



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**ΜΙΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ
ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΜΕ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΟΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ
ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

Εμμανουήλ Ι. Κουφάκη

**Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού
Πολυτεχνικής Σχολής Πανεπιστημίου Πατρών**

Αθήνα, Δεκέμβριος 2008



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών
Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων
και Συστημάτων Αποφάσεων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ι. ΚΟΥΦΑΚΗ
ΔΙΠΛ. ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΤΙΤΛΟΣ

«ΜΙΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ
ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΜΕ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΟΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ
ΔΙΑΝΟΜΗΣ»

Επιβλέπων:

Π.Δ. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Π.Δ. Μπούρκας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Ν.Ι. Θεοδώρου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή την

Π.Δ. Μπούρκας.
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ν.Ι. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π..

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

Μ.Π. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Κ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ι. Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. Μαυράκης
Αναπλ. Καθηγητής
Πανεπιστημίου Αθηνών

Αθήνα, Δεκέμβριος 2008

.....
Εμμανουήλ Ι. Κουφάκης

Διδάκτωρ Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Εμμανουήλ Ι. Κουφάκης, 2008.
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.

Αφιερώνεται
στην οικογένειά μου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις της ΔΕΗ στα Χανιά και στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα.

Από τη θέση αυτή επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα, του οποίου οι πολύτιμες συμβουλές, η επιστημονική καθοδήγηση και η ηθική υποστήριξη υπήρξαν καθοριστικές και συνετέλεσαν ουσιαστικά στην εκπόνηση αυτής της διατριβής. Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης και στα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής Καθηγητές κ.κ. Κ. Καραγιαννόπουλο και Ν. Θεοδώρου για τη βοήθεια και συμπαράστασή τους.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους κα Αικ. Πολυκράτη και κ. Π. Τσαραμπάρη για την άριστη συνεργασία μας σε θέματα που ανέκυψαν κατά την εκπόνηση της διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους συναδέλφους στη ΔΕΗ Χανίων κ.κ. Σ. Κοκάκη, Ε. Μανωλακάκη, Κ. Σωμάκη και Γ. Κωνσταντουδάκη οι οποίοι με προθυμία και επιδεξιότητα με συνέδραμαν στην κατασκευή και τον εξοπλισμό του χώρου πειραματισμού και μετρήσεων, καθώς και στη διακίνηση των προς μέτρηση μετασχηματιστών.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου, για την υπομονή που έδειξε, αλλά και τη θερμή υποστήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διατριβής.

Ε. Ι. Κουφάκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο μετασχηματιστής διανομής είναι ένα ζωτικό και ακριβό στοιχείο του δικτύου μέσης τάσεως. Η προληπτική διάγνωση και συντήρηση των μετασχηματιστών είναι απαραίτητες προκειμένου να βελτιωθεί η αξιοπιστία των ηλεκτρικών συστημάτων.

Η εργασία αυτή αναφέρεται σε μετρήσεις της αντίστασης μόνωσης μετασχηματιστών διανομής σε διάφορες θερμοκρασίες και στον υπολογισμό, στη συνέχεια, του θερμικού συντελεστή των μετασχηματιστών. Μετρήθηκαν συνολικά 72 μετασχηματιστές διανομής από όπου υπήρξαν χρήσιμα συμπεράσματα για την γήρανση και την υπολειπόμενη διάρκεια ζωής τους. Παρουσιάζεται μια μέθοδος πρόβλεψης της διάρκειας ζωής των μετασχηματιστών διανομής, η οποία μπορεί να έχει εφαρμογή και σε άλλο εξοπλισμό των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, όπως διακόπτες, μετασχηματιστές εντάσεως, πυκνωτές κλπ.

Η εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο δίδεται μια εισαγωγή στα ηλεκτρομονωτικά υλικά (υγρά και στερεά) καθώς και στις δύο βασικές θεωρίες των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, ήτοι: τη μακροσκοπική θεωρία και την κβαντομηχανική θεωρία. Παρουσιάζεται το σύστημα μόνωσης λαδιού-χαρτιού των μετασχηματιστών και οι βασικές τεχνικές για διάγνωση της κατάστασής του. Τέλος αναπτύσσεται και παρουσιάζεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή το οποίο διευκολύνει τη μελέτη των ποικίλων φαινομένων που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του.

Το δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας αφορά τον σκοπό της έρευνας που έγινε, ο οποίος είναι ο προσδιορισμός του θερμικού συντελεστή του μετασχηματιστή και η προσέγγιση της διάρκειας ζωής των μόνωσης του μετασχηματιστή, καθώς και άλλων συσκευών των δικτύων των οποίων το μονωτικό σύστημα αποτελείται από λάδι ή χαρτί και λάδι.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίδεται η μέθοδος πειραματισμού και περιγράφεται η διαδικασία των μετρήσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και υπολογισμών, σε πίνακες και γραφικές παραστάσεις, χωρίς κανένα σχόλιο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνονται σχόλια επί των μετρηθεισών αντιστάσεων και επί των υπολογισθέντων θερμικών συντελεστών β των μετασχηματιστών.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προτεινόμενη μέθοδος εκτίμησης του υπολειπόμενου χρόνου ζωής των μετασχηματιστών διανομής. Φαίνεται ότι ο θερμικός συντελεστής του μετασχηματιστή είναι ένα χρήσιμο μέγεθος αξιολόγησής του, γιατί σε συνδυασμό με τη μέτρηση της αντίστασης μόνωσης δίδει πληροφορίες για τη διάρκεια ζωής της μόνωσης.

Το έβδομο κεφάλαιο αναφέρεται στη συμβολή της εργασίας στην έρευνα και στις πρακτικές εφαρμογές.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

ABSTRACT

The distribution transformer is a vital and costly element of the medium voltage network. Preventive diagnosis and maintenance of transformers are necessary in order to improve the reliability of power systems.

This thesis primarily refers to measurements of insulating resistance in distribution transformers, at various temperatures, and there-after to calculations of the thermal coefficient of the transformers. There were realized measurements on 72 distribution transformers, that resulted in useful conclusions on ageing and the remnant life of the transformers. A method for transformer life cycle prediction is presented. The method can also be applied to other devices of the electric network, having oil or oil and paper as insulating system.

The thesis consists of seven sections. In the first section an introduction on dielectric materials (liquid and solid) is given, as well as on the two basic theories of the phenomena before and during the breakdown of the solid insulation materials, that is the macroscopic and the quantum mechanical theory. The oil-paper transformer insulating system is presented, as well as the basic techniques for the assessment of its condition. At the end of the section a transformer equivalent circuit is developed, that facilitates the study of the various phenomena that are presented during its operation.

The second section of this thesis has to do with the aim of the realized research, which is the calculation of the thermal coefficient of the transformer and the approach of the life time of the transformer insulation.

The third section describes the method of experimentation and the measurement procedure.

In the fourth section the results of measurements and calculations are presented.

In the fifth section comments on the measured resistances and on the calculated thermal coefficients β of the transformers are made.

In the sixth section the proposed method for estimation of the remnant life of the distribution transformers is presented. It seems that the transformer thermal coefficient is a useful magnitude for transformer valuation, because in combination with the measurement of the insulation resistance gives information about the life cycle of the insulation.

The seventh section refers to the contribution of this thesis in the research and in practical applications.

At the end of the thesis the bibliography is cited.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

I.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.	ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	2
1.1	Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών.....	2
	1) Η διηλεκτρική αντοχή.....	2
	2) Η σχετική διηλεκτρική σταθερά.....	2
	3) Ο συντελεστής απωλειών (tgδ).....	2
	4) Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	4
	5) Ο συντελεστής $\epsilon \cdot tg\delta$	5
	6) Η επιφανειακή αγωγιμότητα.....	6
	7) Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.....	6
	8) Η μηχανική αντοχή.....	6
2.	ΤΑ ΥΓΡΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ.....	7
2.1	Ιδιότητες των υγρών μονωτικών.....	7
2.2	Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στο μονωτικό λάδι.....	9
2.3	Μέσα ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών.....	10
3.	ΤΑ ΣΤΕΡΕΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ.....	11
3.1	Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών.....	11
3.1.1	Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών.....	12
	α) Η θερμική διάτρηση.....	12
	β) Η ηλεκτρική διάτρηση.....	14
	γ) Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης).....	17
	(I) Γενικά περί μερικών εκκενώσεων.....	17
	(II) Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων.....	18
	δ) Η θερμοχημική διάτρηση.....	23
	ε) Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.....	23
	1) Ο συνδυασμός της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.....	24
	2) Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.....	24
	3) Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.....	25

	στ) Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση.....	26
3.1.2	Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών.....	26
	α) Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών.....	27
	β) Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση.....	33
	γ) Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών.....	35
	δ) Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση.....	35
3.1.3	Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών.....	37
4.	ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΩΣΕΩΣ ΕΛΑΙΟΥ-ΧΑΡΤΟΥ.....	38
4.1	Η κυτταρίνη.....	40
4.2	Μονωτικά λάδια.....	42
5.	ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ.....	43
5.1	Χημικές τεχνικές διάγνωσης της μόνωσης.....	43
5.1.1	Ανάλυση της υγρασίας.....	43
5.1.2	Ανάλυση των διαλυμένων στο λάδι αερίων.....	44
5.1.3	Μετρήσεις του βαθμού πολυμερισμού.....	45
5.1.4	Ανάλυση των παραγομένων φουρανίων.....	45
5.2	Ηλεκτρικές διαγνωστικές μέθοδοι.....	46
5.2.1	Μέτρηση του δείκτη πόλωσης και του συντελεστή απωλειών	46
5.2.2	Η μέτρηση της τάσης επιστροφής.....	47
5.2.3	Η μέτρηση των ρευμάτων πόλωσης-αποπόλωσης.....	47
6.	Ο ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ...	48
6.1	Ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή.....	49
6.1.1	Μακροσκοπική θεώρηση.....	54
	(α) Θερμική διάτρηση.....	55
	(β) Ηλεκτρική διάτρηση.....	55
	(γ) Διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων. Ηλεκτροχημική διάτρηση ή γήρανση της μόνωσης.....	55
	(δ) Θερμοχημική διάτρηση.....	56
6.1.2	Κβαντομηχανική θεώρηση.....	58

II. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	61
III. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ..	63
1. Η μέθοδος πειραματισμού.....	63
2. Οι διατάξεις μέτρησης.....	64
2.1 Η διάταξη μέτρησης της αντίστασης μονώσεως μεταξύ των τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως.....	66
2.2 Η διάταξη μέτρησης της αντίστασης μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου.....	67
IV. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	68
IV.1 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-12988.....	69
IV.1.1 Μέτρηση αντιστάσεων μονώσεως μετασχηματιστή N-12988	69
IV.1.2 Επεξεργασία μετρήσεων μετασχηματιστή N-12988.....	69
IV.2 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-21168.....	74
IV.2.1 Μέτρηση αντιστάσεων μονώσεως μετασχηματιστή N-21168	74
IV.2.2 Επεξεργασία μετρήσεων μετασχηματιστή N-21168.....	74
IV.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-25804.....	79
IV.3.1 Μέτρηση αντιστάσεων μονώσεως μετασχηματιστή N-25804	79
IV.3.2 Επεξεργασία μετρήσεων μετασχηματιστή N-25804.....	79
IV.4 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-21641.....	84
IV.4.1 Μέτρηση αντιστάσεων μονώσεως μετασχηματιστή N-21641	84
IV.4.2 Επεξεργασία μετρήσεων μετασχηματιστή N-21641.....	84
IV.5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-19694.....	89
IV.5.1 Μέτρηση αντιστάσεων μονώσεως μετασχηματιστή N-19694	89
IV.5.2 Επεξεργασία μετρήσεων μετασχηματιστή N-19694.....	89
IV.6 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-18058.....	94
IV.6.1 Μέτρηση αντιστάσεων μονώσεως μετασχηματιστή N-18058	94
IV.6.2 Επεξεργασία μετρήσεων μετασχηματιστή N-18058.....	94
IV.7 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-20428.....	99
IV.7.1 Μέτρηση αντιστάσεων μονώσεως μετασχηματιστή N-20428	99
IV.7.2 Επεξεργασία μετρήσεων μετασχηματιστή N-20428.....	99
IV.8 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-16825.....	104
IV.8.1 Μέτρηση αντιστάσεων μονώσεως μετασχηματιστή N-16825	104
IV.8.2 Επεξεργασία μετρήσεων μετασχηματιστή N-16825.....	104
IV.9 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-18731.....	109
IV.9.1 Μέτρηση αντιστάσεων μονώσεως μετασχηματιστή N-18731	109

IV.9.2	Επεξεργασία μετρήσεων μετασχηματιστή N-18731.....	109
IV.10	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	114
V.	ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	117
VI.	Η ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΛΕΠΟΜΕΝΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	121
VII.	ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	124
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	125

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μετασχηματιστές, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελούν ένα βασικό στοιχείο των ηλεκτρικών δικτύων και ένα σημαντικό πάγιο περιουσιακό στοιχείο των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Γι' αυτό η διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών του δικτύου ενδιαφέρει ιδιαίτερα, και δεν είναι υπερβολή να λεχθεί ότι αυτή εξαρτάται ουσιαστικά από τη διάρκεια ζωής της μόνωσής τους. Για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον πάνω στη διάγνωση της κατάστασης της μόνωσης των μετασχηματιστών. Το μονωτικό σύστημα των μετασχηματιστών αποτελείται κατά βάση από λάδι και χαρτί. Ο συνδυασμός των μονωτικών αυτών υλικών δίδει στην πράξη πολύ καλά αποτελέσματα και βρίσκει εκτεταμένη εφαρμογή σε πολλές ηλεκτροτεχνικές κατασκευές και εξοπλισμό των ηλεκτρικών δικτύων. Το χρησιμοποιούμενο μονωτικό λάδι λαμβάνεται από την κλασματική απόσταξη του πετρελαίου. Πέραν των καλών μονωτικών του ιδιοτήτων, διευκολύνει επίσης την απαγωγή της θερμότητας η οποία δημιουργείται κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών. Η πρώτη ύλη παρασκευής του χαρτιού είναι το ξύλο - υλικό σε αφθονία στη φύση - πράγμα που καθιστά το χαρτί οικονομικό για τη χρήση του σαν μονωτικό στη βιομηχανία μετασχηματιστών, η οποία καταναλώνει τεράστιες ποσότητες υπό μορφή χαρτιού, πεπιεσμένου χαρτιού και χαρτονιού. Κατά την πολύχρονη λειτουργία των μετασχηματιστών, τα μονωτικά υλικά υφίστανται θερμικές, ηλεκτρικές και μηχανικές καταπονήσεις, οι οποίες αλλοιώνουν τις αρχικές τους ιδιότητες και υποβαθμίζουν την μονωτική τους ικανότητα.

Στη συνέχεια δίδεται μια εισαγωγή στα ηλεκτρομονωτικά υλικά (υγρά και στερεά) και εξετάζεται η συμπεριφορά αυτών κάτω από τις διάφορες καταπονήσεις, τόσο με τη μακροσκοπική όσο και με την κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων που εκδηλώνονται [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10]. Για τα συγκεκριμένα μονωτικά υλικά – λάδι και χαρτί – τα οποία χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές, δίδεται μια εκτενέστερη παρουσίαση των ιδιοτήτων τους, καθώς και της συνεργασίας αυτών στο μονωτικό σύστημα των μετασχηματιστών. Παρατίθενται οι βασικές διαγνωστικές τεχνικές για τον προσδιορισμό της κατάστασης της μόνωσης των μετασχηματιστών και δίδεται μια σύντομη ανασκόπηση των πρόσφατων σχετικών ερευνών. Τέλος, αναπτύσσεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή, το οποίο, εκτός από το ηλεκτρικό κύκλωμα, περιλαμβάνει και το μονωτικό του σύστημα και συνδυάζει τη μακροσκοπική και τη κβαντομηχανική θεωρία για τα φαινόμενα που οδηγούν στη μείωση της ηλεκτρομονωτικής ικανότητας.

1. ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

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 για 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. Στο κεφάλαιο αυτό δίδονται βασικοί όροι και έννοιες που διέπουν τα ηλεκτρομονωτικά υλικά και αποτελούν επίσης βασικά κριτήρια αξιολόγησης αυτών.

1.1 Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών

Η ανάγκη για την αξιόπιστη διαχρονική συμπεριφορά των διαφόρων μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή υψηλών τάσεων έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους, τα οποία δεν αφορούν μόνο τις ηλεκτρικές (ή διηλεκτρικές) ιδιότητές 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, κλπ. Τα κριτήρια αυτά είναι [1,2,10]:

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.

2) Η σχετική διηλεκτρική σταθερά

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

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

Ο συνδυασμός του χαρτιού με το μονωτικό λάδι είναι μία μόνωση, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην πράξη, γιατί [11]:

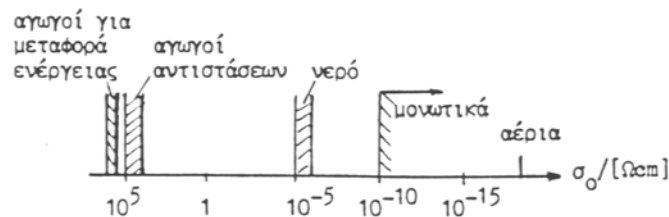
- α) τα δύο αυτά μονωτικά έχουν την ίδια περίπου σχετική διηλεκτρική σταθερά με αποτέλεσμα να μη συμβαίνει ουσιαστικά διάθλαση των γραμμών στη διαχωριστική επιφάνειά τους, και
- β) το λάδι εμποτίζει το χαρτί, ώστε να αποκλείεται έτσι η ύπαρξη του αέρα, ο οποίος μόνο προβλήματα θα μπορούσε να δημιουργήσει, λόγω της μικρής του διηλεκτρικής αντοχής (κυρίως βλάβες στην επιφάνεια του χαρτιού από μερικές εκκενώσεις ή διάσπασης σε φυσαλίδες του αέρα). Το θέμα αυτό και γενικότερα η συνεργασία του μονωτικού λαδιού με τα στερεά μονωτικά εξετάζονται εκτενέστερα σε επόμενα κεφάλαια.

3) Ο συντελεστής απωλειών ($tg\delta$)

Σε μία μόνωση, που παρεμβάλλεται μεταξύ ηλεκτροδίων με σκοπό τη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας, οι οποίες υπό εναλλασσόμενη τάση οφείλονται [12,13]:

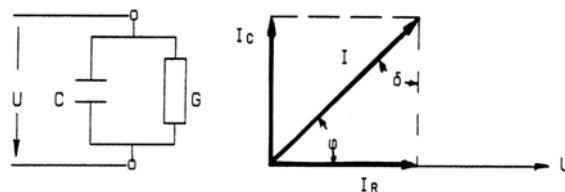
- α) στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροής των δίπολων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης, και β) στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά (σχήμα 1.1-1).

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 1.1-1 : Τάξη μεγέθους της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διαφόρων κατηγοριών υλικών

Στο σχήμα 1.1-2 δίδεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με ομοιογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητας G του

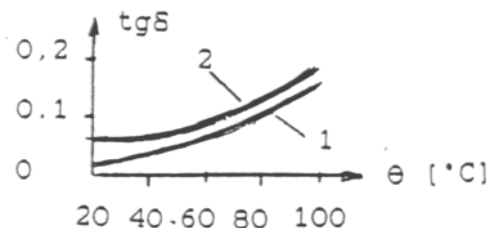


Σχήμα 1.1-2 : Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας G του διηλεκτρικού του

Ο συντελεστής απωλειών :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C} \quad (1.1-1)$$

είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μίας μονωτικής διάταξης γενικότερα), γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του (σχήμα 1.1-3). Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό η $\operatorname{tg} \delta$ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 1.1-3 : $\operatorname{tg} \delta$ ορισμένων διηλεκτρικών
1 : σκληρό χαρτί, 2 : πορσελάνη

Οι απώλειες Joule (P_W) στην αγωγιμότητα G είναι :

$$P_W = I_R U = G U^2 = U^2 \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta = P_B \operatorname{tg} \delta \quad (1.1-2)$$

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

4) Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μία πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σχήμα 1.1-1), που εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή της πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία, κλπ). Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι επομένως ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των διηλεκτρικών, γιατί εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς [14].

Η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα στερεά μονωτικά, σε τιμές πεδίου, που η καταπόνηση του διηλεκτρικού μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μόνο θερμική, δίδεται από την σχέση [1,2,10,14]:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.1-3)$$

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

σ_0 : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

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

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

T : η απόλυτη θερμοκρασία

β : ένας συντελεστής του υλικού

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

Για μεγαλύτερες τιμές της πεδιακής έντασης από προηγουμένως, η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας οφείλεται κυρίως στις μερικές εκκενώσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι στην περίπτωση αυτή συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, όπως στα ιονισμένα αέρια και ότι δεν ισχύει η σχέση 1.1-3.

Για την αύξηση της τιμής σ , από τις απώλειες του διηλεκτρικού και τις μερικές εκκενώσεις, έχει διατυπωθεί η σχέση [1,2,10] :

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\exp(\beta\theta)}{(1-\delta E)^2} \quad (1.1-4)$$

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

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 [1,3].

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

Για ένα πυκνωτή επίπεδων πλακών ισχύει :

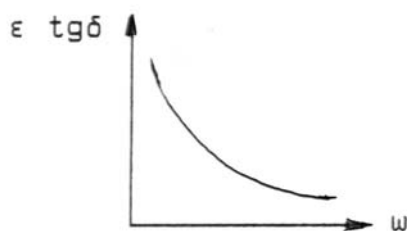
$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.1-5)$$

όπου:

$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, είναι η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού και εξαρτάται, λόγω του ε_r , από το είδος του υλικού και την στατιστικότητα των θέσεων ανομοιογένειας σε αυτό.

$\varepsilon_0 \approx 8,854 \text{ pC/Vm}$ είναι η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά.

Στο σχήμα 1.1-4 δίδεται η γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής κατά την παραπάνω σχέση. Το γινόμενο $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών.



Σχήμα 1.1-4 : $\varepsilon \operatorname{tg} \delta = f(\omega)$ για το ομοιογενές μονωτικό υλικό.
(Υποτίθεται ότι η τιμή σ είναι σταθερή με τη θερμοκρασία)

Από τις σχέσεις 1.1-3 και 1.1-5 προκύπτει 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 $U < U_a$, όπου U_a η τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων) αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία :

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma_0}{\omega} e^{\beta\theta} \quad (1.1-6)$$

Αν θεωρήσουμε την τιμή ε ως σταθερή, τότε από την παραπάνω σχέση έπεται ότι η αύξηση της $\varepsilon \cdot t g \delta$ είναι εκθετική (σχήμα 1.1-3).

Για την αύξηση της τιμής $\varepsilon \cdot t g \delta$ στην περιοχή του στερεού μονωτικού, όπου οι μερικές εκκενώσεις οφείλονται στην αύξηση των απωλειών Joule, έχουμε αντίστοιχα (από τις σχέσεις 1.1-4 και 1.1-5) :

$$\varepsilon \cdot t g \delta = \frac{\sigma_0}{\omega} \frac{e^{\beta \theta}}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.1-7)$$

6) Η επιφανειακή αγωγιμότητα

Η διηλεκτρική αντοχή των στερεών μονωτικών μειώνεται, όταν η επιφάνειά τους περιλαμβάνει ξένες επικαθίσεις (σκόνη, υγρασία, κλπ). Το ίδιο συμβαίνει όταν καταπονηθεί θερμικά η επιφάνεια. Έχει διαπιστωθεί, ότι στα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και μερικές εκκενώσεις), συμμετέχει η επιφάνειά τους σε πάχος μέχρι 30 \AA [1,6,13]. Γι' 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 επιφάνειά τους (όπως : αντοχή σε ρεύμα διαρροής, αντοχή σε ηλεκτρικό τόξο, δυνατότητα απομάκρυνσης των επικαθίσεων κατά τη βροχή κλπ.), που ενδιαφέρουν στην πράξη για την κατασκευή π.χ. μονωτήρων και φλογοθαλάμων διακοπών. Με κριτήριο π.χ. τη μείωση του ποσοστού της σκόνης συμπεραίνει κανείς, ότι οι μονωτήρες πορσελάνης χρησιμοποιούνται ως εξωτερικού χώρου, έναντι των μονωτήρων ρητίνης (που χρησιμοποιούνται ως εσωτερικού χώρου), γιατί η επιφάνειά τους διευκολύνει περισσότερο στην απομάκρυνση της σκόνης κατά τη βροχή [15].

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. : ανομοιογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο λάδι). Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντοτε κατά τη λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ. : απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπών, κλπ.). Επειδή γενικά ισχύει, ότι η θερμική ειδική αγωγιμότητα (λ) συμβαδίζει με την ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα, η τιμή λ είναι (όπως και η τιμή σ) ένα κριτήριο για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών [1,2,10,16].

8) Η μηχανική αντοχή

Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρουν (εκτός από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών) και οι μηχανικές ιδιότητές τους, όπως π.χ. : τα πλαστικά μέρη του μηχανισμού περιστροφής ενός ασφαλειοαποζεύκτη σε ένα πίνακα μέσης τάσης, η αντοχή σε εφελκυσμό ενός μονωτικού, η δύναμη τάνυσης σε μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς, κλπ.). 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 αντοχή 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, κλπ). 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.

2. ΤΑ ΥΓΡΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ

2.1 Ιδιότητες των υγρών μονωτικών

Τα υγρά μονωτικά υλικά έχουν αρκετά μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από ότι τα αέρια σε ατμοσφαιρική πίεση (π.χ.: διηλεκτρική αντοχή του αέρα 21kV/cm και διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών 60÷200kV/cm). Η σημασία τους στις πρακτικές εφαρμογές είναι μεγάλη γιατί έχουν τα παρακάτω γνωρίσματα:

- α) Μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ($\approx 0,3 \cdot 10^{-3}$ cal/cms^oC), με αποτέλεσμα να διευκολύνουν την απαγωγή θερμότητας, η οποία δημιουργείται στους αγωγούς, τις επαφές διακοπών και τους σιδηροπυρήνες μετασχηματιστών.
- β) Ο συνδυασμός τους με στερεά μονωτικά δεν επιτρέπει την ύπαρξη του αέρα, ο οποίος προκαλεί βλάβες στις επιφάνειες των στερεών μονωτικών. Αυτό επιτυγχάνεται όταν η πλήρωση του χώρου, που καταλαμβάνει το υγρό μονωτικό, γίνεται υπό συνθήκες κενού σε ορισμένη θερμοκρασία. Τυπικό παράδειγμα της διαδικασίας αυτής είναι η πλήρωση των δοχείων των μετασχηματιστών υψηλών τάσεων με λάδι.

Ο συνδυασμός, ειδικότερα χαρτί-λάδι έχει μεγάλη εφαρμογή, λόγω της περίπου ίδιας σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, που έχουν τα υλικά αυτά [1,2,10,11].

Το κυρίως χρησιμοποιούμενο υγρό μονωτικό, σε μετασχηματιστές, καλώδια, διακόπτες και πυκνωτές, είναι το μονωτικό λάδι. Παράγεται σαν κλάσμα της απόσταξης του πετρελαίου και η χημική του σύσταση διαφέρει ανάλογα με την προέλευση του πετρελαίου. Τα μονωτικά λάδια διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες :

- 1) Τα *μεθανέλαια* : Στα λάδια αυτά κυριαρχούν κεκορεσμένοι υδρογονάνθρακες τύπου παραφίνης. Από τη γεωλογική άποψη είναι τα παλαιότερα λάδια.
- 2) Τα *ναφθανέλαια* : Κυριαρχούν ακόρεστοι υδρογονάνθρακες τύπου ναφθαλίνης.
- 3) Τα *ναφθαλμεθανέλαια* : Είναι μείγμα των δύο προηγούμενων, χωρίς όμως να κυριαρχεί κανένας από τους δύο τύπους υδρογονανθράκων.

Η θερμοκρασία ανάφλεξης του μονωτικού ελαίου είναι συνήθως 130÷140°C. Γι' αυτό, ως μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους καθορίζεται στις προδιαγραφές (VDE, IEC, κλπ) θερμοκρασία της τάξεως των 90°C.

Τα μονωτικά λάδια είναι γενικώς ακίνδυνα για το προσωπικό κατά τις διάφορες εργασίες κατασκευών και συντήρησης (εκτός βέβαια από εργασίες που μπορούν να προκαλέσουν τιμές της θερμοκρασίας στην περιοχή ανάφλεξης).

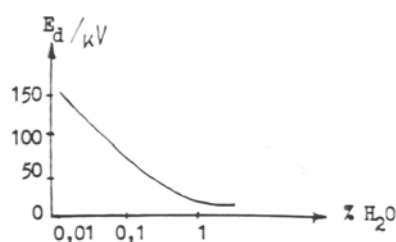
Τα μονωτικά λάδια οξειδώνονται από τον αέρα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή τους. Γι' αυτό, η παρουσία του αέρα αποκλείεται στις κατασκευές που χρησιμοποιείται το μονωτικό λάδι.

Η υγρασία προκαλεί δραστική μείωση στη διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ελαίου (Σχήμα 2.1-1) [1,10].

Η *tgd* των μονωτικών ελαίων (για συχνότητα 50Hz και 0,5÷1kV) στους 90 °C πρέπει να είναι μικρότερη από 0,005, σύμφωνα με το IEC 296/82 [1,10,17].

Η διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών ελαίων εξαρτάται, όπως εκείνη των αερίων και στερεών μονωτικών, από τη διάταξη των ηλεκτροδίων και τη μορφή της τάσης. Ισχύει δηλαδή ότι [1,10]:

- 1) Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο, τόσο μειώνεται η τάση διάσπασης.
- 2) Η διηλεκτρική αντοχή υπό κρουστική τάση είναι μεγαλύτερη από ότι με εναλλασσόμενη τάση 50Hz επί 1min.
- 3) Η διηλεκτρική αντοχή υπό συνεχή τάση είναι μεγαλύτερη από ότι με εναλλασσόμενη τάση.
- 4) Η τάση διάσπασης κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις είναι μεγαλύτερη κατά την αρνητική πολικότητα από ότι κατά τη θετική (φαινόμενο πολικότητας)



Σχήμα 2.1-1 : Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού ελαίου ανάλογα με το ποσοστό του νερού.

Ο έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής των μονωτικών ελαίων γίνεται με ειδικές συσκευές. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, καθώς και η διαδικασία δοκιμής, καθορίζονται ανάλογα με τον κανονισμό που θα γίνουν οι δοκιμές (VDE 0370/10 66, B.S.S 148-195, A.S.T.M D870-49, C.E.I. 10-1 VI 1953). Γι' αυτό, όταν δίνονται τα αποτελέσματα ενός ελέγχου, είναι απαραίτητο να γίνεται αναφορά στον κανονισμό δοκιμών (π.χ. 50kV κατά VDE).

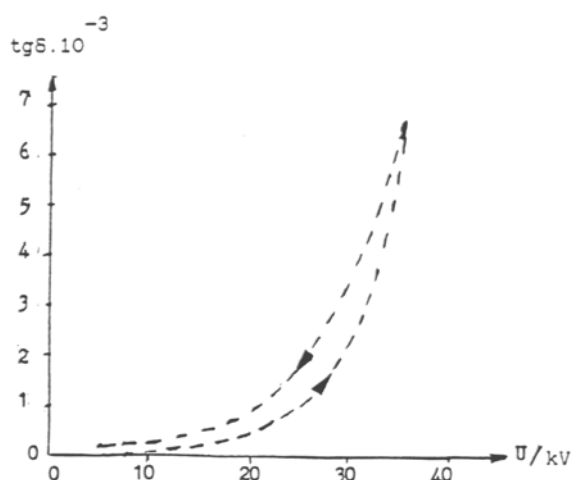
Στα μονωτικά υγρά ανήκουν επίσης υδρογονάνθρακες οι οποίοι έχουν υποστεί χλωρίωση (το χλώριο έχει αντικαταστήσει μεμονωμένα άτομα υδρογόνου), όπως : το Askarel, το Pyranol, το Nerdin κλπ. Τα μονωτικά αυτά, που η εφαρμογή τους άρχισε από το έτος 1934, είναι άκαυστα και έχουν περίπου διπλάσια έως τριπλάσια διηλεκτρική σταθερά ως προς το μονωτικό έλαιο. Δεν χρησιμοποιούνται πλέον, γιατί περιέχουν τοξικά συστατικά, που μετατρέπονται βιολογικά στη φύση σε επικίνδυνες ουσίες (για περισσότερες πληροφορίες βλ. παράγραφο 4.2).

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

Ένα άλλο υγρό μονωτικό είναι το σιλικονούχο έλαιο (υδρογονάνθρακες που περιλαμβάνουν πυρίτιο). Είναι εύφλεκτο υλικό και γι' αυτό έχει πολύ περιορισμένη πρακτική εφαρμογή [18].

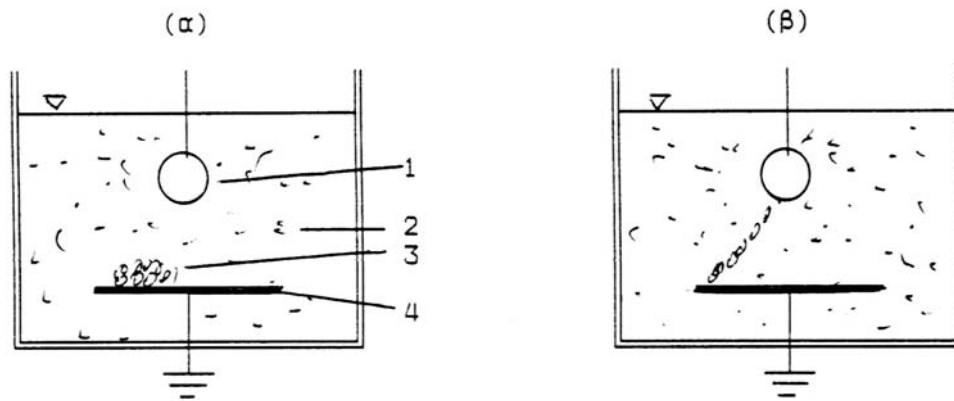
2.2 Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στο μονωτικό λάδι

Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης του μονωτικού ελαίου δεν έχουν ερμηνευτεί πλήρως. Έχει διατυπωθεί η άποψη, ότι οι παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής μπορεί να είναι οι ίδιοι με εκείνους κατά τη γήρανση και διάσπαση των στερεών μονωτικών. Η δυσκολία για τη μελέτη των παραπάνω παραγόντων στο λάδι, οφείλεται στην αλλαγή της μοριακής δομής του μετά από μία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης. Η αλλαγή αυτή διαπιστώνεται πειραματικά από την αύξηση της τιμής $tg\delta$ μετά από καταπόνηση (Σχήμα 2.2-1) [1,2,10,19].



Σχήμα 2.2-1 : $tg\delta=f(U)$ στο λάδι μετασχηματιστών.

Εκτός από τους παράγοντες αυτούς, η γήρανση και η διάσπαση του μονωτικού ελαίου αποδίδεται κυρίως στα αιωρούμενα σε αυτό ξένα σωματίδια, τα οποία φαίνεται ότι μειώνουν τις αποστάσεις μόνωσης, γιατί σχηματίζουν αγώγιμες γέφυρες μεταξύ των ρευματοφόρων μερών με διαφορετικό δυναμικό. Το φαινόμενο αυτό μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί πειραματικά με τη διάταξη του σχήματος 2.2-2, όπου τα μικρά τεμάχια χαρτιού (3) διατάσσονται κατά την εφαρμογή της τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων [1,2,10,20].



Σχήμα 2.2-2 : Πειραματική απόδειξη για τη διάταξη των αιωρούμενων σωματιδίων στο μονωτικό λάδι, υπό μορφή γέφυρας μεταξύ των ηλεκτροδίων.

1, 4 : ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης

2 : μονωτικό λάδι

3 : τεμάχια χαρτιού

α) Τεμάχια χαρτιού πάνω στο ηλεκτρόδιο πλάκα προ της εφαρμογής της τάσης.

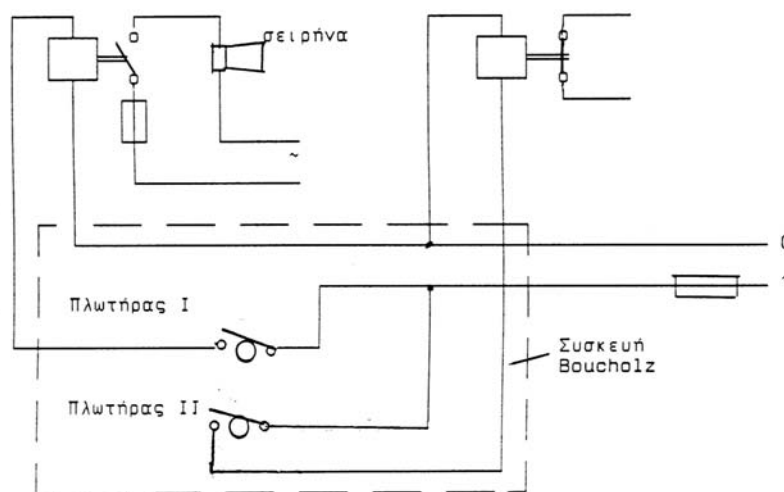
β) Διάταξη των τεμαχίων χαρτιού κατά την εφαρμογή της τάσης.

2.3 Μέσα ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών

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

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής Boucholz (σχήμα 2.3-1) βασίζεται στα αέρια, που παράγονται κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού. Τα αέρια διέρχονται από την συσκευή Boucholz, η οποία έχει δύο πλωτήρες (I και II). Όταν ο χώρος του Boucholz καταλαμβάνεται μόνο από λάδι, τότε οι πλωτήρες αυτοί είναι δύο ανοικτές επαφές. Κατά την μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού εισχωρούν τα παραγόμενα αέρια στο χώρο του Boucholz. Όταν το ποσοστό τους είναι μικρό κλείνει ο πλωτήρας I και ενεργοποιείται έτσι το κύκλωμα της σειρήνας. Για μεγαλύτερο ποσοστό αερίων κλείνει και

ο πλωτήρας II, με αποτέλεσμα να τεθεί εκτός λειτουργίας ο αυτόματος διακόπτης. Η συσκευή Boucholz διαθέτει χειροκίνητη βαλβίδα εξαερισμού, η οποία είναι απαραίτητη κατά την πρώτη εγκατάσταση (ή μετά την αλλαγή λαδιών). Έχει επίσης γυάλινο παραθυράκι για τον έλεγχο της θέσης των πλωτήρων [1,10].



Σχήμα 2.3-1 : Κύκλωμα της προστασίας Boucholz

Η ανάλυση της σύνθεσης και των συγκεντρώσεων των παραγομένων αερίων χρησιμοποιείται σαν μέθοδος διάγνωσης της κατάστασης της μόνωσης των μετασχηματιστών, όπως αναλυτικά παρουσιάζομε στο κεφάλαιο 5.

3. ΤΑ ΣΤΕΡΕΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ

3.1 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών

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

Από τις διάφορες έρευνες, που έχουν γίνει, για τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών μπορεί κανείς να ομαδοποιήσει τις μεθόδους, που εφαρμόζονται, σε δύο βασικές θεωρίες [1,2,4,5,6,7,8,9,10,19,21,22,23,24,25,26] :

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 ανωτέρω βιβλιογραφία στη "μακροσκοπική θεωρία", τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται (ή αποσκοπούν) σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση ακουστικών και φωτεινών φαινομένων, καθώς και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού. Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια. Πρόκειται δηλαδή για μία συσχέτιση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση, με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που εκπέμπεται τότε.

3.1.1. 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 μία εξήγηση στις παραπάνω αλλαγές των υλικών (προ και κατά τη διάτρηση), οδήγησε στην αναζήτηση των διαφόρων παραγόντων, που τις προκαλούν. Έτσι, από μετρήσεις, που έχουν γίνει σε διάφορα στερεά μονωτικά (κυρίως μετρήσεις της τάσης διάσπασης σε σχέση με το χρόνο και τη μορφή της τάσης), οι οποίες έχουν συνδυαστεί με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής, που προκαλείται στα υλικά αυτά, θεωρείται ότι υπάρχουν οι παρακάτω βασικοί παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων τους [1,2,8,10,11,19,22,23,24,27] :

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

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

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

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

α) Η θερμική διάτρηση

Η μορφή της διάτρησης αυτής συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule (π.χ. κακή απαγωγή θερμότητας από τη μόνωση ενός καλωδίου λόγω σκόνης και ύγρανσης). Η εικόνα που παρουσιάζει το θερμικά καταπονούμενο υλικό είναι συνήθως η απανθράκωση και η τήξη του, στην περιοχή όπου οι απώλειες Joule είναι ιδιαίτερα αυξημένες [1,2].

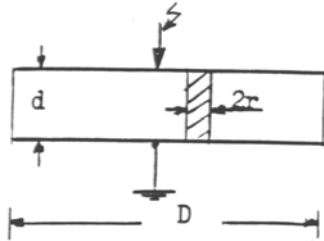
Ο οχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 , οπότε έχουμε (κατά τη σχέση 1.1-3) :

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (3.1.1-1)$$

Με την προϋπόθεση σταθερής διατομής (A) του οχετού διάτρησης (σχήμα 3.1.1-1) και ειδική αγωγιμότητα σ_1 , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι :

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} \quad (3.1.1-2)$$

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



Σχήμα 3.1.1-1 : Απλοποιημένη παράσταση του οχετού διάτρησης λόγω των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού .
 D : διάμετρος δοκιμίου
 d : πάχος του μονωτικού
 $2r$: διάμετρος του οχετού διάτρησης.

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

$$P = P_a + C_0 (d\theta / dt) \quad (3.1.1-3)$$

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

$$P_a = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (3.1.1-4)$$

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:

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (3.1.1-5)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δύο συναρτήσεις της θερμοκρασίας ($P=f(\theta)$ και $P_a=f(\theta)$). Για το λόγο αυτό, η οριακή τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση (U_θ) δίδεται όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι από τη διαφορίση ως προς θ , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης 3.1.1-5, έχουμε [1,2,10,14]:

$$\frac{\beta U_\theta^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \quad (3.1.1-6)$$

Από τις σχέσεις 3.1.1-5 και 3.1.1-6 φαίνεται ότι:

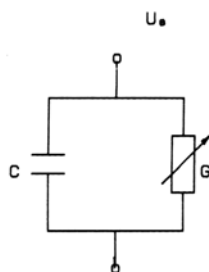
$$\beta \cdot \theta = 1 \quad (3.1.1-7)$$

και

$$U_\theta = d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (3.1.1-8)$$

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_θ μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα 3.1.1-2, όπου (συγκριτικά προς το ισοδύναμο κύκλωμα του ομοιογενούς μονωτή : σχήμα 1.1-2), η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μία μεταβλητή αγωγιμότητα G [1,2,10].

Η διάτρηση στην τιμή U_θ συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ_0 στην τιμή σ_1 : σχέση 3.1.1-1), μία οριακή τιμή G_{\max} .



Σχήμα 3.1.1-2 : Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule.

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

G_0 : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή

G_{\max} : αγωγιμότητα για τη διάτρηση

C : χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή

β) Η ηλεκτρική διάτρηση

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

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

α) αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις (όπως στα αέρια μονωτικά), ή

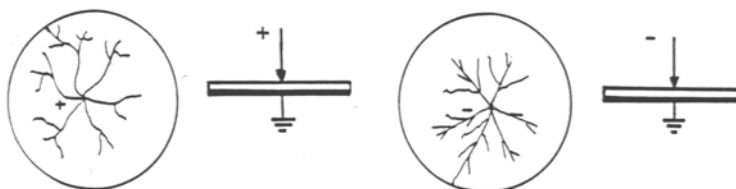
- β) μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή
 γ) συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

Η μορφή της διάτρησης αυτής ονομάζεται ηλεκτρική και διακρίνεται, ανάλογα με την εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση, στη δενδροειδή (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) και εκείνη υπό μορφή οχετού κατά τη διεύθυνση του πεδίου (ηλεκτρομηχανική) [1,2,10,14].

Η δενδροειδής διάτρηση είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, γιατί, λόγω της μεγαλύτερης τιμής της τάσης και επομένως της πεδιακής έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά τη διάτρηση σχετίζεται με θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μία διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγωγή σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 3.1.1-3 δίδεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη (ανάλογα με την πολικότητα της τάσης) για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (ηλεκτρόδια ακίδα-πλάκα) [1,2,10].

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

Όταν όμως η ακίδα είναι αρνητική, οι δυνάμεις απομάκρυνσης μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων είναι, λόγω της μεγάλης ακτίνας, μικρότερες και έτσι οι διαδρομές είναι περίπου οι ακτίνες του κύκλου, των οποίων όμως η λαμπρότητα μειώνεται προς την περιφέρειά του. Έχουμε δηλαδή, ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας, ομοιότητα με τις εικόνες Lichtenberg κατά τη μέτρηση κεραυνών [1,2,10].



Σχήμα 3.1.1-3 : Προς επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη

Η διάτρηση υπό μορφή οχετού (ή ηλεκτρομηχανική διάτρηση) οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από ότι κατά τη δενδροειδή διάτρηση. Στα πολυμερή υλικά διαχωρίζονται τα μόρια σε αρνητικούς και θετικούς φορείς. Η διάτρηση συμβαίνει κυρίως από τις δυνάμεις Coulomb, που εξασκούνται μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η χρονική διάρκεια του φαινομένου είναι μερικά μs. Η εικόνα, που παρουσιάζει το υλικό είναι κυρίως το αποτέλεσμα μίας ακαριαίας εξάσκησης δυνάμεων, στην περιοχή όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα μεγάλη (μηχανική τάνυση, υπό την επίδραση των δυνάμεων του πεδίου) [1,2,10].

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις έχει διαπιστωθεί, ότι πάνω από μία μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης $U_{κmin}$, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, συμβαίνει η διάτρηση με μία κρούση υπό μορφή οχετού, αν και η τιμή της πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης. Η μορφή της διάτρησης αυτής χαρακτηρίζεται επίσης ως ηλεκτρομηχανική. Το φαινόμενο έχει αποδοθεί στην απότομη μεταβολή της πεδιακής έντασης, λόγω της οποίας δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα

την ηλεκτρομηχανική διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ του αρνητικού ηλεκτροδίου και των θετικών ηλεκτρικών φορέων, που συγκρατούνται στο πλέγμα των μορίων [21].

Λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας για την ηλεκτρική διάτρηση και επειδή τα στερεά μονωτικά είναι και μονωτές θερμότητας, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμότητα που απάγεται μόλις πριν από τη διάτρηση είναι αμελητέα. Κατά τη σχέση επομένως 3.1.1-3 και για έναν οχετό διατομής $A=\pi r^2$ (κατά το Σχήμα 3.1.1-1) ισχύει μόλις προ της διάτρησης ότι:

$$U_n^2 \sigma_2 \frac{A}{d} = \sigma_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (3.1.1-9)$$

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

Αν υποθέσουμε ότι, λόγω του μικρού διατιθέμενου χρόνου είναι $d\theta/dt = \theta/T_\delta$, όπου T_δ ο χρόνος για την ηλεκτρική διάτρηση, τότε από τη σχέση 3.1.1-9 έχουμε :

$$U_n = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_\delta}} \quad (3.1.1-10)$$

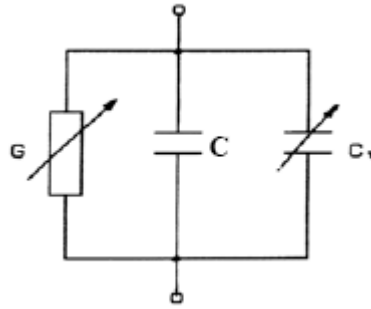
Για τη διάτρηση στη μέγιστη τιμή \hat{U}_{kn} μιας κρουστικής τάσης ισχύει αντίστοιχα:

$$\hat{U}_{kn} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_S}} \quad (3.1.1-11)$$

όπου T_S η διάρκεια του μετώπου της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν μία ικανοποιητική ερμηνεία σε πειράματα, που έχουν γίνει. Πράγματι, όσο αυξάνει ο χρόνος T_S μίας κρουστικής τάσης, τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή.

Μία ερμηνεία της ηλεκτρικής διάτρησης, μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος, μπορεί να δοθεί ως ακολούθως [1,2,10]:



Σχήμα 3.1.1-4 : Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα

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

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

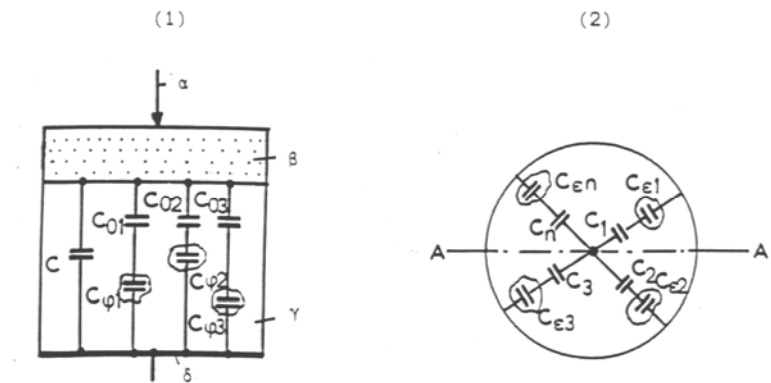
Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μία κρίσιμη για το υλικό τιμή σ_2 , η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα (σχήμα 3.1.1-4), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_{π} (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C .

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

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

(I) Γενικά περί μερικών εκκενώσεων

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (εσωτερικές μερικές εκκενώσεις), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνεια του (εξωτερικές εκκενώσεις). Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίδεται στο σχήμα 3.1.1-5. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές $C_{\varepsilon 1}...C_{\varepsilon n}$ και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές $C_{\varphi 1}...C_{\varphi n}$. Οι πυκνωτές $C_1...C_n$ και $C_{01}...C_{0n}$ παριστάνουν αντίστοιχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (κάθε ένας από αυτούς δίνει την ολική χωρητικότητα δύο πυκνωτών, εκ των οποίων ο ένας είναι η χωρητικότητα μεταξύ ακίδας και της θέσης διαταραχής και ο άλλος η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας και της θέσης διαταραχής) [1,2,8,10,14,22,23].



Σχήμα 3.1.1-5 : Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής σε στερεό μονωτικό εντός μονωτικού ελαίου

1) Τομή A-A της διάταξης πειραματισμού :

α : ηλεκτρόδιο ακίδα

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

γ : στερεό μονωτικό

δ : ηλεκτρόδιο πλάκα

2) Κάτοψη της διάταξης πειραματισμού :

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

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

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

$C_{φ1} \dots C_{φn}$: πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων)

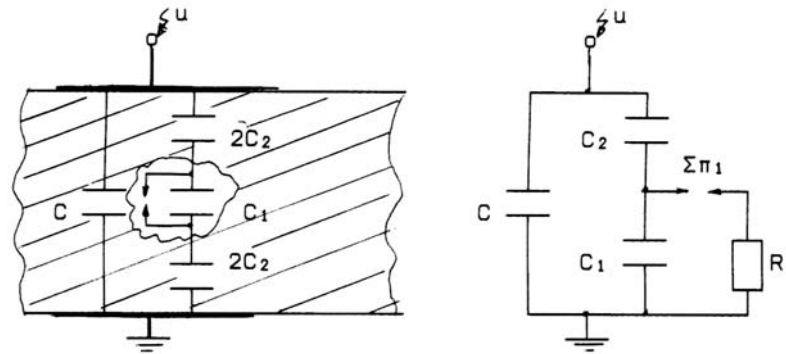
$C_{01} \dots C_{0n}$: πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος του στερεού μονωτικού

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

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

(II) Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων

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



Σχήμα 3.1.1-6 : 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

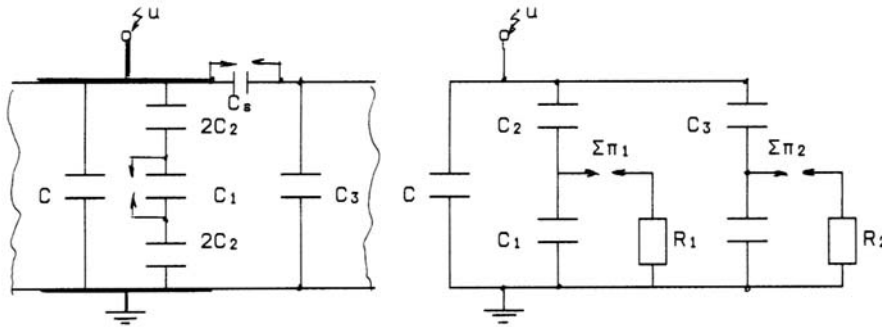
C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

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

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 κύκλωμά τους (σχήμα 3.1.1-6), γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου [23].

Στο σχήμα 3.1.1-7 έχει συμπληρωθεί το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο και για τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C_1) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (C_e). Με τον τρόπο δηλαδή αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού (C_2 και C_3 αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Οι σπινθηριστές $\Sigma\pi_1$ και $\Sigma\pi_2$ στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R_1 , R_2) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C_1 , C_e).

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη. Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς συχνά στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα 3.1.1-8 [1].



Σχήμα 3.1.1-7 : Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής.

α : σχηματική παράσταση

β : ισοδύναμο κύκλωμα

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας

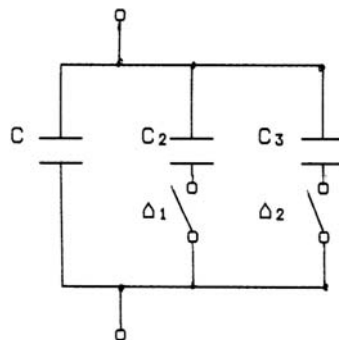
C_ϵ : χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

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

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



Σχήμα 3.1.1-8 : Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff).

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

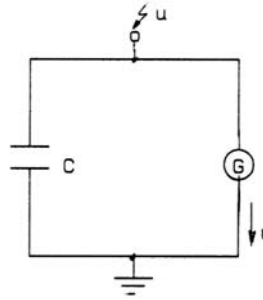
C_2 : χωρητικότητα του υγιούς στον όγκο του μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υγιούς στην επιφάνεια του μονωτικού

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

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φυσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κλπ. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann [1,2,10] δίνει επίσης μία ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 3.1.1-9). Σύμφωνα με αυτό, οι θέσεις διαταραχής αποδίδονται ως μία γεννήτρια μερικών

εκκενώσεων G. Έτσι, όταν διεγείρεται η γεννήτρια G συμβαίνει αύξηση του δυναμικού στους ακροδέκτες της διάταξης.



Σχήμα 3.1.1-9 : Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann.

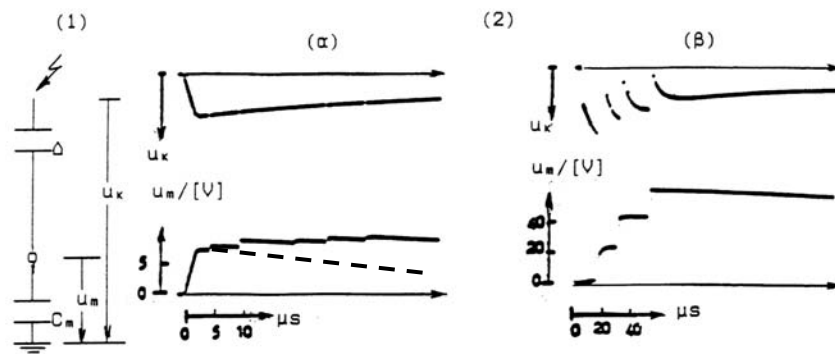
C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

G : γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

Ακολουθως εξετάζεται ένα παράδειγμα ερμηνείας των μερικών εκκενώσεων μέσω των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων [1,2,10]. Στο σχήμα 3.1.1-10 δίδεται απλοποιημένα το κύκλωμα για τη μέτρηση των μερικών εκκενώσεων. Σύμφωνα με αυτό δοκίμια στερεών μονωτικών πάχους 1mm (Δ), καταπονούνται με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 μ s, υπό διάταξη ηλεκτροδίων "ακίδα-πλάκα" (με ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας 0,9mm), σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. Το παλμογράφημα (α) αφορά τη γήρανση του βακελίτη και το παλμογράφημα (β) τη διάτρηση του pertinax. Η διακεκομμένη γραμμή, που έχει σχεδιαστεί στο παλμογράφημα (α), δείχνει την ιδανική συμπεριφορά (όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις) κατά την οποία ισχύει η σχέση καταμερισμού [1,21]:

$$u_m(t) = \frac{C_\delta}{C_m} u_k(t) \quad (3.1.1-12)$$

όπου C_δ η χωρητικότητα της διάταξης των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 3.1.1-10 : Τυπικά παλμογραφήματα κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών

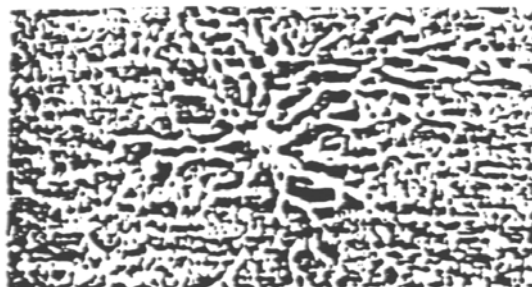
- 1) απλοποιημένη διάταξη μέτρησης (u_{κ} : στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης, Δ : δοκίμιο, u_m : τάση στον πυκνωτή μέτρησης C_m).
- 2) Μετρήσεις με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 μ s:
 - (α) γήρανση : (τιμή πεδίου 1,11MV/cm, $\hat{U}_{\kappa} = 77,5$ kV, $C_m = 210$ nF, υλικό: βακελίτης)
 - (β) διάτρηση: (τιμή πεδίου 1,20MV/cm, $\hat{U}_{\kappa} = 85$ kV, $C_m = 210$ nF, υλικό: pertinax)

Σημείωση: Η διακεκομμένη γραμμή στο παλμογράφημα (α) δείχνει την ιδανική συμπεριφορά (όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις)

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι, μετά από μία τιμή $\hat{U}_{\kappa} \approx 45$ kV (όπου \hat{U}_{κ} η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται κατά τη γήρανση επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 3.1.1-11).

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

Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται ως ακολούθως [1,2,10]:



Σχήμα 3.1.1-11 : Αλλαγή της μοριακής δομής στην επιφάνεια του μονωτικού pertinax κατά την εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη (μετά από πολλές κρούσεις 10/200 μ s, μέγιστης τιμής 75kV)

Από το παλμογράφημα της γήρανσης σχήμα 3.1.1-10 (α) φαίνεται ότι εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού, τα οποία προκαλούνται, κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.1.1-7 (ή του σχήματος 3.1.1-5), από τη σταδιακή

διάσπαση διαφόρων θέσεων διαταραχής (C_1, C_e). Μπορούμε να υποθέσουμε ότι στην περίπτωση αυτή ισχύει για την σχέση καταμερισμού μεταξύ χωρητικότητας του δοκιμίου C και του πυκνωτή μέτρησης C_m :

$$u_m(t) = \frac{C_\delta + \Delta C_\delta}{C_m} u_k(t) \quad (3.1.1-13)$$

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

δ) Η θερμοχημική διάτρηση

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη (σχέση 1.1-6 και σχέση 1.1-7). Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως η ενέργεια εξόδου των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από το πλέγμα των μορίων είναι μικρότερη [24].

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

Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής και δίδεται από τη σχέση [1,2,10,14] :

$$U_a = \sqrt{a \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma_0}} \quad (3.1.1-14)$$

όπου a σταθερά του υλικού που εξαρτάται από τη μορφή της τάσης. Η σταθερά a έχει την τιμή 2,83 για καταπόνηση με συνεχή τάση, ενώ για εναλλασσόμενη τάση είναι 1,88 [14]. Η θερμική τάση ανατροπής αποτελεί το κριτήριο για το τεχνικοοικονομικό πάχος των στερεών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές (όπως μετασχηματιστές, καλώδια κλπ). Η τιμή είναι για τα περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση 50Hz, της τάξης του 1MV [1,2,10,14].

Έρευνες που έχουν γίνει σε στερεά μονωτικά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο του στερεού μονωτικού ενισχύει τις μερικές εκκενώσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται, λόγω της θερμότητας του περιβάλλοντος, σε μικρότερες τιμές της τάσης απ' ότι σε κανονική θερμοκρασία (20°C), με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός δια κρούσεως σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου απ' ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C [5].

ε) Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 3.1.1 τα φαινόμενα προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών μπορούν να αποδοθούν σε τέσσερις βασικούς παράγοντες αποσταθεροποίησης των μορίων (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb, μερικές εκκενώσεις και θερμότητα του περιβάλλοντος), οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως παράγοντες

γήρανσης και διάτρησης. Οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται στην πράξη με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού.

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

Όπως είναι γνωστό, οι διεθνείς προδιαγραφές προσδιορίζουν τα ανώτερα όρια υπερθέρμανσης των ηλεκτρολογικών κατασκευών υψηλής τάσης, βάσει των οποίων καθορίζεται το ονομαστικό ρεύμα (δοκιμή υπερθέρμανσης ή ανύψωσης θερμοκρασίας). Έτσι, έχει γίνει αποδεκτό κάποιο όριο θέρμανσης, που είναι π.χ. της τάξης των $40\div 50^{\circ}\text{C}$ 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 [1,2,10] :

- 1) Αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα (σχέση 1.1-3).
- 2) Διευκολύνεται η εξάσκηση δυνάμεων Coulomb, γιατί οι δεσμοί στο πλέγμα των μορίων των πολυμερών υλικών γίνονται ασθενέστεροι.
- 3) Ενισχύεται ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων, λόγω μεγαλύτερης ευκινησίας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κυρίως στις φυσαλίδες αερίου (σχέση 1.1-4).

Έτσι, αυξάνει διαχρονικά η t_{gd} και μειώνεται η διάρκεια ζωής του στερεού μονωτικού και των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών γενικότερα. Η καταπόνηση, που υφίσταται το στερεό μονωτικό, ανάλογα με τη θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου του φαίνεται ότι προκαλεί μείωση της τάσης για την θερμική διάτρηση, λόγω αύξησης της αγωγιμότητάς του. Επίσης, με την παραδοχή ότι στα στερεά μονωτικά εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις κατά τη δένδροειδή ή την ηλεκτρομηχανική διάτρηση, μπορούμε να υποθέσουμε ότι ισχύει κάτι ανάλογο με τα αέρια, ότι δηλαδή η αύξηση της θερμοκρασίας σημαίνει μείωση του μέσου ελεύθερου μήκους (λ) των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια). Γι' αυτό, η αύξηση της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου φαίνεται ότι προκαλεί μείωση και της τιμής της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση [1,2,10,27,28].

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

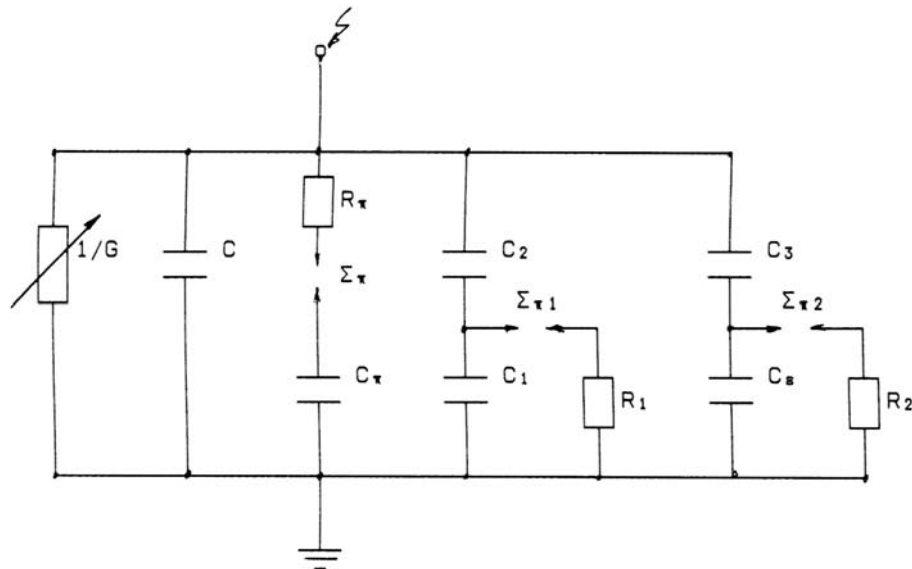
Οι μερικές εκκενώσεις θεωρείται ότι είναι ο κυρίαρχος παράγοντας γήρανσης και διάσπασης των μονώσεων στην πράξη. Μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών μερικών εκκενώσεων, προεξάρχοντα ρόλο έχουν οι τελευταίες, γιατί σχετίζονται με χημικές μεταβολές στον όγκο του υλικού (οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις από ξένες επικαθίσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν με προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης).

Μέχρι τώρα θεωρήσαμε ότι η θερμική διάτρηση αρχίζει σε μία θέση του μονωτικού υλικού, όπου αρχικά, λόγω κάποιας ανομοιογένειας, υπάρχει η αιτία για τοπική αύξηση της αγωγιμότητας. Εμβαθύνοντας μπορούμε να πούμε ότι στην ανομοιογένεια το υλικό έχει μικρότερη διηλεκτρική αντοχή (ή ισοδύναμα υφίσταται μεγαλύτερη πεδιακή ένταση), με αποτέλεσμα να εμφανίζονται εκεί μερικές εκκενώσεις, πράγμα το οποίο εκδηλώνεται ως τοπική αύξηση της αγωγιμότητας του υλικού. Η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις στη θέση όπου εκδηλώνεται η μερική εκκένωση, και επειδή πρακτικά η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι μηδενική, έχει σαν αποτέλεσμα η τάση διάτρησης να μειώνεται. Το αυτό ισχύει και για τη θερμική τάση ανατροπής [29].

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 [25].

Έχει προταθεί το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.1.1-12 προκειμένου να αποδοθεί ο συνδυασμός όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης (κατά τη μακροσκοπική θεωρία) [1,2,10]. Όπως φαίνεται πρόκειται ουσιαστικά για μία παράλληλη σύνδεση ενός πυκνωτή C_{π} , προς το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff. Ο πυκνωτής αυτός εκφράζει την πόλωση του υλικού, λόγω της οποίας συμβαίνει η μηχανική τάνυσή του από τις δυνάμεις του πεδίου. Η διαδρομή εκκένωσης εκφράζεται στην περίπτωση αυτή με τον σπινθηριστή Σ_{π} και την αντίσταση του τόξου R_{π} (υποτίθεται ότι ο Σ_{π} διασπάται ταυτόχρονα με τον πυκνωτή C_{π}). Για να αποδώσει το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα το συνδυασμό όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης (κατά τη μακροσκοπική θεωρία), φαίνεται ότι θα πρέπει να γίνει η παράλληλη σύνδεση μίας μεταβλητής αγωγιμότητας (G), που θα εκφράζει τις θερμικές απώλειες (απώλειες Joule και ενίσχυσή τους από τις μερικές εκκενώσεις) και την καταπόνηση του υλικού από τη θερμότητα του περιβάλλοντος.



Σχήμα 3.1.1-12 : Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

C : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

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

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

C_{ε} : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών.

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

C_{π} : Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου.

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

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

R_{π}, 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 ενίσχυσή τους από τις μερικές εκκενώσεις και τη θερμότητα του περιβάλλοντος.

στ) Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση

Η εκδήλωση των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στη διαχωριστική επιφάνεια του συνδυασμού "στερεό μονωτικό-αέριο μονωτικό", ή του συνδυασμού "στερεό μονωτικό-υγρό μονωτικό" θα οδηγήσει σε επιφανειακή διάσπαση, όταν μία ομάδα ελεύθερων ηλεκτρονίων (η οποία, με βάση τις οπτικές παρατηρήσεις, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μία διαδρομή της δένδροειδούς 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) [6,26].

Από πειράματα είναι γνωστό [1,2,10], 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 [13]. Έτσι, εκτός από τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις (οι οποίες οφείλονται σε ξένες επικαθίσεις και έχουν συνήθως τον κυρίαρχο ρόλο στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στην επιφάνεια), μπορεί κανείς να υποθέσει ότι εκδηλώνονται και οι άλλοι παράγοντες (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος), όπως κατά τη διάτρηση. Μπορεί επομένως να θεωρηθεί, ότι ισχύει το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.1.1-12, 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.

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

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 3.1.1, 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 [3,5], 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) [1,2,6,7,8,9,10,30].

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, κατά την προαναφερθείσα βιβλιογραφία, κυρίως :

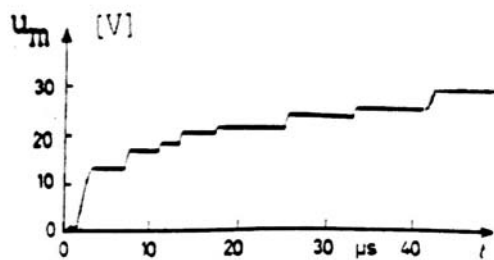
- στις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις (δηλαδή από παλμογραφήματα όπως εκείνο του σχήματος 3.1.1-10).
- στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης (ως στοιχείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε δηλαδή μία αντίσταση, αντί του πυκνωτή μέτρησης : βλέπετε σχήμα 3.1.1-10 α),
- στην ανίχνευση του μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση)
- στην ικανοποιητική πειραματική και θεωρητική ταύτιση του μηχανισμού παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

Στη κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια). Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την ενέργεια Fermi των ηλεκτροδίων διευκολύνει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Τα βασικότερα συμπεράσματα από τη θεωρία αυτή είναι [1,2,5,6,7,9,10,30] :

- 1) Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί, ότι :
 - α) το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.
 - β) Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα)
- 2) Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 2,5-4,5) [1,2,10] 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 1.1-3: $\sigma = \sigma_0 \exp(-W / kT)$
- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση 1.1-3. 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 (κατά την αύξηση της τάσεως παρατηρείται μείωση του ρεύματος). Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια.

α) 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 [1,2,8,10]: Στα σχήματα 3.1.2-1÷3.1.2-3 δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα της τεχνητής γήρανσης στερεών πολυμερών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και στο σχήμα 3.1.2-4 ένα παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου [1,8,10]. Η διάταξη μέτρησης έχει σχεδιαστεί απλοποιημένα στο σχήμα 3.1.2-5.



Σχήμα 3.1.2-1 : Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

$$\hat{U}_κ : 100 \text{ kV.}$$

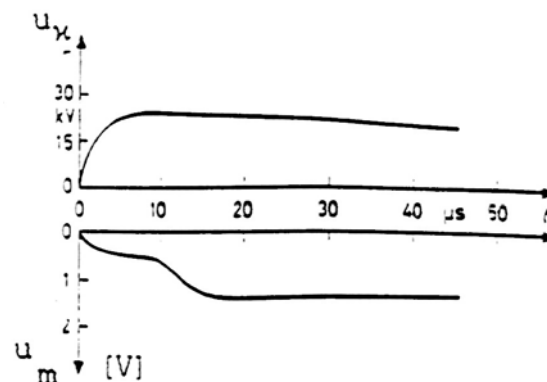
$$E : 0,8 \text{ MV/cm.}$$

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

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 1,2/50μs ή 10/200μs, εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 3.1.2-6). Υπό σταθερή τιμή της τάσης ο δενδρίτης, καθώς και η αντίστοιχη προς αυτόν αλλαγή της μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις
- β) κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs δεν παρατηρήθηκε, υπό σταθερή τιμή της τάσης (που δεν οδηγεί στη διάσπαση), η εκδήλωση του παραπάνω δενδρίτη, ούτε προκλήθηκε αλλαγή της μοριακής δομής

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

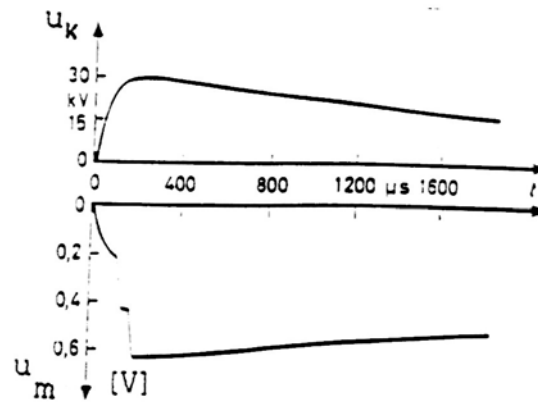


Σχήμα 3.1.2-2: Πρώτο άλμα δυναμικού υπό κρουστική τάση 10/200μs.

$$\hat{U}_κ : 26,6 \text{ kV.}$$

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

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



Σχήμα 3.1.2-3: Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 250/2500μs.

$$\hat{U}_\kappa: 32 \text{ kV.}$$

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

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



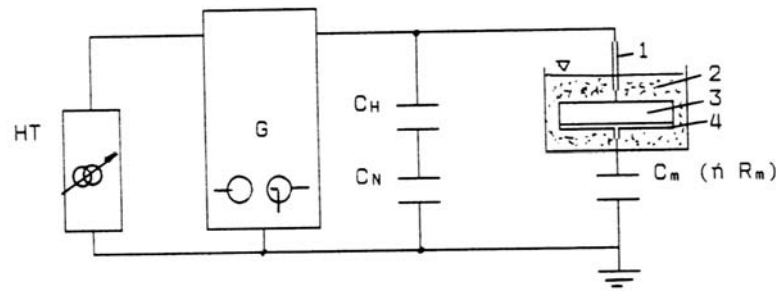
Σχήμα 3.1.2-4: Κρούσεις φορτίου υπό κρουστική τάση 10/200μs.

$$\text{Κλίμακα χρόνου : } 5 \mu\text{s/div.}$$

$$\text{Κλίμακα ρεύματος : } 1,3 \text{ A/div.}$$

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

Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται μέσω της **μακροσκοπικής θεωρίας** από το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 3.1.1-7) ή το ισοδύναμο κύκλωμα όλων των παραγόντων γήρανσης (σχήμα 3.1.1-12).



Σχήμα 3.1.2-5: Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης των αλάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

H.T. : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

G : Γεννήτρια κρουστικών τάσεων.

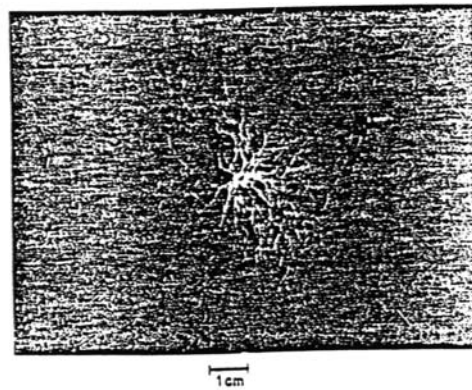
C_H και C_N : Καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης.

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

4 : Ηλεκτρόδιο πλάκα.

C_m : πυκνωτής μέτρησης των αλάτων δυναμικού

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



Σχήμα 3.1.2-6: Εικόνα επιφανειακών διαταραχών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs
 $\hat{U}_κ$: 85 kV, E : 0,8 MV/cm.

Κατά τη **κβαντομηχανική ερμηνεία** ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και όχι ο διαχωρισμός των τελευταίων σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί κατά τη βιβλιογραφία, από την ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης C_m ανά άλμα δυναμικού, με την σχέση [1,2,8,10]:

$$W = 0,5q_e \Delta u \quad (3.1.2-1)$$

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 :

$$\tau = R \cdot C_m \quad (3.1.2-2)$$

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από την σχέση :

$$W = (0,5 \Delta u) / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \text{ σε eV} \quad (3.1.2-3)$$

όπου : Δu σε V και t ο χρόνος φόρτισης του πυκνωτή μέτρησης C_m κατά τη διάρκεια μίας μερικής εκκένωσης (κατά τη βιβλιογραφία περίπου 100ns [1]).

Ορίζοντας ως συντελεστή διόρθωσης f :

$$f = 1 / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \quad (3.1.2-4)$$

Προκύπτει ότι:

$$W = 0,5 \cdot f \cdot \Delta u \text{ σε eV} \quad (3.1.2-5)$$

όπου Δu σε V.

Εκτός από την ενέργεια W για το πρώτο άλμα δυναμικού, μπορεί να υπολογιστεί ο συνολικός αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων N ως ακολούθως:

Το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο κατά την εκδήλωση ενός ή περισσοτέρων αλμάτων δυναμικού (με συνολική αύξηση του δυναμικού κατά Δu) είναι:

$$Q_m = C_m \cdot \Delta u \quad (3.1.2-6)$$

Έτσι, ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων δίδεται από τη σχέση:

$$N = \frac{Q_m}{q_e} = \frac{C_m \cdot \Delta u}{q_e} \quad (3.1.2-7)$$

Στον πίνακα 3.1.2-1 έχουν υπολογιστεί με την παραπάνω σχέση 3.1.2-5 οι τιμές της ενέργειας W για το πρώτο άλμα δυναμικού των παλμογραφημάτων των σχημάτων 3.1.2-1, 3.1.1-2 και 3.1.2-3. Από τις τιμές αυτές φαίνεται, ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών σχετίζεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που μπορεί να περιλαμβάνει υπέρυθρες ακτίνες και υπεριώδεις ακτίνες. Έτσι :

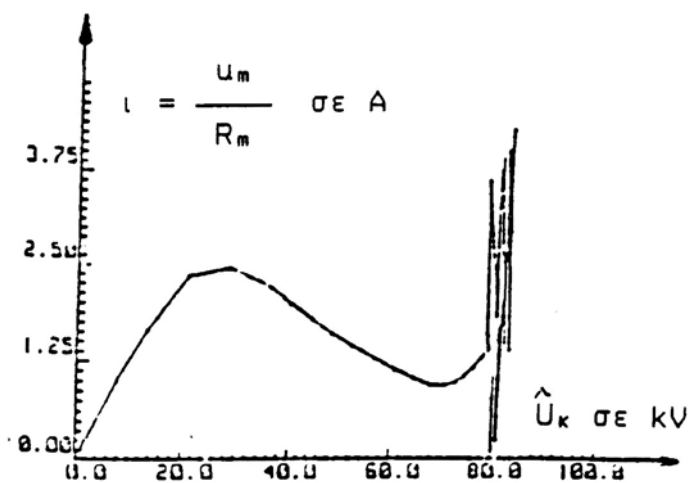
- 1) από τις τιμές της ενέργειας κατά τον πίνακα 3.1.2-1,
- 2) τη φωτεινή ακτινοβολία, που παρατηρείται στην πράξη σε αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων (και η οποία υπολογίζεται εύκολα από τα άλματα δυναμικού), και
- 3) τις ραδιοφωνικές παρεμβολές και τα ακουστικά κύματα, που συχνά προκαλούν 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 [2,7,8,9,10].

Μορφή τάσης	Σχήμα	W σε eV
1,2/50μs	3.1.2-1	$\cong 10,50$
10/200μs	3.1.2-2	$\cong 1,60$
250/2500μs	3.1.2-3	$\cong 0,16$

Πίνακας 3.1.2-1: Τιμές ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πρώτο άλμα δυναμικού.

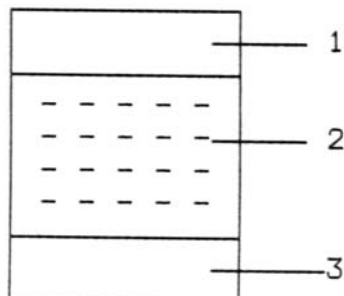
Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γήρανσης έχουν δοθεί από παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου [1,2,8,10,25,26]. Πράγματι από το παλμογράφημα του σχήματος 3.1.2-1 φαίνεται ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις. 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 3.1.2-1). Ο δενδρίτης επομένως, που παρατηρείται, είναι το ορατό φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας. Μπορούμε, να υποθέσουμε, ότι αντίστοιχες δενδροειδούς μορφής εκπομπές συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου (σχήμα 3.1.2-4) 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 3.1.2-7 [1,2,8,10].



Σχήμα 3.1.2-7 : Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης κατά το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου του σχήματος 3.1.2-4

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

στην απαγορευμένη ζώνη, που είναι καθοριστικής σημασίας για την εκδήλωση του ιονισμού (σχήμα 3.1.2-8). Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff (σχήμα 3.1.1-7). Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας [1,2,10].



Σχήμα 3.1.2-8 : Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

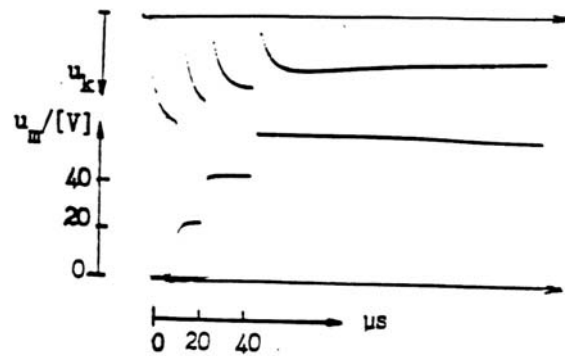
- 1 : ζώνη αγωγιμότητας
- 2 : στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη
- 3: ζώνη σθένους

Από πρόσφατες έρευνες, που έχουν γίνει κατά τη γήρανση στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, υπό εναλλασσόμενη (ή συνεχή) τάση καταπόνησης, διαπιστώνεται επίσης η εκπομπή του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που έχει προαναφερθεί για την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις καταπόνησης ο υπολογισμός της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (πάνω από την ενέργεια Fermi) μπορεί να γίνει, κατά την εκδήλωση αλμάτων δυναμικού, με την σχέση 3.1.2-3 [1].

β) Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση

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

Παρακάτω εξετάζεται ένα παράδειγμα με κρουστικές τάσεις, ώστε να υπάρχουν συγκρίσιμες μετρήσεις με εκείνες της γήρανσης κατά την προηγούμενη παράγραφο. Για το λόγο αυτό, οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με τη διάταξη πειραματισμού του σχήματος 3.1.2-5 [1,2,10]. Τυπικά παλμογραφήματα του φαινομένου δίνονται στα σχήματα 3.1.2-9 και 3.1.2-10. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων (W) έχει υπολογιστεί από την σχέση 3.1.2-5, όπως και κατά την γήρανση. Έτσι, για το πρώτο π.χ. άλμα δυναμικού και $R=0,5\Omega$ (που ήταν η αντίσταση από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης) η τιμή W υπολογίζεται ότι είναι περίπου 105eV. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε, ότι η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων X.



Σχήμα 3.1.2-9 : Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου.

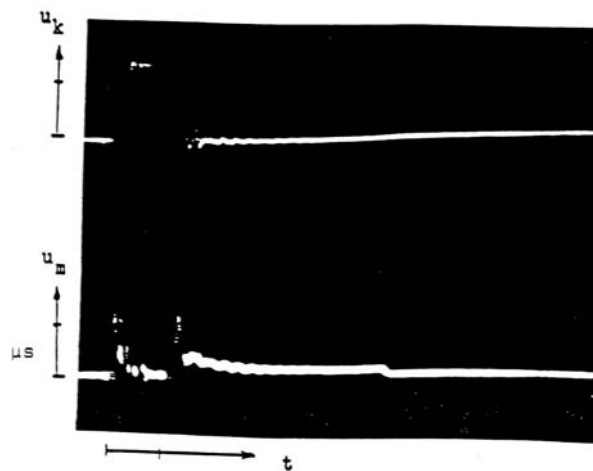
Κρουστική τάση : 1,2/50μs.

R της ακίδας \approx 1mm.

$\hat{U}_κ$: 85 kV.

E : 1,2 MV/cm.

C_m : 1835nF.



Σχήμα 3.1.2-10: Τυπικό παλμογράφημα κρούσεων φορτίου κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση.

R της ακίδας \approx 1 mm.

Μορφή τάσης 1,2/50μs.

$\hat{U}_κ = 85$ kV

E=1,2MV/cm

$R_m = 150\Omega$

u_m : 20V/div

t : 2 μs/div

Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου (σχήμα 3.1.2-10) παρατηρεί κανείς την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Ο αριθμός των κρούσεων περιορίζεται ως

προς εκείνον κατά τη γήρανση, αλλά η τιμή του ρεύματος αυξάνει σημαντικά (συγκρίνατε με το παλμογράφημα του σχήματος 3.1.2-4). Μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι ο μηχανισμός της διάτρησης έχει τα ίδια γνωρίσματα με εκείνον της γήρανσης.

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

γ) 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 [1,3,5,6,8,10] :

$$Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2} \quad (3.1.2-8)$$

όπου:

- E_0 η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων ($E > 0,2\text{MV/cm}$) και Q_0 το φορτίο στον πυκνωτή μέτρησης C_m (σχήμα 3.1.2-5) κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.
- E η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση, λόγω της οποίας το φορτίο στον πυκνωτή μέτρησης C_m αποκτά την τιμή Q .
- A ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από τον χρόνο.

Με βάση την σχέση αυτή έχει γίνει μία ικανοποιητική προσέγγιση πειραματικών χαρακτηριστικών $Q=f(\hat{U}_κ)$ κατά την καταπόνηση στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών (πάχους 1mm ή 2mm) με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή 250/2500 μs) σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Η θεωρητική προσέγγιση έδειξε ότι [1,8,10] :

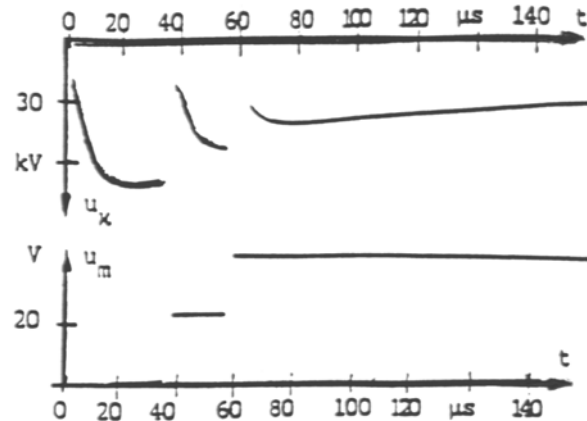
- 1) οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμές πεδίου περίπου $E=0,2\text{MV/cm}$.
- 2) για τιμές πεδίου περίπου μέχρι 0,5 MV/cm η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας διέπεται από την σχέση 1.1-3 ($\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$).
- 3) για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως ισχύει η σχέση 3.1.2-8, με αποτέλεσμα να μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις.
- 4) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ενισχύει σημαντικά τα φαινόμενα ιονισμού. Φαίνεται ότι η σχέση, που διέπει τον συνδυασμό των μερικών εκκενώσεων με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, είναι η 3.1.2-8 [5].

δ) 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 ό,τι και προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης. Συγκεκριμένα αναφέρεται από τη βιβλιογραφία [1,5,6,7,10] το παρακάτω τυπικό παράδειγμα επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών πάχους 2mm

σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 10/200 μ s και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.

Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος 3.1.2-11 υπολογίζεται με την σχέση 3.1.2-3 η ενέργεια W των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η ενέργεια αυτή για το πρώτο και το τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα : 122eV και 96,5eV. Όπως φαίνεται η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτίνων X [6,7,8,30].

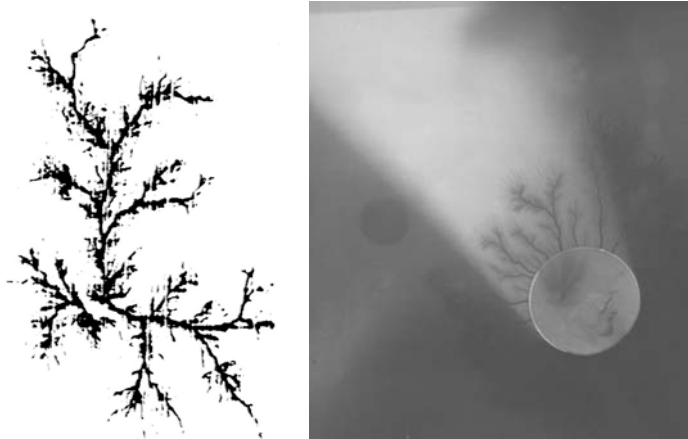


Σχήμα 3.1.2-11: Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pertinax (πάχους 2mm και με διάμετρο της επιφάνειάς του 150mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200 μ s σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου. Ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης : "ακίδα-πλάκα".

Αν τελικά συμβαίνει εκπομπή ακτίνων 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 υπερβόου ακτινοβολίας (τουλάχιστον σε τιμές πεδίου πλησίον της διάσπασης, όπου αυτή να είναι αρκετά eV). Από πειράματα που έχουν γίνει, κατά τη βιβλιογραφία [1,2,6,7,8,10], για τον σκοπό αυτό, φαίνεται ότι προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και απεικονίζονται αντικείμενα, καθώς και βιολογικοί οργανισμοί. Στο σχήμα 3.1.2-12 δίδεται, κατά τη βιβλιογραφία, μία από τις φωτογραφίες αυτές. Επίσης στο ίδιο σχήμα δίδεται και η φωτογραφία ενός επιφανειακού δενδρίτη, που αφορά επιφανειακή διάσπαση [1].

Οι φωτογραφίες του σχήματος 3.1.2-12 αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2mm και διαμέτρου 150mm), υπό κρουστικές τάσης 1,2/50 μ s σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. Οι φωτογραφίες σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, καθώς και εκείνες της διάτρησης (στον αέρα ή στο λάδι), οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα [1].

Τέλος, μπορεί επίσης να συμπεράνει κανείς, ότι ο φωτεινός δενδρίτης και ο σχετός διάσπασης, που παρατηρούνται κατά την ηλεκτρική καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού, αφορούν το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στο υλικό.



Σχήμα 3.1.2-12: Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερών στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση $1,2/50\mu\text{s}$ (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα).

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

Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 3.1.2 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 3.1.2-8 αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του και η τιμή του θα πρέπει να εξαρτάται από την διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Αν π.χ. πραγματοποιήσει κανείς τα πειράματα της παραγράφου 3.1.2-γ με κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$ (ή με $10/200\mu\text{s}$) και προσεγγίσει ακολούθως τις πειραματικές χαρακτηριστικές $Q=f(\hat{U}^k)$ με την σχέση 3.1.2-8, θα διαπιστώσει ότι ο συντελεστής A έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $250/2500\mu\text{s}$. Η διαφορετική αυτή τιμή του συντελεστή A (κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις $1,2/50\mu\text{s}$, ή $10/200\mu\text{s}$) 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, δίδεται στο σχήμα 3.1.3-1 [1]. Πρόκειται ουσιαστικά για μία

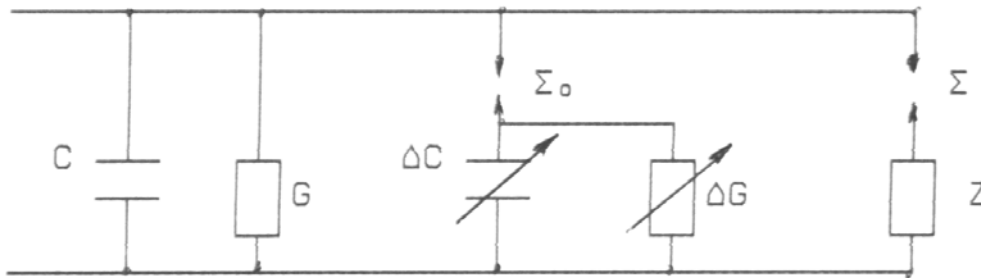
συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant-Philipoff (σχήμα 3.1.1-7), ή ακριβέστερα του ισοδύναμου κυκλώματος όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης κατά το σχήμα 3.1.1-12, όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσει κανείς, ότι 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 3.1.3-1 ως ακολούθως :

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

Η αντίσταση Z συμβολίζει το μη γραμμικό φαινόμενο που εκδηλώνεται.



Σχήμα 3.1.3-1 : Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα

G : ιδανική αγωγιμότητα

ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

ΔG : αύξηση της αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

Z : αρνητική διαφορική αντίσταση

Σ_0 : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Σ : σπινθηριστής εκδήλωσης της Z

Η διαχρονική μεταβολή των τιμών της χωρητικότητας και της αγωγιμότητας, στο ισοδύναμο κύκλωμα συμβολίζεται με τα μεταβλητά στοιχεία ΔC και ΔG .

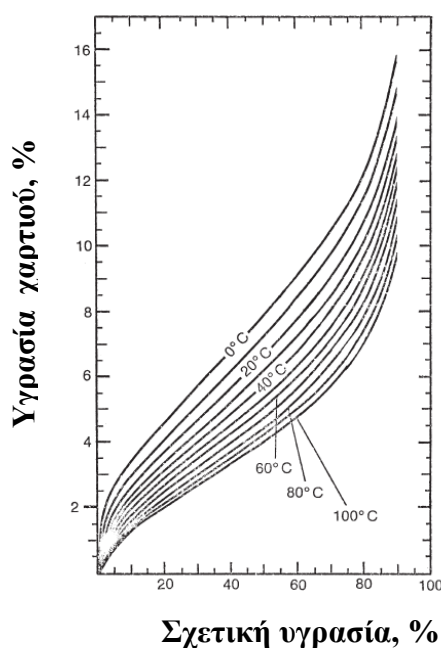
4. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΩΣΗΣ ΕΛΑΙΟΥ-ΧΑΡΤΟΥ

Το σύστημα μόνωσης ελαίου-χάρτου είναι μια σύνθεση από δύο διαφορετικά διηλεκτρικά μέσα, όπου ένα μονωτικό υγρό με ιοντική αγωγιμότητα (λάδι), αναμειγνύεται

με ένα χαμηλότερης αγωγιμότητας εμποτιζόμενο στερεό (χαρτόνι ή χαρτί). Κάθε ένα από τα διηλεκτρικά έχει τη δική του διηλεκτρική απόκριση και, όταν τοποθετηθούν μαζί, η ολική απόκριση δεν αντανακλά μόνο τις ιδιότητες του κάθε υλικού αλλά και του τρόπου με τον οποίο έχουν συνδυαστεί. Όταν τα δύο μέσα τίθενται σε επαφή, εμφανίζεται συγκέντρωση φορτίων στις επιφάνειες επαφής, εξ αιτίας των διαφορετικών ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους. Αν θεωρήσουμε ότι το λάδι και το χαρτί είναι τοποθετημένα σε στρώματα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνισταμένη συμπεριφορά (τη συμπεριφορά του μονωτικού συστήματος) βασισμένοι σε διαδικασίες μοντελοποίησης [31].

Ο μετασχηματιστής ανακαλύφθηκε το 1885 από μια ομάδα Αυστριακών μηχανικών και εξελίχθηκε περισσότερο από άλλους εφευρέτες. Η μόνωση των μετασχηματιστών αναπτύχθηκε σχεδόν ταυτόχρονα με αυτούς. Χρειάστηκαν όμως μερικές δεκαετίες πριν ο συνδυασμός ελαίου-χαρτού γίνει αξιόπιστος και αποδεκτός.

Η βιομηχανία μετασχηματιστών, καλωδίων κ.λ.π καταναλώνει τεράστιες ποσότητες κυτταρίνης σε μονώσεις χαρτού, μετρούμενες σε εκατομμύρια τόνους. Η κυτταρίνη είναι η προτιμώμενη εκλογή για στερεά μόνωση, όχι επειδή είναι η καλύτερη, αλλά επειδή είναι φτηνή, αφού παρασκευάζεται από ξύλο, πηγή διαθέσιμη σε αφθονία στη φύση. Το κύριο μειονέκτημα του χαρτιού για ηλεκτρική χρήση είναι ότι είναι υγροσκοπικό, χρειάζεται επεξεργασία και πρέπει να διατηρείται ξηρό. Το ξηρό χαρτί μπορεί να απορροφήσει μια σημαντική ποσότητα νερού, η οποία είναι συνάρτηση της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας (βλ. σχήμα 4-1 [32]). Ο εμποτισμός του χαρτιού με λάδι μειώνει σημαντικά την απορρόφηση της υγρασίας, εάν όμως απορροφήσει υγρασία, η παρουσία του λαδιού καθιστά δύσκολη την ξήρανση. Αναπτύσσονται διάφορες τεχνικές παραγωγής χαρτιού μειωμένης απορροφητικότητας, συνήθως όμως με αντίστοιχη σημαντική αύξηση του κόστους.



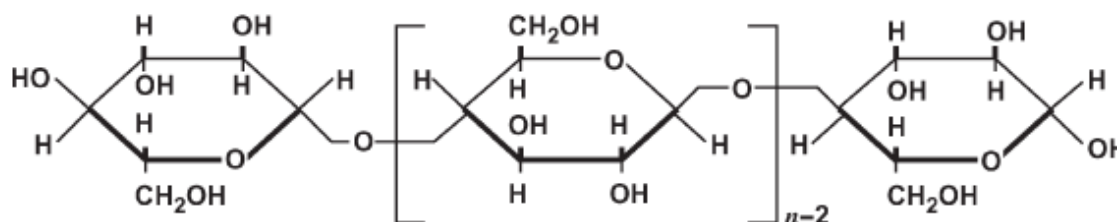
Σχήμα 4-1: Καμπύλες απορρόφησης υγρασίας για το ξηρό χαρτί.

Από τη στιγμή που θα εγκατασταθεί η μόνωση, αρχίζει μια αργή διαδικασία γήρανσης. Η περιεκτικότητα της μόνωσης σε νερό αυξάνεται εξ αιτίας του υποβιβασμού της μοριακής αλυσίδας της κυτταρίνης από θερμικές καταπονήσεις και οξειδωτικές διεργασίες. Σαν αποτέλεσμα προκύπτει μείωση της μηχανικής αντοχής του χαρτιού [32]. Στοιχεία τα οποία έχουν συλλεγεί στη διάρκεια πολλών ετών, δείχνουν ότι στις περιπτώσεις που η

καταστροφή μετασχηματιστών μπορεί να αποδοθεί σε σφάλματα της μόνωσης, η κύρια αιτία οφείλεται στη μείωση της μηχανικής αντοχής του χαρτιού, η οποία οδηγεί σε ηλεκτρική διάσπαση [33,34,35].

4.1 Η κυτταρίνη

Η κυτταρίνη, η ουσιαστική συνιστώσα του χαρτιού και του χαρτονιού, είναι ένα πολυμερές μονάδων γλυκόζης συνδεδεμένων μεταξύ τους με ένα ειδικό τρόπο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1-1 [32].



Σχήμα 4.1-1: Η δομή του πολυμερούς της κυτταρίνης.

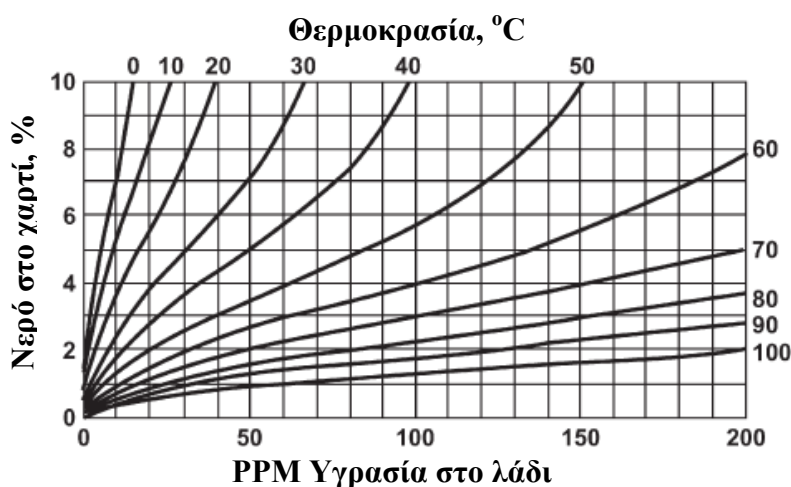
Πιο απλά μπορεί να παρασταθεί ως $[C_6 H_{10} O_5]_n$, όπου n είναι ο βαθμός πολυμερισμού (Degree of Polymerization-DP, δηλαδή ο αριθμός των μονομερών μονάδων στο πολυμερές) [32]. Ο βαθμός πολυμερισμού (DP) ισούται κατά προσέγγιση με το μέσο μήκος της αλυσίδας των μορίων της κυτταρίνης στο χαρτί [35]. Εναλλακτικά, ο βαθμός πολυμερισμού (DP) της κυτταρίνης μπορεί να οριστεί ως ο αριθμός των μονομερών ομάδων γλυκόζης στο μόριό της. [36]. Οι τιμές του βαθμού πολυμερισμού (DP) του καινούριου χαρτιού κυμαίνονται από 1100 ως 1600 και μπορούν να μετρηθούν με ειδικές μεθόδους όπως η ASTM D - 4243. [32]. Μετά από μια μακρά περίοδο λειτουργίας σε υψηλή θερμοκρασία, με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό και οξυγόνο, το χαρτί γίνεται εύθραυστο, αλλάζει χρώμα σε σκούρο καφέ και ο βαθμός πολυμερισμού του (DP) πέφτει στο 200 έως 250. Μετά από μια τέτοια μεταβολή του βαθμού πολυμερισμού του χαρτιού, η μηχανική αντοχή του μπορεί να έχει μειωθεί στο 20% της αρχικής και αυτό το σημείο θεωρείται ως το κριτήριο για το τέλος της ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή. [35,37].

Πηγή για την παρασκευή της κυτταρίνης είναι το ξύλο. Το μαλακό ξύλο τυπικά περιέχει 42% κυτταρίνη και 20% λιγνίνη. Το σκληρό ξύλο περιέχει 45% κυτταρίνη και 20% λιγνίνη. Επιπλέον της κυτταρίνης το ξύλο περιέχει ημιγλυκόζη η οποία συντίθεται από διάφορα σάκχαρα και έχει μικρότερο μήκος αλυσίδας από ότι η γλυκόζη. Τόσο η λιγνίνη όσο και η ημιγλυκόζη απομακρύνονται κατά το μέγιστο δυνατόν από τον τελικό χαρτοπολτό. Οι πιο σημαντικές διαφορές μεταξύ μαλακού και σκληρού ξύλου είναι το μήκος της ίνας (μαλακά ξύλα: $2 \div 6$ mm, σκληρά ξύλα $0,6 \div 1,5$ mm) και η χονδρομετρία (μαλακά ξύλα : $15 \div 35$ mg / 100 mm, σκληρά ξύλα : $5 \div 10$ mg / 100 mm). Οι ιδιότητες αυτές του ξύλου έχουν σχέση με την αντοχή και την ομαλότητα του παραγόμενου χαρτιού [32].

Σε θερμοκρασία χώρου δωματίου (20-25°C) η κυτταρίνη μπορεί να προσλάβει 4 έως 8% νερό, όταν η σχετική υγρασία είναι της τάξεως του 30 έως 70%, όπως είναι σύνηθες σε εργοστασιακούς χώρους σε συνθήκες θέρους και χειμώνα. Σε ένα καινούριο μετασχηματιστή, το επίπεδο υγρασίας στη μόνωση πρέπει να είναι περί το 0,5%. Αυτό κάνει υποχρεωτική τη σχολαστική ξήρανση της μόνωσης στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Η υγρή μόνωση αποτελεί ένα διηλεκτρικό κίνδυνο για αρκετούς λόγους [36]:

- (α) Η έναρξη μερικών εκκενώσεων γίνεται σημαντική πάνω από το επίπεδο του 3% υγρασίας και μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φυσαλίδων αερίου (μεθανίου) καθώς και απελευθέρωση υδρογόνου.
- (β) Ο συντελεστής απωλειών (tgδ) της μόνωσης αυξάνει πάνω από τα αποδεκτά όρια.
- (γ) Η υποβάθμιση και γήρανση του χαρτιού επιταχύνεται υπερβολικά.

Καθώς ο μετασχηματιστής γερνά, το επίπεδο υγρασίας στο χαρτί και το λάδι συνήθως ανεβαίνει και αυτό έχει περαιτέρω δυσμενείς συνέπειες στην ηλεκτρική και θερμική υποβάθμιση. Η παρακολούθηση της περιεχόμενης υγρασίας στο λάδι είναι μέρος ενός συνόλου ελέγχων ρουτίνας που γίνονται στα λάδια των μετασχηματιστών [38,39]. Εν τούτοις, υγρό λάδι δεν σημαίνει πάντοτε μια υγρή μόνωση. Η εξήγηση είναι η εξής [36] : Καθώς ένας μετασχηματιστής ψύχεται κατά τη μείωση φορτίου ή μετά από μια διακοπή, η υγρασία τείνει να επιστρέψει στο χαρτί, αλλά αυτή η διαδικασία είναι αργή. Έτσι, εμφανίζεται μια υγρασία στο λάδι, η οποία δίδει την εντύπωση ότι συνολικά η μόνωση του μετασχηματιστή είναι υγρή. Η αλήθεια είναι ότι τέτοιες μεταβολές στην περιεχόμενη στο λάδι υγρασία, ελάχιστα επηρεάζουν την περιεχόμενη στο χαρτί υγρασία, η οποία παραμένει σχεδόν σταθερή. Αυτό συμβαίνει διότι περισσότερο από το 99% του συνολικού νερού του μονωτικού συστήματος του μετασχηματιστή, περιέχεται στο στερεό μονωτικό, δηλαδή στο χαρτί. Η υγρασία του λαδιού θα μπορούσε να είναι αξιόπιστος δείκτης της υγρασίας του χαρτιού, μόνο αν χαρτί και λάδι είναι σε θερμική ισορροπία, πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει ποτέ σε λειτουργούντες μετασχηματιστές. Παρόλα αυτά, καμπύλες ισορροπίας όπως στο σχήμα 4.1-2 χρησιμοποιούνται για να δώσουν μια ιδέα της περιεχόμενης στο χαρτί υγρασίας [36,40].



Σχήμα 4.1-2: Χαρακτηριστικές ισορροπίας της υγρασίας σε χαρτί και λάδι.

Σήμερα υπάρχουν πιο αξιόπιστες μέθοδοι αξιολόγησης της υγρασίας σε λειτουργούντες μετασχηματιστές, χωρίς να εξαρτώνται από την ισορροπία υγρασίας μεταξύ χαρτιού και λαδιού.

Όπως προαναφέρθη ο βαθμός πολυμερισμού (DP) της κυτταρίνης κυμαίνεται από 1100 έως 1600 για καινούριο χαρτί. Ο αριθμός αυτός μπορεί να μειωθεί κατά 10% μετά τη ξήρανση του χαρτιού και τον εμποτισμό του με λάδι.

Η γήρανση της κυτταρίνης κάτω από θερμική και ηλεκτρική καταπόνηση, συνίσταται στον αποπολυμερισμό αυτής και έχει σαν συνέπεια τη μείωση του βαθμού πολυμερισμού, καθώς και της μηχανικής αντοχής του χαρτιού.

Αυτό συντελείται κατά τη θερμική καταπόνηση:

- (α) με υδρολυτική αποσύνθεση, η οποία διασπά τον δεσμό και δίδει μικρότερες αλυσίδες.
- (β) με πυρόλυση, η οποία διασπά την κυκλική δομή και δίδει μικρότερες αλυσίδες και προϊόντα όπως CO, CO₂, H₂O, πίσσα και ίχνη φουρανίων εκ των οποίων το πιο σημαντικό είναι η 2 - φουρφουραλδεΐδη.
- (γ) με οξείδωση, η οποία διευκολύνεται από την παρουσία των ριζών -OH και -CH₂OH. Τα παραγόμενα προϊόντα είναι CO, CO₂, H₂O και οξέα. Οι ως άνω ρίζες καθιστούν επίσης την κυτταρίνη υγροσκοπική.
- (δ) Επιπρόσθετα της θερμικής, η ηλεκτρική καταπόνηση υποβαθμίζει το χαρτί, ιδιαίτερα το υγρό. Μερικές εκκενώσεις λαμβάνουν χώρα στο χαρτί, οι οποίες αποδεσμεύουν υδρογόνο και μεθάνιο. Τέτοια αποσύνθεση συμβαίνει επίσης στο ορυκτό λάδι, σε κενά (π.χ. φυσαλίδες) και άλλα σημεία τα οποία καταπονούνται έντονα [36,40].

4.2 Μονωτικά λάδια

Όλοι σχεδόν οι Μ/Σ ισχύος και διανομής των ανά τον κόσμο ηλεκτρικών συστημάτων περιέχουν μονωτικό λάδι, το οποίο επενεργεί συγχρόνως σαν ηλεκτρικό μονωτικό και σαν ρευστό μεταφοράς θερμότητας για την ψύξη του μετασχηματιστή. Το ως άνω υγρό πληρώσεως των μετασχηματιστών είναι σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις ορυκτό μονωτικό λάδι το «λάδι μετασχηματιστών», προερχόμενο από το αργό πετρέλαιο [41].

Η εκλογή του αργού πετρελαίου, από το οποίο θα παραχθεί το μονωτικό λάδι, αποτελεί αποφασιστικό παράγοντα για την ποιότητα του μονωτικού λαδιού. Γενικά προτιμάται το αργό πετρέλαιο ναφθενικής βάσης χάρις στη χημική συγκρότηση αλλά και γιατί διατηρεί τη ρευστότητά του σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Δύο είναι οι βασικές επεξεργασίες για την παραγωγή μονωτικού λαδιού από επιλεγμένο αργό πετρέλαιο [18]:

- Ο διαχωρισμός κλασμάτων επιθυμητής ρευστότητας με απόσταξη, και
- Η διύλιση για την απομάκρυνση των ασταθών συστατικών.

Από χημικής απόψεως τα ορυκτά λάδια αποτελούνται από ένα σύνθετο μείγμα υδρογονανθράκων: παραφινικών (40 ως 60%), ναφθενικών (30 ως 50%), αρωματικών (5 ως 20%) και ολεφινικών (περίπου 1%).

Η καλή διαχρονική συμπεριφορά τους καθώς και το χαμηλό ιξώδες οδήγησαν στην ευρεία χρήση των ορυκτών λαδιών σαν μονωτικών και ψυκτικών υγρών. Επιπλέον σημαντικά πλεονεκτήματα των λαδιών αυτών είναι η μεγάλη διαθεσιμότητα και το χαμηλό κόστος. Εν τούτοις τα ορυκτά λάδια έχουν χαμηλή σχετική διηλεκτρική σταθερά (relative permittivity) ($\epsilon_r = 2,2$ έναντι $\epsilon_r = 4$ των συνθετικών), χαμηλό σημείο ανάφλεξης, είναι ελαφρώς τοξικά και συνιστούν κίνδυνο για τα επιφανειακά νερά σε περίπτωση διαρροής του μετασχηματιστή. Οι ηλεκτρικές και διηλεκτρικές ιδιότητες των ορυκτών λαδιών εξαρτώνται πολύ από τη θερμοκρασία και την περιεχόμενη υγρασία. Η θερμοκρασία φαίνεται να σχετίζεται κυρίως με την μορφή που παίρνει η περιεχόμενη υγρασία π.χ. γαλάκτωμα, διάλυμα, σωματίδια πάγου [42,43,44].

Άλλα υγρά -συνθετικά μονωτικά λάδια- έχουν χρησιμοποιηθεί και χρησιμοποιούνται ακόμα σε σχετικά μικρές εμπορικές ποσότητες, σε μετασχηματιστές που προορίζονται για ειδικές χρήσεις. Με τον όρο συνθετικά μονωτικά λάδια εννοούμε γενικά το σύνολο των συνθετικών και μη αναφλέξιμων υγρών που, όταν παθαίνουν αποσύνθεση με την επίδραση ηλεκτρικού τόξου, εκλύουν αέρια που δεν είναι εκρηκτικά [18].

Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 2.1, από το 1934, αρκετές εκατοντάδες χιλιάδες μετασχηματιστές μονώθηκαν με χλωριωμένα συνθετικά υγρά που όλα έχουν για βάση τους το PCB (Polychlorinated Biphenyl, C₁₂H₅CL₅). Τα υγρά αυτά κυκλοφόρησαν στην αγορά με διάφορες ονομασίες όπως Askarel, Aroclor, Inerteen, Clophen, Pyranol, Nepolin κ.λ.π. και είχαν το συγκριτικό πλεονέκτημα ότι δεν αναφλέγονται καθώς και ότι έχουν χαμηλές

διηλεκτρικές απώλειες. Στα μέσα της δεκαετίας του '70 απαγορεύτηκε η παρασκευή και διακίνηση των PCBs διότι διαπιστώθηκε ότι μολύνουν το περιβάλλον.

Μετά την απαγόρευση των PCBs, αναζητήθηκαν οικολογικά μη τοξικά μονωτικά υγρά, με υψηλά σημεία αναφλέξεως και καύσεως. Έτσι παρασκευάστηκαν εστερικά υγρά, σιλικονούχα υγρά και λάδια φυτικής προέλευσης. Τα παραπάνω χαρακτηρίζονται ως υλικά υψηλού σημείου καύσεως, ήτοι άνω των 300°C. Εν τούτοις το σχετικά υψηλό κόστος και η μικρή διαθεσιμότητα αυτών, περιορίζουν τη χρήση τους σε μετασχηματιστές ειδικών εφαρμογών. Σημειώνεται ότι όλα τα ανωτέρω οικολογικά λάδια χαρακτηρίζονται από την υψηλή απορροφητικότητα σε υγρασία. Έτσι σε θερμοκρασία δωματίου έχουν επίπεδα κορεσμού της τάξεως των 740 ppm, έναντι 45 ppm των ορυκτών λαδιών. [18,41,45].

Στο μονωτικό σύστημα λαδιού - χαρτιού, καθώς το λάδι παρεμβάλλεται ανάμεσα στα διάφορα στοιχεία του μετασχηματιστή, που έχουν διαφορετικά δυναμικά, εμποδίζει την ηλεκτρική υπερπήδηση και ενισχύει τις μονωτικές ιδιότητες που έχουν οι μονώσεις των τυλιγμάτων, εμποδίζοντας την εισχώρηση υγρασίας. Σαν μονωτικό μέσο το μονωτικό λάδι είναι καλύτερο από τον αέρα, γιατί έχει πολύ μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά και διηλεκτρική αντοχή. Επίσης, το μονωτικό λάδι χρησιμοποιείται στους μετασχηματιστές, γιατί παρεμποδίζει τη δημιουργία μικροσκοπικών φυσαλίδων αέρα και αερίων στις μονώσεις των τυλιγμάτων. Παρ' όλο που οι μονώσεις από χαρτί εφαρμόζονται πάνω στους αγωγούς με προσοχή, απομένουν μικρά διάκενα μεταξύ των μονώσεων και των μονώσεων ως προς τους αγωγούς. Ο αέρας που μπορεί να υπάρχει στα διάκενα αυτά ιονίζεται και έτσι είναι δυνατό να προκληθούν μερικές εκκενώσεις που προκαλούν τη γήρανση της κατασκευής. Το μονωτικό λάδι όμως γεμίζει τα διάκενα και παρεμποδίζει τον ιονισμό και αυτό είναι το σημαντικότερο πλεονέκτημα του συνδυασμού χαρτί – μονωτικό λάδι. Τέλος, το μονωτικό λάδι χρησιμεύει για να απομακρυνθούν τα μικρά, αλλά σημαντικά σε πλήθος, ίχνη ξένων σωμάτων και υγρασίας, που μπορεί να βρίσκονται σε κάθε καινούριο μετασχηματιστή. Τα ίχνη αυτά απομακρύνονται με την κυκλοφορία του λαδιού, που προκαλείται από διάταξη διηθήσεως (φίλτρο) [18].

5. ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Το σύστημα μόνωσης ελαίου-χάρτου είναι αυτό που κατά βάση χρησιμοποιείται στους μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν εξετάζουμε το θέμα «διάρκεια ωφέλιμης ζωής των μετασχηματιστών» δεν απέχουμε από την πραγματικότητα αν την ταυτίζουμε με τη διάρκεια του μονωτικού τους συστήματος ελαίου-χάρτου [1,46].

Όπως ήδη έχει αναφερθεί στην παράγραφο 3, η διηλεκτρική αντοχή των μονώσεων μειώνεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό επιταχύνεται από την παρουσία οξυγόνου και υγρασίας. Υπάρχουν σήμερα διάφορες τεχνικές διάγνωσης για τον προσδιορισμό της κατάστασης της μόνωσης [37,46,47,48,49,50,51]. Αυτές μπορούμε να τις διακρίνουμε σε χημικές και ηλεκτρικές διαγνωστικές τεχνικές.

5.1 Χημικές τεχνικές διάγνωσης της μόνωσης

5.1.1 Ανάλυση της υγρασίας

Είναι γνωστό ότι η ύπαρξη υγρασίας στα μονωτικά υλικά, αυξάνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τον συντελεστή απωλειών και μειώνει την ηλεκτρική αντοχή. Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι προσδιορισμού της υγρασίας όπως :

- Μέθοδος Karl Fischer Titration (χρωματομετρική τιτλοδότηση Karl Fischer) για τη μέτρηση της υγρασίας στο λάδι [17,37] και εν συνεχεία εκτίμηση της υγρασίας στη στερεά μόνωση (χαρτί) μέσω διαφόρων χαρακτηριστικών ισορροπίας (βλέπε π.χ. σχήμα 4.1-2).
- Ένας χωρητικός αισθητήρας υγρασίας, τύπου λεπτού φιλμ, προτάθηκε από τον T.V. Oommen, για την ανίχνευση υγρασίας στο λάδι του μετασχηματιστή. Ο αισθητήρας ανταποκρίνεται ικανοποιητικά για το λάδι, τόσο σε θερμές όσο και σε ψυχρές καιρικές συνθήκες [38].
- Η φασματοσκοπία κοντά στο ορατό φάσμα (Near Infrared Spectroscopy) φαίνεται να δίδει καλά αποτελέσματα για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας σε χαρτί εμποτισμένο με λάδι. Η μέθοδος μπορεί να ανιχνεύσει πολύ μικρές μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας στη μόνωση χάρτου [37,48].
- Διηλεκτρικές διαγνωστικές τεχνικές, που βασίζονται στο φαινόμενο της πόλωσης του διηλεκτρικού, χρησιμοποιούνται για έμμεση ανάλυση της υγρασίας του μονωτικού συστήματος ελαίου-χάρτου [37,39,50,51,52,53].

5.1.2 Ανάλυση των διαλυμένων στο λάδι αερίων

Μεταξύ των χημικών μεθόδων, η χρωματογραφική ανάλυση των διαλυμένων στο λάδι αερίων έχει κερδίσει παγκόσμια αποδοχή, σαν μια διαγνωστική μέθοδος για την ανίχνευση αρχομένων σφαλμάτων στους μετασχηματιστές. Τα αέρια παράγονται λόγω μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού του μετασχηματιστή και της στερεάς μόνωσης (κυρίως χαρτί και χαρτόνι), η οποία είναι από κυτταρίνη (βλ. παραγρ. 4). Η παρουσία σφάλματος εντός του μετασχηματιστή, αυξάνει σημαντικά τον ρυθμό υποβάθμισης της κυτταρίνης και του λαδιού και κατά συνέπεια και το ρυθμό παραγωγής αερίων.

Τα σημαντικά αέρια που παράγονται από τη λειτουργία του μετασχηματιστή είναι:

- Υδρογονάνθρακες και υδρογόνο: μεθάνιο (CH_4), αιθάνιο (C_2H_6), αιθυλένιο (C_2H_4), ακετυλένιο (C_2H_2) και υδρογόνο (H_2).
- Οξειδία του άνθρακα: μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2).
- Αέρια άσχετα με σφάλματα: άζωτο (N_2) και οξυγόνο (O_2).

Υπάρχει εκτεταμένη έρευνα και βιβλιογραφία σχετικά με τα παραπάνω αέρια και τη συσχέτισή τους με τους τύπους των σφαλμάτων που συμβαίνουν σε ένα μετασχηματιστή [37,47,55]. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι οι ακόλουθες:

- (a) IEEE C57.104-1991 [54]
- (b) Η μέθοδος Doernenberg
- (c) Η μέθοδος Roger
- (d) IEC 60599
- (e) Το τρίγωνο Duval

Έχει γίνει αποδεκτό ότι [37]:

- Από τις μερικές εκκενώσεις στο λάδι και την κυτταρίνη παράγεται υδρογόνο.
- Από τη θερμική καταπόνηση του λαδιού σε χαμηλές θερμοκρασίες παράγονται μεθάνιο και αιθάνιο.
- Από τη θερμική καταπόνηση του λαδιού σε υψηλές θερμοκρασίες παράγονται αιθυλένιο, υδρογόνο, μεθάνιο και αιθάνιο.
- Σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, παρουσία τόξου, παράγεται ακετυλένιο.

- Θερμική καταπόνηση της κυτταρίνης, σε χαμηλές θερμοκρασίες παράγει CO₂, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες παράγει CO.
- Μικρές ηλεκτρικές εκκενώσεις παράγουν υδρογόνο και μεθάνιο καθώς και μικρές ποσότητες αιθανίου και αιθυλενίου.
- Ηλεκτρικά τόξα παράγουν μεγάλες ποσότητες υδρογόνου και ακετυλενίου μαζί με μικρότερες ποσότητες μεθανίου και αιθυλενίου.

Σημειώνεται ότι η χρήση μονωτικών βερνικιών στο εσωτερικό μετασχηματιστών, τα οποία περιέχουν στη σύνθεσή τους καρβοξυλική ομάδα – κυρίως λάδια οργανικής προέλευσης – μπορούν να δώσουν αέρια ανιχνεύσιμα και χωρίς την ύπαρξη σφάλματος. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη για να μη οδηγηθεί κανείς σε λανθασμένα συμπεράσματα.

Αντίθετα, μονωτικά βερνίκια με βάση την πολυουρεθάνη, που δεν περιέχουν καρβοξυλικές ομάδες στη σύνθεσή τους, δεν παρουσιάζουν έκλυση αερίων [46].

5.1.3 Μετρήσεις του βαθμού πολυμερισμού.

Το χαρτί και το χαρτόνι είναι υλικά που παρασκευάζονται από κυτταρίνη (βλ. παράγραφο 4.1). Η κύρια πηγή ινών κυτταρίνης είναι το ξύλο. Η κυτταρίνη είναι ένα γραμμικό πολυμερές το οποίο συντίθεται από μονάδες άνυδρης γλυκόζης συνδεδεμένων στο πρώτο και τέταρτο άτομο άνθρακα μέσω ενός γλυκοσιδικού δεσμού. Οι καλές μηχανικές ιδιότητες της κυτταρίνης και των παραγώγων της, οφείλονται στην πολυμερή και ινώδη φύση τους.

Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 4.1 ο αριθμός των μονομερών μονάδων στο πολυμερές ονομάζεται βαθμός πολυμερισμού (DP). Η ποιότητα της κυτταρίνης συχνά μετράται με βάση το βαθμό πολυμερισμού της, με τη μέθοδο μέτρησης του μέσου ιξώδους αυτής (viscometric method). Με τον τρόπο αυτόν προσδιορίζεται το μήκος της αλυσίδας (DP_V) της δομής της κυτταρίνης. Η μέτρηση του DP_V χρησιμοποιήθηκε σαν διαγνωστικό εργαλείο προσδιορισμού της κατάστασης της μόνωσης [35,37,48].

Η μείωση του DP_V γίνεται ταχύτερη με την αύξηση της θερμοκρασίας, φτάνοντας την τιμή του DP_V που αντιστοιχεί στο τέλος της διάρκειας ζωής της μόνωσης, στη θερμοκρασία των 180 °C [56].

Μετρήσεις έδειξαν ότι ο ρυθμός αντίδρασης κάθε χρονική στιγμή μπορεί να θεωρηθεί ανάλογος προς τον αριθμό των εκάστοτε διαθέσιμων δεσμών της αλυσίδας. Η ανάλυση της εργασίας αυτής έδωσε μια εξίσωση της μορφής [57]:

$$\frac{1}{DP_{Vt}} - \frac{1}{DP_{V0}} = kt \quad (5.1.3-1)$$

Όπου: DP_{Vt} η τιμή του DP_V τη χρονική στιγμή t

DP_{V0} η αρχική τιμή του DP_V

και k σταθερά

5.1.4 Ανάλυση των παραγομένων φουρανίων.

Τα φουράνια είναι κύρια προϊόντα της υποβάθμισης του χαρτιού της μόνωσης και βρίσκονται διαλυμένα στα μονωτικά λάδια των μετασχηματιστών [33]. Η παρουσία φουρφοουραλδεύδης στα μονωτικά λάδια των μετασχηματιστών αποδίδεται αποκλειστικά στη θερμική μονωτική υποβάθμιση της κυτταρίνης, ώστε η ανίχνευση αυτής της ένωσης στα λάδια επιτρέπει την έγκαιρη διάγνωση της γήρανσης της στερεάς μόνωσης. Υπάρχουν

όμως ιδιομορφίες όσον αφορά στη συμπεριφορά της κυτταρίνης στην έκλυση φουρφουραλδεΐδης. Παρατηρήθηκε δηλαδή ανίχνευση μικρών ποσοτήτων φουρφουραλδεΐδης όχι μόνο στο πρώτο αλλά και στα τελευταία στάδια της γήρανσης της κυτταρίνης. Για το λόγο αυτό ο χαρακτηρισμός μιας συγκέντρωσης φουρφουραλδεΐδης σαν «κρίσιμης» ή «επικίνδυνης» θέλει ιδιαίτερη προσοχή. Είναι αξιοσημείωτο ότι η φουρφουραλδεΐδη ανιχνεύεται στα λάδια μετασχηματιστών και όταν ακόμα οι θερμοκρασίες λειτουργίας είναι τόσο χαμηλές ώστε να μη παράγονται αέρια υδρογονανθράκων [46].

Ο ποσοτικός προσδιορισμός της φουρφουραλδεΐδης που βρίσκεται διαλυμένη στα λάδια των μετασχηματιστών γίνεται με τη μέθοδο της Χρωματογραφίας Λεπτής Στιβάδας (T.L.C.) και προσφέρει μια πιο εξυπηρετική μέθοδο ανάλυσης από την απ' ευθείας μέτρηση στο χαρτί της μόνωσης. Εξ άλλου, εκτεταμένα εργαστηριακά πειράματα έχουν δείξει ότι υπάρχει μια περίπου λογαριθμική σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης της φουρφουραλδεΐδης στο λάδι και του βαθμού πολυμερισμού (DP_v) της κυτταρίνης στο χαρτί [33,37,46,55].

Η τεχνική για τον έλεγχο των φουρανίων περιγράφεται στο IEC 61198 (1993-09) [58], το οποίο όμως δεν δίδει οδηγίες για ερμηνείες των αποτελεσμάτων.

5.2 Ηλεκτρικές διαγνωστικές μέθοδοι

5.2.1 Μέτρηση του δείκτη πόλωσης και του συντελεστή απωλειών.

Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 3.1.1, προ και κατά τη διάρκεια των μονωτικών υλικών, συμβαίνουν μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις, οι οποίες συνεπάγονται απώλειες ενέργειας εντός της μάζας του μονωτικού υλικού. Για κάθε μόνωση και συνεπώς και για τη μόνωση του μετασχηματιστή στο σύνολό της ισχύει ότι:

- Επειδή οι απώλειες στο συνεχές ρεύμα οφείλονται αποκλειστικά στην αγωγιμότητα την οποία παρουσιάζει η μόνωση, μπορούμε με περιοδικές μετρήσεις της **αντίστασης μονώσεως** να γνωρίζουμε τη διηλεκτρική συμπεριφορά του μετασχηματιστή.
- Όταν ένα ανομοιογενές μονωτικό υλικό τεθεί υπό συνεχή τάση (όπως εν προκειμένω η μόνωση του μετασχηματιστή), παρουσιάζεται το φαινόμενο της μεταφορτίσεως ή πολώσεως του διηλεκτρικού. Μέγεθος σχετιζόμενο με το φαινόμενο της πολώσεως είναι ο **δείκτης πολώσεως (Polarization Index)** ο οποίος χαρακτηρίζει τον βαθμό ανομοιογένειας του μονωτικού υλικού. Ο δείκτης πολώσεως υπολογίζεται ως ο λόγος της αντιστάσεως μονώσεως εις το πέρας του 10^{ου} λεπτού προς την αντίσταση μονώσεως εις το πέρας του 1^{ου} λεπτού [1,59]:

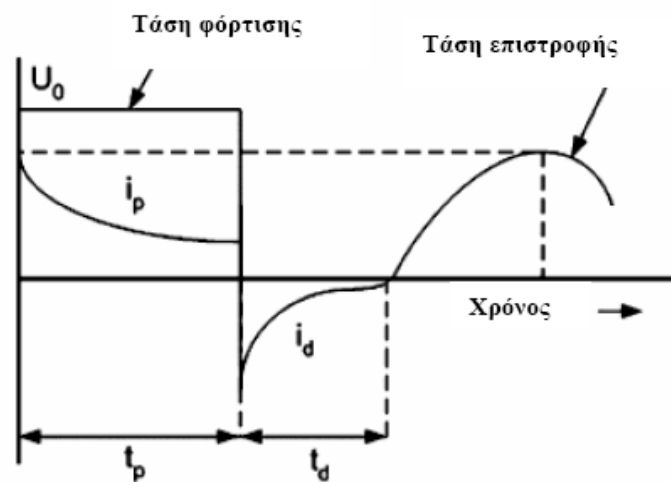
$$P.I. = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (5.2.1-1)$$

Έτσι μετρώντας περιοδικά τον δείκτη πολώσεως ενός μετασχηματιστή, μπορεί να συγκρίνει κανείς τις διαδοχικές τιμές και να έχει ένδειξη για τη μεταβολή του βαθμού ανομοιογένειας του μονωτικού του συστήματος.

- Τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά των μονωτικών υλικών μιας μόνωσης, ήτοι η αγωγιμότητα, η ανομοιογένεια και οι ασυνέχειες της μάζας αυτών εντός των υλικών αλλά και στην επιφάνειά της, εκδηλώνονται σαν απώλειες ενέργειας στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Την εξέλιξη της κατάστασης της μόνωσης ενός μετασχηματιστή από την άποψη των παραπάνω χαρακτηριστικών, μπορούμε να παρακολουθούμε με περιοδικές μετρήσεις (στη βιομηχανική συχνότητα) του **συντελεστή απωλειών (tgδ)** του συστήματος μονώσεως του μετασχηματιστή (βλέπε παραγρ. 1.1 (3)) [1,47,59].

5.2.2 Η μέτρηση της τάσης επιστροφής.

Όταν εφαρμοστεί μια συνεχής τάση σε ένα διηλεκτρικό για μια μακρά χρονική περίοδο (ώστε να φορτιστεί πλήρως) και μετά βραχυκυκλωθεί για ένα σύντομο χρονικό διάστημα ώστε να εκφορτιστεί, τότε, αφού ανοιχτεί το βραχυκύκλωμα, οι ηλεκτρικοί φορείς οι οποίοι ήταν δεσμευμένοι από την πόλωση, μετατρέπονται σε ελεύθερους φορείς και έτσι μια τάση αναπτύσσεται μεταξύ των ηλεκτροδίων στο διηλεκτρικό. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται **τάση επιστροφής (recovery or return voltage - RV)**. Η διεξαγόμενη πάνω στο φαινόμενο αυτό έρευνα στοχεύει στην αξιοποίηση της τάσης επιστροφής για τη γνωμάτευση της μονωτικής ικανότητας του μονωτικού συστήματος «λάδι-χαρτί» [52,60]. Στο σχήμα 5.2.2-1 δίδονται οι μορφές τάσεως και εντάσεων της διηλεκτρικής απόκρισης του μονωτικού.



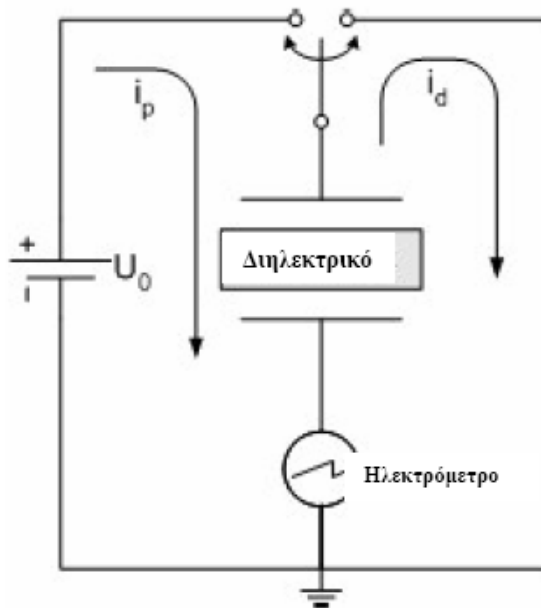
Σχήμα 5.2.2-1: Μετρήσεις πόλωσης του διηλεκτρικού.

- U_0 : βηματική τάση φόρτισης
- i_p : ρεύμα πόλωσης (φόρτισης)
- i_d : ρεύμα αποπόλωσης (εκφόρτισης)
- t_p : χρόνος φόρτισης
- t_d : χρόνος εκφόρτισης

5.2.3 Η μέτρηση των ρευμάτων πόλωσης – αποπόλωσης.

Όταν σε ένα σύστημα μόνωσης εφαρμόζεται μια βηματική τάση U_0 , εμφανίζεται ένα ρεύμα φόρτισης ή πόλωσης. Αν η τάση αποσυνδεθεί από το μονωτικό και το μονωτικό εκφορτισθεί, εμφανίζεται το ρεύμα εκφόρτισης ή αποπόλωσης Ένας αριθμός ερευνητών προτείνουν τη μέτρηση των ρευμάτων πόλωσης/αποπόλωσης (**polarization/depolarization**) του μονωτικού συστήματος του μετασχηματιστή σαν ένα σημαντικό εργαλείο, επειδή αυτό μπορεί να παρακολουθεί την κατάσταση του λαδιού και του χαρτιού χωριστά [39,50,51,53,61,62,63].

Στο σχήμα 5.2.3-1 δίδεται το βασικό κύκλωμα μέτρησης των ρευμάτων πόλωσης (i_p) και αποπόλωσης (i_d).



Σχήμα 5.2.3-1: Βασικό κύκλωμα μέτρησης των ρευμάτων πόλωσης (i_p) και αποπόλωσης (i_d).

Μια άλλη ομάδα ερευνητών χρησιμοποίησε τις **μετρήσεις πόλωσης του μονωτικού συστήματος του μετασχηματιστή στο πεδίο συχνότητας**. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι μετρήσεις στο πεδίο χρόνου και αυτές στο πεδίο συχνότητας, οδηγούν στις ίδιες προβλέψεις για την κατάσταση της μόνωσης [37,47,60].

Καμιά μέθοδος από μόνη της δεν μπορεί να θεωρηθεί ως η καλύτερη διαγνωστική μέθοδος. Η ανάλυση των διαλυμένων αερίων και η ανάλυση των παραγομένων φουρανίων θα παραμείνουν οι πιο χρήσιμες τεχνικές για πρακτικές εφαρμογές. Εν τούτοις η πρόοδος στην τεχνολογία των μετρήσεων και των τεχνικών ανάλυσης δεδομένων, αναμένεται να δώσει ώθηση στις ηλεκτρικές διαγνωστικές μεθόδους οι οποίες βασίζονται στα φαινόμενα της πόλωσης.

6. Ο ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ο μετασχηματιστής διανομής περιλαμβάνει τα τρία τυλίγματα μέσης τάσης σε συνδεσμολογία τριγώνου και τα τρία τυλίγματα χαμηλής τάσης σε συνδεσμολογία αστέρα.

Αποτελείται βασικά από :

- Το δοχείο
- Τα τυλίγματα
- Τον πυρήνα
- Τα μονωτικά, (κυρίως χαρτί/χαρτόνι και λάδι)
- Τους ακροδέκτες, τις συνδέσεις και τις επαφές

Ένας ιδανικός μετασχηματιστής έχει τις εξής ιδιότητες [64,65] :

- (α) Οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων καθώς και αυτές των συνδέσεων, επαφών και ακροδεκτών είναι αμελητέες.
- (β) Όλη η μαγνητική ροή περιορίζεται στον πυρήνα και συνδέει και τα δύο τυλίγματα.
- (γ) Οι απώλειες του πυρήνα είναι αμελητέες.
- (δ) Η μαγνητική διαπερατότητα πυρήνα είναι τόσο υψηλή, ώστε μόνο ένα αμελητέο ρεύμα διεγέρσεως χρειάζεται για να εγκατασταθεί η μαγνητική ροή.
- (ε) Τα μονωτικά υλικά είναι τέλεια και δεν εμφανίζουν καμιά αγωγιμότητα (ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα $\sigma = 0$).

Σε ένα πραγματικό μετασχηματιστή υπάρχουν όμως:

- (1) Αντιστάσεις τυλιγμάτων.
- (2) Αντιστάσεις ακροδεκτών, συνδέσεων και επαφών.
- (3) Μαγνητική σκέδαση.
- (4) Οι απώλειες στον πυρήνα, οφειλόμενες στο (μη μηδενικό) ρεύμα διεγέρσεως. (Ρεύμα διεγέρσεως = υστέρηση και ρεύματα Foucault + ρεύμα μαγνητίσεως).
- (5) Χωρητικότητες των τυλιγμάτων, μεταξύ των σπειρών, προς τον πυρήνα και προς το δοχείο.
- (6) Απώλειες λόγω αγωγιμότητας των μονωτικών.
- (7) Απώλειες λόγω μερικών εκκενώσεων στην επιφάνεια των μονωτικών
- (8) Απώλειες λόγω μερικών εκκενώσεων στη μάζα των μονωτικών.
- (9) Απώλειες λόγω ηλεκτρικής πόλωσης των μονωτικών.
- (10) Διαφοροποίηση των ιδιοτήτων του μονωτικού (ειδική αγωγιμότητα και διηλεκτρική σταθερά) λόγω βάρθρωσης της θερμοκρασίας του [42].
- (11) Μη γραμμικά φαινόμενα στα μονωτικά.

Οι αποκλίσεις ενός πραγματικού μετασχηματιστή από τις ιδανικές ιδιότητες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση της λειτουργίας του μετασχηματιστή.

6.1 Ισοδύναμο κύκλωμα του Μετασχηματιστή

Μια μέθοδος ανάλυσης κάθε μηχανής είναι η τεχνική του ισοδύναμου κυκλώματος, η οποία βασίζεται στη φυσική εξήγηση (physical reasoning), με την οποία φυσικές έννοιες μεταφράζονται σε ποσοτική θεωρία.

Η συνολική μαγνητική ροή που συνδέεται με το πρωτεύον τύλιγμα, διακρίνεται σε δύο συνιστώσες:

- Την προκύπτουσα αμοιβαία μαγνητική ροή, η οποία ουσιαστικά περιορίζεται εις τον σιδηρούν πυρήνα και παράγεται σαν συνδυασμένο αποτέλεσμα των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος. Η προκύπτουσα αμοιβαία μαγνητική ροή συνδέει αμφοτέρωτα τα τυλίγματα και δημιουργείται από τις συνδυασμένες μαγνητεργετικές τους δυνάμεις (mmfs).
- Την μαγνητική ροή σκεδάσεως του πρωτεύοντος, η οποία διέρχεται μόνον από το πρωτεύον τύλιγμα. Επειδή η διαδρομή της σκέδασης είναι κυρίως στον αέρα, η μαγνητική ροή σκεδάσεως και η τάση η επαγόμενη από αυτήν, μεταβάλλονται γραμμικά με το ρεύμα πρωτεύοντος I_1 . Το αποτέλεσμα της μαγνητικής ροής σκεδάσεως πάνω στο πρωτεύον κύκλωμα, μπορούμε να το εξομοιώσουμε προσδιορίζοντας μια επαγωγή σκεδάσεως L_p . Επιπροσθέτως υπάρχει μια πώση τάσεως στην ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος R_p . Ομοίως για το δευτερεύον τύλιγμα προσδιορίζουμε μια επαγωγή σκεδάσεως L_s και μια ωμική αντίσταση τυλίγματος R_s .

Το ρεύμα πρωτεύοντος καλείται να εκπληρώνει δύο απαιτήσεις του μαγνητικού κυκλώματος:

- (α) Να εξουδετερώνει το φαινόμενο απομαγνήτισης που προκαλεί το ρεύμα δευτερεύοντος.
- (β) Να παράγει επαρκή μαγνητεγερτική δύναμη ώστε να δημιουργήσει την προκύπτουσα αμοιβαία μαγνητική ροή.

Σύμφωνα με τις παραπάνω φυσικές έννοιες μπορούμε να αναλύσουμε το ρεύμα πρωτεύοντος σε δύο συνιστώσες:

- μία συνιστώσα φορτίου I'_2 , και
- μία συνιστώσα διεγέρσεως I_ϕ .

Η συνιστώσα φορτίου καθορίζεται ως η συνιστώσα του ρεύματος του πρωτεύοντος η οποία ακριβώς εξουδετερώνει την μαγνητεγερτική δύναμη που παράγει το ρεύμα του δευτερεύοντος I_2 . Ισχύει ότι:

$$I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (6.1-1)$$

όπου N_1 και N_2 ο αριθμός σπειρών πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος.

Η συνιστώσα διεγέρσεως I_ϕ , καθορίζεται ως το επί πλέον ρεύμα πρωτεύοντος που απαιτείται για να παράγει την προκύπτουσα αμοιβαία μαγνητική ροή.

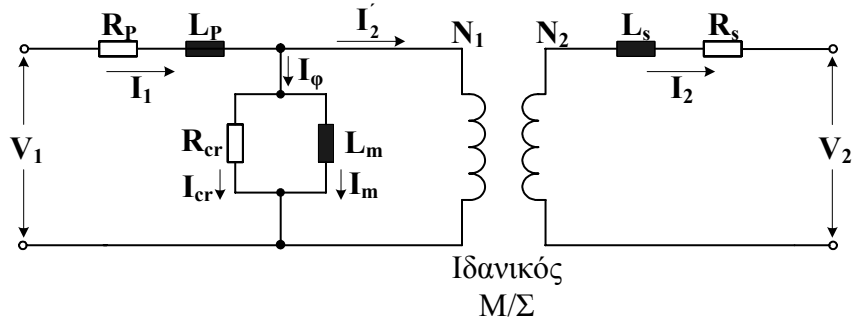
Το ρεύμα διεγέρσεως δεν είναι ημιτονοειδούς μορφής. Επειδή όμως το ρεύμα διεγέρσεως είναι μικρό (σε ένα τυπικό μετασχηματιστή ισχύος είναι της τάξεως του 5% του ονομαστικού ρεύματος), μπορεί να αντικατασταθεί από το ισοδύναμό του ημιτονοειδές, το οποίο παράγει την ίδια μέση ισχύ όπως το πραγματικό.

Το ρεύμα διεγέρσεως I_ϕ μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες:

- (α) Τη συνιστώσα απωλειών του πυρήνα, I_{cr} . Οι απώλειες του πυρήνα οφείλονται στο φαινόμενο της υστέρησης και στα ρεύματα Foucault.
- (β) Τη συνιστώσα μαγνητίσεως, I_m .

Οι δύο αυτές συνιστώσες του ρεύματος διεγέρσεως βρίσκονται σε διαφορά φάσεως 90° και στο ισοδύναμο κύκλωμα μπορούν να παρασταθούν με την παράλληλη διάταξη μιας μη επαγωγικής αντίστασης R_{cr} και μιας επαγωγής χωρίς απώλειες L_m . Οι τιμές των R_{cr} και L_m προσδιορίζονται στις ονομαστικές τιμές λειτουργίας τάσεως και συχνότητας του μετασχηματιστή.

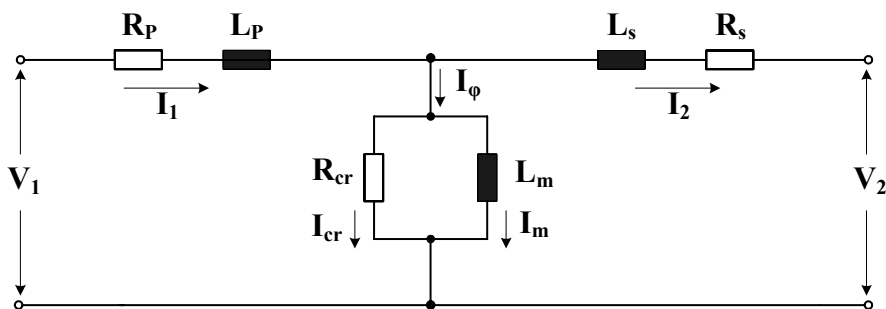
Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 6-1, στο οποίο ο πραγματικός μονοφασικός μετασχηματιστής απεικονίζεται ως ένας ιδανικός μετασχηματιστής συν τις εξωτερικές σύνθετες αντιστάσεις.



Σχήμα 6-1: Βασικό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή.

- R_P : Ωμική αντίσταση πρωτεύοντος
- L_P : Επαγωγή σκεδάσεως πρωτεύοντος
- R_S : Ωμική αντίσταση δευτερεύοντος
- L_S : Επαγωγή σκεδάσεως δευτερεύοντος
- R_{cr} : Μη επαγωγική αντίσταση
- L_m : Επαγωγή χωρίς απώλειες
- V_1 : Τάση πρωτεύοντος
- V_2 : Τάση δευτερεύοντος
- I_1 : Ρεύμα πρωτεύοντος
- I_2 : Ρεύμα δευτερεύοντος
- I_2 : Συνιστώσα φορτίου του ρεύματος πρωτεύοντος
- I_ϕ : Συνιστώσα διεγέρσεως του ρεύματος πρωτεύοντος
- I_{cr} : Συνιστώσα απωλειών του πυρήνα
- I_m : Συνιστώσα μαγνητίσεως
- N_1 : Αριθμός σπειρών πρωτεύοντος τυλίγματος
- N_2 : Αριθμός σπειρών δευτερεύοντος τυλίγματος

Ανάγοντας όλες τις τάσεις, τις εντάσεις και τις σύνθετες αντιστάσεις στο πρωτεύον ή το δευτερεύον, μπορούμε να απομακρύνουμε τον ιδανικό μετασχηματιστή και να διαμορφώσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή – ονομάζεται και T κύκλωμα – όπως φαίνεται στο σχήμα 6-2.



Σχήμα 6-2: T - ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή.

- R_P : Ωμική αντίσταση πρωτεύοντος
- L_P : Επαγωγή σκεδάσεως πρωτεύοντος
- R_S : Ωμική αντίσταση δευτερεύοντος
- L_S : Επαγωγή σκεδάσεως δευτερεύοντος
- R_{cr} : Μη επαγωγική αντίσταση
- L_m : Επαγωγή χωρίς απώλειες
- V_1 : Τάση πρωτεύοντος
- V_2 : Τάση δευτερεύοντος

- I_1 : Ρεύμα πρωτεύοντος
 I_2 : Ρεύμα δευτερεύοντος
 I_φ : Συνιστώσα διεγέρσεως του ρεύματος πρωτεύοντος
 I_{cr} : Συνιστώσα απωλειών του πυρήνα
 I_m : Συνιστώσα μαγνητίσεως

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή που διαμορφώσαμε μέχρι τώρα, έχουν ληφθεί υπόψη: οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων, η μαγνητική σκέδαση και το ρεύμα διεγέρσεως (οι απώλειες στον πυρήνα από υστέρηση και ρεύματα Foucault + ρεύμα μαγνητίσεως). Παρακάτω θα εξετάσουμε το μονωτικό σύστημα του μετασχηματιστή σε ένα πραγματικό μετασχηματιστή και θα συμπληρώσουμε το ισοδύναμο κύκλωμά του λαμβάνοντας υπόψη και τη συμβολή του μονωτικού.

Το μονωτικό σύστημα του μετασχηματιστή αποτελείται βασικά από μονωτικό λάδι και χαρτί. Όπως αναφέραμε στην παράγραφο 2.2 για το μονωτικό λάδι έχει διατυπωθεί η άποψη, ότι οι παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής είναι οι ίδιοι με εκείνους κατά τη γήρανση και διάσπαση των στερεών μονωτικών.

Η δυσκολία για τη μελέτη των παραγόντων αυτών στο χαρτί και στο λάδι, οφείλεται στην διαχρονική αλλαγή της μοριακής δομής τους, η οποία διαπιστώνεται από την αύξηση της τιμής της $\text{tg}\delta$ [1,2,8,10].

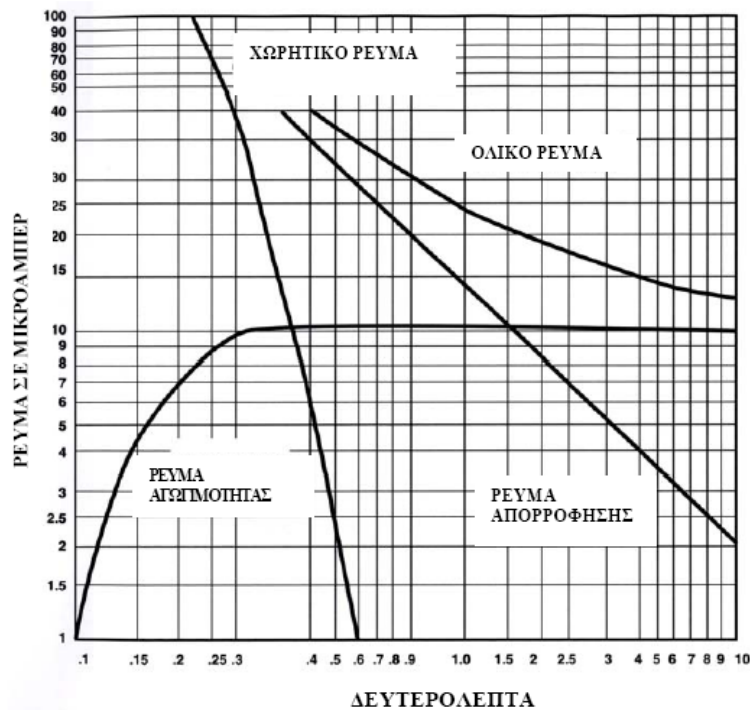
Σε μια μόνωση γενικά που παρεμβάλλεται μεταξύ ηλεκτροδίων με σκοπό τη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, έχουμε ένα συνολικό ρεύμα (I_t) δια μέσω του όγκου της, το οποίο είναι το άθροισμα τριών συνιστωσών [59,66,67]:

- (α) Του ρεύματος φορτίσεως (I_c) της γεωμετρικής χωρητικότητας C_0 . Το I_c ξεκινά από υψηλές τιμές και μειώνεται απότομα. Αντιπροσωπεύει την αρχικά αποθηκευόμενη ενέργεια στην χωρητικότητα. Η γεωμετρική χωρητικότητα είναι η χωρητικότητα του μετασχηματιστή όταν δεν περιέχει τη μόνωση, αλλά αντί αυτής αέρα ή κενό.
- (β) Του ρεύματος απορροφήσεως (I_a), το οποίο αντιστοιχεί στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής των διαφόρων ομάδων διπόλων του μονωτικού, στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης. Επειδή οι ομάδες διπόλων του μονωτικού έχουν διαφορετικές σταθερές χρόνου κατά την εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής, τις παριστούμε στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 6-4 με μια παράλληλη διάταξη κλάδων, καθένας εκ των οποίων περιλαμβάνει την εν σειρά σύνδεση μιας αντίστασης R_{ai} και μιας χωρητικότητας C_{ai} . Η αντίστοιχη σταθερά χρόνου της i ομάδας διπόλων είναι τότε $\tau_i = R_{ai}C_{ai}$. Η συμμετοχή της μόνωσης (δηλαδή όλων των ομάδων διπόλων) στη συνολική χωρητικότητα του μετασχηματιστή, δίδεται από τις επί μέρους χωρητικότητες C_{ai} , οι οποίες βρίσκονται σε παράλληλη διάταξη με τη γεωμετρική χωρητικότητα C_0 .
- Το ρεύμα απορροφήσεως (I_a) ξεκινά επίσης από υψηλές τιμές αλλά μειώνεται με ένα πιο αργό ρυθμό από ότι το χωρητικό I_c , εξαρτώμενο από την ακριβή φύση της μόνωσης. Το ρεύμα απορροφήσεως αντιπροσωπεύει την αποθηκευμένη ενέργεια στο καταπονούμενο (stressed) διηλεκτρικό του πυκνωτή.
- (γ) Του ρεύματος διαρροής ή αγωγιμότητας I_g , το οποίο αντιπροσωπεύεται από την αγωγιμότητα G . Το ρεύμα αυτό είναι μικρό και ουσιαστικά σταθερό για κάθε εφαρμοζόμενη τάση. Ρέει στην επιφάνεια και στο σώμα της μόνωσης, καθώς και δια μέσω ρωγμών και ασυνεχειών αυτής [59].

Οι απώλειες Joule (P_w) στην αγωγιμότητα G δίδονται από τη σχέση 1.1-2:

$$P_w = I_g V = GV^2 = V^2 \omega C \cdot \text{tg}\delta = P_B \text{tg}\delta$$

Όπου P_B η άεργος ισχύς (ισχύς στη χωρητικότητα C).[1]

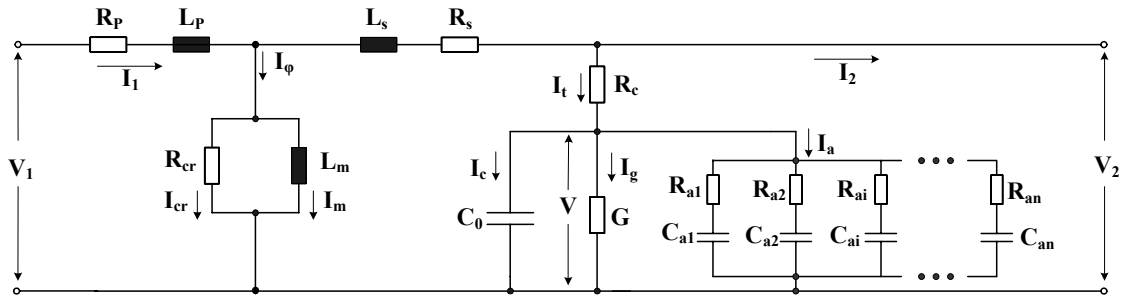


Σχήμα 6-3: Οι συνιστώσες του συνολικού ρεύματος μέσω της μόνωσης [59,67].

Στο Σχήμα 6-3 φαίνεται η εξέλιξη των προαναφερθέντων ρευμάτων μετά την επιβολή του ηλεκτρικού πεδίου. Όπως φαίνεται σε αυτό μετά από λίγα δέκατα του δευτερολέπτου το ρεύμα φόρτισης της χωρητικότητας (C_0) μηδενίζεται και το ρεύμα αγωγιμότητας μέσω της αγωγιμότητας G φθάνει σε μία σταθερή τιμή. Αντιθέτως, η συνιστώσα του ρεύματος απορροφήσεως συνεχίζει να υπάρχει, φθίνουσα με ένα μικρότερο ρυθμό. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [59,67], το ρεύμα απορροφήσεως εξακολουθεί να υπάρχει μέχρι 10 λεπτά και ακόμα περισσότερο. Κατά συνέπεια, μπορούμε να πούμε ότι το συνολικό ρεύμα – το οποίο ονομάζουμε ρεύμα πολώσεως – μέσα στο χρονικό διάστημα από 1 λεπτό μέχρι 10 λεπτά βαίνει μειούμενο ή αντίστοιχα η μετρούμενη αντίσταση βαίνει αυξανόμενη. Έτσι, μετρώντας την αντίσταση μόνωσης, οι μετρούμενες τιμές εξαρτώνται από τον χρόνο ως εξής:

- Στην έναρξη, από τη χωρητικότητα.
- Περί το 1 λεπτό, από την απορρόφηση.
- Στα 10 λεπτά, κυρίως από το ρεύμα αγωγιμότητας.

Μετά τα παραπάνω το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή στο οποίο έχουν ληφθεί υπ' όψη η αγωγιμότητα και η πόλωση του μονωτικού συστήματος, διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 6-4.



Σχήμα 6-4 : Ένα ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή στο οποίο έχουν ληφθεί υπόψη τα φαινόμενα αγωγιμότητας και πώλωσης του μονωτικού συστήματός του.

- R_p : Ωμική αντίσταση πρωτεύοντος
- L_p : Επαγωγή σκεδάσεως πρωτεύοντος
- R_s : Ωμική αντίσταση δευτερεύοντος
- L_s : Επαγωγή σκεδάσεως δευτερεύοντος
- R_{cr} : Μη επαγωγική αντίσταση
- L_m : Επαγωγή χωρίς απώλειες
- V_1 : Τάση πρωτεύοντος
- V_2 : Τάση δευτερεύοντος
- V : Τάση επί του μονωτικού
- I_1 : Ρεύμα πρωτεύοντος
- I_2 : Ρεύμα δευτερεύοντος
- I_ϕ : Συνιστώσα διεγέρσεως του ρεύματος πρωτεύοντος
- I_{cr} : Συνιστώσα απωλειών του πυρήνα
- I_m : Συνιστώσα μαγνητίσεως
- I_t : Συνολικό ρεύμα μέσω του σώματος της μόνωσης
- I_c : Ρεύμα φορτίσεως της γεωμετρικής χωρητικότητας C_0
- I_g : Ρεύμα διαρροής ή αγωγιμότητας
- I_a : Ρεύμα απορροφήσεως
- R_c : Αντίσταση συνδέσεων και επαφών
- C_0 : Γεωμετρική χωρητικότητα του μετασχηματιστή
- G : Αγωγιμότητα της μόνωσης
- R_{ai} : Ωμική αντίσταση της i ομάδας διπόλων της μόνωσης
- C_{ai} : Χωρητικότητα της i ομάδας διπόλων της μόνωσης

Η αντίσταση R_c αντιπροσωπεύει απώλειες εντός των συνδέσεων και επαφών, ως επίσης και τμήμα απωλειών εντός αυτού του ίδιου του μονωτικού, οι οποίες ως εκ της φύσεως των αποδίδονται ακριβέστερα μέσω μιας αντιστάσεως σειράς [65].

Ακολουθώς εξετάζεται το μονωτικό σύστημα του μετασχηματιστή με βάση τις θεωρίες (μακροσκοπική και κβαντομηχανική) των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των μονώσεων, όπως αυτές αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 3. Για λόγους συνοχής της ύλης, αναφερόμαστε εδώ σε τμήματα της ύλης του κεφαλαίου 3, τα οποία σχετίζονται με το υπό διαμόρφωση ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή.

6.1.1 Μακροσκοπική θεώρηση

Σύμφωνα με την μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, υπάρχουν οι παρακάτω βασικοί παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων τους, που οδηγούν στις αντίστοιχες θεωρητικές μορφές διάτρησης:

- (α) Οι απώλειες Joule που οδηγούν σε θερμική διάτρηση.
- (β) Οι δυνάμεις Coulomb που οδηγούν σε ηλεκτρική διάτρηση.

- (γ) Οι μερικές εκκενώσεις που οδηγούν στην ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση).
 (δ) Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος που οδηγεί σε θερμοχημική διάτρηση.

(α) Θερμική διάτρηση

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η μορφή της θερμικής διάτρησης συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνον από τις απώλειες Joule. 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.

Η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα στερεά μονωτικά, σε τιμές πεδίου που η καταπόνηση του διηλεκτρικού μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μόνο θερμική, δίδεται από τη σχέση 1.1-3:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\beta\theta}$$

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

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta}$$

Επομένως την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας και την αύξηση των απωλειών Joule του μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης, θα πρέπει να την παραστήσουμε στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή με μια μεταβλητή αγωγιμότητα G , παράλληλα με τη χωρητικότητα C_0 του ιδανικού μονωτή (βλ. σχήμα 6-6). Η διάτρηση στην τιμή U_θ της τάσης συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ_0 σε σ_1), μια οριακή τιμή G_{\max} .

(β) Ηλεκτρική διάτρηση

Όταν η σταθερή ενεργός τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στο μονωτικό, 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 αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες πόλωσης του μονωτικού.

Η πόλωση του μονωτικού έχει αποδοθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 6-6 με την παράλληλη διάταξη κλάδων που περιλαμβάνουν τις αντιστάσεις R_{ai} και τις χωρητικότητες C_{ai} .

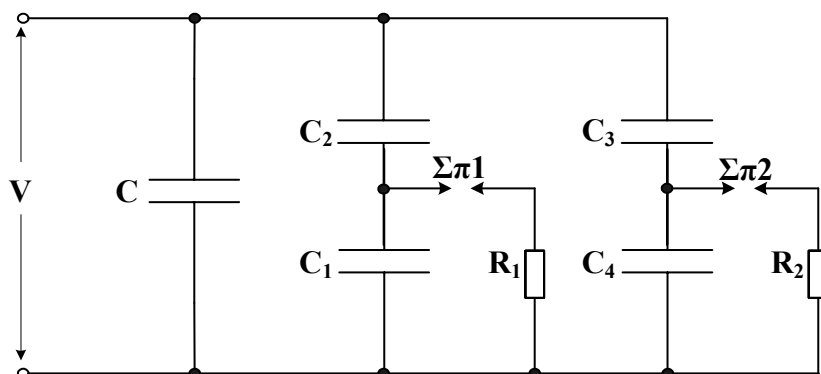
Προκειμένου να συμπεριλάβουμε την ηλεκτρική (ηλεκτρομηχανική) διάτρηση στο ισοδύναμο κύκλωμα, παρεμβάλουμε τον σπινθηριστή Σ_π στην παράλληλη διάταξη των κλάδων πόλωσης. Η διαδρομή εκκένωσης εκφράζεται στην περίπτωση αυτή με τον σπινθηριστή Σ_π , την αντίσταση του τόξου R_π (υποτίθεται ότι ο Σ_π διασπάται ταυτόχρονα με κάποιον ή κάποιους πυκνωτές C_{ai}) και την αντίσταση ή τις αντιστάσεις R_{ai} .

(γ) Διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων. Ηλεκτροχημική διάτρηση ή γήρανση της μόνωσης.

Οι θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο ή στην επιφάνεια του μονωτικού είναι σημεία εμφάνισης των μερικών εκκενώσεων, οι οποίες οδηγούν στη διάσπαση του μονωτικού. Οι μερικές εκκενώσεις προκαλούν σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του μονωτικού, εντονότερη στις πλέον αγωγίμες θέσεις ανομοιογένειας. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο το οποίο προκαλεί βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής και

σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού. Για το λόγο αυτό η ηλεκτροχημική διάτρηση ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού.

Η ηλεκτροχημική διάτρηση αποδίδεται με το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff του σχήματος 3.1.1-7, συμπληρωμένο ώστε να αποδίδει τόσο τις εσωτερικές μερικές εκκενώσεις σε μια ανομοιογένεια (π.χ. φυσαλίδα αερίου), όσο και τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού, το οποίο για λόγους συνοχής της ύλης παραθέτουμε παρακάτω τόσο στο σχήμα 6-5, όσο και στο σχήμα 6-6.



Σχήμα 6-5 : Ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής.

V : επιβαλλόμενη τάση στο μονωτικό

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας

C_4 : χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

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

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

(δ) **Θερμοχημική διάτρηση.**

Η διάτρηση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος το στερεό μονωτικό μέσου, ονομάζεται θερμοχημική διάτρηση. Κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού είναι δεδομένη, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη.

Έτσι:

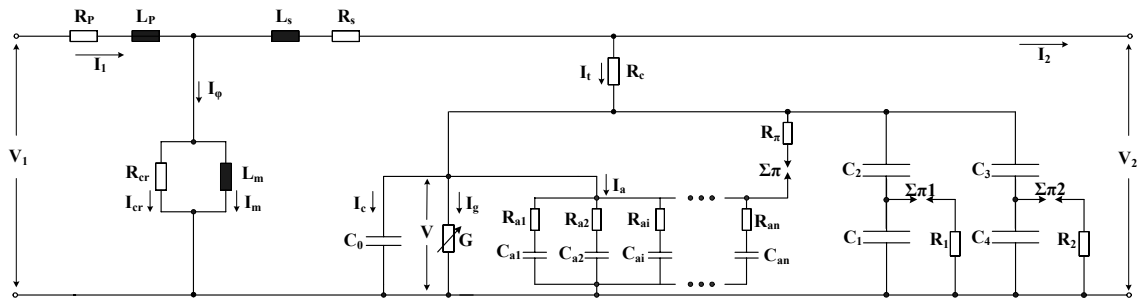
- Αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα.
- Διευκολύνεται η εξάσκηση δυνάμεων Coulomb γιατί οι δεσμοί στο πλέγμα των μορίων των πολυμερών υλικών γίνονται ασθενέστεροι.
- Ενισχύεται ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων, λόγω μεγαλύτερης ευκινησίας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κυρίως στις φυσαλίδες αερίου.

Σημειώνεται δηλαδή μια συνέργεια μεταξύ των διαφόρων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού και της θερμότητας του περιβάλλοντος αυτό μέσου.

Έτσι αυξάνει διαχρονικά ο συντελεστής απωλειών ($tg\delta$) και μειώνεται η διάρκεια ζωής του στερεού μονωτικού.

Επομένως για να εκφράσουμε την καταπόνησή του υλικού από τη θερμότητα περιβάλλοντος, όπως και προηγουμένως τις θερμικές απώλειες (απώλειες Joule και ενίσχυση τους από τις μερικές εκκενώσεις), θα πρέπει να θεωρήσουμε και να δείξουμε την παράλληλη αγωγιμότητα G , ως μεταβλητή (βλέπετε σχήμα 6-6).

Μετά τα παραπάνω, το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή διαμορφώνεται όπως δείχνεται στο σχήμα 6-6. Εννοείται ότι για ένα τριφασικό μετασχηματιστή ισχύει το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα για κάθε φάση του.



Σχήμα 6-6: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή στο οποίο έχουν ληφθεί υπόψη τα φαινόμενα αγωγιμότητας και πόλωσης του μονωτικού συστήματός του, καθώς επίσης η ηλεκτρική και η ηλεκτροχημική διάτρηση αυτού.

- R_P : Ωμική αντίσταση πρωτεύοντος
- L_P : Επαγωγή σκεδάσεως πρωτεύοντος
- R_S : Ωμική αντίσταση δευτερεύοντος
- L_S : Επαγωγή σκεδάσεως δευτερεύοντος
- R_{cr} : Μη επαγωγική αντίσταση
- L_m : Επαγωγή χωρίς απώλειες
- V_1 : Τάση πρωτεύοντος
- V_2 : Τάση δευτερεύοντος
- V : Τάση επί του μονωτικού
- I_1 : Ρεύμα πρωτεύοντος
- I_2 : Ρεύμα δευτερεύοντος
- I_ϕ : Συνιστώσα διεγέρσεως του ρεύματος πρωτεύοντος
- I_{cr} : Συνιστώσα απωλειών του πυρήνα
- I_m : Συνιστώσα μαγνητίσεως
- I_t : Συνολικό ρεύμα μέσω του σώματος της μόνωσης
- I_c : Ρεύμα φορτίσεως της γεωμετρικής χωρητικότητας C_0
- I_g : Ρεύμα διαρροής ή αγωγιμότητας
- I_a : Ρεύμα απορροφήσεως
- R_c : Αντίσταση συνδέσεων και επαφών
- C_0 : Γεωμετρική χωρητικότητα του μετασχηματιστή
- G : Αγωγιμότητα της μόνωσης
- R_{ai} : Ωμική αντίσταση της i ομάδας διπόλων της μόνωσης
- C_{ai} : Χωρητικότητα της i ομάδας διπόλων της μόνωσης
- R_π : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_π
- C_1 : Χωρητικότητα της φυσαλίδας
- C_4 : Χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής
- C_2 : Χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού
- C_3 : Χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ
- R_1 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma_{\pi 1}$
- R_2 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma_{\pi 2}$

6.1.2 Κβαντομηχανική Θεώρηση

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.1.2, η κβαντομηχανική θεωρία αναλαμβάνει να ερμηνεύσει φαινόμενα που δεν μπορεί κανείς να ακούσει ή να παρατηρήσει, τα οποία όμως θεωρείται ότι εκδηλώνονται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση των μονώσεων. Πρόκειται κυρίως για:

- τον ιονισμό με κρούσεις, και
- το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Στη κβαντομηχανική θεώρηση, το ενδιαφέρον κυρίως εστιάζεται στην ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) και εξ αυτής (της ενέργειας) στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

Τα βασικότερα συμπεράσματα της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών μονωτικών είναι:

1. Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό.
2. Υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2MV/cm.
3. Για τιμές πεδίου μέχρι περίπου 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση 1.1-3: $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$
4. Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου δεν ισχύει η παραπάνω σχέση. Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι για την ερμηνεία των φαινομένων χρειάζεται να συνδυαστούν οι δύο θεωρίες (μακροσκοπική και κβαντομηχανική) ώστε να συμπεριληφθούν και τα συμβαίνοντα όταν η πεδιακή ένταση E είναι πολύ μεγαλύτερη της πεδιακής έντασης E_0 (~0,2 MV/cm), στην οποία μόλις συμβαίνει έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

Στην περίπτωση αυτή δεν ισχύει η σχέση 1.1-3, αλλά έχουμε μεγάλη παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από ιονισμό με κρούσεις και εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό.

Μετά τα παραπάνω, το ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή διαμορφώνεται όπως στο σχήμα 6-7.

Κατ' αυτό, στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 6-6, έχει προστεθεί ένας παράλληλος κλάδος ο οποίος περιλαμβάνει την εν σειρά σύνδεση της αρνητικής διαφορικής αντίστασης Z και του σπινθηριστή $\Sigma\pi 3$ για την εκδήλωση της Z .

απωλειών Joule, αλλά και εξ αιτίας αύξησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (θερμοχημική διάτρηση).

Τμήμα c:

Στο τμήμα c μπορούμε να μελετήσουμε την ηλεκτρική διάτρηση του μονωτικού, σε υψηλότερες από πριν πεδιακές εντάσεις, όπου η διάτρηση αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb. Επίσης την ηλεκτροχημική διάσπαση του μονωτικού λόγω μερικών εκκενώσεων, σε θέσεις ανομοιογένειας, μέσα στον όγκο ή στην επιφάνεια του μονωτικού.

Τμήμα d:

Στο τμήμα d του σχήματος 6-7, μπορούμε να μελετήσουμε, συνδυάζοντας τη μακροσκοπική και την κβαντική θεωρία, τα φαινόμενα για πεδιακές εντάσεις πολύ μεγαλύτερες από 0,5MV/cm.

Εννοείται ότι για ένα τριφασικό μετασχηματιστή (όπως οι μετασχηματιστές του δικτύου διανομής) ισχύει το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 6-7 για κάθε φάση του.

II. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Πρωταρχικός σκοπός στις Επιχειρήσεις Κοινής Ωφέλειας είναι η συντήρηση μετά από επιθεώρηση και έλεγχο της κατάστασης του υλικού (condition-based maintenance). Θα μπορούσαμε να το ονομάσουμε και επιδέξια διαχείριση της ζωής του υλικού (life management). Η άποψη αυτή είναι αντίθετη με τη προληπτική συντήρηση, η οποία βασίζεται σε ένα χρονικό προγραμματισμό, μετά από μια γενικότερη εκτίμηση για την ανάγκη συντήρησης του υλικού (time-based maintenance).

Τα αίτια αυτής της εξέλιξης, τόσο στη Βόρεια Αμερική όσο και στην Ευρώπη, μπορούν να βρεθούν στην απορρύθμιση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το κύριο ζητούμενο της απορρύθμισης αυτής της αγοράς, η οποία τώρα υποδιαιρείται σε ανεξάρτητους παραγωγούς, εταιρείες μεταφοράς, διαχειριστές του συστήματος και εταιρείες διανομής, είναι να ενθαρρύνει και να τονώσει τον ανταγωνισμό. Έτσι, όλοι οι εταίροι μέσα σε αυτό το νέο σχήμα αναγκάζονται να περιορίσουν τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας, χωρίς ωστόσο να διακινδυνεύουν τη διαρκή παροχή ηλεκτρισμού στους πελάτες, οι οποίοι γίνονται όλο και πιο απαιτητικοί.

Σημαντική μείωση του κόστους μπορεί να επιτευχθεί με μια μετάβαση από την προληπτική συντήρηση στη συντήρηση μετά από επιθεώρηση και έλεγχο της κατάστασης του υλικού, με την προϋπόθεση βεβαίως ότι η πραγματική κατάσταση του (ακριβού και κρίσιμου) υλικού, μπορεί να είναι αξιόπιστα γνωστή.

Μια τρίτη άποψη και φιλοσοφία για τη συντήρηση είναι η μη προγραμματισμένη κατασταλτική συντήρηση. Κατ' αυτήν οι επισκευές και η συντήρηση γίνεται μόνο όταν ο εξοπλισμός π.χ. ένας μετασχηματιστής ή καλώδιο, χαλάσει. Όμως αυτό προκαλεί διακοπές στην παροχή ρεύματος και τελικά καταλήγει να είναι πολύ περισσότερο ακριβή από τη σχεδιασμένη συντήρηση.

Σήμερα λοιπόν κερδίζει έδαφος η συντήρηση μετά από έλεγχο της κατάστασης του υλικού, βασιζόμενη πάνω σε αξιόπιστα διαγνωστικά εργαλεία [68].

Από τα προηγούμενα κεφάλαια διαπιστώνεται ότι έχει γίνει εκτενές ερευνητικό έργο σχετικά με τη γήρανση των ηλεκτρομονωτικών υλικών κάτω από τις καταπονήσεις που υφίστανται κατά τη λειτουργία τους. Η σχετική έρευνα κατατείνει αφενός μεν στην ανάπτυξη διαφόρων μαθηματικών μοντέλων που να περιγράφουν τη γήρανση του μονωτικού και να εκτιμούν την προσδόκιμη εισέτι διάρκεια ζωής του, αφετέρου δε στην ανάπτυξη διαγνωστικών τεχνικών, που θα δίδουν τη δυνατότητα εκτίμησης της κατάστασης του μονωτικού, με σκοπό βέβαια πάλι να μπορεί να γίνει εκτίμηση για την εναπομένουσα ζωή αυτού. [69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81].

Όσον αφορά τους μετασχηματιστές, το ενδιαφέρον εστιάζεται κατά κύριο λόγο στους μετασχηματιστές μεταφοράς, οι οποίοι είναι ακριβά και κομβικά σημεία του ηλεκτρικού συστήματος. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5, έχουν αναπτυχθεί διάφορες χημικές και ηλεκτρικές τεχνικές για τη διάγνωση της κατάστασης στην οποία ευρίσκεται η μόνωση αυτών, δηλαδή το μονωτικό σύστημα ελαίου-χάρτου. Οι περισσότερες από τις διαγνωστικές αυτές τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τους μετασχηματιστές διανομής.

Για την επιλογή όμως μιας κατάλληλης διαγνωστικής μεθόδου για τους μετασχηματιστές διανομής, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το μεγάλο πλήθος και η μεγάλη διασπορά αυτών. Για το λόγο αυτό η μέθοδος θα πρέπει να χρησιμοποιεί χαμηλού κόστους και εύκολο στο χειρισμό εξοπλισμό, καθώς οι μετρήσεις θα πρέπει να λαμβάνονται επί του ηλεκτρικού δικτύου, στα πλαίσια της καθημερινής δουλειάς ρουτίνας, μιας Επιχείρησης Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Οι μετρήσεις που γίνονται σε μετασχηματιστές διανομής οι οποίοι ήδη λειτουργούν στα δίκτυα μπορούν να διακριθούν σε:

- Εργαστηριακές μετρήσεις. Αφορούν κυρίως τη μέτρηση του συντελεστή απωλειών (tgδ), της χωρητικότητας και των μερικών εκκενώσεων, μετά την ξήρανση των πηνίων και την αλλαγή του μονωτικού λαδιού εν κενώ.
- Μετρήσεις που λαμβάνονται επί του δικτύου, στον τόπο που είναι εγκατεστημένος ο μετασχηματιστής. Αφορούν κυρίως τη μέτρηση της αντίστασης μονώσεως.

Αυτές οι επί του δικτύου μετρήσεις, είναι μεγάλης σημασίας για τις Επιχειρήσεις Ηλεκτρικής Ενέργειας, καθόσον μπορούν να τις χρησιμοποιήσουν για να χειριστούν τον τεράστιο αριθμό ήδη λειτουργούντων μετασχηματιστών διανομής, μέσω των καθημερινών εργασιών ρουτίνας που γίνονται στο δίκτυο.

Ο σκοπός της εργασίας αυτής, είναι να αναπτύξει και να παρουσιάσει μια μέθοδο εκτίμησης της υπολειπόμενης ζωής της μόνωσης μετασχηματιστών διανομής, χρησιμοποιώντας μετρήσεις της αντίστασης μονώσεως αυτών.

Οι Ηλεκτρικές Επιχειρήσεις πραγματοποιούν πάντοτε μετρήσεις στα πλαίσια προγραμματισμένων συνήθων εργασιών. Έτσι χρησιμοποιώντας ένα απλό και μικρού κόστους όργανο όπως είναι το Megger (Μεγγόμετρο), μπορούν να μετρούν και να καταγράφουν την μεταβολή της αντίστασης μονώσεως κατά τη διάρκεια της ζωής των μετασχηματιστών στο δίκτυο.

Αξιοποιώντας τα στοιχεία αυτά, η προτεινόμενη μέθοδος συμβάλει στην εκτίμηση του υπολειπόμενου χρόνου ζωής των μετασχηματιστών, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στην Επιχείρηση να διαχειριστεί το πιο ακριβό περιουσιακό στοιχείο της.

Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να έχει εφαρμογή και σε άλλο εξοπλισμό του ηλεκτρικού δικτύου, με μονωτικό σύστημα από λάδι ή λάδι και χαρτί, που υφίσταται θερμική καταπόνηση.

III. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

1. Η μέθοδος πειραματισμού.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο II, ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι να αναπτύξει μια μέθοδο εκτίμησης του υπολειπόμενου χρόνου ζωής των μετασχηματιστών διανομής, χρησιμοποιώντας μετρήσεις της αντίστασης μονώσεως αυτών.

Για την ανάπτυξη της μεθόδου, θεωρήσαμε πεδριακές εντάσεις κάτω από τις οποίες η καταπόνηση του διηλεκτρικού μπορεί να θεωρηθεί μόνο θερμική. Θερμική καταπόνηση από τις απώλειες Joule υφίστανται τα ηλεκτρομονωτικά υλικά όλων των ηλεκτρικών συσκευών και μηχανών, ιδιαίτερα όταν έχουμε κακή αγωγή της θερμότητας. Όπως αναφέραμε στην παράγραφο 3.1.1, η ως άνω θερμική καταπόνηση του μονωτικού είναι δυνατόν να οδηγήσει σε θερμική διάτρηση αυτού. Η εικόνα που παρουσιάζει τότε το μονωτικό είναι η απανθράκωση και η τήξη του, στην περιοχή όπου οι απώλειες Joule είναι ιδιαίτερα αυξημένες [1,2].

Κατά την εξέλιξη του φαινομένου της θερμικής καταπόνησης του μονωτικού υλικού, έχουμε αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητάς του κατά τη σχέση 1.1-3,

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

όπου : σ : η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας $\Delta\theta$ ως προς το περιβάλλον

σ_0 : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

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

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

T : η απόλυτη θερμοκρασία

β : ένας συντελεστής του υλικού

Ο σχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 .

Η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου συντελεί επίσης στην αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του μονωτικού και κατά συνέπεια ενισχύει τη θερμική καταπόνηση και τη θερμική διάτρηση αυτού [1,2,10,14,73].

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η μελέτη της συμπεριφοράς (π.χ. γήρανση) του μονωτικού συστήματος του μετασχηματιστή, κατά την ως άνω θερμική καταπόνηση – η οποία είναι η συνηθέστερη και η πλέον μακροχρόνια στις ηλεκτρικές συσκευές – μπορεί να γίνει μέσω της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$ και του συντελεστή β του μονωτικού συστήματος, τον οποίο στο εξής θα ονομάζουμε **θερμικό συντελεστή της μόνωσης**.

Από τη σχέση (III-1), η τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$ υπολογίζεται ως:

$$\Delta\theta = \frac{\ln(\sigma / \sigma_0)}{\beta} \quad (\text{III-2})$$

ή

$$\Delta\theta = \frac{\ln(R_0 / R)}{\beta} \quad (\text{III-3})$$

και

$$\beta = \frac{\ln(R_0 / R)}{\Delta\theta} \quad (\text{III-4})$$

Όπου R_0 είναι η αρχική τιμή της αντίστασης μονώσεως του μετασχηματιστή, αντιστοιχούσα στο σ_0 , και R η τιμή της αντίστασης κατά το χρόνο της μέτρησης, αντιστοιχούσα στο σ , η δε μεταβολή αυτή, μπορεί να αντιστοιχηθεί με μια αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta$.

Η τιμή του θερμικού συντελεστή β περιγράφει ένα δεδομένο μονωτικό υλικό ή μονωτικό σύστημα και μπορεί να υπολογιστεί αν η αντίσταση R της μόνωσης είναι γνωστή σε δύο διαφορετικές συγκεκριμένες θερμοκρασίες [43]. Ο συντελεστής αυτός μεταβάλλεται ελάχιστα με το χρόνο ζωής του μονωτικού και γι' αυτό η τιμή του μπορεί να θεωρηθεί στην πράξη ότι είναι σταθερή.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν τυπικές μαθηματικές εκφράσεις και διαγράμματα για τη διάρκεια ζωής t σε ημέρες, μήνες ή χρόνια σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ ($t = f(\Delta\theta)$), για διάφορα στερεά μονωτικά υλικά, συμπεριλαμβανομένου και του χαρτιού το οποίο είναι η βασική μόνωση των μετασχηματιστών διανομής [1,10,14].

Με βάση τα παραπάνω και παίρνοντας σαν δεδομένο ότι η συνάρτηση $t = f(\Delta\theta)$ για το χαρτί, δίδει στην πράξη την κατάσταση της μόνωσης του μετασχηματιστή, τότε η σχέση III-3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του υπολειπόμενου χρόνου ζωής των μετασχηματιστών διανομής μέσω της μέτρησης των μεγεθών R_0 , R και β .

Μετά από προσαρμογή στον ηλεκτρονικό υπολογιστή των χαρακτηριστικών καμπυλών για το χαρτί που δίδονται στη βιβλιογραφία [14], προέκυψαν οι παρακάτω μαθηματικές εκφράσεις:

- Υπολειπόμενος χρόνος ζωής σε ημέρες: $t = 264,29728 \cdot 10^5 \cdot \exp(-0,0879\Delta\theta)$ (III-5)

- Υπολειπόμενος χρόνος ζωής σε μήνες: $t = 3,96329 \cdot 10^5 \cdot \exp(-0,0819\Delta\theta)$ (III-6)

- Υπολειπόμενος χρόνος ζωής σε χρόνια: $t = 1,57945 \cdot 10^5 \cdot \exp(-0,0938\Delta\theta)$ (III-7)

από τις οποίες υπολογίζεται η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του μονωτικού. Συγκεκριμένα η διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή υπολογίζεται από την τελευταία σχέση III-7, ενώ οι σχέσεις III-5 και III-6 βρίσκουν εφαρμογή σε πειραματικές διατάξεις στο εργαστήριο.

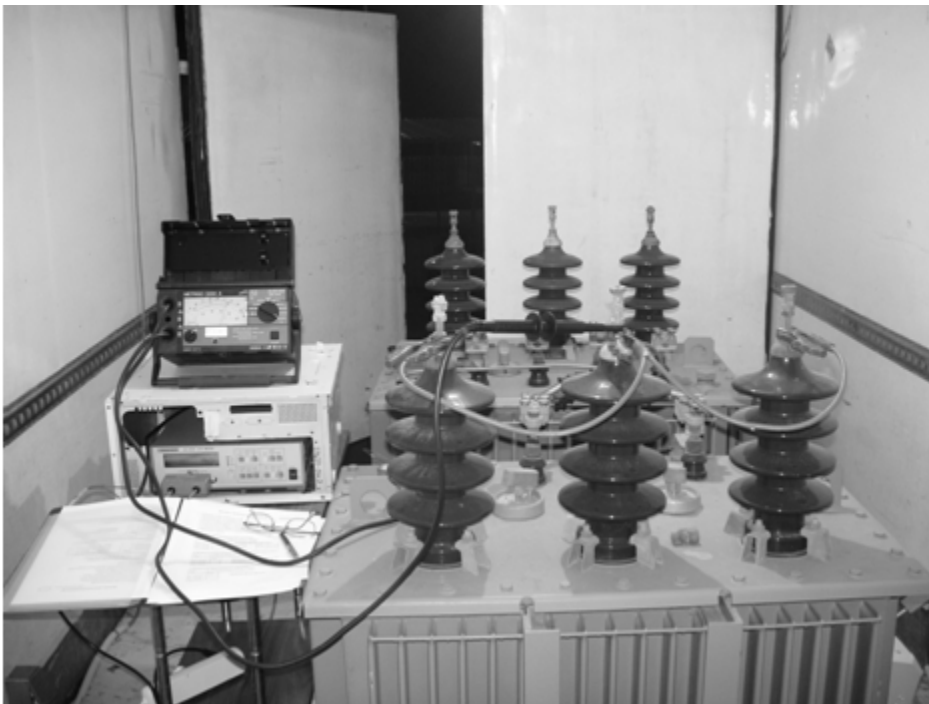
Το σχετικό θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου αναφέρεται στο τμήμα (b) του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή (βλ. σχήμα 6-7) και πιο συγκεκριμένα στη μεταβλητή αγωγιμότητα G .

2. Οι διατάξεις μέτρησης.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής μετρήθηκαν οι αντιστάσεις μονώσεως 72 μετασχηματιστών διανομής, ονομαστικής ισχύος 50 kVA, 100 kVA και 250 kVA, ήτοι: η αντίσταση R_1 μεταξύ τυλιγμάτων μέσης τάσεως (Μ.Τ) και δοχείου (γης), καθώς και η αντίσταση R_2 μεταξύ των τυλιγμάτων μέσης τάσεως (Μ.Τ) και χαμηλής τάσεως (Χ.Τ). Πριν από τις μετρήσεις σε κάθε μετασχηματιστή, γινόταν αποσύνδεση του γεφυροσυνδέσμου ουδετέρου-δοχείου. Κατά τις μετρήσεις οι ακροδέκτες των τυλιγμάτων μέσης τάσεως παρέμεναν βραχυκυκλωμένοι μεταξύ τους, προκειμένου στη μέτρηση να συμμετέχουν και τα τρία τυλίγματα. Το αυτό συνέβαινε και για την χαμηλή τάση.



Φωτογραφία III-1. Ένας μετασχηματιστής διανομής ονομαστικής ισχύος $P_N = 100$ KVA (αριθμός ΔΕΗ: N-20215).
A: Ακροδέκτες μέσης τάσεως, B: Ακροδέκτες χαμηλής τάσεως, Γ: Δοχείο (ηλεκτρική γη).



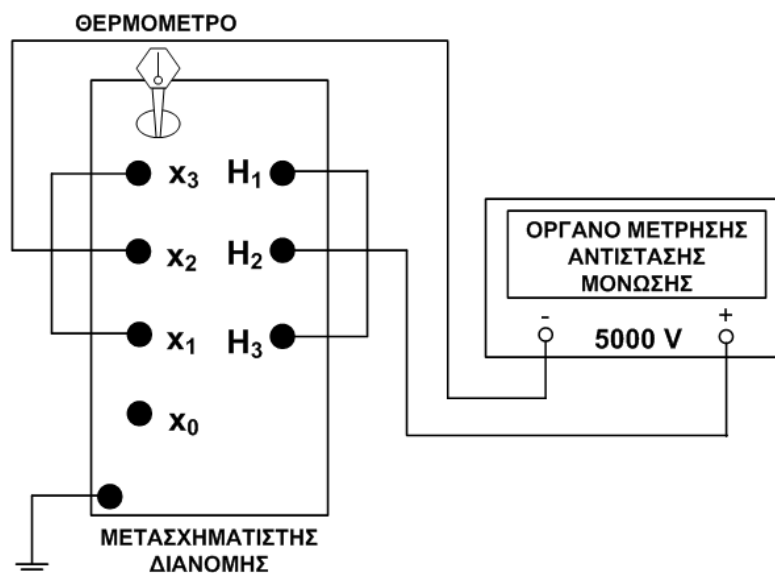
Φωτογραφία III-2. Η διάταξη των μετρήσεων των μετασχηματιστών διανομής εντός του θερμικά μονωμένου θαλάμου.

Οι μετρήσεις των αντιστάσεων μονώσεως των μετασχηματιστών, πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες θερμοκρασίες και οι τιμές, σε κάθε περίπτωση, ελήφθησαν σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Οι μετασχηματιστές ετοποθετούντο εκ περιτροπής σε ένα μονωμένο θάλαμο, όπου αυξάνετο η θερμοκρασία για να διατηρείται σταθερή κατά τη μέτρηση. Κάθε φορά, ο χώρος και οι μετασχηματιστές εκρατούντο σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία για τουλάχιστον 8 ώρες, πριν ληφθούν μετρήσεις. Εναλλακτικά, σε έξι περιπτώσεις, θερμάνθηκαν οι μετασχηματιστές για 8 ώρες στην πιο υψηλή θερμοκρασία και έγιναν μετρήσεις στις επιθυμητές τιμές θερμοκρασίας, καθώς αυτή έπεφτε προς την θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος. Διαπιστώθηκε ότι με τον τρόπο αυτό η διατάραξη του λαδιού του μετασχηματιστή ήταν μικρότερη και τα αποτελέσματα ήταν συμβατά και ομαλότερα. Και στις δύο περιπτώσεις, η θερμοκρασία του λαδιού εντός του δοχείου του μετασχηματιστή, άξανε από τον πυθμένα προς την κορυφή, όπως συμβαίνει όταν ο μετασχηματιστής λειτουργεί κανονικά στο δίκτυο. Η μέτρηση της θερμοκρασίας του λαδιού γινόταν στην κορυφή του δοχείου, μέσω του στομίου πληρώσεως, με ένα υδραργυρικό θερμόμετρο.

Σε όλες τις περιπτώσεις η συνεχής τάση του Megger η οποία εφαρμόστηκε στο μονωτικό σύστημα των μετασχηματιστών για την μέτρηση των αντιστάσεων μόνωσης ήταν 5 kV. Μετρήσεις των αντιστάσεων μονώσεως ελήφθησαν στους χρόνους 30 sec, 60 sec, 5 min και 10 min, σε όλες τις διαφορετικές θερμοκρασίες που προαναφέραμε. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το όργανο ελέγχου της μόνωσης Metriso 5000 A με μπαταρία (High Voltage Insulation Tester with Battery).

2.1 Η διάταξη μέτρησης της αντίστασης μόνωσης μεταξύ των τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως.

Κατά τις μετρήσεις μεταξύ των τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως, ο θετικός πόλος του οργάνου εσυνδέετο στη μέση τάση και ο αρνητικός στη χαμηλή τάση.



Σχήμα III-1 : Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα της διάταξης μέτρησης της αντίστασης μόνωσης μεταξύ των τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως.

H_1 , H_2 , H_3 : ακροδέκτες μέσης τάσεως του μετασχηματιστή.

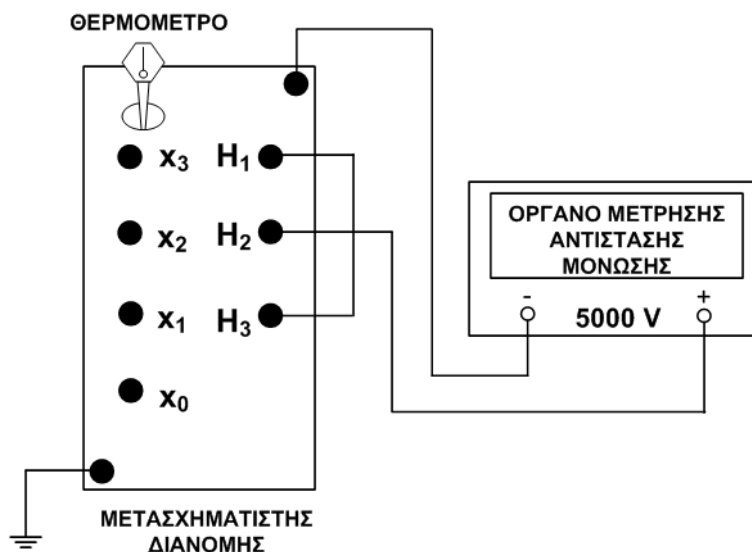
x_0 , x_1 , x_2 , x_3 : ακροδέκτες χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή.

Εφαρμοζόμενη τάση : 5000 volts.

Μέτρηση θερμοκρασίας λαδιού με υδραργυρικό θερμόμετρο

2.2 Η διάταξη μέτρησης της αντίστασης μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου.

Κατά τις μετρήσεις μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου, ο θετικός πόλος εσυνδέετο στη μέση τάση και ο αρνητικός στο δοχείο (γη). Αυτό είναι απαραίτητο διότι διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος εσφαλμένης μέτρησης, επειδή ο χειριστής είναι πιθανό να έρχεται σε επαφή με το κέλυφος του οργάνου στο οποίο εσωτερικά είναι συνδεδεμένος ο αρνητικός πόλος του. Έτσι κατά τη μέτρηση με τον αρνητικό πόλο συνδεδεμένο στα τυλίγματα μέσης τάσεως, η αντίσταση του χειριστή (η οποία είναι αμελητέα ως προς την αντίσταση μονώσεως του μετασχηματιστή) παραλληλίζεται με την αντίσταση μονώσεως των τυλιγμάτων και το όργανο δείχνει μηδέν [17,82].



Σχήμα III-2 : Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα της διάταξης μέτρησης της αντίστασης μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου.

H_1, H_2, H_3 : ακροδέκτες μέσης τάσεως του μετασχηματιστή.

x_0, x_1, x_2, x_3 : ακροδέκτες χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή.

Εφαρμοζόμενη τάση : 5000 volts.

Μέτρηση θερμοκρασίας λαδιού με υδραργυρικό θερμόμετρο

Κάθε μετασχηματιστής μετρήθηκε σε 4 ή 5 επίπεδα θερμοκρασίας. Για κάθε επίπεδο θερμοκρασίας ελαμβάνοντο μετρήσεις της θερμοκρασίας και των αντίστοιχων αντιστάσεων μονώσεως R_1 και R_2 σε χρόνους 30 sec, 60 sec, 5 min και 10 min.

IV. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο III, με το Metrisko 5000 A, High Voltage Insulation Tester with Battery, έγινε ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων σε 72 μετασχηματιστές μεταξύ τυλίγματος Μέσης Τάσεως και Δοχείου αλλά και μεταξύ των τυλιγμάτων Μέσης και Χαμηλής Τάσεως, σε διαφορετικές θερμοκρασίες καθώς και σε διαφορετικούς χρόνους.

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθεται ενδεικτικά ένα μέρος των μετρήσεων και συγκεκριμένα οι μετρήσεις 9 μετασχηματιστών (βλ. IV.1 έως IV.9), εκ των οποίων οι 8 ήταν εύχρηστοι, ενώ του ενός η μόνωση είχε καταστραφεί λόγω παρατεταμένης υπερφόρτισης. Σχόλια και μια πιθανή φυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων μέτρησης γίνονται στο κεφάλαιο V. Οι μετασχηματιστές αναφέρονται με τον κωδικό αριθμό της ΔΕΗ Α.Ε.

Οι πραγματοποιηθείσες μετρήσεις αντιστάσεων μόνωσης στις διάφορες θερμοκρασίες θ_1 έως θ_5 για τον κάθε μετασχηματιστή x , δίδονται στον αντίστοιχο πίνακα IV.x.1-1 (μετρήσεις 1^η έως 5^η), ο οποίος είναι ο βασικός πίνακας μετρήσεων του μετασχηματιστή. Σε κάθε θερμοκρασία έγιναν μετρήσεις της αντίστασης μόνωσης τόσο μεταξύ τυλίγματος Μέσης Τάσεως και Δοχείου (γ ης), όσο και μεταξύ των τυλιγμάτων Μέσης και Χαμηλής τάσεως, σε χρόνους 30 sec, 1 min, 5 min και 10min. Η θερμοκρασία θ_1 της πρώτης μέτρησης ήταν πάντα η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η επεξεργασία των μετρήσεων συνίσταται κατ' αρχάς στον υπολογισμό, σύμφωνα με τη σχέση III-4, των θερμικών συντελεστών β_1 (Μ.Τ. – Δοχείο) και β_2 (Μ.Τ. – Χ.Τ.) σε όλες τις διαφορές θερμοκρασιών ($\Delta\theta$) οι οποίες σημειώθηκαν κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, για χρόνο 10 min. Οι συντελεστές β_1 και β_2 του μετασχηματιστή x δίδονται στον πίνακα IV.x.2-2. Στον πίνακα αυτό φαίνονται και οι επιλεγμένες τιμές των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 , οι οποίες αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο $\Delta\theta$.

Στον πίνακα IV.x.2-1 δίδονται οι τιμές των αντιστάσεων R_1 και R_2 που μετρήθηκαν σε χρόνο 10 min σε διάφορες θερμοκρασίες, καθώς και οι θεωρητικές τιμές που αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες αυτές και οι οποίες υπολογίστηκαν μετά την επιλογή των συντελεστών β_1 και β_2 .

Παραθέτουμε στη συνέχεια γραφικές παραστάσεις τόσο των μετρηθεισών αντιστάσεων συναρτήσει του χρόνου ή/και της θερμοκρασίας (Σχήματα IV.x.2-1 έως IV.x.2-5), όσο και των υπολογισθέντων θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 συναρτήσει της αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (Σχήματα IV.x.2-6 και IV.x.2-7), από τις οποίες μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

Στο τμήμα IV.10 του παρόντος κεφαλαίου παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων για διευκόλυνση της εξαγωγής συμπερασμάτων.

IV.1 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-12988

IV.1.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-12988

α/α Μέτρησης - Θερμοκρασία	Χρόνος Αντίσταση	$t_1 = 0,5 \text{ min}$	$t_2 = 1 \text{ min}$	$t_3 = 5 \text{ min}$	$t_4 = 10 \text{ min}$
		1^η Μέτρηση $\theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	16	19
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	14	19	49	65
2^η Μέτρηση $\theta_2 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	9,5	12	17,5	20
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	8,5	13	28	35
3^η Μέτρηση $\theta_3 = 48 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	5,4	6,3	8,8	11
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	5,8	7,5	14	16,5
4^η Μέτρηση $\theta_4 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	2	2,2	2,8	3,2
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	1,9	2,2	3,2	3,8

Πίνακας IV.1.1-1 : Αποτελέσματα μετρήσεων των αντιστάσεων μονώσεως R_1 και R_2 σε $G\Omega$, σε διάφορες θερμοκρασίες ($\theta_1 \dots \theta_4$) και χρόνους (0,5 ... 10 min).
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή.
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή.

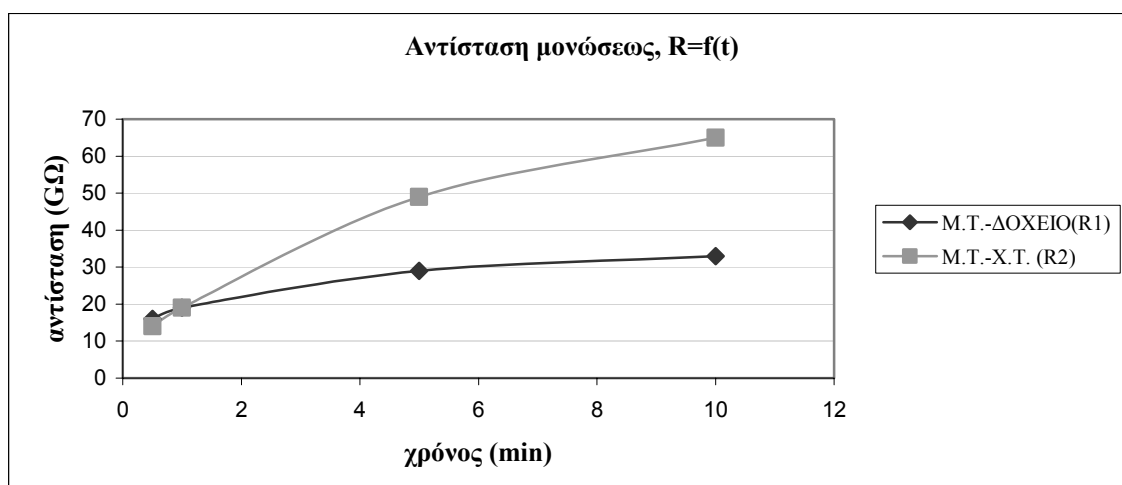
IV.1.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-12988

R_1, R_2	Τιμές των R_1 και R_2 για Θερμοκρασίες			
	$\theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_2 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_3 = 48 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_4 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	33	20	11	3,2
$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	65	35	16,5	3,8
$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	33	18,85	8,93	3,2
$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	65	32,88	13,25	3,8

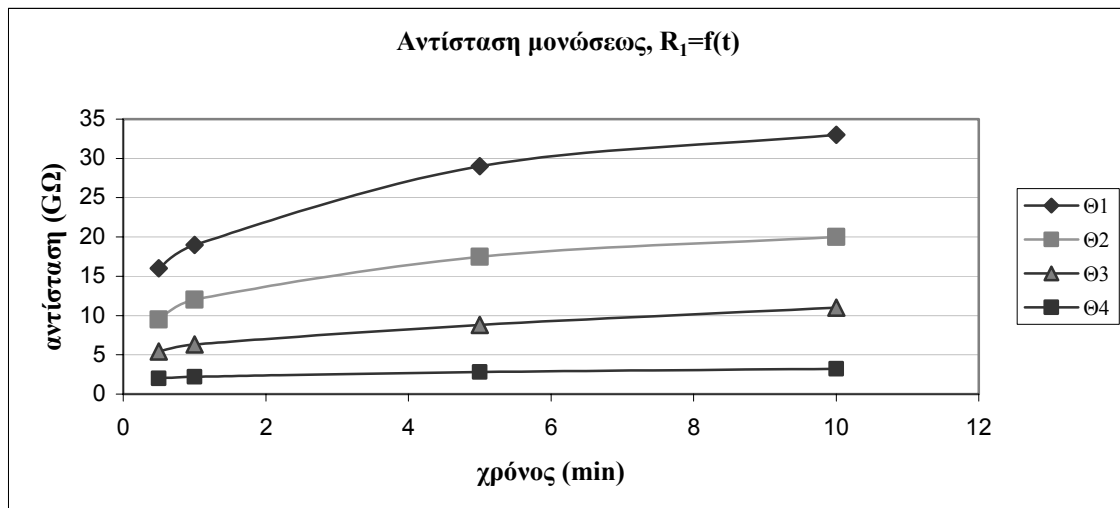
Πίνακας IV.1.2-1: Μεταβολή των αντιστάσεων μονώσεως (μέτρηση σε χρόνο 10 min) σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές σε $G\Omega$.
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R_1 : Θεωρητική τιμή της R_1 .
 R_2 : Θεωρητική τιμή της R_2 .

ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΟΥ			ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΕΩΣ		
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_1	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_2
$\theta_2 - \theta_1$	12	0,041731	$\theta_2 - \theta_1$	12	0,051587
$\theta_3 - \theta_1$	28	0,039236	$\theta_3 - \theta_1$	28	0,048965
$\theta_4 - \theta_1$	50	0,046667	$\theta_4 - \theta_1$	50	0,056788
$\theta_3 - \theta_2$	16	0,037365	$\theta_3 - \theta_2$	16	0,046999
$\theta_4 - \theta_2$	38	0,048226	$\theta_4 - \theta_2$	38	0,058430
$\theta_4 - \theta_3$	22	0,056125	$\theta_4 - \theta_3$	22	0,066744

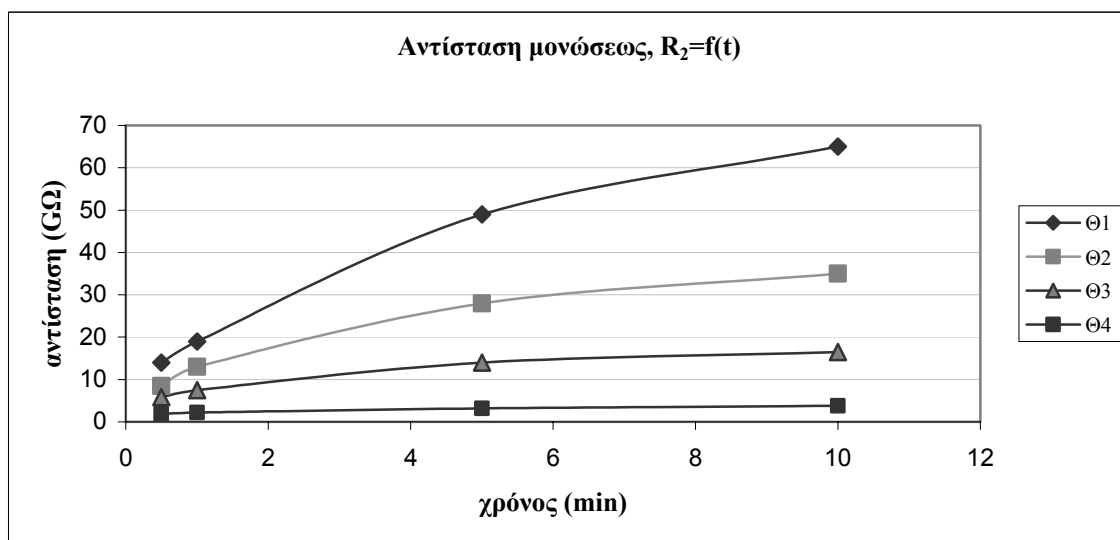
Πίνακας IV.1.2-2 : Υπολογισμός των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 των μονώσεων, για χρόνο μέτρησης 10 min, σε όλες τις διαφορές θερμοκρασιών ($\Delta\theta$) που σημειώθηκαν κατά τις μετρήσεις.
Επιλογή των β_1 και β_2 που αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο $\Delta\theta$.



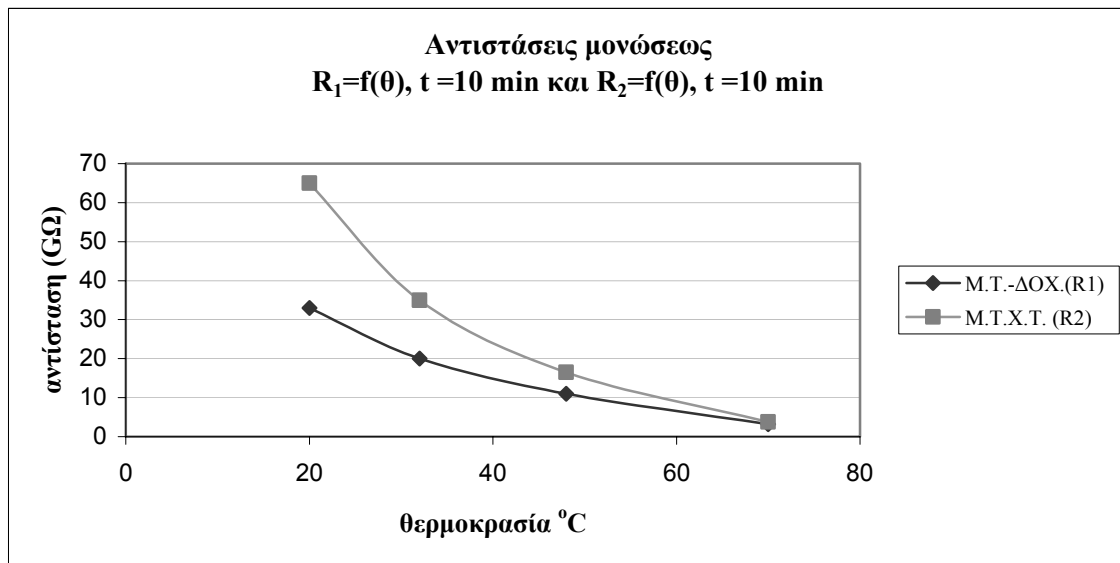
Σχήμα IV.1.2-1 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως (M.T.) και δοχείου, (R_1), καθώς και μεταξύ των τυλιγμάτων μέσης τάσεως (M.T.) και χαμηλής τάσεως (X.T.), (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



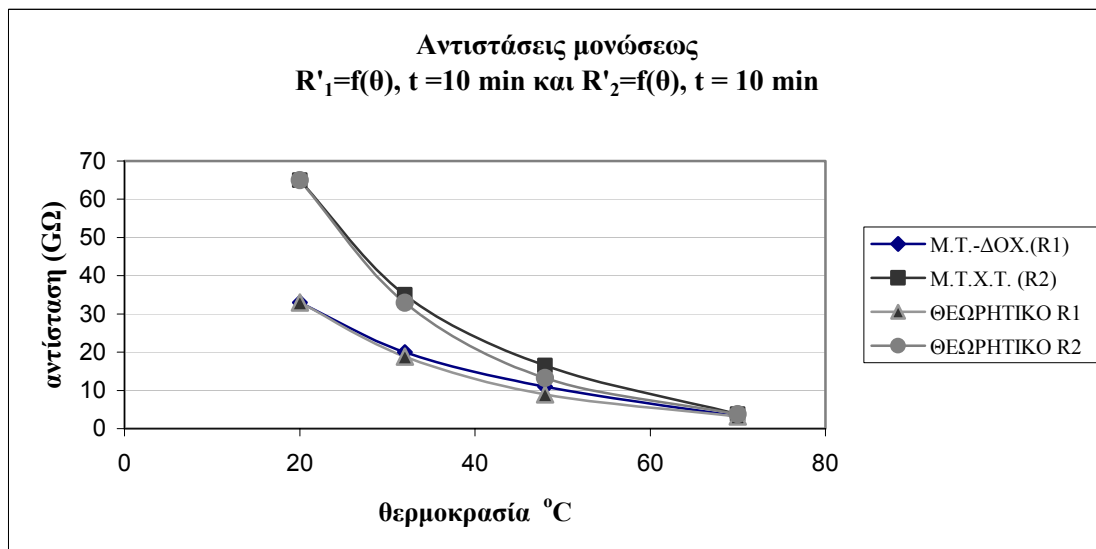
Σχήμα IV.1.2-2 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως (Μ.Τ.) και Δοχείου, (R_1), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



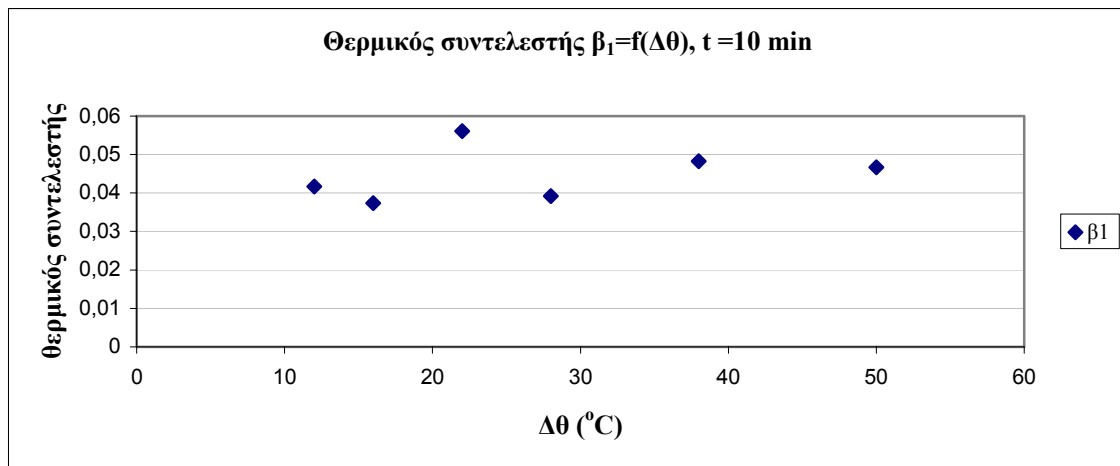
Σχήμα IV.1.2-3 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης τάσεως (Μ.Τ.) και χαμηλής τάσεως (Χ.Τ.), (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



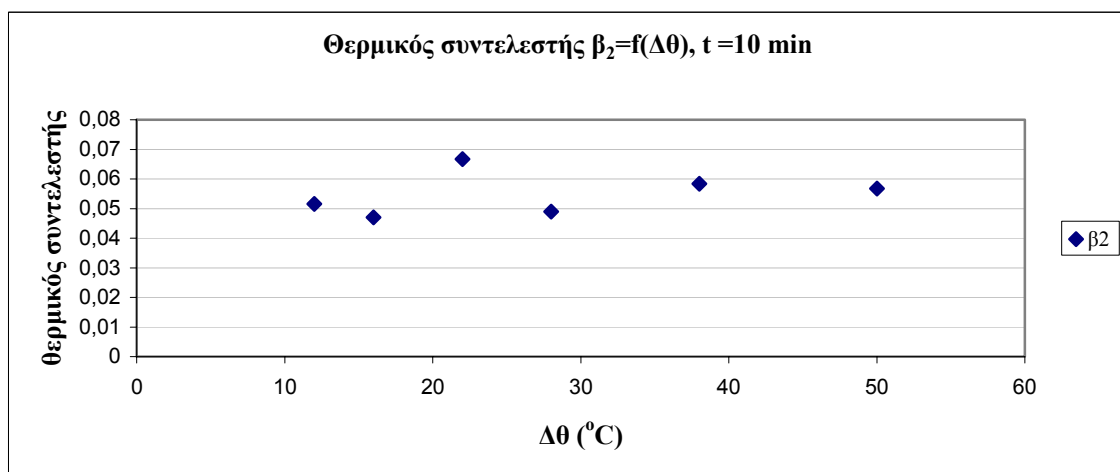
Σχήμα IV.1.2-4 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 min, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα IV.1.2-5 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 min, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές.



Σχήμα IV.1.2-6 : Ο θερμικός συντελεστής β_1 , στα 10 min, για τη μόνωση μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και Δοχείου, σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.



Σχήμα IV.1.2-7 : Ο θερμικός συντελεστής β_2 , στα 10 min, για τη μόνωση μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως, σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.

IV.2 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-21168

IV.2.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-21168

α/α Μέτρησης - Θερμοκρασία	Χρόνος Αντίσταση	$t_1 = 0,5 \text{ min}$	$t_2 = 1 \text{ min}$	$t_3 = 5 \text{ min}$	$t_4 = 10 \text{ min}$
		1^η Μέτρηση $\theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	2,8	3
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	2	2,2	3,1	3,3
2^η Μέτρηση $\theta_2 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	1,9	1,9	2,2	2,6
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	1,15	1,3	1,75	2
3^η Μέτρηση $\theta_3 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,8	0,83	1,1	1,25
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,42	0,5	0,73	1
4^η Μέτρηση $\theta_4 = 67 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,34	0,37	0,43	0,5
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,18	0,2	0,37	0,45

Πίνακας IV.2.1-1 : Αποτελέσματα μετρήσεων των αντιστάσεων μονώσεως R_1 και R_2 σε $G\Omega$, σε διάφορες θερμοκρασίες ($\theta_1 \dots \theta_4$) και χρόνους (0,5 ... 10 min).
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή.
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή.

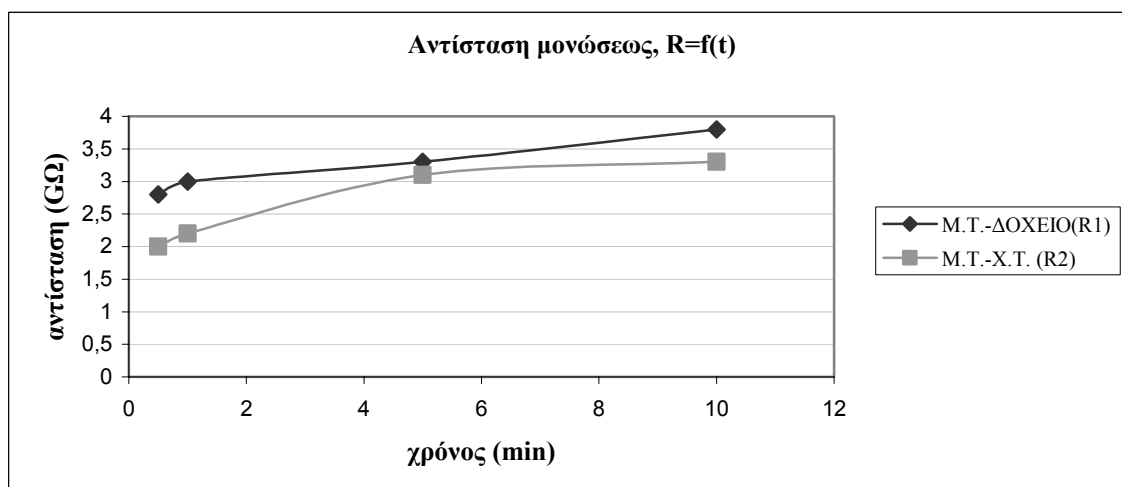
IV.2.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-21168

R_1, R_2	Τιμές των R_1 και R_2 για Θερμοκρασίες			
	$\theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_2 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_3 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_4 = 67 \text{ }^\circ\text{C}$
$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	3,8	2,6	1,25	0,5
$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	3,3	2	1	0,45
$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	3,8	2,69	1,29	0,5
$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	3,3	2,35	1,14	0,45

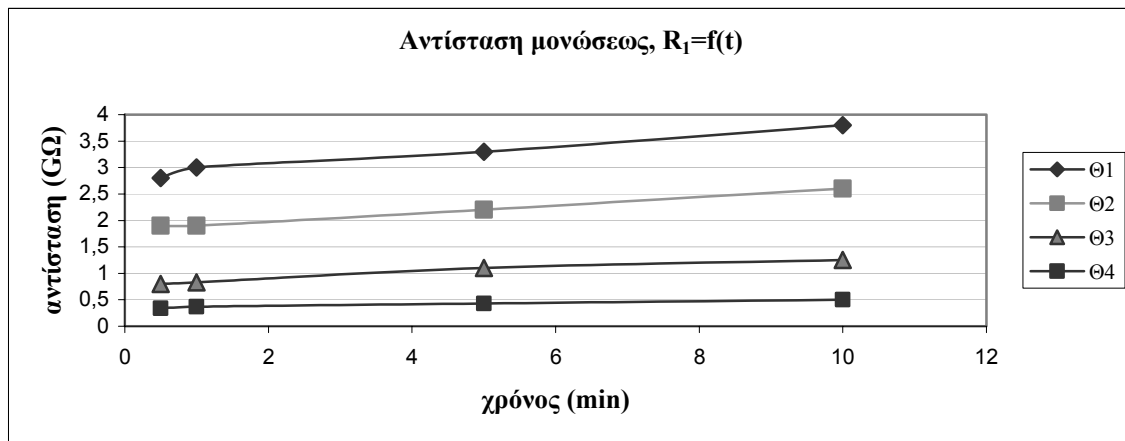
Πίνακας IV.2.2-1: Μεταβολή των αντιστάσεων μονώσεως (μέτρηση σε χρόνο 10 min) σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές σε $G\Omega$.
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R_1 : Θεωρητική τιμή της R_1 .
 R_2 : Θεωρητική τιμή της R_2 .

ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΟΥ			ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΕΩΣ		
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_1	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_2
$\theta_2 - \theta_1$	8	0,047436	$\theta_2 - \theta_1$	8	0,062597
$\theta_3 - \theta_1$	25	0,044474	$\theta_3 - \theta_1$	25	0,047757
$\theta_4 - \theta_1$	47	0,043152	$\theta_4 - \theta_1$	47	0,042392
$\theta_3 - \theta_2$	17	0,043080	$\theta_3 - \theta_2$	17	0,040773
$\theta_4 - \theta_2$	39	0,042273	$\theta_4 - \theta_2$	39	0,038248
$\theta_4 - \theta_3$	22	0,041650	$\theta_4 - \theta_3$	22	0,036296

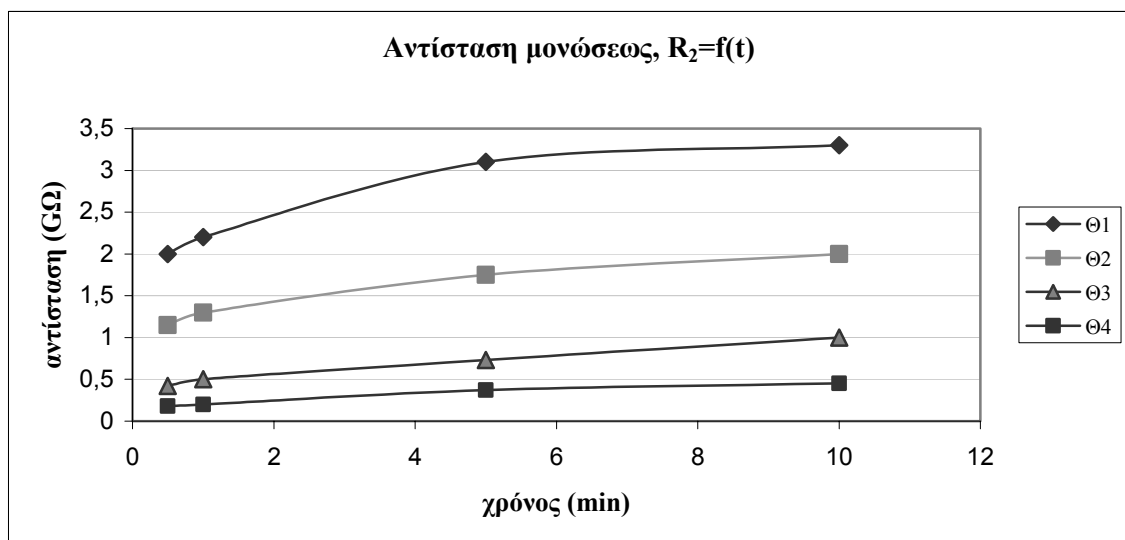
Πίνακας IV.2.2-2 : Υπολογισμός των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 των μονώσεων, για χρόνο μέτρησης 10 min, σε όλες τις διαφορές θερμοκρασιών ($\Delta\theta$) που σημειώθηκαν κατά τις μετρήσεις.
Επιλογή των β_1 και β_2 που αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο $\Delta\theta$.



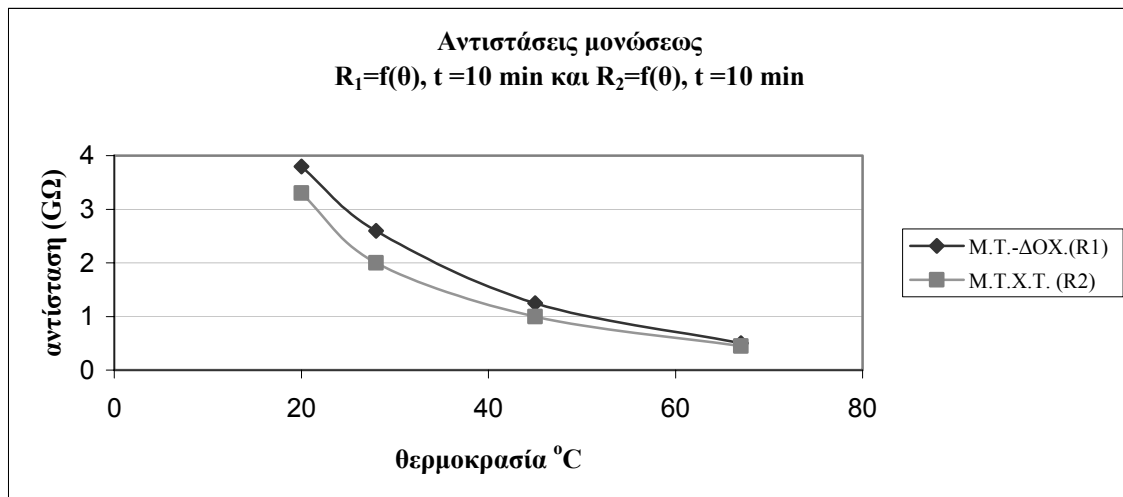
Σχήμα IV.2.2-1 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ Μ.Τ. και Δοχείου (R_1) και Μ.Τ.-Χ.Τ. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



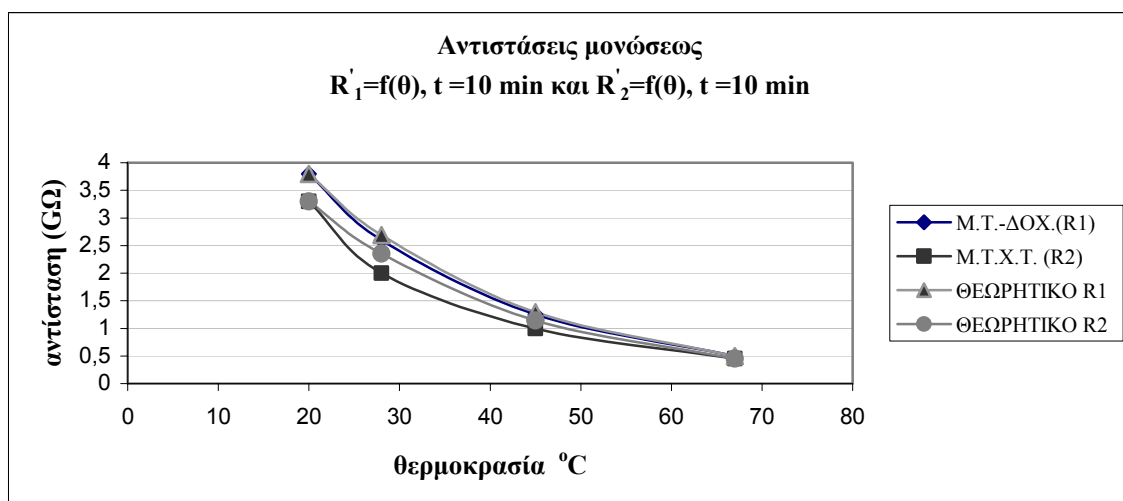
Σχήμα IV.2.2-2 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγματος M.T. και Δοχείου (R_1), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



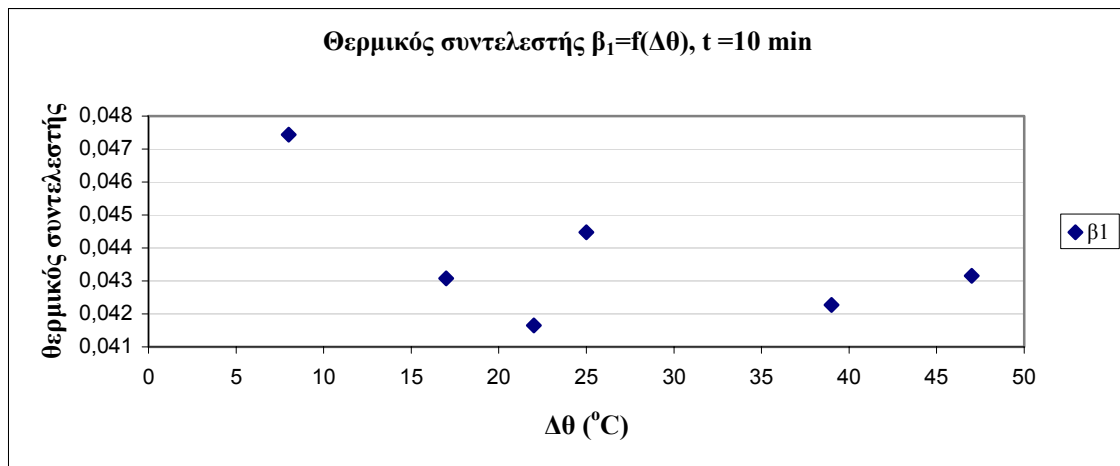
Σχήμα IV.2.2-3 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων M.T. και X.T. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



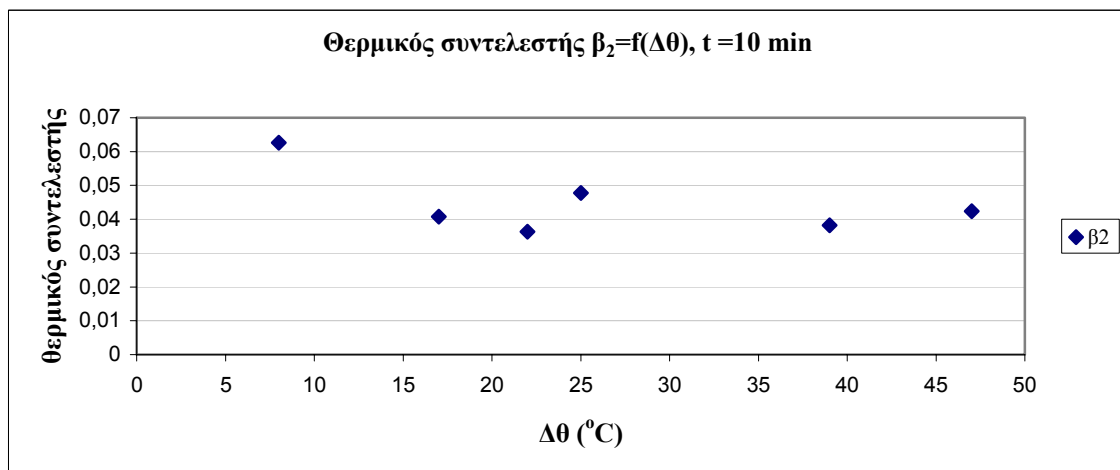
Σχήμα IV.2.2-4 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα IV.2.2-5 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές.



Σχήμα IV.2.2-6 : Ο θερμικός συντελεστής β_1 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλίγματος Μ.Τ. και Δοχείου, σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.



Σχήμα IV.2.2-7 : Ο θερμικός συντελεστής β_2 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλιγμάτων Μ.Τ. και Χ.Τ., σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.

IV.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-25804

IV.3.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-25804

α/α Μέτρησης - Θερμοκρασία	Χρόνος Αντίσταση	$t_1 = 0,5 \text{ min}$	$t_2 = 1 \text{ min}$	$t_3 = 5 \text{ min}$	$t_4 = 10 \text{ min}$
		1 ^η Μέτρηση $\theta_1 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$	R_1 (GΩ)	30	43
R_2 (GΩ)	33		63	155	180
2 ^η Μέτρηση $\theta_2 = 31 \text{ }^\circ\text{C}$	R_1 (GΩ)	17	19	29	30
	R_2 (GΩ)	17	22	35	38
3 ^η Μέτρηση $\theta_3 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$	R_1 (GΩ)	3,8	4,2	5	5,7
	R_2 (GΩ)	5	5,7	7	8,2
4 ^η Μέτρηση $\theta_4 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$	R_1 (GΩ)	3,1	3,4	3,9	4,4
	R_2 (GΩ)	3,8	4,3	5,3	6,2

Πίνακας IV.3.1-1 : Αποτελέσματα μετρήσεων των αντιστάσεων μονώσεως R_1 και R_2 σε GΩ, σε διάφορες θερμοκρασίες ($\theta_1 \dots \theta_4$) και χρόνους (0,5 ... 10 min).
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή.
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή.

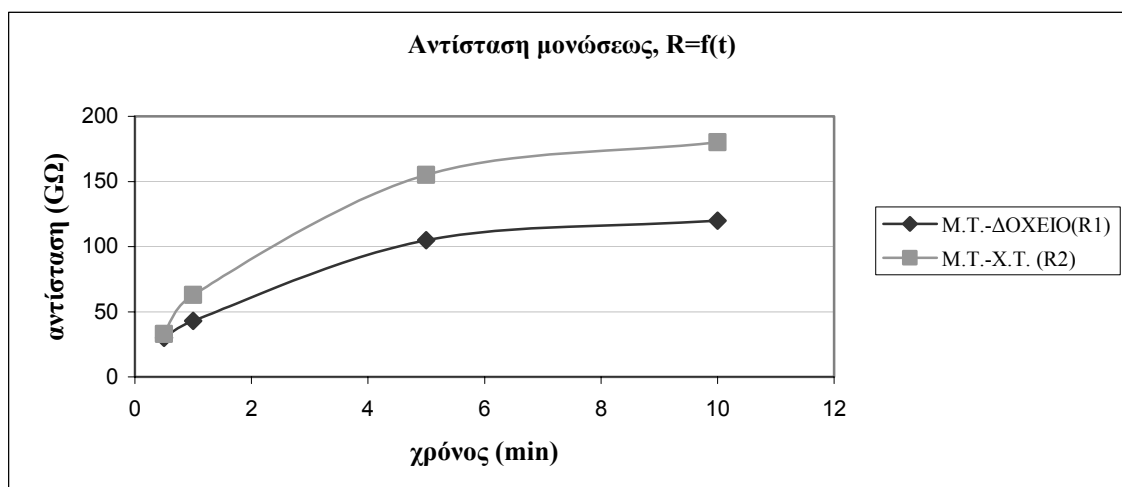
IV.3.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-25804

R_1, R_2	Τιμές των R_1 και R_2 για Θερμοκρασίες			
	$\theta_1 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_2 = 31 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_3 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_4 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$
R_1 (GΩ)	120	30	5,7	4,4
R_2 (GΩ)	180	38	8,2	6,2
R_1 (GΩ)	120	40,90	6,46	4,4
R_2 (GΩ)	180	60,11	9,17	6,2

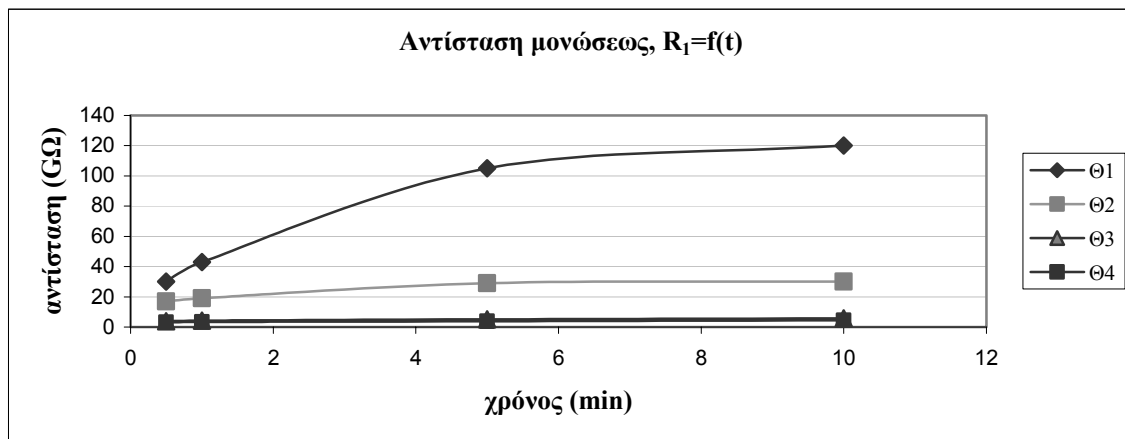
Πίνακας IV.3.2-1: Μεταβολή των αντιστάσεων μονώσεως (μέτρηση σε χρόνο 10 min) σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές σε GΩ.
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R_1 : Θεωρητική τιμή της R_1 .
 R_2 : Θεωρητική τιμή της R_2 .

ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΟΥ			ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΕΩΣ		
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_1	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_2
$\theta_2 - \theta_1$	14	0,099021	$\theta_2 - \theta_1$	14	0,111098
$\theta_3 - \theta_1$	38	0,080185	$\theta_3 - \theta_1$	38	0,081285
$\theta_4 - \theta_1$	43	0,076881	$\theta_4 - \theta_1$	43	0,078335
$\theta_3 - \theta_2$	24	0,069197	$\theta_3 - \theta_2$	24	0,063894
$\theta_4 - \theta_2$	29	0,066193	$\theta_4 - \theta_2$	29	0,062519
$\theta_4 - \theta_3$	5	0,051772	$\theta_4 - \theta_3$	5	0,055917

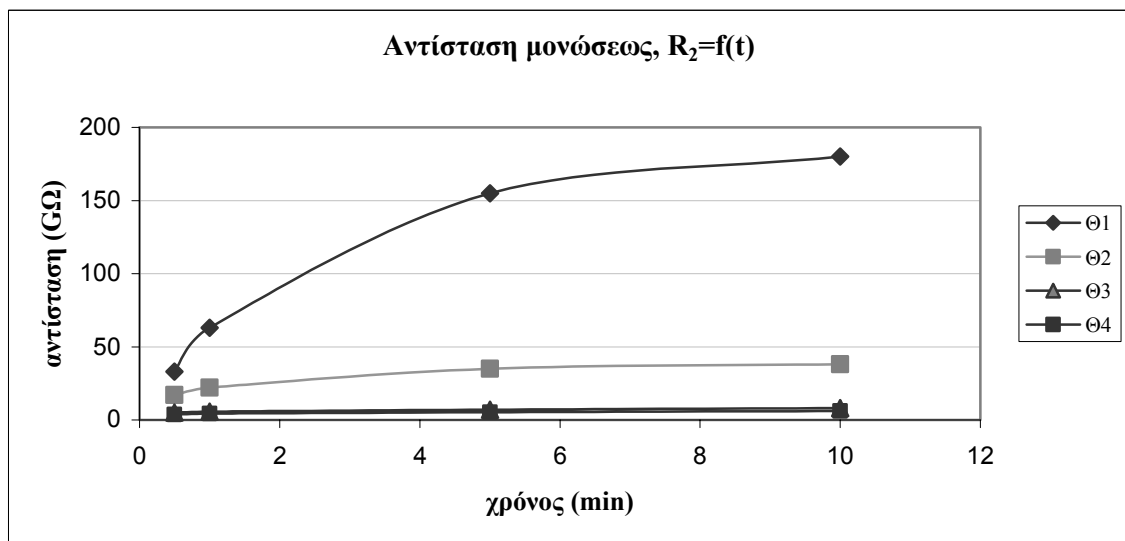
Πίνακας IV.3.2-2 : Υπολογισμός των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 των μονώσεων, για χρόνο μέτρησης 10 min, σε όλες τις διαφορές θερμοκρασιών ($\Delta\theta$) που σημειώθηκαν κατά τις μετρήσεις.
Επιλογή των β_1 και β_2 που αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο $\Delta\theta$.



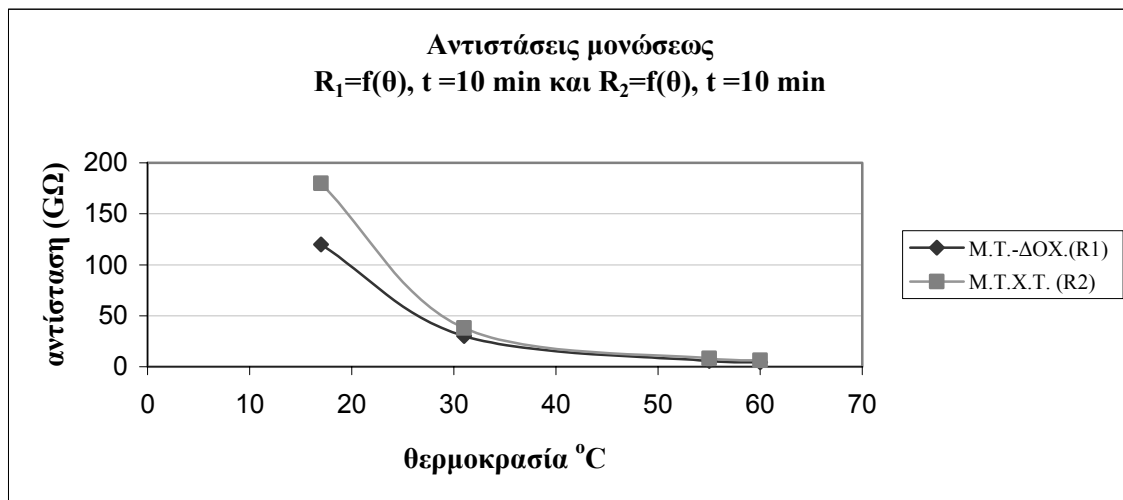
Σχήμα IV.3.2-1 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ Μ.Τ. και Δοχείου (R_1) και Μ.Τ.-X.T. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



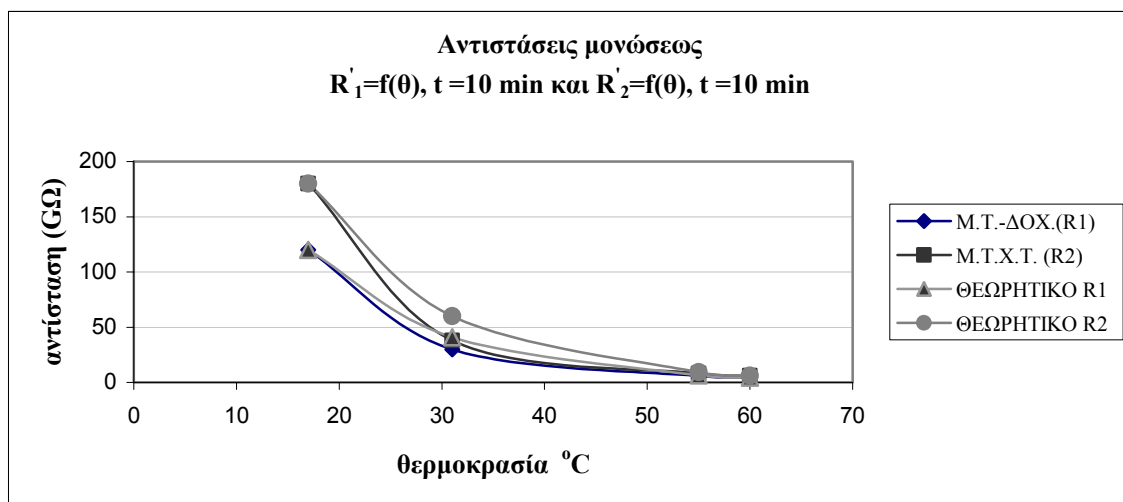
Σχήμα IV.3.2-2 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγματος M.T. και Δοχείου (R_1), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



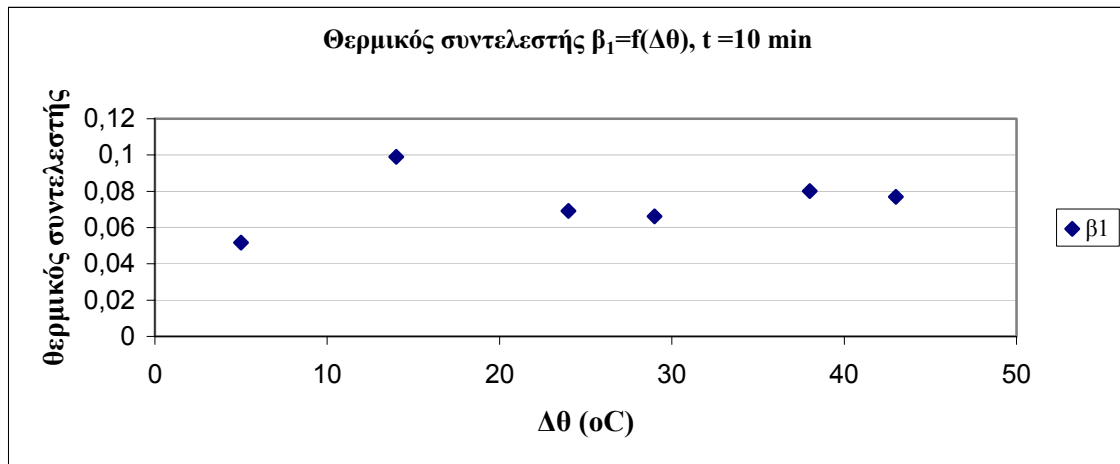
Σχήμα IV.3.2-3 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων M.T. και X.T. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



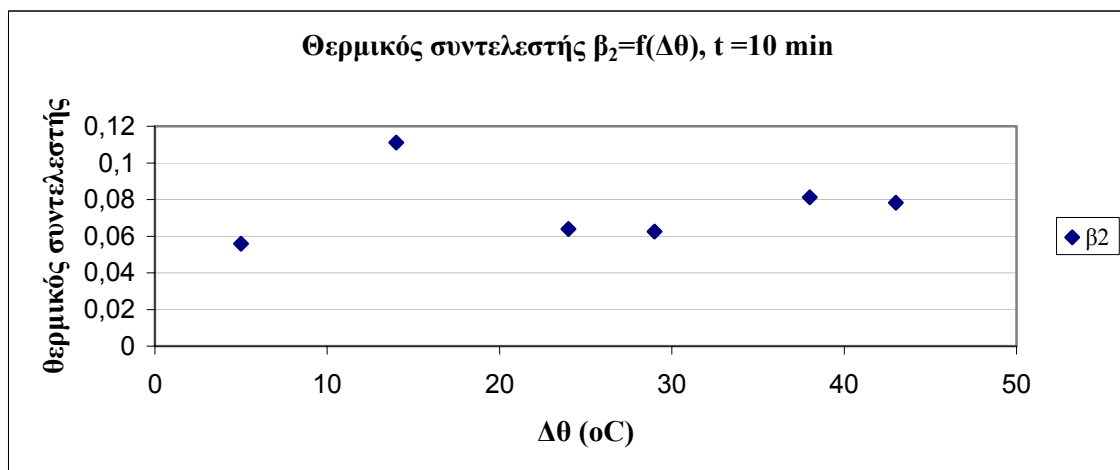
Σχήμα IV.3.2-4 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα IV.3.2-5 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές.



Σχήμα IV.3.2-6 : Ο θερμικός συντελεστής β_1 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλίγματος Μ.Τ. και Δοχείου, σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.



Σχήμα IV.3.2-7 : Ο θερμικός συντελεστής β_2 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλιγμάτων Μ.Τ. και Χ.Τ., σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.

IV.4 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-21641

IV.4.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-21641

α/α Μέτρησης - Θερμοκρασία	Χρόνος Αντίσταση	$t_1 = 0,5 \text{ min}$	$t_2 = 1 \text{ min}$	$t_3 = 5 \text{ min}$	$t_4 = 10 \text{ min}$
		1^η Μέτρηση $\theta_1 = 21 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	19	25
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	19	28	39	43
2^η Μέτρηση $\theta_2 = 33 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	11	14	18	19
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	12	14	19	22
3^η Μέτρηση $\theta_3 = 44 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	7	8	10,5	11,5
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	7	8	11,5	13
4^η Μέτρηση $\theta_4 = 59 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	3,5	3,9	4,7	5,2
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	3,1	3,4	4,7	5,6
5^η Μέτρηση $\theta_5 = 79 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	1	1,15	1,6	1,8
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,75	0,83	1,4	1,75

Πίνακας IV.4.1-1 : Αποτελέσματα μετρήσεων των αντιστάσεων μονώσεως R_1 και R_2 σε $G\Omega$, σε διάφορες θερμοκρασίες ($\theta_1 \dots \theta_5$) και χρόνους (0,5 ... 10 min).
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή.
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή.

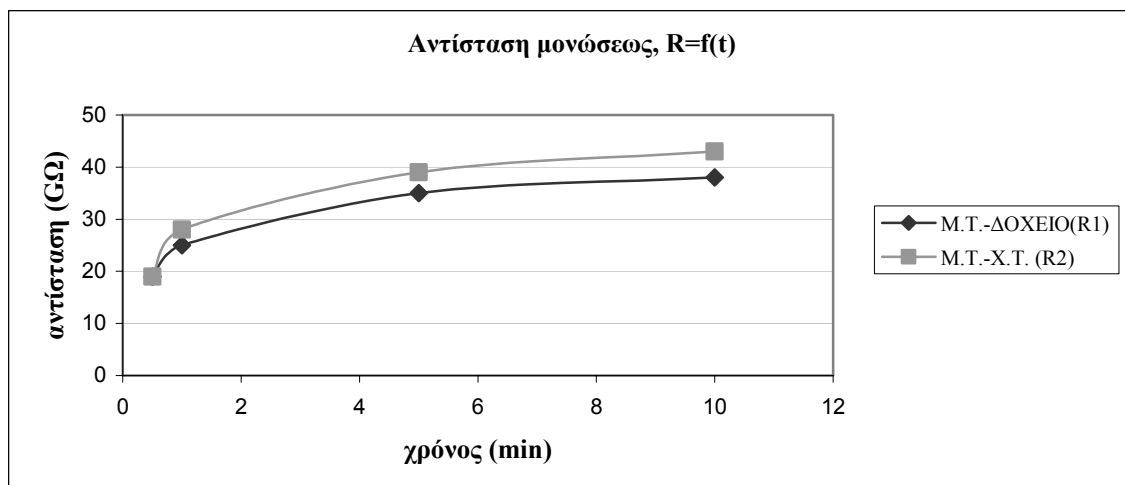
IV.4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-21641

R_1, R_2	Τιμές των R_1 και R_2 για Θερμοκρασίες				
	$\theta_1 = 21 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_2 = 33 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_3 = 44 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_4 = 59 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_5 = 79 \text{ }^\circ\text{C}$
$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	38	19	11,5	5,2	1,8
$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	43	22	13	5,6	1,75
$R'_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	38	20,21	11,33	5,15	1,8
$R'_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	43	22,17	12,08	5,27	1,75

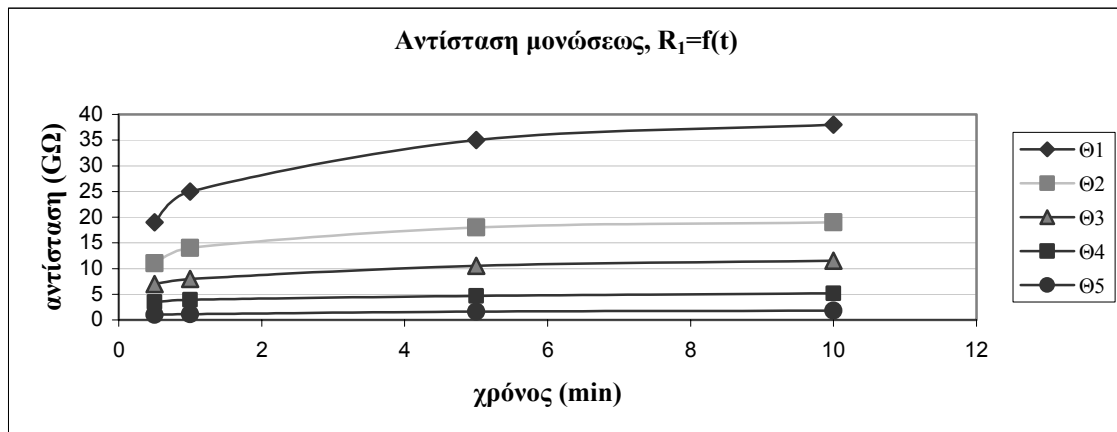
Πίνακας IV.4.2-1: Μεταβολή των αντιστάσεων μονώσεως (μέτρηση σε χρόνο 10 min) σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές σε $G\Omega$.
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R'_1 : Θεωρητική τιμή της R_1 .
 R'_2 : Θεωρητική τιμή της R_2 .

ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΟΥ			ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΕΩΣ		
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_1	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_2
$\theta_2 - \theta_1$	12	0,057762	$\theta_2 - \theta_1$	12	0,055846
$\theta_3 - \theta_1$	23	0,051967	$\theta_3 - \theta_1$	23	0,052011
$\theta_4 - \theta_1$	38	0,05234	$\theta_4 - \theta_1$	38	0,053643
$\theta_3 - \theta_2$	11	0,045645	$\theta_3 - \theta_2$	11	0,047827
$\theta_4 - \theta_2$	26	0,049838	$\theta_4 - \theta_2$	26	0,052626
$\theta_4 - \theta_3$	15	0,052913	$\theta_4 - \theta_3$	15	0,056146
$\theta_5 - \theta_1$	58	0,052583	$\theta_5 - \theta_1$	58	0,0552
$\theta_5 - \theta_2$	46	0,051232	$\theta_5 - \theta_2$	46	0,055031
$\theta_5 - \theta_3$	35	0,052987	$\theta_5 - \theta_3$	35	0,057295
$\theta_5 - \theta_4$	20	0,053044	$\theta_5 - \theta_4$	20	0,058158

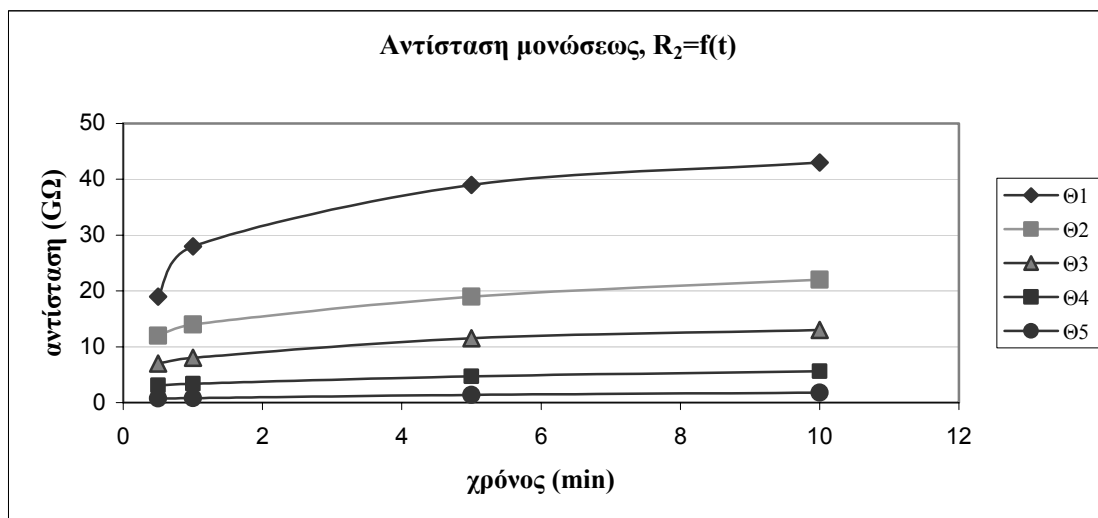
Πίνακας IV.4.2-2 : Υπολογισμός των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 των μονώσεων, για χρόνο μέτρησης 10 min, σε όλες τις διαφορές θερμοκρασιών ($\Delta\theta$) που σημειώθηκαν κατά τις μετρήσεις.
Επιλογή των β_1 και β_2 που αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο $\Delta\theta$.



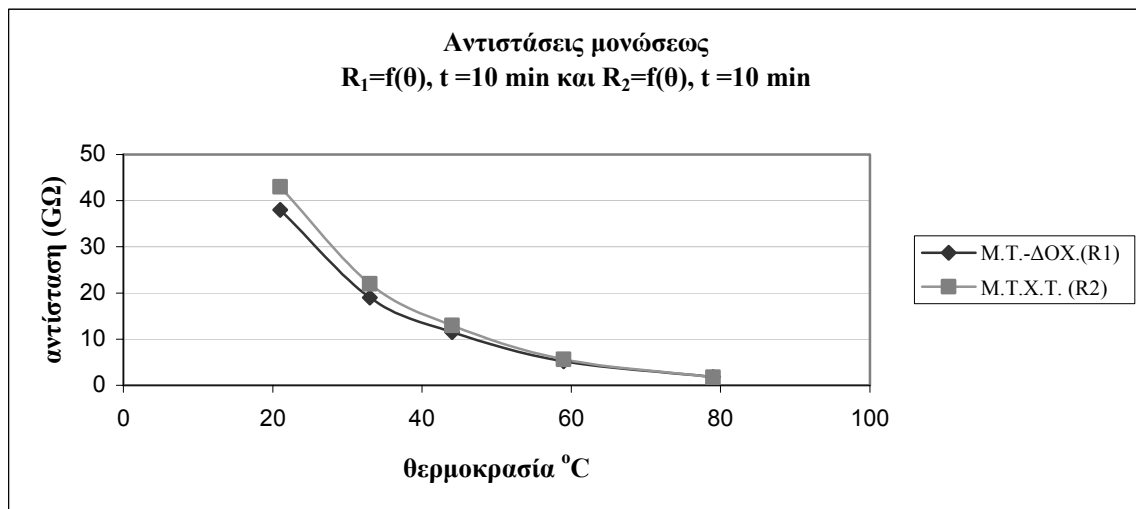
Σχήμα IV.4.2-1 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ M.T. και Δοχείου (R_1) και M.T.- X.T. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



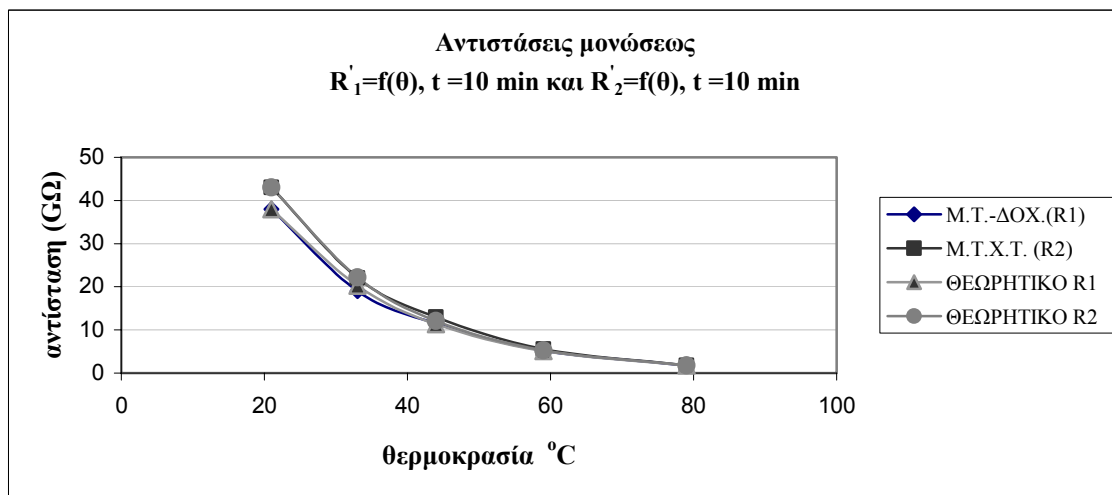
Σχήμα IV.4.2-2 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος Μ.Τ. και Δοχείου (R_1), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



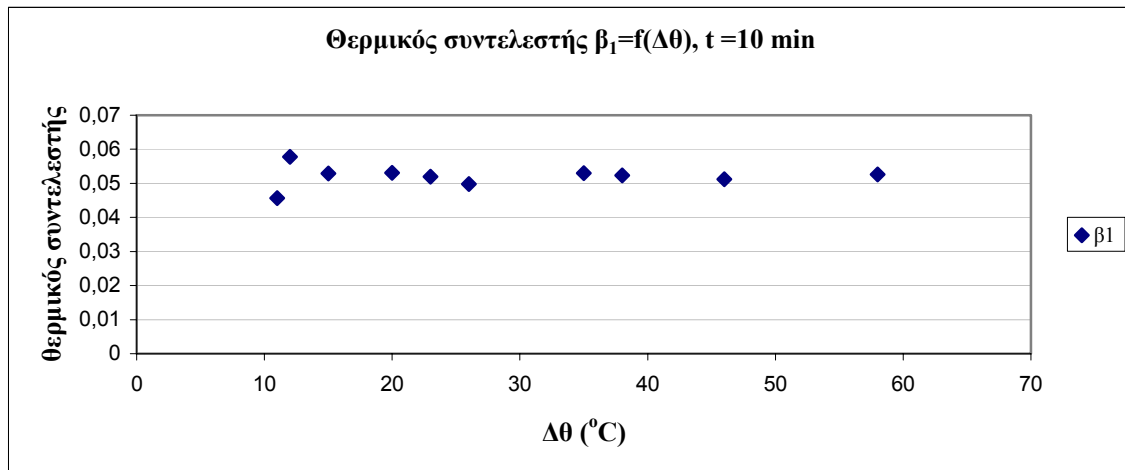
Σχήμα IV.4.2-3 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων Μ.Τ. και Χ.Τ. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



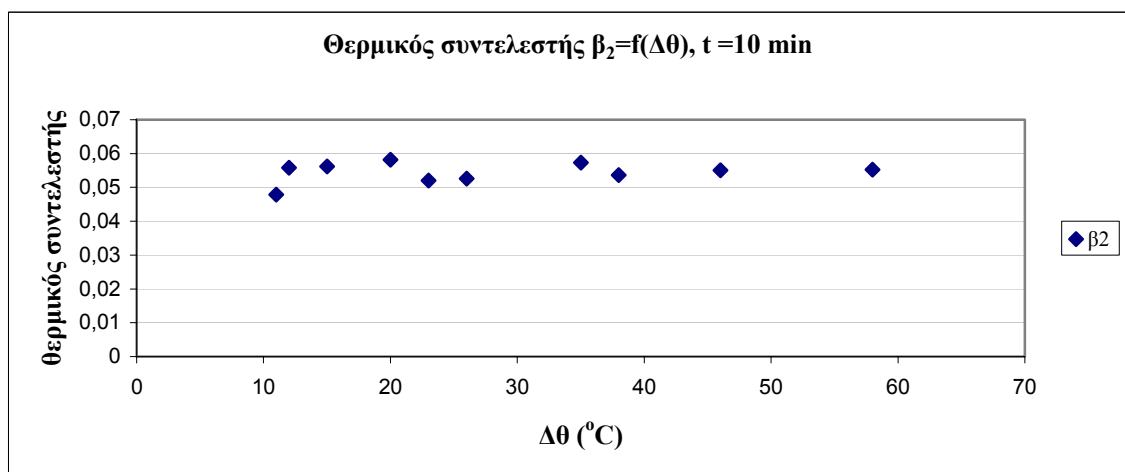
Σχήμα IV.4.2-4 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα IV.4.2-5 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές.



Σχήμα IV.4.2-6 : Ο θερμικός συντελεστής β_1 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλίγματος M.T. και Δοχείου, σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.



Σχήμα IV.4.2-7 : Ο θερμικός συντελεστής β_2 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλιγμάτων M.T. και X.T., σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.

IV.5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-19694

IV.5.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-19694

α/α Μέτρησης - Θερμοκρασία	Χρόνος Αντίσταση	$t_1 = 0,5 \text{ min}$	$t_2 = 1 \text{ min}$	$t_3 = 5 \text{ min}$	$t_4 = 10 \text{ min}$
		1^η Μέτρηση $\theta_1 = 21 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	4,3	5,2
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	5,3	7	11,5	13,5
2^η Μέτρηση $\theta_2 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	2	2,2	2,8	3,05
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	2,6	3,2	4,1	4,5
3^η Μέτρηση $\theta_3 = 53 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,85	0,91	1,05	1,2
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,95	1,15	1,55	1,75
4^η Μέτρηση $\theta_4 = 67 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,35	0,375	0,41	0,44
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,41	0,45	0,62	0,72
5^η Μέτρηση $\theta_5 = 86 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,1	0,11	0,12	0,13
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,14	0,165	0,205	0,23

Πίνακας IV.5.1-1 : Αποτελέσματα μετρήσεων των αντιστάσεων μονώσεως R_1 και R_2 σε $G\Omega$, σε διάφορες θερμοκρασίες ($\theta_1 \dots \theta_5$) και χρόνους (0,5 ... 10 min).
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή.
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή.

IV.5.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-19694

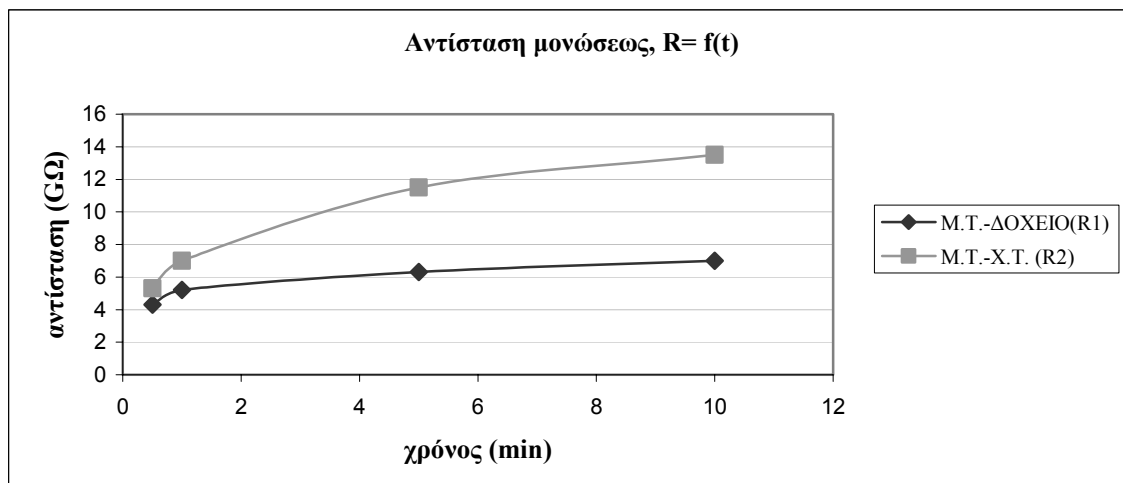
R_1, R_2	Τιμές των R_1 και R_2 για Θερμοκρασίες				
	$\theta_1 = 21^\circ\text{C}$	$\theta_2 = 37^\circ\text{C}$	$\theta_3 = 53^\circ\text{C}$	$\theta_4 = 67^\circ\text{C}$	$\theta_5 = 86^\circ\text{C}$
$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	7	3,05	1,2	0,44	0,13
$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	13,5	4,5	1,75	0,72	0,23
$R'_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	7	2,62	0,98	0,41	0,13
$R'_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	13,5	4,95	1,81	0,75	0,23

Πίνακας IV.5.2-1: Μεταβολή των αντιστάσεων μονώσεως (μέτρηση σε χρόνο 10 min) σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές σε $G\Omega$.
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R'_1 : Θεωρητική τιμή της R_1 .
 R'_2 : Θεωρητική τιμή της R_2 .

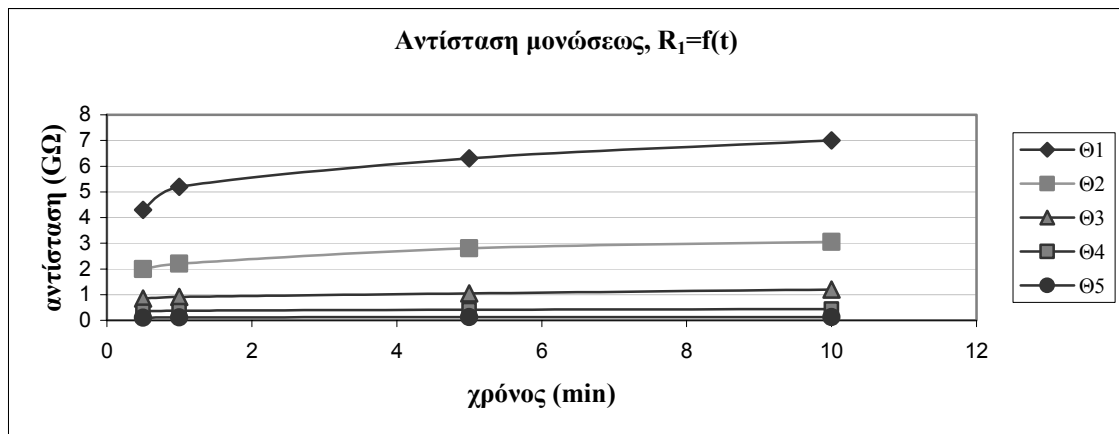
ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΟΥ			ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΕΩΣ		
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_1	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_2
$\theta_2 - \theta_1$	16	0,051923	$\theta_2 - \theta_1$	16	0,068663
$\theta_3 - \theta_1$	32	0,055112	$\theta_3 - \theta_1$	32	0,063846
$\theta_4 - \theta_1$	46	0,06015	$\theta_4 - \theta_1$	46	0,063722
$\theta_3 - \theta_2$	16	0,058301	$\theta_3 - \theta_2$	16	0,059029
$\theta_4 - \theta_2$	30	0,064537	$\theta_4 - \theta_2$	30	0,061086
$\theta_4 - \theta_3$	14	0,071664	$\theta_4 - \theta_3$	14	0,063437
$\theta_5 - \theta_1$	65	0,061325	$\theta_5 - \theta_1$	65	0,062652
$\theta_5 - \theta_2$	49	0,064395	$\theta_5 - \theta_2$	49	0,060689
$\theta_5 - \theta_3$	33	0,06735	$\theta_5 - \theta_3$	33	0,061494
$\theta_5 - \theta_4$	19	0,064171	$\theta_5 - \theta_4$	19	0,060062

Πίνακας IV.5.2-2 : Υπολογισμός των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 των μονώσεων, για χρόνο μέτρησης 10 min, σε όλες τις διαφορές θερμοκρασιών ($\Delta\theta$) που σημειώθηκαν κατά τις μετρήσεις.

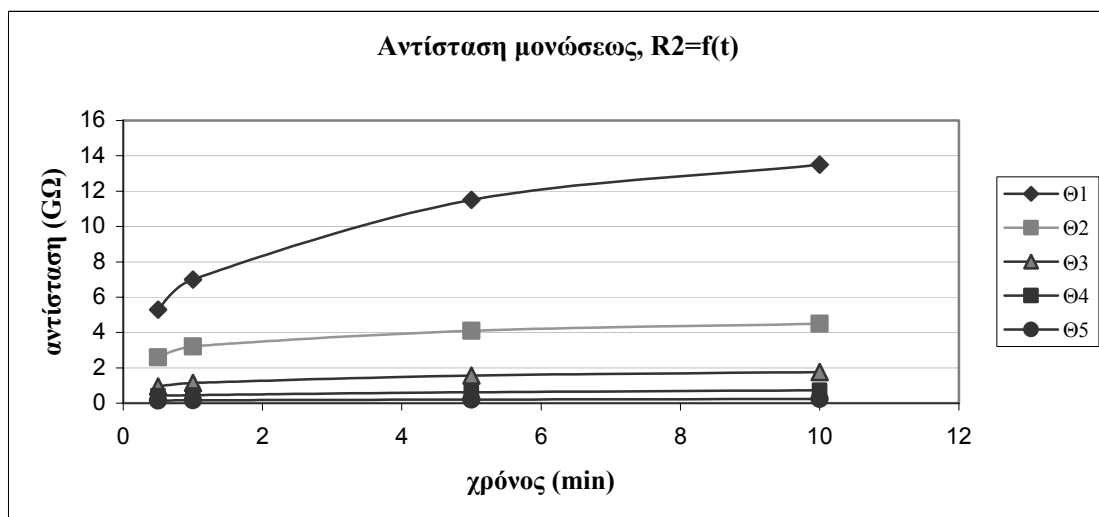
Επιλογή των β_1 και β_2 που αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο $\Delta\theta$.



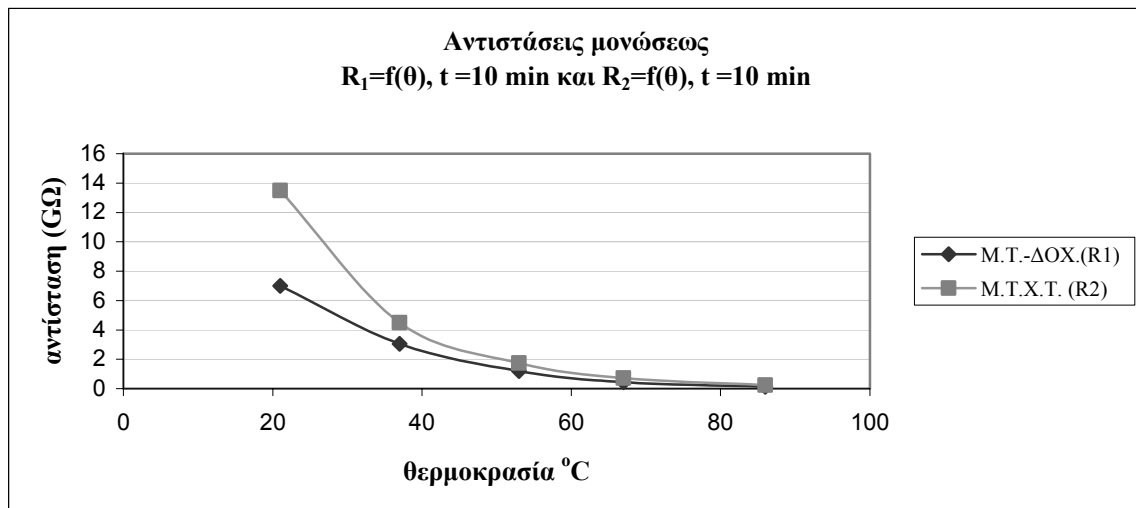
Σχήμα IV.5.2-1 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ Μ.Τ. και Δοχείου (R_1) και Μ.Τ.-Χ.Τ. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



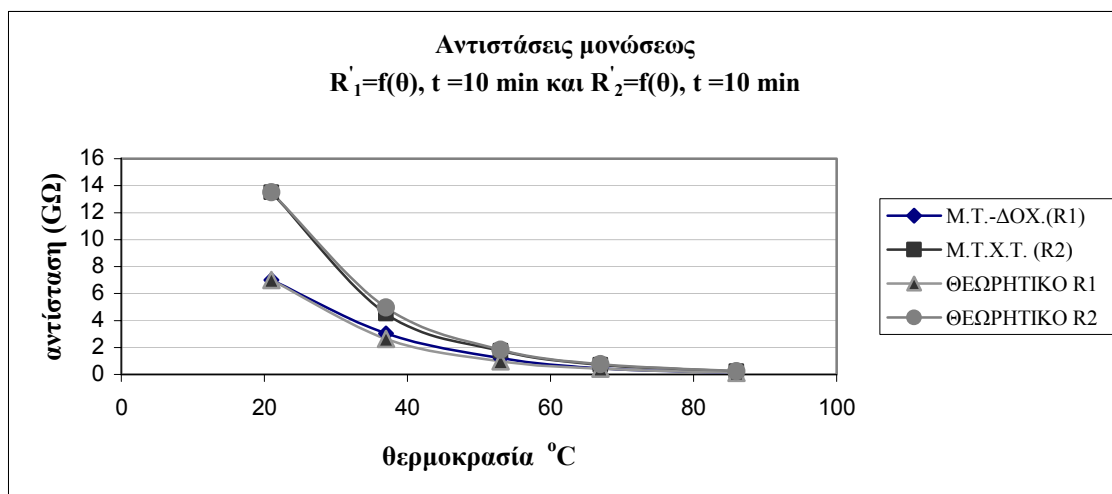
Σχήμα IV.5.2-2 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγματος Μ.Τ. και Δοχείου (R_1), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



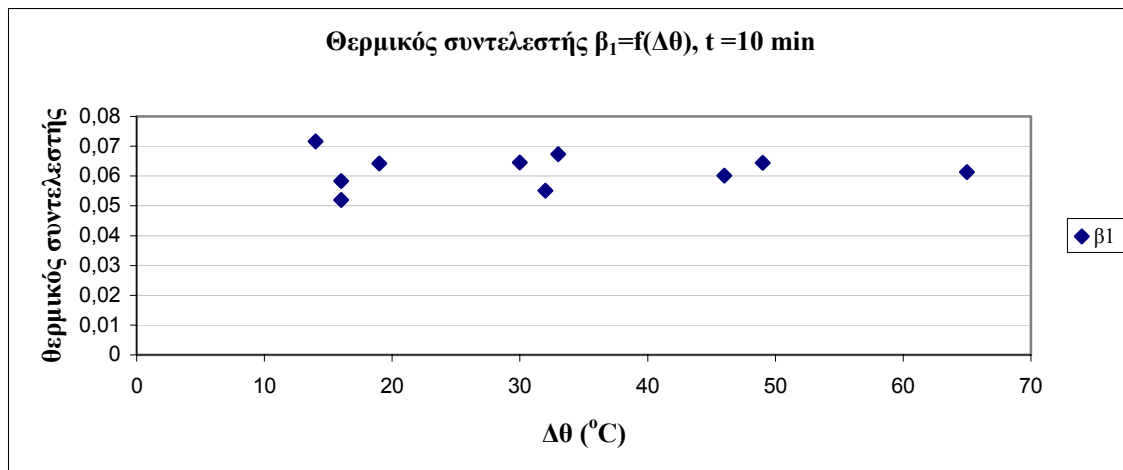
Σχήμα IV.5.2-3 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων Μ.Τ. και Χ.Τ. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



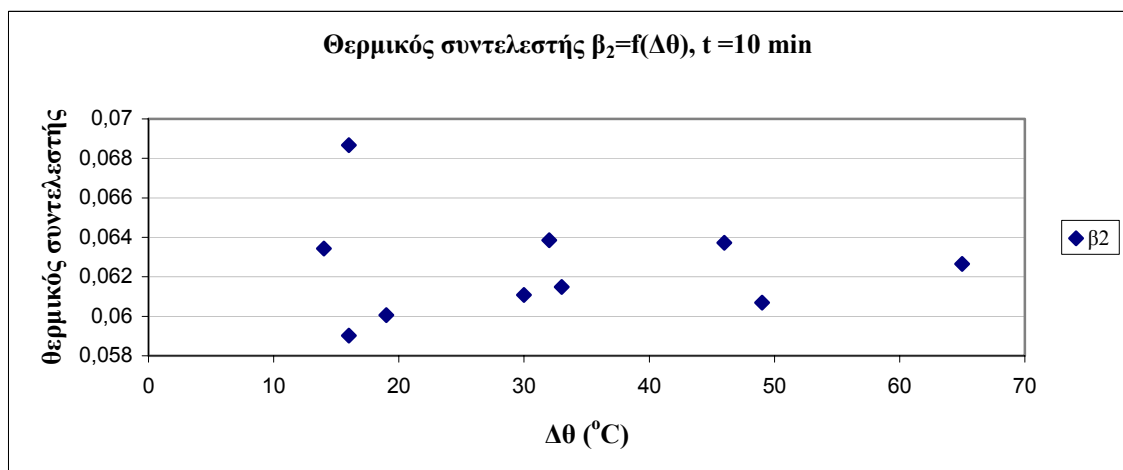
Σχήμα IV.5.2-4 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα IV.5.2-5 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές.



Σχήμα IV.5.2-6 : Ο θερμικός συντελεστής β_1 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλίγματος Μ.Τ. και Δοχείου, σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.



Σχήμα IV.5.2-7 : Ο θερμικός συντελεστής β_2 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλιγμάτων Μ.Τ. και Χ.Τ., σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.

IV.6 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-18058

IV.6.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-18058

α/α Μέτρησης - Θερμοκρασία	Χρόνος Αντίσταση	$t_1 = 0,5 \text{ min}$	$t_2 = 1 \text{ min}$	$t_3 = 5 \text{ min}$	$t_4 = 10 \text{ min}$
		1^η Μέτρηση $\theta_1 = 21 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	5	6
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	4,7	6,2	12,5	16
2^η Μέτρηση $\theta_2 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	2,4	2,9	3,4	3,8
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	2,8	3,2	4,6	5,3
3^η Μέτρηση $\theta_3 = 47 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	1,8	1,9	2,3	2,7
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	1,8	2,1	2,9	3,2
4^η Μέτρηση $\theta_4 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,8	0,84	0,97	1,15
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,65	0,72	0,93	1,2
5^η Μέτρηση $\theta_5 = 87 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,305	0,315	0,375	0,405
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,21	0,23	0,33	0,39

Πίνακας IV.6.1-1 : Αποτελέσματα μετρήσεων των αντιστάσεων μονώσεως R_1 και R_2 σε $G\Omega$, σε διάφορες θερμοκρασίες ($\theta_1 \dots \theta_5$) και χρόνους (0,5 ... 10 min).
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή.
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή.

IV.6.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-18058

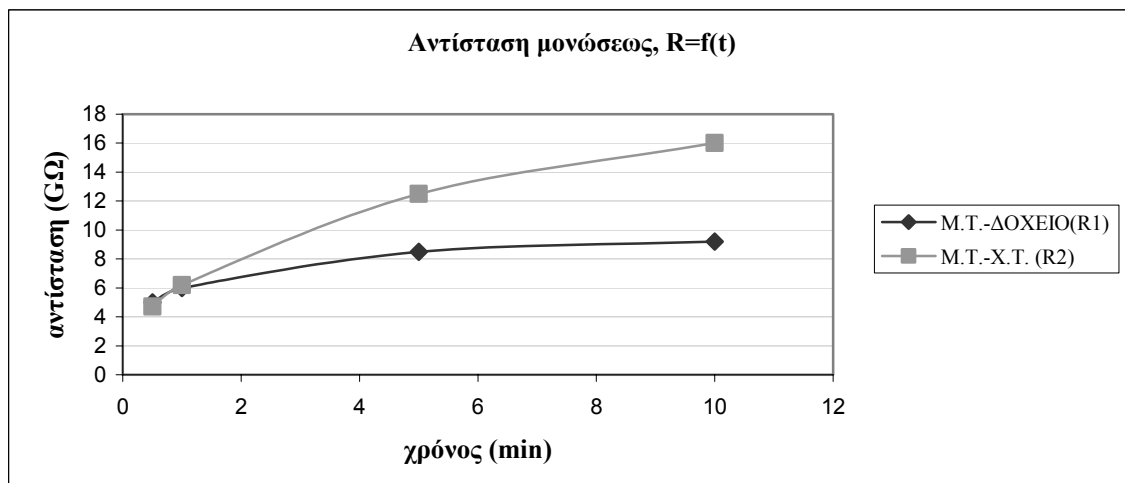
R_1, R_2	Τιμές των R_1 και R_2 για Θερμοκρασίες				
	$\theta_1 = 21 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_2 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_3 = 47 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_4 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_5 = 87 \text{ }^\circ\text{C}$
$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	9,2	3,8	2,7	1,15	0,405
$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	16	5,3	3,2	1,2	0,39
$R'_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	9,2	4,31	2,68	1,14	0,405
$R'_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	16	6,50	3,70	1,34	0,39

Πίνακας IV.6.2-1: Μεταβολή των αντιστάσεων μονώσεως (μέτρηση σε χρόνο 10 min) σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές σε $G\Omega$.
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R'_1 : Θεωρητική τιμή της R_1 .
 R'_2 : Θεωρητική τιμή της R_2 .

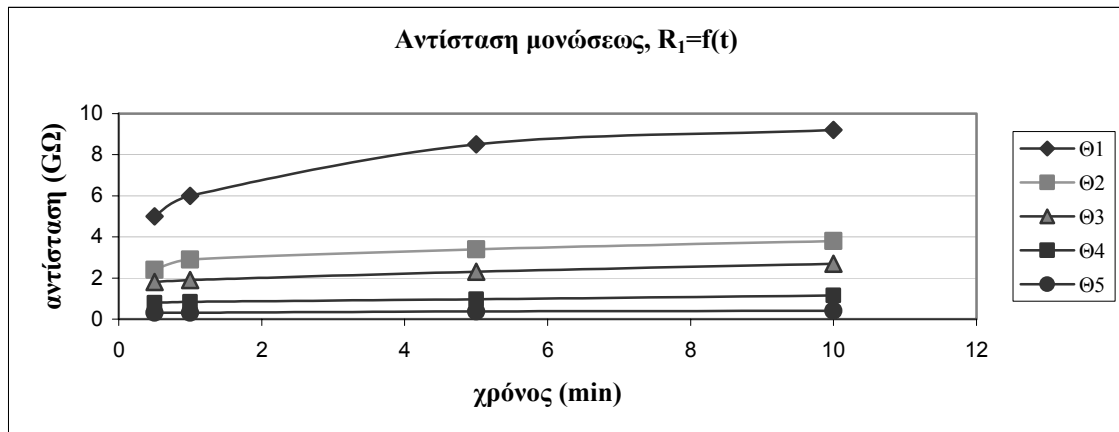
ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΟΥ			ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΕΩΣ		
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_1	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_2
$\theta_2 - \theta_1$	16	0,055263	$\theta_2 - \theta_1$	16	0,069055
$\theta_3 - \theta_1$	26	0,047152	$\theta_3 - \theta_1$	26	0,061901
$\theta_4 - \theta_1$	44	0,04726	$\theta_4 - \theta_1$	44	0,05887
$\theta_3 - \theta_2$	10	0,034175	$\theta_3 - \theta_2$	10	0,050456
$\theta_4 - \theta_2$	28	0,042687	$\theta_4 - \theta_2$	28	0,053049
$\theta_4 - \theta_3$	18	0,047416	$\theta_4 - \theta_3$	18	0,054491
$\theta_5 - \theta_1$	66	0,047319	$\theta_5 - \theta_1$	66	0,056276
$\theta_5 - \theta_2$	50	0,044777	$\theta_5 - \theta_2$	50	0,052186
$\theta_5 - \theta_3$	40	0,047428	$\theta_5 - \theta_3$	40	0,052619
$\theta_5 - \theta_4$	22	0,047438	$\theta_5 - \theta_4$	22	0,051088

Πίνακας IV.6.2-2 : Υπολογισμός των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 των μονώσεων, για χρόνο μέτρησης 10 min, σε όλες τις διαφορές θερμοκρασιών ($\Delta\theta$) που σημειώθηκαν κατά τις μετρήσεις.

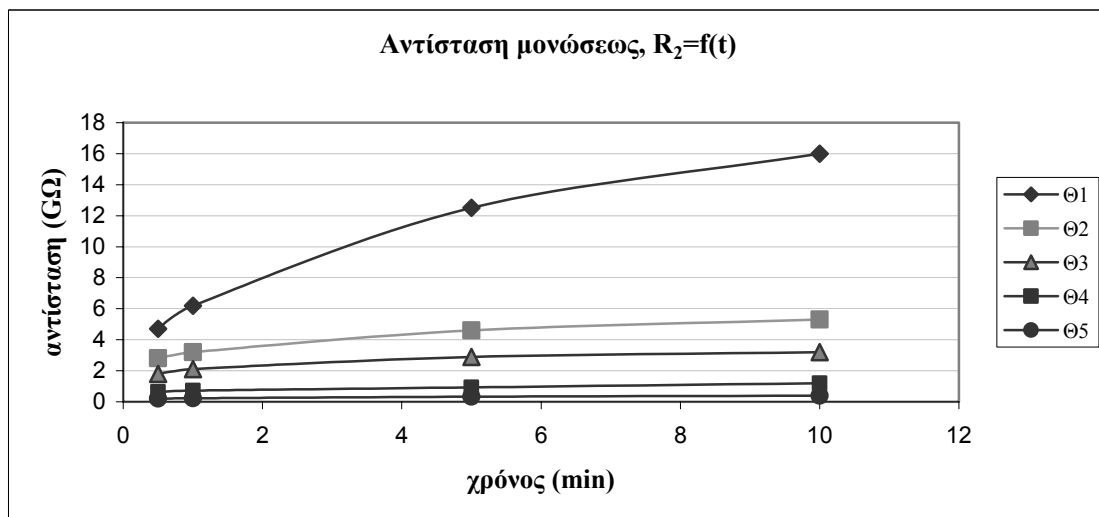
Επιλογή των β_1 και β_2 που αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο $\Delta\theta$.



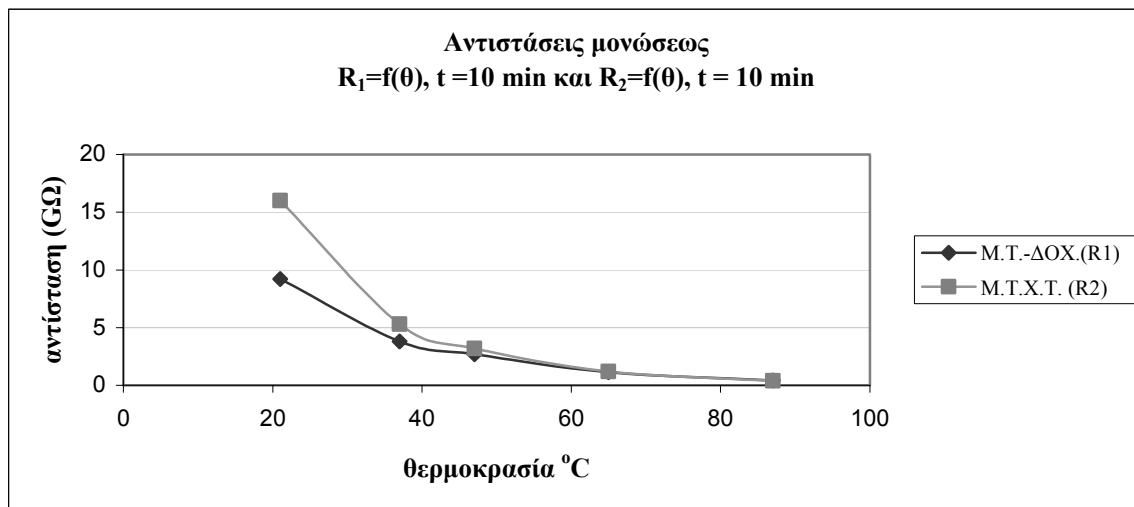
Σχήμα IV.6.2-1 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ Μ.Τ. και Δοχείου (R_1) και Μ.Τ.-Χ.Τ. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



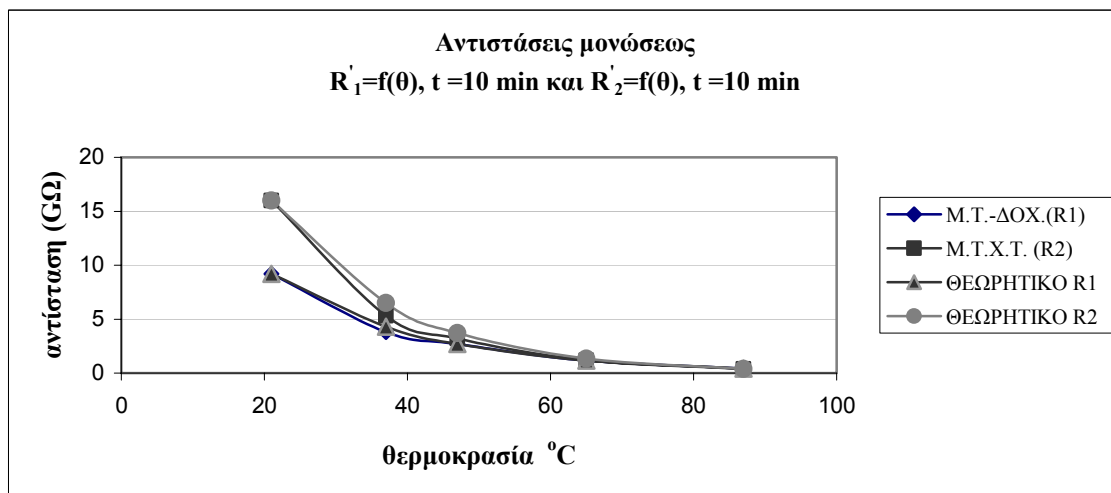
Σχήμα IV.6.2-2 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος M.T. και Δοχείου (R_1), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



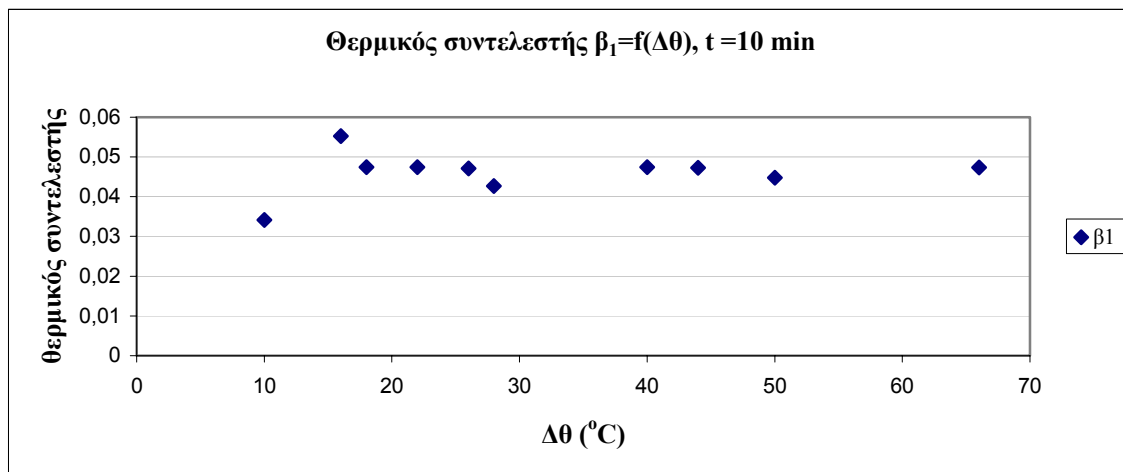
Σχήμα IV.6.2-3 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων M.T. και X.T. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



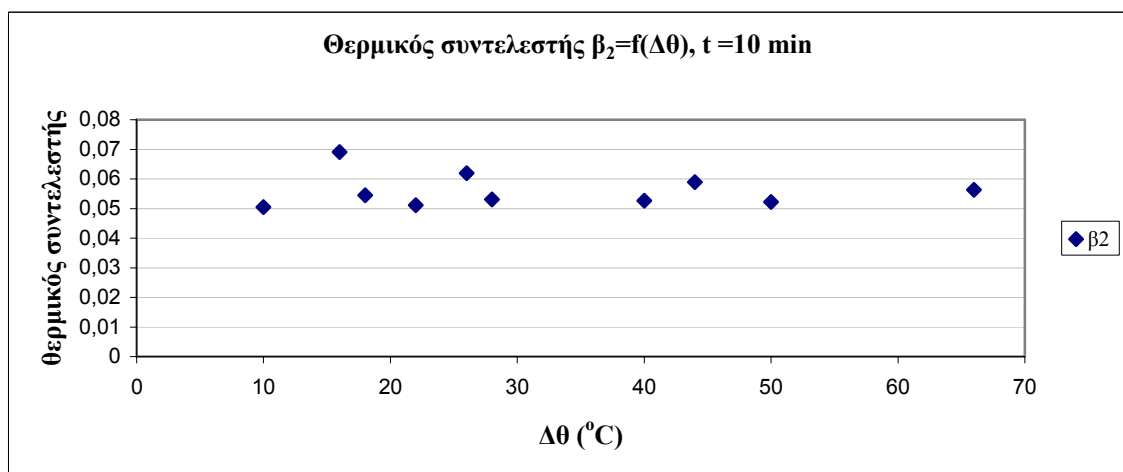
Σχήμα IV.6.2-4 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα IV.6.2-5 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές.



Σχήμα IV.6.2-6 : Ο θερμικός συντελεστής β_1 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλίγματος M.T. και Δοχείου, σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.



Σχήμα IV.6.2-7 : Ο θερμικός συντελεστής β_2 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλιγμάτων M.T. και X.T., σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.

IV.7 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-20428

IV.7.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-20428

α/α Μέτρησης - Θερμοκρασία	Χρόνος Αντίσταση	$t_1 = 0,5 \text{ min}$	$t_2 = 1 \text{ min}$	$t_3 = 5 \text{ min}$	$t_4 = 10 \text{ min}$
		1 ^η Μέτρηση $\theta_1 = 19 \text{ }^\circ\text{C}$	R_1 (GΩ)	2,2	3
R_2 (GΩ)	3,2		4,7	7,5	8,3
2 ^η Μέτρηση $\theta_2 = 36 \text{ }^\circ\text{C}$	R_1 (GΩ)	1,4	1,8	2,3	2,7
	R_2 (GΩ)	1,8	2,3	3,6	3,9
3 ^η Μέτρηση $\theta_3 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$	R_1 (GΩ)	0,65	0,74	0,85	0,96
	R_2 (GΩ)	0,75	0,95	1,25	1,4
4 ^η Μέτρηση $\theta_4 = 67 \text{ }^\circ\text{C}$	R_1 (GΩ)	0,36	0,39	0,48	0,52
	R_2 (GΩ)	0,36	0,4	0,54	0,64

Πίνακας IV.7.1-1 : Αποτελέσματα μετρήσεων των αντιστάσεων μονώσεως R_1 και R_2 σε GΩ, σε διάφορες θερμοκρασίες ($\theta_1 \dots \theta_4$) και χρόνους (0,5 ... 10 min).
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή.
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή.

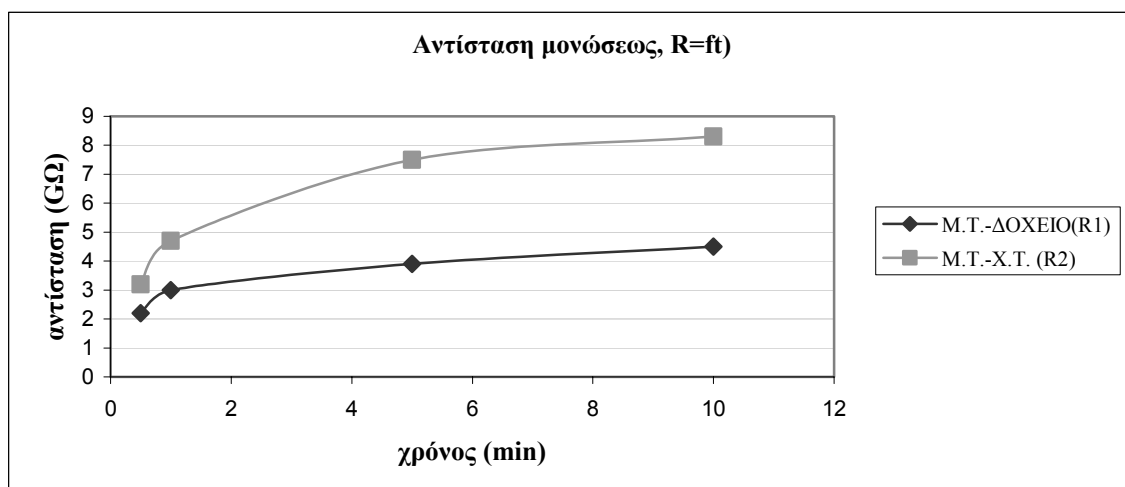
IV.7.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-20428

R_1, R_2	Τιμές των R_1 και R_2 για Θερμοκρασίες			
	$\theta_1 = 19 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_2 = 36 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_3 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_4 = 67 \text{ }^\circ\text{C}$
R_1 (GΩ)	4,5	2,7	0,96	0,52
R_2 (GΩ)	8,3	3,9	1,4	0,64
R_1 (GΩ)	4,5	2,09	0,89	0,52
R_2 (GΩ)	8,3	3,34	1,21	0,64

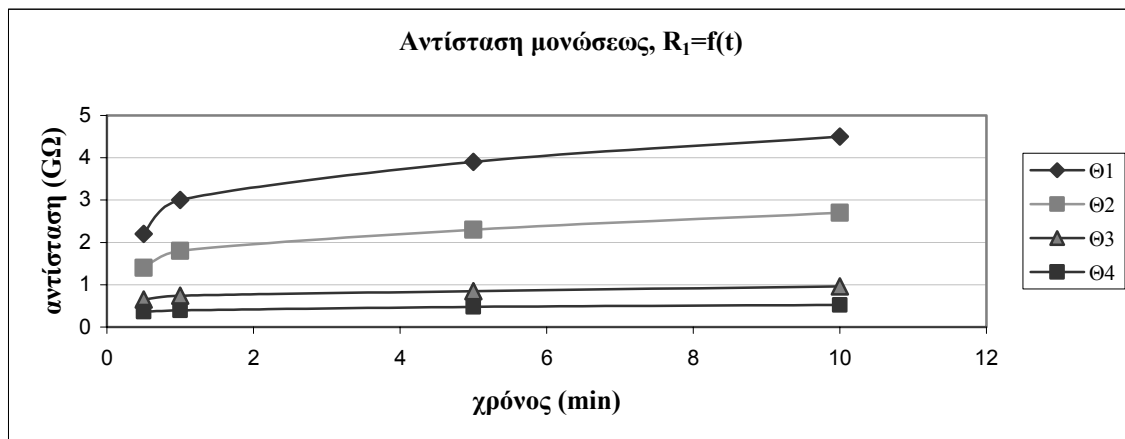
Πίνακας IV.7.2-1: Μεταβολή των αντιστάσεων μονώσεως (μέτρηση σε χρόνο 10 min) σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές σε GΩ.
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R_1 : Θεωρητική τιμή της R_1 .
 R_2 : Θεωρητική τιμή της R_2 .

ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΟΥ			ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΕΩΣ		
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_1	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_2
$\theta_2 - \theta_1$	17	0,030049	$\theta_2 - \theta_1$	17	0,044428
$\theta_3 - \theta_1$	36	0,042914	$\theta_3 - \theta_1$	36	0,049438
$\theta_4 - \theta_1$	48	0,044958	$\theta_4 - \theta_1$	48	0,053386
$\theta_3 - \theta_2$	19	0,054425	$\theta_3 - \theta_2$	19	0,053921
$\theta_4 - \theta_2$	31	0,053135	$\theta_4 - \theta_2$	31	0,058299
$\theta_4 - \theta_3$	12	0,051092	$\theta_4 - \theta_3$	12	0,06523

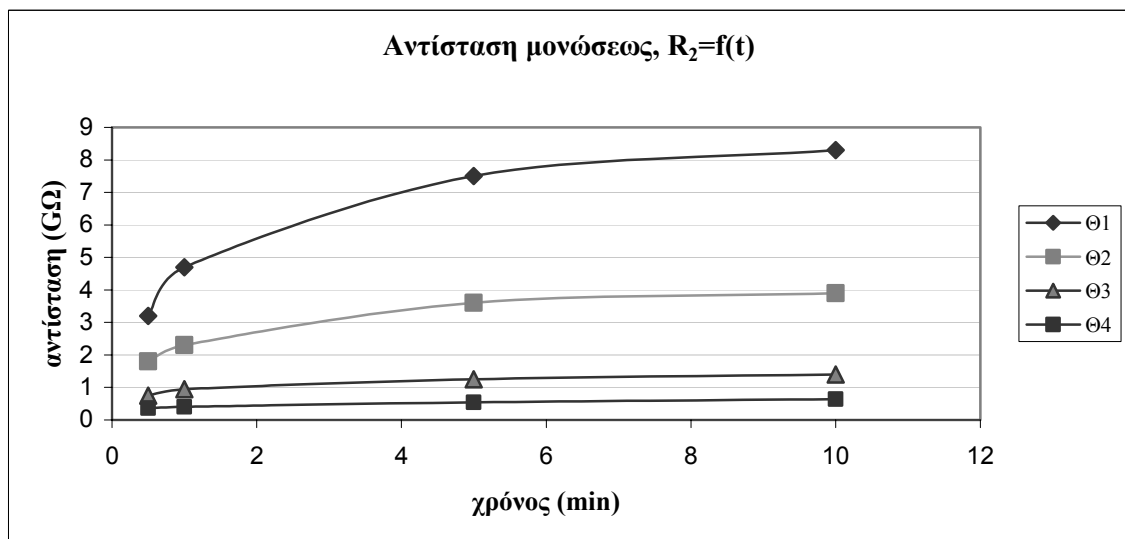
Πίνακας IV.7.2-2 : Υπολογισμός των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 των μονώσεων, για χρόνο μέτρησης 10 min, σε όλες τις διαφορές θερμοκρασιών ($\Delta\theta$) που σημειώθηκαν κατά τις μετρήσεις.
Επιλογή των β_1 και β_2 που αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο $\Delta\theta$.



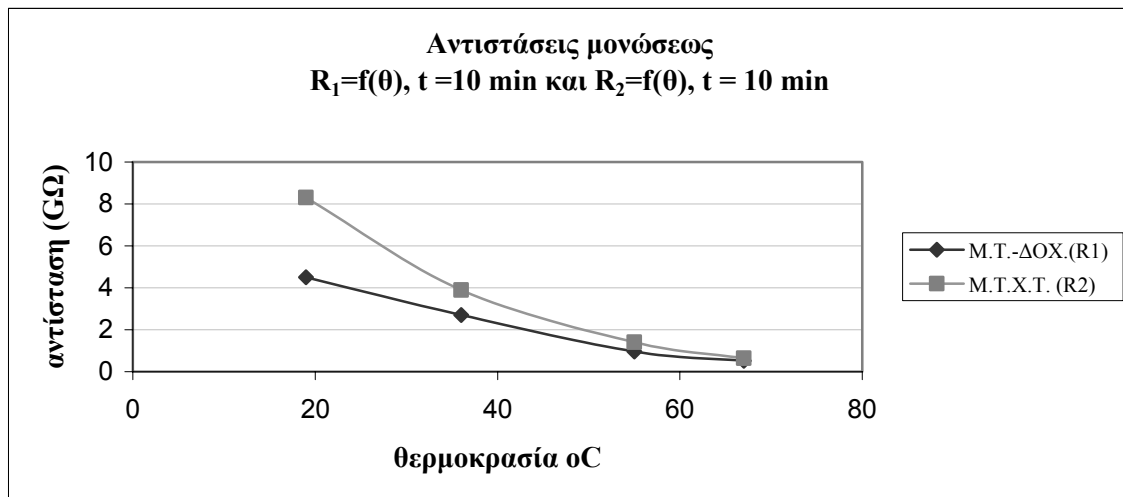
Σχήμα IV.7.2-1 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ Μ.Τ. και Δοχείου (R_1) και Μ.Τ.-Χ.Τ. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



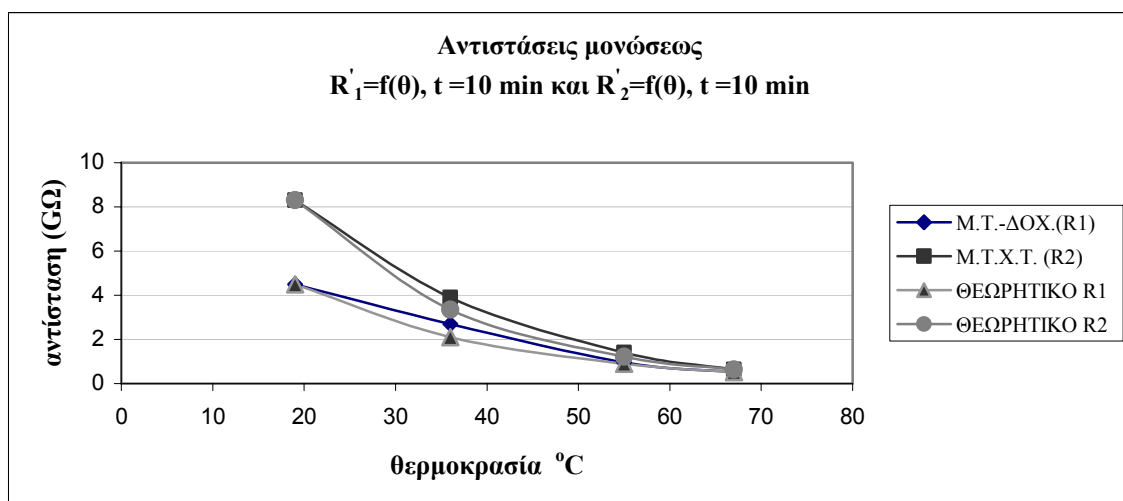
Σχήμα IV.7.2-2 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγματος M.T. και Δοχείου (R_1), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



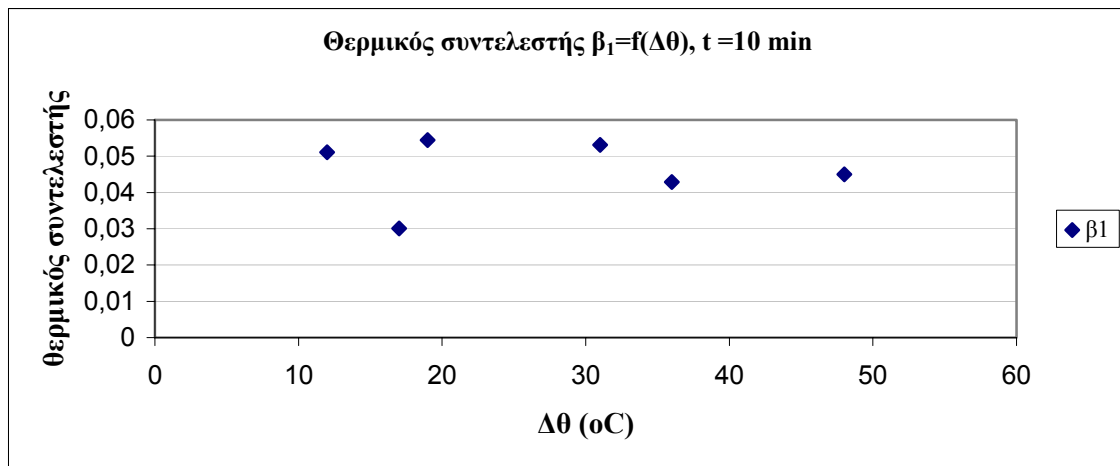
Σχήμα IV.7.2-3 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων M.T. και X.T. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



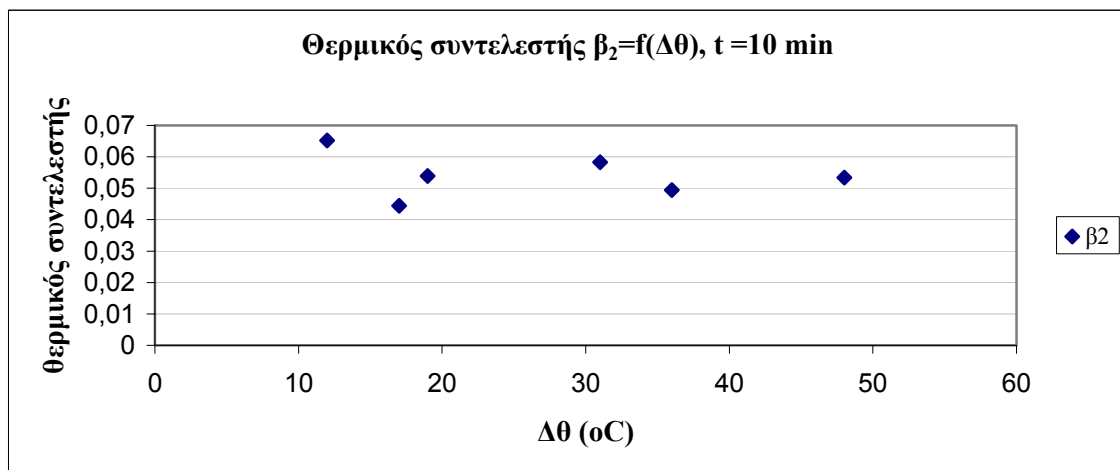
Σχήμα IV.7.2-4 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα IV.7.2-5 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές.



Σχήμα IV.7.2-6 : Ο θερμικός συντελεστής β_1 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλίγματος Μ.Τ. και Δοχείου, σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.



Σχήμα IV.7.2-7 : Ο θερμικός συντελεστής β_2 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλιγμάτων Μ.Τ. και Χ.Τ., σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.

IV.8 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-16825

IV.8.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-16825

α/α Μέτρησης - Θερμοκρασία	Χρόνος Αντίσταση	$t_1 = 0,5 \text{ min}$	$t_2 = 1 \text{ min}$	$t_3 = 5 \text{ min}$	$t_4 = 10 \text{ min}$
		1^η Μέτρηση $\theta_1 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	2,2	2,7
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	3,4	4,2	6	6,8
2^η Μέτρηση $\theta_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	1,2	1,4	1,9	2,2
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	2	2,5	3,3	3,7
3^η Μέτρηση $\theta_3 = 54 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,8	0,9	1,1	1,2
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	1,3	1,6	1,85	2
4^η Μέτρηση $\theta_4 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,32	0,34	0,42	0,48
	$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	0,42	0,45	0,55	0,63

Πίνακας IV.8.1-1 : Αποτελέσματα μετρήσεων των αντιστάσεων μονώσεως R_1 και R_2 σε $G\Omega$, σε διάφορες θερμοκρασίες ($\theta_1 \dots \theta_4$) και χρόνους (0,5 ... 10 min).
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή.
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή.

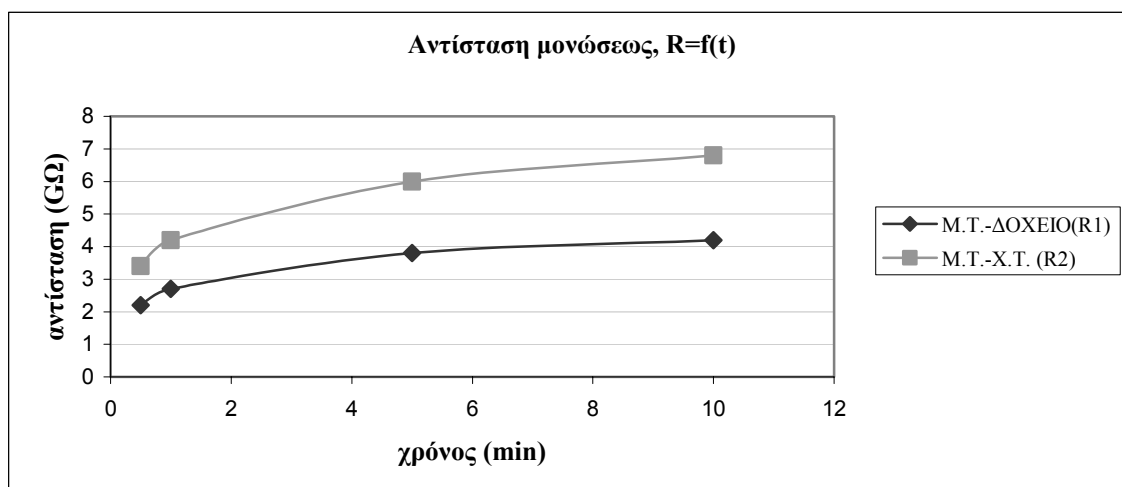
IV.8.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-16825

R_1, R_2	Τιμές των R_1 και R_2 για Θερμοκρασίες			
	$\theta_1 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_3 = 54 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_4 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$
$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	4,2	2,2	1,2	0,48
$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	6,8	3,7	2	0,63
$R_1 \text{ (G}\Omega\text{)}$	4,2	1,77	1,05	0,48
$R_2 \text{ (G}\Omega\text{)}$	6,8	2,64	1,49	0,63

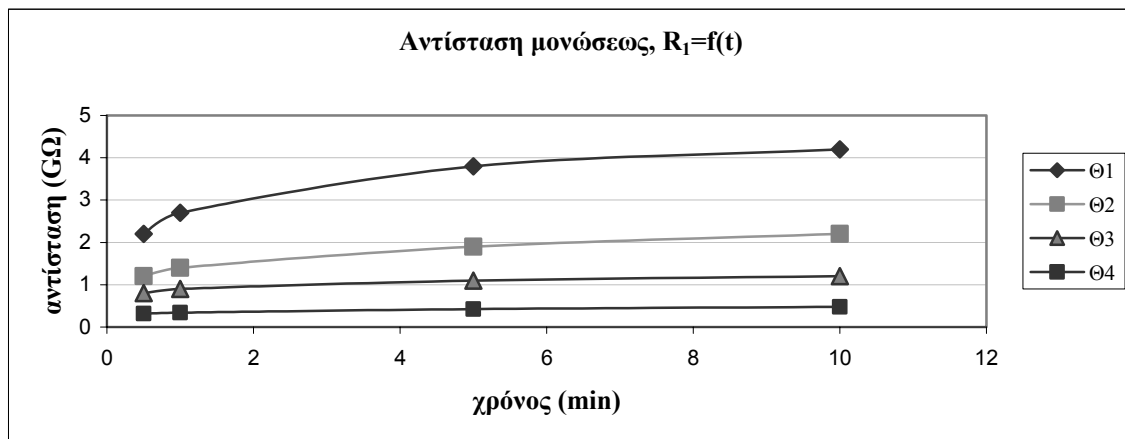
Πίνακας IV.8.2-1: Μεταβολή των αντιστάσεων μονώσεως (μέτρηση σε χρόνο 10 min) σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές σε $G\Omega$.
 R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).
 R_1 : Θεωρητική τιμή της R_1 .
 R_2 : Θεωρητική τιμή της R_2 .

ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΟΥ			ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΕΩΣ		
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_1	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_2
$\theta_2 - \theta_1$	23	0,028114	$\theta_2 - \theta_1$	23	0,02646
$\theta_3 - \theta_1$	37	0,033858	$\theta_3 - \theta_1$	37	0,033075
$\theta_4 - \theta_1$	58	0,037397	$\theta_4 - \theta_1$	58	0,041017
$\theta_3 - \theta_2$	14	0,043295	$\theta_3 - \theta_2$	14	0,043942
$\theta_4 - \theta_2$	35	0,043498	$\theta_4 - \theta_2$	35	0,050582
$\theta_4 - \theta_3$	21	0,043633	$\theta_4 - \theta_3$	21	0,055009

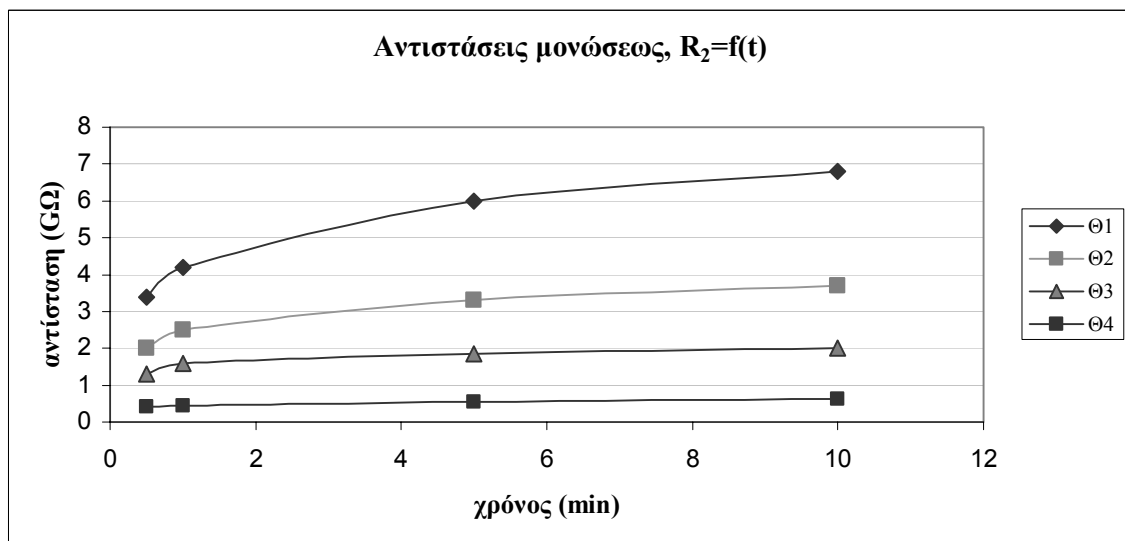
Πίνακας IV.8.2-2 : Υπολογισμός των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 των μονώσεων, για χρόνο μέτρησης 10 min, σε όλες τις διαφορές θερμοκρασιών ($\Delta\theta$) που σημειώθηκαν κατά τις μετρήσεις.
Επιλογή των β_1 και β_2 που αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο $\Delta\theta$.



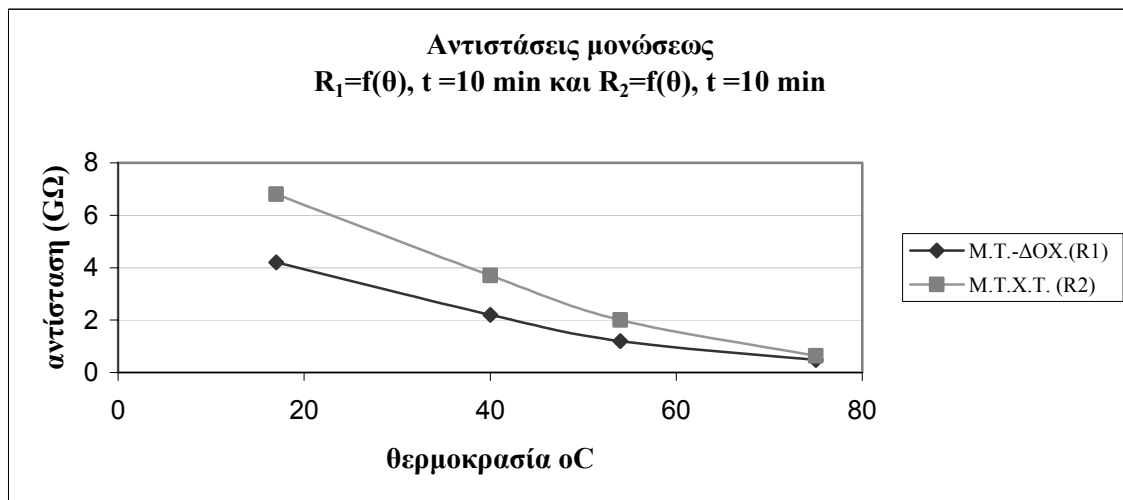
Σχήμα IV.8.2-1 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ Μ.Τ. και Δοχείου (R_1) και Μ.Τ.-Χ.Τ. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



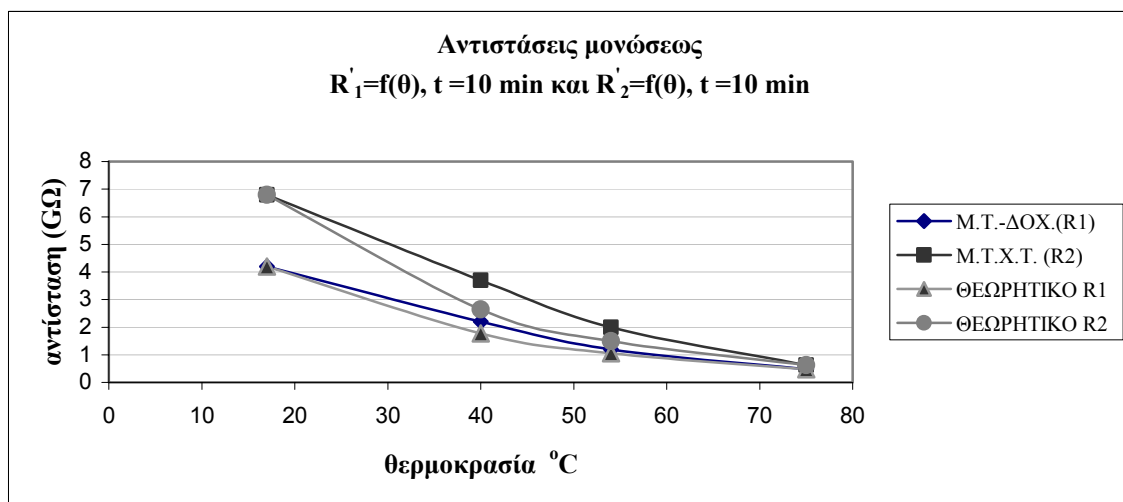
Σχήμα IV.8.2-2 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγματος Μ.Τ. και Δοχείου (R_1), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



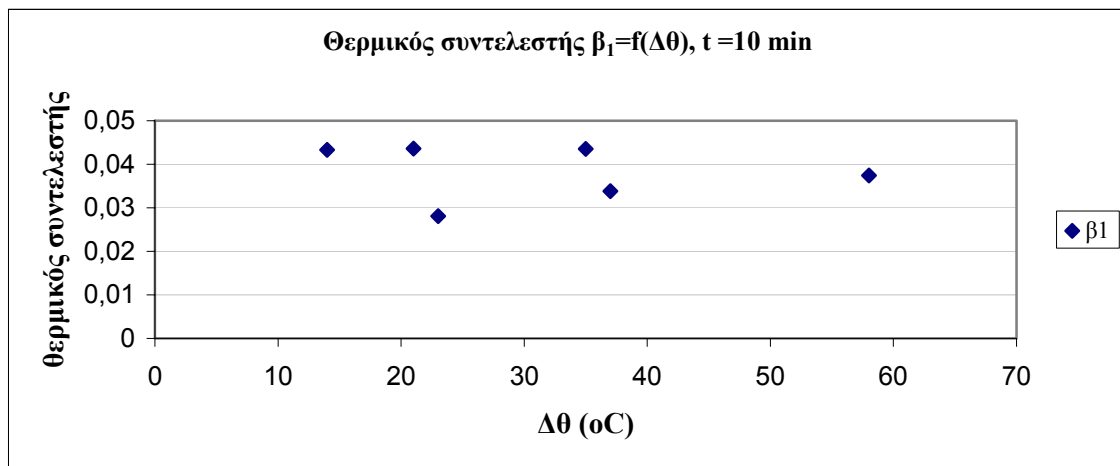
Σχήμα IV.8.2-3 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων Μ.Τ. και Χ.Τ. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



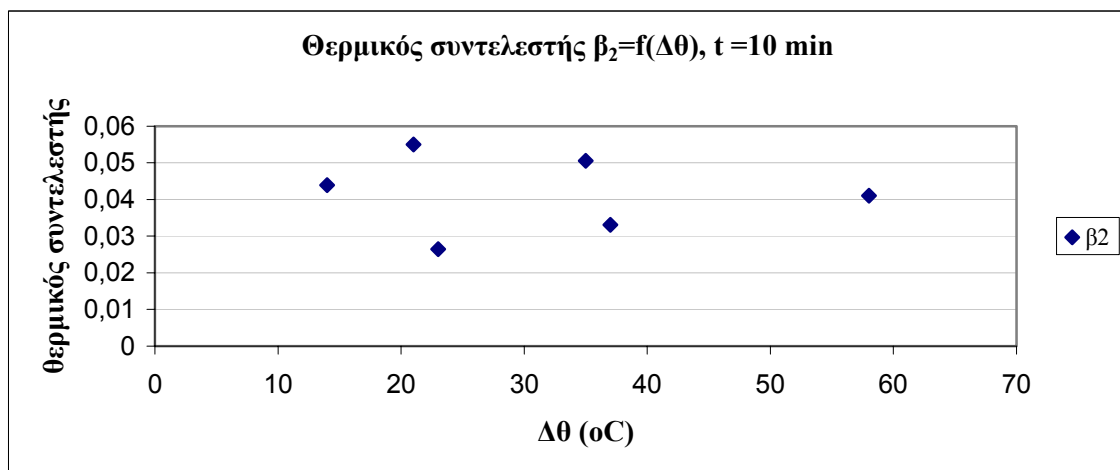
Σχήμα IV.8.2-4 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα IV.8.2-5 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές.



Σχήμα IV.8.2-6 : Ο θερμικός συντελεστής β_1 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλίγματος Μ.Τ. και Δοχείου, σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.



Σχήμα IV.8.2-7 : Ο θερμικός συντελεστής β_2 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλιγμάτων Μ.Τ. και Χ.Τ., σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.

IV.9 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ N-18731

IV.9.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΜΟΝΩΣΕΩΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-18731

α/α Μέτρησης - Θερμοκρασία	Χρόνος Αντίσταση	$t_1 = 0,5 \text{ min}$	$t_2 = 1 \text{ min}$	$t_3 = 5 \text{ min}$	$t_4 = 10 \text{ min}$
		1^η Μέτρηση $\theta_1 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$	R_1 (ΜΩ)	2,1	2,1
	R_2 (ΜΩ)	3,2	3,1	3	3,2
2^η Μέτρηση $\theta_2 = 36 \text{ }^\circ\text{C}$	R_1 (ΜΩ)	2,2	2,2	2,2	2,2
	R_2 (ΜΩ)	2,8	2,8	2,8	3,1
3^η Μέτρηση $\theta_3 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$	R_1 (ΜΩ)	2	1,95	1,95	2,05
	R_2 (ΜΩ)	2,8	2,8	2,6	2,6
4^η Μέτρηση $\theta_4 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$	R_1 (ΜΩ)	2,2	2,2	2,2	2,2
	R_2 (ΜΩ)	2,3	2,3	2,4	2,5

Πίνακας IV.9.1-1 : Αποτελέσματα μετρήσεων των αντιστάσεων μονώσεως R_1 και R_2 σε ΜΩ, σε διάφορες θερμοκρασίες ($\theta_1 \dots \theta_4$) και χρόνους (0,5 ... 10 min).

R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή.

R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή.

IV.9.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ N-18731

R_1, R_2	Τιμές των R_1 και R_2 για Θερμοκρασίες			
	$\theta_1 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_2 = 36 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_3 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_4 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$
R_1 (ΜΩ)	2,1	2,2	2,05	2,2
R_2 (ΜΩ)	3,2	3,1	2,6	2,5
R_1 (ΜΩ)	2,1	2,13	2,16	2,2
R_2 (ΜΩ)	3,2	2,95	2,72	2,5

Πίνακας IV.9.2-1: Μεταβολή των αντιστάσεων μονώσεως (μέτρηση σε χρόνο 10 min) σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές σε ΜΩ.

R_1 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσεως και δοχείου του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).

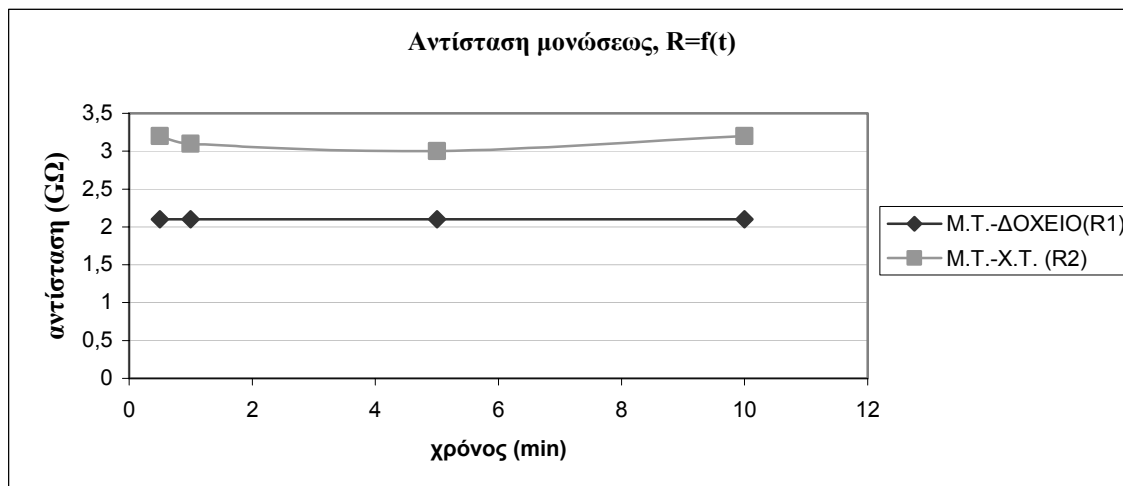
R_2 : αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως του μετασχηματιστή (πραγματική τιμή).

R_1 : Θεωρητική τιμή της R_1 .

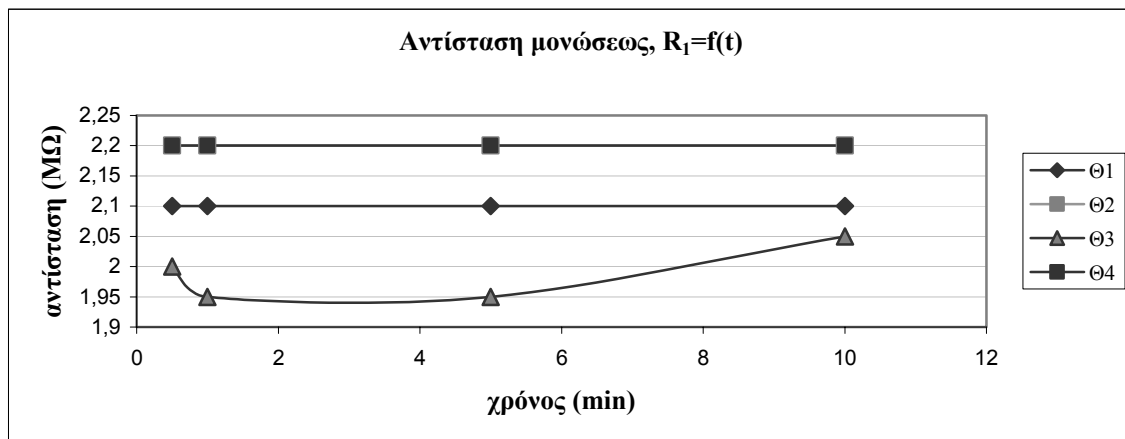
R_2 : Θεωρητική τιμή της R_2 .

ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΟΥ			ΜΟΝΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΕΩΣ		
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_1	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	$\Delta\theta$	β_2
$\theta_2 - \theta_1$	19	-0,00245	$\theta_2 - \theta_1$	19	0,001671
$\theta_3 - \theta_1$	38	0,000634	$\theta_3 - \theta_1$	38	0,005464
$\theta_4 - \theta_1$	58	-0,0008	$\theta_4 - \theta_1$	58	0,004256
$\theta_3 - \theta_2$	19	0,003717	$\theta_3 - \theta_2$	19	0,009257
$\theta_4 - \theta_2$	39	0	$\theta_4 - \theta_2$	39	0,005516
$\theta_4 - \theta_3$	20	-0,00353	$\theta_4 - \theta_3$	20	0,001961

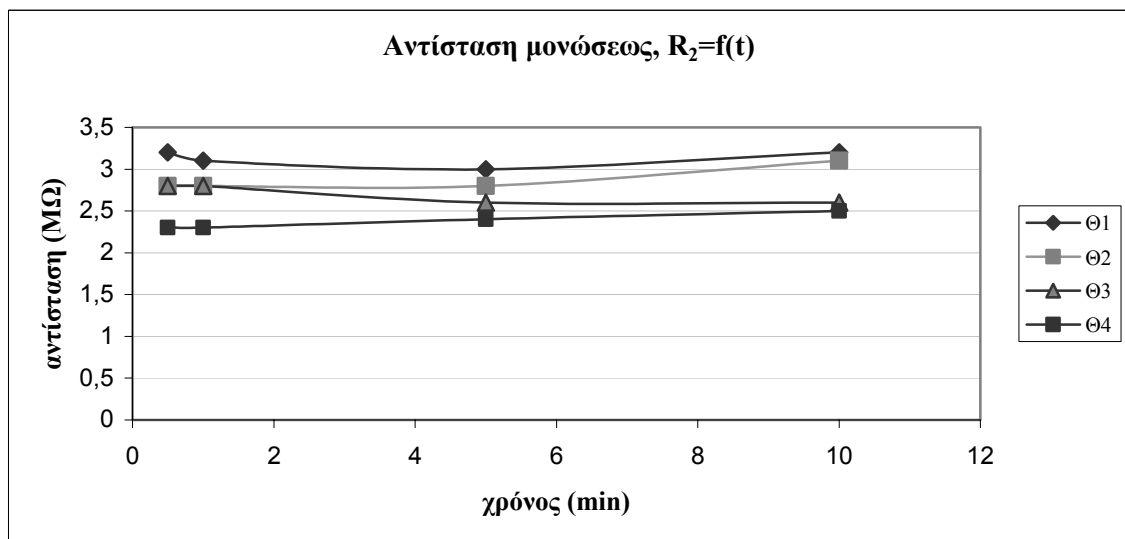
Πίνακας IV.9.2-2 : Υπολογισμός των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 των μονώσεων, για χρόνο μέτρησης 10 min, σε όλες τις διαφορές θερμοκρασιών ($\Delta\theta$) που σημειώθηκαν κατά τις μετρήσεις.
Επιλογή των β_1 και β_2 που αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο $\Delta\theta$.



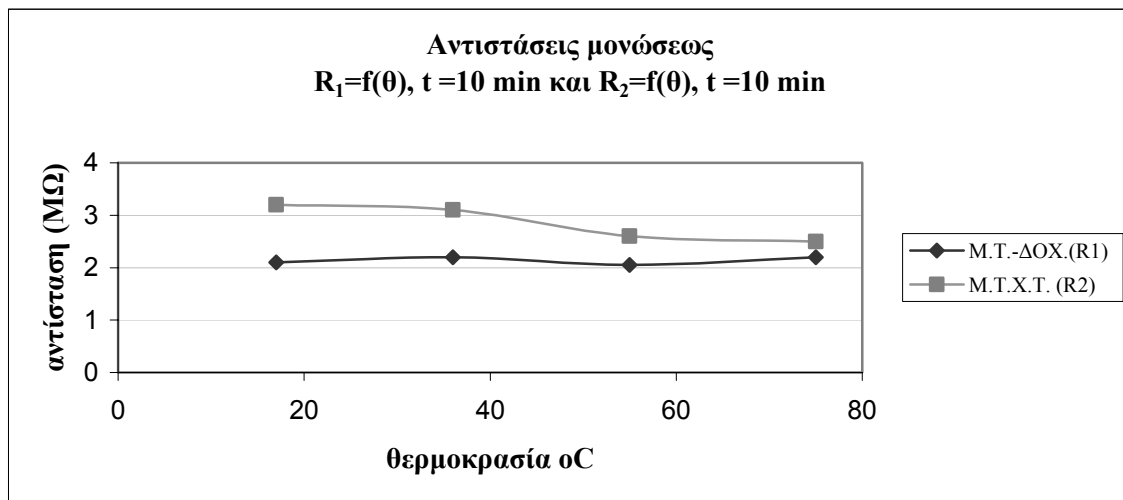
Σχήμα IV.9.2-1 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ M.T. και Δοχείου (R_1) και M.T.-X.T. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



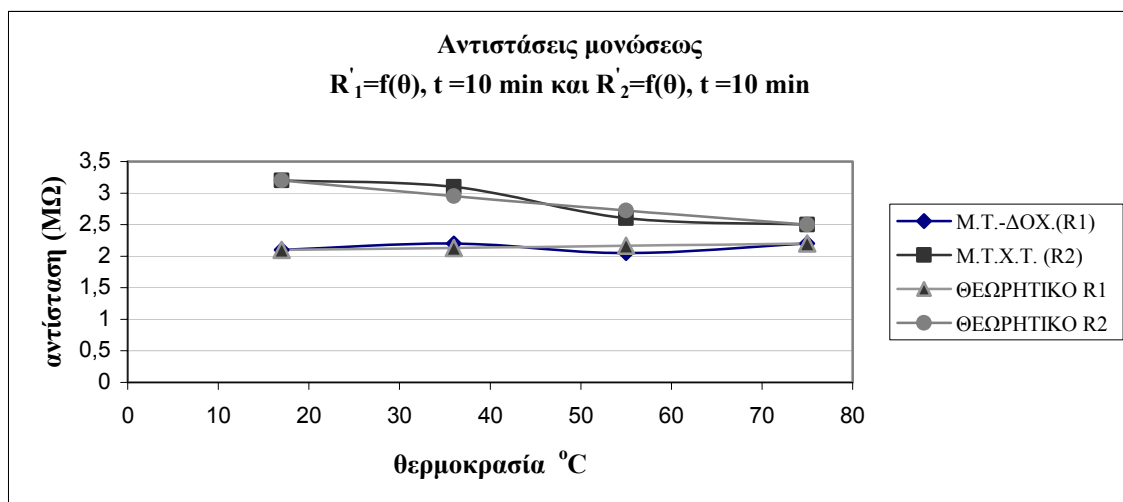
Σχήμα IV.9.2-2 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγματος M.T. και Δοχείου (R_1), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



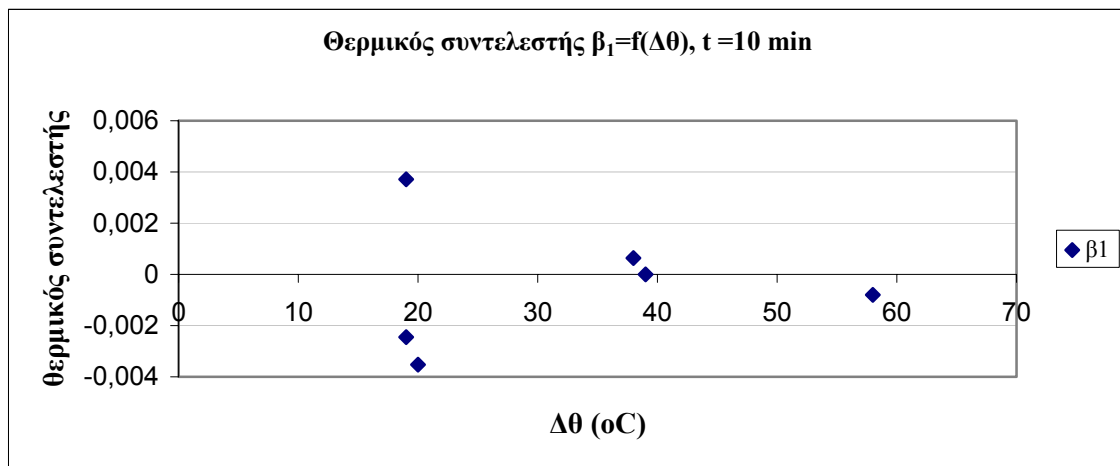
Σχήμα IV.9.2-3 : Η μετρούμενη αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλιγμάτων M.T. και X.T. (R_2), σαν συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.



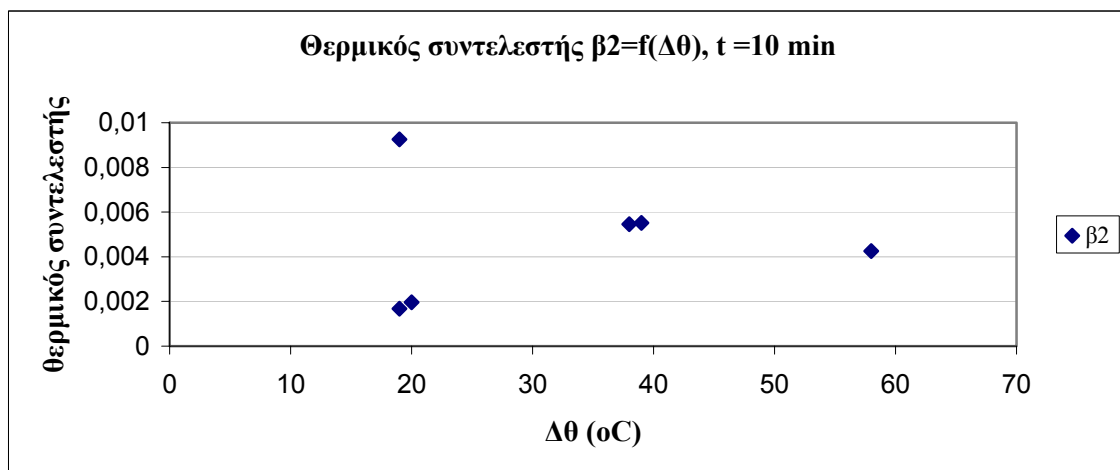
Σχήμα IV.9.2-4 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα IV.9.2-5 : Οι αντιστάσεις μονώσεως R_1 και R_2 μετρούμενες στα 10 λεπτά, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πραγματικές και θεωρητικές τιμές.



Σχήμα IV.9.2-6 : Ο θερμικός συντελεστής β_1 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλίγματος Μ.Τ. και Δοχείου, σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.



Σχήμα IV.9.2-7 : Ο θερμικός συντελεστής β_2 , στα 10 λεπτά, για τη μόνωση μεταξύ τυλιγμάτων Μ.Τ. και Χ.Τ., σαν συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$.

IV.10 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Μεταση- ματιστής Αριθ.ΔΕΗ Ον. ισχύς Κατ/στής	Μετρούμενο μέγεθος	α/α μέτρησης				
		1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
N-12988 100 kVA Fact. A	Θερμοκρασία °C	20	32	48	70	–
	R ₁ (GΩ)	33	20	11	3,2	–
	R ₂ (GΩ)	65	35	16,5	3,8	–
N-21168 100 kVA Fact. B	Θερμοκρασία °C	20	28	45	67	–
	R ₁ (GΩ)	3,8	2,6	1,25	0,5	–
	R ₂ (GΩ)	3,3	2	1	0,45	–
N-25804 100 kVA Fact. C	Θερμοκρασία °C	17	31	55	60	–
	R ₁ (GΩ)	120	30	5,7	4,4	–
	R ₂ (GΩ)	180	38	8,2	6,2	–
N-21641 50 kVA Fact. C	Θερμοκρασία °C	21	33	44	59	79
	R ₁ (GΩ)	38	19	11,5	5,2	1,8
	R ₂ (GΩ)	43	22	13	5,6	1,75
N-19694 50 kVA Fact. A	Θερμοκρασία °C	21	37	53	67	86
	R ₁ (GΩ)	7	3,05	1,2	0,44	0,13
	R ₂ (GΩ)	13,5	4,5	1,75	0,72	0,23
N-18058 50 kVA Fact. A	Θερμοκρασία °C	21	37	47	65	87
	R ₁ (GΩ)	9,2	3,8	2,7	1,15	0,4
	R ₂ (GΩ)	16	5,3	3,2	1,2	0,39
N-20428 50 kVA Fact. A	Θερμοκρασία °C	19	36	55	67	–
	R ₁ (GΩ)	4,5	2,7	0,96	0,52	–
	R ₂ (GΩ)	8,3	3,9	1,4	0,64	–
N-16825 50 kVA Fact. A	Θερμοκρασία °C	17	40	54	75	–
	R ₁ (GΩ)	4,2	2,2	1,2	0,48	–
	R ₂ (GΩ)	6,8	3,7	2	0,63	–
N-18731 50 kVA Fact. A	Θερμοκρασία °C	17	36	55	75	–
	R ₁ (MΩ)	2,1	2,2	2,05	2,2	–
	R ₂ (MΩ)	3,2	3,1	2,6	2,5	–

Πίνακας IV.10-1. Μετρήσεις θερμοκρασιών και των αντίστοιχων αντιστάσεων μονώσεων ληφθείσες στα 10 min. Για κάθε μετασηματιστή ελήφθησαν μετρήσεις σε τέσσερεις ή πέντε διαφορετικές θερμοκρασίες ($\theta_1 \dots \theta_5$).

R₁: Η αντίσταση μονώσεως μεταξύ τυλίγματος Μέσης τάσεως και Δοχείου.

R₂: Η αντίσταση μονώσεως μεταξύ των τυλιγμάτων Μέσης και Χαμηλής τάσεως.

Μετασχηματιστής Αρ. ΔΕΗ Ον. ισχύς	Θερμικοί συντελεστές	Οι θερμικοί συντελεστές β_1, β_2 υπολογισμένοι σε διάφορους χρόνους			
		30 s	60 s	5 min	10 min
N-12988 100 kVA	β_1	0,0415	0,0431	0,0467	0,0466
	β_2	0,0399	0,0431	0,0545	0,0567
N-21168 100 kVA	β_1	0,0448	0,0445	0,0433	0,0431
	β_2	0,0512	0,051	0,0452	0,0423
N-25804 100 kVA	β_1	0,0527	0,059	0,0765	0,0768
	β_2	0,0502	0,0624	0,0785	0,0783
N-21641 50 kVA	β_1	0,0507	0,053	0,0531	0,0525
	β_2	0,0557	0,0606	0,0573	0,0552
N-19694 50 kVA	β_1	0,0578	0,0593	0,0609	0,0613
	β_2	0,0559	0,0576	0,0619	0,0626
N-18058 50 kVA	β_1	0,0423	0,0446	0,0472	0,0473
	β_2	0,047	0,0499	0,055	0,0562
N-20428 50 kVA	β_1	0,0377	0,0425	0,0436	0,0449
	β_2	0,0455	0,0513	0,0548	0,0533
N-16825 50 kVA	β_1	0,0332	0,0357	0,0379	0,0373
	β_2	0,036	0,0385	0,0412	0,041

Πίνακας IV.10-2. Ο πίνακας παρουσιάζει τους θερμικούς συντελεστές β_1 και β_2 υπολογισμένους σε διάφορες χρονικές στιγμές για τη μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας (δηλ. $\theta_4 - \theta_1$ ή $\theta_5 - \theta_1$).

β_1 : Ο θερμικός συντελεστής της μόνωσης μεταξύ τυλίγματος Μέσης τάσεως και Δοχείου.

β_2 : Ο θερμικός συντελεστής της μόνωσης μεταξύ των τυλιγμάτων Μέσης και Χαμηλής τάσεως.

Μετασχηματιστής Αρ. ΔΕΗ Ον. ισχύς Κατ/στής	Υπολογισθείσες τιμές	α/α μέτρησης			
		1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η
N-12988 100 kVA Fact. A	$\Delta\theta$ (°C)	12	28	50	–
	β_1	0,0417	0,0392	0,0466	–
	β_2	0,0515	0,0489	0,0567	–
N-21168 100 kVA Fact. B	$\Delta\theta$ (°C)	8	25	47	–
	β_1	0,0474	0,0444	0,0431	–
	β_2	0,0625	0,0477	0,0423	–
N-25804 100 kVA Fact. C	$\Delta\theta$ (°C)	14	38	43	–
	β_1	0,099	0,0801	0,0768	–
	β_2	0,111	0,0812	0,0783	–
N-21641 50 KVA Fact. C	$\Delta\theta$ (°C)	12	23	38	58
	β_1	0,0577	0,0519	0,0523	0,0525
	β_2	0,0558	0,052	0,0536	0,0552
N-19694 50 kVA Fact. A	$\Delta\theta$ (°C)	16	32	46	65
	β_1	0,0519	0,0551	0,0601	0,0613
	β_2	0,0686	0,0638	0,0637	0,0626
N-18058 50 kVA Fact. A	$\Delta\theta$ (°C)	16	26	44	66
	β_1	0,0552	0,0471	0,0472	0,0473
	β_2	0,069	0,0619	0,0588	0,0562
N-20428 50 kVA Fact. A	$\Delta\theta$ (°C)	17	36	48	–
	β_1	0,03	0,0429	0,0449	–
	β_2	0,0444	0,0494	0,0533	–
N-16825 50 kVA Fact. A	$\Delta\theta$ (°C)	23	37	58	–
	β_1	0,0281	0,0338	0,0373	–
	β_2	0,0264	0,033	0,041	–

Πίνακας IV.10-3. Οι υπολογισθείσες τιμές των θερμικών συντελεστών β_1 , β_2 που αντιστοιχούν στις διάφορες αυξήσεις της θερμοκρασίας $\Delta\theta$, πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (δηλαδή $\theta_2-\theta_1$, $\theta_3-\theta_1$, $\theta_4-\theta_1$ και $\theta_5-\theta_1$) σε χρόνο μέτρησης 10 min.

V. ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων καθώς και των υπολογισμών που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο IV, σε συνδυασμό με τη θεωρία που έχει αναπτυχθεί στο κεφάλαιο I και στη βιβλιογραφία γενικότερα. Κατά τον τρόπο αυτό επιδιώκεται να διερευνηθεί κατά πόσο συμφωνούν τα θεωρητικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα μετρήσεων.

1. Σχόλια επί των μετρηθεισών αντιστάσεων.

Οι μετρήσεις των αντιστάσεων μονώσεως έγιναν σε ένα εύρος θερμοκρασιών από την θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι τους $80\div 85$ °C περίπου. Στο πεδίο αυτών των θερμοκρασιών ευρίσκεται συνήθως ο μετασχηματιστής διανομής κατά την κανονική λειτουργία του, κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτισης αλλά και διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Ο μετασχηματιστής έχει σχεδιαστεί και καλείται να ανταποκριθεί σε συνθήκες οι οποίες κλιμακώνονται από ψυχρή εφεδρεία μέχρι κατάσταση επείγουσας ανάγκης, άμεσης δηλαδή ανάληψης ηλεκτρικού φορτίου και πέραν του ονομαστικού του. Κάτω από αυτές τις συνθήκες και τις συνεπαγόμενες θερμοκρασιακές διαφορές, εκδηλώνονται διάφορα φαινόμενα τα οποία έχουν άμεση σχέση με τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, καθότι έχουν σοβαρές επιπτώσεις στη μόνωσή του. Η διάσπαση της μόνωσης, η οποία συμβαίνει στο πλέον θερμό σημείο της, είναι η κύρια αιτία καταστροφής των μετασχηματιστών στους υποσταθμούς [47,72,83,84,85,86]. Η οδηγία φόρτισης μετασχηματιστών ANSI/IEEE C57.91-1995 καθορίζει περιορισμούς στη φόρτιση και τις εσωτερικές θερμοκρασίες των μετασχηματιστών και εξετάζει τα συναφή φαινόμενα [83].

Η θερμική διάτρηση της μόνωσης των μετασχηματιστών σε μια τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης U_0 , συμβαίνει όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule. Στην περίπτωση αυτή που συμβαίνει αύξηση των απωλειών Joule, η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ) αυξάνει κατά τη σχέση 1.1.-3 και όταν σε κάποια θέση του υλικού φθάσει την οριακή τιμή σ_1 δημιουργείται ο σχετός διάτρησης [1,2,10,14].

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή (σχήμα 6-7) η αύξηση των απωλειών Joule κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης U , συμβολίζεται με μια μεταβλητή αγωγιμότητα G . Έτσι η διάτρηση στην τάση U_0 συμβαίνει όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ_0 στην τιμή σ_1), μια οριακή τιμή G_{max} .

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1.1-ε η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει την περιγραφείσα διαδικασία της θερμικής διάτρησης. Έχει γίνει αποδεκτό ένα όριο θέρμανσης του λαδιού των ηλεκτρολογικών κατασκευών της τάξης των $40\div 50$ °C, το οποίο σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος φτάνει σε μια οριακή θερμοκρασία λειτουργίας της τάξης των $80\div 90$ °C [1,10].

Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις προκύπτει ότι η μετρούμενη σε κάθε μετασχηματιστή αντίσταση μόνωσης αυξάνει σημαντικά με τον χρόνο μέτρησης (από 30 sec σε 10 min). Διαπιστώνουμε ότι το φαινόμενο παρατηρείται σε όλες τις θερμοκρασίες στις οποίες έγιναν μετρήσεις. Η αύξηση της μετρούμενης αντίστασης με το χρόνο οφείλεται στο φαινόμενο της απορρόφησης ή μεταφόρτισης της μόνωσης, το οποίο σχετίζεται άμεσα με την ανομοιογένεια του υλικού της μόνωσης [59]. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6.1, το συνολικό ρεύμα (I_t) διά μέσω του όγκου της μόνωσης είναι άθροισμα τριών συνιστωσών: του ρεύματος φορτίσεως (I_c), του ρεύματος απορροφήσεως (I_a) και του ρεύματος διαρροής ή αγωγιμότητας (I_g). Εξ αυτών, το ρεύμα φορτίσεως αρχίζει από υψηλές τιμές και μειώνεται απότομα, το ρεύμα αγωγιμότητας είναι μικρό και κατ' ουσία σταθερό, ενώ το ρεύμα απορροφήσεως έχει

αρχικά υψηλή τιμή η οποία εν συνεχεία μειούται και μηδενίζεται θεωρητικά σε άπειρο χρόνο [59]. Το ρεύμα απορροφήσεως (I_a) αντιστοιχεί στην κατανάλωση ενέργειας στις διάφορες ομάδες διπόλων του μονωτικού και αποδίδεται με τα δίπολα $R_{ai}-C_{ai}$ του τμήματος (b) του ισοδύναμου κυκλώματος 6-7, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω μελέτη του φαινομένου [59,66].

Επομένως η τιμή του συνολικού ρεύματος (I_t) διά του όγκου της μονώσεως βαίνει μειούμενη με τον χρόνο και βεβαίως αντίστοιχα η μετρούμενη σε πεπερασμένο χρόνο «φαινομένη αντίσταση» βαίνει αυξανόμενη με τον χρόνο.

Αυτό δεν συμβαίνει στην περίπτωση του κατεστραμμένου μετασχηματιστή N-18731 για τις μετρήσεις του οποίου παρατηρούμε τα εξής:

- Οι μετρηθείσες αντιστάσεις μονώσεως είναι πολύ μικρές συγκρινόμενες με αυτές των άλλων μετασχηματιστών.
- Οι τιμές των αντιστάσεων παραμένουν σχεδόν σταθερές κατά τον χρόνο των μετρήσεων (10 min).
- Οι τιμές των αντιστάσεων παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες στις διάφορες μεταβολές της θερμοκρασίας.

Η μόνωση του μετασχηματιστή αυτού θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ανύπαρκτη.

Η μεταβολή στο ρυθμό αύξησης της αντίστασης, η οποία παρατηρείται στους εύχρηστους μετασχηματιστές καθώς αυξάνει η θερμοκρασία, μπορεί να ερμηνευθεί με την μεταβολή συναρτήσεως της θερμοκρασίας της σταθεράς χρόνου $\tau_i = R_{ai}C_{ai}$ των διαφόρων ομάδων διπόλων του μονωτικού, πράγμα που επηρεάζει τη μορφή του ρεύματος απορροφήσεως I_a και κατά συνέπεια αυτήν του συνολικού ρεύματος I_t δια μέσω του όγκου της μόνωσης.

Από τις γραφικές παραστάσεις των σχημάτων IV.1.2-4 μέχρι IV.8.2-4 προκύπτει μια χαρακτηριστική καμπύλη μείωσης της αντίστασης μονώσεως συναρτήσεως της θερμοκρασίας. Η ίδια μορφή χαρακτηριστικής καμπύλης εμφανίζεται σε όλους τους μετασχηματιστές, ενώ διαφέρει ο ρυθμός μείωσης της αντίστασης μονώσεως από μετασχηματιστή σε μετασχηματιστή.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.1.1, τα στερεά μονωτικά κάτω από τις διάφορες καταπονήσεις, υφίστανται μια αλλαγή της μοριακής δομής τους. Κατά τη θερμική και τη θερμοχημική καταπόνηση μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως η ενέργεια εξόδου των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από το πλέγμα των μορίων είναι μικρότερη [1,2,10,24].

Κατά την θερμική καταπόνηση του μετασχηματιστή λαμβάνει χώρα αποπολυμερισμός της κυτταρίνης του μονωτικού χαρτιού του, σαν αποτέλεσμα υδρόλυσης, πυρόλυσης και οξειδώσεως. Οι χημικές αυτές αντιδράσεις επιταχύνονται από την αύξηση της θερμοκρασίας καθώς και από την περιεκτικότητα σε οξυγόνο και υγρασία. Αυτή η κινητική διαδικασία η οποία ενεργοποιείται από την θερμότητα, μπορεί να περιγράψει τη θερμική γήρανση του χαρτιού [87,88].

Ο Dakin τη δεκαετία του '50 υιοθέτησε την εξίσωση του Arrhenius για να περιγράψει τη θερμική γήρανση των ηλεκτρικών μονώσεων. Σύμφωνα με την εξίσωση Arrhenius ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιούνται οι χημικές αντιδράσεις δίδεται από τη σχέση [89]:

$$D = D_a e^{-W/kT} \quad (V-1)$$

Όπου D είναι ο ρυθμός στη θερμοκρασία T, D_a ο ρυθμός στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, W η ενέργεια ενεργοποίησης της κύριας αντίδρασης που λαμβάνει χώρα (δηλαδή η ενέργεια για τη μεταπήδηση του ηλεκτρονίου από την ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας), k η σταθερά Boltzmann, και T η απόλυτη θερμοκρασία σε °K.

Κατά τον Dakin, η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν συνέπεια να αυξάνεται ο ρυθμός των χημικών αντιδράσεων μέσα στη μόνωση. Έτσι θεώρησε ότι η σχέση μεταξύ του ρυθμού της θερμικής γήρανσης και της θερμοκρασίας έχει την ίδια μορφή με την εξίσωση Arrhenius [81,89,90].

Παρατηρούμε ότι το πρώτο μέλος της εξίσωσης 1.1-3 έχει ουσιαστικά ενσωματώσει την εξίσωση Arrhenius.

Οι μεταβολές τις οποίες υφίστανται τα διηλεκτρικά στη δομή τους κατά τη γήρανση, επιδρούν στις ηλεκτρικές ιδιότητες αυτών πολύ πριν συμβεί η καταστροφή της μόνωσης [1,69,91]. Η αγωγιμότητα ενός διηλεκτρικού αντιπροσωπεύει το άθροισμα όλων των μηχανισμών απωλειών του υλικού και είναι ένα μέτρο της συμπεριφοράς του διηλεκτρικού σαν μονωτικού [92]. Στις οδηγίες και κανονισμούς φόρτισης των μετασχηματιστών (IEC, ANSI και IEEE), σαν πρωταρχικός παράγοντας που σχετίζεται με το τέλος ζωής τους θεωρείται η θερμική καταπόνηση [93].

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι για χαμηλές πεδιακές εντάσεις, όπου η καταπόνηση του μονωτικού θεωρείται ότι είναι μόνο θερμικής φύσεως, η μελέτη της γήρανσης μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας την εξίσωση 1.1-3 [1,43].

Από τη σχέση αυτή έχουμε για την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα της μόνωσης:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\beta \Delta \theta} \quad (\text{V-2})$$

οπότε για την μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση της μόνωσης ισχύει:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} e^{\beta \Delta \theta} \quad (\text{V-3})$$

ή

$$R = \frac{R_0}{e^{\beta \Delta \theta}} = R_0 e^{-\beta \Delta \theta} \quad (\text{V-4})$$

Από τη σχέση αυτή γίνεται φανερό ότι κατά τη θερμική καταπόνηση η αντίσταση μονώσεως υφίσταται μια ραγδαία (εκθετική) μείωση με την αύξηση της θερμοκρασίας, πράγμα που κατέδειξαν οι μετρήσεις και οι γραφικές παραστάσεις αυτών. Ο ρυθμός της μείωσης της αντίστασης μονώσεως δίδεται από τον συντελεστή β.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.1 ο συντελεστής απωλειών tgδ μιας μόνωσης είναι βασικό κριτήριο αξιολόγησης αυτής και εκφράζει τις απώλειες ενέργειας που οφείλονται στη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής των διπόλων του μονωτικού υλικού, λόγω εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης, καθώς και στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού [1,2,10,14,47]. Από τη σχέση 1.1-6, αν θεωρήσουμε ότι η διηλεκτρική σταθερά ε του μονωτικού υλικού δεν μεταβάλλεται, έχουμε:

$$\text{tg} \delta = \frac{\sigma_0}{\varepsilon \omega} e^{\beta \Delta \theta} \quad (\text{V-5})$$

Προκύπτει δηλαδή ότι ο συντελεστής απωλειών tgδ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία (βλ. Σχήμα 1.1-3).

Από τις ληφθείσες σε διάφορες θερμοκρασίες μετρήσεις και τα αντίστοιχα διαγράμματα, προκύπτει ότι οι αντιστάσεις μονώσεως R_2 μεταξύ των τυλιγμάτων μέσης

τάσης (Μ.Τ.) και χαμηλής τάσης (Χ.Τ.), είναι σχεδόν πάντα μεγαλύτερες από τις αντιστάσεις R_1 που μετρήθηκαν μεταξύ του τυλίγματος Μ.Τ. και του Δοχείου. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από την κατά πολύ ισχυρότερη μόνωση η οποία μεσολαβεί στην πρώτη περίπτωση (δηλαδή μόνωση με κατά πολύ μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή) σε σχέση με την δεύτερη. Η περίπτωση του μετασχηματιστή N-21168, στην οποία συμβαίνει το αντίθετο, μπορεί ίσως να αποδοθεί σε μια αυξημένη συγκέντρωση νερού και υδροφιλικών οξέων στην κυτταρίνη και στο ότι η ισορροπία δεν είχε ακόμα επιτευχθεί εξ αιτίας της πρόσφατης (τότε) αλλαγής λαδιού.

2. Σχόλια επί των υπολογισθέντων συντελεστών β.

Από τις σχέσεις V-2 και V-5 προκύπτει ότι βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών, όπως είναι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα σ και ο συντελεστής απωλειών $\text{tg}\delta$, έχουν άμεση συνάρτηση με τον θερμικό συντελεστή β του υλικού και καθορίζονται από αυτόν. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι ο θερμικός συντελεστής β ενός μονωτικού υλικού περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού στην περιοχή όπου η καταπόνησή του μπορεί να χαρακτηριστεί κυρίως ως θερμική και επομένως είναι ένα χαρακτηριστικό μέγεθος του υλικού [43]. Ο συντελεστής αυτός μεταβάλλεται ελάχιστα με τον χρόνο ζωής του μονωτικού και γι' αυτό η τιμή του μπορεί να θεωρηθεί στην πράξη ότι είναι σταθερή [14,43,59].

Από τον πίνακα IV.10-2 προκύπτει σχετικά με τον θερμικό συντελεστή β , ότι:

- Είναι της ίδιας τάξεως μεγέθους για την μόνωση μεταξύ τυλίγματος μέσης τάσης και Δοχείου (β_1), καθώς και για την αντίσταση μονώσεως μεταξύ των τυλιγμάτων μέσης και χαμηλής τάσεως (β_2), για κάθε μετασχηματιστή.
- Στις περισσότερες περιπτώσεις αυξάνεται με το χρόνο μέτρησης (30 sec, 60 sec, 5 min, 10 min).
- Οι τιμές του β για χρόνους 5 min και 10 min είναι πολύ κοντά, υποδεικνύοντας έτσι την εκλογή των μετρήσεων στα 10 min για τον υπολογισμό του θερμικού συντελεστή β .
- Από τον πίνακα IV.x.2-2 και τα σχήματα IV.x.2-6 και 7 φαίνεται ότι οι τιμές των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 ενός μετασχηματιστή, υπολογισμένοι στα 10 min, δεν έχουν ευρεία διασπορά. Η διασπορά μειώνεται ακόμα περισσότερο καθώς η διαφορά θερμοκρασίας $\Delta\theta$ αυξάνει.
- Όλοι οι μετρηθέντες μετασχηματιστές παρουσιάζουν μικρή διασπορά των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 , πράγμα που γίνεται σαφέστερο καθώς το $\Delta\theta$ αυξάνει.

Μετά τα παραπάνω φαίνεται ότι η τιμή του συντελεστή β πρέπει να υπολογίζεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, γιατί σ' αυτές συμβαίνει κατά κύριο λόγο θερμική καταπόνηση του μετασχηματιστή, οπότε εμφανίζεται με σαφήνεια σταθερή τιμή του β .

VI. Η ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΛΕΙΠΟΜΕΝΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως οι θερμικοί συντελεστές β_1 και β_2 είναι χαρακτηριστικά μεγέθη της μόνωσης [43]. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε στην εργασία αυτή προτείνει τη χρήση των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 για την εκτίμηση του υπολειπόμενου χρόνου ζωής της μόνωσης ενός μετασχηματιστή διανομής, άρα του υπολειπόμενου χρόνου ζωής του ίδιου του μετασχηματιστή.

Στο μονωτικό σύστημα του μετασχηματιστή, το ρεύμα πολώσεως στο 1 min επηρεάζεται από την ποιότητα του λαδιού, ενώ στα 10 min το ρεύμα πολώσεως επηρεάζεται κυρίως από το χαρτί. Η υγρασία της κυτταρίνης επιδρά στην μακρού χρόνου (>100 s) πληροφορία, στις διηλεκτρικές μετρήσεις [53,62,94].

Έτσι, εφ' όσον ενδιαφέρει η κατάσταση του χαρτιού, πρέπει να επιλεγούν οι μετρήσεις στα 10 min για τον υπολογισμό των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 . Στα 10 min η αντίσταση μόνωσης εξαρτάται κυρίως από το ρεύμα διαρροής ή αγωγιμότητας.

Για τη μελέτη και την εκτίμηση της κατάστασης της μόνωσης του μετασχηματιστή, προτείνεται να υιοθετηθούν οι τιμές των θερμικών συντελεστών β_1 και β_2 οι οποίες υπολογίζονται βάσει των μετρήσεων στα 10 min για διαφορά θερμοκρασίας $\Delta\theta = 80$ °C. Ο χρόνος μετρήσεων των 10 min θεωρείται αναγκαίος διότι προηγούμενη εκτεταμένη έρευνα [31,37,39,52,53,61,62,66], όπως προαναφέρθηκε, έχει δείξει ότι στα 10 min το ρεύμα πολώσεως χαρακτηρίζεται κυρίως από το χαρτί. Εξ άλλου προτείνεται η διαφορά θερμοκρασίας $\Delta\theta=80$ °C, διότι αφ' ενός εμφανίζεται συχνά στην πράξη και προκαλεί θερμική γήρανση στη μόνωση, αφ' ετέρου η διασπορά των τιμών των συντελεστών είναι πολύ μικρή.

Κρίνεται σκόπιμο ότι οι θερμικοί συντελεστές β_1 και β_2 του μετασχηματιστή θα πρέπει να μετρούνται από τον κατασκευαστή στα 10 min και για $\Delta\theta = 80$ °C, μετά την κατασκευή του μετασχηματιστή και οι τιμές των β_1 και β_2 (όπως και το R_0) να αναγράφονται πάνω στην πινακίδα του μετασχηματιστή σαν χαρακτηριστικά μεγέθη του μονωτικού του συστήματος.

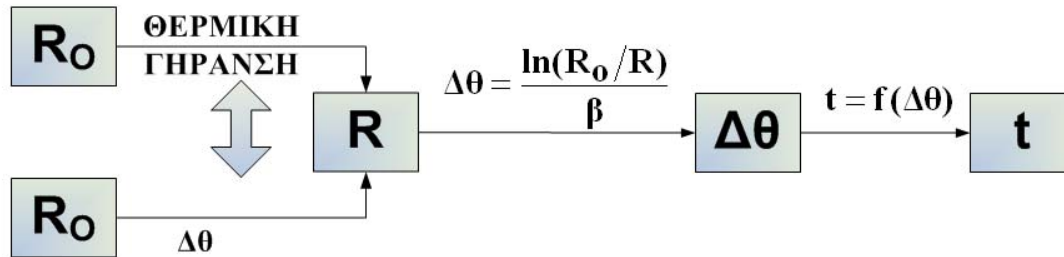
1. Η προτεινόμενη μέθοδος.

Η βασική ιδέα της προτεινόμενης μεθόδου είναι ότι: οι συνθήκες φόρτισης ή υπερφόρτισης κατά τη διάρκεια της ζωής ενός μετασχηματιστή, οι οποίες οδηγούν σε θερμική γήρανση και κατά συνέπεια σε μια μεταβολή της μονωτικής του αντιστάσεως από R_0 σε R , μπορούν να εξομοιωθούν με μια ισοδύναμη αύξηση της θερμοκρασίας, $\Delta\theta$, του μετασχηματιστή, η οποία επίσης να οδηγεί σε μια ίδια μεταβολή της αντίστασης της μόνωσής του. Η προσέγγιση αυτή είναι ρεαλιστική διότι η τιμή του β θεωρείται ότι είναι διαχρονικά σταθερή σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, π.χ. για καλώδια ελαίου-χάρτου είναι 0,021 [1,14].

Εάν δίδονται (από τον κατασκευαστή) οι θερμικοί συντελεστές β_1 και β_2 ενός μετασχηματιστή και γνωρίζει κανείς από μετρήσεις τη μεταβολή της αντίστασης της μόνωσής του (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος) κατά τη διάρκεια της ζωής του στο δίκτυο, τότε από τη σχέση III-3 μπορεί να υπολογίσει την αντίστοιχη ισοδύναμη αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta$.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο III, οι σχέσεις III-5, III-6 και III-7 δίδουν τη συνάρτηση $t = f(\Delta\theta)$ για το χαρτί, δηλαδή τη διάρκεια ζωής t του χαρτιού σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta$.

Με βάση τα παραπάνω και παίρνοντας σαν δεδομένο ότι η συνάρτηση $t = f(\Delta\theta)$ για το χαρτί, δίδει στην πράξη την κατάσταση της μόνωσης του μετασχηματιστή, τότε η σχέση III-3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του υπολειπόμενου χρόνου ζωής των μετασχηματιστών διανομής μέσω μέτρησης των μεγεθών R_0 , R και β .



Σχήμα VI.1-1 : Σχηματική παράσταση της βασικής ιδέας της προτεινόμενης μεθόδου.

2. Εφαρμογή της μεθόδου στους ήδη λειτουργούντες μετασχηματιστές.

Ένας κανόνας τον οποίο οι ηλεκτρικές εταιρείες έχουν για χρόνια χρησιμοποιήσει προκειμένου να καθορίσουν τις ελάχιστες επιτρεπόμενες τιμές της αντίστασης μόνωσης των μετασχηματιστών, είναι «ο κανόνας του ενός ΜΩ», ο οποίος βασίζεται σε μεμονωμένες μετρήσεις της αντίστασης μόνωσης. Ο κανόνας αυτός καθορίζει ότι: « Η αντίσταση μόνωσης του μετασχηματιστή πρέπει να είναι περίπου 1 ΜΩ για κάθε 1000 V της τάσεως λειτουργίας, με ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή το 1 ΜΩ» [59]. Σήμερα έχει γίνει αποδεκτό ότι η κατάσταση είναι πιο πολύπλοκη καθώς οι ελάχιστες τιμές της αντίστασης μόνωσης εξαρτώνται από το είδος του μονωτικού υλικού καθώς και από τις ηλεκτρικές διαστάσεις και τη γεωμετρία της υπό εξέταση συσκευής. Παρ' όλα αυτά, εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας εξακολουθούν να χρησιμοποιούν τον «κανόνα του ενός ΜΩ» κυρίως διότι λόγω της απλότητάς του είναι εύκολο να γίνει κατανοητός και να εφαρμοστεί από το κατώτερο τεχνικό προσωπικό, το οποίο έχει να ασχοληθεί με ένα τεράστιο αριθμό μετασχηματιστών διανομής [82].

Για τους μετασχηματιστές των 20 kV που μετρήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής η αντίσταση μόνωσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος δίδεται στον πίνακα IV.10-1. Οι θερμοκοί συντελεστές β_1 και β_2 που υπολογίστηκαν για τους μετασχηματιστές αυτούς στην μεγαλύτερη τιμή $\Delta\theta$ δίδονται στον πίνακα IV.10-3. Συνεπώς για αντίσταση μόνωσης 20 ΜΩ (λόγω ονομαστικής τάσεως 20 kV) μετά από χρόνο t μπορεί κανείς να υπολογίσει για τους άνω μετασχηματιστές την κατά περίπτωση μετασχηματιστή τιμή $\Delta\theta$. Έτσι, μετά τον προσδιορισμό της $\Delta\theta$ υπολογίζεται πλέον ο ελάχιστος υπολειπόμενος χρόνος ζωής των μετασχηματιστών, χρησιμοποιώντας τις μαθηματικές σχέσεις III-5, III-6 και III-7.

Τα αποτελέσματα δίδονται στον πίνακα VI-1.

Συμπληρωματικά λοιπόν προτείνεται για τους μετασχηματιστές που ήδη λειτουργούν στο δίκτυο, να υπολογίζεται (κατ' επέκταση του κανόνα του 1 ΜΩ) η διάρκεια ζωής για $R=20\text{M}\Omega$ και R_0 ίσο με τη μετρούμενη τιμή κατά την έναρξη εφαρμογής της μεθόδου.

Μεταση- ματιστής Έτος κατασκευής Ονομ. ισχύς	Μετρήσεις	β_1, β_2	R_0 (GΩ)	R (MΩ)	$\Delta\theta$ °C	Υπολειπό- μενος χρόνος ζωής
N-12988 1989 100 kVA	MT-Δοχείο	0,0466	33	20	159	1 μήνας
	MT-XT	0,0567	65	20	143	3 μήνες
N-21168 1998 100 kVA	MT-Δοχείο	0,0431	3,8	20	122	2 χρόνια
	MT-XT	0,0423	3,3	20	121	2 χρόνια
N-25804 2005 100 kVA	MT-Δοχείο	0,0768	120	20	113	4 χρόνια
	MT-XT	0,0783	180	20	116	3 χρόνια
N-21641 1999 50 kVA	MT-Δοχείο	0,0525	38	20	144	3 μήνες
	MT-XT	0,0552	43	20	139	5 μήνες
N-19694 1997 50 kVA	MT-Δοχείο	0,0613	7	20	96	19 χρόνια
	MT-XT	0,0626	13,5	20	104	9 χρόνια
N-18058 1995 50 kVA	MT-Δοχείο	0,0473	9,2	20	130	1 χρόνος
	MT-XT	0,0562	16	20	119	2 χρόνια
N-20428 1998 50 kVA	MT-Δοχείο	0,0449	4,5	20	121	2 χρόνια
	MT-XT	0,0533	8,3	20	113	4 χρόνια
N-16825 1994 50 kVA	MT-Δοχείο	0,0373	4,2	20	143	3 μήνες
	MT-XT	0,041	6,8	20	142	3 μήνες

Πίνακας VI-1 : Εκτίμηση του ελάχιστου υπολειπόμενου χρόνου ζωής των μετασηματιστών στην περίπτωση που, εξ αιτίας της γήρανσης, η αντίσταση μονώσεως πέσει στα 20 MΩ.

β_1 : Ο θερμικός συντελεστής της μόνωσης μεταξύ τυλίγματος Μέσης τάσεως και Δοχείου.

β_2 : Ο θερμικός συντελεστής της μόνωσης μεταξύ των τυλιγμάτων Μέσης και Χαμηλής τάσεως.

R_0 : Η μετρηθείσα αντίσταση μονώσεως του μετασηματιστή, στα 10 min, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

$R=20$ MΩ: Η υποθετική ελάχιστη επιτρεπόμενη αντίσταση μονώσεως του μετασηματιστή, σύμφωνα με τον εμπειρικό κανόνα.

$\Delta\theta$: Η αντιστοιχούσα ισοδύναμη αύξηση της θερμοκρασίας, υπολογισθείσα από την εξίσωση III-3.

VII. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.

Η εργασία αυτή αφορά στη θεωρητική και πειραματική έρευνα για την αξιολόγηση της κατάστασης της μόνωσης των μετασχηματιστών διανομής και την εκτίμηση του υπολειπόμενου χρόνου ζωής αυτών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των υπολογισμών, φαίνεται ότι οι θερμοκοί συντελεστές β_1 και β_2 είναι σημαντικές σταθερές του μετασχηματιστή και μπορούν να αξιοποιηθούν στην προσέγγιση της διάρκειας ζωής των μετασχηματιστών. Οι συντελεστές αυτοί θα πρέπει να δίδονται στην πινακίδα κάθε μετασχηματιστή μαζί με την αρχική αντίσταση μονώσεώς του R_0 . Έτσι, από την μέτρηση της αντίστασης μονώσεως η οποία μπορεί να γίνεται ετησίως στα πλαίσια των προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης, μπορεί να υπολογίζεται η θερμοκρασία λειτουργίας του μετασχηματιστή και ακολούθως η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του. Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να έχει εφαρμογή τόσο σε καινούριους μετασχηματιστές, όσο και σε μετασχηματιστές που ήδη λειτουργούν στο δίκτυο.

Η εργασία αυτή συνέβαλε επίσης στη διατύπωση ενός ισοδύναμου κυκλώματος το οποίο αποδίδει όλους τους παράγοντες λειτουργίας και γήρανσης του μετασχηματιστή.

Η μέθοδος της εργασίας αυτής για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής, εκτιμάται ότι μπορεί να έχει εφαρμογή σε κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή όπου το σύστημα μόνωσης αποτελείται από λάδι ή λάδι με χαρτί, που υφίσταται θερμική καταπόνηση, όπως π.χ. μετασχηματιστές μετρήσεων, ελαιοδιακόπτες, πυκνωτές κ.ά.

Περαιτέρω θα ερευνηθεί η εφαρμογή της μεθόδου σε εξοπλισμό των ηλεκτρικών δικτύων με διαφορετική μόνωση, αλλά και σε πειραματικές διατάξεις.

Ένα ακόμα ερευνητικό πεδίο που ανοίγει η παρούσα εργασία είναι ο προσδιορισμός των μεγεθών του ισοδύναμου κυκλώματος για ένα συγκεκριμένο μετασχηματιστή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μπούρκας Π.Δ., Καραγιαννόπουλος Κ.Γ., Μετρήσεις σε Βιομηχανικές Διατάξεις και Υλικά, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.
- [2] Δέρβος Κ.Θ., Μπούρκας Π.Δ., Εισαγωγή στα Ηλεκτρομονωτικά Υλικά, Εκδόσεις Σπουδαστικής Μέριμνας, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1991.
- [3] Sparks M., Mills D.L., Warren R., Holstein T., Maradudin A., Sham L.J., King D.F., Theory of Electron-avalanche Breakdown in Solids, Phys. Rev. B., Vol. 24, No 5, 1981, p.p. 3519-3536.
- [4] Zeller H.R., Breakdown and Prebreakdown Phenomena in Solid Dielectrics, IEEE Trans. Electr. Insul. EI-22 (1987) Vol. 2, p.p. 115-122.
- [5] Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A, Stathopoulos I.A., Enhanced Partial Discharges due to Temperature Increase in the Combined System of a Solid-Liquid Dielectric, IEEE Trans. Elec. Insul. Vol. 25, No 3, 1990, p.p. 469-474.
- [6] Moronis A.X., Bourkas P.D., Impact Ionization Effects at Interfaces between Solid Dielectrics and Insulation Oil or Air, during High Voltage Pulse Applications, International Journal Interface Science, Vol. 2, p.p. 281-287, 1994.
- [7] Bourkas P.D., Radiation emission phenomena in metal-dielectric-metal model under high electric fields, International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 15, No 2, p.p. 37-41, 1995.
- [8] Σταθόπουλος Ι.Α., Μπούρκας Π.Δ., Τοπαλής Φ.Β., Μετρήσεις και δοκιμές Υψηλών Τάσεων, Ε.Μ.Π., 1991.
- [9] Ψωμόπουλος Κ.Σ., Μη γραμμικά φαινόμενα σε μονωτές και επαφές διακοπών υψηλών τάσεων μέσω αναλογικών/ψηφιακών μετατροπέων, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2002.
- [10] Μπούρκας Π.Δ., Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων, Σημειώσεις Σεμιναρίου για Τεχνικούς της Δ.Ε.Η., (1996).
- [11] Πετρόπουλος Γ.Μ., Μαθήματα Υψηλών Τάσεων, Αθήνα, 1962.
- [12] Lewis T.J., Progress in Dielectrics, Vol. 1 Heywood, London, Wiley, New York, 1959.
- [13] Ritsko J., Electronic Properties of Polymers, ed. J. Mort and G. Pfister, New York, Wiley, 1982.
- [14] Lesch G., Lehrerbuch der Hochspannungstechnik, Berlin-Gottingen-Heidelberg, 1959.
- [15] Μαινιμενλής Χ., Μονώσεις Ηλεκτρικών Δικτύων Υψηλής Τάσεως, Πολυτεχνική Σχολή Πατρών, 1984.
- [16] Καγκαράκης Κ., Μαθήματα στα ηλεκτρομονωτικά υλικά, Τόμος Ι, Αθήνα, 1988.
- [17] Ραϊτίσιος Π.Ε., Μετρήσεις και Ειδικές Λειτουργίες Μετασχηματιστών, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 2002.
- [18] Σαμοϊλης Β.Γ., Μονωτικά λάδια (προέλευση-χρήση-χαρακτηριστικά-συντήρηση), Αθήνα, 1979.

- [19] Μπούρκας Π.Δ., Δερβος Κ., Καγιάφας Ε.Α., Φαινόμενα γήρανσης στο συνδυασμό «βακελίτης-μονωτικό λάδι» κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ζεύξης, *Τεχνικά Χρονικά*, Β, 1988, Τομ. 8, Τεύχος 4, σελ. 29-42.
- [20] Kuffel E., Zaengl W.S., *High Voltage Engineering Fundamentals*, Pergamon Press, Oxford, 1984.
- [21] 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, p.p. 24-27.
- [22] Μπούρκας Π.Δ., Καγιάφας Ε.Α., Συντελεστές ηλεκτρικής ανομοιογένειας στερεών μονωτικών, *Τεχνικά Χρονικά*, Β 1987, Τομ. 7, Τεύχος 7, σελ. 57-68.
- [23] Gemant A., Philipoff W., Die Funkstrecke mit Vorkondensator, *Zt. F. technische Physik*, Bd. 13, 1932, S. 425-430.
- [24] Μπούρκας Π.Δ., Καγιάφας Ε.Α., Σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής στερεών μονωτικών οργανικής σύνθεσης, *Τεχνικά Χρονικά Β*, 1987, Τομ. 7, Τεύχος 2, σελ. 29-57.
- [25] Dervos C., Bourkas P.D., Kayafas E.A, Potential Profile of Dielectrics during Impulse Application, *Physika Status Solidi (a)*, Vol. 112, 1989, p.p. 123-130.
- [26] Dervos C., Bourkas P.D., Kagarakis C.A., Charge Transport through a «metal-thick insulator-metal» Structure during Impulse Voltage Excitation, *Journal of Electrostatics*, Vol. 26, 1991, p.p. 121-132.
- [27] Σταθόπουλος Ι.Α., *Υψηλές Τάσεις*, Αθήνα, 1988.
- [28] Loeb L.B., *The Kinetic Theory of Gases*, New York, 1963.
- [29] Iedo M., Electrical Conduction and Carrier Traps in Polymeric Materials, *IEEE Trans. Electr. Insul.* EI-19 (1984), p.p. 162-178.
- [30] 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.
- [31] Gubanski S. M. et al, CIGRE Task Force 15.01.09, Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, May/June 2003-Vol. 19, No 3.
- [32] Prevost T.A., Oommen T.V., Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part I-History and Development, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, January/February 2006-Vol. 22, No 1.
- [33] Emsley A.M., Xiao X., Heywood R.J., Ali M., Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 2: Formation of furan products in insulating oil, *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol.147, No 3, May 2000.
- [34] Aubin J. et al., Working Group 09 (Thermal aspects of transformers) of Study Committee 12, (WG 12.09), Lifetime Evaluation of Transformers, *ELECTRA* No 150, October 1993.
- [35] Emsley A.M., Heywood R.J., Ali M., Xiao X., Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 4: Effects of ageing on the tensile strength of paper, *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol.147, No 6, November 2000.

- [36] Oommen T.V., Prevost T.A., Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part II- Maintaining Insulation Integrity and Life, IEEE Electrical Insulation Magazine, March/April 2006-Vol.22, No 2.
- [37] Saha T.K., Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.10, No 5, Oct. 2003.
- [38] Oommen T.V., On-line Moisture Sensing in Transformers, Proc. 20th Electr. Electronics Insul. Conf., Boston, USA,1991.
- [39] Yao Z.T., Saha T.K., Separation of Ageing and Moisture Impacts on Transformer Insulation Degradation by Polarisation Measurements, CIGRE 15-304, Session 2002.
- [40] Koch M., Improved Determination of Moisture in Oil-Paper-Insulations by Specialised Moisture Equilibrium Charts, Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, China, 2005.
- [41] Rouse T.O., Mineral Insulating Oil in Transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June - Vol.14, No3.
- [42] Fofana I., Wasserberg V., Borsi H. and Gockenbach E., The Effect of Temperature Gradient on the Dielectric Properties of Insulating Fluids, IEEE 1-4244-0333-2 International Symposium on Electrical Insulation, 2006.
- [43] Tareev B., Physics of Dielectric Materials, MIR Publishers, Moscow, 1979.
- [44] Vaughan A.S., Hoisier I.L., Sutton S.J., Davis F.J., On the Electrical Properties of Insulation Oils, IEEE 0-7803-9257-4 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005.
- [45] Dervos C.T., Paraskevas C.D., Skafidas P., Vassiliou P., Dielectric Characterization of Power Transformer Oils as a Diagnostic Life Prediction Method, IEEE Electrical Insulation Magazine, January/February 2005 - Vol. 21, No 1.
- [46] Κριτωτάκης Κ.Ν., Σαμοϊλης Β.Γ., Σαμοϊλης Κ.Β., Πρόσφατη πρόοδος στη διάγνωση της κατάστασης μετασχηματιστών ισχύος, CIGRE, Ηράκλειο, σύννοδος 1992.
- [47] Bolhuis J.P., Gulski E., Smit J.J., Monitoring and Diagnostic of Transformer Solid Insulation, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No 2, April 2002.
- [48] Herman H., Shenton M.J., Stevens G.C., A New Approach to Condition Assessment and Lifetime Prediction of Paper and Oil Used as Transformer Insulation, IEEE 0-7803-6352-3 International Conference on Solid Dielectrics, 2001.
- [49] Darveniza M., Saha T.K., Hill D.J.T., Le T.T., Investigations into Effective Methods for Assessing the Condition of Insulation in Aged Power Transformers, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.13, No 4, 1998.
- [50] Saha T.K., Darveniza M., Hill D.J.T., Le T.T., Electrical and Chemical Diagnostics of Transformers Insulation-Part A: Aged Transformer Samples, IEEE Trans.on Power Delivery, Vol. 12, No 4, 1997.
- [51] Saha T.K., Darveniza M., Hill D.J.T., Le T.T., Electrical and Chemical Diagnostics of Transformers Insulation-Part B: Accelerated Aged Insulation Samples, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No 4, 1997.

- [52] Saha T.K., Review of Time-Domain Polarization Measurements for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 18, No 4, October 2003.
- [53] Saha T.K., Purkait P., Investigation of Polarization and Depolarization Current Measurements for the Assessment of Oil-paper Insulation of Aged Transformers, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No 1, February 2004.
- [54] IEEE, IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-immersed Transformers, IEEE Standard C57.104-1991, pp1-30,1991.
- [55] Yan Z., Dong M., Shang Y., Muhr M., Ageing Diagnosis and Life Estimation of Paper Insulation for Operating Power Transformer, IEEE 0-7803-8348-6 International Conference on Solid Dielectrics, 2004.
- [56] Pahlavanpour B., Martins M.A., and DePablo A., Experimental Investigation into the Thermal-ageing of Kraft Paper and Mineral Insulating Oil, IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul., Boston, MA, USA, pp.341-345, 2002.
- [57] Emsley A.M., Stevens G.C., A Reassessment of the Low Temperature Thermal Degradation of Cellulose, 6th Intern. Conf. Dielect. Materials, Measur. Appl., UK, pp. 229-232, 1992.
- [58] IEC, IEC 61198 (1993-09), Mineral Insulating Oils-Methods for the Determination of 2-furfural and Related Compounds, 1993.
- [59] Μουσλόγλου Ε.Μ., Δοκιμαί και μετρήσεις επί ηλεκτρικών μονώσεων, Δ.Ε.Η., 1975.
- [60] CIGRE Task Force 15.01.09, Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June 2003, Vol.19, No 3.
- [61] Saha T.K., Purkait P., Investigating some Important Parameters of the PDC Measurement Technique for the Insulation Condition Assessment of Power Transformer, 6th International Power Engineering Conference, Singapore, 2003.
- [62] Koch M., Tenbohlen S., Diagnostics of Oil-Paper-Insulations Using Relaxation Currents, Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, China, 2005.
- [63] Saha T.K., Purkait P., Investigation of an Expert System for the Condition Assessment of Transformer Insulation Based on Dielectric Response Measurements, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No 3, July 2004.
- [64] Fitzgerald A.E., Kingsley C. Jr, Kusko A., Electric Machinery, McGraw-Hill, Third Edition, 1971.
- [65] Νικολόπουλος Π.Ν., Υψηλαί Τάσεις, Τόμος Α', Αθήνα 1976.
- [66] Saha T.K., Prithwiraj P., Muller F., Deriving an Equivalent Circuit of Transformers Insulation for Understanding the Dielectric Response Measurements, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No 1, January 2005.
- [67] AEMC INSTRUMENTS, Understanding Insulation Resistance Testing, 2005.
- [68] Zaengl W.S., Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations, IEEE Electrical Insulation Magazine, September/October 2003, Vol.19, No 5.

- [69] Wang H., Butler K.L., Modeling Transformers With Internal Incipient Faults, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No 2, April 2002.
- [70] Jota P.R.S., Islam S.M., Jota F.G., Modeling the Polarization Spectrum in Composite Oil/Paper Insulation Systems, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No 2, April 1999.
- [71] Tang W.H., Spurgeon K., Wu Q.H., Richardson Z.J., An Evidential Reasoning Approach to Transformer Condition Assessments, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No 4, October 2004.
- [72] Lachman M.F., Griffin P.J., Walter W., Wilson A., Real-Time Dynamic Loading and Thermal Diagnostic of Power Transformers, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 18, No 1, January 2003.
- [73] Muthanna K.T., Sarkar A., Das K., Waldner K., Transformer Insulation Life Assessment, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 21, No 1, 2006.
- [74] Montanari G.C., Simoni L., Aging Phenomenology and Modeling, IEEE Trans. on El. Ins., Vol.28, No 5, 1993.
- [75] Montanari G.C., Aging and Life Models for Insulation Systems Based on PD detection, IEEE Trans. Diel. El. Insul., Vol. 2, No 4, 1995.
- [76] Simoni L., A General Phenomenological Life Model for Insulating Materials under Combined Stresses, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No 2, 1999.
- [77] Mazzanti G., Montanari G.C., Dissado L.A., A Space-charge Life Model for ac Electrical Aging of Polymers, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No 6, 1999.
- [78] Crine J.P., A molecular Model to Evaluate the Impact of Aging on Space Charges in Polymer Dielectrics, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No 5, 1997.
- [79] Crine J.P., On the Interpretation of Some Electrical Aging and Relaxation Phenomena in Solid Dielectrics, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No 6, 2005.
- [80] Mazzanti G., Montanari G.C., Dissado L.A., Electrical Aging and Life Models : The Role of Space Charge, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No 5, 2005.
- [81] Montanari G.C., Mazzanti G., Simoni L., Progress in Electrothermal Life Modeling of Electrical Insulation during the Last Decades, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No 5, 2002.
- [82] ΔΕΗ Α.Ε., Οδηγία Διανομής Νο 20, Τεχνικές Οδηγίες Μετασχηματιστών, Αθήνα, 1990.
- [83] Peterchuck D., Pahwa A., Sensitivity of Transformer's Hottest-Spot and Equivalent Aging to Selected Parameters, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No 4, October 2002.
- [84] Susa D., Lehtonen M., Nordman H., Dynamic Thermal Modeling of Distribution Transformers, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No 3, July 2005.

- [85] Tang W.H., Wu Q.H., Richardson Z.J., A Simplified Transformer Thermal Model Based on Thermal-Electric Analogy, IEEE Trans. on Power Delivery Vol. 19, No 3, July 2004.
- [86] Pradhan M.K., Ramu T.S., Estimation of the Hottest Spot Temperature (HST) in Power Transformers Considering Thermal Inhomogeneity of the Windings, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No 4, October 2004.
- [87] Lundgaard L.E., Hansen W., Linhjell D., Painter T.J. , Ageing of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No 1, 2004.
- [88] Emsley A.M. and Stevens G.C., Review of Chemical Indicators of Degradation of Cellulosic Electrical Paper Insulation in Oil-filled Transformers, Proc. Inst. Elect. Eng., Sci. Meas. Technol., Vol.141, No 5, 1994.
- [89] Gjaerde A.C., Multifactor Ageing Models – Origin and Similarities, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No 1, 1997.
- [90] Linzey W.G. and Bruning A.M., Report on 2000 CEIDP Workshop on Multifactor Insulation Ageing, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.18, No 5, 2002.
- [91] Bartnikas R., Engineering dielectrics volume IIB- Electrical properties of solid insulating materials: Measurement techniques, Philadelphia, PA, Special Tech. Pub. 926, 1987.
- [92] Anderson J.C., Dielectrics, London, Chapman and Hall LTD, 1963.
- [93] Wang M. and Vandermaar A.J., Srivastava K.D., Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, No 6, 2002.
- [94] Bhumiwat S.A., The Latest On-Site Non-Destructive Technique for Insulation Analysis of Electrical Power Apparatus, presented at Weidmann-ACTI Annual Technical Conference, Sacramento, USA, 2004.