



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ 150/21 kV

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Χ. ΜΑΝΤΕΛΗΣ

Επιβλέποντες : ΙΩΑΝΝΗΣ Φ. ΓΚΟΝΟΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΠΟΛΥΚΡΑΤΗ

ΕΔΙΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2020



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

ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ 150/21 kV

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Χ. ΜΑΝΤΕΛΗΣ

Επιβλέποντες : ΙΩΑΝΝΗΣ Φ. ΓΚΟΝΟΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΠΟΛΥΚΡΑΤΗ

ΕΔΙΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 03^η Ιουνίου 2020

.....

Ι.Φ. Γκόνος

Αναπληρωτής Καθηγητής

.....

Φ. Τοπαλής

Καθηγητής

.....

Π. Γεωργιλάκης

Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος 2020

.....

Νικόλαος Χ. Μαντέλης

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

Copyright © Νικόλαος Μαντέλης, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

**Αφιερώνεται
στον πατέρα μου**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την παρουσίαση των βασικών μετρήσεων και δοκιμών που εκτελούνται σε μετασχηματιστές ισχύος καθώς και στα μονωτικά έλαια αυτών, μετά την κατασκευή, εγκατάσταση, συντήρηση ή την επισκευή τους. Ακόμη, παρουσιάζονται αναλύσεις των φυσικοχημικών μετρήσεων των μονωτικών ελαίων των Υποσταθμών κλειστού τύπου, Κέντρων Διανομής (Κ/Δ), της Αττικής και πως αυτές μεταβάλλονται με την πάροδο των χρόνων.

Στο 1^ο Κεφάλαιο αναφέρεται η θεωρία των μετασχηματιστών και των μονωτικών ελαίων, καθώς, επίσης, και τα κύρια μέρη των μετασχηματιστών.

Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις δοκιμές στις οποίες υποβάλλονται: οι μετασχηματιστές στο εργοστάσιο κατασκευή τους και τα μονωτικά έλαια κατά την παραλαβή μίας καινούργιας παρτίδας.

Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφονται οι μετρήσεις που εκτελούνται από το Συνεργείο Επισκευής Μετασχηματιστών Αττικής (ΣΕΜ-Α) τόσο στο χώρο του συνεργείου όσο και επί τόπου στον Υποσταθμό μετά από επισκευή ή συντήρηση του μετασχηματιστή.

Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται ο εξοπλισμός με τον οποίο είναι εφοδιασμένο το ΣΕΜ-Α για την εκτέλεση των ηλεκτρικών και φυσικοχημικών μετρήσεων. Επίσης, περιγράφονται αναλυτικά οι διαδικασίες των μετρήσεων αυτών.

Στο 5^ο Κεφάλαιο καταγράφονται τα αποτελέσματα των φυσικοχημικών μετρήσεων των μονωτικών ελαίων των μετασχηματιστών που είναι εγκατεστημένοι στα Κέντρα Διανομής της Αττικής στο πλαίσιο του προληπτικού ελέγχου όπως προβλέπεται από τις διεθνείς προδιαγραφές - πρότυπα.

Τέλος, στο 6^ο Κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που καταλήξαμε σε αυτή την διπλωματική εργασία καθώς και ενδεχόμενα πεδία για περαιτέρω διερεύνηση.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κο. Ιωάννη Φ. Γκόνο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και την κα. Αικατερίνη Πολυκράτη, η οποία με την άρτια επιστημονική της κατάρτιση και την ουσιαστική καθοδήγησή της, με βοήθησε στη συγγραφή της εργασίας αυτής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Βοηθό Διευθυντή της Διεύθυνσης Ειδικών Εγκαταστάσεων Δικτύου κο. Τραπεζόντα Νικόλαο για την υποστήριξή του, ενώ θερμές ευχαριστίες οφείλω στην Προϊσταμένη του Τομέα Τεχνικής Υποστήριξης κα. Μακρή Χρηστίνα, για τη στήριξή της και την άριστη συνεργασία της τόσο κατά τη διάρκεια της επαγγελματικής απασχόλησής μου στο Συνεργείο Επισκευής Μετασχηματιστών Αθηνών, όσο και κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την συμπαράσταση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα τη γυναίκα μου για την έμπνευση και την εμπύχυσή της να εκπληρώσω το όραμα μου να αποφοιτήσω από τη ΣΗΜΜΥ του ΕΜΠ.

Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1	Κατηγορίες μετασχηματιστών	14
1.2	Βασικά εξαρτήματα ενός μετασχηματιστή ισχύος	15
1.3	Περιγραφή του κυριότερου εξοπλισμού ενός μετασχηματιστή ισχύος.....	18
1.4	Εισαγωγή στα μονωτικά έλαια	25
1.5	Είδη μονωτικών ελαίων	26
1.6	Χρήση και ιδιότητες μονωτικών ελαίων	26
2.	ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ	27
2.1	Δοκιμές Τριφασικών Μετασχηματιστών Ισχύος.....	27
2.2	Δοκιμές σειράς Τριφασικών Μετασχηματιστών Ισχύος.....	27
2.2.1.	Μέτρηση της ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων	27
2.2.2.	Μέτρηση του λόγου των τάσεων και έλεγχος της συνδεσμολογίας των τυλιγμάτων (Διανυσματική ομάδα).....	28
2.2.3.	Μέτρηση της σύνθετης αντίστασης βραχυκυκλώσεως και των απωλειών υπό φορτίο	28
2.2.4.	Μέτρηση ρεύματος μαγνητίσεως και απωλειών εν κενώ στο 90%, 100% και στο 110% της ονομαστικής τάσης	28
2.2.5.	Προσδιορισμός της χωρητικότητας μεταξύ τυλιγμάτων-γης και μεταξύ των τυλιγμάτων και μέτρηση του συντελεστή απωλειών (εφδ)	29
2.2.6.	Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης	29
2.2.7.	Μέτρηση απόκρισης συχνότητας	29
2.2.8.	Δοκιμή στεγανότητας του δοχείου του μετασχηματιστή	29
2.2.9.	Δοκιμές λαδιού μετασχηματιστή	30
2.2.10.	Διηλεκτρικές δοκιμές	30
2.2.11.	Δοκιμή μόνωσης βοηθητικών καλωδιώσεων (AuxW test).....	32
2.2.12.	Δοκιμή λειτουργίας του μηχανισμού αλλαγής λήψεων υπό φορτίο	32
2.3	Δοκιμές τύπου Τριφασικών Μετασχηματιστών Ισχύος.....	32
2.3.1	Δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας	32
2.3.2	Προσδιορισμός στάθμης θορύβου	33
2.3.3	Μέτρηση ισχύος ανεμιστήρων	33
2.4	Ειδικές δοκιμές Τριφασικών Μετασχηματιστών Ισχύος	33
2.4.1	Δοκιμή κεραυνικής κρουστικής τάσης αποκομμένου κύματος στους ακροδέκτες της γραμμής (LIC)	33
2.4.2	Δοκιμή εσωτερικής κρουστικής τάσης στους ακροδέκτες της γραμμής (SI - Switching impulse test)	34

2.4.3	Δοκιμή αντοχής εναλλασσόμενου ρεύματος στους ακροδέκτες της γραμμής (Line terminal AC withstand test - LTAC)	34
2.4.4	Μέτρηση αρμονικών του ρεύματος λειτουργίας εν κενώ στην ονομαστική τάση	34
2.4.5	Μέτρηση επαγωγικής αντίδρασης μηδενικής ακολουθίας.....	35
2.4.6	Μέτρηση της ανύψωσης θερμοκρασίας του θερμότερου σημείου τυλίγματος	35
2.5	Δοκιμές Μονωτικού Ελαίου Μετασχηματιστών Ισχύος	35
3.	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ	37
3.1	Μετρήσεις σε Μετασχηματιστές μετά από Επισκευή ή Επιθεώρηση του Ενεργού Μέρους του Μετασχηματιστή	37
3.1.1	Αρχικές μετρήσεις	37
3.1.2	Ενδιάμεσες μετρήσεις.....	38
3.1.3	Τελικές μετρήσεις.....	38
3.2	Μετρήσεις στο μετασχηματιστή στη θέση λειτουργίας του	39
3.2.1	Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης	39
3.2.2	Μέτρηση της ωμικής αντίστασης τυλιγμάτων.....	40
3.2.3	Μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού.....	41
3.2.4	Μέτρηση του ρεύματος διέγερσης του πυρήνα (ρεύμα εν κενώ)	41
3.2.5	Μέτρηση της εφδ της μόνωσης.....	41
3.2.6	Μέτρηση της χωρητικότητας των τυλιγμάτων	42
3.3	Μετρήσεις και Δοκιμές στο μονωτικό λάδι του μετασχηματιστή.....	42
3.3.1	Διηλεκτρική αντοχή.....	43
3.3.2	εφδ λαδιού.....	43
3.3.3	Βαθμός εξουδετέρωσης.....	43
3.3.4	Υγρασία στο λάδι	43
3.3.5	Σχετικός κορεσμός της υγρασίας.....	43
3.3.6	Χρώμα – Οσμή.....	44
3.3.7	Πυκνότητα	44
3.3.8	Επιφανειακή τάση.....	44
3.3.9	Προσδιορισμός φουρανίων	44
3.3.10	Αεριοχρωματογραφική ανάλυση των διαλυμένων στο λάδι αερίων	45
4.	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	46
4.1	Ηλεκτρικές μετρήσεις.....	47
4.1.1	Μέτρηση του λόγου τάσης μετασχηματισμού, της φασικής απόκλισης και ελέγχος της ομάδας ζεύξης	47
4.1.2	Μέτρηση της αντίστασης τυλιγμάτων	49
4.1.3	Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης	51
4.1.4	Μέτρηση της εφδ, του ρεύματος διεγέρσεως και της τάσης βραχυκυκλώσεως....	52

4.2	Φυσικοχημικές μετρήσεις μονωτικού ελαίου	57
4.2.1	Δειγματοληψία και μεταφορά του δείγματος.....	57
4.2.2	Έλεγχος του συντελεστή απωλειών και της ειδικής αντίστασης.....	58
4.2.3	Μέτρηση της διηλεκτρικής αντοχής	59
4.2.4	Έλεγχος της περιεχόμενης υγρασίας στο μονωτικό έλαιο	60
4.2.5	Χαρακτηρισμός χρώματος μονωτικού ελαίου	61
4.2.6	Επιφανειακή τάση και πυκνότητα	62
4.2.7	Αεριοχρωματογραφική ανάλυση των διαλυμένων στο μονωτικό έλαιο αερίων ...	68
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	73
5.1	Φυσικοχημικά αποτελέσματα μετρήσεων	73
5.2	Αποτελέσματα αεριοχρωματογραφικών αναλύσεων	85
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	96
6.1	Συμπεράσματα της εργασίας.....	96
6.2	Προτάσεις και θέματα για περαιτέρω διερεύνηση	99
	Βιβλιογραφία – Αναφορές.....	100

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Πλάγια όψη μετασχηματιστή 20/25MVA (Πηγή: [1]).....	15
Σχήμα 1.2: Κάτοψη μετασχηματιστή 20/25MVA (Πηγή: [1])	17
Σχήμα 1.3: Πρόσοψη μετασχηματιστή 20/25MVA (Πηγή: [1])	18
Σχήμα 1.4: Δοχείο – Κύρια Δεξαμενή μετασχηματιστή (Πηγή: [2]).....	19
Σχήμα 1.5: Μονωτήρας διέλευσης (Πηγή:[3])	20
Σχήμα 1.6: Δοχείο διαστολής (Πηγή:[4])	20
Σχήμα 1.7: Ψυγεία και ανεμιστήρες (Πηγή:[5]).....	21
Σχήμα 1.8: Ασφαλιστική διάταξη Buchholz (Πηγή:[6])	21
Σχήμα 1.9: Ηλεκτρονόμος και βαλβίδα εκτόνωσης πίεσης (Πηγή:[7])	22
Σχήμα 1.10: Αφυγρανήρας (Πηγή:[8]).....	22
Σχήμα 1.11: Πινακίδα ενός μετασχηματιστή ισχύος (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α).....	23
Σχήμα 1.12: Μετασχηματιστής ισχύος με σύστημα αλλαγής λήψεως υπό φορτίο (Πηγή:[9])	23
Σχήμα 1.13: Σύστημα αλλαγής λήψεως υπό φορτίο (OLTC) (Πηγή:[10])	24
Σχήμα 1.14: Μεταγωγικός διακόπτης (Diverter switch) (Πηγή:[11]).....	25
Σχήμα 4.1: Απεικόνιση συνδεσμολογίας συσκευής ATRT-03 με τριφασικό μετασχηματιστή Τρίγωνο σε Αστέρα (Πηγή: [14])	47
Σχήμα 4.2: Απεικόνιση συνδεσμολογίας συσκευής TRM-403 με τριφασικό μετασχηματιστή συνδεσμολογίας Τριγώνου σε Αστέρα με ουδέτερο (Πηγή: [15])	49
Σχήμα 4.3: Συσκευή TeraOhm 5kV (Πηγή: [16])	51
Σχήμα 4.4: Συσκευή μέτρησης εφδ M4100 της doble (Πηγή: [17]).....	54
Σχήμα 4.5: Πάνω όψη συσκευής M4100 της doble (Πηγή: [17]).....	55
Σχήμα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση μέτρηση μόνωσης μονωτήρα υψηλής τάσης (Πηγή: Λογισμικό doble).....	55
Σχήμα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση μέτρηση μόνωσης τριφασικού μετασχηματιστή (Πηγή: Λογισμικό doble).....	56
Σχήμα 4.8: Συνδεσμολογία συσκευών M4100 και M4110 (Πηγή: Εγχειρίδιο κατασκευαστή doble)	56
Σχήμα 4.9: Γυάλινο δοχείο και ξύλινο κουτί μεταφοράς (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)	57
Σχήμα 4.10: Συσκευή μέτρησης εφδ, σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r και της ειδικής αντίστασης ρ DTL (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α).....	58
Σχήμα 4.11: Συσκευή μέτρησης διηλεκτρικής αντοχής DTA E - 100 (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)	59
Σχήμα 4.12: Συσκευή μέτρησης υγρασίας METROHM – 684 KF Coulometer (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)	60
Σχήμα 4.13: Ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας Precisa (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)	61
Σχήμα 4.14: Τυποποιημένος χρωματιστός δίσκος χρωματομέτρου (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α).....	61
Σχήμα 4.15: Γυάλινα δοχεία τοποθέτησης δείγματος και απεσταγμένου νερού (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α).....	62
Σχήμα 4.16: Συσκευή μέτρησης επιφανειακής τάσης και πυκνότητας K-20 της Kruss (Πηγή: [18])63	
Σχήμα 5.1: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα του χρώματος του ελαίου, περιόδου 2015 – 2019	77
Σχήμα 5.2: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα της πυκνότητας του ελαίου, περιόδου 2015 – 2019	78
Σχήμα 5.3: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα της οξύτητας του ελαίου, περιόδου 2015 – 2019	79
Σχήμα 5.4: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα της υγρασίας του ελαίου, περιόδου 2015 – 2019	80

Σχήμα 5.5: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα της διηλεκτρικής αντοχής του ελαίου, περιόδου 2015 – 2019	81
Σχήμα 5.6: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα της επιφανειακής τάσης του ελαίου, περιόδου 2015 – 2019	82
Σχήμα 5.7: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα του συντελεστή απωλειών του ελαίου, περιόδου 2015 – 2019.....	83
Σχήμα 5.8: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα της ειδικής αντίστασης του ελαίου, περιόδου 2015 – 2019	84
Σχήμα 5.9: Τρίγωνο Duval (Πηγή: [12]).....	86
Σχήμα 5.10: Συγκέντρωση του αερίου H ₂ στο έλαιο από τις αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής, περιόδου 2015 – 2019.....	89
Σχήμα 5.11: Συγκέντρωση του αερίου CH ₄ στο έλαιο από τις αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής, περιόδου 2015 – 2019.....	90
Σχήμα 5.12: Συγκέντρωση του αερίου CO στο έλαιο από τις αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής, περιόδου 2015 – 2019.....	91
Σχήμα 5.13: Συγκέντρωση του αερίου CO ₂ στο έλαιο από τις αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής, περιόδου 2015 – 2019.....	92
Σχήμα 5.14: Συγκέντρωση του αερίου C ₂ H ₄ στο έλαιο από τις αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής για το έτος 2019	93
Σχήμα 5.15: Συγκέντρωση του αερίου C ₂ H ₆ στο έλαιο από τις αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής για το έτος 2019	94
Σχήμα 5.16: Συγκέντρωση του αερίου C ₂ H ₂ στο έλαιο από τις αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής για το έτος 2019	95

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Αποδεκτές τιμές των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των μονωτικών ελαίων των μετασχηματιστών ισχύος.....	36
Πίνακας 2: Βήματα ελέγχου λόγου μετασχηματισμού για τριφασικό μετασχηματιστή	48
Πίνακας 3: Βήματα μέτρησης αντίστασης τυλιγμάτων για τριφασικό μετασχηματιστή	50
Πίνακας 4: Διεθνή πρότυπα ελέγχου χαρακτηριστικών μονωτικών ελαίων.....	73
Πίνακας 5: Κατάταξη μονωτικών ελαίων.....	73
Πίνακας 6: Αποτελέσματα φυσικοχημικών αναλύσεων Κ/Δ Αττικής (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)	75
Πίνακας 7: Όρια συγκεντρώσεων διαλυμένων αερίων σύμφωνα με τα πρότυπα	85
Πίνακας 8: Περιγραφή καταστάσεων σύμφωνα με το πρότυπο IEEE C 57-104.....	85
Πίνακας 9: Αποτελέσματα αεριοχρωματογραφικών αναλύσεων Κ/Δ Αττικής (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)	88
Πίνακας 10: Μέση τιμή ανά ιδιότητα μονωτικού ελαίου	96
Πίνακας 11: Συγκεντρώσεις αερίων σε ppm στο μονωτικό έλαιο Κ/Δ 14.1.....	98
Πίνακας 12: Συγκεντρώσεις αερίων σε ppm στο μονωτικό έλαιο Κ/Δ 10.2.....	98

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθεί μια συνοπτική θεωρία και τα κύρια χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών ισχύος. Οι μετασχηματιστές είναι ένα από τα βασικότερα δομικά στοιχεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας καθώς η χρήση τους είναι ζωτικής σημασίας για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ρόλος των μετασχηματιστών στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι να αλλάζουν την τιμή της εναλλασσόμενης τάσης χωρίς να υπάρχουν σημαντικές απώλειες ενέργειας. Οι μετασχηματιστές κατατάσσονται στις πιο αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές καθώς η απόδοσή τους αγγίζει το 99.75%.

1.1 Κατηγορίες μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές ανάλογα με τη χρήση τους στα ηλεκτρικά δίκτυα διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Μετασχηματιστές ισχύος: Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μεγάλοι μετασχηματιστές, οι οποίοι χρησιμοποιούνται προκειμένου να ανυψώνουν την τάση των γεννητριών στους σταθμούς παραγωγής στο επίπεδο του συστήματος μεταφοράς, αλλά και για να υποβιβάζουν την τάση σε υποσταθμούς διανομής ώστε να τροφοδοτούνται τα συστήματα διανομής του ΔΕΔΔΗΕ και οι πελάτες Μέσης Τάσης.
- Μετασχηματιστές διανομής: Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μετασχηματιστές, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να υποβιβάζουν την τάση από το επίπεδο της μέσης τάσης (20kV) στο επίπεδο χαμηλής τάσης (400V/230V), το οποίο είναι κατάλληλο για χρήση από τους καταναλωτές.
- Μετασχηματιστές τάσης: Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μετασχηματιστές μέτρησης, οι οποίοι συνδέονται παράλληλα με τη γραμμή ισχύος ώστε η υψηλή τάση μεταφοράς ή διανομής να μετασχηματίζεται σε χαμηλή τάση. Με τη χρήση τους καθίσταται εφικτή η μέτρηση μιας υψηλής τάσης με βολτόμετρα χαμηλής κλίμακας καθώς και η λειτουργία των ηλεκτρονόμων προστασίας χαμηλής τάσης.
- Μετασχηματιστές έντασης: Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μετασχηματιστές μέτρησης, οι οποίοι συνδέονται σε σειρά με τη γραμμή ισχύος ώστε τα υψηλά ρεύματα μεταφοράς ή διανομής να μετασχηματίζονται σε χαμηλής έντασης ρεύματα. Με τη χρήση τους καθίσταται εφικτή η μέτρηση υψηλών ρευμάτων με αμπερόμετρα χαμηλής κλίμακας αλλά και η λειτουργία ηλεκτρονόμων χαμηλής έντασης.

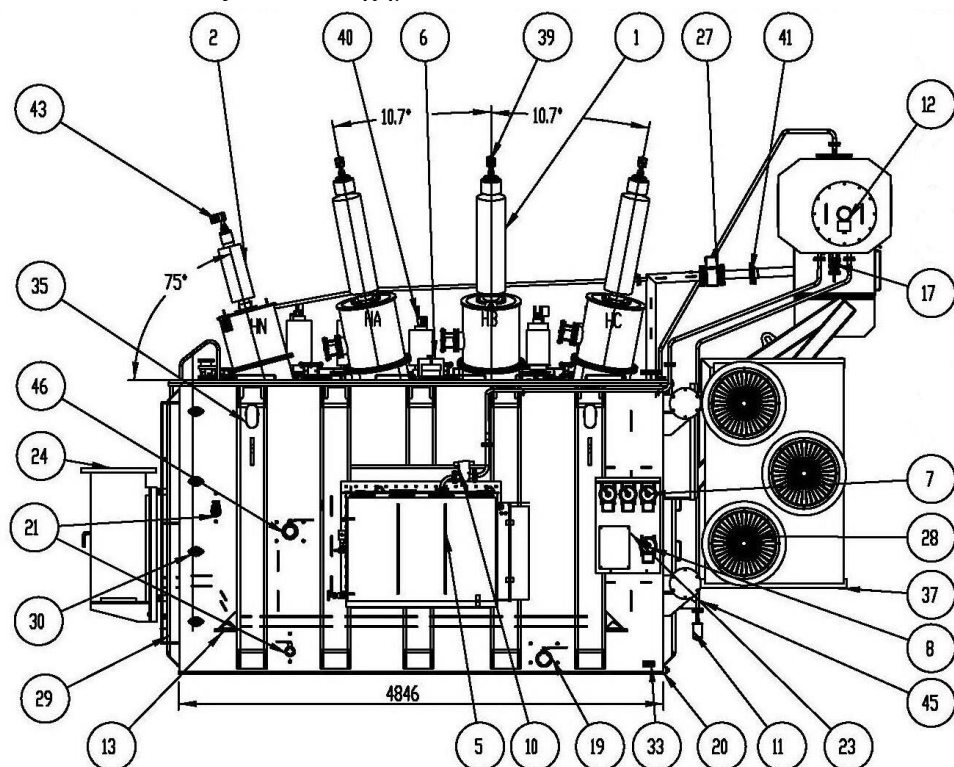
Οι μετασχηματιστές ανάλογα με τον τρόπο ψύξης τους διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Λαδιού με φυσική ψύξη (ONAN – Oil Natural Air Natural): Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μετασχηματιστές στους οποίους η αναπτυσσόμενη θερμότητα στο εσωτερικό τους μέρος απομακρύνεται με την φυσική κυκλοφορία του λαδιού και την εξωτερική κυκλοφορία του ατμοσφαιρικού αέρα.

- Λαδιού με εξαναγκασμένη ψύξη (ONAF – Oil Natural Air Forced): Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μετασχηματιστές στους οποίους η αναπτυσσόμενη θερμότητα στο εσωτερικό τους μέρος απομακρύνεται με την φυσική κυκλοφορία του λαδιού αλλά και με την εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα ψύξης με τη χρήση κυρίως ανεμιστήρων για μετασχηματιστές. Η ισχύς των μετασχηματιστών της κατηγορίας αυτής ξεπερνά τα 10 MVA.
- Λαδιού με εξαναγκασμένη κυκλοφορία λαδιού (OFAF – Oil Forced Air Forced): Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μετασχηματιστές στους οποίους η κυκλοφορία του λαδιού γίνεται με τη χρήση αντλιών και σωληνώσεων, όπως επίσης και η κυκλοφορία του αέρα ψύξης γίνεται με τη χρήση ανεμιστήρων. Η ισχύς των μετασχηματιστών της κατηγορίας αυτής ξεπερνά τα 50 MVA.
- Ξηρού τύπου με φυσική ψύξη: Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μετασχηματιστές στους οποίους το ενεργό μέρος τους δεν είναι εμποτισμένο στο λάδι αλλά έρχεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η ισχύς των μετασχηματιστών της κατηγορίας αυτής δεν ξεπερνά τα 25 kVA.
- Ξηρού τύπου με εξαναγκασμένη ψύξη: Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μετασχηματιστές στους οποίους η απομάκρυνση της θερμότητας γίνεται με τη χρήση ανεμιστήρων.

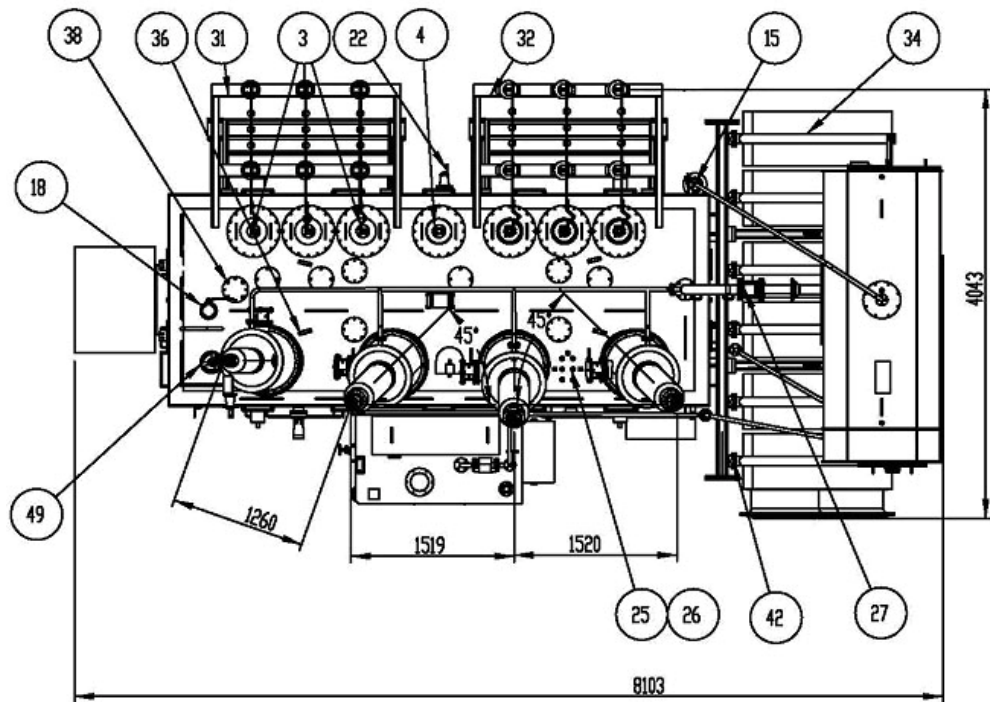
1.2 Βασικά εξαρτήματα ενός μετασχηματιστή ισχύος

Το σύνολο των εξαρτημάτων που απαρτίζουν έναν μετασχηματιστή ισχύος μεγαλύτερης ή ίσης των 20 MVA απεικονίζεται στα Σχήματα 1.1, 1.2 και 1.3 που ακολουθούν [1]:



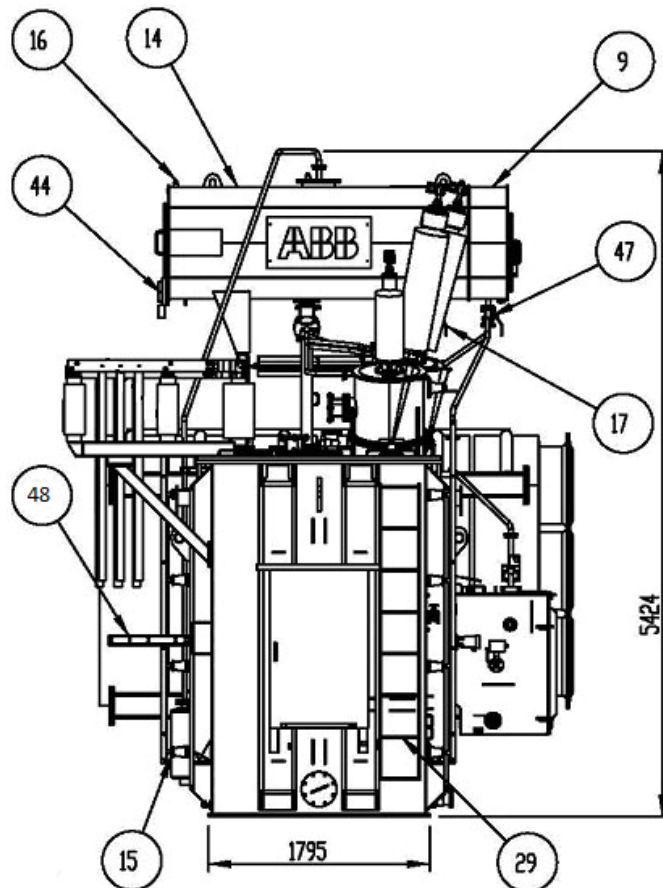
Σχήμα 1.1: Πλάγια όψη μετασχηματιστή 20/25MVA (Πηγή: [1])

1. Μονωτήρας διέλευσης (Bushing) υψηλής τάσης
2. Μονωτήρας διέλευσης (Bushing) ουδέτερου κόμβου υψηλής τάσης
5. Μεταγωγέας λήψεων υπό φορτίο (OLTC - On Load Tap Changer)
6. Συσκευή ανακούφισης πίεσης
7. Θερμόμετρα τυλιγμάτων
8. Θερμόμετρο λαδιού
10. Ηλεκτρονόμος ροής λαδιού μεταγωγέα
11. Αφυγραντήρας μεταγωγέα
12. Ενδεικτικό στάθμης λαδιού μεταγωγέα
13. Λαβές έλξης
17. Βάνα αποστράγγισης δοχείου διαστολής κύριας δεξαμενής
19. Βάνα πλήρωσης/αποστράγγισης λαδιού
20. Πώμα αποστράγγισης
21. Βάνα δειγματοληψίας
23. Πινακίδα (Nameplate)
24. Πίνακας ελέγχου
27. Ηλεκτρονόμος ανίχνευσης αερίων (Buchholz)
28. Ανεμιστήρας ψύξης
29. Σκάλα
30. Γείωση τυλιγμάτων υψηλής τάσης
33. Ακροδέκτης γείωσης κύριας δεξαμενής
35. Λαβές ανύψωσης μετασχηματιστή
37. Βάνα αποστράγγισης ψυγείου
39. Ακροδέκτες μονωτήρα διέλευσης υψηλής τάσης
40. Ακροδέκτες μονωτήρα διέλευσης μέσης και χαμηλής τάσης
41. Βάνα απομόνωσης
43. Ακροδέκτης μονωτήρα ουδέτερου κόμβου
45. Βαλβίδα εξαέρωσης δεξαμενής
46. Ηλεκτρονόμος άμεσης εκτόνωσης
47. Βάνα αποστράγγισης δοχείου διαστολέα



Σχήμα 1.2: Κάτοψη μετασχηματιστή 20/25MVA (Πηγή: [1])

3. Μονωτήρας διέλευσης μέσης τάσης
4. Μονωτήρας διέλευσης χαμηλής τάσης
15. Αφυγραντήρας δοχείου διαστολής κύριας δεξαμενής
18. Βάνα κένωσης
22. Ακροδέκτης γείωσης ουδετέρου κόμβου
25. Αισθητήρας θερμοκρασίας ελαίου (προαιρετικά)
26. Αισθητήρας θερμοκρασίας τυλιγμάτων (προαιρετικά)
27. Ηλεκτρονόμος ανίχνευσης αερίων (Buchholz)
31. Ζυγοί μέσης τάσης (προαιρετικά)
32. Ζυγοί χαμηλής τάσης (προαιρετικά)
34. Ψυγείο
36. Λαβές ανύψωσης πάνω καλύμματος
38. Κιβώτιο σύνδεσης γείωσης πυρήνα
42. Βάνες ψυγείου
49. Μεταγωγέας λήψεων εν κενό



Σχήμα 1.3: Πρόσωση μετασχηματιστή 20/25MVA (Πηγή: [1])

- 9. Δοχείο διαστολής μεταγωγέα λήψεων
- 14. Δοχείο διαστολής κύριας δεξαμενής
- 15. Αφυγραντήρας δοχείου διαστολής κύριας δεξαμενής
- 16. Εξαερωτήρας δοχείου διαστολής
- 17. Βάνα αποστράγγισης δοχείου διαστολής κύριας δεξαμενής
- 29. Σκάλα
- 44. Ενδεικτικό στάθμης για δοχείο διαστολής
- 47. Βάνα αποστράγγισης δοχείου διαστολέα
- 48. Σχάρα όδευσης καλωδίων

1.3 Περιγραφή του κυριότερου εξοπλισμού ενός μετασχηματιστή ισχύος

Τα βασικά μέρη του εξοπλισμού ενός μετασχηματιστή ισχύος μεγαλύτερης ή ίσης των 20 MVA είναι:

- Δοχείο – Κύρια Δεξαμενή: Το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή ισχύος, ο πυρήνας και τα τυλίγματά του, με το μονωτικό λάδι περικλείονται από ένα κατάλληλο χαλύβδινο δοχείο. Συνήθως το άνω μέρος του δοχείου στεγανοποιείται με ένα βιδωτό χαλύβδινο καπάκι. Πάνω σε αυτό προσαρμόζονται οι μονωτήρες διελεύσεως υψηλής και μέσης τάσης, ενώ στις πλάγιες πλευρές της δεξαμενής υπάρχουν κατάλληλες υποδοχές για την τοποθέτηση και την στήριξη των ψυκτικών σωμάτων.



Σχήμα 1.4: Δοχείο – Κύρια Δεξαμενή μετασχηματιστή (Πηγή: [2])

- Μονωτήρες διελεύσεως: Οι μονωτήρες διελεύσεως χρησιμοποιούνται για την ασφαλή διέλευση του ρεύματος. Οι μονωτήρες υψηλής τάσης είναι συνήθως τύπου πυκνωτή (το εσωτερικό τους αποτελείται από μονωτικό υλικό, συνήθως χαρτί στο οποίο έχουν παρεμβληθεί κύλινδροι από φύλλα κασσίτερου ή αλουμινίου). Συνεπώς, από τον αγωγό διέλευσης μέχρι το σώμα του μετασχηματιστή δημιουργείται μια σειρά από πυκνωτές ίσης χωρητικότητας. Σκοπός των πυκνωτών αυτών είναι η ομαλή κατανομή της τάσης σε όλο το πάχος του μονωτικού ώστε να μην καταπονούνται ηλεκτρικά ορισμένα τμήματα της μόνωσης. Σχετικά με τους μονωτήρες μέσης τάσης, οι βασικοί τύποι που χρησιμοποιούνται είναι δύο: ο πρώτος τύπος είναι όμοιος με αυτόν της υψηλής τάσης ενώ ο δεύτερος αποτελείται μόνο από πορσελάνη και επικοινωνεί υδραυλικά με το λάδι του μετασχηματιστή. [13]



Σχήμα 1.5: Μονωτήρας διέλευσης (Πηγή:[3])

- Δοχείο διαστολής: Η χρήση του δοχείου διαστολής είναι να δέχεται τις αυξομειώσεις του όγκου του λαδιού που οφείλονται στην υπερθέρμανση και στην υπερφόρτιση του μετασχηματιστή. Στο δοχείο διαστολής υπάρχει ενδεικτικό στάθμης για τον οπτικό έλεγχο της ποσότητας του λαδιού που περιέχει, το οποίο μπορεί να είναι ένας απλός γυάλινος σωλήνας που βασίζεται στην αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων ή ένας μαγνητικός δέκτης με μια κατακόρυφη σειρά από μαγνητάκια, τα οποία ενεργοποιούνται από πλωτήρα με μεταλλικό στοιχείο που επιπλέει στο δοχείο.



Σχήμα 1.6: Δοχείο διαστολής (Πηγή:[4])

- Ψυκτικό σώμα: Στους μετασχηματιστές ισχύος σχεδιάζεται ένα σύστημα ψύξης, το οποίο αποβάλλει την θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω της ύπαρξης υψηλής θερμοκρασίας κατά τη λειτουργία του. Τα ψυκτικά σώματα τοποθετούνται πλευρικά της δεξαμενής του μετασχηματιστή και μέσω αυτών κυκλοφορεί το λάδι όπου με τη

χρήση ανεμιστήρων διευκολύνεται η ψύξη του με την εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα.



Σχήμα 1.7: Ψυγεία και ανεμιστήρες (Πηγή:[5])

- Ασφαλιστική διάταξη Buchholz: Οι μετασχηματιστές ισχύος είναι εφοδιασμένοι με μία ασφαλιστική διάταξη Buchholz, που τοποθετείται μεταξύ του δοχείου διαστολής και της δεξαμενής. Η διάταξη αυτή διαθέτει δύο επαφές, μία για σήμανση κινδύνου και μία για απόζευξη του μετασχηματιστή. Ο ηλεκτρονόμος Buchholz ενεργοποιείται όταν στο εσωτερικό του συγκεντρώνονται φυσαλίδες αερίων. Όταν ο όγκος τους ξεπεράσει κάποιο όριο δίνεται εντολή σήμανσης κινδύνου, ενώ εάν ο όγκος τους συνεχίζει να αυξάνεται τότε δίνεται εντολή απόζευξης. Ενεργοποιείται επίσης όταν υπάρχει έντονη ροή λαδιού στο σωλήνα που συνδέεται καθώς και όταν παρουσιαστεί πτώση της στάθμης του λαδιού π.χ. λόγω διαρροής κτλ.



Σχήμα 1.8: Ασφαλιστική διάταξη Buchholz (Πηγή:[6])

- Ηλεκτρονόμος και βαλβίδα εκτόνωσης πίεσης: Όλοι σχεδόν οι μετασχηματιστές ισχύος διαθέτουν έναν ηλεκτρονόμο και μία βαλβίδα εκτόνωσης πίεσης καθώς χρησιμεύουν στην εκτόνωση των μεταβολών πίεσης που παρουσιάζονται από εσωτερικά σφάλματα. Όταν συμβεί ένα βραχυκύκλωμα ή ένα ηλεκτρικό τόξο στο ενεργό μέρος του μετασχηματιστή, τότε δημιουργούνται αέρια υπό υψηλή πίεση, τα οποία προκαλούν υπερπίεση. Η πιο συνηθισμένη συσκευή είναι η συσκευή ανακούφισης τύπου μεμβράνης, η οποία αποτελείται από έναν αριθμό συμπιεσμένων ελατηρίων που εφαρμόζονται πάνω από το διάφραγμα της συσκευής και μια μηχανικά κινούμενη ενδεικτική ράβδο. Όταν η πίεση στο εσωτερικό του διαφράγματος ξεπεράσει το άνω όριο τότε η μεμβράνη συμπιέζεται μετακινώντας τα ελατήρια καθώς και τη θέση της ράβδου, με αποτέλεσμα την αλλαγή της θέσης από την κανονική λειτουργία στην κατάσταση εκτόνωσης. Ο ηλεκτρονόμος εκτόνωσης απότομης μεταβολής της πίεσης έχει έναν ταχύτατο χρόνο απόκρισης και λειτουργεί σε περίπτωση εμφάνισης ακραίων βραχυκυκλωμάτων στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, το οποίο προκαλεί απότομη μεταβολή της πίεσης.



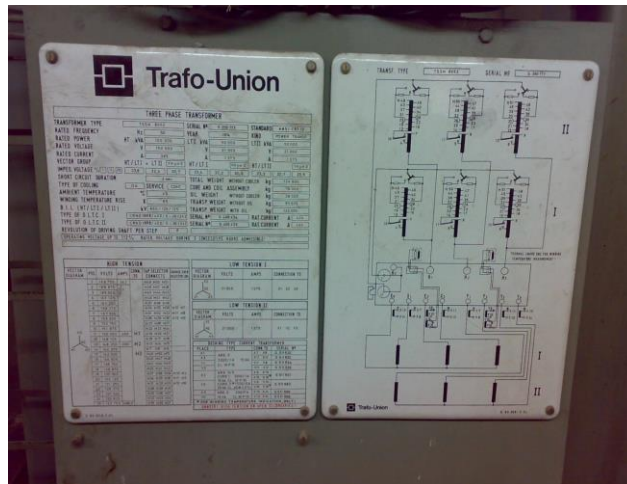
Σχήμα 1.9: Ηλεκτρονόμος και βαλβίδα εκτόνωσης πίεσης (Πηγή:[7])

- Αφυγραντήρας: Προκειμένου να αποφευχθεί η εισχώρηση της υγρασίας του περιβάλλοντος στο μονωτικό λάδι, καθώς αυτό επιφέρει υποβάθμιση του μονωτικού λαδιού και της μόνωσης του μετασχηματιστή, τοποθετείται αφυγραντήρας στο δοχείο διαστολής του.



Σχήμα 1.10: Αφυγραντήρας (Πηγή:[8])

- Πινακίδα: Σε τυπική πινακίδα ενός μετασχηματιστή αναγράφονται οι πληροφορίες σχετικά με τον κατασκευαστή, τον αριθμό σειράς/κατασκευής, το έτος κατασκευής, τον σχετικό κανονισμό, τον αριθμό φάσεων, την ομάδα ζεύξης των τυλιγμάτων, το εύρος λήψεων των τάσεων, την ονομαστική ισχύ, τα ονομαστικά ρεύματα, τη συχνότητα, την σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης, τον τύπο του πυρήνα, το βάρος του, το είδος του μονωτικού λαδιού, την στάθμη μόνωσης, τον τύπο ψύξης, την ανύψωση θερμοκρασίας του άνω τμήματος του λαδιού και την αντοχή στην πίεση κενού.



Σχήμα 1.11: Πινακίδα ενός μετασχηματιστή ισχύος (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)

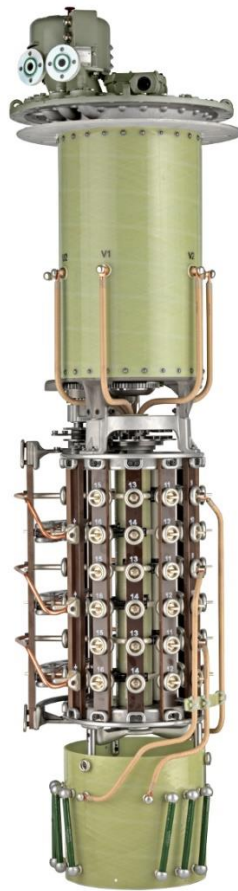
- Σύστημα αλλαγής λήψεως υπό φορτίο (OLTC - On Load Tap Changer): Οι μετασχηματιστές ισχύος διαθέτουν ένα σύστημα αλλαγής λήψεως υπό φορτίο, το οποίο τοποθετείται συνήθως στην πλευρά της υψηλής τάσης καθώς εκεί τα ρεύματα είναι μικρότερα, προκειμένου η τάση να ρυθμίζεται στο επιθυμητό επίπεδο με την μεταγωγή των λήψεων του τυλίγματος χωρίς να διακόπτεται η λειτουργία του.



Σχήμα 1.12: Μετασχηματιστής ισχύος με σύστημα αλλαγής λήψεως υπό φορτίο (Πηγή:[9])

Το σύστημα αλλαγής λήψεως υπό φορτίο απαρτίζεται από τρία βασικά τμήματα:

- τον μηχανισμό κίνησης (motor drive unit) που αποτελείται από έναν ηλεκτροκινητήρα και τον αυτοματισμό του. Ο ηλεκτροκινητήρας αυτός κινεί είτε αριστερόστροφα είτε δεξιόστροφα έναν άξονα, ο οποίος μεταφέρει την κίνηση στα άλλα δύο μέρη του συστήματος, το σύστημα επαφών και τον μεταγωγικό διακόπτη. Ο μηχανισμός κίνησης τοποθετείται πλευρικά της δεξαμενής του μετασχηματιστή.
- ένα σύστημα επαφών (Tap selector) που συνδέει τις απολήξεις των λήψεων του τυλίγματος και το οποίο βρίσκεται εντός του σώματος του μετασχηματιστή.
- τον μεταγωγικό διακόπτη (diverter switch) που βρίσκεται σε ξεχωριστό δοχείο και είναι επισκέψιμο ανά πάσα στιγμή στο άνω μέρος, στο καπάκι, της δεξαμενής του μετασχηματιστή.



Σχήμα 1.13: Σύστημα αλλαγής λήψεως υπό φορτίο (OLTC) (Πηγή:[10])



Σχήμα 1.14: Μεταγωγικός διακόπτης (Diverter switch) (Πηγή:[11])

1.4 Εισαγωγή στα μονωτικά έλαια

Σε κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζονται ενεργειακές απώλειες υπό την μορφή θερμότητας, με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας τους. Τα μονωτικά στοιχεία των συστημάτων αυτών αναλαμβάνουν και το ρόλο της ψύξης. Αρχικά, είχαν επικρατήσει τα στερεά μονωτικά υλικά, καθώς αποτελούνται κυρίως από οργανικές συνθέσεις με βάση την κυτταρίνη, η οποία έχει μέγιστη οικονομική λειτουργία σε θερμοκρασίες μικρότερες των 100°C και έπειτα ακολούθησαν έρευνες για αποδοτικότερα μέσα ψύξης. Ξεκίνησε σταδιακά η ένταξη των μονωτικών και διηλεκτρικών υγρών ως κύριο ψυκτικό και μονωτικό μέσο. Στην αρχή χρησιμοποιήθηκαν ορυκτέλαια, έλαια πετρελαϊκής προέλευσης, τα οποία εμφάνισαν τοξικά παράγωγα και έτσι οι έρευνες αναγκαστικά οδηγήθηκαν σε συνθετικά και φυσικά έλαια, μη πετρελαϊκής προέλευσης. Η πρώτη προσπάθεια για τη χρήση εναλλακτικών λαδιών ήταν τα άφλεκτα έλαια με βάση τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCB), τα οποία, βέβαια, σε σύντομο χρονικό διάστημα αποσύρθηκαν λόγω των συνεπειών της βιοσυσσώρευσης. Ακολούθησε η χρησιμοποίηση λαδιών με βάση την σιλικόνη αλλά ούτε το εγχείρημα αυτό είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αργότερα την εμφάνισή τους έκαναν οι συνθετικοί εστέρες, η χρήση των οποίων περιορίστηκε λόγω του υψηλού κόστους αλλά η καλή απόδοσή τους οδήγησε τις έρευνες σε ανεύρεση μονωτικού λαδιού με παρόμοιες ιδιότητες αλλά χαμηλότερου κόστους. Από τις έρευνες αυτές ισχυροποιήθηκε η πεποίθηση ότι οι φυσικοί εστέρες ή τα φυτικά λάδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αποδοτικά μονωτικά μέσα. Με κάποιες αλλαγές στη χημική τους σύσταση τα φυτικά λάδια κατέστησαν μια εφικτή και άκρως εφαρμόσιμη λύση και έτσι τα τελευταία χρόνια οι φυσικοί εστέρες χρησιμοποιούνται επιτυχώς ως διηλεκτρικά μέσα μετασχηματιστών

αντικαθιστώντας τα συμβατικά ορυκτέλαια. Μερικά από τα πλεονεκτήματα των φυτικών ελαίων, που καθιστούν τη χρήση τους ως μία μέθοδο παράτασης της θερμικής ζωής του μετασχηματιστή είναι το πολύ υψηλό σημείο ανάφλεξης και η βελτίωση της κατάστασης του μονωτικού χαρτιού έναντι της θερμικής αποσύνθεσης.

1.5 Είδη μονωτικών ελαίων

Τα φυτικά έλαια ήταν τα πρώτα που χρησιμοποιήθηκαν, ακολούθησαν τα ορυκτέλαια και τα συνθετικά έλαια. Σήμερα, λόγω των ανησυχιών που σχετίζονται με το περιβάλλον, η τάση τείνει στη χρήση των φυτικών ελαίων αν και η χρήση τους προς στιγμήν είναι απαγορευτική σε μετασχηματιστές ισχύος.

Τα είδη των μονωτικών είναι τα ακόλουθα:

1. Φυτικά έλαια (Vegetable oils)
2. Ορυκτά έλαια (Mineral oils)
3. Συνθετικά υγρά (Synthetic liquids)

1.6 Χρήση και ιδιότητες μονωτικών ελαίων

Τα μονωτικά έλαια χρησιμοποιούνται, κυρίως, στους μετασχηματιστές, στα καλώδια, στους πυκνωτές, στις αυτεπαγωγές, στους μονωτήρες διέλευσης, στους ελαιοδιακόπτες και στους μετασχηματιστές μετρήσεων.

Οι ιδιότητες των μονωτικών λαδιών χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Φυσικές: Στις φυσικές ιδιότητες περιλαμβάνονται η επιφανειακή τάση, το χρώμα, η καθαρότητα, το σημείο ανάφλεξης, το σημείο καύσης, το σημείο ροής, η πυκνότητα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής, η κινητική εσωτερική τριβή, η ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα.
- Χημικές: Στις χημικές ιδιότητες περιλαμβάνονται η οξείδωση, η οξύτητα, ο βαθμός εξουδετέρωσης, η αλκαλικότητα, η υγρασία, η απορρόφηση και η έκλυση αερίων.
- Ηλεκτρικές: Στις ηλεκτρικές ιδιότητες περιλαμβάνονται η διηλεκτρική αντοχή, η ειδική αντίσταση, η διηλεκτρική σταθερά, ο συντελεστής διηλεκτρικών απωλειών και η ειδική αγωγιμότητα.

Ο έλεγχος και η μέτρηση των ανωτέρω ιδιοτήτων του μονωτικού λαδιού είναι αναγκαία για τον προσδιορισμό της κατάστασης του και κατ' επέκταση της κατάστασης του μετασχηματιστή.

2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ

2.1 Δοκιμές Τριφασικών Μετασχηματιστών Ισχύος

Η περιγραφή των δοκιμών στις οποίες υποβάλλονται οι καινούργιοι μετασχηματιστές έχει στηριχθεί στη προδιαγραφή Νο SS-25/20 [28] της εταιρείας ΑΔΜΗΕ (τριφασικοί μετασχηματιστές 40/50MVA, 150 / 15,75-21kV) και την τεχνική περιγραφή ΔΔ – 387 [25] της εταιρείας ΔΕΔΔΗΕ (τριφασικοί μετασχηματιστές 150/21kV, ισχύος 40/50 MVA 20/25 MVA, Dyn1). Οι δοκιμές εκτελούνται σύμφωνα με τα Διεθνή Πρότυπα IEC 60076-1 [42], IEC 60076-2 [44] και IEC 60076-3 [45]. Λόγω του ότι οι μετασχηματιστές ισχύος κατασκευάζονται χειρωνακτικά, καθώς κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους εμπλέκεται μικρή αυτοματοποίηση της διαδικασίας παραγωγής σε αντίθεση με τον υπόλοιπο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, η αγορά ενός μετασχηματιστή βασίζεται όχι στις εκτεταμένες δοκιμές τύπου αλλά σε μία σειρά δοκιμών και μετρήσεων που θα εκτελεστούν στον ίδιο το μετασχηματιστή μετά την κατασκευή του, οι οποίες θα επιβεβαιώσουν ή θα απορρίψουν τα στοιχεία της μελέτης του.

Οι δοκιμές καταλληλόλητας του μετασχηματιστή ισχύος διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Δοκιμές σειράς, στις οποίες υποβάλλονται όλοι οι μετασχηματιστές που κατασκευάζονται
- Δοκιμές τύπου, στις οποίες υποβάλλεται ένας μετασχηματιστής ή ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα του ίδιου τύπου
- Ειδικές δοκιμές, στις οποίες υποβάλλεται συνήθως σε έναν μετασχηματιστή μετά από συμφωνία πελάτη και κατασκευαστή

2.2 Δοκιμές σειράς Τριφασικών Μετασχηματιστών Ισχύος

Πριν την εκτέλεση των δοκιμών σειράς έχει υπολογιστεί από τον κατασκευαστή του μετασχηματιστή τόσο το άθροισμα των μετρούμενων απωλειών εν κενώ και υπό φορτίο όσο και το αθροιστικό σφάλμα αυτών, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60076-19:2013. [50]

2.2.1. Μέτρηση της ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 11.2 του IEC 60076-1:2011 [42]. Η εξισορρόπηση της θερμοκρασίας μεταξύ της μέσης θερμοκρασίας του λαδιού και της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων επιτυγχάνεται αφού έχει παραμείνει για τουλάχιστον τρεις ώρες εκτός λειτουργίας ο μετασχηματιστής και στη συνέχεια εκτελείται η μέτρηση τροφοδοτώντας με συνεχές ρεύμα τα τυλίγματα ανά φάση του μετασχηματιστή. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας προκύπτει με συνυπολογισμό της θερμοκρασίας στο πάνω και στο κάτω τμήμα του λαδιού.

2.2.2. Μέτρηση του λόγου των τάσεων και έλεγχος της συνδεσμολογίας των τυλιγμάτων (Διανυσματική ομάδα)

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 11.3 του IEC 60076-1:2011 [42]. Στο πλαίσιο της δοκιμής αυτής γίνεται έλεγχος της συνδεσμολογίας των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή και μετράται ο λόγος των τάσεων για κάθε λήψη του μηχανισμού αλλαγής λήψεων υπό φορτίο.

2.2.3. Μέτρηση της σύνθετης αντίστασης βραχυκυκλώσεως και των απωλειών υπό φορτίο

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 11.4 του IEC 60076-1:2011 [42]. Η μέτρηση αυτή γίνεται στην ονομαστική συχνότητα, εφαρμόζοντας μια τάση ημιτονοειδούς μορφής στο υπό μέτρηση τύλιγμα, βραχυκυκλώνοντας το δεύτερο τύλιγμα. Η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως πρέπει να είναι τουλάχιστον 15.2% στα 40MVA και 19% στα 50MVA σε κάθε λήψη του μηχανισμού αλλαγής λήψεων υπό φορτίο. Το ρεύμα που θα διαρρέει το υπό δοκιμή τύλιγμα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον το μισό του αντίστοιχου ονομαστικού ρεύματος του τυλίγματος αυτού για τη συγκεκριμένη λήψη. Οι μετρούμενες τιμές ανάγονται στη θερμοκρασία των 75°C, σύμφωνα με το IEC 60076-1:2011 [42] προκειμένου να υπολογιστούν οι απώλειες υπό φορτίο.

2.2.4. Μέτρηση ρεύματος μαγνητίσεως και απωλειών εν κενώ στο 90%, 100% και στο 110% της ονομαστικής τάσης

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 11.5 του IEC 60076-1:2011 [42]. Η δοκιμή αυτή προηγείται της διηλεκτρικής δοκιμής και της ανύψωσης θερμοκρασίας και εκτελείται εφαρμόζοντας την ονομαστική τάση στην ονομαστική συχνότητα στο πρωτεύον ή δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή, στην κύρια λήψη του μηχανισμού αλλαγής λήψεων υπό φορτίο, έχοντας το άλλο τύλιγμα ανοιχτοκυκλωμένο. Η ρύθμιση της εφαρμοζόμενης τάσης επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο βολτομέτρων, τα οποία συνδέονται παράλληλα. Το ένα βολτόμετρο μετράει την ενεργό τιμή της τάσης (V) ενώ το άλλο τη μέση τιμή της τάσης (V'). Εάν η διαφορά των τιμών των δύο ανωτέρω ενδείξεων είναι μικρότερη του 3% τότε η κυματομορφή της τάσης εφαρμογής κρίνεται αποδεκτή. Λαμβάνοντας υπόψη τη μέση τιμή των μετρήσεων των οργάνων για τις τρεις φάσεις μετράται συγχρόνως η ενδεικνύομενη τιμή του ρεύματος μαγνήτισης με τις απώλειες. Οι απώλειες εν κενώ υπολογίζονται μέσω της σχέσης:

$$P_0 = P_m \left(1 + \frac{V' - V}{V'} \right)$$

2.2.5. Προσδιορισμός της χωρητικότητας μεταξύ τυλιγμάτων-γης και μεταξύ των τυλιγμάτων και μέτρηση του συντελεστή απωλειών (εφδ)

Η μέτρηση των χωρητικοτήτων και του συντελεστή απωλειών εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 11.1.2.2 του IEC 60076-1:2011 [42].

Οι μετρήσεις εκτελούνται με τάση δοκιμής στα 10kV για τις ακόλουθες συνδέσεις:

α. Υψηλή προς γειωμένη χαμηλή (CH + CHL)

β. Υψηλή και χαμηλή προς γη (CH + CL)

γ. Χαμηλή προς γειωμένη υψηλή (CL + CHL)

Αποδεκτή τιμή για τον συντελεστή απωλειών, εφδ, είναι $\leq 0,5\%$ στους 20°C.

2.2.6. Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 11.1.2.2 του IEC 60076-1:2011 [42]. Οι μετρήσεις διεξάγονται για τρεις χρονικές περιόδους, των 15 δευτερολέπτων, των 60 δευτερολέπτων και των 10 λεπτών, με τον προσδιορισμό των συντελεστών DAR (ο λόγος των μετρήσεων των 60s προς 15s) και PI (ο λόγος των μετρήσεων των 10min προς 1min), με τάση δοκιμής τα 5kV, για τις ακόλουθες συνδέσεις:

α. Υψηλή προς γειωμένη χαμηλή

β. Χαμηλή προς γειωμένη υψηλή

γ. Υψηλή και χαμηλή προς γη

δ. Υψηλή προς χαμηλή

Επίσης, εκτελείται με τάση δοκιμής τα 2,5kV, μέτρηση της αντίστασης μόνωσης μεταξύ του πυρήνα και του δοχείου του μετασχηματιστή, του μεταλλικού πλαισίου του πυρήνα και του δοχείου καθώς και του πυρήνα και του μεταλλικού του πλαισίου του σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 11.12 του IEC 60076-1:2011 [42].

2.2.7. Μέτρηση απόκρισης συχνότητας

Η μέτρηση απόκρισης συχνότητας εκτελείται δύο φορές στο μετασχηματιστή σύμφωνα με το IEC 60076-18:2012 [49], αρχικά ενώ είναι γεμάτος με λάδι και έπειτα αφού είναι κενός ελαίου, μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών σειράς και των ειδικών δοκιμών. Η μέτρηση πραγματοποιείται σε κάθε τύλιγμα και φάση του μετασχηματιστή. Τα αποτελέσματα της μέτρησης είναι διαγράμματα Bode, με εύρος συχνοτήτων από 20 Hz έως 2 MHz.

2.2.8. Δοκιμή στεγανότητας του δοχείου του μετασχηματιστή

Το δοχείο του μετασχηματιστή με το καπάκι του, εντός των οποίων βρίσκεται το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή με την κατάλληλη ποσότητα λαδιού δοκιμάζεται για 24 ώρες σε πίεση τουλάχιστον 0,3 bar μεγαλύτερης της πίεσης του λαδιού, η οποία έχει μετρηθεί, σύμφωνα και με τις προβλέψεις της παραγράφου 11.8 του IEC 60076-1:2011. [42]

2.2.9. Δοκιμές λαδιού μετασχηματιστή

Για τον έλεγχο της κατάστασης του μονωτικού ελαίου μετά τη λήψη δείγματος από τον μετασχηματιστή, εκτελούνται βασικές μετρήσεις και δοκιμές:

- α. Διηλεκτρική δοκιμή της τάσης διάσπασης (≥ 220 kV/cm) σύμφωνα με το IEC 60156:2018 [55].
- β. Διηλεκτρικός συντελεστής απωλειών (εφδ) σύμφωνα με το IEC 60247:2004 [54].
- γ. Ανάλυση διαλυμένων αερίων (Dissolved gas in oil analysis) πριν την έναρξη των δοκιμών στο μετασχηματιστή καθώς και με το πέρας του συνόλου των δοκιμών σύμφωνα με το IEC 60599:2007 [53].
- δ. Ύπαρξη διαβρωτικού θείου σύμφωνα με DIN 51353:1985, με αρνητικό αποτέλεσμα (μη διαβρωτικό) [64].
- ε. Ύπαρξη δυνητικά διαβρωτικού θείου σύμφωνα με IEC 62535:2008, με αρνητικό αποτέλεσμα (μη διαβρωτικό) καθώς και PCB's [56].

2.2.10. Διηλεκτρικές δοκιμές

2.2.10.1. Δοκιμή αντοχής σε κρουστική τάση (LI TEST-LIN TEST)

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 13.2 του IEC 60076-3:2013 [46]. Σε κάθε ακροδέκτη των τυλιγμάτων Υ.Τ. και Χ.Τ. όπως και για το τύλιγμα του ουδετέρου, εάν υπάρχει, εκτελείται αυτή η δοκιμή, με την ακόλουθη σειρά εφαρμογής:

Τύλιγμα Υ.Τ.

1. Εφαρμόζεται ένα μειωμένο κύμα κρουστικής τάσης 50% - 70% του πλήρους κύματος (375kV – 525kV), μορφής 1,2/50 μs.
2. Εφαρμόζονται τρία διαδοχικά πλήρη κύματα κρουστικής τάσης 750kV μορφής 1,2/50μs.

Τύλιγμα Χ.Τ.

1. Εφαρμόζεται ένα μειωμένο κύμα κρουστικής τάσης 50% - 70% του πλήρους κύματος (72,5kV – 101,5kV), μορφής 1,2/50μs.
2. Εφαρμόζονται τρία διαδοχικά πλήρη κύματα κρουστικής τάσης 145kV μορφής 1,2/50μs.

Στο τύλιγμα του ουδετέρου, η διάρκεια του μετώπου του κύματος εφαρμογής δεν πρέπει να ξεπερνά τα 13 μs.

2.2.10.2. Δοκιμή αντοχής σε εφαρμοζόμενη τάση (AV TEST)

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 10 του IEC 60076-3:2013 [46]. Η δοκιμή αυτή εκτελείται με την εφαρμογή μίας μονοφασικής τάσης δοκιμής, κατά μέγιστη προσέγγιση ημιτονοειδούς κυματομορφής και συχνότητας τουλάχιστον 40 Hz. Η εφαρμοζόμενη τάση είναι μειωμένη στο 1/3 της τιμής της τάσης δοκιμής τόσο κατά την

έναρξη όσο και κατά τη λήξη της δοκιμής. Η πλήρης τάση δοκιμής εφαρμόζεται για 1 λεπτό μεταξύ των άκρων των υπό δοκιμή τυλιγμάτων του μετασχηματιστή. Η τάση δοκιμής στα τυλίγματα Υ.Τ. είναι 325kV με τα τυλίγματα Χ.Τ. και του ουδετέρου καθώς και το δοχείο του μετασχηματιστή να είναι βραχυκυκλωμένα και γειωμένα. Αντιστοίχως, η τάση δοκιμής στα τυλίγματα Χ.Τ. είναι 50kV με τα τυλίγματα Υ.Τ. και το δοχείο του μετασχηματιστή να είναι βραχυκυκλωμένα και γειωμένα.

2.2.10.3. Δοκιμή επαγόμενης τάσης με μέτρηση μερικών εκφορτίσεων (IVW test και IVPD test)

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 12.2.2 του IEC 60076-3:2000 [45]. Η δοκιμή αυτή γίνεται με την εφαρμογή εναλλασσόμενης πολικής τάσης ημιτονοειδούς μορφής και συχνότητας έως 100 Hz στις τρεις φάσεις της Χ.Τ. του μετασχηματιστή με τον μηχανισμό αλλαγής λήψεων ευρισκόμενο στη θέση 1 (161.250/21kV) και τον ακροδέκτη του ουδετέρου γειωμένο. Οι ακροδέκτες της Υ.Τ. είναι ανοιχτοκυκλωμένοι.

Σε περίπτωση που η συχνότητα της τάσης εφαρμογής ξεπερνά τα 100 Hz, τότε ο χρόνος δοκιμής της επαγόμενης τάσης (σε δευτερόλεπτα), δίνεται από τη σχέση : $120 \times \left(\frac{f_r}{f_t}\right)$, όπου f_r είναι η ονομαστική συχνότητα και f_t η συχνότητα δοκιμής, αλλά δεν πρέπει να είναι μικρότερος των 15 δευτερολέπτων.

Η εφαρμογή της επαγόμενης τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος μικρής διάρκειας γίνεται ως ακολούθως:

- α. Στην έναρξη της δοκιμής εφαρμόζεται τάση, η οποία δεν ξεπερνά το 1/3 των 75 kV.
- β. Ανύψωση της τάσης στο 110% της ονομαστικής τάσης (187kV) και παραμονή στο επίπεδο αυτό για 5 λεπτά.
- γ. Ανύψωση στα 225kV και παραμονή στο επίπεδο αυτό για 5 λεπτά.
- δ. Ανύψωση στα 325kV και παραμονή στο επίπεδο αυτό για το χρόνο δοκιμής επαγόμενης τάσης.
- ε. Αμέσως μετά, μείωση στο επίπεδο των 225kV και παραμονή στο επίπεδο αυτό για 5 λεπτά.
- στ. Μείωση στο επίπεδο του 110% της ονομαστικής τάσης (187kV) και παραμονή στο επίπεδο αυτό για 5 λεπτά.
- ζ. Μείωση στο επίπεδο του 1/3 των 75kV πριν τη λήξη της δοκιμής.

Οι μερικές εκφορτίσεις παρακολουθούνται σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

Η δοκιμή επαγόμενης τάσης με μέτρηση μερικών εκφορτίσεων θεωρείται επιτυχής εάν:

- Δε συμβεί κατάρρευση της τάσης δοκιμής.
- Το συνεχές επίπεδο των εμφανών εκφορτίσεων στα 225 kV στο δεύτερο 5λεπτο, δεν υπερβεί τα 300 pC
- Οι μερικές εκφορτίσεις δεν παρουσιάζουν συνεχή αυξητική τάση.
- Το συνεχές επίπεδο των εμφανών εκφορτίσεων δεν υπερβεί τα 100 pC στα 187kV.

Εφόσον δεν υπάρχει κατάρρευση τάσης αλλά υπάρχει αποτυχία στα παραπάνω όρια των μερικών εκφορτίσεων, αυτό δε συνεπάγεται και άμεση απόρριψη και αστοχία του μετασχηματιστή. Στην περίπτωση αυτή διεξάγονται επιπρόσθετες έρευνες, όπως αυτές αναφέρονται και στο Παράρτημα Α του IEC 60076-3:2013 [46].

2.2.11. Δοκιμή μόνωσης βοηθητικών καλωδιώσεων (AuxW test)

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 9 του IEC 60076-3:2013 [46]. Τα κυκλώματα των βοηθητικών καλωδιώσεων που χρησιμοποιούνται για σήμανση και έλεγχο, δοκιμάζονται με εναλλασσόμενη τάση 2kV ως προς γη για 1 λεπτό.

2.2.12. Δοκιμή λειτουργίας του μηχανισμού αλλαγής λήψεων υπό φορτίο

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 11.7 του IEC 60076-1:2011 [42]. Έχοντας τοποθετήσει και θέσει σε πλήρη λειτουργία τον μηχανισμό αλλαγής λήψεων τάσεων υπό φορτίο εκτελούνται οι ακόλουθες λειτουργίες.

- α. Οκτώ (8) πλήρεις κύκλοι λειτουργίας (σε ένα πλήρη κύκλο λειτουργίας ο επιλογέας πηγαίνει από τη χαμηλότερη λήψη μέχρι την υψηλότερη και επιστρέφει) με τον μετασχηματιστή απενεργοποιημένο.
- β. Ένας (1) πλήρης κύκλος λειτουργίας με τον μετασχηματιστή απενεργοποιημένο και τη βοηθητική τάση τροφοδοσίας στο 85% της ονομαστικής.
- γ. Ένας (1) πλήρης κύκλος λειτουργίας με τον μετασχηματιστή ενεργοποιημένο χωρίς φορτίο, στην ονομαστική τάση και ονομαστική συχνότητα.
- δ. Δέκα (10) λειτουργίες αλλαγής λήψεων κατά μήκος και σε εύρος δύο (2) βημάτων προς κάθε πλευρά, με αφετηρία τη μεσαία λήψη, με τα τυλίγματα της Υ.Τ. ή της Χ.Τ. του μετασχηματιστή βραχυκυκλωμένα και αντίστοιχα τα άλλα τυλίγματα της Χ.Τ. ή Υ.Τ. να έχουν το ονομαστικό ρεύμα.

Επιπλέον, ενώ ο μηχανισμός αλλαγής λήψεων υπό φορτίο είναι πλήρως συναρμολογημένος στον μετασχηματιστή, εκτελείται δοκιμή αντοχής σε τάση συχνότητας δικτύου για τα βοηθητικά κυκλώματα.

2.3 Δοκιμές τύπου Τριφασικών Μετασχηματιστών Ισχύος

2.3.1 Δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο IEC 60076-2:2011 [44]. Η δοκιμή αυτή εκτελείται πριν τις διηλεκτρικές δοκιμές σειράς, σε δύο στάδια:

1. Εφαρμόζεται μια τάση δοκιμής τέτοια ώστε η μετρούμενη ενεργός ισχύς να είναι ίση με τις συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή. Επίσης, προκειμένου να καλύπτονται οι απώλειες κενού, το ρεύμα δοκιμής πρέπει να είναι μεγαλύτερο του ονομαστικού. Η δοκιμή ολοκληρώνεται όταν ο ρυθμός μεταβολής της ανύψωσης

θερμοκρασίας στο ανώτερο τμήμα του λαδιού πέσει κάτω από 1°C ανά ώρα και παραμείνει σ' αυτή την κατάσταση για 3 ώρες.

2. Όταν επιβεβαιωθεί ότι η θερμική ανύψωση στο ανώτερο τμήμα του λαδιού δεν ξεπερνά τον 1°C, τότε εφαρμόζεται το ονομαστικό ρεύμα του υπό δοκιμή τυλίγματος για 1 ώρα. Μετά την ολοκλήρωση της μίας ώρας, αποσυνδέεται απότομα η παροχή και μετράται η αντίσταση του τυλίγματος ενώ ο υπολογισμός γίνεται προσεγγιστικά με τη γραφική μέθοδο.

Ο σκοπός της δοκιμής αυτής είναι να αποδείξει:

- α. Την ανύψωση θερμοκρασίας στο ανώτερο τμήμα του λαδιού του μετασχηματιστή, σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης και στην περίπτωση συνολικών απωλειών, απώλειες υπό φορτίο και απώλειες εν κενώ.
- β. Την μέση ανύψωση θερμοκρασίας του τυλίγματος στο ονομαστικό ρεύμα.

Για την εκτέλεση της δοκιμής πρέπει να είναι διαθέσιμες δύο εσοχές μέτρησης της θερμοκρασίας του λαδιού στο καπάκι του δοχείου του μετασχηματιστή καθώς και μία εσοχή στην είσοδο και μία στην έξοδο του λαδιού των ψυγείων.

2.3.2 Προσδιορισμός στάθμης θορύβου

Η μέτρηση εκτελείται σύμφωνα με την παράγραφο 11 του IEC 60076-10:2016 [48]. Η μέτρηση αυτή εκτελείται στην ονομαστική τάση και συχνότητα, με το τέλος της δοκιμής ανύψωσης θερμοκρασίας και κοντά στη θερμοκρασία λειτουργίας του μετασχηματιστή.

2.3.3 Μέτρηση ισχύος ανεμιστήρων

Η μέτρηση εκτελείται σύμφωνα με την παράγραφο 11.1.3 του IEC 60076-1:2011 [42]. Η μέτρηση αυτή εκτελείται ταυτόχρονα με την δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας. Η μέτρηση γίνεται προκειμένου να εξακριβωθούν οι απαιτήσεις ισχύος του συστήματος ψύξης του μετασχηματιστή, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στις συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή.

2.4 Ειδικές δοκιμές Τριφασικών Μετασχηματιστών Ισχύος

2.4.1 Δοκιμή κεραυνικής κρουστικής τάσης αποκομμένου κύματος στους ακροδέκτες της γραμμής (LIC)

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 13.3 του IEC 60076-3:2013 [46]. Η διάταξη που χρησιμοποιείται σε αυτή τη δοκιμή είναι η ίδια με αυτή της δοκιμής κρουστικού κύματος απλά προστίθεται το διάκενο των σφαιρών αποκοπής.

Κατά τη δοκιμή ανοχής σε πλήρες κρουστικό κύμα σε κάθε τύλιγμα του μετασχηματιστή είναι δυνατό να παρεμβληθεί η εφαρμογή αποκομμένου κύματος 1.2/50 μsec με πλάτος 10% μεγαλύτερο του αντίστοιχου κρουστικού κύματος.

Η σειρά της διηλεκτρικής αυτής δοκιμής διαμορφώνεται ως εξής:

- Εφαρμόζεται 1 μειωμένο κύμα κρουστικής τάσης μορφής 1.2/50 μsec (50% \div 70% του πλήρους κύματος).
- Εφαρμόζεται 1 πλήρες κρουστικό κύμα μορφής 1.2/50 μsec .
- Εφαρμόζονται 2 πλήρη αποκομμένα κύματα μορφής 1.2/50 μsec .
- Εφαρμόζονται 2 πλήρη κύματα μορφής 1.2/50 μsec .

Ο χρόνος αποκοπής του αποκομμένου κύματος είναι από 2 μsec έως 6 μsec .

2.4.2 Δοκιμή εσωτερικής κρουστικής τάσης στους ακροδέκτες της γραμμής (SI - Switching impulse test)

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 14 του IEC 60076-3:2013 [46]. Η δοκιμή αυτή γίνεται σε κάθε ακροδέκτη Υ.Τ. του μετασχηματιστή, με τον ακροδέκτη ουδετέρου της Χ.Τ. γειωμένο απευθείας ή μέσω μικρής σύνθετης αντίστασης. Ο μηχανισμός αλλαγής λήψης βρίσκεται στη θέση 1, προκειμένου να μεταφέρεται η υψηλότερη δυνατή υπέρταση χειρισμών στον αντίστοιχο ακροδέκτη Χ.Τ. Στον υπό δοκιμή ακροδέκτη Υ.Τ. εφαρμόζεται απευθείας η τάση δοκιμής ενώ οι άλλοι δύο ακροδέκτες Υ.Τ. είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους αλλά όχι γειωμένοι.

Κατά την δοκιμή, αρχικά εφαρμόζεται ένας παλμός μειωμένης κρουστικής τάσης 50% \div 70% των 750kV και στη συνέχεια 3 πλήρη κύματα των 750kV. Το εφαρμοζόμενο κύμα μέχρι την κορυφή έχει χρόνο τουλάχιστον 100 μs , χρόνο τουλάχιστον 200 μs για τάση άνω του 90% της τάσης δοκιμής και χρόνο τουλάχιστον 1000 μs έως το μηδέν.

Σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται οι κυματομορφές της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης και της έντασης ουδετέρου.

2.4.3 Δοκιμή αντοχής εναλλασσόμενου ρεύματος στους ακροδέκτες της γραμμής (Line terminal AC withstand test - LTAC)

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 12 του IEC 60076-3:2013 [46]. Η δοκιμή αυτή εκτελείται σε κάθε φάση χωριστά με τη σύνδεση των τριών φασικών τυλιγμάτων και εφαρμόζοντας μια μονοφασική τάση προκειμένου στον υπό δοκιμή ακροδέκτη Υ.Τ. να παραχθεί μια επαγόμενη τάση προς γη ίση με 325kV. Ο μηχανισμός αλλαγής λήψης βρίσκεται σε θέση τέτοια έτσι ώστε να παραχθεί μια τάση όσο το δυνατόν πιο κοντά στα 50kV στον αντίστοιχο ακροδέκτη Χ.Τ..

2.4.4 Μέτρηση αρμονικών του ρεύματος λειτουργίας εν κενώ στην ονομαστική τάση

Η μέτρηση των αρμονικών του ρεύματος κενής λειτουργίας εκτελείται σύμφωνα με το IEC 60076-1:2000 [43]. Η μέτρηση αυτή γίνεται και για τις τρεις φάσεις του μετασχηματιστή και το μέγεθος των αρμονικών δηλώνεται ως ποσοστό της θεμελιώδους συνιστώσας των αρμονικών του ρεύματος μαγνήτισης.

Η μέτρηση αυτή γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και η μέτρηση των απωλειών και του ρεύματος κενής λειτουργίας και εκτελείται κατά κανόνα αμέσως μετά τη μέτρηση αυτή.

Η τάση τροφοδότησης είναι ημιτονοειδής και η μέτρηση εκτελείται στο 90, 100 και 110% της ονομαστικής τάσης του μετασχηματιστή. Ο αναλυτής ρεύματος καταγράφει αυτόματα όλο το φάσμα των αρμονικών και αποδίδει έτοιμα τα ποσοστά. Το πρότυπο δεν αναφέρει κάποιο όριο αποδοχής αλλά η γνώση των αρμονικών των παλιότερων μετασχηματιστών είναι χρήσιμη για την ρύθμιση των προστατευτικών ηλεκτρονόμων, ειδικότερα εάν χρησιμοποιούνται ακόμη συμβατικοί ηλεκτρομηχανικοί ηλεκτρονόμοι.

2.4.5 Μέτρηση επαγωγικής αντίδρασης μηδενικής ακολουθίας

Η μέτρηση εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 11.6 του IEC 60076-1:2011 [42]. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιείται στους ακροδέκτες της Χ.Τ. των τυλιγμάτων συνδεδεμένων σε αστέρα και στον ακροδέκτη του ουδετέρου σε ονομαστική συχνότητα. Η επαγωγική αντίδραση μηδενικής ακολουθίας εκφράζεται σε Ohms ανά φάση και δίνεται από τη σχέση: $3 \cdot V/I$, όπου V είναι η τάση δοκιμής και I είναι το ρεύμα δοκιμής.

2.4.6 Μέτρηση της ανύψωσης θερμοκρασίας του θερμότερου σημείου τυλίγματος

Η μέτρηση εκτελείται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 11.1.4 του IEC 60076-1:2011 [42]. Η μέτρηση αυτή εκτελείται ταυτόχρονα με τη δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας

2.5 Δοκιμές Μονωτικού Ελαίου Μετασχηματιστών Ισχύος

Τα μονωτικά έλαια που χρησιμοποιούνται σήμερα στους μετασχηματιστές ισχύος από τους Διαχειριστές του Δικτύου Διανομής και Μεταφοράς προέρχονται αποκλειστικά από κλάσματα πετρελαίου. Τα έλαια αυτά εκτός από τα βασικά έλαια, τα οποία είναι ναφθενικής βάσης, εμπεριέχουν και πρόσθετα ώστε το έλαιο να έχει τα επιθυμητά επίπεδα στα φυσικοχημικά του χαρακτηριστικά σύμφωνα με τις απαιτήσεις του IEC-60296:2012. [57]

Σύμφωνα με την τεχνική περιγραφή ΔΕΕΔ-ΔΔ-394 / 09.2018 [27] της εταιρείας ΔΕΔΔΗΕ (μονωτικά έλαια μετασχηματιστών ισχύος ναφθενικής βάσης με ανασταλτικά), τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των ελαίων των μετασχηματιστών ισχύος πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις του παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 1: Αποδεκτές τιμές των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των μονωτικών ελαίων των μετασχηματιστών ισχύος

Ιδιότητα – (ελάχιστο, μέγιστο)	Μέθοδος Δοκιμής	Μονάδες Μέτρησης	Αποδεκτές Τιμές
1. Κινηματικό Ιξώδες στους 40 °C, max	ISO 3104	mm ² /sec	12
2. Κινηματικό Ιξώδες στους -30 °C, max	ISO 3104	mm ² /sec	1800
3. Κινηματικό Ιξώδες στους 40 °C, max	IEC 61868	mm ² /sec	2500
4. Σημείο Ροής, max	ISO 3016	°C	-40
5. Περιεχόμενο Νερό (στα βαρέλια), max	IEC 60814	mg/kg	30
6. Διηλεκτρική Αντοχή (BDV), min	IEC 60156	kV	30 70 (μετά από επεξεργασία)
7. Πυκνότητας στους 20°C, max	ISO 3675 ή ISO 12185	g/ml	0,895
8. Συντελεστής Διηλεκτρικών Απωλειών (DDF) στους 90 °C, max	IEC 60247 ή IEC 61620	-	0,005
9. Όψη	IEC 60422		Καθαρό χωρίς αιωρούμενα και καθιζάνοντα σωματίδια
10. Οξύτητα, max	IEC 62021-1 ή 62021-2	mg KOH/g	0,01
11. Διεπιφανειακή Τάση στους 25 °C, min	EN 14210 or ASTM D971	mN/m	40
12. Ολικό Περιεχόμενο Θείου, max	IP 373 ή ISO 14596	%	0,05
13. Διαβρωτικό Θείο	DIN 51353	-	Μη Διαβρωτικό
14. Εν δυνάμει Διαβρωτικό Θείο	IEC 62535	-	Μη Διαβρωτικό
15. Αντιοξειδωτικά Πρόσθετα δι-βενζυλ-δι-σουλφίδιο (DBDS)	IEC 62697-1	mg/kg	Μη Ανιχνεύσιμα (<5)
16. Αντιοξειδωτικά Πρόσθετα	IEC 60666	%	0,08-0,4
17. Αντοχή στην Οξείδωση	IEC 61125: 1992 (method C) Test Duration: 500 h		
- Ολική Οξύτητα	1.9.4 of IEC 61125: 1992	mg KOH/g	0,3
- Λάσπη	1.9.1 of IEC 61125: 1992	%	0,05
- Συντελεστής Διηλεκτρικών Απωλειών (DDF) στους 90°C	1.9.4 of IEC 61125, Amendment 1 (2004) +IEC 60247		0,050
18. Περιεχόμενη 2-FAL και σχετικές Ενώσεις	IEC 61198	mg/kg	Μη Ανιχνεύσιμο για κάθε ένωση (<0,05)
19. Τάση Σχηματισμού Αερίων, max	IEC 60628:1985, Method A	mm ³ /min	+5
20. Σημείο Ανάφλεξης, min	ISO 2719	°C	135
21. Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες (PCA), max	IP 346	%	3
22. Περιεκτικότητα PCB's	IEC 61619	-	Μη Ανιχνεύσιμα (<2mg/kg)
23. Κατανομή Ανθράκων	ASTM D2140	%	Aromatic/Naphthenic/Paraffinic

3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναλυτική περιγραφή των μετρήσεων που εκτελούνται κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της επισκευής ενός μετασχηματιστή ή για την ανάγκη εντοπισμού μιας βλάβης, όπως αυτές καταγράφονται στο σύγγραμμα του Μηχανολόγου – Ηλεκτρολόγου κ. Σαμοΐλη Βασίλη «Μετασχηματιστές – Παρακολούθηση, Διαγνωστική Εκτίμηση της Λειτουργικής Κατάστασης» [22].

3.1 Μετρήσεις σε Μετασχηματιστές μετά από Επισκευή ή Επιθεώρηση του Ενεργού Μέρους του Μετασχηματιστή

Κατά την φάση της επισκευής ενός μετασχηματιστή καθώς και μετά την ολοκλήρωσή αυτής εκτελείται μια σειρά μετρήσεων προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι δεν συνέβη κάποιο σφάλμα κατά την διαδικασία της επισκευής του ή κατά την συναρμολόγησή του.

Οι μετρήσεις που εκτελούνται στο μετασχηματιστή ως μετρήσεις επιβεβαίωσης επιτυχημένης εκτέλεσης ανακαίνισης ή επισκευής, καταγράφονται και αποτελούν πλέον τις «τιμές αναφοράς» για τις μετρήσεις που θα ακολουθήσουν και θα εκτελεστούν τόσο σε μελλοντικές προγραμματισμένες συντηρήσεις όσο και σε περίπτωση εκδήλωσης κάποιου σφάλματος στο μετασχηματιστή.

Οι μετρήσεις, που εκτελούνται σε ένα μετασχηματιστή, που έχει επισκευαστεί, ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. Αρχικές μετρήσεις
2. Ενδιάμεσες μετρήσεις
3. Τελικές μετρήσεις

3.1.1 Αρχικές μετρήσεις

Οι αρχικές μετρήσεις εκτελούνται όταν ο μετασχηματιστής βρίσκεται εκτός λειτουργίας για προγραμματισμένη συντήρηση ή επιθεώρηση ή στην περίπτωση που έχει υποστεί εσωτερική βλάβη. Οι αρχικές μετρήσεις συνήθως εκτελούνται πριν την αποσυναρμολόγηση του μετασχηματιστή και είναι κυρίως ανιχνευτικές, δηλαδή αποσκοπούν στον προσδιορισμό της φύσης της βλάβης, όταν φυσικά συνέβη βλάβη, καθώς και στον προσδιορισμό της κατάστασης της μόνωσής του από πλευράς ξήρανσης.

Οι αρχικές αυτές μετρήσεις είναι:

- Μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού σε όλες τις θέσεις του μηχανισμού αλλαγής λήψεως υπό φορτίο
- Μέτρηση της ωμικής αντίστασης τυλιγμάτων με συνεχές ρεύμα
- Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης
- Προσδιορισμός της χωρητικότητας μεταξύ τυλιγμάτων-γης και μεταξύ των τυλιγμάτων και μέτρηση του συντελεστή απωλειών (εφδ) με τη χρήση κατάλληλης συσκευής, η οποία παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα με τάση μέχρι τουλάχιστον 10kV

- Μετρήσεις στο μονωτικό λάδι, όπως διηλεκτρική αντοχή, εφδ, βαθμό εξουδετέρωσης, περιεχόμενη υγρασία και χρώμα

3.1.2 Ενδιάμεσες μετρήσεις

Οι ενδιάμεσες μετρήσεις εκτελούνται όταν ο μετασχηματιστής έχει αποσυναρμολογηθεί και βρίσκεται σε εξέλιξη η επισκευή του. Η έκταση των μετρήσεων εξαρτάται από την έκταση της επισκευής.

Στην περίπτωση που η βλάβη δεν είναι μεγάλη και δεν χρειάζεται να αποσυναρμολογηθεί το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή, οι ενδιάμεσες μετρήσεις που εκτελούνται είναι:

- Μέτρηση της αντοχής των ως άνω κοχλιών σε εφαρμοζόμενη τάση
- Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης των κοχλιών σύσφιξης του πυρήνα και των ζυγωμάτων (άνω και κάτω)
- Μέτρηση των μονωτήρων διέλευσης με εφαρμοζόμενη τάση

Στην περίπτωση που αποσυναρμολογηθεί το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή, αυξάνονται οι ενδιάμεσες μετρήσεις και εκτελείται μέρος των αρχικών μετρήσεων.

3.1.3 Τελικές μετρήσεις

Στους μετασχηματιστές που αποσυναρμολογήθηκαν, επισκευάστηκαν και συναρμολογήθηκαν ξανά, εκτελούνται οι παρακάτω μετρήσεις:

- Έλεγχος της συνδεσμολογίας των τυλιγμάτων (Διανυσματική ομάδα)
- Μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού
- Μέτρηση της ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων
- Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης
- Προσδιορισμός της χωρητικότητας μεταξύ τυλιγμάτων-γης και μεταξύ των τυλιγμάτων και μέτρηση του συντελεστή απωλειών (εφδ) με τη χρήση κατάλληλης συσκευής, η οποία παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα με τάση μέχρι τουλάχιστον 10kV
- Μέτρηση των απωλειών χαλκού και της τάσης βραχυκύκλωσης (Ανεξάρτητη πηγή Εναλλασσόμενου Ρεύματος με χρήση μειωμένης έντασης)
- Μέτρηση των απωλειών εν κενώ και του ρεύματος εν κενώ (Διέγερση πυρήνα με ανεξάρτητη πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος)
- Μετρήσεις στο μονωτικό λάδι του μετασχηματιστή

Πέραν των προαναφερόμενων μετρήσεων, σε ορισμένες περιπτώσεις εκτελούνται και οι ακόλουθες μετρήσεις:

- Ανάλυση απόκρισης συχνότητας με σάρωση συχνοτήτων
- Μέτρηση της υγρασίας στη στερεά μόνωση με μεθόδους διηλεκτρικής απόκρισης όπως RVM, PDC, FDS
- Μέτρηση των μερικών εκκενώσεων με ακουστική εκπομπή
- Θερμογραφική ανάλυση

3.2 Μετρήσεις στο μετασχηματιστή στη θέση λειτουργίας του

Στους εν λειτουργία μετασχηματιστές εκτελείται μια σειρά μετρήσεων βάσει σχετικού προγράμματος συντήρησής του, οι οποίες αποσκοπούν στην παρακολούθηση της κατάστασης του μονωτικού συστήματος, του ηλεκτρομαγνητικού και μαγνητικού συστήματος, των παρελκομένων κ.λπ. καθώς και στην εκτίμηση της κατάστασής του και στην διαχείριση του υπολειπόμενου χρόνου ζωής του.

Η ανάγκη που οδηγεί στην εκτέλεση των μετρήσεων στο μετασχηματιστή επί τόπου στη θέση λειτουργίας του είναι κυρίως:

- Η δημιουργία «τιμών αναφοράς»
- Ο προσδιορισμός του μεγέθους της επιδείνωσης του μονωτικού ή του ηλεκτρομαγνητικού ή του μηχανικού συστήματος του μετασχηματιστή κατά το διάστημα μεταξύ των συντηρήσεων
- Η οσμή ή ο θόρυβος, που οφείλεται σε τόξα ή στο θολό λάδι του μετασχηματιστή
- Ο θόρυβος είναι μεγαλύτερος από το κανονικό
- Το ελεύθερο νερό στο λάδι
- Η υπερθέρμανση και η υπερφόρτιση
- Η ταχεία μεταβολή του χρώματος του λαδιού
- Η αποθήκευση ενός μετασχηματιστή για να ελεγχθεί η καλή κατάστασή του, ώστε να δικαιολογείται η αποθήκευσή του
- Η χρησιμοποίηση ενός αποθηκευμένου μετασχηματιστή για να ελεγχθεί η υφιστάμενη κατάσταση του
- Η μετακίνηση του μετασχηματιστή σε νέα θέση για να ελεγχθεί μήπως έχει προκληθεί κάποια μετατόπιση στο εσωτερικό κατά τη μετακίνηση

Οι βασικές μετρήσεις εκτελούνται στο μετασχηματιστή στη θέση λειτουργίας του με τη χρήση κατάλληλων συσκευών μέτρησης, οι οποίες και περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο και ερμηνεύουν τα αποτελέσματα μέσω ικανοποιητικών μεθόδων.

Οι μετρήσεις αυτές είναι:

- Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης
- Μέτρηση της ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων
- Μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού
- Μέτρηση του ρεύματος διέγερσης του πυρήνα
- Μέτρηση της εφδ της μόνωσης
- Μέτρηση της χωρητικότητας των τυλιγμάτων

3.2.1 Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης

Η μέτρηση της αντίστασης μόνωσης εκτελείται με μονοσιώμετρο, συσκευή, η οποία είναι διεθνώς γνωστή με την ονομασία μεγγόμετρο (Megohmmeter). Η μέτρηση αυτή, εκτός από

την εκτίμηση της ποιότητας της μόνωσης, μπορεί να εντοπίσει και σημαντικά ελαττώματα στη μόνωσή του μετασχηματιστή.

Η αντίσταση μόνωσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μάλιστα τα δύο αυτά μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα. Η μεταξύ τους συνάρτηση εκφράζεται με το νόμο του Montsinger [41], κατά τον οποίο, για μείωση της θερμοκρασίας του δοκιμίου κατά $6-8^{\circ}\text{C}$ διπλασιάζεται η τιμή της αντίστασης μόνωσης του.

Με την εφαρμογή αυτού του νόμου γίνεται αναγωγή των αποτελεσμάτων, σε $\text{M}\Omega$, των μετρήσεων στη θερμοκρασία των 20°C προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, οι οποίες πιθανώς να έχουν εκτελεσθεί σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Η μέτρηση της αντίστασης μόνωσης επηρεάζεται ακόμη και από μικρές μεταβολές στον εξοπλισμό. Για την ακριβή και αξιόπιστη ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων δίνεται ιδιαίτερη προσοχή πέραν της θερμοκρασίας του δοκιμίου και στην καθαριότητα των μονωτήρων, ώστε να αποφεύγονται ρεύματα λόγω της ρύπανσής τους, στη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας καθώς και στη διάρκεια της δοκιμής.

3.2.2 Μέτρηση της ωμικής αντίστασης τυλιγμάτων

Η μέτρηση της ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων εκτελείται με τη χρήση ωμομέτρου μικρών αντιστάσεων και τα αποτελέσματα της συγκρίνονται με τις «τιμές αναφοράς», που είναι τα αποτελέσματα της μέτρησης που εκτελέσθηκε στο εργοστάσιο κατασκευής ή επισκευής του μετασχηματιστή. Στην περίπτωση που διαπιστωθούν μικρές αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων, αυτό μπορεί να οφείλεται σε βραχυκυκλωμένες σπείρες ή σε ελαττωματικές συνδέσεις ή σε κακές επαφές ή σε διακοπή παράλληλων αγωγών των τυλιγμάτων ή σε επαφές αγωγών με τον μηχανισμό αλλαγής λήψεως υπό φορτίο ή σε συνδυασμό τους. Η απόκλιση των μετρούμενων τιμών επί τόπου από εκείνες του εργοστασίου είναι δυνατόν να είναι έως 2%, δεδομένου ότι δεν υπάρχει δυνατότητα μετρήσεων της θερμοκρασίας με ακρίβεια. Η αντίσταση του χαλκού μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και τα σχετικά αποτελέσματα ανάγονται στους 75°C .

Η μέτρηση εκτελείται σε κάθε τύλιγμα απευθείας, όταν αυτό είναι δυνατόν, όπως π.χ. στη συνδεσμολογία αστέρα, στους τριφασικούς μετασχηματιστές.

Στη συνδεσμολογία τριγώνου εκτελούνται τρεις μετρήσεις. Αρχικά η μέτρηση γίνεται μεταξύ των μονωτήρων διέλευσης των φάσεων Α και Β, όπου μετράται η αντίσταση του τυλιγματος ΑΒ, η οποία είναι σε παραλληλία με το άθροισμα των εν σειρά αντιστάσεων των τυλιγμάτων ΒΓ και ΑΓ.

Έπειτα, εκτελούνται δύο ακόμη μετρήσεις όπως η πρώτη, διαδοχικά στα ζεύγη των μονωτήρων των φάσεων ΒΓ και ΑΓ. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποτελούν ένα σύστημα τριών απλών εξισώσεων με τρεις αγνώστους, όπου προσδιορίζονται οι αντιστάσεις των τριών τυλιγμάτων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στις τρεις φάσεις πρέπει να μη έχουν απόκλιση μεγαλύτερη του 2% μεταξύ τους.

3.2.3 Μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού

Η μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού ή της σχέσης μετασχηματισμού εκτελείται προκειμένου να διερευνηθούν τυχόν προβλήματα κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή. Η μέτρηση αυτή εντάσσεται στο πρόγραμμα της προληπτικής συντήρησης των μετασχηματιστών και μέσω των αποτελεσμάτων της μπορούν να αποκαλυφθούν βραχυκυκλωμένες σπείρες, εσφαλμένες θέσεις του μηχανισμού αλλαγής τάσεως υπό φορτίο, βλάβες στον μηχανισμό αλλαγής τάσεως υπό φορτίο καθώς και εσφαλμένος προσδιορισμός των ακροδεκτών. Για το λόγο αυτό, αν συμβεί βλάβη σε μετασχηματιστή, ένας από τους πρώτους ελέγχους είναι η μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού.

3.2.4 Μέτρηση του ρεύματος διέγερσης του πυρήνα (ρεύμα εν κενώ)

Η μέτρηση του ρεύματος διέγερσης του πυρήνα αποτελεί έναν από τους χρησιμοποιούμενους ελέγχους της κατάστασης του ηλεκτρομαγνητικού συστήματος του μετασχηματιστή και στοχεύει στην ανακάλυψη και στον εντοπισμό διαφόρων σφαλμάτων στο εσωτερικό του μετασχηματιστή όσον αφορά στο ηλεκτρομαγνητικό του σύστημα. Το σπουδαιότερο σφάλμα που μπορεί να εντοπιστεί με τη μέτρηση αυτή, είναι η βραχυκύκλωση μεταξύ σπειρών ενός τυλίγματος. Ακόμη, μπορεί να ανακαλυφθούν χαλαρές συσφίξεις στον πυρήνα και διάκενα αέρα στο μαγνητικό του κύκλωμα, βραχυκυκλωμένα φύλλα του πυρήνα καθώς και θεμελιώδης μεταβολή των χαρακτηριστικών του πυρήνα.

Η μέτρηση του ρεύματος διέγερσης και η μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού είναι συμπληρωματικές. Η μία δεν αντικαθιστά την άλλη, παρόλο που και οι δύο μετρήσεις ανακαλύπτουν βραχυκυκλωμένες σπείρες. Με τη μέτρηση του ρεύματος διέγερσης μπορούν να ανακαλυφθούν προβλήματα στον πυρήνα, τα οποία δεν μπορεί να ανακαλύψει η μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού. Αντιθέτως, η μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού μπορεί να ανακαλύψει ανοιγμένα τυλίγματα, τα οποία δεν μπορεί να ανακαλυφθούν με τη μέτρηση του ρεύματος διέγερσης πυρήνα.

3.2.5 Μέτρηση της εφδ της μόνωσης

Ο έλεγχος της μόνωσης με τις μετρήσεις των διηλεκτρικών απωλειών (εφδ) και του συντελεστή ισχύος υποδείχθηκε για πρώτη φορά από τον Frank C. Doble και γι' αυτό ονομάζονται διεθνώς «δοκιμές Doble».

Με τη μέτρηση της εφδ της μόνωσης μπορούν να αποκαλυφθούν αφανή σφάλματα, τα οποία μπορεί να οφείλονται σε αστοχία σχεδίασης (design), εγγενή ελαττώματα, κακή κατασκευή ή συναρμολόγηση, υπερφόρτιση, υπερθέρμανση, ηλεκτρική καταπόνηση, εσωτερικές υπερτάσεις, εξωτερικές υπερτάσεις ή και σε χειροτέρευση λόγω ασυμβατότητας υλικών.

Επιπλέον, με την μέτρηση αυτή μπορεί να επιβεβαιωθεί ότι ο μετασχηματιστής δεν έχει υποστεί κάποια ζημιά κατά τη μεταφορά στη θέση λειτουργίας του και ότι η εγκατάστασή του έγινε με τον κατάλληλο τρόπο.

3.2.6 Μέτρηση της χωρητικότητας των τυλιγμάτων

Η μέτρηση της χωρητικότητας των τυλιγμάτων γίνεται με την άφιξη του μετασχηματιστή στον τόπο εγκατάστασής του. Η χωρητικότητα είναι ένα σημαντικό στοιχείο των μονωτικών υλικών και είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του τυλίγματος, η οποία είναι δυνατόν να μεταβληθεί λόγω αδέξιων χειρισμών κατά τη μεταφορά του μετασχηματιστή.

Επιβάλλεται να υπάρχουν οι «τιμές αναφοράς» που εκτελέστηκαν στο εργοστάσιο κατασκευής του μετασχηματιστή ώστε να γίνει ο έλεγχος των τιμών της χωρητικότητας με την μέτρησή της που εκτελείται με την εγκατάσταση του μετασχηματιστή. Με την σύγκριση των τιμών της χωρητικότητας μπορεί να ανακαλυφθεί μετατόπιση ή παραμόρφωση του τυλίγματος.

3.3 Μετρήσεις και Δοκιμές στο μονωτικό λάδι του μετασχηματιστή

Η δειγματοληψία του μονωτικού λαδιού από το μετασχηματιστή γίνεται σύμφωνα με τις σχετικές οδηγίες δειγματοληψίας του προτύπου IEC 60475:2011. [58] Οι βασικές μετρήσεις και δοκιμές που εκτελούνται σε δείγμα μονωτικού λαδιού είναι:

- Οπτική επιθεώρηση
- Διηλεκτρική αντοχή
- εφδ
- Περιεχόμενη υγρασία
- Βαθμός εξουδετέρωσης
- Πυκνότητα
- Χρώμα
- Σχετικός κορεσμός της υγρασίας

Σε περίπτωση που τα αποτελέσματα των παραπάνω δοκιμών και μετρήσεων οδηγήσουν στο συμπέρασμα ότι το λάδι είναι αμφίβολης κατάστασης, τότε εκτελούνται μια δεύτερη βαθμίδα μετρήσεων, φυσικών και χημικών αναλύσεων.

Οι μετρήσεις αυτές είναι:

- Επιφανειακή τάση
- Αεριοχρωματογραφική ανάλυση των διαλυμένων στο λάδι αερίων
- Προσδιορισμός φουρανίων

Οι μετρήσεις αυτές εντάσσονται σε πρόγραμμα μετρήσεων, το οποίο εκτελείται ανά διετία. Εάν βέβαια τα αποτελέσματα δεν είναι εντός των προδιαγραφόμενων ορίων, η συχνότητα των μετρήσεων γίνεται ανάλογα με τις σχετικές συστάσεις του προτύπου IEC 60422:2013. [52] Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για μια αρχική εκτίμηση της κατάστασης του μετασχηματιστή, μέσω του λαδιού του, και αποτελούν πολύτιμο πληροφοριακό σύστημα.

3.3.1 Διηλεκτρική αντοχή

Η μέτρηση της διηλεκτρικής αντοχής είναι η πιο κοινή μέτρηση καθώς η εφαρμοζόμενη μέθοδος είναι απλή και η αντίστοιχη συσκευή εύχρηστη.

Όταν η τιμή της διηλεκτρικής αντοχής βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα αυτό υποδηλώνει ότι στο λάδι υπάρχει νερό ή αγωγιμα σωματίδια ή σκόνη ή συνδυασμός τους. Η ύπαρξη ιλύος (λάσπης - sludge) ή οξέων στο λάδι δεν αποκαλύπτεται με τη δοκιμή αυτή όπως και η ύπαρξη ρυπαντών, καθώς μπορεί η τιμή της διηλεκτρικής αντοχής να είναι υψηλή και στο λάδι να περιέχονται ρυπαντές. Η χαμηλή τιμή της διηλεκτρικής αντοχής που οφείλεται στην ύπαρξη ρυπαντών ή ιλύος μπορούν να αφαιρεθούν με διατάξεις καθαρισμού λαδιών (φίλτρα).

3.3.2 εφδ λαδιού

Η μέτρηση της εφδ προσδιορίζει την ποιότητα του λαδιού, υπολογίζοντας το ρεύμα διαρροής διαμέσου του. Το αποτέλεσμα της μέτρησης ανάγεται στους 20°C και εάν αυτό υπερβεί το 0.5% τότε χρήζει περαιτέρω διερεύνηση για την ικανότητα του ως μονωτικό υλικό. Η εφδ παριστάνει τις διηλεκτρικές απώλειες του λαδιού, δηλαδή τη διηλεκτρική θέρμανση, και η υψηλή τιμή αυτής υποδεικνύει την ύπαρξη μόλυνσης ή προϊόντων υποβάθμισης όπως νερό ή άλλα αγωγιμα υλικά.

3.3.3 Βαθμός εξουδετέρωσης

Ο βαθμός εξουδετέρωσης αποτελεί μέθοδο μέτρησης της οξύτητας, δηλαδή της παρουσίας οξέων στο δείγμα λαδιού. Όταν ο βαθμός εξουδετέρωσης είναι μεγαλύτερος του 0.2 mg KOH/gr υποδηλώνει την ύπαρξη οργανικών οξέων ή ξένων σωματιδίων, όπως βερνίκι, χρώμα ή άλλα σωματίδια.

Τα οξέα συμβάλλουν στην αύξηση της διαλυτότητας του νερού στο χαρτί λόγω της πολωμένης δομής τους και δρουν καταλυτικά στη διαδικασία αποσύνθεσης του χαρτιού.

3.3.4 Υγρασία στο λάδι

Η μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας στο λάδι γίνεται ώστε να εκτιμηθεί το περιεχόμενο νερό τόσο στο λάδι του μετασχηματιστή όσο και στο μονωτικό σύστημα της κυτταρίνης. Η απόλυτη τιμή της υγρασίας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία παρέχει πληροφορίες για το περιεχόμενο νερό στη στερεά μόνωση και πρέπει να είναι χαμηλή έτσι ώστε η τιμή της διηλεκτρικής αντοχής να είναι υψηλή.

3.3.5 Σχετικός κορεσμός της υγρασίας

Ο βαθμός του σχετικού κορεσμού της υγρασίας στο λάδι δίνει πληροφορίες για τη μονωτική ακεραιότητα του συστήματος της κυτταρίνης και εκφράζεται σε ποσοστό τοις % συνοδευόμενο με την τιμή της θερμοκρασίας του. Η μέτρηση του σχετικού κορεσμού

γίνεται είτε με χρήση κατάλληλης συσκευής είτε με τον υπολογισμό μέσω των συντελεστών διαλυτότητας του νερού στο λάδι.

Ο σχετικός κορεσμός της υγρασίας σε ένα κλειστό κύκλωμα με λάδι και κάποιο χώρο αερίων είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και της μερικής πίεσης του νερού. Με δεδομένο και σταθερό το περιεχόμενο της υγρασίας καθώς και τη πίεση του συστήματος, ο σχετικός κορεσμός της υγρασίας μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού.

3.3.6 Χρώμα – Οσμή

Ο προσδιορισμός του χρώματος του λαδιού γίνεται συγκρίνοντάς το με έγχρωμα τυποποιημένα γυαλιά διαφόρων χρωματικών αποχρώσεων, με αρίθμηση από το 1 έως το 8. Ο αριθμός 1 αντιστοιχεί στο ανοιχτόχρωμο και σχεδόν διαφανές χρώμα και ο αριθμός 8 στο σχεδόν μαύρο. Στην περίπτωση που το χρώμα του λαδιού είναι 8 τότε το λάδι πρέπει να αποσυρθεί και να χρησιμοποιηθεί νέο λάδι στο μετασχηματιστή καθώς το σκούρο χρώμα του υποδηλώνει μόλυνσή του ή και υποβάθμισή του. Το χρώμα και η εμφάνιση του λαδιού δίνουν μία πρώτα και άμεση εικόνα για την ποιότητά του. Ακόμη, η οσμή του λαδιού υποδεικνύει ότι έχει συμβεί τόξο και έτσι διασπάστηκε το λάδι.

3.3.7 Πυκνότητα

Η πυκνότητα του λαδιού έχει κατώτατο όριο την τιμή των 0.875 g/cm^3 και επιδρά στο ρυθμό μεταφοράς της θερμότητας που αναπτύσσεται στο μετασχηματιστή.

3.3.8 Επιφανειακή τάση

Η μέτρηση της επιφανειακής τάσης του λαδιού είναι ποιοτική μέτρηση και γίνεται προκειμένου να υπολογιστεί η δύναμη σε δύνες ανά εκατοστό που απαιτείται για να διασπαστεί διαχωριστική μεμβράνη μεταξύ λαδιού και νερού. Η ύπαρξη ρυπαντών όπως βερνίκια, χρώματα και προϊόντα οξείδωσης, αδυνατίζουν τη διαχωριστική μεμβράνη λαδιού και νερού με αποτέλεσμα την απαίτηση μικρότερης δύναμης για τη διάσπασή της.

Όταν η τιμή της επιφανειακής τάσης είναι χαμηλή, σημαίνει ότι υπάρχουν επιβλαβή προϊόντα οξείδωσης, τα οποία υποβαθμίζουν τη μόνωση και προκαλούν δυσλειτουργία στη ψύξη του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή.

3.3.9 Προσδιορισμός φουρανίων

Ο προσδιορισμός των φουρανίων γίνεται έτσι ώστε να ανακαλυφθεί η τυχόν παρουσία τους στο λάδι του μετασχηματιστή καθώς αυτό αποτελεί ένδειξη της γήρανσης της στερεάς μόνωσης του μετασχηματιστή και υποβάθμιση των μονωτικών χαρτιών.

Τα φουράνια προσδιορίζονται μέσω της χρωματογραφίας υγρής φάσης (High performance liquid chromatography-HPLC) ή μέσω της μεθόδου αεριοχρωματογραφίας-φασματοσκοπίας μάζας (Gas chromatography /mass-spectroscopy – GC/MS). Τα συνήθη προσδιοριζόμενα φουράνια είναι τα ακόλουθα πέντε:

- 5-Hydromethyl-2-furfural - HMF
- Furfuryl alcohol - FOL
- 2-Furfural - FFA
- Acetyl furan - AF
- 5-Methyl-2-furfural - MF

3.3.10 Αεριοχρωματογραφική ανάλυση των διαλυμένων στο λάδι αερίων

Η αεριοχρωματογραφική ανάλυση των διαλυμένων στο λάδι αερίων έχει ποιοτικό χαρακτήρα και μέσω της καταγραφής των ποσοτήτων των αερίων που ανιχνεύτηκαν αποκαλύπτονται σφάλματα που έχουν συμβεί στο εσωτερικό του μετασχηματιστή χωρίς βέβαια να εντοπίζεται η ακριβής θέση του σφάλματος.

Η περιεκτικότητα αερίων που ανιχνεύονται στο λάδι μετασχηματιστή που βρίσκεται σε λειτουργία αποτελεί την πρώτη ένδειξη ανωμαλίας που μπορεί ενδεχομένως να οδηγήσει σε βλάβη και σε αστοχία του μετασχηματιστή. Η δημιουργία των αερίων στο λάδι οφείλονται στην αποσύνθεση του λαδιού και της στερεάς μόνωσης, των υλικών της κυτταρίνης, τα οποία συμβαίνουν εξαιτίας ηλεκτρικών τόξων, μερικών εκκενώσεων, υπερφόρτισης και υπερθέρμανσης του μονωτικού συστήματος.

4. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Ο Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) έχει ως σκοπό τη λειτουργία, τη συντήρηση και την ανάπτυξη του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Σύμφωνα με το οργανόγραμμα της εταιρείας, η ΔΕΕΔ (Διεύθυνση Ειδικών Εγκαταστάσεων Δικτύου) έχει την αρμοδιότητα και την ευθύνη για τη συντήρηση, την κατασκευή και την αποκατάσταση βλαβών των Υποσταθμών με τη συνδρομή των περιφερειακών τομέων. Επίσης, η ΔΕΕΔ συντηρεί και επεκτείνει τις υπόγειες καλωδιακές γραμμές 150kV και τα υποβρύχια καλώδια Μέσης Τάσης για τα διασυνδεδεμένα νησιά. Πιο συγκεκριμένα, ο Τομέας Τεχνικής Υποστήριξης (ΤΤΥ) έχει την ευθύνη για την επισκευή μετασχηματιστών ισχύος 150/21kV για όλη την Ελλάδα ενώ συντηρεί και επισκευάζει μετασχηματιστές ισχύος 20/0,4kV για τη Διεύθυνση της Περιφέρειας Αττικής καθώς και της Περιφέρειας των Νησιών.

Το ΣΕΜ-Α (Συνεργείο Επισκευής Μετασχηματιστώ Αθηνών) ανήκει στο ΤΤΥ και διαθέτει πιστοποίηση ISO 9001:2015, 14001:2015 και OHSAS 18001:2007 από τον φορέα Bureau Veritas. Επίσης, είναι κατάλληλα εξοπλισμένο προκειμένου να εκτελεί τις απαιτούμενες μετρήσεις για τις ακόλουθες εργασίες:

- εντοπισμό της βλάβης ενός μετασχηματιστή ο οποίος έχει τεθεί εκτός λειτουργίας στο δίκτυο
- έλεγχο της ορθής συναρμολόγησης του μετασχηματιστή στον υποσταθμό πριν την ηλεκτρισή του
- διασφάλιση της ποιότητας επισκευής των μετασχηματιστών σε όλα τα στάδια αυτής
- έλεγχο των ιδιοτήτων του μονωτικού ελαίου για τον προσδιορισμό της γήρανσής του
- καταγραφή ιστορικού των μετρήσεων ώστε να προβλεφθεί πιθανή μελλοντική βλάβη

Οι ηλεκτρικές μετρήσεις που μπορούν να διεξαχθούν σε έναν μετασχηματιστή ισχύος και το αντίστοιχο όργανο για τη κάθε μέτρηση αναφέρονται παρακάτω:

- Λόγος μετασχηματισμού - VANGUARD ATRT-03
- Αντίσταση τυλιγμάτων – VANGUARD TRM 403
- Αντίσταση μόνωσης – METREL TERA OHM 5 kV
- Εφαπτομένη δ – DOBLE M4000
- Ρεύμα διεγέρσεως - DOBLE M4000
- Τάση βραχυκύκλωσης - DOBLE M4000 + DOBLE M4110

Ενώ για την εκτέλεση των φυσικοχημικών μετρήσεων του μονωτικού ελαίου υπάρχει εξοπλισμένο Χημείο με τα ακόλουθα όργανα για την αντίστοιχη μέτρηση:

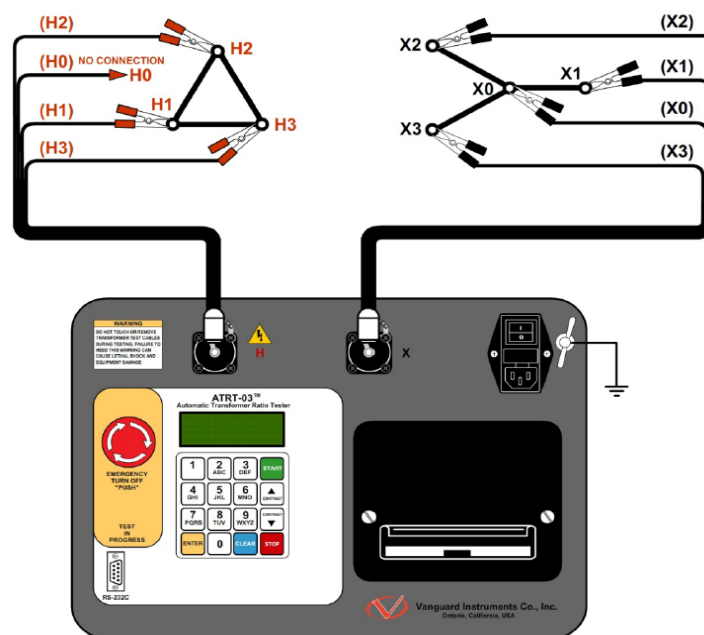
- Συντελεστή απωλειών (εφδ) και ειδικής αντίστασης – BAUR DTL
- Διηλεκτρική αντοχή – BAUR DTA 100 E-AD
- Υγρασία – METRHOM 684 KF

- Χρώμα ελαίου βάσει προτύπου ASTM D 1500
- Διεπιφανειακή τάση και πυκνότητα – KRUSS FORCE TENSIOMETER K20
- Ανάλυση αερίων ελαίου – MORGAN SCAFFER MYRKOS

4.1 Ηλεκτρικές μετρήσεις

4.1.1 Μέτρηση του λόγου τάσης μετασχηματισμού, της φασικής απόκλισης και ελέγχος της ομάδας ζεύξης

Η συσκευή που διατίθεται είναι η ATRT-03 της κατασκευάστριας εταιρείας Vanguard, η οποία είναι φορητή και δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να πραγματοποιεί αυτοματοποιημένες μετρήσεις σε μονοφασικούς και τριφασικούς μετασχηματιστές ισχύος, τάσεως και εντάσεως, για τον υπολογισμό μεγεθών όπως ο λόγος μετασχηματισμού, η πολικότητα των τυλιγμάτων και το ρεύμα διέγερσης χωρίς φορτίο. Ο λόγος μετασχηματισμού ενός μετασχηματιστή μετρείται εφαρμόζοντας μια τάση δοκιμής στα άκρα του πρωτεύοντος (H) τυλίγματος και στη συνέχεια μετράει την επαγόμενη τάση στην πλευρά του δευτερεύοντος (X). Αφού δεν υπάρχουν φορτία συνδεδεμένα στα τυλίγματα κατά τη δοκιμή, ο μετρούμενος λόγος των τάσεων ταυτίζεται με τον λόγο μετασχηματισμού των τυλιγμάτων. Πριν από κάθε δοκιμή, η συσκευή κάνει αυτόματη βαθμονόμηση των κυκλωμάτων μέτρησης που διαθέτει και ελέγχει τη συνδεσμολογία των καλωδίων μέτρησης για σφάλματα, εφαρμόζοντας μια χαμηλή τάση ελέγχου (300mV) στο υπό έλεγχο τύλιγμα και μετρώντας τις επαγόμενες δευτερεύουσες τάσεις. Εάν η επαγόμενη τάση είναι μεγαλύτερη από την εφαρμοζόμενη τάση διέγερσης, η συσκευή εντοπίζει σφάλμα συνδεσμολογίας. Η συσκευή μετράει λόγους από 0,8 έως 15.000, ρεύμα διέγερσης από 0,0 έως 2,000 mA και η πολικότητα των τυλιγμάτων εμφανίζεται με τα πρόσημα +/-.



Σχήμα 4.1: Απεικόνιση συνδεσμολογίας συσκευής ATRT-03 με τριφασικό μετασχηματιστή Τρίγωνο σε Αστέρα (Πηγή: [14])

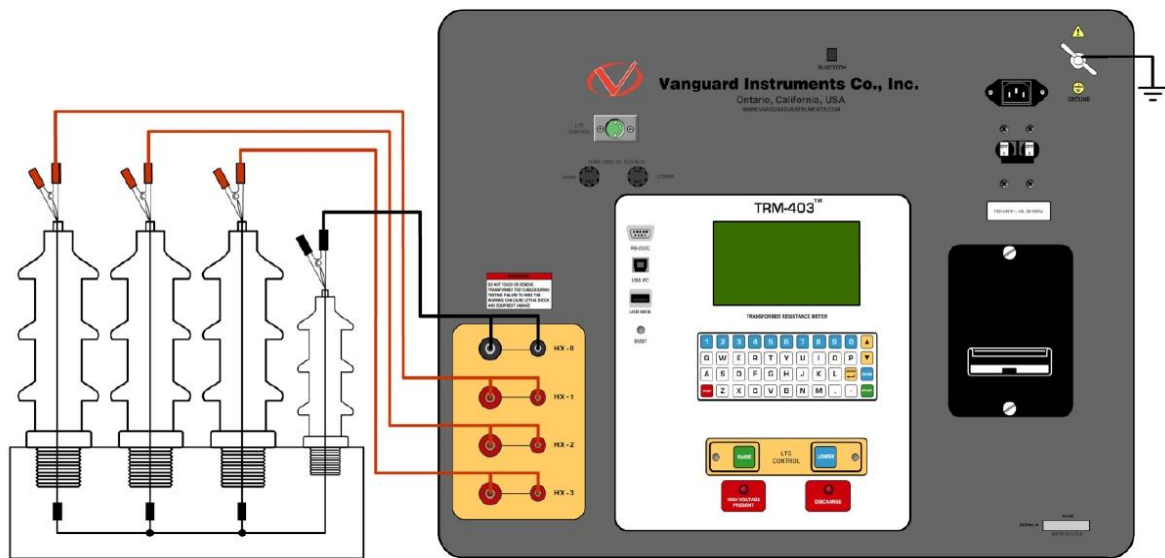
Στον επόμενο πίνακα καταγράφονται ως παράδειγμα τα βήματα ελέγχου ενός μετασχηματιστή συνδεσμολογίας Τριγώνου σε Αστέρα με χρήση ονομαστικών τάσεων.

Πίνακας 2: Βήματα ελέγχου λόγου μετασχηματισμού για τριφασικό μετασχηματιστή

ΒΗΜΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΕΝΔΕΙΞΗ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ												
1	Νέα δοκιμή Μ/Σ	1. TEST XFMR 2. SET UP 3. CALCULATOR 4. DIAGNOSTIC	ΠΑΤΑΜΕ ΤΟ ΠΛΗΚΤΡΟ 1												
2	Επιλογή Μ/Σ Τρίγωνο σε Αστέρα	XFMR CONFIGURATION: 1. SNGL PHS 2. dT - Y 3. Y - dT 4. dT - dT 5. Y - Y	ΠΑΤΑΜΕ ΤΟ ΠΛΗΚΤΡΟ 2												
3	Επιλογή χρήσης ονομαστικών τάσεων Μ/Σ	XFMR NAME PLATE VLTG 1. YES 2. NO	ΠΑΤΑΜΕ ΤΟ ΠΛΗΚΤΡΟ 1												
4	Επιλογή να μη γίνεται διακοπή μετά από τη μέτρηση σε κάθε φάση	STOP BETWEEN PHASES? 1. NO 2. YES	ΠΑΤΑΜΕ ΤΟ ΠΛΗΚΤΡΟ 1												
5	Καταχώρηση τάσης τυλίγματος Η	ENTER H WINDING NAME-PLATE 150000 V	ΠΛΗΚΤΡΟΛΟΓΟΥΜΕ ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΚΑΙ ΣΤΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑ ΤΟ ΠΛΗΚΤΡΟ ENTER												
6	Καταχώρηση τάσης τυλίγματος Χ	ENTER X WINDING NAME-PLATE 21000 V	ΠΛΗΚΤΡΟΛΟΓΟΥΜΕ ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΚΑΙ ΣΤΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑ ΤΟ ΠΛΗΚΤΡΟ ENTER												
7	Εκκίνηση δοκιμής	DELTA to Y XFORMER "START" TO RUN TEST OR "STOP" TO ABORT	ΠΑΤΑΜΕ ΤΟ ΠΛΗΚΤΡΟ START												
8	Ένδειξη λόγου Μ/Σ, ρεύματος διέγερσης και % σφάλματος	<table border="1"> <thead> <tr> <th>RATIO</th> <th>mA</th> <th>%DIFF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12,378</td> <td>0001</td> <td>0,12</td> </tr> <tr> <td>12,381</td> <td>0001</td> <td>0,13</td> </tr> <tr> <td>12,375</td> <td>0001</td> <td>0,12</td> </tr> </tbody> </table>	RATIO	mA	%DIFF	12,378	0001	0,12	12,381	0001	0,13	12,375	0001	0,12	ΠΑΤΑΜΕ ΟΠΟΙΟΔΗΠΟΤΕ ΠΛΗΚΤΡΟ ΓΙΑ ΣΥΝΕΧΕΙΑ
RATIO	mA	%DIFF													
12,378	0001	0,12													
12,381	0001	0,13													
12,375	0001	0,12													
9	Επιλογή εκτύπωσης	PRINT TEST RESULTS? 1. YES 2. NO	ΚΑΤ'ΕΠΙΛΟΓΗ												
10	Επιλογή αποθήκευσης ένδειξης στη μνήμη	KEEP THIS READING 1. YES 2. NO	ΚΑΤ'ΕΠΙΛΟΓΗ												

4.1.2 Μέτρηση της αντίστασης τυλιγμάτων

Η μέτρηση της αντίστασης τυλιγμάτων γίνεται με τη συσκευή TRM-403 της κατασκευάστριας εταιρείας Vanguard, μέσω της οποίας δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να μετρήσει, σε ένα τριφασικό μετασχηματιστή, την αντίσταση κάθε τυλιγματος ξεχωριστά, είτε είναι συνδεσμολογίας Τριγώνου είτε Αστέρα χωρίς ουδέτερο, χωρίς να απαιτείται αλλαγή στην καλωδίωση. Η μέτρηση γίνεται εφαρμόζοντας συνεχή τάση 60V και δυνατότητα επιλογής ρεύματος τροφοδοσίας από 1A έως 40A. Το εύρος της αντίστασης που μπορεί να μετρηθεί είναι από 1 Ohm έως 500 Ohms, ενώ μπορεί να γίνει αναγωγή σε κάθε θερμοκρασία ώστε τα αποτελέσματα να είναι σε τέτοια μορφή για σύγκριση με τις εργοστασιακές τιμές αναφοράς. Επίσης, η συσκευή δίνει τη δυνατότητα μέτρησης της αντίστασης (Special Resistance Test) σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα μεταξύ ενός (1) λεπτού και ενενήντα (90) λεπτών, με καταγραφή της μέτρησης κάθε 15 ή 60 δευτερόλεπτα. Τέλος, ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει και μια δυναμική μέτρηση αντίστασης ώστε να αξιολογήσει τις επαφές του συστήματος αλλαγής τάσεως υπό φορτίου (ΣΑΤΥΦ), αλλάζοντας σταδιακά όλες τις λήψεις του τυλιγματος μέσα σε χρονικό διάστημα 240 δευτερολέπτων.



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση συνδεσμολογίας συσκευής TRM-403 με τριφασικό μετασχηματιστή συνδεσμολογίας Τριγώνου σε Αστέρα με ουδέτερο (Πηγή: [15])

Στον επόμενο πίνακα καταγράφονται ως παράδειγμα τα βήματα μέτρησης της αντίστασης τυλιγμάτων ενός τριφασικού μετασχηματιστή συνδεσμολογίας Τριγώνου σε Αστέρα με τιμή έντασης ρεύματος 10Α.

Πίνακας 3: Βήματα μέτρησης αντίστασης τυλιγμάτων για τριφασικό μετασχηματιστή

ΒΗΜΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΕΝΔΕΙΞΗ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ
1	Νέα δοκιμή Μ/Σ	1. RUN TEST 2. SET UP 3. USER DIAGNOSTICS	ΠΑΤΑΜΕ ΤΟ ΠΛΗΚΤΡΟ 1
2	Επιλογή μέτρησης αντίστασης τυλιγμάτων	1. RESISTANCE TEST 2. SPECIAL RES TEST 3. DYNAMIC LTC TEST 4. DEGAUSS WINDING	ΠΑΤΑΜΕ ΤΟ ΠΛΗΚΤΡΟ 1
3	Επιλογή ρυθμιστικού	LTC OR VTG REGULATOR 1. YES 2. NO	ΠΑΤΑΜΕ ΤΟ ΠΛΗΚΤΡΟ 2
4	Επιλογή συνδεσμολογίας	1. DELTA 2. WYE (WITH NEUTRAL) 3. WYE (NO NEUTRAL) 4. SINGLE PHASE	ΠΑΤΑΜΕ ΤΟ ΠΛΗΚΤΡΟ 1
5	Επιλογή της έντασης ρεύματος	SELECT TEST CURRENT 1. 1A 2. 5A 3. 10A 4. 20A 5. 40A 6. CUSTOM	ΠΑΤΑΜΕ ΤΟ ΠΛΗΚΤΡΟ 3
6	Επιλογή αναγωγής αποτελεσμάτων σε προκαθορισμένη θερμοκρασία	CONVERT READINGS TO STANDARD TEM? 1. YES 2. NO	ΠΑΤΑΜΕ ΤΟ ΠΛΗΚΤΡΟ 2
7	Προειδοποίηση τόξου εάν αποσυνδεθούν τα καλώδια	**** WARNING! **** DANGEROUS FLASH-OVER WILL OCCUR IF CABLES ARE DISCONNECTED	ΠΑΤΑΜΕ ΟΠΟΙΟΔΗΠΟΤΕ ΠΛΗΚΤΡΟ ΓΙΑ ΣΥΝΕΧΕΙΑ
8	Εκκίνηση δοκιμής	DELTA 10 AMP TEST "START" TO RUN TEST OR "STOP" TO ABORT	ΠΑΤΑΜΕ ΤΟ ΠΛΗΚΤΟ START

9	Έναρξη της μέτρησης φορτίζοντας το τύλιγμα μέχρι την τιμή της έντασης του ρεύματος που έχουμε καθορίσει	CALIBRATING PLEASE WAIT...	ΌΤΑΝ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΘΕΙ Η ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΠΑΤΑΜΕ ENTER
		XFMR CHARGING H/X1-H/X3 PLEASE WAIT... ** XFMR ENERGISED! **	
		XFMR CHARGING H/X1-H/X3 PLEASE WAIT... I = 10,55 AMPS ** XFMR ENERGISED! **	
		TEST IN PROGRESS 14 I = 11,27 AMPS R = 1,943 Ω "ENTER" TO ACCEPT PHS	
10	Καταγραφή της μέτρησης	TEST IN PROGRESS 14 I = 11,27 AMPS R = 1,943 Ω TEST SAVED	ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ 9 & 10 ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΓΙΑ H/X2-H/X1 H/X3-H/X2
11	Επιλογή εκτύπωσης	PRINT TEST RESULTS? 1. YES 2. NO	ΚΑΤ'ΕΠΙΛΟΓΗ
12	Επιλογή αποθήκευσης ένδειξης στη μνήμη	SAVE THIS RECORD 1. YES 2. NO	ΚΑΤ'ΕΠΙΛΟΓΗ

4.1.3 Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης

Για τη μέτρηση της αντίστασης μόνωσης το ΣΕΜ-Α διαθέτει τη συσκευή TeraOhm 5kV της κατασκευάστριας εταιρείας METREL, η οποία είναι φορητή και προσιτή για τον χρήστη.



Σχήμα 4.3: Συσκευή TeraOhm 5kV (Πηγή: [16])

Η τάση που εφαρμόζεται για τη μέτρηση είναι τα 5kV και έχει τις επιλογές να καταγράφει τις μετρήσεις στα 15s, 60s, και στα 10min. Επίσης, υπολογίζει το λόγο (DAR) της μέτρησης της αντίστασης στο 1 λεπτό προς την αντίστοιχη στα 15s, που δίνεται από τη σχέση:

$$DAR = \frac{R_{iso} (1min)}{R_{iso} (15s)}$$

καθώς και το λόγο (PI) που αποτελεί το λόγο της αντίστασης στα 10min προς την αντίσταση στο 1min, και δίνεται από τη σχέση:

$$PI = \frac{R_{iso} (10min)}{R_{iso} (1min)}$$

Τέλος, η συσκευή δίνει και τη μέτρηση (DD) που αποτελεί τη διαγνωστική δοκιμή της μόνωσης και εκτελείται μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης της αντίστασης της μόνωσης και δίνεται από τη σχέση:

$$DD = \frac{I_{dis} 1min(mA)}{U (V) * C (F)}$$

όπου

I_{dis} 1min, το ρεύμα εκφόρτισης μετά από 1 λεπτό

U, η εφαρμοζόμενη τάση

C, η χωρητικότητα του δοκιμίου

4.1.4 Μέτρηση της εφδ, του ρεύματος διεγέρσεως και της τάσης βραχυκυκλώσεως

Η συσκευή M4100 που διαθέτει το ΣΕΜ-A είναι φορητή και χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της κατάστασης του εξοπλισμού υψηλής τάσης στο πεδίο. Εφαρμόζει στη μόνωση του υπό έλεγχο εξοπλισμού μια εναλλασσόμενη (AC) τάση δοκιμής έως 12 kV, συχνότητας ίδιας ή παρόμοιας με αυτή του δικτύου τροφοδοσίας. Τυχόν ηλεκτροστατικές παρεμβολές λόγω της έλλειψης συγχρονισμού με τη συχνότητα του δικτύου φιλτράρονται πλήρως. Η συσκευή μετρά απευθείας την ένταση και την τάση στο δοκίμιο και υπολογίζει όλες τις παραμέτρους που σχετίζονται με τις ιδιότητες της μόνωσης, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών ισχύος, της χωρητικότητας, και του συντελεστή ισχύος. Τα κυκλώματα της συσκευής M4100 αποτελούνται από κυκλώματα ψηφιακού ελέγχου, κυκλώματα ισχύος, κυκλώματα αναλογικής μέτρησης, καθώς και κυκλώματα προστασίας με απευθείας έλεγχο που εξασφαλίζουν ηλεκτρική ασφάλεια του προσωπικού και του εξοπλισμού.

Η συσκευή M4100 χρησιμοποιεί εσωτερική γεννήτρια ημιτονοειδών τάσεων και έναν ενισχυτή ισχύος 3 kVA για να παράγει πλήρως απομονωμένη τάση δοκιμής 0–12 kV. Στη συνέχεια μετράει την τάση και την ένταση στο δοκίμιο χρησιμοποιώντας μια πρότυπη σύνθετη αντίσταση (reference impedance). Η συσκευή υπολογίζει τα αποτελέσματα

μετατρέποντας τα μετρούμενα δεδομένα σε διανυσματικά (πλάτος και φάση) μεγέθη, χρησιμοποιώντας κλασική θεωρία κυκλωμάτων AC. Όλα τα αποτελέσματα, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών ισχύος, της χωρητικότητας, και του συντελεστή ισχύος, εξάγονται από τα διανύσματα της τάσης και της έντασης. Προκειμένου να απορρίψει τυχόν παρεμβολές, η συσκευή M4100 χρησιμοποιεί τεχνικές θωράκισης, όπως η line-synchronized reversal και η line frequency modulation. Η τεχνική line frequency modulation τεχνική αφορά σε διεξαγωγή μετρήσεων σε ημιτονοειδείς συχνότητες μεγαλύτερες και μικρότερες από αυτή του δικτύου, και υπολογισμό μέσου όρου.

Πριν τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων, η συσκευή χρησιμοποιεί την τεχνική της σύγχρονης ανίχνευσης και αφαίρεσης οποιασδήποτε συνιστώσας έντασης θορύβου από τα δεδομένα, πρόκειται για μαθηματική επεξεργασία η οποία διαχωρίζει τη συνιστώσα μίας συχνότητας από ένα σήμα. Είναι κάτι ανάλογο με ένα ζωνοπερατό φίλτρο με κεντρική συχνότητα αυτή της δοκιμής. Η τεχνική χρησιμοποιείται επίσης για την αφαίρεση της αρμονικής παραμόρφωσης και του τυχαίου θορύβου από το σήμα ελέγχου.

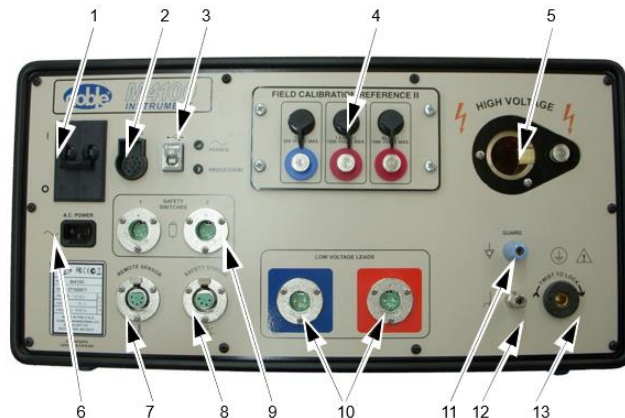
Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται τα παρελκόμενα εξαρτήματα της συσκευής με την περιγραφή τους, τα οποία είναι απαραίτητα για την εκτέλεση της δοκιμής.



1	M4200c Controller (ή laptop PC)	8	Φορείο
2	Μπουτόν ασφαλείας 1 και 2	9	Καλώδιο USB
3	Καλώδιο τροφοδοσίας 120/240 V	10	Καλώδιο μέτρησης Κόκκινο (χαμηλής)
4	Αισθητήριο θερμοκρασίας – υγρασίας	11	Καλώδιο γείωσης
5	Φάρος ασφαλείας	12	Καλώδιο Υψηλής τάσης
6	Καλώδιο εσωτερικής διάγνωσης	13	M4151 Πρότυπο Βαθμονόμησης
7	Καλώδιο μέτρησης Μπλέ (χαμηλής)	14	Σειριακό καλώδιο

Σχήμα 4.4: Συσκευή μέτρησης εφδ M4100 της doble (Πηγή: [17])

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζονται η πάνω όψη της συσκευής η οποία περιλαμβάνει τα πλήκτρα και τις υποδοχές για τη σύνδεση των εξαρτημάτων.

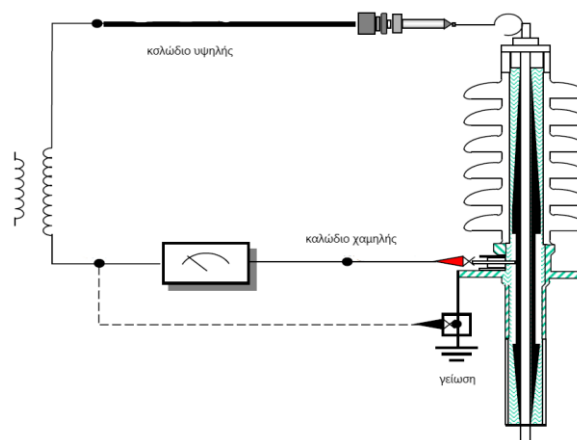


1	Διακόπτης ενεργοποίησης
2	Σειριακή θύρα
3	Θύρα USB
4	Πρότυπο Βαθμονόμησης
5	Σύνδεση καλωδίου μέτρησης Υ.Τ.
6	Σύνδεση καλωδίου τροφοδοσίας A/C
7	Σύνδεση αισθητηρίου θερμοκρασίας - υγρασίας

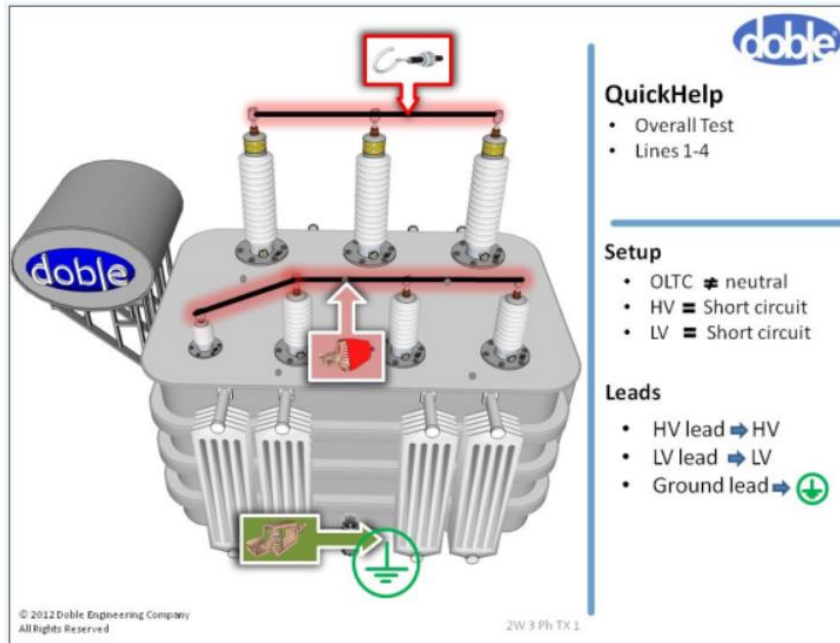
8	Σύνδεση προειδοποιητικού φάρου ασφαλείας
9	Σύνδεση Μπουτόν ασφαλείας 1 και 2
10	Σύνδεση καλωδίων μέτρησης Χαμηλής τάσης
11	Προστασία
12	Γείωση περιβλήματος
13	Γείωση δοκιμής

Σχήμα 4.5: Πάνω όψη συσκευής M4100 της doble (Πηγή: [17])

Η δοκιμή εκτελείται μέσω ενός συμβατού φορητού ηλεκτρονικού υπολογιστή με τη χρήση λογισμικού της εταιρείας doble του οποίου το περιβάλλον είναι φιλικό στο χρήστη και αναλύει τα βήματα που απαιτούνται ενώ σε κάθε μέτρηση παρέχεται σχηματική αναπαράσταση της εκάστοτε συνδεσμολογίας. Οι μετρήσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν είναι αυτή της εφδ και του ρεύματος διέγερσης σε κάθε μετασχηματιστή καθώς επίσης και τη μέτρηση της μόνωσης ενός μονωτήρα υψηλής τάσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σχηματικές αναπαραστάσεις της συνδεσμολογίας όπως αυτές προκύπτουν από τη χρήση του λογισμικού.

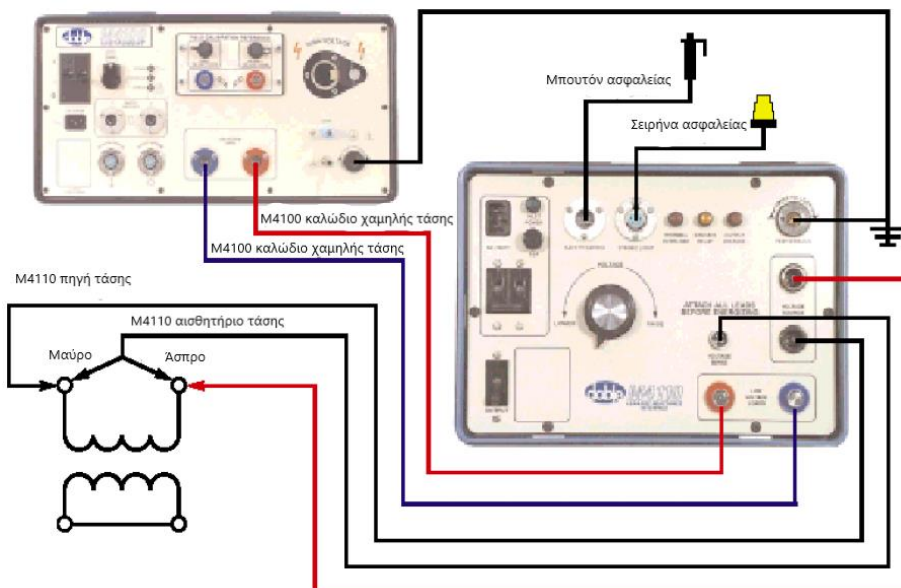


Σχήμα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση μέτρηση μόνωσης μονωτήρα υψηλής τάσης (Πηγή: Λογισμικό doble)



Σχήμα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση μέτρηση μόνωσης τριφασικού μετασχηματιστή (Πηγή: Λογισμικό doble)

Επίσης το ΣΕΜ-A είναι εφοδιασμένο και με την συσκευή M4110 η οποία επιτρέπει τη μέτρηση της τάσης βραχυκύκλωσης με τη χρήση κατάλληλων καλωδίων για τη σύνδεσή της με τη συσκευή M4100. Προσφάτως, το συνεργείο εξοπλίστηκε και με τον πυκνωτή TTR της εταιρείας doble, ο οποίος είναι ένας μικρός φορητός πυκνωτής που μπορεί να ηλεκτριστεί με μέγιστη τάση 10kV για τη μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού σε υψηλές τάσεις μέσω της κεντρικής συσκευής M4100. Στη συνέχεια παριστάνεται η συνδεσμολογία των δύο συσκευών M4100 και M4110 για τη μέτρηση της τάσης βραχυκύκλωσης.



Σχήμα 4.8: Συνδεσμολογία συσκευών M4100 και M4110 (Πηγή: Εγχειρίδιο κατασκευαστή doble)

4.2 Φυσικοχημικές μετρήσεις μονωτικού ελαίου

4.2.1 Δειγματοληψία και μεταφορά του δείγματος

Η δειγματοληψία επιβάλλει προσεκτικές και σχολαστικές διαδικασίες προκειμένου το δείγμα του ελαίου να διατηρήσει τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του αναλλοίωτες από εξωτερικούς παράγοντες κατά την αποθήκευση και τη μεταφορά του στο εργαστήριο. Για τη συλλογή του δείγματος, απαιτούνται κατάλληλα δοχεία, κατά προτίμηση γυάλινα ώστε να είναι ορατά ξένα σωματίδια, τα οποία πριν τη χρήση τους θα πρέπει να έχουν πλυθεί επιμελώς και να έχουν υποστεί ξήρανση σε κατάλληλο φούρνο για την απομάκρυνση της υγρασίας. Για τη μεταφορά των γυάλινων δοχείων, απαιτούνται ειδικά ξύλινα κουτιά προκειμένου να προφυλαχθεί το δείγμα από την επίδραση φωτός.



Σχήμα 4.9: Γυάλινο δοχείο και ξύλινο κουτί μεταφοράς (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)

Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας δε θα πρέπει να υπάρχει σκόνη και υγρασία στο γύρω χώρο και τα βοηθητικά μέσα που θα χρησιμοποιηθούν να είναι και αυτά σχολαστικά καθαρισμένα και να αποφεύγεται η χρήση χνουδωτών υφασμάτων. Για τη λήψη του δείγματος συστήνεται η βάνα από το κάτω μέρος του μετασχηματιστή, η οποία αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση λόγω της καθίζησης των σωματιδίων, αφού πρώτα ελεγχθεί το στόμιο για την ύπαρξη ξένων σωμάτων και αφήνοντας να εκρεύσει μία ποσότητα λαδιού για την απομάκρυνση των συσσωρευμένων ακαθαρσιών στο σωλήνα εκροής. Πριν την πλήρωση του δοχείου, γίνονται δύο πλύσεις του δοχείου με το υπό δοκιμή έλαιο, ενώ η πλήρωση πρέπει να γίνεται με σταθερή ροή για την αποφυγή φυσαλίδων. Η ποσότητα που απαιτείται για την εκτέλεση όλων των φυσικοχημικών μετρήσεων στο εργαστήριο είναι 2 λίτρα.

4.2.2 Έλεγχος του συντελεστή απωλειών και της ειδικής αντίστασης

Η συσκευή που διαθέτει το χημείο του ΣΕΜ-Α, για τη μέτρηση του συντελεστή διηλεκτρικών απωλειών (εφδ), τη σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r και την ειδική αντίσταση ρ , είναι της εταιρείας BAUR, το μοντέλο DTL. Η διαδικασία ελέγχου που ακολουθείται είναι βάσει των διεθνών προτύπων IEC 60247 και ASTM D 924.



Σχήμα 4.10: Συσκευή μέτρησης εφδ, σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r και της ειδικής αντίστασης ρ DTL (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)

Για την εκτέλεση της δοκιμής απαιτείται ποσότητα του υπό δοκιμή δείγματος τουλάχιστον 200ml. Πριν από κάθε μέτρηση πρέπει να γίνονται 3 πλύσεις του δοχείου δοκιμής (χωρητικότητας 45ml) με το δείγμα δοκιμής πατώντας το κουμπί αποστράγγισης. Το γέμισμα του δοχείου δοκιμής MC2A με το λάδι πρέπει να γίνεται αργά και σταθερά μέχρι η στάθμη στο γυάλινο παράθυρο να είναι περίπου 1cm. Για την έναρξη της μέτρησης πρέπει να κλείσει και να ασφαλιστεί το προστατευτικό κάλυμμα. Η απαραίτητη θερμοκρασία δοκιμής επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός κυκλώματος επαγωγικής θέρμανσης, ενώ οι μετρήσεις εκτελούνται με τη βοήθεια της ψηφιακής γέφυρας μέτρησης. Η ανάγνωση των αποτελεσμάτων γίνεται από την οθόνη που διαθέτει η συσκευή, ενώ παρέχει τη δυνατότητα στον χρήστη να τα εκτυπώσει. Το σύστημα μέτρησης DTL μετράει τιμές εφδ με μέγιστη ακρίβεια από 0,00001 έως 4,0, το οποίο επιτρέπει να καθοριστούν με ακρίβεια χαρακτηριστικά των μονωτικών υγρών, όπως το επίπεδο της καθαρότητας, η περιεκτικότητα σε νερό και ο βαθμός γήρανσης. Επίσης, η μέτρηση της ειδικής αντίστασης ρ^+ και ρ^- πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας θετική και αρνητική DC τάση δοκιμής. Εάν υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ ρ^+ και ρ^- , αυτό μπορεί να σημαίνει ότι το δοχείο δοκιμής δεν είναι καθαρό, ενώ μικρές διαφορές δείχνουν ότι οι συνθήκες είναι κατάλληλες για την εκτέλεση αξιόπιστης μέτρησης της εφδ. Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης, για την αποφυγή υγρασίας στο δοχείο δοκιμής, θα πρέπει να παραμένει γεμάτο με έλαιο μέχρι την επόμενη μέτρηση.

4.2.3 Μέτρηση της διηλεκτρικής αντοχής

Για τη μέτρηση της διηλεκτρικής αντοχής χρησιμοποιείται η συσκευή DTA 100 E της εταιρείας BAUR.

Ο έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού είναι ο πιο σύνηθες γιατί δίνει άμεσα ένδειξη σχετικά με την ύπαρξη υγρασίας ή και σωματιδίων. Η μέτρηση γίνεται βάσει του προτύπου IEC 60156/95. Η βελτίωση των τιμών της διηλεκτρικής αντοχής μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ειδικών συγκροτημάτων που απαρτίζονται από αντλίες, θερμοαντιστάσεις, σύστημα φυγοκεντρικού διαχωρισμού και αντλία κενού. Πριν την εκτέλεση της μέτρησης, προστίθεται μικρή ποσότητα από το υπό δοκιμή έλαιο και ανακινείται ελαφρώς ώστε να απλωθεί σε όλες τις πλευρές του γυάλινου δοχείου για την απομάκρυνση τυχόν εναπομεινάντων σωματιδίων από προηγούμενη μέτρηση. Το γυάλινο δοχείο είναι χωρητικότητας 400 ml, συνεπώς για την προετοιμασία και την εκτέλεση της μέτρησης απαιτούνται περίπου 800 ml ελαίου. Στη συνέχεια με τη χρήση ενός φίλερ (πρότυπη λάμα 2 mm) ρυθμίζεται η απόσταση των δύο ορειχάλκινων ηλεκτροδίων στα 2 mm. Η πλήρωση του δοχείου με έλαιο γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφευχθεί η ύπαρξη φυσαλίδων.



Σχήμα 4.11: Συσκευή μέτρησης διηλεκτρικής αντοχής DTA E - 100 (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)

Αφού ισορροπήσει το δείγμα στο δοχείο και επέλθει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (περίπου 20 °C), τότε είναι έτοιμο για να ξεκινήσει η μέτρηση. Με τη βοήθεια ενός μαγνήτη εξασφαλίζουμε την ανάδευση του ελαίου για την ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων. Εκτελούνται συνολικά 6 μετρήσεις με χρονική απόσταση μεταξύ τους τα 2 λεπτά, ενώ η μέτρηση γίνεται με σταθερή αύξηση της τάσης 2 kV/s και μέχρι να επιτευχθεί διάσπαση του μονωτικού ελαίου με μέγιστη τιμή τα 100kV. Η διάσπαση συνοδεύεται με ορατό ηλεκτρικό τόξο μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Η τελική τιμές της διηλεκτρικής αντοχής προκύπτει από το μέσο όρο των 6 τιμών των αντίστοιχων μετρήσεων, ενώ είναι διαθέσιμη στο χρήστη και

η μέγιστη απόκλιση των τιμών από το μέσο όρο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στην οθόνη της συσκευής και δίνεται η δυνατότητα να εκτυπωθούν. Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης, για την αποφυγή υγρασίας στο δοχείο δοκιμής, θα πρέπει να παραμένει γεμάτο με έλαιο μέχρι την επόμενη μέτρηση.

4.2.4 Έλεγχος της περιεχόμενης υγρασίας στο μονωτικό έλαιο

Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της υγρασίας είναι το METROHM – 684 KF Coulometer (υγρασιόμετρο) και η αρχή λειτουργίας της στηρίζεται στο αντιδραστήριο Karl -Fischer (K-F). Το αντιδραστήριο K-F είναι διάλυμα διοξειδίου του θείου, πυριδίνης και ιωδίου σε μεθανόλη. Μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος γίνεται η ανίχνευση του σημείου εξουδετέρωσης της υγρασίας στο υπό δοκιμή δείγμα και συγκρίνεται με την ποσότητα που χρειάζεται για την εξουδετέρωση γνωστού όγκου νερού.



Σχήμα 4.12: Συσκευή μέτρησης υγρασίας METROHM – 684 KF Coulometer (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)

Για τη μέτρηση της υγρασίας απαιτείται η χρήση μιας σύριγγας των 10 ml για την έγχυση του δείγματος στο δοχείο τιτλοδότησης. Έχοντας συλλέξει το δείγμα, αφαιρείται ο αέρας που πιθανώς έχει εγκλωβιστεί στη σύριγγα και τοποθετείται η σύριγγα σε ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας της εταιρείας Precisa.



Σχήμα 4.13: Ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας Precisa (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)

Αφού μηδενιστεί η ένδειξη της ζυγαριάς αφαιρείται η σύριγγα και γίνεται η έγχυση ποσότητας περίπου 2 ml του δείγματος στο δοχείο τιτλοδότησης, τρυπώντας με τη βελόνα μια λαστιχένια τάπα για την αποφυγή εισροής υγρασίας από το περιβάλλον. Στη συνέχεια ξανά ζυγίζεται η σύριγγα ώστε να προσδιοριστεί η ακριβής ποσότητα του ελαίου που προστέθηκε στο δοχείο. Η μέτρηση της ποσότητας αυτής εισάγεται στη συσκευή και μέσω μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας προκύπτει το αποτέλεσμα της δοκιμής εκφρασμένο σε ppm.

4.2.5 Χαρακτηρισμός χρώματος μονωτικού ελαίου

Η συσκευή που διαθέτει το χημείο του ΣΕΜ-Α για το συμβατικό χαρακτηρισμό του χρώματος είναι της εταιρείας HELLIGE INC PV και ανταποκρίνεται στις σχετικές προδιαγραφές PIN 51517 – ASTM P155. Η συσκευή αποτελείται από δύο τυποποιημένους χρωματιστούς γυάλινους δίσκους με κλίμακα από το 1 έως το 8, όπου με τη διαβάθμιση 1 προσδιορίζεται το καινούργιο έλαιο και όσο αυξάνεται τόσο κρίνεται πιο ακατάλληλο. Η διαβάθμιση του πρώτου δίσκου είναι: 1, 1½, 2, 2½, 3, 3½, 4 και του δεύτερου δίσκου είναι: 4, 4½, 5, 6, 7, 8.



Σχήμα 4.14: Τυποποιημένος χρωματιστός δίσκος χρωματομέτρου (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)

Επίσης, αποτελείται από δύο γυάλινα δοχεία όπου στο ένα τοποθετείται απεσταγμένο νερό σε ύψος 50 mm και στο δεύτερο το υπό δοκιμή έλαιο.

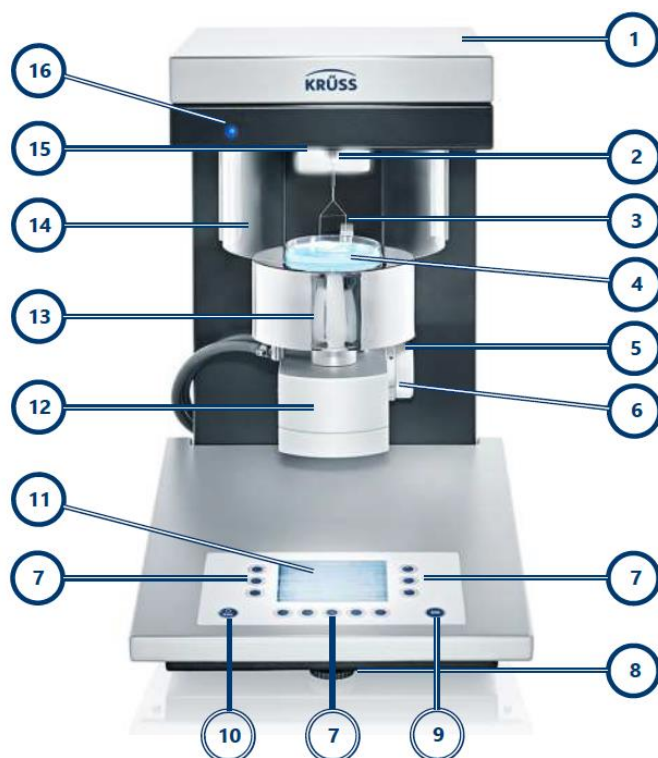


Σχήμα 4.15: Γυάλινα δοχεία τοποθέτησης δείγματος και απεσταγμένου νερού (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)

Για τον προσδιορισμό του χρώματος απαιτείται μια πηγή φωτός με το κλείσιμο του καλύμματος της συσκευής και. Εστιάζοντας στη διάταξη προς παρατήρηση γίνεται σύγκριση του χρώματος του υπό δοκιμή ελαίου με το χρώμα του χρωματιστού δίσκου που υπάρχει πάνω από τον κύλινδρο με το απεσταγμένο νερό. Ρυθμίζοντας τη διαβάθμιση του τυποποιημένου χρωματιστού δίσκου προσεγγίζεται η συσχέτιση των δύο χρωμάτων και δίνεται στο έλαιο η αντίστοιχη διαβάθμιση.

4.2.6 Επιφανειακή τάση και πυκνότητα

Το όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της επιφανειακής τάσης και της πυκνότητας του λαδιού είναι της εταιρείας Kruss, το μοντέλο Δυναμικό Τασίμετρο – K20. Τα μέρη από τα οποία απαρτίζεται παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα και περιγράφονται στον σχετικό πίνακα.

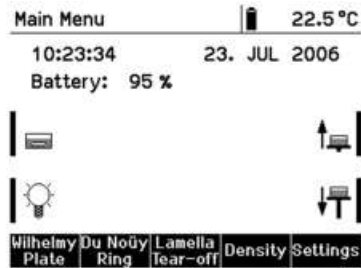


Θέση	Ονομασία	Θέση	Ονομασία
1	Αλφάδι	9	Επιβεβαίωση εισαγωγής
2	Αισθητήρας δύναμης με άγκιστρο	10	Διακόπτης On/off
3	Αισθητήρας μέτρησης	11	Οθόνη
4	Δοχείο δείγματος SV20 με δείγμα	12	Στάδια δείγματος
5	Χειροκίνητη ρύθμιση ύψους	13	Κάλυμμα θερμοστάτη
6	Δείκτης τραβήγματος	14	Προστατευτικό τζάμι
7	Λειτουργία μενού	15	Φωτισμός
8	Ρυθμιζόμενη βάση	16	Ενδεικτική λυχνία

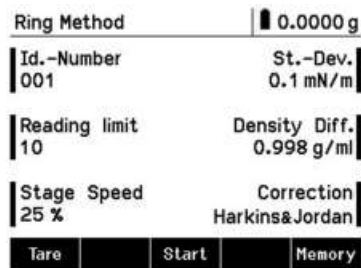
Σχήμα 4.16: Συσκευή μέτρησης επιφανειακής τάσης και πυκνότητας K-20 της Krüss (Πηγή: [18])

Μέτρηση της επιφανειακής τάσης

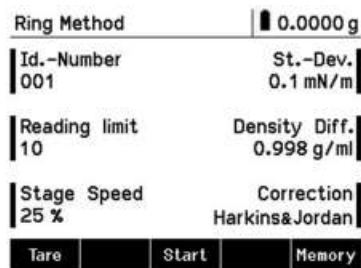
1. Μετακινούμε το επίπεδο δείγματος προς τα κάτω.
2. Αναρτούμε τον καθαρισμένο δακτύλιο από το άγκιστρο στον αισθητήρα πίεσης.
3. Γεμίζουμε το δείγμα προς μέτρηση στην καθαρή υποδοχή δείγματος και τοποθετούμε την υποδοχή στην θέση δείγματος.
4. Επιλέγουμε **Du Nouy Ring** στο βασικό μενού.



5. Ελέγχουμε και υιοθετούμε τις τρέχουσες παραμέτρους.
6. Μετακινούμε το επίπεδο δείγματος προς τα πάνω μέχρι ο δακτύλιος να βρίσκεται ακριβώς πάνω από την επιφάνεια του υγρού. Περιμένουμε με τα επόμενα βήματα μέχρι ο δακτύλιος να μην κινείται και το υγρό να έχει έρθει σε ηρεμία.
7. Πατάμε **Tare** για το μηδενισμό του βάρους της πλάκας στον αέρα. Περιμένουμε έως ότου εμφανιστεί βάρος 0.0000 g στην πάνω δεξιά γωνία της οθόνης.



8. Μετακινούμε το επίπεδο του δείγματος προς τα πάνω και βυθίζουμε το δακτύλιο σε ένα βάθος περίπου 1 mm στο υγρό.
9. Πατάμε **Start** για να μετράμε την επιφανειακή τάση του υγρού.



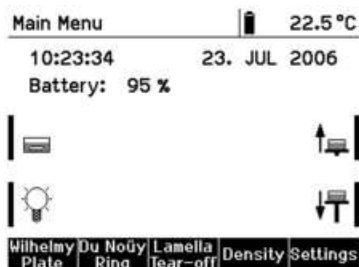
Η μέτρηση γίνεται αυτόματα. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης θα εμφανιστούν οι μεμονωμένες τιμές μέτρησης της επιφανειακής τάσης. Στο τέλος η οθόνη εμφανίζει μια σελίδα με τη μέση τιμή για την επιφανειακή τάση, την τυπική απόκλιση και τις πειραματικές ρυθμίσεις.

- Πατώντας **Abort** θα διακοπεί η μέτρηση. Ωστόσο, όλα τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί μέχρι το σημείο αυτό θα χαθούν.
- Κατά τη διάρκεια της μέτρησης η επιφάνεια χαμηλώνει και γίνεται μέτρηση της μέγιστης δύναμης για την τάση του φιλμ κάτω από το δακτύλιο. Η μέτρηση σταματά όταν η μεμβράνη κάτω από το δακτύλιο σπάσει. Στην περίπτωση αυτή ελαττώστε την ταχύτητα μέτρησης και την ευαισθησία.

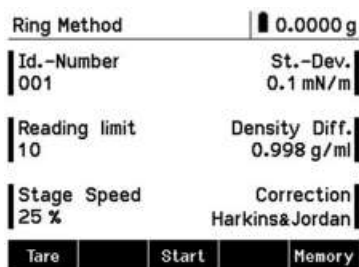
10. Αποθηκεύουμε τα αποτελέσματά μας, πατώντας **Save** και/ή τα εκτυπώνουμε (**Print**).
11. Πατάμε **OK**.

Μέτρηση της διεπιφανειακής τάσης

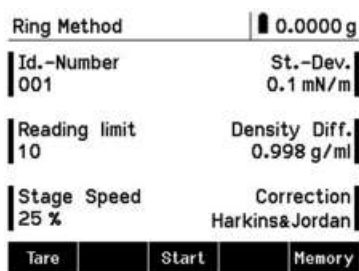
1. Μετακινούμε το επίπεδο δείγματος προς τα κάτω.
2. Αναρτούμε τον καθαρισμένο δακτύλιο από το άγκιστρο στον αισθητήρα πίεσης.
3. Πληρώνουμε την ελαφριά φάση (αραιό υγρό) στην καθαρισμένη υποδοχή δείγματος και τοποθετούμε την υποδοχή στο επίπεδο δείγματος.
4. Επιλέγουμε **Du Noüy Ring** στο βασικό μενού.



5. Ελέγχουμε και υιοθετούμε τις τρέχουσες παραμέτρους. Η καταχώρηση της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ των δύο φάσεων στο **Density Diff.** είναι ιδιαίτερης σημασίας.



6. Μετακινούμε το επίπεδο δείγματος προς τα πάνω μέχρι ο δακτύλιος να βυθιστεί μέσα στην ελαφριά φάση. Το βάθος βύθισης πρέπει να είναι το ίδιο όπως και για την μετέπειτα μέτρηση. Περιμένουμε μέχρι το υγρό να έρθει σε ισορροπία.
7. Πατάμε **Tare** για μηδενισμό του βάρους του δακτυλίου στην ελαφριά φάση. Περιμένουμε μέχρι να εμφανιστεί η ένδειξη 0.0000 g στην επάνω δεξιά γωνία της οθόνης.



8. Μετακινούμε το επίπεδο δείγματος προς τα κάτω και αφαιρούμε το δοχείο δείγματος με την ελαφριά φάση. Αφαιρούμε το δακτύλιο από το άγκιστρο και καθαρίζουμε τον (περιλαμβάνοντας και την ερυθροπύρωση). Στη συνέχεια επανατοποθετούμε το δακτύλιο.
9. Πληρώνουμε το καθαρισμένο δοχείο δείγματος έως το ένα τρίτο με την βαρέα φάση (πυκνό υγρό) και τοποθετούμε το στο επίπεδο δείγματος.
10. Μετακινούμε την τράπεζα δείγματος προς τα πάνω μέχρι ο δακτύλιος να βυθιστεί 2-3mm μέσα στη βαρέα φάση. Περιμένουμε μέχρι το υγρό να έρθει σε ισορροπία.

11. Επικαλύπτουμε προσεκτικά την βαρέα φάση με την ελαφριά φάση. Το επίπεδο πλήρωσης εξαρτάται από τη βύθιση του δακτυλίου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απόβαρου.
12. Πατάμε **Start** για να μετρήσουμε την διεπιφανειακή τάση μεταξύ των υγρών.

Ring Method	0.0000 g
Id.-Number	St.-Dev.
001	0.1 mN/m
Reading limit	Density Diff.
10	0.998 g/ml
Stage Speed	Correction
25 %	Harkins&Jordan
Tare	Start
	Memory

Η μέτρηση γίνεται αυτόματα. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης θα εμφανιστούν οι μεμονωμένες τιμές μέτρησης. Στο τέλος η οθόνη εμφανίζει μια σελίδα με τη μέση τιμή για την επιφανειακή τάση, την τυπική απόκλιση και τις πειραματικές ρυθμίσεις.

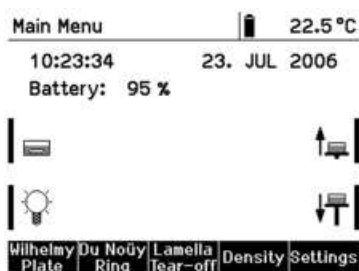
- Πατώντας **Abort** θα διακοπεί η μέτρηση. Ωστόσο, όλα τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί μέχρι το σημείο αυτό θα χαθούν.
 - Κατά τη διάρκεια της μέτρησης η επιφάνεια χαμηλώνει και γίνεται μέτρηση της μέγιστης δύναμης για την τάση του φιλμ κάτω από το δακτύλιο. Η μέτρηση σταματά όταν η μεμβράνη κάτω από το δακτύλιο σπάσει. Στην περίπτωση αυτή ελαττώστε την ταχύτητα μέτρησης και την ευαισθησία.
13. Αποθηκεύουμε τα αποτελέσματά μας, πατώντας **Save** και/ή τα εκτυπώνουμε (**Print**).
 14. Πατάμε **OK**.

Μετρήσεις πυκνότητας

Για τις μετρήσεις πυκνότητας, η υποδοχή για τον αισθητήρα πυκνότητας αλλά και ο αισθητήρας θα πρέπει να έχουν καθαριστεί από λίπη και να είναι στεγνά. Το αισθητήριο μέτρησης για τον καθορισμό της πυκνότητας υγρών θα πρέπει να είναι απολύτως καθαρό, χωρίς γράσο, αντιθέτως φυσαλίδες αέρα θα μπορούσαν να προσκολληθούν στην επιφάνειά του και να προκαλέσει λανθασμένες μετρήσεις. Απολιπώνουμε τον αισθητήρα πυκνότητας, π.χ. με ακετόνη ή ισοπροπανόλη. Στη συνέχεια, ξεπλένουμε με απεσταγμένο νερό και αφήνουμε να στεγνώσει. Αποφεύγουμε την επαφή με τα δάχτυλά σας. Αφού καθαριστούν θα πρέπει να αγγίζονται μόνο με λαβίδα.

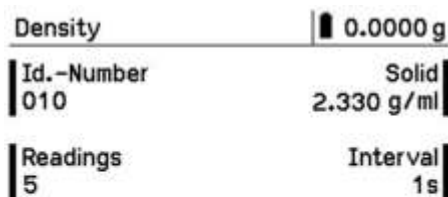
Διαδικασία μέτρησης πυκνότητας

1. Μετακινούμε το επίπεδο δείγματος προς τα κάτω.
2. Αναρτούμε τον καθαρισμένο υποδοχέα για να τοποθετηθεί το σώμα πυκνότητας στον αισθητήρα πίεσης.
3. Επιλέγουμε τη μέθοδο **Density** στο βασικό μενού.

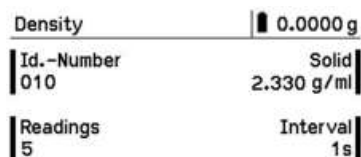


Ελέγχουμε και υιοθετούμε τις τρέχουσες παραμέτρους.

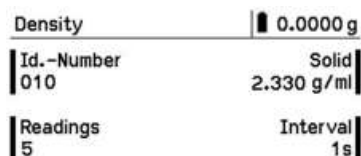
4. Αναμένουμε μέχρι ο υποδοχέας δεν κινείται πλέον. Πατάμε **Tare** και περιμένουμε έως ότου εμφανιστεί βάρος 0.0000g στην πάνω δεξιά γωνία της οθόνης.



5. Χρησιμοποιώντας λαβίδα τοποθετούμε το καθαρισμένο σώμα πυκνότητας. Περιμένουμε μέχρι ο υποδοχέας και το σώμα πυκνότητας είναι πλέον ακίνητα.
6. Πατάμε **Detect Weight** ώστε να προσδιοριστεί το βάρος του σώματος πυκνότητας στον Αέρα.



7. Χρησιμοποιώντας λαβίδα, αφαιρούμε το σώμα πυκνότητας από τον υποδοχέα.
8. Πληρώνουμε το υπό μέτρηση δείγμα στο δοχείο δείγματος και τοποθετούμε το δοχείο στο επίπεδο δείγματος.
9. Μετακινούμε το επίπεδο δείγματος προς τα πάνω μέχρι ο υποδοχέας να βυθιστεί μέσα στο υγρό έως σημείο του ζυγού.
10. Πατάμε **Tare** ξανά για να μηδενίσετε το βάρος του υποδοχέα μέσα στο υγρό. Περιμένουμε έως ότου εμφανιστεί βάρος 0.0000 g στην πάνω δεξιά γωνία της οθόνης.



11. Μετακινούμε το επίπεδο δείγματος προς τα κάτω και τοποθετούμε το βάρος στον υποδοχέα χρησιμοποιώντας λαβίδα.
12. Μετακινούμε το τραπέζι προς τα πάνω ώστε ο υποδοχέας με το σώμα πυκνότητας να είναι βυθισμένος μέσα στο υγρό. Ο υποδοχέας θα πρέπει να είναι βυθισμένος στο ίδιο ακριβώς βάθος με εκείνο της διαδικασίας απόβαρου. Περιμένουμε μέχρι ο υποδοχέας και το σώμα πυκνότητας δεν κινούνται πλέον και το υγρό έχει έρθει σε ισορροπία.
13. Πατάμε **Start** για τη μέτρηση της πυκνότητας του υγρού.

Density	0.0000 g
Id.-Number	Solid
010	2.330 g/ml
Readings	Interval
5	1s

Tare	Detect Weight	Start	Memory
------	---------------	-------	--------

Η μέτρηση γίνεται αυτόματα. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης θα εμφανιστούν οι μεμονωμένες τιμές μέτρησης. Στο τέλος η οθόνη εμφανίζει μια σελίδα με τη μέση τιμή για την τάση πυκνότητας, την τυπική απόκλιση και τις πειραματικές ρυθμίσεις.

- Πατώντας **Abort** θα διακοπεί η μέτρηση. Ωστόσο, όλα τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί μέχρι το σημείο αυτό θα χαθούν.

14. Αποθηκεύουμε τα αποτελέσματά μας πατώντας **Save** και/ή τα εκτυπώνουμε (**Print**).
15. Πατάμε **OK**.

4.2.7 Αεριοχρωματογραφική ανάλυση των διαλυμένων στο μονωτικό έλαιο αερίων

Το όργανο με το οποίο είναι εξοπλισμένο το Χημείο του ΣΕΜ-A είναι της εταιρείας Morgan Scaffer το μοντέλο Myrkos. Όλες οι διαδικασίες που απαιτούνται για την ανάλυση εκτελούνται μέσω φορητού ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος διαθέτει κατάλληλο λογισμικό όπου περιγράφονται αναλυτικά όλα τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν. Αρχικά, κατά την εκκίνηση της συσκευής απαιτείται να ελεγχθεί εάν το δοχείο αποθήκευσης αερίου περιέχει αέριο με πίεση μικρότερη από 200 psi ώστε στην περίπτωση αυτή να γίνει πλήρωση με το φέρον αέριο, στην συγκεκριμένη περίπτωση με ήλιο. Στη συνέχεια συγχρονίζεται ο φορητός υπολογιστής ελέγχου με ένα καλώδιο ethernet. Το επόμενο βήμα είναι η διαπίστωση πως οι τιμές της θερμοκρασίας των καναλιών A και B έχουν φτάσει στις προκαθορισμένες τιμές που αναγράφονται στη στήλη 'Set Point' (65°C για το κανάλι A και 45°C για το κανάλι B). Απαιτείται αναμονή 45 λεπτών προκειμένου να σταθεροποιηθεί το σύστημα στις προκαθορισμένες τιμές των καναλιών, για βέλτιστα αποτελέσματα στην ανάλυση των αερίων. Η τελική διαδικασία πριν την έναρξη της μέτρησης είναι η βαθμονόμηση του οργάνου. [19]

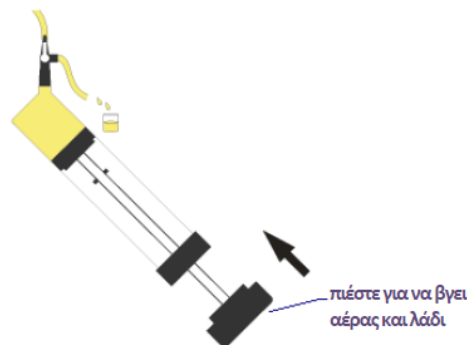
Δειγματοληψία

Πολύ σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων διαδραματίζει και ο τρόπος δειγματοληψίας. Τα βήματα δειγματοληψίας είναι τα εξής:

1. Γυρίζουμε τη λαβή της 3-οδης βαλβίδας της σύριγγας Shake Test κάθετα (κάθετη θέση: κλειστή) και στη συνέχεια πιέζουμε το έμβολο μέχρι να τερματίσει, ώστε να βγει όλος ο αέρας.



2. Χρησιμοποιούμε ένα σωληνάκι Tygon για να συνδέσουμε τη σύριγγα με την υποδοχή του δοχείου όπου βρίσκεται το δείγμα ελαίου. Γεμίζουμε τη σύριγγα με λίγα cc ελαίου από το δείγμα (περίπου το 1/8 του όγκου).
3. Στρέφουμε το στόμιο της σύριγγας προς τα πάνω. Γυρίζουμε τη λαβή της 3-οδης βαλβίδας προς το σωληνάκι Tygon (εισαγωγή ελαίου: κλειστή) και στη συνέχεια πιέζουμε το έμβολο για να βγει **όλος ο αέρας** και μεγάλη ποσότητα ελαίου.



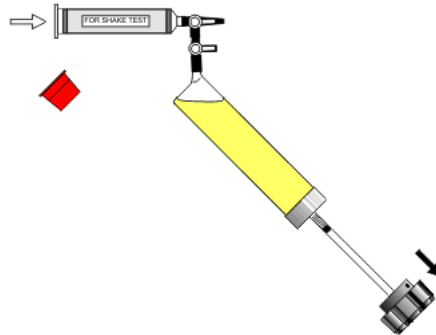
4. Γυρίζουμε τη λαβή της 3-οδης βαλβίδας της σύριγγας κάθετα (κάθετη θέση: κλειστή). Γεμίζουμε ολόκληρη τη σύριγγα με λάδι τραβώντας το έμβολο προς τα έξω. Περιστρέφουμε τον άξονα του εμβόλου ώστε η ακίδα μέτρησης να περάσει από τη σχισμή του καλύμματος της σύριγγας και το έμβολο να εκτονωθεί τελείως. Γυρίζουμε τη λαβή της 3-οδης βαλβίδας προς τη σύριγγα (κλείνοντας τη σύριγγα) και αφαιρούμε το σωληνάκι Tygon.

Προετοιμασία δείγματος λαδιού

1. Περιστρέφουμε τον άξονα του εμβόλου κατά 90° ώστε η ακίδα μέτρησης να μην μπορεί να περάσει από τη σχισμή του καλύμματος της σύριγγας.
2. Στρέφουμε το στόμιο της σύριγγας προς τα κάτω. Γυρίζουμε τη λαβή της 3-οδης βαλβίδας κάθετα (κάθετη θέση: κλειστή) και στη συνέχεια πιέζουμε το έμβολο μέχρις ότου η ακίδα μέτρησης χτυπήσει στο κάλυμμα της σύριγγας, αδειάζοντας ποσότητα

ελαίου. Στη σύριγγα θα παραμείνει η απαραίτητα για τη μέτρηση ποσότητα ελαίου. Γυρίζουμε τη λαβή της 3-οδης βαλβίδας προς τη σύριγγα (κλείνοντας τη σύριγγα).

3. Συνδέουμε στη σύριγγα την παγίδα CO₂ με τη σήμανση ‘FOR SHAKE TEST’ και αφαιρούμε το πορτοκαλί κάλυμμα της παγίδας. Στρέφουμε το στόμιο της σύριγγας προς τα πάνω. Γυρίζουμε τις λαβές των δύο 3-οδων βαλβίδων προς την ελεύθερη θέση (κλείνοντας την ελεύθερη θέση) και στη συνέχεια τραβάμε ολόκληρο το έμβολο προς τα έξω. Στη σύριγγα θα εισέλθει συγκεκριμένη ποσότητα καθαρού αέρα. Κλείνουμε την παγίδα CO₂ και την σύριγγα (λαβές βαλβίδων προς παγίδα και σύριγγα αντίστοιχα) και αφαιρούμε την παγίδα CO₂.

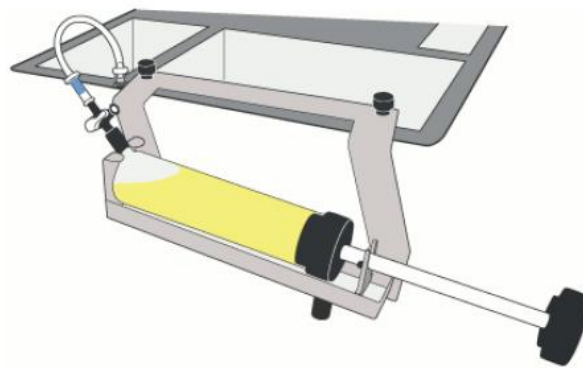


4. Ανακινούμε τη σύριγγα έντονα για 30 δευτερόλεπτα.
5. *επανάληψη βήματος 3)* Για να αφαιρεθεί ο αέρας που πιθανόν έχει διαλυθεί στο λάδι, ξανασυνδέουμε στη σύριγγα την παγίδα CO₂ με τη σήμανση ‘FOR SHAKE TEST’ και αφαιρούμε το πορτοκαλί κάλυμμα της παγίδας. Στρέφουμε το στόμιο της σύριγγας προς τα πάνω. Γυρίζουμε τις λαβές των δύο 3-οδων βαλβίδων προς τα ελεύθερα σημεία (κλείνοντας τα 2 ελεύθερα σημεία) και στη συνέχεια τραβάμε ολόκληρο το έμβολο προς τα έξω. Κλείνουμε την παγίδα CO₂ και την σύριγγα (λαβές βαλβίδων προς παγίδα και σύριγγα αντίστοιχα) και αφαιρούμε την παγίδα CO₂.
6. *(επανάληψη βήματος 4)* Ανακινούμε τη σύριγγα έντονα για 30 δευτερόλεπτα.
7. - Αν το έμβολο έχει παραμείνει ολόκληρο τραβηγμένο προς τα έξω, επιλέγουμε ‘**DONE**’ (ΟΛΟΚΛΗΡΩΘΗΚΕ). Αλλιώς επαναλαμβάνουμε το βήμα 3: Ξανασυνδέουμε στη σύριγγα την παγίδα CO₂ με τη σήμανση ‘FOR SHAKE TEST’ και αφαιρούμε το πορτοκαλί κάλυμμα της παγίδας. Στρέφουμε το στόμιο της σύριγγας προς τα πάνω. Γυρίζουμε τις λαβές των δύο 3-οδων βαλβίδων προς τα ελεύθερα σημεία (κλείνοντας τα 2 ελεύθερα σημεία) και στη συνέχεια τραβάμε ολόκληρο το έμβολο προς τα έξω. Κλείνουμε την παγίδα CO₂ και την σύριγγα (λαβές βαλβίδων προς παγίδα και σύριγγα αντίστοιχα) και αφαιρούμε την παγίδα CO₂.
- Επανατοποθετούμε το πορτοκαλί κάλυμμα στην παγίδα CO₂.

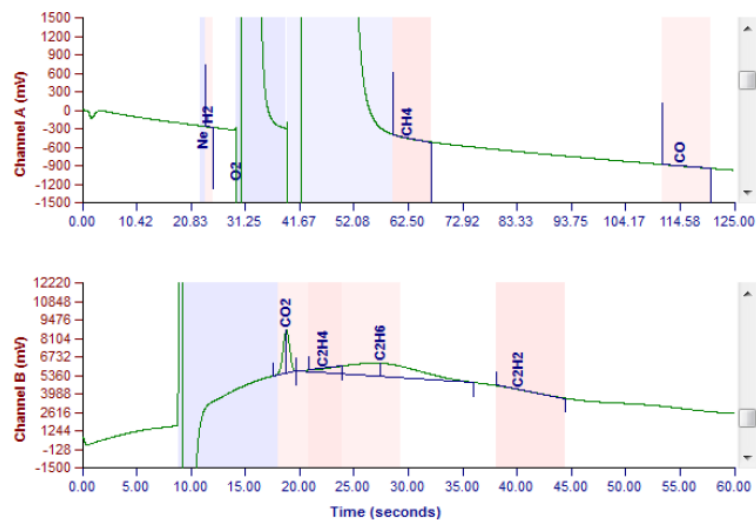
Διαδικασία μέτρησης

1. Συναρμολογούμε τη βάση στήριξης της σύριγγας . Βιδώνουμε τη βάση στο πλάι της συσκευής Myrkos. Τοποθετούμε τη σύριγγα Shake Test στη βάση στήριξης. Ο προεπιλεγμένος τύπος ελαίου είναι **ASTM 3612**. Επιλέγουμε ‘**Change Oil Type**’ για να αλλάξετε τον τύπο του ελαίου που θα μετρηθεί.

2. Παίρνουμε μια καινούργια ελαιοπαγίδα από το σακουλάκι. Δεν πρέπει να χρησιμοποιούμε ποτέ δύο φορές την ίδια παγίδα. Σε μια χρησιμοποιημένη ελαιοπαγίδα, το μπλε απορροφητικό υλικό στον αντάπτορα της ελαιοπαγίδας θα έχει σκουρύνει από το λάδι.
3. Συνδέουμε την σύριγγα με τη συσκευή χρησιμοποιώντας ελαιοπαγίδα, με τον αντάπτορα στην πλευρά της σύριγγας.
4. - Βεβαιωνόμαστε πως υπάρχει αέριο στο πάνω μέρος της σύριγγας. Περιστρέφουμε τον άξονα του εμβόλου της σύριγγας ώστε η ακίδα να είναι στην οριζόντια θέση. Τραβάμε το κινούμενο στέλεχος της βάσης στήριξης προς τα έξω (το ελατήριο θα τεντώσει), περνάμε το πίσω από την ακίδα της σύριγγας και το αφήνουμε απαλά ώστε να ακουμπήσει στην ακίδα. Στην ακίδα θα ασκείται η πίεση του ελατηρίου που θα εφαρμόζεται στο δείγμα
 - Περιστρέφουμε τη λαβή του εμβόλου και κινούμε την μπρος πίσω για να βεβαιωθούμε πως το έμβολο δεν έχει κολλήσει.
 - Γυρίζουμε τη λαβή της 3-οδης βαλβίδας κάθετα (κάθετη θέση: κλειστή).
 - Για την πρώτη μέτρηση του δείγματος πιέζουμε την ίδια στιγμή, βεβαιωνόμαστε πως δεν υπάρχει διαρροή, ελέγχοντας αν κινείται το έμβολο, ή αν υπάρχουν κινούμενες φυσαλίδες στο σωληνάκι της ελαιοπαγίδας. Αν διαπιστώσουμε διαρροή, απελευθερώνουμε το κινούμενο στέλεχος και ελέγχουμε τα σημεία σύνδεσης.
5. Για την πρώτη μέτρηση του δείγματος λαδιού πιέζουμε το κουμπί Purge



6. Επιλέγουμε το κουμπί Inject και η μέτρηση ξεκινάει.



5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

5.1 Φυσικοχημικά αποτελέσματα μετρήσεων

Στο Χημείο του Συνεργείου Επισκευής Μετασχηματιστών Αθηνών, εκτός από τις φυσικοχημικές μετρήσεις στο λάδι των μετασχηματιστών που εκτελούνται στον εντοπισμό μίας βλάβης ή κατά την διάρκεια συντήρησης – επισκευής αυτών, πραγματοποιούνται και περιοδικές μετρήσεις στα πλαίσια προληπτικών ελέγχων. Ο σκοπός των μετρήσεων αυτών, είναι η ανάλυση της ποιότητας του ελαίου και ο έλεγχος της γήρανσής του με την πάροδο των χρόνων. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επιδρούν στην γήρανση του λαδιού είναι η υψηλή θερμοκρασίας λειτουργίας, η εισροή υγρασίας με αποτέλεσμα την αλλοίωση των μονωτικών χαρτιών και τέλος η ύπαρξη οξυγόνο με άμεση συνέπεια την παρουσία προϊόντων οξείδωσης.

Στους Πίνακες 4 και 5 φαίνονται αντίστοιχα τα πρότυπα σύμφωνα με τα οποία εκτελέστηκαν οι μετρήσεις και τα όρια κάθε χαρακτηριστικού του μονωτικού ελαίου για την κατάταξή του ως καλό, ανεκτό ή πτωχό.

Πίνακας 4: Διεθνή πρότυπα ελέγχου χαρακτηριστικών μονωτικών ελαίων

ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ	ΠΡΟΤΥΠΟ
Χρώμα	ASTM D 1500
Πυκνότητα	ISO 3675
Οξύτητα	ASTM D 974-02
Υγρασία	ISO3675
Διηλεκτρική αντοχή	IEC 60156
Επιφανειακή τάση	ASTM D 971-91
Συντελεστής απωλειών	IEC 60247
Ειδική αντίσταση	IEC 60247

Πίνακας 5: Κατάταξη μονωτικών ελαίων

ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ	ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΕΛΑΙΟΥ κατά IEC 60422		
	ΚΑΛΟ	ΑΝΕΚΤΟ	ΠΤΩΧΟ
Χρώμα	< 2		> 2
Οξύτητα [mgr KOH/gr]	< 0,1	0,1 - 0,2	> 0,2
Υγρασία [ppm]	< 20	20 - 30	> 30
Διηλεκτρική αντοχή [kV]	> 50	40 - 50	< 40
Επιφανειακή τάση [mN/m]	> 28	22 - 28	< 22
Συντελεστής απωλειών	< 0,1	0,1 - 0,5	> 0,5
Ειδική αντίσταση [GΩm]	> 3	2 - 3	< 2

Υπάρχουν συγκεντρωτικά αποτελέσματα φυσικοχημικών μετρήσεων από το 2015, όταν πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες από όλα τα Κέντρα Διανομής (Κ/Δ) του Νομού Αττικής. Σε κάποια από τα Κ/Δ επαναλήφθηκαν οι μετρήσεις το 2017, ενώ στο σύνολό τους έγιναν το 2019. Τα Κ/Δ είναι 14 και αποτελούνται συνήθως από 3 μετασχηματιστές ισχύος 100MVA ή 50MVA. Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται για κάθε Κ/Δ ο αριθμός των

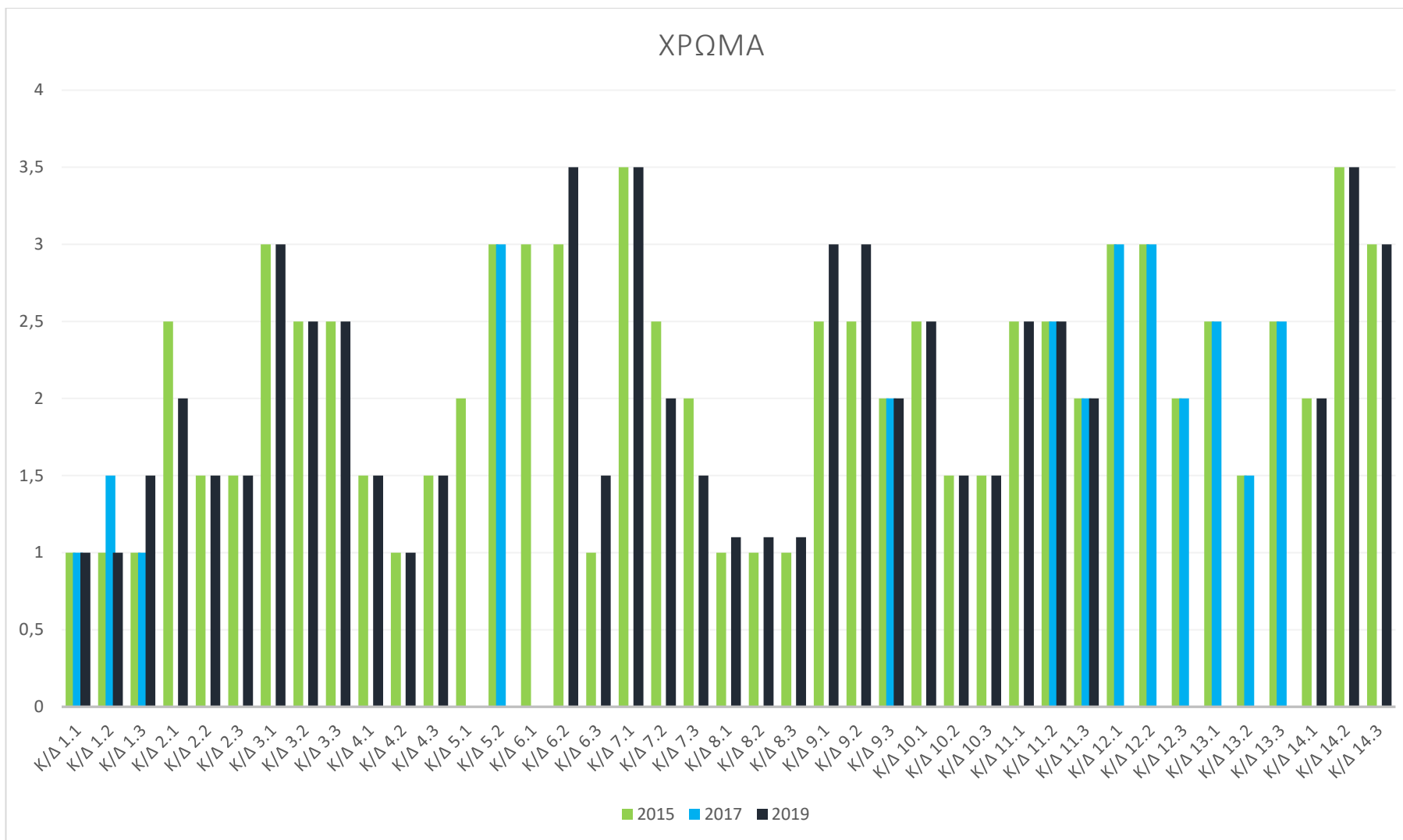
μετασχηματιστών, ο κατασκευαστής, η ισχύς και το έτος κατασκευής. Επίσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα εξής χαρακτηριστικά του ελαίου: χρώμα, πυκνότητα, οξύτητα, υγρασία, διηλεκτρική αντοχή, επιφανειακή τάση, συντελεστής απωλειών και ειδική αντίσταση. Όλοι οι μετασχηματιστές είναι τάσης 150/21kV.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα φυσικοχημικών αναλύσεων Κ/Δ Αττικής (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)

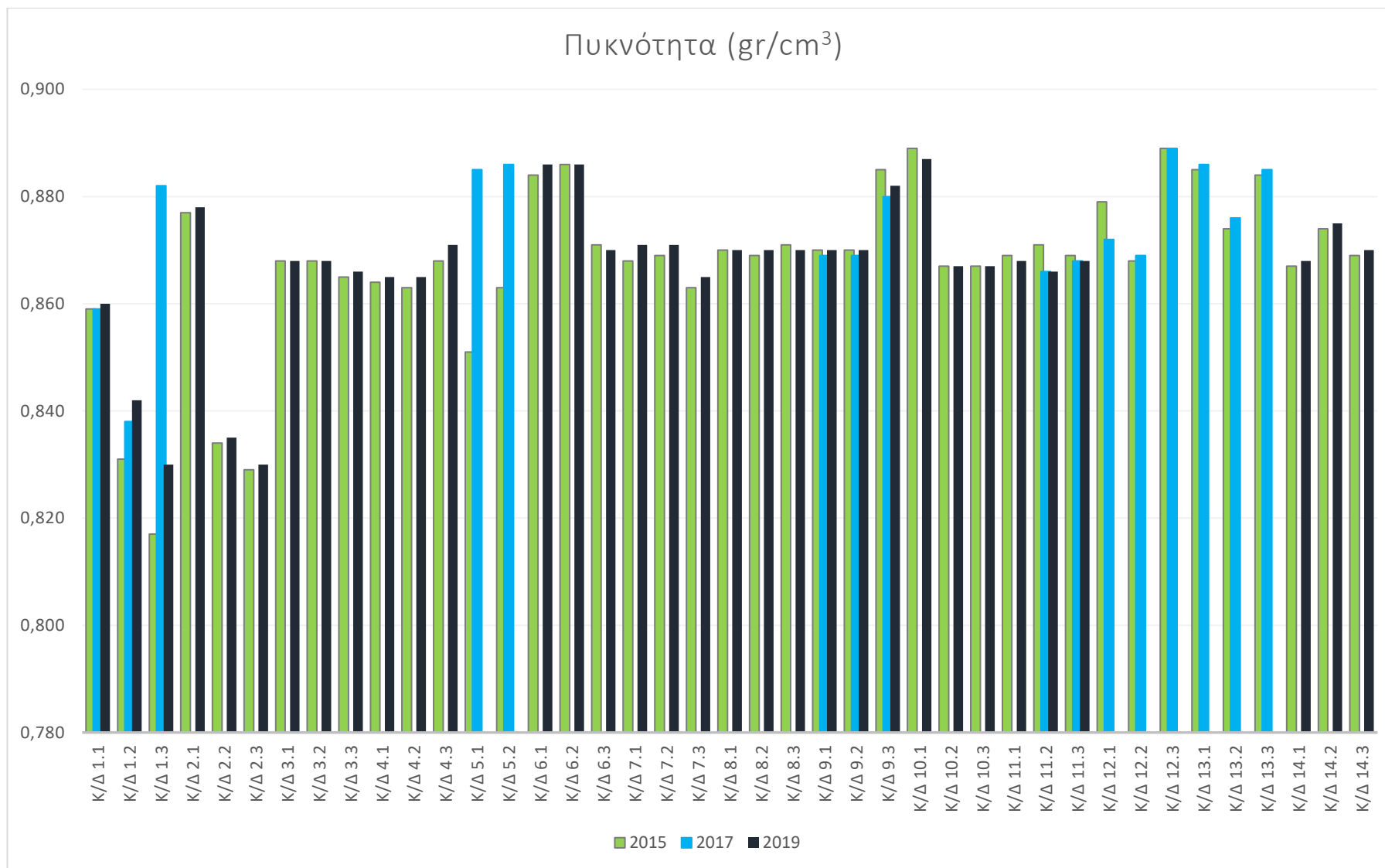
α/α	Κατασκευαστής	Ισχύς	Έτος Κατ'ής	Χρώμα			Πυκνότητα (gr/cm ³)			Οξύτητα (mgr (KOH)/gr)			Υγρασία (ppm)			Διηλεκτρική αντοχή (KV)			Επιφανειακή τάση (mN/m)			Συντελεστής Απολείων			Ειδική Αντίσταση GΩm		
				2015	2017	2019	2015	2017	2019	2015	2017	2019	2015	2017	2019	2015	2017	2019	2015	2017	2019	2015	2017	2019	2015	2017	2019
K/Δ 1.1	ASGEN	100	1967	1	1	1	0,859	0,859	0,86	-	0,03	0,03	16,8	20	18	73,3	74,8	76	35,3	33,4	33,2	0,0124	0,0088	0,0085	26	36,5	38,5
K/Δ 1.2	BHEL	100	2004	1	1,5	1	0,831	0,838	0,842	0,02	0,02	0,02	5,1	5,3	4,3	78,9	79,8	86,9	32,4	31,1	31,7	0,0044	0,0032	0,0031	95,3	172,5	189,7
K/Δ 1.3	BHEL	100	2011	1	1	1,5	0,817	0,882	0,83	0,01	0,02	0,02	7,6	11	8,7	75	82,2	82,5	40,7	37,3	39,4	0,0021	0,007	0,005	268	689,5	511,6
K/Δ 2.1	BHEL	100	2001	2,5		2	0,877		0,878	0,03		0,04	5,2		5,2	78,8		80,4	29,6		29,3	0,0278		0,0231	10,7		12,65
K/Δ 2.2	BHEL	100	2001	1,5		1,5	0,834		0,835	0,03		0,03	3,9		3,2	81,6		88,5	32,8		31,5	0,0071		0,0072	54,7		53,7
K/Δ 2.3	BHEL	100	2010	1,5		1,5	0,829		0,83	0,02		0,02	7,6		4,5	86,3		85,5	34,7		32,8	0,0048		0,007	88,7		84,4
K/Δ 3.1	TRAFU UNION	100	1974	3		3	0,868		0,868	0,04		0,07	4,1		5	87,3		83,9	20,9		19,6	0,0386		0,031	6,45		7,7
K/Δ 3.2	TRAFU UNION	100	1976	2,5		2,5	0,868		0,868	0,04		0,06	9,3		9	89,2		81,2	20,5		20,2	0,0625		0,0262	9,45		8,8
K/Δ 3.3	TRAFU UNION	100	1974	2,5		2,5	0,865		0,866	0,04		0,06	6,9		5,9	88,7		83,9	23,3		20,7	0,0331		0,031	7,75		9,4
K/Δ 4.1	ABB	50	2003	1,5		1,5	0,864		0,865	0,06		0,05	12,8		10,8	57,1		76,7	28,6		25,8	0,0061		0,0041	47		81,6
K/Δ 4.2	ABB	50	2003	1		1	0,863		0,865	0,03		0,03	5		8	68,4		81	35		31,5	0,003		0,0064	114		58,5
K/Δ 4.3	ABB	50	2009	1,5		1,5	0,868		0,871	0,04		0,05	6,9		8,1	75,7		92,8	25,6		22,1	0,006		0,0079	44,7		33,5
K/Δ 5.1	BHEL	100	1995	2	2+		0,851	0,885		0,03	0,02		6,8	4,5		76	82,1		31,4	32,1		0,0266	0,0291		17,8	10,5	
K/Δ 5.2	TRAFU UNION	100	1974	3	3		0,863	0,886		0,03	0,03		6,8	3,9		94,7	90,9		20,2	23,4		0,0348	0,031		6,5	8	
K/Δ 6.1	ALSTOM	50	2003	3		3,5+	0,884		0,886	0,1		0,07	16,2		8,7	80,5		90,3	17,57		17,8	0,0247		0,0256	10,7		9,3
K/Δ 6.2	ALSTOM	50	2003	3		3,5	0,886		0,886	0,1		0,05	15		8	82,3		82,1	19,89		17,6	0,0259		0,0272	10,5		9,2
K/Δ 6.3	ALSTOM	50	2009	1		1,5	0,871		0,87	0,02		0,02	6,5		5,9	85,8		83,9	40,01		34,5	0,0018		0,0012	130		324
K/Δ 7.1	TRAFU UNION	100	1976	3,5		3,5	0,868		0,871	0,05		0,07	7,5		4,2	86,1		86	19,7		18,2	0,0954		0,0329	6,25		7,4
K/Δ 7.2	TRAFU UNION	100	1976	2,5		2	0,869		0,871	0,04		0,05	8,2		9	87,7		89,8	22,7		21,9	0,0188		0,0209	12,65		11,5
K/Δ 7.3	BHEL	100	1998	2		1,5	0,863		0,865	0,03		0,03	3,5		3,4	75,5		79,8	28,1		30,4	0,0262		0,0174	15,6		16,3

Συνέχεια Πίνακα 6: Αποτελέσματα φυσικοχημικών αναλύσεων Κ/Δ Αττικής (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)

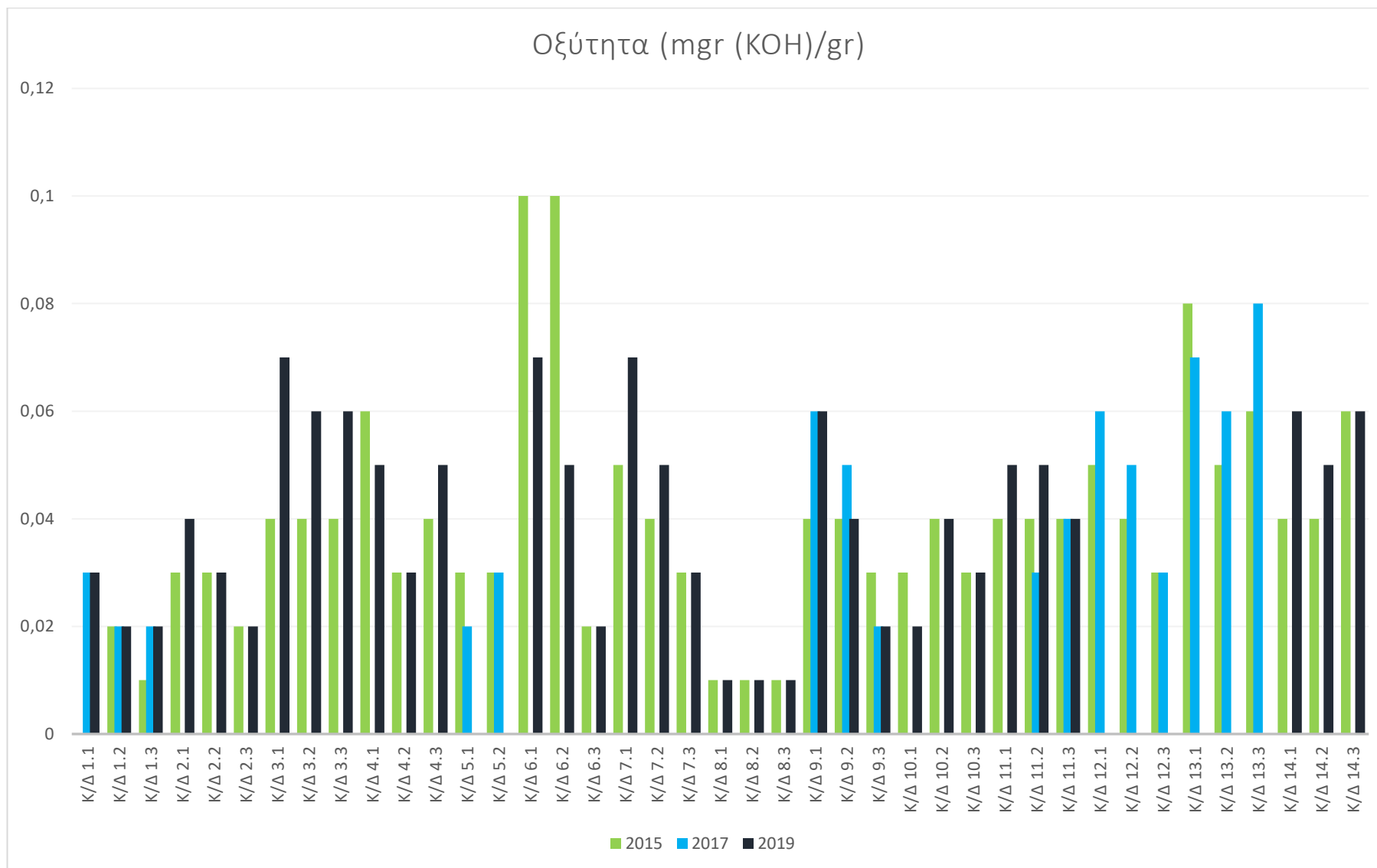
α/α	Κατασκευαστής	Ισχύς	Έτος Κατ'ής	Χρώμα			Πυκνότητα (gr/cm ³)			Οξύτητα (mgr (KOH)/gr)			Υγρασία (ppm)			Διηλεκτρική αντοχή (KV)			Επιφανειακή τάση (mN/m)			Συντελεστής Αποβλήτων			Ειδική Αντίσταση GΩm		
				2015	2017	2019	2015	2017	2019	2015	2017	2019	2015	2017	2019	2015	2017	2019	2015	2017	2019	2015	2017	2019	2015	2017	2019
K/Δ 8.1	AREVA	100	2004	1		1,1	0,87		0,87	0,01		0,01	6,1		4	83,6		80,7	36,2		38,1	0,0625		0,0009	93,45		153,7
K/Δ 8.2	AREVA	100	2004	1		1,1	0,869		0,87	0,01		0,01	4,9		3,6	83,1		86,7	40,7		41,3	0,0039		0,0049	199,8		138,5
K/Δ 8.3	AREVA	100	2004	1		1,1	0,871		0,87	0,01		0,01	4,9		6,7	88,5		85,1	44,1		43,6	0,0034		0,007	241,5		162,9
K/Δ 9.1	TRAFU UNION	100	1975	2,5	3 -	3	0,87	0,869	0,87	0,04	0,06	0,06	6,6	7,7	7,7	82,7	84	87,7	23,46	21,4	20,8	0,0291	0,0285	0,0266	9,2	9,9	9,8
K/Δ 9.2	TRAFU UNION	100	1975	2,5	3 -	3	0,87	0,869	0,87	0,04	0,05	0,04	7,1	8	5,8	78	86,2	94,5	22	21,1	20,8	0,0136	0,0266	0,0262	10,05	11,8	10,9
K/Δ 9.3	BHEL	100	1995	2	2	2	0,885	0,88	0,882	0,03	0,02	0,02	6,3	6,3	7,4	84,8	82,6	86,1	30,1	28,2	28,6	0,046	0,0456	0,0448	8,8	10	10
K/Δ 10.1	BHEL	100	1994	2,5		2,5	0,889		0,887	0,03		0,02	6,5		5,3	70,4		79,9	27		33,4	0,0046		0,0288	10		15,2
K/Δ 10.2	ASGEN	100	1967	1,5		1,5	0,867		0,867	0,04		0,04	12,8		11,1	52,3		64,4	24		25	0,0182		0,0148	16,4		22
K/Δ 10.3	ASGEN	100	1967	1,5		1,5	0,867		0,867	0,03		0,03	7,2		11,5	61,4		63,2	25,5		24,6	0,0101		0,0109	27,5		25
K/Δ 11.1	TRAFU UNION	100	1974	2,5		2,5	0,869		0,868	0,04		0,05	9,1		8,5	87,3		78,6	22,5		21,8	0,0373		0,0361	6,25		6,5
K/Δ 11.2	TRAFU UNION	100	1974	2,5	2,5	2,5	0,871	0,866	0,866	0,04	0,03	0,05	3,6	9,4	5,8	95,6	85,7	86,9	20,9	23,2	29,6	0,0259	0,0274	0,0285	9	9,3	8,6
K/Δ 11.3	TRAFU UNION	100	1976	2	2	2	0,869	0,868	0,868	0,04	0,04	0,04	13,8	15,8	14,4	84,6	79,8	75,6	23,7	24,7	25	0,0137	0,024	0,0152	16,2	35,5	16,5
K/Δ 12.1	TRAFU UNION	100	1974	3	3		0,879	0,872		0,05	0,06		9,8	4,8		91	84,7		22	20,1		0,0348	0,0339		6,7	6,5	
K/Δ 12.2	TRAFU UNION	100	1974	3	3		0,868	0,869		0,04	0,05		5,1	7		78,3	83,3		20	19,7		0,0329	0,0297		6,8	7,5	
K/Δ 12.3	BHEL	100	1995	2	2		0,889	0,889		0,03	0,03		4,9	4		78,3	83,9		29,15	31,4		0,0415	0,0412		8,4	11	
K/Δ 13.1	ALSTOM	50	2003	2,5	2,5		0,885	0,886		0,08	0,07		9,9	12,9		80	82,3		21,22	20		0,0133	0,0148		22,1	17,7	
K/Δ 13.2	ELECTROPUTERE	50	2010	1,5	1,5		0,874	0,876		0,05	0,06		11,6	5,6		76,1	93,7		25,1	22,2		0,0042	0,0067		61	34	
K/Δ 13.3	ALSTOM	50	2003	2,5	2,5		0,884	0,885		0,06	0,08		12,3	8,4		91,9	90,6		20,3	17,1		0,0137	0,0152		20,15	17,1	
K/Δ 14.1	ASGEN	100	1967	2		2	0,867		0,868	0,04		0,06	18,1		7,2	59,8		91,1	19,8		20,7	0,0183		0,0164	12,5		13,2
K/Δ 14.2	TRAFU UNION	100	1992	3,5		3,5	0,874		0,875	0,04		0,05	5,8		8,8	74,8		83,6	15,9		16,8	0,024		0,0205	10		11,9
K/Δ 14.3	TRAFU UNION	100		3		3	0,869		0,87	0,06		0,06	4,4		3	82,9		95,8	18,7		19,5	0,0259		0,0247	9,85		10,7



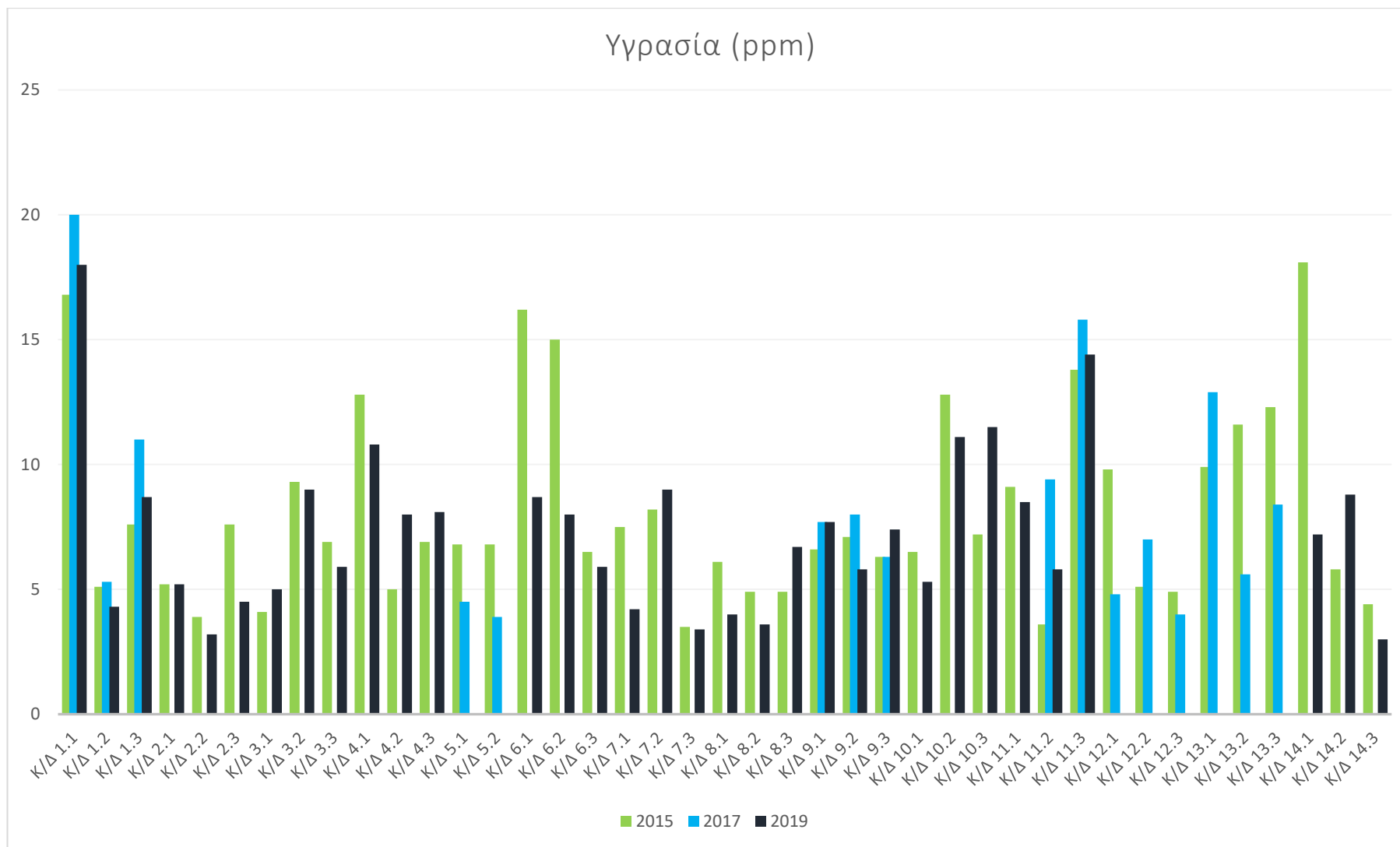
Σχήμα 5.1: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα του χρώματος του ελαίου, περίοδον 2015 – 2019



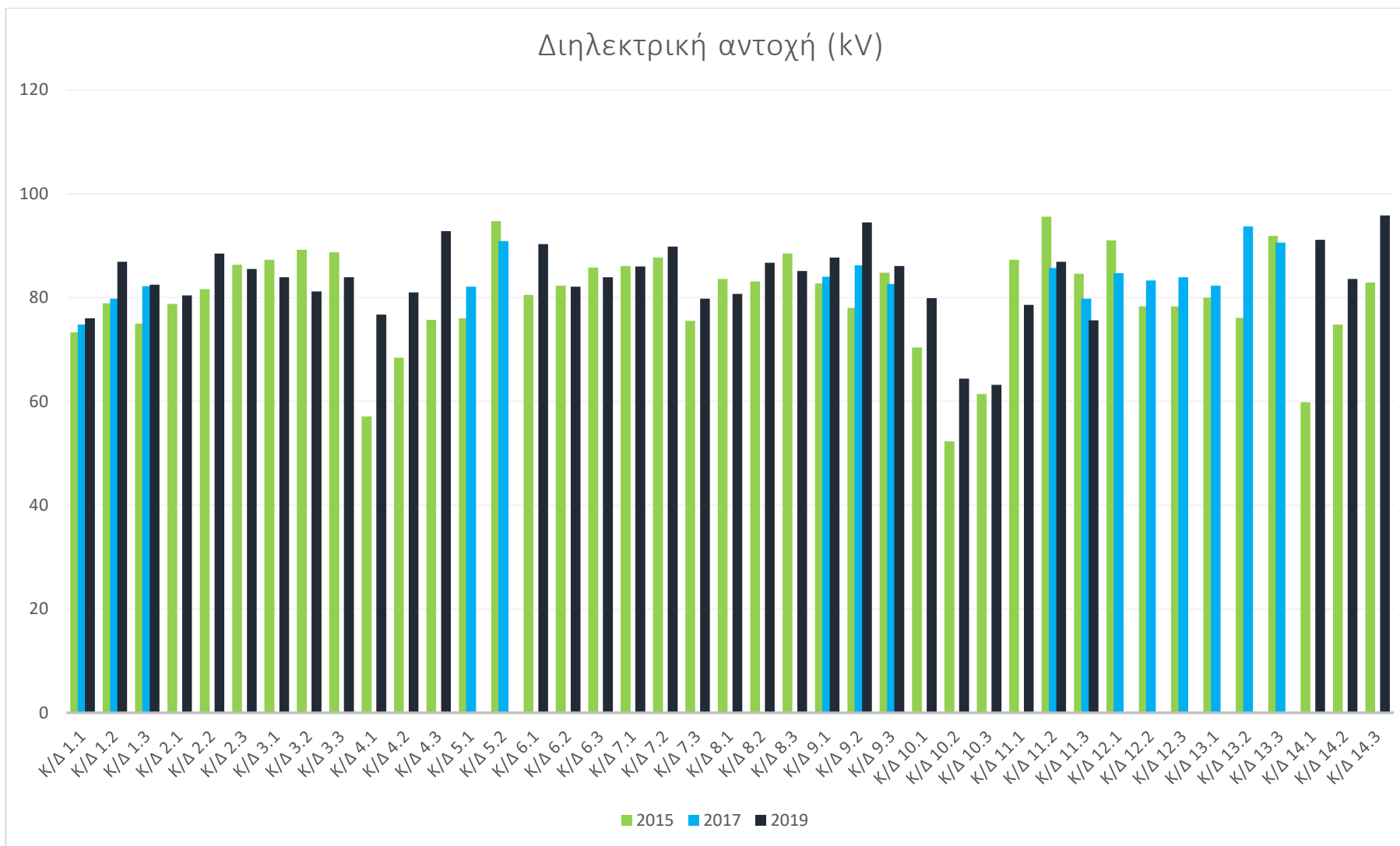
Σχήμα 5.2: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα της πυκνότητας του ελαίου, περίοδο 2015 – 2019



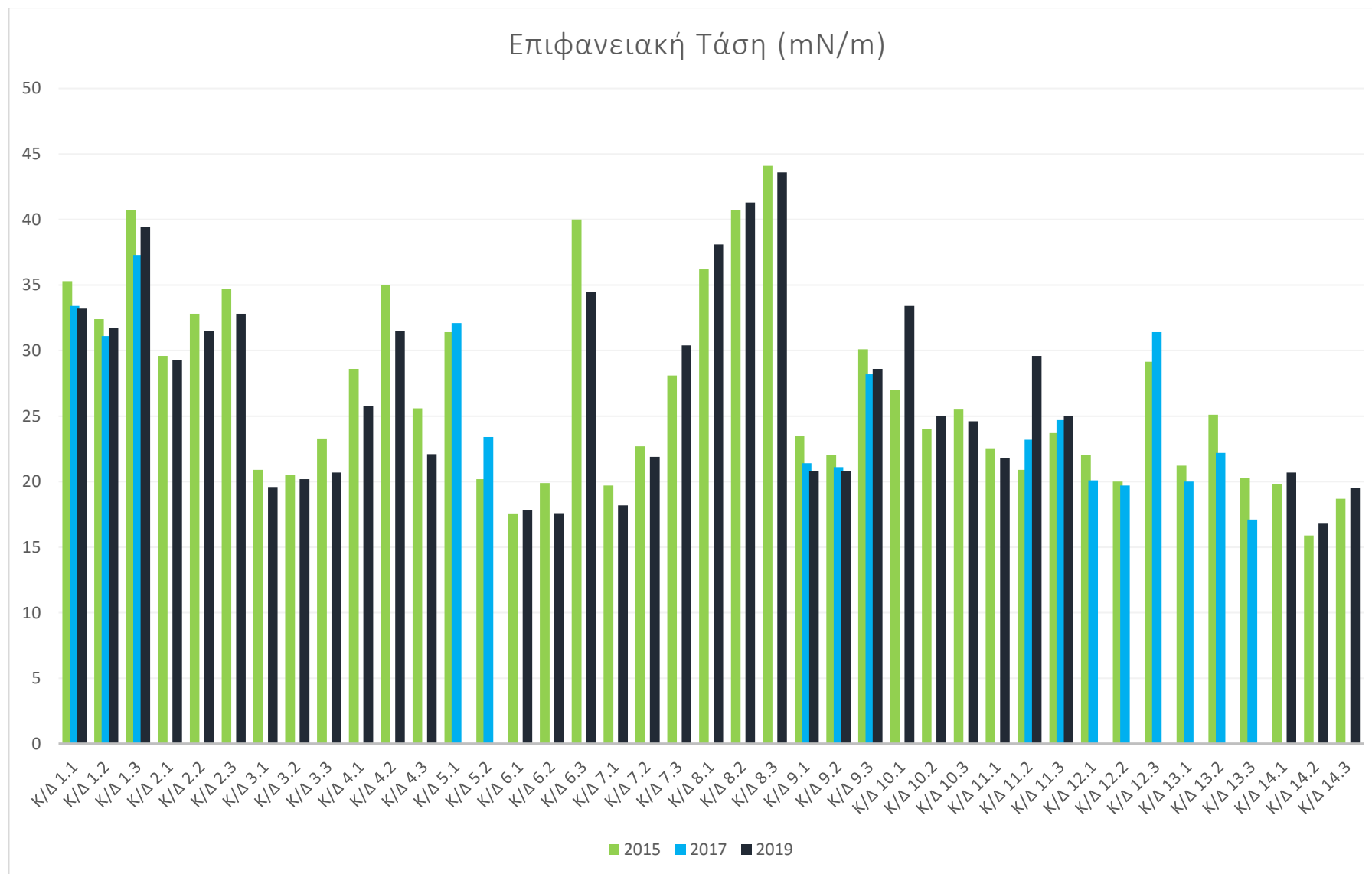
Σχήμα 5.3: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα της οξύτητας του ελαίου, περίοδο 2015 – 2019



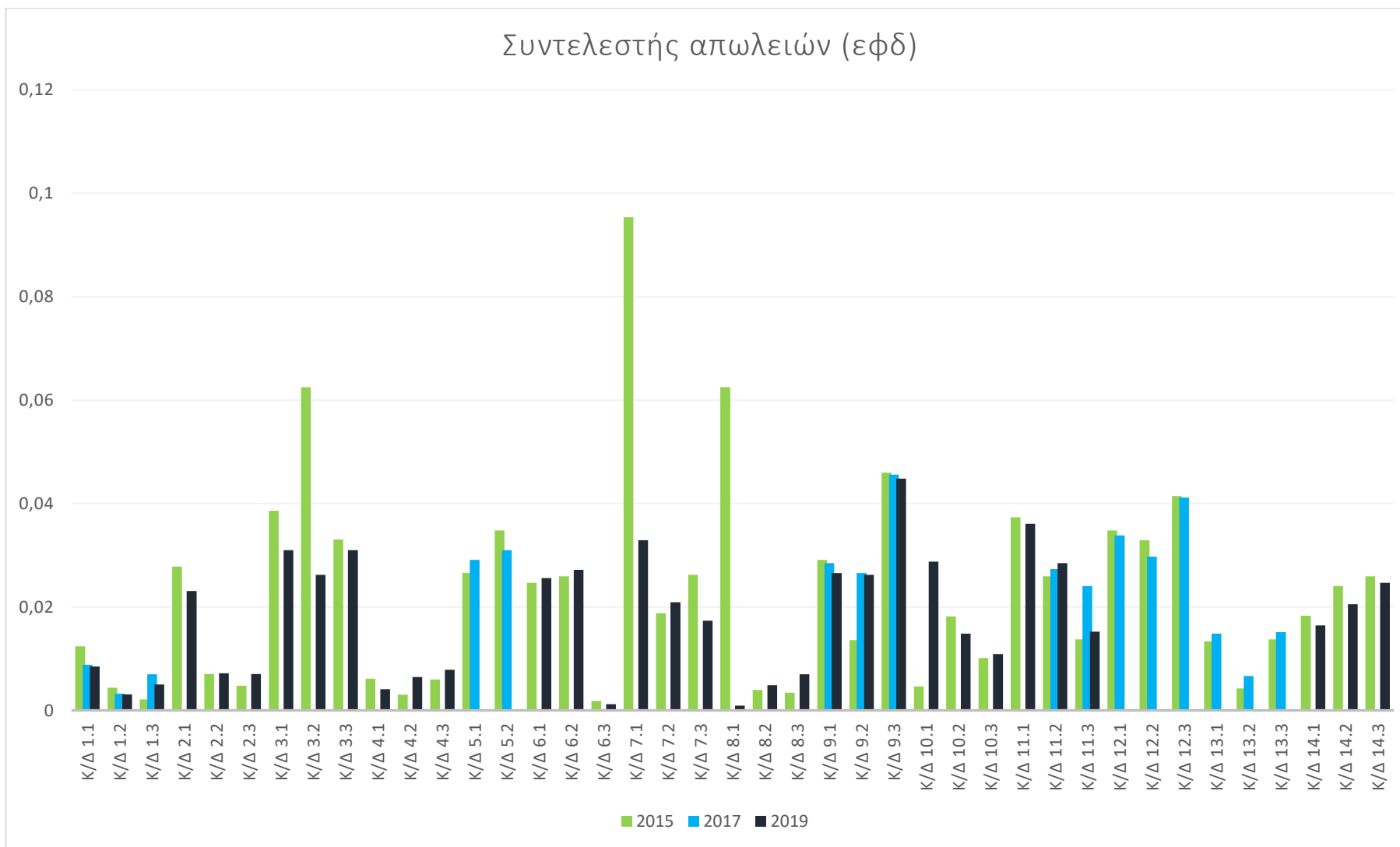
Σχήμα 5.4: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα της υγρασίας του ελαίου, περίοδου 2015 – 2019



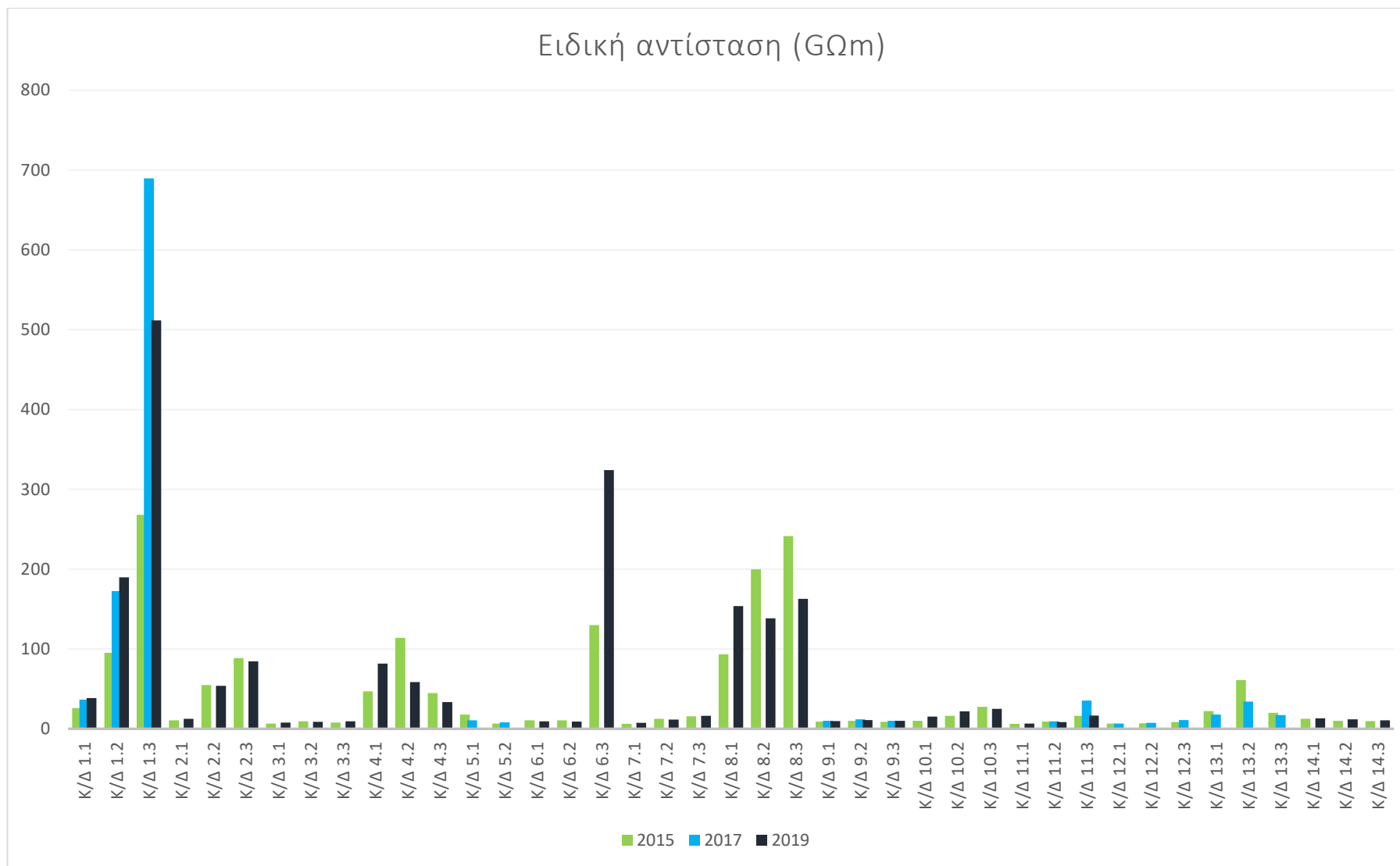
Σχήμα 5.5: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα της διηλεκτρικής αντοχής του ελαίου, περίοδον 2015 – 2019



Σχήμα 5.6: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα της επιφανειακής τάσης του ελαίου, περίοδο 2015 – 2019



Σχήμα 5.7: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα του συντελεστή απωλειών του ελαίου, περίοδου 2015 – 2019



Σχήμα 5.8: Φυσικοχημικές αναλύσεις Κ/Δ Αττικής ως προς την ιδιότητα της ειδικής αντίστασης του ελαίου, περιόδου 2015 – 2019

5.2 Αποτελέσματα αεριοχρωματογραφικών αναλύσεων

Εκτός από τις φυσικοχημικές μετρήσεις, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, το ΣΕΜ-Α διαθέτει και συσκευή κατάλληλη για την εκτέλεση αεριοχρωματογραφικών αναλύσεων (Dissolves Gas Analysis, DGA). Η αεριοχρωματογραφική ανάλυση αποτελεί μια σπουδαία μέθοδο για τον προσδιορισμό της κατάστασης του μετασχηματιστή καθώς μπορεί να εξακριβώσει τυχόν υπερθερμάνσεις, μερικές εκκενώσεις, θερμά σημεία και σπινθηρισμούς. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται είτε για τη δημιουργία τιμών αναφοράς ώστε σε μελλοντικές μετρήσεις να μπορεί να γίνει σύγκριση της συγκέντρωσης των αερίων, είτε για την εκτέλεση περιοδικών μετρήσεων ώστε να ανιχνευτούν τυχόν μετασχηματιστές με υψηλό κίνδυνο επικείμενης βλάβης. Τα αέρια που ελευθερώνονται είναι συνήθως το υδρογόνο (H₂), το μεθάνιο (CH₄), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το αιθυλένιο (C₂H₄), αιθάνιο (C₂H₆) και το ακετυλένιο (C₂H₂). Για την ερμηνεία των συγκεντρώσεων των αερίων στο λάδι και την κατάσταση του μετασχηματιστή έχουν σχηματιστεί τα πρότυπα IEEE C 57-104 και IEC 60599 τα όρια των οποίων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 7: Όρια συγκεντρώσεων διαλυμένων αερίων σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 60599 και IEEE C 57-104 σε ppm

A/A	ΥΔΡΟΓΟΝΟ H ₂	ΜΕΘΑΝΙΟ CH ₄	ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ CO	ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ CO ₂	ΑΙΘΥΛΕΝΙΟ C ₂ H ₄	ΑΙΘΑΝΙΟ C ₂ H ₆	ΑΚΕΤΥΛΕΝΙΟ C ₂ H ₂	
IEC 60599	50 - 150	30 - 130	400 - 600	3800 - 14000	60 - 280	20 - 90	60 - 280	
IEEE Κατάσταση	1	100	120	350	2500	50	65	35
	2	101 - 700	121 - 400	351 - 570	2500 - 4000	51 - 100	66 - 100	36 - 50
	3	701 - 1800	401 - 1000	571 - 1400	4001 - 10000	101 - 200	101 - 150	51 - 80
	4	>1800	>1000	>1400	>10000	>200	>150	>80

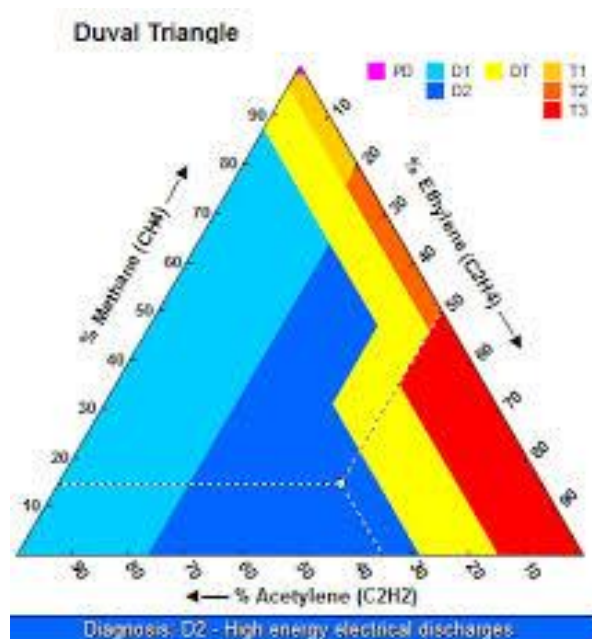
Πίνακας 8: Περιγραφή καταστάσεων σύμφωνα με το πρότυπο IEEE C 57-104

	Συνολικές συγκεντρώσεις αερίων (δε συμπεριλαμβάνεται το CO ₂)	Ημερήσια αύξηση σε ppm	Ενέργειες	
			Επόμενη δειγματοληψία	Διαδικασίες Λειτουργίας
Κατάσταση 1	< 720 ppm	< 10	6 μήνες	Καλή λειτουργία
		10 - 30	3 μήνες	
		> 30	μηνιαίως	Κίνδυνος. Ανάλυση του κάθε αερίου. Καθορισμός του φορτίου.
Κατάσταση 2	721 - 1920 ppm	< 10	3 μήνες	Κίνδυνος. Ανάλυση του κάθε αερίου. Καθορισμός του φορτίου.
		10 - 30	μηνιαίως	
		> 30	μηνιαίως	
Κατάσταση 3	1941 - 2630 ppm	< 10	μηνιαίως	Μεγάλος κίνδυνος. Μ/Σ εκτός λειτουργίας. Αξιολόγηση βλάβης
		10 - 30	εβδομαδιαίως	
		> 30	εβδομαδιαίως	
Κατάσταση 4	> 4639 ppm	< 10	εβδομαδιαίως	Μεγάλος κίνδυνος. Μ/Σ εκτός λειτουργίας. Αξιολόγηση βλάβης
		10 - 30	ημερησίως	
		> 30	ημερησίως	Μ/Σ εκτός δικτύου. Αξιολόγηση βλάβης

Επίσης, η συσκευή αεριοχρωματογραφικής ανάλυσης Μγκκος υπολογίζει και τους λεγόμενους λόγους Rogers. Η μέθοδος αυτή έχει ισχύ μόνο όταν υπάρχει σημαντική συγκέντρωση ενός τουλάχιστον εκ των τριών αερίων CH₄, C₂H₂ και C₂H₄. Οι λόγοι τους Rogers R₁, R₂ και R₅ αντιστοιχούν στους λόγους των συγκεντρώσεων των διαλυμένων αερίων όπως φαίνεται παρακάτω:

$$R_1 = \frac{CH_4}{H_2} \quad R_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \quad R_5 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

Τέλος, διατίθεται στον αναλυτή, ως εργαλείο εκτίμησης του σφάλματος, το τρίγωνο του Duval. Η μέθοδος Duval Triangle αφορά μόνο τα τρία αέρια υδρογονανθράκων CH₄, C₂H₄ και C₂H₂. Η κάθε πλευρά του τριγώνου εκφράζει το ποσοστό του κάθε αερίου ως προς το σύνολο και των τριών αερίων, ενώ το εμβαδό του τριγώνου Duval χωρίζεται σε έξι ζώνες, που η κάθε μία προσδιορίζει την αιτία του σφάλματος.



Σχήμα 5.9: Τρίγωνο Duval (Πηγή: [12])

Οι περιοχές σφαλμάτων καθορίζονται ως εξής:

PD : μερικές εκκενώσεις

T1 : θερμικό σφάλμα σε θερμοκρασία <300°C

T2 : θερμικό σφάλμα μεταξύ 300°C και 700°C

T3 : θερμικό σφάλμα μεγαλύτερη από 700°C

D1 : Εκκενώσεις χαμηλής ενέργειας

D2 : Εκκενώσεις υψηλής ενέργειας (τόξα)

DT : Συνδυασμός θερμικών και ηλεκτρικών σφαλμάτων

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι τόσο οι λόγοι του Rogers, όσο και το τρίγωνο του Duval δεν αποτελούν μεθόδους εντοπισμού σφαλμάτων παρά ανάλυση αυτών, εφόσον έχει επιβεβαιωθεί η ύπαρξη των σφαλμάτων με την αξιοποίηση των προτύπων.

Η καταπόνηση που δέχεται ο μετασχηματιστής έχει ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση αερίων στο λάδι. Το είδος της καταπόνησης συσχετίζεται με τη δημιουργία αερίων ως εξής:

- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO):
 - Η ύπαρξη του μονοξειδίου του άνθρακα υποδηλώνει θερμική γήρανση του χαρτιού ή μερικές εκκενώσεις μέσα σε στερεά μόνωση.

- Υδρογόνο (H₂):
 - Οι υψηλές συγκεντρώσεις του υδρογόνου δημιουργούνται από την ηλεκτρόλυση ελεύθερου νερού.

- Ακετυλένιο (C₂H₂):
 - Η ύπαρξη του ακετυλενίου οφείλεται κυρίως σε ηλεκτρικό σφάλμα, αφού για την παραγωγή άνθρακα με τριπλό δεσμό απαιτείται θερμοκρασία μεγαλύτερη από 500°C περίπου.

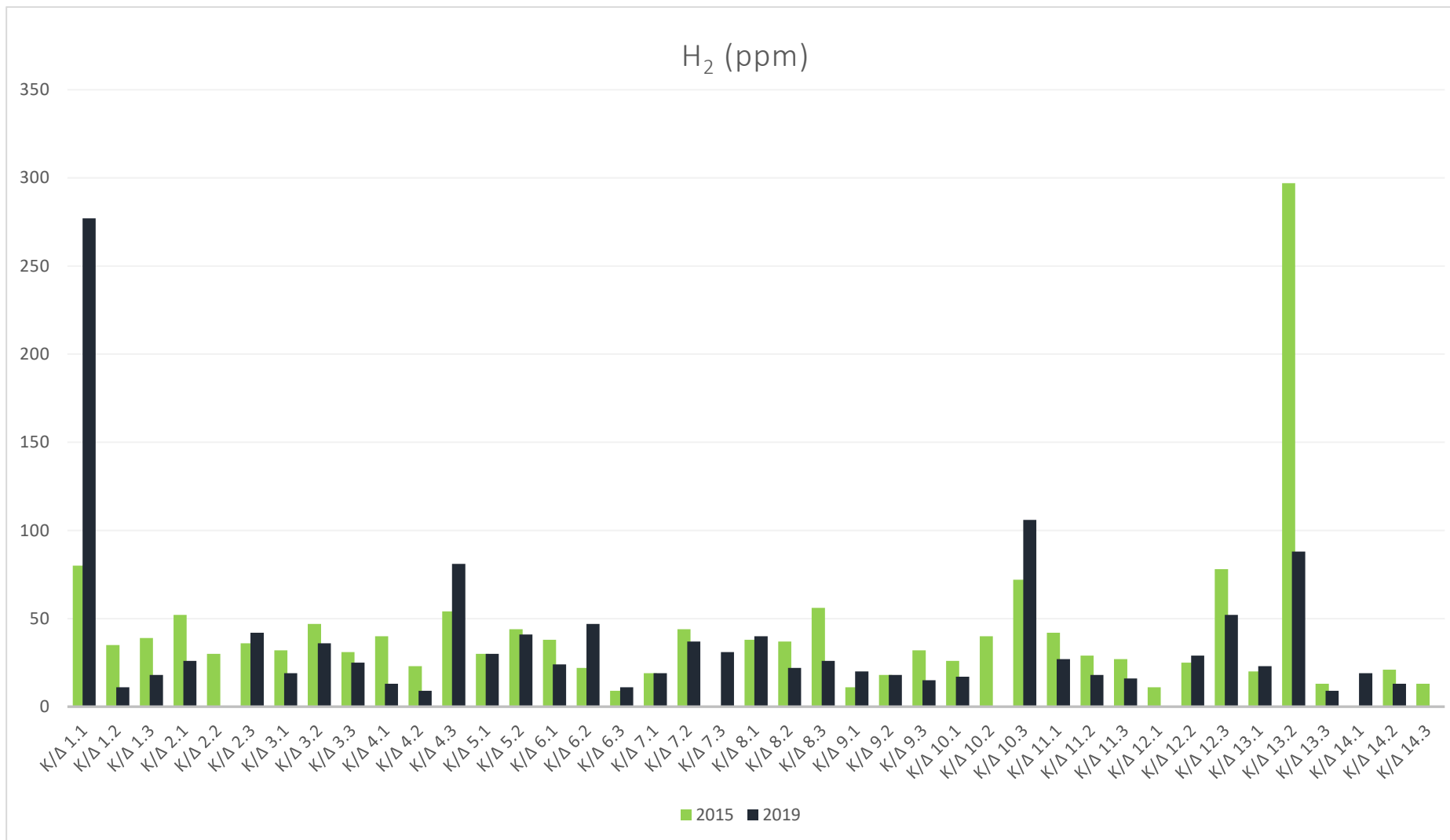
- Αιθυλένιο (C₂H₄):
 - Μεγάλες ποσότητες αιθυλενίου μπορούν να παραχθούν από θερμική καταπόνηση σε μέτριες θερμοκρασίες

- Μεθάνιο, αιθάνιο και αιθυλένιο (CH₄, C₂H₆ και C₂H₄):
 - Οι συγκεντρώσεις των αερίων αυτών υποδηλώνουν θερμική καταπόνηση του μονωτικού λαδιού.

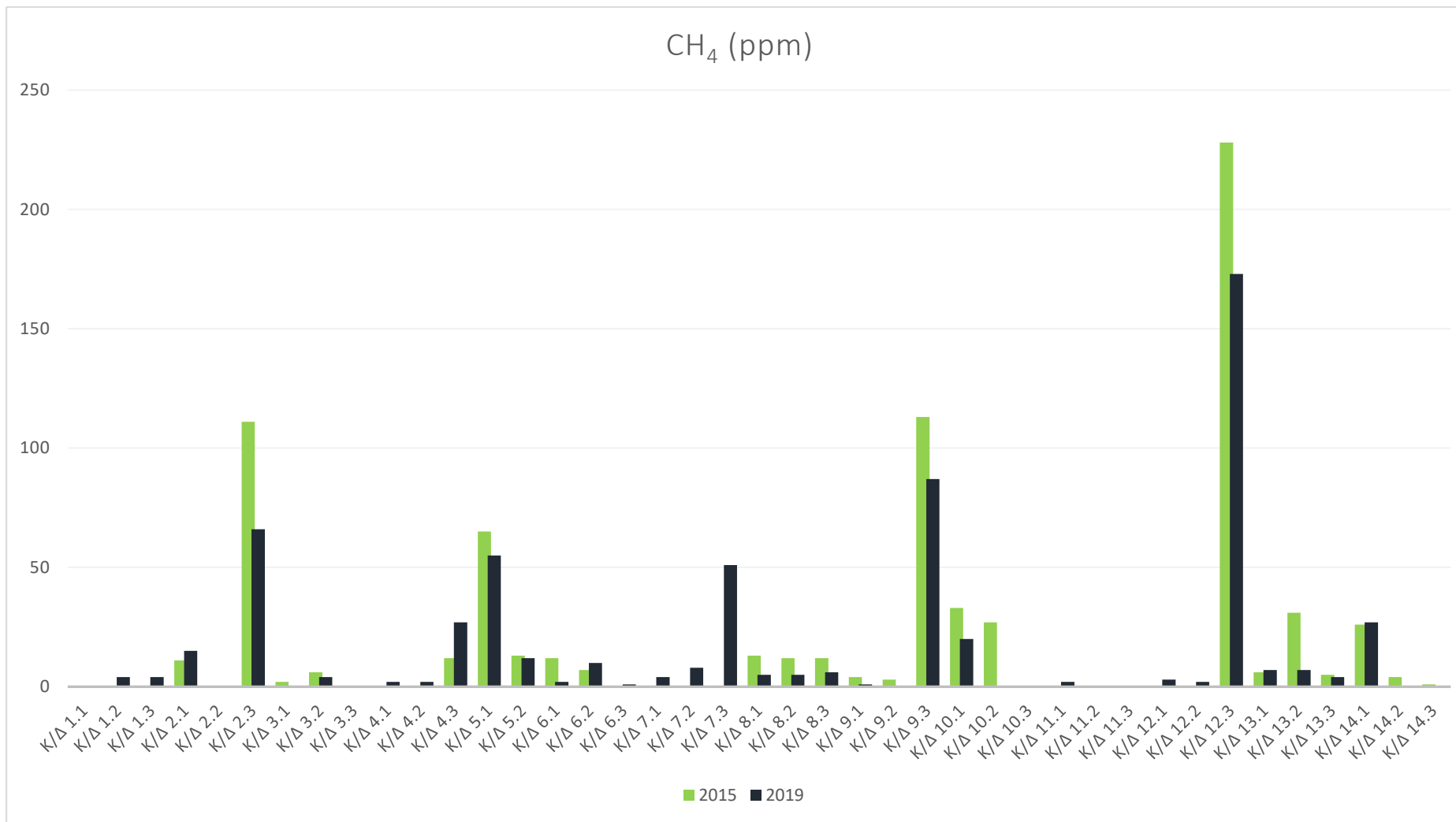
Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου αυτού, το ΣΕΜ-Α έχει προχωρήσει σε αεριοχρωματογραφική ανάλυση των μονωτικών λαδιών των μετασχηματιστών που βρίσκονται στα Κ/Δ της Αττικής για τα έτη 2015 και 2019, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθεντο στον Πίνακα 9. Με κόκκινο πλαίσιο έχουν σημειωθεί οι τιμές των αερίων που είναι εκτός των ορίων που αναφέρονται στα πρότυπα IEEE C 57-104 και IEC 60599.

Πίνακας 9: Αποτελέσματα αεριοχρωματογραφικών αναλύσεων Κ/Δ Αττικής (Πηγή: Αρχείο ΣΕΜ-Α)

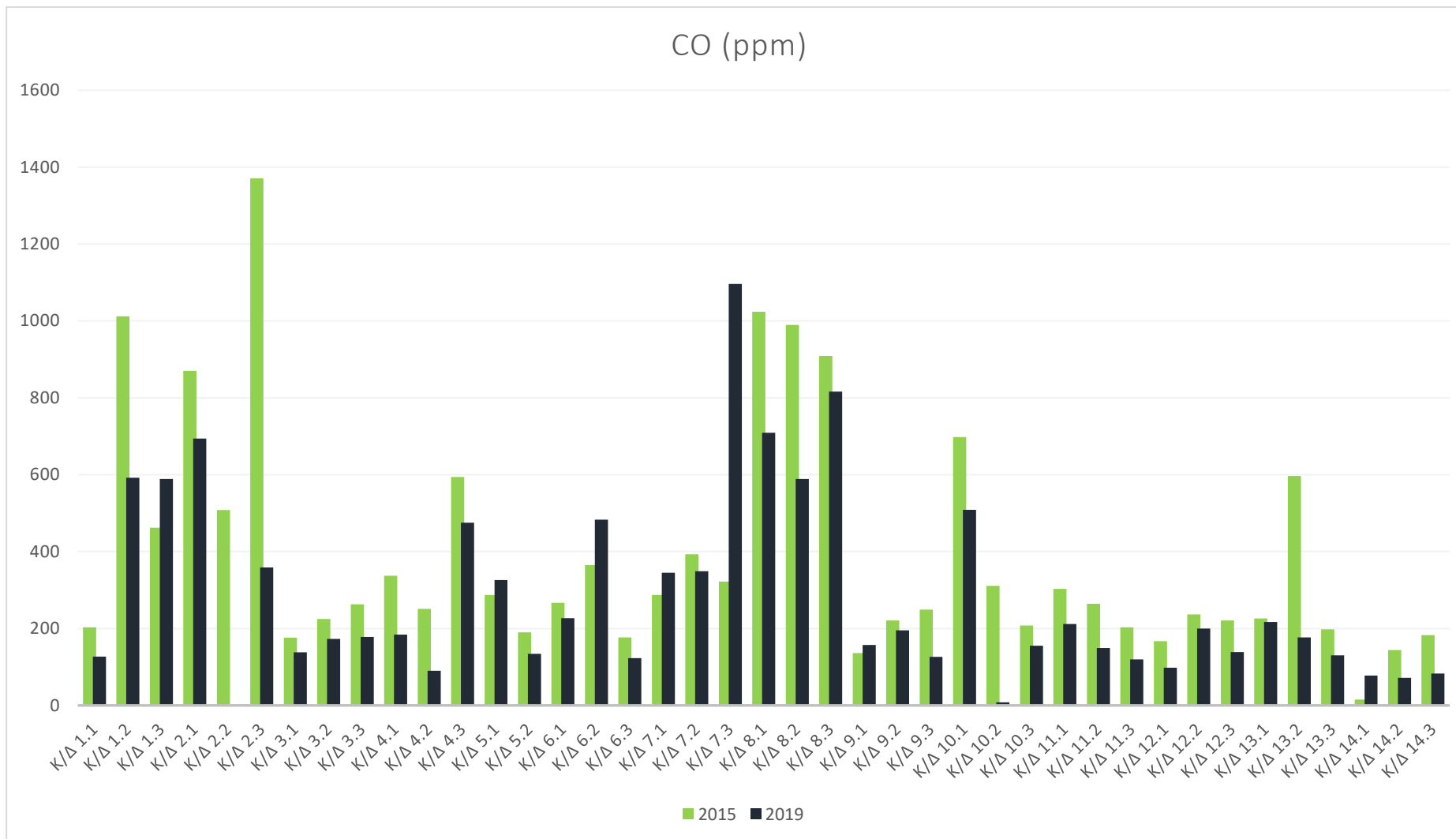
α/α	Κατασκευαστής	Ισχύς	Έτος Κατ'ής	H2		CH4		CO		CO2		C2H4		C2H6		C2H2	
				2015	2019	2015	2019	2015	2019	2015	2019	2015	2019	2015	2019	2015	2019
Κ/Δ 1.1	ASGEN	100	1967	80	277	882	1549	203	127	3359	2680	4242	5646	0	1708	26	57
Κ/Δ 1.2	BHEL	100	2004	35	11	0	4	1012	592	5124	3737	0	18	0	0	0	0
Κ/Δ 1.3	BHEL	100	2011	39	18	0	4	462	589	3370	3278	0	1	0	0	0	0
Κ/Δ 2.1	BHEL	100	2001	52	26	11	15	870	694	6235	4961	0	15	0	0	0	0
Κ/Δ 2.2	BHEL	100	2001	30		0		508		5297		0		0		0	
Κ/Δ 2.3	BHEL	100	2010	36	42	111	66	1371	359	10224	3257	0	159	0	14	10	0
Κ/Δ 3.1	TRAFO UNION	100	1974	32	19	2	0	176	138	2700	2032	0	8	0	0	6	0
Κ/Δ 3.2	TRAFO UNION	100	1976	47	36	6	4	225	173	3356	2880	0	21	0	2	11	3
Κ/Δ 3.3	TRAFO UNION	100	1974	31	25	0	0	263	178	3274	2705	0	11	0	0	0	0
Κ/Δ 4.1	ABB	50	2003	40	13	0	2	337	184	16026	9197	0	22	0	16	0	0
Κ/Δ 4.2	ABB	50	2003	23	9	0	2	251	90	10492	6311	0	43	0	8	0	0
Κ/Δ 4.3	ABB	50	2009	54	81	12	27	594	475	11072	8279	0	15	54	111	9	0
Κ/Δ 5.1	BHEL	100	1995	30	30	65	55	287	326	4096	2836	0	0	0	12	15	0
Κ/Δ 5.2	TRAFO UNION	100	1974	44	41	13	12	190	134	3380	2302	0	0	0	0	130	97
Κ/Δ 6.1	ALSTOM	50	2003	38	24	12	2	267	227	0	10644	0	76	0	19	199	97
Κ/Δ 6.2	ALSTOM	50	2003	22	47	7	10	365	483	14332	12083	0	7	0	8	0	2
Κ/Δ 6.3	ALSTOM	50	2009	9	11	0	1	177	123	4651	3947	0	11	0	4	8	0
Κ/Δ 7.1	TRAFO UNION	100	1976	19	19	0	4	287	345	5129	4189	0	23	0	5	0	0
Κ/Δ 7.2	TRAFO UNION	100	1976	44	37	0	8	393	349	5745	4832	0	28	0	2	59	46
Κ/Δ 7.3	BHEL	100	1998	0	31	0	51	322	1096	4658	5689	0	72	0	14	0	0
Κ/Δ 8.1	AREVA	100	2004	38	40	13	5	1024	709	4481	3704	0	0	0	0	0	0
Κ/Δ 8.2	AREVA	100	2004	37	22	12	5	990	589	3297	2770	0	1	0	0	0	0
Κ/Δ 8.3	AREVA	100	2004	56	26	12	6	909	816	4290	3710	0	0	0	0	0	0
Κ/Δ 9.1	TRAFO UNION	100	1975	11	20	4	1	136	157	3277	2652	0	21	0	3	10	9
Κ/Δ 9.2	TRAFO UNION	100	1975	18	18	3	0	221	195	3604	2798	0	6	0	0	3	2
Κ/Δ 9.3	BHEL	100	1995	32	15	113	87	249	126	2983	1908	0	18	149	152	0	0
Κ/Δ 10.1	BHEL	100	1994	26	17	33	20	698	509	0	3119	0	23	0	7	0	0
Κ/Δ 10.2	ASGEN	100	1967	40	0	27	0	311	8	0	169	0	1	0	0	8	0
Κ/Δ 10.3	ASGEN	100	1967	72	106	265	293	208	155	2733	2151	889	1172	72	229	52	40
Κ/Δ 11.1	TRAFO UNION	100	1974	42	27	0	2	303	212	3903	2796	0	18	0	2	5	6
Κ/Δ 11.2	TRAFO UNION	100	1974	29	18	0	0	264	149	3464	2174	0	6	0	0	0	0
Κ/Δ 11.3	TRAFO UNION	100	1976	27	16	0	0	203	120	5028	2791	0	6	0	0	0	0
Κ/Δ 12.1	TRAFO UNION	100	1974	11	0	0	3	167	98	2942	1682	0	7	0	18	7	18
Κ/Δ 12.2	TRAFO UNION	100	1974	25	29	0	2	237	200	3267	2050	0	7	0	0	6	3
Κ/Δ 12.3	BHEL	100	1995	78	52	228	173	221	139	3296	1918	0	70	66	86	0	0
Κ/Δ 13.1	ALSTOM	50	2003	20	23	6	7	226	217	14094	9085	0	0	0	0	0	0
Κ/Δ 13.2	ELECTROPUTERE	50	2010	297	88	31	7	597	177	7485	4911	0	0	121	65	0	0
Κ/Δ 13.3	ALSTOM	50	2003	13	9	5	4	198	130	10579	6981	0	0	10	0	0	0
Κ/Δ 14.1	ASGEN	100	1967	0	19	26	27	15	78	846	1441	133	111	0	18	9	21
Κ/Δ 14.2	TRAFO UNION	100	1992	21	13	4	0	144	72	2236	1611	0	2	0	2	0	0
Κ/Δ 14.3	TRAFO UNION	100		13	0	1	0	183	83	2611	1542	0	6	0	2	0	1



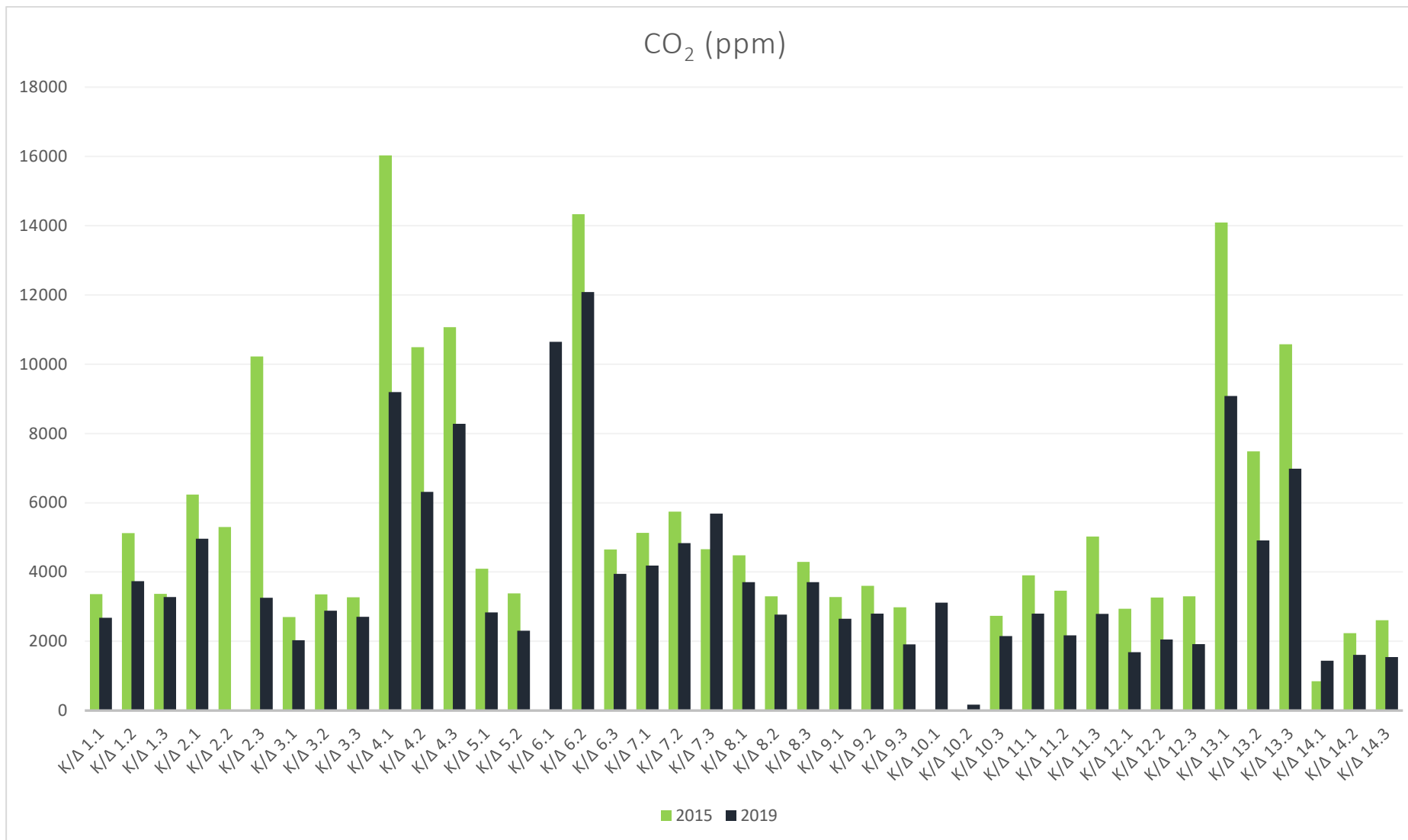
Σχήμα 5.10: Συγκέντρωση του αερίου H_2 στο έλαιο από τις αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής, περίοδου 2015 – 2019



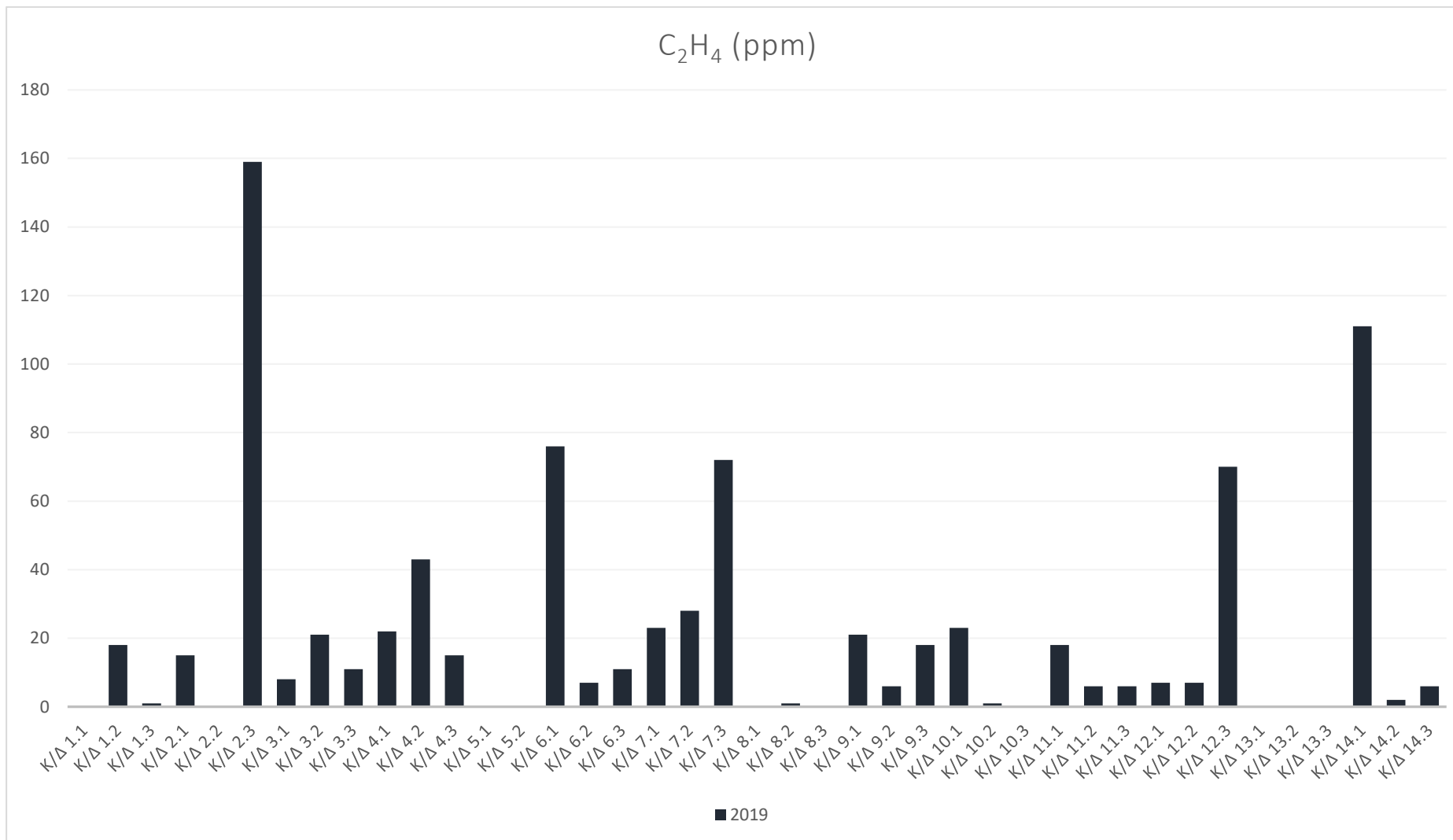
Σχήμα 5.11: Συγκέντρωση του αερίου CH₄ στο έλαιο από τις αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής, περίοδου 2015 – 2019



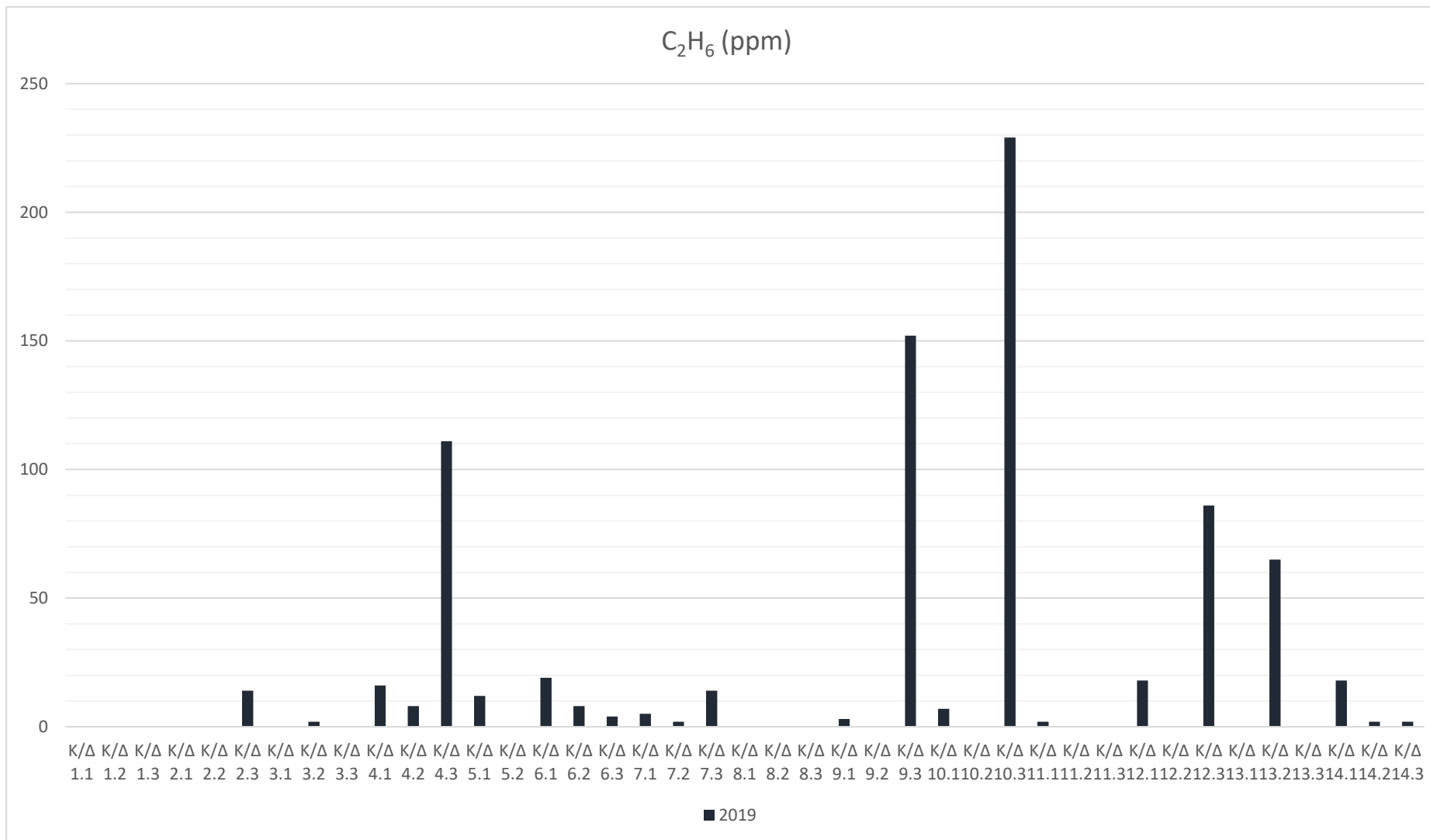
Σχήμα 5.12: Συγκέντρωση του αερίου CO στο έλαιο από τις αεροχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής, περίοδου 2015 – 2019



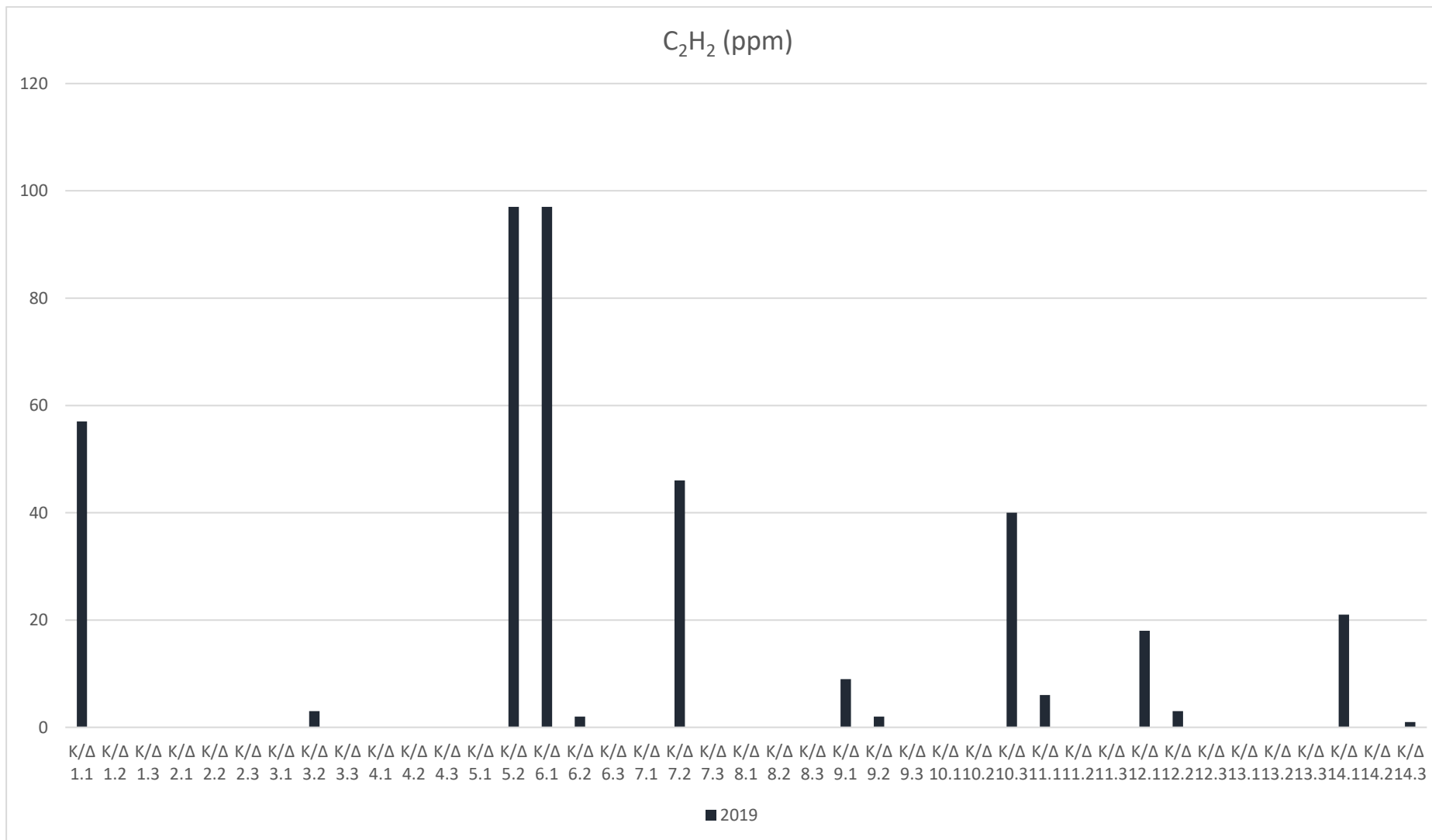
Σχήμα 5.13: Συγκέντρωση του αερίου CO₂ στο έλαιο από τις αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής, περίοδου 2015 – 2019



Σχήμα 5.14: Συγκέντρωση του αερίου C_2H_4 στο έλαιο από τις αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής για το έτος 2019



Σχήμα 5.15: Συγκέντρωση του αερίου C_2H_6 στο έλαιο από τις αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής για το έτος 2019



Σχήμα 5.16: Συγκέντρωση του αερίου C_2H_2 στο έλαιο από τις αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις των Κ/Δ Αττικής για το έτος 2019

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

6.1 Συμπεράσματα της εργασίας

Από την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων του Κεφαλαίου 5, το Συνεργείο Επισκευής Μετασχηματιστών Αθηνών (ΣΕΜ-Α) διαθέτει μια πρώτη εκτίμηση της κατάστασης του μετασχηματιστή μέσω του μονωτικού του λαδιού και ανάλογα με τις τιμές που καταγράφονται γίνονται οι αντίστοιχες ενέργειες.

Οι κοινές πρακτικές που ακολουθούνται ανάλογα με τις τιμές των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του λαδιού είναι:

- η αφύγρανση και ο καθαρισμός του μονωτικού λαδιού που περιλαμβάνει την απομάκρυνση της υγρασίας και των στερεών κατάλοιπων με διάφορους μηχανικούς τρόπους, όπως είναι το φιλτράρισμα, δηλαδή η μέθοδος της φυγοκεντρικής ή η μέθοδος της αφαίρεσης της υγρασίας υπό κενό. Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής συνίσταται στην περίπτωση που οι τιμές της υγρασίας και της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού βρίσκονται σε οριακά επίπεδα, σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 5, με την προϋπόθεση βέβαια ότι οι τιμές των υπόλοιπων ιδιοτήτων, βρίσκονται τουλάχιστον σε ανεκτά επίπεδα.
- η αντικατάστασή του μονωτικού λαδιού του μετασχηματιστή που εφαρμόζεται όταν οι τιμές των ιδιοτήτων του λαδιού, βρίσκονται σε πτωχά επίπεδα, σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 5, ανεξάρτητα από το επίπεδο που εντάσσονται οι τιμές της υγρασίας και της διηλεκτρικής αντοχής.

Στην περίπτωση που τόσο οι τιμές των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του λαδιού όσο και οι αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις είναι εκτός των αποδεκτών ορίων και η αιτία δεν είναι η γήρανση του λαδιού αλλά η ύπαρξη ηλεκτρικού σφάλματος ή μηχανικής βλάβης, τότε ο μετασχηματιστής τίθεται εκτός λειτουργίας για περαιτέρω διερεύνηση και επισκευή.

Υπολογίζοντας τη μέση τιμή των φυσικοχημικών μετρήσεων, για τα έτη 2015 και 2019 στα οποία υπάρχει διαθέσιμος μεγαλύτερος αριθμός αναλύσεων, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι δεν διαπιστώνονται αξιόλογες μεταβολές. Στον Πίνακα 10 φαίνονται η μέση τιμή ανά ιδιότητα για τα έτη 2015 και 2019.

Πίνακας 10: Μέση τιμή ανά ιδιότητα μονωτικού ελαίου

Μέσος όρος έτους	Χρώμα	Πυκνότητα (gr/cm ³)	Οξύτητα (mgr (KOH)/gr)	Υγρασία (ppm)	Διηλεκτρική αντοχή (KV)	Επιφανειακή τάση (mN/m)	Συντελεστής Απολειών	Ειδική Αντίσταση GΩm
2015	2,1	0,87	0,04	8,11	79,9	26,6	0,0229	43,6
2019	2,07	0,87	0,04	7,29	83,4	26,9	0,0179	63,1

Η μικρή απόκλιση που παρατηρείται στη μέση τιμή της ιδιότητα του χρώματος για τα έτη 2015 και 2019, θα μπορούσε να αιτιολογηθεί λόγω του σφάλματος του αναλυτή κατά την εκτίμηση τη διαβάθμισης από τον τυποποιημένο χρωματιστό δίσκο.

Η μέση τιμή της πυκνότητας, της οξύτητας και της επιφανειακής τάσης δεν παρουσιάζουν καμία μεταβολή και σε συνδυασμό με την σχεδόν αμετάβλητη τιμή του χρώματος, δείχνουν ότι το μονωτικό έλαιο των μετασχηματιστών είναι σε καλή κατάσταση, χωρίς σημάδια μόλυνσης και υποβάθμισης, και εμμέσως εκτιμάται η καλή κατάσταση των μετασχηματιστών. Σημειώνεται ότι οι μεταβολές που παρατηρούνται στην τιμή της υγρασίας, της διηλεκτρικής αντοχής και του συντελεστή απωλειών είναι πολύ μικρές και πιθανώς να οφείλονται στις διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, καθώς επίσης και στις εργαστηριακές συνθήκες κατά την εκτέλεση των αναλύσεων. Επίσης, στην περίπτωση της ειδικής αντίστασης, θα περιμέναμε είτε και αυτή να είχε παραμείνει στα ίδια επίπεδα με το 2015 είτε να παρουσίαζε μια μικρή πτώση λόγω γήρανσης του μονωτικού ελαίου. Αντιθέτως, βλέπουμε μια σημαντική αύξηση του μέσου όρου η οποία οφείλεται κυρίως στην αυξημένη τιμή της ειδικής αντίστασης των μονωτικών ελαίων που προέρχονται από το Κ/Δ 1.2 και 1.3. Εάν αυτές οι τιμές απομονωθούν, τότε η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης είναι 44,6 GΩm, δηλαδή παραπλήσια της αντίστοιχης του 2015. Συνεπώς, θα πρέπει να επαναληφθούν οι φυσικοχημικές μετρήσεις για τα συγκεκριμένα Κ/Δ ώστε να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των μετρήσεων.

Στα τέλη του 2016, ενεργοποιήθηκε η προστασία του μετασχηματιστή Κ/Δ 14.1 λόγω συγκέντρωσης αερίων στην ασφαλιστική διάταξη Buchholz, με αποτέλεσμα ο μετασχηματιστής να τεθεί εκτός λειτουργίας. Το Συνεργείο Επισκευής Μετασχηματιστών (ΣΕΜ-Α), προχώρησε σε δειγματοληψία και αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις όπου διαπιστώθηκε η συγκέντρωση υψηλών τιμών αερίων. Ο μετασχηματιστής τέθηκε πάλι σε λειτουργία και επαναλήφθηκε δειγματοληψία ελαίου και μετρήσεις, οι οποίες επιβεβαίωσαν την ύπαρξη αερίων. Σε συνεννόηση με το Κέντρο Κατανομής Φορτίων (ΚΚΦ), ο μετασχηματιστής τέθηκε εκ νέου εκτός λειτουργίας προκειμένου να γίνει φιλτράρισμα στο λάδι, το οποίο διήρκησε τρία (3) 24ώρα. Οι αρχικές τιμές για την υγρασία και τη διηλεκτρική αντοχή ήταν 18,1 ppm και 59,8 kV, ενώ μετά την παρέμβαση μειώθηκαν στα 7,2 ppm και 91,1 kV αντίστοιχα, αυξάνοντας έτσι το χρόνο ζωής του μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής τέθηκε πάλι σε λειτουργία και μετά από μία εβδομάδα επαναλήφθηκαν οι αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις, οι οποίες έδειξαν ότι δημιουργήθηκαν νέα αέρια η συγκέντρωση των οποίων ήταν σε ανεκτά επίπεδα. Αν και οι τιμές των αερίων ήταν εντός των ορίων, η δημιουργία νέων αερίων σε τόσο μικρό διάστημα υποδήλωνε μια δυσλειτουργία του μετασχηματιστή, με αποτέλεσμα να αποφασιστεί η μείωση των φορτίων. Η περιοδική μέτρηση που έγινε το 2019, απέδειξε ότι η επέμβαση αυτή λειτούργησε ευνοϊκά για την ασφαλή λειτουργία του μετασχηματιστή μέχρι να επιτευχθεί η δυνατότητα να απομακρυνθεί από το δίκτυο και να διερευνηθεί η κατάσταση του και να αποκατασταθεί πιθανή βλάβη.

Πίνακας 11: Συγκεντρώσεις αερίων σε ppm στο μονωτικό έλαιο Κ/Δ 14.1

A/A	ΥΔΡΟΓΟΝΟ H ₂	ΜΕΘΑΝΙΟ CH ₄	ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ CO	ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ CO ₂	ΑΙΘΥΛΕΝΙΟ C ₂ H ₄	ΑΙΘΑΝΙΟ C ₂ H ₆	ΑΚΕΤΥΛΕΝΙΟ C ₂ H ₂	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
13/10/2015	0	26	15	846	133	0	9	Περιοδική Μέτρηση
4/11/2016	105	149	142	2879	677	51	52	Ενεργοποιήθηκε η προστασία του Μ/Σ
18/11/2016	115	192	166	3522	927	70	55	Επανεέλεγχος
25/11/2016	136	205	168	3105	786	56	48	Επανεέλεγχος
30/11/2016	135	229	163	2653	750	50	44	Επανεέλεγχος
5/12/2016	0	9	8	188	60	0	0	Μ/Σ εκτός λειτουργίας
15/12/2016	23	29	16	313	108	0	3	Μετά από 3 ημέρες φιλτράρισμα
3/4/2019	19	27	78	1441	111	18	21	Περιοδική Μέτρηση

Για το μετασηματιστή Κ/Δ 10.2, στα πλαίσια του προληπτικού ελέγχου του 2019, εντοπίστηκε σημαντική αύξηση στις τιμές όλων των αερίων, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 12: Συγκεντρώσεις αερίων σε ppm στο μονωτικό έλαιο Κ/Δ 10.2

A/A	ΥΔΡΟΓΟΝΟ H ₂	ΜΕΘΑΝΙΟ CH ₄	ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ CO	ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ CO ₂	ΑΙΘΥΛΕΝΙΟ C ₂ H ₄	ΑΙΘΑΝΙΟ C ₂ H ₆	ΑΚΕΤΥΛΕΝΙΟ C ₂ H ₂
2015	40	27	311	0	0	0	8
2018	15	18	257	4030	127	22	4
2019 1η	69	43	415	4620	165	29	5
2019 2η	0	0	8	169	1	0	0

Λόγω των αυξημένων τιμών κατά την πρώτη ανάλυση του μονωτικού ελαίου, αποφασίστηκε το φιλτράρισμα για τέσσερα (4) 24ώρα προκειμένου να διαπιστωθεί εάν η αύξηση της συγκέντρωσης των προήλθε από την ύπαρξη κάποιου στιγμιαίου σφάλματος κατά τη λειτουργία του μετασηματιστή ή από συνεχόμενη ηλεκτρική δυσλειτουργία. Η διερεύνηση της αιτίας, κατά την εκπόνηση της διπλωματικής, ήταν σε εξέλιξη.

Το κοινό χαρακτηριστικό των μετασηματιστών Κ/Δ 10.2 και Κ/Δ 14.1, καθώς επίσης και των Κ/Δ 1.1 και Κ/Δ 10.3 που παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις στο σύνολο των αερίων, όπως γίνεται φανερό από τον Πίνακα 9, είναι η κατασκευάστρια εταιρεία (ASGEN) και το έτος κατασκευής (1967). Στο παρελθόν έχει γίνει επισκευή σε μετασηματιστή ίδιου κατασκευαστή λόγω ύπαρξης θερμικού σφάλματος, όπου διαπιστώθηκε ότι οφειλόταν στο σχεδιασμό του ενεργού μέρους του μετασηματιστή. Συγκεκριμένα, τα πηνία δεν ψύχονταν επαρκώς με την φυσική κυκλοφορία του λαδιού με αποτέλεσμα την υπερθέρμανσή τους, λόγω των μικρών αποστάσεων τόσο μεταξύ των πηνίων όσο και μεταξύ των στρώσεων των σπειρών τους.

Συνοψίζοντας, θα μπορούσαμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι τα μονωτικά έλαια των μετασηματιστών των υποσταθμών κλειστού τύπου, Κέντρα Διανομής, του Νομού Αττικής κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα, αφού τόσο οι φυσικοχημικές μετρήσεις όσο και οι αεριοχρωματογραφικές αναλύσεις, στο μεγαλύτερό τους ποσοστό, βρίσκονται εντός των ορίων που προβλέπονται από τα διεθνή πρότυπα. Οι επιμέρους επεμβάσεις, όπου αυτές

κρίθηκαν απαραίτητες, ήταν εύστοχες και με φανερά βελτιωμένα αποτελέσματα με απώτερο σκοπό την προστασία του μετασχηματιστή.

6.2 Προτάσεις και θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Μέσω της διπλωματικής αυτής έγινε η καταγραφή των αποτελεσμάτων των φυσικοχημικών μετρήσεων και των αεριοχρωματογραφικών αναλύσεων των μονωτικών λαδιών των μετασχηματιστών από τα Κέντρα Διανομής του Νομού Αττικής, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν βάση δεδομένων για μελλοντική διερεύνηση της κατάστασης των μετασχηματιστών. Μερικές προτάσεις που θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην εύρυθμη και αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, με κύριο γνώμονα την προστασία των μετασχηματιστών είναι:

- Τοποθέτηση μπαλονιού στο δοχείο διαστολής όλων των μετασχηματιστών, για τον περιορισμό της υγρασίας που απορροφά το μονωτικό λάδι από την επαφή του με τον ατμοσφαιρικό αέρα.
- Ετήσιος έλεγχος των φυσικοχημικών μετρήσεων και των αεριοχρωματογραφικών αναλύσεων για την αποτελεσματικότερη παρακολούθηση της γήρανσης του λαδιού και την πρόληψη από επικείμενη ηλεκτρική βλάβη.
- Ένταξη νέων μετασχηματιστών στο δίκτυο της Αττικής για την αποφόρτιση των υφιστάμενων μετασχηματιστών.
- Τοποθέτηση καταγραφικών συστημάτων (Monitoring Systems) για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης αερίων κατά τη διάρκεια λειτουργίας του μετασχηματιστή.

Ένα συμπληρωματικό πεδίο έρευνας μια άλλης διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να είναι η συσχέτιση των αποτελεσμάτων των φυσικοχημικών μετρήσεων και των αεριοχρωματογραφικών αναλύσεων των μονωτικών λαδιών με τις συνθήκες λειτουργίας και φόρτισης των μετασχηματιστών. Επίσης, θα ήταν ενδιαφέρον να αναπτυχθεί ένα λογισμικό πρόγραμμα που θα αξιολογεί την κατάσταση των μετασχηματιστών, με βάση τα όσα ορίζονται στα σχετικά διεθνή πρότυπα, τα αποτελέσματα των φυσικοχημικών μετρήσεων και των αεριοχρωματογραφικών αναλύσεων των μονωτικών λαδιών.

Βιβλιογραφία – Αναφορές

- [1] ABB, Data Sheets Transformer, Transformer 25MVA 15±9x1.78%/38.5±2x2.5%/23(10)kV (1ZVN460100-E), 2007
- [2] <http://www.baysankazan.com>
- [3] <https://www.inmr.com/optimizing-safety-uhv-bushings/>
- [4] <https://www.indiamart.com/proddetail/transformer-conservator-tank-10911237188.html>
- [5] <https://thermofin.net/products/t-rex-transformer-oil-coolers/>
- [6] <http://www.cedaspe.com/en/instruments-protective-devices/bushholz-relays-ee.html>
- [7] <http://www.acme.in.th/pressure-relief-device.html>
- [8] http://www.swambe.com/silica_gel_breather_transformer.html
- [9] <https://www.dienkythuat.com/may-bien-ap-1>
- [10] https://www.reinhausen.com/de/desktopdefault.aspx/tabid-233/80_read-47/
- [11] https://www.reinhausen.com/desktopdefault.aspx/tabid-1549/1943_read-4856/
- [12] <http://www.programmabob.nl/Test-Equip/MS-HandOut/2012-Handout.pdf>
- [13] <http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=89>
- [14] Vanguard Instruments Company, Inc., “Operating instructions for models ATRT-03, ATRT-03A and ATRT-03B Three Phases Transformers Turns-Ratio Meter”, Revision 04, Jan 2005.
- [15] Vanguard Instruments Company, Inc., “TRM-203 and TRM-403 Transformer Resistance Meters, User’s Manual”, Revision 1.5, August 2015.
- [16] Metrel, “TeraOhm 5kV MI2077, User Manual”, Version 1.5. Code No. 20750378, 2002.
- [17] Doble Engineering Company, “Operating Manual for M4100 Transformer tanδ Meter”, Revision L, Sep. 2016.
- [18] Kruss, “Force Tenniometer K20, User Manual”, version 2-23.
- [19] Morgan Schaffer, “Transformers – The inside view, User Manual”, PPMreport 3,6.
- [20] Παύλος Ε. Ραΐτσιος, “Μελέτη μετασχηματιστών”, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Αθήνα 2000.
- [21] Παύλος Ε. Ραΐτσιος, “Μετρήσεις και Ειδικές Λειτουργίες Μετασχηματιστών”, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Αθήνα 2002.
- [22] Βασίλης Γ. Σαμοΐλης, “Μετασχηματιστές, (Παρακολούθηση – Διαγνωστική - Εκτίμηση της Λειτουργικής Κατάστασης)”, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, 2007.
- [23] Βασίλης Γ. Σαμοΐλης, “Μονωτικά Λάδια, (Προέλευση – Χρήση – Χαρακτηριστικά – Συντήρηση)”, Βιργινία Σαμοΐλη, Αθήνα, 1979.
- [24] Ι. Α. Τεγόπουλος, “Ηλεκτρικές Μηχανές, Μέρος Β: Μόνιμη Κατάσταση”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- [25] ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε , “Τριφασικοί μετασχηματιστές 150/21 kV, 40/50 MVA ΚΑΙ 20/25 MVA, Dyn1”, Τεχνική περιγραφή ΔΔ-387, Απρίλιος 2018.

- [26] ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε., “ Τριφασικοί μετασχηματιστές διανομής”, Τεχνική περιγραφή ΔΔ-01.48/23.10.2017.
- [27] ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε., “Μονωτικά έλαια μετασχηματιστών ισχύος ναφθενικής βάσης με ανασταλτικά”, Τεχνική περιγραφή ΔΕΕΔ-ΔΔ 394, 09/2018.
- [28] ΑΔΜΗΕ Α.Ε., “Προδιαγραφή Νο SS-25/20, Τριφασικοί μετασχηματιστές 40/50 MVA, 150/15,75-21kV”, Νοέμβριος 2013.
- [29] ABB, “Transformer Handbook”, 2004.
- [30] AREVA, “Power Transformer Expertise”, Volume 2, 2008.
- [31] SIEMENS, “Power Engineering Guide”, 5th edition, 2008.
- [32] General Electric, “Distribution Electric Transformer Manual”, 1958.
- [33] Kenneth R. Edwards “Transformers”, Second Edition, Amer Technical Pub, 2007.
- [34] W.G. Hurley, W. H. Wölfle, “Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications”, 1st Edition, Wiley, 2013.
- [35] Bharat Heavy Electricals Limited, “Transformers”, Second Edition, 2003.
- [36] Schneider Electric, “Τεχνικό Τετράδιο Νο.2-Μετασχηματιστές Διανομής Λαδιού ΕΛΒΗΜ”.
- [37] James H. Harlow ,“Electric Power Transformer Engineering”, Third Edition, CRC Press LLC, 2012.
- [38] Robert M. Del Vecchio, Bertrand Poulin, Pierre T. Feghali, Dilipkumar M. Shah, Rajendra Ahuja, “Transformer Design Principles”, Third Edition, CRC Press LLC, 2017.
- [39] B.M. Weedy, B.J. Cory, “Electric Power Systems”, 4th Edition, Chichester: John Wiley & Sons, 1998.
- [40] Farouk A.M. Rizk, Giao N. Trinh, “High Voltage Engineering”, 1st Edition, CRC Press LLC, 2017.
- [41] V.M. Montsinger “Loading transformer by temperature” AIEE transactions, Bd. 49, 1930, p.p. 776-792
- [42] “Power Transformers - Part 1: General”, IEC 60076-1, Edition 3.0, 2011-04.
- [43] “Power Transformers - Part 1: General”, IEC 60076-1, Edition 2.1, 2000-04.
- [44] “Power Transformers - Part 2: Temperature Rise”, IEC 60076-2, Edition 3.0, 2011-02.
- [45] “Power Transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air”, IEC 60076-3, Second edition, 2000-03.
- [46] “Power Transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air”, IEC 60076-3, Second edition, 2013-11.
- [47] “Power Transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit”, IEC 60076-5, Edition 3.0, 2006-02.
- [48] “Power Transformers - Part 10: Determination of sound levels”, IEC 60076-10, Edition 2.0, 2016-03.
- [49] “Power Transformers - Part 18: Measurement of frequency response”, IEC 60076-18, Edition 1.0, 2012-07.

- [50] “Power Transformers - Part 19: Rules for the determination of uncertainties in the measurements of the losses on power transformers and reactors”, IEC 60076-19, Edition 1.0, 2013-03.
- [51] “Energy performance of large power transformers ($U_m > 36$ kV or $S_r \geq 40$ MVA)”, EN 50629, 2015.
- [52] “Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance”, IEC 60422, Edition 4.0, 2013-01.
- [53] “Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis”, IEC 60599, Edition 2.1, 2007-05.
- [54] “Insulating liquids – Measurements of relative permittivity, dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) and d.c. resistivity”, IEC 60247, Edition 3, 2004-02.
- [55] “Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method”, IEC 60156, Edition 3.0, 2018-08.
- [56] “Insulating liquids – Test method for detection of potentially corrosive Sulphur in used and unused insulating oil”, IEC 62535, Edition 1.0. 2008-10.
- [57] “Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear”, IEC 60296, Edition 4.0, 2012-02.
- [58] “Method of sampling insulating liquids”, IEC 60475, Edition 2.0, 2011-10.
- [59] “Crude petroleum and liquid petroleum products – Laboratory determination of density – Hydrometer method”, ISO 3675, Edition 3, 1998-06.
- [60] “Guide for the Interpretation of gases generated in oil-immersed transformer”, IEEE C 57.104, 1991.
- [61] “Standard test method for ASTM color of petroleum products”, ASTM D 1500-12.
- [62] “Standard test method for acid and base number by color-indicator titration”, ASTM D 974-02.
- [63] “Standard test method for interfacial tension of oil against water by the ring method”, ASTM D 971-91.
- [64] “Testing of insulating oils; detection of corrosive sulfur; silber strip test”, DIN 51353:1985.