



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

**Διάταξη εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την
ηλεκτρική καταπόνηση ηλεκτρομονωτικών υλικών υπό ταχέως
μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΥΡΙΑΚΟΣ ΣΤ. ΧΑΤΖΗΠΕΤΡΟΣ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2011



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

**Διάταξη εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την
ηλεκτρική καταπόνηση ηλεκτρομονωτικών υλικών υπό ταχέως
μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΥΡΙΑΚΟΣ ΣΤ. ΧΑΤΖΗΠΕΤΡΟΣ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

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

.....
Π. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2011

.....
Κυριάκος Στ. Χατζηπετρός

Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κυριάκος Στ. Χατζηπέτρος, 2011

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.

Πρόλογος

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο των Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. κατά το ακαδημαϊκό έτος 2010-11 στα πλαίσια των εκπαιδευτικών και ερευνητικών δραστηριοτήτων του εργαστηρίου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου κ. Κωνσταντίνο Καραγιαννόπουλο και κ. Περικλή Μπούρκα για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Δρ. Κωνσταντίνο Χαλεβίδη για την βοήθεια του στην διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θέλω να αφιερώσω την παρούσα εργασία στους γονείς μου και τον αδερφό μου για τη συμπαράσταση και τη στήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Κυριάκος Στ. Χατζηπέτρος

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT.....	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	10
1.1 Βασικές ιδιότητες των ηλεκτρομονωτικών υλικών.....	10
1.2 Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών.....	12
1.2.1 Η διηλεκτρική αντοχή.....	12
1.2.2 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά.....	12
1.2.3 Ο συντελεστής απωλειών (tgδ).....	12
1.2.4 Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	14
1.2.5 Ο συντελεστής ετgd.....	15
1.2.6 Η επιφανειακή αγωγιμότητα.....	16
1.2.7 Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.....	17
1.2.8 Η μηχανική αντοχή.....	18
1.3 Η διάσπαση των αερίων μονωτικών.....	19
1.4 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.....	21
1.4.1 Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών.....	21
1.4.1.1 Η θερμική διάτρηση.....	22
1.4.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση.....	24
1.4.1.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων.....	27
1.4.1.3.1 Γενικά περί μερικών εκκενώσεων.....	27
1.4.1.3.2 Η τεχνητή γήρανση.....	29
1.4.1.3.3 Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων.....	30
1.4.1.3.4 Παράδειγμα ερμηνείας παλμογραφημάτων των μερικών εκκενώσεων με των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων..	33
1.4.1.3.5 Μια ερμηνεία του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff, μέσω σύγκρισης της ηλεκτρικής καταπόνησης με τη μηχανική καταπόνηση....	34
1.4.1.4 Η θερμοχημική διάτρηση.....	36
1.4.1.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.....	37
1.4.1.5.1 Ο συνδυασμός της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.....	37
1.4.1.5.2 Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.....	41
α) Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule..	41
β) Η μείωση της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση, λόγω εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων.....	43
γ) Η μείωση της θερμικής τάσης ανατροπής από τις μερικές εκκενώσεις.....	43
δ) Η διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων.....	44

1.4.1.5.3 Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.....	50
1.4.1.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων.....	55
1.4.1.7 Το φαινόμενο της πολικότητας σε πολυμερή στερεά μονωτικά κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.....	61
1.4.2 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση.....	62
1.4.3 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών.....	63
1.4.3.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών..	64
α) Μακροσκοπική ερμηνεία.....	66
β) Κβαντομηχανική ερμηνεία.....	67
1.4.3.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση.....	69
1.4.3.3 Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών.....	71
1.4.3.4 Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση.....	73
1.4.4 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών.....	76
2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	78
3.Η ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	79
4. ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	83
5. ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	95

Περίληψη

Στην εισαγωγή της παρούσας διπλωματικής γίνεται αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο των αερίων και των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών. Επίσης, αναλύονται τα φαινόμενα προ και κατά της διάσπασης των στερεών μονωτικών, ενώ παρατίθενται και τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης τους.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η διάταξη εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιήθηκε για να ληφθούν μετρήσεις αλλά και να προσβληθεί φωτογραφικό φιλμ.

Τέλος, παρουσιάζεται και ο σκοτεινός θάλαμος που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας για την εμφάνιση του φωτογραφικού φιλμ

Λέξεις κλειδιά

Ηλεκτρομονωτικά υλικά, ηλεκτρική καταπόνηση, διάσπαση, μετρήσεις, φωτογραφικό φιλμ, διάκενο, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, σκοτεινός θάλαμος

Abstract

In the introduction of this diploma thesis a report in the theoretical background of gases and solid insulators is given. Also, the prebreakdown and the breakdown phenomena in solid insulators are analyzed. In addition, a description of their basic evaluation's criteria is given.

Then, the device of electromagnetic radiation emission of High Voltages and Electric Measurements laboratory of National Technical University of Athens is presented. This device was used in order to take measurements and to expose the photographic film.

Finally, the dark room that was manufactured in the frames of diplomatic work for the appearance of photographic film is presented.

Key words

Insulators, electrical stress, breakdown, measurements, photographic film, gap, electromagnetic radiation, dark room

1. Εισαγωγή - Θεωρητικό Μέρος

Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται γενικές πληροφορίες για τις βασικές ιδιότητες και τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών, καθώς και για το μηχανισμό γήρανσης και διάσπασης των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών που προέρχονται από τη βιβλιογραφία που παρατίθεται στο τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.1 Βασικές ιδιότητες των ηλεκτρομονωτικών υλικών

Σκοπός των μονώσεων σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των ρευματοφόρων μερών καθώς και των ρευματοφόρων μερών προς γη, κατά τρόπο ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό. Η ανάγκη την εκπλήρωση του σκοπού αυτού και η μελέτη των φαινομένων, που προκαλούν ολική ή μερική αναίρεση του ηλεκτροστατικού πεδίου σε μία κατασκευή, οδήγησαν στον καθορισμό ορισμένων εννοιών. Έτσι, σε αντιστοιχία προς την μηχανική αντοχή των υλικών, έχει αναπτυχθεί μία εξειδικευμένη περιοχή της ηλεκτρολογίας, που αφορά την ηλεκτρική (ή διηλεκτρική) αντοχή των μονώσεων.

Με τον όρο διάσπαση εννοεί κανείς την αγωγήμη σύνδεση δύο μεταξύ τους μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση επί της επιφάνειας ενός στερεού μονωτικού ονομάζεται επιφανειακή διάσπαση. Η διάσπαση στο περιβάλλον μέσο ενός στερεού μονωτικού, λόγω μείωσης της απόστασης μόνωσης του στερεού μονωτικού από αγωγίμες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνειά του (όπως π.χ. συμβαίνει σε ρυπασμένους μονωτήρες) χαρακτηρίζεται ως υπερπήδηση. Η διάσπαση μέσω του όγκου ενός στερεού μονωτικού υλικού καλείται διάτρηση. Ως διηλεκτρική αντοχή (E_d) ενός μονωτικού υλικού εντός ομογενούς πεδίου έχει οριστεί το πηλίκο της ελάχιστης τιμής της τάσης για τη διάσπαση προς την απόσταση των ηλεκτροδίων.

Η τιμή E_d είναι ένα κριτήριο για την επιλογή των διάφορων μονωτικών υλικών σε μια κατασκευή. Οι τιμές που δίνονται στο παρακάτω πίνακα 1.1-1 για τη διηλεκτρική αντοχή μερικών μονωτικών υλικών (σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50Hz και για μικρό χρόνο καταπόνησης) δείχνουν τη δυνατότητα αυτή.

Μονωτικό Υλικό	Πάχος μόνωσης d σε mm	E_d σε kV/cm
Αέρας		21
Λάδι μετασχηματιστών	-	60...200
Πορσελάνη	0,5.....3	240...380
Στεατίτης	0,5.....3	200...300
Γυαλί	<1	160...450
Χαρτόνι	0,5.....1,5	300...450
Χαρτόνι στο λάδι	<2	200...400
Σκληρό ελαστικό	<3	300...500
Εύλο	<3	30...50
Glimmer	0,01.....0,1	500...1000

Πίνακας 1.1-1: E_d για καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας ορισμένων μονωτικών υλικών σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50Hz

Όταν η διηλεκτρική αντοχή αναφέρεται στην ελάχιστη απόσταση μόνωσης (d) υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης (ενεργού τιμής U_d), τότε ισχύει:

$$E_d = \frac{U_d \sqrt{2}}{d} \quad (1.1-1)$$

Η πεδιακή ένταση για τη διάσπαση ενός μονωτικού υλικού στη μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης τάσης καταπόνησης του $\sqrt{2}U_{da}$ εντός ανομοιογενούς πεδίου, δίνεται

από τη σχέση:
$$E_{da} = \frac{U_{da} \sqrt{2}}{dn} \quad (1.1-2)$$

όπου n ο συντελεστής χρησιμοποίησης ($0 < n < 1$)

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις είναι προφανές ότι:

$$E_{da} < E_d \quad (1.1-3)$$

ή
$$U_{da} < U_d \quad (1.1-4)$$

Σε διάφορες πρακτικές εφαρμογές υψηλών τάσεων συναντώνται συχνότατα χωρικά φορτία μεταξύ των ηλεκτροδίων. Σε μία δεδομένη διάταξη δυο ηλεκτροδίων, τα χωρικά φορτία συγκεντρώνονται προ του ηλεκτροδίου με την αντίθετη προς αυτά πολικότητα και σχηματίζουν έτσι ένα νέφος χωρικών φορτίων. Το πεδίο είναι ηλεκτροστατικό όταν τα χωρικά φορτία του νέφους είναι αμετακίνητα. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι μέχρι μια τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης συμβαίνει μια κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των εξασκούμενων δυνάμεων Coulomb, ώστε το πεδίο να εξακολουθεί να είναι χωρικό. Όταν μετά την παραπάνω τιμή εφαρμοζόμενου πεδίου καταστρέφεται η κατάσταση ισορροπίας (χωρίς να συμβαίνει διάσπαση), τότε εκδηλώνονται περιορισμένης έκτασης εκκενώσεις, που ονομάζονται μερικές εκκενώσεις. Οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού χαρακτηρίζονται ως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις και εκείνες στην επιφάνεια ως εξωτερικές μερικές εκκενώσεις. Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν την ξεχωριστή ονομασία: στεμματοειδής μερικές εκκενώσεις (ή Corona). Η ενεργός τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (U_a), κατά την οποία αρχίζει η έναρξη των μερικών εκκενώσεων ονομάζεται τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (ή αρχική τάση). Η τιμή της πεδιακής έντασης E_a για την έναρξη των μερικών εκκενώσεων χαρακτηρίζεται αντίστοιχα ως πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (ή αρχική πεδιακή ένταση).

1.2 Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών

Η ανάγκη για την αξιόπιστη διαχρονική συμπεριφορά των διαφόρων μονωτικών υλικών σε μια κατασκευή υψηλών τάσεων έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησης τους, τα οποία δεν αφορούν μόνο τις ηλεκτρικές (ή διηλεκτρικές) ιδιότητες τους, αλλά και άλλες ιδιότητες, που πρέπει να έχουν, ανάλογα με την κατασκευή, όπως π.χ.: η θερμική αντοχή κατά την απαγωγή των απωλειών Joule των αγωγών, η ψυκτική ικανότητα κατά τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου σε διακόπτες, η μηχανική αντοχή των μονωτήρων (π.χ. λόγω του βάρους της γραμμής), η αντοχή κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος, κ.λ.π.. Τα κριτήρια είναι:

1.2.1) Η διηλεκτρική αντοχή

Η διηλεκτρική αντοχή (E_d) είναι ένας ορισμός για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών, μέσω της ελάχιστης τιμής της πεδιακής έντασης για τη διάσπαση εντός ομογενούς πεδίου.

1.2.2 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά

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

Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών, που συνθέτουν μια μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασηματιστών και μονώσεις καλωδίων), θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο, ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειες τους, για να μην διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.

Ο συνδυασμός του χαρτιού με το μονωτικό λάδι είναι μια μόνωση, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην πράξη, γιατί:

α) τα δυο αυτά μονωτικά υλικά έχουν την ίδια περίπου σχετική διηλεκτρική σταθερά με αποτέλεσμα να μην συμβαίνει ουσιαστικά διάθλαση των γραμμών στη διαχωριστική επιφάνεια τους, και

β) το λάδι εμποτίζει το χαρτί, ώστε να αποκλείεται έτσι η ύπαρξη του αέρα, ο οποίος μόνο προβλήματα θα μπορούσε να δημιουργήσει, λόγω της μικρής του διηλεκτρικής αντοχής κατά τον πίνακα 1.1-1 (κυρίως βλάβες στην επιφάνεια του χαρτιού από μερικές εκκενώσεις ή διάσπασης σε φυσαλίδες του αέρα).

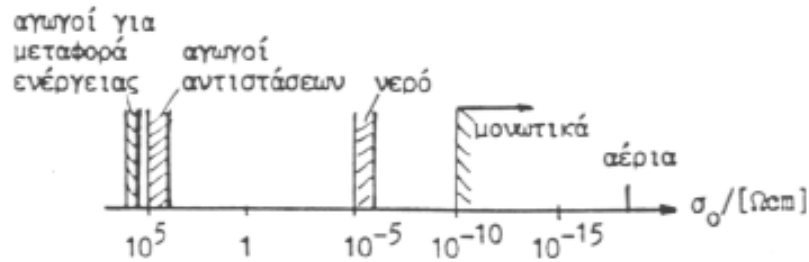
1.2.3 Ο συντελεστής απωλειών ($\text{tg}\delta$)

Σε μια μόνωση, που περιλαμβάνεται μεταξύ ηλεκτροδίων με σκοπό τη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας, οι οποίες υπό εναλλασσόμενη τάση οφείλονται:

α) στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροής των δίπολων στο ρυθμό εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης, και

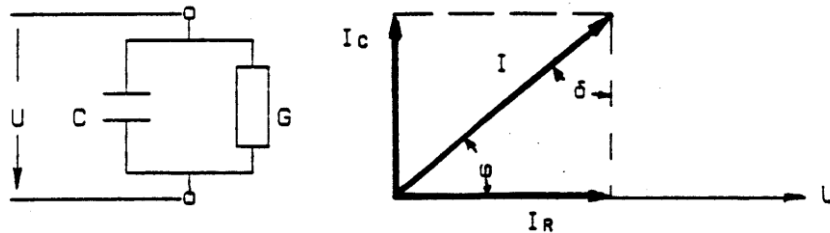
β) στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά (σχήμα 1.2.3-1).

Έτσι, ο μονωτής έχει, εκτός από το χωρητικό ρεύμα, I_c και ένα ρεύμα διαρροής I_r . Στην πράξη το ρεύμα διαρροής αυξάνει, γιατί η αγωγιμότητα του μονωτή γίνεται μεγαλύτερη, όπως συμβαίνει π.χ. κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων, και τη θερμική καταπόνηση του μονωτή από τις απώλειες των αγωγών.



Σχήμα 1.2.3-1: Τάξη μεγέθους της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διαφόρων κατηγοριών υλικών

Στο σχήμα 1.2.3-2 δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με ομοιογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητας του G).

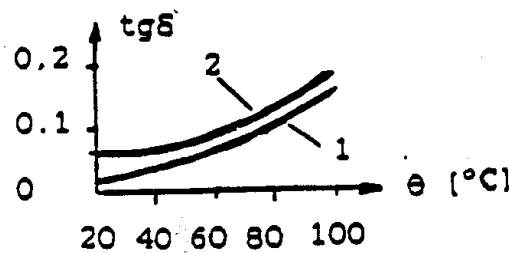


Σχήμα 1.2.3-2: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας του G του διηλεκτρικού του

Ο συντελεστής απωλειών:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C} \quad (2.3-1)$$

είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μιας μονωτικής διάταξης γενικότερα), γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του (σχήμα 1.2.3-3). Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό η $\operatorname{tg} \delta$ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 1.2.3-3: $\operatorname{tg} \delta$ ορισμένων διηλεκτρικών

- 1: σκληρό χαρτί
- 2: πορσελάνη

Οι απώλειες Joule (P_w) στην αγωγιμότητα G είναι:

$$P_w = I_R U = G U^2 = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = P_B \operatorname{tg} \delta \quad (1.2.3-2)$$

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

Αν υποθέσουμε, ότι ο παραπάνω πυκνωτής αποτελείται από δυο επίπεδες πλάκες διατομής A σε απόσταση d και ότι ο μεταξύ τους χώρος καταλαμβάνεται από ένα μονωτικό με σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r , τότε η τιμή της χωρητικότητας C είναι:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1.2.3-3)$$

Για την αγωγιμότητα G του παραπάνω πυκνωτή ισχύει η σχέση:

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (1.2.3-4)$$

όπου σ η ειδική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού. Για τις απώλειες του πυκνωτή αυτού ισχύει κατά τις σχέσεις 1.2.3-2 και 1.2.3-3 :

$$P_w = U^2 \omega \varepsilon \frac{A}{d} \operatorname{tg} \delta \quad (1.2.3-5)$$

ή πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με d :

$$P_w = \operatorname{tg} \delta (U/d)^2 \omega \varepsilon V \quad (1.2.3-6)$$

όπου V ο όγκος του διηλεκτρικού.

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

$$P_w = \operatorname{tg} \delta \cdot \omega \varepsilon \int (U/d)^2 dV = \operatorname{tg} \delta \cdot \omega \varepsilon \int E^2 dV \quad (1.2.3-7)$$

1.2.4 Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μια πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, (σχήμα 1.2.3-1) που εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή της πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία, κ.λ.π.). Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι επομένως ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των διηλεκτρικών, γιατί εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς.

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

$$\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.2.4-1)$$

όπου : σ_0 : η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας θ ως προς το περιβάλλον

σ : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

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

k : η σταθερά Boltzmann ($1.37 \cdot 10^{-23}$ Ws/°K)

T : η απόλυτη θερμοκρασία

β : ένας συντελεστής του υλικού (π.χ. για το presspan $\beta \approx 0.02$)

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

Για μεγαλύτερες τιμές της πεδιακής έντασης από προηγούμενως, η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας οφείλεται κυρίως στις μερικές εκκενώσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι στην περίπτωση αυτή συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, όπως στα ιονισμένα αέρια και ότι δεν ισχύει η σχέση 1.2.4-1.

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

$$\sigma = \sigma_o \frac{e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2} \quad (1.2.4-2)$$

όπου E η πεδιακή ένταση στο τμήμα υλικού, που δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (το οποίο χαρακτηρίζεται ως υγείες 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 $\delta>0$.

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

1.2.5 Ο συντελεστής $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$

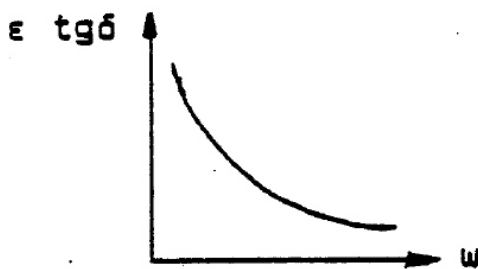
Από τις σχέσεις 1.2.3-1, 1.2.3-2, 1.2.3-3 έχουμε για ένα πυκνωτή επίπεδων πλακών:

$$\varepsilon_r \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma}{\varepsilon_o \omega} \quad (1.2.5-1)$$

ή με $\varepsilon = \varepsilon_o \varepsilon_r$:

$$\varepsilon \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.2.5-2)$$

Στο σχήμα 1.2.5-1 δίνεται η γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής κατά την παραπάνω σχέση. Το φαινόμενο $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών (πίνακας 1.2.5-1).



Σχήμα 1.2.5-1: $\varepsilon \operatorname{tg}\delta = f(\omega)$ για το ομοιογενές μονωτικό υλικό

Υλικό	Πάχος μόνωσης σε mm	$\varepsilon \operatorname{tg}\delta$
Λάδι μετασχηματιστών	-	0,004....0,0046
Πορσελάνη	0,5.....3	0,085....0,16
Στεατίτης	0,5.....3	0,006....0,02
Γυαλί	<1	
Χαρτόνι	0,5.....1,5	0,03....0,1
Glimmer	0.5.....3	0,009....0,012

Πίνακας 1.2.5-1: Τάξη μεγέθους των τιμών $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ για ορισμένα διηλεκτρικά σε θερμοκρασία 20 °C.

Από την σχέση 1.2.4-1 και 1.2.5-2 έπεται ότι ο συντελεστής $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ του ομοιογενούς στερεού μονωτικού υλικού (ή γενικότερα του στερεού διηλεκτρικού όταν δεν εκδηλώνονται σε αυτό μερικές εκκενώσεις, π.χ. λόγω $U > U_a$) αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία:

$$\varepsilon \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma_o}{\omega} e^{\beta\theta} \quad (1.2.5-3)$$

Αν θεωρήσουμε την τιμή ε ως σταθερή, τότε από την παραπάνω σχέση έπεται ότι η αύξηση της $\operatorname{tg}\delta$ είναι εκθετική (σχήμα 1.2.3-2).

Για την αύξηση της τιμής $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ στην περιοχή του στερεού μονωτικού, όπου οι μερικές εκκενώσεις στην αύξησης των απωλειών Joule, έχουμε αντίστοιχα (από τις σχέσεις 1.2.4-2 και 1.2.5-2):

$$\varepsilon \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma_o}{\omega} \frac{e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.2.5-4)$$

1.2.6 Η επιφανειακή αγωγιμότητα

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

Η επιφανειακή αγωγιμότητα έχει συσχετιστεί με έννοιες, που αφορούν την αντοχή των στερεών μονωτικών από τις καταπονήσεις στην επιφάνεια τους (όπως: αντοχή σε ρεύμα διαρροής, αντοχή σε ηλεκτρικό τόξο, δυνατότητα απομάκρυνσης των επικαθίσεων κατά τη βροχή κ.λ.π.), που ενδιαφέρουν στην πράξη για την κατασκευή π.χ. μονωτήρων και φλογοθαλάμων διακοπών. Με κριτήριο π.χ. τη μείωση του

ποσοστού της σκόνης συμπεραίνει κανείς, ότι οι μονωτήρες πορσελάνης χρησιμοποιούνται ως εξωτερικού χώρου, έναντι των μονωτήρων ρητίνης (που χρησιμοποιούνται ως εσωτερικού χώρου), γιατί η επιφάνεια τους διευκολύνει περισσότερο στην απομάκρυνση σκόνης κατά τη βροχή.

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

1.2.7 Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις θέσεις, όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως π.χ.: ανομειογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο λάδι). Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντοτε κατά την λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ. απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπών, κ.λ.π.). Επειδή γενικά ισχύει, ότι η θερμική αγωγιμότητα (λ) συμβαδίζει με την ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα, η τιμή λ είναι (όπως και η τιμή σ) ένα κριτήριο για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών. Στο πίνακα 1.2.7-1 δίνονται τιμές του συντελεστή λ για διάφορα διηλεκτρικά.

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

Πίνακας 1.2.7-1: Τιμές του συντελεστή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας (λ) για ορισμένα μονωτικά υλικά.

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

Το χαρτί μαζί με το λάδι αποτελούν κυρίως τη μόνωση ενός μετασχηματιστή υψηλής τάσης (μετασχηματιστής μεταφοράς, μετασχηματιστής διανομής και μετασχηματιστής μέτρησης). Έτσι, μπορεί κανείς να εκτιμήσει (μετά από μετρήσεις στα πλαίσια των προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης) τον μέγιστο υπολειπόμενο χρόνο ζωής του. Αν θεωρηθεί η μεταβολή της τιμής ϵ πολύ μικρή συγκριτικά προς εκείνη της μεταβολής της $\text{tg}\delta$ (λόγω επικαθίσεων αιωρούμενων σωματιδίων στο χαρτί, που δημιουργούνται ως ανεπιθύμητες προσμείξεις στο λάδι),

τότε με τη μέτρηση της $tg\delta$ (μετά από αφύγρανση και πλήρωση του μετασχηματιστή με λάδι, υπό συνθήκες κενού), από τις σχέσεις 1.2.4-1 και 1.2.5-3 έχουμε:

$$\theta = \frac{\ln(tg\delta / tg\delta')}{\beta} \quad (1.2.7-1)$$

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

1.2.8 Η μηχανική αντοχή

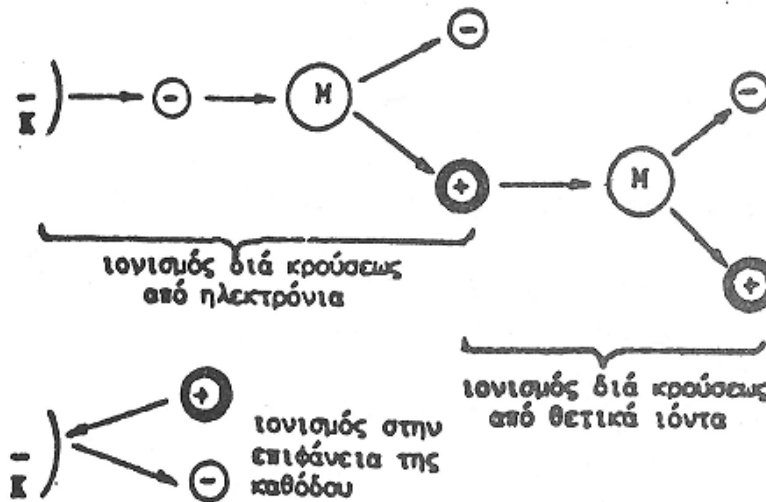
Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρουν (εκτός από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών) και οι μηχανικές ιδιότητες τους, όπως π.χ.: τα πλαστικά μέρη του μηχανισμού περιστροφής ενός ασφαλειοποζεύκτη σε ένα πίνακα μέσης τάσης, η αντοχή σε εφελκυσμό ενός μονωτικού, η δύναμη τάνυσης σε μονωτήρες των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

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

1.3 Η διάσπαση των αερίων μονωτικών

Η διάσπαση των αερίων για μικρά διάκενα ερμηνεύεται από τη θεωρία Thowsend και τον νόμο του Paschen. Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τη θεωρία Thowsend δίνεται στο σχήμα 1.3-1. Σύμφωνα με αυτό η δημιουργία των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται σε τρεις δυνατότητες ιονισμού:

- ιονισμός με κρούσεις από ηλεκτρόνια,
- ιονισμός με κρούσεις θετικά όντα, και
- ιονισμός στη επιφάνεια της καθόδου



Σχήμα 1.3-1: Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τις περιπτώσεις ιονισμού με κρούσεις κατά τη θεωρία Thowsend

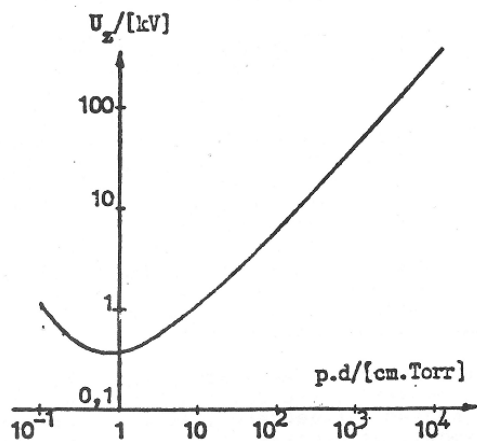
- K: κάθοδος
- : ηλεκτρόνιο
- + : θετικό ιόν
- M: μόριο

Κατά τον νόμο του Paschen η τάση έναυσης (U_z : τάση αυτοσυντήρησης του ιονισμού) διέπεται από τη σχέση :

$$U_z = f(p \cdot d) \quad (1.3-1)$$

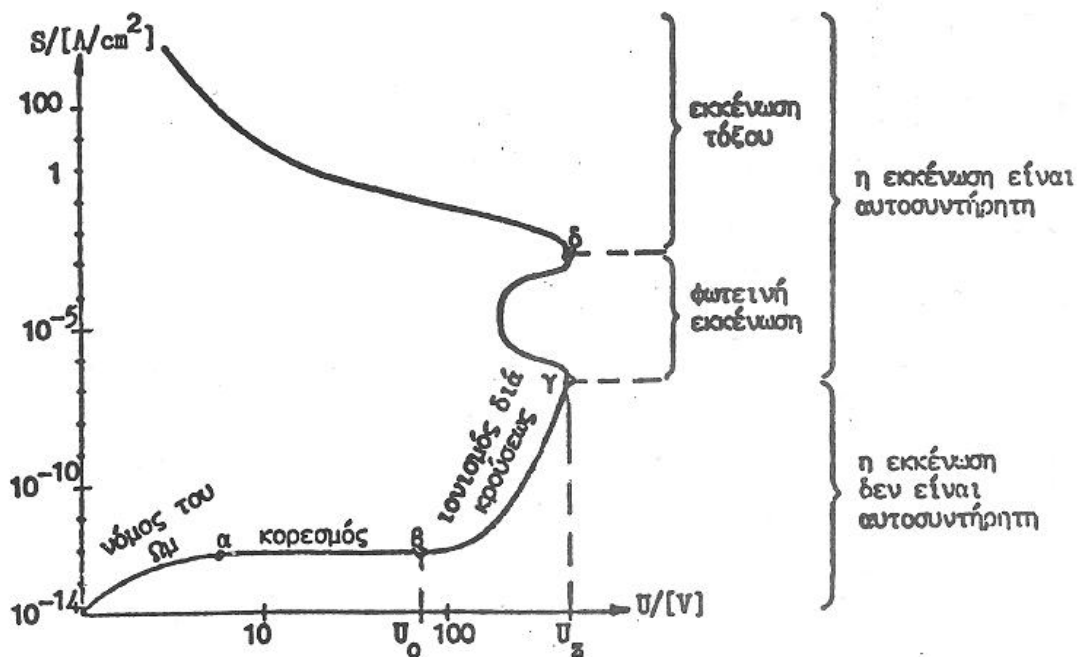
όπου p η πίεση του αερίου και d η απόσταση των ηλεκτροδίων. Η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης για τον αέρα στο ομογενές πεδίο δίνεται στο σχήμα 1.3-2.

Από τις μετρήσεις που έχουν γίνει για την ερμηνεία των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά τη διάσπαση των αερίων μονωτικών, έχει ιδιαίτερη σημασία η χαρακτηριστική “ρεύματος - τάσης”, κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενες τάσεις υπό κανονικές συνθήκες (20° C, 760 Torr). Η χαρακτηριστική αυτή δίνεται προσεγγιστικά στο σχήμα 1.3-3 για την πυκνότητα ροής (S), ανάλογα με την ενεργό τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (U). Στην χαρακτηριστική αυτή επισημαίνονται οι διάφορες περιοχές ανάλογα με το είδος της εκκένωσης.



Σχήμα 1.3-2: $U_z=f(p \cdot d)$ για τον αέρα

Ο μηχανισμός διάσπασης μεγάλων διακένων αποδίδεται στη δημιουργία διαδοχικών οχετών. Στην περίπτωση αυτή δεν ισχύει ο νόμος του Paschen. Η θεωρία της διάσπασης με διαδοχικούς οχετούς βασίζεται στον ιονισμό, που εκδηλώνεται αρχικά στην περιοχή της ανόδου, με αποτέλεσμα να προκαλείται πρακτικά μείωση της απόστασης του διακένου και να διευκολύνεται η εκδήλωση διαδοχικών οχετών, ανάλογα με τη μορφή του πεδίου και την απόσταση των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 1.3-3: Χαρακτηριστική “τάσης - πυκνότητας ροής” των αερίων υπό κανονικές συνθήκες, κατά G. Oberdorffer

- U_0 : αρχική τάση
- U_z : τάση έναυσης
- S : πυκνότητα ροής

1.4 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών

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

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

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

2)Τη κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών

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

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

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

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

α)οι απώλειες Joule

β)οι απώλειες Coulomb

γ)οι μερικές εκκενώσεις

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 **δενδροειδή** και την **ηλεκτρομηχανική**)

γ)η ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση)

δ)η θερμοχημική διάτρηση

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

1.4.1.1 Η θερμική διάτρηση

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

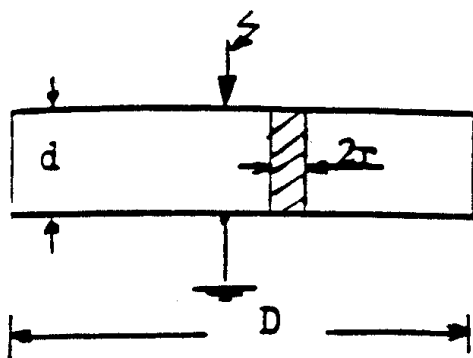
Ο σχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 , όποτε έχουμε (κατά τη σχέση 1.2.4-1) :

$$\sigma_1 = \sigma_o e^{\beta\theta} \quad (1.4.1.1-1)$$

Με την προϋπόθεση σταθερότητας (A) του σχετού διάτρησης (σχήμα 1.4.1.1-1) και ειδική αγωγιμότητα σ_1 , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \sigma_o e^{\beta\theta} A}{d} \quad (1.4.1.1-2)$$

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



Σχήμα 1.4.1.1-1: Απλοποιημένη παράσταση του σχετού διάτρησης λόγω απωλειών Joule του στερεού μονωτικού.

D:διάμετρος δοκιμίου

δ: πάχος του μονωτικού

2r: διάμετρος του σχετού διάτρησης

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

$$P = P_a + C_o(d\theta/dt) \quad (1.4.1.1-3)$$

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

$$P_a = 2\pi r d \kappa \theta \quad (1.4.1.1-4)$$

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:

$$\frac{U^2 \sigma_o e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi r d \kappa \theta \quad (1.4.1.1-5)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δυο 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_o) δίνεται όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι από τη διαφόριση ως προς e , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης 1.4.1.1-5, έχουμε:

$$\frac{\beta U_o^2 \sigma_o e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi r d \kappa \quad (1.4.1.1-6)$$

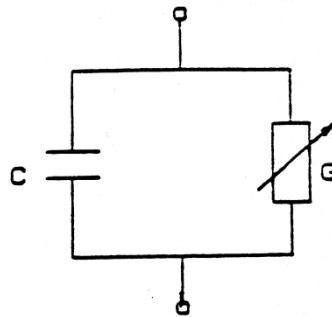
Από τις σχέσεις 1.4.1.1-5 και 1.4.1.1-6 φαίνεται ότι:

$$\beta\theta = 1 \quad (1.4.1.1-7)$$

$$\text{και } U_o = d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_o r}} \quad (1.4.1.1-8)$$

Την αύξηση απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_o μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα 1.4.1.1-2, όπου (συγκριτικά προς το ισοδύναμο κύκλωμα του ομοιογενούς μονωτή: σχήμα 1.2.3-2, η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μια μεταβλητή αγωγιμότητας G .

Η διάτρηση στην τιμή U_o συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει, λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ_o σε σ_1 : σχέση 3.1.1-1, μια οριστική τιμή G_{max} .



Σχήμα 1.4.1.1-2: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού υλικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule.

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

G_o : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή

G_{max} : αγωγιμότητα για τη διάτρηση

C : χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή

1.4.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

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

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

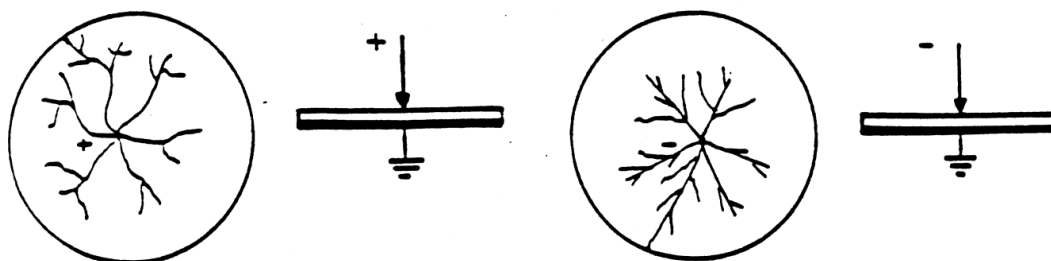
- α) αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις (όπως στα αέρια μονωτικά), ή
- β) μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή
- γ) συνδυασμό των δυο παραπάνω περιπτώσεων.

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

Η **δένδροειδής** 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 τη θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μια διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγωγίμη σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 1.4.1.2-1 δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη (ανάλογα με την πολικότητα της τάσης) για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (ηλεκτρόδια ακίδα – πλάκα).

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

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



Σχήμα 1.4.1.2-1: Προς επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη.

Η διάτρηση υπό μορφή οχető (η ηλεκτρομηχανική διάτρηση) οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από ότι τη δένδροειδή 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 μς. Η εικόνα, που παρουσιάζει το υλικό είναι κυρίως το αποτέλεσμα μιας ακαριαίας εξάσκησης δυνάμεων, στην περιοχή όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα μεγάλη (μηχανική τάση, υπό την επίδραση των δυνάμεων του πεδίου).

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις έχει διαπιστωθεί, ότι πάνω από μια μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης $U_{\text{κmin}}$, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, συμβαίνει η διάτρηση με μια κρούση υπό μορφή οχető, αν και η τιμή της πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης. Το φαινόμενο έχει αποδοθεί στην απότομη μεταβολή της πεδιακής έντασης, λόγω της οποίας δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα την ηλεκτρομηχανική διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ του αρνητικού ηλεκτροδίου και των θετικών φορέων, που συγκρατούνται στο πλέγμα των μορίων.

Λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας για την ηλεκτρική διάτρηση και επειδή τα στερεά μονωτικά είναι και μονωτές θερμότητας (παράγραφος 1.2.7), μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμότητα που απάγεται μόλις πριν από τη διάτρηση είναι αμελητέα. Κατά τη σχέση επομένως 1.4.1.1-3 και για έναν οχető διατομής $A = \pi r^2$ (κατά το σχήμα 1.4.1.1-1) ισχύει μόλις προ της διάτρησης ότι:

$$U_n^2 \sigma_2 \frac{A}{d} = \sigma_o \frac{d\theta}{dt} \quad (1.4.1.2-1)$$

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

Αν υποθέσουμε ότι, λόγω του μικρού διατιθέμενου χρόνου είναι $d\theta/dt = \theta/T_\delta$, όπου T_δ ο χρόνος για την ηλεκτρική διάτρηση, τότε από τη σχέση 1.4.1.2-1 έχουμε:

$$U_n = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_o \theta}{\sigma_2 A T_\delta}} \quad (1.4.1.2-2)$$

Για τη διάτρηση στη μέγιστη τιμή $U_{\text{κn}}$ μιας κρουστικής τάσης ισχύει αντίστοιχα:

$$\hat{U}_{\text{κn}} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_o \theta}{\sigma_2 A T_s}} \quad (1.4.1.2-3)$$

όπου T_s η διάρκεια του μετώπου της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν μια ικανοποιητική ερμηνεία σε πειράματα, που έχουν γίνει. Πράγματι, όσο αυξάνει ο χρόνος T_s μίας κρουστικής τάσης, τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή (βλέπετε πίνακα 1.4.1.2-1). Κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση ισχύει περίπου η αναλογία $U_N = f(1/\sqrt{T_\delta})$ (βλέπετε σχήμα 1.4.1.2-2)

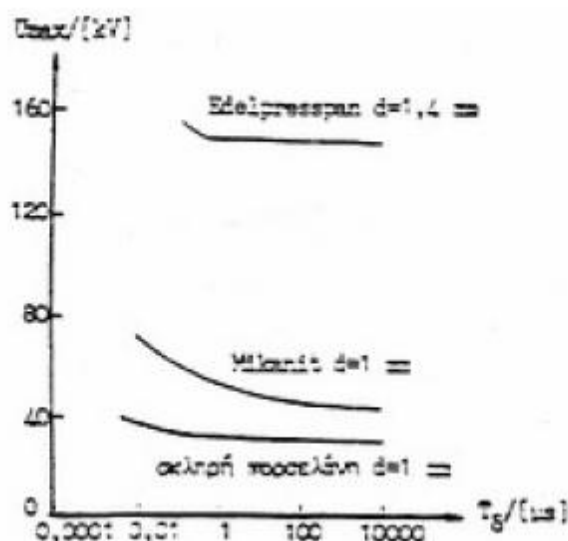
d [mm]	κρουστική τάση		\hat{U}_k 50% [kV]	Περιοχή τιμών \hat{U}_k για τη διάσπαση [kV]
	μορφή [μs]	πολικότητα		
1	1,2/50	θετική	80	78.....90
	1,2/50	αρνητική	86	81.....95
	10/200	θετική	74	69.....78
	10/200	αρνητική	77	71.....79
	25/2500	Θετική	66	63.....69
	25/2500	αρνητική	68	65.....70
2	1,2/50	θετική	135	126.....151
	1,2/50	αρνητική	148	132.....165
	10/200	θετική	74	69..... 80

Πίνακας 1.4.1.2-1: Τιμές της τάσης διάσπασης του στερεωτικού μονωτικού pertinax H1270 (πάχους 1 mm & 2 mm) κατά την καταπόνηση του με διάφορες μορφές κρουστικών τάσεων σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών.

Διάμετρος δοκιμίων: 150 mm

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα

Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: R=0,9 mm

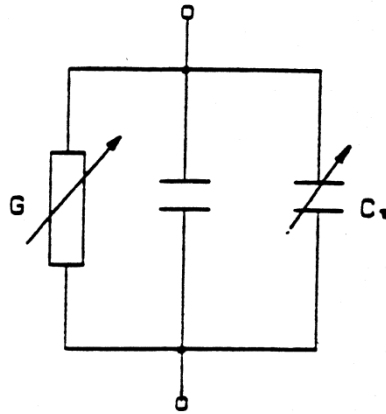


Σχήμα 1.4.1.2-2: Διάσπαση διαφόρων στερεών μονωτικών σε σχέση με το χρόνο καταπόνησης

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

U_{max} : η τιμή της εφαρμοζόμενης εναλλασσόμενης τάσης

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



Σχήμα 1.4.1.2-3: Ισοδύναμο κύκλωμα στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα.

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

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

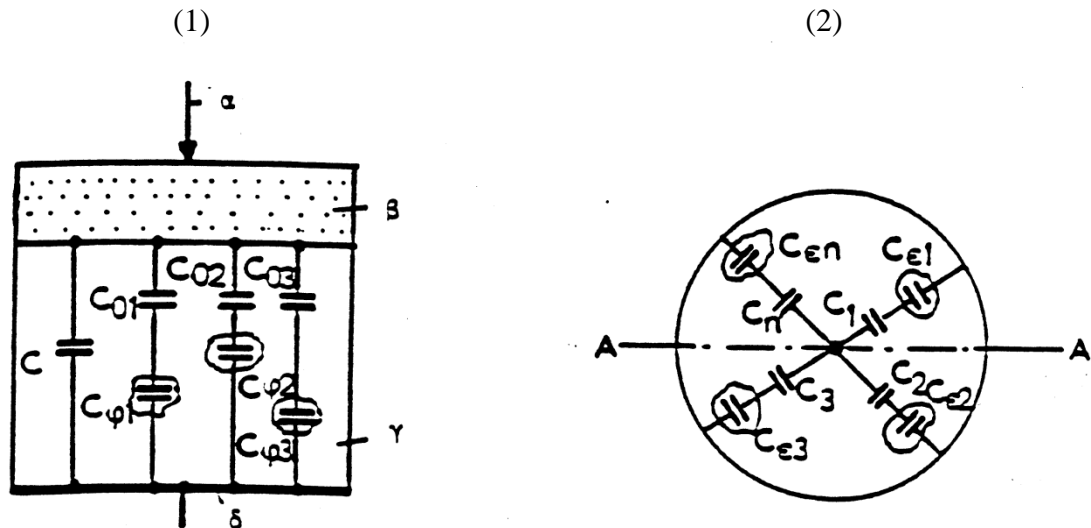
Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μια κρίσιμη για το υλικό τιμή σ_2 , η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα (σχήματος 1.4.1.2-3), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_{π} (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C .

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

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

1.4.1.3.1 Γενικά περί μερικών εκκενώσεων

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (εσωτερικές μερικές εκκενώσεις), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνεια του (εξωτερικές εκκενώσεις). Μια μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίνεται στο σχήμα 1.4.1.3.1-1. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές $C_{\varepsilon 1} \dots C_{\varepsilon n}$ και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές $C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$. Οι πυκνωτές $C_1 \dots C_n$ και $C_{on} \dots C_{on}$ παριστάνουν αντίστοιχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (κάθε ένας από αυτούς δίνει την ολική χωρητικότητα δυο 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 1.4.1.3.1-1: Μια μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχή σε στερεό μονωτικό εντός μονωτικού ελαίου

1) Τομή A-A της διάταξης πειραματισμού:

α: ηλεκτρόδιο ακίδα

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

γ: στερεό μονωτικό

δ: ηλεκτρόδιο πλάκα

2) Κάτοψη της διάταξης πειραματισμού:

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

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

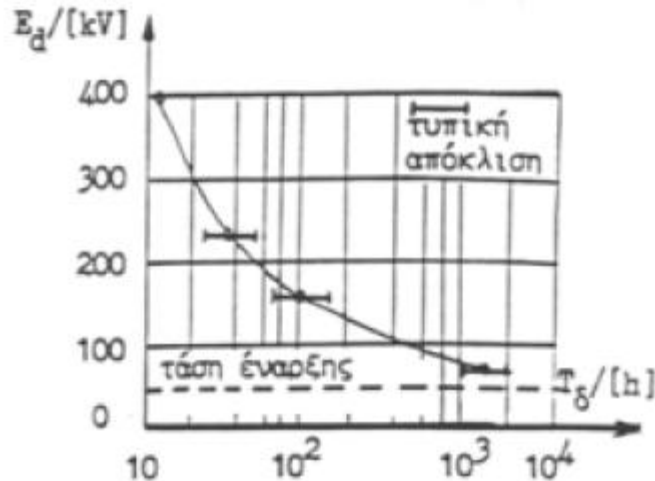
C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

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

$C_{o 1} \dots C_{o n}$: πυκνωτές του “υγιούς” τμήματος του στερεού μονωτικού.

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

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού. Στο σχήμα 1.4.1.3.1-2 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



Σχήμα 1.4.1.3.1-2 : Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχος 0,125mm, λόγω μερικών εκκενώσεων
 Αριθμός δοκιμών: 10 ανά σημείο μέτρησης.
 T_d : χρόνος διάσπασης

1.4.1.3.2) Η τεχνητή γήρανση

Κατά την καταπόνηση ενός στέρεου 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 στέρεου μονωτικού δεν ανταποκρίνεται βέβαια στην πραγματική κατάσταση, που δημιουργείται με τη πάροδο του χρόνου (όταν το υλικό εργάζεται υπό ονομαστικά μεγέθη στο δίκτυο), δίνει όμως την δυνατότητα ανίχνευσης των παραγόντων διάσπασης, που τελικά δεν μπορεί να είναι διαφορετικοί από τους πραγματικούς.

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

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

$$\mu_s = \frac{U_s}{U} \quad (1.4.1.3.2-1)$$

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

Κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ισχύει αντίστοιχα:

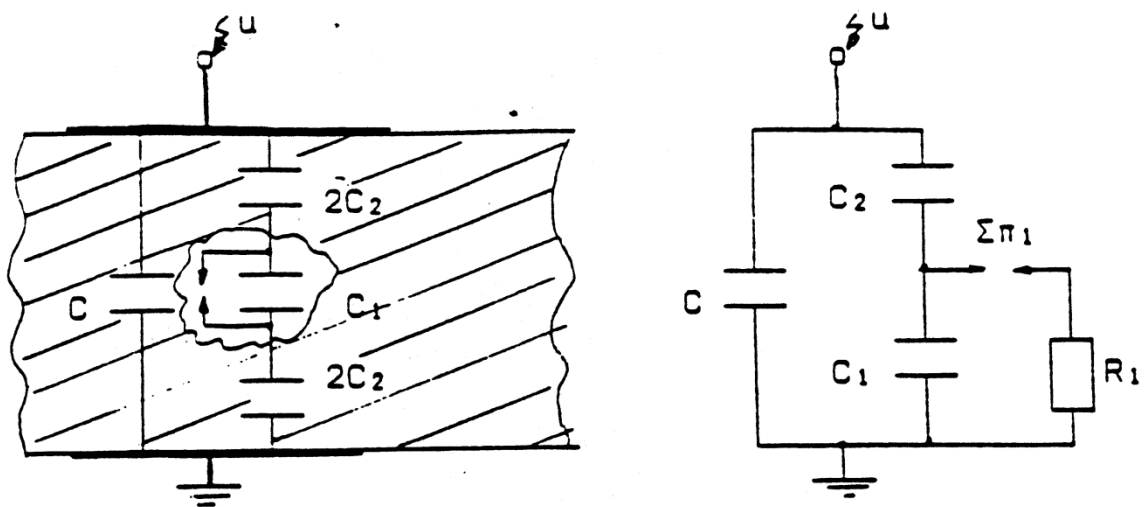
$$\mu_o = \frac{\hat{U}_{ks}}{\hat{U}_k} \quad (1.4.1.3.2-2)$$

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

1.4.1.3.3) Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων

Όπως είναι γνωστό, με τη γέφυρα Schering μέτρα κανείς το σύνολο απωλειών ενός μονωτικού υλικού ή μιας διάταξης υψηλής τάσης, δηλαδή της απώλειες αγωγιμότητας, πόλωσης και εκείνης λόγω εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων. Όταν άρχισε να γίνεται αντιληπτό το φαινόμενο της γήρανσης των μονωτικών υλικών εμφανίστηκε πρώτη μέθοδος ανίχνευσης των μερικών εκκενώσεων. Πρόκειται για την μέθοδο Callender, η οποία είναι παραλλαγή της γέφυρας Schering και με την οποία κατορθώθηκε η εξουδετέρωση των παράσιτων χωρητικοτήτων του κυκλώματος μέτρηση κατά τον 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 στο ισοδύναμο κύκλωμα (σχήμα 1.4.1.3.3-1), γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου.



Σχήμα 1.4.1.3.3-1: Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του κατά Gemant και Philipoff

α: σχηματική παράσταση

β: ισοδύναμο κύκλωμα

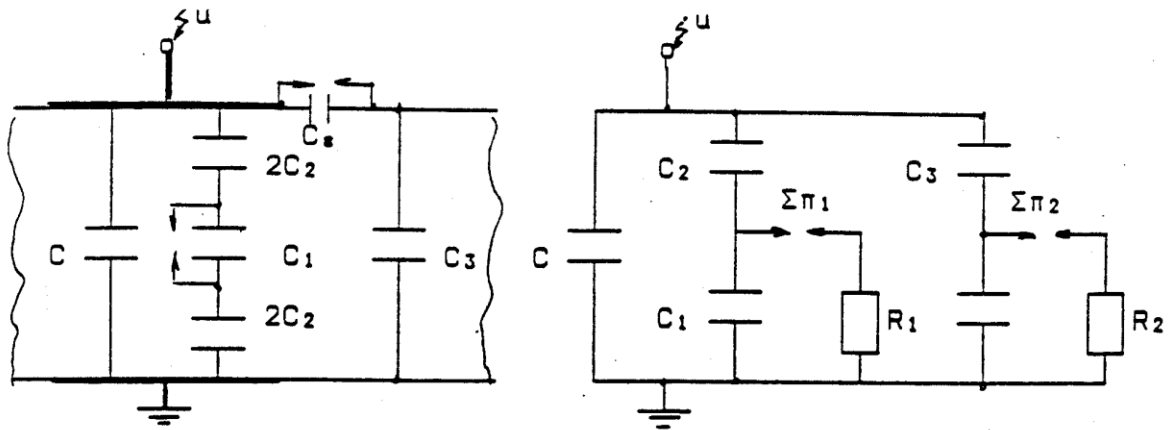
C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας

C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου “υγιούς τμήματος” του στερεού μονωτικού

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

Στο σχήμα 1.4.1.3.3-2 έχει συμπληρωθεί το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο και για τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση χωρητικότητας, η οποία επιταχύνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C_1) & του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (C_s). Με τον τρόπο αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου “υγιούς τμήματος” του μονωτικού (C_2 & 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_2).



Σχήμα 1.4.1.3.3-2: Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στέρεου μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θάση διαταραχή.

α: σχηματική παράσταση

β: ισοδύναμο κύκλωμα

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας

C_2 : χωρητικότητα της επιφανειακής θάσης διαταραχής

C_3 : χωρητικότητα του υπόλοιπου “υγιούς τμήματος” του στερεού μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υπόλοιπου “υγιούς τμήματος” του επιφανειακού φιλμ

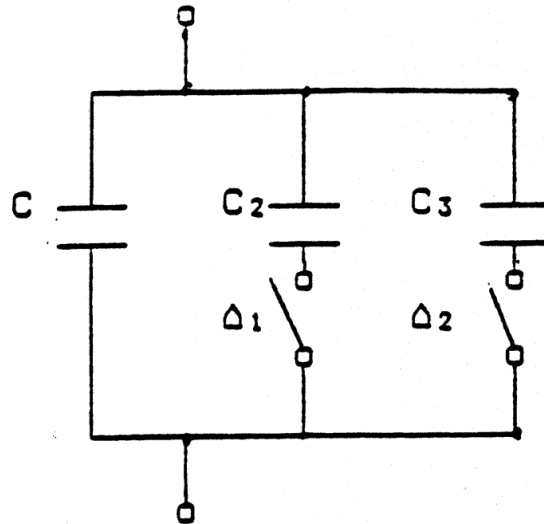
R_1 : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma_{\pi 1}$

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

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη. Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα 1.4.1.3.3-3.

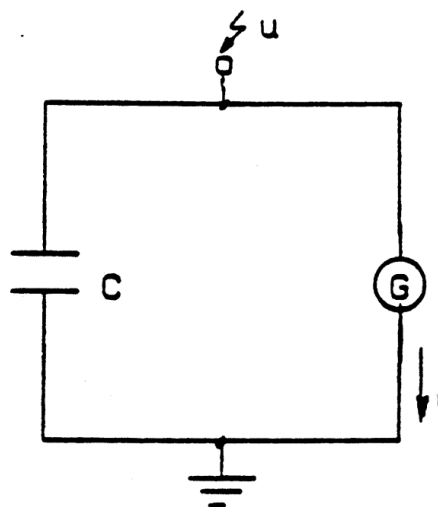
Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπ όψη η

αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φουσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κ.λ.π. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει



Σχήμα 1.4.1.3.3-3 :Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff)
 C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
 C₂: χωρητικότητα του υγιούς τμήματος στον όγκο του μονωτικού
 C₃: χωρητικότητα του υγιούς τμήματος στην επιφάνεια του μονωτικού
 Δ₁ και Δ₂: διακόπτες που όταν κλείνουν συμβολίζουν την διάσπαση αντίστοιχα των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων

επίσης μια ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 1.4.1.3.3-4). Σύμφωνα με αυτό, οι θέσεις διαταραχής αποδίδονται ως μια γεννήτρια μερικών εκκενώσεων G. Έτσι όταν διεγείρεται η γεννήτρια G συμβαίνει αύξηση του δυναμικού στους ακροδέκτες της διάταξης.

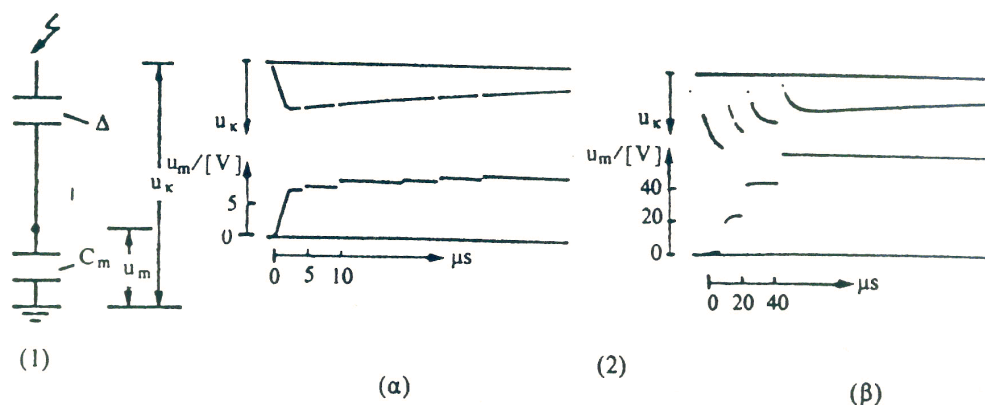


Σχήμα 1.4.1.3.3-4: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann
 C: ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
 G: γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

1.4.1.3.4 Παραδείγματα ερμηνείας παλμογραφημάτων των μερικών εκκενώσεων μέσω των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Στο σχήμα 1.4.1.3.4-1 δίνεται απλοποιημένα το κύκλωμα για τη μέτρηση των μερικών εκκενώσεων. Σύμφωνα με αυτό δοκίμια στερεών μονωτικών πάχους 1 mm (Δ) κατά DIN 7735, καταπονούνται με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 μ s, υπό διάταξη ηλεκτροδίων “ακίδα - πλάκα” (με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9 mm). Το παλμογράφημα (α) αφορά τη γήρανση του βακελίτη και το παλμογράφημα (β) τη διάτρηση του pertinax. Η διακεκομμένη γραμμή, που έχει σχεδιαστεί στο παλμογράφημα (α), δείχνει την ιδανική συμπεριφορά όταν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις.

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι, μετά από μια τιμή $U_K \approx 45$ kV (όπου U_K η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται κατά τη γήρανση επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρεί στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 1.4.1.3.4-2).



Σχήμα 1.4.1.3.4-1: Τυπικά παλμογραφήματα κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών

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

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

(α) γήρανση: (τιμή πεδίου 1,11 MV/cm, $U_K = 77,5$ kV, $C_m=210$ nF, υλικό: βακελίτης)

(β) διάτρηση: (τιμή πεδίου 1,20 MV/cm, $U_K = 85$ kV, $C_m=210$ nF, υλικό: pertinax)

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



Σχήμα 1.4.1.3.4-2: Αλλαγή της μοριακής δομής στην επιφάνεια του μονωτικού pertinax κατά την εκδήλωση επιφανειακού δένδριτη (μετά από πολλές κρούσεις 10/200 μs, μέγιστης τιμής 75 kV)

Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται ως ακολούθως:

Από το παλμογράφημα της γήρανσης σχήμα 1.4.1.3.4-1α, φαίνεται ότι εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού, τα οποία προκαλούνται, κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4.1.3.3-2 (ή του σχήματος 1.4.1.3.1-1), από τη σταδιακή διάσπαση διαφόρων θέσεων διαταραχής (C_1 , C_2). Μπορούμε να υποθέσουμε ότι στην περίπτωση αυτή ισχύει για την σχέση καταμερισμού μεταξύ χωρητικότητας του δοκιμίου C και του πυκνωτή μέτρησης C_m :

$$U_m(t) = \frac{C + \Delta C}{C_m} = u_\kappa(t) \quad (1.4.1.3.4-1)$$

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

1.4.1.3.5 Μια ερμηνεία του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων μέσω των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων κατά Gemant και Philipoff, μέσω σύγκρισης της ηλεκτρικής καταπόνησης με τη μηχανική καταπόνηση

Για την ερμηνεία της μηχανικής καταπόνησης των στερεών υλικών χρησιμοποιούνται μηχανικά πρότυπα, που βασίζονται σε δυο γραμμικά στοιχεία: το ελαστικό και το ιξώδες. Το πρώτο εκφράζει τη μεταβολή της τροπής λόγω της ακαριαίας επιβολής (ή αφαίρεσης) φορτίου σε ένα στερεό υλικό και το δεύτερο τη διαχρονική μεταβολή της τροπής. Το ελαστικό στοιχείο θεωρείται ότι είναι ένα ελατήριο και το ιξώδες η αντίσταση ροής ενός συνεκτικού υγρού, το οποίο γεμίζει το χώρο ενός κυλίνδρου κάτω από ένα έμβολο, κατά τρόπο ώστε να διαρρέει από ένα μικρό κενό μεταξύ κυλίνδρου & εμβόλου ή από μια τρύπα στο έμβολο. Από την σύνδεση των δυο παραπάνω στοιχείων σε σειρά προκύπτει το μοντέλο Maxwell (σχήμα 1.4.1.3.5-1α), για το οποίο ισχύει:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} E + \frac{\tau}{\kappa} \quad (1.4.1.3.5-1)$$

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

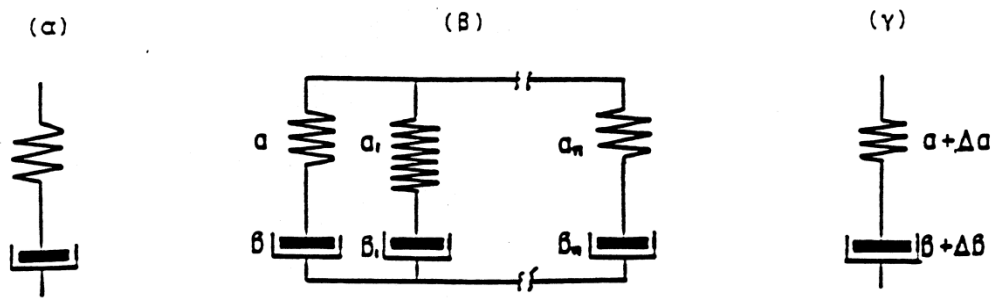
$$\frac{dL}{dt} = a \frac{dF}{dt} + \beta F \quad (1.4.1.3.5-2)$$

όπου a και β σταθερές του υλικού. Η παραπάνω σχέση αφορά τη συμπεριφορά του ομοιογενούς στέρεου, γιατί οι τιμές a και β δεν μεταβάλλονται με την καταπόνηση. Ένα μοντέλο για τη συμμετοχή των θέσεων ανομοιογένειας σε ένα στερεό υλικό φαίνεται ότι μπορεί να γίνεται με την παράλληλη σύνδεση πολλών μοντέλων Maxwell (σχήμα 1.4.1.3.5-1β και γ), ένα των οποίων αντιστοιχεί στο βασικό υλικό και τα υπόλοιπα στις επιμέρους ανομοιογένειες του. Η μεταβολή μήκους κατά dL στο μοντέλο αυτό μπορεί να δοθεί από την παραπάνω σχέση, με την εισαγωγή των συντελεστών A και B του υλικού, όπου:

$$A = a + \Delta a \quad (1.4.1.3.5-3)$$

$$\text{και } B = \beta + \Delta\beta \quad (1.4.1.3.5-4)$$

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



Σχήμα 1.4.1.3.5-1: Στοιχείο Maxwell (α) και μηχανικό μοντέλο του ανομοιογενούς στερεού υλικού (β): αναλυτικό μοντέλο και (γ): απλουστευμένο μοντέλο

Κατά αναλογία προς τη σχέση 1.4.1.3.5-2 έχουμε επομένως:

$$\frac{dL}{dt} = (a + \Delta a) \frac{dF}{dt} + (\beta + \Delta\beta) F \quad (1.4.1.3.5-5)$$

Από την αναλογία μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών μεγεθών κατά G. Oberdorffer (πίνακας 1.4.1.3.5), μπορούμε να καταλήξουμε (κατά την εφαρμογή μιας ηλεκτρικής τάσης στο υλικό) στη σχέση:

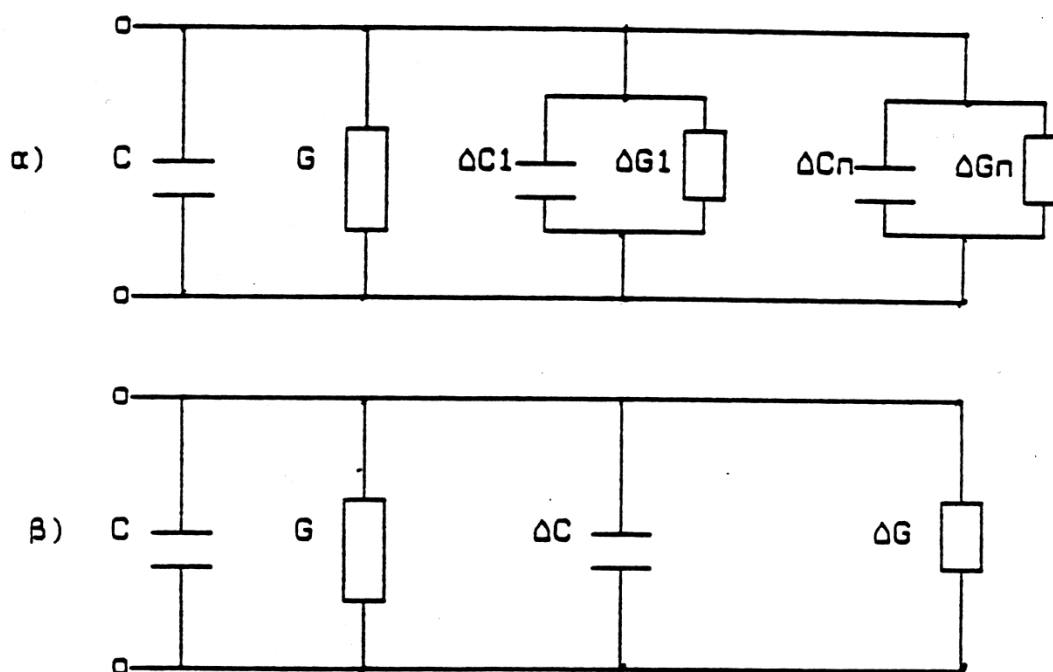
$$\frac{dQ}{dt} = (C + \Delta C) \frac{dU}{dt} + (G + \Delta G) U \quad (1.4.1.3.5-6)$$

από την οποία φαίνεται ότι ο συντελεστής $C + \Delta C$ είναι η χωρητικότητα του ανομοιογενούς υλικού όταν έχει μονωτικές ιδιότητες, ενώ ο $G + \Delta G$ η αγωγιμότητα του όταν έχει αγώγιμες ιδιότητες. Το ομοιογενές στερεό μονωτικό δίνεται από την παραπάνω σχέση $\Delta C = 0$ και $\Delta G = 0$, ενώ για $C + \Delta C = 0$ το στερεό υλικό είναι μια ωμική αντίσταση. Από τη σχέση 1.4.1.3.5-6 καταλήγει κανείς στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4.1.3.5-2, το οποίο φαίνεται ότι ταυτίζεται (ως προς την ερμηνεία για την αύξηση της χωρητικότητας κατά την εκδήλωση των ανομοιογενειών

του μονωτικού) με εκείνο των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff (σχήμα 1.4.1.3.3-2).

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

Πίνακας 1.4.1.3.5: Αναλογίες μεταξύ ηλεκτρομαγνητικών και μηχανικών μεγεθών



Σχήμα 1.4.1.3.5-2: Ισοδύναμο κύκλωμα για την αύξηση της χωρητικότητας λόγω ανομοιογενειών στο στερεό μονωτικό υλικό

α: πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα

β: απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα

1.4.1.4 Η θερμοχημική διάτρηση

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη (σχέσεις 1.2.5-3 και 1.2.5-4). Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως η ενέργεια έξοδο των ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων από το πλέγμα των μορίων είναι μικρότερη.

Η διάτρηση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος του στερεού μονωτικού μέσου, ονομάζεται θερμοχημική. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά

ότι, μετά από μια τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης. Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής και δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta U_1 = U_\theta - U_{\theta_{\varepsilon\text{min}}} = d\delta E \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_\theta r}} \quad (1.4.1.4-1)$$

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

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

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

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

1.4.1.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 1.4.1 τα φαινόμενα προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών μπορούν να αποδοθούν σε τέσσερις βασικούς παράγοντες αποσταθεροποίησης των μορίων (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb, μερικές εκκενώσεις, και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος), οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως παράγοντες γήρανσης και διάτρησης. Οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται στη πράξη με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού.

1.4.1.5.1 Ο συνδυασμός της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσω με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης

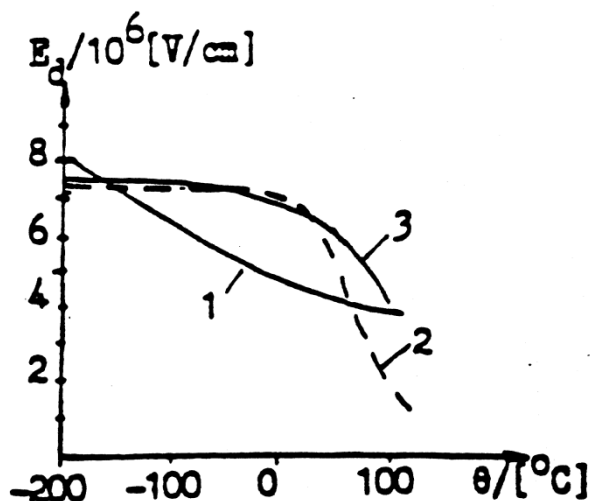
Όπως είναι γνωστό, οι διεθνείς προδιαγραφές προσδιορίζουν τα ανώτερα όρια υπερθέρμανσης των ηλεκτρολογικών κατασκευών υψηλής τάσης, βάσει των οποίων καθορίζεται το ονομαστικό ρεύμα (δοκιμή υπερθέρμανσης ή ανύψωσης

θερμοκρασίας). Έτσι, έχει γίνει αποδεκτό κάποιο όριο θέρμανσης, που είναι π.χ. της τάξης των $(40 \div 50)^{\circ}\text{C}$ στο λάδι, λόγω του οποίου, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η οριακή θερμοκρασία λειτουργίας να είναι της τάξης των $(80 \div 90)^{\circ}\text{C}$. Όταν όμως συντρέχουν λόγοι μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής από άλλους παράγοντες, η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως το ρόλο τους, γιατί:

- 1) Αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα (σχέση 1.2.4-1).
- 2) Διευκολύνεται η άσκηση δυνάμεων Coulomb, γιατί η δομή στο πλέγμα των μορίων των πολυμερών υλικών γίνονται ασθενέστεροι.
- 3) Ενισχύεται ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων, λόγω μεγαλύτερης ευκινησίας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κυρίως στις φυσαλίδες (σχέση 1.2.4-2).

Έτσι, αυξάνει διαχρονικά η $\text{tg}\delta$ και μειώνεται η διάρκεια ζωής του στερεού μονωτικού και των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών γενικότερα. Η καταπόνηση που υφίσταται το στερεό μονωτικό, με τη θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου του φαίνεται ότι προκαλεί μείωση της τάσης για την θερμική διάτρηση, λόγω αύξησης της αγωγιμότητας του. Επίσης, στα στερεά μονωτικά εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις κατά τη δένδροειδή ή την ηλεκτρομηχανική διάτρηση (παράγραφος 1.4.1.2). Γι αυτό η αύξηση της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου φαίνεται ότι προκαλεί μείωση και της τιμής της τάσης για την διηλεκτρική διάτρηση.

Στο σχήμα 1.4.1.5.1-1 δίνονται παραδείγματα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής διαφόρων μονωτικών υλικών, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, η οποία μπορεί να ερμηνευτεί από τον παραπάνω συνδυασμό της επίδρασης της θερμότητας του περιβάλλοντος με τους υπόλοιπους παράγοντες γήρανσης και διάσπασης. Επίσης, η χαρακτηριστική $\text{tg}\delta=f(\theta)$ του σχήματος 1.2.3-3 είναι ένα τυπικό παράδειγμα του αποτελέσματος της θερμικής καταπόνησης των στερεών μονωτικών.

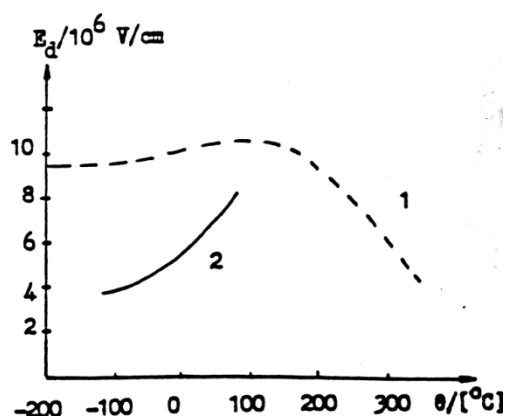


Σχήμα 1.4.1.5.1-1: Μείωση διηλεκτρικής αντοχής σε στερεά μονωτικά κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου.

- 1 : Βακελίτης
- 2 : Πολυαιθυλένιο
- 3 : Πολυστετυρόλη

Υπάρχουν όμως περιπτώσεις στερεών μονωτικών υλικών όπου η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος δεν οδηγεί σε μείωση διηλεκτρικής αντοχής, τουλάχιστον σε κάποια περιοχή τους. Στο σχήμα 1.4.1.5.1-2 φαίνονται δυο παραδείγματα που ανήκουν στην περίπτωση αυτή. Μια ερμηνεία, για τη διαφορετική

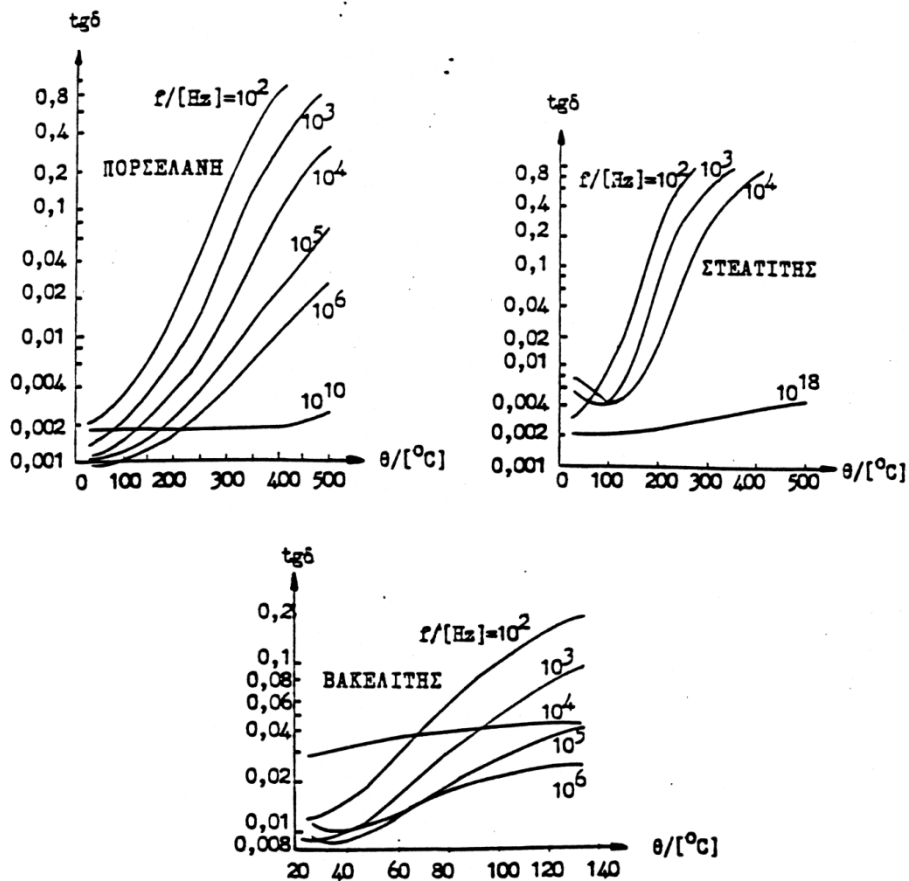
αυτή ανασύνδεση της μίκας (Glimmer) και του χαλαζία (Quarz) μπορεί να αποδοθεί σε αλληλεξουδετέρωση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.



Σχήμα 1.4.1.5.1-2: Διηλεκτρική αντοχή σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
(1) της μίκας
(2) του κρυστάλλου χαλαζία

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

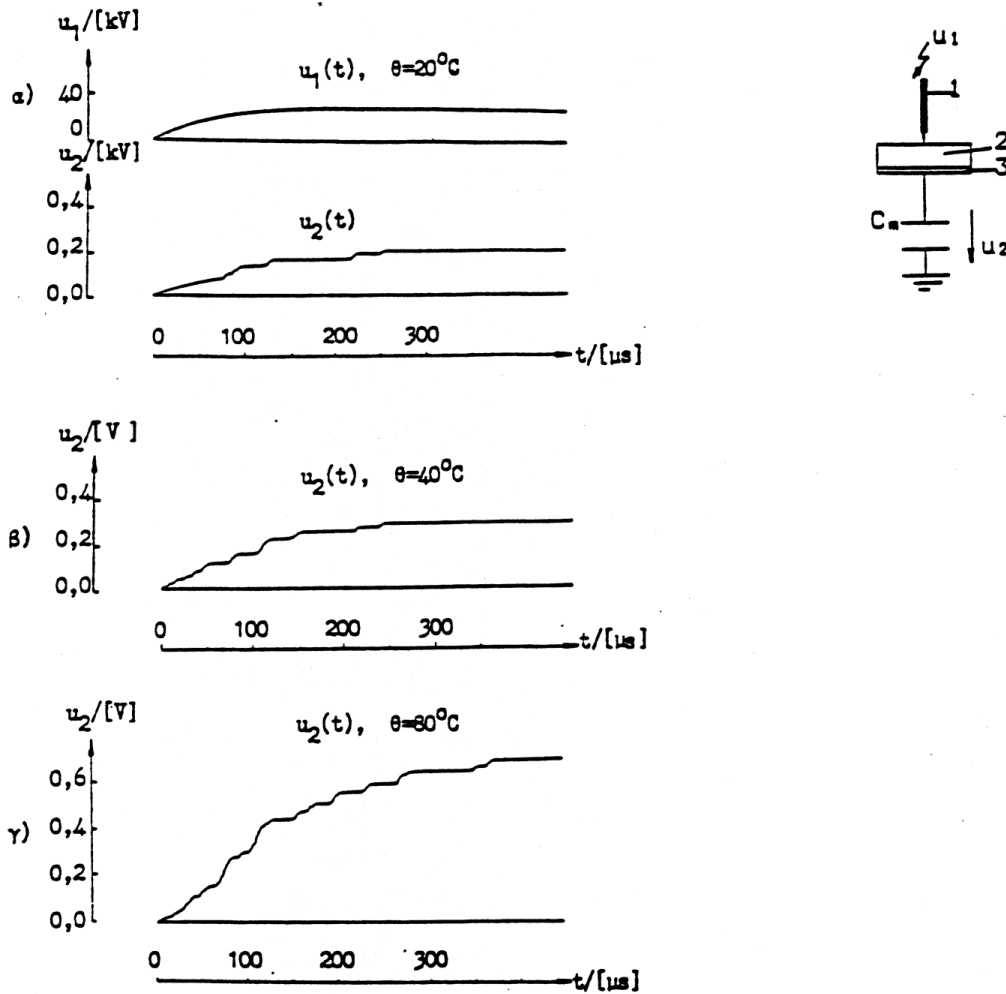
Οι χαρακτηριστικές $\text{tg}\delta=f(\theta)$ διαφόρων στερεών μονωτικών (σχήμα 1.4.1.5.1-3), κατά τη βιβλιογραφία, δείχνουν επίσης την αύξηση των συνολικών απωλειών με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, λόγω των οποίων μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή.



Σχήμα 1.4.1.5.1-3: $tg\delta=f(\theta)$ σε διάφορα στερεά μονωτικά.

Η μείωση των απωλειών που παρατηρείται σε κάποια περιοχή ορισμένων χαρακτηριστικών του σχήματος 1.4.1.5.1-3, κατά την αύξηση της θερμοκρασίας και της συχνότητας, μπορεί ίσως να αποδοθεί σε επανασύνδεση των παραγόμενων φορέων.

Πρόσφατες μετρήσεις με κρουστικές τάσεις σε στερεά μονωτικά, κατά την καταπόνηση τους σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (20°C , 40°C & 80°C), οδηγούν επίσης στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας (και επομένως η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής) είναι δεδομένη, όσο αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτό φαίνεται πολύ παραστατικά στα παλμογραφήματα του σχήματος 1.4.1.5.1-4, όπου οι μερικές εκκενώσεις γίνονται ισχυρότερες όταν αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 1.4.1.5.1-4: Αύξηση των μερικών εκκενώσεων λόγω μεγαλύτερες θερμοκρασία στο περιβάλλον μέσο.

α) $\theta = 20^\circ C$, β) $\theta = 40^\circ C$ και γ) $\theta = 80^\circ C$.

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

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

3: Ηλεκτρόδιο πλάκα (διαμέτρου 150 mm).

Μορφή κρουστικής τάσης: 250/2500 μs .

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

u_1 : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης

u_2 : άλματα δυναμικού σε ένα πυκνωτή μέτρηση $C_m = 1000 \mu F$ σε σειρά με το δοκίμιο

$C_m = 1000 \mu F$ σε σειρά με το δοκίμιο

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

Οι μερικές εκκενώσεις θεωρείται ότι είναι ο κυρίαρχος παράγοντας γήρανσης και διάσπασης των μονώσεων στην πράξη. Μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών 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 1.4.1.1 θεωρήθηκε ότι η θερμική διάτρηση αρχίζει σε μια 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 λήφθηκε υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις, που εμφανίζονται λόγω της μικρότερης διηλεκτρικής αντοχής, στην ανομοιογένεια του υλικού.

Προς κατανόηση της συμμετοχής των θέσεων διαταραχής, στον όγκο και στην επιφάνεια του στερεού μονωτικού, έχει σχεδιαστεί στο σχήμα 1.4.1.5.2-1 η χαρακτηριστική $E=f(x)$ του στερεού μονωτικού, όταν αυτό καταλαμβάνει όλο το χώρο μεταξύ ηλεκτροδίων και δεν έχει ανομοιογένειες στον όγκο του, συγκριτικά με εκείνη του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού με περιβάλλον μέσο το μονωτικό λάδι. Παρατηρούμε ότι στις θέσεις ανομοιογένειας, όπου η αγωγιμότητα είναι αυξημένη έναντι του υπόλοιπου “υγιούς” τμήματος του συνδυασμού των δυο μονωτικών (στερεό μονωτικό – μονωτικό λάδι), η πεδιακή ένταση έχει μεγαλύτερες τιμές από ότι αν δεν υπάρχουν ανομοιογένειες.

Τη συμμετοχή αυτή των ανομοιογενειών στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής μπορεί να λάβει κανείς υπ' όψη σαν να πρόκειται για αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας του υπόλοιπου “υγιούς τμήματος” του μονωτικού από την πεδιακή ένταση (σχέση 2.5-4).

Για το ανομοιογενές στερεό μονωτικό έχουμε επομένως κατά τη σχέση 1.4.1.1-3:

$$\frac{U^2 \sigma_o e^{\beta \theta} A}{(1 - \delta E)^2 d} = \kappa 2\pi r d\theta + C_o \frac{d\theta}{dt} \quad (1.4.1.5.2-1)$$

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

$$\frac{U_{\theta c}^2 \sigma_o e^{\beta \theta} A}{(1 - \delta E)^2 d} = \kappa 2\pi r d\theta \quad (1.4.1.5.2-2)$$

από την οποία προκύπτει ότι:

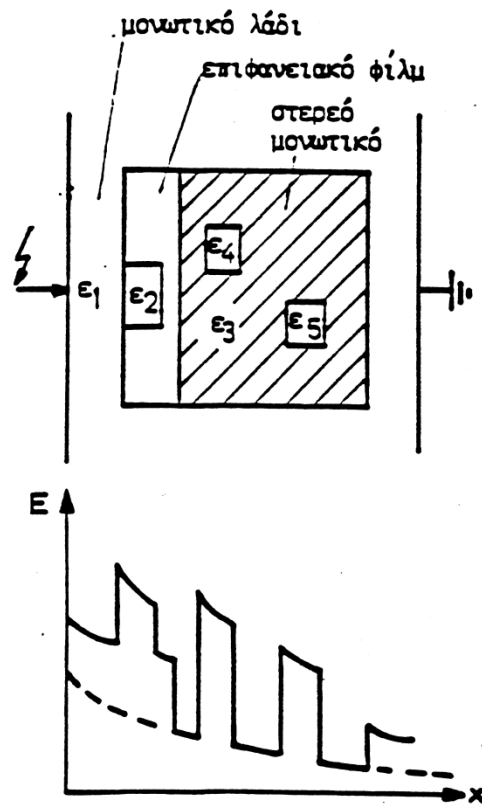
$$\theta = \frac{U_{\theta c}^2 \sigma_o e^{\beta \theta} A}{d\kappa 2\pi r^2 (1 - \delta E)^2 d} \quad (1.4.1.5.2-3)$$

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

$$1 = \frac{U_{\theta c}^2 \sigma_o e^{\beta \theta} A}{d\kappa 2\pi r^2 (1 - \delta E)^2 d} \quad (1.4.1.5.2-4)$$

Από τις σχέσεις 1.4.1.5.2-3 και 1.4.1.5.2-4 φαίνεται ότι $\beta \theta = 1$ και επομένως η οριακή τιμή της τάσης διάσπαση είναι:

$$U_{\theta\epsilon\min} = d(1 - \delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_o r}} \quad (1.4.1.5.2-5)$$



Σχήμα 1.4.1.5.2-1: Αύξηση της πεδιακής έντασης στις θέσεις ανομοιογενειών στερεού μονωτικού.
 ϵ_1 έως ϵ_5 : διηλεκτρικές σταθερές
 ϵ_1 : Μονωτικό λάδι
 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 το χώρο μεταξύ ηλεκτροδίων και δεν έχει ανομοιογένειες στον όγκο του.
 ——— Χαρακτηριστική με θέσεις διαταραχής και περιβάλλον μονωτικό λάδι.

Σε συνδυασμό με τη σχέση 1.4.1.1-8, η μείωση της τάσης για τη θερμική διάτρηση (ΔU_1), λόγω συμμετοχής των μερικών εκκενώσεων είναι:

$$\Delta U_1 = U_\theta - U_{\theta\epsilon\min} = d\delta E \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_o r}} \quad (1.4.1.5.2-6)$$

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

Αν πάρει κανείς υπ' όψη στη σχέση 1.4.1.2-1 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις στη θέση όπου εκδηλώνεται η μερική εκκένωση (σχέση 1.2.4-6), τότε, με την παραδοχή ότι η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι πρακτικά μηδενική ισχύει:

$$\frac{u^2 \sigma A}{(1 - \delta E)^2} = C_o \frac{d\theta}{dt} \quad (1.4.1.5.2-7)$$

και για την διάτρηση στην τιμή U_{ns} , λόγω του συνδυασμού μεταξύ των δυνάμεων Coulomb και των μερικών εκκενώσεων, είναι :

$$U_{ns} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_o \theta}{\sigma A T_\delta}} \quad (1.4.1.5.2-8)$$

Η τάση διάτρησης μειώνεται δηλαδή κατά την τιμή ΔU_2 :

$$\Delta U_2 = U_n - U_{ns} = \sqrt{d} \delta E \sqrt{\frac{C_o \theta}{\sigma A T_\delta}} \quad (1.4.1.5.2-9)$$

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

Αν πάρει κανείς υπ' όψη στη σχέση 1.4.1.4-1 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας λόγω των μερικών εκκενώσεων (σχέση 1.2.4-6), τότε η θερμική τάση ανατροπής U_{xs} , λόγω του συνδυασμού της θερμότητας του περιβάλλοντος με τις μερικές εκκενώσεις, θα είναι:

$$U_{xs} = (1 - \delta E) \sqrt{\frac{\alpha k \theta}{\sigma_o}} \quad (1.4.1.5.2-10)$$

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

$$\Delta U_3 = U_x - U_{xs} = \delta E \sqrt{\frac{\alpha k \theta}{\sigma_o}} \quad (1.4.1.5.2-11)$$

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

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

1) Το θερμικό φαινόμενο: μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις.

II) Την ηλεκτρομηχανική διάτρηση κατά την τελευταία κρούση (m) στην τιμή U_{κ} ή πολύ κοντά σε αυτή.

Το θερμικό φαινόμενο θεωρείται ότι είναι μια τεχνητή γήρανση (βλέπετε παράγραφο 1.4.1.3.2) μέχρι προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω του οποίου το υλικό απέκτησε σε μια περιοχή του (όπου εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις) την ειδική αγωγιμότητα:

$$\sigma = \sigma_o e^{\beta_m \theta_m} \quad (1.4.1.5.2-12)$$

όπου θ_m η θερμοκρασία και β_m ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτώνται από τη τιμή U_{κ} , τη συχνότητα των κρούσεων (ο 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^η κρούση (όπως στην περίπτωση β, που αναφέρθηκε παραπάνω). Κατά αντιστοιχία επομένως προς την σχέση 1.4.1.2-1 ισχύει:

$$u^2 \frac{\sigma_o e^{\beta_m \theta_m} A}{(1-\delta E)^2 d} = C_m \frac{d\theta}{dt} \quad (1.4.1.5.2-13)$$

όπου C_m η θερμοχωρητικότητα, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, η οποία εξαρτάται επίσης από τους παράγοντες, που προαναφέρθηκαν για τις τιμές β_m και θ_m . Έτσι, για τη διάσπαση στην τιμή U_{κ} έχουμε αντίστοιχα με τη σχέση 3.1.2-2):

$$U_{\kappa} = (1-\delta E) \sqrt{d \frac{C_m \theta_m}{\sigma A T_s}} \quad (1.4.1.5.2-14)$$

όπου T_s ο χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης.

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

$$\Delta u = \delta E \sqrt{d \frac{C_m \theta_m}{\sigma A T_s}} \quad (1.4.1.5.2-15)$$

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

$$(m-1)a\hat{U}_{\kappa}^2 + \gamma\hat{U}_{\kappa}^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai} + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{ai}}{(1-\delta E)^2} + \beta\hat{U}_{\kappa}^2 \quad (1.4.1.5.2-16)$$

όπου:

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

$\gamma \hat{U}_\kappa^2$: το μέρος της ενέργειας, που παρέχεται στο μονωτικό μόλις προ της διάτρησης κατά τη m^{ns} κρούση,
 $\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai}$: η θερμότητα, που μεταδίδεται μέχρι προ της εφαρμογής m^{ns} κρούση,
 $\sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{ai}}{(1-\delta E)^2}$: η θερμότητα, που έχει παραμείνει στη συγκεκριμένη θέση προ της διάτρησης,
 $\beta \hat{U}_\kappa^2$: η ενέργεια κατά τη διάτρηση

Επειδή κατά τη διάτρηση είναι:

$$\frac{W_{ai}}{(1-\delta E)^2} + \beta \hat{U}_\kappa^2 = \gamma \hat{U}_\kappa^2 \quad (1.4.1.5.2-17)$$

από την σχέση 1.4.1.5.2-16 έπεται ότι:

$$(m-1)a\hat{U}_\kappa^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai} + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{ai}}{(1-\delta E)^2} \quad (1.4.1.5.2-18)$$

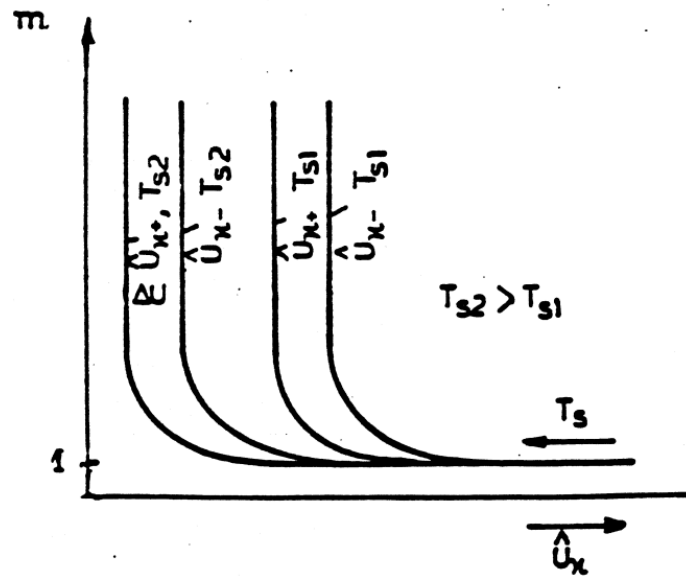
άρα έχουμε:

$$\mu = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai}}{a\hat{U}_\kappa^2} + \frac{\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{ai}}{a\hat{U}_\kappa^2 (1-\delta E)^2} \quad (1.4.1.5.2-19)$$

Δηλαδή:

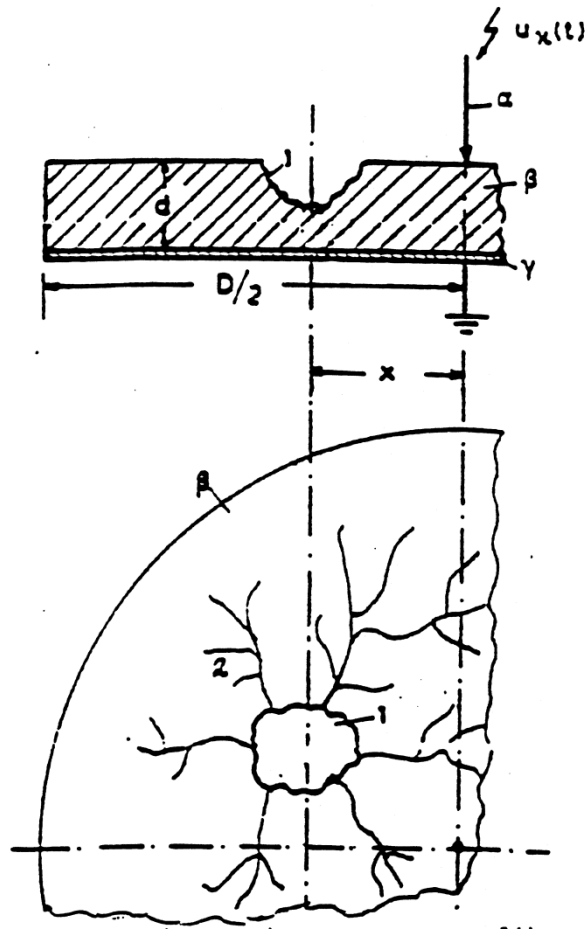
$$\mu = 1 + \frac{\alpha_1}{\hat{U}_\kappa^2} + \frac{\alpha_2}{\hat{U}_\kappa^2} = 1 + \frac{\alpha_3}{\hat{U}_\kappa^2} \quad (1.4.1.5.2-20)$$

όπου α_1 και α_3 συντελεστές, που εξαρτώνται από την τιμή U_κ , τη συχνότητα των κρούσεων, τη μορφή της τάσεις και το πάχος του υλικού, το οποίο είναι καθοριστικό για την τιμή της πεδιακής έντασης. Αν λάβει κανείς υπ' όψη τη σημασία της πολικότητας της ακίδας και τη μείωση του χρόνου διάσπασης με την αύξηση της διάρκειας του μετώπου της κρουστικής τάσης, τότε οι χαρακτηριστικές $m=f(\hat{U}_\kappa)$ έχουν τη μορφή, που δίνεται στο σχήμα 1.4.1.5.2-2.



Σχήμα 1.4.1.5.2-2: Χαρακτηριστικές $m=f(\hat{U}_k, T_s)$
 m : Αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση
 T_s : Χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης
 \hat{U}_k : Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

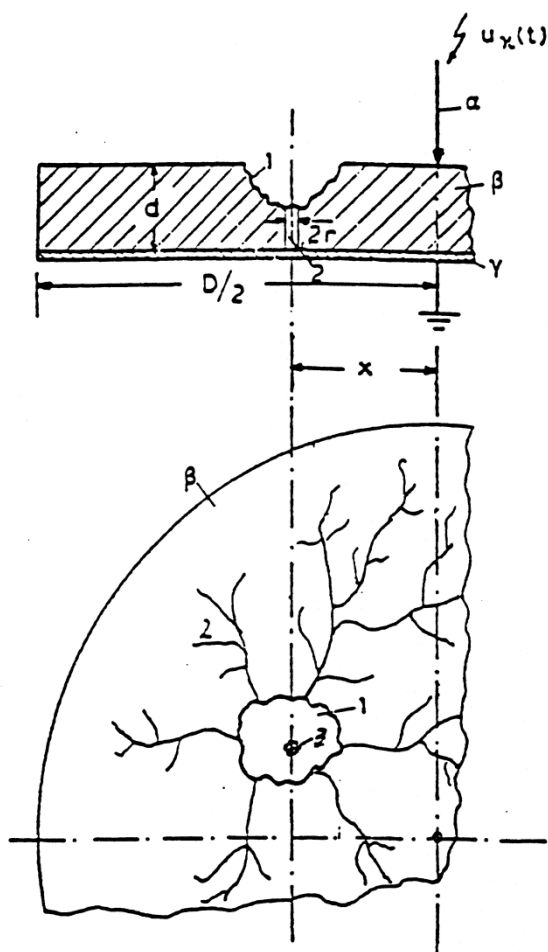
Κατά τη καταπόνηση του στερεού μονωτικού, που αναλύθηκε προηγούμενος θεωρήθηκε, ότι η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη για τη διάτρηση με μια κρούση. Από τα πειράματα, που έχουν γίνει με κρουστικές τάσης της μορφής $1,2/50 \mu s$ σε τιμές U_k πλησίον της περιοχής διάτρησης (πίνακας 1.4.1.2-1), έχει διαπιστωθεί ότι, εκτός από τη θερμική καταπόνηση, δημιουργούνται μικρά θραύσματα στη θέση προσεχούς διάσπασης. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι στη περίπτωση αυτή συμμετέχουν στην τεχνίτη γήρανση του υλικού (από κρούση σε κρούση) και οι δυνάμεις Coulomb. Η εικόνα, την οποία παρουσιάζει το δοκίμιο κατά τη γήρανση δίνεται στο σχήμα 1.4.1.5.2-3 και ονομάζεται εικόνα επιφανειακών διαταραχών.



Σχήμα 1.4.1.5.2-3: Παράδειγμα εικόνας επιφανειακών διαταραχών κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών υλικών με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50 \mu\text{s}$, για τιμή U_k πλησίον της περιοχής για τη διάτρηση
 α: ακίδα ($R \approx 1 \text{ mm}$)
 β: στερεό μονωτικό
 γ: πλάκα
 1: κρατήρας
 2: σπήλαια

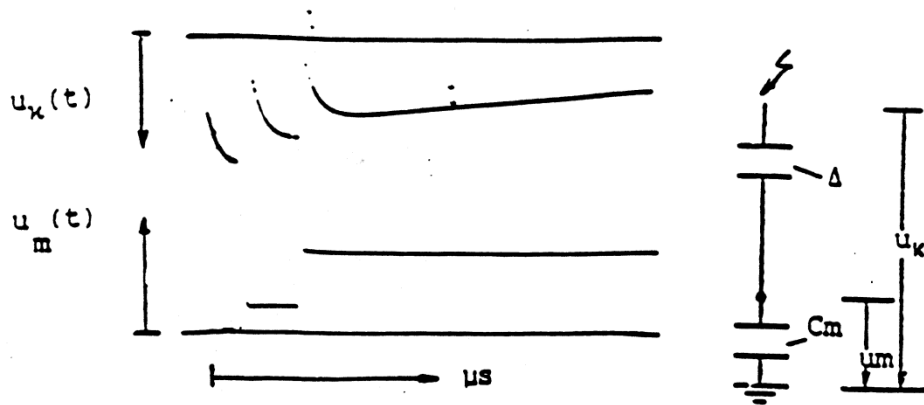
Πρόκειται για μια μόνιμη παραμόρφωση του υλικού, η οποία σχετίζεται με την εκδήλωση φωτεινής ακτινοβολίας (υπό μορφή δενδρίτη), που παρατηρεί κανείς κατά την πραγματοποίηση πειραμάτων. Τα σπήλαια & ο κρατήρας έχουν αποδοθεί στη θερμική καταπόνηση του μονωτικού, γιατί φαίνεται ότι είναι αποτέλεσμα κάποιας τήξης του υλικού στα ίχνη του επιφανειακού δενδρίτη. Τα θραύσματα, που προαναφέρθηκαν, δημιουργούνται κυρίως στη περιοχή του κρατήρα, τα οποία είναι και η θέση, όπου θα συμβεί και η διάτρηση. Πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχουν δείξει ότι η εικόνα επιφανειακών διαταραχών συρρικνώνεται όσο αυξάνει η διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης (υπό σταθερή τιμή U_k) η εικόνα επιφανειακών διαταραχών είναι π.χ. μεγαλύτερη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση της μορφής $1,2/50 \mu\text{s}$, ως προς εκείνη με κρουστική τάση $10/200 \mu\text{s}$. Έχει επίσης διαπιστωθεί, ότι η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών περιορίζεται, όσο μειώνεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων.

Όταν τελικά συμβεί η διάτρηση μετά από m κρούσεις, τότε παρατηρεί κανείς μια μικρή τρύπα διάτρησης (με διάμετρο μικρότερη από 0,1 mm, ως προέκταση του κρατήρα (σχήμα 1.4.1.5.2-4).

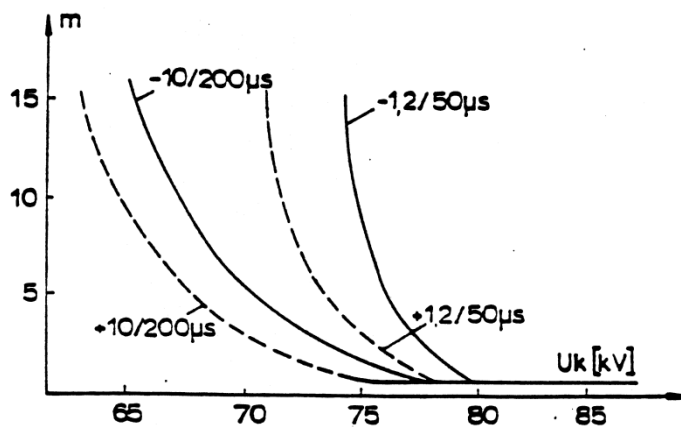


Σχήμα 1.4.1.5.2-4: Παράδειγμα της εικόνας διάτρησης μετά από την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών υλικών με κρουστική τάση της μορφής 1,2/50 μς, για τιμή U_k πλησίον της περιοχής για τη διάτρηση
 α : ακίδα ($R \approx 1$ mm)
 β : στερεό μονωτικό
 γ : πλάκα
 1: κρατήρας
 2: σπήλαια
 3: οπή διάτρησης

Στο σχήμα 1.4.1.5.2-5 δίνεται ένα παράδειγμα διάτρησης του βακελίτη (πάχους 1 mm) σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό διάταξη “ακίδα - πλάκα”, κατά την καταπόνηση του με κρουστική τάση της μορφής 10/200 μς, με μέγιστη τιμή πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση (πίνακας 1.4.1.2-1). Παρατηρεί κανείς ότι το παλμογράφημα αυτό είναι της ίδιας μορφής με εκείνο της ηλεκτρομηχανικής διάτρησης του σχήματος 1.4.1.3.4-1β. Επίσης, οι πειραματικές χαρακτηριστικές του σχήματος 1.4.1.5.2-6 (για το στερεό μονωτικό pertinax πάχους 1 mm) εξηγούνται ικανοποιητικά από τις θεωρητικές του σχήματος 1.4.1.5.2-2



Σχήμα 1.4.1.5.2-5: Διάτρηση του βακελίτη (πάχους 1 mm) με κρουστική τάση της μορφής 10/200μs.
 $U_k = 72 \text{ kV}$.



Σχήμα 1.4.1.5.2-6: $m = f(|\hat{U}_k|, T_s)$ για το στερεό μονωτικό pertinax.

Ηλεκτρόδια : ακίδα – πλάκα.

Δοκίμιο : pertinax πάχους 1 mm εντός μονωτικού ελαίου

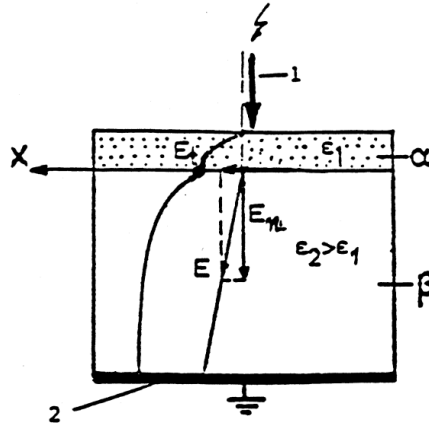
m : αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση

+ : θετική πολικότητα της ακίδας

- : αρνητική πολικότητα της ακίδας

Όπως δείχνεται στα σχήματα 1.4.1.5.2-3 και 1.4.1.5.2-4 ο κρατήρας και η τρύπα διάτρηση σχηματίζονται σε μια απόσταση x από την ακίδα (συνήθως μερικά mm), αν και η μέγιστη τιμή του πεδίου είναι στην κορυφή της ακίδας. Η ίδια παρατήρηση ισχύει για την τρύπα διάτρησης, όταν η διάτρηση συμβαίνει με μια μόνο κρούση. Αυτό φαίνεται ότι οφείλεται:

- στην στατιστικότητα του φαινομένου (είναι στατιστικά αδύνατο να βρίσκεται ακριβώς κάτω από την ίδια ακίδα η επικρατέστερη θέση διαταραχής), και
- σε πολύ μικρή απόσταση από την ακίδα μετακινούνται, υπό την επίδραση της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης οι ετερόνυμοι προς αυτήν ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς του επιφανειακού φιλμ, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρακτικά επέκταση του ίχνους της ακίδας (σχήμα 1.4.1.5.2-7).



Σχήμα 1.4.1.5.2-7: Επεξήγηση της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης στον καθορισμό του κρατήρα και γενικότερα της θέσης διάτρησης, κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50 μς και 10/200 μς
 1: ακίδα
 2: πλάκα
 α) επιφανειακό φιλμ
 β) στερεό μονωτικό

Η παραπάνω παρατήρηση για τη θέση της τρύπας διάτρησης ισχύει επίσης κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφής κρουστικής τάσης 25/2500 μς), καθώς και εκείνη με εναλλασσόμενη ή συνεχή τάση. Από έρευνες, που έχουν γίνει με τις παραπάνω μορφές τάσεις (με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9 mm ή 1 mm) δεν έχει διαπιστωθεί κατά την τεχνητή γήρανση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1 mm ή 2 mm) η εκδήλωση κρατήρα ή σπηλαίων, ούτε έχει παρατηρηθεί η εκδήλωση επιφανειακού δένδριτης (ανεξαρτήτως της τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης). Η διαφορά αυτή ως προς την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών, που παρουσιάζεται κατά την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις 1,2/50 μς και 10/200 μς, είναι μια σημαντική παρατήρηση, που έχει οδηγήσει (σε συνδυασμό με μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών) στο διαχωρισμό μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης στο στερεό μονωτικό τάσης.

1.4.1.5.3 Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

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

Αν θεωρηθεί π.χ. ότι πρόκειται για γήρανση του υλικού, τότε η καταπόνηση είναι κυρίως θερμική, όποτε από τις σχέσεις 1.4.1.1-3 και 1.22.4-2 έχουμε:

$$\frac{u^2 A}{d} \frac{e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2} = 2\pi r d\kappa + C_o \frac{d\theta}{dt} \quad (1.4.1.5.3-1)$$

όπου u η στιγμιαία τιμή της τάσης για τη διάτρηση και θ η διαφορά θερμοκρασίας ως προς το περιβάλλον. Από τη παραπάνω σχέση και την σχέση 1.4.1.1-8 ο χρόνος διάτρησης είναι:

$$t = \frac{C_o \beta}{2\pi r d \kappa} \int \frac{d\theta}{\left[\frac{U}{U_s}\right]^2 e^{\beta\theta} - \beta\theta} \quad (1.4.1.5.3-2)$$

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

$$\beta\theta \ll \left[\frac{U}{U_s}\right]^2 e^{\beta\theta-1} \quad (1.4.1.5.3-3)$$

τότε, από την σχέση 1.4.1.5.3-2 έχουμε:

$$t \approx \frac{C_o e}{2\pi r d \kappa \beta} \left[\frac{U_s}{U}\right]^2 \quad (1.4.1.5.3-4)$$

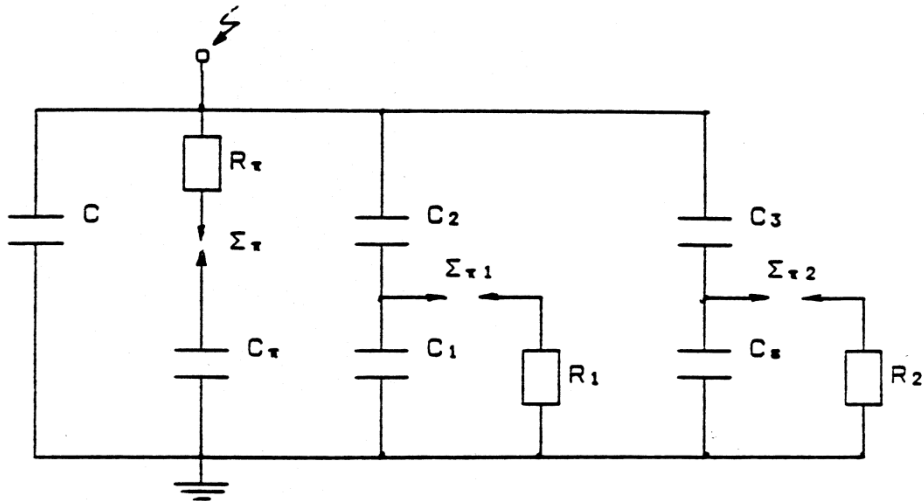
ή τελικά:

$$t = \frac{a}{U^2} \quad (1.4.1.5.3-5)$$

όπου a ένας συντελεστής του υλικού.

Η παραπάνω σχέση δίνει μια πιθανή ερμηνεία για τη διάτρηση στερεών μονωτικών, σε καταπονήσεις μικρής χρονικής διάρκειας. Πράγματι, η σχέση 1.4.1.5.2-10 για τη διάτρηση μετά από ένα αριθμό κρούσεων (βλέπετε χαρακτηριστικές των σχημάτων 1.4.1.5.2-2 και 1.4.1.5.2-6) φαίνεται ότι εναρμονίζεται με την σχέση 1.4.1.5.3-5, γιατί ο αριθμός των κρούσεων (m) σχετίζεται με τον χρόνο καταπόνησης.

Από πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχει προταθεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που αποδίδει ικανοποιητικά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση και τις μερικές εκκενώσεις (σχήμα 1.4.1.5.3-1). Όπως φαίνεται πρόκειται ουσιαστικά για μια παράλληλη σύνδεση ενός πυκνωτή C_π , προς το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff. Ο πυκνωτής αυτός εκφράζει την πόλωση του υλικού, λόγω της οποίας συμβαίνει η μηχανική τάνυση του από τις δυνάμεις του πεδίου. Η διαδρομή εκκένωσης εκφράζεται στην περίπτωση αυτή με τον σπινθηριστή Σ_π και την αντίσταση του τόξου R_π (υποτίθεται ότι ο Σ_π διασπάται ταυτόχρονα με τον πυκνωτή C_π). Για να αποδίδει το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα το συνδυασμό όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης (κατά τη μακροσκοπική θεωρία), φαίνεται τι θα πρέπει να γίνει η παράλληλη σύνδεση μιας μεταβλητής αγωγιμότητας, που θα εκφράζει τις θερμικές απώλειες (απώλειες Joule και ενίσχυσης τους από τις μερικές εκκενώσεις) και την καταπόνηση του υλικού από τη θερμότητα του περιβάλλοντος (σχήμα 1.4.1.5.3-2).



Σχήμα 1.4.1.5.3-1: Βελτίωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff, ώστε να αποδίδεται από αυτό η γήρανση και η ηλεκτρομηχανική διάτρηση.

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

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

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

C_z : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών

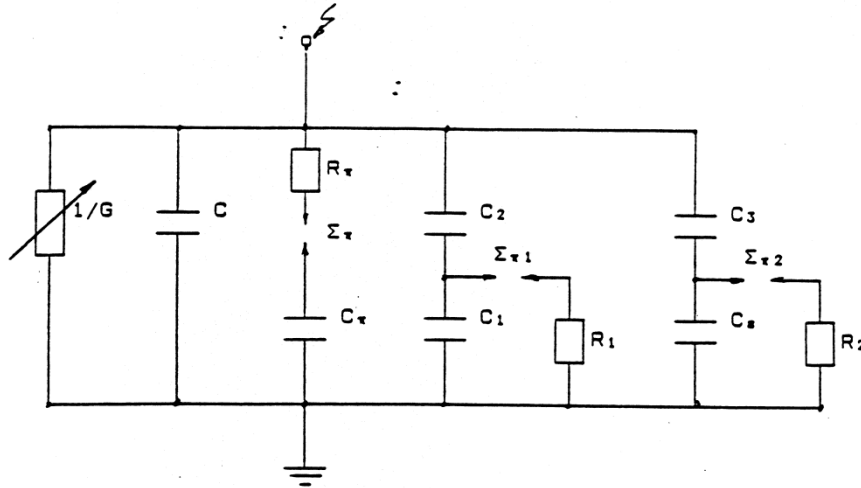
C_3 : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του επιφανειακού φιλμ.

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

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

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

R_π, Σ_π : Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του C_π (R_π , αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_π).



Σχήμα 1.4.1.5.3-2: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

C: Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C₁: Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών (κυρίως φυσαλίδες αερίων).

C₂: Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του στερεού μονωτικού.

C_z: Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών

C₃: 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.

R₁: Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_{π1}

R₂: Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_{π2}

R_π, Σ_π : Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του C_π (R_π, αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_π).

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

Στον πίνακα 1.4.1.5.3-1 δίνονται συνοπτικά οι βασικές περιπτώσεις συνδυασμού των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης, που εξετάστηκαν στην παράγραφο αυτή. Οι θεωρητικές σχέσεις του πίνακα 1.4.1.5.3-1 δεν δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού της τάσης διάτρησης (γιατί περιλαμβάνουν αρκετές άγνωστες τιμές, που πρέπει να βρεθούν με μετρήσεις), δίνουν όμως τη δυνατότητα κατανόησης των φαινομένων, όταν οι μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών συνδυάζονται με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής.

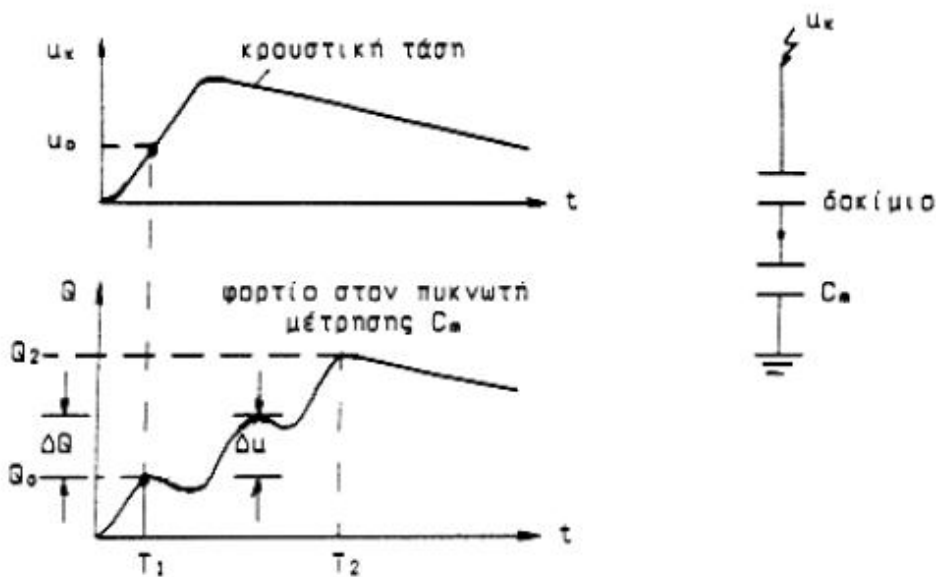
a/a	Παράγοντες που συμμετέχουν στην αλλαγή της μοριακής δομής	Θεμελιώδεις σχέσεις	Οριακή τιμή της τάσης για τη διάτρησης.
1	Συνδυασμός της θερμοκρασία του περιβάλλοντος με τους άλλους παράγοντες γήρανσης & διάτρησης	Η θερμότητα του περιβάλλοντος ενισχύει όλους τους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης	
2	Μερικές εκκενώσεις και απώλειες Joule	$1) \sigma = \frac{\sigma_o e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2}$ $2) \frac{\sigma_o e^{\beta\theta} A}{(1-\delta E)^2} = 2\pi r d \kappa \theta$	$u_{es} = d(1-\delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_o}}$ <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση:</p> $\Delta u_1 = dE \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_o}})$
3	Μερικές εκκενώσεις και απώλειες Coulomb	$1) \sigma = \frac{\sigma_o e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2}$ $2) \frac{u^2 \sigma A}{(1-\delta E)^2} = C_o \frac{d\theta}{dt}$	$u_{ns} = (1-\delta E) \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_o \theta}{\sigma A T_\delta}}$ <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση:</p> $\Delta u_2 = \delta E \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_o \theta}{\sigma A T_\delta}})$
4	Μερικές εκκενώσεις και θερμοκρασία του περιβάλλοντος	$1) u_x = \sqrt{a \frac{\kappa\theta}{\sigma}}$ $2) \sigma = \frac{\sigma_o e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2}$	$u_{xs} = (1-\delta E) \sqrt{a \frac{\kappa\theta}{\sigma}}$ <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση:</p> $\Delta u_3 = \delta E \sqrt{a \frac{\kappa\theta}{\sigma}})$
5	Συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων*	$\frac{u^2 e^{\beta\theta} A}{d(1-\delta E)^2} = 2\pi f \kappa \theta \left(\frac{d\theta}{dt}\right)$	Εξαρτάται κυρίως από τον παράγοντα που υπερισχύει.

Πίνακας 1.4.1.5.3-1: Βασικές σχέσεις μιας θεωρητικής ερμηνείας για τη γήρανσης και διάτρηση των στερεών μονωτικών.

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

1.4.1.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω των παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως π.χ. στο σχήμα 1.4.1.6-1 για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Με παρόμοιες σκέψεις, μπορεί κανείς να καθορίσει μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση με άλλες μορφές τάσεων, καθώς και με άλλα τετράπολα μέτρησης (συνήθως ωμική αντίσταση, αντί του πυκνωτή, ή συνδυασμός των δύο αυτών στοιχείων μέτρησης, σχήμα 1.4.1.6-2). Στο σχήμα π.χ. 6.1.6-3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



Σχήμα 1.4.1.6-1: Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

T_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

T_2 : Χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

Q_0 : Φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Q_2 : Φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

u_k : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

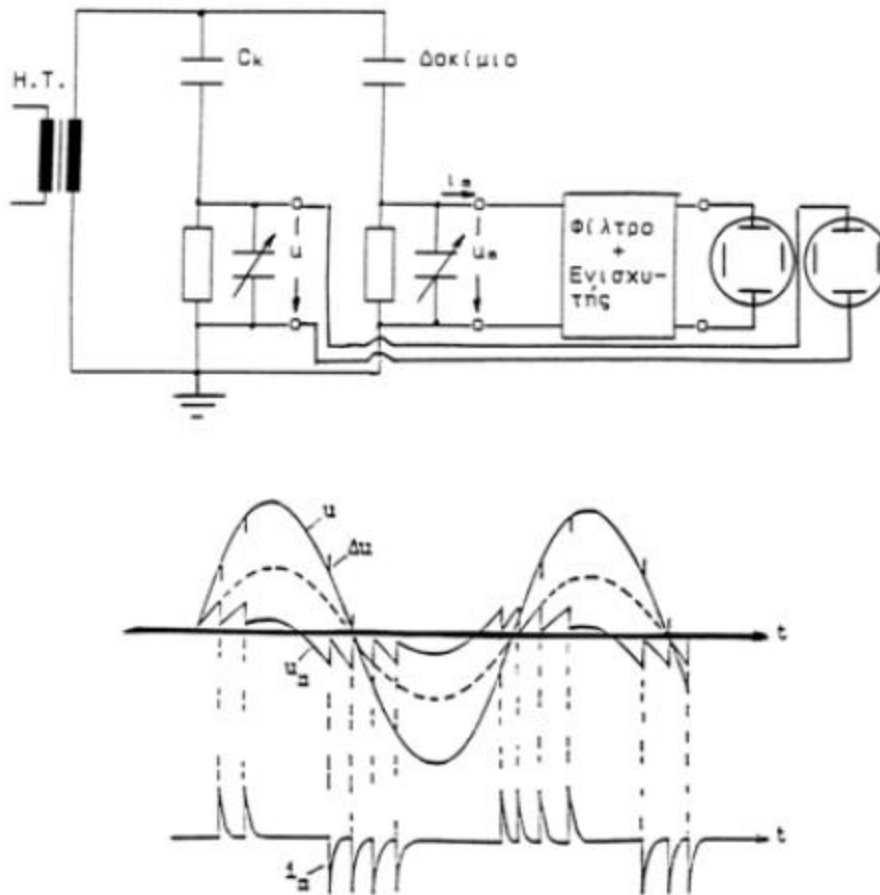
u_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή)

Δu : Άλμα δυναμικού

ΔQ : Αύξηση φορτίου

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως: η χαρακτηριστική $Q = f(|\hat{U}_k|)$, η χαρακτηριστική $u_0 = f(|\hat{U}_k|)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της τάσης, κλπ. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q = f(|\hat{U}_k|)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 1.4.1.6-4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών

μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50 μ s ή 10/200 μ s όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Στο σχήμα 1.4.1.6-5 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από πού φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90^η κρούση, ως προς τη 60^η. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών, εύκολα διαπιστώνεται, ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου Q στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις (θραύσματα) στην επιφάνεια του μονωτικού.



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

H.T.: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης

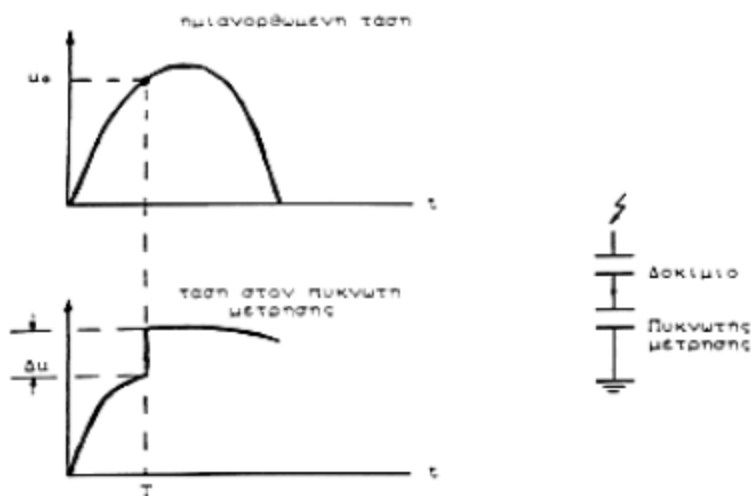
C_k: Πυκνωτής υψηλής τάσης

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

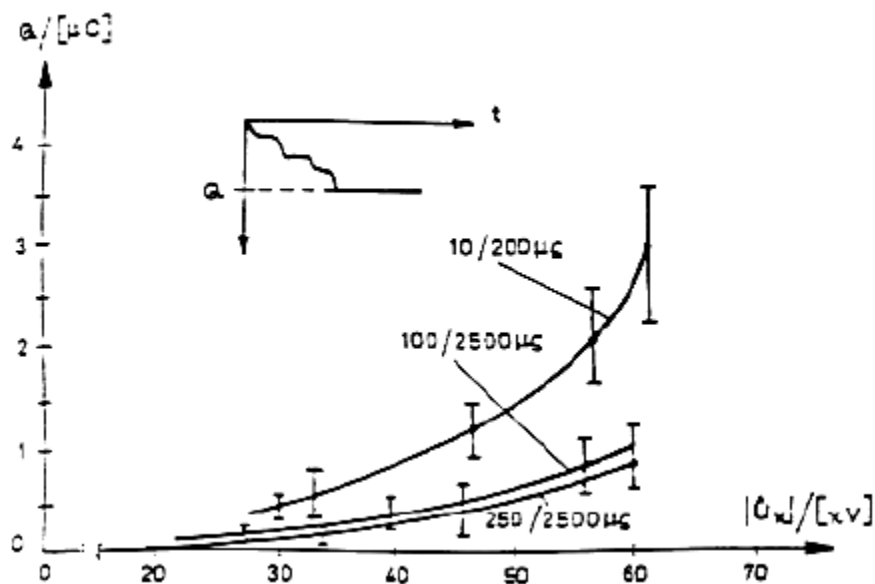
u_m: Στιγμαία τιμή της τάσης στο ωμικό-χωρητικό τετράπολο μέτρησης των μερικών εκκενώσεων

i_m: Στιγμαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων

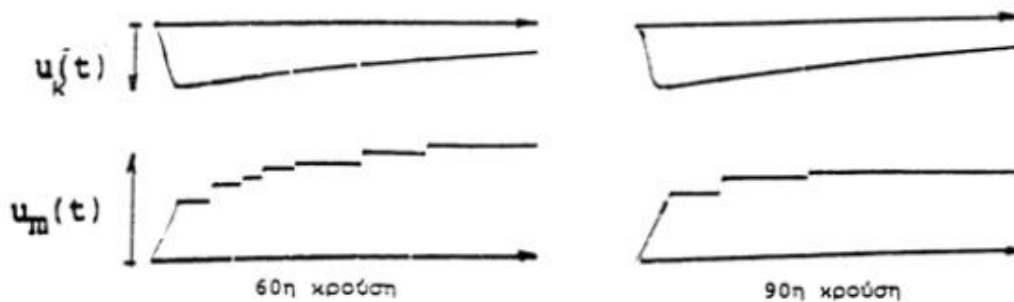
Δu: Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων



Σχήμα 1.4.1.6-3: Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης
 T_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων
 U_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμαιαία τιμή)
 Δu : άλμα δυναμικού



Σχήμα 1.4.1.6-4: Χαρακτηριστική $Q_2 = f(|\hat{U}_κ|)$ για τον βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs
 Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα πλάκα
 C_m : 1000nF



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

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

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

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

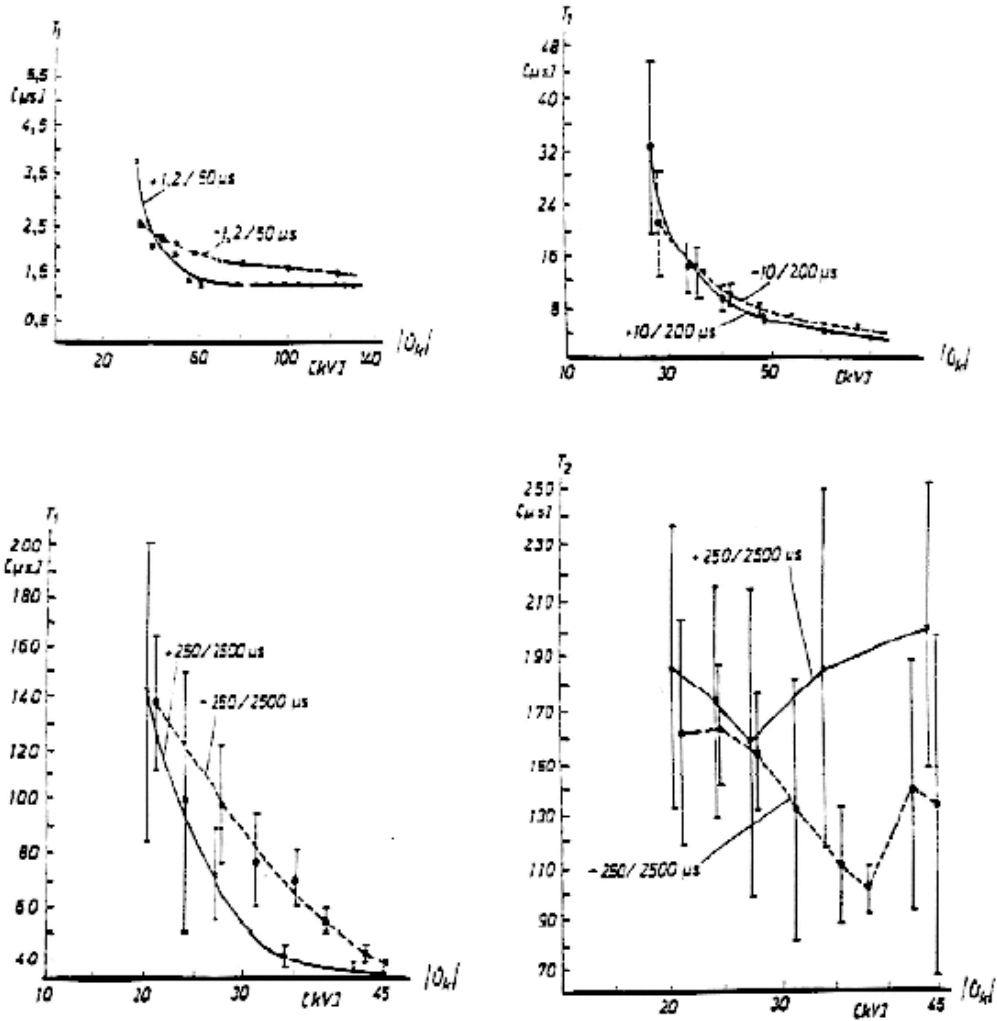
Μια πειραματική προσέγγιση του παραπάνω διαχωρισμού, μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, έχει δοθεί από παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού σε στερεά οργανικά μονωτικά, με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών (σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα), που συνδυάστηκαν με ταυτόχρονες οπτικές παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών κατά το σχήμα 1.4.1.5.2-3. Στον πίνακα 1.4.1.6-1 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$, από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που προαναφέρθηκε. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης 1,2/50μs) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

Μια άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, ως προς το χρόνο εκδήλωσής τους (υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης), έχει βασιστεί σε χαρακτηριστικές $T_1 = f(|\hat{U}_κ|)$ και $T_2 = f(|\hat{U}_κ|)$ σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των

επιφανειακών διαταραχών. Στο σχήμα 1.4.1.6-6 φαίνεται ο χρόνος έναρξης (T_1) των μερικών εκκενώσεων (στα μονωτικά υλικά και το είδος της καταπόνηση, που προαναφέρθηκαν), καθώς και ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων (T_2), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500 μ s, ώστε σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις του πίνακα 1.4.1.6-1 για την εικόνα των επιφανειακών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.

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

Πίνακας 1.4.16-1: Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών



Σχήμα 1.4.1.6-6: 1) Χαρακτηριστική $T_1 = f(|\hat{U}_κ|)$ κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2mm και $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$) με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, 10/200μs και 250/2500μs

2) Χαρακτηριστική $T_2 = f(|\hat{U}_κ|)$ κατά την καταπόνηση των υλικών αυτών με κρουστικές τάσεις 250/2500μs

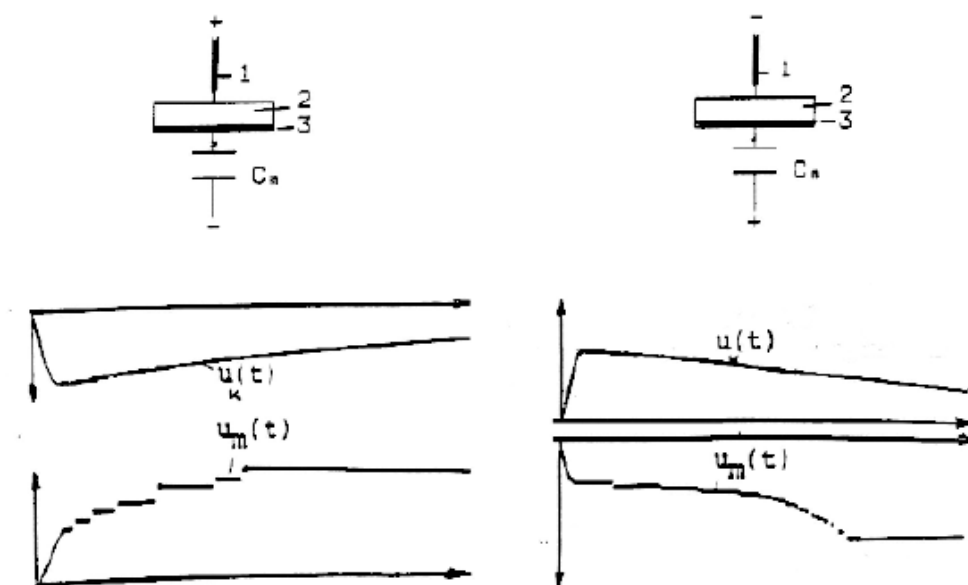
Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα πλάκα

I: 2 φορές η τυπική απόκλιση

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

Από τη μέση καμπύλη των χαρακτηριστικών του σχήματος 1.4.1.6-6 γίνεται επίσης φανερό η εκδήλωση του φαινομένου της πολικότητας, όπως και κατά τη διάτρηση. Οι επικαλύψεις τιμών, που παρατηρούνται μπορούν να αποδοθούν στη διαφορετική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο (τα οργανικά στερεά μονωτικά είναι ανομοιογενή και δεν είναι δυνατό να υπάρχει συμμετρική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο). Πάντως, το φαινόμενο της πολικότητας γίνεται φανερό στα άλματα δυναμικού από την κύρτωση (παρέκκλιση) της $u_m(t)$ προς τον άξονα του χρόνου (σχήμα 1.4.1.7-1)



Σχήμα 1.4.1.7-1: Τυπικά παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών εντός μονωτικού ελαίου υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs

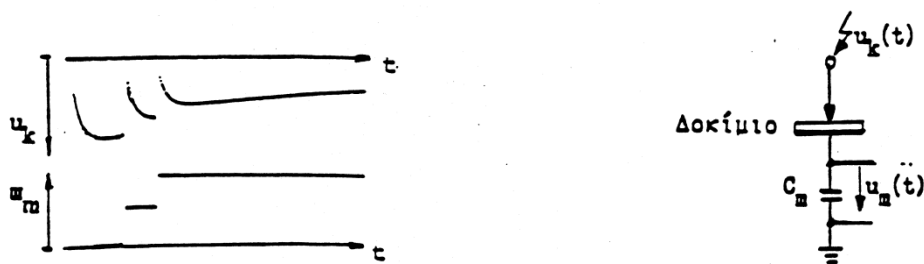
- 1: Ηλεκτρόδιο ακίδα
- 2: Δοκίμιο
- 3: Ηλεκτρόδιο πλάκα
- C_m : Πυκνωτής μέτρησης

1.4.2 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση

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

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\AA . Έτσι, εκτός από τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις (οι οποίες οφείλονται σε ξένες επικαθίσεις και έχουν συνήθως τον κυρίαρχο ρόλο στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στην επιφάνεια), μπορεί κανείς να υποθέσει ότι εκδηλώνονται και άλλοι παράγοντες (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος), όπως κατά τη διάτρηση. Μπορεί επομένως να θεωρηθεί, ότι ισχύει το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4.1.5.3-1 όπου όμως οι μερικές εκκενώσεις στο επιφανειακό φιλμ (δηλαδή στο συνδυασμό “επιφάνεια του στερεού μέχρι βάθος 30\AA - περιβάλλον μέσο”) είναι συνήθως ο κυρίαρχος παράγοντας για την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση.

Πειραματικές έρευνες σε στερεά μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών με κρουστικές τάσεις, δείχνουν ότι υπάρχει ομοιότητα των παλμογραφημάτων της διάτρησης ως προς εκείνα της επιφανειακής διάσπασης, με διαφορά ότι η επιφανειακή διάσπαση εκδηλώνεται στην ουρά της κρουστικής τάσης (Σχήμα 1.4.2-1).



Σχήμα 1.4.2-1: Τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2 mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση της μορφής 10/200 μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα - πλάκα

C_m : 1835 nF

U_k : 70 kV

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

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στα κεφάλαια 1.4.1 και 1.4.2, η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών οφείλονται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες (απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb, και θερμότητα του περιβάλλοντος). Οι παράγοντες αυτοί δεν περιλαμβάνουν όμως στοιχεία για φαινόμενα, που δεν μπορεί κανείς να ακούσει, ή να παρατηρήσει, όπως

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

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

- στις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις (δηλαδή από παλμογραφήματα όπως εκείνα των σχημάτων: 1.4.1.5.1-1, 1.4.1.5.2-4, 1.4.1.6-1 και 1.4.1.7-1),
- στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης (ως στοιχείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε δηλαδή μια αντίσταση, αντί του πυκνωτή μέτρησης: βλέπετε σχήμα 1.4.3.1-5),
- στην ανίχνευση το μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και διάσπαση).
- στην ικανοποιητική πειραματική και θεωρητική ταύτιση του μηχανισμού παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

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

1) Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί, ότι :

α) το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.

β) Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί μέχρι τις ακτίνες X (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα)

2) Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 2,5÷4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2MV/cm.

3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση 1.2.4-1 ($\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$).

4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση 1.2.4-1. Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια

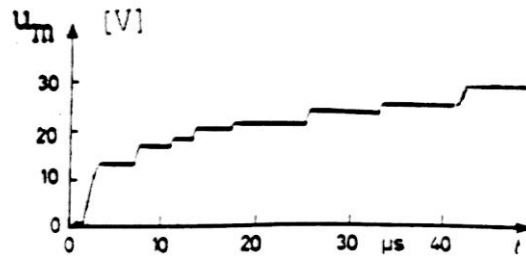
1.4.3.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών

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

Στα σχήματα 1.4.3.1-1 ως 1.4.3.1-3 δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα της τεχνητής γήρανσης στερεών πολυμερών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και στο σχήμα 1.4.3.1-4 ένα παλμογράφημα των

κρούσεων φορτίου. Η διάταξη μέτρησης έχει σχεδιαστεί απλοποιημένα στο σχήμα 1.4.3.1-5. Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώθηκε ότι :

- α) μετά από μία τιμή $\hat{U}_κ \approx 45\text{kV}$, κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50 μs ή 10/200 μs , εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 1.4.3.1-6). Υπό σταθερή τιμή της τάσης ο δενδρίτης, καθώς και η αντίστοιχη προς αυτόν αλλαγή της μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις
- β) κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500 μs δεν παρατηρήθηκε, υπό σταθερή τιμή της τάσης (που δεν οδηγεί στη διάσπαση), η εκδήλωση του παραπάνω δενδρίτη, ούτε προκλήθηκε αλλαγή της μοριακής δομής.

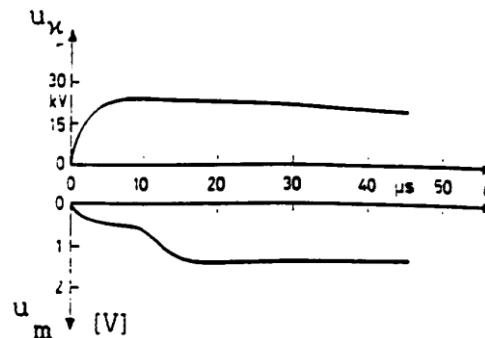


Σχήμα 1.4.3.1-1: Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 1,2/50 μs .

$$\hat{U}_κ : 100\text{kV}.$$

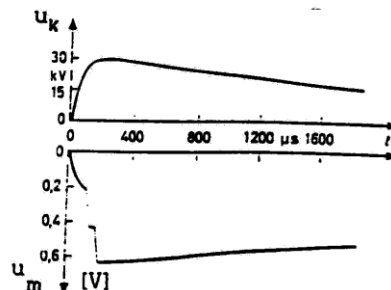
$$E : 0,8 \text{ MV/cm}.$$

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



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

$$\hat{U}_κ : 26,6\text{kV}. E: 0,38\text{MV/cm}. C_m: 210\text{nF}.$$

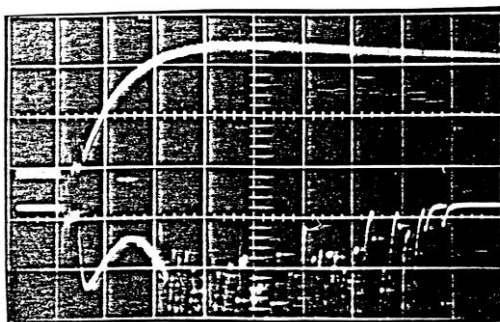


Σχήμα 1.4.3.1-3 : Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 250/2500 μs .

$$\hat{U}_κ : 32 \text{ kV}.$$

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

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

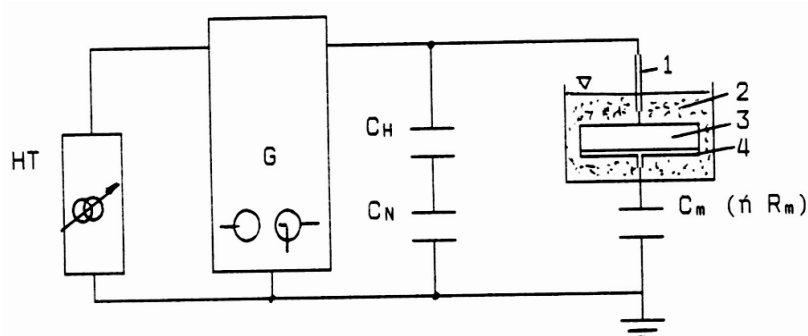


Σχήμα 1.4.3.1-4 : Κρούσεις φορτίου υπό κρουστική τάση 10/200μs.

Κλίμακα χρόνου : 5 μs/div.

Κλίμακα ρεύματος : 1,3 A/div.

$\hat{U}_κ$: 81kV, E : 0,86 MV/cm.



Σχήμα 1.4.3.1-5 : Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης των αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

H.T. : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

G : Γεννήτρια κρουστικών τάσεων.

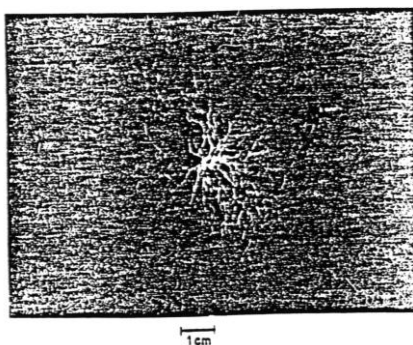
C_H και C_N : Καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης.

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

4 : Ηλεκτρόδιο πλάκα.

C_m : πυκνωτής μέτρησης των αλμάτων δυναμικού

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



Σχήμα 1.4.3.1-6: Εικόνα επιφανειακών διαταραχών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs

$\hat{U}_κ$: 85kV, E : 0,8MV/cm.

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

α) Μακροσκοπική ερμηνεία

Αν και οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνευτούν με την μακροσκοπική θεωρία, όπως έγινε στο παράδειγμα της παραγράφου 1.4.1.3.4 τότε καταλήγει κανείς στα συμπεράσματα του πίνακα 1.4.1.6-1. Η εκδήλωση των αλμάτων δυναμικού (ή των κρούσεων φορτίου) κατά τη θεωρία αυτή ερμηνεύονται από το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (σχήματα 1.4.1.3.3-2 έως 1.4.1.3.3-4

β) Κβαντομηχανική ερμηνεία

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

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

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από την σχέση :

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

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

Για μια αντίσταση $R=0,5\Omega$, ως συντελεστή διόρθωσης f :

$$f = 1 / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \quad (1.4.3.1-3)$$

δίνεται στον πίνακα 1.4.3.1-1 για χωρητικά τετράπολα μέτρησης, που συνήθως χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις αυτές. Για τους πυκνωτές του πίνακα αυτού και για $R=0,5\Omega$, ισχύει επομένως:

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

Πίνακας 1.4.3.1-1: Τιμές του συντελεστή f για $R=0,5\Omega$

$$W = 0,5 \cdot f \cdot \Delta u \text{ σε eV} \quad (1.4.3.1-4)$$

όπου Δu σε V.

Στον πίνακα 1.4.3.1-2 έχουν υπολογιστεί με την παραπάνω σχέση οι τιμές της ενέργειας W για το πρώτο άλμα δυναμικού των παλμογραφημάτων των σχημάτων 1.4.3.1-1, 1.4.3.1-2 και 1.4.3.1-3. Από τις τιμές αυτές φαίνεται, ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών σχετίζεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που μπορεί να περιλαμβάνει υπεριώδεις ακτίνες και υπέρυθρες ακτίνες. Έτσι :

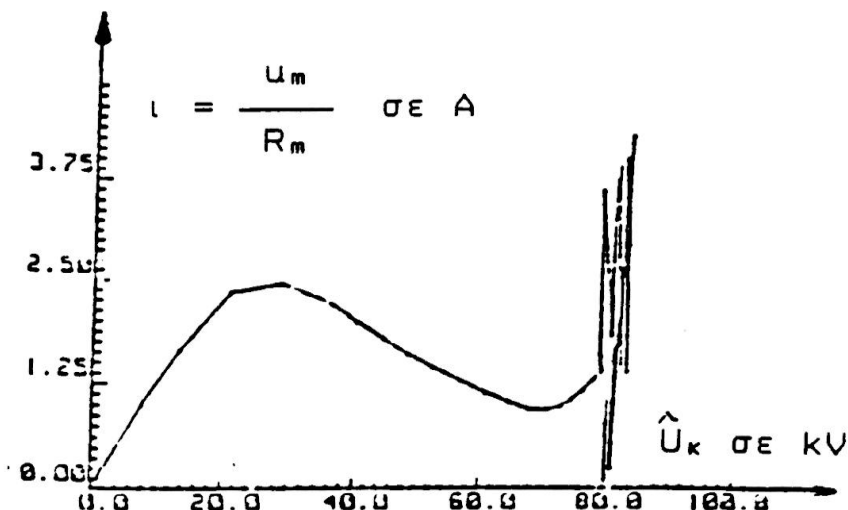
- 1) από τις τιμές της ενέργειας κατά τον πίνακα 1.4.3.1-2,
- 2) τη φωτεινή ακτινοβολία, που παρατηρείται στην πράξη σε αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων (και η οποία με υπολογισμό της ενέργειας W εύκολα διαπιστώνεται σε άλματα δυναμικού του παλμογραφήματος του σχήματος 1.4.3.1-1), και
- 3) τις ραδιοφωνικές παρεμβολές και τα ακουστικά κύματα, που συχνά προκαλούν οι μερικές εκκενώσεις,

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

Μορφή τάσης	Σχήμα	W σε eV
1,2/50μs	1.4.3.1-1	10,50
10/200μs	1.4.3.1-2	1,60
250/2500μs	1.4.3.1-4	0,16

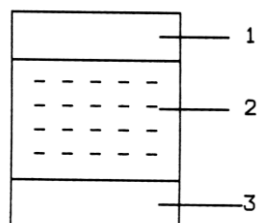
Πίνακας 1.4.3.1-2 : Τιμές της ενέργειας (W) των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πρώτο άλμα δυναμικού.

Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γήρανσης έχουν δοθεί από παλμογραφήματα των κρούσεων φορτίου. Πράγματι από το παλμογράφημα του σχήματος 1.4.3.1-5 φαίνεται ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις. Έτσι, όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσειμά της ενέργειάς τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (πίνακας 1.4.3.1-2). Ο δεικνυόμενος επομένως, που παρατηρείται, είναι το ορατό φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας. Μπορούμε, να υποθέσουμε, ότι αντίστοιχες δεικνυόμενες μορφές εκπομπές συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου (σχήμα 1.4.3.1-5) φαίνεται επίσης, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης (κατά την αύξηση της τάσης παρατηρείται μείωση του ρεύματος). Η αντίσταση αυτή, που προηγείται του ιονισμού με κρούσεις, δίνεται αναλυτικότερα στην χαρακτηριστική "ρεύματος-τάσης" του σχήματος 1.4.3.1-7.



Σχήμα 1.4.3.1-7 : Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης κατά το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου του σχήματος 1.4.3.1-4

Από τα παραπάνω μπορεί να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα ότι μία διαδρομή της δένδροειδούς μορφής εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αντιστοιχεί σε μία κρούση φορτίου, η οποία περιλαμβάνει ελεύθερα ηλεκτρόνια, που είχαν την ίδια ενεργειακή στάθμη (κατά την άφιξή τους στην άνοδο προκάλεσαν εκπομπή του ίδιου μήκους κύματος). Μπορούμε να υποθέσουμε, λόγω του εύρους της παραπάνω ακτινοβολίας, ότι υπάρχουν στο υλικό διάφορες ενεργειακές στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη, που είναι καθοριστικής σημασίας για την εκδήλωση του ιονισμού (σχήμα 1.4.3.1-8). Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff. Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 1.4.3.1-8 : Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

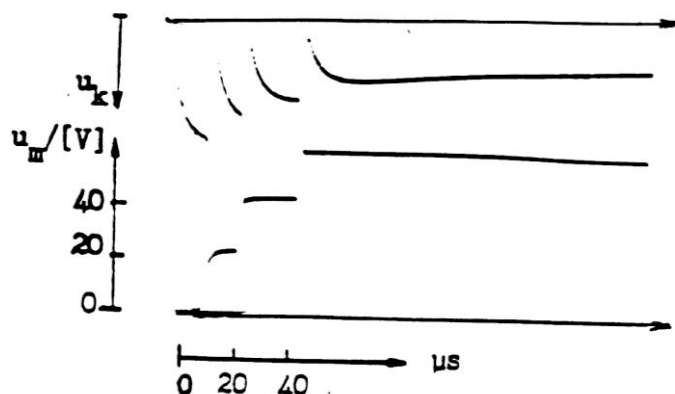
- 1 : ζώνη αγωγιμότητας
- 2 : στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη
- 3 : ζώνη σθένους

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

1.4.3.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση

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

Παρακάτω εξετάζεται ένα παράδειγμα από τη βιβλιογραφία με κρουστικές τάσεις, ώστε να υπάρχουν συγκρίσιμες μετρήσεις με εκείνες της γήρανσης κατά την προηγούμενη παράγραφο. Για το λόγο αυτό, οι μετρήσεις έχουν γίνει (σύμφωνα με τη βιβλιογραφία) με τη διάταξη πειραματισμού του σχήματος 1.4.3.1-5. Τυπικά παλμογραφήματα του φαινομένου δίνονται στα σχήματα 1.4.3.2-1 και 1.4.3.2-2. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων (W) έχει υπολογιστεί από την σχέση 1.4.3.1-4, όπως και κατά την γήρανση. Έτσι, για το πρώτο π.χ. άλμα δυναμικού και $R=0,5\Omega$ (που ήταν η αντίσταση από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης) η τιμή W υπολογίζεται ότι είναι περίπου 105eV. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε, ότι η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτινών X.



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

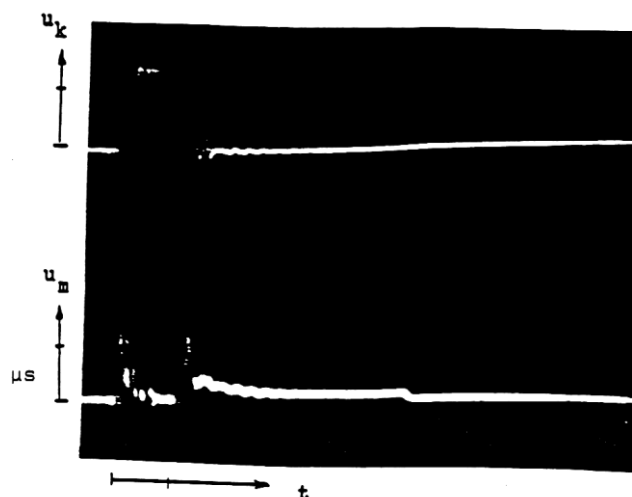
Κρουστική τάση : 1,2/50μs.

R της ακίδας ≈ 1 mm.

$\hat{U}_κ$: 85kV.

E : 1,2 MV/cm.

C_m : 1835nF.



Σχήμα 1.4.3.2-2: Τυπικό παλμογράφημα κρούσεων φορτίου κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση.

R της ακίδας ≈ 1 mm.

Μορφή τάσης 1,2/50μs.

$$\hat{U}_κ = 85\text{kV}$$

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

$$R_m = 150\Omega$$

$$u_m : 20\text{V/div}$$

$$t : 2 \mu\text{s/div}$$

Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου (σχήμα 1.4.3.2-2) παρατηρεί κανείς την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Ο αριθμός των κρούσεων περιορίζεται ως προς εκείνον κατά τη γήρανση, αλλά η τιμή του ρεύματος αυξάνει σημαντικά. Μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι ο μηχανισμός της διάτρησης έχει τα ίδια γνωρίσματα με εκείνον της γήρανσης.

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

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

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

$$Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2} \quad (1.4.3.3-1)$$

όπου:

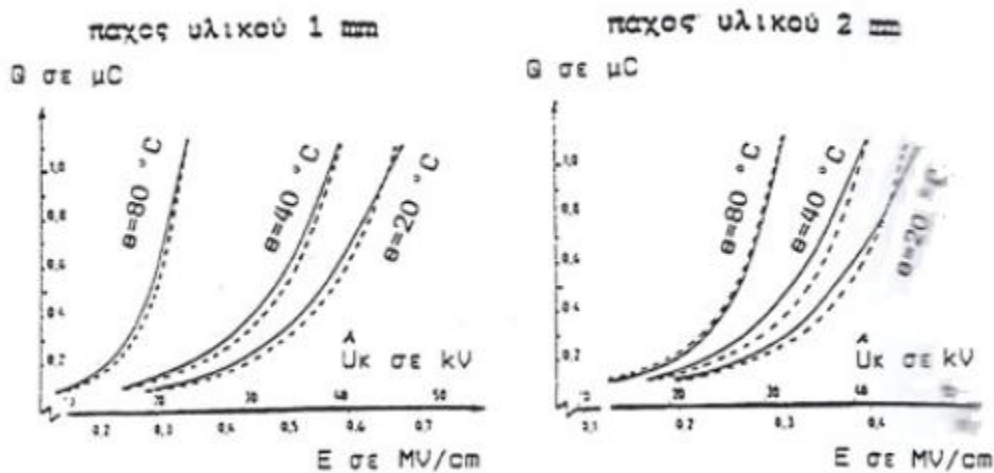
- E_0 είναι η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($E > 0,2 \text{ MV/cm}$), Q_0 το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων,
- E η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση, λόγω της οποίας το φορτίο αποκτά την τιμή Q -
- A ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από τον χρόνο.

Με βάση την σχέση αυτή έχει γίνει μία προσέγγιση πειραματικών χαρακτηριστικών $Q=f(\hat{U}_κ)$ κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm ή 2mm) με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή 250/2500μs), η οποία (ως γνωστό από τον πίνακα 1.4.1.6-1) προκαλεί μόνο εσωτερικές μερικές εκκενώσεις. Η διάταξη, που έγιναν τα πειράματα, έχει δοθεί απλοποιημένα στο σχήμα 1.4.3.1-5. Οι πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (20° C, 40° C, και 80° C), ώστε:

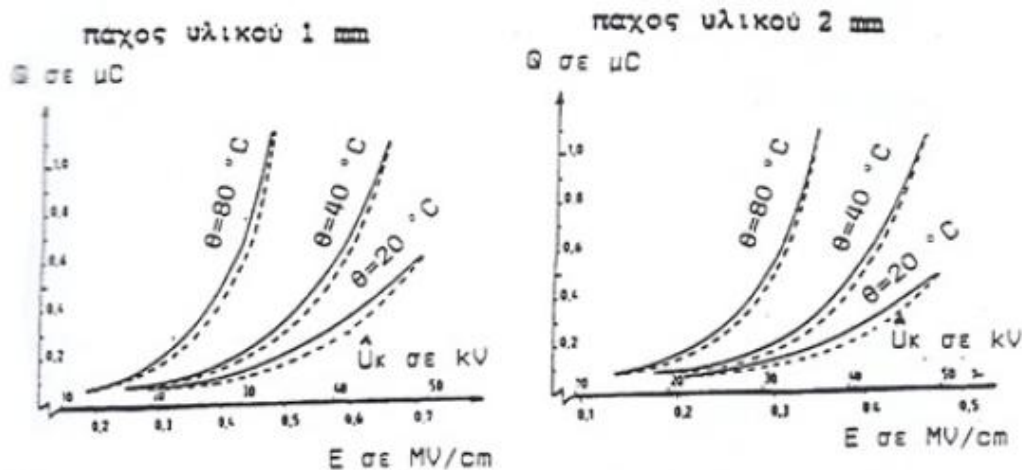
- να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων και
- να εναρμονίζονται οι μετρήσεις με τα παραδεκτά όρια λειτουργίας του μονωτικού ελαίου των μετασχηματιστών, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη.

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι πειραματικές χαρακτηριστικές για δύο μονωτικά καθώς και οι θεωρητικές χαρακτηριστικές κατά τη σχέση 1.4.3.3-1, (με προσδιορισμό του συντελεστή A για κάθε υλικό). Όπως φαίνεται, υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ θεωρίας και πειραμάτων. Η θεωρητική προσέγγιση έδειξε ότι:

- 1) οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμές πεδίου περίπου $E=0,2 \text{ MV/cm}$
- 2) για τιμές πεδίου περίπου μέχρι $0,5 \text{ MV/cm}$ η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας διέπεται από τη σχέση $\sigma=\sigma_0 \exp(-W/kT)$
- 3) για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως ισχύει η σχέση 1.4.3.3-1, με αποτέλεσμα να μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις.
- 4) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ενισχύει σημαντικά τα φαινόμενα ιονισμού. Φαίνεται ότι η σχέση, που διέπει τον συνδυασμό των μερικών εκκενώσεων με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, είναι η 1.4.3.3-1



Σχήμα 1.4.3.3-1: Χαρακτηριστικές $Q=f(\hat{U}_κ)$ για τον pertinax ενός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα πλάκα. $A=0,48$



Σχήμα 1.4.3.3-2: Χαρακτηριστικές $Q=f(\hat{U}_κ)$ για τον βακελίτη ενός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα πλάκα $A=0.44$

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

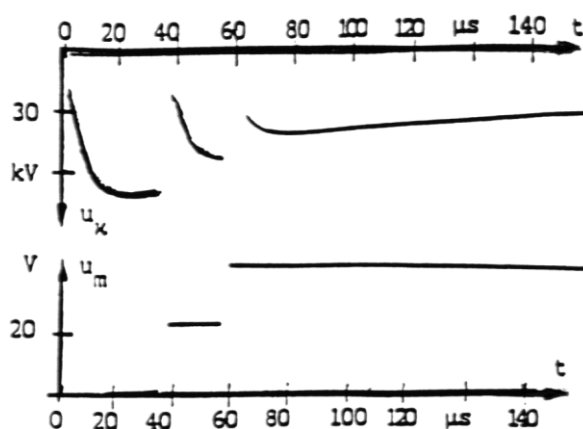
1.4.3.4. Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση

Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι ισχύει ότι και προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης. Παρακάτω εξετάζεται (για λόγους σύγκρισής με τη διάτρηση) ένα τυπικό παράδειγμα επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών πάχους 2mm σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα πλάκα. (βλέπετε σχήμα 1.4.3.1-5). Δεν θα γίνει αναφορά στα παλμογράφημα της γύρανσης, γιατί είναι προφανές ότι τα φαινόμενα δεν εξαρτώνται, με το αν θα ακολουθήσει η διάτρηση ή η επιφανειακή διάσπαση.

Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος 1.4.3.4-1 υπολογίζεται με την σχέση 1.4.3.3-1 η ενέργεια W των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η ενέργεια αυτή για το πρώτο και το τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα : 122eV και 96,5eV. Όπως φαίνεται η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτινών X.

Αν τελικά συμβαίνει εκπομπή ακτινών X κατά τη διάτρηση και την επιφανειακή διάσπαση, τότε θα πρέπει να προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και να

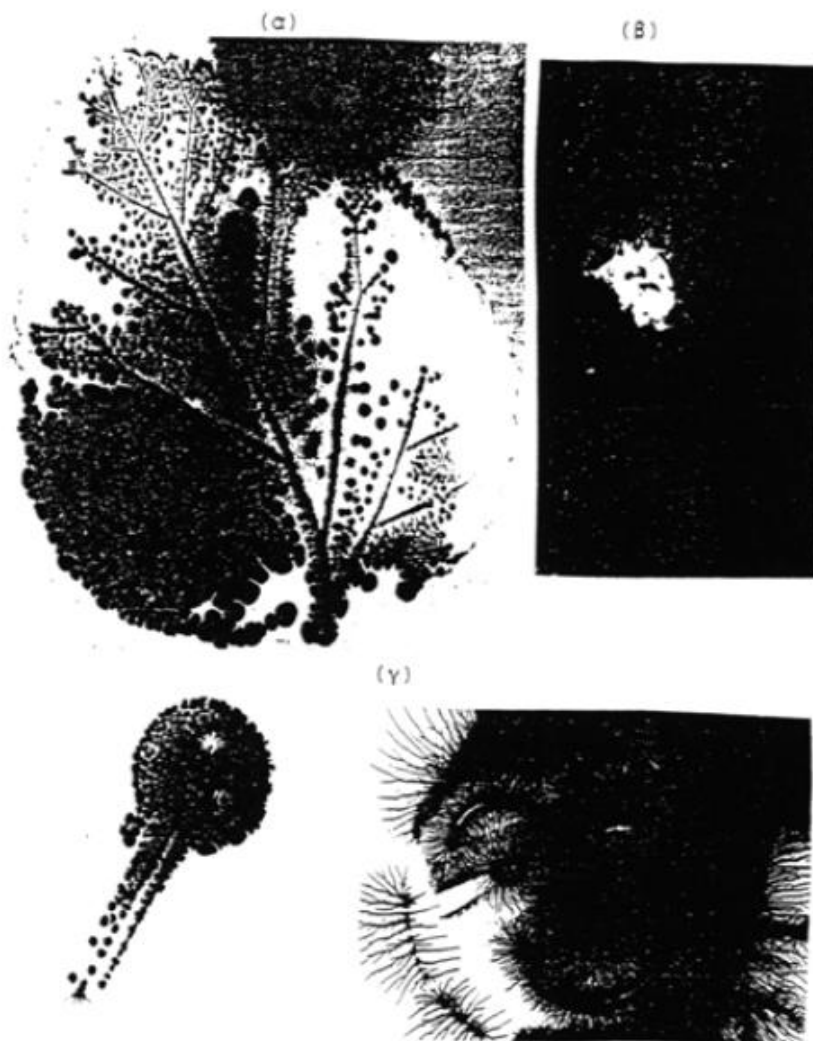
απεικονίζονται αντικείμενα (όπως π.χ. συμβαίνει με τις λυχνίες των ακτινολογικών μηχανημάτων). Το ίδιο θα πρέπει να ισχύει και κατά την εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας (τουλάχιστον σε τιμές πεδίου πλησίον της διάσπασης). Από πειράματα που έχουν γίνει κατά τη βιβλιογραφία για τον σκοπό αυτό, φαίνεται ότι προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και απεικονίζονται αντικείμενα, καθώς και βιολογικοί οργανισμοί. Στα σχήματα 1.4.3.4-2, 1.4.3.4-3 και 1.4.3.4-4 δίνονται κατά ορισμένες από τις φωτογραφίες αυτές. Επίσης, στα σχήματα 1.4.3.4-4 και 1.4.3.4-5 δίνονται φωτογραφίες επιφανειακών δενδρίτων, που αφορούν αντίστοιχα τη γήρανση και τη διάσπαση. Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2mm και διαμέτρου 150mm), υπό κρουστικές τάσης 1,2/50μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. Οι φωτογραφίες στο σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, καθώς και εκείνες της διάρτησης (στον αέρα ή στο λάδι), οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα.



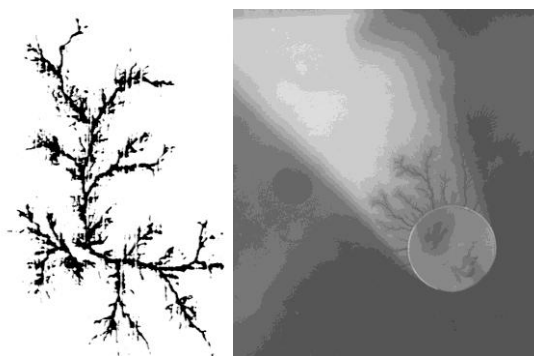
Σχήμα 1.4.3.4-1: Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pertinax (πάχους 2mm και με διάμετρο της επιφάνειάς του 150mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου.
Ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης : "ακίδα-πλάκα".



Σχήμα 1.4.3.4-2: Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την καταπόνηση πολυμέρους στερεού μονωτικού πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (φωτογράφιση ενός φύλλου δένδρου)



Σχήμα 1.4.3.4-3: Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμέρους στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση 1,2/50μς
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα πλάκα
 α) Φωτογράφιση φύλλου δένδρου
 β) Φωτογραφία βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι)
 γ) Φωτογραφία μεταλλικών αντικειμένων



Σχήμα 1.4.3.4-4: Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερών στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση 1,2/50μς (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα).

Σχετικά με την απεικόνιση των δενδριτών στο φωτογραφικό φιλμ μπορούμε να υποθέσουμε, ότι ο δενδρίτης στη φωτογραφία του σχήματος 1.4.3.4-4 σχετίζεται με την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ εκείνος του σχήματος 1.4.3.4-5 με υπεριώδης ακτινοβολία και ακτίνες X. Μπορεί επίσης να συμπεράνει κανείς ότι ο φωτεινός δενδρίτης και ο οχρετός διάσπασης, που παρατηρούνται κατά την ηλεκτρική καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού, αφορούν το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στο υλικό.



Σχήμα 1.4.3.4-5: Φωτογραφίες δενδριτών κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα- πλάκα)
 α) Δενδρίτης σε τιμές πεδίου πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση
 β) Δενδρίτης κατά την επιφανειακή διάσπαση

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

Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 1.4.3 φαίνεται, ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα υλικά αυτά κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους. Οι πληροφορίες αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεώρηση των παραπάνω φαινομένων. Πλεονέκτημα όμως της μακροσκοπικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών μονωτικών φαίνεται ότι είναι ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη. Ο διαχωρισμός αυτός των μερικών εκκενώσεων δεν μπορεί να δοθεί από την θεωρία του ιονισμού με κρούσεις, γιατί ο συντελεστής A στην σχέση 1.4.3.3-1 αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του και η τιμή της θα πρέπει να εξαρτάται από την διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Αν π.χ. πραγματοποιήσει κανείς τα πειράματα της παραγράφου 1.4.3.3 με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs (ή με 10/200μs) και προσεγγίσει ακολούθως τις πειραματικές χαρακτηριστικές $Q=f(\hat{U}_κ)$ με

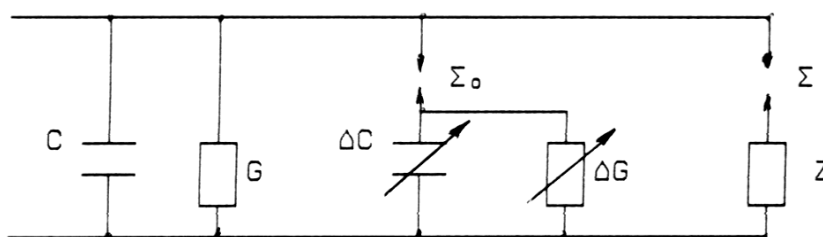
την σχέση 1.4.3.3-1, θα διαπιστώσει ότι ο συντελεστής A έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Η διαφορετική αυτή τιμή του συντελεστή A (κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, ή 10/200μs) μπορεί να θεωρηθεί μόνο ως μία ένδειξη ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, χωρίς όμως να καθορίζεται η περιοχή εκδήλωσής του (στον όγκο του μονωτικού, ή στην επιφάνειά του, ή στον όγκο και στην επιφάνεια του μονωτικού). Γι' αυτό, δεν μπορεί να καταλήξει κανείς, μέσω της κβαντομηχανικής θεώρησης των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, στον διαχωρισμό των μερικών εκκενώσεων στα παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού.

Από το παραπάνω φαίνεται, ότι για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών χρειάζεται να συνδυαστούν οι δύο θεωρίες, ώστε να δίνουν περισσότερες πληροφορίες για την πράξη. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που έχει προταθεί για τον σκοπό αυτό, δίνεται στο σχήμα 1.4.4-1. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant-Philipoff (σχήμα 1.4.1.3.3-2), όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσει κανείς, ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει στην τιμή της πεδιακής έντασης E_0 (περίπου 0,2MV/cm), τότε, τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4.4-1 ως ακολούθως :

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

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

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



Σχήμα 1.4.4-1 : Ένα ισοδύναμο κύκλωμα του συνδυασμού της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα

G : ιδανική αγωγιμότητα

ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

ΔG : αύξηση της αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

Z : αρνητική διαφορική αντίσταση

Σ_0 : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων

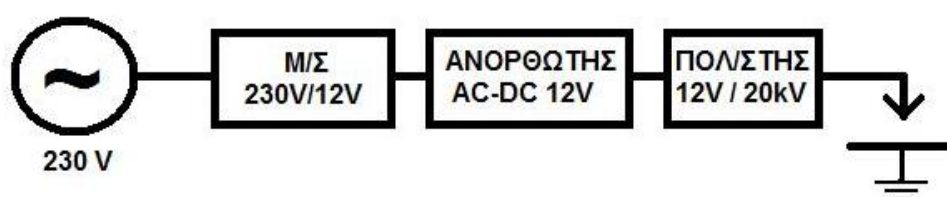
Σ : σπινθηριστής εκδήλωσης της Z

2. Σκοπός της εργασίας

Όπως προκύπτει από την §1 (Εισαγωγή) τα μονωτικά υλικά εκπέμπουν κατά την ηλεκτρική γήρανση τους ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μέτρηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με γεννήτρια κρουστικών 1,2/50μs. Επίσης, στο σκοπό της εργασίας εντάσσεται και η μέτρηση της εν λόγω ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μια διάταξη παραγωγής της που έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. από τον καθηγητή κ. Μπούρκα. Η συγκεκριμένη διάταξη συναρμολογήθηκε από τον συγγραφέα της διπλωματικής αυτής εργασίας, ώστε να γίνει εύχρηστη και εύμορφη και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικές αλλά και εκπαιδευτικές δραστηριότητες. Τέλος, στα πλαίσια της διπλωματικής εντάσσεται και η κατασκευή ενός σκοτεινού θαλάμου για την εμφάνιση φωτογραφικού φιλμ που προσβάλλεται από την ακτινοβολία που εκπέμπεται.

3. Η Διάταξη εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίστηκε στη διάταξη εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την ηλεκτρική καταπόνηση ηλεκτρομαγνητικών υλικών υπό ταχέως μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Η διάταξη κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. από τον καθηγητή κ. Μπούρκα και συναρμολογήθηκε από τον συγγραφέα της παρούσας διπλωματικής εργασίας Το σχηματικό διάγραμμα της διάταξης φαίνεται στο Σχήμα 3.1



Σχήμα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης

Η διάταξη αποτελείται από:

- α) Ένα μετασχηματιστή 230V /12V
- β) Ανορθωτική διάταξη AC/DC 12 V
- γ) Πολλαπλασιαστή Αυτοκινήτου 20 kV
- δ) Ηλεκτρόδιο Ακίδα- Πλάκα

Η διάταξη τροφοδοτείται από το δίκτυο XT της ΔΕΗ (230V) και στην συνέχεια μέσω του μετασχηματιστή και του ανορθωτή παράγεται μια τάση 12V DC. Η τάση αυτή τροφοδοτεί τον πολλαπλασιαστή στον οποίο συνδέεται το ηλεκτρόδιο ακίδας-πλάκας. Η ΥΤ των 20kV που παρέχει ο πολλαπλασιαστής στο ηλεκτρόδιο είναι η ικανή να διασπάσει το διάκενο ανάμεσα στην ακίδα και την πλάκα. Η διάσπαση αυτή έχει ως αποτέλεσμα, όπως προαναφέρθηκε στη θεωρία, την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Στα σχήματα 3.2, 3.3, 3.4 που ακολουθούν υπάρχουν φωτογραφίες από την εν λόγω διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις που παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 3.2: Η διάταξη εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



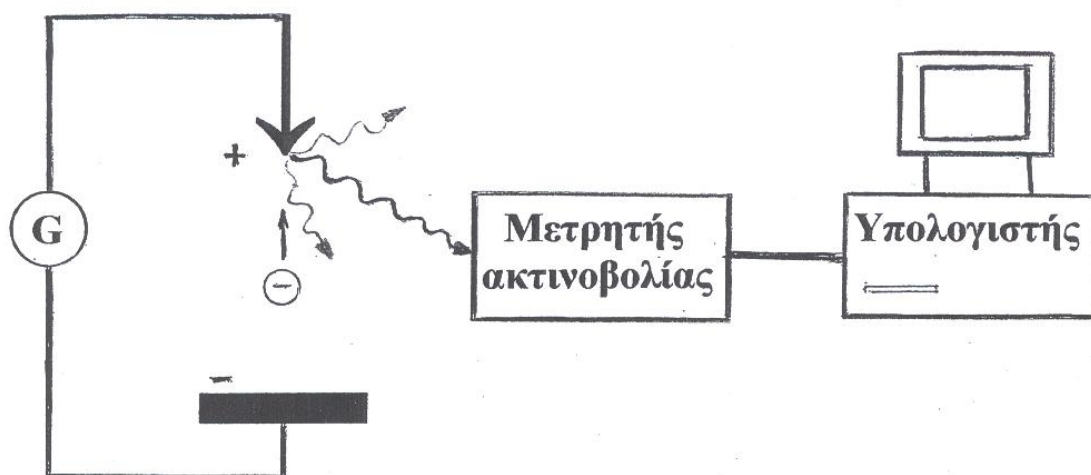
Σχήμα 3.3: Η διάταξη εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



Σχήμα 3.4: Το ηλεκτρόδιο ακίδα-πλάκα της διάταξης

4. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων

Για την μέτρηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την διάταξη χρησιμοποιήθηκε το όργανο ανίχνευσης και μέτρησης της ακτινοβολίας BR-15. Η αρχή λειτουργίας της πειραματικής διάταξης εκπομπής και μέτρησης της ακτινοβολίας φαίνεται στο σχήμα 4.1



Σχήμα 4.1: Η αρχή λειτουργίας της πειραματικής διάταξης εκπομπής και μέτρησης της ακτινοβολίας.

Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα μεγέθη που σχετίζονται με την ακτινοβολία, ενώ στην συνέχεια επεξηγούνται οι μονάδες μέτρησης.

Μέγεθος	Σχέση	Άλλες μονάδες
Δόση έκθεσης (J) (ή δόση ιόντων για παραγωγή ιόντων)	$J=dQ/dm$ [C/kg]	$1R=2,58 \cdot 10^{-4} C/kg$
Ισχύς της δόσης έκθεσης (\dot{J})	$\dot{J} =J/t$ [C/(kg s)]	$1 C/(kgs)=1A/kg$
Δόση ενέργειας (D) ή απορροφημένη δόση από μία μάζα ή ενέργεια που προσφέρεται σε μία μάζα	$D=dW/dm$ [J/kg]	$1rd=1cJ/kg=1cGy$ (όπου $c=10^{-2}$) ακτινογραφία: 5÷15 mrd τομογραφία: 2 rd
Ενέργεια δόσης στη μονάδα του χρόνου (\dot{D})	$\dot{D} =D/t$ [rd/s]	$1rd/s=1cJ/kgs=1cGy/s =$ $1cW/s$ (όπου $c=10^{-2}$)
Ισοδύναμη απορροφημένη δόση (D_a)	$D_a=D$ [Sv]	0,01 μSv=1Rem=1rd=cGy (όπου $c=10^{-2}$)

Πίνακας 4.1: Καθορισμός εννοιών

Επεξήγηση μονάδων μέτρησης

A: Αμπέρ

Gy: Gray

m: μάζα (μονάδα μέτρησης kg)

c=10⁻² (εκατοστό)

J: Joule

R: Roentgen

rd: rad, mrd: χιλιοστό του rd

s: δευτερόλεπτο

Sv=Sivert

W: Βατ

Το μέγεθος που μετρήθηκε στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας είναι η ισοδύναμη απορροφημένη δόση (D_w). Τα χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης αλλά και οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων φαίνονται στους πίνακες 4.2 και 4.3 αντίστοιχα. Οι μετρήσεις είναι καταγεγραμμένες στους πίνακες 4.4 και 4.5, ενώ ακολουθούν και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Ύψη	Πρόσοψη
Διάκενο	d=5mm
Απόσταση μεταξύ οργάνου και πλάκας	b=70mm
Απόσταση της βάσης του οργάνου από τη βάση του χώρου μέτρησης	H=45mm

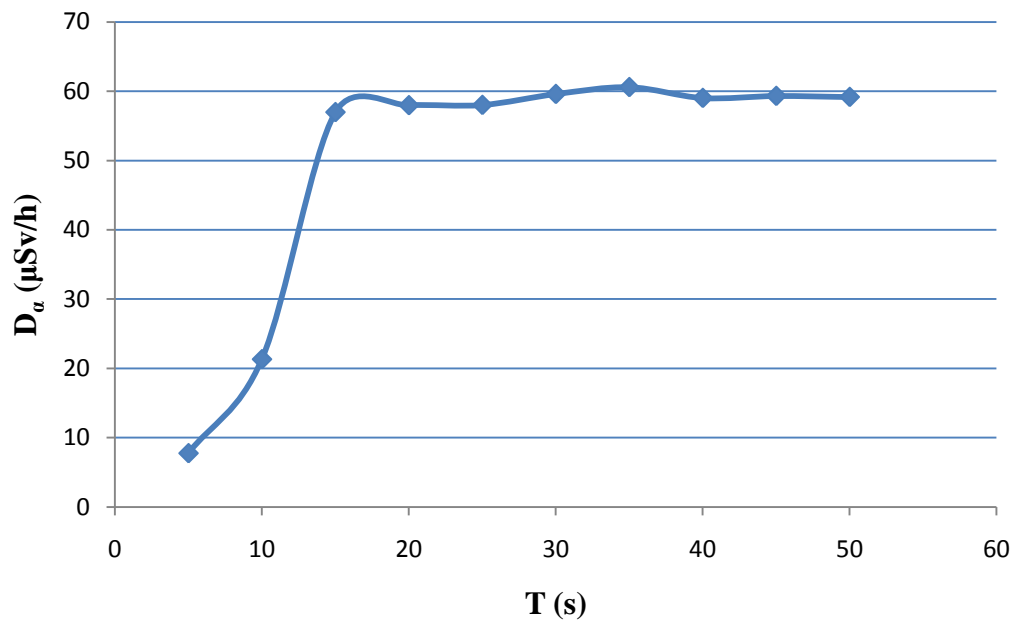
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά μέτρησης

Θερμοκρασία	23° C
Υγρασία	55 %

Πίνακας 4.3: Περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων

Χρόνος t (s)	Ισοδύναμη απορροφημένη δόση D_a ($\mu\text{Sv/h}$)
5	7,79
10	21,34
15	56,97
20	57,97
25	58,01
30	59,59
35	60,58
40	59,02
45	59,31
50	59,16

Πίνακας 4.4: Μετρήσεις για χρονικό διάστημα 5-50 s



Σχήμα 4.2: Ισοδύναμη απορροφημένη δόσης (D_a) για t=5-50 s

Διάκενο: d=5 mm

Απόσταση μεταξύ οργάνου και πλάκας: b=70 mm

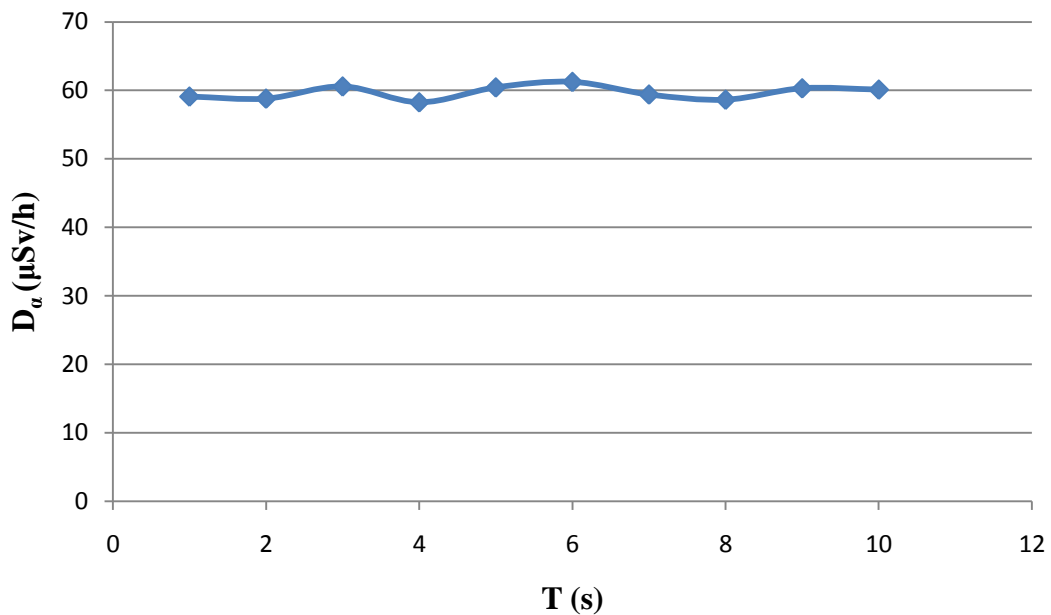
Απόσταση της βάσης του οργάνου από τη βάση του χώρου μέτρησης:

H=45mm

$\Theta=23^\circ\text{C}$, $\Sigma.Y.: 55\%$

Χρόνος t (min)	Ισοδύναμη απορροφημένη δόση D_a ($\mu\text{Sv/h}$)
1	59,10
2	58,80
3	60,58
4	58,26
5	60,44
6	61,25
7	59,40
8	58,64
9	60,31
10	60,12

Πίνακας 4.5: Μετρήσεις για χρονικό διάστημα 1-10 min



Σχήμα 4.3: Ισοδύναμη απορροφημένη δόσης (D_a) για $t=5-50$ s

Διάκενο: $d=5$ mm

Απόσταση μεταξύ οργάνου και πλάκας: $b=70$ mm

Απόσταση της βάσης του οργάνου από τη βάση του χώρου μέτρησης:

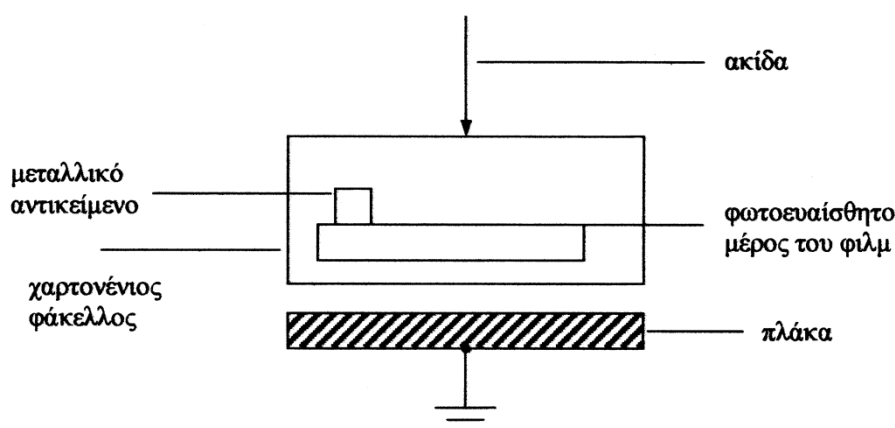
$H=45$ mm

$\Theta=23^\circ$ C, $\Sigma Y: 55\%$

Αρχικά, για να εφαρμοσθεί η πειραματική διαδικασία χρειάστηκε να γίνουν ορισμένες προπαρασκευαστικές εργασίες οι κυριότερες των οποίων είναι:

- Κατασκευή φακέλων διαστάσεων από μαύρο χαρτόνι για την τοποθέτηση των φωτοευαίσθητων έγχρωμων φιλμ.
- Κατασκευή σκοτεινού θαλάμου, για την εμφάνιση των φωτοευαίσθητων έγχρωμων φιλμ αυτόματης εμφάνισης, μετά την κάθε μέτρηση (Σχήμα 4.5).
- Έρευνα και προμήθεια κατάλληλου έγχρωμου φωτοευαίσθητου φιλμ αυτόματης εμφάνισης. Τα φιλμ που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα ήταν το Polaroid PX 70 (125 ASA) και το Polaroid 1200.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων είναι η εξής: Στον σκοτεινό θάλαμο, τοποθετείται το φιλμ μέσα στον μαύρο φάκελο. Σε ορισμένες μετρήσεις μέσα στον φάκελο τοποθετούνται και μεταλλικά αντικείμενα με σκοπό τη διαπίστωση της προσβολής του φωτογραφικού φίλμ, Ακολουθεί η εφαρμογή της τάσης στο ηλεκτρόδιο ακίδα - πλάκα. Παρατηρείται οπτικά η ύπαρξη λάμψης. Τέλος αφαιρείται ο φάκελος από την διάταξη και εμφανίζεται το φιλμ στον σκοτεινό θάλαμο. Η σχηματική αναπαράσταση της διάταξης μέτρησης μεταξύ ακίδας-πλάκας φαίνεται με λεπτομέρεια στο σχήμα 4.4

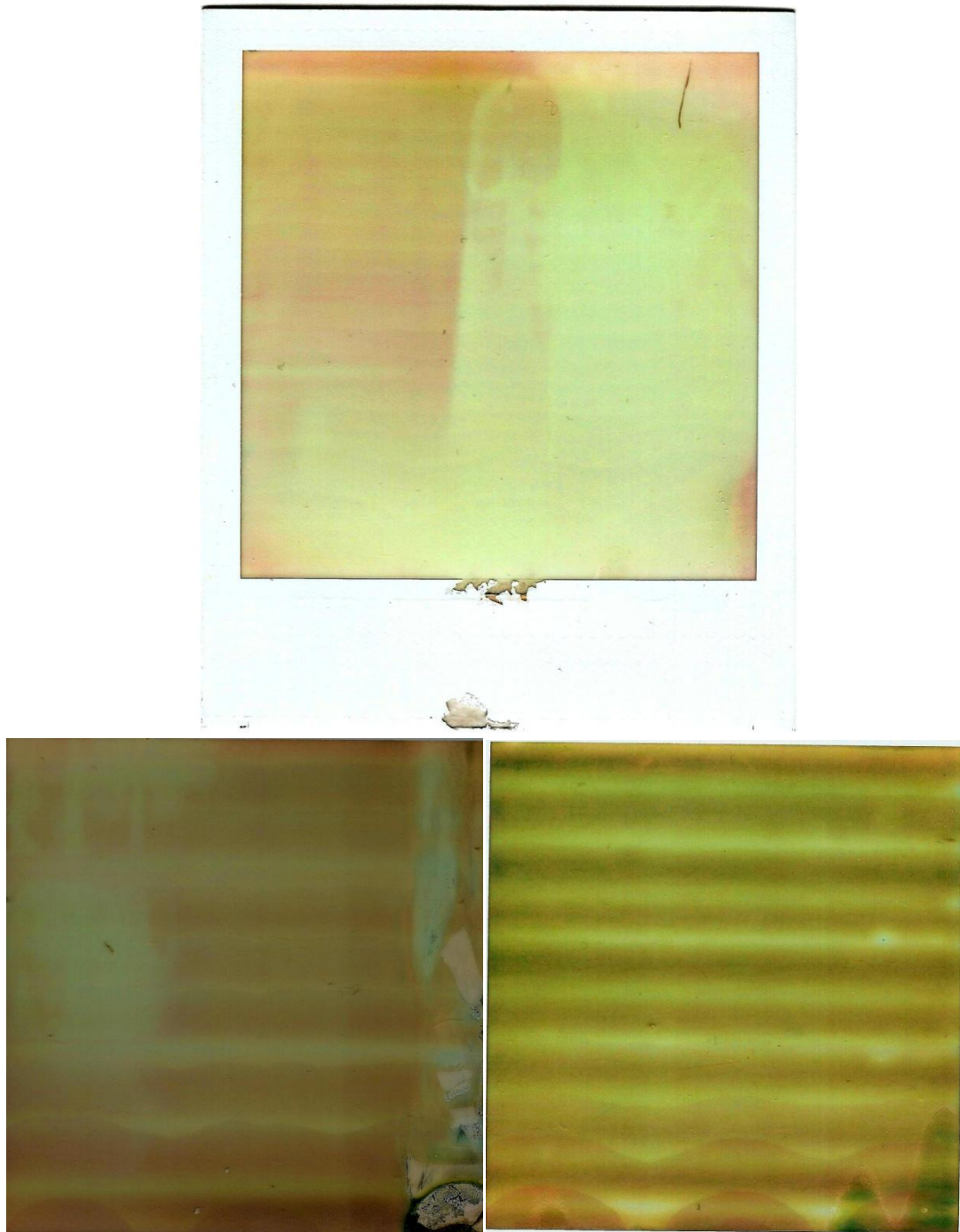


Σχήμα 4.4: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης μεταξύ ακίδας-πλάκας

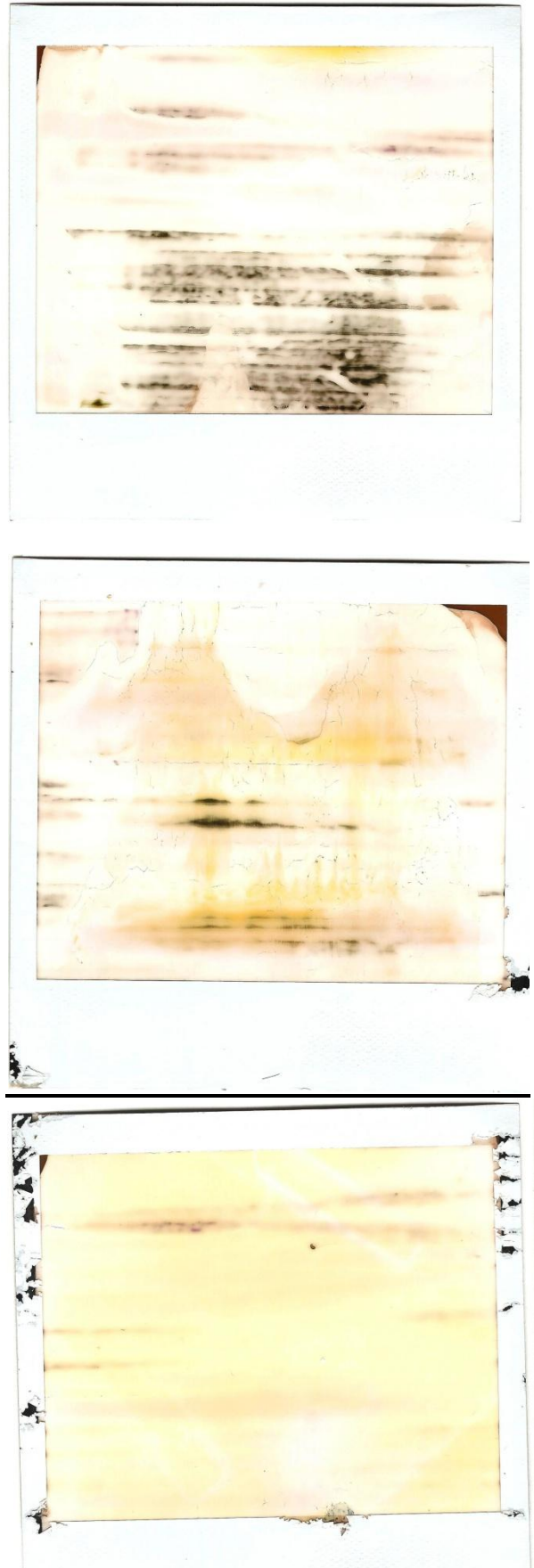


Σχήμα 4.5: Ο σκοτεινός θάλαμος μου κατασκευάστηκε για την εμφάνιση του φωτογραφικού φιλμ

Ακολουθούν οι φωτογραφίες που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία στα Σχήματα 4.6 και 4.7.

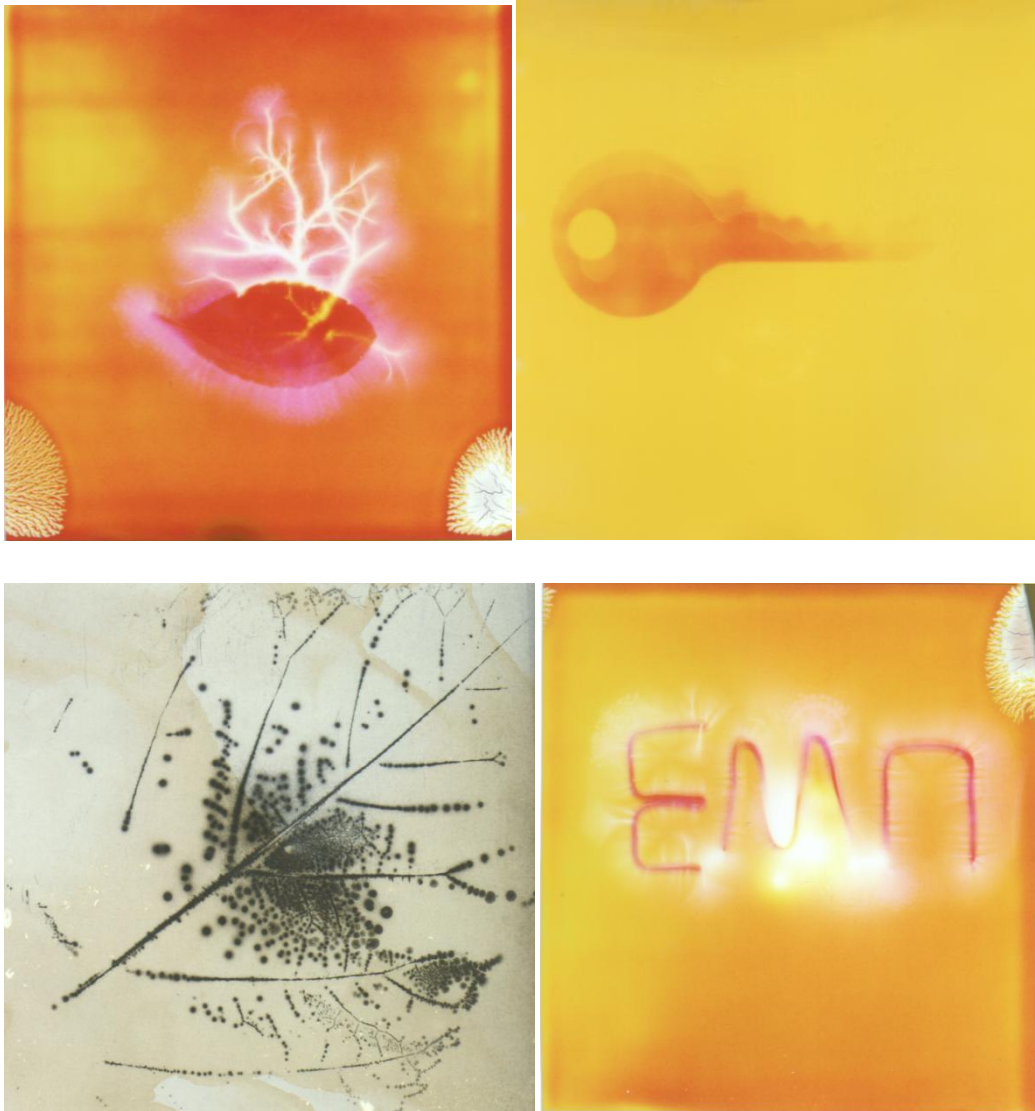


Σχήμα 4.6: Φωτογραφίες σε φιλμ Polaroid 125



Σχήμα 4.7: Φωτογραφίες σε φιλμ Polaroid 1200

Με παρόμοια διαδικασία αλλά με εφαρμογή κρουστικής τάσης 1,2/50μs είχαν ληφθεί κατά το παρελθόν από τον κ. Μπούρκα οι παρακάτω φωτογραφίες (σχήμα 4.8)



Σχήμα 4.8: Φωτογραφίες με εφαρμογή κρουστικής τάσης 1,2/50μs

5. Συμπεράσματα - Σχόλια

Η εκπομπή ακτινοβολίας εκτός του ότι μπορεί να μετρηθεί ποσοτικά, επιβεβαιώνεται και ποιοτικά με την προσβολή του φωτογραφικού φιλμ. Ακολουθεί η επεξήγηση αυτού φαινομένου.

Η ενέργεια, που προσφέρεται στο άτομο για να συμβεί ιονισμός, ονομάζεται ενέργεια ιονισμού W_i . Ο ιονισμός ενός ατόμου μπορεί να θεωρηθεί ως επιδίωξη του ηλεκτρονίου να απομακρυνθεί σε απόσταση $r=\infty$ από τον μητρικό του πυρήνα (βλέπετε σχήμα 5.1). Έτσι, για το ηλεκτρόνιο εντός του σφαιρικού (κατά προσέγγιση) πεδίου του πυρήνα ισχύει :

$$W_i = \int_{r_T}^{\infty} \vec{F} d\vec{r} = q_e \int_{r_T}^{\infty} \vec{E} d\vec{r} = q_e U_i \quad (5.1)$$

όπου U_i η τάση ιονισμού.

Για την πεδιακή ένταση E σε απόσταση r από το κέντρο του πυρήνα ισχύει η σχέση :

$$E = E_{\pi} (r_{\pi} / r)^2 \quad (5.2)$$

ή

$$U_i = E_{\pi} r_{\pi}^2 / r \quad (5.3)$$

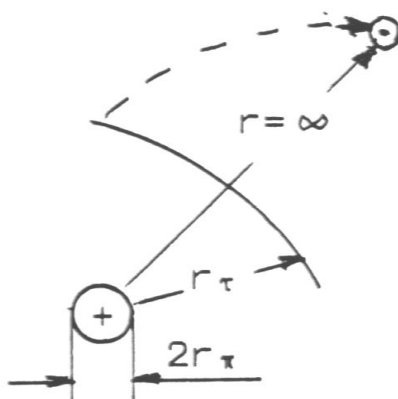
όπου E_{π} η πεδιακή ένταση στην επιφάνεια του πυρήνα, για την οποία ισχύει η σχέση:

$$E_{\pi} = \frac{q_e}{4\pi r_{\pi}^2 \epsilon_0} \quad (5.4)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις η ενέργεια ιονισμού είναι :

$$W_i = q_e E_{\pi} r_{\pi}^2 \int_{r_T}^{\infty} \frac{dr}{r} = \frac{q_e E_{\pi} r_{\pi}^2}{r_T} = \frac{q_e^2}{4\pi \epsilon_0 r_T} \quad (5.5)$$

Με $\epsilon_0=8,854 \text{ pF/m}$ και $r_T=0,1 \text{ nm}$ είναι $W_i=14,38 \text{ eV}$ ($1\text{eV}=1,6\cdot 10^{-19}\text{Ws}$).



Σχήμα 5.1: Μακροσκοπική παράσταση της απομάκρυνσης ενός ηλεκτρονίου από το μητρικό πυρήνα του, λόγω ιονισμού.

+ : πυρήνας

- : ηλεκτρόνιο (r_{π} απόσταση τροχιάς προ του ιονισμού)

Συνεπώς, η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επεκτείνεται μέχρι και την ιονίζουσα περιοχή της, γι' αυτό πρέπει να προσβάλλεται από αυτή το φωτογραφικό φιλμ.

Στα σχήματα 5.2 και 5.3 παρουσιάζονται οι πρώτες δημοσιευμένες προσβολές του φωτογραφικού φιλμ το 1990 στο διεθνές επιστημονικό περιοδικό *Phisika Scripta* και το 1994 στο διεθνές επιστημονικό περιοδικό *Interface Science* αντίστοιχα

Nationale Technische Universität Athen. Abteilung für Elektrotechnik, 10682 Athen, Greece

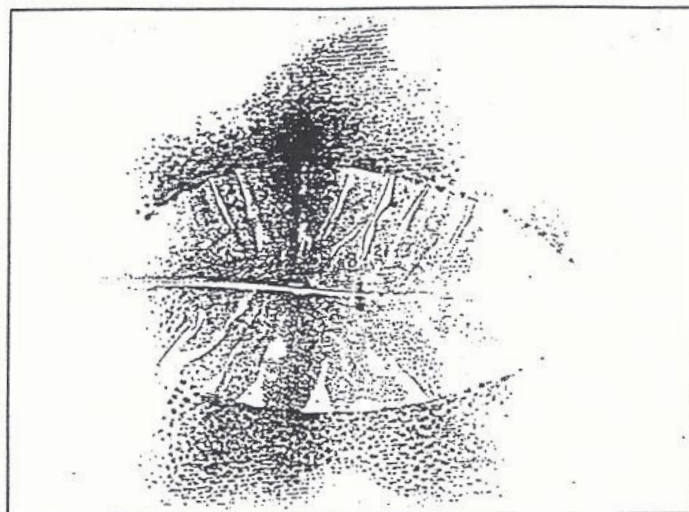
Received January 15, 1990; accepted April 2, 1990



Σχήμα 5.2: Η πρώτη δημοσιευμένη προσβολή φωτογραφικού φιλμ στο *Phisika Scripta* (Δενδρίτης ακτίνων X)

National Technical University of Athens, Department of Electrical Engineering, 42, 28th October st., 106 82 Athens, Greece

Received May 10, 1993; Revised July 5, 1994.



Σχήμα 5.3: Η πρώτη δημοσιευμένη προσβολή φωτογραφικού φιλμ στο *Interface Science*

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιτεύχθηκε η εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσω της ηλεκτρικής καταπόνησης ηλεκτρομονωτικών υλικών. Όπως φαίνεται από τις μετρήσεις, η τιμή της ισοδύναμης απορροφημένης δόσης (D_w) ($\sim 60 \mu\text{Sv/h}$) είναι ιδιαίτερα μεγάλη ειδικά αν λάβουμε υπ' όψιν μας ότι τα όρια είναι $10 \mu\text{Sv/h}$ για προσωπικό κατηγορίας Α και $3 \mu\text{Sv/h}$ για προσωπικό κατηγορίας Β (για 2000 ώρες εργασίας). Ωστόσο, για μικρά χρονικά διαστήματα, όπως αυτά της πειραματικής διαδικασίας δεν τίθεται κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα.

Έκτος, όμως, από την άμεση μέτρηση της ακτινοβολίας η πειραματική διαδικασία περιλάμβανε και την ανίχνευσή της με προσβολή του φωτογραφικού φιλμ σε τιμές τάσης κοντά στην περιοχή διάσπασης μεταξύ ακίδας - πλάκας. Η προσβολή αυτή καταδεικνύει την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων στην περιοχή της ιονίζουσας ακτινοβολίας.

Στα πλαίσια των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δύο έγχρωμα φωτογραφικά φιλμ αυτόματης εμφάνισης, το Polaroid PX 70 (125 ASA) και το Polaroid 1200. Όπως φαίνεται στα σχήματα 4.6 και 4.7 καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με το φιλμ Polaroid PX 70 (125 ASA). Ειδικότερα, στην πρώτη φωτογραφία του σχήματος 4.6 φαίνεται η απεικόνιση ενός συνδετήρα. Ωστόσο, η μικρή ευαισθησία του συγκεκριμένου φιλμ δεν μας επέτρεψε να έχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα όπως προκύπτει από τις υπόλοιπες δύο φωτογραφίες του σχήματος 4.6. Αντίθετα, πολύ μεγάλη ευαισθησία είχε το έτερο φιλμ (Polaroid 1200). Το συγκεκριμένο στοιχείο ουσιαστικά καθιστά ανέφικτη την απεικόνιση μέσω της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Αυτό συμβαίνει καθώς, όταν η ακτινοβολία προσβάλει το συγκεκριμένο φωτογραφικό φιλμ, αυτό λόγω της μεγάλης ευαισθησίας καταστρέφεται (το λευκό χρώμα επικρατεί στις φωτογραφίες του σχήματος 4.7). Πάντως, τα αποτελέσματα που προκύπτουν και από τα δύο είδη φωτογραφικού φιλμ αποδεικνύουν την προσβολή από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Καλύτερη, λοιπόν, λύση θα ήταν να χρησιμοποιηθεί ένα φιλμ με ενδιάμεση ευαισθησία (ISO ή ASA), ώστε να γίνεται ακριβής φωτογράφιση των αντικειμένων και των δενδριτών του σχήματος 4.8 που έχουν ληφθεί κατά το παρελθόν.

Με βάση τα παραπάνω, η συγκεκριμένη ακτινοβολία, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί κατάλληλα, αν συνυπολογίσουμε και το γεγονός ότι το κόστος είναι σχετικά χαμηλό. Η εν λόγω διάταξη ουσιαστικά αποτελεί την αρχή λειτουργίας του ενός ακτινογραφικού μηχανήματος. Επομένως, αν μέσω εκτενέστερης έρευνας και μελέτης γίνει εφικτό να κατευθυνθεί η ακτινοβολία, θα ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σαν φορητή συσκευή για την λήψη ακτινογραφιών. Κάτι τέτοιο θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο σε χώρες με χαμηλό βιοτικό επίπεδο, με δεδομένο ότι με τις κατάλληλες μετατροπές μπορεί να λειτουργήσει χωρίς τροφοδοσία από δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αλλά με κάποια μπαταρία ή ακόμα και με φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Βιβλιογραφία

- 1) Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος: “Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., (2003)
- 2) Π.Δ. Μπούρκας: “Εφαρμογές κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., (1998)
- 3) Μπούρκας Π.Δ., Καγιάφας Ε.Α.: “Συντελεστές ηλεκτρικής ανομοιογένειας στερεών μονωτικών”, Τεχνικά Χρονικά, (1987), Τομ. 7, Τεύχος 7
- 4) Μπούρκας Π.Δ., Δέρβος Κ., Καγιάφας Ε.Α.: “ Φαινόμενα γύρασης στο συνδυασμό “βακελίτης- μονωτικό λάδι” κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ζεύξης”, Τεχνικά Χρονικά, (1988), Τομ. 8, Τεύχος 4
- 5) Bourkas P.D., Kayafas E.A., Dervos C., Stathopoulos I.A.: “Eine mogliche Erklarung der Glimmentladungen in festen Isolierstoffen bei Stossspannungsbeanspruchung”, etz-Archiv, (1989), B.d. 11
- 6) Bourkas P.D., Stathopoulos I.A., Kayafas E.A.: “Entwicklung der Teilentladungen an der Isolation Hartpapier in Transformatoroil unter Stossspannungsbeanspruchung”, e&1, Jahrgang 106, (1989)
- 7) Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A.: “High frequency current oscillations in solid dielectris”, J- Physics D - Applied Physics, Vol 22, (1989)
- 8) Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A.: “Potential profile of dielectrics during impulse application”, Physika Status Solidi (a), Vol. 112, (1989)
- 9) Bourkas P.D., Stathopoulos I.A., Topalis F.V.: “Breakdown of the pressboard-oil insulation under repeated stress by impulse voltages”, International Journal of Energy Systems, Vol. 10, No. 1, (1990)
- 10) Bourkas P.D., Dervos C., Eleftheriou M., Kagarakis C.: “Ionisationsvorgange beim Gleitdurchschlag der festen organischen Isolierstoffe”, Physica Scripta, Vol. 42, (1990)
- 11) Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A.: “Enhanced partial discharges due to temperature increase in the compinead system of a solid-liquid dielectric”, IEEE Trans. Elec. Insul. Vol 25, No 3 (1990)
- 12) 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)
- 13) Dervos C., Bourkas P.D., Kagarakis C.A.: “Charge transport through a "metal-thick insulator-metal" structure during impulse voltage exitation”, Journal of Electrostatics, Vol. 26, (1991)

14) 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 of power and Energy Systems, Vol. 14, No 3, (1994)

15) 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)

16) Bourkas P.D.: “Radiation emission phenomena in a metall-dielectric-metall model under high electric fields”, International Journal of Power and Energy Systems, Vol.15, No. 2, (1995)