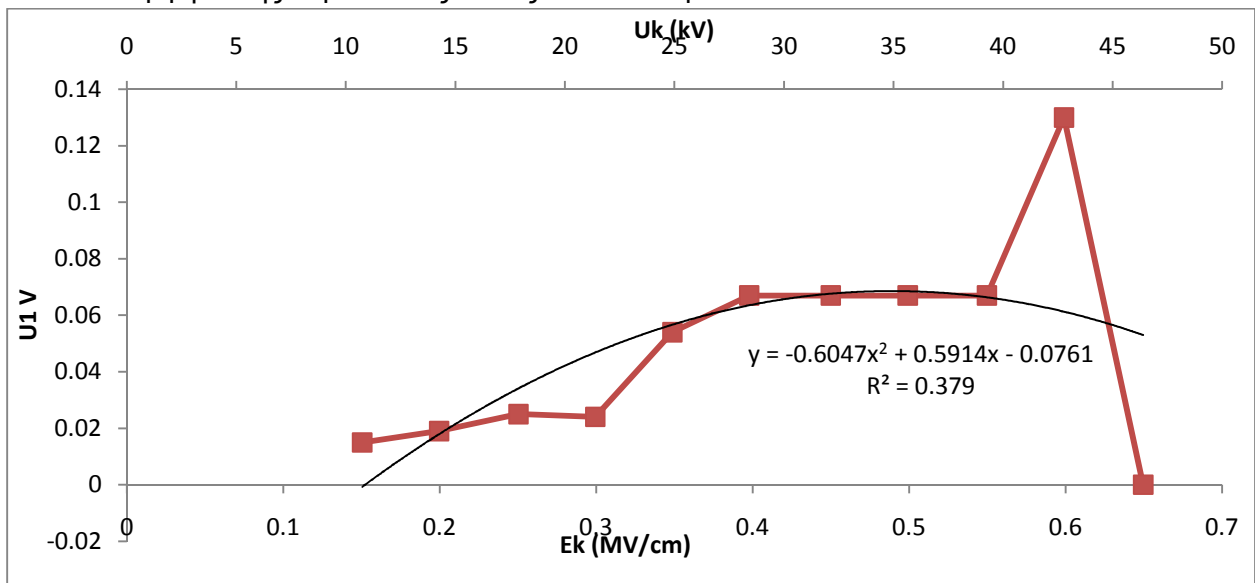
$u_{EV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{EV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{EV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.8:** Χαρακτηριστική  $u_1 = f(U_k, E_k)$

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

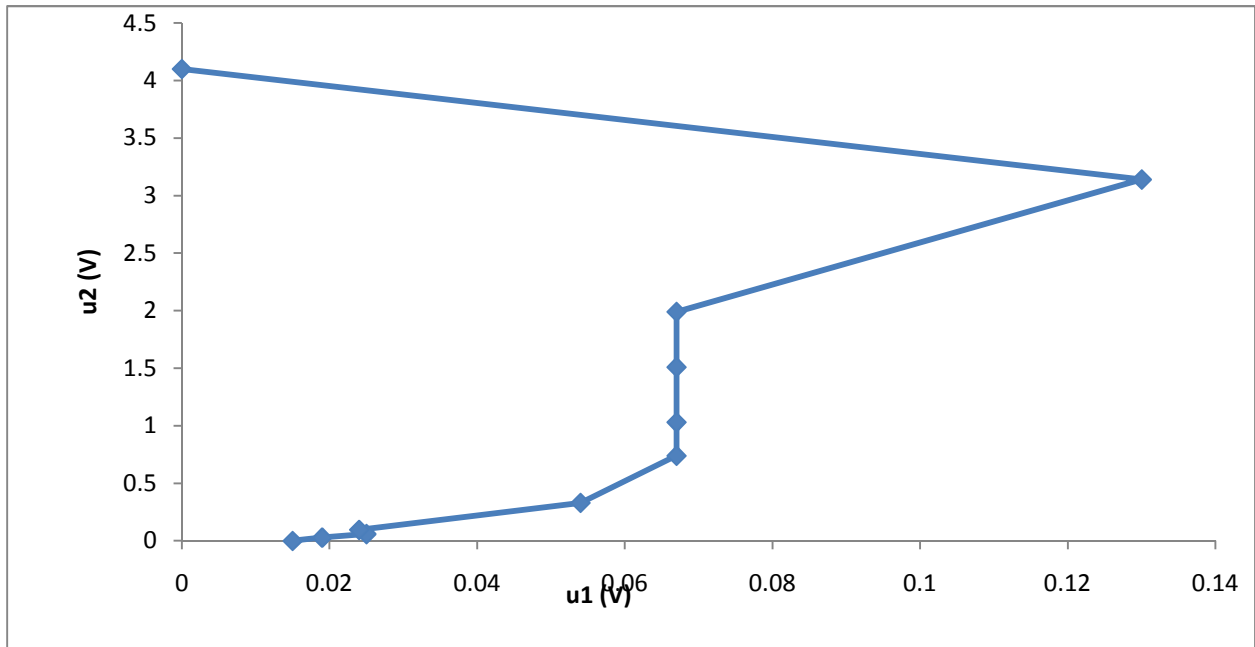
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.9:** Χαρακτηριστική  $u_2 = f(u_1)$

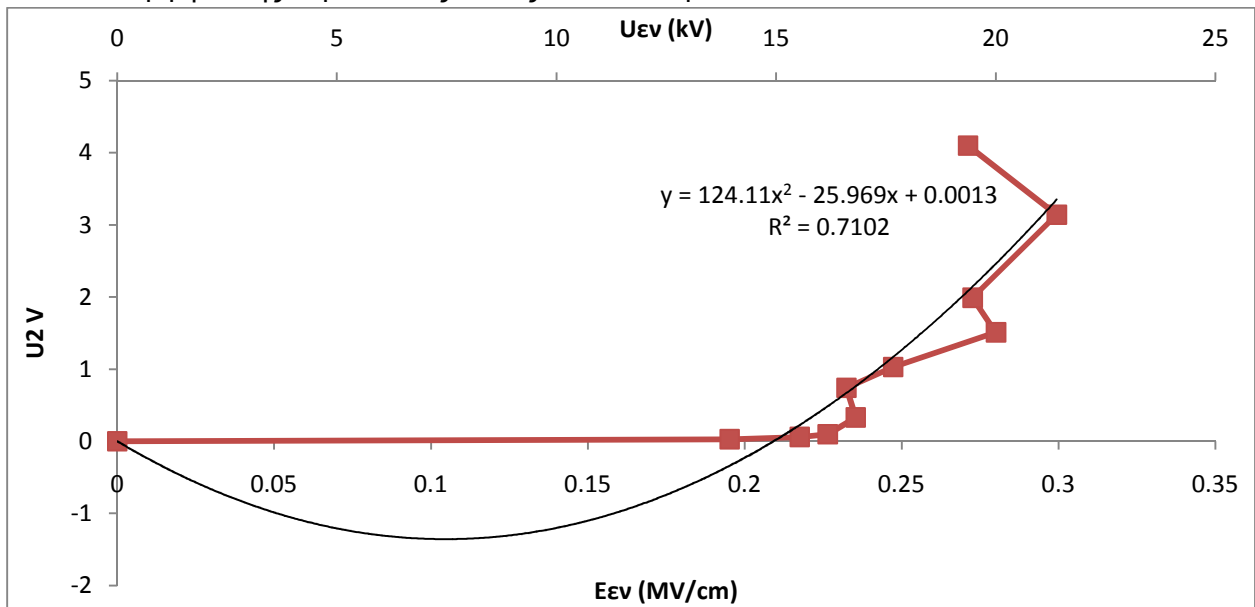
$u_2$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.10:** Χαρακτηριστική  $u_2 = f(u_{ev}, E_{ev})$

$u_2$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$u_{ev}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

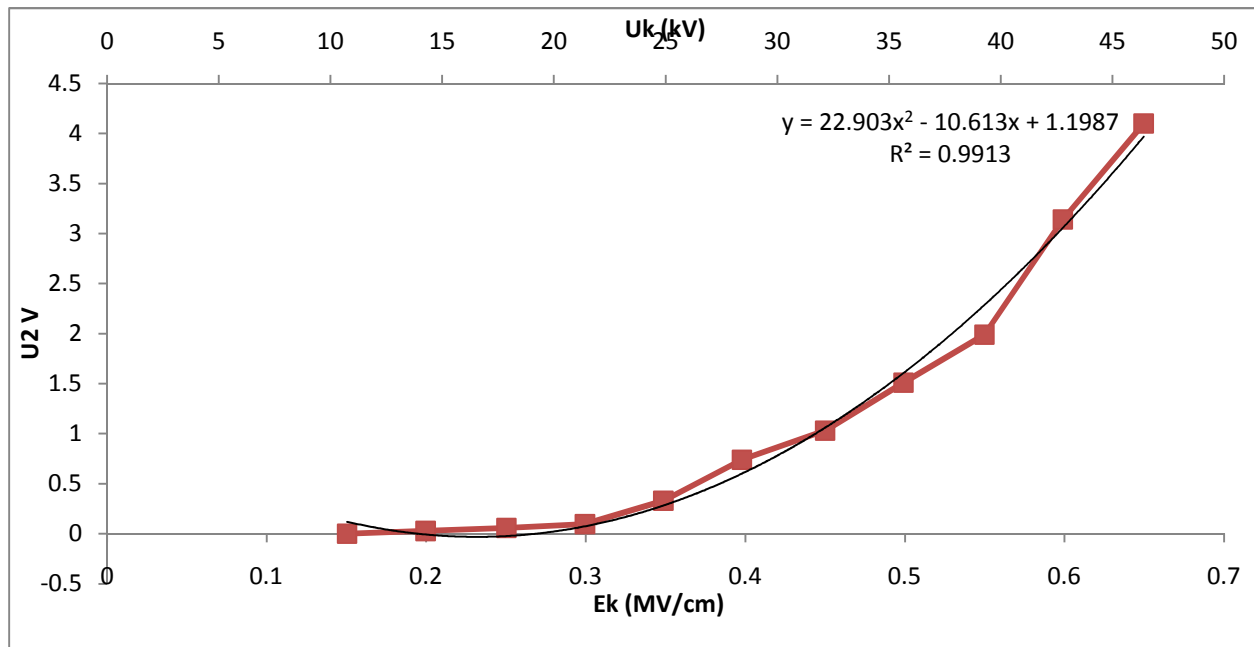
$E_{ev}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{ev}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$





**Σχήμα 3.1.11:** Χαρακτηριστική  $u_2 = f(U_k, E_k)$

$u_2$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

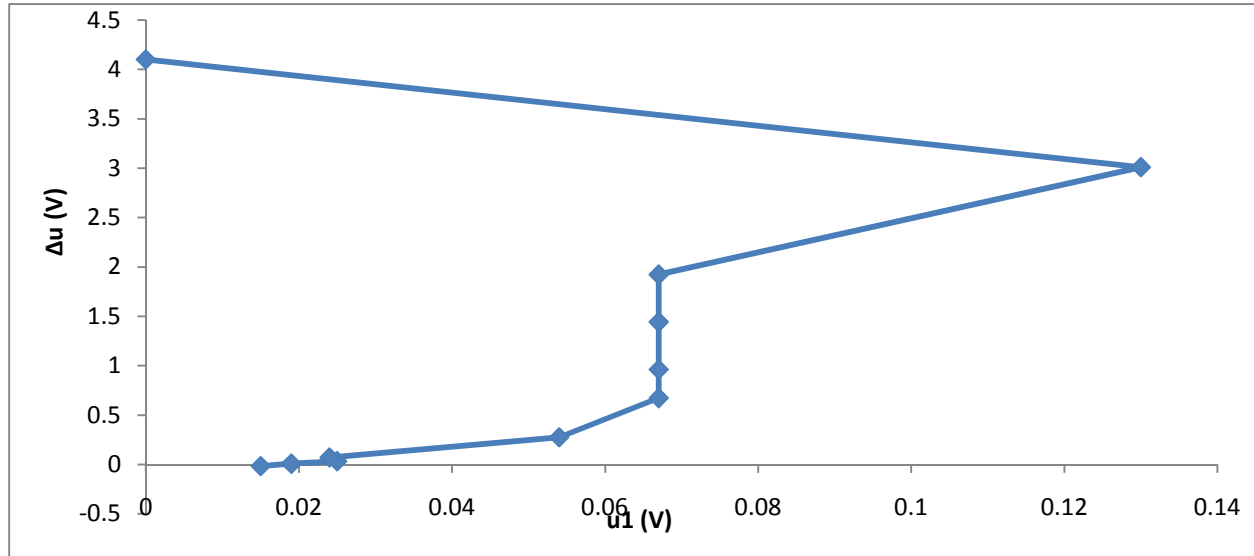
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.12:** Χαρακτηριστική  $\Delta u = f(u_1)$

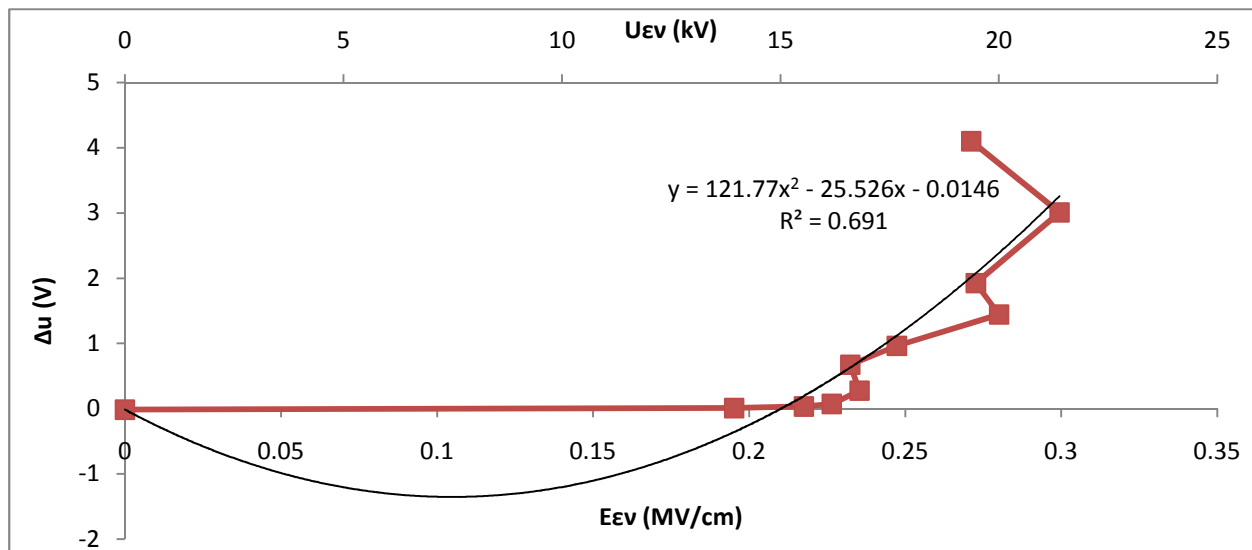
$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά το πέρας αυτών  $u_2$ .

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.13:** Χαρακτηριστική  $\Delta u = f(u_{EV}, E_{EV})$

$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά το πέρας αυτών  $u_2$ .

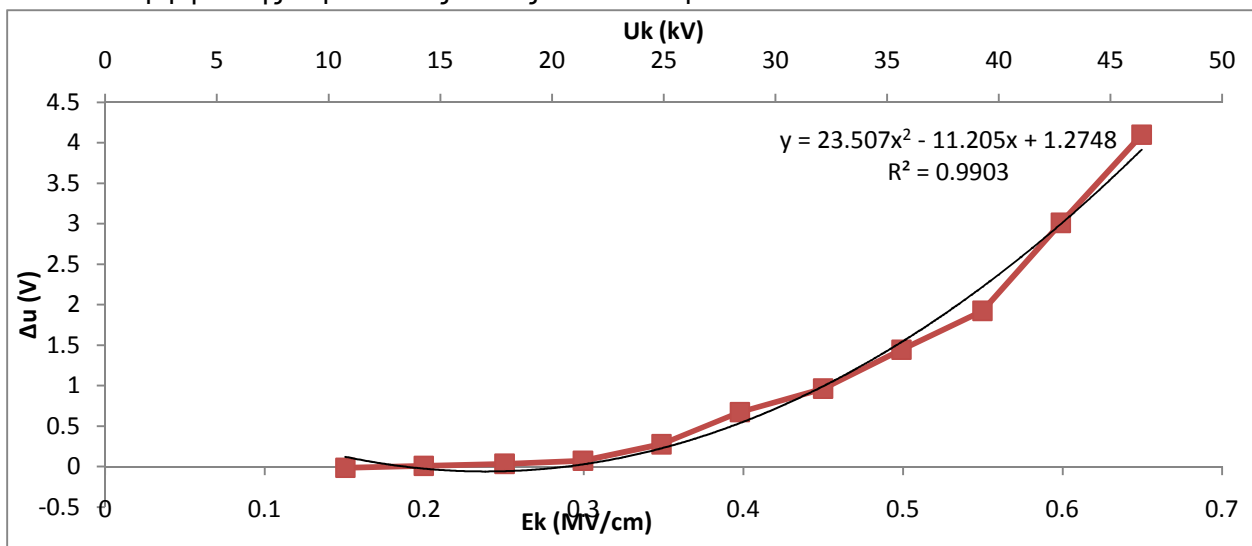
$u_{EV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{EV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{EV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.14:** Χαρακτηριστική  $\Delta u = f(U_k, E_k)$

$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά το πέρας αυτών  $u_2$ .

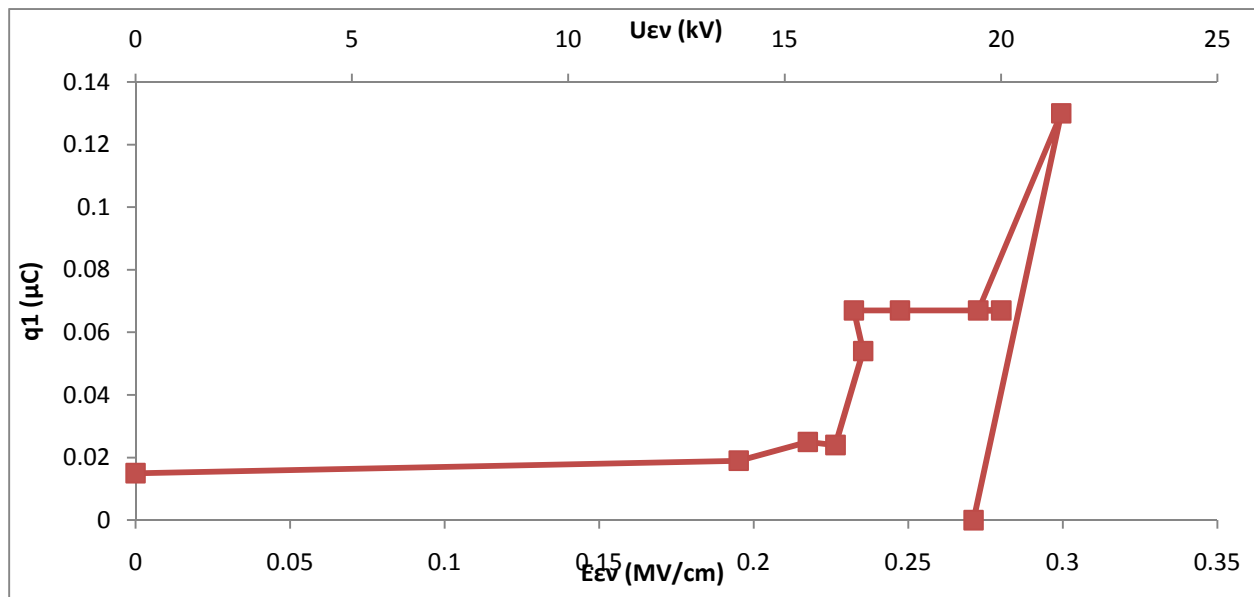
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

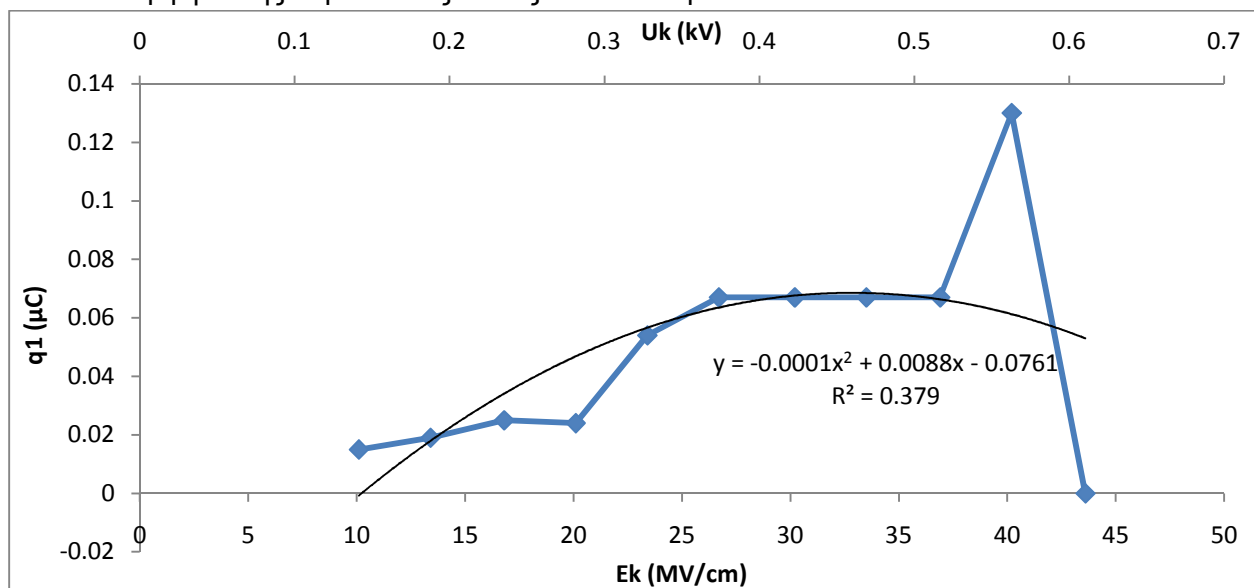
Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



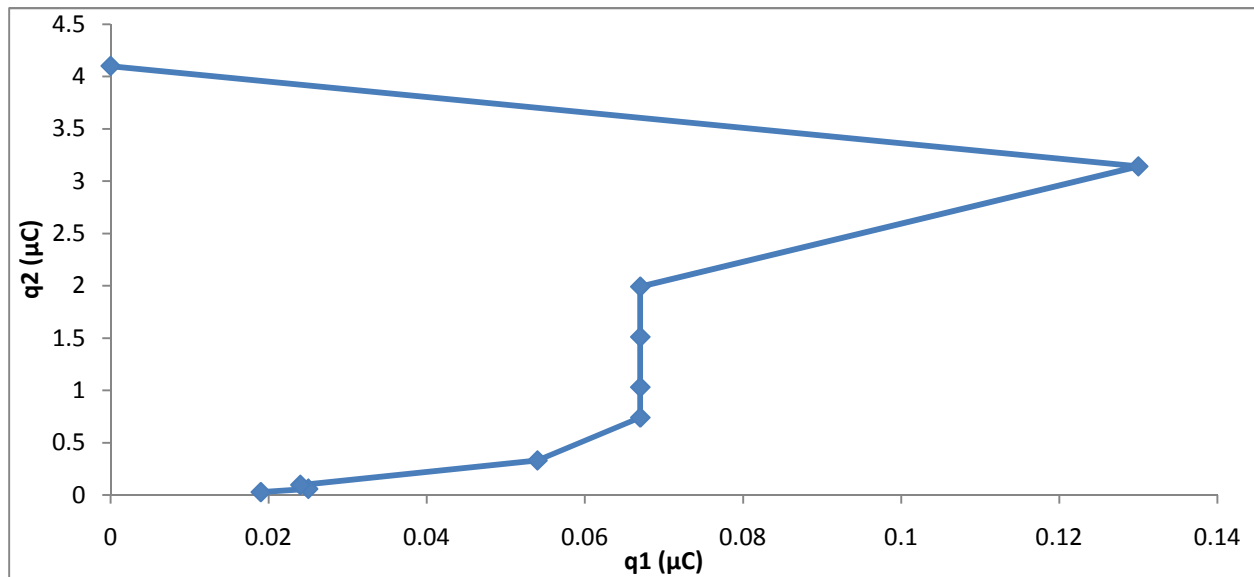
**Σχήμα 3.1.15:** Χαρακτηριστική  $q_1 = f(u_{ev}, E_{ev})$

$q_1$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  
 $u_{ev}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  
 $E_{ev}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{ev}$   
 Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο  
 Πάχος δοκιμίου :  $d=1mm$   
 Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu s$



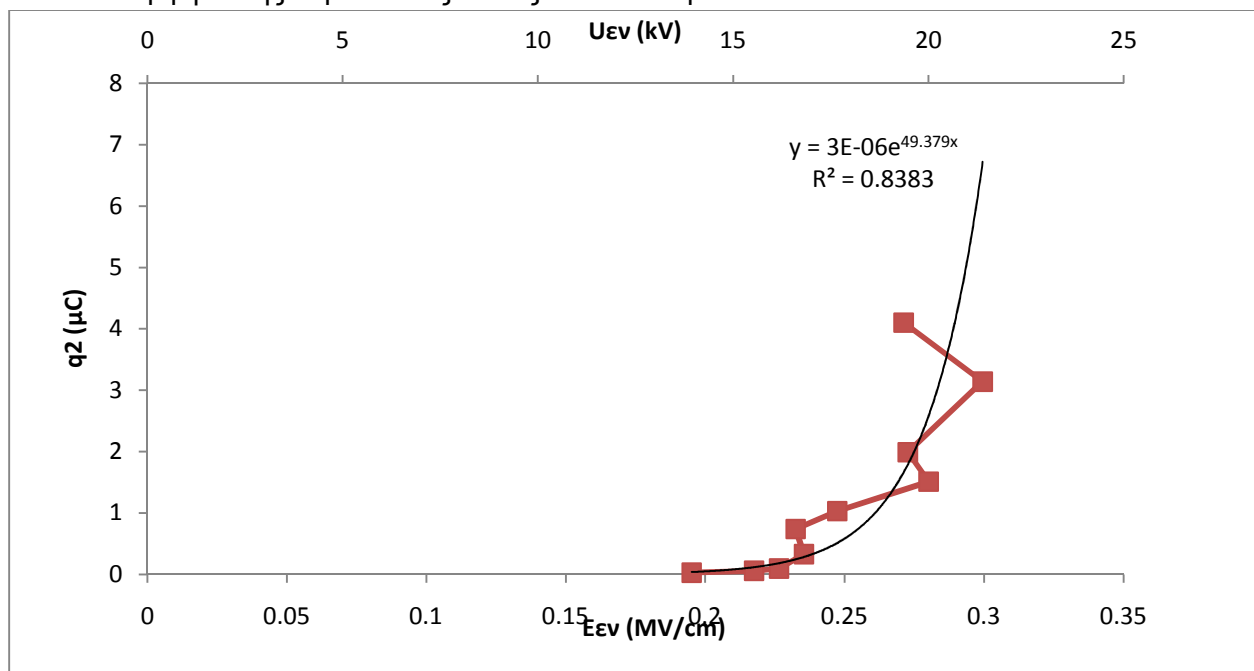
**Σχήμα 3.1.16:** Χαρακτηριστική  $q_1 = f(U_k, E_k)$

$q_1$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  
 $U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης  
 $E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$   
 Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο  
 Πάχος δοκιμίου :  $d=1mm$   
 Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu s$



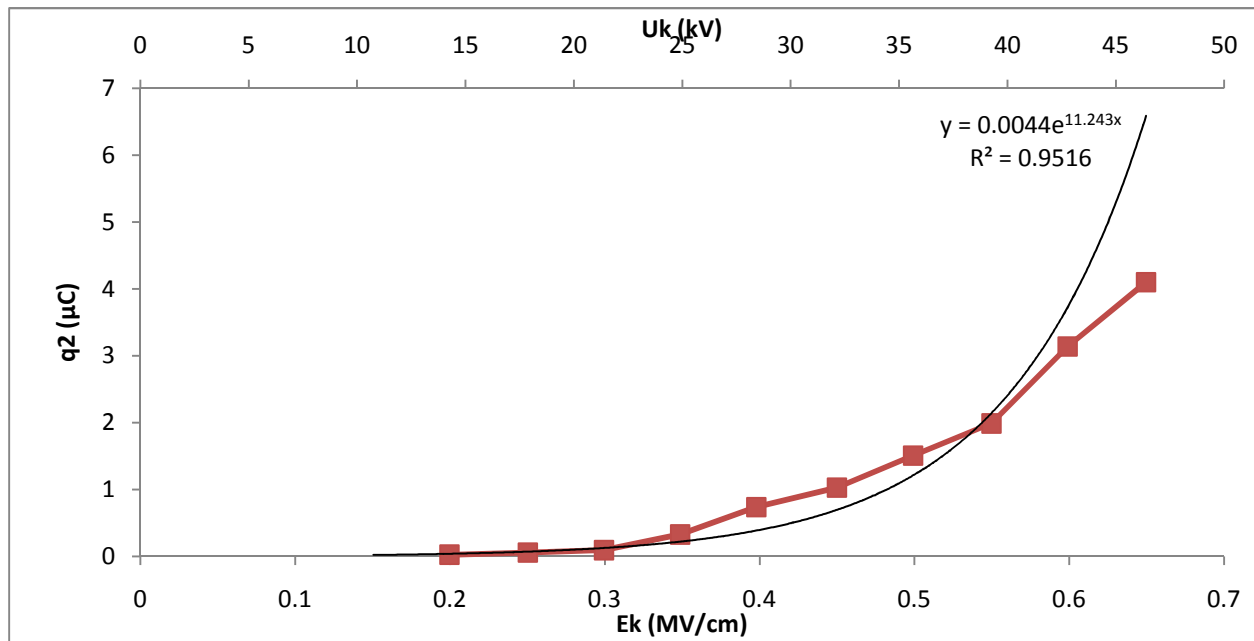
**Σχήμα 3.1.17:** Χαρακτηριστική  $q_2 = f(q_1)$

$q_2$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων  
 $q_1$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  
 Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο  
 Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$   
 Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.18:** Χαρακτηριστική  $q_2 = f(u_{εν}, E_{εν})$

$q_2$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων  
 $u_{εν}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  
 $E_{εν}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{εν}$   
 Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο  
 Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$   
 Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.19:** Χαρακτηριστική  $q_2 = f(U_k, E_k)$

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

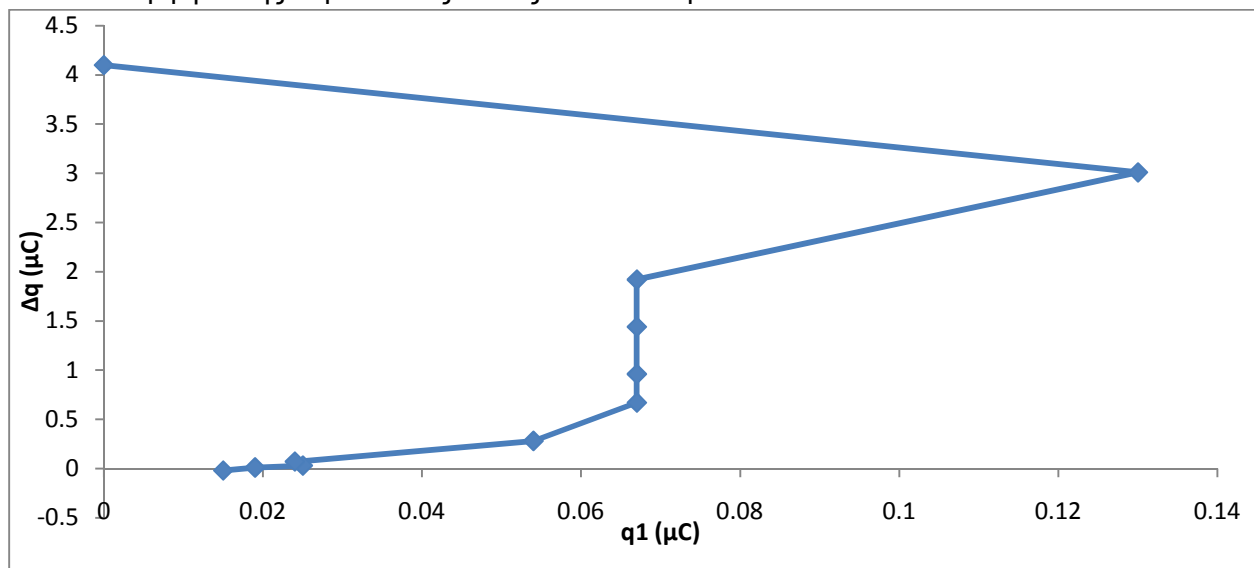
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.20:** Χαρακτηριστική  $\Delta q = f(q_1)$

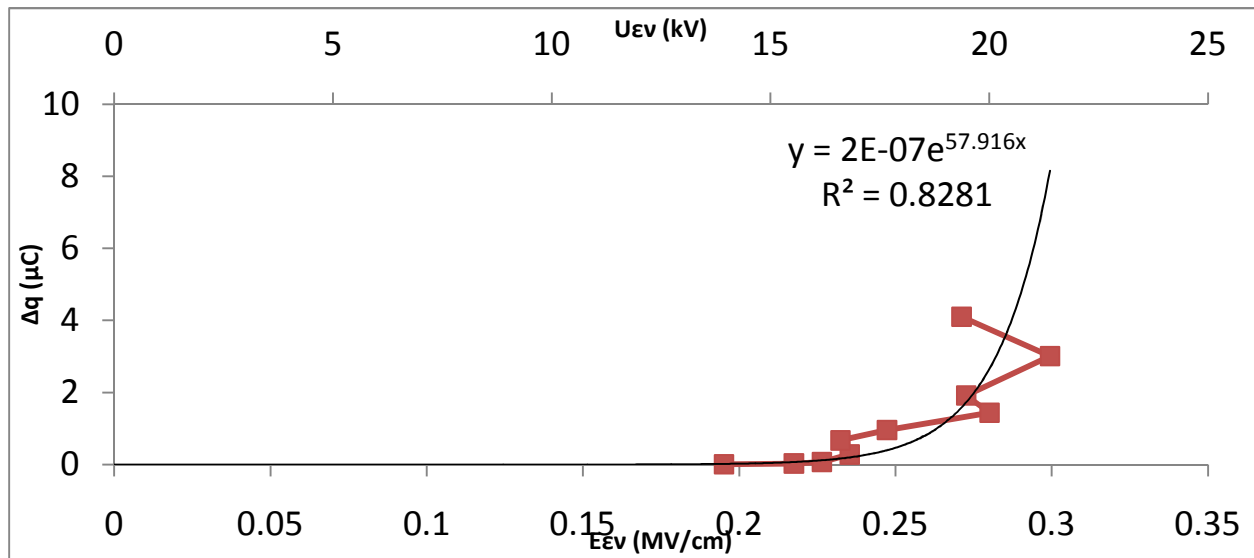
$\Delta q$  : διαφορά μεταξύ στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $q_1$  και της στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας αυτών.

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

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.21:** Χαρακτηριστική  $\Delta q = f(u_{EV}, E_{EV})$

$\Delta q$  : διαφορά μεταξύ στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $q_1$  και της στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας αυτών.

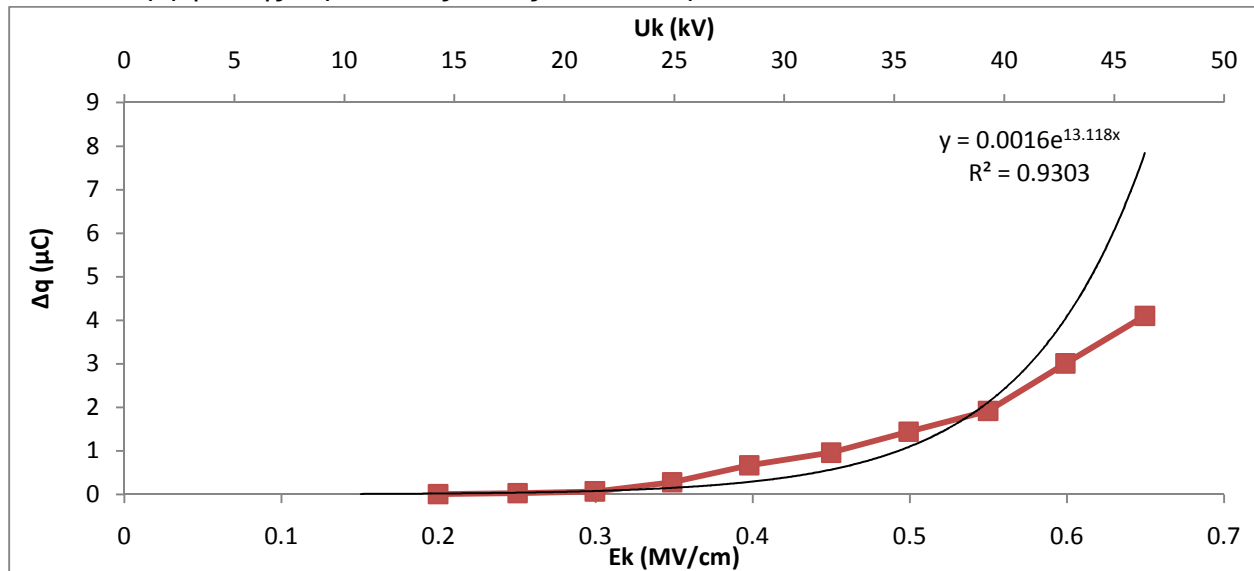
$u_{EV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{EV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $u_{EV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.22:** Χαρακτηριστική  $\Delta q = f(U_k, E_k)$

$\Delta q$  : διαφορά μεταξύ στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $q_1$  και της στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας αυτών.

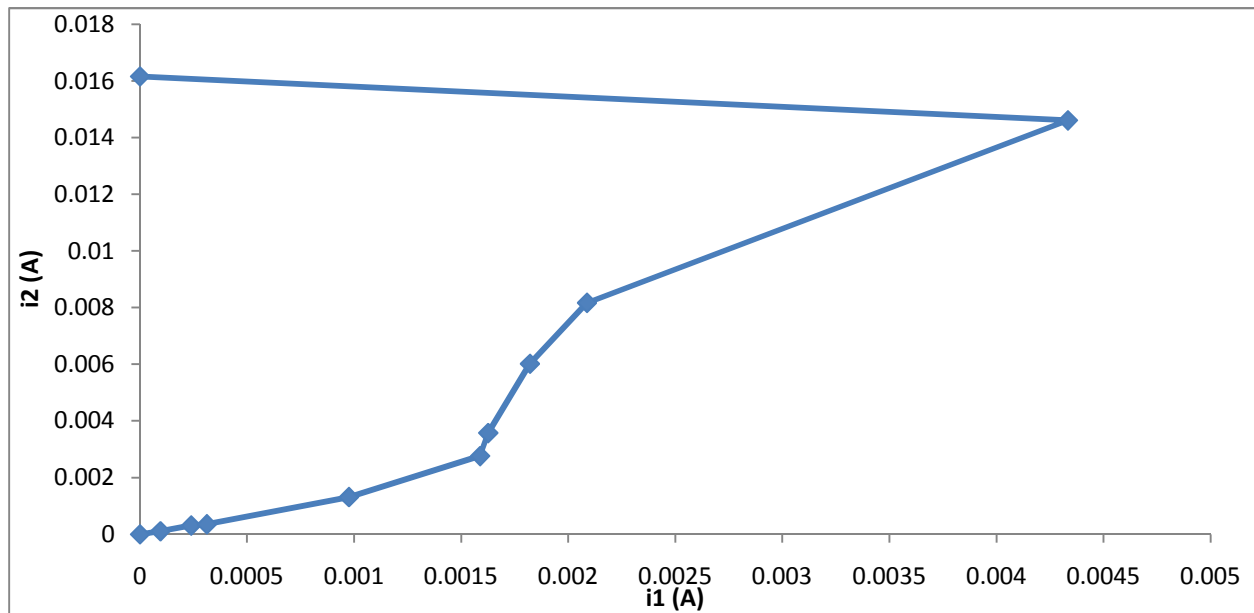
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

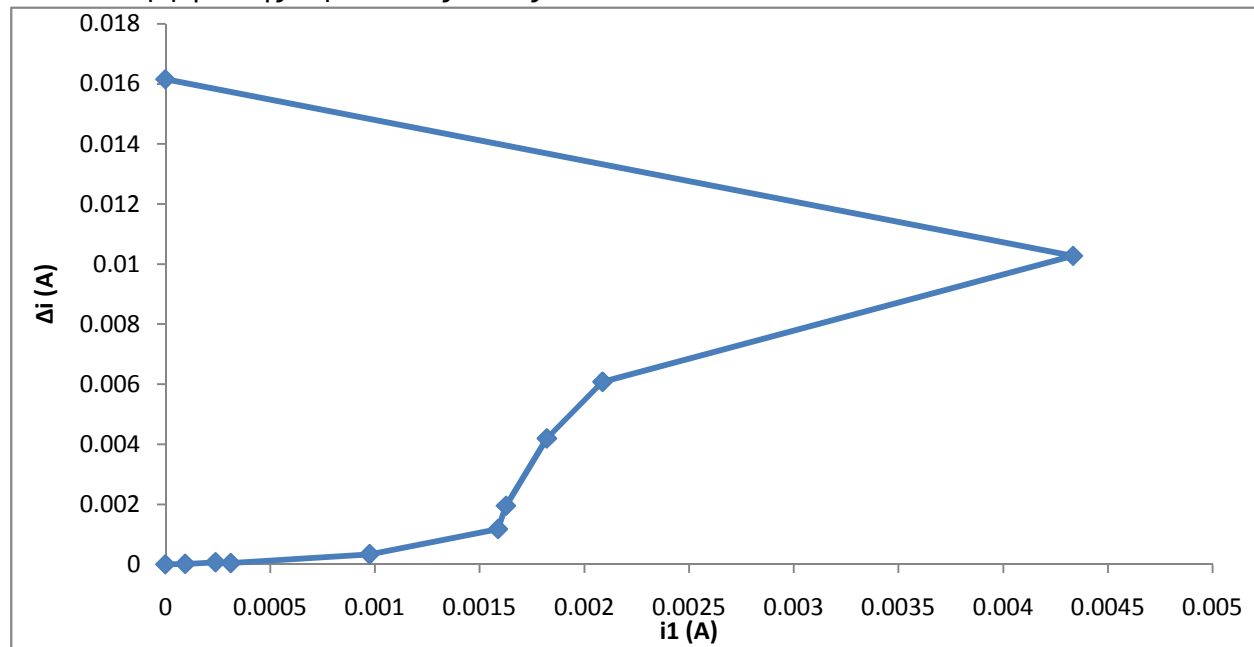
Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



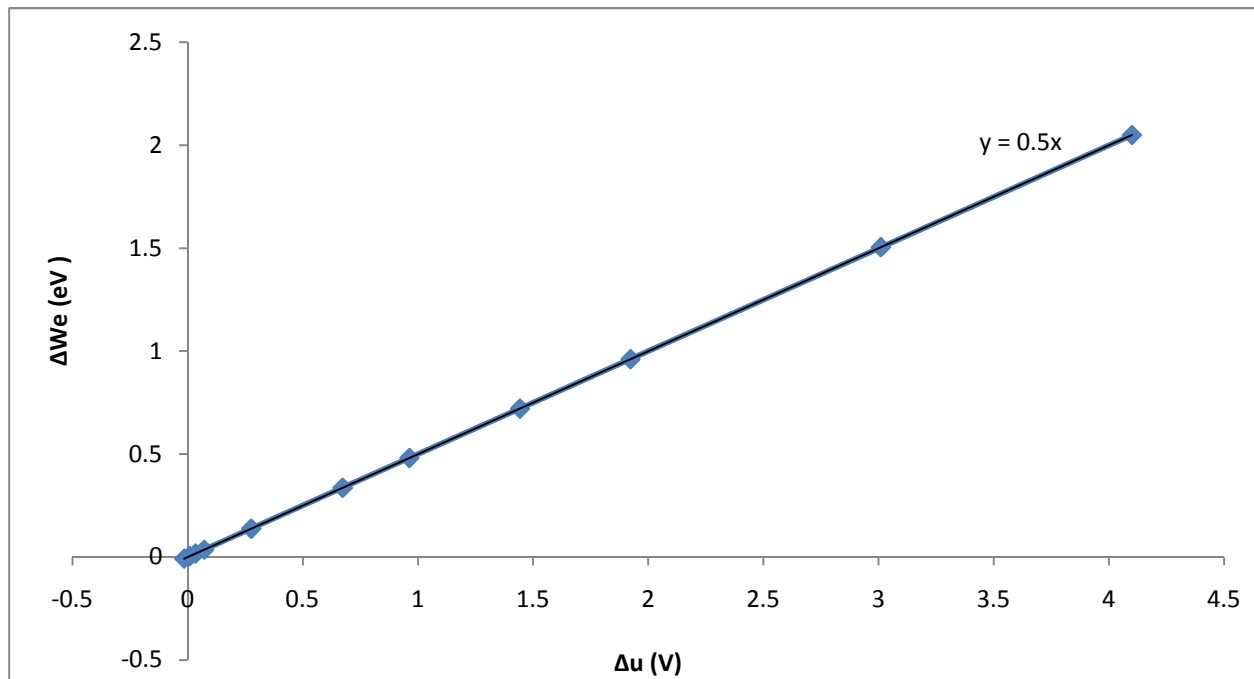
**Σχήμα 3.1.23:** Χαρακτηριστική  $i_2 = f(i_1)$

$i_2$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στον Cm κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων  
 $i_1$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στον Cm κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  
 Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο  
 Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$   
 Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500$



**Σχήμα 3.1.24:** Χαρακτηριστική  $\Delta i = f(i_1)$

$\Delta i$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος στον Cm κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $i_1$  και της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος στον Cm κατά το πέρας αυτών  $i_2$ .  
 $i_1$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στον Cm κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  
 Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο  
 Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$   
 Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500$



**Σχήμα 3.1.25:** Χαρακτηριστική  $\Delta W_e = f(\Delta u)$

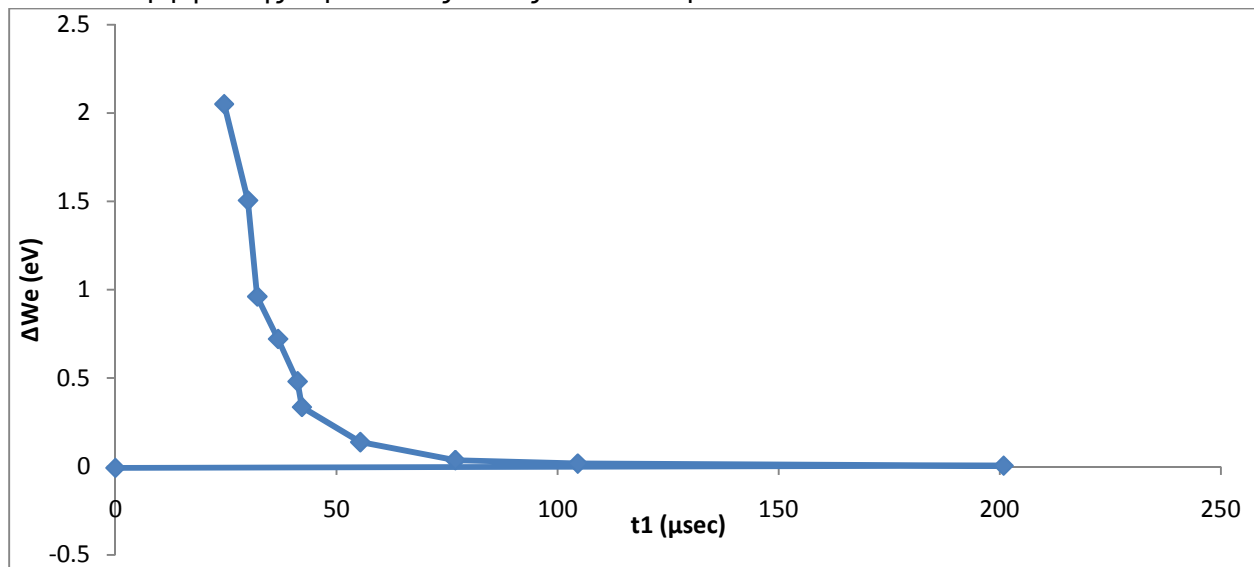
$\Delta W_e$  : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά το πέρασ αυτών  $u_2$ .

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.1.26:** Χαρακτηριστική  $\Delta W_e = f(t_1)$

$\Delta W_e$  : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων

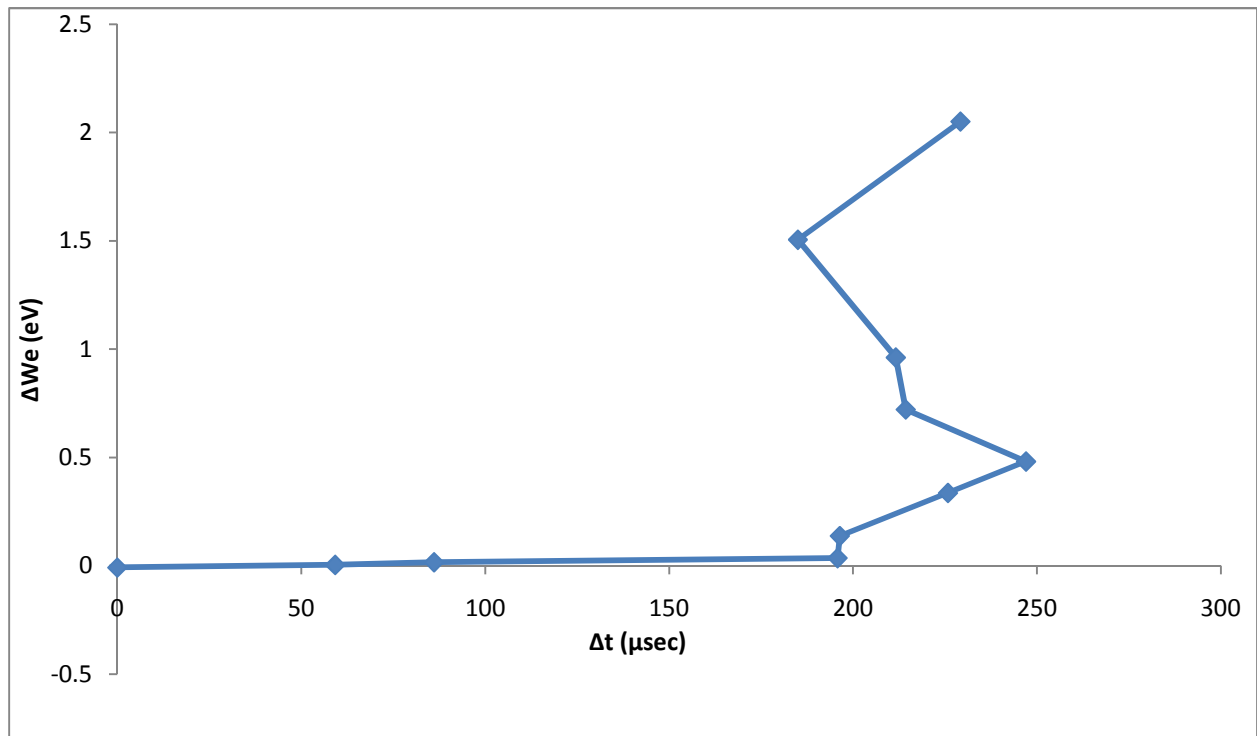
$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$





**Σχήμα 3.1.27:** Χαρακτηριστική  $\Delta W_e = f(\Delta t)$

$\Delta W_e$  : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και

$t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$

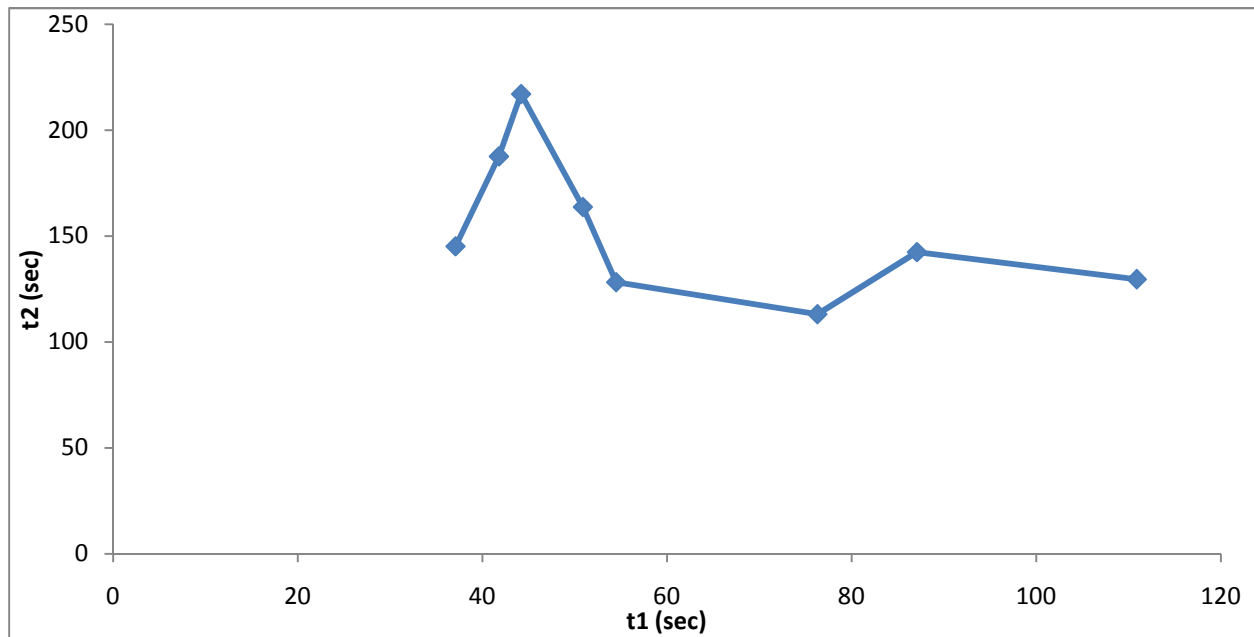
### 3.2 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 1 \text{ mm}$ Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας

Πίνακας 3.2.1

Uk kV	Ek MV/cm	Cm nF	u1 V	u2 V	Δu V	t1 μs	t2 μs	Δt μs
-20,7	-0,308382	1000	0,079	0,130	0,051	110,9	129,6	18,7
-24,2	-0,360524	1000	0,083	0,240	0,157	87,1	142,4	55,3
-27,6	-0,411176	1000	0,067	0,380	0,313	76,3	113,1	36,8
-31,1	-0,463318	1000	0,100	0,480	0,380	54,5	128,2	73,7
-34,5	-0,513971	1000	0,067	0,820	0,753	50,9	163,7	112,8
-37,9	-0,564623	1000	0,067	1,890	1,823	44,2	217	172,8
41,4	0,616765	1000	0,000	2,290	2,290	41,8	187,6	145,8
-44,8	-0,667417	1000	0,000	2,240	2,240	37,1	145,1	108

Πίνακας 3.2.2

q1 μC	q2 μC	Δq μC	i1 A	i2 A	Δi A	uεν kV	Eεν MV/cm	ΔWe eV	Ne	Na
0,079	0,13	0,05	0,000712	0,001003	0,000291	15,4	0,229425	0,0255	318750000	187
0,083	0,24	0,16	0,000953	0,001685	0,000732	17,7	0,263689	0,0785	981250000	553
0,067	0,38	0,31	0,000878	0,003360	0,002482	18,3	0,272628	0,1565	1956250000	368
0,100	0,48	0,38	0,001835	0,003744	0,001909	17,5	0,260710	0,1900	2375000000	737
0,067	0,82	0,75	0,001316	0,005009	0,003693	17,3	0,257730	0,3765	4706250000	1128
0,067	1,89	1,82	0,001516	0,008710	0,007194	18,2	0,271138	0,9115	11393750000	1728
0,000	2,29	2,29	0,000000	0,012207	0,012207	18,8	0,280077	1,1450	14312500000	1458
0,000	2,24	2,24	0,000000	0,015438	0,015438	19,6	0,291995	1,1200	14000000000	1080



**Σχήμα 3.2.1:** Χαρακτηριστική  $t_2 = f(t_1)$

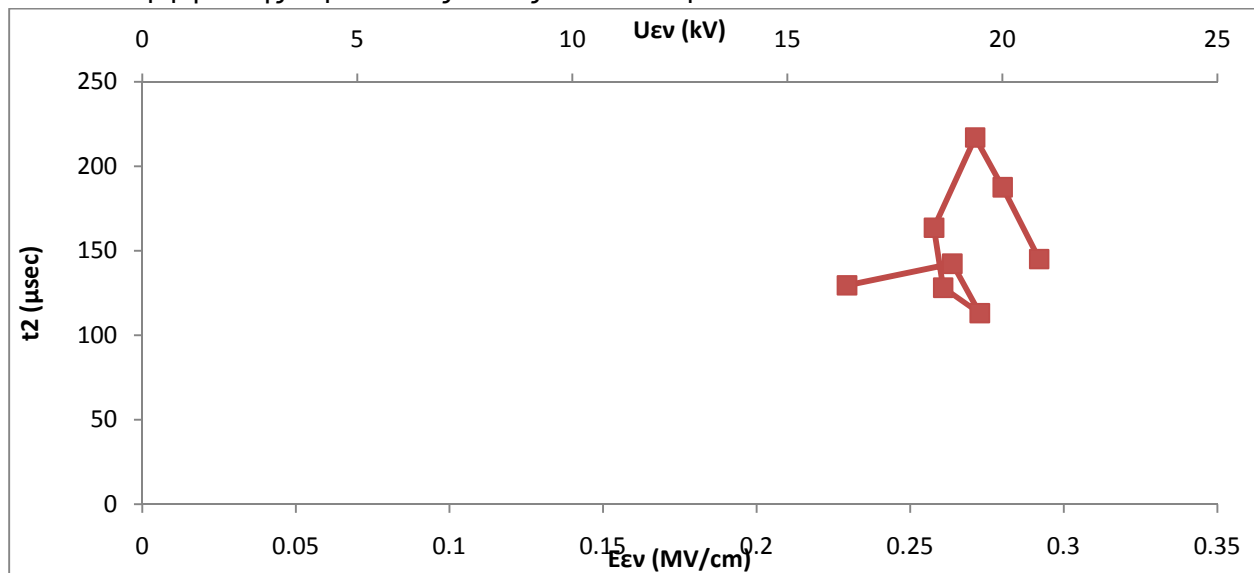
$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.2:** Χαρακτηριστική  $t_2 = f(u_{εν}, E_{εν})$

$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

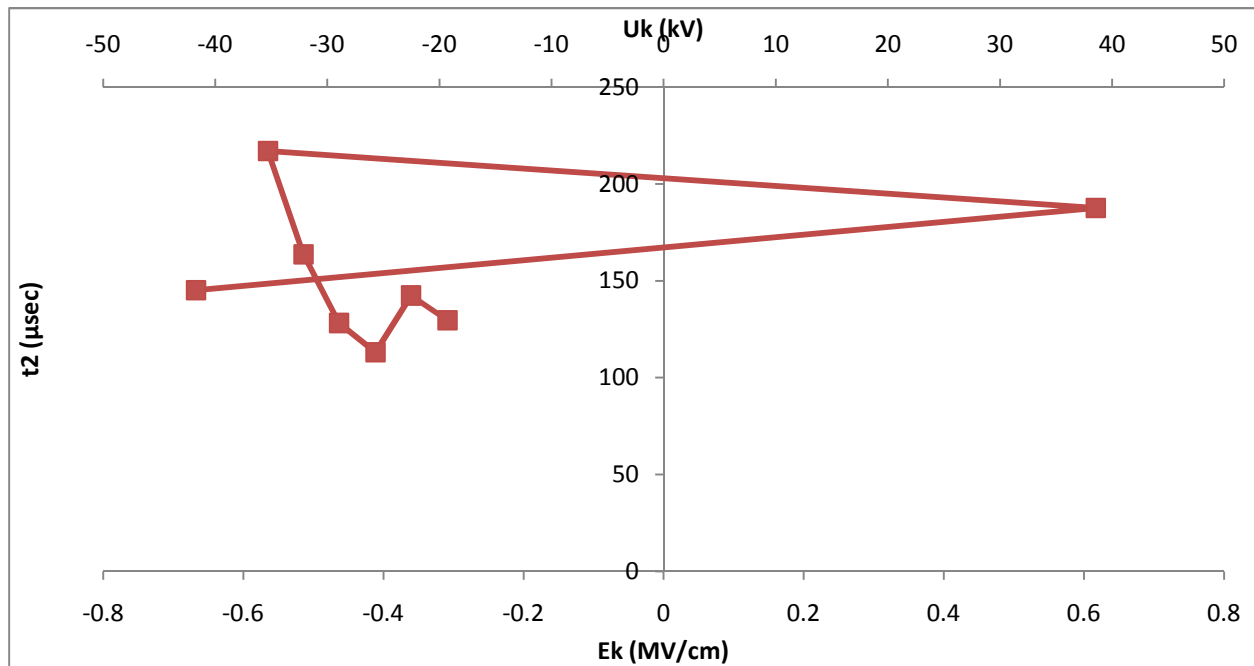
$u_{εν}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{εν}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{εν}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.3:** Χαρακτηριστική  $t_2 = f(U_k, E_k)$

$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

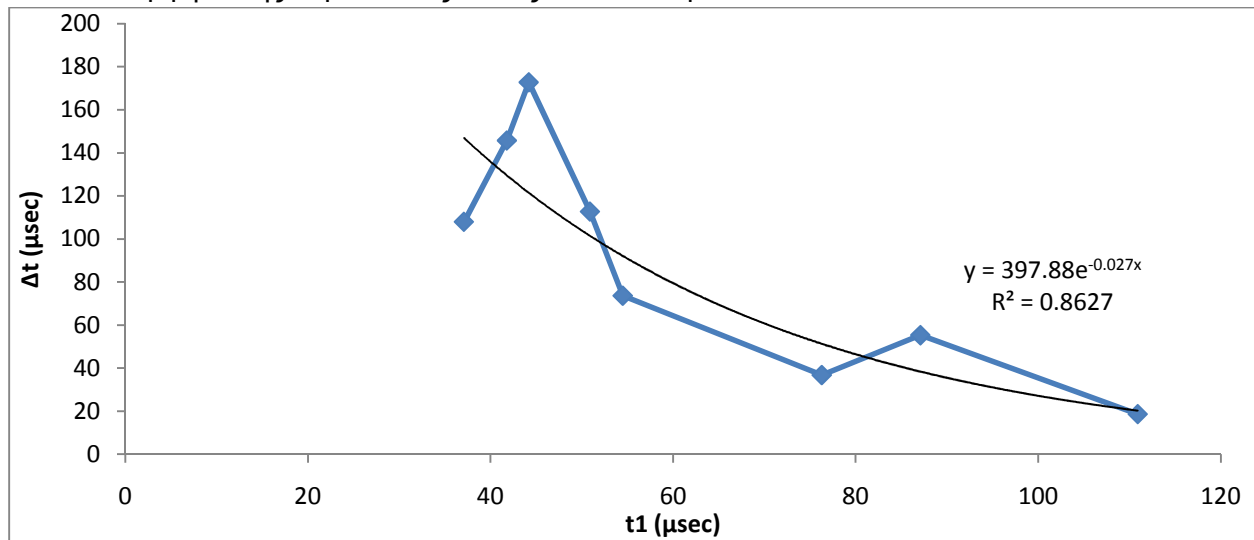
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.4:** Χαρακτηριστική  $\Delta t = f(t_1)$

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και

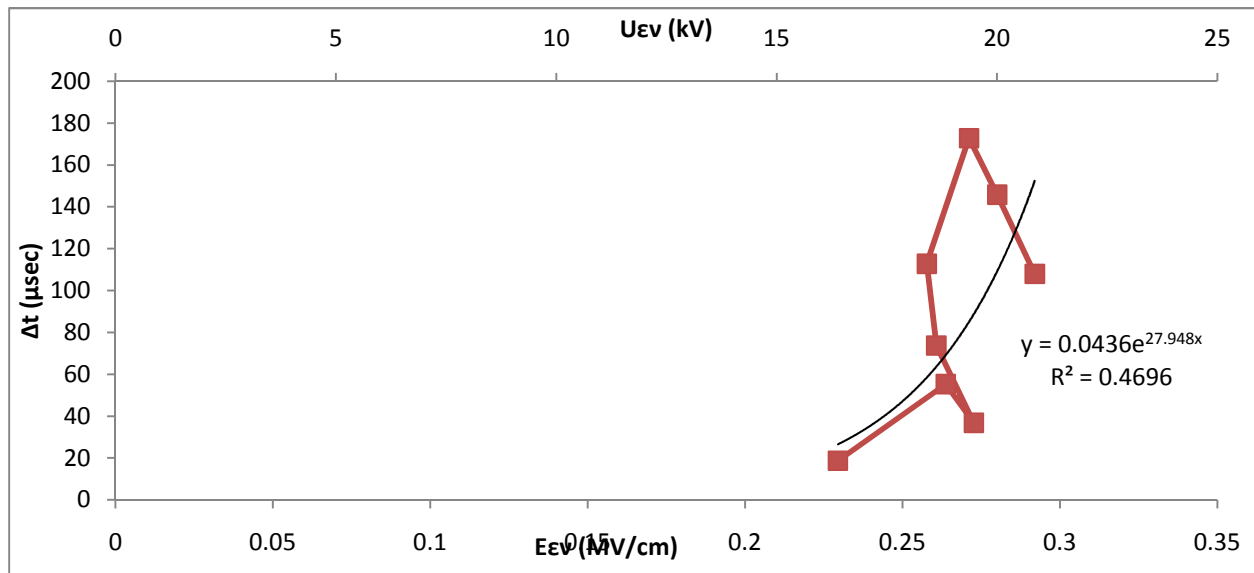
$t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.5:** Χαρακτηριστική  $\Delta t = f(u_{EV}, E_{EV})$

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και  $t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

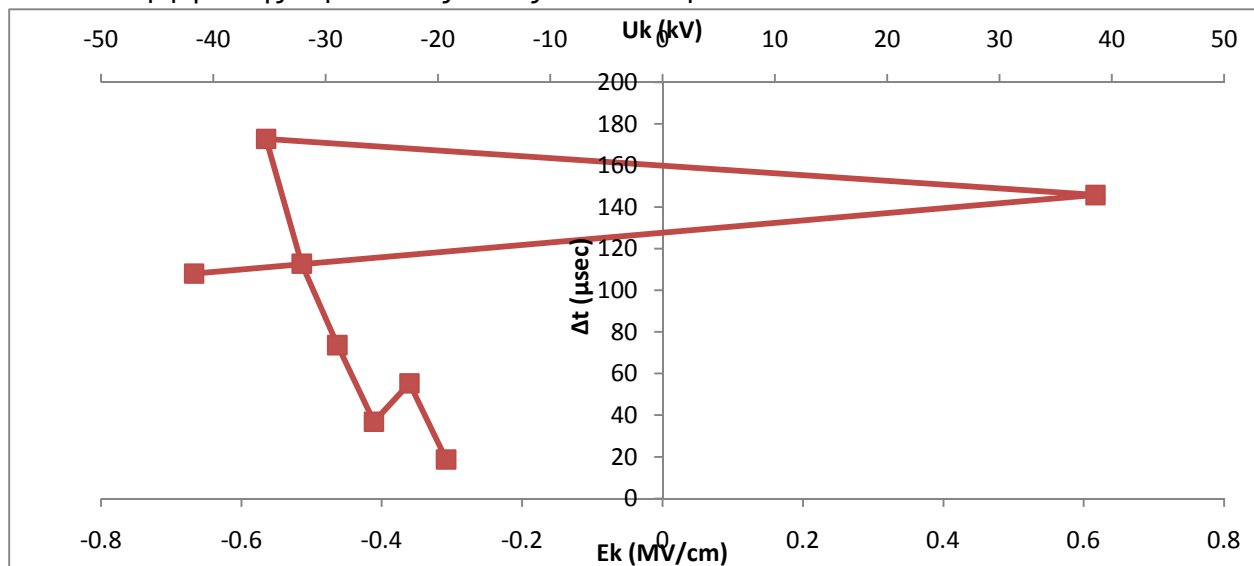
$u_{EV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{EV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{EV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.6:** Χαρακτηριστική  $\Delta t = f(U_k, E_k)$

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και  $t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

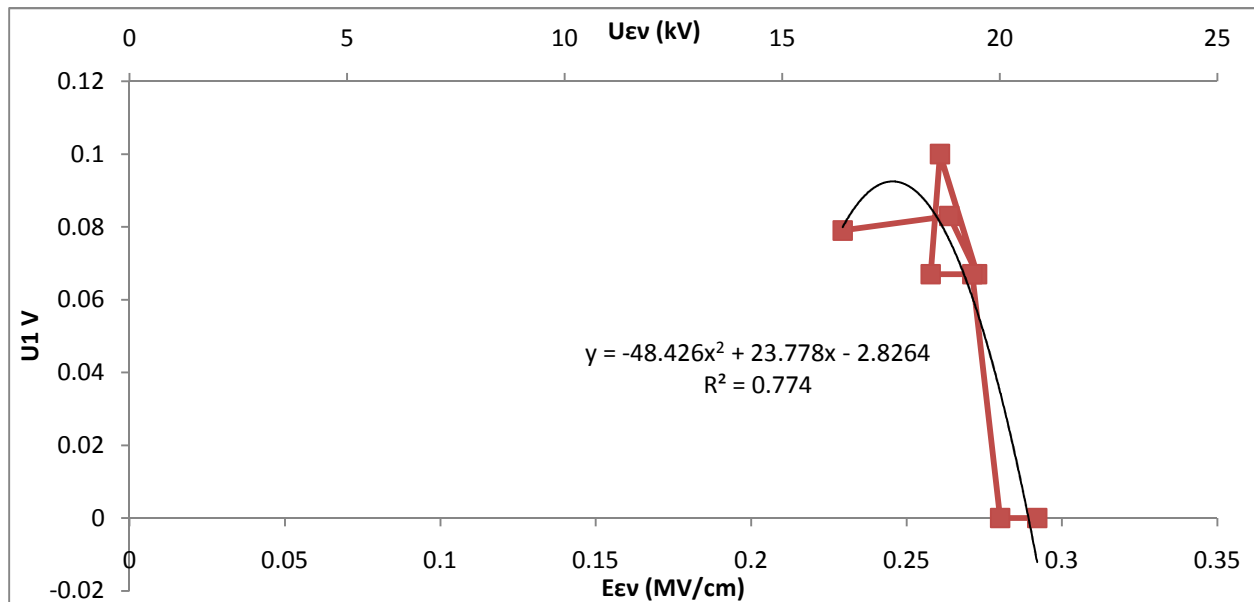
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.7:** Χαρακτηριστική  $u_1 = f(u_{εV}, E_{εV})$

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

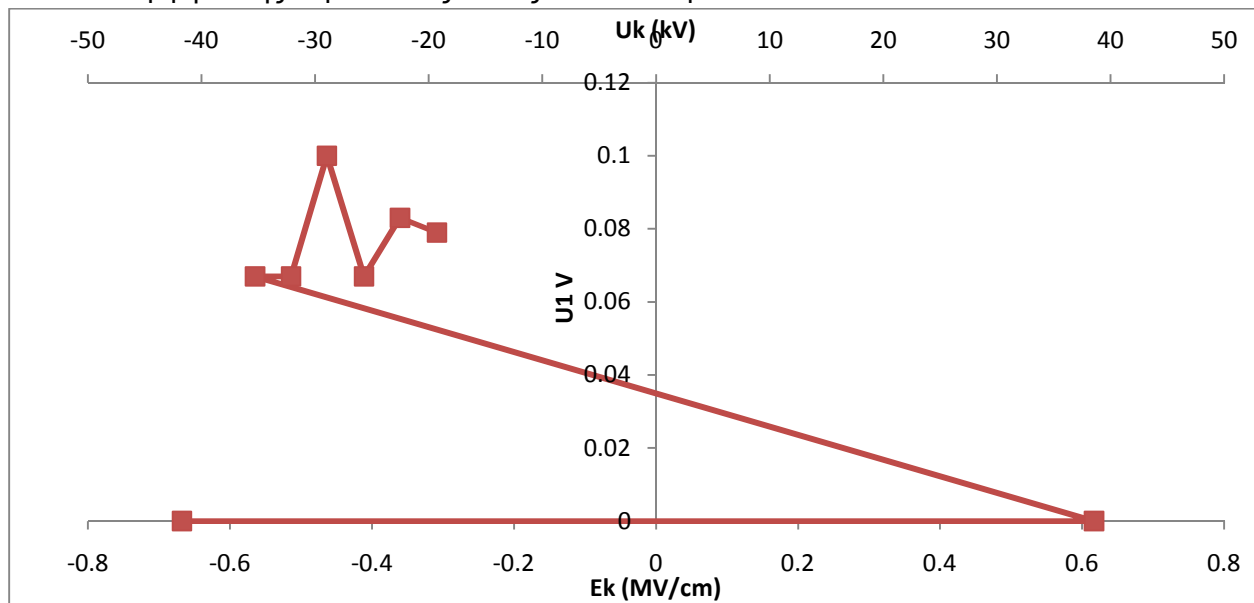
$u_{εV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{εV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{εV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.8:** Χαρακτηριστική  $u_1 = f(U_k, E_k)$

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

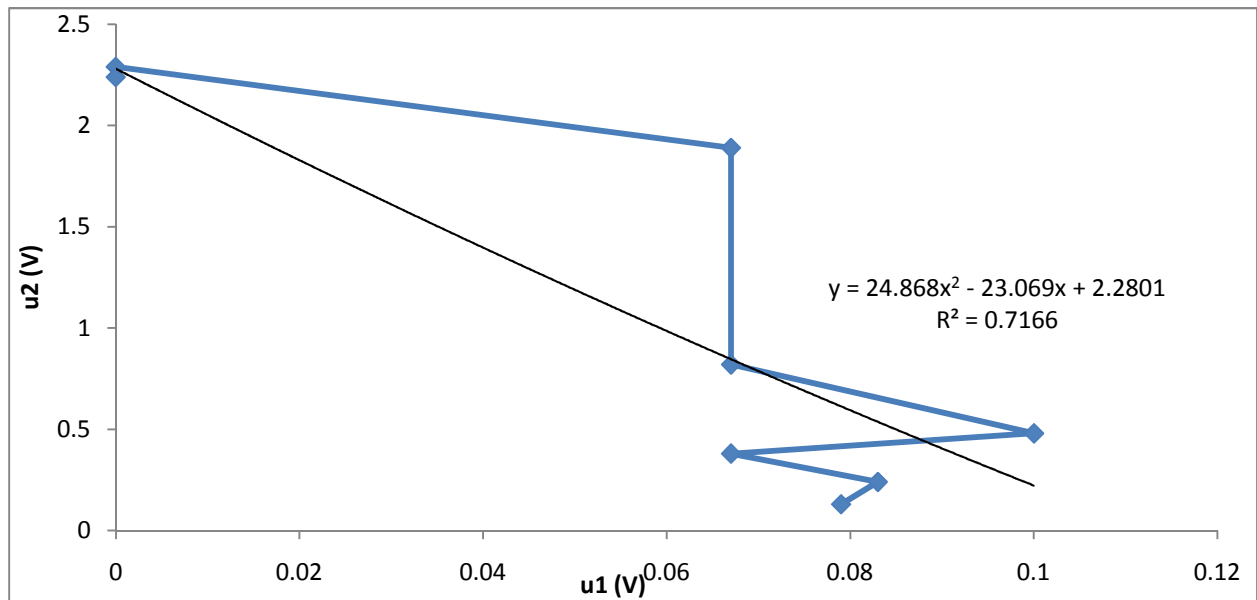
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.9:** Χαρακτηριστική  $u_2 = f(u_1)$

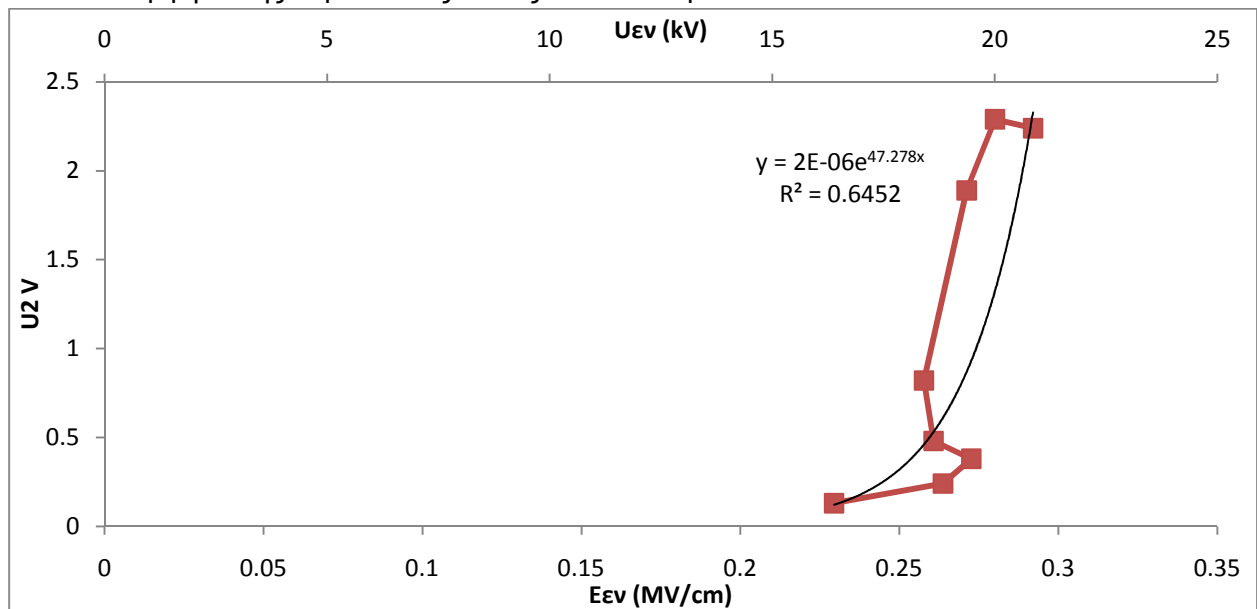
$u_2$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.10:** Χαρακτηριστική  $u_2 = f(u_{ev}, E_{ev})$

$u_2$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα το πέρας των μερικών εκκενώσεων

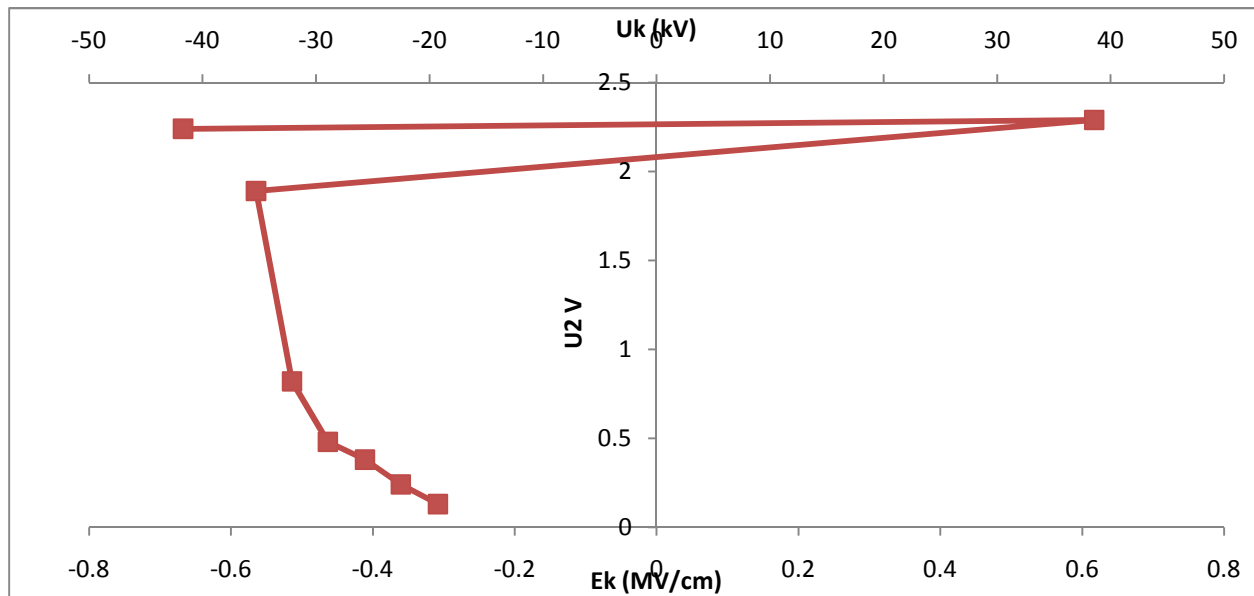
$u_{ev}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{ev}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{ev}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.11:** Χαρακτηριστική  $u_2 = f(U_k, E_k)$

$u_2$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα το πέρας των μερικών εκκενώσεων

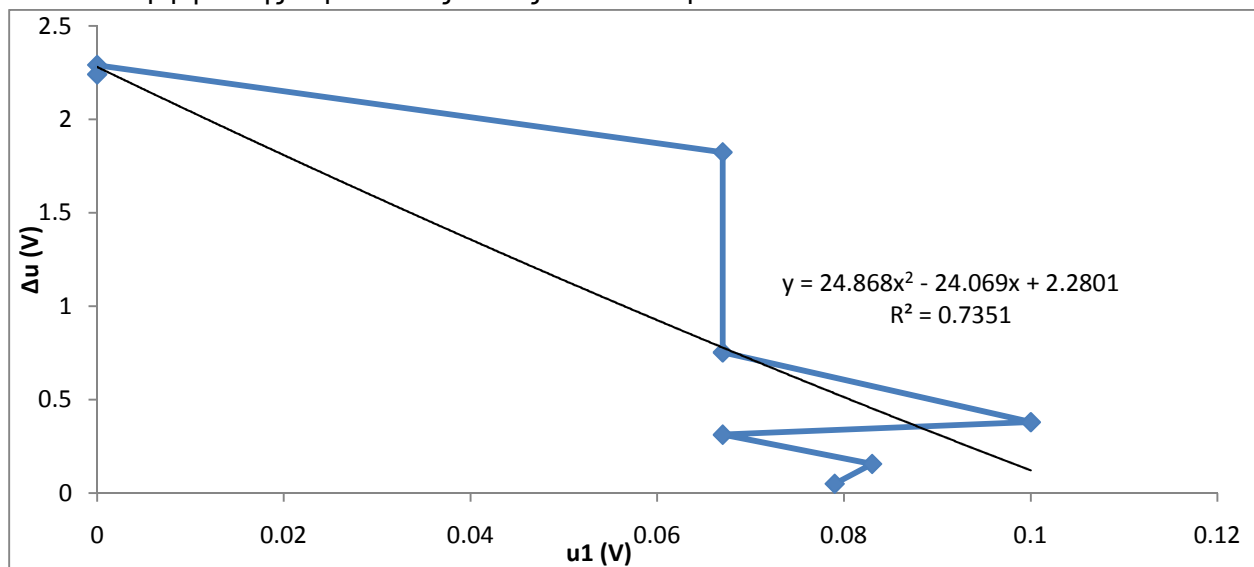
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.12:** Χαρακτηριστική  $\Delta u = f(U_1)$

$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατα το πέρας αυτών  $u_2$ .

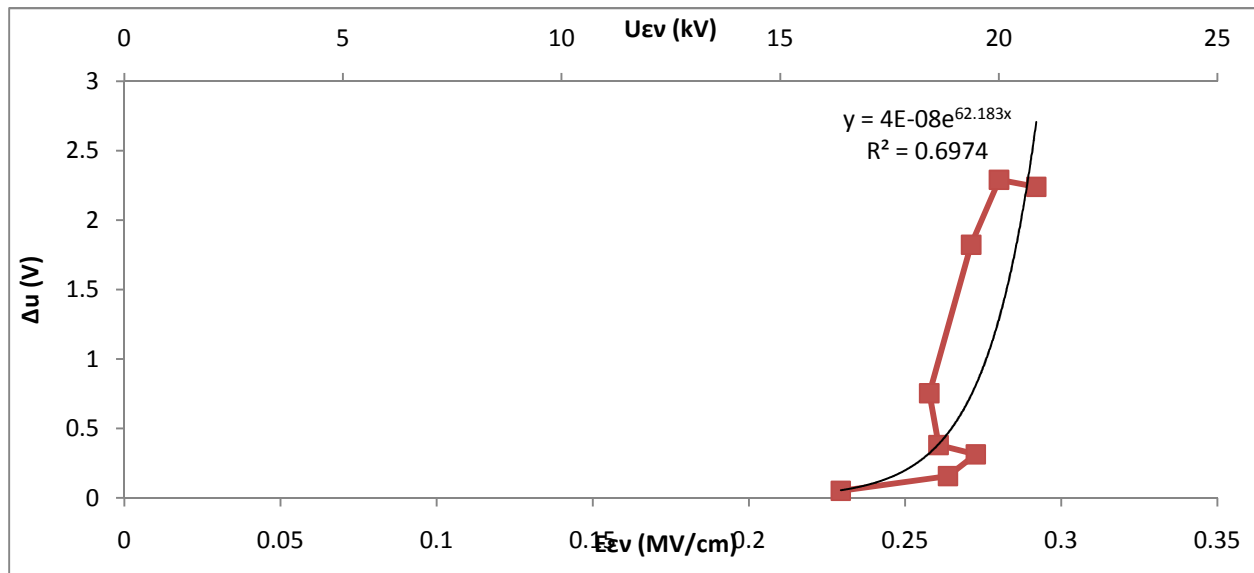
$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$





**Σχήμα 3.2.13:** Χαρακτηριστική  $\Delta u = f(u_{EV}, E_{EV})$

$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά το πέρας αυτών  $u_2$ .

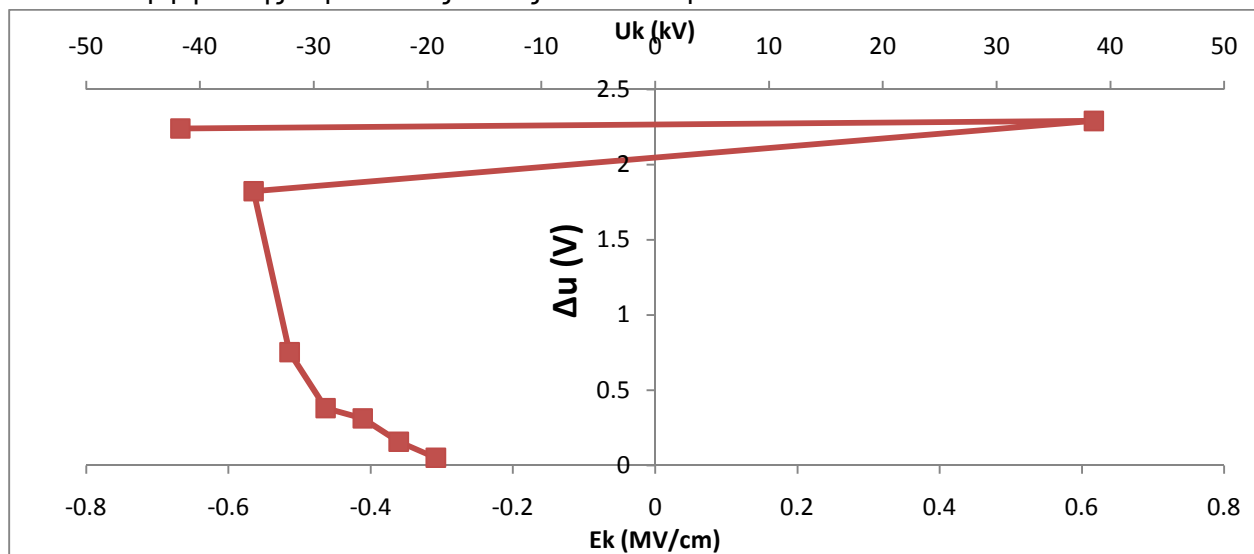
$u_{EV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{EV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{EV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.14:** Χαρακτηριστική  $\Delta u = f(U_k, E_k)$

$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά το πέρας αυτών  $u_2$ .

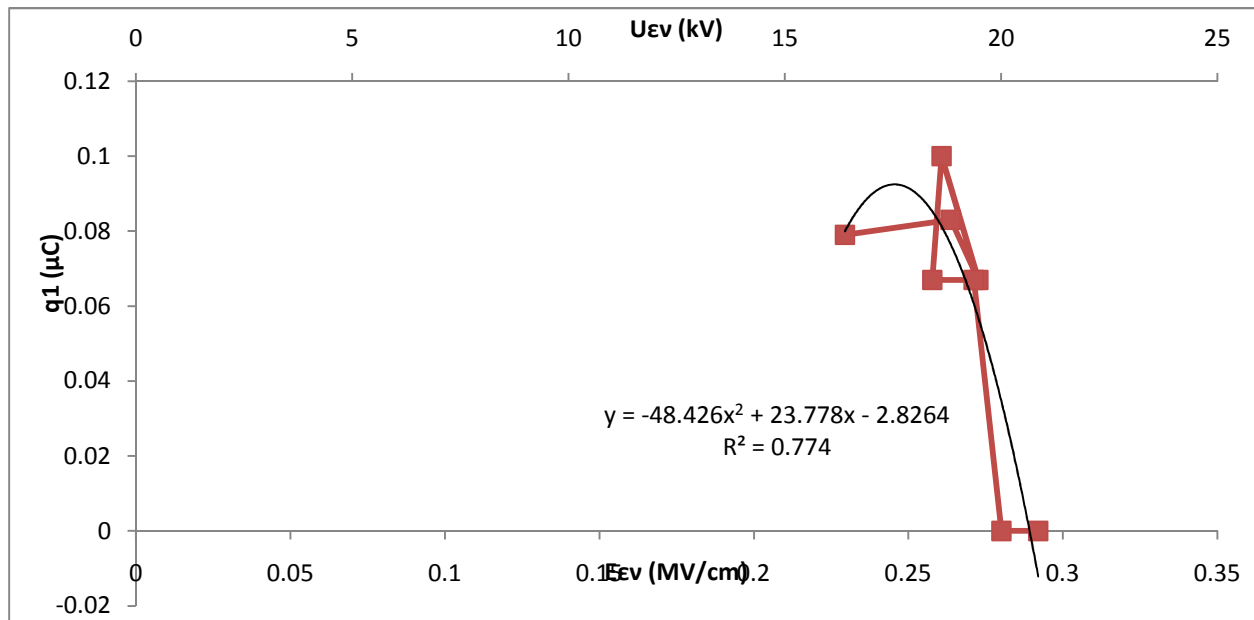
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.15:** Χαρακτηριστική  $q_1 = f(u_{ev}, E_{ev})$

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

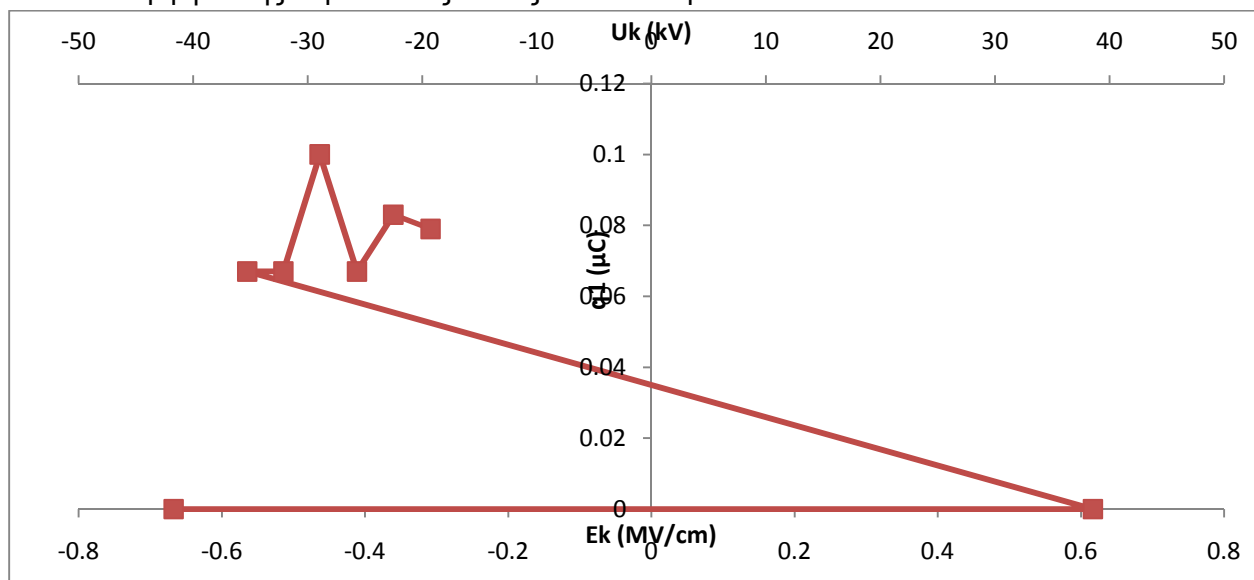
$u_{ev}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{ev}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{ev}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.16:** Χαρακτηριστική  $q_1 = f(U_k, E_k)$

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

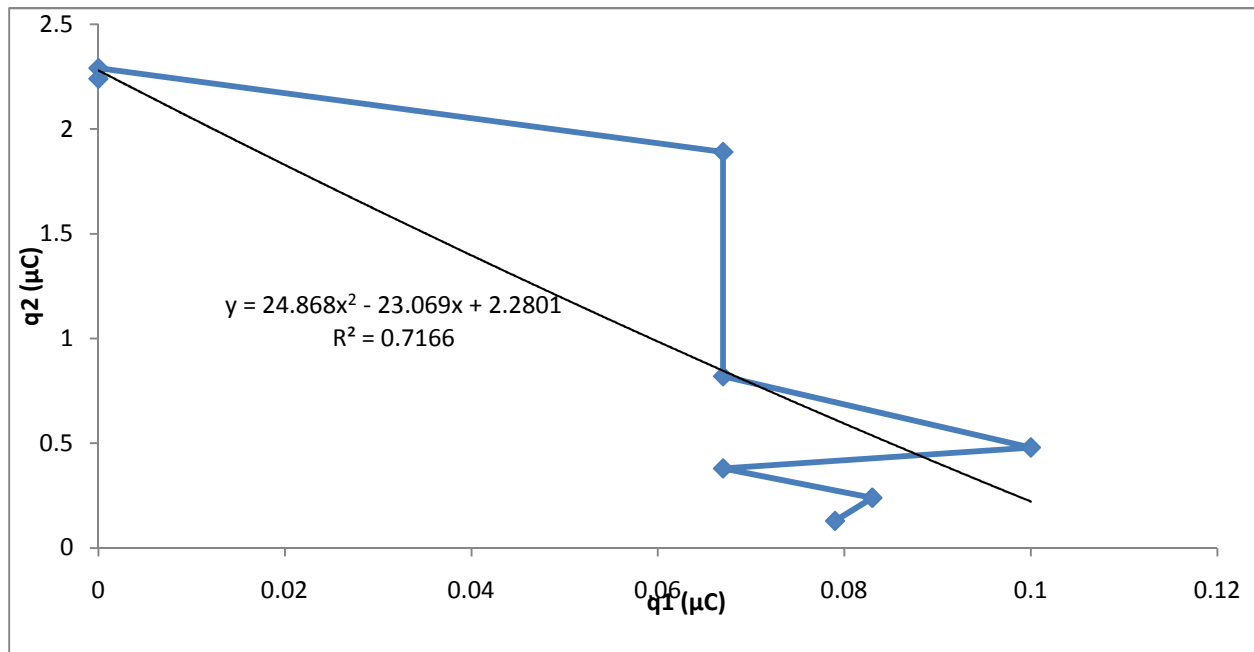
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.17:** Χαρακτηριστική  $q_2 = f(q_1)$

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

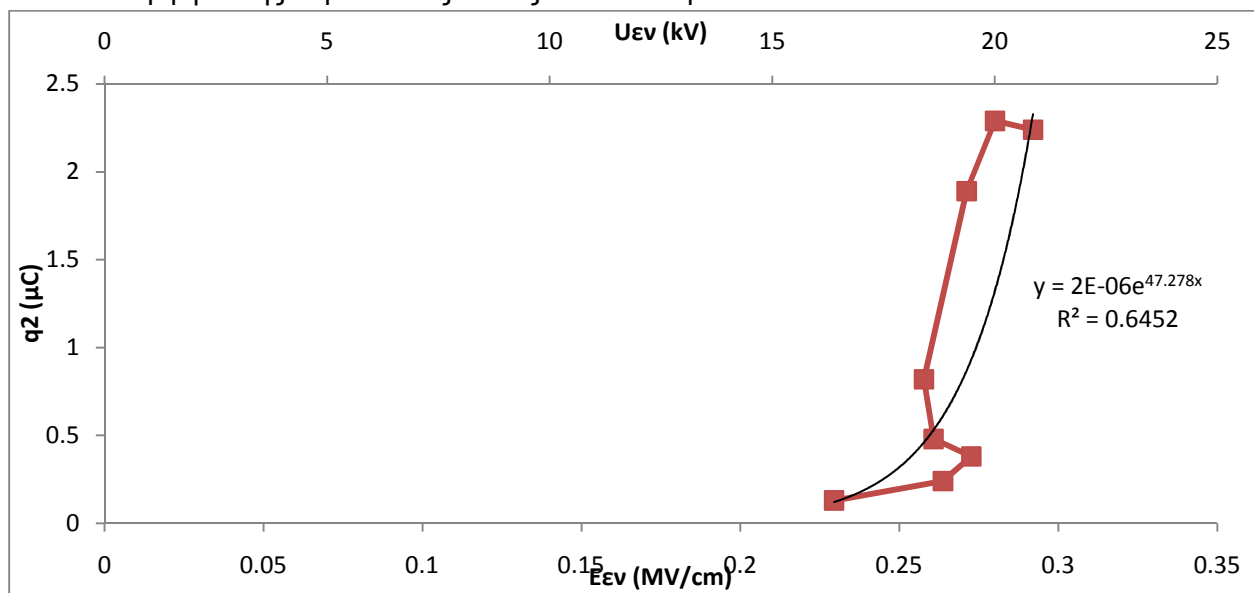
$q_1$  :

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

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.18:** Χαρακτηριστική  $q_2 = f(u_{εν}, E_{εν})$

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

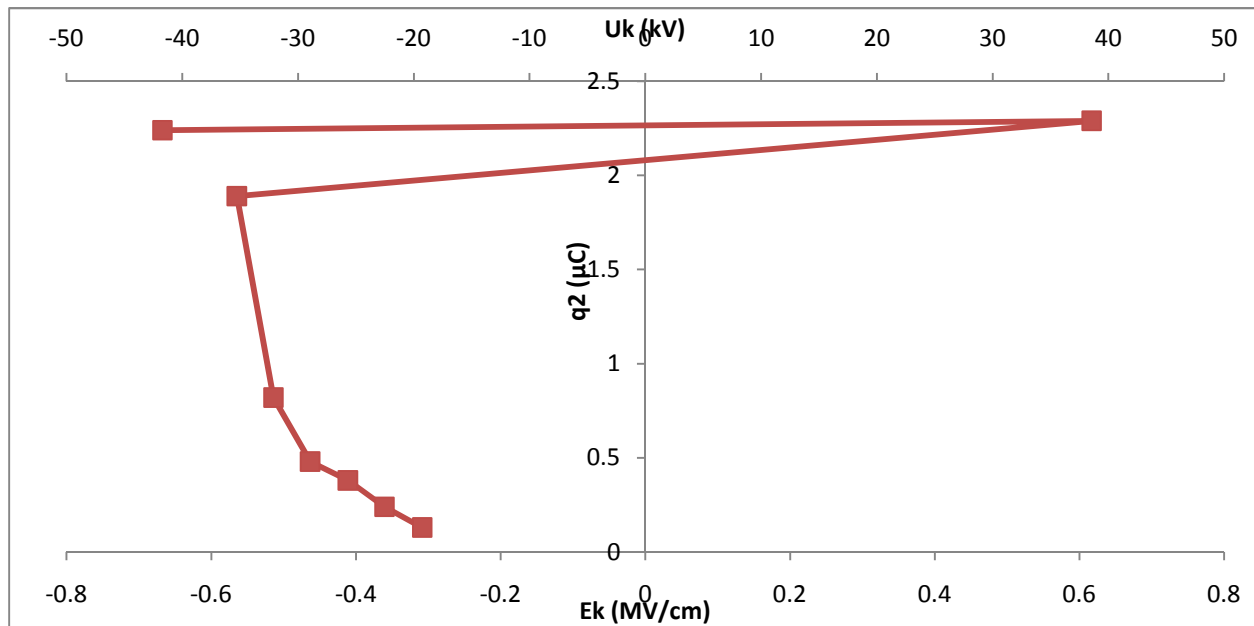
$u_{εν}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{εν}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{εν}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.19:** Χαρακτηριστική  $q_2 = f(U_k, E_k)$

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

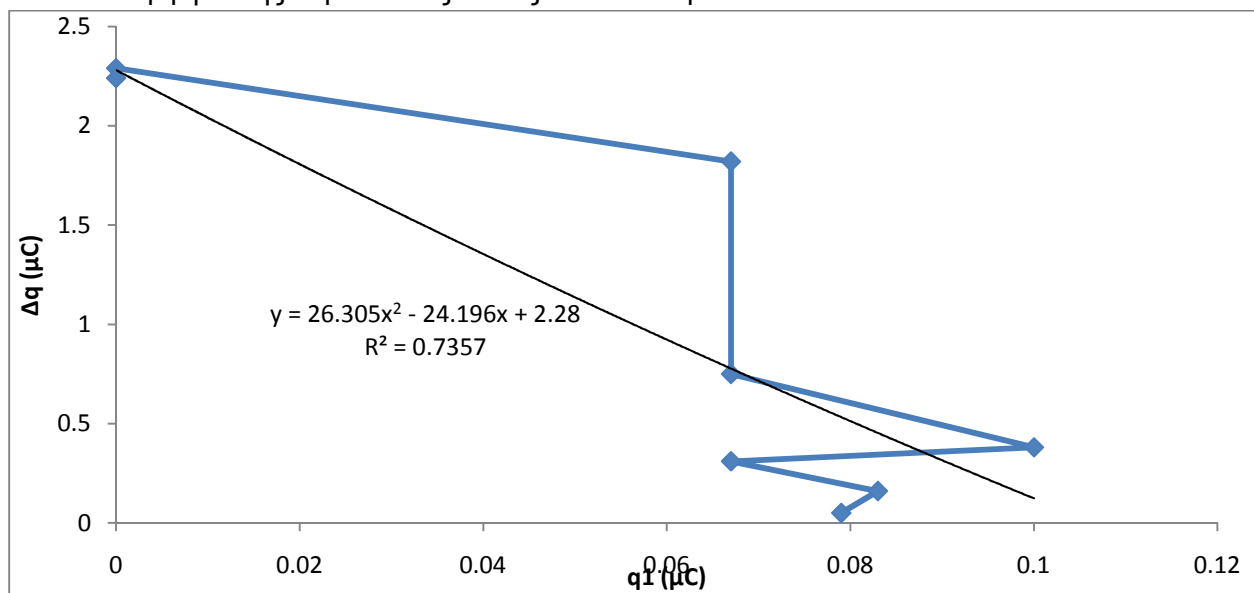
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίου

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.20:** Χαρακτηριστική  $\Delta q = f(q_1)$

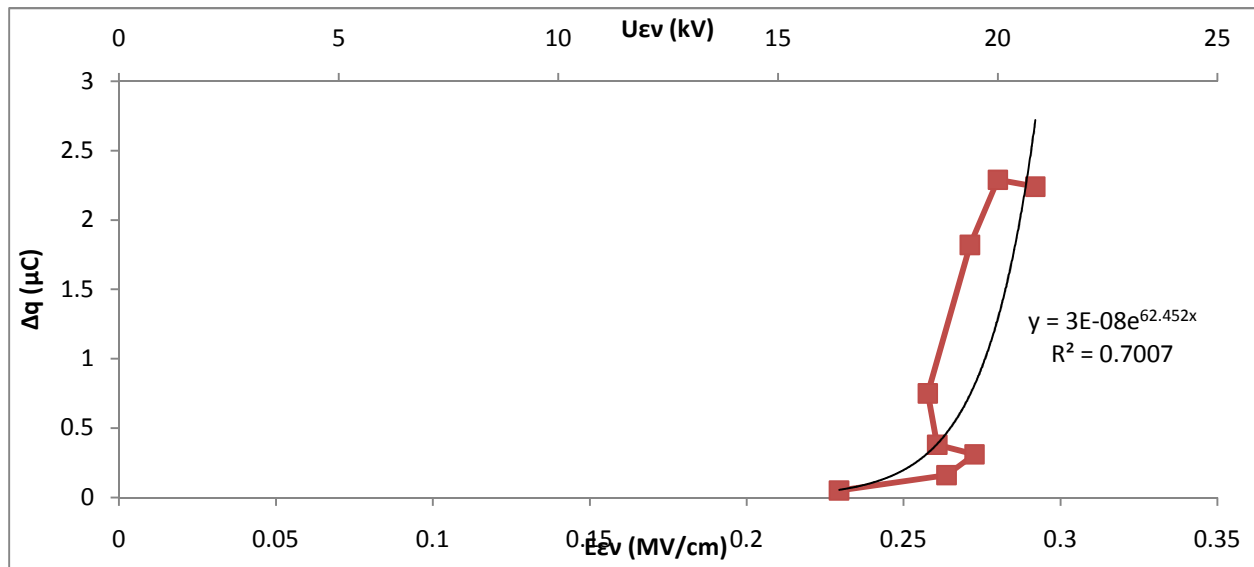
$\Delta q$  : διαφορά μεταξύ στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο Cm κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $q_1$  και της στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο Cm κατά το πέρας αυτών.

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

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίου

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.21:** Χαρακτηριστική  $\Delta q = f(u_{EV}, E_{EV})$

$\Delta q$  : διαφορά μεταξύ στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $q_1$  και της στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας αυτών.

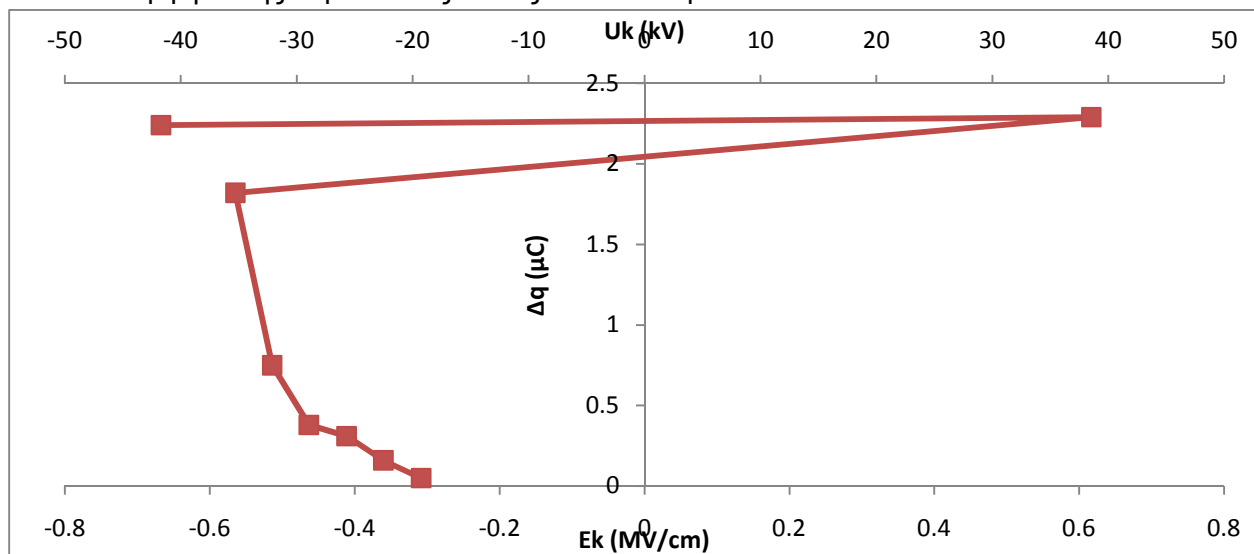
$u_{EV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{EV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $u_{EV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1mm$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu s$



**Σχήμα 3.2.22:** Χαρακτηριστική  $\Delta q = f(U_k, E_k)$

$\Delta q$  : διαφορά μεταξύ στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $q_1$  και της στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας αυτών.

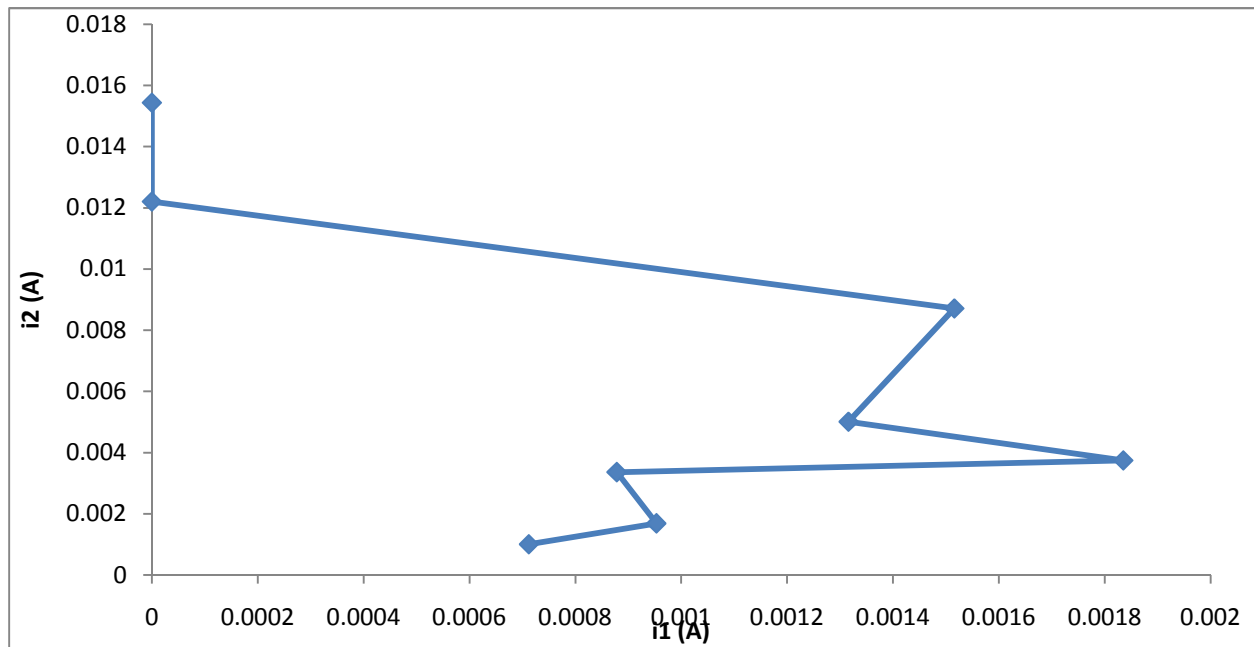
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

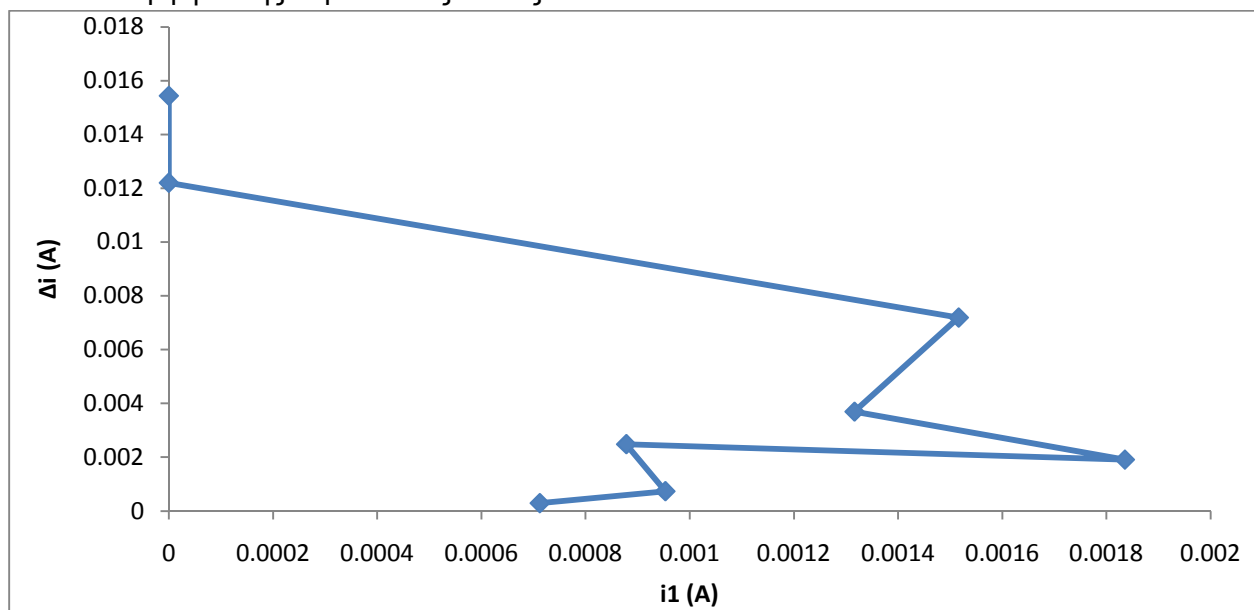
Πάχος δοκιμίου :  $d=1mm$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu s$



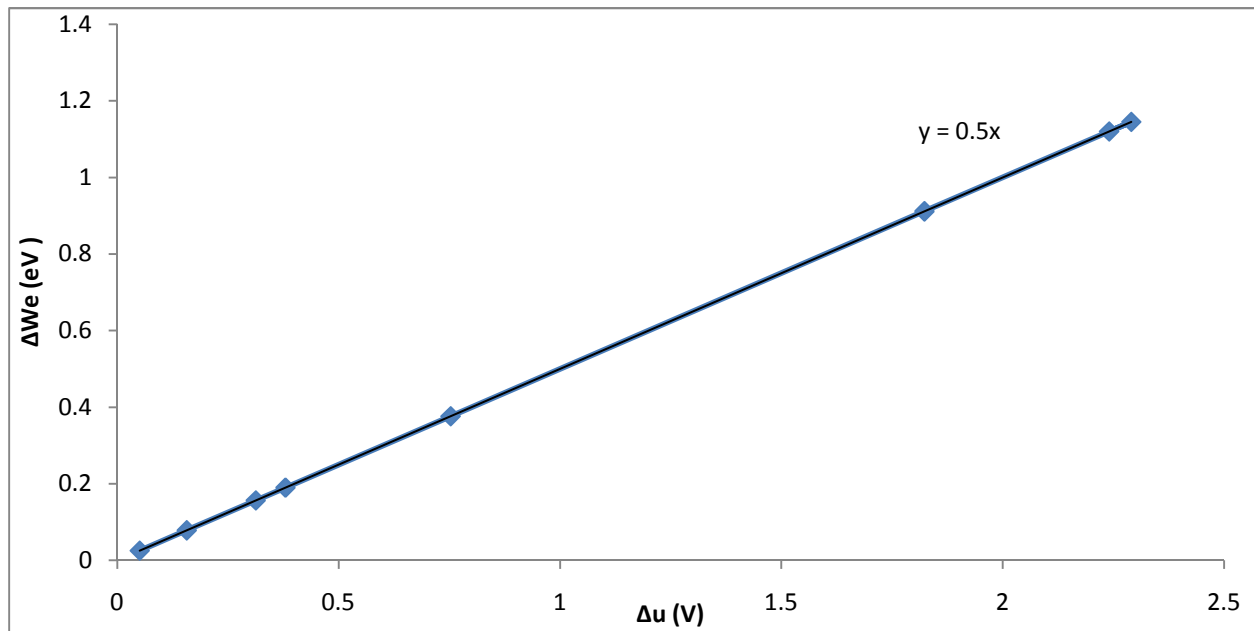
**Σχήμα 3.2.23:** Χαρακτηριστική  $i_2 = f(i_1)$

$i_2$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στον Cm κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων  
 $i_1$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στον Cm κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  
 Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο  
 Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$   
 Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500$



**Σχήμα 3.2.24:** Χαρακτηριστική  $\Delta i = f(i_1)$

$\Delta i$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος στον Cm κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $i_1$  και της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος στον Cm κατά το πέρας αυτών  $i_2$ .  
 $i_1$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στον Cm κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  
 Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο  
 Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$   
 Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500 \mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.25:** Χαρακτηριστική  $\Delta W_e = f(\Delta u)$

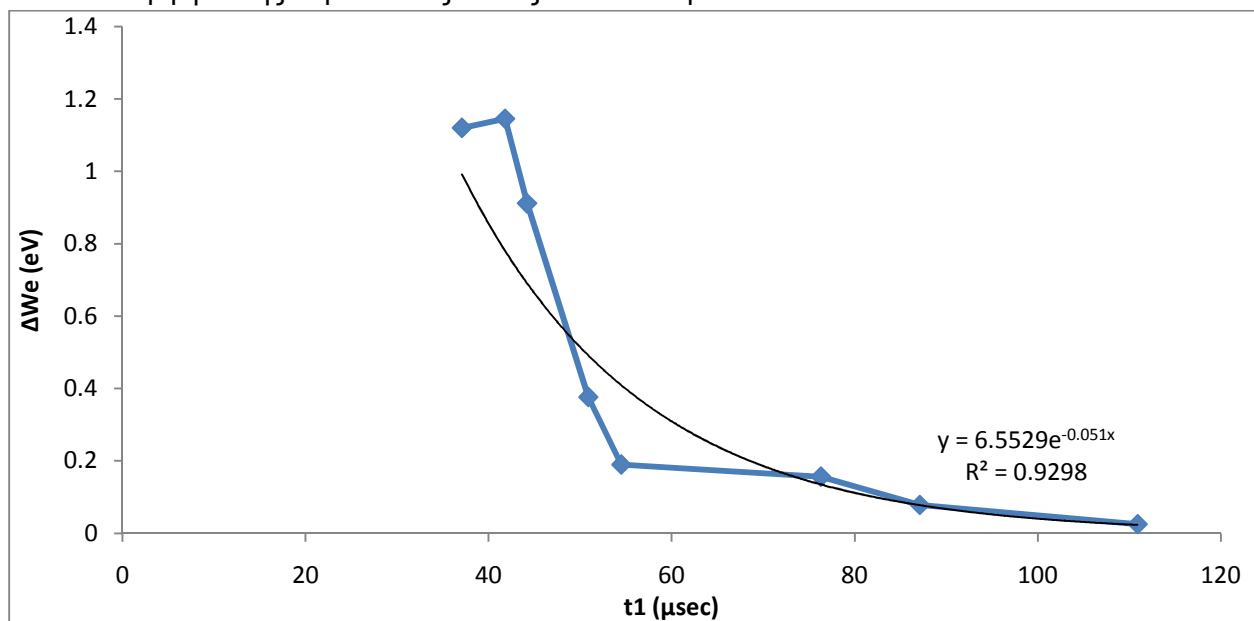
$\Delta W_e$  : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά το πέρας αυτών  $u_2$ .

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.26:** Χαρακτηριστική  $\Delta W_e = f(t_1)$

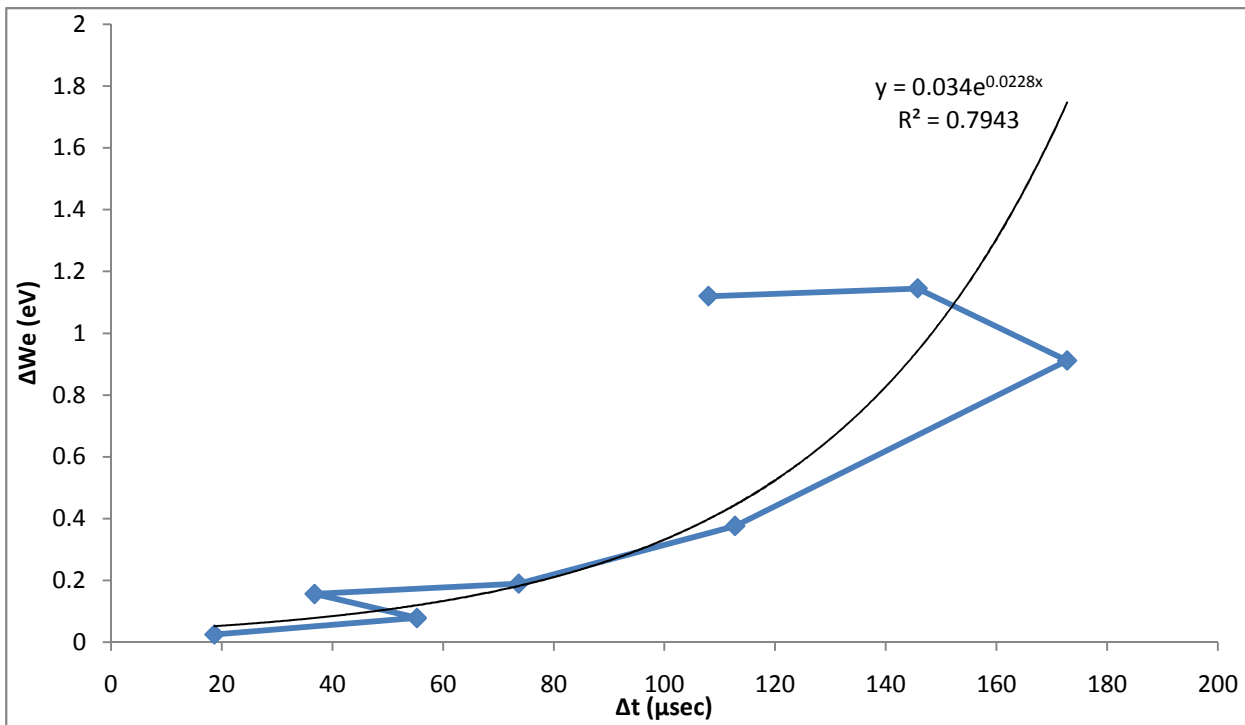
$\Delta W_e$  : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.2.27:** Χαρακτηριστική  $\Delta W_e = f(\Delta t)$

$\Delta W_e$  : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και

$t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=1\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



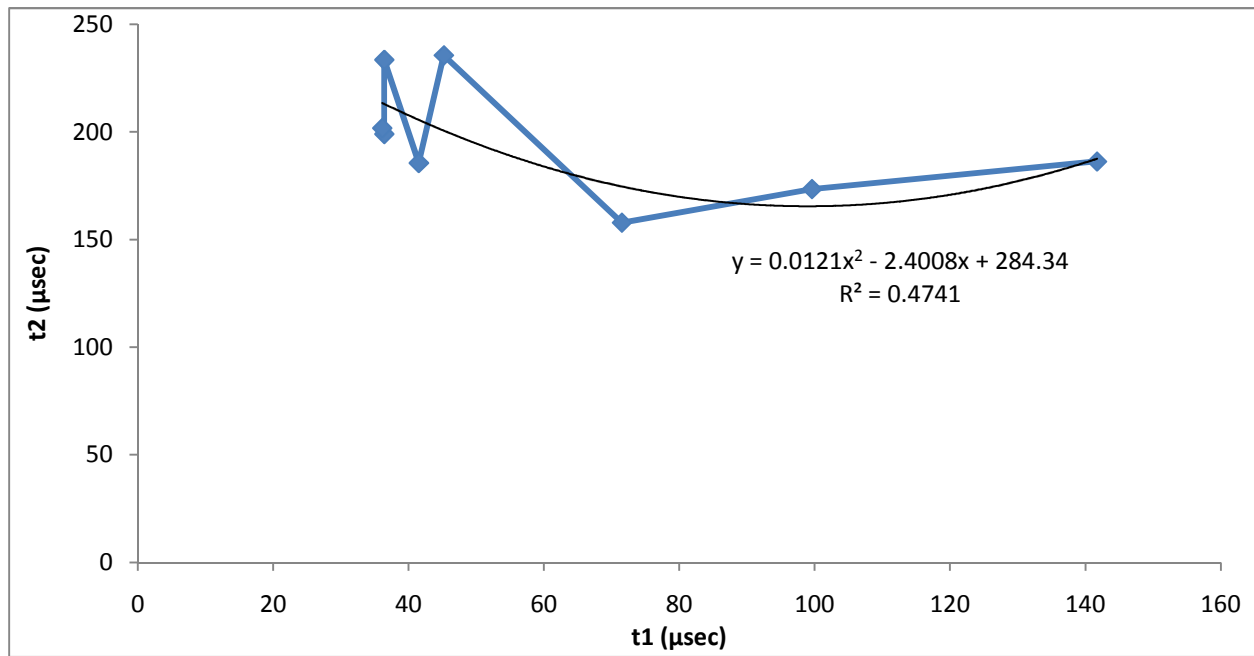
### 3.3 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 2 \text{ mm}$ Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας

Πίνακας 3.3.1

Uk kV	Ek MV/cm	Cm nF	u1 V	u2 V	$\Delta u$ V	t1 $\mu\text{s}$	t2 $\mu\text{s}$	$\Delta t$ $\mu\text{s}$
20,8	0,211563	1000	0,082	0,130	0,048	141,7	186,3	44,6
24,1	0,245128	1000	0,074	0,120	0,046	99,6	173,5	73,9
27,7	0,281744	1000	0,081	0,180	0,099	71,5	157,9	86,4
31,1	0,316327	1000	0,067	0,340	0,273	45,2	235,6	190,4
34,5	0,350909	1000	0,067	0,390	0,323	41,5	185,6	144,1
37,8	0,384474	1000	0,067	0,640	0,573	36,4	233,5	197,1
41,4	0,421091	1000	0,100	0,780	0,680	36,4	199,1	162,7
44,6	0,453639	1000	0,067	0,750	0,683	36,1	201,8	165,7

Πίνακας 3.3.2

q1 $\mu\text{C}$	q2 $\mu\text{C}$	$\Delta q$ $\mu\text{C}$	i1 A	i2 A	$\Delta i$ A	uεν kV	Eεν MV/cm	$\Delta We$ eV	Ne	Na
0,082	0,13	0,05	0,000579	0,000698	0,000119	17,8	0,181049	0,0240	300000000	446
0,074	0,12	0,05	0,000743	0,000692	-0,000051	20,4	0,207494	0,0230	287500000	739
0,081	0,18	0,1	0,001133	0,001140	0,000007	21,9	0,222751	0,0495	618750000	864
0,067	0,34	0,27	0,001482	0,001443	-0,000039	20,5	0,208511	0,1365	1706250000	1904
0,067	0,39	0,32	0,001614	0,002101	0,000487	22,1	0,224785	0,1615	2018750000	1441
0,067	0,64	0,57	0,001841	0,002741	0,000900	22,6	0,229871	0,2865	3581250000	1971
0,100	0,78	0,68	0,002747	0,003918	0,001170	25,3	0,257333	0,3400	4250000000	1627
0,067	0,75	0,68	0,001856	0,003717	0,001861	25,9	0,263436	0,3415	4268750000	1657



**Σχήμα 3.3.1:** Χαρακτηριστική  $t_2 = f(t_1)$

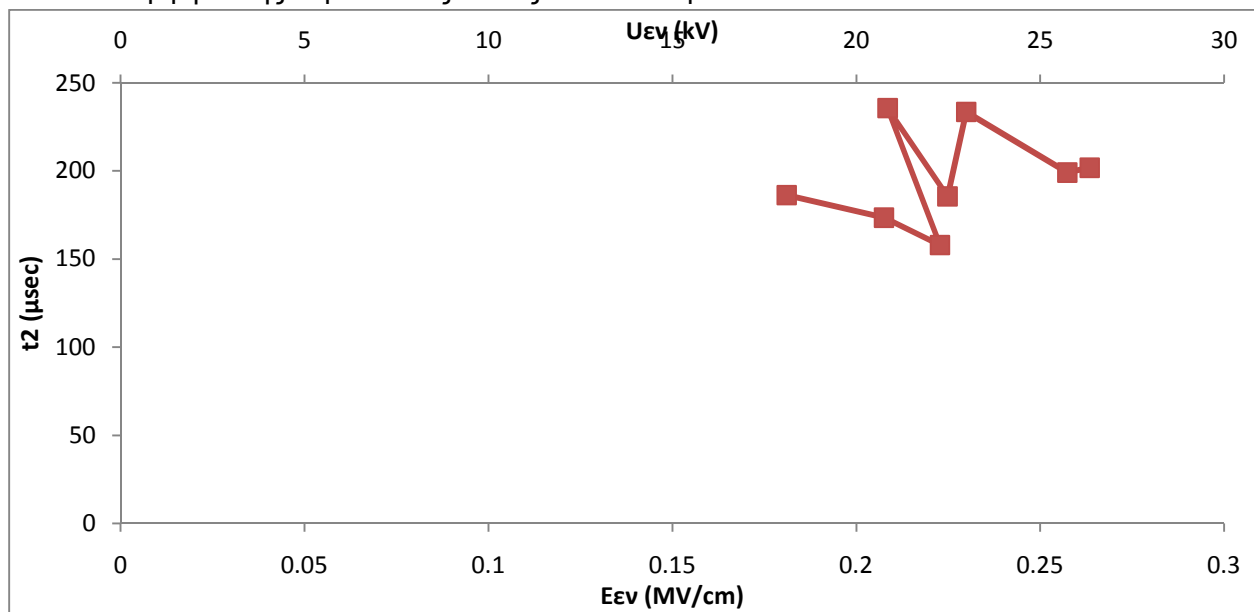
$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.2:** Χαρακτηριστική  $t_2 = f(u_{εν}, E_{εν})$

$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

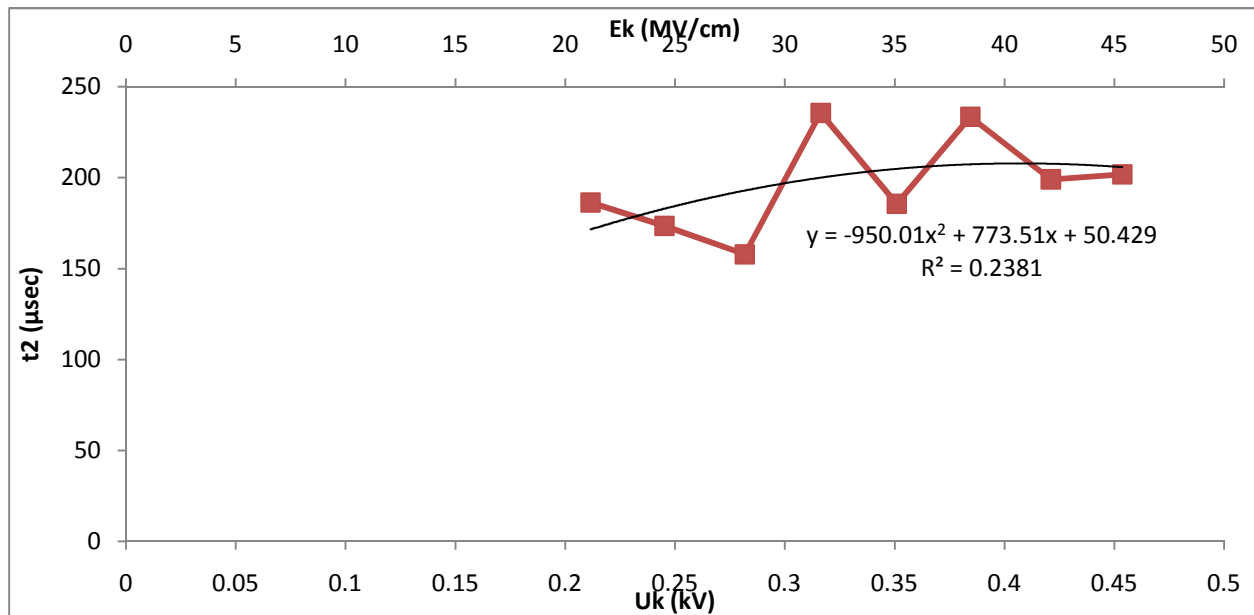
$u_{εν}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{εν}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{εν}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.3:** Χαρακτηριστική  $t_2 = f(U_k, E_k)$

$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

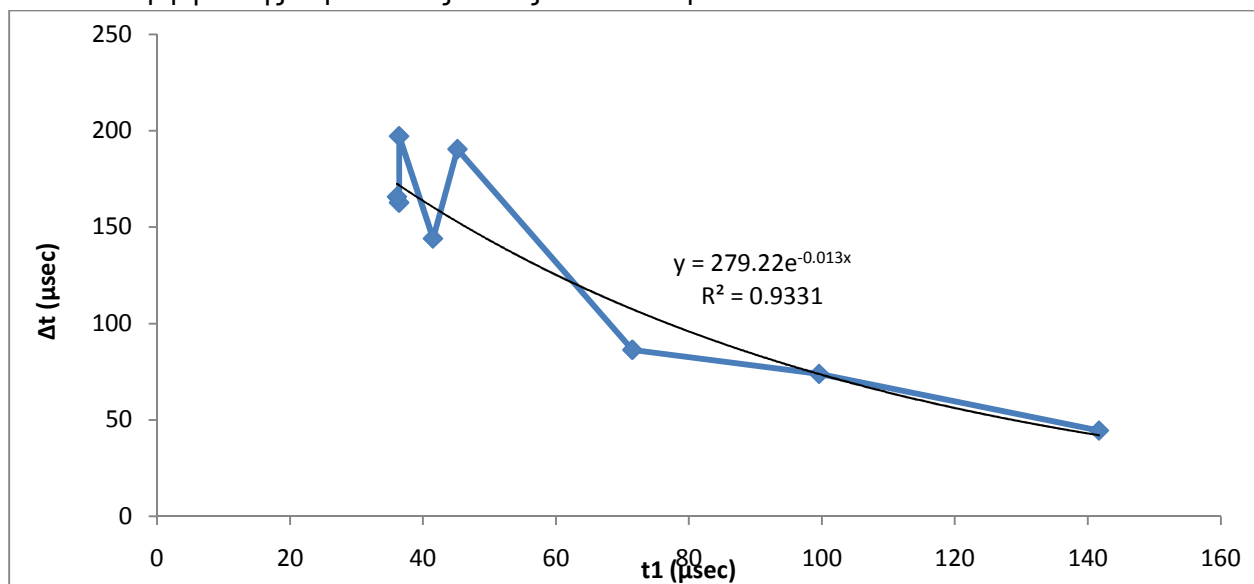
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.4:** Χαρακτηριστική  $\Delta t = f(t_1)$

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και

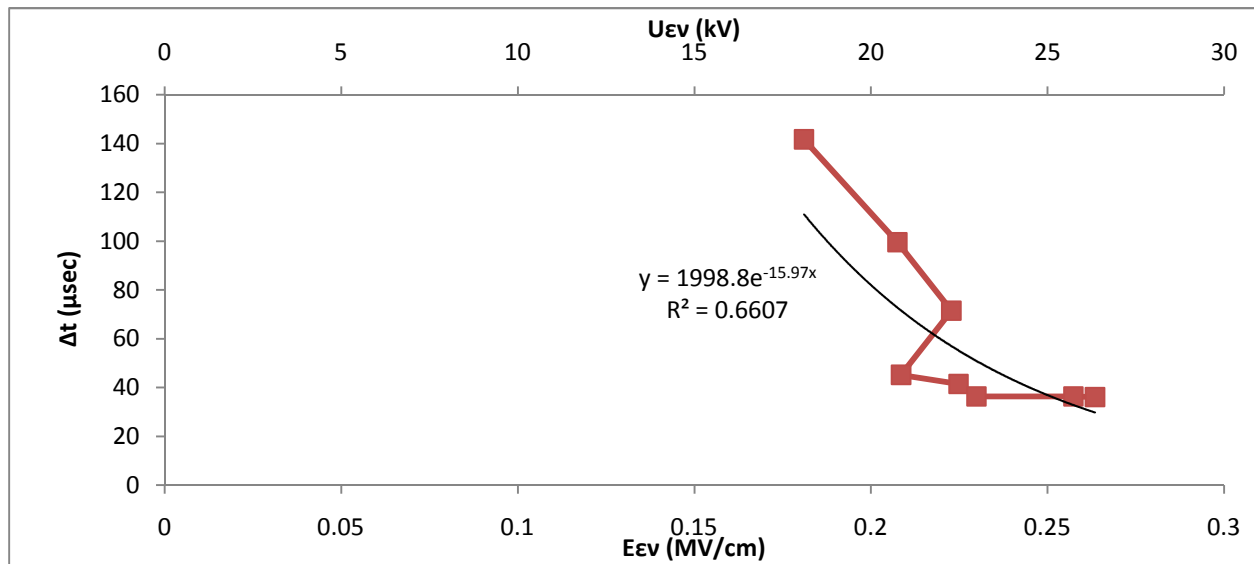
$t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.5:** Χαρακτηριστική  $\Delta t = f(u_{ev}, E_{ev})$

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και  $t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

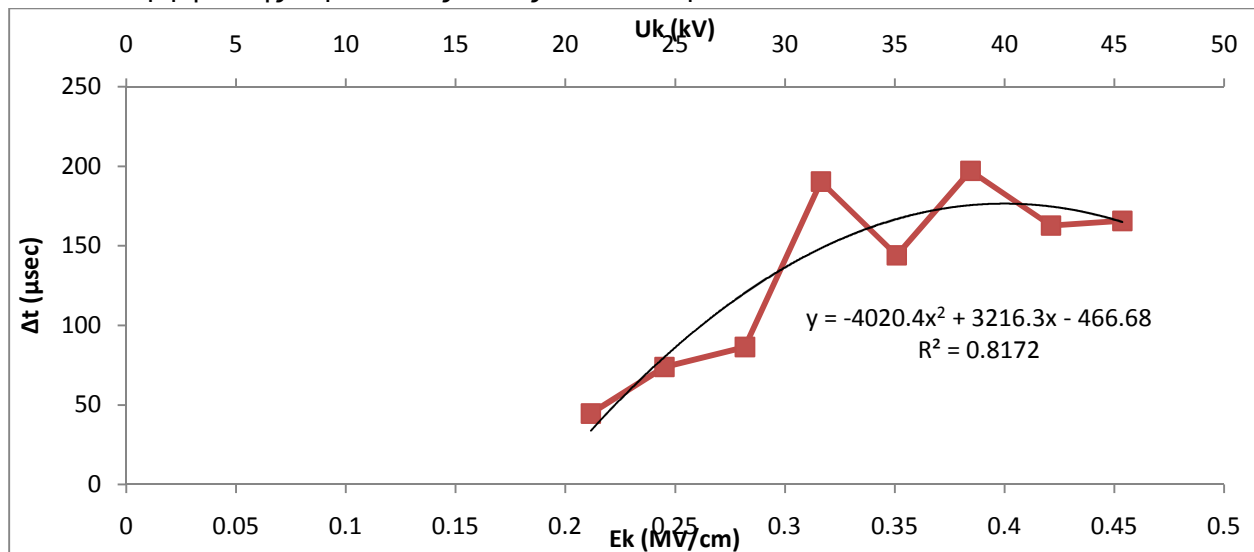
$u_{ev}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{ev}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{ev}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.6:** Χαρακτηριστική  $\Delta t = f(U_k, E_k)$

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και  $t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

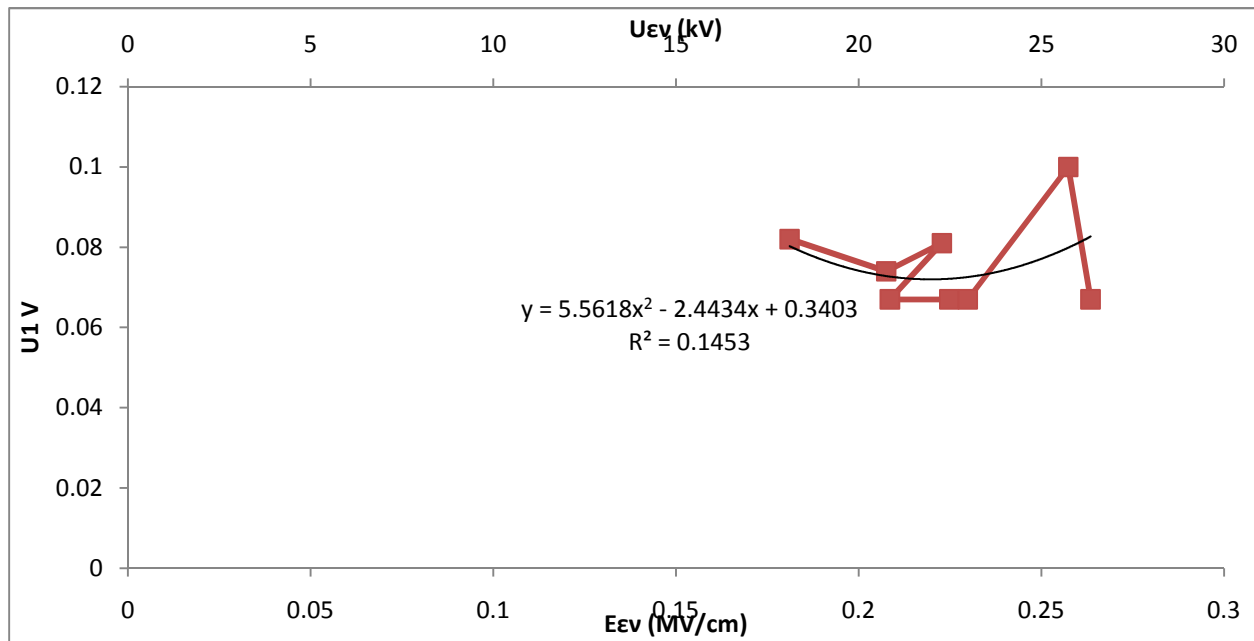
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.7:** Χαρακτηριστική  $u_1 = f(u_{ev}, E_{ev})$

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

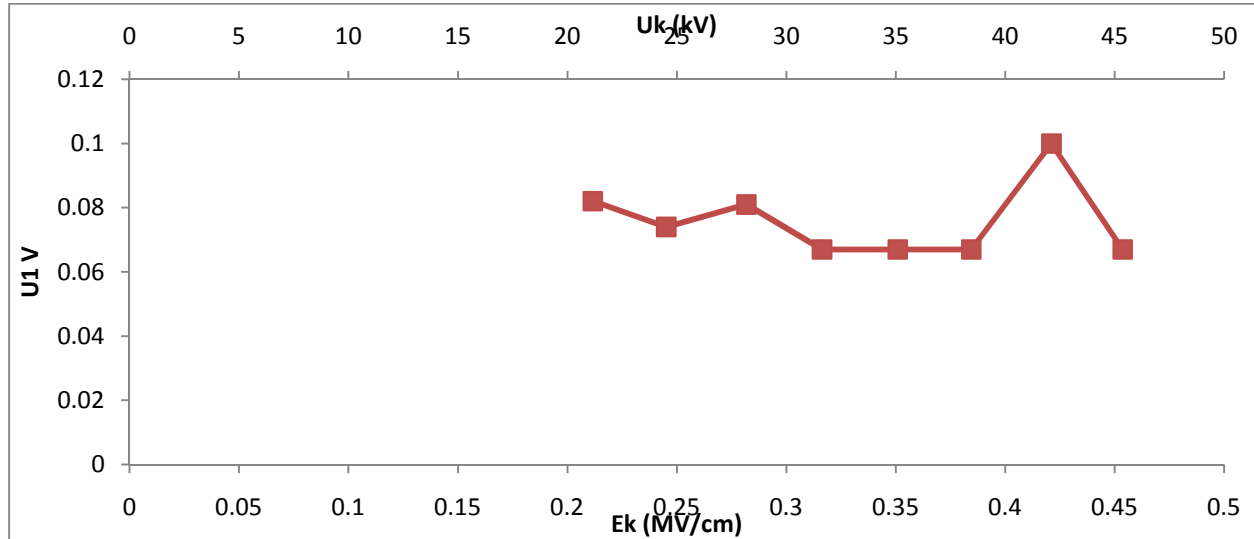
$u_{ev}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{ev}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{ev}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.8:** Χαρακτηριστική  $u_1 = f(U_k, E_k)$

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

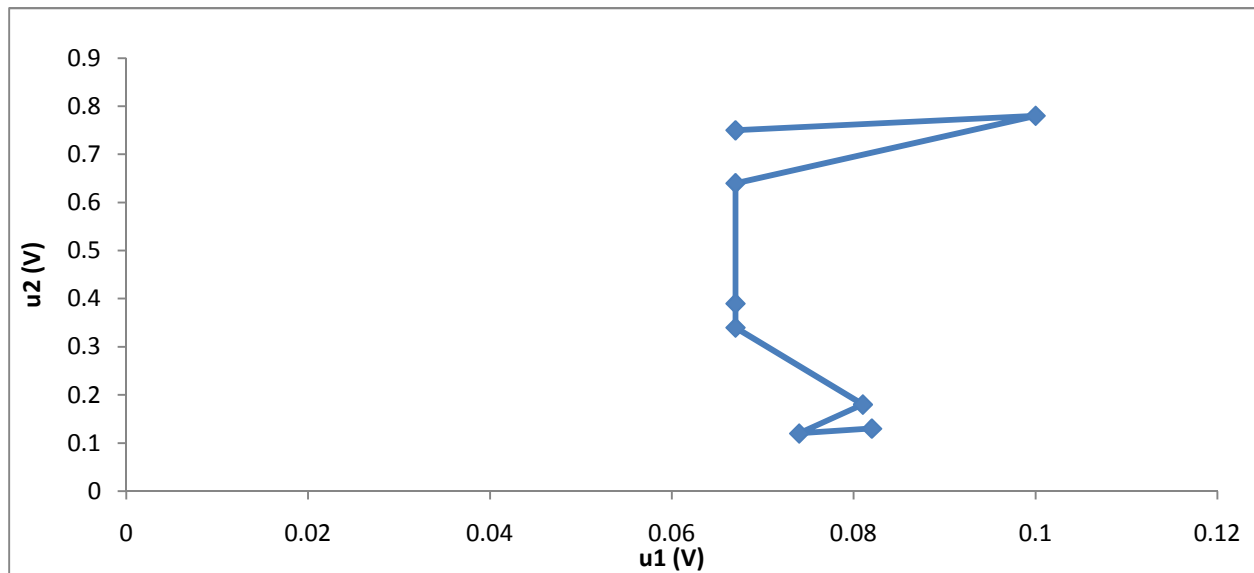
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.9:** Χαρακτηριστική  $u_2 = f(u_1)$

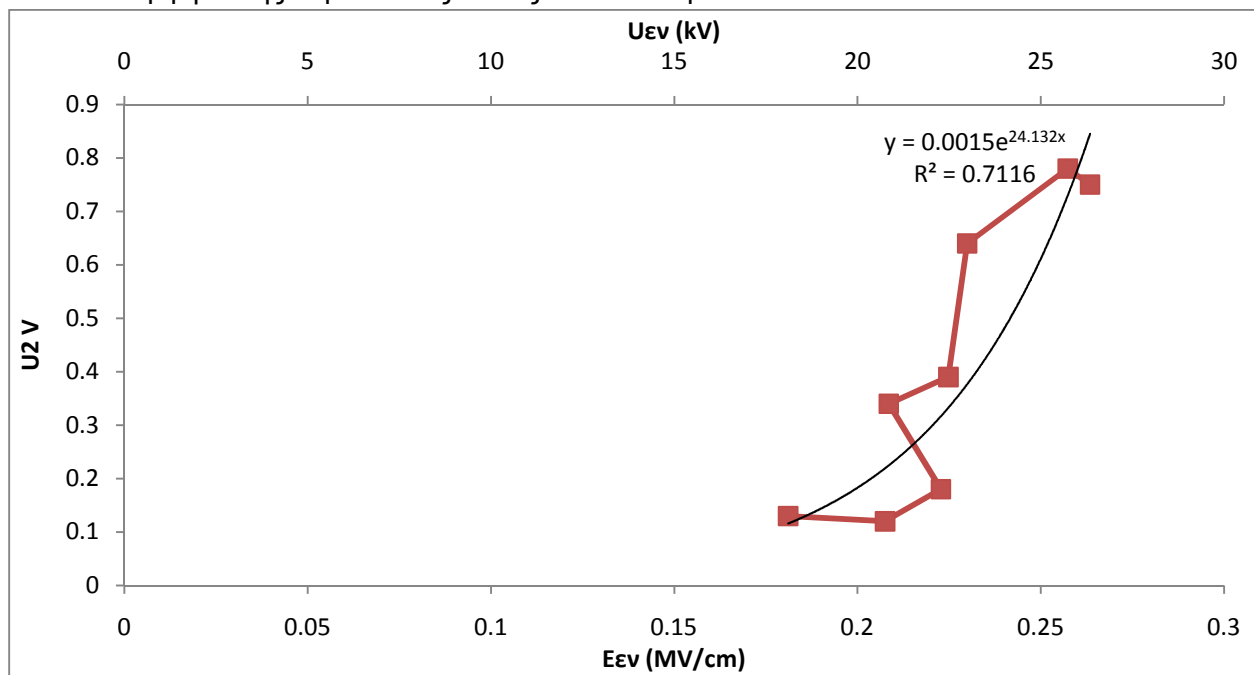
$u_2$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.10:** Χαρακτηριστική  $u_2 = f(u_{EV}, E_{EV})$

$u_2$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα το πέρας των μερικών εκκενώσεων

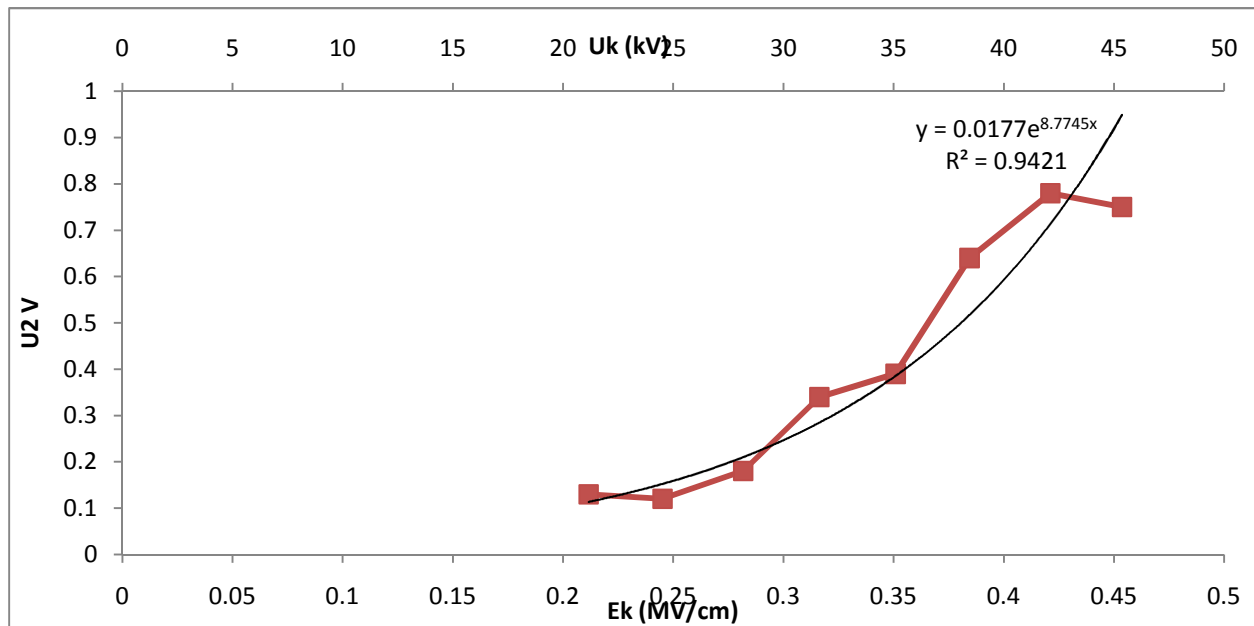
$u_{EV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{EV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{EV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.11:** Χαρακτηριστική  $u_2 = f(U_k, E_k)$

$u_2$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα το πέρας των μερικών εκκενώσεων

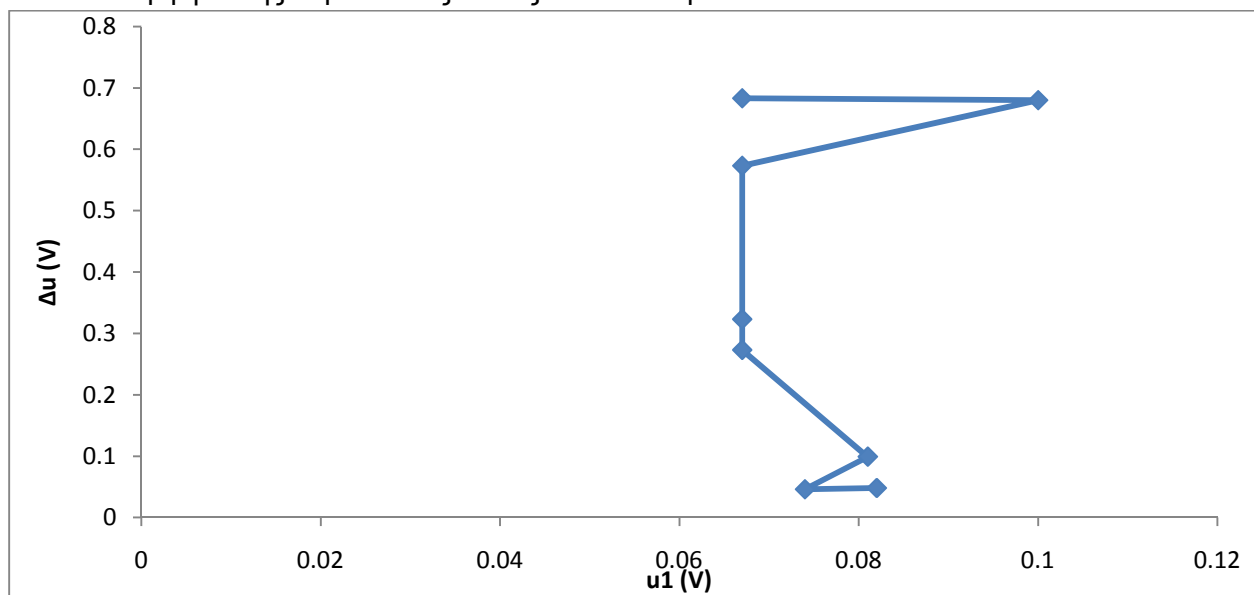
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.12:** Χαρακτηριστική  $\Delta u = f(u_1)$

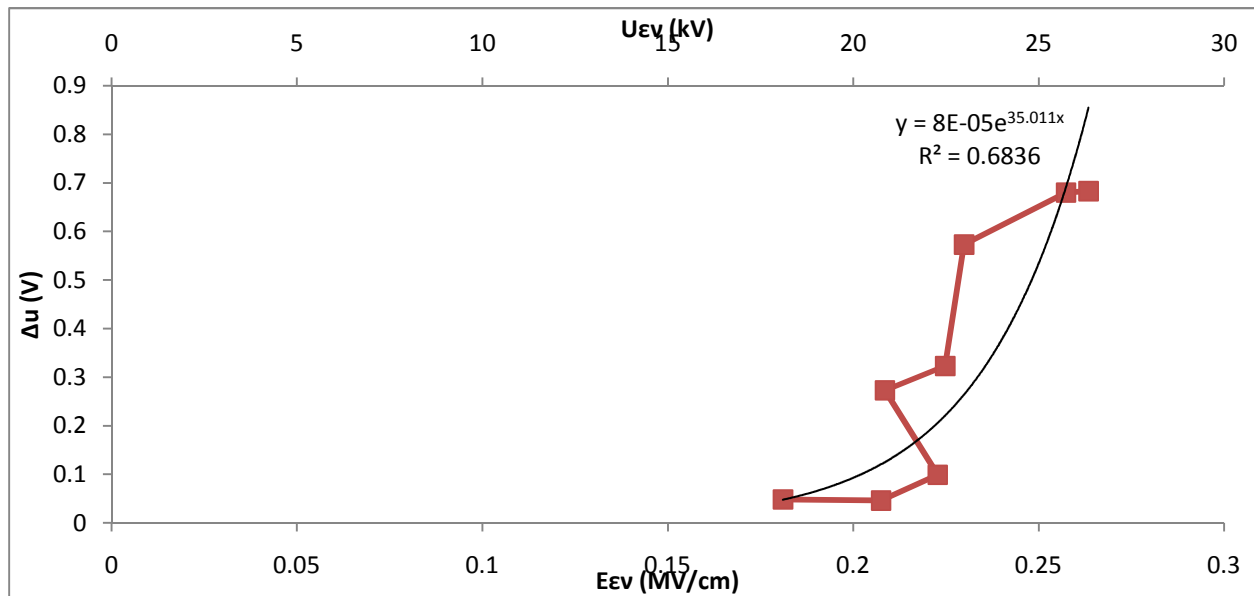
$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατα την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατα το πέρας αυτών  $u_2$ .

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.13:** Χαρακτηριστική  $\Delta u = f(u_{\epsilon\nu}, E_{\epsilon\nu})$

$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά το πέρας αυτών  $u_2$ .

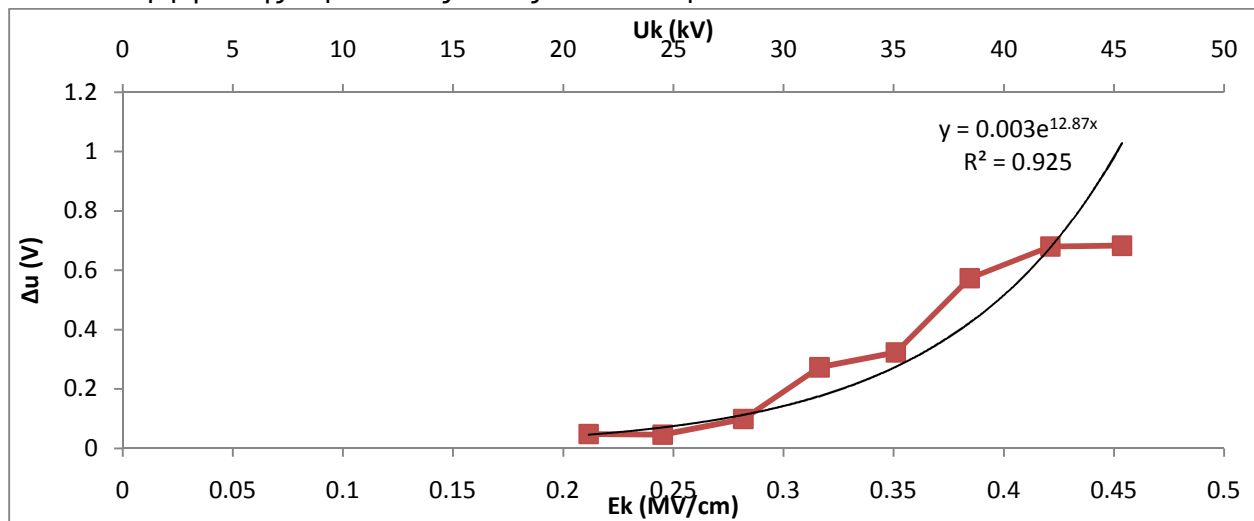
$u_{\epsilon\nu}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\epsilon\nu}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{\epsilon\nu}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.14:** Χαρακτηριστική  $\Delta u = f(U_k, E_k)$

$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά το πέρας αυτών  $u_2$ .

$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

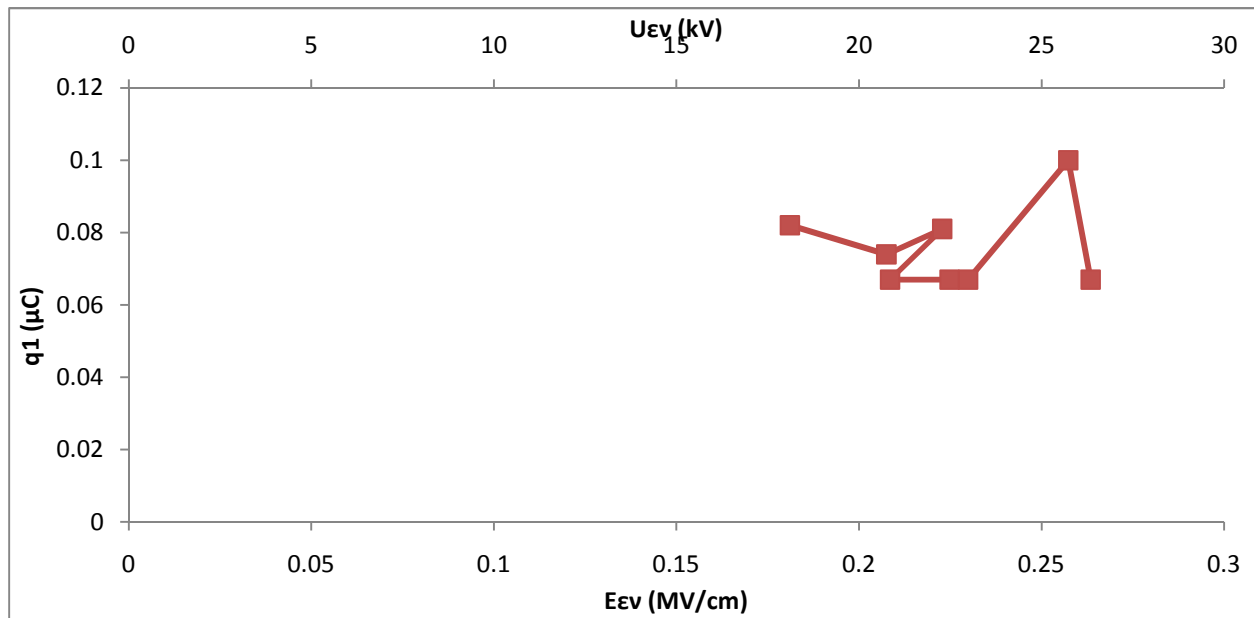
$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$





**Σχήμα 3.3.15:** Χαρακτηριστική  $q_1 = f(u_{ev}, E_{ev})$

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

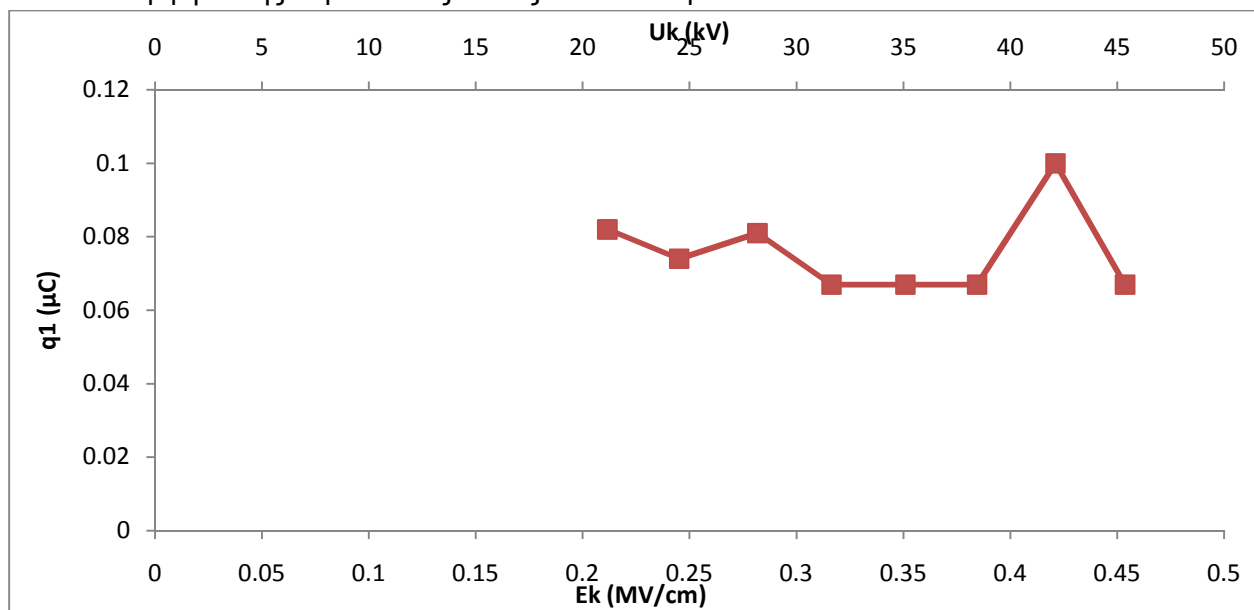
$u_{ev}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{ev}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{ev}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2mm$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu s$



**Σχήμα 3.3.16:** Χαρακτηριστική  $q_1 = f(U_k, E_k)$

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

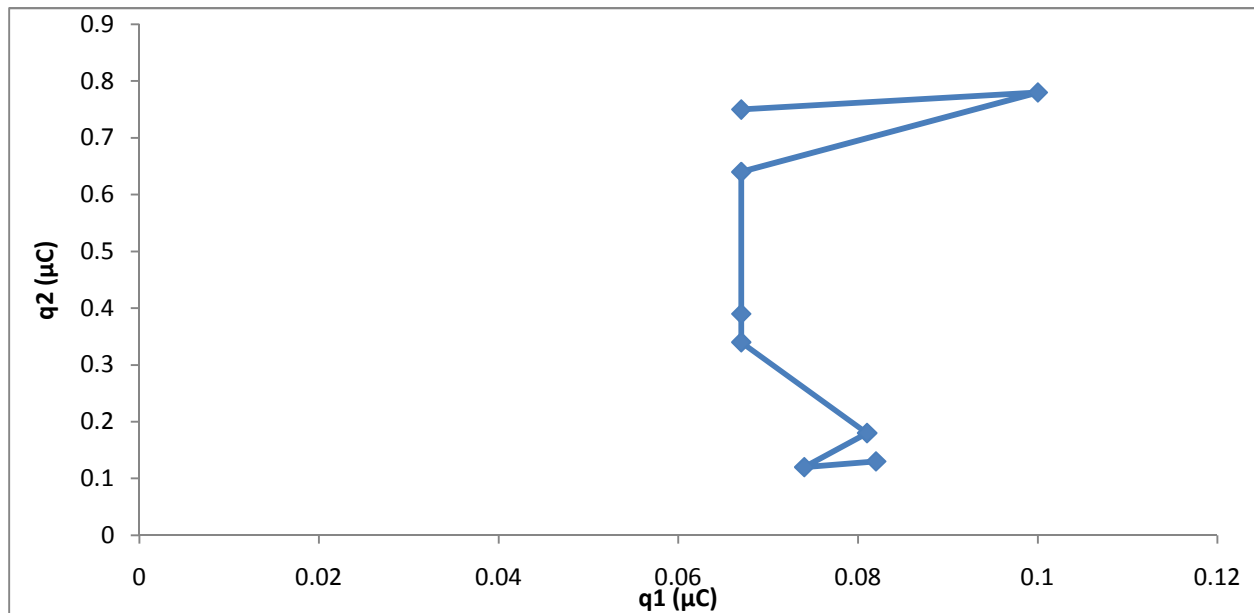
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2mm$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu s$



**Σχήμα 3.3.17:** Χαρακτηριστική  $q_2 = f(q_1)$

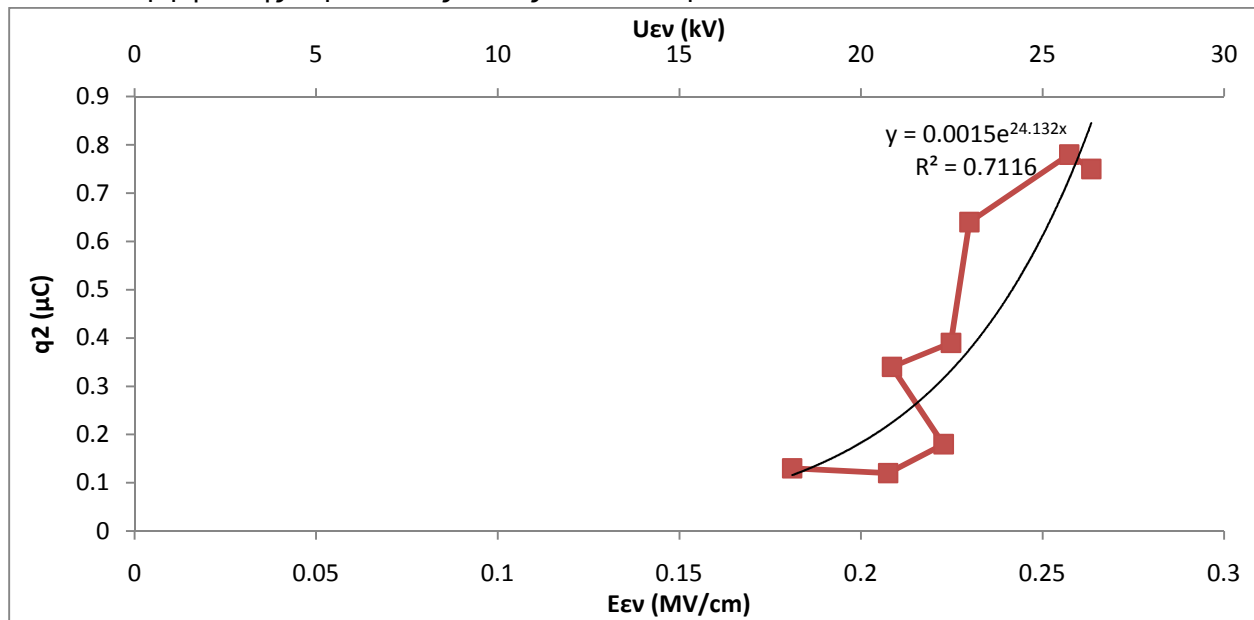
$q_2$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

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

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.18:** Χαρακτηριστική  $q_2 = f(u_{εν}, E_{εν})$

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

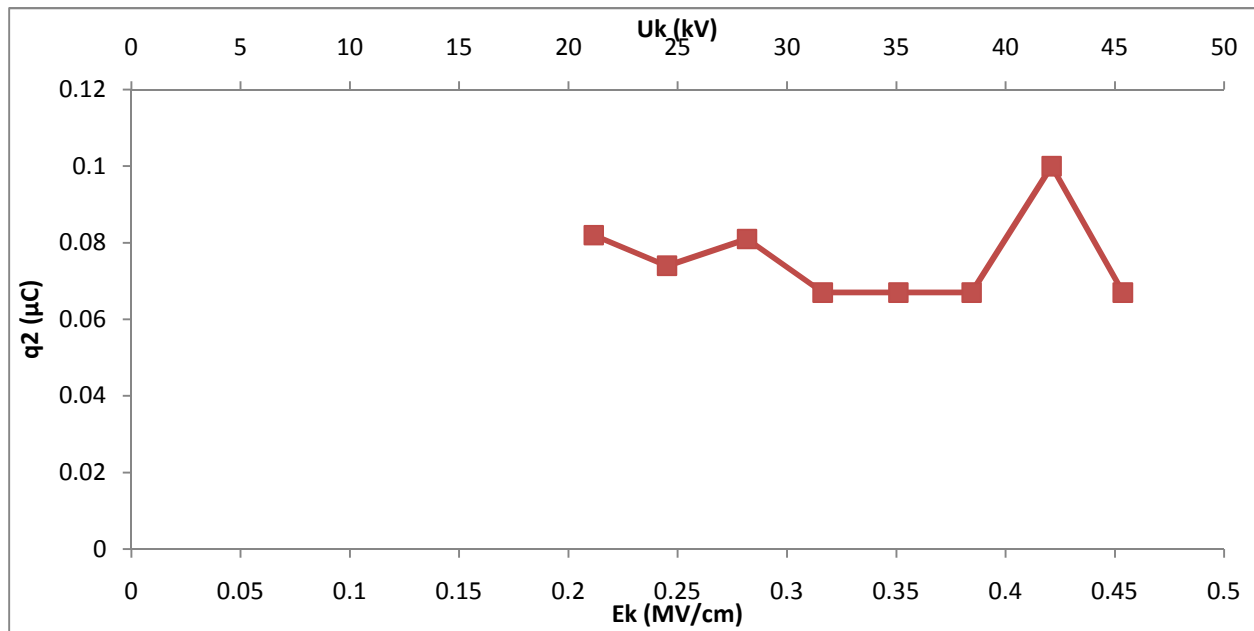
$u_{εν}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{εν}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{εν}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.19:** Χαρακτηριστική  $q_2 = f(U_k, E_k)$

$q_2$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C<sub>m</sub> κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

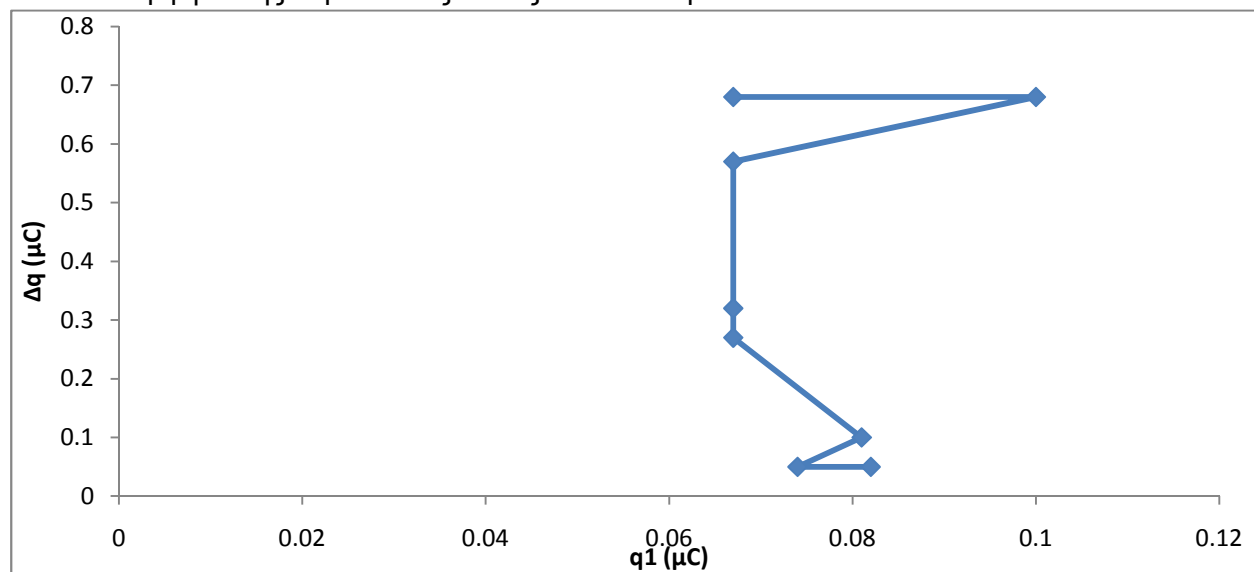
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου : d=2mm

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις ±250/2500μs



**Σχήμα 3.3.20:** Χαρακτηριστική  $\Delta q = f(q_1)$

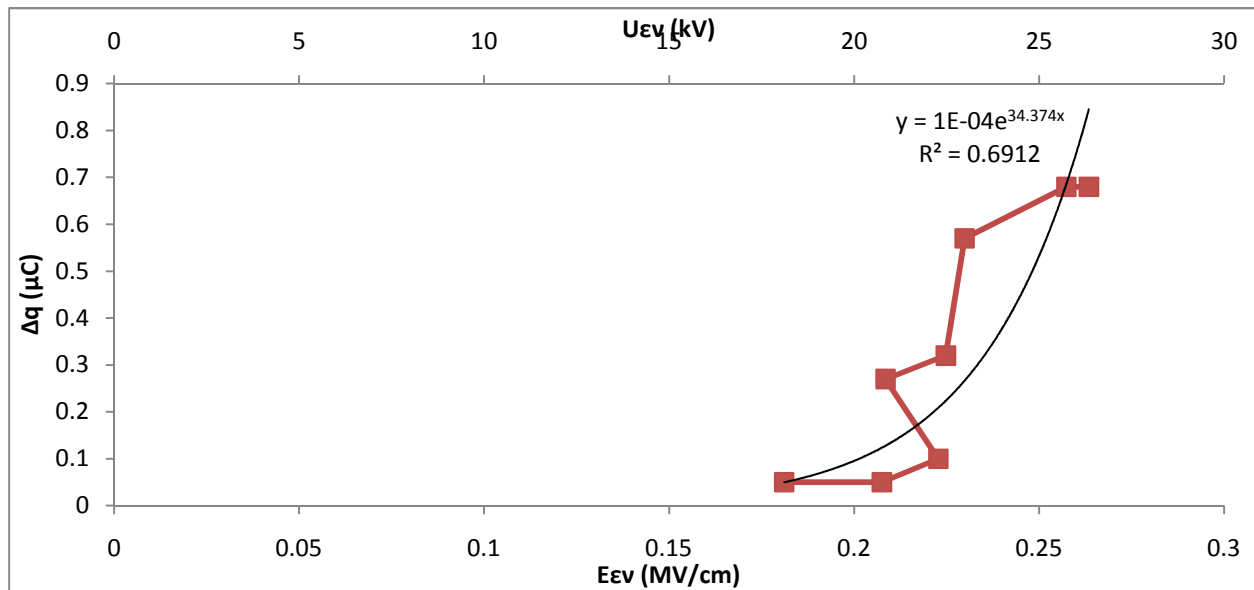
$\Delta q$  : διαφορά μεταξύ στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο C<sub>m</sub> κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $q_1$  και της στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο C<sub>m</sub> κατά το πέρας αυτών.

$q_1$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C<sub>m</sub> κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου : d=2mm

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις ±250/2500μs



**Σχήμα 3.3.21:** Χαρακτηριστική  $\Delta q = f(u_{EV}, E_{EV})$

$\Delta q$  : διαφορά μεταξύ στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $q_1$  και της στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας αυτών.

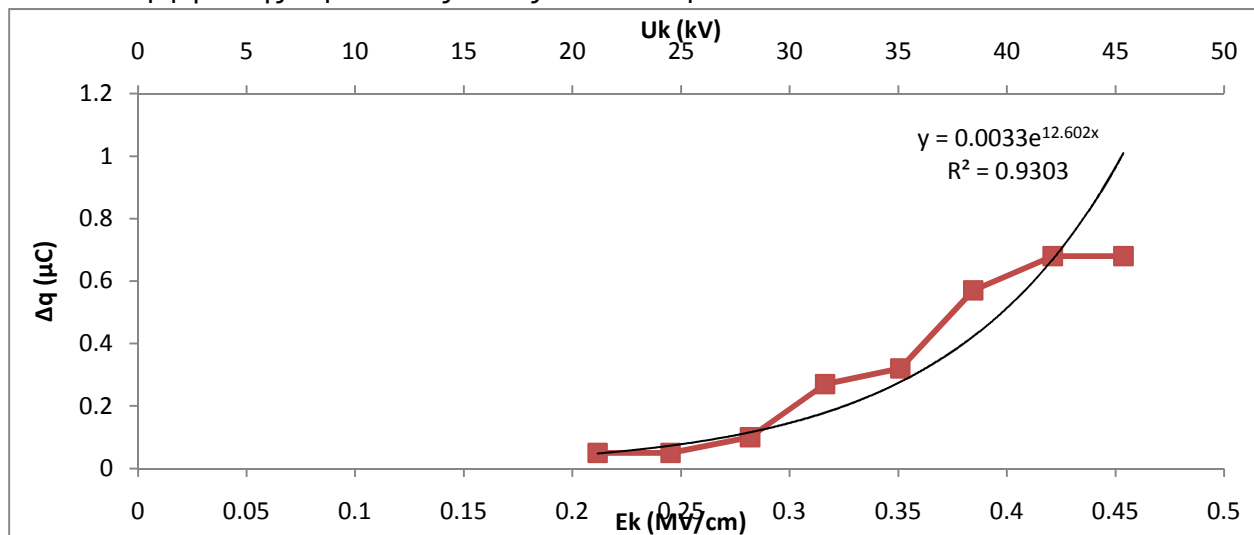
$u_{EV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{EV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $u_{EV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2mm$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu s$



**Σχήμα 3.3.22:** Χαρακτηριστική  $\Delta q = f(U_k, E_k)$

$\Delta q$  : διαφορά μεταξύ στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $q_1$  και της στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας αυτών.

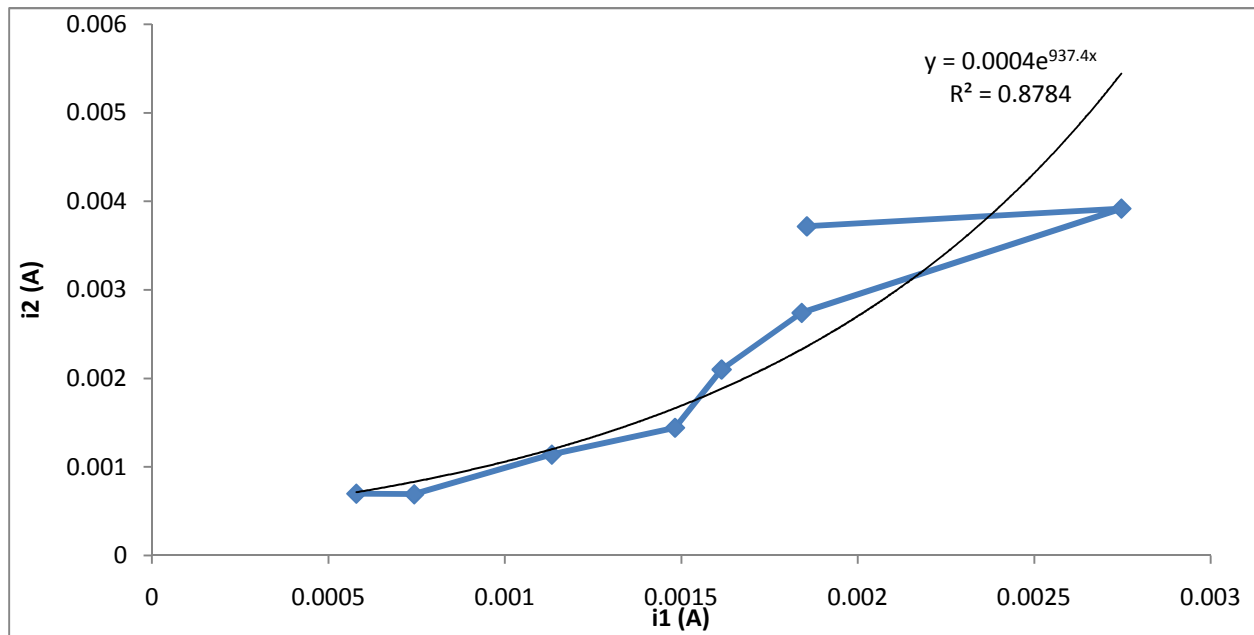
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2mm$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu s$



**Σχήμα 3.3.23:** Χαρακτηριστική  $i_2 = f(i_1)$

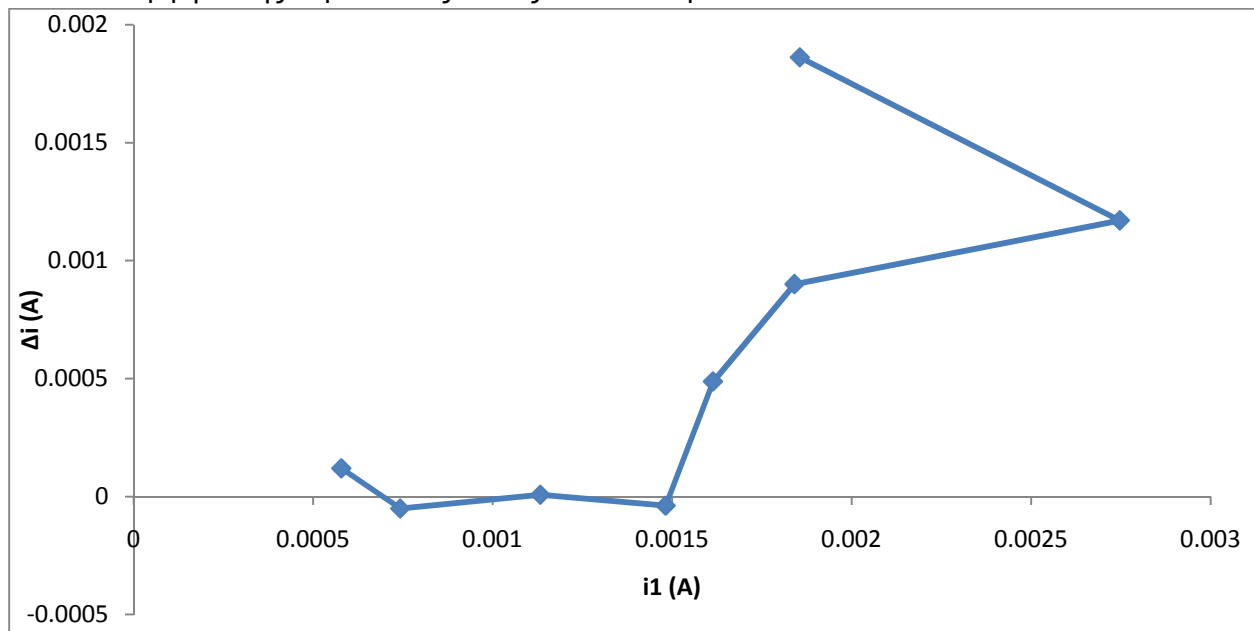
$i_2$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στον Cm κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$i_1$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στον Cm κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.24:** Χαρακτηριστική  $\Delta i = f(i_1)$

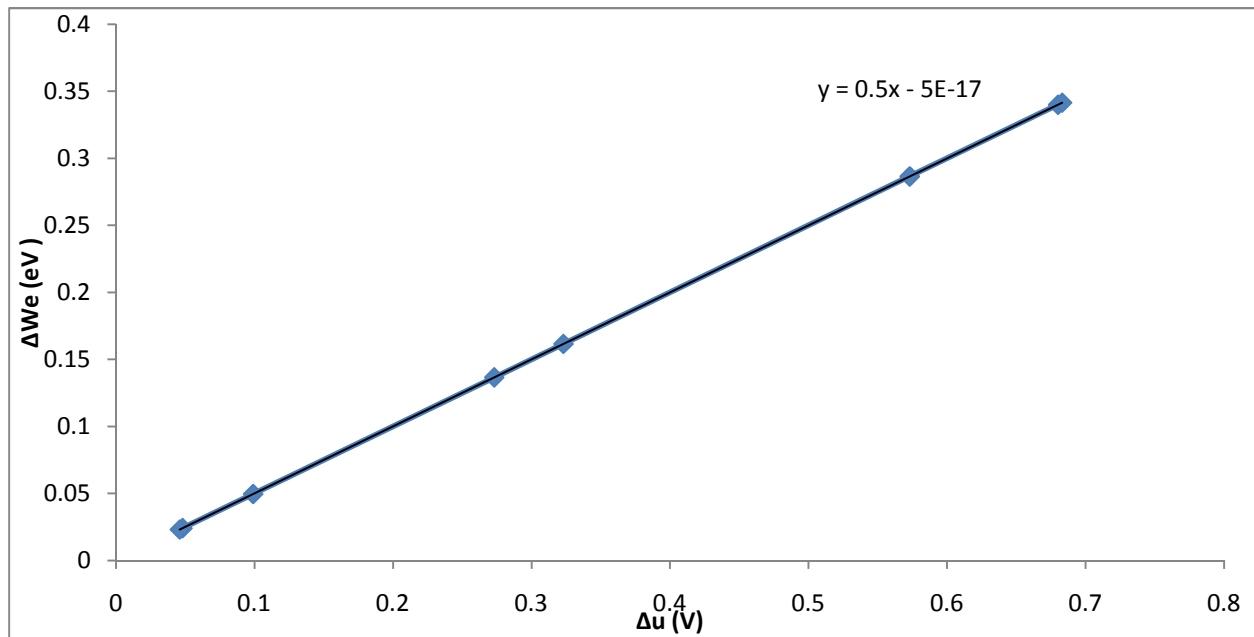
$\Delta i$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος στον Cm κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $i_1$  και της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος στον Cm κατά το πέρας αυτών  $i_2$ .

$i_1$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στον Cm κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.25:** Χαρακτηριστική  $\Delta W_e = f(\Delta u)$

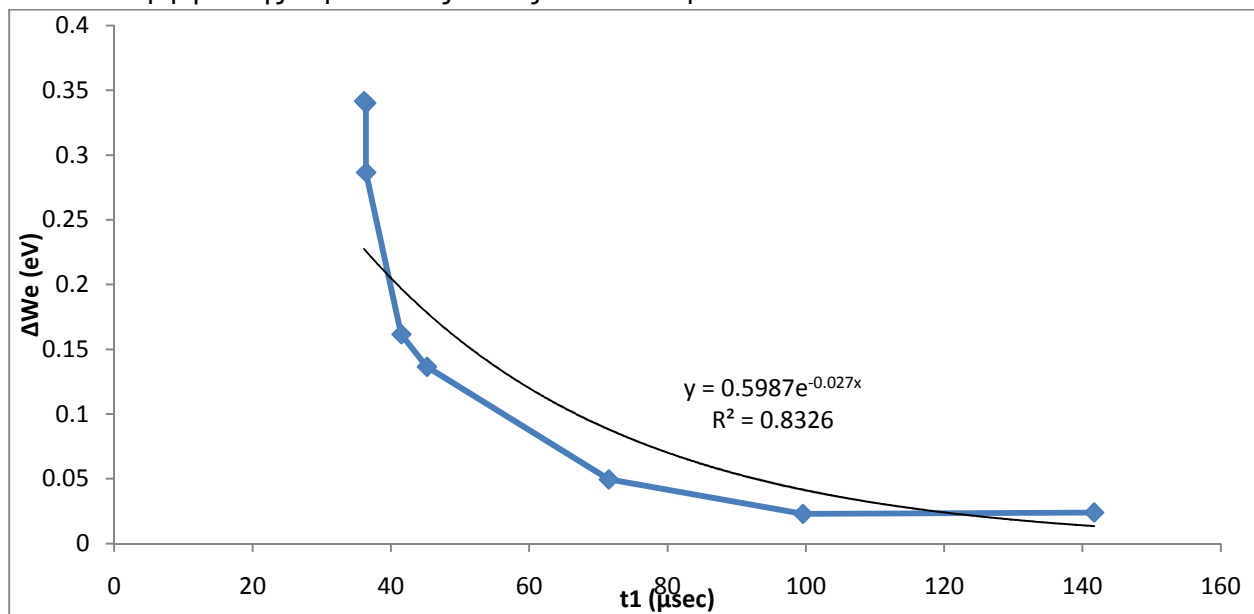
$\Delta W_e$  : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά το πέρας αυτών  $u_2$ .

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.26:** Χαρακτηριστική  $\Delta W_e = f(t_1)$

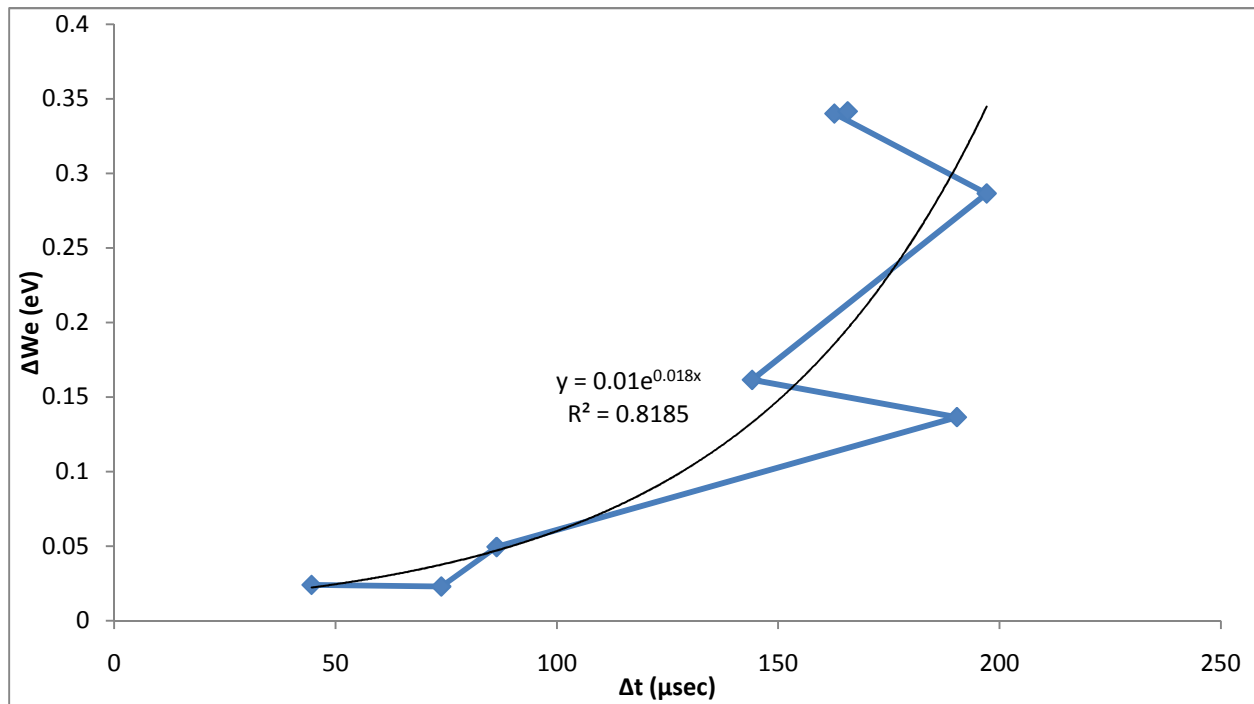
$\Delta W_e$  : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.3.27:** Χαρακτηριστική  $\Delta W_e = f(\Delta t)$

$\Delta W_e$  : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και

$t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$

### 3.4 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 2 \text{ mm}$ Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας

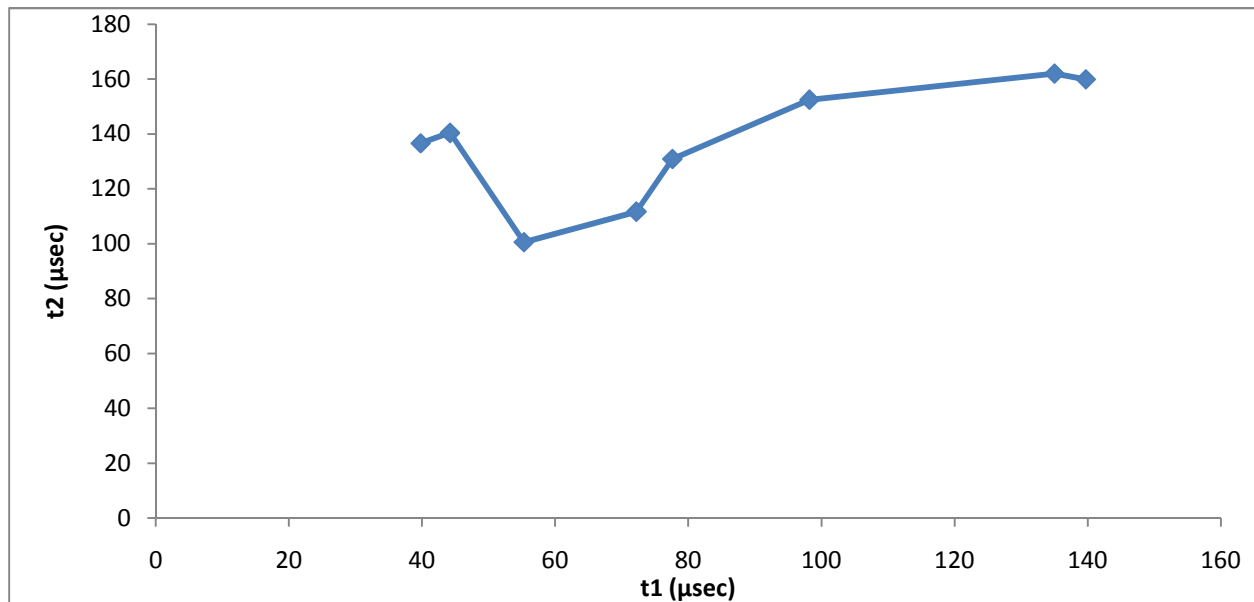
Πίνακας 3.4.1

Uk kV	Ek MV/cm	Cm nF	u1 V	u2 V	Δu V	t1 μs	t2 μs	Δt μs
-21,2	-0,215631	1000	0,085	0,100	0,015	139,7	159,9	20,2
-24,6	-0,250213	1000	0,089	0,150	0,061	135	162	27
-28,3	-0,287847	1000	0,094	0,160	0,066	98,2	152,5	54,3
-31,8	-0,323447	1000	0,081	0,240	0,159	77,6	130,9	53,3
-35,1	-0,357012	1000	0,087	0,340	0,253	72,2	111,7	39,5
-38,6	-0,392611	1000	0,067	0,420	0,353	55,3	100,6	45,3
-42,4	-0,431262	1000	0,067	0,880	0,813	44,2	140,4	96,2
-44,8	-0,455673	1000	0,067	0,790	0,723	39,8	136,6	96,8

Πίνακας 3.4.2

q1 μC	q2 μC	Δq μC	i1 A	i2 A	Δi A	uεν kV	Eεν MV/cm	ΔWe eV	Ne	Na
0,085	0,1	0,02	0,000608	0,000625	0,000017	18,3	0,186134	0,0075	93750000	202
0,089	0,15	0,06	0,000659	0,000926	0,000267	22,4	0,227837	0,0305	381250000	270
0,094	0,16	0,07	0,000957	0,001049	0,000092	22,4	0,227837	0,0330	412500000	543
0,081	0,24	0,16	0,001044	0,001833	0,000790	25,8	0,262419	0,0795	993750000	533
0,087	0,34	0,25	0,001205	0,003044	0,001839	25,2	0,256316	0,1265	1581250000	395
0,067	0,42	0,35	0,001212	0,004175	0,002963	25,5	0,259368	0,1765	2206250000	453
0,067	0,88	0,81	0,001516	0,006268	0,004752	26,9	0,273607	0,4065	5081250000	962
0,067	0,79	0,72	0,001683	0,005783	0,004100	28,4	0,288864	0,3615	4518750000	968





**Σχήμα 3.4.1:** Χαρακτηριστική  $t_2 = f(t_1)$

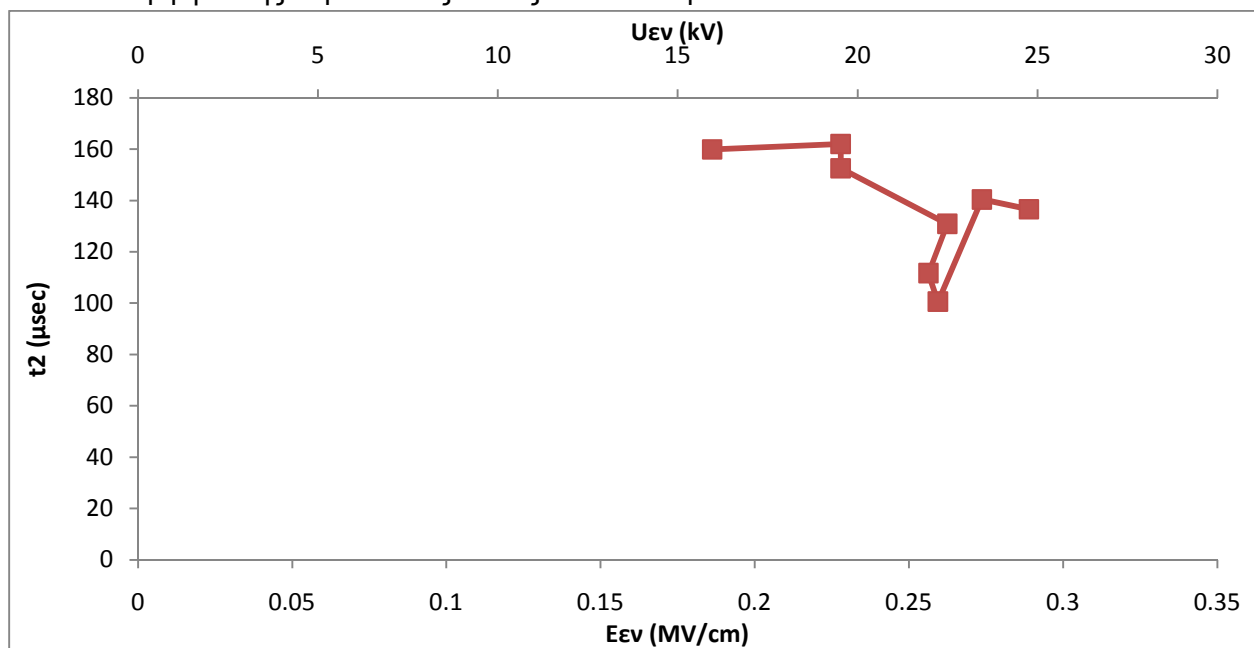
$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.2:** Χαρακτηριστική  $t_2 = f(u_{εν}, E_{εν})$

$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

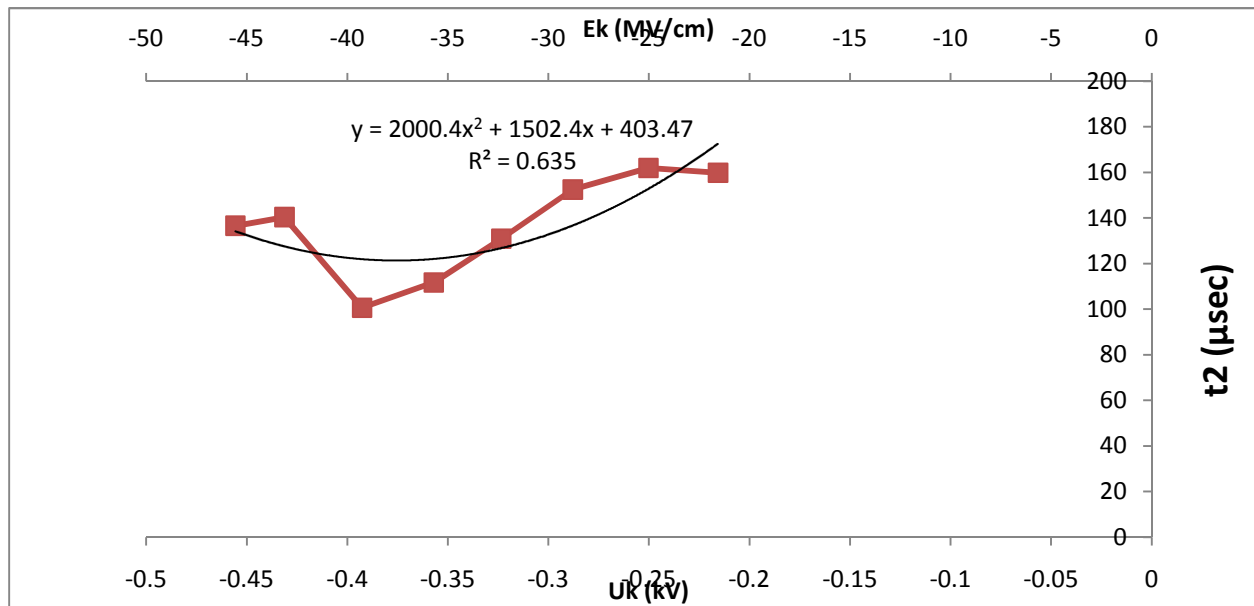
$u_{εν}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{εν}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{εν}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.3:** Χαρακτηριστική  $t_2 = f(U_k, E_k)$

t<sub>2</sub> : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

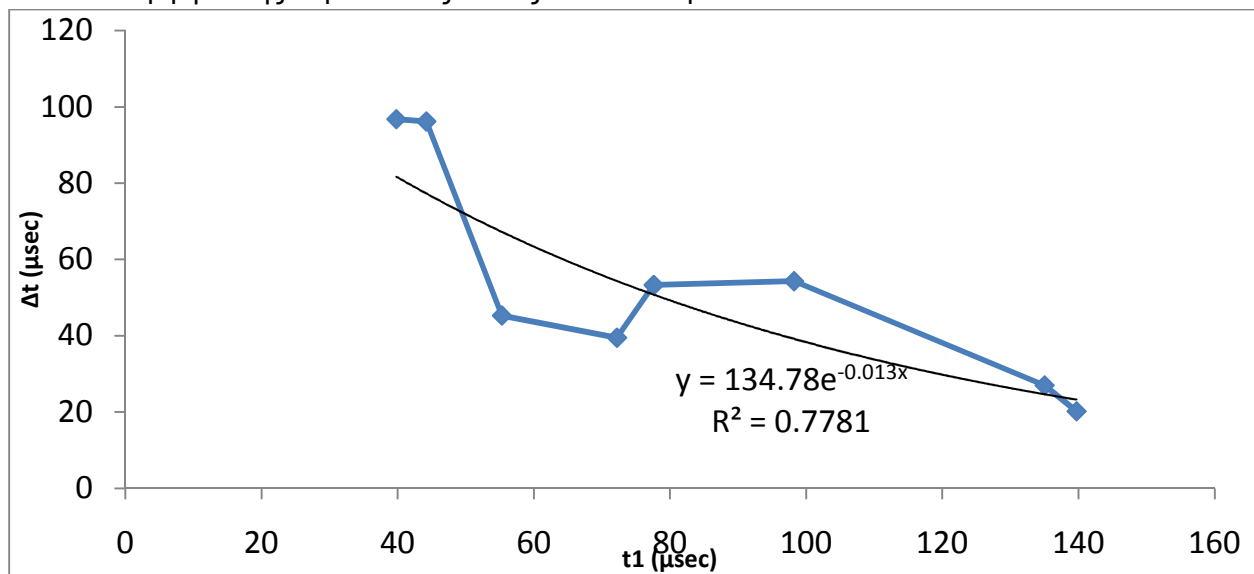
U<sub>k</sub> : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E<sub>k</sub> : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U<sub>k</sub>

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου : d=2mm

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις ±250/2500μs



**Σχήμα 3.4.4:** Χαρακτηριστική  $\Delta t = f(t_1)$

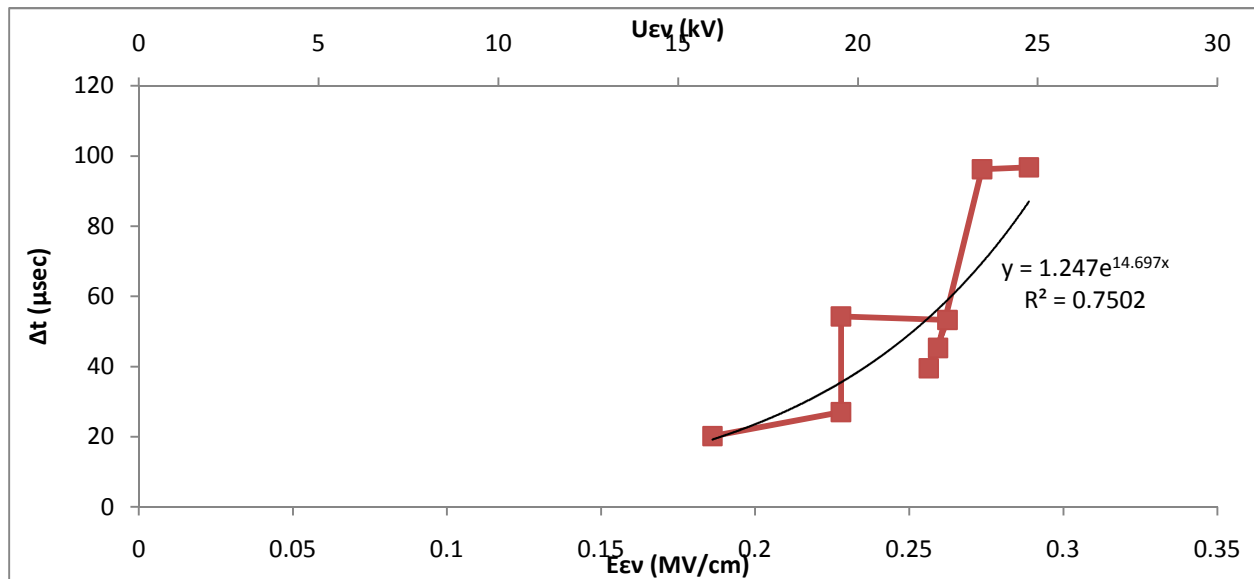
Δt : διαφορά μεταξύ t<sub>1</sub> χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και t<sub>2</sub> χρόνου περαίωσης αυτών

t<sub>1</sub> : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου : d=2mm

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις ±250/2500μs



**Σχήμα 3.4.5:** Χαρακτηριστική  $\Delta t = f(u_{εν}, E_{εν})$

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και  $t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

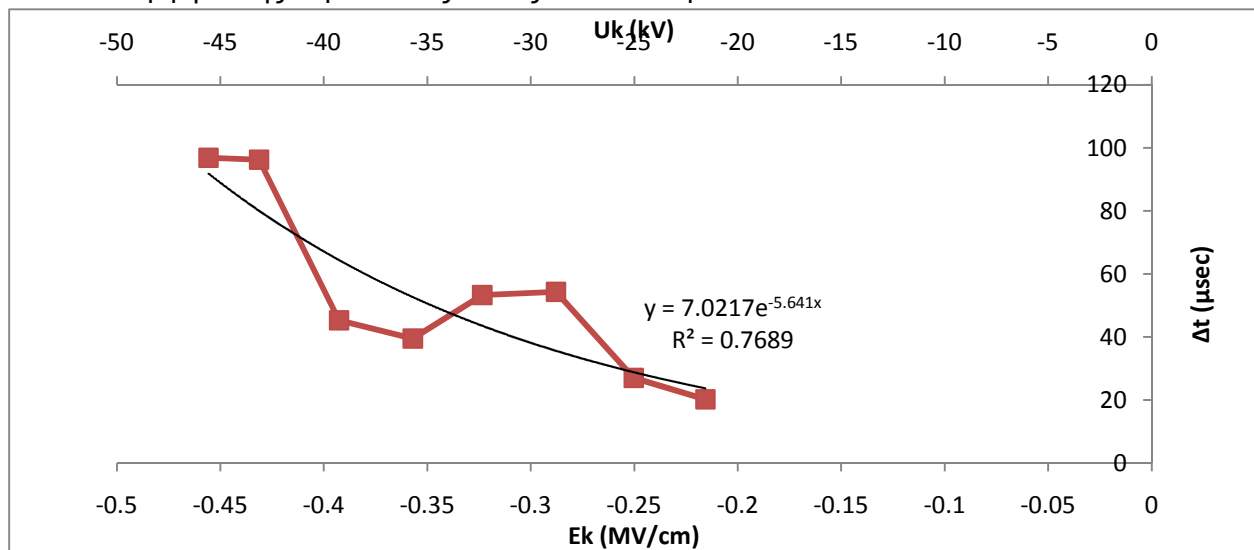
$u_{εν}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{εν}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{εν}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.6:** Χαρακτηριστική  $\Delta t = f(U_k, E_k)$

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και  $t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

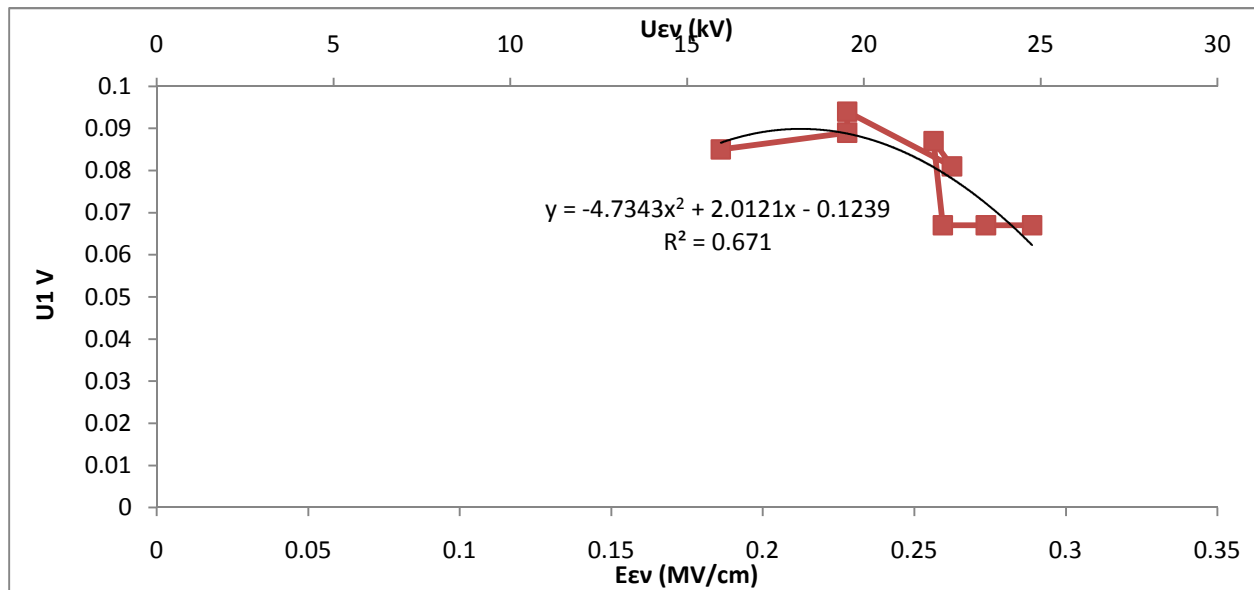
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.7:** Χαρακτηριστική  $u_1 = f(u_{EV}, E_{EV})$

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

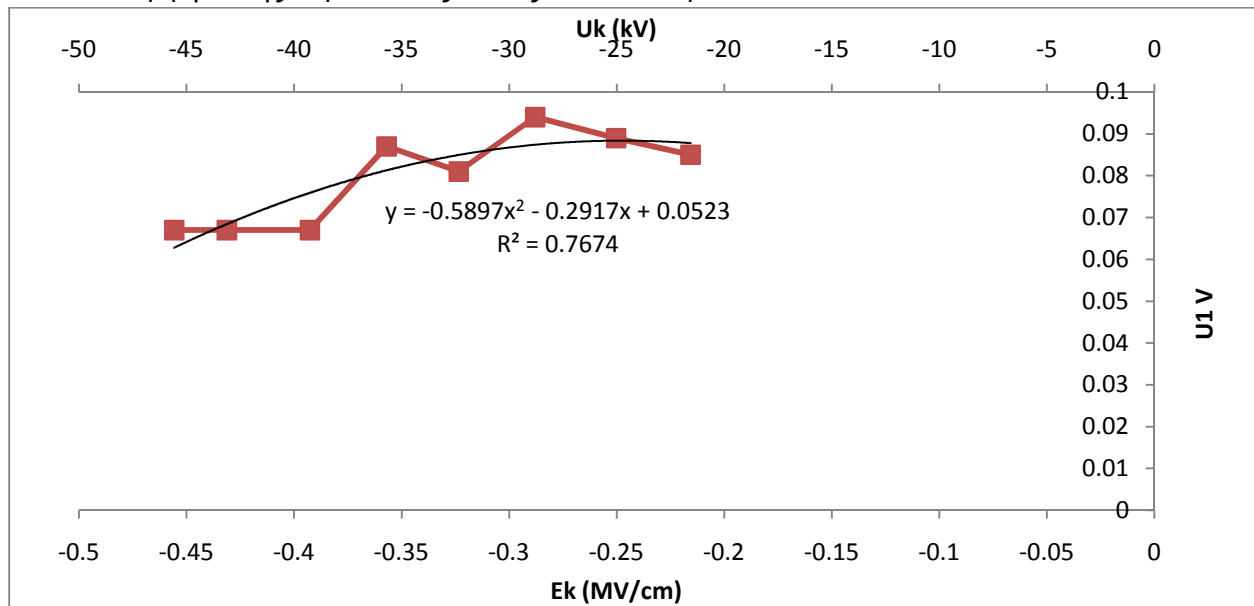
$u_{EV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{EV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{EV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.8:** Χαρακτηριστική  $u_1 = f(U_k, E_k)$

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

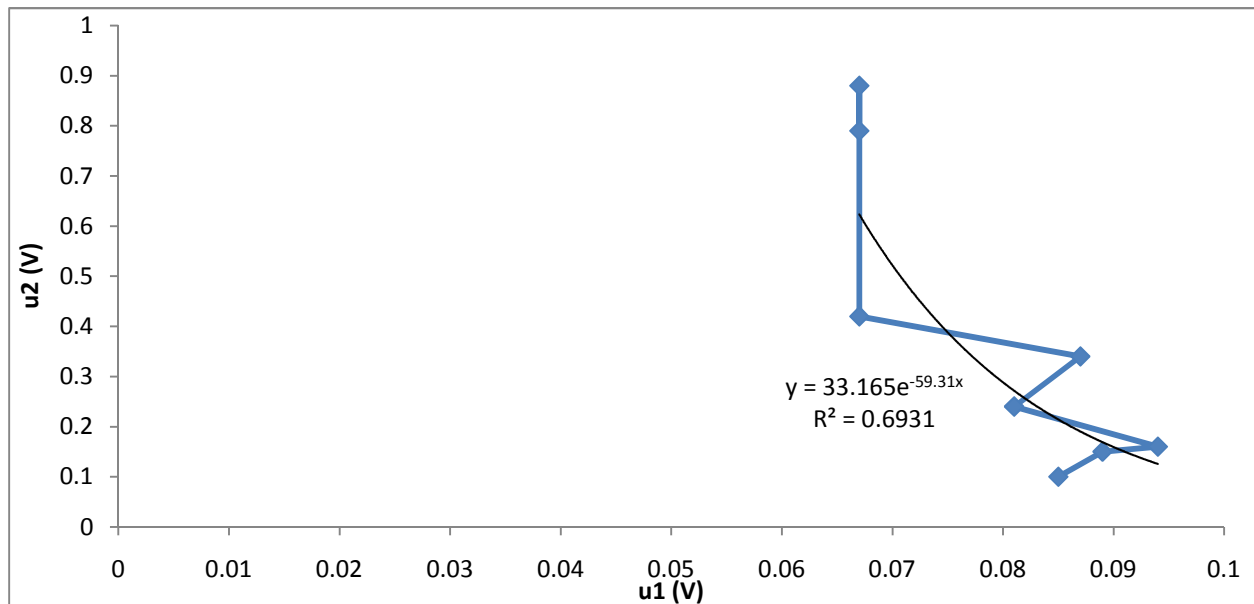
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.9:** Χαρακτηριστική  $u_2 = f(u_1)$

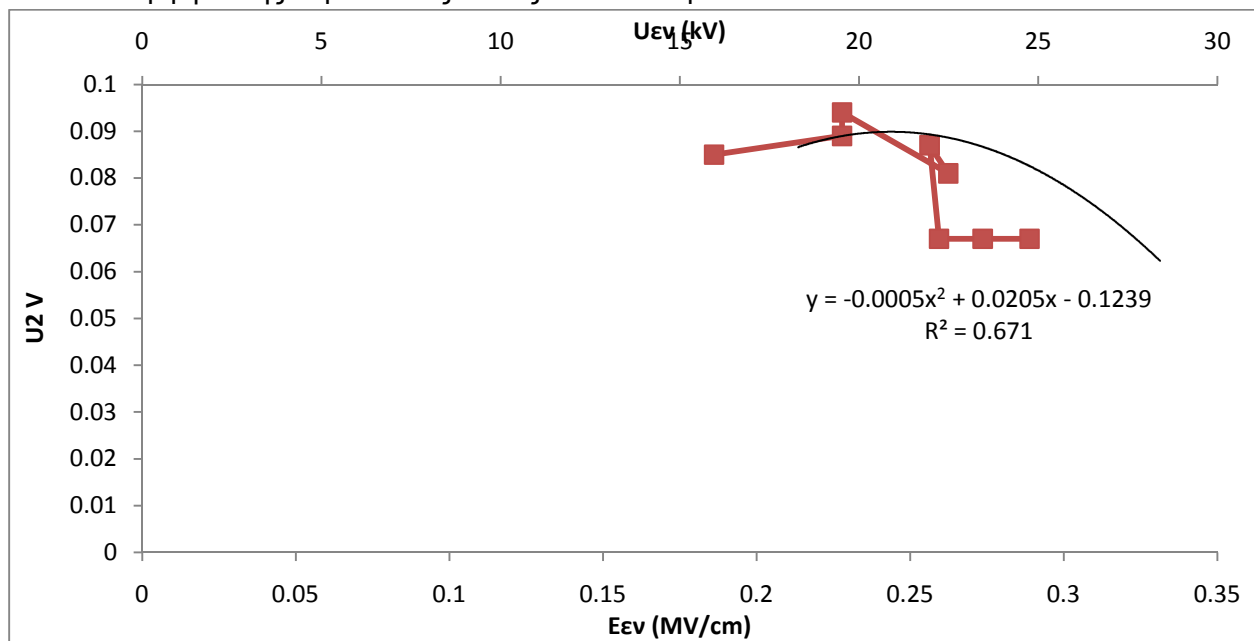
$u_2$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.10:** Χαρακτηριστική  $u_2 = f(u_{EV}, E_{EV})$

$u_2$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα το πέρας των μερικών εκκενώσεων

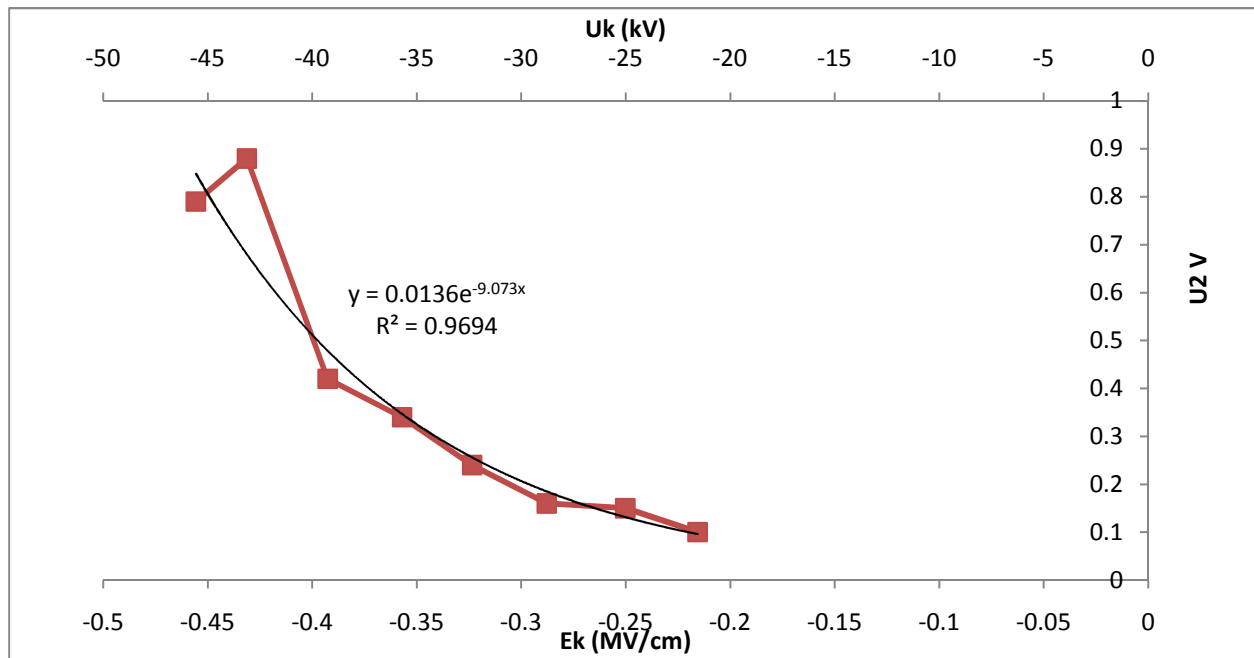
$u_{EV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{EV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{EV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.11:** Χαρακτηριστική  $u_2 = f(U_k, E_k)$

$u_2$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα το πέρας των μερικών εκκενώσεων

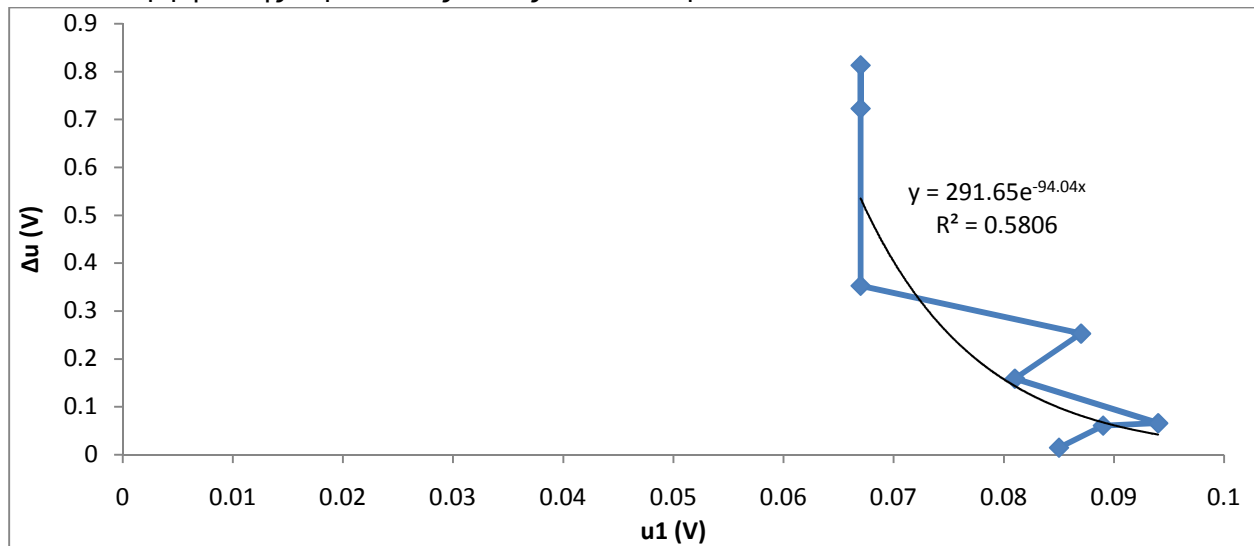
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.12:** Χαρακτηριστική  $\Delta u = f(u_1)$

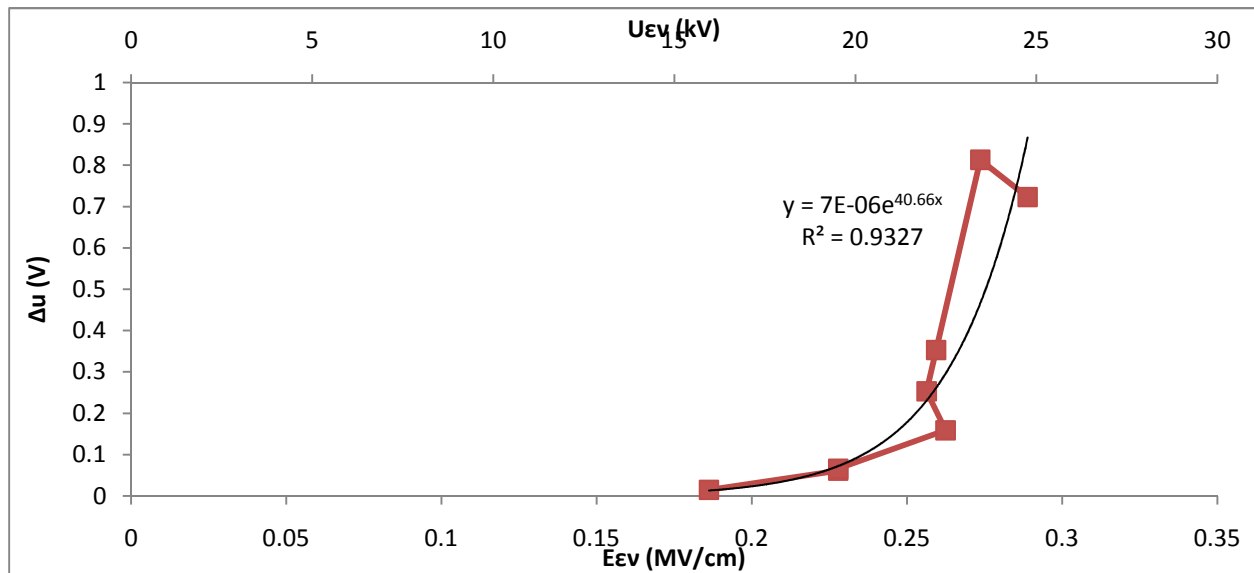
$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατα την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατα το πέρας αυτών  $u_2$ .

$u_1$  : της στιγμιαία τιμή της  $U_m$  κατα την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.13:** Χαρακτηριστική  $\Delta u = f(u_{EV}, E_{EV})$

$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά το πέρας αυτών  $u_2$ .

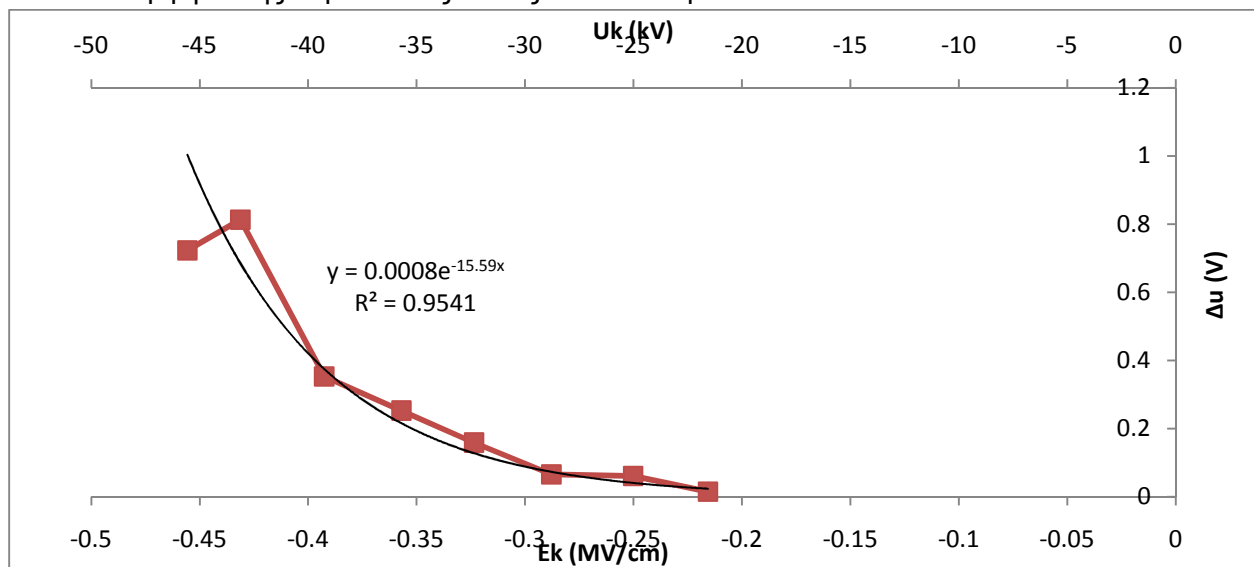
$u_{EV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{EV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{EV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.14:** Χαρακτηριστική  $\Delta u = f(U_k, E_k)$

$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά το πέρας αυτών  $u_2$ .

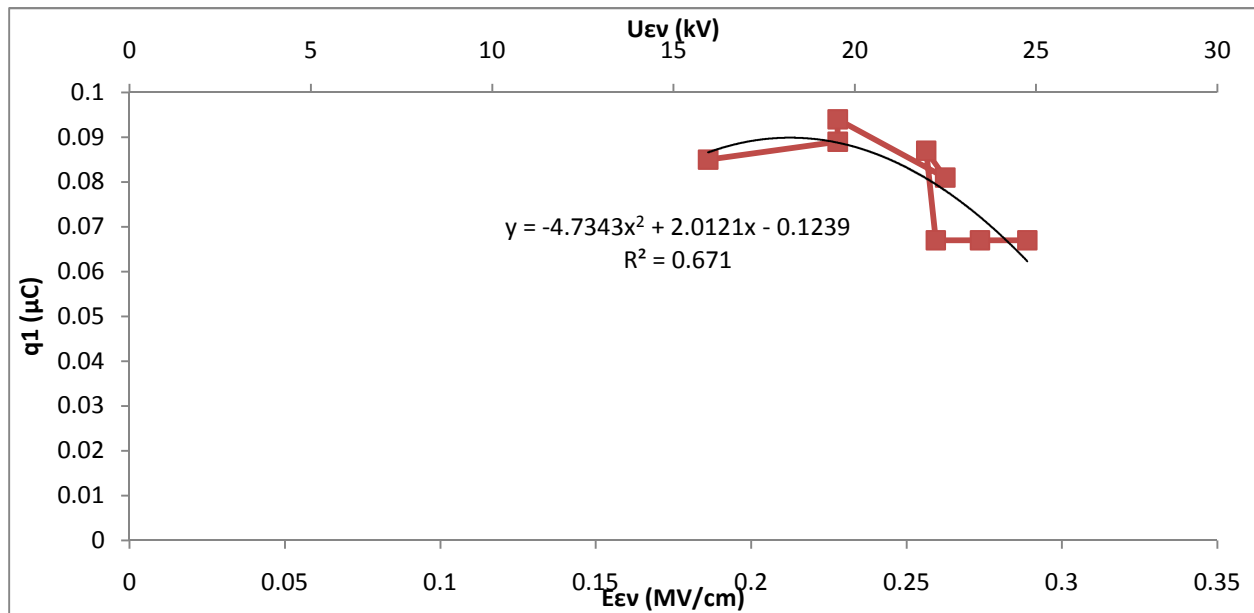
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

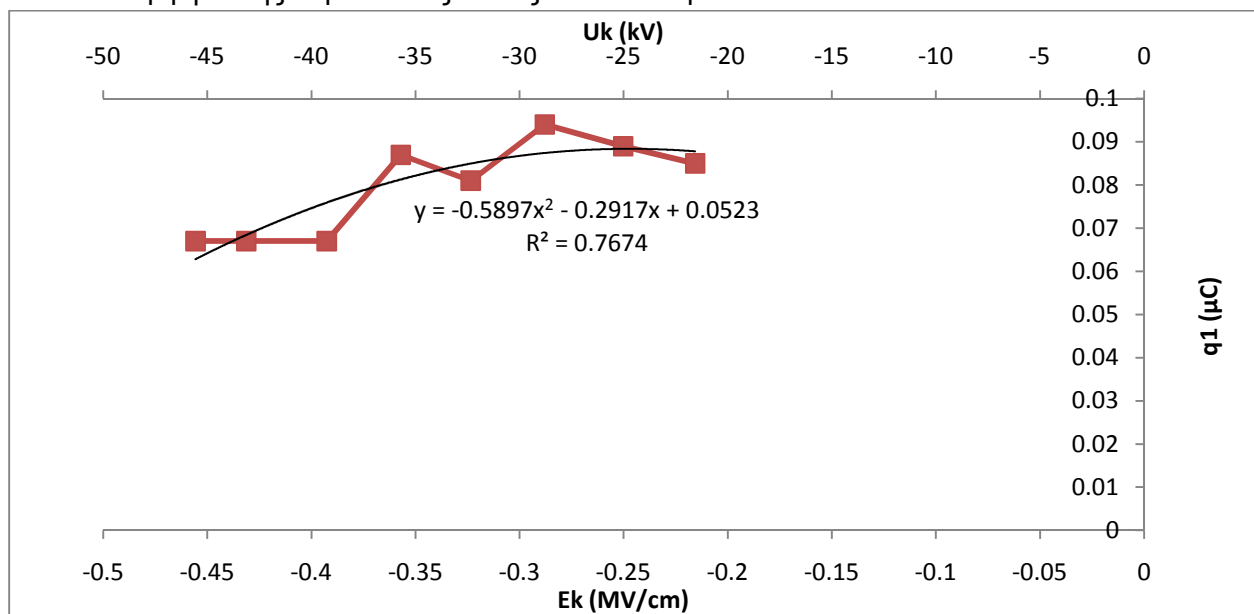
Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.15:** Χαρακτηριστική  $q_1 = f(u_{ev}, E_{ev})$

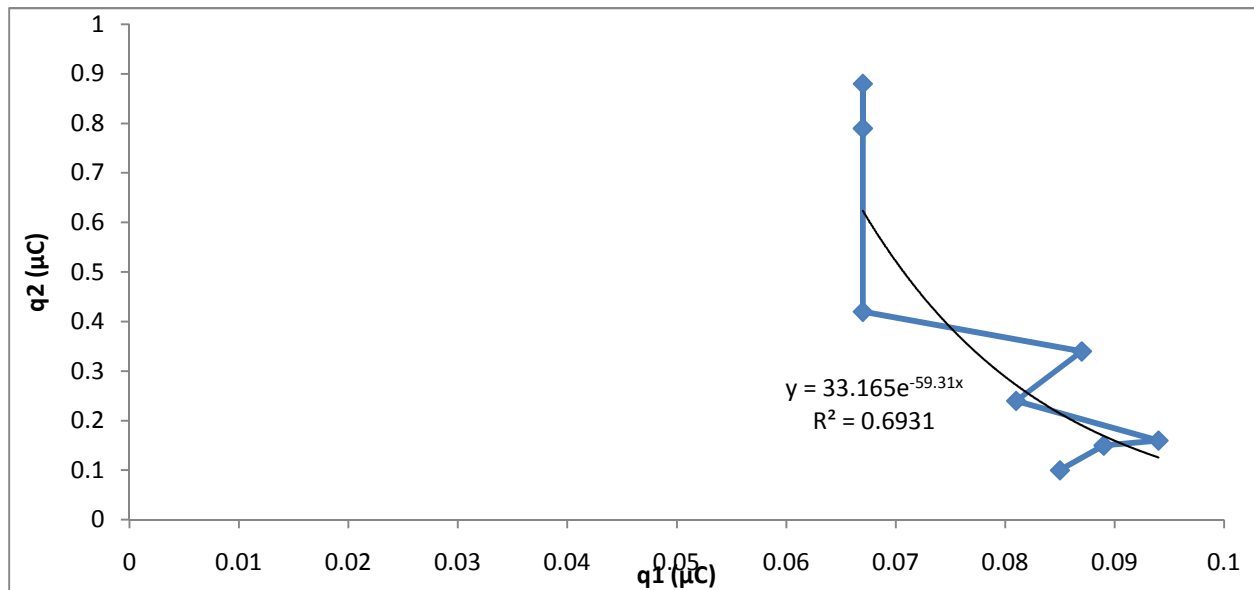
$q_1$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  
 $u_{ev}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  
 $E_{ev}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{ev}$   
 Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο  
 Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$   
 Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.16:** Χαρακτηριστική  $q_1 = f(U_k, E_k)$

$q_1$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  
 $U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης  
 $E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$   
 Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο  
 Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$   
 Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$





**Σχήμα 3.4.17:** Χαρακτηριστική  $q_2 = f(q_1)$

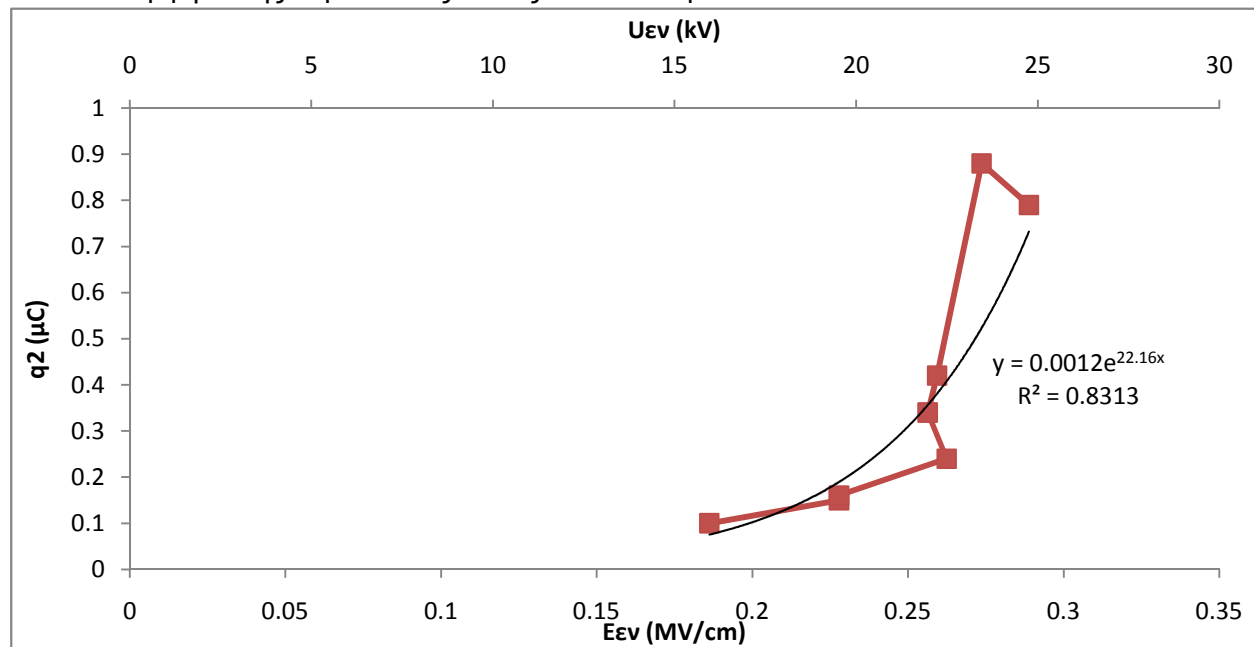
$q_2$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

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

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.18:** Χαρακτηριστική  $q_2 = f(u_{ev}, E_{ev})$

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

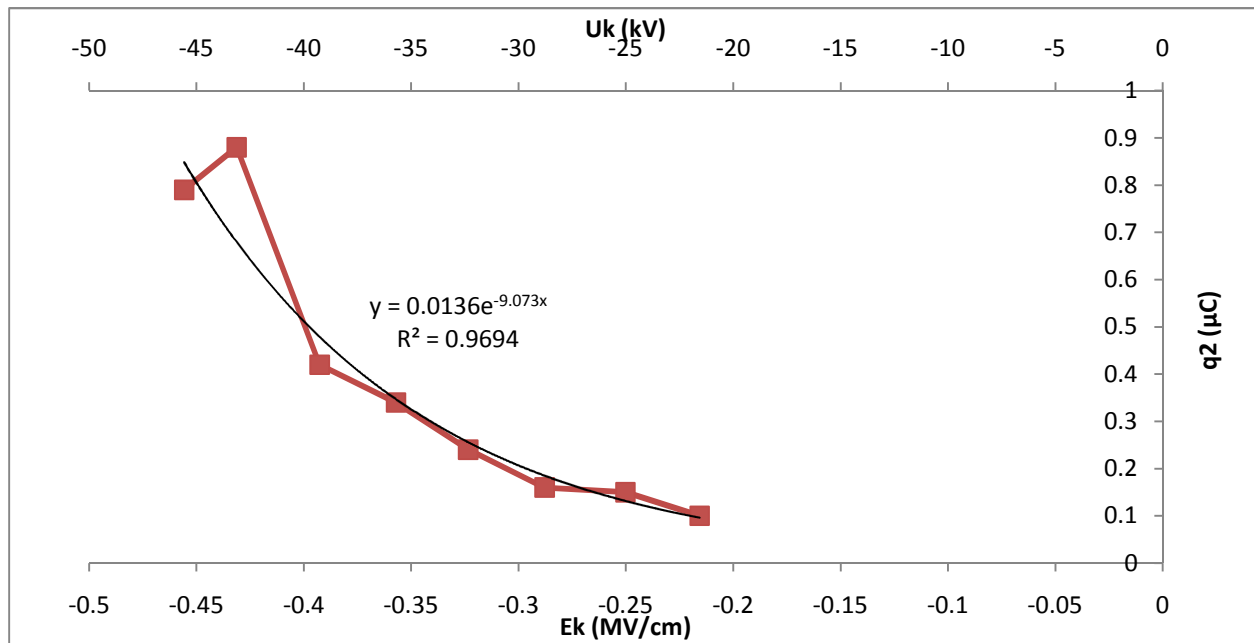
$u_{ev}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{ev}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{ev}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.19:** Χαρακτηριστική  $q_2 = f(U_k, E_k)$

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

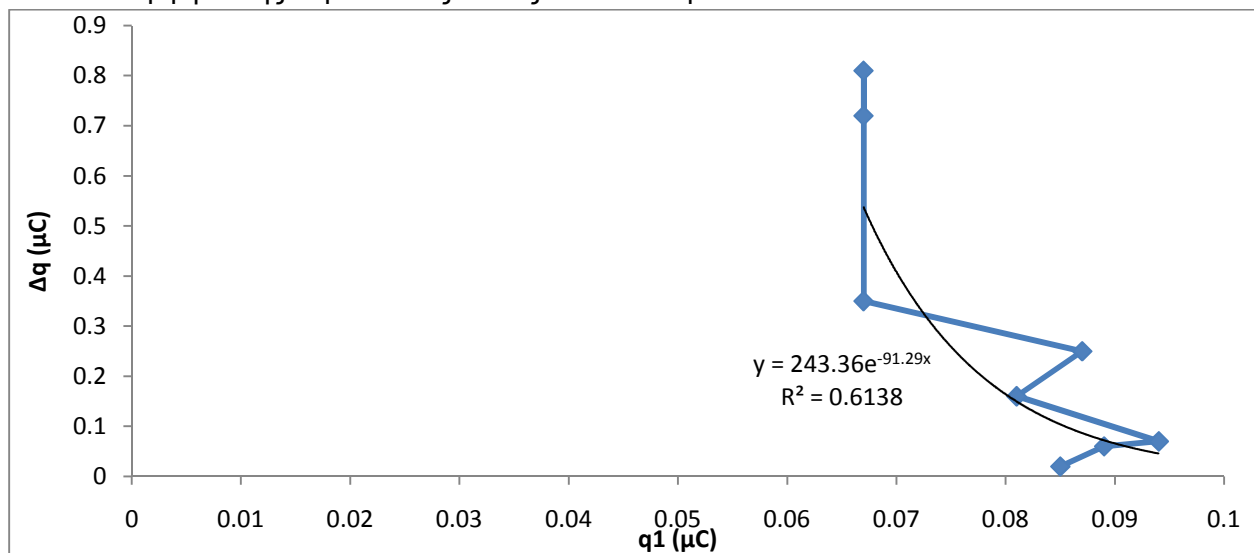
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.20:** Χαρακτηριστική  $\Delta q = f(q_1)$

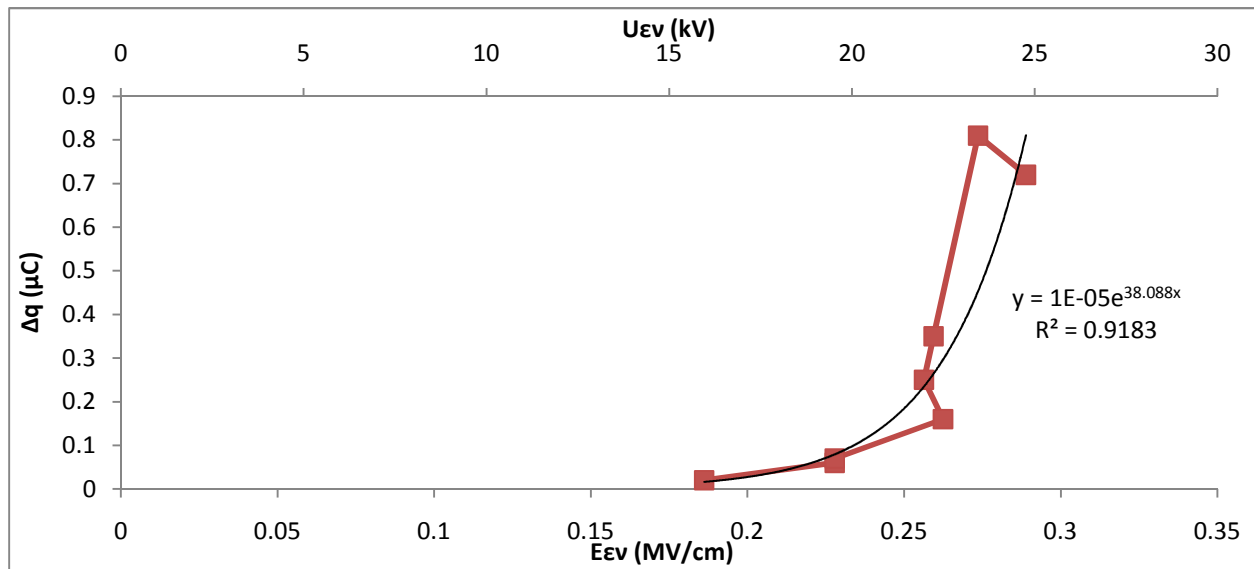
$\Delta q$  : διαφορά μεταξύ στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $q_1$  και της στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας αυτών.

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

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.21:** Χαρακτηριστική  $\Delta q = f(u_{EV}, E_{EV})$

$\Delta q$  : διαφορά μεταξύ στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $q_1$  και της στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας αυτών.

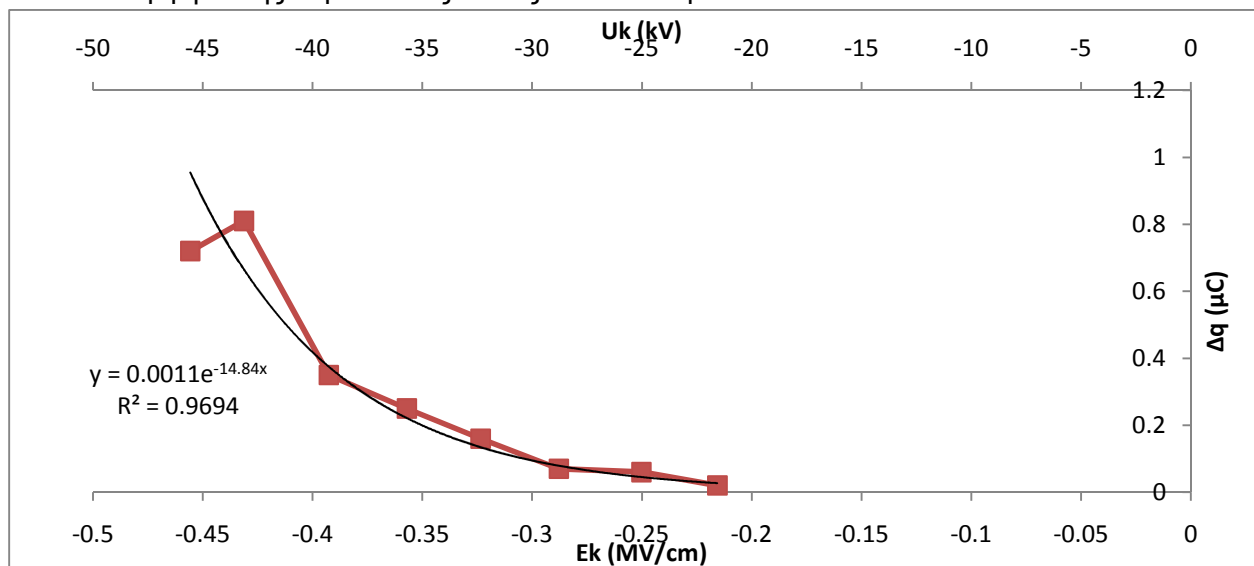
$u_{EV}$  : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{EV}$  : στιγμιαία τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_{EV}$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2mm$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu s$



**Σχήμα 3.4.22:** Χαρακτηριστική  $\Delta q = f(U_k, E_k)$

$\Delta q$  : διαφορά μεταξύ στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $q_1$  και της στιγμιαίας τιμής του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας αυτών.

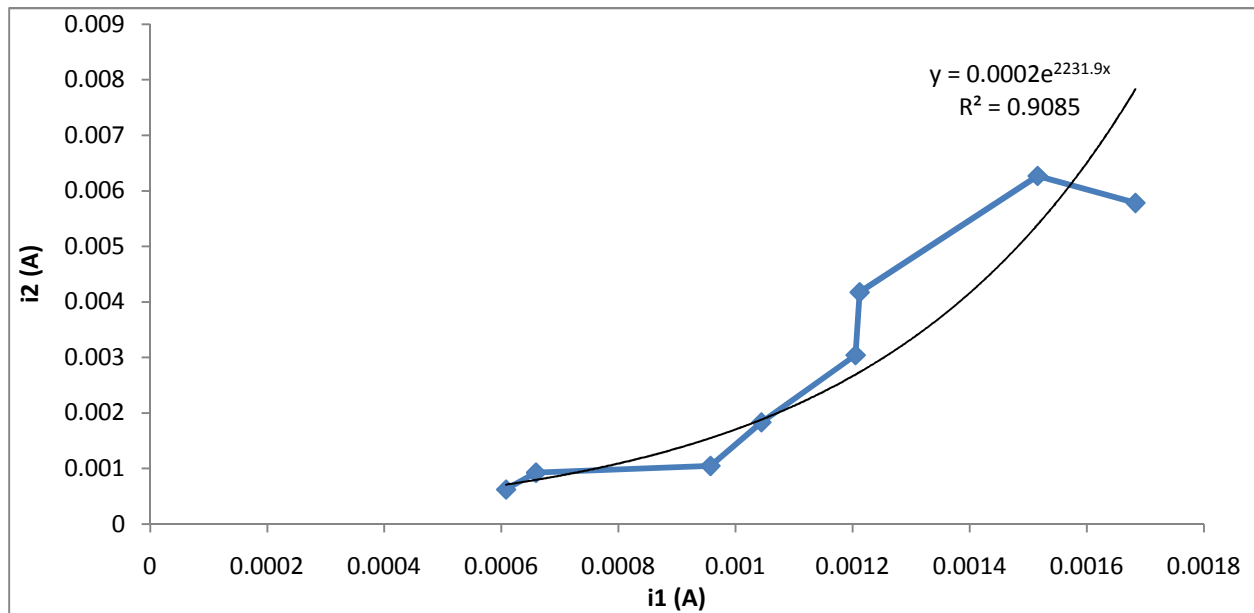
$U_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$E_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $U_k$

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2mm$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu s$



**Σχήμα 3.4.23:** Χαρακτηριστική  $i_2 = f(i_1)$

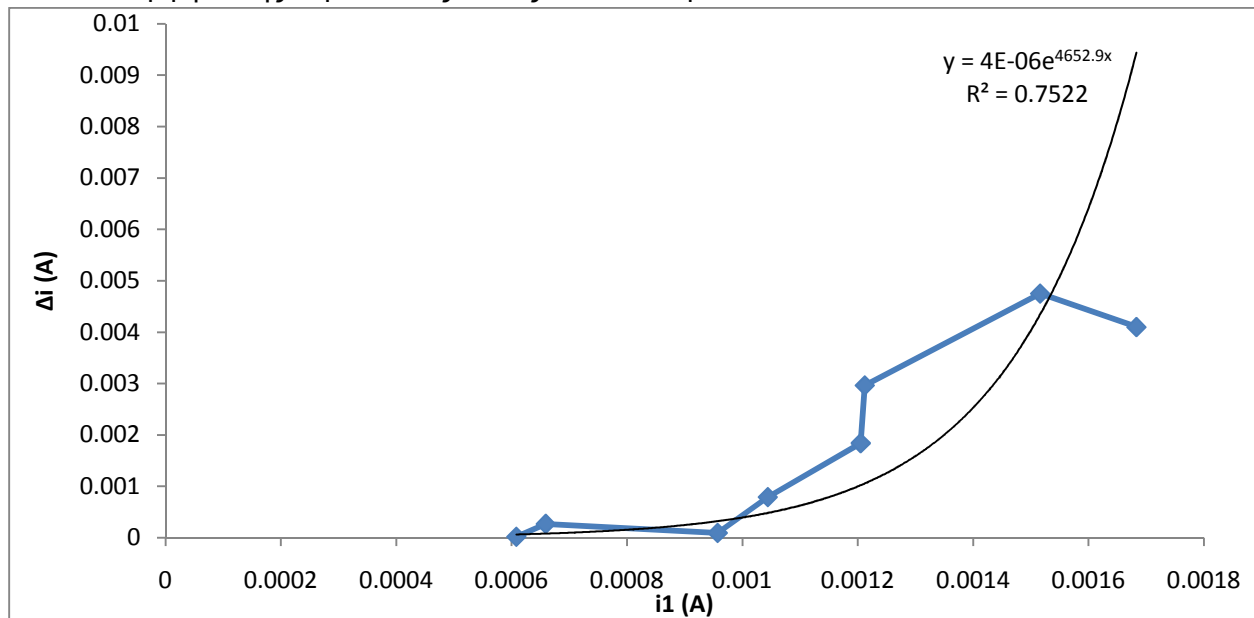
$i_2$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στον Cm κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$i_1$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στον Cm κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.24:** Χαρακτηριστική  $\Delta i = f(i_1)$

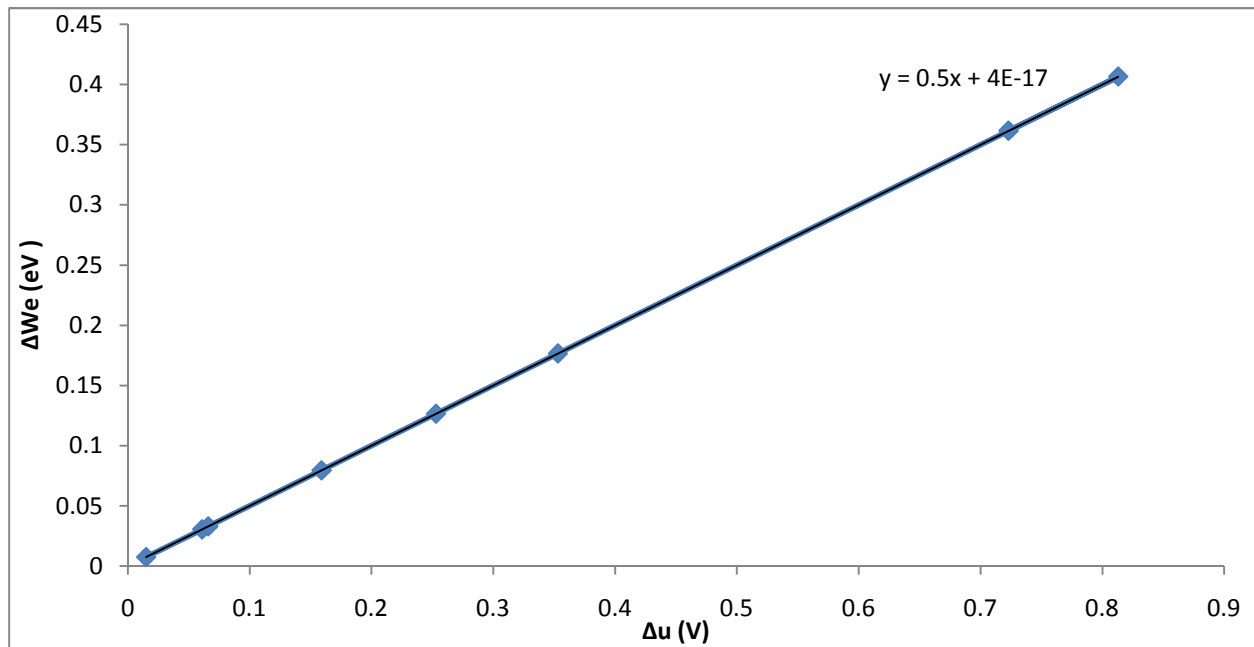
$\Delta i$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος στον Cm κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $i_1$  και της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος στον Cm κατά το πέρας αυτών  $i_2$ .

$i_1$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στον Cm κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.25:** Χαρακτηριστική  $\Delta W_e = f(\Delta u)$

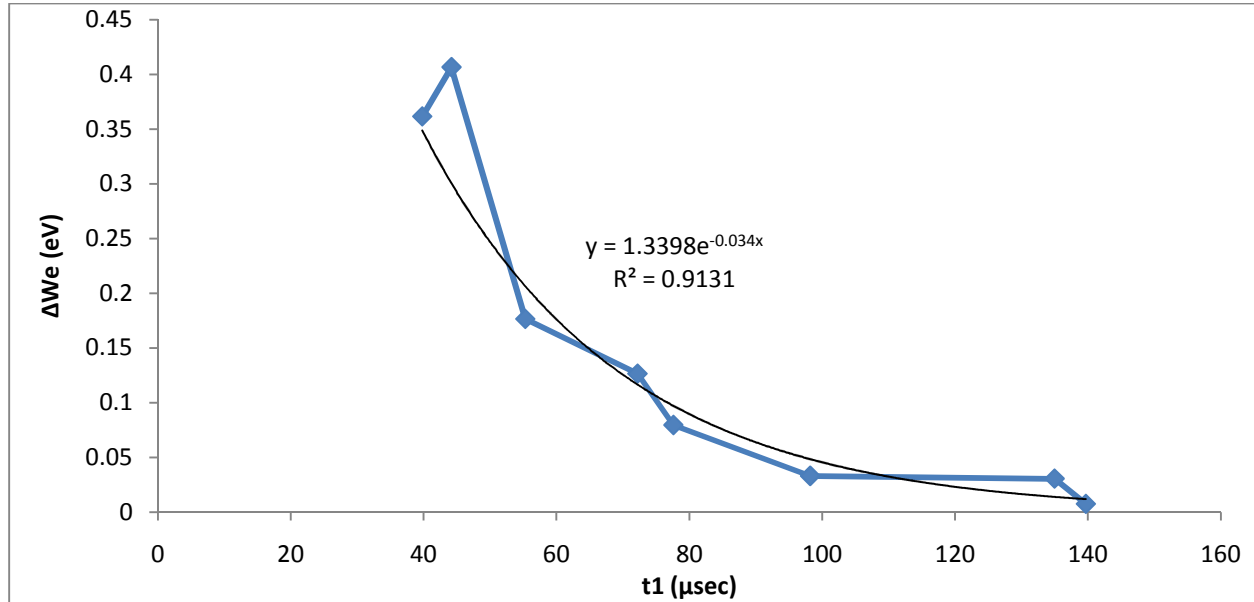
$\Delta W_e$  : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u$  : διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  $u_1$  και της στιγμιαίας τιμής της  $U_m$  κατά το πέρας αυτών  $u_2$ .

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.26:** Χαρακτηριστική  $\Delta W_e = f(t_1)$

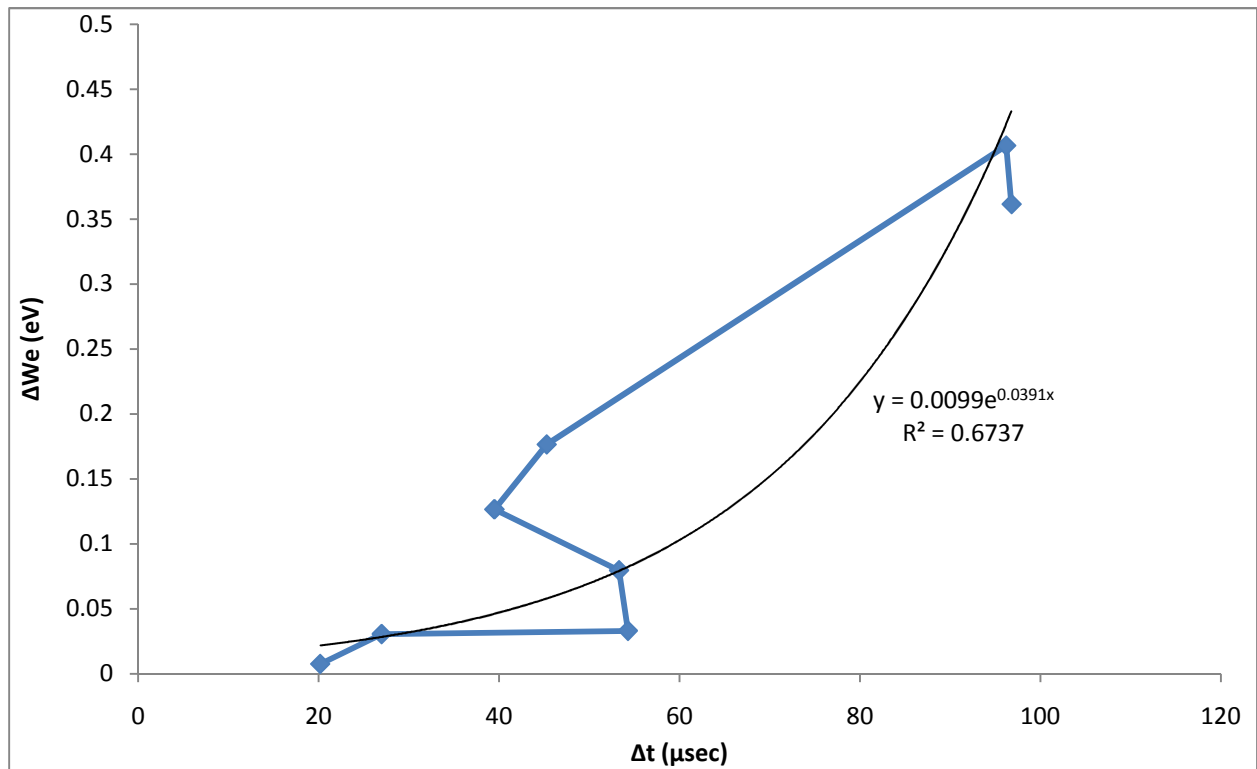
$\Delta W_e$  : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$



**Σχήμα 3.4.27:** Χαρακτηριστική  $\Delta W_e = f(\Delta t)$

$\Delta W_e$  : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$\Delta t$  : διαφορά μεταξύ  $t_1$  χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων και

$t_2$  χρόνου περαίωσης αυτών

Είδος δοκιμίου : στερεό μονωτικό τύπου Pertinax-λάδι μετασχηματιστών 20°C εντός ανομοιογενούς πεδίο

Πάχος δοκιμίου :  $d=2\text{mm}$

Μορφή τάσης : κρουστικές τάσεις  $\pm 250/2500\mu\text{s}$

## 4. Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών

Τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών αερίων έχουν επεξηγηθεί ικανοποιητικά. Αυτό οφείλεται βασικά στη μικρή σταθερότητα των μορίων τους, ως προς εκείνη των υγρών και προ πάντων των στερεών μονωτικών, με αποτέλεσμα να επανέρχεται το αέριο μετά τη διάσπαση (ή την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων) στην αρχική του κατάσταση. Στα στερεά μονωτικά, η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη και η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σε αυτά (κάψιμο, τήξη, μηχανικές κακώσεις, κλπ). Επίσης, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των στερεών μονωτικών υλικών, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται κατά τη διάσπαση ή να αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες (λόγω επιφανειακής διάσπασης, υπερπήδησης και μερικών εκκενώσεων) είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού της γήρανσης της διάσπασής τους.

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

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

Σύμφωνα με την "μακροσκοπική θεωρία", τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται (ή αποσκοπούν) σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση ακουστικών και φωτεινών φαινομένων, καθώς και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού.

Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια. Πρόκειται δηλαδή για μία συσχέτιση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση, με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που εκπέμπεται, όπως ήδη έχει γίνει στην παράγραφο 4.8 για το εξαφθοριούχο θείο.

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι δύο θεωρίες, που προαναφέρθηκαν, καθώς και ο συνδυασμός τους. Επίσης, για λόγους ευκολότερης κατανόησης των περιεχομένων, εξετάζεται ξεχωριστά η διάτρηση από ,την επιφανειακή διάσπαση και την υπερπήδηση.

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

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

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

- α) η θερμική διάτρηση,
- β) η ηλεκτρική διάτρηση (που διακρίνεται στη 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.

### 4.1 Η θερμική διάτρηση

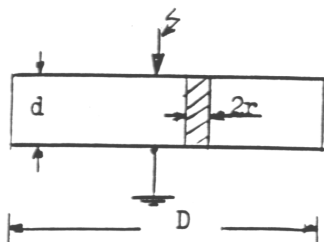
Η μορφή της διάτρησης αυτής συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule (π.χ. κακή απαγωγή θερμότητας από τη μόνωση ενός καλωδίου λόγω σκόνης και ύγρανσης). Η εικόνα που παρουσιάζει το θερμικά καταπονούμενο υλικό είναι συνήθως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

Ο σχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή  $\sigma_1$ , οπότε έχουμε :

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta} \tag{4.1-1}$$

Με την προϋπόθεση σταθερής διατομής (A) του σχετού διάτρησης (σχήμα 4-1) και ειδική αγωγιμότητα  $\sigma_1$ , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι :

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} \tag{4.1-2}$$



όπου U η ενδεικνύμενη τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια.

**Σχήμα 4-1 :** Απλοποιημένη παράσταση του σχετού διάτρησης λόγω των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού .

D : διάμετρος δοκιμίου

d : πάχος του μονωτικού

2r: διάμετρος του σχετού διάτρησης.

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

$$P = P_a + C_0 (d\theta / dt) \tag{4.1-3}$$



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

$$P_a = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (4.1-4)$$

όπου  $\kappa$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

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

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (4.1-5)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δύο συναρτήσεις της θερμοκρασίας ( $P=f(\theta)$  και  $P_a=f(\theta)$ ). Για το λόγο αυτό, η οριακή τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση ( $U_\theta$ ) δίνεται όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι από τη διαφόριση ως προς  $\theta$ , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης 4.1-5, έχουμε:

$$\frac{\beta U_\theta^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \quad (4.1-6)$$

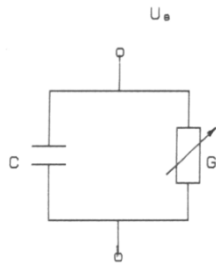
Από τις σχέσεις 2.1-5 και 2.1-6 φαίνεται ότι:

$$\beta \cdot \theta = 1 \quad (4.1-7)$$

$$\text{και} \quad U_\theta = d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (4.1-8)$$

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή  $U_\theta$  μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα 4-2, όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μία μεταβλητή αγωγιμότητα  $G$ .

Η διάτρηση στην τιμή  $U_\theta$  συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από  $\sigma_0$  στην τιμή  $\sigma_1$  : σχέση 4.1-1), μία οριστική τιμή  $G_{\max}$ .



**Σχήμα 4-2 :** 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

## 4.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

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

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

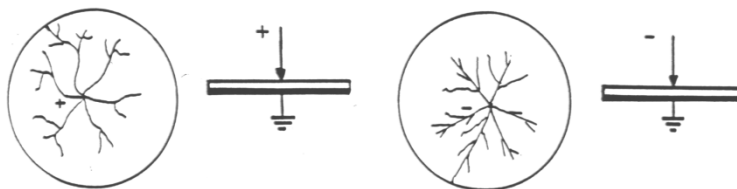
- α) αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις (όπως στα αέρια μονωτικά), ή
- β) μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, από την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή
- γ) συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

Η μορφή της διάτρησης αυτής ονομάζεται ηλεκτρική και διακρίνεται, ανάλογα με την εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση, στη δενδροειδή (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) και εκείνη υπό μορφή οχετού 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 μία διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγώγιμη σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 4-3 δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη (ανάλογα με την πολικότητα της τάσης) για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (ηλεκτρόδια ακίδα-πλάκα).

Στην περίπτωση της θετικής ακίδας ο δενδρίτης έχει, λόγω των δυνάμεων Coulomb που εξασκούνται μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) κατά την κίνηση τους προς την ακίδα, αρκετές διακλαδώσεις (κατά κανόνα μη ευθύγραμμες).

Όταν όμως η ακίδα είναι αρνητική, οι δυνάμεις απομάκρυνσης μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων είναι, λόγω της μεγάλης ακτίνας, μικρότερες και έτσι οι διαδρομές είναι περίπου οι ακτίνες του κύκλου, των οποίων όμως η λαμπρότητα μειώνεται προς την περιφέρειά του. Έχουμε δηλαδή, ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας, ομοιότητα με τις εικόνες Lichtenberg κατά τη μέτρηση κεραυνών.



**Σχήμα 4-3:** Προς επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη

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

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις έχει διαπιστωθεί, ότι πάνω από μία μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης  $U_{kmin}$ , 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.

Λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας για την ηλεκτρική διάτρηση και επειδή τα στερεά μονωτικά είναι και μονωτές θερμότητας, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμότητα που απάγεται μόλις πριν από τη διάτρηση είναι αμελητέα. Κατά τη σχέση επομένως 4.1-3 και για έναν οχετό διατομής  $A=\pi r^2$  (κατά το Σχήμα 4-1) ισχύει μόλις προ της διάτρησης ότι:

$$U_n^2 \sigma_2 \frac{A}{d} = \sigma_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (4.2-1)$$

όπου:  $\sigma_2$  η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια ανομοιογένεια (λόγω της οποίας η πεδιακή ένταση έγινε ιδιαίτερα μεγάλη στην περιοχή εκείνη του υλικού) και  $U_n$  η ενδεικνύμενη τιμή της τάσης για την ηλεκτρική διάσπαση του υλικού στην παραπάνω περιοχή. Αν υποθέσουμε ότι, λόγω του μικρού διατιθέμενου χρόνου είναι  $d\theta/dt = \theta/T_\delta$ , όπου  $T_\delta$  ο χρόνος για την ηλεκτρική διάτρηση, τότε από τη σχέση 4.2-1 έχουμε :

$$U_n = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_\delta}} \quad (4.2-2)$$

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

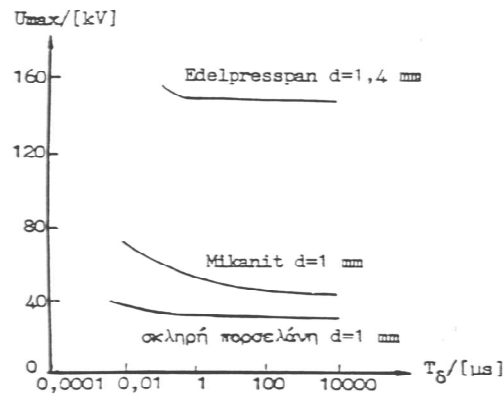
**Πίνακας 4-1:** Τιμές της τάσης διάσπασης του στερεού μονωτικού pertinax H1270 (πάχους 1mm και 2mm) κατά την καταπόνησή του με διάφορες μορφές κρουστικών τάσεων σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών.  
 Διάμετρος δοκιμίων: 150 mm  
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα  
 Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας:  $R=0,9$  mm

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

$$\hat{U}_{kn} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_s}} \quad (4.2-3)$$

όπου  $T_s$  η διάρκεια του μετώπου της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν μία ικανοποιητική ερμηνεία σε πειράματα, που έχουν γίνει. Πράγματι, όσο αυξάνει ο χρόνος  $T_s$  μίας κρουστικής τάσης, τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή (βλέπετε πίνακα 4-1). Κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση ισχύει περίπου η αναλογία  $U_n = f(1/\sqrt{T_\delta})$

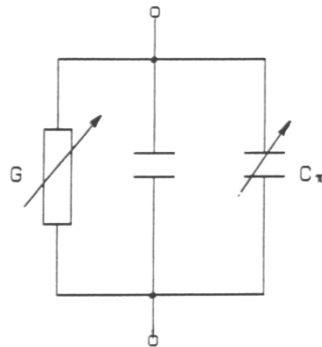


**Σχήμα 4-4:** Διάσπασης διαφόρων στερεών μονωτικών σε σχέση με το χρόνο καταπόνησης.

Για πολύ μικρούς χρόνους ισχύει η αναλογία :  $U_{\max} = f(1/\sqrt{T_\delta})$

$U_{\max}$ : η τιμή της εφαρμοζόμενης εναλλασσόμενης τάσης.

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



**Σχήμα 4-5:** Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

$C$  : ιδανική χωρητικότητα

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

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

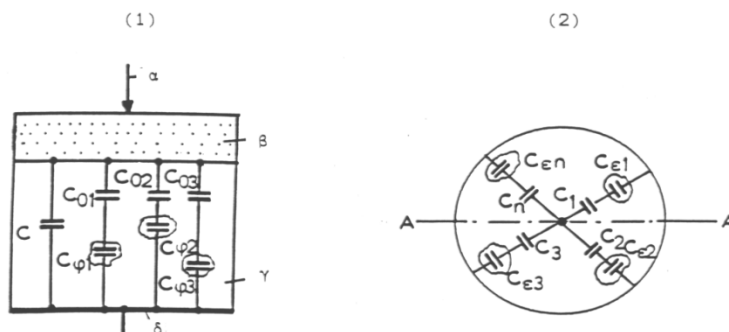
Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μία κρίσιμη για το υλικό τιμή  $\sigma_2$ , η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί σε

ένα ισοδύναμο κύκλωμα (σχήματος 4-5), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή  $C_{\pi}$  (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα  $C$ . Όταν η αγωγιμότητα  $G$  και ο πυκνωτής  $C_{\pi}$  έχουν αποκτήσει μόλις προ της διάτρησης τις τιμές  $G_{\max}$  και  $C_{\max}$  (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα  $\sigma_2$ , λόγω κάποιων ανομοιογένειων), τότε συμβαίνει η διάτρηση.

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

#### 4.3.1 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 επιφάνεια του (εξωτερικές εκκενώσεις). Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίνεται στο σχήμα 4-6. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές  $C_{\varepsilon 1} \dots C_{\varepsilon n}$  και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές  $C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$ . Οι πυκνωτές  $C_1 \dots C_n$  και  $C_{01} \dots C_{0n}$  παριστάνουν αντίστοιχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (κάθε ένας από αυτούς δίνει την ολική χωρητικότητα δύο πυκνωτών, εκ των οποίων ο ένας είναι η χωρητικότητα μεταξύ ακίδας και της θέσης διαταραχής και ο άλλος η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας και της θέσης διαταραχής).



**Σχήμα 4-6 :** Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής σε στερεό μονωτικό εντός μονωτικού ελαίου

1) Τομή A-A της διάταξης πειραματισμού :

α : ηλεκτρόδιο ακίδα

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

γ : στερεό μονωτικό

δ : ηλεκτρόδιο πλάκα

2) Κάτοψη της διάταξης πειραματισμού :

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

$C_{\varepsilon 1} \dots C_{\varepsilon n}$ : πυκνωτές επιφανειακών (εξωτερικών) θέσεων διαταραχής

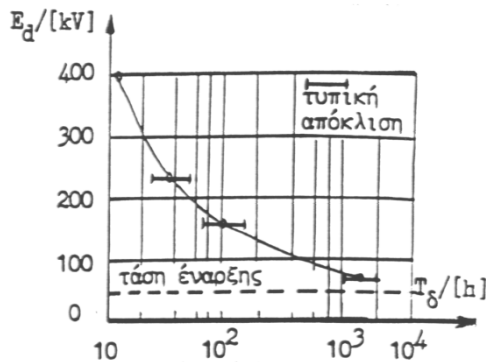
$C$ : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

$C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$ : πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων)

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

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

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί **βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής**, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και **γήρανση** του μονωτικού υλικού. Στο Σχήμα 4-7 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



**Σχήμα 4-7 :** Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχους 0,125mm, λόγω μερικών εκκενώσεων.  
Αριθμός δοκιμών : 10 ανά σημείο μέτρησης.  
 $T_\delta$  : χρόνος διάσπασης.

### 4.3.2 Η τεχνητή γήρανση

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

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

Ένα κριτήριο αξιολόγησης που έχει προταθεί, βασισμένο στην έναρξη της τεχνητής γήρανσης, είναι ο φαινόμενος συντελεστής ανομοιογενειών. Ο συντελεστής αυτός έχει ορισθεί ως το πηλίκο της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων προς την τάση της διηλεκτρικής δοκιμής που προβλέπεται στις προδιαγραφές, ανάλογα με την ονομαστική τάση και τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης.

Στην περίπτωση της καταπόνησης με εναλλασσόμενη τάση η τιμή του συντελεστή είναι:

$$\mu_\varepsilon = U_\varepsilon / U \quad (4.3.2-1)$$

όπου  $U$  η προβλεπόμενη τάση δοκιμής (π.χ.: 55kV επί 1 min για ονομαστική τάση 20kV) και  $U_\varepsilon$  εκείνη κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη μερική εκκένωση.

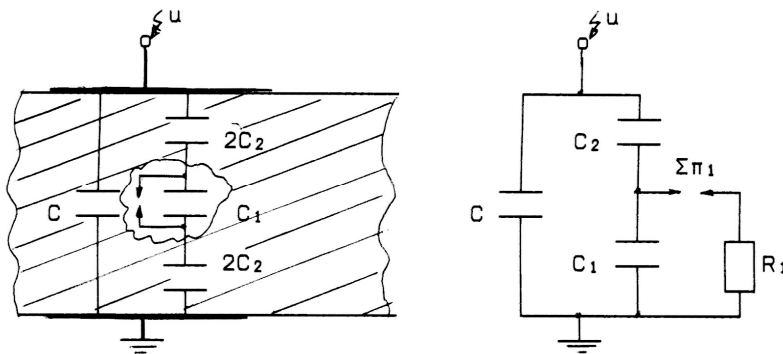
Κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ισχύει αντίστοιχα :

$$\mu_0 = \hat{U}_{κε} / \hat{U}_κ \quad (4.3.2-2)$$

όπου  $\hat{U}_{κε}$  η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης, κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη μερική εκκένωση και  $\hat{U}_κ$  η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης που προβλέπεται από τις προδιαγραφές για τη διηλεκτρική δοκιμή υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

### 4.3.3 Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων

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



**Σχήμα 4-8 :** 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<sub>1</sub>: χωρητικότητα της φυσαλίδας

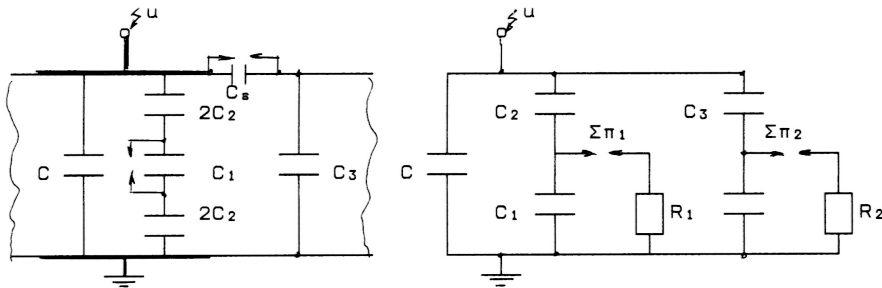
C<sub>2</sub>: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

R<sub>1</sub>: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ<sub>1</sub>

Η ανάγκη για τη φυσική εξήγηση και τη μαθηματική ανάλυση του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων μέσα στον όγκο του στερεού μονωτικού, οδήγησε τους Gemant και Philipoff στο ισοδύναμο κύκλωμα του (σχήμα 4-8), γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου.

Στο σχήμα 4-9 έχει συμπληρωθεί το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο και για τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C<sub>1</sub>) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (C<sub>ε</sub>). Με τον τρόπο δηλαδή αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού (C<sub>2</sub> και C<sub>3</sub> αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C. Οι σπινθήρες Σπ<sub>1</sub> και Σπ<sub>2</sub> στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C<sub>1</sub>, C<sub>ε</sub>).

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη. Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς συχνά στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα 4-10.



**Σχήμα 4-9 :** Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής.

α : σχηματική παράσταση

β : ισοδύναμο κύκλωμα

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C<sub>1</sub>: χωρητικότητα της φυσαλίδας

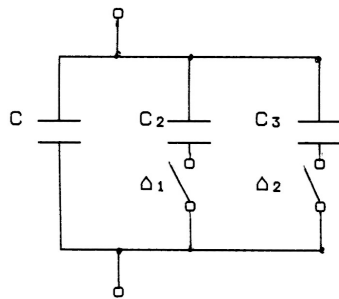
C<sub>ε</sub>: χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

C<sub>2</sub>: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C<sub>3</sub>: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

R<sub>1</sub>: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ<sub>1</sub>

R<sub>2</sub>: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ<sub>2</sub>



**Σχήμα 4-10 :** Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff).

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C<sub>2</sub>: χωρητικότητα του υγιούς στον όγκο του μονωτικού

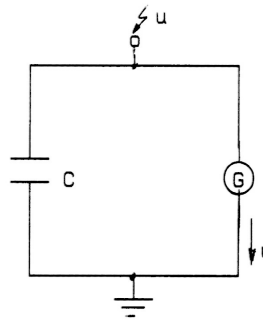
C<sub>3</sub>: χωρητικότητα του υγιούς στην επιφάνεια του μονωτικού

Δ<sub>1</sub> και Δ<sub>2</sub> : διακόπτες, που όταν κλείνουν συμβολίζουν την διάσπαση αντίστοιχα των εσωτερικών και των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων.

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα,



στα οποία λαμβάνονται υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φυσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κλπ. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει επίσης μία ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 4-11). Σύμφωνα με αυτό, οι θέσεις διαταραχής αποδίδονται ως μία γεννήτρια μερικών εκκενώσεων G. Έτσι, όταν διεγείρεται η γεννήτρια G



συμβαίνει αύξηση του δυναμικού στους ακροδέκτες της διάταξης.

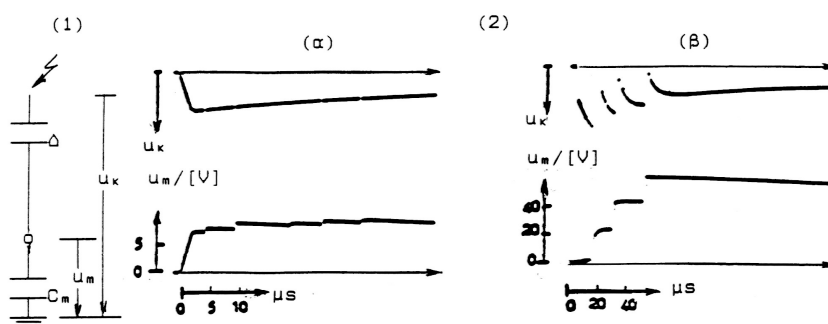
**Σχήμα 4-11 :** Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann.

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

G : γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

#### 4.3.4 Παράδειγμα ερμηνείας παλμογραφημάτων των μερικών εκκενώσεων μέσω των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Στο σχήμα 4-12 δίνεται απλοποιημένα το κύκλωμα για τη μέτρηση των μερικών εκκενώσεων. Σύμφωνα με αυτό δοκίμια στερεών μονωτικών πάχους 1mm ( $\Delta$ ), κατά DIN 7735, καταπονούνται με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 $\mu$ s, υπό διάταξη ηλεκτροδίων "ακίδα-πλάκα" (με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm). Το παλμογράφημα ( $\alpha$ ) αφορά τη γήρανση του βακελίτη και το παλμογράφημα ( $\beta$ ) τη διάτρηση του pertinax. Η διακεκομμένη γραμμή, που έχει σχεδιαστεί στο παλμογράφημα ( $\alpha$ ), δείχνει την ιδανική συμπεριφορά (όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις).

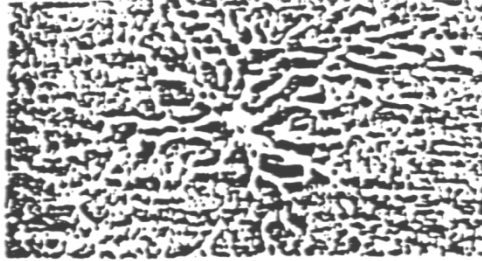


- Σχήμα 4-12 :** Τυπικά παλμογραφήματα κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών
- 1) απλοποιημένη διάταξη μέτρησης ( $u_k$  : στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης,  $\Delta$  : δοκίμιο,  $u_m$  : τάση στον πυκνωτή μέτρησης  $C_m$ ).
  - 2) Μετρήσεις με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 $\mu$ s:
    - ( $\alpha$ ) γήρανση : (τιμή πεδίου 1,11MV/cm,  $\hat{U}_k=77,5$ kV,  $C_m=210$ nF, υλικό: βακελίτης)
    - ( $\beta$ ) διάτρηση: (τιμή πεδίου 1,20MV/cm,  $\hat{U}_k=85$ kV,  $C_m=210$ nF, υλικό: pertinax)

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι, μετά από μία τιμή  $\hat{U}_κ \approx 45\text{kV}$  (όπου  $\hat{U}_κ$  η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται κατά τη γήρανση επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 4-13).

Κατά τη διάτρηση δεν εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, αλλά ηλεκτρικό τόξο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η εικόνα, που παρουσιάζουν τα δοκίμια μετά τη διάτρηση, είναι μία μικρή τρύπα (μικρότερη από 0,1mm) πλησίον της ακίδας.

Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται ως ακολούθως :



**Σχήμα 4-13 :** Αλλαγή της μοριακής δομής στην επιφάνεια του μονωτικού pertinax κατά την εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη (μετά από πολλές κρούσεις 10/200μs, μέγιστης τιμής 75kV)

Από το παλμογράφημα της γήρανσης σχήμα 4-12 α) φαίνεται ότι εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού, τα οποία προκαλούνται, κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4-9 (ή του σχήματος 4-6), από τη σταδιακή διάσπαση διαφόρων θέσεων διαταραχής ( $C_1$ ,  $C_ε$ ). Μπορούμε να υποθέσουμε ότι στην περίπτωση αυτή ισχύει για την σχέση καταμερισμού μεταξύ χωρητικότητας του δοκιμίου C και του πυκνωτή μέτρησης  $C_m$  :

$$u_m(t) = \frac{C_\delta + \Delta C_\delta}{C_m} u_\kappa(t) \quad (4.3.4-1)$$

όπου  $\Delta C_\delta$  η αύξηση της χωρητικότητας, λόγω εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων. Ο δενδρίτης μπορεί να ερμηνευθεί από τα παραπάνω ισοδύναμα κυκλώματα ως επέκταση του ίχνους της ακίδας μέχρι τις θέσεις διαταραχής, που διασπώνται. Η διάτρηση φαίνεται ότι συμβαίνει στη θέση διαταραχής, όπου η πεδιακή ένταση έχει τη μέγιστη τιμή της. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι πρόκειται για ηλεκτρομηχανική διάτρηση.

#### 4.4 Η θερμοχημική διάτρηση

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

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

$$U_a = \sqrt{a \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma_0}} \quad (4.4-1)$$

όπου  $\alpha$  σταθερά του υλικού που εξαρτάται από τη μορφή της τάσης. Η σταθερά  $\alpha$  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 50Hz, της τάξης του 1MV.

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

#### Σημείωση

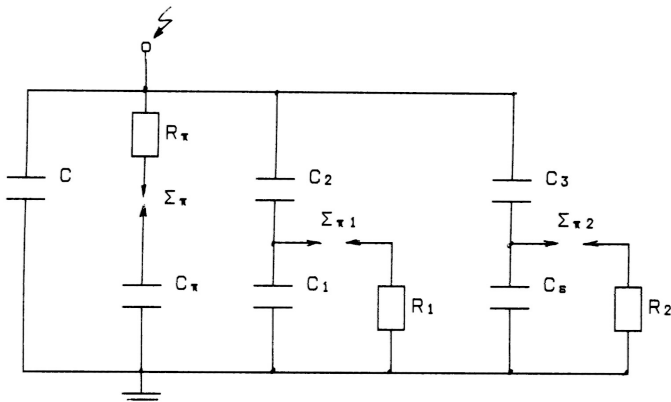
Τα παραπάνω ερευνητικά αποτελέσματα οδηγούν στο πρακτικό συμπέρασμα ότι, οι διηλεκτρικές δοκιμές τύπου θα πρέπει να διεξάγονται ακριβώς μετά τη δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας (εφ' όσον βέβαια προβλέπεται η δοκιμή υπερθέρμανσης σε μία κατασκευή). Κατά τον τρόπο δηλαδή αυτόν, εξετάζεται ουσιαστικά η εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων εντός των παραδεκτών ορίων υπερθέρμανσης μίας κατασκευής. Αν υποθέσουμε, ως παράδειγμα, ότι πρόκειται να γίνουν οι δοκιμές τύπου κατά τον ποιοτικό έλεγχο κάποιων μετασχηματιστών διανομής, τότε κρίνεται σκόπιμο να διεξάγονται οι διηλεκτρικές δοκιμές (δοκιμή υπό κρουστική τάση και δοκιμή με εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας) ακριβώς μετά το πέρας της δοκιμής ανύψωσης θερμοκρασίας, όπου η θερμοκρασία στο λάδι είναι της τάξης των 70°C.

## **4.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης**

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 1 τα φαινόμενα προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών μπορούν να αποδοθούν σε τέσσερις βασικούς παράγοντες αποσταθεροποίησης των μορίων (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb μερικές εκκενώσεις και θερμότητα του περιβάλλοντος), οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως παράγοντες γήρανσης και διάτρησης. Οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται στην πράξη με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού.

## 4.6 Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

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



**Σχήμα 4-14 :** Βελτίωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff, ώστε να αποδίδεται από αυτό η γήρανση και η ηλεκτρομηχανική διάτρηση.

$C$  : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

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

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

$C_ε$ : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών.

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

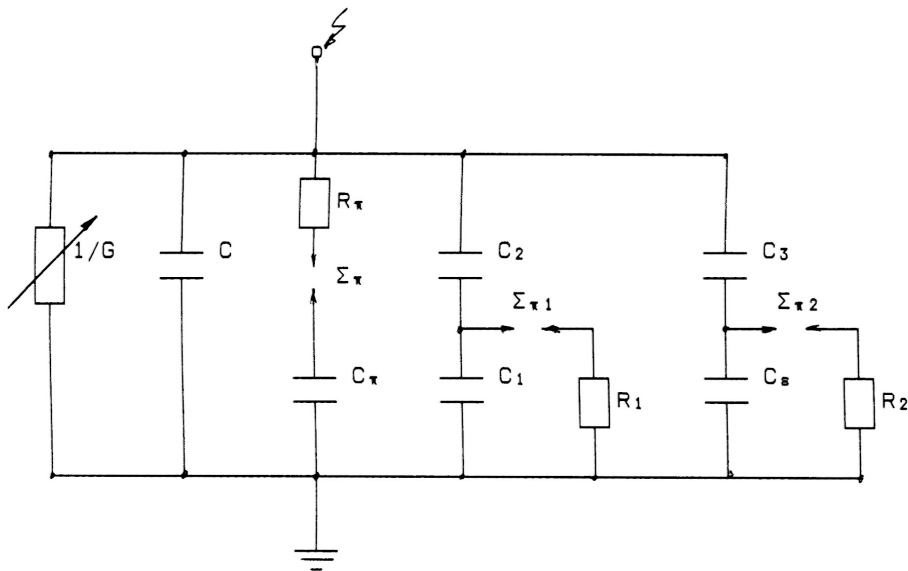
$C_π$ : Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου.

$R_1$ : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi_1$ .

$R_2$ : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi_2$ .

$R_π, \Sigma\pi$ : Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του  $C_π$  ( $R_π$  αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi$ ).

Από πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχει προταθεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που αποδίδει ικανοποιητικά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση και τις μερικές εκκενώσεις (σχήμα 4-14). Όπως φαίνεται πρόκειται ουσιαστικά για μία παράλληλη σύνδεση ενός πυκνωτή  $C_π$ , προς το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff. Ο πυκνωτής αυτός εκφράζει την πόλωση του υλικού, λόγω της οποίας συμβαίνει η μηχανική τάνυσή του από τις δυνάμεις του πεδίου. Η διαδρομή εκκένωσης εκφράζεται στην περίπτωση αυτή με τον σπινθηριστή  $\Sigma\pi$  και την αντίσταση του τόξου  $R_π$  (υποτίθεται ότι ο  $\Sigma\pi$  διασπάται ταυτόχρονα με τον πυκνωτή  $C_π$ ). Για να αποδίδει το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα το συνδυασμό όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης (κατά τη μακροσκοπική θεωρία), φαίνεται ότι θα πρέπει να γίνει η παράλληλη σύνδεση μίας μεταβλητής αγωγιμότητας, που θα εκφράζει τις θερμικές απώλειες (απώλειες Joule και ενίσχυσή τους από τις μερικές εκκενώσεις) και την καταπόνηση του υλικού από τη θερμότητα του περιβάλλοντος (σχήμα 4-15).



**Σχήμα 4-15 :** Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

$C$  : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

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

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

$C_ε$ : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών.

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

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

$R_1$ : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi_1$ .

$R_2$ : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi_2$ .

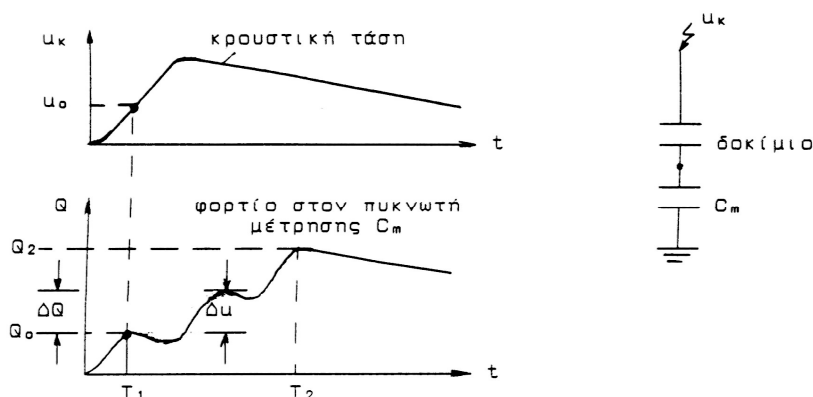
$R_π, \Sigma\pi$ : Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του  $C_π$  ( $R_π$  αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi$ ).

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

## 4.7 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων των κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως π.χ. στο σχήμα 4-16 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 4-17). Στο σχήμα π.χ. 4-18 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.

**Σχήμα 4-16 :** 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).

$\Delta u$  : Άλλα δυναμικού.

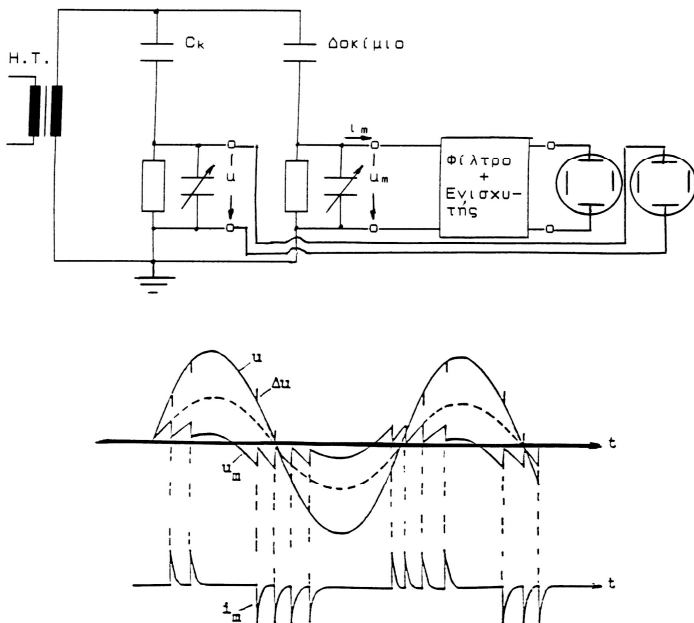
$\Delta Q$  : Αύξηση φορτίου.

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 την μέγιστη τιμή της τάσης, κλπ. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική  $Q=f(\hat{U}_k)$ , η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 5-4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs ή 10/200μs, όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Στο σχήμα 5-5 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90<sup>η</sup> κρούση, ως προς την 60<sup>η</sup>. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των

επιφανειακών διαταραχών, εύκολα διαπιστώνεται, ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου  $Q$  στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις (θραύσματα) στην επιφάνεια του μονωτικού.

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

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

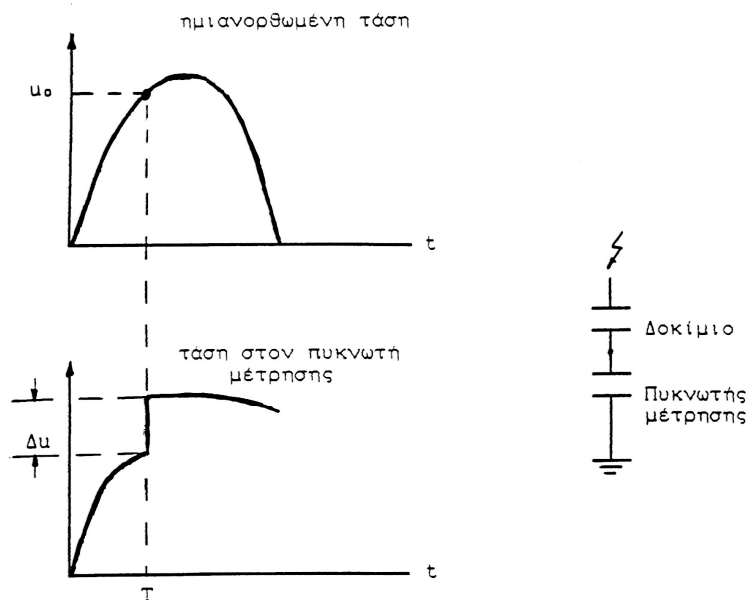


**Σχήμα 4-17 :** Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω "ωμικού-χωρητικού" τετράπολου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz.  
 H.T.: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.  
 $C_k$  : Πυκνωτής υψηλής τάσης.  
 $u$  : Στιγμιαία τιμή της εναλλασσόμενης τάσης (η οποία μετράται σε ένα ωμικό-χωρητικό τετράπολο).  
 $u_m$  : Στιγμιαία τιμή της τάσης στο ωμικό-χωρητικό τετράπολο μέτρησης των μερικών εκκενώσεων.  
 $I_m$  : Στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων.  
 $\Delta u$  : Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων.

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

Μία πειραματική προσέγγιση του παραπάνω διαχωρισμού, μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, έχει δοθεί από παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού σε στερεά οργανικά μονωτικά, με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών (σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα), που συνδυάστηκαν με ταυτόχρονες οπτικές παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών κατά το σχήμα 4-22. Στον πίνακα 4.7-1 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με  $\epsilon \approx 2,5 \div 4,5$ , από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που προαναφέρθηκε. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης  $1,2/50\mu s$ ) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

**Σχήμα 4-18 :** Παράδειγμα Καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις



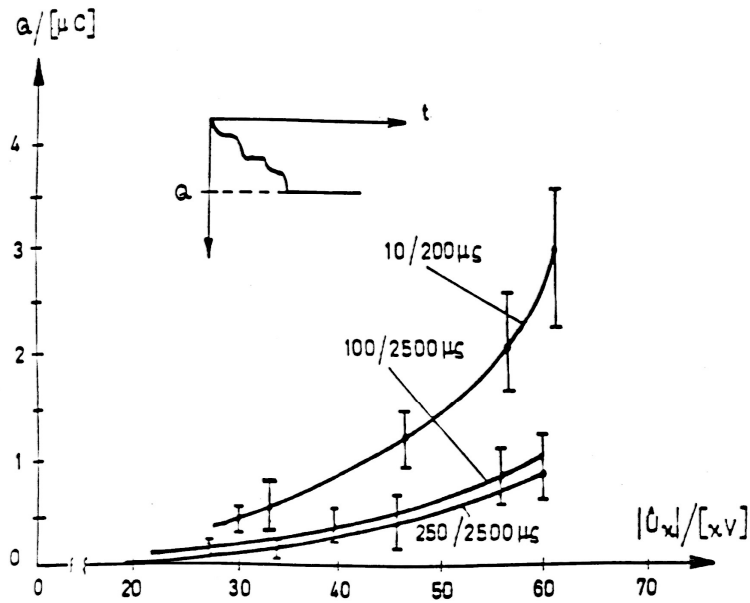
καταπόνησης.

$T_1$  : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

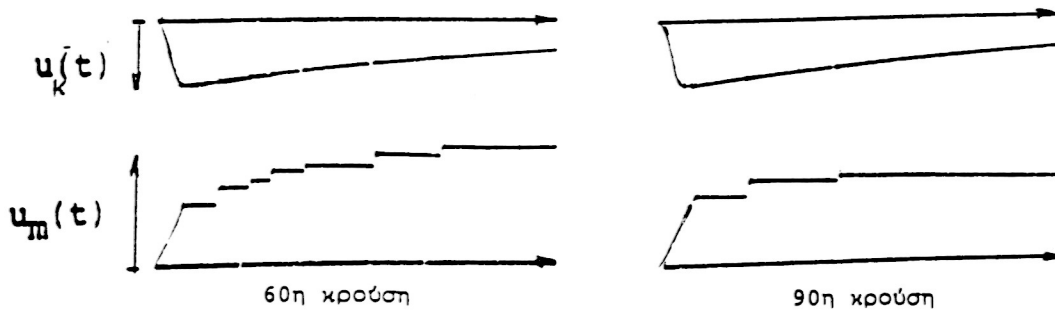
$U_0$  : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).

$\Delta u$  : άλμα δυναμικού





**Σχήμα 4-19 :** Χαρακτηριστική  $Q_2=f(\hat{U}_k)$  για τον βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs.  
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι  
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα  
 $C_m$ : 1000nF

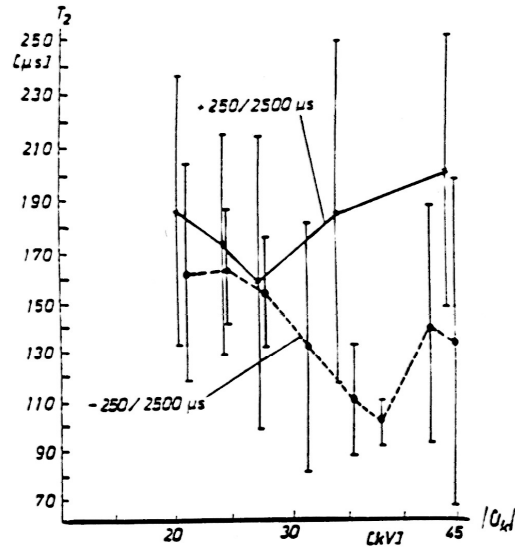
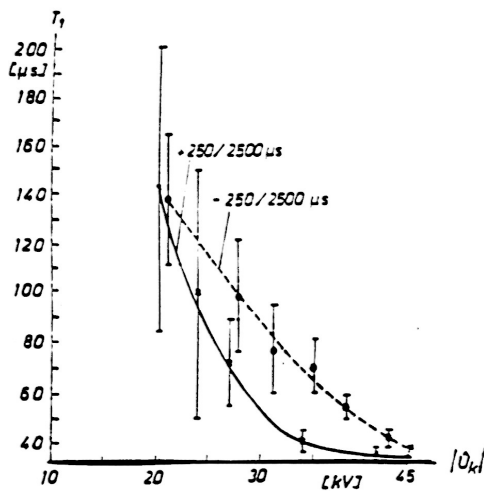
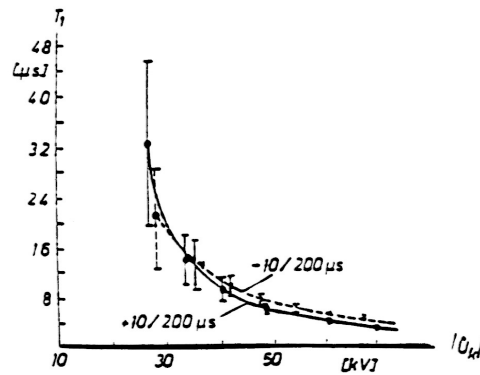
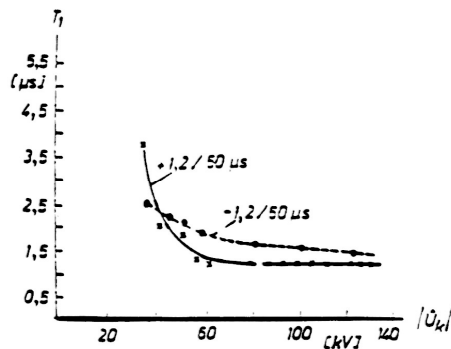


**Σχήμα 4-20 :** Άλματα δυναμικού κατά την 60<sup>η</sup> και την 90<sup>η</sup> κρούση στο pertinax (πάχους 2mm).  
 Μορφή τάσης : 1,2/50μs ( $\hat{U}_k=99,7\text{kV}$ ).  
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.  
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.  
 $C_m$  : 210nF.

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

**Πίνακας 4.7-1 :** Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

Μία άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, ως προς τον χρόνο εκδήλωσής τους (υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης), έχει βασιστεί σε χαρακτηριστικές  $T_1=f(|\hat{U}_κ|)$  και  $T_2=f(|\hat{U}_κ|)$  σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών. Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ο χρόνος έναρξης ( $T_1$ ) των μερικών εκκενώσεων (στα μονωτικά υλικά και το είδος της καταπόνησης, που προαναφέρθηκαν), καθώς και ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων ( $T_2$ ), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs), ώστε σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις του πίνακα 4.7-1 για την εικόνα των επιφανειακών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.



**Σχήμα 4-21 :** 1) Χαρακτηριστική  $T_1=f(|\hat{U}_κ|)$  κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2mm και  $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$ ) με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, 10/200μs και 250/2500μs.  
 2) Χαρακτηριστική  $T_2=f(|\hat{U}_κ|)$  κατά την καταπόνηση των υλικών αυτών με κρουστικές τάσεις 250/2500μs.  
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.  
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.  
 I : 2 φορές η τυπική απόκλιση.

## 5 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών

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

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

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

- στις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις (δηλαδή από παλμογράφημα όπως εκείνα των σχημάτων : 4-12, 4-16),
- στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης (ως στοιχείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε δηλαδή μία αντίσταση, αντί του πυκνωτή μέτρησης),
- στην ανίχνευση του μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση)
- στην ικανοποιητική πειραματική και θεωρητική ταύτιση του μηχανισμού παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

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

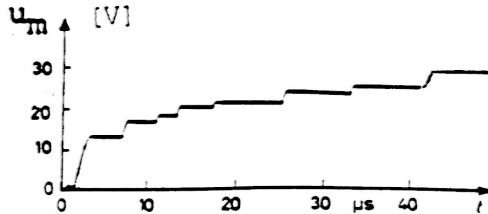
- 1) Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί, ότι :
  - α) το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.
  - β) Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα)
- 2) Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 2,5-4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2MV/cm.
- 3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση 3-10 ( $\sigma = \sigma_0 \exp(-W / kT)$ ).
- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση 3-10. 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.

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

## 5.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών

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

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



**Σχήμα 5-1 :** Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

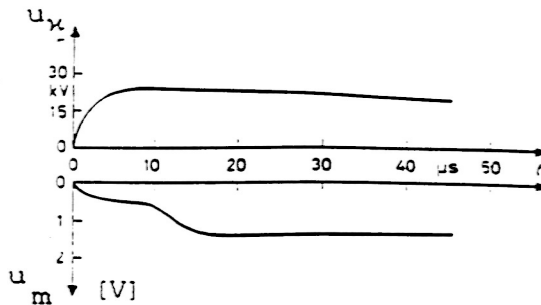
$$\hat{U}_κ : 100\text{kV}.$$

$$E : 0,8 \text{ MV/cm}.$$

$$C_m : 210\text{nF}.$$

- α) μετά από μία τιμή  $\hat{U}_κ \approx 45\text{kV}$ , κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs ή 10/200μs, εκδηλώνεται επιφανειακός δένδριτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 5-6). Υπό σταθερή τιμή της τάσης ο δένδριτης, καθώς και η αντίστοιχη προς αυτόν αλλαγή της μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις
- β) κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs δεν παρατηρήθηκε, υπό σταθερή τιμή της τάσης (που δεν οδηγεί στη διάσπαση), η εκδήλωση του παραπάνω δένδριτη, ούτε προκλήθηκε αλλαγή της μοριακής δομής

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

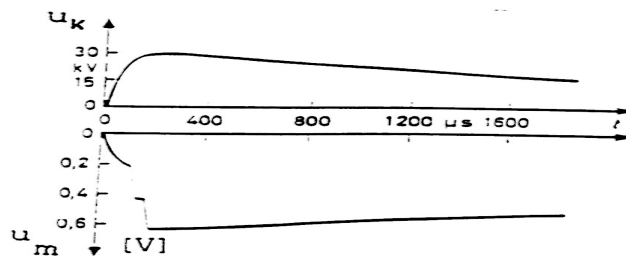


**Σχήμα 5-2 :** Πρώτο άλμα δυναμικού υπό κρουστική τάση 10/200μs.

$$\hat{U}_κ : 26,6\text{kV}.$$

$$E : 0,38\text{MV/cm}.$$

$$C_m : 210\text{nF}$$

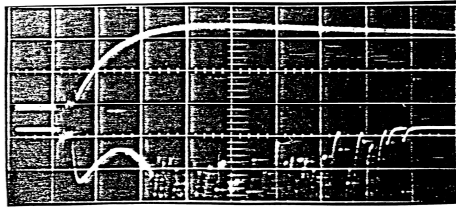


**Σχήμα 5-3 :** Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 250/2500μs.

$$\hat{U}_k : 32 \text{ kV.}$$

$$E : 0,31 \text{ MV/cm.}$$

$$C_m : 1000 \text{ nF.}$$



**Σχήμα 5-4 :** Κρούσεις φορτίου υπό κρουστική τάση 10/200μs.

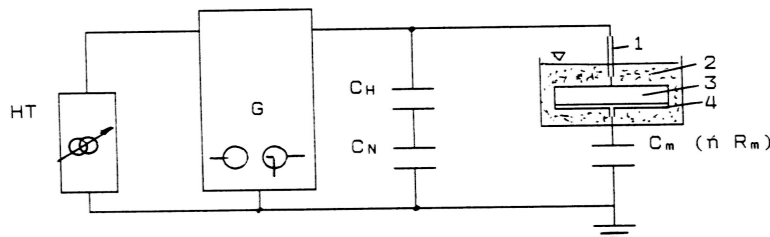
Κλίμακα χρόνου : 5 μs/div.

Κλίμακα ρεύματος : 1,3 A/div.

$$\hat{U}_k : 81 \text{ kV, } E : 0,86 \text{ MV/cm.}$$

### α) Μακροσκοπική ερμηνεία :

Αν οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνευτούν με τη μακροσκοπική θεωρία, τότε καταλήγει κανείς στα συμπεράσματα του πίνακα 4.7-1. Η εκδήλωση των αλμάτων δυναμικού (ή των κρούσεων φορτίου) κατά τη θεωρία αυτή ερμηνεύονται από το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (σχήματα 4-9 έως 4-11).



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

H.T. : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

G : Γεννήτρια κρουστικών τάσεων.

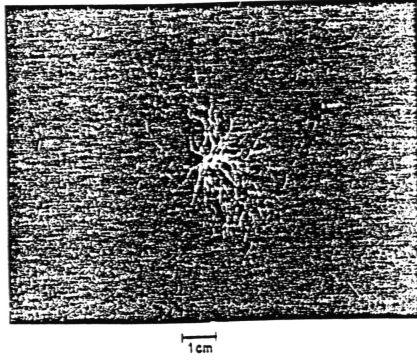
$C_H$  και  $C_N$  : Καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης.

1 : Ηλεκτρόδιο ακίδα, 2 : Μονωτικό λάδι, 3 : Δοκίμιο (πάχος 2mm),

4 : Ηλεκτρόδιο πλάκα.

$C_m$  : πυκνωτής μέτρησης των αλμάτων δυναμικού

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



**Σχήμα 5-6 :** Εικόνα επιφανειακών διαταραχών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs

$$\hat{U}_κ : 85kV, E : 0,8MV/cm.$$

**β) Κβαντομηχανική ερμηνεία :**

Κατά τη θεωρία αυτή ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και όχι ο διαχωρισμός των τελευταίων σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης  $C_m$  ανά άλμα δυναμικού, με την σχέση  $W = 0,5q_e \Delta u$ , όπου :  $q_e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου και  $\Delta u$  το άλμα δυναμικού). Η σχέση αυτή ισχύει για μηδενική τιμή της ωμικής αντίστασης  $R$  από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης. Για  $R > 0$  θα πρέπει να πάρει κανείς υπ' όψη το μεταβατικό φαινόμενο με σταθερά χρόνου :

$$\tau = R \cdot C_m \tag{5.1-1}$$

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από την σχέση :

$$W = (0,5\Delta u) / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \text{ σε eV} \tag{5.1-2}$$

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

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

$$f = 1 / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \tag{5.1-3}$$

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

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

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

$$W = 0,5 \cdot f \cdot \Delta u \text{ σε eV} \tag{5.1-4}$$

όπου  $\Delta u$  σε V.

Στον πίνακα 5-2 έχουν υπολογιστεί με την παραπάνω σχέση οι τιμές της ενέργειας  $W$  για το πρώτο άλμα δυναμικού των παλμογραφημάτων των σχημάτων 5-1, 5-2 και 5-3. Από τις τιμές αυτές φαίνεται, ότι η

γήρανση των στερεών μονωτικών σχετίζεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που μπορεί να περιλαμβάνει υπεριώδεις ακτίνες και υπέρυθρες ακτίνες. Έτσι :

- 1) από τις τιμές της ενέργειας κατά τον πίνακα 5-2,
- 2) τη φωτεινή ακτινοβολία, που παρατηρείται στην πράξη σε αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων (και η οποία με υπολογισμό της ενέργειας  $W$  εύκολα διαπιστώνεται σε άλματα δυναμικού του παλμογραφήματος του σχήματος 5-1), και
- 3) τις ραδιοφωνικές παρεμβολές και τα ακουστικά κύματα, που συχνά προκαλούν οι μερικές εκκενώσεις, μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών σχετίζεται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται σε αυτά, το φάσμα της οποίας είναι : από ακουστικά κύματα μέχρι και υπεριώδεις ακτίνες.

Μορφή τάσης	Σχήμα	$W$ σε eV
1,2/50 $\mu$ s	6.3.1-1	$\cong 10,50$
10/200 $\mu$ s	6.3.1-2	$\cong 1,60$
250/2500 $\mu$ s	6.3.1-4	$\cong 0,16$

**Πίνακας 5-2 :** Τιμές ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πρώτο άλμα δυναμικού.

## 5.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση

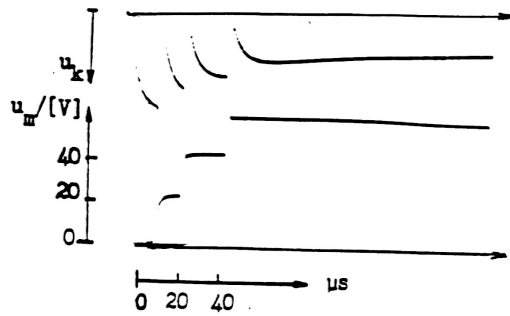
Η διάτρηση έχει διερευνηθεί με καταπονήσεις στερεών μονωτικών με σχετική διηλεκτρική σταθερά περίπου 2,5÷4,5 (διάφορα χαρτιά μετασχηματιστών, πεπιεσμένο χαρτί, βακελίτης, pertinax, πανίτης, κλπ). Οι τάσεις δοκιμής, που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κβαντομηχανική ερμηνεία του μηχανισμού διάτρησης, είναι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

Παρακάτω εξετάζεται ένα παράδειγμα με κρουστικές τάσεις, ώστε να υπάρχουν συγκρίσιμες μετρήσεις με εκείνες της γήρανσης κατά την προηγούμενη παράγραφο. Για το λόγο αυτό, οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με τη διάταξη πειραματισμού του σχήματος 5-5. Τυπικά παλμογραφήματα του φαινομένου δίνονται στα σχήματα 5-9 και 5-10. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων ( $W$ ) μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση 5-2, όπως και κατά την γήρανση. Έτσι, για το πρώτο π.χ. άλμα δυναμικού και  $R=0,5\Omega$  (που ήταν η αντίσταση από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης) η τιμή  $W$  υπολογίζεται ότι είναι περίπου 105eV. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε, ότι η **διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων X**.

Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου παρατηρεί κανείς την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Ο αριθμός των κρούσεων περιορίζεται ως προς εκείνον κατά τη γήρανση, αλλά η τιμή του ρεύματος αυξάνει σημαντικά (συγκρίνατε με το παλμογράφημα του σχήματος 5-3). Μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι ο μηχανισμός της διάτρησης έχει τα ίδια γνωρίσματα με εκείνον της γήρανσης.

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





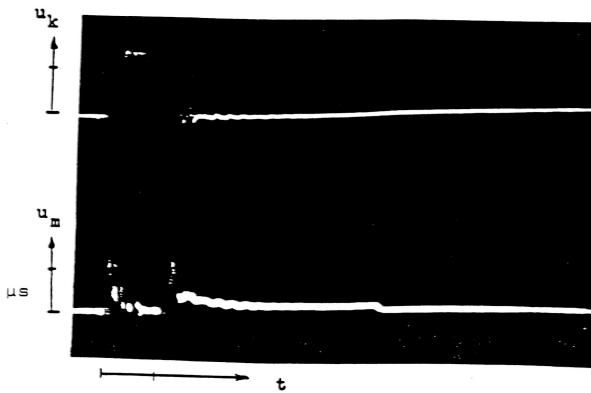
**Σχήμα 5-9 :** Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου.

Κρουστική τάση : 1,2/50μs.

R της ακίδας ≈1mm.

$\hat{U}_κ$  : 85kV.

E : 1,2 MV/cm.



**Σχήμα 5-10 :** Τυπικό παλμογράφημα κρούσεων φορτίου κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση.

R της ακίδας ≈1 mm.

Μορφή τάσης 1,2/50μs.

$\hat{U}_κ = 85kV$

E=1,2MV/cm

$R_m = 150\Omega$

$u_m : 20V/div$

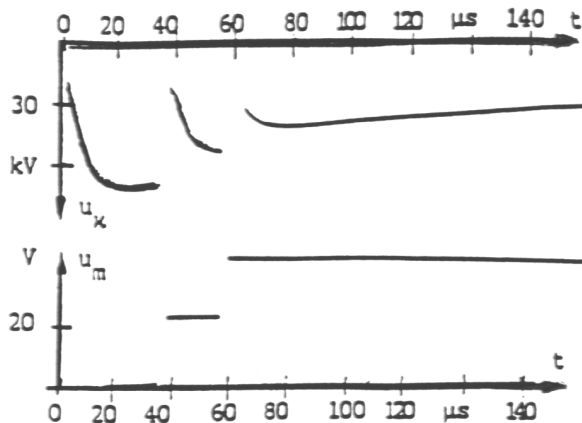
$t : 2 \mu s/div$

### 5.3 Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση

Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι ισχύει ότι και προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης. Παρακάτω εξετάζεται (για λόγους σύγκρισης με τη διάτρηση) ένα τυπικό παράδειγμα επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών πάχους 2mm σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (βλέπετε σχήμα 5-5). Δεν θα γίνει αναφορά στα παλμογράφημα της γήρανσης, γιατί είναι προφανές ότι τα φαινόμενα δεν εξαρτώνται, με το αν θα ακολουθήσει η διάτρηση ή η επιφανειακή διάσπαση.

Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος 5-11 υπολογίζεται με την σχέση 5.1-2 η ενέργεια  $W$  των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η ενέργεια αυτή για το πρώτο και το τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα : 122eV και 96,5eV. Όπως φαίνεται η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτίνων Χ.

Αν τελικά συμβαίνει εκπομπή ακτίνων Χ κατά τη διάτρηση και την επιφανειακή διάσπαση, τότε θα πρέπει να προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και να απεικονίζονται αντικείμενα (όπως π.χ. συμβαίνει με τις λυχνίες των ακτινολογικών μηχανημάτων). Το ίδιο θα πρέπει να ισχύει και κατά την εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας (τουλάχιστον σε τιμές πεδίου πλησίον της διάσπασης, όπου αυτή να είναι αρκετά eV). Από πειράματα που έγιναν για τον σκοπό αυτό, φαίνεται ότι προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και απεικονίζονται αντικείμενα, καθώς και βιολογικοί οργανισμοί. Στα σχήματα 5-12, 5-13 και 5-14 δίνονται ορισμένες από τις φωτογραφίες αυτές. Επίσης, στα σχήματα 5-14 και 5-15 δίνονται φωτογραφίες επιφανειακών δενδριτών, που αφορούν αντίστοιχα τη γήρανση και τη διάσπαση. Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2mm και διαμέτρου 150mm), υπό κρουστικές τάσης 1,2/50μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. Οι φωτογραφίες στο σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, καθώς και εκείνες της διάτρησης (στον αέρα ή στο λάδι), οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα.



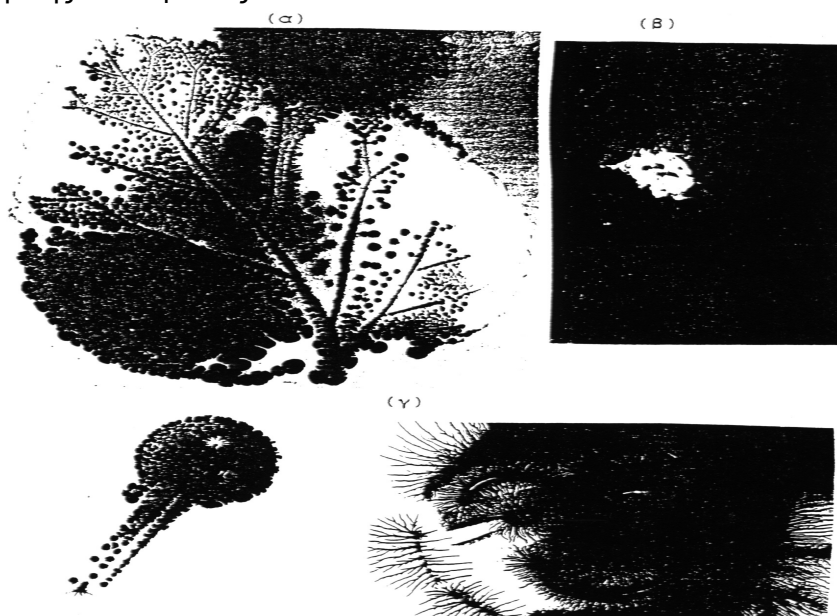
**Σχήμα 5-11 :** Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pertinax (πάχους 2mm και με διάμετρο της επιφάνειάς του 150mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου.

Ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης : "ακίδα-πλάκα".

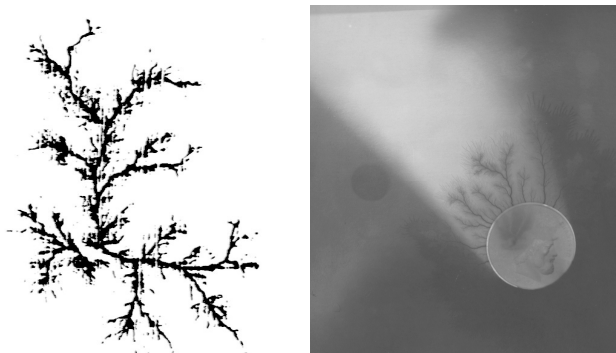


**Σχήμα 5-12 :** Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την καταπόνηση πολυμερούς στερεού μονωτικού πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs. (φωτογράφιση ενός φύλλου δένδρου)

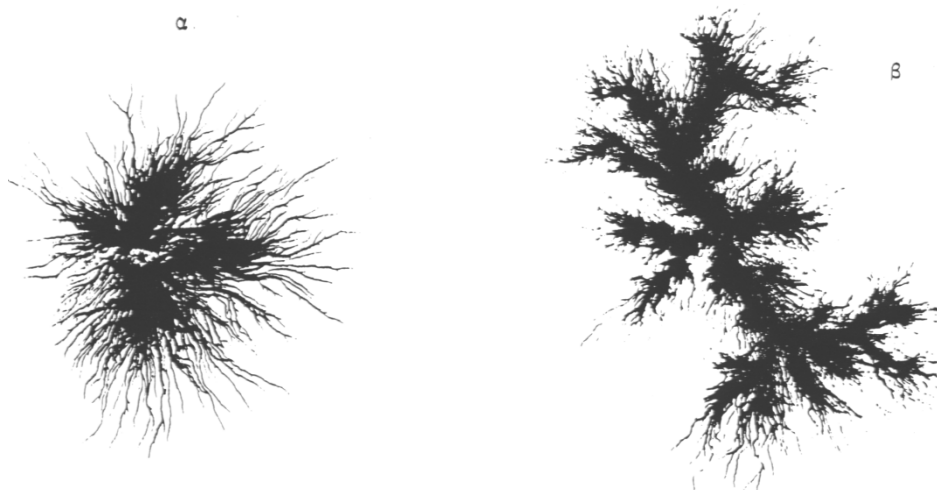
Σχετικά με την απεικόνιση των δενδριτών στο φωτογραφικό φιλμ μπορούμε να υποθέσουμε, ότι ο δενδρίτης στη φωτογραφία του σχήματος 5-14 σχετίζεται με την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ εκείνος του σχήματος 5-15 με υπεριώδεις ακτίνες και ακτίνες Χ. Κατά τον τρόπο αυτό δίνεται μία φυσική ερμηνεία για τις γνωστές εικόνες Lichtenberg. Μπορεί επίσης να συμπεράνει κανείς, ότι ο φωτεινός δενδρίτης και ο σχετός διάσπασης, που παρατηρούνται κατά την ηλεκτρική καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού, αφορούν το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.



**Σχήμα 5-13 :** Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερούς στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.  
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.  
 α) Φωτογράφιση φύλλου δένδρου  
 β) Φωτογραφία βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι).  
 γ) Φωτογραφία μεταλλικών αντικειμένων.



**Σχήμα 5-14 :** Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερών



στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα).

**Σχήμα 5-15 :** Φωτογραφίες δένδριτών κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα).

α) Δένδριτης σε τιμές πεδίου πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση).  
β) Δένδριτης κατά την επιφανειακή διάσπαση.

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

Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 5 φαίνεται, ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα υλικά αυτά κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους. Οι πληροφορίες αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεώρηση των παραπάνω φαινομένων. Πλεονέκτημα όμως της μακροσκοπικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών μονωτικών φαίνεται ότι είναι ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης, που (όπως θα δούμε ακολούθως στο παράδειγμα 2) ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη. Ο διαχωρισμός αυτός των μερικών εκκενώσεων δεν μπορεί να δοθεί από την θεωρία του ιονισμού με κρούσεις, γιατί ο συντελεστής  $A$  στην σχέση 5.3-1 αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του και η τιμή της

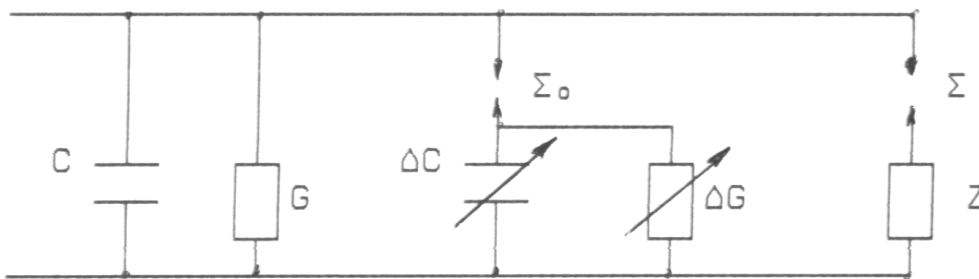
θα πρέπει να εξαρτάται από την διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Αν π.χ. πραγματοποιήσει κανείς τα πειράματα της παραγράφου 5.3 με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs (ή με 10/200μs) και προσεγγίσει ακολούθως τις πειραματικές χαρακτηριστικές  $Q=f(\hat{U}_κ)$  με την σχέση 5.3-1, θα διαπιστώσει ότι ο συντελεστής  $A$  έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Η διαφορετική αυτή τιμή του συντελεστή  $A$  (κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, ή 10/200μs) 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, δεν μπορεί να καταλήξει κανείς, μέσω της κβαντομηχανικής θεώρησης των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, στον διαχωρισμό των μερικών εκκενώσεων στα παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού.

Από το 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 τον σκοπό αυτό, δίνεται στο σχήμα 8-1. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant-Philipoff (σχήμα 4-9), 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  $E_0$  (κατά την παράγραφο 5.3 περίπου 0,2MV/cm), τότε, τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 5-16 ως ακολούθως :

- 1) Για  $E < E_0$  : Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δεν διασπώνται σπινθηριστές  $\Sigma_0$  και  $\Sigma$ ).
- 2) Για  $E > E_0$ : Εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (διασπάται ο  $\Sigma_0$ ) και η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διέπεται από την σχέση :  $\sigma = \sigma_0 \exp(-W / kT)$ .
- 3) Για  $E \gg E_0$ : Εμφανίζεται αρνητική διαφορική αντίσταση και εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις. Δεν ισχύει η σχέση  $\sigma = \sigma_0 \exp(-W / kT)$ , αλλά η σχέση :

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

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



**Σχήμα 5-16** :Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάτρηση.

$C$  : ιδανική χωρητικότητα

$G$  : ιδανική αγωγιμότητα

$\Delta C$  : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

$\Delta G$  : αύξηση της αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

$Z$  : αρνητική διαφορική αντίσταση

$\Sigma_0$  : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων

$\Sigma$  : σπινθηριστής εκδήλωσης της  $Z$

## Παραδείγματα

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένα παραδείγματα των πρακτικών εφαρμογών, από τα οποία φαίνεται η χρησιμότητα της θεωρίας, που προαναφέρθηκε.

Παράδειγμα 1 : Η θερμική καταπόνηση των μονώσεων των καλωδίων κατά την ομαδοποιημένη εγκατάστασή τους, όταν δεν εφαρμόζονται οι σχετικοί κανονισμοί :

Η ομαδοποιημένη εγκατάσταση των καλωδίων (στο έδαφος ή στον αέρα) θα πρέπει να γίνεται με μεθόδους, που να διευκολύνουν την απαγωγή της θερμότητας. Σε διαφορετική περίπτωση θα αυξηθεί η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα των διαφόρων μονωτικών υλικών ως ακολούθως :

α) για  $E < E_0$  :  $\sigma_1 = \sigma_0 \exp(-W / kT)$

β) για  $E > E_0$  :  $\sigma_2 \gg \sigma_1$ , γιατί ισχύει  $Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2) / E_0^2}$

Η πρώτη περίπτωση αφορά κυρίως τα καλώδια χαμηλής τάσης. Για τη μείωση της θερμικής καταπόνησης των καλωδίων θα πρέπει να εφαρμόζονται οι προδιαγραφές ομαδοποίησής τους (π.χ.: VDE 0100, BS 6004, κλπ).

Παράδειγμα 2 : Στο εργαστήριο δοκιμών ενός εργοστασίου πινάκων μέσης τάσης διαπιστώθηκε σε έναν πίνακα διακόπτη φορτίου η επιτυχής διεξαγωγή των διηλεκτρικών δοκιμών υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50μs. Σε επόμενη παραγγελία του ίδιου τύπου πίνακα η παραπάνω δοκιμή μεταξύ φάσεων προς γη ήταν ανεπιτυχής (ένα παλμογράφημα έδειξε αποκοπή στην ουρά της κρουστικής τάσης). Σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών, είναι πολύ πιθανή η παρακάτω ερμηνεία για την αναζήτηση της βλάβης :

Τα αποτελέσματα των ερευνών για την χρονική εκδήλωση των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της κρουστικής τάσης, έχουν δείξει ότι : οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται κατά την διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης, ενώ οι εξωτερικές κατά τη διάρκεια της ουράς της. Γι' αυτό η αποκοπή στην ουρά της κρουστικής τάσης είναι πολύ πιθανό να σχετίζεται με κατασκευαστικές ατέλειες εκτός του όγκου των μονωτικών υλικών. Υπό την προϋπόθεση ότι δεν συντρέχουν λόγοι ξένων επικαθίσεων στα μονωτικά υλικά, η βλάβη θα πρέπει να οφείλεται σε κατασκευαστική ατέλεια, που προκαλεί μείωση των αποστάσεων μόνωσης στον αέρα. Σε μία τυποποιημένη κατασκευή των μεταλλικών μερών του πίνακα, η μείωση των αποστάσεων μόνωσης θα μπορούσε π.χ. να οφείλεται σε κάποιον λυόμενο σύνδεσμο μεταξύ των ζυγών, ο οποίος προκαλεί μείωση της απόστασης μόνωσης προς γη.

Παράδειγμα 3 : Σε μία ρυπασμένη ατμόσφαιρα το μήκος ερπυσμού των μονωτήρων είναι, λόγω του αυξημένου ρόλου των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, μεγαλύτερο από ότι συνήθως.

## 6. Συμπεράσματα και σχόλια

Η συγκεκριμένη εργασία, όπως φάνηκε από τα παραπάνω, έχει σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη μελέτη των ιδιοτήτων του υλικού  $\text{peritax}$  ως μονωτικό μέσο και τη καταγραφή της συμπεριφοράς του στις δοκιμές που το υποβάλλαμε. Από τις πειραματικές μετρήσεις δημιουργήθηκαν πίνακες, και από αυτούς κατασκευάστηκαν γραφικές παραστάσεις από όπου εξάγονται και τα συμπεράσματα μας.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι ακριβής μελέτη για την συμπεριφορά του υλικού δεν μπορεί να γίνει καθώς η διάταξη μας και το υλικό επηρεάζονταν σημαντικά από περιβαλλοντικούς παράγοντες οι οποίοι δεν είναι εφικτό να συνυπολογιστούν. Τέτοιοι είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η υγρασία, η σκόνη. Επιπλέον θα πρέπει να αναφερθούμε και σε τυχόντα απρόβλεπτα σφάλματα στην εκτέλεση των μετρήσεων από τις ηλεκτρονικές συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν. Για παράδειγμα, ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε, παρόλο που είναι ψηφιακός μπορεί να κάνει σφάλματα προερχόμενα από παράσιτα και διάφορες συνδέσεις καλωδίων π.χ ομοαξονικά, probe, που δημιουργούν πολλά προβλήματα στις μετρήσεις.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας, είναι τα χαρακτηριστικά του υλικού το οποίο υποβάλλεται στο πείραμα. Μετά από διαδοχικές εφαρμογές κρουστικών τάσεων σε ένα υλικό το τελευταίο είναι πιθανό να χάσει μεγάλο μέρος από τις ιδιότητες του με αποτέλεσμα να εμφανίσει διαφορετική συμπεριφορά από την αναμενόμενη κατά την διάρκεια του πειράματος.

Σε ότι έχει να κάνει με τους 4 βασικούς παράγοντες γήρανσης και διάτρησης, που έχουν αναφερθεί (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb, θερμοκρασία περιβάλλοντος και μερικές εκκενώσεις), πρέπει να μην συμπεριλάβουμε τη θερμοκρασία, γιατί η θερμοκρασία ήταν σχεδόν σταθερή σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων και ίση με  $20^{\circ}\text{C}$ . Επίσης δεν επιδρούν οι απώλειες Joule, διότι η χρονική διάρκεια της διάσπασης είναι μικρή και δεν προλαβαίνει να υπάρξει θερμική καταπόνηση. Επομένως οι παράγοντες με βάση τους οποίους θα ερμηνεύσουμε τις γραφικές παραστάσεις είναι οι δυνάμεις Coulomb που σχετίζονται με την μείωση του φορτίου και οι ηλεκτρικές εκκενώσεις που είναι υπεύθυνες για την αύξηση του φορτίου.

Τα δύο αυτά σημεία έρχονται να συμπληρώσουν οι δύο θεωρίες, η μακροσκοπική και η κβαντομηχανική.

Με την κβαντική θεωρία εξηγείται η αύξηση των φορτίων. Σύμφωνα με αυτήν η αύξηση της τάσης δημιουργεί πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ενισχύεται ο ιονισμός με κρούσεις. Οι κρούσεις αυτές αυξάνουν τις ταχύτητες των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Με τον ίδιο τρόπο συνεπώς θα αυξάνονται και όλα τα μεγέθη, τα οποία είναι ανάλογα με τα μεγέθη των φορτίων.

Συνδυάζοντας τις δύο θεωρίες γίνεται κατανοητό το πώς η μείωση των φορτίων συνεπάγεται και την αύξηση των δυνάμεων Coulomb.

Έπειτα, εφόσον οι μεταβολές στις καμπύλες οφείλονται σε κάποιον από τους δύο προαναφερθέντες παράγοντες, σημαίνει πως τα άλματα σε αυτές, φανερώνουν αλλαγές στη δομή του υλικού. Αυτές οι αλλαγές της δομής του υλικού π.χ γήρανση είναι ο λόγος που μπορεί να παρουσιαστεί διαφορά από μέτρηση σε μέτρηση.

Πρωτό αναφερθούμε στις γραφικές παραστάσεις που παρατέθηκαν ανωτέρω, αξίζει να αναφερθεί ότι σε αρκετές γραφικές παραστάσεις, η προσέγγιση ίσως αποδιδόταν καλύτερα με πολυωνυμική ή άλλη συνάρτηση. Όμως βάσει βιβλιογραφίας, τα φαινόμενα πριν και κατά την διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών αποδίδονται κατά κύριο λόγο στον ιονισμό με κρούσεις. Έτσι επιλέχθηκε η εκθετική προσέγγιση των χαρακτηριστικών του φορτίου συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης (ή του ηλεκτρικού πεδίου). Τυχόν διακυμάνσεις γύρω από την προτιμητέα εκθετική θεωρητική μορφή οφείλονται στην στατιστικότητα του φαινομένου επειδή το υλικό είναι ανομοιογενές.

Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η ίδια γενική εκθετική μορφή για όλα τα μεγέθη ούτως ώστε η διαφορετικότητα των μεγεθών να αποτυπώνεται μέσω της διαφορετικής τιμής των συντελεστών της προσεγγιστικής εκθετικής συνάρτησης.

Για τις ηλεκτρικές εκκενώσεις παρατηρείται πως όταν αυξάνεται η επιβαλλόμενη τάση, αυτές γίνονται πιο ευδιάκριτες στις γραφικές παραστάσεις λόγω του ότι η ενέργεια  $\Delta W$  είναι μεγαλύτερη. Αυξανόμενου λοιπόν

του  $\Delta W$ , σημειώνεται και αύξηση της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων που εγκαταλείπουν το υλικό και προσκρούουν σε μόρια αέρα του περιβάλλοντος. Στις χαμηλότερες τάσεις η ενέργεια των ηλεκτρονίων αυτών (eV) δεν αντιστοιχεί σε οπτικό φάσμα πράγμα που συμβαίνει κατά τη διάσπαση του υλικού όπου η ενέργεια είναι πολύ μεγαλύτερη και κατά το φαινόμενο παρατηρείται η λάμψη εκείνη που το χαρακτηρίζει.

Ο χρόνος διάσπασης είναι μικρότερος υπό αρνητική πολικότητα απ'ότι είναι υπό θετική πολικότητα.

Η τάση διάσπασης δεν εξαρτάται μόνο από το μήκος του διακένου αλλά και από τη μορφή του καθώς και από την πολικότητα και την κυματομορφή της τάσεως.

Η επίδραση του μήκους του διακένου είναι μεγαλύτερη υπό αρνητική πολικότητα απ'ότι είναι υπό θετική πολικότητα.

Από τις καμπύλες  $\Delta Q = f(U_{ev}, E_{ev})$  και  $Q_2 = f(U_{ev}, E_{ev})$  μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι παρουσιάζουν μια εκθετική αύξηση. Επίσης στο δοκίμιο πάχους 1mm παρουσιάζονται μεγάλα άλματα δυναμικού τα οποία προέρχονται από τις μερικές εκκενώσεις που λαμβάνουν χώρα. Αντίθετα στο δοκίμιο πάχους 2 mm τα άλματα δυναμικού δεν είναι τόσο έντονα. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι το δοκίμιο των 2mm έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από το δοκίμιο πάχους 1mm.