



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

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΑΕΡΙΩΝ
ΥΠΟΣΤΑΘΜΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Δ. Στεργίου

Ηλίας Σ. Νικολάου

Επιβλέπων : Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής

Αθήνα, Απρίλιος 2009



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

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΑΕΡΙΩΝ
ΥΠΟΣΤΑΘΜΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Δ. Στεργίου

Ηλίας Σ. Νικολάου

Επιβλέπων : Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την

.....
Περικλής Μπούρκας
Καθηγητής

.....
Νικόλαος Θεοδώρου
Καθηγητής

.....
Κων/νος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής

Αθήνα, Απρίλιος 2009

.....
Νικόλαος Δ. Στεργίου
Ηλίας Σ. Νικολάου

Διπλωματούχοι Ηλεκτρολόγοι Μηχανικοί και Μηχανικοί Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Νικόλαος Δ. Στεργίου, 2009
Copyright © Ηλίας Σ. Νικολάου, 2009

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 τους συγγραφείς.

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

Περίληψη (Abstract)

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση της εφαρμογής της θερμικής απεικόνισης στην μέτρηση της θερμοκρασίας λειτουργίας σε υποσταθμούς διανομής.

Η εργασία ξεκινάει με μια αναφορά στα δίκτυα διανομής και σε βασικές αρχές των μετασχηματιστών, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο που επιδρά η θερμοκρασία στην λειτουργία τους.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές αρχές που διέπουν την υπέρυθρη θερμογραφία και άλλα ενδιαφέροντα στοιχεία όπως τα πεδία εφαρμογής της.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε εναέριους υποσταθμούς διανομής στους Δήμους Αγίων Αναργύρων και Ζωγράφου Αττικής, όπου λήφθηκαν θερμικές εικόνες των μετασχηματιστών των υποσταθμών, καθώς επίσης και των διατάξεων ασφαλειών και αλεξικέραυνων. Σκοπός ήταν ο έλεγχος υπερθέρμανσης αλλά και των δυνατοτήτων της θερμοκάμερας, που χρησιμοποιήθηκε, για μέτρηση της θερμοκρασίας σε διατάξεις μικρής επιφάνειας όπως είναι οι ασφάλειες του υποσταθμού.

Λέξεις κλειδιά (Keywords)

Υπέρυθρη θερμογραφία, Θερμική απεικόνιση, Θερμοκάμερα, Εκπεμπικότητα (Emissivity), Μετασχηματιστής, Υποσταθμός διανομής, Θερμοκρασία, Υπέρυθρη ακτινοβολία.

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Περικλή Μπούρκα, καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του ΕΜΠ, που μας εμπιστεύθηκε και μας έδωσε την δυνατότητα να εκπονήσουμε αυτή την διπλωματική εργασία.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Δρ. Μηχανικό του ΕΜΠ κ. Παναγιώτη Τσαραμπάρη, για την συνεργασία, την υπομονή και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1^ο	
Παραγωγή, Μεταφορά και Διανομή της Ηλεκτρικής Ενέργειας	8
1.1 Ιστορικά στοιχεία.....	8
1.2 Θεμελιώδη μεγέθη	8
1.3 Σταθμοί παραγωγής	9
1.4 Μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας	9
1.4.1 Επίπεδα τάσης.....	10
1.4.2 Σύγκριση ευρωπαϊκού και αμερικάνικου μοντέλου δικτύων διανομής.....	11
1.5 Υποσταθμοί διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	13
Κεφάλαιο 2^ο	
Μετασχηματιστές.....	17
2.1 Βασικές αρχές κατασκευής και λειτουργίας.....	17
2.1.1 Γενικά.....	17
2.1.2 Ο ιδανικός μετασχηματιστής	21
2.1.3 Πραγματικός μετασχηματιστής	21
2.2 Κατηγορίες μετασχηματιστών	23
2.3 Μετασχηματιστές διανομής.....	25
2.3.1 Ιστορικά στοιχεία.....	25
2.3.2 Βασικά στοιχεία των μετασχηματιστών διανομής.....	26
2.3.3 Συντήρηση των μετασχηματιστών διανομής.....	30
2.4 Θερμοκρασία και Μετασχηματιστές	31
2.4.1 Θερμοκρασιακά όρια	31
2.4.2 Θερμικοί έλεγχοι (Heat Run Tests)	32
2.4.3 Ψύξη των μετασχηματιστών	32
2.4.4 Υπολογισμός θερμικής απόκρισης μετασχηματιστών.....	33
2.4.5 Θερμοκρασία και διάρκεια ζωής μετασχηματιστών.....	34
Κεφάλαιο 3^ο	
Υπέρυθρη Θερμογραφία.....	38
3.1 Εισαγωγικά	38
3.2 Φυσικές Αρχές Λειτουργίας μιας Θερμικής Κάμερας.....	39
3.2.1 Σύστημα μέτρησης της θερμοκρασίας με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας	39
3.2.2 Η ανακάλυψη της υπέρυθρης ακτινοβολίας	39
3.2.3 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	40
3.2.4 Το μέλαν σώμα (Black Body).....	41
3.2.5 Εκπεμπικότητα (Emissivity).....	43
3.2.6 Πειραματικός προσδιορισμός της εκπεμπικότητας	46
3.3 Υπέρυθροι ανιχνευτές.....	47
3.3.1 Θερμικοί ανιχνευτές.....	47
3.3.2 Κβαντικοί ανιχνευτές.....	48
3.3.3 Σύγχρονες τεχνικές	49
3.4 Πεδία εφαρμογής της υπέρυθρης θερμογραφίας	51

3.5 Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα υπέρυθρης θερμογραφίας.....	57
3.6 Εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας στην συντήρηση.....	58
3.7 Έλεγχοι ηλεκτρικών διατάξεων με χρήση της θερμικής απεικόνισης.....	59
3.7.1 Έλεγχοι για ηλεκτρικές ασυμμετρίες και υπερφορτίσεις	59
3.7.2 Έλεγχοι για διαβρωμένες ή χαλαρές ηλεκτρικές επαφές.....	60
3.7.3 Έλεγχοι σε ηλεκτρικούς κινητήρες.....	60
3.7.4 Έλεγχοι σε μετασχηματιστές	61
3.7.5 Έλεγχοι και δοκιμές για αποφυγή πυρκαγιών σε ηλεκτρικές διατάξεις.....	63
3.8 Πρακτικές οδηγίες για θερμικές εικόνες μέγιστης ακρίβειας.....	64
3.9 Κριτήρια επιλογής μιας θερμικής κάμερας	65
Κεφάλαιο 4^ο	
Μετρήσεις σε Εναέριους Υποσταθμούς Διανομής	68
4.1 Παρουσίαση των μετρήσεων	68
4.1.1 Μετρήσεις στον Δήμο Αγίων Αναργύρων.....	68
4.1.2 Μετρήσεις στον Δήμο Ζωγράφου	76
4.2 Επεξεργασία των μετρήσεων	81
4.3 Συμπεράσματα	83
Βιβλιογραφία	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	93

Κεφάλαιο 1^ο

Παραγωγή, Μεταφορά και Διανομή της Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.1 Ιστορικά στοιχεία

Η καθιέρωση της ηλεκτρικής ενέργειας σαν κυρίαρχη μορφή ενέργειας, περί τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, αποτέλεσε την αρχή για την ανάπτυξη μιας οργανωμένης δομής που σκοπό έχει την αξιόπιστη παροχή ηλεκτρισμού στους τελικούς αποδέκτες – καταναλωτές.

Τα πρώτα **συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ)** αποτελούνται ουσιαστικά από μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρισμού και ένα περιορισμένο σε ισχύ φορτίο.

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα επικράτησε η τάση διασύνδεσης των παραπάνω μεμονωμένων συστημάτων, προκειμένου να επιτευχθεί η γεωγραφική επέκταση τους και να εξυπηρετούνται έτσι περισσότεροι καταναλωτές. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με αρκετά ταχείς ρυθμούς, αν αναλογιστούμε ότι η πλειοψηφία των πολιτών στις ΗΠΑ έγιναν καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας πριν τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, και συνεχίζεται παγκοσμίως καθώς η ζήτηση σε ηλεκτρισμό παρουσιάζει συνεχή ανοδική πορεία.

1.2 Θεμελιώδη μεγέθη

Τα μεγέθη που παρουσίαζαν και παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε ένα οργανωμένο σύστημα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα εξής :

- **Ρεύμα (Current)**
- **Τάση (Voltage)**

Η λειτουργία και ανάπτυξη των πρώτων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας βασιζόταν στο **συνεχές ρεύμα και τάση (DC)**.

Σε ένα DC κύκλωμα η πολικότητα παραμένει συνεχώς ίδια. Έχουμε θετική πολικότητα στην μια πλευρά του κυκλώματος, αρνητική στην άλλη και το ρεύμα ουσιαστικά ρέει προς την ίδια διεύθυνση αποκλειστικά.

Αυτού του είδους η υλοποίηση των ΣΗΕ γρήγορα αποτέλεσε θέμα προς μελέτη και βελτίωση καθώς συνοδευόταν από κάποια πολύ σοβαρά προβλήματα. Αναλυτικότερα:

- Υπήρχε περιορισμός στην τάση μεταφοράς. Παρόλο που οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνταν μπορούσαν να παράγουν ενέργεια σε υψηλές τάσεις, για λόγους ασφαλείας των καταναλωτών η τάση παραγωγής, μεταφοράς και διανομής έπρεπε να παραμένει σε αρκετά χαμηλά επίπεδα.
- Σαν συνέπεια του προηγούμενου, οι απώλειες των γραμμών αποτελούσε ένα σοβαρό πλήγμα, που με την σειρά τους καθιστούσαν πολύ δαπανηρή την γεωγραφική επέκταση των ΣΗΕ.

Προκειμένου να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα αυτά, καθιερώθηκαν **το εναλλασσόμενο ρεύμα και τάση (AC)** που συνδέθηκαν με την λειτουργία των **μετασχηματιστών**.

Οι μετασχηματιστές, που για την λειτουργία τους απαιτούνται αποκλειστικά AC μεγέθη, κυριάρχησαν και συνεχίζουν να κυριαρχούν σε όλες τις βαθμίδες των ΣΗΕ, καθώς εξασφαλίζουν την πιο εύκολη και οικονομική αλλαγή της τάσης, προκειμένου να έχουμε αποδοτική μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.

1.3 Σταθμοί παραγωγής

Οι μέθοδοι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες :

1. *Συμβατικές μέθοδοι*
2. *Μη συμβατικές μέθοδοι*

Στις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνονται :

- οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί,
- οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί,
- οι πυρηνικοί σταθμοί.

Στις μη συμβατικές μεθόδους περιλαμβάνονται :

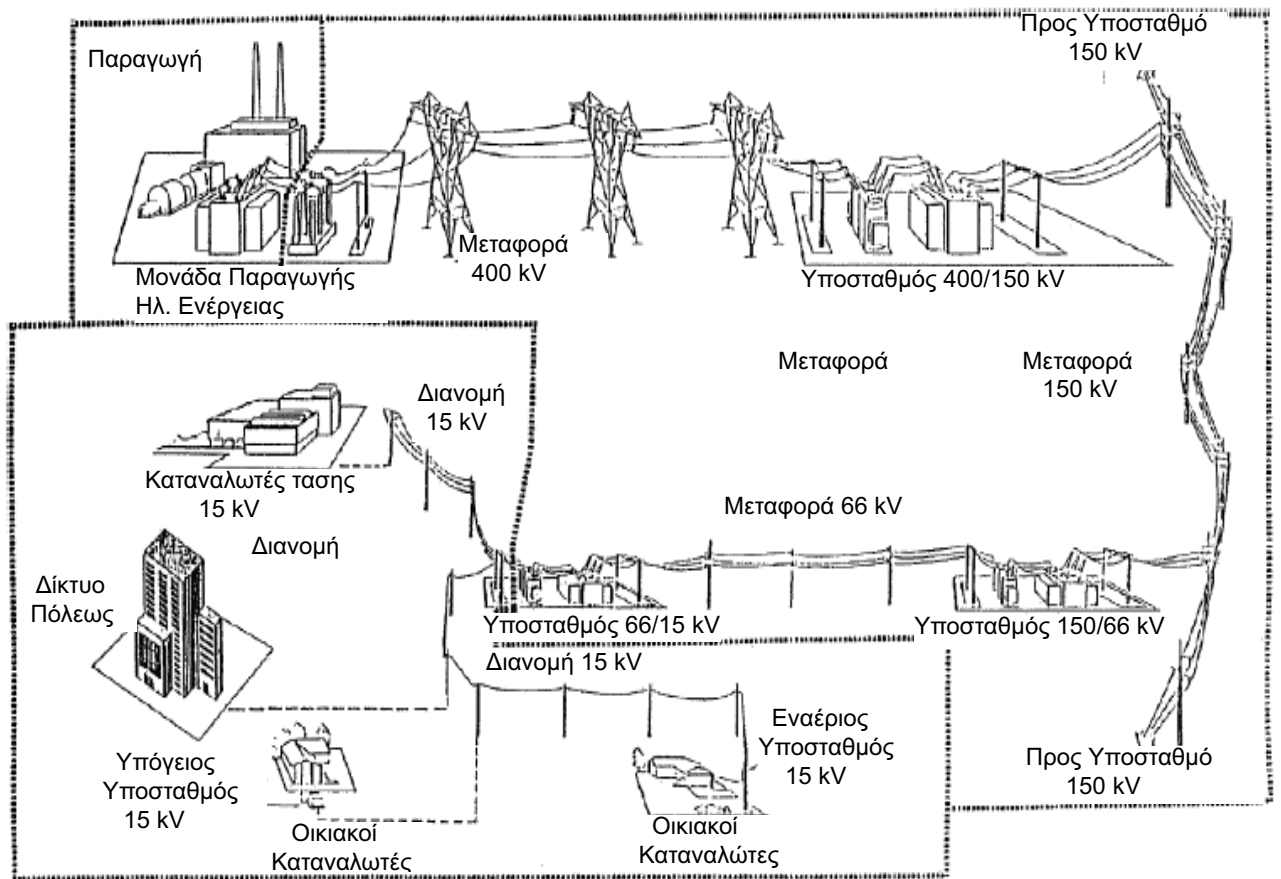
- οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με επικρατούντα τα φωτοβολταϊκά και την αιολική ενέργεια,
- προηγμένες τεχνολογίες ενέργειας όπως είναι οι κυψέλες καυσίμων και σύγχρονα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως είναι η αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα και η αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας υπεραγωγών.

Η ανάπτυξη των μη συμβατικών τεχνολογιών υπόσχεται απεξάρτηση της ενεργειακής κοινότητας από τα υψηλού κόστους καύσιμα, όπως είναι το πετρέλαιο, ενώ θα συμβάλλει ριζικά στην φιλική προς το περιβάλλον παραγωγή ηλεκτρισμού.

Παρόλο αυτά, η σύνδεση της παραγωγής με εξωγενείς παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες στην περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθιστούν ακόμα πολύ δύσκολη την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη με αυτές τις μεθόδους.

1.4 Μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Η οργάνωση ενός σύγχρονου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας δίδεται σχηματικά στην εικόνα 1.4.1, όπου φαίνεται η διαδρομή του ηλεκτρισμού από μια μονάδα παραγωγής, μέσω του συστήματος μεταφοράς και των δικτύων διανομής, στους τελικούς αποδέκτες, που είναι οι καταναλωτές :



Εικόνα 1.4.1 : Η διαδρομή της ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή στους καταναλωτές

Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα αρκετά μεγάλο και πολύπλοκο ζήτημα, που δεν θα αναλύσουμε διεξοδικά σε αυτή την εργασία.

Στη συνέχεια εξετάζονται τα επίπεδα τάσης που χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ, για την μεταφορά και διανομή, καθώς και οι υποσταθμοί διανομής με αναλυτική αναφορά στο επόμενο κεφάλαιο στους μετασχηματιστές, αφού αποτελούν κύριο αντικείμενο της μελέτης μας.

Χάριν συνοχής θα παρουσιάσουμε συνοπτικά το μοντέλο των δικτύων διανομής που χρησιμοποιείται στην Ευρώπη σε σύγκριση με αυτό που έχει επικρατήσει στις ΗΠΑ.

1.4.1 Επίπεδα τάσης

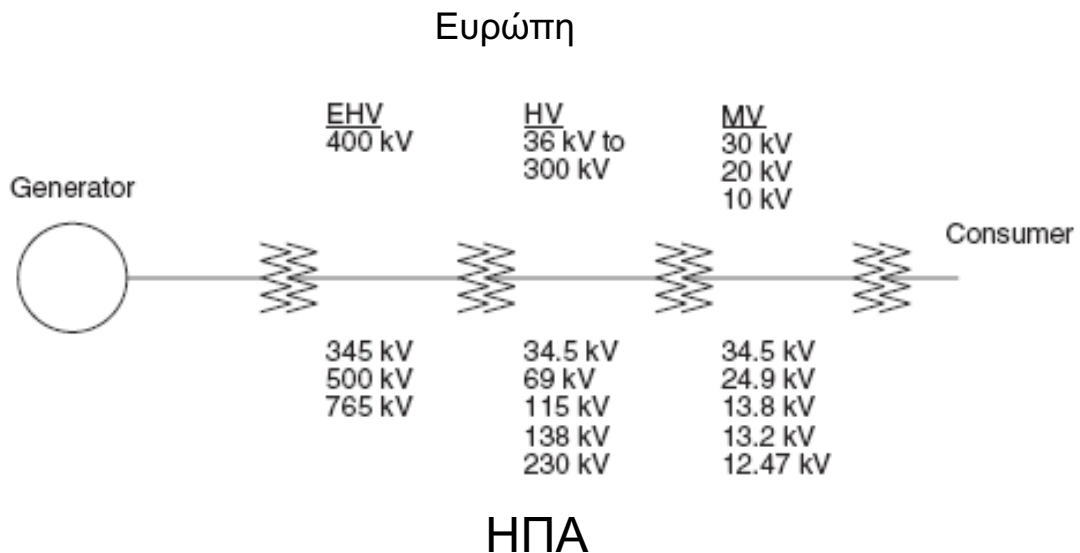
Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, η αλλαγή της τάσης, με χρήση μετασχηματιστών, αποτελεί την βέλτιστη λύση για ευέλικτη και συμφέρουσα μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Διακρίνονται τα εξής επίπεδα τάσης γενικά :

- *Υπερυψηλή Τάση (EHV)* → Χρησιμοποιείται στην μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.
- *Υψηλή Τάση (HV)* → Ομοίως με την υπερυψηλή.

- *Μέση Τάση (MV)* → Χρησιμοποιείται στην διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας γενικά, ενώ κάποιες ειδικές περιπτώσεις καταναλωτών (π.χ. βιομηχανίες) τροφοδοτούνται από αυτό το επίπεδο.
- *Χαμηλή τάση (LV)* → Είναι η τάση που φτάνει στους καταναλωτές προς χρήση.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές των παραπάνω επιπέδων που χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ :



Εικόνα 1.4.2 : Επίπεδα τάσεων σε Ευρώπη και ΗΠΑ

Για την χαμηλή τάση στους καταναλωτές (consumers) έχουμε στην Ευρώπη 230/400 V (φασική/πολική τάση), ενώ στις ΗΠΑ, όπου η τροφοδότηση των καταναλωτών γίνεται μέσω δευτερεύοντος μονοφασικού δικτύου διανομής, έχει επικρατήσει 120/240 V.

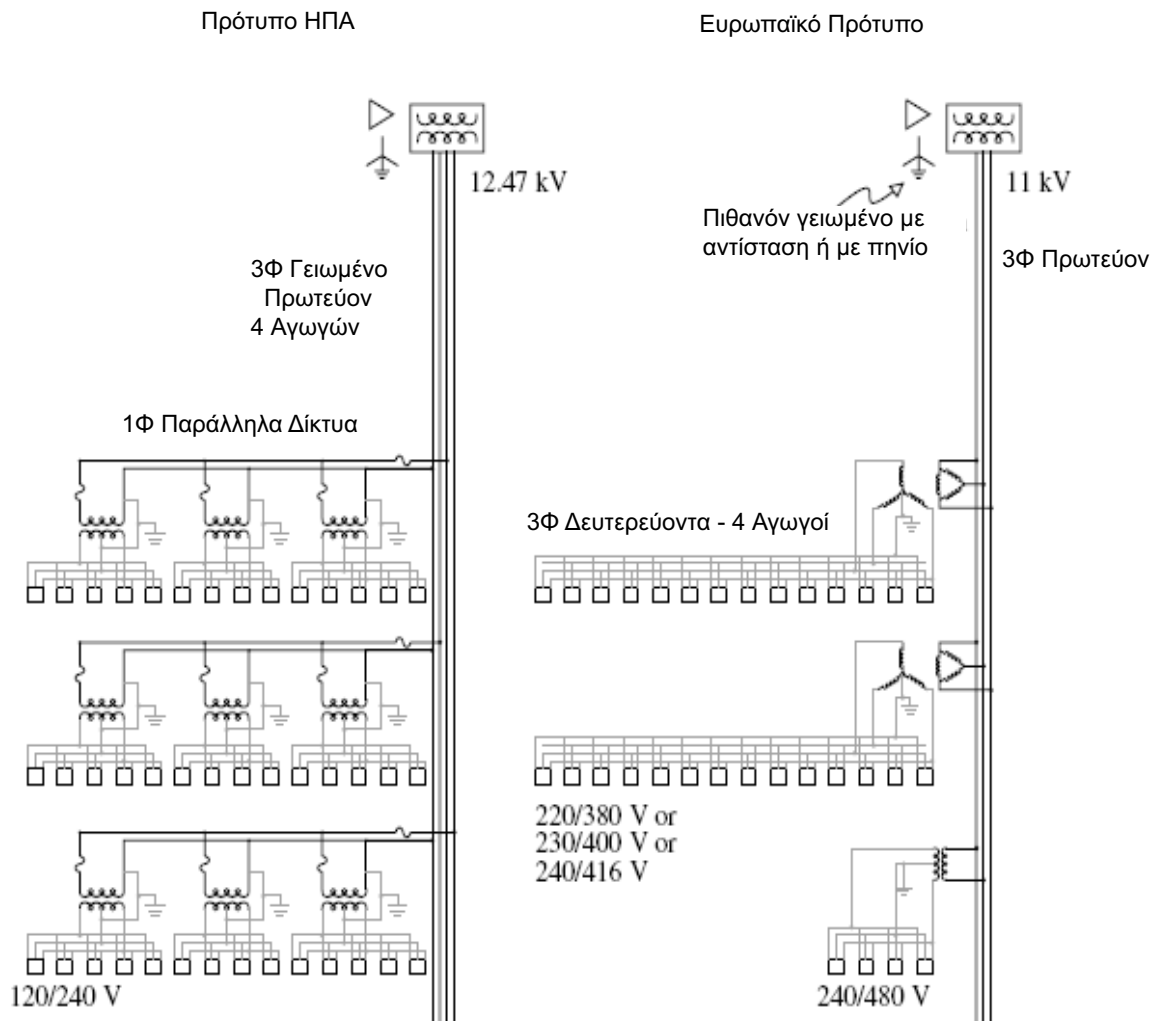
Στην Ελλάδα έχουμε υπερυψηλή τάση 400 kV, υψηλή τάση 150 kV και 66 kV, μέση τάση 15 kV και 20 kV, και σχετικά πρόσφατα η χαμηλή τάση από 220/380 V μετατράπηκε σε 230/400 V.

Με την επικράτηση της εναλλασσόμενης τάσης έπρεπε να επιλεγεί κατάλληλα ένα ακόμα μέγεθος, η **συχνότητα λειτουργίας**, που για τις ΗΠΑ καθιερώθηκε να είναι 60Hz, ενώ για την Ευρώπη 50 Hz.

Τα μεγέθη αυτά προέκυψαν μετά από συνδυασμό των απαιτήσεων στην συχνότητα των φορτίων – καταναλωτών, του συστήματος μεταφοράς και των μονάδων παραγωγής, προκειμένου να έχουμε βέλτιστη απόδοση.

1.4.2 Σύγκριση ευρωπαϊκού και αμερικάνικου μοντέλου δικτύων διανομής

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το μοντέλο που χρησιμοποιείται κυρίως στην Ευρώπη, όσον αφορά τις διατάξεις των δικτύων διανομής, σε αντιπαραβολή με το αντίστοιχο των ΗΠΑ :



Εικόνα 1.4.3: Πρότυπο δικτύων διανομής σε Ευρώπη και ΗΠΑ

Γενικά, στην Ευρώπη επικρατεί η τάση εγκατάστασης μεγαλύτερων σε ισχύ μετασχηματιστών, που κυρίως είναι τριφασικοί. Το γεγονός αυτό έχει σαν συνέπεια να αντιστοιχούν περισσότεροι καταναλωτές σε κάθε μετασχηματιστή.

Κάθε ένα από τα δυο μοντέλα έχει τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματά του. Συνοπτικά μπορούν να επισημανθούν κάποιες ουσιώδεις διαφορές :

- *Κόστος* – Γενικά το ευρωπαϊκό μοντέλο θεωρείται ακριβότερο, από οικονομικής άποψης, από αυτό των ΗΠΑ, κυρίως λόγω του εξοπλισμού, ειδικότερα σε περιοχές που θα μπορούσαν να τροφοδοτηθούν και από μονοφασικά κυκλώματα.
- *Ευελιξία* – Το μοντέλο των ΗΠΑ μπορεί να θεωρηθεί περισσότερο ευέλικτο από την πλευρά των πρωτεύοντων των μετασχηματιστών διανομής (primary, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.4.3), αφού γενικά ισχύει ότι στο εν λόγω μοντέλο είναι πιο εύκολες οι αναβαθμίσεις ή επεκτάσεις του δικτύου.

Αντίθετα, το ευρωπαϊκό μοντέλο θεωρείται περισσότερο ευέλικτο στην πλευρά των δευτερευόντων των μετασχηματιστών διανομής (secondaries στην εικόνα 1.4.3), αφού για παράδειγμα, σε μια πυκνοκατοικημένη αστική

περιοχή η τροφοδότηση με ηλεκτρισμό μπορεί να εξασφαλιστεί με λιγότερους υποσταθμούς διανομής σε κατάλληλα επιλεγμένες θέσεις.

- *Ασφάλεια* – Ο γειωμένος ουδέτερος του μοντέλου των ΗΠΑ παρέχει ασφάλεια σε αρκετές περιπτώσεις σφαλμάτων, όπως η αποτροπή ηλεκτροπληξίας ατόμων. Από την άλλη μεριά, στο ευρωπαϊκό μοντέλο έχουμε εύκολο εντοπισμό σφαλμάτων υψηλής σύνθετης αντίστασης.
- *Αξιοπιστία* – Μελέτες έχουν αποδείξει ότι το αμερικανικό μοντέλο είναι περισσότερο αξιόπιστο και ειδικότερα έχουμε κατά μέσο όρο 35% υψηλότερη συχνότητα διακοπών στην ηλεκτροδότηση των Ευρωπαίων καταναλωτών.
- *Ποιότητα Ισχύος* – Γενικά στην Ευρώπη έχουμε λιγότερες βυθίσεις τάσης, γεγονός που οφείλεται κυρίως στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μοντέλου (τριφασικό σύστημα, τρίγωνο τύλιγμα στους Μ/Σ διανομής)

Σε περιοχές εκτός Ευρώπης και ΗΠΑ απαντώνται και τα δυο μοντέλα, με το ευρωπαϊκό να είναι πιο διαδεδομένο, ενώ σε κάποιες χώρες έχουμε συνδυασμό στοιχείων και από τα δυο μοντέλα.

Σημειώνεται πως η χειρότερη “μίξη” που θα μπορούσε να γίνει στην ανάπτυξη ενός συστήματος διανομής είναι η χρήση των 120 V στην τάση των καταναλωτών σε συνδυασμό με την πρωτεύουσα διανομή του ευρωπαϊκού προτύπου (primary), αφού έχουμε την μικρότερη δυνατή παρερχομένη τάση με την ακριβότερη διάταξη διανομής.

1.5 Υποσταθμοί διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Οι υποσταθμοί διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σκοπό έχουν τον μετασχηματισμό της μέσης τάσης σε χαμηλή, προκειμένου να δοθεί στους καταναλωτές προς χρήση.

Διακρίνουμε τρεις κατηγορίες τέτοιων υποσταθμών :

1. *Επίγειοι υποσταθμοί διανομής* – είναι ουσιαστικά ειδικά διαμορφωμένα κουβούκλια, που βρίσκονται σε επιλεγμένες επίγειες θέσεις και περιέχουν τον απαραίτητο εξοπλισμό μέσης και χαμηλής τάσης μαζί με τον απαραίτητο μετασχηματιστή υποβιβασμού. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ένας τέτοιος υποσταθμός :



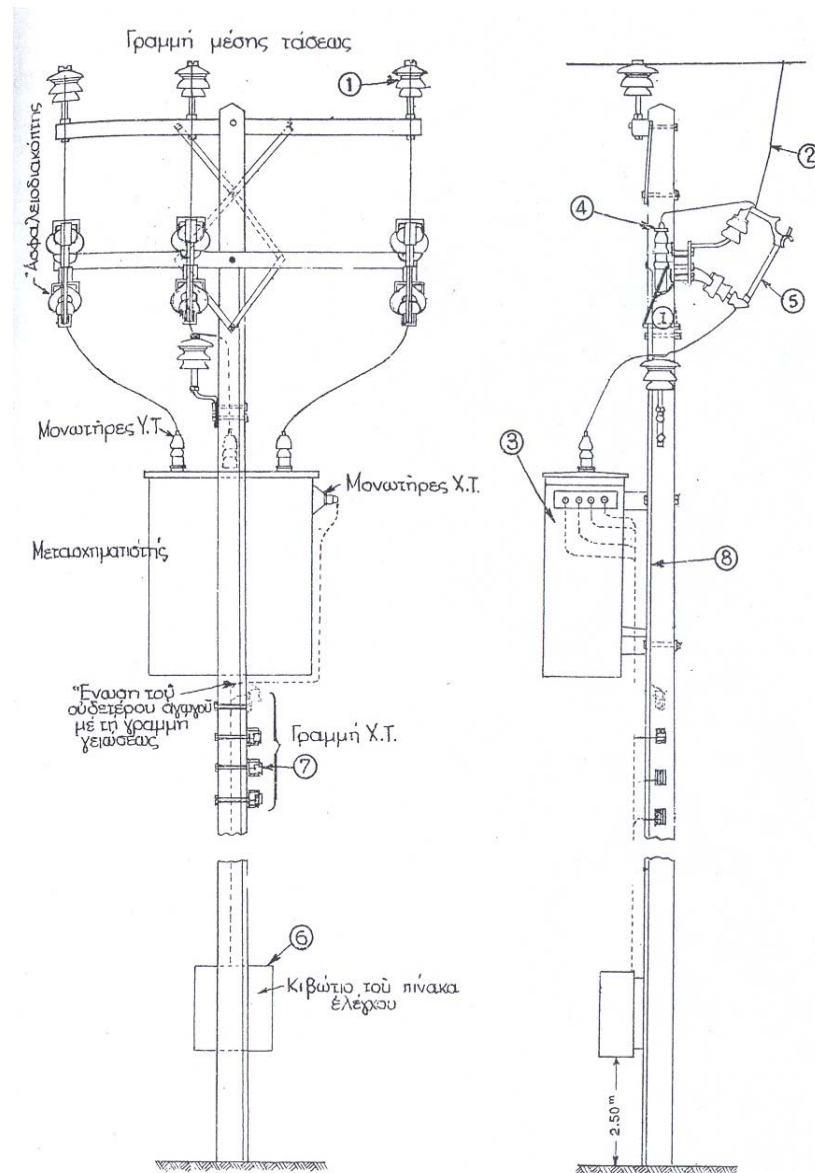
Εικόνα 1.5.1 : Επίγειος υποσταθμός διανομής

2. Υπόγειοι υποσταθμοί διανομής – στην περίπτωση αυτή ο απαραίτητος εξοπλισμός του υποσταθμού βρίσκεται σε υπόγειο χώρο, συνήθως σε υπόγεια πολυκατοικιών. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε αρκετά πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου δεν υπάρχει διαθέσιμος χώρος για επίγειους υποσταθμούς και δεν επιτρέπεται η κατασκευή εναέριων υποσταθμών για αισθητικούς ή άλλους λόγους.

Το κέντρο της Αθήνας αποτελεί χαρακτηριστική περίπτωση τέτοιου τρόπου τροφοδότησης.

3. Εναέριοι υποσταθμοί διανομής – αποτελούν την πιο οικονομική λύση στους υποσταθμούς διανομής, όσον αφορά το κόστος κατασκευής και τον χώρο που απαιτείται γι' αυτό και είναι αρκετά διαδεδομένοι παγκοσμίως. Ο μετασχηματιστής και ο απαραίτητος εξοπλισμός τοποθετούνται σε στύλους.

Ανάλογα με την ισχύ του μετασχηματιστή διακρίνουμε δυο περιπτώσεις εναέριων υποσταθμών διανομής, όπως φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν :



Εικόνα 1.5.2 : Εναέριος υποσταθμός διανομής

Αυτός ο τύπος εναέριου υποσταθμού έχει μικρή μηχανική αντοχή και γι' αυτό χρησιμοποιείται για χαμηλές ισχύεις που δεν ξεπερνούν τα 25 kVA.

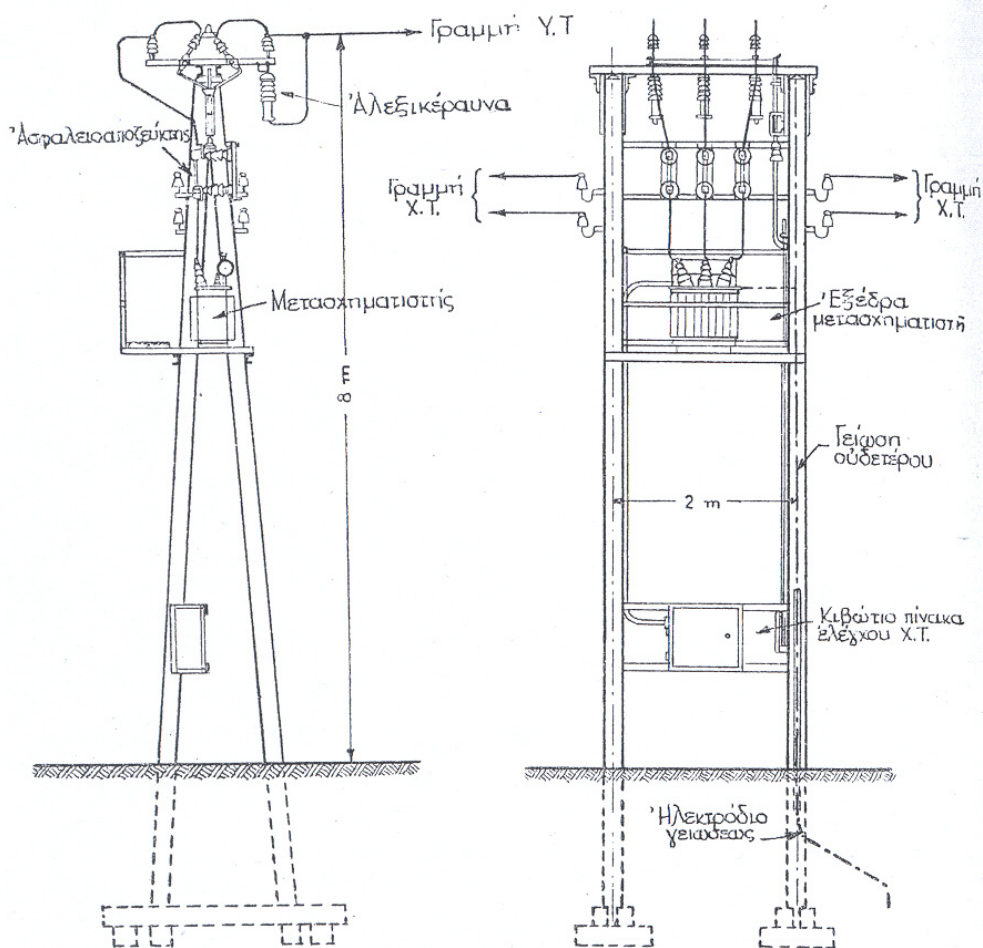
Παρατηρούμε ότι η γραμμή μέσης τάσης φτάνει στους μονωτήρες του στύλου (1) και διακλαδίζεται (2) προκειμένου να τροφοδοτήσει τον μετασχηματιστή (3), αφού περάσει πρώτα από τα απαραίτητα για την προστασία του υποσταθμού, αλεξικέραυνα και τους τρεις μονοπολικούς ασφαλειοδιακόπτες (5).

Οι αγωγοί της χαμηλής τάσης λαμβάνονται από τα πλαϊνά του μετασχηματιστή και οδηγούνται προς ένα κιβώτιο (6), όπου υπάρχουν κατάλληλες ασφάλειες για την προστασία της πλευράς της χαμηλής τάσης.

Μετά το κιβώτιο αυτό οι γραμμές ανεβαίνουν στους μονωτήρες χαμηλής τάσης (7), από όπου το ρεύμα διακλαδίζεται προς το δίκτυο διανομής.

Τέλος, παρατηρούμε την γείωση του αλεξικέραυνου (8), όπου για λόγους προστασίας ενώνεται και το μεταλλικό σώμα του μετασχηματιστή.

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την εναλλακτική κατασκευή εναέριων υποσταθμών, που χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη ισχύ :



Εικόνα 1.5.3 : Εναέριος υποσταθμός διανομής

Παρατηρούμε και εδώ την ύπαρξη αλεξικέραυνου, ενώ έχουμε τους απαραίτητους ασφαλειοαποσείκτες για την προστασία του μετασχηματιστή από βραχυκυκλώματα και υπερφορτώσεις.

Επίσης, για την προστασία στην μεριά της χαμηλής τάσης μπορούμε να έχουμε ασφάλειες ή αυτόματους διακόπτες στο στεγανό κιβώτιο στην βάση των στύλων.

Η παραπάνω κατασκευή αποτελεί παλιότερη τεχνική και είναι πλέον ελαφρώς τροποποιημένη όσον αφορά τους στύλους. Έχουμε πλέον δυο τσιμεντένιους στύλους έναντι των τεσσάρων (ξύλινων) που φαίνονται στο σχήμα, εξασφαλίζοντας έτσι μεγαλύτερη αντοχή και διάρκεια ζωής.

Κεφάλαιο 2^ο

Μετασχηματιστές

2.1 Βασικές αρχές κατασκευής και λειτουργίας

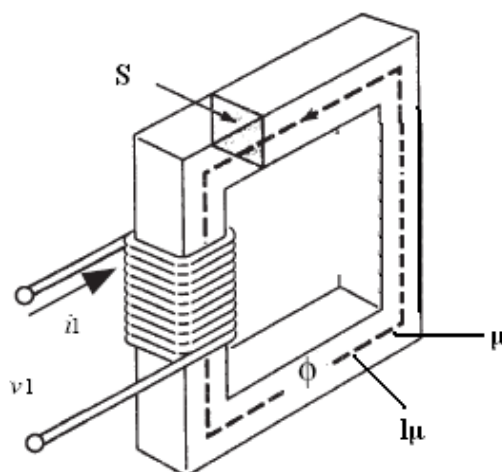
2.1.1 Γενικά

Ο μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει εναλλασσόμενη τάση από ένα επίπεδο σε εναλλασσόμενη τάση διαφορετικού επιπέδου, χρησιμοποιώντας σαν μέσο το μαγνητικό πεδίο. Η συσκευή αυτή αποτελείται από δύο ή περισσότερα πηνία που τυλίγονται γύρω από έναν κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα πηνία αυτά συνήθως δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η μόνη σύζευξη που υπάρχει μεταξύ των σπειρών είναι το κοινό μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του πυρήνα.

Το ένα από τα δύο πηνία του μετασχηματιστή συνδέεται με μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης, ενώ το δεύτερο (ή το τρίτο, εάν υπάρχει) συνδέεται με το φορτίο. Το πρώτο τύλιγμα ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα ή τύλιγμα εισόδου του μετασχηματιστή και το δεύτερο ονομάζεται δευτερεύον ή τύλιγμα εξόδου. Αν υπάρχει και τρίτο τύλιγμα, αυτό ονομάζεται τριτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή.

Οι μετασχηματιστές μπορεί να είναι μονοφασικοί ή τριφασικοί, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα απλό μαγνητικό κύκλωμα το οποίο αποτελείται από τον πυρήνα και το πηνίο. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό και χαρακτηρίζεται από τη διατομή S , το μέσο μήκος l_{μ} και την μαγνητική διαπερατότητα μ .

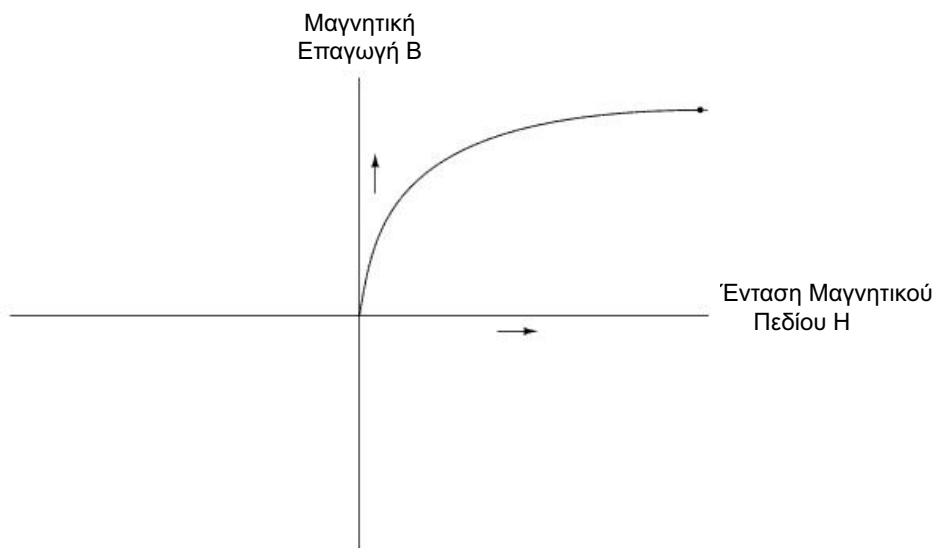


Εικόνα 2.1.1: Απλό μαγνητικό κύκλωμα

Το πηνίο είναι τυλιγμένο γύρω από τον πυρήνα και αποτελείται από N σπείρες μονωμένες ηλεκτρικά μεταξύ τους και ως προς τον πυρήνα

Σημειώνεται ότι η χρήση σιδηρομαγνητικών υλικών στους μετασχηματιστές παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι για συγκεκριμένη ένταση πεδίου (H) στο εσωτερικό τους παράγεται πολλαπλάσια μαγνητική ροή από αυτήν που θα παραγόταν στον αέρα.

Η συμπεριφορά της διαπερατότητας του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα απεικονίζεται με την καμπύλη μαγνήτισής του. Πρόκειται για την μη γραμμική σχέση $\mathbf{B} = \mathbf{F}(\mathbf{H})$, που η μορφή της φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί :



Εικόνα 2.1.2 : Καμπύλη $B = F(H)$

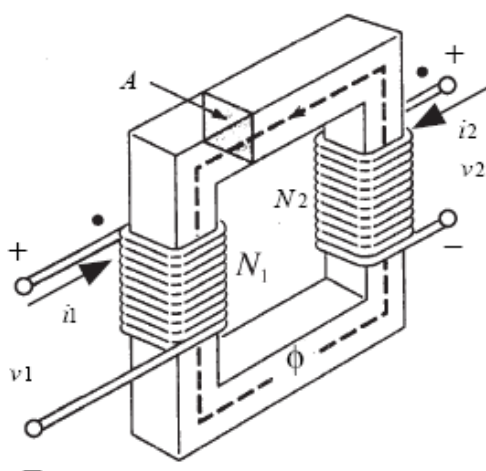
Παρατηρείται ότι μια μικρή αύξηση της έντασης του πεδίου H , στην αρχή, προκαλεί μεγάλη αύξηση της μαγνητικής επαγωγής B . Η περιοχή αυτή ονομάζεται **ακόρεστη**. Μετά από ένα συγκεκριμένο σημείο η επιπλέον αύξηση του πεδίου H προκαλεί σχετικά μικρότερη αύξηση της μαγνητικής επαγωγής B . Αυτή η περιοχή είναι η περιοχή μετάβασης από την ακόρεστη στην κορεσμένη περιοχή και ονομάζεται **γόνατο κορεσμού**. **Κορεσμένη περιοχή** είναι αυτή όπου η καμπύλη τείνει να γίνει οριζόντια.

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα βασικά μεγέθη του μαγνητικού πεδίου:

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδες
Ένταση μαγνητικού πεδίου	H	(Aτ/ m)
Μαγνητική επαγωγή	B	(T)
Μαγνητική ροή	Φ	(wb)
Μαγνητική διαπερατότητα υλικού	μ	(H/m)
Σχετική μαγνητική διαπερατότητα	μ _r	αδιάστατο μέγεθος
Μαγνητική διαπερατότητα του κενού	μ ₀	(H/m)

Πίνακας 2.1: Βασικά μεγέθη του μαγνητικού πεδίου

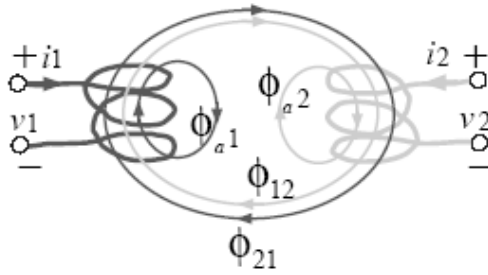
Για να παρουσιαστούν οι βασικές σχέσεις που διέπουν την λειτουργία ενός μετασχηματιστή μπορεί κανείς να στηριχθεί στο απλό μοντέλο που φαίνεται παρακάτω :



Εικόνα 2.1.3 : Απλό μοντέλο μετασχηματιστή

Ο μετασχηματιστής αποτελείται από δύο πηνία, θεωρητικά πολλών τυλιγμάτων, με κοινό πυρήνα διατομής A, ενώ έχει τέσσερις ακροδέκτες και δυο θύρες από τις οποίες λαμβάνει ή αποδίδει ενέργεια.

Στην συνέχεια φαίνεται μια “μεγέθυνση” στα πηνία του παραπάνω μοντέλου από όπου μπορούμε να δούμε τι ακριβώς συμβαίνει κατά την λειτουργία του μετασχηματιστή :



Εικόνα 2.1.4 : Επισκόπηση στα πηνία του Μ/Σ

Όπως βλέπουμε το πηνίο 1 διαρρέεται από ρεύμα i_1 και το πηνίο 2 από ρεύμα i_2 . Το ρεύμα i_1 προκαλεί μαγνητική ροή ϕ_{21} που εμπλέκει το πηνίο 2 και ροή ϕ_{a1} που εμπλέκει το πηνίο 1. Αντίστοιχα το πηνίο 2 προκαλεί μαγνητική ροή ϕ_{12} που εμπλέκει το πηνίο 1 και ροή ϕ_{a2} που εμπλέκει το πηνίο 2. Έτσι λοιπόν, η συνολική πεπλεγμένη ροή που διέρχεται από το πηνίο 1 δίνεται από την σχέση :

$$\lambda_1 = N_1 \cdot (\phi_{a1} + \phi_{12} + \phi_{21}) = N_1 \cdot (\phi_{11} + \phi_{12}) \quad (2.1)$$

όπου ϕ_{11} είναι η συνολική ροή που οφείλεται στο ρεύμα i_1 , ενώ N_1 και N_2 είναι ο αριθμός των περιελίξεων στο πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα αντίστοιχα. Ομοίως, για το πηνίο 2 η συνολική πεπλεγμένη ροή είναι :

$$\lambda_2 = N_2 \cdot (\phi_{a2} + \phi_{21} + \phi_{12}) = N_2 \cdot (\phi_{22} + \phi_{21}) \quad (2.2)$$

όπου η συνολική ροή που οφείλεται στο ρεύμα i_2 .

Εφαρμόζοντας το νόμο του Faraday $v = \frac{d\lambda}{dt}$ στις σχέσεις (2.1) και (2.2) καταλήγουμε ότι :

$$v_1 = L_{11} \cdot \left(\frac{di_1}{dt} \right) + L_{12} \cdot \left(\frac{di_2}{dt} \right) \quad (2.3)$$

$$v_2 = L_{22} \cdot \left(\frac{di_2}{dt} \right) + L_{21} \cdot \left(\frac{di_1}{dt} \right) \quad (2.4)$$

όπου έχουμε ότι L_{11} είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πρώτου πηνίου, L_{22} ο συντελεστής αυτεπαγωγής του δεύτερου πηνίου και οι L_{12} , L_{21} είναι οι συντελεστές αλληλεπαγωγής (οφείλονται δηλ. στη σύζευξη των δυο πηνίων). Εάν το μέσο από το οποίο διέρχεται η ροή είναι γραμμικό τότε ισχύει ότι :

$$L_{12} = L_{21} = M \quad (2.5)$$

όπου η σταθερά M λέγεται συντελεστής αλληλεπαγωγής των πηνίων. Για ευκολία θέτουμε συνήθως $L_{11} = L_1$ και $L_{22} = L_2$, οπότε οι σχέσεις (2.3) και (2.4) γίνονται τελικά :

$$v_1 = L_1 \cdot \left(\frac{di_1}{dt} \right) + M \cdot \left(\frac{di_2}{dt} \right) \quad (2.6)$$

$$v_2 = L_2 \cdot \left(\frac{di_2}{dt} \right) + M \cdot \left(\frac{di_1}{dt} \right) \quad (2.7)$$

2.1.2 Ο ιδανικός μετασχηματιστής

Ο ιδανικός μετασχηματιστής είναι ένα απλό μοντέλο μετασχηματιστή, όπου θεωρείται ότι η ροή στο πρωτεύον είναι ίδια με την ροή που έχουμε στο δευτερεύον. Λαμβάνοντας υπόψη το νόμο του Faraday για την επαγωγή θα έχουμε για το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα ενός ιδανικού μετασχηματιστή αντίστοιχα :

$$v_1 = N_1 \cdot \left(\frac{d\phi}{dt} \right) \quad (2.8)$$

$$v_2 = N_2 \cdot \left(\frac{d\phi}{dt} \right) \quad (2.9)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις δυο παραπάνω σχέσεις προκύπτει η θεμελιώδης σχέση υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης :

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (2.10)$$

όπου α είναι ο λόγος μετασχηματισμού και είναι χαρακτηριστικό για κάθε μετασχηματιστή, ενώ γίνεται εμφανές πως για $\alpha > 1$ (δηλ. $N_1 > N_2$) ο μετασχηματιστής υποβιβάζει την τάση v_1 , ενώ για $\alpha < 1$ (δηλ. $N_1 < N_2$) ο μετασχηματιστής ανυψώνει την τάση v_1 .

Από την σχέση (2.10) εύκολα προκύπτει ότι :

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\alpha} \quad (2.11)$$

Σημειώνεται πως σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν απώλειες ηλεκτρικής ισχύος, οπότε είναι προφανές ότι όση ισχύς εισέρχεται από τη μία θύρα, τόση εξέρχεται από την άλλη.

2.1.3 Πραγματικός μετασχηματιστής

Ο πραγματικός μετασχηματιστής, σε αντίθεση με τον ιδανικό παρουσιάζει απώλειες κατά τη λειτουργία του. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι οι ακόλουθες :

- *Απώλειες χαλκού* : πρόκειται για τις θερμικές απώλειες στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ρεύματος στα τυλίγματά του (I^2R).
- *Απώλειες δινορευμάτων* : είναι οι θερμικές απώλειες που οφείλονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της τάσης η οποία εφαρμόζεται στην είσοδο του μετασχηματιστή.
- *Απώλειες υστέρησης* : οφείλονται στην αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων στο εσωτερικό του πυρήνα και συμβαίνει σε κάθε ημιπερίοδο της τάσης εισόδου. Η μεταβολή τους με το χρόνο είναι μία πολύπλοκη μη γραμμική συνάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται στο μετασχηματιστή.
- *Ροή σκέδασης* : πρόκειται για την μαγνητική ροή που “ξεφεύγει” από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει. Η ροή αυτή παράγει τις αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων του πυρήνα που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή.

Από τα παραπάνω προκύπτουν οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή. Οι απώλειες χαλκού, που είναι θερμικές απώλειες ενσωματώνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την προσθήκη δύο αντιστάσεων : της R_p , που αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος και της R_s , που αντιστοιχεί σ’ αυτήν του δευτερεύοντος. Η ροή σκέδασης του πρωτεύοντος ϕ_{L1} παράγει την τάση e_{L1} , η οποία υπολογίζεται με εφαρμογή του νόμου του Faraday (σχέση 2.8) :

$$e_{L1} = N_1 \cdot \left(\frac{d\phi_{L1}}{dt} \right) \quad (2.12)$$

και αντίστοιχα για το δευτερεύον θα ισχύει :

$$e_{L2} = N_2 \cdot \left(\frac{d\phi_{L2}}{dt} \right) \quad (2.13)$$

Αποδεικνύεται τελικά ότι οι παραπάνω σχέσεις λαμβάνουν την μορφή :

$$e_{L1} = L_1 \cdot \left(\frac{di_1}{dt} \right) \quad (2.14)$$

$$e_{L2} = L_2 \cdot \left(\frac{di_2}{dt} \right) \quad (2.15)$$

όπου είναι $L_1 = N_1^2 \cdot P$ η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος τυλίγματος, $L_2 = N_2^2 \cdot P$ η αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος τυλίγματος και P η μαγνητική αγωγιμότητα της διαδρομής της μαγνητικής ροής.

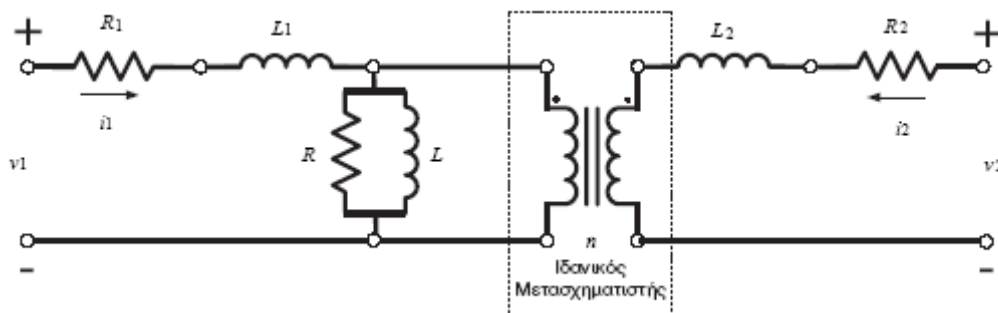
Παρατηρούμε ότι οι δύο ροές σκέδασης αντιστοιχίζονται στο ισοδύναμο κύκλωμα σε αυτεπαγωγές.

Το ρεύμα μαγνήτισης i_m είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή, ενώ η κυματομορφή του έπεται αυτής της τάσης κατά 90° . Έτσι το ρεύμα αυτό αντιστοιχίζεται σε μία αντίδραση X_m , τοποθετημένη εγκάρσια.

Το ρεύμα απωλειών του πυρήνα i_{h+e} (απώλειες που οφείλονται σε δινορεύματα και στο φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης), είναι ανάλογο της τάσης που

εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή, ενώ η κυματομορφή του είναι ίδια με αυτήν της τάσης. Έτσι το ρεύμα αυτό μπορεί να παρουσιάζεται με μία αντίσταση R_C τοποθετημένη παράλληλα στην πηγή τάσης.

Στην εικόνα που ακολουθεί, παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή, που χρησιμοποιείται στην πράξη για υπολογισμούς :



Εικόνα 2.1.5 : Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού Μ/Σ

2.2 Κατηγορίες μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές ταξινομούνται σε κατηγορίες ανάλογα με διάφορα κριτήρια :

(1) Ως προς την **ισχύ** :

- *Μετασχηματιστές οργάνων* : είναι μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται σε όργανα μέτρησης και σε πίνακες εσωτερικών εγκαταστάσεων.
- *Μετασχηματιστές ισχύος* : μεταβιβάζουν σημαντικές ποσότητες ισχύος και χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

(2) Ως τον αριθμό των **φάσεων** :

- *Τριφασικοί μετασχηματιστές* : χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της τάσης σε τριφασικό σύστημα.
- *Μονοφασικοί μετασχηματιστές* : χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της τάσης μιας φάσης του τριφασικού συστήματος.

(3) Ανάλογα με τον **τρόπο ψύξης**:

- *Μετασχηματιστές ξηρού τύπου* : ψύχονται με αέρα.
- *Μετασχηματιστές λαδιού* : ψύχονται με κυκλοφορία λαδιού.

(4) Ανάλογα με το **χώρο τοποθέτησης** :

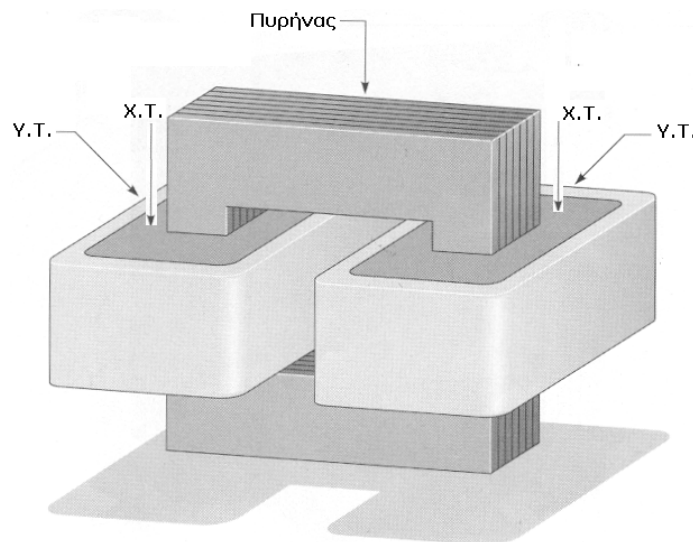
- *Μετασχηματιστές υπαίθρου*
- *Μετασχηματιστές κλειστού χώρου*

(5) Ανάλογα με τη χρήση στο σύστημα ηλεκτροδότησης :

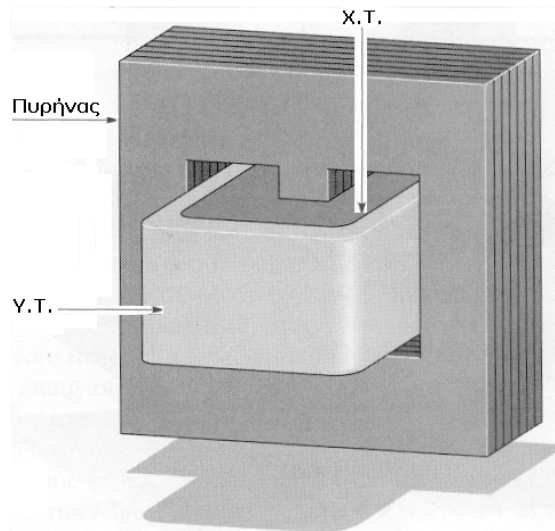
- *Μετασχηματιστές ανύψωσης* : συνδέονται στην έξοδο των γεννητριών και ανυψώνουν την τάση ώστε να οδηγηθεί στη γραμμή μεταφοράς.
- *Μετασχηματιστές υποβιβασμού* : συνδέονται στο τέλος των γραμμών μεταφοράς και υποβιβάζουν την τάση στα επίπεδα διανομής.
- *Μετασχηματιστές διανομής* : υποβιβάζουν την τάση στα επίπεδα κατανάλωσης.

(6) Ανάλογα με τον τύπο πυρήνα :

- *Μετασχηματιστές τύπου πυρήνα* : τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται γύρω από τις δύο πλευρές ενός ορθογώνιου πυρήνα (εικόνα 2.2.1).
- *Μετασχηματιστές τύπου κελύφους ή μανδύα* : σε αυτή την κατηγορία τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται στο μεσαίο σκέλος του πυρήνα με αποτέλεσμα η ροή να κλείνει το κύκλωμα από τα ακριανά σκέλη και το ζύγωμα (εικόνα 2.2.2). Σημειώνεται ότι γενικά οι μετασχηματιστές τύπου κελύφους παρουσιάζουν μικρότερη ροή σκέδασης από τους μετασχηματιστές τύπου πυρήνα.



Εικόνα 2.2.1 : Μετασχηματιστής τύπου πυρήνα



Εικόνα 2.2.2 : Μετασχηματιστής τύπου κελύφους

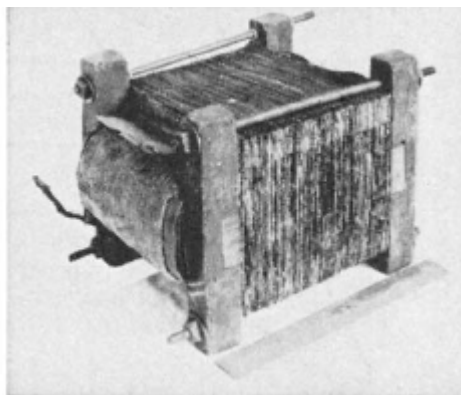
2.3 Μετασχηματιστές διανομής

Μετά την παρουσίαση των βασικών αρχών κατασκευής και λειτουργίας των μετασχηματιστών κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν κάποια επιπλέον στοιχεία για τους μετασχηματιστές διανομής γενικά.

2.3.1 Ιστορικά στοιχεία

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 1, η ανάγκη επέκτασης της ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε στην κατασκευή των μετασχηματιστών διανομής, που η λειτουργία τους είναι να μετασχηματίζουν την τάση σε κατάλληλα επίπεδα για κατανάλωση.

Ο πρώτος μετασχηματιστής διανομής κατασκευάστηκε περί τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, από τον William Stanley και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα :



Εικόνα 2.3.1 : Ο πρώτος Μ/Σ διανομής

2.3.2 Βασικά στοιχεία των μετασχηματιστών διανομής

Οι μετασχηματιστές διανομής μπορεί να είναι μονοφασικοί ή τριφασικοί, ενώ η ισχύς λειτουργίας τους ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιούνται. Γενικά, η ισχύς των μονοφασικών μετασχηματιστών διανομής κυμαίνεται από 5 μέχρι 500 KVA, ενώ των τριφασικών από 25 μέχρι 1600 KVA.

Οι αρχές λειτουργίας δεν διαφέρουν από αυτές των άλλων μετασχηματιστών γενικά, που αναφέρονται σε προηγούμενη παράγραφο. Αξίζει όμως να αναφερθούν τα εξαρτήματα που συνθέτουν έναν σύγχρονο μετασχηματιστή διανομής :

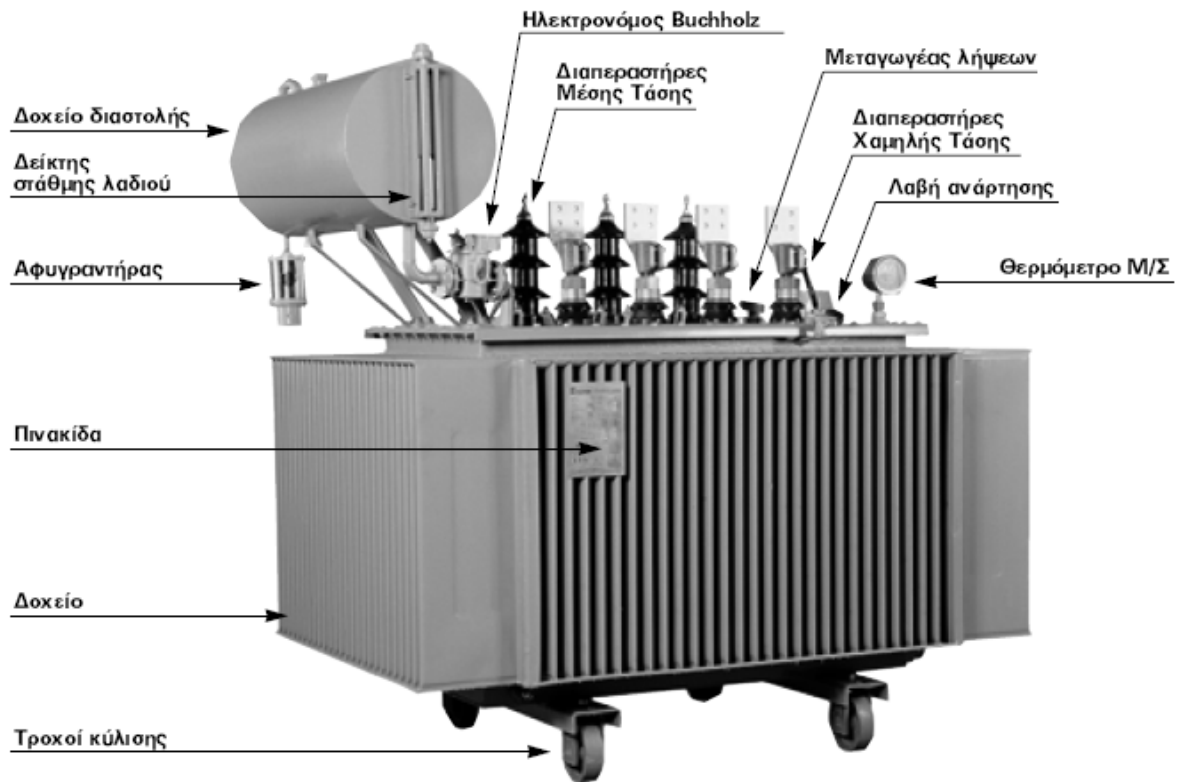
- *Δοχείο μετασχηματιστή* : αποτελείται από την στεφάνη, τον πυθμένα και τα πλευρικά τοιχώματα. Τα πλευρικά τοιχώματα του δοχείου κατασκευάζονται από πτυχωτά πάνελα (ελάσματα) με στόχο την αύξηση της επιφάνειας ψύξης. Το δοχείο των Μ/Σ κλειστού τύπου (είναι οι Μ/Σ διανομής που δεν έχουν δοχείο διαστολής), γεμίζουν με λάδι και σφραγίζονται ερμητικά. Τα ελαστικά τοιχώματα του δοχείου δεν επιτρέπουν να δημιουργηθεί μεγάλη αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του, η οποία προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού κατά την λειτουργία του μετασχηματιστή. Στο δοχείο τοποθετούνται επίσης και δυο αφαλοί γείωσης, ενώ στον πυθμένα είναι συγκολλημένο το σύστημα κύλισης με τροχούς ή η βάση έδρασης.
- *Κάλυμμα μετασχηματιστή* : πάνω στο κάλυμμα υπάρχουν δυο λαβές ανάρτησης, που χρησιμοποιούνται για την ανύψωση και την μεταφορά του μετασχηματιστή. Επίσης εδώ έχουμε το θερμόμετρο, δυο αφαλούς γείωσης και κατάλληλη βαλβίδα σε περίπτωση μετασχηματιστών κλειστού τύπου.
- *Λαβές ανάρτησης* : χρησιμοποιούνται για την μεταφορά και ανύψωση των μετασχηματιστών.
- *Τροχοί κύλισης* : Οι μετασχηματιστές μέχρι 160 KVA χρησιμοποιούνται στους εναέριους υποσταθμούς τάσης (σε μονόστηλα ή δίστηλα) και δεν έχουν τροχούς. Αντίθετα, οι μετασχηματιστές άνω των 160 KVA έχουν συνήθως τροχούς κύλισης, των οποίων η κατεύθυνση μπορεί να μεταβάλλεται κατά 90°.
- *Σύνδεσμος γείωσης ουδετέρου* : με τον σύνδεσμο αυτόν εξασφαλίζεται η γείωση του ουδετέρου του τριφασικού τυλίγματος με το δοχείο του μετασχηματιστή.
- *Βαλβίδα εκκένωσης και δειγματοληψίας λαδιού* : Στο κάτω μέρος ενός πλευρικού τοιχώματος του μετασχηματιστή βρίσκεται η βαλβίδα εξαγωγής λαδιού, που επιτρέπει την δειγματοληψία για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού.
- *Διαπεραστήρες μέσης τάσης* : για μέση τάση 6, 10, 20 και 30 kV χρησιμοποιούνται διαπεραστήρες πορσελάνης κατά DIN 42531.
- *Διαπεραστήρες χαμηλής τάσης* : χρησιμοποιούνται διαπεραστήρες από πορσελάνη κατά DIN 42530.

- *Ακροδέκτες χαμηλής τάσης* : οι ακροδέκτες που χρησιμοποιούνται είναι κατά DIN 43675.
- *Μεταγωγέας λήψεων* : η εφαρμοζόμενη μέση τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από την θέση του μετασχηματιστή στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο μεταγωγέας λήψεων, ώστε με δεδομένη την εφαρμοζόμενη τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, να διατηρείται όσο το δυνατόν σταθερή η τάση στο δευτερεύον. Ο μεταγωγέας λήψεων τοποθετείται στο δοχείο του μετασχηματιστή με το χειριστήριο του πάνω στο κάλυμμα. Σημειώνεται ότι ο χειρισμός του μεταγωγέα γίνεται μόνο όταν ο μετασχηματιστής βρίσκεται εκτός τάσης.
- *Μεταγωγέας τάσεων* : χρησιμοποιείται για την αλλαγή της τάσης λειτουργίας του μετασχηματιστή από μια τάση σε μια άλλη (πχ. από 15 σε 20 kV και αντίστροφα), ανάλογα με την τάση του δικτύου, στην οποία είναι συνδεδεμένος ο μετασχηματιστής. Ο χειρισμός του είναι παρόμοιος με αυτόν του μεταγωγέα λήψεων.
- *Θερμόμετρο μετασχηματιστή* : το θερμικό στοιχείο του θερμομέτρου είναι τοποθετημένο στο πιο ψηλό στρώμα του λαδιού, ώστε να μετράει την μέγιστη θερμοκρασία αυτού. Οι ηλεκτρικές επαφές του θερμομέτρου ρυθμίζονται στις επιθυμητές θερμοκρασίες και συνδέονται στο κύκλωμα προστασίας για συναγερμό (alarm) και για διακοπή (trip) του κυκλώματος, όταν γίνεται υπέρβαση των θερμοκρασιακών ορίων που τίθενται.
- *Δοχείο διαστολής* : κατά την μεταβολή της θερμοκρασίας του λαδιού του μετασχηματιστή, και συνεπώς του όγκου του λαδιού, το δοχείο διαστολής δέχεται αυτή την αυξομείωση του όγκου. Η ποσότητα του λαδιού που περιέχει το δοχείο διαστολής μετριέται από τον δείκτη στάθμης λαδιού, ο οποίος είναι ανθεκτικός σε υψηλή θερμοκρασία και έχει δυο ενδεικτικά σημεία : το ένα δείχνει την στάθμη του λαδιού στους $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ και το άλλο στους $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- *Ηλεκτρονόμος Buchholz* : η προστασία των μετασχηματιστών λαδιού από εσωτερικά σφάλματα, τα οποία προκαλούν ανάπτυξη αερίων ή έντονη ροή λαδιού, γίνεται με τον ηλεκτρονόμο Buchholz, ο οποίος τοποθετείται μεταξύ του δοχείου του μετασχηματιστή και του δοχείου διαστολής. Σε περίπτωση σχηματισμού φυσαλίδων (σαν αποτέλεσμα εσωτερικής βλάβης), ή έλλειψης λαδιού μετακινείται ένας πλωτήρας και ενεργοποιείται έτσι η επαφή συναγερμού, ενώ όταν τα αέρια που εκλύονται είναι αρκετά (έχουμε δηλ. σημαντική βλάβη) μετακινείται ένας δεύτερος πλωτήρας ενεργοποιώντας έτσι την επαφή διακοπής. Επίσης, διακοπή έχουμε αν δημιουργηθεί έντονη ροή λαδιού προς το δοχείο διαστολής μετά από βραχυκύκλωμα ή εσωτερική βλάβη.
- *Αφυγραντήρας* : τοποθετείται πάνω στο δοχείο διαστολής. Μέσα από τον αφυγραντήρα περνά ο αέρας προς και από το δοχείο διαστολής του μετασχηματιστή λόγω της συστολής και διαστολής του όγκου του λαδιού. Περιέχει κρυστάλλους SiO_2 (silicagel) που απορροφούν την υγρασία του

αέρα. Όσο το χρώμα της ουσίας αυτής είναι μπλε σημαίνει ότι η απορρόφηση γίνεται επιτυχώς. Όταν αλλάξει το χρώμα του σε ροζ σημαίνει ότι έχει κορεστεί και πρέπει να ξηραθεί ή να αντικατασταθεί. Η ξήρανση του επιτυγχάνεται θερμαίνοντας το σε θερμοκρασία από 120 °C μέχρι 150 °C ώσπου το χρώμα του να ξαναγίνει μπλε.

- *Πώμα πλήρωσης* : όλοι οι μετασχηματιστές είναι εφοδιασμένοι με το κατάλληλο πώμα πλήρωσης (σύμφωνα με τις προδιαγραφές DIN), από όπου γίνεται η συμπλήρωση με μονωτικό λάδι.
- *Δείκτης στάθμης λαδιού* : στους μετασχηματιστές κλειστού τύπου (χωρίς δοχείο διαστολής), ο δείκτης στάθμης λαδιού (ελαιοδείκτης) είναι τοποθετημένος στο πλευρικό τοίχωμα ή στο κάλυμμα του μετασχηματιστή. Σε μετασχηματιστές με δοχείο διαστολής τοποθετείται σε αυτό ένας ελαιοδείκτης σωληνωτού τύπου (γυάλινος διαφανής σωλήνας) ή μαγνητικού τύπου.
- *Πινακίδα μετασχηματιστή* : στην πινακίδα του μετασχηματιστή αναγράφονται όλα τα στοιχεία που ορίζουν οι διεθνείς προδιαγραφές : τύπος Μ/Σ, ισχύς σε KVA, φάσεις, συχνότητα, τάσεις βραχυκύκλωσης, ζεύξη, είδος ψύξης, υλικό τυλιγμάτων, αριθμός σειράς, έτος κατασκευής, βάρος πυρήνα και τυλιγμάτων, βάρος λαδιού, ολικό βάρος, μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ανύψωση θερμοκρασίας τυλίγματος, ανύψωση θερμοκρασίας λαδιού, ονομαστική τάση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, ονομαστική ένταση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, απώλειες κενού φορτίου, απώλειες φορτίου, θέσεις του μεταγωγέα λήψεων και του μεταγωγέα φάσεων.
- *Αφαλός γείωσης δοχείου* : στο δοχείο του μετασχηματιστή και πιο συγκεκριμένα κοντά στον πυθμένα, τοποθετούνται δυο αφαλοί γείωσης αντιδιαμετρικά μεταξύ τους, ώστε να παρέχεται η δυνατότητα γείωσης του δοχείου.
- *Επιπλέον εξαρτήματα μετασχηματιστών κλειστού τύπου* : οι μετασχηματιστές κλειστού τύπου είναι συνήθως επιπλέον εφοδιασμένοι με ανακουφιστική βαλβίδα και θερμόμετρο, ή ηλεκτρονόμο DGPT2. Ο ηλεκτρονόμος αυτός είναι ένα όργανο, που διαθέτει διακόπτη υπερπίεσης, θερμόμετρο με επαφές συναγερού και διακοπής και ελαιοδείκτη με επαφή για διακοπή του κυκλώματος.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ένας σύγχρονος μετασχηματιστής διανομής και σημειώνονται κάποια από τα στοιχεία που προαναφέρθηκαν :

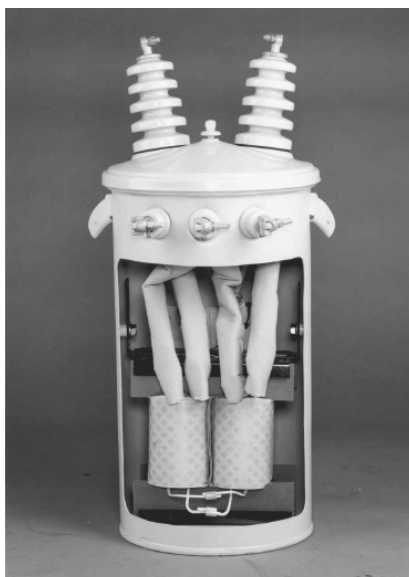


Εικόνα 2.3.2 : Σύγχρονος τριφασικός Μ/Σ διανομής

Τέλος παρατίθεται μια εικόνα όπου φαίνεται ένας μετασχηματιστής διανομής σε τομή και μια εικόνα ενός τυπικού μονοφασικού μετασχηματιστή διανομής :



Εικόνα 2.3.3 : Μ/Σ διανομής σε τομή



Εικόνα 2.3.4 : Μονοφασικός Μ/Σ διανομής

2.3.3 Συντήρηση των μετασχηματιστών διανομής

Οι μετασχηματιστές διανομής (και γενικά οι μετασχηματιστές) θεωρούνται πολύ αξιόπιστες ηλεκτρικές συσκευές που δεν απαιτούν συντήρηση στα πολλά χρόνια λειτουργίας τους. Αυτό όμως προϋποθέτει ότι ο μετασχηματιστής είναι καθαρός, ότι δεν υπερφορτώθηκε περισσότερο από τα προβλεπόμενα όρια φόρτισης και τα επιτρεπόμενα χρονικά όρια υπερφόρτισης, ότι δεν είχαμε βραχυκυκλώματα, υπερτάσεις και κεραυνούς στο δίκτυο που εξυπηρετεί και ότι οι συσκευές ζεύξης σε χαμηλή και μέση τάση, καθώς επίσης και οι συσκευές προστασίας του μετασχηματιστή λειτουργούν σωστά.

Φυσικά, είναι αδύνατο να τηρούνται όλα τα παραπάνω κι έτσι γενικά συστήνονται οι παρακάτω ενέργειες συντήρησης :

Οπτικός έλεγχος (κάθε τρεις μήνες)

- Έλεγχος του μετασχηματιστή αν είναι καθαρός, κυρίως στους μονωτήρες (σκόνη και υγρασία υποβοηθούν τις υπερπηδήσεις).
- Έλεγχος για διαρροή λαδιού.
- Έλεγχος φθοράς της βαφής του μετασχηματιστή. Αν υπάρχει φθορά θα πρέπει να διορθωθεί για να προληφθεί η οξείδωση του δοχείου.
- Έλεγχος της στάθμης του λαδιού του ελαιοδείκτη, όταν ο μετασχηματιστής είναι εκτός λειτουργίας. Αν πχ. η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι +20 °C και η ένδειξη του ελαιοδείκτη είναι κάτω από τους +20 °C απαιτείται συμπλήρωμα λαδιού.
- Έλεγχος της κατάστασης του αφυγραντήρα ως προς το χρώμα του (αναφέρεται παραπάνω).

Έλεγχος λαδιού (κάθε χρόνο)

- Έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού. Ο έλεγχος γίνεται βάσει δείγματος που λαμβάνεται από τον κρουνό εκκένωσης και δειγματοληψίας του μετασχηματιστή. Λαμβάνεται δείγμα 1 lt αφού πρώτα τρέξουν 10 lt λαδιού. Αν ο έλεγχος δείξει ότι η διηλεκτρική αντοχή του λαδιού είναι κάτω από 40 kV, τότε το λάδι πρέπει να αντικατασταθεί ή να υποστεί επεξεργασία από ειδική μηχανή καθαρισμού.
- Έλεγχος της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου Buchholz, του θερμομέτρου και της κατάστασης των επαφών του.

Σημειώνεται ότι για οποιαδήποτε από τις παραπάνω ενέργειες είναι απαραίτητο να προηγούνται το άνοιγμα των διακοπών σε μέση και χαμηλή τάση και η γείωση του μετασχηματιστή για την απομάκρυνση τυχόν χωρητικών φορτίων.

2.4 Θερμοκρασία και Μετασχηματιστές

Η θερμοκρασία αποτελεί μια από τις βασικότερες παραμέτρους της λειτουργίας ενός μετασχηματιστή, που πρέπει να παρακολουθείται τακτικά αφού μπορούμε έτσι να εξάγουμε πολλές χρήσιμες πληροφορίες.

2.4.1 Θερμοκρασιακά όρια

Σύμφωνα με τα πρότυπα ANSI και IEEE, προκειμένου οι μετασχηματιστές διανομής να έχουν φυσιολογική λειτουργία, και κατ' επέκταση φυσιολογική διάρκεια ζωής, πρέπει να έχουν μέση ανύψωση θερμοκρασίας στα τυλίγματα τέτοια που να μην ξεπερνάει τους 65 °C, ως προς την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Δηλ. η διαφορά της θερμοκρασίας περιβάλλοντος από την μετρούμενη θερμοκρασία στον Μ/Σ δεν πρέπει να είναι πάνω από το όριο που τίθεται. Παλιότερα μοντέλα, που πρακτικά χρησιμοποιούνται ακόμα σήμερα, έχουν σαν όριο την θερμοκρασία των 55 °C.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέγιστη δυνατή θερμοκρασία των τυλιγμάτων που ονομάζεται **hot – spot** και δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τους 80 °C ως προς το περιβάλλον. Έτσι, για θερμοκρασία περιβάλλοντος 30 °C θα έχουμε μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία, hot – spot, 110 °C.

Τέλος, για την τάση λειτουργίας τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται στην πράξη ορίζουν ότι στο κενό φορτίο δεν πρέπει να ξεπερνάει το 110% της ονομαστικής και στο πλήρες φορτίο το 105%. Οι σύγχρονοι μετασχηματιστές είναι ικανοί να λειτουργούν πέραν αυτών των ορίων χωρίς να προκαλούν υπερβολικό κορεσμό του πυρήνα. Παρόλο αυτά, το γεγονός αυτό επιφέρει ανάπτυξη θερμότητας μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη κι έτσι έχουμε γενική αύξηση της θερμοκρασίας.

2.4.2 Θερμικοί έλεγχοι (Heat Run Tests)

Είναι οι έλεγχοι που εφαρμόζονται προκειμένου να διαπιστώνονται η μέση και η μέγιστη (hot – spot) θερμοκρασία των τυλιγμάτων ενός μετασχηματιστή ως προς την θερμοκρασία περιβάλλοντος καθώς επίσης και η μέγιστη θερμοκρασία του λαδιού του μετασχηματιστή.

Οι έλεγχοι αυτοί γίνονται με σκοπό να επαληθευτεί αν οι εξεταζόμενοι μετασχηματιστές θα μπορούν να διανέμουν το φορτίο λειτουργίας τους χωρίς να παραβιάζονται οι τιμές των μεγεθών που προαναφέρθηκαν και καθορίζονται από τις προδιαγραφές των κατασκευαστών.

Σύμφωνα με τα πρότυπα ANSI και IEEE αυτοί οι έλεγχοι πρέπει να γίνονται για το ελάχιστο και μέγιστο φορτίο λειτουργίας.

2.4.3 Ψύξη των μετασχηματιστών

Όπως είναι γνωστό κανένας μετασχηματιστής δεν είναι απόλυτα ιδανικός και συνεπώς έχουμε απώλειες ενέργειας που κυρίως μετατρέπονται σε θερμότητα.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την απαγωγή της θερμότητας στους μετασχηματιστές εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι το είδος της εφαρμογής, το μέγεθος του μετασχηματιστή και η ποσότητα της θερμότητας που πρέπει να απαχθεί.

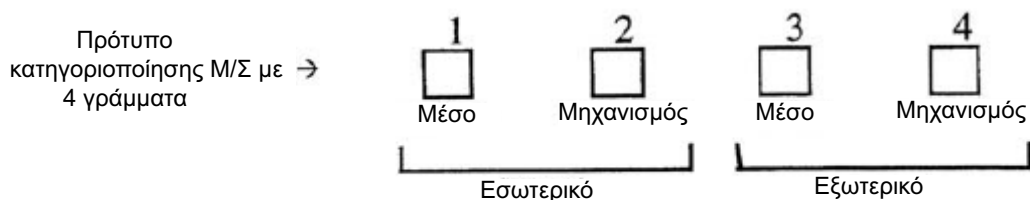
Το μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται σε έναν μετασχηματιστή, κυρίως λάδι, έχει διπλό ρόλο. Αρχικά, να συμπεριφέρεται σαν μονωτής και ύστερα να αποτελεί κατάλληλη λύση για την απαγωγή της θερμότητας.

Τα τυλίγματα και ο πυρήνας αποτελούν τις κύριες πηγές της θερμότητας, αν και υπάρχουν εσωτερικές μεταλλικές κατασκευές που δρουν με τον ίδιο τρόπο. Είναι απαραίτητη η ύπαρξη αγωγών και περασμάτων κοντά στις πηγές θερμότητας ώστε να επιτρέπεται η ροή του ψυκτικού μέσου και να απάγεται έτσι η παραγόμενη θερμότητα.

Η φυσική κυκλοφορία του λαδιού μέσα σε έναν μετασχηματιστή και συνεπώς η μεταφορά θερμότητας ονομάζεται **φαινόμενο θερμοσίφωνα**, αφού θυμίζει την λειτουργία του κλασσικού θερμοσίφωνα. Η θερμότητα μεταφέρεται στο ντεπόζιτο του λαδιού του μετασχηματιστή και τελικά απάγεται στο περιβάλλον.

Επίσης, έχουν επικρατήσει και ειδικές διατάξεις απαγωγής θερμότητας που τοποθετούνται στην επιφάνεια των μετασχηματιστών και μπορεί να είναι είτε σωλήνες όπου ρέει το λάδι, είτε μεταλλικές κατασκευές που θυμίζουν καλοριφέρ. Με αυτές τις τεχνικές αποφεύγεται ουσιαστικά η ανάγκη για περισσότερο μονωτικό λάδι και συνεπώς δεν είναι υποχρεωτική η αύξηση του μεγέθους του ντεπόζιτου του λαδιού.

Σύμφωνα με πρότυπο του IEEE οι μετασχηματιστές διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά ψύξης τους. Ουσιαστικά, η κάθε κατηγορία περιγράφονται με τέσσερα γράμματα. Η γενική μέθοδος που γίνεται η περιγραφή αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Εικόνα 2.4.1 : Μέθοδος κατηγοριοποίησης Μ/Σ ως προς την ψύξη τους

Παρατηρούμε ότι τα γράμματα αφορούν το ψυκτικό μέσο (λάδι, ή ό,τι άλλο) και τον μηχανισμό που γίνεται η απαγωγή θερμότητας, που μπορεί να είναι με φυσική ροή (απλή κυκλοφορία του μέσου) ή εξαναγκασμένη ροή (κυκλοφορία με χρήση αντλιών ή άλλων διατάξεων). Ακόμα βλέπουμε ότι τα δυο πρώτα γράμματα αφορούν το εσωτερικό του μετασχηματιστή και τα δυο τελευταία το εξωτερικό του.

Αυτός ο απλός τρόπος ταξινόμησης των μετασχηματιστών χρησιμοποιείται ευρύτατα σε ΗΠΑ και Ευρώπη και αποτελεί μια αρκετά καλή μέθοδο, αφού με τέσσερα γράμματα λαμβάνουμε σημαντικές πληροφορίες για το σύστημα ψύξης ενός Μ/Σ.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα γράμματα που χρησιμοποιούνται και τι συμβολίζουν αυτά :

<i>Εσωτερικό Μ/Σ</i>	1 ^ο γράμμα (ψυκτικό μέσο)	Γράμμα	Περιγραφή
		O	Υγρό με σημείο καύσης μικρότερο ή ίσο των 300 °C
		K	Υγρό με σημείο καύσης μεγαλύτερο των 300 °C
		L	Υγρό με μη μετρήσιμο σημείο καύσης
	2 ^ο γράμμα (μηχανισμός ψύξης)	N	Φυσική ροή στον εξοπλισμό ψύξης και στα τυλίγματα
		F	Εξαναγκασμένη κυκλοφορία στον εξοπλισμό ψύξης, φυσική ροή στα τυλίγματα
		D	Εξαναγκασμένη κυκλοφορία στον εξοπλισμό ψύξης, κατευθυνόμενη ροή στα τυλίγματα.
<i>Εξωτερικό Μ/Σ</i>	3 ^ο γράμμα (ψυκτικό μέσο)	A	Αέρας
		W	Νερό
	4 ^ο γράμμα (μηχανισμός ψύξης)	N	Φυσική ροή
		F	Εξαναγκασμένη κυκλοφορία

Πίνακας 2.2 : Πρότυπο κατηγοριοποίησης των Μ/Σ ως προς τον τρόπο ψύξης τους

2.4.4 Υπολογισμός θερμικής απόκρισης μετασχηματιστών

Σε πρότυπα του IEEE βρίσκουμε λεπτομερείς μεθόδους ώστε να επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του λαδιού και των τυλιγμάτων ενός μετασχηματιστή.

Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του λαδιού είναι απαραίτητος προκειμένου να έχουμε μια πρόβλεψη της θερμικής απόκρισης του μετασχηματιστή. Οι συνολικές απώλειες σε έναν μετασχηματιστή προκαλούν την ανύψωση της θερμοκρασίας του λαδιού για δεδομένο φορτίο. Όταν λέμε συνολικές απώλειες μετασχηματιστή εννοούμε το άθροισμα των απωλειών πυρήνα (απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων) και φορτίου.

Η μέγιστη ανύψωση της θερμοκρασίας του λαδιού του μετασχηματιστή (TO_2) δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$TO_2 = TO_1 \cdot \left(\frac{TL_2}{TL_1} \right)^n, \quad (2.16)$$

όπου TO_1 είναι η αρχική ή κάποια γνωστή ανύψωση της θερμοκρασίας του λαδιού, TL_2 οι συνολικές απώλειες στο μέγιστο φορτίο, TL_1 οι συνολικές απώλειες σε κάποιο γνωστό φορτίο και n ένας συντελεστής που ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του μετασχηματιστή.

Αμελώντας τις απώλειες πυρήνα και αντικαθιστώντας τις απώλειες φορτίου με $i^2 r$ ο τύπος (2.16) γίνεται :

$$TO_2 = TO_1 \cdot \left(\frac{i_2^2 r}{i_1^2 r} \right)^n = TO_1 \cdot \left(\frac{i_2^2}{i_1^2} \right)^n = TO_1 \cdot \left(\frac{i_2}{i_1} \right)^{2n} \quad (2.17)$$

Αντίστοιχα μπορεί να γίνει και ο υπολογισμός για την περιοχή hot – spot των τυλιγμάτων :

$$HSG_2 = HSG_1 \cdot \left(\frac{i_2}{i_1} \right)^{2m} \quad (2.18)$$

όπου m σταθερά, που ομοίως με την n , εξαρτάται από τον τύπο του μετασχηματιστή και προκύπτουν ουσιαστικά από τις θερμοκρασιακές δοκιμές του μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή.

2.4.5 Θερμοκρασία και διάρκεια ζωής μετασχηματιστών

Η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των μετασχηματιστών γενικά είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που μπορούν να έχουν οι μηχανικοί, καθώς επιφέρει οικονομικά και τεχνικά οφέλη.

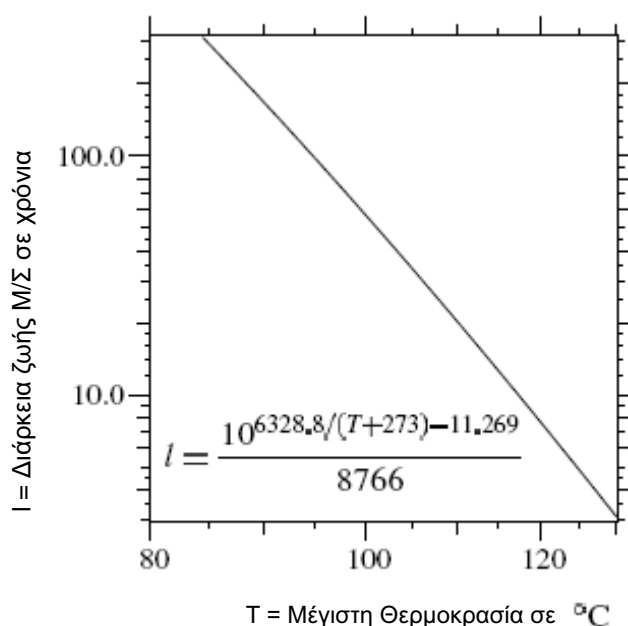
Οι μετασχηματιστές διανομής ειδικότερα, μπορούν να διανέμουν την ισχύ λειτουργίας τους χωρίς να παρουσιάζεται αύξηση των θερμοκρασιακών ορίων υπό τις παρακάτω συνθήκες :

- Η τάση στο δευτερεύον να μην ξεπερνάει το 105% της ονομαστικής τάσης λειτουργίας.
- Ο συντελεστής φορτίου ($\cos\phi$) να είναι $\geq 0,8$.
- Η συχνότητα λειτουργίας να μην είναι κάτω του 95% της ονομαστικής (50 ή 60 Hz).

Μεγάλη σημασία παρουσιάζει η μέγιστη θερμοκρασία των τυλιγμάτων, δηλ. η θερμοκρασία hot – spot, καθώς σε αυτή την θερμοκρασία μπορεί να παρατηρηθεί αλλοίωση των μονώσεων, που σταδιακά επιφέρει την δυσλειτουργία του μετασχηματιστή και τελικά την καταστροφή του.

Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι η καλή λειτουργία και η διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή διανομής (ή γενικότερα κάθε μετασχηματιστή), είναι άμεσα συνδεδεμένη με την θερμοκρασία.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η γραφική παράσταση της διάρκειας ζωής ενός μετασχηματιστή σε έτη συναρτήσει της μέγιστης αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας σε °C. Επίσης, φαίνεται και η μαθηματική σχέση που συνδυάζει τα δυο μεγέθη και από την οποία προκύπτει το εν λόγω γράφημα :



Εικόνα 2.4.2 : Γραφική παράσταση της διάρκειας ζωής ενός M/Σ διανομής ως προς την μέγιστη θερμοκρασία του

Παρατηρούμε ότι για μέγιστη θερμοκρασία 110 °C (δηλ. για θερμοκρασία περιβάλλοντος 30 °C και 80 °C hot – spot, που είναι το ενδεικνυόμενο όριο), έχουμε διάρκεια ζωής ίση με 20 χρόνια.

Λόγω όμως των εποχιακών και των ημερήσιων μεταβολών στο φορτίο που εξυπηρετούν οι μετασχηματιστές διανομής, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά κύριο λόγο, είναι αρκετά χαμηλές ώστε η διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών να περιορίζεται σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα. Έχει αποδειχθεί, γενικά, ότι ένας μέσος μετασχηματιστής που λειτουργεί με το 50% του ονομαστικού rms φορτίου έχει διάρκεια ζωής περίπου 30 χρόνια, ενώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι μια αύξηση 5,8 °C στην θερμοκρασία επιφέρει μείωση στα 23,7 χρόνια δηλ. έχουμε μείωση της τάξης του 21%.

Για οικονομικοτεχνικούς λόγους οι μετασχηματιστές διανομής κατασκευάζονται ώστε να μπορούν να λειτουργούν σε σημαντικές υπερφορτώσεις για σύντομες περιόδους του έτους. Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλή υπάρχει η δυνατότητα μεγαλύτερης υπερφόρτωσης των μετασχηματιστών. Έτσι λοιπόν σε

περιοχές που παρουσιάζουν μεγαλύτερη αιχμή φορτίου την χειμερινή περίοδο, μπορούμε να έχουμε μικρότερους μετασχηματιστές από ότι θα είχαμε αν η ίδια μέγιστη αιχμή παρουσιαζόταν την θερινή περίοδο.

Στα πρότυπα που χρησιμοποιούνται γενικά για τα θερμοκρασιακά όρια στους μετασχηματιστές η θερμοκρασία περιβάλλοντος λαμβάνεται ίση με 30 °C. Για θερμοκρασίες διαφορετικές από αυτήν έχουμε τις εξής παραδοχές :

- *θερμοκρασίες > 30 °C* : μείωση της ικανότητας φόρτισης του μετασχηματιστή κατά 1.5% της ισχύος λειτουργίας για κάθε 1 °C άνω των 30 °C.
- *θερμοκρασίες < 30 °C* : αύξηση της ικανότητας φόρτισης του μετασχηματιστή κατά 1% της ισχύος λειτουργίας για κάθε 1 °C κάτω των 30 °C.

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος αποτελεί έναν πολύ σοβαρό παράγοντα για την σωστή εκτίμηση και πρόβλεψη της λειτουργίας των μετασχηματιστών διανομής, οπότε είναι απαραίτητη η όσο το δυνατόν πιο ακριβής μέτρησή της.

Γενικά η θερμοκρασία σε μια συγκεκριμένη περιοχή μπορεί να εκτιμηθεί με μεγάλη ακρίβεια χρησιμοποιώντας τα καταγεγραμμένα καιρικά δεδομένα. Σύμφωνα με τα πρότυπα ANSI και IEEE για την εκτίμηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η **μέση ημερήσια θερμοκρασία για τον μήνα που εξετάζεται** που προσεγγίζεται με τον μέσο όρο των μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών που μετρούνται στην διάρκεια της ημέρας.

Ειδικότερα για φορτία περιορισμένης διάρκειας, που συνήθως είναι υψηλά και για τα οποία έχει γίνει πρόβλεψη για μια λογική και ελεγχόμενη θυσία στην διάρκεια ζωής των Μ/Σ χρησιμοποιούμε απλά την **μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία**

Σε γενικότερες περιπτώσεις η μέση θερμοκρασία για τον μήνα που εξετάζεται προκύπτει από πίνακες που περιλαμβάνουν την μέση θερμοκρασία του εκάστοτε μήνα των περασμένων χρόνων, προσθέτοντας στην τελική θερμοκρασία 5°C προκειμένου να συμπεριληφθεί και η αύξηση της ετήσιας θερμοκρασίας του περιβάλλοντος συνολικά. Οι παραδοχές αυτές ισχύουν για εναέριους υποσταθμούς διανομής που βρίσκονται σε περιοχές χαμηλού υψομέτρου που δεν ξεπερνάει τα 1000m. Για υψόμετρο άνω των 1000m πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι εξαιτίας της μειωμένης πυκνότητας του αέρα παρουσιάζεται μείωση στην θερμότητα του μετασχηματιστή που ελάγεται στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα για κάθε 1000m να έχουμε μείωση στην ισχύ του μετασχηματιστή κατά 3%.

Έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες σχετικά με την απώλεια ζωής των μετασχηματιστών διανομής εξαιτίας της αυξανόμενης θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Τα πρότυπα ANSI/IEEE μας δίνουν μια μέθοδο υπολογισμού για την απώλεια χρόνου ζωής ενός πρότυπου εναέριου μετασχηματιστή διανομής ελαίου σε περιοχή χαμηλού σχετικά υψομέτρου. Η μαθηματική έκφραση που χρησιμοποιείται είναι :

$$LOL = 100t \cdot \left(10^{-\left[\frac{A+B}{T} \right]} \right) \quad (2.19)$$

όπου έχουμε t το χρονικό διάστημα μελέτης σε ώρες όπου το φορτίο θεωρείται ότι παραμένει σταθερό, A (σε ώρες) και B (ώρες/°K) είναι σταθερές που λαμβάνονται από την καμπύλη της αναμενόμενης διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία σε °K.

Σε αυτό το μοντέλο υπολογισμού οι παράμετροι που παίζουν σημαντικό ρόλο είναι:

- a. η θερμοκρασία περιβάλλοντος θ_a (σε °C),
- b. η μέγιστη ανύψωση στην θερμοκρασία του λαδιού ως προς την θερμοκρασία του περιβάλλοντος θ_o (σε °C) ,
- c. η μέγιστη ανύψωση στην θερμοκρασία των αγωγών του μετασχηματιστή ως προς την μέγιστη θερμοκρασία του λαδιού θ_g (σε °C).

Έτσι αν τεθεί $T = 273 + \theta_a + \theta_o + \theta_g$ θα έχουμε τελικά :

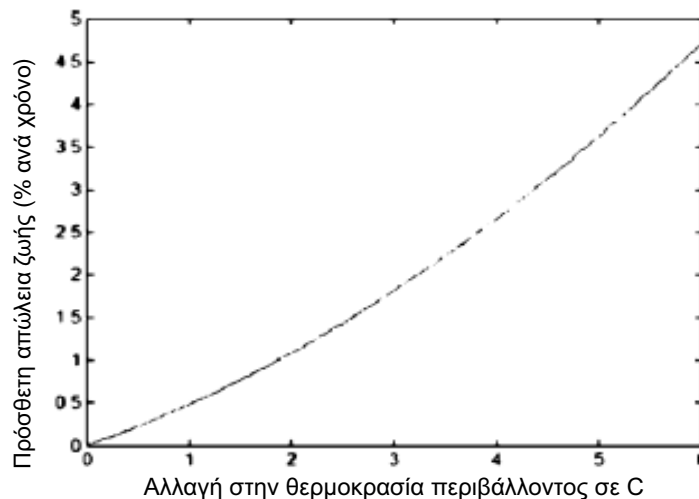
$$LOL_{gw} = 100 t \cdot \left(10^{-\left[A + \frac{B}{T + \Delta\theta_a} \right]} \right) \quad (2.20)$$

και αναπτύσσοντας σε σειρά Taylor η σχέση (2.20) θα γίνει τελικά :

$$LOL_{gw} = LOL \left(1 + \frac{B \ln(10)}{T^2} \cdot (\theta_a - \Delta\theta_a) + \left[\frac{B \ln(10)}{T^3} + \frac{B^2 (\ln(10))^2}{2T^4} \right] \cdot (\theta_a - \Delta\theta_a)^2 + \dots \right) \quad (2.21)$$

όπου $\Delta\theta_a$ είναι η διαφορά στην θερμοκρασία περιβάλλοντος και LOL_{gw} είναι η απώλεια ζωής του μετασχηματιστή διανομής συμπεριλαμβανομένων των θερμοκρασιακών μεγεθών που προαναφέρονται.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η πρόσθετη απώλεια ζωής ενός μετασχηματιστή διανομής σε επί τοις εκατό ποσοστό, που οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η προσαύξηση αυτή προκύπτει από την σχέση (2.20) για κάποιον μετασχηματιστή που εξετάστηκε. Η μορφή της καμπύλης είναι κοινή για οποιονδήποτε μετασχηματιστή διανομής κι αν εφαρμοστεί αλλά προφανώς αλλάζουν τα αριθμητικά δεδομένα σε κάθε διαφορετική περίπτωση :



Εικόνα 2.4.3 : Πρόσθετη απώλεια ζωής ενός Μ/Σ διανομής λόγω της αύξησης στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος

Κεφάλαιο 3^ο

Υπέρυθρη Θερμογραφία

3.1 Εισαγωγικά

Υπέρυθρη θερμογραφία (Infrared Thermography) είναι η τεχνική απεικόνισης ενός αντικειμένου χρησιμοποιώντας την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει το αντικείμενο αυτό. Η εκπεμπόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία (IR) είναι αόρατη στο ανθρώπινο μάτι και ουσιαστικά οφείλεται στην θερμική κατάσταση του υλικού που μελετάται.

Τα εργαλεία που μας επιτρέπουν να πραγματοποιούμε μια τέτοια απεικόνιση λέγονται **θερμικές κάμερες** (thermal imager). Οι θερμικές κάμερες είναι όργανα που θυμίζουν εξωτερικά τις συμβατικές κάμερες, αλλά ουσιαστικά δημιουργούν εικόνες από την θερμότητα που εκπέμπει ο στόχος αντί του φωτός. Παρακάτω φαίνονται ενδεικτικά κάποιες θερμικές κάμερες που διατίθενται στο εμπόριο:



Εικόνα 3.1.1 : Σύγχρονες θερμικές κάμερες

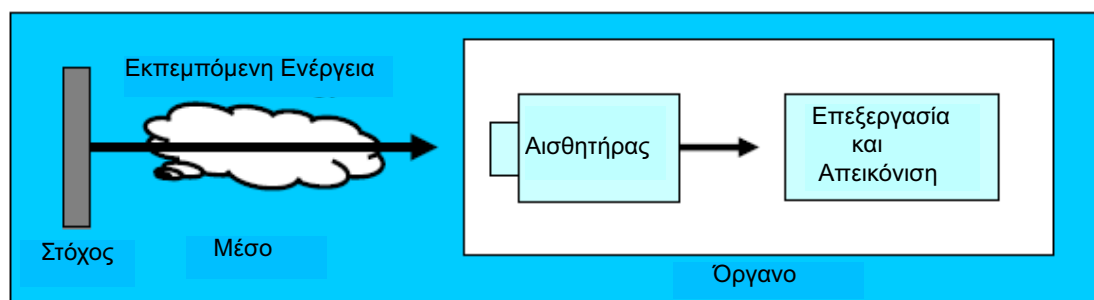
3.2 Φυσικές Αρχές Λειτουργίας μιας Θερμικής Κάμερας

3.2.1 Σύστημα μέτρησης της θερμοκρασίας με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας

Κάθε σώμα με θερμοκρασία πάνω από αυτή του απόλυτου μηδέν ($-273,15^{\circ}\text{C} = 0^{\circ}\text{K}$) εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από την επιφάνεια του η οποία είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του. Ένα μέρος αυτής της ακτινοβολίας είναι υπέρυθρη ακτινοβολία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να μετρήσουμε την θερμοκρασία του εξεταζόμενου σώματος.

Η υπέρυθρη ακτινοβολία έχει την ιδιότητα να διαδίδεται στον αέρα κι έτσι δίνεται η δυνατότητα με την χρήση κατάλληλων φακών να εστιάζεται σε κάποιον ανιχνευτή. Από εκεί έχουμε την αναπαραγωγή ενός ηλεκτρικού σήματος ανάλογο της ακτινοβολίας, το οποίο με κατάλληλη ενίσχυση και ψηφιακή επεξεργασία σήματος μετασχηματίζεται σε ένα σήμα εξόδου ανάλογο της θερμοκρασίας του εξεταζόμενου αντικειμένου. Το σήμα εξόδου μπορεί να είναι μια εικόνα όπου φαίνονται αναλυτικά με χρωματική διαφοροποίηση οι θερμοκρασιακές διαφορές του αντικειμένου, στην περίπτωση μιας θερμικής κάμερας, ή απλά μια ψηφιακή ένδειξη στην περίπτωση άλλων οργάνων που χρησιμοποιούν τις αρχές αυτές (πχ. υπέρυθρα θερμόμετρα ή πυρόμετρα).

Στην παρακάτω εικόνα παραθέτουμε μια πολύ γενική και απλοποιημένη εικόνα του συστήματος μέτρησης/απεικόνισης που περιγράφεται :



Εικόνα 3.2.1 : Μπλοκ διάγραμμα συστήματος μέτρησης χωρίς επαφή

3.2.2 Η ανακάλυψη της υπέρυθρης ακτινοβολίας

Αναζητώντας κάποιο νέο οπτικό υλικό ο William Herschel ανακάλυψε τυχαία περί τα 1800 την υπέρυθρη ακτινοβολία. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε αποτελούταν από ένα ευαίσθητο θερμόμετρο υδραργύρου, του οποίου είχε μαυρίσει το άκρο του κι ένα πρίσμα το οποίο χρησιμοποίησε για την εστίαση του ηλιακού φωτός. Ουσιαστικά μετρήσε την θερμότητα των διαφόρων χρωμάτων του φάσματος του ηλιακού φωτός. Μετακινώντας αργά το μαυρισμένο θερμόμετρο κατά μήκος του φάσματος παρατήρησε αύξηση της θερμοκρασίας από το ιώδες προς το κόκκινο, ενώ στην περιοχή όπου τελείωνε το φάσμα, πίσω από το κόκκινο, η θερμοκρασία αυξήθηκε ακόμα περισσότερο. Τελικά, παρατήρησε ότι η μέγιστη θερμοκρασία εμφανίστηκε σε περιοχή πολύ πιο πίσω από το κόκκινο χρώμα. Η περιοχή αυτή ονομάστηκε **περιοχή υπέρυθρου μήκους κύματος** (infrared wavelength area).

3.2.3 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Φάσμα, με την φυσική έννοια, είναι η απεικόνιση της έντασης μιας μίξης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συνάρτηση με την συχνότητα ή το μήκος κύματος αυτών. Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας καλύπτει μια πολύ μεγάλη περιοχή μηκών κύματος και χωρίζεται σε επιμέρους κατηγορίες ακτινοβολίας με κριτήρια την προέλευση, την δημιουργία και τις εφαρμογές που χαρακτηρίζουν την ακτινοβολία για κάθε συγκεκριμένο διάστημα μήκους κύματος.

Όλοι οι τύποι της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υπακούουν στις ίδιες φυσικές αρχές που αφορούν την διάθλαση, την ανάκλαση και την σκέδαση τους. Η ταχύτητα διάδοσης θεωρείται ίδια με την ταχύτητα διάδοσης του φωτός και για κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ισχύει η παρακάτω θεμελιώδης σχέση :

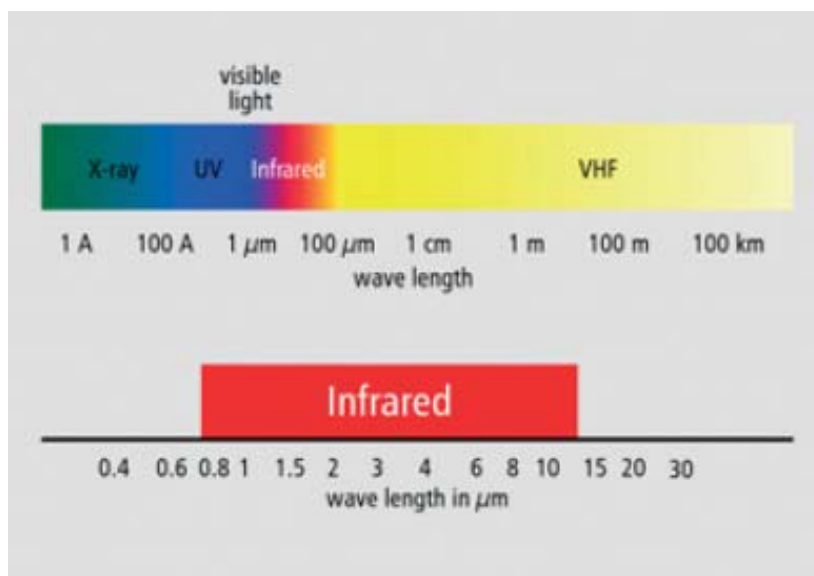
$$\lambda \cdot f = c \quad (3.1)$$

όπου λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, f η συχνότητα διάδοσης της και c η ταχύτητα του φωτός που είναι $3 \cdot 10^8$ km/sec.

Η υπέρυθη ακτινοβολία καλύπτει μια πολύ μικρή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος : ξεκινάει από την περιοχή της ορατής ακτινοβολίας, περίπου από τα $0,78\mu\text{m}$ και εκτείνεται μέχρι τα $10\mu\text{m}$ περίπου.

Η περιοχή που μας ενδιαφέρει για την λειτουργία των θερμικών καμερών, και για κάθε άλλο όργανο μέτρησης με χρήση της υπέρυθρης ακτινοβολίας, είναι μεταξύ $0,7$ και $14\mu\text{m}$. Πέραν αυτού του διαστήματος η ενέργεια είναι τόσο χαμηλή που οι ανιχνευτές των οργάνων δεν είναι τόσο ευαίσθητοι για να την εντοπίσουν.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και οι κυρίες περιοχές στις οποίες χωρίζεται με βάση το μήκος κύματος, ενώ φαίνεται και μια μεγέθυνση στην υπέρυθη περιοχή.



Εικόνα 3.2.2 : Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα οι Planck, Stefan, Boltzmann, Wien και Kirchhoff όρισαν με ακρίβεια το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και έθεσαν τα θεμέλια της ποσοτικής και ποιοτικής περιγραφής της υπέρυθρης ενέργειας.

3.2.4 Το μέλαν σώμα (Black Body)

Μέλαν σώμα χαρακτηρίζεται το σώμα που απορροφά κάθε ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό, ενώ δεν παρουσιάζει καθόλου ανάκλαση και εκπέμπει όση ακτινοβολία απορροφά. Έτσι ισχύει ότι :

$$a = \varepsilon = 1 \quad (3.2)$$

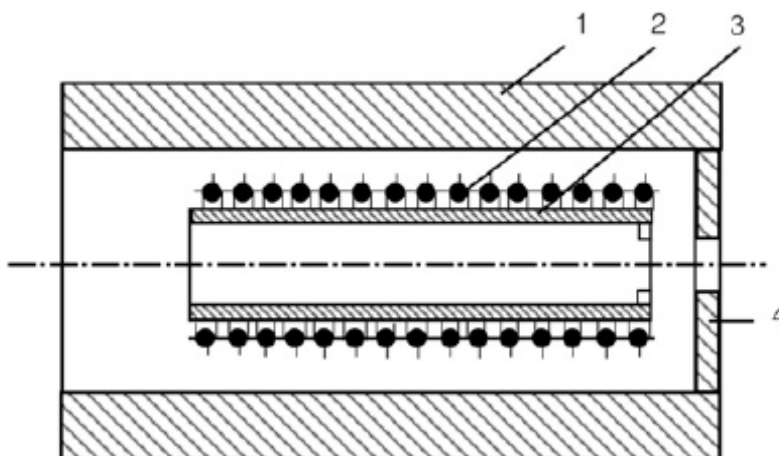
όπου a είναι η απορροφητικότητα και ε η εκπεμπικότητα του υλικού.

Ένα μέλαν σώμα εκπέμπει την μέγιστη δυνατή ενεργεία σε κάθε μήκος κύματος, ενώ η συγκέντρωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι ίδια παντού τριγύρω του. Η θεωρία του μέλανος σώματος είναι η βάση για την κατανόηση των φυσικών αρχών που διέπουν τις μετρήσεις χωρίς επαφή με το εξεταζόμενο αντικείμενο και αποτελεί θεμελιώδη αρχή για την βαθμονόμηση των υπέρυθρων θερμομέτρων.

Η γενική ιδέα υλοποίησης ενός μέλανος σώματος είναι σχετικά απλή. Ουσιαστικά χρειάζεται μόνο ένα θερμαινόμενο κούφιο σώμα με ένα μικρό άνοιγμα στο ένα άκρο. Καθώς το σώμα θερμαίνεται και φτάνει σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία στο εσωτερικό του σώματος κάποια στιγμή παρατηρείται ισορροπία ως προς την θερμοκρασία του. Σε αυτή την θερμοκρασία εκπέμπεται ιδεατή μαύρη ακτινοβολία από το άνοιγμα του σώματος. Τοποθετώντας μια κατάλληλη συσκευή μέτρησης στο άνοιγμα μπορούμε να καθορίσουμε την θερμοκρασία του εσωτερικού μέρους, δηλ. να μετρήσουμε την μαύρη εκπεμπόμενη ακτινοβολία, και να χρησιμοποιήσουμε την μέτρηση αυτή για βαθμονόμηση οργάνων.

Φυσικά, η κατασκευή του σώματος ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή που μελετάμε, ως προς το υλικό και τα γεωμετρικά του στοιχεία. Επίσης, αν το άνοιγμα είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με την επιφάνεια του σώματος σαν σύνολο, η επίδραση της ιδεατής κατάστασης, που προαναφέρθηκε, είναι πολύ μικρή.

Για να γίνει κατανοητή η παραπάνω διαδικασία στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ένα μοντέλο μέλανος σώματος όπως αυτό που περιγράφεται.



Εικόνα 3.2.3 : Πρότυπο μέλανος σώματος

1. κεραμικό κανάλι, 2. θέρμανση,
3. κανάλι από Al_2O_3 , 4. άνοιγμα

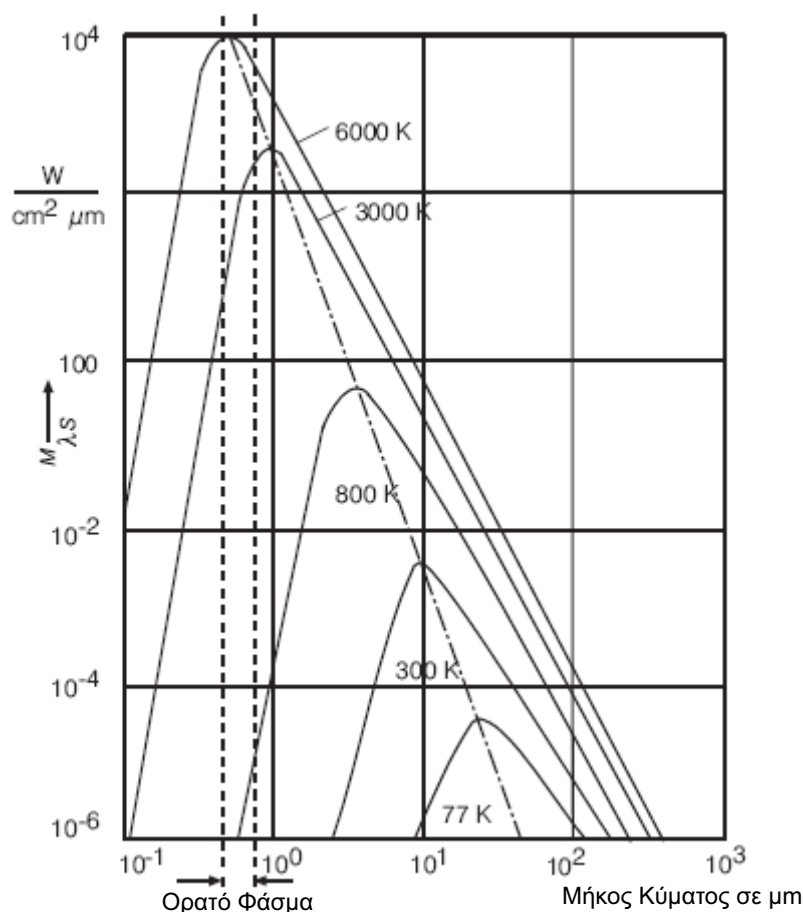
Στην πραγματικότητα χρησιμοποιούνται πιο απλές διατάξεις που αποτελούνται μόνο από κάποιες επιφάνειες βαμμένες μαύρες. Έχει αποδειχθεί ότι για τις επιφάνειες αυτές η απορροφητικότητα και η εκπεμπικότητα ταυτίζονται κατά το 99% με τις

θεωρητικές αναμενόμενες τιμές. Η μέθοδος αυτή είναι και η πλέον συνήθης για την βαθμονόμηση οργάνων.

Ο νόμος του Planck για την ακτινοβολία αποτελεί την βασική σχέση για τις μετρήσεις χωρίς επαφή με το αντικείμενο. Συνδέει την ένταση της φασματικής ακτινοβολίας του μέλανος σώματος με την θερμοκρασία του σώματος και το μήκος κύματος εκπομπής. Η μαθηματική έκφραση που συνδέει τα μεγέθη αυτά είναι :

$$M_{\lambda S} = \frac{2\pi \cdot hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (3.3)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός, $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$, $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{K m}$, ενώ είναι $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{sec}$ η σταθερά του Planck. Η γραφική παράσταση της σχέσης (3.3), δηλ. η ένταση της φασματικής ακτινοβολίας του μέλανος σώματος ως προς το μήκος κύματος σε μm , για διάφορες θερμοκρασίες σε $^\circ\text{K}$ δίδεται στο ακόλουθο σχήμα :



Εικόνα 3.2.4 : Γραφική παράσταση της σχέσης (3.3)

Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες που προκύπτουν δεν τέμνονται. Βλέπουμε έτσι ότι ένα μέλαν σώμα σε υψηλότερη θερμοκρασία, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος, θα εκπέμπει περισσότερη ακτινοβολία από ένα μέλαν σώμα σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Επίσης, μπορούμε να διακρίνουμε ότι για αύξηση της θερμοκρασίας η μέγιστη τιμή της ακτινοβολίας που εκπέμπεται ολισθαίνει σε μικρότερα μήκη

κύματος. Στο διάγραμμα σημειώνεται και η περιοχή του ορατού φάσματος από τον άνθρωπο.

Ο τύπος (3.3) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρακτικές εφαρμογές. Παρόλο αυτά μπορούμε να εξάγουμε κάποιες σημαντικές πληροφορίες. Αν ολοκληρώσουμε την ένταση της φασματικής ακτινοβολίας για όλα τα μήκη κύματος από το μηδέν μέχρι το άπειρο λαμβάνουμε ουσιαστικά την τιμή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του σώματος σαν σύνολο. Καταλήγουμε έτσι στο νόμο των Stefan-Boltzmann που εκφράζεται ως εξής :

$$M_{\lambda S} = \sigma \cdot T^4 [Watt \cdot m^2] \quad (3.4)$$

όπου είναι $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$. Βλέπουμε δηλ. ότι η συνολική εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος, για κάποια περιοχή μήκους κύματος, αυξάνεται ανάλογα με την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας του σώματος.

Παραγωγίζοντας την σχέση του Planck προκύπτει ο νόμος της μετατόπισης του Wien που λέει ότι το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στην μέγιστη εκπεμπόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει μετατόπιση προς χαμηλότερες τιμές, καθώς έχουμε αύξηση της απόλυτης θερμοκρασίας. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται πολύ εύκολα αν κοιτάξει κανείς την εικόνα 3.6, ενώ εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (3.5)$$

3.2.5 Εκπεμπικότητα (Emissivity)

Πολύ λίγα σώματα μόνο προσεγγίζουν το ιδεατό μέλαν σώμα. Συνήθως τα πραγματικά σώματα εκπέμπουν πολύ λιγότερη ακτινοβολία. Η παράμετρος που συσχετίζει την ακτινοβολία ενός πραγματικού σώματος με αυτήν του μέλανος είναι η εκπεμπικότητα (ϵ) και ισχύει ότι $0 < \epsilon < 1$. Για το ιδεατό μέλαν σώμα είναι $\epsilon = 1$.

Ουσιαστικά, η εκπεμπικότητα συγκρίνει την θερμική ακτινοβολία του μέλανος σώματος για μια δεδομένη θερμοκρασία με την θερμική ακτινοβολία ενός γκρι σώματος στην ίδια θερμοκρασία. Με τον όρο **γκρι σώμα** εννοούμε το σώμα που έχει ίδιο ϵ για όλα τα μήκη κύματος και εκπέμπει λιγότερη ακτινοβολία από το μέλαν σώμα (δηλ. $\epsilon < 1$). Τα αντικείμενα των οποίων το ϵ εξαρτάται τόσο από την θερμοκρασία αλλά και από το μήκος κύματος ονομάζονται **επιλεκτικά ή όχι γκρι σώματα** (πχ. μέταλλα).

Ο υπέρυθρος ανιχνευτής της θερμικής κάμερας, ή αντίστοιχα όποιου άλλου οργάνου τέτοιας τεχνολογίας, δέχεται την εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια του σώματος μαζί με ένα ποσοστό ακτινοβολίας από το περιβάλλον, δημιουργώντας έτσι κάποια αλλοίωση στην ζητούμενη μέτρηση. Η σχέση που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των πραγματικών σωμάτων είναι :

$$\epsilon + \rho + \tau = 1 \quad (3.6)$$

όπου ϵ είναι η εκπεμπικότητα, ρ είναι ο συντελεστής ανάκλασης και τ είναι ο συντελεστής διάδοσης του σώματος που εξετάζεται. Τα περισσότερα στερεά υλικά απορροφούν πρακτικά όλη την ακτινοβολία σε ένα πολύ λεπτό εξωτερικό στρώμα τους, πάχους μικρότερου του 1mm. Θεωρούνται λοιπόν αδιαφανή σώματα και έτσι η σχέση (3.6) γίνεται :

$$\varepsilon + \rho = 1$$

(3.7)

Η παραπάνω σχέση θεωρείται πολύ σημαντική καθώς από αυτήν μπορούμε να συμπεράνουμε ότι υψηλή εκπεμπικότητα σημαίνει χαμηλή ανάκλαση και αντίστροφα.

Για ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις στην θερμογραφία, είναι απαραίτητο η εκπεμπικότητα να λαμβάνει μεγάλες τιμές. Οι σύγχρονες θερμικές κάμερες έχουν την δυνατότητα να βελτιώνουν την εκπεμπικότητα χρησιμοποιώντας κάποια αρχική τιμή που εισάγει ο χρήστης. Μελέτες έχουν δείξει ότι για $\varepsilon < 0,5$ οι λαμβανόμενες μετρήσεις θεωρούνται αρκετά ανακριβείς.

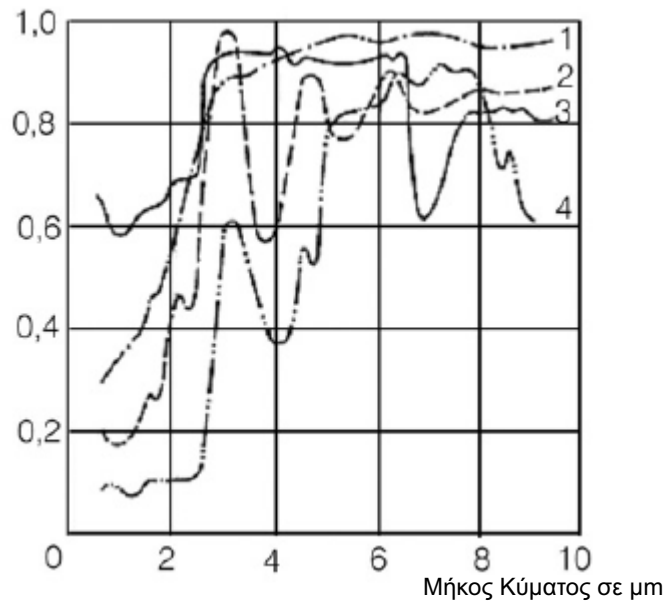
Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη τιμή εκπεμπικότητας, που μπορούμε να βρούμε με την βοήθεια κατάλληλων πινάκων. Ένας τέτοιος πίνακας παρατίθεται στο παράρτημα Α.

Γενικά, η παράμετρος εκπεμπικότητα θεωρείται αρκετά ασταθής. Εκτός από το είδος του υλικού εξαρτάται επίσης και από τα παρακάτω:

- την επιφάνεια του αντικειμένου που εξετάζεται δηλ. το σχήμα και γενικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά,
- την θερμοκρασία του αντικειμένου,
- την γωνία παρατήρησης του αντικειμένου,
- το μήκος κύματος, που σημαίνει ότι είναι πιθανό δυο διαφορετικές θερμικές κάμερες να δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα για το ίδιο αντικείμενο και να θεωρούνται και τα δυο αληθή. Συστήνεται για τον όσο το δυνατό πιο ακριβή προσδιορισμό της εκπεμπικότητας η διεξαγωγή επαναλαμβανόμενων μετρήσεων,
- το πάχος του αντικειμένου, όταν αυτό είναι ημιδιαφανές.

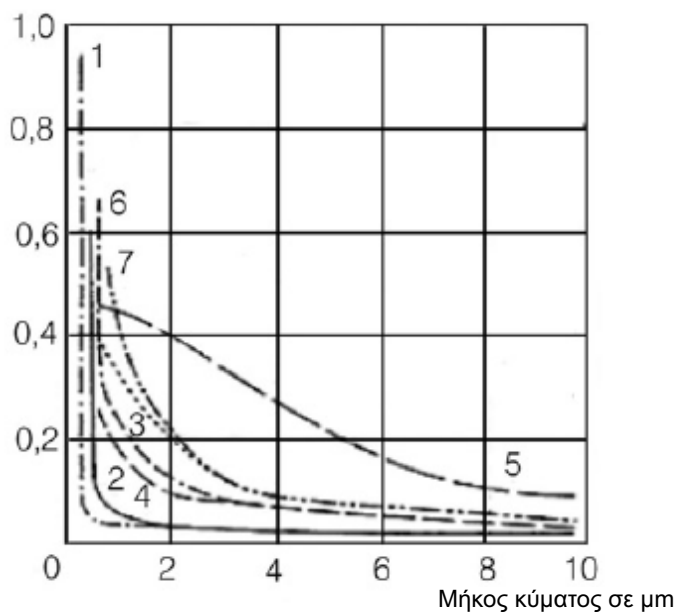
Τα διηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται παρουσιάζουν υψηλή εκπεμπικότητα, που κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,8 και 0,95. Στο διάστημα αυτό βρίσκονται και τα καλά βαμμένα μέταλλα. Τα μη οξειδωμένα μέταλλα έχουν εκπεμπικότητα κάτω από 0,3, ενώ στα οξειδωμένα μέταλλα έχουμε ότι $0.5 < \varepsilon < 0.9$. Στην κατηγορία αυτή δημιουργείται πρόβλημα όσον αφορά τον ακριβή προσδιορισμό της εκπεμπικότητας λόγω του διευρυμένου διαστήματος που κυμαίνεται. Ο βαθμός οξείδωσης ενός αντικειμένου αποτελεί άλλο ένα στοιχείο που επηρεάζει την εκπεμπικότητα και η σχέση τους είναι ανάλογη, δηλ. αυξημένη οξείδωση επιφέρει αύξηση στην εκπεμπικότητα.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η εκπεμπικότητα διάφορων υλικών σε συνάρτηση με το μήκος κύματος :



Εικόνα 3.2.5 : Εκπεμτικότητα διάφορων υλικών
 1. Αδαμαντίνη, 2. Γύψος
 3. Τσιμέντο, 4. Άργιλος

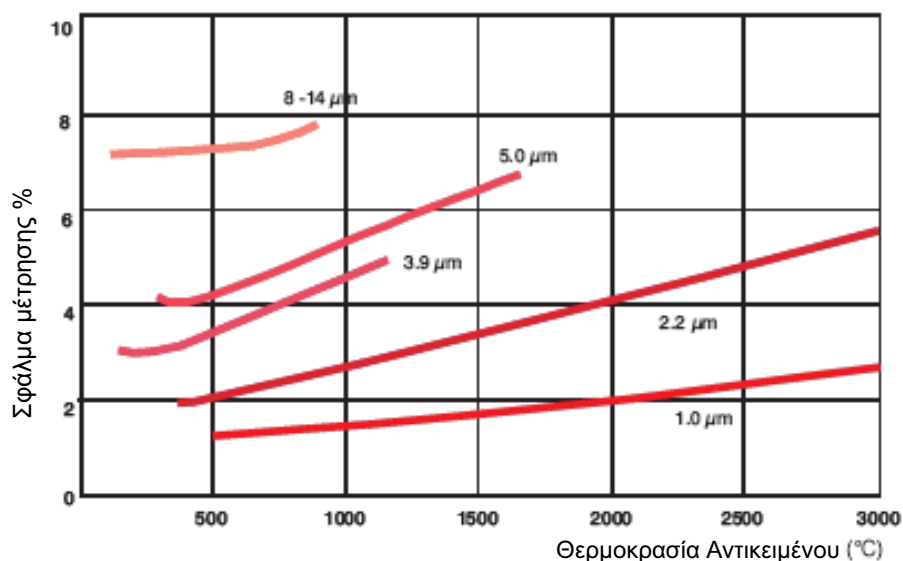
Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος που μεταβάλλεται η εκπεμτικότητα στα μέταλλα παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα :



Εικόνα 3.2.6 : Εκπεμτικότητα στα μέταλλα
 1. Άργυρος, 2. Χρυσός, 3. Πλατίνα,
 4. Ρόδιο, 5. Χρώμιο, 6. Ταντάλιο,
 7. Μολυβδαίνιο

Γίνεται εμφανές ότι η εκπεμτικότητα στα μέταλλα μειώνεται απότομα καθώς αυξάνεται το μήκος κύματος. Έτσι, απαιτείται μεγάλη προσοχή ως προς το μήκος κύματος στο οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Ενδείκνυται να επιλέγεται πάντα

το μικρότερο δυνατό, όπου εξασφαλίζεται το μέγιστο ε , ενώ ελαττώνεται έτσι το σφάλμα στην μέτρηση που διεξάγεται.



Εικόνα 3.2.7 : Επί τοις εκατό σφάλμα που υπεισέρχεται στις μετρήσεις σε μέταλλα, συναρτήσει της θερμοκρασίας και του μήκους κύματος

Για μετρήσεις σε μέταλλα το ιδανικότερο μήκος κύματος θεωρείται το διάστημα 0.8 μέχρι 1 μm .

3.2.6 Πειραματικός προσδιορισμός της εκπεμπικότητας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για κάθε υλικό η εκπεμπικότητα είναι καθορισμένη και μπορεί εύκολα να βρεθεί. Παρόλο αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις που πρέπει να επαληθευτεί η τιμή αυτή καθώς οι συνθήκες μέτρησης σπάνια είναι ιδανικές. Οι συνήθεις μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής :

- *Με χρήση θερμοζεύγους :* Στο προς εξέταση αντικείμενο λαμβάνεται μέτρηση της θερμοκρασίας του, χρησιμοποιώντας ένα θερμοζεύγος, που είναι όργανο μέτρησης της θερμοκρασίας με επαφή. Στην συσκευή μέτρησης χωρίς επαφή (θερμική κάμερα, υπέρυθρο θερμόμετρο ή ότι άλλο), ρυθμίζοντας την παράμετρο της εκπεμπικότητας πρέπει να βρεθεί η κατάλληλη τιμή ώστε να προκύψει ταύτιση της θερμοκρασίας που δίνει η συσκευή με αυτήν του θερμοζεύγους. Φυσικά απαιτείται η επαφή με το θερμοζεύγος να είναι πολύ καλή ώστε να μην παρουσιάζονται μεγάλες απώλειες θερμότητας.
- *Δημιουργώντας ένα μέλαν σώμα από ίδιο υλικό με αυτό του εξεταζόμενου αντικειμένου :* Ένα μοντέλο μέλανος σώματος περιγράφηκε παραπάνω, ενώ στην εικόνα (3.5) φαίνεται μια συνήθης διάταξη που χρησιμοποιείται. Πρέπει απλά να σημειωθεί ότι λόγω των οπτικών χαρακτηριστικών των υπέρυθρων συσκευών και της απόστασης μέτρησης, πρέπει η στοχεύσει να γίνεται στην βάση της οπής του δοκιμίου – μέλανος σώματος ώστε να προκύπτουν όσο το δυνατό πιο ακριβείς μετρήσεις.

- *Στηριζόμενοι σε μια εκπεμπικότητα αναφοράς* : Σε αυτή την μέθοδο απαιτείται κάποια ουσία με γνωστή εκπεμπικότητα. Η ουσία αυτή μπορεί να είναι μπογιά, ταινία ή κάποιο κονίαμα που τοποθετείται πάνω στο εξεταζόμενο αντικείμενο. Ρυθμίζοντας την παράμετρο της εκπεμπικότητας στην υπέρυθρη συσκευή (στην γνωστή τιμή) μετράμε ουσιαστικά την θερμοκρασία της ουσίας που έχουμε. Κατόπιν, λαμβάνεται μέτρηση για την περιοχή δίπλα σε αυτή που βρίσκεται η ουσία ρυθμίζοντας την εκπεμπικότητα ώστε να έχουμε και εκεί την ίδια θερμοκρασία με την προηγούμενη.

3.3 Υπέρυθροι ανιχνευτές

Ένας υπέρυθρος ανιχνευτής ουσιαστικά είναι ένας μετατροπέας που μετασχηματίζει την εκπεμπόμενη υπέρυθρη ενέργεια σε κάποια μετρήσιμη μορφή, και αποτελεί το σημαντικότερο συστατικό τόσο σε μια θερμική κάμερα, όσο και σε οποιοδήποτε όργανο μέτρησης που χρησιμοποιεί την υπέρυθρη τεχνολογία.

Οι υπέρυθροι ανιχνευτές χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τις αρχές ανίχνευσης στις οποίες βασίζονται :

1. *Θερμικοί ανιχνευτές* : η λειτουργία τους στηρίζεται στις θερμοκρασιακές διαφορές που προκύπτουν από την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει το αντικείμενο που εξετάζεται.
2. *Κβαντικοί ανιχνευτές* : η λειτουργία τους στηρίζεται σε κβαντικά φαινόμενα. Παράγουν ηλεκτρικά κύματα μέσω της αλληλεπίδρασης φωτονίων και ελευθέρων ηλεκτρονίων.

3.3.1 Θερμικοί ανιχνευτές

Η απορρόφηση της υπέρυθρης ενέργειας θερμαίνει τον ανιχνευτή και οδηγεί σε αλλαγές των φυσικών ιδιοτήτων του ανιχνευτή. Οι αλλαγές αυτές εντοπίζονται από κατάλληλες διατάξεις και αναλόγως προκύπτουν οι μετρήσεις ή η θερμική απεικόνιση του αντικειμένου που εξετάζεται. Παραδείγματα θερμικών ανιχνευτών είναι :

- *Θερμοζεύγη/Θερμοστήλες* : ένα θερμοζεύγος αποτελείται από δυο ανόμοια, ενωμένα μέταλλα. Στην ένωση τους αναπτύσσεται μια τάση ανάλογη της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται εκεί. Η θερμοκρασία με την σειρά της εξαρτάται ανάλογα από την ροή της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το αντικείμενο που παρατηρείται. Για ευαίσθητους ανιχνευτές το θερμοζεύγος πρέπει να είναι καλά θερμικά μονωμένο από το περιβάλλον. Μια **θερμοστήλη** είναι μια σειρά από θερμοζεύγη ενωμένα μεταξύ τους ώστε να παρέχεται αυξημένη ευαισθησία.
- *Πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές* : αποτελούνται από ένα πολωμένο υλικό, του οποίου η πολικότητα αλλάζει όταν διαπιστωθεί αλλαγή στην θερμοκρασία. Οι ανιχνευτές αυτοί λειτουργούν μέσω ενός καταναμημένου κυκλώματος. η διακύμανση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του εξεταζόμενου αντικειμένου επιφέρει μια ανάλογη διακύμανση στην πολικότητα και την ύπαρξη έτσι

εναλλασσόμενου ρεύματος που μπορεί να ανιχνευτεί με την βοήθεια ενός ενισχυτή.

- *Φεरोηλεκτρικοί ανιχνευτές* : η λειτουργία τους είναι παρεμφερής με αυτή των πυροηλεκτρικών ανιχνευτών, βασίζεται δηλ. στην αλλαγή πολικότητας σε σχέση με τις αλλαγές στην θερμοκρασία.
- *Θερμίστορ/Βολόμετρα/Μικροβολόμετρα* : στα θερμίστορ η αντίσταση του υλικού μεταβάλλεται ανάλογα με την θερμοκρασία. Παράδειγμα θερμίστορ αποτελεί το βολόμετρο, που ουσιαστικά είναι μια συσκευή που μετράει την ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα αντικείμενο. Οι εξελίξεις της μικροηλεκτρονικής έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη μικροβολομέτρων, που αποτελούνται από έναν πίνακα εμφυτευμένων βολομέτρων σε κύκλωμα πυριτίου. Η τεχνολογία αυτή αποτελεί εξαιρετική λύση για την θερμική απεικόνιση, ενώ το κόστος της είναι σχετικά χαμηλό αφού μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες δωματίου, αποφεύγοντας έτσι την χρήση ψυκτικών διατάξεων.

3.3.2 Κβαντικοί ανιχνευτές

Στην περίπτωση των κβαντικών ανιχνευτών το φως αλληλεπιδρά άμεσα με τους ημιαγωγούς με αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτρικών κυμάτων. Λόγω του ότι οι ανιχνευτές αυτοί δεν λειτουργούν βάσει των θερμοκρασιακών μεταβολών, αποκρίνονται πιο γρήγορα από ότι οι θερμικοί ανιχνευτές. Παραδείγματα κβαντικών ανιχνευτών είναι :

- *Εσωτερικοί ανιχνευτές* : διακρίνονται σε δυο επιμέρους κατηγορίες. Οι **φωτοβολταϊκοί ανιχνευτές (PV)** δημιουργούν ρεύμα φωτοηλεκτρονίων που μπορεί να καταγραφεί με χρήση ενός μετατροπέα ρεύματος σε τάση. Το ρεύμα φωτοηλεκτρονίων δημιουργείται όταν προσπίπτει στον ανιχνευτή ακτινοβολία με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού που έχουμε. Υψηλής απόδοσης PV ανιχνευτές κατασκευάζονται από Si, Ge, GaAs, InSb, InGaAs και HgCdTe (MCT). Οι **φωτοαγωγιμοί ανιχνευτές (PC)** λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγού έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή κυμάτων ρεύματος. Αυτό συνεπάγεται την αλλαγή στην αντίσταση και τελικά της αγωγιμότητας του ανιχνευτή. Υλικά που χρησιμοποιούνται για PC ανιχνευτές είναι τα PbS, PbSe και MCT.
- *Εξωτερικοί ανιχνευτές* : οι εξωτερικοί ανιχνευτές κατασκευάζονται από πυρίτιο ή γερμάνιο με νοθεύσεις βορίου, αρσενικού και γαλλίου. Μοιάζουν αρκετά με τους εσωτερικούς ανιχνευτές. Εν τούτοις, σε αυτή την κατηγορία η δημιουργία των κυμάτων ρεύματος βασίζεται στις νοθεύσεις του ανιχνευτή κι όχι στο βασικό υλικό. Έχουμε και εδώ PV και PC ανιχνευτές.
- *Ανιχνευτές φωτοεκπομπής* : βασίζονται στην εκπομπή ακτινοβολίας από ένα μέταλλο σε ένα ημιαγωγικό υλικό λόγω απορρόφησης φωτός. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί το PtSi.

- *QWIP – Quantum Well Infrared Photodetector* : πρόκειται για υπέρυθρο ανιχνευτή που αποτελείται από ένα πολλαπλό, λεπτό στρώμα GaAs εναλλασσόμενο με στρώματα AlGaAs. Απορρόφηση υπέρυθρου φωτός δημιουργεί ρεύμα φωτοηλεκτρονίων.

3.3.3 Σύγχρονες τεχνικές

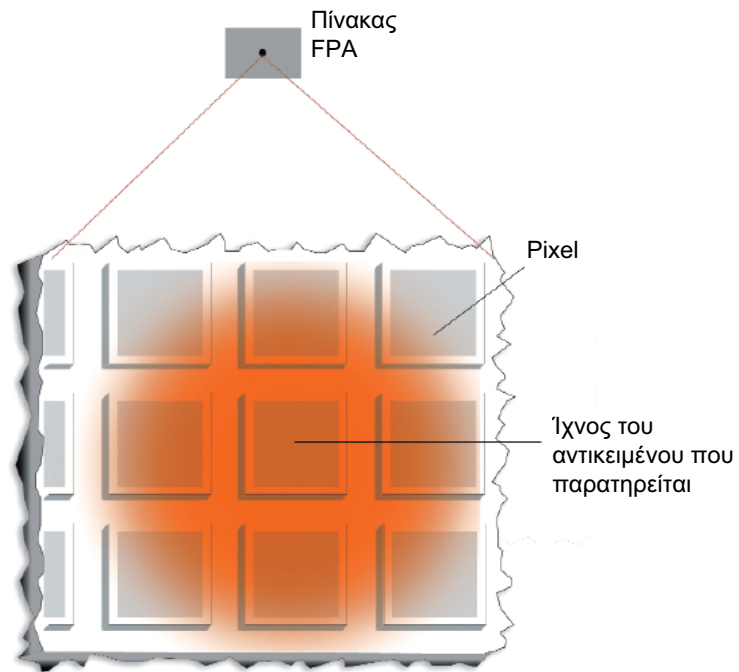
Στις σύγχρονες θερμικές κάμερες χρησιμοποιούνται ανιχνευτές που βασίζονται στην τεχνολογία των πινάκων εστιακού επιπέδου (focal plane array – FPA). Οι ανιχνευτές FPA κατασκευάζονται συνδυάζοντας την σύγχρονη τεχνολογία της φωτολιθογραφίας και της μικρομηχανικής με τις τεχνικές επεξεργασίας πυριτίου. Ουσιαστικά πρόκειται για μια κρυσταλλική μονάδα που περιέχει πολλούς ανιχνευτές.

Οι FPA ανιχνευτές είναι πολύ αποδοτικοί, ενώ οι κάμερες που κατασκευάζονται βάσει αυτής της τεχνολογίας παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, κάποια από τα οποία είναι :

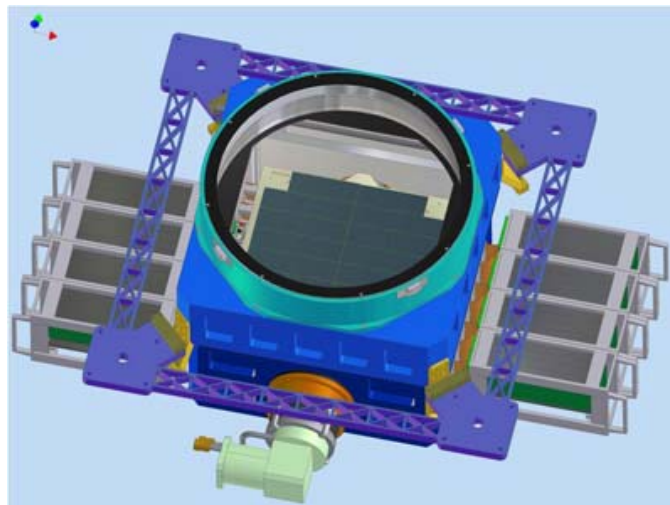
- η δυνατότητα καταγραφής πολύ υψηλών θερμοκρασιών καθώς η ψύξη των διατάξεων είναι αρκετά εύκολη,
- η μεγάλη αξιοπιστία λόγω των περιορισμένων κινούμενων διατάξεων που απαιτούνται,
- το χαμηλότερο κόστος σε σχέση με κάμερες που χρησιμοποιούν άλλη τεχνολογία,
- η καλύτερη ανάλυση εικόνας,
- η μειωμένη επίδραση παράσιτων μεγεθών (πχ. θερμοκρασία περιβάλλοντος).

Παρόλο αυτά υπάρχει κάποιο όριο στην ακρίβεια των μετρήσεων. Στους σύγχρονους ανιχνευτές FPA είναι απαραίτητο η εικόνα του αντικειμένου να “πέφτει” τουλάχιστον σε μια ομάδα ανιχνευτών (που περιέχονται στο FPA), μεγέθους 3x3 pixels, έτσι ώστε να έχουμε ακρίβεια στις μετρήσεις εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Για να επιτευχθεί αυτό επιλέγονται κατάλληλες οπτικές διατάξεις ώστε να εστιάζεται η εικόνα σε αυτόν τον ελάχιστο αριθμό pixels.

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται μια αναπαράσταση FPA ανιχνευτή σε μεγέθυνση όπου απεικονίζεται η προϋπόθεση για εστίαση στα 3x3 pixels, και μια διάταξη FPA ανιχνευτή πίσω από τον φακό μιας σύγχρονης θερμικής κάμερας :



Εικόνα 3.3.1 : Ποιοτική απεικόνιση FPA ανιχνευτή



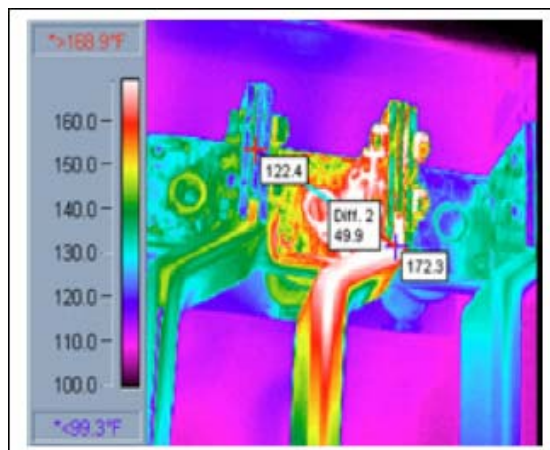
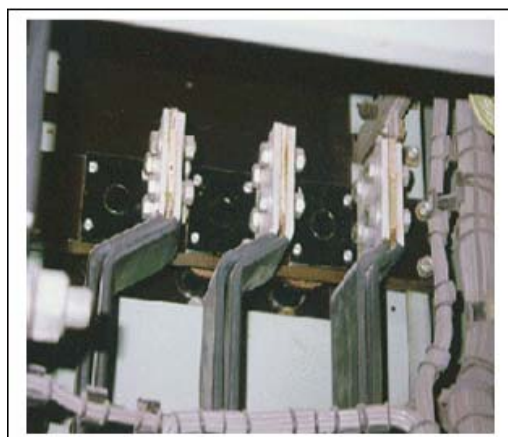
Εικόνα 3.3.2 : Διάταξη FPA ανιχνευτή σύγχρονης θερμικής κάμερας σε 3D σχεδίαση

3.4 Πεδία εφαρμογής της υπέρυθρης θερμογραφίας

Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι ένα πολύτιμο και ευπροσάρμοστο εργαλείο, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές. Γενικά, μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε κατάσταση όπου το πρόβλημα μπορεί να αποκαλυφθεί με τη βοήθεια θερμοκρασιακής διαφοράς. Οι κυριότεροι τομείς που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι οι ακόλουθοι :

(1) Σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας :

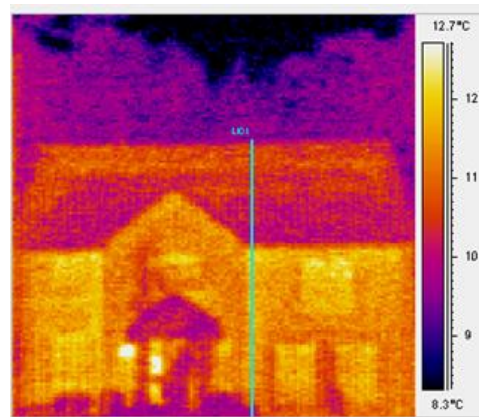
- Επιθεωρήσεις πραγματοποιούνται στην παραγωγή ενέργειας και συγκεκριμένα στους διεγέρτες, στις διάφορες συνδέσεις και στις μηχανές.
- Έλεγχοι στους υποσταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικότερα στους διακόπτες, στους αποζεύκτες, στους μετασχηματιστές, στους μονωτήρες και στις συστοιχίες πυκνωτών.
- Έλεγχοι σε όλο το δίκτυο διανομής.



Εικόνα 3.4.1 : Μπάρες ηλεκτρικών συνδέσεων σε συμβατική απεικόνιση και σε θερμογράφημα

(2) Σε κατασκευές

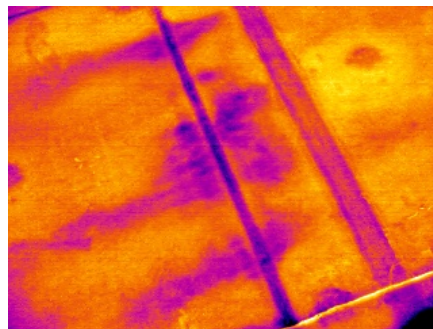
- Πραγματοποιούνται επιθεωρήσεις για να καθοριστούν οι θερμικές απώλειες σε κατοικίες, σε εργοστάσια, σε κτήρια που στεγάζουν υπηρεσίες ή γραφεία και σε διυλιστήρια.
- Επιθεωρήσεις για τον εντοπισμό υγρασίας.
- Έλεγχοι για να καθοριστεί η ευστάθεια του τσιμέντου.
- Έλεγχοι σε θερμαινόμενα πατάματα, ώστε να εντοπιστούν τυχόν διαρροές και να εξακριβωθεί ο τρόπος που διανέμεται η θερμοκρασία τους.
- Έλεγχος των στρωμάτων τσιμέντου σε ισχυρές κατασκευές, όπως γέφυρες.
- Εντοπισμός σημείων ανάπτυξης μούχλας σε κτήρια.



Εικόνα 3.4.2 : Θερμογραφήματα μιας κρεμαστής γέφυρας και ενός σπιτιού

(3) Σε συστήματα στέγασης

- Εντοπισμός των πιθανών διαρροών στις στέγες σπιτιών, βιομηχανικών μονάδων και άλλων εγκαταστάσεων.
- Παρέχεται η δυνατότητα άμεσου εντοπισμού και επιδιόρθωσης των κατεστραμμένων τμημάτων στέγασης από την υγρασία.



Εικόνα 3.4.3 : Θερμογράφημα σκεπής – διακρίνεται η υγρασία που έχει αναπτυχθεί

(4) Σε μηχανολογικά συστήματα

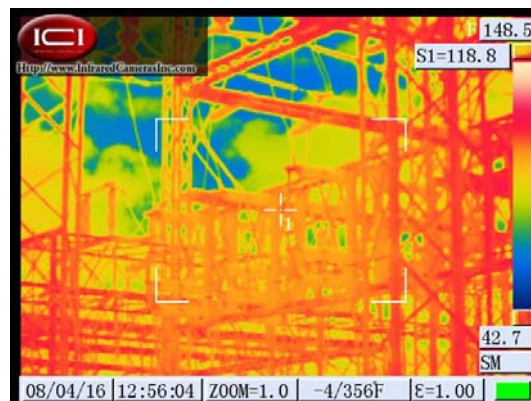
- Έλεγχος σε καυστήρες για υπερβολική ανάπτυξη θερμοκρασίας
- Εξέταση της πορείας της καύσης στους καυστήρες και μετρήσεις στην επιφανειακή θερμοκρασία των σωληνώσεων θέρμανσης κατά την διάρκεια της κανονικής λειτουργίας τους και όταν είναι σε αναμονή.
- Ανίχνευση ζημιών στο εξωτερικό περίβλημα του λέβητα ή εντοπισμός θερμότερων περιοχών που πιθανώς να εξελιχθούν σε βλάβες μελλοντικά.
- Εντοπισμός διαρροών αερίων σε καπνοδόχους λεβήτων σε μονάδες παραγωγής ενέργειας.
- Αξιολόγηση του εξοπλισμού στον εξαερισμό και στον κλιματισμό.
- Εντοπισμός διαρροών στις μονώσεις εξοπλισμού ψύξεως.



Εικόνα 3.4.4: Θερμογραφήματα λέβητα και σωληνώσεων

(5) Σε πετροχημικές εφαρμογές

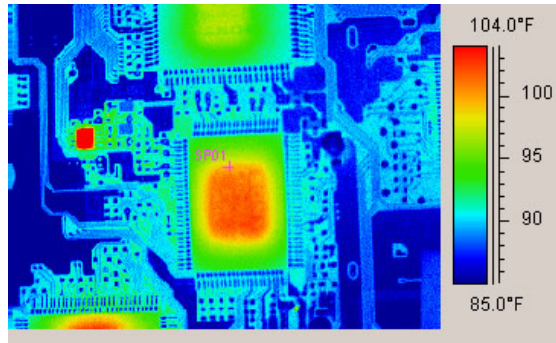
- Έλεγχος για απώλειες των μονώσεων και διαρροές σε δυλιστήρια.
- Εκτίμηση της απόδοσης και ποιότητας των εναλλακτών θερμότητας.
- Έλεγχοι στις μονώσεις των κλιβάνων, καθώς και στους σωλήνες τους αλλά και στην διαδικασία καύσης τους.



Εικόνα 3.4.5: Θερμογράφημα σε δυλιστήριο

(6) Σε εφαρμογές ηλεκτρονικού εξοπλισμού

- Αξιολόγηση και εντοπισμός βλαβών σε ολοκληρωμένα κυκλώματα.
- Δυνατότητα ανάπτυξης θερμικού χάρτη διατάξεων ημιαγωγών.
- Έλεγχος υβριδικών μικροκυκλωμάτων.
- Έλεγχος συγκολλήσεων από καλά

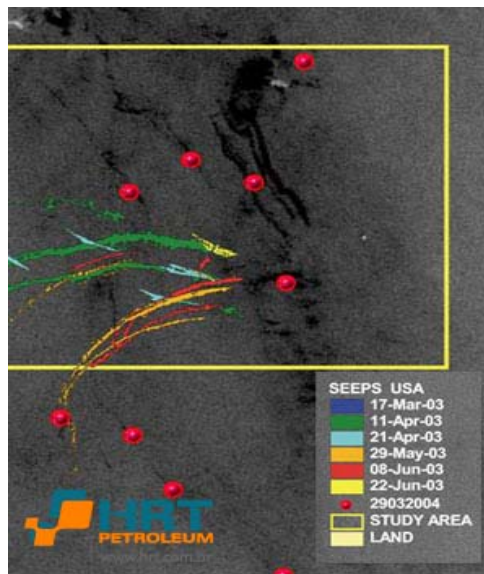


Εικόνα 3.4.6: Θερμογράφημα ολοκληρωμένου ηλεκτρονικού κυκλώματος

(7) Σε περιβαλλοντικές εφαρμογές

- Εντοπίζονται παλιές περιοχές ταφής αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων.
- Δυνατότητα εντοπισμού διαρροών πετρελαίου ή άλλων επιβλαβών για το περιβάλλον ουσιών.

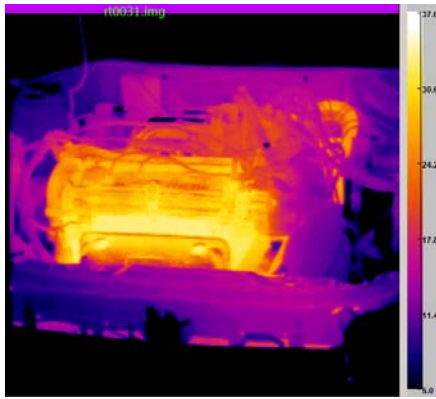
Σημειώνεται ότι οι επιθεωρήσεις αυτές μπορούν να πραγματοποιηθούν και εναέρια.



Εικόνα 3.4.7: Εντοπισμός πετρελαιοκηλίδων στην θάλασσα του Μεξικό

(8) Σε αυτοκινητοβιομηχανίες

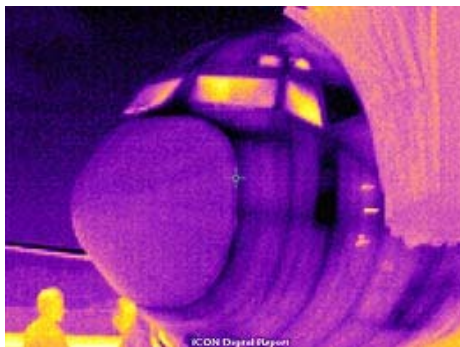
- Έλεγχος στην θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα λάστιχα και στις αναρτήσεις.
- Επιθεώρηση των συστημάτων του κινητήρα και των φρένων, ώστε να γίνονται οι απαραίτητες ενέργειες, που εξασφαλίζουν μέγιστη απόδοση και σωστή κατανομή θερμότητας.



Εικόνα 3.4.8: Θερμογραφήματα κινητήρα και σασί ενός αυτοκινήτου

(9) Σε αεροδιαστημικές εφαρμογές

- Διευκολύνεται η ανίχνευση νερού στις επιφάνειες του αεροπλάνου και στο επικάλυμμα του ραντάρ, που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα.
- Παρέχεται εύκολος, ακριβής και γρήγορος έλεγχος στα ελαστικά, στα φρένα και στα φτερά των αεροσκαφών.
- Εντοπισμός ρωγμών και διαβρώσεων στο σώμα του σκάφους.
- Έλεγχος της κατάστασης στην οποία βρίσκεται η μηχανή των αεροπλάνων και των διαστημόπλοιων.



Εικόνα 3.4.9: Θερμογραφήματα μπροστινής όψης και τουρμπίνας επιβατικού αεροσκάφους

(10) Σε ιατρικές εφαρμογές

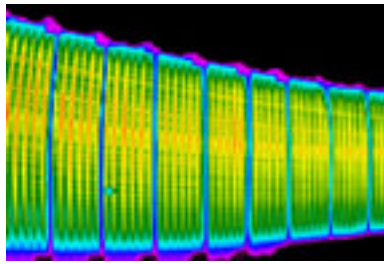
- Διάγνωση διαφόρων χτυπημάτων και κάποιων συνδρόμων.
- Διάγνωση καρκινικών όγκων, αρθρίτιδας κτλ.
- Οδοντιατρικές εφαρμογές.
- Διαγνώσεις σε αθλητικά ατυχήματα και αξιόπιστη παρακολούθηση της αποκατάστασης.
- Έλεγχος ποσότητας ουσιών και laser, που χορηγούνται σε ιστούς.



Εικόνα 3.4.10 : Θερμογράφημα για ιατρικούς σκοπούς

(11) Σε ατμοστρόβιλους και στις υδροηλεκτρικές γεννήτριες

- Η λήψη μιας θερμικής εικόνας του στάτη χρησιμοποιείται ως αρχείο ώστε να χρησιμοποιείται σαν πρότυπο στις μετέπειτα εργασίες επισκευής.
- Πιστοποιείται η αποτελεσματικότητα των επιδιορθώσεων που έχουν γίνει.
- Εντοπίζονται εύκολα τα σφάλματα του πυρήνα του στάτη.



Εικόνα 3.4.11 : Θερμογράφημα στάτη ενός ατμοστρόβιλου

(12) Σε διάφορες άλλες εφαρμογές

- Στον εντοπισμό πυρκαγιών χαμηλής έντασης σε δασικές περιοχές.
- Σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης.
- Στον εντοπισμό ανθρώπων σε φλεγόμενα κτίρια ώστε να μπορέσουν να διασωθούν.
- Στον εντοπισμό χαμένων ανθρώπων (σκανάρισμα περιοχής από ύψος)



Εικόνα 3.4.12 : Θερμογραφήματα φλεγόμενου δάσους και κτηρίου

3.5 Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα υπέρυθρης θερμογραφίας

Η τεχνολογία της υπέρυθρης θερμογραφίας παρόλο το ευρύ πεδίο εφαρμογών, που είδαμε πως έχει σε παραπάνω παράγραφο, παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα, τα σπουδαιότερα από τα οποία είναι :

- το κόστος του εξοπλισμού υπέρυθρης τεχνολογίας είναι αρκετά υψηλό,
- παρουσιάζεται ανικανότητα στην ανίχνευση της εσωτερικής θερμοκρασίας κάποιων διατάξεων, ιδιαίτερα αν το εξεταζόμενο αντικείμενο περιβάλλεται από γυαλί, πολυαιθυλένιο κλπ.
- σε κάποιες περιπτώσεις έχουμε μείωση στην αξιοπιστία των μετρήσεων λόγω των θερμικών απωλειών, που οφείλονται στην μετάδοση της ακτινοβολίας,
- προβλήματα λόγω της εκπεμπικότητας των υλικών,
- δυνατότητα επιθεώρησης ενός περιορισμένου πάχους υλικού.

Οι παραπάνω αρνητικές διαπιστώσεις όσον αφορά την υπέρυθρη θερμογραφία αντισταθμίζονται αν σκεφτεί κανείς τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, τα σπουδαιότερα από τα οποία είναι :

- η τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι τύπου non-contact (χωρίς επαφή),
- παρέχει γρήγορες, αξιόπιστες και ακριβείς μετρήσεις χωρίς την διακοπή της λειτουργίας ενός συστήματος ή κάποιας διάταξης,
- μια μεγάλη επιφάνεια μπορεί να εξεταστεί σε ελάχιστο χρονικό διάστημα,
- τα αποτελέσματα – μετρήσεις μπορούν να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν σε ψηφιακή μορφή,
- παρέχονται κατάλληλα πακέτα λογισμικού για την επεξεργασία και την ανάλυση της εικόνας,
- ο χειρισμός του εξοπλισμού υπέρυθρης θερμογραφίας είναι αρκετά εύκολος και δεν απαιτεί ιδιαίτερες γνώσεις ή ικανότητες.
- επιφέρει μείωση στο κόστος και τον χρόνο της συντήρησης εξοπλισμού,
- παρέχει πρόβλεψη στην διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και οι υποψήφιες βλάβες μπορούν να αποφευχθούν, εξοικονομώντας έτσι χρόνο και χρήμα,
- συνεισφέρει στην γενική εξοικονόμηση ενέργειας, αποτελώντας έτσι τεχνολογία, που βοηθά στην προστασία του περιβάλλοντος.

3.6 Εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας στην συντήρηση

Όπως αναφέρεται και παραπάνω ένα από τα πλεονεκτήματα της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι η βελτίωση που παρέχει στις εργασίες συντήρησης εξοπλισμού. Επιτυγχάνεται μείωση τόσο στον χρόνο της συντήρησης, όσο και στο κόστος, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί μια αξιόπιστη τεχνική στην πρόβλεψη βλαβών. Η χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας σε αυτήν την περιοχή αποτελεί μια σύγχρονη τάση σε βιομηχανικές μονάδες.

Στοιχεία από το Ομοσπονδιακό Πρόγραμμα Διαχείρισης Ενέργειας των ΗΠΑ (Federal Energy Management Program – FEMP) δείχνουν ότι η συντήρηση που παρέχει πρόβλεψη των βλαβών και του χρόνου ζωής του εξοπλισμού, έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του κόστους κατά 30 – 40% έναντι της συμβατικής συντήρησης χωρίς εξοπλισμό κατάλληλο για προβλέψεις.

Ειδικότερα σε βιομηχανικές μονάδες, όπου η εξοικονόμηση κόστους και χρόνου είναι από τις σημαντικότερες παραμέτρους, η εφαρμογή της υπέρυθρης τεχνολογίας στις διαδικασίες συντήρησης είναι ζωτικής σημασίας. Σύμφωνα με ιστορικά στοιχεία από μονάδες που εφάρμοσαν συστηματικά αυτήν την μέθοδο συντήρησης – πρόβλεψης επιτεύχθηκε :

- **Περιορισμός στις μη προγραμματισμένες διακοπές της λειτουργίας της μονάδας λόγω αστοχίας του εξοπλισμού.** Ειδικότερα, επιτεύχθηκε μείωση από 40 ως 60% στα πρώτα δυο χρόνια εφαρμογής του προγράμματος συντήρησης, ενώ η μείωση αγγίζει το 90% από πέντε και πάνω χρόνια.
- **Αύξηση της αξιοποίησης του ανθρώπινου δυναμικού,** καθώς μειώνεται κατά πολύ ο μέσος χρόνος συντήρησης, που περιλαμβάνει την διάγνωση και εν συνέχεια την επιδιόρθωση του προβλήματος.
- **Αύξηση της παραγωγικής ικανότητας της μονάδας.** Στο αρχικό στάδιο εφαρμογής αυτής της μεθόδου συντήρησης (1 με 3 χρόνια), η παραγωγή αυξάνεται κατά μέσο όρο 15 – 40%, ενώ για μακροπρόθεσμη εφαρμογή, το ποσοστό αύξησης της παραγωγής φτάνει στο 75 – 80%.
- **Μείωση στο κόστος συντήρησης.** Σημειώνεται ότι στον πρώτο χρόνο εφαρμογής της υπέρυθρης τεχνολογίας στην συντήρηση συνήθως παρατηρείται αύξηση στο κόστος, γεγονός που οφείλεται στην απόκτηση του απαραίτητου εξοπλισμού και στην εξοικείωση με αυτό. Όταν τα προβλήματα αυτά ξεπεραστούν, η μείωση στο κόστος συντήρησης μπορεί να φτάσει στο 35 με 60%.

Παρόλο την μεγάλη αξιοπιστία και οικονομία που επιφέρει η χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας στην συντήρηση – πρόβλεψη βλαβών, πρέπει να γίνει κατανοητό ότι δεν αρκεί, καθώς η ανίχνευση θερμοκρασίας πέραν των φυσιολογικών ορίων φανερώνει ότι υπάρχει πρόβλημα αλλά δεν μπορεί κανείς να γνωρίζει τι ακριβώς φταίει. Απαιτείται λοιπόν λεπτομερής έλεγχος της κάθε περίπτωσης από εξειδικευμένα άτομα που έχουν την κατάλληλη εμπειρία και τεχνογνωσία.

3.7 Έλεγχοι ηλεκτρικών διατάξεων με χρήση της θερμικής απεικόνισης

3.7.1 Έλεγχοι για ηλεκτρικές ασυμμετρίες και υπερφορτίσεις

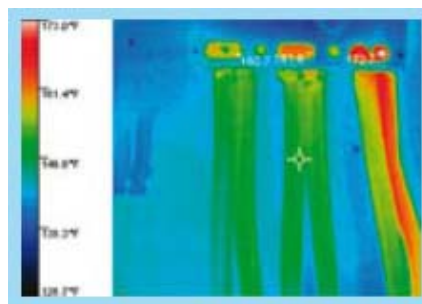
Η θερμική απεικόνιση αποτελεί έναν εύκολο τρόπο για τον εντοπισμό θερμοκρασιακών διαφορών σε τριφασικά ηλεκτρικά κυκλώματα αν συγκριθούν με τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας τους. Η λεπτομερής εξέταση των τριών φάσεων σε ένα κύκλωμα μπορεί πολύ εύκολα να δείξει αν έχουμε ανωμαλίες που οφείλονται σε ασυμμετρία ή υπερφόρτιση.

Ακόμα και μια μικρή ασυμμετρία στην τάση μπορεί να προκαλέσει φθορά στις συνδέσεις του κυκλώματος, να εξασθενήσει την συνολική παρερχομένη τάση, ενώ οι κινητήρες ή άλλα φορτία, που μπορεί να συνδέονται στο σύστημα που εξετάζεται, απορροφούν μεγάλο ρεύμα, λειτουργώντας ταυτόχρονα σε χαμηλή ροπή με αποτέλεσμα να καταστρέφονται γρήγορα.

Μια μεγαλύτερη ασυμμετρία μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή κάποιας ασφάλειας με αποτέλεσμα κάποια φάση του κυκλώματος να βγει εκτός. Στο μεταξύ, το ασύμμετρο ρεύμα θα κυκλοφορήσει στον ουδέτερο αγωγό, και ο χρήστης θα χρεωθεί για υψηλή κατανάλωση ενέργειας.

Πρακτικά, είναι σχεδόν αδύνατο να εξαλειφθούν πλήρως οι ασυμμετρίες σε ένα τριφασικό σύστημα. Προκειμένου να βοηθηθούν οι χρήστες στον καθορισμό επιτρεπτών ορίων ασυμμετριών, έχουν συνταχθεί πρότυπα που παρέχουν προδιαγραφές για διάφορες διατάξεις.

Η βασική ιδέα για τον εντοπισμό ασυμμετρίας ή υπερφόρτισης σε τριφασικά κυκλώματα, χρησιμοποιώντας θερμική απεικόνιση είναι ότι οι φάσεις που έχουν ίσα φορτία πρέπει να έχουν και ίση θερμοκρασία. Σε μια κατάσταση ασυμμετρίας η φάση που έχει το πρόβλημα θα εμφανίζεται να έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία σε σχέση με τις άλλες δυο, λόγω της θερμότητας που παράγεται από την αυξημένη αντίσταση.



Εικόνα 3.7.1 : Τριφασική διάταξη – παρατηρείται αυξημένη θερμοκρασία στην μια από τις τρεις φάσεις

Τα σφάλματα σε κινητήρες είναι μια από τις συνήθεις επιπτώσεις της ασυμμετρίας της τάσης, που εκτός του λειτουργικού κόστους επιφέρει σημαντική οικονομική επιβάρυνση. Η επιβάρυνση αυτή περιλαμβάνει το κόστος αγοράς και εγκατάστασης ενός νέου κινητήρα (σε περίπτωση που κριθεί απαραίτητη η αντικατάσταση του παλαιού) και τη ζημία λόγω μείωσης στην παραγωγή (αν πρόκειται για κάποια βιομηχανική μονάδα).

3.7.2 Έλεγχοι για διαβρωμένες ή χαλαρές ηλεκτρικές επαφές

Ένας από τους σημαντικότερους λόγους που η θερμική απεικόνιση θεωρείται κατάλληλη για την παρακολούθηση ηλεκτρικών διατάξεων είναι ότι κάθε καινούργια ηλεκτρική διάταξη ξεκινάει να φθείρεται από την στιγμή που θα εγκατασταθεί.

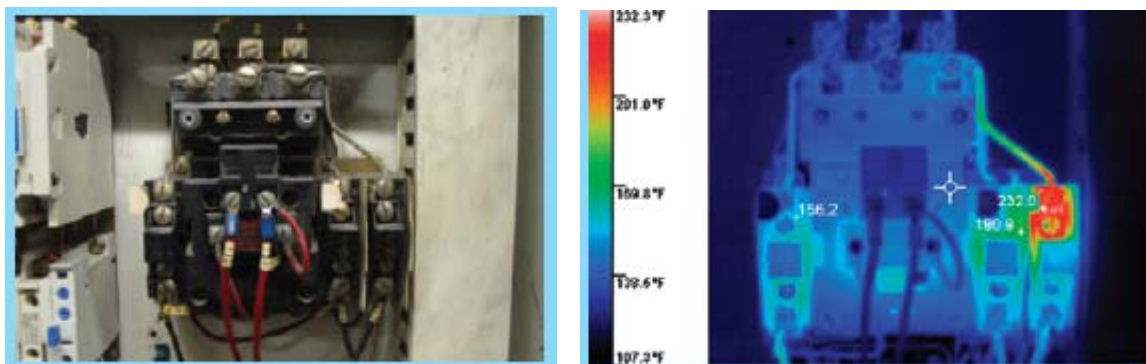
Το χαλάρωμα των ηλεκτρικών επαφών μπορεί να οφείλεται στο φορτίο που εξυπηρετεί το κύκλωμα, στις διάφορες ταλαντώσεις των διατάξεων, στην γενικότερη “κόπωση” (λόγω υπερλειτουργίας) και γήρανση του εξοπλισμού. Πέραν αυτών, οι συνθήκες του περιβάλλοντος μιας ηλεκτρικής επαφής επιφέρει την σταδιακή διάβρωση της.

Γίνεται λοιπόν εμφανές πως κάθε ηλεκτρική επαφή οδηγείται σε κάποιο σφάλμα με το πέρασ του χρόνου. Αν δεν εντοπιστεί το πρόβλημα ή δεν επιδιορθωθεί άμεσα, είναι πολύ πιθανή η εμφάνιση σοβαρότερων προβλημάτων, όπως εκδήλωση πυρκαγιάς ή διακοπή παροχής ενέργειας.

Μια διαβρωμένη ή χαλαρή ηλεκτρική επαφή – σύνδεση έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης διάβασης, που με την σειρά της επιφέρει αύξηση στην θερμότητα που εκλύεται. Έτσι, μια θερμική εικόνα μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό του προβλήματος προτού αυτό εξελιχθεί σε σημαντική βλάβη.

Γενικά, με την θερμική απεικόνιση πρέπει να αναζητήσει κανείς επαφές που παρουσιάζουν αυξημένη θερμοκρασία σε σχέση με άλλες.

Οι προβληματικές επαφές θα πρέπει να αποσυναρμολογούνται, να καθαρίζονται, να επιδιορθώνονται και να συναρμολογούνται ξανά. Αν μετά από αυτά το πρόβλημα συνεχίζει να υπάρχει, είναι πιθανό να μην οφείλεται η επαφή για την αύξηση της θερμοκρασίας και θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και άλλες μέθοδοι εκτός από την θερμική απεικόνιση.



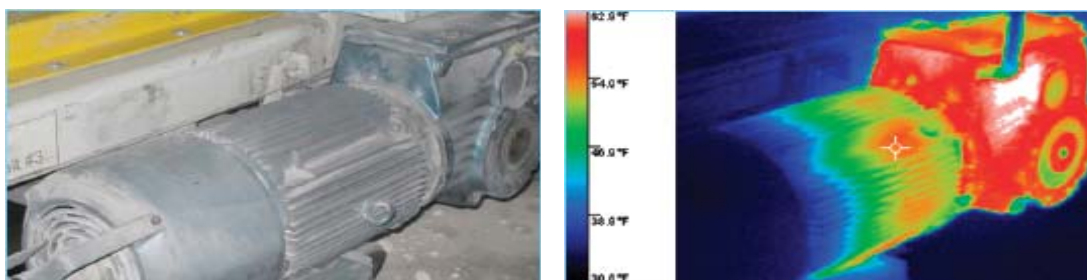
Εικόνα 3.7.2 : Αύξηση στην θερμοκρασία μιας επαφής, που φανερώνει δυσλειτουργία

3.7.3 Έλεγχοι σε ηλεκτρικούς κινητήρες

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν την ραχοκοκαλιά των βιομηχανιών. Στις ΗΠΑ εκτιμάται ότι λειτουργούν 40 εκατομμύρια κινητήρες στις βιομηχανικές μονάδες, και το 70% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν οι μονάδες αυτές προορίζεται για τους κινητήρες.

Η εφαρμογή της θερμικής απεικόνισης και εδώ αποτελεί μια βέλτιστη λύση στον εντοπισμό προβλημάτων στους κινητήρες. Μια θερμική κάμερα παρέχει το ολοκληρωμένο θερμοκρασιακό προφίλ ενός κινητήρα σε μια δυσδιάστατη εικόνα.

Σε όλους τους κινητήρες πρέπει να αναγράφεται η φυσιολογική θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την λειτουργία τους στην πινακίδα τους. Καθώς με την θερμική απεικόνιση δεν είναι εφικτή η καταγραφή της εσωτερικής θερμοκρασίας, η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας αποτελεί μια ένδειξη για το εσωτερικό του κινητήρα. Όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό ανεβαίνει συμβαίνει το ίδιο και στο εξωτερικό. Έτσι, ένας έμπειρος χειριστής θερμικής κάμερας, ο οποίος έχει γνώσεις όσον αφορά τους κινητήρες, μπορεί να προσδιορίσει τα πιθανά προβλήματα που εμφανίζονται όπως ελλιπής ροή αέρα, διάβρωση της μόνωσης του δρομέα ή του στάτη, επιπλοκές στα τυλίγματα κτλ, ανάλογα με τις ενδείξεις που συγκεντρώνει.



Εικόνα 3.7.3 : Θερμική απεικόνιση ηλεκτρικού κινητήρα – παρατηρείται μια ανωμαλία που φαίνεται με λευκό χρώμα στα δεξιά

3.7.4 Έλεγχοι σε μετασχηματιστές

Η εφαρμογή της θερμικής απεικόνισης στους μετασχηματιστές εξασφαλίζει άμεση και ακριβή διάγνωση προβλημάτων που σχετίζονται με υπεραύξηση της θερμοκρασίας τους. Γενικά, είναι απαραίτητο να ελέγχονται εξωτερικές και εσωτερικές διατάξεις, ώστε να έχει κανείς πλήρη έλεγχο της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή που εξετάζεται.

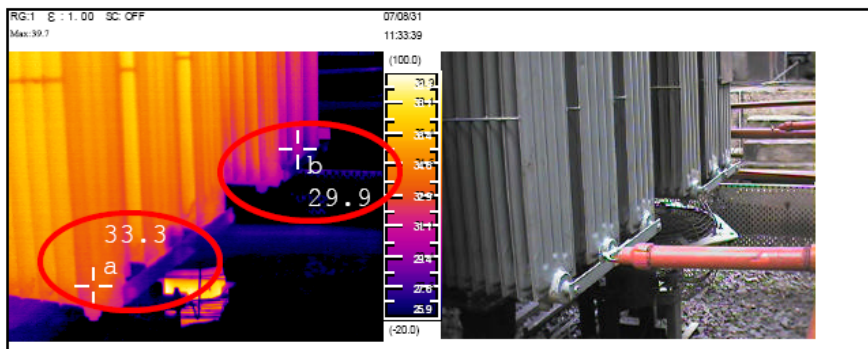
Σε έναν μετασχηματιστή ελαίου πρέπει να γίνεται έλεγχος στις εξής εξωτερικές διατάξεις :

- **Συνδέσεις υψηλής και χαμηλής τάσης** : αύξηση της θερμοκρασίας πέραν του κανονικού στις συνδέσεις υψηλής, μέσης ή χαμηλής τάσης, δηλώνει αύξηση στην αντίσταση διάβασης, που μπορεί να οφείλεται σε ακάθαρτες συνδέσεις, ή σε χαλάρωση των συνδέσεων. Επίσης, πρέπει να γίνεται μια εξέταση των φάσεων προκειμένου να ανιχνευτεί υπερφόρτωση ή ασυμμετρίες.
- **Σωλήνες ψύξης** : οι σωλήνες ψύξης, στους οποίους ρέει λάδι προκειμένου να διευκολύνεται η ψύξη των μετασχηματιστών, υπό φυσιολογικές συνθήκες παρουσιάζουν αυξημένη θερμοκρασία. Σε περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία τους ενός ή περισσότερων σωλήνων είναι χαμηλή συγκριτικά με τους υπόλοιπους, σημαίνει ότι υπάρχει πρόβλημα στην ροή του λαδιού και πρέπει να εντοπιστεί το πρόβλημα.
- **Ανεμιστήρες και αντλίες ψύξης** : ο έλεγχος των ανεμιστήρων και των αντλιών πρέπει να γίνεται όταν βρίσκονται σε λειτουργία. Υπό φυσιολογικές συνθήκες θα πρέπει να έχουν αυξημένη θερμοκρασία, οπότε αν μετρηθεί

χαμηλή θερμοκρασία, υπάρχει κάποιο πρόβλημα στην λειτουργία της διάταξης.



Εικόνα 3.7.4 : Ακροδέκτες μετασχηματιστή σε συμβατική και θερμική απεικόνιση – παρατηρείται υπερθέρμανση σε έναν από τους ακροδέκτες



Εικόνα 3.7.5 : Θερμική απεικόνιση ανεμιστήρα ψύξης Μ/Σ – παρατηρούμε υψηλότερη θερμοκρασία στην περιοχή a, σε σύγκριση με την περιοχή b

Με την θερμική απεικόνιση μπορούν επίσης να εντοπισθούν προβλήματα στα συστήματα προστασίας των μετασχηματιστών από βραχυκυκλώματα, στις διατάξεις αλεξικέραυνων που οδεύουν στην γη και στους μονωτήρες. Εντούτοις, ο εντοπισμός προβλημάτων στις διατάξεις αυτές είναι αρκετά δύσκολος με χρήση της θερμικής απεικόνισης καθώς, οι θερμοκρασιακές μεταβολές, που επισημαίνουν την ύπαρξη βλάβης, είναι πολύ μικρές. Άλλες τεχνολογίες, όπως χρήση υπερήχων, συνιστανται σαν πιο κατάλληλες για τέτοιου είδους ελέγχους.

Για προβλήματα σε εσωτερικές διατάξεις ενός μετασχηματιστή, η θερμική απεικόνιση αποτελεί αποτελεσματική τεχνική αν η εσωτερική δυσλειτουργία παράγει θερμότητα ικανή να εντοπίζεται στην εξωτερική επιφάνεια του μετασχηματιστή. Πολλές φορές είναι αρκετά δύσκολο να κατανοήσει κανείς αν υπάρχει κάποιο εσωτερικό πρόβλημα, οπότε απαιτείται προσεκτικός έλεγχος.

Στο εσωτερικό των μετασχηματιστών μπορούν να παρουσιαστούν προβλήματα που οφείλονται συνήθως :

- **Στις εσωτερικές συνδέσεις :** πρόβλημα έχουμε όταν η θερμοκρασία των εσωτερικών συνδέσεων είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία στην επιφάνεια του μετασχηματιστή.
- **Στους μεταγωγείς λήψεων :** η θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτές τις διατάξεις δεν πρέπει να είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία στην επιφάνεια του μετασχηματιστή. Γενικά, τα προβλήματα που μπορεί να υπάρξουν στους μεταγωγείς λήψεων σπάνια είναι εύκολο να εντοπιστούν, αφού κατά τον έλεγχο δεν λειτουργούν όλες οι λήψεις.

Προβλήματα υπερθέρμανσης στο εσωτερικό του μετασχηματιστή εμφανίζονται πολλές φορές λόγω της κακής κατάστασης του λαδιού, οπότε κρίνεται απαραίτητη η λήψη και εξέταση δείγματος αυτού. Η παρουσία μεθανίου έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού, ενώ το ακετυλένιο ευνοεί την ανάπτυξη ηλεκτρικών τόξων.

Σημειώνεται ότι σε μετρήσεις μετασχηματιστών υπαίθριων υποσταθμών θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες του περιβάλλοντος, καθώς μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα μας. Ειδικότερα, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η ταχύτητα και η υγρασία των αέρα στην περιοχή όπου γίνονται οι μετρήσεις, θα πρέπει να εξετάζονται λεπτομερώς σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται πολύ ακριβή αποτελέσματα.

3.7.5 Έλεγχοι και δοκιμές για αποφυγή πυρκαγιών σε ηλεκτρικές διατάξεις

Η εκδήλωση πυρκαγιάς σε ηλεκτρικές διατάξεις αποτελεί τον μεγαλύτερο κίνδυνο που θα μπορούσε να συμβεί εξαιτίας αυξημένης παραγωγής θερμότητας. Γενικά, στην σύγχρονη εποχή ο κίνδυνος αυτός έχει μειωθεί αρκετά σε σχέση με το παρελθόν, καθώς έχουν θεσπιστεί αυστηρά πρότυπα ασφαλείας, έχει βελτιωθεί κατά πολύ ο σχεδιασμός των διάφορων διατάξεων, ενώ η σωστή εγκατάσταση και συντήρηση του εξοπλισμού αποτελούν ουσιώδεις διαδικασίες.

Η εκδήλωση πυρκαγιάς προϋποθέτει την ύπαρξη θερμότητας και κάποιου εύφλεκτου υλικού. Οι σχεδιαστές ηλεκτρολογικού εξοπλισμού προσπαθούν να χρησιμοποιούν όσο το δυνατόν λιγότερο εύφλεκτα υλικά. Οι πυρκαγιές στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ξεκινούν από υλικά που είναι εύφλεκτα και μπορεί να βρίσκονται κοντά σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, από όπου δέχονται συνήθως τα “απαραίτητα” μεγάλα ποσά θερμότητας για την εκδήλωση της φωτιάς.

Η θερμότητα είναι ένα φυσιολογικό υποπροϊόν της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος, που κανονισμοί ορίζουν τα επιτρεπτά όρια της. Οι συνήθεις λόγοι εκδήλωσης πυρκαγιών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι εξής :

- **Κακές επαφές – συνδέσεις :** αναφέρθηκε και παραπάνω ότι οι φθαρμένες ή οι χαλαρές επαφές επιφέρουν αύξηση της αντίστασης διάβασης του ρεύματος με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμότητας, που με την σειρά της μπορεί να προκαλέσει την εκδήλωση φωτιάς. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι και η δημιουργία οξειδίων στις επαφές συμβάλλει στην παραπάνω διαδικασία, ενώ οι χαλαρές επαφές είναι πιθανό να ευνοήσουν την εμφάνιση ηλεκτρικών τόξων.
- **Σφάλματα μονώσεων :** οι σύγχρονες τάσεις στα υλικά των μονώσεων αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους για την μείωση των

πυρκαγιών στις ηλεκτρικές διατάξεις. Όμως, κάθε στοιχείο μόνωσης φθείρεται εξαιτίας της θερμότητας που αναπτύσσεται ή λόγω γήρανσης του υλικού. Η πιο ακραία περίπτωση σφάλματος, που οφείλεται σε αστοχία ή καταστροφή της μόνωσης, είναι το βραχυκύκλωμα. Το πολύ μεγάλο ρεύμα που θα αναπτυχθεί θα οδηγήσει στην λειτουργία κάποιας διάταξης προστασίας όπως στην τήξη κάποιας ασφάλειας ή στο άνοιγμα κάποιου διακόπτη. Αλλά, αν η διάταξη προστασίας αποτύχει η παρουσία του μεγάλου ρεύματος για κάποιο χρονικό διάστημα θα οδηγήσει σε υπερθέρμανση και ακολούθως σε φωτιά.

- **Κεραυνοί** : μια από τις θεμελιώδεις λειτουργίες του συστήματος γείωσης στα ηλεκτρικά συστήματα είναι να παρέχει ένα μονοπάτι χαμηλής αντίστασης προς την γη, έτσι ώστε ένα κεραυνικό χτύπημα να επιφέρει την λιγότερη δυνατή ζημιά στις διατάξεις. Οι περιοδικοί έλεγχοι στο σύστημα γείωσης και η μέτρηση της αντίστασης στο ηλεκτρόδιο γείωσης βοηθούν στην διασφάλιση της καλής λειτουργίας και στην αποφυγή ακραίων καταστάσεων.
- **Αρμονικές** : η παρουσία αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος συνεισφέρουν στην αύξηση της θερμότητας σε ένα ηλεκτρικό σύστημα. Αρμονική παραμόρφωση εμφανίζεται σε κάθε ηλεκτρικό σύστημα που περιλαμβάνει ηλεκτρονικές διατάξεις.
- **Υπερφόρτιση** : η μεγάλη ροή ρεύματος μπορεί επιφέρει μεγάλη αύξηση της θερμότητας αν δεν λειτουργήσουν τα συστήματα προστασίας.

Όλα τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμότητας που παράγεται στις ηλεκτρικές διατάξεις και κατά συνέπεια στην ανύψωση της θερμοκρασίας. Η χρήση της θερμικής απεικόνισης είναι προφανές ότι μπορεί να εντοπίσει αυτή την θερμοκρασιακή αύξηση εγκαίρως και κατά συνέπεια να αποφευχθεί κάποια πιθανή εκδήλωση πυρκαγιών. Θα πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι μια θερμική κάμερα, ή όποιο άλλο σύστημα θερμικής απεικόνισης, δεν αρκεί προκειμένου να εντοπιστεί η αιτία αύξησης της θερμοκρασίας. Είναι απαραίτητη η διενέργεια επιπλέον μετρήσεων και δοκιμών για κάθε περίπτωση.

3.8 Πρακτικές οδηγίες για θερμικές εικόνες μέγιστης ακρίβειας

Προκειμένου οι θερμικές εικόνες που λαμβάνονται να είναι ακριβείς και ποιοτικές κατά το βέλτιστο δυνατό προτείνονται οι παρακάτω πρακτικές οδηγίες, για μετρήσεις σε ηλεκτρικά συστήματα και διατάξεις :

- το σύστημα που εξετάζεται πρέπει να λειτουργεί τουλάχιστον στο 40% του ονομαστικού του φορτίου (λιγότερο φορτίο δεν προκαλεί αρκετή θερμότητα, ώστε να μπορεί να ανιχνευτεί),
- η απόσταση από τον στόχο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή και πρέπει να αποφεύγεται η παρεμβολή υλικών όπως γυαλί. Όταν εξασφαλίζεται η ασφάλεια των χρηστών, καλό είναι οι μετρήσεις να διενεργούνται αφού έχουν αφαιρεθεί όποιες περιφράξεις υπάρχουν στις εξεταζόμενες διατάξεις.

- οι συνθήκες του περιβάλλοντος θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη, σε περίπτωση που οι μετρήσεις διενεργούνται σε εξωτερικούς χώρους. Για παράδειγμα υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος έχουν σαν αποτέλεσμα να θερμαίνεται ο εξοπλισμός, ενώ ο ψυχρός καιρός έχει τα αντίθετα αποτελέσματα. Επιπλέον, εκτός της θερμοκρασίας περιβάλλοντος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα ρεύματα αέρα που επικρατούν στην περιοχή.
- θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα προβλήματα δεν εμφανίζονται σαν αύξηση της θερμοκρασίας. Μια σκασμένη ασφάλεια και κάποιες δυσλειτουργίες σε συστήματα ψύξης, αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα όπου ένα πρόβλημα εντοπίζεται εξαιτίας μειωμένης θερμοκρασίας σε σχέση με την φυσιολογική. Οι χειριστές των συστημάτων θερμικής απεικόνισης πρέπει να είναι σε θέση να γνωρίζουν τα φυσιολογικά επίπεδα της θερμοκρασίας των διατάξεων, ώστε να αναγνωρίζουν τότε υπάρχει πρόβλημα.
- απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην παράσιτη ακτινοβολία από άλλα σώματα κοντά στην διάταξη που μελετάμε,
- μέταλλα που δεν έχουν βαφτεί είναι δύσκολο να μετρηθούν σωστά. Προκειμένου να έχουμε καλύτερη ακρίβεια πρέπει τα μέταλλα αυτά να καλύπτονται από ειδικές χάρτινες ταινίες ή βερνίκια,
- θα πρέπει να συγκεντρώνει κανείς τα αριθμητικά δεδομένα αλλά και τις υπέρυθρες εικόνες που έλαβε, έτσι ώστε να διευκολύνεται η μακροπρόθεσμη ανάλυση δεδομένων. Από τα αποτελέσματα που συλλέγονται γίνεται κατανοητό πού θα πρέπει να επικεντρωθούν οι μελλοντικές μετρήσεις – παρατηρήσεις,
- καλό θα ήταν για κάθε διάταξη που μετρήθηκε να καθορίζεται μια μέγιστη δυνατή θερμοκρασία που μπορεί να μετρηθεί σε αυτήν. Έτσι, όταν στο μέλλον πρέπει να εξεταστεί ξανά η ίδια διάταξη, μπορεί κανείς να έχει ένα αναμενόμενο ανώτατο όριο της θερμοκρασίας που θα μετρήσει. Αν η νέα μέτρηση ξεπεράσει το μέγιστο καθορισμένο όριο θα πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτό και να διεξαχθούν οι απαραίτητες ενέργειες αποκατάστασης του προβλήματος, αν υπάρχει.

Τονίζεται ότι οι παραπάνω πρακτικές δεν περιορίζονται μόνο σε μετρήσεις ηλεκτρικών συστημάτων και διατάξεων. Μπορούν πολύ εύκολα να επεκταθούν και σε άλλες εφαρμογές, αφού γίνουν οι απαραίτητες προσαρμογές που πιθανώς απαιτούνται.

3.9 Κριτήρια επιλογής μιας θερμικής κάμερας

Από προηγούμενη παράγραφο είδαμε ότι οι θερμικές κάμερες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές. Όπως για κάθε προϊόν έτσι και εδώ, ένας υποψήφιος αγοραστής – χρήστης μιας θερμικής κάμερας, που δεν έχει πλήρη τεχνογνωσία του αντικειμένου, αντιμετωπίζει πρόβλημα στην επιλογή της κατάλληλης για τις ανάγκες του θερμικής κάμερας.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά τα κριτήρια που πρέπει να εξετάσει κανείς προκειμένου να καταλήξει στην καλύτερη δυνατή επιλογή θερμικής κάμερας. Αυτά είναι :

(1) Ανιχνευτές : οι ανιχνευτές αποτελούν την καρδιά της θερμικής κάμερας. Η τεχνολογία και η λειτουργία τους αναλύθηκε σε παραπάνω παράγραφο. Σημειώνεται και εδώ ότι πλεονεκτούν κατά πολύ οι FPA ανιχνευτές, οι οποίοι εξελίσσονται προκειμένου να εξαλειφθούν όποια προβλήματα προκύπτουν, ενώ νέες κατηγορίες ανιχνευτών αναπτύσσονται συνεχώς βάσει των FPA.

(2) Διατάξεις ψύξης των ανιχνευτών : οι ανιχνευτές γενικά πρέπει να μην υπερθερμαίνονται έτσι ώστε να είναι ευαίσθητοι ακόμα και σε μικρές θερμοκρασιακές διαφορές. Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιούταν ήταν μια ψυκτική διάταξη με υγρό άζωτο, αρκετά ογκώδης και δυσλειτουργική όμως με τα σημερινά δεδομένα. Μια από τις πιο μεταγενέστερες μεθόδους που επικράτησε είναι η θερμοηλεκτρική μέθοδος (TE method) γνωστή και ως μέθοδος Peltier. Με την μέθοδο αυτήν δεν απαιτούνταν διακίνηση κάποιου ψυκτικού υγρού ή αερίου, ενώ αύξησε κατά πολύ την διάρκεια ζώνης των ανιχνευτών. Παρόλο αυτά, λόγω κάποιων λειτουργικών μειονεκτημάτων η TE μέθοδος αυτή δεν αποτέλεσε την βέλτιστη λύση. Η πιο σύγχρονη τακτική θεωρείται η χρήση ανιχνευτών που δεν απαιτούν ύπαρξη ψυκτικών διατάξεων. Οι ανιχνευτές αυτοί βασίζονται στην τεχνολογία FPA.

(3) Μήκος κύματος και φίλτρα : στηριζόμενοι στο νόμο του Wien που αναφέρεται στην παράγραφο 3.2.4 μπορεί να γίνει η εξής κατηγοριοποίηση για το μήκος κύματος:

- συστήματα με δυνατότητες σε μικρά μήκη κύματος (3 – 5 μm) είναι κατάλληλα για μετρήσεις μέσων και υψηλών θερμοκρασιών (πάνω από 2000°C),
- αντίθετα, συστήματα με μεγαλύτερα μήκη κύματος (8 – 12 μm) θεωρούνται κατάλληλα για γενικές χρήσεις και εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών (πάνω από 500°C).

Όσον αφορά τα φίλτρα υπάρχει μια ευρεία γκάμα που μπορούν να βελτιώσουν κατά πολύ τις μετρήσεις και να αυξήσουν την ικανότητα μέτρησης μια θερμικής κάμερας, ανάλογα με την εφαρμογή. Ανατρέχοντας σε κατάλληλη βιβλιογραφία μπορεί κανείς επιλέξει αυτό που χρειάζεται (ενδεικτικά αναφέρεται το Instrument Engineer's Handbook, 3rd Edition, Chilton).

(4) Φακοί : το γυαλί είναι αδιαφανές στο υπέρυθρο φως, οπότε οι φακοί για τις θερμικές κάμερες κατασκευάζονται από υλικά που έχουν σαν βάση το γερμάνιο ή το πυρίτιο. Οι φακοί πρέπει να είναι λεπτοί, ικανοί να λειτουργούν σε περιπτώσεις μέσου που ευνοεί τις απώλειες ενέργειας και η εστιακή απόσταση πρέπει να είναι σταθερή. Όλα αυτά καθιστούν τους φακούς ένα ακριβό συστατικό σε μια κάμερα, αν και διατίθενται και αρκετά φτηνοί φακοί από πλαστικό.

Παρόμοια με τις συμβατικές κάμερες, συναντάμε και στην περίπτωση των θερμικών καμερών τηλεφακούς ή ευρυγώνιους φακούς που σε πολλές περιπτώσεις εξασφαλίζουν πολύ βελτιωμένη ορατότητα.

(5) Εκπεμπικότητα : η έννοια της εκπεμπικότητας αναλύθηκε διεξοδικά σε παραπάνω παράγραφο. Αναφέρουμε μόνο ότι υπάρχουν πίνακες όπου μπορεί να

ανατρέξει κανείς ώστε να βρει την τιμή της εκπεμπικότητας για κάποιο συγκεκριμένο υλικό (βλ. Παράρτημα Α). Σημειώνεται ότι συνήθως μια περιοχή – στόχος που θέλουμε να μετρήσουμε αποτελείται από περισσότερα από ένα υλικά με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να ρυθμιστεί σωστά η εκπεμπικότητα. Υπάρχουν κατάλληλα πακέτα λογισμικού που μπορούν να βοηθήσουν στην διόρθωση της εκπεμπικότητας, ενώ κάποιες κάμερες έχουν λειτουργία που επιτρέπει αυτή την διόρθωση την ώρα των μετρήσεων.

(6) Αντοχή : όπως για κάθε άλλη συσκευή, έτσι και για μια θερμική κάμερα κάποιες από τις παραμέτρους που κρίνουν την αντοχή της είναι : η ανθεκτικότητα στις μηχανικές καταπονήσεις, η καλή λειτουργία σε περιοχές υψηλού υψομέτρου, η καλή λειτουργία σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η επίδραση που έχει η υγρασία, η σκόνη και άλλες ουσίες που μπορεί να εκτεθεί η θερμική κάμερα.

Γενικά, οι θερμικές κάμερες θεωρείται ότι δεν χρειάζονται συντήρηση, ενώ είναι πιθανό να χρειάζονται ετήσια βαθμονόμηση ως προς ένα ιδανικό μέλαν σώμα.

(7) Έξοδος : οι σύγχρονες θερμικές κάμερες έχουν ενσωματωμένο σύστημα ψηφιοποίησης των εικόνων που λαμβάνουν. Έχουν την δυνατότητα σύνδεσης με έναν απλό οικιακό υπολογιστή όπου μπορούν να αποθηκευτούν οι εικόνες και ακολούθως να της επεξεργαστεί κανείς χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό. Οι εικόνες αυτές μπορούν να εισαχθούν σε αναφορές σαν απλές εικόνες.

(8) Φορητότητα : οι θερμικές κάμερες προορίζονται για χρήση σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους. Είναι λοιπόν προφανές ότι θα πρέπει να είναι εύκολη η μετακίνησή τους. Τα περισσότερα μοντέλα που κυκλοφορούν στην αγορά δεν ζυγίζουν πολύ, ενώ συνοδεύονται με ειδικά διαμορφωμένες θήκες μεταφοράς. Οι κατασκευαστές προσπαθούν συνεχώς να μειώσουν τον όγκο των θερμικών καμερών, διατηρώντας σταθερή την καλή τους λειτουργία.

Κεφάλαιο 4^ο

Μετρήσεις σε Εναέριους Υποσταθμούς Διανομής

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε εναέριους υποσταθμούς διανομής με χρήση θερμικής κάμερας τύπου FLUKE Flexcam Ti45. Συγκεκριμένα, λάβαμε δείγμα 12 εναέριων υποσταθμών στον Δήμο Αγίων Αναργύρων Αττικής και δείγμα 7 υποσταθμών στην περιοχή του Δήμου Ζωγράφου Αττικής. Αντικείμενο των μετρήσεων ήταν οι μετασχηματιστές των υποσταθμών καθώς και οι διατάξεις των ασφαλειών – αλεξικέραυνων.

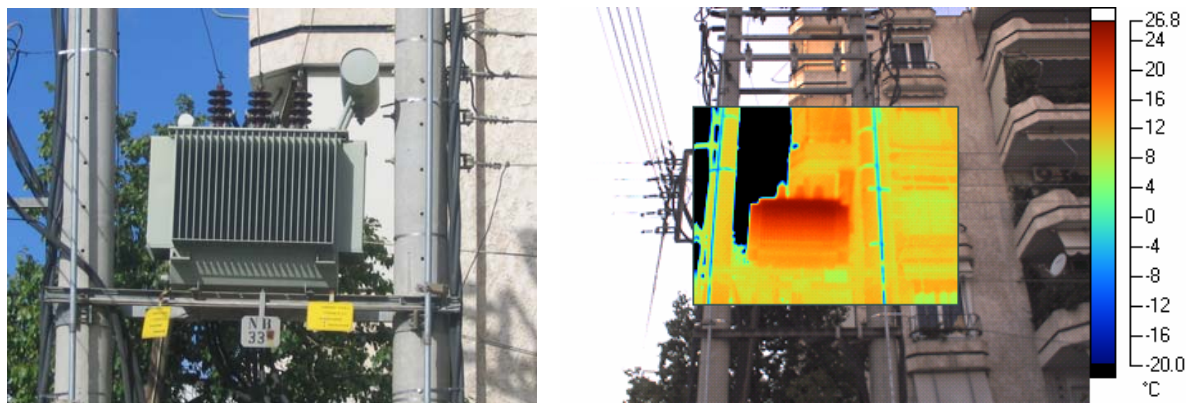
4.1 Παρουσίαση των μετρήσεων

Για τις μετρήσεις που ελήφθησαν παρατίθενται οι θερμικές εικόνες των διατάξεων που εξετάστηκαν (με την κάμερα FLUKE Flexcam Ti45), οι συμβατικές τους φωτογραφίες, οι συνθήκες του περιβάλλοντος κατά την στιγμή των μετρήσεων (θερμοκρασία και σχετική υγρασία του περιβάλλοντος) και τέλος τα στοιχεία του υποσταθμού (αριθμός και ονομαστική ισχύς).

4.1.1 Μετρήσεις στον Δήμο Αγίων Αναργύρων

(1) Αριθμός υποσταθμού : NB 33

Οδός : Γ. Παπανδρέου και Περικλέους



Εικόνα 4.1.1α : Μετασχηματιστής του 1^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος - 9 °C, Σχετική υγρασία - 39,7 %

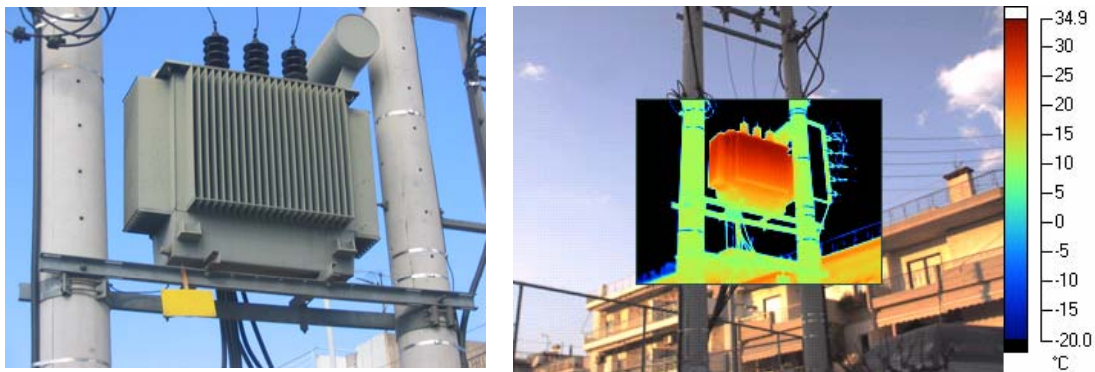
Βάσει της θερμικής εικόνας παρατηρείται στον μετασχηματιστή μέγιστη θερμοκρασία 25 °C περίπου.



Εικόνα 4.1.1β : Διάταξη ασφαλειών του 1^{ου} υποσταθμού.

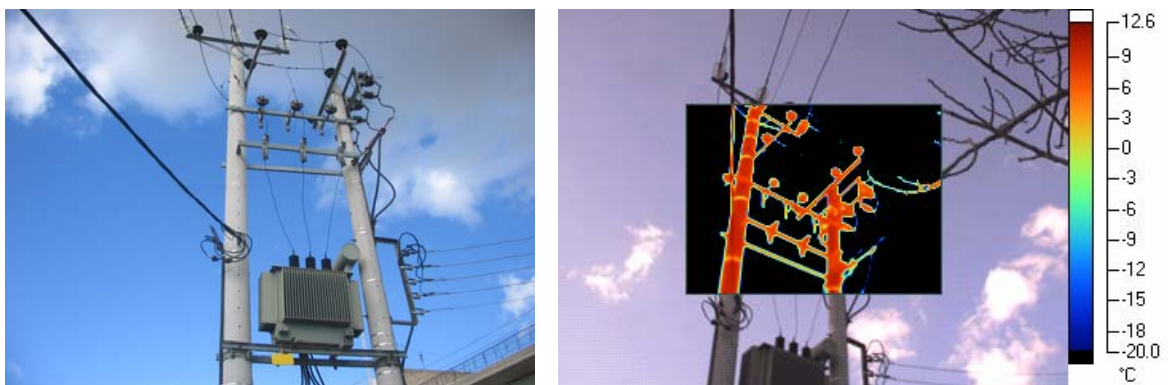
Από την θερμική εικόνα διακρίνεται μέγιστη θερμοκρασία 10 °C περίπου στις ασφάλειες του υποσταθμού.

(2) Αριθμός υποσταθμού : NB 7
Οδός : Γ. Παπανδρέου και Σουλίου



Εικόνα 4.1.2α : Μετασχηματιστής του 2^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 8,4 °C, Σχετική υγρασία – 38,9 %

Στον μετασχηματιστή εμφανίζεται μέγιστη θερμοκρασία 32 °C περίπου



Εικόνα 4.1.2β : Διάταξη ασφαλειών του 2^{ου} υποσταθμού

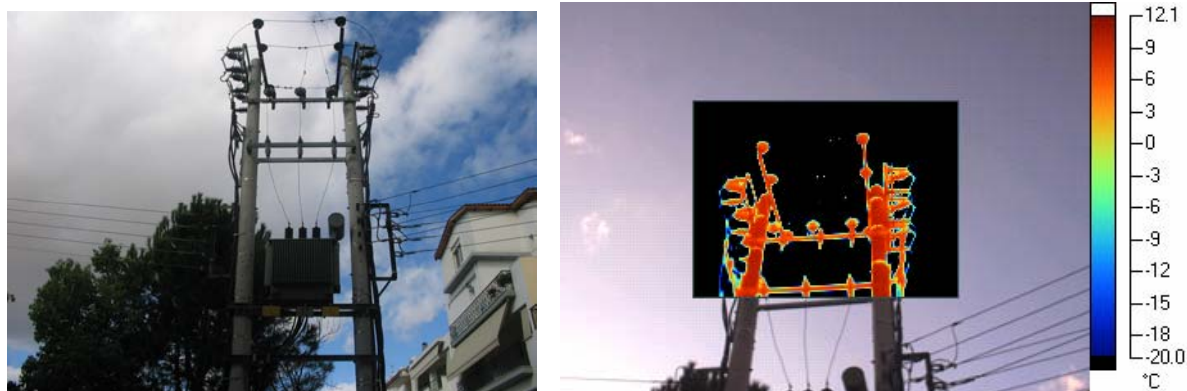
Παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία περίπου 11 °C στις ασφάλειες του υποσταθμού.

(3) Αριθμός υποσταθμού : NB 74
Οδός : Καλύμνου – Πλατεία Άρη Βελουχιώτη



Εικόνα 4.1.3α : Μετασχηματιστής του 3^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 8,9 °C, Σχετική υγρασία – 39,1 %

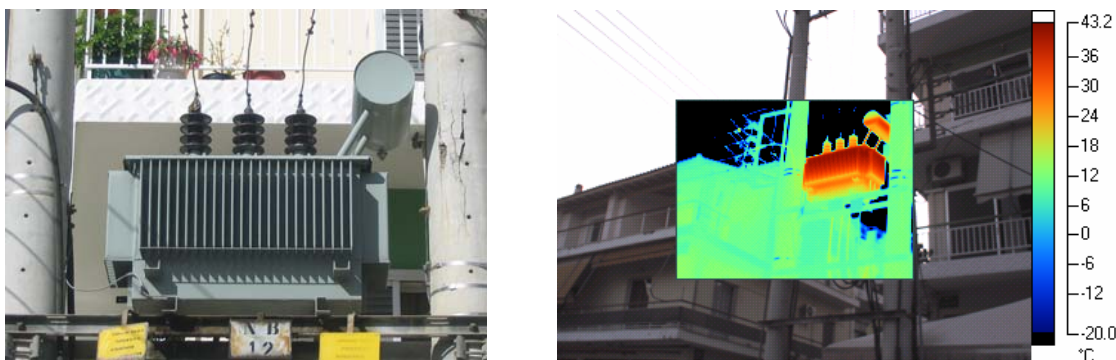
Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 30 °C περίπου.



Εικόνα 4.1.3β : Διάταξη ασφαλειών του 3^{ου} υποσταθμού

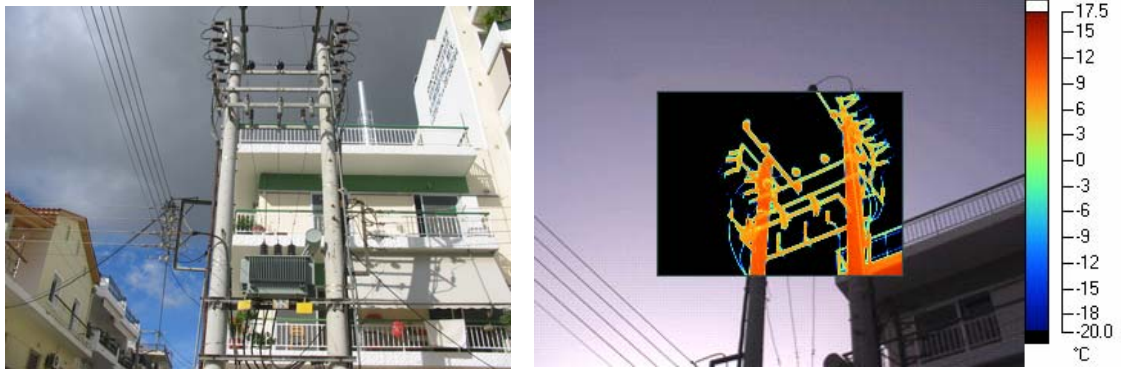
Παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 11 °C περίπου στις ασφάλειες του υποσταθμού.

(4) Αριθμός υποσταθμού : NB 12
Οδός : Ακροπόλεως και Φαιστού



Εικόνα 4.1.4α : Μετασχηματιστής του 4^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 250 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 8,8 °C, Σχετική υγρασία – 39,5 %

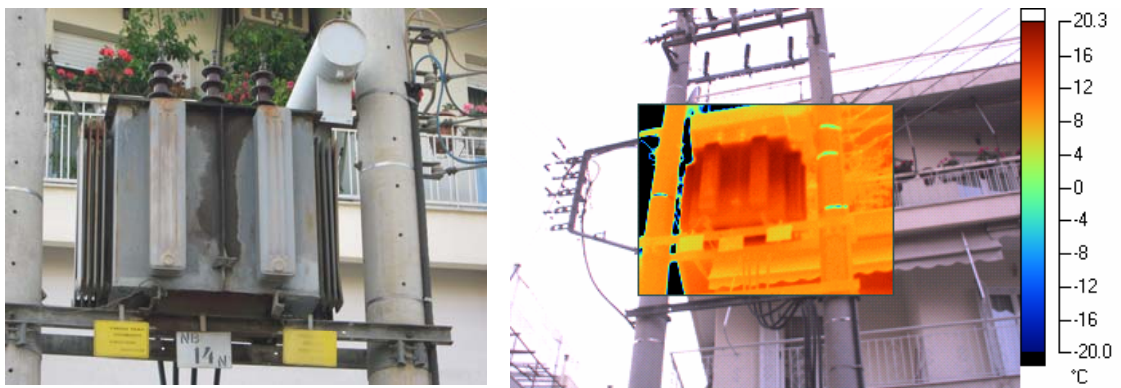
Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 40 °C περίπου.



Εικόνα 4.1.4β : Διάταξη ασφαλειών του 4^{ου} υποσταθμού

Παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία στις ασφάλειες του υποσταθμού 11 °C περίπου.

(5) Αριθμός υποσταθμού : NB 14 N
Οδός : Γ. Παπανδρέου και Μεσσηνίας



Εικόνα 4.1.5α : Μετασχηματιστής του 5^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 9 °C, Σχετική υγρασία – 39 %

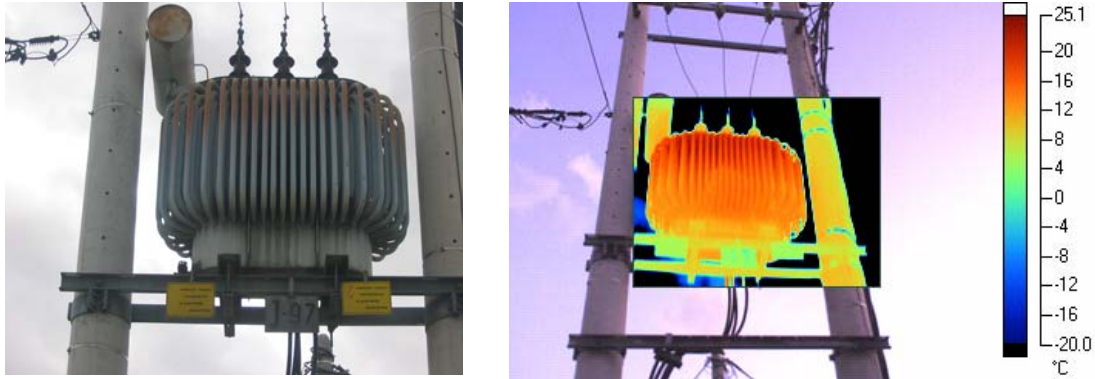
Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 20 °C περίπου.



Εικόνα 4.1.5β : Διάταξη ασφαλειών του 5^{ου} υποσταθμού

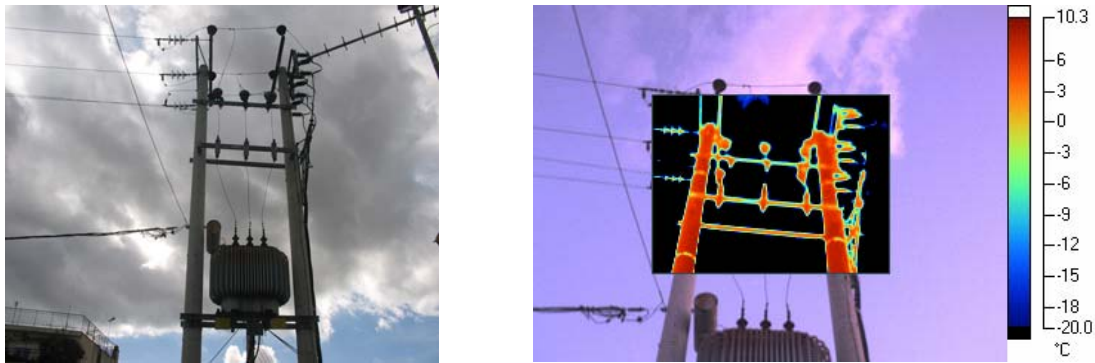
Στις ασφάλειες του υποσταθμού παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 10 °C περίπου.

(6) Αριθμός υποσταθμού : J 97
Οδός : Γ. Παπανδρέου και Σολωμού



Εικόνα 4.1.6α : Μετασχηματιστής του 6^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 9 °C, Σχετική υγρασία – 41,9 %

Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 20 °C περίπου.



Εικόνα 4.1.6β : Διάταξη ασφαλειών του 6^{ου} υποσταθμού

Στις ασφάλειες του υποσταθμού παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 9 °C περίπου.

(7) Αριθμός υποσταθμού : NB 2
Οδός : Ηπίρου και Σοφ. Βενιζέλου



Εικόνα 4.1.7α : Μετασχηματιστής του 7^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 8,5 °C, Σχετική υγρασία – 40 %

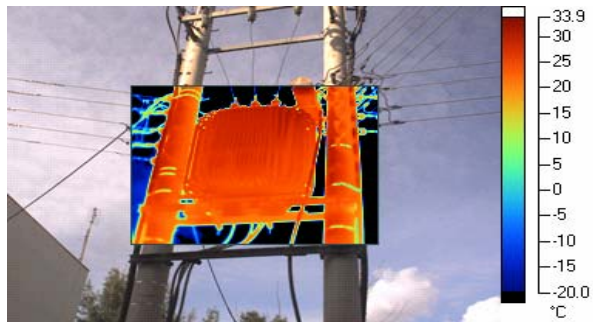
Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 25 °C περίπου.



Εικόνα 4.1.7β : Διάταξη ασφαλειών του 7^{ου} υποσταθμού

Στις ασφάλειες του υποσταθμού παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 9 °C περίπου.

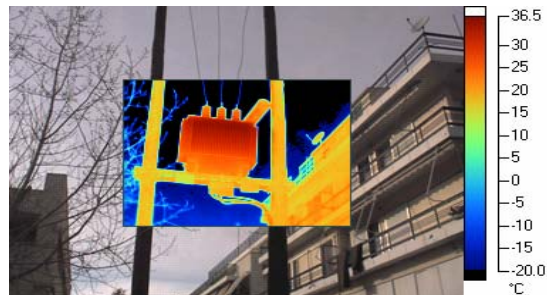
(8) Αριθμός υποσταθμού : NB 50 N
Οδός : Ικάρων και Δερβενακίων



Εικόνα 4.1.8α : Μετασχηματιστής του 8^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 18,1 °C, Σχετική υγρασία – 29,5 %

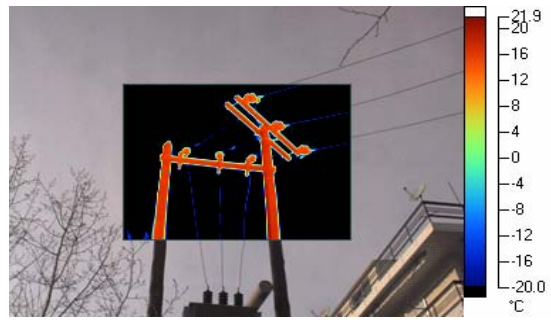
Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 28 °C περίπου, ενώ στις ασφάλειες του υποσταθμού μετρήθηκε μέγιστη θερμοκρασία 23 °C περίπου.

(9) Αριθμός υποσταθμού : NB 39
Οδός : Πάρνηθος και Χίου



Εικόνα 4.1.9α : Μετασχηματιστής του 9^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 19 °C, Σχετική υγρασία – 27,5 %

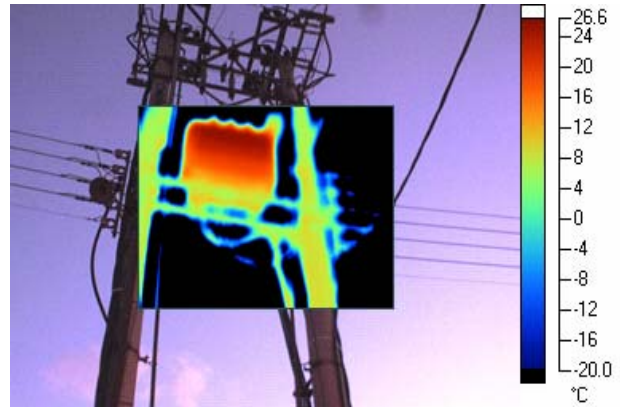
Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 32 °C περίπου.



Εικόνα 4.1.9β : Διάταξη ασφαλειών του 9^{ου} υποσταθμού

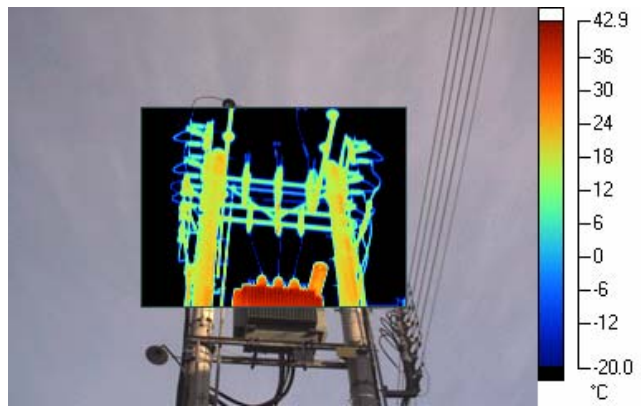
Στις ασφάλειες του υποσταθμού μετρήθηκε μέγιστη θερμοκρασία 20 °C περίπου.

(10) Αριθμός υποσταθμού : NB 8
Οδός : Κένεντυ και Καλύμνου



Εικόνα 4.1.10α : Μετασχηματιστής του 10^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 18,3 °C, Σχετική υγρασία – 26,5 %

Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 38 °C περίπου.



Εικόνα 4.1.10β : Διάταξη ασφαλειών του 10^{ου} υποσταθμού

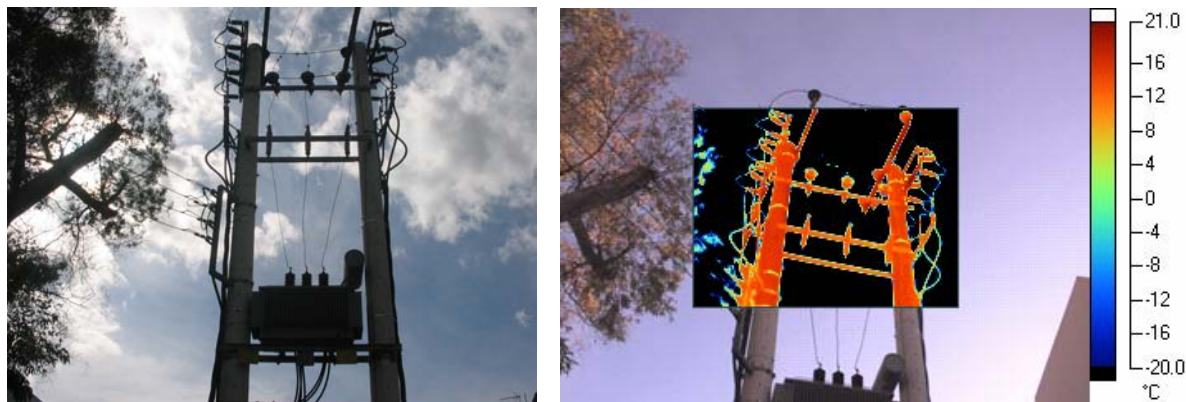
Στις ασφάλειες του υποσταθμού έχουμε μέγιστη θερμοκρασία 22 °C περίπου.

(11) Αριθμός υποσταθμού : NB 95
Οδός : Σύρου και Σοφ. Βενιζέλου



Εικόνα 4.1.11α : Μετασχηματιστής του 11^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 250 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 17,5 °C, Σχετική υγρασία – 28,7 %

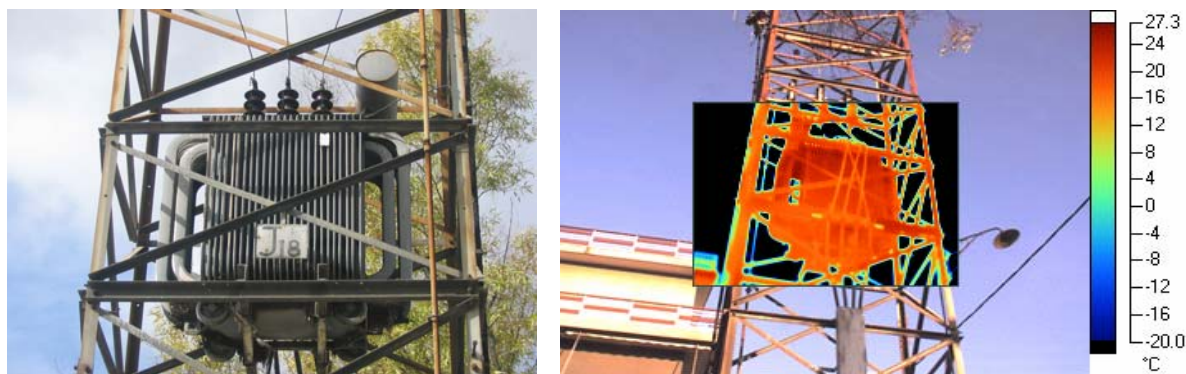
Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 25 °C περίπου.



Εικόνα 4.1.11β : Διάταξη ασφαλειών του 11^{ου} υποσταθμού

Στις ασφάλειες του υποσταθμού παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 18 °C περίπου.

(12) Αριθμός υποσταθμού : J 18
Οδός : Αγ. Αναργύρων και Αλ. Παπάγου



Εικόνα 4.1.12α : Μετασχηματιστής του 12^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 16 °C, Σχετική υγρασία – 32,5 %

Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 23 °C περίπου.



Εικόνα 4.1.12β : Διάταξη ασφαλειών του 12^{ου} υποσταθμού

Στις ασφάλειες του υποσταθμού έχουμε μέγιστη θερμοκρασία 18 °C περίπου.

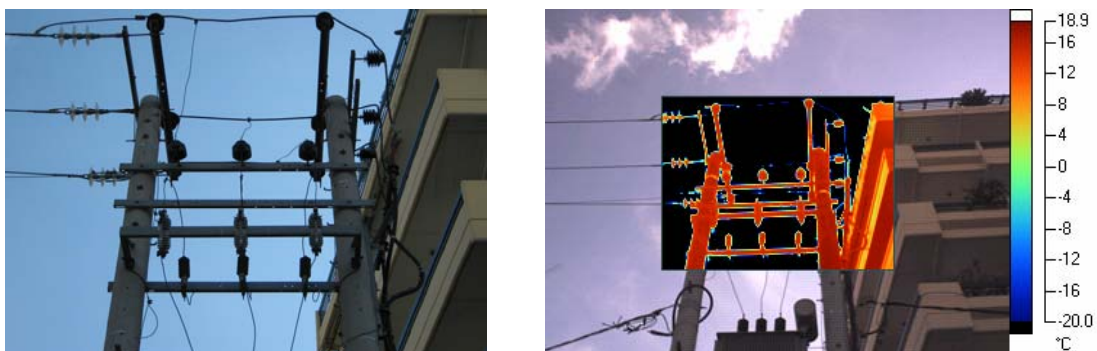
4.1.2 Μετρήσεις στον Δήμο Ζωγράφου

(1) Αριθμός υποσταθμού : AZ 32
Οδός : Σμύρνης και Χλόης



Εικόνα 4.2.1α : Μετασχηματιστής του 1^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 16 °C, Σχετική υγρασία – 32,7 %

Παρατηρείται στον μετασχηματιστή μέγιστη θερμοκρασία 24 °C περίπου.



Εικόνα 4.2.1β : Διάταξη ασφαλειών του 1^{ου} υποσταθμού

Στις ασφάλειες του υποσταθμού παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 17 °C περίπου.

(2) Αριθμός υποσταθμού : AZ 75

Οδός : Ηρ. Πολυτεχνείου και Μακρυγιάννη



Εικόνα 4.2.2α : Μετασχηματιστής του 2^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 16,6 °C, Σχετική υγρασία – 37,7 %

Παρατηρείται στον μετασχηματιστή έχουμε μέγιστη θερμοκρασία 22 °C περίπου.



Εικόνα 4.2.2β : Διάταξη ασφαλειών του 2^{ου} υποσταθμού

Στις ασφάλειες του υποσταθμού παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 17,5 °C περίπου.

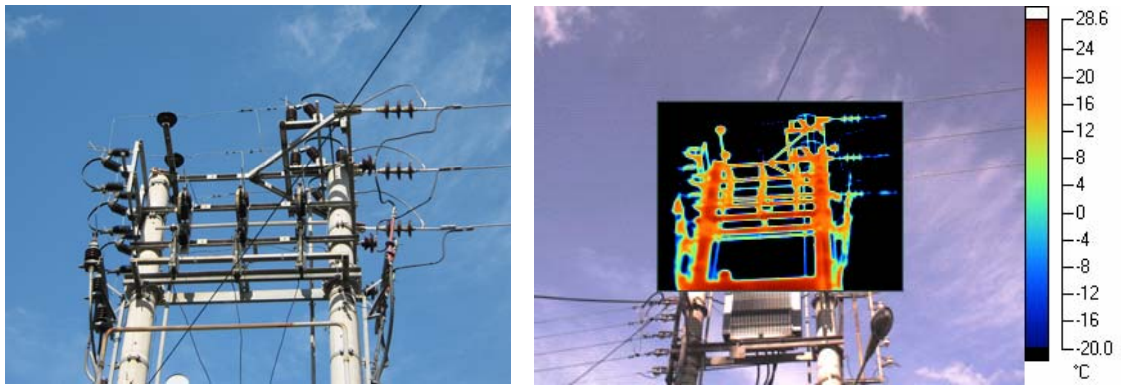
(3) Αριθμός υποσταθμού : AZ 27

Οδός : Πλαστήρα και Κουσίδη



Εικόνα 4.2.3α : Μετασχηματιστής του 3^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 15,8 °C, Σχετική υγρασία – 38 %

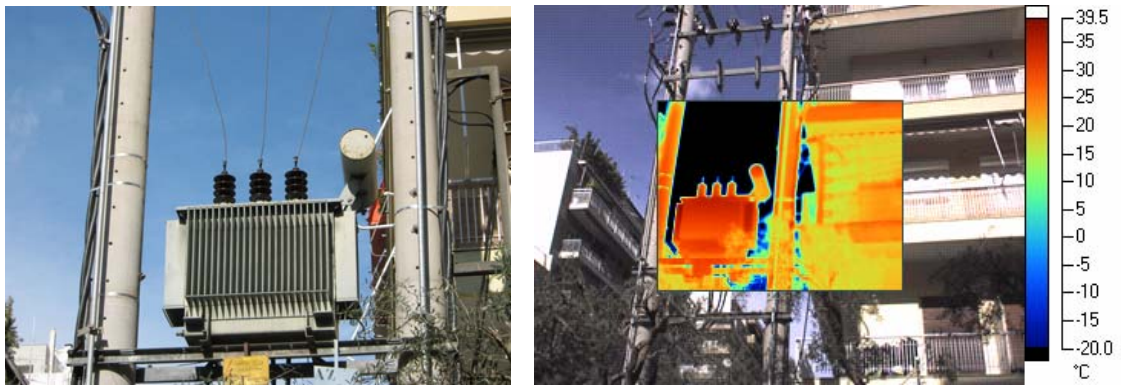
Παρατηρείται στον μετασχηματιστή μέγιστη θερμοκρασία 25 °C περίπου.



Εικόνα 4.2.3β : Διάταξη ασφαλειών του 3^{ου} υποσταθμού

Στις ασφάλειες του υποσταθμού μετρήθηκε μέγιστη θερμοκρασία 20 °C περίπου.

(4) Αριθμός υποσταθμού : AZ 58
Οδός : Κουσίδη και Μακρυγιάννη



Εικόνα 4.2.4α : Μετασχηματιστής του 4^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 16,1 °C, Σχετική υγρασία – 37,8 %

Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 31 °C περίπου.



Εικόνα 4.2.4β : Διάταξη ασφαλειών του 4^{ου} υποσταθμού

Στις ασφάλειες του υποσταθμού παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 22 °C περίπου.

(5) Αριθμός υποσταθμού : AZ 67
Οδός : Κουσίδη και Ανδρούτσου



Εικόνα 4.2.5α : Μετασχηματιστής του 5^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 15,7 °C, Σχετική υγρασία – 38 %

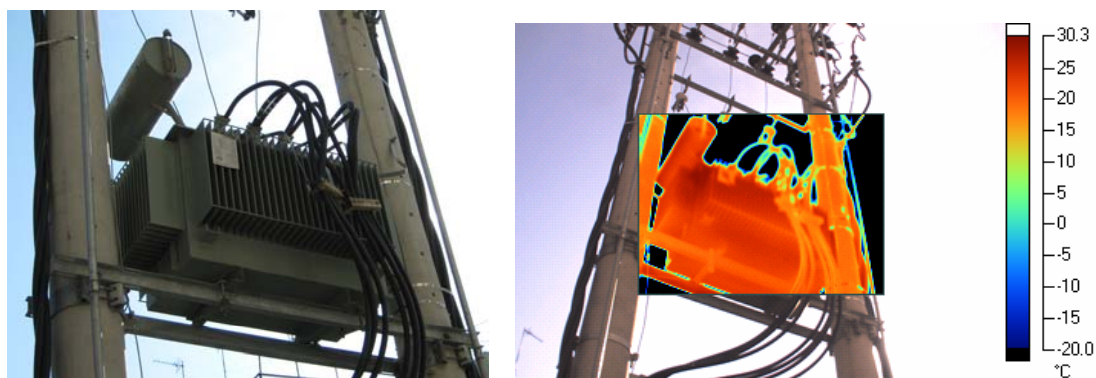
Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 25,5 °C περίπου.



Εικόνα 4.2.5β : Διάταξη ασφαλειών του 5^{ου} υποσταθμού

Στις ασφάλειες του υποσταθμού μετρήθηκε μέγιστη θερμοκρασία 21 °C περίπου.

(6) Αριθμός υποσταθμού : - (δεν υπήρχε πινακίδα)
Οδός : Παπάγου και Αγ. Γεωργίου



Εικόνα 4.2.6α : Μετασχηματιστής του 6^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 250 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 16,1 °C, Σχετική υγρασία – 39,2 %

Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 26 °C περίπου.



Εικόνα 4.2.6β : Διάταξη ασφαλειών του 6^{ου} υποσταθμού

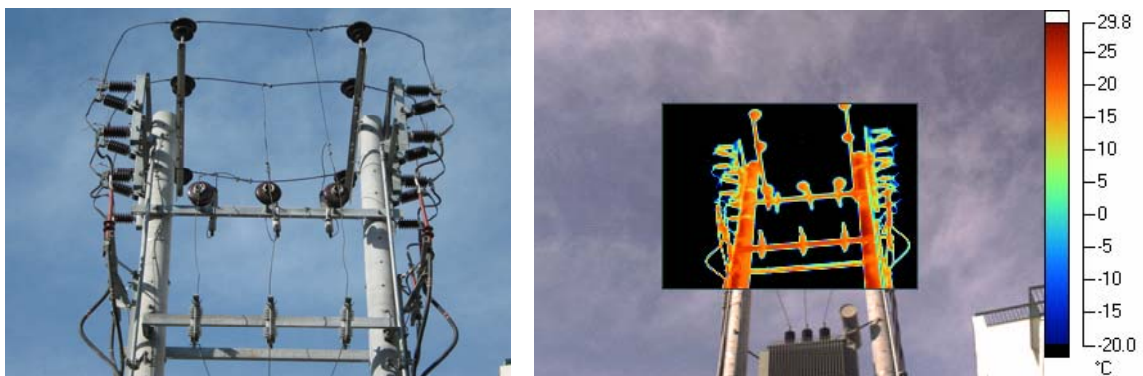
Στις ασφάλειες του υποσταθμού παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 21 °C περίπου.

(7) Αριθμός υποσταθμού : - (δεν υπήρχε πινακίδα)
Οδός : Ευθ. Κλάδου και Ηρ. Πολυτεχνείου



Εικόνα 4.2.7α : Μετασχηματιστής του 7^{ου} υποσταθμού : Ισχύς - 400 KVA,
Θερμοκρασία περιβάλλοντος – 16,4 °C, Σχετική υγρασία – 36,1 %

Στον μετασχηματιστή παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 28 °C περίπου.



Εικόνα 4.2.7β : Διάταξη ασφαλειών του 7^{ου} υποσταθμού

Στις ασφάλειες του υποσταθμού παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασία 23 °C περίπου.

4.2 Επεξεργασία των μετρήσεων

Από τις θερμικές εικόνες – μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, γίνεται διερεύνηση του κατά πόσο οι μετασχηματιστές των υποσταθμών λειτουργούν κοντά στην ονομαστική τους φόρτιση. Για να προκύψουν τα ζητούμενα αποτελέσματα ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία :

Για την ενεργό ισχύ του μετασχηματιστή γενικά ισχύει η σχέση :

$$P = I^2 \cdot R = k \cdot A \cdot \Delta\theta \quad (4.1)$$

όπου k και A είναι σταθερές, I και R το ρεύμα και η αντίσταση του μετασχηματιστή, ενώ $\Delta\theta$ είναι η διαφορά της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή ($\theta_{M\Sigma}$) από την θερμοκρασία περιβάλλοντος ($\theta_{περ}$).

Αντίστοιχα, για την ονομαστική ενεργό ισχύ θα είναι :

$$P_N = I_N^2 \cdot R = k \cdot A \cdot \Delta\theta_N \quad (4.2)$$

όπου I_N το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή και $\Delta\theta_N = 55$ °C.

Διαιρώντας τις παραπάνω σχέσεις κατά μέλη προκύπτει η σχέση :

$$I = I_N \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_N}\right)}, \quad (4.3)$$

από την οποία θα υπολογιστεί το ρεύμα για κάθε μετασχηματιστή που μετρήθηκε.

Οι μετασχηματιστές είναι συνδεσμολογίας τρίγωνο – αστέρα, με το τρίγωνο να είναι στην μεριά της μέσης τάσης των 20 kV και ο αστέρας στην μεριά της χαμηλής τάσης των 230/400 V. Για το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή στην μεριά της μέσης τάσης ισχύει :

$$S_N = \sqrt{3} \cdot V_{\Pi} \cdot I_N \Rightarrow I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot V_{\Pi}}, \quad (4.4)$$

με S_N την ονομαστική φαινομένη ισχύ του μετασχηματιστή, που για τους υποσταθμούς που εξετάστηκαν ήταν κυρίως 400 kVA και 250 kVA σε λίγες περιπτώσεις.

Τα αποτελέσματα για τους μετασχηματιστές που μετρήθηκαν φαίνονται συγκεντρωτικά παρακάτω ανά περιοχή:

- *Δήμος Αγ. Αναργύρων*

Αριθμός Υ/Σ	S _N (kVA)	I _N (A)	Δθ (°C)	I _{M/Σ} (A)
NB 33	400	11,55	16	6,23
NB 7	400	11,55	23,6	7,56
NB 74	400	11,55	21,1	7,15
NB 12	250	7,22	31,2	5,44
NB 14 N	400	11,55	11	5,16
J 97	400	11,55	11	5,16
NB 2	400	11,55	16,5	6,32
NB 50 N	400	11,55	9,9	4,90
NB 39	400	11,55	13	5,61
NB 8	400	11,55	19,7	6,91
NB 95	250	7,22	7,5	2,67
J 18	400	11,55	7	4,12

- *Δήμος Ζωγράφου*

Αριθμός Υ/Σ	S _N (kVA)	I _N (A)	Δθ (°C)	I _{M/Σ} (A)
AZ 32	400	11,55	8	4,40
AZ 75	400	11,55	5,4	3,62
AZ 27	400	11,55	9,2	4,72
AZ 58	400	11,55	14,9	6,01
AZ 67	400	11,55	9,8	4,87
Παπάγου και Αγ. Γεωργίου	250	7,22	9,9	3,06
Ευθ. Κλάδου και Ηρ. Πολυτεχνείου	400	11,55	11,6	5,30

Επιπρόσθετα, είναι επιθυμητός και ο έλεγχος του κατά πόσο η θερμική κάμερα που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια διατάξεις μικρής επιφάνειας όπως είναι οι ασφάλειες των υποσταθμών. Έτσι, με παρόμοιο τρόπο από τις σχέσεις 4.1 – 4.4 υπολογίστηκε το ρεύμα που ρέει στις ασφάλειες και στην συνέχεια στους μετασχηματιστές, αφού είναι συνδεδεμένοι σε σειρά μετά τις διατάξεις προστασίας.

Έτσι, για κάθε περιοχή θα είναι :

- *Δήμος Αγ. Αναργύρων*

Αριθμός Υ/Σ	S _N (kVA)	I _N (A)	Δθ (°C)	I _{ΑΣΦ} (A)
NB 33	400	11,55	1	1,56
NB 7	400	11,55	2,6	2,51
NB 74	400	11,55	2,1	2,26
NB 12	250	7,22	2,2	1,44
NB 14 N	400	11,55	1	1,56
J 97	400	11,55	0,5	1,10
NB 2	400	11,55	0,5	1,10
NB 50 N	400	11,55	4,9	3,45
NB 39	400	11,55	1	1,56
NB 8	400	11,55	3,7	2,99
NB 95	250	7,22	0,5	0,69
J 18	400	11,55	2	2,20

- Δήμος Ζωγράφου

Αριθμός Υ/Σ	S_N (kVA)	I_N (A)	$\Delta\theta$ (°C)	$I_{\Lambda\Sigma\Phi}$ (A)
AZ 32	400	11,55	1	1,56
AZ 75	400	11,55	0,9	1,48
AZ 27	400	11,55	4,2	3,19
AZ 58	400	11,55	5,9	3,78
AZ 67	400	11,55	5,3	3,58
Παπάγου και Αγ. Γεωργίου	250	7,22	4,9	2,15
Ευθ. Κλάδου και Ηρ. Πολυτεχνείου	400	11,55	6,6	4,00

4.3 Συμπεράσματα

Από τις παραπάνω μετρήσεις και από τους υπολογισμούς που ακολούθησαν παρατηρούνται τα εξής :

- Σχεδόν όλοι οι μετασχηματιστές των υποσταθμών που εξετάστηκαν λειτουργούν κάτω από το 50 % της ονομαστικής τους φόρτισης. Μπορεί κανείς να υποθέσει πως κατά την μελέτη του δικτύου διανομής υπάρχει υπερεκτίμηση του φορτίου των δυο Δήμων και συνεπώς υψηλότερο και αδικαιολόγητο κόστος από το αναγκαίο. Προκειμένου όμως να έχει ισχυρότερη βάση αυτή η υπόθεση είναι απαραίτητη η εξέταση των ίδιων υποσταθμών κατά την θερινή περίοδο και σε ώρες κατά τις οποίες θα υπάρχει αυξημένη λειτουργία των ενεργοβόρων κλιματιστικών.
- Το ρεύμα που ρέει στις ασφάλειες ($I_{\Lambda\Sigma\Phi}$) δεν είναι ίδιο με αυτό που ρέει στον μετασχηματιστή ($I_{M\Sigma}$), παρόλο που οι δυο διατάξεις είναι συνδεδεμένες σε σειρά. Συμπεραίνεται λοιπόν πως η θερμική κάμερα που χρησιμοποιήθηκε δεν παρέχει αρκετή ακρίβεια για μετρήσεις σε διατάξεις μικρής επιφάνειας όπως είναι οι ασφάλειες των εναέριων υποσταθμών διανομής. Φυσικά, τα αποτελέσματα μας θα ήταν περισσότερο ακριβή αν υπήρχε η δυνατότητα να προσεγγίσει κανείς πολύ κοντά στις ασφάλειες.

Βιβλιογραφία

- [1] Β.Κ. Τσόλκας, Σ.Α. Τυρέκογλου – Διπλωματική εργασία “Μετρήσεις της Θερμοκρασίας Λειτουργίας των Μετασχηματιστών του Δικτύου Διανομής”, ΕΜΠ, Αθήνα Σεπτέμβριος 2008.
- [2] Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος - “Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και Υλικά”, ΕΜΠ, Αθήνα 2003
- [3] Γ.Κ. Ανεμογιάννης – “Ηλεκτροτεχνία τόμος Γ-Παραγωγή, Μεταφορά, Διανομή Ρεύματος – Ηλεκτρικές Μετρήσεις”, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα 1970
- [4] Ι.Α. Τεγόπουλος – “Ηλεκτρικές Μηχανές-Μέρος Β-Μόνιμη Κατάσταση”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
- [5] Τεχνικό Τετράδιο n° 2 “Μετασχηματιστές Διανομής Λαδιού ΕΛΒΗΜ-Χρήση και Συντήρηση”, Schneider Electric
- [6] Ο. Ζώγου – “Θερμομετρία-Θερμογραφία”, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας – Πολυτεχνική Σχολή – Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Βόλος 2007
- [7] American Society for Testing and Materials - “Annual book of ASTM standards, Section 3, Metals test measurements”, 1999
- [8] Maldague, Xavier P.V – “Infrared methodology and technology”, 1994
- [9] Maldague, Xavier P.V – “Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography”, 1993
- [10] “Identifying energy savings with thermal imaging”, Carbon Trust
- [11] M.K. Sharma, C.B. Mehta, R.B. Desai, N.J. Buch, A.K. Singh – “Infrared Thermography of Electrical Equipment – An Excellent NDT Tool for Condition Assessment of Power Transformers”, ERDA India
- [12] S.P. Garnaik – “Infrared Thermography : A Versatile Technology for Conditioning Monitoring and Energy Conservation”, NPC, Kanpur, India
- [13] Fluke corporation – “Thermal Applications : Monitoring Transformers”
- [14] Fluke corporation – “Solving Electrical Problems with Thermal Imaging”
- [15] Fluke corporation – “Detecting Electrical Unbalance and Overloads”
- [16] Fluke corporation – “Detecting Loose or Corroded Electrical Connections”
- [17] Fluke corporation – “Applying Infrared Thermography to Predictive Maintenance”
- [18] Fluke corporation – “Inspecting Electric motors”

- [19] FLIR – “Accurate Precision Infrared Solutions”
- [20] Micro Epsilon – “More precision : Basics of Noncontact Temperature Measurements, Infrared Thermometers and Thermal Imagers”
- [21] R. Repas – “Hot Tips on Thermal Imaging”, Machine Design, 2007
- [22] J.W Stahlhut, G.T Heydt, N. J Selover – “A Preliminary Assessment of the Impact of Ambient Temperature Rise on Distribution Transformer Loss of Life”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, N° 4, October 2008
- [23] S.K. Ghosh, P.J Galeski – “Criteria for Selection of Infrared Camera System”, IEEE, 1994
- [24] T.A Short – “Electric Power Distribution Equipment and Systems”, Taylor & Francis Group, 2006
- [25] L.L Grigsby – “Electric Power Generation, Transmission and Distribution”, CRC Press, 2006
- [26] “Electric Power Transformer Engineering”, CRC Press, 2004

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας Α1 : Τιμές εκπεμπικότητας υλικών	87
Πίνακας Α2 : Απώλειες φορτίου μετασχηματιστών διανομής.....	91
Πίνακας Α3 : Προδιαγραφές Μετασχηματιστών.....	92
Πίνακας Α4 : Ανοχές εγγυημένων τιμών μετασχηματιστών	92
Πίνακας Α5 : Υπερφόρτιση μετασχηματιστών	92

Πίνακες Α1 : Τιμές εκπεμπικότητας υλικών

ΜΕΤΑΛΛΑ

Material	Temp °F (°C)	Ε-Emissivity
Alloys		
20-Ni, 24-CR, 55-FE, Oxid.	392 (200)	.90
20-Ni, 24-CR, 55-FE, Oxid.	932 (500)	.97
60-Ni, 12-CR, 28-FE, Oxid.	518 (270)	.89
60-Ni, 12-CR, 28-FE, Oxid.	1040 (560)	.82
80-Ni, 20-CR, Oxidized	212 (100)	.87
80-Ni, 20-CR, Oxidized	1112 (600)	.87
80-Ni, 20-CR, Oxidized	2372 (1300)	.89
Aluminium		
Unoxidized	77 (25)	.02
Unoxidized	212 (100)	.03
Unoxidized	932 (500)	.06
Oxidized	390 (199)	.11
Oxidized	1110 (599)	.19
Oxidized at 599°C (1110°F)	390 (199)	.11
Oxidized at 599°C (1110°F)	1110 (599)	.19
Heavily Oxidized	200 (93)	.20
Heavily Oxidized	940 (504)	.31
Highly Polished	212 (100)	.09
Roughly Polished	212 (100)	.18
Commercial Sheet	212 (100)	.09
Highly Polished Plate	440 (227)	.04
Highly Polished Plate	1070 (577)	.06
Bright Rolled Plate	338 (170)	.04
Bright Rolled Plate	932 (500)	.05
Alloy A3003, Oxidized	600 (316)	.40
Alloy A3003, Oxidized	900 (482)	.40
Alloy 1100-0	200-800 (93-427)	.05
Alloy 24ST	75 (24)	.09
Alloy 24ST, Polished	75 (24)	.09
Alloy 75ST	75 (24)	.11
Alloy 75ST, Polished	75 (24)	.08
Bismuth, Bright	176 (80)	.34
Bismuth, Unoxidized	77 (25)	.05
Bismuth, Unoxidized	212 (100)	.06
Brass		
73% Cu, 27% Zn, Polished	476 (247)	.03
73% Cu, 27% Zn, Polished	674 (357)	.03
62% Cu, 37% Zn, Polished	494 (257)	.03
62% Cu, 37% Zn, Polished	710 (377)	.04
83% Cu, 17% Zn, Polished	530 (277)	.03
Matte	68 (20)	.07
Burnished to Brown Colour	68 (20)	.40
Cu-Zn, Brass Oxidized	392 (200)	.61
Cu-Zn, Brass Oxidized	752 (400)	.60
Cu-Zn, Brass Oxidized	1112 (600)	.61
Unoxidized	77 (25)	.04
Unoxidized	212 (100)	.04
Cadmium	77 (25)	.02
Carbon		
Lampblack	77 (25)	.95
Unoxidized	77 (25)	.81
Unoxidized	212 (100)	.81
Unoxidized	932 (500)	.79
Candle Soot	250 (121)	.95
Filament	500 (260)	.95
Graphitized	212 (100)	.76
Graphitized	572 (300)	.75
Graphitized	932 (500)	.71
Chromium	100 (38)	.08
Chromium	1000 (538)	.26
Chromium, Polished	302 (150)	.06
Cobalt, Unoxidized	932 (500)	.13
Cobalt, Unoxidized	1832 (1000)	.23
Columbium, Unoxidized	1500 (816)	.19
Columbium, Unoxidized	2000 (1093)	.24
Copper		
Cuprous Oxide	100 (38)	.87
Cuprous Oxide	500 (260)	.83
Cuprous Oxide	1000 (538)	.77
Black, Oxidized	100 (38)	.78
Etched	100 (38)	.09
Matte	100 (38)	.22
Roughly Polished	100 (38)	.07

Material	Temp °F (°C)	Ε-Emissivity
Polished	100 (38)	.03
Highly Polished	100 (38)	.02
Rolled	100 (38)	.64
Rough	100 (38)	.74
Molten	1000 (538)	.15
Molten	1970 (1077)	.16
Molten	2230 (1221)	.13
Nickel Plated	100-500 (38-260)	.37
Dow Metal	0.4-600 (-18-316)	.15
Gold		
Enamel	212 (100)	.37
Plate (.0001)		
Plate on .0005 Silver	200-750 (93-399)	.11-.14
Plate on .0005 Nickel	200-750 (93-399)	.07-.09
Polished	100-500 (38-260)	.02
Polished	1000-2000 (538-1093)	.03
Haynes Alloy C,		
Oxidized	600-2000 (316-1093)	.90-.96
Haynes Alloy 25,		
Oxidized	600-2000 (316-1093)	.86-.89
Haynes Alloy X,		
Oxidized	600-2000 (316-1093)	.85-.88
Inconel Sheet	1000 (538)	.28
Inconel Sheet	1200 (649)	.42
Inconel Sheet	1400 (760)	.58
Inconel X, Polished	75 (24)	.19
Inconel B, Polished	75 (24)	.21
Iron		
Oxidized	212 (100)	.74
Oxidized	930 (499)	.84
Oxidized	2190 (1199)	.89
Unoxidized	212 (100)	.05
Red Rust	77 (25)	.70
Rusted	77 (25)	.65
Liquid	2760-3220 (1516-1771)	.42-.45
Cast Iron		
Oxidized	390 (199)	.64
Oxidized	1110 (599)	.78
Unoxidized	212 (100)	.21
Strong Oxidation	40 (104)	.95
Strong Oxidation	482 (250)	.95
Liquid	2795 (1535)	.29
Wrought Iron		
Dull	77 (25)	.94
Dull	660 (349)	.94
Smooth	100 (38)	.35
Polished	100 (38)	.28
Lead		
Polished	100-500 (38-260)	.06-.08
Rough	100 (38)	.43
Oxidized	100 (38)	.43
Oxidized at 1100°F	100 (38)	.63
Gray Oxidized	100 (38)	.28
Magnesium	100-500 (38-260)	.07-.13
Magnesium Oxide 1880-3140 (1027-1727)		.16-.20
Mercury	32 (0)	.09
*	77 (25)	.10
*	100 (38)	.10
*	212 (100)	.12
Molybdenum	100 (38)	.06
*	500 (260)	.08
*	1000 (538)	.11
*	2000 (1093)	.18
* Oxidized at 1000°F	600 (316)	.80
* Oxidized at 1000°F	700 (371)	.84
* Oxidized at 1000°F	800 (427)	.84
* Oxidized at 1000°F	900 (482)	.83
* Oxidized at 1000°F	1000 (538)	.82
Monel, Ni-Cu	392 (200)	.41
Monel, Ni-Cu	752 (400)	.44
Monel, Ni-Cu	1112 (600)	.46
Monel, Ni-Cu Oxidized	68 (20)	.43

Material	Temp °F (°C)	ε-Emissivity
Monel, Ni-Cu Oxid. at 1110°F	1110 (599)	.46
Nickel		
Polished	100 (38)	.05
Oxidized	100-500 (38-260)	.31-.46
Unoxidized	77 (25)	.05
Unoxidized	212 (100)	.06
Unoxidized	932 (500)	.12
Unoxidized	1832 (1000)	.19
Electrolytic	100 (38)	.04
Electrolytic	500 (260)	.06
Electrolytic	1000 (538)	.10
Electrolytic	2000 (1093)	.16
Nickel Oxide	1000-2000 (538-1093)	.59-.86
Palladium Plate (.00005 on .0005 silver)	200-750 (93-399)	.16-.17
Platinum	100 (38)	.05
"	500 (260)	.05
"	1000 (538)	.10
Platinum, Black	100 (38)	.93
"	500 (260)	.96
"	2000 (1093)	.97
" Oxidized at 1100°F	500 (260)	.07
"	1000 (538)	.11
Rhodium Flash (0.0002 on 0.0005 Ni)	200-700 (93-371)	.10-.18
Silver		
Plate (0.0005 on Ni)	200-700 (93-371)	.06-.07
Polished	100 (38)	.01
"	500 (260)	.02
"	1000 (538)	.03
"	2000 (1093)	.03
Steel		
Cold Rolled	200 (93)	.75-.85
Ground Sheet	1720-2010 (938-1099)	.55-.61
Polished Sheet	100 (38)	.07
"	500 (260)	.10
"	1000 (538)	.14
Mild Steel, Polished	75 (24)	.10
Mild Steel, Smooth	75 (24)	.12
Mild Steel, Liquid	2910-3270 (1599-1793)	.28
Steel, Unoxidized	212 (100)	.08
Steel, Oxidized	77 (25)	.80
Steel Alloys		
Type 301, Polished	75 (24)	.27
Type 301, Polished	450 (232)	.57
Type 301, Polished	1740 (949)	.55
Type 303, Oxidized	600-2000 (316-1093)	.74-.87
Type 310, Rolled	1500-2100 (816-1149)	.56-.81
Type 316, Polished	75 (24)	.28
Type 316, Polished	450 (232)	.57
Type 316, Polished	1740 (949)	.66
Type 321	200-800 (93-427)	.27-.32
Type 321 Polished	300-1500 (149-815)	.18-.49
Type 321 w/BK Oxide	200-800 (93-427)	.66-.76
Type 347, Oxidized	600-2000 (316-1093)	.87-.91
Type 350	200-800 (93-427)	.18-.27
Type 350 Polished	300-1800 (149-982)	.11-.35
Type 446, Polished	300-1500 (149-815)	.15-.37
Type 17-7 PH	200-600 (93-316)	.44-.51
Type 17-7 PH Polished	300-1500 (149-815)	.09-.16
Type C1020, Oxidized	600-2000 (316-1093)	.87-.91
Type PH-15-7 MO	300-1200 (149-649)	.07-.19
Stellite, Polished	68 (20)	.18
Tantalum, Unoxidized	1340 (727)	.14
"	2000 (1093)	.19
"	3600 (1982)	.26
"	5306 (2930)	.30
Tin, Unoxidized	77 (25)	.04
"	212 (100)	.05
Tinned Iron, Bright	76 (24)	.05
"	212 (100)	.08

Material	Temp °F (°C)	ε-Emissivity
Titanium		
Alloy C110M, Polished	300-1200 (149-649)	.08-.19
* Oxidized at 538°C (1000°F)	200-800 (93-427)	.51-.61
Alloy Ti-95A, Oxid. at 538°C (1000°F)	200-800 (93-427)	.35-.48
Anodized onto SS	200-600 (93-316)	.96-.82
Tungsten		
Unoxidized	77 (25)	.02
Unoxidized	212 (100)	.03
Unoxidized	932 (500)	.07
Unoxidized	1832 (1000)	.15
Unoxidized	2732 (1500)	.23
Unoxidized	3632 (2000)	.28
Filament (Aged)	100 (38)	.03
Filament (Aged)	1000 (538)	.11
Filament (Aged)	5000 (2760)	.35
Uranium Oxide	1880 (1027)	.79
Zinc		
Bright, Galvanized	100 (38)	.23
Commercial 99.1% Galvanized	500 (260)	.05
Galvanized	100 (38)	.28
Oxidized	500-1000 (260-538)	.11
Polished	100 (38)	.02
Polished	500 (260)	.03
Polished	1000 (538)	.04
Polished	2000 (1093)	.06

Material	Temp °F (°C)	ε-Emissivity
Adobe	68 (20)	.90
Asbestos		
Board	100 (38)	.96
Cement	32-392 (0-200)	.96
Cement, Red	2500 (1371)	.67
Cement, White	2500 (1371)	.65
Cloth	199 (93)	.90
Paper	100-700 (38-371)	.93
Slate	68 (20)	.97
Asphalt, pavement	100 (38)	.93
Asphalt, tar paper	68 (20)	.93
Basalt	68 (20)	.72
Brick		
Red, rough	70 (21)	.93
Gault Cream	2500-5000 (1371-2760)	.26-.30
Fire Clay	2500 (1371)	.75
Light Buff	1000 (538)	.80
Lime Clay	2500 (1371)	.43
Fire Brick	1832 (1000)	.75-.80
Magnesite, Refractory	1832 (1000)	.38
Gray Brick	2012 (1100)	.75
Silica, Glazed	2000 (1093)	.88
Silica, Unglazed	2000 (1093)	.80
Sandlime	2500-5000 (1371-2760)	.59-.63
Carborundum	1850 (1010)	.92
Ceramic		
Alumina on Inconel	800-2000 (427-1093)	.69-.45
Earthenware, Glazed	70 (21)	.90
Earthenware, Matte	70 (21)	.93
Greens No. 5210-2C	200-750 (93-399)	.89-.82
Coating No. C20A	200-750 (93-399)	.73-.67
Porcelain	72 (22)	.92
White Al ₂ O ₃	200 (93)	.90
Zirconia on Inconel	800-2000 (427-1093)	.62-.45
Clay	68 (20)	.39
* Fired	158 (70)	.91
* Shale	68 (20)	.69
* Tiles, Light Red	2500-5000 (1371-2760)	.32-.34
* Tiles, Red	2500-5000 (1371-2760)	.40-.51
* Tiles, Dark Purple	2500-5000 (1371-2760)	.78
Concrete		
Rough	32-2000 (0-1093)	.94
Tiles, Natural	2500-5000 (1371-2760)	.63-.62
* Brown	2500-5000 (1371-2760)	.87-.83
* Black	2500-5000 (1371-2760)	.94-.91
Cotton Cloth	68 (20)	.77
Dolomite Lime	68 (20)	.41
Emery Corundum	176 (80)	.86
Glass		
Convex D	212 (100)	.80
Convex D	600 (316)	.80
Convex D	932 (500)	.76
Nonex	212 (100)	.82
Nonex	600 (316)	.82
Nonex	932 (500)	.78
Smooth	32-200 (0-93)	.92-.94

Material	Temp °F (°C)	ε-Emissivity
Granite	70 (21)	.45
Gravel	100 (38)	.28
Gypsum	68 (20)	.80-.90
Ice, Smooth	32 (0)	.97
Ice, Rough	32 (0)	.98
Lacquer		
Black	200 (93)	.96
Blue, on Al Foil	100 (38)	.78
Clear, on Al Foil (2 coats)	200 (93)	.08 (.09)
Clear, on Bright Cu	200 (93)	.66
Clear, on Tarnished Cu	200 (93)	.64
Red, on Al Foil (2 coats)	100 (38)	.61 (.74)
White	200 (93)	.95
White, on Al Foil (2 coats)	100 (38)	.69 (.88)
Yellow, on Al Foil (2 coats)	100 (38)	.57 (.79)
Lime Mortar	100-500 (38-260)	.90-.92
Limestone	100 (38)	.95
Marble, White	100 (38)	.95
" Smooth, White	100 (38)	.56
" Polished Gray	100 (38)	.75
Mica	100 (38)	.75
Oil on Nickel		
0.001 Film	72 (22)	.27
0.002 "	72 (22)	.46
0.005 "	72 (22)	.72
Thick *	72 (22)	.82
Oil, Linseed		
On Al Foil, uncoated	250 (121)	.09
On Al Foil, 1 coat	250 (121)	.56
On Al Foil, 2 coats	250 (121)	.51
On Polished Iron, .001 Film	100 (38)	.22
On Polished Iron, .002 Film	100 (38)	.45
On Polished Iron, .004 Film	100 (38)	.65
On Polished Iron, Thick Film	100 (38)	.83
Paints		
Blue, Cu ₂ O ₃	75 (24)	.94
Black, CuO	75 (24)	.96
Green, Cu ₂ O ₃	75 (24)	.92
Red, Fe ₂ O ₃	75 (24)	.91
White, Al ₂ O ₃	75 (24)	.94
White, Y ₂ O ₃	75 (24)	.90
White, ZnO	75 (24)	.95
White, MgCO ₃	75 (24)	.91
White, ZrO ₂	75 (24)	.95
White, ThO ₂	75 (24)	.90
White, MgO	75 (24)	.91
White, PbCO ₃	75 (24)	.93
Yellow, PbO	75 (24)	.90
Yellow, PbCrO ₄	75 (24)	.93
Paints, Aluminium	100 (38)	.27-.67
10% Al	100 (38)	.52
26% Al	100 (38)	.30
Dow XP-310	200 (93)	.22
Paints, Bronze	Low	.34-.80
Gum Varnish (2 coats)	70 (21)	.53
Gum Varnish (3 coats)	70 (21)	.50
Cellulose Binder (2 coats)	70 (21)	.34

ΑΜΕΤΑΛΛΑ (συν.)

Material	Temp °F (°C)	ε-Emissivity
Paints, Oil		
All colors	200 (93)	.92-.96
Black	200 (93)	.92
Black Gloss	70 (21)	.90
Camouflage Green	125 (52)	.85
Flat Black	80 (27)	.88
Flat White	80 (27)	.91
Gray-Green	70 (21)	.95
Green	200 (93)	.95
Lamp Black	209 (98)	.96
Red	200 (93)	.95
White	200 (93)	.94
Quartz, Rough, Fused	70 (21)	.93
Glass, 1.98 mm	540 (282)	.90
Glass, 1.98 mm	1540 (838)	.41
Glass, 6.88 mm	540 (282)	.93
Glass, 6.88 mm	1540 (838)	.47
Opaque	570 (299)	.92
Opaque	1540 (838)	.68
Red Lead	212 (100)	.93
Rubber, Hard	74 (23)	.94
Rubber, Soft, Gray	76 (24)	.86
Sand	68 (20)	.76
Sandstone	100 (38)	.67
Sandstone, Red	100 (38)	.60-.83
Sawdust	68 (20)	.75
Shale	68 (20)	.69
Silica, Glazed	1832 (1000)	.85
Silica, Unglazed	2012 (1100)	.75
Silicon Carbide	300-1200 (149-649)	.83-.96
Silk Cloth	68 (20)	.78
Slate	100 (38)	.67-.80
Snow, Fine Particles	20 (-7)	.82
Snow, Granular	18 (-8)	.89
Soil		
Surface	100 (38)	.38
Black Loam	68 (20)	.66
Plowed Field	68 (20)	.38
Soot		
Acetylene	75 (24)	.97
Camphor	75 (24)	.94
Candle	250 (121)	.95
Coal	68 (20)	.95
Stonework	100 (38)	.93
Water	100 (38)	.67
Waterglass	68 (20)	.96
Wood	Low	.80-.90
Beech Planed	158 (70)	.94
Oak, Planed	100 (38)	.91
Spruce, Sanded	100 (38)	.89

Πίνακες Α2 : Απώλειες φορτίου μετασχηματιστών διανομής

Ονομαστική ισχύς (kVA)	Κατηγορία Α'		Κατηγορία Β'		Κατηγορία C'		Τάση βραχυκύκλωσης (%)
	Απώλειες κενού P_0 (W)	Θόρυβος L_w (dB)	Απώλειες κενού P_0 (W)	Θόρυβος L_w (dB)	Απώλειες κενού P_0 (W)	Θόρυβος L_w (dB)	
50	190	55	145	50	125	47	4
100	320	59	260	54	210	49	4
160	460	62	375	57	300	52	4
250	650	65	530	60	425	55	4
400	930	68	750	63	610	58	4
630	1300	70	1030	65	860	60	4
630	1200	70	940	65	800	60	6
1000	1700	73	1400	68	1100	63	6
1600	2600	76	2200	71	1700	66	6
2500	3800	81	3200	76	2500	71	6

Πίνακας Α2.1 :Κατηγορίες απωλειών κενού φορτίου σύμφωνα με την προδιαγραφή CENELEC HD 428.1 S1/1992

Ονομαστική ισχύς (kVA)	Κατηγορία Α	Κατηγορία Β	Κατηγορία C	Τάση βραχυκύκλωσης (%)
	Απώλειες φορτίου P_k (W)	Απώλειες φορτίου P_k (W)	Απώλειες φορτίου P_k (W)	
50	1100	1350	875	4
100	1750	2150	1475	4
160	2350	3100	2000	4
250	3250	4200	2750	4
400	4600	6000	3850	4
630	6500	8400	5400	4
630	6750	8700	5600	6
1000	10500	13000	9500	6
1600	17000	20000	14000	6
2500	26500	32000	22000	6

Πίνακας Α2.2 : Κατηγορίες απωλειών φορτίου σύμφωνα με την προδιαγραφή CENELEC HD 428.1 S1/1992

Πίνακας Α3 : Προδιαγραφές Μετασχηματιστών

A/A	Προδιαγραφή	Περιγραφή
1	IEC 76-1	ΜΣ ισχύος: γενικά
2	IEC 76-2	ΜΣ ισχύος: ανύψωση θερμοκρασίας
3	IEC 76-3	ΜΣ ισχύος: επίπεδα μόνωσης και διηλεκτρικές δοκιμές
4	IEC 76-5	ΜΣ ισχύος: δυνατότητα αντοχής σε βραχυκύκλωμα
5	IEC 137	Διαπεραστήρες για εναλλασσόμενες τάσεις πάνω από 1000 V
6	IEC 354	Οδηγός φόρτισης ΜΣ λαδιού
7	IEC 726	ΜΣ ισχύος Ξηρού τύπου
8	IEC 905	Οδηγός φόρτισης ΜΣ Ξηρού τύπου

Προδιαγραφές μετασχηματιστών κατά τα πρότυπα IEC

Πίνακας Α4 : Ανοχές εγγυημένων τιμών μετασχηματιστών

Μέγεθος	Ανοχή
Ονομαστικός λόγος μετασχηματισμού	Η μικρότερη από τις παρακάτω τιμές: α) $\pm 0.5\%$ του εγγυημένου λόγου μετασχηματισμού β) $\pm 1/10$ της μετρηθείσας ονομαστικής τάσης βραχυκύκλωσης
Ονομαστική τάση βραχυκύκλωσης	$\pm 10\%$ της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης
Απώλειες κενού φορτίου	+15% των εγγυημένων απωλειών κενού φορτίου
Απώλειες φορτίου	+15% των εγγυημένων απωλειών φορτίου
Συνολικές απώλειες (φορτίου και κενού)	+10% των εγγυημένων συνολικών απωλειών (φορτίου και κενού)
Ρεύμα κενού φορτίου	+30% του εγγυημένου ρεύματος κενού φορτίου
Στάθμη θορύβου	+3dB της εγγυημένης στάθμης θορύβου

Ανοχές εγγυημένων τιμών κατά το πρότυπο IEC 76 – 1

Πίνακας Α5 : Υπερφόρτιση μετασχηματιστών

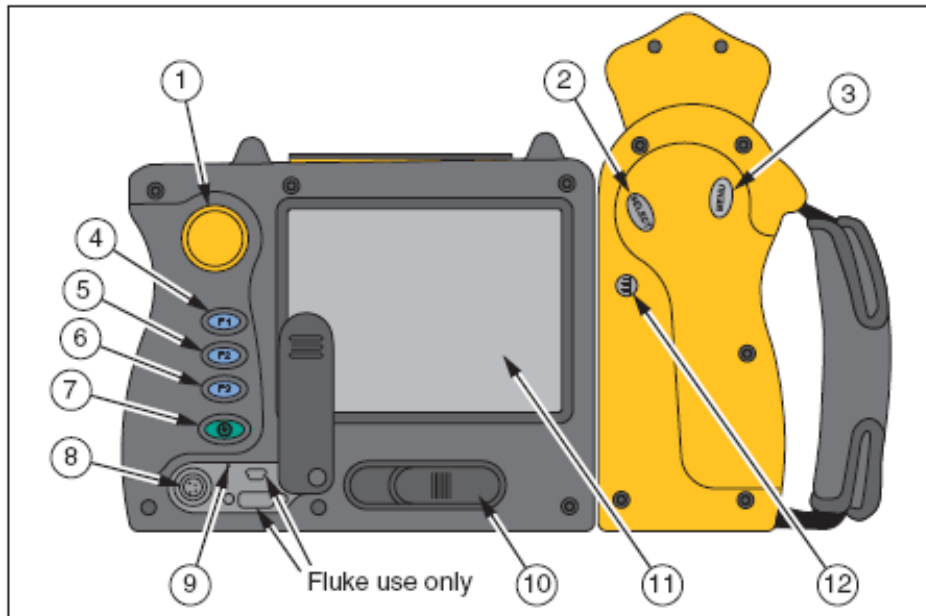
Προηγούμενη διαρκής φόρτιση (% της ονομαστικής ισχύος)	Θερμοκρασία εξόδου λαδιού (°C)	Χρόνος υπερφόρτισης (min) για συγκεκριμένη υπερφόρτιση (% της ονομαστικής ισχύος)				
		10% min	20% min	30% min	40% min	50% min
50	55	180	90	60	30	15
75	68	120	60	30	15	8
90	78	60	30	15	8	4

Επιτρεπόμενη διάρκεια και μέγεθος υπερφόρτισης μετασχηματιστών

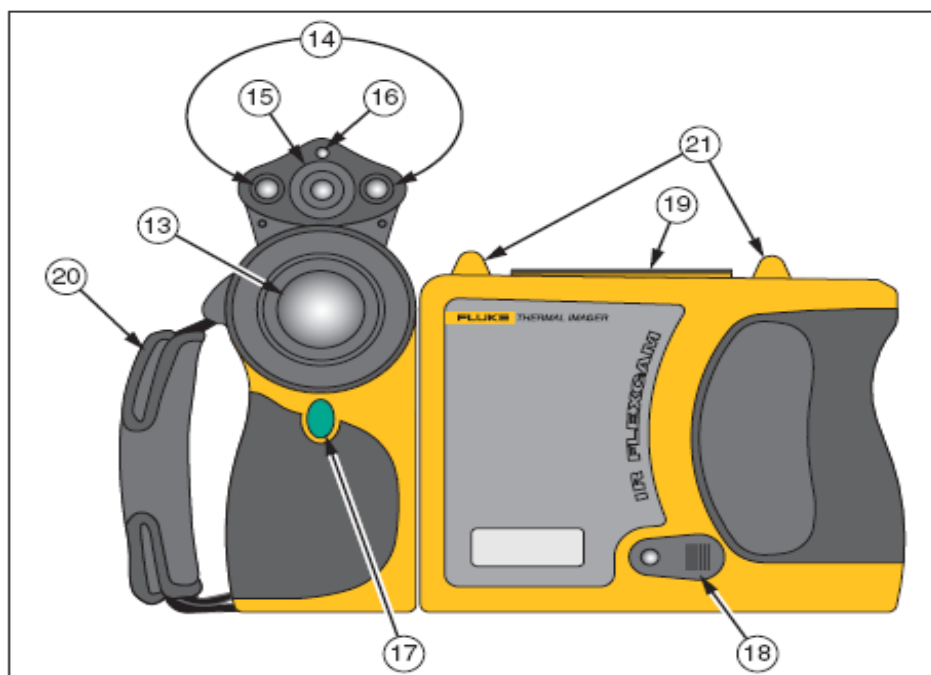
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Σύντομη παρουσίαση της θερμικής κάμερας FLUKE Flexcam Ti45

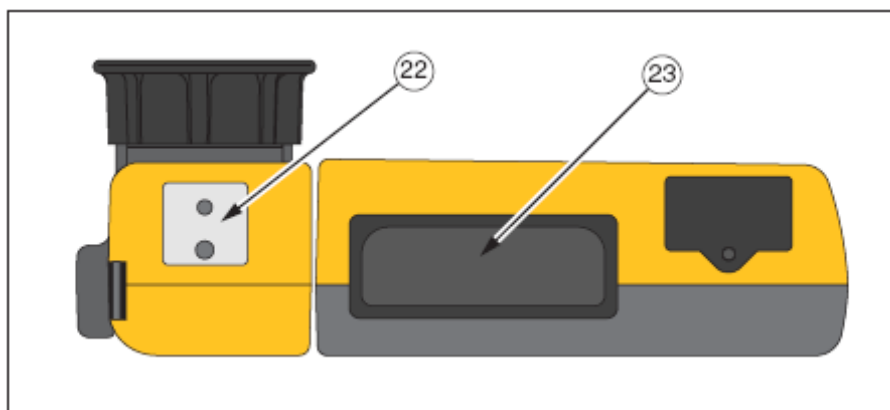
Τα μέρη της θερμικής κάμερας που χρησιμοποιήσαμε, παρουσιάζονται στις εικόνες Β-1, Β-2, Β-3 και περιγράφονται παρακάτω.



Εικόνα Β-1 : Πίσω πλευρά



Εικόνα Β-2 : Μπροστά και άνω πλευρά



Εικόνα B-3 : Κάτω πλευρά

1. **Ποντίκι** - Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της θέσης του δείκτη στις εικόνες και στην επιλογή κειμένων.
2. **SELECT** Εκτελεί το “κλικ” του ποντικιού ή την λειτουργία “enter” για το δείκτη
3. **MENU** Χρησιμοποιείται για την πρόσβαση των επιλογών οθόνης. Σημ.: Πιέζοντας μια φορά εμφανίζονται οι επιλογές.
4. **F1** Μπορεί να προγραμματιστεί για να εκτελέσει διάφορες λειτουργίες.
5. **F2** Μπορεί να προγραμματιστεί για να εκτελέσει διάφορες λειτουργίες.
6. **F3** Μπορεί να προγραμματιστεί για να εκτελέσει διάφορες λειτουργίες.
7. **Power** Χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση της κάμερας καθώς και για να τεθεί σε λειτουργία χαμηλής ισχύος, ώστε να διατηρηθεί η ισχύς της μπαταρίας.
8. Θύρα σύνδεσης για τον φορτιστή AC/DC
9. **RESET** – Πλήκτρο για την επαναρύθμιση της κάμερας. Μπορεί λόγω της θέσης του να ενεργοποιηθεί με έναν συνδετήρα εγγράφου.
10. **Σύρτης μπαταρίας** – Χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της μπαταρίας.
11. **Οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD)** – Έγχρωμη οθόνη για την εξέταση των εικόνων και για πρόσβαση στις επιλογές της κάμερας.
12. **Thermometer** Χρησιμοποιείται στην αναμόρφωση της παλέτας χρωμάτων στις μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες στην τρέχουσα εικόνα και στην ρύθμιση του επιπέδου IR-Fusion.
13. **Υπέρυθρος φακός** – Φακός γερμανίου με χειροκίνητη εστίαση.

14. Φακός/Φλας – Χρησιμοποιείται για τον φωτισμό των σκοτεινότερων σημείων εργασίας. Όταν λειτουργεί φωτίζεται το αντικείμενο και εξασφαλίζεται έτσι καλύτερη ποιότητα εικόνας στο ορατό φως. Ο φακός και το φλας μπορούν να λειτουργούν συγχρόνως.

15. Φακός ορατού φωτός - Χρησιμοποιείται για λήψη ορατού φωτός για τον έλεγχο της εικόνας.

16. Laser – Χρησιμοποιείται για να επισημανθεί το αντικείμενο που στοχεύει η κάμερα.

17. Πλήκτρο Σκανδαλισμού – Χρησιμοποιείται για να σταματήσει ή και να αποθηκεύσει μια εικόνα. Επίσης, χρησιμοποιείται για να δεχτεί μια αλλαγή, το κλείσιμο μιας σελίδας επιλογής και για την επιστροφή σε λειτουργία ανίχνευσης στόχων.

18. Θύρα video – Θύρα τύπου RCA που χρησιμοποιείται στην σύνδεση της κάμερας με κάποιο τηλεοπτικό όργανο ελέγχου (πχ. TV).

19. Θύρα για την κάρτα μνήμης.

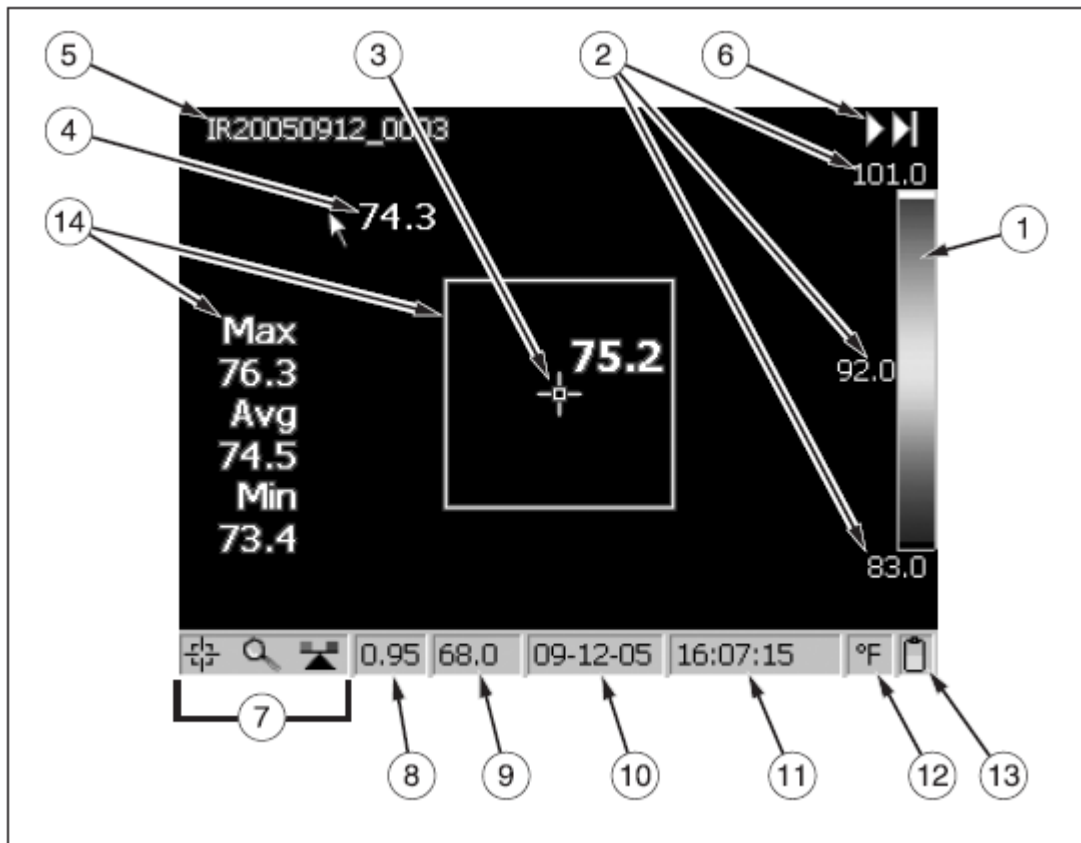
20. Λουρί χεριών – Ρυθμιζόμενο λουρί για επιπρόσθετη σταθερότητα κατά την λήψη εικόνων.

21. Λουρί λαιμού – Θέση για την τοποθέτηση του λουριού λαιμού ή/και ώμων.

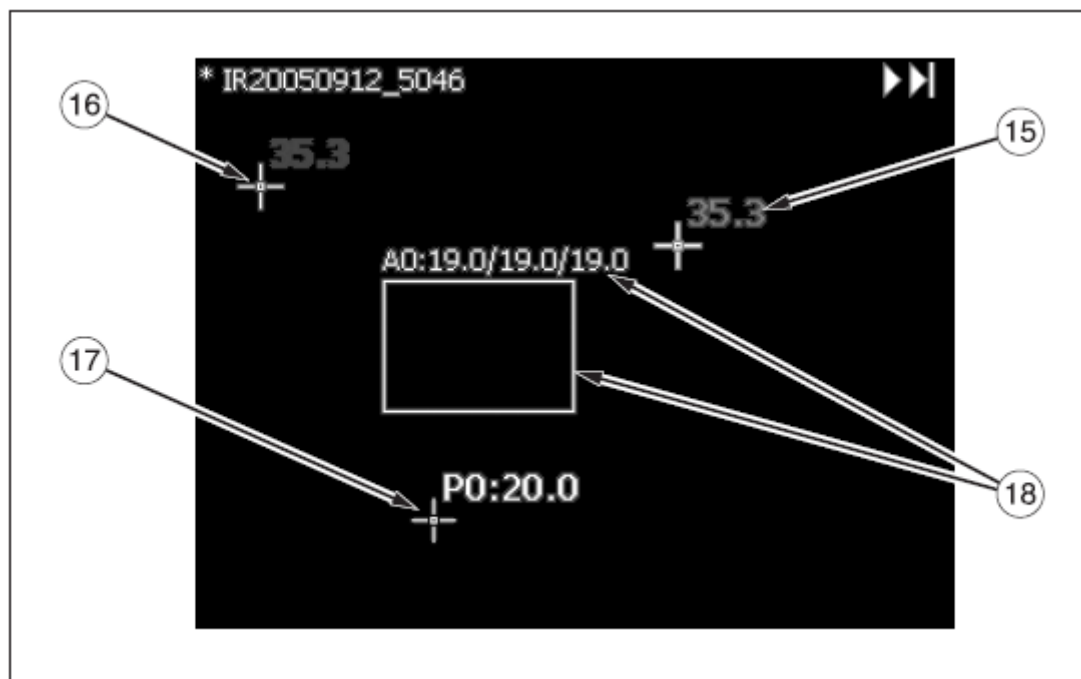
22. Τυποποιημένη 1/4-20 διαμετρής οπή για την τοποθέτηση της κάμερας στο τρίποδο.

23. Μπαταρία – Λιθίου 7 V.

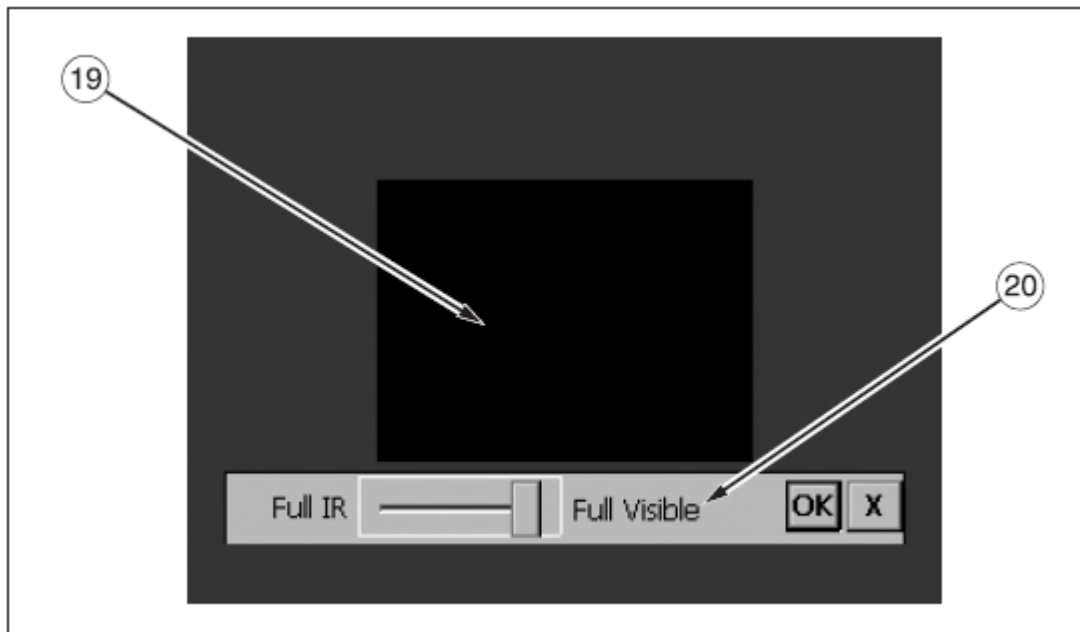
Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η οθόνη της κάμερας με τα διάφορα σύμβολα που συναντά ο χρήστης, ενώ ακολουθεί και επεξήγηση.



Εικόνα Β-4



Εικόνα Β-5



Εικόνα B-6

- 1. Παλέτα χρωμάτων** – Η παλέτα που χρησιμοποιείται στην τρέχουσα απεικόνιση. Πατώντας πάνω μπορεί να γίνει αλλαγή στις ρυθμίσεις της παλέτας χρωμάτων.
- 2. Επίπεδο και πλάτος μετρήσεων** – Μέγιστη, μέση και ελάχιστη θερμοκρασία της παλέτας χρωμάτων. Πατώντας στις θερμοκρασίες μπορούν να αλλάξουν τα όρια που τίθενται.
- 3. Δείκτης θερμοκρασίας στο κέντρο** – Μέση θερμοκρασία του κεντρικού σημείου της εικόνας.
- 4. Δείκτης ποντικιού και θερμοκρασίας** – Θερμοκρασία του σημείου που δείχνει ο δείκτης του ποντικιού.
- 5. Όνομα της εικόνας** – Το όνομα της εικόνας αποτελείται από ένα πρόθεμα εκχώρησης, από την ημερομηνία λήψης της εικόνας και από μια ακολουθία αριθμών. Εμφανίζεται μόνο όταν προβάλλονται οι υποθηκευμένες εικόνες.
- 6. Βέλη προσπέλασης εικόνων** – Εμφανίζονται όταν είναι ενεργή η λειτουργία προσπέλασης των εικόνων. Πατώντας πάνω η προβολή προχωράει με την επόμενη ή την προηγούμενη εικόνα.
- 7. Εικόνες προγραμματιζόμενων πλήκτρων** – Εικόνες για τα τρία προγραμματιζόμενα πλήκτρα **F1**, **F2** και **F3**. Πατώντας πάνω γίνεται αλλαγή στην λειτουργία του πλήκτρου.
- 8. Εκπεμτικότητα** – Παράμετρος που χρησιμοποιείται από την κάμερα για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του στόχου. Πατώντας στον αριθμό μπορεί να αλλάξει η τιμή της εκπεμτικότητας.

9. Θερμοκρασία περιβάλλοντος - Παράμετρος που χρησιμοποιείται από την κάμερα για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του στόχου. Πατώντας στον αριθμό μπορεί να αλλάξει η τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

10. Ημερομηνία – Η τρέχουσα ημερομηνία. Πατώντας πάνω μπορεί να αλλάξει.

11. Ώρα – Η τρέχουσα ώρα σε 24-mode. Πατώντας πάνω μπορεί να αλλάξει.

12. Μονάδα μέτρησης της θερμοκρασίας – Πατώντας πάνω μπορεί να αλλάξει.

13. Πηγή τροφοδότησης – Απεικονίζεται είτε η AC τροφοδοσία της κάμερας, είτε το επίπεδο της μπαταρίας. Πατώντας πάνω εμφανίζεται ο χρόνος που απομένει μέχρι την εξάντληση της μπαταρίας.

14. Κεντρικό πλαίσιο με θερμοκρασίες – Πλαίσιο στο κέντρο της εικόνας 50x50 pixels με την μέγιστη, την μέση και την ελάχιστη θερμοκρασία που εντοπίζονται μέσα στο πλαίσιο (όταν αυτό ενεργοποιείται).

15. Δείκτης μέγιστης θερμοκρασίας – Θερμοκρασία και θέση της μέγιστης θερμοκρασίας που εντοπίζεται στην εικόνα.

16. Δείκτης χαμηλότερης θερμοκρασίας - Θερμοκρασία και θέση της ελάχιστης θερμοκρασίας που εντοπίζεται στην εικόνα.

17. Σημείο ανάλυσης – Θερμοκρασία κάποιου μαρκαρισμένου από τον χρήστη σημείου. Μπορεί να προστεθούν μέχρι τρία σημεία μαρκαρίσματος.

18. Περιοχή ανάλυσης – Ελάχιστη, μέση και μέγιστη θερμοκρασία της περιοχής που μαρκάρεται από τον χρήστη. Μπορούν να προστεθούν μέχρι τρεις μαρκαρισμένες περιοχές.

19. Εικόνα στην εικόνα (PIP) – Λειτουργία που επιτρέπει υπέρυθρη απεικόνιση στο κέντρο της οθόνης και ορατής απεικόνισης στην υπόλοιπη οθόνη.

20. Μπάρα διαλόγου για το συνδυασμό του επιπέδου IR-Fusion – Χρησιμοποιείται για την αλλαγή του συνδυασμού του επιπέδου IR-Fusion από το πλήρες υπέρυθρο (IR) μέχρι το ορατό φως (VL) ή προκειμένου να επιτευχθεί ένας συνδυασμός των δυο.

Τέλος, παραθέτουμε τις προγραμματιζόμενες λειτουργίες που μπορούν να εκχωρηθούν στα πλήκτρα **F1**, **F2** και **F3** :



Δείκτης κέντρου – Χρησιμοποιείται για να κυκλώσει το κεντρικό σημείο της εικόνας.



Ζουμ – Χρησιμοποιείται για γρήγορες εναλλαγές μεγέθυνσης 2x, 4x, 8x στην τρέχουσα εικόνα.



Φωτεινότητα – Χρησιμοποιείται για γρήγορες ρυθμίσεις της φωτεινότητας στην τρέχουσα εικόνα. Οι εναλλακτικές είναι “Dim – Σκοτεινή”, “Normal – Φυσιολογική”, “Bright – Φωτεινή”.



Σχολιασμός – Χρησιμοποιείται για γρήγορη πρόσβαση στην σύνταξη σχολίων.



Προβολή εικόνων – Χρησιμοποιείται για άμεση επανάκτηση της τελευταίας υποθηκευμένης εικόνας ή της τελευταίας εικόνας που προβλήθηκε.



Προβολή μικρογραφιών – Χρησιμοποιείται για την προβολή μικρογραφιών των εικόνων που έχουν αποθηκευτεί στην κάρτα μνήμης.



Παλέτα – Χρησιμοποιείται για την προβολή ή την απόκρυψη της παλέτας χρωμάτων στην οθόνη.



Μπάρα δεικτών μαρκαρίσματος – Χρησιμοποιείται για την εμφάνιση ή την απόκρυψη της μπάρας των δεικτών μαρκαρίσματος για την προσθήκη δεικτών ή περιοχών μαρκαρίσματος στην εικόνα και την προβολή των αντίστοιχων θερμοκρασιών.



Φακός – Χρησιμοποιείται για γρήγορη ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του φακού LED. Ο φακός μπορεί να φωτίσει τις σκοτεινές περιοχές εργασίας.



Laser – Χρησιμοποιείται για την συσχέτιση της εικόνας που προβάλλεται στην οθόνη με αυτό που κοιτάζει ο χρήστης. Το στίγμα του laser είναι ορατό στην εικόνα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν σημείο αναφοράς.



Έναρξη ακολουθίας εικόνων – Χρησιμοποιείται για την έναρξη της αυτόματης συλλογής εικόνων.



Τέλος ακολουθίας εικόνων – Χρησιμοποιείται για την λήξη της προηγούμενης λειτουργίας.



Εμπλουτισμός εικόνας – Χρησιμοποιείται για γρήγορο τονισμό της εικόνας. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι “Off – Εκτός λειτουργίας”, “Normal – Φυσιολογικός”, “Medium – Μέσος” και “High – Υψηλός”.



Εικόνα στην εικόνα – Χρησιμοποιείται για γρήγορη εναλλαγή μεταξύ της λειτουργίας εικόνα στην εικόνα και στην πλήρη προβολή εικόνας.



Επαναβαθμονόμηση – Χρησιμοποιείται για την ρύθμιση της βαθμονόμησης από τον χρήστη.