



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

Μία διερεύνηση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάσπαση σε στερεά ηλεκτρομονωτικά, στον ατμοσφαιρικό αέρα, υπό κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$, μέσω μετρήσεων των μερικών εκκενώσεων με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δέσποινα Δ. Δημητριάδου

Αθήνα, Ιούνιος 2016



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

Μία διερεύνηση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάσπαση σε στερεά ηλεκτρομονωτικά, στον ατμοσφαιρικό αέρα, υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, μέσω μετρήσεων των μερικών εκκενώσεων με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δέσποινα Δ. Δημητριάδου

Συμβουλευτική Επιτροπή : Περικλής Δ. Μπούρκας
Νικόλαος Ι. Θεοδώρου
Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την ^η Ιουνίου 2016.

.....
Π. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....
Μ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Ε. Πυργιώτη
Επίκουρος Καθηγήτρια
Πανεπιστημίου Πατρών

Αθήνα, Ιούνιος 2016

.....
Δέσποινα Δ. Δημητριάδου

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

Copyright © Δέσποινα Δ. Δημητριάδου, 2016
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.

*στη μνήμη του πατέρα μου
Δημήτρη*

Πρόλογος

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων, στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στο πλαίσιο της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής με θέμα τις μερικές εκκενώσεις.

Από τη θέση αυτή επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά τον ομότιμο καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα για τις οδηγίες και τις συμβουλές του, κάθε στιγμή που τις χρειάστηκα, καθώς και για τον ιδιαίτερα σημαντικό χρόνο που μου διέθεσε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας, η επιστημονική του καθοδήγηση, η συμπαράσταση και η υποστήριξή τους ήταν πολύτιμες ώστε να αντιμετωπίσω τις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν. Αποτέλεσε ένα μάθημα ζωής για ολόκληρη τη ζωή μου και για οποιαδήποτε πτυχή της.

Ιδιαίτερα επιθυμώ να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής για τη συστηματική καθοδήγηση και το ουσιαστικό ενδιαφέρον τους καθ' όλο το χρονικό διάστημα που πραγματοποιούσα την εργασία αυτή, καθηγητές κ.κ. Νικόλαο Θεοδώρου και Κωνσταντίνο Καραγιαννόπουλο. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους διδάκτορες ηλεκτρολόγους μηχανικούς, Αικατερίνη Πολυκράτη και Κωνσταντίνο Χαλεβίδη για την άριστη συνεργασία μας και την πολύπλευρη βοήθεια τους που τόσο πρόθυμα μου πρόσφεραν σε όλα τα στάδια σύνθεσης της εργασίας.

Ευχαριστίες οφείλω σε φίλους και συνεργάτες οι οποίοι με βοήθησαν σε διάφορα στάδια της εργασίας αυτής. Χωρίς τη βοήθειά τους η παρούσα εργασία δεν θα είχε αυτή τη μορφή.

Στο τέλος αφήνω το σύζυγό μου, Μιχάλη, για τη συμπαράσταση, βοήθεια και κατανόηση που έδειξε σε όλα τα στάδια αυτής της προσπάθειας. Φυσικά δεν θα μπορούσα να παραλείψω τα παιδιά μου, Ιωάννα και Βασίλη για το χρόνο που τους στέρησα προκειμένου να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή.

Δέσποινα Δ. Δημητριάδου

Αθήνα, Ιούνιος 2016

Περίληψη

Η εργασία αυτή αποτελεί μία διερεύνηση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση στερεών ηλεκτρομονωτικών, στον ατμοσφαιρικό αέρα, υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, μέσω μετρήσεων των μερικών εκκενώσεων με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η εργασία περιλαμβάνει έξι κεφάλαια.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη αναφορά στη μακροσκοπική και κβαντική θεωρία για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση στο συνδυασμό στερεού ηλεκτρομονωτικού υπό διάφορες μορφές τάσεων, από όπου καταδεικνύεται ο σκοπός της εργασίας αυτής, στο δεύτερο κεφάλαιο, που είναι η διερεύνηση του εν λόγω φαινομένου στο συνδυασμό στερεό ηλεκτρομονωτικό – ατμοσφαιρικός αέρας. Ως τάση δοκιμής επιλέχθηκε η κρουστική τάση 1,2/50μs, τα δε στερεά μονωτικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το πέριναξ και το χαρτί μετασχηματιστών. Για να εκφραστεί η δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών τα ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης ήταν ακίδα-πλάκα.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίνονται οι διαδικασίες των μετρήσεων μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή και καθορίζεται ως μετρούμενο μέγεθος η συνολική αύξηση της τάσης Δu_m κατά την εκδήλωση αλμάτων δυναμικού.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που δίνονται στο κεφάλαιο τέσσερα είναι κατά κύριο λόγο, οι χαρακτηριστικές $\Delta u_m = f(U_k, E_k)$, $\Delta Q = f(U_k, E_k)$ και $\Delta W = f(U_k, E_k)$. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $\Delta Q = f(U_k, E_k)$, η οποία είναι εκθετικής μορφής και η οποία προσεγγίζεται μαθηματικά με τη σχέση: $\Delta Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2}$, που θεωρείται πως αποδίδει τον ιονισμό με κρούσεις κατά τη γήρανση και διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών υλικών. Από τη χαρακτηριστική $\Delta W = f(U_k, E_k)$ φαίνεται πως κατά τη διάσπαση του στερεού ηλεκτρομονωτικού εκπέμπεται ακτινοβολία στην περιοχή των μαλακών ακτίνων X. Φαίνεται επίσης ότι η γήρανση πλησίον της τάσης διάσπασης σχετίζεται με υπεριώδεις ακτινοβολίες. Οι παραπάνω ακτινοβολίες καταγράφηκαν και μέσω της προσβολής του φωτογραφικού φιλμ.

Τα σχόλια επί των πειραματικών και των θεωρητικών αποτελεσμάτων που προαναφέρθηκαν δίνονται στο τέταρτο κεφάλαιο. Συμπερασματικά φαίνεται ότι τα φαινόμενα που εκδηλώνονται στα στερεά ηλεκτρομονωτικά σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs είναι ίδια με εκείνα στο συνδυασμό ηλεκτρομονωτικό έλαιο μετασχηματιστών. Στην εργασία προτείνονται ισοδύναμα κυκλώματα τα οποία αποδίδουν τη μακροσκοπική και κβαντική θεωρία προ και κατά τη διάσπαση.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται ένα αντιπροσωπευτικό περιστατικό εκδήλωσης σπινθηρισμών (μερικών εκκενώσεων) λόγω ξένων επικαθήσεων σε μονωτήρες πορσελάνης μέσης τάσης στο δίκτυο διανομής. Ενώ στο έκτο κεφάλαιο δίνεται περιληπτικά η συνεισφορά της εργασίας στην έρευνα και τις πρακτικές εφαρμογές.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής υλοποιήθηκε πρόγραμμα με την χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic, στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, το οποίο δίνεται στο Παράρτημα Ι. Με την χρήση του προγράμματος γίνεται ο υπολογισμός των μεγεθών: α) της ενέργειας ΔW των ελεύθερων ηλεκτρονίων, β) του ηλεκτρικού φορτίου ΔQ , γ) του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρονίων N που συλλέχθηκαν από την άνοδο, δ) της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων v , ε) της κινητικότητάς τους μ , της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του στερεού σ , στ) της πυκνότητας του ρεύματος J , ζ) της συχνότητας f , της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και η) του μήκους κύματος λ . Ο υπολογισμός αυτών των μεγεθών είναι δυνατός για τα δύο υλικά που ερευνήθηκαν στην παρούσα εργασία, το πέριναξ και το χαρτί μετασχηματιστών. Στο τέλος δίνεται επίσης ένα παράδειγμα χρήσης του προγράμματος υπολογισμού των παραπάνω μεγεθών για καθένα από τα δύο υπό εξέταση υλικά.

Abstract

This thesis is the investigation of the events before and during breakdown of electrical insulators, in air, under impulse voltages 1.2 / 50 μ s through measurements of partial discharges via computer. The paper includes six chapters.

Initially, there is a brief reference concerning the microscopic and quantum theory for the phenomena before and during breakdown in the conjunction of solid electrically insulator - solid under various forms of stress. The purpose of this work is the investigation of those phenomena to the combination of solid electrically - atmospheric air breakdown. As a test voltage selects the impulse voltage 1.2 / 50ms, and the solid insulation used were pertinax and transformers' paper. To express an unfavorable situation test electrodes were pin-plate.

The third section gives the measurement procedures via computer and set as a measured magnitude of the temporal change in voltage in a measuring capacitor, the total increase of Dum voltage from the start of partial discharges up cleavage.

The results of the measurements given in chapter four is the characteristics $\Delta u_m = f(U_k, E_k)$, $DQ = f(U_k, E_k)$ and $\Delta W = f(U_k, E_k)$. Particular importance has the typical $\Delta Q = f(U_k, E_k)$, which is approximated mathematically by the relationship:

$\Delta Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2}$ and can be considered that yields the ionization impacts in the aging and degradation of electrical insulating materials. From the characteristic? $W = f(U_k, E_k)$ appears during breakdown of solid electrically emitted radiation in the range of soft X-ray. It also appears that aging near the breakdown voltage associated with ultraviolet radiation. These radiations recorded through the attack of the photographic film.

Comments on the experimental and theoretical results mentioned above are given in the fourth chapter. In conclusion it seems that the effects are the same as those in the combination oil. This thesis proposes equivalent circuits which perform the theory of macroscopic and quantum theory before and during breakdown.

The fifth chapter analyzes a representative event which occurred (partial discharges) due to foreign deposits in porcelain insulators MV distribution network.

The sixth chapter provides summary contribution of working in research and practical applications.

As part of this work was implemented program using the Visual Basic programming language, which is given in Annex I. The use of this program is the calculation of sizes: a) ΔW the energy of free electrons, b) electric charge ΔQ , c) the number of free electrons N collected from the anode, d) the speed of free electrons v , e) their mobility μ , the specific electrical

conductivity of the solid σ , f) of the current density J , g) the frequency f of the emitted radiation and h) of the wavelength λ . The calculation of these sizes can be specified for both materials investigated in this work, pertinax and transformers' paper. At the end also an example is given of use of the above size calculation program for each of the two test materials.

Περιεχόμενα

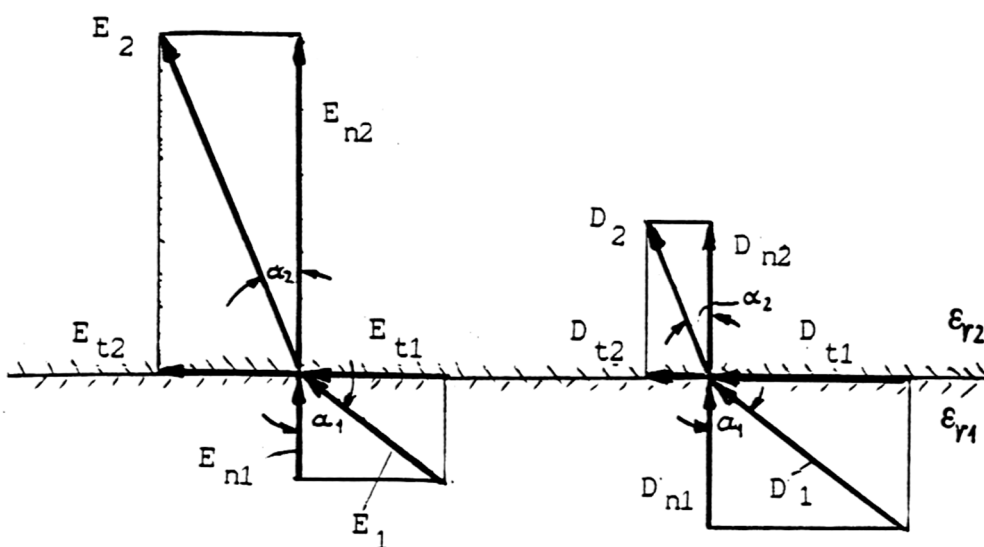
| | |
|---|----|
| Πρόλογος..... | 7 |
| Περίληψη | 8 |
| Abstract | 10 |
| Περιεχόμενα..... | 12 |
| 1. Εισαγωγή..... | 14 |
| 1.1. Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών εντός ελαίου μετασχηματιστών..... | 18 |
| 1.1.1. Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ της διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών εντός ελαίου μετασχηματιστών..... | 19 |
| Α. Η θερμική διάτρηση λόγω των απωλειών Joule | 19 |
| Β. Η ηλεκτρική διάτρηση λόγω των δυνάμεων Coulomb | 22 |
| Γ. Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης)..... | 24 |
| Δ. Η θερμοχημική διάτρηση..... | 29 |
| Ε. Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης..... | 31 |
| 1.1.2. Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών σε περιβάλλον ελαίου μετασχηματιστών | 39 |
| 1.1.3. Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικό – έλαιομετασχηματιστών»..... | 41 |
| 1.1.4. Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών σε περιβάλλον ελαίου μετασχηματιστών. | 43 |
| 2. Σκοπός της εργασίας..... | 45 |
| 3. Οι μετρήσεις που έγιναν..... | 47 |
| 3.1. Πειραματική διερεύνηση της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων σε στερεά ηλεκτρομονωτικά των πρακτικών εφαρμογών (πέτριναξ και χαρτί μετασχηματιστών) υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. | 47 |
| 3.1.1. Η διαδικασία των μετρήσεων των μερικών εκκενώσεων στα δοκίμια | 47 |
| 3.2. Το κύκλωμα των μετρήσεων και η διαδικασία των μετρήσεων..... | 49 |
| 3.3. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων | 54 |
| 4. Σχόλια επί των αποτελεσμάτων των μετρήσεων..... | 82 |
| 5. Η εκδήλωση σπινθηρισμών σε μονωτήρες πορσελάνης μέσης τάσης | 97 |

| | |
|--|-----|
| 6. Συμβολή της εργασίας στην έρευνα και στις πρακτικές εφαρμογές | 106 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι..... | 109 |
| Βιβλιογραφία..... | 114 |

1. Εισαγωγή

Τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών αερίων έχουν επεξηγηθεί ικανοποιητικά. Αυτό οφείλεται βασικά στη μικρή σταθερότητα των μορίων τους, ως προς εκείνη των υγρών και προ πάντων των στερεών ηλεκτρομονωτικών, με αποτέλεσμα να επανέρχεται το αέριο μετά τη διάσπαση (ή μετά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων, όταν διακοπεί η ηλεκτροδότηση) στην αρχική του κατάσταση. Στα στερεά ηλεκτρομονωτικά, η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη και η διάσπαση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σε αυτά (κάψιμο, τήξη, μηχανικές κακώσεις, κ.λ.π.). Επίσης, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών, 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 ηλεκτρομονωτικών υλικών, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται κατά τη διάσπαση ή να αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες (λόγω επιφανειακής διάσπασης ή υπερπήδησης ή εξ αιτίας μερικών εκκενώσεων) είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού της γήρανσης και της διάσπασής τους [43].

Στην πράξη συναντάται συχνότατα η χρησιμοποίηση στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. Στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ στερεού ηλεκτρομονωτικού και ατμοσφαιρικού αέρα (βλ. σχήμα 1-1) συμβαίνει διάθλαση των γραμμών του πεδίου σύμφωνα με την σχέση [43]:



Σχήμα 1-1: Διάθλαση των γραμμών του πεδίου στη διαχωριστική επιφάνεια δύο διηλεκτρικών [43].

$$\frac{\tan \alpha_2}{\tan \alpha_1} = \frac{E_{t2} \cdot \varepsilon_{r2}}{E_{t1} \cdot \varepsilon_{r1}} \quad (1-1)$$

όπου E_{t2} η επιφανειακή συνιστώσα της πεδιακής έντασης στον ατμοσφαιρικό αέρα, ε_{r2} η σχετική διηλεκτρική σταθερά του αέρα, E_{t1} η επιφανειακή συνιστώσα της πεδιακής έντασης στο στερεό ηλεκτρομονωτικό και ε_{r1} η σχετική διηλεκτρική σταθερά του στερεού ηλεκτρομονωτικού,

$E_{t1} = E_{t2}$ είναι :

$$\frac{\tan \alpha_2}{\tan \alpha_1} = \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}} \quad (1-2)$$

Από τη σχέση 1-2 συμπεραίνεται ότι, επειδή η σχετική διηλεκτρική σταθερά του ατμοσφαιρικού αέρα είναι $\varepsilon_{r2} \approx 1$, μειώνεται η γωνία εξόδου α_2 ανάλογα με την τιμή ε_{r1} . Για μεγάλες τιμές ε_{r1} (π.χ. γαλί ή πορσελάνη) οι γραμμές του πεδίου εξέρχονται στον αέρα περίπου κάθετες στη διαχωριστική επιφάνεια. Επίσης, συμπεραίνεται, ότι στην περίπτωση του ομογενούς πεδίου ($\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$), ισχύει:

$$\bar{E}_1 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \bar{E}_2 \quad (1-3)$$

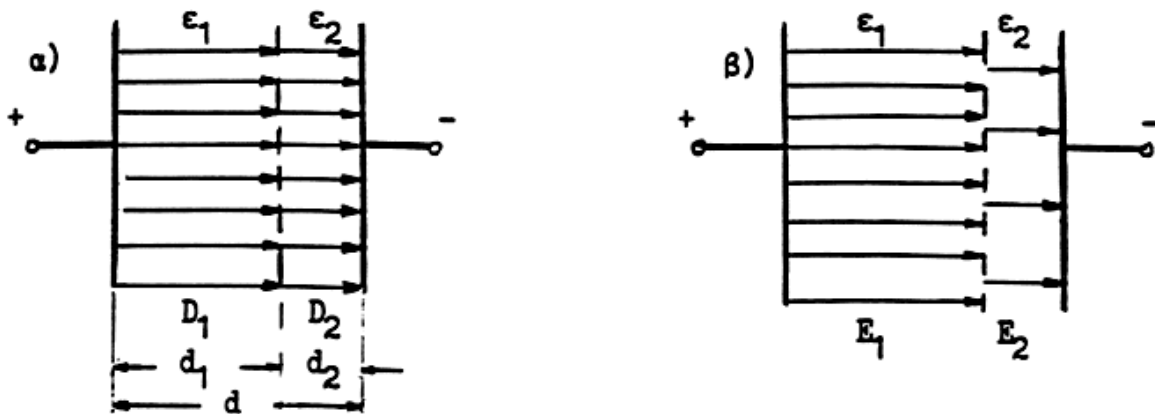
Από παραπάνω σχέση φαίνεται, ότι το μονωτικό με μικρότερη διηλεκτρική σταθερά, που είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, καταπονούνται από τις δυνάμεις του ηλεκτρικού πεδίου περισσότερο. Το μειονέκτημα αυτό του αέρα, να καταπονείται περισσότερο από τα στερεά ηλεκτρομονωτικά που περιβάλλει, έχει ως αποτέλεσμα, σε συνδυασμό με συγκέντρωση ξένων επικαθήσεων στην επιφάνεια των στερεών ηλεκτρομονωτικών (κυρίως σκόνη, καθαλατώσεις, καπναιθάλη, κλπ.), την μείωση της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών, η οποία διαπιστώνεται συνήθως στην πράξη από την εκδήλωση φαινομένων ιονισμού, υπό μορφή φωτεινής ακτινοβολίας συνοδευόμενης με τριγμούς [43]. Επίσης, ο ατμοσφαιρικός αέρας προκαλεί βλάβες στα στερεά και υγρά ηλεκτρομονωτικά, όταν εγκλωβίζονται σ' αυτά, γιατί τότε επενεργεί ως ανεπιθύμητη ανομοιογένεια, η οποία μειώνει (κυρίως λόγω μερικών εκκενώσεων) τη διηλεκτρική αντοχή των στερεών και υγρών μονωτικών [43].

Η ανεπιθύμητη συνεργασία του αέρα με τα στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά εξετάζεται παρακάτω στο παράδειγμα του σχήματος 1-2, που δίνεται στη βιβλιογραφία [43]: Σύμφωνα με το εν λόγω παράδειγμα, σε ομογενές πεδίο με απόσταση μεταξύ των επιπέδων

ηλεκτροδίων $d=1$ cm και εναλλασσόμενη τάση ενεργού τιμής 20 kV πρόκειται να χρησιμοποιηθούν τα μονωτικά: ατμοσφαιρικός αέρας και πορσελάνη. Η διαχωριστική επιφάνεια των παραπάνω μονωτικών είναι παράλληλη προς τα ηλεκτρόδια. Η πορσελάνη καταλαμβάνει 0,8 cm και ο αέρας 0,2 cm. Η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι 21 kV/cm και της πορσελάνης π.χ. 200 kV/cm.

Τα ερωτήματα που τίθενται είναι:

- 1) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο παραπάνω συνδυασμός των μονωτικών, ως μόνωση του πυκνωτή;
- 2) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ο αέρας σε όλο τον χώρο;
- 3) Ποια θα μπορούσε να είναι η ενεργός τιμή της τάσης (χωρίς να συμβεί διάσπαση), όταν χρησιμοποιηθεί μόνο η πορσελάνη σε όλο το χώρο;



Σχήμα 1-2: Παράδειγμα της ανεπιθύμητης συνεργασίας του ατμοσφαιρικού αέρα με στερεό ηλεκτρομονωτικό [43].

D : ηλεκτρική ροή

E : πεδιακή ένταση

ϵ : διηλεκτρική σταθερά

Οι απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα αυτά είναι οι ακόλουθες:

- 1) Για δύο ηλεκτρομονωτικά κατά το σχήμα 1-2 ισχύει γενικά ότι:

Επειδή το πεδίο είναι ομογενές ισχύει:

$$U = E_1 d_1 + E_2 d_2 = E_2 \frac{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2}{\epsilon_1} \quad (1.4)$$

ή:

$$E_2 = \frac{\epsilon_1 U}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2} = \frac{\epsilon_{r1} U}{\epsilon_{r2} d_1 + \epsilon_{r1} d_2} \quad (1.5)$$

και

$$E_1 = \frac{\epsilon_2 U}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2} = \frac{\epsilon_{r2} U}{\epsilon_{r2} d_1 + \epsilon_{r1} d_2} \quad (1.6)$$

Επομένως ισχύει για το γυαλί:

$$E_2 = \frac{\epsilon_{r2} U}{\epsilon_{r2} d_1 + \epsilon_{r1} d_2} \quad (1.7)$$

ή με $\epsilon_{r2} = 1$ και $\epsilon_{r1} = 6$ είναι:

$$E_1 = 10 \text{ kV/cm} \quad (1-8)$$

και συνεπώς για τον αέρα ισχύει:

$$E_2 = E_1 \epsilon_{r1} / \epsilon_{r2} = 60 \text{ kV/cm} \quad \text{υπολογίστη} \\ (1-9)$$

Συνεπώς, εκ των ανωτέρω φαίνεται ότι η πορσελάνη καταπονείται ελάχιστα, ενώ ο αέρας διασπάται.

- 2) Με μονωτικό μόνο τον αέρα είναι : $E = 20 \text{ kV/cm} < 21 \text{ kV/cm}$. Επομένως ο αέρας καλύπτει τις απαιτήσεις μόνωσης.
- 3) Η συγκεκριμένη πορσελάνη έχει διηλεκτρική αντοχή 200 kV/cm και επομένως καλύπτει τις απαιτήσεις μόνωσης για τάσεις μικρότερες από 200 kV .

Από τα ανωτέρω γίνεται φανερό, ότι για την διαχρονική διατήρηση της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών ηλεκτρομονωτικών σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα είναι χρήσιμο να γνωρίζει κανείς τον μηχανισμό ιονισμού που εκδηλώνεται, λόγω ξένων επικαθίσεων (καθαλατώσεις, σκόνη, καπναιθάλη, υγρασία, κλπ.) στην διαχωριστική επιφάνεια των δύο διηλεκτρικών (στην οποία θεωρείται ότι συμμετέχει το στερεό ηλεκτρομονωτικό σε βάθος μέχρι 30 \AA [6, 43]), γιατί αυτό θα διευκολύνει στην αναζήτηση μέτρων προστασίας στις πρακτικές εφαρμογές (τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον), όπως αυτό καθίσταται αναγκαίο π.χ. κατά την αποκοπή μίας ξύλινης τραβέρσας του δικτύου μέσης τάσης λόγω ισχυρών μερικών εκκενώσεων σε μονωτήρα πορσελάνης ή κατά την θερμική καταπόνηση του προαναφερθέντα μονωτήρα σε περιβάλλον πυρκαγιάς [43, 44] κλπ.

Πληροφορίες για τον σκοπό αυτό μπορούν να αναζητηθούν από έρευνες των φαινομένων ιονισμού που έχουν γίνει στην διαχωριστική επιφάνεια του συνδυασμού «στερεό ηλεκτρομονωτικό - έλαιο μετασχηματιστών» [9, 15, 16 18, 19, 20÷39, 43, 44]. Πράγματι, τα τελευταία χρόνια έχει γίνει σημαντική έρευνα για τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ και κατά την διάσπαση στον συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικό - λάδι μετασχηματιστών», υπό διάφορες μορφές τάσεων (κρουστική τάση διαφόρων μορφών, εναλλασσόμενη τάση και συνεχή τάση) [9, 33-36, 43, 44], από όπου έχει προκύψει ένας μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων σε επιστημονικά περιοδικά υψηλού κύρους [15, 16, 18-20, 32]. Ακολούθως γίνεται μία σύντομη αναφορά στο εν λόγω ερευνητικό έργο γιατί αποτελεί την υποδομή επί της οποίας βασίστηκε η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή για την διερεύνηση των φαινομένων ιονισμού προ και κατά την διάσπαση του συνδυασμού «στερεό ηλεκτρομονωτικό-ατμοσφαιρικός αέρας».

1.1. Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών εντός ελαίου μετασχηματιστών

Από τις διάφορες έρευνες, που έχουν γίνει, για τα φαινόμενα προ και κατά την διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών εντός ελαίου μετασχηματιστών μπορεί κανείς να ομαδοποιήσει τις μεθόδους, που εφαρμόζονται για τη διερεύνηση των εν λόγω φαινομένων, σε δύο βασικές θεωρίες [1-44]:

1. τη μακροσκοπική θεωρία, και
2. τη κβαντομηχανική θεωρία.

Σύμφωνα με τη «μακροσκοπική θεωρία», τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται (ή αποσκοπούν) σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση ακουστικών και φωτεινών φαινομένων, καθώς και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού [1, 9, 10, 12, 15-17, 22, 24, 27, 43, 44]

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 την διάσπαση, με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που εκπέμπεται [16, 18-21, 23, 25-28, 30, 31, 43, 44]. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι δύο θεωρίες, που προαναφέρθηκαν, καθώς και ο συνδυασμός τους.

1.1.1. Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ της διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών εντός ελαίου μετασχηματιστών.

Όπως προαναφέρθηκε, τα στερεά ηλεκτρομονωτικά αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες προ της διάσπασης και καταστρέφονται κατά τη διάτρηση. Η ανάγκη για να δοθεί μία εξήγηση στις παραπάνω αλλαγές των υλικών αυτών εντός του ελαίου μετασχηματιστών, οδήγησε στην αναζήτηση των διαφόρων παραγόντων, που τις προκαλούν. Έτσι, από μετρήσεις, που έχουν γίνει σε διάφορα στερεά ηλεκτρομονωτικά εντός ελαίου μετασχηματιστών (κυρίως μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού και των κρούσεων φορτίου, ανάλογα με τη μορφή της τάσης), οι οποίες έχουν συνδυαστεί με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής, που προκαλείται στα στερεά διηλεκτρικά, θεωρείται ότι υπάρχουν οι παρακάτω βασικοί παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων τους [9, 27, 33, 35, 36, 43]:

- 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 [9, 27, 43].

A. Η θερμική διάτρηση λόγω των απωλειών Joule

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 [9, 27, 43]:

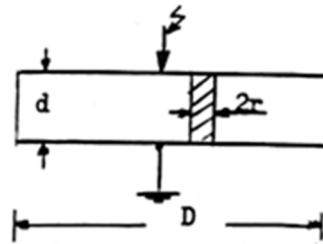
$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.1.1-1)$$

Με την προϋπόθεση σταθερής διατομής (A) του οχετού διάτρησης (σχήμα 1.1.1-1) και ειδική αγωγιμότητα σ_1 , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2}{d} \sigma_0 e^{\beta\theta} A \quad (1.1.1-2)$$

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

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



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

D : διάμετρος δοκιμίου

d : πάχος του μονωτικού

$2r$: διάμετρος του οχετού διάτρησης.

$$P = P_a + C_0 (d\theta / dt) \quad (1.1.1-3)$$

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

$$P_a = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (1.1.1-4)$$

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:

$$\frac{U^2}{d} \sigma_0 e^{\beta\theta} A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (1.1.1-5)$$

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 διαφόριση ως προς θ , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης 1.1.1-5, έχουμε:

$$\frac{\beta U_\theta^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \quad (1.1.1-6)$$

Από τις σχέσεις 1.1.1-5 και 1.1.1-6 φαίνεται ότι:

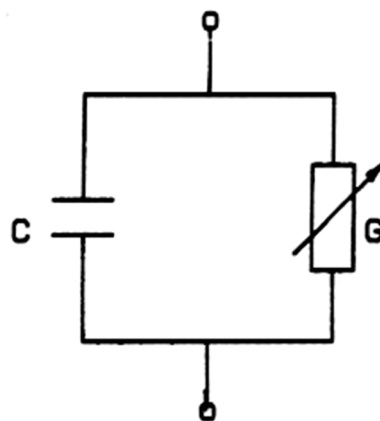
$$\beta \cdot \theta = 1 \quad (1.1.1-7)$$

και

$$U_\theta = d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.1.1-8)$$

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_θ μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα 1.1.1-2, όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μία μεταβλητή αγωγιμότητα G [9, 43, 44].

Η διάτρηση στην τιμή U_θ συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ_0 στην τιμή σ_1 : σχέση 1.1.1-1), μία οριστική τιμή G_{\max} .



Σχήμα 1.1.1-2: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule.

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

G_0 : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή

G_{\max} : αγωγιμότητα για τη διάτρηση

C : χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή

Όπως προαναφέρθηκε, οι απώλειες Joule είναι βασικά η αιτία διάσπασης των μονώσεων των καλωδίων χαμηλής τάσης. Ένα παράδειγμα θερμικής διάσπασης σε καλώδια χαμηλής τάσης είναι η υπερθέρμανση της μόνωσης από το ρεύμα βραχυκύκλωσης, σε περίπτωση που οι ασφάλειες μίας τριφασικής γραμμής είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι έπρεπε (επειδή τοποθετήθηκαν εσφαλμένα μεγαλύτερες, λόγω μελλοντικής αύξησης των ηλεκτρικών φορτίων της βιοτεχνίας).

B. Η ηλεκτρική διάτρηση λόγω των δυνάμεων Coulomb

Όταν η σταθερή ενεργός τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στο στερεό διηλεκτρικό, 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, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή
- γ) συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

Η μορφή της διάτρησης αυτής ονομάζεται ηλεκτρική και διακρίνεται, ανάλογα με την εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση, στη 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 αγωγήμνη σύνδεση των ηλεκτροδίων [11, 27, 43].

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 τάση, υπό την επίδραση των δυνάμεων του πεδίου) [9, 43].

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. Η μορφή της διάτρησης αυτής χαρακτηρίζεται επίσης ως ηλεκτρομηχανική [9, 43]. Λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας για την ηλεκτρική διάτρηση (και επειδή τα στερεά μονωτικά είναι και μονωτές θερμότητας), μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η θερμότητα που απάγεται μόλις πριν από τη διάτρηση είναι αμελητέα. Κατά τη σχέση επομένως 1.1.1-3 και για έναν οχετό διατομής $A=\pi^2$ (κατά το Σχήμα 1.1.1-1) ισχύει μόλις προ της διάτρησης ότι:

$$U_n^2 \sigma_2 \frac{A}{d} = \sigma_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.1-9)$$

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 ενδεικνυόμενη τιμή της τάσης για την ηλεκτρική διάσπαση του υλικού στην παραπάνω περιοχή.

Αν υποτεθεί 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 1.1.1-9 έπεται ότι [9, 27, 43]:

$$U_n = \sqrt{d} \cdot \sqrt{\frac{C_o \cdot \theta}{\sigma_2 \cdot A \cdot T_\delta}} \quad (1.1.1-10)$$

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

$$\hat{U}_{kn} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_S}} \quad (1.1.1-11)$$

όπου T_S η διάρκεια του μετώπου της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

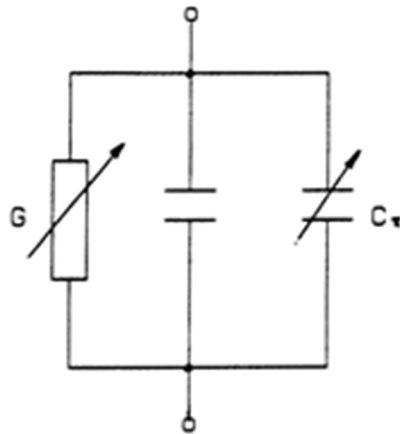
Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν μία ικανοποιητική ερμηνεία σε πειράματα, που έχουν γίνει [9, 27, 33, 35, 36, 43].

Μία ερμηνεία της ηλεκτρικής διάτρησης, μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος, μπορεί να δοθεί ως ακολούθως [9, 43, 44]:

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 1.1.1-3), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_p (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C .

Όταν η αγωγιμότητα G και ο πυκνωτής C_p 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.



Σχήμα 1.1.1-3: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα

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

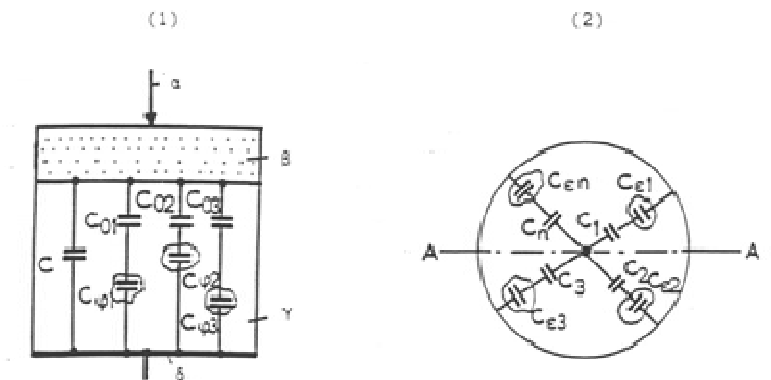
$G = 0 \dots G_{max}$: αγωγιμότητα λόγω αύξησης των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στη θέση όπου θα συμβεί η διάτρηση.

Γ. 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 1.1.1-4 [9, 43]. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές $C_{ε1} \dots C_{εn}$ και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές $C_{φ1} \dots C_{φn}$. 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 1.1.1-4 : Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής σε στερεό μονωτικό εντός μονωτικού ελαίου [9, 43]

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

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

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

$C_{φ1} \dots C_{φn}$: 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 αγωγίμες. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού.

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού

Μία τυπική περίπτωση εκδήλωσης εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που μπορεί να προκαλέσει επιφανειακή διάσπαση είναι οι σπινθηρισμοί που εκδηλώνονται σε κεραμικούς μονωτήρες των εναέριων γραμμών μέσης τάσης σε περιοχές με ρύπανση (καθαλατώσεις, σκόνη, καπναιθάλη, περιττώματα πουλιών, κλπ.). Το θέμα αυτό εξετάζεται, για λόγους συνοχής των περιεχομένων, στην παράγραφο 5.

2. Η τεχνητή γήρανση

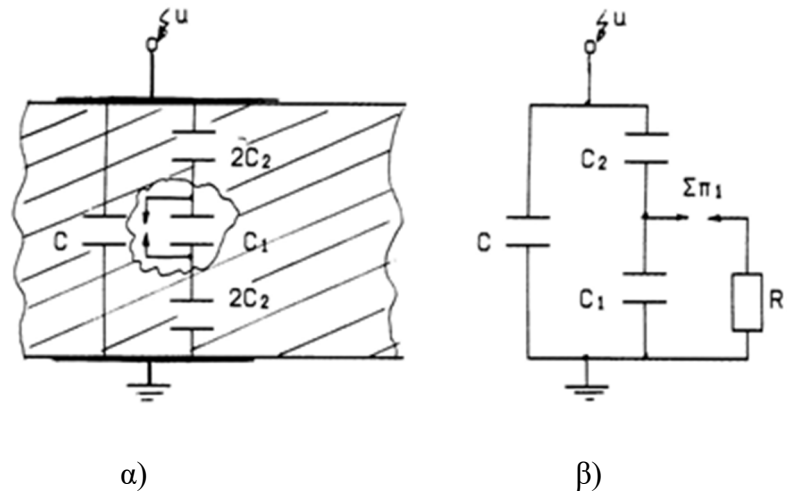
Κατά την καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού υλικού με κάποια μορφή τάσης (εναλλασσόμενη, κρουστική ή συνεχή), διαπιστώνει κανείς ότι μετά από κάποια τιμή της τάσης (ανάλογα με τη μορφή της) εμφανίζονται μερικές εκκενώσεις.

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 [9, 12, 43].

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 χωρητικοτήτων του κυκλώματος μέτρησης κατά το διαχωρισμό των απωλειών αγωγιμότητας και πόλωσης από εκείνες λόγω μερικών εκκενώσεων.

Η ανάγκη για τη φυσική εξήγηση και τη μαθηματική ανάλυση του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων μέσα στον όγκο του στερεού μονωτικού, οδήγησε τους Gemant και Philipoff [1] στο ισοδύναμο κύκλωμα του (σχήμα 1.1.1-5), γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου.



Σχήμα 1.1.1-5 : Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του (κατά Gemant και Philipoff [1]).

α : σχηματική παράσταση

β : ισοδύναμο κύκλωμα

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας

C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

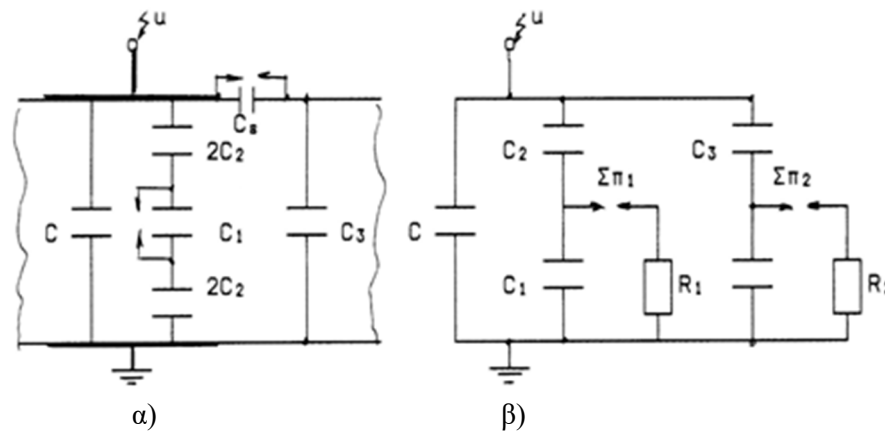
R_1 : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_1$

Στο σχήμα 1.1.1-6 έχει συμπληρωθεί το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο και για τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού [9, 43]. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C_1) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (C_e). Με τον τρόπο δηλαδή αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού (C_2 και C_3 αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Οι σπινθήρες $\Sigma\pi_1$ και $\Sigma\pi_2$ στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R_1, R_2) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C_1, C_e).

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορεί δηλαδή να υποθέσει κανείς, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη. Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς συχνά στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα 1.1.1-7.

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη

μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φυσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κλπ. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει επίσης μία ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 1.1.1-8). Σύμφωνα με αυτό, οι θέσεις διαταραχής αποδίδονται ως μία γεννήτρια μερικών εκκενώσεων G . Έτσι, όταν διεγείρεται η γεννήτρια G συμβαίνει αύξηση του δυναμικού στους ακροδέκτες της διάταξης.



Σχήμα 1.1.1-6 : Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής.

α : σχηματική παράσταση

β : ισοδύναμο κύκλωμα

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας

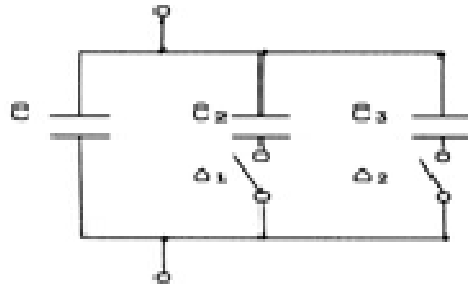
C_3 : χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

$2C_2$: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

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

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



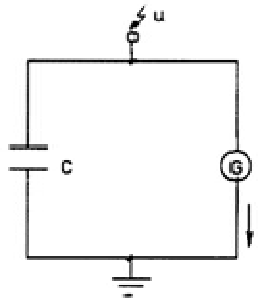
Σχήμα 1.1.1-7 : Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff).

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.



Σχήμα 1.1.1-8 : Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

G : Γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

Δ. 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

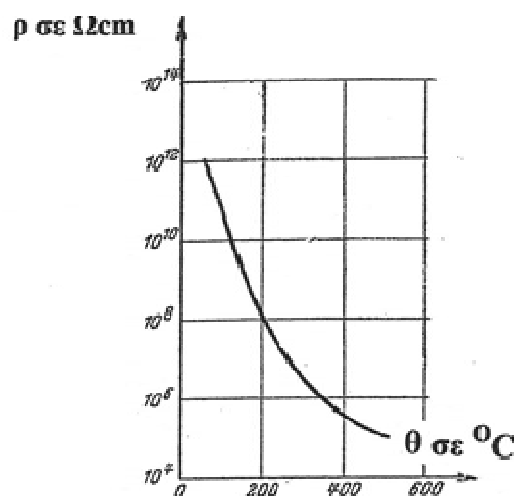
τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης.

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

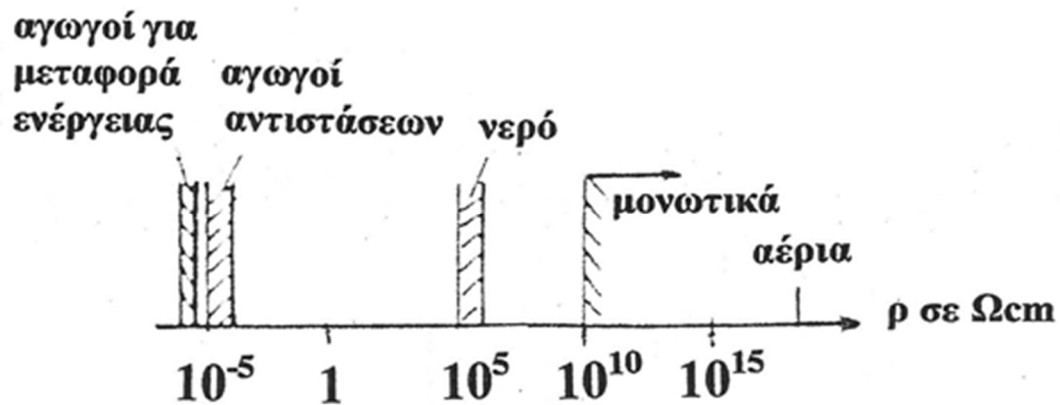
$$U_a = \sqrt{a \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma_0}} \quad (1.1.1-13)$$

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 [9, 43]. Πρόσφατες έρευνες σε στερεά μονωτικά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο του στερεού μονωτικού ενισχύει τις μερικές εκκενώσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής [18, 27, 43]. Έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται, λόγω της θερμότητας του περιβάλλοντος, σε μικρότερες τιμές της τάσης απ' ό,τι σε κανονική θερμοκρασία (20°C), με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός δια κρούσεως σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου απ' ό,τι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C [18, 27, 43].

Ένα τυπικό παράδειγμα της επίδρασης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στην γήρανση και την διάσπαση των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών είναι η μείωση της ειδικής αντίστασης των κεραμικών μονωτήρων των εναέριων γραμμών διανομής μέσης τάσης σε περιπτώσεις πυρκαγιών. Πράγματι, σε συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος η ειδική αντίσταση των εν λόγω μονωτήρων είναι περίπου 10^{12} Ωcm, ενώ σε θερμοκρασία 150 °C (λόγω ακτινοβολίας και μεταφοράς θερμότητας από το υπέρθερμο περιβάλλον, λόγω πυρκαγιάς) η ειδική αντίσταση μπορεί να αποκτήσει τιμή της τάξεως των 10^9 Ωcm (βλ. σχήμα 1.1.1-9), που καθιστά τον μονωτήρα αγώγιμο (βλ. σχήμα 1.1.1-10), με επακόλουθο ακόμη και την διάσπαση) [43, 44].



Σχήμα 1.1.1-9: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση (ρ) της πορσελάνης



Σχήμα 1.1.1-10: Κατάταξη των υλικών ανάλογα με την τιμή της ειδικής αντίστασής τους

Ε. Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα στα εδάφια Α έως Δ ανωτέρω, 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.

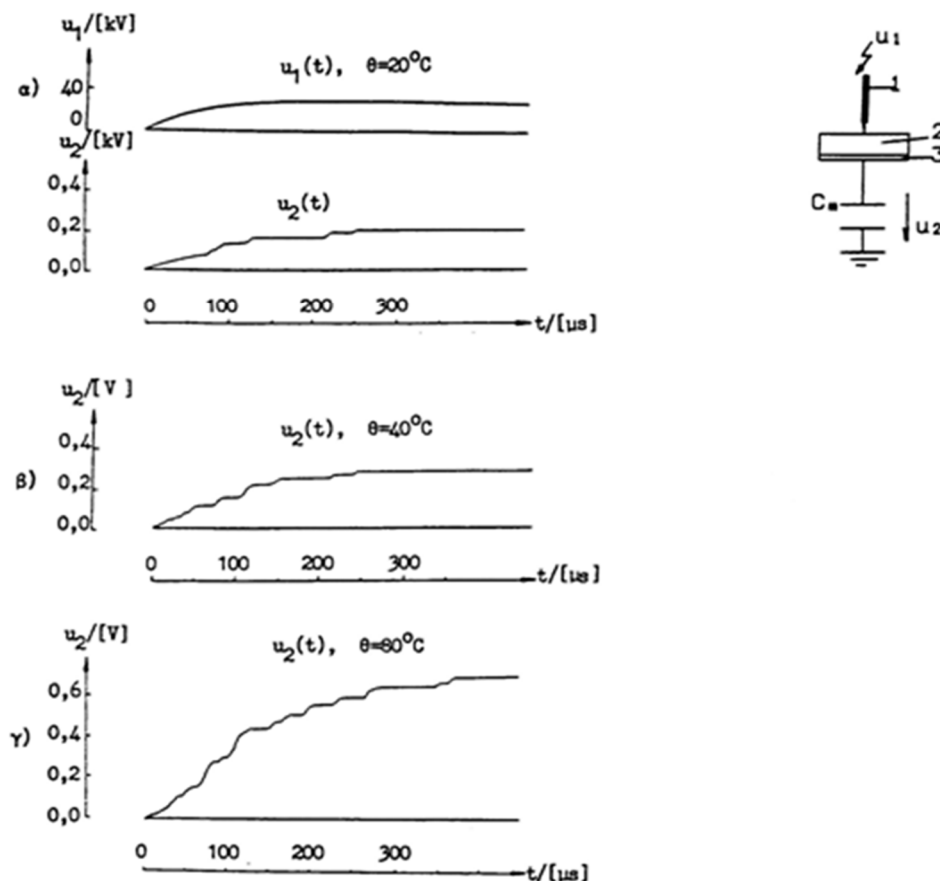
1. Ο συνδυασμός της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης

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 $40,50^\circ\text{C}$ στο λάδι, λόγω του οποίου, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η οριακή θερμοκρασία λειτουργίας να είναι της τάξης των $80,90^\circ\text{C}$. Όταν όμως συντρέχουν λόγοι μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής από άλλους παράγοντες, η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως το ρόλο τους, γιατί [9, 27, 43] :

- Αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα (σχέση 1.1.1-1).
- Διευκολύνεται η εξάσκηση δυνάμεων Coulomb, γιατί οι δεσμοί στο πλέγμα των μορίων των πολυμερών υλικών γίνονται ασθενέστεροι.
- Ενισχύεται ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων, λόγω μεγαλύτερης ευκινησίας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κυρίως στις φουσαλίδες αερίου κατά την σχέση [43]:

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\exp(\beta\theta)}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.1.1-12)$$

όπου E η πεδιακή ένταση στο τμήμα του υλικού, που δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (το οποίο χαρακτηρίζεται ως υγιές τμήμα) και δ ένας συντελεστής, που εκφράζει τη συμμετοχή των ανομοιογενειών του υλικού στη διαμόρφωση της τιμής σ . Για το ομοιογενές υλικό είναι $\delta=0$, διαφορετικά ισχύει $\delta>0$.



Σχήμα 1.1.1-11: Αύξηση των αλμάτων δυναμικού λόγω μεγαλύτερης θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο. α) $\theta=20^\circ\text{C}$, β) $\theta=40^\circ\text{C}$ και γ) $\theta=80^\circ\text{C}$. [18]

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

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

3: Ηλεκτρόδιο πλάκα (διαμέτρου 150mm).

Μορφή της κρουστικής τάσης: $250/2500\mu\text{s}$.

Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης: $\approx 28,8\text{kV}$.

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

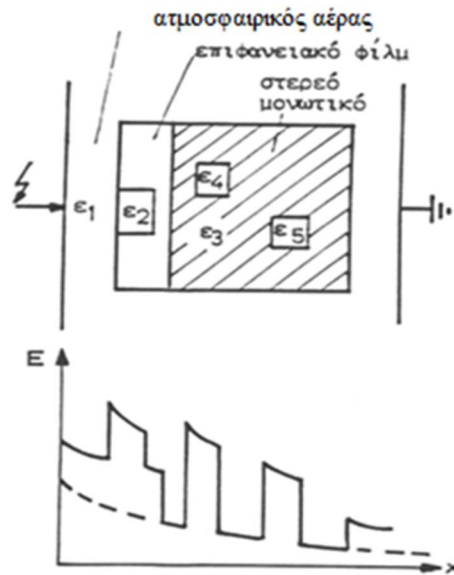
Από μετρήσεις που έχουν γίνει κατά την καταπόνηση στερεών ηλεκτρομονωτικών εντός ελαίου μετασχηματιστών, υπό κρουστικές τάσεις 250/2500 μs για διάφορες θερμοκρασίες του ελαίου (20°C, 40°C και 80°C), συμπεραίνεται ότι η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας (και επομένως η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής) είναι δεδομένη, όσο αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτό φαίνεται πολύ παραστατικά στα παλμογραφήματα του σχήματος 1.1.1-11, όπου τα άλματα δυναμικού (λόγω μερικών εκκενώσεων) γίνονται ισχυρότερα όταν αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

2. 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 1.1.1. 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.



Σχήμα 1.1.1-12 : Αύξηση της πεδιακής έντασης στις θέσεις ανομοιογενειών του στερεού μονωτικού.

ϵ_1 έως ϵ_5 : διηλεκτρικές σταθερές

ϵ_1 : Ατμοσφαιρικός αέρας

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

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 ατμοσφαιρικού αέρα.

Προς κατανόηση της συμμετοχής των θέσεων διαταραχής, στον όγκο και την επιφάνεια του στερεού μονωτικού, έχει σχεδιαστεί στο σχήμα 1.1.1-12 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 τον ατμοσφαιρικό αέρα. Παρατηρούμε ότι στις θέσεις ανομοιογένειας, όπου η αγωγιμότητα είναι αυξημένη έναντι του υπόλοιπου "υγιούς" τμήματος του συνδυασμού των δύο μονωτικών (στερεό μονωτικό-ατμοσφαιρικός αέρας), 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.

Για το ανομοιογενές στερεό μονωτικό έχουμε επομένως κατά τη σχέση 1.1.1-3 [9, 27, 43] :

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1-\delta E)^2 d} = 2\pi r k d \theta + C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.1-15)$$

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

$$\frac{U_{\theta e}^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1-\delta E)^2} = 2\pi r k d \theta \quad (1.1.1-16)$$

$$\theta = \frac{U_{\theta e}^2 \sigma_0 \beta e^{\beta\theta} A}{2\pi r^2 k d (1-\delta E)^2} \quad (1.1.1-17)$$

Η οριακή τιμή δίνεται από τη διαφόριση του αριστερού και του δεξιού τμήματος της παραπάνω σχέσης ως προς θ (βλέπετε παράγραφο 1.1.1) :

$$1 = \frac{U_{\theta e}^2 \sigma_0 \beta e^{\beta\theta} A}{2\pi r^2 k d (1-\delta E)^2} \quad (1.1.1-18)$$

Από τις σχέσεις 1.1.1-16 και 1.1.1- 17 φαίνεται ότι $\beta\theta=1$ και επομένως η οριακή τιμή της τάσης διάσπασης είναι :

$$U_{\theta e} = d(1-\delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.1.1-19)$$

Σε συνδυασμό με τη σχέση 1.1.1-8, η μείωση της τάσης για τη θερμική διάτρηση (ΔU_1), λόγω συμμετοχής των μερικών εκκενώσεων είναι:

$$\Delta U_1 = U_\theta - U_{\theta e} = \delta E d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.1.1-20)$$

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

Αν πάρει κανείς υπ' όψη στη σχέση 1.1.1-9 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις στην θέση όπου εκδηλώνεται η μερική εκκένωση (σχέση 3-15), τότε, με την παραδοχή ότι η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι πρακτικά μηδενική ισχύει [9, 27, 43]:

$$\frac{u^2 \sigma A}{(1 - \delta E)^2 d} = C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.1-21)$$

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

$$U_{\eta\epsilon} = (1 - \delta E) \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_\delta}} \quad (1.1.1-22)$$

Η τάση διάτρησης μειώνεται δηλαδή κατά την τιμή ΔU_2 :

$$\Delta U_2 = U_\eta - U_{\eta\epsilon} = \delta E \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_\delta}} \quad (1.1.1-23)$$

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

Αν πάρει κανείς υπ' όψη στη σχέση 1.1.1-13 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων (σχέση 1.1.1-14), τότε η θερμική τάση ανατροπής U_{xe} (λόγω του συνδυασμού της θερμότητας του περιβάλλοντος με τις μερικές εκκενώσεις) θα είναι :

$$U_{xe} = (1 - \delta E) \sqrt{\frac{\alpha k \theta}{\sigma_0}} \quad (1.1.1-24)$$

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

$$\Delta U_3 = U_x - U_{xe} = \delta E \sqrt{\frac{\alpha k \theta}{\sigma_0}} \quad (1.1.1-25)$$

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), που έχουν αρκετά μικρότερη μέγιστη τιμή από εκείνη για τη διάτρηση με μία κρούση, έχει αποδοθεί σε δύο φαινόμενα [9, 10, 27, 43]:

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}_κ ή πολύ πλησίον αυτής.

Το θερμικό φαινόμενο θεωρείται ότι είναι μία τεχνητή γήρανση (βλέπετε παράγραφο 1.1.1.) μέχρι προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω του οποίου το υλικό απέκτησε σε μία περιοχή του (όπου εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις) την ειδική αγωγιμότητα [9, 43]:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\beta_m \theta_m} \quad (1.1.1-26)$$

όπου :

θ_m η θερμοκρασία και β_m ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτώνται από την τιμή \hat{U}_κ , 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 1.1.1-14 ισχύει :

$$u^2 \frac{\sigma_0 e^{\beta_m \theta_m}}{(1 - \delta E)^2} \frac{A}{d} = C_m \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.1-27)$$

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_κ έχουμε (αντίστοιχα με τη σχέση 1.1.1-10) :

$$\hat{U}_\kappa = (1 - \delta E) \sqrt{d \frac{C_m \theta_m}{\sigma A T_s}} \quad (1.1.1-28)$$

όπου T_s ο χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης).

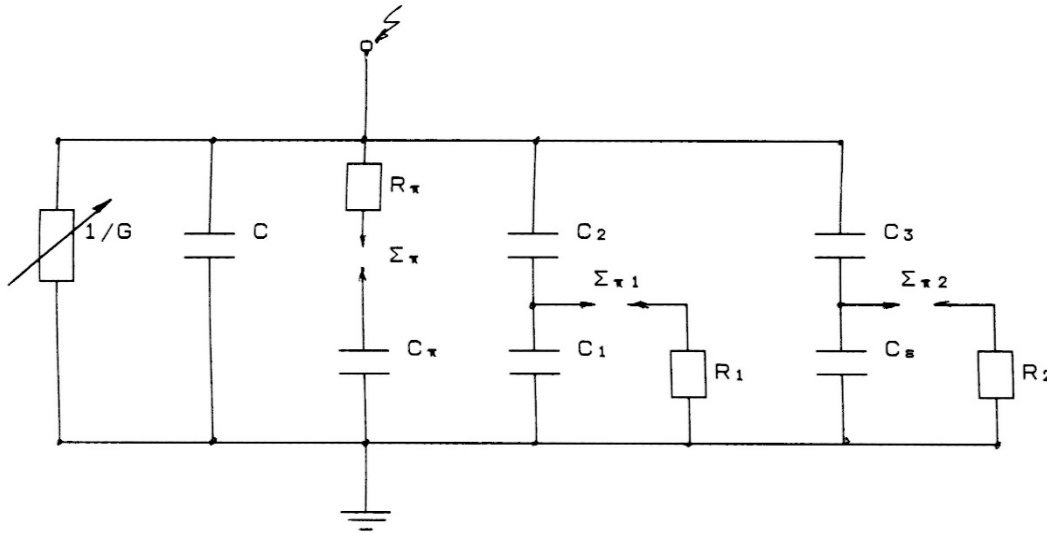
Επομένως, η μείωση της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης για τη διάτρηση (συγκριτικά προς εκείνη κατά τη διάτρηση χωρίς προηγούμενη τεχνητή γήρανση) είναι :

$$\Delta u = \delta E \sqrt{d \frac{C_m \theta_m}{\sigma A T_s}} \quad (1.1.1-29)$$

ε) Το ισοδύναμο κύκλωμα του συνδυασμού των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης κατά την μακροσκοπική θεωρία

Από πειραματικές έρευνες έχει προταθεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που αποδίδει ικανοποιητικά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση και τις μερικές εκκενώσεις (σχήμα 1.1.1-13) [43]. Όπως φαίνεται πρόκειται ουσιαστικά για μία παράλληλη σύνδεση ενός πυκνωτή C_p ,

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 $R\pi$ (υποτίθεται ότι ο $\Sigma\pi$ διασπάται ταυτόχρονα με τον πυκνωτή $C\pi$).



Σχήμα 1.1.1-13: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

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

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

C_e : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών.

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

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

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

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

$R_\pi, \Sigma\pi$: 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.

Για να αποδίδει το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα το συνδυασμό όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης (κατά τη μακροσκοπική θεωρία), έχει γίνει η παράλληλη σύνδεση μίας μεταβλητής αγωγιμότητας, που εκφράζει τις θερμικές απώλειες (απώλειες Joule και ενίσχυσή τους από τις μερικές εκκενώσεις) και την καταπόνηση του υλικού από τη θερμότητα του περιβάλλοντος.

1.1.2. Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών σε περιβάλλον ελαίου μετασχηματιστών

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 1.1.1. η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών εντός ελαίου μετασχηματιστών 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).

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 [18, 19, 23, 26, 27, 43]
- 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 [20, 21, 23, 26, 27, 43],
- στην ανίχνευση του μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση) [30, 31, 27, 43].
- στην ικανοποιητική πειραματική και θεωρητική ταύτιση του μηχανισμού παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων [18, 19, 23, 26, 27, 30, 31, 43].

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 (για τον συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικό-έλαιο μετασχηματιστών») είναι [18, 19, 23, 26, 27, 30, 31, 43] :

- 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) σε περιβάλλον ελαίου μετασχηματιστών, 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 [43]:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.1.2-1)$$

όπου :

σ : η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας θ ως προς το περιβάλλον

σ_0 : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

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

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

T : η απόλυτη θερμοκρασία

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

- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η ανωτέρω σχέση. Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2) / E_0^2} \quad (1.1.2-2)$$

όπου: E_0 η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων, Q_0 το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, E η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση, λόγω της οποίας το φορτίο αποκτά την τιμή Q και A ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από την μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης.

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.

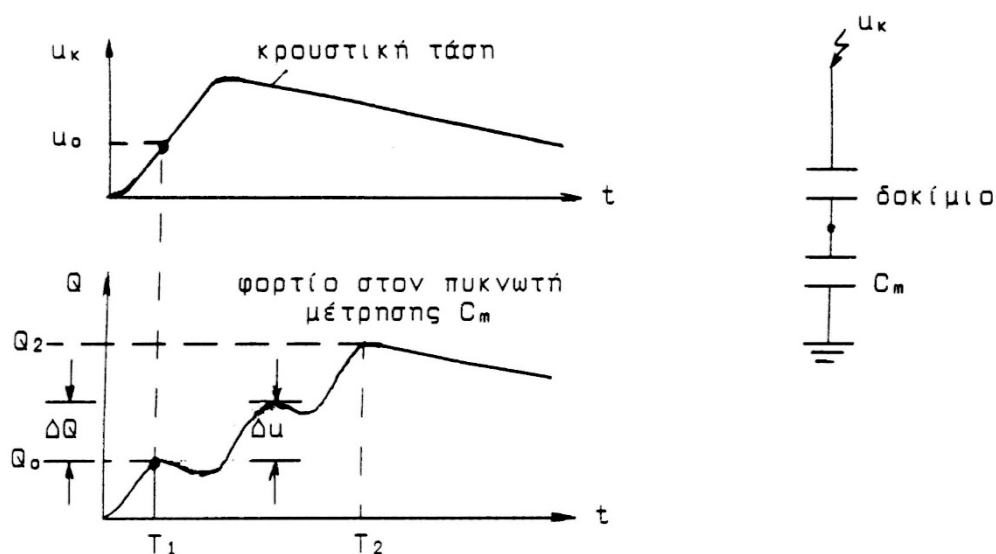
1.1.3. Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων στον συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικό – έλαιο μετασχηματιστών».

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων, έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως π.χ. στο σχήμα 1.1.3-1 για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Με παρόμοιες σκέψεις, μπορεί κανείς να καθορίσει μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση με άλλες μορφές τάσεων, καθώς και με άλλα τετράπολα μέτρησης (συνήθως ωμική αντίσταση, αντί του πυκνωτή, ή συνδυασμός των δύο αυτών στοιχείων μέτρησης, σχήμα 1.1.3-2).

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως :

- η χαρακτηριστική $Q=f(U_k)$,
- ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων που συλλέχθηκαν από την άνοδο,
- η ταχύτητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων,
- η κινητικότητα (ή ευκινησία) των ελεύθερων ηλεκτρονίων,
- η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του στερεού ηλεκτρομονωτικού ,
- η πυκνότητα του ρεύματος ,
- το μήκος κύματος (λ),
- η συχνότητα (f) της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στην άνοδο, που υπολογίζονται από την γνωστή σχέση,
- κλπ [9, 10, 12, 15, 17, 18, 22, 24, 27, 29, 33, 35-37, 39, 40-44].

Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q=f(U_k)$ η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής [18, 27, 33, 35, 36, 43, 44], 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 [9, 27, 43].



Σχήμα 1.1.3-1: 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.

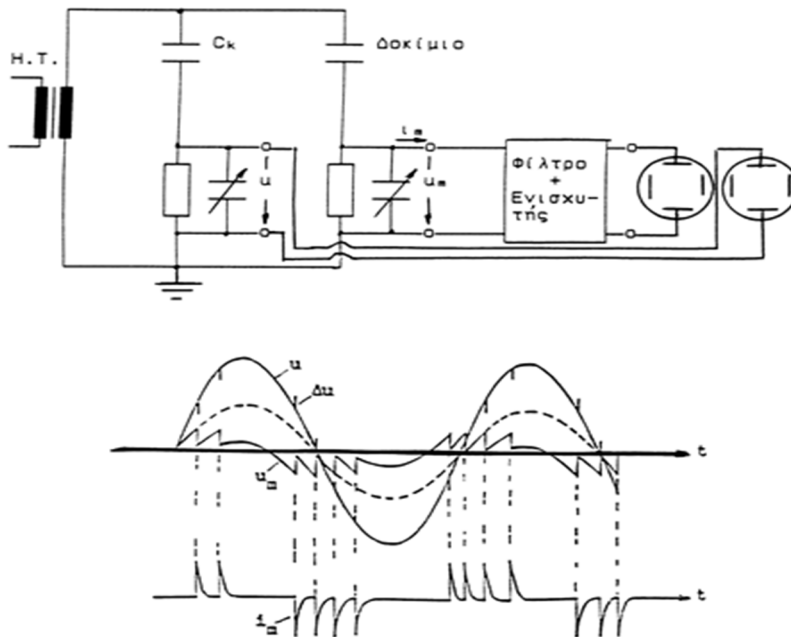
Q_2 : Φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

u_k : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

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

Δu : Άλμα δυναμικού.

ΔQ : Αύξηση φορτίου.



Σχήμα 1.1.3-2 : Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω "ωμικού-χωρητικού" τετράπολου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz.[43]

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.

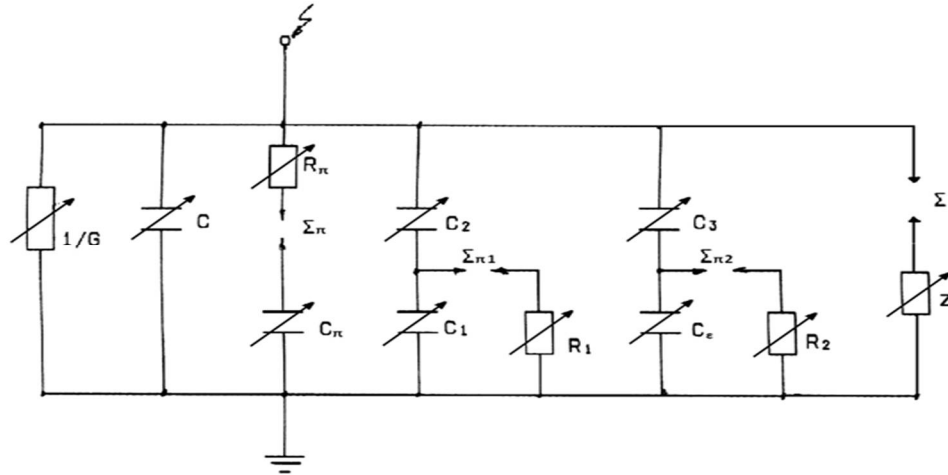
Δu : Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων.

C_m : 1000nF

1.1.4. Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών σε περιβάλλον ελαίου μετασχηματιστών.

Από τα αναφερόμενα στις παραγράφους 1.1.1. και 1.1.2. φαίνεται, ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών σε περιβάλλον ελαίου μετασχηματιστών 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 ηλεκτρομονωτικών φαίνεται ότι είναι ο διαχωρισμός των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης. Με σκοπό των συνδυασμό των δύο θεωριών έχουν διατυπωθεί διάφορα ισοδύναμα κυκλώματα. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα δίνεται στο σχήμα 1.1.4-1 [44].



Σχήμα 1.4.3-1: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης, των στερεών ηλεκτρομονωτικών των πρακτικών εφαρμογών

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

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

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

C_e : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών

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

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

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

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

$R_\pi, \Sigma\pi$: 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

Z : Μη γραμμική αντίσταση, που αποδίδει τα φαινόμενα κατά την κβαντική θεωρία της γήρανσης και διάσπασης

Σ : Σπινθηριστής

2. Σκοπός της εργασίας

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1, για την διατήρηση της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών ηλεκτρομονωτικών σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα είναι χρήσιμο να γνωρίζει κανείς τον μηχανισμό ιονισμού που εκδηλώνεται στην διαχωριστική επιφάνεια των δύο διηλεκτρικών. Η γνώση του εν λόγω μηχανισμού είναι φανερό ότι θα διευκολύνει και στην αναζήτηση μέτρων και μέσων προστασίας στις πρακτικές εφαρμογές, τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον, όπως αυτό καθίσταται αναγκαίο π.χ. κατά την αποκοπή μίας ξύλινης τραβέρσας του δικτύου μέσης τάσης λόγω ισχυρών μερικών εκκενώσεων σε μονωτήρα πορσελάνης ή κατά την θερμική καταπόνηση ενός μονωτήρα μέσης τάσης σε περιβάλλον πυρκαγιάς [43, 44], κλπ. Γι' αυτό, η εργασία αυτή είναι μία διερεύνηση των φαινομένων ιονισμού προ και κατά την διάσπαση στη διαχωριστική επιφάνεια του συνδυασμού «στερεό ηλεκτρομονωτικό-ατμοσφαιρικός αέρας». Η μέθοδος που εφαρμόστηκε, βασίζεται σε μεθόδους μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού (λόγω μερικών εκκενώσεων), που έχουν εφαρμοσθεί στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Ε. Μ. Πολυτεχνείου στον συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικό- έλαιο μετασχηματιστών» [9, 15, 16, 18÷20, 25, 32], από όπου μπορεί κανείς να καταλήξει στο φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προ και κατά την διάσπαση. Ειδικότερα, το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, τόσο κατά την διάσπαση όσο και κατά την καταπόνηση του στερεού διηλεκτρικού σε τιμές της τάσης πλησίον της περιοχής για τη διάσπαση, ανιχνεύτηκε με την μέθοδο προσβολής του φωτογραφικού φιλμ [27, 30, 31, 43].

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το πέριναξ πάχους 1mm και το χαρτί μετασχηματιστών πάχους 0,5 mm. Ως τάση δοκιμής επελέγη η κρουστική τάση 1,2/50 μ s γιατί παρέχει πρακτικά τη δυνατότητα, λόγω της μικρής χρονικής διάρκειάς της (συγκριτικά προς την εναλλασσόμενη τάση) την διερεύνηση των φαινομένων στην έναρξή τους [9, 33, 34, 35, 36, 43].

Για να εκφράζουν οι μετρήσεις την δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών τα ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης στα δοκίμια ήταν ακίδα (με ακτίνα καμπυλότητας $R= 0,9\text{mm}$) και γειωμένη πλάκα τετραγωνικής μορφής διαστάσεων 150mm x 150mm [9, 33, 35, 36, 43, 44].

Οι μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού προ και κατά την διάσπαση των δοκιμίων έγιναν από ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω A/D μετατροπέα.

Εκτός από τις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού (λόγω μερικών εκκενώσεων), που έγιναν σε ένα σημαντικό αριθμό δοκιμίων, ερευνήθηκαν πραγματικά περιστατικά εκδήλωσης σπινθηρισμών (μερικών εκκενώσεων) λόγω ξένων επικαθήσεων σε μονωτήρες πορσελάνης μέσης τάσης, για τα οποία δίνεται στην εργασία αυτή ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα.

3. Οι μετρήσεις που έγιναν

3.1. Πειραματική διερεύνηση της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων σε στερεά ηλεκτρομονωτικά των πρακτικών εφαρμογών (πέρτιναξ και χαρτί μετασχηματιστών) υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα.

3.1.1. Η διαδικασία των μετρήσεων των μερικών εκκενώσεων στα δοκίμια

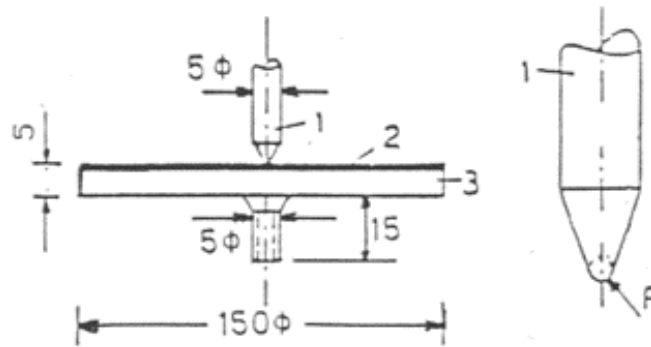
3.1.1.1. Η επιλογή των δοκιμίων

Ως στερεά ηλεκτρομονωτικά χρησιμοποιήθηκαν το πέρτιναξ και το χαρτί μετασχηματιστών. Το στερεό ηλεκτρομονωτικό πέρτιναξ H 1270 κατασκευάζεται από τη γερμανική εταιρεία F&G Dielektra κατά DIN 7735. Πρόκειται για πεπιεσμένο χαρτί εμποτισμένο με φαινόλη που χρησιμοποιείται σε εξοπλισμούς χαμηλής και μέσης τάσης [34]. Τα δοκίμια από χαρτί μετασχηματιστών προέρχονται από το χαρτί που χρησιμοποιείται στις σε πηνία των μετασχηματιστών μέσης τάσης της εταιρείας Schneider Electric. Όλα τα δοκίμια ήταν σε τετραγωνική μορφή 150 mm x 150 mm. Το πάχος των δοκιμίων από πέρτιναξ και από χαρτί ήταν αντίστοιχα 1 mm και 0,5 mm αντίστοιχα.

3.1.1.2. Η επιλογή της κρουστικής τάσης 1,2/50 μs ως τάσης δοκιμής και η διάταξη των ηλεκτροδίων εφαρμογής της τάσης.

Στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Ε.Μ. Πολυτεχνείου όπου εφαρμόστηκε η πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων στα προαναφερθέντα στερεά ηλεκτρομονωτικά επελέγη ως τάση δοκιμής η κρουστική τάση 1,2/50μs. Αυτό έγινε γιατί η εν λόγω τάση παρέχει πρακτικά τη δυνατότητα εξαιτίας της μικρής χρονικής διάρκειάς της, τη διερεύνηση των μερικών εκκενώσεων στην έναρξή τους. Με την έννοια αυτή, η εφαρμογή ενός αριθμού επαναλαμβανόμενων κρούσεων σε μικρή χρονική απόσταση μεταξύ τους, (περίπου 1min) έχει δώσει σημαντικές πληροφορίες για τη διαχρονική εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων [9, 10, 12, 15÷31, 33, 43]. Η διάταξη των ηλεκτροδίων καθορίζει την επίδραση της μορφής του πεδίου στο φαινόμενο που εξετάζεται. Μία συχνά χρησιμοποιούμενη διάταξη μέτρησης των μερικών εκκενώσεων σε οργανικά στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά, είναι ένας πυκνωτής με ηλεκτρόδια ακίδα - πλάκα και μονωτικό το υπό εξέταση υλικό. Όσο μικρότερη είναι η ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας

τόσο αυξάνει η τιμή του πεδίου. Στο σχήμα 3.1.1.2-1 δίνεται η διάταξη των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 3.1.1.2-1: Διάταξη ηλεκτροδίων και διαστάσεις

1: Ορειχάλκινη ακίδα

2: Δοκίμιο 150X150

3: Ορειχάλκινη πλάκα 150X150

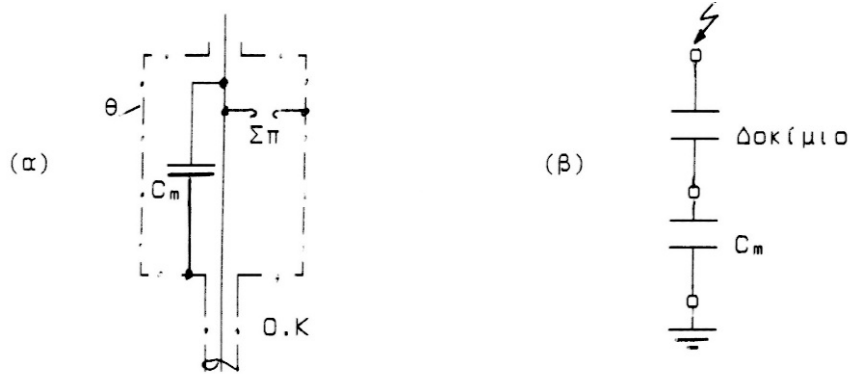
Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: $R=0,9 \text{ mm}$

(Οι διαστάσεις σε mm)

Η παραπάνω διάταξη των ηλεκτροδίων ενδείκνυται για ερευνητικούς σκοπούς περισσότερο από κάθε άλλη, γιατί δίνει τη δυνατότητα έρευνας των μερικών εκκενώσεων στη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών [9, 10, 12, 15÷31, 33, 35, 36, 43].

3.1.1.3. Τα τετράπολα μέτρησης

Οι μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων σε ένα δοκίμιο, το οποίο καταπονείται με υψηλές τάσεις, γίνεται με καταμερισμό της τάσης, κατά τον οποίο η διάταξη του δοκιμίου είναι ο πυκνωτής υψηλής τάσης. Οι μετρήσεις επομένως των μεταβολών της ηλεκτρικής κατάστασης στο δοκίμιο έγιναν με ένα τετράπολο μέτρησης σε σειρά με τη διάταξη του δοκιμίου (συνήθως χωρητικό, ή ωμικό, ή χωρητικό και ωμικό). Στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν ο πυκνωτής μέτρησης C_m , ο οποίος ήταν απαλλαγμένος από την παρεμβολή παρασίτων (βλέπε σχήμα 3.1.1.3-1). Η μέτρηση της τάσης στο δοκίμιο και στον πυκνωτή μέτρησης γίνεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω κατάλληλου A/D μετατροπέα [43]. Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι μετρήσεις έγιναν μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Σχήμα 3.1.1.3-1: Απλοποιημένη παράσταση ενός χωρητικού τετράπολου μέτρησης με θωράκιση [1]

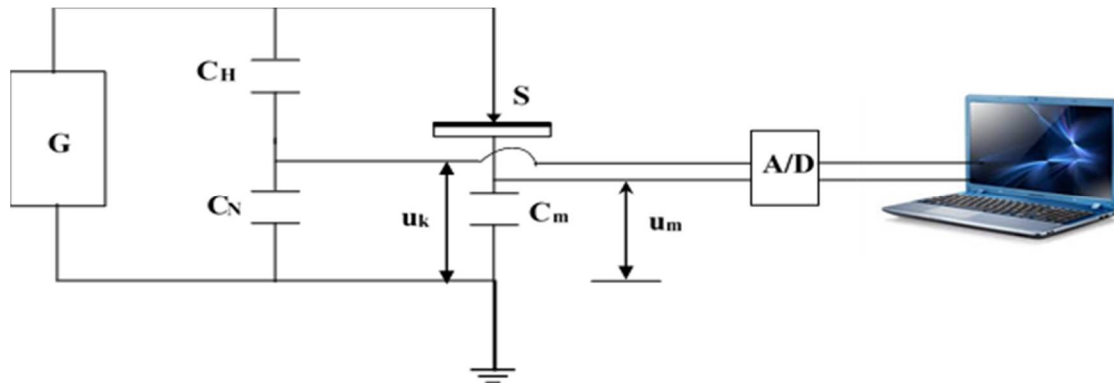
- C_m : Πυκνωτής μέτρησης
 $\Sigma\pi$: Σπινθηριστής προστασίας του C_m
 θ : Θωράκιση
 $O.K.$: Ομοαξονικό καλώδιο
α) Τετράπολο μέτρησης
β) Απλοποιημένη διάταξη της χωρητικότητας C_δ ενός δοκιμίου και του πυκνωτή μέτρησης C_m .

3.2. Το κύκλωμα των μετρήσεων και η διαδικασία των μετρήσεων

Στις μετρήσεις που έγιναν, εφαρμόστηκαν όλα τα απαραίτητα μέτρα και μέσα προστασίας που διέπουν ένα εργαστήριο Υψηλών Τάσεων [43]. Συγκεκριμένα, το πεδίο δοκιμών υψηλής τάσης είναι διαχωρισμένο από τον υπόλοιπο χώρο μέτρησης με σταθερά, γειωμένα κιγκλιδώματα ύψους 2m περίπου και εφαρμόζονται όλα τα απαραίτητα μέτρα και μέσα προστασίας που διέπουν ένα εργαστήριο Υψηλών Τάσεων. Η τάση στο πεδίο δοκιμών διακόπτεται αυτόματα με το άνοιγμα της μοναδικής πόρτας εισόδου ή μέσω διακόπτη τύπου "μπουτόν", τοποθετημένου στον πίνακα χειρισμών εκτός του πεδίου δοκιμών. Η τάση διακόπτεται επίσης, όταν η ράβδος γείωσης δεν είναι αναρτημένη επί ενός τερματοδιακόπτη, που είναι εγκατεστημένος εκτός του πεδίου δοκιμών.

Στο σχήμα 3.2-1 δίνεται απλοποιημένο το κύκλωμα των μετρήσεων. Επισημαίνεται ότι ο πυκνωτής C_m , άλλαζε προκειμένου να καταγράφονται οι παρατηρήσεις από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με μεγαλύτερη ευκρίνεια. Έτσι στον συνδυασμό «πέρτιναξ – ατμοσφαιρικός αέρας» έγιναν οι εξής αλλαγές: Στις μετρήσεις από 5kV έως 11kV ο πυκνωτής είχε

χωρητικότητα 20 nF, ενώ πάνω από τα 12 kV, είχε χωρητικότητα 60 nF. Σε ότι αφορά τον συνδυασμό χαρτί μετασχηματιστών - ατμοσφαιρικός αέρας ο C_m ήταν πάντοτε 60 nF. Σε όλες τις μετρήσεις που έγιναν η αντίσταση προσαρμογής ήταν 75 Ω. Η σύνδεση της εν λόγω αντίστασης είχε γίνει με τον πυκνωτή μέτρησης C_m .



Σχήμα 3.2-1: Απλοποιημένο κύκλωμα των μετρήσεων

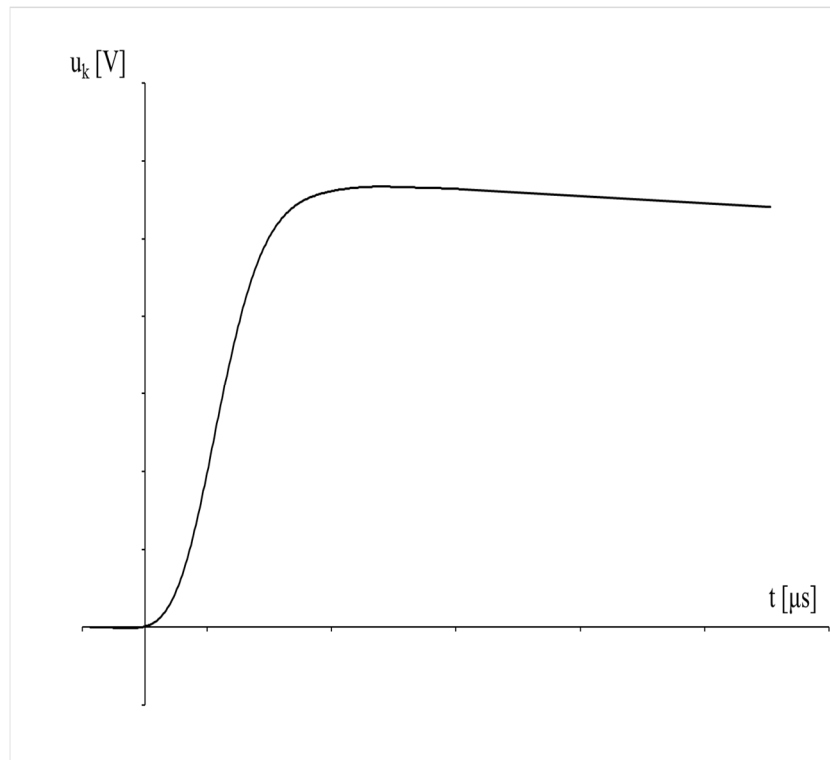
Αρχικά, έγιναν μετρήσεις προκειμένου να ευρεθεί η κατάλληλη ελάχιστη τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης μετά την οποία εκδηλώνονται άλματα δυναμικού. Η τάση αυτή ήταν περίπου 4 kV και για τα δύο δοκίμια. Από αυτό το επίπεδο τάσης (4 kV), συνεχίστηκε η διαδικασία των μετρήσεων με τη σταδιακή αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης σε βήματα του 1 kV για τα δοκίμια του πέρτιναξ μέχρι να συμβεί η διάσπαση και σε βήματα 0,5 kV για τα δοκίμια από χαρτί μετασχηματιστών μέχρι να συμβεί η διάσπαση. Σε κάθε επίπεδο τάσης εφαρμόστηκαν 20 κρούσεις σε χρονική μεταξύ τους απόσταση περίπου 1min. Η ανωτέρω διαδικασία καταπόνησης εφαρμόστηκε σε 20 δοκίμια από πέρτιναξ και 20 δοκίμια από χαρτί μετασχηματιστών.

Ακολούθως μετρήθηκε σε κάθε παλμογράφημα $u_m(t)$ η αύξηση της τάσης λόγω αλμάτων δυναμικού [9, 10, 12, 15-19, 22-24, 26-33, 43, 44] και σχεδιάστηκε (τόσο για το τον συνδυασμό «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας» όσο και για τον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας») η χαρακτηριστική $\Delta u_m = f(U_k, E_k)$, όπου Δu_m η μέση τιμή αύξησης της τάσης (λόγω των αλμάτων δυναμικού στον πυκνωτή μέτρησης C_m [32] (βλ. σχήμα 3.2-3) επί του συνόλου των 40 παλμογραφημάτων ανά επίπεδο μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (U_k) και E_k η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (δηλαδή η τιμή της που αντιστοιχεί στην U_k) κατά τη σχέση [8, 43]:

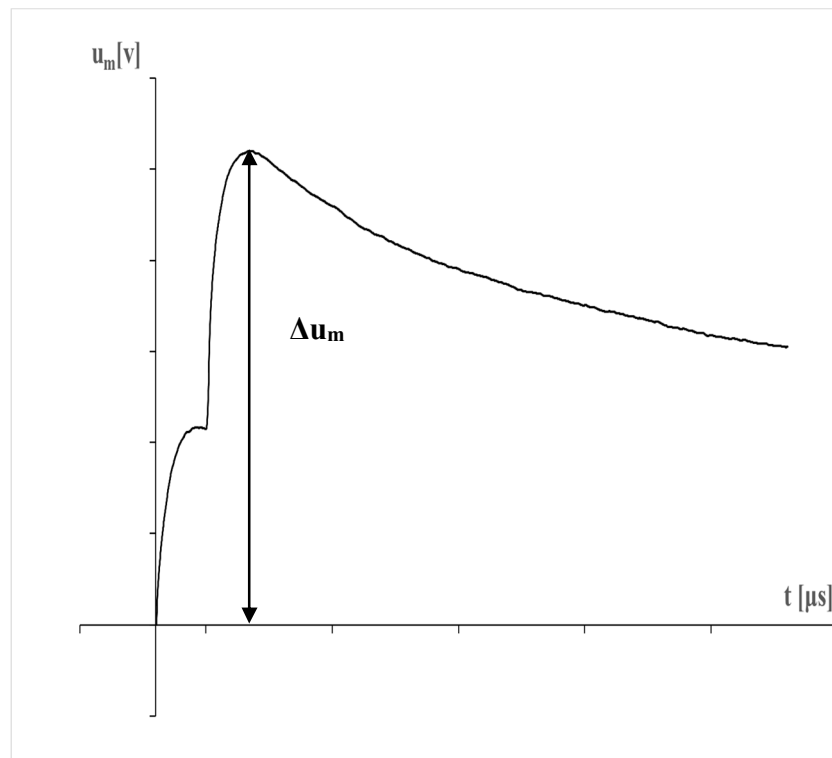
$$E_k = \frac{2U_k}{R \ln(4d/R)} \quad (3.2-1)$$

Όπου R η ακτίνα καμπυλότητας της ακτίνας (0,9 mm) και d το πάχος του δοκιμίου.

α)



β)



Σχήμα 3.2-3: Καθορισμός της αύξησης της τάσης Δu_m , λόγω αλμάτων δυναμικού
(α) κυματομορφή της εφαρμοζόμενη κρουστική τάση
(β) κυματομορφή στον πυκνωτή μέτρησης C_m

Από την τιμή Δu_m μπορεί κανείς να υπολογίσει το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο ΔQ και την ενέργεια ΔW των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την άφιξή τους στην άνοδο. Η τιμή ΔQ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta Q = C_m \cdot \Delta u_m \quad (3.2-2)$$

και για την τιμή ΔW ισχύει η σχέση:

$$\Delta W = \frac{1}{2} \Delta u_m \text{ σε eV} \quad (3.2-3)$$

όπου Δu_m σε V

Από τις σχέσεις 3.2-1, 3.2-2 και 3.2-3 υπολογίστηκαν οι χαρακτηριστικές $\Delta Q = f(U_k, E_k)$ και $\Delta W = f(U_k, E_k)$, όπου ΔQ η μέση τιμή της αύξησης του ηλεκτρικού φορτίου των ελεύθερων ηλεκτρονίων (επί του συνόλου των 40 παλμογραφημάτων ανά επίπεδο μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης U_k) και ΔW η μέση τιμή της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων (επί του συνόλου των 40 παλμογραφημάτων ανά επίπεδο μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης U_k) κατά την άφιξή τους στην άνοδο. Επί των ανωτέρω σημειώνεται ότι οι σχέσεις (3.2-2 και 3.2-3) ισχύουν για μηδενική τιμή της αντίστασης από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης. Για $R > 0$ θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το μεταβατικό φαινόμενο με σταθερά χρόνου [19, 43]:

$$\tau = R \cdot C_m \quad (3.2-4)$$

οπότε η τιμή π.χ. της ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$W = (0.5 \Delta u) / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \text{ σε eV} \quad (3.2-5)$$

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

Για μία αντίσταση $R = 0,5 \Omega$ (που ήταν η αντίσταση της κρουστικής γείωσης), ο συντελεστής:

$$f = 1 / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \quad (3.2-6)$$

δίνεται στον πίνακα 3.2-1, για χωρητικά τετράπολα μέτρησης, που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις αυτές.

| | | |
|----------------------------|-----------|--------------|
| C_m σε nF | 20 | 60 |
| f | 1 | 1.038 |

Πίνακας 3.2-1: Τιμές του συντελεστή f για R=0,5Ω [19,43]

Για τους πυκνωτές του πίνακα αυτού και για R=0,5 Ω, ισχύει επομένως:

$$W = 0,5 \cdot f \cdot \Delta u \text{ σε eV} \quad (3.2-7)$$

όπου Δu σε V.

Με βάση το ηλεκτρικό φορτίο ΔQ και το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο (μέγιστης τιμής E_k) είναι δυνατό να υπολογιστεί μία σειρά μεγεθών, που αφορούν την στατιστική ανάλυση της καταπόνησης των δοκιμίων [9, 33, 35, 36].

Στην εργασία αυτή υπολογίστηκαν τα παρακάτω μεγέθη:

- Ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων που συλλέχθηκαν από την άνοδο, για τον οποίο ισχύει η σχέση:

$$N = \Delta Q / q_e$$

όπου q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου (1,6 · 10⁻¹⁹ C)

- Η ταχύτητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων (v):

Με την παραδοχή ότι η κινητική ενέργεια ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου ισούται με την τιμή ΔW [36], ισχύει:

$$\Delta W = 0,5 \cdot m_e \cdot v^2$$

όπου m_e η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου (9,1 · 10⁻³¹ kg)

ή:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta W}{m_e}}$$

- Η κινητικότητα (ή ευκινησία) των ελεύθερων ηλεκτρονίων (μ):

Με την παραδοχή ότι η ταχύτητα ολίσθησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων ισούται με την τιμή v [36], ισχύει:

$$\mu = \frac{v}{E_k}$$

- Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του στερεού ηλεκτρομονωτικού από την σχέση [36]:

$$\sigma = \mu \cdot \Delta Q$$

- Η πυκνότητα του ρεύματος (J) από την σχέση [36]:

$$J = \sigma \cdot E_k$$

- Το μήκος κύματος (λ) και η συχνότητα (f) της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στην άνοδο, που υπολογίζονται από την γνωστή σχέση [36]:

$$\Delta W = h \cdot f = h (c/\lambda)$$

όπου h η σταθερά Planck ($6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$) και c ταχύτητα του φωτός (300 m/μs).

Εκ των ανωτέρω σχέσεων παρέχεται η δυνατότητα υπολογισμού των γραφικών παραστάσεων:

$$N = f(U_k, E_k),$$

$$v = f(U_k, E_k),$$

$$\sigma = f(U_k, E_k),$$

$$J = f(U_k, E_k),$$

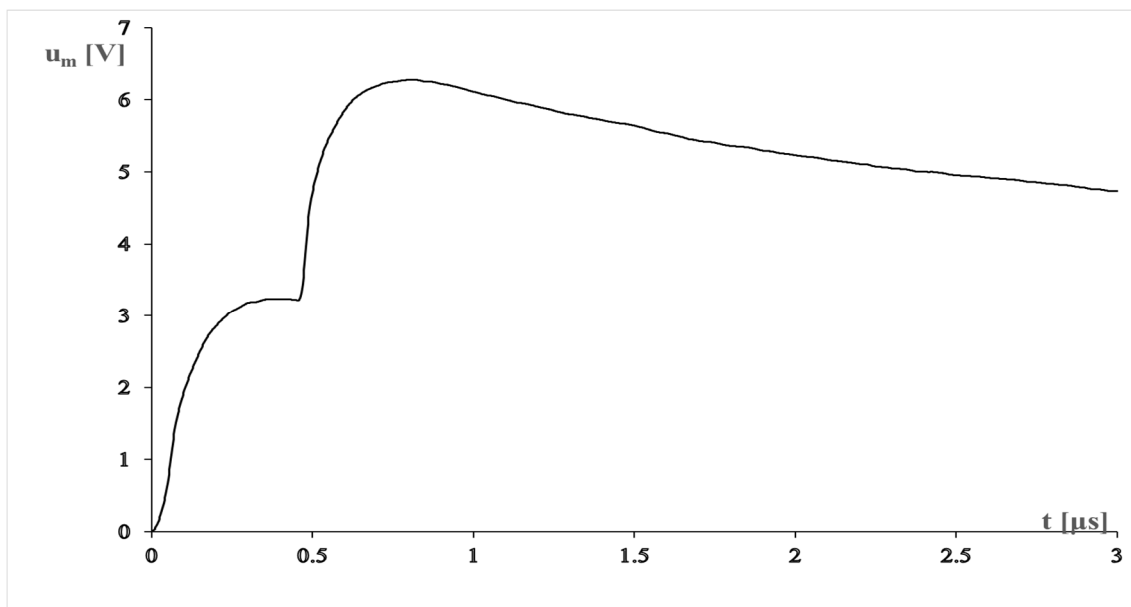
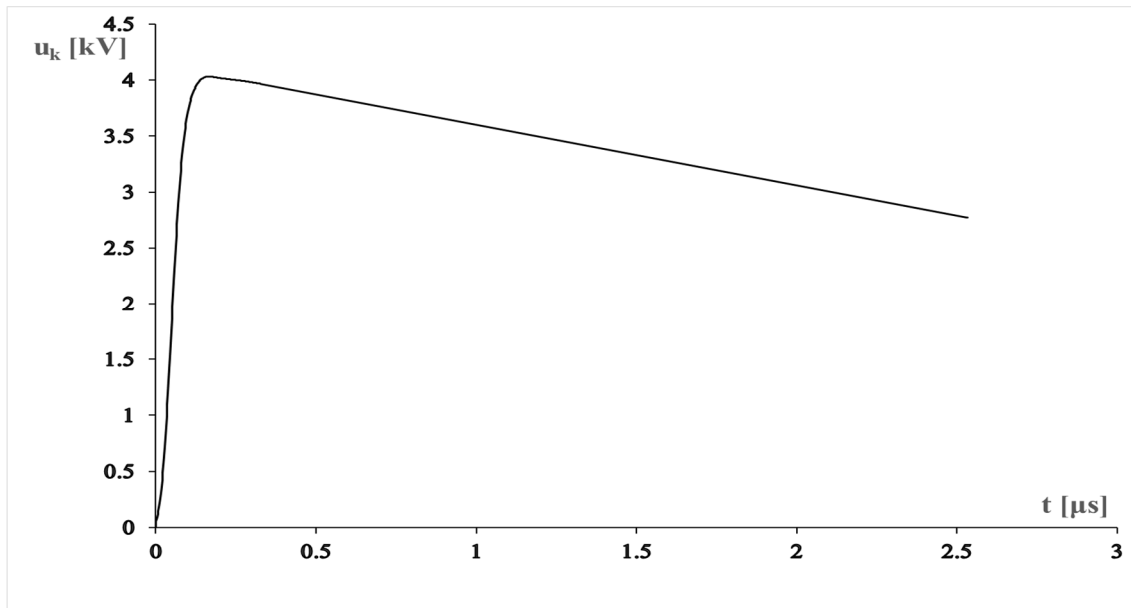
$$f = f(U_k, E_k) \text{ και}$$

$$\lambda = f(U_k, E_k).$$

Τέλος, το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά την διάσπαση ανιχνεύτηκε με την μέθοδο προσβολής του φωτογραφικού φιλμ [27, 30, 31, 43].

3.3. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων

Στα σχήματα 3.3-1 και 3.3-2 δίνονται αντίστοιχα ενδεικτικά παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού προ και κατά την διάτρηση του συνδυασμού «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (καμπυλότητα ακίδας 0.9 mm). Επίσης, στα σχήματα 3.3-3 και 3.3-4 δίνονται αντίστοιχα ενδεικτικά παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση του συνδυασμού «πέρτιναξ - ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (καμπυλότητα ακίδας 0.9 mm).



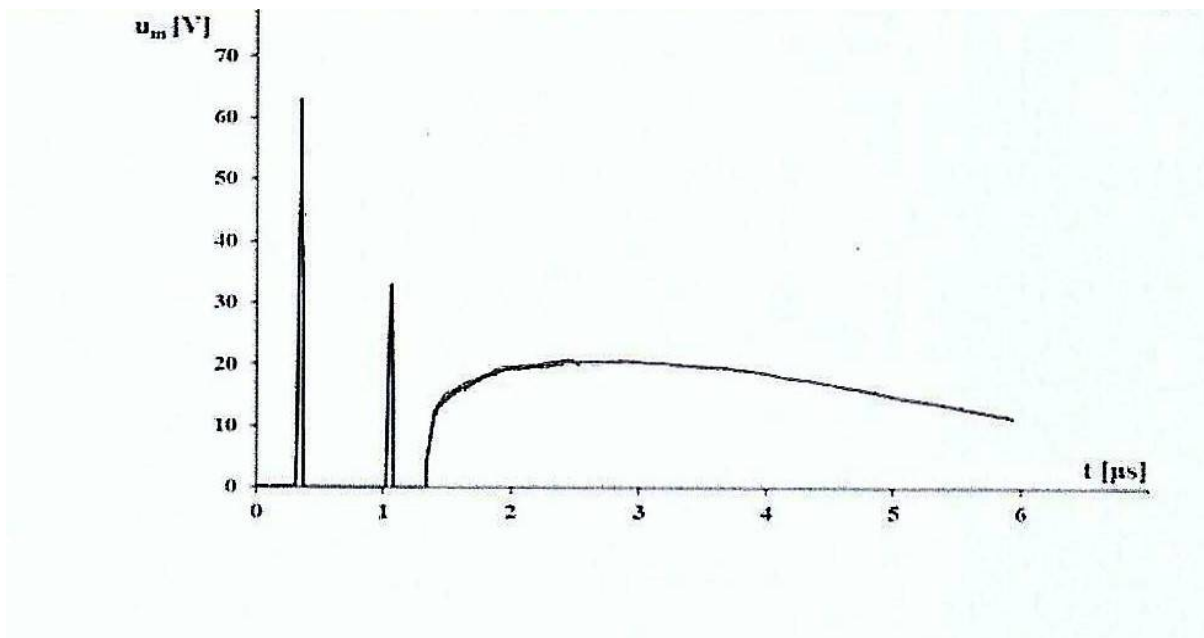
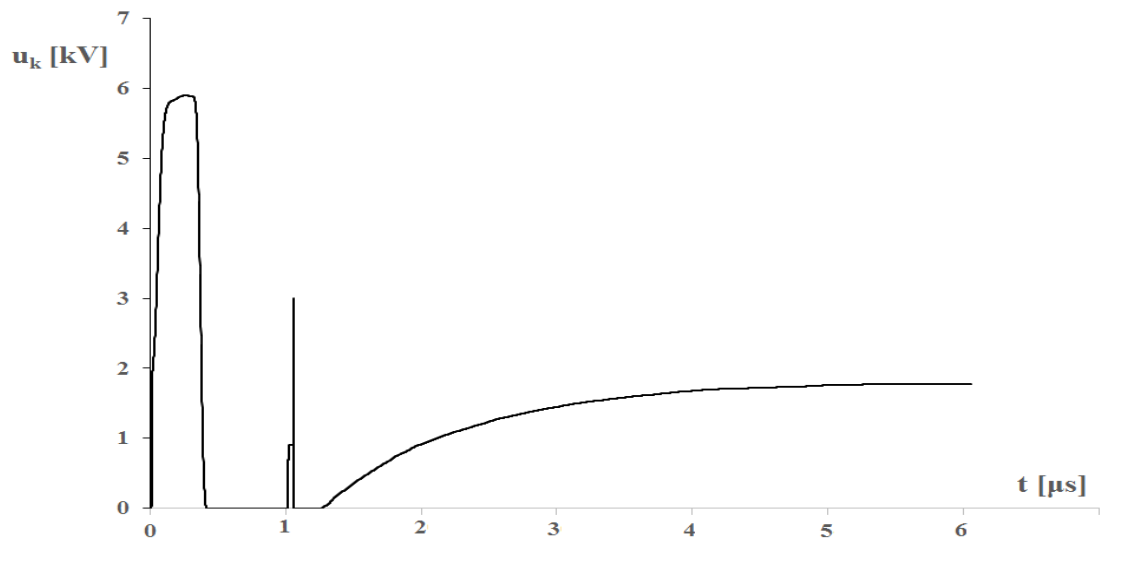
Σχήμα 3.3-1: Ενδεικτικό παλμογράφημα των αλμάτων δυναμικού προ της διάτρησης του συνδυασμού «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση $1,2/50 \mu\text{s}$, όπως καταγράφεται από τον ψηφιακό παλμογράφο.

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα (καμπυλότητα ακίδας $0,9\text{mm}$)

$$\Delta u_m = 6,14\text{V}$$

$$\Delta Q = 122,8\text{nC}$$

$$\Delta W = 3,07\text{eV}$$



Σχήμα 3.3-2: Ενδεικτικό παλμογράφημα των αλμάτων δυναμικού κατά την διάτρηση του συνδυασμού «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs .

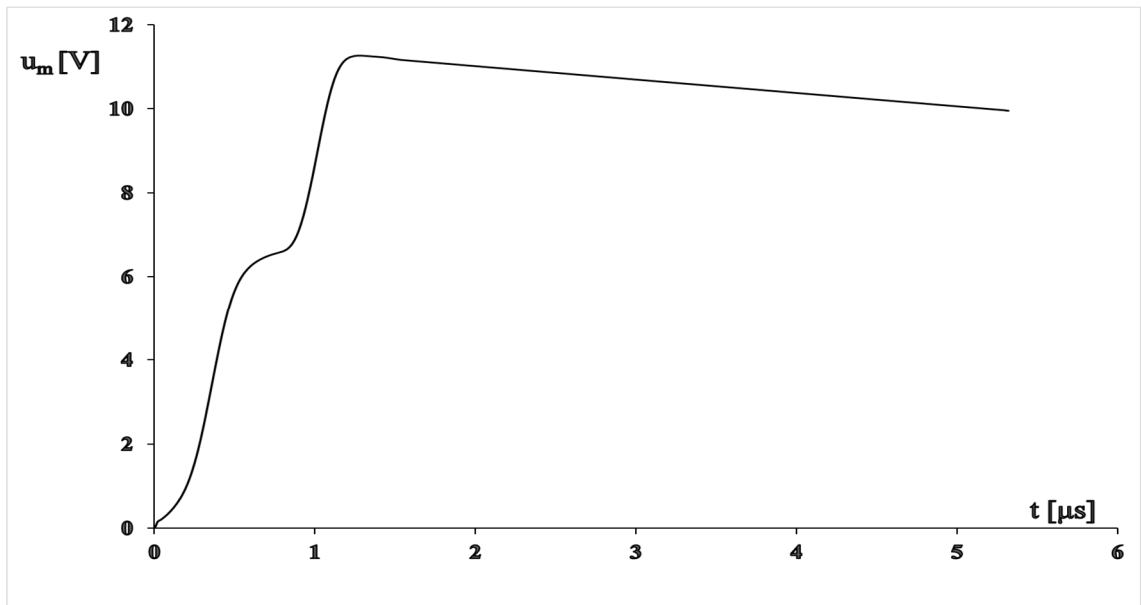
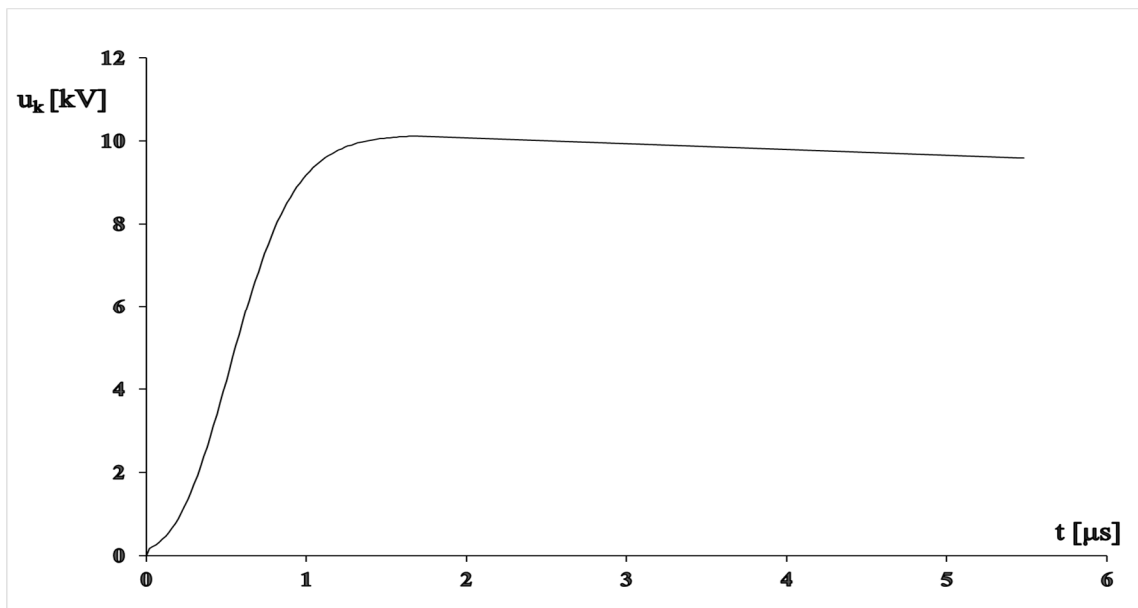
Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα (καμπυλότητα ακίδας 0,9 mm)

$$U_k=6 \text{ kV}$$

$$\Delta u_m \approx 63 \text{ V}$$

$$\Delta Q= 1260 \text{ nC}$$

$$\Delta W= 31.5 \text{ eV}$$



Σχήμα 3.3-3: Ενδεικτικά παλμογράφημα των αλμάτων δυναμικού προ της επιφανειακής διάσπασης του συνδυασμού «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs

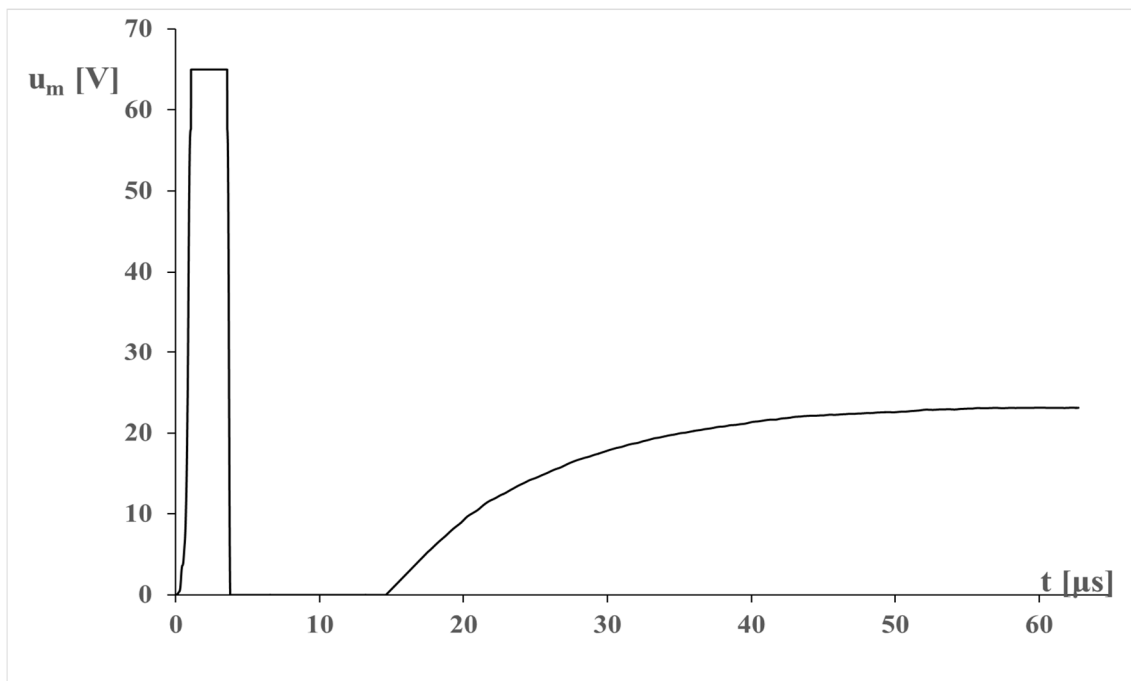
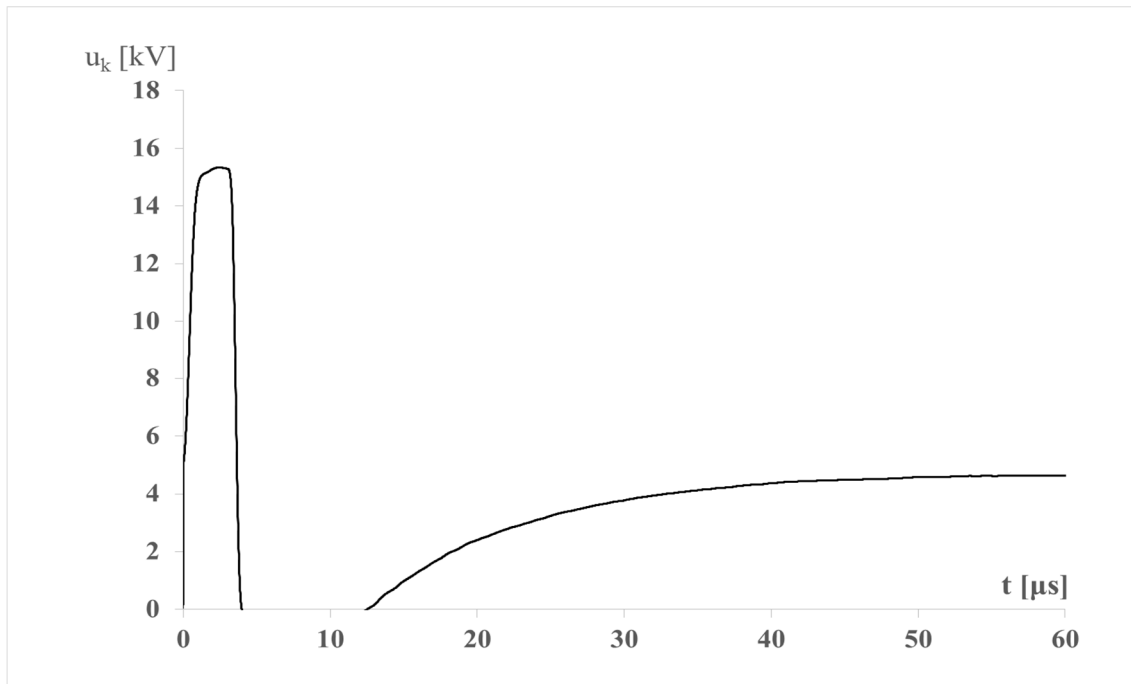
Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα (καμπυλότητα ακίδας 0.9mm)

$$U_k = 11\text{kV}$$

$$\Delta u_m = 11,26\text{V}$$

$$\Delta Q = 225.2\text{nC}$$

$$\Delta W = 5.63\text{eV}$$



Σχήμα 3.3-4: Ενδεικτικό παλμογράφημα των αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του συνδυασμού «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα (καμπυλότητα ακίδας 0,9mm)

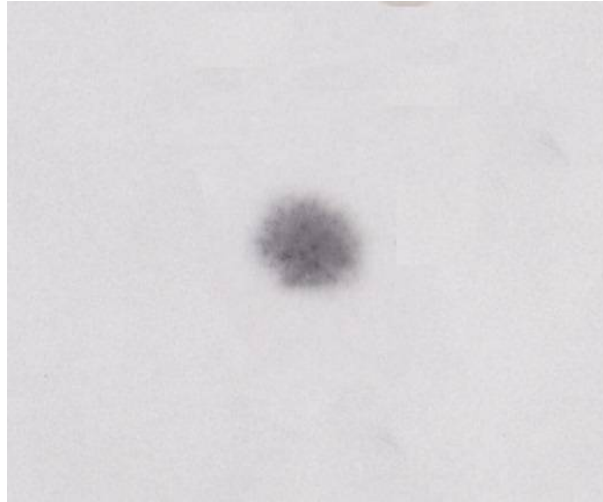
$U_k = 18\text{kV}$

$\Delta u_m \approx 65\text{V}$

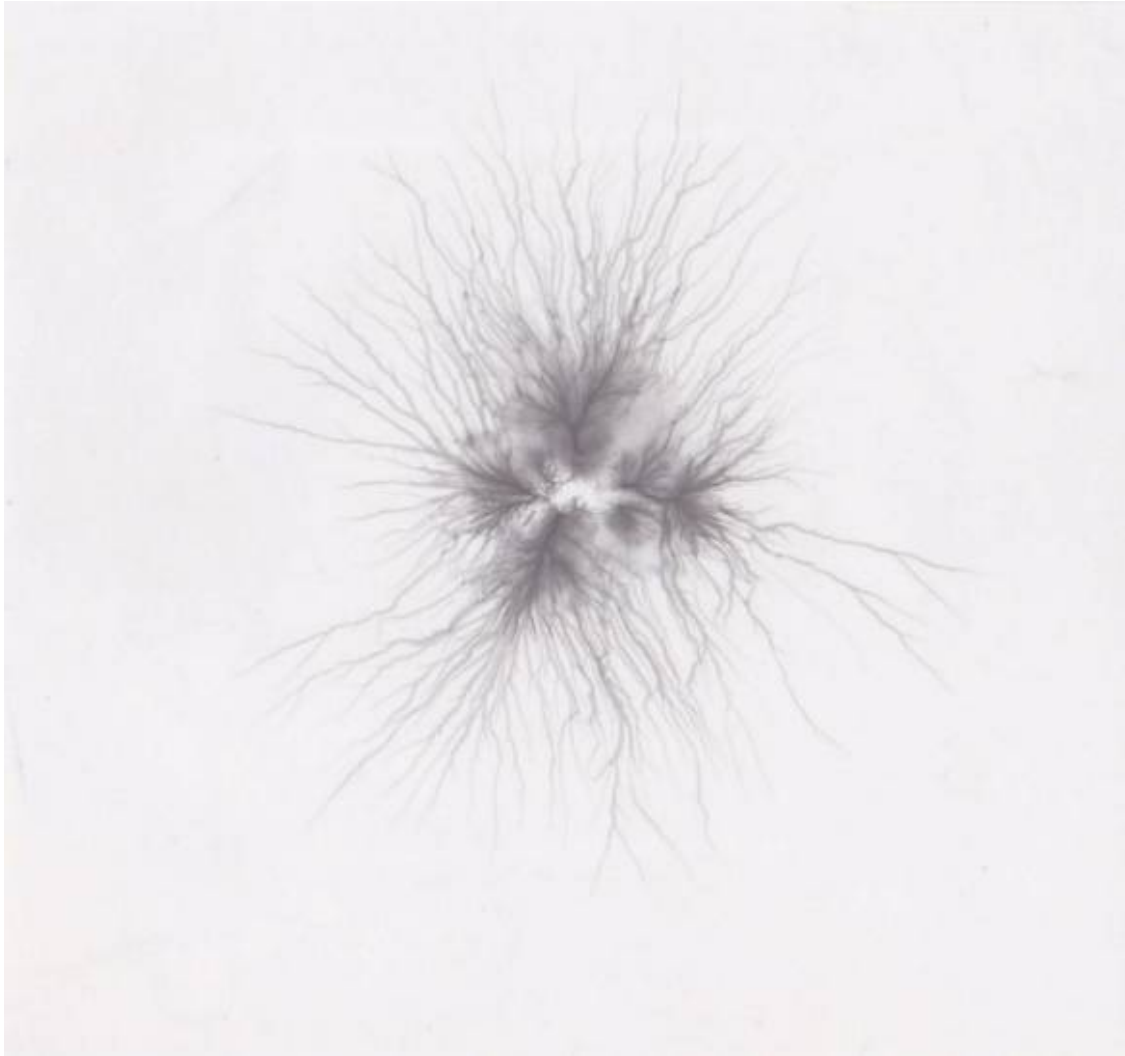
$\Delta Q = 3900\text{nF}$

$\Delta W = 32,5\text{ eV}$

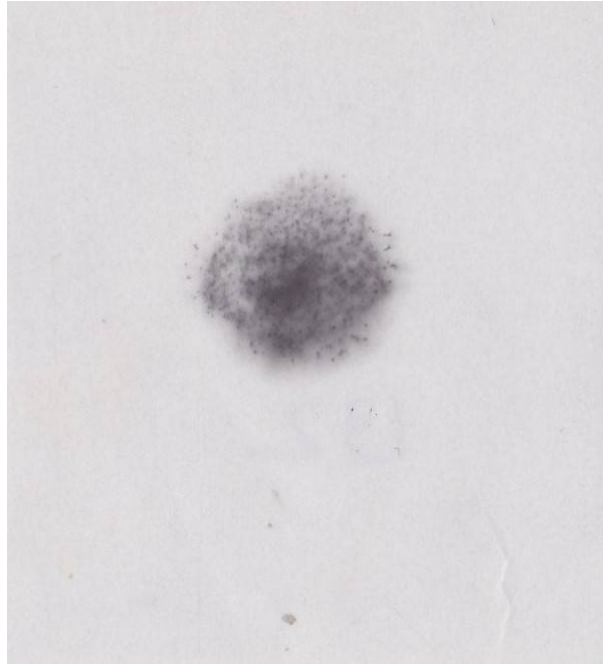
Ενδεικτικές φωτογραφίες προσβολής του φωτογραφικού φιλμ κατά την καταπόνηση των δοκιμίων πλησίον της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης 1,2 /50 μs για την διάσπαση και κατά την διάσπαση (υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα, με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm) δίνονται στα σχήματα 3.3-5 έως 3.3-8.



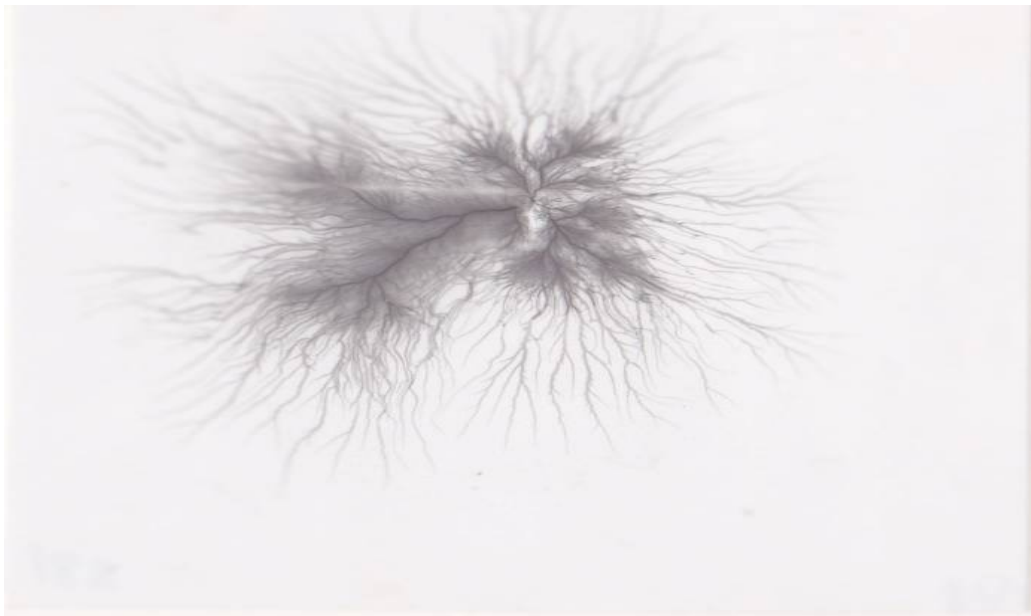
Σχήμα 3.3-5: Ενδεικτική φωτογραφία προσβολής του φωτογραφικού φιλμ στον συνδυασμό «χαρτί μετασηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας» για μέγιστη τιμή της τάσης πλησίον της μέγιστης τιμής της για την διάτρηση, υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm).



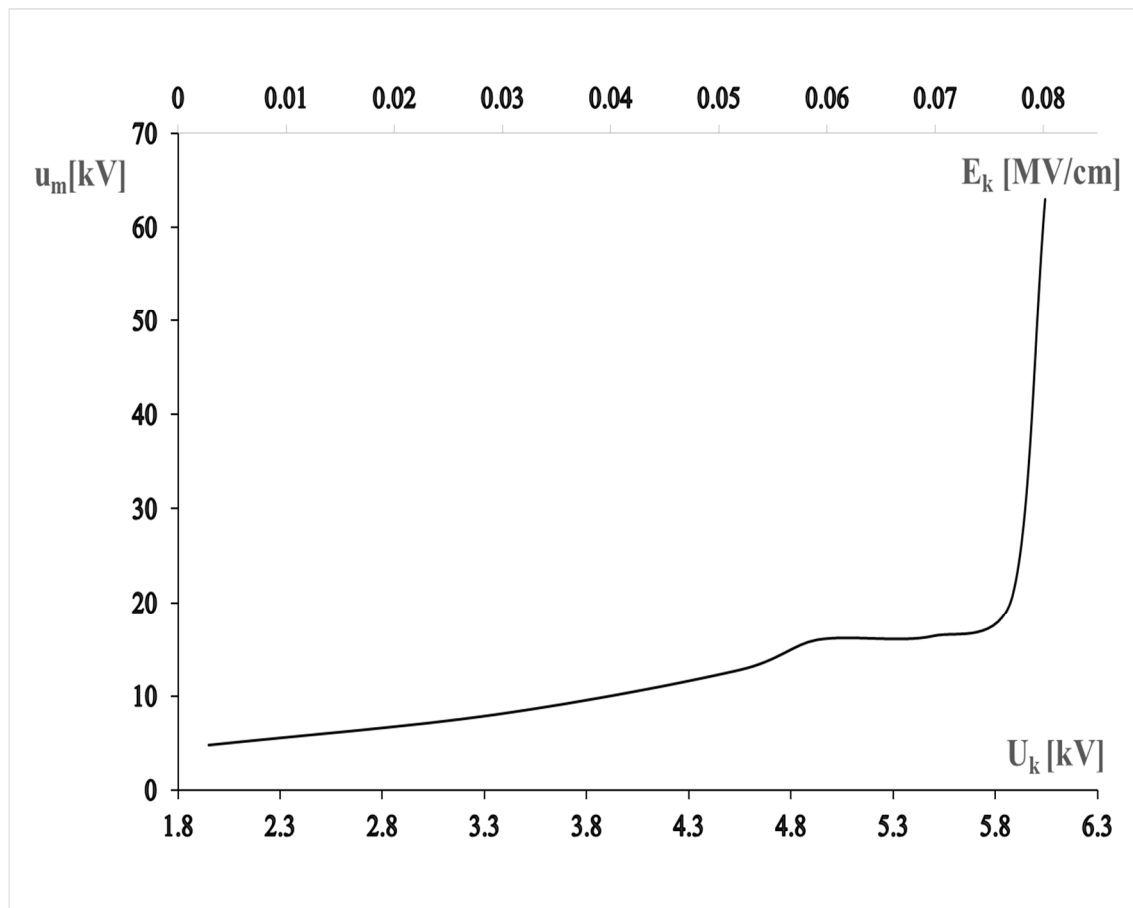
Σχήμα 3.3-6: Ενδεικτική φωτογραφία προσβολής του φωτογραφικού φιλμ στον συνδυασμό «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας» για μέγιστη τιμή της τάσης πλησίον της μέγιστης τιμής της για την επιφανειακή διάσπαση, υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm).



Σχήμα 3.3-7: Ενδεικτική φωτογραφία προσβολής του φωτογραφικού φιλμ στον συνδυασμό «χαρτί μετασηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας» κατά την διάτρηση, υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0.9mm).



Σχήμα 3.3-8: Ενδεικτική φωτογραφία προσβολής του φωτογραφικού φιλμ στον συνδυασμό «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας» κατά την επιφανειακή διάσπαση, υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm).



Σχήμα 3.3-9: Χαρακτηριστική $\Delta u_m = f(U_k, E_k)$ στον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm)

Δu_m : αύξηση της τάσης λόγω αλμάτων δυναμικού

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

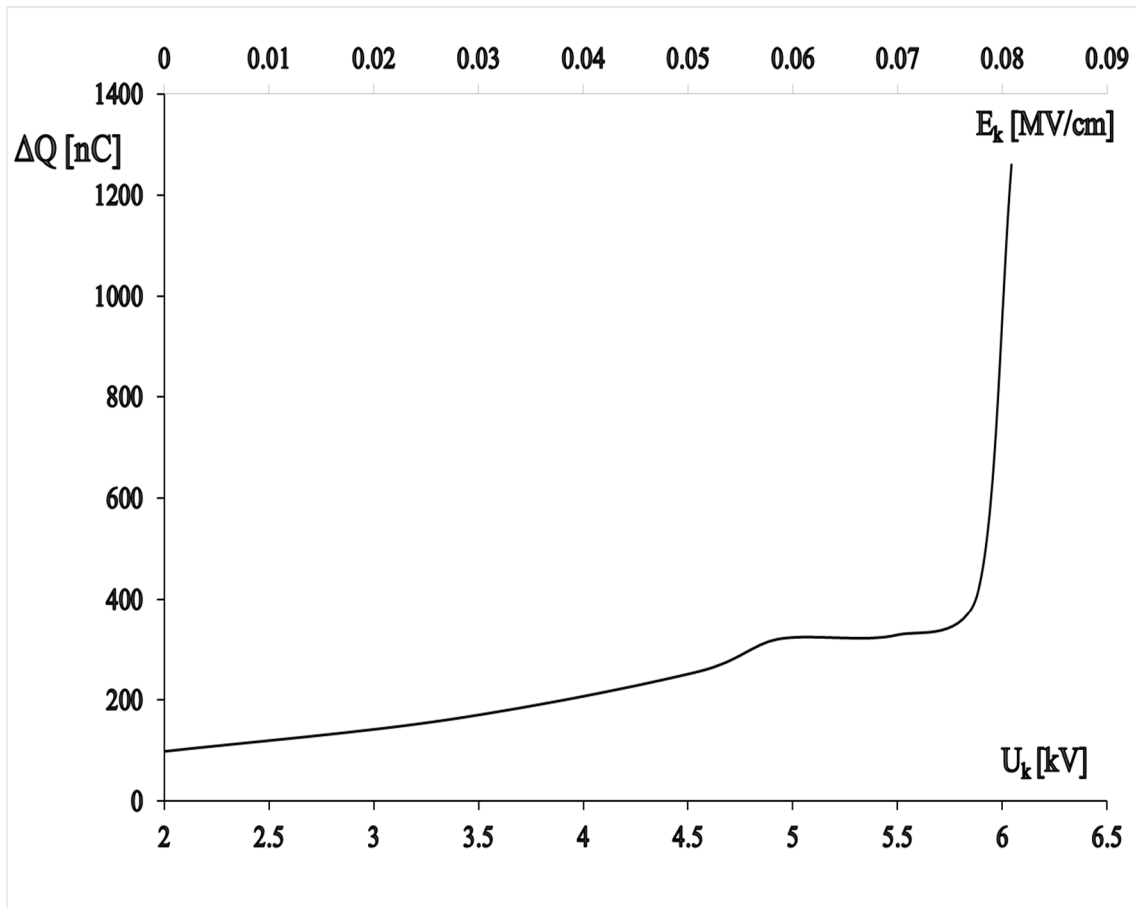
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάρρηξης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 6 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.09 \text{ MV/cm}$$

$$\Delta u_{md} = 63 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-10: Χαρακτηριστική $\Delta Q = f(U_k, E_k)$ στον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm)

ΔQ_m : αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου λόγω αλμάτων δυναμικού

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

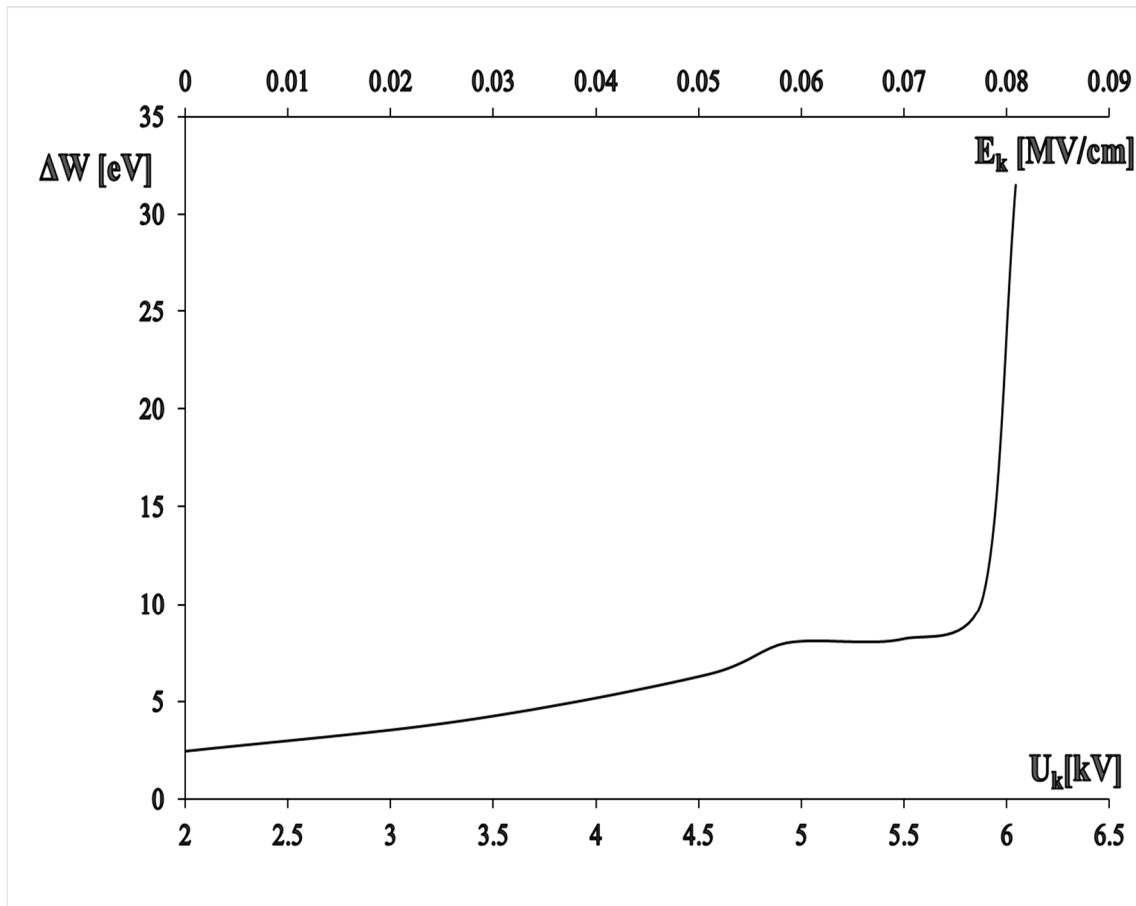
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάρρηξης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$U_{kd} = 6 \text{ kV}$

$E_{kd} = 0.09 \text{ MV/cm}$

$\Delta u_{md} = 63 \text{ V}$



Σχήμα 3.3-11: Χαρακτηριστική $\Delta W = f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm).

ΔW : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στην άνοδο

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

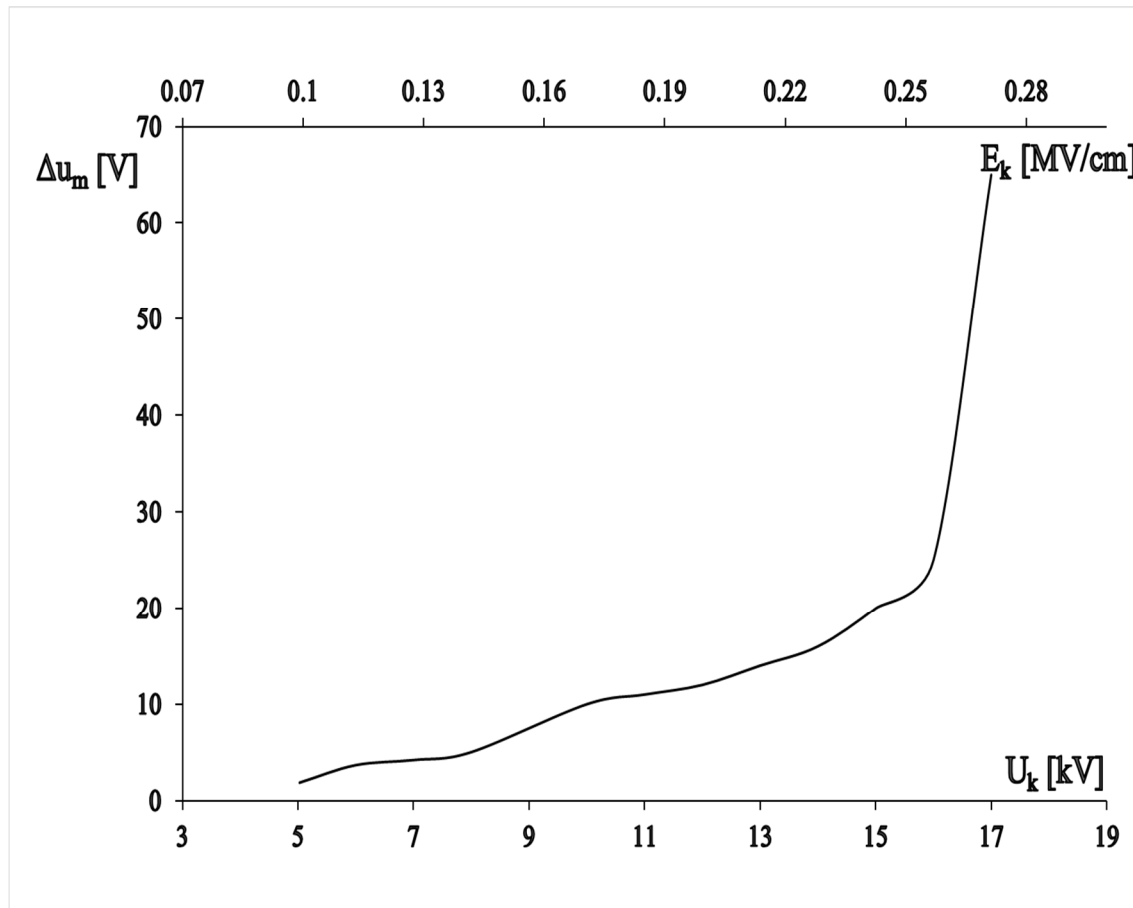
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάτρησης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 6 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.09 \text{ MV/cm}$$

$$\Delta u_{md} = 63 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-12: Χαρακτηριστική $\Delta u_m = f(U, E_k)$ στον συνδυασμό «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0.9mm)

Δu_m : η αύξηση της τάσης λόγω αλμάτων δυναμικού

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

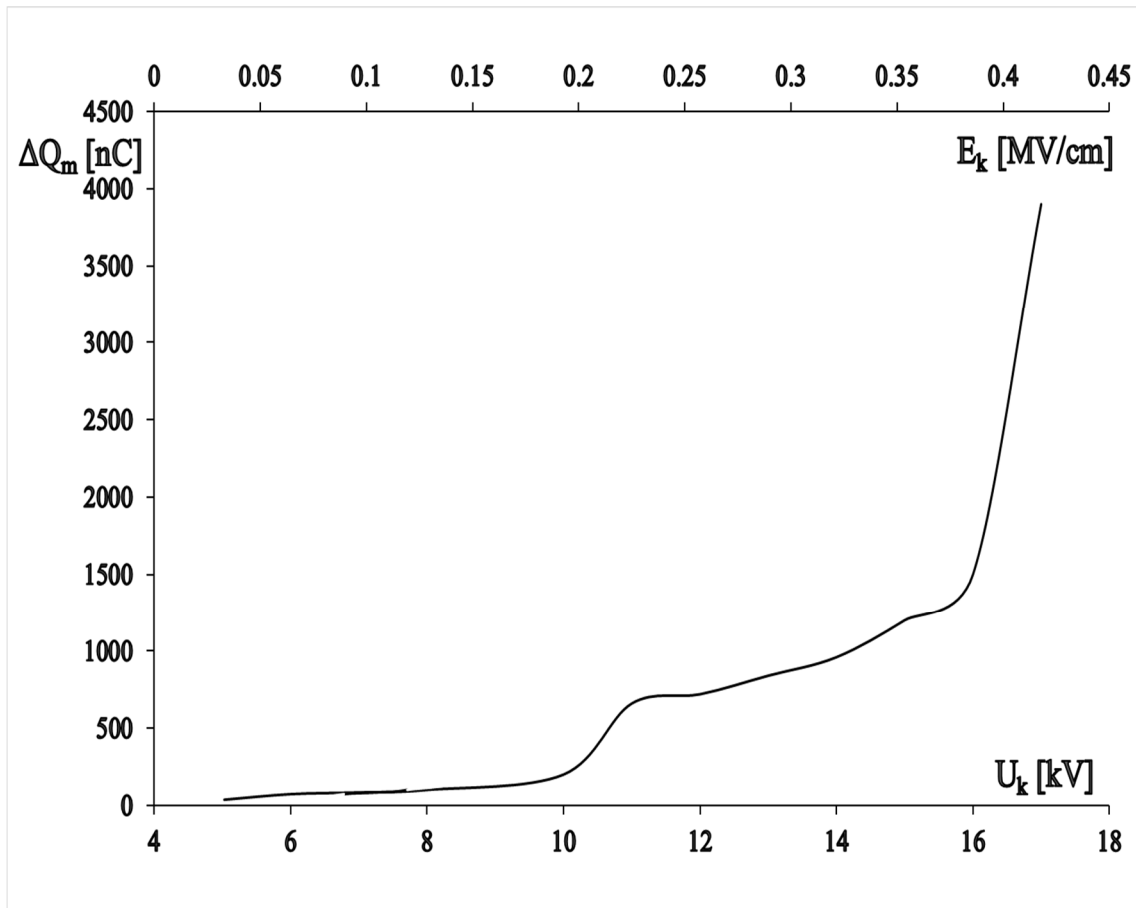
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάτρησης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 18 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0,27 \text{ MV / cm}$$

$$\Delta u_{md} = 65 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-13: Χαρακτηριστική $\Delta Q = f(U_k, E_k)$ στον συνδυασμό «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0.9mm)

ΔQ_m : η αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου λόγω αλμάτων δυναμικού

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

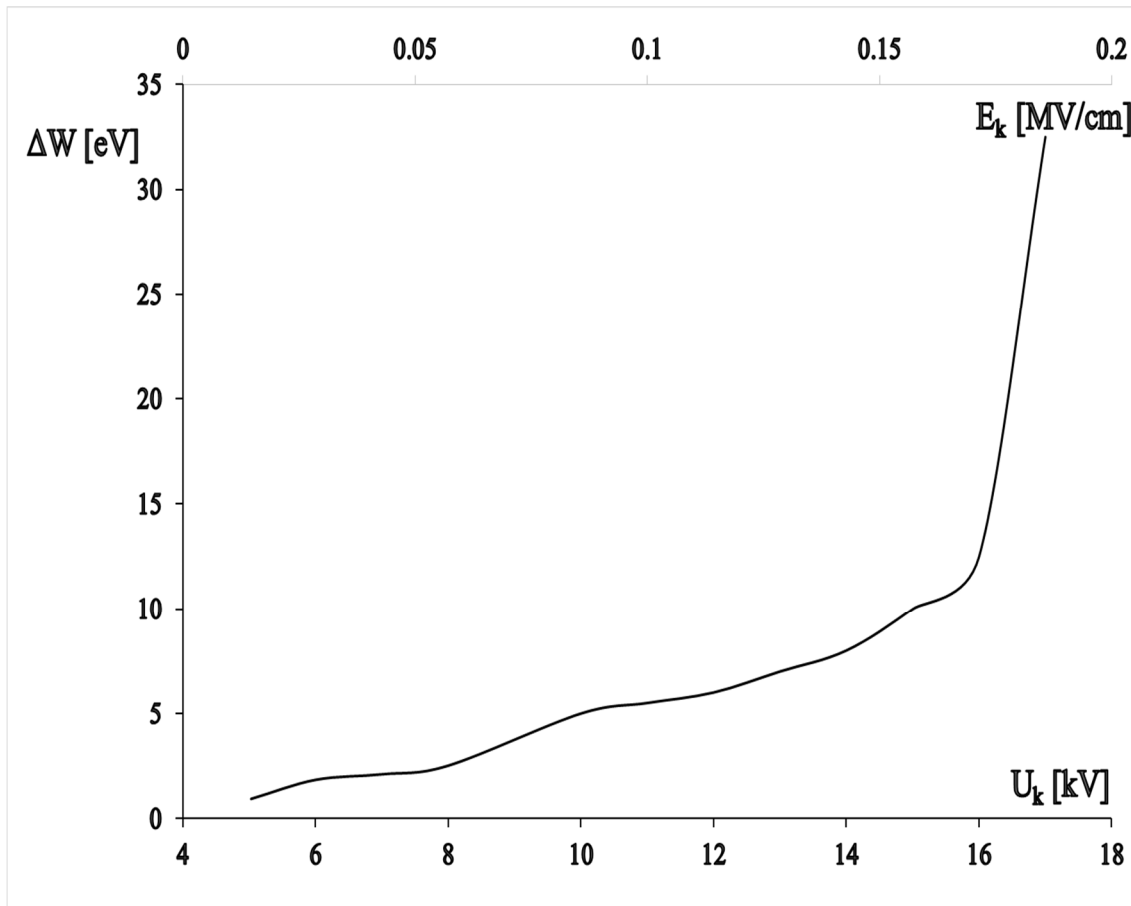
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάτρησης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 18 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.27 \text{ MV/cm}$$

$$\Delta u_{md} = 65 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-14: Χαρακτηριστική $\Delta W = f(U_k, E_k)$ στον συνδυασμό «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0.9mm)

ΔW : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στην άνοδο

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

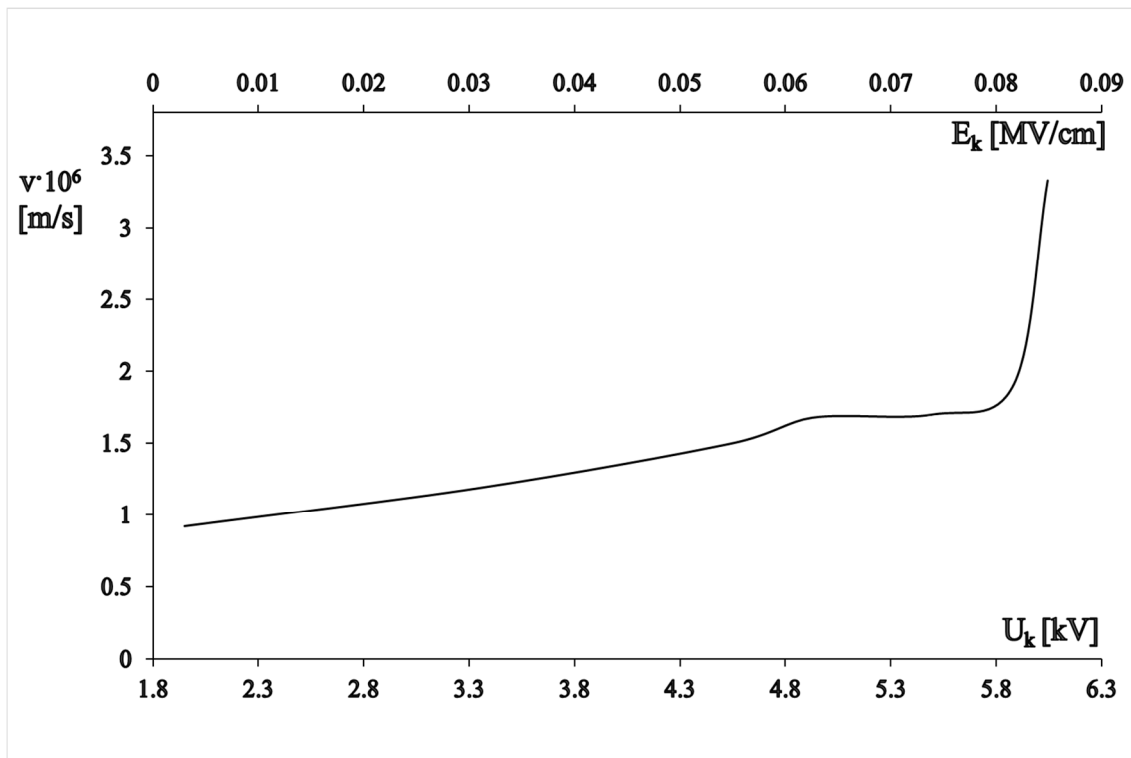
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάτρησης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$U_{kd} = 18 \text{ kV}$

$E_{kd} = 0.27 \text{ MV/cm}$

$\Delta u_{md} = 65 \text{ V}$



Σχήμα 3.3-15: Χαρακτηριστική $v=f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm)

v : μεταβολή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

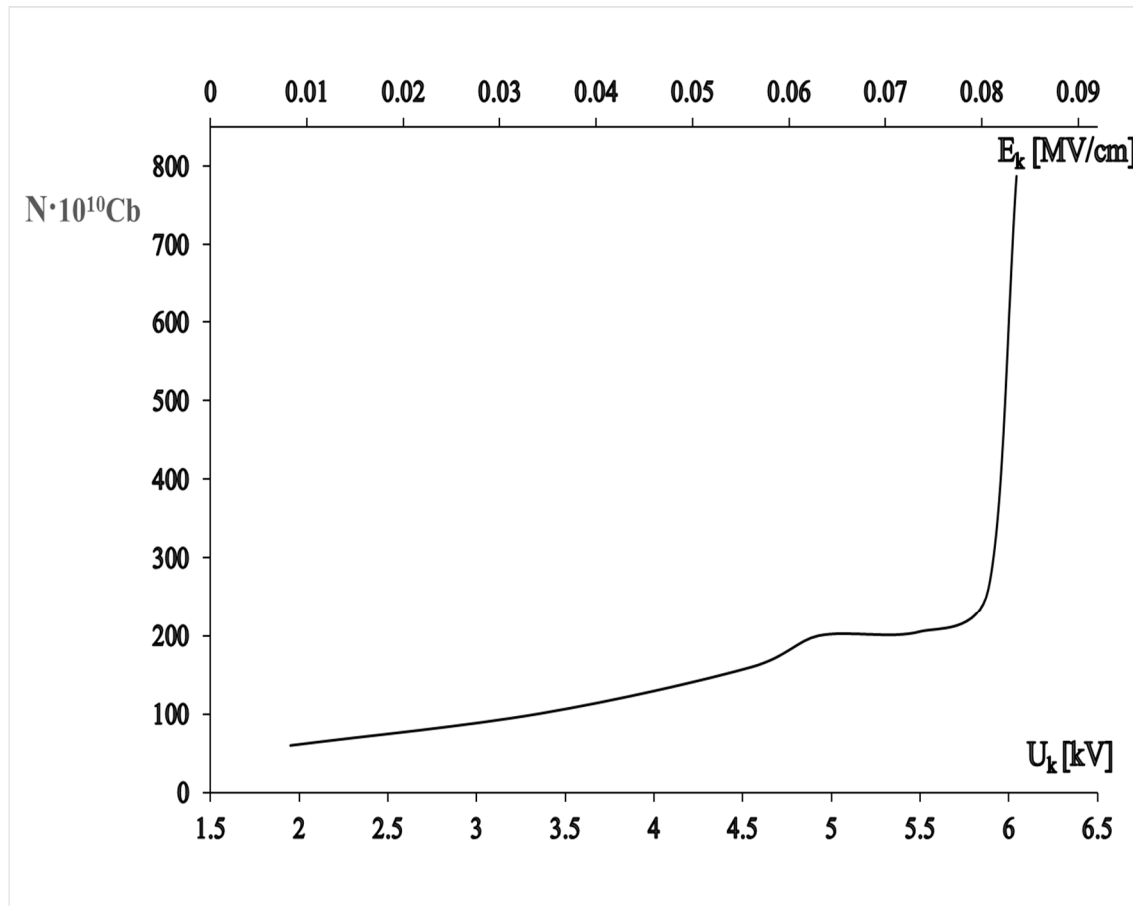
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάρρηξης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 6 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.09 \text{ MV/cm}$$

$$\Delta u_{md} = 63 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-16: Χαρακτηριστική $N=f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm)

N : Ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων που συλλέχθηκαν από την άνοδο

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

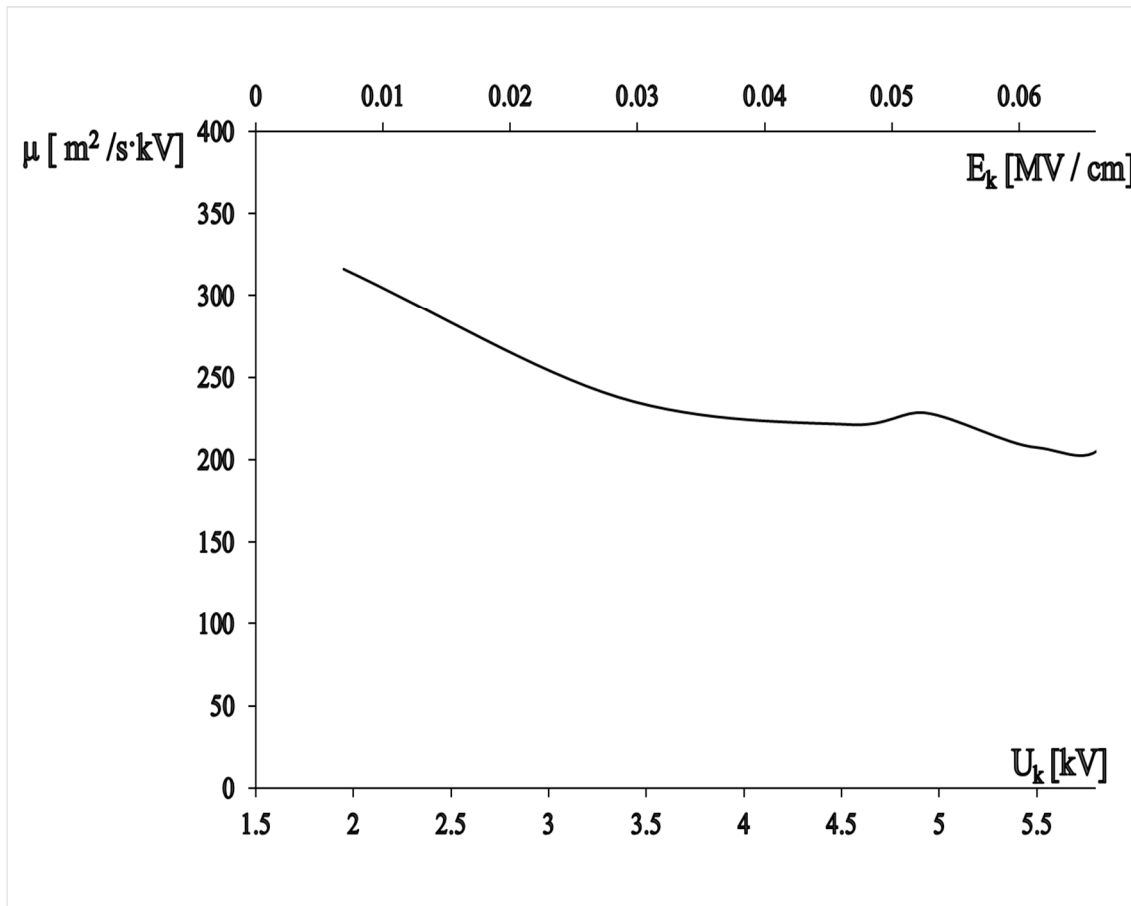
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάρρηξης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 6 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.09 \text{ MV/cm}$$

$$\Delta u_{md} = 63 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-17: Χαρακτηριστική $\mu=f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm)

μ : Η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

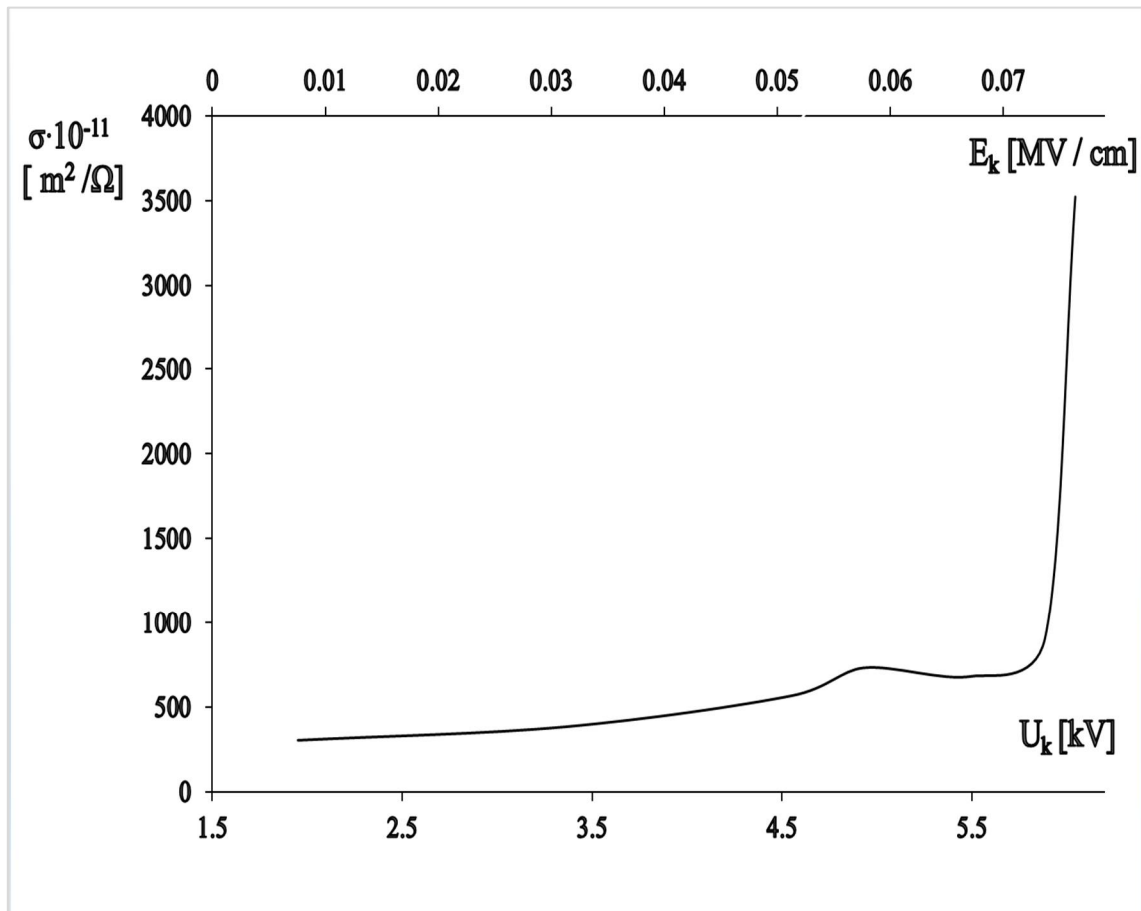
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάρτησης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 6 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.09 \text{ MV/cm}$$

$$\Delta u_{md} = 63 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-18: Χαρακτηριστική $\sigma=f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9 mm)

σ : Η ειδική αγωγιμότητα του στερεού ηλεκτρομονωτικού στην 10^{-9}

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

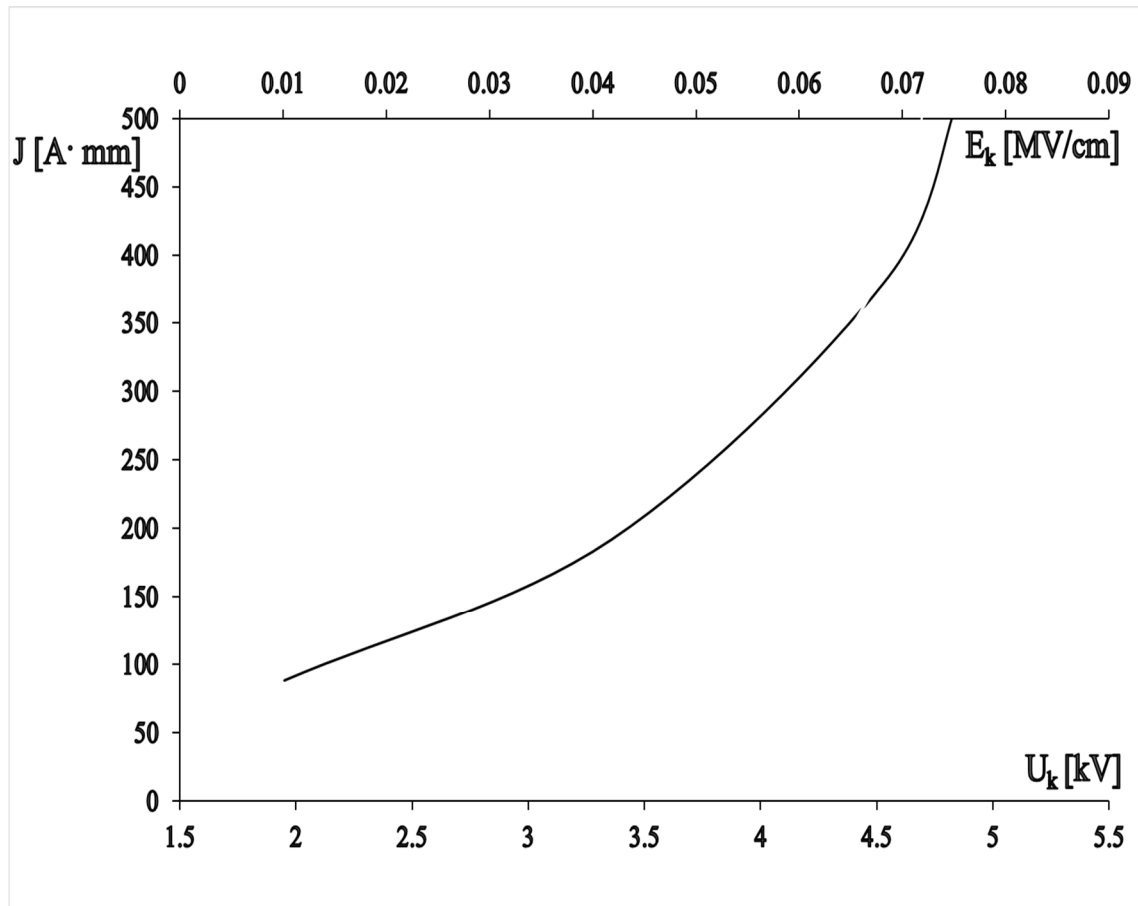
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάρρηξης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$U_{kd} = 6 \text{ kV}$

$E_{kd} = 0.09 \text{ MV/cm}$

$\Delta u_{md} = 63 \text{ V}$



Σχήμα 3.3-19: Χαρακτηριστική $J=f(u_k, E_k)$, στον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9 mm)

J: Η πυκνότητα του ρεύματος

U_k: μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

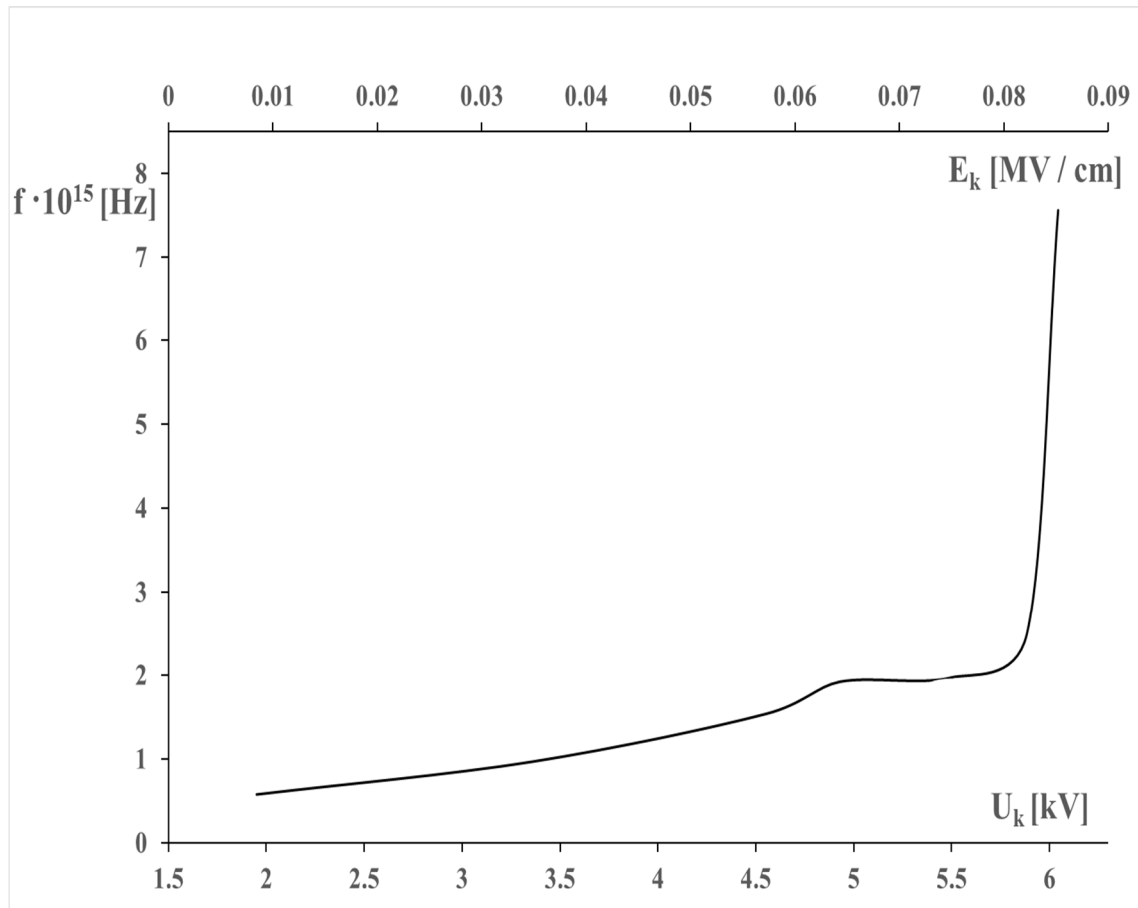
E_k: μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάρρηξης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 6 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.09 \text{ MV/cm}$$

$$\Delta u_{md} = 45.76 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-20: Χαρακτηριστική $f=f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9 mm)

f : Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην 10^7

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

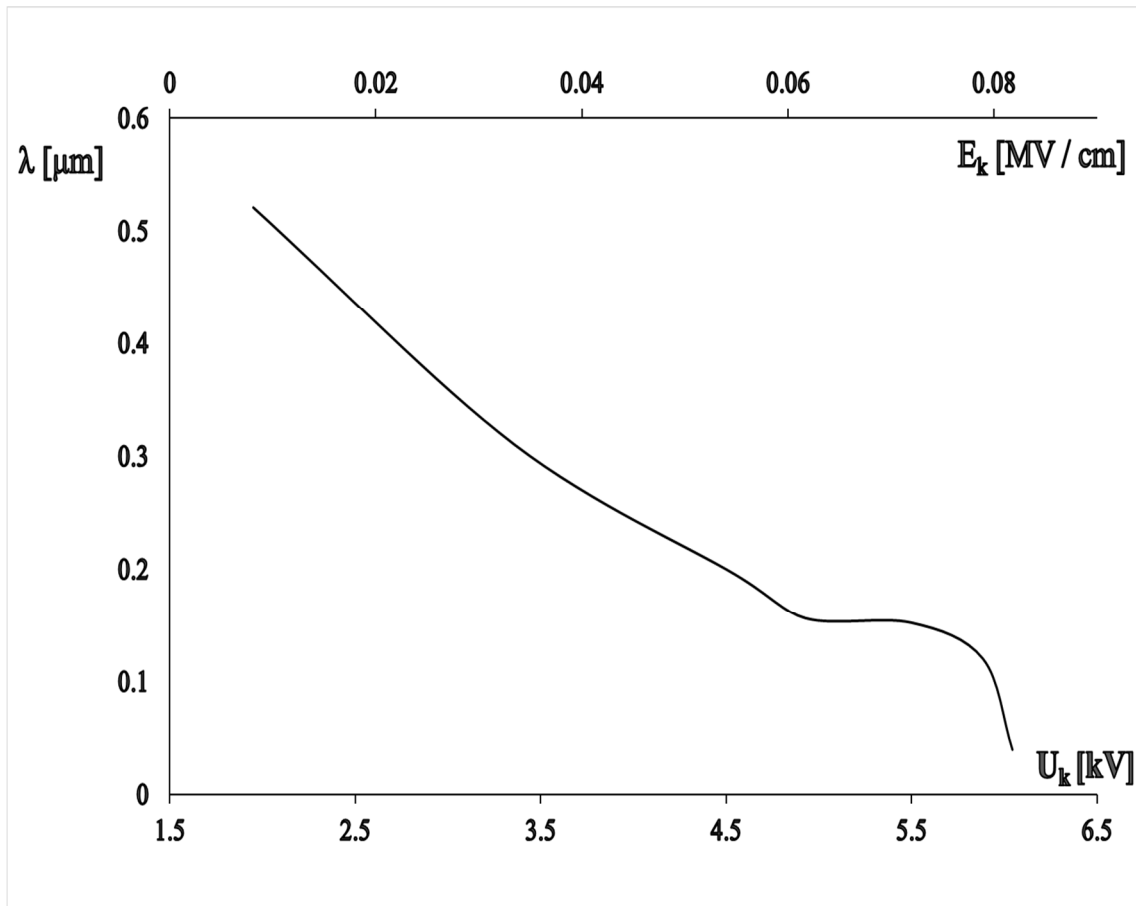
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάτρησης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 6 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.09 \text{ MV/cm}$$

$$\Delta u_{md} = 63 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-21: Χαρακτηριστική $\lambda=f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9 mm)

λ : Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

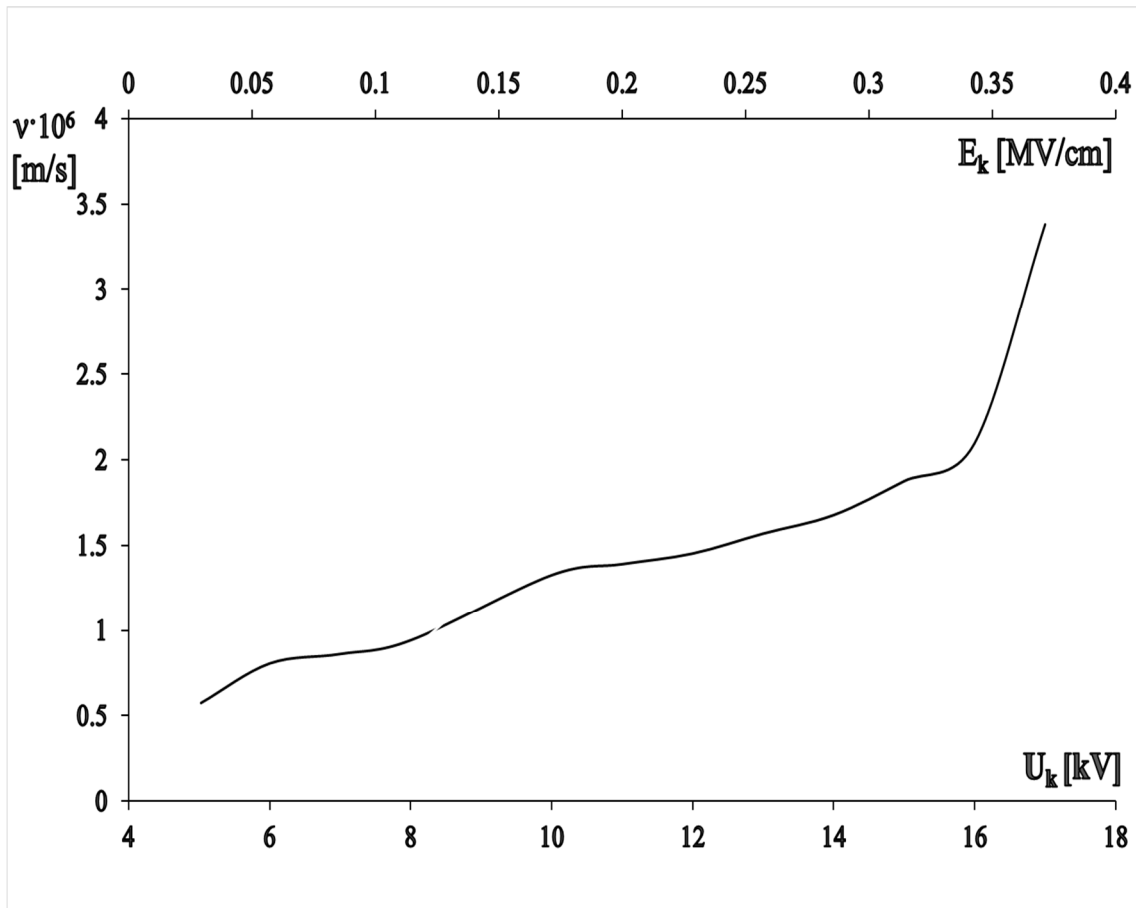
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάρτησης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 6 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.09 \text{ MV/cm}$$

$$\Delta u_{md} = 63 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-22: Χαρακτηριστική $v=f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «πέριναξ-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm)

v : μεταβολή της ταχύτητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

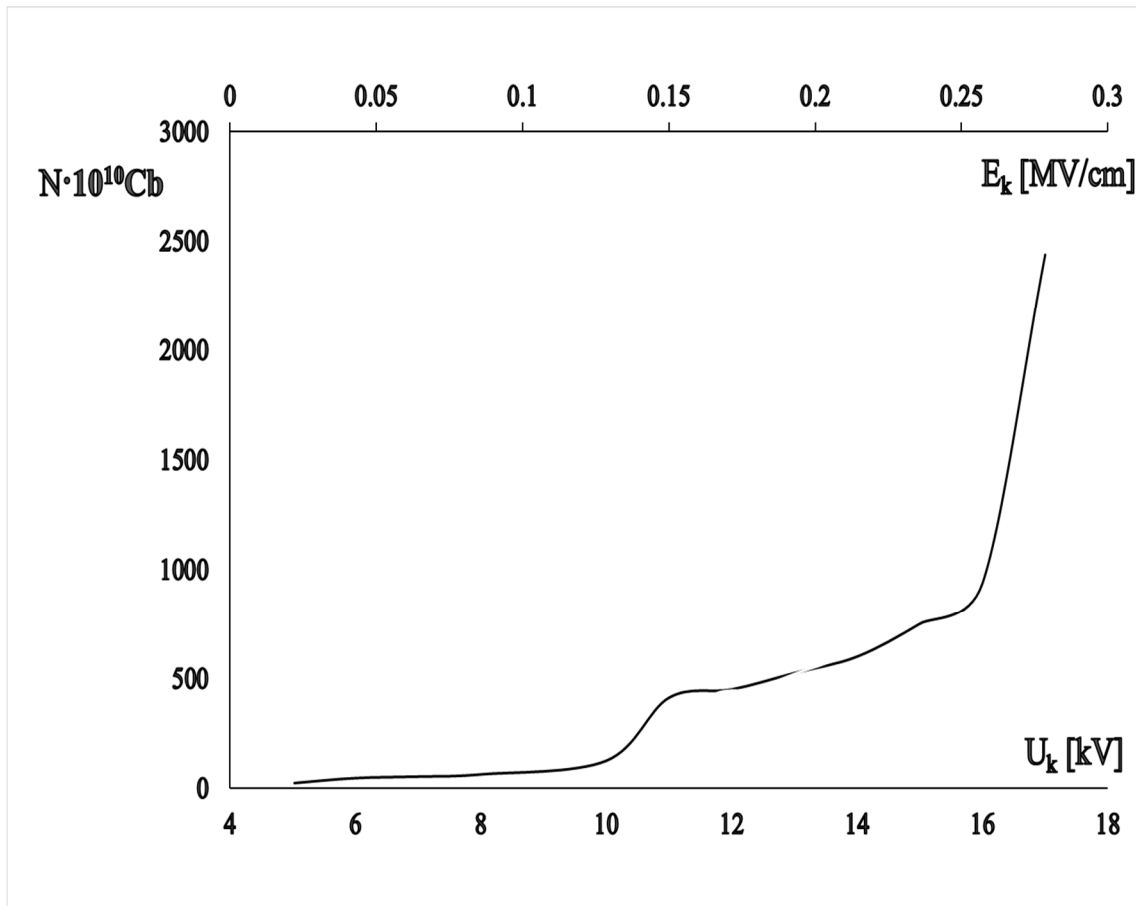
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάτρησης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 18 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.27 \text{ MV / cm}$$

$$\Delta u_{md} = 65 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-23: Χαρακτηριστική $N=f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm)

N : Ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων που συλλέχθηκαν από την άνοδο

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

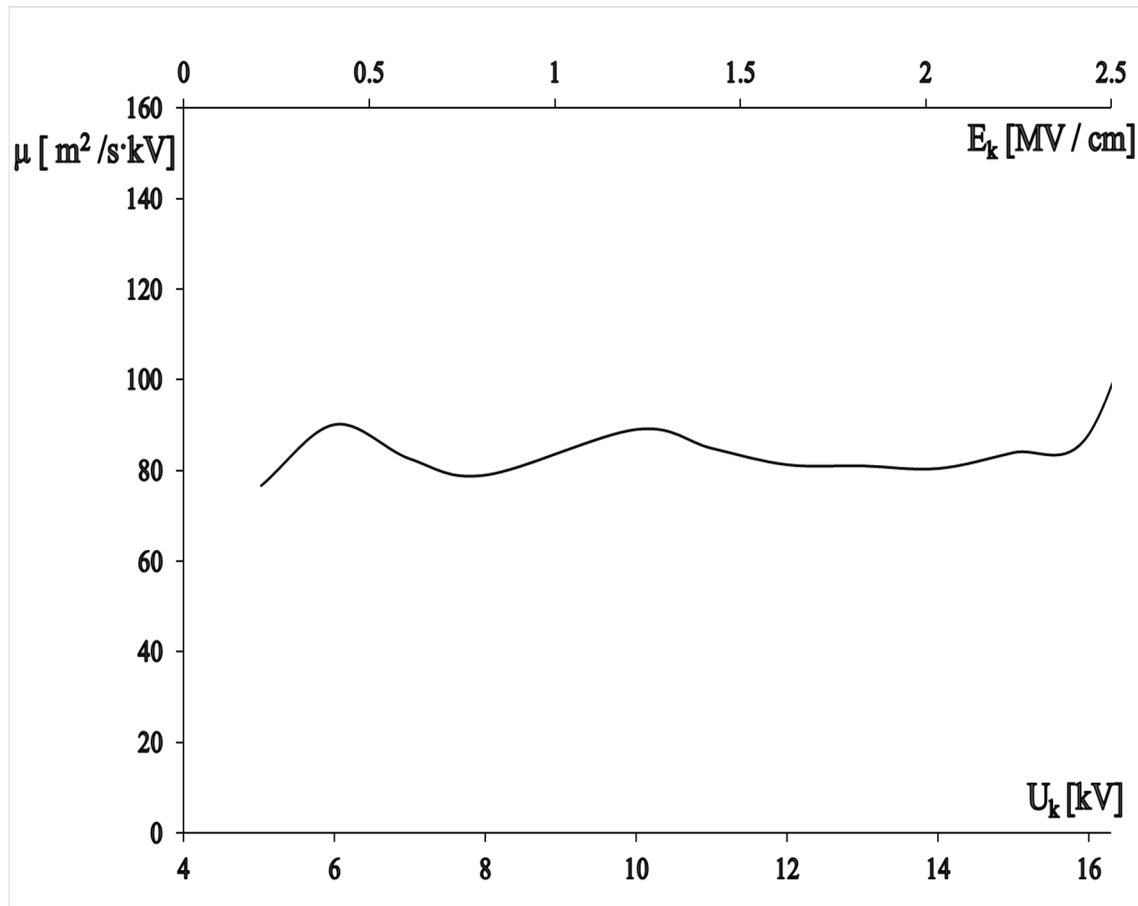
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάτρησης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 18 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.27 \text{ MV / cm}$$

$$\Delta u_{md} = 65 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-24: Χαρακτηριστική $\mu=f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm)

μ : Η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

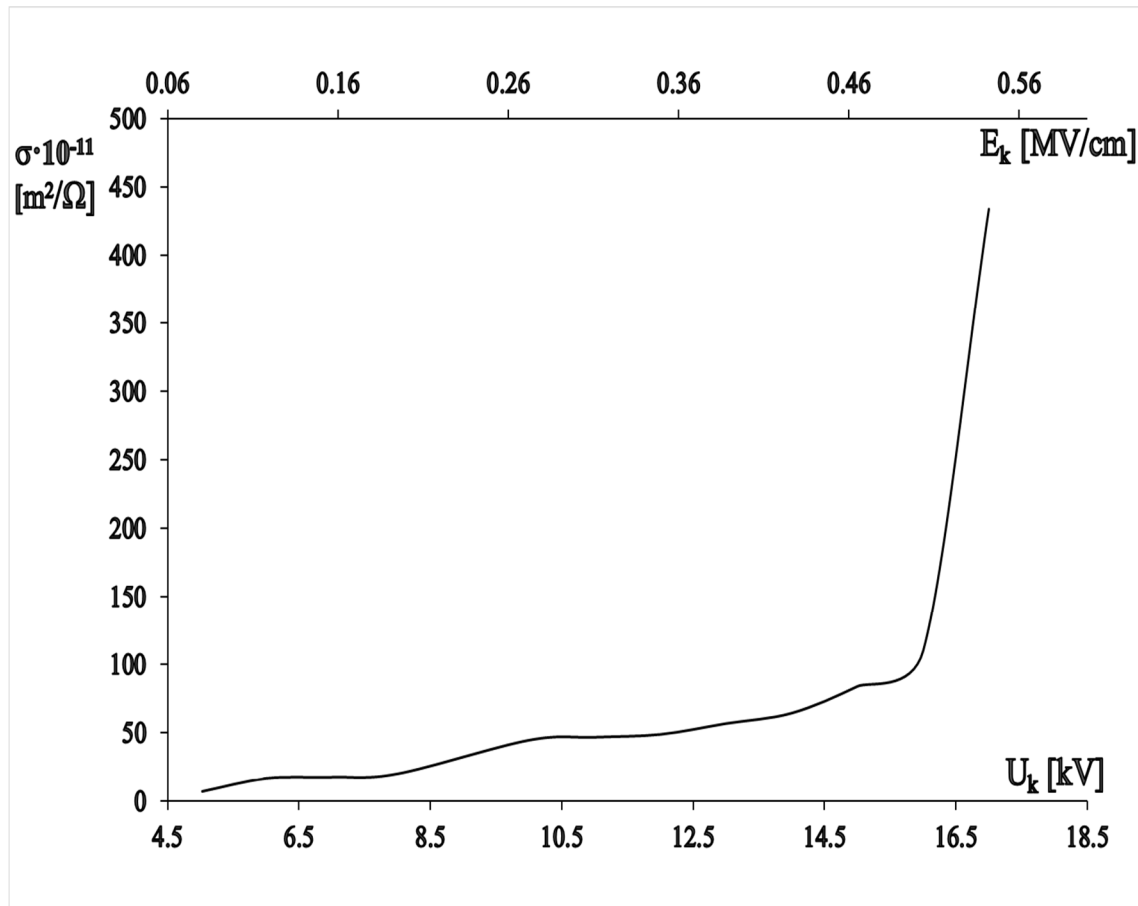
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάτρησης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$U_{kd} = 18 \text{ kV}$

$E_{kd} = 0.27 \text{ MV / cm}$

$\Delta u_{md} = 65 \text{ V}$



Σχήμα 3.3-25: Χαρακτηριστική $\sigma=f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm)

σ : Η ειδική αγωγιμότητα του στερεού ηλεκτρομονωτικού στην 10^{-9}

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

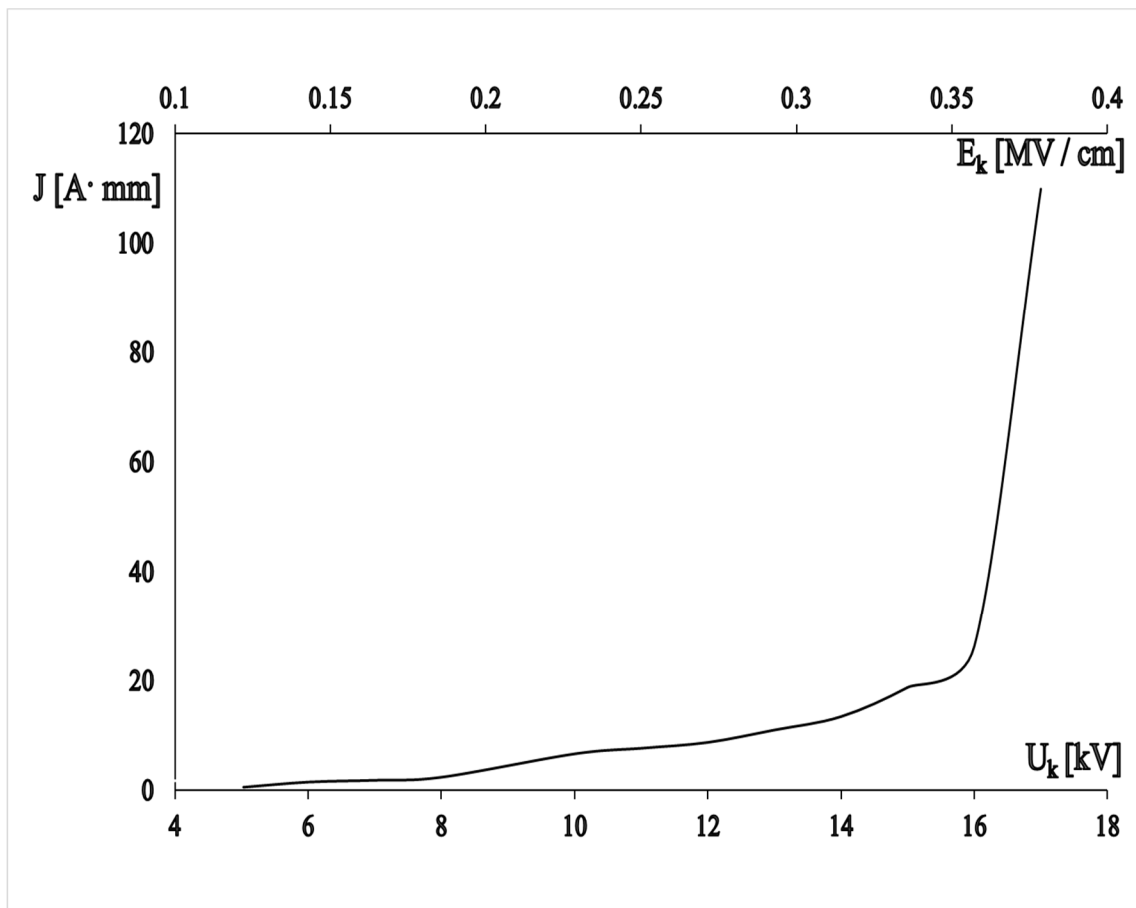
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάρρηξης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 18 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.27 \text{ MV / cm}$$

$$\Delta u_{md} = 65 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-26: Χαρακτηριστική $J=f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm)

J: Η πυκνότητα του ρεύματος

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

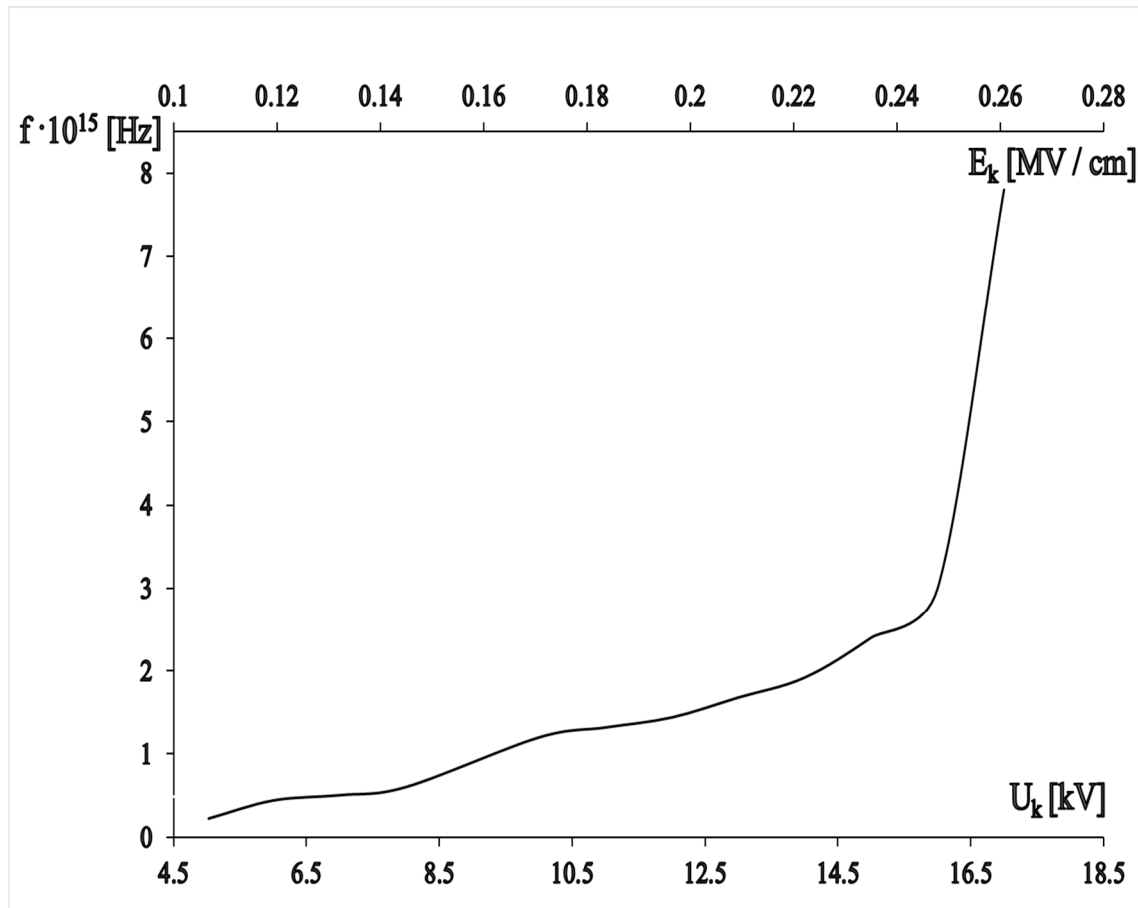
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάτρησης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 18 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.27 \text{ MV / cm}$$

$$\Delta u_{md} = 65 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-27: Χαρακτηριστική $f=f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «**περτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας**», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm)

f : Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην 10^7

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

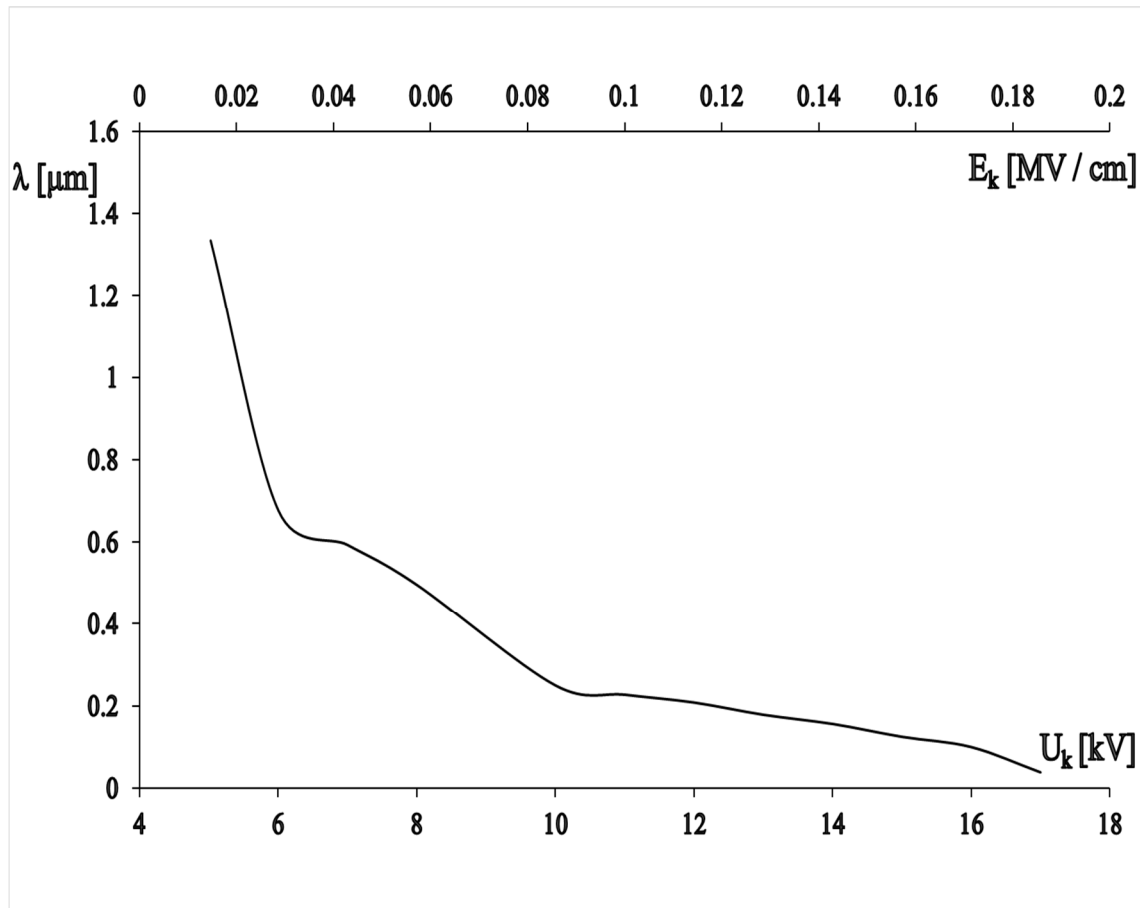
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάτρησης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 18 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.27 \text{ MV / cm}$$

$$\Delta u_{md} = 65 \text{ V}$$



Σχήμα 3.3-28: Χαρακτηριστική $\lambda=f(U_k, E_k)$, στον συνδυασμό «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm)

λ : Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης.

Σημείωση: Επειδή η τιμή Δu_m κατά τη διάσπαση δεν είναι δυνατό να ενταχθεί στην κλίμακα των τιμών προ της διάτρησης για αυτό δίνονται οι τιμές κατά τη διάσπαση.

$$U_{kd} = 18 \text{ kV}$$

$$E_{kd} = 0.27 \text{ MV / cm}$$

$$\Delta u_{md} = 65 \text{ V}$$

4. Σχόλια επί των αποτελεσμάτων των μετρήσεων

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων υπό κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών, μέσω παλμογραφημάτων ή κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (μέσω αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα) [9, 10, 12, 15-19, 22-24, 26-33, 43, 44], έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως η αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων, η τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων, κ.λ.π. Στο σχήμα π.χ. 3.1-1 έχει ήδη καθορισθεί (σε εναρμόνιση με την βιβλιογραφία [9, 18, 33, 43, 44]) η έννοια της αύξησης της τάσης Δu_m λόγω των αλμάτων δυναμικού (εξαιτίας των μερικών εκκενώσεων) στο συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικο-ατμοσφαιρικός αέρας». Με βάση τις τιμές Δu_m έχουν σχεδιαστεί (τόσο για τον συνδυασμό «πέρτιναξ-ατμοσφαιρικός αέρας» όσο και για τον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας») οι χαρακτηριστικές $\Delta u_m = f(U_k, E_k)$ και ακολούθως οι χαρακτηριστικές $\Delta Q = f(U_k, E_k)$ και $\Delta W = f(U_k, E_k)$ (βλ. σχήματα 3.3-9 έως 3.3-14.). Ιδιαίτερη σημασία έχει, ότι οι χαρακτηριστικές $\Delta Q = f(U_k, E_k)$ (βλ. σχήματα 3.2-10 και 3.2-13) είναι εκθετικής μορφής, με αποκλίσεις όμως από την μορφή αυτή, που αποδίδονται στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών ηλεκτρομονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής (κυρίως των απωλειών Joule και των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs, όπου έχουν διαπιστωθεί θερμικές καταπονήσεις και μηχανικές βλάβες σε στερεά ηλεκτρομονωτικά σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων [9, 10, 27, 33, 43], όπως παρατηρήθηκαν και κατά τις μετρήσεις που έγιναν στην εργασία αυτή. Το τελικό αποτέλεσμα της σε βήματα αύξησης της τάσης (βλ.παρ. 3.1) ήταν πάντοτε η διάτρηση του χαρτιού μετασχηματιστών (οπή διάτρησης διαμέτρου περίπου 0,1 mm) και η επιφανειακή διάσπαση του πέρτιναξ υπό μορφή δενδρίτη, στα ίχνη του οποίου παρατηρείτο αλλαγή της μοριακής δομής στην επιφάνεια του εν λόγω υλικού.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 1.1, για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά την διάσπαση των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών υπάρχουν δύο θεωρίες (η μακροσκοπική και η κβαντομηχανική [1-4, 7, 9-12, 15, 16, 22, 24, 27, 29-37, 39-44]), ο συνδυασμός των οποίων έχει αποδοθεί με το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4.3-1 [44]. Ακολούθως γίνεται μία προσπάθεια ερμηνείας των παλμογραφημάτων των αλμάτων δυναμικού (βλ. σχήματα 3.3-1 έως 3.3-4) μέσω της μακροσκοπικής θεωρίας και στη συνέχεια μέσω της κβαντομηχανικής θεωρίας. Τα παλμογράφημα των σχημάτων 3.3-1 και 3.3-3

αφορούν αντίστοιχα την τεχνητή γήρανση του χαρτιού (βλ. παράγραφο Γ, εδάφιο 2) μετασχηματιστών και του πέρτιναξ, ενώ τα παλμογραφήματα των σχημάτων 3.3-2 και 3.3-4 αφορούν αντίστοιχα την διάτρηση του χαρτιού μετασχηματιστών και την επιφανειακή διάσπαση του πέρτιναξ.

Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται μέσω της μακροσκοπικής θεωρίας ως ακολούθως:

Από το παλμογράφημα της γήρανσης (σχήμα 3.3-1 και 3.3-3) φαίνεται ότι εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού, τα οποία προκαλούνται, κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff (βλ. σχήμα 1.1.1-5) [1], από τη σταδιακή διάσπαση διαφόρων θέσεων διαταραχής. Μπορεί κανείς να υποθέσει ότι στην περίπτωση αυτή ισχύει για τη σχέση καταμερισμού μεταξύ χωρητικότητας του δοκιμίου C_δ και του πυκνωτή μέτρησης C_m :

$$u_m(t) = u_k(t) (C_\delta + \Delta C_\delta) / C_m \quad (4-1)$$

όπου ΔC_δ η αύξηση της χωρητικότητας, λόγω εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων.

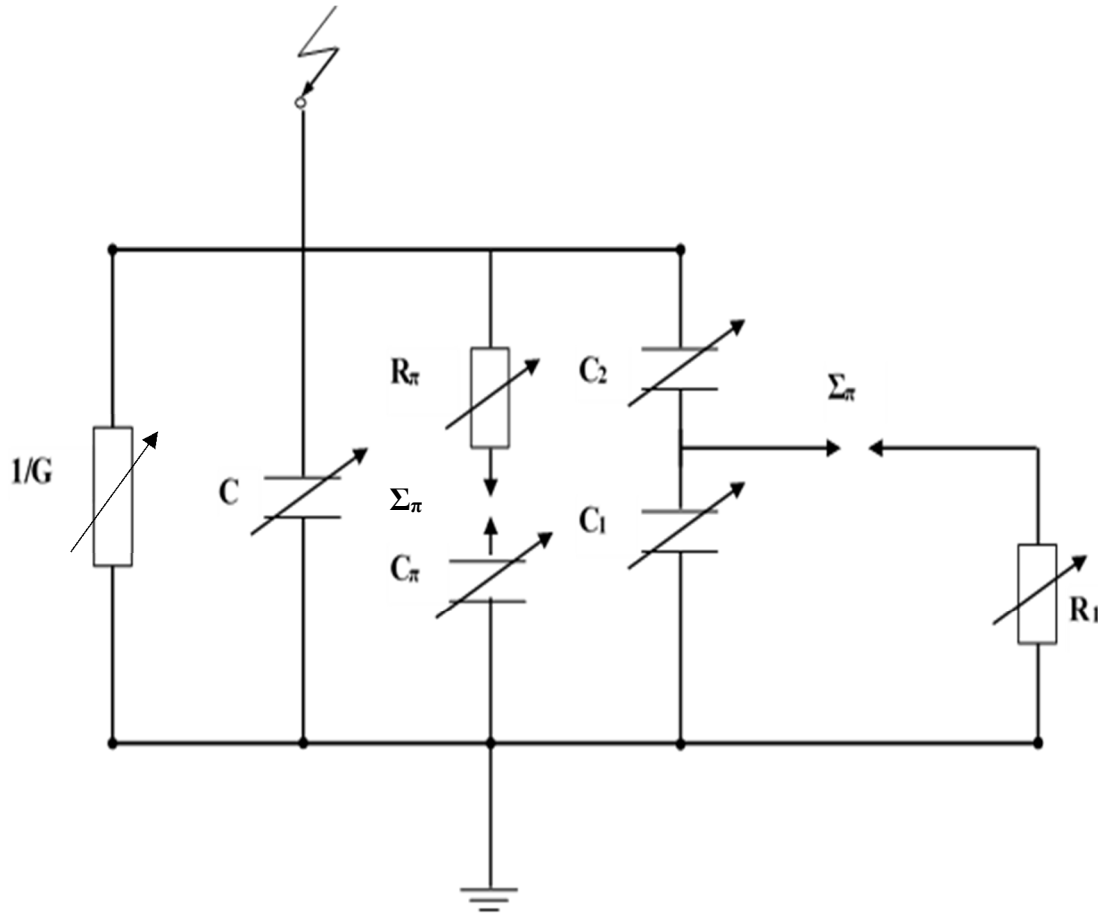
Η διάτρηση του χαρτιού μετασχηματιστών μπορεί να αποδοθεί στη θέση διαταραχής, όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να έχει τη μέγιστη τιμή της, η οποία (θέση) δεν ήταν, λόγω της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης, κάτω από την ακίδα. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι πρόκειται για ηλεκτρομηχανική διάτρηση (βλ. παράγραφο Β).

Ο δενδρίτης κατά την επιφανειακή διάσπαση του πέρτιναξ μπορεί να ερμηνευθεί από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff (βλ. σχήμα 1.1.1-5) [1] ως επέκταση του ίχνους της ακίδας μέχρι τις θέσεις διαταραχής, που διασπώνται. Η επιφανειακή διάσπαση φαίνεται ότι συμβαίνει όταν μία ομάδα ελεύθερων ηλεκτρονίων (η οποία, με βάση τις οπτικές παρατηρήσεις, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μία διαδρομή της δενδροειδούς φωτεινής ακτινοβολίας, που εκδηλώνεται) 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 εν μέρει στον ατμοσφαιρικό αέρα (υπερπήδηση). Η διάκριση αυτή μεταξύ επιφανειακής διάσπασης ή υπερπήδησης είναι θεωρητική, γιατί δεν ήταν δυνατό να διαπιστωθεί οπτικά. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, 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, (επιφανειακό φιλμ) [6, 43]. 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 μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος) στο εν λόγω επιφανειακό φιλμ. Κατόπιν των ανωτέρω, για να αποδίδει το ισοδύναμο κύκλωμα τους παράγοντες γήρανσης και διάσπασης κατά την μακροσκοπική θεωρία, προτείνεται:

- για την ηλεκτρική καταπόνηση στον όγκο του στερεού ηλεκτρομονωτικού (όταν μπορεί να θεωρηθεί ότι οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις είναι αμελητέες ως προς τις εσωτερικές μερικές εκκενώσεις) το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4-1 που οδηγεί σε διάτρηση (όπως συνέβη στην υπό εξέταση περίπτωση με το χαρτί μετασχηματιστών), και
- για την ηλεκτρική καταπόνηση στην επιφάνεια του στερεού ηλεκτρομονωτικού (όταν μπορεί να θεωρηθεί ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις είναι αμελητέες ως προς τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις) το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4-2 που οδηγεί στην επιφανειακή διάσπαση (όπως συνέβη στην υπό εξέταση περίπτωση στο πέρτιναξ).

Επομένως, σύμφωνα με τα ανωτέρω, το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4-1 αποδίδει τα φαινόμενα προ και κατά την διάτρηση. Η διάτρηση μπορεί να είναι θερμική (μέσω της αντίστασης $1/G$), ή ηλεκτρομηχανική (μέσω της διαδρομής R_π, Σ_π, C_π), ή λόγω εσωτερικών μερικών εκκενώσεων (μέσω της διαδρομής C_2, C_1 , όπου η διαδρομή $\Sigma_{\pi 1}, R_1$ συμβολίζει την διάσπαση του C_1) ή θερμοχημική (μέσω της αντίστασης $1/G$), ή συνδυασμός όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης (βλ. παράγραφο 1.4). Επίσης, από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4-2 φαίνεται ότι η διάσπαση είναι επιφανειακή λόγω των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, με ενίσχυση του ρόλου τους από την θερμότητα Joule (βλ. παράγραφο 1.4.1) και τις δυνάμεις Coulomb Joule (βλ. παράγραφο 1.4.1).



Σχήμα 4-1: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης (κατά την μακροσκοπική θεωρία) του συνδυασμού «στερεό ηλεκτρομονωτικό-ατμοσφαιρικός αέρας».

$1/G$: Ιδανική αντίσταση στο επιφανειακό φιλμ

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

C_π : Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού

R_π, Σ_π : Διαδρομή εκκένωσης κατά την διάσπαση του C_π

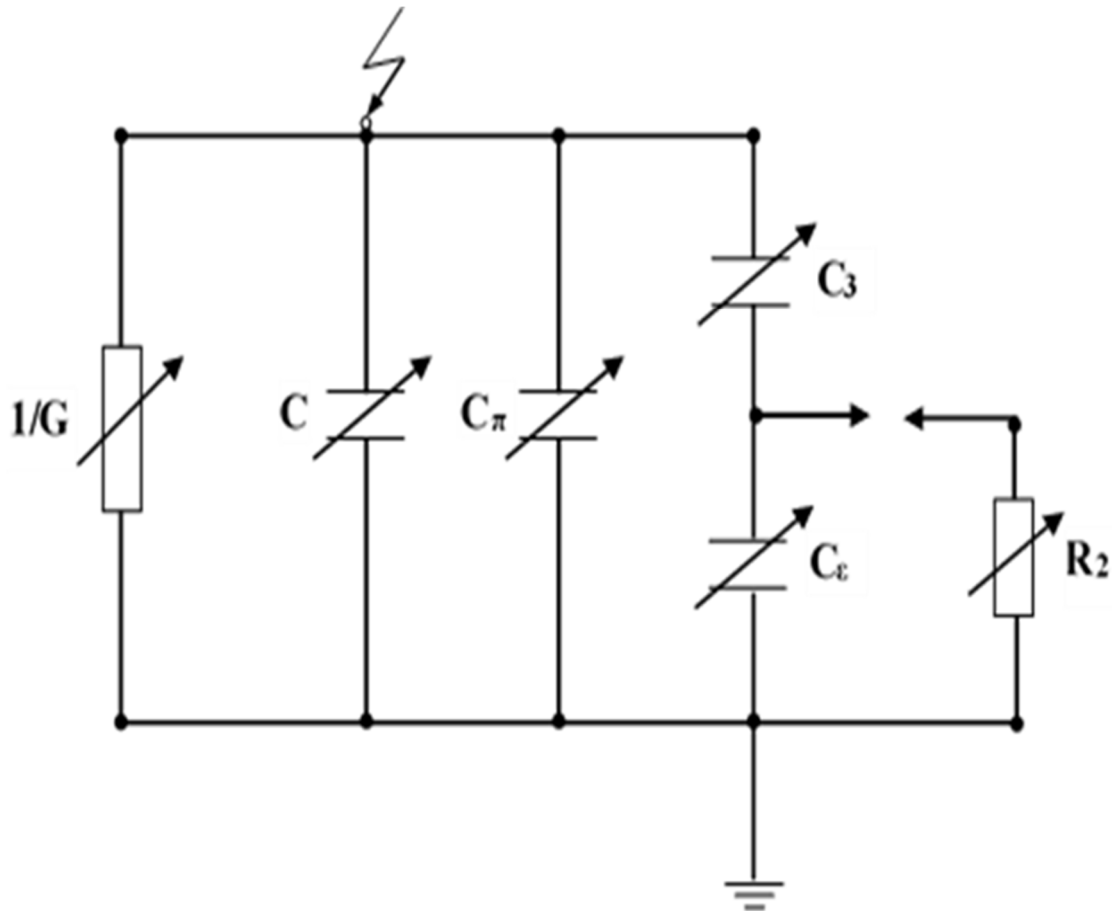
C_1 : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών.

C_2 : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του υλικού

Σ_1 : Σπινθηριστής που συμβολίζει την διάσπαση του C_1

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

Σημείωση: Τα στοιχεία του κυκλώματος είναι μεταβλητά για να αποδίδουν την διαχρονική αλλαγή τους.



Σχήμα 4-2: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα των παραγόντων γήρανσης και επιφανειακής διάσπασης (κατά την μακροσκοπική θεωρία) του συνδυασμού «στερεό ηλεκτρομονωτικό-ατμοσφαιρικός αέρας»

$1/G$: Ιδανική αντίσταση της διάταξης

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

C_e : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών και τις θέσεις διαταραχής στο επιφανειακό φιλμ.

C_3 : Χωρητικότητα που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του υλικού.

C_π : Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού

$\Sigma_{\pi 2}$: Σπινθηριστής που συμβολίζει την διάσπαση του C_e

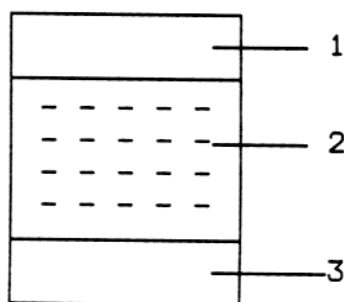
R_2 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma_{\pi 2}$.

Σημείωση: Τα στοιχεία του κυκλώματος είναι μεταβλητά για να αποδίδουν την διαχρονική αλλαγή τους

Είναι φανερό ότι από τα ισοδύναμα κυκλώματα των σχημάτων 4-1 και 4-2 δεν μπορεί να δοθεί μία ερμηνεία για τα μη γραμμικά φαινόμενα, όπως π.χ. τα φαινόμενα που προκαλούν προσβολή του φωτογραφικού φιλμ (βλ. σχήματα 3.3-5 έως 3.3-8). Μία ερμηνεία των εν λόγω μη γραμμικών φαινομένων έχει δοθεί στον συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικό-έλαιο μετασχηματιστών» μέσω της κβαντομηχανικής θεωρίας [5, 11, 13-15, 18-21, 23, 25-36, 38-40, 43, 44], η οποία φαίνεται ότι ισχύει και στον συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικό-ατμοσφαιρικός αέρας». Πράγματι, μία πιθανή κβαντομηχανική ερμηνεία των παλμογραφημάτων των αλμάτων δυναμικού που μετρήθηκαν προ και κατά την διάσπαση των δοκιμίων (βλ. σχήματα 3.3-1 έως 3.3-4) μπορεί να δοθεί ως ακολούθως. Τα παλμογράφημα των σχημάτων 3.3-1 και 3.3-3 αφορούν αντίστοιχα την γήρανση του χαρτιού μετασχηματιστών και του πέρτιναξ, ενώ τα παλμογραφήματα των σχημάτων 3.2-2 και 3.2-4 αφορούν αντίστοιχα την διάτρηση του χαρτιού μετασχηματιστών και την επιφανειακή διάσπαση του πέρτιναξ. Όπως έχει προαναφερθεί, το τελικό αποτέλεσμα της σε βήματα αύξησης της τάσης (βλ. παράγραφο 3.1.) ήταν πάντοτε η διάτρηση του χαρτιού μετασχηματιστών (οπή διάτρησης διαμέτρου περίπου 0,1 mm) και η επιφανειακή διάσπαση του πέρτιναξ υπό μορφή δενδρίτη, στα ίχνη του οποίου παρατηρείτο αλλαγή της μοριακής δομής στην επιφάνεια του εν λόγω υλικού.

Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων [18-23, 26-28, 30, 31, 33, 35, 36, 43]. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, υπολογίστηκε από την ενέργεια των αλμάτων δυναμικού στον πυκνωτή μέτρησης C_m με τη σχέση 3.2-3, από όπου έχουν προκύψει οι χαρακτηριστικές $\Delta W = f(U_k, E_k)$ (σχήματα 3.3-11 και 3.3-14). Από τις εν λόγω χαρακτηριστικές φαίνεται ότι η γήρανση του συνδυασμού «στερεό ηλεκτρομονωτικό-ατμοσφαιρικός αέρας» σχετίζεται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες. Φαίνεται επίσης ότι η διάσπαση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων X. Η εκπομπή της υπεριώδους ακτινοβολίας κατά την γήρανση εκδηλώνεται σε τιμές U_k πλησίον της κρουστικής τάσης διάσπασης και ανιχνεύτηκε με την μέθοδο προσβολής του φωτογραφικού φιλμ (σχήματα 3.2-5 και 3.2-6). Επίσης, με την μέθοδο του φωτογραφικού φιλμ ανιχνεύτηκε και η εκπομπή των μαλακών ακτίνων X κατά την διάσπαση (βλ. σχήματα 3.2-7 και 3.2-8). Κατόπιν των ανωτέρω, από τα παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού μπορεί κανείς να υποθέσει ότι κάθε άλμα δυναμικού αφορά ελεύθερα ηλεκτρόνια του αυτού ενεργειακού επιπέδου. Φαίνεται δηλαδή ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις [5, 18, 43]. Έτσι,

όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσειμα της ενέργειάς τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (βλ σχήματα 3.2-11 και 3.2-14). Ο δενδρίτης επομένως, που παρατηρείται κατά την επιφανειακή διάσπαση του πέριναξ ή ο οχετός διάσπαση στο χαρτί των μετασχηματιστών, είναι το ορατό φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι αντίστοιχες δενδροειδούς μορφής εκπομπές ή οχετοί διάσπασης συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Επίσης, από τα παραπάνω μπορεί κανείς να καταλήξει 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). Φαίνεται ότι, λόγω του εύρους της παραπάνω ακτινοβολίας, υπάρχουν στο υλικό διάφορες ενεργειακές στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη, που είναι καθοριστικής σημασίας για την εκδήλωση του ιονισμού (σχήμα 4-3) [23, 43]. Οι εν λόγω στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff (σχήμα 1.1.1-5) [1]. Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας [43].



Σχήμα 4-3: Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

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

Μία Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών ηλεκτρομονωτικών μπορεί να δοθεί από την σχέση [5, 18, 27, 33, 35, 36, 43]:

$$\Delta Q = Q_0 \cdot e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2} \quad (4-2)$$

όπου :

E_0 η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων, που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή U_{k0} της κρουστικής τάσης,

Q_0 το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων,

E η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση, που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή U_k της κρουστικής τάσης, λόγω της οποίας το φορτίο αποκτά την τιμή ΔQ

και A ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από την μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης [18, 27, 33, 35, 36, 43] που στην υπό εξέταση περίπτωση είναι η κρουστική τάση 1,2/50μs.

Με βάση τη σχέση 4-2 έχει γίνει στα σχήματα 4-4 και 4-5 ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών χαρακτηριστικών $\Delta Q = f(U_k)$ (βλ. σχήματα 3.2-2 και 3.2-4) από όπου έχει προκύψει ότι ο συντελεστής A είναι:

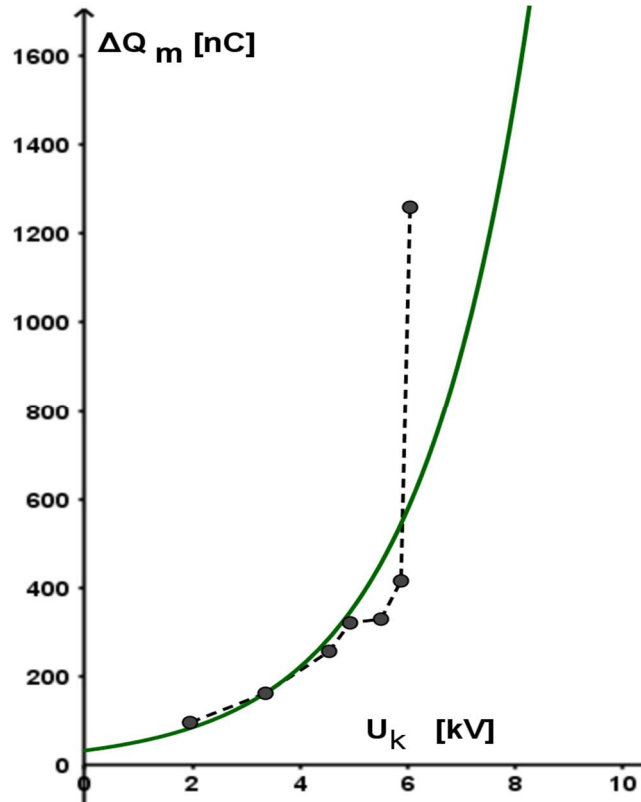
- για τον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας»: $A = 0,75$ και
- για τον συνδυασμό «πέρτιναξ - ατμοσφαιρικός αέρας»: $A = 2,12$

Οι χαρακτηριστικές των σχημάτων 3.3-9 ως 3.3-16, 3.3-18 ως 3.3-20, 3.3-22 ως 3.3-23 και 3.3-25 ως 3.3-27 είναι εκθετικής μορφής γιατί τα μεγέθη είναι ανάλογα μεταξύ τους ενώ οι χαρακτηριστικές των σχημάτων: 3.3-17, 3.3-21, 3.3-24 και 3.3-28 έχουν μορφή αντιστρόφως ανάλογη της εκθετικής. Από τα προαναφερθέντα φαίνεται, ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών ηλεκτρομονωτικών 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 ηλεκτρομονωτικών σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα φαίνεται ότι είναι ο διαχωρισμός των επιμέρους παραγόντων γήρανσης και διάσπασης, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη για την αναζήτηση αιτίων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής. Γι' αυτό φαίνεται ότι είναι αναγκαίος ο συνδυασμός των δύο θεωριών με βελτίωση των ισοδύναμων κυκλωμάτων των σχημάτων 4-1 και 4-2. Αυτό μπορεί να γίνει αν λάβει κανείς υπ' όψη στα εν λόγω ισοδύναμα κυκλώματα τα φαινόμενα ιονισμού μέσω μίας μη γραμμικής αντίστασης Z , η οποία θα συμβολίζει τον ιονισμό με κρούσεις. Κατόπιν των ανωτέρω, για να αποδώσει το ισοδύναμο κύκλωμα τους παράγοντες γήρανσης και διάσπασης κατά την κβαντομηχανική θεωρία, προτείνεται:

- για την ηλεκτρική καταπόνηση στον όγκο του στερεού ηλεκτρομονωτικού (όταν μπορεί

να θεωρηθεί ότι οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις είναι αμελητέες ως προς τις εσωτερικές μερικές εκκενώσεις) το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4-6 που οδηγεί σε διάτρηση (όπως συνέβη στην υπό εξέταση περίπτωση με το χαρτί μετασχηματιστών), και

- για την ηλεκτρική καταπόνηση στην επιφάνεια του στερεού ηλεκτρομονωτικού (όταν μπορεί να θεωρηθεί ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις είναι αμελητέες ως προς τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις) το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4-7 που οδηγεί στην επιφανειακή διάσπαση (όπως συνέβη στην υπό εξέταση περίπτωση στο πέριναξ).



Σχήμα 4-4: Θεωρητική χαρακτηριστική $\Delta Q = f(U_k)$ στον συνδυασμό «χαρτί μετασχηματιστών-ατμοσφαιρικός αέρας», υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm)

ΔQ_m : η αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου λόγω αλμάτων δυναμικού

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

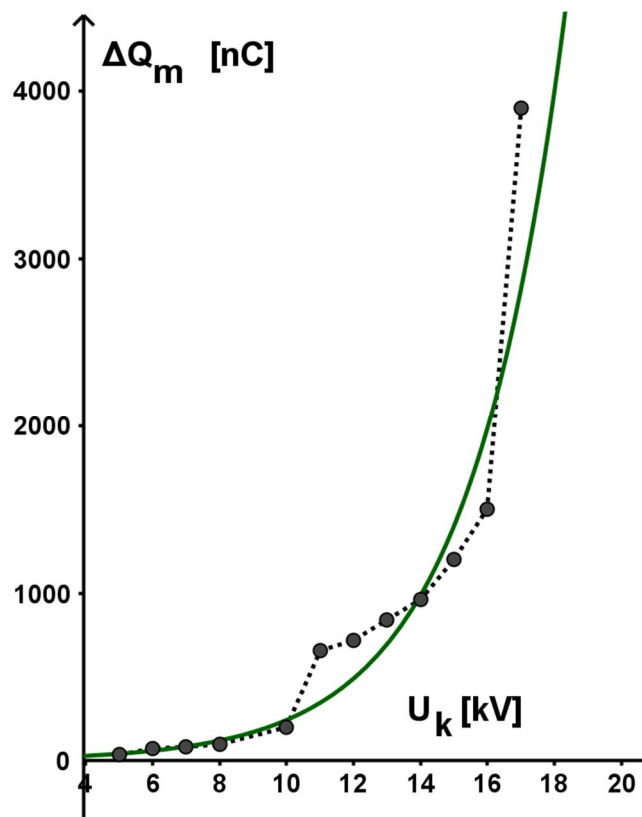
E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης

.....: Πειραματική χαρακτηριστική (σχέση 4-2)

————: Θεωρητική χαρακτηριστική

Επομένως, σύμφωνα με τα ανωτέρω, το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4-6 αποδίδει τα φαινόμενα προ και κατά την διάτρηση, όπου κυρίαρχο ρόλο έχει ο ιονισμός με κρούσεις λόγω εκδήλωσης εσωτερικών μερικών εκκενώσεων (ο οποίος συμβολίζεται με την

μη γραμμική αντίσταση Z). Η διάτρηση συμβαίνει κυρίως λόγω του ιονισμού με κρούσεις (διαδρομή C_2 , C_1 , όπου η διαδρομή $\Sigma_{\pi 1}$, R_1 συμβολίζει την διάσπαση του C_1), χωρίς να αποκλείεται, αν συντρέχουν άλλοι λόγοι (όπως θερμική καταπόνηση, μηχανική καταπόνηση, κλπ.), η θερμική διάτρηση (μέσω της αντίστασης $1/G$), ή ηλεκτρομηχανική διάτρηση (μέσω της διαδρομής R_{π} , Σ_{π} , C_{π}), ή θερμοχημική διάτρηση (μέσω της αντίστασης $1/G$), ή συνδυασμός όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης. Επίσης, από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4-7 φαίνεται ότι η διάσπαση είναι επιφανειακή εξ αιτίας του ιονισμού με κρούσεις λόγω των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, με ενίσχυση του ρόλου τους από την θερμότητα Joule (βλ. παράγραφο 1.4.1) και τις δυνάμεις Coulomb (βλ. παράγραφο 1.4.2).



Σχήμα 4-5: Θεωρητική χαρακτηριστική $\Delta Q = f(U_k)$, στον **συνδυασμό «πέριναξ-ατμοσφαιρικός αέρας»**, υπό κρουστική τάση $1,2/50 \mu s$ και υπό διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας $0,9mm$)

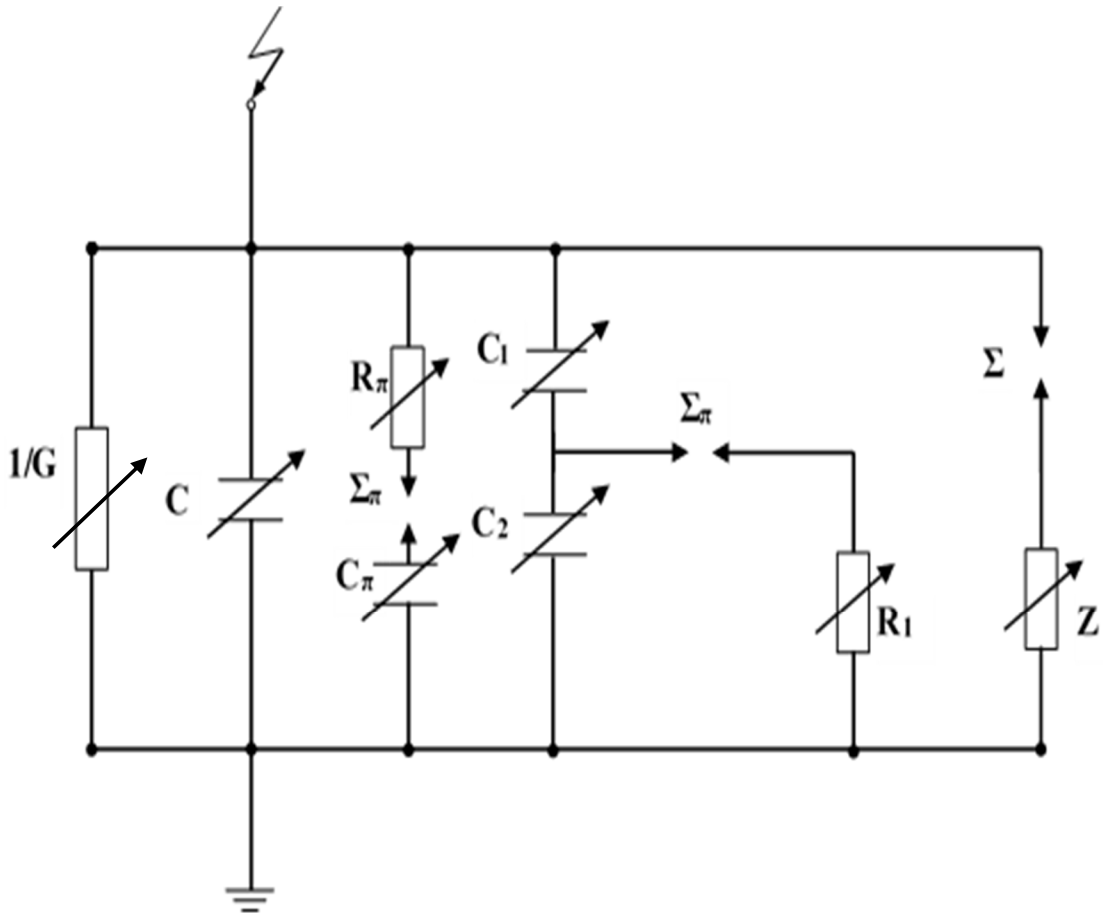
ΔQ : η αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου λόγω αλμάτων δυναμικού

U_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

E_k : μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης πεδιακής έντασης

..... : Πειραματική χαρακτηριστική (σχέση 4-2)

———— : Θεωρητική χαρακτηριστική



Σχήμα 4-6: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης του συνδυασμού «στερεό ηλεκτρομονωτικό-ατμοσφαιρικός αέρας» κατά την μακροσκοπική θεωρία και την κβαντομηχανική θεωρία

$1/G$: Ιδανική αντίσταση στο επιφανειακό φιλμ

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

C_{π} : Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού

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

C_1 : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών.

C_2 : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του υλικού

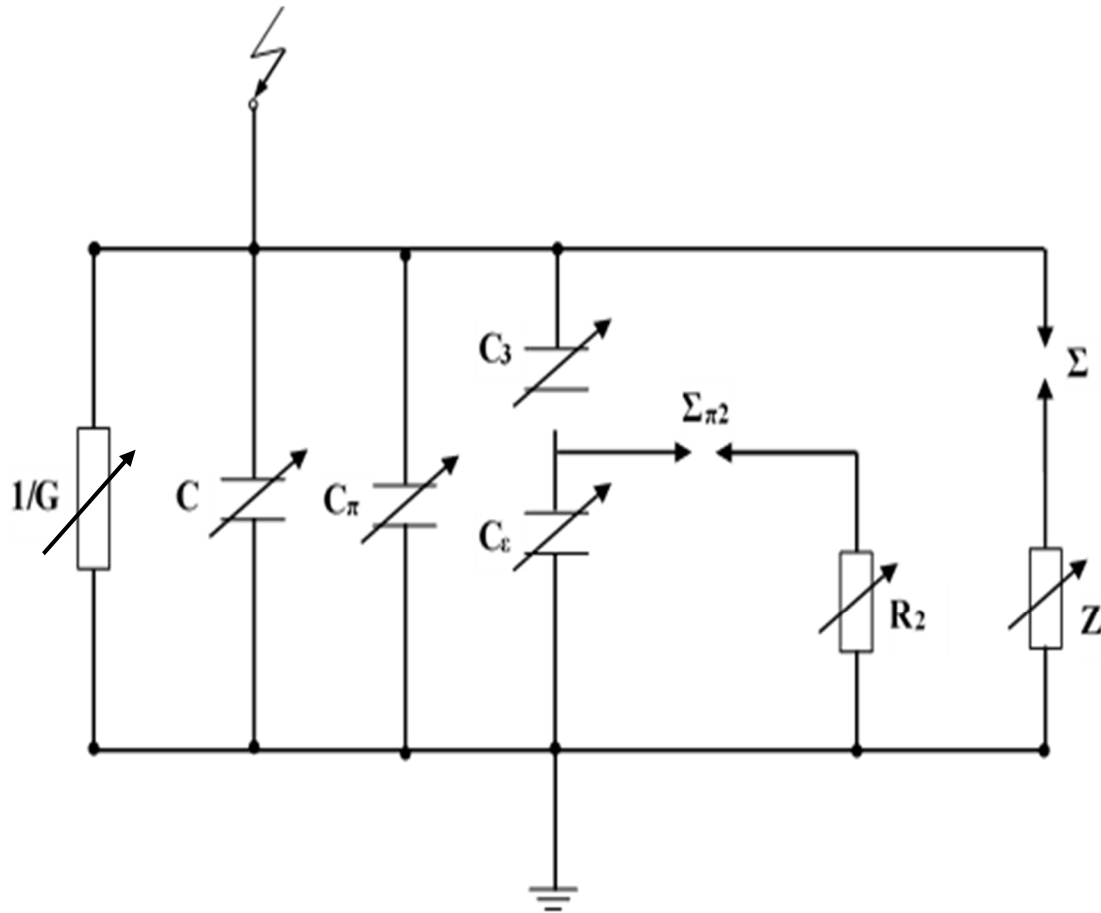
Σ_1 : Σπινθηριστής που συμβολίζει την διάσπαση του C_1

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

Z : Μη γραμμική αντίσταση, που αποδίδει τον ιονισμό με κρούσεις

Σ : Σπινθηριστής που συμβολίζει την συμμετοχή της Z στο κύκλωμα

Σημείωση: τα στοιχεία του κυκλώματος είναι μεταβλητά για να αποδίδουν την διαχρονική αλλαγή τους.



Σχήμα 4-7: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα των παραγόντων γήρανσης και επιφανειακής διάσπασης του συνδυασμού «στερεό ηλεκτρομονωτικό-ατμοσφαιρικός αέρας» κατά την μακροσκοπική θεωρία και την κβαντομηχανική θεωρία

$1/G$: Ιδανική αντίσταση της διάταξης

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

C_{ε} : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών και τις θέσεις διαταραχής στο επιφανειακό φιλμ.

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

C_{π} : Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού

$\Sigma_{\pi 2}$: Σπινθηριστής που συμβολίζει την διάσπαση του C_{ε}

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

Z : Μη γραμμική αντίσταση, που αποδίδει τον ιονισμό με κρούσεις στο επιφανειακό φιλμ

Σ : Σπινθηριστής που συμβολίζει την συμμετοχή της Z στο κύκλωμα

Σημείωση: τα στοιχεία του κυκλώματος είναι μεταβλητά για να αποδίδουν την διαχρονική αλλαγή τους

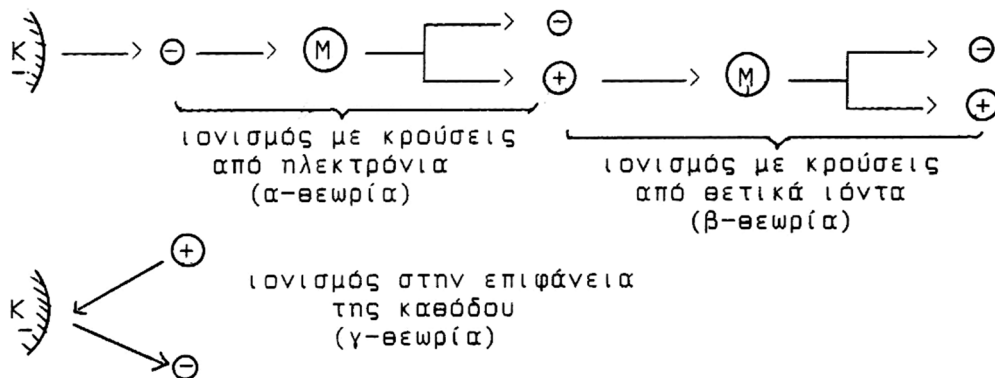
Συμπερασματικά, μπορεί κανείς να υποθέσει από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ότι

τα φαινόμενα προ και κατά την διάσπαση στον συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικό-ατμοσφαιρικός αέρας» σχετίζονται με τον ιονισμό με κρούσεις, όπως συμβαίνει τόσο στον συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικό-έλαιο μετασχηματιστών» όσο και στον ατμοσφαιρικό αέρα για μικρά διάκενα (διάκενα μέχρι περίπου 30 cm) [43].

Η θεωρία, του ιονισμού με κρούσεις στον ατμοσφαιρικό αέρα (και γενικότερα στα ηλεκτρομονωτικά αέρια) για μικρά διάκενα (διάκενα μέχρι 30 cm) έχει διατυπωθεί από τον J.S. Towsaend και γι' αυτό είναι γνωστή στη βιβλιογραφία ως εκκένωση Townsend [43]. Σύμφωνα με την θεωρία αυτή η δημιουργία των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται σε τρεις δυνατότητες ιονισμού με κρούσεις (βλ. σχήμα 4-8):

- με κρούσεις από ηλεκτρόνια επί ατόμων ή μορίων του αερίου
- με κρούσεις από θετικά ιόντα επί ατόμων ή μορίων του αερίου
- με κρούσεις θετικών ιόντων στην επιφάνεια της καθόδου (επιφανειακός ιονισμός).

Σε αντιστοιχία προς τον συντελεστή ιονισμού α για τον ιονισμό με κρούσεις από ελεύθερα ηλεκτρόνια (που δίνει τον αριθμό των παραγόμενων ζευγών ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων ανά cm ή mm), έχουν οριστεί: για τον ιονισμό με κρούσεις από θετικά ιόντα επί ατόμων (ή μορίων του αερίου) ο συντελεστής ιονισμού β και για τον επιφανειακό ιονισμό ο συντελεστής ιονισμού γ [43].



Σχήμα 4-8 : Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τις περιπτώσεις ιονισμού με κρούσεις κατά τη θεωρία Townsend .

- K : κάθοδος
 - : ηλεκτρόνιο
 + : θετικό ιόν
 M : Μόριο

Ο ιονισμός με κρούσεις από θετικά ιόντα επί ατόμων (ή μορίων) του αερίου και ο

επιφανειακός ιονισμός θεωρείται ότι εκδηλώνονται σε συνδυασμό με τον ιονισμό από ελεύθερα ηλεκτρόνια. Γι' αυτό γίνεται διάκριση σε δύο περιπτώσεις ιονισμού με κρούσεις στα ηλεκτρομονωτικά αέρια [43]:

- ιονισμός στα ηλεκτρομονωτικά αέρια με κρούσεις από ελεύθερα ηλεκτρόνια επί ατόμων (ή μορίων του αερίου) και επιφανειακός ιονισμός (α-γ θεωρία)
- ιονισμός στα ηλεκτρομονωτικά αέρια με κρούσεις επί ατόμων (ή μορίων του αερίου) από ελεύθερα ηλεκτρόνια και από θετικά ιόντα (α-β θεωρία)

Παρακάτω εξετάζεται με βάση την θεωρία Townsend ο μηχανισμός αύξησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων, μέσω κρούσεων από ελεύθερα ηλεκτρόνια (χωρίς τη συμμετοχή των αρνητικών ιόντων στον ιονισμό), που ενδιαφέρει ιδιαίτερα τα φαινόμενα ιονισμού στα στερεά ηλεκτρομονωτικά. Αν δεχτεί κανείς ότι αρχικά υπάρχει 1 μόνο ελεύθερο ηλεκτρόνιο επί της καθόδου, τότε παράγεται με κρούση του ηλεκτρονίου αυτού επί ενός ατόμου (ή μορίου) ένα ζεύγος ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια έγιναν 2 και παράγονται τώρα από αυτά με κρούσεις 2 ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Κατά τον τρόπο αυτό, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια έγιναν 4 και θα πληθαίνουν παρομοίως σε 8, 16, 32, κ.λ.π. Αν υποθεθεί, ότι αντί του ενός αρχικού ελεύθερου ηλεκτρονίου εγκατέλειψαν την κάθοδο n_0 αρχικά ηλεκτρόνια (για να προκαλέσουν ιονισμό με κρούσεις) και ότι σε απόσταση x κινούνται n ελεύθερα ηλεκτρόνια, τότε η αύξηση του αριθμού τους είναι [43]:

$$dn = n \cdot a \cdot dx \quad (4-3)$$

όπου a ο συντελεστής ιονισμού, που δίνει (όπως προαναφέρθηκε) τα ζεύγη των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων ανά cm (όπου λαμβάνονται υπ' όψη τα ηλεκτρόνια που εξουδετερώθηκαν) [43].

Επομένως ισχύει:

$$\frac{dn}{n} = a \cdot dx \quad (4-4)$$

ή με ολοκλήρωση:

$$n = n_0 e^{a \cdot x} \quad (4-5)$$

Για απόσταση διακένου d τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που φθάνουν την άνοδο είναι:

$$N = n_0 e^{a \cdot d} \quad (4-6)$$

Επομένως, η τιμή του ηλεκτρικού φορτίου που αφίχθηκε στην άνοδο είναι:

$$Q = q_e N = Q_0 e^{ad} \quad (4-7)$$

όπου: q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου,

$$Q=q_e N \quad (4-8)$$

και

$$Q_0 = q_e n_0 \quad (4-9)$$

Από την σχέση 4-7 προκύπτει η εκθετική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου λόγω ιονισμού με κρούσεις, όπως αυτό αποδίδεται από την σχέση 4-2, που θεωρείται ότι ισχύει στον ιονισμό με κρούσεις στα στερεά ηλεκτρομονωτικά [5, 18, 27, 33, 35, 36, 43].

Τέλος, από τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται, τόσο μέσω της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την διάσπαση (σχ. 3.2-11 και 3.2-14), όσο και με την προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την διάσπαση (σχ. 3.2-7 και 3.2-8), ότι το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, κατά την διάσπαση στερεών ηλεκτρομονωτικών σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα επεκτείνεται μέχρι τις μαλακές ακτίνες X . Φαίνεται επίσης ότι το φάσμα της εν λόγω ακτινοβολίας επεκτείνεται για τιμές της τάσης πλησίον της περιοχής της τάσης για την διάσπαση μέχρι τις υπεριώδεις ακτίνες (σχ. 3.2-5, 3.2-6, 3.2-7 και 3.2-8). Το συμπέρασμα αυτό εναρμονίζεται με την προσβολή του φωτογραφικού φιλμ στο συνδυασμό στερεό ηλεκτρομονωτικό-έλαιο μετασχηματιστών [27, 31, 43].

5. Η εκδήλωση σπινθηρισμών σε μονωτήρες πορσελάνης μέσης τάσης

Εκτός από τις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού (λόγω μερικών εκκενώσεων), που έγιναν σε ένα μεγάλο αριθμό δοκιμίων (βλ. παρ. 3.2), ερευνήθηκαν πραγματικά περιστατικά εκδήλωσης σπινθηρισμών (μερικών εκκενώσεων) λόγω ξένων επικαθήσεων σε μονωτήρες πορσελάνης μέσης τάσης, για τα οποία δίνονται στην εργασία αυτή ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα, που έχει γίνει αποδεκτό προς δημοσίευση σε διεθνές επιστημονικό περιοδικό [45].

Προ της ανάλυσης του εν λόγω αντιπροσωπευτικού περιστατικού επισημαίνεται ότι η τιμή της τάσης για την επιφανειακή διάσπασης των κεραμικών μονωτήρων μειώνεται σημαντικά από τις ξένες επικαθήσεις και από την υγρασία επί αυτών. Στον πίνακα 5-1, που πηγάζει από το πρότυπο IEC 815/1086, δίνεται το μήκος ερπυσμού κεραμικών και γυάλινων μονωτήρων. Για τους μονωτήρες αυτούς ενδιαφέρει στην πράξη η εκδήλωση ρευμάτων διαρροής και η μείωση της τάσης επιφανειακής διάσπασης τόσο λόγω υγρασία όσο προ πάντων λόγω ξένων επικαθήσεων (ρύπανση) σε συνδυασμό με υγρασία. Το ρεύμα διαρροής λόγω ξένων επικαθήσεων είναι συνήθως (λόγω των προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης στο δίκτυο) $10 \div 100$ mA. Για την ενεργό τιμή της τάσης επιφανειακής διάσπασης λόγω ξένων επικαθήσεων και υγρασίας ($U_{d,\varepsilon,\nu}$) και την ενεργό τιμή της τάσης επιφανειακής διάσπασης χωρίς υγρασία (U_d) ισχύει περίπου [43, 44]:

$$U_{d,\varepsilon,\nu} = (0,20 \div 0,30) \cdot U_d \quad (5-1)$$

Από την ανωτέρω σχέση και από τεχνικά χαρακτηριστικά μονωτήρων του δικτύου διανομής 20 kV στην Ελλάδα, μπορεί να προκύψουν τιμές της τάσης (βλ. πίνακα 5-2), που αν δεν οδηγήσουν σε επιφανειακή διάσπαση, θα προκαλέσουν εκδήλωση σπινθηρισμών (μερικών εκκενώσεων). Επίσης, όπως προκύπτει από τον πίνακα 5-2, η υγρασία επί των μονωτήρων προκαλεί μείωση της τάσης για την επιφανειακή διάσπαση στην τιμή $U_{d,\nu}$ για την οποία ισχύει περίπου [43, 44]:

$$U_{d,\nu} \approx 0,63 U_d \quad (5-2)$$

| α/α | Επίπεδο Ρύπανσης | Τυπικό παράδειγμα περιβάλλοντος | I_{min} σε cm $U_N=20kV$ | I_{min} σε cm $U_N=15kV$ |
|-----|---|---|-------------------------------|-------------------------------|
| I | Μικρό (0,006 mg/cm ²) | <ol style="list-style-type: none"> 1. Περιοχές χωρίς βιομηχανίες και με μικρή πυκνότητα σπιτιών με κεντρική θέρμανση. 2. Περιοχές με χαμηλή πυκνότητα εργοστασίων ή σπιτιών υπό συνήθεις ανέμους και/ή βροχές. 3. Αγροτικές περιοχές (η χρήση λιπασμάτων μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο επίπεδο ρύπανσης). <u>Σημείωση:</u> Οι προαναφερθείσες περιοχές θα πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 10 km έως 20 km από τη θάλασσα και να μην εκτίθενται σε ανέμους που έρχονται από τη θάλασσα. | 32 | 24 |
| II | Μεσαίο (0,20 mg/cm ²) | <ol style="list-style-type: none"> 1. Περιοχές με εργοστάσια που δεν παράγουν ρυπαντικό καπνό και/ή με μέση πυκνότητα σπιτιών εξοπλισμένων με κεντρική θέρμανση. 2. Περιοχές με υψηλή πυκνότητα σπιτιών και/ή εργοστάσια, αλλά εκτεθειμένες σε συνήθεις ανέμους και/ή βροχοπτώσεις. 3. Περιοχές εκτεθειμένες σε ανέμους προερχόμενους από τη θάλασσα, αλλά όχι τόσο κοντά στην ακτή (το λιγότερο σε απόσταση αρκετών km). | 40 | 30 |
| III | Υψηλό (0,60 mg/cm ²) | <ol style="list-style-type: none"> 1. Περιοχές με μεγάλη πυκνότητα εργοστασίων και προάστια μεγάλων πόλεων με μεγάλη πυκνότητα εγκαταστάσεων θέρμανσης που παράγουν καπνό. 2. Περιοχές κοντά στη θάλασσα ή σε κάθε περίπτωση εκτεθειμένες σε σχετικά ισχυρούς ανέμους προερχόμενους από τη θάλασσα. | 50 | 37,5 |
| IV | Πολύ Υψηλό (>0,60 mg/cm ²) | <ol style="list-style-type: none"> 1. Περιοχές γενικά μέτριας έκτασης εκτεθειμένες σε αγωγίμες σκόνες και σε βιομηχανικό καπνό ο οποίος παράγει ειδικά λεπτές αγωγίμες επικαθίσεις. 2. Περιοχές γενικά μέτριας έκτασης πολύ κοντά στην ακτή ή εκτεθειμένες σε πολύ ισχυρό αέρα προερχόμενο από τη θάλασσα. 3. Περιοχές ερήμου, που χαρακτηρίζονται από την απουσία βροχής για μεγάλες χρονικές περιόδους, εκτεθειμένες σε ισχυρούς ανέμους που μεταφέρουν άμμο και αλάτι. | 62 | 46,6 |

Πίνακας 5-1: Ελάχιστο μήκος ερπυσμού (L_{min}) κεραμικών και γυάλινων μονωτήρων.

(σύμφωνα με το πρότυπο IEC 815/1086)

U_N : Ονομαστική τάση

Επίσης, στον πίνακα 5-2 δίνεται και το μήκος ερπυσμού των μονωτήρων, ανάλογα με το οποίο καθορίζεται το περιβάλλον για το οποίο είναι κατάλληλοι. Έτσι, όπως διαπιστώνεται από τον εν λόγω πίνακα, ισχύει για τους μονωτήρες π.χ. των 20 kV ότι: οι μονωτήρες με α/α 1 είναι κατάλληλοι σε περιοχές με μικρό επίπεδο ρύπανσης, οι μονωτήρες με α/α 2 και 3 ενδείκνυνται για περιβάλλον με μεσαίο επίπεδο ρύπανσης, οι μονωτήρες με α/α 4, 5, 7 και 8 είναι κατάλληλοι σε περιοχές με υψηλό επίπεδο ρύπανσης και οι μονωτήρες με α/α 6 είναι κατάλληλοι σε περιβάλλον με πολύ υψηλή ρύπανση.

| α/α | Τύπος μονωτήρα | Μήκος ερπυσμού [cm] | U _d [kV] | U _{d,v} [kV] | U _{d,e,v} [kV] |
|-----|---|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | 20 kV κώδωνος | 33,0 | 95 | 60 | 19,0÷28,5 |
| 2 | 20 kV κώδωνος | 43,0 | 110 | 70 | 22,0÷33,0 |
| 3 | 20 kV κώδωνος | 43,2 | 110 | 70 | 22,0÷33,0 |
| 4 | 20 kV κώδωνος για μολυσμένη ατμόσφαιρα | 53,0 | 100 | 45 | 20,0÷30,0 |
| 5 | 20 kV κώδωνος για μολυσμένη ατμόσφαιρα | 53,0 | 125 | 80 | 25,0÷37,5 |
| 6 | 20 kV κώδωνος για πολύ μολυσμένη ατμόσφαιρα | 68,0 | 140 | 95 | 28,0÷42,0 |
| 7 | 20 kV κώδωνος ομίχλης | 53,0 | 110 | 70 | 22,0÷33,0 |
| 8 | 20 kV κώδωνος ομίχλης | >53,0 | 110 | 70 | 22,0÷33,0 |

Πίνακας 5-2: Τάση επιφανειακής διάσπασης και μήκος ερπυσμού μονωτήρων του δικτύου διανομής μέσης τάσης (20 kV) σε περίπτωση: ξηρασίας, υγρασίας και υγρασίας σε συνδυασμό με ρύπανση

U_d : Τάση επιφανειακής διάσπασης σε περίπτωση ξηρασίας.

U_{d,v}: Τάση επιφανειακής διάσπασης σε περίπτωση υγρασία.

U_{d,e,v}: Τάση επιφανειακής διάσπασης σε περίπτωση ξένων επικαθίσεων και υγρασίας.

Ως σπινθηρισμούς επί των μονωτήρων εννοεί κανείς στην πράξη φωτεινές μερικές εκκενώσεις (δηλαδή εκκενώσεις περιορισμένης διαδρομής επί της επιφάνειας των μονωτήρων) συνοδευόμενες από θόρυβο. Οι εν λόγω σπινθηρισμοί παρουσιάζονται αρχικά επί μονωτήρων λόγω περιορισμένου ποσοστού ξένων επικαθήσεων, οι οποίες αυξάνουν τις απώλειες Joule [7, 13]. Οι μερικές αυτές εκκενώσεις εξελίσσονται ενίοτε (λόγω πάρα πολύ μεγάλου ποσοστού ρύπων και υγρασίας) και σε έρπουσες διαρροές επί των μονωτήρων, που μπορεί να προκαλέσουν επιφανειακή διάσπαση ή υπερπήδηση, με αποτέλεσμα τη διακοπή της τάσης από τα προτεταμένα μέσα προστασίας της γραμμής. Οι σπινθηρισμοί και η εξέλιξή τους σε έρπουσες εκκενώσεις επί των μονωτήρων οφείλονται κατά κανόνα σε ταυτόχρονη επίδραση υγρασίας της ατμόσφαιρας (που επικάθεται στην επιφάνεια των μονωτήρων υπό μορφή δρόσου) και ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων από καθαλατώσεις, σκόνη, καπναϊθάλη, κ.λ.π. Είναι απαραίτητο να συνυπάρχουν και οι δύο αυτές συνθήκες για να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις σπινθηρισμών μετά ερπουσών ηλεκτρικών εκκενώσεων, επιφανειακής διάσπασης ή υπερπήδησης. Για το λόγο αυτό, τέτοια φαινόμενα παρουσιάζονται στην Ελλάδα ενίοτε κατά τους φθινοπωρινούς μήνες (Οκτώβριο και Νοέμβριο), όταν υπάρχει παρατεταμένη ανομβρία (πριν η πρώτη βροχή πλύνει τους μονωτήρες) και έντονη υγρασία κατά τις πρώτες μεταμεσονύκτιες και πρωινές ώρες της ημέρας, σε γραμμές υψηλής και μέσης τάσης (όπως προαναφέρθηκε) και σε περιοχές όπου υπάρχουν επικαθίσεις ρύπων στις επιφάνειες των μονωτήρων [43]. Αυτό συμβαίνει σε γραμμές παραθαλάσσιες, ή σε γραμμές που βρίσκονται πολύ κοντά σε ρυπογόνες βιομηχανίες, όπου στη μεν πρώτη περίπτωση είναι ενδεχόμενο να υπάρχουν καθαλατώσεις, στη δε δεύτερη έντονη βιομηχανική ρύπανση στους μονωτήρες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, έχουν διαπιστωθεί σπινθηρισμοί καθώς και διακοπές ρεύματος σε δίκτυα μέχρι 500 kV, που προήλθαν από περιπτώματα πουλιών στους μονωτήρες, διότι έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε αλάτι (βλ. τεύχος της διεθνούς Cigre: Αύγουστου 1998, Polluted Insulators) [43].

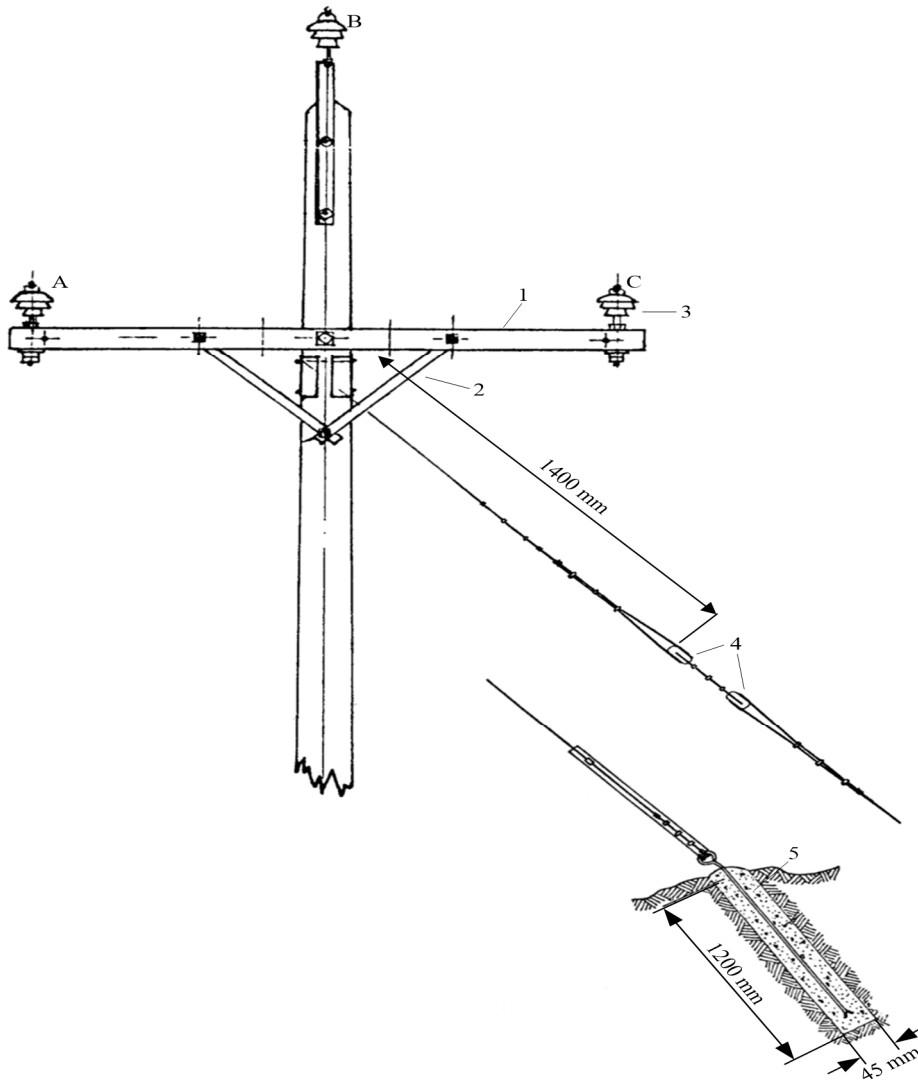
Το αντιπροσωπευτικό παράδειγμα, που εξετάζεται ακολούθως, αφορά την εκδήλωση έντονων σπινθηρισμών, λόγω περιπτώσεων πουλιών επί μονωτήρα γραμμής διανομής μέσης τάσης, που είχε ως επακόλουθο την αποκοπή της ξύλινης τραβέρσας στην θέση στήριξης του εν λόγω μονωτήρα επί αυτής. Αν και αποκοπές ξύλινων τραβερσών έχουν συμβεί λόγω έντονων σπινθηρισμών σε κεραμικούς μονωτήρες (οφειλόμενων κυρίως σε καθαλατώσεις ή σε σκόνη ή σε βιομηχανικούς ρύπους) κρίθηκε σκόπιμο να αναλυθεί και να αξιολογηθεί το συγκεκριμένο περιστατικό, για να καταδειχτεί η ανάγκη μέσων προστασίας, δεδομένου ότι ο εν λόγω μονωτήρας είχε επιθεωρηθεί μερικές ημέρες πριν το συμβάν.

Το περιστατικό αυτό αφορά την επαφή μεταξύ ενός αγωγού μέσης τάσης και ενός επιτόνου (ή άλλη μεταλλική επιφάνεια), που δεν προκάλεσε την απενεργοποίηση της γραμμής, με αποτέλεσμα ο επίτονος να βρεθεί υπό τάση. Στην περίπτωση αυτή, μία τραβέρσα στύλου μέσης τάσης κάηκε στο ένα άκρο, με αποτέλεσμα την επαφή του αντίστοιχου αγωγού με τον επίτονο σε ένα σημείο μεταξύ της αγκύρωσης και το μονωτικό στέλεχος του επιτόνου. Σημειώνεται ότι, παρά την επαφή του ενός αγωγού με την γραμμή του επιτόνου, η γραμμή λειτούργησε κανονικά. Τα μέσα προστασίας του δικτύου μέσης τάσης δεν ανίχνευσαν την κατάσταση αυτή επιτρέποντας στον επίτονο να παραμείνει υπό τάση. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε ατύχημα, αν ένας άνθρωπος ερχόταν σε επαφή με το προστατευτικό κάλυμμα του επιτόνου υπό τάση.

Ακολούθως, γίνεται μία προσπάθεια ανάλυσης αυτού του περιστατικού, προκειμένου να βρεθούν τα αίτια που το προκάλεσαν και να προταθούν μέτρα προκειμένου να αποτραπούν άλλα παρόμοια περιστατικά στο μέλλον.

Οι εναέριες γραμμές μέσης τάσης συνήθως αποτελούνται, ως γνωστό, από 3 αγωγούς των φάσεων σε οριζόντια διάταξη ή σε κατακόρυφη διάταξη (σε περίπτωση αλλαγής της διεύθυνσης της γραμμής). Οι αγωγοί σε οριζόντια διάταξη στηρίζονται σε μονωτήρες που είναι τοποθετημένοι σε τραβέρσες από ξύλο ή χάλυβα. Οι ξύλινες τραβέρσες έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια [49] καθώς παρουσιάζουν καλή διηλεκτρική συμπεριφορά [46]. Στο Σχήμα 5-1 δίνεται απλοποιημένα η διάταξη των μονωτήρων στο στύλο όπου συνεβει το εν λόγω περιστατικό. Ο επίτονος είχε τοποθετηθεί κάθετα προς την κατεύθυνση της γραμμής, και ήταν κατασκευασμένος σύμφωνα με τις προδιαγραφές [51]. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχουν μέσα προειδοποίησης για μια ενδεχόμενη επαφή του επιτόνου με τον αγωγό της γραμμής.

Η γραμμή προστατευόταν μέσω τριών μονοπολικών αποζευκτών (ένας ανά φάση) με ασφάλεια ανά φάση 15Α. Οι μονωτήρες πρόσδεσης του γυμνών αγωγών του στύλου ήταν κεραμικοί, και είχαν μήκος ερπυσμού 33 εκατοστών. Αυτή η απόσταση ερπυσμού ήταν επαρκής, διότι η γραμμή ήταν 40 χιλιόμετρα μακριά από τη θάλασσα, και δεν είχαν συμβεί ρυπογόνες δραστηριότητες στην περιοχή της γραμμής [47, 48] (βλ. πίνακες 5-1 και 5-2)



Σχήμα 5.1.1-1: Απλοποιημένο σχήμα του στύλου των 15kV [75].

- 1: Ξύλινη τραβέρσα
- 2: Αντηρίδα τραβέρσας
- 3: Μονωτήρας τύπου κώδωνος
- 4: Σύστημα μονωτήρα του επιτόνου
- 5: Τσιμεντοκονία 450Kg ταχείας πήξεως

Από την αυτοψία που έγινε διαπιστώθηκε ότι η επιφάνεια των μονωτήρων ήταν πολύ ρυπασμένη, και παρουσίαζε ίχνη εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (σπινθηρίσεων). Σημειώνεται ότι τις προηγούμενες ημέρες υπήρξαν σποραδικές βροχές στην ευρύτερη περιοχή του στύλου. Επισημαίνεται επίσης, ότι η επιθεώρηση και συντήρηση των γραμμών διανομής γίνεται συνήθως μια φορά το χρόνο. Στην προκειμένη περίπτωση, οι εν λόγω εργασίες είχαν πραγματοποιηθεί 3 μήνες πριν από το συμβάν. Επιπλέον, μια εβδομάδα πριν το συμβάν, είχαν πραγματοποιηθεί επισκευές σε ένα κοντινό στύλο (περίπου 50 μέτρα μακριά) και επομένως αν υπήρχε κάποιο πρόβλημα σπινθηρισμών στον στύλο που εμπλεκόταν στο συμβάν, θα είχε εντοπιστεί.

Ως εκ τούτου, μπορεί να υποθεθεί ότι συνέβη ένα ακραίο γεγονός κατά την εβδομάδα πριν από την αποκοπή της τραβέρσας που προκάλεσε σημαντικές διαρροές ρεύματος στο εν λόγω μονωτικό, εξαιτίας των οποίων, απανθρακώθηκε και κόπηκε η τραβέρσα με επακόλουθο να προκληθεί η επαφή μεταξύ του αγωγού και επιτόνου. Αυτό το ακραίο γεγονός διαπιστώθηκε ότι προκλήθηκε από τα περιττώματα πουλιών με βάρος περιττωμάτων μεγαλύτερο από 0,6 mg / cm², που αποτελεί πολύ υψηλό επίπεδο ρύπανσης (βλ. πίνακα 5-1). Η ρύπανση αυτή σε συνδυασμό με την αυξημένη υγρασία περιβάλλοντος και βροχή προκάλεσε σημαντικά ρεύματα διαρροής, με αποτέλεσμα τη θραύση της τραβέρσας. Σημειώνεται ότι τα περιττώματα των πουλιών σε μονωτήρες προκαλούν δραστική μείωση της διηλεκτρικής αντοχής λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε αλάτι. Αναφέρεται επίσης ότι, ένα σημαντικό μέρος των διακοπών σε γραμμές έως 500 kV έχει αποδοθεί σε περιττώματα πουλιών [45]. Τα περιττώματα πουλιών έχουν μια αγωγιμότητα 10 έως 30 mS / cm.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η προστασία της γραμμής δεν λειτούργησε, παρά τη συνεχή επαφή του αγωγού φάσης με τον επίτονο μεταξύ του σημείου αγκύρωσης και το σύστημα μόνωσης του επιτόνου. Η μη λειτουργία της ασφάλειας των 15 A μπορεί να αποδοθεί στο βραχώδες έδαφος και στην τσιμεντοκονία, λόγω των οποίων το ρεύμα διαρροής ήταν μικρότερο από το ονομαστικό ρεύμα ασφάλειας της ασφάλειας. Επειδή η ειδική αντίσταση του εδάφους ρ εκτιμάται ήταν 3.000 Ω m (βραχώδες έδαφος [43]), η αντίσταση γείωσης μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από τη σχέση [43]:

$$R = \rho / (L - 0,5) \quad (5-3)$$

Όπου L το μήκος της ράβδου (περίπου 1,2 m). Επομένως η αντίσταση γείωσης ήταν περίπου 4286Ω, οπότε η τιμή του ρεύματος διαρροής προς τη γη ήταν για τάση προς γη είναι της

τάξεως των 2Α.

Συνεπώς, η ανωτέρω τιμή ρεύματος ήταν επόμενο να μην προκαλέσει τήξη της ασφάλειας των 15Α.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η καύση και η θραύση της τραβέρσας αποτελεί γενικά κίνδυνο πυρκαγιάς, καθώς από την πτώση κάρβουνων μπορεί να ξεκινήσει η φωτιά, αν υπάρχουν εκεί ξερά χόρτα. Επιπλέον, όταν η επαφή επίτονου και αγωγού δεν είναι σε θέση να ενεργοποιήσει την προστασία της γραμμής, (όπως στην υπό εξέταση περίπτωση) το ρεύμα διαρροής προς τη γη αποτελεί αφενός έναν κίνδυνο πυρκαγιάς, και αφετέρου κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. Δηλαδή, αν το ρεύμα διαρροής προς τη γη είναι επαρκούς μεγέθους, μπορούν να αναπτυχθούν θερμοκρασίες που να αναφλεγούν ξηρή βλάστηση (η θερμοκρασία ανάφλεξης του ξηρή βλάστηση είναι περίπου 180 ° C [50,52]).

Το εν λόγω περιστατικό καταδεικνύει μια νέα κατηγορία σφαλμάτων, τα οποία μπορεί να συμβούν όταν η προτεταμένη προστασία δεν ανιχνεύσει την επαφή ενός εναέριου αγωγού με μια μεταλλική επιφάνεια (στην υπό εξέταση περίπτωση, τον επίτονο).

Εκ των ανωτέρω φαίνεται ότι χρειάζονται μέσα προστασίας για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, γιατί η αποκοπή μίας ξύλινης τραβέρσας του δικτύου μέσης τάσης, λόγω εκδήλωσης έντονων σπινθηρισμών επί κεραμικών μονωτήρων (που οφείλονται σε καθαλατώσεις, σκόνη, βιομηχανική ρύπανση, περιττώματα πουλιών, κλπ.), μπορεί να έχει ως επακόλουθο (αν συμβεί επαφή ηλεκτροφόρου αγωγού με επίτονο στύλου) την πρόκληση ηλεκτροπληξίας σε άνθρωπο ή την εκδήλωση πυρκαγιάς (αν στην βάση του επίτονου υπάρχουν ξερά χώρα) ή και τα δύο. Ορισμένα μέσα, που φαίνεται ότι αντιμετωπίζουν το πρόβλημα (ανάλογα με την περίπτωση) είναι:

- Η τοποθέτηση του επίτονου εντός κατάλληλου ηλεκτρομονωτικού σωλήνα (π.χ. από πέρτιναξ ή βακελίτη ή PVC, κ.λ.π., ώστε σε περίπτωση κρέμασης ενός αγωγού (λόγω αποκοπής της ξύλινης τραβέρσας από ισχυρούς σπινθηρισμούς ή από άλλη αιτία) να αποκλείεται η ηλεκτρική επαφή του εν λόγω αγωγού με τον επίτονο.
- Η τοποθέτηση και του μονωτήρα στον επίτονο σε κατάλληλο ύψος (ή και η τοποθέτηση και δεύτερου μονωτήρα σε κατάλληλο ύψος, αν απαιτείται) ώστε σε περίπτωση κρέμασης ενός αγωγού (λόγω αποκοπής της ξύλινης τραβέρσας από ισχυρούς σπινθηρισμούς ή από άλλη αιτία) να αποκλείεται αφενός η ροή ρεύματος από τον εν λόγω αγωγό στο τμήμα του επίτονου μεταξύ του πλησιέστερου μονωτήρα του επιτόνου και γης και αφετέρου η πρόκληση ηλεκτροπληξίας σε άνθρωπο που ενδέχεται να έλθει

σε επαφή με το προαναφερθέν τμήμα του επίτονου.

- Να καθιερωθεί η γείωση των επιτόνων, σαν να πρόκειται για γείωση προστασίας μερικών Ωμ, ώστε σε περίπτωση κρέμασης ενός αγωγού (λόγω αποκοπής της ξύλινης τραβέρσας από ισχυρούς σπινθηρισμούς ή από άλλη αιτία) και επαφής του με τον επίτονο το ρεύμα προς γη να προκαλεί διακοπή της ηλεκτροδότησης της γραμμής από την προτεταμένη προστασία. Κατά τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αφενός μεν η προστασία του ανθρώπου, αφετέρου η προστασία του περιβάλλοντος από εκδήλωση πυρκαγιάς, γιατί, λόγω του μικρού διαθέσιμου χρόνου (κλάσμα του δευτερολέπτου) που απαιτείται για να συμβεί η διακοπή ρεύματος από το προτεταμένο μέσο προστασίας, η αναπτυσσόμενη αύξηση της θερμοκρασίας στον επίτονο θα είναι άνευ σημασίας.
- Να γίνεται αποψίλωση των χόρτων στην περιοχή του επιτόνου (όπως γίνεται κατά την Οδηγία Νο 9 της ΔΕΗ στην περιοχή στύλων που φέρουν εξοπλισμό (όπως: μετασχηματιστές, διακόπτες, κλπ.), ώστε να αποκλείεται και για τον λόγο αυτό η εκδήλωση πυρκαγιάς.

Εκτός των ανωτέρω προτεινόμενων μέσων, έχουν ήδη εφαρμοσθεί επιτυχώς: α) η αντικατάσταση των ξύλινων τραβερσών με μεταλλικές και β) η εγκατάσταση πλαστικών μονωτήρων (αντί των κεραμικών) σε παραθαλάσσιες κυρίως γραμμές, γιατί οι μονωτήρες αυτοί είναι υδρόφοβοι και δεν διευκολύνουν την εκδήλωση σπινθηρισμών [44]). Επίσης, από πρόσφατη έρευνα που έχει γίνει, προέκυψε ότι η χρησιμοποίηση υδρόφοβης σιλικονούχου επάλειψης σε κεραμικούς μονωτήρες έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του ηλεκτρικού φορτίου των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων [44] (δηλαδή των σπινθηρισμών) και ως εκ τούτου την μείωση των φαινομένων ιονισμού, με επακόλουθο περιορίζεται το πρόβλημα των καθαλατώσεων σε κεραμικούς μονωτήρες παραθαλάσσιων γραμμών (και γενικότερα το πρόβλημα των ξένων επικαθήσεων στους εν λόγω μονωτήρες).

6. Συμβολή της εργασίας στην έρευνα και στις πρακτικές εφαρμογές

Η εργασία αυτή πιστεύουμε ότι συνέβαλε στην έρευνα του μηχανισμού της ηλεκτρικής γήρανσης στα στερεά ηλεκτρομονωτικά των πρακτικών εφαρμογών εντός ανομοιογενούς πεδίου σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα, υπό κρουστικές τάσης 1,2/50 μ s. Από τα πειραματικά αποτελέσματα δίνεται μία δυνατότητα προσέγγισης του ιονισμού με κρούσεις, στον συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικό – ατμοσφαιρικός αέρας» υπό κρουστική τάση 1,2/50 μ s, ο οποίος θεωρείται ότι εκδηλώνεται προ και κατά την διάσπαση των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών των πρακτικών εφαρμογών σε περιβάλλον ελαίου μετασχηματιστών κατά την καταπόνησή τους με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών (κυρίως κρουστικές τάσεις της μορφής: 1,2/50 μ s, 10/200 μ s και 250/2500 μ s) ή με εναλλασσόμενες τάσεις ή συνεχείς τάσεις.

Για λόγους σύγκρισης των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση στον συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικό-ατμοσφαιρικός αέρας» εντός ανομοιογενούς πεδίου υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50 μ s, εφαρμόστηκε η ήδη διεθνώς αποδεκτή μέθοδος μέτρησης των αλμάτων δυναμικού και ανίχνευσης του μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που έχει εφαρμοσθεί στο Ε. Μ. Πολυτεχνείο (τόσο από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων, όσο και από το Εργαστήριο Ηλεκτρομονωτικών Υλικών) κατά τη διερεύνηση των εν λόγω φαινομένων στον συνδυασμό όμως «στερεό ηλεκτρομονωτικό-έλαιο μετασχηματιστών», υπό της προαναφερθείσες μορφές της τάσης καταπόνησης.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνεται ότι τα φαινόμενα προ και κατά την διάσπαση στον συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικό-ατμοσφαιρικός αέρας» σχετίζονται με τον ιονισμό με κρούσεις, όπως συμβαίνει τόσο στον συνδυασμό «στερεό ηλεκτρομονωτικό-έλαιο μετασχηματιστών» όσο και στον ατμοσφαιρικό αέρα για μικρά διάκενα (διάκενα μέχρι περίπου 30 cm). Επίσης, από τα πειράματα που έγιναν φαίνεται (τόσο μέσω της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στην άνοδο, όσο και από την προσβολή του φωτογραφικού φιλμ) ότι το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά την διάσπαση επεκτείνεται μέχρι τις μαλακές ακτίνες X, και ότι το φάσμα της εν λόγω ακτινοβολίας επεκτείνεται, για τιμές της τάσης πλησίον της περιοχής της τάσης για την διάσπαση, μέχρι τις υπεριώδεις ακτίνες (βλ. σχήματα 3.2-5 έως 3.2-8).

Σημαντική είναι η προσπάθεια που έγινε στην εργασία αυτή για τον συνδυασμό της

προγράμματα μακροσκοπικής θεωρίας των φαινομένων προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, με την κβαντομηχανική θεωρία των εν λόγω φαινομένων, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη στους κεραμικούς και στους γυάλινους μονωτήρες των εναέριων γραμμών διανομής μέσης τάσης. Για τον σκοπό αυτό προτάθηκε το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4-6 για τα φαινόμενα προ και κατά την διάτρηση του συνδυασμού «στερεό ηλεκτρομονωτικό-ατμοσφαιρικός αέρας» και το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 4-7 για τα φαινόμενα προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση για τον εν λόγω συνδυασμό των δυο ηλεκτρομονωτικών.

Σημαντικά είναι επίσης τα συμπεράσματα από το αντιπροσωπευτικό παράδειγμα, που εξετάστηκε σχετικά με την εκδήλωση έντονων σπινθηρισμών επί κεραμικών μονωτήρων μέσης τάσης του δικτύου διανομής (λόγω καθαλατώσεων ή από σκόνης ή εξ αιτίας βιομηχανικής ρύπανσης ή από περιπτώσεων πουλιών, κλπ.), που μπορεί να έχουν ως επακόλουθο την αποκοπή της ξύλινης τραβέρσας στην θέση στήριξης του εν λόγω μονωτήρα επί αυτής, με όλα τα επακόλουθα, τα οποία είναι δυνατό να συμβούν σε βάρος του ανθρώπου και του περιβάλλοντος. Από την εν λόγω έρευνα φαίνεται ότι πρέπει να ληφθούν πρόσθετα μέσα και μέτρα προστασίας ανάλογα με την περίπτωση, όπως:

- Η τοποθέτηση του επιτόνου εντός κατάλληλου ηλεκτρομονωτικού σωλήνα (π.χ. από πέρτιναξ ή βακελίτη ή PVC, κ.λ.π., ώστε σε περίπτωση κρέμασης ενός αγωγού (λόγω αποκοπής της ξύλινης τραβέρσας από ισχυρούς σπινθηρισμούς ή από άλλη αιτία) να αποκλείεται η ηλεκτρική επαφή του εν λόγω αγωγού με τον επίτονο.
- Η εγκατάσταση προστατευτικών ηλεκτρομονωτικών καλυμμάτων κάτω από το μεταλλικό κάλυμμα του επιτόνου, που θα χρησιμεύσουν επίσης ως πρόσθετη μηχανική προστασία.
- Η τοποθέτηση του μονωτήρα στον επίτονο σε κατάλληλο ύψος (ή και η τοποθέτηση και δεύτερου μονωτήρα, αν απαιτείται) ώστε σε περίπτωση κρέμασης ενός αγωγού (λόγω αποκοπής της ξύλινης τραβέρσας από ισχυρούς σπινθηρισμούς ή από άλλη αιτία) να αποκλείεται αφενός η ροή ρεύματος από τον εν λόγω αγωγό στο τμήμα του επιτόνου .μεταξύ του πλησιέστερου μονωτήρα του επιτόνου και γης και αφετέρου η πρόκληση ηλεκτροπληξίας σε άνθρωπο που ενδέχεται να έλθει σε επαφή με το προαναφερθέν τμήμα του επιτόνου. Σημειώνεται ότι η απόσταση 1,4 m της τοποθέτησης του μονωτήρα δεν μπορεί να είναι επαρκής σε όλες τις περιπτώσεις, λόγω των διαφορετικών γωνιών εγκατάστασης όπως αποδεικνύεται από το εν λόγω περιστατικό.
- Να καθιερωθεί η γείωση των επιτόνων, σαν να πρόκειται για γείωση προστασίας μερικών

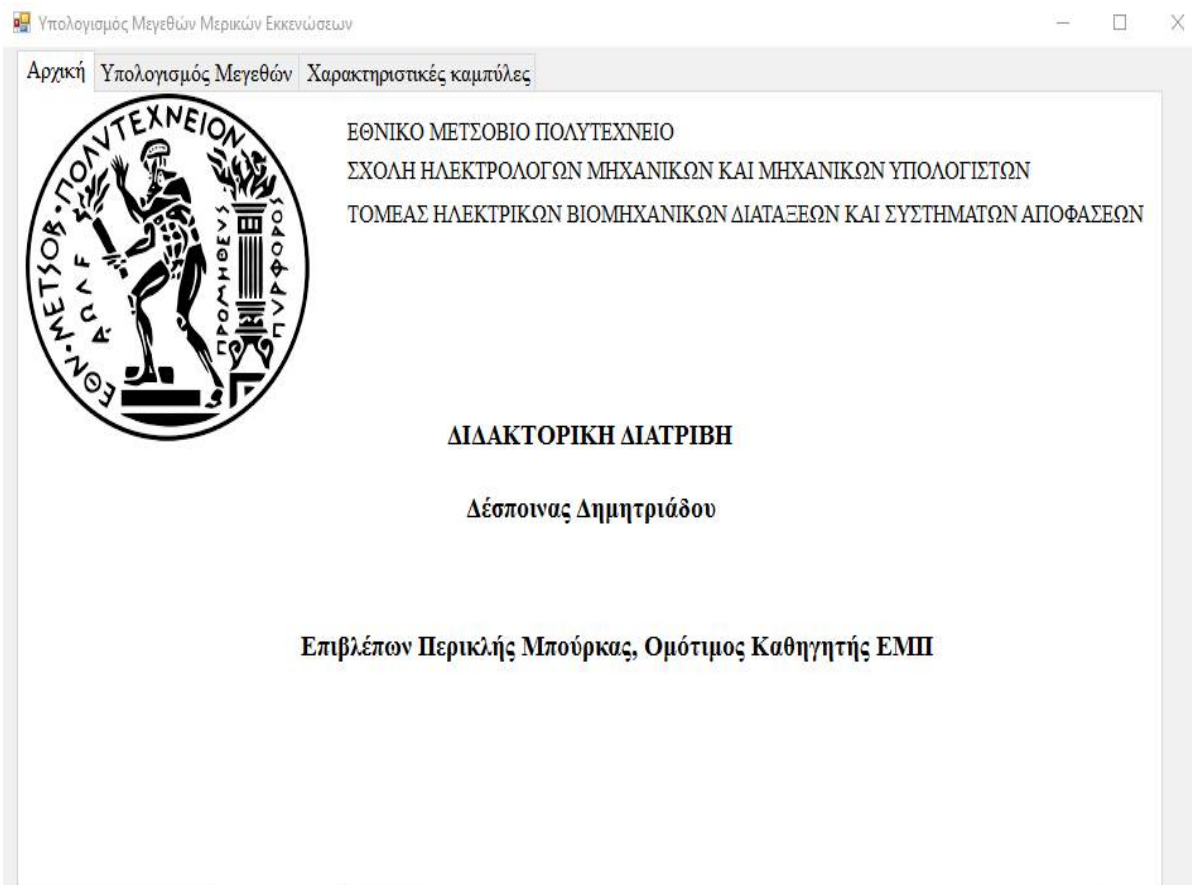
Ωμ, ώστε σε περίπτωση κρέμασης ενός αγωγού (λόγω αποκοπής της ξύλινης τραβέρσας από ισχυρούς σπινθηρισμούς ή από άλλη αιτία) και επαφής του με τον επίτονο το ρεύμα προς γη να προκαλεί διακοπή της ηλεκτροδότησης της γραμμής από την προτεταγμένη προστασία. Κατά τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αφενός μεν η προστασία του ανθρώπου, αφετέρου η προστασία του περιβάλλοντος από εκδήλωση πυρκαγιάς, γιατί, λόγω του μικρού διαθέσιμου χρόνου (κλάσμα του δευτερολέπτου) που απαιτείται για να συμβεί η διακοπή ρεύματος από το προτεταμένο μέσο προστασίας, η αναπτυσσόμενη αύξηση της θερμοκρασίας στον επίτονο θα είναι άνευ σημασίας.

- Να γίνεται αποψίλωση των χόρτων στην περιοχή του επιτόνου (όπως γίνεται κατά την Οδηγία Νο 9 της ΔΕΗ στην περιοχή στύλων που φέρουν εξοπλισμό (όπως: μετασχηματιστές, διακόπτες, κλπ.), ώστε να αποκλείεται και για τον λόγο αυτό η εκδήλωση πυρκαγιάς.

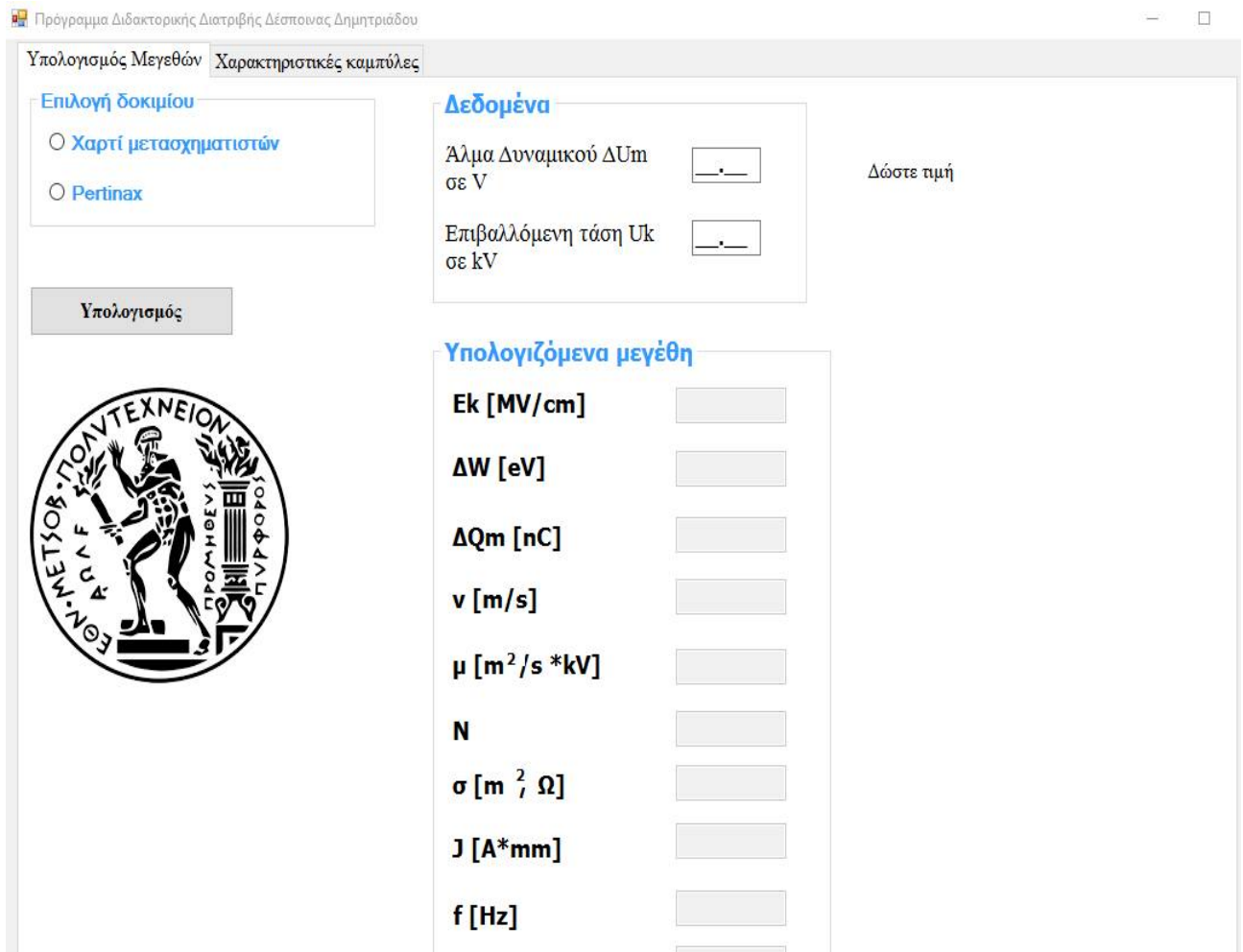
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής κρίθηκε σκόπιμο να αναπτυχθεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή πρόγραμμα υπολογισμού των μεγεθών που αναφέρονται στο κεφάλαιο και εμφάνιση των χαρακτηριστικών. Τα αυτά βασίζονται τόσο στους θεωρητικούς υπολογισμούς όσο και στα πειράματα των προηγούμενων παραγράφων και η πρόσβαση σ' αυτά γίνεται μέσω ενός καταλόγου δυνατοτήτων (μενού) μίας αρχικής οθόνης (εικόνα Π-1). Το πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε με τη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic 2010.

Στην κεντρική οθόνη του προγράμματος πατώντας το κουμπί «Είσοδος», γίνεται η μετάβαση στην κεντρική οθόνη του προγράμματος (εικόνα Π-2). Στην κεντρική οθόνη υπάρχουν δύο επιλογές για τον χρήστη: Είτε να επιλέξει τον υπολογισμό διάφορων μεγεθών από την επιλογή «Υπολογισμός μεγεθών», εικόνα Π-3, είτε να σχεδιαστούν οι χαρακτηριστικές των μεγεθών από την επιλογή Χαρακτηριστικές καμπύλες από την αντίστοιχη επιλογή (εικόνα Π-4).



Εικόνα Π-1: Αρχική οθόνη προγράμματος



Εικόνα Π-2: Κεντρική οθόνη του προγράμματος

Υπολογισμός μεγεθών

Εικόνα Π-3: Επιλογή υπολογισμός μεγεθών

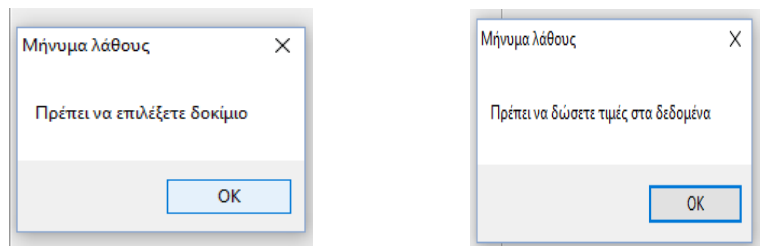
Χαρακτηριστικές καμπύλες

Εικόνα Π-4: Επιλογή χαρακτηριστικές Καμπύλες

Α) Επιλογή «Υπολογισμός μεγεθών»

Από την επιλογή «Υπολογισμός Μεγεθών» δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη, δίνοντας το άλμα δυναμικού Δu_m (σε V) και την αντίστοιχη επιβαλλόμενη τάση U_k (σε kV), να εμφανίζονται τα μεγέθη: E_k , ΔQ , ΔW , v , μ , N , σ , J , f , λ. Μεγέθη για τα οποία έχουν δοθεί οι μαθηματικές σχέσεις που τα συνδέουν στο κεφάλαιο 3.2. Απαραίτητη είναι η επιλογή του

δοκιμίου, το οποίο μπορεί να είναι είτε το πέριναξ είτε το χαρτί μετασχηματιστών. Στην περίπτωση που δεν δοθεί κάποια τιμή για τα δεδομένα εμφανίζεται το μήνυμα: «Πρέπει να επιλέξετε δοκίμιο» (εικόνα Π-5).



Εικόνα Π-5: Μηνύματα λάθους για μη επιλογή δοκιμίου ή μη δεδομένων

Επίσης είναι απαραίτητο ο χρήστης να δώσει τιμές για τα δύο δεδομένα, αλλιώς και πάλι εμφανίζεται το μήνυμα λάθους: «Πρέπει να δώσετε τιμές στα δεδομένα».

Μετά την επιλογή γίνεται ο υπολογισμός και η εμφάνιση όλων των μεγεθών που προαναφέρθηκαν.

Στη συνέχεια δίνεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα για καθένα από τα δύο υλικά. Η εικόνα Π-6 αφορά την επιλογή του χαρτιού μετασχηματιστών και η εικόνα Π-7 για το πέριναξ.

| Υπολογιζόμενα μεγέθη | Τιμή |
|----------------------|-----------|
| E_k | 0.0745 |
| ΔW | 2.5 |
| ΔQ_m | 100 |
| v | 1.475 |
| μ | 19.798657 |
| N | 62.5 |
| σ | 1979.8657 |
| J | 147.5 |
| f | 0.6 |
| λ | 5 |

Εικόνα Π-6: Χαρακτηριστικό παράδειγμα εκτέλεσης της εφαρμογής για το χαρτί μετασχηματιστών.

Υπολογισμός μεγεθών | **Χαρακτηριστικές καμπύλες**

Δεδομένα

Άλμα δυναμικού ΔU_m σε V

Επιβαλλόμενη τάση U_k σε kV

Επιλογή δοκιμίου

Χαρτί μετασχηματιστών

Pertinax

Υπολογιζόμενα μεγέθη

E_k

ΔW

ΔQ_m

v

μ


N

σ

J

f

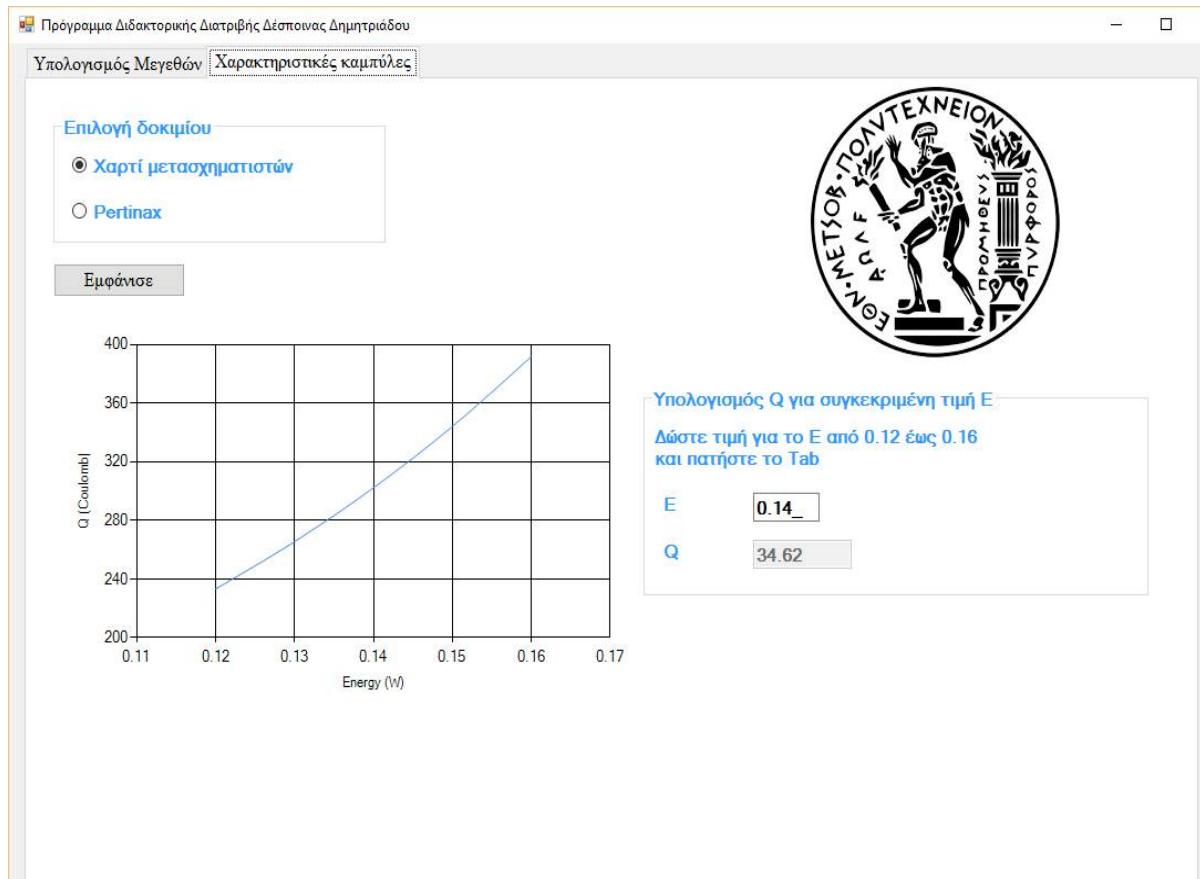
λ



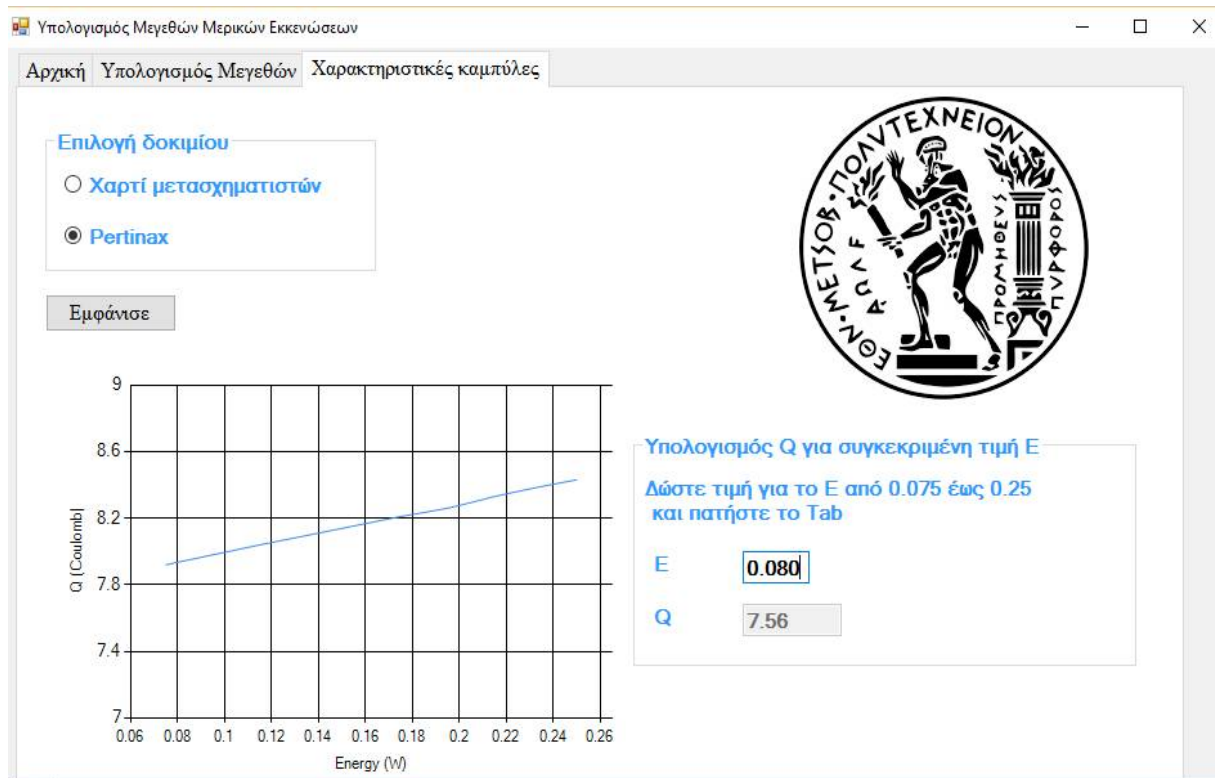
Εικόνα ΠΙ-7: Χαρακτηριστικό παράδειγμα εκτέλεσης της εφαρμογής για το πέρτιναξ.

Β) Επιλογή «Χαρακτηριστικές καμπύλες»

Με την επιλογή χαρακτηριστικές καμπύλες δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να βλέπει την χαρακτηριστική η οποία αντιστοιχεί στην τιμή της τάσης E_k που θα δώσει.



Εικόνα Π-8: Χαρακτηριστικό παράδειγμα εκτέλεσης της εφαρμογής για το χαρτί μετασχηματιστών.



Εικόνα Π-9: Χαρακτηριστικό παράδειγμα εκτέλεσης της εφαρμογής για το χαρτί πέρτιναξ

Βιβλιογραφία

Η παρακάτω βιβλιογραφική ανασκόπηση ακολουθεί χρονολογική σειρά. Σημειώνεται ότι η βιβλιογραφία 45 έως 52 δεν ακολουθεί την προηγούμενη αλλά δική της χρονολογική σειρά. Αυτό έχει γίνει επειδή η βιβλιογραφία αυτή αναφέρεται σε ένα πολύ ειδικό θέμα και γι' αυτό επιλέχθηκε να μην ενσωματωθεί στην υπόλοιπη.

1. Gemant A., Philipoff W.: Die Funkstrecke mit Vorkondensator, Zt. f. technische Physik, Bd. 13, 1932, S. 425-430.
2. Lesch G.: Lehrbuch der Hochspannungstechnik, Berlin-Gottingen-Heidelberg, 1959.
3. Kind D. Einfurung in der Hochspannungstechnik, Braunschweig 1978.
4. Hilgarth G.: Hochspannungstechnik , B.G. Teubner Stuttgart, 1981.
5. Sparks M., Mills D.L., Warren R. , Holstein T. ,Maradudin A., Sham L.J., King D.F. : Theory of electron-avalanche breakdown in solids, Phys. Rev. B., Vol. 24, No. 5, 1981, p.p. 3519-3536.
6. Ritsko J. : Electronic Properties of Polymers, ed. J. Mort and G. Pfister, New York : Wiley, 1982.
7. Kuffel E., Zaengl W.S.: High Voltage Engineering Fundamentals, Pergamon Press, Oxford 1984.
8. Himba T., Zeller H.R. : Direct measurement of spacecharge injection from a needle electrode into dielectrics , J. App. Phys. 59 (1986) p.p 1614-1620.
9. Μπούρκας Π.Δ., Μερικές εκκενώσεις εντός ανομοιογενούς μονωτικού υλικού κατά την καταπόνησή του με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Τμήμα Ηλεκτρολόγων, Αθήνα 1986.
10. Μπούρκας Π.Δ., Καγιάφας Ε.Α. : Σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής στερεών μονωτικών οργανικής σύνθεσης , Τεχνικά Χρονικά Β, Τομ.7, Τεύχος 2, 1987, σελ. 29-57.
11. Zeller H.R. : Breakdown and prebreakdown phenomena in solid dielectrics, IEEE Trans. Electr. Insul. EI-22 (1987) Vol. 2, p.p 115-122.

- 12.Μπούρκας Π.Δ., Καγιάφας Ε.Α.: Συντελεστές ανομοιογένειας στην ηλεκτρική αντοχή στερεών μονωτικών υλικών, Τεχνικά Χρονικά Β, Τόμ. 7, Τεύχος 4, 1987, σελ. 57-66.
- 13.Cartier E., Pfluger P. : Detection of hot electron-induced radiation damage in organic dielectrics by exoelectron emission from thin films. IEEE Trans. Electr. Insul. EI-22 (1987) Vol. 2, p.p 123-128.
- 14.Σταθόπουλος Ι.Α. : Υψηλές τάσεις, Αθήνα 1988
- 15.Bourkas P.D., Stathopulos I.A., Kayafas E.A. : Gleitentladungsuntersuchungen am Modell eines Mehrstoffdielektrikums , Modelling Simulation and Control A, Vol.18, No.2, 1988, p.p. 1-12.
- 16.Bourkas P.D, Kayafas E.A., Stathopulos I.A. : Unterscheidung zwischen inneren und äusseren Teilentladungen an der Isolation Hartpapier in Transformatorenöl unter Stossspannungsbeanspruchung, e&i, Jahrgang 105, H. 2, 1988, p.p. 89-91.
- 17.Μπούρκας Π.Δ., Δέρβος Κ., Καγιάφας Ε.Α. : Φαινόμενα γήρανσης στο συνδυασμό βακελίτης-μονωτικό λάδι κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ζεύξης , Τεχνικά χρονικά Β, Τόμος 8, Τεύχος 4, 1988, σελ. 29-42.
- 18.Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A., Stathopulos I.A. : Enhanced partial discharges, due to temperature increase in the combined system of a solid-liquid dielectric , IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol.25, No. 3, 1989, p.p. 469-474.
- 19.Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A. : Potential profile of dielectrics during impulse application, Physica Status Solidi (a), Vol. 112, 123, 1989, p.p. 123-130.
- 20.Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A. : High frequency current oscillations in solid dielectrics, J. Phys. D : Appl. Phys., Vol. 22, 1989, p.p. 316-322.
- 21.Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A.: High frequency current oscillations in solid dielectrics, Phy. Abstracts, 1989, Vol. 92, No 1355, p. 6078.

-
22. Bourkas P.D., Kayafas E.A., Stathopoulos I.A. : Entwicklung der Teilentladungen an der Isolation Hartpapier in Transformatorenöl unter Stossspannungsbeanspruchung , *e&i* , Jahrgang 106, H. 2, 1989, S. 62-66.
23. Bourkas P.D., Kayafas E.A., Dervos C., Stathopoulos I.A.: Eine mögliche Erklärung der Glimmentladungen in festen Isolierstoffen bei Stossspannungsbeanspruchung, *etz-Archiv*, Bd. 11, H. 5, 1989, S. 163-165 .
24. Bourkas P.D., Stathopoulos I.A., Topalis F.V.: Breakdown of the pressboard-oil insulation under repeated stress by impulse voltages, *Energy Systems*, Vol. 10, No. 2, 1990, p.p. 24-27.
25. Dervos C., Bourkas P.D., Kagarakis C.A., Uzunoglu N.K.: Millimeter wavelength radiation during dielectric aging, *International Journal of Infrared & Millimeter Waves*, Vol. 11, No.1, January 1990.
26. Bourkas P.D., Dervos C., Eleftheriou M., Kagarakis C., Ionisationsvorgänge beim Gleitdurchschlag der festen organischen Isolierstoffe, *Physica Scripta*, Vol. 42, 1990, p.p. 737-740.
27. Σταθόπουλος I.A., Μπούρκας Π.Δ., Τοπαλής Φ.Β. : Μετρήσεις και δοκιμές Υψηλών τάσεων, Ε.Μ.Π. 1991
28. Dervos C., Bourkas P.D., Kagarakis C.A.: Charge transport through a "metal-thick insulator-metal" structure during impulse voltage excitation, *Journal of Electrostatics*, Vol. 26, 1991, p.p. 121-132.
29. Moronis A.X., Bourkas P.D., Dervos C.T., Kagarakis C.A.: A program to process the experimental measurements connected with the research of breakdown and prebreakdown phenomena in solid polymeric insulators, *International Journal of Power and Energy Systems*, Vol.14, No. 3, 1994, p.p. 77-83.

30. Moronis A.X., Bourkas P.D. : Impact ionization effects at interfaces between solid dielectrics and insulation oil or air, during high voltage pulse applications , International Journal Interface Science, Vol. 2, 1994 p.p. 281-287.
31. Bourkas P.D.: Radiation emission phenomena in a model metal-dielectric-metal under high electric fields, International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 14, No. 2 , 1995, p.p. 37-41.
32. Moronis A., Bourkas P., Karagiannopoulos C., Xalaris P.G., Tsitsoglou I., Tsitsias S: A mathematical model for the overall equivalent capacitance change of a metal-tip-solid polymeric dielectric-metal plane configuration, under the application of high voltage impulses , International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 15, No.3, 1995, p.p. 85-88.
33. Μορώνης Α.Ξ., Ηλεκτρονική συμπεριφορά των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών υπό την επίδραση υψηλών ταχέως μεταβαλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Τμήμα Ηλεκτρολόγων, Αθήνα 1995
34. Tsitsoglou I., Halaris P.G., Karagiannopoulos C.G., Bourkas P.D. : Dielectric aging relative to impact ionisation, International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 19, No. 2, 1999, p.p. 125-128.
35. Τσιτσόγλου Η., Μερικές εκκενώσεις υπό εναλλασσόμενη τάση και ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις σε πολυμερή στερεά μονωτικά, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Τμήμα Ηλεκτρολόγων, Αθήνα 1995
36. Χάλαρης Π.Γ. Μερικές εκκενώσεις σε πολυμερή στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου υπό υψηλές συνεχείς τάσεις, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Τμήμα Ηλεκτρολόγων, Αθήνα 1996
37. Halaris P.G., P.D. Bourkas, Moronis A.X, Tsitsias S.A., Tsitsoglou I., Karagiannopoulos C.G.: Stressing the model of a solid-liquid dielectric, through the application of high D.C.

- voltage, International Journal of Power and Energy Systems, Vol.19, No. 2-3, 1999, p.p. 23-27.
- 38.C.G. Karagiannopoulos, D.P. Agoris, P.D. Bourkas, A.V. Marinescu : High frequency interference problems caused by partial discharges in industrial high voltage solid insulating systems, R. R. Sci. Techn. - Electrotechn. et Energ., Vol. 44, No 4, 1999, p.p. 621-627.
- 39.D.P. Agoris, C.G. Karagiannopoulos, P.D. Bourkas, C.S. Psomopoulos : Aging effects on solid insulators concerning the form of the stressing pulse, International Journal of Power & Energy Systems, Vol.20, No. 2, 2000, p.p. 86-90.
- 40.P.D. Bourkas, C.G. Karagiannopoulos, D.P. Agoris, C.S. Psomopoulos : The effective capacitance of a solid-liquid dielectric combination under high impulse voltages application, International Journal of Power & Energy Systems, Vol.20, No. 3, 2000, p.p. 113-118.
- 41.P.T. Tsarabaris, C.G. Karagiannopoulos, P.D. Bourkas, N.J. Theodorou: "An experimental investigation of leakage current on high voltage contaminated insulators", I. Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 2, No.1, 2003, p.p. 30-34.
- 42.P.T. Tsarabaris, C.G. Karagiannopoulos, P.D. Bourkas, N.J. Theodorou: A classification of the leakage current pulses of high voltage contaminated porcelain insulators using a self-organised neural network, International Journal of Engineering Intelligent Systems, Vol.14, No.1, 2006, p.p.157-167.
- 43.Μπούρκας Π.Δ., Πολυκράτη Α.Δ., Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Τόμος ΙΙ (Εφαρμογές βιομηχανικών ηλεκτρικών διατάξεων), Ε.Μ.Π., Αθήνα 2012
44. Σουλινάρης Γ.Κ, Αξιολόγηση συμπεριφοράς γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον πυρκαγιάς, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα 2015.

-
- 45.Cigre WG 33.04 (1998), Task Force 01. A review of current knowledge: Polluted insulators, August.
- 46.Halevidis, C.D. (2011) ‘Wooden pole ladder network model development and verification using finite elements analysis’, European Transaction on Electrical Power, Vol. 23 No. 1, pp. 62-71.
- 47.IEC/TR (1986), Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions, IEC standard 60815.
- 48.Kuffel, E.W., Zaengl, S. (1984) ‘High Voltage Engineering Fundamentals’, Pergamon Press, Oxford.
- 49.Liebel, S. A. and. Mueller R. E (1994) ‘Douglas fir crossarms: Solid sawn vs. laminated comparison’, In Proceedings of the IEEE Power Engineering Society, Transmission and Distribution Conference, Chicago, IL, pp. 581-586.
- 50.Mouzakitis, P. I., Halevidis, C.D. ., Soulinaris, G.K., Koustellis, J.D and Koufakis, E. I. (2011) ‘Feasibility of fire ignition from molten particles of electrical appliances’ in EuroPES Conference, Crete, Greece, pp. 292-295.
- 51.Public Power Corporation S.A. (1985). Manual of typical constructions, Athens, GR.
- 52.Quintiere, J. G (1997) ‘Principles of Fire Behavior’, Cengage Learning, Inc.