



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΣΙΑΚΤΣΗΡΑ Δ. ΙΩΑΝΝΗ

Επιβλέπων : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Θ. ΔΕΡΒΟΣ
Καθ. ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ/κων & Μηχ/κων Υπολογιστών

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΣΙΑΚΤΣΗΡΑ Δ. ΙΩΑΝΝΗ

Επιβλέπων : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Θ. ΔΕΡΒΟΣ
Καθ. ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ/κων & Μηχ/κων Υπολογιστών

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

.....
Κ.Θ. Δέρβος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π. Βασιλείου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Κ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Δ. Τσιακτσήρας
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Ιωάννης Δ. Τσιακτσήρας

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή μελετώνται οι διηλεκτρικές ιδιότητες των ηλεκτρομονωτικών ελαίων και οι διάφορες χρήσεις τους σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Στην ανάλυση της χρήσης των ηλεκτρομονωτικών ελαίων, δίνεται έμφαση στη συσκευή του μετασχηματιστή ισχύος, λόγω της λειτουργικής και οικονομικής σημασίας του για το ηλεκτρικό δίκτυο. Γίνεται αναφορά στους βασικούς λόγους αστοχίας του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που χρησιμοποιεί λάδι για ηλεκτρομόνωση και σύντομη παρουσίαση της εξέλιξης των ηλεκτρομονωτικών ελαίων.

Στη συνέχεια, ανιχνεύονται πειραματικά τα φαινόμενα πόλωσης που εισάγονται από την ρύπανση νανοσωματιδίων σε παραφινέλαιο, ένα οργανικό μονωτικό υγρό, που αποτελεί το κύριο συστατικό των ηλεκτρομονωτικών ελαίων και εμφανίζει ανάλογη ηλεκτρική συμπεριφορά. Χρησιμοποιήθηκαν τεχνητά δείγματα τα οποία περιελάμβαναν κόνιες από τα οξείδια CuO , Cu_2O και Fe_2O_3 σε συγκεντρώσεις έως 5% w/v στο υγρό παραφινέλαιο. Η ανάμειξη έγινε με τη βοήθεια υπερήχων. Εξετάστηκε η σχετική διηλεκτρική σταθερά και η εφαπτομένη απωλειών ($\tan\delta$) των μιγμάτων και του καθαρού υγρού δείγματος αναφοράς στην περιοχή συχνοτήτων 20 Hz έως 1 MHz, με τη μέθοδο της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας στο πεδίο της συχνότητας. Στην εργασία αυτή μελετάται η εξάρτηση των διηλεκτρικών μεγεθών από τη σύσταση και τη μορφολογία του δείγματος.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Υγρά μονωτικά, Διηλεκτρική πόλωση, Διηλεκτρική χαλάρωση, PCBs, Διηλεκτρική Φασματοσκοπία, Διηλεκτρική σταθερά, Εφαπτομένη απωλειών, Υπέρηχοι, Ορυκτέλαια, Διηλεκτρική διάσπαση, Οξείδιο του χαλκού (II), Οξείδιο του χαλκού (I), Οξείδιο του σιδήρου (III)

ABSTRACT

This work describes the dielectric properties of electrical insulating oils and their basic electric power applications. In applications' analysis, we emphasize to the power transformer due to its operational role and its significant cost in the electric grid. We also describe the main causes of failure for oil filled electrical equipment (OFEE) and a presentation of the electrical insulating oils' process.

This work investigates polarization phenomena induced by nanoparticle inclusions in paraffin oil, an insulating organic liquid. Fine metal oxide powders and nanopowders of CuO, Cu₂O and Fe₂O₃ were tested at concentrations up to 5% w/v in the liquid matrix. Emulsification was attained by ultrasound treatment to avoid agglomerations. The relative dielectric constant and loss tangent ($\tan\delta$) of both pure oil and emulsions were recorded with dielectric spectroscopy method, in the 20 Hz-1 MHz frequency range. Dielectric spectroscopy results are given for the samples, relating the dielectric measurements to the sample composition and morphology.

KEYWORDS

Liquid dielectrics, Dielectric polarization, Dielectric relaxation, PCBs, Dielectric spectroscopy, Dielectric constant, Loss tangent, ultrasound, Mineral oil, Dielectric breakdown, cupric oxide, cuprus oxide, ferric oxide

1 ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1 ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	7
2 ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	9
3 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	11
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
3.2 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.....	12
3.3 Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ ΠΕΔΙΑ.....	12
3.4 ΠΟΛΩΣΗ ΚΑΙ ΠΟΛΩΣΙΜΟΤΗΤΑ.....	14
3.5 ΕΙΔΗ ΠΟΛΩΣΗΣ.....	15
3.6 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΧΑΛΑΡΩΣΗ-ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ DEBYE.....	17
3.7 ΠΟΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΗ ΠΟΛΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	18
3.8 ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	19
3.8.1 Κριτήρια επιλογής ηλεκτρομονωτικού υλικού.....	20
3.8.2 Διηλεκτρική διάσπαση.....	21
4. ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ.....	23
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	23
4.2 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ.....	24
4.2.1 Αργό πετρέλαιο.....	24
4.2.2 Παραγωγή μονωτικών λαδιών.....	25
4.3 ΕΙΔΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ.....	26
4.3.1 Ορυκτέλαια.....	26
4.3.2 Έλαια που περιέχουν PCBs.....	27
4.3.3 Άλλα ηλεκτρομονωτικά έλαια.....	29
4.3.3.1 Υγροί εστέρες.....	29
4.3.3.2 Υγρά σιλικόνης.....	29
4.3.3.3 Φυτικά έλαια.....	29
4.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.....	32
4.4.1 Γενικά.....	32
4.4.2 Ηλεκτρονική διάσπαση.....	32
4.4.3 Μηχανισμός αιωρούμενων σωματιδίων.....	33
4.4.4 Διάσπαση κοιλότητας.....	33
4.4.5 Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση.....	34
5. ΧΡΗΣΕΙΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ.....	35
5.1 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ.....	35
5.1.1 Εισαγωγή.....	35
5.1.2 Δομή μετασχηματιστών.....	36
5.1.3 Μετασχηματιστές ισχύος.....	38
5.1.3.1 Βασικά κατασκευαστικά μέρη μετασχηματιστή ισχύος λαδιού.....	39
5.1.3.2 Μονωτικό χαρτί.....	41
5.1.4 Χρόνος ζωής μετασχηματιστή.....	42
5.1.4.1 Αιτίες αστοχίας του μετασχηματιστή.....	42
5.1.4.2 Επίδραση της γήρανσης του λαδιού στη μιγαδική διηλεκτρική σταθερά.....	44
5.2 ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	45
5.3 ΠΥΚΝΩΤΕΣ.....	46
5.4 ΚΑΛΩΔΙΑ.....	47

5.5 ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ.....	50
5.6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΛΑΙΩΝ.....	51
5.6.1 Φυσικοχημικοί έλεγχοι.....	51
5.6.2 Αεριοχρωματογραφία.....	54
5.6.3 Διηλεκτρική Φασματοσκοπία	55
5.7 ΣΚΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	56
6. ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ.....	57
6.1 ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	57
6.1.1 Γέφυρα μέτρησης LCR (HP 4284A).....	57
6.1.2 Κελί διηλεκτρικών μετρήσεων ρευστών (Agilent 16452A).....	58
6.1.3 Καλώδιο σύνδεσης.....	59
6.2 ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣΜΙΞΕΩΝ.....	60
6.2.1 Επιλογή υλικών.....	60
6.2.2 Οξείδιο του χαλκού (II).....	60
6.2.3 Οξείδιο του χαλκού (I).....	62
6.2.4 Οξείδιο του σιδήρου (III).....	63
6.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	65
6.3.1 Γενικά.....	65
6.3.2 Ανάμειξη πρώτων υλών.....	65
6.4 Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	66
6.4.1 Διηλεκτρικές μετρήσεις σε θερμοκρασία δωματίου.....	66
6.4.2 Παράμετροι διηλεκτρικών μετρήσεων.....	67
6.4.3 Επεξεργασία μετρήσεων.....	67
6.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	67
6.5.1 Μοντελοποίηση διάταξης.....	67
6.5.2 Μοντελοποίηση διηλεκτρικού.....	70
6.5.2.1 Μακροσκοπική θεώρηση: επιφανειακή αγωγιμότητα και πόλωση όγκου.....	70
6.5.2.2 Μικροσκοπική θεώρηση : ενεργειακές ζώνες και καταστάσεις επιφάνειας.....	71
7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	73
7.1 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ.....	73
7.2 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ- CuO.....	74
7.3 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ- Cu ₂ O.....	78
7.4 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ- Fe ₂ O ₃	81
7.5 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ - Cu ₂ O – CuO.....	85
7.6 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ - Cu ₂ O – Fe ₂ O ₃	87
7.7 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ -Cu ₂ O-CuO-Fe ₂ O ₃	89
8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	92
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	96

2. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη των διηλεκτρικών ιδιοτήτων και των φαινομένων πόλωσης που παρουσιάζονται, όταν σε μονωτικό λάδι προσθέσουμε κόκκους ημιαγώγιμων υλικών και συγκεκριμένα οξειδίων. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τα είδη των μονωτικών ελαίων που υπάρχουν, η μονωτική χρήση τους σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, οι μηχανισμοί διάσπασης των υγρών μονωτικών και τα προβλήματα που προκύπτουν από αστοχία υλικού.

Με βάση τα παραπάνω και την ερευνητική εργασία που έχει γίνει, έγιναν πειραματικές μετρήσεις προκειμένου να παρατηρηθεί η αλλαγή που προκύπτει στο λάδι αν αναμιξούμε οξείδια του χαλκού και του σιδήρου. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο πώς αυτά επιδρούν ως παραπροϊόντα ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (π.χ δοχείο και τυλίγματα μετασχηματιστή) αλλά και το πώς ενδεχόμενη χρήση τους σε άλλες ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές μπορούν να βελτιώσουν την αντοχή, την αξιοπιστία και την απόδοση της ηλεκτρομόνωσης.

Αναλυτικά :

Το **Κεφάλαιο 3** αναφέρεται στα διηλεκτρικά υλικά, τις ιδιότητές τους και τους μηχανισμούς πόλωσής τους, καθώς και στα κριτήρια επιλογής των ηλεκτρομονωτικών υλικών. Γίνεται επίσης αναφορά, στο φαινόμενο της διηλεκτρικής χαλάρωσης και αναφέρεται το μοντέλο του Debye.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα μονωτικά έλαια, δηλαδή ο τρόπος παρασκευής τους, τα είδη τους και οι κύριοι μηχανισμοί διάσπασής τους.

Στο **Κεφάλαιο 5** περιγράφονται οι εφαρμογές που βρίσκουν τα μονωτικά λάδια σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό (μετασχηματιστές, πυκνωτές, καλώδια, διακόπτες, μονωτήρες διέλευσης). Δίνεται μια έμφαση στους μετασχηματιστές , στις αιτίες αστοχίας τους, στα προβλήματα που δημιουργεί η καταστροφή τους. Επίσης, αναφέρονται οι βασικοί ποιοτικοί έλεγχοι που γίνονται για να εξασφαλισθεί η αντοχή και η ποιότητα του λαδιού στις ηλεκτρικές καταπονήσεις.

Στο **Κεφάλαιο 6** δίνεται βάρος στη μελέτη των συντελεστών του πειράματος και στη μοντελοποίηση της μεθόδου της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας. Περιγράφονται αναλυτικά τα όργανα μετρήσεων και τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε. Επίσης περιγράφεται η πειραματική διαδικασία και μια μοντελοποίηση του διηλεκτρικού μίγματος.

Το **Κεφάλαιο 7** αναλύει τα αποτελέσματα των μετρήσεων και την επίδραση της μορφολογίας και των ιδιοτήτων των οξειδίων. Γίνεται προσπάθεια να ανιχνευθούν τα φαινόμενα διηλεκτρικής πόλωσης και χαλάρωσης και να παρουσιαστούν τυχόν χρήσεις των μιγμάτων σε εφαρμογές.

Τέλος, σε αυτό το σημείο νιώθω την υποχρέωση να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας και συγκεκριμένα :

Τον κ. Κωνσταντίνο Δέρβο, Καθηγητή του Τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών του Ε.Μ.Π. για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τον κ. Ιωάννη Μέργο, Διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη καθοδήγηση του, την ουσιαστική βοήθεια του, το χρόνο που διέθεσε και την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Την οικογένειά μου για την κάθε είδους υποστήριξη που μου παρείχε σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Τους φίλους Σάββα Στέφανο, Μουλό Χρήστο, Μαυρίδη Αντρέα για τη κάθε είδους βοήθεια που μου παρείχαν.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011
Ιωάννης Δ. Τσιακτσής

*" Αυτοί που μας πήραν το βιβλίο από το χέρι,
μας κατηγορούν ότι μείναμε αδιάβαστοι... "*

Μπέρλτολτ Μπρέχτ

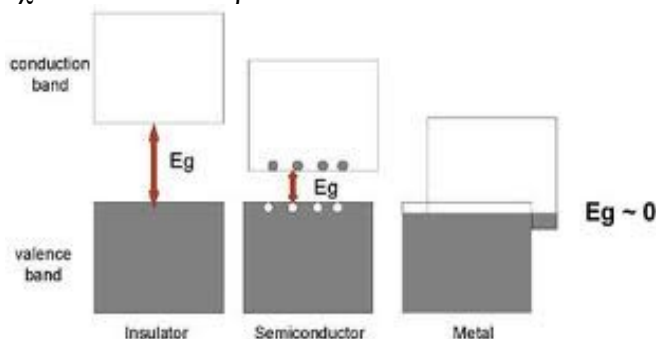
3. ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως γνωρίζουμε, τα υλικά, σε σχέση με την ικανότητα τους να επιτρέπουν κίνηση ηλεκτρικών φορέων, χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες αγωγούς, ημιαγωγούς, μονωτές. Επίσης, με βάση τη φυσική τους κατάσταση χωρίζονται σε υγρά, στερεά και αέρια. Οι μονωτές με τους οποίους θα ασχοληθούμε δεν έχουν τη δυνατότητα αγωγής ηλεκτρικών φορτίων.

Ένας ασφαλής τρόπος διαχωρισμού των υλικών είναι το ενεργειακό διάκενο E_g που έχει το υλικό. Το ενεργειακό διάκενο αποτελεί την ενέργεια που διαχωρίζει τη ζώνη σθένους από τη ζώνη αγωγιμότητας. Η ζώνη σθένους περιλαμβάνει τα ηλεκτρόνια τα οποία συμβάλουν στη συνοχή του υλικού, ενώ η ζώνη αγωγιμότητας τα ηλεκτρόνια που συμβάλουν και προσδιορίζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου. Πρακτικά, το ενεργειακό διάκενο αντιστοιχεί στην απαιτούμενη ενέργεια προκειμένου να διασπασθεί ο χημικός δεσμός που υπάρχει μεταξύ των ατόμων του υλικού. Στην περίπτωση των μονωτικών υλικών το εύρος των ενεργειακών διακενών κυμαίνεται μεταξύ 2,5eV και 10eV, ενώ τα αντίστοιχα των ημιαγωγών μεταξύ 0,5eV και 2,5eV.

Οι χημικοί δεσμοί που συνήθως υπάρχουν στα μονωτικά υλικά είναι είτε ομοιοπολικοί είτε ιοντικοί. Στα μονωτικά υλικά οι ενέργειες με τις οποίες συνδέονται τα άτομα μεταξύ τους είναι σαφώς μεγαλύτερες, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των ημιαγωγών. Για τα ομοιοπολικά μονωτικά υλικά η ενέργεια ανά χημικό δεσμό είναι μεταξύ 2,5eV και 5eV, ενώ για τα ιοντικά μεταξύ 5eV και 10eV. Κατά πλειοψηφία, ανάμεσα σε ιοντικά και ομοιοπολικά, για μονωτήρες θα επιλέγαμε ιοντικά εφόσον δεν είναι βαριά κι αυτό λόγω του ότι τα ομοιοπολικά χαλάνε ευκολότερα.



Σχ.3. 1 Διάταξη των ενεργειακών ζωνών

Η εργασία αυτή θα ασχοληθεί με τα διηλεκτρικά υλικά, δηλαδή με τα μονωτικά υλικά τα οποία λόγω της δομής τους έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικού φορτίου. Αν ένα διηλεκτρικό υλικό τοποθετηθεί σε ηλεκτρικό πεδίο τότε τα θετικά φορτία ωθούνται προς την κατεύθυνση του πεδίου ενώ τα αρνητικά προς την αντίθετη. Επειδή συνεπώς συμβαίνει ένας διαχωρισμός θετικών και αρνητικών φορτίων σε κάθε στοιχειώδη όγκο του υλικού, λέγεται ότι, "επάγεται διπολική ροπή". Όταν αρθεί το εξωτερικό πεδίο, η επαγόμενη διπολική ροπή καταστρέφεται καθώς τα φορτία επιστρέφουν στις αρχικές τους θέσεις. Η διεργασία αυτή ονομάζεται πόλωση, ενώ το πολωμένο υλικό παράγει κι αυτό ένα ηλεκτρικό πεδίο και τροποποιεί το εξωτερικό πεδίο που αρχικά δημιούργησε την πόλωση.

3.2 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Χαρακτηριστικό ενός διηλεκτρικού υλικού είναι η διηλεκτρική του επιτρεπτότητα ϵ' , η οποία δείχνει ως ένα βαθμό τη δυνατότητα αποθήκευσης φορτίου στο υλικό αυτό όταν εφαρμοσθεί ηλεκτρικό πεδίο. Για να ορίσουμε το μέγεθος αυτό θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο του πυκνωτή. Στην περίπτωση του πυκνωτή παράλληλων πλακών χωρίς διηλεκτρικό έχουμε από το νόμο του Gauss ότι

$$\epsilon_0 \oint E ds = \epsilon_0 \cdot E_0 \cdot S = Q \rightarrow E_0 = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot S}$$

με $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ Cb}^2$ τη διηλεκτρική σταθερά του κενού

Όταν ο πυκνωτής έχει διηλεκτρικό ο νόμος του Gauss γράφεται

$$\epsilon_0 \cdot \oint E ds = \epsilon_0 \cdot E \cdot S = Q - Q' \rightarrow E = \frac{Q - Q'}{\epsilon_0 \cdot S}$$

Η εισαγωγή διηλεκτρικού εξασθενίζει το πεδίο στην τιμή E και ο λόγος των δύο τιμών λέγεται ηλεκτρική διαπερατότητα ϵ' του μέσου ή διηλεκτρική σταθερά.

$$\epsilon' = \frac{E_0}{E}$$

Η αιτία είναι η εμφάνιση φορτίων στην επιφάνεια του διηλεκτρικού αναγκάζοντας την άφιξη νέων φορτίων από τη μπαταρία για να κρατήσει σταθερή τη διαφορά δυναμικού.

3.3 Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ ΠΕΔΙΑ

Σε χρονομεταβλητές περιπτώσεις (π.χ. Ημιτονοειδής διέγερση) τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία εμφανίζονται ταυτόχρονα. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορεί να διαδοθεί μέσα στον ελεύθερο χώρο ή μέσα από τα υλικά. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να υπάρξουν σε διάφορα μήκη κύματος, κι επειδή το μήκος κύματος είναι αντίστροφο της συχνότητας ($\lambda = c/f$), αυξανόμενης της συχνότητας θα έχουμε μικρότερα μήκη κύματος.

Πολλά από τα θέματα που αναφέρονται στη διάδοση των κυμάτων συνδέονται με τη διηλεκτρική σταθερά των υλικών. Για παράδειγμα, κατά τη μετάβαση ενός κύματος από τον ελεύθερο χώρο προς το εσωτερικό ενός υλικού, παρουσιάζεται μία μεταβολή της μιγαδικής αντίστασης στη διεπιφάνεια, και κατά συνέπεια, ένα μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανακλάται ενώ το υπόλοιπο διαθλάται και μεταδίδεται μέσα στο υλικό. Στο εσωτερικό του υλικού η ταχύτητα διάδοσης και το μήκος κύματος ελαττώνονται. Σε ένα χαλαρό υλικό αναμένεται ότι κατά την εισαγωγή θα υπάρξει απώλεια ενώ κατά τη μεταφορά του κύματος στο εσωτερικό απόσβεση.

Ένα υλικό μπορεί να αναπτύξει αρκετούς διηλεκτρικούς μηχανισμούς οι οποίοι αναμένεται να συμβάλλουν στη διαμόρφωση της διηλεκτρικής του σταθεράς. Τα διηλεκτρικά εμφανίζουν μια χωρική κατανομή του φορτίου, η οποία μπορεί να μεταβληθεί κατά την επιβολή ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Τα φορτία αυτά πολώνονται για την αντιστάθμιση του ηλεκτρικού πεδίου, οπότε τα θετικά και τα αρνητικά φορτία προσανατολίζονται σε αντίθετες κατευθύνσεις.

Για να υπολογίσουμε τη διηλεκτρική διαπερατότητα σε AC σήμα θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο του πυκνωτή. Όταν ένας πυκνωτής (χωρίς διηλεκτρικό) χωρητικότητας C_0 συνδεθεί με πηγή εναλλασσόμενης τάσης $V=V_0 \cdot e^{j\omega t}$ με κυκλική συχνότητα $\omega=2\pi f$ αποκτά φορτίο $Q= C_0 \cdot V$ ενώ το ρεύμα φόρτισής του είναι

$$I_{\text{charge}}=j\omega \cdot C_0 \cdot V$$

Μεταξύ ρεύματος και τάσης υπάρχει διαφορά φάσης $\pi/2$ με το ρεύμα να προηγείται της τάσης.

Όταν όμως ο πυκνωτής περιέχει διηλεκτρικό υλικό ανάμεσα στους οπλισμούς του, τότε αυξάνει η χωρητικότητά του και γίνεται

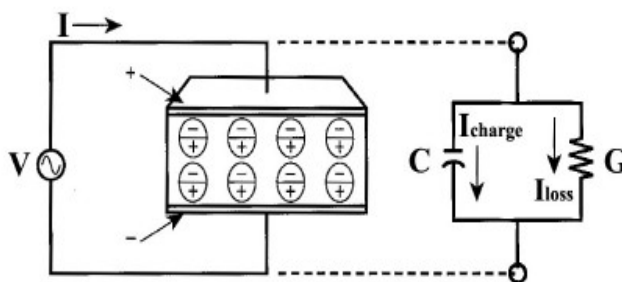
$$C=\epsilon_r' \cdot C_0$$

Συγχρόνως όμως εμφανίζεται εκτός από το ρεύμα φόρτισης I_{charge} και ένα ρεύμα διαρροής I_{loss} του διηλεκτρικού, σε φάση με την τάση

$$I_{\text{loss}}=G \cdot V$$

όπου G η αγωγιμότητα του υλικού. Τότε το ολικό ρεύμα που διαρρέει το μονωτικό υλικό θα είναι:

$$I=I_{\text{charge}}+I_{\text{loss}}=V \cdot (j\omega C+G)$$



Σχ.3. 2 Ισοδύναμο κύκλωμα του πυκνωτή παράλληλων πλακών με διηλεκτρικό

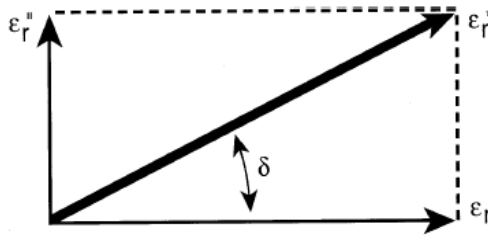
Θέτοντας $G=\omega \cdot C_0 \cdot \epsilon_r''$ έχουμε

$$I=V \cdot (j\omega C_0 \epsilon_r' + \omega C_0 \epsilon_r'')= V \cdot (j\omega C_0) \cdot (\epsilon_r' - j\epsilon_r'')=V \cdot (j\omega C_0) \cdot \epsilon_r^*$$

όπου $\epsilon_r^*=\epsilon_r' - j\epsilon_r''$ και $\epsilon_r^*=\epsilon^*/\epsilon_0$

Η σχετική μιγαδική διαπερατότητα είναι ένα αδιάστατο μέγεθος, που συγκρίνει τη μιγαδική διαπερατότητα (ϵ^*) ενός υλικού με την διαπερατότητα του κενού ($\epsilon_0=8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m). Περιγράφει την αλληλεπίδραση ενός υλικού με το ηλεκτρικό πεδίο και αποτελείται από το πραγματικό μέρος (ϵ_r'), που αντιπροσωπεύει την αποθήκευση φορτίου και από το φανταστικό μέρος (ϵ_r'') που αντιπροσωπεύει τις απώλειες.

Το πραγματικό μέρος είναι ένα μέτρο για το πόση ενέργεια από ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο αποθηκεύεται από ένα υλικό και συχνά αναφέρεται ως διηλεκτρική σταθερά. Το φανταστικό μέρος καλείται συντελεστής απωλειών και είναι ένα μέτρο για το πόσες απώλειες δημιουργεί το υλικό υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου. Σύμφωνα με τη θεωρία $\epsilon_r' > 1$ και $\epsilon_r'' > 0$ αλλά $\epsilon_r'' \ll \epsilon_r'$. Σχεδιάζοντας τη μιγαδική διαπερατότητα σε ένα ανυσματικό διάγραμμα, το πραγματικό μέρος έχει διαφορά φάσης 90° από το φανταστικό. Το ανυσματικό τους άθροισμα ϵ_r^* σχηματίζει γωνία δ με τον πραγματικό άξονα (ϵ_r').



Σχ.3.3 Ανυσματικό διάγραμμα της σχετικής μιγαδικής διαπερατότητας

Ο λόγος του ρεύματος διαρροής προς το ρεύμα φόρτισης, ονομάζεται συντελεστής απωλειών ή εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta$ και ισούται με:

$$\tan\delta = \frac{I_{\text{loss}}}{I_{\text{charge}}} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

Για ένα μονωτικό υλικό η σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r' και η εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta$ αποτελούν βασικά στοιχεία για τον χαρακτηρισμό του και την εξαγωγή συμπερασμάτων για την διηλεκτρική του συμπεριφορά.

Παρατήρηση: Το ϵ_r^* συναντάται και ως κ^* και ονομάζεται επίσης μιγαδική διηλεκτρική σταθερά. Επομένως ισχύουν $\kappa' = \epsilon_r'$ (σχετική διηλεκτρική σταθερά) και $\kappa'' = \epsilon_r''$ (διηλεκτρικές απώλειες). Ο συμβολισμός ϵ_r χρησιμοποιείται συνήθως από φυσικούς επιστήμονες ενώ ο κ από μηχανικούς. Σε αυτό και στα επόμενα κεφάλαια, για πρακτικούς λόγους χρησιμοποιήθηκε ο συμβολισμός ϵ_r για το θεωρητικό μέρος και ο κ για το πειραματικό.

3.4 ΠΟΛΩΣΗ ΚΑΙ ΠΟΛΩΣΙΜΟΤΗΤΑ

Η πόλωση P , που είναι ανυσματικό μέγεθος, ορίζεται ως η διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου του υλικού. Σε μοριακό επίπεδο υπάρχουν 2 διαφορετικοί μηχανισμοί πόλωσης. Ο πρώτος έχει να κάνει με την επαγόμενη διπολική ροπή ενός μεμονωμένου ατόμου ή μορίου, που είναι ανάλογη προς το εφαρμοζόμενο εξωτερικό πεδίο. Ο δεύτερος εξαρτάται από τα μόρια των υλικών έχουν μόνιμες διπολικές ροπές. Τότε απουσία πεδίου, λόγω τυχαίας κατανομής από τη θερμική κίνηση, το υλικό δεν παρουσιάζει πόλωση καθώς η μέση διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου είναι μηδέν. Αν όμως το υλικό βρεθεί σε πεδίο, προσανατολίζονται τα διπολικά μόρια προς το πεδίο και το υλικό αποκτά διπολική ροπή. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την πόλωση ενός υλικού τα ηλεκτρόνια μετακινούνται από τις θεμελιώδεις θέσεις τους κατά αποστάσεις μικρότερες των ατομικών διαμέτρων. Προφανώς δεν υπάρχει μεταφορά φορτίου σε μακροσκοπικές αποστάσεις, όπως συμβαίνει σε έναν αγωγό.

Επομένως εφαρμόζοντας ηλεκτρικό πεδίο σε ένα πολικό διηλεκτρικά υλικό, δημιουργείται πόλωση από τα δίπολα που τείνουν να ευθυγραμμιστούν με το πεδίο και επάγεται διπολική ροπή ($m_{\text{επαγ}}$) η οποία αντιτίθεται στο πεδίο έτσι ώστε η συνολική διπολική ροπή για το υλικό να είναι :

$$m = \mu + m_{\text{επαγ}}$$

Η μέση ροπή για πεδία της τάξης μεγέθους που συνήθως συναντώνται είναι γραμμική προς το πεδίο αυτό, που ονομάζεται τοπικό πεδίο και συμβολίζεται με F . Είναι δηλαδή

$$m = \alpha \cdot F$$

όπου α είναι η ολική πολωσιμότητα των μορίων

3.5 ΕΙΔΗ ΠΟΛΩΣΗΣ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται όλοι οι μηχανισμοί πόλωσης των υλικών, που αποτελούν τη φυσική αιτία των διηλεκτρικών ιδιοτήτων και της εξάρτησης τους από τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου πεδίου.

Ένα υλικό μπορεί να αναπτύξει αρκετούς διηλεκτρικούς μηχανισμούς, που συμβάλλουν στην διαμόρφωση της μιγαδικής του επιτρεπτότητας. Τα διηλεκτρικά υλικά εμφανίζουν μια χωρική κατανομή των ηλεκτρικών φορτίων, που μπορεί να μεταβληθεί κατά την επιβολή εξωτερικού πεδίου. Τα θετικά και αρνητικά φορτία προσανατολίζονται σε αντίθετες κατευθύνσεις, ώστε το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από την πόλωση να αντισταθμίζει μερικώς το εξωτερικά επιβαλλόμενο. Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί πόλωσης, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι ο ηλεκτρονικός, ο ιοντικός, ο διπολικός και ο διεπιφανειακός. Επειδή η πόλωση περιλαμβάνει κίνηση φορτίων, απαιτεί ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα για να ολοκληρωθεί. Επομένως, για κάθε διηλεκτρικό μηχανισμό υπάρχει ένα όριο συχνότητας, πάνω από το οποίο η πόλωση δεν είναι δυνατό να παρακολουθήσει τις μεταβολές του πεδίου.

- Ηλεκτρονική Πόλωση

Όλα τα υλικά αποτελούνται από πυρήνες ατόμων περιτριγυρισμένους από νέφη ηλεκτρονίων. Επειδή τα ηλεκτρόνια είναι πολύ ευκίνητα και χαρακτηρίζονται από μικρή ενεργό μάζα, έχουν μία πολύ γρήγορη αντίδραση στις αλλαγές του πεδίου. Μπορούν δηλαδή να ακολουθούν ακόμα τις πεδιακές αλλαγές σε οπτικές συχνότητες. Είναι ουσιαστικά η συνεισφορά στην διπολική ροπή λόγω της παραμόρφωσης των ηλεκτρονικών φλοιών εξαιτίας του πεδίου.

- Ιοντική Πόλωση

Παρατηρείται σε κρυσταλλικά υλικά που αποτελούνται από θετικά και αρνητικά ιόντα. Τα ιόντα αυτά δεν διαχωρίζονται από ασθενή πεδία, μπορούν όμως να υποστούν μικρές ελαστικές μετατοπίσεις γύρω από τη θέση ισορροπίας τους και να σχηματίσουν δίπολα. Λόγω της μεγαλύτερης μάζας των ιόντων από τα ηλεκτρόνια, η πόλωση μπορεί να ακολουθήσει το πεδίο μέχρι τις υπέρυθρες συχνότητες, που είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις συχνότητες ταλάντωσης του κρυσταλλικού πλέγματος.

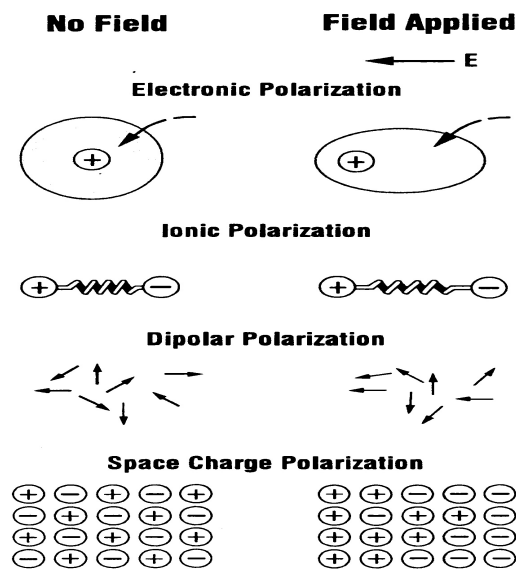
- Πόλωση Προσανατολισμού ή Διπολική Πόλωση

Αυτή αφορά υγρά ή αέρια στα οποία ολόκληρα μόρια, τα οποία έχουν μόνιμη ή επαγόμενη διπολική ροπή, κινούνται παράλληλα με το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Μπορεί κανείς να αναρωτηθεί γιατί σε ένα ασθενές πεδίο όλα τα μόρια δεν ευθυγραμμίζονται τελικά. Αν το έκαναν, αυτή θα ήταν η χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση για το σύστημα, αλλά γνωρίζουμε από τις στατιστικές Boltzmann ότι σε θερμική ισορροπία, ο αριθμός των μορίων με ενέργεια E είναι ανάλογος με $\exp(-E/kT)$, έτσι σε οποιαδήποτε άλλη κατάσταση θα υπάρχουν κι άλλοι προσανατολισμοί.

- Διεπιφανειακή Πόλωση

Παρατηρείται κυρίως σε μονωτικά υλικά που αποτελούνται από διαφορετικά διηλεκτρικά υλικά, όπως π.χ. το χαρτί / κυτταρίνη εμβαπτισμένο σε μονωτικό έλαιο. Ο κακός συνδυασμός των διάφορων διηλεκτρικών υλικών προκαλεί, κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου, την απόθεση των κινούμενων θετικών και αρνητικών φορτίων στις (μικρο - ή μακρο -) διεπιφάνειες των διαφορετικών υλικών, διαμορφώνοντας έτσι κάποια είδη διπόλων. Αυτό το φαινόμενο είναι συχνά πολύ αργό και γενικά γίνεται αντιληπτό στο φάσμα της συχνότητας ισχύος και κάτω ($f \leq 50\text{Hz}$).

Συμπερασματικά, η διηλεκτρική πόλωση είναι πάντοτε αποτέλεσμα της σχετικής μετατόπισης θετικών και αρνητικών φορτίων στο εσωτερικό του υλικού. Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας το πεδίο δεν είναι ικανό να αναγκάσει τα φορτία να ξεφύγουν από το υλικό, κάτι που θα προκαλούσε ηλεκτρική αγωγιμότητα.

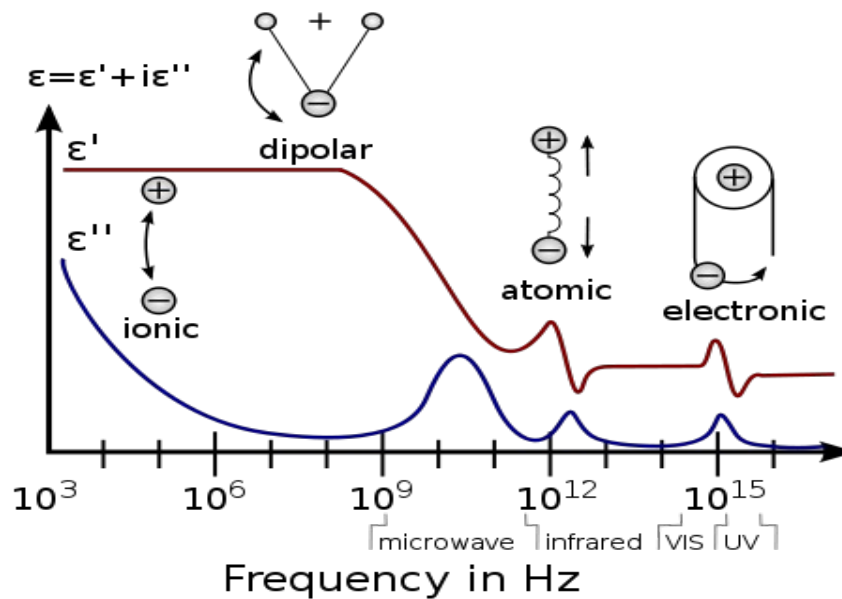


Σχ.3.4 Οι μηχανισμοί πόλωσης που περιγράφονται

Καθένας από τους τέσσερεις τύπους πολωσιμότητας είναι συνάρτηση της συχνότητας του εφαρμοζόμενου πεδίου. Όταν η συχνότητα του πεδίου είναι μικρή, όλοι οι τύποι της πόλωσης προφθαίνουν και αποκτούν την τιμή που θα είχαν αν το πεδίο ήταν συνεχές, με τιμή ίση με τη στιγμιαία τιμή του εναλλασσόμενου πεδίου. Τότε η ολική πολωσιμότητα είναι :

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_d + \alpha_{\pi p}$$

Καθώς όμως η συχνότητα αυξάνει, η πόλωση δεν προφθαίνει να αποκτήσει τη σταθερή της τιμή. Για παράδειγμα στην περιοχή συχνοτήτων 10^{10} με 10^{12} Hz, η πόλωση προσανατολισμού δε μπορεί να φθάσει την τιμή ισορροπίας και συνεισφέρει όλο και λιγότερο στην πόλωση. Αυτή ακριβώς η πτώση της πολωσιμότητας με την αντίστοιχη πτώση της ηλεκτρικής διαπερατότητας, συνιστά τη διηλεκτρική χαλάρωση. Όταν η συχνότητα του πεδίου αποκτήσει συχνότητες συγκρινόμενες με αυτές της ταλάντωσης των ατόμων στα μόρια τότε η α_i αποκτά την τιμή της ισορροπίας της και συνεπώς θα δημιουργηθεί μια νέα περιοχή χαλάρωσης.



Σχ.3.5 Διαδικασίες πόλωσης στο φάσμα της συχνότητας

Επομένως, καθένας από τους διηλεκτρικούς μηχανισμούς συνδέεται με μια χαρακτηριστική συχνότητα συντονισμού (απότομη αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς γύρω από τη συχνότητα) ή συχνότητα χαλάρωσης (σταδιακή μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς με την αύξηση της συχνότητας). Καθώς η συχνότητα αυξάνεται, οι αργότεροι διηλεκτρικοί μηχανισμοί πόλωσης εξαλείφονται, αφήνοντας μόνο τους ταχύτερους να συμβάλλουν στα φαινόμενα αποθήκευσης ενέργειας. Τα φαινόμενα συντονισμού συνήθως συνδέονται με την ηλεκτρονική πόλωση και παρατηρούνται σε πολύ υψηλές συχνότητες. Τα φαινόμενα χαλάρωσης αναπτύσσονται κατά την πόλωση των υπόλοιπων τύπων και συνδέονται με τη μετατόπιση ιόντων, διπόλων ή και χωρικών φορτίων στον όγκο.

3.6 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΧΑΛΑΡΩΣΗ- ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ DEBYE

Από ότι είδαμε παραπάνω, η επίδραση της συχνότητας στη μιγαδική διαπερατότητα είναι αρκετά σύνθετη. Υπάρχει μια ικανοποιητική προσέγγιση στο θέμα αυτό από τον Debye, η οποία αφορά στη συμπεριφορά των υλικών με πόλωση προσανατολισμού στις περιοχές συχνοτήτων όπου η διηλεκτρική πόλωση είναι "χαλαρή", δηλαδή η περίοδος ενός κύματος AC είναι συγκρίσιμη με τον απαιτούμενο χρόνο ευθυγράμμισης των διπόλων. Όταν η εφαρμοζόμενη συχνότητα γίνει πολύ μεγαλύτερη από το αντίστροφο του χρόνου ευθυγράμμισης, τότε ορίζουμε τη σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα ως ϵ_∞ (συμβολίζοντας την ατομική και ηλεκτρονική πόλωση). Για πολύ χαμηλότερες συχνότητες η σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα γίνεται ϵ_s και ονομάζεται στατική διηλεκτρική σταθερά. Πρέπει να βρούμε μια έκφραση της μορφής

$$\epsilon_r^*(\omega) = \epsilon_\infty + f(\omega) \quad \text{όπου για } \omega \rightarrow 0 \text{ η έκφραση γίνεται:}$$

$$f(0) = \epsilon_s - \epsilon_\infty$$

Ας υποθέσουμε τώρα ότι εφαρμόζουμε σταθερό πεδίο έτσι ώστε να ευθυγραμμίσουμε τα μόρια και μετά το αναιρούμε. Η πόλωση, και ως εκ τούτου το εσωτερικό πεδίο, θα μειωθούν. Ακολουθώντας την προσέγγιση Debye θα πρέπει να υποθέσουμε ότι η ελάττωση είναι εκθετική με μια χρονική σταθερά τ , το χαρακτηριστικό χρόνο χαλάρωσης της διπολικής ροπής του μορίου.

$$P(t) = P_0 \exp(-t/\tau)$$

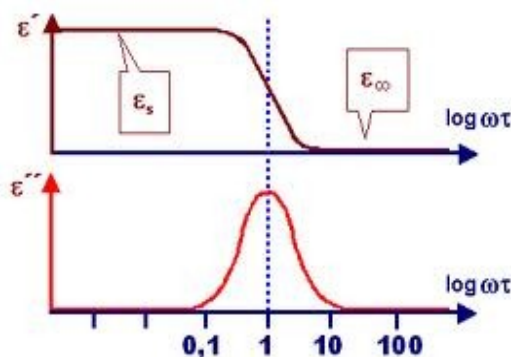
Γνωρίζουμε ότι η μεταβολή του χρόνου και το φάσμα συχνοτήτων συνδέονται με τον μετασχηματισμό Fourier. Σε αυτή την περίπτωση η σχέση γίνεται:

$$f(\omega) = K \cdot \int P(t) \exp(j\omega t) dt = \frac{K P_0}{-i\omega + 1/\tau}$$

Όπου K είναι μια σταθερά η οποία εξασφαλίζει ότι η ποσότητα $f(\omega)$ έχει σωστές διαστάσεις. Για $\omega=0$ καταλήγουμε στην: $K \cdot p_0 = \epsilon_s - \epsilon_\infty$

$$\omega \text{ εκ τούτου γίνεται: } \epsilon_r^* = \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) / (1 - i\omega\tau)$$

Χωρίζοντας σε πραγματικό και φανταστικό μέρος παίρνουμε τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις, όπου παρατηρούμε ότι στη συχνότητα που το ϵ_r' μειώνεται γρήγορα, στην καμπύλη του ϵ_r'' τείνει να δημιουργηθεί μια κορυφή.



Σχ.3. 6 Μεταβολές της συχνότητας τις οποίες προβλέπουν οι εξισώσεις του Debye

3.7 ΠΟΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΗ ΠΟΛΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Αυτός ο διαχωρισμός γίνεται συχνά τόσο στους ημιαγωγούς όσο και στα διηλεκτρικά. Ένα μη πολικό υλικό είναι αυτό το οποίο δεν έχει μόνιμα δίπολα. Για παραδειγμα τα Si, Ge και C (διαμάντι) είναι μη πολικά. Οι μερικώς ανάλογες III-V ενώσεις όπως GaAs, InSb και GaP μοιράζονται τα ηλεκτρόνια σθένους έτσι ώστε τα ιόντα που σχηματίζουν το κρυσταλλικό πλέγμα να τείνουν να είναι θετικά (ομάδα V του περιοδικού συστήματος) ή αρνητικά (ομάδα III). Ως εκ τούτου το κρυσταλλικό πλέγμα είναι μια μάζα από μόνιμα δίπολα των οποίων η ροπή αλλάζει όταν εφαρμόζεται πεδίο. Εκτός από αυτά τα υλικά στα οποία υπάρχουν ιοντικοί δεσμοί, υπάρχουν άλλες δύο κατηγορίες πολικών υλικών. Υπάρχουν ενώσεις όπως οι υδρογονάνθρακες οι οποίες έχουν διπολικές διατάξεις, αλλά έχουν μηδενική συνολική ροπή. Ακόμα υπάρχουν μόρια όπως το νερό και αρκετά λάδια μετασχηματιστών τα οποία έχουν μόνιμες διπολικές ροπές και η συνολική διπολική τους ροπή καθορίζεται από την προσανατολιστική τους πολωσιμότητα.

3.8 ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα διηλεκτρικά υλικά λέγονται ηλεκτρομονωτικά όταν οι ιδιότητές τους είναι τέτοιες ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ηλεκτρική μόνωση μεταξύ αγωγών και μεταξύ αγωγών και εδάφους σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Συγκεκριμένα η σχετική διηλεκτρική σταθερά ενός μονωτικού πρέπει να είναι αρκετά μικρή (έως περίπου 10) , ενώ για ένα διηλεκτρικό γενικά μπορεί να πάρει αρκετά μεγαλύτερες τιμές. Επίσης, ένα ηλεκτρομονωτικό υλικό πρέπει να έχει χαμηλή αγωγιμότητα τόσο σε συνεχή όσο και σε εναλλασσόμενα πεδία. Οι λέξεις διηλεκτρικά και ηλεκτρομονωτικά υλικά, χρησιμοποιούνται συχνά ως περίπου συνώνυμες, όμως με την πρώτη δίνουμε έμφαση στις ιδιότητες του υλικού από φυσική άποψη, ενώ με τη δεύτερη στη χρήση του σε πρακτικές εφαρμογές.

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν ευρεία χρήση σε ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές, όπου απαιτείται να διατηρούν την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού για αρκετές δεκαετίες χωρίς να αστοχήσουν. Πρέπει επίσης να ανθίστανται σε καταπονήσεις κρουστικών τάσεων που προκαλούνται από κεραυνούς ή χειρισμούς διακοπών του δικτύου, χωρίς να διασπώνται. Ανάλογα με την επιθυμητή χρήση και τις απαιτήσεις της εφαρμογής επιλέγουμε το μονωτικό υλικό. Κάποια παραδείγματα δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Εφαρμογή	Υλικό	ϵ_r'
Καλώδιο υψηλής τάσης	Polyethylene (PE)	2,25
	Poly vinyl chloride (PVC)	3,18
Διακόπτης ΜΤ	SF ₆ , κενό	1,0006/ 1
Μονωτήρας ανάρτησης καλωδίου	Πορσελάνη, γυαλί	5-10
Μονωτήρας διέλευσης Μ/Σ	Πορσελάνη	5-8
Διηλεκτρικό BJT (transistor)	SiO ₂	4,5
Εσωτερικό Μ/Σ	Ορυκτέλαια	2,3

Πίνακας 3.1 Ενδεικτική χρήση ηλεκτρομονωτικών υλικών

3.8.1 Κριτήρια επιλογής ηλεκτρομονωτικού υλικού

Η ανάγκη για την αξιόπιστη, διαχρονική συμπεριφορά των μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους, ανάλογα και με το πεδίο εφαρμογής αυτών.

- **Αγωγιμότητα όγκου και επιφάνειας:** Οι ειδικές αγωγιμότητες όγκου (σ) και επιφάνειας (σ_s) εμφανίζονται σε όλα τα στερεά μονωτικά σώματα και γενικά ισχύει $\sigma \ll \sigma_s$. Η ειδική αγωγιμότητα όγκου είναι πολύ μικρή για τους μονωτές σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στα μέταλλα. Η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα (σ_s) μπορεί να γίνει αρκετά μεγάλη, καθώς επηρεάζεται σημαντικά από την υγρασία του περιβάλλοντος και την επιφανειακή ρύπανση του σώματος. Είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία του ρεύματος ερπυσμού. Το ρεύμα αυτό έχει αρκετά σταθερή τιμή, η κατανομή όμως της πυκνότητάς του δεν είναι ομοιόμορφη, γιατί οι φορείς ακολουθούν κατά προτίμηση τους αγωγίμους δρόμους διαρροής στην επιφάνεια ή τις ρωγμές του σώματος.

Ένα ιδανικό μονωτικό υλικό έχει μηδενική ή σχεδόν μηδενική αγωγιμότητα, επειδή το ενεργειακό του διάκενο είναι πολύ μεγάλο και τα ηλεκτρόνια δεν έχουν αρκετή ενέργεια να μεταβούν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Η μετάβαση αυτή γίνεται ευκολότερη όταν υπάρχουν ενεργειακές καταστάσεις στο εσωτερικό του διακένου. Επομένως οι αγωγιμότητες της επιφάνειας και του όγκου του υλικού, εξαρτώνται από την ύπαρξη και την πυκνότητα των ενεργειακών καταστάσεων διακένου στην επιφάνεια και στον όγκο του αντίστοιχα.

- **Σχετική διηλεκτρική σταθερά :** Η σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r (>1)$ είναι ένας συντελεστής, η τιμή του οποίου διαφέρει σε κάθε είδος μονωτικού, και εξαρτάται από τη στατιστικότητα των ανομοιογενειών στο υλικό. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά δίνει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μια διάταξης συγκριτικά με εκείνη στο κενό ή στον αέρα. Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές διαφόρων μονωτικών που συνθέτουν μία μόνωση θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειες τους, για να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων.

- **Εφαπτομένη απωλειών :** Όταν τα μονωτικά υλικά βρίσκονται κάτω από την επίδραση ηλεκτρικών πεδίων, αναπτύσσονται διάφοροι μηχανισμοί οι οποίοι απορροφούν ενέργεια από τα πεδία. Δηλαδή, έχουμε ανεπιθύμητη απώλεια ενέργειας. Το φαινόμενο είναι επιπρόσθετα δυσάρεστο, διότι η ενέργεια που απορροφάται στα υλικά μετατρέπεται κυρίως σε θερμότητα, η οποία αν δεν αποβάλλεται προς το περιβάλλον με αρκετά ταχύ ρυθμό, προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών με αποτέλεσμα την κακή λειτουργία, τις βλάβες και την πρόωφη καταστροφή των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων.

Ειδικότερα, κάτω από συνεχή τάση η απορρόφηση της ενέργειας οφείλεται στη δημιουργία του ρεύματος διαρροής στο μονωτικό σώμα, εξαιτίας της όποιας αγωγιμότητας όγκου ή και της επιφανειακής του αγωγιμότητας. Δηλαδή η θέρμανση του υλικού οφείλεται στο φαινόμενο Joule. Στα εναλλασσόμενα πεδία εμφανίζεται επιπλέον μία συνήθως πολύ μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας και θέρμανση του σώματος, που προκαλείται από τις περιοδικές πολώσεις και αποπολώσεις του, σύμφωνα με τους διάφορους μηχανισμούς πόλωσης.

- **Θερμική αγωγιμότητα :** Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις περιοχές όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (παρουσία υγρασίας στην περίπτωση αέριου μονωτικού). Γενικά ισχύει ο κανόνας ότι όσο πιο καλός μονωτής είναι ένα υλικό τόσο καλύτερες είναι οι θερμομονωτικές ιδιότητες του.
- **Μηχανική αντοχή:** Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρουν εκτός από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών και οι μηχανικές τους ιδιότητες (αντοχή σε εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας, δύναμη τάνυσης κτλ). Συχνά ενδιαφέρει η μηχανική αντοχή της όλης κατασκευής, όταν αυτή ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης, όπως συμβαίνει κατά το βραχυκύκλωμα. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης ή και να καταστρέψουν τα μονωτικά υλικά, όταν δεν έχουν γίνει σωστές επιλογές ως προς τη μηχανική αντοχή των μονώσεων και τη διατήρηση των αποστάσεων μόνωσης γενικότερα.
- **Διηλεκτρική αντοχή:** Ισούται με τη μέγιστη πεδιακή ένταση που μπορεί να εφαρμοστεί στο μονωτικό υλικό χωρίς να πραγματοποιηθεί διάσπαση
- **Υγροσκοπικότητα:** Περιγράφει την απορρόφηση υγρασίας από το περιβάλλον
- **Χημική σταθερότητα :** να μην αντιδρά χημικά με άλλα υλικά σχηματίζοντας ενώσεις
- **Αντοχή στις ακτινοβολίες**
- **Ιξώδες :** η εσωτερική τριβή των ρευστών

Συγκεκριμένα, στο συνεχές πεδίο λαμβάνονται συνήθως υπόψιν οι αγωγιμότητες όγκου και επιφάνειας, ενώ στο εναλλασσόμενο χρησιμοποιούνται κυρίως οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς και της εφαπτομένης απωλειών στην περιοχή των συχνοτήτων λειτουργίας. Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψιν η διηλεκτρική αντοχή, ειδικά σε εφαρμογές υψηλής τάσης.

3.8.2 Διηλεκτρική διάσπαση

Υπάρχουν τρεις κύριοι μηχανισμοί οι οποίοι ευθύνονται για την εμφάνιση διηλεκτρικής διάσπασης: (1) εσωτερική διάσπαση, (2) θερμική διάσπαση και (3) διάσπαση εκφόρτισης. Η ηλεκτρική διάσπαση είναι ένα αντικείμενο το οποίο είναι δύσκολο να περιγράψουμε αυστηρά. Για παράδειγμα ένας καλοσχεδιασμένος μονωτής διασπάται σε συνθήκες εργαστηρίου ακόμα και αν αλλάξει η κατεύθυνση του αέρα ή παρουσιαστεί ομίχλη. Ένας υψηλής τάσης πυκνωτής λαδιού θα παρουσιάσει αρνητικές επιδόσεις, ανεξάρτητα από τον τύπο του λαδιού, αν υπάρχει νερό σε ποσοστό της τάξης του 0,01%. Η παρουσία ρύπων, σκόνης και υγρασίας είναι οι κύριοι παράγοντες κατά τη σχεδίαση ενός μονωτή. Τα σχήματα με ομαλές επιφάνειες που χρησιμοποιούνται για τους μονωτές των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, οφείλονται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι μειώνουν την πιθανότητα παρουσίασης επιφανειακής διάσπασης. Η έναρξη της διηλεκτρικής διάσπασης είναι το όριο το οποίο καθορίζει το σχεδιασμό ενός μονωτή τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής πλευράς.

Εσωτερική διάσπαση: Όταν τα λίγα παρόντα ηλεκτρόνια επιταχυνθούν αρκετά από το ηλεκτρικό πεδίο, μπορούν να ιονίσουν τα άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος. Η ελάχιστη απαίτηση για να συμβεί αυτό είναι να δώσουν τα ηλεκτρόνια αρκετή ενέργεια στη ζώνη σθένους έτσι ώστε να μπορέσουν να διασχίσουν το ενεργειακό χάσμα του υλικού.

Θερμική διάσπαση: Αυτή συμβαίνει όταν σε συνθήκες λειτουργίας θερμανθεί το κρυσταλλικό πλέγμα. Για παράδειγμα μια δοκιμή AC σε ένα υλικό, στην περιοχή της συχνότητας χαλάρωσης, όπου το ϵ'' είναι μεγάλο, θα μπορούσε να δημιουργήσει θέρμανση λόγω της απώλειας της αλληλεπίδρασης των διπόλων σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από τη θέρμανση που θα μπορούσε να δημιουργηθεί από την επιτάχυνση ελεύθερων ηλεκτρονίων. Σε αυτήν την περίπτωση τα ιόντα του θερμού κρυσταλλικού πλέγματος μπορούν να ιονισθούν πιο εύκολα και ως εκ τούτου το πεδίο διάσπασης θα είναι μεγαλύτερο από το πεδίο της εσωτερικής διάσπασης. Για παράδειγμα, το πολυαιθυλένιο, που είναι τυπικό πολυμερές, έχει ένα πεδίο διάσπασης της τάξης 3 έως 5×10^8 V/m για πολύ χαμηλές συχνότητες, αυτό όμως μειώνεται και γίνεται περίπου 5×10^6 V/m στο 1 MHz που είναι η συχνότητα χαλάρωσης των μορίων.

Διάσπαση εκφόρτισης: Σε υλικά όπως η μίκα ή τα πορώδη κεραμικά στα οποία περικλείονται αέρια, τα αέρια συχνά ιονίζονται πριν διασπασεί το στερεό. Τα ιόντα του αερίου μπορούν να προκαλέσουν επιφανειακή φθορά του υλικού, πράγμα το οποίο επιταχύνει την διάσπαση. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται με τη μορφή περιοδικών σπινθηρισμών και στη συνέχεια σημαίνει διάσπαση καθώς το πεδίο αυξάνει.



Σχ.3.7 Υπερπήδηση μονωτήρα πορσελάνης

4. ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενταντική αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας όλο και μεγαλύτερης τάσης. Ταυτόχρονα πρέπει να εξασφαλίζεται η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αντοχή στις διάφορες ηλεκτρικές καταπονήσεις με τη χρήση κατάλληλων μονωτικών υλικών. Τα υγρά που χρησιμοποιούνται ως μονωτικά είναι μέρος μια ομάδας διηλεκτρικών υγρών και είναι γνωστά σαν υγρά,ουσιώδη για την παραγωγή, μεταφορά, διανομή και βιομηχανική χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ρόλος που παίζουν τα μονωτικά υγρά είναι σημαντικός αν και η αξία επί του συνόλου του σχετικού ηλεκτρικού εξοπλισμού είναι μόλις το 2%.

Ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υγρά μονωτικά είναι τα μονωτικά έλαια, που προέρχονται από την κλασματική απόσταξη του πετρελαίου. Τα μονωτικά λάδια είναι τα πλέον εύχρηστα καθώς διατίθενται σε αφθονία και σε σχετικά χαμηλό κόστος. Οι ιδιότητες που κάνουν το μονωτικό λάδι κατάλληλο για χρήση σε ηλεκτροτεχνικές συσκευές, είναι ο συνδυασμός μεγάλης διηλεκτρικής αντοχής με την ικανότητα να απάγει τη θερμότητα που αναπτύσσεται στην λειτουργία των συσκευών. Επιπλέον χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με στερεά μονωτικά, καθώς τα προστατεύει από την υγρασία και την ελεύθερη επαφή με τον αέρα και έχει την χαμηλότερη διηλεκτρική σταθερά που μπορεί να έχει ένα υγρό.

Ένας περιορισμός που τίθεται στην χρησιμοποίησή των μονωτικών λαδιών είναι η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία λειτουργίας τους. Ο περιορισμός αυτός τίθεται αφενός μεν γιατί η υψηλή θερμοκρασία συντελεί στην ταχεία αποσύνθεση των λαδιών και αφετέρου επειδή σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας εκρηκτικών ατμών και αναφλέξεως. Κατα τους γερμανικούς κανονισμούς VDE η μέγιστη θερμοκρασία διαρκούς λειτουργίας δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 95° C, ενώ οι αμερικάνικοι κανονισμοί επιβάλλουν θερμοκρασίες κάτω των 90° C.

Υπό την επίδραση υψηλής θερμοκρασίας και την επαφή με το οξυγόνο τα μονωτικά λάδια οξειδώνονται. Τα προϊόντα της οξείδωσης είναι πτητικά οξείδια, νερό, το οποίο παραμένει διαλυμένο στο λάδι και μειώνει σημαντικά τη διηλεκτρική του αντοχή και ιζήματα τα οποία αποφράζουν τους σχετούς κυκλοφορίας του λαδιού και παρεμποδίζουν την ψύξη της συσκευής. Τα ενδιάμεσα προϊόντα οξείδωσης που παράγονται, προσβάλλουν επίσης τα στερεά μονωτικά με τα οποία συνδυάζεται το λάδι, που είναι κυρίως το χαρτί, και μειώνουν τη μηχανική τους αντοχή στην οποία στηρίζεται συχνά η συγκράτηση των διαφόρων μελών της συσκευής όπως π.χ. συμβαίνει με τα τυλίγματα των μετασχηματιστών.

Εκτός από την υψηλή θερμοκρασία η ταχύτητα με την οποία προχωρεί η οξείδωση ενός μονωτικού λαδιού εξαρτάται επίσης από την προέλευση και το βαθμό διυλίσεως του. Συνήθως υπάρχει ένας βέλτιστος βαθμός διυλίσεως για τον οποίο η ταχύτητα οξείδωσης παρουσιάζει ένα ελάχιστο. Η επαφή του λαδιού με διάφορα μέταλλα και κυρίως με χαλκό επιταχύνει σημαντικά την οξείδωση. Η επαφή με μόλυβδο συντελεί στη σαπωνοποίηση του λαδιού. Για αυτό η παρουσία γυμνού χαλκού ή μολύβδου σε επαφή με μονωτικό λάδι, πρέπει να αποφεύγεται κατά την κατασκευή ηλεκτρικών συσκευών.

Για την αποτελεσματική ψύξη των ρευστών για την απαγωγή της θερμότητας, στην περίπτωση των μετασχηματιστών αλλά και για να μην παρεμποδίζεται η ελεύθερη κίνηση των κινητών μελών διακοπών, είναι κατά κανόνα επιθυμητό ένα χαμηλό ιξώδες.

Ο βαθμός Engler αποτελεί το λόγο του χρόνου που χρειάζεται ένα ρευστό για να διαρρεύσει από ένα δοχείο με κανονισμένο άνοιγμα, προς το χρόνο που χρειάζεται για να διαρρεύσει ίση ποσότητα νερού. Για τη μέτρηση του ιξώδους υπάρχουν κι άλλες μέθοδοι και μονάδες.

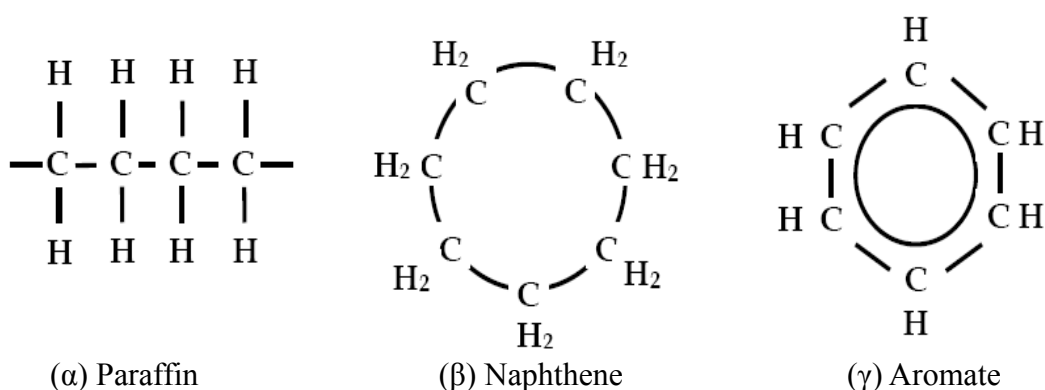
4.2 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ

4.2.1 Αργό πετρέλαιο

Ηλεκτροτεχνικά υγρά, του τύπου λαδιού, προέρχονται από ακατέργαστο πετρέλαιο, που σχηματίζεται από ενταφιασμό και σήψη φυτικής ύλης ή από την επίδραση νερού πάνω στο ορυκτό ανθρακασβέστιο. Το αργό πετρέλαιο αποτελείται βασικά από υδρογονάνθρακες, που μπορούν να καταταγούν σε τρεις ομάδες:

- α) αρωματικοί υδρογονάνθρακες
- β) παραφινικοί υδρογονάνθρακες
- γ) ναφθενικοί υδρογονάνθρακες

Στους αρωματικούς υδρογονάνθρακες τα άτομα του άνθρακα ενώνονται μεταξύ με απλό δεσμό, σχηματίζοντας έναν τουλάχιστον δακτύλιο και καλούνται "κορεσμένοι" υδρογονάνθρακες. Στους παραφινικούς και ναφθενικούς υδρογονάνθρακες, δύο ή περισσότερα άτομα άνθρακα ενώνονται με απλό ή πολλαπλό δεσμό σχηματίζοντας πολλαπλή αλυσίδα και καλούνται "ακόρεστοι". Είναι περισσότερο σταθεροί υδρογονάνθρακες σε σχέση με τους αρωματικούς.



Σχ. 4.1 Ενώσεις υδρογονανθράκων

Υδρογονάνθρακες, που έχουν απλά και μικρά μόρια, βρίσκονται υπό κανονική θερμοκρασία και πίεση, σε αέρια κατάσταση. Οι υδρογονάνθρακες με σύνθετα και μεγάλα μόρια βρίσκονται σε ρευστή κατάσταση, ενώ οι υδρογονάνθρακες με πιο μεγάλα και πολυσύνθετα μόρια βρίσκονται σε στερεά κατάσταση (π.χ άσφαλτος). Με βάση την παραπάνω κατάταξη των υδρογονανθράκων, η πλέον σύγχρονη και ευρέως χρησιμοποιούμενη ταξινόμηση του αργού πετρελαίου είναι αυτή του U.S. Bureau of Mines, όπου ένα ακατέργαστο τοποθετείται σε μια από τις παρακάτω 9 κατηγορίες, που περιγράφονται με συνδυασμό της συμφωνίας παραφινικών, ενδιάμεσων και ναφθενικών βάσεων.

Τάξη	Πετρέλαιο
1	παραφινικό
2	παραφινικό-ενδιάμεσο
3	ενδιάμεσο-παραφινικό
4	ενδιάμεσο
5	ενδιάμεσο-ναφθενικό
6	ναφθενικό-ενδιάμεσο
7	ναφθενικό
8	παραφινικό-ναφθενικό
9	ναφθενικό-παραφινικό

Πίνακας 4.1 Ταξινόμηση αργού πετρελαίου

Το αργό πετρέλαιο της πρώτης κατηγορίας περιέχει σε μεγάλη αναλογία (πάνω από 66%) παραφινικούς υδρογονάνθρακες και σε μικρή αναλογία ναφθενικούς και αρωματικούς. Στην αναλογία αυτή υπάρχει σε μεγάλη αναλογία κερί και σε μικρή άσφαλτος. Το αργό πετρέλαιο της έβδομης κατηγορίας περιέχει σε μεγάλη αναλογία (πάνω από 66%) ναφθενικούς υδρογονάνθρακες και σε μικρή αναλογία παραφινικούς και αρωματικούς. Στην αναλογία αυτή υπάρχει σε μεγάλη αναλογία άσφαλτος και σε μικρή κερί.

Το μεγαλύτερο ποσοστό αργού πετρελαίου ανήκει στην τέταρτη κατηγορία, που περιέχει υδρογονάνθρακες όλων των ομάδων σε σχετικά μεγάλη αναλογία και τα μόρια του είναι σε δακτυλιοειδή μορφή.

4.2.2 Παραγωγή μονωτικών λαδιών

Όπως αναφέραμε τα μονωτικά λάδια παράγονται από την κατεργασία μονωτικών λαδιών και οι μέθοδοι είναι δύο:

α) ο διαχωρισμός κλασμάτων με απόσταξη (κλασματική απόσταξη)

Το εκλεγμένο πετρέλαιο θερμαίνεται, εξατμίζεται και οι ατμοί που συμπυκνώνονται σε διάφορες θερμοκρασίες και σχηματίζουν υγρά αποστάγματα. Η απόσταξη εφαρμόζεται σε συνθήκες κενού, διότι σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης απαιτείται μεγάλη θερμοκρασία που μπορεί να οδηγήσει σε αποσύνθεση του λαδιού.

β) η διύλιση

Μετά την απόσταξη έχουμε τη διαδικασία καθαρισμού και την επεξεργασία με οξέα, δηλαδή το στάδιο της διύλισης. Παλαιότερα η διύλιση περιοριζόταν στην εντατική επεξεργασία των μονωτικών λαδιών με οξέα μόνα ή σε συνδυασμό με διαλύτες. Όταν η διύλιση είναι μικρή το παραγόμενο λάδι αποσυντίθεται γρήγορα και μέσα σε αυτό δημιουργούνται μεγάλες ποσότητες λάσπης (sludge). Όταν πάλι η διύλιση είναι μεγάλη, το λάδι που παράγεται αποσυντίθεται γρήγορα, η οξύτητα αυξάνεται με ταχύ ρυθμό ενώ η λάσπη που σχηματίζεται αρχικά είναι περιορισμένη. Υπάρχει πάντα ένα βέλτιστο σημείο διύλισης. Με τη διύλιση πρέπει να εξαλειφθεί ένα ποσοστό αρωματικών ενώσεων ώστε να περιοριστεί η δημιουργία οξέων, προκειμένου να μην αυξηθεί γρήγορα η οξύτητα και διαβρωθούν τα μεταλλικά μέρη της ηλεκτρικής συσκευής.

Οι σύγχρονοι τρόποι διύλισης σε συνδυασμό με τη βελτίωση των διαλυτών δίνουν λάδια πολύ καλής ποιότητας, που μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των συσκευών υψηλής τάσης. Ένας από αυτούς είναι η διύλιση με H_2 , όπου το λάδι έρχεται σε επαφή με υδρογόνο υπό μεγάλη θερμοκρασία με τη βοήθεια ειδικών καταλυτών.

Γενικά κατά την παραγωγή μονωτικών λαδιών πρέπει να δώσουμε προσοχή ώστε να παράγουμε λάδι με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, οξειδωτική σταθερότητα και όπου είναι απαραίτητο καλές ιδιότητες του απορροφούμενου αερίου καθώς και μικρή ποσότητα θείου και αζώτου. Αν και τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει μεταβολές στις μεθόδους διύλισης δεν έχει γίνει μεγάλη αλλαγή στα χαρακτηριστικά του προϊόντος εδώ και δεκαετίες. Μεγάλη προσοχή έχει δοθεί σε βελτιώσεις και στην τεχνική εξασφάλισης σταθερότητας με δοκιμές που αφορούν την ποιότητα του λαδιού.

4.3 ΕΙΔΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ

Σε αυτή την παράγραφο θα αναφέρουμε και θα αναλύσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των μονωτικών ελαίων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Βέβαια αναλόγως με την εφαρμογή που χρησιμοποιούμε τα λάδια υπάρχουν και ιδιαιτερότητες και άλλες απαιτήσεις. Κατά την ανάλυση δίνεται μια μεγαλύτερη έμφαση στις εφαρμογές των μετασχηματιστών. Σε επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθούν οι απαιτήσεις ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιούνται.

4.3.1 Ορυκτέλαια

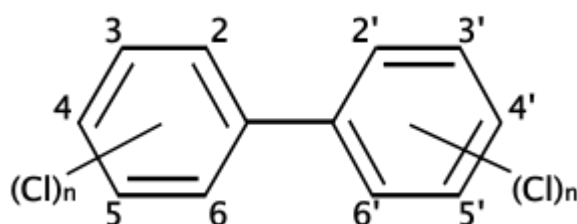
Τα έλαια που χρησιμοποιούνται ευρέως στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό είναι τα ορυκτέλαια, τα οποία προέρχονται από τη διύλιση των υδρογονανθράκων που συλλέγονται κατά την κλασματική απόσταξη του αργού πετρελαίου. Χημικά τα ορυκτέλαια έχουν μια σύνθετη δομή των βασικών υγρών υδρογονανθράκων όπως:

- paraffin (αλκάνιο) : 40-60%
- naphthene (κυκλο-αλκάνιο) : 30-50%
- aromatic : 5-20%
- olefin (αλκένιο) : 1%

Ο συνδυασμός καλής συμπεριφοράς σε σχέση με τη γήρανσή του και το χαμηλό ιξώδες κάνουν τα ορυκτέλαια καλούς μονωτές και ψυκτικούς συντελεστές. Οι βασικές ηλεκτρικές και διηλεκτρικές ιδιότητες είναι η ισχυρή θερμική αντοχή και η μη υγροσκοπικότητα. Τα βασικά προτερήματά τους είναι η ποικίλη διαθεσιμότητά του και το χαμηλό κόστος τους. Τα ορυκτέλαια έχουν σχετικά χαμηλή διηλεκτρική σταθερά, αλλά εκδηλώνουν ένα χαμηλό σημείο ανάφλεξης και είναι ελαφρώς τοξικά. Επίσης, έχουν το αρνητικό ότι σε περίπτωση διαρροής μετασχηματιστή ή πυρκαγιάς θέτουν σε κίνδυνο το περιβάλλον. Για αυτό στις θέσεις εγκατάστασης των μετασχηματιστών, ανάλογα με το μέγεθός τους και με το αν εγκαθίστανται σε κλειστούς ή ανοικτούς χώρους, προβλέπονται από τους κανονισμούς ειδικές διαμορφώσεις των δαπέδων, ώστε σε περίπτωση διαρρήξεως του κιβωτίου και διαρροής ή αναφλέξεως του λαδιού, να απάγεται χωρίς να δημιουργεί κίνδυνο μετάδοσης της φωτιάς. Επιπλέον αν οι ατμοί του λαδιού αναμιχθούν με ατμοσφαιρικό αέρα, είναι δυνατό να προκαλέσουν ισχυρό εκρηκτικό μίγμα με αποτέλεσμα υπό ορισμένες συνθήκες να προκληθεί ισχυρή έκρηξη.

4.3.2 Έλαια που περιέχουν PCBs

Αρχικά, τα μονωτικά λάδια που χρησιμοποιήθηκαν βασιζόταν σε προΐοντα ορυκτελαίων, αλλά αργότερα τα συνθετικά λάδια που βασίστηκαν στα PCBs, λόγω της χαμηλής αναφλεξιμότητάς τους υιοθετήθηκαν σε μια σειρά εφαρμογές ως μονωτικός και ψυκτικός εξοπλισμός. Τα PCBs (Poly-chlorinated Biphenyls, Πολυχλωριωμένα διφαινύλια) είναι μια κατηγορία χημικών ενώσεων που σχηματίζονται από την προσθήκη χλωρίου (Cl_2) στο διφαινύλιο ($\text{C}_{12}\text{H}_{10}$), το οποίο είναι μια δομή διπλού δακτυλίου, που περιλαμβάνει δύο δακτύλιους βενζολίου με 6 άτομα άνθρακα τα οποία ενώνονται με ενιαίο δεσμό άνθρακα-άνθρακα. Η φύση ενός "αρωματικού" δακτυλίου (βενζολίου) επιτρέπει μια μοναδική σύνδεση σε κάθε άνθρακα και επομένως υπάρχουν 10 πιθανές θέσεις για την τοποθέτηση του χλωρίου (στη θέση του υδρογόνου στο διφαινύλιο).



Σχ. 4.2 Χημική δομή των PCBs. Οι πιθανές θέσεις των ατόμων Cl στους δακτύλιους βενζολίου σημειώνονται με νόμμερα στα άτομα άνθρακα

Τα έλαια αυτά είναι γνωστά και με τις εμπορικές τους ονομασίες ως Pyralen, Chlophen (κλοφέν), Askarel, Inerteen, Chrovextol κλπ και υπερτερούν έναντι των ορυκτών στα παρακάτω:

- ◆ Αναφλέγονται δύσκολα
- ◆ Όταν αναφλεγούν καίγονται πολύ δύσκολα (λόγω των περιεχόμενων χλωριόντων)
- ◆ Έχουν υψηλότερη διηλεκτρική σταθερά
- ◆ Στις ξαφνικές αυξήσεις ηλεκτρικών φορτίων μεταβάλλεται σημαντικά το ιξώδες τους με παράλληλη αύξηση της ειδικής θερμότητας και θερμοαγωγιμότητάς τους, πράγμα που τα αναδεικνύει σε πολύ καλά ψυκτικά μέσα

Όμως έχουν και σημαντικά μειονεκτήματα, που τα εμποδίζουν να αντικαταστήσουν τα καθαρά ορυκτέλαια και αυτά είναι τα εξής:

- ◆ Μερικά από αυτά είναι ισχυρά διαλυτικά και μπορούν να προξενήσουν ζημιά στα μονωτικά μέσα όπως βερνίκια, τσιμούχες, κλπ
- ◆ Σχηματίζουν διαλύματα με τα ορυκτά έλαια, που διαχωρίζονται εύκολα
- ◆ Αρκετά είναι τοξικά και για αυτό απαιτούν προσοχή και μέτρα προφύλαξης από επαφή με αυτά και αποφυγή παρατεταμένης εισπνοής σε κλειστούς χώρους
- ◆ Η καύση τους παράγει παραπροϊόντα, όπως υδροχλώριο, πολυχλωριωμένες διβενζοδιοξίνες τα οποία είναι ισχυρά τοξικά και πολύ επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία

Λόγω των δυσμενών επιπτώσεων στην υγεία στα μέσα του 1970 με βάση τους κανονισμούς της EPA περιορίστηκε η παραγωγή, το εμπόριο και η χρήση των PCBs. Συγκεκριμένα έχει αποδειχθεί ότι προκαλούν καρκίνο στα ζώα καθώς και διάφορες άλλες καρκινικές επιπτώσεις στο ανοσοποιητικό σύστημα, το αναπαραγωγικό και το νευρικό σύστημα και στο ενδοκρινικό σύστημα των ζώων. Οι μελέτες στους ανθρώπους παρέχουν στοιχεία για πιθανή καρκινογόνο δράση των PCBs. Οι διαφορετικές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων μπορούν να συσχετιστούν, δεδομένου ότι οι αλλαγές σε ένα σύστημα μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις σε άλλα συστήματα του σώματος .

Σήμερα τα μονωτικά υγρά που περιέχουν PCBs στην υψηλή τάση δεν χρησιμοποιούνται. Η ισχύουσα νομοθεσία απαιτεί ότι πολλοί, αλλά όχι όλοι οι μετασχηματιστές που περιέχουν PCBs πρέπει να αποσυρθούν. Είναι γεγονός ότι πολλές από τις διατάξεις, που βρίσκονται σε πολυετή λειτουργία, είναι πιθανόν να περιλαμβάνουν ηλεκτρομονωτικά ορυκτέλαια, τα οποία εμπεριέχουν μικρές περιεκτικότητες σε πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PolyChlorinated Biphenyls, PCBs), η εισαγωγή των οποίων γίνεται είτε εκ κατασκευής είτε ως προϊόντα επιμόλυνσης του κύκλου ζωής τους. Οι επιμολύνσεις συνήθως προκύπτουν μέσα από μολυσμένα φίλτρα αφύγρανσης, ή/και αναμίξεις δειγμάτων και συχνά επαυξάνουν την πρόσθετη ποσότητα των PCBs. Αυτά, οδηγούνται στο χαρτί της μόνωσης και πρακτικά δεν μπορεί να αφαιρεθούν από τη διάταξη του ΜΣ.

Σε πολλές περιπτώσεις οι μονάδες που λειτουργούν μπορεί να περιέχουν ακόμη PCB σε πολύ χαμηλή συγκέντρωση, που βελτιώνει την ηλεκτρική τους απόδοση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, τα αποδεκτά όρια για τα περιεχόμενα PCBs στο έλαιο των μετασχηματιστών, μειώθηκαν πρόσφατα στις Η.Π.Α. από τα 50 ppm στα 2 ppm και η μέτρησή τους γίνεται από εξειδικευμένα εργαστήρια σύμφωνα με ειδικά πρότυπα μετρήσεων . Η ποσότητα αυτή της πρόσμιξης θεωρείται κρίσιμη, προκειμένου να δοθεί έγκριση για τη θερμική καταστροφή των διατάξεων και υλικών, που έχουν ήδη ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής τους. Χρειάζεται προσοχή, καθώς η καύση αντικειμένων που εμπεριέχουν PCBs, ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, οδηγεί στο σχηματισμό διοξεινών στην ατμόσφαιρα, οι οποίες μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις και μέσω της αναπνευστικής και τροφικής οδού καταλήγουν στους ανθρώπινους οργανισμούς -Οι διοξίνες κυρίως προσβάλλουν το ανοσοποιητικό σύστημα του ανθρώπου και ευθύνονται για σειρά καρκινογενέσεων-. Σε διαφορετική περίπτωση, είναι αναγκαία η χημική καταστροφή (αντί της θερμικής) γεγονός που εμπεριέχει πολύπλοκες χημικές διεργασίες.



Σχ. 4.3 Απόσυρση μετασχηματιστών με PCB και η σχετική ετικέτα

4.3.3 Άλλα ηλεκτρομονωτικά έλαια

Ψάχνοντας για μη-τοξικά και δυσανάφλεκτα αντικατάστατα των συνθετικών λαδιών με PCBs, αυτά που προορίζονται είναι τα σιλικονούχα λάδια, οι εστέρες και τα φυτικά έλαια.

4.3.3.1 Υγροί εστέρες

Οι υγροί εστέρες αποτελούνται από πενταερυθριτολ-τετραεστέρες (pentaerythritol tetraester) και διάφορα λιπαρά οξέα, και οι χημικές δομές τους δίνονται στη βιβλιογραφία. Δεν είναι τοξικοί, αφομοιώνονται εύκολα από μικροοργανισμούς και έχουν χαμηλή πίεση ατμών στις θερμορασίες λειτουργίας μετασχηματιστών υψηλής τάσης (20° C έως 90° C). Κατά την καύση τους δεν παράγουν διοξίνες ή τοξικά προϊόντα και έχουν πολύ καλή βιοδιασπασιμότητα. Οι υγροί εστέρες έχουν καλές φυσικοχημικές ιδιότητες, ενώ το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους είναι η ικανότητά τους να στεγνώνουν τη στερεά μόνωση (εμποτισμένο χαρτί) από τα ελίγματα των μετασχηματιστών. Εντούτοις, είναι επιρρεπείς σε πιθανή υδρόλυση λόγω του υψηλού βαθμού κορεσμού τους .

4.3.3.2 Υγρά σιλικόνης

Τα υγρά σιλικόνης ανήκουν χημικά στα πολύ-διμεθυλοσιλοξάνια (poly-dimethyl siloxanes), και οι χημικές δομές τους δίνονται στη βιβλιογραφία. Οι μετασχηματιστές στους οποίους χρησιμοποιούνται πληρούν τις περισσότερες από τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις και τις απαιτήσεις πυροπροστασίας. Τα υγρά σιλικόνης είναι περιβαλλοντικά ουδέτερα, και δρουν ως επιβραδυντικά σε περίπτωση πυρκαγιάς. Επιπλέον, σε περίπτωση διαρροής δεν απειλούν τους ζωντανούς οργανισμούς. Όσον αφορά στις ιδιότητες και την ψυκτική τους ικανότητα, τα υγρά σιλικόνης μπορούν να συγκριθούν με τα ορυκτέλαια. Τα υγρά σιλικόνης είναι άχρωμα και χαρακτηρίζονται από την πολύ χαμηλή θερμοκρασία ροής τους, συγκρινόμενα με τα ορυκτέλαια, ακόμα κι αν το ιξώδες τους είναι υψηλότερο.

4.3.3.3 Φυτικά έλαια

Για περισσότερο από 100 χρόνια τα ορυκτέλαια κυριαρχούν στο χώρο ηλεκτρομονωτικών υγρών που χρησιμοποιούνται κυρίως στους μετασχηματιστές ισχύος. Η τεράστια αυτή δημοτικότητα τους οφείλεται στις πολύ καλές διηλεκτρικές και ψυκτικές τους ιδιότητες. Στην εποχή μας όμως για λόγους που αναφέρουμε παρακάτω γεννήθηκε η ανάγκη αντικατάστασής τους. Αυτοί οι λόγοι είναι οι εξής:

1. Τα ορυκτέλαια χαρακτηρίζονται από πολύ μικρή βιοδιασπασιμότητα. Μπορούν πολύ εύκολα να μολύνουν το έδαφος και κατά συνέπεια τον υδροφόρο ορίζοντα. Το πρόβλημα αυτό οξύνεται αν σκεφτεί κανείς ότι οι περισσότεροι μετασχηματιστές είναι εγκατεστημένοι κοντά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.
2. Τα αποθέματα πετρελαίου μειώνονται δραματικά, αφού δεν έχει βρεθεί καμμία εναλλακτική πηγή ενέργειας ακόμα που να τύχει ευρείας διάδοσης και πιστεύεται ότι θα υπάρξει σοβαρή έλλειψη κατά τα μέσα του αιώνα που διανύουμε.
3. Τα συνθετικά έλαια (PCBs) που κατά καιρούς κατασκευάστηκαν, αποδείχθηκαν βλαβερά για την ανθρώπινη υγεία.

Αυτά τα προβλήματα οδήγησαν στην αναζήτηση νέων πηγών για την παρασκευή ηλεκτρομονωτικών ελαίων, με κύριο πεδίο την ανάπτυξη φυτικών ελαίων. Από τα τέλη του 1962 είχε ήδη προταθεί η χρήση φυτικών ελαίων (βαμβακέλαιο, καστορέλαιο) σε πυκνωτές. Το 1971, Ινδοί ερευνητές πρότειναν τη χρήση ελαίου καρύδας και φυστικέλαιου σε συσκευές ισχύος. Στη συνέχεια όμως το 1974, η ίδια ομάδα ερευνητών αποφάνθηκε ότι το πλέον κατάλληλο έλαιο για χρήση σε πυκνωτές ήταν το καστορέλαιο. Σε αυτό το συμπέρασμα κατέληξαν και άλλοι ερευνητές, κατά το διάστημα 1979-1983. Κατά το 1985 μια αμερικάνικη ευρεσιτεχνία περιέγραψε την πιθανή χρήση σογιέλαιου σε πυκνωτές. Το 1990 το έλαιο από σπόρους ελαιοκράμβης έγινε το κέντρο του ενδιαφέροντος. Επειδή αυτό το έλαιο δεν ήταν βρώσιμο και υπήρχε σε μεγάλες ποσότητες η χρήση του ήταν ελπιδοφόρα.

Η χρήση φυτικών ελαίων σε μετασχηματιστές ισχύος, όμως, απαιτούσε περαιτέρω επεξεργασία τους, αφού χρειαζόνταν ισχυρότερες ηλεκτρομονωτικές ιδιότητες. Τα έλαια αυτά θα έπρεπε να είναι απαλλαγμένα από αγωγίμα ιοντικά κατάλοιπα, και τα φυτικά έλαια που κυκλοφορούν στο εμπόριο δεν έχουν τέτοιες ιδιότητες. Το πρώτο φυτικό έλαιο που παράχθηκε για εμπρική χρήση σε μετασχηματιστές ισχύος ήταν το BIOTEMP, το 1999. Βάση του ήταν φυτικό έλαιο με περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 80% σε έλαιο που παράχθηκε από επιλεγμένους καρπούς μετά από γενετικές τροποποιήσεις τους.

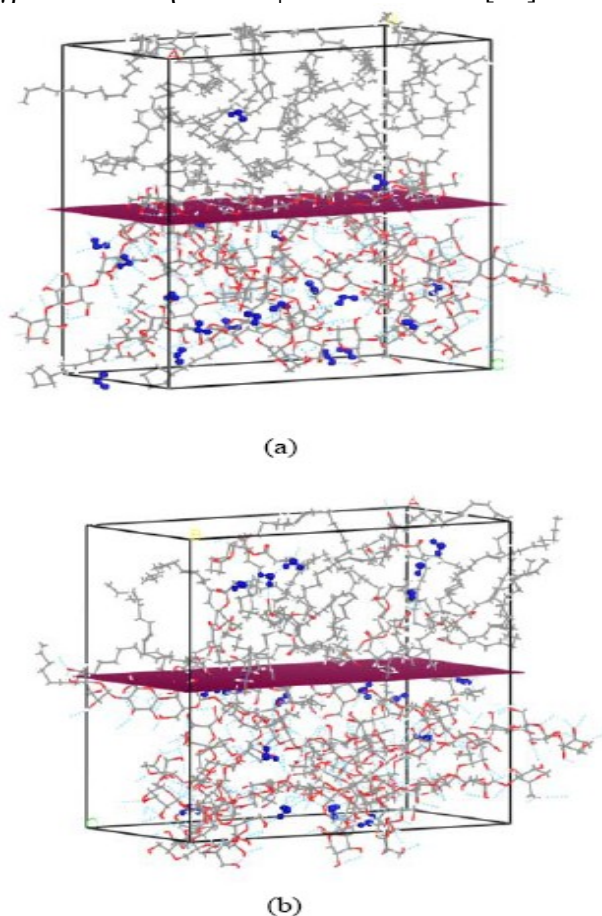
Παρακάτω δίνεται ένας τυπικός πίνακας σύγκρισης των λαδιών σε σχέση με τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά τους:

Ιδιότητα	Ορυκτέλαιο	Σιλικόνες	Φυτικά	Εστέρες
Διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r)	2,2	2,71	3,1	3,3
Εφαπτομένη απωλειών - 90°C	$>10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	-	$1 \cdot 10^{-4}$
Σημείο ανάφλεξης	°C	130-135	300	257
Σημείο καύσης	°C	150-175	340	310
Διαλυτότητα στο νερό (20°C)	ppm	45	200	1200
Τάση διάσπασης	kV	68	73	85
Τοξικότητα	ελαφρώς	OXI	OXI	OXI
Οξύτητα	0,01	-	0,06	0,01
Κινηματικό ιξώδες (25°C)	300	-	55-75	50
Χρώμα	Ανοιχτό κίτρινο	άχρωμο	Ανοιχτό κίτρινο	Ανοιχτό κίτρινο

Πίνακας 4. 2 Συγκριτικός πίνακας των βασικών ηλεκτρομονωτικών ελαίων

Λόγω του υψηλού τους κόστους και της χαμηλής διαθεσιμότητάς τους χρησιμοποιούνται μόνο σε εξειδικευμένες εφαρμογές. Οι εστέρες, τα σιλικονούχα λάδια και τα φυτικά έλαια ανήκουν στην κατηγορία υλικών με υψηλό σημείο ανάφλεξης (HFP- high fire point) και επομένως έχουν ελάχιστο σημείο ανάφλεξης τους 300°C. Παρά ότι αυτά τα λάδια είναι και οικολογικά και έχουν χαμηλή αναφλεξιμότητα, χαρακτηρίζονται ως υγροσκοπικά (ή υδρόφιλα) καθώς έχουν μεγάλη απορρόφηση της υγρασίας, η οποία σε θερμοκρασία δωματίου είναι πάνω από 200ppm σε σύγκριση με 45ppm των ορυκτέλαιων. Επομένως, εφόσον η υγρασία αποτελεί το μεγαλύτερο εχθρό των μονώσεων, ιδίως στη συχνότητα λειτουργίας των δικτύων, αλλά και λόγω των άλλων λόγων που αναφέραμε προτιμούμε τα ορυκτέλαια.

Με βάση το παρακάτω διάγραμμα δύο φάσεων (υγρή-στερεά) φαίνεται ότι τα περισσότερα μόρια νερού για το ορυκτέλαιο συγκεντρώνονται στο μονωτικό χαρτί, ενώ για το φυτικό έλαιο αρκετά μόρια συγκεντρώνονται και στο έλαιο. Αυτή η προσομοίωση δείχνει ξεκάθαρα την υγροσκοπικότητα των φυτικών ελαίων [15].



Σχ.4.4 Προσομοίωση της κατανομής μορίων του νερού (a) σε ορυκτέλαιο-χαρτί (b) σε φυτικό έλαιο-χαρτί

Επίσης, όπως παρατηρούμε από τον πίνακα, πέρα από το ότι είναι σχετικά υγροσκοπικά τα φυτικά έλαια έχουν σχετικά αυξημένο βαθμό οξύτητας, πράγμα που σημαίνει πιο έντονη διαβρωτική ικανότητα στα μεταλλικά μέρη των συσκευών. Ακόμη, τα φυτικά έλαια, οι εστέρες και οι σιλικόνες έχουν σε σχέση με τα ορυκτέλαια μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά και έχει παρατηρηθεί σημαντική αύξηση της εφαπτομένης απωλειών $\tan\delta$ κατά τη γήρανση του λαδιού. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες αποτρέπουν την χρήση αυτών των λαδιών σαν ηλεκτρομονωτικά σε ευρεία γκάμα συσκευών.

4.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

4.4.1 Γενικά

Το γενικό επίπεδο γνώσης επί της ηλεκτρικής διάσπασης σε υγρά είναι λιγότερο γνωστό από ότι είναι στην περίπτωση των αερίων ή ακόμη και των στερεών. Πολλές απόψεις για τη διάσπαση υγρών έχουν ερευνηθεί κατά τις τελευταίες δεκαετίες, αλλά τα ευρήματα και τα συμπεράσματα πολλών ερευνητών δε μπορούν να εναρμονιστούν και να παράγουν μια γενική θεωρία εφαρμόσιμη σε υγρά. Η κύρια αιτία για αυτήν την κατάσταση είναι η έλλειψη αναλυτικής θεωρίας όσο αφορά στη φυσική βάση της υγρής κατάστασης, η οποία θεωρία θα σχημάτιζε τη σκελετική δομή με την οποία οι παρατηρήσεις θα μπορούσαν να συγκριθούν και να συσχετισθούν.

Εντενείς ανασκοπήσεις των δημοσιευμένων δεδομένων επί του θέματος έχουν γίνει περιοδικά και οι πιο πρόσφατες περιλαμβάνουν αυτές των Lewis, Swann, Kok, Krasucki, Zaky, Hawley και Gallagher. Η όλη εργασία εμπίπτει γενικά σε δύο σχολές απόψεων. Η μια εξ αυτών επιχειρεί να ερμηνεύσει τη διάσπαση υγρών με ένα πρότυπο το οποίο είναι επέκταση της αέριας διάσπασης, στηριγμένο στον ιονισμό στοιβάδας των ατόμων που προκαλείται από κρούσεις ηλεκτρονίων μέσα στο εφαρμοζόμενο πεδίο. Τα ηλεκτρόνια θεωρούνται να εγγέονται από την κάθοδο στο υγρό είτε μέσω εκπομπής πεδίου, είτε μέσω θερμοϊονικού φαινομένου (Schottky) ενισχυμένου από το πεδίο. Αυτός ο τύπος μηχανισμού διάσπασης έχει θεωρηθεί ότι εφαρμόζεται σε ομογενή υγρά υπερβολικής καθαρότητας και δεν εφαρμόζεται σε εμπορικά εκμεταλλεύσιμη υγρή μόνωση.

Η δεύτερη σχολή ερμηνεύει τη διάσπαση των υγρών ως αποτέλεσμα παρουσίας ξένων σωματιδίων. Σε μια προσέγγιση έχει διατυπωθεί αξιωματικά ότι τα αιωρούμενα σωματίδια πολώνονται και είναι υψηλότερης διαπερατότητας από το υγρό. Ως αποτέλεσμα, αυτά υποβάλλονται σε μια ηλεκτρική δύναμη κατευθυνόμενη προς τη θέση μέγιστης έντασης. Με ηλεκτρόδια ομοιόμορφου πεδίου εκλαμβάνεται να εκκινεί από επιφανειακές ανωμαλίες των ηλεκτροδίων, οι οποίες εγείρουν τοπικές πεδιακές βαθμώσεις. Η συσσώρευση σωματιδίων συνεχίζεται και τείνει να σχηματίσει μία ζεύξη κατά μήκος του διακένου, η οποία οδηγεί σε έναρξη διάσπασης.

Οι ρύποι μπορεί επίσης να είναι αέριες φυσαλλίδες χαμηλότερης έντασης διάσπασης από το υγρό, περίπτωση κατά την οποία η διάσπαση της φυσαλλίδας δύναται να πυροδοτήσει την πλήρη διάσπαση του υγρού. Οι βασικοί μηχανισμοί διάσπασης που εντοπίζονται αναλύονται παρακάτω.

4.4.2 Ηλεκτρονική διάσπαση

Αμφότεροι οι μηχανισμοί εκπομπής πεδίου και θερμοϊονικής εκπομπής ενισχυμένης από πεδίο, έχουν θεωρηθεί υπεύθυνοι για το ρεύμα στην κάθοδο. Μελέτες αγωγής σε μονωτικά υγρά για υψηλά πεδία δείχνουν ότι τα περισσότερα πειραματικά δεδομένα για το ρεύμα προσαρμόζονται καλά στην τύπου Schottky εξίσωση, στην οποία το ρεύμα είναι εξαρτημένο από τη θερμοκρασία. Μετρήσεις διάσπασης ωστόσο δείχνουν μικρή θερμοκρασιακή εξάρτηση. Αυτό υποδεικνύει ότι η καθοδική διαδικασία είναι μάλλον εκπομπή πεδίου παρά θερμοϊονική εκπομπή.

Μόλις το ηλεκτρόνιο εγγυθεί μέσα στο υγρό κερδίζει ενέργεια από το εφαρμοζόμενο πεδίο. Στην ηλεκτρονική θεωρία διάσπασης εικάζεται ότι μερικά ηλεκτρόνια κερδίζουν περισσότερη ενέργεια από το πεδίο, από ότι αυτά απολύουν σε κρούσεις με μόρια. Αυτά τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται μέχρι να κερδίσουν επαρκή ενέργεια για να ιονίσουν μόρια επί κρούσεων και εκκινήσουν στοιβάδα.

4.4.3 Μηχανισμός αιωρούμενων στερεών σωματιδίων

Στερεοί ρύποι μπορούν να είναι παρόντες στο υγρό, είτε ως ίνες είτε ως διεσπαρμένα στερεά σωματίδια. Ας θεωρήσουμε ένα σφαιρικό σωματίδιο ακτίνας r και διαπερατότητας ϵ να αιωρείται σε διηλεκτρικό υγρό διαπερατότητας ϵ_{liq} . Τότε, εντός ενός πεδίου το σωματίδιο θα πολωθεί και θα υποστεί μια δύναμη που δίνεται από τη σχέση

$$F_e = \epsilon_{liq} r^3 = (\epsilon - \epsilon_{liq}) E \text{ grad} E / (E - 2 \epsilon_{liq})$$

Αυτή η δύναμη κατευθύνεται προς τη θέση μέγιστης έντασης αν $\epsilon > \epsilon_{liq}$ αλλά για φυσαλλίδες $\epsilon < \epsilon_{liq}$ κι αυτή έχει την αντίθετη κατεύθυνση. Η δοθείσα δύναμη από την εξίσωση αυξάνει καθώς η διαπερατότητα του αιωρούμενου σωματιδίου αυξάνει και για ένα αγωγίμο σωματίδιο, για το οποίο $\epsilon \rightarrow \infty$, η δύναμη γίνεται

$$F_e = F_\infty = r^3 E \text{ grad} E$$

Έτσι, η δύναμη παροτρύνει το σωματίδιο να κινηθεί στην περιοχή του ισχυρότερου πεδίου. Σε ένα διάκενο ομοιόμορφου πεδίου, ή διάκενο σφαιρών μικρού μήκους το ισχυρότερο πεδίο είναι στην ομοιόμορφη περιοχή. Αν η διαπερατότητα του σωματιδίου είναι υψηλότερη από αυτή του μέσου, τότε η παρουσία του στην περιοχή ομοιόμορφου πεδίου επιφέρει συγκέντρωση ηλεκτρικής ροής στην επιφάνεια του. Επιπρόσθετα σωματίδια θα ελκυσθούν στην περιοχή υψηλότερης συγκέντρωσης ροής και με τον χρόνο θα ευθυγραμμιστούν από την κεφαλή προς τα πίσω σχηματίζοντας μια ζεύξη κατά μήκος του διακένου. Το πεδίο στο υγρό μεταξύ των σωματιδίων θα ενισχυθεί κι, αν αυτό φθάσει μια κρίσιμη τιμή, έψεται διάσπαση.

4.4.4 Διάσπαση κοιλότητας

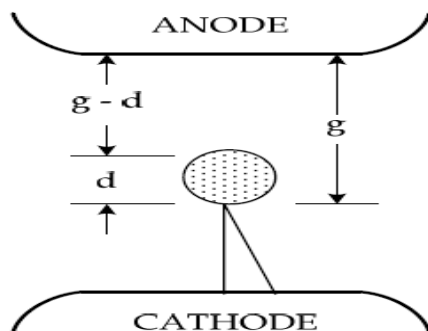
Μονωτικά υγρά δύναται να περιέχουν αέρια υπό τη μορφή φυσαλλίδων. Οι διαδικασίες μέσω των οποίων σχηματίζονται φυσαλλίδες περιλαμβάνουν:

- i. θυλάκια αέρα στην επιφάνεια ηλεκτροδίων
- ii. αλλαγές στη θερμοκρασία και την πίεση
- iii. αποσύνδεση προϊόντων μέσω ηλεκτρονικών κρούσεων, δίνοντας αφορμή για το σχηματισμό αέριων προϊόντων
- iv. εξάτμιση υγρού υπό εκκενώσεις τύπου κορώνας σε ακίδες και ανωμαλίες επί των ηλεκτροδίων

Το ηλεκτρικό πεδίο μέσα σε μια φυσαλίδα αερίου η οποία είναι βυθισμένη σε ένα υγρό διαπερατότητας ϵ_{liq} , δίνεται από τη σχέση:

$$E_b = 3 E_0 / (\epsilon_{liq} + 2) ,$$

όπου E_0 είναι το πεδίο εντός του υγρού απουσία της φυσαλλίδας. Όταν το πεδίο E_b γίνεται ίσο με το πεδίο ιονισμού αέριας φάσης, λαμβάνει χώρα εκκένωση, η οποία οδηγεί σε αποσύνθεση του υγρού και δύναται να ακολουθήσει διάσπαση.

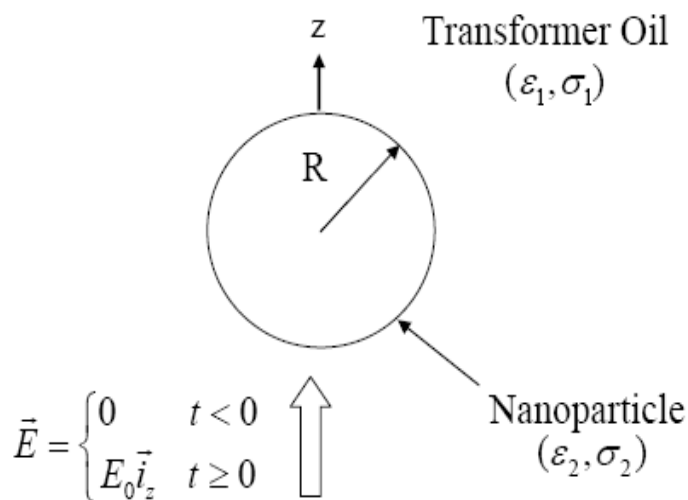


Σχ.4.5 Υπαρξη φυσαλλίδας στο υγρό

4.4.5 Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση

Με βάση προηγούμενη ερευνητική δραστηριότητα οι ερευνητές J. George Hwang,, Markus Zahn, Francis M. O'Sullivan, Leif A. A. Pettersson, Olof Hjortstam, και Rongsheng Liu ανέλυσαν την επίδραση αγώγιμων νανοσωματιδίων σε μονωτικό λάδι μετασχηματιστή. Πειραματικά, κι ενώ αναμενόταν μικρότερη τάση διάσπασης από ότι στο σκέτο λάδι, αποδείχθηκε ότι έχει υψηλότερη καθοδική τάση διάσπασης και μικρότερη ταχύτητα δημιουργίας στοβάδας ηλεκτρονίων. Επίσης, με βάση τη μελέτη αναλύθηκαν ηλεκτροδυναμικά οι διαδικασίες που επιδρούν σε αυτή τη συμπεριφορά και ένα μοντέλο για το σχηματισμό στοιβάδας στη συγκεκριμένη περίπτωση. Με τη χρήση μαθηματικών μεθόδων το μοντέλο παρουσιάζει τα αγώγιμα σωματίδια ως συλλέκτες ηλεκτρονίων μετατρέποντας τα γρήγορα κινούμενα ηλεκτρόνια σε αργά, αρνητικά φορτισμένα σωματίδια. Η έρευνα σκόπευε στο ανιχνευθεί εάν τα νανοσωματίδια μπορούν να χρησιμεύσουν στην ψύξη του πυρήνα των μετασχηματιστών ισχύος.

Για να κατανοήσουμε γιατί το λάδι του μετασχηματιστή αναμεμιγμένο με νανοσωματίδια επιφέρει διαφορετικά χαρακτηριστικά διάσπασης από ότι το σκέτο λάδι, είναι αναγκαίο να κατανοηθεί πώς αυτά επιδρούν στις βασικές ηλεκτροδυναμικές διαδικασίες. Ο χρόνος χαλάρωσης του νανοσωματιδίου έχει μεγάλη επιρροή στο περιεχόμενο των διεργασιών στο λάδι. Αν ο χρόνος χαλάρωσης είναι κοντά στις τιμές για δημιουργία νηματοειδούς αγώγιμου διαύλου (streamer), έχει μεγάλη επίδραση στην ηλεκτροδυναμική του υγρού. Για να υπολογίσουμε μια γενική έκφραση του χρόνου χαλάρωσης υποθέτουμε ένα νανοσωματίδιο ακτίνας R , διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_2 και αγωγιμότητας σ_2 , περιτριγυρισμένο από λάδι μετασχηματιστή αγωγιμότητας $\sigma_1=1 \times 10^{-12}$ S/m και διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_1=2,2 \epsilon_0$.



Σχ. 4.6 Υπαρξη νανοσωματιδίου εντός ηλεκτρομονωτικού ελαίου υπό την επίδραση πεδίου

Τη χρονική στιγμή $t=0_+$ ένα ηλεκτρικό πεδίο στην z -κατεύθυνση E_0 ενεργοποιείται σε απόσταση $r \rightarrow \infty$. Ο υπολογισμός της κατανομής του πεδίου γύρω από το νανοσωματίδιο γίνεται με τη μέθοδο των χωριζομένων μεταβλητών στη λύση της εξίσωσης Laplace σε πολικές συντεταγμένες. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το παράδειγμα του μαγνητίτη Fe_3O_4 και βρέθηκε ότι η σταθερά χρόνου χαλάρωσης είναι εξαιρετικά μικρή, της τάξεως ns/ms, χρονικές κλίμακες ανάλογες με τη διάδοση δενδρίτη. Αυτή είναι ανάλογη της σταθεράς χρόνου που περιγράφει τον ρυθμό φόρτισης του πυκνωτή (το ρόλο του παίζουν τα νανοσωματίδια) σε ένα κύκλωμα RC όταν η πηγή τίθεται υπό λειτουργία [7].

5. ΧΡΗΣΕΙΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ

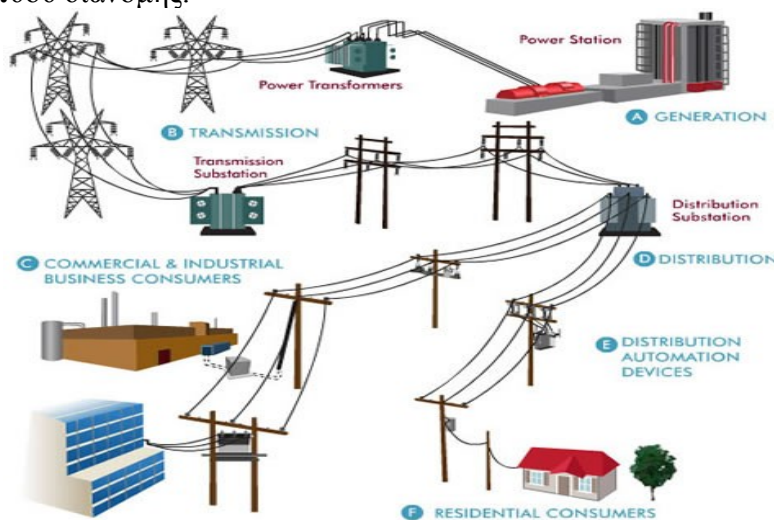
Τα μονωτικά έλαια είναι ευρέως διαδεδομένα και το πεδίο χρήσης τους είναι τεράστιο. Χρησιμοποιούνται κυρίως στην υψηλή τάση και η παρουσία τους είναι συνηθισμένη σε μετασχηματιστές ισχύος, ελαιοδιακόπτες, πυκνωτές, μονωτήρες διελεύσεως και μετασχηματιστές οργάνων. Ανάλογα με τη χρήση τους πρέπει να τηρούν κάποιες απαιτήσεις, όπως για παράδειγμα στους μετασχηματιστές και στους διακόπτες πρέπει να έχουν καλές ψυκτικές ιδιότητες και καλές ηλεκτρικές ιδιότητες με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης. Το λάδι των ελαιοδιακοπών πρέπει να αντέχει στα τόξα που δημιουργούνται χωρίς τον κίνδυνο δημιουργίας εναποθέσεων. Το λάδι των πυκνωτών πρέπει να είναι τελείως μονωτικό για να μην έχουμε απώλειες και να αντέχει σε ψηλές τάσεις, δηλαδή να ελκύει όσο το δυνατόν λιγότερα αέρια (ο ιονισμός των οποίων οδηγεί στη διάσπαση του μονωτικού). Τα χαρακτηριστικά κάθε λαδιού πρέπει να διατηρούνται επί μεγάλο χρονικό διάστημα και ιδίως στους μετασχηματιστές.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στις βασικές χρήσεις των μονωτικών λαδιών καθώς και στις απαιτήσεις που πρέπει να τηρούν αναλόγως της ηλεκτρικής συσκευής που χρησιμοποιούνται.

5.1 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

5.1.1 Εισαγωγή

Η γρήγορη εξέλιξη της χρήσης του ηλεκτρισμού απαιτεί τη βελτίωση του συστήματος ισχύος, δηλαδή την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να υπάρχει ένα υψηλό επίπεδο ασφάλειας και αξιοπιστίας. Αυτό εμπερικλείει και τη δυνατότητα των καταναλωτών του δικτύου να έχουν την επιθυμητή τάση ανάλογα με την εγκατάστασή τους. Οι μετασχηματιστές συνιστούν μια τεχνολογία που καλύπτει αυτή την ανάγκη και έχει βρεί πολλαπλές και ποικίλλες εφαρμογές εδώ και δεκαετίες. Καλύπτουν ανάγκες μιας ευρείας γκάμας εγκαταστάσεων, από τις πλέον μεγάλες είναι οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί και από τις πλέον μικρές οι οικιακές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Καθοριστική είναι η ύπαρξη των μετασχηματιστών στην ανύψωση και τον υποβιβασμό της τάσης στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία ως γνωστόν είναι εξαιρετικά εκτεταμένα και καλύπτουν τα κέντρα κατανάλωσης του εθνικού ηλεκτρικού δικτύου διανομής.



Σχήμα 5.1 Δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Καθώς η σφαίρα εφαρμογών των μετασχηματιστών είναι ευρεία, έχουμε διαφορετικούς τύπους μετασχηματιστών που ο σκοπός τους καθορίζει και τον τρόπο κατασκευής τους. Για παράδειγμα στους μετασχηματιστές τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, η κύρια απαίτηση συνίσταται στην πιστότητα αναπαραγωγής του σήματος, σε ευρεία περιοχή συχνότητας και τάσης. Στους μετασχηματιστές αυτούς το υλικό, οι διαστάσεις και η διάταξη των τυλιγμάτων υπαγορεύονται από την ανάγκη ύπαρξης ηλεκτρικών και μαγνητικών χαρακτηριστικών, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα ικανοποιητική απόκριση συχνότητας και ανεκτή παραμόρφωση. Οι συνήθεις τύποι μετασχηματιστών είναι:

α) Μετασχηματιστές ισχύος : Χρησιμοποιούνται στους σταθμούς παραγωγής για την ανύψωση της τάσης και στους υποσταθμούς (ΥΣ) για την ανύψωση ή για τον υποβιβασμό της τάσης μέχρι τη Μέση Τάση. Η ισχύς υπερβαίνει συνήθως τα 2MVA.

β) Μετασχηματιστές διανομής : Χρησιμοποιούνται στο δίκτυο διανομής για να μεταφέρουν ενέργεια από τη μέση τάση στο δίκτυο χαμηλής τάσης των καταναλωτών. Η ισχύς τους είναι από 50kVA έως και 1600kVA.

γ) Αυτομετασχηματιστές : για τη μετατροπή τάσεων εντός σχετικά μικρών ορίων, για σύνδεση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας διαφόρων τάσεων, για εκκίνηση κινητήρων Ε.Ρ. κ.λ.π.

δ) Μετασχηματιστές δοκιμών : για εκτέλεση δοκιμών με υψηλή και υπερυψηλή τάση

ε) Μετασχηματιστές ανόρθωσης

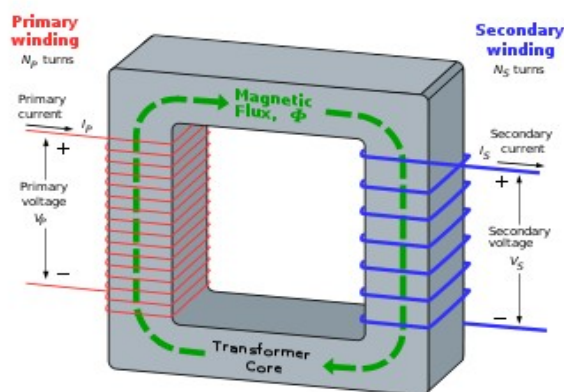
στ) Μετασχηματιστές μετρήσεων : για σύνδεση οργάνων μετρήσεως σε δίκτυα με σκοπό τη μέτρηση της τάσεως και της εντάσεως

ζ) Μετασχηματιστές τηλεπικοινωνιών

Εν τούτοις σε όλες τις περιπτώσεις, οι κύριες μέθοδοι καθορισμού της λειτουργίας ενός μετασχηματιστή καθώς και της μελέτης των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε αυτόν, είναι ουσιαστικά οι ίδιες.

5.1.2 Δομή μετασχηματιστή

Ο μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική μηχανή με σταθερά μέρη, η οποία έχει δύο πηνία για κάθε φάση τα οποία είναι μαγνητικά συζευγμένα και ηλεκτρικά ανεξάρτητα μεταξύ τους. Το τύλιγμα που τροφοδοτούμε το ονομάζουμε πρωτεύον και αυτό από το οποίο παίρνουμε την ηλεκτρική ενέργεια με μετασχηματισμένη τάση το ονομάζουμε δευτερεύον.



Σχ. 5.2 Απλοποιημένη δομή μονοφασικού μετασχηματιστή

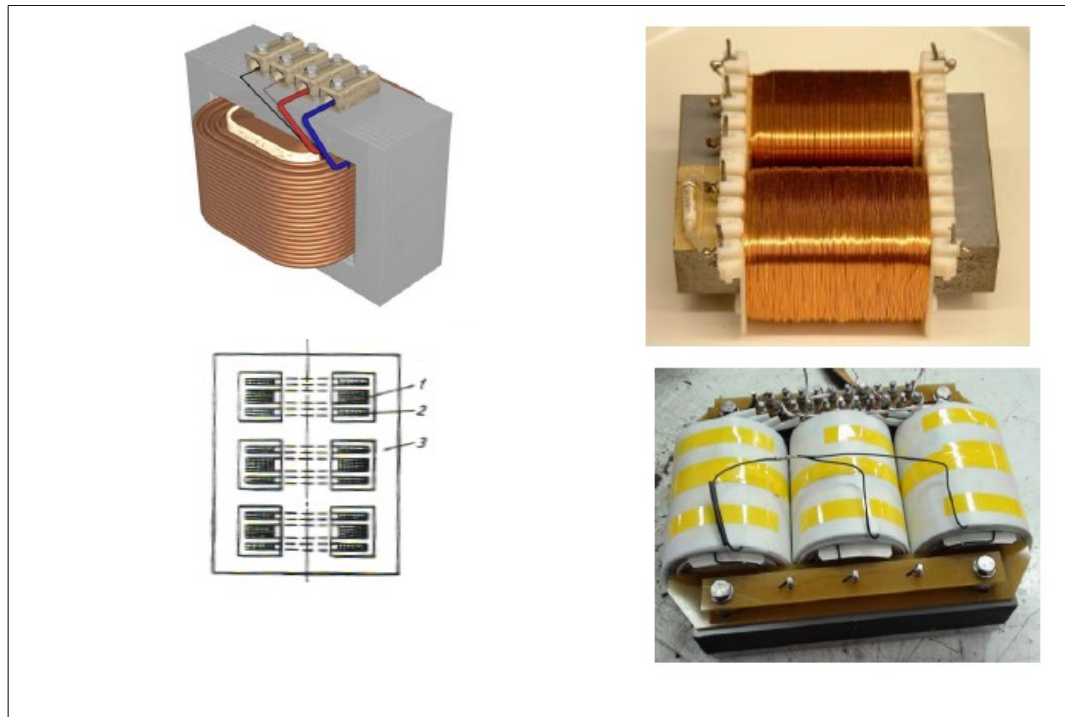
Η λειτουργία του μετασχηματιστή βασίζεται σε δύο αρχές: πρώτον ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να παράγει μαγνητικό πεδίο και δεύτερον ότι ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που διαρρέει ένα πηνίο επάγει τάση στα άκρα του πηνίου. Επομένως αλλάζοντας το ρεύμα στο πρωτεύον αλλάζει η μαγνητική ροή που εγκαθίσταται και η μεταβολή της μαγνητικής ροής επάγει μια τάση στο δευτερεύον του πηνίου. Ένας ιδανικός μετασχηματιστής όπως δείχνεται στο σχήμα 5.2 έχει εγκατεστημένα τα πηνία του τυλιγμένα γύρω από έναν πυρήνα πολύ υψηλής μαγνητικής επιτρεπτότητας, όπως ο σίδηρος, έτσι ώστε η μαγνητική ροή να διατρέχει και τα δύο πηνία. Από το νόμο επαγωγής του Faraday $V=N \frac{d\Phi}{dt}$ και με βάση ότι η μαγνητική ροή Φ που διαρρέει τα δύο πηνία είναι κοινή,

έχουμε $\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$ όπου N_s, N_p ο αριθμός των ελιγμάτων του πρωτεύοντος και του

δευτερεύοντος αντίστοιχα και V_s, V_p οι τάσεις τους. Βέβαια στον πραγματικό μετασχηματιστή η βασική διαφορά είναι, ότι δεν είναι όλη η μαγνητική ροή που παράγεται στο πρωτεύον τυλίγμα, ωφέλιμη. Ένα κομμάτι αυτής κλείνει μέσω του αέρα χωρίς να συμπεριλάβει το δευτερεύον και ονομάζεται ροή σκεδάσεως.

Ανάλογα με τη χρήση του μετασχηματιστή έχουμε αντίστοιχα επίπεδα τάσεως λειτουργίας και αντίστοιχα μονοφασικούς και τριφασικούς μετασχηματιστές. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μονοφασικών και τριφασικών μετασχηματιστών:

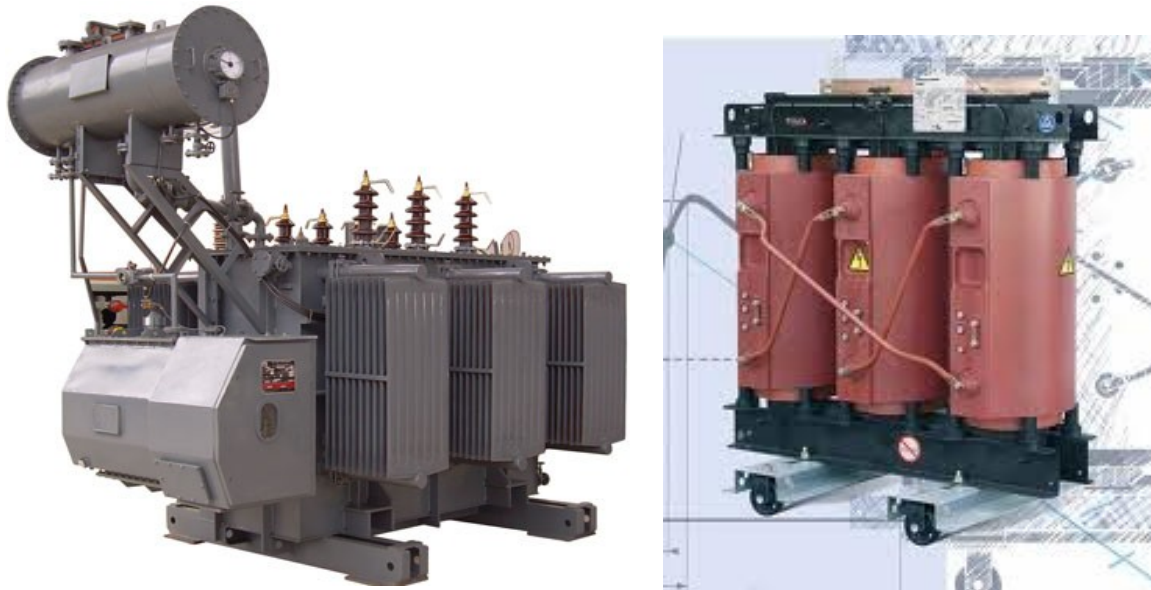
- τύπος πυρήνα: στον μονοφασικό τα τυλίγματα τοποθετούνται στα δύο σκέλη του μαγνητικού κυκλώματος. Κάθε σκέλος αυτού περιλαμβάνει το μισό των ελιγμάτων αμφοτέρων των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Τα δυο σκέλη ενώνονται με ζυγούς οι οποίοι κλείνουν το μαγνητικό κύκλωμα. Στον τριφασικό τύπου πυρήνα έχουμε τρία σκέλη αντί για δύο.
- Τύπος κελύφους: στον μονοφασικό τα τυλίγματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος βρίσκονται στο μεσαίο σκέλος και το μαγνητικό κύκλωμα διαθλείται τώρα τρία σκέλη. Η διατομή του μεσαίου σκέλους είναι περίπου διπλάσια των δύο άλλων σκελών διότι η συνολική ροή στο μεσαίο σκέλος διανέμεται έτσι ώστε τα εξωτερικά σκέλη και οι ζυγοί να διαρρέονται από το μισό της ροής. Στον τριφασικό τύπου κελύφους έχουμε απλά συνένωση τριών μονοφασικών μετασχηματιστών τύπου κελύφους.



Σχ.5.3 Αριστερά: μονοφασικός μετασχηματιστής κελύφους (πάνω) και αντίστοιχος τριφασικός (κάτω) Δεξιά: Μονοφασικός μετασχηματιστής τύπου πυρήνα (πάνω) και ο αντίστοιχος τριφασικός (κάτω)

5.1.3 Μετασχηματιστές ισχύος

Η εργασία μας επικεντρώνεται στους μετασχηματιστές ισχύος μέσης και υψηλής τάσης οι οποίοι είναι τριφασικοί και είναι συνήθως τύπου πυρήνα. Αυτοί όπως είναι λογικό εμφανίζουν σημαντικές θερμικές απώλειες λόγω και των τυλιγμάτων (ωμικές απώλειες) και λόγω του πυρήνα (από υστέρηση και δινορρεύματα). Η απαγωγή της θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο και η ηλεκτρική μόνωση μεταξύ των μερών του μετασχηματιστή επιτυγχάνεται γενικά με αέρα ή με λάδι. Με βάση το μέσο ηλεκτρικής και θερμικής μόνωσης τους χωρίζονται σε μετασχηματιστές λαδιού και μετασχηματιστές ξηρού τύπου. Οι ξηρού τύπου μετασχηματιστές ψύχονται ή με ακτινοβολία και φυσική έλξη (αυτόψυξη) ή με τη βοήθεια ανεμιστήρα (εξωτερικός αερισμός) και χρησιμοποιούνται σε μικρής ισχύος μετασχηματιστές, μέχρι 25 kVA .



Σχ. 5. 4 Αριστερά: Μετασχηματιστής λαδιού (air-breathing)
Δεξιά: Μετασχηματιστής ξηρού τύπου

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το λάδι ως μονωτικό έναντι του αέρα είναι τα εξής:

- Το μεγαλύτερο ειδικό βάρος, η μεγαλύτερη ειδική θερμότητα και η μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα του λαδιού έχουν ως αποτέλεσμα την καλή απαγωγή θερμότητας των απωλειών σιδήρου (λόγω του πυρήνα) και χαλκού (λόγω των ελιγμάτων) και τη δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλης ποσότητας ενέργειας θερμότητας
- Το λάδι αντέχει σε υψηλότερες τάσεις παρά ο αέρας επειδή η αντοχή διασπάσεως του λαδιού μετασχηματιστών είναι περίπου εξαπλάσια

Επομένως στην πλειοψηφία των εφαρμογών χρησιμοποιούμε μετασχηματιστές λαδιού σε αυτές τις τάσεις, οι οποίοι ανάλογα με το αν ψύχεται το λάδι ή όχι χωρίζονται σε air-breathing (χρησιμοποιούν φίλτρα για την αφαίρεση της υγρασίας και η ψύξη του λαδιού γίνεται από τον αέρα) και σε hermetic (όπου το λάδι δεν ψύχεται). Η μεγάλη πλειοψηφία των μετασχηματιστών λαδιού είναι air-breathing.

5.1.3.1 Βασικά κατασκευαστικά μέρη μετασχηματιστή ισχύος λαδιού

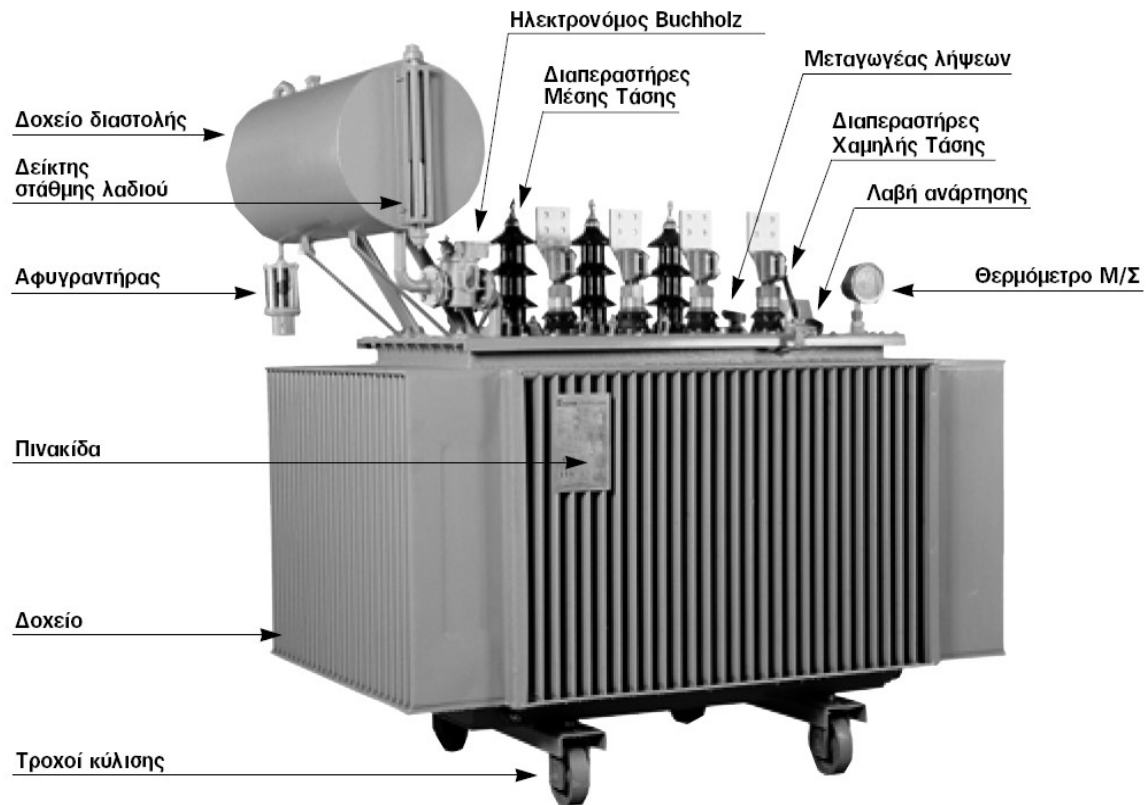
Τα βασικά μέρη ενός μετασχηματιστή μεγάλης ισχύος με ηλεκτρομονωτικό λάδι είναι:

- Ένα κατάλληλο χαλύβδινο δοχείο που περικλείει τον πυρήνα και τα τυλίγματα το οποίο είναι γεμάτο με μονωτικό λάδι. Στο πάνω μέρος του δοχείου υπάχει σιδερένιο καπάκι που στερεώνεται στο δοχείο περιφερειακά με βίδες. Πάνω στο καπάκι τοποθετούνται οι μονωτήρες μέσης και υψηλής τάσης, ενώ στα πλευρικά βρίσκονται κατάλληλες υποδοχές για την τοποθέτηση των ψυγείων ψύξεως του λαδιού.

Όταν τα τυλίγματα του μετασχηματιστή διαρρέονται από ρεύμα εκλύεται κατά το γνωστό φαινόμενο Joule θερμότητα. Έτσι έχουμε μια απώλεια ενέργειας από το χαλκό των τυλιγμάτων. Ωστόσο θερμότητα εκλύεται επίσης από τον πυρήνα λόγω κυκλοφορίας μέσα σε αυτόν των δινορρευμάτων. Η θερμότητα που εκλύεται πρέπει να αποβάλλεται στο περιβάλλον για να μην πλησιάζει η θερμοκρασία του μετασχηματιστή σε επικίνδυνα όρια. Το μονωτικό λάδι είναι αυτό που λειτουργεί σαν ψυκτικό μέσο. Τα τυλίγματα κατασκευάζονται από σύρματα μονωμένα.

- Το σώμα του πυρήνα αποτελείται από λεπτά σιδερένια ελάσματα, μονωμένα μεταξύ τους ηλεκτρικά. Επειδή στον πυρήνα εμφανίζεται το φαινόμενο της ανάπτυξης δινορρευμάτων με κατάλληλη κατεργασία μετάλλων και με κατάλληλες προσμίξεις έχει επιτευχθεί η μείωση των απωλειών του πυρήνα στο ελάχιστο. Τα ελάσματα πρέπει να έχουν κατάλληλο σχήμα ώστε να μπαίνουν τα πηνία εύκολα στα ανοίγματα που σχηματίζουν.
- Τους μονωτήρες μέσης και υψηλής τάσης που χρησιμεύουν για την ασφαλή διέλευση του ρεύματος. Οι μονωτήρες υψηλής τάσης είναι συνήθως τύπου πυκνωτή. Το εσωτερικό του μονωτήρα αποτελείται από μονωτικό υλικό, συνήθως χαρτί στο οποίο έχουν παρεμβληθεί κύλινδροι από φύλλα κασίτερου ή αλουμινίου. Με τον τρόπο αυτό από τον αγωγό διέλευσης μέχρι το σώμα του μετασχηματιστή παρεμβάλλεται μια σειρά από πυκνωτές ίσης χωρητικότητας. Σκοπός των πυκνωτών αυτών είναι η ομαλή κατανομή της τάσης σε όλο το πάχος του μονωτικού για να μην καταπονούνται ηλεκτρικά ορισμένα τμήματα της μόνωσης. Αναφορικά με τους μονωτήρες μέσης τάσης δύο είναι οι βασικοί τύποι που χρησιμοποιούνται : ο ένας είναι όμοιος με αυτούς της υψηλής τάσης και ο άλλος συνίσταται σε έναν μονωτήρα από πορσελάνη, ο οποίος είναι γεμάτος με λάδι το οποίο επικοινωνεί υδραυλικά με το λάδι ψύξης του μετασχηματιστή.
- Το δοχείο διαστολής, το οποίο χρησιμεύει για να δέχεται την αύξηση του όγκου του λαδιού όταν αυτό θερμαίνεται κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή. Στο δοχείο διαστολής υπάρχει δείκτης στάθμης λαδιού ώστε να ελέγχεται οπτικά η ποσότητα του λαδιού που υπάρχει μέσα σε αυτό. Ο δείκτης μπορεί να είναι ένας απλός γυάλινος σωλήνας που δείχνει τη στάθμη με βάση την αρχή των συγκινουμένων δοχείων ή ένας μαγνητικός δείκτης, που καταγράφει τη στάθμη με μια κατακόρυφη σειρά από μαγνητάκια, τα οποία ενεργοποιούνται από πλωτήρα με μεταλλικό στοιχείο που επιπλέει μέσα στο δοχείο.
- Το ψυγείο του λαδιού που χρησιμεύει για την ψύξη του λαδιού. Για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας τοποθετούνται εξωτερικά του δοχείου του μετασχηματιστή τα ψυγεία που διαθέτουν εκτεταμένες επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας. Στους μετασχηματιστές μμεγάλης ισχύος με λάδι η ψύξη του λαδιού διευκολύνεται ακόμη περισσότερο με την εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα χρησιμοποιώντας ανεμιστήρες
- Την ασφαλιστική διάταξη Bouchholtz, η οποία τοποθετείται μεταξύ του δοχείου διαστολής και του σώματος του μετασχηματιστή. Αυτή φέρει έναν πλωτήρα οπτικής και ηχητικής σήμανσης, έναν πλωτήρα διακοπής, έναν εξαεριστικό κρουνό και έναν κρουνό αποστράγγισης και συνιστά μια διάταξη ευαίσθητη και αξιόπιστη για την προστασία ενός μετασχηματιστή από διαρροή λαδιού και υπερθέρμανση. Αυτό γιατί αν εξαιτίας μιας διαρροής λαδιού αδειάσει το δοχείο διαστολής και κατέβει η στάθμη του λαδιού κάτω από τον πλωτήρα σήμανσης θα κλείσουν οι επαφές της διάταξης Bouchholtz θα ηχήσει σειρήνα και θα αρχίσει να αναβοσβήνει μια λάμπα.

- Τον αφυγραντήρα, που μπορεί να είναι εφοδιασμένος με χημικό φίλτρο ώστε να εμποδίζει την "εισπνοή" της υγρασίας από την ατμόσφαιρα στο δοχείο. Αυτός συνεισφέρει στην ασφαλή και έμπιστη λειτουργία του μετασχηματιστή, καθώς η υγρασία ελαττώνει τη διηλεκτρική δυνατότητα του λαδιού και την μονωτική ικανότητα του μονωτικού χαρτιού



Σχ.5.5 Δομικά μέρη μετασχηματιστή ισχύος

5.1.3.2 Μονωτικό χαρτί

Το μονωτικό χαρτί από πολτό ξύλου, επειδή είναι ευκολότερο να κατασκευαστεί από άλλα υλικά, χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία συστημάτων μόνωσης καλωδίων, πυκνωτών αλλά και μετασχηματιστών. Ο πιο συνηθισμένος τύπος του είναι το Kraft paper. Αποτελείται από 90% κυτταρίνη (cellulose), 6-7% λιγνίνη (lignin) και 3-4% πεντοσάνες (pentosans). Όσον αφορά τους μετασχηματιστές, αποτελεί το βασικό στερεό μονωτή (χρησιμοποιείται ως περιέλιξη στα τυλίγματα), αφού σε ένα μετασχηματιστή υψηλής τάσης μπορεί να περιέχονται περίπου 12 τόνοι μονωτικού χαρτιού και 40 τόνοι μονωτικού ελαίου.

Έχει αποδειχθεί ότι το μονωτικό χαρτί έχει αρκετά καλές φυσικές και χημικές ιδιότητες για να χρησιμοποιηθεί ως ηλεκτρομονωτικό υλικό. Έχει όμως ένα σημαντικό πλεονέκτημα αποσυντίθεται εύκολα. Αυτή η διάσπαση παράγει παραπροϊόντα όπως νερό, CO, CO₂, τα οποία μειώνουν την συνολική ικανότητα μόνωσης και είναι επικίνδυνα για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

5.1.4 Χρόνος ζωής μετασχηματιστή

5.1.4.1 Αιτίες αστοχίας του μετασχηματιστή

Ο χρόνος ζωής ενός μετασχηματιστή αποτελεί τη χρονική διάρκεια κατά την οποία η συσκευή θα μπορεί να εκτελεί τη λειτουργία της στο δίκτυο. Σχετίζεται κυρίως με την υποβάθμιση της μόνωσης, που προκαλείται από τη θερμική καταπόνηση του μονωτικού χαρτιού και από την ηλεκτροχημική αποσύνθεση του λαδιού. Τα παραγόμενα παραπροϊόντα μέσα στο μονωτικό υγρό, είναι το νερό και άλλα συστατικά μερικώς πολωμένου ή ιονισμένου χαρακτήρα. Επίσης, κατά τη διάρκεια της αποικοδόμησης του ελαίου συντελείται η θραύση των μοριακών αλυσίδων των υδρογονανθράκων και αναπτύσσονται αέρια παραπροϊόντα, τα οποία αφήνουν μεγάλες ελεύθερες ρίζες στην υγρή φάση. Οι συγκρούσεις μεταξύ τέτοιων ελεύθερων ριζών παράγουν συνήθως μεγάλα συσσωματώματα κολλοειδών προϊόντων αποσύνθεσης με ένα μέσο μοριακό βάρος από 450 έως 550, τα οποία δεν είναι πλέον διαλυτά στο έλαιο και καθιζάνουν με τη μορφή λάσπης ή στάχτης.

Ο χρόνος ζωής δεν εξαρτάται μόνο από τη φόρτιση, αλλά επηρεάζεται και από τον τύπο του χαρτιού, την σύνθεσή του, την υγρασία και την παρουσία οξυγόνου, όπως και από το επίπεδο οξύτητας του λαδιού. Όσο η υποβάθμιση της μόνωσης εκτιλίσσεται, τα επίπεδα οξύτητας του ορυκτέλαιου αυξάνονται και συμβαίνουν ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μεταξύ του λαδιού και των μεταλλικού εξοπλισμού του μετασχηματιστή (κυρίως με το δοχείο που εμπερικλείει τη συσκευή). Επίσης, η υποβάθμιση του μονωτικού λαδιού μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση της υγρασίας, στην ενίσχυση της πιθανότητας για μικρο-εκκενώσεις της μόνωσης και στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του συστήματος μόνωσης χαρτί-λάδι.

Συχνά, συμβαίνουν αστοχίες σε μετασχηματιστές υψηλής και υπερυψηλής τάσης εξαιτίας του νηματοειδούς αγωγισμού διαύλου ηλεκτρονίων (streaming electrification). Αυτό το φορτίο, δημιουργείται στις διεπιφάνειες μεταξύ του κινούμενου μονωτικού ελαίου και των στερεών μονωτικών υλικών του μετασχηματιστή ισχύος. Επομένως με την πάροδο του χρόνου, η μόνωση του μετασχηματιστή αδυνατίζει και κάθε είδους αστοχίες μπορούν να συμβούν στον μετασχηματιστή, που μπορούν να οδηγήσουν μέχρι και την έκρηξή του. Η έκρηξη του μετασχηματιστή συνοδεύεται με τη διαρροή λαδιού, το οποίο είναι επιβλαβές για το περιβάλλον όπως τα δέντρα, το έδαφος, το νερό και άλλους ζωντανούς οργανισμούς.



Σχ. 5.6 Μετασχηματιστής λαδιού έπειτα από έκρηξη που προηγήθηκε από αστοχία στο εσωτερικό του

Τα αποτελέσματα της καταστροφής ενός μετασχηματιστή, είναι πέραν της καταστροφής του περιβάλλοντος, η επικινδυνότητα για τους εργαζόμενους της περιοχής και το μεγάλο κόστος για την αντικατάστασή του. Βέβαια η γήρανση δεν αποτελεί το μόνο λόγο αστοχίας σε μετασχηματιστή. Εάν συνέβαινε αυτό τότε θα είχαμε πολύ λιγότερα προβλήματα να λύσουμε. Οι αστοχίες προκαλούνται είτε από εσωτερικούς ή από εξωτερικούς παράγοντες. Για τους εσωτερικούς αναφερθήκαμε πιο πάνω (αστοχία μόνωσης, κατασκευαστικά λάθη, "μόλυνση λαδιού") και είναι αυτοί οι οποίοι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων προκαλούν την αστοχία. Ο παρακάτω πίνακας βασίστηκε στην παρατήρηση αστοχιών σε μετασχηματιστές ισχύος όπου φαίνεται ο λόγος που κάθε φορά προκάλεσε την αστοχία (και οι λεγόμενοι εξωτερικοί παράγοντες) και το αντίστοιχο κόστος :

Αιτία αστοχίας	Αριθμός	Κόστος
Αστοχία Μόνωσης	24	\$ 149,967,277
Κατασκευαστική	22	\$ 64,696,051
Άγνωστη	15	\$ 29,776,245
Μόλυνση λαδιού	4	\$ 11,836,367
Υπερφόρτιση	5	\$ 8,568,768
Φωτιά/ Έκρηξη	3	\$ 8,045,771
Line surge	4	\$ 4,959,691
Έλλειψη συντήρησης	5	\$ 3,518,783
Πλημμύρα	2	\$ 2,240,198
Χαλαρή σύνδεση	6	\$ 2,186,725
Κεραυνός	3	\$ 657,935
Υγρασία	1	\$ 175,000
	94	

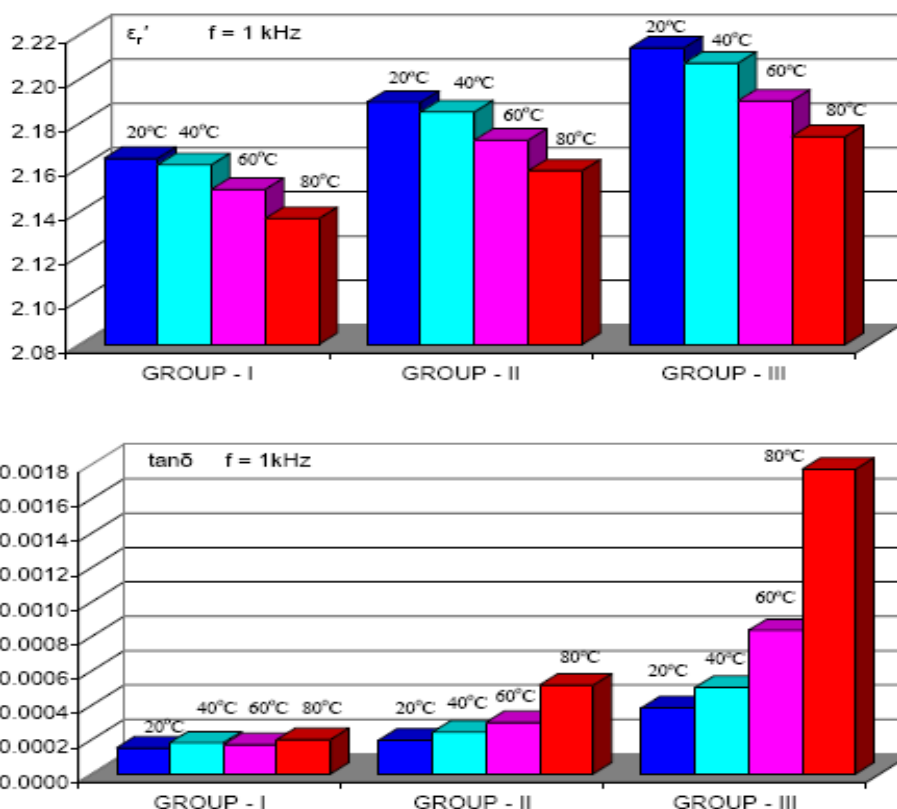
Πίνακας 5.1 Αιτίες αστοχιών (Πηγή: *International Association of engineering insurers*)

Όπως φαίνεται κι από τον πίνακα ο κυριότερος λόγος αστοχιών είναι η δυσλειτουργία της μόνωσης του μετασχηματιστή, που οφείλεται στην οξύτητα, στην οξείδωση και στη θερμότητα.

Σύμφωνα με μελέτες, τα τελευταία χρόνια οι αστοχίες στους μετασχηματιστές του ηλεκτρικού δικτύου έχουν αυξηθεί [11]. Η αυξανόμενη χρησιμοποίηση του εξοπλισμού λόγω των αυξανόμενων αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια σε συνδυασμό με τη μη επένδυση κεφαλαίου για τη συντήρηση και αναβάθμιση του εξοπλισμού οδηγούν σε αυτό το αποτέλεσμα.

5.1.4.2 Επίδραση της γήρανσης του λαδιού στη μιγαδική διηλεκτρική σταθερά

Με βάση τα παραπάνω για διάφορους λόγους προκαλείται υποβάθμιση της μόνωσης του μετασχηματιστή. Κατά τη γήρανση του λαδιού του μετασχηματιστή λόγω του ότι εμφανίζονται παραπροϊόντα η διηλεκτρική σταθερά, όπως και οι διηλεκτρικές απώλειες, αυξάνονται. Όπως είναι λογικό τα αέρια ($O_2, N_2, H_2, CH_4, CO, CO_2, \dots$) και οι υγροί υδρονάνθρακες που δημιουργούνται ως παραπροϊόντα αυξάνουν τη δυνατότητα αποθήκευσης φορτίου καθώς και το ρεύμα απωλειών. Αυτή η διαπίστωση έχει γίνει και με μελέτες. Συγκεκριμένα, δίνουμε πειραματικά αποτελέσματα μελέτης που εκπόνησε το εργαστήριο του Πολυτεχνείου:



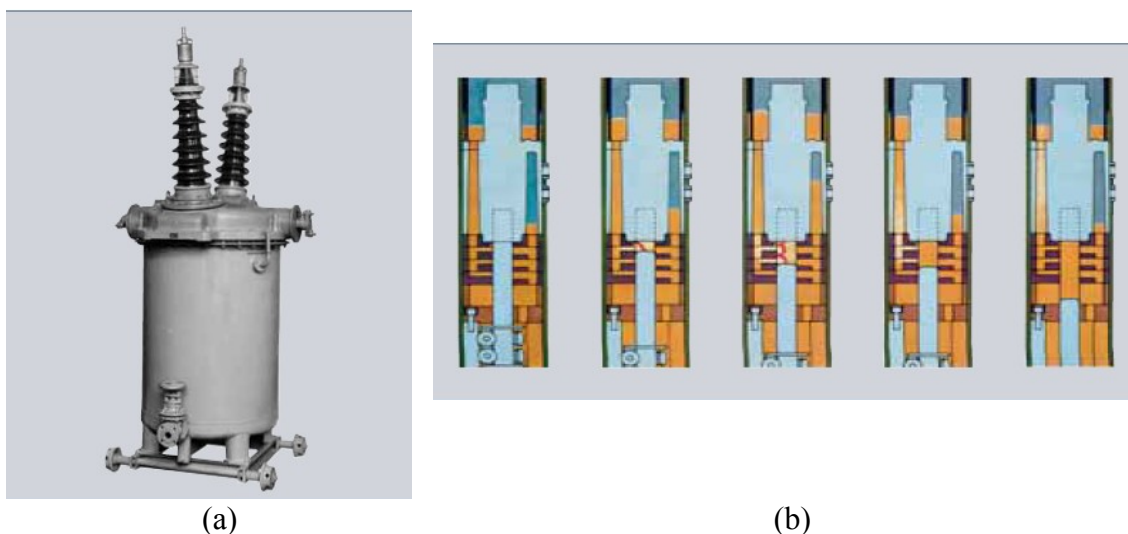
Σχ.5.7 Επίδραση της γήρανσης του λαδιού στην ϵ_r και στην $\tan\delta$ συναρτήσει της θερμοκρασίας

Όπου Group-I, Group-II, Group-III οι ομάδες των δειγμάτων των λαδιών από πραγματικό μετασχηματιστή, ομαδοποιημένες σε σχέση με τα χρόνια λειτουργίας του μετασχηματιστή που συλλέγησαν σε αύξουσα σειρά (Group-I με τα λιγότερα χρόνια λειτουργίας, Group-III με τα περισσότερα). Όπως παρατηρούμε σημαντικό ρόλο στην διηλεκτρική συμπεριφορά του λαδιού παίζει η θερμοκρασία. Αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού προκαλεί μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς του λαδιού και αυξημένες απώλειες ($\tan\delta$) [4].

5.2 ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

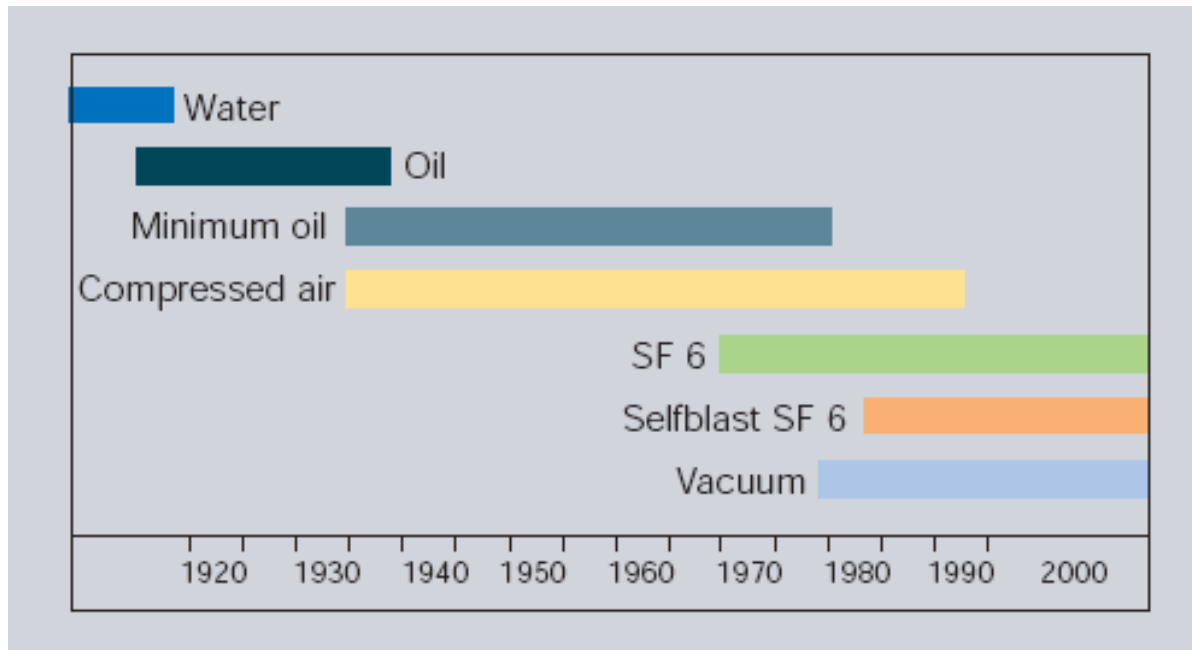
Ο διακόπτης κυκλώματος αποτελεί ένας αυτόματης λειτουργίας ηλεκτρικός διακόπτης που αποσκοπεί στην προστασία ενός ηλεκτρικού κυκλώματος από ζημιές που προκλήθηκαν από υπερφόρτωση ή βραχυκύκλωμα. Σε αντίθεση με την ασφάλεια, η οποία λειτουργεί μία φορά και στη συνέχεια πρέπει να αντικατασταθεί, ο διακόπτης κυκλώματος μπορεί να επαναφέρεται (είτε με το χέρι ή αυτόματα) για να συνεχιστεί η κανονική λειτουργία του. Αυτόματοι διακόπτες κυκλώματος υπάρχουν σε διαφορετικά μεγέθη, από μικρές συσκευές που προστατεύουν ένα άτομο οικιακών συσκευών μέχρι μεγάλους διακόπτες που αποσκοπούν στην προστασία των κυκλωμάτων υψηλής τάσης που τροφοδοτούν μια ολόκληρη πόλη.

Οι διακόπτες που χρησιμοποιούν ως μέσο σβέσης του τόξου μονωτικό λάδι, ονομάζονται διακόπτες ελαίου. Στους διακόπτες ελαίου, το λάδι εξυπηρετεί σε δύο σκοπούς. Λειτουργεί σαν μονωτής μεταξύ των φάσεων και μεταξύ φάσης-γης και αποτελεί το μέσο για την σβέση του τόξου. Όταν το ηλεκτρικό τόξο αποσβέννεται μέσω του λαδιού, το λάδι ατμοποιείται και δημιουργείται μια φυσαλίδα γύρω από το τόξο. Το αέριο στο εσωτερικό της φυσαλίδας είναι κατά 80% υδρογόνο, το οποίο εντείνει τον ιονισμό. Η αποσύνθεση του λαδιού απαιτεί ενέργεια η οποία προέρχεται από τη θερμότητα που γεννά το τόξο. Το λάδι που υπάρχει γύρω από τη φυσαλίδα απομακρύνει τη θερμότητα από το τόξο και επίσης συνεισφέρει στο απο-ιονισμό του τόξου. Το βασικό μειονέκτημα των ελαιδιακοπών είναι η χαμηλή αναφλεξιμότητα του λαδιού και η αναγκασία συντήρησή του ώστε να κρατιέται το λάδι σε καλή κατάσταση (π.χ. αντικατάσταση και καθαρισμός του).



Σχ.5.8 (a) Ελαιδιακόπτης εξωτερικού χώρου, 110 kV, 350 A.
(b) Απόσβεση ηλεκτρικού τόξου σε διακόπτη ελαίου , [12]

Στις τάσεις μετάδοσης κάτω από 345 kV, οι διακόπτες ελαίου ήταν δημοφιλείς. Χάνουν όλο και περισσότερο έδαφος από τους αεριο-μονωτικούς διακόπτες ισχύος, όπως οι διακόπτες κενού και οι διακόπτες SF6. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται αυτή η εξέλιξη στους διακόπτες ισχύος :



Σχ. 5.9 Χρονολογική εξέλιξη των χρησιμοποιούμενων μονωτικών σε διακόπτες

5.3 ΠΥΚΝΩΤΕΣ

Οι πυκνωτές ελαίου χρησιμοποιήθηκαν για πολλά χρόνια σε ποικιλία εφαρμογών υψηλού ρεύματος και υψηλής τάσης όπως ο έλεγχος μηχανής, η εκκίνηση μηχανής και η διόρθωση του συντελεστή ισχύος. Τα τελευταία χρόνια οι υψηλής τάσης πυκνωτές χρησιμοποιούν κερί και πετρέλαιο. Οι πυκνωτές με μόνωση ορυκτέλαιου-χαρτιού και φύλλα αλουμινίου στα ηλεκτρόδια, χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στα 1920s.

Η χρήση του μονωτικού υγρού γίνεται για να ενισχυθεί η μόνωση των πυκνωτών την οποία και διαποτίζει. Ο διαποτισμός γίνεται υπό συνθήκες υψηλού κενού και υψηλής θερμοκρασίας έπειτα υπό την τέλεια ξήρανση. Τα φύλλα αλουμινίου με την ενδιάμεση διαποτισμένη μόνωση κλείνονται μέσα σε στεγανό σφραγιστό μεταλλικό δοχείο, για αυτό δε μπορούμε να αντικαταστήσουμε ή να συμπληρώσουμε υγρό. Αυτό έχει ως συνέπεια, η διάρκεια ζωής του υγρού να είναι διάρκεια ωφέλιμης ζωής του πυκνωτή. Φυσικά το υγρό δε μπορεί να οξειδωθεί αφού δεν έρχεται σε επαφή με τον αέρα και η θερμοκρασία λειτουργίας δεν είναι μεγάλη.



Σχ. 5.10 Πυκνωτές ελαίου 2 μ F και 25 μ F για φιλτράρισμα της dc συνιστώσας

Το υγρό πρέπει να αντέχει σε πεδιακές εντάσεις της τάξης των 100 kV/cm, ενώ στους μετασχηματιστές οι εντάσεις αυτές είναι γύρω στα 45 kV/cm. Αρχικά, τα λάδια των πυκνωτών ήταν όμοια με αυτά των μετασχηματιστών, ενώ τελευταία χρησιμοποιούνται ειδικά λάδια αφού οι συνθήκες λειτουργίας των πυκνωτών διαφέρουν από αυτές των μετασχηματιστών. Αυτά χωρίζονται σε δυο κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκουν αυτά που προέρχονται από ορυκτά έλαια και στη δεύτερη τα χλωρισμένα συνθετικά υγρά που όλα έχουν σαν βάση τους τα PCBs.

Όπως αναφέραμε όμως στο κεφάλαιο 3 παρόλο το πλεονέκτημα των χαμηλών διηλεκτρικών απωλειών και του χαμηλού σημείου αναφλεξιμότητας, δεν χρησιμοποιούνται λόγω των αρνητικών επιδράσεών τους στο περιβάλλον. Ένα από αυτά που είχαν χρησιμοποιηθεί και αντικαταστάθηκε έχει εμπορική ονομασία XFS-4169L και έχει τοξικότητα 20 φορές μικρότερη από τα άλλα έλαια που βασίζονται στα PCBs. Επίσης έχει σημεία ανάφλεξης και καύσης μεγαλύτερα από τα ορυκτέλαια, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Τύπος	Σημείο ανάφλεξης	Σημείο καύσης
Ορυκτέλαια	154 °C	167 °C
Έλαια με PCBs	166 °C	316 °C
XFS-4169L	174 °C	199 °C

Πίνακας 5.2 Χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενων μονωτικών ελαίων

5.4 ΚΑΛΩΔΙΑ

Η μόνωση χαρτί-λάδι είναι η πιο συμβατική, υπάρχει εδώ και 100 χρόνια, και είναι η πιο δοκιμασμένη σε όλες τις περιοχές τάσεων από 380 V έως 400 kV. Ωστόσο σήμερα η χρήση καλωδίων MT με μόνωση χαρτί-λάδι είναι σπάνια και γίνεται κυρίως από τη ΔΕΗ. Η μόνωση χαρτιού σχηματίζεται με την ελικοειδή περιέλιξη ταινίας χαρτιού επάνω στους αγωγούς, μέχρι να σχηματισθεί ορισμένο συνολικό πάχος μόνωσης. Το περιτύλιγμα του χαρτιού γίνεται με προσοχή, ώστε η τοποθέτηση των ταινιών να είναι ομοιόμορφη, για να προκύψει ομοιογενής μόνωση χωρίς κενά αέρος στο εσωτερικό της. Ο εμποτισμός του χαρτιού με λάδι αποσκοπεί στην αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης και στη συμπλήρωση των διακένων, τα οποία υπάρχουν μεταξύ των ταινιών. Ο εμποτισμός της μόνωσης με λάδι γίνεται μετά την τοποθέτηση της επάνω στους αγωγούς και πριν από την τοποθέτηση του μολύβδινου μανδύα και γίνεται με το λάδι υπό πίεση.

Το χρησιμοποιούμενο λάδι έχει σχετικά υψηλό ιξώδες, ώστε να είναι παχύρρευστο και να μη μετακινείται εύκολα στις υψομετρικές διακυμάνσεις της διαδρομής του καλωδίου ή διαρρέει σε μεγάλες ποσότητες κατά το κόψιμό του. Τα μονωτικά λάδια μπορεί να διασπαστούν με το χρόνο αλλοιώνοντας έτσι τις μονωτικές τους ιδιότητες.

Έτσι προσμειγνύονται ουσίες (φαινόλες κτλ) στο λάδι για προστασία κατά της γήρανσης.

Το μονωτικό λάδι χρησιμοποιείται στα υπόγεια και στα υποβρύχια καλώδια για να:

- Ενισχύσουμε την μόνωσή τους που είναι από χαρτί
- Παρεμποδίσουμε την εισχώρηση υγρασίας
- Ψύχουμε τον αγωγό του καλωδίου, όπως συμβαίνει με τα καλώδια τύπου PIRELLI

Παλιότερα, τα καλώδια χαμηλής τάσης είχαν για μόνωση θεικόμενη άσφαλτο που όμως αλλοιωνόταν πολύ γρήγορα, με αποτέλεσμα στις υψηλές θερμοκρασίες το σχηματισμό κενών που μπορούσαν να ιονιστούν. Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό

χρησιμοποιήθηκε σαν πτητικό το κολοφώνιο που ενίσχυε την προσκόλληση του διαποτιστικού υλικού. Αργότερα με την αύξηση των τάσεων μεταφοράς παρατηρήθηκαν συχνές διασπάσεις της μόνωσης του καλωδίου που οφειλόταν στα κενά που δημιουργούσε η συστολή του υλικού στις χαμηλές θερμοκρασίες. Μετά χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα παραφινικά λάδια που αναμιγνύονται με πυκνωτικά (π.χ κολοφώνιο). Το ποσοστό του πυκνωτικού εξαρτιέται από την τοποθέτηση του καλωδίου. Στα οριζόντια αναμιγνύεται λιγότερο πυκνωτικό σε σχέση με τα κατακόρυφα. Επειδή το παραπάνω υλικό έχει χαμηλή διηλεκτρική αντοχή, δε χρησιμοποιείται σε καλώδια υψηλών τάσεων.

Έτσι για καλώδια μέχρι 66kV έχουμε παχύρρευστα λάδια, πολλές φορές αναμιγμένα με εξευγενισμένο κολοφώνιο. Το εξευγενισμένο κολοφώνιο έχει βέβαια μικρότερες απώλειες, δεν έχει όμως ικανοποιητική διαλυτότητα στα λάδια παραφινικής βάσης και στις χαμηλές θερμοκρασίες παίρνει κρυσταλλική μορφή όταν οξειδωθεί. Εξ αιτίας αυτού προτιμώνται τα λάδια παραφινικής βάσης που έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- να διατηρούν το κολοφώνιο εύκολα, ακόμα και όταν οξειδωθεί
- είναι πιο λεπτόρρευστα στις θερμοκρασίες διαποτισμού
- έχουν μικρές απώλειες

Στα καλώδια που προορίζονται για τάσεις άνω των 66kV έχουμε λάδι με πίεση. Σχετικά με τα καλώδια αυτά, τελευταίες έρευνες πάνω στην αντοχή των λαδιών τους έδειξαν ότι αυτά παθαίνουν φυσικοχημικές αλλοιώσεις, ακόμη και στην κανονική λειτουργία του καλωδίου, επειδή μολύνονται από τα προϊόντα των αντιδράσεων που προκαλούνται από την ανύψωση της θερμοκρασίας. Η μόλυνση και οι αλλοιώσεις επιδρούν πάνω στις διηλεκτρικές απώλειες του λαδιού και του καλωδίου. Κανονικά οι απώλειες αυξάνονται με την θερμοκρασία και πρακτικά είναι ανεξάρτητες από την τάση. Δηλαδή η συνδυασμένη επίδραση θερμότητας και τάσης με την παρουσία χαλκού και σιδήρου προκαλεί γήρανση του λαδιού χωρίς όμως να σχηματισθούν κατάλοιπα οξείδωσης, όπως συμβαίνει με την οξείδωση από τον αέρα. Αυτά βέβαια είναι αντίθετα με τον ισχυρισμό ότι το καλώδιο δεν υφίσταται οξείδωση αφού δεν έρχεται σε επαφή με τον αέρα.



Σχ.5.11 Καλώδιο MT ακτινικού πεδίου ΝΑΕΚΕΒΑ 12/20...18/30kV :

1) αγωγός, 2) εξομαλυντικό ημιαγωγό στρώμα, 3) μόνωση, 4) ταινίες από αλουμίνιο, 5) μόλυβδος, 6,7,8,9) προστατευτικά στρώματα, 10) ταινία χαλύβδινη, 11) προστατευτικό στρώμα από εμπεποτισμένες ίνες

Επειδή οι αλλοιώσεις του λαδιού δεν προσβάλλουν το μονωτικό χαρτί, μπορούμε να αφαιρέσουμε το γηρασμένο λάδι, να ξεπλύνουμε τα καλώδια με λάδι και να τα γεμίσουμε με καινούριο για εκ νέου χρήση τους. Τα λάδια που χρησιμοποιούνται σε καλώδια υψηλής τάσης έχουν γενικά ναφθενική βάση. Αυτά πρέπει να αντέχουν σε μεγάλες θερμοκρασίες και στη γήρανση. Επίσης, πρέπει να ελκύουν όσο το δυνατόν λιγότερο αέρια και να είναι παχύρρευστα αν δεν προσδιορίζονται για κυκλοφορία μέστω στα καλώδια. Τόσο το λάδι όσο και το μονωτικό εκλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε οποιοσδήποτε συνθήκες το λάδι να διαποτίζει το μονωτικό χαρτί.

Η διηλεκτρική σταθερά μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ η $\tan\delta$ έχει μεταβολή της μορφής U. Ο βασικός λόγος της χρήσης του κολοφωνίου είναι η αύξηση του ιξώδους του λαδιού, αλλά ταυτόχρονα δίνει πλεονεκτήματα που έχουν σχέση με τις διηλεκτρικές απώλειες. Υγρά εμποτισμού με μεγάλη εσωτερική τριβή παίζουν επίσης ρόλο στα καλώδια με πίεση αερίου που προορίζονται για πολύ υψηλές τάσεις. Έτσι, χρησιμοποιούνται μεν συνηθισμένες μονωτικές ουσίες γνωστές ως compounds αλλά χρησιμοποιούνται και ειδικά compounds που περιέχουν πολυμερή του ισοβουτυλενίου σε ποσοστό 30% κατά βάρος. Στις μεγάλες θερμοκρασίες σε αυτά τα compounds οι τιμές της $\tan\delta$ είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες των compounds με ρυτίνες.

Με τα λάδια των καλωδίων χρειάζεται προσοχή στο έλεγχο της χημικής τους σύνθεσης, να εξασφαλίζουμε σε αυτά χαμηλό σημείο ροής και να μην δημιουργείται σε αυτά κερί. Οι βασικές ιδιότητες των λαδιών των καλωδίων είναι:

- Η εσωτερική τριβή των λαδιών πρέπει να είναι όσο το δυνατό χαμηλή με αποδεκτή πτητικότητα. Η χαμηλή εσωτερική τριβή κάνει δυνατό το σχεδιασμό συστημάτων που μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επίσης μειώνει την τάση για μεταβατικές συνθήκες από αυξομειώσεις της πίεσης, επιτρέποντας έτσι οικονομία στο σχεδιασμό συστημάτων. Η πτητικότητα πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή για να επιτρέπει απαέρωση με μεγάλο κενό για να αποφεύγεται μεγάλη αναφλεξιμότητα.
- Το λάδι πρέπει να έχει την ικανότητα απορρόφησης κάθε αερίου που ίσως παραμένει στο καλώδιο μετά την εγκατάσταση
- Η $\tan\delta$ πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρή σε συνδυασμό με καλή χημική σταθερότητα ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας

Πάντως, τα λάδια σαν υλικά εμποτισμού μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες:

- Παχύρρευστα, που περιέχουν εξευγενισμένο κολοφώνιο ή πολυμερείς υδρογονάνθρακες
- Λάδια με χαμηλή εσωτερική τριβή (ιξώδες)

5.5 ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ

Οι μονωτήρες διέλευσης των μετασχηματιστών περιέχουν λάδι που μπορεί να είναι ίδιο με το λάδι των μετασχηματιστών. Αν το λάδι του μονωτήρα επικοινωνεί με το λάδι του μετασχηματιστή τότε βρίσκεται στην πίεση που οφείλεται στη στάθμη του λαδιού του δοχείου διαστολής.

Αν το λάδι του μονωτήρα διέλευσης δεν επικοινωνεί με το λάδι του μετασχηματιστή τότε είναι ένα παχύρρευστο ειδικό λάδι που έχει διηλεκτρική αντοχή που δε μεταβάλλεται ακόμα και με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι μονωτήρες διέλευσης των μετασχηματιστών και των διακοπών είναι στεγανοί και έχουν χώρο διαστολής του υγρού που δεν επικοινωνεί με την ατμόσφαιρα και άρα δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες.

Η ταπδ επιδρά κατά τη συγκεκριμένη χρήση του μονωτικού λαδιού αλλά όχι στο βαθμό που επιδρά στο μονωτικό λάδι του πυκνωτή. Για αυτό το λάδι του μετασχηματιστή είναι γενικά κατάλληλο για μονωτήρες διέλευσης. Ειδικά στους μετασχηματιστές υπερυψηλής τάσης χρησιμοποιείται λάδι που περιέχει πρόσθετο βελτιωτικό.

Σύνοψη: Ακολουθεί πίνακας που δίνει τα χαρακτηριστικά του λαδιού που έχουν μεγαλύτερη σημασία για κάθε τύπο συσκευής που χρησιμοποιείται

Συσκευή	Χαρακτηριστικά
Μετασχηματιστές	Χημική σταθερότητα, θερμικά χαρακτηριστικά, μη αναφλεξιμότητα
Ελαιοδιακόπτες	Σχηματισμός άνθρακα, σβήσιμο τόξου
Πυκνωτές	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, διηλεκτρική σταθερά, θερμική σταθερότητα
Καλώδια	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, διηλ. σταθερά, θερμική σταθερότητα
Μονωτήρες διέλευσης	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Πίνακας 5. 3 Χαρακτηριστικά λαδιού σε σχέση με τη συσκευή που χρησιμοποιείται

5.6 Έλεγχος ποιότητας των ηλεκτρομονωτικών ελαίων

5.6.1 Φυσικοχημικοί έλεγχοι

Η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή αποτελεί προϋπόθεση για την εύρυθμη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους σταθμούς παραγωγής και την αδιάλειπτη μεταφορά ενέργειας μέσω των δικτύων σε εθνικό επίπεδο. Η συνεχής παρακολούθηση και ο έλεγχος της ικανότητας μόνωσης των διατάξεων των μετασχηματιστών και γενικώς του ηλεκτρομονωτικού ελαίου του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, αποτελεί επιτακτική ανάγκη δεδομένου ότι, πέραν της τακτικής περιοδικής συντήρησης μπορεί να προβλεφθεί έγκαιρα η αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης αστοχίας στις διατάξεις αυτές και να επιχειρηθεί προληπτική συντήρηση, όταν και όπου απαιτηθεί. Σε περιπτώσεις μετασχηματιστών υπερυψηλής και υψηλής τάσης συμβαίνουν ατυχήματα που οφείλονται στη μη συντήρηση, που δημιουργούν μεγάλο κόστος για τον προμηθευτή ισχύος και σε εξαιρετικές περιπτώσεις έκρηξη με επακόλουθο εργατικά ατυχήματα και περιβαλλοντική επίπτωση.

Για να ελέγχεται η ποιότητα των ηλεκτρομονωτικών ελαίων χρησιμοποιούμε διάφορα κριτήρια, τα οποία ελέγχουμε το κατά πόσο ικανοποιούνται μέσω φυσικοχημικών μεθόδων, που αναλύονται παρακάτω.

Έλεγχος ορυκτελαίων	Μέθοδος ASTM
Τάση διάσπασης	D877
Διεπιφανειακή τάση	D971
Βαθμός εξουδετέρωσης	D974
Περιεκτικότητα νερού	D1533
Σχετική Πυκνότητα	D1298
Χρώμα	D1500

Πίνακας 5.4. Φυσικοχημικοί έλεγχοι και όρια αποδεκτών τιμών για τον έλεγχο της ποιότητας των ηλεκτρομονωτικών ελαίων.

Τάση διάσπασης

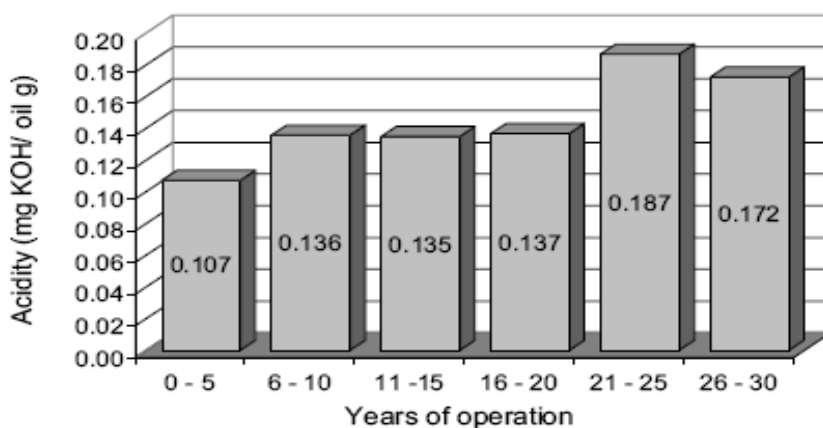
Ως τάση διάσπασης καθορίζεται η τάση κατά την οποία εμφανίζεται διάσπαση του μονωτικού μέσου, στην περίπτωση μας το έλαιο, το οποίο βρίσκεται μεταξύ δύο σημείων διαφορετικού δυναμικού. Πειραματικά, η τάση διάσπασης μπορεί να οριστεί ως διηλεκτρική αντοχή, που είναι η μέγιστη τιμή τάσης, που μπορεί να εφαρμοστεί ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια βυθισμένα στο έλαιο χωρίς να δημιουργηθεί τόξο. Η τάση διάσπασης δεν είναι κριτήριο της ποιότητας κατασκευής του μονωτικού ελαίου, είναι όμως μια συμβατική μέθοδος δοκιμής, που μπορεί να μας αποκαλύψει το βαθμό, στον οποίο νερό ή και άλλα αιωρούμενα σωματίδια είναι αναμεμιγμένα στο έλαιο. Η μετρούμενη τιμή της τάσης διάσπασης εξαρτάται κυρίως από τη συσκευή και τη μέθοδο που θα χρησιμοποιήσουμε. Η συσκευή όπως και η μέθοδος περιγράφονται σε διάφορους κανονισμούς, ο επικρατέστερος των οποίων είναι ο ASTM D 877. Η μέθοδος που περιγράφεται σε αυτό τον κανονισμό είναι και η πιο κοινά χρησιμοποιούμενη, για την εκτίμηση της ποιότητας των ηλεκτρομονωτικών ελαίων.

Διεπιφανειακή τάση

Η μέθοδος σύμφωνα με την οποία μετράται η διεπιφανειακή τάση σε ορυκτέλαια είναι η ASTM D 971. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων απαιτείται ειδική συσκευή (interfacial tensiometer). Η επιφανειακή τάση αποτελεί μοριακή ιδιότητα, που οφείλεται στις έλξεις μεταξύ των μορίων. Το φαινόμενο της μοριακής έλξης εμφανίζεται και στην επιφάνεια που διαχωρίζει δυο αδιάλυτα μεταξύ τους υγρά, π.χ. την επιφάνεια που διαχωρίζει μονωτικό έλαιο και αποσταγμένο νερό. Σ' αυτήν την περίπτωση η επιφανειακή τάση λέγεται διεπιφανειακή τάση. Τα σωματίδια που υπάρχουν ή που δημιουργούνται στο μονωτικό έλαιο τείνουν να συγκεντρωθούν στην επιφάνεια, που διαχωρίζει αυτό από το αποσταγμένο νερό. Η συγκέντρωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της επιφανειακής τάσης. Γι' αυτό, ο προσδιορισμός της επιφανειακής τάσης του ελαίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξεύρεση της παρουσίας προϊόντων, που οφείλονται σε οξείδωση. Επίσης ο προσδιορισμός αυτός οδηγεί σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με την ποιότητα και την εξέλιξη των ιδιοτήτων του ελαίου. Τα πιο πάνω ισχύουν τόσο για τα καινούργια έλαια όσο και για τα έλαια που βρίσκονται σε μηχανήματα εν λειτουργία.

Βαθμός εξουδετέρωσης

Η εύρεση του βαθμού εξουδετέρωσης, ή οξύτητας, ενός μονωτικού ελαίου περιγράφεται στον κανονισμό ASTM D974, και υποδηλοί τον αριθμό των mg KOH που απαιτούνται για να ουδετεροποιήσουν ένα γραμμάριο ηλεκτρομονωτικού ελαίου. Η οξύτητα εξαρτάται από τα παραπροϊόντα γήρανσης, όπως και από τις συγκεντρώσεις των πρόσθετων ουσιών, όπως η πιθανή συγκέντρωση PCBs στο σώμα του ελαίου με τιμή μεγαλύτερη των 50 ppm. Ο βαθμός εξουδετέρωσης αποτελεί μέτρο της οξύτητας του ελαίου. Η οξύτητα, που μετράται στα μονωτικά έλαια, πρακτικά, αποτελείται μόνο από την οργανική οξύτητα, γιατί η ανόργανη είναι αμελητέα. Έχει σημασία η παρακολούθηση της οξύτητας του ελαίου, γιατί αύξηση της οξείδωσής του, συνοδεύεται γενικά και από αύξηση της οξύτητάς του. Όπως φαίνεται παρακάτω, με βάση μετρήσεις που έχουν παρθεί σε μονωτικό λάδι μετασχηματιστή, η γήρανση προκαλεί αύξηση του βαθμούς της οξύτητας και επομένως δημιουργεί οξείδια με μεγαλύτερο ρυθμό.



Σχ. 5.12 Επίδραση της γήρανσης στην οξύτητα του λαδιού [3]

Περιεκτικότητα νερού

Η μέθοδος για την εύρεση της περιεκτικότητας νερού στον όγκο του μονωτικού ελαίου (ppm max) περιγράφεται στον κανονισμό ASTM D1533, ο οποίος απαιτεί τη χρήση ειδικού οργάνου (αναλυτής Karl Fischer). Η αυξημένη περιεκτικότητα νερού μπορεί να σημαίνει τον χαρακτηρισμό του ελαίου στο οποίο περιέχεται, ως ακατάλληλο για χρήση. Αντίθετα η μικρή περιεκτικότητα νερού δε σημαίνει κατ' ανάγκη και την ικανοποιητική ποιότητα του μονωτικού ελαίου. Συνεπώς για το χαρακτηρισμό της ποιότητας του ελαίου η αποκλειστική χρήση αυτής της μεθόδου δεν είναι αρκετή.

Σχετική πυκνότητα

Οι μετρήσεις σχετικής πυκνότητας γίνονται σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM D1298. Η σχετική πυκνότητα δεν αποτελεί μέτρο ποιότητας του μετρούμενου δείγματος, είναι όμως μια ένδειξη για την ύπαρξη παραπροϊόντων γήρανσης στον όγκο του. Η αύξηση της σχετικής πυκνότητας μπορεί να οφείλεται στα παραπροϊόντα αποικοδόμησης, στον όγκο του ελαίου, δηλαδή στη χημική αποσύνθεση του μονωτικού χαρτιού, στα παραγόμενα ιόντα χαλκού, ή στις ελεύθερες ρίζες διασπασμένων αλυσίδων υδρογονανθράκων.

Χρώμα

Ο κανονισμός, που χρησιμοποιείται συνήθως για τον έλεγχο του χρωματικού βαθμού ενός μονωτικού ελαίου, είναι ο ASTM D1500. Σύμφωνα με αυτόν απαιτείται μια συσκευή, που ονομάζεται χρωματόμετρο, η οποία περιλαμβάνει πηγή φωτός, τυποποιημένους χρωματιστούς γυάλινους δίσκους και δύο γυάλινα δοχεία με κάλυμμα και διάταξη για την παρατήρηση. Οι τυποποιημένοι γυάλινοι δίσκοι χαρακτηρίζονται από συμβατικούς αριθμούς που απέχουν κατά 0,5 ο ένας από τον άλλο. Η κλίμακα αρχίζει από το 0,5 (ανοιχτόχρωμα έλαια) και φτάνει ως το 8 (πλέον σκουρόχρωμα έλαια). Το χρώμα των μονωτικών ελαίων είναι γενικά ανοιχτό κίτρινο και διαφέρει λίγο από έλαιο σε έλαιο.

Το χρώμα του αχρησιμοποίητου ελαίου είναι κάποιο στοιχείο για να εκτιμηθεί η κατάσταση του. Το ίδιο ισχύει τόσο για τα λίγο μεταχειρισμένα έλαια όσο και για τα έλαια, που βρίσκονται σε χρήση για πολύ χρόνο. Αν η κατάσταση των τελευταίων έχει χειροτερεύσει από τη χρήση τους, είναι δυνατό να βγουν συμπεράσματα από τη μεταβολή στο χρώμα τους, σε συνδυασμό όμως και με άλλους ελέγχους. Η μεταβολή του χρώματος του ελαίου που βρίσκεται σε υπηρεσία πιθανό να σημαίνει οξείδωση ή παρουσία ξένων σωματιδίων μέσα σ' αυτό.

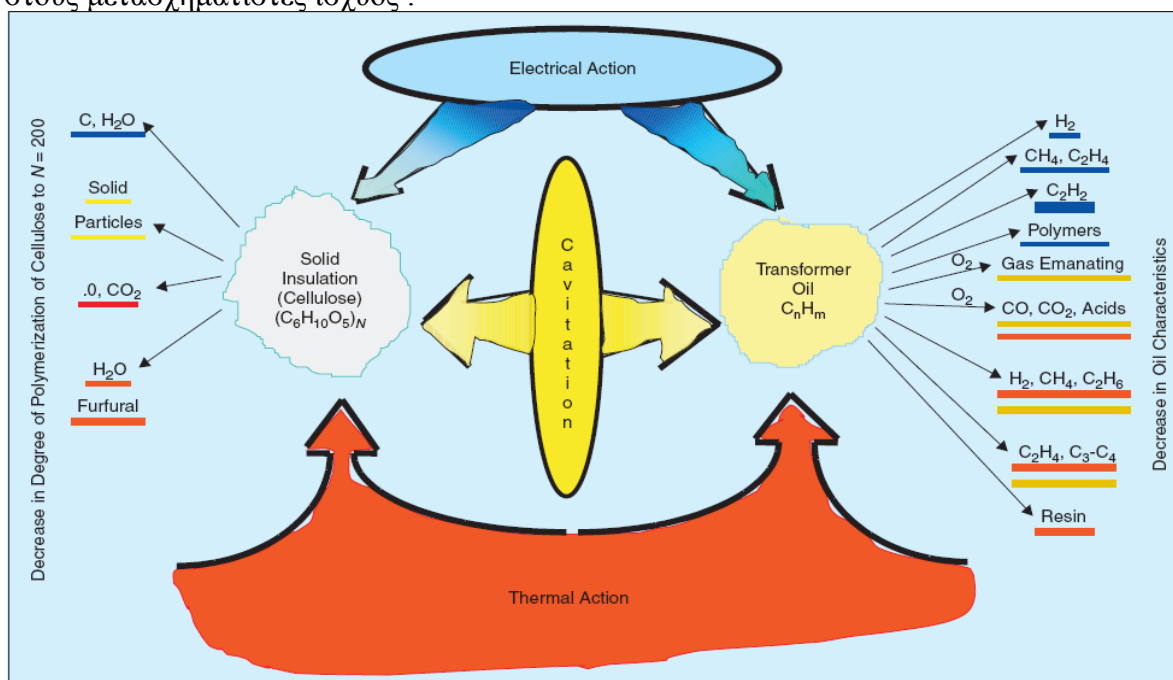
Επίσης, ενίοτε και όποτε κρίνεται απαραίτητο, γίνονται φυσικοχημικοί έλεγχοι για τα μεγέθη, που περιγράφονται στον Πίνακα 5.5, σύμφωνα με τους σχετικούς κανονισμούς.

Έλεγχος	ASTM
Ιξώδες	D445
Ειδική αντίσταση	D1169
Περιεκτικότητα σε χαλκό	D3635
Περιεκτικότητα σε φουρανικά	D5837
Ιλύς	D1698
Σημείο ανάφλεξης	D92
Περιεκτικότητα σε PCBs	D4059

Πίνακας 5.5. Πρόσθετοι φυσικοχημικοί έλεγχοι

5.6.2 Αεριοχρωματογραφία

Συμπληρωματικά, γίνονται αεριοχρωματογραφικές μετρήσεις, που αποσκοπούν στην καταγραφή των περιεκτικότητων των παραγόμενων αερίων λόγω της ταυτόχρονης επιβολής ηλεκτρικής και θερμικής καταπόνησης (συνέργειας) στο συνδυασμό του υγρού-στερεού μονωτικού υλικού. Τα συχνότερα ανιχνευόμενα αέρια με τη βοήθεια Υγρής Χρωματογραφίας Υψηλής Πίεσης (High Performance Liquid Chromatography) σε ορυκτά έλαια μετασχηματιστών είναι O_2 , N_2 , H_2 , CH_4 , CO , CO_2 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_3H_8 και άλλοι υδρογονάνθρακες. Το Σχήμα 1 συνοψίζει τους μηχανισμούς σχηματισμού αερίων εγκλεισμάτων και στερεών καταλοίπων στη μήτρα του μονωτικού ελαίου, που εμπεριέχεται στους μετασχηματιστές ισχύος .



Σχήμα 5.13 : Η δημιουργία παραπροϊόντων σε ηλεκτρικές διατάξεις που εμπεριέχουν ηλεκτρομονωτικά έλαια

Σύμφωνα με τις παρεχόμενες συγκεντρωτικές πληροφορίες του παραπάνω σχήματος , τα παραπροϊόντα που δημιουργούνται από τη γήρανση του συστήματος των μονώσεων στους μετασχηματιστές ισχύος ενδέχεται να προέρχονται είτε από τη μείωση του βαθμού πολυμερισμού της κυτταρίνης $(C_6H_{10}O_5)_N$ σε $N=200$ στο μονωτικό χαρτί, είτε από τη μείωση των χαρακτηριστικών του μονωτικού ελαίου (C_nH_m) . Τα δημιουργούμενα παραπροϊόντα αποτελούνται από νερό και από ουσίες μερικώς πολωμένες ή ιονισμένες. Οι παράγοντες που μπορούν να επιδράσουν με μηχανισμούς συνέργειας και να αλλοιώσουν τα χαρακτηριστικά των μονώσεων προξενώντας γήρανση είναι:

- η ηλεκτρική καταπόνηση
- η σπηλαιώση και οι κοιλότητες στον όγκο των υλικών
- η θερμική καταπόνηση

Η αεριοχρωματογραφική μελέτη στο έλαιο ενός μετασχηματιστή εντοπίζει τις αέριες φάσεις και τα ποσοστά τους (ppm) με τα οποία εμπεριέχονται. Η σωματιδιακή ρύπανση, όπως και τα διάφορα άλλα στερεά παραπροϊόντα δεν προσδιορίζονται με τη μέθοδο της αεριοχρωματογραφίας και κατά συνέπεια δε λαμβάνονται υπόψη. Αυτού του είδους τα παραπροϊόντα μπορούν να ελέγχονται μόνο μέσα από συγκεκριμένες συμπληρωματικές φυσικοχημικές αναλύσεις -ξεχωριστές για το κάθε πιθανό συστατικό- οι οποίες και θα πρέπει να επαναλαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. προσδιορισμός τέφρας). Το γεγονός ότι απαιτείται η παράλληλη διεξαγωγή πολλών και διαφορετικών μετρήσεων για τον τελικό χαρακτηρισμό της κατάστασης του ηλεκτρομονωτικού ελαίου ενδεχομένως υποδηλοί μία πρακτική αδυναμία στη συνολική προσέγγιση του προβλήματος.

5.6.3 Διηλεκτρική Φασματοσκοπία

Η διηλεκτρική φασματοσκοπία καταγράφει τη μεταβολή των διηλεκτρικών ιδιοτήτων ενός υλικού με το χρόνο ή με τη συχνότητα. Η μετάβαση από μετρήσεις μιας συχνότητας σε αυτή των πολλών συχνοτήτων είναι απλή, καθώς εφαρμόζοντας κάθε φορά πεδίο διαφορετικής συχνότητας προσδιορίζεται το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα και παίρνονται οι μετρήσεις για την ϵ_r και την $\tan\delta$.

Αντίθετα, στο πεδίο του χρόνου τα πράγματα είναι διαφορετικά. Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο (π.χ. μια βηματική συνάρτηση ή ένας τετραγωνικός παλμός) εμπεριέχει πληροφορία σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Επομένως, τα διηλεκτρικά μεγέθη που έχουν οριστεί μέχρι τώρα δεν είναι δυνατόν να περιγράψουν άμεσα τα παρατηρούμενα φαινόμενα. Για το λόγο αυτό παρακάτω μελετάται η συμπεριφορά ενός υλικού σε χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο ξεκινώντας από στοιχειώδεις έννοιες ηλεκτρομαγνητισμού και περιγράφονται οι εξισώσεις μεταξύ των ηλεκτρικών ποσοτήτων στο πεδίο του χρόνου. Στη συνέχεια με τη χρήση μετασχηματισμών Fourier ή Laplace τα μεγέθη μετατρέπονται στο πεδίο της συχνότητας και συνδέονται με την έννοια της μιγαδικής επιτρεπτότητας.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια να αντικατασταθούν οι συνήθεις μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων των μονωτικών ελαίων, όπως οξύτητας, χρώματος, τάσης διασπασης, ιξώδους, διεπιφανειακής τάσης, υγρασίας και αεριοχρωματογραφίας από μία μόνο σύνθετη μέτρηση. Η μέθοδος μέτρησης που προτιμάται είναι η «διηλεκτρική φασματοσκοπία στο πεδίο της συχνότητας», όπου γίνεται καταγραφή της μεταβολής της μιγαδικής επιτρεπτότητας στα ηλεκτρομονωτικά έλαια μετασχηματιστών ΥΤ. Προσφέρει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει την εμφάνιση των τυχόν αναπτυσσόμενων μηχανισμών πώρωσης και χαλάρωσης του εξεταζόμενου δείγματος .

5.7 ΣΚΟΠΙΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η βελτίωση του χρόνου ζωής των μετασχηματιστών αλλά και όλου του εξοπλισμού που χρησιμοποιεί ηλεκτρομονωτικά λάδια (Oil Filled Electrical Equipment-OFEE) μέσω της μείωσης των αστοχιών σε αυτά, καθώς και η βελτίωση συνολικά των διηλεκτρικών τους ιδιοτήτων είναι ζωτική για την αξιοπιστία του δικτύου, το κόστος λειτουργίας του και τις επιπτώσεις από την καταστροφή του. Επομένως, στόχος είναι ο έλεγχος της διηλεκτρικής συμπεριφοράς του ελαίου και η αντιστροφή πιθανών αρνητικών φαινομένων γήρανσης εξαιτίας παραπροϊόντων. Η ιδέα για την υλοποίηση του στόχου ήταν η προσθήκη νανο-σωματιδίων χαμηλής συγκέντρωσης στο διηλεκτρικό υγρό (ορυκτέλαιο), σχηματίζοντας ένα μίγμα του οποίου θα μελετάμε τη διηλεκτρική συμπεριφορά.

Συγκεκριμένα, θα πάρουμε μετρήσεις σε μια σειρά μιγμάτων για την διηλεκτρική τους σταθερά και την εφαπτομένη απωλειών ως συνάρτηση της συχνότητας (διηλεκτρική φασματοσκοπία) προκειμένου να ανιχνεύσουμε τα φαινόμενα πόλωσης και τους μηχανισμούς χαλάρωσης που εμφανίζονται. Επομένως θα ασχοληθούμε με την ηλεκτρική συμπεριφορά του λαδιού και όχι με τη θερμική του, καθώς δεν θα μεταβάλλουμε τη θερμοκρασία. Η μεταβολή των διηλεκτρικών ιδιοτήτων του μονωτικού λαδιού, που γίνεται με την προσθήκη νανο-σωματιδίων μπορεί να αξιοποιηθεί :

- Στον έλεγχο των διηλεκτρικών ιδιοτήτων του διηλεκτρικού υγρού. π.χ. Ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να ήταν επιθυμητό να αυξήσουμε τη διηλεκτρική σταθερά κρατώντας τις διηλεκτρικές απώλειες σε ένα επιθυμητό επίπεδο
- Στην γνώση της μεταβολής των διηλεκτρικών ιδιοτήτων του λαδιού με την πιθανή εμφάνιση των νανοσωματιδίων σαν παραπροϊόντα από τη διάβρωση του OFEE και στην αιτιολόγηση της απόκρισης τους με βάση τα φαινόμενα διεπιφανειακής πόλωσης και τους παράγοντες που την επηρεάζουν
- Στην ανίχνευση ιδιοτήτων που αντιστρέφουν τα φαινόμενα γήρανσης του λαδιού.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, πρόσφατες μελέτες επίσης έχουν δείξει ότι η προσθήκη νανοκρυστάλλων σε λάδι μετασχηματιστών βελτιώνουν τη διηλεκτρική αντοχή του λαδιού. Σε σύγκρουση με τη λογική η προσθήκη ημαγώγιμων νανοκρυστάλλων προκαλεί πιο αργή διηλεκτρική διάσπαση στο μονωτικό λάδι. Έχει παρατηρηθεί ότι κάποια ημιαγώγιμα νανοσωματίδια (magnetite) λειτουργούν σαν παγίδες ηλεκτρονίων σε ηλεκτρικά καταπονημένα λάδια μετασχηματιστών, με αποτέλεσμα τα γρήγορα ηλεκτρόνια να μετατρέπονται σε αργά κινούμενα φορτισμένα σωματίδια. Δηλαδή, έχουμε επιβράδυνση της κίνησης του διαρρέοντος φορτίου, κι αυτό εξηγεί το παράδοξο ότι έχουμε ουσιαστικά μεγαλύτερη αντοχή σε ηλεκτρική διάσπαση σε σχέση με το σκέτο λάδι. Το παραπάνω εντείνει το ενδιαφέρον μας για την διηλεκτρική μελέτη λαδιού με προσθήκη ημιαγώγιμων νανοκρυστάλλων.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε (CuO , Cu_2O , Fe_2O_3) στην εργασία μας. Περιγράφεται η δομή, η προέλευση και ορισμένες ιδιότητες και χρήσεις του καθενός. Τα οξείδια που χρησιμοποιήσαμε έχουν μεγάλη διάδοση στη φύση και ποικιλία εφαρμογών. Για το λόγο αυτό παρουσιάζονται ανεξάρτητα από τα αντιστοιχά τους μέταλλα.

6. ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ

6.1 ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

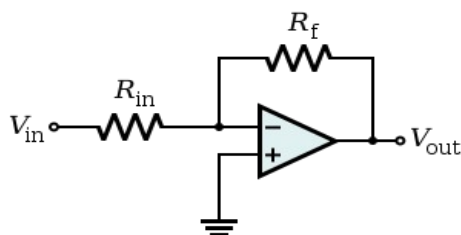
Για τη διεξαγωγή των ηλεκτρικών μετρήσεων χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο μια γέφυρα μέτρησης LCR υψηλής ακρίβειας τύπου 4284A της εταιρίας Hewlett Packard (Agilent), στην οποία συνδέεται το κελί μετρήσεων ρευστών 16452A. Ο έλεγχος της διάταξης γίνεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω της κάρτας επικοινωνίας HP-IB και με τη βοήθεια ειδικά σχεδιασμένου λογισμικού σε γλώσσα C (perm). Παρακάτω παρουσιάζονται τα δύο βασικά στοιχεία της διάταξης αναλυτικά.

6.1.1 Γέφυρα μέτρησης LCR (HP 4284A)



Σχ.6.1 Γέφυρα μέτρησης LCR

Η γέφυρα μέτρησης LCR χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της σύνθετης αντίστασης, ισοδύναμης της χωρητικότητας και αγωγιμότητας των δειγμάτων, ώστε να υπολογιστεί η μιγαδική τους επιτρεπτότητα. Το όργανο HP 4284A αποτελεί μια υλοποίηση της αυτομάτως ισορροπούμενης γέφυρας, η αρχή λειτουργίας της οποίας φαίνεται στο σχ.6.2. Το ρεύμα που διαρρέει μια άγνωστη αντίσταση R_{in} , διαρρέει επίσης την αντίσταση R_f . Το σημείο μετά την αντίσταση R_{in} διατηρείται σε δυναμικό μηδέν και ονομάζεται "εικονική γείωση" (virtual ground), καθώς τόσο η αντίσταση εισόδου όσο και το κέρδος ανοιχτού βρόχου του ενισχυτή λαμβάνουν πολύ μεγάλες τιμές. Η σύνθετη αντίσταση R_{in} υπολογίζεται μετρώντας το δυναμικό V_{in} και τη διαφορά δυναμικού στα άκρα της R_f , που παρέχει την τιμή του ρεύματος.



Σχ. 6.2 Απλοποιημένο κύκλωμα της γέφυρας για κατανόηση της λειτουργίας της

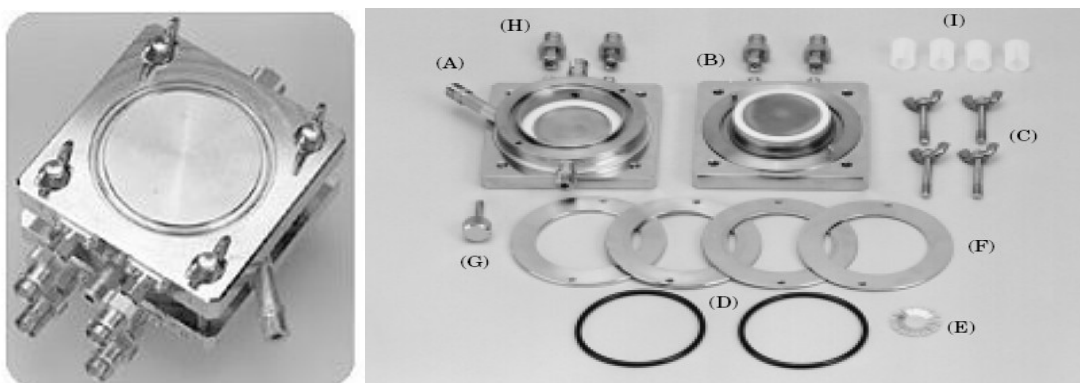
Στην πράξη η ακριβής μορφή και συνδεσμολογία της γέφυρας εξαρτάται από το εύρος συχνοτήτων των μετρήσεων που παίρνει η γέφυρα. Οι απλές γέφυρες για συχνότητες κάτω των 100kHz περιέχουν μόνο έναν απλό τελεστικό ενισχυτή. Οι γέφυρες ευρείας ζώνης, όπως αυτή που χρησιμοποιούμε, χρησιμοποιούν ένα εξελιγμένο σύστημα ανίχνευσης μηδενισμού, ανίχνευση φάσης, ολοκληρωτή και διανυσματικού διαμορφωτή προκειμένου να αυξήσουν το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων. Αποτελείται από το αναλογικό μέρος, που περιέχει το τμήμα πηγής σημάτων, το τμήμα αυτομάτως ισορροπούμενης γέφυρας και το τμήμα ανίχνευσης μετρούμενων παραμέτρων και από το ψηφιακό μέρος. Το ψηφιακό μέρος εκτελεί 3 ομάδες λειτουργιών: ελέγχει τη λειτουργία του αναλογικού τμήματος, επεξεργάζεται και αποθηκεύεται δεδομένα της μέτρησης (μετά την μετατροπή του σε ψηφιακά μέσω του A/D μετατροπέα) και επικοινωνεί με το εξωτερικό περιβάλλον και το χρήστη, μέσω του πληκτρών ελέγχου και της οθόνης.

Η γέφυρα 4284A είναι κατάλληλη, εκτός από εργαστηριακή-ερευνητική χρήση, για τον έλεγχο των εισερχόμενων εξαρτημάτων σε μια γραμμή παραγωγής και τον έλεγχο ποιότητας παραγωγής. Χρησιμοποιείται για να μετρήσει τις παραμέτρους LCR, υλικών, διατάξεων ημιαγωγών σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (από 20Hz έως 1MHz) με πειραματικά σήματα 5 mV έως 40 V rms.

Το HP 4284A παρέχει μετρήσεις χωρητικότητας- αγωγιμότητας με ακρίβεια 0,05% στη χωρητικότητα και ανάλυση 6 δεκαδικών ψηφίων σε όλες τις συχνότητες δοκιμής. Η κάρτα HP-IB είναι μια κάρτα διασύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση ενός αυτόματου συστήματος δοκιμής για το διηλεκτρικό χαρακτηρισμό υλικών με χειρισμό αποκλειστικά μέσω υπολογιστή.

6.1.2 Κελί διηλεκτρικών μετρήσεων ρευστών (Agilent 16452A)

Η διάταξη λειτουργεί σαν ένας πυκνωτής παράλληλων πλακών, με κατασκευή κατάλληλη για τοποθέτηση ρευστών διηλεκτρικών στο εσωτερικό του. Μεταβάλλοντας το διάκενο μεταξύ των πλακών, είναι δυνατός ο χαρακτηρισμός μεγαλύτερης ή μικρότερης ποσότητας ρευστού. Αποτελείται από δύο μέρη που αποτελούν ουσιαστικά τις πλάκες του πυκνωτή, οι οποίες έχουν από δύο ακροδέκτες και ενώνονται μεταξύ τους με βίδες. Βιδώνοντας μεταξύ τους τις πλάκες αυτές εφάπτονται και δεν υπάρχει διάκενο στο πυκνωτή. Γιαυτό ανάμεσα τους τοποθετούμε κυκλικό δακτύλιο ποικίλου πάχους (spacer, συγκεκριμένα χρησιμοποιούμε πάχους 3mm) προκειμένου να έχουμε το επιθυμητό διάκενο. Επίσης, περιέχει λαστιχένιους δακτυλίους (O-rings) για την καλύτερη επαφή μεταξύ των πλακών και άρα την αποφυγή σφαλμάτων.



Σχ. 6.3 Το κελί των ρευστών και τα επιμέρους κομμάτια του

Ο πυκνωτής έχει τρεις εισόδους-εξόδους για το υγρό, που στις μετρήσεις μας συγκεκριμένα χρησιμοποιούσαμε την κάτω για να αδειάσουμε το υγρό από το κελί, την πλάγια για να γεμίζουμε το κελί με υγρό μέσω σήραγγας και την πάνω για να ελέγχουμε την πλήρωση του κελιού με το υγρό μέσω της υπερχειλίσης που προκαλούταν. Έτσι αποφεύγαμε να παραμένει αέρας στο κελί μας και οι μετρήσεις μας να μην είναι αξιόπιστες. Με βάση το datasheet του πυκνωτή έχουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του:

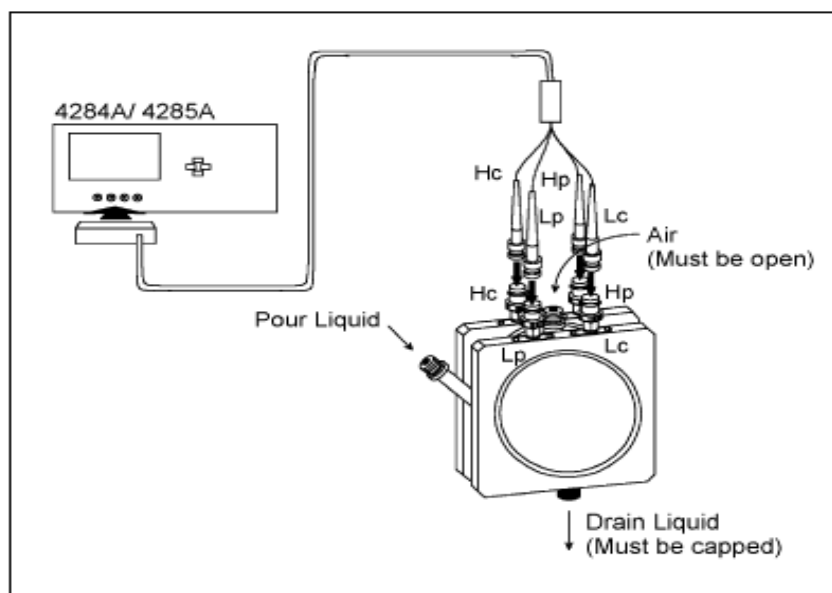
<i>Spacer thickness</i>	<i>3mm</i>
<i>Air capacitance value</i>	<i>5.5 pF (+-10%)</i>
<i>Ls (equivalent series inductance)</i>	<i>20 nH</i>
<i>Rs (equivalent series resistance)</i>	<i>0.5 Ω</i>

Πίνακας 6.1 Βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πυκνωτή

Η διάταξη αυτή είναι κατάλληλη για μέτρηση στερεών διηλεκτρικών με μορφή κόνιας, η οποία έχει ιδιότητες που προσομοιάζουν σε ρευστό. Χρησιμοποιήθηκε λοιπόν για μετρήσεις μιγμάτων ρευστού-σκόνης.

6.1.3 Καλώδιο σύνδεσης

Η γέφυρα LCR διαθέτει 4 ομοαξονικούς ακροδέκτες για σύνδεση με τη μετρούμενη διάταξη του πυκνωτή. Το δυναμικό και το ρεύμα που τους διαρρέει δεν είναι εκ των προτέρων γνωστά, για το λόγο αυτό χαρακτηρίζονται ως άγνωστοι ακροδέκτες. Διακρίνονται σε υψηλού ρεύματος (Hc, High current), σε χαμηλού ρεύματος (Lc, Low current), σε υψηλού δυναμικού (Hp, High potential) και σε χαμηλού δυναμικού (Lp, Low potential). Τα Hc, Lc χρησιμεύουν για την εφαρμογή του σήματος ρεύματος στον πυκνωτή και τα Hp, Lp για τη μέτρηση της αναπτυσσόμενης τάσης στα άκρα του.



Σχ.6.4 Διασύνδεση των οργάνων του πειράματος

6.2 ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣΜΙΞΕΩΝ

6.2.1 Επιλογή υλικών

Τα στερεά υλικά που μελετώνται σε μίγματα με παραφινέλαιο στην παρούσα έρευνα, είναι ανόργανα υλικά σε μορφή λεπτής κονιάς (powder) σχεδόν σφαιρικών σωματιδίων (κόκκων), με διαστάσεις που βρίσκονται στο διάστημα μετάβασης από την περιοχή του μικροκρυστάλλου προς αυτή του νανοκρυστάλλου.

Όπως αναφέρθηκε ο σκοπός της έρευνας είναι εν ολίγοις :

- Αφενός, να εξετάσει τη μεταβολή της διηλεκτρικής συμπεριφοράς του λαδιού ανάλογα με το υλικό της κονιάς που αναμιγνύεται (αλλά και την περιεκτικότητα, το μέγεθος του κόκκου)
- Αφετέρου, με βάση τα παραπάνω να εξετάσει τα φαινόμενα πόλωσης και χαλάρωσης

Η έρευνα αποτελεί συνέχεια της προσπάθειας που έχει ξεκινήσει από το εργαστήριο και που μέχρι στιγμής είχαν εξεταστεί υλικά όπως η αλουμίνα (Al_2O_3), το διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2). Τα υλικά που επιλέξαμε να εξετάσουμε αποτελούν υλικά τα οποία είναι όμοια υλικών που εμφανίζονται ως παραπροϊόντα στα μονωτικά λάδια κατά τη γήρανση τους (CuO , CuO_2 , Fe_2O_3), καθώς γνωρίζουμε ότι τα τυλίγματα του χαλκού κατασκευάζονται από χαλκό και ότι ο πυρήνας του μετασχηματιστή κατασκευάζεται από σίδηρο. Επομένως, με την απορρόφηση υγρασίας και με την απελευθέρωση υδρογονανθράκων από την αποσύνθεση του λαδιού και του χαρτιού γίνονται χημικές αντιδράσεις που δημιουργούν αυτά τα οξείδια (διαβρωτική δράση λαδιών στα μεταλλικά μέρη του μετασχηματιστή- αύξηση οξύτητας).

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα παραπάνω υλικά. Περιγράφεται η δομή, η προέλευση καθώς και ορισμένες ιδιότητες και χρήσεις του καθενός. Για τα υλικά χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά διαθέσιμες κονιές γνωστών διεθνών χημικών οίκων.

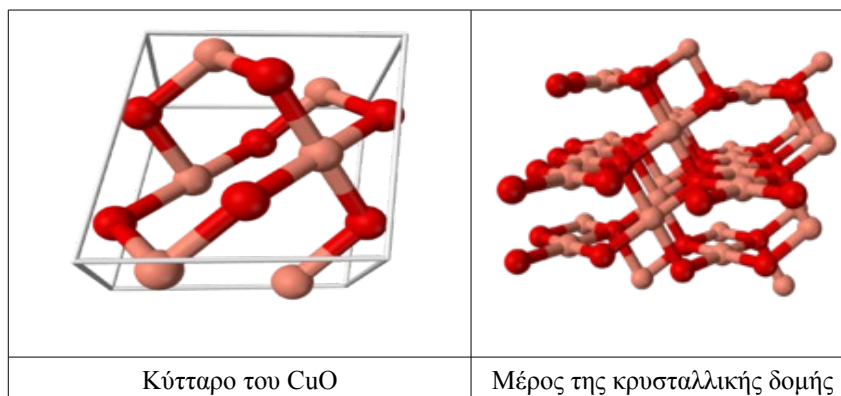
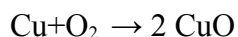
6.2.2 Οξείδιο του χαλκού (II)

Το οξείδιο του χαλκού (CuO), με αγγλική ονομασία cupric oxide, είναι ένα στερεό χρώματος μαύρου και ανήκει στους ημιαγωγούς καθώς έχει ενεργειακό διάκενο $E_g=1,2$ eV



Σχ.6.5 Οξείδιο του χαλκού (II) σε μορφή κονιάς και ορυκτού

Έχει ιοντική δομή και λιώνει στους 1200°C με απώλεια οξυγόνου. Μπορεί να σχηματιστεί με καύση του χαλκού:



Σχ.6.6 Η κρυσταλλική του δομή

Το οξείδιο του χαλκού (II) χρησιμοποιείται ως χρωστική ουσία στην κεραμική για να παράγει μπλε, κόκκινα, πράσινα (και μερικές φορές γκρι, ροζ ή μαύρα) βερνίκια. Επίσης, χρησιμοποιείται ως συμπλήρωμα διατροφής για ζώα και σαν ημιαγωγός p-τύπου επειδή έχει στενό ενεργειακό διάκενο. Οξείδιο του χαλκού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μπαταριών τύπου dry-cell και σαν λειαντικό για γυάλισμα εξοπλισμού. Ακόμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν υποκατάστατο του οξειδίου του σιδήρου στην κατασκευή εκρηκτικών. Βέβαια, μπορεί το οξείδιο του χαλκού (II) να βρίσκει αρκετές εφαρμογές αλλά έχει διάφορες επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και χρειάζεται προσοχή.

Μοριακό βάρος	79,545 g/mol
Μορφή	Μαύρη κονία
Κρυσταλλική δομή	μονοκλινης
Αριθμός CAS	1317-38-0
Διαλυτότητα στο νερό	αδιάλυτο
Πυκνότητα	6,31 g/cm ³
Σημείο τήξης	1201°C
Σημείο βρασμού	2000°C
Ενεργειακό διάκενο	1,2 eV

Πίνακας 6.2 Ιδιότητες του οξειδίου του χαλκού (II)

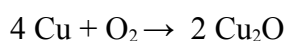
6.2.3 Οξείδιο του χαλκού (I)

Το οξείδιο του χαλκού (I) είναι μια ανόργανη ένωση με αγγλική ονομασία cuprus oxide ή copper oxide (I) και με χημικό τύπο Cu_2O . Είναι ένα από τα πιο βασικά οξείδια του χαλκού και ηλεκτρικά ανήκει στους ημιαγωγούς. Έχει χρώμα κοκκινωπό, είναι στερεό και είναι βασικό συστατικό σε αντιρρυπαντικά χρώματα. Η ένωση μπορεί να βρεθεί και σε κίτρινο χρώμα, ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων και εμφανίζεται στη φύση σαν ορυκτό με την ονομασία κυπρίτης (cuprite).



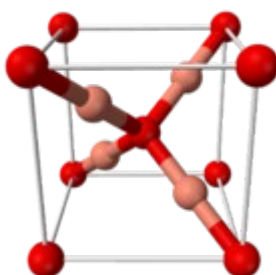
σχ. 6.7 Οξείδιο του χαλκού (I) σε μορφή κονιάς και ορυκτού

Το Cu_2O μπορεί να παρασκευαστεί με διάφορες μεθόδους, με πιο άμεση αυτή της απευθείας οξειδωσή του χαλκού:



Το στερεό είναι διαμαγνητικό. Διαλύεται σε αμμωνία και σχηματίζει το άχρωμο $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_2]^+$, το οποίο εύκολα οξειδώνεται στο αέρα και παράγει το χρώματος μπλε $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$. Επίσης, διαλύεται σε υδροχλωρικό οξύ και δίνει διαλύματα CuCl_2^- . Διαλύεται ακόμη σε θειικό οξύ και σε νιτρικό οξύ παράγοντας θειούχο χαλκό και νιτρούχο χαλκό, αντίστοιχα.

Η μοριακή του δομή είναι κυβική με σταθερά πλέγματος $a=4,2696\text{\AA}$. Τα άτομα του χαλκού είναι οργανωμένα σε δομή FCC ενώ τα άτομα του οξυγόνου σε δομή BCC. Σε κάθε δομικό κελί υπάρχουν 4 άτομα Cu και 2 άτομα O.



Σχ.6.8 Η κρυσταλλική δομή του οξειδίου του χαλκού (I)

Στην ιστορία της φυσικής των ημιαγωγών το Cu_2O είναι ένα από τα πιο μελετημένα υλικά και πολλές πειραματικές παρατηρήσεις και εφαρμογές ημιαγωγών έγιναν πρώτα σε αυτό το υλικό όπως οι διόδοι ημιαγωγών. Σήμερα, το υλικό αυτό ερευνάται πάνω στην οπτική με ημιαγωγούς.

Επίσης, συχνά χρησιμοποιείται σαν χρωστική ουσία, σαν μυκητοκτόνο και σαν προστατευτικό παράγοντα στις μπογιές που βάφονται τα καράβια. Οι ανορθωτές διόδων βασίζονται στο υλικό από το 1924, πολύ πριν εδραιωθεί η χρήση του πυριτίου.

Κάποιες βασικές ιδιότητες του δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Μοριακό βάρος	143,09 g/mol
Μορφή	Κόκκινη κωνία
Κρυσταλλική δομή	Κυβική
Αριθμός CAS	13417-39-1
Διαλυτότητα στο νερό	Αδιάλυτο
Πυκνότητα	6,0 g/cm ³
Σημείο τήξης	1235° C
Σημείο βρασμού	1800° C
Ενεργειακό διάκενο	2,137 eV

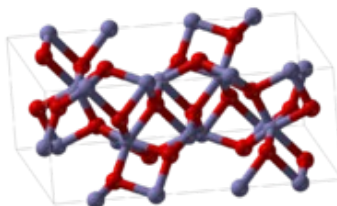
Πίνακας 6.3 Ιδιότητες του οξειδίου του χαλκού (I)

6.2.4 Οξείδιο του σιδήρου (III)

Το οξείδιο του σιδήρου είναι μια ανόργανη ουσία με χημικό τύπο Fe_2O_3 και αγγλική ονομασία iron (III) oxide ή ferric oxide. Είναι ένα από τα 3 βασικά οξείδια του σιδήρου, με τα άλλα δύο να είναι το οξείδιο του σιδήρου (II)- FeO , το οποίο είναι σπάνιο, και το οξείδιο του σιδήρου (II-III)- Fe_3O_4 το οποίο συναντάται στη φύση σαν μαγνητίτης. Το Fe_2O_3 σαν ορυκτό συναντάται με την ονομασία αιματίτης και είναι η βασική πηγή σιδήρου στη βιομηχανία ατσαλιού. Είναι παραμαγνητικό υλικό, με χρώμα κόκκινο προς καφέ και είναι εύκολα διαλυτό από οξέα. Γνωστό επίσης είναι με την ονομασία σκουριά.

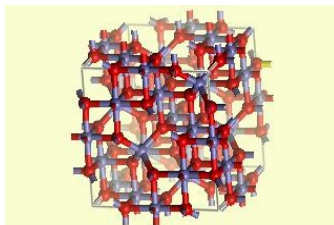
Το Fe_2O_3 είναι πολύμορφο υλικό και εμφανίζεται κυρίως σε 2 κρυσταλλικούς τύπους τον α και τον γ :

α - Fe_2O_3 : έχει ρομβοειδή δομή και είναι η πιο συνηθισμένη μορφή του Fe_2O_3 . Σε αυτή τη δομή, συναντιέται ως ορυκτό στη φύση με την ονομασία αιματίτη, το οποίο εξορύσσεται ως βασικό μέταλλευμα του σιδήρου. Είναι διαμαγνητικό κάτω από τους 260 K και ελαφρώς σηρομαγνητικό από 260 έως 950 K. Οι μαγνητικές του ιδιότητες εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως πίεση, μέγεθος σωματιδίου και η ένταση του μαγνητικού πεδίου.



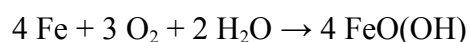
σχ. 6.9 Θεμελιωδης δομή αιματίτη

γ - Fe_2O_3 : κυβική δομή, μετατρέπεται σε α -φάση στις υψηλές θερμοκρασίες. Στη φύση συναντιέται ως ορυκτό με την ονομασία maghemite. Είναι σιδηρομαγνητικό υλικό, αλλά σε πολύ μικρά σωματίδια, μικρότερα από 10 nm , είναι υπέρ-παραμαγνητικό.

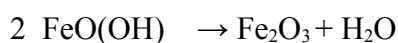


σχ.6.10 θεμελιώδης μονάδα maghemite

Το Fe_2O_3 είναι προϊόν οξείδωσης του σιδήρου και μπορεί να κατασκευαστεί εργαστηριακά από ηλεκτρόλυση διαλύματος διττανθρακικού νατρίου, έναν αδρανή ηλεκτρολύτη, με μια άνοδο σιδήρου:



το ένυδρο προϊόν, $\text{FeO}(\text{OH})$, αφυδατώνεται στους 200° C



Η κυριότερη χρήση του είναι ως πρώτη ύλη για την κατασκευή ατσαλιού και σιδήρου. Επίσης χρησιμοποιείται σε κοσμήματα και φακούς.

Κάποιες βασικές ιδιότητες του δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Μοριακό βάρος	159,69 g/mol
Μορφή	Κόκκινη-καφέ κονία
Κρυσταλλική δομή	Ρομβοειδή/κυβική
Αριθμός CAS	1309-37-1
Διαλυτότητα στο νερό	Αδιάλυτο
Πυκνότητα	5,242 g/cm ³
Σημείο τήξης	1566° C
Ενεργειακό διάκενο	2,2 eV

Πίνακας 6.4 Ιδιότητες του οξειδίου του σιδήρου (III)

6.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

6.3.1 Γενικά

Τα υλικά που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι κρυσταλλικά υλικά, ιοντικής μορφής και συγκεκριμένα οξείδια μετάλλων. Πρόκειται συνεπώς για διηλεκτρικά υλικά, όπου ο κύριος μηχανισμός πόλωσης στον όγκο του υλικού είναι ο ιοντικός. Επιπλέον, λόγω της κοκκώδους μορφής τους, στις χαμηλές συχνότητες παρουσιάζεται έντονα το φαινόμενο της πόλωσης των επιφανειών. Με βάση τις μετρήσεις που θα κάνουμε θέλουμε να προσδιορίσουμε τις διηλεκτρικές ιδιότητες των μιγμάτων (μιγαδική επιτρεπτότητα, ισοδύναμα σχετική διηλεκτρική σταθερά και εφαπτομένη απωλειών) σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (από 20 Hz έως 1 MHz, δηλαδή σχεδόν 5 τάξεις μεγέθους) και να διερευνήσουμε την εξάρτησή τους από περιβαλλοντικές επιρροές.

Οι διηλεκτρικές μετρήσεις πραγματοποιούνται τοποθετώντας το προς μελέτη δείγμα μεταξύ των πλακών του πυκνωτή. Για το λόγο αυτό θέλουμε τα μίγματα ελαίου-σκόνης να είναι όσο το δυνατόν ομογενή. Με τον όρο περιβαλλοντικές επιρροές αναφερόμαστε στα ακόλουθα :

- Σύσταση και μορφολογία του υλικού: Σε ένα συμπαγές υλικό-λάδι-, οι ιδιότητες παρατηρούνται κατά κύριο λόγο στον όγκο του. Όταν όμως εμπεριέχει και κόνια, οι επιμέρους κόκκοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε μεγάλο βαθμό. Η κατανομή μεγέθους των κόκκων και ο βαθμός συμπίεσής τους είναι οι κύριοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη όταν αυτοί αποτελούνται από το ίδιο υλικό. Στην περίπτωση που θα χρησιμοποιήσουμε 2 ειδών κόκκους, από διαφορετικά υλικά, οι ιδιότητες του μίγματος επηρεάζονται κι από τον τρόπο αλληλεπίδρασης μεταξύ τους.
- Οι συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Οι συνθήκες που λαμβάνονται υπόψη εδώ είναι η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος χώρου. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία του χώρου καθορίζει την εσωτερική ενέργεια και την κατανομή των στοιχειωδών σωματιδίων του στις διάφορες ενεργειακές καταστάσεις, επομένως και το βαθμό πόλωσης στο ηλεκτρικό πεδίο. Από την άλλη η υγρασία επηρεάζει την απορρόφηση νερού από το διηλεκτρικό, πράγμα σημαντικό τόσο σε μικροσκοπικό επίπεδο (τα μόρια του νερού είναι ισχυρά δίπολα) όσο και σε μακροσκοπικό (εμφάνιση ρευμάτων διαρροής). Επιπλέον θα λάβουμε υπόψη μας την επίδραση εξωτερικών πεδίων στο εσωτερικό του εργαστηρίου.

6.3.2 Ανάμειξη πρώτων υλών

Οι πρώτες ύλες που θα χρησιμοποιήσουμε είναι:

- ◆ Ως υγρό διηλεκτρικό, φαρμακευτικό παραφινέλαιο, μάρκας Columbia Petro Chem PVT. Είναι ευρέως διαθέσιμο ορυκτέλαιο με ιξώδες 32.10 mPa s στους 20°C και ειδική βαρύτητα 0.845 στους 25°C.
- ◆ Κονία του Οξειδίου του χαλκού (II) (CuO), μάρκας Riedel-de Haen No 12867. Με μοριακό βάρος 79,54 g/mol, χρώματος κόκκινου
- ◆ Κονία του Οξειδίου του χαλκού (II) (bottle)
- ◆ Κονία του Οξειδίου του χαλκού (I) (Cu₂O), μάρκας Riedel-de Haen No 12841, χρώματος μαύρου
- ◆ Κονία του Οξειδίου του σιδήρου (III) (Fe₂O₃), μάρκας Merck
- ◆ Κονία του Οξειδίου του σιδήρου (III) (Fe₂O₃), bottle

Για δοκιμή χρησιμοποιήσαμε και κονία οξειδίου του τιτανίου (TiO_2 , rutile titania), μάρκας Aldrich No 637262, 99.5%.

Επομένως όπως φαίνεται χρησιμοποιήσαμε οξείδια των ίδιων μετάλλων διαφορετικού όμως τύπου, των οποίων τις διαφορές θα δούμε στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Για κάθε δείγμα προσθέσαμε 20ml από παραφινέλαιο με φαρμακευτική σύριγγα, με την απαιτούμενη προσοχή, καθώς μικρά λάθη θα είχαν άλλα αποτελέσματα από τα επιθυμητά στις συγκεντρώσεις των δειγμάτων. Η μέτρηση του βάρους της κονίας γινόταν με ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας και έπειτα προσθέτονταν στο παραφινέλαιο. Επίσης, κατά την προετοιμασία του μείγματος, χρειαζόνταν προσοχή ώστε να αφηθεί εκτεθειμένο όσον το δυνατό λιγότερο στην υγρασία του περιβάλλοντος.

Όπως τονίσαμε θέλουμε το δείγμα για το οποίο θα παίρνουμε τις μετρήσεις να είναι ομογενές, για αυτό δεν αρκούσε να το αναμιξούμε χειροκίνητα. Τα μίγματα υποβάλλονταν για 30 με 45 λεπτά της ώρας στους υπερήχους (35 kHz, 170 W) ώστε να αναμιχθούν όσο το δυνατό καλύτερα και να αποφευχθεί όσο το δυνατό περισσότερο η καθίζησή τους. Για αυτό κάθε φορά που κατασκευάζαμε το μίγμα και το βάζαμε στους υπερήχους, οι μετρήσεις έπρεπε να παρθούν όσο το δυνατόν συντομότερο από τη στιγμή που θα έπαυε να εκτίθεται στην ακτινοβολία.

Οι υπέρηχοι είναι τα ηχητικά κύματα με συχνότητα μεγαλύτερη από 20 kHz. Σε μια διαδικασία που είναι γνωστή ως σπηλαίωση, δημιουργούνται εκατομμύρια μικροσκοπικές φυσαλίδες μέσα στο υγρό μέσο, χάρη στα θετικά και αρνητικά κύματα πίεσης στο διάλυμα. Συγκεκριμένα, οι φυσαλίδες δημιουργούνται όταν η πίεση του υγρού ελαττώνεται απότομα και καταστρέφονται όταν η πίεση αυξάνεται απότομα. Η σπηλαίωση στην περίπτωση μας δημιουργείται από τους υπερήχους στο μίγμα λάδι-κονία, όπου αναπτύσσονται κατά τη διάρκειά της υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Η δημιουργία και η καταστροφή φυσαλίδων λόγω των κυμάτων πίεσης δημιουργεί ταλαντώσεις και απωστικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων της κονίας με αποτέλεσμα να απομακρύνονται. Μετά από αυτή τη διαδικασία το μίγμα μας είναι έτοιμο για τις μετρήσεις.

6.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

6.4.1 Διηλεκτρικές μετρήσεις σε θερμοκρασία δωματίου

Η κεντρική ιδέα της διαδικασίας διηλεκτρικών μετρήσεων είναι η ακόλουθη. Αρχικά, πήραμε μετρήσεις στο κελί του πυκνωτή χωρίς να προσθέσουμε σε αυτό διηλεκτρικό, προκειμένου να μετρήσουμε τη χωρητικότητα του κενού C_{p0} . Στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται μεταξύ των ηλεκτροδίων και με τη βοήθεια της γέφυρας μετράται η χωρητικότητα C_p και η αγωγιμότητά του G στο επιθυμητό φάσμα συχνοτήτων. Έτσι, μπορεί να υπολογιστεί για κάθε συχνότητα το πραγματικό ($k''=C_p/C_{p0}$) και το φανταστικό μέρος ($k''=G/\omega C_{p0}$) της μιγαδικής επιτρεπτότητας, καθώς και η εφαπτομένη απωλειών ($\tan\delta=k''/k'$).

Στα πειράματα που έγιναν, το κελί μετρήσεων υγρών τοποθετήθηκε στον πάγκο του εργαστηρίου, χωρίς έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών. Επομένως οι μετρήσεις πάρθηκαν υπό συνθήκες δωματίου (θερμοκρασία 20-30 °C, σχετική υγρασία 30-40%).

6.4.2 Παράμετροι διηλεκτρικών μετρήσεων

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της γέφυρας LCR κατά τη λήψη και αποθήκευση των μετρήσεων χρησιμοποιεί ορισμένες παραμέτρους, που καθορίζονται από το χρήστη. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις συνοψίζονται παρακάτω :

- Κλίμακα συχνοτήτων: Λογαριθμική
- Εύρος συχνοτήτων: συχνότητα έναρξης $f_{start}=20$ Hz, συχνότητα λήξης $f_{stop}=10^6$ Hz
- Τύπος μετρήσεων: C_p-G (χωρητικότητα-αγωγιμότητα σε παράλληλη σύνδεση)
- Αριθμός μετρήσεων που λαμβάνονται σε κάθε συχνότητα $avg=1$ ή $avg=8$
- Χρόνος μεταξύ των μετρήσεων: 1 sec
- Συνεχής συνιστώσα εφαρμοζόμενης τάσης: $bias=0$
- Πλάτος εναλλασσόμενου σήματος: 20mV

Αφού βάλουμε σαν είσοδο στο πρόγραμμα τις παραπάνω επιθυμητές τιμές για τις μετρήσεις πατάμε το Enter και παίρνουμε τις μετρήσεις για το δείγμα που έχουμε τοποθετήσει.

6.4.3 Επεξεργασία μετρήσεων

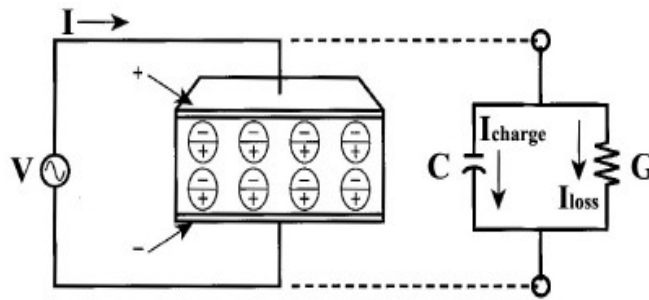
Κάθε φορά που παίρνει μετρήσεις η γέφυρα LCR μετρά όπως είπαμε την αγωγιμότητα και την χωρητικότητα του διηλεκτρικού υλικού. Ο υπολογισμός της μιγαδικής επιτρεπτότητας μπορεί επομένως να γίνει άμεσα αν το διηλεκτρικό υλικό καλύπτει την περιοχή μεταξύ των ηλεκτροδίων. Επίσης, κάθε φορά που βρισκόμαστε στο εργαστήριο για μετρήσεις, πριν τοποθετήσουμε το δείγμα στον πυκνωτή παίρνουμε μετρήσεις για το κενό, οι οποίες ήταν διαφορετικές από αυτές που είχε αποθηκεύσει ο υπολογιστής. Γιαυτό κάθε φορά που επεξεργαζόμαστε τις μετρήσεις χρησιμοποιούσαμε την τιμή της χωρητικότητας κενού που είχαμε μετρήσει αρχικά, για να έχουμε μεγαλύτερη αξιοπιστία.

6.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

6.5.1 Μοντελοποίηση διάταξης

Το βασικό στοιχείο της πειραματικής διάταξης είναι το κελί διηλεκτρικών μετρήσεων ρευστών (Agilent 16452A), το οποίο όπως είπαμε λειτουργεί ως ένας πυκνωτής παράλληλων πλακών. Επειδή όμως δεν είναι ιδανικός πυκνωτής, όταν εφαρμοστεί μια εναλλασσόμενη ημιτονοειδής τάση στα άκρα του, το συνολικά παρατηρούμενο ρεύμα θα προέρχεται από το ρεύμα φόρτισης (I_{charge}) που διαρρέει τον πυκνωτή και σχετίζεται με τη χωρητικότητα (και επομένως τη διηλεκτρική σταθερά του υλικού), και από το ρεύμα απωλειών (I_{loss}) που σχετίζεται με τις απώλειες δηλ. την αντίσταση όγκου του υλικού.

Οι απώλειες στο υλικό μπορούν να προσδιορισθούν από τη διαγωγιμότητα (G), η οποία συνδέεται παράλληλα με τον ιδανικό πυκνωτή (C). Το συνολικό ρεύμα που διαρρέει το δοκίμιο, μέσα από τον πυκνωτή (I_{charge}), και μέσα από την αντίσταση απωλειών (I_{loss}), είναι σύμφωνα με το προτεινόμενο παράλληλο κύκλωμα C-G του Σχ. :



Σχ.6.11 Πυκνωτής παράλληλων πλακών με ενδιάμεσο διηλεκτρικό. Παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα C – G που χρησιμοποιείται για τον αναλυτικό προσδιορισμό των διηλεκτρικών μεγεθών.

$$I = I_{\text{charge}} + I_{\text{loss}} = V \cdot (j\omega C + G) = V \cdot (j\omega C_0 \kappa' + G)$$

Αντικαθιστώντας, $G = \omega C_0 \kappa''$ λαμβάνουμε,

$$I = V \cdot (j\omega C_0 \kappa' + \omega C_0 \kappa'') = V \cdot (j\omega C_0)(\kappa' - j\kappa'') = V \cdot (j\omega C_0) \kappa^*$$

όπου $\kappa^* = \kappa' - j\kappa''$.

Η μιγαδική διηλεκτρική σταθερά (κ^*) συναποτελείται από το πραγματικό μέρος (κ'), στο οποίο αποδίδεται η αποθήκευση ηλεκτρικών φορτίων στον ιδανικό πυκνωτή (C), και από το φανταστικό μέρος (κ''), στο οποίο αποδίδεται η διαρροή ηλεκτρικών φορτίων μέσα από τη διαγωγιμότητα (G) του εξεταζόμενου συστήματος μόνωσης (ρεύμα απωλειών).

Η σχετική μιγαδική διηλεκτρική επιτρεπτότητα ($\epsilon_r^* \equiv \kappa^*$) περιγράφει την αλληλεπίδραση των υλικών με το ηλεκτρικό πεδίο. Η σχετική μιγαδική διηλεκτρική επιτρεπτότητα (ϵ_r^*), είναι ισοδύναμη προς τη μιγαδική διηλεκτρική επιτρεπτότητα (ϵ^*) ανηγμένη ως προς τη διηλεκτρική σταθερά του κενού.

$$\epsilon_r^* = \epsilon^*/\epsilon_0 = (\epsilon'/\epsilon_0) - j(\epsilon''/\epsilon_0) = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$$

όπου $\epsilon_0 = \eta$ διηλεκτρική σταθερά του κενού $\cong 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.

Παρατήρηση: Το ϵ_r^* συναντάται και ως κ^* και ονομάζεται επίσης μιγαδική διηλεκτρική σταθερά. Επομένως ισχύουν $\kappa' = \epsilon_r'$ (σχετική διηλεκτρική σταθερά) και $\kappa'' = \epsilon_r''$ (διηλεκτρικές απώλειες). Ο συμβολισμός ϵ_r χρησιμοποιείται συνήθως από φυσικούς επιστήμονες ενώ ο κ από μηχανικούς. Μέχρι τώρα στα προηγούμενα κεφάλαια, για πρακτικούς λόγους χρησιμοποιήθηκε ο συμβολισμός ϵ_r για το θεωρητικό μέρος. Για το πειραματικό μέρος, που ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο χρησιμοποιείται ο συμβολισμός κ .

Γενικά στη βιβλιογραφία υπάρχει σύγχυση σχετικά με το συμβολισμό και την ονοματολογία των όρων διηλεκτρικών μεγεθών, η οποία συνοψίζεται στον Πίνακα

Σύμβολο	Ονοματολογία	Μέγεθος
κ^*	Μιγαδική διηλεκτρική σταθερά	Αδιάστατο
ϵ^*	Μιγαδική διηλεκτρική επιτρεπτότητα	F/m
ϵ_r^*	Σχετική μιγαδική διηλεκτρική επιτρεπτότητα	Αδιάστατο
ϵ_r'	Σχετική διηλεκτρική σταθερά	Αδιάστατο
ϵ_r''	Συντελεστής απωλειών	Αδιάστατο
κ'	Διηλεκτρική σταθερά	Αδιάστατο

Διευκρινίζεται επίσης ότι: $\kappa^* = \epsilon^* \rightarrow \kappa' - j\kappa'' = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$

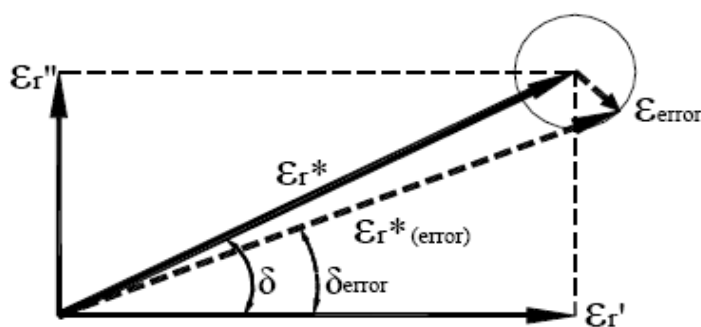
Πίνακας 6.5 :Ονοματολογία των διηλεκτρικών μεγεθών που συνήθως χρησιμοποιείται

Για το εξεταζόμενο ισοδύναμο κύκλωμα (Σχήμα 6.11), το ανυσματικό διάγραμμα της σχετικής μιγαδικής διηλεκτρικής επιτρεπτότητας εμφανίζει διαφορά φάσης 90° μεταξύ της φανταστικής και της πραγματικής συνιστώσας. Η ανυσματική συνιστώσα (ϵ_r^*) σχηματίζει γωνία δ με τον πραγματικό άξονα (ϵ_r'). Τα αναμενόμενα επίπεδα «χαλάρωσης», στη συχνότητα που ενδιαφέρει για το κάθε υλικό, προκύπτουν από την αναλογία της απολεσθείσας ενέργειας ως προς την αποθηκευόμενη ενέργεια στο χρόνο μιας περιόδου. Ανά κύκλο συχνότητας ισχύει ότι,

$$\tan\delta = \text{απολεσθείσα} / \text{αποθηκευθείσα ενέργεια},$$

$$\tan\delta = I_{\text{loss}} / I_{\text{charge}} = \kappa'' / \kappa' = \epsilon_r'' / \epsilon_r'$$

Για τα ισχυρά μονωτικά υλικά, όπως είναι τα ηλεκτρομονωτικά έλαια μετασχηματιστών, το διάνυσμα του ϵ_r^* τείνει στο ϵ_r' και η $\tan\delta$ τείνει στο 0_+ . Επομένως, όταν το μέτρο του διανυσματικού σφάλματος ϵ_{error} της μετρητικής διάταξης γίνει μεγαλύτερο από το μέτρο του ϵ_r'' , του μετρούμενου υλικού, η συνολικά μετρούμενη γωνία δ_{error} μπορεί να γίνει αρνητική, π.χ. $\tan\delta \rightarrow -0$ (Σχήμα 6.12). Αυτή είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος, που θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη κατά τη μέτρηση ηλεκτρομονωτικών ελαίων στην επιλογή της κατάλληλης μετρητικής διάταξης και κυρίως του κατάλληλου μετρητικού αισθητήρα - κελιού. Για να ξεπεραστεί αυτή η πειραματική δυσκολία, η γεωμετρία του κελιού που εμπεριέχει το δείγμα του μονωτικού ελαίου, που πρόκειται να χαρακτηριστεί, θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να ενισχύει το σήμα του I_{loss} , έτσι ώστε αυτό να μπορεί να καταγραφεί από μια υψηλής ακρίβειας γέφυρα LCR σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με την αύξηση της γεωμετρίας των ηλεκτροδίων, είτε με την επιλογή κατάλληλων υλικών για την κατασκευή του κελιού μετρήσεων.



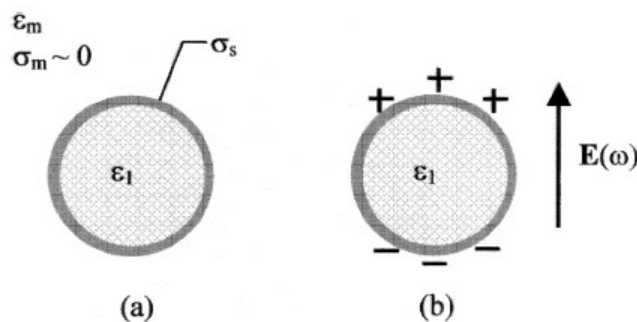
Σχ. 6.12 διανυσματικό διάγραμμα της σχετικής μιγαδικής διηλεκτρικής επιτρεπτότητας.

6.5.2 Μοντελοποίηση διηλεκτρικού

Εδώ παρουσιάζεται το θεωρητικό μοντέλο, το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε για την ερμηνεία του αποτελέσματος των πειραμάτων. Η ερμηνεία αυτή λαμβάνει υπόψιν το θεωρητικό έργο διαφόρων ερευνητών, από όπου προκύπτει ότι οι συνολικές διηλεκτρικές ιδιότητες των μιγμάτων ελαίου-σωματιδίων, εξαρτώνται κυρίως από την αγωγιμότητα και τη συγκέντρωση φορτίων στις διαχωριστικές επιφάνειες.

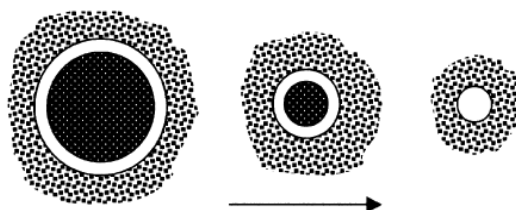
6.5.2.1 Μακροσκοπική θεώρηση: επιφανειακή αγωγιμότητα και πόλωση όγκου

Το σχήμα 6.13 παρουσιάζει τις κύριες διηλεκτρικές παραμέτρους για την περίπτωση κρυσταλλικών κόκκων μέσα σε μονωτικό έλαιο, υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Η μέγιστη επιφανειακή αγωγιμότητα αντιστοιχεί στις χαμηλότερες συχνότητες, όπου το επιδερμικό πεδίο μεταφέρει τους φορείς κατά μήκος της επιφάνειας, επάγοντας μια πολικότητα μεταξύ των φορτισμένων άκρων των κόκκων. Οι κόκκοι γίνονται μεγάλα δίπολα, τα οποία συνεισφέρουν στην διηλεκτρική πόλωση του υλικού. Πρόκειται δηλαδή για ένα είδος διεπιφανειακής πόλωσης. Επομένως, η σχετική διηλεκτρική σταθερά κ' του μίγματος ελαίου-κονίας μπορεί να λάβει μεγαλύτερες τιμές από το σκέτο έλαιο. Αντίστοιχα βέβαια και οι διηλεκτρικές απώλειες είναι μεγαλύτερες λόγω της κίνησης μεγαλύτερου αριθμού φορτίου.



Σχ. 6.13 (a) Οι παράμετροι του μοντέλου Ο' Konski για διηλεκτρικά σωματίδια σε διηλεκτρικό υγρό (b) Το επαγόμενο δίπολο ως αποτέλεσμα της επίδρασης εναλασσόμενου πεδίου μικρής συχνότητας

Στις υψηλότερες συχνότητες, όπου συναντάται χαμηλή επιφανειακή αγωγιμότητα, δε σχηματίζονται δίπολα. Πραγματικά, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν η διεπιφανειακή πόλωση αποτελεί έναν αργό διηλεκτρικό μηχανισμό. Επομένως, οι διηλεκτρικές ιδιότητες οφείλονται αποκλειστικά στους γρηγορότερους μηχανισμούς πόλωσης (κυρίως τον ιοντικό) που αναπτύσσονται στον όγκο του υλικού και είναι ανεξάρτητοι του μεγέθους των κόκκων. Επειδή, το μεγαλύτερο ποσοστό των μιγμάτων αποτελείται από παραφινέλαιο ($\kappa'_{oil}=2,2$), ο παράγοντας που καθορίζει την ενεργό τιμή της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς είναι ο χώρος που καταλαμβάνουν οι κόκοι.



Σχ. 6.14 Οι διεπιφανειακές ιδιότητες αυξάνονται απότομα όσο μικραίνει το μέγεθος του σωματιδίου

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η διεπιφανειακή πόλωση είναι πιο έντονη όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του κόκκου, καθώς αυξάνει το συνολικό εμβαδό των επιφανειών. Δηλαδή για ίδια ποσότητα σωματιδίων, όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των κόκκων τόσο μεγαλύτερη είναι η διεπιφανειακή πόλωση.

6.5.2.2 Μικροσκοπική θεώρηση : ενεργειακές ζώνες και καταστάσεις επιφάνειας

Προχωρώντας σε πιο μακροσκοπικό επίπεδο, η διηλεκτρική απόκριση των κόκκων της κόνιας, μπορεί να συσχετιστεί με την ύπαρξη υψηλής πυκνότητας ηλεκτρονικών καταστάσεων επιφάνειας. Οι εισαγόμενες ηλεκτρονικές καταστάσεις επιφάνειας οφείλονται στο γεγονός ότι η περιοδικότητα του κρυσταλλικού πλέγματος τερματίζεται απότομα στην επιφάνεια των κόκκων. Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν λύσεις της εξίσωσης Schrodinger που αντιστοιχούν στην εισαγωγή ενεργειακών επιπέδων μέσα στο ενεργειακό διάκενο του υλικού και σε φανταστικές τιμές του κυματοδιανύσματος k . Αυτές οι κυματικές εξισώσεις είναι αποσβενύμενα κύματα, που εξασθενούν εκθετικά με το βάθος από την επιφάνεια των κόκκων. Είναι χωρικά εντοπισμένα, σε αντίθεση με τα κύματα Bloch που διαδίδονται μέσα στους νανοκρυστάλλους, και σε ένα τέλειο κόκκο μπορούν να υπάρξουν μόνο γύρω από την επιφάνεια.

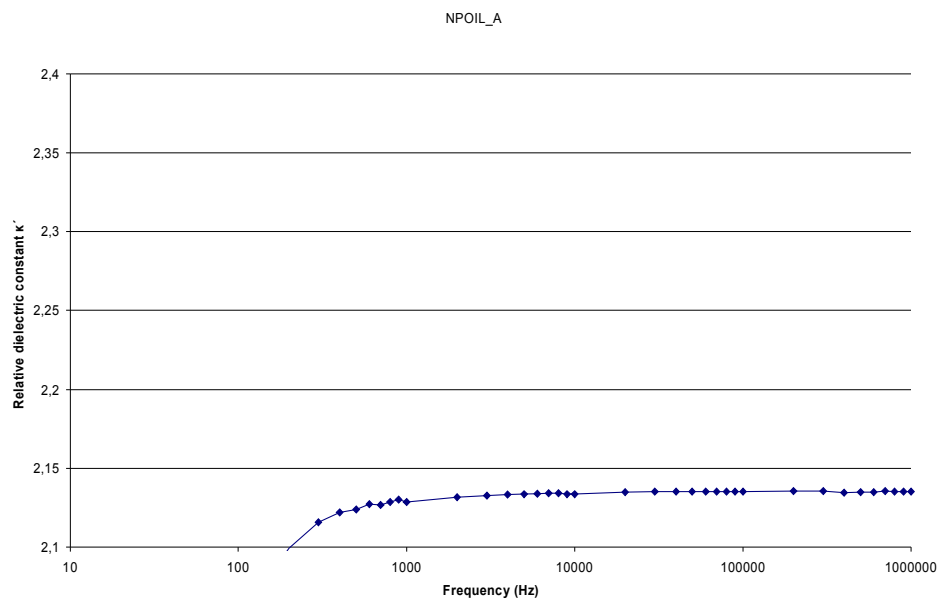
Η συνολική κατανομή ηλεκτρονίων που απαιτείται για να καταστήσουν την επιφάνεια πλήρως ηλεκτρικά ουδέτερη πραγματοποιείται όταν η ζώνη των επιφανειακών καταστάσεων είναι μόνο μερικώς πλήρης. Συγκεκριμένα οι επιφανειακές καταστάσεις μιας ηλεκτρικά ουδέτερης επιφάνειας είναι πλήρεις μέχρι "ένα ουδέτερο ενεργειακό επίπεδο" Φ_0 . Όταν υπάρχουν κενές καταστάσεις κάτω από το Φ_0 τότε η επιφάνεια έχει αμιγώς θετικό φορτίο, ενώ αν υπάρχουν πλήρεις καταστάσεις πάνω από το Φ_0 τότε η επιφάνεια αποκτά αμιγώς αρνητικό φορτίο.

Για κρυσταλλικούς κόκκους με διαστάσεις κάτω του 1μm η διαδικασία απορρόφησης ηλεκτρικής ενέργειας στην επιφάνεια ή στον όγκο, μπορεί να μοντελοποιηθεί με διαγράμματα δυναμικής ενέργειας. Στις χαμηλές συχνότητες, η παρεχόμενη ηλεκτρική μεταβάλλει την πληρότητα των επιφανειακών καταστάσεων στα πολικά άκρα του μορίου, επάγοντας έτσι επιφανειακή συσσώρευση ή απογύμνωση φορέων. Το υψηλό και το χαμηλό επίπεδο πληρότητας επιφανειακών καταστάσεων στα απέναντι άκρα του κόκκου καθορίζουν την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύεται πάνω στην επιφάνεια από το πεδίο.

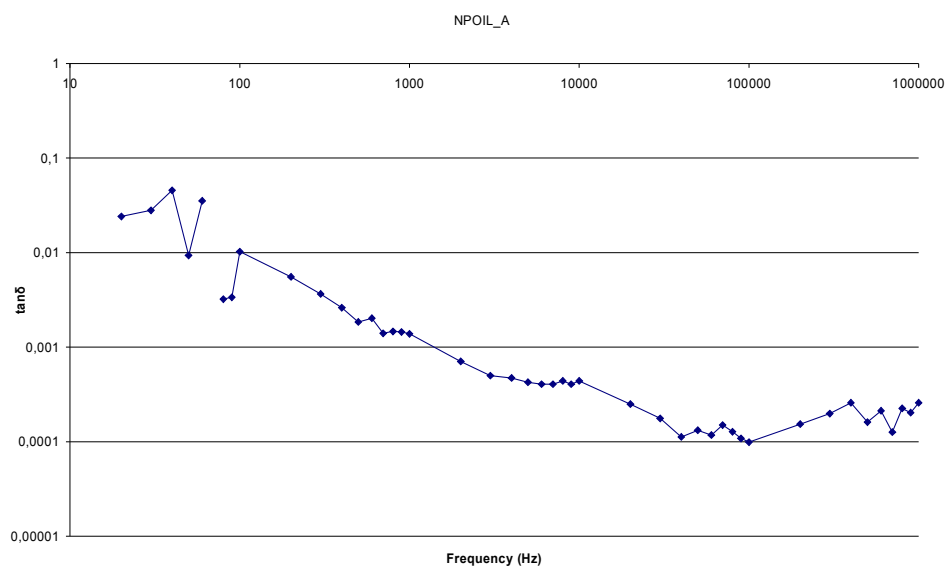
7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

7.1 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ

Αρχικά, πήραμε μετρήσεις για σκέτο λάδι, χωρίς προσθήκη σωματιδίων, προκειμένου να δούμε την διηλεκτρική συμπεριφορά του και να αξιοποιήσουμε τις μετρήσεις προκειμένου να γίνει σύγκριση με τα επόμενα μίγματα. Οι μετρήσεις έγιναν σε θερμοκρασία δωματίου με απόσταση των πλακών του πυκνωτή ίση με 3mm και έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:



Σχ.7.1 Σχετική διηλεκτρική σταθερά παραφινέλαιου στο πεδίο της συχνότητας



Σχ.7.2 Εφαπτομένη απωλειών του παραφινέλαιου στο πεδίο της συχνότητας

Όπως φαίνεται, για το παραφινέλαιο η διηλεκτρική σταθερά k' είναι περίπου 2,13 και έχει μεγάλη σταθερότητα για συχνότητες μεγαλύτερες του 1kHz, όπου είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη από τη συχνότητα. Επίσης, ταυτόχρονα με τη σταθερότητα του k' έχουμε συνεχώς μειούμενες απώλειες με την αύξηση της συχνότητας κι έτσι μπορούμε να πούμε ότι προσομοιώνουμε σε μεγάλο βαθμό τα λάδια που χρησιμοποιούνται στις διάφορες συσκευές και ιδίως στους μετασχηματιστές.

Στις χαμηλές συχνότητες το k' έχει μικρότερη τιμή κι αυτό εξαιτίας των ανωμαλιών που εμφανίζονται κατά τη μέτρηση της χωρητικότητας κενού C_{p0} . Αυτές οι ανωμαλίες έχουν να κάνουν με τις μετρήσεις και όχι με τη φύση του μίγματος και πιθανοί λόγοι ύπαρξής τους είναι:

- α) Μετρήσεις κοντά στα όρια μέτρησης του συστήματος
- β) Παρασιτικά φαινόμενα χωρητικότητων
- γ) Παρεμβολή από το ηλεκτρικό δίκτυο (50Hz και αρμονικές)

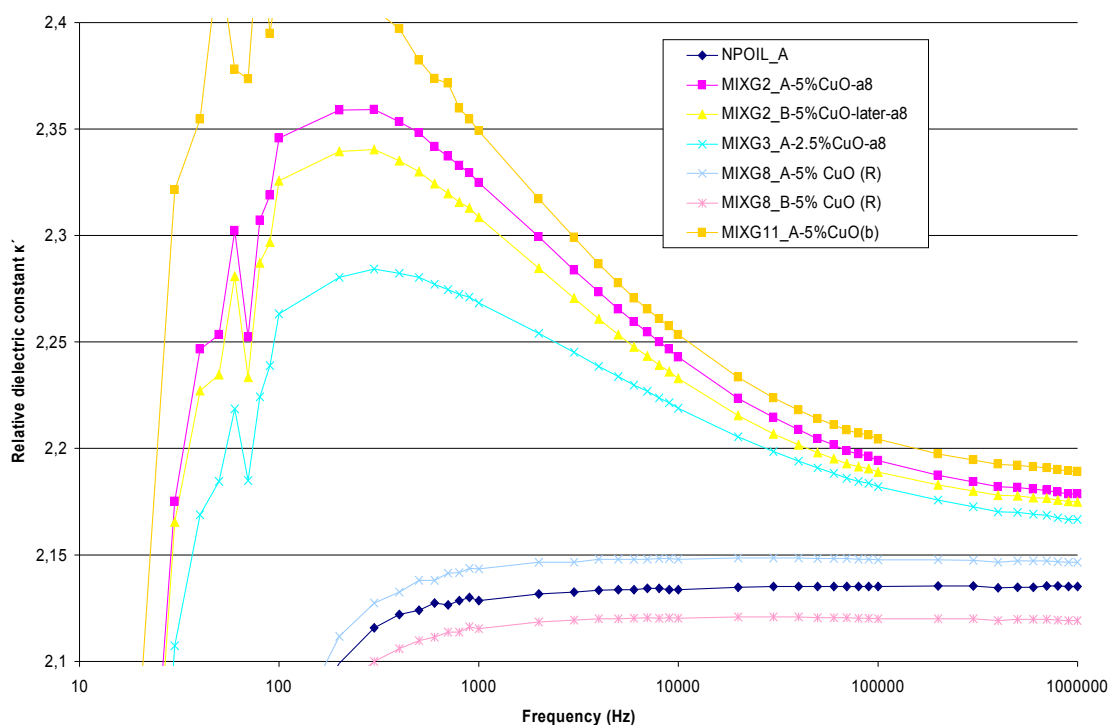
Για την εφαπτομένη απωλειών σε γενικές γραμμές παρατηρείται μείωση με την αύξηση της συχνότητας, με τιμές από περίπου 0,05 (για τις χαμηλές συχνότητες) έως 0,0001 (για τις υψηλές συχνότητες). Οι ανωμαλίες που παρατηρούνται στις τιμές της $\tan\delta$ κοντά στο 0,0001 οφείλονται στο ότι είναι στα όρια του μετρητικού συστήματος, ενώ αυτές στις χαμηλές συχνότητες είναι οι αντίστοιχες που παρουσιάζονται και στη διηλεκτρική σταθερά.

7.2 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ- CuO

Χρησιμοποιήσαμε δύο διαφορετικά είδη οξειδίου του χαλκού (II), δηλαδή με διαφορετικά μεγέθη κόκκων.

- ◆ Το μίγμα MIXG2, έχει σύσταση 20ml παραφινέλαιο, 1 gr CuO (b) δηλαδή 5% CuO σε περιεκτικότητα (θεωρητικά). Το μίγμα αφέθηκε στους υπερήχους για 45 λεπτά και πάρθηκαν δύο μετρήσεις με σχετικά μικρή χρονική διαφορά, οι MIXG2_A και MIXG2_B.
- ◆ Το μίγμα MIXG3 έχει περιεκτικότητα 2,5% (θεωρητικά) σε CuO (b), για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν 10ml του μίγματος MIXG2 και προστέθηκαν 10ml παραφινέλαιο. Αφέθηκε για 30 λεπτά στους υπερήχους και πάρθηκε η μέτρηση MIXG3_A.
- ◆ Το μίγμα MIXG8 αποτελείται από 20ml παραφινέλαιο, 1 gr CuO (Riddle) δηλαδή θεωρητικά 5% περιεκτικότητα. Το μίγμα αφέθηκε στους υπερήχους για 1 ώρα αλλά δεν ανακατεύτηκε καλά. Πάρθηκαν 2 μετρήσεις με διαφορετικό μέσο όρο μετρήσεων ανά μέτρηση, η MIXG8_A (avg=8) και η MIXG8_B (avg=1), με διαφορά χρόνου.
- ◆ Το MIXG11 είναι επανάληψη του μίγματος MIXG2, για το οποίο πάρθηκαν 4 μετρήσεις με χρονική διαφορά, που λόγω της ομοιότητάς τους κρατάμε τη MIXG11_A

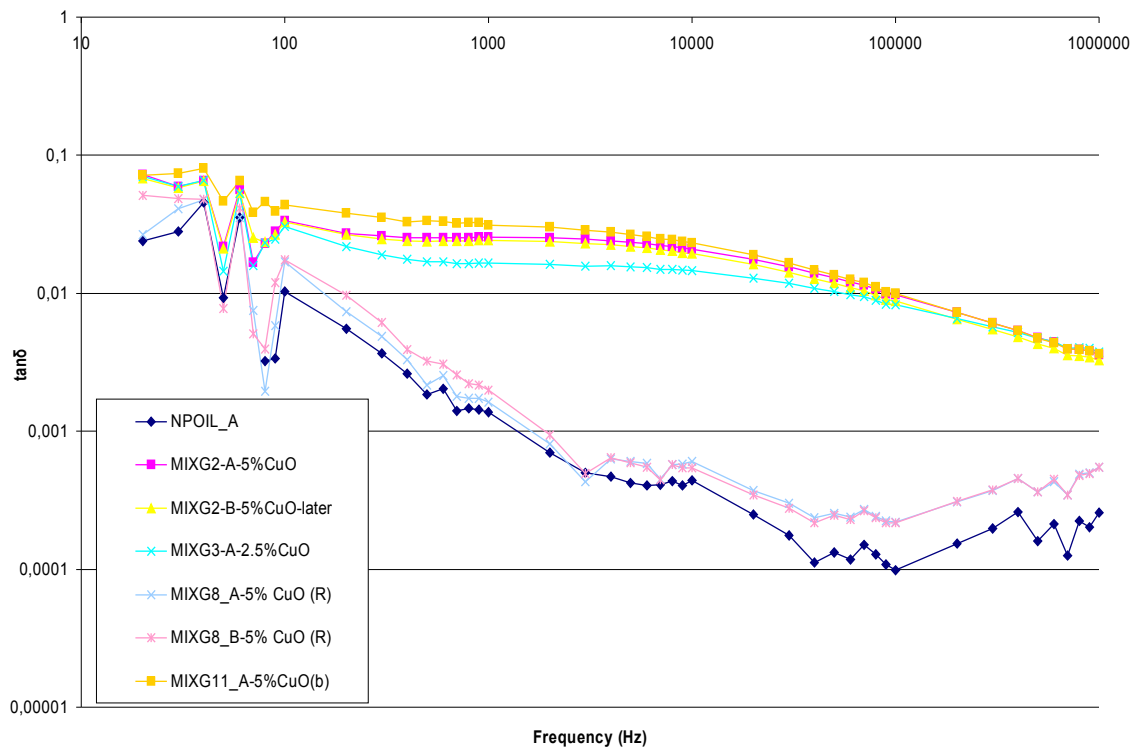
Παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τη διηλεκτρική σταθερά και την εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta$:



Σχ.7.3 Σχετική διηλεκτρική σταθερά μίγματος παραφινέλαιου-CuO στο πεδίο της συχνότητας

Για τη διηλεκτρική σταθερά κ' παρατηρούμε διαφορετική συμπεριφορά των μιγμάτων ανάλογα με το μέγεθος του κόκκου και την περιεκτικότητα του μίγματος σε οξείδιο του χαλκού (II). Για τις μετρήσεις των μιγμάτων παραφινέλαιου-CuO (b), παρατηρούμε μια απότομη κορυφή στην περιοχή συχνοτήτων 100 Hz – 1 kHz που καταλήγει σε μια τιμή περίπου 2,16-2,19 στο 1 MHz. Η διαφορά μεταξύ των μιγμάτων MIXG2, MIXG11 και του MIXG3 είναι ότι το MIXG3_A είναι μετατοπισμένο προς τα κάτω, δηλαδή έχει μικρότερες τιμές κ' . Επίσης η διαφορά που παρατηρούμε μεταξύ των μετρήσεων MIXG2_A και MIXG2_B οφείλεται στην καθίζηση των κόκκων του CuO που γίνεται με την πάροδο του χρόνου και οδηγεί σε μεγαλύτερη καθαρότητα τον όγκο του μίγματος. Για αυτό και το MIXG2_B είναι ελαφρά μετατοπισμένο προς τα κάτω, σε σχέση με το MIXG2_A. Σε σχέση με το MIXG11, παρόλο που είναι ίδιας σύνθεσης με το MIXG2, παρατηρούμε αύξηση της κορυφής του κ' στην τιμή 2,45 σε σχέση με το μέγιστο 2,35 του MIXG2. Αυτή προφανώς οφείλεται στην καλύτερη ανάμειξη των κόκκων.

Στο μίγμα παραφινέλαιου-CuO (Riddle) έχουμε διαφορετική συμπεριφορά, καθώς δεν εμφανίζεται αυτή η κορυφή και τα επίπεδα της διηλεκτρικής σταθεράς είναι πιο χαμηλά. Όπως αναφέρθηκε η ανάμειξη των κόκκων στο παραφινέλαιο δεν ήταν καλή, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις για το μίγμα MIXG3 να κειμώνονται γύρω από τις τιμές του σκέτου λαδιού. Βέβαια, αυτό το είδος του CuO παρόλα αυτά, όπως είπαμε δεν παρουσιάζει κορυφή κι αυτό έχει να κάνει με το μέγεθος του κόκκου.



Σχ.7.4 Εφαπτομένη απωλειών του μίγματος παραφινέλαιου-CuO στο πεδίο της συχνότητας

Για την εφαπτομένη απωλειών έχουμε και πάλι ουσιαστικά την ομαδοποίηση των μετρήσεων με αυτές του μίγματος παραφινέλαιου-CuO (b) να παρουσιάζουν πιο ομαλή μείωση με την αύξηση της συχνότητας, σε σχέση με το σκέτο παραφινέλαιο. Η συμπεριφορά του μίγματος παραφινέλαιου-CuO (Riedel) παρουσιάζει συμπεριφορά αντίστοιχη του σκέτου παραφινέλαιου. Οι τιμές της $\tan\delta$ για τα μίγματα MIXG2, MIXG3, MIXG11 κυμαίνονται περίπου από 0,004 έως 0,08 ενώ για το μίγμα MIXG8 από 0,002 έως 0,05. Ουσιαστικά με την ανάμιξη κόκκων CuO(b) στο παραφινέλαιο πετυχαίνουμε ουσιαστικά μια ομαλοποίηση της καμπύλης για συχνότητες μεγαλύτερες των 100Hz.

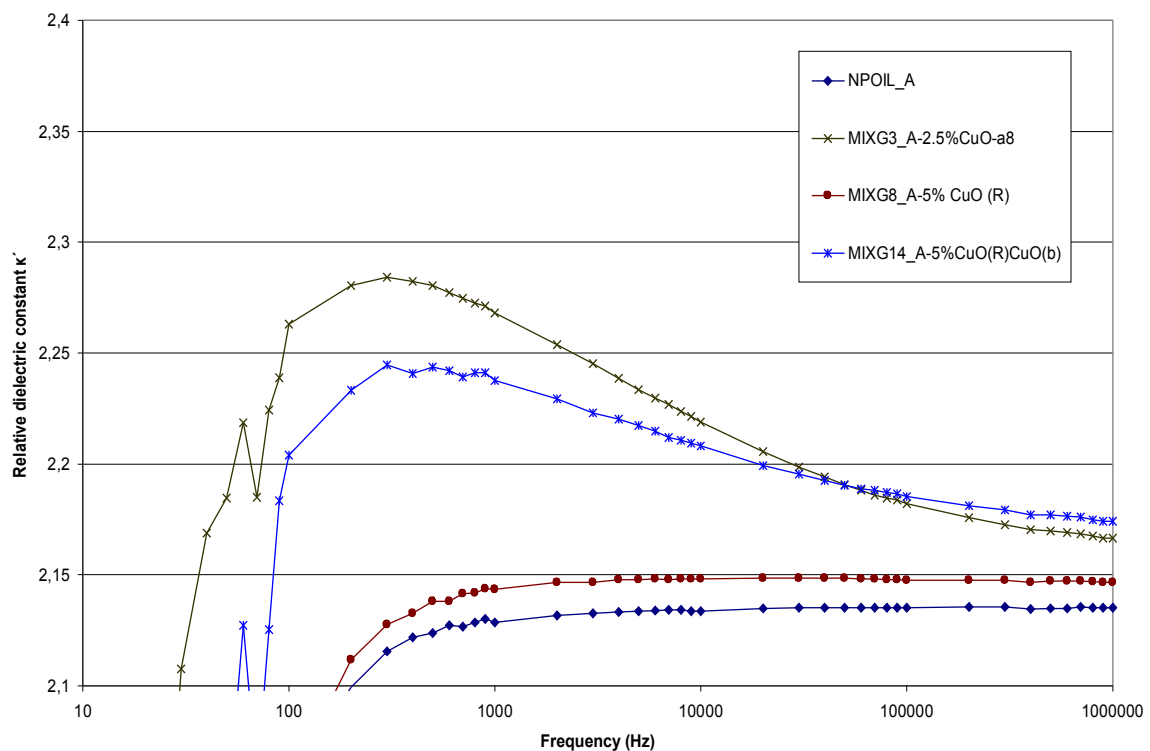
Γενικά, μπορούμε να συμπεράνουμε τα παρακάτω:

- Παρατηρούμε ότι έχουμε διηλεκτρικό μηχανισμό γύρω από τη συχνότητα 300Hz όπου έχουμε απότομη αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς (συντονισμός) κι έπειτα απότομη μείωσή της (χαλάρωση). Δηλαδή, εμφανίζεται για μια στενή ζώνη συχνοτήτων ένας διηλεκτρικός μηχανισμός πόλωσης. Ο μηχανισμός αυτός σύμφωνα με τη μοντελοποίηση που κάναμε στην παράγραφο 6.5.2, είναι ένα είδος διεπιφανειακής πόλωσης. Αντίστοιχα, οι διηλεκτρικές απώλειες είναι μεγαλύτερες λόγω της κίνησης μεγαλύτερου αριθμού φορτίου.

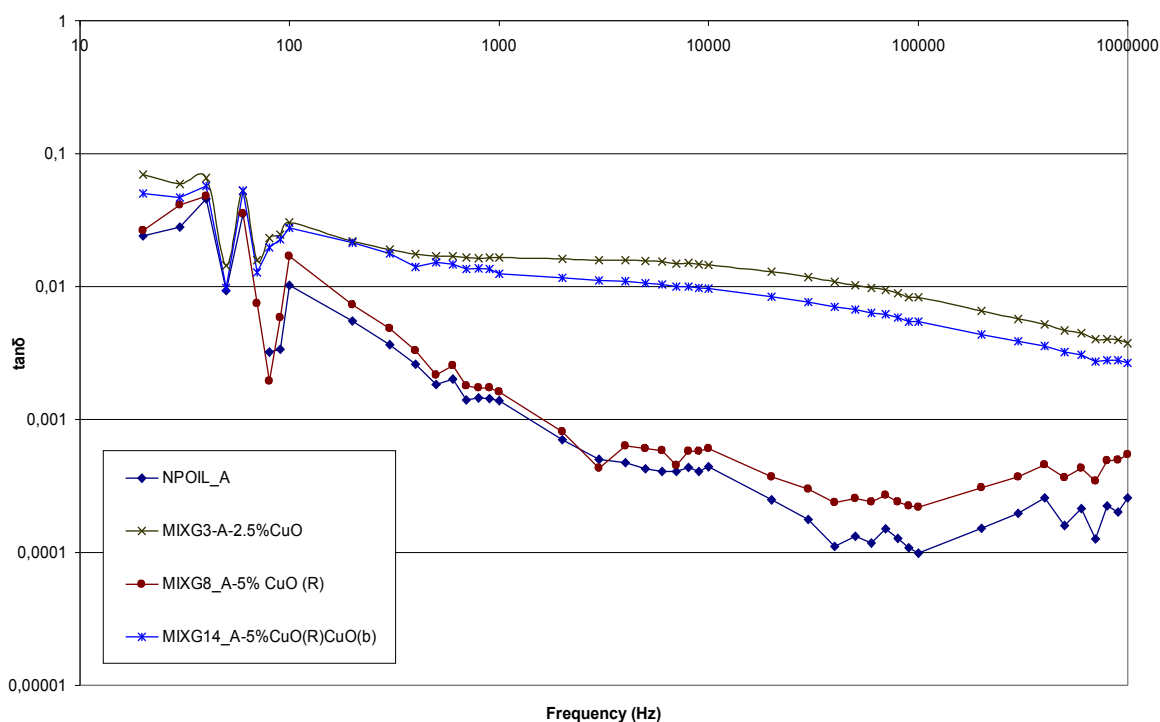
Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν η διεπιφανειακή πόλωση αποτελεί έναν αργό διηλεκτρικό μηχανισμό. Επομένως, στις υψηλότερες συχνότητες οι διηλεκτρικές ιδιότητες οφείλονται αποκλειστικά στους γρηγορότερους μηχανισμούς πόλωσης (κυρίως τον ιοντικό) που αναπτύσσονται στον όγκο του υλικού και είναι ανεξάρτητοι του μεγέθους των κόκκων.

- Σύμφωνα με την μοντελοποίηση που κάναμε, το μέγεθος των κόκκων της σκόνης καθορίζει τη διηλεκτρική συμπεριφορά στις χαμηλές συχνότητες. Το φαινόμενο είναι πιο έντονο με τη μείωση του μεγέθους των κόκκων, λόγω της αύξησης του συνολικού εμβαδού των διεπιφανειών. Επομένως, για αυτό και στις μετρήσεις του μίγματος παραφινέλαιου-CuO(Riddle) ο διηλεκτρικός μηχανισμός που εμφανιζόταν για το CuO (bottle) δεν υπάρχει, λόγω του μεγάλου μεγέθους των κόκκων και της κακής ανάμιξης με το λάδι.
- Για το μίγμα με CuO (Riedel), γύρω από τη συχνότητα του 1MHz παρατηρούμε ελαφρή μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς, που σε συνδυασμό με την αύξηση των απωλειών δείχνει ότι ενδεχομένως επιδρά μηχανισμός χαλάρωσης. Βέβαια αυτή η παρατήρηση δεν είναι ξεκάθαρη, αλλά έχει βάρος γιατί αναφέρεται σε δημοσιεύσεις αντίστοιχου περιεχομένου [13,14]
- Το οξείδιο του χαλκού (I), ηλεκτρικά είναι ημιαγωγός και έχει ενεργειακό διάκενο 2,137 eV και σχετική διηλεκτρική σταθερά 18,1. Επομένως, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικής κ' του μίγματος, πράγμα που φαίνεται για κάθε μέτρηση που παίρνουμε. Ο συντελεστής απωλειών κ'' μειώνεται, καθώς το παραφινέλαιο συνεχίζει να παίζει τον βασικό ρόλο στο μίγμα. Βέβαια, λόγω του ότι προσθέτουμε τα νανοσωματίδια οι απώλειες αυξάνονται, αναλόγως με το μέγεθος του κόκκου.

Στη συνέχεια, κατασκευάσαμε το μίγμα MIXG14, το οποίο περιέχει CuO και από τα δύο είδη. Συγκεκριμένα, έχει συγκέντρωση 2.5% CuO (Riedel) και 2.5% CuO(bottle) σε 20ml παραφινέλαιου. Κι έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



Σχ.7.5 Σχετική διηλεκτρική σταθερά μίγματος παραφινέλαιου-CuO- CuO(R) στο πεδίο της συχνότητας



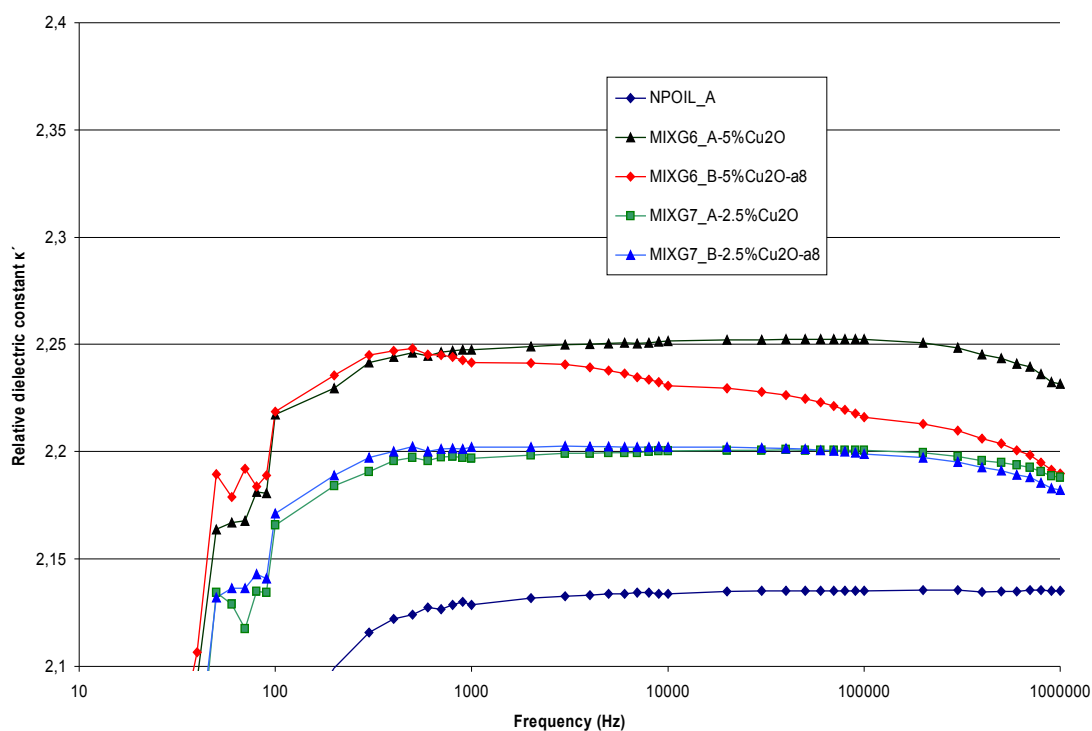
Σχ.7.6 Εφαρμοσμένη απωλειών του μίγματος παραφινέλαιου-CuO-CuO(R) στο πεδίο της συχνότητας

Παρατηρούμε ότι η ανάμειξη των δύο ειδών CuO δεν δημιουργεί κάποιο νέο φαινόμενο. Βέβαια όπως είναι λογικό, λόγω της μικρότερης συγκέντρωσης CuO (bottle) έχουμε χαμηλότερη κορυφή κατά το διεπιφανειακό μηχανισμό πόλωσης και λίγο μικρότερες απώλειες. Το βασικό που μπορούμε να παρατηρήσουμε, είναι ότι έχουμε αυξημένη διηλεκτρική σταθερά του νέου μίγματος για τις υψηλές συχνότητες και ότι ο ιοντικός μηχανισμός χαλάρωσης που υποθέσαμε για το μίγμα CuO (Riedel) δεν παρατηρείται. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι αποσβένεται από την παρουσία των νανοσωματιδίων CuO (bottle).

7.3 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ- Cu₂O

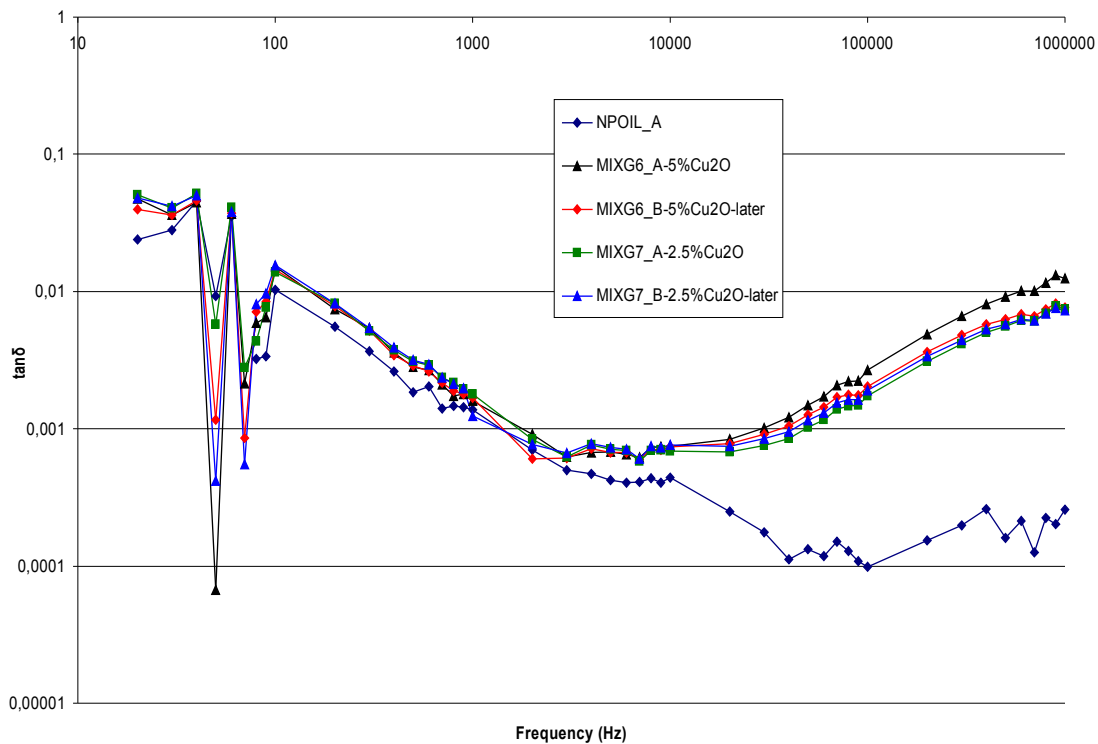
Χρησιμοποιούμε ένα μέγεθος κόκκων Cu₂O για τα μίγματα που κατασκευάζουμε και παίρνουμε τις παρακάτω μετρήσεις:

- ◆ Το μίγμα MIXG6, έχει σύσταση 20ml παραφινέλαιο, 1 gr Cu₂O δηλαδή 5% Cu₂O σε περιεκτικότητα (θεωρητικά). Το μίγμα αφέθηκε στους υπερήχους για 45 λεπτά και πάρθηκαν δύο μετρήσεις, με διαφορετικό μέσο όρο μετρήσεων ανά μέτρηση, η MIXG6_A (avg=1) και η MIXG6_B (avg=8) με διαφορά χρόνου.
- ◆ Το μίγμα MIXG7 έχει περιεκτικότητα 2,5% (θεωρητικά) σε Cu₂O, για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν 10ml του μίγματος MIXG6 και προστέθηκαν 10ml παραφινέλαιο. Αφέθηκε για 30 λεπτά στους υπερήχους και πάρθηκαν δύο μετρήσεις με διαφορετικό μέσο όρο μετρήσεων ανά μέτρηση, η MIXG7_A (avg=1) και η MIXG7_B (avg=8), με διαφορά χρόνου.



Σχ.7.7 Σχετική διηλεκτρική σταθερά μίγματος παραφινέλαιου-Cu₂O στο πεδίο της συχνότητας

Όπως είναι λογικό τα μίγματα MIXG6, MIXG7 παρουσιάζουν ανάλογη διηλεκτρική συμπεριφορά. Η διαφορά τους είναι ότι το μίγμα MIXG6 παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς k' σε όλο το εύρος των συχνοτήτων (2,25 έναντι 2,2), που οφείλεται στην μεγαλύτερη περιεκτικότητα του μίγματος σε κόκκους Cu₂O. Για τις διαφορετικές μετρήσεις του μίγματος MIXG7 παρατηρούμε ότι η διαφορά ανάμεσα τους είναι πολύ μικρή και φαίνεται ότι δεν έχουν προλάβει να καθιζάνουν οι κόκκοι, λόγω του μικρού μοριακού βάρους. Σε αντίθεση με το μίγμα MIXG7, στο MIXG6 οι δύο μετρήσεις έχουν μεγαλύτερη διαφορά, έχοντας στη μέτρηση MIXG6_B απότομη μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς k' μετά τη συχνότητα 1kHz.



Σχ.7.8 Εφαπτομένη απωλειών του μίγματος παραφινέλαιου-Cu₂O στο πεδίο της συχνότητας

Για την εφαπτομένη απωλειών έχουμε επίσης όμοια συμπεριφορά για τα 2 μίγματα με χαρακτηριστική απότομη αύξηση της μετά τη συχνότητα 6kHz περίπου. Μέχρι εκείνη την τιμή συχνοτήτων τα μίγματα έχουν όμοια συμπεριφορά με το σκέτο παραφινέλαιο, δηλαδή μείωση της $\tan\delta$ με την αύξηση της συχνότητας. Οι τιμές της $\tan\delta$ για τα μίγματα MIXG6, MIXG7 κυμαίνονται περίπου από 0,006 έως 0,05. Οι ανωμαλίες που παρουσιάζονται στις χαμηλές συχνότητες (πολύ απότομες αυξομειώσεις) οφείλονται κυρίως στην παρεμβολή από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Γενικά, μπορούμε να συμπεράνουμε τα παρακάτω:

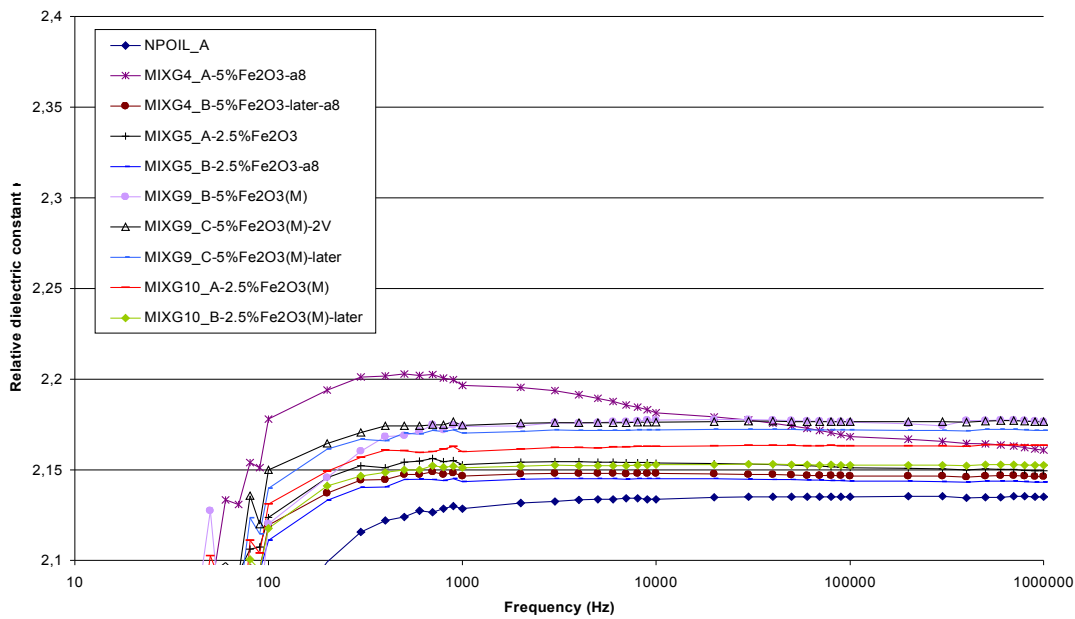
- Παρατηρούμε ότι στις υψηλές συχνότητες έχουμε μικρή τάση μείωσης για τη διηλεκτρική σταθερά κ' και ταυτόχρονα αύξηση της εφαπτομένης απωλειών. Πρόκειται μάλλον για έναν διηλεκτρικό μηχανισμό χαλάρωσης, καθώς πέρα από τη μικρή μείωση που παρατηρείται στην κ' , έχουμε αύξηση του συντελεστή απωλειών κ'' (φαίνεται από την απότομη αύξηση της $\tan\delta$). Από το εύρος συχνοτήτων των μετρήσεων δε μπορούμε να δούμε τη συχνότητα χαλάρωσης, καθώς δεν έχουμε κορυφή στην τιμή της $\tan\delta$. Από ότι φαίνεται η συχνότητα αυτή είναι κοντά στο 1MHz. **Αυτό σημαίνει ότι ο τύπος της πόλωσης που μάλλον χάνεται είναι ο ιοντικός.** Αυτά τα αποτελέσματα συμφωνούν και με ιδιότητες που έχουν παρατηρηθεί και από σχετικές δημοσιεύσεις (Βιβλιογραφία..), οι οποίες είναι αντίστοιχες των εξισώσεων Debye.
- Το μόριο του Cu₂O αποτελεί ουσιαστικά ένα δίπολο με ιοντικούς δεσμούς, όπου το ανιόν είναι το άτομο του O και τα κατιόντα τα άτομα του Cu. Επίσης, φαίνεται και από την σχετικά ασθενή πτώση του κ' που έχει να κάνει με το ότι εφόσον το Cu₂O έχει ιοντικούς δεσμούς, ο ιοντικός τύπος πόλωσης είναι ο κύριος και όχι ο διπολικός.

➤ Το οξείδιο του χαλκού (II), ηλεκτρικά είναι ημιαγωγός και έχει ενεργειακό διάκενο 1,2 eV και σχετική διηλεκτρική σταθερά 18,1. Επομένως, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικής κ' του μίγματος, πράγμα που φαίνεται για κάθε μέτρηση που παίρνουμε. Για τις μικρές συχνότητες ο συντελεστής απωλειών κ'' μειώνεται, καθώς το παραφινέλαιο συνεχίζει να παίζει τον βασικό ρόλο στο μίγμα. Βέβαια, λόγω του ότι προσθέτουμε τα νανοσωματίδια οι απώλειες αυξάνονται ελαφρώς. Στις υψηλές συχνότητες ο συντελεστής απωλειών παρουσιάζεται ιδιαίτερα αυξημένος λόγω του μηχανισμού που αναφέραμε.

7.4 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ- Fe_2O_3

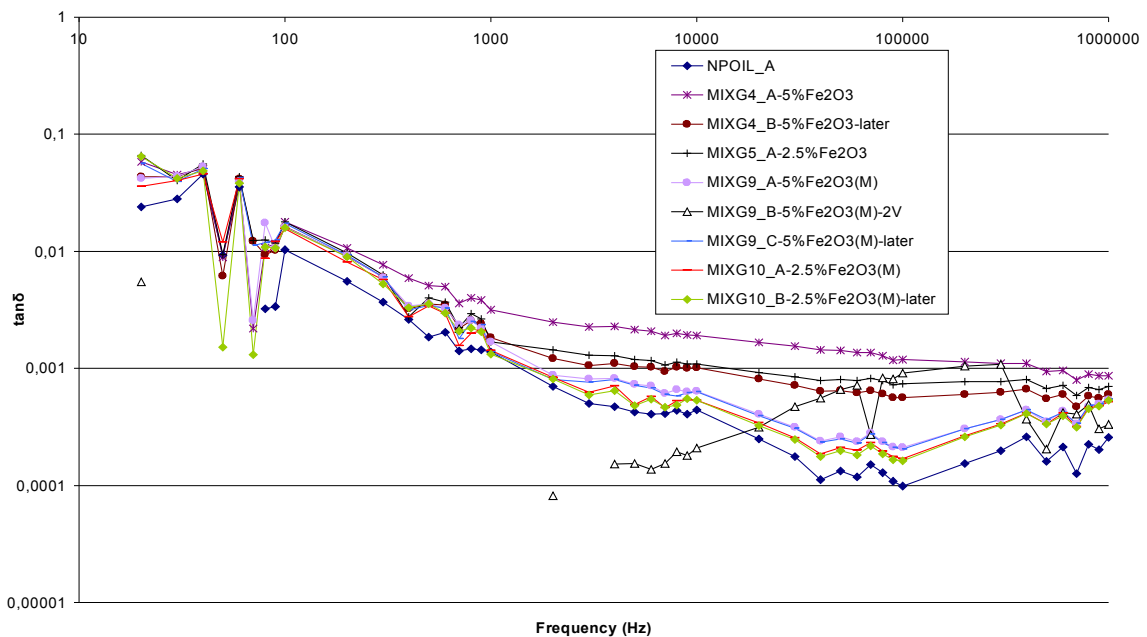
Χρησιμοποιήσαμε δύο διαφορετικά είδη οξειδίου του σιδήρου (III), δηλαδή με διαφορετικά μεγέθη κόκκων (θα τα ονομάζουμε bottle και Merck). Τα μίγματα στα οποία πειραματιστήκαμε είναι τα παρακάτω:

- ◆ Το μίγμα MIXG4, έχει σύσταση 20ml παραφινέλαιο, 1 gr Fe_2O_3 (bottle) δηλαδή 5% Fe_2O_3 σε περιεκτικότητα (θεωρητικά). Το μίγμα αφέθηκε στους υπερήχους για 60 λεπτά και πάρθηκαν δύο μετρήσεις με διαφορά χρόνου ανά μέτρηση και $avg=8$
- ◆ Το μίγμα MIXG5 έχει περιεκτικότητα 2,5% (θεωρητικά) σε Fe_2O_3 (bottle), για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν 10ml του μίγματος MIXG4 και προστέθηκαν 10ml παραφινέλαιο. Αφέθηκε για 30 λεπτά στους υπερήχους και πάρθηκαν δύο μετρήσεις με διαφορετικό μέσο όρο μετρήσεων ανά μέτρηση, η MIXG5_A ($avg=1$) και η MIXG5_B ($avg=8$)
- ◆ Το μίγμα MIXG9, έχει σύσταση 20ml παραφινέλαιο, 1 gr Fe_2O_3 (Merck) δηλαδή 5% Fe_2O_3 σε περιεκτικότητα (θεωρητικά). Το μίγμα αφέθηκε στους υπερήχους για 45 λεπτά και πάρθηκαν τρεις μετρήσεις με διαφορά χρόνου ανά μέτρηση και $avg=1$
- ◆ Το μίγμα MIXG10 έχει περιεκτικότητα 2,5% (θεωρητικά) σε Fe_2O_3 (Merck), για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν 10ml του μίγματος MIXG9 και προστέθηκαν 10ml παραφινέλαιο. Αφέθηκε για 30 λεπτά στους υπερήχους και πάρθηκαν δύο μετρήσεις με διαφορά χρόνου.



Σχ.7.9 Σχετική διηλεκτρική σταθερά μίγματος παραφινέλαιου- Fe_2O_3 στο πεδίο της συχνότητας

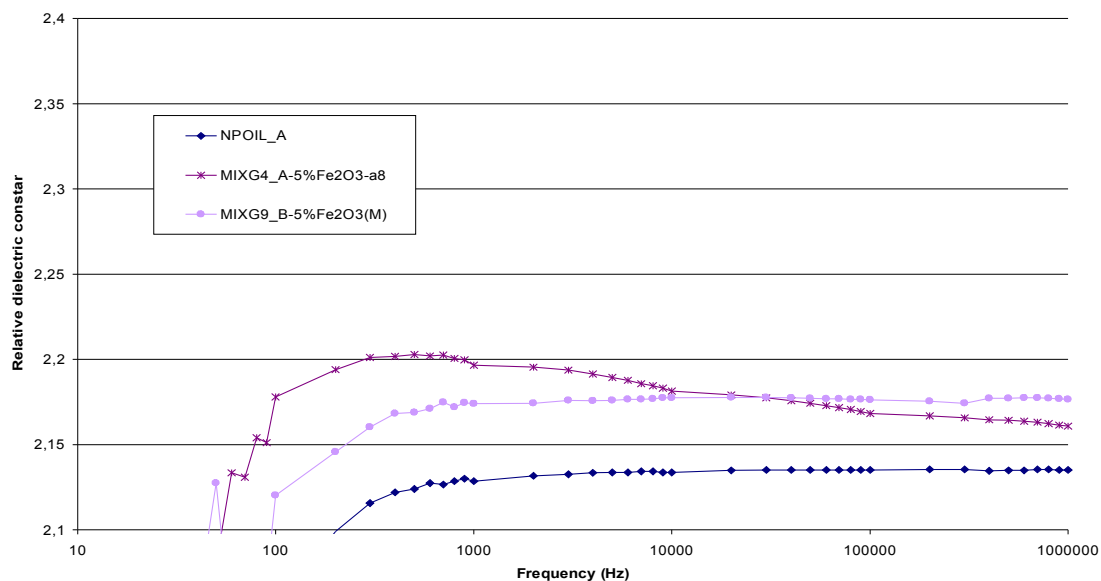
Όπως φαίνεται, η προσθήκη κόκκων Fe_2O_3 αυξάνει τη διηλεκτρική σταθερά. Για τα μίγματα MIXG4 και MIXG5 έχουμε μια διαφορά στην τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς, πράγμα λογικό καθώς το MIXG4 έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση κόκκων Fe_2O_3 . Για τις διαφορετικές μετρήσεις των δειγμάτων MIXG4 και MIXG5 παρατηρούμε μείωση στις B μετρήσεις, λόγω του ότι με την πάροδο του χρόνου οι κόκκοι καθιζάνουν. Οι συγκεκριμένοι μάλιστα κόκκοι καθιζάνουν σχετικά γρήγορα λόγω του μεγάλου μοριακού τους βάρους. Αντίστοιχα, είναι τα αποτελέσματα για τα μίγματα MIXG9 και MIXG10, που περιέχουν κόκκους Fe_2O_3 (Merck), με διαφοροποίηση για τη μέτρηση MIXG9_C, η οποία παίρνεται στην τάση 2V, 100 φορές μεγαλύτερη δηλαδή σε σχέση με τις υπόλοιπες μετρήσεις.



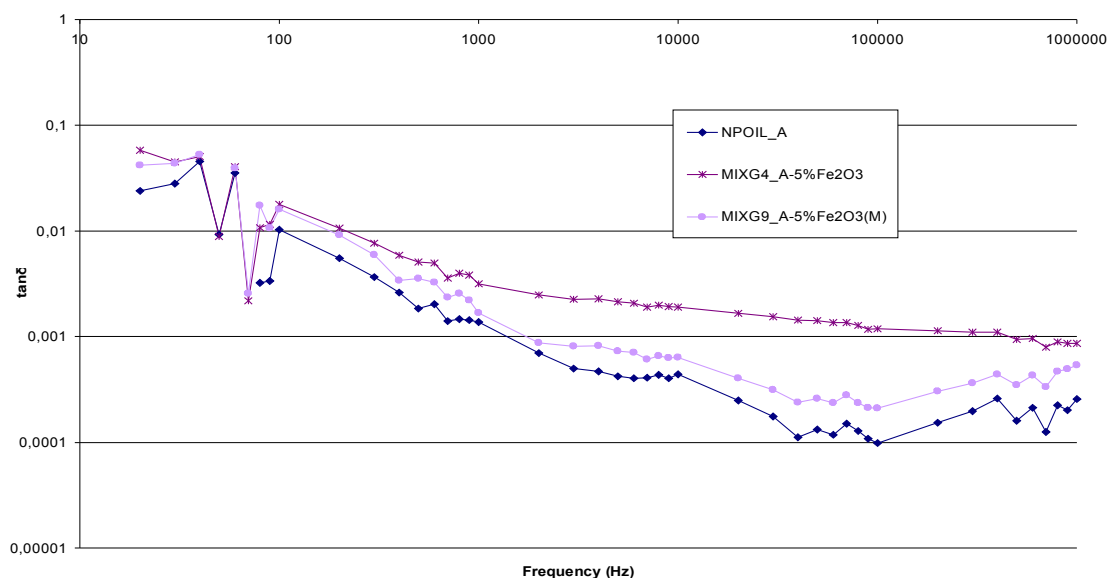
Σχ.7.10 Εφαπτομένη απωλειών του μίγματος παραφινέλαιου- Fe_2O_3 στο πεδίο της συχνότητας

Για την εφαπτομένη απωλειών, μπορούμε να ομαδοποιήσουμε και πάλι τα αποτελέσματα, ανάλογα με τον τύπο των κόκκων. Έτσι φαίνεται ότι τα μίγματα MIXG4 και MIXG5 έχουν αυξημένες απώλειες σε σχέση με τα μίγματα MIXG9 και MIXG10, οι οποίες κυμαίνονται κοντά στις απώλειες που εμφανίζει το σκέτο παραφινέλαιο. Πιο έντονη η διαφοροποίηση γίνεται στις συχνότητες άνω των 10kHz.

Προκειμένου, να γίνει καλύτερη σύγκριση των μιγμάτων με τους διαφορετικούς κόκκους Fe_2O_3 , διαλέγουμε τα μίγματα MIXG4, MIXG9 και παίρνουμε τα παρακάτω διαγράμματα :



(a)



(b)

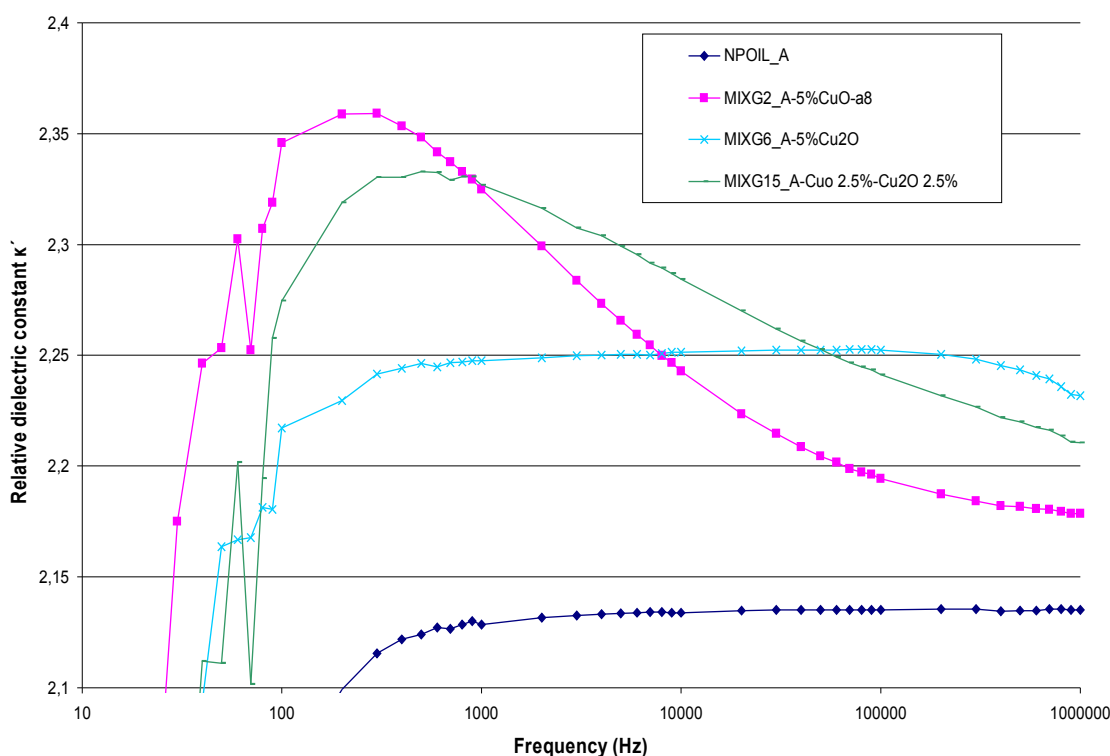
Σχ.7.11 (a) Σύγκριση της διηλεκτρικής σταθεράς των μιγμάτων MIXG4 και MIXG9
(b) Σύγκριση της εφαπτομένης απωλειών των μιγμάτων MIXG4 και MIXG9

- Δεν παρατηρείται κάποιος διηλεκτρικός μηχανισμός χαλάρωσης. Έχουμε απλώς αύξηση των απωλειών και της διηλεκτρικής σταθεράς σε σχέση με το σκέτο λάδι, σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Η συνεχής μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς κ' σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων για το δείγμα MIXG4 δεν υποδεικνύει κάποιο μηχανισμό χαλάρωσης καθώς δεν παρατηρείται κάποια αντίστοιχη αυξομείωση στην εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta$.
- Η διαφορετική συμπεριφορά του μίγματος G4 όσο αναφορά τη διηλεκτρική σταθερά έχει να κάνει με το ότι οι μετρήσεις παίρνονται με $\text{avg}=8$ με αποτέλεσμα πιο χρονοβόρα μέτρηση. Επομένως, οι κόκκοι του Fe_2O_3 προλαβαίνουν και καθιζάνουν με τάση να λάβουν της τιμές της μέτρησης MIXG4_B. Αν πέραμε μετρήσεις με $\text{avg}=1$ θα είχαμε ως αποτέλεσμα σχεδόν σταθερή διηλεκτρική σταθερά για όλο το φάσμα των συχνοτήτων, αντίστοιχη του MIX_G9 με λίγο πιο αυξημένη διηλεκτρική σταθερά κ'. Αυτό οφείλεται στον τύπο του οξειδίου Fe_2O_3 που χρησιμοποιούμε.
- Σε σχέση με την εφαπτομένη απωλειών όμως, η διαφορετική συμπεριφορά του μίγματος G4 είναι ουσιαστική καθώς παρατηρείται και στις δυο μετρήσεις του. Ουσιαστικά, έχουμε πιο αυξημένες απώλειες και πιο σταθερές στο φάσμα συχνοτήτων, σε σχέση με το δείγμα MIXG9 το οποίο παρουσιάζει απότομη μείωση αντίστοιχη του σκέτου παραφινέλαιου. Οι ανωμαλίες που παρατηρούνται στις τιμές της $\tan\delta$ για το μίγμα G9, κοντά στο 0,0001 οφείλονται στο ότι είναι στα όρια του μετρητικού συστήματος.

7.5 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ - Cu₂O - CuO

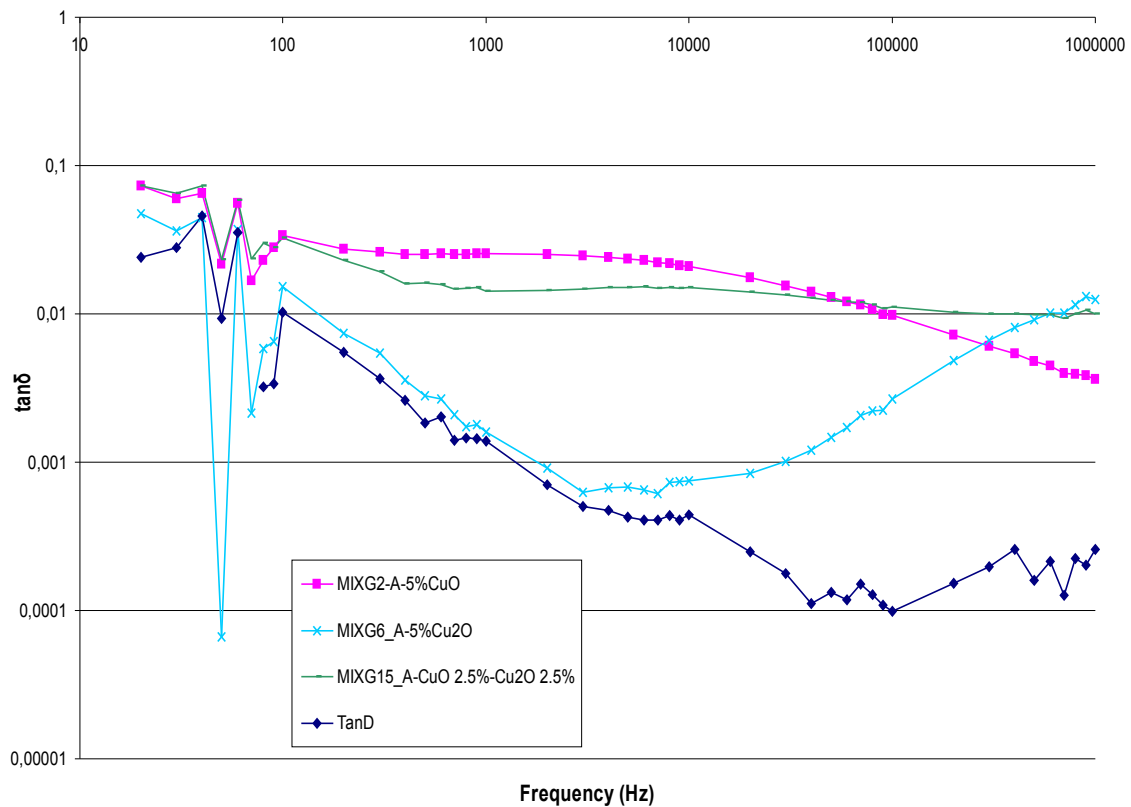
Στη συνέχεια, αναμίξαμε κόκκους των δύο οξειδίων του χαλκού (I & II) σε ίση αναλογία μέσα στο παραφινέλαιο. Τα μίγματα στα οποία πειραματιστήκαμε είναι τα παρακάτω:

- ◆ Το μίγμα MIXG15, έχει σύσταση 20ml παραφινέλαιο, 0,5 gr CuO (bottle) και 0,5 gr Cu₂O (Riddle), δηλαδή 2.5% Cu₂O και 2.5% CuO σε περιεκτικότητα (θεωρητικά). Το μίγμα αφέθηκε στους υπερήχους για 45 λεπτά και πάρθηκαν δύο μετρήσεις με διαφορά χρόνου ανά μέτρηση και avg=1
- ◆ Το μίγμα MIXG16 έχει περιεκτικότητα 1.25% (θεωρητικά) Cu₂O και 1.25% CuO, για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν 10ml του μίγματος MIXG15 και προστέθηκαν 10ml παραφινέλαιο. Αφέθηκε για 30 λεπτά στους υπερήχους και πάρθηκε μια μέτρηση.



Σχ.7.12 Σχετική διηλεκτρική σταθερά μίγματος παραφινέλαιου-Cu₂O- CuO στο πεδίο της συχνότητας

Όπως παρατηρείται, το νέο μίγμα διατηρεί την αυξομείωση της διηλεκτρικής σταθεράς που παρουσίασε το μίγμα MIXG2 με μικρότερη κορυφή και μετατοπισμένο λίγο δεξιά. Ότι έχει χαμηλότερη κορυφή, οφείλεται στο ότι η συγκέντρωση Cu₂O είναι η μισή σε σχέση με το μίγμα MIXG2. Επίσης, η μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς με την αύξηση της συχνότητας είναι πιο ομαλή σε σχέση με το MIXG2 και σε αυτό συμβάλλει η σταθερή διηλεκτρική σταθερά που παρουσιάζει το MIXG6. Βέβαια, διαπιστώνουμε ότι κοντά στο 1 MHz παρατηρείται η μείωση της κ' που είχαμε στο MIXG6, πιο αδύναμα όμως.



Σχ.7.13 Σχετική διηλεκτρική σταθερά μίγματος παραφινέλαιου-Cu₂O-CuO στο πεδίο της συχνότητας

Για την εφαιτομένη απωλειών παρατηρούμε ότι είναι αυξημένη σε σχέση με το σκέτο λάδι, όπως ήταν λογικό. Σε σχέση με τα μίγματα MIXG2 και MIXG6 είναι αρκετά ομαλή σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων, με τιμές στα επίπεδα του μίγματος MIXG2. Υπάρχει βέβαια μια μείωση της τάξης του 0,01 αλλά δεν παρουσιάζει τις έντονες μεταβολές που παρουσιάστηκαν στα μίγματα MIXG2 και MIXG6.

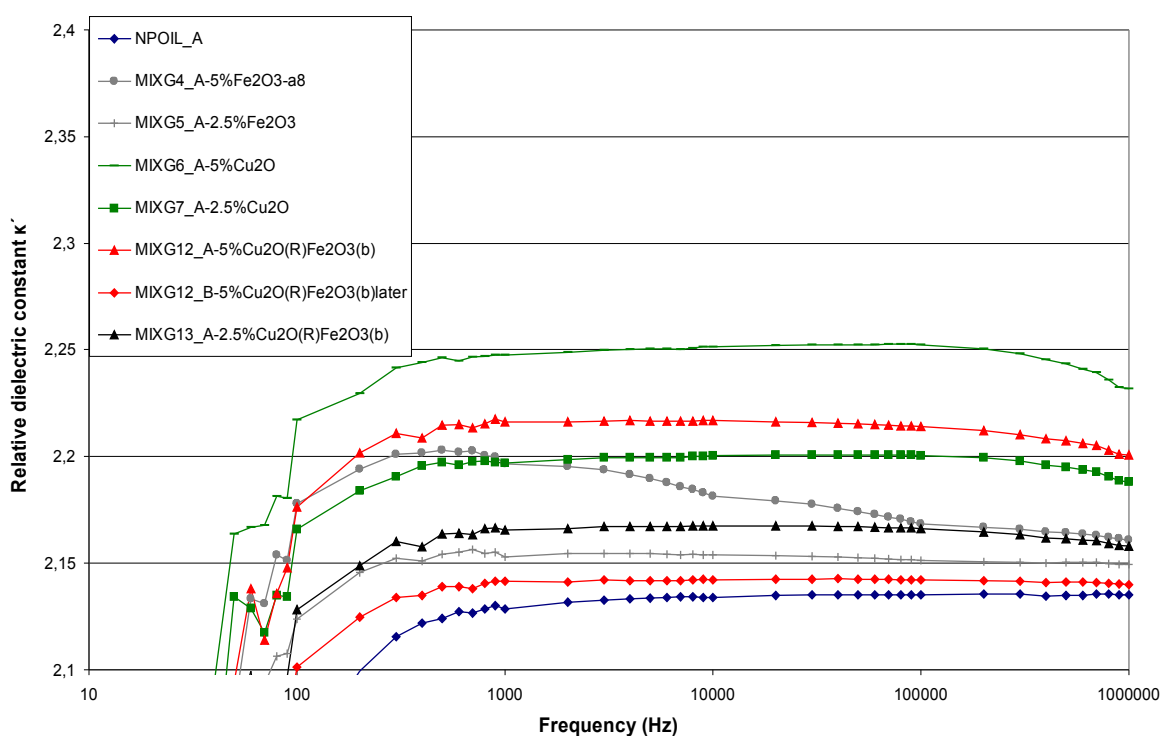
Γενικά μπορούμε να συμπεράνουμε τα παρακάτω:

- Διατηρείται ο μηχανισμός της διεπιφανειακής πόλωσης και χαλάρωσης που εμφανίστηκε στο μίγμα MIXG2, με κορυφή μετατοπισμένη περίπου στη συχνότητα 500 Hz. Επίσης, ο μηχανισμός πόλωσης που εμφανίζεται στο μίγμα MIXG6 για τις υψηλές συχνότητες επικαλύπτεται ουσιαστικά από την παρουσία των κόκκων του CuO (bottle).
- Το αποτέλεσμα παρουσιάζει κάποιο ενδιαφέρον λόγω της σχετικής σταθερότητας της tanδ σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων, αν και είναι γενικά αυξημένες (της τάξης 0,01). Επίσης, η διηλεκτρική σταθερά του μίγματος MIXG15 μειώνεται με σταθερό ρυθμό με την αύξηση της συχνότητας.

7.6 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ - Cu_2O - Fe_2O_3

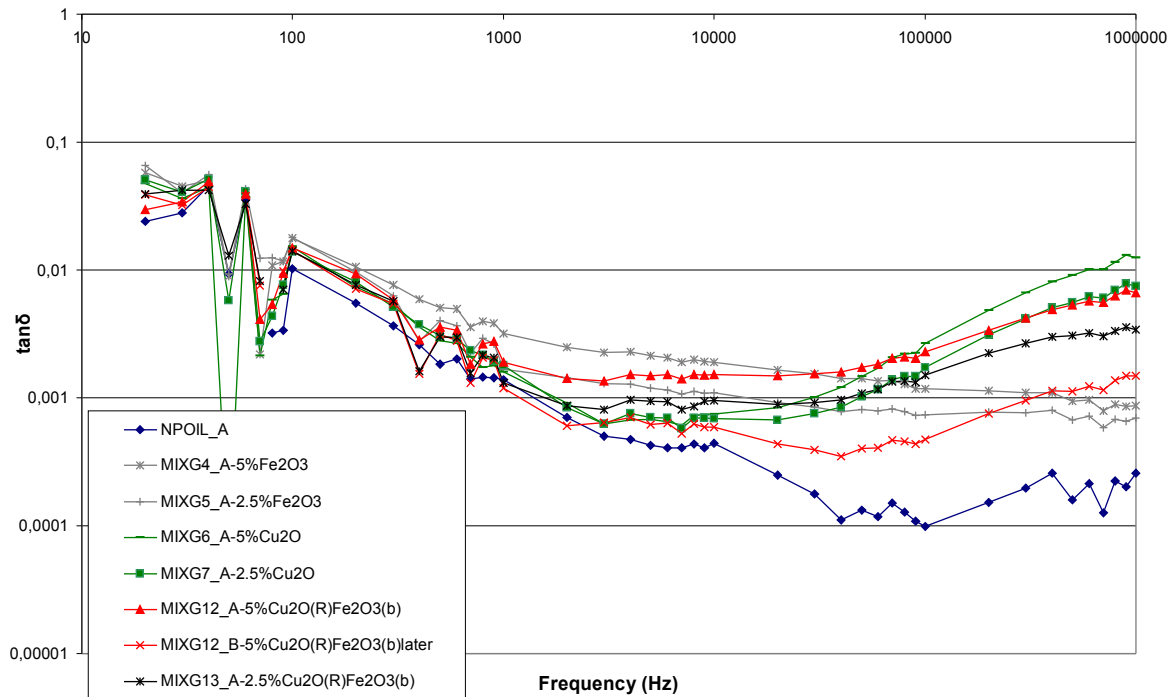
Στη συνέχεια, αναμίξαμε κόκκους του οξειδίου του χαλκού(I) και του οξειδίου του σιδήρου σε ίση αναλογία μέσα στο παραφινέλαιο. Τα μίγματα στα οποία πειραματιστήκαμε είναι τα παρακάτω:

- ◆ Το μίγμα MIXG12, έχει σύσταση 20ml παραφινέλαιο, 0,5 gr Fe_2O_3 (bottle) και 0,5 gr Cu_2O (Riddle) δηλαδή 2.5% Cu_2O και 2.5% Fe_2O_3 σε περιεκτικότητα (θεωρητικά). Το μίγμα αφέθηκε στους υπερήχους για 45 λεπτά και πάρθηκαν δύο μετρήσεις με διαφορά χρόνου ανά μέτρηση και $\text{avg}=1$
- ◆ Το μίγμα MIXG13 έχει περιεκτικότητα 1.25% (θεωρητικά) Cu_2O και 1.25% Fe_2O_3 , για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν 10ml του μίγματος MIXG12 και προστέθηκαν 10ml παραφινέλαιο. Αφέθηκε για 30 λεπτά στους υπερήχους και πάρθηκε μία μέτρηση.



Σχ.7.14 Σχετική διηλεκτρική σταθερά μίγματος παραφινέλαιου- Cu_2O - Fe_2O_3 στο πεδίο της συχνότητας

Όπως φαίνεται, τα μίγματα του Cu_2O και του Fe_2O_3 παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά. Για τη σύγκριση με το νέο μίγμα θα βασιστούμε στα μίγματα MIXG5, MIXG7 και MIXG12 καθώς για αυτά οι ποσότητες των αντίστοιχων οξειδίων είναι ίδιες. Ουσιαστικά, φαίνεται σαν να μην υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο οξειδίων. Έχουμε προσθετική σχεδόν αύξηση της κ' για το νέο μίγμα και διατηρείται η ελαφρή μείωση που παρουσίασε το μίγμα MIXG7 στις υψηλές συχνότητες.



Σχ.7.15 Σχετική διηλεκτρική σταθερά μίγματος παραφινέλαιου- Cu_2O - Fe_2O_3 στο πεδίο της συχνότητας

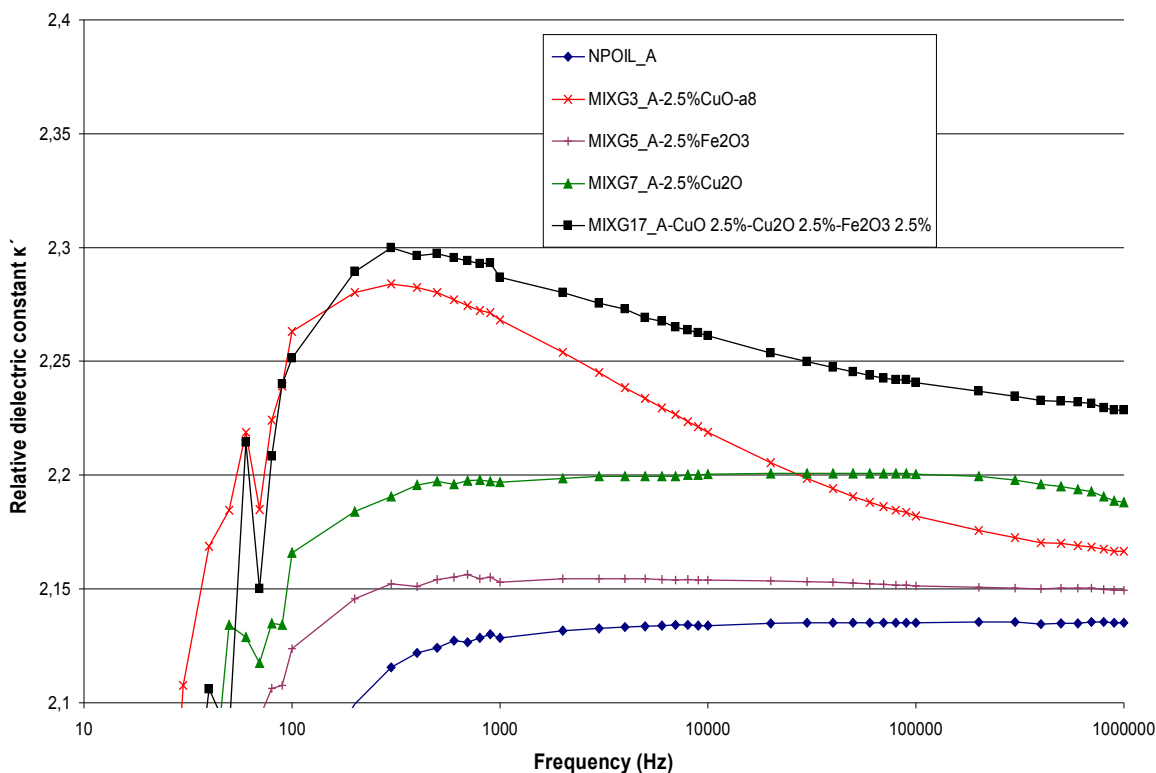
Για την επατομένη απωλειών τα δύο μίγματα MIXG5, MIXG7 παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά, ιδίως μετά τη συχνότητα των 10kHz. Οι απώλειες για το μίγμα του χαλκού αυξάνονται ενώ για το μίγμα του σιδήρου μειώνονται ελαφρά. Το μίγμα MIXG12 παρουσιάζει σχετικά με τα δύο μίγματα αυξημένες απώλειες και ακολουθεί στις υψηλές συχνότητες την αύξηση του MIXG7 με μικρότερη ταχύτητα.

- Γενικά, τα συμπεράσματά μας είναι περιορισμένα καθώς η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο οξειδίων φαίνεται να είναι μηδαμινή. Το σίγουρο είναι ότι παρατηρείται και πάλι ο διηλεκτρικός μηχανισμός γύρω περίπου από τη συχνότητα του 1 MHz που οφείλεται στα νανοδοματίδια του Cu_2O . Επιπλέον, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι έχουμε σταθερή διηλεκτρική σταθερά σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων, αυξημένη στο 2,2 και σχετικά μικρές απώλειες σε σχέση με το μίγμα MIXG15 των δύο χαλκών, που εξετάστηκε παραπάνω.

7.7 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΦΙΝΕΛΑΙΟΥ -Cu₂O-CuO-Fe₂O₃

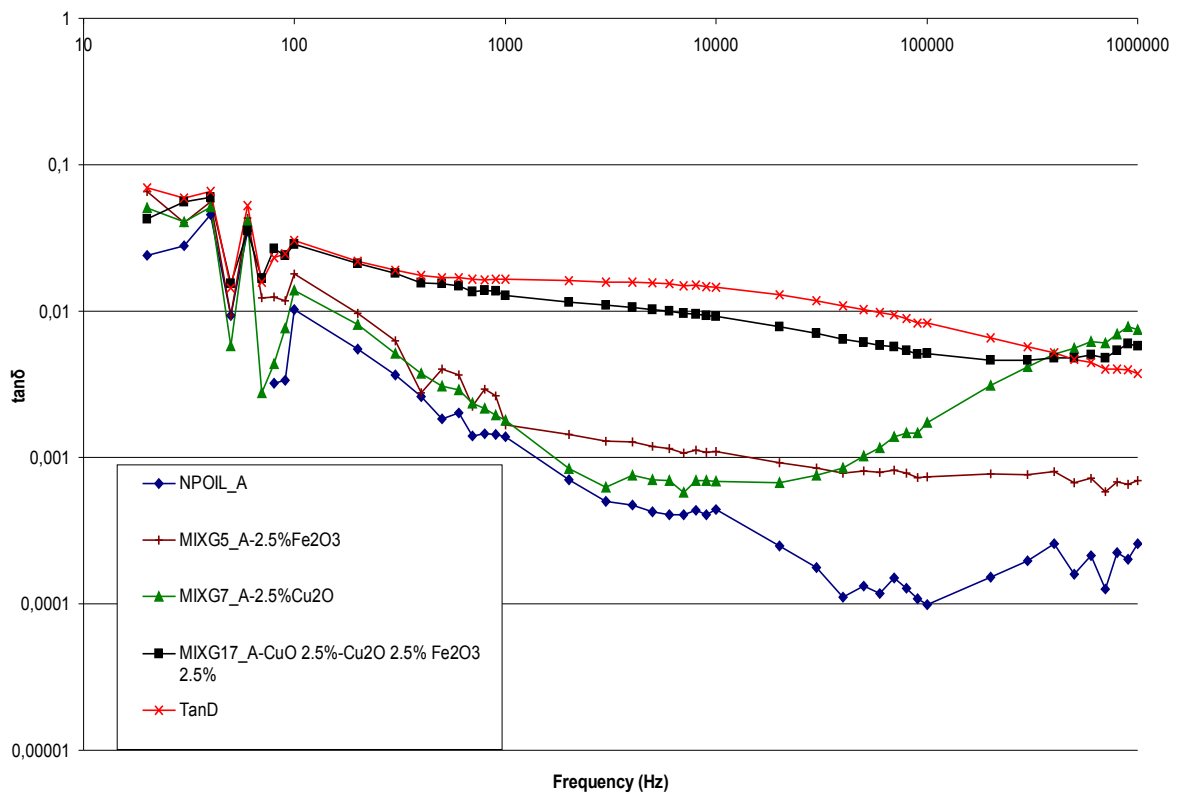
Στη συνέχεια, αναμίξαμε κόκκους των δύο οξειδίων του χαλκού (I & II) και του οξειδίου του σιδήρου σε ίση αναλογία μέσα στο παραφινέλαιο. Τα μίγματα στα οποία πειραματιστήκαμε είναι τα παρακάτω:

- ◆ Το μίγμα MIXG17, έχει σύσταση 20ml παραφινέλαιο, 0,5 gr CuO (bottle) , 0,5 gr Cu₂O (Riddle) και 0,5 gr Fe₂O₃ (bottle) δηλαδή 2.5% Cu₂O , 2.5% CuO και 2.5% Fe₂O₃ (bottle) σε περιεκτικότητα (θεωρητικά). Το μίγμα αφέθηκε στους υπερήχους για 45 λεπτά και πάρθηκε μια μέτρηση με avg=1



Σχ.7.16 Σχετική διηλεκτρική σταθερά μίγματος παραφινέλαιου-Cu₂O-CuO-Fe₂O₃ στο πεδίο της συχνότητας

Όπως παρατηρείται, από την ανάμιξη τριών οξειδίων διαφορετικής χημικής σύνθεσης έχουμε απόλυτη αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Είναι λογικό, καθώς έχουμε μεγαλύτερη συγκέντρωση νανοσωματιδίων στο MIXG17 σε σχέση με τα μίγματα MIXG3, MIXG5 και MIXG7. Βέβαια αυτή η αύξηση δεν είναι προσθετική, αλλιώς θα είχαμε μεγαλύτερες τιμές του κ'. Παρατηρείται η κορυφή που εισάγουν τα νανοσωματίδια CuO (bottle) περίπου στα 500 Hz , όπως και στο MIXG15, αλλά είναι λιγότερο απότομη. Η μείωση μετά την κορυφή γίνεται με σταθερή κλίση, το οποίο δείχνει αλληλεπίδραση μεταξύ των νανοσωματιδίων.



Σχ.7.17 Σχετική διηλεκτρική σταθερά μίγματος παραφινέλαιου- Cu_2O - CuO - Fe_2O_3 στο πεδίο της συχνότητας

Για την εφαπτομένη απωλειών βλέπουμε ότι είναι στα επίπεδα του μίγματος MIXG3, δηλαδή αρκετά αυξημένες σε σχέση με το σκέτο παραφινέλαιο. Επίσης, μπορούμε να πούμε ότι σε σχέση με τη συχνότητα έχει συμπεριφορά αντίστοιχη του μίγματος MIXG5, δηλαδή ομαλής μείωσης με την αύξηση της συχνότητας. Με βάση τα παραπάνω μάλλον υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ των νανοσωματιδίων CuO και Cu_2O η οποία παρατηρήθηκε και στο μίγμα MIXG15.

Γενικά μπορούμε να συμπεράνουμε ότι:

- Ο διεπιφανειακός μηχανισμός πόλωσης που εμφάνισαν τα νανοσωματίδια CuO (bottle) εμφανίζεται κι εδώ αλλά εξασθενημένος. Πιθανόν να μην έγινε καλά η ανάμειξη και να μετρήθηκαν πολλοί κόκκοι ως συσσωματώματα, με αποτέλεσμα ουσιαστικά μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου. Ισχύει ότι η ανάμειξη των τριών οξειδίων ήταν πιο δύσκολη.
- Παρατηρείται μια μικρή αύξηση, στα μετρητικά όρια του συστήματος, για την εφαπτομένη απωλειών, η οποία δεν είναι ξεκάθαρη. Στην ίδια περιοχή συχνοτήτων διαφαίνεται μικρή μείωση της κ' . Πιθανόν να υπάρχει κάποια περιοχή χαλάρωσης, αντίστοιχη με αυτή που παρουσιάζουν τα νανοσωματίδια του Cu_2O .

Ανασκόπηση

Με βάσει τις μετρήσεις που πάρθηκαν μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποιες βασικές παρατηρήσεις. Καταρχήν για μονωτικά υλικά με απαίτηση Low_κ' – Lowloss , μπορούμε να πούμε ότι η παρουσία νανοσωματιδιακής ρύπανσης χαλκού και σιδήρου έχει αρνητική επίδραση στις διηλεκτρικές ιδιότητες. Τέτοιες εφαρμογές με την παραπάνω απαίτηση είναι και τα λάδια μετασχηματιστών, στα οποία δώσαμε έμφαση.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμπεριφορά των νανοσωματιδίων του Fe_2O_3 , που σε σχέση με τα νανοσωματίδια του χαλκού, παρουσιάζει μειωμένες απώλειες (της τάξεως 0,001) ενώ ταυτόχρονα έχει αυξημένη κ'. Θα μπορούσε να ανιχνευθεί η χρήση του μίγματος για εφαρμογές ηλεκτρομονωτικών υλικών με απαίτηση High_κ' – Lowloss.

Οι προσμίξεις νανοσωματιδίων CuO και Cu_2O τύπου Riedel, φαίνεται να παρουσιάζουν υψηλές τιμές της κ' και χαλάρωση στις υψηλότερες συχνότητες, η οποία υποδεικνύει έναν διαφορετικό μηχανισμό πόλωσης στο εύρος συχνοτήτων. Το γεγονός ότι στις υψηλές συχνότητες (της τάξεως του 1 MHz) τα οξείδια του χαλκού παρουσιάζουν αυξημένες απώλειες, ιδιαίτερα του Cu_2O , είναι σημαντικό στην περίπτωση υπερτάσης που έχει τη μορφή κρουστικής (ή spike), όπως κατά τη διάρκεια αστραπής ή χειρισμού διακόπτη. Στην περίπτωση αυτή αυξάνεται η πιθανότητα διάσπασης του μονωτικού ελαίου, ακόμη κι αν έχει μεγάλη διηλεκτρική αντοχή.

Επίσης, αξία έχει και η συμπεριφορά των νανοσωματιδίων CuO (bottle) όπου φαίνεται ότι για μικρότερο μέγεθος κόκκου εμφανίζεται πιο έντονη διεπιφανειακή πόλωση. Αυτή οδηγεί σε έντονη αύξηση της κ' και σε αυξημένες απώλειες. Επομένως, ρόλο στη μεταβολή των διηλεκτρικών ιδιοτήτων λόγω νανοσωματιδιακής ρύπανσης παίζει και το μέγεθος του κόκκου των σωματιδίων. Όσο πιο μικρό το μέγεθος του κόκκου τόσο πιο ενεργή γίνεται η επιφάνειά του. Στην επιφάνεια προσροφώνται μόρια υγρασίας και λοιπών αερίων ρύπων για την ελαχιστοποίηση της επιφανειακής ενέργειας. Οι απορροφήσεις υγρασίας στην επιφάνεια εντείνουν την διεπιφανειακή πόλωση. Συγκεκριμένα, το οξείδιο αυτό παρουσιάζει ίδια συμπεριφορά με το οξείδιο του υδροσκοπικού αλουμινίου Al_2O_3 , με βάση πρόσφατη δημοσίευση του εργαστηρίου [5]. Επομένως, ίσως ο βασικός λόγος διαφοροποίησης των μιγμάτων με CuO (bottle) και με CuO (Riedel) δεν είναι το μέγεθος του κόκκου και η επίδραση της ροφημένης υγρασίας στο CuO (bottle) που εισάγουν εντονότερα φαινόμενα πόλωσης από ότι σε άλλα οξείδια.

8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Σύσταση μιγμάτων

<u>MixtureG1</u>	TiO2-np[r]-H2O	
NPoil (ml)		20
TiO2-np[rutile] (g)		1
Ultrasound (min)		45
Theoretical %w/v		5
H2O deionized (drops)		5
<u>MixtureG2</u>	CuO(b)-5%	
NPoil (ml)		20
CuO (bottle) [g]		1
Ultrasound (min)		45
Theoretical %w/v		5
11ml used for Mixture G3		
<u>MixtureG3</u>	CuO(b)-2.5%	
Mixture G3 (ml)		11
NPoil (ml)		11
Ultrasound (min)		30
Theoretical %w/v		2,5
<u>MixtureG4</u>	Fe2O3(b)-5%	
NPoil (ml)		20
Fe2O3 (bottle) [g]		1
Ultrasound (min)		60
Theoretical %w/v		5
<u>MixtureG5</u>	Fe2O3(b)-2.5%	
Mixture G4 (ml)		10
NPoil (ml)		10
Ultrasound (min)		30
Theoretical %w/v		2,5
<u>MixtureG6</u>	Cu2O (R)-5%	
NPoil (ml)		20
Cu2O (Riddle) [g]		1
Ultrasound (min)		45
Theoretical %w/v		5
<u>MixtureG7</u>	Cu2O(R)-2.5%	
Mixture G6 (ml)		10
NPoil (ml)		10
Ultrasound (min)		30
Theoretical %w/v		2,5
<u>MixtureG8</u>	CuO(R)-5%	
NPoil (ml)		20
CuO (Riddle) [g]		1
Ultrasound (min)		60
Theoretical %w/v		5

<u>MixtureG9</u>	Fe2O3(M)-5%	
NPoil (ml)		20
Fe2O3 (Merck) [g]		1
Ultrasound (min)		45
Theoretical %w/v		5
<u>MixtureG10</u>	Fe2O3(M)-2.5%	
Mixture G9 (ml)		10
NPoil (ml)		10
Ultrasound (min)		30
Theoretical %w/v		2,5
<u>MixtureG11</u>	CuO(b)-5%	
NPoil (ml)		20
CuO (bottle) [g]		1
Ultrasound (min)		45
Theoretical %w/v		5
<u>MixtureG12</u>		
NPoil (ml)		20
Cu2O (Riddle) [g]		0,5
Fe2O3 (bottle) [g]		0,5
Ultrasound (min)		45
Th. %w/v Cu2O		2,5
Th. %w/v Fe2O3		2,5
<u>MixtureG13</u>		
Mixture G12 (ml)		10
NPoil (ml)		10
Ultrasound (min)		30
Th. %w/v Cu2O		1,25
Th. %w/v Fe2O3		1,25
<u>MixtureG14</u>	CuO(R)2.5%+CuO(b)2.5%	
NPoil (ml)		20
CuO (Riddle) [g]		0,5
CuO (bottle) [g]		0,5
Ultrasound (min)		45
Th. %w/v CuO(R)		2,5
Th. %w/v CuO(b)		2,5
<u>Mixture G15</u>	Cu2O(R)2.5%+CuO(b)2.5%	
NPoil (ml)		20
Cu2O (Riddle) [g]		0,5
CuO (bottle) [g]		0,5
Ultrasound (min)		45
Th. %w/v Cu2O(R)		2,5
Th. %w/v CuO(b)		2,5
<u>Mixture G16</u>	Cu2O(R)1.25%+CuO(b)1.25%	
Mixture G12 (ml)		10
NPoil (ml)		10
Ultrasound (min)		30
Th. %w/v Cu2O(R)		1,25
Th. %w/v CuO(b)		1,25

Mixture G17

NPoil (ml)	20
Cu ₂ O (Riddle) [g]	0,5
CuO (bottle) [g]	0,5
Fe ₂ O ₃ (bottle) [g]	0,5
Ultrasound (min)	45
Th. %w/v Cu ₂ O(R)	2,5
Th. %w/v CuO(b)	2,5
Th. %w/v Fe ₂ O ₃ (b)	2,5

● Ακολουθία μετρήσεων

Date	Material	Spacer(mm)	Cpo	Filename	Other parameters
22/3/2011	Npoil	3	measure	NPOIL_A	avg=1
	Mixture G1	3	file	MIXG1_A	avg=1
	new quantity	3	file	MIXG1_B	avg=1
	30min later	3	file	MIXG1_C	avg=1
24/3/2011	Mixture G2	3	measure	MIXG2_A	avg=8
	30 min later	3	file	MixG2_B	avg=8
	Mixture G3	3	file	MixG3_A	avg=8
29/3/2011	Mixture G4	3	measure	MixG4_A	avg=8
	same quantity	3	file	MixG4_B	avg=8
	Mixture G5	3	file	MixG5_A	avg=1
	same quantity	3	file	MixG5_B	avg=8
31/3/2011	Air	3	measure	Air31Mar	avg=8, 1
	Mixture G6	3	measure	MixG6_A	avg=1
	same quantity	3	file	MixG6_B	avg=8
	Mixture G7	3	file	MixG7_A	avg=1
	same quantity	3	file	MixG7_B	avg=8
4/4/2011	Mixture G8	3	measure	MixG8_A	avg=8, 1
	new quantity	3	file	MixG8_A	avg=1
14/4/2011	Air	3	measure	Air14ap	avg=20
	Mixture G9	3	file	MixG9_A	avg=1
	same quantity	3	file	MixG9_B	avg=1, ampl=2000mV
	later,same quantity	3	file	MixG9_C	avg=1,ampl=def
	Mixture G10	3	file	MixG10_A	avg=1,ampl=def
	later,same quantity	3	file	MixG10_B	avg=1,ampl=def
4/5/2011	Mixture G11	3	measure	MixG11_A	avg=8, 1
	same quantity	3	file	MixG11_B	avg=1
	a little more added	3	file	MixG11_C	avg=1
	new quantity	3	file	MixG11_D	avg=1
6/5/2011	Mixture G12	3	measure	MixG12_A	avg=8,1
	later,same quantity	3	file	MixG12_B	avg=1
	Mixture G13	3	file	MixG13_A	avg=1
10/5/2011	Mixture G14	3	measure	MixG14_A	avg=8,1
	same quantity	3	file	MixG14_B	avg=1
13/5/2011	Mixture G15	3	measure	MixG15_A	avg=8,1
	same quantity,later	3	file	MixG15_B	avg=1
	Mixture G16	3	file	MixG16_A	avg=1
20/5/2011	Mixture G17	3	measure	MixG17_A	avg=8,1

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. C.T. Dervos, C.D. Paraskevas, P. Skafidas and P. Vassiliou, "Dielectric characterization of power transformer oils as a diagnostic life prediction method" IEEE-EI Mag., Vol. 21, No.1, pp.11-19, (2005).
2. C. T. Dervos, P. Vassiliou, P. Skafidas and Ch. Paraskevas, "Service life estimation of transformer oil" in Proc. Intern. Conf. on Protection and Restoration of the Environment VI, Skiathos, July 1-5, 2002, pp. 1239-1246.
3. C. T. Dervos, P. Vassiliou and Ch. Paraskevas, "Temperature Dependent Dielectric Spectroscopy in Frequency Domain of High-Voltage Transformer Oils Compared to Physicochemical Results "
4. C. T. Dervos, C. D. Paraskevas, P. D. Skafidas and N. Stefanou "Dielectric Spectroscopy And Gas Chromatography Methods Applied on High-Voltage Transformer Oils "
5. John A. Mergos, C. T. Dervos, Maria D. Athanassopoulou and Theodore G. Argyropoulos, " Dielectric Properties of Nanopowder Emulsions in Paraffin Oil "
6. Κ.Θ. Δέρβος, <<Μονωτικά υψηλών τάσεων>>, Αθήνα 2007
7. J. George Hwang, Markus Zahn, Francis M. O'Sullivan, Leif A. A. Pettersson, Olof Hjortstam, and Rongsheng Liu, "Electron Scavenging by Conductive Nanoparticles in Oil Insulated Power Transformers "
8. T J Lewis, " Interfaces are the Dominant Feature of Dielectrics at the Nanometric Level "
9. Χ. Μαινεμενλής, << Μόνωση ηλεκτρικών δικτύων υψηλής τάσης >>, Πάτρα 2004
10. E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, << Υψηλές τάσεις >> , Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
11. William H. Bartley P.E. , " Analysis of Transformer Failures", 36th Annual Conference of International Association of Engineering Insurers – Stockholm, 2003
12. Fritz Pinnekamp, " The circuit breaker : A showcase of industrial product development", ABB Review, 2007
13. T. Putjuso, P. Manyum, R. Yimmirun, T. Yamwong, P. Thongbai, and S.Maensiri, "Giant dielectric behavior of solution-growth CuO ceramics subjected to dc bias voltage and uniaxial compressive stress", Solid State Sci., Vol. 13, pp. 158-162, 2011.
14. M. Veith, S. Ren, M. Wittmar, and H. Bolz, "Giant dielectric constant response of the composites in ternary system CuO–TiO₂–CaO", J. Solid State Chem., Vol. 182, pp. 2930–2936, 2009.
15. Lijun Yang, Ruijin Liao, Sun Caixin and Mengzhao Zhu, "Influence of Vegetable Oil on the Thermal Aging of Transformer Paper and its Mechanism"
16. Daisuke Saruhashi, Satoshi Arazoe, Satoru Yanabu, Shigemitsu Okabe, Ichiro Kiyama, " Thermal Degradation Characteristics of Insulating Paper and Oils", IEEE International Conference on Dielectric Liquids , 2011
17. Χ. Παρασκευάς, " Η διηλεκτρική φασματοσκοπία, ως μέθοδος πρόβλεψης της γήρανσης μονωτικών ελαίων μετασχηματιστή ", Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2005
18. ΕΛΒΗΜ (Schneider Electric), Τεχνικό τετράδιο: "Μετασχηματιστές Χυτορουτίνης"
19. Schneider Electric, Τεχνικό τετράδιο: "Μετασχηματιστές Λαδιού ΕΛΒΗΜ. Χρήση και συντήρηση."
20. Endah Yuliasuti, " Analysis of dielectric properties. Comparison between mineral oil and synthetic ester oil ", Diploma thesis , Holland 2010
21. Ιωάννης Α. Μέργος, " Διηλεκτρικά υλικά και Περιβάλλον ", Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2007
22. <http://www.wikipedia.org/>