



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

**Σύνθετη Αντίσταση και ενέργεια στον συνδυασμό «Pertinax -
Λάδι Μετασχηματιστών 80⁰C» εντός ανομοιογενούς πεδίου,
υπο κρουστικές τάσεις $\pm 250/2500 \mu s$**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κασαλιέρι Δαβίδ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2010



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

**Σύνθετη Αντίσταση και ενέργεια στον συνδυασμό «Pertinax -
Λάδι Μετασχηματιστών 80°C» εντός ανομοιογενούς πεδίου,
υπο κρουστικές τάσεις $\pm 250/2500 \mu s$**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δαβίδ Κασαλιέρι

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε απο την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Οκτωβρίου 2010.

.....
Νικόλαος Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μ. Ιωαννίδου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κων/νος Καραγιαννόπουλος
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2010

.....
Δαβίδ Κασαλιέρι

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

Copyright © Δαβίδ Κασαλιέρι, 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Στην μητέρα μου

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	9
Λέξεις Κλειδιά	9
Abstract.....	10
Key words	10
1. Εισαγωγή.....	11
Καθορισμός βασικών εννοιών	11
1.1 Κρουστική τάση.....	11
1.2 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών.....	13
1.3 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών.....	13
1.3.1 Η θερμική διάτρηση.....	14
1.3.2 Η ηλεκτρική διάτρηση	15
1.3.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης).....	19
1) Γενικά περί μερικών εκκενώσεων	19
2) Η τεχνητή γήρανση.....	20
3) Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων.....	21
4) Παράδειγμα ερμηνείας παλμογραφημάτων των μερικών εκκενώσεων μέσω των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων.....	23
5) Μία ερμηνεία του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff, μέσω σύγκρισης της ηλεκτρικής καταπόνησης με τη μηχανική καταπόνηση.....	24
1.3.4 Η θερμοχημική διάτρηση.....	26
1.3.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.....	27
1) Ο συνδυασμός της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.....	27
2) Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.....	30
3) Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.....	38
1.3.6 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση.....	41
1.4 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών.....	42
1.4.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών.....	43
α) Μακροσκοπική ερμηνεία.....	45
β) Κβαντομηχανική ερμηνεία :	46

1.4.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση	49
1.4.3 Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών.....	50
1.5 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών	52
1.6 Εργαστηριακός έλεγχος των μονωτικών υλικών	54
1.6.1 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων	54
1.6.2 Το φαινόμενο της πολικότητας σε πολυμερή στερεά μονωτικά κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.....	59
1.6.3 Η Διάταξη των ηλεκτροδίων.....	60
1.6.4 Το περιβάλλον μέσο κατά τις δοκιμές σε στερεά μονωτικά.....	61
2. Σκοπός της εργασίας.....	62
3. Αποτελέσματα και στατιστική ανάλυση των μετρήσεων	65
3.1 Κρουστική τάση +250/2500 μs , πάχος δοκιμίου $d=1\text{mm}$	65
3.1.1 Πίνακες στατιστικής ανάλυσης μετρήσεων (+250/2500, $d=1\text{mm}$).....	66
3.1.2 Χαρακτηριστικές της στατιστικής ανάλυσης (+250/2500, $d=1\text{mm}$)	70
3.2 Κρουστική τάση -250/2500 μs , πάχος δοκιμίου 1mm	85
3.2.1 Πίνακες στατιστικής ανάλυσης μετρήσεων (-250/2500, $d=1\text{mm}$)	86
3.2.2 Χαρακτηριστικές της στατιστικής ανάλυσης (-250/2500, $d=1\text{mm}$)	90
3.3 Κρουστική τάση +250/2500 μs , πάχος δοκιμίου 2mm	105
3.3.1 Πίνακες στατιστικής ανάλυσης μετρήσεων (+250/2500, $d=2\text{mm}$).....	106
3.3.2 Χαρακτηριστικές της στατιστικής ανάλυσης (+250/2500, $d=2\text{mm}$)	111
3.4 Κρουστική τάση -250/2500 μs , πάχος δοκιμίου 2mm	126
3.4.1 Πίνακες στατιστικής ανάλυσης μετρήσεων (-250/2500, $d=2\text{mm}$)	127
3.4.2 Χαρακτηριστικές της στατιστικής ανάλυσης (-250/2500, $d=2\text{mm}$)	132
4. Σχόλια επι των υπολογισμών.....	147
4.1 Μαθηματικές προσεγγίσεις.....	147
4.2 Φυσική ερμηνεία.....	149
5. Συμβολή της εργασίας στην έρευνα και την πρακτική εφαρμογή.....	149
6. Βιβλιογραφία.....	150

Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των μερικών εκκενώσεων και οι επιπτώσεις αυτών, σε βιομηχανικά μονωτικά υλικά υπό κρουστική τάση της μορφής 250/2500μs. Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων, και είναι απαραίτητα για τη σωστή λειτουργία του, αλλά και για την προστασία των χειριστών τους. Η μελέτη των ιδιοτήτων συγκεκριμένων ηλεκτρομονωτικών υλικών οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία και τη σωστή χρήση τους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων και αφορά τη μελέτη και στατιστική ανάλυση των ηλεκτρικών φαινομένων, που συνοδεύουν τις μερικές εκκενώσεις, οι οποίες εκδηλώνονται στο υλικό Pertinax, εντός μονωτικού ελαίου, όταν σε αυτό ασκείται κρουστική τάση της μορφής $\pm 250/2500\mu s$. Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται ευρύτατα στις ηλεκτρικές μονώσεις. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, γίνεται δυνατή η κατανόηση των ιδιοτήτων των δοκιμίων του Pertinax, και μελετάται η συμπεριφορά τους όταν βρίσκονται μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από ηλεκτρόδια "ακίδα-πλάκα". Έτσι είναι δυνατή η επιλογή του σωστού υλικού για κάθε μόνωση, αλλά παράλληλα ενισχύεται και η περαιτέρω πρόοδος της τεχνολογίας. Αναφέρεται εδώ ότι η θεωρητική προσέγγιση βασίζεται κυρίως στο βιβλίο «Μετρήσεις σε Βιομηχανικές Διατάξεις και Υλικά» των καθηγητών Ε.Μ.Π., Π.Δ. Μπούρκα και Κ.Γ. Καραγιαννόπουλου.

Στο κυρίως μέρος της εργασίας, αρχικά γίνεται μία περιγραφή των κυριότερων χαρακτηριστικών των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές εφαρμογές, καθώς και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάσπαση αυτών υπό υψηλή τάση. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι εργαστηριακές διατάξεις και ο τρόπος που γίνονται οι μετρήσεις των διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών, προκειμένου να διερευνηθεί ο μηχανισμός γήρανσης – καταστροφής των μονωτικών υλικών. Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις όλων των μετρηθέντων μεγεθών, καθώς και άλλων που προκύπτουν από αυτά και βοηθούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τις ιδιότητες του υλικού. Τέλος, παρατίθενται τα σχόλια επί των μετρήσεων καθώς και η φυσική ερμηνεία τους.

Λέξεις Κλειδιά

Μονωτικά υλικά, Διάσπαση – Διάτρηση μόνωσης, Μερικές εκκενώσεις, Γήρανση υλικών, Κρουστική τάση, Σύνθετη αντίσταση, Ενέργεια, Pertinax

Abstract

The aim of this thesis is the study of partial discharges and their repercussions, in industrial insulating materials under impact voltage of form 250/2500 μ s. The electrical insulating materials take part in every electrical installation, and are essential for the proper operation and the protection of the operators. The study of certain attributes of these insulating materials lead to useful conclusions on their operation and use.

This thesis was conducted in the department of Electric Industrial Provisions and Decision Systems, and concerns the study and statistical analysis of electric phenomena that take place during partial discharges that are expressed in Pertinax inside insulating oil, when hit by impact voltage of form 250/2500 μ sec. Pertinax is commonly used in electric insulations. In this thesis, we can comprehend the attributes of Pertinax, and its behavior in electric field that is created by spike electrode on plate. This way we can choose correctly the proper material for each insulation case, and further the progress of technology. The theoretical approach is based mainly on the book "Measurements in Industrial Provisions and Materials" of professors P.D. Bourkas and K.G. Karagianopoulos.

In the main part of the thesis, initially there is a description of principal characteristics of common insulating materials that are used today in a lot of applications, as well as phenomena that take place at the destruction of them, under high voltage. Then, there is a description of the laboratorial provisions and the way they were used to take the measurements of various electric sizes, so that we can investigate the mechanism of ageing and destruction of insulating materials. Then we have a description of the laboratory instruments that were used to take the measurements of various electric sizes. Finally, we present the graphic representations of all the sizes that were measured, comments on the measurements and their natural interpretation.

Key words

Insulating materials, break-perforation of insulation, partial discharges, ageing – destruction of materials, impact voltage, Complex Impedance, Energy.

1. Εισαγωγή

Καθορισμός βασικών εννοιών

Μονωτής (ή **διηλεκτρικό**) είναι κάθε υλικό το οποίο δεν επιτρέπει την ελεύθερη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου από τη μάζα του. Τέλειοι μονωτές που να απαγορεύουν εντελώς τη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου από τη μάζα τους δεν υπάρχουν, αλλά μερικά υλικά προσεγγίζουν αρκετά καλά αυτή τη συμπεριφορά. Σκοπός των μονώσεων σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των ηλεκτροφόρων μερών, καθώς και των ρευματοφόρων μερών προς γη, έτσι ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό.

Με τον όρο **διάσπαση** εννοούμε την αγωγή σύνδεση δύο μεταξύ τους μονωμένων ηλεκτροδίων, μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μονωτικών (π.χ. αέρας-πορσελάνη, βακελίτης-μονωτικό λάδι), τότε ονομάζεται **επιφανειακή διάσπαση**. Η διάσπαση στο περιβάλλον μέσο ενός στερεού μονωτικού, λόγω μείωσης της απόστασης μόνωσης του στερεού μονωτικού από ξένες επικαθίσεις στην επιφάνεια του υλικού (π.χ. ρυπασμένοι μονωτήρες), ονομάζεται **υπερπήδηση**. Η διάσπαση μέσω του όγκου ενός μονωτικού υλικού καλείται **διάτρηση**.

Στις διάφορες πρακτικές εφαρμογές υψηλών τάσεων συναντώνται συχνότατα χωρικά φορτία μεταξύ των ηλεκτροδίων. Σε μία διάταξη δύο ηλεκτροδίων, τα χωρικά φορτία συγκεντρώνονται στο ηλεκτρόδιο με την αντίθετη προς αυτά πολικότητα και έτσι σχηματίζουν ένα νέφος χωρικών φορτίων. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι μέχρι κάποια τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (ή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης) το πεδίο είναι **χωρικό** (ή ηλεκτροστατικό), δηλαδή τα χωρικά φορτία του νέφους είναι αμετακίνητα. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει μία κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των εξασκούμενων δυνάμεων Coulomb.

Όταν, μετά την παραπάνω τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου, καταστρέφεται η κατάσταση ισορροπίας (χωρίς να συμβαίνει διάσπαση), τότε εκδηλώνονται περιορισμένης έκτασης εκκενώσεις. Αυτές ονομάζονται **μερικές εκκενώσεις**. Οι μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε θέσεις ανομοιογένειας στον όγκο ή στην επιφάνεια του υλικού (κυρίως φυσαλίδες αερίων στον όγκο του υλικού και διάφορες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνειά του όπως σκόνη, υγρασία, κ.λ.π.). Οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού ονομάζονται **εσωτερικές μερικές εκκενώσεις**, ενώ αυτές που εκδηλώνονται στην επιφάνεια του χαρακτηρίζονται ως **εξωτερικές μερικές εκκενώσεις**. Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν την ξεχωριστή ονομασία **στεμματοειδείς μερικές εκκενώσεις** (ή **Korona**).

Η ενεργός τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (U_a), κατά την οποία αρχίζει η έναρξη των μερικών εκκενώσεων ονομάζεται **τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων** (ή **αρχική τάση**). Η τιμή της πεδιακής έντασης E_a για την έναρξη των μερικών εκκενώσεων χαρακτηρίζεται ως **πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων** (ή **αρχική πεδιακή ένταση**). Επίσης, αναφέρεται και ως **πεδίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων**. Γενικά, η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση μεταξύ των ηλεκτροδίων αποκαλείται εφαρμοζόμενο πεδίο.

1.1 Κρουστική τάση

Μεγάλη σημασία για την ηλεκτρική αντοχή των μονώσεων έχει η μελέτη προ και κατά τη διάσπαση των μονωτικών υλικών (και των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών υψηλών τάσεων γενικότερα), ως προς τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης. Αυτό είναι λογικό, αν

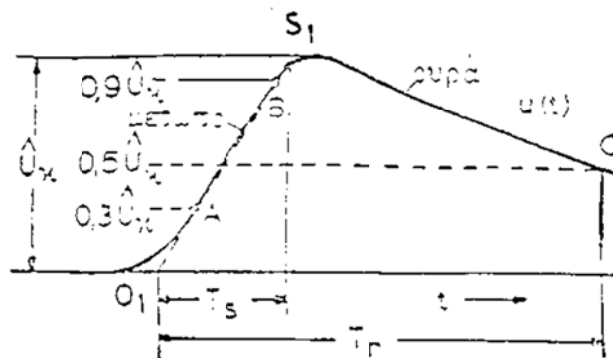
σκεφτεί κανείς ότι οι μονώσεις πρέπει να διατηρούν την αξιοπιστία τους όταν συμβαίνουν υπερτάσεις στο δίκτυο. Γενικά, οι τάσεις δοκιμής είναι εναλλασσόμενες, συνεχείς, κρουστικές και αποσβεννύμενες ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας (οι τελευταίες δε συνηθίζονται πλέον).

Οι κρουστικές τάσεις (ως κρουστική τάση χαρακτηρίζεται ένας μοναδιαίος και ενιαίως πολικότητας παλμός τάσης) χρησιμοποιούνται κατά τη διεξαγωγή τεχνικών δοκιμών υψηλών τάσεων, με στόχο την προσομοίωση των διηλεκτρικών καταπονήσεων που υφίστανται οι εγκατεστημένες στα ηλεκτρικά δίκτυα διατάξεις και στοιχεία κατά την ανάπτυξη επί των δικτύων εσωτερικών και εξωτερικών υπερτάσεων και επίσης, κατά τη βασική έρευνα την αφορώσα στη μελέτη της διάσπασης μονωτικών υλικών.

Οι κρουστικές τάσεις χωρίζονται σε ορθογωνικές, σφηνοειδείς και διπλοεκθετικές. Οι δύο πρώτες μορφές χρησιμοποιούνται σε ερευνητικές εργασίες, ενώ για τη διεξαγωγή δοκιμών χρησιμοποιούνται προτυποποιημένες διπλοεκθετικές κρουστικές τάσεις. Κρουστικές τάσεις με διάρκεια μετώπου της τάξης του 1μs και ημίσεως εύρους μερικές δεκάδες μs, προσομοιώνουν τις υπό κεραυνών δημιουργούμενες υπερτάσεις, ενώ σημαντικά μεγαλύτερης διάρκειας κρουστικές τάσεις προσομοιώνουν τις υπερτάσεις που ακολουθούν τους διάφορους χειρισμούς ζεύξης και απόζευξης σε ένα δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Διακρίνουμε πλήρεις και αποκεκομμένες κρουστικές τάσεις (στο μέτωπο, στην κορυφή ή στην ουρά). Οι αποκεκομμένες κρουστικές τάσεις δημιουργούνται όταν συμβεί διάσπαση στο δοκίμιο. Έτσι εμφανίζεται απότομος μηδενισμός της τάσης, ο οποίος συνεπάγεται εμφάνιση ταλάντωσης τάσης (μεταβατικό φαινόμενο).

Η μορφή της κεραυνικής κρουστικής τάσης (ή κρουστικής τάσης μικρής διάρκειας) δίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.1-1).



Σχήμα 1.1-1: Χαρακτηρισμός των μεγεθών μίας κρουστικής τάσης.

- U_{κ} : Μέγιστη τιμή
- T_s : Διάρκεια μετώπου
- T_r : Διάρκεια ημίσεως εύρους

Χαρακτηρίζεται από το χρόνο μετώπου (T_s) και το χρόνο ουράς (T_r). Η συνήθης κεραυνική τάση είναι μία κρουστική τάση της μορφής 1,2/50μs, που σημαίνει $T_s=1,2\mu s$ και $T_r=50\mu s$. Ως τυποποιημένη κρουστική τάση χειρισμών θεωρείται αντίστοιχα η 250/2500μs. Επίσης, χαρακτηριστικό μέγεθος μίας κρουστικής τάσης αποτελεί και η μέγιστη τιμή της (\ddot{u}_{κ}).

Οι κρουστικές τάσεις χειρισμών (ή κρουστικές τάσεις μεγάλης διάρκειας) έχουν χαρακτηριστικό μέγεθος το χρόνο μεγίστου (t_m), αντί του χρόνου μετώπου. Κατά κανόνα οι κρουστικές τάσεις παράγονται μέσω της εκφόρτισης πυκνωτών υψηλής τάσης, διαμέσου σπινθηριστών έναυσης, σε ένα κύκλωμα αντιστάσεων και χωρητικότητας. Η μέγιστη τιμή

των κρουστικών τάσεων μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια σπινθηριστών μέτρησης και οργάνων μέτρησης σε συνδυασμό με καταμεριστές τάσης. Η χρονική μεταβολή μίας κρουστικής τάσης λαμβάνεται μέσω ηλεκτρονικού παλμογράφου ή αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα, συνδυαζομένων πάντα με καταμεριστή τάσης.

1.2 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών

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

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

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

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

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

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

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

Όπως προαναφέρθηκε, τα στερεά μονωτικά αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες προ της διάσπασης και καταστρέφονται κατά τη διάτρηση. Η ανάγκη για να δοθεί μία εξήγηση στις παραπάνω αλλαγές των υλικών (προ και κατά τη διάτρηση), οδήγησε στην αναζήτηση των διαφόρων παραγόντων, που τις προκαλούν. Έτσι, από μετρήσεις, που έχουν γίνει σε διάφορα στερεά μονωτικά (κυρίως μετρήσεις της τάσης διάσπασης σε σχέση με το χρόνο και τη μορφή της τάσης), οι οποίες έχουν συνδυαστεί με παρατηρήσεις σχετικά με την

αλλαγή της μοριακής δομής, που προκαλείται στα υλικά αυτά, θεωρείται ότι υπάρχουν οι παρακάτω βασικοί παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων τους :

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

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

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

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

1.3.1 Η θερμική διάτρηση

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

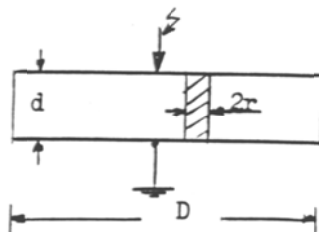
Ο οχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 , οπότε έχουμε :

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.3.1-1)$$

Με την προϋπόθεση σταθερής διατομής (A) του οχετού διάτρησης (σχήμα 2-1) και ειδική αγωγιμότητα σ_1 , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι :

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} \quad (1.3.1-2)$$

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



Σχήμα 1.3.1-1 : Απλοποιημένη παράσταση του οχετού διάτρησης λόγω των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού .

D : διάμετρος δοκιμίου

d : πάχος του μονωτικού

$2r$: διάμετρος του οχετού διάτρησης.

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

$$P = P_a + C_0(d\theta/dt) \quad (1.3.1-3)$$

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

$$P_a = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (1.3.1-4)$$

όπου κ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

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

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (1.3.1-5)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δύο συναρτήσεις της θερμοκρασίας ($P=f(\theta)$ και $P_a=f(\theta)$). Για το λόγο αυτό, η οριακή τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση (U_θ) δίνεται όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι από τη διαφορίση ως προς θ , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης 1.3.1-5, έχουμε:

$$\frac{\beta U_\theta^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \quad (1.3.1-6)$$

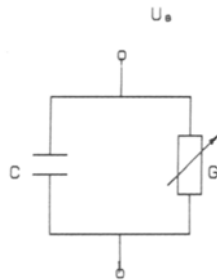
Από τις σχέσεις 1.3.1-5 και 1.3.1-6 φαίνεται ότι:

$$\beta \cdot \theta = 1 \quad (1.3.1-7)$$

$$\text{και} \quad U_\theta = d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.3.1-8)$$

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_θ μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα 1.3.1-2, όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μία μεταβλητή αγωγιμότητα G .

Η διάτρηση στην τιμή U_θ συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ_0 στην τιμή σ_1 : σχέση 1.3.1-1), μία οριστική τιμή G_{\max} .



Σχήμα 1.3.1-2 : Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule.

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

G_0 : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή

G_{\max} : αγωγιμότητα για τη διάτρηση

C : χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή

1.3.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

Όταν η σταθερή ενεργός τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη για τη θερμική διάτρηση, τότε η πεδιακή ένταση γίνεται

μεγαλύτερη και επομένως μπορεί να αυξηθεί η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων μέσα στο μονωτικό υλικό.

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

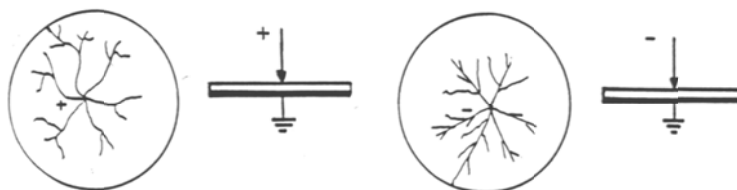
- α) αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις (όπως στα αέρια μονωτικά), ή
- β) μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, από την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή
- γ) συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

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

Η **δενδροειδής διάτρηση** είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, γιατί, λόγω της μεγαλύτερης τιμής της τάσης και επομένως της πεδιακής έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά τη διάτρηση σχετίζεται με θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μία διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγώγιμη σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 1.3.2-3 δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη (ανάλογα με την πολικότητα της τάσης) για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (ηλεκτρόδια ακίδα-πλάκα).

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

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



Σχήμα 1.3.2-1: Προς επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη

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

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις έχει διαπιστωθεί, ότι πάνω από μία μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης U_{kmin} , που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, συμβαίνει η διάτρηση με μία κρούση υπό μορφή οχετού, αν και η τιμή της

πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης. Η μορφή της διάτρησης αυτής χαρακτηρίζεται επίσης ως ηλεκτρομηχανική. Το φαινόμενο έχει αποδοθεί στην απότομη μεταβολή της πεδιακής έντασης, λόγω της οποίας δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα την ηλεκτρομηχανική διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ του αρνητικού ηλεκτροδίου και των θετικών ηλεκτρικών φορέων, που συγκρατούνται στο πλέγμα των μορίων.

Λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας για την ηλεκτρική διάτρηση και επειδή τα στερεά μονωτικά είναι και μονωτές θερμότητας, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμότητα που παράγεται μόλις πριν από τη διάτρηση είναι αμελητέα. Κατά τη σχέση επομένως 1.3.1-3 και για έναν οχετό διατομής $A=\pi r^2$ (κατά το Σχήμα 1.3.1-1) ισχύει μόλις προ της διάτρησης ότι:

$$U_n^2 \sigma_2 \frac{A}{d} = \sigma_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.3.2-1)$$

όπου: σ_2 η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια ανομοιογένεια (λόγω της οποίας η πεδιακή ένταση έγινε ιδιαίτερα μεγάλη στην περιοχή εκείνη του υλικού) και U_n η ενδεικνύμενη τιμή της τάσης για την ηλεκτρική διάσπαση του υλικού στην παραπάνω περιοχή.

Αν υποθέσουμε ότι, λόγω του μικρού διατιθέμενου χρόνου είναι $d\theta/d = \theta/T_\delta$, όπου T_δ ο χρόνος για την ηλεκτρική διάτρηση, τότε από τη σχέση 1.3.2-1 έχουμε :

$$U_n = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_\delta}} \quad (1.3.2-2)$$

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

Πίνακας 1.3.2-1: Τιμές της τάσης διάσπασης του στερεού μονωτικού pertinax H1270 (πάχους 1mm και 2mm) κατά την καταπόνησή του με διάφορες μορφές κρουστικών τάσεων σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών.

Διάμετρος δοκιμίων: 150 mm

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα

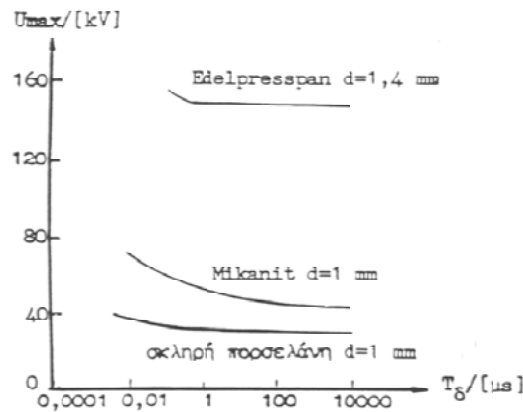
Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: $R=0,9$ mm

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

$$\hat{U}_{kn} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_s}} \quad (1.3.2-3)$$

όπου T_S η διάρκεια του μετώπου της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν μία ικανοποιητική ερμηνεία σε πειράματα, που έχουν γίνει. Πράγματι, όσο αυξάνει ο χρόνος T_S μίας κρουστικής τάσης, τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή (βλέπετε πίνακα 1.3.2-1). Κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση ισχύει περίπου η αναλογία $U_n = f(1/\sqrt{T_\delta})$ (βλέπετε σχήμα 1.3.2-2).

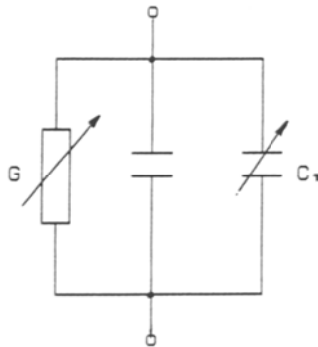


Σχήμα 1.3.2-2: Διάσπασης διαφόρων στερεών μονωτικών σε σχέση με το χρόνο καταπόνησης.

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

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

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



Σχήμα 1.3.2-3: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα

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

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

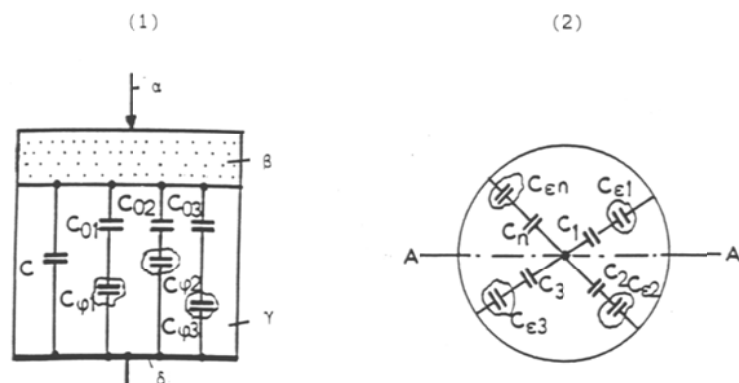
Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μία κρίσιμη για το υλικό τιμή σ_2 , η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα (σχήματος 1.3.2-3), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_π (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C .

Όταν η αγωγιμότητα G και ο πυκνωτής C_{π} έχουν αποκτήσει μόλις προ της διάτρησης τις τιμές G_{\max} και C_{\max} (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα σ_2 , λόγω κάποιας ανομοιογένειας), τότε συμβαίνει η διάτρηση.

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

1) Γενικά περί μερικών εκκενώσεων

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (εσωτερικές μερικές εκκενώσεις), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνεια του (εξωτερικές εκκενώσεις). Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίνεται στο σχήμα 1.3.3-1. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές $C_{\varepsilon 1} \dots C_{\varepsilon n}$ και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές $C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$. Οι πυκνωτές $C_1 \dots C_n$ και $C_{01} \dots C_{0n}$ παριστάνουν αντίστοιχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (κάθε ένας από αυτούς δίνει την ολική χωρητικότητα δύο πυκνωτών, εκ των οποίων ο ένας είναι η χωρητικότητα μεταξύ ακίδας και της θέσης διαταραχής και ο άλλος η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας και της θέσης διαταραχής).



Σχήμα 1.3.3-1 : Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής σε στερεό μονωτικό εντός μονωτικού ελαίου

1) Τομή A-A της διάταξης πειραματισμού :

α : ηλεκτρόδιο ακίδα

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

γ : στερεό μονωτικό

δ : ηλεκτρόδιο πλάκα

2) Κάτοψη της διάταξης πειραματισμού :

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

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

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

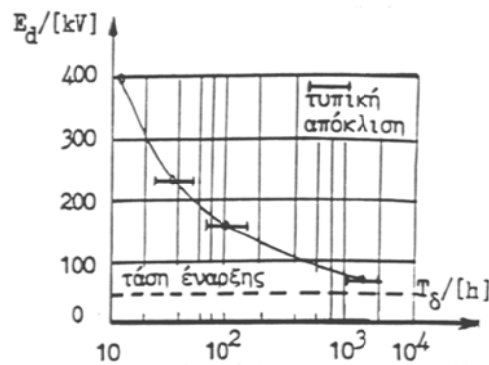
$C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$: πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων)

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

Από τη στιγμή της έναρξης των μερικών εκκενώσεων προκαλείται συνήθως σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του στερεού μονωτικού, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε περιορισμένο τμήμα του, όπου δηλαδή έτυχε οι θέσεις ανομοιογένειας να είναι περισσότερο

αγώγιμες. Πρόκειται για ένα **ηλεκτροχημικό φαινόμενο**, που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού.

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί **βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής**, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και **γήρανση** του μονωτικού υλικού. Στο Σχήμα 1.3.3-2 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



Σχήμα 1.3.3-2 : Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχος 0,125mm, λόγω μερικών εκκενώσεων.

Αριθμός δοκιμών : 10 ανά σημείο μέτρησης.

T_d : χρόνος διάσπασης.

2) Η τεχνητή γήρανση

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

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

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

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

$$\mu_e = U_e / U \quad (1.3.3-1)$$

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

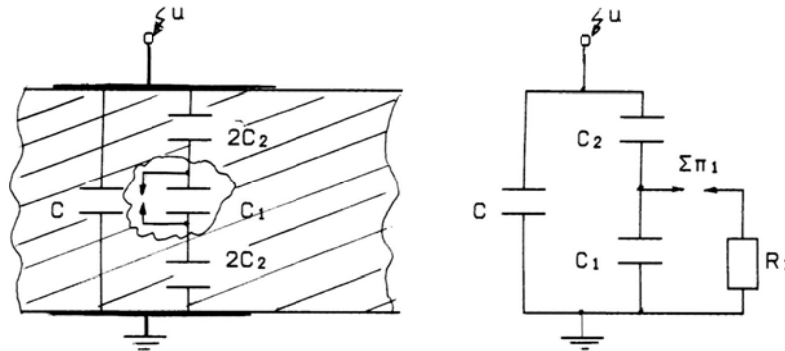
Κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ισχύει αντίστοιχα :

$$\mu_0 = \hat{U}_{κε} / \hat{U}_κ \quad (1.3.3-2)$$

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

3) Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων

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



Σχήμα 1.3.3-3 : Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του (κατά Gemant και Philipoff).

α : σχηματική παράσταση

β : ισοδύναμο κύκλωμα

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C₁ : χωρητικότητα της φυσαλίδας

C₂ : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

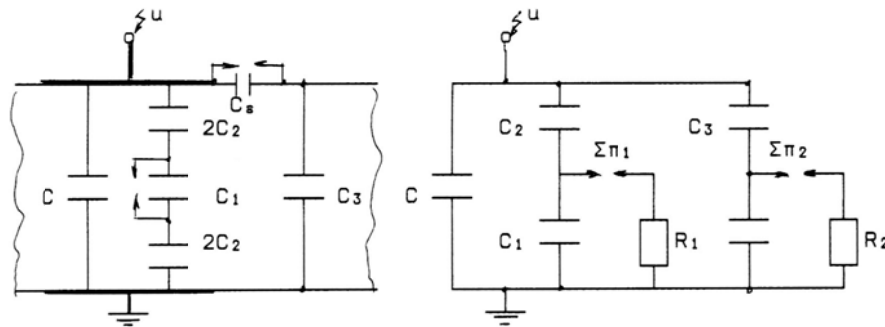
R₁ : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ₁

Η ανάγκη για τη φυσική εξήγηση και τη μαθηματική ανάλυση του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων μέσα στον όγκο του στερεού μονωτικού, οδήγησε τους Gemant και Philipoff στο ισοδύναμο κύκλωμα του (σχήμα 1.3.3-3), γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου.

Στο σχήμα 1.3.3-4 έχει συμπληρωθεί το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο και για τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C₁) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (C_ε). Με τον τρόπο δηλαδή αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού (C₂ και C₃ αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C. Οι σπινθήρες Σπ₁ και Σπ₂ στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R₁, R₂) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C₁, C_ε).

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται

χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη. Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς συχνά στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα 1.3.3-5.



Σχήμα 1.3.3-4 : Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής.

a : σχηματική παράσταση

β : ισοδύναμο κύκλωμα

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας

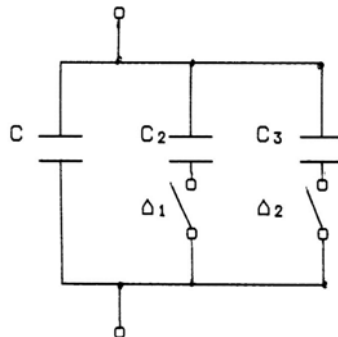
C_ϵ : χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

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

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



Σχήμα 1.3.3-5 : Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff).

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

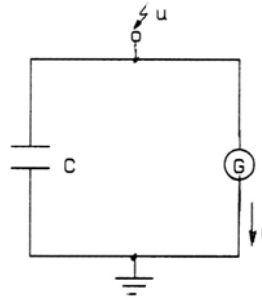
C_2 : χωρητικότητα του υγιούς στον όγκο του μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υγιούς στην επιφάνεια του μονωτικού

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

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φυσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κλπ. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει επίσης μία ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 1.3.3-6). Σύμφωνα με αυτό, οι θέσεις διαταραχής αποδίδονται ως μία γεννήτρια μερικών εκκενώσεων G . Έτσι, όταν

διεγείρεται η γεννήτρια G συμβαίνει αύξηση του δυναμικού στους ακροδέκτες της διάταξης.



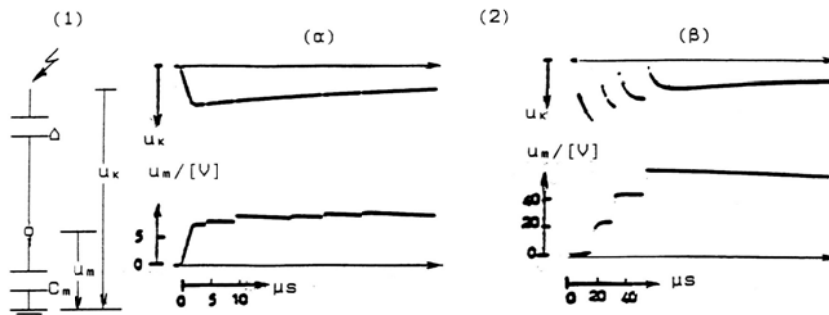
Σχήμα 1.3.3-6 : Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann.

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

G : γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

4) Παράδειγμα ερμηνείας παλμογραφημάτων των μερικών εκκενώσεων μέσω των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Στο σχήμα 1.3.3-7 δίνεται απλοποιημένα το κύκλωμα για τη μέτρηση των μερικών εκκενώσεων. Σύμφωνα με αυτό δοκίμια στερεών μονωτικών πάχους 1mm (Δ), κατά DIN 7735, καταπονούνται με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 μ s, υπό διάταξη ηλεκτροδίων "ακίδα-πλάκα" (με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm). Το παλμογράφημα (α) αφορά τη γήρανση του βακελίτη και το παλμογράφημα (β) τη διάτρηση του pertinax. Η διακεκομμένη γραμμή, που έχει σχεδιαστεί στο παλμογράφημα (α), δείχνει την ιδανική συμπεριφορά (όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις).



Σχήμα 1.3.3-7 : Τυπικά παλμογραφήματα κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών

1) απλοποιημένη διάταξη μέτρησης (u_k : στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης, Δ : δοκίμιο, u_m : τάση στον πυκνωτή μέτρησης C_m).

2) Μετρήσεις με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 μ s:

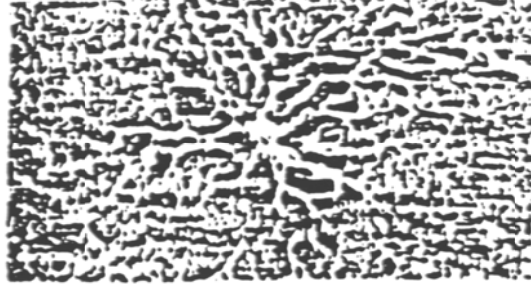
(α) γήρανση : (τιμή πεδίου 1,11MV/cm, $\hat{U}_k=77,5_kV$, $C_m=210nF$, υλικό: βακελίτης)

(β) διάτρηση: (τιμή πεδίου 1,20MV/cm, $\hat{U}_k=85_kV$, $C_m=210nF$, υλικό: pertinax)

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι, μετά από μία τιμή $\hat{U}_k \approx 45_kV$ (όπου \hat{U}_k η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται κατά τη γήρανση επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 1.3.3-8).

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

Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται ως ακολούθως :



Σχήμα 1.3.3-8 : Αλλαγή της μοριακής δομής στην επιφάνεια του μονωτικού pertinax κατά την εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη (μετά από πολλές κρούσεις 10/200μs, μέγιστης τιμής 75kV)

Από το παλμογράφημα της γήρανσης σχήμα 1-7α) φαίνεται ότι εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού, τα οποία προκαλούνται, κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1-4 (ή του σχήματος 1-1), από τη σταδιακή διάσπαση διαφόρων θέσεων διαταραχής (C_1 , C_2). Μπορούμε να υποθέσουμε ότι στην περίπτωση αυτή ισχύει για την σχέση καταμερισμού μεταξύ χωρητικότητας του δοκιμίου C και του πυκνωτή μέτρησης C_m :

$$u_m(t) = \frac{C_\delta + \Delta C_\delta}{C_m} u_k(t) \quad (1.3.3-3)$$

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

5) Μία ερμηνεία του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff, μέσω σύγκρισης της ηλεκτρικής καταπόνησης με τη μηχανική καταπόνηση

Για την ερμηνεία της μηχανικής καταπόνησης των στερεών υλικών χρησιμοποιούνται μηχανικά πρότυπα, που βασίζονται σε δύο γραμμικά στοιχεία : το ελαστικό και το ιξώδες. Το πρώτο εκφράζει τη μεταβολή της τροπής λόγω της ακαριαίας επιβολής (ή αφαίρεση) φορτίου σε ένα στερεό υλικό και το δεύτερο τη διαχρονική μεταβολή της τροπής. Το ελαστικό στοιχείο θεωρείται ότι είναι ένα ελατήριο και το ιξώδες η αντίσταση ροής ενός συνεκτικού υγρού, το οποίο γεμίζει το χώρο ενός κυλίνδρου κάτω από ένα έμβολο, κατά τρόπο ώστε να διαρρέει από ένα μικρό κενό μεταξύ κυλίνδρου και εμβόλου ή από μία τρύπα στο έμβολο. Από τη σύνδεση των δύο παραπάνω στοιχείων σε σειρά προκύπτει το μοντέλο Maxwell (σχήμα 1.3.3-9α), για το οποίο ισχύει:

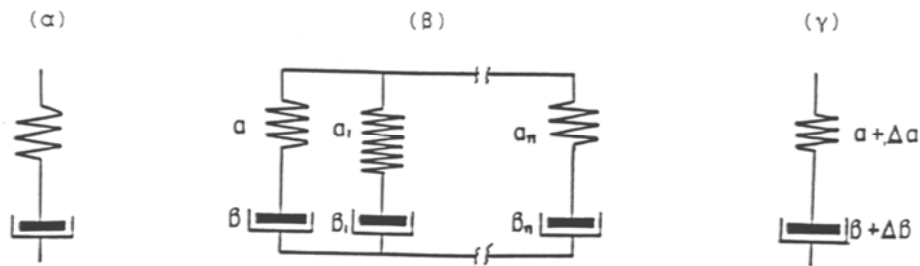
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} E + \frac{\tau}{\kappa} \quad (1.3.3-4)$$

όπου ε η τροπή, τ η μηχανική τάση, E το μέτρο ελαστικότητας, κ μία σταθερά του υλικού και t ο χρόνος. Επειδή η μεταβολή της τροπής $d\varepsilon$ αντιστοιχεί σε μία μεταβολή του μήκους κατά dL και η μηχανική τάση είναι ανάλογη της δύναμης, έπεται ότι :

$$\frac{dL}{dt} = a \frac{dF}{dt} + \beta F \quad (1.3.3-5)$$

όπου a και β σταθερές του υλικού. Η παραπάνω σχέση αφορά τη συμπεριφορά του ομοιογενούς στερεού, γιατί οι τιμές a και β δεν μεταβάλλονται με την καταπόνηση. Ένα μοντέλο για τη συμμετοχή των θέσεων ανομοιογένειας σε ένα στερεό υλικό φαίνεται ότι μπορεί να γίνει με την παράλληλη σύνδεση πολλών μοντέλων Maxwell (σχήμα 3.9β, γ), ένα εκ των οποίων αντιστοιχεί στο βασικό υλικό και τα υπόλοιπα στις επιμέρους ανομοιογένειές του. Η μεταβολή του μήκους κατά dL στο μοντέλο αυτό μπορεί να δοθεί από την παραπάνω σχέση, με την εισαγωγή των συντελεστών A και B του υλικού, όπου :

$$A = a + \Delta a \quad (1.3.3-6)$$



και $B = \beta + \Delta \beta$ (1.3.3-7)

Σχήμα 1.3.3-9 : Στοιχείο Maxwell (α) και μηχανικό μοντέλο του ανομοιογενούς στερεού υλικού (β : αναλυτικό μοντέλο και γ : απλουστευμένο μοντέλο)

όπου Δa και $\Delta \beta$ οι αντίστοιχες μεταβολές των συντελεστών A και B , ως προς τις σταθερές a και β του βασικού υλικού.

Κατ' αναλογία προς τη σχέση 3.1.5-2 έχουμε επομένως :

$$\frac{dL}{dt} = (a + \Delta a) \frac{dF}{dt} + (\beta + \Delta \beta) F \quad (1.3.3-8)$$

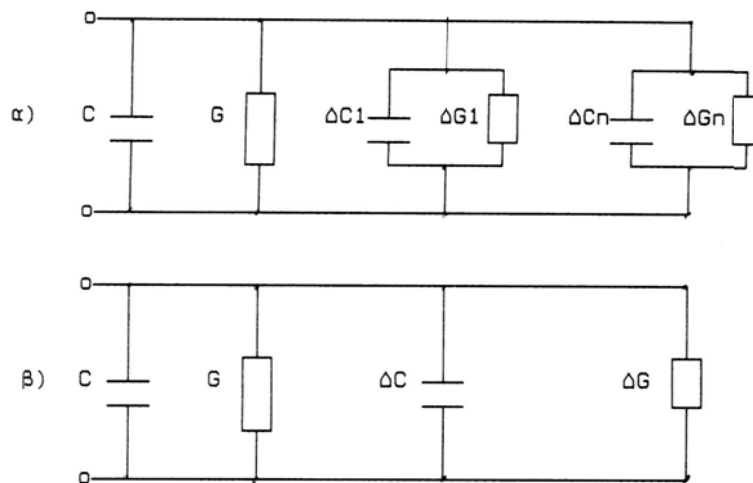
Από την αναλογία μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών μεγεθών κατά G. Oberdorffer (πίνακας 1.3.1-1), μπορούμε να καταλήξουμε (κατά την εφαρμογή μίας ηλεκτρικής τάσης στο υλικό) στη σχέση :

$$\frac{dQ}{dt} = (C + \Delta C) \frac{dU}{dt} + (G + \Delta G) U \quad (1.3.3-9)$$

από την οποία φαίνεται ότι ο συντελεστής $C + \Delta C$ είναι η χωρητικότητα του ανομοιογενούς υλικού (όταν έχει μονωτικές ιδιότητες), ενώ ο $G + \Delta G$ η αγωγιμότητα του (όταν έχει αγώγιμες ιδιότητες). Το ομοιογενές στερεό μονωτικό δίνεται από την παραπάνω σχέση για $\Delta C = 0$ και $\Delta G = 0$, ενώ για $C + \Delta C = 0$ το στερεό υλικό είναι μία ωμική αντίσταση. Από τη σχέση 1.3.3-9 καταλήγει κανείς στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.3.3-10, το οποίο φαίνεται ότι ταυτίζεται (ως προς την ερμηνεία για την αύξηση της χωρητικότητας κατά την εκδήλωση των ανομοιογενειών του μονωτικού) με εκείνο των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff (σχήμα 1-4).

Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο	Μηχανικό σύστημα
τάση	δύναμη
ρεύμα	ταχύτητα
ηλεκτρικό φορτίο	επιμήκυνση
ωμική αντίσταση	τριβή
αυτεπαγωγή	μάζα
χωρητικότητα	ελαστικότητα

Πίνακας 1.3.3-1 : αναλογίες μεταξύ ηλεκτρομαγνητικών και μηχανικών μεγεθών



Σχήμα 1.3.3-10 : Ισοδύναμο κύκλωμα για την αύξηση της χωρητικότητας λόγω ανομοιογενειών στο στερεό μονωτικό υλικό
 α : πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα
 β : απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα

1.3.4 Η θερμοχημική διάτρηση

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

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

Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής και δίνεται από τη σχέση :

$$U_a = \sqrt{a \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma_0}} \quad (1.3.4-1)$$

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

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

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 απ' ότι σε κανονική θερμοκρασία (20°C), με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός δια κρούσεως σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου απ' ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C.

Σημείωση

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

1.3.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 1.3 τα φαινόμενα προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών μπορούν να αποδοθούν σε τέσσερις βασικούς παράγοντες αποσταθεροποίησης των μορίων (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb μερικές εκκενώσεις και θερμότητα του περιβάλλοντος), οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως παράγοντες γήρανσης και διάτρησης. Οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται στην πράξη με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού.

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

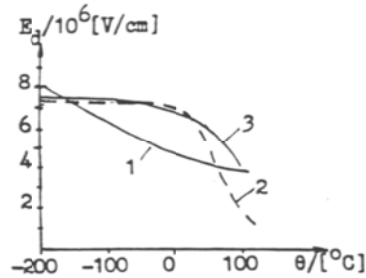
Όπως είναι γνωστό, οι διεθνείς προδιαγραφές προσδιορίζουν τα ανώτερα όρια υπερθέρμανσης των ηλεκτρολογικών κατασκευών υψηλής τάσης, βάσει των οποίων καθορίζεται το ονομαστικό ρεύμα (δοκιμή υπερθέρμανσης ή ανύψωσης θερμοκρασίας). Έτσι, έχει γίνει αποδεκτό κάποιο όριο θέρμανσης, που είναι π.χ. της τάξης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

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

Έτσι, αυξάνει διαχρονικά η $tg\delta$ και μειώνεται η διάρκεια ζωής του στερεού μονωτικού και των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών γενικότερα. Η καταπόνηση, που υφίσταται το στερεό μονωτικό, ανάλογα με τη θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου του φαίνεται ότι προκαλεί μείωση της τάσης για την θερμική διάτρηση, λόγω αύξησης της αγωγιμότητάς του (σχήμα

1.3.1-2). Επίσης, με την παραδοχή ότι στα στερεά μονωτικά εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις κατά τη δένδροειδή ή την ηλεκτρομηχανική διάτρηση, μπορούμε να υποθέσουμε ότι μια σχέση εδώ ανάλογη με οτι ισχύει για τα αέρια, όπου η αύξηση της θερμοκρασίας σημαίνει μείωση του μέσου ελεύθερου μήκους (λ) των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια). Γι' αυτό, η αύξηση της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου φαίνεται ότι προκαλεί μείωση και της τιμής της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση.

Στο σχήμα 1.3.5-1 δίνονται παραδείγματα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής διαφόρων μονωτικών υλικών, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, η οποία μπορεί να ερμηνευθεί από τον παραπάνω συνδυασμό της επίδρασης της θερμότητας του περιβάλλοντος με τους υπόλοιπους παράγοντες γήρανσης και διάσπασης.

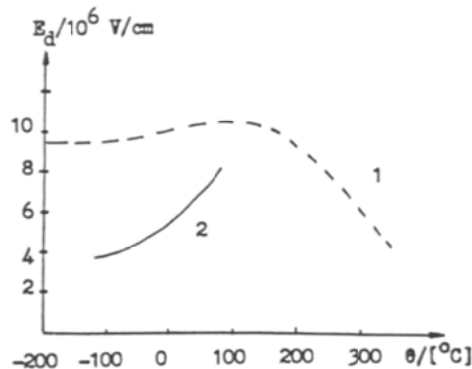


Σχήμα 1.3.5-1 : Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στερεά μονωτικά κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου.
1 : Βακελίτης, 2 : Πολυαιθυλένιο, 3 : Πολυστετυρόλη

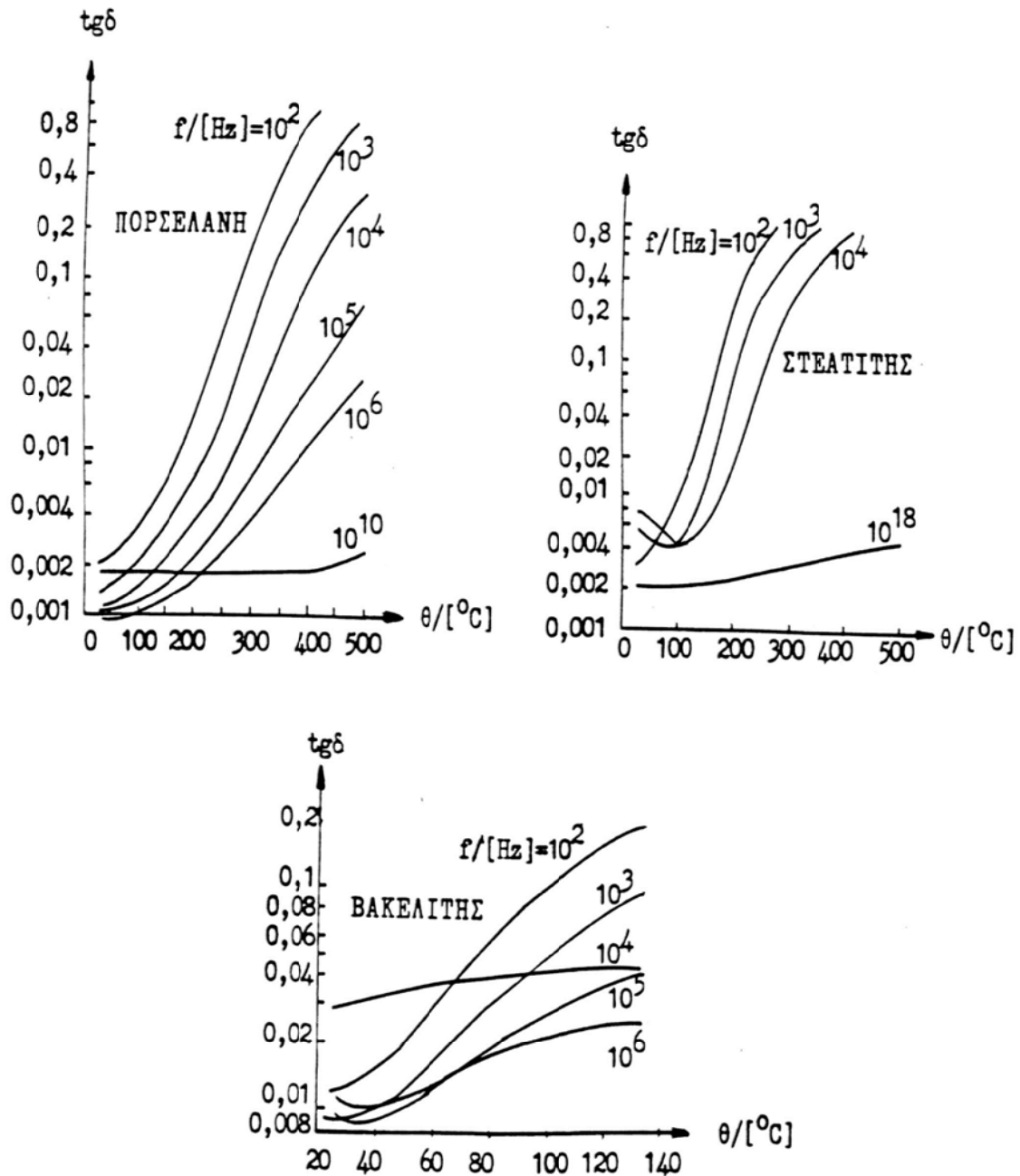
Υπάρχουν όμως περιπτώσεις στερεών μονωτικών υλικών όπου η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος δεν οδηγεί σε μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, τουλάχιστον σε κάποια περιοχή τους. Στο σχήμα 1.3.5-2 φαίνονται δύο παραδείγματα που ανήκουν στην περίπτωση αυτή. Μία ερμηνεία, για τη διαφορετική αυτή ανασύνδεση της μίκας (Glimmer) και του χαλαζία (Quartz) μπορεί να αποδοθεί σε αλληλοεξουδετέρωση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

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

Οι χαρακτηριστικές $tg\delta=f(\theta)$ διαφόρων στερεών μονωτικών (σχήμα 1.3.5-3), κατά τη βιβλιογραφία, δείχνουν επίσης την αύξηση των συνολικών απωλειών με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, λόγω των οποίων μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή.



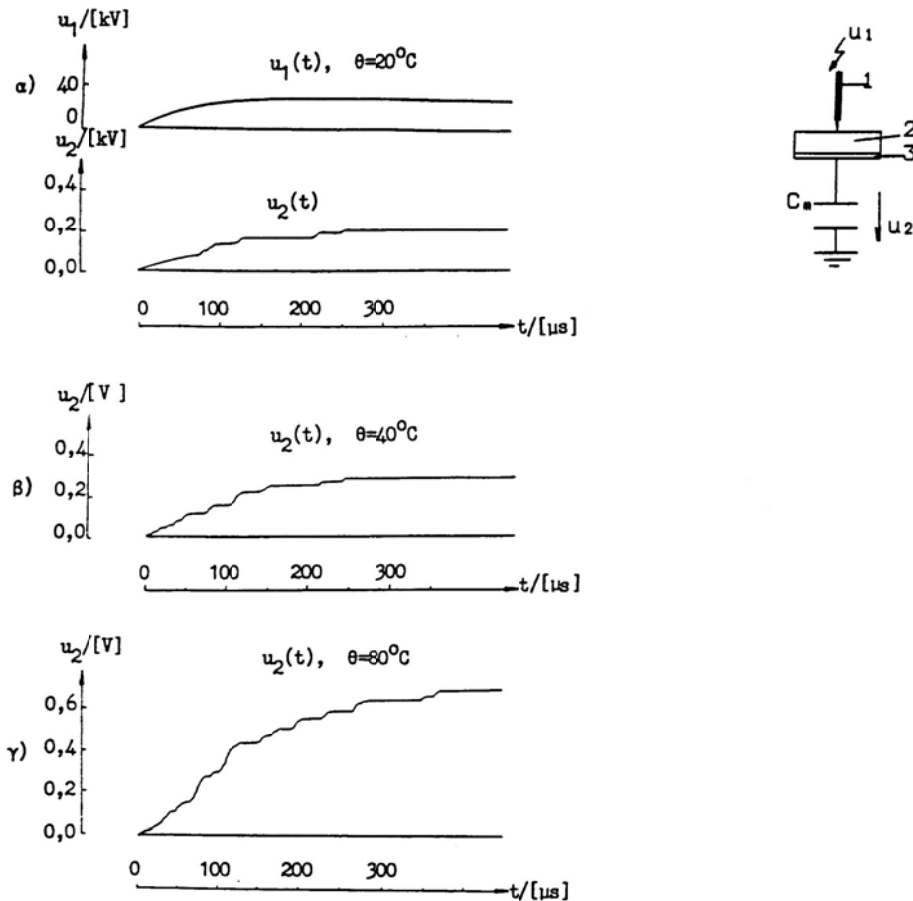
Σχήμα 1.3.5-2 : Διηλεκτρική αντοχή της μίκας (1) και του κρυστάλλου χαλαζία (2) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος



Σχήμα 1.3.5-3 : $tg\delta=f(\theta)$ διαφόρων στερεών μονωτικών

Η μείωση των απωλειών που παρατηρείται σε κάποια περιοχή ορισμένων χαρακτηριστικών του σχήματος 1.3.5-3, κατά την αύξηση της θερμοκρασίας και της συχνότητας, μπορεί ίσως να αποδοθεί σε επανασύνδεση των παραγόμενων φορέων.

Πρόσφατες μετρήσεις με κρουστικές τάσεις σε στερεά μονωτικά, κατά την καταπόνηση τους σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος ($20^{\circ}C$, $40^{\circ}C$ και $80^{\circ}C$), οδηγούν επίσης στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας (και επομένως η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής) είναι δεδομένη, όσο αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτό φαίνεται πολύ παραστατικά στα παλμογραφήματα του σχήματος 1.3.5-4, όπου οι μερικές εκκενώσεις γίνονται ισχυρότερες όταν αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 1.3.5-4 : Αύξηση των μερικών εκκενώσεων λόγω μεγαλύτερης θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο. α) $\theta=20^{\circ}\text{C}$, β) $\theta=40^{\circ}\text{C}$ και γ) $\theta=80^{\circ}\text{C}$.

1: Ηλεκτρόδιο ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας $R=0,9\text{mm}$).

2: Δοκίμιο: Pertinax (πάχους 1mm και διαμέτρου 150mm).

3: Ηλεκτρόδιο πλάκα (διαμέτρου 150mm).

Μορφή της κρουστικής τάσης: 250/2500μs.

Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης: $\hat{U}_k=28,8\text{kV}$.

u_1 : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης.

u_2 : άλματα δυναμικού σε έναν πυκνωτή μέτρησης

$C_m=1000\mu\text{F}$ σε σειρά με το δοκίμιο (συγκρίνατε με τη διάσπαση των θέσεων διαταραχής κατά το σχήμα 1.3.1-4 ή το σχήμα 1.3.1-5).

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

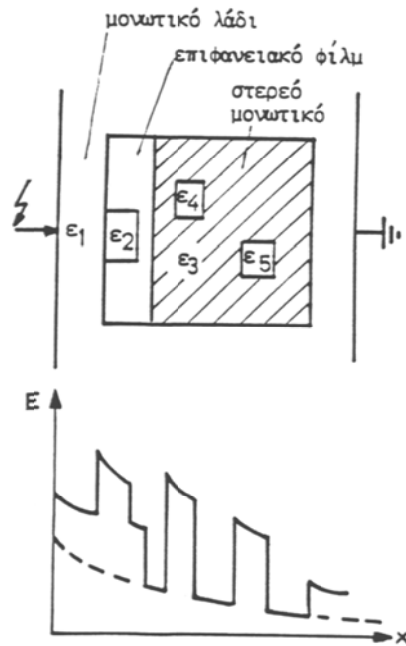
Οι μερικές εκκενώσεις θεωρείται ότι είναι ο κυρίαρχος παράγοντας γήρανσης και διάσπασης των μονώσεων στην πράξη. Μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών μερικών εκκενώσεων, προεξέχοντα ρόλο έχουν οι τελευταίες, γιατί σχετίζονται με χημικές μεταβολές στον όγκο του υλικού (οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις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

α) Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule

Στην παράγραφο 1.3.1 θεωρήθηκε ότι η θερμική διάτρηση αρχίζει σε μία θέση του μονωτικού υλικού, όπου αρχικά, λόγω κάποιας ανομοιογένειας, υπάρχει η αιτία για τοπική αύξηση της αγωγιμότητας. Για να μελετηθεί ειδικά η θερμική διάτρηση, δεν πάρθηκε υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις, που εμφανίζονται λόγω της μικρότερης διηλεκτρικής αντοχής, στην ανομοιογένεια του υλικού.

Προς κατανόηση της συμμετοχής των θέσεων διαταραχής, στον όγκο και την επιφάνεια του στερεού μονωτικού, έχει σχεδιαστεί στο σχήμα 1.3.5-5 η χαρακτηριστική $E=f(x)$ του στερεού μονωτικού, όταν αυτό καταλαμβάνει όλο το χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων και δεν έχει ανομοιογένειες στον όγκο του, συγκριτικά με εκείνη του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού με περιβάλλον μέσο το μονωτικό λάδι. Παρατηρούμε ότι στις θέσεις ανομοιογένειας, όπου η αγωγιμότητα είναι αυξημένη έναντι του υπόλοιπου "υγιούς" τμήματος του συνδυασμού των δύο μονωτικών (στερεό μονωτικό-μονωτικό λάδι), η πεδιακή ένταση έχει μεγαλύτερες τιμές από ότι αν δεν υπάρχουν ανομοιογένειες.

Τη συμμετοχή αυτή των ανομοιογενειών στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής μπορεί να λάβει κανείς υπ' όψη σαν να πρόκειται για αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού από την πεδιακή ένταση.



Σχήμα 1.3.5-5 : Αύξηση της πεδιακής έντασης στις θέσεις ανομοιογενειών του στερεού μονωτικού.

ϵ_1 έως ϵ_5 : διηλεκτρικές σταθερές

ϵ_1 : Μονωτικό λάδι

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

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

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

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

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

Για το ανομοιογενές στερεό μονωτικό έχουμε επομένως κατά τη σχέση 1.3.1-3 :

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1 - \delta E)^2 d} = 2\pi r k d \theta + C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.3.5-1)$$

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

$$\frac{U_{\theta\epsilon}^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1-\delta E)^2} = 2\pi r \kappa d \theta \quad (1.3.5-2)$$

$$\text{ή: } \theta = \frac{U_{\theta\epsilon}^2 \sigma_0 \beta e^{\beta\theta} A}{2\pi r^2 \kappa d (1-\delta E)^2} \quad (1.3.5-3)$$

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

$$1 = \frac{U_{\theta\epsilon}^2 \sigma_0 \beta e^{\beta\theta} A}{2\pi r^2 \kappa d (1-\delta E)^2} \quad (1.3.5-4)$$

Από τις σχέσεις 1.3.5-3 και 1.3.5-4 φαίνεται ότι $\beta\theta=1$ και επομένως η οριακή τιμή της τάσης διάσπασης είναι :

$$U_{\theta\epsilon} = d(1-\delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.3.5-5)$$

Σε συνδυασμό με τη σχέση 1.3.1-8, η μείωση της τάσης για τη θερμική διάτρηση (ΔU_1), λόγω συμμετοχής των μερικών εκκενώσεων είναι:

$$\Delta U_1 = U_{\theta} - U_{\theta\epsilon} = \delta E d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.3.5-6)$$

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, που ερμηνεύεται ικανοποιητικά από τις σχέσεις 1.3.5-5 και 1.3.5-6 έχει δοθεί ήδη στο σχήμα 1.3.1-2.

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

Αν πάρει κανείς υπ' όψη στη σχέση 1.3.2-1 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις στην θέση όπου εκδηλώνεται η μερική εκκένωση, τότε, με την παραδοχή ότι η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι πρακτικά μηδενική ισχύει :

$$\frac{u^2 \sigma A}{(1-\delta E)^2 d} = C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.3.5-7)$$

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

$$U_{\eta\epsilon} = (1-\delta E) \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_{\delta}}} \quad (1.3.5-8)$$

Η τάση διάτρησης μειώνεται δηλαδή κατά την τιμή ΔU_2 :

$$\Delta U_2 = U_{\eta} - U_{\eta\epsilon} = \delta E \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_{\delta}}} \quad (1.3.5-9)$$

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

Αν πάρει κανείς υπ' όψη στη σχέση 1.3.4-1 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων, τότε η θερμική τάση ανατροπής U_{xe} (λόγω του συνδυασμού της θερμότητας του περιβάλλοντος με τις μερικές εκκενώσεις) θα είναι :

$$U_{xe} = (1 - \delta E) \sqrt{\frac{ak\theta}{\sigma_0}} \quad (1.3.5-10)$$

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

$$\Delta U_3 = U_x - U_{xe} = \delta E \sqrt{\frac{ak_\theta}{\sigma_0}} \quad (1.3.5-11)$$

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

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

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

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

$$\sigma = \sigma_0 e^{\beta_m \theta_m} \quad (1.3.5-12)$$

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

Στην περιοχή δηλαδή, όπου συμβαίνουν οι μερικές εκκενώσεις, το υλικό άλλαξε, λόγω των χημικών διεργασιών, τις φυσικές του ιδιότητες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής του, ώστε τελικά να πρόκειται για ένα "άλλο" μονωτικό, το οποίο πλέον διασπάται ηλεκτρομηχανικά στη $m^{\text{η}}$ κρούση (όπως στην περίπτωση β, που αναφέρθηκε παραπάνω). Κατά αντιστοιχία επομένως προς την σχέση 2.2-1 ισχύει :

$$u^2 \frac{\sigma_0 e^{\beta_m \theta_m}}{(1 - \delta E)^2} \frac{A}{d} = C_m \frac{d\theta}{dt} \quad (1.3.5-13)$$

(όπου C_m η θερμοχωρητικότητα, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, η οποία εξαρτάται επίσης από τους παράγοντες, που προαναφέρθηκαν για τις τιμές β_m και θ_m). Έτσι, για τη διάσπαση στην τιμή U_k έχουμε (αντίστοιχα με τη σχέση 1.3.2-2) :

$$\hat{U}_k = (1 - \delta E) \sqrt{d \frac{C_m \theta_m}{\sigma A T_s}} \quad (1.3.5-14)$$

όπου T_s ο χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης.

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

$$\Delta u = \delta E \sqrt{d \frac{C_m \theta_m}{\sigma A T_s}} \quad (1.3.5-15)$$

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

$$(m-1)a\hat{U}_\kappa^2 + \gamma\hat{U}_\kappa^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{a_i} + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{\theta_i}}{(1-\delta E)^2} + \beta\hat{U}_\kappa^2 \quad (1.3.5-16)$$

όπου:

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

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

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

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

και

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

Επειδή κατά τη διάτρηση είναι :

$$\frac{W_{\theta_m}}{(1-\delta E)^2} + \beta\hat{U}_\kappa^2 = \gamma\hat{U}_\kappa^2 \quad (1.3.5-17)$$

από την σχέση 1.3.5-16 έπεται ότι :

$$(m-1)a\hat{U}_\kappa^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{a_i} + \sum_{i=1}^{i=m-1} \frac{W_{\theta_i}}{(1-\delta E)^2} \quad (1.3.5-18)$$

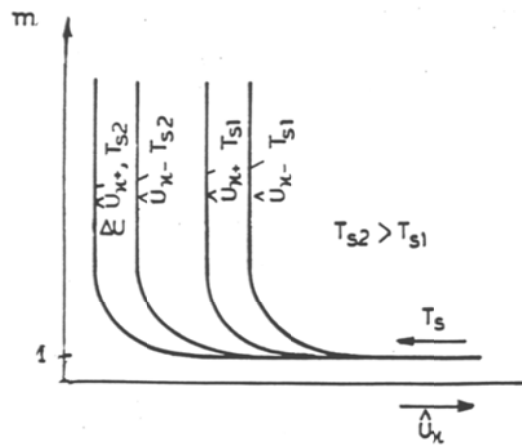
$$\text{ή} \quad m = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{a_i}}{a\hat{U}_\kappa^2} + \frac{\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{\theta_i}}{(1-\delta E)^2 a\hat{U}_\kappa^2}$$

δηλαδή :

$$m = 1 + \frac{a_1}{\hat{U}_\kappa^2} + \frac{a_2}{\hat{U}_\kappa^2} = 1 + \frac{a_3}{\hat{U}_\kappa^2} \quad (1.3.5-19)$$

όπου α_1 , α_2 και α_3 συντελεστές, που εξαρτώνται από την τιμή \hat{U}_κ , τη συχνότητα των κρούσεων, τη μορφή της τάσης και το πάχος του υλικού (το οποίο είναι καθοριστικό για την τιμή της πεδιακής έντασης). Αν λάβει κανείς υπ' όψη τη σημασία της πολικότητας της ακίδας και τη μείωση του χρόνου διάσπασης με την αύξηση της διάρκειας του μετώπου της

κρουστικής τάσης, τότε οι χαρακτηριστικές $m = f(\hat{U}_κ, T_s)$ έχουν τη μορφή, που δίνεται στο σχήμα 1.3.5-6.

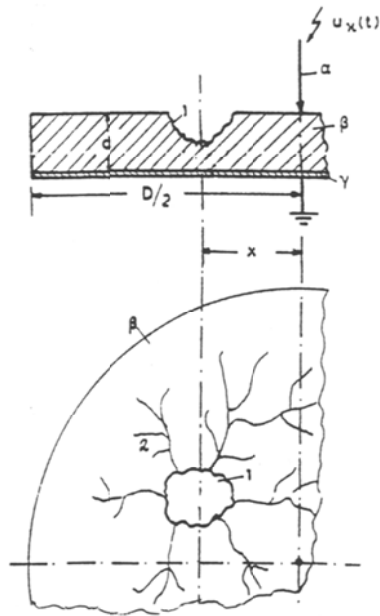


Σχήμα 1.3.5-6 : Χαρακτηριστικές $m = f(\hat{U}_κ, T_s)$.

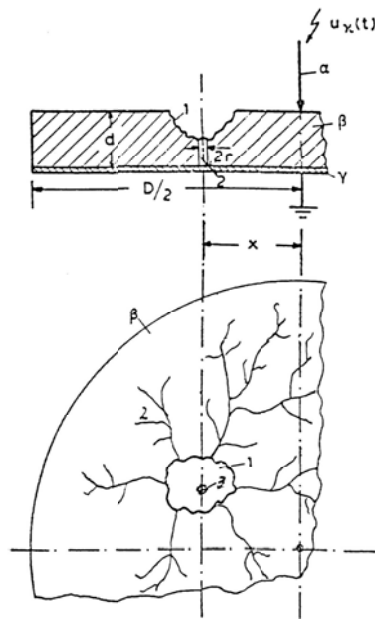
- m : Αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση
- T_s : Χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης
- $\hat{U}_κ$: Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

Κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού, που αναλύθηκε προηγουμένως θεωρήθηκε, ότι η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη για τη διάτρηση με μία κρούση. Από πειράματα, που έχουν γίνει με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs και 10/200μs, σε τιμές $\hat{U}_κ$ πλησίον της περιοχής διάτρησης (πίνακας.1.3.2-1), έχει διαπιστωθεί ότι, εκτός από τη θερμική καταπόνηση, δημιουργούνται μικρά θραύσματα στη θέση προσεχούς διάσπασης. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι στην περίπτωση αυτή συμμετέχουν στην τεχνητή γήρανση του υλικού (από κρούση σε κρούση) και οι δυνάμεις Coulomb. Η εικόνα, την οποία παρουσιάζει το δοκίμιο κατά τη γήρανση δίνεται στο σχήμα 1.3.5-7 και ονομάζεται **εικόνα επιφανειακών διαταραχών**. Πρόκειται για μία μόνιμη παραμόρφωση του υλικού, η οποία σχετίζεται με την εκδήλωση φωτεινής ακτινοβολίας (υπό μορφή δενδρίτη) , που παρατηρεί κανείς κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Τα σπήλαια και ο κρατήρας έχουν αποδοθεί στη θερμική καταπόνηση του μονωτικού, γιατί φαίνεται ότι είναι αποτέλεσμα κάποιας τήξης του υλικού στα ίχνη του επιφανειακού δενδρίτη. Τα θραύσματα, που προαναφέρθηκαν, δημιουργούνται κυρίως στην περιοχή του κρατήρα, η οποία είναι και η θέση, όπου θα συμβεί η διάτρηση. Πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχουν δείξει ότι η εικόνα επιφανειακών διαταραχών συρρικνώνεται όσο αυξάνει η διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης (υπό σταθερή τιμή $\hat{U}_κ$ η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών είναι π.χ. μεγαλύτερη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση της μορφής 1,2/50μs, ως προς εκείνη με κρουστική τάση 10/200μs. Έχει επίσης διαπιστωθεί, ότι η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών περιορίζεται, όσο μειώνεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων.

Όταν τελικά συμβεί η διάτρηση μετά από m κρούσεις, τότε παρατηρεί κανείς μία μικρή τρύπα διάτρησης (με διάμετρο μικρότερη από 0,1mm), ως προέκταση του κρατήρα (σχήμα 1.3.5-8).

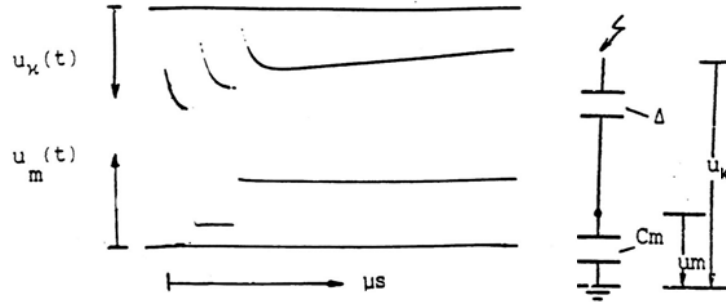


Σχήμα 1.3.5-7 : Παράδειγμα εικόνας επιφανειακών διαταραχών κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$ για τιμή \hat{U}_k πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση
 α : ακίδα ($R \approx 1\text{mm}$)
 β : στερεό μονωτικό
 γ : πλάκα
 1 : κρατήρας
 2 : σπήλαια

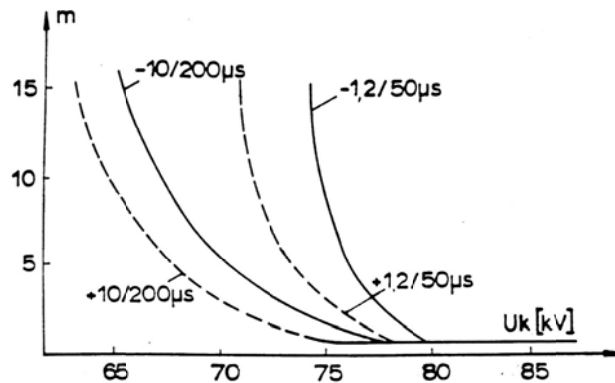


Σχήμα 1.3.5-8 : Παράδειγμα της εικόνας διάτρησης μετά από την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$ για τιμή \hat{U}_k πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση
 α : ακίδα ($R \approx 1\text{mm}$)
 β : στερεό μονωτικό
 γ : πλάκα
 1 : κρατήρας
 2 : σπήλαια
 3 : οπή διάτρησης

Στο σχήμα 1.3.5-9 δίνεται ένα παράδειγμα διάτρησης του βακελίτη (πάχος 1mm) σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό διάταξη "ακίδα-πλάκα", κατά την καταπόνησή του με κρουστική τάση της μορφής 10/200μs, με μέγιστη τιμή πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση (πίνακας 1.3.2-1). Παρατηρεί κανείς ότι το παλμογράφημα αυτό είναι της ίδιας μορφής με εκείνο της ηλεκτρομηχανικής διάτρησης του σχήματος 1.3.3-7β. Επίσης, οι πειραματικές χαρακτηριστικές του σχήματος 1.3.5-10 (για το στερεό μονωτικό pertinax πάχους 1mm) εξηγούνται ικανοποιητικά από τις θεωρητικές του σχήματος 1.3.5-6.



Σχήμα 1.3.5-9 : Διάτρηση του βακελίτη (πάχους 1mm) με κρουστική τάση της μορφής 10/200μs.
 $\hat{U}_k = 72 \text{ kV}$



Σχήμα 1.3.5-10 : $m = f(\hat{U}_k, T_s)$ για το στερεό μονωτικό Pertinax.

Ηλεκτρόδια : ακίδα- πλάκα

Δοκίμιο : pertinax πάχους 1 mm εντός μονωτικού ελαίου

m : αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση

+ : θετική πολικότητα της ακίδας

- : αρνητική πολικότητα της ακίδας

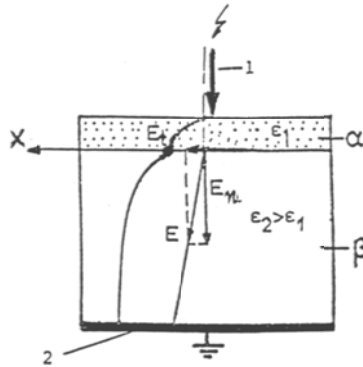
Όπως δείχνεται στο σχήματα 1.3.5-7 και 1.3.5-8 ο κρατήρας και η τρύπα διάτρησης σχηματίζονται σε μία απόσταση x από την ακίδα (συνήθως μερικά mm), αν και η μέγιστη τιμή του πεδίου είναι στην κορυφή της ακίδας. Η ίδια παρατήρηση ισχύει για την τρύπα διάτρησης, όταν η διάτρηση συμβαίνει με μία μόνο κρούση. Αυτό φαίνεται ότι οφείλεται :

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

β) σε πολύ μικρή απόσταση από την ακίδα μετακινούνται, υπό την επίδραση της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης οι ετερόνυμοι προς αυτήν ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς του επιφανειακού φιλμ, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρακτικά επέκταση του ίχνους της ακίδας (σχήμα 1.3.5-11).

Η παραπάνω παρατήρηση για τη θέση της τρύπας διάτρησης ισχύει επίσης κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή κρουστικής τάσης 250/2500μs), καθώς και εκείνη με εναλλασσόμενη ή συνεχή τάση. Από έρευνες, που έχουν γίνει με τις

παραπάνω μορφές τάσης (με ακτίνα καμπυλότητα της ακίδας 0,9mm ή 1mm) δεν έχει διαπιστωθεί κατά την τεχνητή γήρανση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm ή 2mm) η εκδήλωση κρατήρα ή σπηλαίων, ούτε έχει παρατηρηθεί η εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη (ανεξαρτήτως της τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης). Η διαφορά αυτή ως προς την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών, που παρουσιάζεται κατά την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs και 10/200μs, είναι μία σημαντική παρατήρηση, που έχει οδηγήσει (σε συνδυασμό με μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών) στο διαχωρισμό μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης στο στερεό μονωτικό τάσης.



Σχήμα 1.3.5-11 : Επεξήγηση της σημασίας της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης στον καθορισμό του κρατήρα και γενικότερα της θέσης διάτρησης, κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs και 10/200μs.

1 : ακίδα, 2 : πλάκα

α) επιφανειακό φιλμ

β) στερεό μονωτικό

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

3) Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

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

Αν θεωρηθεί π.χ., ότι πρόκειται για γήρανση του υλικού, τότε η καταπόνηση είναι κυρίως θερμική, οπότε από τη σχέση 2.1-3 έχουμε :

$$\frac{u^2 A}{d} \frac{e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2} = 2\pi r \cdot d \cdot \kappa + C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.3.5-20)$$

όπου u η στιγμιαία τιμή της τάσης για τη διάτρηση και θ η διαφορά θερμοκρασίας ως προς το περιβάλλον. Από την παραπάνω σχέση και την σχέση 1.3.1-8 ο χρόνος διάτρησης είναι:

$$t = \frac{C_0 \beta}{2\pi r \cdot d \cdot \kappa} \int \frac{d\theta}{\left(\frac{U}{U_\theta}\right)^2 e^{\beta\theta} - \beta\theta} \quad (1.3.5-21)$$

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

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

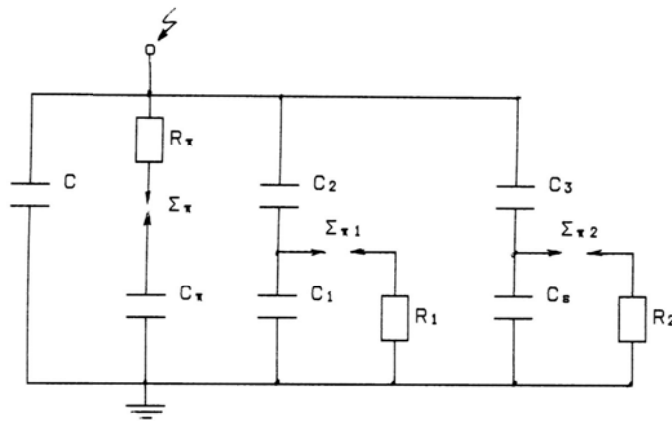
τότε, από την σχέση 4.1-2 έχουμε :

$$t \approx \frac{C_0 e}{2\pi r \cdot d \cdot \kappa \cdot \beta} \cdot \left(\frac{U_\theta}{U}\right)^2 \quad (1.3.5-22)$$

$$\text{ή : } t \approx \frac{a}{U^2} \quad (1.3.5-23)$$

όπου a ένας συντελεστής του υλικού.

Η παραπάνω σχέση δίνει μία πιθανή ερμηνεία για τη διάτρηση των στερεών μονωτικών, σε καταπονήσεις μικρής χρονικής διάρκειας. Πράγματι, η σχέση 1.3.5-10 για τη διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων (βλέπετε χαρακτηριστικές των σχημάτων 1.3.5-6 και 1.3.5-10) φαίνεται ότι εναρμονίζεται με την σχέση 1.3.5-23, γιατί ο αριθμός των κρούσεων (m) σχετίζεται με τον χρόνο καταπόνησης.



Σχήμα 1.3.5-12 : Βελτίωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff, ώστε να αποδίδεται από αυτό η γήρανση και η ηλεκτρομηχανική διάτρηση.

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

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

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

C_e : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών.

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

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

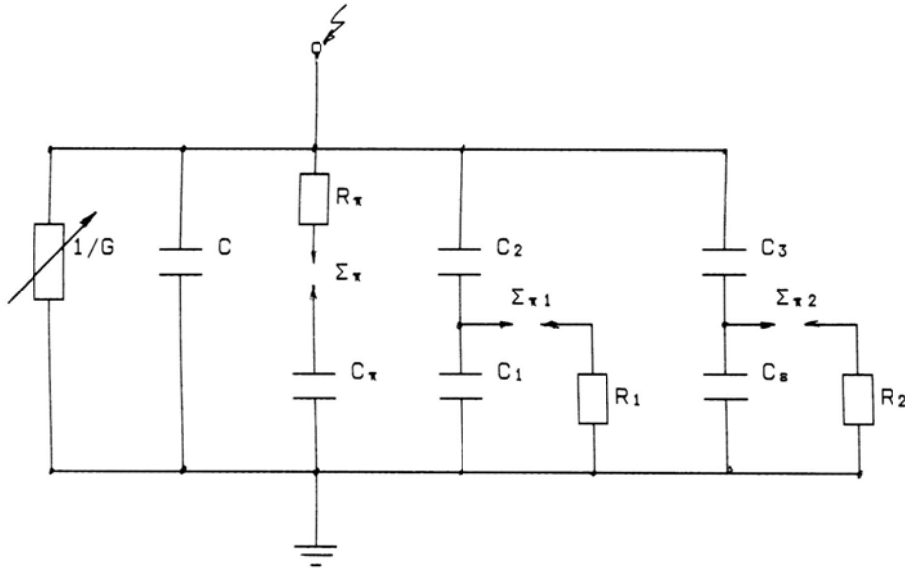
R_1 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_1$.

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

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

Από πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχει προταθεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που αποδίδει ικανοποιητικά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση και τις μερικές εκκενώσεις (σχήμα 1.3.5-13). Όπως φαίνεται πρόκειται ουσιαστικά για μία παράλληλη σύνδεση ενός πυκνωτή C_π , προς το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff. Ο πυκνωτής αυτός εκφράζει την πόλωση του υλικού, λόγω της οποίας συμβαίνει η μηχανική τάνυσή του από τις δυνάμεις

του πεδίου. Η διαδρομή εκκένωσης εκφράζεται στην περίπτωση αυτή με τον σπινθηριστή $\Sigma\pi$ και την αντίσταση του τόξου R_π (υποτίθεται ότι ο $\Sigma\pi$ διασπάται ταυτόχρονα με τον πυκνωτή C_π). Για να αποδίδει το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα το συνδυασμό όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης (κατά τη μακροσκοπική θεωρία), φαίνεται ότι θα πρέπει να γίνει η παράλληλη σύνδεση μίας μεταβλητής αγωγιμότητας, που θα εκφράζει τις θερμικές απώλειες (απώλειες Joule και ενίσχυσή τους από τις μερικές εκκενώσεις) και την καταπόνηση του υλικού από τη θερμότητα του περιβάλλοντος (σχήμα 1.3.5-13).



Σχήμα 1.3.5-13 : Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

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

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

C_e : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών.

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

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

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

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

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

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

Στον πίνακα 1.3.5-1 δίνονται συνοπτικά οι βασικές περιπτώσεις συνδυασμού των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης, που εξετάστηκαν στην παράγραφο αυτή. Οι θεωρητικές σχέσεις του πίνακα 1.3.5-1 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.

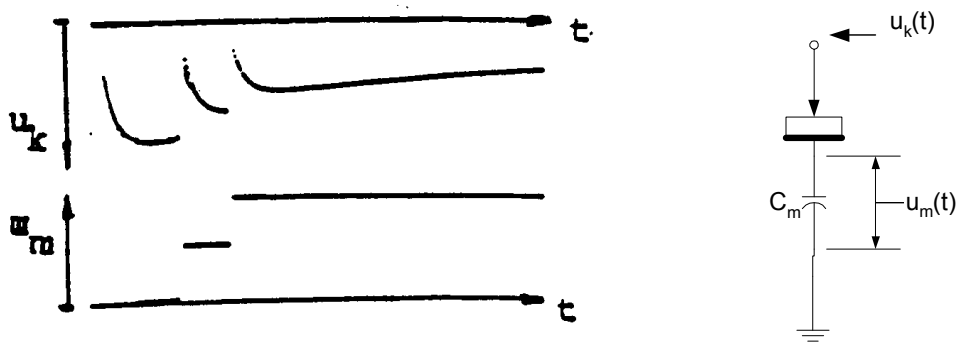
α/α	Παράγοντες που συμμετέχουν στην αλλαγή της μοριακής δομής	Θεμελιώδεις σχέσεις	Οριακή τιμή της τάσης για τη διάτρηση
1	Συνδυασμός της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος με τους άλλους παράγοντες διάτρησης	Η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως όλους τους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.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

Πίνακας 1.3.5.-1 : Βασικές σχέσεις μίας θεωρητικής ερμηνείας για τη γήρανση και διάτρηση των στερεών μονωτικών.

* : μερικές εκκενώσεις, απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

1.3.6 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 δένδροειδούς φωτεινής ακτινοβολίας, που εκδηλώνεται) θα προκαλέσει μείωση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων (δηλαδή μείωση της απόστασης μόνωσης), ώστε τελικά να συμβεί ένας οχετός διάσπασης στην επιφάνεια του στερεού (επιφανειακή διάσπαση), ή στο περιβάλλον μέσο του (υπερπήδηση).



Σχήμα 1.3.6-1: Τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2 mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση 10/200 μ s και διάταξη ακίδα – πλάκα.
 $C: 1835 \text{ nF}$, $\hat{U}_{k m}: 70 \text{ KV}$

Από πειράματα είναι γνωστό, ότι στα φαινόμενα παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών συμμετέχει και η ίδια η επιφάνεια σε βάθος μέχρι 30 Å. 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 Å - περιβάλλον μέσο») είναι συνήθως ο κυρίαρχος παράγοντας για την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση.

Πειραματικές έρευνες σε στερεά μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών με κρουστικές τάσεις, δείχνουν ότι υπάρχει ομοιότητα των παλμογραφημάτων της διάτρησης ως προς εκείνα της επιφανειακής διάσπασης, με τη διαφορά ότι η επιφανειακή διάσπαση εκδηλώνεται στην ουρά της κρουστικής τάσης (παλμογράφημα του σχήματος 1.3.6-1).

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

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 1.3, η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών οφείλονται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες (**απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb, και θερμότητα του περιβάλλοντος**). Οι παράγοντες αυτοί δεν περιλαμβάνουν όμως στοιχεία για φαινόμενα, που δεν μπορεί κανείς να ακούσει, ή να παρατηρήσει, όπως :

- **ο ιονισμός με κρούσεις**, που πιστεύεται ότι εκδηλώνεται στα στερεά μονωτικά, και
- **το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας** και η συσχέτισή του με φωτεινά φαινόμενα και καταπονήσεις, που παρατηρούνται στο υλικό (θερμικές, ή μηχανικές , ή και τα δύο : π.χ. κατά τα σχήματα 1.3.5-7 και 1.3.5-8), που θα έδινε περισσότερες πληροφορίες για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής.

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

- στις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις (δηλαδή από παλμογραφήματα όπως εκείνα των σχημάτων : 1.3.3-7,

1.3.5-4, 1.3.5-9),

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

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

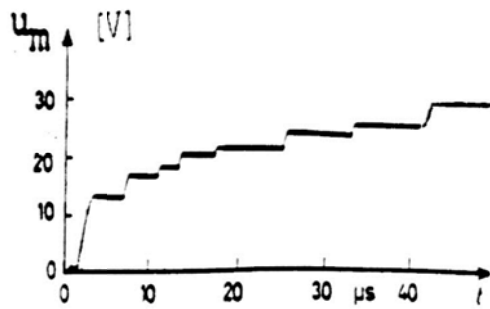
- 1) Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί, ότι :
 - α) το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.
 - β) Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά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

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

1.4.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών

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

Στο σχήμα 1.4.1-1÷1.4.1-3 δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα της τεχνητής γήρανσης στερεών πολυμερών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και στο σχήμα 1.4.1-4 ένα παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου. Η διάταξη μέτρησης έχει σχεδιαστεί απλοποιημένα στο σχήμα 1.4.1-5. Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώθηκε ότι :



Σχήμα 1.4.1-1 : Αλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

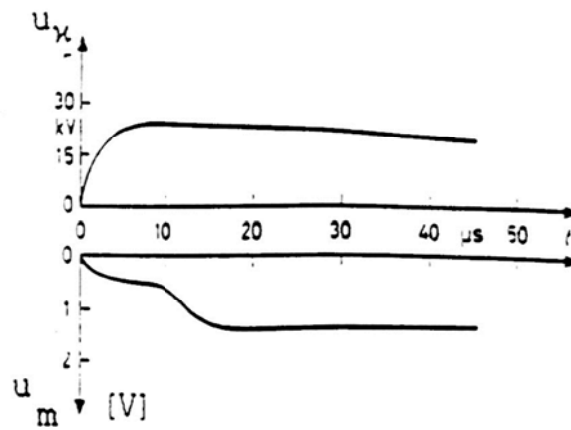
$$\hat{U}_κ : 100_kV.$$

$$E : 0,8 MV/cm.$$

$$C_m : 210nF.$$

- α) μετά από μία τιμή $\hat{U}_κ \approx 45_kV$, κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs ή 10/200μs, εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 1.4-6). Υπό σταθερή τιμή της τάσης ο δενδρίτης, καθώς και η αντίστοιχη προς αυτόν αλλαγή της μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις
- β) κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs δεν παρατηρήθηκε, υπό σταθερή τιμή της τάσης (που δεν οδηγεί στη διάσπαση), η εκδήλωση του παραπάνω δενδρίτη, ούτε προκλήθηκε αλλαγή της μοριακής δομής

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

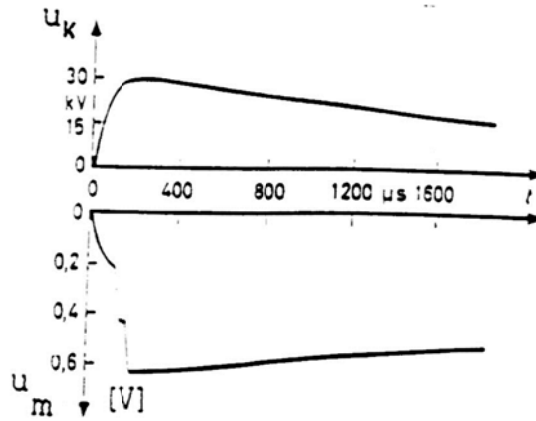


Σχήμα 1.4.1-2 : Πρώτο άλμα δυναμικού υπό κρουστική τάση 10/200μs.

$$\hat{U}_κ : 26,6_kV.$$

$$E : 0,38MV/cm.$$

$$C_m : 210nF.$$

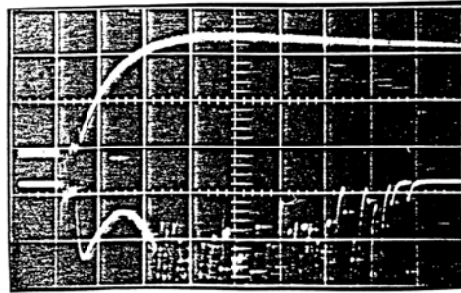


Σχήμα 1.4.1-3 : Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 250/2500μs.

$$\hat{U}_κ : 32 \text{ kV.}$$

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

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



Σχήμα 1.4.1-4 : Κρούσεις φορτίου υπό κρουστική τάση 10/200μs.

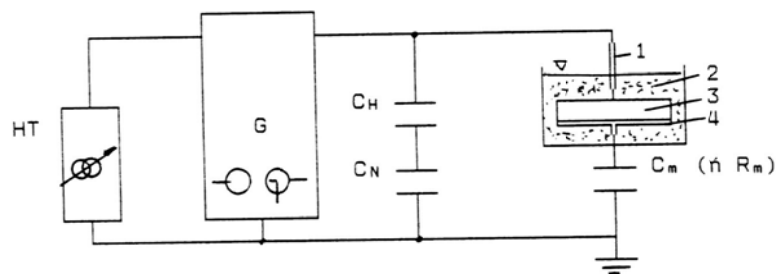
Κλίμακα χρόνου : 5 μs/div.

Κλίμακα ρεύματος : 1,3 A/div.

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

a) Μακροσκοπική ερμηνεία

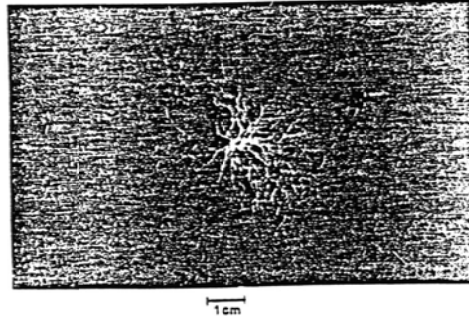
Αν οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνευτούν με τη μακροσκοπική θεωρία, όπως έγινε στο παράδειγμα της παραγράφου 1.3.4,4, τότε καταλήγει κανείς στα συμπεράσματα του πίνακα 1.6.1-1. Η εκδήλωση των αλμάτων δυναμικού (ή των κρούσεων φορτίου) κατά τη θεωρία αυτή ερμηνεύονται από το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (σχήματα 1.3.3-4 έως 1.3.3-6).



Σχήμα 1.4.1-5 : Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης των αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

H.T. : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

G : Γεννήτρια κρουστικών τάσεων.
 C_H και C_N : Καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης.
 1 : Ηλεκτρόδιο ακίδα, 2 : Μονωτικό λάδι, 3 : Δοκίμιο (πάχος 2mm),
 4 : Ηλεκτρόδιο πλάκα.
 C_m : πυκνωτής μέτρησης των αλμάτων δυναμικού
 R_m : αντίσταση μέτρησης των κρούσεων φορτίου (δηλαδή του ρεύματος).



Σχήμα 1.4.1-6 : Εικόνα επιφανειακών διαταραχών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs
 $\hat{U}_κ$: 85kV, E : 0,8MV/cm.

β) Κβαντομηχανική ερμηνεία :

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

$$\tau = R \cdot C_m \quad (1.4.1-1)$$

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από την σχέση :

$$W = (0,5\Delta u) / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \text{ σε eV} \quad (1.4.1-2)$$

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

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

$$f = 1 / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \quad (1.4.1-3)$$

δίνεται στον πίνακα 1.4.1-1, για χωρητικά τετράπολα μέτρησης, που συνήθως χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις αυτές. Για τους πυκνωτές του πίνακα αυτού και για $R=0,5\Omega$, ισχύει επομένως :

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

Πίνακας 1.4.1-1 : Τιμές του συντελεστή f για $R=0,5\Omega$

$$W = 0,5 \cdot f \cdot \Delta u \text{ σε eV} \quad (1.4.1-4)$$

όπου Δu σε V.

Στον πίνακα 1.4.1-2 έχουν υπολογιστεί με την παραπάνω σχέση οι τιμές της ενέργειας W για το πρώτο άλμα δυναμικού των παλμογραφήματων των σχημάτων 1.4.1-1, 1.4.1-2 και 1.4.1-3. Από τις τιμές αυτές φαίνεται, ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών σχετίζεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που μπορεί να περιλαμβάνει υπεριώδεις ακτίνες και υπέρυθρες ακτίνες. Έτσι :

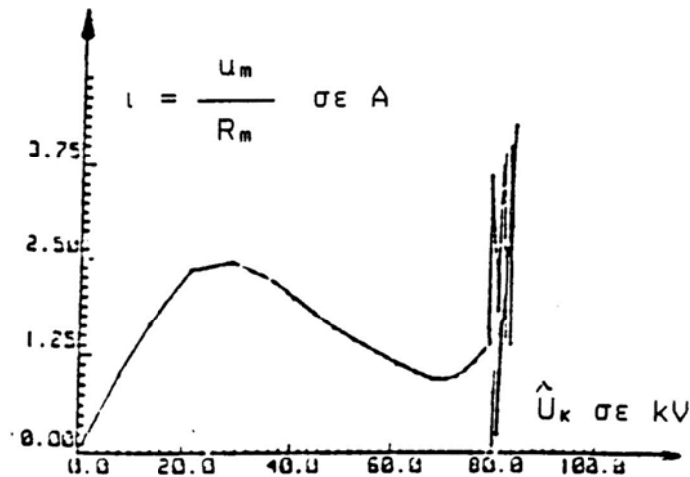
- 1) από τις τιμές της ενέργειας κατά τον πίνακα 1.4.1-2,
- 2) τη φωτεινή ακτινοβολία, που παρατηρείται στην πράξη σε αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων (και η οποία με υπολογισμό της ενέργειας W εύκολα διαπιστώνεται σε άλματα δυναμικού του παλμογραφήματος του σχήματος 1.4.1-1), και
- 3) τις ραδιοφωνικές παρεμβολές και τα ακουστικά κύματα, που συχνά προκαλούν οι μερικές εκκενώσεις,

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

Μορφή τάσης	Σχήμα	W σε eV
1,2/50μs	6.1.1-1	$\cong 10,50$
10/200μs	6.1.1-2	$\cong 1,60$
250/2500μs	6.1.1-4	$\cong 0,16$

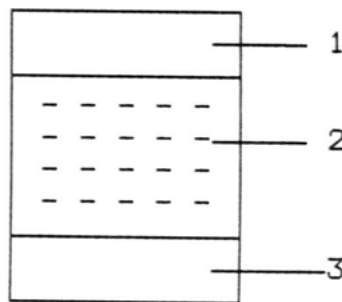
Πίνακας 1.4.1-2 : Τιμές ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πρώτο άλμα δυναμικού.

Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γήρανσης έχουν δοθεί από παλμογραφήματα των κρούσεων φορτίου. Πράγματι από το παλμογράφημα του σχήματος 1.4.1-5 φαίνεται ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις. Έτσι, όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσειμά της ενέργειάς τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (πίνακας 1.4.1-2). Ο δενδρίτης επομένως, που παρατηρείται, είναι το ορατό φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας. Μπορούμε, να υποθέσουμε, ότι αντίστοιχες δενδροειδούς μορφής εκπομπές συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου (σχήμα 1.4.1-5) φαίνεται επίσης, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης (κατά την αύξηση της τάσης παρατηρείται μείωση του ρεύματος). Η αντίσταση αυτή, που προηγείται του ιονισμού με κρούσεις, δίνεται αναλυτικότερα στην χαρακτηριστική "ρεύματος-τάσης" του σχήματος 1.4.1-7.



Σχήμα 1.4.1-7 : Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης κατά το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου του σχήματος 1.4.1-4

Από τα παραπάνω μπορεί να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα ότι μία διαδρομή της δενδροειδούς μορφής εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αντιστοιχεί σε μία κρούση φορτίου, η οποία περιλαμβάνει ελεύθερα ηλεκτρόνια, που είχαν την ίδια ενεργειακή στάθμη (κατά την άφιξή τους στην άνοδο προκάλεσαν εκπομπή του ίδιου μήκους κύματος). Μπορούμε να υποθέσουμε, λόγω του εύρους της παραπάνω ακτινοβολίας, ότι υπάρχουν στο υλικό διάφορες **ενεργειακές στάθμες διαταραχής** μέσα στην απαγορευμένη ζώνη, που είναι καθοριστικής σημασίας για την εκδήλωση του ιονισμού (σχήμα 1.4.1-8). Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff (σχήμα 1.4.1-4). Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 1.4.1-8 : Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

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

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

(πάνω από την ενέργεια Fermi) μπορεί να γίνει, κατά την εκδήλωση αλμάτων δυναμικού, με την σχέση 1.4.1-2.

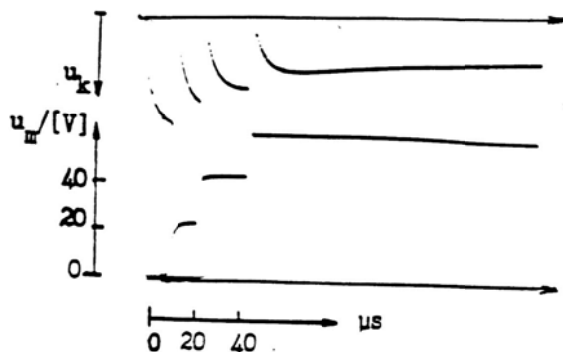
1.4.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση

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

Παρακάτω εξετάζεται ένα παράδειγμα με κρουστικές τάσεις, ώστε να υπάρχουν συγκρίσιμες μετρήσεις με εκείνες της γήρανσης κατά την προηγούμενη παράγραφο. Για το λόγο αυτό, οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με τη διάταξη πειραματισμού του σχήματος 1.4.1-5. Τυπικά παλμογράφημα του φαινομένου δίνονται στα σχήματα 1.4.2-9 και 1.4.2-10. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων (W) μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση 1.4.1-7, όπως και κατά την γήρανση. Έτσι, για το πρώτο π.χ. άλμα δυναμικού και $R=0,5\Omega$ (που ήταν η αντίσταση από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης) η τιμή W υπολογίζεται ότι είναι περίπου 105eV. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε, ότι η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων X.

Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου παρατηρεί κανείς την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Ο αριθμός των κρούσεων περιορίζεται ως προς εκείνον κατά τη γήρανση, αλλά η τιμή του ρεύματος αυξάνει σημαντικά (συγκρίνατε με το παλμογράφημα του σχήματος 1.4.1-3). Μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι ο μηχανισμός της διάτρησης έχει τα ίδια γνωρίσματα με εκείνον της γήρανσης.

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



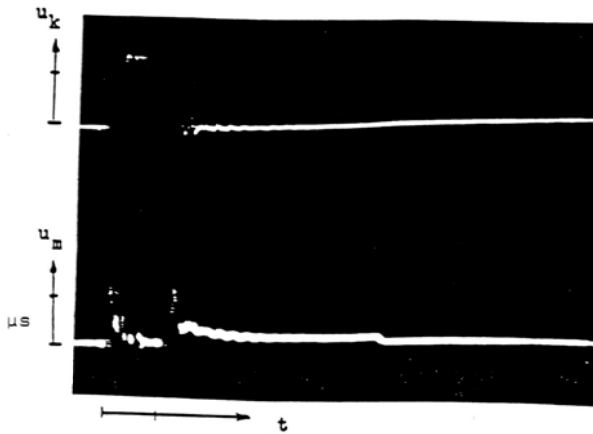
Σχήμα 1.4.2-9 : Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου.

Κρουστική τάση : 1,2/50μs.

R της ακίδας $\approx 1\text{mm}$.

$\hat{U}_κ$: 85kV.

E : 1,2 MV/cm.



Σχήμα 1.4.2-10 : Τυπικό παλμογράφημα κρούσεων φορτίου κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση.

R της ακίδας ≈ 1 mm.

Μορφή τάσης 1,2/50μs.

$\hat{U}_k = 85$ kV

$E = 1,2$ MV/cm

$R_m = 150$ Ω

$u_m : 20$ V/div

$t : 2$ μs/div

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

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

$$Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2} \quad (1.4.3-1)$$

όπου (κατά το σχήμα 1.5-1) :

- E_0 η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($E > 0,2$ MV/cm) και Q_0 το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.
- E η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση, λόγω της οποίας το φορτίο αποκτά την τιμή Q .
- A ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από τον χρόνο.

Με βάση την σχέση αυτή έχει γίνει μία προσέγγιση πειραματικών χαρακτηριστικών $Q=f(\hat{U}_k)$ κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm ή 2mm) με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή 250/2500μs), η οποία (ως γνωστό από τον πίνακα 1.5-1) προκαλεί μόνο εσωτερικές μερικές εκκενώσεις. Η διάταξη, που έγιναν τα πειράματα, έχει δοθεί απλοποιημένα στο σχήμα 1.4.1-5. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (20°C, 40°C και 80°C), ώστε :

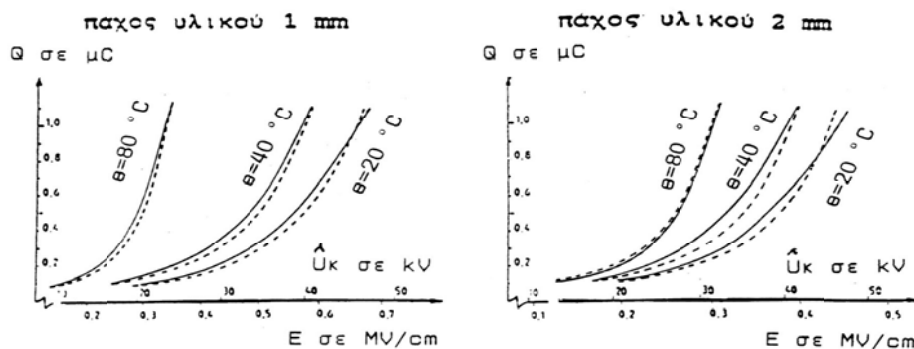
α) να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, και

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

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι πειραματικές χαρακτηριστικές για δύο μονωτικά καθώς και οι θεωρητικές χαρακτηριστικές κατά την σχέση 1.4.3-1, (με προσδιορισμό του

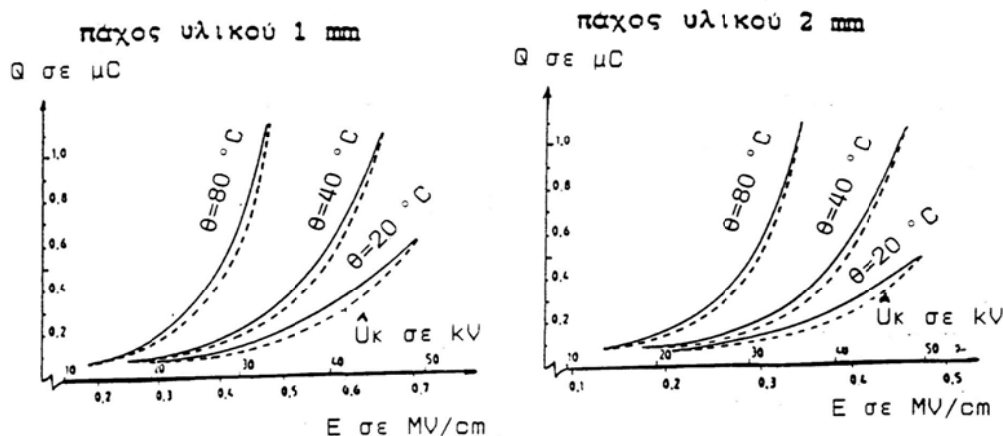
συντελεστή A για κάθε υλικό). Όπως φαίνεται, υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ θεωρίας και πειραμάτων. Η θεωρητική προσέγγιση έδειξε ότι :

- 1) οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμές πεδίου περίπου $E=0,2\text{MV/cm}$.
- 2) για τιμές πεδίου περίπου μέχρι $0,5\text{ MV/cm}$ ισχύει για την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$.
- 3) για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγούμενως ισχύει η σχέση 1.4.3-1, με αποτέλεσμα να μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις.
- 4) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ενισχύει σημαντικά τα φαινόμενα ιονισμού. Φαίνεται ότι η σχέση, που διέπει τον συνδυασμό των μερικών εκκενώσεων με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, είναι η 1.4.3-1.



Σχήμα 1.4.3-1 : Χαρακτηριστικές $Q=f(\hat{U}_κ)$ για το perlinax εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. $A=0,48$.

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



Σχήμα 1.4.3-2 : Χαρακτηριστικές $Q=f(\hat{U}_κ)$ για τον βακελίτη εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. $A=0,44$.

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

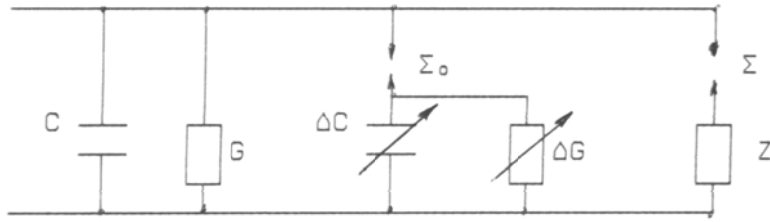
Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 1.4 φαίνεται, ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα υλικά αυτά κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους. Οι πληροφορίες αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεώρηση των παραπάνω φαινομένων. Πλεονέκτημα όμως της μακροσκοπικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών μονωτικών φαίνεται ότι είναι ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης, που (όπως θα δούμε ακολούθως στο παράδειγμα 2) ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη. Ο διαχωρισμός αυτός των μερικών εκκενώσεων δεν μπορεί να δοθεί από την θεωρία του ιονισμού με κρούσεις, γιατί ο συντελεστής A στην σχέση 1.4.3-1 αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του και η τιμή της θα πρέπει να εξαρτάται από την διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Αν π.χ. πραγματοποιήσει κανείς τα πειράματα της παραγράφου 1.4.3 με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs (ή με 10/200μs) και προσεγγίσει ακολούθως τις πειραματικές χαρακτηριστικές $Q=f(\dot{U}_κ)$ με την σχέση 1.4.3-1, θα διαπιστώσει ότι ο συντελεστής A έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Η διαφορετική αυτή τιμή του συντελεστή A (κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, ή 10/200μs) μπορεί να θεωρηθεί μόνο ως μία ένδειξη ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, χωρίς όμως να καθορίζεται η περιοχή εκδήλωσής του (στον όγκο του μονωτικού, ή στην επιφάνειά του, ή στον όγκο και στην επιφάνεια του μονωτικού). Γι' αυτό, δεν μπορεί να καταλήξει κανείς, μέσω της κβαντομηχανικής θεώρησης των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, στον διαχωρισμό των μερικών εκκενώσεων στα παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού.

Από το παραπάνω φαίνεται, ότι για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών χρειάζεται να συνδυαστούν οι δύο θεωρίες, ώστε να δίνουν περισσότερες πληροφορίες για την πράξη. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που έχει προταθεί για τον σκοπό αυτό, δίνεται στο σχήμα 1.5-1. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant-Philipoff (σχήμα 1.3.3-4), όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσει κανείς, ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει στην τιμή της πεδιακής E_0 (κατά την παράγραφο 1.4.3 περίπου 0,2MV/cm), τότε, τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.5-1 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 : $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$.
- 3) Για $E \gg E_0$: Εμφανίζεται αρνητική διαφορική αντίσταση και εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις. Δεν ισχύει η σχέση $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$, αλλά η σχέση :

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

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



Σχήμα 1.5-1 : Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα

G : ιδανική αγωγιμότητα

ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

ΔG : αύξηση της αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

Z : αρνητική διαφορική αντίσταση

Σ_0 : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Σ : σπινθηριστής εκδήλωσης της Z

Παραδείγματα

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

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

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

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

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

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

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

Τα αποτελέσματα των ερευνών για την χρονική εκδήλωση των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της κρουστικής τάσης, έχουν δείξει ότι : οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται κατά την διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης, ενώ οι εξωτερικές κατά τη διάρκεια της ουράς της. Γι' αυτό η αποκοπή στην ουρά της κρουστικής τάσης είναι πολύ πιθανό να σχετίζεται με κατασκευαστικές ατέλειες εκτός του όγκου των μονωτικών υλικών. Υπό την προϋπόθεση ότι δεν συντρέχουν λόγοι ξένων επικαθίσεων στα μονωτικά υλικά, η βλάβη θα πρέπει να οφείλεται σε κατασκευαστική ατέλεια, που προκαλεί μείωση των αποστάσεων μόνωσης

στον αέρα. Σε μία τυποποιημένη κατασκευή των μεταλλικών μερών του πίνακα, η μείωση των αποστάσεων μόνωσης θα μπορούσε π.χ. να οφείλεται σε κάποιον λυόμενο σύνδεσμο μεταξύ των ζυγών, ο οποίος προκαλεί μείωση της απόστασης μόνωσης προς γη.

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

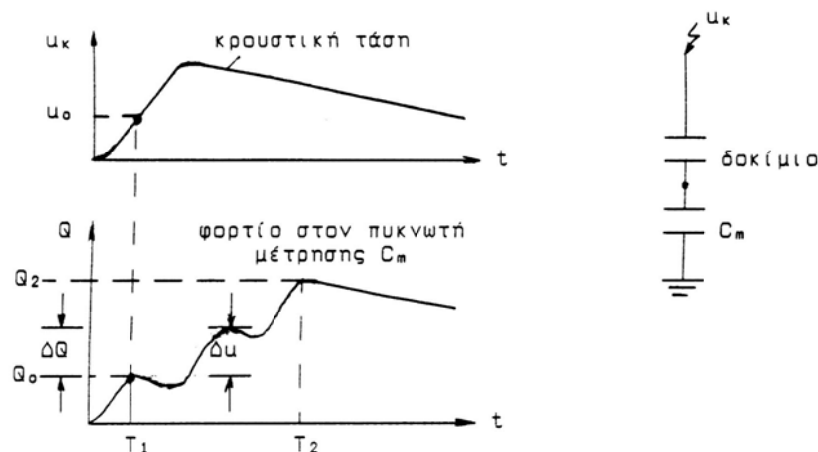
1.6 Εργαστηριακός έλεγχος των μονωτικών υλικών

Η αξιοπιστία και η καλή λειτουργία του συστήματος μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται τις περισσότερες φορές, από την σωστή επιλογή των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται στις διάφορες ηλεκτρολογικές διατάξεις. Έτσι, η αστοχία της μόνωσης σε έναν μετασχηματιστή μεταφοράς ή διανομής, μπορεί να προκαλέσει πληθώρα προβλημάτων με αλυσιδωτές αντιδράσεις. Η διακοπή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε μία τσιμεντοβιομηχανία ή σε ένα διυλιστήριο, ακόμα και για λίγες ώρες, έχει μεγάλο οικονομικό αντίκτυπο. Επίσης, η ασφάλεια των εργαζομένων που έρχονται σε επαφή με ηλεκτρολογικές διατάξεις (πίνακες χειρισμών, εναέριες γραμμές κλπ.) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή της κατάλληλης μόνωσης. Τέλος, με βάση τις εργαστηριακές μετρήσεις είναι δυνατόν να εκτιμηθεί ο χρόνος ζωής των μονωτικών υλικών, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, και να προγραμματιστεί έγκαιρα η αντικατάστασή τους.

Με βάση τα παραπάνω γίνεται φανερό η ανάγκη για τον εργαστηριακό έλεγχο των μονωτικών υλικών, τόσο για την αποφυγή δυσάρεστων καταστάσεων όσο και για την βελτίωση των χαρακτηριστικών τους με την χρησιμοποίηση σύγχρονων υλικών για την κατασκευή τους. Η εμπειρία από την πράξη και οι εργαστηριακές μετρήσεις διερεύνησης των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης των μονώσεων αποτελούν τις πηγές πληροφόρησης για την βελτίωση των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών. Οι διαδικασίες, που εφαρμόζονται για τις εργαστηριακές μετρήσεις διερεύνησης των παραπάνω φαινομένων δεν αποτελούν κάποια προδιαγεγραμμένη μεθοδολογία. Προϋποθέτουν όμως, για το αντικείμενο που εξετάζεται, τη γνώση των ερευνών που έχουν γίνει, καθώς και την εμπειρία στο εργαστήριο και τις πρακτικές εφαρμογές.

1.6.1 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 1.6.1-1 για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Με παρόμοιες σκέψεις, μπορεί κανείς να καθορίσει μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση με άλλες μορφές τάσεων, καθώς και με άλλα τετράπολα μέτρησης (συνήθως ωμική αντίσταση, αντί του πυκνωτή, ή συνδυασμός των δύο αυτών στοιχείων μέτρησης, σχήμα 1.6.1-2). Στο σχήμα π.χ. 1.6.1-3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



Σχήμα 1.6.1-1 : Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

T_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

T_2 : Χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

Q_0 : Φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

Q_2 : Φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

u_k : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

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

Δu : Άλμα δυναμικού.

ΔQ : Αύξηση φορτίου.

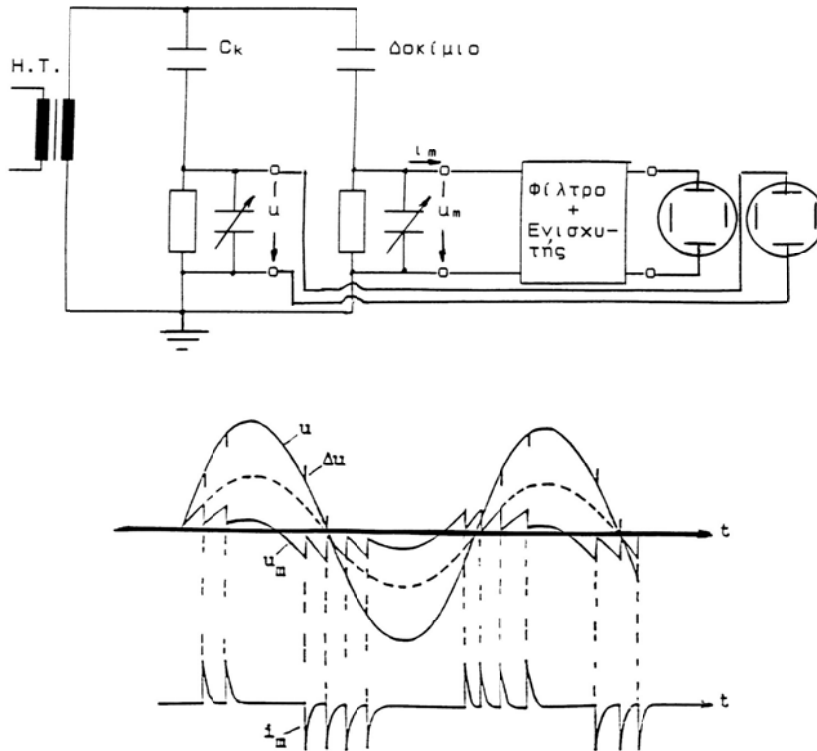
Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως : η χαρακτηριστική $Q=f(|\hat{U}_k|)$, η χαρακτηριστική $u_0=f(|\hat{U}_k|)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της τάσης, κλπ. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q=f(\hat{U}_k)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 1.6.1-4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs ή 10/200μs, όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Στο σχήμα 1.6.1-5 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90^η κρούση, ως προς την 60^η. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών, εύκολα διαπιστώνεται, ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου Q στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις (θραύσματα) στην επιφάνεια του μονωτικού.

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

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

τάση.

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



Σχήμα 1.6.1-2 : Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω "ωμικού-χωρητικού" τετράπολου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz.

H.T.: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

C_k : Πυκνωτής υψηλής τάσης.

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

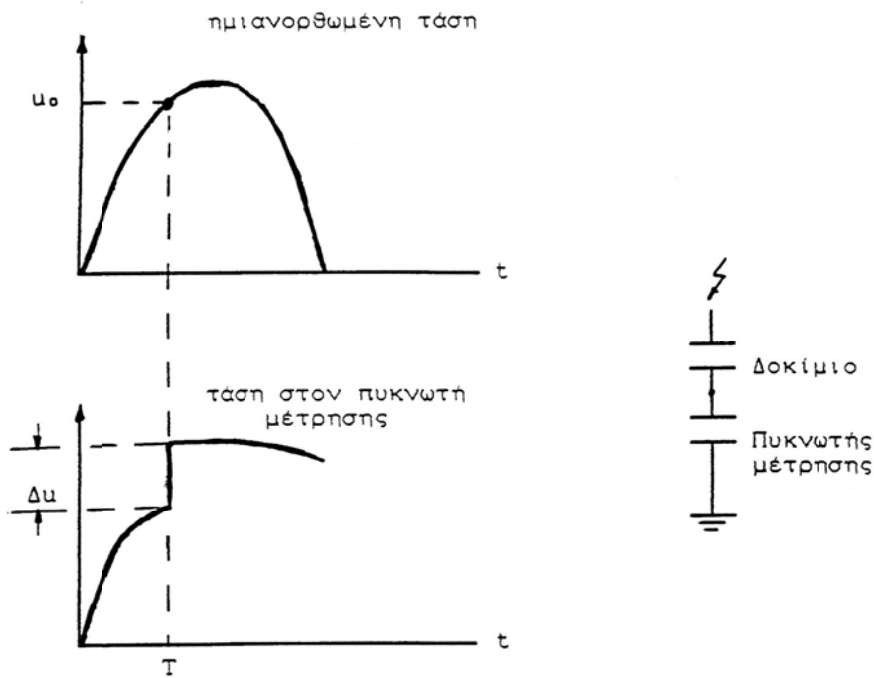
u_m : Στιγμιαία τιμή της τάσης στο ωμικό-χωρητικό τετράπολο μέτρησης των μερικών εκκενώσεων.

i_m : Στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων.

Δu : Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων.

Μία πειραματική προσέγγιση του παραπάνω διαχωρισμού, μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, έχει δοθεί από παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού σε στερεά οργανικά μονωτικά, με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών (σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα), που συνδυάστηκαν με ταυτόχρονες οπτικές παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών κατά το σχήμα 1.3.5-7. Στον πίνακα 1.6.1-1 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$, από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που προαναφέρθηκε. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη

γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης 1,2/50μs) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

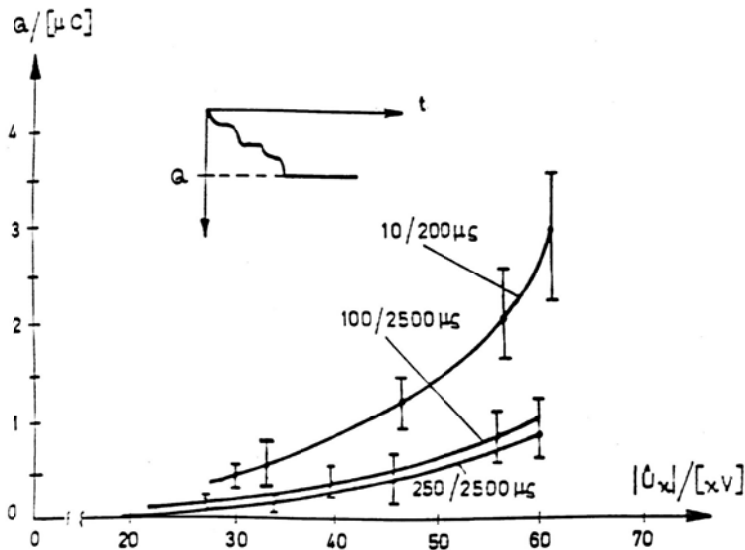


Σχήμα 1.6.1-3 : Παράδειγμα Καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

T_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

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

Δu : άλμα δυναμικού

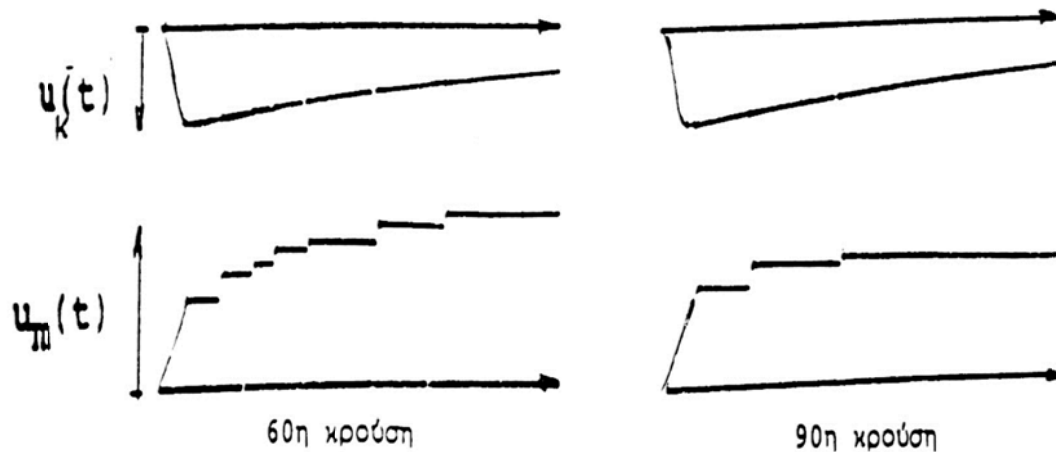


Σχήμα 1.6.1-4 : Χαρακτηριστική $Q_2=f(\hat{U}_κ)$ για τον βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα

C_m : 1000nF



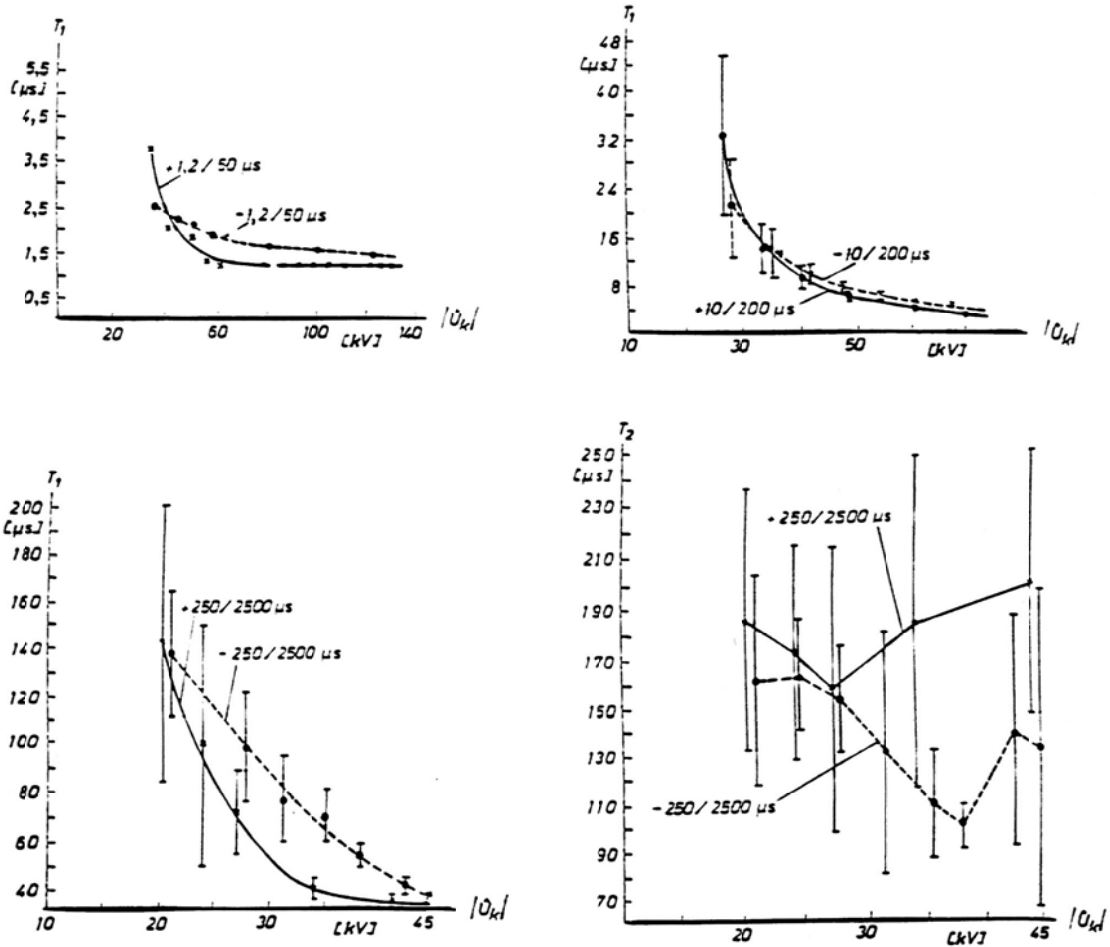
Σχήμα 1.6.1-5 : Αλματα δυναμικού κατά την 60^η και την 90^η κρούση στο pertinax (πάχους 2mm).
 Μορφή τάσης : 1,2/50μs ($\hat{U}_κ = 99,7kV$).
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.
 C_m : 210nF.

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

Πίνακας 1.6.1-1 : Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

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

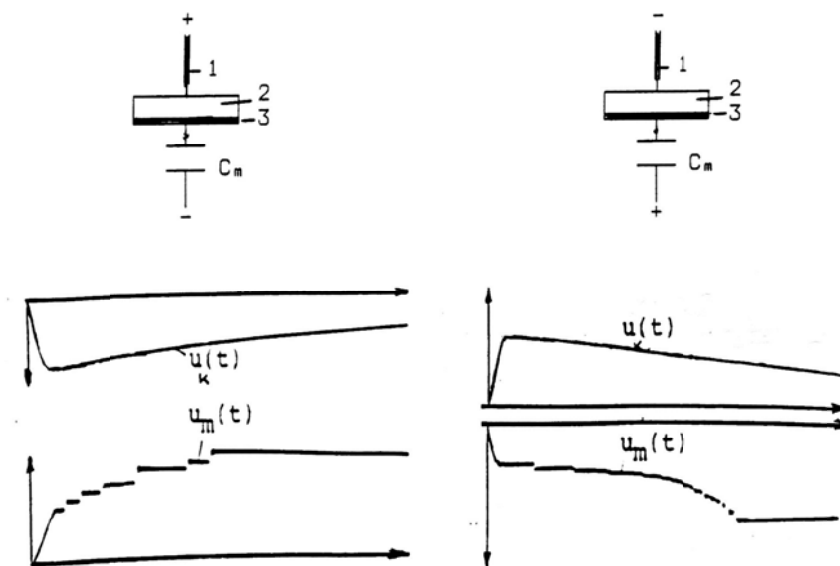
παρατηρήσεις του πίνακα 1.5-1 για την εικόνα των επιφανειακών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.



Σχήμα 1.6.1-6 : 1) Χαρακτηριστική $T_1=f(|\hat{U}_\kappa|)$ 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 $T_2=f(|\hat{U}_\kappa|)$ 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.

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

Από την μέση καμπύλη των χαρακτηριστικών του σχήματος 1.3.5-6 γίνεται επίσης φανερή η εκδήλωση του φαινομένου της πολικότητας, όπως και κατά τη διάτρηση. Οι επικαλύψεις τιμών, που παρατηρούνται μπορούν να αποδοθούν στη διαφορετική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο (τα οργανικά στερεά μονωτικά είναι ανομοιογενή και δεν είναι δυνατό να υπάρχει συμμετρική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο). Πάντως, το φαινόμενο της πολικότητας γίνεται φανερό στα άλματα δυναμικού από την κύρτωση (παρέκκλιση) της $u_m(t)$ προς τον άξονα του χρόνου (σχήμα 6-1)



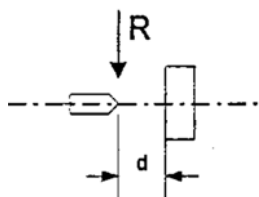
Σχήμα 1.6.2-1 : Τυπικά παλμογραφήματα των αλάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs.
(1: Ηλεκτρόδιο ακίδα, 2: Δοκίμιο, 3: Ηλεκτρόδιο πλάκα, C_m : Πυκνωτής μέτρησης).

1.6.3 Η Διάταξη των ηλεκτροδίων

Η διάταξη των ηλεκτροδίων παίζει καθοριστικό ρόλο σε μια εργαστηριακή δοκιμή, διότι καθορίζει την μορφή του αναπτυσσόμενου πεδίου. Μία συχνά χρησιμοποιούμενη διάταξη, σε πολλές δοκιμές και ελέγχους μονωτικών υλικών, είναι ένα πυκνωτής με ηλεκτρόδια ακίδα – πλάκα, και για διηλεκτρικό, το υπό εξέταση μονωτικό. Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος στην περίπτωση αυτή είναι η ακτίνα καμπυλότητας, αφού με αυτό τον τρόπο καθορίζεται η μορφή και η ένταση του πεδίου. Όσο μικρότερη είναι η ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας τόσο αυξάνει η μέγιστη τιμή του πεδίου. Ένας προσεγγιστικός υπολογισμός της πεδιακής έντασης στην ακίδα μπορεί να γίνει από τη σχέση :

$$E = \frac{2U}{R \cdot \ln\left(\frac{4d}{R}\right)} \quad (1.6.3-1)$$

όπου d το πάχος του δοκιμίου σε mm, r η ακτίνα καμπυλότητας και U η τάση που εφαρμόζεται κάθε φορά.



Σχήμα 5.6 -1 : Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα – πλάκα.
 d : απόσταση ακίδας – πλάκας.
 R : ακτίνα καμπυλότητας ακίδας.

Η παραπάνω διάταξη των ηλεκτροδίων ενδείκνυται για ερευνητικούς σκοπούς περισσότερο από κάθε άλλη, γιατί δίνει τη δυνατότητα έρευνας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης στη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών. Ανάλογα με τη φύση του προβλήματος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και άλλες διατάξεις των ηλεκτροδίων όπως : ακίδα – ακίδα, πλάκα – πλάκα. Οι ακριβείς διαστάσεις της διάταξης ακίδας – πλάκας, καθώς και το υλικό κατασκευής τους, καθορίζονται από διεθνείς κανονισμούς ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

1.6.4 Το περιβάλλον μέσο κατά τις δοκιμές σε στερεά μονωτικά

Το περιβάλλον μέσο της διάταξης του δοκιμίου είναι συνήθως ο αέρας ή το λάδι (κυρίως λόγω του συνδυασμού των περισσότερων στερεών μονωτικών με τον αέρα ή το λάδι). Οι συνθήκες του περιβάλλοντος μέσου (κυρίως η θερμοκρασία, η υγρασία και η πίεση) έχουν σημασία στις έρευνες, που θα γίνουν.

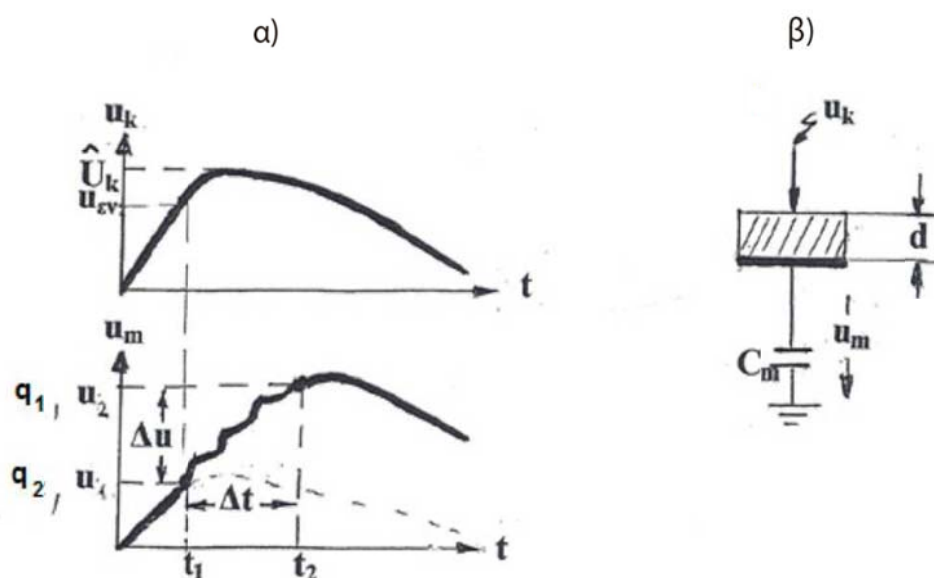
Επίσης, έχουν γίνει έρευνες στα στερεά μονωτικά, υπό συνθήκες κενού. Στην περίπτωση αυτή είναι φανερό, ότι οι μετρήσεις αποσκοπούν στο να αποκλείσουν πρακτικά τη συμμετοχή του περιβάλλοντος μέσου στην εκδήλωση φαινομένων περιαγωγής ελευθέρων υλικών φορέων στο δοκίμιο.

2. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και στατιστική ανάλυση των ηλεκτρικών φαινομένων λόγω μερικών εκκενώσεων, οι οποίες εκδηλώνονται σε δοκίμια Pertinax πάχους 1mm και 2mm αντίστοιχα, εντός ελαίου μετασχηματιστών θερμοκρασίας 80° C, όταν στα μονωτικά αυτά ασκείται κρουστική τάση της μορφής $\pm 250/2500\mu\text{s}$.

Συγκεκριμένα, πρόκειται κυρίως για την σύνθετη αντίσταση και την ενέργεια που παρουσιάζεται στον συνδυασμό των δύο μονωτικών, κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

Οι μετρήσεις προέκυψαν από πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο, με τη διάταξη μέτρησης που δίνεται απλοποιημένα στο σχήμα 2-1 β. Η κρουστική τάση ασκείται στο δοκίμιο, με διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: $R=0,9\text{mm}$. Η μέτρηση της τάσης γίνεται με τη βοήθεια ενός πυκνωτή μέτρησης, του οποίου είναι γνωστή η χωρητικότητα.



Σχήμα 2-1: α. Καθορισμός εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων.

β. Διάταξη μέτρησης.

t1: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t2: χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt: χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

q1: στιγμιαία τιμή του φορτίου στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

q2: στιγμιαία τιμή του φορτίου στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

u1: στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u2: στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

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

C_m : χωρητικότητα του πυκνωτή μέτρησης (1000 μF)

d: πάχος δοκιμίου

Η παρουσία των μερικών εκκενώσεων έγινε αισθητή με την εκδήλωση αλμάτων δυναμικού, τα οποία φαινόταν στα παλμογραφήματα που λήφθηκαν. Έτσι έγινε δυνατή η μέτρηση ορισμένων μεγεθών.

Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκαν:

- η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης (U_k)
- το φορτίο του πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων (q_1),
- το Φορτίο του πυκνωτή C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων (q_2),
- ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων (t_1)
- ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (t_2).

Σημείωση: Ο πυκνωτής C_m ήταν 1000μF σε όλες τις μετρήσεις.

Για την εξαγωγή των απαραίτητων συμπερασμάτων, υπολογίστηκαν τα μεγέθη που παρατίθενται παρακάτω. Ο υπολογισμός των μεγεθών αυτών έγινε με τη βοήθεια του σχήματος 2-1 και των ακόλουθων σχέσεων.

- Μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης:

$$E_k = \frac{2U_k}{R \cdot \ln\left(\frac{4d}{R}\right)} \quad (2-1)$$

- Σύνθετη αντίσταση του δοκιμίου κατά την αρχή των μερικών εκκενώσεων:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{q_1}{t_1} = \frac{C_m \cdot u_1}{t_1} \\ Z_1 &= \frac{u_1}{i_1} \end{aligned} \right\} \rightarrow Z_1 = \frac{u_1}{\frac{C_m \cdot u_1}{t_1}} \rightarrow$$

$$Z_1 = \frac{t_1}{C_m} \quad (2-2)$$

- Σύνθετη αντίσταση του δοκιμίου κατά την λήξη των μερικών εκκενώσεων
Αντίστοιχα με την Z_1 , έχουμε:

$$Z_2 = \frac{t_2}{C_m} \quad (2-3)$$

- Διαφορά αντίστασης πριν και μετά τις μερικές εκκενώσεις:

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

- Τάση κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων:

$$u_1 = q_1 / C_m \quad (2-5)$$

- Τάση κατά την λήξη των μερικών εκκενώσεων:

$$u_2 = q_2 / C_m \quad (2-6)$$

- Διαφορά τάσης πριν και μετά τις μερικές εκκενώσεις:

$$\Delta u = u_2 - u_1 \quad (2-7)$$

- Στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$$W_1 = u_1 \cdot i_1 \cdot t_1 = u_1 \cdot \{(C_m \cdot u_1)/t_1\} / t_1 \rightarrow$$

$$W_1 = u_1^2 \cdot C_m \quad (2-8)$$

- Στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

Αντίστοιχα με την W_1 είναι:

$$W_2 = u_2^2 \cdot C_m \quad (2-9)$$

- Διαφορά ενέργειας πριν και μετά τις μερικές εκκενώσεις

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad (2-10)$$

- Ισχύς κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

$$P_1 = W_1 / t_1 \quad (2-11)$$

- Ισχύς κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$$P_2 = W_2 / t_2 \quad (2-12)$$

- Διαφορά ισχύος πριν και μετά τις μερικές εκκενώσεις

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (2-13)$$

- Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

$$\Delta W_e = 0,5 \cdot k \cdot \Delta u \quad (2-14)$$

όπου $k=5,51$ σύμφωνα με τον πίνακα 1.4.1-1, αφού είναι $C_m=1000\mu F$

3. Αποτελέσματα και στατιστική ανάλυση των μετρήσεων

Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης και της ενέργειας λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2-1 έως 2-14.

3.1 Κρουστική τάση +250/2500 μ s, πάχος δοκιμίου $d=1\text{mm}$

U_k (KV)	t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	q_1 (μ C)	q_2 (μ C)
10,02	111,37	310,5	0,064	0,074
	-	-	0,006	-
13,4	45,9	336,15	0,049	0,182
	7,87	56,3	0,006	0,017
16,95	33,54	319,95	0,059	0,319
	10,46	58,15	0,013	0,018
20,16	23,62	403,65	0,056	0,583
	3,01	46,25	0,002	0,013
23,41	26,99	378,9	0,068	1,032
	3,69	48,8	0,016	0,11
26,8	24,97	409,04	0,068	1,605
	5,05	43,2	0,01	0,061
30,5	Διάσπαση			

Πίνακας 3.1-1: Μετρήσεις χρόνου και φορτίου κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων που εκδηλώνονται σε δοκίμιο Pertinax πάχους 1mm, με εφαρμογή θετικής κρουστικής τάσης αυξανόμενης μέγιστης τιμής, διάρκειας 250/2500 μ sec
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
Πυκνωτής: $C_m=1000\text{nF}$
Πάχος: $d=1\text{mm}$
Σημείωση: Η δεύτερη τιμή ανά επίπεδο τάσης, είναι η τυπική απόκλιση, και η κάθε τιμή είναι μέση τιμή δέκα μετρήσεων.

3.1.1 Πίνακες στατιστικής ανάλυσης μετρήσεων (+250/2500, d=1mm)

U_k (KV)	E_k (MV/cm)	C_m (nF)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	Δt (μs)	Z_1 (Ω)	Z_2 (Ω)	ΔZ (Ω)
10,02	0,149	1000	0,064	0,074	111,37	310,5	199,13	111,37	310,5	199,13
13,4	0,200	1000	0,049	0,182	45,9	336,15	290,25	45,9	336,15	290,25
16,95	0,253	1000	0,059	0,319	33,54	319,95	286,41	33,54	319,95	286,41
20,16	0,300	1000	0,056	0,583	23,62	403,65	380,03	23,62	403,65	380,03
23,41	0,349	1000	0,068	1,032	26,99	378,9	351,91	26,99	378,9	351,91
26,8	0,399	1000	0,068	1,605	24,97	409,04	384,07	24,97	409,04	384,07
30,5	0,454	Διάσπαση								

Πίνακας 3.1.1-1 : Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μF)

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

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

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$\Delta t = t_2 - t_1$: χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

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

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

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$

U_k (KV)	E_k (MV/cm)	C_m (nF)	q_1 (μ C)	q_2 (μ C)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)	W_1 (KWs)	W_2 (KWs)	ΔW (KWs)	ΔW_e (ev)
10,02	0,149	1000	0,064	0,074	0,064	0,074	0,01	4,10	5,476	1,4	0,03
13,4	0,200	1000	0,049	0,182	0,049	0,182	0,133	2,40	33,12	30,7	0,37
16,95	0,253	1000	0,059	0,319	0,059	0,319	0,26	3,48	101,8	98,3	0,72
20,16	0,300	1000	0,056	0,583	0,056	0,583	0,527	3,14	339,9	337	1,45
23,41	0,349	1000	0,068	1,032	0,068	1,032	0,964	4,62	1065	1060	2,66
26,8	0,399	1000	0,068	1,605	0,068	1,605	1,537	4,62	2576	2571	4,23
30,5	0,454	Διάσπαση									

Πίνακας 3.1.1-2: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k (KV)	E_k (MV/cm)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)	t_1 (ms)	t_2 (μ s)	Δt (μ s)	P_1 (MW)	P_2 (MW)	ΔP (MW)	
10,02	0,149	0,064	0,074	0,01	111,4	310,5	199,13	36,8	17,6	-19,1	
13,4	0,200	0,049	0,182	0,133	45,9	336,15	290,25	52,3	98,5	46,2	
16,95	0,253	0,059	0,319	0,26	33,54	319,95	286,4	103,8	318,1	214,3	
20,16	0,300	0,056	0,583	0,527	23,62	403,65	380,0	132,8	842,0	709,3	
23,41	0,349	0,068	1,032	0,964	26,99	378,9	351,9	171,3	2810,8	2639,5	
26,8	0,399	0,068	1,605	1,537	24,97	409,04	384,1	185,2	6297,7	6112,6	
30,5	0,454	Διάσπαση									

Πίνακας 3.1.1-3: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μ F)

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας

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

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

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt : $t_2 - t_1$ χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

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

W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

ΔW : $W_2 - W_1$

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

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

ΔP : $P_2 - P_1$

ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

U_k (KV)	t_1 (μs)	t_{1min} (μs)	t_{1max} (μs)	t_2 (μs)	t_{2min} (μs)	t_{2max} (μs)
10,02	111,37	111,37	111,37	310,5	310,5	310,5
	-			-		
13,4	45,9	43,41	48,39	336,15	318,35	353,95
	7,87			56,3		
16,95	33,54	30,23	36,85	319,95	301,56	338,34
	10,46			58,15		
20,16	23,62	22,67	24,57	403,65	389,02	418,28
	3,01			46,25		
23,41	26,99	25,82	28,16	378,9	363,47	394,33
	3,69			48,8		
26,8	24,97	23,37	26,57	409,04	395,38	422,70
	5,05			43,2		
30,5	Διάσπαση					

Πίνακας 3.1.1-4: Στατιστική ανάλυση της αποκλισης της μέσης τιμής του χρόνου έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων, με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

t_{1min} : ελάχιστος αναμενόμενος χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

t_{1max} : μέγιστος αναμενόμενος χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

t_{2min} : ελάχιστος αναμενόμενος χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

t_{2max} : μέγιστος αναμενόμενος χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

Σημείωση: Η δευτερογενής τιμή στα μεγέθη t_1 , t_2 είναι η τυπική απόκλιση

U_k (KV)	C_m (nF)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	$u_{1\mu}$ (V)	u_{1min} (V)	u_{1max} (V)	$u_{2\mu}$ (V)	u_{2min} (V)	u_{2max} (V)
10,02	1000	0,064	0,074	0,064	0,062	0,066	0,074	0,074	0,074
		0,006							
13,4	1000	0,049	0,182	0,049	0,047	0,051	0,182	0,176624	0,187376
		0,006	0,017						
16,95	1000	0,059	0,319	0,059	0,055	0,063	0,319	0,313308	0,324692
		0,013	0,018						
20,16	1000	0,056	0,583	0,056	0,055	0,057	0,583	0,578889	0,587111
		0,002	0,013						
23,41	1000	0,068	1,032	0,068	0,063	0,073	1,032	0,997215	1,066785
		0,016	0,11						
26,8	1000	0,068	1,605	0,068	0,065	0,071	1,605	1,58571	1,62429
		0,01	0,061						
30,5	1000	Διάσπαση							

Πίνακας 3.1.1-5: Στατιστική ανάλυση της αποκλισης της μέσης τιμής της στιγμιαίας τάσης στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη και περαίωση των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων, με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μF)

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας

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

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

u_{1min} : ελάχιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

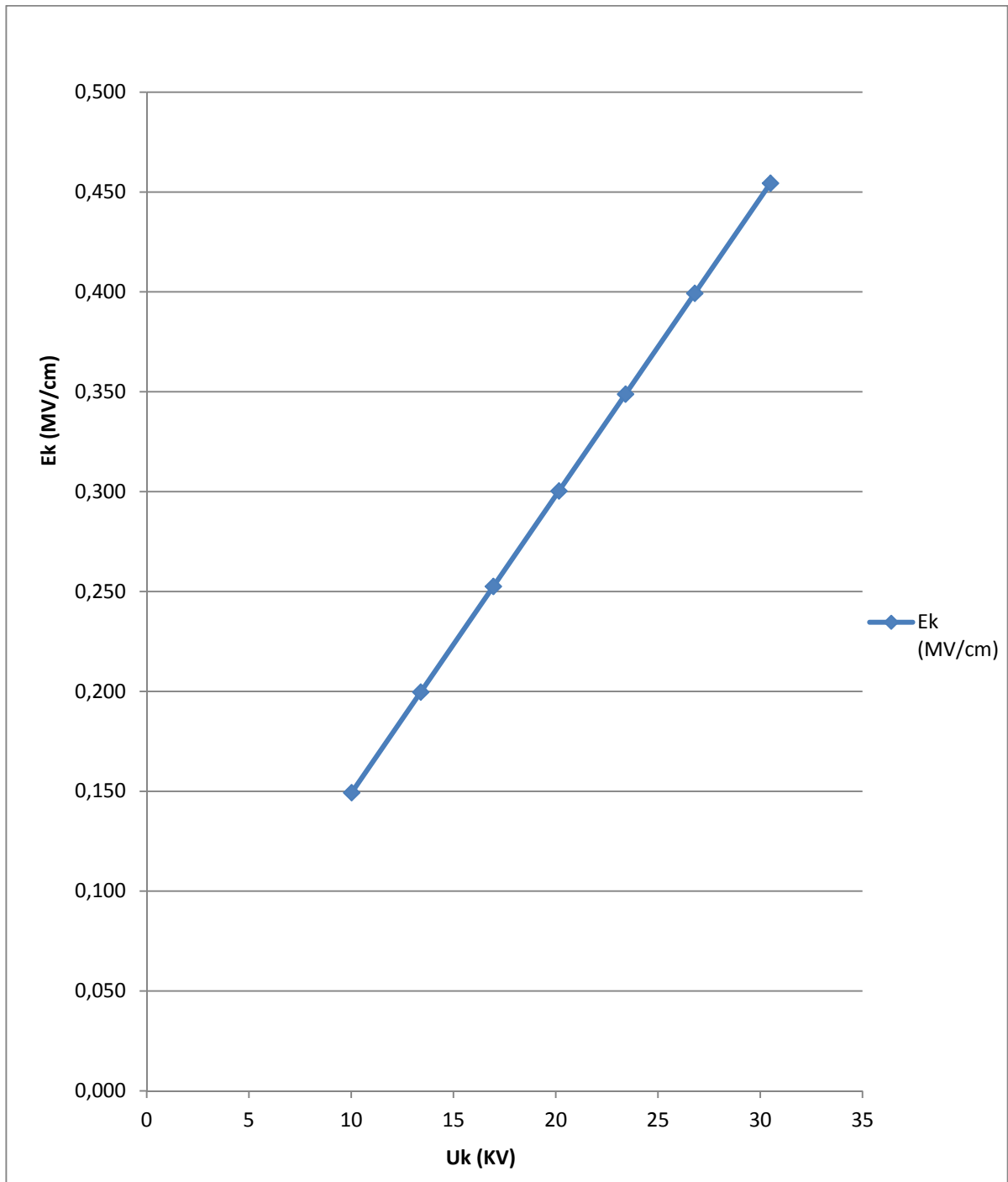
u_{1max} : μέγιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

u_{2min} : ελάχιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

u_{2max} : μέγιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή στα μεγέθη q_1 , q_2 είναι η τυπική απόκλιση

3.1.2 Χαρακτηριστικές της στατιστικής ανάλυσης (+250/2500, d=1mm)

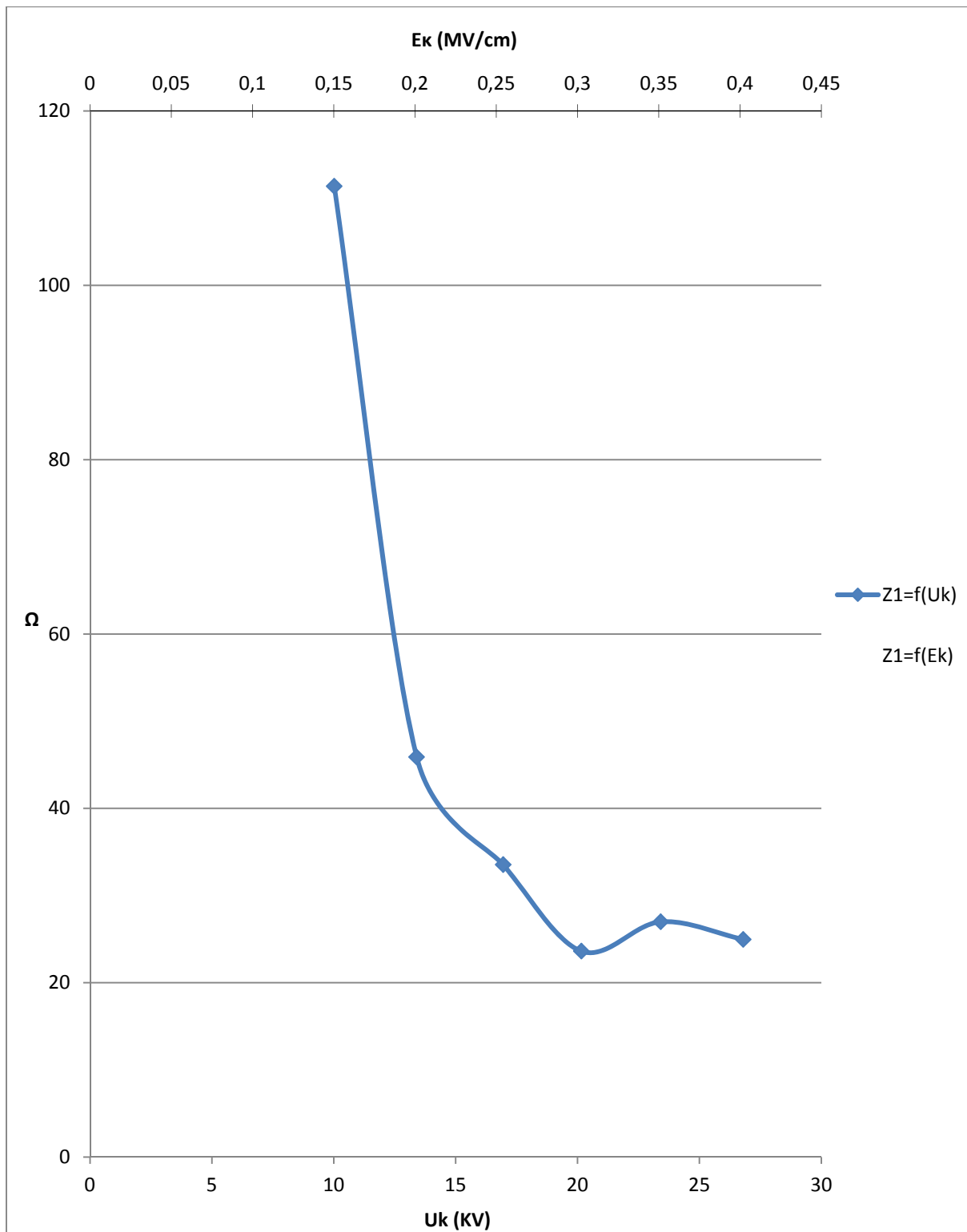


Σχήμα 3.1.2-1: Χαρακτηριστική $E_k=f(U_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

$$E_k = \frac{2U_k}{R \cdot \ln\left(\frac{4d}{R}\right)}$$

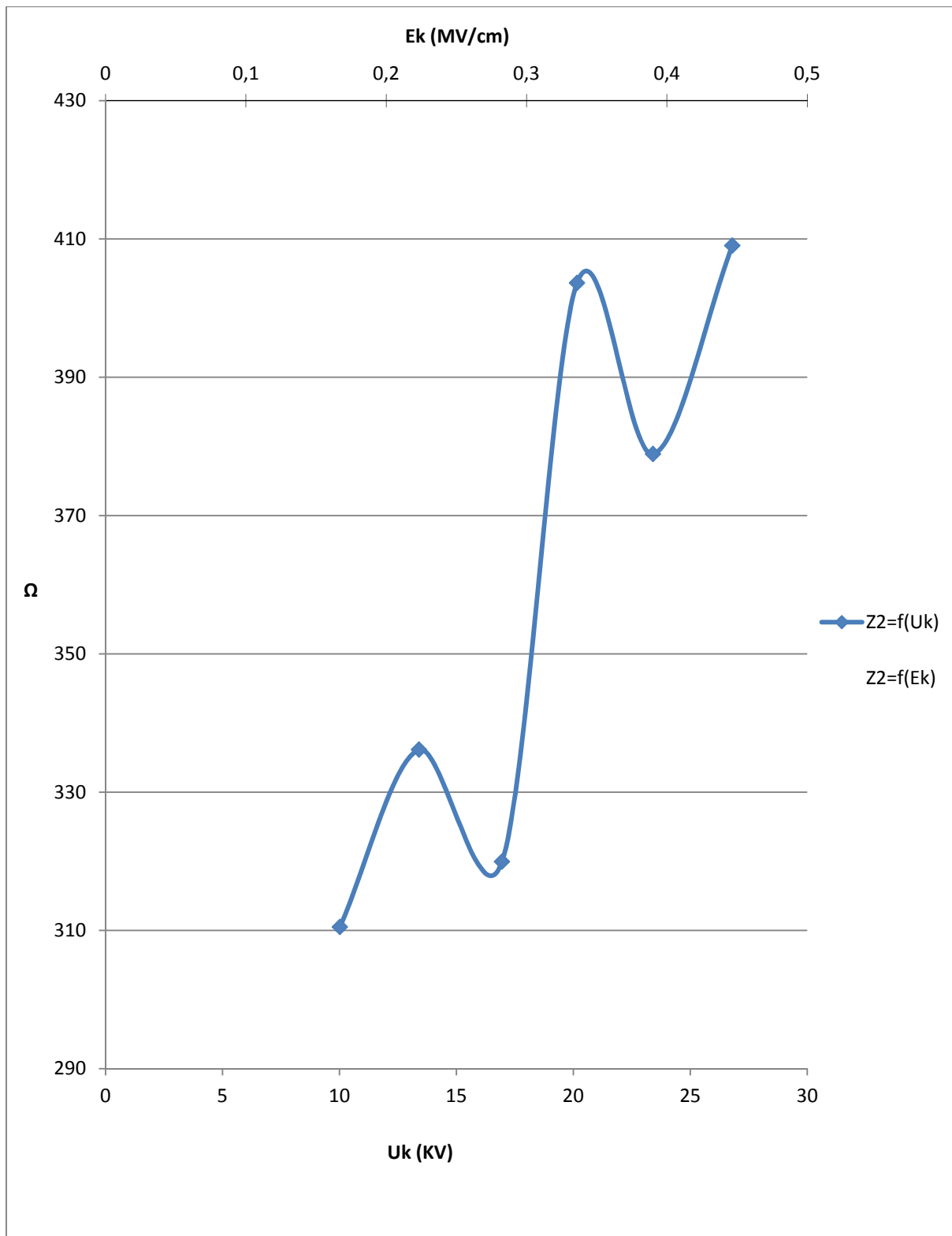


Σχήμα 3.1.2-2: Χαρακτηριστική $Z_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

Z₁: σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

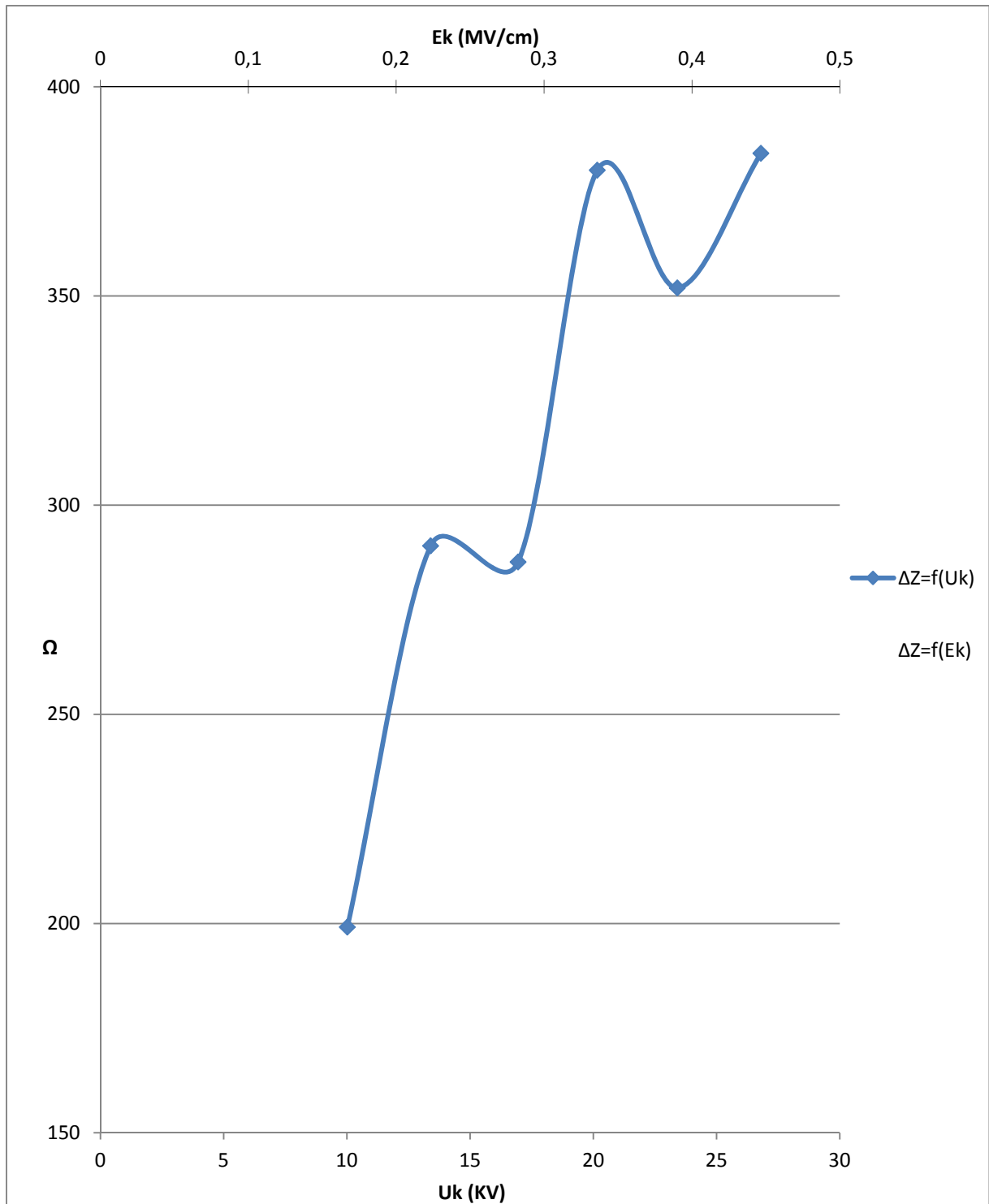


Σχήμα 3.1.2-3: Χαρακτηριστική $Z_2=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

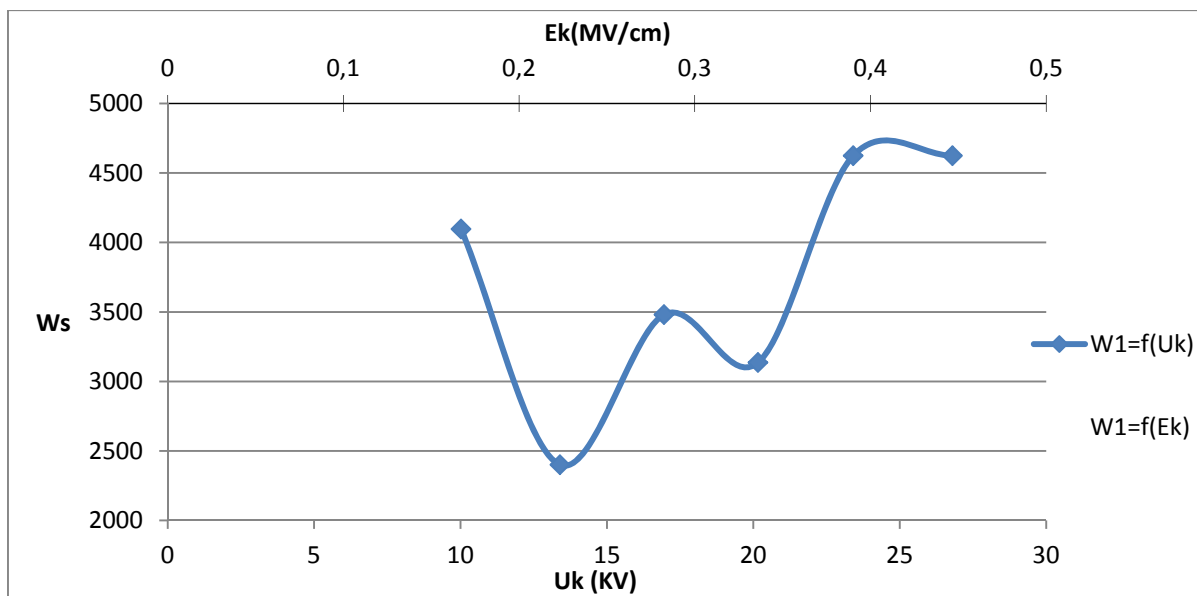
U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

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



Σχήμα 3.1.2-4: Χαρακτηριστική $\Delta Z=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm
 ΔZ : Z_2-Z_1
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
 Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

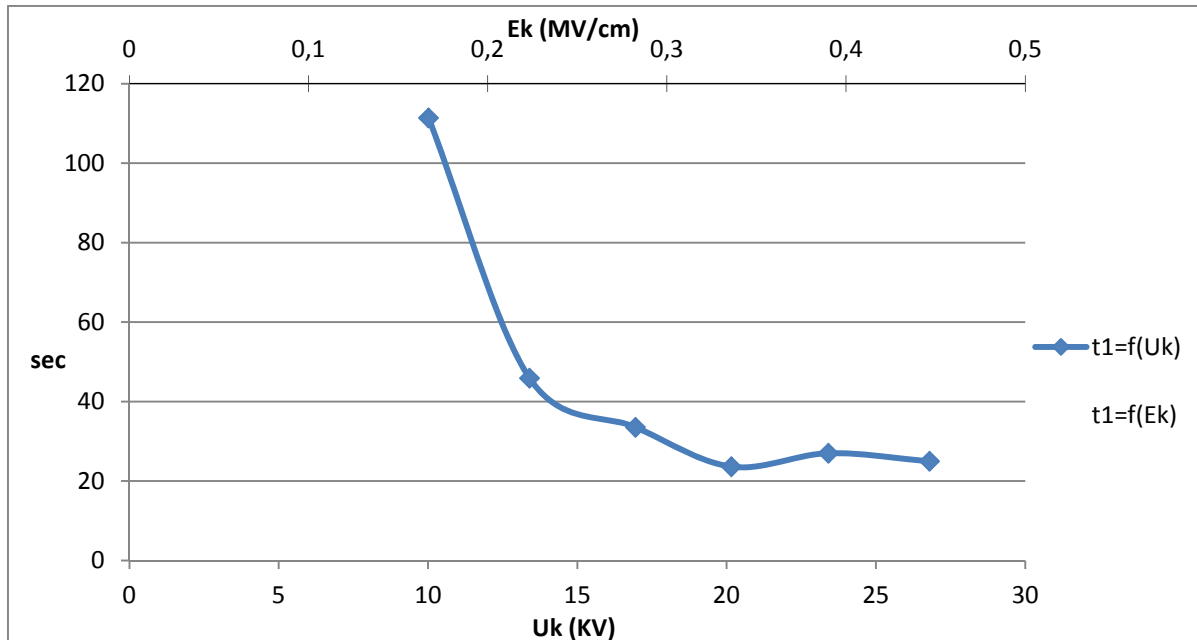


Σχήμα 3.1.2-5: Χαρακτηριστική $W_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm

W₁: στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

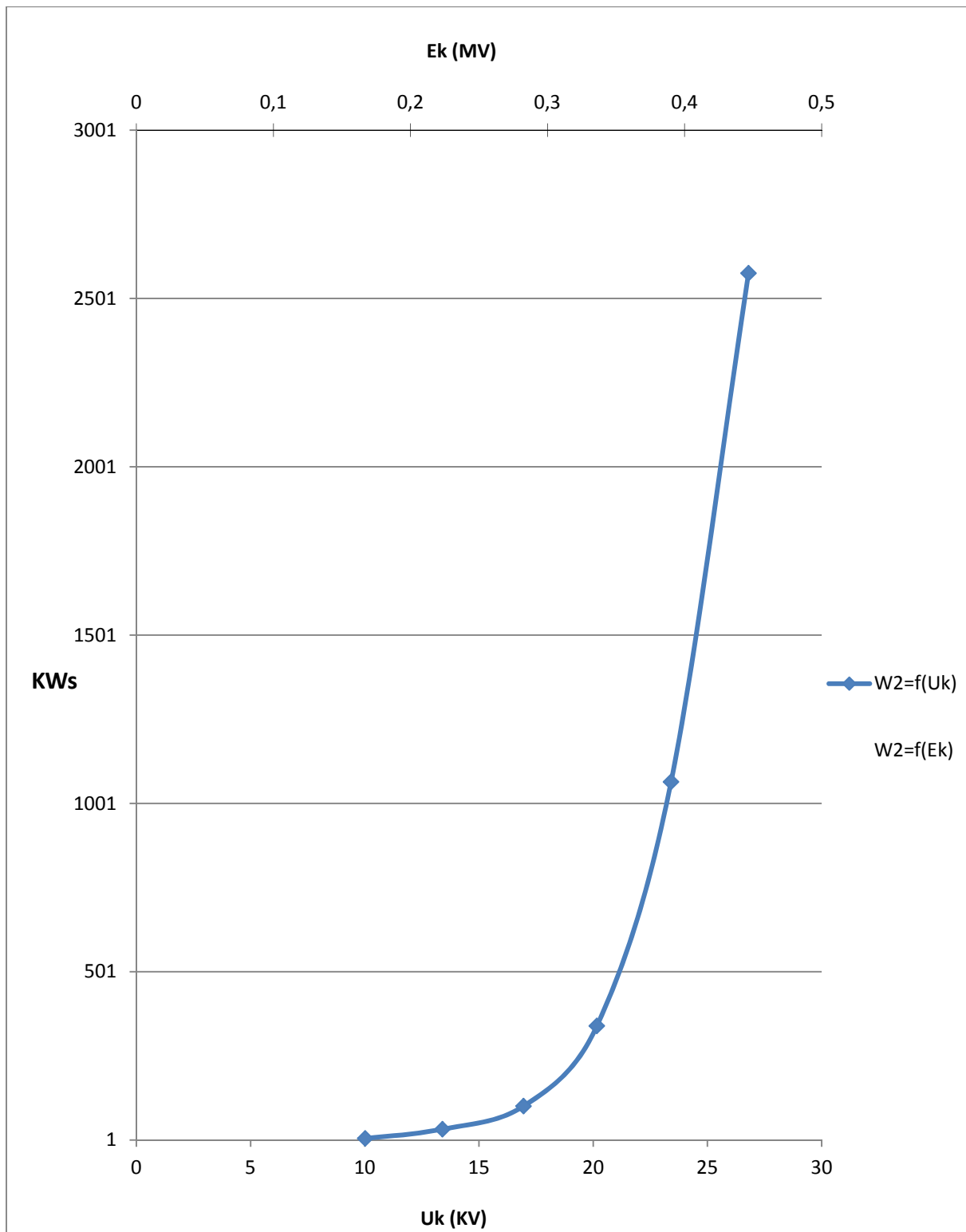


Σχήμα 3.1.2-6: Χαρακτηριστική $t_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm

t₁: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

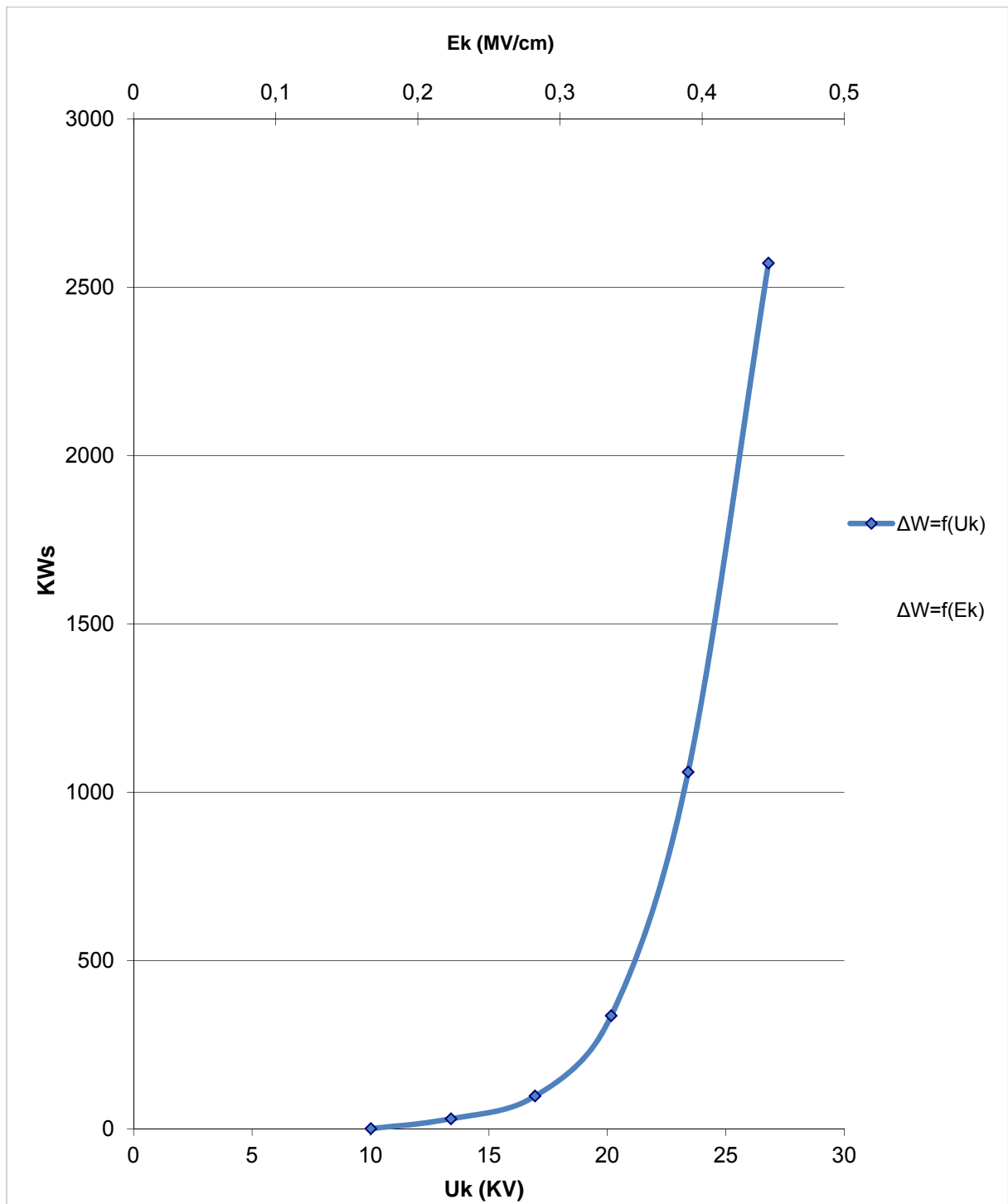


Σχήμα 3.1.2-7: Χαρακτηριστική $W_2=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

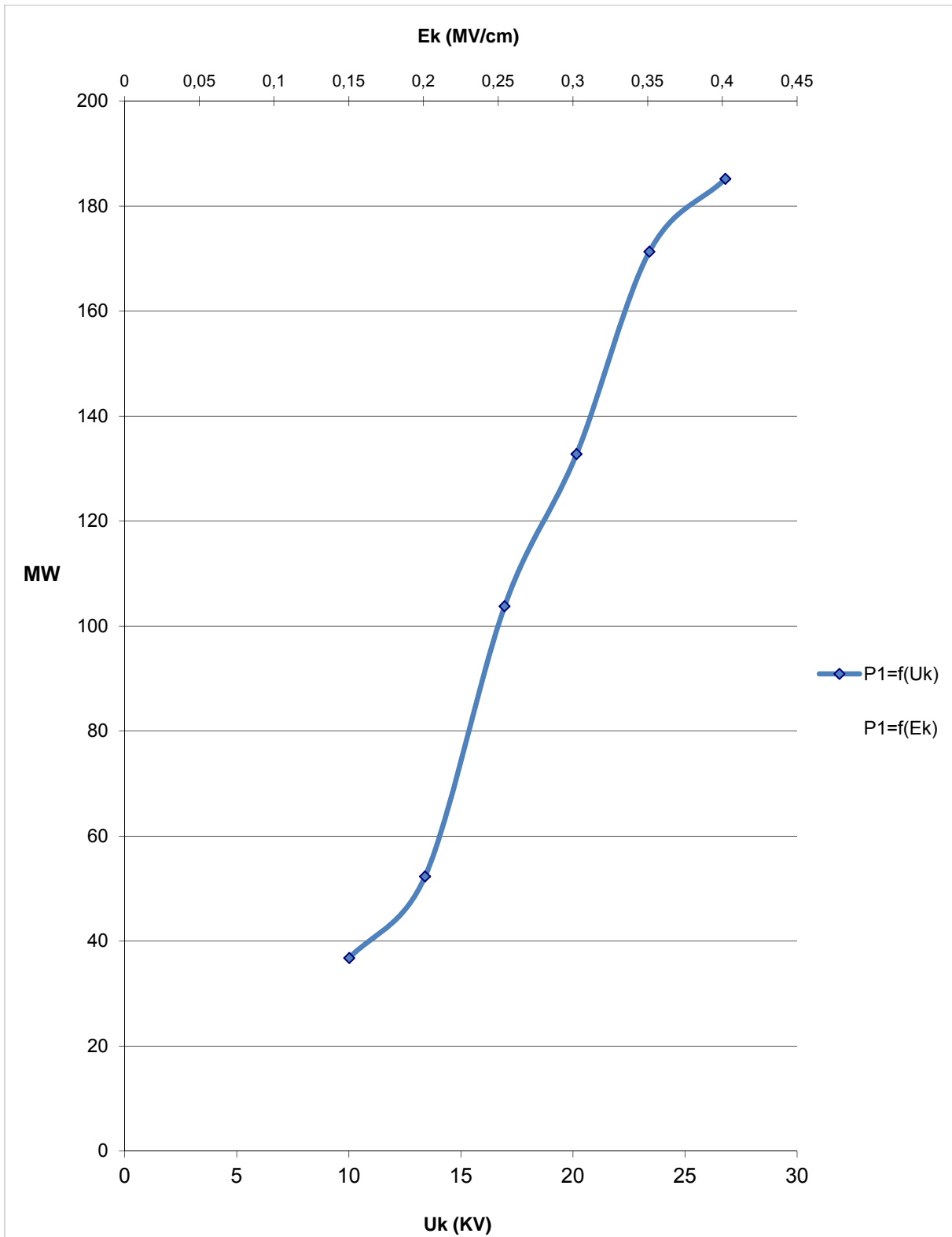
W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.1.2-8: Χαρακτηριστική $\Delta W=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm
 ΔW : $W_2 - W_1$
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
 W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 W_1 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

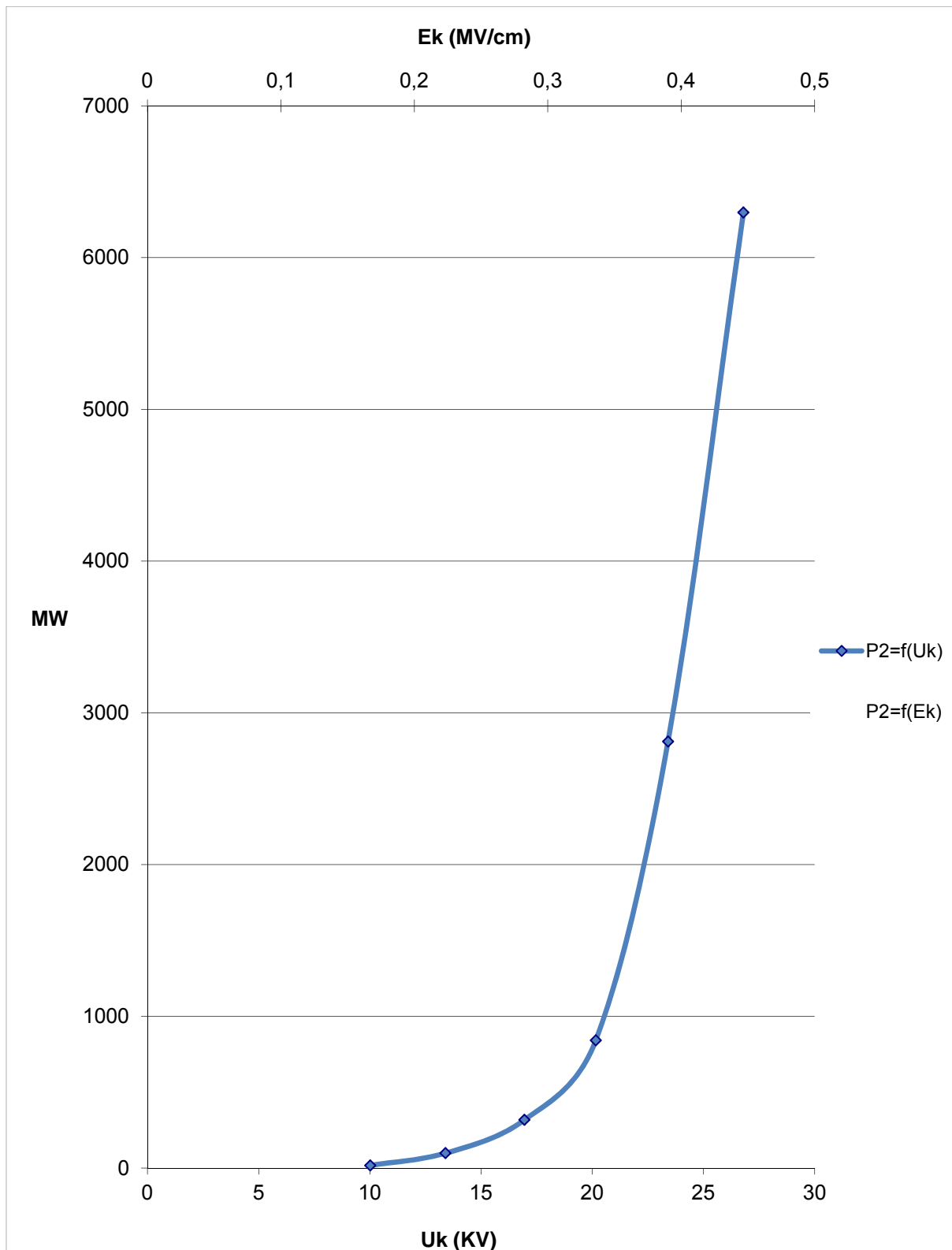


Σχήμα 3.1.2-9: Χαρακτηριστική $P_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

P₁: στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

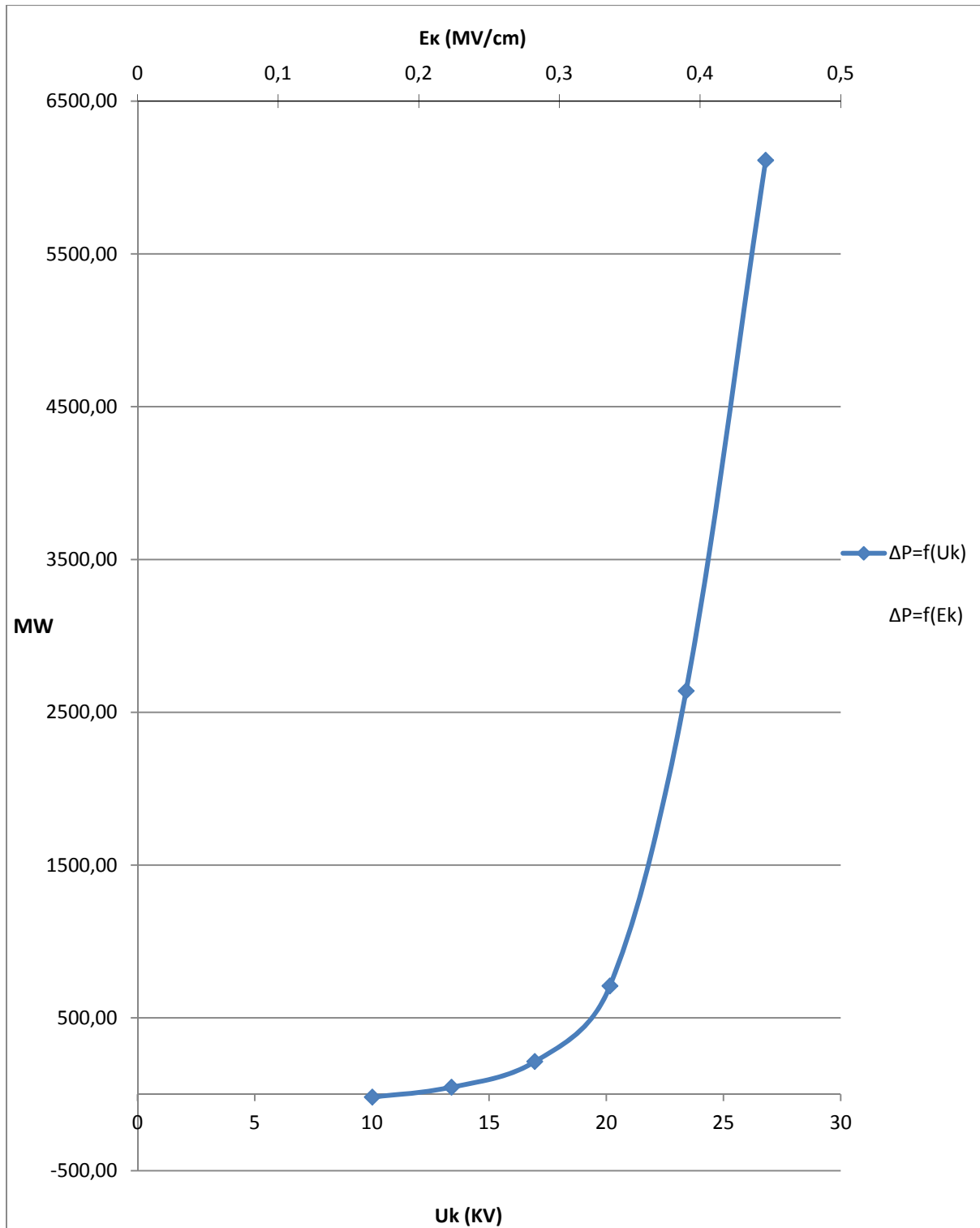


Σχήμα 3.1.2-10: Χαρακτηριστική $P_2=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

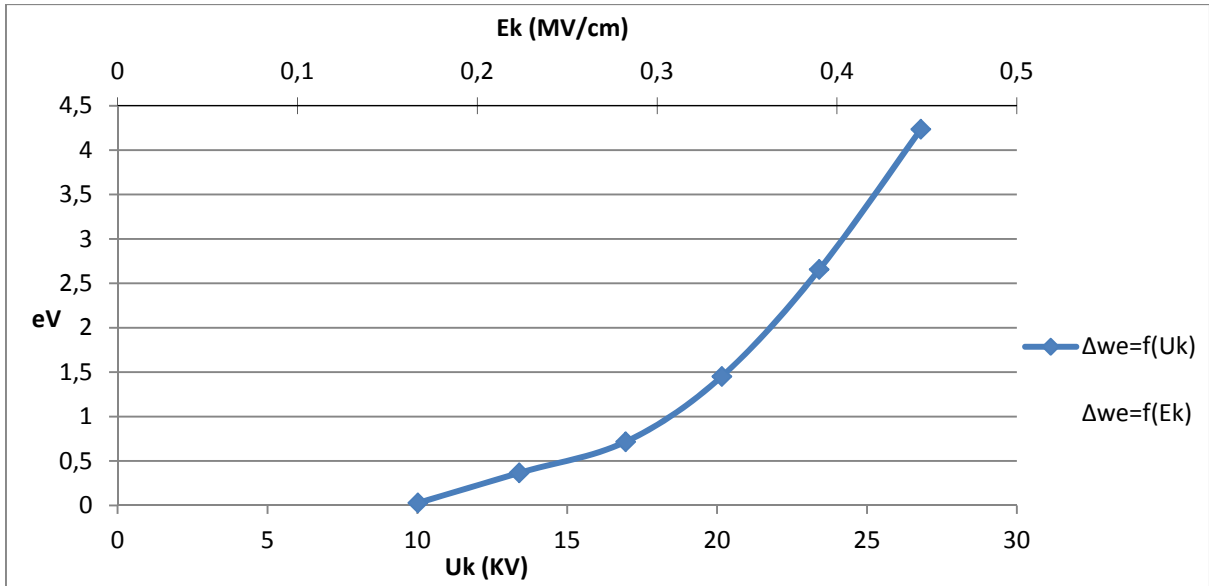
P₂: στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

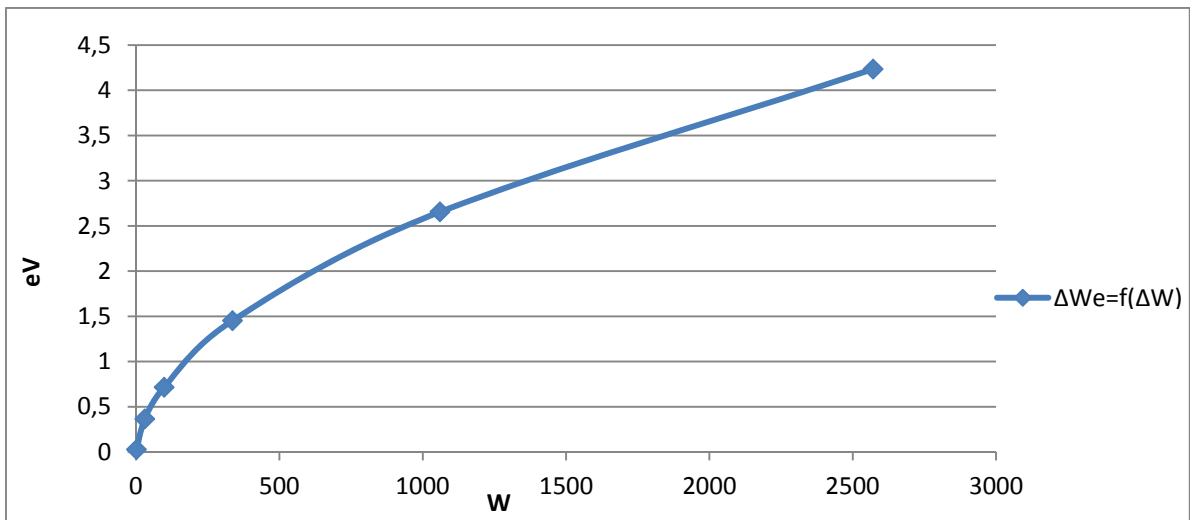
E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



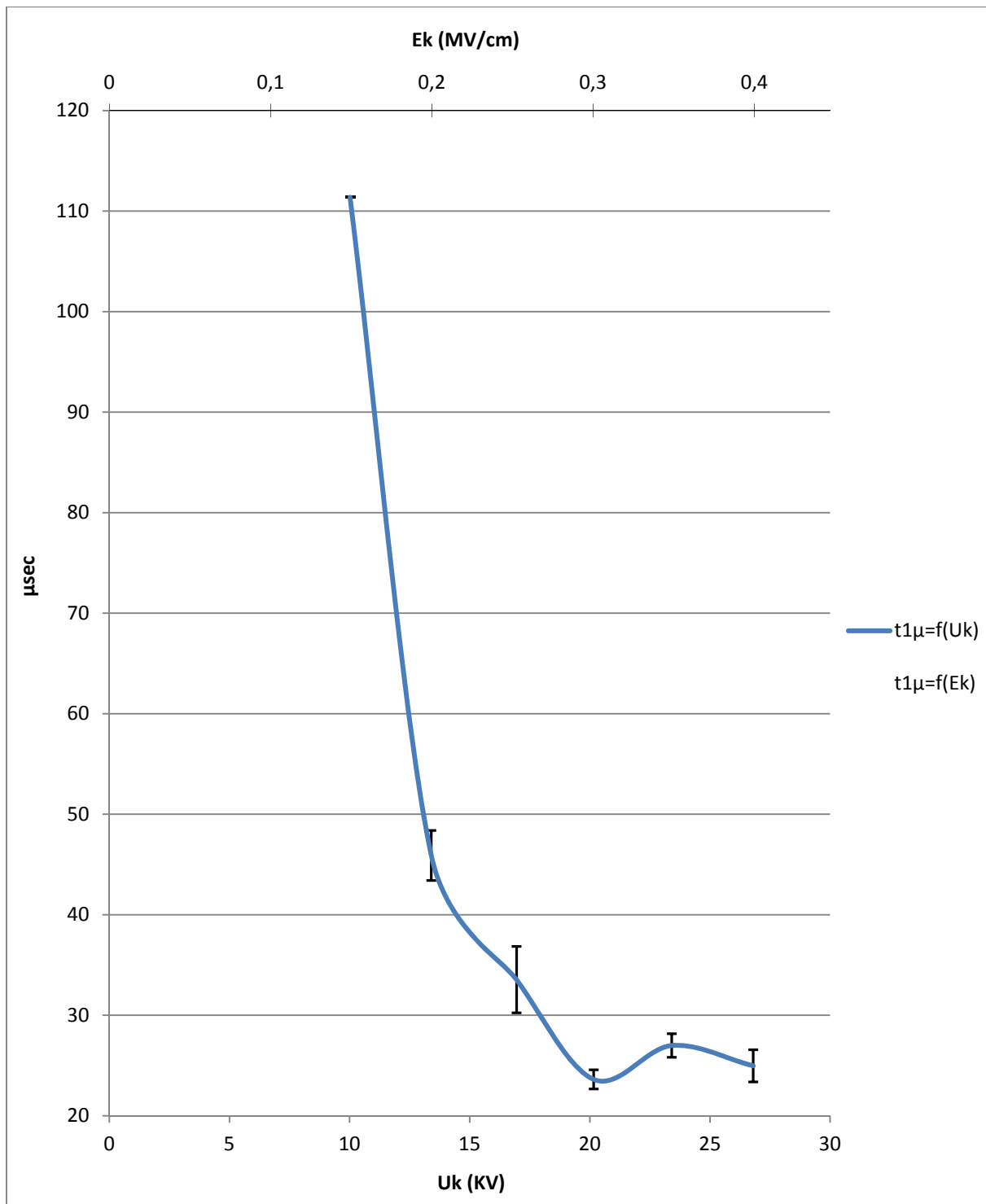
Σχήμα 3.1.2-11: Χαρακτηριστική $\Delta P=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm
 $\Delta P=P_2-P_1$
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
 P_1 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων



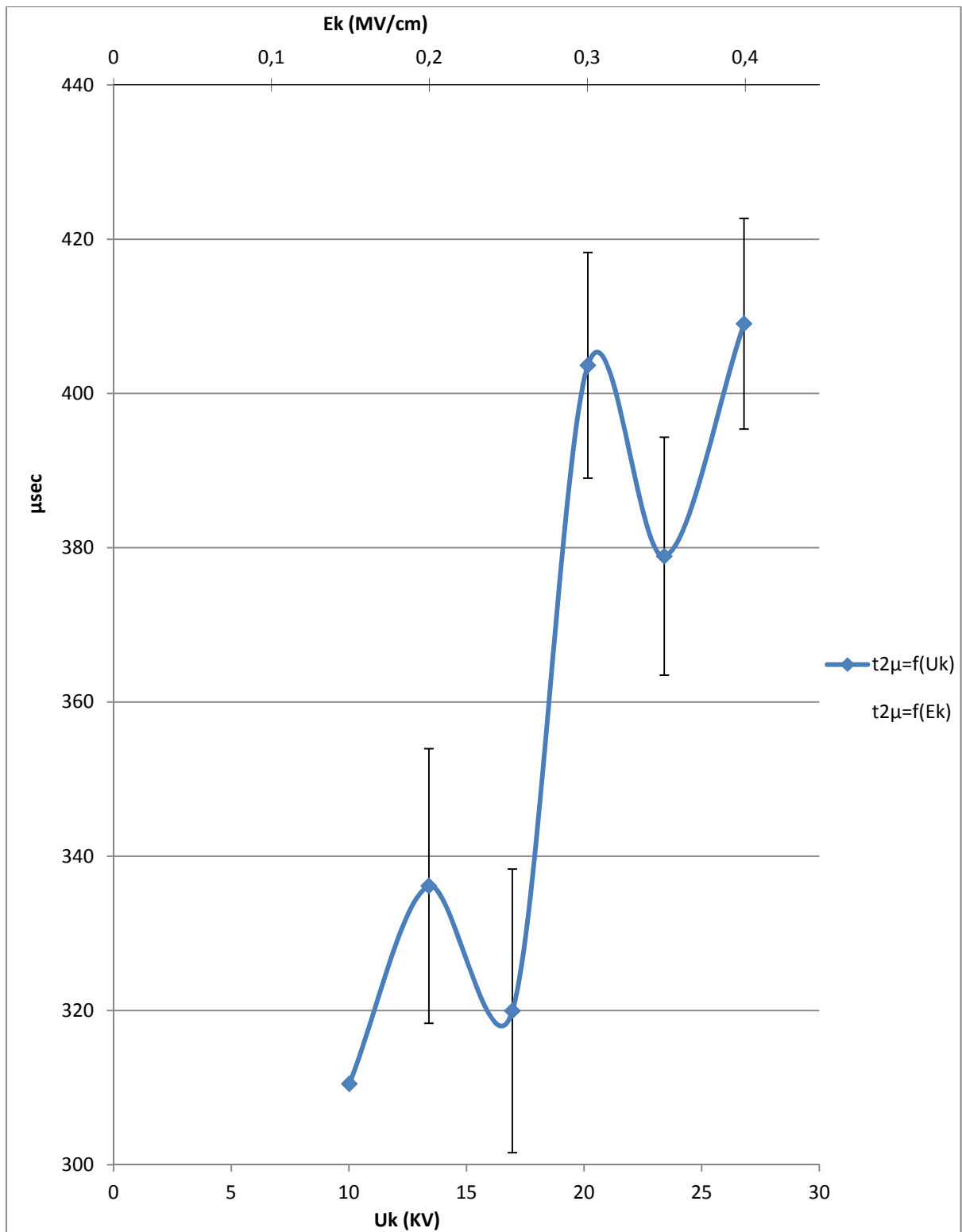
Σχήμα 3.1.2-12: Χαρακτηριστική $\Delta W_e=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος d=1mm
 ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



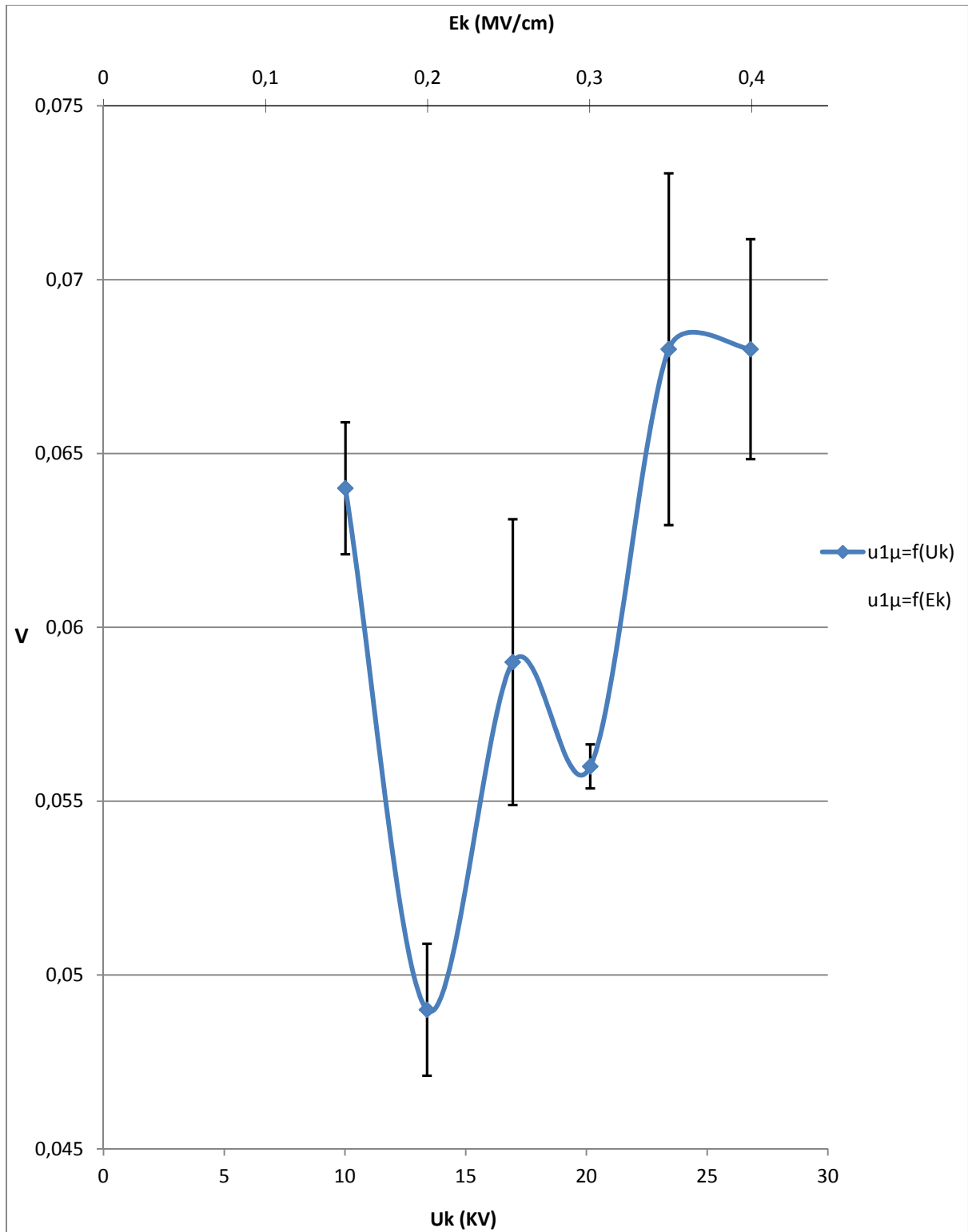
Σχήμα 3.1.2-13: Χαρακτηριστική $\Delta W_e=f(\Delta W)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος d=1mm
 ΔW : W_2-W_1
 ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 W_1 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων



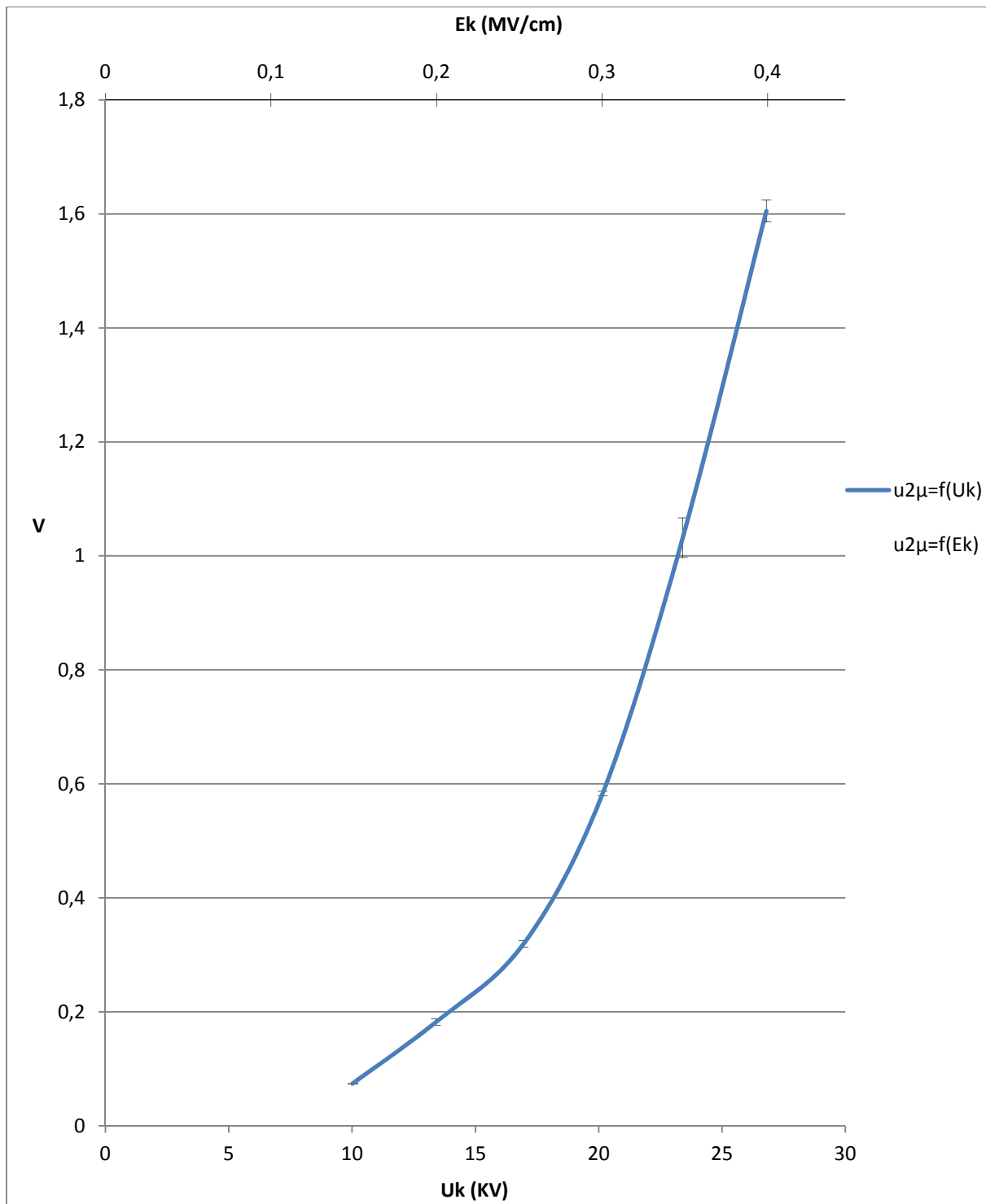
Σχήμα 3.1.2-14: Χαρακτηριστική $t_{1\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm
 $t_{1\mu}$: Μέση αναμενόμενη τιμή χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
Σημείωση: Η τυπική απόκλιση είναι αμελητέα, γι αυτό το λόγο δεν είναι εμφανής στο διάγραμμα



Σχήμα 3.1.2-15: Χαρακτηριστική $t_{2\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητα 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm
t_{2μ}: Μέση αναμενόμενη τιμή χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων
U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.1.2-16: Χαρακτηριστική $u_{1\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm
 $u_{1\mu}$: Μέση αναμενόμενη τιμή της στιγμιαίας τιμής της τάσης στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.1.2-17: Χαρακτηριστική $u_{2\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm
 $u_{2\mu}$: Μέση αναμενόμενη τιμή της στιγμιαίας τιμής της τάσης στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων
U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
Σημείωση: Η τυπική απόκλιση είναι αμελητέα, γι αυτό το λόγο δεν είναι εμφανής στο διάγραμμα

3.2 Κρουστική τάση -250/2500 μ s, πάχος δοκιμίου 1mm

U_k (KV)	t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	q_1 (μ C)	q_2 (μ C)
-10,5	-	-	0,059	-
	-	-	0,001	-
-13,78	-	-	0,175	-
	-	-	0,004	-
-17,17	126	177,75	0,1968	0,163
	3,18	41,73	0,07	0,01
-21,24	83,7	183,6	0,126	0,356
	16,31	30	0,01	0,05
-24,46	61,42	215,99	0,132	0,931
	13,22	29,26	0,016	0,2
-27,9	Διάσπαση			

Πίνακας 3.2-1: Μετρήσεις χρόνου και φορτίου κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων που εκδηλώνονται σε δοκίμιο Pertinax πάχους 2mm, με εφαρμογή θετικής κρουστικής τάσης αυξανόμενης μέγιστης τιμής, διάρκειας 250/2500 μ sec

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

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

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

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Πυκνωτής: $C_m=1000nF$

Πάχος: $d=2mm$

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

3.2.1 Πίνακες στατιστικής ανάλυσης μετρήσεων (-250/2500, d=1mm)

U_k (KV)	E_k (MV/cm)	C_m (nF)	q_1 (μ C)	q_2 (μ C)	t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	Δt (μ s)	Z_1 (Ω)	Z_2 (Ω)	ΔZ (Ω)
10,5	0,156	1000	0,059	-	-	-	-	-	-	-
13,78	0,205	1000	0,175	-	-	-	-	-	-	-
17,17	0,256	1000	0,1968	0,163	126	177,75	51,75	126	177,75	51,75
21,24	0,316	1000	0,126	0,356	83,7	183,6	99,9	83,7	183,6	99,9
24,46	0,364	1000	0,135	0,931	61,42	215,99	154,57	61,42	215,99	154,57
27,9	0,416	Διάσπαση								

Πίνακας 3.2.1-1 : Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μ F)

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

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

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt : t_2-t_1 χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

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

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

$\Delta Z=Z_2-Z_1$

U_k (KV)	E_k (MV/cm)	C_m (nF)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)	$W1$ (KWs)	$W2$ (KWs)	ΔW (KWs)	ΔW_e (ev)
10,5	0,156	1000	0,059	-	-	-	-	-	-	-	-
13,78	0,205	1000	0,175	-	-	-	-	-	-	-	-
17,17	0,256	1000	0,197	0,163	0,197	0,16	-0,03	38,7	26,569	-12	-0,09
21,24	0,316	1000	0,126	0,356	0,126	0,36	0,23	15,9	126,74	111	0,63
24,46	0,364	1000	0,135	0,931	0,135	0,93	0,80	18,2	866,76	849	2,19
27,9	0,416	Διάσπαση									

Πίνακας 3.2.1-2: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k (KV)	E_k (MV/cm)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	Δt (μs)	P_1 (MW)	P_2 (MW)	ΔP (MW)	
10,5	0,156	0,059	-	-	-	-	-	-	-	-	
13,78	0,205	0,175	-	-	-	-	-	-	-	-	
17,17	0,256	0,1968	0,163	-0,0338	126	177,75	51,75	307	149	-158	
21,24	0,316	0,126	0,356	0,23	83,7	183,6	99,9	190	690	501	
24,46	0,364	0,135	0,931	0,796	61,42	215,99	154,57	297	4013	3716	
27,9	0,416	Διάσπαση									

Πίνακας 3.2.1-3: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μF)

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας

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

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

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt : $t_2 - t_1$ χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

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

W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

ΔW : $W_2 - W_1$

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

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

ΔP : $P_2 - P_1$

ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

U_k (KV)	t_1 (μ s)	t_{1min} (μ s)	t_{1max} (μ s)	t_2 (μ s)	t_{2min} (μ s)	t_{2max} (μ s)
10,5	-	-	-	-	-	-
	-			-		
13,78	-	-	-	-	-	-
	-			-		
17,17	126	124,99	127,01	177,75	164,55	190,95
	3,18			41,73		
21,24	83,7	78,54	88,86	183,6	174,11	193,09
	16,31			30		
24,46	61,42	57,24	65,60	215,99	206,74	225,24
	13,22			29,26		
27,9	Διάσπαση					

Πίνακας 3.2.1-4: Στατιστική ανάλυση της αποκλισης της μέσης τιμής του χρόνου έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων, με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

t_{1min} : ελάχιστος αναμενόμενος χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

t_{1max} : μέγιστος αναμενόμενος χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

t_{2min} : ελάχιστος αναμενόμενος χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

t_{2max} : μέγιστος αναμενόμενος χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

Σημείωση: Η δευτερή τιμή στα μεγέθη t_1 , t_2 είναι η τυπική απόκλιση

Για τις τιμές 10,5 και 13,78 της U_k δεν παρατηρήθηκαν μερικές εκκενώσεις

U_k (KV)	C_m (nF)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	$u_{1\mu}$ (V)	u_{1min} (V)	u_{1max} (V)	$u_{2\mu}$ (V)	u_{2min} (V)	u_{2max} (V)
10,5	1000	0,059	-	0,059	0,059	0,059	-	-	-
		0,001	-						
13,78	1000	0,175	-	0,175	0,174	0,176	-	-	-
		0,004	-						
17,17	1000	0,1968	0,163	0,1968	0,175	0,219	0,163	0,141	0,185
		0,07	0,01						
21,24	1000	0,126	0,356	0,126	0,123	0,129	0,356	0,353	0,359
		0,01	0,05						
24,46	1000	0,132	0,931	0,132	0,127	0,137	0,931	0,926	0,936
		0,016	0,2						
27,9	1000	Διάσπαση							

Πίνακας 3.2.1-5: Στατιστική ανάλυση της αποκλισης της μέσης τιμής της στιγμιαίας τάσης στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη και περαίωση των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων, με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μF)

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας

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

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

u_{1min} : ελάχιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

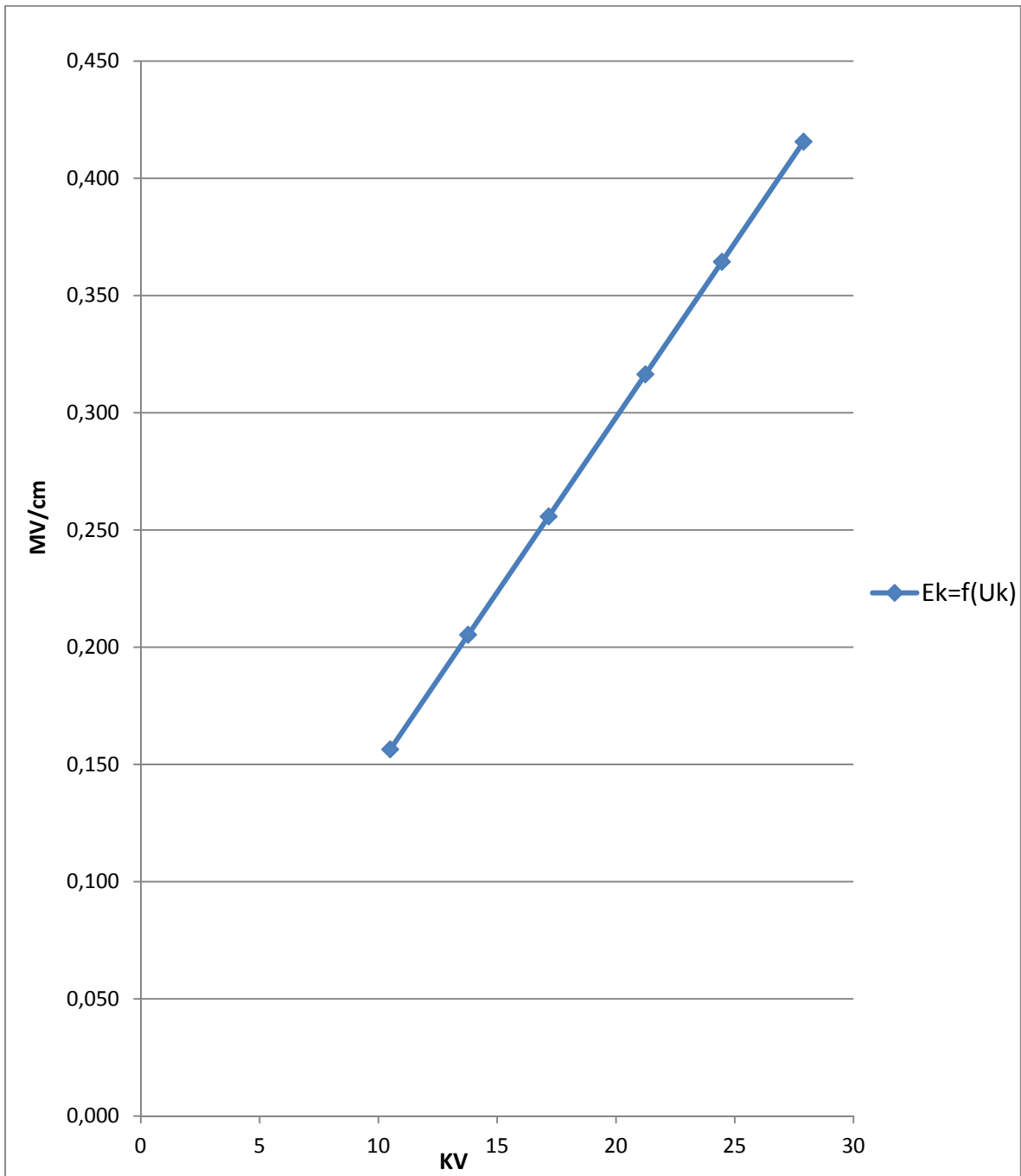
u_{1max} : μέγιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

u_{2min} : ελάχιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

u_{2max} : μέγιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

Σημείωση: Η δευτερη τιμή στα μεγέθη q_1 , q_2 είναι η τυπική απόκλιση

3.2.2 Χαρακτηριστικές της στατιστικής ανάλυσης (-250/2500, d=1mm)

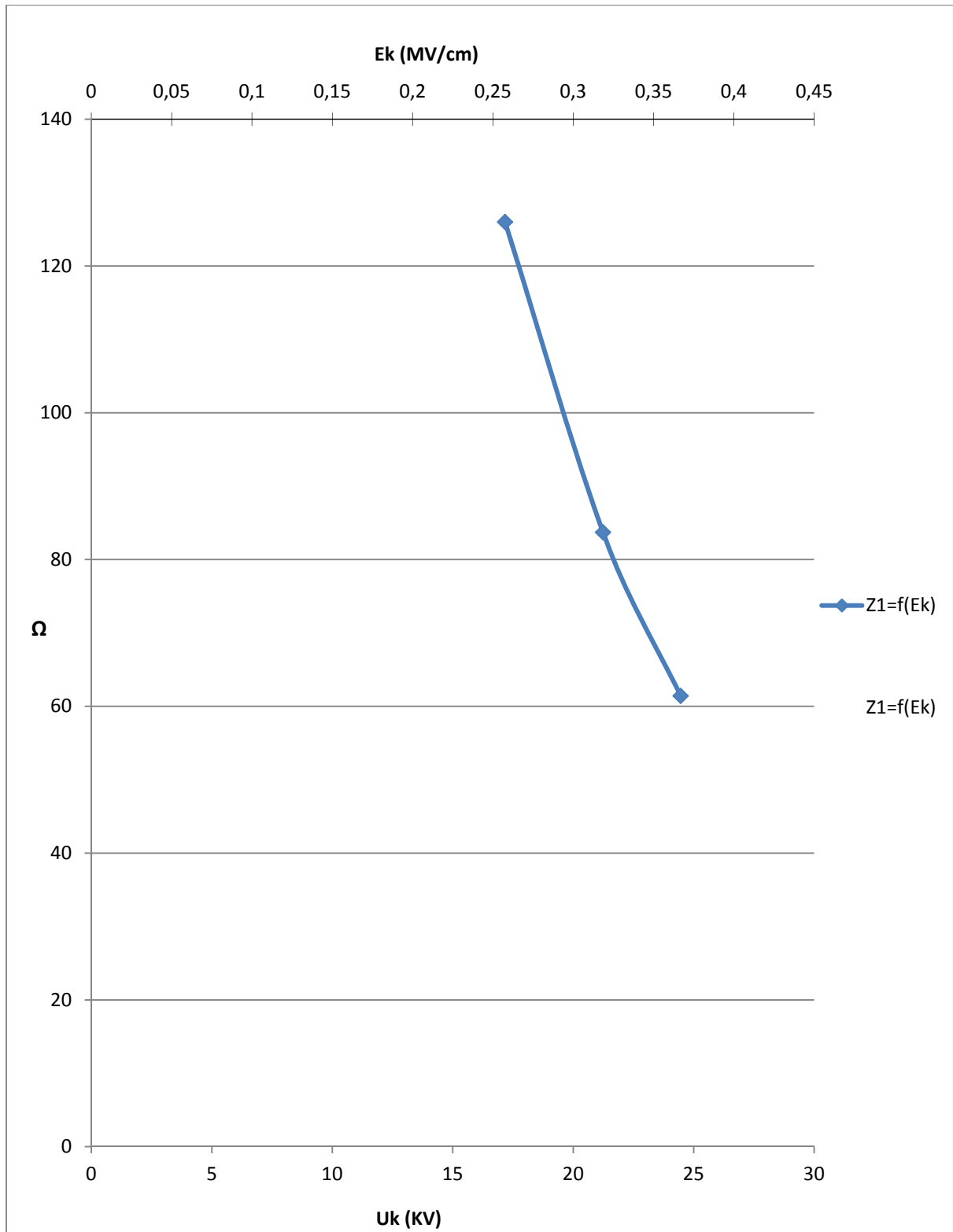


Σχήμα 3.2.2-1: Χαρακτηριστική $E_k=f(U_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση -250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

$$E_k = \frac{2U_k}{R \cdot \ln\left(\frac{4d}{R}\right)}$$

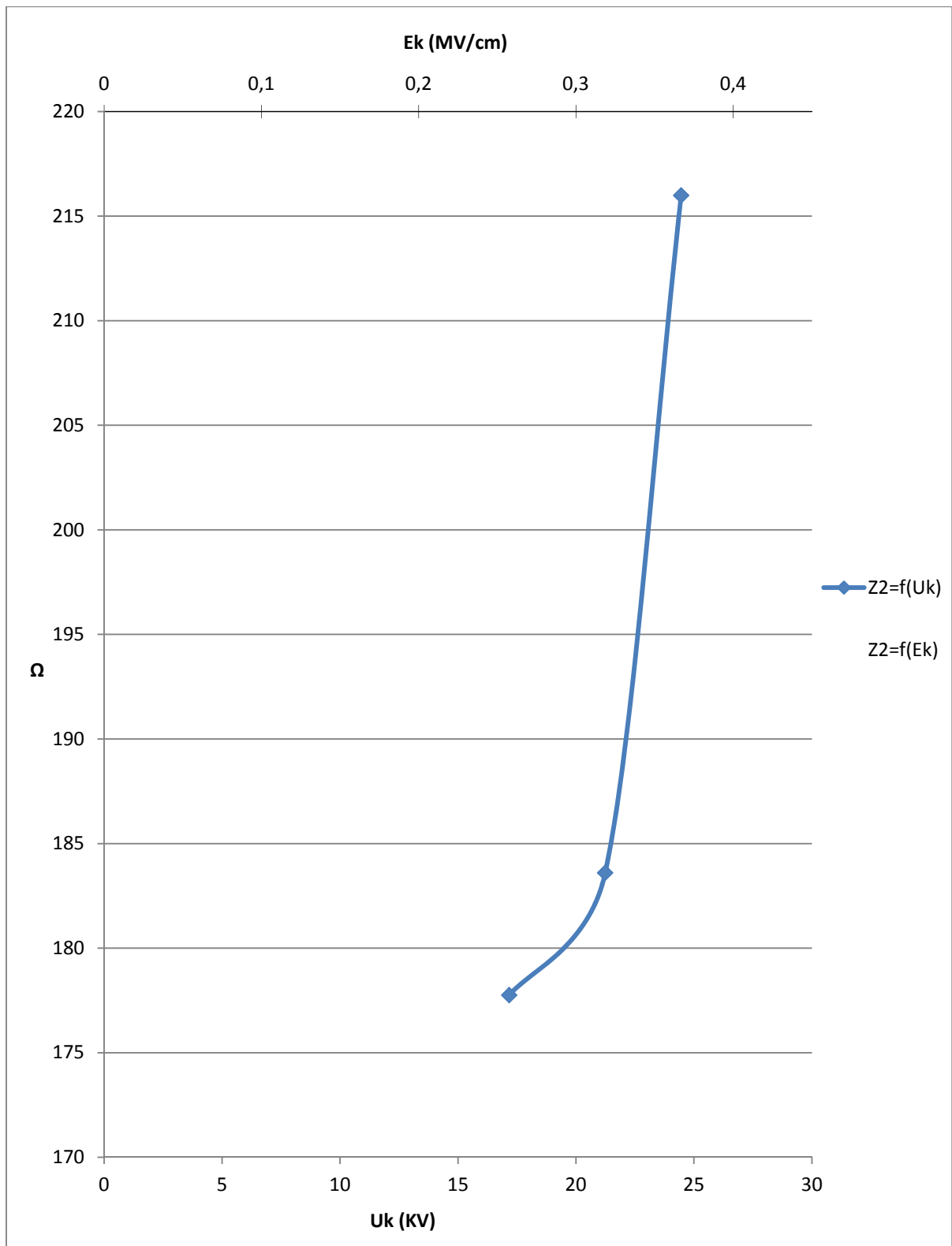


Σχήμα 3.2.2-2: Χαρακτηριστική $Z_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητα $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

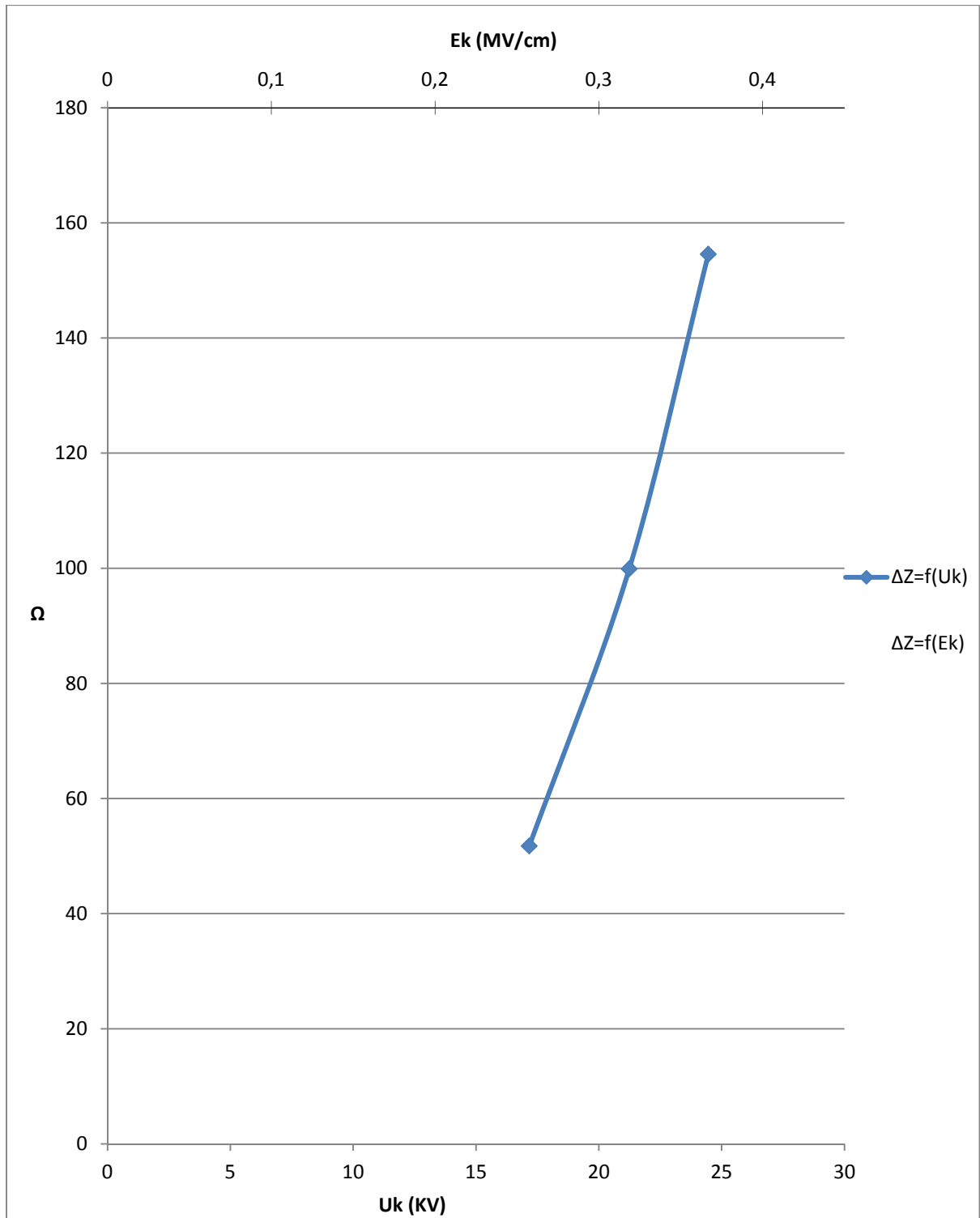
U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

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



Σχήμα 3.2.2-3: Χαρακτηριστική $Z_2=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
 Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.2.2-4: Χαρακτηριστική $\Delta Z=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

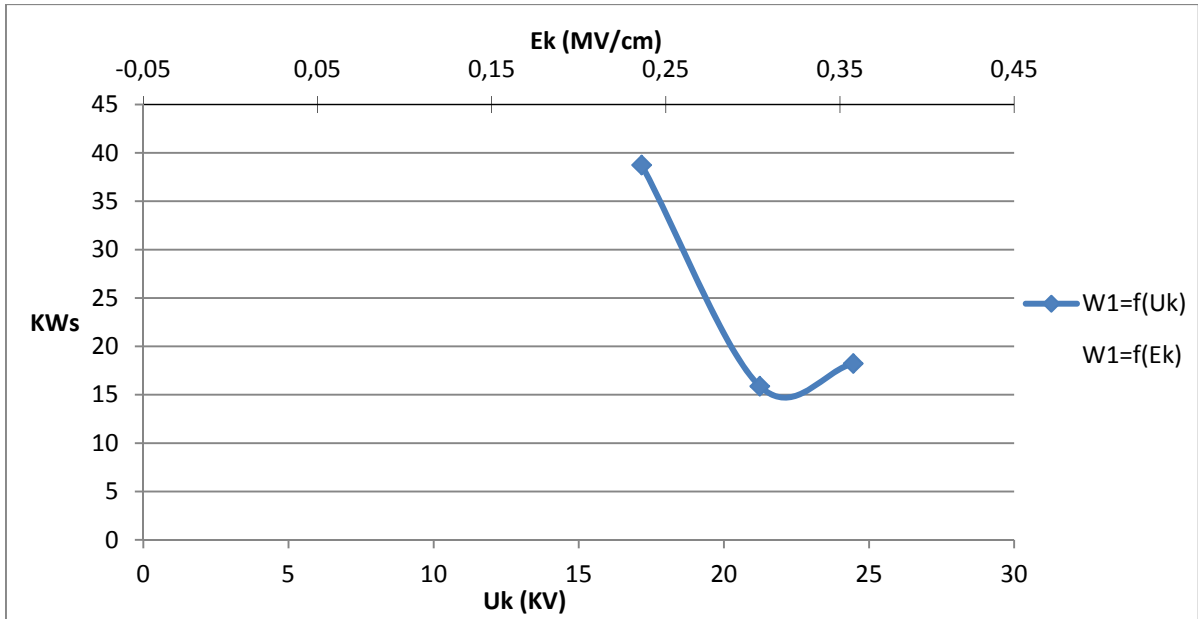
ΔZ : Z_2-Z_1

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

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

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

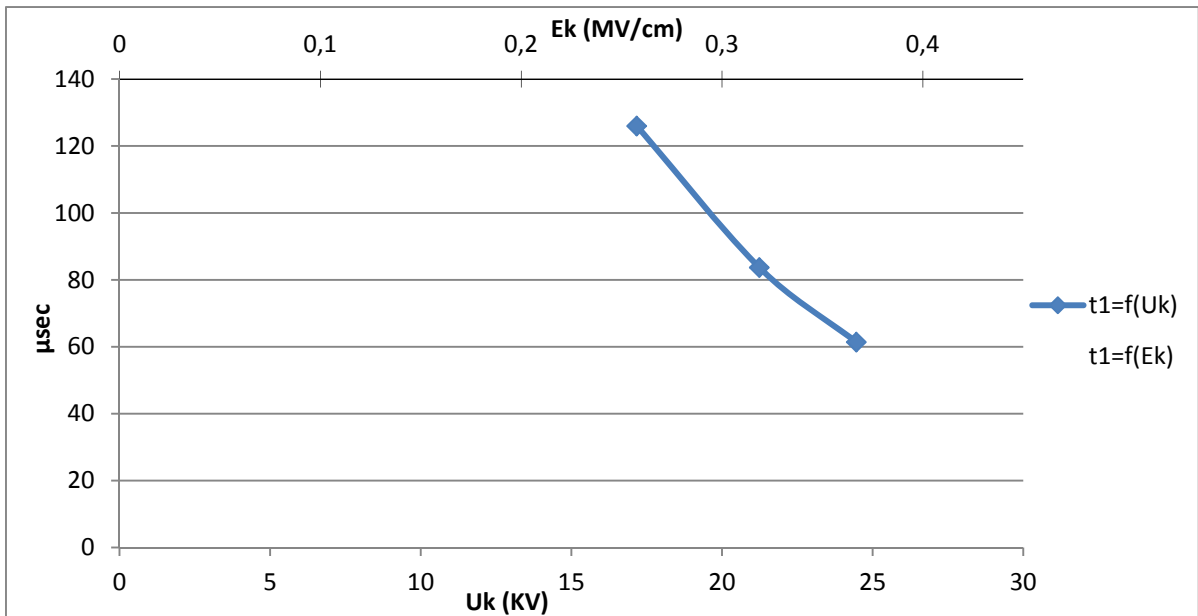


Σχήμα 3.2.2-5: Χαρακτηριστική $W_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

W₁: στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

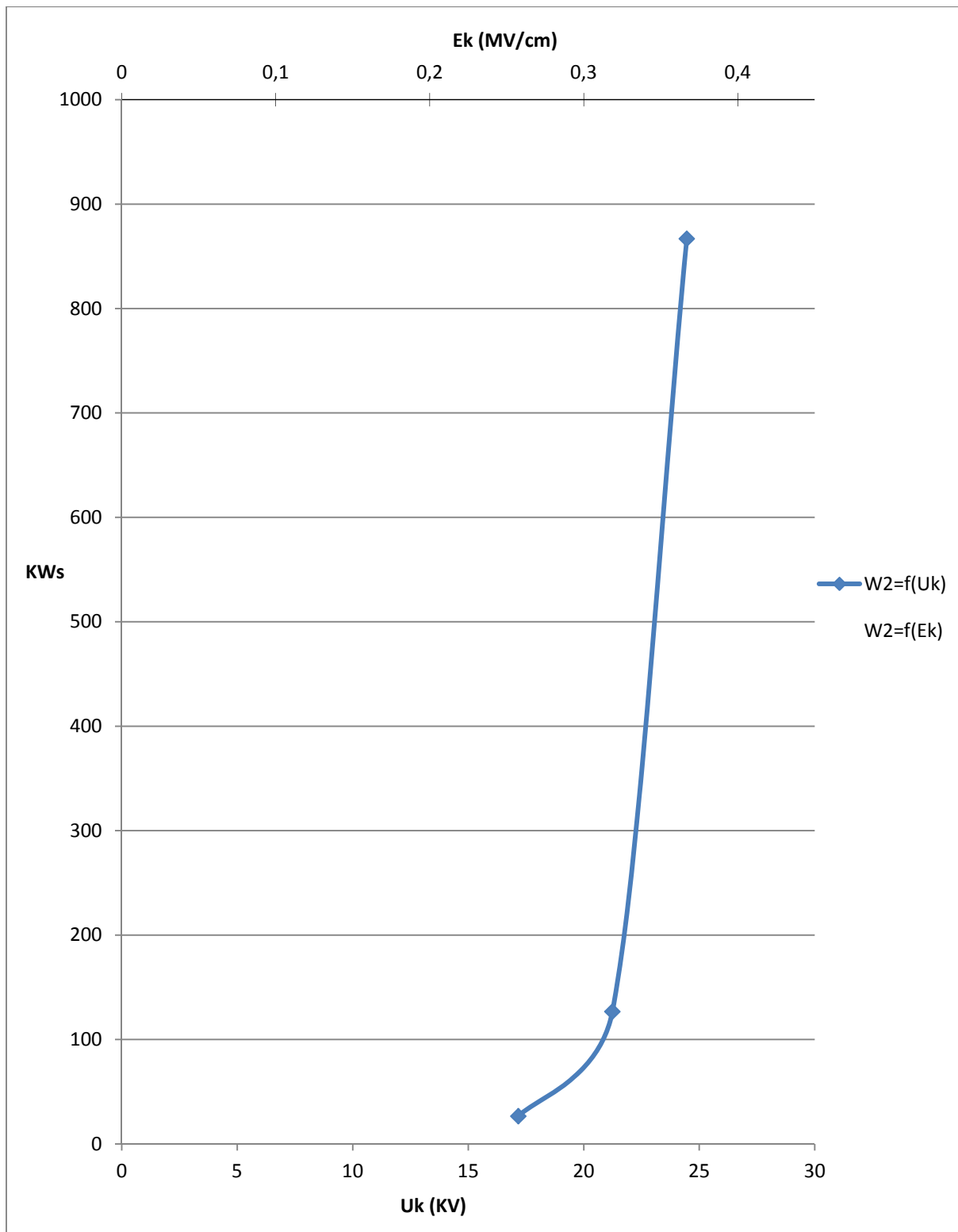


Σχήμα 3.2.2-6: Χαρακτηριστική $t_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

t₁: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

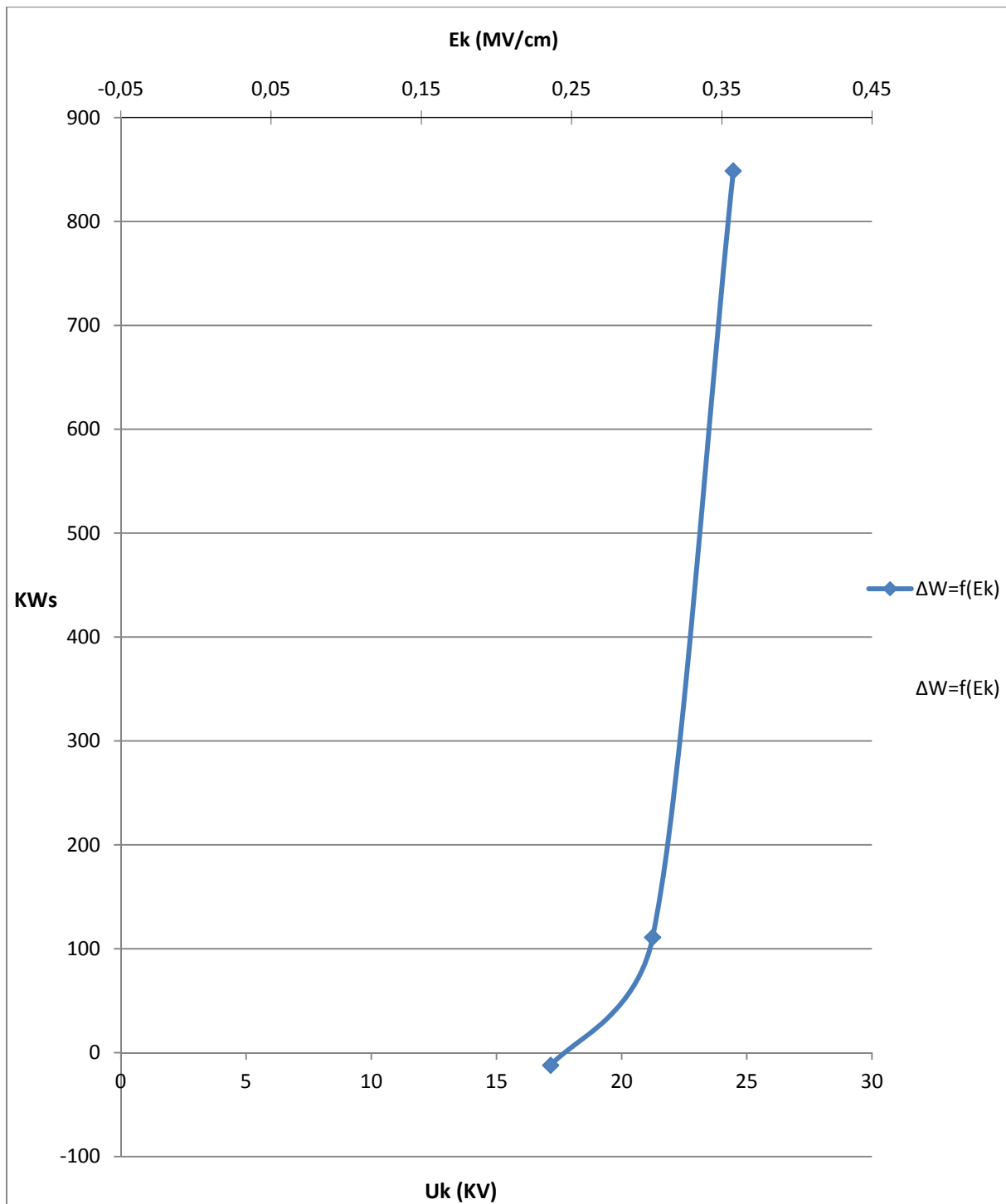


Σχήμα 3.2.2-7: Χαρακτηριστική $W_2=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

W₂: στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.2.2-8: Χαρακτηριστική $\Delta W=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση -250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm

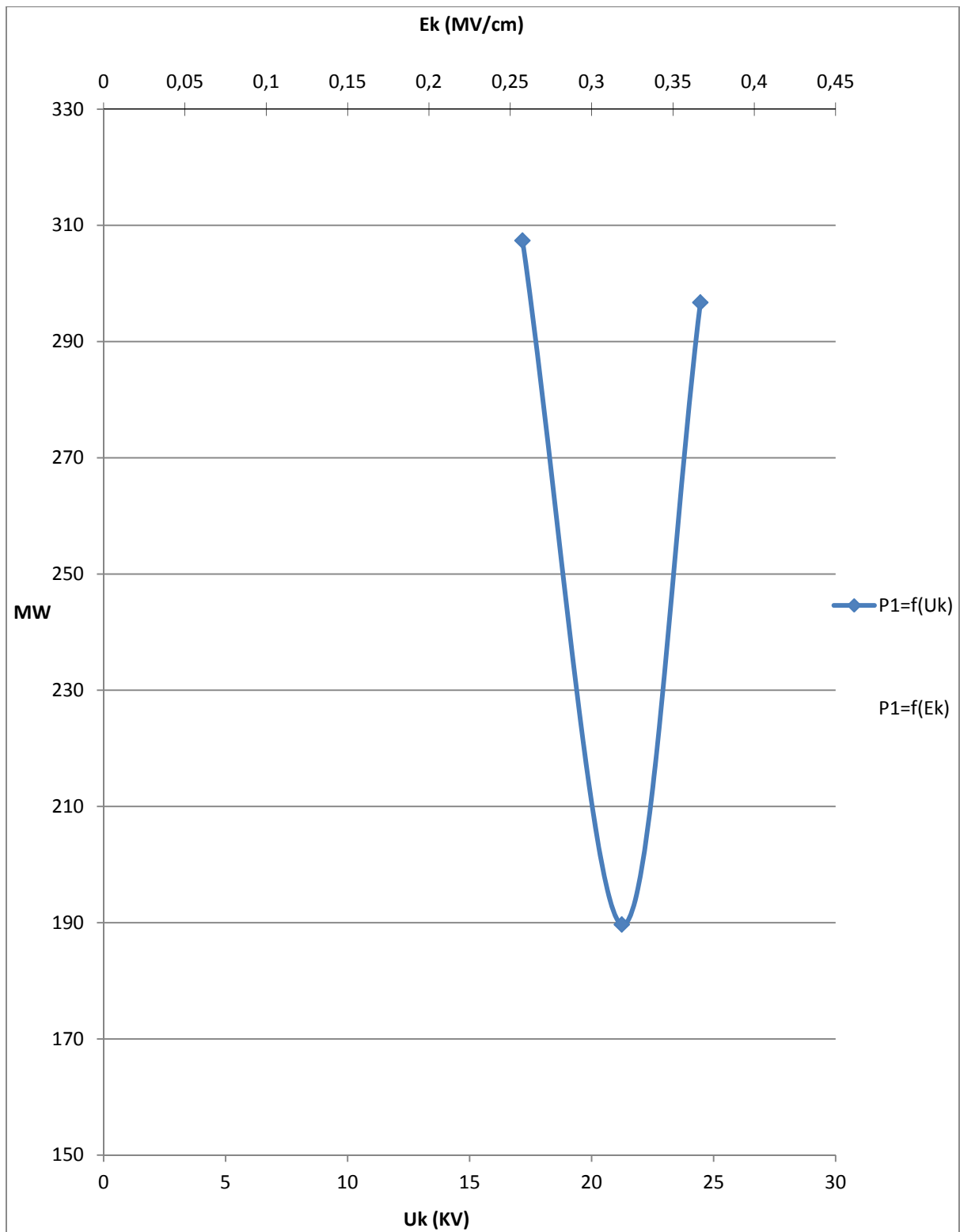
ΔW : $W_2 - W_1$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

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

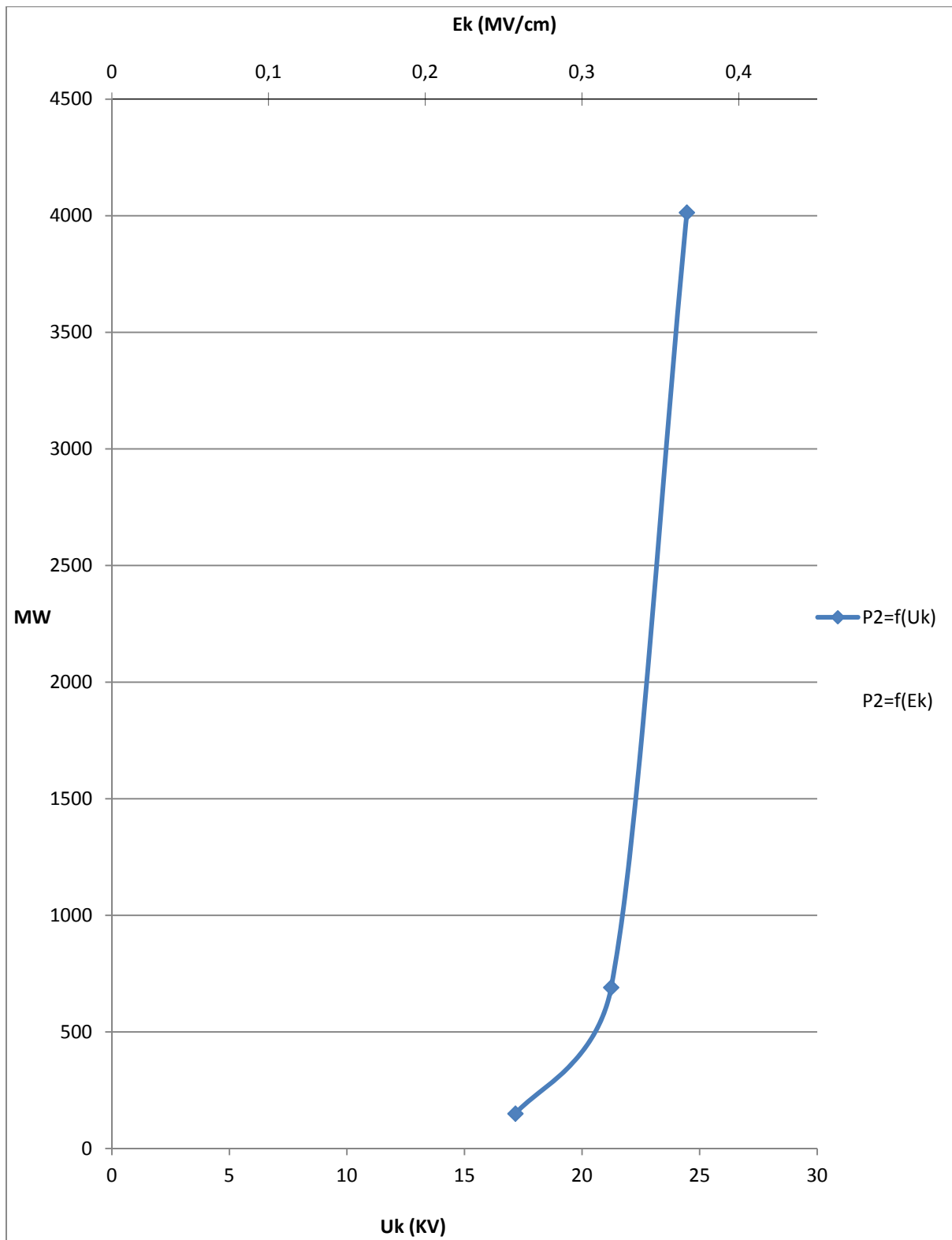


Σχήμα 3.2.2-9: Χαρακτηριστική $P_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

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

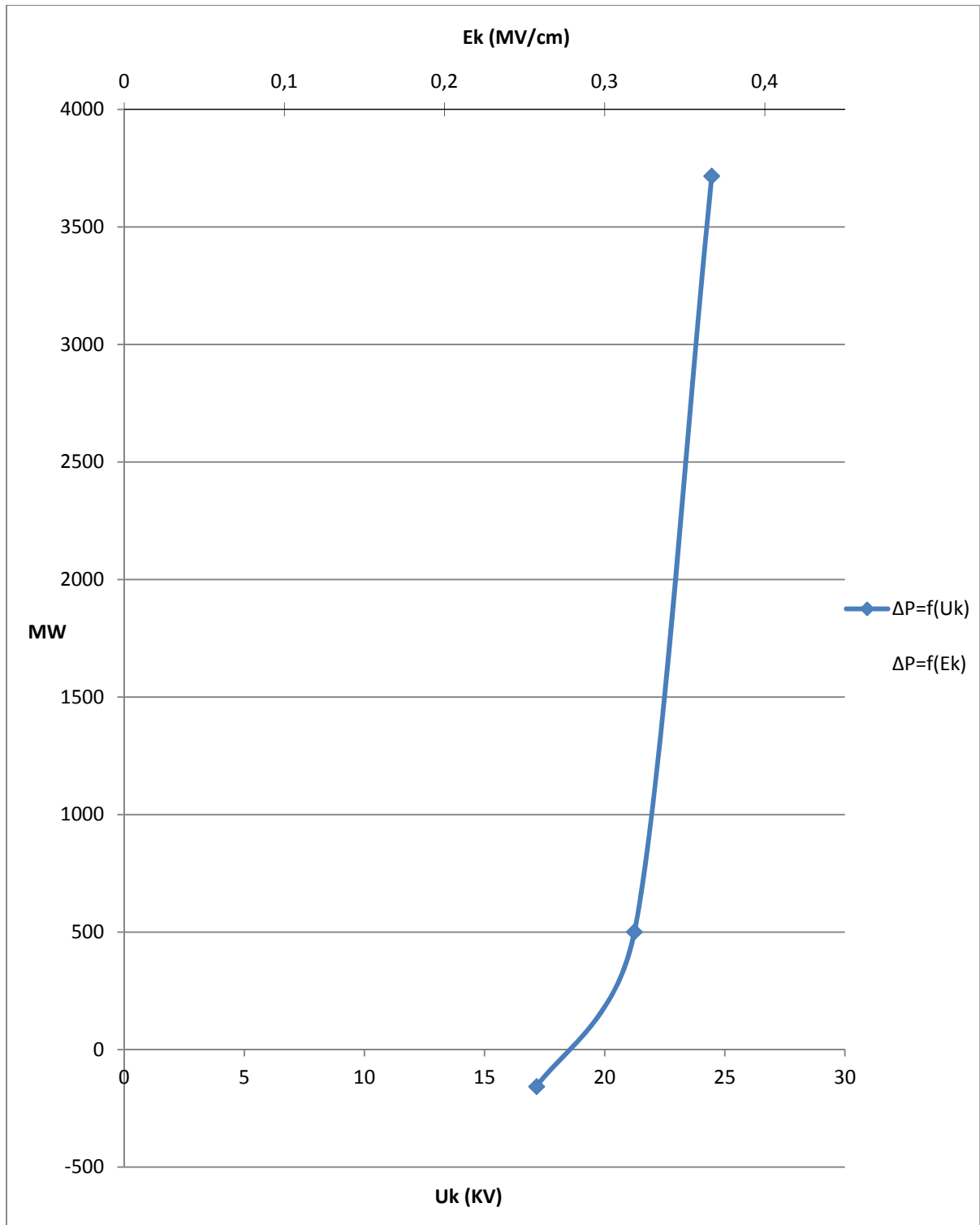


Σχήμα 3.2.2-10: Χαρακτηριστική $P_2=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση - 250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm

P₂: στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.2.2-11: Χαρακτηριστική $\Delta P=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

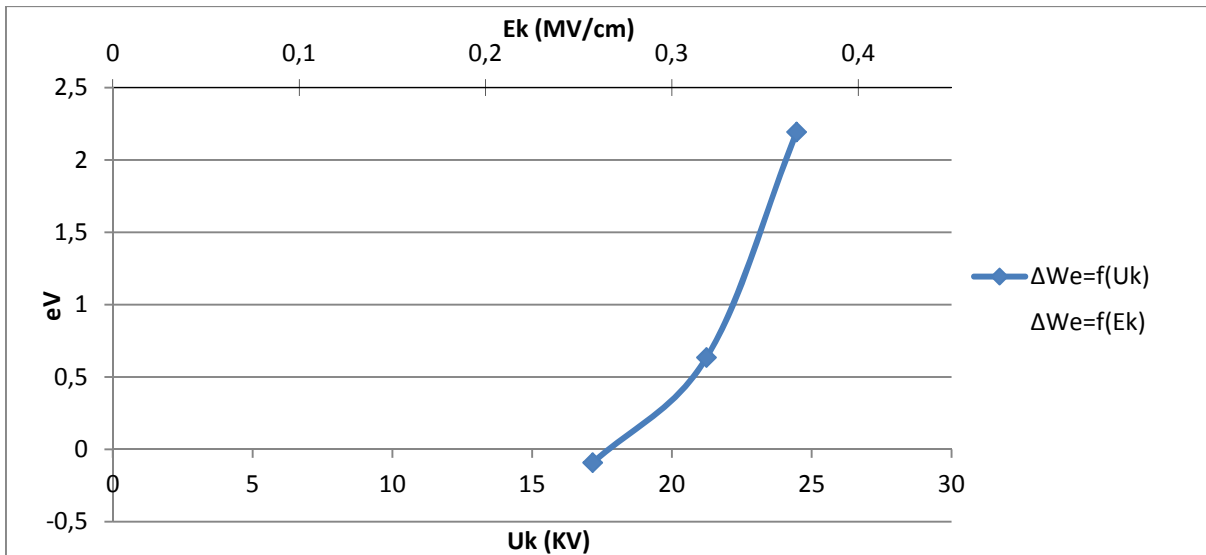
$$\Delta P = P_2 - P_1$$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

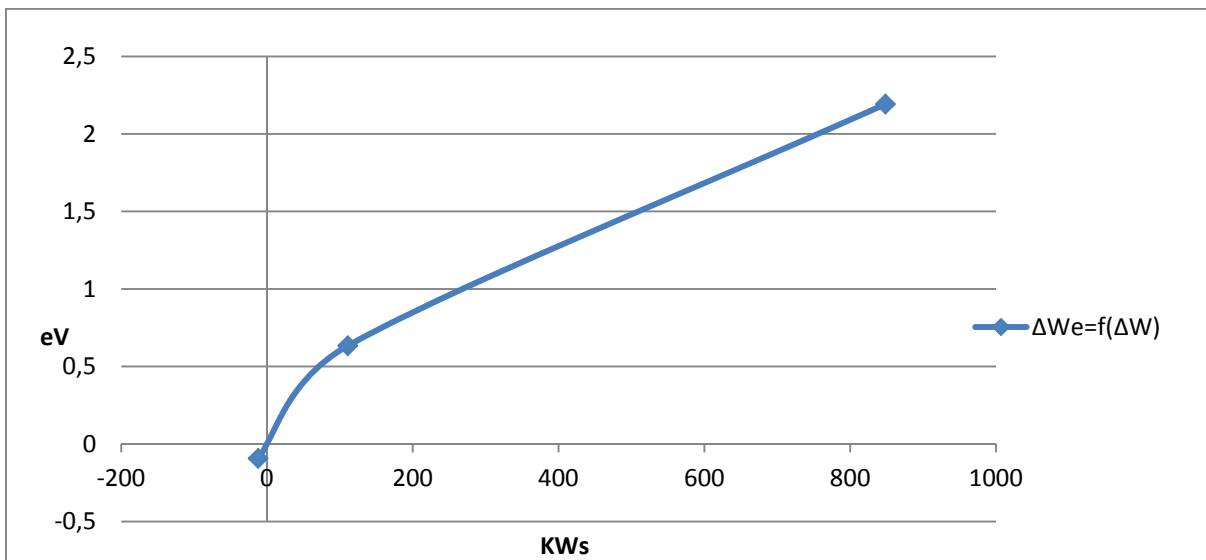
E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

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

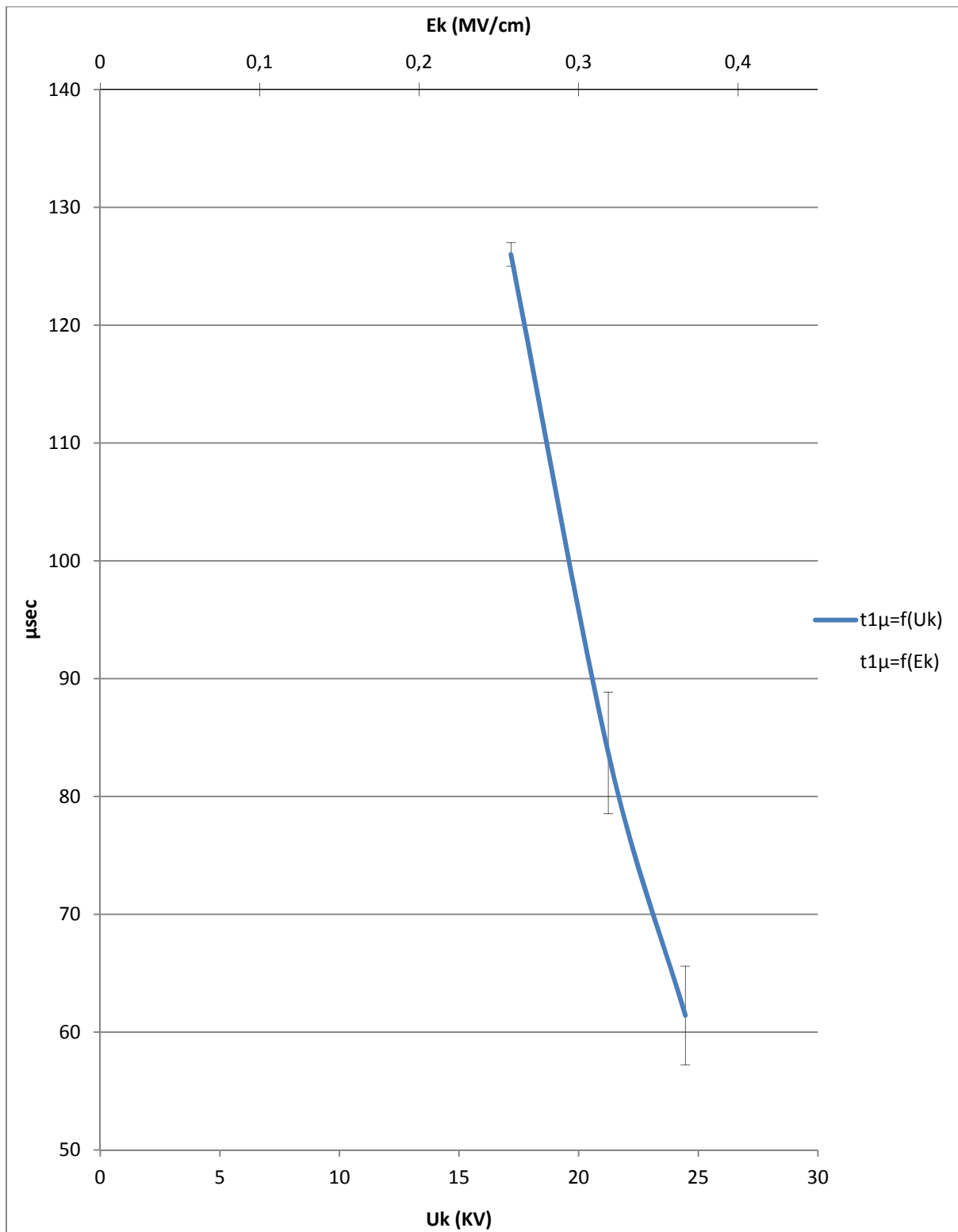
P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.2.2-12: Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση -250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm
 ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.2.2-13: Χαρακτηριστική $\Delta W_e = f(\Delta W)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση -250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm
 ΔW : $W_2 - W_1$
 ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 W_2 : Στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 W_1 : Στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

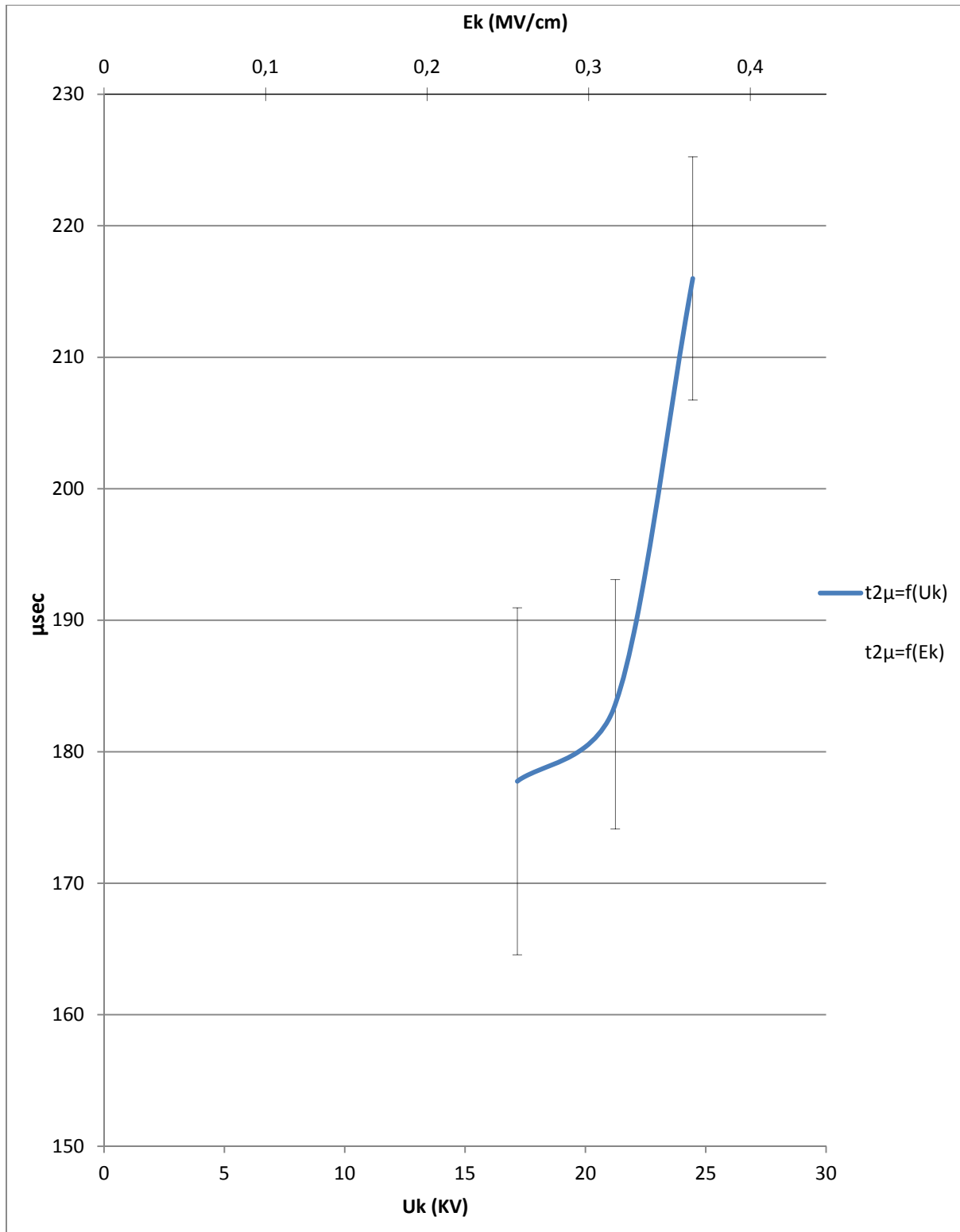


Σχήμα 3.2.2-14: Χαρακτηριστική $t_{1\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση -250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm

t_{1μ}: Μέση αναμενόμενη τιμή χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

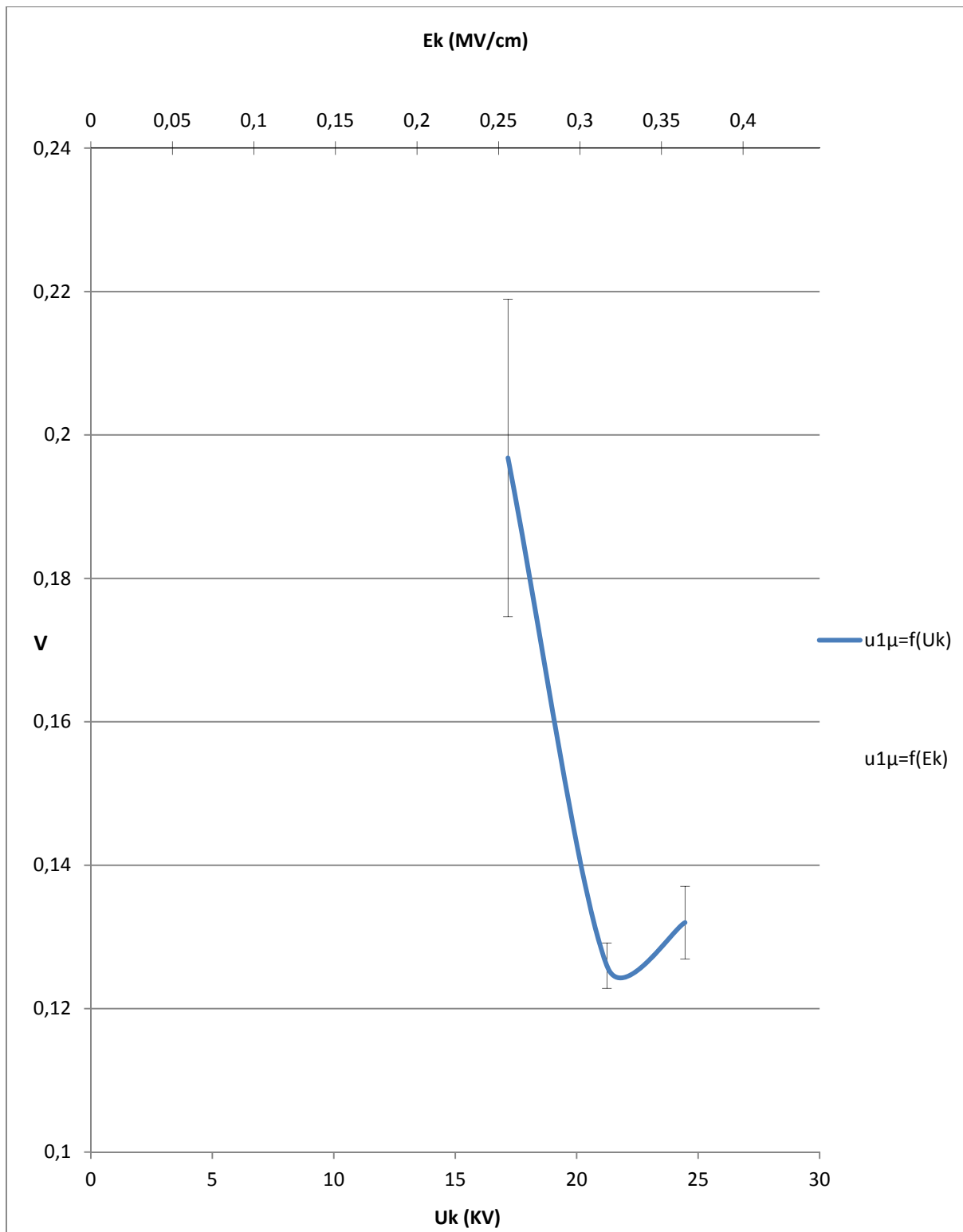


Σχήμα 3.2.2-15: Χαρακτηριστική $t_{2\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

$t_{2\mu}$: Μέση αναμενόμενη τιμή χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

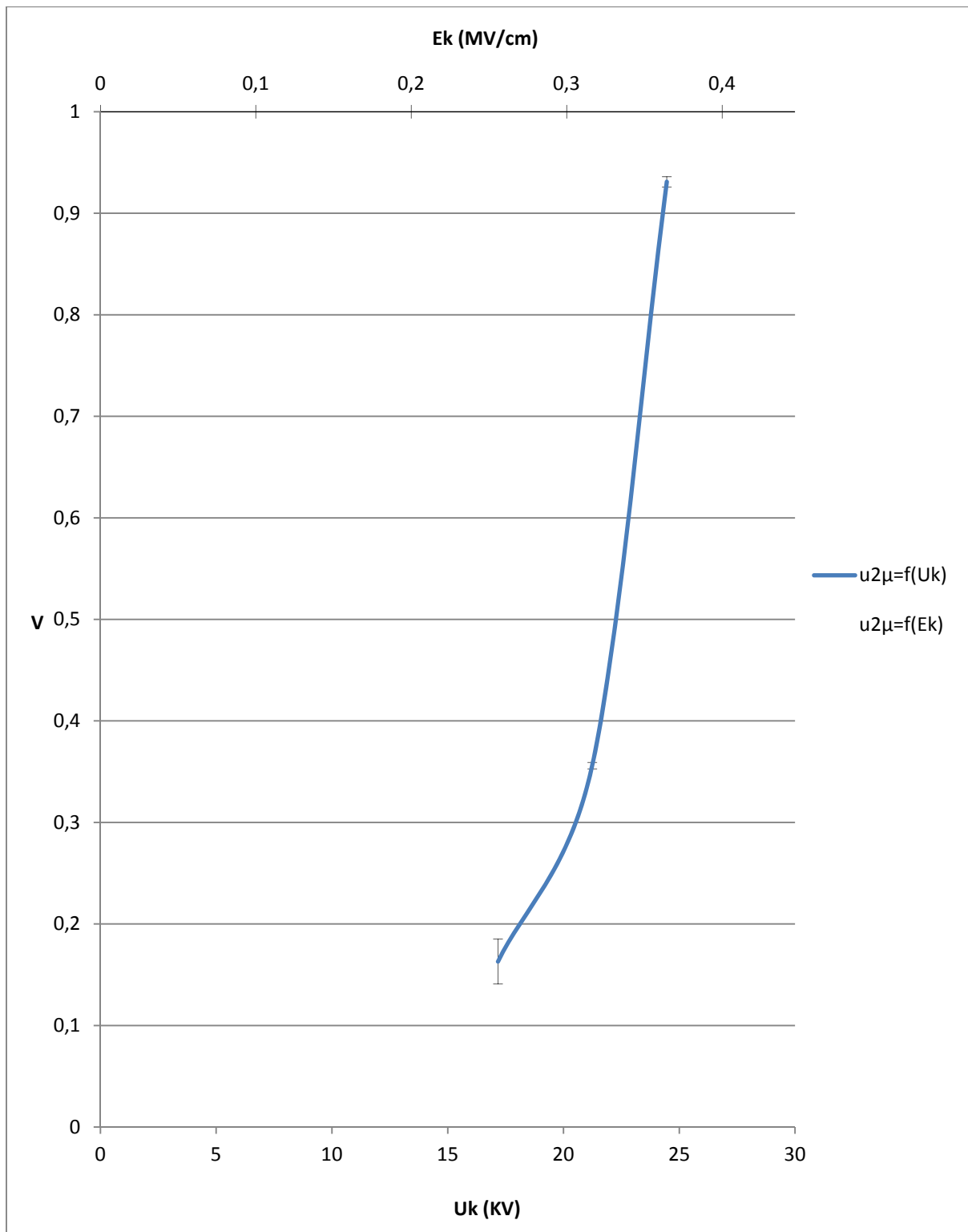


Σχήμα 3.2.2-16: Χαρακτηριστική $u_{1\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση -250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm

u_{1μ}: Μέση αναμενόμενη τιμή της στιγμιαίας τιμής της τάσης στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.2.2-17: Χαρακτηριστική $u_{2\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

$u_{2\mu}$: Μέση αναμενόμενη τιμή της στιγμιαίας τιμής της τάσης στον C_m κατά το πέρασμα των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

3.3 Κρουστική τάση +250/2500 μ s, πάχος δοκιμίου 2mm

U_k (KV)	t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	q_1 (μ C)	q_2 (μ C)
10,35	-	-	0,0168	-
	-	-	0,001	-
14,1	73,44	280,8	0,02	0,04
	18,08	32,68	0,001	0,001
17,45	41,85	371,2	0,018	0,069
	5,07	42,02	0,002	0,002
21	30,37	394,5	0,014	0,104
	2,52	26,03	0,001	0,004
23,83	31,72	346,95	0,031	0,293
	8,43	35,1	0,069	0,012
27,4	28,75	400,95	0,066	0,702
	6,07	41,25	0,022	0,029
31,05	22,27	373,95	0,059	1,046
	1,65	34,31	0,008	0,076
34,5	18,49	363,15	0,07	1,45
	3,85	58,44	0,018	0,052
37,78	33,07	437,39	0,231	1,7
	12,87	30,01	0,11	0,081
41,64	17,55	446,85	0,116	2,433
	5,4	8,95	0,01	0,08
44,72	16,2	464,4	0,094	3,28
	3,3	13,08	0,01	0,081

Πίνακας 3.3-1: Μετρήσεις χρόνου και φορτίου κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων που εκδηλώνονται σε δοκίμιο Pertinax πάχους 2mm, με εφαρμογή θετικής κρουστικής τάσης αυξανόμενης μέγιστης τιμής, διάρκειας 250/2500 μ sec
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

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

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

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Πυκνωτής: $C_m=1000nF$

Πάχος: $d=2mm$

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

Για $U_k=10,35KV$ δεν παρατηρήθηκαν μερικές εκκενώσεις

3.3.1 Πίνακες στατιστικής ανάλυσης μετρήσεων (+250/2500, d=2mm)

U_k (KV)	E_k (MV/cm)	C_m (nF)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	Δt (μs)	Z_1 (Ω)	Z_2 (Ω)	ΔZ (Ω)
10,35	0,105	1000	0,0168	-	-	-	-	-	-	-
14,1	0,143	1000	0,02	0,04	73,44	280,8	207,36	73,44	280,8	207,36
17,45	0,177	1000	0,018	0,069	41,85	371,2	329,35	41,85	371,2	329,35
21	0,214	1000	0,014	0,104	30,37	394,5	364,13	30,37	394,5	364,13
23,83	0,242	1000	0,031	0,293	31,72	346,95	315,23	31,72	346,95	315,23
27,4	0,279	1000	0,066	0,702	28,75	400,95	372,2	28,75	400,95	372,2
31,05	0,316	1000	0,059	1,046	22,27	373,95	351,68	22,27	373,95	351,68
34,5	0,351	1000	0,07	1,45	18,49	363,15	344,66	18,49	363,15	344,66
37,78	0,384	1000	0,231	1,7	33,07	437,39	404,32	33,07	437,39	404,32
41,64	0,424	1000	0,116	2,433	17,55	446,85	429,3	17,55	446,85	429,3
44,72	0,455	1000	0,097	3,28	16,2	464,4	448,2	16,2	464,4	448,2

- Πίνακας 3.3.1-1:** Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14
- U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
 C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μF)
 u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας
 q_1 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 q_2 : στιγμιαία τιμή του φορτίου στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων των μερικών εκκενώσεων
 t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων
 Δt : t_2-t_1 χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων
 Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 $\Delta Z=Z_2-Z_1$

U_k (KV)	E_k (MV/cm)	C_m (nF)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)	W_1 (KWs)	W_2 (KWs)	ΔW (KWs)	ΔW_e (ev)
10,35	0,11	1000	0,017		0,017	0,00	-0,017	282	0,0	-0,28	-0,05
14,1	0,14	1000	0,02	0,040	0,020	0,04	0,020	400	1,6	1,20	0,06
17,45	0,18	1000	0,018	0,069	0,018	0,07	0,051	324	4,8	4,44	0,14
21	0,21	1000	0,014	0,104	0,014	0,10	0,090	196	10,8	10,62	0,25
23,83	0,24	1000	0,031	0,293	0,031	0,29	0,262	961	85,8	84,9	0,72
27,4	0,28	1000	0,066	0,702	0,066	0,70	0,636	4356	493	488	1,75
31,05	0,32	1000	0,059	1,046	0,059	1,05	0,987	3481	1094	1091	2,72
34,5	0,35	1000	0,07	1,450	0,070	1,45	1,380	4900	2103	2098	3,80
37,78	0,38	1000	0,231	1,700	0,231	1,70	1,469	53361	2890	2837	4,05
41,64	0,42	1000	0,116	2,433	0,116	2,43	2,317	13456	5919	5906	6,38
44,72	0,45	1000	0,097	3,280	0,097	3,28	3,183	9409	10758	10749	8,77

Πίνακας 3.3.1-2: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μF)

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας

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

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

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

W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

ΔW : $W_2 - W_1$

ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

U_k (KV)	E_k (MV/cm)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)	t_1 (ms)	t_2 (μ s)	Δt (μ s)	P_1 (MW)	P_2 (MW)	ΔP (MW)
10,35	0,1053	0,0168	-	-	-	-	-	-	-	-
14,1	0,1434	0,02	0,04	0,02	73,44	280,8	207,36	5,4	6	0,3
17,45	0,1775	0,018	0,069	0,051	41,85	371,2	329,35	7,7	13	5,1
21	0,2136	0,014	0,104	0,09	30,37	394,5	364,13	6,5	27	21
23,83	0,2424	0,031	0,293	0,262	31,72	346,95	315,23	30,3	247	217
27,4	0,2787	0,066	0,702	0,636	28,75	400,95	372,2	151,5	1229	1078
31,05	0,3158	0,059	1,046	0,987	22,27	373,95	351,68	156,3	2926	2770
34,5	0,3509	0,07	1,45	1,38	18,49	363,15	344,66	265,0	5790	5525
37,78	0,3843	0,231	1,7	1,469	33,07	437,39	404,32	1613,6	6607	4994
41,64	0,4235	0,116	2,433	2,317	17,55	446,85	429,3	766,7	13247	12480
44,72	0,4549	0,097	3,28	3,183	16,2	464,4	448,2	580,8	23166	22585

Πίνακας 3.3.1-3: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μ F)

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt : t_2-t_1 χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

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

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

ΔP : P_2-P_1

ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

U_k (KV)	t_1 (μ s)	t_{1min} (μ s)	t_{1max} (μ s)	t_2 (μ s)	t_{2min} (μ s)	t_{2max} (μ s)
10,35	-	-	-	-	-	-
	-			-		
14,1	73,44	67,72	79,16	280,8	270,47	291,13
	18,08			32,68		
17,45	41,85	40,25	43,45	371,2	357,91	384,49
	5,07			42,02		
21	30,37	29,57	31,17	394,5	386,27	402,73
	2,52			26,03		
23,83	31,72	29,05	34,39	346,95	335,85	358,05
	8,43			35,1		
27,4	28,75	26,83	30,67	400,95	387,91	413,99
	6,07			41,25		
31,05	22,27	21,75	22,79	373,95	363,10	384,80
	1,65			34,31		
34,5	18,49	17,27	19,71	363,15	344,67	381,63
	3,85			58,44		
37,78	33,07	29,00	37,14	437,39	427,90	446,88
	12,87			30,01		
41,64	17,55	15,84	19,26	446,85	444,02	449,68
	5,4			8,95		
44,72	16,2	15,16	17,24	464,4	460,26	468,54
	3,3			13,08		

Πίνακας 3.3.1-4: Στατιστική ανάλυση της αποκλισης της μέσης τιμής του χρόνου έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων, με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

t_{1min} : ελάχιστος αναμενόμενος χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

t_{1max} : μέγιστος αναμενόμενος χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

t_{2min} : ελάχιστος αναμενόμενος χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

t_{2max} : μέγιστος αναμενόμενος χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή στα μεγέθη t_1 , t_2 είναι η τυπική απόκλιση

U_k (KV)	C_m (nF)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	$u_{1\mu}$ (V)	u_{1min} (V)	u_{1max} (V)	$u_{2\mu}$ (V)	u_{2min} (V)	u_{2max} (V)
10,35	1000	0,0168	-	-	-	-	-	-	-
		0,001	-						
14,1	1000	0,02	0,04	0,02	0,020	0,020	0,04	0,040	0,040
		0,001	0,001						
17,45	1000	0,018	0,069	0,018	0,017	0,019	0,069	0,068	0,070
		0,002	0,002						
21	1000	0,014	0,104	0,014	0,014	0,014	0,104	0,103	0,105
		0,001	0,004						
23,83	1000	0,031	0,293	0,031	0,009	0,053	0,293	0,289	0,297
		0,069	0,012						
27,4	1000	0,066	0,702	0,066	0,059	0,073	0,702	0,693	0,711
		0,022	0,029						
31,05	1000	0,059	1,046	0,059	0,056	0,062	1,046	1,022	1,070
		0,008	0,076						
34,5	1000	0,07	1,45	0,07	0,064	0,076	1,45	1,434	1,466
		0,018	0,052						
37,78	1000	0,231	1,7	0,231	0,196	0,266	1,7	1,674	1,726
		0,11	0,081						
41,64	1000	0,116	2,433	0,116	0,113	0,119	2,433	2,408	2,458
		0,01	0,08						
44,72	1000	0,094	3,28	0,094	0,091	0,097	3,28	3,254	3,306
		0,01	0,081						

Πίνακας 3.3.1-5: Στατιστική ανάλυση της αποκλισης της μέσης τιμής της στιγμιαίας τάσης στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη και περαίωση των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων, με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μF)

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας

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

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

u_{1min} : ελάχιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

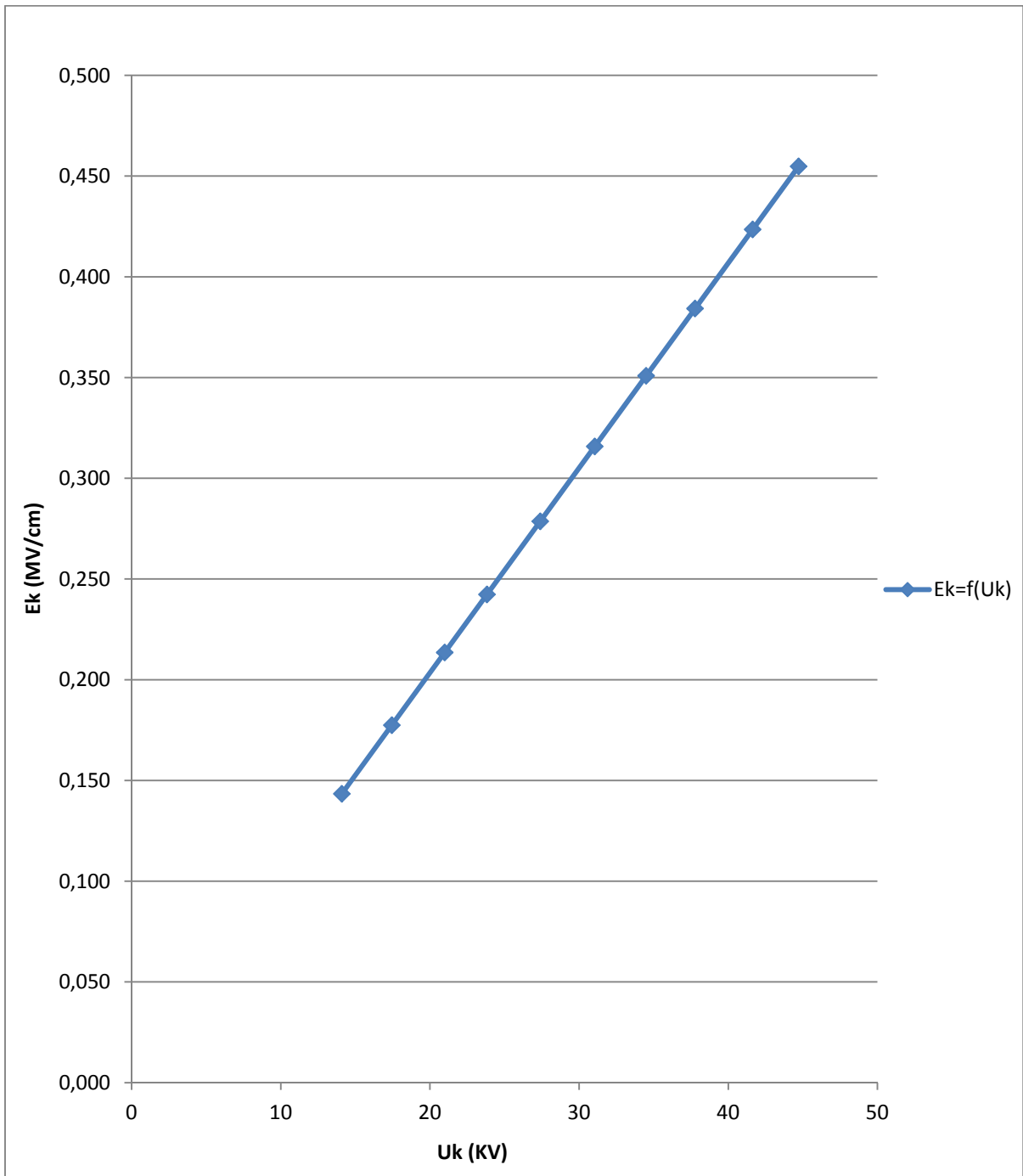
u_{1max} : μέγιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

u_{2min} : ελάχιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

u_{2max} : μέγιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

Σημείωση: Η δεύτερη τιμή στα μεγέθη q_1 , q_2 είναι η τυπική απόκλιση

3.3.2 Χαρακτηριστικές της στατιστικής ανάλυσης (+250/2500, d=2mm)

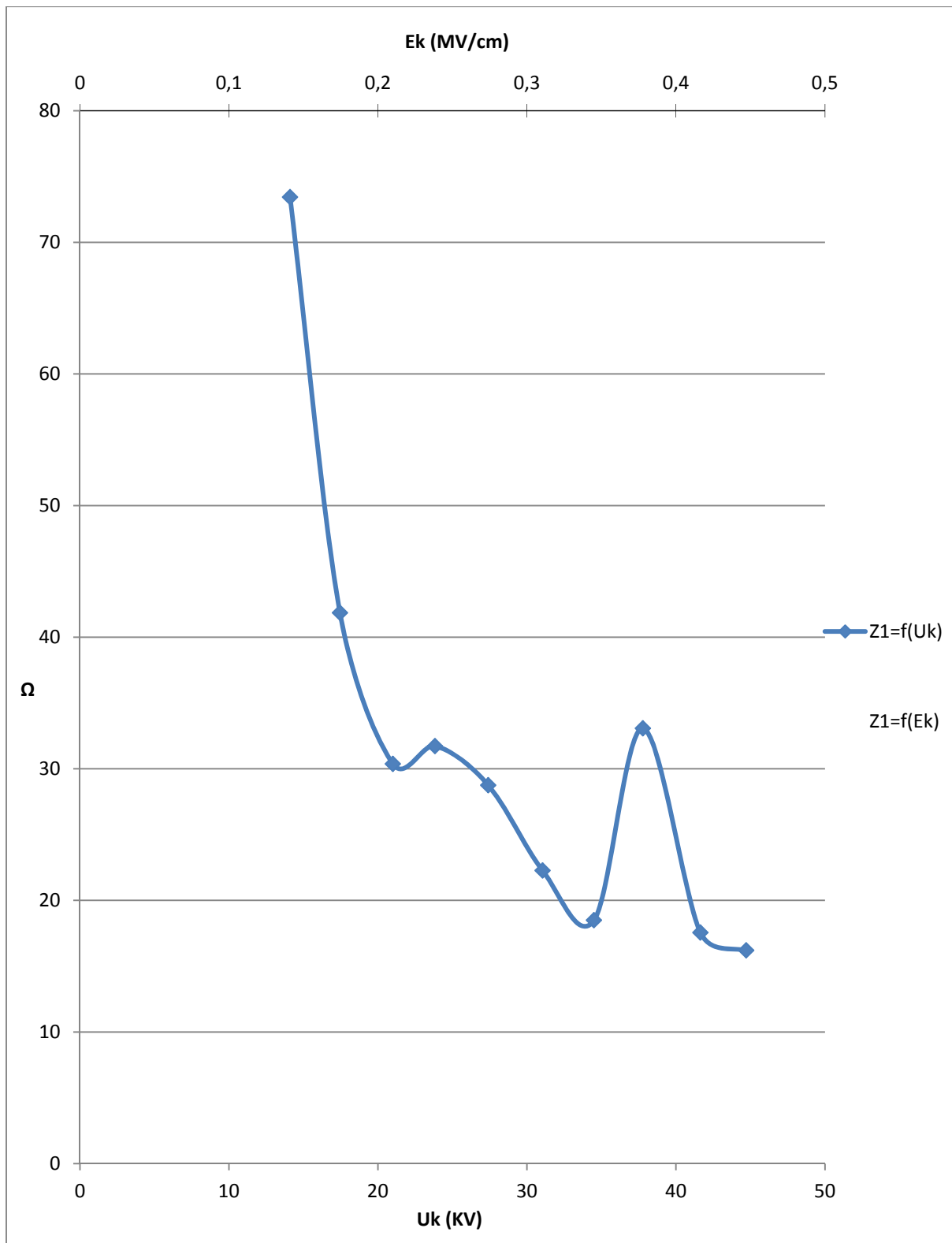


Σχήμα 3.3.2-1: Χαρακτηριστική $E_k=f(U_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 2mm

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

$$E_k = \frac{2U_k}{R \cdot \ln\left(\frac{4d}{R}\right)}$$

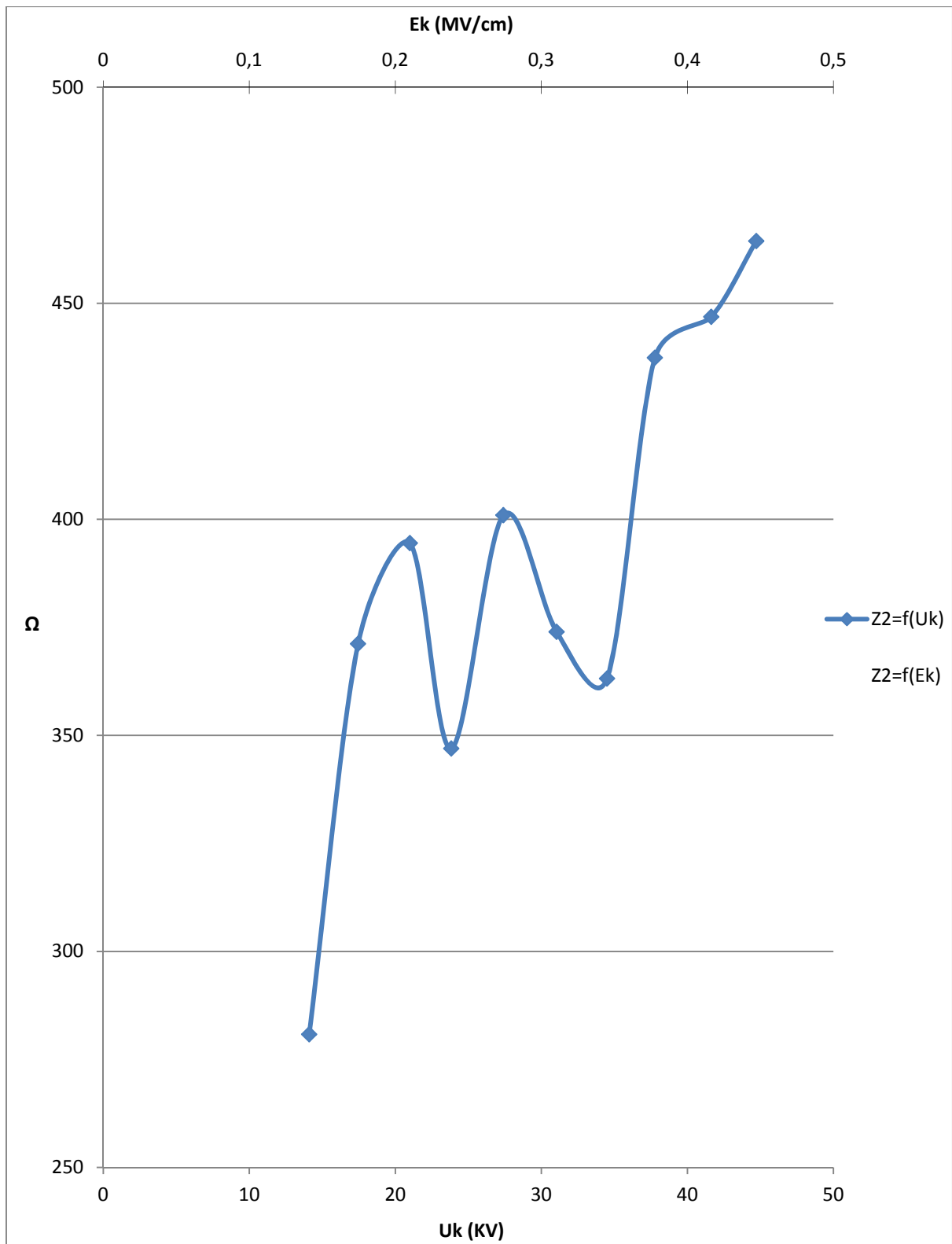


Σχήμα 3.3.2-2: Χαρακτηριστική $Z_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

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

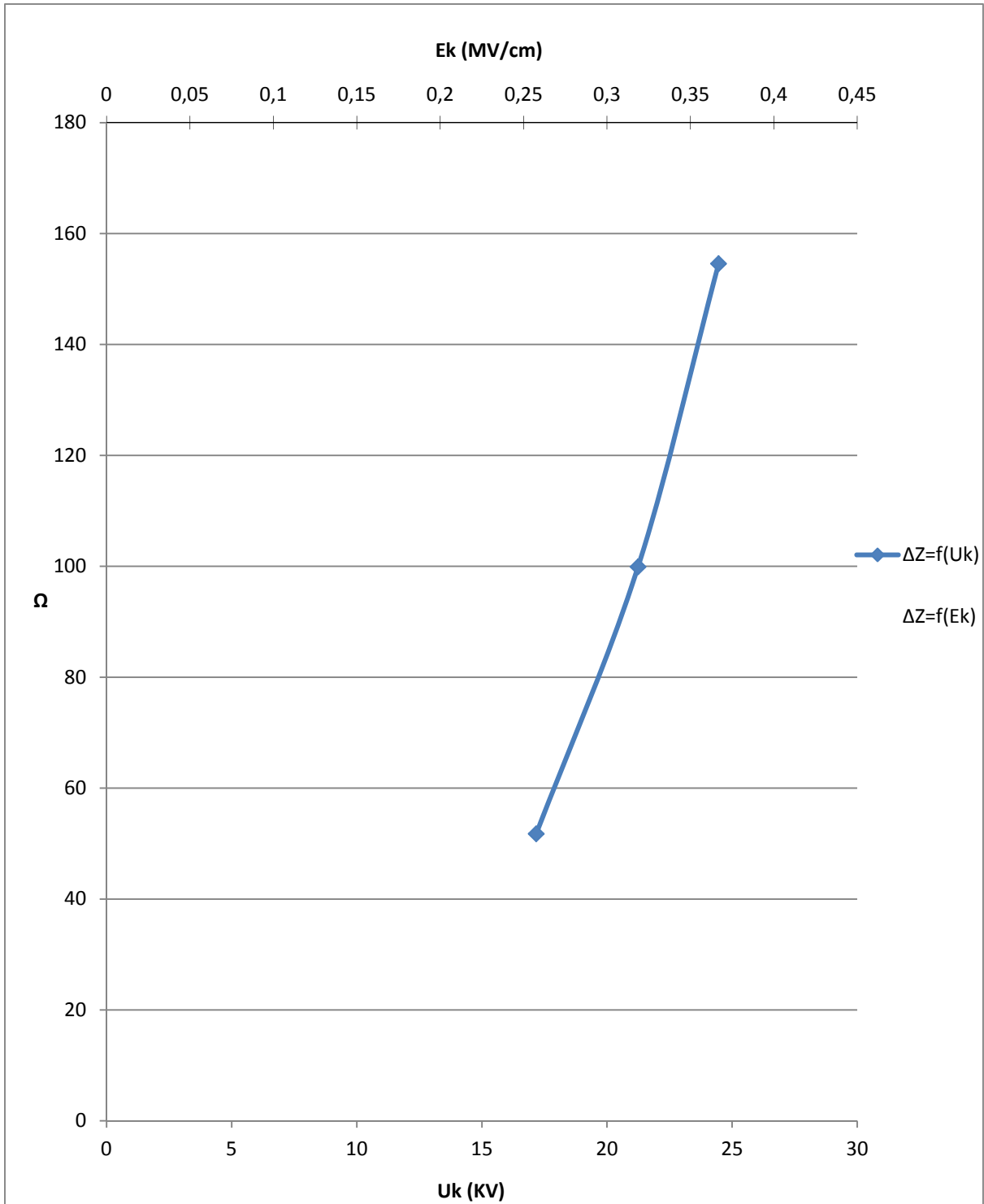


Σχήμα 3.3.2-3: Χαρακτηριστική $Z_2=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητα 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 2mm

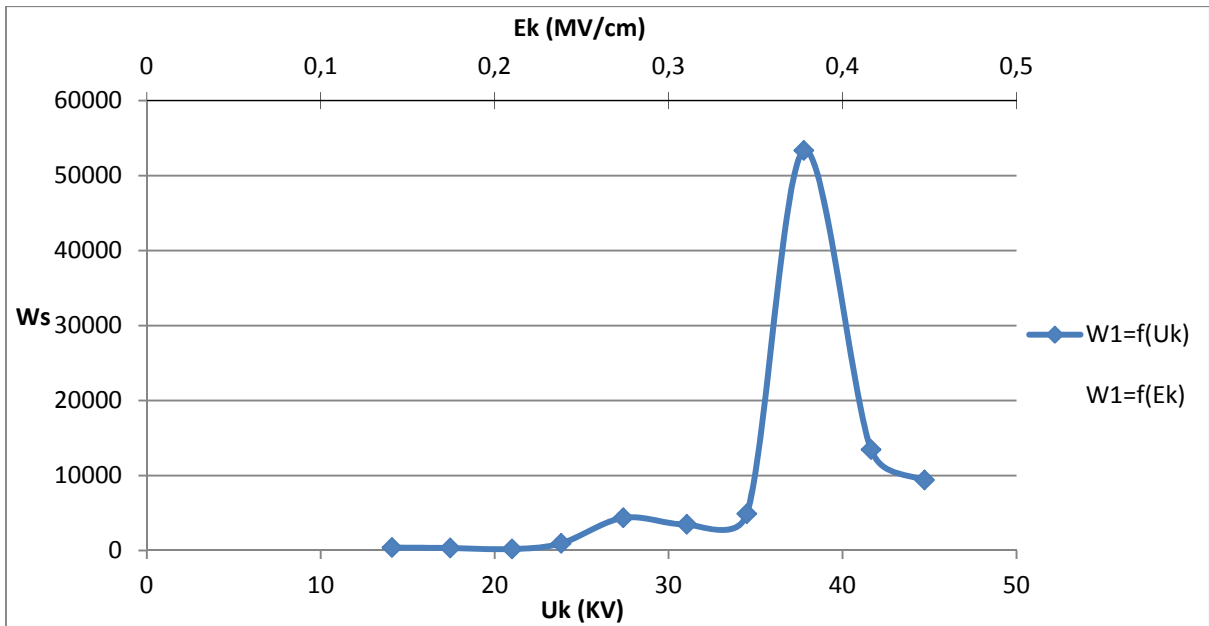
U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

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



Σχήμα 3.3.2-4: Χαρακτηριστική $\Delta Z=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm
 ΔZ : Z_2-Z_1
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
 Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

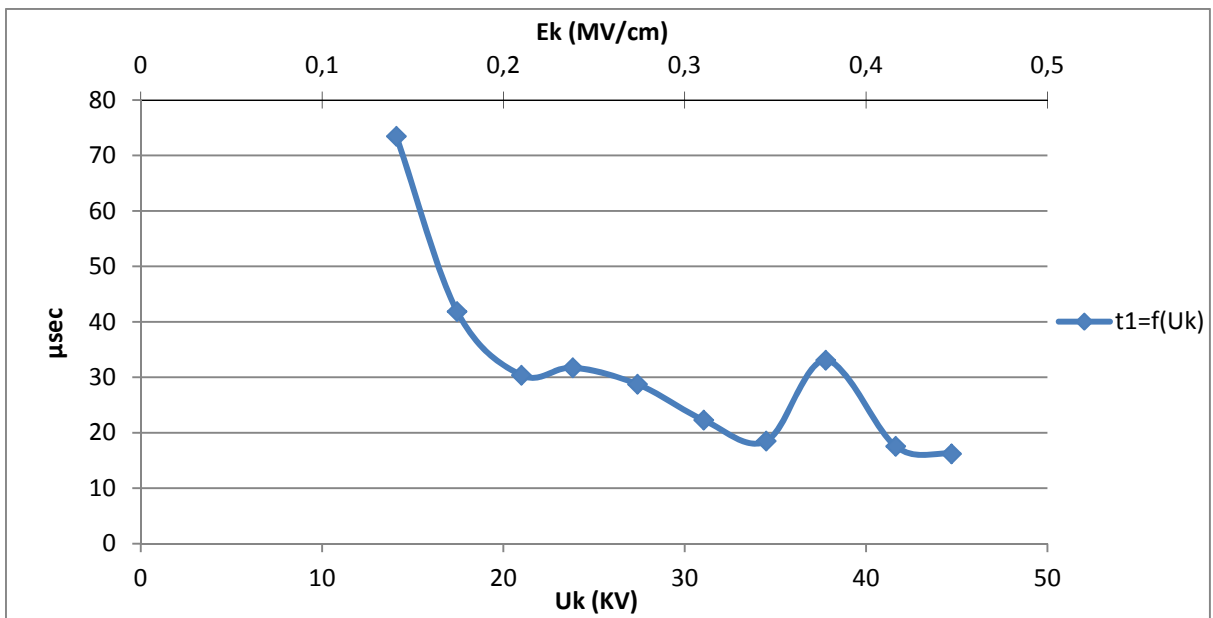


Σχήμα 3.3.2-5: Χαρακτηριστική $W_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 2mm

W₁: στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

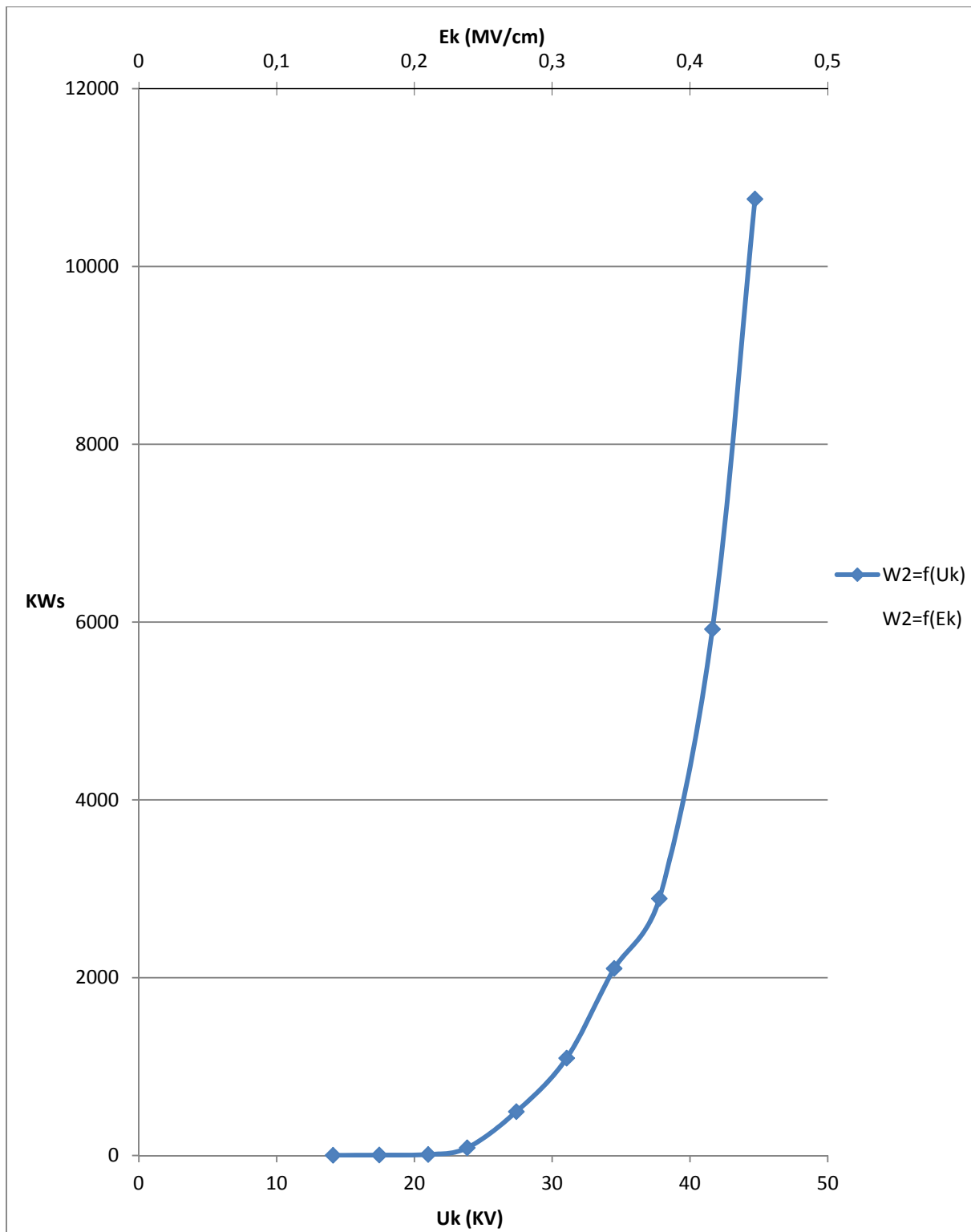


Σχήμα 3.3.2-6: Χαρακτηριστική $t_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 2mm

t₁: χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

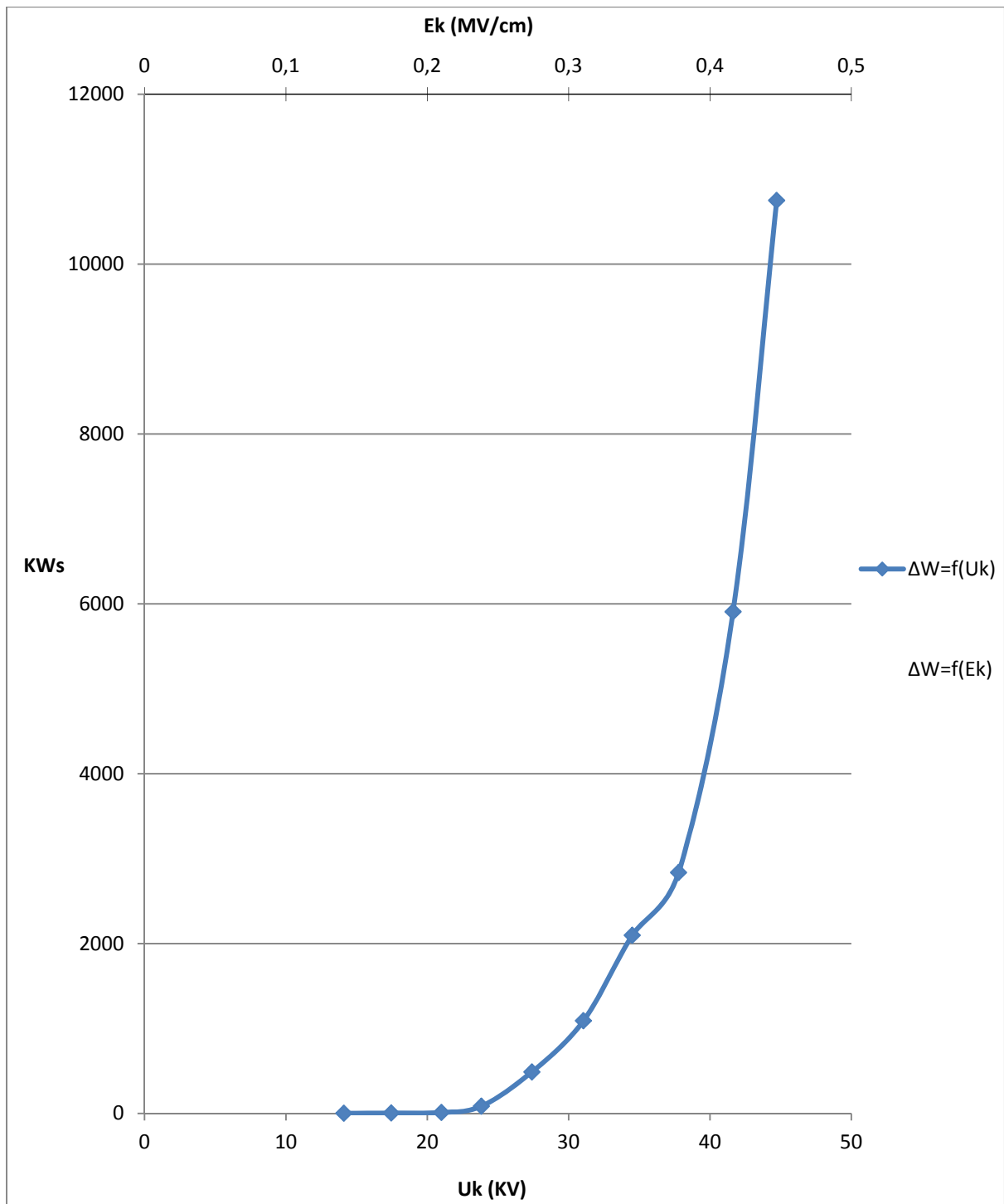


Σχήμα 3.3.2-7: Χαρακτηριστική $W_2=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm

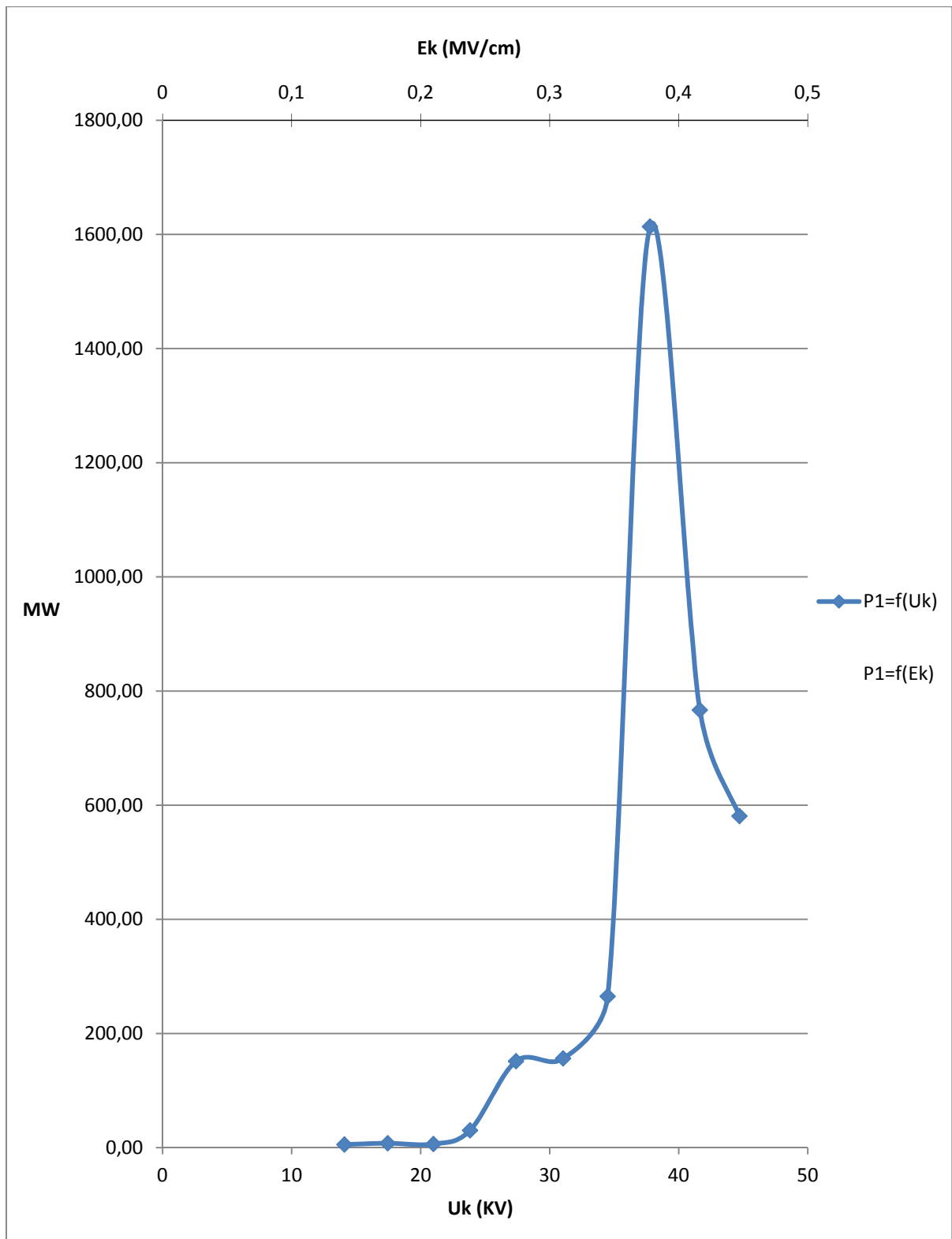
W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.3.2-8: Χαρακτηριστική $\Delta W=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm
 ΔW : W_2-W_1
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
 W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 W_1 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

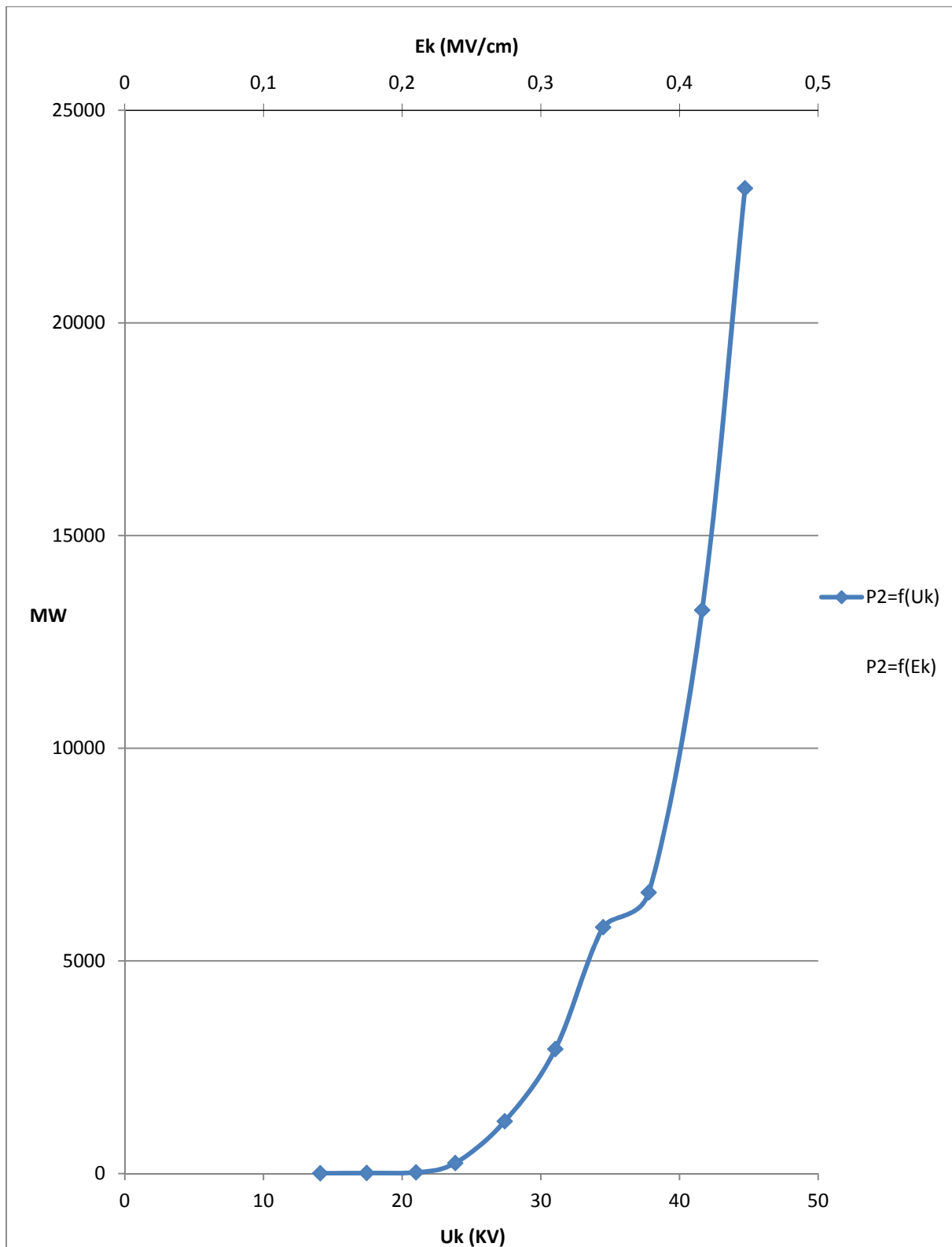


Σχήμα 3.3.2-9: Χαρακτηριστική $P_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 2mm

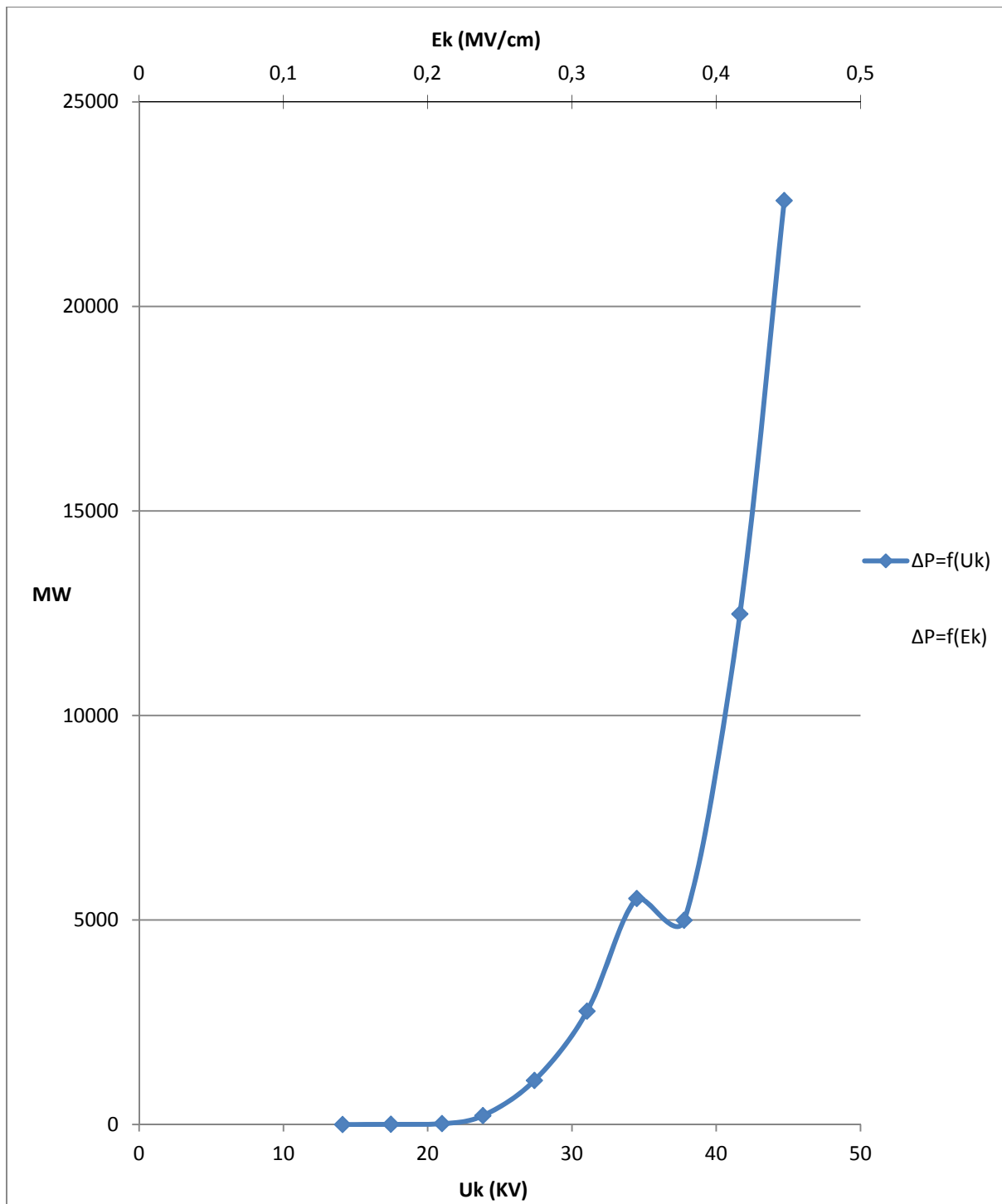
U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

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



Σχήμα 3.3.2-10: Χαρακτηριστική $P_2=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $+250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm
 P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.3.2-11: Χαρακτηριστική $\Delta P=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 2mm

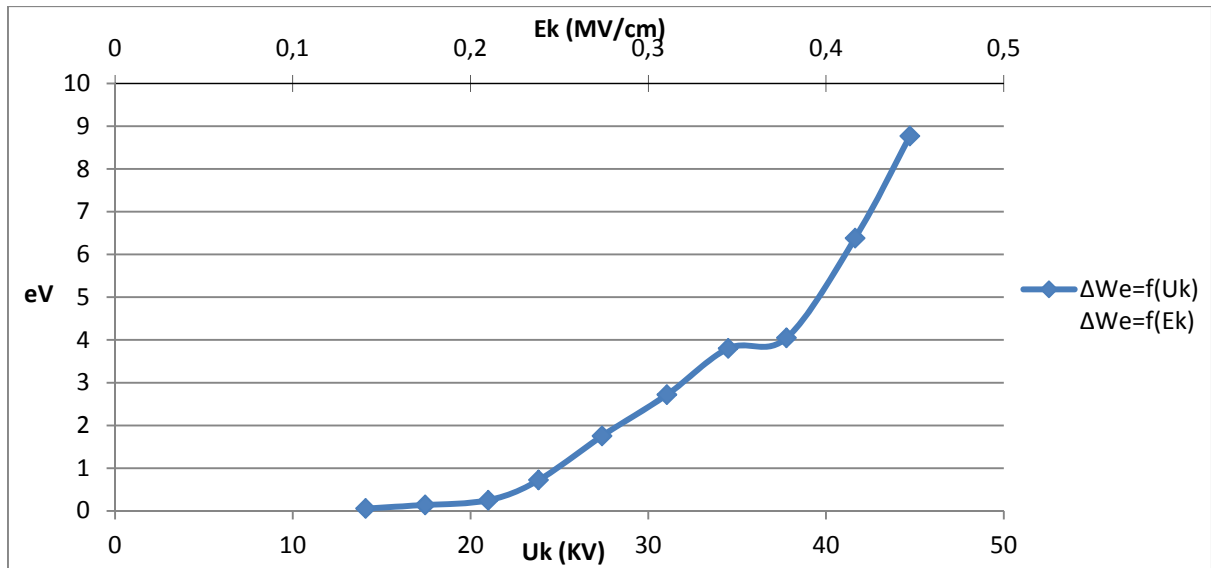
$$\Delta P = P_2 - P_1$$

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

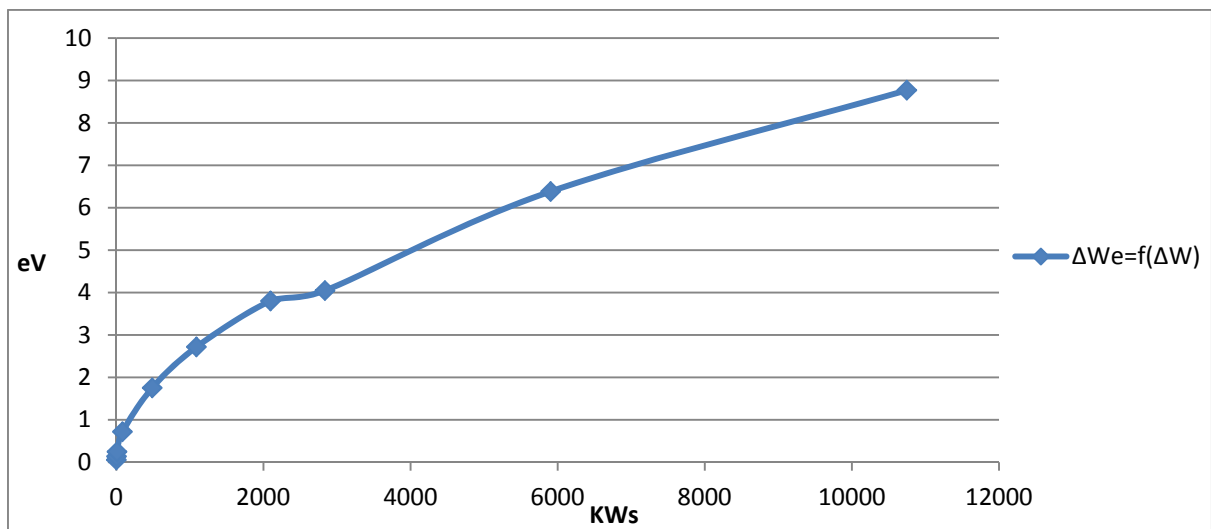
E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

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

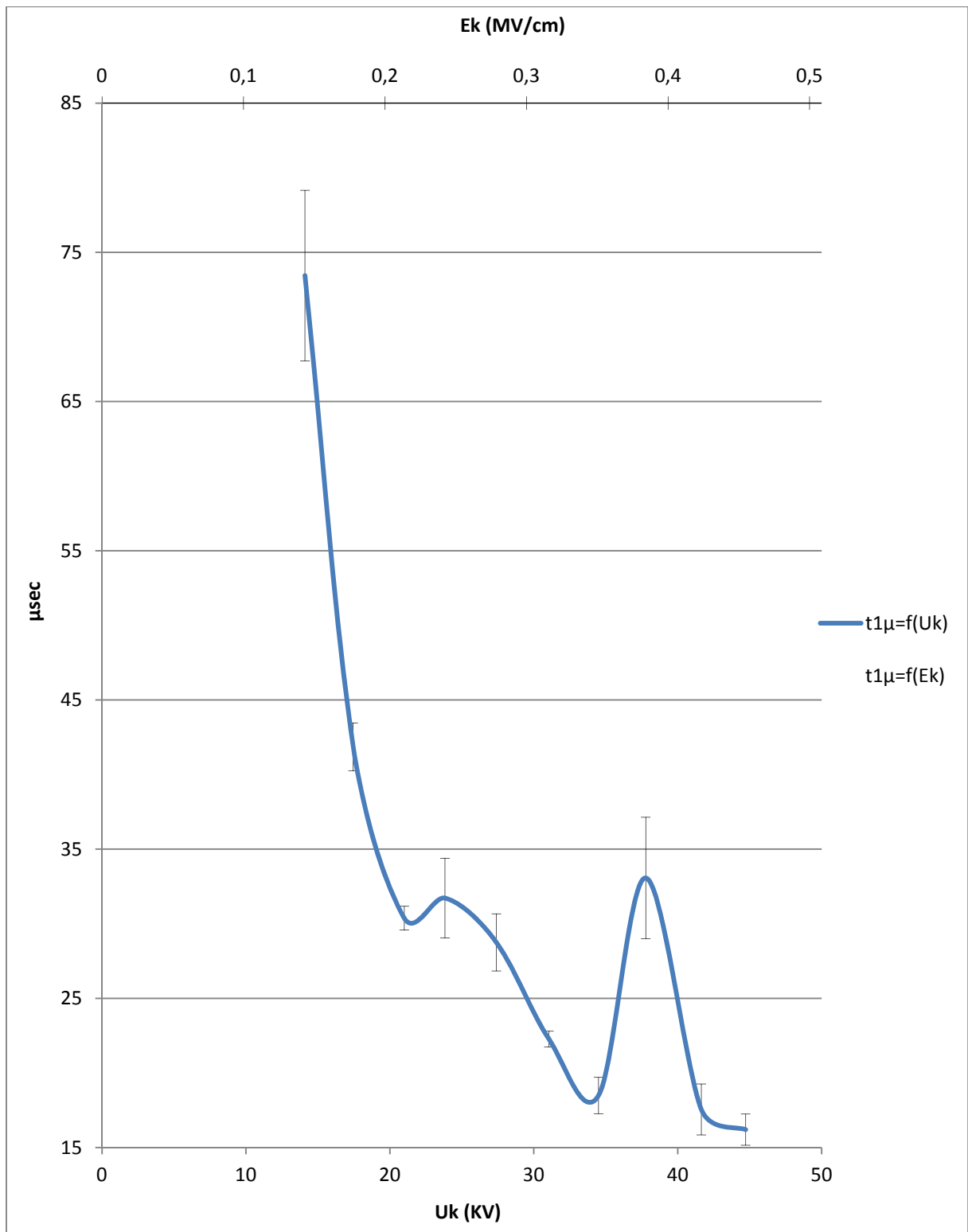
P_2 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 3.3.2-12: Χαρακτηριστική $\Delta W_e=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 2mm
 ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.3.2-13: Χαρακτηριστική $\Delta W_e=f(\Delta W)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση +250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 2mm
 ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 W_1 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 ΔW : W_2-W_1

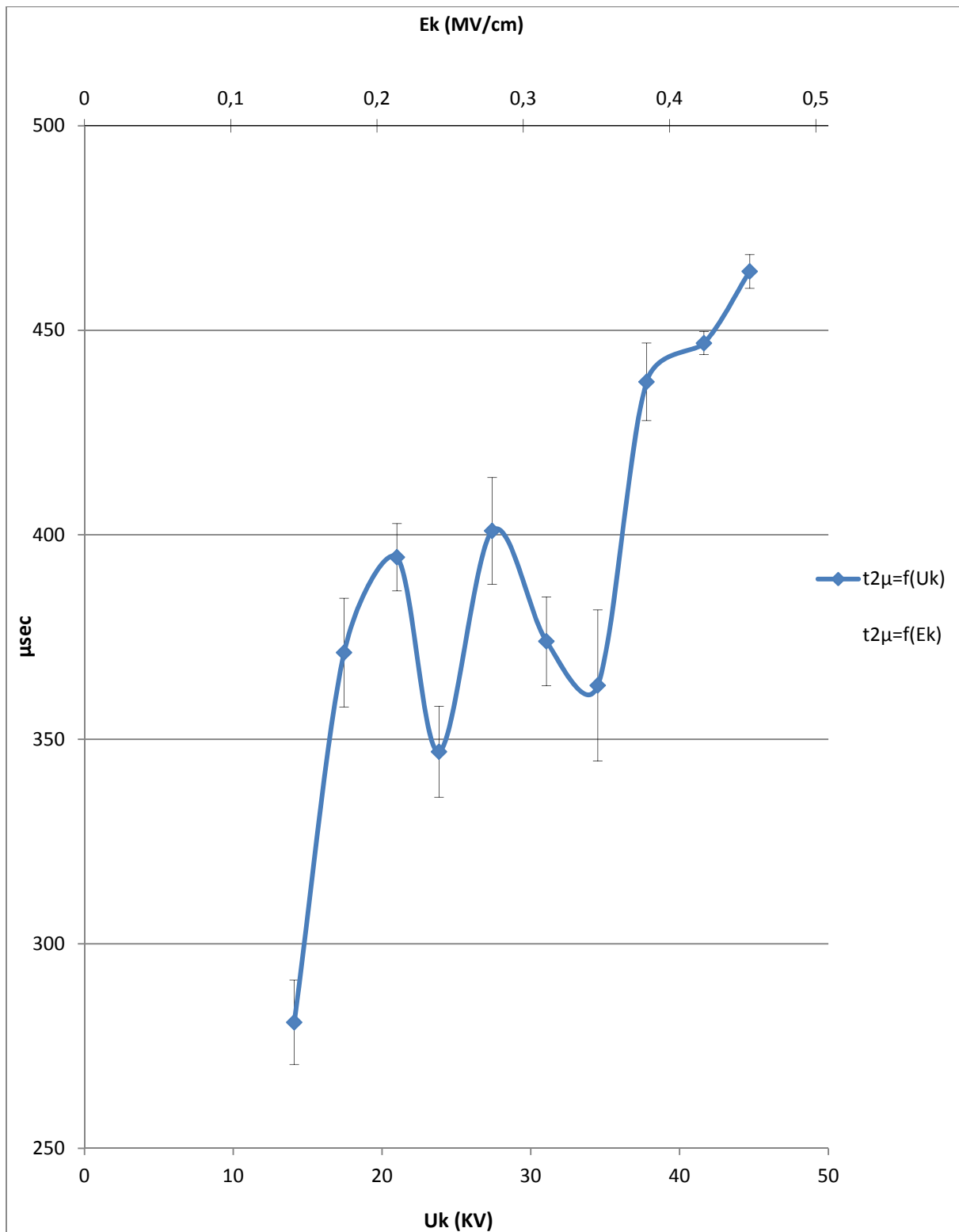


Σχήμα 3.3.2-14: Χαρακτηριστική $t_{1\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

$t_{1\mu}$: Μέση αναμενόμενη τιμή χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

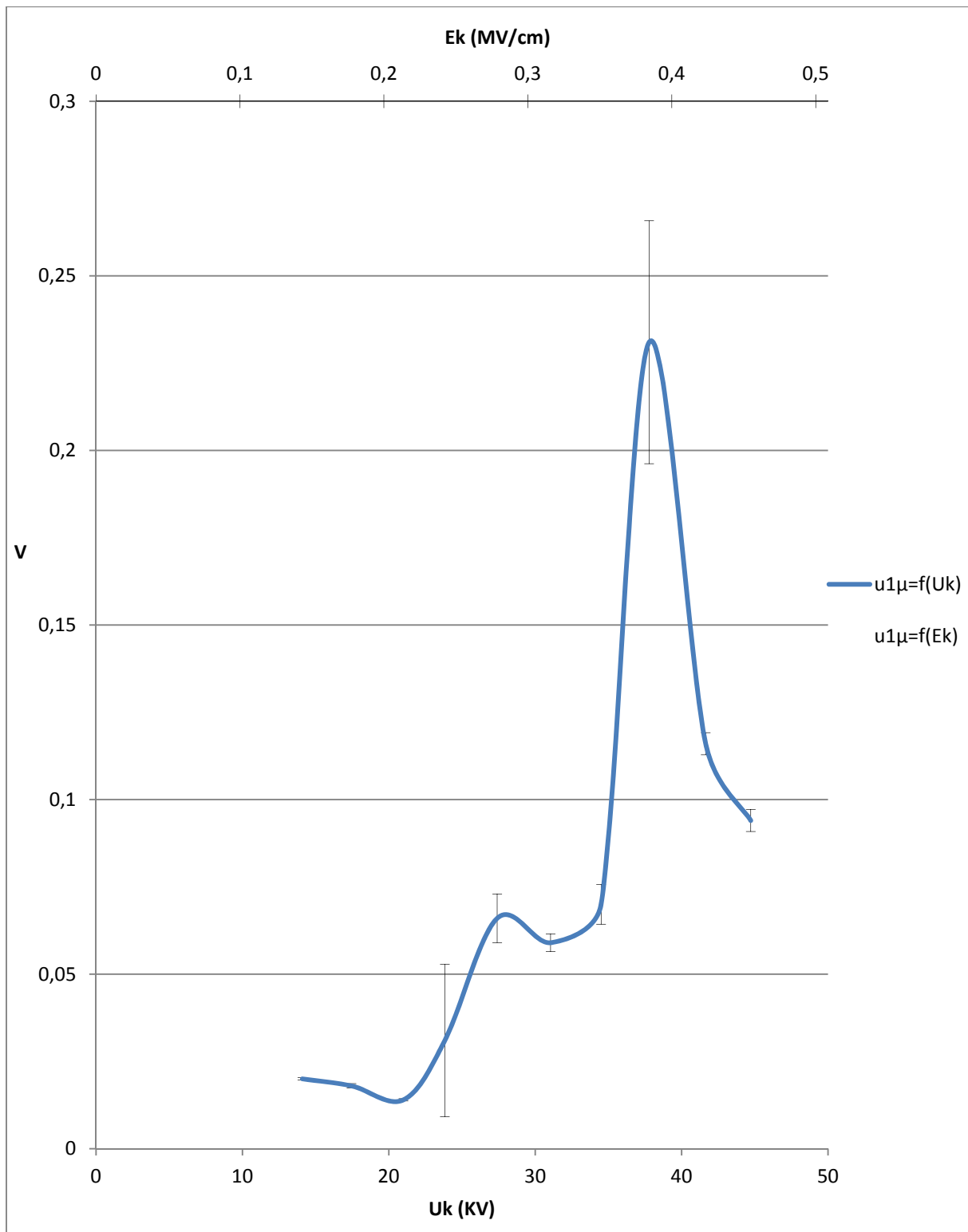


Σχήμα 3.3.2-15: Χαρακτηριστική $t_{2\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητα $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

$t_{2\mu}$: Μέση αναμενόμενη τιμή χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

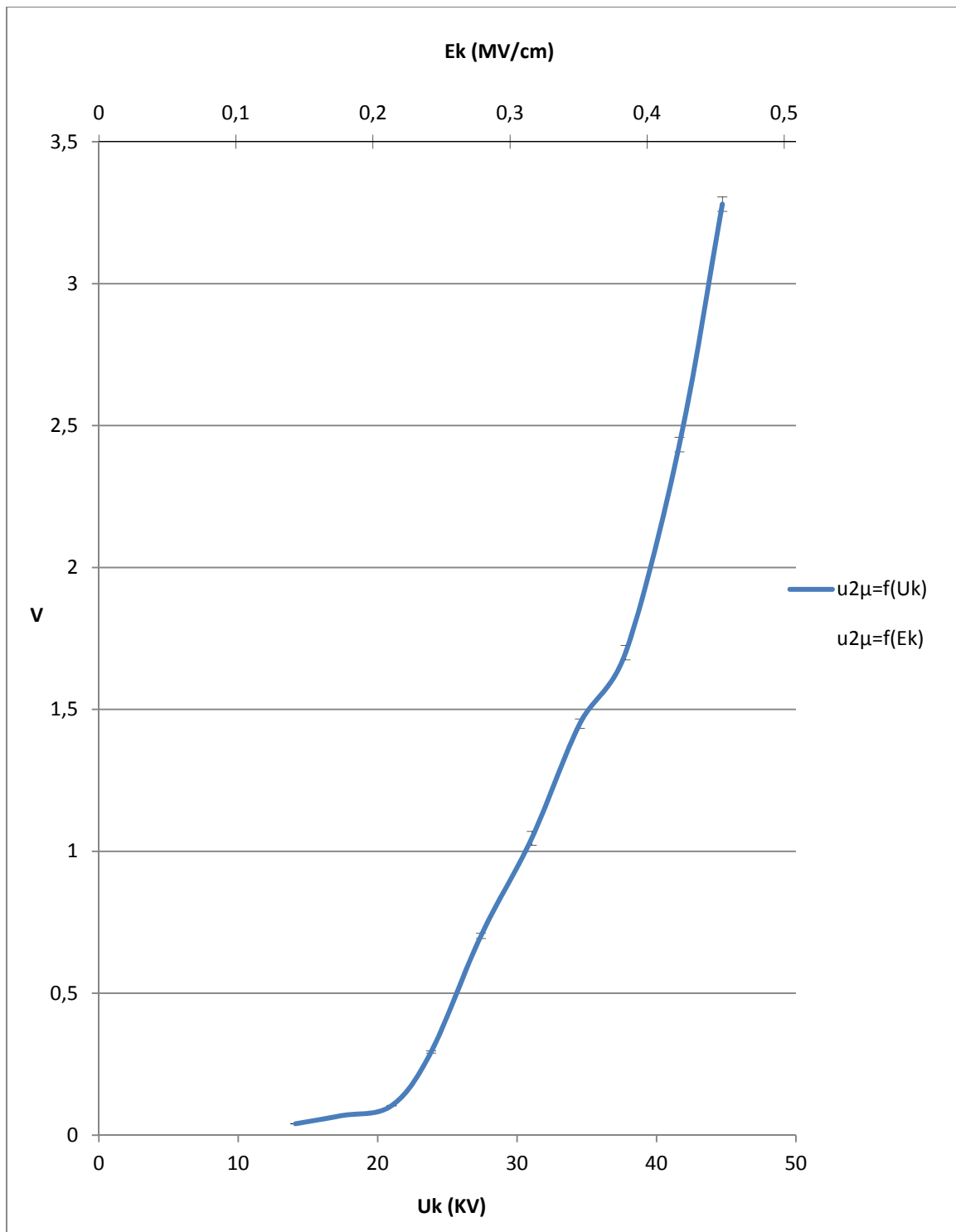


Σχήμα 3.3.2-16: Χαρακτηριστική $u_{1\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητα $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

$u_{1\mu}$: Μέση αναμενόμενη τιμή της στιγμιαίας τιμής της τάσης στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.3.2-17: Χαρακτηριστική $u_{2\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 1mm

$u_{2\mu}$: Μέση αναμενόμενη τιμή της στιγμιαίας τιμής της τάσης στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

Σημείωση: Η τυπική απόκλιση είναι αμελητέα, γι αυτό το λόγο δεν είναι εμφανής στο διάγραμμα

3.4 Κρουστική τάση -250/2500 μ s, πάχος δοκιμίου 2mm

U_k (KV)	t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	q_1 (μ C)	q_2 (μ C)
17,22	154,4	268,3	0,092	0,107
	38,95	70,69	0,007	0,009
21,03	125,55	259,2	0,098	0,163
	32,11	57,05	0,003	0,019
24,11	58,72	363,15	0,088	0,317
	2,7	32,8	0,004	0,01
27,88	53,32	296,59	0,102	0,525
	7,81	63,05	0,014	0,039
29,74	49,25	315,9	0,128	0,796
	5,4	61,18	0,025	0,045
34,95	39,14	299,7	0,103	1,107
	4,57	58,31	0,021	0,054
38,94	39,1	280,8	0,109	1,504
	3,44	39,95	0,03	0,05
41,82	34,42	306,4	0,148	1,835
	2,52	73,89	0,036	0,11
45,43	29,69	310,5	0,145	2,835
	3,93	69,49	0,035	0,17

Πίνακας 3.4-1: Μετρήσεις χρόνου και φορτίου κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων που εκδηλώνονται σε δοκίμιο Pertinax πάχους 2mm, με εφαρμογή αρνητικής κρουστικής τάσης αυξανόμενης μέγιστης τιμής, διάρκειας 250/2500 μ sec

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

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

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

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Πυκνωτής: $C_m=1000nF$

Πάχος: $d=2mm$

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

3.4.1 Πίνακες στατιστικής ανάλυσης μετρήσεων (-250/2500, d=2mm)

U_k (KV)	E_k (MV/cm)	C_m (nF)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	Δt (μs)	Z_1 (Ω)	Z_2 (Ω)	ΔZ (Ω)
17,22	0,175	1000	0,092	0,107	154,4	268,3	113,9	154,4	268,3	113,9
21,03	0,214	1000	0,098	0,163	125,55	259,2	133,65	125,55	259,2	133,65
24,11	0,245	1000	0,088	0,317	58,72	363,15	304,43	58,72	363,15	304,43
27,88	0,284	1000	0,102	0,525	53,32	296,59	243,27	53,32	296,59	243,27
29,74	0,302	1000	0,128	0,796	49,25	315,9	266,65	49,25	315,9	266,65
34,95	0,355	1000	0,103	1,107	39,14	299,7	260,56	39,14	299,7	260,56
38,94	0,396	1000	0,109	1,504	39,1	280,8	241,7	39,1	280,8	241,7
41,82	0,425	1000	0,148	1,835	34,42	306,4	271,98	34,42	306,4	271,98
45,43	0,462	1000	0,145	2,835	29,69	310,5	280,81	29,69	310,5	280,81

Πίνακας 3.4.1-1: Στατιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μF)

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας

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

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

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt : $t_2 - t_1$ χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

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

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

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$

U_k (KV)	E_k (MV/cm)	C_m (nF)	q_1 (μ C)	q_2 (μ C)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)	W_1 (KW _s)	W_2 (KW _s)	ΔW (KW _s)	ΔW_e (ev)
17,22	0,175	1000	0,092	0,107	0,092	0,107	0,015	8,5	11,4	2,99	0,04
21,03	0,214	1000	0,098	0,163	0,098	0,163	0,065	9,6	26,6	16,97	0,18
24,11	0,245	1000	0,088	0,317	0,088	0,317	0,229	7,7	100,5	92,75	0,63
27,88	0,284	1000	0,102	0,525	0,102	0,525	0,423	10,4	275,6	265,2	1,17
29,74	0,302	1000	0,128	0,796	0,128	0,796	0,668	16,4	633,6	617	1,84
34,95	0,355	1000	0,103	1,107	0,103	1,107	1,004	10,6	1225,4	1215	2,77
38,94	0,396	1000	0,109	1,504	0,109	1,504	1,395	11,9	2262,0	2250	3,84
41,82	0,425	1000	0,148	1,835	0,148	1,835	1,687	21,9	3367,2	3345	4,65
45,43	0,462	1000	0,145	2,835	0,145	2,835	2,69	21,0	8037,2	8016	7,41

Πίνακας 3.4.1-2: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μ F)

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας

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

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

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

W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

ΔW : $W_2 - W_1$

U_k (KV)	E_k (MV/cm)	C_m (nF)	u_1 (V)	u_2 (V)	Δu (V)	t_1 (ms)	t_2 (μ s)	Δt (μ s)	P_1 (MW)	P_2 (MW)	ΔP (MW)
17,22	0,175	1000	0,092	0,107	0,015	154,4	268,3	113,9	54,8	42,7	-12,1
21,03	0,214	1000	0,098	0,163	0,065	73,44	280,8	207,4	130,8	94,6	-36,2
24,11	0,245	1000	0,088	0,317	0,229	41,85	371,2	329,4	185,0	270,7	85,7
27,88	0,284	1000	0,102	0,525	0,423	30,37	394,5	364,1	343	699	356
29,74	0,302	1000	0,128	0,796	0,668	31,72	346,95	315,2	517	1826	1310
34,95	0,355	1000	0,103	1,107	1,004	28,75	400,95	372,2	369	3056	2687
38,94	0,396	1000	0,109	1,504	1,395	22,27	373,95	351,7	533	6049	5515
41,82	0,425	1000	0,148	1,835	1,687	18,49	363,15	344,7	1185	9272	8088
45,43	0,462	1000	0,145	2,835	2,69	33,07	437,39	404,3	636	18375	17740

Πίνακας 3.4.1-3: Στατιστική ανάλυση της ενέργειας λόγω μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μ F)

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Δt : $t_2 - t_1$ χρονική διάρκεια των μερικών εκκενώσεων

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

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

ΔP : $P_2 - P_1$

ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

U_k (KV)	t_1 (μs)	t_{1min} (μs)	t_{1max} (μs)	t_2 (μs)	t_{2min} (μs)	t_{2max} (μs)
17,22	154,4	142,08	166,72	268,3	245,95	290,65
	38,95			70,69		
21,03	125,55	115,40	135,70	259,2	241,16	277,24
	32,11			57,05		
24,11	58,72	57,87	59,57	363,15	352,78	373,52
	2,7			32,8		
27,88	53,32	50,85	55,79	296,59	276,65	316,53
	7,81			63,05		
29,74	49,25	47,54	50,96	315,9	296,55	335,25
	5,4			61,18		
34,95	39,14	37,69	40,59	299,7	281,26	318,14
	4,57			58,31		
38,94	39,1	38,01	40,19	280,8	268,17	293,43
	3,44			39,95		
41,82	34,42	33,62	35,22	306,4	283,03	329,77
	2,52			73,89		
45,43	29,69	28,45	30,93	310,5	288,53	332,47
	3,93			69,49		

Πίνακας 3.4.1-4: Στατιστική ανάλυση της αποκλισης της μέσης τιμής του χρόνου έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων, με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

t_2 : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

t_{1min} : ελάχιστος αναμενόμενος χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

t_{1max} : μέγιστος αναμενόμενος χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

t_{2min} : ελάχιστος αναμενόμενος χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

t_{2max} : μέγιστος αναμενόμενος χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

Σημείωση: Η δευτερογενής τιμή στα μεγέθη t_1 , t_2 είναι η τυπική απόκλιση

U_k (KV)	C_m (nF)	q_1 (μC)	q_2 (μC)	$u_{1\mu}$ (V)	u_{1min} (V)	u_{1max} (V)	$u_{2\mu}$ (V)	u_{2min} (V)	u_{2max} (V)
17,22	1000	0,092	0,107	0,092	0,090	0,094	0,107	0,104	0,110
		0,007	0,009						
21,03	1000	0,098	0,163	0,098	0,097	0,099	0,163	0,157	0,169
		0,003	0,019						
24,11	1000	0,088	0,317	0,088	0,087	0,089	0,317	0,314	0,320
		0,004	0,01						
27,88	1000	0,102	0,525	0,102	0,098	0,106	0,525	0,513	0,537
		0,014	0,039						
29,74	1000	0,128	0,796	0,128	0,120	0,136	0,796	0,782	0,810
		0,025	0,045						
34,95	1000	0,103	1,107	0,103	0,096	0,110	1,107	1,090	1,124
		0,021	0,054						
38,94	1000	0,109	1,504	0,109	0,100	0,118	1,504	1,488	1,520
		0,03	0,05						
41,82	1000	0,148	1,835	0,148	0,137	0,159	1,835	1,800	1,870
		0,036	0,11						
45,43	1000	0,145	2,835	0,145	0,134	0,156	2,835	2,781	2,889
		0,035	0,17						

Πίνακας 3.4.1-5: Στατιστική ανάλυση της αποκλισης της μέσης τιμής της στιγμιαίας τάσης στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη και περαίωση των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων, με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα 2-1 και στις σχέσεις 2.1-2.14

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

C_m : πυκνωτής μέτρησης (1000 μF)

u_1 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

u_2 : στιγμιαία τιμή της τάσης στον πυκνωτή μέτρησης κατά το πέρας

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

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

u_{1min} : ελάχιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

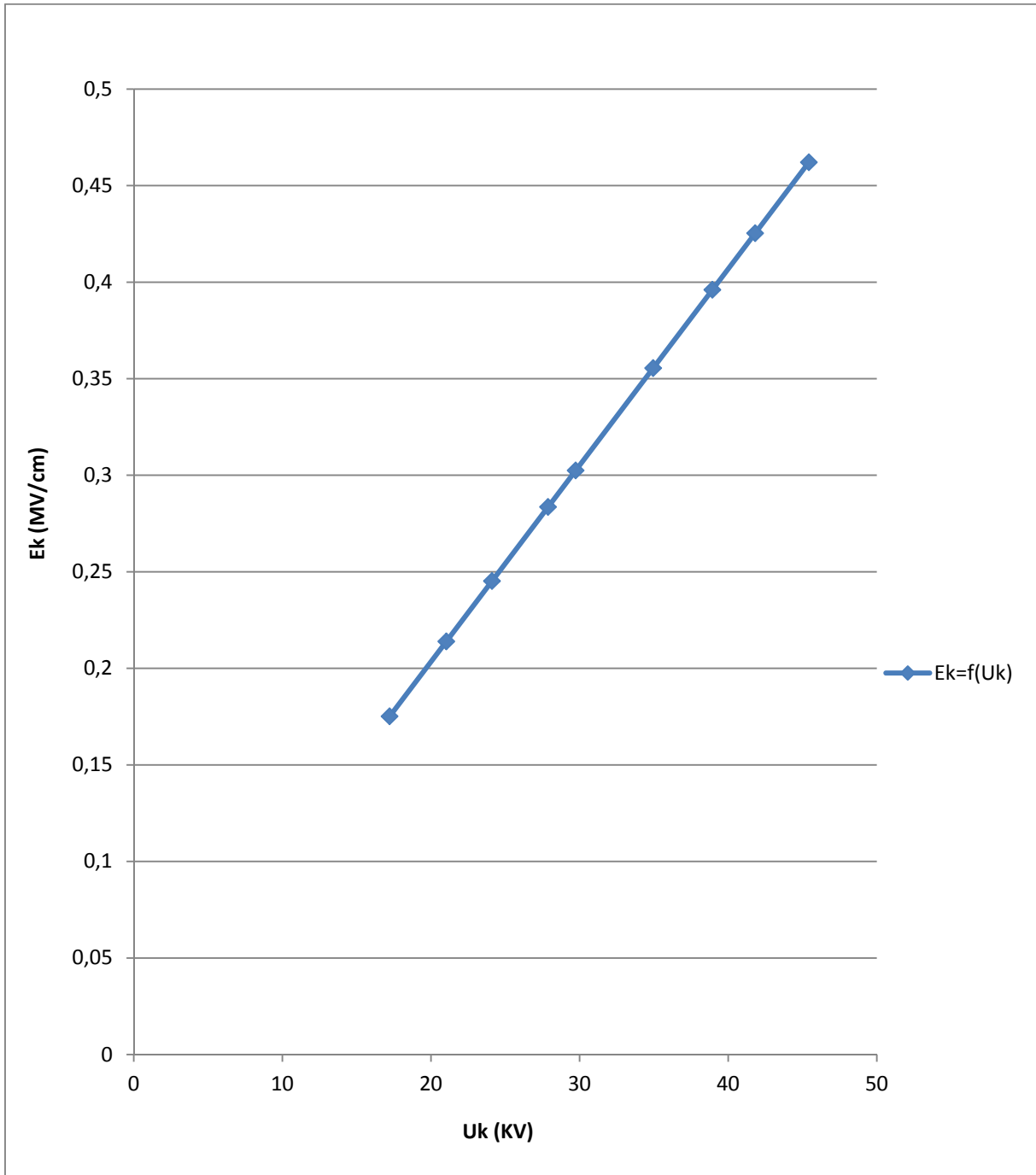
u_{1max} : μέγιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

u_{2min} : ελάχιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

u_{2max} : μέγιστη αναμενόμενη στιγμιαία τάση στον πυκνωτή C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

Σημείωση: Η δευτερή τιμή στα μεγέθη q_1 , q_2 είναι η τυπική απόκλιση

3.4.2 Χαρακτηριστικές της στατιστικής ανάλυσης (-250/2500, d=2mm)

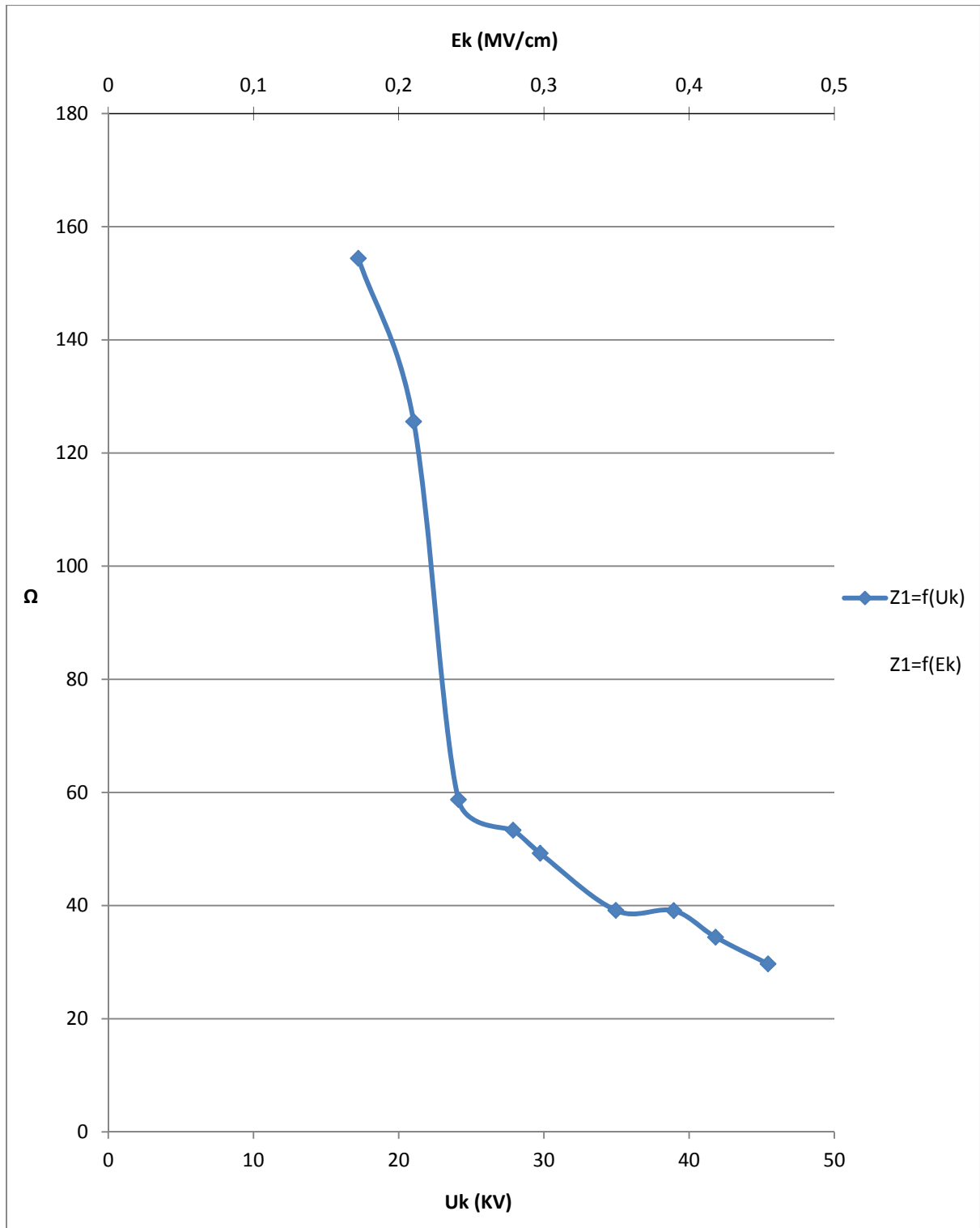


Σχήμα 3.4.2-1: Χαρακτηριστική $E_k=f(U_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση -250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 2mm

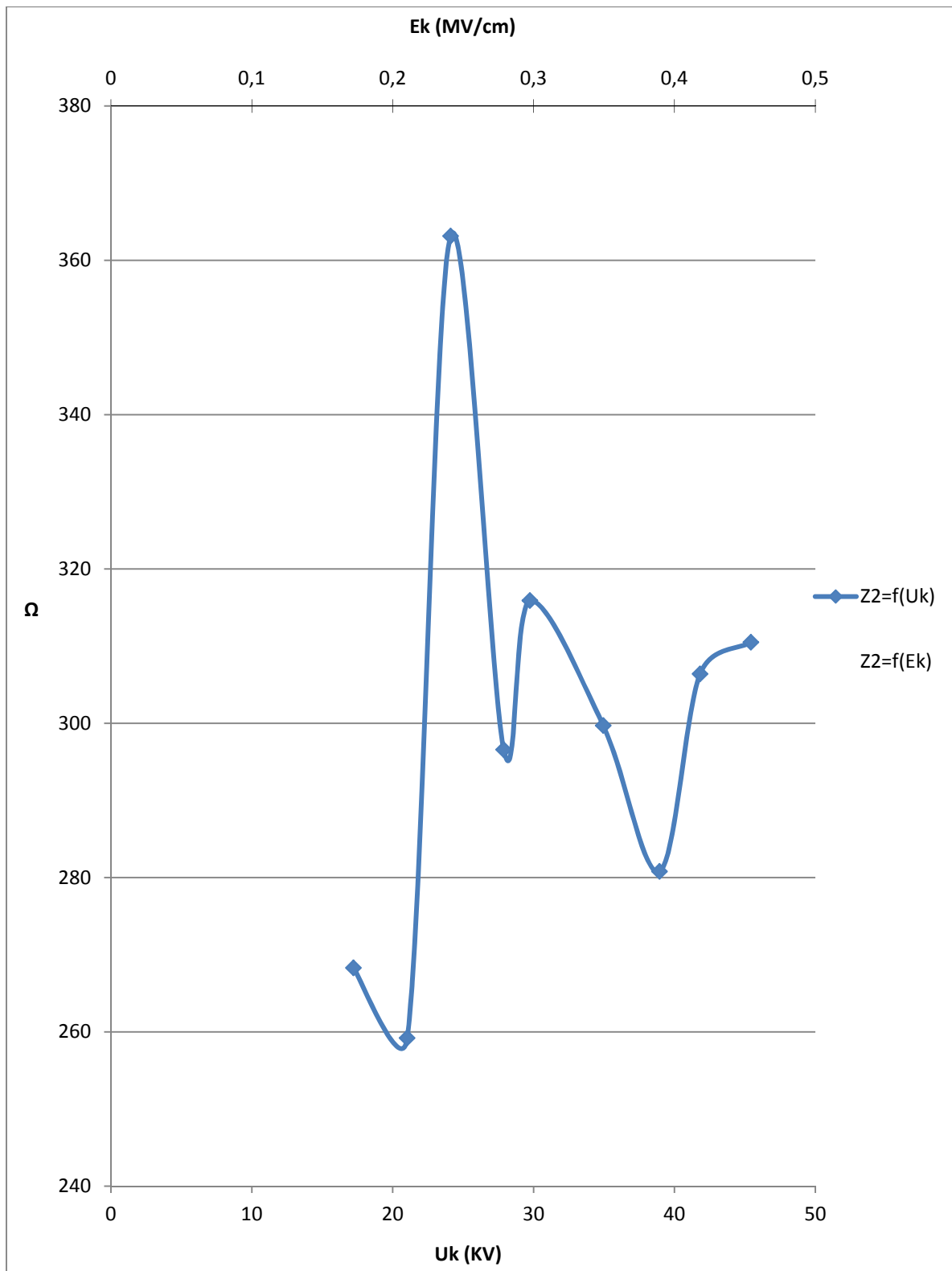
U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

$$E_k = \frac{2U_k}{R \cdot \ln\left(\frac{4d}{R}\right)}$$



Σχήμα 3.4.2-2: Χαρακτηριστική $Z_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
 Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

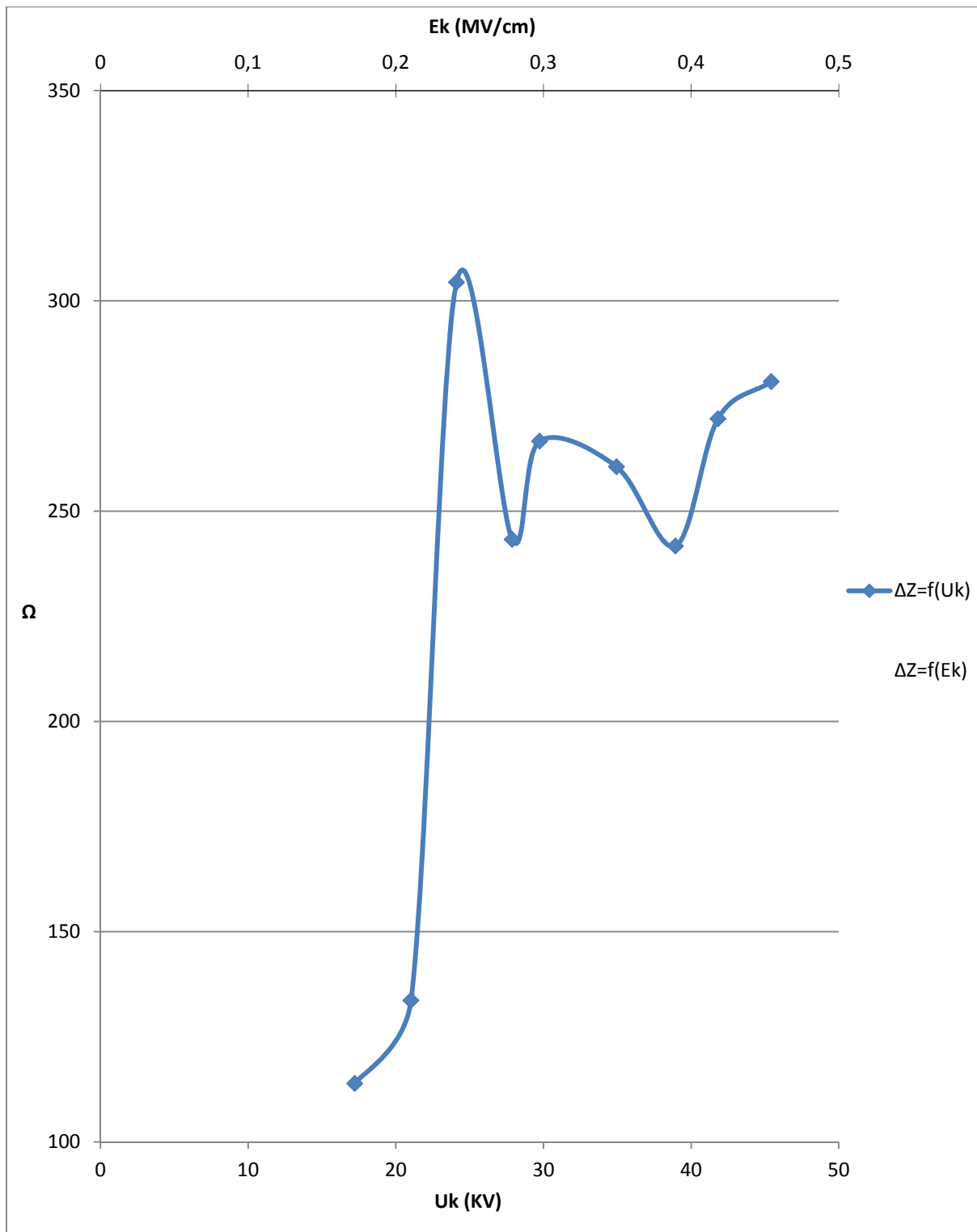


Σχήμα 3.4.2-3: Χαρακτηριστική $Z_2=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm

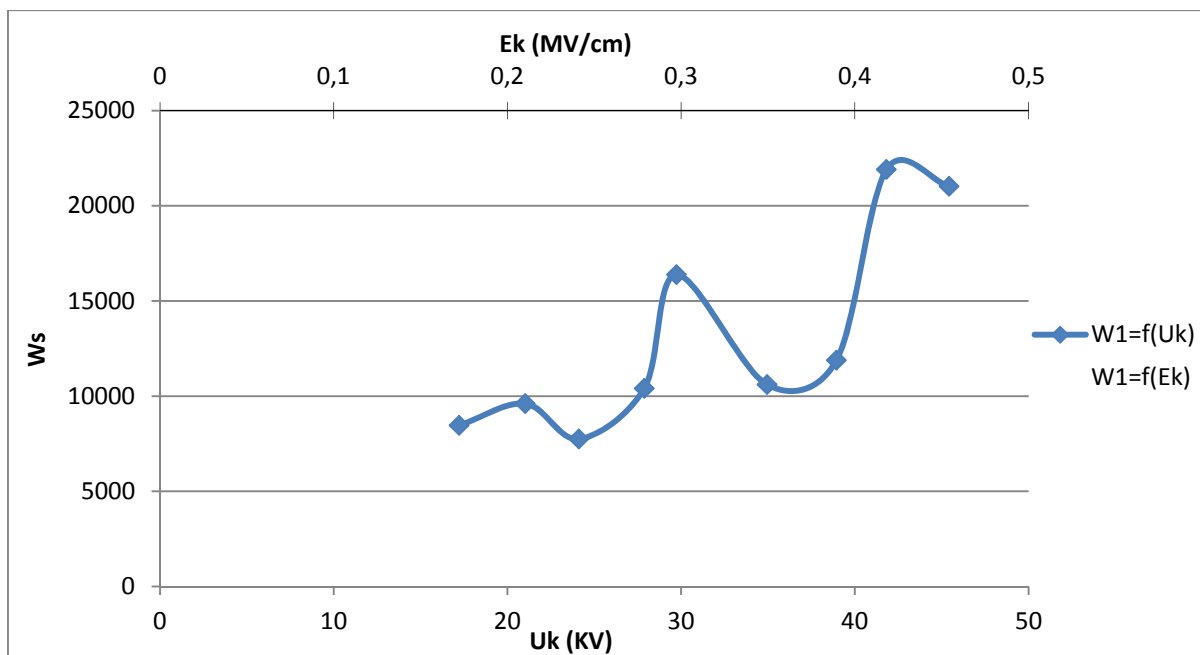
U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

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



Σχήμα 3.4.2-4: Χαρακτηριστική $\Delta Z=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητα $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm
 ΔZ : Z_2-Z_1
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
 Z_1 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 Z_2 : σύνθετη αντίσταση στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

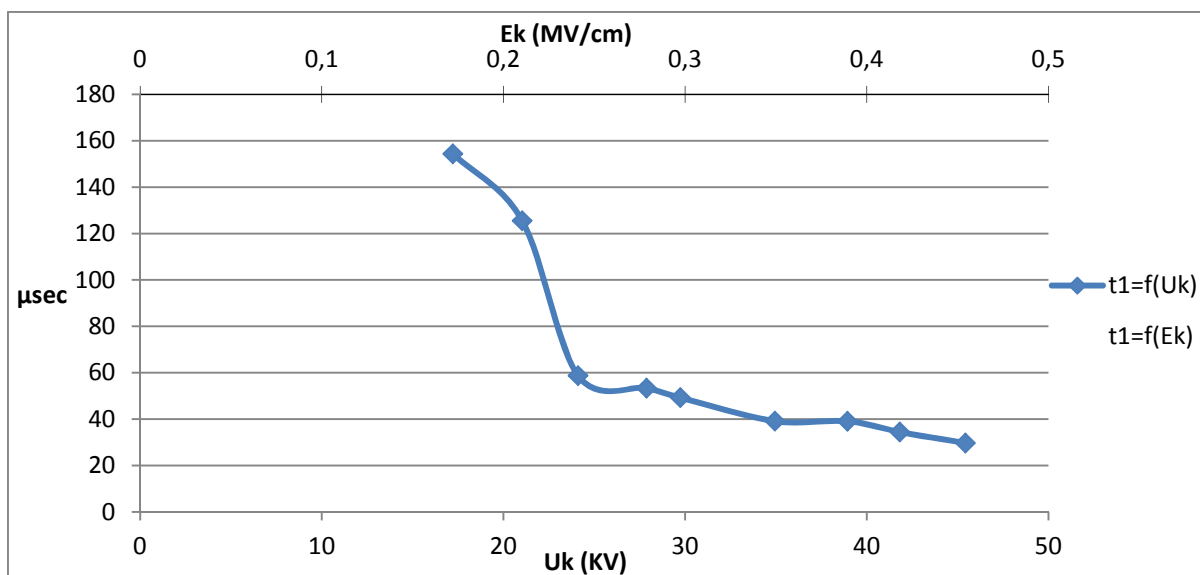


Σχήμα 3.4.2-5: Χαρακτηριστική $W_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm

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

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

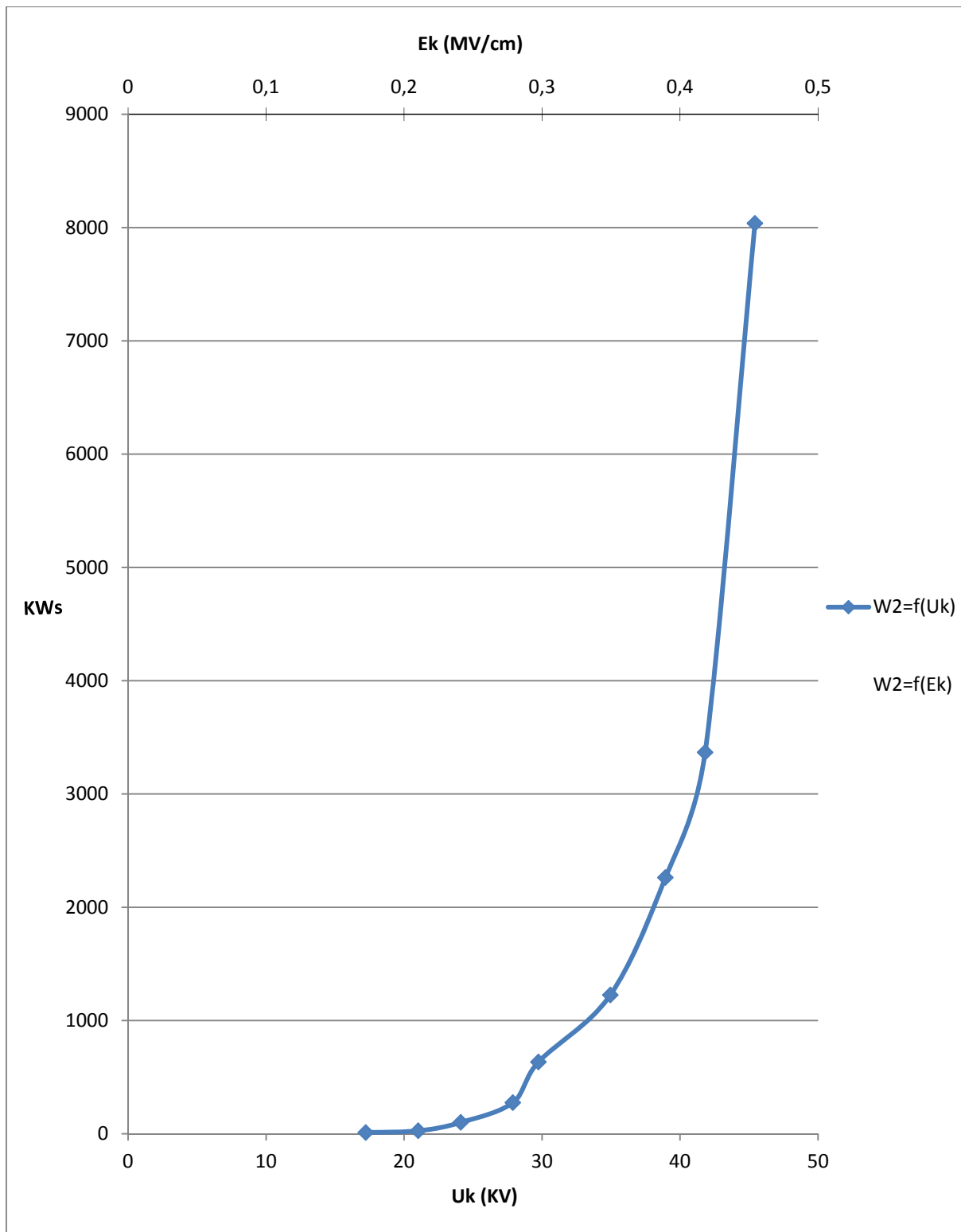


Σχήμα 3.4.2-6: Χαρακτηριστική $t_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm

t_1 : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

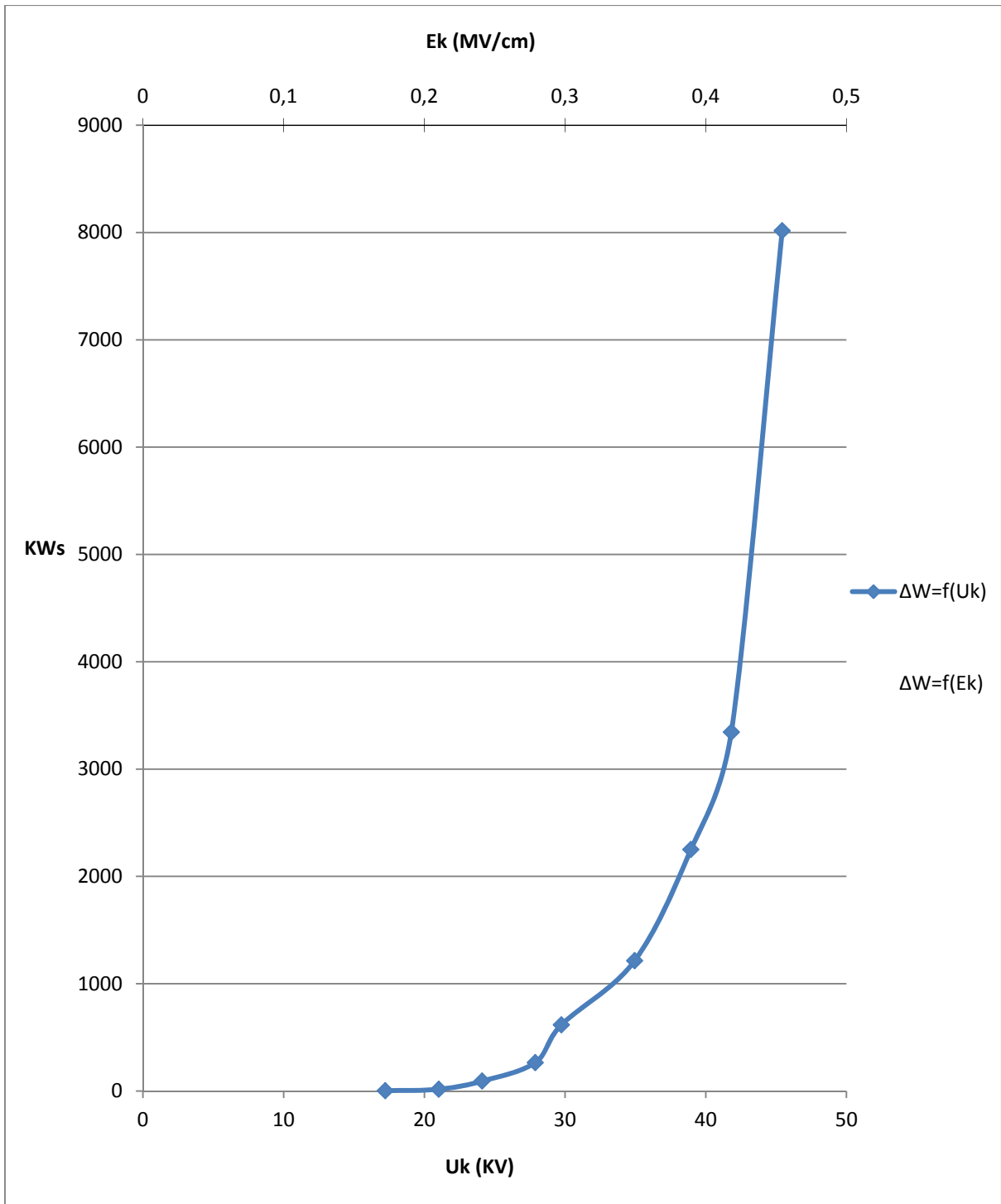


Σχήμα 3.4.2-7: Χαρακτηριστική $W_2=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm

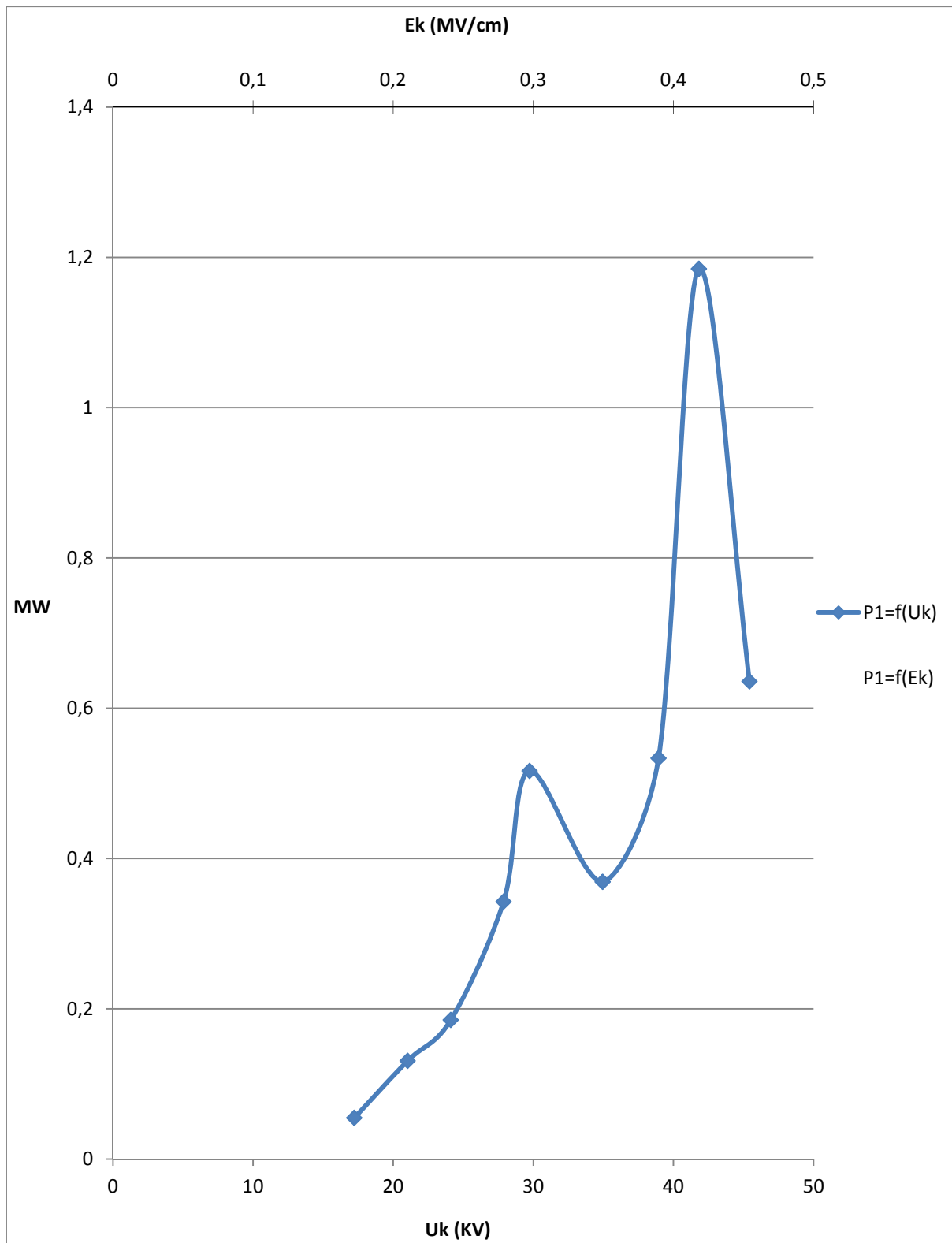
W₂: στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.4.2-8: Χαρακτηριστική $\Delta W=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm
 ΔW : W_2-W_1
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k
 W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 W_1 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

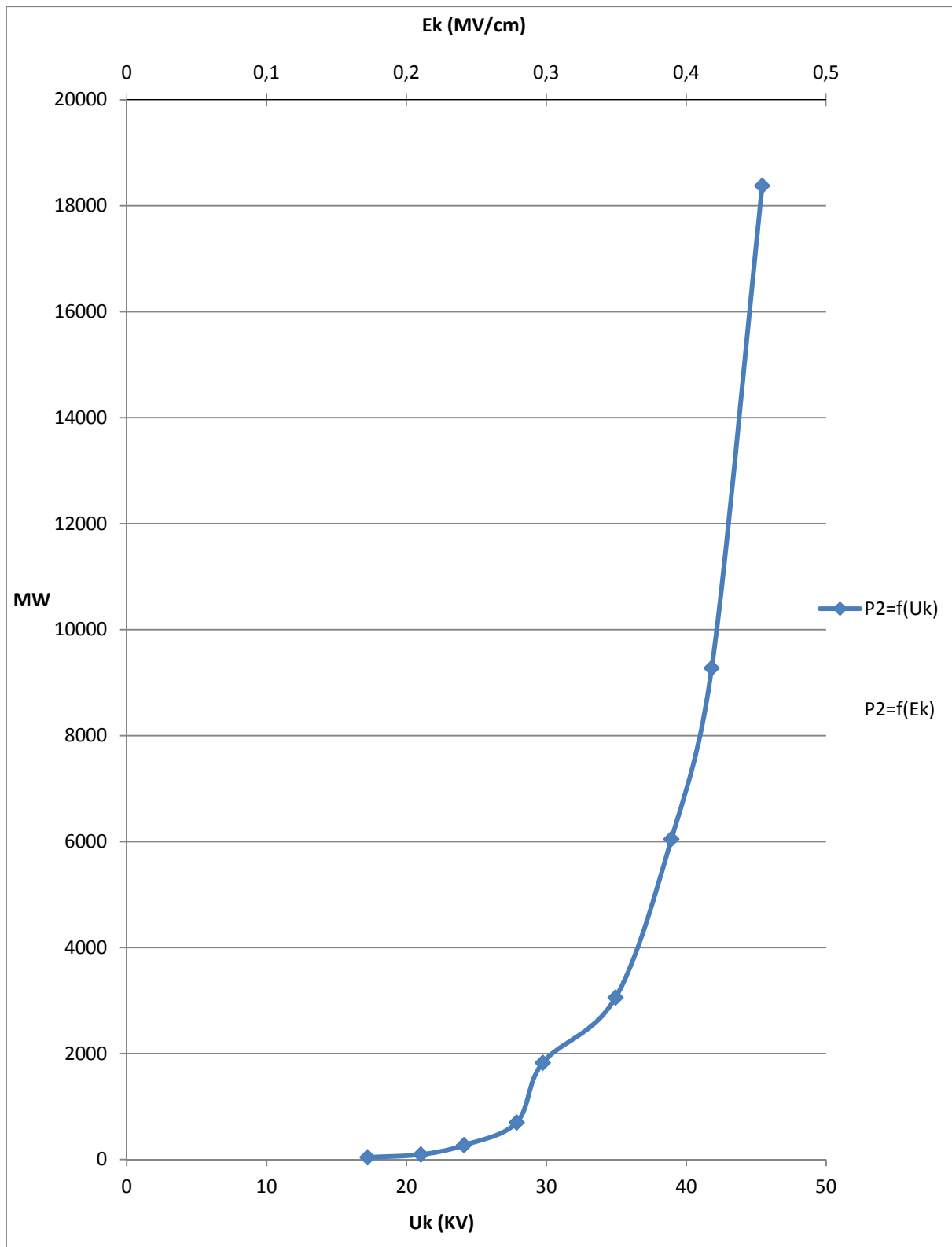


Σχήμα 3.4.2-9: Χαρακτηριστική $P_1=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση -250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 2mm

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

P₁: στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

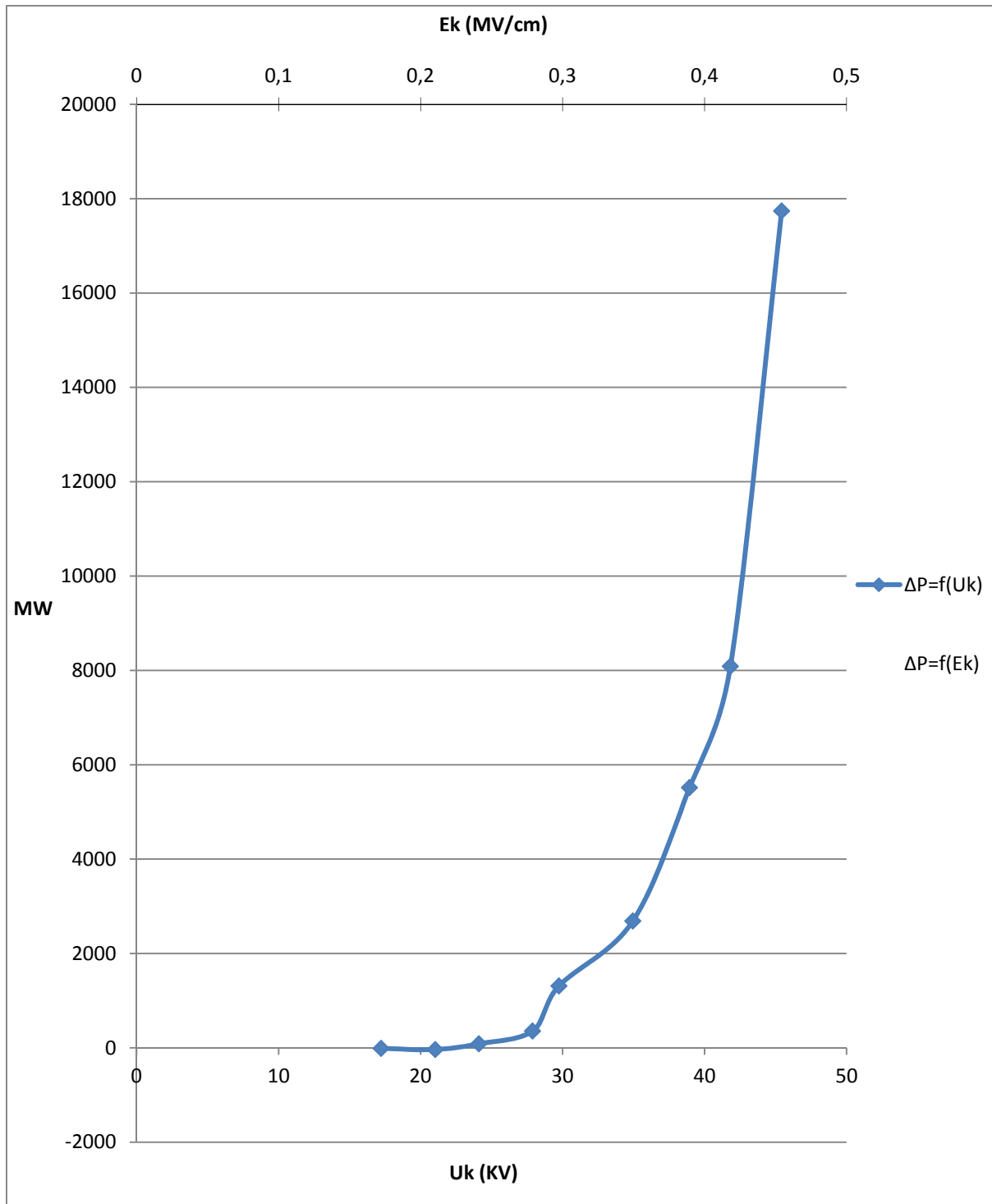


Σχήμα 3.4.2-10: Χαρακτηριστική $P_2=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητα $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm

P₂: στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.4.2-11: Χαρακτηριστική $\Delta P=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση - 250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 2mm

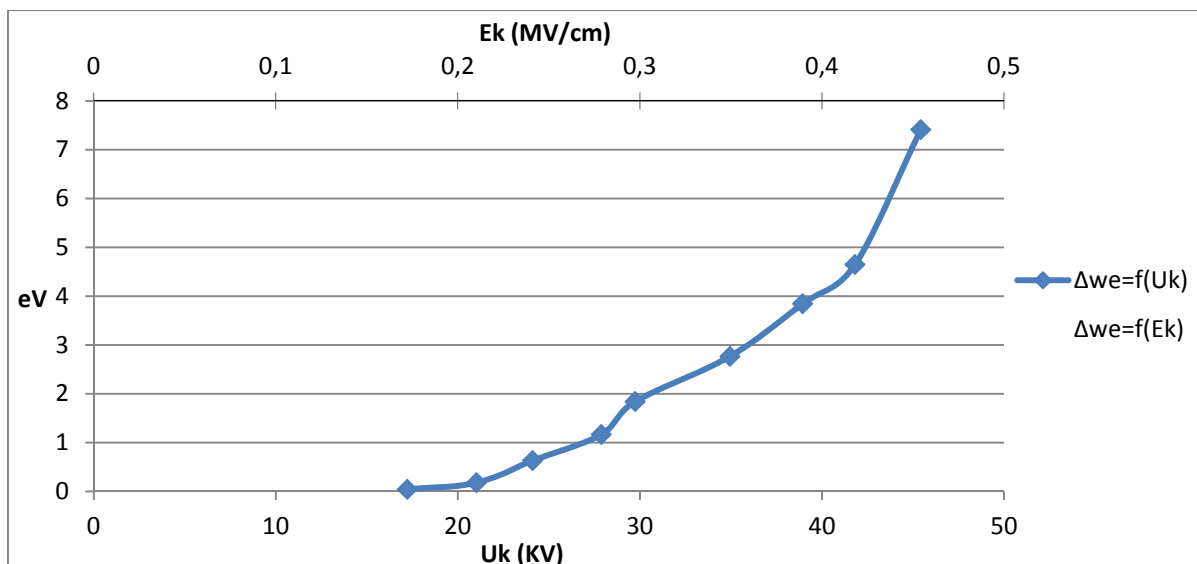
U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

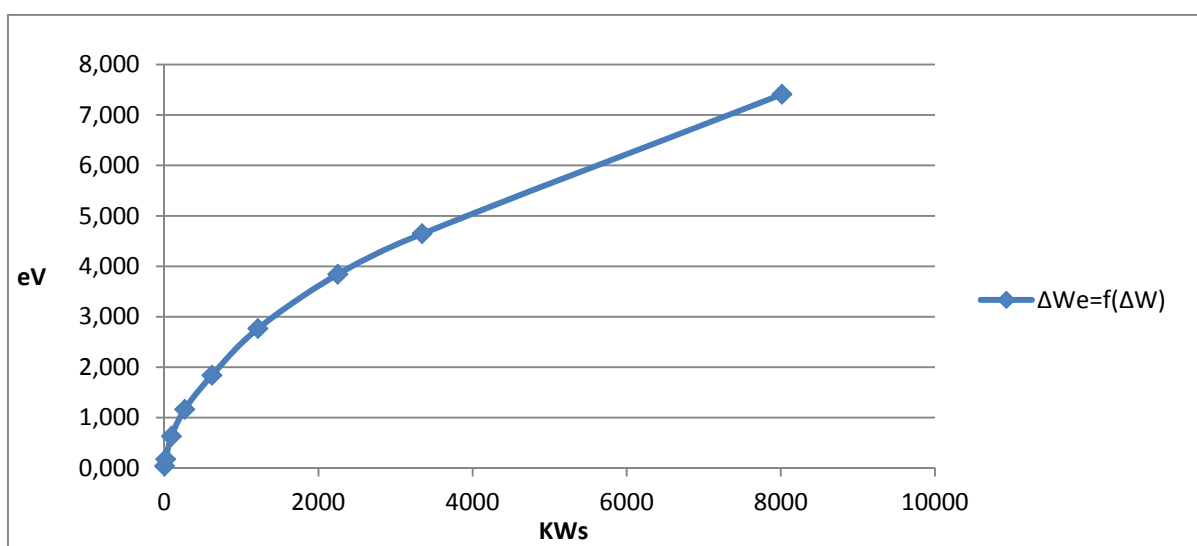
P_1 : στιγμιαία τιμή της ισχύος στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

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

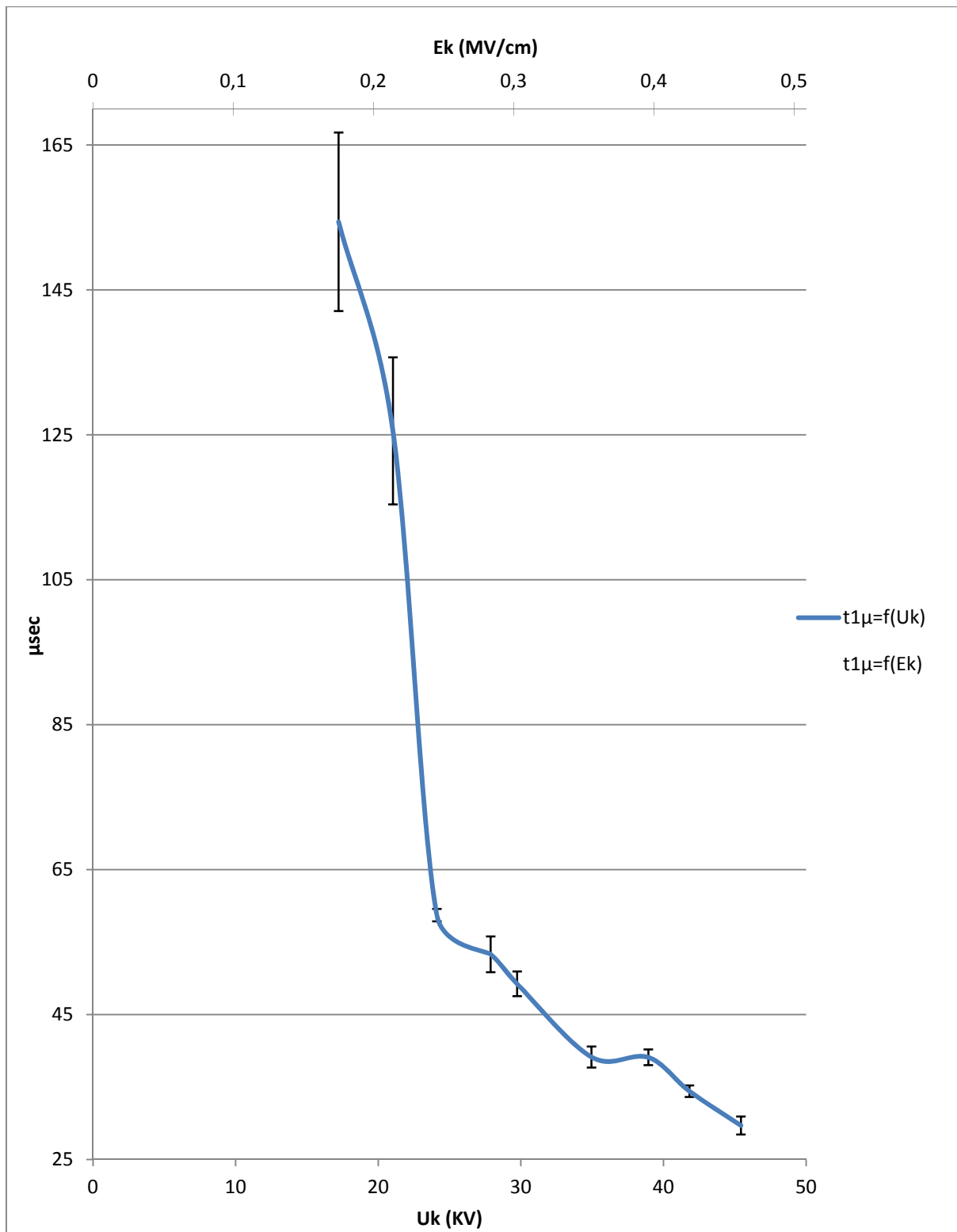
$\Delta P=P_2-P_1$



Σχήμα 3.4.2-12: Χαρακτηριστική $\Delta W_e=f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm
 ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.4.2-13: Χαρακτηριστική $\Delta W_e=f(\Delta W)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm
 ΔW : W_2-W_1
 ΔW_e : Ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων
 W_2 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
 W_1 : στιγμιαία τιμή της ενέργειας στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων

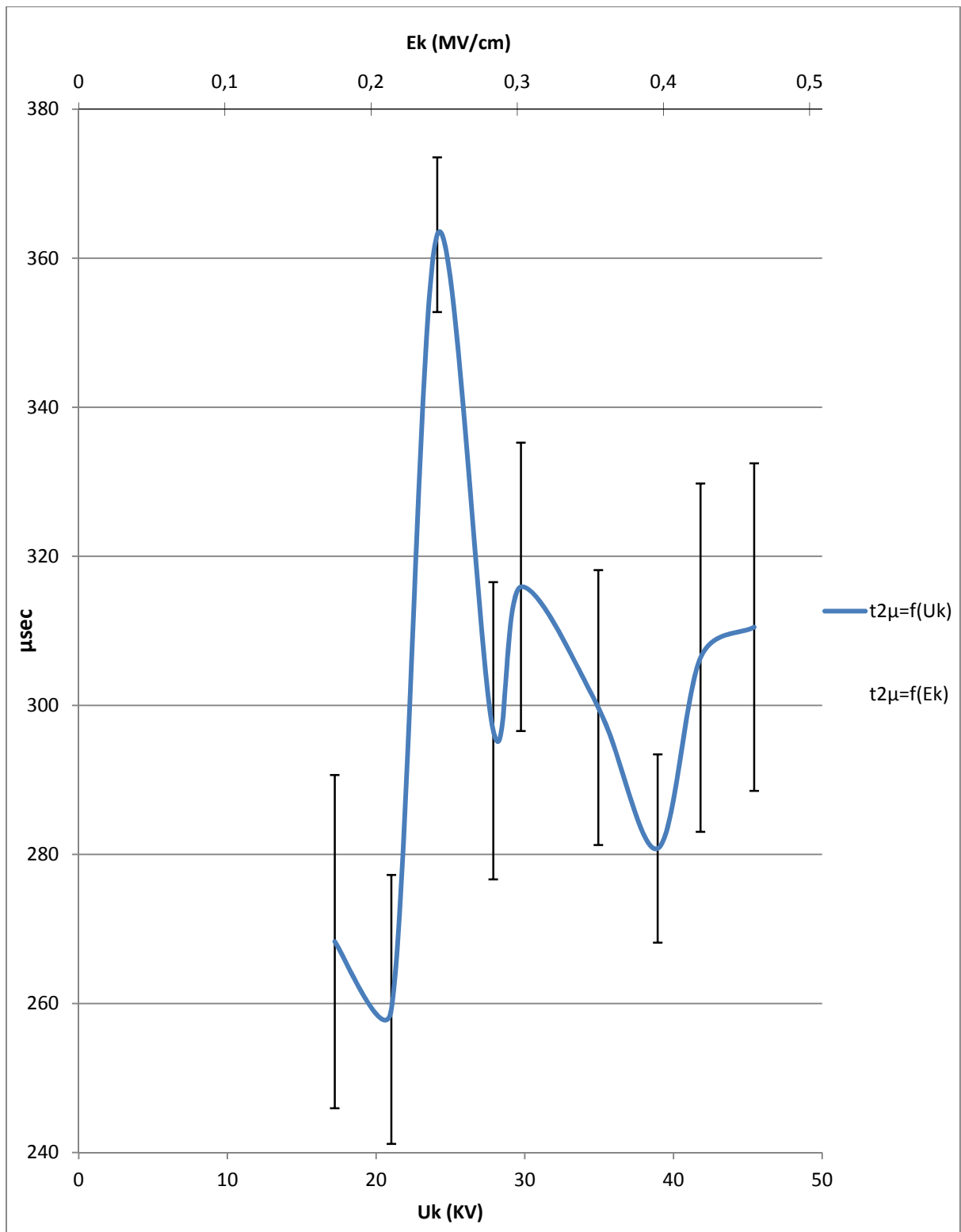


Σχήμα 3.4.2-14: Χαρακτηριστική $t_{1\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητα $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm

$t_{1\mu}$: Μέση αναμενόμενη τιμή χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

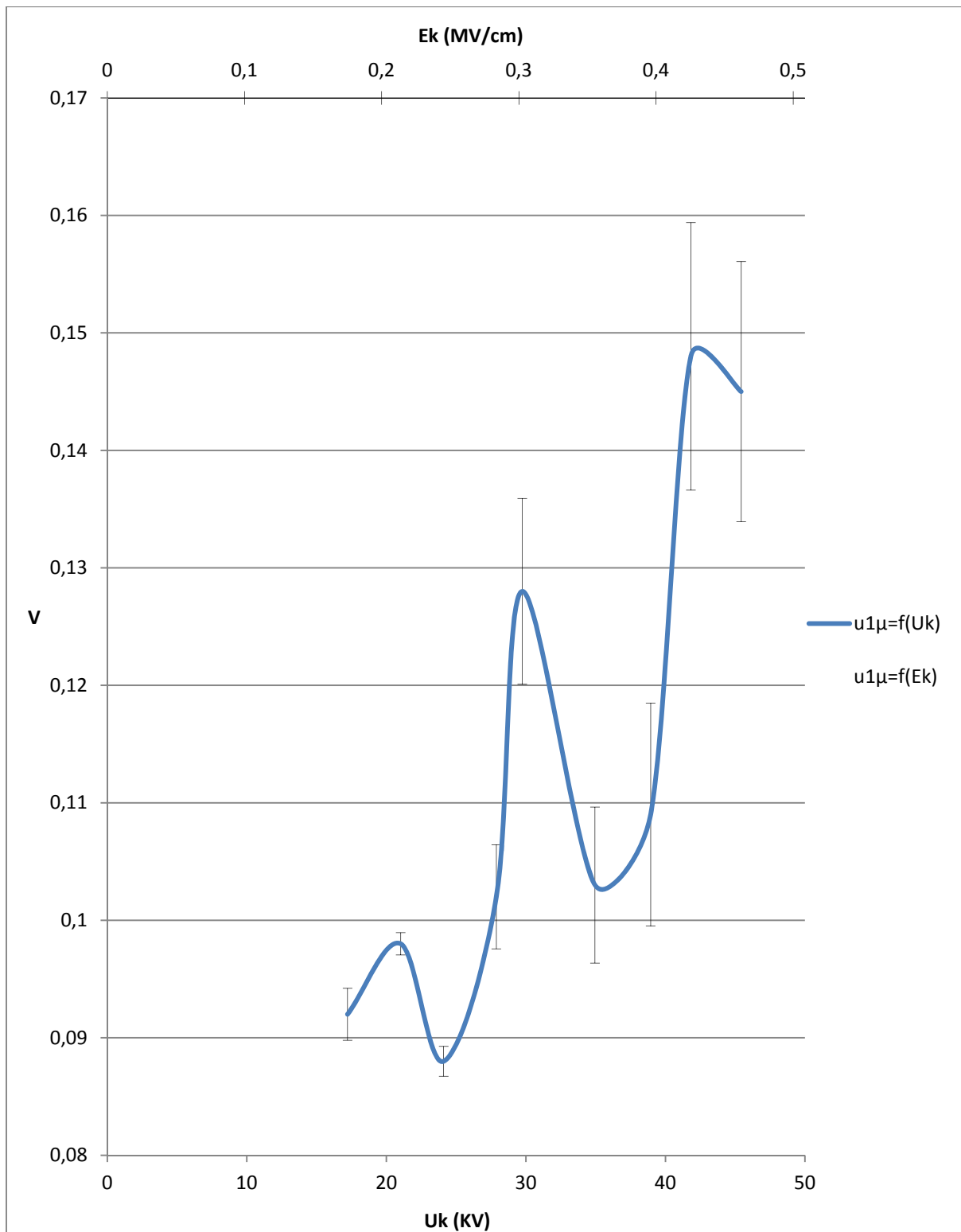


Σχήμα 3.4.2-15: Χαρακτηριστική $t_{2\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση - 250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 2mm

$t_{2\mu}$: Μέση αναμενόμενη τιμή χρόνου περαίωσης των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

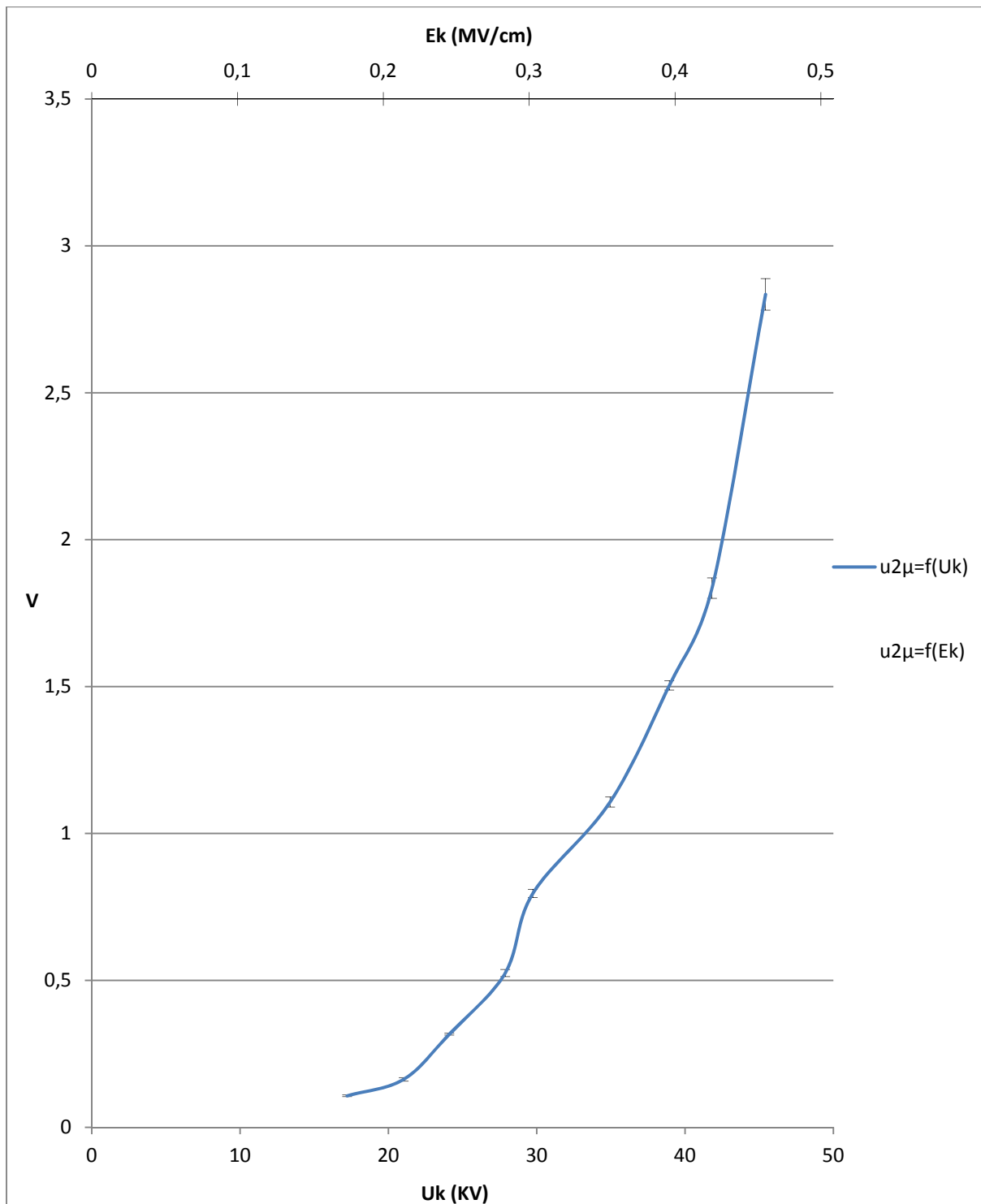


Σχήμα 3.4.2-16: Χαρακτηριστική $u_{1\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση $-250/2500\mu\text{s}$ και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητας $0,9\text{mm}$. Πάχος δοκιμίου 2mm

$u_{1\mu}$: Μέση αναμενόμενη τιμή της στιγμιαίας τιμής της τάσης στον C_m κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k



Σχήμα 3.4.2-17: Χαρακτηριστική $u_{2\mu} = f(U_k, E_k)$ κατά την καταπόνηση του συνδυασμού Pertinax-Λάδι μετασχηματιστών (θερμοκρασία ελαίου 80°C), υπό κρουστική τάση - 250/2500μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, καμπυλότητα 0,9mm. Πάχος δοκιμίου 1mm

u_{2μ}: Μέση αναμενόμενη τιμή της στιγμιαίας τιμής της τάσης στον C_m κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων, κατά την επανάληψη των μετρήσεων

U_k: μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E_k: ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην U_k

Σημείωση: Η τυπική απόκλιση είναι αμελητέα, γι αυτό το λόγο δεν είναι εμφανής στο διάγραμμα

4. Σχόλια επι των υπολογισμών

4.1 Μαθηματικές προσεγγίσεις

	α/α	Χαρακτηριστική	Μαθηματική προσέγγιση
+250/2500 d=1mm	3.1.2-1	$E_k=f(U_k)$	$y = 0,0149x - 4*10^{-16}$
	3.1.2-2	$Z_1=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0055x^4 - 0,4666x^3 + 14,809x^2 - 208,25x + 1125$
	3.1.2-3	$Z_2=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0149x^5 - 1,3698x^4 + 48,982x^3 - 849,57x^2 + 7136,9x - 22877$
	3.1.2-4	$\Delta Z=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0168x^5 - 1,5498x^4 + 55,7x^3 - 973,1x^2 + 8260,7x - 26983$
	3.1.2-5	$W_1=f(U_k, E_k)$	$y = -0,2803x^5 + 25,943x^4 - 937,79x^3 + 16534x^2 - 141911x + 476267$
	3.1.2-6	$t1=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0632x^3 + 4,0895x^2 - 86,952x + 634,1$
	3.1.2-7	$W_2=f(U_k, E_k)$	$y = 201,53e^{0,362x}$, $y = 1128x^3 - 46286x^2 + 631276x - 3E+06$
	3.1.2-8	$\Delta W=f(U_k, E_k)$	$y = 1130,9x^3 - 46463x^2 + 634585x - 3E+06$
	3.1.2-9	$P_1=f(U_k, E_k)$	$y = 0,003x^4 - 0,2779x^3 + 8,8601x^2 - 106,85x + 466,24$
	3.1.2-10	$P_2=f(U_k, E_k)$	$y = 0,768e^{0,3452x}$, $y = 2,4819x^3 - 98,743x^2 + 1312,7x - 5718,7$
	3.1.2-11	$\Delta P=f(U_k, E_k)$	$y = 2,5359x^3 - 101,65x^2 + 1352,3x - 5912,5$
	3.1.2-12	$\Delta W_e=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0005x^3 - 0,0103x^2 + 0,12x - 0,5909$
-250/2500 d=1mm	3.2.2-1	$E_k=f(U_k)$	$y = 0,0149x - 7E-16$
	3.2.2-2	$Z_1=f(U_k, E_k)$	$y = 683,88e^{-0,099x}$
	3.2.2-3	$Z_2=f(U_k, E_k)$	$y = 1,1827x^2 - 43,989x + 584,38$
	3.2.2-4	$\Delta Z=f(U_k, E_k)$	$y = 3,9528e^{0,1506x}$
	3.2.2-5	$W_1=f(U_k, E_k)$	$y = 870,34x^2 - 39045x + 452551$
	3.2.2-6	$t1=f(U_k, E_k)$	$y = 683,88e^{-0,099x}$
	3.2.2-7	$W_2=f(U_k, E_k)$	$y = 6,9365e^{0,474x}$
	3.2.2-8	$\Delta W=f(U_k, E_k)$	$y = 27279x^2 - 1E+06x + 9E+06$
	3.2.2-9	$P_1=f(U_k, E_k)$	$y = 8,5275x^2 - 356,46x + 3913,9$
	3.2.2-10	$P_2=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0623e^{0,4481x}$
	3.2.2-11	$\Delta P=f(U_k, E_k)$	$y = 114,79x^2 - 4247,4x + 38928$
	3.2.2-12	$\Delta W_e=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0419x^2 - 1,4321x + 12,134$

	α/α	Χαρακτηριστική	Μαθηματική Προσέγγιση
+250/2500 d=2mm	3.3.2-1	$E_k=f(U_k)$	$y = 0,0102x$
	3.3.2-2	$Z_1=f(U_k, E_k)$	$y = 7E-06x^6 - 0,0012x^5 + 0,0919x^4 - 3,5814x^3 + 76,661x^2 - 856,09x + 3943,4$
	3.3.2-3	$Z_2=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0028x^4 + 0,3519x^3 - 15,912x^2 + 306,6x - 1752,3$
	3.3.2-4	$\Delta Z=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0031x^4 + 0,3955x^3 - 18,209x^2 + 358,95x - 2215,8$
	3.3.2-5	$W_1=f(U_k, E_k)$	$y = -0,9907x^4 + 107,45x^3 - 4111,4x^2 + 66170x - 378465$
	3.3.2-6	$t_1=f(U_k, E_k)$	$y = 7E-06x^6 - 0,0012x^5 + 0,0919x^4 - 3,5814x^3 + 76,661x^2 - 856,09x + 3943,4$
	3.3.2-7	$W_2=f(U_k, E_k)$	$y = 4,0786x^5 - 537,84x^4 + 27775x^3 - 692091x^2 + 8E+06x - 4E+07$
	3.3.2-8	$\Delta W=f(U_k, E_k)$	$y = 4,0873x^5 - 538,12x^4 + 27740x^3 - 689951x^2 + 8E+06x - 4E+07$
	3.3.2-9	$P_1=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0008x^5 + 0,0812x^4 - 2,9925x^3 + 44,096x^2 - 175,69x - 699,76$
	3.3.2-10	$P_2=f(U_k, E_k)$	$y = 0,011x^5 - 1,4787x^4 + 77,74x^3 - 1964,5x^2 + 23785x - 110424$
	3.3.2-11	$\Delta P=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0117x^5 - 1,5599x^4 + 80,733x^3 - 2008,6x^2 + 23961x - 109724$
	3.3.2-12	$\Delta W_e=f(U_k, E_k)$	$y = 3E-06x^5 - 0,0003x^4 + 0,0162x^3 - 0,3662x^2 + 3,8328x - 14,953$
-250/2500 d=2mm	3.4.2-1	$E_k=f(U_k)$	$y = 0,0102x$
	3.4.2-2	$Z_1=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0132x^3 + 1,5008x^2 - 57,2x + 767,5$
	3.4.2-3	$Z_2=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0004x^5 + 0,0583x^4 - 3,5354x^3 + 103,3x^2 - 1446,2x + 8029,7$
	3.4.2-4	$\Delta Z=f(U_k, E_k)$	$y = -5E+06x^5 + 8E+06x^4 - 5E+06x^3 + 1E+06x^2 - 212084x + 11603$
	3.4.2-5	$W_1=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0159x^6 + 2,9489x^5 - 222,66x^4 + 8766,6x^3 - 189634x^2 + 2E+06x - 1E+07$
	3.4.2-6	$t_1=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0132x^3 + 1,5008x^2 - 57,2x + 767,5$
	3.4.2-7	$W_2=f(U_k, E_k)$	$y = 0,365x^6 - 62,567x^5 + 4400,3x^4 - 162321x^3 + 3E+06x^2 - 4E+07x + 2E+08$
	3.4.2-8	$\Delta W=f(U_k, E_k)$	$y = 0,381x^6 - 65,516x^5 + 4623x^4 - 171087x^3 + 4E+06x^2 - 4E+07x + 2E+08$
	3.4.2-9	$P_1=f(U_k, E_k)$	$y = -0,0007x^6 + 0,135x^5 - 10,006x^4 + 386,74x^3 - 8219,6x^2 + 91060x - 410757$
	3.4.2-10	$P_2=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0062x^5 - 0,8381x^4 + 44,981x^3 - 1174,9x^2 + 14907x - 73575$
	3.4.2-11	$\Delta P=f(U_k, E_k)$	$y = 0,0007x^6 - 0,1279x^5 + 9,0908x^4 - 338,68x^3 + 6976,7x^2 - 75370x + 333526$
	3.4.2-12	$\Delta W_e=f(U_k, E_k)$	$y = 3E-06x^5 - 0,0004x^4 + 0,0238x^3 - 0,6143x^2 + 7,6233x - 36,767$

4.2 Φυσική ερμηνεία

Όπως αναφέρθηκε στην παραγραφο 1.3, μακροσκοπικά τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης διέπονται απο τέσσερεις παράγοντες που είναι:

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

Στην υπο εξέταση περίπτωση, λόγω κρουστικής τάσης εκδηλώνονται οι μερικές εκκενώσεις και οι δυνάμεις Coulomb, και συνεπώς το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής καταπόνησης του δοκιμίου είναι ο συνδυασμός των δύο αυτών παραγόντων. Συγκεκριμένα, όταν το φορτίο αυξάνει εκθετικά, υπερισχύουν οι μερικές εκκενώσεις λόγω του ιονισμού με κρούσεις (βλέπε παράγραφο 1.4), ενώ όταν υπερισχύουν οι δυνάμεις Coulomb, υπαναχωρεί το φορτίο λόγω μερικών εκκενώσεων, επειδή η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται για την μηχανική καταπόνηση του δοκιμίου. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο, χαρακτηριστικές μεγεθών που είναι ανάλογα του φορτίου, όπως η ισχύς και η ενέργεια, να έχουν εκθετική μορφή. Π.χ. χαρακτηριστικές 3.1.2-7, 3.1.2-10, 3.3.2-7.

Για τα υπόλοιπα μεγέθη δεν έχει διατυπωθεί κάποια φυσική ερμηνεία για τις αυξομειώσεις που υφίστανται αναλόγως της τιμής της τάσης, δεδομένου ότι ο ιονισμός με κρούσεις έχει ερευνηθεί μόνο για το φορτίο, συναρτήσει της τάσης (ή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου).

5. Συμβολή της εργασίας στην έρευνα και την πρακτική εφαρμογή

Η εργασία αυτή είναι μια συμβολή στην διερεύνηση των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης στον συνδυασμό στερεό-υγρό μονωτικό. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προκύπτει ότι η γήρανση και διάσπαση του παραπάνω συνδυασμού οφείλεται στον ιονισμό με κρούσεις, ο οποίος θεωρείται ότι εκδηλώνεται σε στερεά μονωτικά. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την διερεύνηση των φαινομένων, μπορεί να είναι χρήσιμη στις πρακτικές εφαρμογές για λόγους σύγκρισης ισοδυνάμων μονωτικών υλικών.

6. Βιβλιογραφία

- [1] Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος: “Μετρήσεις σε Βιομηχανικές Διατάξεις και Υλικά”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2004
- [2] Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος: “Βιομηχανικές Διατάξεις και υλικά”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2003