



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων
και Συστημάτων Αποφάσεων

**« ΔΙΑΡΡΟΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ
ΣΤΟ ΠΕΠΙΕΣΜΕΝΟ ΧΑΡΤΙ ΕΝΤΟΣ ΕΛΑΙΟΥ
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΣΕ ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΠΕΔΙΟ ΥΠΟ
ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ $10/200 \mu\text{s}$ »**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ ΓΙΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων: Κ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών διατάξεων
και Συστημάτων Αποφάσεων

**« ΔΙΑΡΡΟΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ
ΣΤΟ ΠΕΠΙΕΣΜΕΝΟ ΧΑΡΤΙ ΕΝΤΟΣ ΕΛΑΙΟΥ
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΣΕ ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΠΕΔΙΟ ΥΠΟ
ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ 10/200 μs »**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ ΓΙΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων : Κ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή

Π.Δ. Μπούρκας – Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ν. Θεοδώρου – Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. Καραγιαννόπουλος – Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Παναγιωτόπουλος Γιάννης

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

Copyright © Παναγιωτόπουλος Γιάννης 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 της προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Πρόλογος

Σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι η ανάλυση των επιπτώσεων των μερικών εκκενώσεων σε βιομηχανικά μονωτικά υλικά υπό κρουστικές τάσεις. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η διαρροή ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων σε πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ και $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστικές τάσεις $\pm 10/200\mu\text{s}$.

Αρχικά παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο – περιγράφονται τα στερεά και υγρά μονωτικά που αποτελούν το αντικείμενο έρευνας της διπλωματικής και αναλύεται η συμπεριφορά τους κατά την επιβολή υψηλής τάσης. Στη συνέχεια γίνεται η στατιστική μελέτη της γήρανσης του μονωτικού χαρτιού υπό κρουστικές τάσεις διάφορων μορφών – δίνονται πίνακες και χαρακτηριστικές συναρτήσεις των αντίστοιχων μεγεθών. Τέλος παρουσιάζονται οι προσεγγιστικοί τύποι που εξάγονται από τις χαρακτηριστικές αυτές και καταλήγουμε στα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από αυτή τη διπλωματική.

Τα στοιχεία για το θεωρητικό σκέλος της εργασίας αντλήθηκαν κυρίως από το βιβλίο του καθηγητή Π.Δ. Μπούρκα << Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και Υλικά >>. Άλλες πηγές αναφέρονται στη βιβλιογραφία στο τέλος της διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	7
1.1. Καθορισμός Εννοιών για την Ηλεκτρική Αντοχή των Μονώσεων	7
1.2. Βασικά Κριτήρια Αξιολόγησης των Μονωτικών Υλικών	8
1.3. Τα υγρά μονωτικά	20
1.3.1. Βασικά χαρακτηριστικά των υγρών μονωτικών	20
1.3.2. Το μονωτικό λάδι	20
1.3.3. Τεχνικά χαρακτηριστικά των υγρών μονωτικών υλικών	22
1.3.4. Συντήρηση – επεξεργασία μονωτικού λαδιού	24
1.3.5. Μέσα ελέγχου της μονωτική ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών	27
1.4. Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών	28
1.4.1. Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών	29
1.4.1.1. Η θερμική διάτρηση	30
1.4.1.2. Η ηλεκτρική διάτρηση	30
1.4.1.3. Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων	30
1.4.1.4. Η θερμοχημική διάτρηση	31
1.4.1.5. Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης	32
1.4.1.6. Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων	34
1.4.2. Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση	41
1.4.3. Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών	41
1.4.3.1. Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών	42
1.4.3.2. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση	46
1.4.3.3. Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση	47

1.4.3.4. Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών	51
2. Σκοπός της εργασίας	54
3. Στατιστική μελέτη της γήρανσης πεπιεσμένου χαρτιού εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +10/200μs και -200μs	55
3.1. Συγκεντρωτικοί πίνακες και σχεδιαγράμματα για δείγμα πάχους d=1mm υπό κρουστική τάση +10/200μs	57
3.2. Συγκεντρωτικοί πίνακες και σχεδιαγράμματα για δείγμα πάχους d=1mm υπό κρουστική τάση -10/200μs	72
3.3. Συγκεντρωτικοί πίνακες και σχεδιαγράμματα για δείγμα πάχους d=2mm υπό κρουστική τάση +10/200μs	87
3.4. Συγκεντρωτικοί πίνακες και σχεδιαγράμματα για δείγμα πάχους d=2mm υπό κρουστική τάση -10/200μs	102
4. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα	117
Βιβλιογραφία	119

1. Εισαγωγή

1.1 Καθορισμός Εννοιών για την Ηλεκτρική Αντοχή των Μονώσεων

Ως μονωτικά υλικά ή μονωτές χαρακτηρίζονται τα υλικά που πρακτικά έχουν μηδενική ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σχετικά ασθενή πεδία συνεχούς ρεύματος. Οι μονωτές είναι σώματα μοριακής, ιοντικής ή ομοιοπολικής σύνθεσης. Σε κάθε περίπτωση τα σώματα αυτά δεν διαθέτουν αξιόλογο αριθμό ελεύθερων φορέων ώστε να εκδηλώσουν ουσιαστική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Πάντως είναι πρακτικά αναπόφευκτη σε κάθε μονωτικό υλικό η ύπαρξη κάποιων ανωμαλιών (προσμίξεις, ξένες επικαθήσεις στην επιφάνειά του, διασπάσεις κτ) που να οδηγούν στη μείωση της μονωτικής του ικανότητας.

Σκοπός των μονώσεων σε μια ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των ρευματοφόρων μερών και των ρευματοφόρων μερών με τη γη, κατά τρόπο ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό. Η ανάγκη για την εκπλήρωση του σκοπού αυτού και η μελέτη των φαινομένων που προκαλούν ολική ή μερική αναίρεση του ηλεκτροστατικού πεδίου σε μια κατασκευή οδήγησαν στον καθορισμό ορισμένων εννοιών. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε μια εξειδικευμένη περιοχή της ηλεκτρολογίας που αφορά τη διηλεκτρική αντοχή των μονώσεων.

Ο όρος διάσπαση αναφέρεται στην αγωγή σύνδεση δύο μονωμένων μεταξύ τους ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση επί της επιφάνειας ενός στερεού μονωτικού ονομάζεται επιφανειακή διάσπαση. Η διάσπαση στο περιβάλλον μέσο ενός στερεού μονωτικού, λόγω μείωσης της απόστασης μόνωσης του από αγωγίμες ξένες επικαθήσεις στην επιφάνειά του καλείται υπερπήδηση ενώ η διάσπαση μέσω του όγκου του διάτρηση.

Στις διάφορες πρακτικές εφαρμογές υψηλών τάσεων συναντώνται πολύ συχνά χωρικά φορτία μεταξύ των ηλεκτροδίων. Σε μια δεδομένη διάταξη δύο ηλεκτροδίων τα χωρικά φορτία συγκεντρώνονται προ του ηλεκτροδίου με την αντίθετη προς αυτά πολικότητα και σχηματίζουν έτσι ένα νέφος χωρικών φορτίων. Το πεδίο είναι χωρικό όταν τα φορτία του νέφους αυτού είναι αμετακίνητα. Μέχρι μια τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (ή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης) υπάρχει μια κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των εξασκουμένων δυνάμεων Coulomb ώστε το πεδίο να παραμένει χωρικό. Όταν ξεπεραστεί η τιμή αυτή του πεδίου καταστρέφεται η κατάσταση ισορροπίας (χωρίς να προκαλείται διάσπαση) με αποτέλεσμα να εκδηλώνονται περιορισμένης έκτασης ηλεκτρικά φαινόμενα που ονομάζονται μερικές εκκενώσεις. Οι

εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού χαρακτηρίζονται ως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις ενώ αυτές τις επιφάνειες ως εξωτερικές μερικές εκκενώσεις. Οι εκκενώσεις που παρατηρούνται στον αέρα γύρω από τους γυμνούς αγωγούς ονομάζονται στεμματοειδείς μερικές εκκενώσεις ή Κορονα. Η ενεργός τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων ονομάζεται τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων ή αρχική τάση ενώ η αντίστοιχη πεδιακή ένταση καλείται πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

1.2 Βασικά Κριτήρια Αξιολόγησης των Μονωτικών Υλικών

Η ανάγκη για την αξιόπιστη διαχρονική συμπεριφορά των διαφόρων μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή υψηλών τάσεων έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους, τα οποία αναφέρονται σε διάφορες ιδιότητες που πρέπει να έχουν πέραν των ηλεκτρικών, ανάλογα με την κατασκευή τους. Τέτοιες ιδιότητες είναι π.χ. η θερμική αντοχή κατά την απαγωγή των απωλειών Joule των αγωγών, η ψυκτική ικανότητα κατά τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου σε διακόπτες, η μηχανική αντοχή των μονωτήρων (π.χ. λόγω του βάρους της γραμμής), η αντοχή κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος, κ.λπ. Τα κριτήρια αυτά είναι:

1) Η διηλεκτρική αντοχή

Ως διηλεκτρική αντοχή (E_d) ενός μονωτικού υλικού εντός ομογενούς πεδίου έχει οριστεί το πηλίκο της ελάχιστης τιμής της τάσης για τη διάσπαση προς την απόσταση των ηλεκτροδίων.

$$E_d = U_{d \min} / d \quad (\text{συνήθως σε kV/cm}) \quad (1.2-1)$$

Η τιμή της E_d είναι ένα κριτήριο για την επιλογή των διάφορων μονωτικών σε μια κατασκευή. Οι τιμές που δίνονται στον παρακάτω πίνακα για τη διηλεκτρική αντοχή μερικών μονωτικών υλικών (σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50Hz και για μικρό χρόνο καταπόνησης) δείχνουν τη δυνατότητα αυτή.

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

Πίνακας 1.2-1 : E_d για καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας ορισμένων μονωτικών υλικών σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50 Hz.

2) Η σχετική διηλεκτρική σταθερά

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

Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών, που συνθέτουν μία μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών και μονώσεις καλωδίων), θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο, ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειές τους, για να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. Αυτός είναι και ο λόγος που ο συνδυασμός του χαρτιού με το μονωτικό λάδι βρίσκει πολλές εφαρμογές. Τα δύο αυτά μονωτικά έχουν την ίδια περίπου σχετική διηλεκτρική σταθερά (όπως φαίνεται στον πίνακα 1.2-2) με αποτέλεσμα να μην συμβαίνει ουσιαστικά διάθλαση των γραμμών στη διαχωριστική επιφάνειά τους. Επιπλέον το λάδι εμποτίζει το χαρτί, ώστε να αποκλείεται η ύπαρξη του αέρα, ο οποίος θα μπορούσε να δημιουργήσει προβλήματα (κυρίως βλάβες στην επιφάνεια του χαρτιού από μερικές εκκενώσεις ή διάσπαση σε φυσαλίδες του αέρα), λόγω της μικρής του διηλεκτρικής αντοχής (πίνακας 1.2-1).

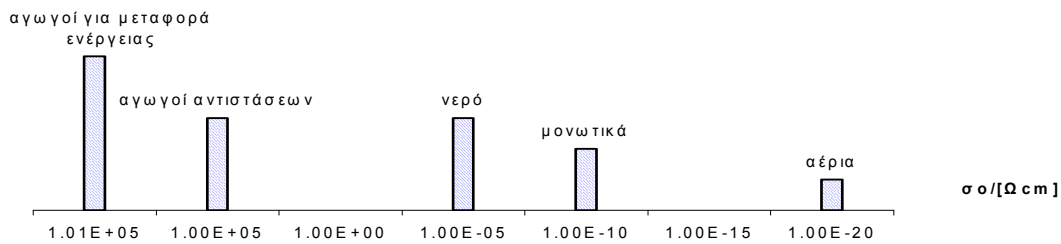
Υλικό	ϵ_r	Υλικό	ϵ_r
Αέρας (κανονικές συνθήκες)	1,000594	Πάγος	2 – 3
Αέρας (υγρός)	1,5	Pertinax	4,8 – 5,4
Αποσταγμένο νερό	8	PVC	4 – 6
Βακελίτης	3,5 – 8,2	Plexiglas	2,6 – 3,5
Condesa	4 – 8	Πορσελάνη	5,5 – 6
Glimmer	4 – 8	Presspann	2,5 – 3,4
Γυαλί	5 – 16	Ρητίνη	2,2
Θερμοπλαστικά συνθετικά	2 – 5	SF6	1,002049
Μονωτικό λάδι	2 – 2,5	Στεατίτης	6,4
Λάστιχο	2,8 – 6,5	Teflon	2,1
Mikanit	4 – 6	Χαλαζίας	3 – 7
Εύλο	2,5 – 6,5	Χαρτί	1,8 – 2,6

Πίνακας 1.2-2 : Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους $20^\circ C$.

3) Ο συντελεστής απωλειών

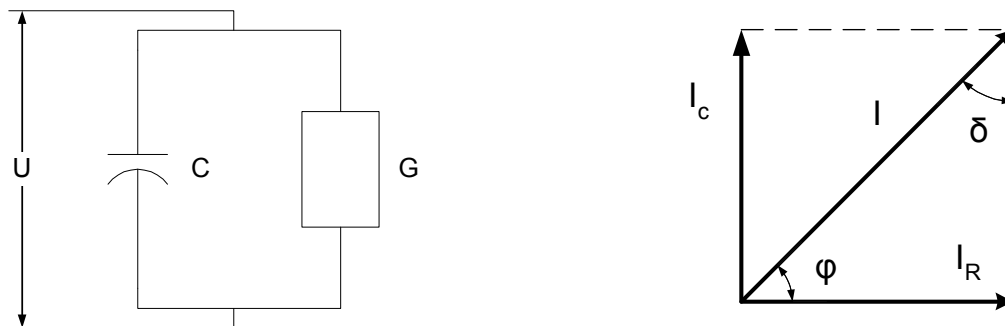
Σε μία μόνωση, που παρεμβάλλεται μεταξύ ηλεκτροδίων με σκοπό τη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, υπάρχουν πάντοτε ανεπιθύμητες απώλειες ενέργειας. Οι απώλειες οφείλονται στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής των δίπολων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης και στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά (σχήμα 1.2-1).

Ο μονωτής επομένως παρουσιάζει εκτός από το χωρητικό ρεύμα I_c κι ένα ρεύμα διαρροής I_r , το οποίο σταδιακά αυξάνει καθώς η αγωγιμότητα του μονωτή γίνεται μεγαλύτερη (π.χ. κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων ή τη θερμική καταπόνηση του μονωτή από τις απώλειες των αγωγών).



Σχήμα 1.2-1 : Τάξη μεγέθους της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διαφόρων κατηγοριών υλικών

Στο σχήμα 1.2-2 δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα της πυκνωτή C με ομοιογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητας του G).

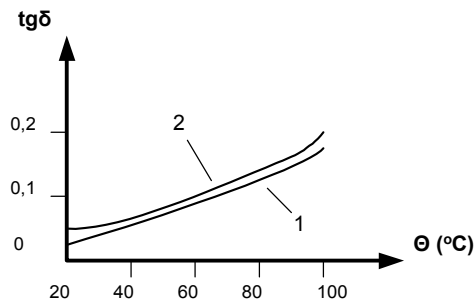


Σχήμα 1.2-2 : Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας G του διηλεκτρικού του

Ο συντελεστής απωλειών:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{G}{\omega C} \quad (1.2-2)$$

είναι κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μίας μονωτικής διάταξης γενικότερα), γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ο συντελεστής απωλειών αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 1.2-3 : $tg\delta$ ορισμένων διηλεκτρικών

1 : σκληρό χαρτί

2 : πορσελάνη

Οι απώλειες Joule (P_w) στην αγωγιμότητα G είναι:

$$P_w = I_r \cdot U = G \cdot U^2 = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg\delta = P_B \cdot tg\delta \quad (1.2-3)$$

όπου P_B η άεργος ισχύς (ισχύς στην χωρητικότητα C).

Αν υποθέσουμε, ότι ο παραπάνω πυκνωτής αποτελείται από δύο επίπεδες πλάκες διατομής A σε απόσταση d και ότι ο μεταξύ τους χώρος καταλαμβάνεται από ένα μονωτικό υλικό της χωρητικότητας C είναι:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (1.2-4)$$

Για την αγωγιμότητα G του παραπάνω πυκνωτή ισχύει η σχέση:

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (1.2-5)$$

όπου σ η ειδική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού. Για τις απώλειες του πυκνωτή αυτού κατά τις σχέσεις 1.2-3 και 1.2-4 :

$$P_w = U^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \cdot tg\delta \quad (1.2-6)$$

και πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με d :

$$P_w = (U/d)^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot tg\delta \cdot (A \cdot d) = (U/d)^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot tg\delta \cdot V \quad (1.2-7)$$

όπου V ο όγκος του διηλεκτρικού.

Αν θεωρήσουμε ότι ο στοιχειώδης όγκος dV μίας τυχαίας διάταξης ηλεκτροδίων είναι ένας μικρός πυκνωτής επιπέδων πλακών, τότε οι απώλειες Joule της διάταξης είναι:

$$P_w = \omega \cdot \varepsilon \cdot tg\delta \cdot \int (U/d)^2 dV = \omega \cdot \varepsilon \cdot tg\delta \cdot \int E^2 dV \quad (1.2-8)$$

Από την παραπάνω σχέση μπορούν εύκολα να υπολογιστούν οι απώλειες Joule μιας μόνωσης.

4) Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μία πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σχήμα 1.2-1), που εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή της πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία κ.λπ.). Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι επομένως ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των διηλεκτρικών, γιατί εκφράζει τους ελεύθερους φορείς.

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

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-w/kT} = \sigma_0 \cdot e^{\beta \cdot \theta} \quad (1.2-9)$$

όπου σ_0 : η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας

θ ως προς το περιβάλλον

σ : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

W : η ενέργεια ενεργοποίησης (ενέργεια για τη μεταφορά ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας)

k : η σταθερά Boltzmann ($1,37 \cdot 10^{-23} \text{Ws} / ^\circ K$)

T : η απόλυτη θερμοκρασία

β : ένας συντελεστής του υλικού

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

Για μεγαλύτερες τιμές της πεδιακής έντασης από προηγουμένως, η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας οφείλεται κυρίως στις μερικές

εκκενώσεις. Έχει διαπιστωθεί ότι στην περίπτωση αυτή συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις όπως στα ιονισμένα αέρια και ότι δεν ισχύει η σχέση 1.2-9.

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

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\beta \cdot \theta} / (1 - \delta E)^2 \quad (1.2-10)$$

όπου E : η πεδιακή ένταση στο τμήμα του υλικού που δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (το οποίο χαρακτηρίζεται ως υγιές τμήμα)

δ : ένας συντελεστής που εκφράζει τη συμμετοχή των ανομοιογενών του υλικού στη διαμόρφωση της τιμής σ . Για ομοιογενές υλικό $\delta=0$, διαφορετικά $\delta>0$.

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

5) Ο συντελεστής $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$

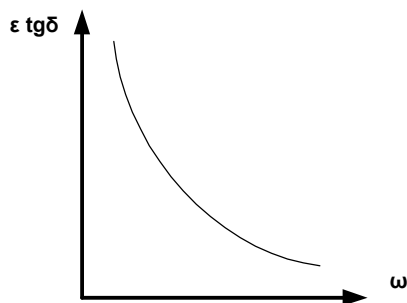
Από τις σχέσεις 1.2-2, 1.2-4 και 1.2-5 έχουμε για ένα πυκνωτή επίπεδων πλακών :

$$\varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \cdot \omega} \quad (1.2-11)$$

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

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.2-12)$$

Στο σχήμα 1.2-4 δίνεται η γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής κατά την παραπάνω σχέση. Το γινόμενο $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών (Πίνακας 1.2-3).



Σχήμα 1.2-4 : $\varepsilon \cdot \text{tg}\delta = f(\omega)$ για το ομοιογενές μονωτικό υλικό (Υποτίθεται ότι η τιμή σ είναι σταθερή με τη θερμοκρασία).

Υλικό	Πάχος μόνωσης (mm)	$\varepsilon \text{ tg}\delta$
Λάδι μετασχηματιστών		0,004 ... 0,0046
Πορσελάνη	0,5 ... 3	0,085 ... 0,16
Στεατίτης	0,5 ... 3	0,006 ... 0,02
Γυαλί	< 1	
Χαρτόνι	0,5 ... 1,5	0,03 ... 0,1
Glimmer	0,01 ... 0,1	0,009 ... 0,012

Πίνακας 1.2-3 : Τάξη μεγέθους των τιμών $\varepsilon \cdot \text{tg}\delta$ για ορισμένα διηλεκτρικά σε θερμοκρασία 20°C

Από τις σχέσεις 1.2-9 και 1.2-12 έπεται ότι ο συντελεστής $\varepsilon \cdot \text{tg}\delta$ του ομοιογενούς στερεού μονωτικού υλικού (ή γενικότερα του στερεού διηλεκτρικού όταν δεν εκδηλώνονται σε αυτό μερικές εκκενώσεις, π.χ. λόγω $U < U_a$) αυξάνει με τη θερμοκρασία :

$$\varepsilon \cdot \text{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega} \cdot e^{\beta\theta} \quad (1.2-13)$$

Αν θεωρήσουμε την τιμή ε ως σταθερή, τότε από την παραπάνω σχέση έπεται ότι η αύξηση της $\text{tg}\delta$ είναι εκθετική (σχήμα 1.2-3).

Για την αύξηση της τιμής $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ στην περιοχή του στερεού μονωτικού, όπου οι μερικές εκκενώσεις συντελούν στην αύξηση των απωλειών Joule, έχουμε αντίστοιχα (από τις σχέσεις 1.2-10 και 1.2-12) :

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\omega} \cdot \frac{e^{\beta \theta}}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.2-14)$$

6) Επιφανειακή αγωγιμότητα

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

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

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

7) Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων στις θέσεις, όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως π.χ. : ανομοιογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, ανεπιθύμητα

αιωρούμενα σωματίδια στο λάδι). Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντοτε κατά τη λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ. : απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπών, κ.λπ.). Επειδή γενικά ισχύει, ότι η θερμική ειδική αγωγιμότητα (λ) συμβαδίζει με την ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα, η τιμή λ είναι (όπως και η τιμή σ) ένα κριτήριο για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών. Στον πίνακα 1.2-4 δίνονται τιμές του συντελεστή λ για διάφορα διηλεκτρικά.

Υλικό	Πάχος μόνωσης (mm)	λ [$\frac{W \text{ cm}}{cm^2 \text{ grad}}$]
Πορσελάνη	0,5 ... 3	0,008 ... 0,015
Στεατίτης	0,5 ... 3	0,02 ... 0,026
Γυαλί	< 1	0,0075 ... 0,012
Ξύλο	< 3	0,001 ... 0,002
Χαρτόνι	0,3 ... 1,5	0,003
Σκληρό ελαστικό	< 3	0,001
Glimmer	< 0,5	0,003
Χαρτί στο λάδι	< 2	0,014 ... 0,03

Πίνακας 1.2-4 : Τιμές συντελεστή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας για ορισμένα μονωτικά υλικά.

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

Για την επίδραση της θερμοκρασίας στη διάρκεια ζωής των στερεών μονωτικών υλικών έχουν γίνει αρκετές έρευνες, που δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για τις πρακτικές εφαρμογές. Οι χαρακτηριστικές π.χ. κατά το σχήμα 1.2-5 δίνουν τη διάρκεια ζωής του χαρτιού, ανάλογα με τη θερμοκρασία θ . Από μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών αυτών (μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή) ισχύουν αντίστοιχα οι σχέσεις :

α) διάρκεια ζωής σε έτη:

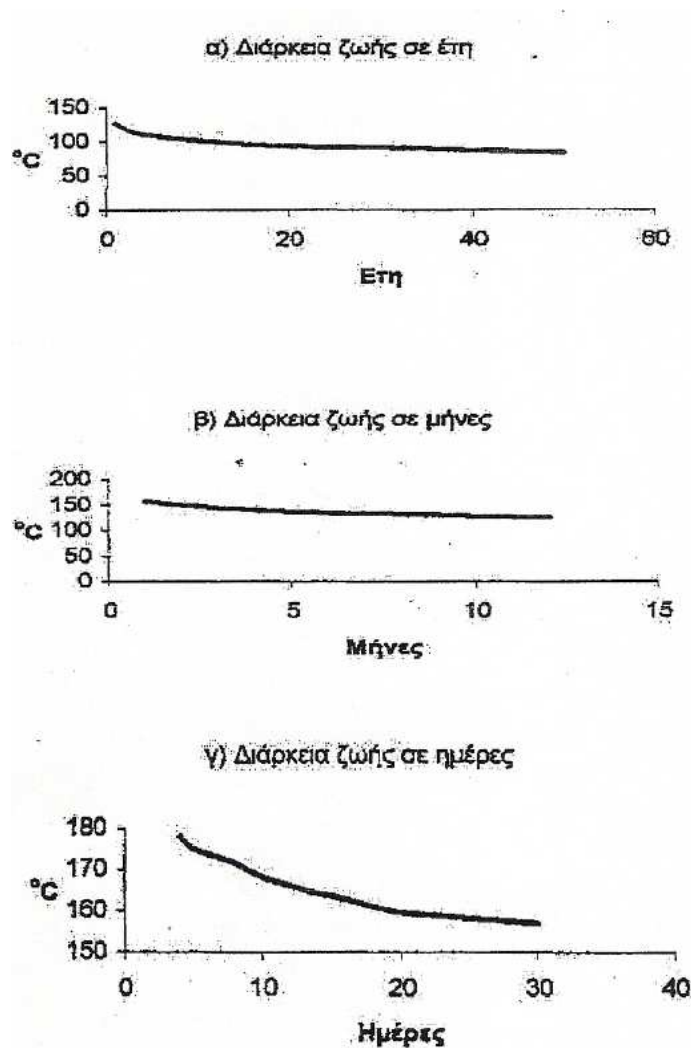
$$t = 1,15242 \cdot 10^2 \cdot e^{-0,00736482 \cdot \theta} \quad (1.2-15)$$

β) διάρκεια ζωής σε μήνες:

$$t = 1,154429 \cdot 10^2 \cdot e^{-0,01838 \cdot \theta} \quad (1.2-16)$$

γ) διάρκεια ζωής σε ημέρες:

$$t = 1,78848 \cdot 10^2 \cdot e^{-0,00483647 \cdot \theta} \quad (1.2-17)$$



Σχήμα 1.2-5 : Διάρκεια ζωής χαρτιού, ανάλογα με τη θερμοκρασία.

Έτσι επειδή το χαρτί μαζί με το λάδι αποτελούν κυρίως τη μόνωση ενός μετασχηματιστή υψηλής τάσης (μετασχηματιστής μεταφοράς, μετασχηματιστής διανομής και μετασχηματιστής μέτρησης), μπορεί κανείς να εκτιμήσει (μετά από μετρήσεις στα πλαίσια των προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης) το μέγιστο υπολειπόμενο χρόνο ζωής του. Αν θεωρηθεί η μεταβολή της τιμής ε πολύ μικρή

συγκριτικά προς εκείνη της μεταβολής της $tg\delta$ (λόγω επικαθίσεων αιωρούμενων σωματιδίων στο χαρτί, που δημιουργούνται ως ανεπιθύμητες προσμείξεις στο λάδι), τότε με μέτρηση της $tg\delta$ (μετά από αφύγρυνση και πλήρωση του μετασχηματιστή με λάδι, υπό συνθήκες κενού), από τις σχέσεις 1.2-9 και 1.2-13 έχουμε :

$$\theta = \frac{\ln(tg\delta / tg\delta^*)}{\beta} \quad (1.2.18)$$

Όπου $tg\delta^*$ ο αρχικός συντελεστής απωλειών (όταν ο μετασχηματιστής εγκαταστάθηκε στο δίκτυο για πρώτη φορά). Για τον συντελεστή β μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει : $\beta \approx 0,02$.

8) Η μηχανική αντοχή

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

Συχνά ενδιαφέρει η μηχανική σε πλήρεις κατασκευές, που περιλαμβάνουν στερεά μονωτικά, όταν αυτή ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από την εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης, όπως συμβαίνει κατά το βραχυκύκλωμα (π.χ. : πίνακες μέσης τάσης, μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστές μέτρησης στο δίκτυο υψηλών τάσεων, διακόπτες υψηλών τάσεων, κ.λπ.). Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να γίνουν αιτία καταστροφής της κατασκευής, όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή κατά το βραχυκύκλωμα. Η μόνωση π.χ. ενός διακόπτη υψηλής τάσης δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης, προς τη δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου, όταν η επιδίωξη αυτή δεν συνδυάζεται με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, που θα εξασφαλίζει την ικανότητα μόνωσης μέχρι να διακοπεί το βραχυκύκλωμα από το μέσο προστασίας του δικτύου.

1.3 Τα υγρά μονωτικά

1.3.1 Βασικά χαρακτηριστικά των υγρών μονωτικών

Τα υγρά μονωτικά υλικά έχουν αρκετά μεγάλη διηλεκτρική αντοχή συγκρινόμενα με τα αέρια σε ατμοσφαιρική πίεση, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από τον πίνακα 1.2-1 (η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι 21 kV/cm ενώ η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών κυμαίνεται από 60 έως 200 kV/cm). Η σημασία των υγρών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές είναι μεγάλη γιατί έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

α) Μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ($\approx 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ cal / cms} \cdot ^\circ \text{C}$), με αποτέλεσμα να διευκολύνουν την απαγωγή θερμότητας λόγω απωλειών Joule που δημιουργείται στους αγωγούς, στις επαφές διακοπών και στους σιδηροπυρήνες μετασχηματιστών. Ειδικότερα στους μετασχηματιστές εφαρμόζεται συνήθως η κυκλοφορία μονωτικού ορυκτέλαιου ώστε να επιτυγχάνεται ψύξη των τυλιγμάτων. Η θερμότητα και οι εκκενώσεις πάντως δημιουργούν αλλοιώσεις στο ορυκτέλαιο που συνοδεύονται από έκλυση αερίων, όπως το υδρογόνο και το μεθάνιο, τα οποία έχουν τη δύναμη να σχηματίσουν εκρηκτικά μίγματα με τον αέρα.

β) Ο συνδυασμός τους με στερεά μονωτικά δεν επιτρέπει την ύπαρξη αέρα, ο οποίος προκαλεί βλάβες στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών. Αυτό επιτυγχάνεται με πλήρωση του χώρου, που καταλαμβάνει το υγρό μονωτικό, υπό συνθήκες κενού σε ορισμένη θερμοκρασία. Τυπικό παράδειγμα της διαδικασίας αυτής είναι η πλήρωση των δοχείων των μετασχηματιστών υψηλών τάσεων με λάδι.

Ο συνδυασμός ειδικότερα χαρτιού με μονωτικό έλαιο έχει μεγάλη εφαρμογή λόγω της περίπου ίδιας σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς που έχουν τα υλικά αυτά.

1.3.2 Το μονωτικό λάδι

Το κυρίως χρησιμοποιούμενο υγρό μονωτικό σε μετασχηματιστές, καλώδια, διακόπτες και πυκνωτές, είναι το μονωτικό λάδι. Στις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται είτε ορυκτέλαια είτε συνθετικά μονωτικά λάδια ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις.

Τα φυτικά έλαια (κυρίως ρητινώδη) δεν είναι κατάλληλα για χρήση ως μονωτικά διότι παρουσιάζουν αστάθεια στην ποιότητά τους και τείνουν να σχηματίσουν καταστροφικά λιπαρά οξέα. Αλλά και τα ζωικά έλαια είναι ακατάλληλα για ηλεκτρολογικές εφαρμογές επειδή

παρουσιάζουν μεγάλο ιξώδες και έχουν τη τάση, όπως και τα φυτικά έλαια, να σχηματίσουν λιπαρά οξέα τα οποία προσβάλλουν ινώδη υλικά, όπως το χαρτί. Τα πλέον κατάλληλα για χρήση σε ηλεκτροτεχνικούς σκοπούς είναι τα ορυκτέλαια τα οποία παράγονται ως κλάσμα της απόσταξης του πετρελαίου και η χημική τους σύσταση διαφέρει ανάλογα με την ποιότητα του πετρελαίου. Τα ορυκτέλαια διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- α) μεθανέλαια : κυριαρχούν κορεσμένοι υδρογονάνθρακες τύπου παραφίνης
- β) ναφανέλαια : κυριαρχούν ακόρεστοι υδρογονάνθρακες τύπου ναφθαλίνης
- γ) ναφθαλμεθανέλαια : αποτελούν μείγμα των δύο προηγούμενων χωρίς να κυριαρχεί κανένας από τους δύο τύπους υδρογονανθράκων

Για την αποφυγή των κινδύνων έκρηξης (από τη συγκέντρωση αέριων προϊόντων από την αλλοίωση του πετρελαίου) ή ανάφλεξης του λαδιού και των προϊόντων του, χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις συνθετικά μονωτικά λάδια που είναι αρκετά σταθερότερα στην επίδραση της θερμότητας και των εκκενώσεων. Συνήθως είναι χλωριωμένα παράγωγα του διφαινυλίου (C_6H_5- , C_6H_5) και κυκλοφορούν στο εμπόριο με διάφορες ονομασίες όπως Clophene, Aroclor, Askarel, Pyranol, Inerteen, Clorextol, Permitol, Afcolin κ.λπ. Τα μονωτικά αυτά έχουν διπλάσια ως τριπλάσια διηλεκτρική αντοχή συγκρινόμενα με το ορυκτέλαιο. Χαρακτηρίζονται και ως <<άκαυστα έλαια>> κάτι το οποίο δεν είναι απόλυτο. Η χρήση των χλωριωμένων υδρογονανθράκων τα τελευταία χρόνια τείνει να εξαλειφθεί διότι περιέχουν τοξικές ουσίες οι οποίες είναι άκρως επικίνδυνες για το προσωπικό συντήρησης των διάφορων ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων. Επιπλέον δεν έχει καταστεί εφικτή η αναδόμηση τους με μια διαδικασία ακίνδυνη για το προσωπικό και φιλική προς το περιβάλλον.

Μία άλλη κατηγορία συνθετικών μονωτικών υγρών είναι υδρογονάνθρακες που έχουν υποστεί φθορίωση. Η διηλεκτρική σταθερά τους είναι μεγαλύτερη από εκείνη του μονωτικού ελαίου. Δεν προκαλούν φθορές στα στερεά μονωτικά και είναι άκαυστα υλικά. Η εφαρμογή τους είναι πρακτικά ανύπαρκτη λόγω του μεγάλου κόστους τους.

Ακόμα ένα υγρό μονωτικό είναι το σιλικονούχο έλαιο (υδρογονάνθρακες που περιέχουν πυρίτιο). Είναι εύφλεκτο υλικό γι' αυτό η πρακτική εφαρμογή του είναι περιορισμένη.

1.3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά των υγρών μονωτικών υλικών

Κατά την εκλογή ενός μονωτικού ελαίου σε μια ηλεκτροτεχνική κατασκευή θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα εξής χαρακτηριστικά:

1) Ιξώδες

Το ιξώδες καθορίζει τη δυνατότητα ψύξεως και μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας. Για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας σε έναν μετασχηματιστή, όπου υπάρχουν μικρά διάκενα μεταξύ των τυλιγμάτων του, είναι απαραίτητο το μονωτικό λάδι να χαρακτηρίζεται από χαμηλό ιξώδες, έτσι ώστε να ρέει ευκολότερα ανάμεσα στα τυλίγματα.

2) Μονωτική ικανότητα

Η μεγάλη πλειοψηφία των μονωτικών ελαίων είναι καλοί μονωτές. Σε μεγάλο βαθμό όμως μας ενδιαφέρει ο βαθμός μείωσης της μονωτικής ικανότητας του ελαίου παρουσία υγρασίας η οποία θα πρέπει να αποφεύγεται αυστηρώς. Μια μικρή ποσότητα υγρασίας εντός του ελαίου μειώνει δραματικά τη διηλεκτρική αντοχή του ενώ σκόνη και μικρές ίνες τείνουν να δημιουργήσουν οδούς μεγάλης αγωγιμότητας.

3) Σημείο ανάφλεξης

Είναι η θερμοκρασία στην οποία το μονωτικό έλαιο, θερμαινόμενο εντός ειδικής συσκευής (Pensky-Martens), αναδίδει ατμούς σε ποσότητα τέτοια ώστε αναμιγνυόμενοι με τον ατμοσφαιρικό αέρα να σχηματίζουν εύφλεκτο μίγμα και, παρουσία σπινθήρα, να αναφλέγονται αυτοστιγμεί. Για λόγους ασφαλείας και αξιοπιστίας του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού το σημείο ανάφλεξης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με $130^{\circ}C$.

4) Σημείο καύσεως

Είναι η θερμοκρασία στην οποία το έλαιο, θερμαινόμενο υπό κανονικές συνθήκες δόκιμης, αναδίδει ατμούς τέτοιας επάρκειας ώστε να αναφλεγεί και να συνεχίσει καιγόμενο. Η θερμοκρασία αυτή είναι περίπου 25% υψηλότερα του σημείου ανάφλεξης.

5) Καθαρότητα

Το έλαιο δεν πρέπει να περιέχει όπως θείο και ενώσεις αυτού. Η παρουσία θείου προκαλεί διάβρωση των μεταλλικών μερών και επιταχύνει την παραγωγή ιζήματος.

6) Σχηματισμός ιζήματος

Η ευκολία με την οποία σχηματίζεται ίζημα αποτελεί μεγάλης σημασίας χαρακτηριστικό, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μετασχηματιστών. Πρόκειται για το βραδύ σχηματισμό ημιστέρεων υδρογονανθράκων, ενίοτε οξειδωμένης μορφής, οι οποίοι επικάθονται επί των τυλιγμάτων και των τοιχωμάτων του δοχείου του μετασχηματιστή. Ο σχηματισμός του ιζήματος συνδέεται άμεσα με τη θερμοκρασία και την οξείδωση του λαδιού. Το ίζημα σχηματιζόμενο καθιστά το σύνολο του μετασχηματιστή θερμότερο, όσο δε αυξάνει η θερμοκρασία μεταβάλλει προς το χειρότερο την κατάσταση από άποψης ιζήματος, έως ότου φραχθούν τελικώς οι σωλήνες ψύξης και ο μετασχηματιστής καταστεί ακατάλληλος για χρήση λόγω υπερθέρμανσης. Η εμπειρία δείχνει ότι το ίζημα σχηματίζεται ταχύτερα εκεί που υπάρχουν στιλπνές επιφάνειες χαλκού.

7) Οξύτητα

Μεταξύ των παραγόμενων προϊόντων οξείδωσης του λαδιού είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), πτητικά και οργανικά οξέα διαλυτά στο νερό και νερό. Τα παραπάνω προϊόντα σε συνδυασμό δύνανται να προσβάλλουν και να διαβρώσουν τα μεταλλικά τμήματα του μετασχηματιστή. Για το λόγο αυτό υπάρχουν ειδικές διατάξεις που εμποδίζουν την είσοδο υγρού αέρα στο δοχείο λαδιού και επιπλέον απομακρύνουν τα ανεπιθύμητα προϊόντα οξείδωσης.

8) Δυνατότητα εμπλουτισμού του ελαίου

Η αλλοίωση του ελαίου κατά τη διάρκεια χρησιμοποίησής του είναι δυνατόν να επιβραδυνθεί με τον εμπλουτισμό του, κατά την κατεργασία του, με αντιοξειδωτικά μέσα. Τα αντιοξειδωτικά αυτά, τα οποία είναι συνήθως τύπου φαινόλης ή αμίνης, μετατρέπουν τα σχηματισμένα μοριακά συγκροτήματα εντός του ελαίου σε αδρανή μόρια, καταναλισκόμενα βαθμιαία κατά τη λειτουργία. Οι αντιοξειδωτικές ουσίες εμπλουτισμού αυξάνουν σημαντικά τη διάρκεια χρησιμοποίησής

του ελαίου, αφού ο σχηματισμός οξέων και ιζήματος είναι ουσιαστικά μηδενικός.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τεχνικά χαρακτηριστικά ορισμένων υγρών μονωτικών υλικών.

	Πυκνότητα gr/cm^3	Ειδική αντίσταση Ω cm	Διηλεκτρική αντοχή KV/cm	Διηλεκτρική σταθερά	Συντελεστής απώλειών	Σημείο ανάφλεξης $^{\circ}C$	Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία
Ορυκτέλαιο	<0,89	10^{14}	110	2,2	10^{-3}	130	$90^{\circ}C$
Βαζελίνη (> $55^{\circ}C$)	0,90	10^{15}	300	2,2	10^{-4}	130	$90^{\circ}C$
Πολυισοβουτυλένιο	0,85	10^{14}	150	2,2	10^{-3}	200	$85^{\circ}C$
Έλαιο σιλικόνης	0,96	10^{15}	100	2,8	10^{-4}	300	$150^{\circ}C$

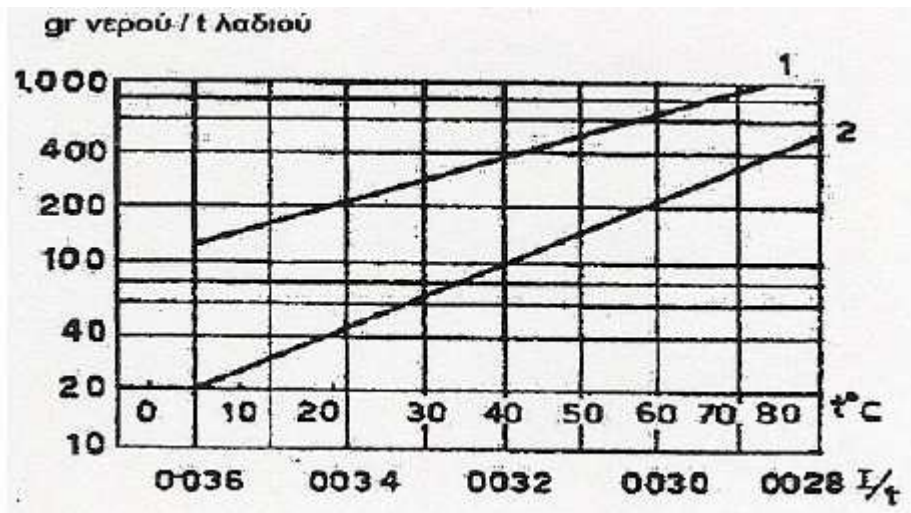
Πίνακας 1.3.3-1 : Τεχνικές ιδιότητες ορισμένων υγρών μονωτικών υλικών.

1.3.4 Συντήρηση – επεξεργασία μονωτικού λαδιού

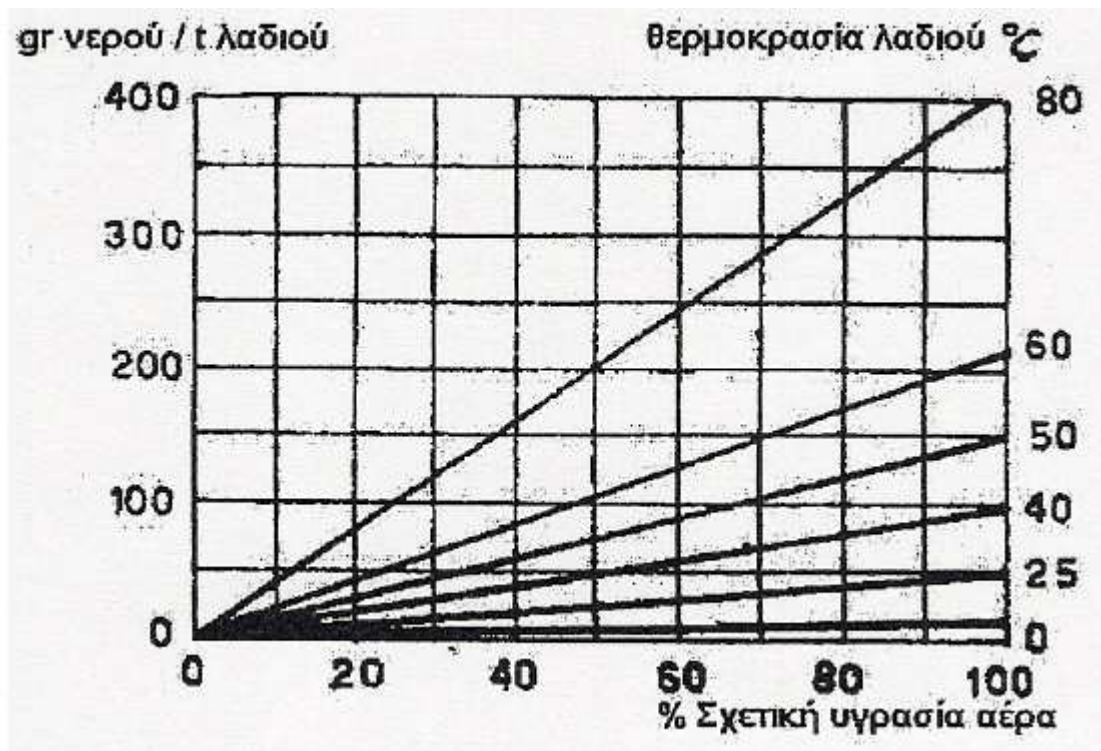
Η εξέλιξη των μετασχηματιστών σε ολοένα και μεγαλύτερες τάσεις λειτουργίας και παροχής ισχύος έχει δημιουργήσει την ανάγκη να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην κατάλληλη συντήρηση και επεξεργασία του μονωτικού λαδιού, έτσι ώστε να διατηρεί τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά καλής λειτουργίας.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του λαδιού είναι αρκετοί και σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να οδηγήσουν στην αχρηστία ακριβές ηλεκτροτεχνικές εγκαταστάσεις. Η παρουσία νερού μειώνει την μονωτική ικανότητα του λαδιού και επιπλέον συμβάλλει στην οξείδωση των επιμέρους τμημάτων της διάταξης. Μονωτικό λάδι εκτεθειμένο στον αέρα απορροφά υγρασία, το δε ποσοστό αυτής εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως είναι ο τύπος του λαδιού και η θερμοκρασία.

Ένα καλώς διωλισμένο ή φτωχό σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες λάδι είναι δυνατόν να απορροφήσει σε θερμοκρασία $20^{\circ}C$ μέχρι $40gr H_2O/t_{\lambdaαδιού}$ ενώ λάδι που περιέχει αρωματικούς υδρογονάνθρακες έως $240gr H_2O/t_{\lambdaαδιού}$. Οι οριακές αυτές τιμές αντιστοιχούν σε λάδι σε επαφή με αέρα 100% κεκορεσμένο σε υγρασία επί μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης το νερό δύναται να εμφανισθεί και εντός του λαδιού ως προϊόν οξείδωσης.



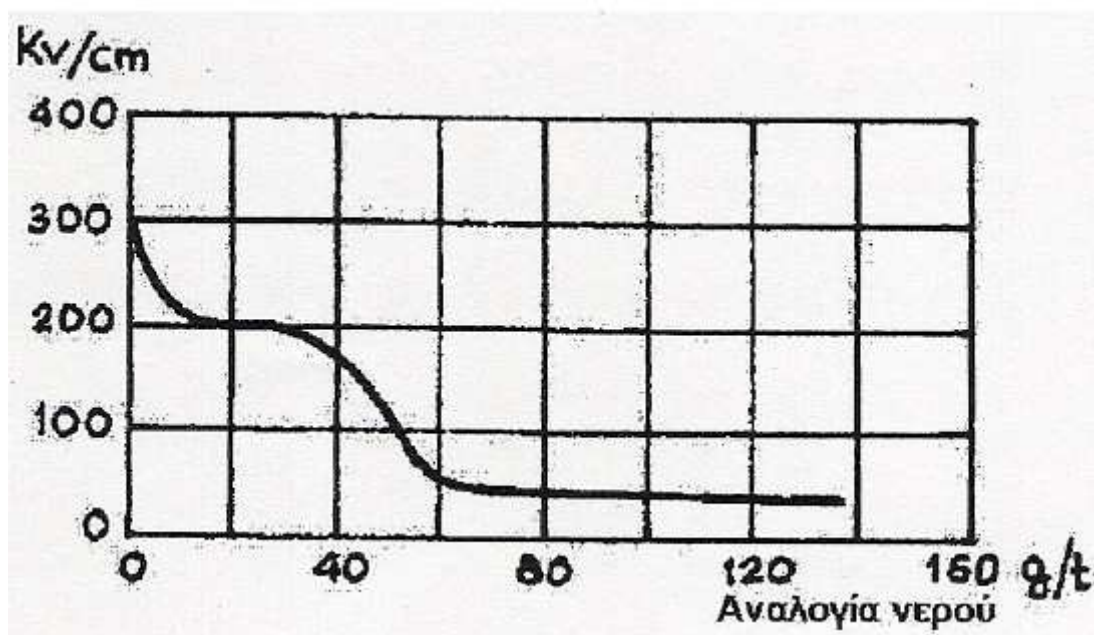
Σχήμα 1.3.4-1 : Μέγιστη διαλυτότητα του νερού στο μονωτικό λάδι συναρτήσει της θερμοκρασίας του ελαίου όπου
 1 : λάδι με αρωματικούς υδρογονάνθρακες
 2 : λάδι μετασχηματιστών



Σχήμα 1.3.4-2 : Περιεκτικότητα νερού σε μονωτικό λάδι μετασχηματιστή συναρτήσει της % σχετικής υγρασίας του αέρα.

Το νερό σε όποια μορφή (διαλυμένο ή διεσπαρμένο κατά περιοχές) εμφανισθεί εντός του λαδιού, επιδρά καθοριστικά στη μονωτική

ικανότητα του ενώ παράλληλα συμμετέχει ενεργά στη διαδικασία γήρανσης της μόνωσης. Είναι γεγονός ότι το χαρτί που περιβάλλει τα τυλίγματα του μετασχηματιστή καταστρέφεται σταδιακά από την παρουσία νερού στο μονωτικό λάδι. Με την πάροδο του χρόνου κι εφόσον δε ληφθεί μέριμνα για την ξήρανση του λαδιού, εκδηλώνονται διασπάσεις μεταξύ των ελιγμάτων, επιταχύνοντας την απαξίωση της μόνωσης και της ηλεκτρολογικής διάταξης γενικότερα.



Σχήμα 1.3.4-3 : Τάση διάσπασης ορυκτού ελαίου συναρτήσει της περιεκτικότητας σε νερό.

Προκειμένου να διατηρηθεί η μονωτική ικανότητα του λαδιού σε ικανοποιητικά επίπεδα κρίνεται αναγκαίος ο περιοδικό του έλεγχος ώστε να αποφευχθούν ατυχήματα και καταστροφή του εξοπλισμού. Στην περίπτωση που διαπιστωθεί ότι στο μονωτικό λάδι υπάρχουν προσμίξεις, αέρας, υγρασία ή μικροσωματίδια τότε είναι δυνατή η συμβατική αναγέννηση του λαδιού. Με τον όρο συμβατική αναγέννηση εννοούμε τον μηχανικό καθαρισμό του λαδιού με διύλιση, την αφυδάτωση (ξήρανση) σε κενό, την απαέρωση σε δοχείο κενού.

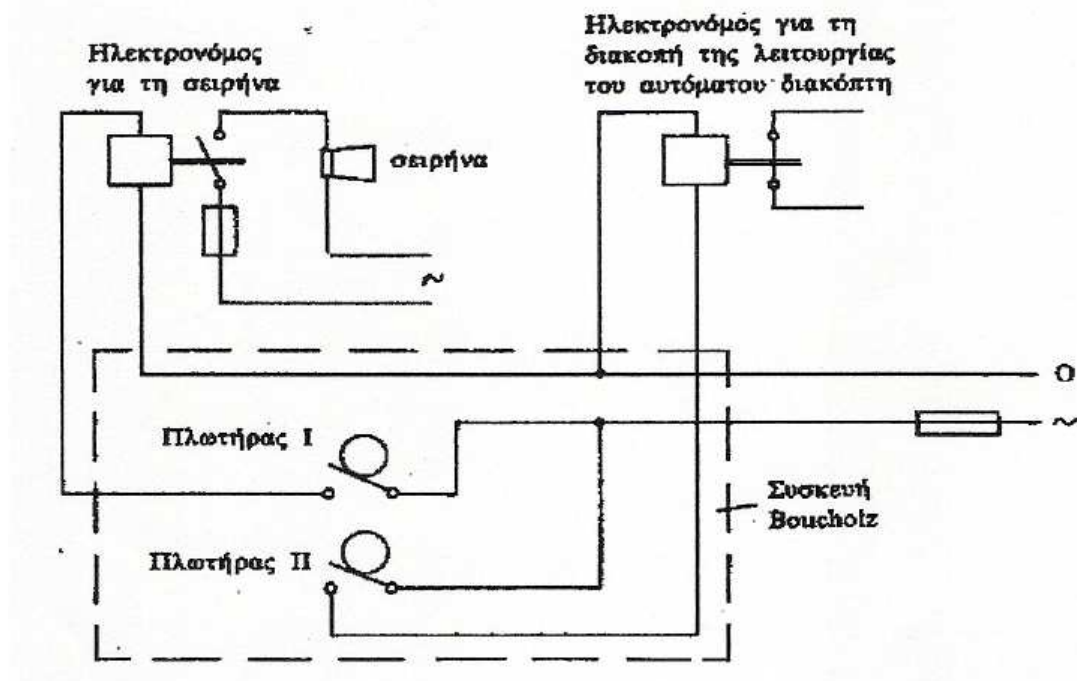
Κατά τη διύλιση απομακρύνονται τα προϊόντα γήρανσης, τα οποία εμφανίζονται υπό μορφή ιζήματος, ίνες μονωτικών υλικών και νερό. Κατά κανόνα το μονωτικό λάδι θα πρέπει να διυλίζεται εντελώς ψυχρό διότι ορισμένα προϊόντα γήρανσης και το νερό διαλύονται εύκολα στο θερμό λάδι.

Η αφυδάτωση υπό κενό και η απαέρωση λαμβάνουν χώρα σε ειδικές συσκευές κενού, έτσι ώστε να αποκλειστεί η πιθανότητα επαφής του λαδιού με τον αέρα και διάφορα σωματίδια.

1.3.5 Μέσα ελέγχου της μονωτική ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η υγρασία και τα αέρια που δημιουργούνται κατά τη γήρανση του μονωτικού λαδιού, μειώνουν δραστικά τη διηλεκτρική αντοχή του. Για το λόγο αυτό προβλέπονται (κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών) μέσα ελέγχου, που προειδοποιούν για τη μείωση της αντοχής του μονωτικού ελαίου. Προβλέπεται επίσης προστασία του μετασχηματιστή όταν η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού είναι σημαντική. Πρόκειται για τον αφυγραντήρα και τη συσκευή Boucholz, που πρέπει να περιλαμβάνονται στο μετασχηματιστή. Ο αφυγραντήρας τοποθετείται επί το δοχείο διαστολής του μετασχηματιστή. Περιέχει υλικό (silicagel) που απορροφά την υγρασία. Από το γυάλινο μέρος του αφυγραντήρα παρακολουθεί κανείς το χρώμα του silicagel. Όταν το χρώμα είναι γαλάζιο, τότε έχει το υλικό αυτό τη δυνατότητα απορρόφησης της υγρασίας. Όταν το χρώμα γίνει κόκκινο, τότε το υλικό είναι κορεσμένο από υγρασία και πρέπει να υποβληθεί σε ξήρανση (3 έως 6 ώρες σε θερμοκρασία 140° C το πολύ).

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής Boucholz (σχήμα 1.3.5-1) βασίζεται στα αέρια που παράγονται κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού. Τα αέρια διέρχονται από τη συσκευή Boucholz, η οποία έχει δύο πλωτήρες (I και II). Όταν ο χώρος του Boucholz καταλαμβάνεται μόνο από λάδι, τότε οι πλωτήρες αυτοί είναι οι δύο ανοιχτές επαφές. Κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού εισχωρούν τα παραγόμενα αέρια στο χώρο του Boucholz. Όταν το ποσοστό τους είναι μικρό κλείνει ο πλωτήρας I ενεργοποιώντας το κύκλωμα της σειρήνας. Για μεγαλύτερο ποσοστό αερίων κλείνει και ο πλωτήρας II, με αποτέλεσμα να τεθεί εκτός λειτουργίας ο αυτόματος διακόπτης. Η συσκευή διαθέτει χειροκίνητη βαλβίδα εξαερισμού, η οποία είναι απαραίτητη κατά την πρώτη εγκατάσταση (ή μετά την αλλαγή λαδιών). Έχει επίσης γυάλινο παραθυράκι για τον έλεγχο της θέσης των πλωτήρων.



Σχήμα 1.3.5-1 : Κύκλωμα προστασίας Boucholz

Μια μέθοδος διάγνωσης της ποιότητας του λαδιού, που εφαρμόζεται από τις εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, βασίζεται στα είδη των παραγόμενων αερίων (κυρίως υδρογόνο, μεθάνιο, αιθάνιο, αιθυλένιο και ακετυλένιο) και στις σχετικές ποσότητές τους, μέσω χρωματογράφου αερίων. Μια μικρή αποσύνθεση γίνεται φανερή σε κανονικές θερμοκρασίες λειτουργίας, όπου παράγονται κυρίως υδρογόνο και μεθάνιο. Η παραγωγή του αιθανίου και του αιθυλενίου θεωρείται ότι σχετίζεται με θέσεις αυξημένης θερμοκρασίας του μετασχηματιστή. Το ακετυλένιο γίνεται σημαντικό ως ποσότητα σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες, που οφείλονται κυρίως στην εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου και ισχυρών μερικών εκκενώσεων.

1.4 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών

Στα στερεά μονωτικά, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης τους, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής τους. 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.

Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών μπορούν να ομαδοποιηθούν, 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

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

Σύμφωνα με τη «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. Συμφωνά με αυτή τη θεωρία υπάρχουν τέσσερις βασικοί παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων των στερεών μονωτικών υλικών. Αυτοί είναι:

- 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 (δενδροειδής ή 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 κ.λπ.), έτσι ώστε η αλλαγή της μοριακής δομής να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμα τους.

1.4.1.1 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.

1.4.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

Όταν η σταθερή ενεργός τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη για τη θερμική διάτρηση, τότε η πεδιακή ένταση γίνεται μεγαλύτερη, 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 υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή
- γ) συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

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

1.4.1.3. Η διάσπαση λόγω 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).

Από τη στιγμή της έναρξης των μερικών εκκενώσεων προκαλείται συνήθως σταδιακή αλλαγή της δομής του στερεού μονωτικού, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη στο τμήμα όπου οι ανομοιογένειες είναι περισσότερο αγώγιμες. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα θα προκαλέσει τη διάσπαση του στερεού μονωτικού.

Σε αντίθεση με άλλες μορφές διάσπασης η ηλεκτρομηχανική 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.

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

1.4.1.4 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:

$$U_a = \sqrt{a \frac{k \cdot \theta}{\sigma_0}} \quad (1.4.1.4-1)$$

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

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

Πρόσφατες έρευνες σε στερεά μονωτικά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσω 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 από 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.

1.4.1.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Τα φαινόμενα προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών μπορούν, όπως προαναφέρθηκε, να αποδοθούν σε τέσσερις βασικούς παράγοντες αποσταθεροποίησης των μορίων (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb, μερικές εκκενώσεις και θερμότητα 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.

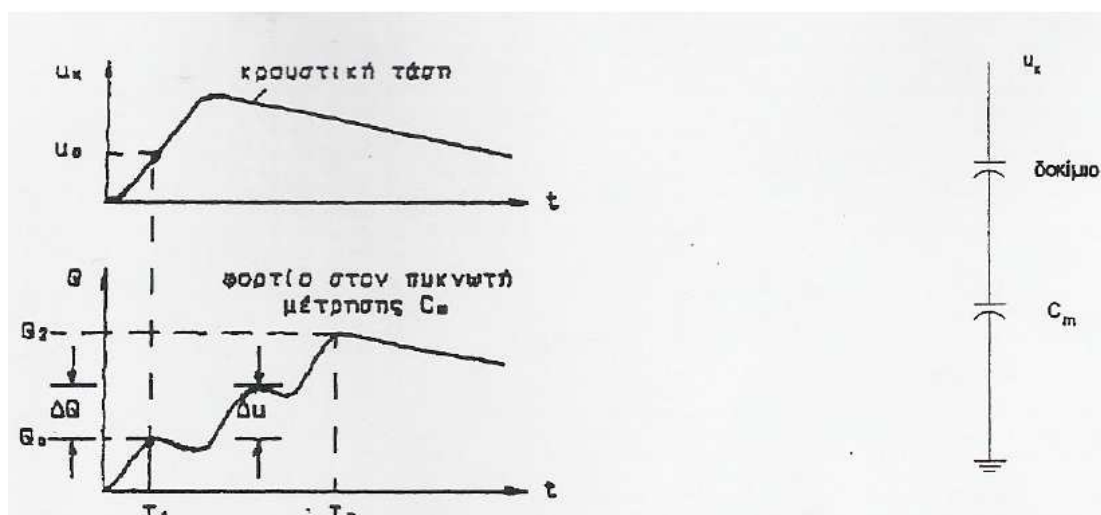
Στον πίνακα 1.4.1.5-1 δίνονται συνοπτικά οι βασικές περιπτώσεις συνδυασμού των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης. Οι θεωρητικές σχέσεις του πίνακα 1.4.1.5-1 δεν δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού της τάσης διάτρησης (γιατί περιλαμβάνουν αρκετές άγνωστες τιμές, που πρέπει να βρεθούν με μετρήσεις), δίνουν όμως τη δυνατότητα κατανόησης των φαινομένων, όταν οι μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών συνδυάζονται με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής.

α/ α	Παράγοντες που συμμετέχουν στην αλλαγή της μοριακής δομής	Θεμελιώδεις σχέσεις	Οριακή τιμή της τάσης για τη διάτρωση
1	Συνδυασμός της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρωσης	<p>Η θερμότητα του περιβάλλοντος ενισχύει όλους τους παράγοντες γήρανσης και διάτρωσης</p>	
2	Μερικές εκκενώσεις και απώλειες Joule	<p>1) $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\beta \cdot \theta} / (1 - \delta E)^2$</p> <p>2) $\frac{\sigma_0 \cdot e^{\beta \cdot \theta} \cdot A}{(1 - \delta E)^2 \cdot d} = k \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot d \theta$</p>	<p>$u_{\theta\epsilon} = d \cdot (1 - \delta E) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{e \cdot \beta \cdot \sigma_0}}$</p> <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρωση:</p> <p>$\Delta u_1 = u_\theta - u_{\theta\epsilon} = \delta E \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{e \cdot \beta \cdot \sigma_0}}$</p> <p>)</p>
3	Μερικές εκκενώσεις και δυνάμεις Coulomb	<p>1) $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\beta \cdot \theta} / (1 - \delta E)^2$</p> <p>2) $\frac{u^2 \cdot \sigma \cdot A}{(1 - \delta E)^2 \cdot d} = C_0 \cdot \frac{d\theta}{dt}$</p>	<p>$U_{\eta\epsilon} = (1 - \delta E) \cdot \sqrt{d} \cdot \sqrt{\frac{C_0 \cdot \theta}{\sigma \cdot A \cdot T_\delta}}$</p> <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρωση:</p> <p>$\Delta u_3 = dE \cdot \sqrt{d} \cdot \sqrt{\frac{C_0 \cdot \theta}{\sigma \cdot A \cdot T_\delta}}$</p>
4	Μερικές εκκενώσεις και θερμοκρασία περιβάλλοντος	<p>1) $u_a = \sqrt{\alpha \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma}}$</p> <p>2) $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\beta \cdot \theta} / (1 - \delta E)^2$</p>	<p>$U_{\alpha\epsilon} = (1 - \delta E) \cdot \sqrt{a \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma_0}}$</p> <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρωση:</p> <p>$\Delta u_4 = u_a - u_{\alpha\epsilon} = \delta E \cdot \sqrt{\frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma_0}}$</p>
5	Συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων	<p>$u^2 \cdot \frac{A}{d} \cdot \frac{e^{\beta \cdot \theta}}{(1 - \delta E)^2} =$</p> <p>$2 \cdot \pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta + C_0 \cdot \frac{d\theta}{dt}$</p>	Εξαρτάται κυρίως από τον παράγοντα που υπερिशύει

Πίνακας 1.4.1.5-1 : Βασικές σχέσεις μιας θεωρητικής ερμηνείας για τη γήρανση και διάτρωση των στερεών μονωτικών

1.4.1.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων των κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού – ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως π.χ. στο σχήμα 1.4.1.6-1 για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Με παρόμοιες σκέψεις, μπορεί κανείς να καθορίσει μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση με άλλες μορφές τάσης). Στο σχήμα 1.4.1.6-3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



Σχήμα 1.4.1.6-1 : Παράδειγμα καθορισμού 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_x : στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

u_0 : τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή)

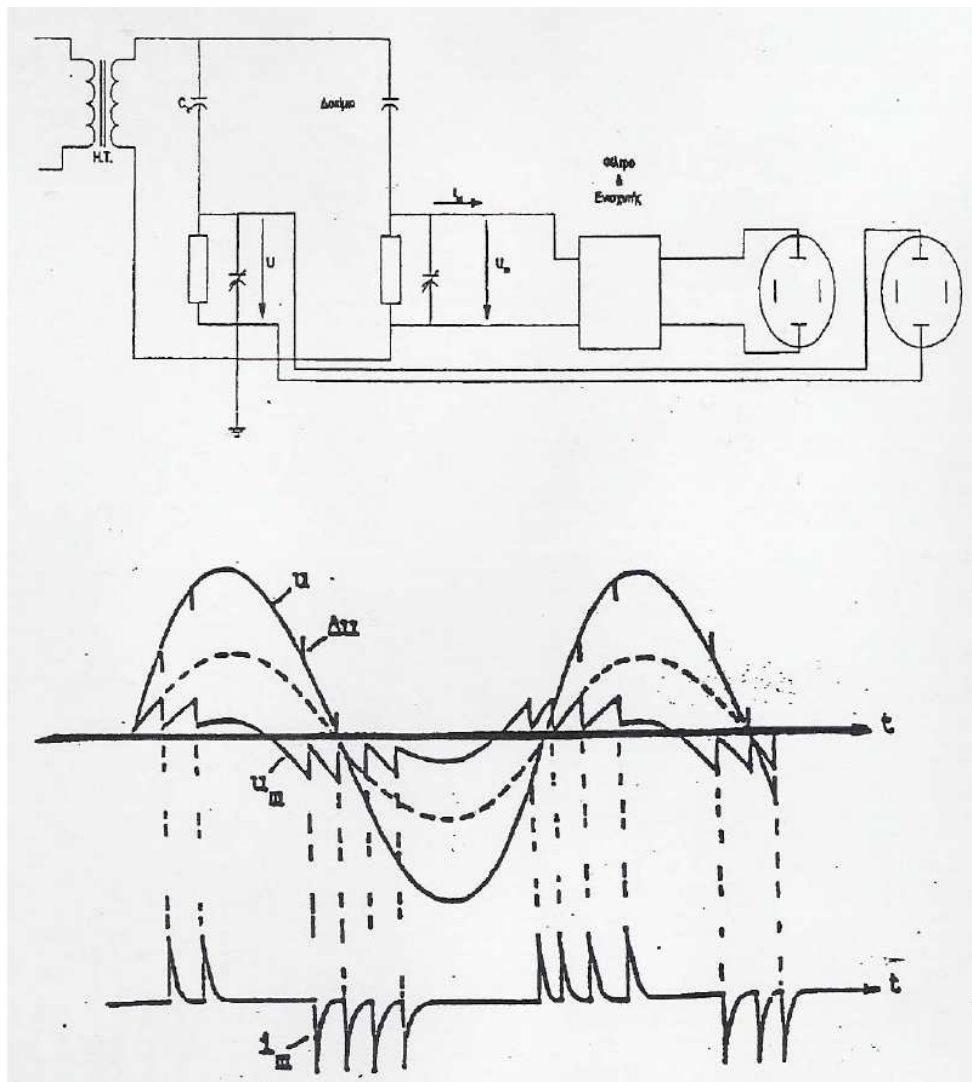
Δu : άλμα δυναμικού
 ΔQ : αύξηση φορτίου

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως η χαρακτηριστική $Q = f(\hat{U}_k)$, η χαρακτηριστική $u_0 = f(\hat{U}_k)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της τάσης, κ.λπ. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q = f(\hat{U}_k)$ η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 1.4.1.6-4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών καθώς και στην εκδήλωση άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως είναι οι δυνάμεις Coulomb. Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs ή 10/200μs παρατηρούνται μηχανικές κακώσεις στο υλικό που αποδίδονται στις δυνάμεις Coulomb. Στο σχήμα 1.4.1.6-5 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης δείγματος pertinax, όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90^η κρούση, ως προς την 60^η. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών, εύκολα διαπιστώνεται, ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου Q στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις (θραύσματα) στην επιφάνεια του μονωτικού.

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

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

Τα παραπάνω στην περίπτωση κρουστικών τάσεων σημαίνουν ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης, ενώ οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις κατά τη διάρκεια της ουράς της κρουστικής τάσης.



Σχήμα 1.4.1.6-2 : Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω «ωμικού – χωρητικού» τετράπολου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz.

H.T. : μετασχηματιστής υψηλής τάσης

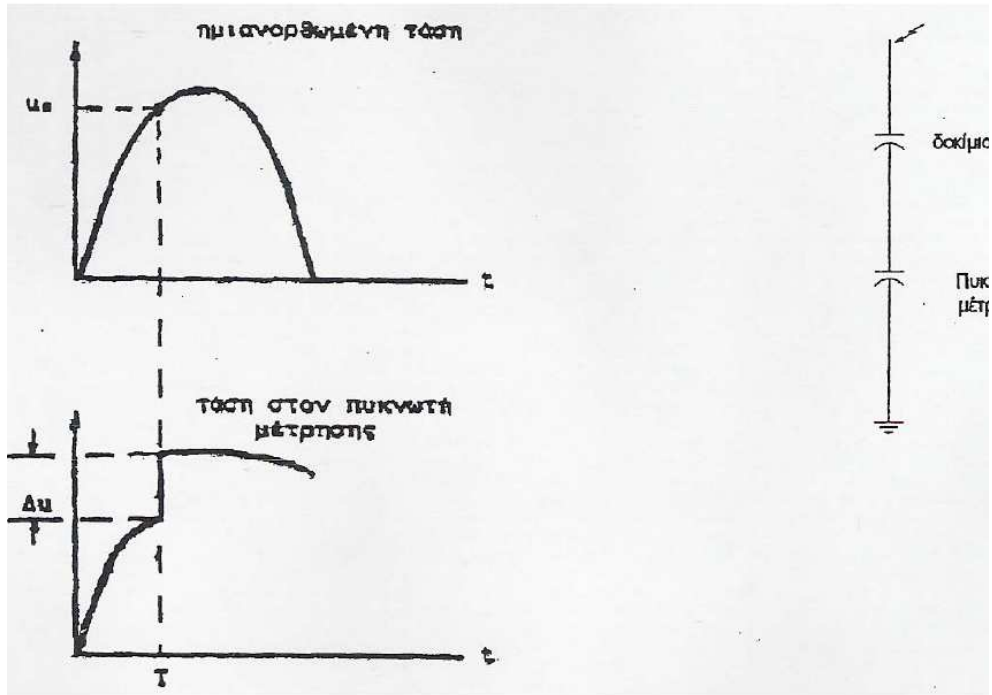
C_k : πυκνωτής υψηλής τάσης

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

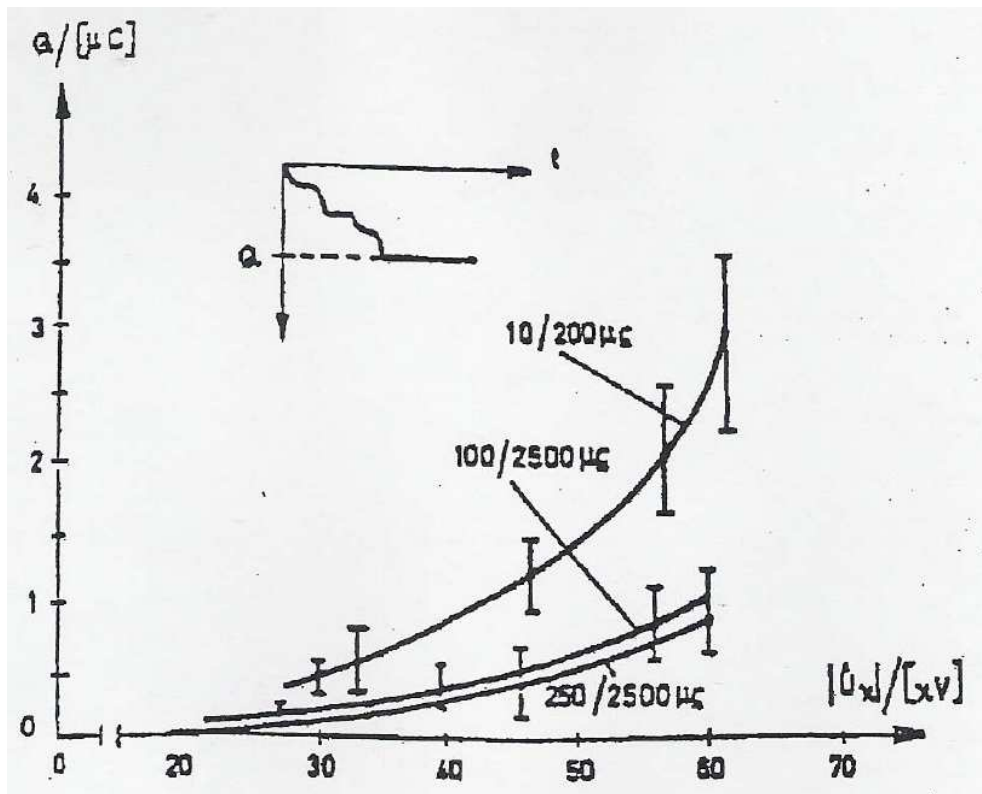
u_m : στιγμιαία τιμή της τάσης στο ωμικό – χωρητικό τετράπολο μέτρησης των μερικών εκκενώσεων

i_m : στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων

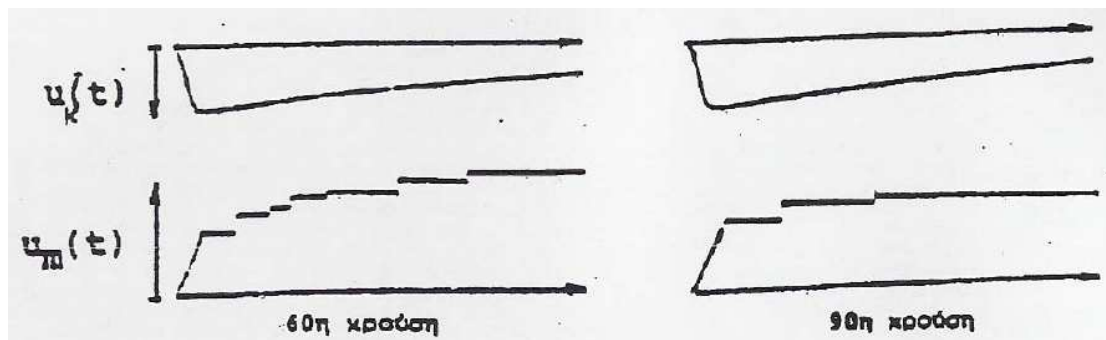
Δu : μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 1.4.1.6-3 : Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.
 T_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 u_0 : τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή)
 Δu : άλμα δυναμικού



Σχήμα 1.4.1.6-4 : Χαρακτηριστική $Q = f(\hat{U}_k)$ για το βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs.
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα
 C_m : 1000 nF



Σχήμα 1.4.1.6-5 : Αλματα δυναμικού κατά την 60^η και την 90^η κρούση στο pertinax (πάχους 2mm)
 Μορφή τάσης : 1,2/50 μs ($\hat{U}_k = 99,7$ kV)
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα
 C_m : 210 nF

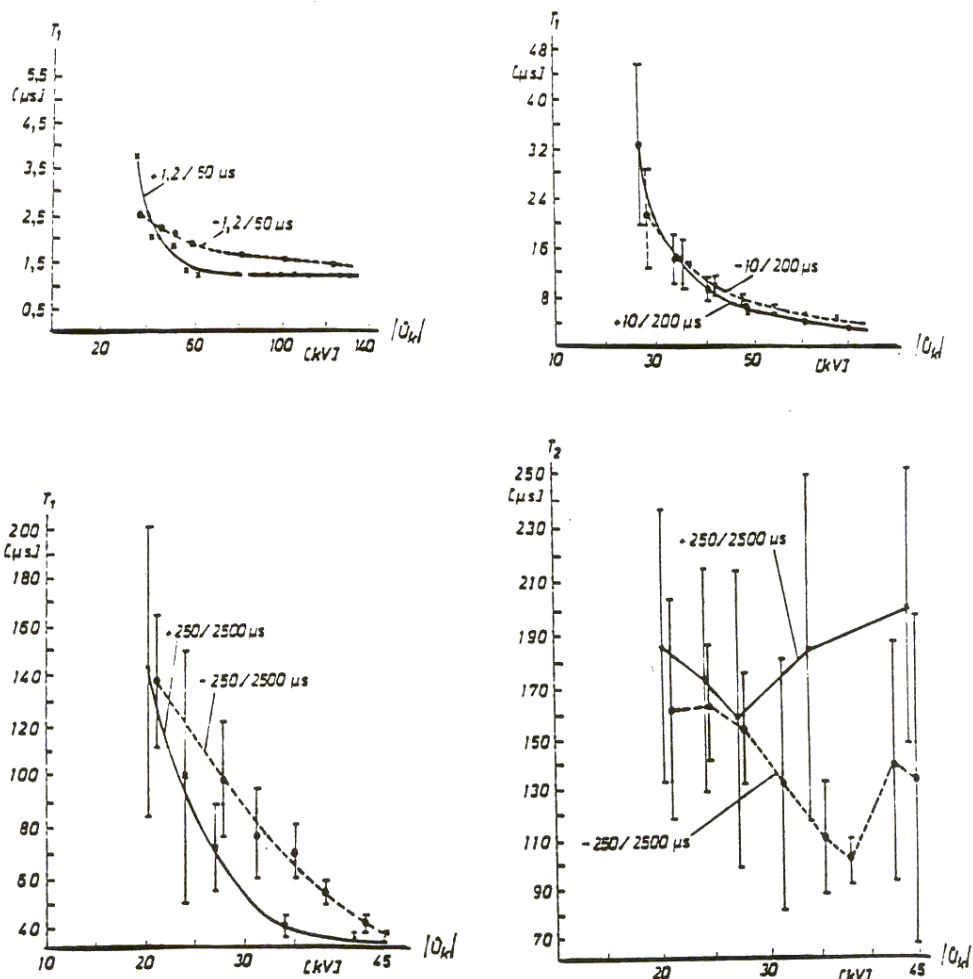
Στον πίνακα 1.4.1.6-1 δίνονται αποτελέσματα στατιστικών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$, στα οποία φαίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που προαναφέρθηκε. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

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

Πίνακας 1.4.1.6-1 : Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών

Μια άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, ως προς τον χρόνο εκδήλωσης τους (υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης), έχει βασιστεί σε χαρακτηριστικές $T_1 = f(|\hat{U}_k|)$ και $T_2 = f(|\hat{U}_k|)$ σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών. Στο παρακάτω 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 250/2500 μs), ώστε σε συνδυασμό

με τις παρατηρήσεις του πίνακα 1.4.1.6-1 για την εικόνα των επιφανειών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.



Σχήμα 1.4.1.6-6 : 1) Χαρακτηριστική $T_1 = f(|\hat{U}_k|)$ κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2mm και $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$) με κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs , 10/200 μs και 250/2500 μs .
 2) Χαρακτηριστική $T_2 = f(|\hat{U}_k|)$ κατά την καταπόνηση των υλικών αυτών με κρουστικές τάσεις 250/2500 μs .
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα – πλάκα
 I : 2 φορές η τυπική απόκλιση

Από την μέση καμπύλη των χαρακτηριστικών του σχήματος 1.4.1.6-6 γίνεται φανερή η εκδήλωση του φαινομένου της πολικότητας. Οι επικαλύψεις τιμών, που παρατηρούνται μπορούν να αποδοθούν στη διαφορετική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο (τα οργανικά στερεά μονωτικά είναι ανομοιογενή και δεν είναι δυνατό να

υπάρχει συμμετρική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο).

1.4.2 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση.

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

Στα φαινόμενα παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρονίων) στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών συμμετέχει και η ίδια η επιφάνεια σε βάθος μέχρι 30 \AA . Έτσι, εκτός από τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις (οι οποίες οφείλονται σε ξένες επικαθίσεις και έχουν συνήθως τον κυρίαρχο ρόλο στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στην επιφάνεια), μπορεί κανείς να υποθέσει ότι εκδηλώνονται και οι άλλοι παράγοντες (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος), όπως κατά τη διάτρηση. Μπορεί επομένως να θεωρηθεί, οι μερικές εκκενώσεις στο επιφανειακό φιλμ (δηλαδή στο συνδυασμό «επιφάνεια του στερεού μέχρι βάθος 30 \AA - περιβάλλον μέσο») είναι συνήθως ο κυρίαρχος παράγοντας για την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση.

1.4.3 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών.

Στη κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρονία). Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την ενέργεια Fermi των ηλεκτροδίων διευκολύνει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί ότι το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες. Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του .

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 0,2 MV/cm.

Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0.5 MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση 1.2-9 ($\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\frac{-W}{kT}}$).

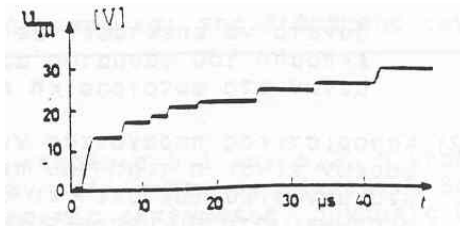
Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση 1.2-9. Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση τους στα ηλεκτρόδια.

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

1.4.3.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών

Στα σχήματα 1.4.3.1-1 ως 1.4.3.1-3 δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα της τεχνητής γήρανσης στερεών πολυμερών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου. Η διάταξη μέτρησης έχει σχεδιαστεί απλοποιημένα στο σχήμα 1.4.3.1-4. Με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώθηκε ότι μετά από μία τιμή $\dot{U}_k \approx 45 \text{ kV}$, κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs ή 10/200 μs , εκδηλώνεται επιφανειακός δένδριτης στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 1.4.3.1-5). Υπό σταθερή τιμή της τάσης ο δένδριτης, καθώς και η αντίστοιχη προς αυτόν αλλαγή της μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις. Κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500 μs 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, εξετάζονται (με τα παραπάνω δεδομένα) και οι δύο αυτές περιπτώσεις:

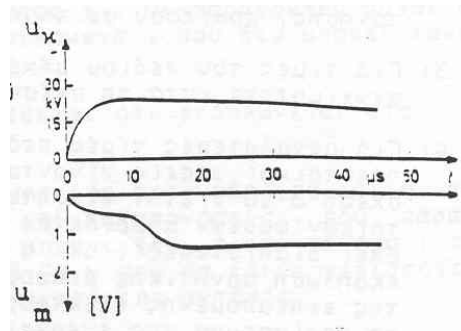


Σχήμα 1.4.3.1-1 : Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 1,2/50μs

$$\hat{U}_k : 100\kappa\text{V}$$

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

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

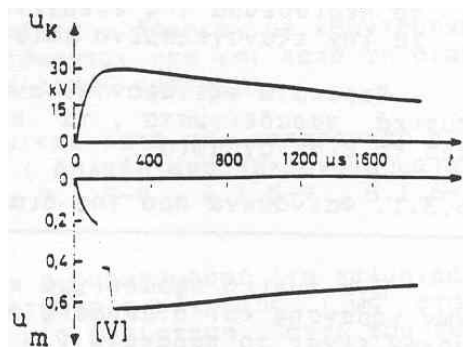


Σχήμα 1.4.3.1-2 : Πρώτο άλμα δυναμικού υπό κρουστική τάση 10/200μs

$$\hat{U}_k : 26,6\kappa\text{V}$$

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

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



Σχήμα 1.4.3.1-3 : Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 250/2500μs

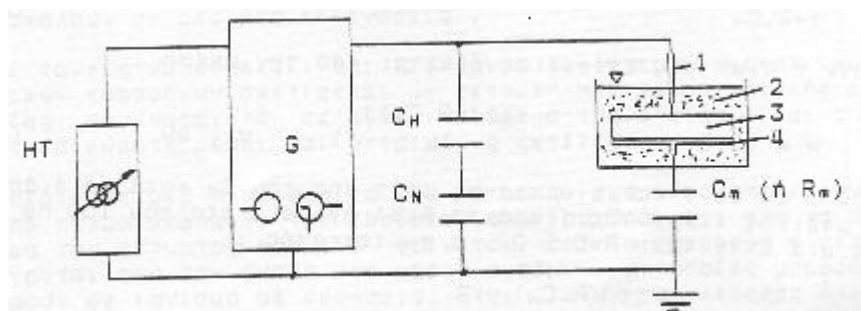
$$\hat{U}_k : 32\kappa\text{V}$$

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

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

α) Μακροσκοπική εμπειρία

Αν οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνευτούν με τη μακροσκοπική θεωρία, τότε καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα του πίνακα 1.4.1.6-1. Η εκδήλωση των αλμάτων δυναμικού (ή των κρούσεων φορτίου) κατά τη θεωρία αυτή ερμηνεύονται από το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 1.4.3.1-4 : 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, C_N : Καταμεριστής για τη μέτρηση κρουστικής τάσης.

1 : ηλεκτρόδιο ακίδα

2 : μονωτικό λάδι

3 : δοκίμιο (πάχους 2mm)

4 : ηλεκτρόδιο πλάκα

C_m : πυκνωτής μέτρησης των αλμάτων δυναμικού

R_m : αντίσταση μέτρησης των κρούσεων φορτίου (ρεύμα)

β) Κβαντομηχανική ερμηνεία:

Κατά τη θεωρία αυτή ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και όχι ο διαχωρισμός των τελευταίων σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρονία), πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης C_m ανά άλμα δυναμικού, με τη σχέση $W = 0,5q_e \Delta u$ (όπου: q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου και Δu το άλμα δυναμικού). Η σχέση αυτή ισχύει για μηδενική τιμή της ωμικής αντίστασης R από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδια

γείωσης. Για $R > 0$ θα πρέπει να πάρει κανείς υπ' όψη το μεταβατικό φαινόμενο με σταθερά χρόνου:

$$r = R \cdot C_m \quad (1.4.3.1-1)$$

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$W = 0,5 \cdot \Delta u / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}), \text{ (σε eV)} \quad (1.4.3.1-2)$$

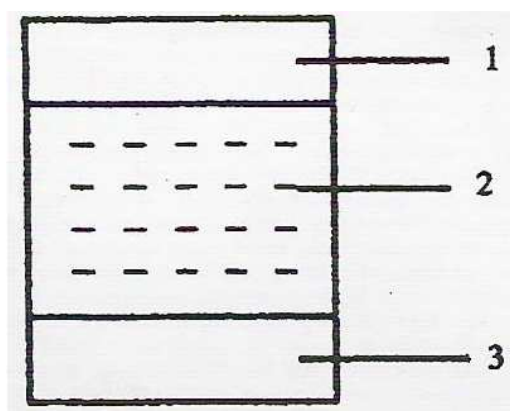
όπου: Δu σε V και t ο χρόνος φόρτισης του C_m κατά τη διάρκεια μίας μερικής εκκένωσης.

Από τις μετρήσεις των τιμών ενέργειας των ηλεκτρονίων κατά τα άλματα δυναμικού καθώς και διάφορες παρατηρήσεις, όπως η φωτεινή ακτινοβολία που παρατηρείται σε αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων και οι ραδιοφωνικές παρεμβολές και τα ακουστικά κύματα, που συχνά προκαλούν οι μερικές εκκενώσεις, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών σχετίζεται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται σε αυτά, το φάσμα της οποίας είναι: από ακουστικά κύματα μέχρι και υπεριώδεις ακτίνες.

Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γήρανσης έχουν δοθεί από παλμογραφήματα των κρούσεων φορτίου. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις. Όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσειμά της ενέργειάς τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ο δενδρίτης επομένως, που παρατηρείται, είναι το ορατό φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας. Μπορούμε, να υποθέσουμε, ότι αντίστοιχες δενδροειδούς μορφής εκπομπές συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης (κατά την αύξηση της τάσης παρατηρείται μείωση του ρεύματος).

Από τα παραπάνω μπορεί να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα ότι μία διαδρομή της δενδροειδούς μορφής εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αντιστοιχεί σε μία κρούση φορτίου, η οποία περιλαμβάνει ελεύθερα ηλεκτρόνια, που είχαν την ίδια ενεργειακή στάθμη (κατά την άφιξή τους στην άνοδο προκάλεσαν εκπομπή του ίδιου μήκους κύματος). Μπορούμε να υποθέσουμε, λόγω του εύρους της παραπάνω ακτινοβολίας, ότι υπάρχουν στο υλικό διάφορες ενεργειακές στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη, που είναι

καθοριστικής σημασίας για την εκδήλωση του ιονισμού (σχήμα 1.4.3.1-5). Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 1.4.3.1-5 : Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού
1 : ζώνη αγωγιμότητας
2 : στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη
3 : ζώνη σθένους

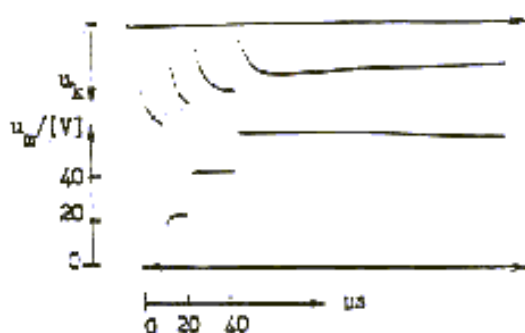
Από πρόσφατες έρευνες, που έχουν γίνει κατά τη γήρανση στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, υπό εναλλασσόμενη (ή συνεχή) τάση καταπόνησης, διαπιστώνεται επίσης η εκπομπή του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που έχει προαναφερθεί για την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις καταπόνησης ο υπολογισμός της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (πάνω από την ενέργεια Fermi) μπορεί να γίνει, κατά την εκδήλωση αλμάτων δυναμικού, με την σχέση 1.4.3.1-2.

1.4.3.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρωση.

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

Παρακάτω εξετάζεται ένα παράδειγμα με κρουστικές τάσεις με τη διάταξη του σχήματος 1.4.3.1-4. Τυπικά παλμογραφήματα του φαινομένου δίνονται στα σχήματα 1.4.3.2-1.

Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα στερεά μονωτικά κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων γήρανσης και διάτρησης εξαρτάται σημαντικά από τον συντελεστή χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων. Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο, τόσο μειώνεται το εύρος της παραπάνω ακτινοβολίας. Όταν η ακίδα έχει π.χ. ακτίνα καμπυλότητας 0.3mm (αντί του $\approx 1\text{mm}$), τότε (όπως έχει διαπιστωθεί πειραματικά) η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επεκτείνεται μέχρι το ορατό τμήμα της.



Σχήμα 1.4.3.2-1 : Τυπικό παράδειγμα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου

Κρουστική τάση : 1,2/50μs

$R_{ακίδας} : 1\text{mm}$

$\hat{U}_k : 85\text{kV}$

$E : 1,2\text{ MV/cm}$

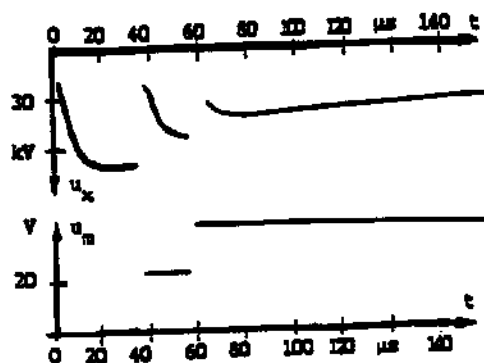
$C_m : 1835\text{nF}$

1.4.3.3 Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση.

Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται πριν και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ο μηχανισμός είναι ο ίδιος με αυτόν της γήρανσης και της διάτρησης. Παρακάτω εξετάζεται (για λόγους σύγκρισης με τη διάτρηση) ένα τυπικό παράδειγμα επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών πάχους 2mm σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος 1.4.3.3-1 υπολογίζεται από τη σχέση 1.4.3.1-2 η ενέργεια W των

ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η ενέργεια αυτή για το πρώτο και το τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα: 122eV και 96,5eV αντίστοιχα. Όπως φαίνεται η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτίνων Χ.



Σχήμα 1.4.3.3-1 : Παλμογραφήματα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pertinax (πάχους 2mm και διαμέτρου επιφανείας 150mm) υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου. Ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης : ακίδα - πλάκα

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. 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 1.4.3.3-2, 1.4.3.3-3 και 1.4.3.3-5 δίνονται ορισμένες από τις φωτογραφίες αυτές. Επίσης, στα σχήματα 1.4.3.3-4 και 1.4.3.3-5 δίνονται φωτογραφίες επιφανειακών δενδριτών, που αφορούν αντίστοιχα τη γήρανση και τη διάσπαση. Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2 mm και διαμέτρου 150mm), υπό κρουστικές τάσης 1,2/50 μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. Οι φωτογραφίες σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, καθώς και εκείνες της διάτρησης (στον αέρα ή στο λάδι), οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα.

Σχετικά με την απεικόνιση των δενδριτών στο φωτογραφικό φιλμ μπορούμε να υποθέσουμε, ότι ο δενδρίτης στη φωτογραφία του σχήματος 1.4.3.3-4 σχετίζεται με την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ εκείνος του σχήματος 1.4.3.3-5 με υπεριώδεις ακτίνες και ακτίνες Χ. Κατά τον τρόπο

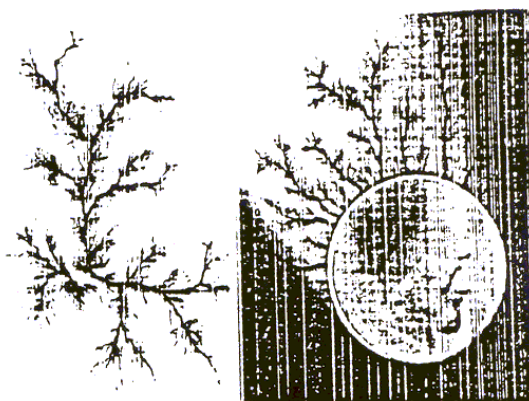
αυτό δίνεται μία φυσική ερμηνεία για τις γνωστές εικόνες Lichtenberg. Μπορεί επίσης να συμπεράνει κανείς, ότι ο φωτεινός δένδριτης και ο σχετός διάσπασης, που παρατηρούνται κατά την ηλεκτρική καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού, αφορούν το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στο υλικό.



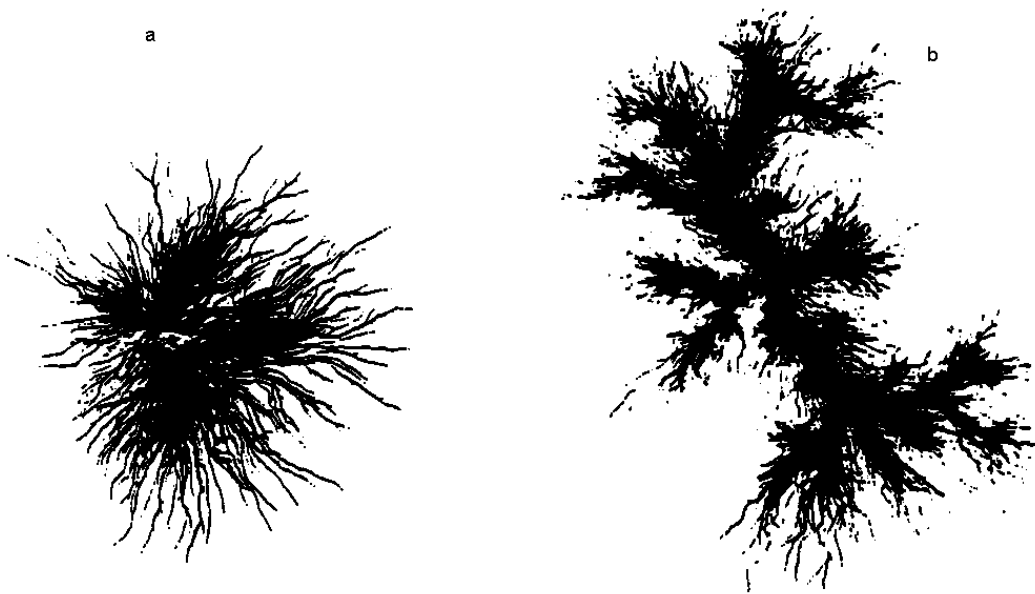
Σχήμα 1.4.3.3-2 : Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την καταπόνηση πολυμερούς στερεού μονωτικού πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs .
(φωτογράφιση ενός φύλλου δένδρου)



Σχήμα 1.4.3.3-3 : Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερούς στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση $1,2/50\mu\text{s}$.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.
 a) Φωτογράφιση φύλλου δένδρου.
 b) Φωτογράφιση βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι).
 c) Φωτογράφιση μεταλλικών αντικειμένων.



Σχήμα 1.4.3.3-4 : Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερών στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση $1,2/50\mu\text{s}$ (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα - πλάκα).



Σχήμα 1.4.3.3-5 : Φωτογραφίες δενδριτών κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα – πλάκα)

a) Δενδρίτης σε τιμές πεδίου πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση.

b) Δενδρίτης κατά την επιφανειακή διάσπαση.

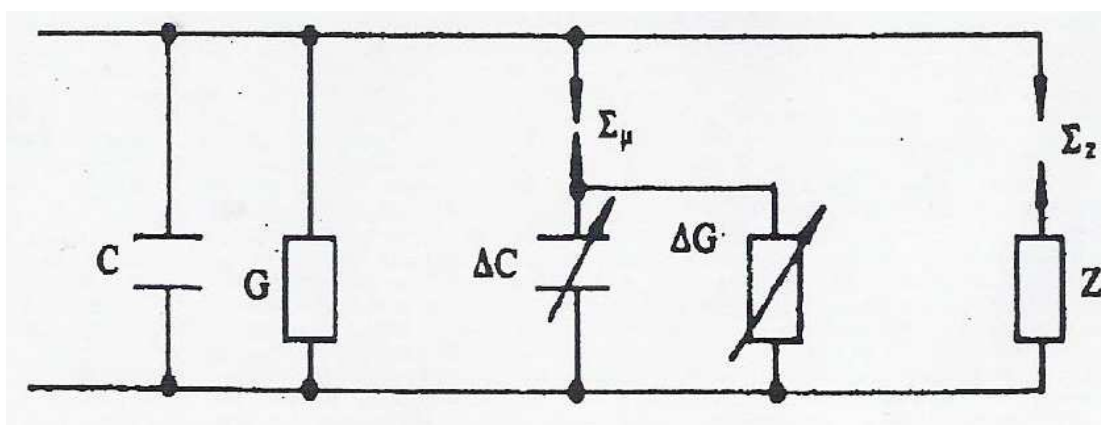
1.4.3.4 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών

Η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στα υλικά αυτά κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους. Οι πληροφορίες αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεώρηση των παραπάνω φαινομένων. Πλεονέκτημα όμως της μακροσκοπικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών μονωτικών φαίνεται ότι είναι ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη. Ο διαχωρισμός αυτός των μερικών εκκενώσεων δεν μπορεί να δοθεί από την θεωρία του ιονισμού με κρούσεις. Επομένως για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών χρειάζεται να συνδυαστούν οι δύο θεωρίες, ώστε να δίνουν περισσότερες πληροφορίες για την πράξη. Ένα

ισοδύναμο κύκλωμα, που έχει προταθεί για τον σκοπό αυτό, δίνεται στο σχήμα 1.4.3.4-1. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant-Philippoff 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 τότε, τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4.3.4-1 ως ακολούθως :

- 1) Για $E < E_0$: Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δεν διασπώνται οι σπινθηριστές Σ_0 και Σ).
- 2) Για $E > E_0$: Εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (διασπάται ο Σ_0) και η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διέπεται από την σχέση: $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\frac{-W}{k \cdot T}}$.
- 3) Για $E \gg E_0$: Εμφανίζεται αρνητική διαφορική αντίσταση και εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις. Δεν ισχύει η σχέση $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\frac{-W}{k \cdot T}}$, αλλά η σχέση : $Q = Q_0 \cdot e^{A(E^2 - E_0^2)/E^2}$

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



Σχήμα 1.4.3.4-1 : Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάτρηση.
 C : ιδανική χωρητικότητα
 G : ιδανική αγωγιμότητα.

ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων.

Z : αρνητική διαφορική αντίσταση.

Σ_0 : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

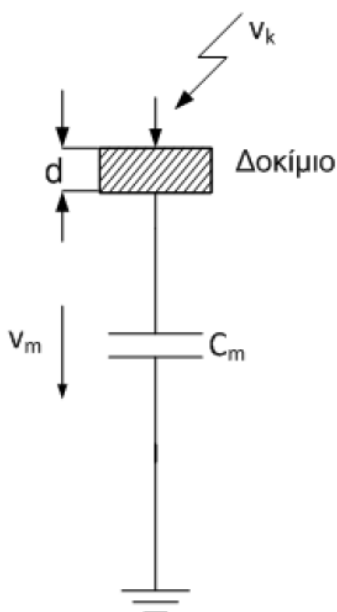
Σ : σπινθηριστής εκδήλωσης της Z .

2. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των μερικών εκκενώσεων και των επιπτώσεών τους στα στερεά μονωτικά υλικά. Ειδικότερα εξετάζονται οι επιπτώσεις της καταπόνησης πεπιεσμένου χαρτιού πάχους $d=1\text{mm}$ και $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών από κρουστικές τάσεις $10/200\mu\text{s}$.

3. Στατιστική μελέτη της γήρανσης πεπιεσμένου χαρτιού εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστική τάση +10/200μs και -200μs.

Στην ενότητα αυτή γίνεται η παρουσίαση των μεγεθών που μετρήθηκαν και υπολογίστηκαν με τη βοήθεια της εργαστηριακής διάταξης του σχήματος 3-1 και τις γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν από την ανάλυση των μεγεθών αυτών.



Σχήμα 3-1 : Εργαστηριακή διάταξη

Με τη βοήθεια της διάταξης μετρώνται οι τιμές των παρακάτω μεγεθών:

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$u_{εν}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

ενώ από τύπους υπολογίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

$E_k = 2 \cdot U_k / (R \cdot \ln(4 \cdot d / R))$: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

$E_{ev} = 2 \cdot u_{ev} / (R \cdot \ln(4 \cdot d / R))$: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_{ev}

$q_1 = C_m \cdot u_1$: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$q_2 = C_m \cdot u_2$: στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

$i_1 = q_1 / t_1$: ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$i_2 = q_2 / t_2$: ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

$$\Delta i = \Delta q / \Delta t$$

$$\Delta W_e = 0,5 \cdot \Delta u$$
 : ενέργεια ηλεκτρονίων

όπου

$R = 0,9mm$: ακτίνα καμπυλότητας

d : πάχος μονωτικού

3.1 Συγκεντρωτικοί πίνακες και σχεδιαγράμματα για δείγμα πάχους d=1mm υπό κρουστική τάση +10/200μs.

U_k (kV)	E_k (MV/cm)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)	ΔW_e (eV)
26,10	0,389	24,82	0,370	0,524	1,571	1,047	0,52
32,00	0,477	28,06	0,418	0,619	3,667	3,048	1,52
43,80	0,653	33,56	0,500	1,000	18,429	17,429	8,71
50,50	0,752	37,00	0,551	1,000	25,571	24,571	12,29
57,30	0,854	40,40	0,602	1,000	37,286	36,286	18,14
64,00	0,953	43,80	0,653	0,250	10,650	10,400	5,20
70,70	1,053	47,00	0,700	0,000	16,230	16,230	8,12
77,50	1,155	69,81	1,040	2,000	27,820	25,820	12,91

Πίνακας 3.1-1 : συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων για δείγμα πάχους d=1mm υπό κρουστική τάση +10/200μs όπου:

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

u_{ev} : κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_{ev}

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

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u = u_2 - u_1$

ΔW_e : ενέργεια ηλεκτρονίων

C_m (nf)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	Δt (μs)	i_1 (mA)	i_2 (mA)	Δi (mA)
210	0,11	0,33	17,39	40,67	23,28	6,33	8,11	9,44
210	0,13	0,77	8,24	30,04	21,80	15,78	25,63	29,36
210	0,21	3,87	5,96	46,04	40,08	35,23	84,06	91,32
210	0,21	5,37	5,56	70,22	64,66	37,77	76,47	79,80
210	0,21	7,83	5,08	66,92	61,84	41,34	117,01	123,22
1000	0,25	10,65	4,00	93,32	89,32	62,50	114,12	116,44
1000	0,00	16,23	4,00	83,41	79,41		194,58	204,38
1835	3,67	51,05	0,00	11,64	11,64		4385,71	4070,42

Πίνακας 3.1-2 : συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων για δείγμα πάχους $d=1mm$ υπό κρουστική τάση $+10/200\mu s$ όπου:

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

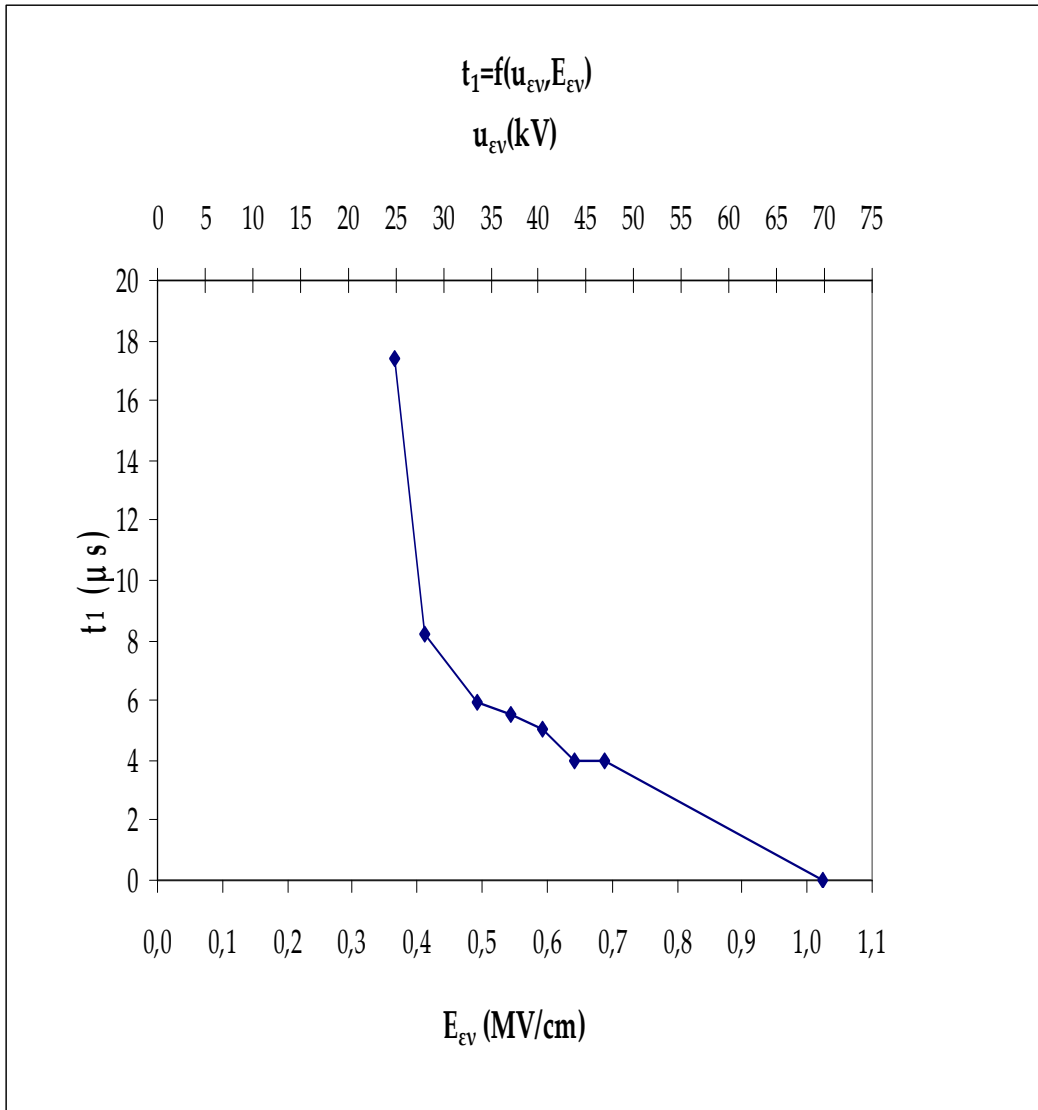
t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

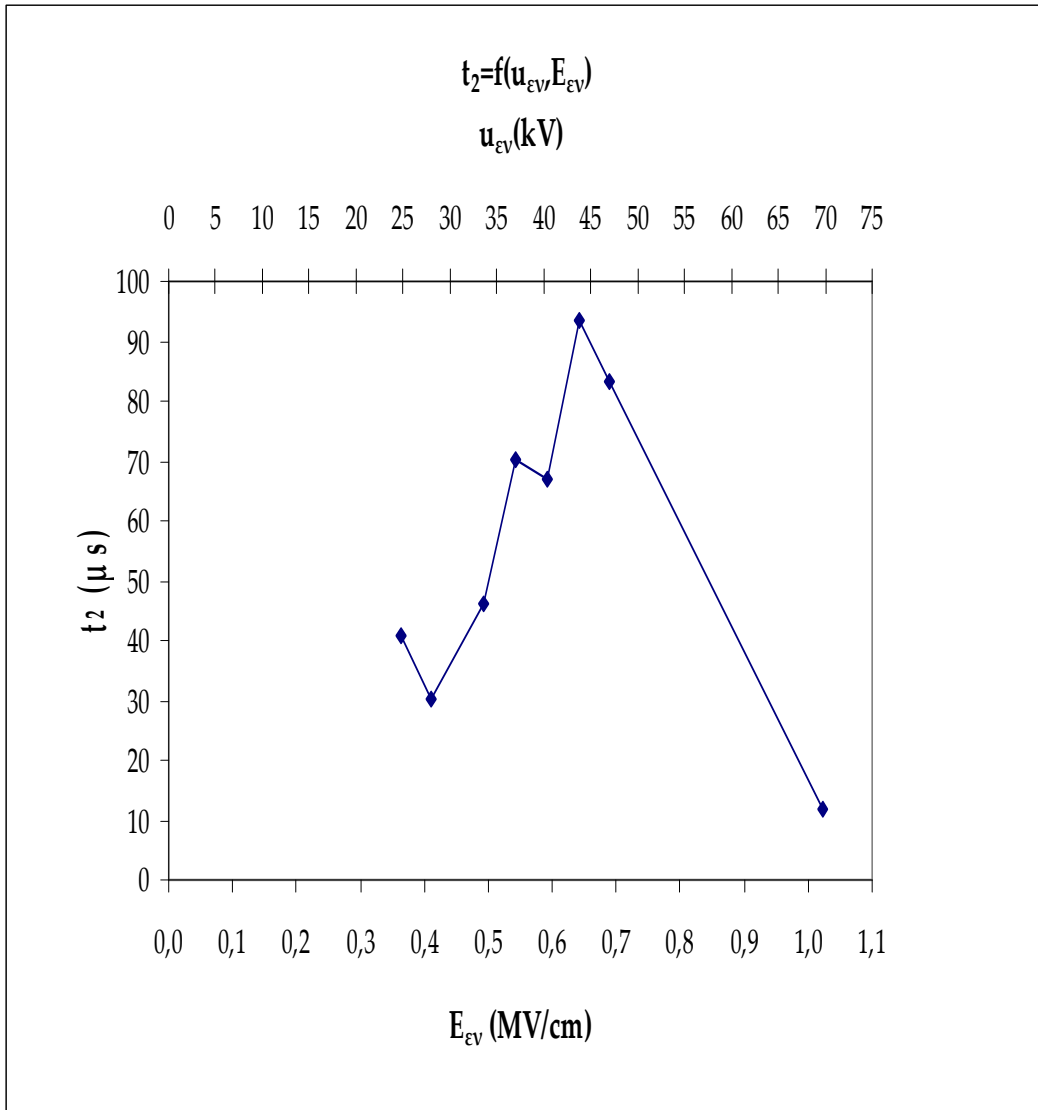
i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

$$\Delta i = \Delta q / \Delta t$$



Σχήμα 3.1-1 : Χαρακτηριστική $t_1 = f(u_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 $u_{\varepsilon V}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 $E_{\varepsilon V}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon V}$
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

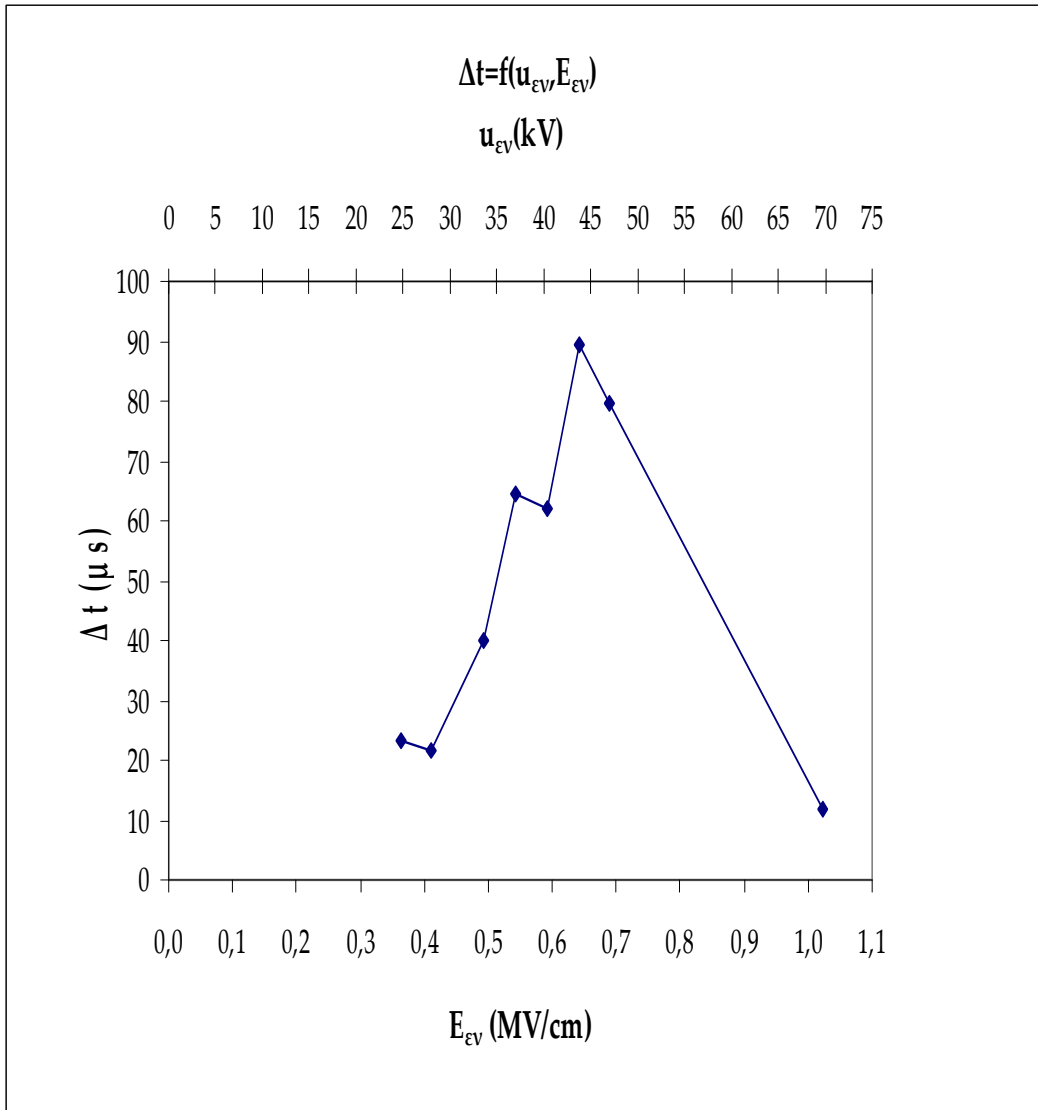


Σχήμα 3.1-2 : Χαρακτηριστική $t_2 = f(u_{\epsilon V}, E_{\epsilon V})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

$u_{\epsilon V}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\epsilon V}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\epsilon V}$

t_2 : χρόνος περαιώσης των μερικών εκκενώσεων

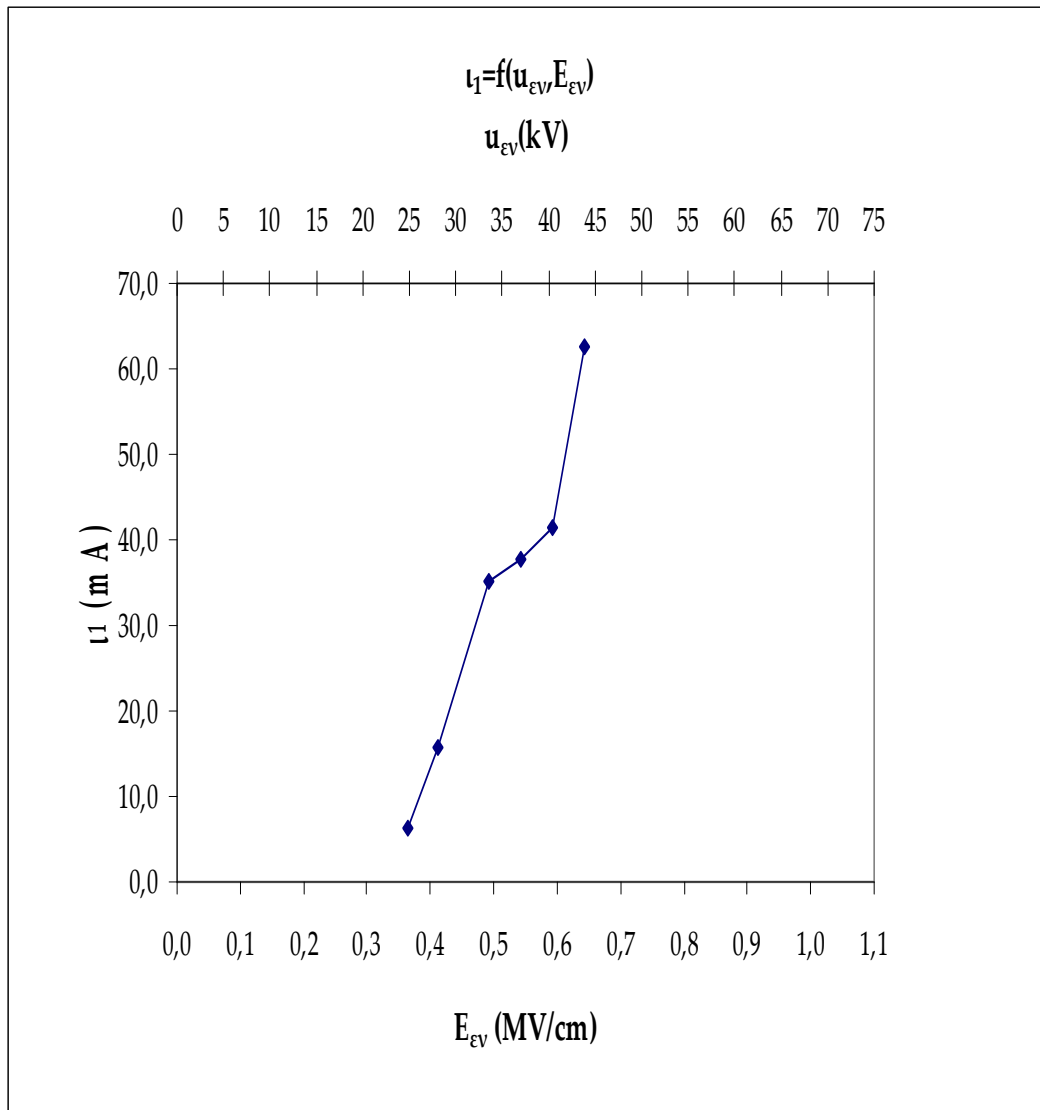


Σχήμα 3.1-3 : Χαρακτηριστική $\Delta t = f(u_{\epsilon\nu}, E_{\epsilon\nu})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu s$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

$u_{\epsilon\nu}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\epsilon\nu}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\epsilon\nu}$

Δt : $t_2 - t_1$

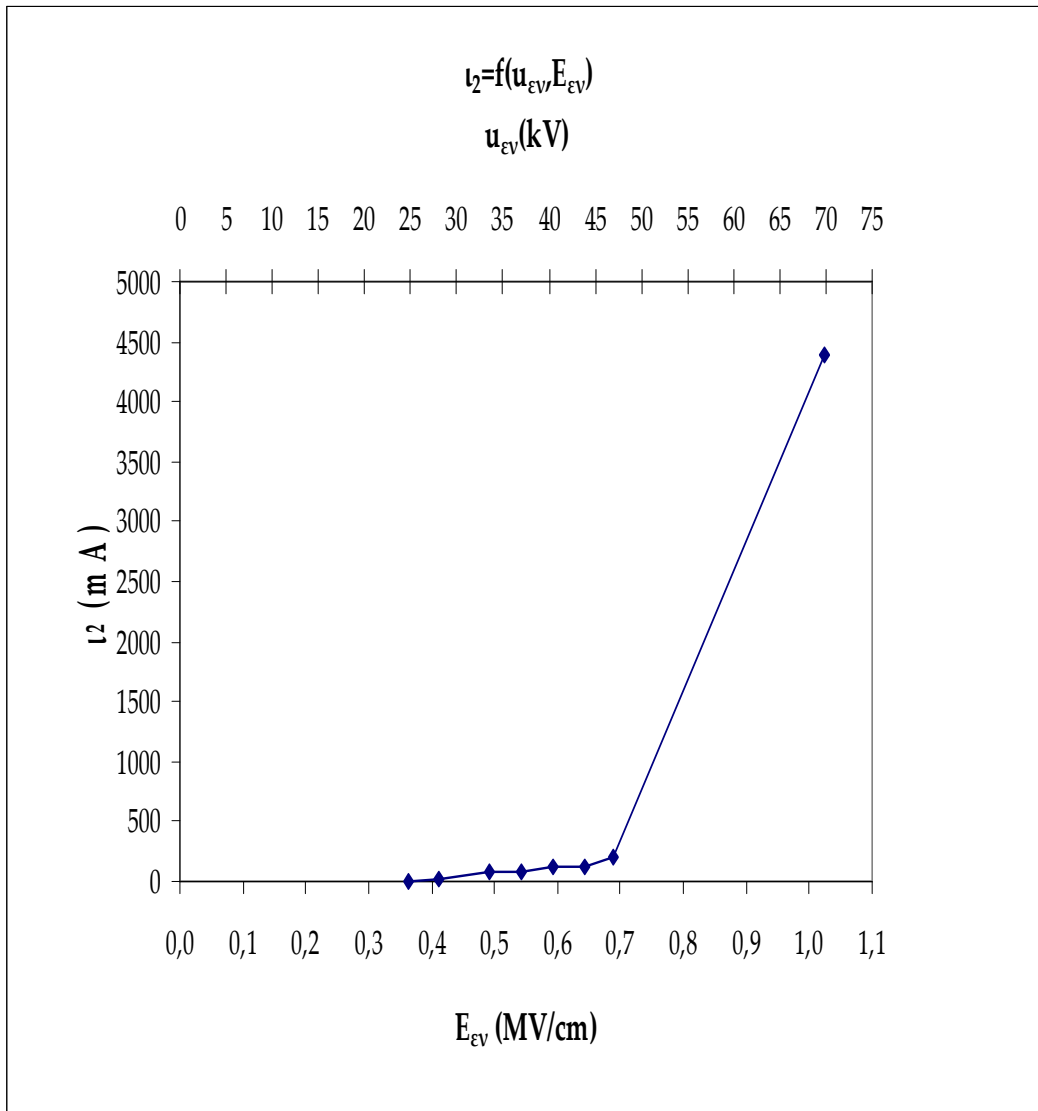


Σχήμα 3.1-4 : Χαρακτηριστική $i_1 = f(u_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

$u_{\varepsilon V}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\varepsilon V}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon V}$

i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρηση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

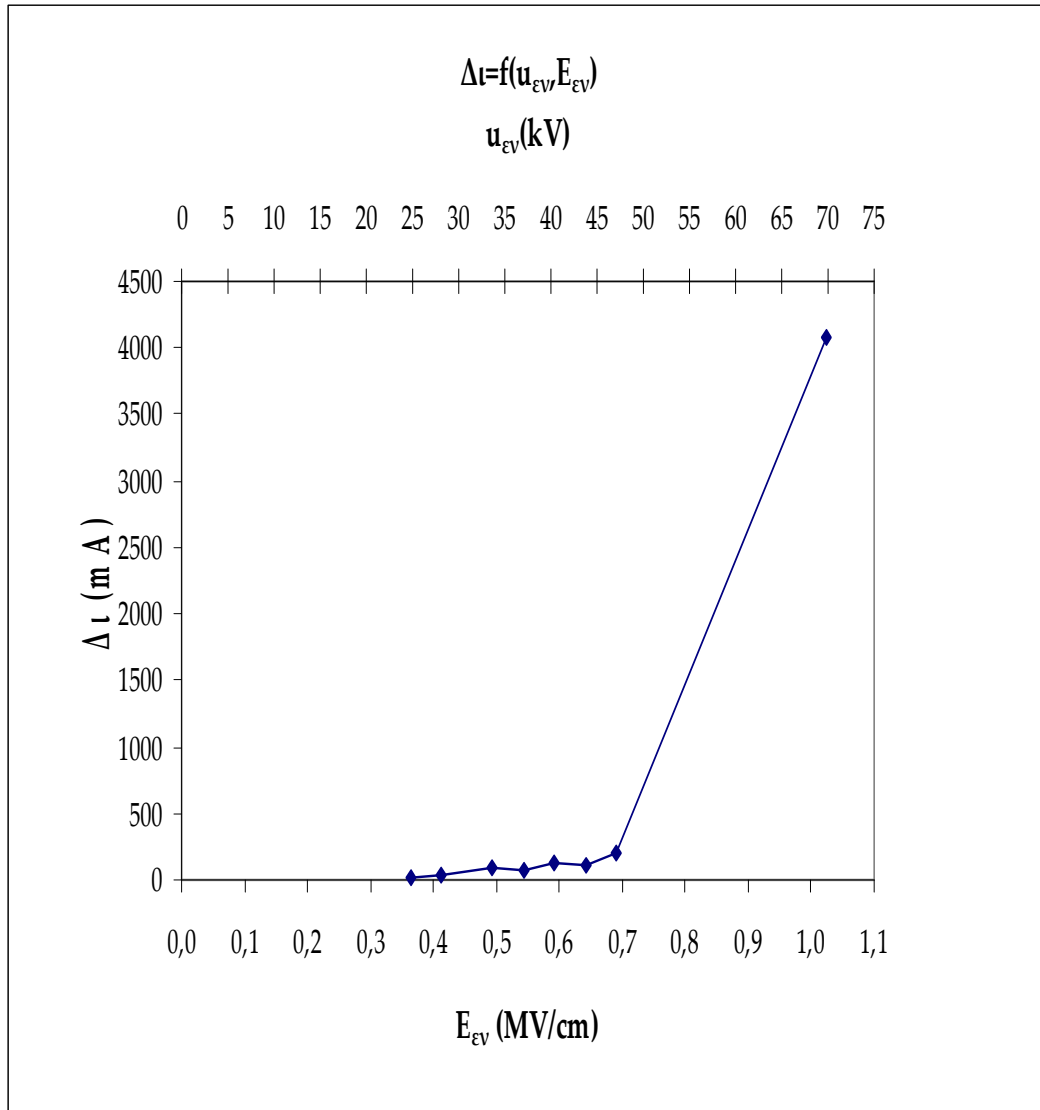


Σχήμα 3.1-5 : Χαρακτηριστική $i_2 = f(u_{εν}, E_{εν})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

$u_{εν}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{εν}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{εν}$

i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων

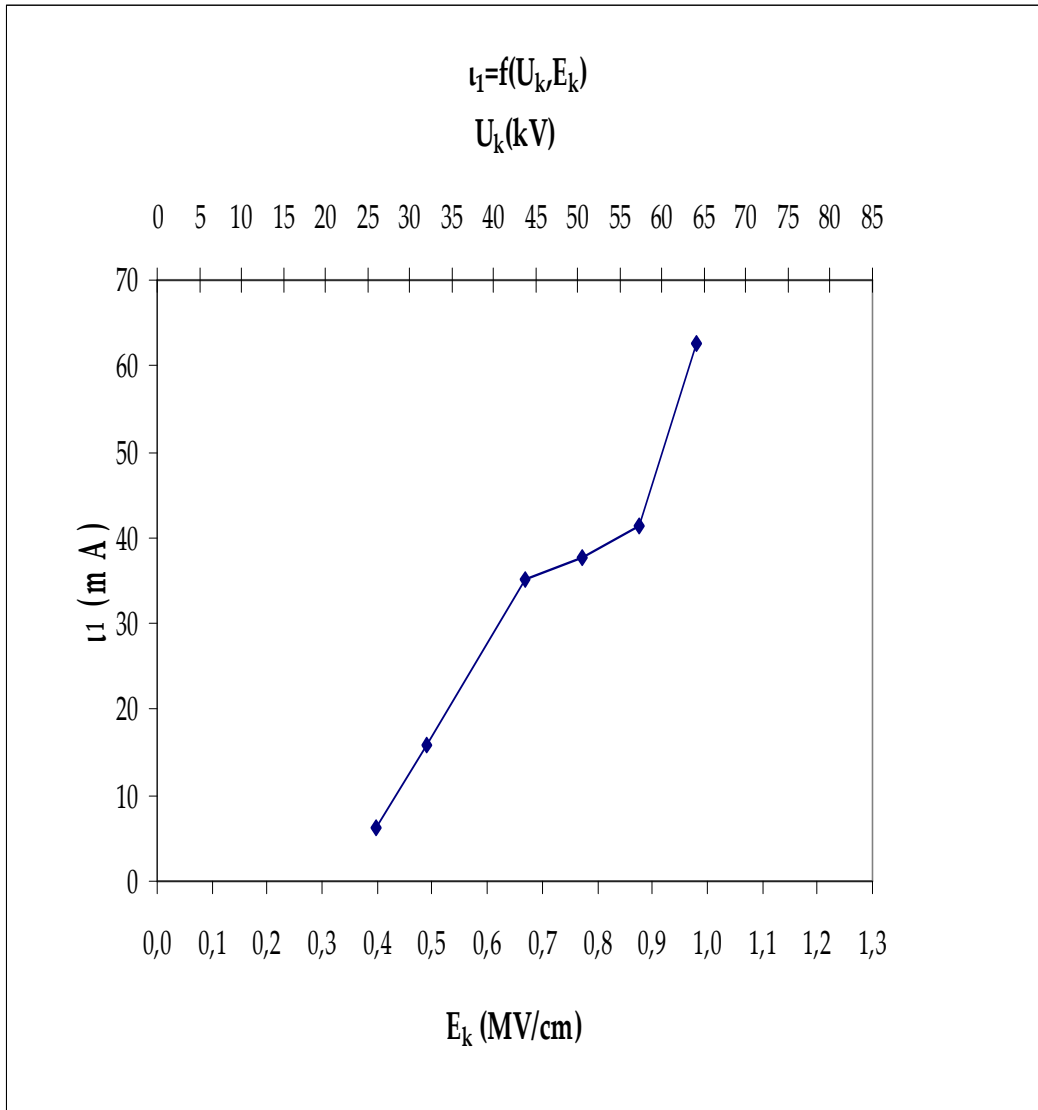


Σχήμα 3.1-6 : Χαρακτηριστική $\Delta i = f(u_{\varepsilon v}, E_{\varepsilon v})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

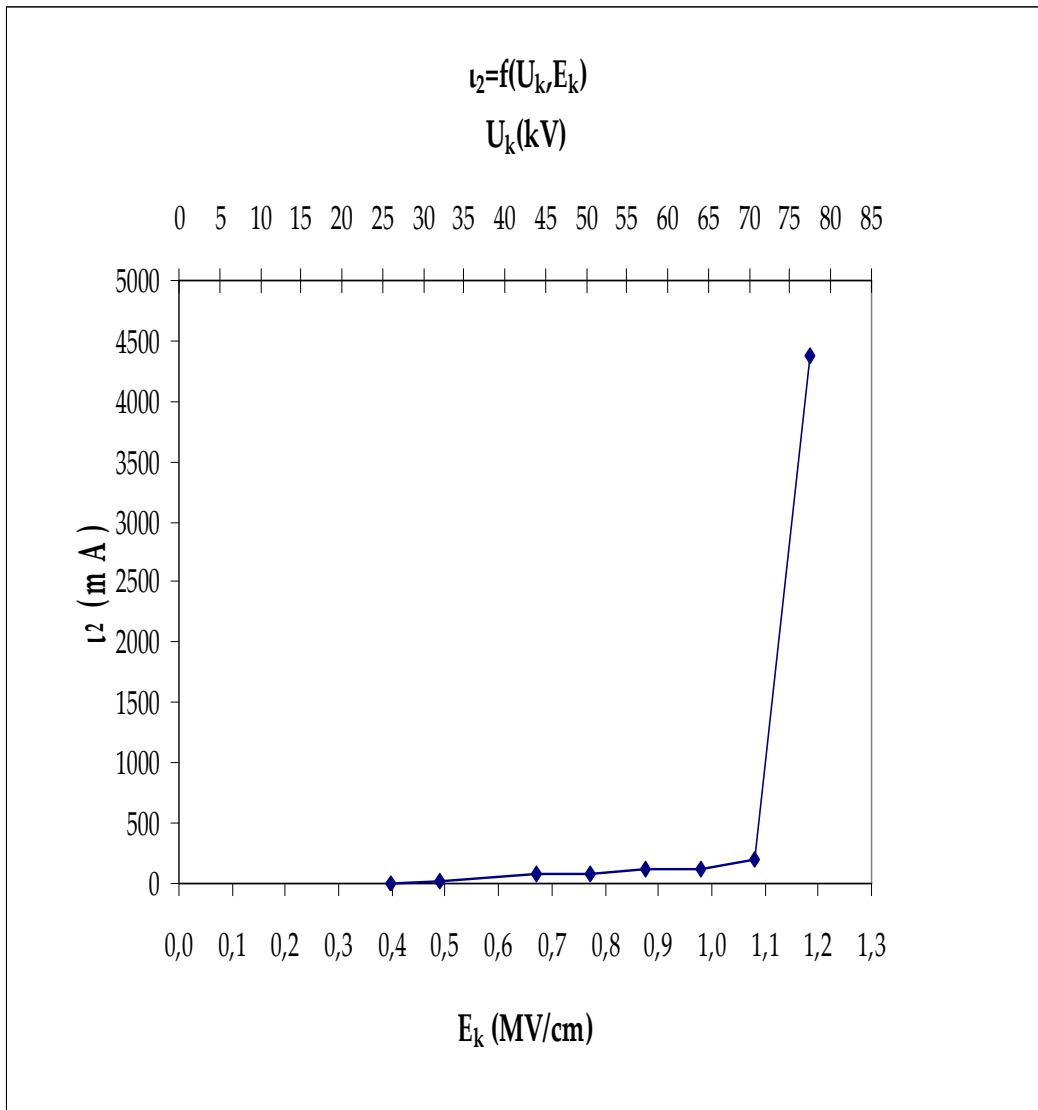
$u_{\varepsilon v}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\varepsilon v}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon v}$

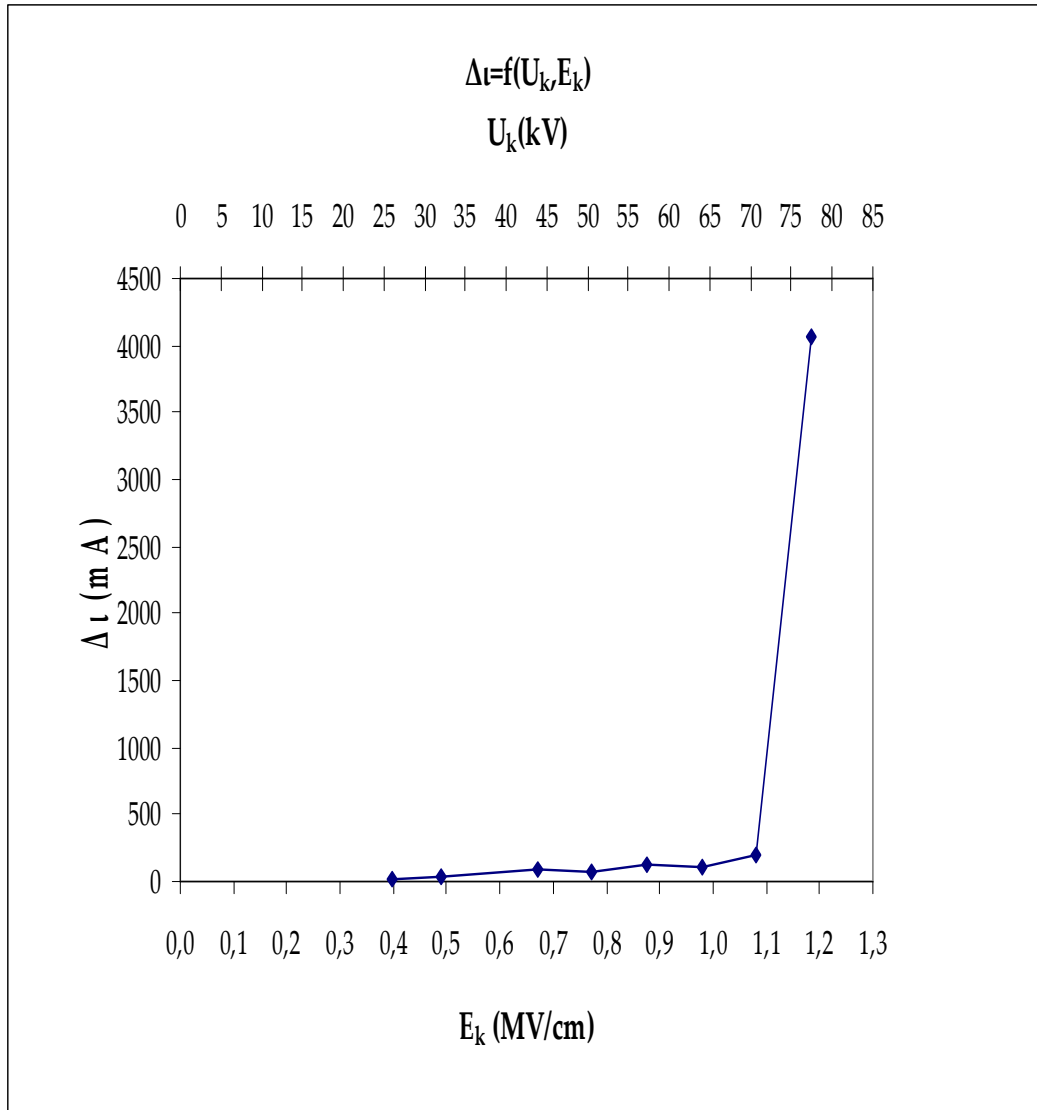
Δi : $\Delta q / \Delta t$



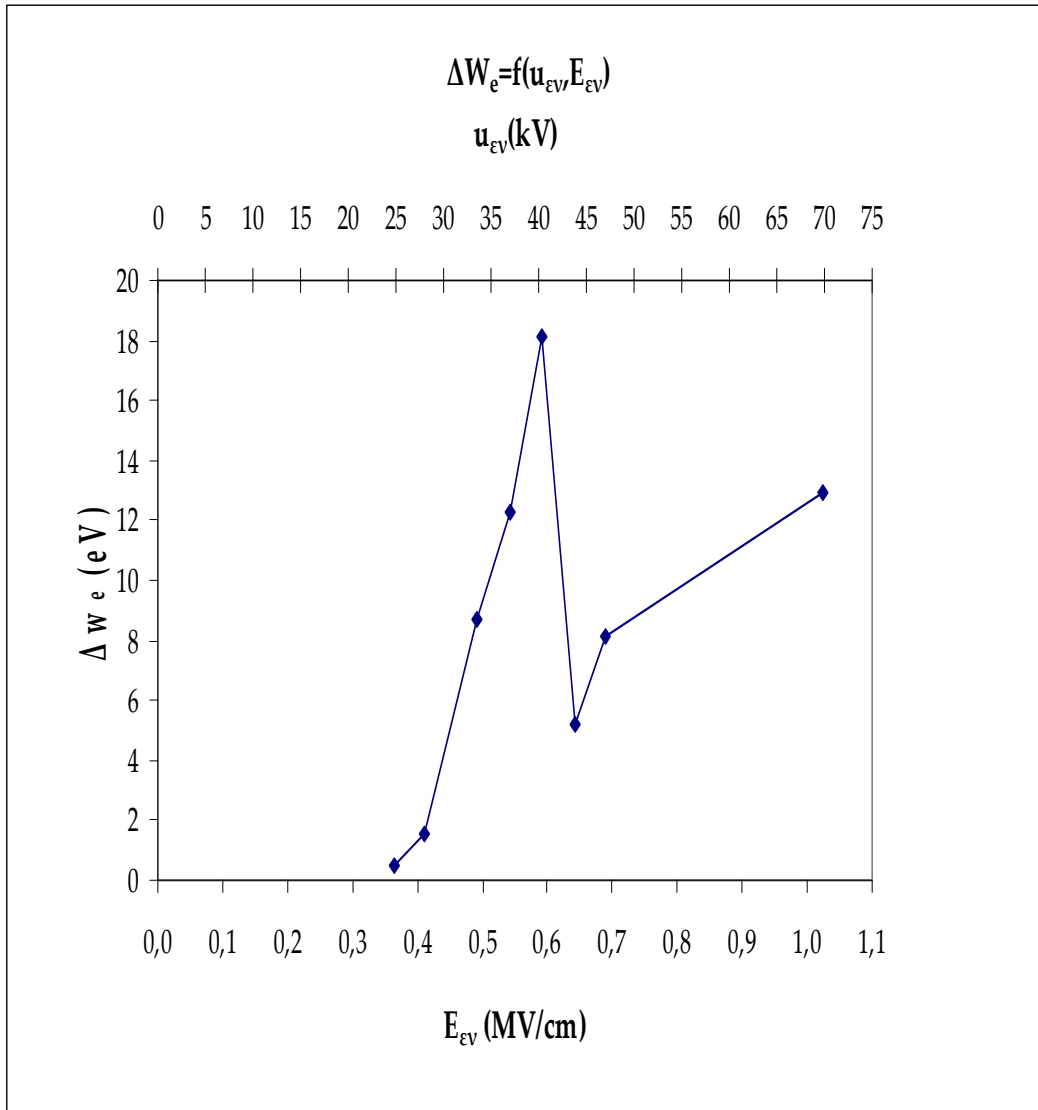
Σχήμα 3.1-7 : Χαρακτηριστική $i_1 = f(u_k, E_k)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_k
 i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.1-8 : Χαρακτηριστική $i_2 = f(u_k, E_k)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_k
 i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.1-9 : Χαρακτηριστική $\Delta i = f(u_k, E_k)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_k
 Δi : $\Delta q / \Delta t$

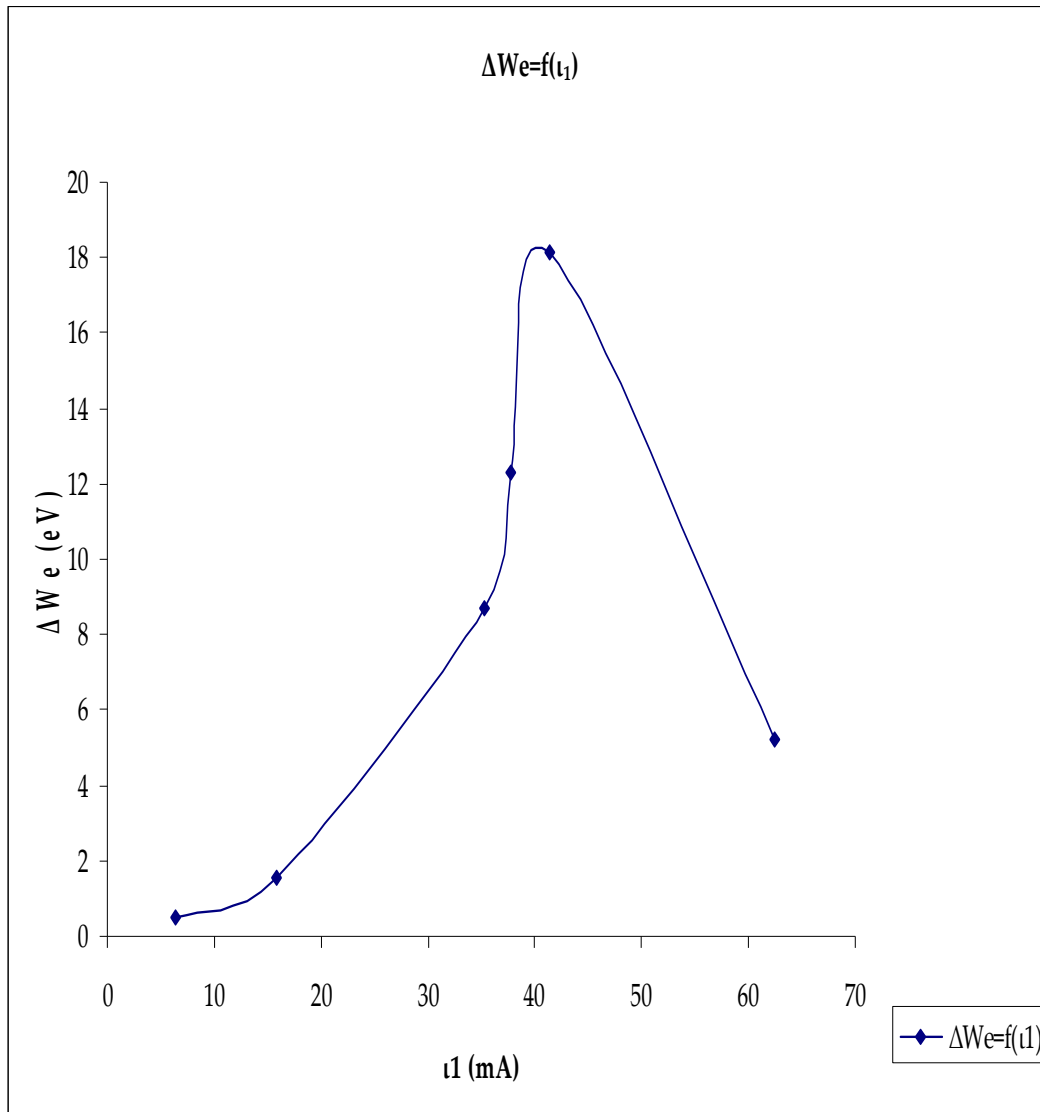


Σχήμα 3.1-10 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(u_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

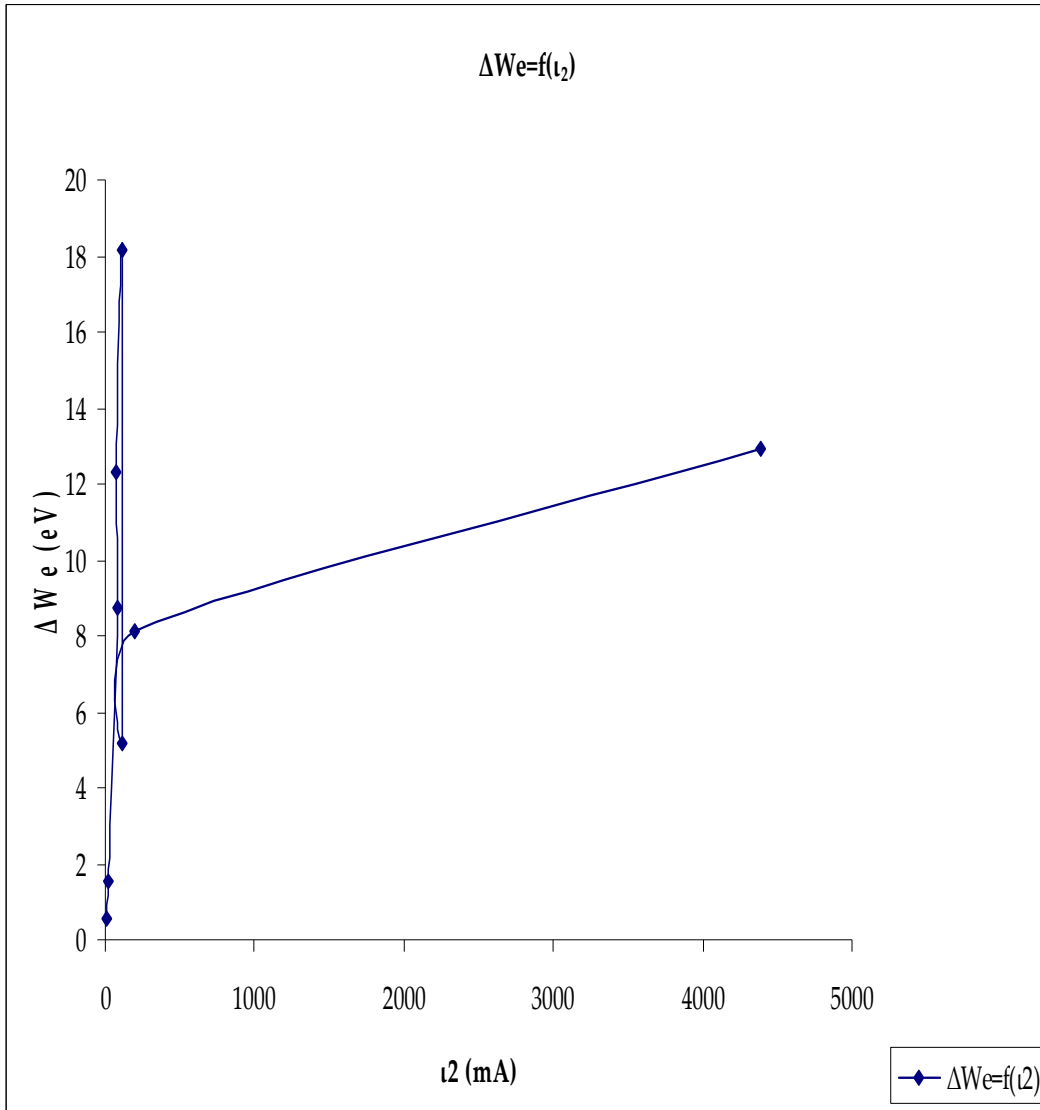
$u_{\varepsilon V}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\varepsilon V}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon V}$

ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης



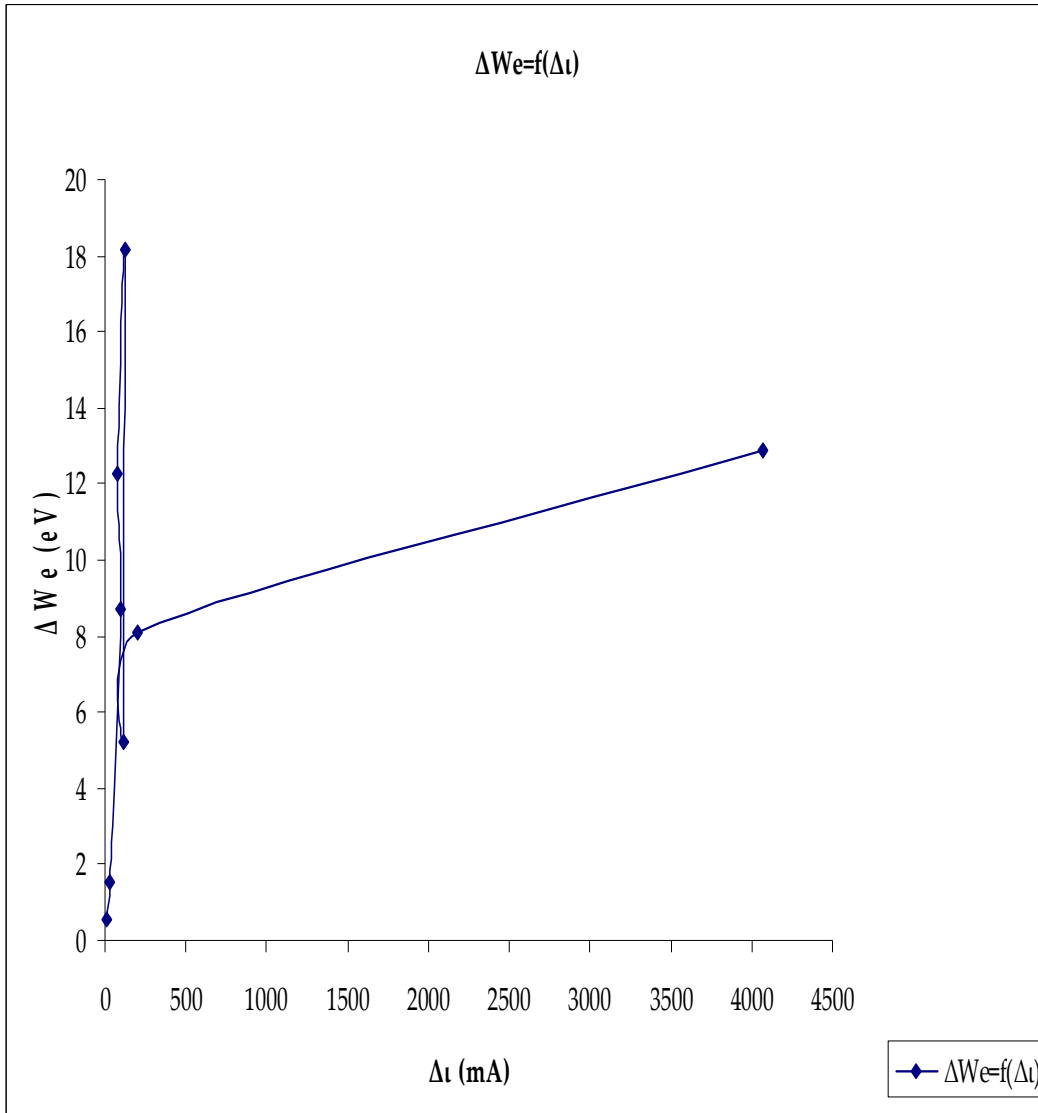
Σχήμα 3.1-11 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_1)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης
 i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.1-12 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_2)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης

i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.1-13 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(\Delta t)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης
 Δt : $\Delta q / \Delta t$

3.2 Συγκεντρωτικοί πίνακες και σχεδιαγράμματα για δείγμα πάχους d=1mm υπό κρουστική τάση -10/200μs

U_k (kV)	E_k (MV/cm)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)	ΔW_e (eV)
-19,90	-0,296	-19,55	-0,291	0,381	0,524	0,143	0,07
-26,90	-0,401	-25,70	-0,383	0,524	1,476	0,952	0,48
-33,70	-0,502	-30,27	-0,451	0,619	4,190	3,571	1,79
-40,40	-0,602	-34,49	-0,514	1,000	9,952	8,952	4,48
-47,10	-0,702	-37,82	-0,563	1,000	22,286	21,286	10,64
-52,20	-0,778	-42,71	-0,636	2,000	34,952	32,952	16,48
-60,60	-0,903	-43,80	-0,653	2,000	42,048	40,048	20,02
-67,40	-1,004	-43,80	-0,653	0,500	9,670	9,170	4,59
-70,40	-1,049	-50,50	-0,752	0,000	14,510	14,510	7,26

Πίνακας 3.2-1 : συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων για δείγμα πάχους d=1mm υπό κρουστική τάση -10/200μs όπου:

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

u_{ev} : κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_{ev}

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

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u = u_2 - u_1$

ΔW_e : ενέργεια ηλεκτρονίων

C_m (nf)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	Δt (μs)	i_1 (mA)	i_2 (mA)	Δi (mA)
210	0,08	0,11	18,25	24,50	6,25	4,38	4,49	4,80
210	0,11	0,31	11,76	29,54	17,78	9,36	10,49	11,24
210	0,13	0,88	9,32	33,30	23,98	13,95	26,42	31,27
210	0,21	2,09	7,60	40,43	32,83	27,63	51,69	57,26
210	0,21	4,68	6,42	45,14	38,72	32,71	103,68	115,45
210	0,42	7,34	5,72	59,94	54,22	73,43	122,45	127,63
210	0,42	8,83	4,00	76,36	72,36	105,00	115,64	116,23
1000	0,50	9,67	4,00	91,41	87,41	125,00	105,79	104,91
1000	0,00	14,51	4,00	98,09	94,09		147,93	154,21

Πίνακας 3.2-2 : συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων για δείγμα πάχους $d=1mm$ υπό κρουστική τάση $-10/200\mu s$ όπου

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

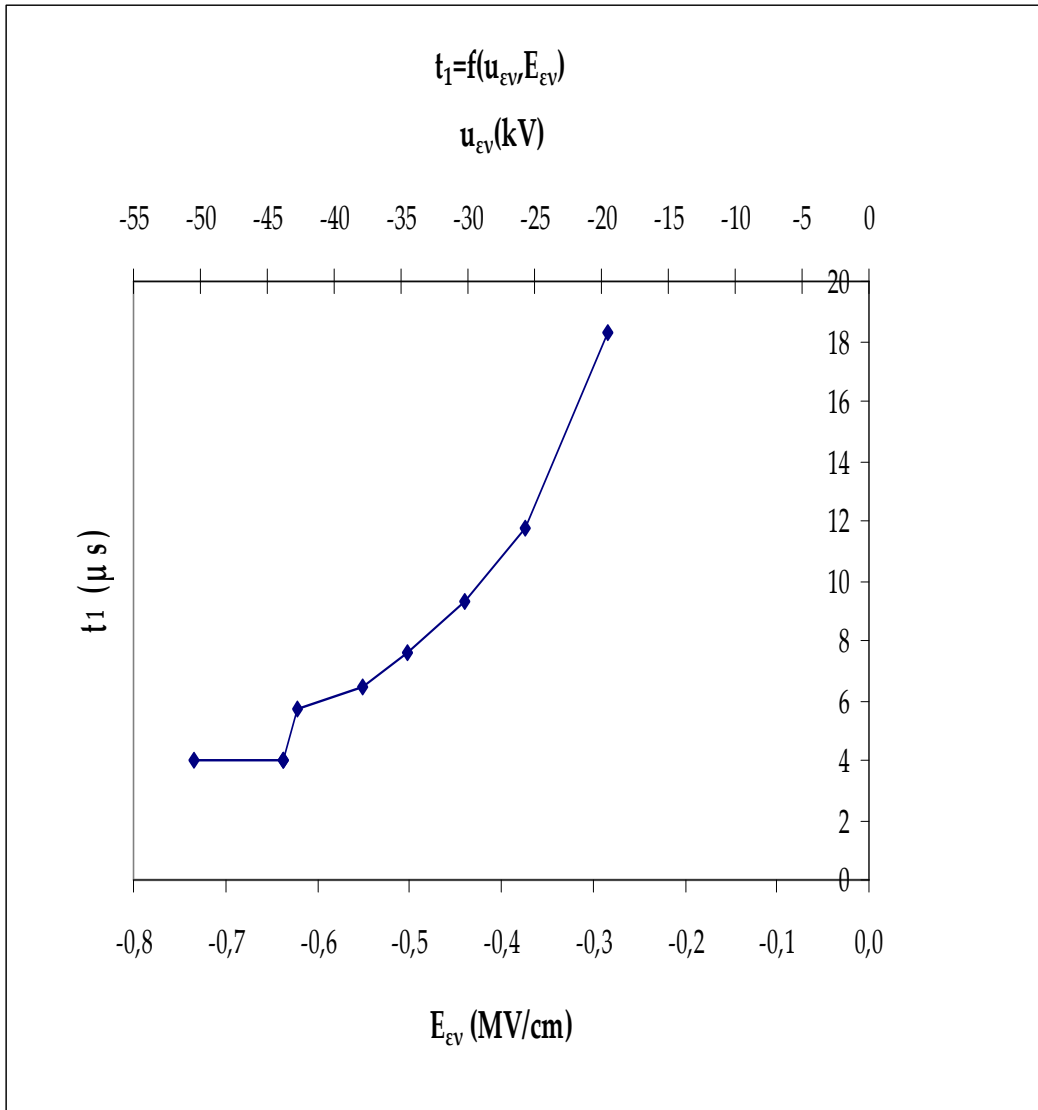
t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

$$\Delta i = \Delta q / \Delta t$$



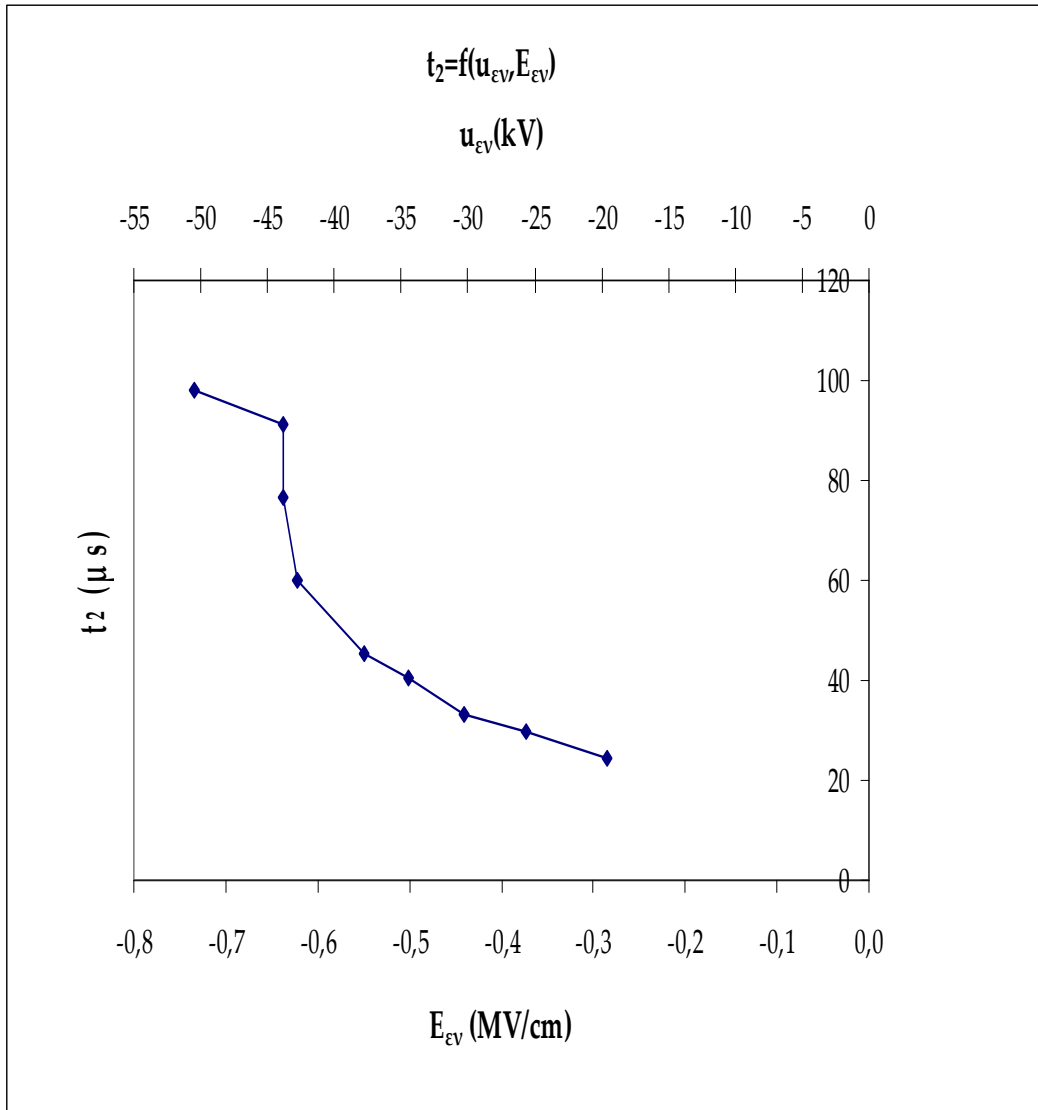
Σχήμα 3.2-1 : Χαρακτηριστική $t_1 = f(u_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$ για το πεπιεσμένο χαρτί

πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

$u_{\varepsilon V}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\varepsilon V}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon V}$

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων



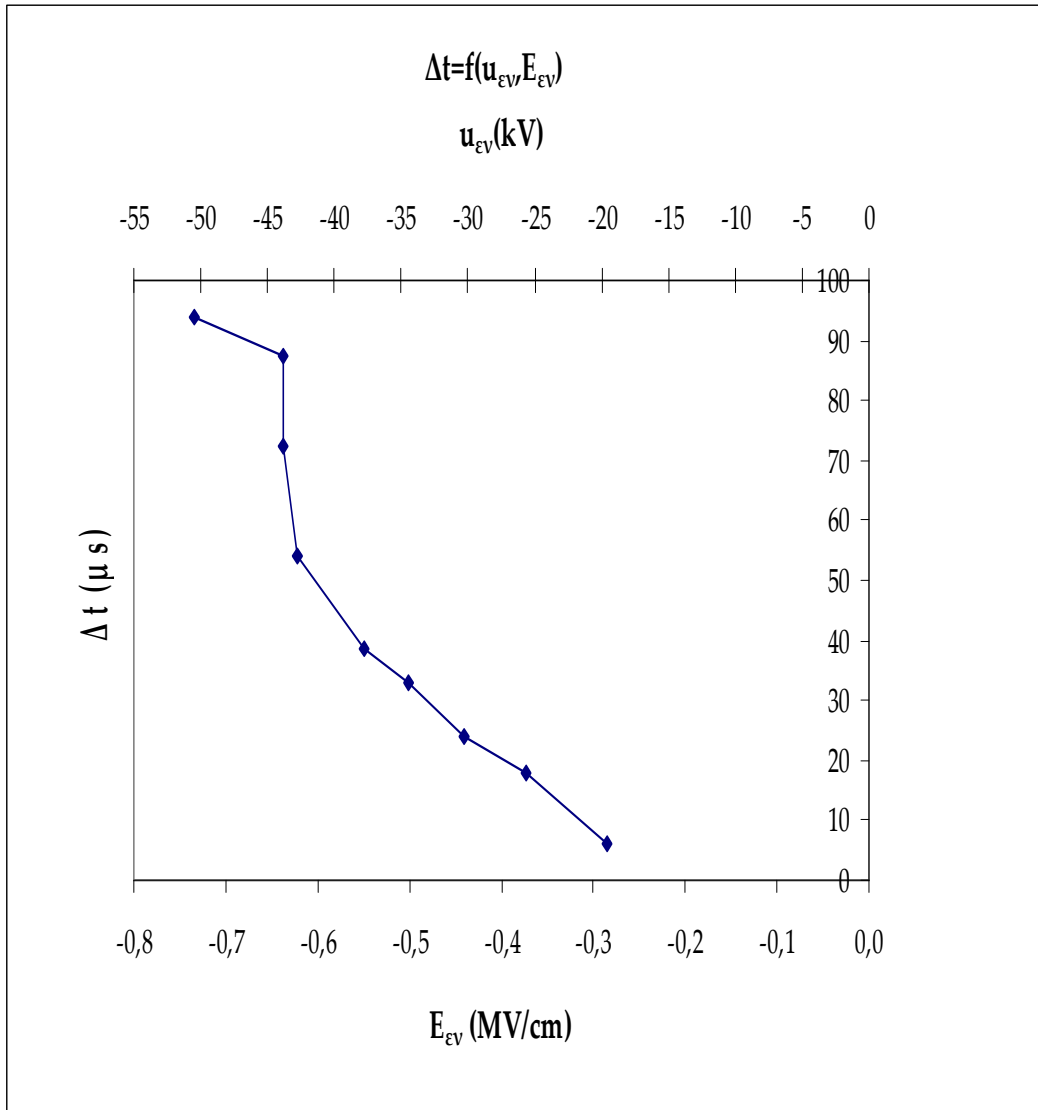
Σχήμα 3.2-2 : Χαρακτηριστική $t_2 = f(u_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$ για το πεπιεσμένο χαρτί

πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

$u_{\varepsilon V}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\varepsilon V}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon V}$

t_2 : χρόνος περαιώσης των μερικών εκκενώσεων

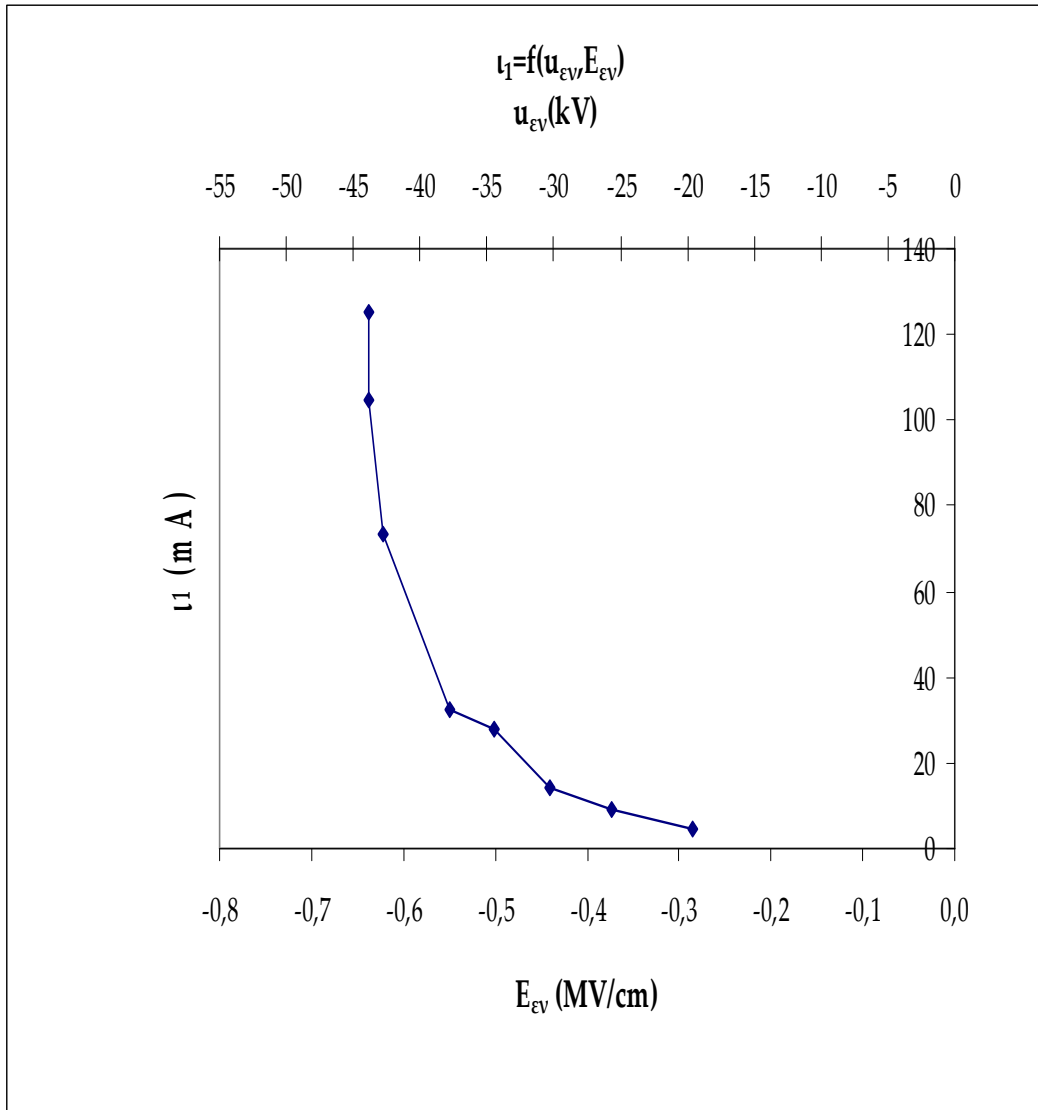


Σχήμα 3.2-3 : Χαρακτηριστική $\Delta t = f(u_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

$u_{\varepsilon V}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\varepsilon V}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon V}$

Δt : $t_2 - t_1$

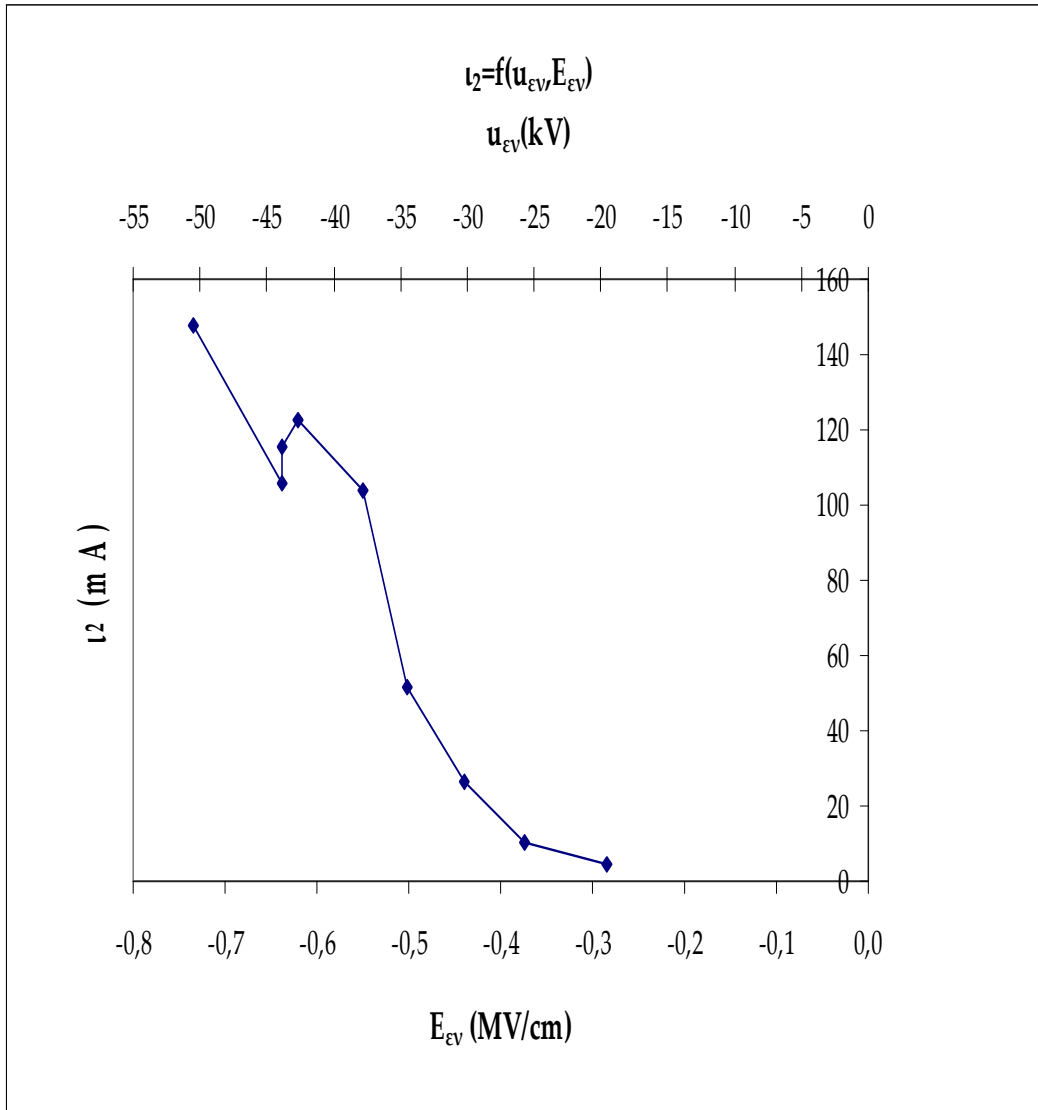


Σχήμα 3.2-4 : Χαρακτηριστική $i_1 = f(u_{ev}, E_{ev})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

u_{ev} : κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_{ev}

i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρηση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

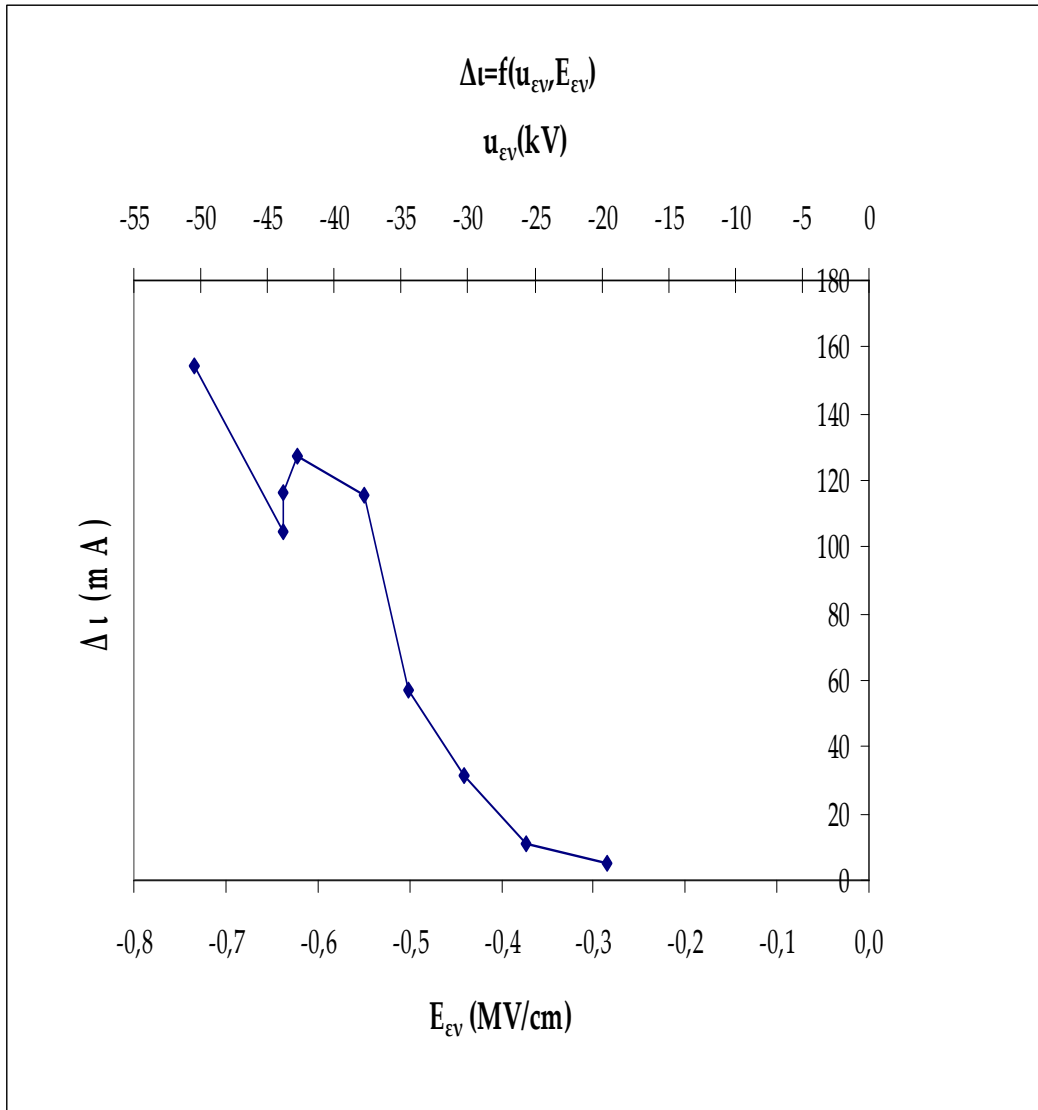


Σχήμα 3.2-5 : Χαρακτηριστική $i_2 = f(u_{ev}, E_{ev})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1mm$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu s$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9mm$ – πλάκα)

u_{ev} : κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_{ev}

i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων

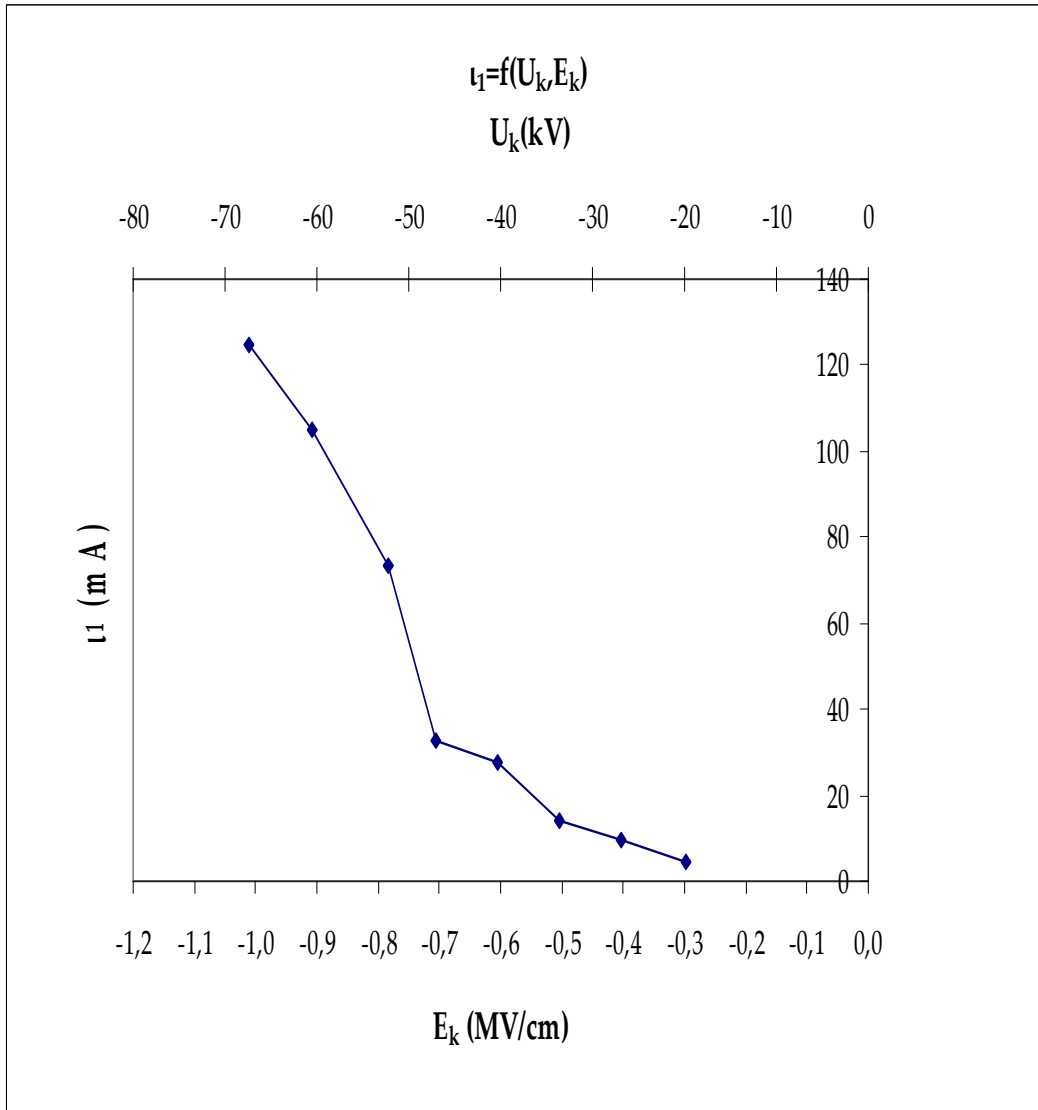


Σχήμα 3.2-6 : Χαρακτηριστική $\Delta I = f(u_{ev}, E_{ev})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

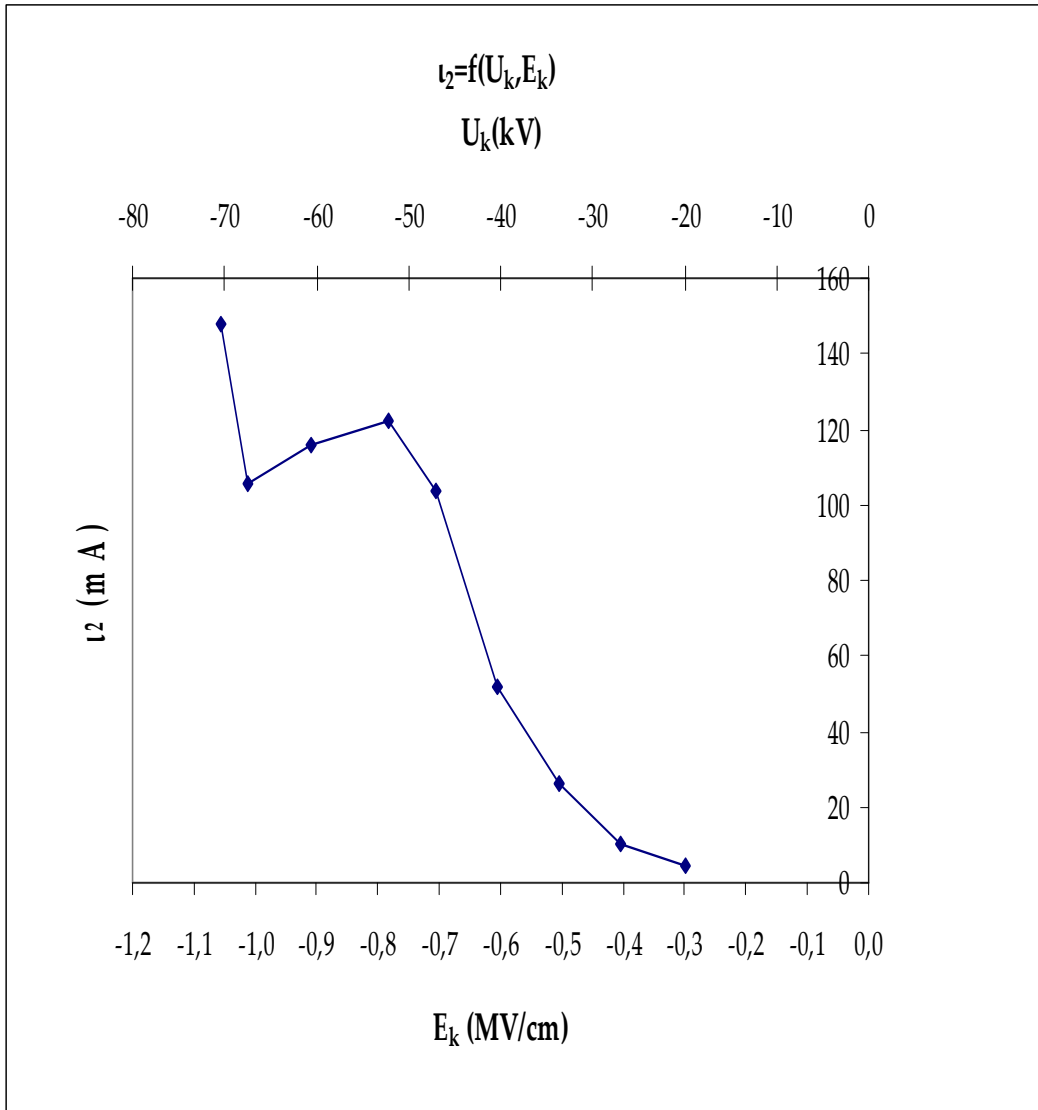
u_{ev} : κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_{ev}

ΔI : $\Delta q / \Delta t$



Σχήμα 3.2-7 : Χαρακτηριστική $i_1 = f(u_k, E_k)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_k
 i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

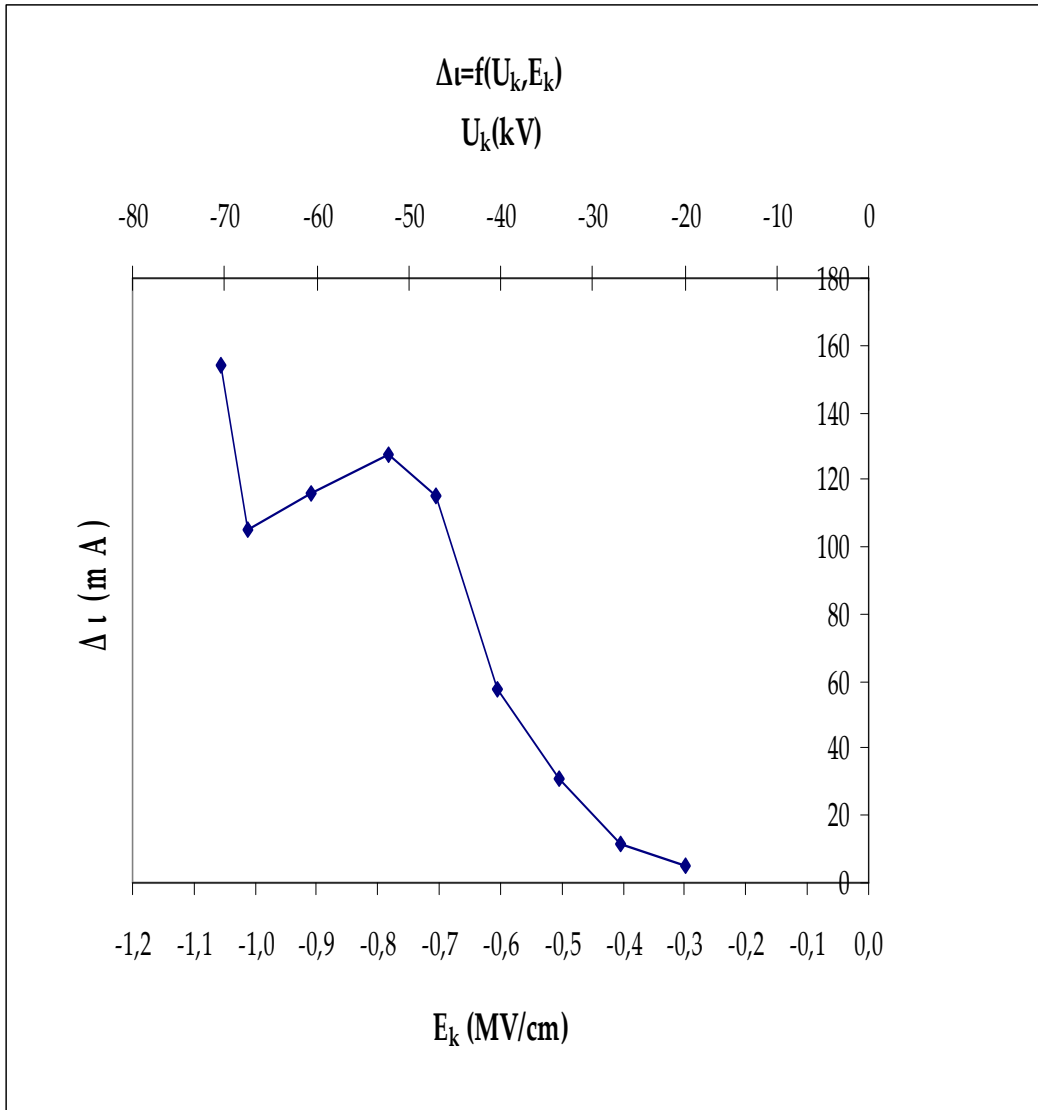


Σχήμα 3.2-8 : Χαρακτηριστική $i_2 = f(u_k, E_k)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

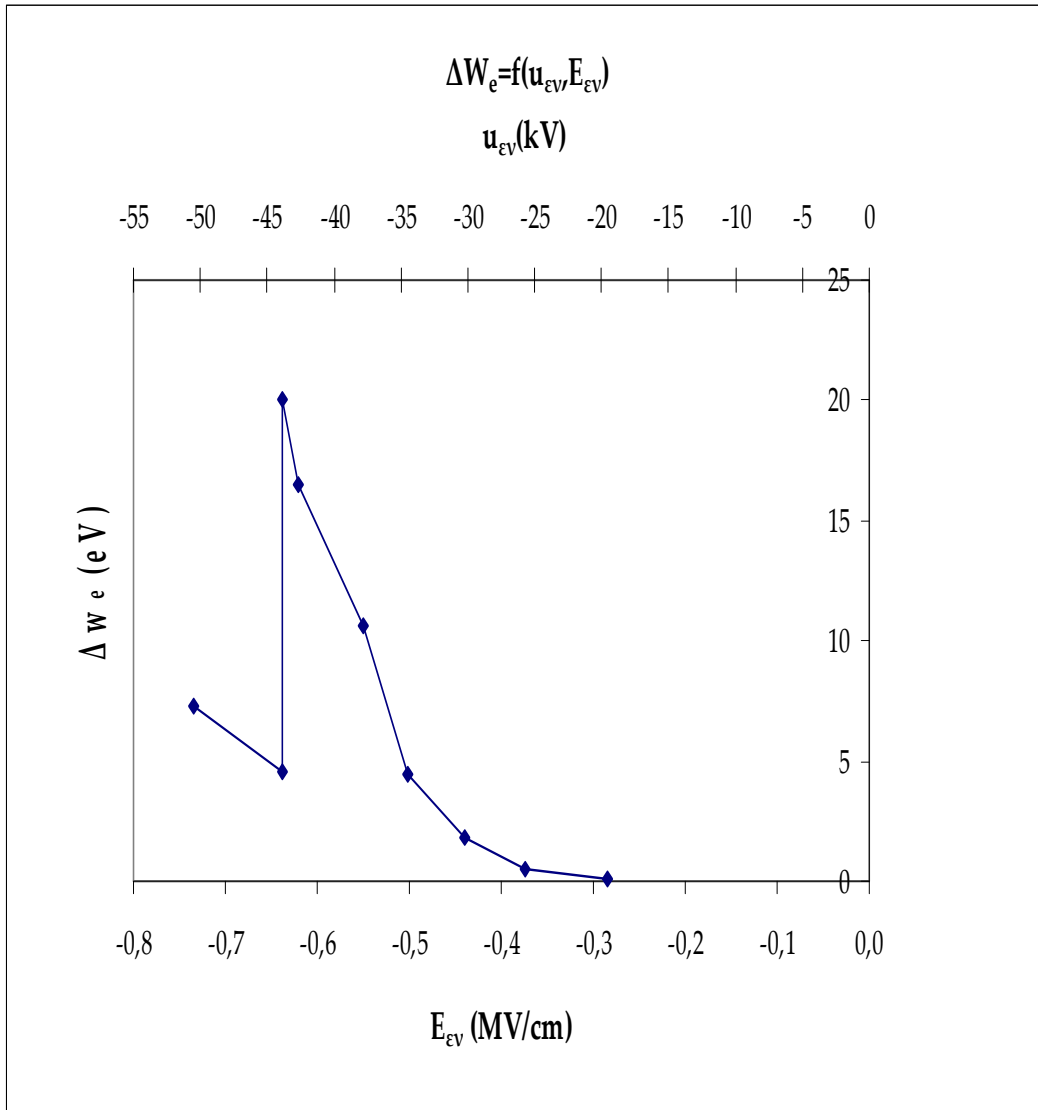
u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_k

i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.2-9 : Χαρακτηριστική $\Delta i = f(u_k, E_k)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_k
 Δi : $\Delta q / \Delta t$

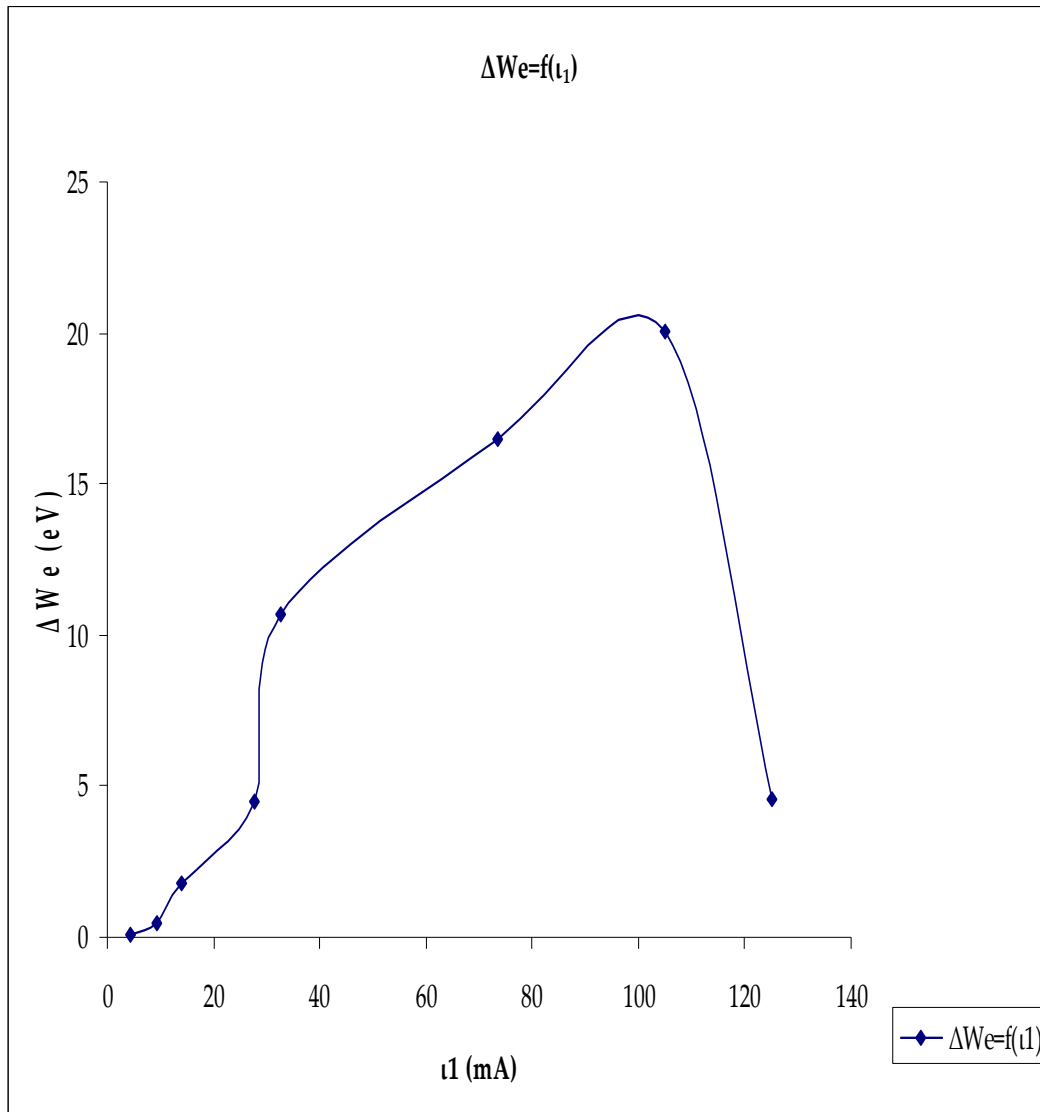


Σχήμα 3.2-10 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(u_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

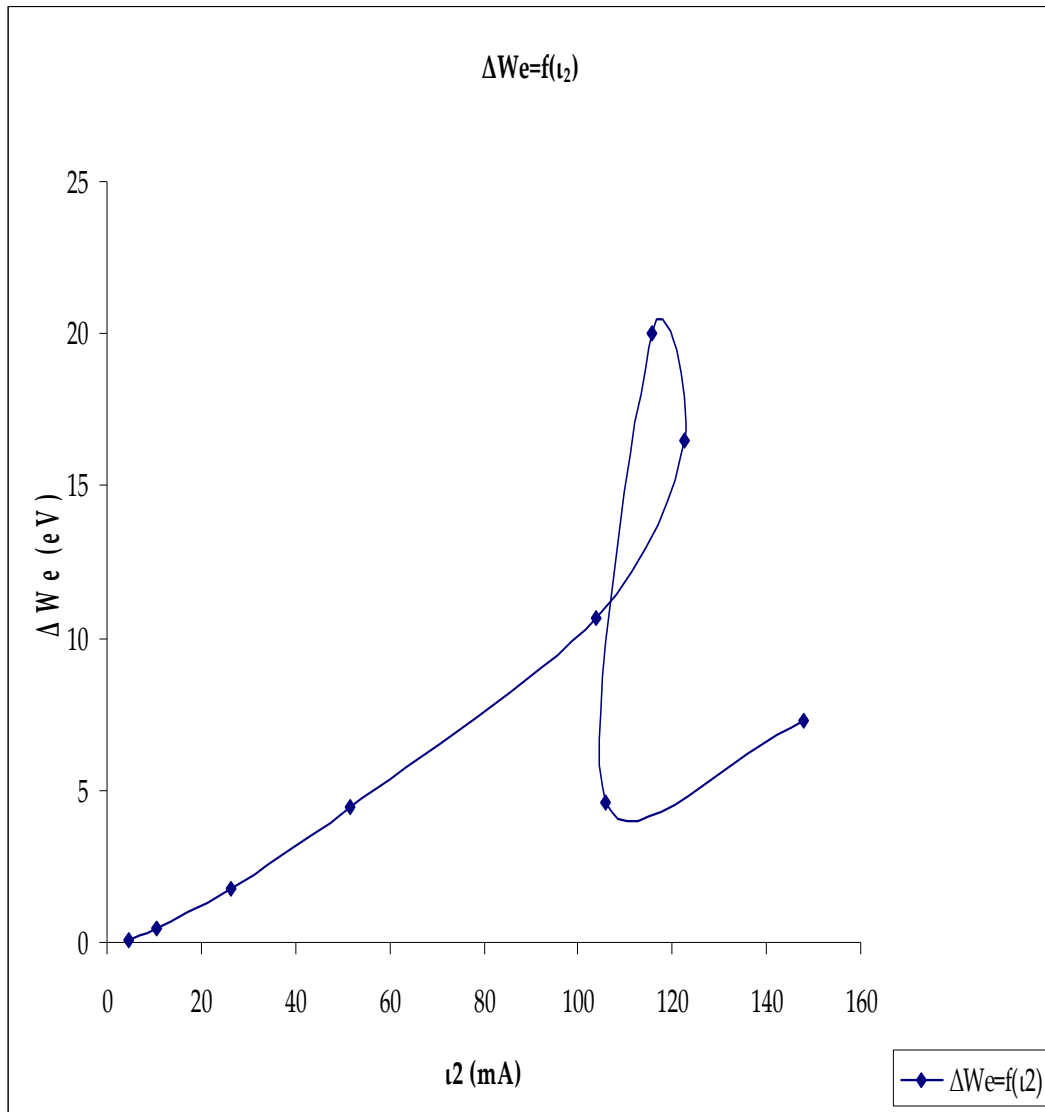
$u_{\varepsilon V}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\varepsilon V}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon V}$

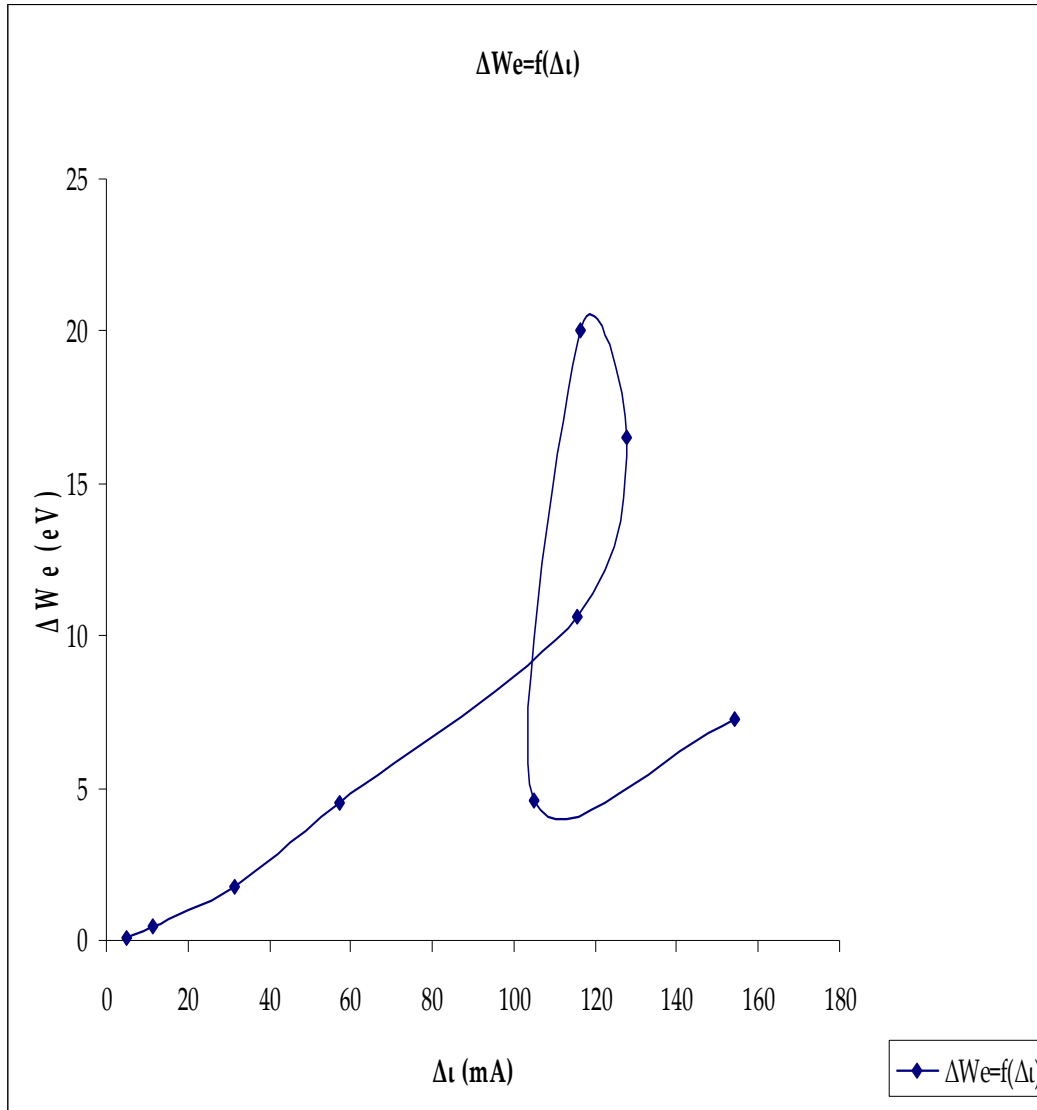
ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης



Σχήμα 3.2-11 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_1)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης
 i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.2-12 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_2)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης
 i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.2-13 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(\Delta i)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=1\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης
 Δi : $\Delta q / \Delta t$

3.3 Συγκεντρωτικοί πίνακες και σχεδιαγράμματα για δείγμα πάχους d=2mm υπό κρουστική τάση +10/200μs.

U_k (kV)	E_k (MV/cm)	$u_{εν}$ (kV)	$E_{εν}$ (MV/cm)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)	ΔW_e (eV)
26,90	0,274	26,09	0,265	0,524	0,905	0,381	0,19
33,70	0,343	32,81	0,334	0,619	1,714	1,095	0,55
40,40	0,411	38,29	0,389	0,810	3,286	2,476	1,24
47,20	0,480	41,35	0,421	1,000	6,714	5,714	2,86
53,90	0,548	46,93	0,477	1,000	12,048	11,048	5,52
60,60	0,616	43,80	0,446	1,000	15,524	14,524	7,26
67,40	0,686	47,20	0,480	0,420	5,590	5,170	2,59

Πίνακας 3.3-1 : συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων για δείγμα πάχους d=2mm υπό κρουστική τάση +10/200μs όπου:

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

$u_{εν}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{εν}$: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην $u_{εν}$

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

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u = u_2 - u_1$

ΔW_e : ενέργεια ηλεκτρονίων

C_m (nf)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	Δt (μs)	i_1 (mA)	i_2 (mA)	Δi (mA)
210	0,11	0,19	32,45	37,64	5,19	3,39	5,05	15,42
210	0,13	0,36	14,49	34,98	20,49	8,97	10,29	11,22
210	0,17	0,69	10,44	33,02	22,58	16,29	20,90	23,03
210	0,21	1,41	7,56	38,34	30,78	27,78	36,77	38,98
210	0,21	2,53	6,92	45,58	38,66	30,35	55,51	60,01
210	0,21	3,26	5,00	59,28	54,28	42,00	54,99	56,19
1000	0,42	5,59	5,00	60,88	55,88	84,00	91,82	92,52

Πίνακας 3.3-2 : συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων για δείγμα πάχους $d=2mm$ υπό κρουστική τάση $+10/200\mu s$ όπου:

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

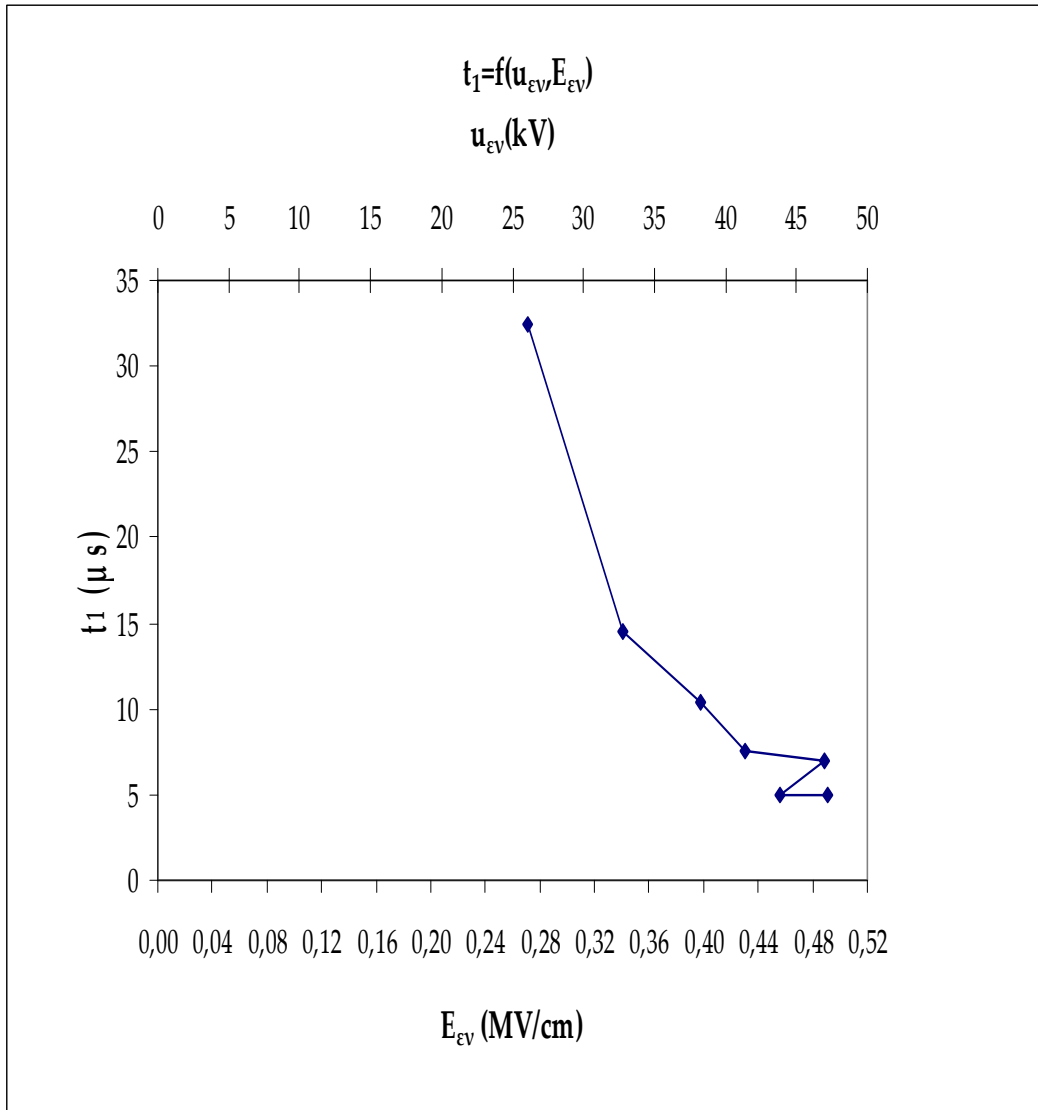
t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

$$\Delta i = \Delta q / \Delta t$$



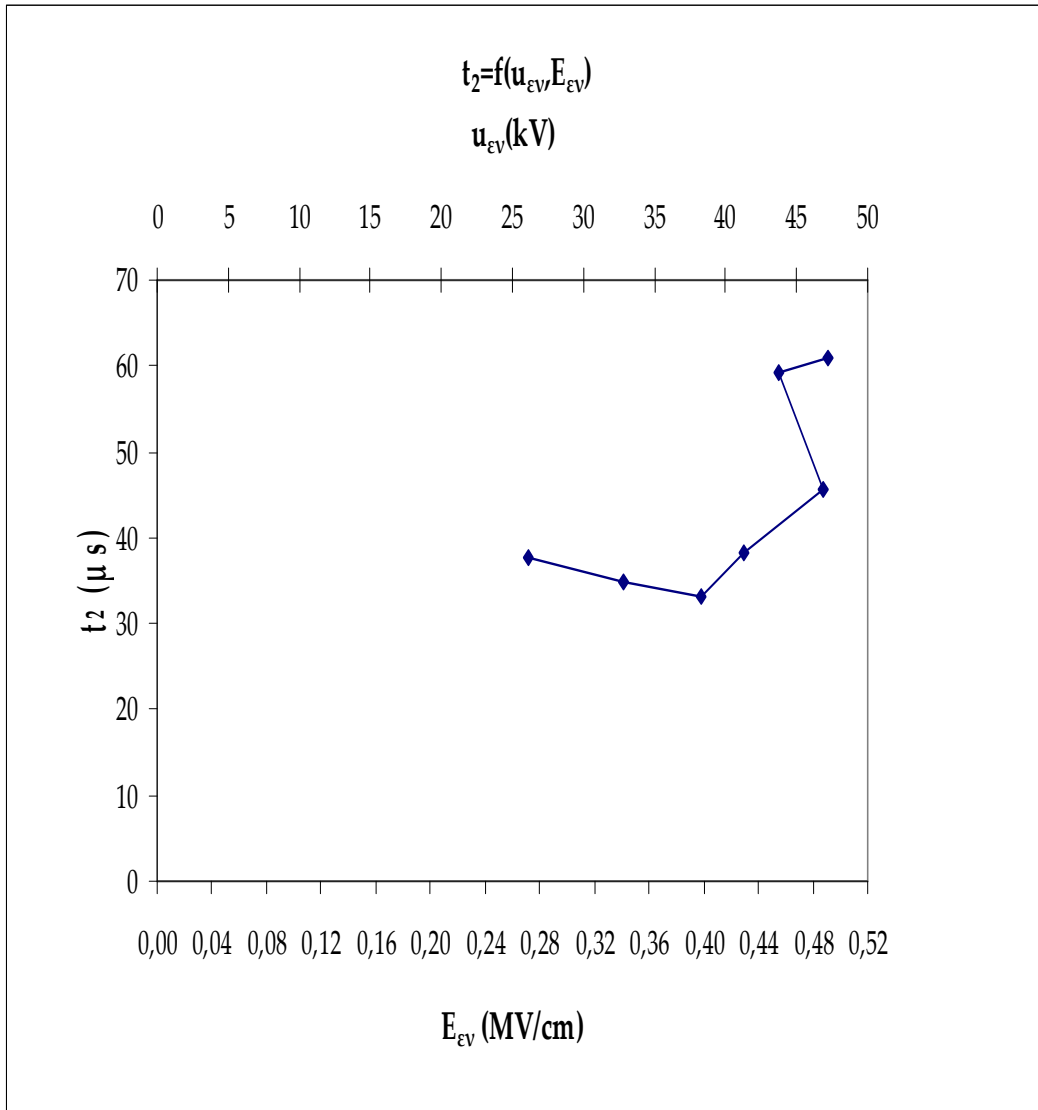
Σχήμα 3.3-1 : Χαρακτηριστική $t_1 = f(u_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$ για το πεπιεσμένο χαρτί

πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

$u_{\varepsilon V}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\varepsilon V}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon V}$

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

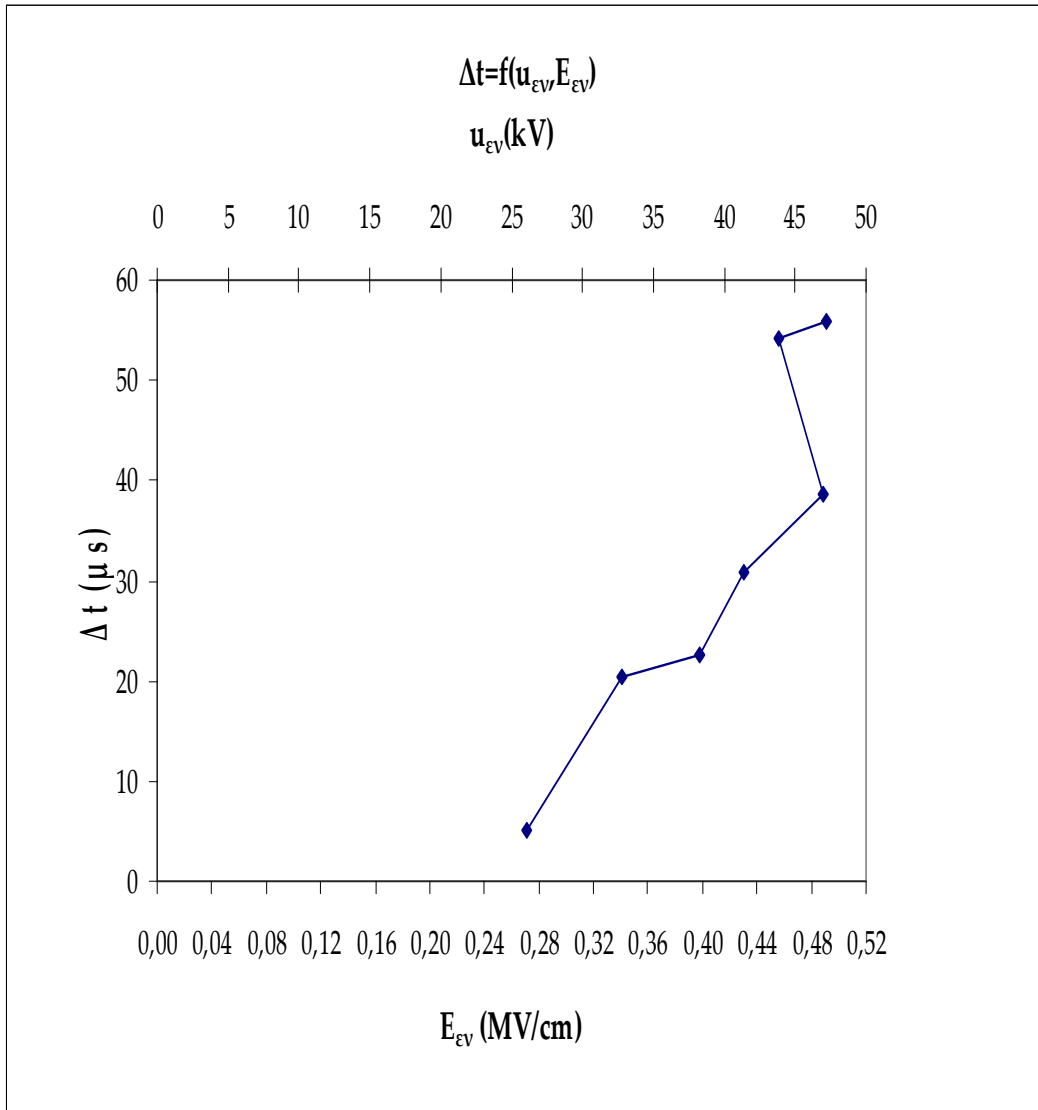


Σχήμα 3.3-2 : Χαρακτηριστική $t_2 = f(u_{\varepsilon v}, E_{\varepsilon v})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

$u_{\varepsilon v}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\varepsilon v}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon v}$

t_2 : χρόνος περαιώσης των μερικών εκκενώσεων

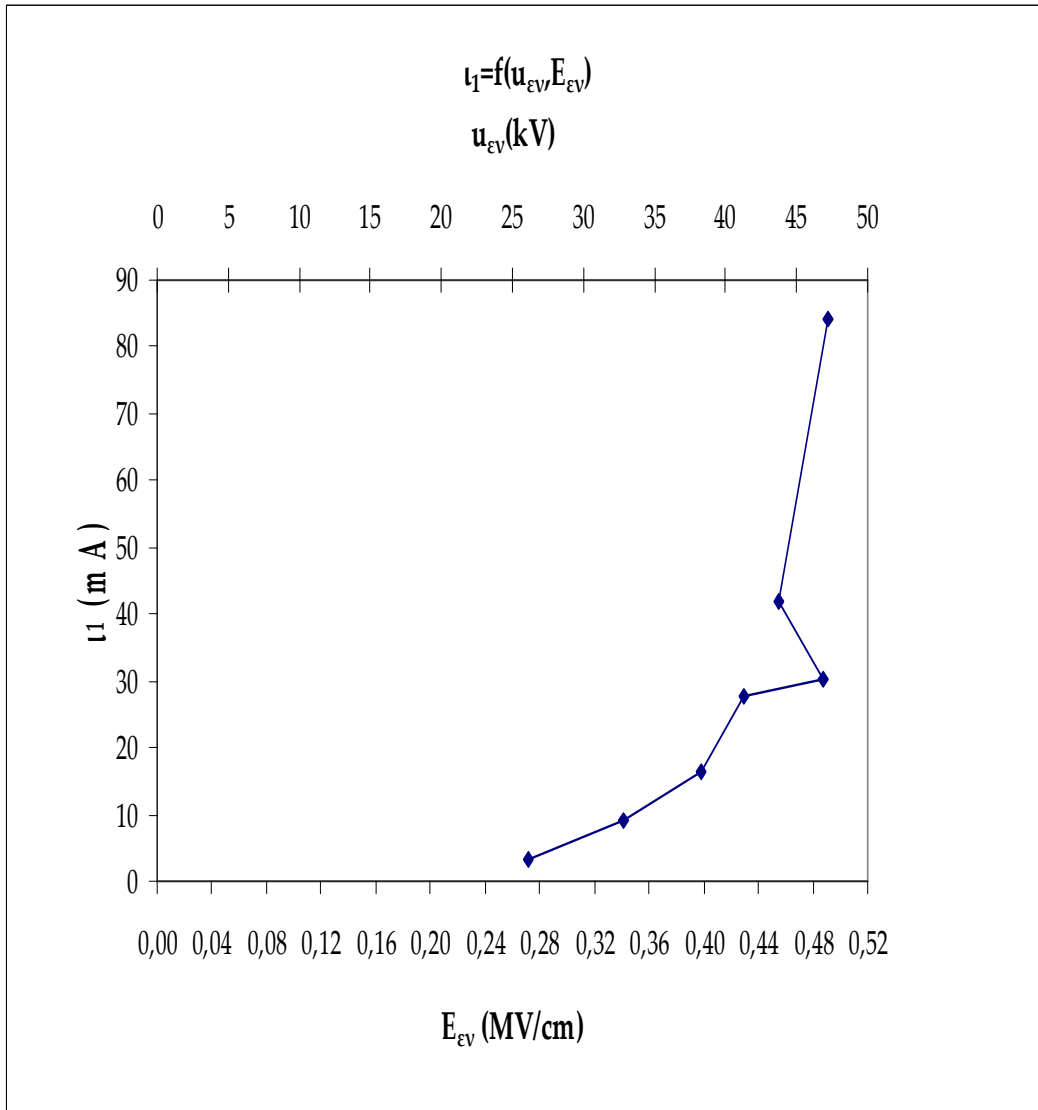


Σχήμα 3.3-3 : Χαρακτηριστική $\Delta t = f(u_{\epsilon\nu}, E_{\epsilon\nu})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu s$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

$u_{\epsilon\nu}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\epsilon\nu}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\epsilon\nu}$

Δt : $t_2 - t_1$

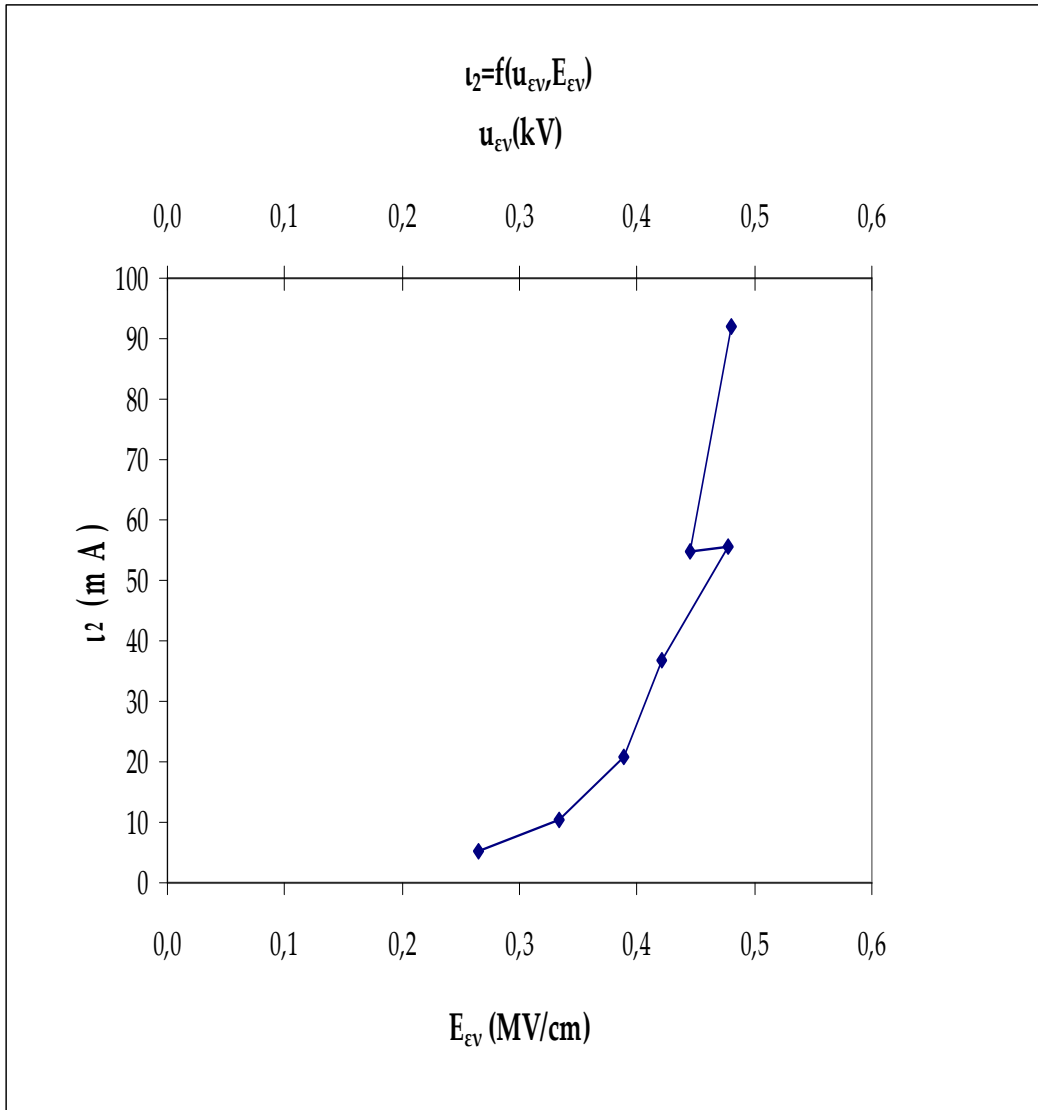


Σχήμα 3.3-4 : Χαρακτηριστική $i_1 = f(u_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

$u_{\varepsilon V}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\varepsilon V}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon V}$

i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρηση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

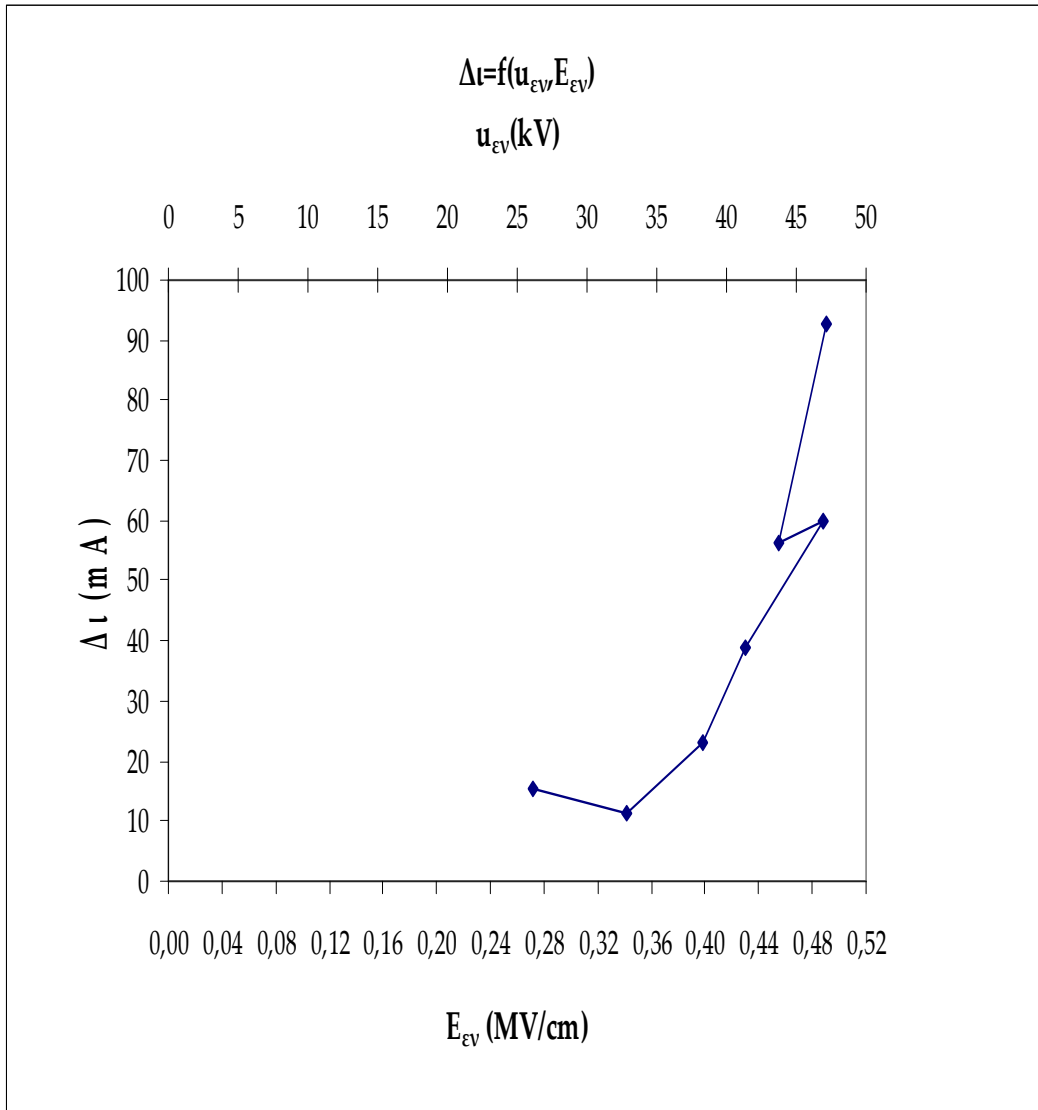


Σχήμα 3.3-5 : Χαρακτηριστική $i_2 = f(u_{ev}, E_{ev})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

u_{ev} : κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_{ev}

i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων

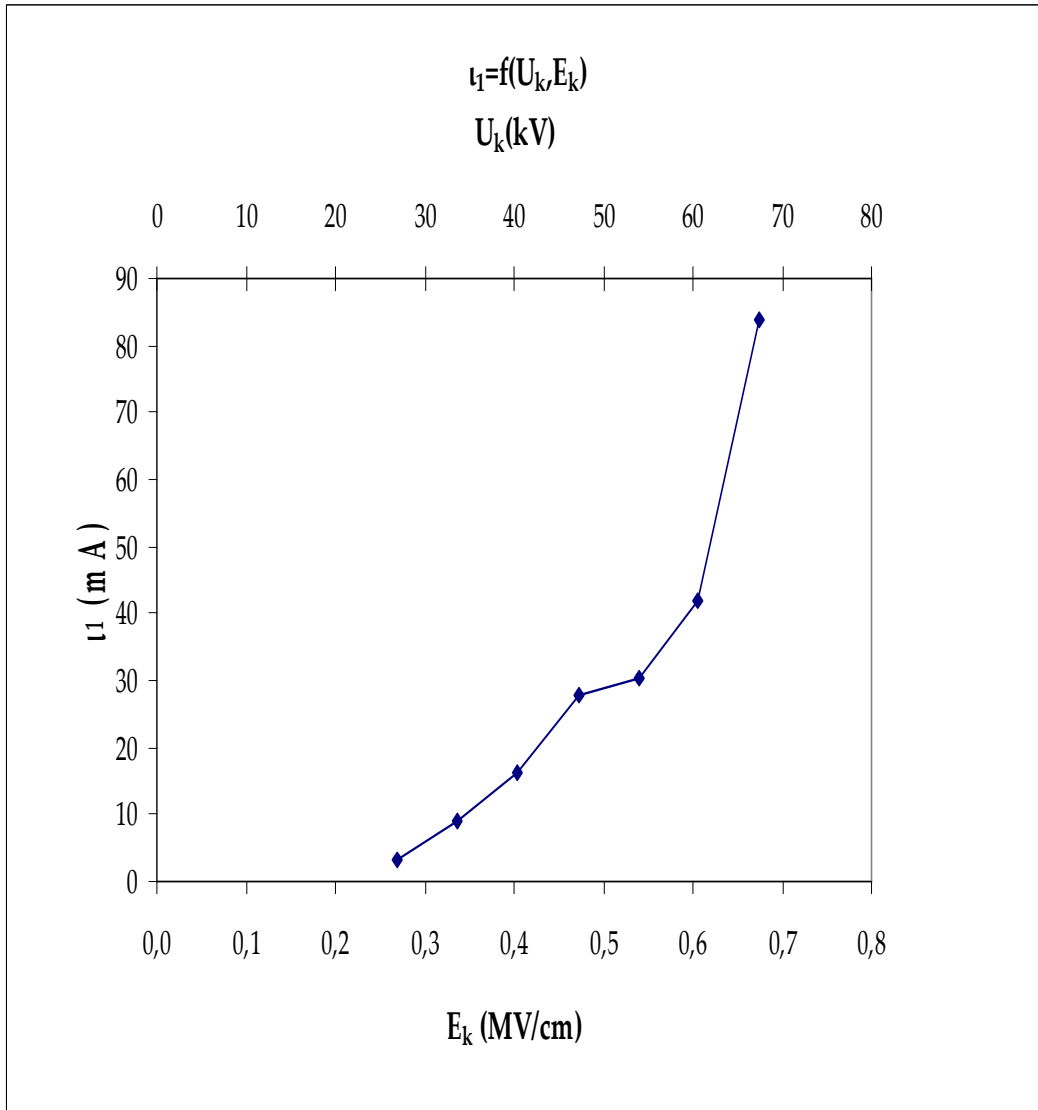


Σχήμα 3.3-6 : Χαρακτηριστική $\Delta i = f(u_{\varepsilon v}, E_{\varepsilon v})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

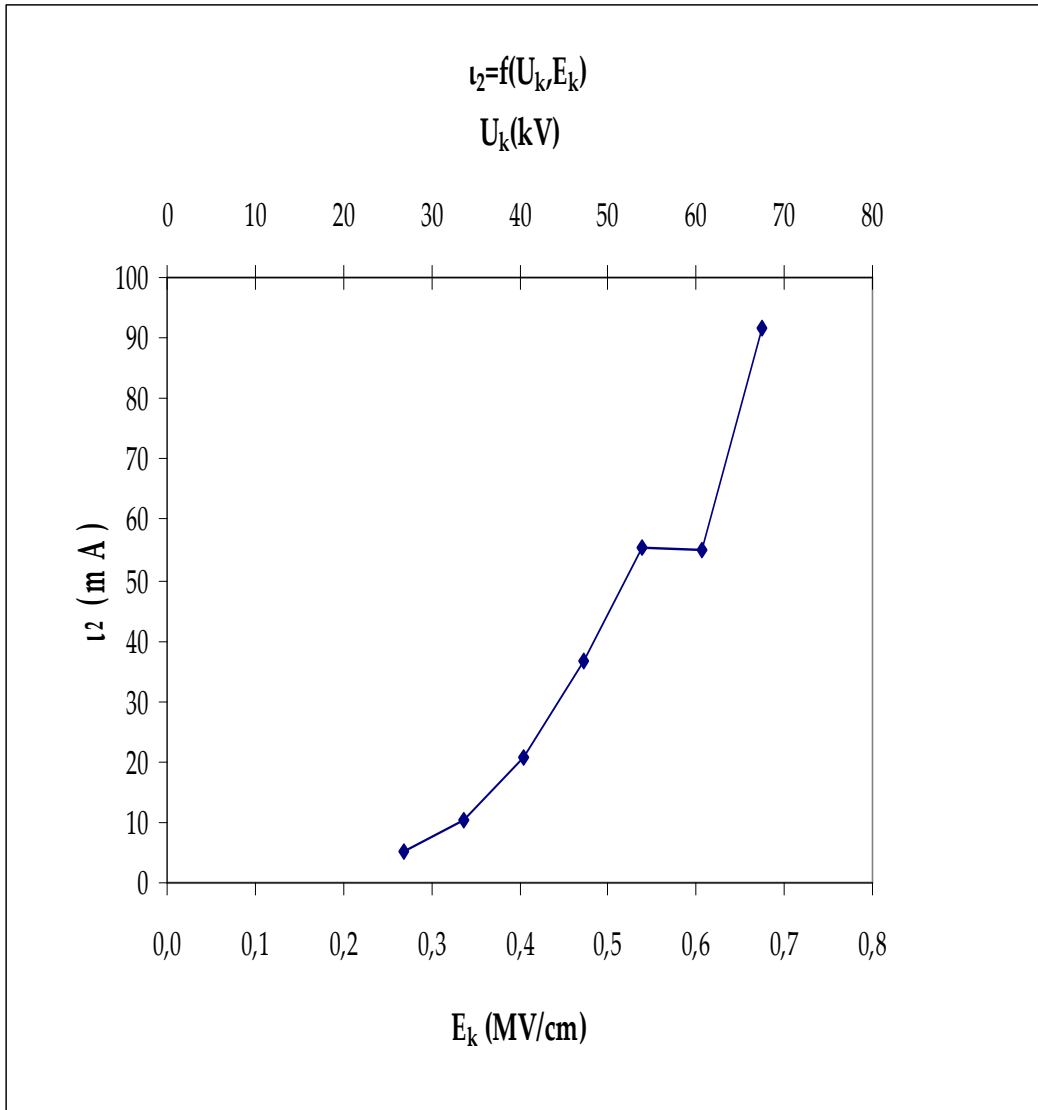
$u_{\varepsilon v}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\varepsilon v}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon v}$

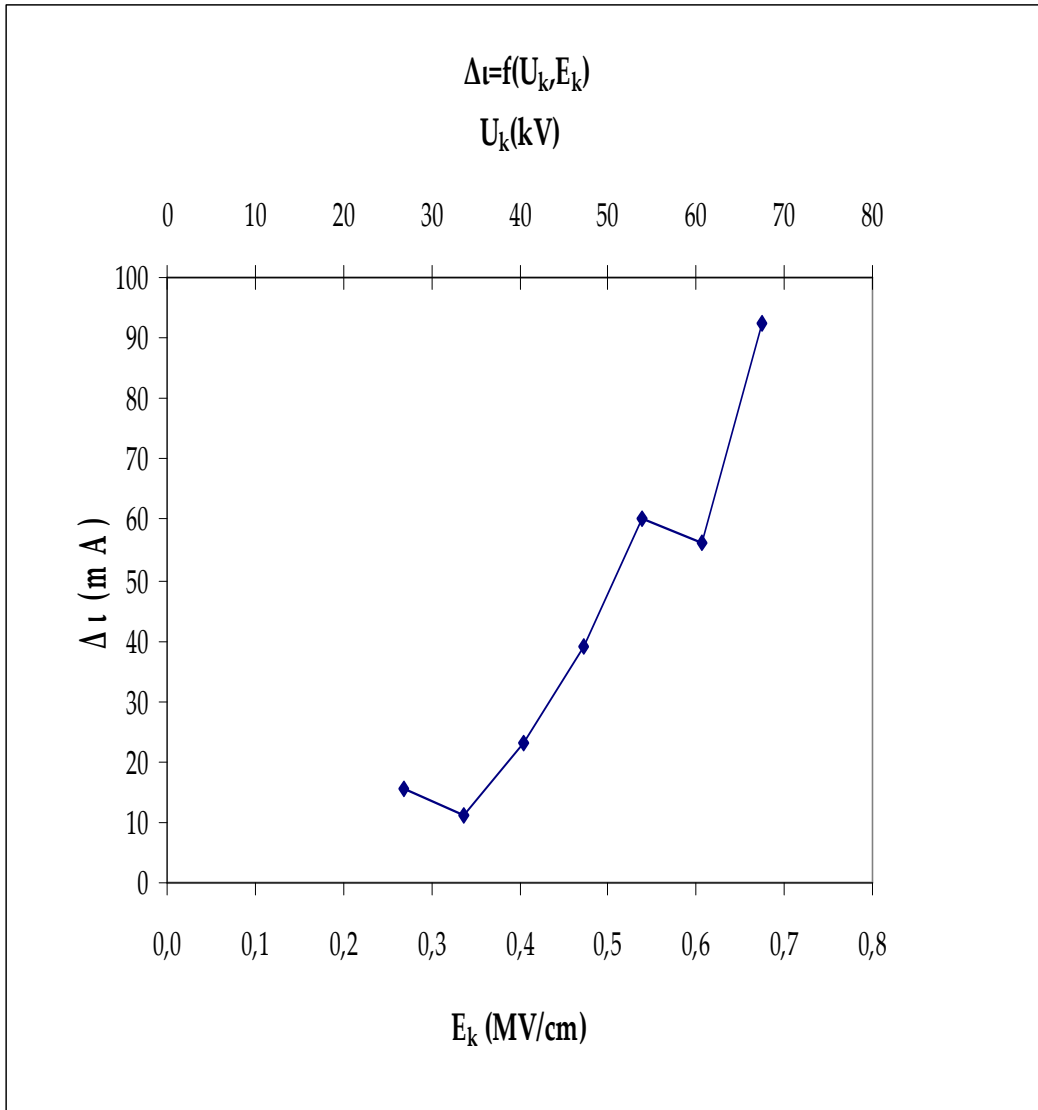
Δi : $\Delta q / \Delta t$



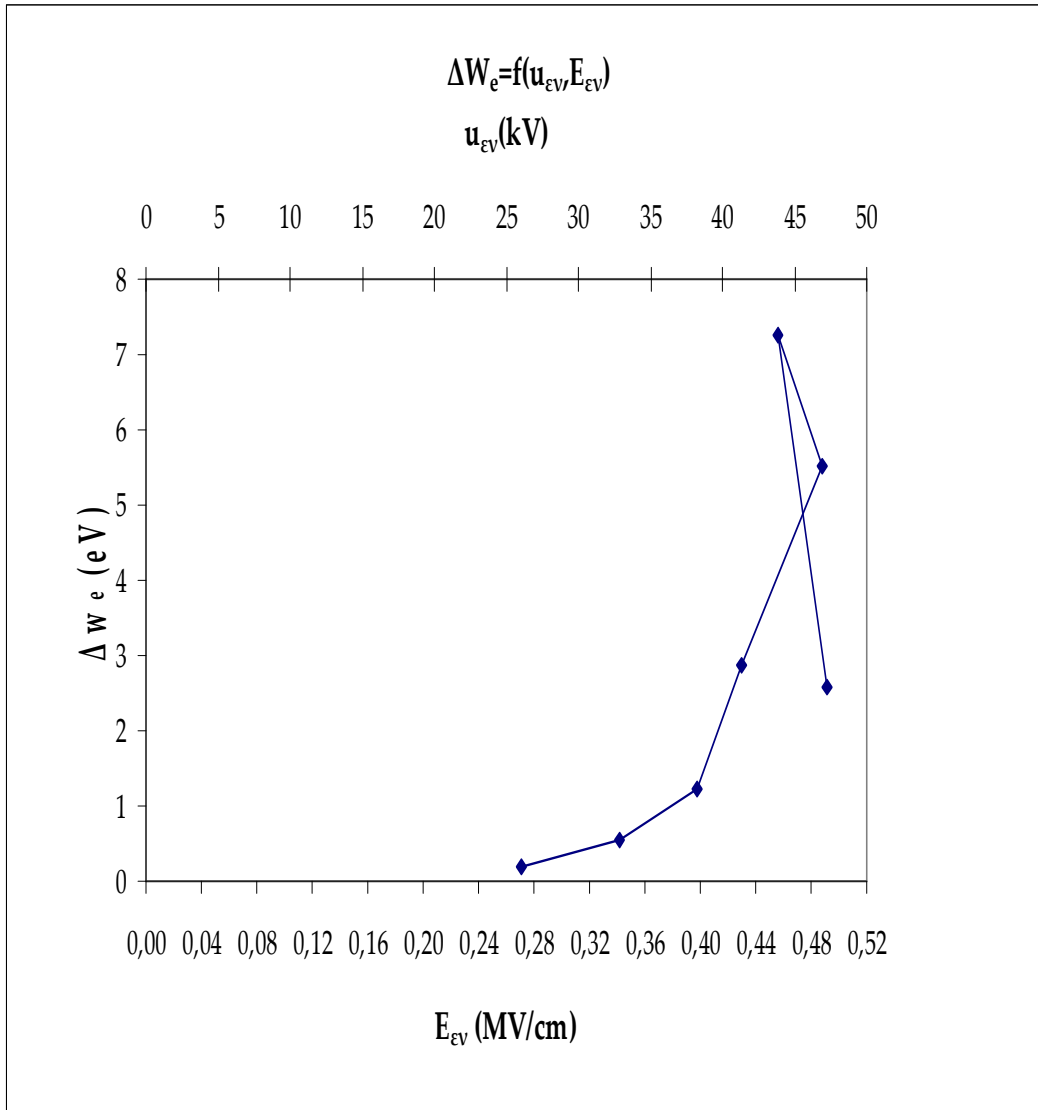
Σχήμα 3.3-7 : Χαρακτηριστική $i_1 = f(u_k, E_k)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_k
 i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.3-8 : Χαρακτηριστική $i_2 = f(u_k, E_k)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_k
 i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.3-9 : Χαρακτηριστική $\Delta i = f(u_k, E_k)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_k
 Δi : $\Delta q / \Delta t$

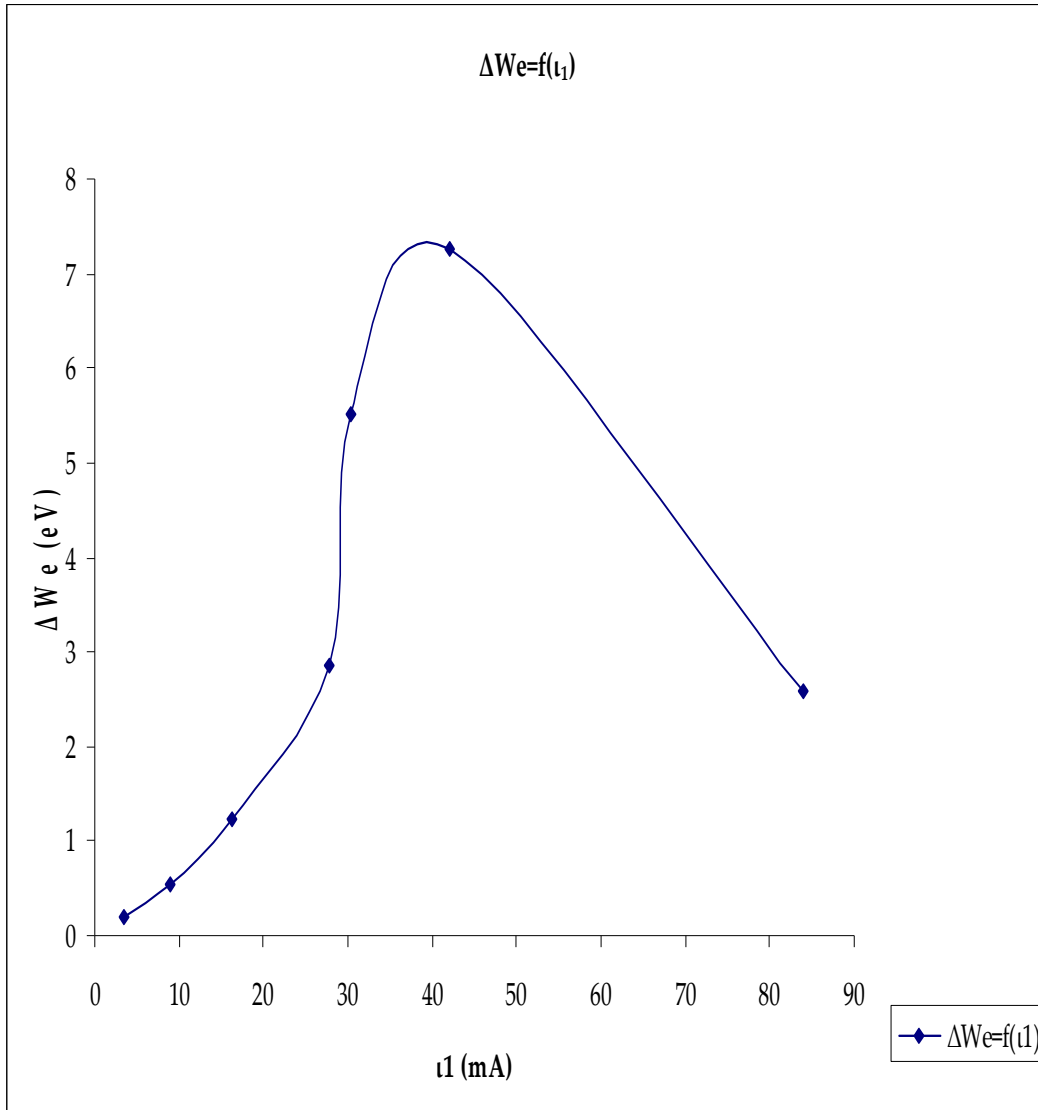


Σχήμα 3.3-10 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(u_{\varepsilon v}, E_{\varepsilon v})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2mm$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu s$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9mm$ – πλάκα)

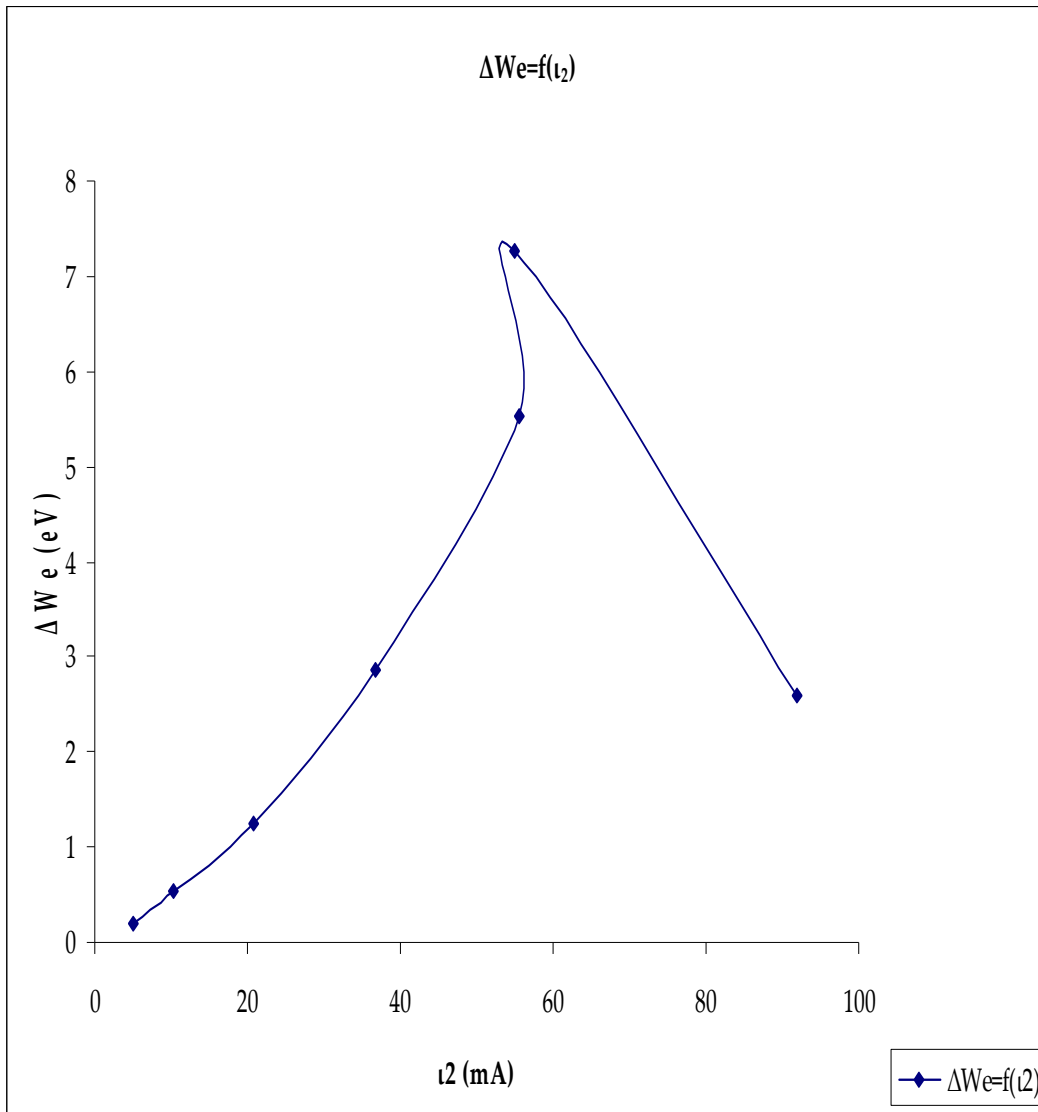
$u_{\varepsilon v}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$E_{\varepsilon v}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon v}$

ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης



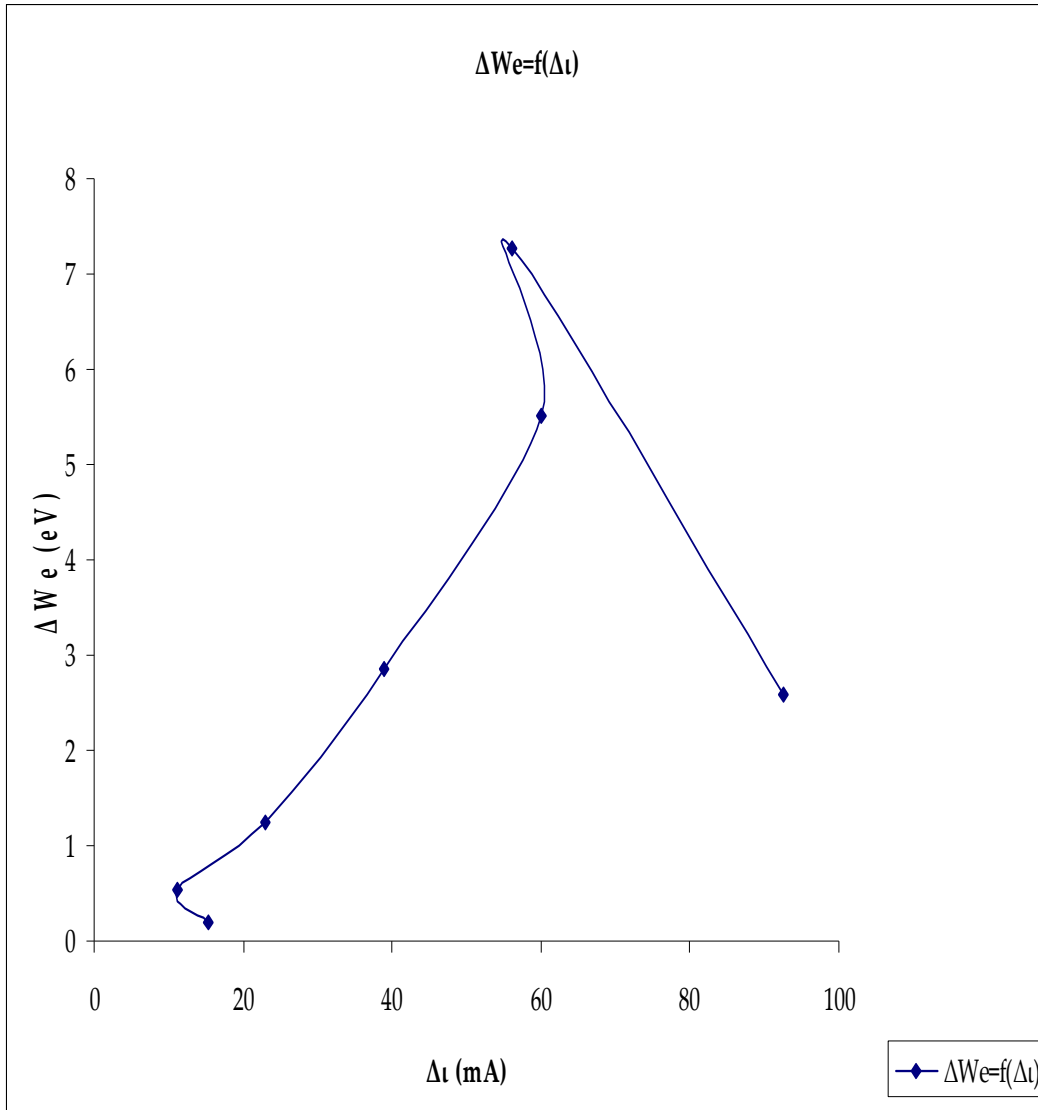
Σχήμα 3.3-11 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_1)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης
 i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.3-12 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_2)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης

i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.3-13 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(\Delta i)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $+10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης
 Δi : $\Delta q / \Delta t$

3.4 Συγκεντρωτικοί πίνακες και σχεδιαγράμματα για δείγμα πάχους d=2mm υπό κρουστική τάση -10/200μs.

U_k (kV)	E_k (MV/cm)	u_{ev} (kV)	E_{ev} (MV/cm)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)	ΔW_e (eV)
-28,60	-0,291	-26,09	-0,265	0,429	0,667	0,238	0,12
-35,40	-0,360	-33,65	-0,342	0,619	1,286	0,667	0,33
-42,10	-0,428	-39,54	-0,402	0,810	3,000	2,190	1,10
-57,30	-0,583	-50,05	-0,509	1,000	8,286	7,286	3,64
-60,60	-0,616	-40,40	-0,411	1,000	11,190	10,190	5,10
-64,00	-0,651	-53,90	-0,548	0,200	3,310	3,110	1,56
-67,40	-0,686	-47,20	-0,480	0,000	6,190	6,190	3,10

Πίνακας 3.4-1 : συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων για δείγμα πάχους d=2mm υπό κρουστική τάση -10/200μs όπου:

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_k

u_{ev} : κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην u_{ev}

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

u_2 : στιγμιαία τιμή της u_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

$\Delta u = u_2 - u_1$

ΔW_e : ενέργεια ηλεκτρονίων

C_m (nf)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	Δt (μs)	i_1 (mA)	i_2 (mA)	Δi (mA)
210	0,09	0,14	19,11	30,89	11,78	4,71	4,53	4,24
210	0,13	0,27	17,60	33,62	16,02	7,39	8,03	8,74
210	0,17	0,63	8,84	34,76	25,92	19,24	18,12	17,74
210	0,21	1,74	7,00	50,90	43,90	30,00	34,19	34,85
210	0,21	2,35	7,00	55,28	48,28	30,00	42,51	44,32
1000	0,20	3,31	5,00	56,30	51,30	40,00	58,79	60,62
1000	0,00	6,19	4,00	45,20	41,20	0,00	136,95	150,24

Πίνακας 3.4-2 : συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων για δείγμα πάχους $d=2mm$ υπό κρουστική τάση $-10/200\mu s$ όπου:

C_m : πυκνωτής μέτρησης

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

q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο C_m κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

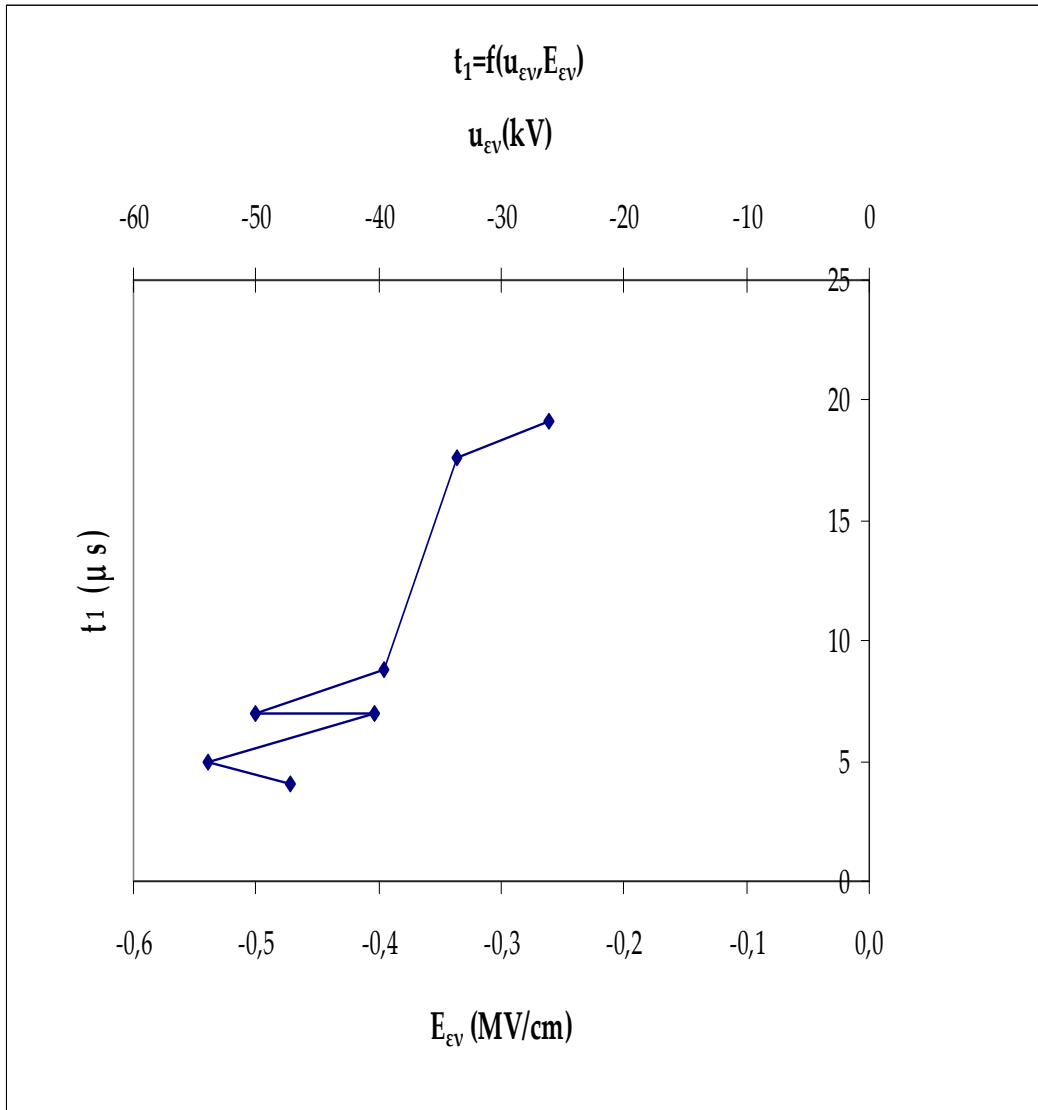
t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

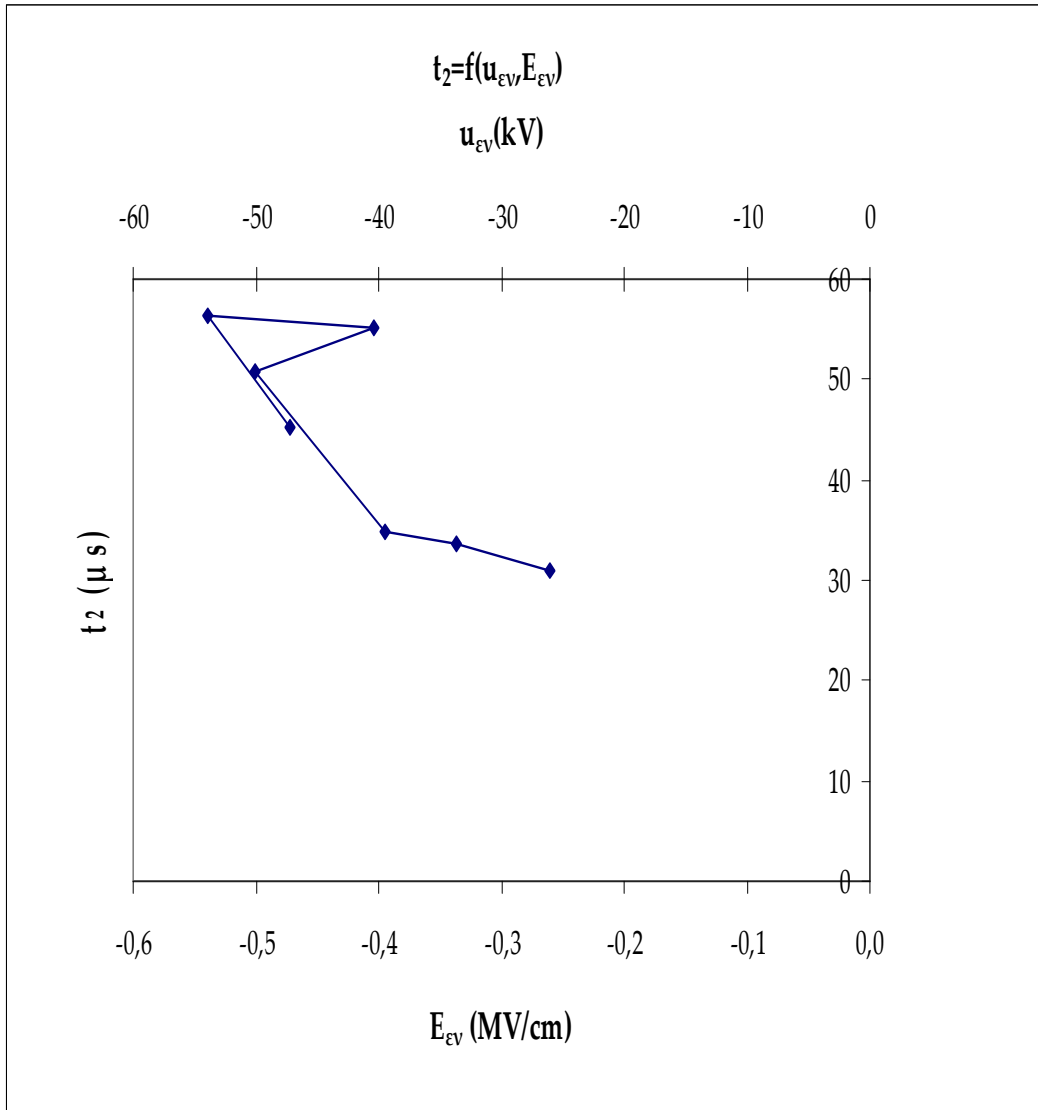
i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την περαίωση των μερικών εκκενώσεων

$$\Delta i = \Delta q / \Delta t$$



Σχήμα 3.4-1 : Χαρακτηριστική $t_1 = f(u_{\varepsilon v}, E_{\varepsilon v})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu s$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 $u_{\varepsilon v}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 $E_{\varepsilon v}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\varepsilon v}$
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

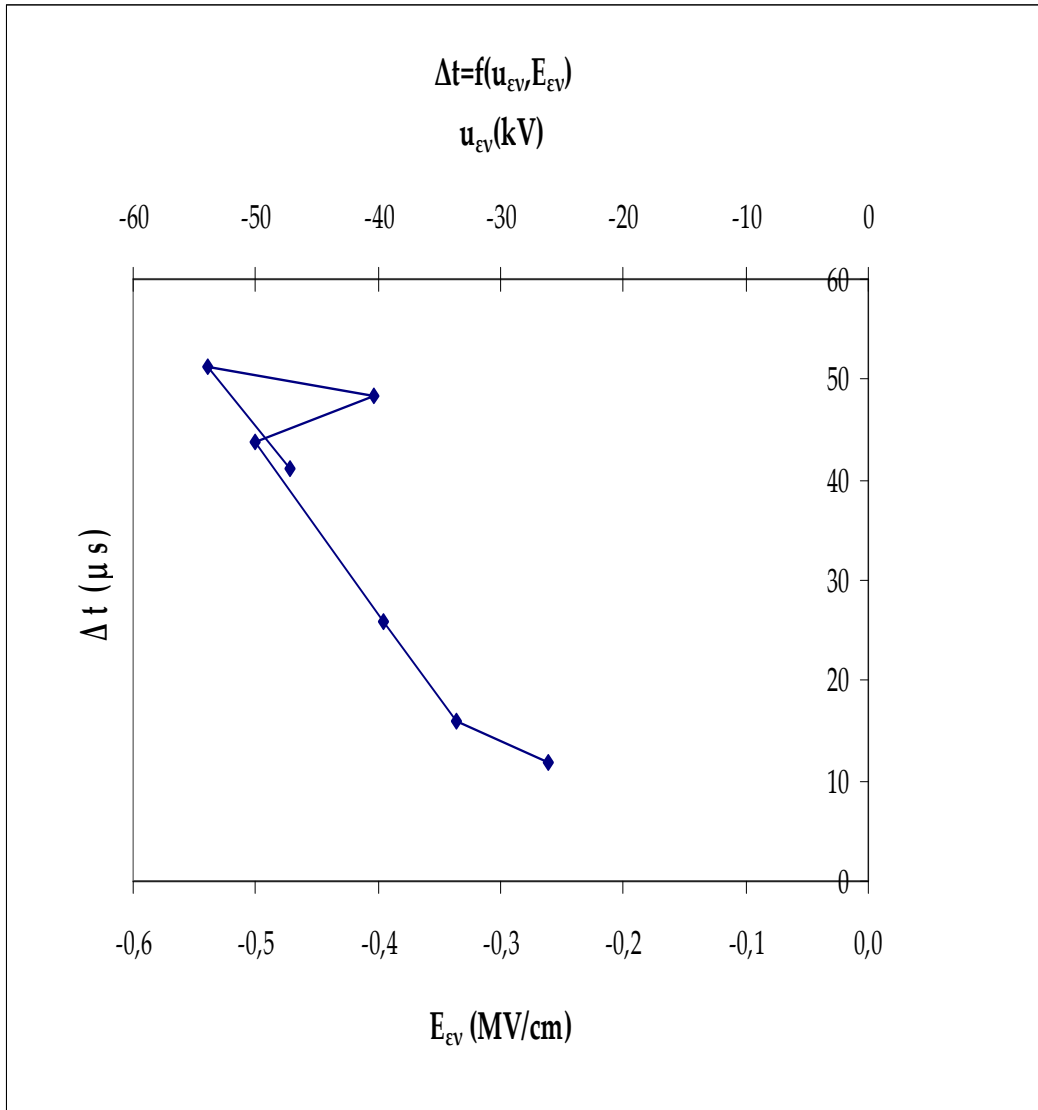


Σχήμα 3.4-2 : Χαρακτηριστική $t_2 = f(u_{ev}, E_{ev})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

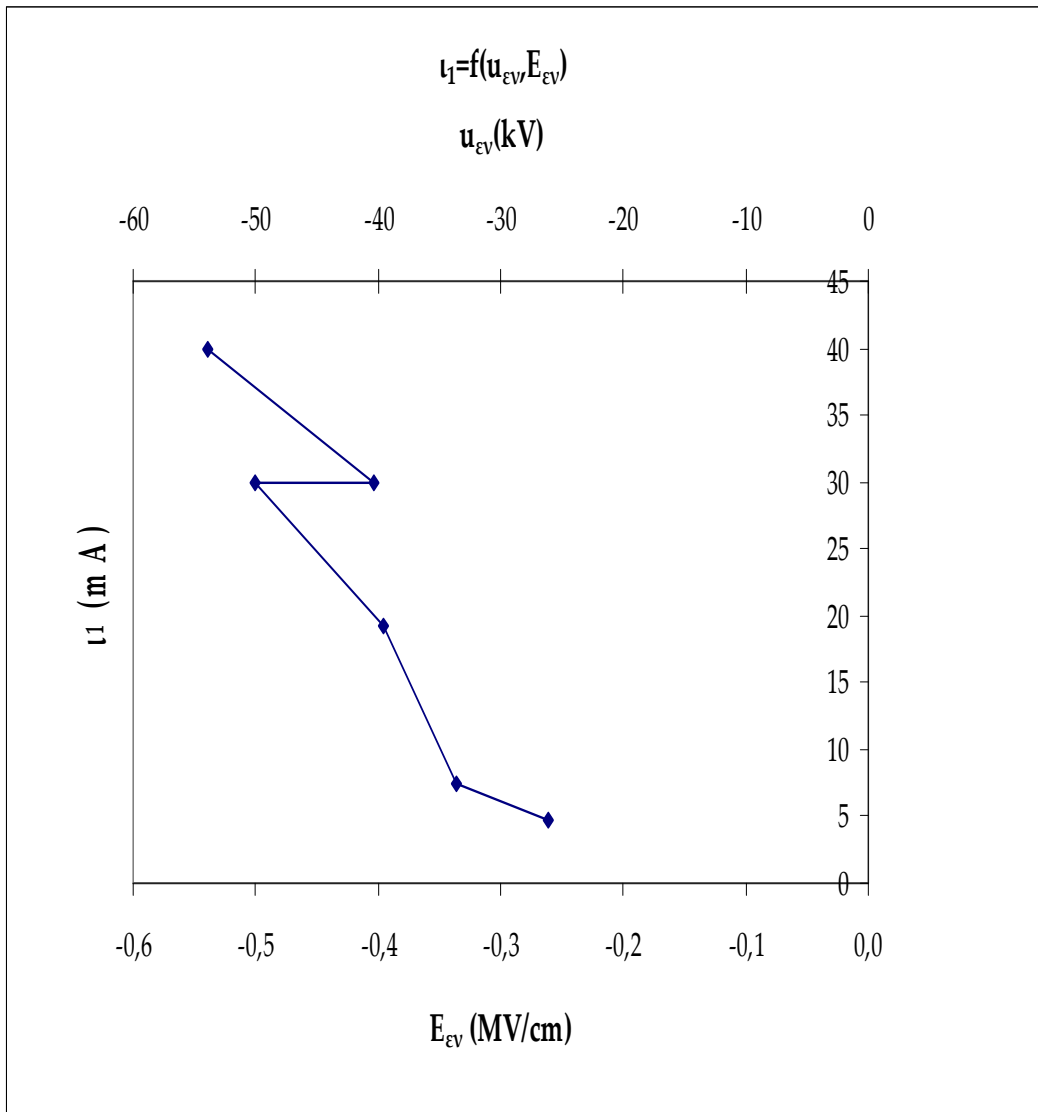
u_{ev} : κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_{ev}

t_2 : χρόνος περαιώσης των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.4-3 : Χαρακτηριστική $\Delta t = f(u_{\epsilon v}, E_{\epsilon v})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu s$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 $u_{\epsilon v}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 $E_{\epsilon v}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\epsilon v}$
 Δt : $t_2 - t_1$

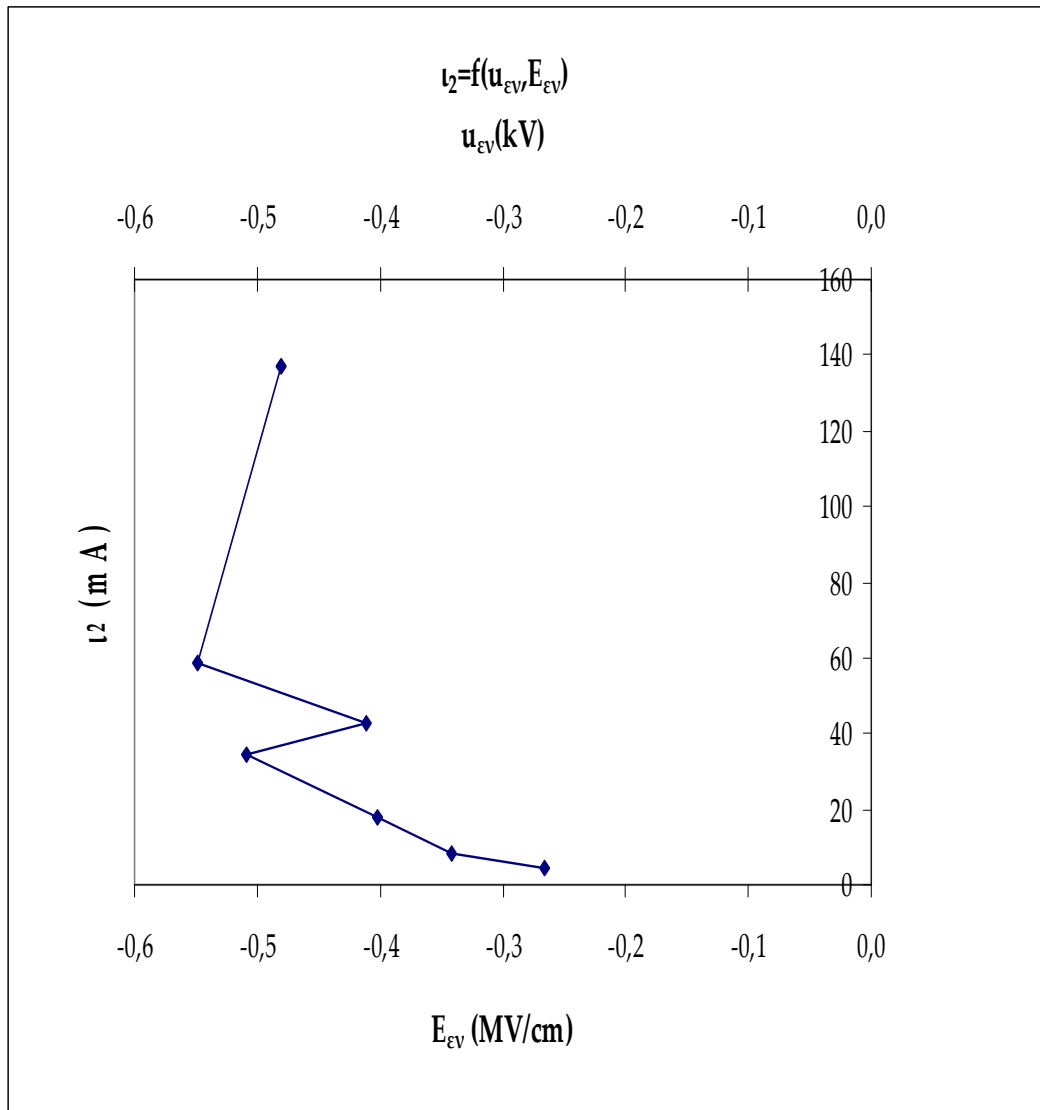


Σχήμα 3.4-4 : Χαρακτηριστική $i_1 = f(u_{ev}, E_{ev})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2mm$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu s$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9mm$ – πλάκα)

u_{ev} : κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_{ev}

i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρηση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

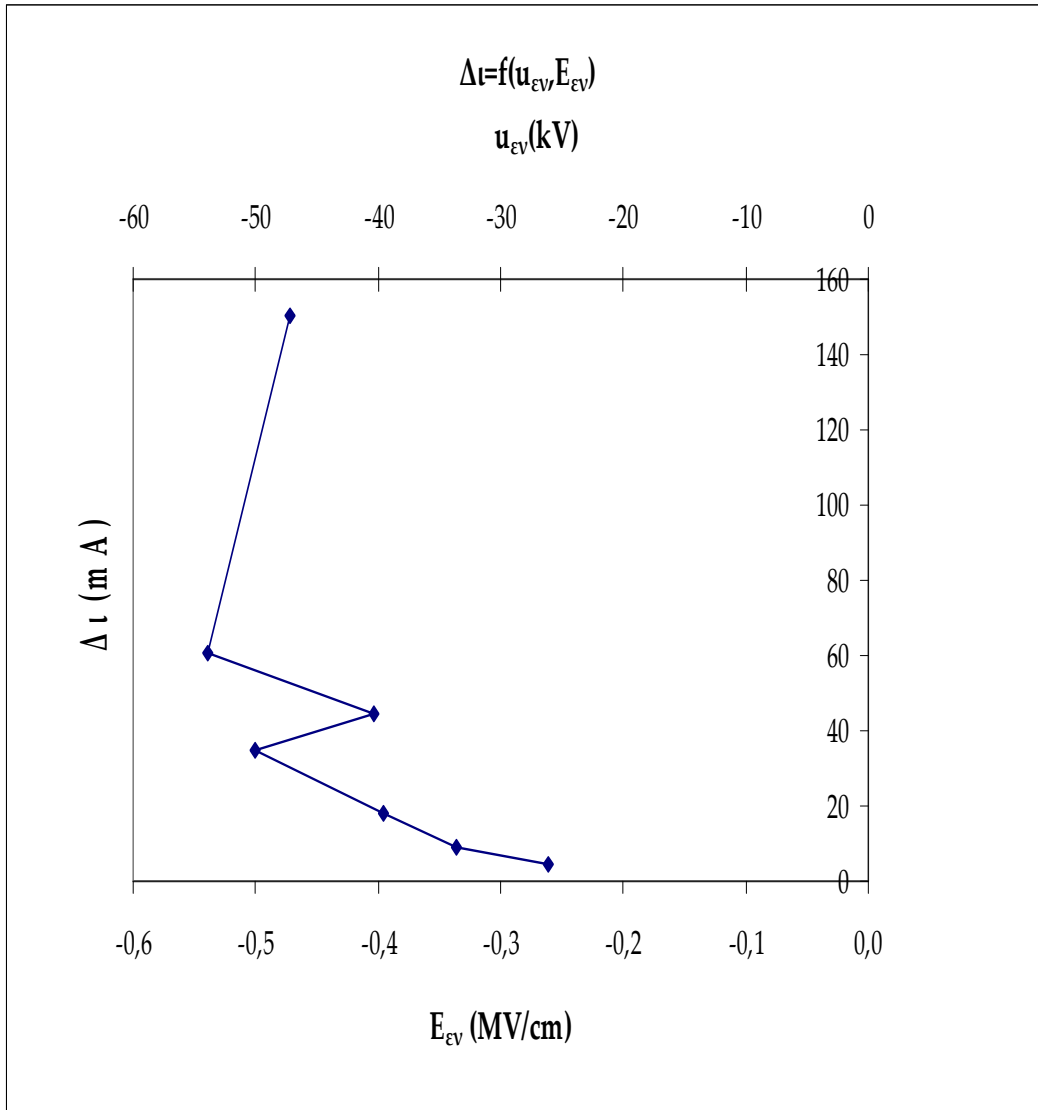


Σχήμα 3.4-5 : Χαρακτηριστική $i_2 = f(u_{ev}, E_{ev})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

u_{ev} : κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{ev} : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_{ev}

i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων

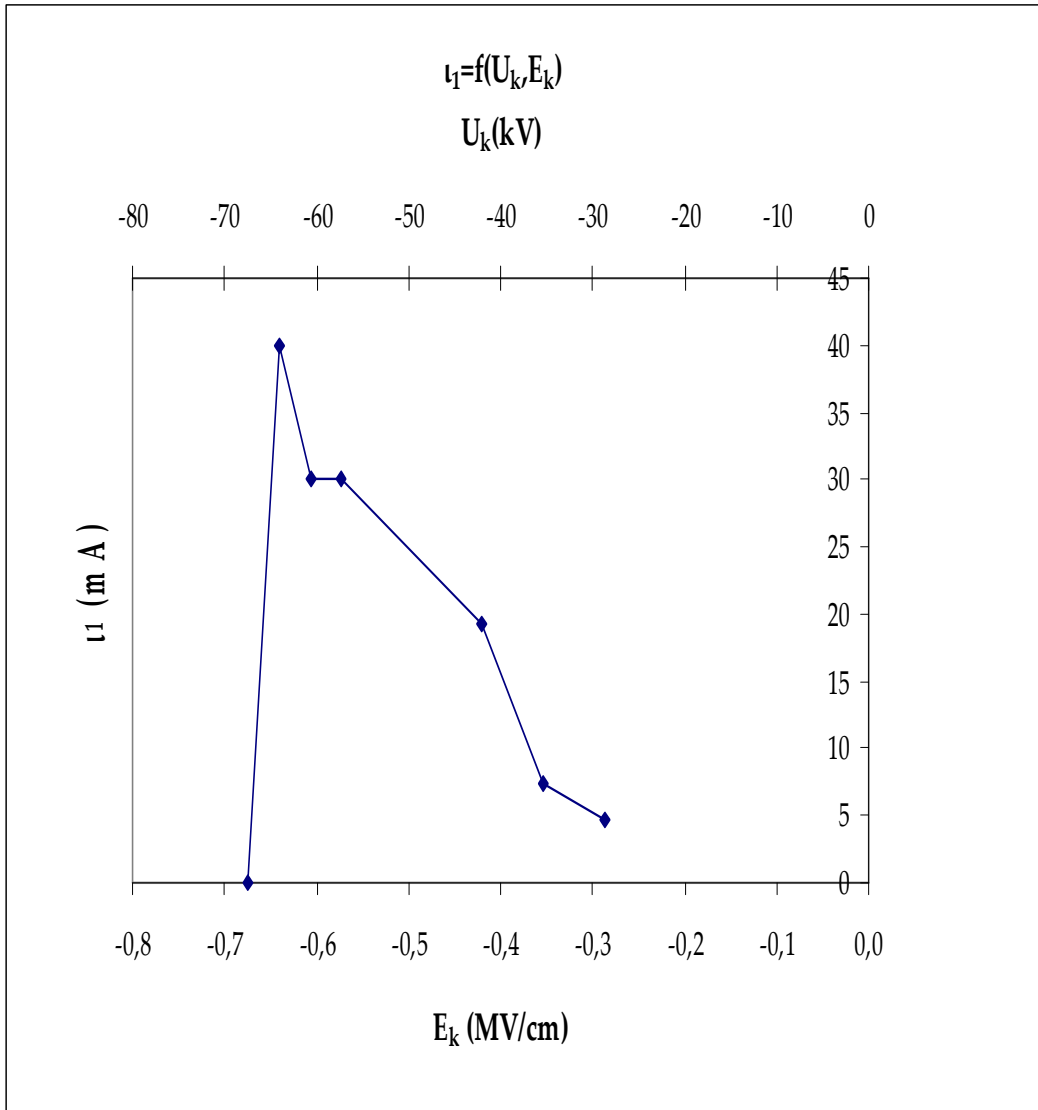


Σχήμα 3.4-6 : Χαρακτηριστική $\Delta I = f(u_{EV}, E_{EV})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2mm$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu s$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9mm$ – πλάκα)

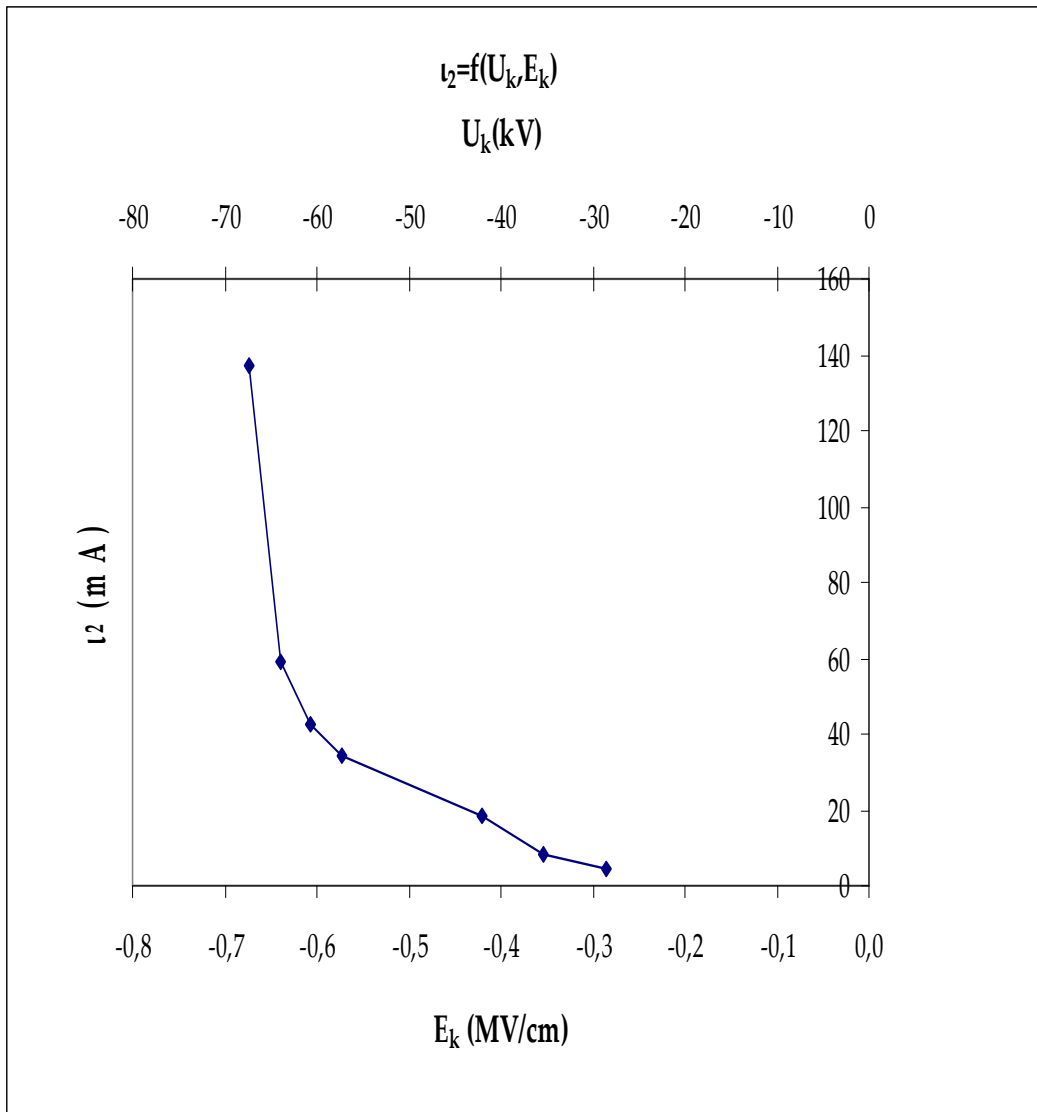
u_{EV} : κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

E_{EV} : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_{EV}

ΔI : $\Delta q / \Delta t$



Σχήμα 3.4-7 : Χαρακτηριστική $i_1 = f(u_k, E_k)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_k
 i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

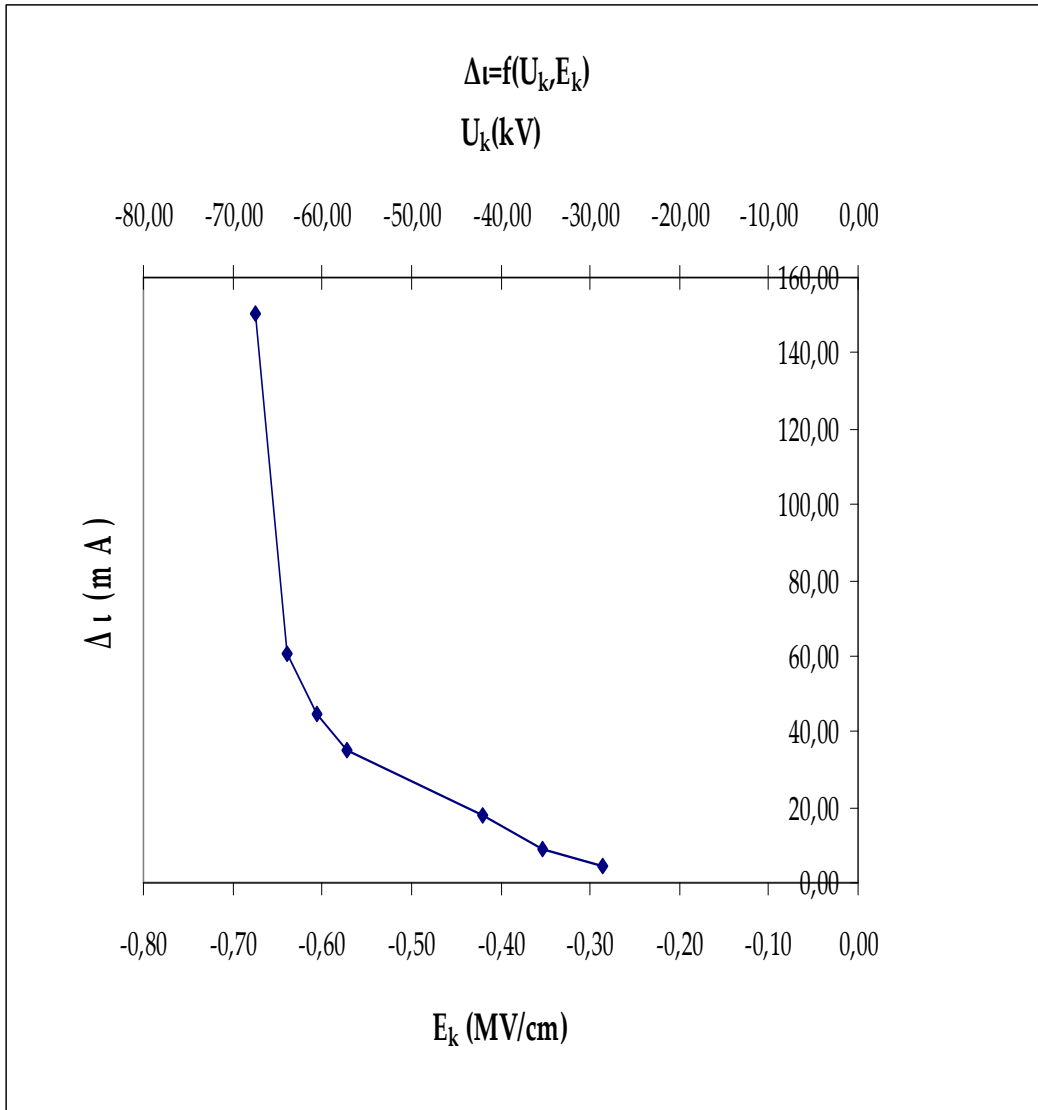


Σχήμα 3.4-8 : Χαρακτηριστική $i_2 = f(u_k, E_k)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτροδία : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)

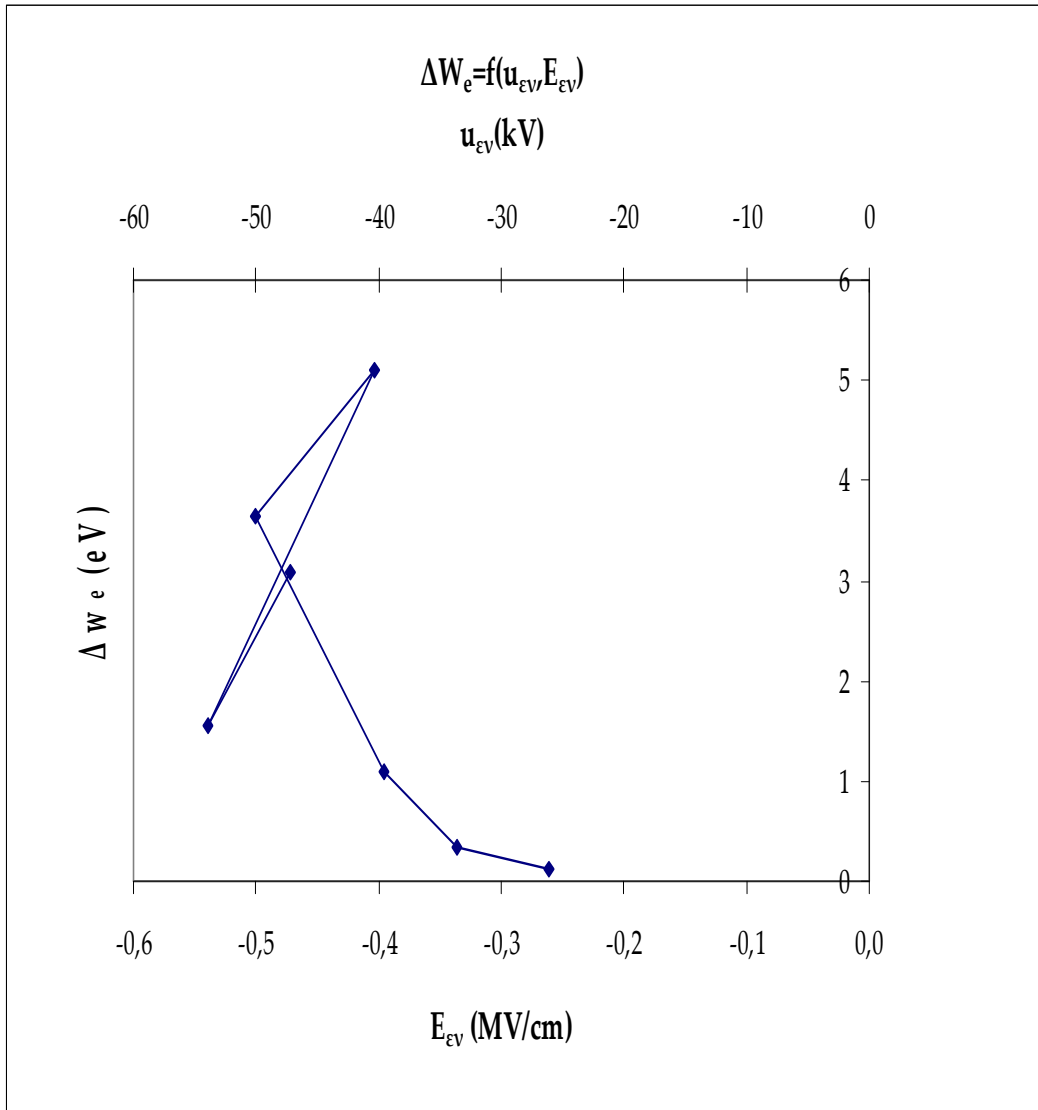
u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_k

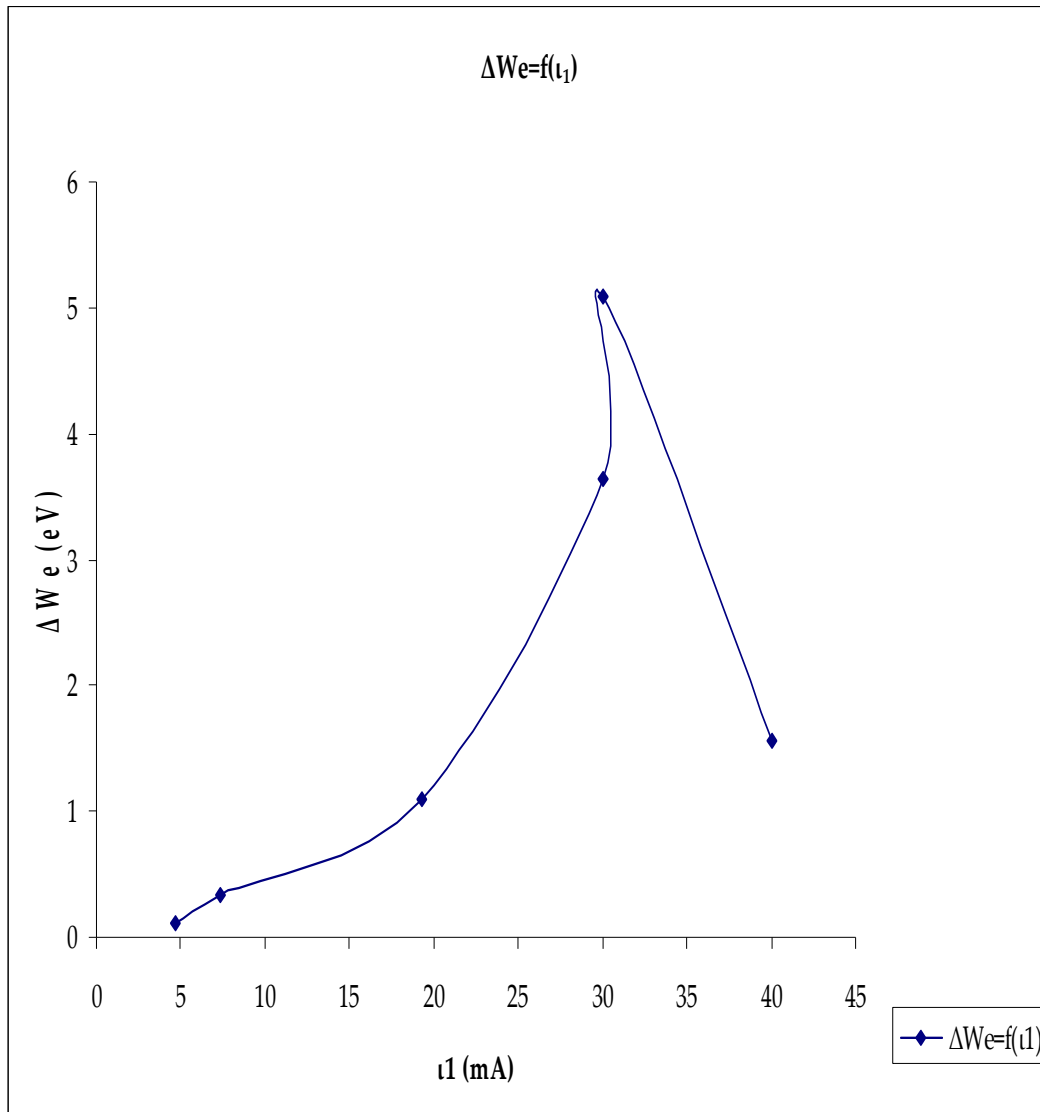
i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά τη λήξη των μερικών εκκενώσεων



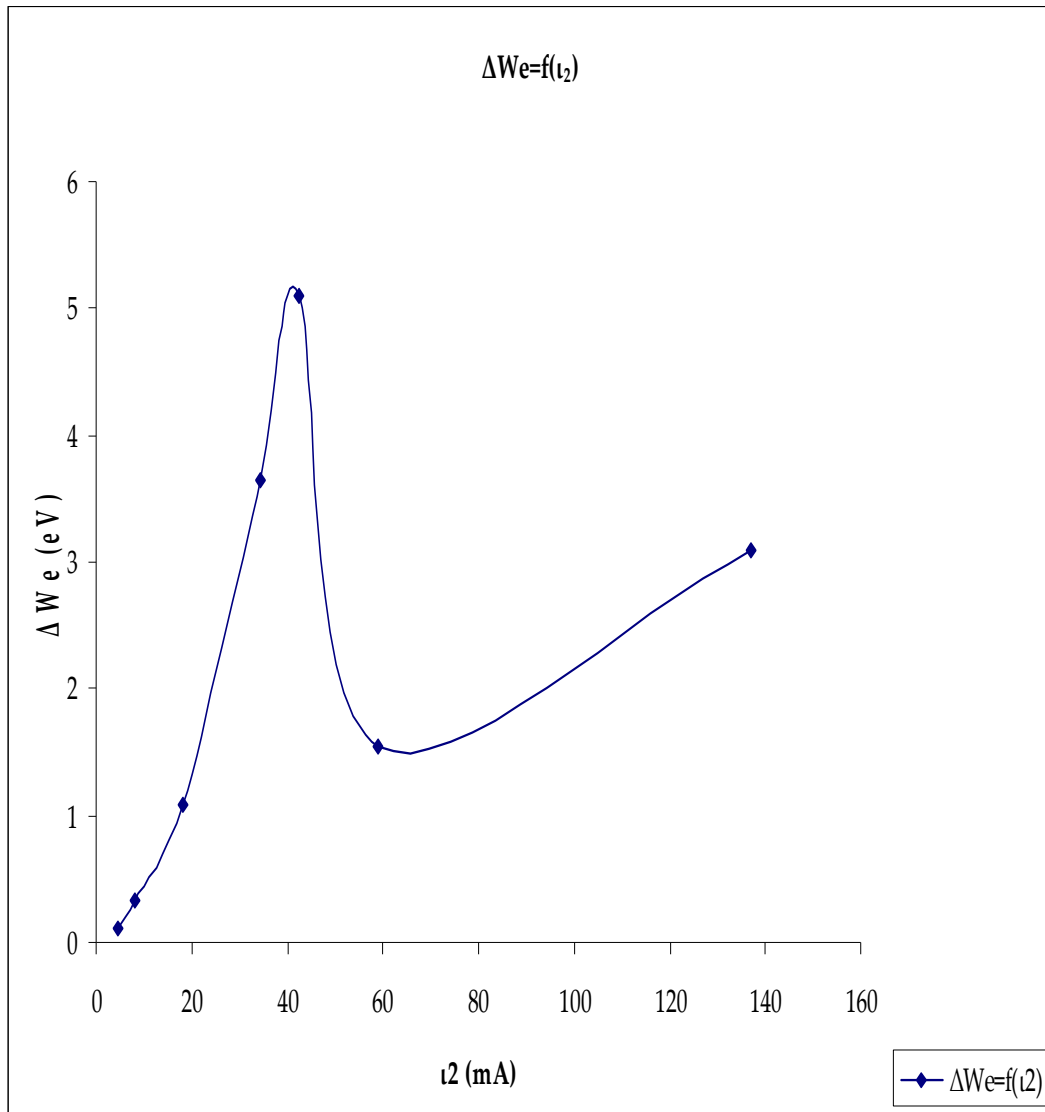
Σχήμα 3.4-9 : Χαρακτηριστική $\Delta i = f(u_k, E_k)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 u_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση u_k
 Δi : $\Delta q / \Delta t$



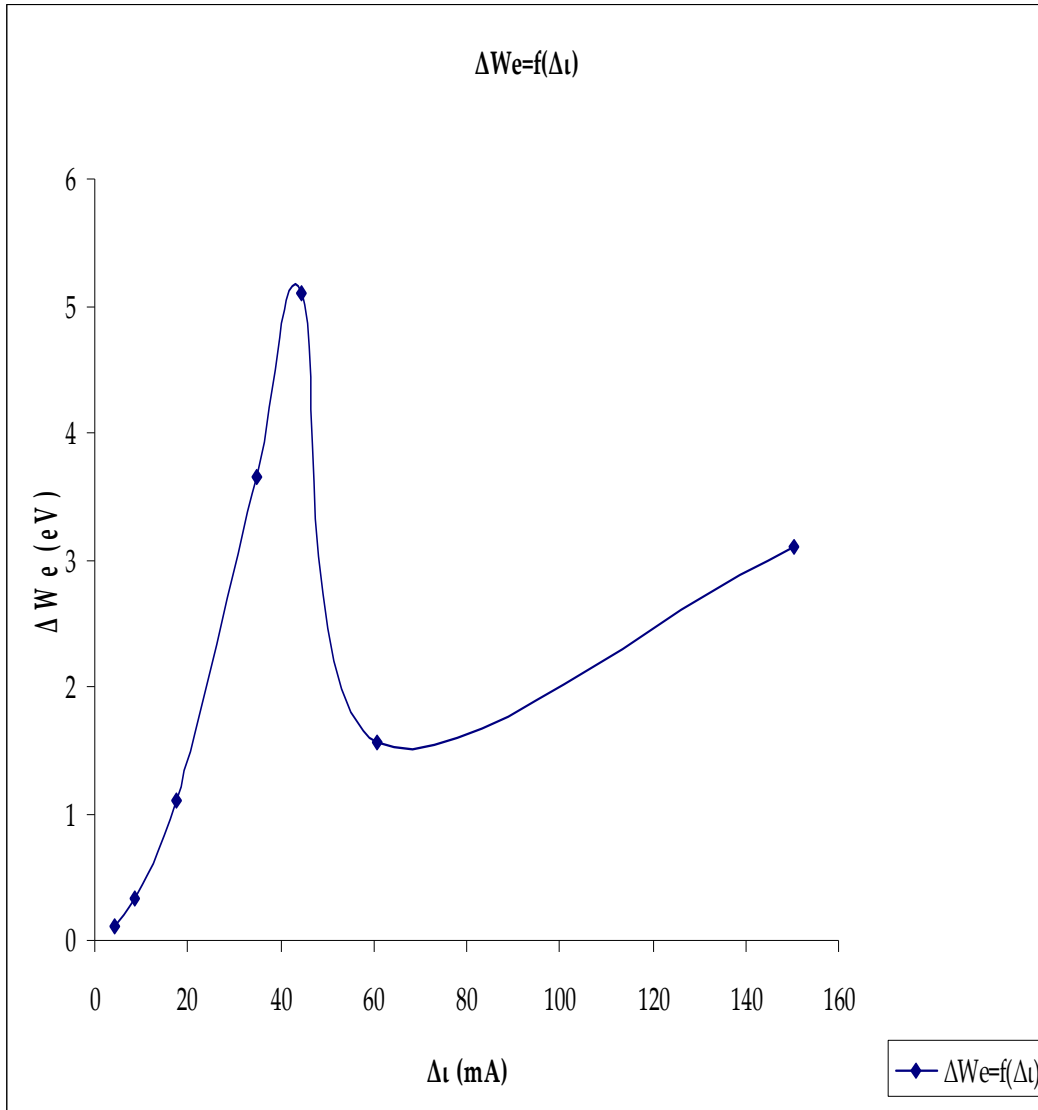
Σχήμα 3.4-10 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(u_{\epsilon V}, E_{\epsilon V})$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 $u_{\epsilon V}$: κρουστική τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 $E_{\epsilon V}$: τιμή του πεδίου στην αντίστοιχη θέση $u_{\epsilon V}$
 ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης



Σχήμα 3.4-11 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_1)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης
 i_1 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.4-12 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(i_2)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης
 i_2 : ένταση του ρεύματος στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.4-13 : Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(\Delta t)$ για το πεπιεσμένο χαρτί πάχους $d=2\text{mm}$ εντός ελαίου μετασχηματιστών υπό κρουστική τάση $-10/200\mu\text{s}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου (ηλεκτρόδια : ακίδα με ακτίνα καμπυλότητας $0,9\text{mm}$ – πλάκα)
 ΔW_e : ενέργεια για την πρώτη ομάδα ηλεκτρονίων στον πυκνωτή μέτρησης
 Δt : $\Delta q/\Delta t$

4. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα

Από τις χαρακτηριστικές $t_1=f(u_{ev}, E_{ev})$ διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνεται η τάση τόσο μειώνεται ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων. Με την αύξηση της τάσης παρέχεται μεγαλύτερη ενέργεια στα ηλεκτρόνια του υλικού με αποτέλεσμα να καταστρέφεται γρηγορότερα η κατάσταση ισορροπίας και να εκδηλώνονται ταχύτερα μερικές εκκενώσεις.

Στις χαρακτηριστικές $t_2=f(u_{ev}, E_{ev})$ παρατηρείται αρχικά αύξηση του χρόνου περαιώσης των μερικών εκκενώσεων. Μετά από μια τιμή της τάσης όμως ο χρόνος περαιώσης καταρρέει. Αυτό οφείλεται στη μηχανική καταπόνηση του υλικού λόγω εξάσκησης δυνάμεων Coulomb μεταξύ των ηλεκτροδίων και του υλικού που τείνει να υπερισχύσει των μερικών εκκενώσεων όταν μεγάλο μέρος των ηλεκτρικών φορέων έχει απομακρυνθεί από το υλικό λόγω των εκκενώσεων αυτών.

Ομοίως εξηγείται και η μορφή των καμπυλών $\Delta t=f(u_{ev}, E_{ev})$

Από τις καμπύλες $i=f(u_{ev}, E_{ev})$, $i=f(u_k, E_k)$ παρατηρούμε την εκθετική αύξηση του ρεύματος με την αύξηση του πεδίου όπως ήταν αναμενόμενο από τη θεωρία του ιονισμού με κρούσεις. Οι αποκλίσεις από την εκθετική μορφή στο μέσο περίπου των καμπυλών παρουσιάζονται επειδή τοπικά οι δυνάμεις Coulomb υπερισχύουν της ηλεκτροχημικής διάσπασης. Όπως εξηγήθηκε και προηγουμένως η απομάκρυνση ηλεκτρικών φορέων από το υλικό λόγω μερικών εκκενώσεων ακολουθείται από μηχανική καταπόνησή του λόγω δυνάμεων Coulomb μεταξύ υλικού και ηλεκτροδίων καθώς και μεταξύ διαφόρων θέσεων του υλικού. Αυτό οδηγεί σε μείωση της διηλεκτρικής αντοχής και στην επανεμφάνιση τελικά μερικών εκκενώσεων.

Στις χαρακτηριστικές $i_2=f(u_{ev}, E_{ev})$, $i_2=f(u_k, E_k)$, $\Delta i=f(u_{ev}, E_{ev})$, $\Delta i=f(u_k, E_k)$, που εξηγούνται επίσης από τη θεωρία του ιονισμού με κρούσεις η απότομη αύξηση της τιμής του ρεύματος στο τέλος οφείλεται στην μείωση της ηλεκτρικής αντοχής του υλικού που προκλήθηκε από την ηλεκτροχημική διάσπασή του.

Από τις γραφικές παραστάσεις $\Delta w_e=f(u_{ev}, E_{ev})$ παρατηρούμε ότι η αύξηση του πεδίου συνοδεύεται αρχικά με αύξηση της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ακολούθως η ενέργεια μειώνεται λόγω της δράσης των δυνάμεων Coulomb.

Οι καμπύλες $\Delta w_e=f(i_1)$, $\Delta w_e=f(i_2)$, $\Delta w_e=f(\Delta i)$ δεν μπορούν να εξηγηθούν με βάση τη θεωρία του ιονισμού με κρούσεις και θα χρειαστούν περαιτέρω αναλύσεις.

Ορισμένες παρεκκλίσεις που παρατηρούνται σε ορισμένες καμπύλες ιδιαίτερα της ενότητας 3.4 προφανώς οφείλονται σε πιθανές αστοχίες μετρήσεων καθώς και στην αλλαγή των ιδιοτήτων των

μονωτικών εξαιτίας της συνεχούς καταπόνησης τους με κρουστικές τάσεις.

Βιβλιογραφία

- 1) Π.Δ. Μπούρκας – Κ.Γ. Καραγιάννης
« Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και Υλικά » Αθήνα 2003
- 2) Κ.Θ. Δέρβος
« Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων » Αθήνα 2007
- 3) Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
« Υψηλές Τάσεις Ι » Εκδόσεις Συμεών
- 4) Δημήτριος Μ. Δρόσος
« Στατιστική Ανάλυση Αλμάτων Δυναμικού σε Δοκίμια Πεπιεσμένου Χαρτιού υπό Κρουστική Τάση Μορφής 10/200μs » Αθήνα 2008