

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου

**ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ
ΚΡΑΔΑΣΜΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του
ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Β. ΚΑΡΑΘΑΝΟΥ

Σπουδαστή της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Αν. Καθηγητής Ιωάννης Αντωνιάδης

ΑΘΗΝΑ 2011

Αφιερώνεται στους γονείς μου, Βασίλη και Σοφία, που έκαναν ότι μπορούσαν για να με μεγαλώσουν και τη σύζυγό μου Ειρήνη που συνεχίζει το δύσκολο έργο τους.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ιωάννη Αντωνιάδη για το πολύ ενδιαφέρον θέμα που μου εμπιστεύθηκε καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε για το χειρισμό ειδικού εξοπλισμού του εργαστηρίου σε βιομηχανικό περιβάλλον.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Χρήστο Γιακόπουλο για τις ώρες που αφιέρωσε επιβλέποντας κάθε βήμα αυτής της εργασίας καθώς και για την άμεση και ουσιαστική επίλυση όσων προβλημάτων παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια της, όπως επίσης και το υπόλοιπο προσωπικό του εργαστηρίου Δυναμικής και Κατασκευών για την προθυμία του στην παροχή κάθε είδους βοήθειας.

Σημαντική ήταν επίσης και η συμβολή του στρατιωτικού και πολιτικού προσωπικού του 301ΕΒ στους Αγίους Αναργύρους, που με προθυμία μου παρείχαν κάθε διευκόλυνση κατά τη διάρκεια των μετρήσεων εντός του χώρου του εργοστασίου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το φίλο και συνάδερφο Γιάννη Πρέσσα για την πολύτιμη βοήθειά του στην εγκατάσταση και εκτέλεση των προγραμμάτων LabView και MATLAB που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των μετρήσεων.

Τέλος, από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα το Γενικό Επιτελείο Στρατού για τη χορήγηση εκπαιδευτικής άδειας, στη διάρκεια της οποίας πραγματοποίησα τις σπουδές μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και το θέμα της αφορά τη διάγνωση βλαβών επαγωγικών ηλεκτροκινητήρων με ανάλυση ρεύματος και κραδασμών.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση της λειτουργίας της μεθόδου καταγραφής του ρεύματος, καθώς και η ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στους ίδιους ηλεκτροκινητήρες με τις μεθόδους καταγραφής ρεύματος και κραδασμών.

Η καταγραφή και ανάλυση ρεύματος γίνεται με εφαρμογή της μεθόδου «Motor Current Signature Analysis» ή «MCSA». Η μέθοδος «MCSA» χρησιμοποιεί αισθητήρες οι οποίοι δεν διεισδύουν στο εσωτερικό της μηχανής και η λειτουργία της βασίζεται στην ανάλυση του φάσματος του ρεύματος του στάτη (ρεύματος τροφοδοσίας) ενός ηλεκτροκινητήρα, με σκοπό να εντοπιστεί ένα σφάλμα εν τη γένεση του. Η ύπαρξη κάποιου σφάλματος προκαλεί την εμφάνιση αρμονικών συνιστωσών χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου σφάλματος.

Η καταγραφή των κραδασμών γίνεται με τη μελέτη του συνολικού επιπέδου κραδασμών της μηχανής και της ανάλυσης της κυματομορφής των κραδασμών στις διάφορες κατευθύνσεις.

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 6 κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια περιληπτική αναφορά στις βασικές αρχές που διέπουν την κατασκευή και λειτουργία των επαγωγικών ηλεκτροκινητήρων, καθώς και στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την εκκίνησή τους.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται παρουσίαση της μεθόδου «Motor Current Signature Analysis» η οποία χρησιμοποιείται για τη διάγνωση βλαβών. Αναφέρονται οι λόγοι για τους οποίους είναι χρήσιμο ένα τέτοιο διαγνωστικό σύστημα, οι κανόνες που λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση. Τέλος, γίνεται λεπτομερής καταγραφή συγκεκριμένων τύπων βλαβών και πως αυτές ανιχνεύονται με την ανάλυση ρεύματος.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στη μέθοδο της καταγραφής κραδασμών και την διάγνωση σφαλμάτων με αυτή. Επίσης, παρουσιάζεται η συμπτωματολογία συγκεκριμένων βλαβών που μπορεί να εμφανίσει ένας ηλεκτροκινητήρας και ο τρόπος που διαγιγνώσκονται με τη μελέτη των κραδασμών.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μια εκτενής παρουσίαση του εξοπλισμού «Dynamic Motor Monitor EXP3000» που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ρεύματος, της διαδικασίας εγκατάστασης, επιλογής παραμέτρων και της διαδικασίας λήψης δεδομένων. Επίσης, παρουσιάζονται αναλυτικά οι μετρήσεις (τεστ) που εκτελεί το διαγνωστικό μηχάνημα και η επίδραση κάθε αποτελέσματος στη λειτουργία του κινητήρα.

Το κεφάλαιο 5 αναφέρεται στις βιομηχανικές εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στους χώρους του 301 Εργοστασίου Βάσεως, σε οκτώ (8) διαφορετικούς ηλεκτροκινητήρες με τη χρήση του εξοπλισμού «Dynamic Motor Monitor EXP3000» της εταιρίας Baker, έγινε η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, διαπιστώθηκε η κατάσταση λειτουργίας τους και έγινε διάγνωση συγκεκριμένων βλαβών.

Συγχρόνως, καταγράφηκαν κραδασμοί με τη χρήση πολικάναλου συστήματος καταγραφής δονήσεων και συναφών δεδομένων, σε τέσσερις (4) από τους παραπάνω ηλεκτροκινητήρες. Χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό περιβάλλον των προγραμμάτων LabView και MATLAB, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τους δύο τύπους δεδομένων (ρεύματος και κραδασμών.)

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται μια ανασκόπηση της Διπλωματικής Εργασίας και συγκεντρώνονται συνολικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν. Επίσης, γίνονται προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Βασικές αρχές κατασκευής.....	1
1.3 Βασικές αρχές λειτουργίας.....	3
1.4 Εκκίνηση κινητήρων.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ "MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS" (MCSA).....	7
2.1 Χρησιμότητα της διάγνωσης βλαβών στους Ηλεκτροκινητήρες.....	7
2.2 Τι είναι η ανάλυση ρεύματος «MCSA».....	7
2.3 Βασικά βήματα για την ανάλυση ρεύματος.....	8
2.4 Κανόνες που λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση ρεύματος.....	8
2.5 Ανίχνευση βλαβών με την ανάλυση ρεύματος.....	9
2.5.1 Σπασμένες ράβδοι δρομέα.....	9
2.5.2 Εκκεντρότητα δρομέα.....	11
2.5.3 Μηχανικά προβλήματα του στάτη.....	13
2.5.4 Βραχυκυκλώματα (Shorted turns) στα τυλίγματα του στάτη.....	14
2.5.5 Κακή ευθυγράμμιση.....	14
2.5.6 Χαλαρότητα κατά την εγκατάσταση.....	15
2.5.7 Προβλήματα ρουλεμάν.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΡΑΔΑΣΜΩΝ.....	16
3.1 Εισαγωγή.....	16
3.2 Μέτρηση κραδασμών.....	16
3.3 Διάγνωση βλαβών.....	18
3.4 Συμπτωματολογία βλαβών ηλεκτροκινητήρων με την ανάλυση κραδασμών.....	19
3.4.1 Εκκεντρότητα στον στάτη του κινητήρα.....	19
3.4.2 Εκκεντρότητα στο δρομέα του κινητήρα.....	19
3.4.3 Πιτσικαρισμένος δρομέας κινητήρα.....	19
3.4.4 Ραγισμένη ή σπασμένη ράβδος (μπάρα) του κινητήρα.....	19
3.4.5 Χαλαρές ράβδοι του κινητήρα.....	20
3.4.6 Χαλαρός δρομέας.....	20
3.4.7 Χαλαρά τυλίγματα στον στάτη.....	20
3.4.8 Προβληματικά ελάσματα.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΣΚΕΥΗ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ "DYNAMIC MOTOR MONITOR EXP3000" ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ BAKER.....	21
4.1 Περιγραφή Εξοπλισμού.....	22
4.2 Εγκατάσταση Εξοπλισμού.....	22
4.3 Επιλογή παραμέτρων και διαδικασία εκτέλεσης της μέτρησης.....	23
4.3.1 Δημιουργία βάσης δεδομένων νέου ηλεκτροκινητήρα.....	23

4.3.2 Δημιουργία ηλεκτρικού τεστ.....	23
4.3.3 Επιλογή βρόχων κατά τη συλλογή δεδομένων (Loop Acquisition).....	23
4.3.4 Επιλογή παραμέτρων συλλογής δεδομένων.....	23
4.3.5 Επιλογή λοιπών παραμέτρων μέτρησης.....	24
4.3.6 Έλεγχος συνδέσεων.....	24
4.4 Εκτελούμενα Τεστ από το EXP3000.....	25
4.4.1 Κατάσταση Ισχύος (Power Condition).....	25
4.4.1.1 Επίπεδο Τάσης (Voltage Level).....	25
4.4.1.2 Ασυμμετρία Τάσης (Voltage Unbalance).....	27
4.4.1.3 Παραμόρφωση Τάσης (Voltage Distortion).....	29
4.4.2 Επίδοση Ηλεκτροκινητήρα (Motor Performance).....	31
4.4.2.1 Επίπεδο Έντασης (Current Level).....	31
4.4.2.2 Συντελεστής Αποτελεσματικότητας (Effective Service Factor).....	32
4.4.3 Κατάσταση Ηλεκτροκινητήρα (Motor Condition).....	33
4.4.3.1 Κατάσταση Λειτουργίας (Operating Condition).....	33
4.4.3.2 Ανάλυση Φασμάτων (Spectrum Tests).....	34
4.4.4 Ενεργειακή Αξιολόγηση (Energy Assessment).....	38
4.4.4.1 Απόδοση (Efficiency).....	38
4.4.4.2 Περίοδος Απόσβεσης (Payback Period).....	39
4.4.4.3 Motor Master +	40
4.4.5 Φορτίο (Load).....	40
4.4.5.1 Ιστορικό Φορτίου (Load History).....	40
4.4.5.2 Κυματομορφή Ροπής (Torque Ripple).....	40
4.4.6 Οδήγηση Μεταβλητής Συχνότητας (Variable Frequency Drive VFD).....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	42
5.1 Αεροσυμπιεστής.....	42
5.2 Τροχός.....	53
5.3 Δράπανο.....	58
5.4 Πλάνη.....	64
5.5 Αντλία απορρόφησης σκόνης.....	69
5.6 Ρεκτιφιέ στροφαλοφόρου άξονα.....	79
5.7 Ρεκτιφιέ.....	87
5.8 Λείανση.....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	100
6.1 Ανασκόπηση.....	100
6.2 Συμπεράσματα.....	100
6.3 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.....	100
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	101

1. ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ [1,2,3].

1.1 Γενικά.

Οι επαγωγικοί, ή ασύγχρονοι, τριφασικοί κινητήρες (σχήμα 1.1) είναι οι πλέον διαδεδομένοι ανάμεσα στους κινητήρες γιατί είναι φθηνοί, απλοί στη χρήση τους καθώς και ανθεκτικοί και αξιόπιστοι στη λειτουργία τους. Κατασκευάζονται συνήθως με ισχείς από 50 W μέχρι μερικά MW, ενώ η φορά περιστροφής αλλάζει με την εναλλαγή της τροφοδοσίας δύο φάσεων. Χρησιμοποιούνται σε όλες τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις (κίνηση αντλιών, μάντων, ανεμιστήρων, συμπιεστών, εργαλειομηχανών και σε πλήθος άλλων εφαρμογών).



Σχήμα 1.1: Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας.

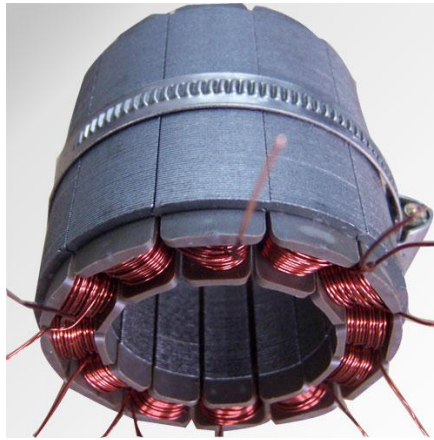
1.2 Βασικές αρχές κατασκευής.

Ένας επαγωγικός κινητήρας αποτελείται από ένα ακίνητο μέρος, το στάτη και τον περιστρεφόμενο δρομέα. Ο κυλινδρικός στάτης, σχήμα 1.2, κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων και φέρει τριφασικό τύλιγμα που τοποθετείται σε αυλάκια της εσωτερικής του επιφάνειας.

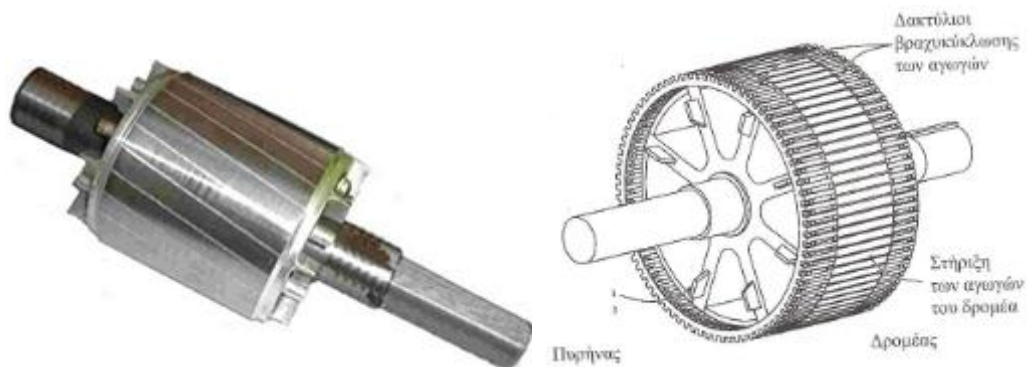
Ο δρομέας κατασκευάζεται και αυτός από σιδηρομαγνητικό υλικό και φέρει αυλάκια στην εξωτερική του επιφάνεια. Υπάρχουν δύο τύποι δρομέων:

- Ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel-cage rotor), σχήμα 1.3, αποτελείται από ράβδους αλουμινίου ή χαλκού που τοποθετούνται μέσα στα αυλάκια του δρομέα και βραχυκυκλώνονται στα άκρα τους με δαχτυλίδια από αλουμίνιο ή χαλκό. Το αλουμίνιο συνήθως χρησιμοποιείται σε κινητήρες χαμηλότερης ισχύος και καταλαμβάνει τα αυλάκια του δρομέα με κατευθείαν χύτευση του υγρού αλουμινίου, με αποτέλεσμα να προκύπτει ενιαίος και στιβαρός δρομέας.
- Ο τυλιγμένος δρομέας (wound rotor), έχει τρία τυλίγματα ίδια με αυτά του στάτη, που συνδέονται σε διάταξη αστέρα ή τριγώνου. Οι τρεις ακροδέκτες συνδέονται

με δακτυλίους ολίσθησης, που διακρίνονται στο σχήμα 1.4 και βρίσκονται σε μόνιμη επαφή με σταθερές ψήκτρες.



Σχήμα 1.2: Στάτης τυπικού επαγωγικού κινητήρα.



Σχήμα 1.3: Τυπικός δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού και σχεδιάγραμμά του.



Σχήμα 1.4: Τυπικός τυλιγμένος δρομέας.

1.3 Βασικές αρχές λειτουργίας.

Το ρεύμα που διαρρέει τα τρία τυλίγματα του στάτη, δημιουργεί με επαγωγή τάσεις στο δρομέα. Η αναπτυσσόμενη μαγνητική ροή διαρρέει εκτός από το σιδηρομαγνητικό υλικό και το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα. Έτσι, οι τάσεις από επαγωγή δημιουργούν ρεύμα στους αγωγούς του δρομέα, από την κίνηση των οποίων στο μαγνητικό πεδίο του στάτη παράγεται η απαιτούμενη ροπή.

Εάν η συχνότητα του δικτύου που τροφοδοτεί τον κινητήρα είναι f_s και η μηχανή έχει P πόλους, τότε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται έχει ταχύτητα ίση με τη σύγχρονη n_s , σχέση 1-1:

$$n_s = \frac{120f_s}{P} \quad (1 - 1)$$

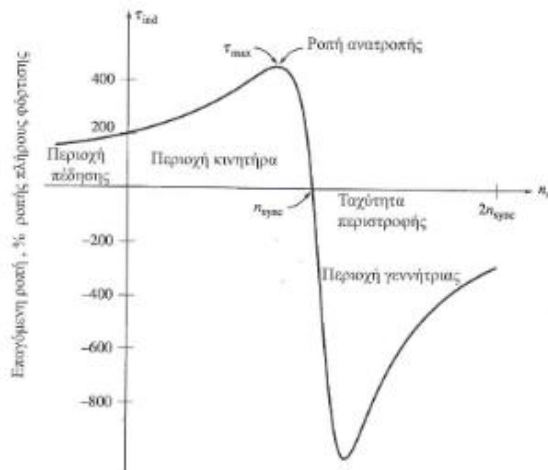
Προϋπόθεση για να δημιουργηθεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με σταθερό εύρος και σταθερό αριθμό στροφών είναι η ύπαρξη τριών συμμετρικών τυλιγμάτων τοποθετημένων κατά 120° μεταξύ τους στο χώρο και τροφοδοτούμενων από ημιτονοειδές σύστημα τάσεων με διαφορά φάσης 120° μεταξύ τους. Το πεδίο αυτό, επάγει στο δρομέα ρεύματα, τα οποία σχηματίζουν με το ίδιο το πεδίο ηλεκτρομαγνητική ροπή, που να τείνει να περιστρέψει το δρομέα κατά τη φορά του πεδίου και να αντισταθεί στο αίτιο που προκάλεσε την κίνηση. Επομένως ο δρομέας "προσπαθεί" να φτάσει το στρεφόμενο πεδίο, ώστε μόλις γίνει η σχετική ταχύτητα μηδέν, να μηδενιστεί και το ρεύμα. Δεν κατορθώνει να φτάσει όμως ποτέ το μαγνητικό πεδίο, δηλαδή δεν αποκτά ποτέ σύγχρονη ταχύτητα n_s , διότι τότε δεν θα είχαμε ρεύμα εξ' επαγωγής και η ροπή θα ήταν μηδέν. Η σχετική ταχύτητα πεδίου – δρομέα λέγεται ταχύτητα ολίσθησης (slip speed) και είναι ίση με τη διαφορά της σύγχρονης ταχύτητας από τη μηχανική ταχύτητα του δρομέα, σχέση 1-2:

$$n_{slip} = n_s - n_m \quad (1-2)$$

Η σχετική ταχύτητα μπορεί να εκφραστεί και από το μέγεθος που ονομάζεται ολίσθηση (slip) και είναι ουσιαστικά η σχετική ταχύτητα ολίσθησης εκφρασμένη σε εκατοστιαία ή σε ανά μονάδα (per-unit) βάση, σχέση 1-3:

$$s = \frac{n_{slip}}{n_s} = (100\%) \quad (1-3)$$

Οι καταστάσεις λειτουργίας ενός κινητήρα, γίνονται κατανοητές από τη χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας περιστροφής, σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5: Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας επαγωγικής μηχανής.

Στο διάγραμμα του σχήματος 1.5 φαίνονται τρεις περιοχές λειτουργίας:

- **Περιοχή κινητήρα.** Εάν ο δρομέας περιστρέφεται με ορισμένη ολίσθηση και αυξηθεί το φορτίο, τότε θα αυξηθεί η ολίσθηση, δηλαδή θα μειωθεί ο αριθμός στροφών της μηχανής. Το ρεύμα εξ' επαγωγής και μέσω αυτού και η ροπή αυξάνεται. Η αύξηση αυτή γίνεται μέχρι ενός ορισμένου σημείου, το οποίο ονομάζεται σημείο ανατροπής, η δε αντιστοιχούσα ροπή λέγεται ροπή ανατροπής και η αντίστοιχη ολίσθηση λέγεται ολίσθηση ανατροπής. Πέρα από το σημείο αυτό η ροπή μειώνεται, έτσι η ροπή ανατροπής είναι η μέγιστη δυνατή ροπή της ασύγχρονης μηχανής. Η περιοχή από τον συγχρονισμό μέχρι το σημείο ανατροπής λέγεται περιοχή ευστάθειας. Έξω από την περιοχή αυτή και για ταχύτητες μικρότερες της σύγχρονης επικρατεί αστάθεια.
- **Περιοχή γεννήτριας.** Εάν ο δρομέας στρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη του στρεφόμενου πεδίου, τότε η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, δηλαδή προσφέρει μέσω του στάτη προς το δίκτυο ηλεκτρική ενέργεια, η δε ολίσθηση γίνεται αρνητική.
- **Περιοχή πέδης.** Εάν η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό του, η επαγόμενη ροπή θα σταματήσει τον κινητήρα και θα προσπαθήσει να τον περιστρέψει προς την αντίθετη φορά. Η φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων μπορεί να πραγματοποιηθεί με αντιμετάθεση των συνδέσεων σε δύο από τις τρεις φάσεις και έτσι να επιτυγχάνεται το απότομο σταμάτημα του κινητήρα (ακραία πέδηση). Η ολίσθηση παραμένει θετική, αλλά μεγαλύτερη από την ολίσθηση της περιοχής, όπου λειτουργεί η μηχανή ως κινητήρας.

1.4 Εκκίνηση επαγωγικών κινητήρων

Κατά την εκκίνηση κινητήρων υπάρχει αύξηση των στροφών από 0 έως τις ονομαστικές στροφές και μείωση της ολίσθησης από 100% σε 1-8% περίπου. Το ρεύμα που για δοσμένο κινητήρα εξαρτάται μόνο από την ολίσθηση δηλ. την στιγμιαία

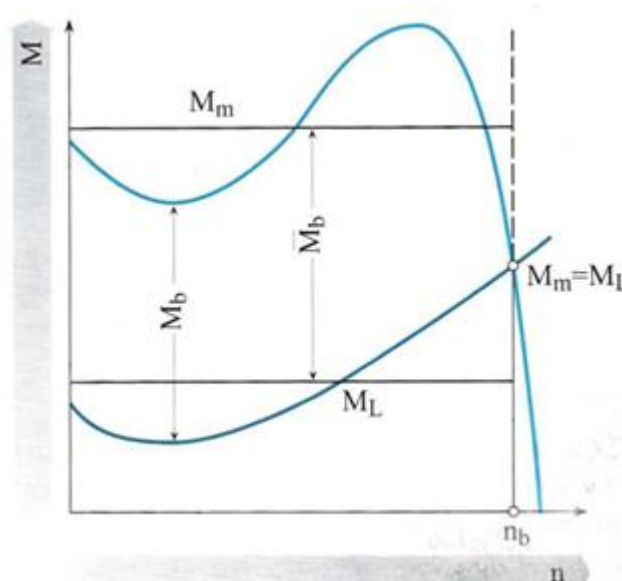
περιστροφική ταχύτητα και την τάση, είναι περίπου 4- 7 φορές του κανονικού στην αρχή και μειώνεται στο κανονικό όταν ο κινητήρας φθάσει στο ονομαστικό φορτίο του.

Οι ροπές που δρουν κατά την εκκίνηση είναι δύο ειδών (σχήμα. 1.6):

- Η ροπή του κινητήρα M_m .
- Η ροπή του φορτίου M_L .

Η διαφορά τους λέγεται ροπή επιτάχυνσης M_b (σχέση 1-4) και είναι η ροπή που επιταχύνει τον κινητήρα, από την ακινησία στις ονομαστικές στροφές:

$$M_b = M_m - M_L = \text{συνάρτηση του χρόνου.} \quad (1-4)$$



Σχήμα 1.6: Χαρακτηριστικές ροπές κινητήρα M_m και ροπής φορτίου M_L .

Επιτάχυνση έχουμε μόνο όταν η ροπή του κινητήρα είναι μεγαλύτερη από τη ροπή του φορτίου, κάτι που ισχύει μέχρι τις στροφές που αντιστοιχούν στη ροπή ανατροπής και μάλιστα με μεγάλα περιθώρια (π.χ $M_m > 1,5M_L$), ιδιαίτερα όταν έχουμε σημαντικές πτώσεις τάσεις (>10%). Ο κινητήρας επιταχύνει έως ότου $M_m = M_L$, οπότε ακολουθεί η στάσιμη λειτουργία του.

Κατά την εκκίνηση, οι απώλειες του κινητήρα μπορεί να είναι 40 φορές επί τις απώλειες υπό κανονική λειτουργία, γι' αυτό και δεν επιτρέπονται απεριόριστες εκκινήσεις η μία μετά την άλλη ή απεριόριστη διάρκεια εκκίνησης.

Η εκκίνηση των κινητήρων μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους:

- Απ' ευθείας εκκίνηση, με σταθερή τάση, στο δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης. Εφαρμόζεται για τριφασικούς κινητήρες μέχρι 1,5... 2 kW, λόγω κανονισμών του διανομέα ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΕΗ). Η εκκίνηση αυτή δίνει μεγαλύτερη ροπή, απ' ό τι ο επόμενος τρόπος εκκίνησης.
- Εκκίνηση με μειωμένη τάση στα τυλίγματα, (εκκίνηση αστέρα-τριγώνου) εκκίνηση με αστέρα που καταλήγει σε τρίγωνο. Η ροπή και το ρεύμα είναι το 1/3 της ροπής και του ρεύματος της απ' ευθείας εκκίνησης. Ο εκκινητής που

χρειάζεται εδώ είναι ένας διακόπτης αστέρα-τριγώνου. Η μεταγωγή Υ-Δ πρέπει να γίνει στη σωστή στιγμή, σχεδόν υπό ονομαστικές στροφές, αλλιώς έχουμε μεγάλα ρεύματα εκκίνησης και ελέγχεται με χρονοδιακόπτη.

- Εκκίνηση με ηλεκτρονικό ρυθμιστή τάσης (soft starter). Εδώ η εναλλασσόμενη τάση τροφοδοσίας ρυθμίζεται με θυρίστορες, ενδεχόμενα με ανάδραση μέσω των στροφών.
- Εκκίνηση με αντίσταση σε σειρά με μία φάση (λέγεται και συνδεσμολογία Kusa). Εδώ έχουμε μία αργή εκκίνηση με μικρή ροπή εκκίνησης. Αυτή η εκκίνηση προτιμάται όταν απαιτείται μία σταδιακή, αργή αύξηση των στροφών.
- Εκκίνηση με μετασχηματιστή που μειώνει την τάση. Εδώ ροπή και ρεύμα είναι μειωμένα σε σχέση με την απ' ευθείας εκκίνηση. Εκκίνηση με αντιστάσεις στο δρομέα σε δακτυλιοφόρους κινητήρες. Εδώ έχουμε ρεύματα και ροπές όπως στην απ' ευθείας εκκίνηση.
- Εκκίνηση με μετατροπέα συχνότητας (inverter). Η τροφοδότηση γίνεται κατά την εκκίνηση με μεταβλητή συχνότητα ώστε η ροπή να είναι υψηλή και το ρεύμα χαμηλό.

2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ "MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS" (MCSA).

2.1 Χρησιμότητα της διάγνωσης βλαβών στους Ηλεκτροκινητήρες. [4]

Διάφορες μελέτες που αφορούν τις αιτίες σφαλμάτων ασύγχρονων κινητήρων έχουν δείξει ότι αυτές οφείλονται:

- Κατά 36% σε σφάλματα στο στάτη, εκ των οποίων το 80% οφείλονται σε ηλεκτρικό πρόβλημα.
- Κατά 10% σε σφάλματα στο δρομέα.
- Κατά 41% σε σφάλματα στα ρουλεμάν.
- Κατά 13% σε άλλες αιτίες.

Περίπου το 29% όλων των σφαλμάτων των ηλεκτρικών κινητήρων έχουν άμεση σχέση με ένα ηλεκτρικό πρόβλημα και μπορούν να αποφευχθούν με περιοδικό έλεγχο ή παρακολούθηση του κινητήρα.

Απρογραμματίστες διακοπές λειτουργίας λόγω βλαβών σε κρίσιμους κινητήρες μπορεί να προκαλέσουν ζημιές εκατοντάδων χιλιάδων ευρώ. Η αποφυγή αυτών των βλαβών με τον εντοπισμό, τη διάγνωση και τη διόρθωση των προβλημάτων είναι ο κύριος στόχος του προγράμματος προβλεπτικής συντήρησης και απαιτεί μεγάλη τεχνογνωσία, εμπειρία και τα κατάλληλα εργαλεία.

Ένας Η/Κ είναι μέρος ενός μηχανικού συστήματος που αποτελείται από τρία κατασκευαστικά μέρη: την εισερχόμενη ποιότητα του ρεύματος, τον κινητήρα (αποτελούμενο από ηλεκτρικά και μηχανικά στοιχεία όπως ο χαλκός περιέλιξης καλωδίων, συστήματα μόνωσης, έδρανα) και τον εξοπλισμό που οδηγείται από τον κινητήρα (αντλίες, συμπιεστές, μεταφορικές μηχανές κλπ).

Η παρακολούθηση της θερμοκρασίας και των ταλαντώσεων του κινητήρα χρησιμοποιούνται για δεκαετίες στη συντήρηση των Η/Κ, όμως ο δυναμικός έλεγχος ηλεκτρικών μεγεθών από ένα εργαλείο που παρέχει διάγνωση για υπάρχουσα βλάβη και προειδοποίηση για επικείμενο πρόβλημα χωρίς παρεμβατικό χαρακτήρα ή διακοπή της λειτουργίας του, καθορίζει λεπτά ζητήματα στο πλαίσιο των μηχανικών ή ηλεκτρικών συστημάτων και σε συνδυασμό με τις προηγούμενες μεθόδους διευκολύνουν τη λήψη αποφάσεων για τη συντήρηση. Συχνά οι κινητήρες επισκευάζονται ή να αντικαθίστανται χωρίς να διαγνωστεί η βασική αιτία του προβλήματος, με αποτέλεσμα ο Η/Κ να αποτύχει κατά τον ίδιο τρόπο, προκαλώντας ξανά διακοπές λειτουργίας. Ζητήματα όπως αρμονικές, διακυμάνσεις ή ασυμμετρίες τάσης, προβλήματα στις ράβδους του δρομέα, κακή ευθυγράμμιση και βλάβες ρουλεμάν είναι μερικά μόνο από τα προβλήματα επηρεάζουν τον κινητήρα αρνητικά, αυξάνοντας το κόστος λειτουργίας και μειώνοντας την απόδοση λειτουργίας αλλά και είναι πλέον δυνατόν να προσδιοριστούν με τον ηλεκτρικό έλεγχο.

2.2 Τι είναι η ανάλυση ρεύματος «MCSA». [5]

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί την ανάλυση του φάσματος του ρεύματος του στάτη (ρεύματος τροφοδοσίας) μίας ασύγχρονης μηχανής με σκοπό να εντοπιστεί ένα σφάλμα

εν τη γενέσει του στον κινητήρα. Η ύπαρξη κάποιου σφάλματος προκαλεί την εμφάνιση αρμονικών συνιστωσών χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου σφάλματος. Η συγκεκριμένη μέθοδος βοηθάει στον προσδιορισμό των ακόλουθων θεμάτων:

- Προβλήματα και ασυμμετρία στην τροφοδοσία του ρεύματος (ποιότητα εισερχομένου ρεύματος).
- Κατάσταση της μόνωσης στα τυλίγματα του στάτη.
- Σπασμένες ράβδους στον κλωβό του δρομέα.
- Εκκεντρότητα δρομέα.
- Φθαρμένα ρουλεμάν.
- Προβλήματα σχετιζόμενα με το φορτίο.
- Απόδοση του κινητήρα.

Η αξιόπιστη ερμηνεία του φάσματος είναι ιδιαίτερα δύσκολη, λόγω παρεμβολών θορύβου στην κυματομορφή του ρεύματος, που προέρχονται συνήθως από ανωμαλίες στο δρομέα. Το σήμα αναλύεται στο πεδίο των συχνοτήτων με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier (FFT), για να υπάρχει καλύτερο και πιο ξεκάθαρο αποτέλεσμα. Περιπτώσεις όπου χρησιμοποιήθηκε αυτή η μέθοδος έχουν δείξει ότι το MCSA αποτελεί μία καλή τεχνική παρακολούθησης και επιτήρησης ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα. [6]

2.3 Βασικά βήματα για την ανάλυση ρεύματος.

Υπάρχει μια σειρά από απλές ενέργειες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση με χρήση MCSA, οι οποίες είναι:

- Επισκόπηση του συστήματος που πρόκειται να αναλυθεί.
- Καθορισμός των στοιχείων που σχετίζονται με το σύστημα προς ανάλυση. Για παράδειγμα, αν αποτελεί αιτία της ανάλυσης ο μη κατάλληλος χειρισμός του εξοπλισμού, ή αν υπάρχουν επιπλέον δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση.
- Λήψη δεδομένων.
- Εξέταση των δεδομένων και ανάλυση:
 - του χρονικού σήματος της έντασης για έλεγχο της λειτουργίας κατά τη διάρκεια της λήψης των δεδομένων,
 - των χαμηλών συχνοτήτων στο φάσμα της έντασης για τον έλεγχο του δρομέα και ζητημάτων που σχετίζονται με το φορτίο,
 - των υψηλών συχνοτήτων στο φάσμα της έντασης και της τάσης για τον έλεγχο και προσδιορισμό άλλων μηχανικών και ηλεκτρικών σφαλμάτων.

2.4 Κανόνες που λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση ρεύματος.

Οι περισσότερες βλάβες προσδιορίζονται μόνο με μια ανάγνωση των αποτελεσμάτων που μπορεί να είναι παρόμοια για τις μεθόδους ανάλυσης κραδασμών και ρεύματος. Υπάρχουν ωστόσο κάποιοι κανόνες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ανάλυση του φάσματος της έντασης:

- Εμφάνιση πλευρικών της pole pass frequency (ppf) υποδεικνύουν βλάβες των ράβδων του δρομέα. Όσο μεγαλύτερες είναι οι αιχμές τόσο σοβαρότερες είναι και οι βλάβες.
- Εμφάνιση αρμονικών της ppf υποδηλώνουν χαλαρότητα των ράβδων ή προβλήματα (ύπαρξη κενών) κατά τη χύτευση.
- Μη ύπαρξη πλευρικών της ppf, προκαλούν αυξημένο επίπεδο θορύβου γύρω από την αιχμή της συχνότητας του δικτύου (f_L) και συνδέεται με προβλήματα του οδηγούμενου φορτίου, όπως για παράδειγμα η χαλαρότητα.
- Φάσματα με αυξημένο επίπεδο θορύβου υποδεικνύουν προβλήματα χαλαρότητας ή σπηλαίωσης.
- Αιχμές που εμφανίζονται στα φάσματα τάσης και έντασης, αφορούν ηλεκτρικά ζητήματα, όπως η ποιότητα της εισερχόμενης ενέργειας. Εμφάνιση αιχμών μόνο στο φάσμα της έντασης αφορούν βλάβες στα τυλίγματα ή μηχανικά προβλήματα.
- Ζεύγη αιχμών που δεν συνδέονται με την ταχύτητα περιστροφής ή τη συχνότητα του δικτύου, σχετίζονται με προβλήματα των ρουλεμάν.

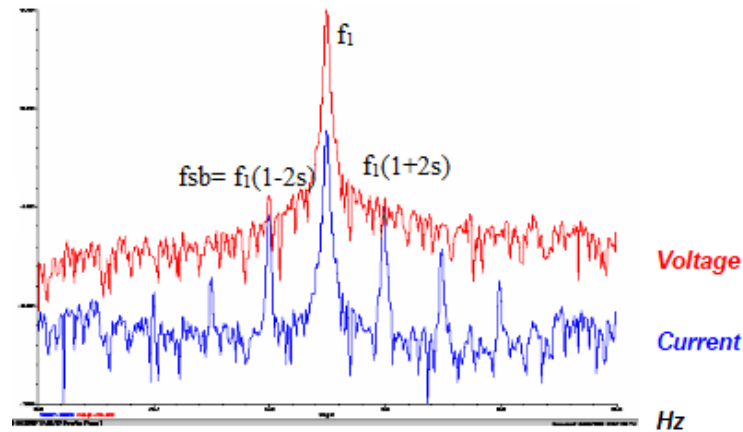
2.5 Ανίχνευση βλαβών με την ανάλυση ρεύματος. [6]

2.5.1 .Σπασμένες ράβδοι δρομέα.

Η αρχή λειτουργίας των επαγωγικών κινητήρων περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 1. Η συχνότητα τροφοδοσίας από το δίκτυο είναι: $f_1 = 50 \text{ Hz}$, και το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής στρέφεται με το σύγχρονο αριθμό στροφών n_s . Ο Η/Κ επιταχύνεται έως ότου αποκτήσει ταχύτητα $n_R < n_s$, με αποτέλεσμα ο δρομέας να παρουσιάζει κάποια ολίσθηση s .

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα ρεύματα τα οποία επάγονται στο δρομέα δημιουργούν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο έχει τον ίδιο αριθμό πόλων με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο στάτης, με την διαφορά ότι περιστρέφεται με μια συχνότητα ολίσθησης $f_2 = s \cdot f_1$. Όταν ο βραχυκυκλωμένος κλωβός παρουσιάζει απόλυτη συμμετρία το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται περιστρέφεται με την ίδια φορά που περιστρέφεται ο δρομέας. Όταν ο βραχυκυκλωμένος κλωβός παρουσιάζει ασυμμετρία, δημιουργείται ακόμη ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο περιστρέφεται αντίθετα από την φορά περιστροφής του δρομέα. Το αντίθετης φοράς μαγνητικό πεδίο επάγει ρεύματα στο στάτη στη συχνότητα: $f_{sb} = f_1 \cdot (1-2s)$. Η συχνότητα αυτή είναι γνωστή ως: “Συχνότητα διπλής ολίσθησης πλευρικής μπάντας λόγω σπασμένων ράβδων” (σχήμα 2.1).

Επομένως, υπάρχει μια κυκλική εναλλαγή ρεύματος που προκαλεί μια ταλάντωση της ροπής στη συχνότητα $2sf_1$ και μια αντίστοιχη ταλάντωση της ταχύτητας που είναι και αυτή συνάρτηση της αδράνειας του κινητήριου συστήματος.



Σχήμα 2.1: Εμφάνιση Συχνότητας διπλής ολίσθησης πλευρικής μάντας λόγω σπασμένων ράβδων στο φάσμα Έντασης και Τάσης.

Η ταλάντωση της ταχύτητας μπορεί να μειώσει το πλάτος της πλευρικής μάντας $f_1(1-2s)$, όμως ταυτόχρονα εισάγεται στο ρεύμα του στάτη μια επιπλέον πλευρική μάντα στη συχνότητα $f_1(1+2s)$ η οποία οφείλεται στην ταλάντωση του δρομέα. Αυτή η πλευρική μάντα ενισχύεται από την τρίτη αρμονική της ροής. Επομένως τα σφάλματα από σπασμένες μπάρες εισάγουν στο ρεύμα του στάτη αρμονικές, οι οποίες εμφανίζονται στις συχνότητες $f_{sb} = f_1(1 \pm 2s)$. Οι αρμονικές εμφανίζονται στις χαμηλές συχνότητες (0-100 Hz), ενώ στις υψηλές συχνότητες δεν παίρνουμε κάποια πληροφορία σχετική με τις ράβδους του δρομέα.

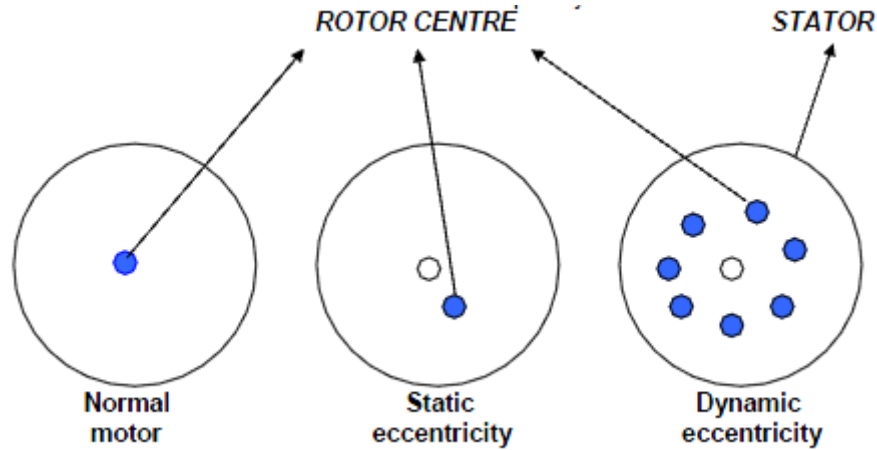
Η διαφορά στο μέγεθος των αιχμών μεταξύ της θεμελιώδους συχνότητας και των πλευρικών της, δείχνει και το μέγεθος της σοβαρότητας του προβλήματος, που παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1. [7]

Πίνακας 2.1: Επίπεδο σημαντικότητας βλάβης ράβδων δρομέα.

Επίπεδο	f_1 / f_{sb} (db)	Κατάσταση Κινητήρα	Προτεινόμενη Ενέργεια
1	>60	Εξαιρετική	Καμία
2	54-60	Καλή	Καμία
3	48-54	Μέτρια	Έλεγχος δεδομένων
4	42-48	Ανάπτυξη ρωγμών σε ράβδους ή υψηλή αντίσταση στις συνδέσεις	Αύξηση της επιβαλλόμενης συχνότητας
5	36-42	Ρωγμή ή σπάσιμο σε μία ή δύο ράβδους	Μέτρηση κραδασμών για επιβεβαίωση του αιτίου και της σπουδαιότητας
6	30-36	Πολλαπλές ρωγμές ή σπάσιμο σε περισσότερες ράβδους	Επισκευή κινητήρα
7	<30	Πολλαπλές ρωγμές ή σπάσιμο σε περισσότερες ράβδους και δακτυλίους βραχυκύκλωσης	Επισκευή ή αντικατάσταση κινητήρα

2.5.2 Εκκεντρότητα δρομέα.

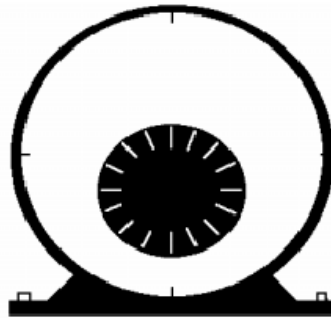
Υπάρχουν δύο είδη εκκεντρότητας που μπορούν να εμφανιστούν σε έναν Η/Κ, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Είδη εκκεντρότητας.

- Στατική εκκεντρότητα (σχήμα 2.3).

Ορίζεται ως ένα σταθερό κενό μεταξύ στάτη και δρομέα και προκαλείται είτε από την παραμόρφωση του πυρήνα του δρομέα (οβάλ αντί για κυκλική περίμετρος) είτε από λανθασμένη τοποθέτηση του δρομέα κατά την αρχική εγκατάσταση. Μια μη ισορροπημένη μαγνητική έλξη αναπτύσσεται μεταξύ αυτού του κενού, με αποτέλεσμα την αύξηση της εκκεντρότητας.



Σχήμα 2.3: Στατική εκκεντρότητα.

Στο φάσμα του ρεύματος (σχήμα 2.4) η στατική εκκεντρότητα εμφανίζεται με αιχμές της Rotor Bar Pass Frequency (RBPF) και των αρμονικών της και πλευρικές τη θεμελιώδη συχνότητα και τις αρμονικές της .

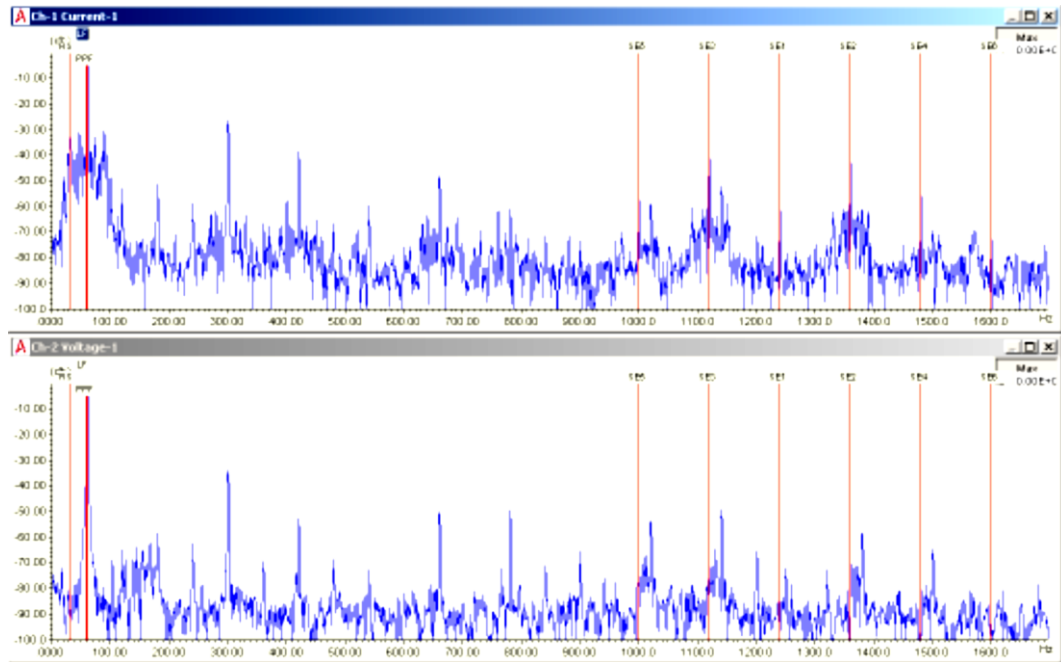
$$\text{Στατική εκκεντρότητα} = \text{RB} \times \text{RS} \pm n\text{FL} \quad (2-1)$$

όπου: RB: ο αριθμός των ράβδων του δρομέα.

RS: η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα.

FL: η συχνότητα του δικτύου (θεμελιώδης).

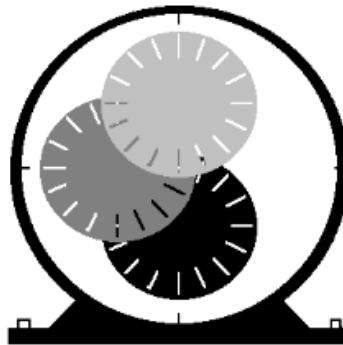
n: ο αριθμός της αρμονικής συχνότητας της θεμελιώδους.



Σχήμα 2.4: Φάσμα έντασης στην περίπτωση στατικής εκκεντρότητας.

- Δυναμική εκκεντρότητα (σχήμα 2.5).

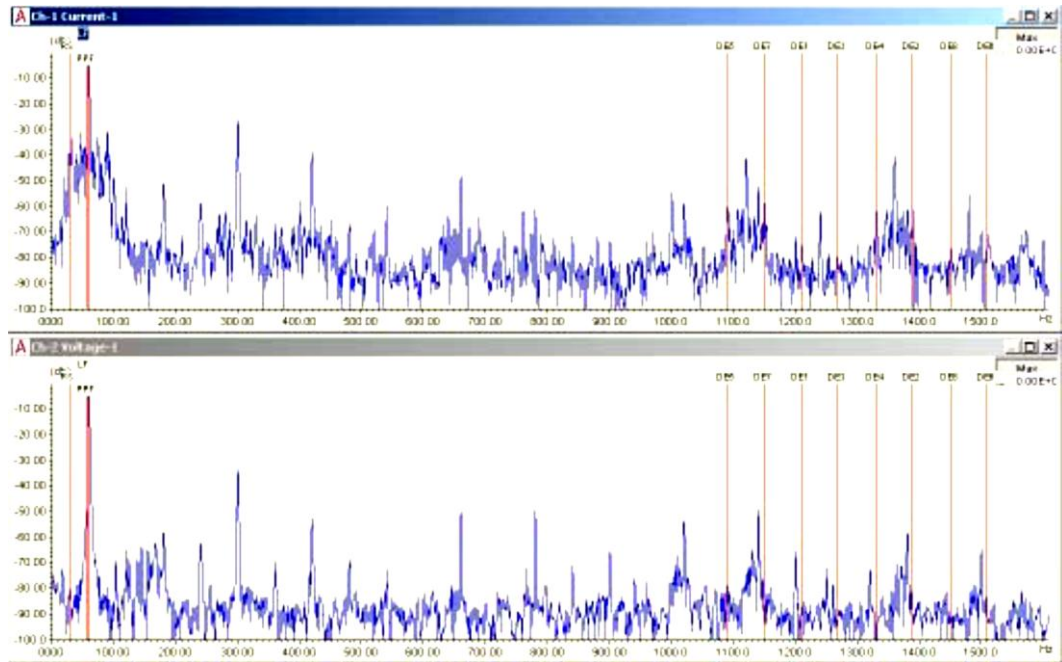
Ορίζεται ως ένα περιστρεφόμενο κενό μεταξύ στάτη και δρομέα και προκαλείται είτε από λυγισμό του άξονα είτε από φθορά των ρουλεμάν. Δημιουργείται έτσι τριβή μεταξύ στάτη και δρομέα προκαλώντας σημαντικές φθορές στον Η/Κ.



Σχήμα 2.5: Δυναμική εκκεντρότητα.

Στο φάσμα του ρεύματος (σχήμα 2.6) η δυναμική εκκεντρότητα εμφανίζεται με αιχμές της Rotor Bar Pass Frequency (RBPF) και των αρμονικών της και πλευρικές τη θεμελιώδη συχνότητα και τις αρμονικές της μαζί με τη συχνότητα περιστροφής:

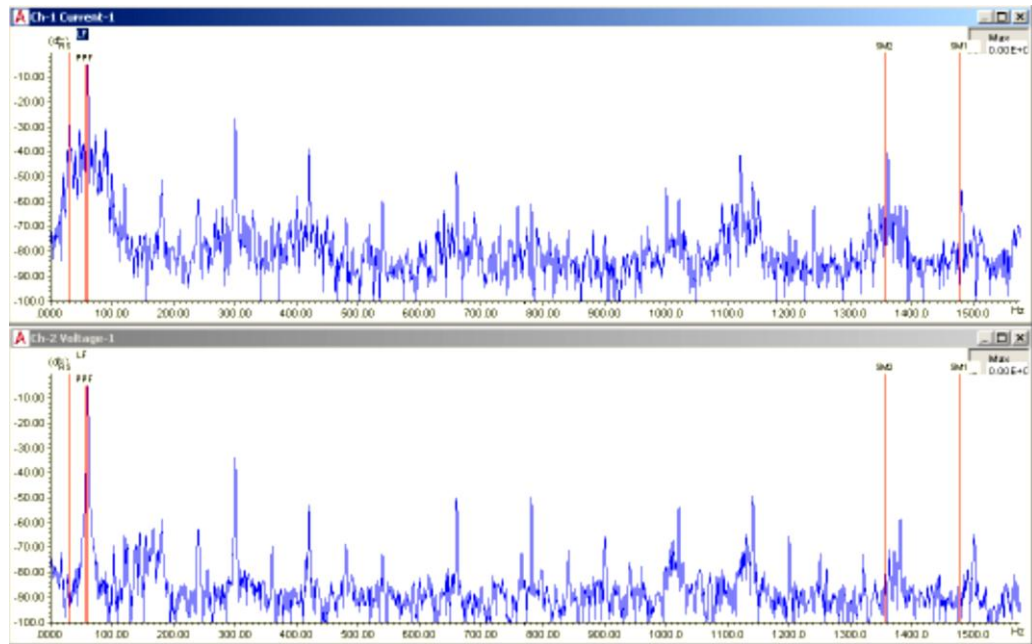
$$\text{Δυναμική εκκεντρότητα} = \text{RB} \times \text{RS} \pm nF_L \pm \text{RS} \quad (2-2)$$



Σχήμα 2.6: Φάσμα έντασης στην περίπτωση δυναμικής εκκεντρότητας.

2.5.3 Μηχανικά προβλήματα του στάτη.

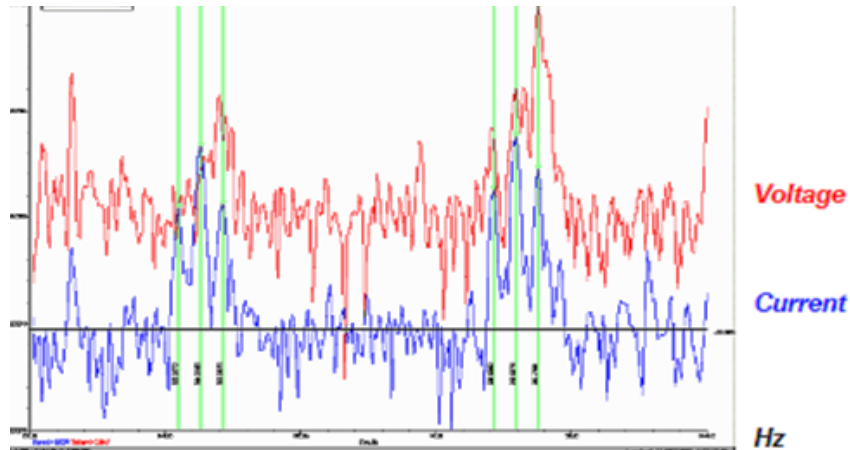
Η χαλαρότητα και η διάβρωση της επίστρωσης των τυλιγμάτων του στάτη, προκαλεί δινορεύματα που αυξάνουν τη θέρμανση των τυλιγμάτων με την τριβή και καταστρέφουν τη μόνωση των αγωγών. Το φάσμα έχει τη μορφή που εμφανίζεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Φάσμα έντασης στην περίπτωση μηχανικών προβλημάτων του στάτη.

2.5.4 Βραχυκυκλώματα (Shorted turns) στα τυλίγματα του στάτη.

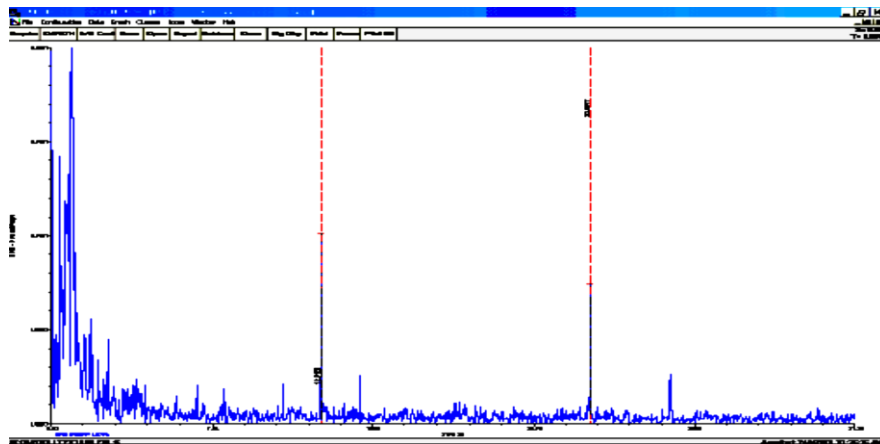
Στη βιβλιογραφία καθώς και σε πολλές δημοσιεύσεις [8,9], γίνεται προσπάθεια να εντοπιστούν και να αναπτυχθούν μαθηματικά ρεύματα που προκαλούν το φαινόμενο και δεν οφείλονται σε κάποιο ηλεκτρικό ή μηχανικό πρόβλημα, ώστε να αποτραπεί η υπερθέρμανση των τυλιγμάτων του στάτη και οι ασυμμετρίες έντασης. Το φάσμα έχει τη μορφή που εμφανίζεται στο σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Φάσμα έντασης και τάσης στην περίπτωση Shorted turns.

2.5.5 Κακή ευθυγράμμιση.

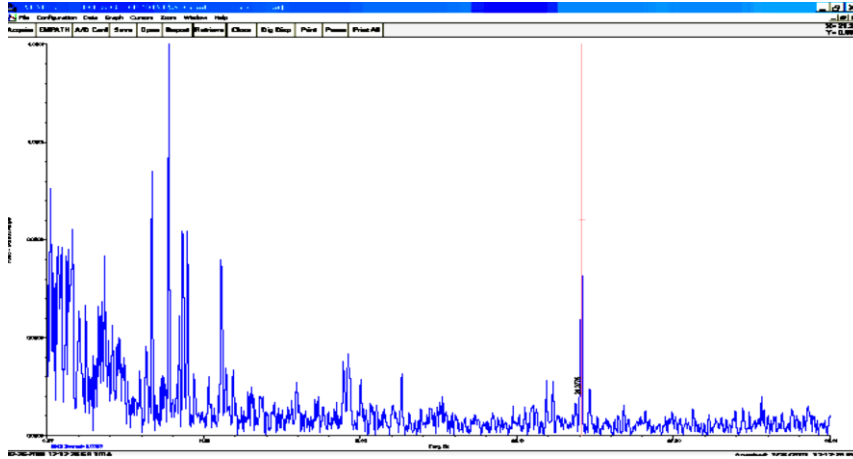
Για τον προσδιορισμό αυτών των προβλημάτων, χρησιμοποιείται το αποδιαμορφωμένο φάσμα της έντασης ώστε να αφαιρεθεί η συχνότητα του δικτύου και οι αρμονικές της. Στο φάσμα αυτό, εμφανίζεται αιχμή στην ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Εάν υπάρχει σωστή ευθυγράμμιση, τότε η αιχμή αυτή είναι ελάχιστα ορατή στο φάσμα. Στην περίπτωση όμως που υπάρχει κακή ευθυγράμμιση ή μηχανική ανισορροπία, τότε εμφανίζονται μεγάλες αιχμές στην ταχύτητα περιστροφής και τις αρμονικές της, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9: Φάσμα έντασης στην περίπτωση κακής ευθυγράμμισης.

2.5.6 Χαλαρότητα κατά την εγκατάσταση.

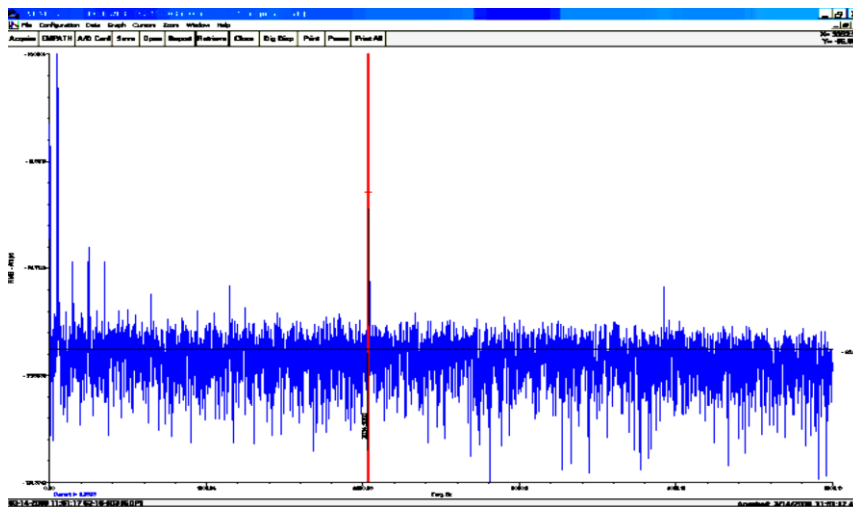
Άνιση ή χαλαρή σύσφιξη των κοχλιών κατά την εγκατάσταση, προκαλούν αυξημένες δονήσεις στον κινητήρα. Αυτές εμφανίζονται στο αποδιαμορφωμένο φάσμα ως αιχμές σε ταχύτητα ίση με το μισό της ταχύτητας περιστροφής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10: Φάσμα έντασης στην περίπτωση χαλαρότητας.

2.5.7 Προβλήματα ρουλεμάν.

Όπως και στη μελέτη των κραδασμών, έτσι και στην ανάλυση ρεύματος, προβλήματα που αφορούν ρουλεμάν (φθορά εξωτερικού ή εσωτερικού δακτυλίου, κλπ), εμφανίζονται στο φάσμα ως αιχμές στις αντίστοιχες συχνότητες που δίνει ο κατασκευαστής (σχήμα 2.11). Είναι ωστόσο προτιμότερη η ανάλυση του φάσματος της ροπής που προκύπτει κατά τις μετρήσεις που δίνει ευκρινέστερα αποτελέσματα στην υψίσυχη περιοχή των φασμάτων.



Σχήμα 2.11: Φάσμα έντασης στην περίπτωση βλάβης των ρουλεμάν.

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΡΑΔΑΣΜΩΝ [10, 11]

3.1 Εισαγωγή.

Όλες οι μηχανές κατά τη λειτουργία τους παράγουν κραδασμούς. Στην ιδεατή κατάσταση λειτουργίας της μηχανής, το επίπεδο των κραδασμών είναι μηδενικό ή ελάχιστο. Στην πραγματική κατάσταση, κατασκευαστικές ατέλειες ή βλάβες που αναπτύσσονται, οδηγούν σε αύξηση των κραδασμών. Τμήμα της ενέργειας που παράγουν ή μεταφέρουν οι μηχανές, δεν διοχετεύεται πλέον στον τελικό αποδέκτη της λειτουργίας της μηχανής, αλλά διεγείρει τα δομικά της στοιχεία και το κέλυφος της, με αποτέλεσμα μεταξύ άλλων και την παραγωγή θορύβου.

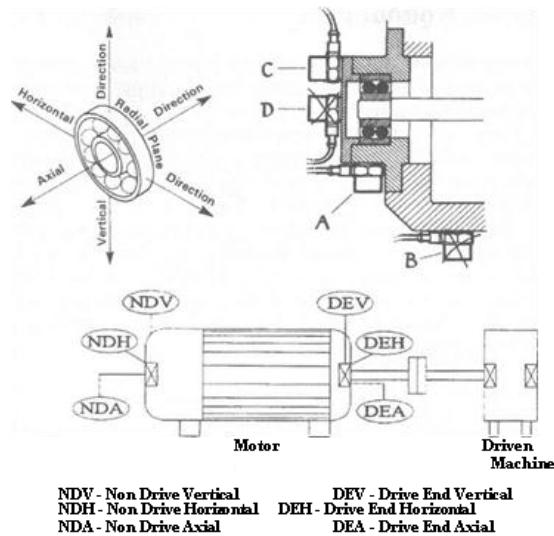
Η παρακολούθηση και η ανάλυση των κραδασμών παρέχει πολλές χρήσιμες πληροφορίες για την κατάσταση μίας μηχανής. Θεωρητικά όλες, και πρακτικά οι περισσότερες ατέλειες ή βλάβες μίας μηχανής μεταβάλλουν το επίπεδο κραδασμών της, που έγιναν προσπάθειες να μελετηθεί αρχικά με πρωτογενή μέσα είτε από τον εκπεμπόμενο θόρυβο και σήμερα με σύγχρονες και αποτελεσματικές μεθόδους ανάλυσης της δυναμικής συμπεριφοράς των μηχανών και ειδικών μετρητικών συστημάτων κραδασμών.

Η μεταβολή των κραδασμών σαν συνέπεια βλάβης, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ο μηχανολογικός εξοπλισμός αποτελεί τη μεγαλύτερη κατηγορία βιομηχανικού εξοπλισμού, καθιστούν σήμερα την παρακολούθηση των κραδασμών σαν την επικρατέστερη μέθοδο "Προβλεπτικής Συντήρησης" στις σύγχρονες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Η έγκαιρη αντίληψη και διάγνωση μίας βλάβης στα αρχικά της στάδια, παρέχει στο προσωπικό συντήρησης όλη τη χρονική ευχέρεια για τη διόρθωση της, προτού η βλάβη επεκταθεί, με πολλαπλασιαστικά καταστροφικά αποτελέσματα, που μπορεί να οδηγήσουν ακόμη και στο σταμάτημα όλης της παραγωγικής μονάδας.

3.2 Μέτρηση κραδασμών.

Για να είναι ασφαλέστερη η αναγνώριση της κατάστασης της μηχανής από την ανάλυση των σημάτων των κραδασμών, πρέπει οι βασικές πληροφορίες που αφορούν την κατάσταση των κινούμενων μερών της μηχανής, να απομονώνονται κατά το δυνατόν από τις υπόλοιπες.

Η πρώτη βασική προϋπόθεση για αυτό, είναι η εύρεση σωστών σημείων τοποθέτησης των αισθητήριων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1. Η μέτρηση πρέπει να γίνεται κατά το δυνατόν και στις 3 χωρικές κατευθύνσεις. Το αισθητήριο πρέπει να είναι τοποθετημένο κατά το δυνατόν πλησιέστερα στα σημεία επαφής των κινούμενων με τα ακίνητα μέρη (π.χ. έδρανα), ώστε να μειώνεται η παραμόρφωση από την οδό διέλευσης των κραδασμών (π.χ. ανακλάσεις σε σημεία ένωσης τμημάτων) και τη συνάρτηση μεταφοράς του κελύφους της μηχανής. Οι μετρήσεις πρέπει να περιλαμβάνουν πολλά σημεία της ίδιας της μηχανής, ώστε να απομονώνονται κατά το δυνατόν οι κραδασμοί που οφείλονται στο περιβάλλον (π.χ. κραδασμοί βάσεως προκαλούμενες από γειτονικές μηχανές).



Σχήμα 3.1: Τυπικά σημεία μέτρησης κραδασμών: Χωρικές διευθύνσεις, θέσεις τοποθέτησης σε ένα σημείο μέτρησης και θέσης σημείων σε μία μηχανή.

Το πρώτο επίπεδο ανάλυσης των κραδασμών περιλαμβάνει την παρακολούθηση του συνολικού επιπέδου των κραδασμών μίας μηχανής. Ο βασικότερος δείκτης που χρησιμοποιείται, είναι η μέση τετραγωνική τιμή της ταχύτητας (mm/sec rms) ή της επιτάχυνσης (g rms). Με βάση αυτή την τιμή, είναι δυνατόν σε πρώτο βαθμό η διάγνωση της κατάστασης της μηχανής. Για το σκοπό αυτό έχουν προταθεί διάφορα κριτήρια και διαγράμματα "Σοβαρότητας Κραδασμών". Τυπικό παράδειγμα αποτελείτο ISO 2372 που προβλέπει την ταξινόμηση των μηχανών σε 6 κατηγορίες, ανάλογα με την ισχύ τους, τη μορφή των στρεφόμενων μερών τους, τον τρόπο έδρασής τους και τον τρόπο σύνδεσης τους με τα υπόλοιπα μηχανήματα, από τα οποία παραλαμβάνουν και/ή μεταβιβάζουν ισχύ. Για κάθε μία από τις τέσσερις πρώτες κατηγορίες (σχήμα 3.2), προβλέπεται η ταξινόμηση της μηχανής από άποψη του συνολικού επιπέδου κραδασμών σε τέσσερις επιμέρους περιοχές:

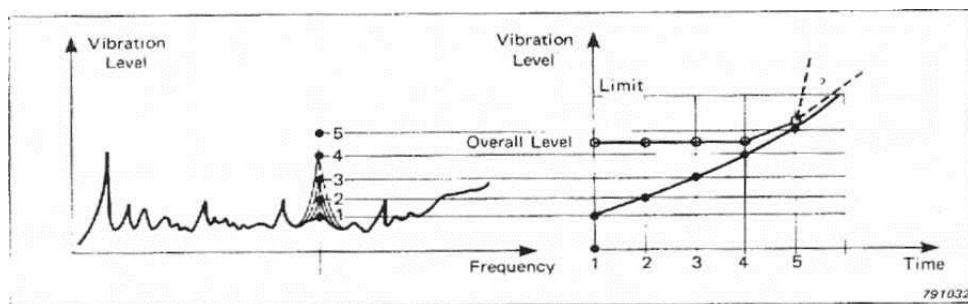
VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816					
Machine		Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
in/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28			
	0.02	0.45			
	0.03	0.71		A good	
	0.04	1.12			
	0.07	1.80			
	0.11	2.80		B satisfactory	
	0.18	4.50			
	0.28	7.10		C unsatisfactory	
	0.44	11.2			
	0.70	18.0			
	0.71	28.0		D unacceptable	
	1.10	45.0			

- (A) Καλή
- (B) Ικανοποιητική
- (C) Μη ικανοποιητική
- (D) Μη επιτρεπτή

Σχήμα 3.2: Περιοχές σημαντικότητας συνολικού επιπέδου κραδασμών.

3.3 Διάγνωση βλαβών.

Αν και το συνολικό επίπεδο κραδασμών παρέχει χρήσιμες ενδείξεις για την κατάσταση μιας μηχανής, πολύ περισσότερες πληροφορίες μπορεί να αντληθούν από τη λεπτομερή ανάλυση της κυματομορφής των κραδασμών. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3, μία βλάβη μπορεί να έχει επίπτωση σε μία περιορισμένη περιοχή συχνοτήτων του φάσματος της κυματομορφής. Όταν αυτή η περιοχή αντιστοιχεί σε υψηλή συχνότητα, το συνολικό επίπεδο κραδασμών παραμένει αμετάβλητο έως σχεδόν το τελικό στάδιο της βλάβης. Πέρα από την έγκαιρη αντίληψη της βλάβης, η λεπτομερής ανάλυση της κυματομορφής των κραδασμών μπορεί να παράσχει και τη δυνατότητα "Διάγνωσης" της μορφής της βλάβης (π.χ. δομικό στοιχείο της μηχανής όπου εμφανίζεται, έκταση της βλάβης, κ.λ.π).



Σχήμα 3.3: Παρακολούθηση εξέλιξης βλάβης στο φάσμα και το συνολικό επίπεδο κραδασμών.

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι διάγνωσης στηρίζονται στην ανάλυση του φάσματος των κραδασμών. Σε μία μηχανή υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας, τα κινούμενα στοιχεία της εκτελούν περιοδικές κινήσεις με συχνότητες επανάληψης σχετιζόμενες με μία βασική ταχύτητα περιστροφής. Κατά συνέπεια, τα φάσματα κραδασμών χαρακτηρίζονται από αιχμές σε συχνότητες, που αντιστοιχούν στις περιόδους λειτουργίας των στοιχείων της μηχανής.

Η παρακολούθηση των μεταβολών του φάσματος, μπορεί σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό να συσχετισθεί με την ύπαρξη ή την πρόοδο μιας συγκεκριμένης βλάβης σε ένα συγκεκριμένο στοιχείο της μηχανής. Προϋπόθεση γι' αυτό είναι η τήρηση των ίδιων συνθηκών λειτουργίας (π.χ. στροφές, ισχύς) και η άριστη γνώση του τρόπου λειτουργίας και της δυναμικής συμπεριφοράς της μηχανής. Σε πάρα πολλές περιπτώσεις, η ανάλυση του φάσματος πρέπει να συνοδεύεται και από ένα σύνολο συμπληρωματικών μετρήσεων, όπως π.χ. ανάλυση της ίδιας της κυματομορφής, ανάλυση φάσης, συνδυασμός φασμάτων πολλών σημείων, ανάλυση μεταβατικής απόκρισης της μηχανής, μετρήσεις συμπληρωματικών φυσικών μεγεθών. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι η αντιστοιχία βλάβης-αιχμών του φάσματος δεν είναι μονοσήμαντη. Η ίδια βλάβη, σε διαφορετικό στάδιο ή σε διαφορετική μηχανή, μπορεί να εκδηλώνεται και σε διαφορετικό τμήμα του φάσματος, ενώ μεταβολές σε μία συχνότητα του φάσματος μπορεί να οφείλονται σε διαφορετικές αιτίες βλαβών.

3.4 Συμπτωματολογία βλαβών ηλεκτροκινητήρων με την ανάλυση κραδασμών. [12]

3.4.1 Εκκεντρότητα στον στάτη του κινητήρα.

Σύμπτωμα: Ακτινική αιχμή στη διπλάσια συχνότητα της ηλεκτρικής γραμμής δηλαδή στα 100 Hz.

Τα προβλήματα του στάτη δημιουργούν μεγάλη δόνηση σε συχνότητα που είναι διπλάσια της συχνότητας του ρεύματος ήτοι στα 100 Hz. Η εκκεντρότητα του στάτη δημιουργεί ασύμμετρο διάκενο αέρα μεταξύ των περυγίων και του στάτη, το οποίο παράγει κραδασμούς προς δεδομένη κατεύθυνση. Μαλακά ή πιτσικαρισμένα πόδια κινητήρα ή στρεβλή βάση έχουν ως αποτέλεσμα την εκκεντρότητα του στάτη.

3.4.2 Εκκεντρότητα στο δρομέα του κινητήρα.

Σύμπτωμα: Ακτινική αιχμή στη συχνότητα 100 Hz.

Pole pass frequency γύρω από την 1X.

Ένας έκκεντρος δρομέας δημιουργεί μεταβλητό διάκενο αέρα μεταξύ των περυγίων και του στάτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία παλλόμενη πηγή κραδασμού. Πέρα από την αιχμή στη διπλάσια συχνότητα της γραμμής 100 Hz, θα αναμένουμε να δούμε πλευρικές αιχμές της pole pass frequency γύρω από την αιχμή στη συχνότητα 1X. Η συχνότητα αυτή (pole pass frequency) ισούται με την συχνότητα ολίσθησης επί τον αριθμό των πόλων. Η συχνότητα ολίσθησης αντιπροσωπεύει την διαφορά της πραγματικής ταχύτητας του κινητήρα από την σύγχρονη ταχύτητα του.

3.4.3 Πιτσικαρισμένος δρομέας κινητήρα.

Σύμπτωμα: Ακτινική αιχμή στη συχνότητα 1X.

Ασύμμετρη θέρμανση του δρομέα λόγω άνισης διανομής ρεύματος στις μπάρες του, προκαλεί στρέβλωση στον δρομέα, με αποτέλεσμα δημιουργία κατάστασης αζυγοσταθμίας. Τα συμπτώματα δεν υπάρχουν όταν ο κινητήρας είναι κρύος. Οι τοπικές υπερθερμάνσεις στους κινητήρες μπορεί να προκαλέσουν βίαιες συνθήκες στις ράβδους, ώστε κάποια από αυτές να υπερθερμανθεί τόσο πολύ μέχρι να λειώσει με αποτέλεσμα την ανάπτυξη διάκενου αέρος (όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις).

3.4.4 Ραγισμένη ή σπασμένη ράβδος (μπάρα) του κινητήρα.

Σύμπτωμα: pole pass sidebands γύρω από την συχνότητα 1X.

Εμφάνιση αρμονικών.

Ραγισμένη μπάρα του κινητήρα δημιουργεί pole pass frequency sidebands γύρω από την συχνότητα 1X και τις αρμονικές της 2X, 3X κλπ. Ένας επαγωγικός κινητήρας με βλάβη στις μπάρες του δίνει χαρακτηριστική ταλάντωση μεταβλητού πλάτους με συχνότητα διπλάσια της συχνότητας ολίσθησης του κινητήρα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται beating, το οποίο μπορεί να ακουστεί και να μετρηθεί. Η συχνότητα και το

πλάτος της ταλάντωσης beating εξαρτώνται από συχνότητα ολίσθησης η οποία εξαρτάται από το φορτίο του κινητήρα.

3.4.5 Χαλαρές ράβδοι του κινητήρα.

Σύμπτωμα: 100 Hz sidebands γύρω από την συχνότητα RBPF.

Εάν στον κινητήρα υπάρχουν χαλαρές ράβδοι, θα εμφανισθεί αιχμή στη συχνότητα RBPF= Rotor Bar Pass Frequency (η οποία ισούται με το γινόμενο του αριθμού των ράβδων επί την συχνότητα του δρομέα) και γύρω της θα εμφανισθούν sidebands της διπλάσιας συχνότητας του ρεύματος (100 Hz). Ακόμη και όταν δεν γνωρίζουμε τον αριθμό των ράβδων του κινητήρα, εάν δούμε αιχμή σε υψηλή συχνότητα και γύρω της διάφορες sidebands με διαφορές 100 Hz, μπορούμε να αποδώσουμε αυτήν την συχνότητα στη συγκεκριμένη βλάβη.

3.4.6 Χαλαρός δρομέας.

Σύμπτωμα: Μεγάλη αιχμή στην 1X και ύπαρξη αρμονικών της.

Μερικές φορές ο δρομέας μπορεί να ολισθαίνει επί της ατράκτου, κατά διαλείμματα ανάλογα με την θερμοκρασία. Αυτό προκαλεί ισχυρή δόνηση στη συχνότητα 1X και στις αρμονικές της. Η κατάσταση αυτή υποκινείται από απότομες μεταβολές του φορτίου ή της τάσης του ρεύματος.

3.4.7 Χαλαρά τυλίγματα στον στάτη.

Σύμπτωμα: Μεγάλη ακτινική αιχμή στη συχνότητα 100 Hz.

Εάν χαλαρώσουν, έστω και λίγο, τα τυλίγματα στον στάτη του κινητήρα, η αιχμή στη διπλάσια (100 Hz) συχνότητα του ρεύματος (50 Hz) θα αυξηθεί. Η κατάσταση αυτή είναι ολέθρια διότι καταστρέφει (τρίβει) την μόνωση των αγωγών και οδηγεί σε ελαττωματικά τυλίγματα που καταλήγουν σε βλάβη του στάτη.

3.4.8 Προβληματικά ελάσματα.

Σύμπτωμα: Μεγάλη ακτινική αιχμή στη συχνότητα 100 Hz.

Ο δρομέας και ο στάτης των κινητήρων (AC) εναλλασσομένου ρεύματος γίνονται από λεπτά ελάσματα που είναι μονωμένα μεταξύ τους. Εάν τα ελάσματα βραχυκυκλωθούν (πάψουν να είναι μονωμένα) θα συμβεί τοπική υπερθέρμανση και πιτσικάρισμα (τοπική στρέβλωση). Τέτοια ελάσματα δημιουργούν μεγάλη αιχμή στη διπλάσια (100 Hz) συχνότητα του ρεύματος (50 Hz) ενώ η στρέβλωση αυξάνει την αιχμή στη συχνότητα 1X και συχνά εμφανίζει σε αυτήν pole pass sidebands.

4. ΣΥΣΚΕΥΗ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ "DYNAMIC MOTOR MONITOR EXP3000" ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ BAKER.

4.1 Περιγραφή Εξοπλισμού. [13]

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός της εταιρείας Baker, μέλους της SKF, και συγκεκριμένα το διαγνωστικό μηχάνημα: Dynamic Motor Monitor EXP 3000 που φαίνεται στην εικόνα του σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.1: Dynamic Motor Monitor EXP 3000.

Ο εξοπλισμός του Dynamic Motor Monitor EXP 3000 αποτελείται από τα εξής:

- Κεντρική μονάδα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων EXP 3000 με θύρες τάσης και έντασης εναλλασσόμενου/συνεχούς ρεύματος και θύρα για ανάλυση κραδασμών.
- Υπολογιστής με εγκατεστημένο λογισμικό για την επεξεργασία των δεδομένων.
- Αισθητήρες μέτρησης της έντασης του εναλλασσόμενου ρεύματος στις 3 φάσεις. Πρόκειται για σετ τριών (3) αμπεροτσιμπιδών που τυλίγουν (αγκαλιάζουν) το καλώδιο της κάθε φάσης (clamp-on) με διαφορετικό χρωματισμό (κόκκινο, κίτρινο, μπλε). Διατίθενται αμπεροτσιμπίδες των 10A, 150A, 1000A και 3000A και χρησιμοποιούνται ανάλογα με την ονομαστική ένταση που δίνει ο κατασκευαστής κάθε ηλεκτροκινητήρα.
- Αισθητήρες μέτρησης της τάσης του εναλλασσόμενου ρεύματος στις 3 φάσεις και γείωση. Πρόκειται για σετ τριών (3) τσιμπιδών (clips) που εφαρμόζουν σε κάθε φάση με διαφορετικό χρωματισμό (κόκκινο, κίτρινο, μπλε) και τσιμπίδα (clip) για τη γείωση του εξοπλισμού. Η μέγιστη τάση που μπορεί να μετρηθεί είναι 600V.
- Επίσης, διατίθενται αισθητήρες για ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος, καθώς και πρόσθετος εξοπλισμός για την ανάλυση κραδασμών, που όμως δεν περιλαμβάνονται στον εξοπλισμό του εργαστηρίου.

4.2 Εγκατάσταση Εξοπλισμού.

- Αρχικά, γίνεται η σύνδεση του EXP3000 με τους φορητούς αισθητήρες:
 - Σύνδεση των αισθητήρων τάσης και έντασης στις αντίστοιχες θύρες του επεξεργαστή του EXP3000.
 - Σύνδεση του EXP3000 με την παροχή ρεύματος και ενεργοποίηση του υπολογιστή.
 - Άνοιγμα του προγράμματος "Explorer" με διπλό κλικ στο αντίστοιχο εικονίδιο.
- Στη συνέχεια, γίνεται η σύνδεση του EXP3000 με τον ηλεκτροκινητήρα.

Υπάρχουν δύο πιθανοί τρόποι σύνδεσης. Είτε συνδέεται ο EXP3000 με τον πίνακα διανομής ρεύματος από τον οποίο τροφοδοτείται ο ηλεκτροκινητήρας (Motor Control Center), είτε με το ακροκιβώτιο σύνδεσης που είναι προσαρμοσμένο σε κάθε ηλεκτροκινητήρα. Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε ο δεύτερος τρόπος, όπως φαίνεται στην εικόνα του σχήματος 4.2, καθώς έτσι περιορίζονται στο ελάχιστο οι απώλειες που υπάρχουν στη γραμμή που συνδέει τους ηλεκτροκινητήρες με το δίκτυο.

- Σύνδεση των τσιμπιδών της τάσης σε κάθε μια από τις 3 φάσεις και τη γείωση στην αντίστοιχη θέση γείωσης του ηλεκτροκινητήρα.
- Με τις αμπεροτσιμπίδες, αγκαλιάζονται τα καλώδια της κάθε φάσης προσέχοντας ώστε τα χρώματά τους να ταιριάζουν με αυτά των τσιμπιδών της τάσης. (Η κόκκινη αμπεροτσιμπίδα συνδέεται στη φάση που συνδέθηκε η κόκκινη τσιμπίδα τάσης και το ίδιο για την κίτρινη και τη μπλε). Επίσης, χρειάζεται προσοχή ώστε η κατεύθυνση των που είναι χαραγμένα πάνω στις αμπεροτσιμπίδες να δείχνουν προς τη μεριά του φορτίου.



Σχήμα 4.2: Σύνδεση αισθητήρων στο ακροκιβώτιο ηλεκτροκινητήρα.

4.3 Επιλογή παραμέτρων και διαδικασία εκτέλεσης της μέτρησης.

4.3.1 Δημιουργία βάσης δεδομένων νέου ηλεκτροκινητήρα (ταυτότητα κινητήρα).

- Από τη γραμμή εργαλείων και την επιλογή: Machine → Create Machine. Στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται, εισάγονται τα στοιχεία που αναφέρονται παρακάτω:
 - προαιρετικά πληροφορίες σχετικά με τον ηλεκτροκινητήρα που πρόκειται να μελετηθεί, όπως: Όνομα, Αριθμός ονομαστικού, Κατασκευαστής, Μοντέλο, Θέση/κτήριο που βρίσκεται, Ώρες λειτουργίας και Κόστος ανά KWh,
 - υποχρεωτικά τα ονομαστικά του χαρακτηριστικά που βρίσκονται στην πινακίδα του κατασκευαστή: Ισχύς σε Hp ή KW, Τάση (Volts), Ένταση (Amps), Ταχύτητα περιστροφής (Rpm), Συχνότητα (Frequency) εάν αυτή είναι σταθερή (50Hz) ή VFD (Variable Frequency Drive) εάν έχουμε οδήγηση μεταβλητής συχνότητας.
- Στη συνέχεια επιλογή: Create Machine.

4.3.2 Δημιουργία ηλεκτρικού τεστ.

Είναι δυνατόν να τεθούν νέα όρια ή να γίνει αλλαγή των ορίων (thresholds) που έχουν τεθεί στα προς εξέταση μεγέθη, από την επιλογή Thresholds → Create Elec. Test Model / Edit Test Model και συμπλήρωση των επιθυμητών ορίων στο παράθυρο διαλόγου. Για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν τα αποθηκευμένα από το σύστημα όρια μιας και τέθηκαν βάσει των κανονισμών NEMA Standards MG1 Motors and Generators.

4.3.3 Επιλογή βρόχων κατά τη συλλογή δεδομένων (Loop Acquisition).

Από τη γραμμή εργαλείων επιλέγεται Tools → Loop Acquisition. Υπάρχει η δυνατότητα δύο επιλογών:

- Χρονικά προγραμματισμένα (Timed), όπου ορίζεται στο παράθυρο διαλόγου ο αριθμός των τεστ που θα εκτελεστούν, ανά πόσο χρονικό διάστημα και τότε θα γίνει η έναρξη και η λήξη τους.
- Συνεχόμενα (Continuous), όπου εκτελείται διαδοχικά ο αριθμός των τεστ που ορίζεται, χωρίς διαστήματα μεταξύ των τεστ. Στις μετρήσεις που έγιναν επιλέχθηκε αυτή η μορφή με 10 επαναλήψεις.

4.3.4 Επιλογή παραμέτρων συλλογής δεδομένων.

- Επιλογή του χρόνου (sec) και των αρμονικών που θα αποθηκευθούν: Από τη γραμμή εργαλείων και την επιλογή: Options → Electrical Acquisition Options και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγεται η διάρκεια της λήψης δεδομένων από 10 έως και 120 sec και το πλήθος των αρμονικών που θα ληφθεί από 20 έως 100.


- Επιλογή του χρόνου (sec) και της μέγιστης συχνότητας (Hz) που θα έχουν τα φάσματα που προκύπτουν: Από τη γραμμή εργαλείων και την επιλογή: Options → Spectrum Acquisition Options και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγεται η διάρκεια από 0,05 έως και 13,11 sec και η μέγιστη συχνότητα από 500 έως 16666 Hz.

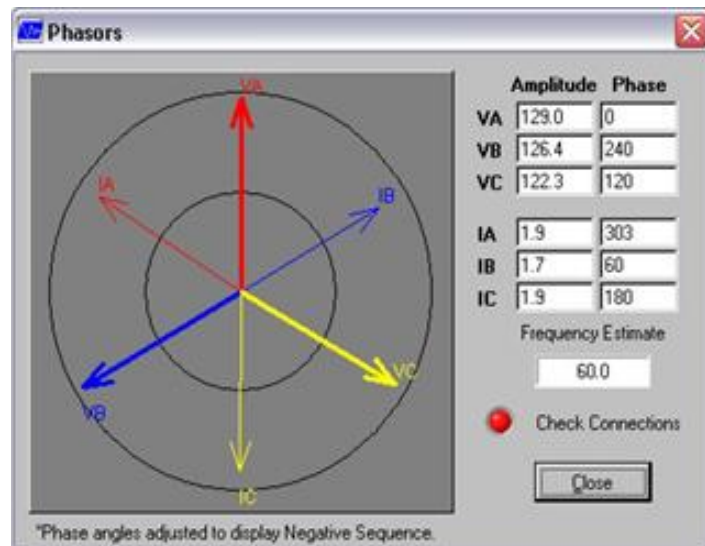
4.3.5 Επιλογή λοιπών παραμέτρων μέτρησης.

- Επιλογή αυτόματης επιλογής φάσεων (autophase) ώστε να μην είναι απαραίτητη η παρέμβαση του χειριστή μετά τη σύνδεση των αισθητηρίων. Από την αρχική οθόνη και την επιλογή: Autophase → Yes.
- Επιλογή των φορητών αισθητήρων. Από την αρχική οθόνη και την επιλογή Sensors → Portable.
- Επιλογή των αμπεροτσιμπίδων που χρησιμοποιούνται, ανάλογα με την ονομαστική ένταση του κάθε ηλεκτροκινητήρα. Από την αρχική οθόνη και την επιλογή CT Selection → επιλογή μεταξύ 10A, 150A, 1000A, 3000A.

4.3.6 Έλεγχος συνδέσεων.

Υπάρχουν τρεις τρόποι για τον έλεγχο της ορθής σύνδεσης των αισθητήρων:

- Από τη γραμμή εργαλείων και την επιλογή: Tools → View Connections.
- Από το εικονίδιο  που βρίσκεται στην αρχική οθόνη.
- Από την αρχική οθόνη και την επιλογή: Connection → Phasors.



Σχήμα 4.3: Τρέχουσα κατάσταση συνδέσεων στις 3 φάσεις.

Και στις τρεις περιπτώσεις, η κατάσταση των συνδέσεων περιγράφεται όπως στην εικόνα του σχήματος 4.3. Εάν οι συνδέσεις είναι σωστές θα υπάρχει πράσινη ένδειξη, σε αντίθετη περίπτωση η ένδειξη θα είναι κόκκινη και θα πρέπει να σταματήσει η λειτουργία του κινητήρα ώστε να γίνει έλεγχος στην σωστή τοποθέτηση των χρωματισμών των αισθητήρων ή την κατεύθυνση των βελών των αμπεροτσιμπίδων, ή ακόμη και της περίπτωσης που έφυγε από τη θέση της μια τσιμπίδα.

Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, τίθεται σε λειτουργία ο κινητήρας και εκτελείται η μέτρηση με την επιλογή: Run Electrical από την αρχική οθόνη και με την ολοκλήρωσή του γίνεται αποθήκευση των αποτελεσμάτων.

4.4 Εκτελούμενα Τεστ από το EXP3000. [14]

4.4.1 Κατάσταση Ισχύος (Power Condition).

Ερευνά την ποιότητα του ρεύματος εισόδου στον κινητήρα. Εάν αυτή είναι χαμηλή, τότε ο κινητήρας δυσκολεύεται να παράγει το προβλεπόμενο έργο, θερμαίνεται και επιδεινώνεται η μόνωσή του. Βάσει των Standard NEMA, αύξηση κατά 10% στη θέρμανση των τυλιγμάτων, συνεπάγεται μείωση στο μισό της διάρκειας ζωής της μόνωσης.

Τα προβλήματα στην κατάσταση ισχύος:

- Προέρχονται από το δίκτυο τροφοδοσίας (πηγή ηλεκτροδότησης) και έως πριν τον Η/Κ.
- Αφορούν όλους τους Η/Κ που είναι συνδεδεμένοι και τροφοδοτούνται από το κοινό δίκτυο και όχι μόνο αυτόν που εξετάζεται.
- Επιφέρουν μεγαλύτερη επιδείνωση στους Η/Κ που εργάζονται σε μεγαλύτερα φορτία και περισσότερες στροφές.

4.4.1.1 Επίπεδο Τάσης (Voltage Level).

Σε κανονικές συνθήκες, ο ένας κινητήρας πρέπει να λειτουργεί στο 100% της τάσης που προβλέπει ο κατασκευαστής. Η λειτουργία των επαγωγικών Η/Κ παραμένει επιτυχή αν η απόκλιση της τάσης από την ονομαστική τιμή είναι της τάξης του $\pm 10\%$. Ωστόσο, οι κινητήρες ενδέχεται να λειτουργούν σε κυκλώματα τάσης εκτός των ονομαστικών τους τιμών. Υπό αυτές όμως τις συνθήκες, η απόδοση του κινητήρα θα διαφέρει από την προβλεπόμενη. Παρακάτω αναλύονται μερικά από τα λειτουργικά αποτελέσματα που προκαλούνται λόγω των μικρών διακυμάνσεων της τάσης και είναι ενδεικτικά του γενικού χαρακτήρα των αλλαγών που παράγεται από την εν λόγω μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας.

Επιπτώσεις στη θερμοκρασία: Με αύξηση ή μείωση της τάσης κατά 10% από την τιμή που προσδιορίζεται από τον κατασκευαστή, η θέρμανση στην ονομαστική ιπποδύναμη του φορτίου μπορεί να αυξηθεί. Αυτή η λειτουργία για μεγάλα χρονικά διαστήματα μπορεί να επιταχύνει την υποβάθμιση του συστήματος μόνωσης.

Επιπτώσεις στον συντελεστή ισχύος (Power Factor): Σε ένα κινητήρα με συνήθη χαρακτηριστικά που λειτουργεί στο πλήρες ονομαστικό φορτίο, αύξηση της τάσης κατά

10% από την προσδιοριζόμενη τιμή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή ισχύος, ενώ μείωσή της κατά 10% συνήθως συνεπάγεται αύξηση του συντελεστή ισχύος.

Επιπτώσεις στη ροπή εκκίνησης: Η ροπή κατά την εκκίνηση (locked-rotor torque) και η ροπή ανατροπής (breakdown torque), είναι ανάλογη με το τετράγωνο της εφαρμοζόμενης τάσης.

Επιπτώσεις στην ολίσθηση: Αύξηση της τάσης κατά 10%, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ολίσθησης σε ποσοστό 17%, ενώ μείωση της τάσης κατά 10% έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ολίσθησης σε ποσοστό 21%. Έτσι, αν η ολίσθηση στην ονομαστική τάση ήταν 5% και υπήρχε μείωση της τάσης κατά 10% από την ονομαστική της τιμή, τότε το αποτέλεσμα θα ήταν να αυξηθεί η ολίσθηση σε 6,05% .

Η λειτουργία με υπέρβαση της τάσης, σε ποσοστό 5%, αρκετές φορές επιδιώκεται [15], καθώς έτσι εξασφαλίζεται ότι η τάση που φτάνει στα τερματικά των Η/Κ θα είναι επαρκής μετά και την πτώση τάσης εξαιτίας της αντίστασης κατά την οδήγηση και επίσης η μικρή υπέρβαση στην τάση προκαλεί τεχνητή μείωση στα επίπεδα της έντασης των ρευμάτων του στάτη που χρησιμοποιούνται σε μια πρώτη εκτίμηση του φορτίου και αποτελούν πηγή των απωλειών I^2R .

Η πρακτική όμως αυτή είναι λανθασμένη καθώς η εκτίμηση του φορτίου βάσει της έντασης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα, δίνοντας την αίσθηση της ασφάλειας όταν ο Η/Κ λειτουργεί με αυξημένη τάση αλλά την ονομαστική ένταση και επίσης δίνεται η αίσθηση της μείωσης των απωλειών και πιο υγιούς λειτουργίας του κινητήρα, κάτι που βελτιώνει μόνο οριακά την απόδοση λειτουργίας του.

Στην πραγματικότητα, εισάγονται καταστάσεις υπερθέρμανσης και οι Η/Κ κάτω από αυτές τις συνθήκες λειτουργούν με επιδείνωση του συντελεστή ισχύος (service factor). Τα σημαντικότερα προβλήματα που προκαλούνται από υπέρβαση τάσης (Over Voltage) συνοψίζονται παρακάτω:

- Δημιουργία υπερβολικών αρμονικών ρευμάτων, με αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή ισχύος.
- Μικρή υπέρβαση από την ονομαστική τιμή της τάσης και με την προϋπόθεση ότι το φορτίο παραμένει σταθερό, προκαλεί μικρή μείωση στην ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον στάτορα.
- Μεγάλη υπέρβαση από την ονομαστική τιμή της τάσης προκαλεί αύξηση στα επίπεδα της έντασης, υπερθέρμανση και μείωση της απόδοσης λειτουργίας.

Η περίπτωση όπου υπάρχει υποβιβασμός της τάσης (Under Voltage) στην τροφοδοσία του κινητήρα είναι χειρότερη για τη λειτουργία του, καθώς:

- Ο Η/Κ τραβάει περισσότερο ρεύμα για να παράγει την απαιτούμενη ισχύ, κάτι που συνεπάγεται αυξημένες απώλειες I^2R και υπερθέρμανση του στάτη με τελικό αποτέλεσμα την πρόωρη φθορά της μόνωσης των τυλιγμάτων.
- Όσο μικρότερη είναι η τάση που φτάνει στον Η/Κ, τόσο μεγαλύτερη είναι η ολίσθηση για συγκεκριμένο φορτίο.
- Μείωση του επιπέδου της τάσης προκαλεί μείωση στην ροπή που παράγεται από τον κινητήρα.

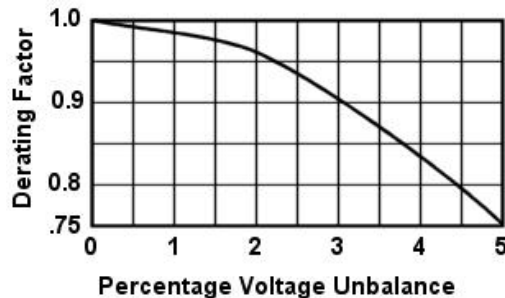
4.4.1.2 Ασυμμετρία Τάσης (Voltage Unbalance) [16, 17].

Ορίζεται ως το ποσοστό του λόγου της μέγιστης απόκλισης των τάσεων από τη μέση τιμή της τάσης προς την τιμή αυτή.

Για παράδειγμα, εάν οι τάσεις σε κάθε φάση μετρηθούν 460V, 467V και 450V, η μέση τιμή τους είναι 459V, επομένως η μέγιστη απόκλιση από αυτήν είναι: $459 - 450 = 9V$. Ορίζεται σαν Voltage Unbalance το ποσοστό: $100\% \times 9/459 = 1,96\%$.

Σε ένα συμμετρικό σύστημα, τα διανύσματα των τάσεων στις 3 φάσεις έχουν το ίδιο μέγεθος και διαφορά φάσης 120° μεταξύ τους. Κάθε παρέκκλιση από αυτά τα δεδομένα εισάγει ασυμμετρίες. Η ασυμμετρία τάσης μπορεί να περιγραφεί και ως αλληλουχία τριών συμμετρικών συνιστωσών: θετικής, αρνητικής και μηδενικής. Για την περίπτωση του 3φασικού ρεύματος, η θετική συνιστώσα αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό, είναι επωφελής για τη λειτουργία καθώς είναι αυτή που κινεί το ρότορα στη σωστή κατεύθυνση για την παραγωγή ροπής και προκαλεί ελάχιστη υπερθέρμανση. Η αρνητική συνιστώσα έχει τη μεγαλύτερη σημασία, καθώς τείνει να περιστρέψει το ρότορα σε κατεύθυνση αντίθετη της κανονικής (θετικής), προκαλώντας υπερθέρμανση. Η μηδενική συνιστώσα δεν έχει πρακτική σημασία καθώς είναι το άθροισμα της 3^{ης}, 6^{ης}, 9^{ης} κλπ αρμονικής της θεμελιώδους συχνότητας λειτουργώντας σαν γείωση.

Σε κανονικές συνθήκες, ένας Η/Κ πρέπει να λειτουργεί με Voltage Unbalance 0%. Βάσει των Standards της NEMA MG1, το ποσοστό αυτό δεν πρέπει να ξεπερνάει το 1%. Αν αυτό συμβαίνει, προκαλείται υπερθέρμανση η οποία αντισταθμίζεται με τον συντελεστή φθοράς (Derating Factor) που φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 4.4.



Σχήμα 4.4: Συντελεστή φθοράς συναρτήσει της ασυμμετρίας τάσης.

Βάσει του διαγράμματος του σχήματος 4.4, ο Η/Κ πρέπει να λειτουργεί κάτω από την ονομαστική ισχύ εξόδου του (derating) εάν το ποσοστό της ασυμμετρίας είναι άνω του 1%, ενώ η λειτουργία του κινητήρα με ποσοστό ασυμμετρίας πάνω από 5% πρέπει να αποφεύγεται. Για παράδειγμα, εάν σε Η/Κ 10 kW υπάρχει ασυμμετρία τάσης 3%, τότε από το διάγραμμα ο κινητήρας θα πρέπει να λειτουργεί σε φορτίο 9 kW. Εάν απαιτείται ισχύς εξόδου 10 kW και υπάρχει ασυμμετρία τάσης 3%, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί κινητήρας με ονομαστική ισχύ εξόδου 12 kW.

Η ασυμμετρία στην τάση οφείλεται στο δίκτυο διανομής της ενέργειας και μαζί με την εκλογή του κατάλληλου κινητήρα για συγκεκριμένο φορτίο είναι τα αίτια των σημαντικότερων ηλεκτρικών προβλημάτων στη βιομηχανία.

Μερικές από τις επιπτώσεις της ασυμμετρίας τάσης στην απόδοση λειτουργίας των Η/Κ είναι:

- Επιπτώσεις στη ροπή: Η ροπή εκκίνησης και η ροπή ανατροπής μειώνονται. Εάν η ασυμμετρία είναι μεγάλη, τότε ίσως η ονομαστική ροπή εξόδου του Η/Κ να μην είναι επαρκής για την εργασία που προορίζεται.
- Επιπτώσεις στην ταχύτητα περιστροφής: Οι στροφές λειτουργίας του Η/Κ είναι ελαφρώς μειωμένες. Η ύπαρξη παλμών στην ταχύτητα περιστροφής προκαλεί και υψηλότερα επίπεδα θορύβου και κραδασμών του κινητήρα.
- Επιπτώσεις στην ολίσθηση: Η ολίσθηση αυξάνεται ώστε να ανταπεξέλθει ο κινητήρας στις αυξημένες ανάγκες λόγω των πρόσθετων απωλειών.

Συγκεκριμένα, στη θετική συνιστώσα της τάσης αντιστοιχεί μικρή ολίσθηση:

$$s_1 = (N_s - N_r) / N_s \quad (4-1)$$

ενώ στην αρνητική συνιστώσα της τάσης αντιστοιχεί μεγάλη ολίσθηση (κοντά στο 2):

$$s_2 = (-N_s - N_r) / -N_s = 2 - s_1 \quad (4-2)$$

όπου: N_s = σύγχρονη ταχύτητα, N_r = ταχύτητα δρομέα.

- Επιπτώσεις στην ένταση του ρεύματος: Ήπια ασυμμετρία τάσης προκαλεί μικρή αύξηση της έντασης του ρεύματος, αλλά ταυτόχρονα και μεγάλη ασυμμετρία στην ένταση (Current Unbalance) που είναι 6 – 10 φορές της Voltage Unbalance. Όσο μικρότερο είναι το φορτίο τόσο μεγαλύτερη είναι η ασυμμετρία στην ένταση.

Από τη θεωρία των επαγωγικών κινητήρων γνωρίζουμε πως η αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη της ολίσθησης. Έτσι, στην εκκίνηση που η ολίσθηση είναι υψηλή, η αντίσταση είναι μικρή, ενώ όταν η ολίσθηση μικραίνει (κατά τη λειτουργία), η αντίσταση είναι μεγάλη. Αντίστοιχα, μπορούμε να πούμε ότι ο λόγος της αντίστασης της θετικής προς αυτή της αρνητικής συνιστώσας είναι:

$$Z_1/Z_2 = I_{start}/I_{running} \quad (4-3)$$

Η θετική συνιστώσα της έντασης είναι:

$$I_1 = V_1/Z_1 \quad (4-4)$$

και η αρνητική:

$$I_2 = V_2/Z_2 \quad (4-5)$$

και ο λόγος τους:

$$I_2/I_1 = (V_2/V_1) \times (I_{start}/I_{running}) \quad (4-6)$$

Για παράδειγμα, εάν σε Η/Κ που το ρεύμα εκκίνησης είναι 6 φορές του ρεύματος λειτουργίας και υπάρχει ασυμμετρία τάσης 5%, τότε η ασυμμετρία στην ένταση θα φτάσει το 30%.

- Επιπτώσεις στη θερμοκρασία: Η ασυμμετρία στην τάση προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του Η/Κ, αυξημένες απώλειες και μείωση της διάρκειας ζωής της μόνωσής του. Συγκεκριμένα, η επιπρόσθετη αύξηση της θερμοκρασίας είναι:

$$\% \text{αύξηση θερμοκρασίας} = 2 \times (\% \text{ Voltage Unbalance})^2 \quad (4-7)$$

Αυτό σημαίνει πως σε Η/Κ με θερμοκρασία 100°C και ασυμμετρία τάσης 2%, υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας κατά 8°C.

- Επιπτώσεις στην απόδοση: Οι κινητήρες που λειτουργούν με Voltage Unbalance, παρουσιάζουν χαμηλότερη απόδοση λόγω των αυξημένων απωλειών όπως αναφέρθηκαν παραπάνω.

Ο μηδενισμός της ασυμμετρίας τάσης είναι ανέφικτος λόγω της τυχαιότητας της σύνδεσης και αποσύνδεσης του φορτίου, της άνισης διανομής του φορτίου στις τρεις φάσεις και τις εγγενείς ασυμμετρίες του συστήματος τροφοδοσίας. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες τεχνικές που μπορούν να βελτιώσουν κάποιες από τις επιπτώσεις του Voltage Unbalance στους κινητήρες:

- Μείωση των ασυμμετριών που εισάγονται στο σύστημα από αντιστάσεις όπως οι γραμμές μεταφοράς του ρεύματος και μετατροπείς (transformers).
- Χρήση παθητικών συστημάτων (passive network systems) και ενεργητικών ηλεκτρονικών συστημάτων (active power electronic systems) που μπορούν να διορθώσουν δυναμικά την ασυμμετρία, όπως (static var compensators, line conditioners).
- Επανεξέταση και διαμόρφωση του φορτίου έτσι ώστε να μειωθεί η ασυμμετρία με αλλαγή των λειτουργικών παραμέτρων.
- Αποφυγή σύνδεσης εξοπλισμού που είναι ευαίσθητος σε Voltage Unbalance.

4.4.1.3 Παραμόρφωση Τάσης (Voltage Distortion). [18]

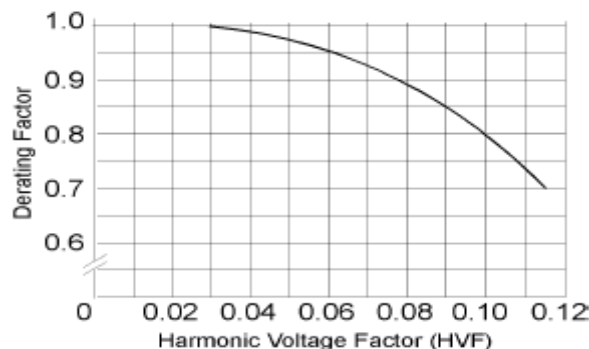
Είναι κάθε μεταβολή στην κυματομορφή της παρεχόμενης τάσης σε σχέση με την ιδεατή (ημιτονοειδή) μορφή της. Κάθε παραμόρφωση στην τάση, παράγει ρεύματα που δεν συμβάλουν στη ροπή αλλά όταν αθροίζονται λειτουργούν σαν ηλεκτρικό φρένο, επιβραδύνοντας το δρομέα και προκαλώντας υπερθέρμανση.

Η NEMA ορίζει τον συντελεστή HVF (Harmonic Voltage Factor) που εξετάζει τη θεμελιώδη συχνότητα (50 ή 60 Hz) και τις αρμονικές της (100, 150, 200 Hz κλπ ή 120,180,240 Hz κλπ) ως:

$$HVF = \sum (V_n/n) \quad (4-8)$$

όπου V_n οι αρμονικές συνιστώσες της τάσης V της n – αρμονικής, με $n > 5$.

Η αντιστάθμιση του HVF γίνεται με τον συντελεστή φθοράς (Derating Factor) που φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 4.5.



Σχήμα 4.5: Συντελεστή φθοράς συναρτήσει του συντελεστή HVF.

Οι δύο συνηθέστερες μετρήσεις για τον προσδιορισμό των αρμονικών είναι οι συντελεστές HVF και THD (Total Harmonic Distortion) που ορίζονται ως:

$$HVF_V = \sum(V_n/n) / V_{RMS}, \text{ με } n > 5 \quad (4-9)$$

$$HVF_I = \sum(I_n/n) / I_{RMS}, \text{ με } n > 5 \quad (4-10)$$

$$THD_V = (V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2)^{1/2} / V_1 = [\sum(V_n^2)]^{1/2} / V_{RMS} \quad (4-11)$$

$$THD_I = (I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)^{1/2} / I_1 = [\sum(I_n^2)]^{1/2} / I_{RMS} \quad (4-12)$$

όπου V_n , I_n οι τιμές τάσης και έντασης στην n - αρμονική, ενώ V_1 , I_1 οι αντίστοιχες τιμές της θεμελιώδους συχνότητας.

Η διαφορά των δύο συντελεστών είναι ότι ο συντελεστής HVF προσομοιάζει την επιπλέον θέρμανση που προκαλούν οι αρμονικές συνιστώσες στον κινητήρα, ενώ ο συντελεστής THD αντιπροσωπεύει το ποσό της παραμόρφωσης που φέρει το σήμα.

Ωστόσο, υπάρχουν κάποια προβλήματα στις μετρήσεις των συντελεστών HVF και THD που συνοψίζονται παρακάτω:

Οι εξισώσεις HVF δείχνουν πως κάθε αρμονική συνισταμένη (ξεκινώντας από την 5^η όπου αναμένεται η πρώτη μεγαλύτερη συνισταμένη για τους 3-φασικούς κινητήρες), διαιρείται με τον όρο της αρμονικής n , επομένως όσο μικρότερος είναι ο όρος της αρμονικής τόσο λιγότερο σταθερός είναι αυτός ο λόγος, που σημαίνει ότι ένα μικρό σφάλμα στη μέτρηση ή τους υπολογισμούς πχ στη 2^η αρμονική θα έχει τη διπλάσια παραμόρφωση από της ίδιας κλίμακας σφάλματος θορύβου στην 5^η αρμονική. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα εμφάνισης της παραμόρφωσης τάσης, τόσο μικρότερο είναι το αποτέλεσμα της στη δημιουργία αρμονικών ρευμάτων. Οι συνισταμένες αρμονικές προστίθενται αριθμητικά, συμβάλλοντας έτσι μεμονωμένα και ανεξάρτητα μεταξύ τους στη θέρμανση του κινητήρα.

Αντίθετα, στις εξισώσεις THD, η συνολική ενέργεια του σήματος προκύπτει προσθέτοντας τις συνιστώσες του ως γεωμετρικά ανεξάρτητες. Στην περίπτωση που έχουμε Οδήγηση Μεταβλητής Συχνότητας (Variable Frequency Drive), εισάγονται στο σήμα μεγάλες παραμορφώσεις στην κυματομορφή της τάσης δημιουργώντας συνισταμένες που μπορεί να υπερκεράσουν τη θεμελιώδη σε σημείο τέτοιο που να κάνει αδύνατο τον εντοπισμό της θεμελιώδους ανάμεσα στον επιβαλλόμενο θόρυβο.

Η λύση των παραπάνω προβλημάτων δίνεται με την εισαγωγή ενός νέου συντελεστή (Total Distortion) που αφαιρεί από τις εξισώσεις THD την θεμελιώδη, οπότε η μορφή των εξισώσεων έχει ως εξής:

$$TD_V = [\sum(V_{RMS}^2 - V_{fund}^2)]^{1/2} / V_{RMS} \quad (4-13)$$

$$TD_I = [\sum(I_{RMS}^2 - I_{fund}^2)]^{1/2} / I_{RMS} \quad (4-14)$$

Ο συντελεστής TD δεν περιγράφεται στα Standards IEEE και NEMA αλλά γίνονται μετρήσεις του καθώς δίνει αποτελέσματα ακόμη και στην Οδήγηση Μεταβλητής Συχνότητας.

Επίσης, γίνεται μέτρηση του συντελεστή κορυφής (Crest Factor) για την τάση και την ένταση, που ορίζεται ως ο λόγος της αιχμής προς τη μέση τιμή (peak/rms) τους και δείχνει πόσο «οξεία» είναι η κορυφή στην κυματομορφή τους. Για $c.f > 1,41$ που συμβαίνει κυρίως στα χαμηλά φορτία, η κορυφή είναι περισσότερο έντονη (οξεία) από την κανονική, ενώ για $c.f < 1,41$ που συμβαίνει κυρίως στα υψηλά φορτία, η κορυφή είναι περισσότερο επίπεδη (flat) από την κανονική.

Οι επιπτώσεις της παραμόρφωσης τάσης στη λειτουργία του κινητήρα είναι όμοιες με αυτές που περιγράφηκαν στην περίπτωση της ασυμμετρίας τάσης (Voltage Unbalance). Η μείωση του συντελεστή ισχύος όταν ο Η/Κ λειτουργεί σε δίκτυο με παραμόρφωση τάσης είναι μικρότερη από την περίπτωση που υπάρχει ασυμμετρία τάσης, όμως ο συνδυασμός των δύο καταστάσεων καθορίζει την τελική τιμή του συντελεστή φθοράς (NEMA Derating Factor). Σημαντικές παραμορφώσεις τάσης παρουσιάζονται στην περίπτωση της λειτουργίας των κινητήρων με Οδήγηση Μεταβλητής Συχνότητας. Η NEMA καθορίζει σαν μέγιστη τιμή του συντελεστή THD στο ποσοστό του 5%.

4.4.2 Επίδοση Ηλεκτροκινητήρα (Motor Performance).

Εξετάζει τα στοιχεία που σχετίζονται με την υπερθέρμανση του κινητήρα όπως το επίπεδο της έντασης ρεύματος η ποιότητα της παρεχόμενης από το δίκτυο τάσης και το επίπεδο του φορτίου λειτουργίας, ώστε να αποφεύγεται η πρόωρη καταστροφή της μόνωσης και τελικά του ίδιου του κινητήρα. Τα προβλήματα που αντικατοπτρίζονται στη χαμηλή επίδοση του κινητήρα είναι συνδυασμός προβλημάτων πριν και μετά τον κινητήρα, όπως:

- Κατάσταση Ισχύος (Power Condition).
- Φορτίο (Load).
- Κατάσταση κινητήρα (Motor Condition).

Τα προβλήματα της χαμηλής επίδοσης κινητήρα σπανίως αναφέρονται σε όλους τους κινητήρες που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο υπό την ίδια τάση και αφορούν κυρίως τον υπό εξέταση Η/Κ.

Η αντιμετώπιση της χαμηλής επίδοσης γίνεται είτε διορθώνοντας την αιτία της υπερθέρμανσης (όπως θέματα που αφορούν το φορτίο), είτε μετριάζοντάς την χρησιμοποιώντας πρόσθετη ή εξαναγκασμένη ψύξη (όταν υπάρχουν προβλήματα στη διανομή της ισχύος).

Αξίζει να σημειωθεί πως τα όρια για την επίδοση του κινητήρα τίθενται υπό κανονικές συνθήκες που σημαίνει σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος, επαρκής αερισμός, όχι ακραίες αυξομειώσεις ή άλλες ασυνήθιστες καταστάσεις, που όμως τις περισσότερες φορές δεν επιτυγχάνονται στο βιομηχανικό περιβάλλον λειτουργίας του κινητήρα.

4.4.2.1 Επίπεδο Έντασης (Current Level) και ασυμμετρία έντασης (Current Unbalance).

Για λόγους Προγνωστικής Συντήρησης (Predictive Maintenance) στους 3-φασικούς κινητήρες, δεν μας ενδιαφέρει η μέση ένταση των ρευμάτων των τριών φάσεων, αλλά η ένταση του ρεύματος στη φάση εκείνη που διαρρέεται από το μεγαλύτερο ρεύμα η οποία προκαλεί και την υπερθέρμανση του συγκεκριμένου τυλίγματος. Η υπέρβαση της έντασης από την ονομαστική της τιμή (η NEMA το ορίζει σε 10%), προκαλεί αυξημένες απώλειες I^2R και επομένως υπερθέρμανση του κινητήρα.

Η NEMA ορίζει την ασυμμετρία έντασης ως:

$$\%I_{\text{unbal}} = 100 \times [I_{\text{RMS}} - \max \{(I_A - I_B), (I_B - I_C), (I_A - I_C)\}] / I_{\text{RMS}} \quad (4-15)$$

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το επίπεδο και την ασυμμετρία της έντασης είναι:

- Το φορτίο: Το μέγεθος της απαιτούμενης ισχύος εξόδου είναι καθοριστικής σημασίας για την ένταση που απαιτείται να διαρρεύσει τον κινητήρα. Όταν το φορτίο είναι μικρό, ακόμη και αν ο κινητήρας είναι υγιής, εμφανίζεται ασυμμετρία έντασης είναι μεγάλη που απαλείφεται όταν το φορτίο μεγαλώνει. Για να έχουμε αξιόπιστες μετρήσεις απαιτείται ελάχιστο φορτίο 25%.
- Το επίπεδο τάσης: Έστω και μικρή αύξηση στην τάση του παρεχόμενου ρεύματος επιφέρει αύξηση της έντασης.
- Η ασυμμετρία τάσης: Ύπαρξη ασυμμετρίας στην τάση προκαλεί ελάχιστη αύξηση της μέσης έντασης του ρεύματος, αλλά μεγάλη αύξηση στο επίπεδο της έντασης όπως αυτό ορίστηκε παραπάνω. Επίσης, μικρές ασυμμετρίες τάσης προκαλούν πολλαπλάσιες (6-10 φορές) ασυμμετρίες έντασης.
- Η παραμόρφωση τάσης: Ακόμη και μικρή παραμόρφωση στην τάση προκαλεί μεγάλη αύξηση στην ένταση και παραμορφώσεις έντασης.
- Η εκκίνηση Η/Κ (Startup): Κατά την εκκίνηση, ο κινητήρας εκτίθεται σε ρεύμα 6-10 φορές του ρεύματος λειτουργίας.

4.4.2.2 Συντελεστής Αποτελεσματικότητας (Effective Service Factor). [19]

Ορίζεται ως ο λόγος του εκτιμώμενου φορτίου προς τον συντελεστή φθοράς NEMA Derating Factor και προσδιορίζει πόσο κοντά λειτουργεί ο κινητήρας στον συντελεστή απόδοσής του. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας θα πρέπει $E.s.f = 1$. Εάν ο συντελεστής αυξηθεί, προκαλείται υπερθέρμανση του κινητήρα.

$$E.s.f = \% \text{ load} / \% \text{ derating factor} \quad (4-16)$$

Ο συντελεστής Derating Factor εξαρτάται από την ασυμμετρία τάσης και το συντελεστή HVF :

$$\text{Derating Factor} = \text{Voltage Unbalance Factor} \times \text{HVF Factor} \quad (4-17)$$

Για παράδειγμα θα εξετάσουμε την υπερθέρμανση κινητήρα 100 hp που λειτουργεί με Voltage Unbalance 2% και HVF 0.06 υπό φορτίο 95 hp:

Από τα διαγράμματα των σχημάτων 4.4 και 4.5, βρίσκουμε αντίστοιχα: για Voltage Unbalance 2% συντελεστή 0,95 και για HVF 0,06 συντελεστή 0,95. Ο συνολικός συντελεστής προκύπτει από το γινόμενο των δύο παραπάνω συντελεστών (σχέση 4-17):

$$\text{Derating Factor} = \text{Voltage Unbalance Factor} \times \text{HVF Factor} = 0,95 \times 0,95 = 0,9025$$

που μεταφράζεται σε ισχύ εξόδου 90,25 hp για κινητήρα 100 hp.

Ο Συντελεστής Αποτελεσματικότητας (E.s.f) από τη σχέση 4-16, θα είναι:

$$E.s.f = \% \text{ load} / \% \text{ derating factor} = 95\% / 90,25\% = 1,05$$

που σημαίνει πως κάτω από τις δεδομένες συνθήκες, η θερμική καταπόνηση του κινητήρα είναι αντίστοιχη με αυτή που θα υφίσταντο εάν λειτουργούσε με 5% επιπλέον φορτίο.

Παράγοντες που επηρεάζουν τον Συντελεστής Αποτελεσματικότητας:

- Το περιβάλλον: Η υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος και ο ανεπαρκής αερισμός αναγκάζουν τον κινητήρα να λειτουργήσει σε συνθήκες υπερθέρμανσης.
- Το φορτίο: Ο συντελεστής E.s.f είναι ανάλογος του φορτίου, επομένως συνθήκες υπερφόρτωσης μειώνουν την απόδοση του κινητήρα.
- Η Κατάσταση Ισχύος: Χαμηλή ποιότητα της ισχύος εισόδου αυξάνει την ασυμμετρία και την παραμόρφωση τάσης, οπότε αυξάνεται ο E.s.f
- Η Κατάσταση του κινητήρα: Σπασμένες ράβδοι, χαλαρές συνδέσεις στα τερματικά κ.α αυξάνουν την ένταση του ρεύματος και συντελούν στην υπερθέρμανση του κινητήρα.

4.4.3 Κατάσταση Ηλεκτροκινητήρα (Motor Condition).

Εξετάζει τα προβλήματα που σχετίζονται απευθείας με την κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα και οφείλονται σε καταστάσεις πριν ή μετά τον H/K, στον ίδιο τον κινητήρα ή ακόμη και σε συνδυασμό των παραπάνω.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατάσταση του κινητήρα είναι η κατάσταση λειτουργίας του (Operating Condition), καθώς και προβλήματα σχετικά με τις ράβδους του κινητήρα (Rotor Bars), που αναλύονται στη συνέχεια.

4.4.3.1 Κατάσταση Λειτουργίας (Operating Condition).

Ελέγχοντας την κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα, δεν λαμβάνονται ακριβείς πληροφορίες για τον εντοπισμό του πυρήνα του προβλήματος, όμως υπάρχουν αλλαγές σε σχέση με προηγούμενες συνθήκες (που θεωρούνται κανονικές) και πρέπει να απομονωθούν και να μελετηθούν.

Αλλαγές στην κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα μπορούν να εντοπιστούν σε:

- Αποκλίσεις τιμών τάσης, έντασης, απόδοσης κλπ.
- Αλλαγές στην κατάσταση ισχύος (Power Condition).
- Αλλαγή στη θερμοκρασία του κινητήρα.
- Αλλαγές στο φορτίο (λόγω χαλάρωσης, τριβών, ασυμμετρίας).

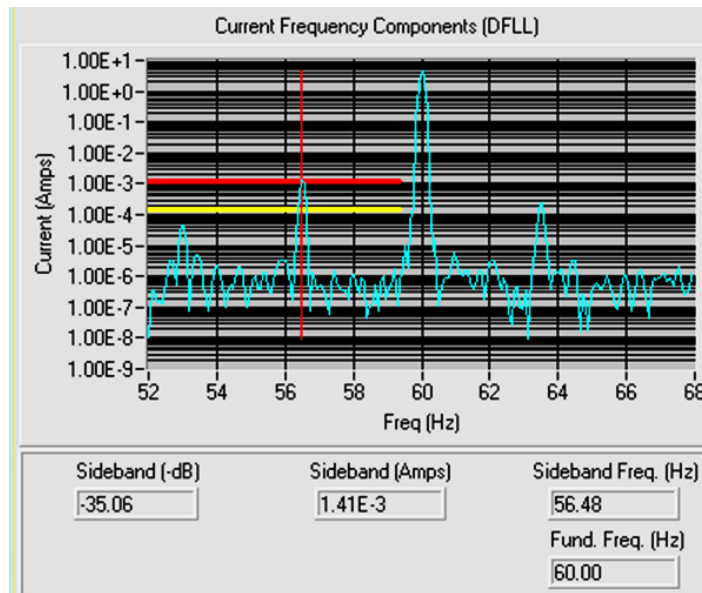
Το πλεονέκτημα του τεστ για την κατάσταση λειτουργίας είναι ότι δεν εστιάζει σε ένα μόνο μηχανισμό αλλά παρακολουθεί όλο το σύστημα και διαπιστώνει αν αυτό λειτουργεί όπως και πριν και αν υπάρχουν διαφορές προσδιορίζει ακριβώς ποιο στοιχείο έχει αλλάξει. Το μειονέκτημα είναι ότι θα πρέπει να υπάρχει μέτρηση με τη σωστή λειτουργία του κινητήρα που θα αποτελεί και την υπογραφή του. Αν για παράδειγμα στην μέτρηση που θεωρούμε ως κανονική λειτουργία υπάρχει σπασμένη ράβδος δρομέα, τότε οι επόμενες μετρήσεις θα συγκρίνονται με τη λανθασμένη αυτή κατάσταση.

4.4.3.2 Ανάλυση Φασμάτων (Spectrum Tests).

Περιέχουν μια σειρά από φάσματα, η εξέταση των οποίων βοηθάει στον εντοπισμό των συμπτωμάτων που προέρχονται από βλάβες του Η/Κ:

- Προβλήματα των ράβδων του δρομέα (Rotor Bar Test).
- Φάσμα Τάσης/Έντασης (V/I Spectrum).
- Αποδιαμορφωμένο Φάσμα (Demodulated Spectrum).
- Αρμονικές Τάσης/ Έντασης (Harmonics).

Στα προβλήματα των ράβδων του δρομέα (Rotor Bar Test), τα συμπτώματα είναι ξεκάθαρα και οδηγούν σε στοχευόμενο έλεγχο σε προβλήματα σχετικά με το φορτίο και την κυματομορφή της ροπής (Torque Ripple). Κατά την εκκίνηση του κινητήρα, οι ράβδοι του δρομέα δέχονται μεγάλες ηλεκτρικές φορτίσεις (ρεύματα που τις διαρρέουν), που προκαλούν σημαντικές σε μέγεθος ταλαντώσεις. Αυτές με τη σειρά τους αλληλεπιδρούν με το μαγνητικό πεδίο και σε συνδυασμό με τη μεγάλη ολίσθηση προκαλούν κόπωση και ρήγματα στις ράβδους, ειδικά εάν κατά τη διαδικασία της χύτευσης του αλουμινίου υπήρχαν ατέλειες όπως προσμίξεις ή κενά. Επίσης, βλάβη στις ράβδους μπορεί να εμφανιστεί όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε εξαιρετικά υψηλά φορτία. Η λειτουργία του τεστ βασίζεται στη μέθοδο της ανάλυσης ρεύματος (Motor Current Signature Analysis MCSA) για την ανίχνευση της έλλειψης συμμετρίας στο ρεύμα που ρέει στον κλωβό του κινητήρα. Για την εκτέλεση του τεστ απαιτείται σταθερό φορτίο και κατ'ελάχιστο 30% του ονομαστικού, ώστε το ρεύμα που ρέει το δρομέα να είναι σημαντικό (αισθητό) και να μην είναι χαμηλότερο από το θόρυβο. Το διάγραμμα που παίρνουμε ως αποτέλεσμα αυτού του τεστ φαίνεται στο σχήμα 4.6, όπου υπάρχει σαφής υπόδειξη των ορίων και της περίπτωσης εμφάνισης της συγκεκριμένης βλάβης.



Σχήμα 4.6: Αποτέλεσμα Rotor Bar Test.

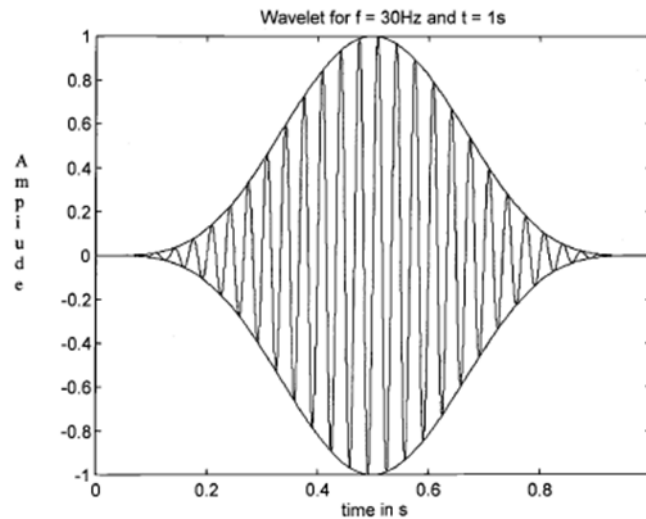
Οι επιπτώσεις της ύπαρξης σπασμένων ράβδων στην απόδοση λειτουργίας των κινητήρων περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

- Επιπτώσεις στο επίπεδο της έντασης (Current Level): Υπάρχει απόκλιση της διανομής ρεύματος από τις ιδανικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς οι ράβδοι που γειτνιάζουν με τις σπασμένες δέχονται περισσότερο ρεύμα, οπότε και απαιτείται περισσότερο ρεύμα στον στάτη ώστε να μεταφέρει ο κινητήρας το κατάλληλο φορτίο. Η αύξηση του ρεύματος στον στάτη για κάθε επιπρόσθετη σπασμένη ράβδος είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή για την προηγούμενη σπασμένη ράβδος.
- Επιπτώσεις στην ολίσθηση: Η ολίσθηση που απαιτείται για μεταφορά του ίδιου φορτίου αυξάνει με τον αριθμό των σπασμένων ράβδων και προκαλεί επιπλέον επιδείνωση στις υπόλοιπες ράβδους.
- Επιπτώσεις στην ροπή: Η ροπή του κινητήρα με την ύπαρξη ραγισμένων ράβδων παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις, ενώ η αλλαγή στην κυματομορφή της αποτελεί σοβαρή ένδειξη για βλάβες τέτοιου τύπου.
- Επιπτώσεις στη θερμοκρασία: Αύξηση του ρεύματος στον στάτη λόγω ύπαρξης σπασμένων ράβδων του ρότορα, προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του Η/Κ, αυξημένες απώλειες και μείωση της διάρκειας ζωής της μόνωσής του.
- Επιπτώσεις στους κραδασμούς: Σπασμένοι ράβδοι πολλαπλασιάζουν τους κραδασμούς του κινητήρα και η μελέτη τους επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα του ηλεκτρικού Rotor Bar Test.
- Σύνδρομο της επόμενης ράβδου (Next Bar Syndrome): Όταν σπάει μια ράβδος, τότε οι επόμενες δέχονται περισσότερο ρεύμα και σπάνε με τη σειρά τους, δημιουργώντας έτσι μια καταστροφική διαδοχή από σπασμένες ράβδους.

Στο 2^ο Κεφάλαιο περιγράφηκε αναλυτικά η μέθοδος της ανάλυσης ρεύματος. Στο σημείο όμως αυτό, κρίνεται σκόπιμη η αναφορά στη μέθοδο της Ψηφιακής Συχνότητας Κλειστού Βρόχου (DFLL) που χρησιμοποιείται κατά την εκτέλεση του Rotor Bar Test από το EXP3000. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε για τον περιορισμό της χρονικής περιόδου λήψης των στοιχείων και την εύρεση των πλευρικών συχνοτήτων με μεγαλύτερη ανάλυση και χρησιμοποιεί την ανάλυση Wavelet. [19]

Η ανάλυση Wavelet πολλαπλασιάζει ένα λειτουργικό παράθυρο (συνήθως Hanning, Flattop ή Gaussian) με την παραγόμενη οικογένεια ημιτονοειδών σημάτων. Το αποτέλεσμα είναι ένα ημιτονοειδές σήμα που περιβάλλεται από το λειτουργικό παράθυρο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7.

Τα πλεονεκτήματα της εισαγωγής του παραθύρου είναι ότι απλοποιεί τις μη γραμμικές συνιστώσες που εισάγονται από εσωτερικούς παράγοντες, έχει συγκεκριμένες συχνότητες λόγω της ομαδοποίησης της ενέργειάς του σε μικρή χρονική διάρκεια και μπορεί να επεξεργαστεί γραμμικά ανεξάρτητες συνιστώσες διαφορετικών σχημάτων (wavelets).



Σχήμα 4.7: Wavelet για 30Hz διάρκειας 1 sec

Με την ανάλυση wavelet, μπορούμε να παρατηρήσουμε ταυτόχρονα τη συχνότητα και το χρόνο. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια εσωτερική συχνότητα f_i ως φίλτρο για τη συχνότητα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας οικογένειας wavelets σύμφωνα με τις σχέσεις (4-18) και (4-19).

$$\varphi_i(t) = w(t)\sin(2\pi f_i t) \quad (4-18)$$

$$w(z) = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\pi f_i z)] , \text{ με } z=0 \div 1 \quad (4-19)$$

όπου $\varphi_i(t)$: η συνάρτηση wavelet που χρησιμοποιείται.

w: η συνάρτηση του παραθύρου.

z: μεταβλητή χρόνου, παίρνει τιμές από 0 έως 1 και ορίζει το πλάτος του παραθύρου. Στο σχήμα 4.7 το πλάτος είναι 1 sec, επομένως για την περίπτωση αυτή: $z=t$.

Έτσι, μπορούμε κάθε σήμα $f(t)$ που λαμβάνουμε κατά τη μέτρηση να το αναλύσουμε σε οικογένειες wavelets (συναρτήσεις φ_i) σύμφωνα με τη σχέση 4-20 και αντίστροφα από τις οικογένειες αυτές των φ_i να ανασηματίσουμε την $f(t)$. Για κάθε χρονική στιγμή t , υπάρχει ένα σύνολο συνδυασμών A μεταξύ των $f(t)$ και φ_i σύμφωνα με τη σχέση 4-21.

$$f(t) = \sum_i a_i \cdot \varphi_i \quad (4-20)$$

$$A(t, i) = \sum \varphi_i(t - k) \cdot f(t) \quad (4-21)$$

όπου k : χρονική μεταβλητή ανάλογης λειτουργίας με την μεταβλητή z της σχέσης 4-19.

Η εξίσωση της σχέσης 4-21 αντιπροσωπεύει το μέγεθος της φ_i που υπάρχει στο σήμα της f στο χρόνο t για τη συγκεκριμένη επιλεγμένη φ_i . Επίσης, στη σχέση 4-21 γίνεται σαφές γιατί η φ_i πρέπει να είναι χρονικά περιορισμένη, καθώς έχει νόημα μόνο για $\varphi_i \neq 0$. Το μειονέκτημα είναι ότι για τη λύση της, απαιτείται μεγάλος υπολογιστικός όγκος καθώς περιλαμβάνει τη χρονική συνιστώσα. Η κατασκευή της εξίσωσης 4-21 δείχνει πόσο μια ορισμένη συχνότητα είναι παρούσα σε ένα σήμα f_t , ενώ αυτό δεν έχει στοιχεία μετατόπισης φάσης. Επομένως, είναι δυνατός ο υπολογισμός του ποσοστού συμμετοχής κάθε συχνότητας στο σήμα, με τη δημιουργία δύο οικογενειών σημάτων, συναρτήσεις ημιτόνου και συνημιτόνου. Κάθε μία από τις συναρτήσεις αυτές

πολλαπλασιάζεται σημείο προς σημείο με μια σειρά από τα δεδομένα που αποκτήθηκαν και στο τέλος προστίθενται ώστε να δημιουργηθούν οι εξισώσεις 4-22:

$$c = \int_{t=0}^{t=T} f(t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_i \cdot t) \cdot w(t) \cdot dt \quad (4-22\alpha)$$

$$s = \int_{t=0}^{t=T} f(t) \cdot \sin(2\pi \cdot f_i \cdot t) \cdot w(t) \cdot dt \quad (4-22\beta)$$

$$A_i = \sqrt{s_i^2 + c_i^2} \quad (4-22\gamma)$$

Η χρήση του παραθύρου w επιτρέπει τον κατακερματισμό του συνολικού χρόνου T σε μικρά χρονικά διαστήματα, ενώ η μεταβλητή i ποικίλει ανάλογα με τις συχνότητες που έχουν ενδιαφέρον. Τα πλάτη A_i αντιπροσωπεύουν τα ποσά των συχνοτήτων f που εμφανίζονται. Εάν υπάρχει μια διακριτή κορυφή στο παράθυρο ενδιαφέροντος, τότε αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στο σχεδιασμό του A_i ως προς τις συχνότητες f_i .

Υποθέτοντας ότι το σήμα περιέχει μια εξέχουσα αιχμή στη συχνότητα f_k ενώ οι υπόλοιπες κορυφές έχουν μικρό πλάτος, τότε οι εξισώσεις 4-22 γράφονται στη μορφή των σχέσεων 4-23.

$$c = \int_{t=0}^{t=T} B_i \sin(2\pi \cdot f_k \cdot t + \varphi) \cdot \cos(2\pi \cdot f_i \cdot t) \cdot w(t) \cdot dt \quad (4-23\alpha)$$

$$s = \int_{t=0}^{t=T} B_i \sin(2\pi \cdot f_k \cdot t + \varphi) \cdot \sin(2\pi \cdot f_i \cdot t) \cdot w(t) \cdot dt \quad (4-23\beta)$$

$$A_i = \sqrt{s_i^2 + c_i^2} \quad (4-23\gamma)$$

Το ημίτονο και συνημίτονο στις εξισώσεις 4-23 αποτελούν τις ορθογώνιες συνιστώσες του σήματος που περιλαμβάνει τη μετατόπιση φάσης φ που εμφανίζεται σε υπολογισμούς φάσης.

Με τον τρόπο αυτό, οι συχνότητες που προκύπτουν έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια (το σφάλμα είναι μόλις 10^{-3} Hz), ενώ ο απαιτούμενος χρόνος για λήψη των δεδομένων περιορίζεται σημαντικά εξαιτίας του παραθύρου w (10sec αρκούν για να μας δώσει το EXP 3000 τα αποτελέσματα).

Τα φάσματα τάσης και έντασης γίνονται ανεξάρτητα για κάθε μια φάση. Το φάσμα της έντασης περιέχει πολλές χρήσιμες πληροφορίες και η μελέτη του βασίζεται στην μέθοδο της Ανάλυσης Ρεύματος (MCSA). Μεγάλο πλήθος δημοσιεύσεων και ερευνών, τόσο εργαστηριακών όσο και βιομηχανικών, αναλύουν τα συμπεράσματα που εξάγονται από την ανάλυση του φάσματος της έντασης, ανάμεσα στα οποία περιέχονται και προβλήματα ευθυγράμμισης, χαλάρωσης, εκκεντρότητας, σπηλαίωσης και φθοράς ρουλεμάν. Η εμπειρία έχει δείξει πως η διάγνωση μηχανικών (και όχι ηλεκτρικών) προβλημάτων, γίνεται πιο εύκολα χρησιμοποιώντας το φάσμα της ροπής καθώς σε αυτό ο θόρυβος που εμφανίζεται είναι πολύ χαμηλότερος από τον θόρυβο που εμφανίζεται στο φάσμα της έντασης.

Το αποδιαμορφωμένο φάσμα (Demodulated Spectrum), δίνει τη δυνατότητα της 3-διάστατης απεικόνιση του αποδιαμορφωμένου φάσματος της ροπής καθώς και της τάσης και έντασης σε κάθε μια φάση. Με την μελέτη του αναλύεται η δυναμική συμπεριφορά του φορτίου του κινητήρα.

Οι αρμονικές τάσης και έντασης (Harmonics), εξετάζουν τα αποτελέσματα των μη-ημιτονοειδών συνιστωσών του συστήματος, ενώ τα γραφήματα για κάθε μια φάση αποτυπώνουν τη διανομή των αρμονικών συνιστωσών στις διάφορες συχνότητες. Επίσης, περιέχουν τις μετρήσεις THD και HVF.

4.4.4 Ενεργειακή Αξιολόγηση (Energy Assessment).[20]

Επεξεργάζεται στοιχεία σχετικά με την απόδοση του κινητήρα και το ενεργειακό κόστος της λειτουργίας του. Απαντάει στα παρακάτω ερωτήματα:

- Είναι ο Η/Κ αποδοτικός;
- Απαιτείται αντικατάσταση του υπάρχοντος Η/Κ με άλλον μεγαλύτερης απόδοσης;
- Χρειάζεται αναμονή για αντικατάσταση μετά την επισκευή του υπάρχοντος Η/Κ;
- Ποιο είναι το ιστορικό του Η/Κ; Έχει γίνει νωρίτερα κάποια επισκευή σε αυτόν;
- Ποια θα ήταν η απόδοση του Η/Κ αν δούλευε υπό διαφορετικό φορτίο;

Τα βασικά στοιχεία της ενεργειακής αξιολόγησης ενός κινητήρα είναι η απόδοση, η περίοδος απόσβεσης και το πρόγραμμα Motor Master + .

4.4.4.1 Απόδοση (Efficiency).[14, 21, 22, 23]

Ορίζεται ως ο λόγος της μηχανικής ισχύος εξόδου του Η/Κ προς την ηλεκτρική ισχύ εισόδου:

$$\eta = 100(1 - P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}) \quad (4-24)$$

όπου: P_{loss} : απώλειες ισχύος, κυρίως λόγω θέρμανσης.

P_{in} : ισχύς εισόδου.

Το τεστ συγκρίνει την απόδοση του κινητήρα με αυτές σε προηγούμενες μετρήσεις. Χαμηλότερα αποτελέσματα υποδεικνύουν αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη λειτουργία του κινητήρα και συνεπώς ταχύτερη υποβάθμισή του. Επίσης, γίνεται σύγκριση του υπό εξέταση Η/Κ με μια υπάρχουσα βάση Η/Κ, ελέγχοντας για κοινό αριθμό πόλων, τάση τροφοδοσίας και ταξινόμηση βάση άλλων χαρακτηριστικών. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί πως οι μετρήσεις της απόδοσης λειτουργίας (εκτιμώμενη απόδοση) βάσει των κανονισμών IEEE, γίνονται σε εργαστηριακό περιβάλλον που διαφέρει από το πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας (όπου υπάρχουν προβλήματα τάσης, αζυγοσταθμίας κλπ), που οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα, γι' αυτό και η σύγκριση με προηγούμενες μετρήσεις στο ίδιο περιβάλλον έχουν μεγαλύτερη σημασία.

Οι παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση των κινητήρων είναι:

- Ο σχεδιασμός των κινητήρων (Motor Design): Ο διαφορετικός σχεδιασμός των Η/Κ δίνει και διαφορετικές αποδόσεις. Οι εξελίξεις στο σχεδιασμό και την κατασκευή Η/Κ, καθώς και οι αυξημένες απαιτήσεις των κανονισμών είναι οι σημαντικότεροι λόγοι για καλύτερες επιδόσεις στους νεότερους κινητήρες. Οι παλαιότεροι κινητήρες είχαν μεγαλύτερους ανεμιστήρες για μεγαλύτερη ψύξη, που όμως επέφεραν μεγαλύτερες απώλειες λόγω τριβών. Αντίθετα, οι νεώτεροι έχουν μικρότερους ανεμιστήρες αλλά βελτιωμένα υλικά μόνωσης που επιτρέπουν στους κινητήρες να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες.
- Το επίπεδο του φορτίου (Load Level): Όταν το φορτίο είναι κάτω του 50% του ονομαστικού, η απόδοση είναι χαμηλή.
- Το επίπεδο της τάσης (Voltage Level): Μικρότερες τιμές στην τάση του ρεύματος μειώνουν την απόδοση του κινητήρα, ενώ λειτουργία με την ονομαστική ή λίγο μεγαλύτερη τάση δίνει μεγαλύτερη απόδοση.
- Η ασυμμετρία της τάσης (Voltage Unbalance): Ύπαρξη ασυμμετρίας τάσης προκαλεί δραστική μείωση της απόδοσης του κινητήρα.
- Η παραμόρφωση της τάσης (Voltage Distortion): Μικρές αυξήσεις στην παραμόρφωση της τάσης προκαλούν μεγάλες παραμορφώσεις έντασης και επομένως χαμηλή απόδοση στην λειτουργία των κινητήρων που συνδέονται με το δίκτυο διανομής του ρεύματος.
- Ύπαρξη σπασμένων ράβδοι δρομέα (Rotor Bar): Τα προβλήματα σχετικά με τη φθορά των ράβδων μπορεί στα αρχικά στάδια να μην γίνονται αισθητά, όμως η επιδείνωση της κατάστασής τους μειώνει σημαντικά την απόδοση.

4.4.4.2 Περίοδος Απόσβεσης (Payback Period).[24, 25]

Είναι ο υπολογισμός των απωλειών ενέργειας του υπό ελέγχου κινητήρα με άλλους μεγαλύτερης απόδοσης βάση της ταχύτητας περιστροφής, του λόγου χρέιματος προς kWh και της ισχύος εισόδου, με την προϋπόθεση ότι λειτουργούν υπό το ίδιο φορτίο. Ως απώλεια ενέργειας θεωρείται η διαφορά της απόδοσης που έχουμε σαν στόχο (εκτιμώμενη) από την πραγματική απόδοση λειτουργίας.

Υπάρχουν πολλές θεωρητικές μελέτες και εφαρμογές στην βιομηχανία που αφορούν στο οικονομικό και ενεργειακό όφελος ή ζημία που προκύπτει από τη χρήση των Η/Κ. Τα απαιτούμενα στοιχεία για τον υπολογισμό της περιόδου απόσβεσης είναι:

- Ώρες λειτουργίας του Η/Κ ανά ημέρα.
- Ημέρες λειτουργίας στη διάρκεια του έτους.
- Κόστος λειτουργίας ανά kWh.
- Υπάρχοντες Η/Κ στη βάση δεδομένων (με βασικές παραμέτρους τον αριθμό των πόλων, την παραγόμενη ισχύ και την τάση τροφοδοσίας).

Η προειδοποίηση κατά την εκτέλεση του τεστ υποδεικνύει χαμηλή απόδοση, κακή κατάσταση ισχύος είτε προβλήματα του ίδιου του κινητήρα (για παράδειγμα σπασμένες ράβδοι δρομέα). Για να είναι βέλτιστα τα στοιχεία της απόδοσης και της σύγκρισης μεταξύ κινητήρων, θα πρέπει το φορτίο να είναι μεταξύ 75% και 100%.

4.4.4.3 Motor Master + .

Περιέχεται κατάλογος 20000 επαγωγικών κινητήρων και εργαλεία όπως η καταγραφή της παρακολουθούμενης συντήρησης, η ανάλυση της απόδοσης, η αξιολόγηση της εξοικονόμησης ενέργειας, η ενεργειακή λογιστική και δυνατότητες υποβολής περιβαλλοντικών εκθέσεων.

4.4.5 Φορτίο (Load). [26]

Για την προγνωστική συντήρηση (Predictive Maintenance), σημαντικό στοιχείο αποτελεί η παρακολούθηση της κατάστασης του Η/Κ στο χρόνο και όχι σε μια συγκεκριμένη στιγμή. Το φορτίο για τον κινητήρα έχει το ρόλο του αισθητήρα που παρακολουθεί on-line το φορτίο που τελικά οδηγείται (driven load). Ο Η/Κ αντιδρά σε προβλήματα σχετικά με το επίπεδο του φορτίου (Load Level), προσπαθώντας να μεταφέρει τη ροπή που απαιτεί η αλλαγή του φορτίου.

Τα εργαλεία για την κατανόηση του συστήματος του φορτίου είναι η on-line παρακολούθησή και έλεγχός του με προηγούμενες καταστάσεις (Load History) και η υπογραφή του, δηλ. η κυματομορφή και το φάσμα του (Torque Ripple, Spectrum). Τα εργαλεία αξιολόγησης του φορτίου είναι το ιστορικό του (Load History) και ο συντελεστής αποτελεσματικότητας (Effective Service Factor).

4.4.5.1 Ιστορικό Φορτίου (Load History).

Είναι η καταγραφή της μακροχρόνιας συμπεριφοράς του φορτίου, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις η φθορά του Η/Κ είναι σταδιακή. Το φορτίο λειτουργίας πρέπει να παραμένει σταθερό. Η σταδιακή αύξηση του φορτίου είναι σημάδι πρόσθετων τριβών στο σύστημα οδήγησης, ενώ η μείωσή του επισημαίνει το σταδιακό φράξιμο στην είσοδο του ανεμιστήρα ή της αντλίας.

Απαιτούμενο στοιχείο για το ιστορικό του φορτίου είναι το Επίπεδο Φορτίου (Load Level). Η αλλαγή στο μέγεθος του φορτίου που απαιτείται να μεταφέρει ο Η/Κ δεν έχει ως αίτιο την αλλαγή στην ικανότητα του κινητήρα αλλά αλλαγές που συμβαίνουν στο οδηγούμενο φορτίο. Η διάγνωση των αλλαγών γίνεται με λεπτομερή γνώση της διαδικασίας λειτουργίας και είναι απαραίτητη η πραγματογνωμοσύνη στο συγκεκριμένο φορτίο ώστε να διευκρινιστεί το μέγεθος των αλλαγών για την προοπτική της προγνωστικής συντήρησης του συγκεκριμένου κινητήρα.

4.4.5.2 Κυματομορφή Ροπής (Torque Ripple).

Καταγράφει τη βραχυπρόθεσμη συμπεριφορά του φορτίου και προειδοποιεί για αλλαγές της ροπής. Ορίζεται ως το πηλίκο της διαφοράς της μέγιστης ροπής από τη μέση ροπή, προς τη μέση ροπή κατά την περίοδο της μέτρησης:

$$\% \text{ Torque Ripple} = (\text{Peak Torque} - \text{Steady State Torque}) / \text{Steady State Torque} \quad (4-25)$$

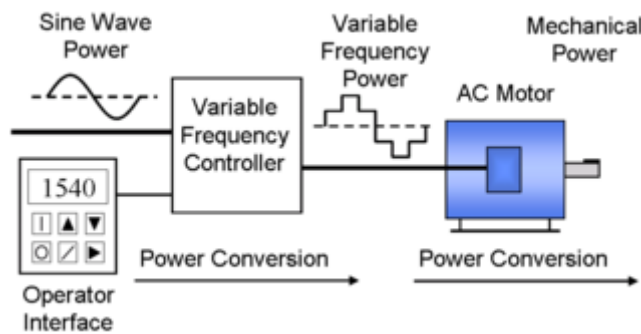
Ως τιμή δείχνει το μέγεθος της ζώνης της ροπής γύρω από τη σταθερή τιμή της μέσης τιμής της, όμως σαν γράφημα αποτελεί την ολική υπογραφή της στιγμιαίας ροπής

(ροπή ως προς το χρόνο), οπότε και εντοπίζει αιχμές και παλμούς άνω των καθορισμένων τιμών ακόμη και αν η ισχύς που μεταφέρεται στο φορτίο δεν ξεπερνά την ονομαστική της τιμή. Κάθε διακύμανση του φορτίου πρέπει να εξετάζεται, καθώς στοιχεία όπως για παράδειγμα η επίδραση ενός σπασμένου πτερυγίου ανεμιστήρα ή φθαρμένα ρουλεμάν σε μεταφορικές ταινίες, μπορούν να εντοπιστούν στο γράφημα της στιγμιαίας ροπής.

Η καταγραφή της στιγμιαίας ροπής εξαρτάται αποκλειστικά από τις απαιτήσεις του φορτίου και για το λόγο αυτό είναι το ισχυρότερο εργαλείο on-line διάγνωσης προβλημάτων φορτίου. Επίσης, είναι ανεξάρτητη της κατάστασης ισχύος (Power Condition) και της έντασης (Current Level) και γι'αυτό βοηθάει στο διαχωρισμού των προβλημάτων φορτίου από τα προβλήματα που έχει ο ίδιος ο κινητήρας.

4.4.6 Οδήγηση Μεταβλητής Συχνότητας (Variable Frequency Drive VFD). [14]

Δείχνει την αλληλεπίδραση μεταξύ τάσης, συχνότητας, ροπής και εκτιμώμενης ταχύτητας στην περίπτωση της οδήγησης μεταβλητής συχνότητας. Ο σκοπός του τεστ είναι να γίνει σαφής η δυναμική συμπεριφορά κατά την οδήγηση αυτή, ώστε να διαγνωστούν προβλήματα που αφορούν τον έλεγχο της ίδιας της οδήγησης VFD, σχήμα 4.8, ή μηχανικά προβλήματα κατά την εγκατάσταση του κινητήρα.



Σχήμα 4.8: Οδήγηση μεταβλητής συχνότητας (VFD).

Τα τεστ που εκτελούνται είναι ανάλογα με την περίπτωση της σταθερής συχνότητας με τις διαφορές που αναφέρθηκαν παραπάνω στις διάφορες περιπτώσεις.

Για τη λήψη μέτρησης με το EXP3000, επιλέγεται η λειτουργία VFD από την εισαγωγή του κινητήρα στη βάση δεδομένων και στη συνέχεια ακολουθείται η ίδια διαδικασία λήψης δεδομένων.

Επιπλέον των προαναφερθέντων αποτελεσμάτων, η λειτουργία VFD παρέχει λεπτομέρειες όπως η μεταβολή της συχνότητας και της ταχύτητας περιστροφής συναρτήσει του χρόνου.

Πλήθος εφαρμογών σε κινητήρες που οδηγούνται από συστήματα μεταβλητής συχνότητας έχουν αναδείξει προβλήματα που με τις κλασικές μεθόδους δεν ήταν αντιληπτά [15].

5. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1 Αεροσυμπιεστής.

Για τον έλεγχο της λειτουργικής κατάστασης του ηλεκτροκινητήρα ενός αεροσυμπιεστή, πραγματοποιήθηκε καταγραφή ρεύματος. Ο αεροσυμπιεστής βρίσκεται στο συνεργείο επισκευής οχημάτων (τοποθεσία: 301EB) και παρουσιάζεται στην εικόνα του σχήματος 5.1. Ο υπό εξέταση κινητήρας συνδέεται με μαντοκίνηση με τον αεροσυμπιεστή, ο οποίος εισάγει στο αεροφυλάκιο αέρα υπό πίεση. Από εκεί ξεκινάει ένα δίκτυο τροφοδοσίας αέρα σε συγκεκριμένες θέσεις του κτιρίου.

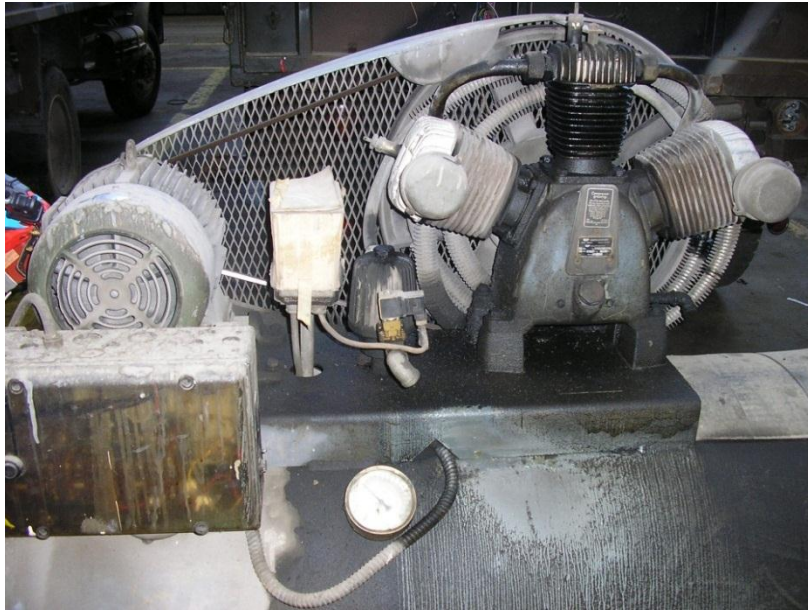
Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα σύμφωνα με τον κατασκευαστή (name plate data) είναι τα ακόλουθα:

- Κατασκευαστής : Bauknecht
- Τύπος : R55/2-7S, VDE 530/59
- Σύγχρονος αριθμός στροφών : 3000 rpm
- Ονομαστικός αριθμός στροφών : 2860 rpm
- Συχνότητα : 50 Hz
- Τάση Λειτουργίας : 380 V
- Συνδεσμολογία στάτη : Τρίγωνο (Δ)
- Ονομαστική Ισχύς : 7,37 HP (5,5 KW)
- Συντελεστής Ισχύος $\cos\phi$: 0,88
- Ονομαστική ένταση ρεύματος : 12,5 A
- Αριθμός πόλων: 2
- Προστασία: IP 33

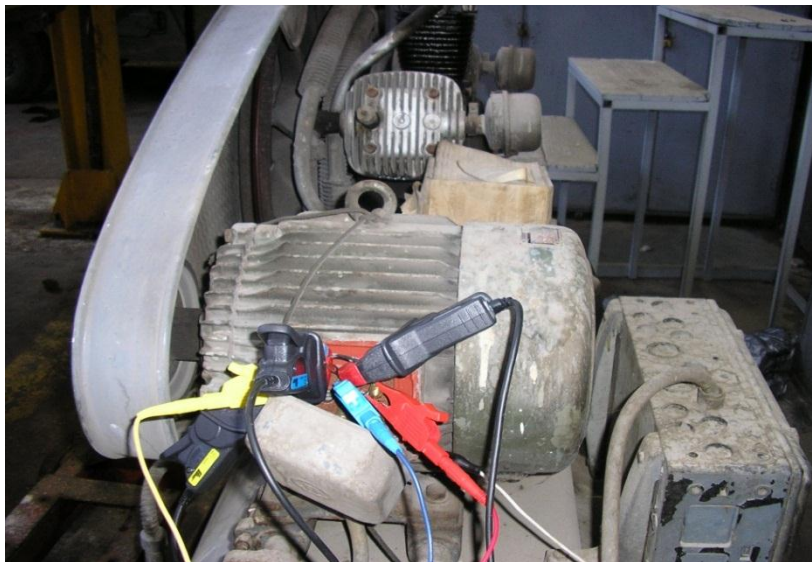
Στη συγκεκριμένη μηχανή εκτελέστηκε μέτρηση με το διαγνωστικό εξοπλισμό EXP 3000 της εταιρίας BAKER, εφαρμόζοντας τη διαδικασία Electric Test, η οποία βασίζεται στην μέθοδο της ανάλυσης ρεύματος (Motor Current Signature Analysis).

Οι τιμές των παραμέτρων που εισήχθησαν στη βάση δεδομένων για την μέτρηση του ρεύματος είναι:

- Ονομαστικά στοιχεία κινητήρα: Όπως αναγράφονται στα τεχνικά του χαρακτηριστικά του (nameplate data).
- Όρια μετρούμενων μεγεθών: Όπως φαίνονται στον πίνακα 5.1
- Βρόχοι συλλογής δεδομένων (loop acquisition): 10 Τεστ, συνεχόμενα (continuous).
- Χρόνος συλλογής δεδομένων (acquisition time): 10sec
- Αριθμός αρμονικών προς αποθήκευση: 51
- Χρόνος συλλογής δεδομένων φάσματος: 1,37sec
- Μέγιστη συχνότητα φάσματος: 3000Hz
- Αυτόματη επιλογή φάσεων: NAI
- Επιλογή αισθητηρίων: Φορητοί
- Επιλογή αμπεροτσιμπίδων: 10 A
- Έλεγχος συνδέσεων: NAI



Σήμα 5.1: Αεροσυμπιεστής

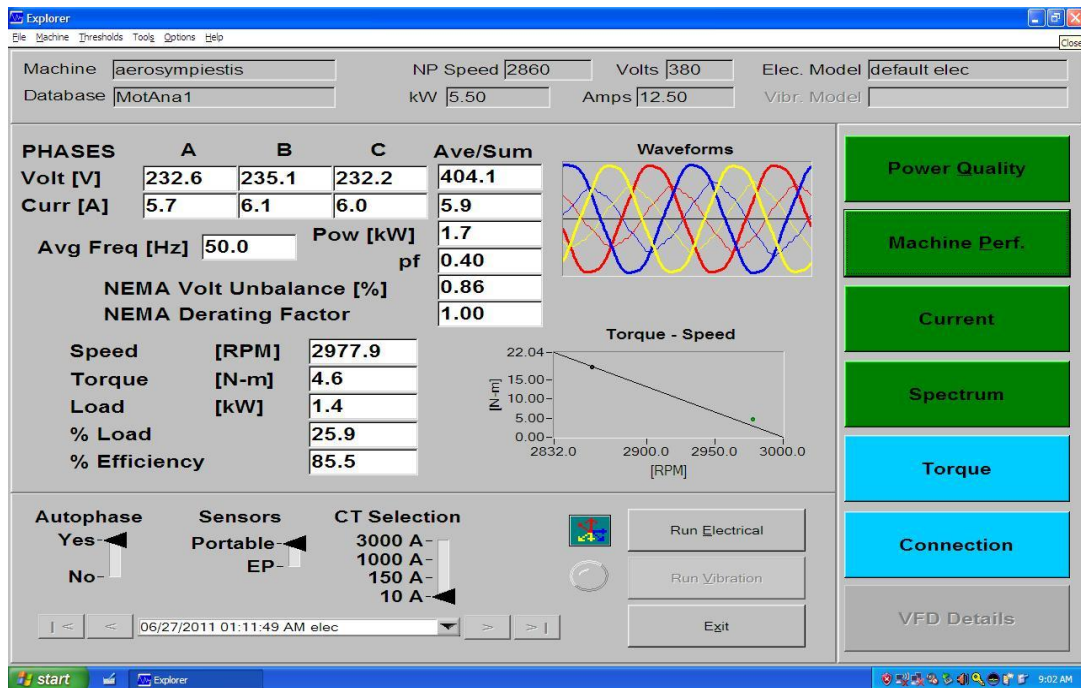


Σχήμα 5.2: Σύνδεση αισθητηρίων καταγραφής ρεύματος

Εφόσον, εισήχθησαν τα στοιχεία καταγραφής και τοποθετήθηκαν τα αισθητήρια στις τρεις φάσεις του ακροκιβωτίου του κινητήρα, όπως φαίνεται στην εικόνα του σχήματος 5.2, ο κινητήρας τέθηκε σε λειτουργία. Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης, στην επιφάνεια εργασίας του EXP 3000 εμφανίζονται τα αποτελέσματα του σχήματος 5.3. Από την εικόνα του σχήματος 5.3, είναι φανερό ότι η κατάσταση του κινητήρα δεν παρουσιάζει προβλήματα, καθώς όλες οι ενδείξεις είναι πράσινες (εκτός των Torque και Connection, όπου οι ενδείξεις είναι μόνιμα γαλάζιες μετά από κάθε μέτρηση). Τα σημαντικότερα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη μέτρηση, συνοψίζονται στον πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.1: Όρια προσοχής και προειδοποίησης (Thresholds).

Τεστ	Προσοχή (Caution)	Προειδοποίηση (Warning)
Υπέρβαση Τάσης (Over Voltage)	10%	20%
Υποβιβασμός Τάσης (Under Voltage)	5%	10%
Ασυμμετρία Τάσης (Voltage Unbalance)	2%	3,5%
Σύνολο Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD _V)	7%	9%
Σύνολο Παραμόρφωσης (TD _V)	10%	12%
Υπέρβαση Έντασης (Over Current)	110%	120%
Συντελεστής Αποτελεσματικότητας (esf)	1,1	1,25
Ράβδοι Δρομέα (Rotor Bar)	45db	36db
Ασυμμετρία Έντασης (Current Unbalance)	10%	20%
Φορτίο (Load)	110%	125%



Σχήμα 5.3: Αποτελέσματα μέτρησης με ανάλυση ρεύματος.

Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέτρησης κινητήρα αεροσυμπιεστή.

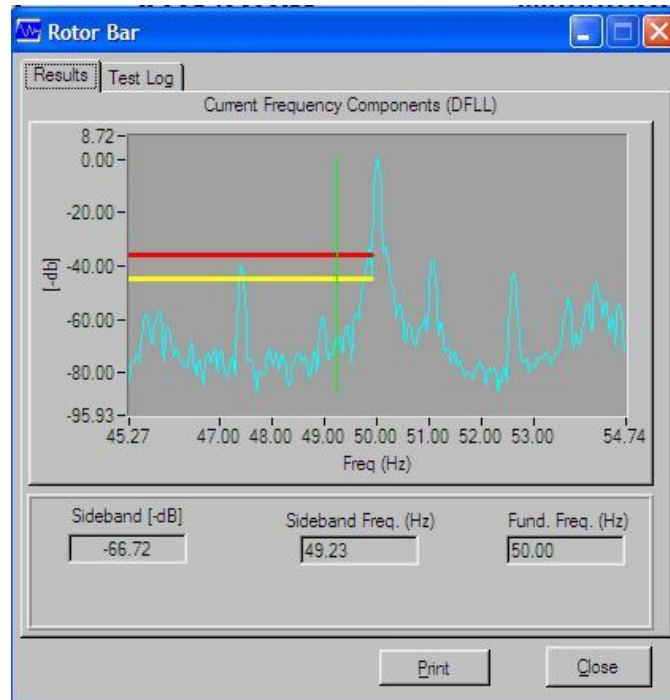
Τεστ	Μέτρηση	Κατάσταση
Υπέρβαση Τάσης (Over Voltage)	6,34%	Καλή
Ασυμμετρία Τάσης (Voltage Unbalance)	0,86%	Καλή
Σύνολο Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD _v)	2,75%	Καλή
Σύνολο Παραμόρφωσης (TD _v)	2,75%	Καλή
Υπέρβαση Έντασης (Over Current)	49,05% (της ονομαστικής τιμής)	Καλή
Συντελεστής Αποτελεσματικότητας (esf)	0,26	Καλή
Ράβδοι Δρομέα (Rotor Bar)	66,72db	Καλή
Ασυμμετρία Έντασης (Current Unbalance)	4,1%	Καλή
Φορτίο (Load)	25,9%	Καλή
Απόδοση (Efficiency)	85,5%	Καλή

Η υπέρβαση της τάσης σε ποσοστό 6,34% (είναι εντός των αποδεκτών ορίων), οφείλεται στο γεγονός ότι η ονομαστική τάση του κινητήρα, είναι 380V, ενώ η παρεχόμενη τάση από το δίκτυο είναι 400V. Η πραγματική λοιπόν υπέρβαση τάσης είναι ακόμα μικρότερη, καθώς η τάση λειτουργίας μετρήθηκε σε 404,1V.

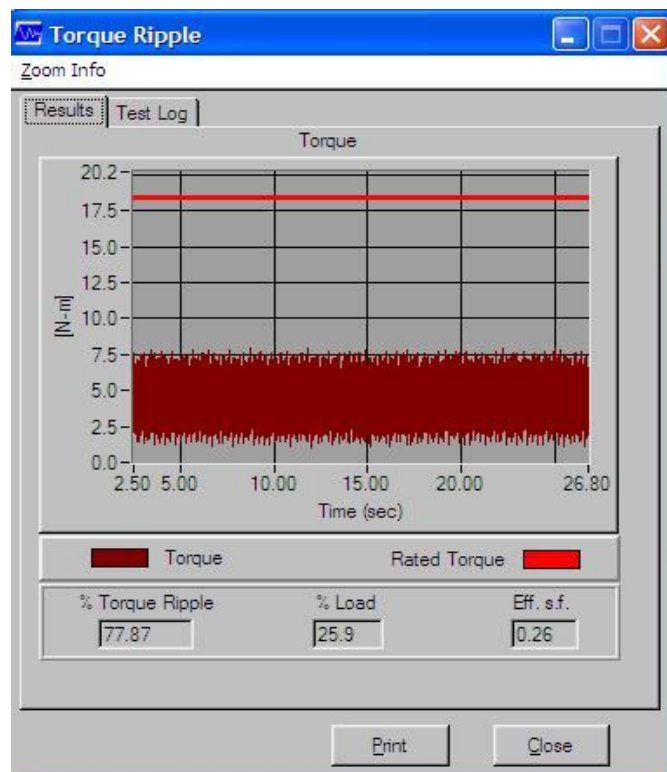
Η ανάλυση του Rotor Bar Test, πραγματοποιείται με την εφαρμογή της μεθοδολογίας Digital Filter Locked Looped (DFLL), όπου χρησιμοποιώντας την ετεροσυσχέτιση σημάτων ελέγχεται ο βαθμός συμμετοχής κάθε συχνότητας στο μετρούμενο σήμα (σε αυτή την περίπτωση η f_{rotor}). Στο διάγραμμα του σχήματος 5.4, παρατηρείται πως στη συχνότητα $f_{\text{rotor}} = 49,23$ Hz εμφανίζει πλάτος -66.72dB που καθιστά τον εξαιρετική την κατάσταση του κινητήρα όσον αφορά την κατάσταση των ράβδων του δρομέα (πίνακας 2.1). Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2, η συχνότητα διπλής ολίσθησης πλευρικής μπάνας λόγω σπασμένων ράβδων προκύπτει από τη σχέση:

$$f_{\text{rotor}} = f_N \cdot (1-2 \cdot s) \text{ από την οποία υπολογίζεται η ολίσθηση } s = 0,0077 \text{ ή } 0,77\%.$$

Στην καταγραφή της ροπής, σχήμα 5.5, παρατηρείται σταθερότητα στη κυμάτωση της ροπής και η μέση της τιμή κατά τη διάρκεια της μέτρησης διατηρείται σταθερή (περίπου 5Nm), ενώ το φορτίο (25,9%) θεωρείται ικανοποιητικό για τη μέτρηση. Οι αιχμές που εμφανίζονται οφείλονται σε διακυμάνσεις του φορτίου, που θα αναλυθούν στη συνέχεια με την επεξεργασία του φάσματος της ροπής. Η διακύμανση της ροπής (σχήμα 5.5) σε συνδυασμό με το φάσμα της έντασης (σχήμα 5.4), αποκλείει κάθε περίπτωση βλάβης στις ράβδους του δρομέα.



Σχήμα 5.4: Επεξεργασία ρεύματος με το φίλτρο DFLL (Rotor Bar Test).



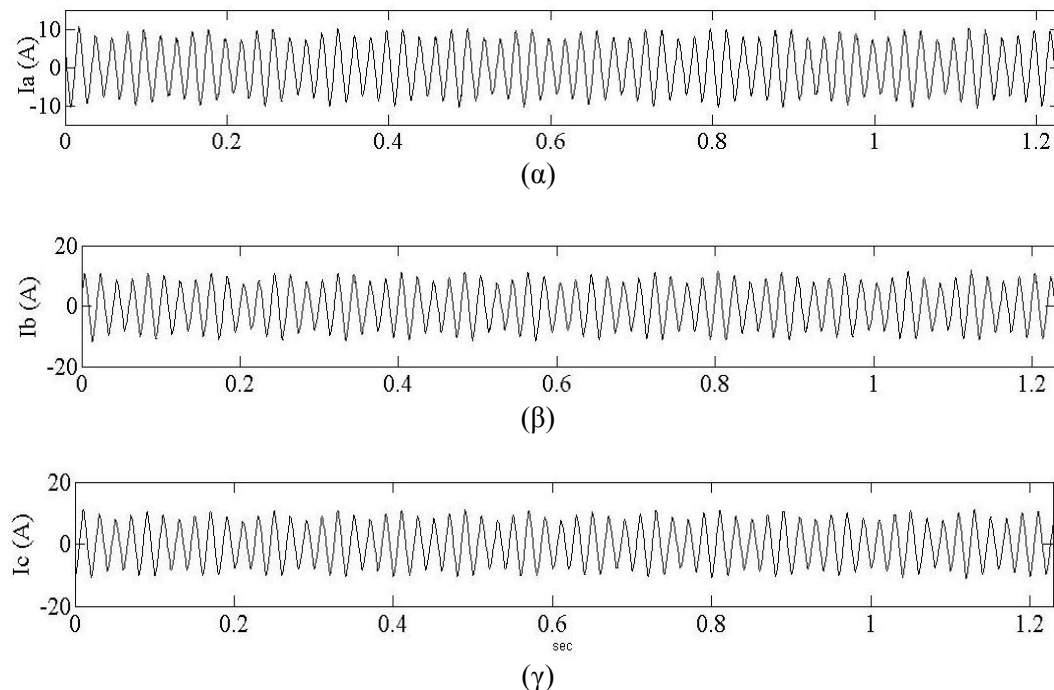
Σχήμα 5.5: Επεξεργασία κυματομορφής ροπής (Torque Ripple).

Τα δεδομένα των φασμάτων έντασης, τάσης και ροπής που λήφθηκαν από το Spectrum Test, εξάγονται με τη μορφή αρχείων txt και αναλύονται στο υπολογιστικό περιβάλλον των προγραμμάτων LabView και MATLAB, ώστε να υπάρχει καλύτερη ποιότητα στην παρουσίαση των διαγραμμάτων.

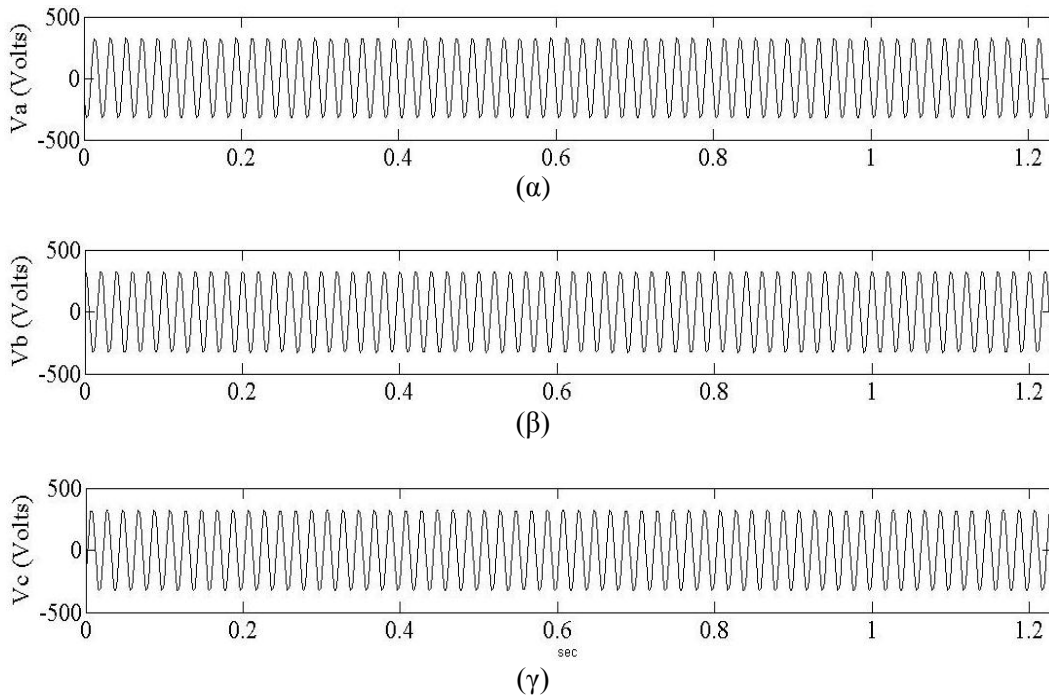
Οι χαρακτηριστικές συχνότητες του κινητήρα που ενδέχεται να εμφανιστούν στα φάσματα είναι:

- Η συχνότητα του δικτύου $f_1 = 50 \text{ Hz}$, που συμπίπτει με τη σύγχρονη συχνότητα (f_N) του κινητήρα, καθώς αυτός είναι διπολικός.
- Η συχνότητα περιστροφής f_{shaft} προκύπτει από την πραγματική συχνότητα περιστροφής (2977,9 rpm): $f_{\text{shaft}} = 2977,9 \text{ rpm}/60 \text{ sec} = 49,63 \text{ Hz}$.
- Η συχνότητα ολίσθησης f_{slip} προκύπτει από τη διαφορά της σύγχρονης από τη συχνότητα περιστροφής: $f_{\text{slip}} = f_N - f_{\text{shaft}} = 50 - 49,63 = 0,37 \text{ Hz}$.
- Η συχνότητα του ρυθμού περάσματος από τους πόλους:
 $\text{PPF} = \text{Αριθμός πόλων} \times f_{\text{shaft}} = 2 \times 49,63 = 0,74 \text{ Hz}$.

Στα σχήματα 5.6 και 5.7 παρουσιάζονται οι χρονικές κυματομορφές των καταγραφών της έντασης και της τάσης, αντίστοιχα. Στα γραφήματα, παρατηρείται για κάθε φάση του ρεύματος η διαφορά φάσης περίπου 90° μεταξύ της τάσης και της έντασης. Επίσης, παρατηρείται και διαφορά φάσης περίπου 120° μεταξύ των 3 φάσεων του ρεύματος και της τάσης. Από τη σύγκριση των κυματομορφών δυο σημάτων γίνεται φανερό πως αυτή της έντασης παρουσιάζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις από αυτή της τάσης, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι η ασυμμετρία έντασης είναι σχεδόν πενταπλάσια της ασυμμετρίας τάσης, όπως άλλωστε αναμενόταν από όσα έχουν αναφερθεί.

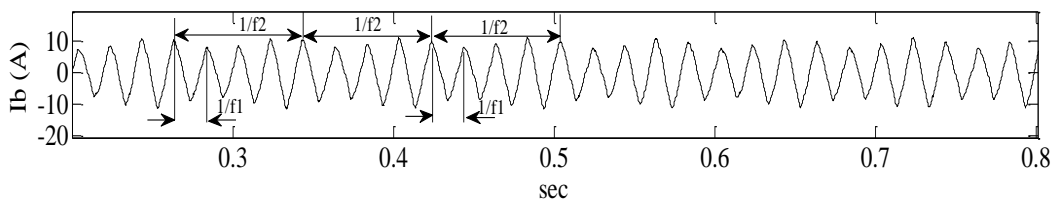


Σχήμα 5.6: Χρονική κυματομορφή της μετρούμενης έντασης (α) I_a , (β) I_b και (γ) I_c .



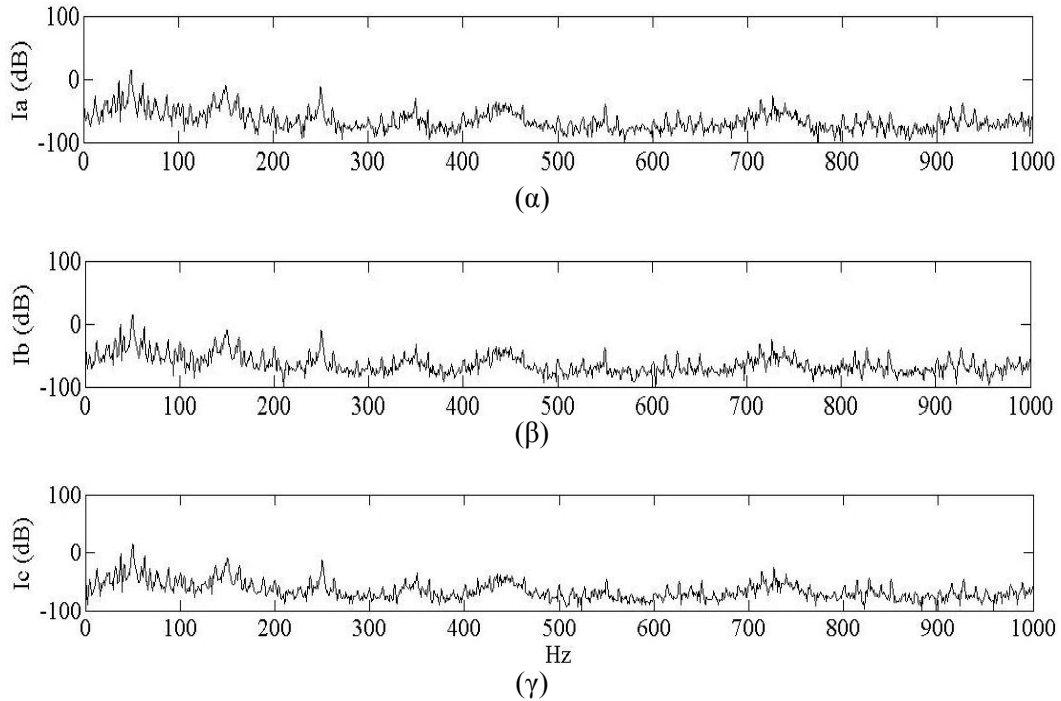
Σχήμα 5.7: Χρονική κυματομορφή του σήματος της μετρούμενης τάσης (α) V_a , (β) V_b και (γ) V_c .

Στο σχήμα 5.8 αναλύεται ένα μέρος του χρονικού σήματος της έντασης στη φάση που δέχεται το μεγαλύτερο ρεύμα (φάση B). Διακρίνεται η περιοδικότητα που ισούται με 0,02 sec και αντιστοιχεί στη συχνότητα του δικτύου, $f_1 = 50$ Hz και μια περιοδικότητα 0,08 sec που αντιστοιχεί σε συχνότητα $f_2 = 12,21$ Hz να διαμορφώνει την f_1 .

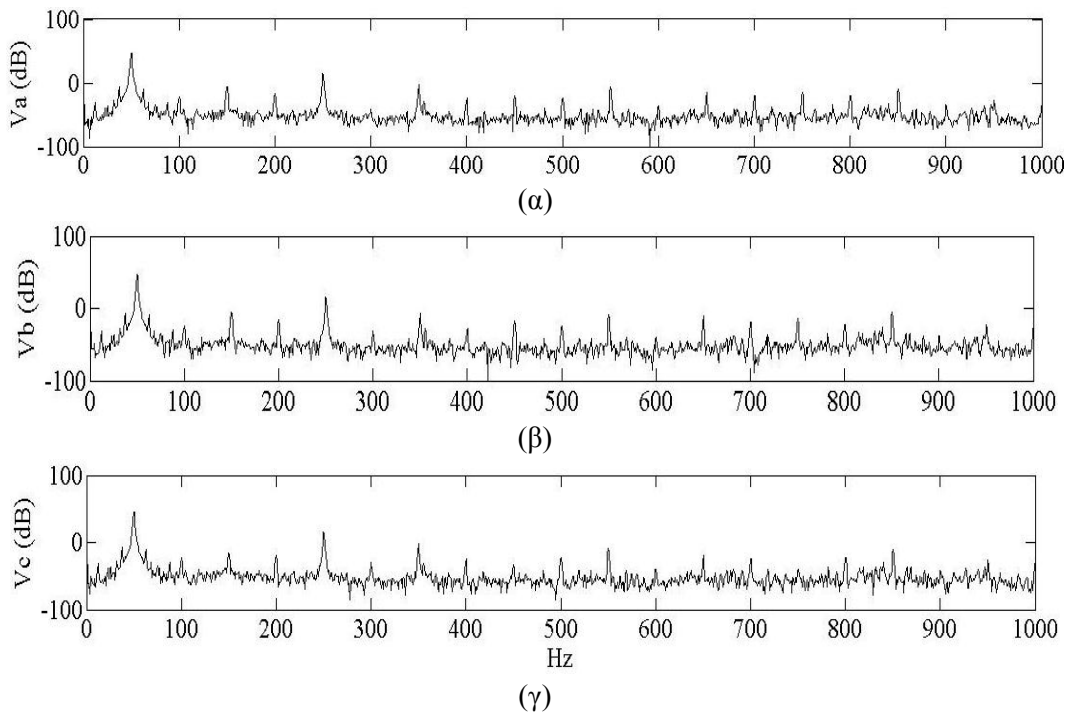


Σχήμα 5.8: Τμήμα της χρονικής κυματομορφής της έντασης I_b .

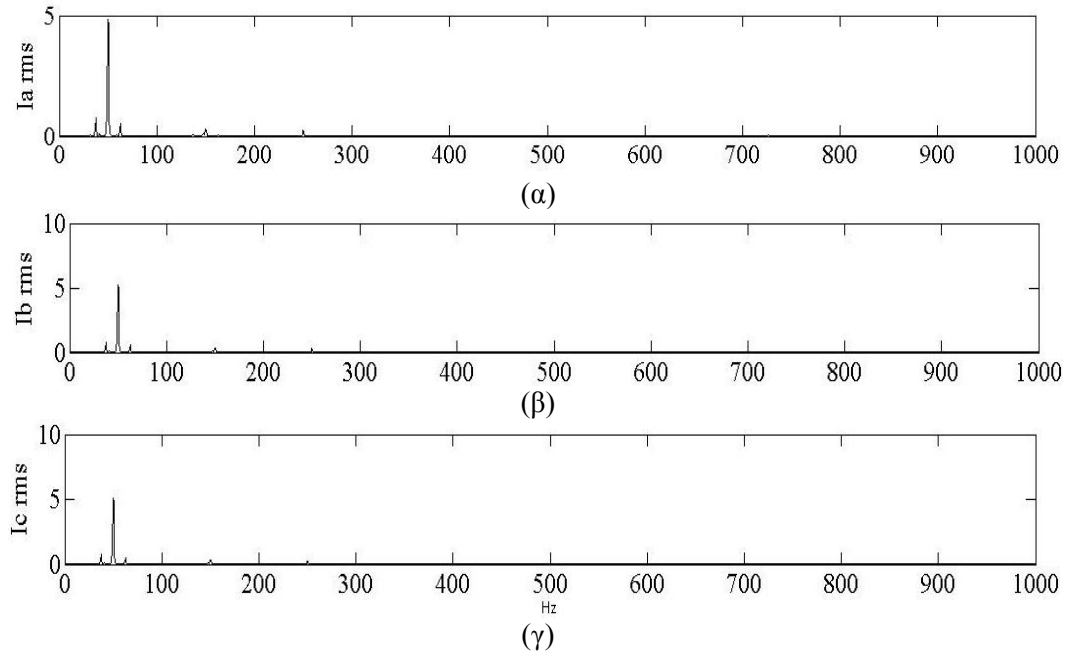
Στη συνέχεια, τα μετρούμενα χρονικά σήματα με την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier αναλύονται στο πεδίο της συχνότητας για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης. Στα σχήματα 5.9 και 5.10 εμφανίζονται τα φάσματα της έντασης και της τάσης αντίστοιχα σε κάθε φάση με τα πλάτη των συχνοτήτων να μετρώνται σε dB, ενώ στα σχήματα 5.11 και 5.12, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα φάσματα με γραμμικά πλάτη. Είναι εμφανές πως η επιλογή του μεγέθους του πλάτους σε dB αναδεικνύει τις συχνοτικές συνιστώσες και διευκολύνει την ανάλυση, όπως επίσης και το γεγονός ότι στο φάσμα της έντασης γίνονται διακριτές περισσότερες αιχμές από τα αντίστοιχα φάσματα τάσης.



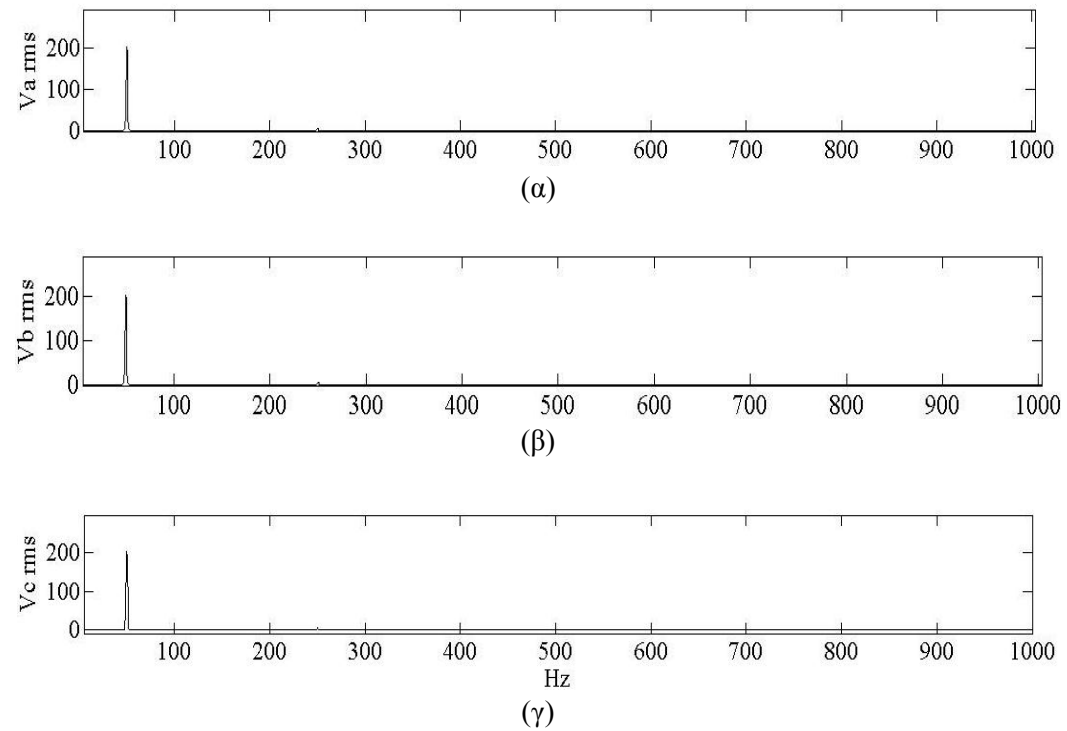
Σχήμα 5.9: Φάσμα μετρούμενων εντάσεων σε dB και σε εύρος 1000 Hz (α) I_a , (β) I_b και (γ) I_c .



Σχήμα 5.10: Φάσμα μετρούμενων τάσεων σε dB και σε εύρος 1000 Hz (α) V_a , (β) V_b και (γ) V_c .

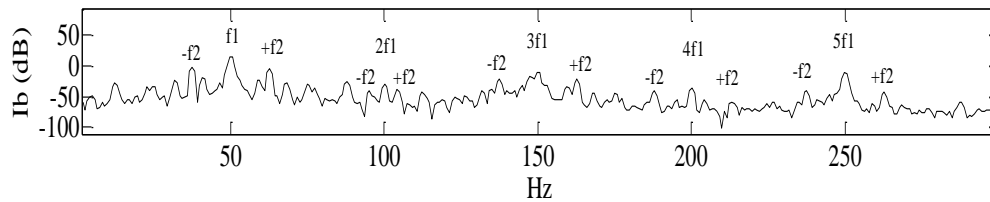


Σχήμα 5.11: Φάσμα μετρούμενων εντάσεων σε rms και σε εύρος 1000 Hz. (α) I_a , (β) I_b και (γ) I_c .



Σχήμα 5.11: Φάσμα μετρούμενων τάσεων σε rms και σε εύρος 1000 Hz (α) V_a , (β) V_b και (γ) V_c .

Στο σχήμα 5.12 παρουσιάζεται το φάσμα της έντασης για τη φάση Β. Εμφανίζονται οι πέντε (5) πρώτες αρμονικές συχνότητες του δικτύου περιφερειακά των οποίων αναπτύσσονται με μικρότερα πλάτη αιχμές, οι οποίες απέχουν απόσταση ίση με τη συχνότητα $f_2 = 12,5$ Hz.

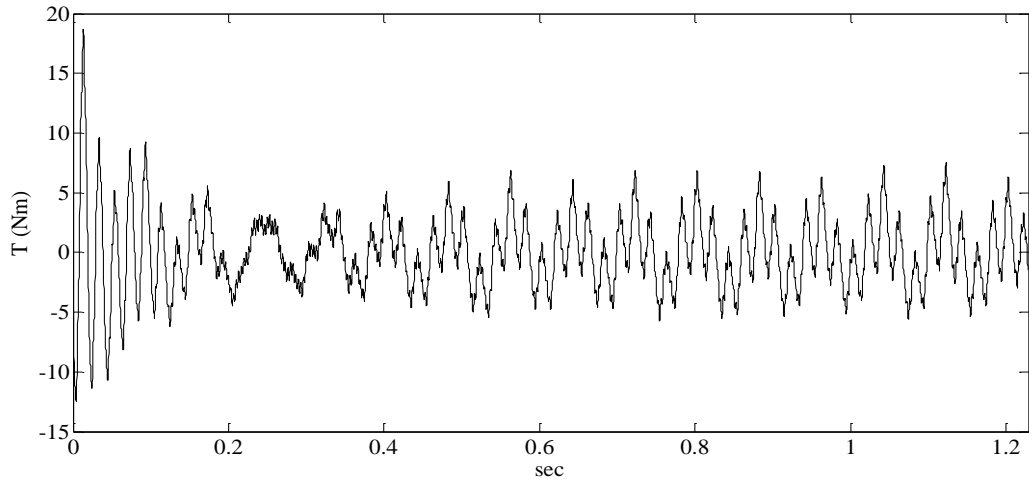


Σχήμα 5.12: Φάσμα μετρούμενης έντασης I_b σε dB και σε εύρος 300 Hz.

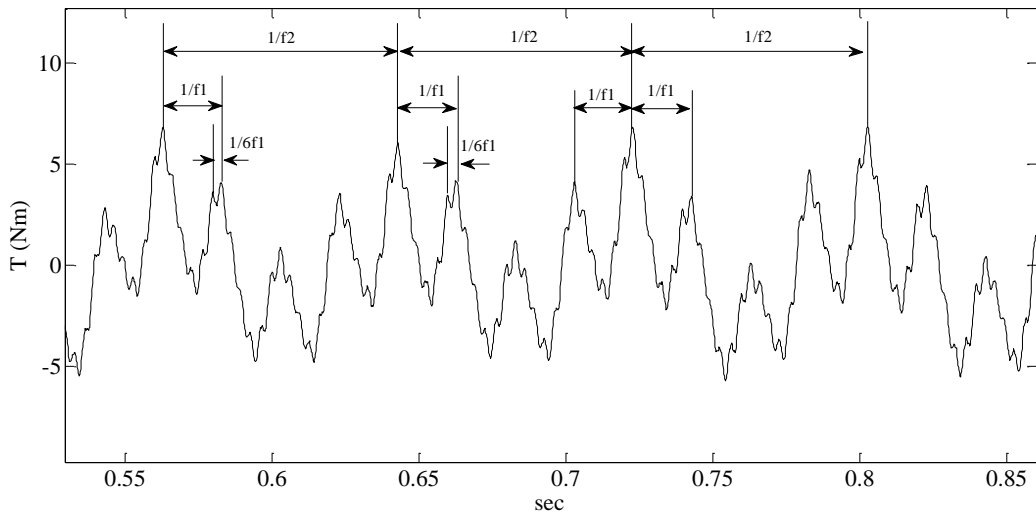
Κατόπιν, αναλύεται η μετρούμενη ροπή. Στο σχήμα 5.13 εμφανίζεται η χρονική κυματομορφή της ροπής. Για λεπτομερέστερη ανάλυση το ενδιαφέρον εστιάζεται σε ένα τμήμα της κυματομορφής, σχήμα 5.14, από όπου προκύπτουν διάφορες χαρακτηριστικές περιοδικότητες. Συγκεκριμένα, παρατηρείται η περιοδικότητα με διάρκεια $3,33 \times 10^{-3}$ sec που αντιστοιχεί στην 6^η αρμονική της συχνότητας του δικτύου ($6f_1 = 300$ Hz). Επίσης, παρατηρείται περιοδικότητα 0,02 sec που αντιστοιχεί στην $f_1 = 50$ Hz να διαμορφώνει το πλάτος της 6^{ης} αρμονικής. Τέλος, μια τρίτη περιοδικότητα 0,08sec που αντιστοιχεί στην $f_2 = 12,21$ Hz, διαμορφώνει το πλάτος της συχνότητας f_1 .

Στη συνέχεια, γίνεται επεξεργασία του χρονικού σήματος της ροπής του σχήματος 5.13 και προκύπτει το γραμμικό φάσμα της ροπής. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στη χαμηλόσυχη περιοχή όπως φαίνεται στο σχήμα 5.15, όπου δεσπόζουν η συχνότητα του δικτύου f_1 και οι αρμονικές της (με μεγαλύτερο πλάτος στην 6^η αρμονική), και πλευρικές αιχμές γύρω από την f_1 και τις αρμονικές της που ισαπέχουν κατά f_2 .

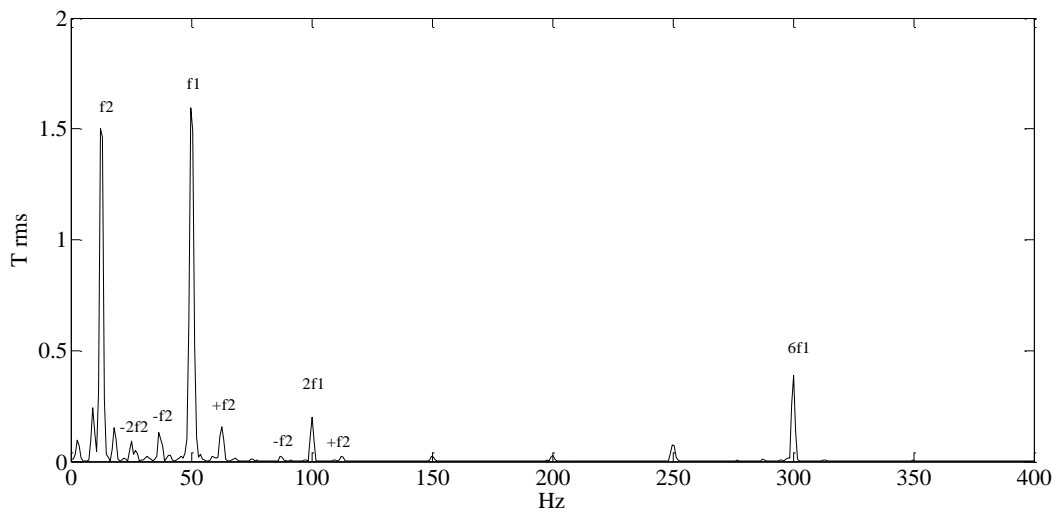
Η εμφάνιση της συχνότητας f_2 στο φάσμα της έντασης και πολύ εντονότερα στο φάσμα της ροπής και η διαμόρφωση της συχνότητας του δικτύου από αυτή, δεν συνδέεται με κάποια βλάβη του κινητήρα, καθώς δεν είναι από τις συχνότητες του κινητήρα που αναμένονταν να εμφανιστούν όπως αυτές υπολογίστηκαν. Αντίθετα, οφείλονται σε μηχανικούς λόγους που σχετίζονται με το φορτίο και ενδεχομένως να προκαλούνται από τα χτυπήματα των κυλίνδρων του αεροσυμπιεστή, τον μάντα ή τη σχέση μετάδοσης κίνησης μεταξύ του κινητήρα και του αεροσυμπιεστή, αστοχία στη συγκόλληση των ακτίνων με τον οδοντοτό τροχό του αεροσυμπιεστή κ.α. Το γεγονός των διαταραχών στο φορτίο ενισχύεται και από την κυματομορφή της ροπής, όπως αυτό καταγράφηκε στο Torque Ripple (σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.13: Χρονική κυματομορφή της μετρούμενης ροπής.



Σχήμα 5.14: Τμήμα της χρονικής κυματομορφή της ροπής.



Σχήμα 5.15: Φάσμα μετρούμενης ροπής σε εύρος 1000 Hz.

5.2 Τροχός κοπής.

Ο κινητήρας του τροχού κοπής μεταλλικών ράβδων που εξετάστηκε με καταγραφή ρεύματος, βρίσκεται στο συνεργείο επισκευής οχημάτων (τοποθεσία: 301EB) και παρουσιάζεται στα σχήματα 5.16 και 5.17. Ο υπό εξέταση κινητήρας έχει τη δυνατότητα λειτουργίας σε δύο ταχύτητες κοπής (1420 και 2880 rpm) με την αντίστοιχη επιλογή από διακόπτη (σχ. 5.12). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα σύμφωνα με τον κατασκευαστή (name plate data) είναι τα ακόλουθα:

- Τύπος : NID 100X2-4
- Σύγχρονος αριθμός στροφών : 3000 rpm
- Ονομαστικός αριθμός στροφών : 2880 rpm και 1420 rpm (ανάλογα με την επιλογή).
- Συχνότητα : 50 Hz
- Τάση Λειτουργίας : 380 V
- Ονομαστική Ισχύς : 3 HP και 2,25HP (ανάλογα με την επιλογή).
- Ονομαστική ένταση ρεύματος : 4,7A και 4,1 A (ανάλογα με την επιλογή).
- Αριθμός πόλων: 2 και 4 (ανάλογα με την επιλογή).

Στη συγκεκριμένη μηχανή εκτελέστηκε μέτρηση με το διαγνωστικό εξοπλισμό EXP 3000 της εταιρίας BAKER. Έγιναν μετρήσεις με τον κινητήρα σε λειτουργία και στις δυο ταχύτητες περιστροφής. Καθώς τα αποτελέσματα ήταν ανάλογα, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν οι μετρήσεις που έγιναν στην υψηλή ταχύτητα περιστροφής.

Οι τιμές των παραμέτρων που εισήχθησαν στη βάση δεδομένων για την μέτρηση του ρεύματος είναι:

- Ονομαστικά στοιχεία κινητήρα: Όπως αναγράφονται στα τεχνικά του χαρακτηριστικά του (nameplate data).
- Όρια μετρούμενων μεγεθών: Όπως φαίνονται στον πίνακα 5.1
- Βρόχοι συλλογής δεδομένων (loop acquisition): 10 Τεστ, συνεχόμενα (continuous).
- Χρόνος συλλογής δεδομένων (acquisition time): 10sec
- Αριθμός αρμονικών προς αποθήκευση: 51
- Χρόνος συλλογής δεδομένων φάσματος: 1,37sec
- Μέγιστη συχνότητα φάσματος: 3000Hz
- Αυτόματη επιλογή φάσεων: NAI
- Επιλογή αισθητηρίων: Φορητοί
- Επιλογή αμπεροτσιπιδών: 10 A
- Έλεγχος συνδέσεων: NAI

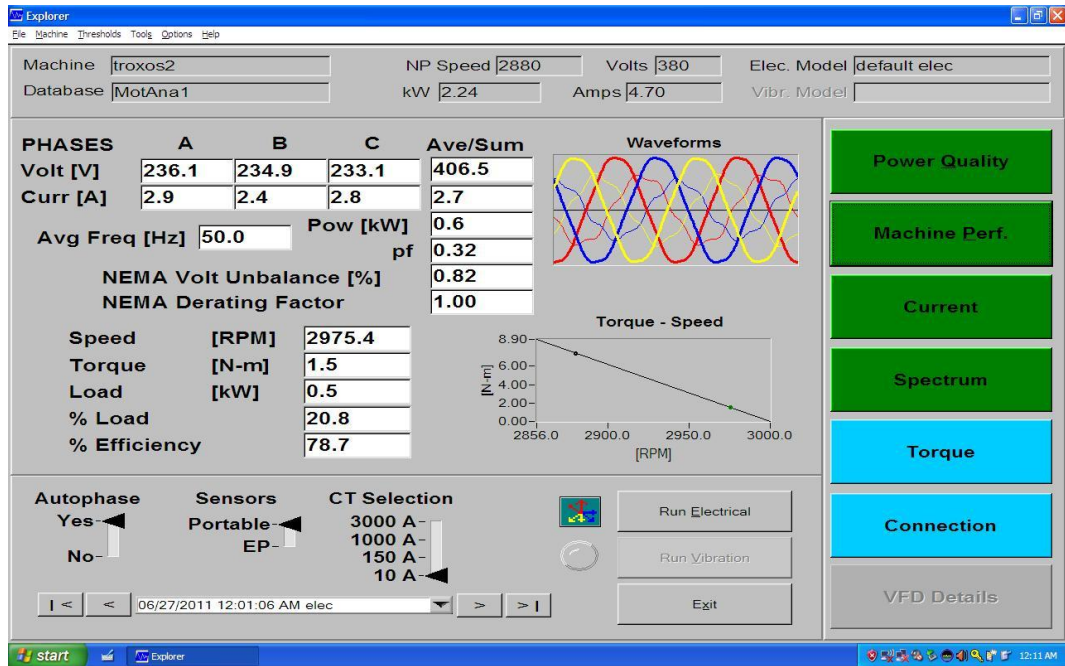
Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης, στην επιφάνεια εργασίας του EXP 3000 εμφανίζονται τα αποτελέσματα του σχήματος 5.18.



Σήμα 5.16: Τροχός κοπής μεταλλικών ράβδων.



Σήμα 5.17: Σύνδεση αισθητηρίων στον τροχό κοπής.



Σχήμα 5.18: Αποτελέσματα μέτρησης με ανάλυση ρεύματος κινητήρα τροχού κοπής.

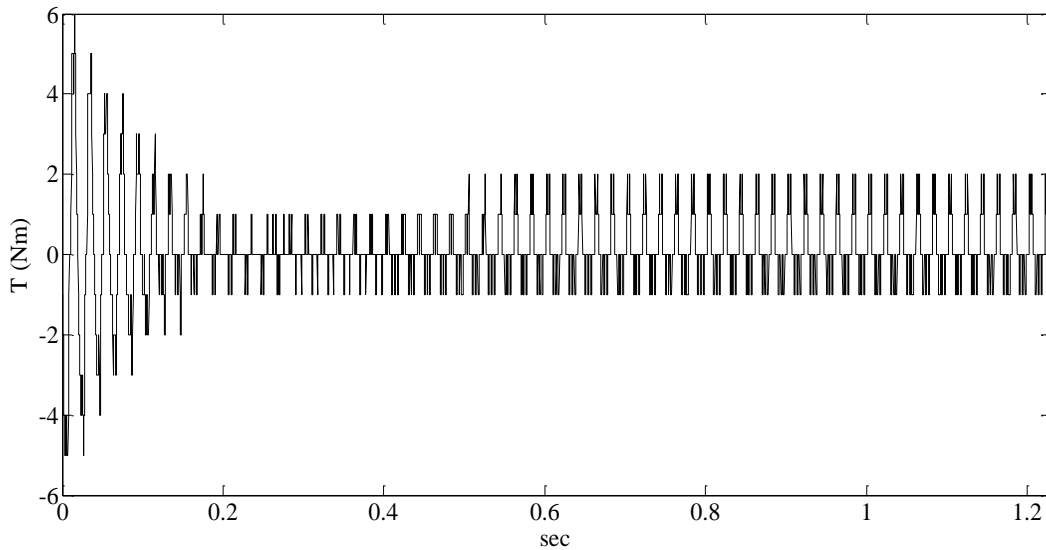
Πίνακας 5.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέτρησης κινητήρα τροχού κοπής.

Τεστ	Μέτρηση	Κατάσταση
Υπέρβαση Τάσης (Over Voltage)	6,97%	Καλή
Ασυμμετρία Τάσης (Voltage Unbalance)	0,82%	Καλή
Σύνολο Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD _V)	2,77%	Καλή
Σύνολο Παραμόρφωσης (TD _V)	2,75%	Καλή
Υπέρβαση Έντασης (Over Current)	61,06% (της ονομαστικής τιμής)	Καλή
Συντελεστής Αποτελεσματικότητας (esf)	0,21	Καλή
Ράβδοι Δρομέα (Rotor Bar)	56,26 db	Καλή
Ασυμμετρία Έντασης (Current Unbalance)	11,2%	Υπέρβαση ορίου (δεν λαμβάνεται υπόψη)
Φορτίο (Load)	20,8%	Καλή
Απόδοση (Efficiency)	78,7%	Καλή

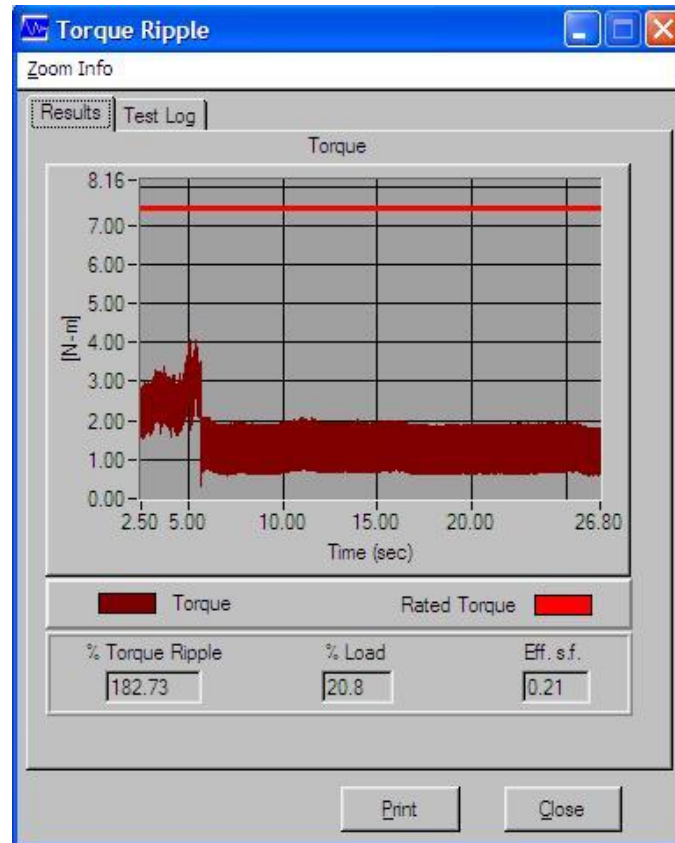
Από την εικόνα του σχήματος 5.18, είναι φανερό ότι η κατάσταση του κινητήρα δεν παρουσιάζει προβλήματα, καθώς όλες οι ενδείξεις είναι πράσινες. Τα σημαντικότερα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη μέτρηση, συνοψίζονται στον πίνακα 5.3, από τον οποίο φαίνεται ότι τα μετρούμενα μεγέθη είναι εντός των αποδεκτών ορίων, εκτός της ασυμμετρίας έντασης. Ωστόσο, η ένδειξη δεν λαμβάνεται υπόψη (μπλε ένδειξη) καθώς το τεστ αυτό συνδέεται με το φορτίο που όμως δεν ξεπέρασε το 25% της πλήρους τιμής του. Η ύπαρξη μεγάλης ασυμμετρίας στην ένταση, ακόμα και αν η ασυμμετρία στην τάση είναι πολύ μικρή, όπως στον υπό εξέταση κινητήρα, είναι συνήθης σε υγιείς κινητήρες που οδηγούνται από χαμηλό φορτίο. [13]

Κατόπιν, αναλύεται η μετρούμενη ροπή. Στο σχήμα 5.19 εμφανίζεται η χρονική κυματομορφή της ροπής. Η μορφή του σήματος οφείλεται στην κατεργασία της κοπής, καθώς όπως φαίνεται στην κυμάτωση της ροπής (Torque Ripple), σχήμα 5.20, η ροπή μέχρι τα 5,8sec που διαρκεί η κοπή δεν είναι σταθερή, ενώ μετά σταθεροποιείται. Στο γεγονός αυτό οφείλεται η μεγάλη διακύμανση της ροπής (σε ποσοστό 183%). Ωστόσο, η σταθερότητα που παρουσιάζει η καταγραφή της ροπής στο Torque Ripple και το γεγονός ότι δεν υπάρχουν αιχμές στη διακύμανσή του, οδηγεί στο συμπέρασμα πως δεν υπάρχει κάποια ηλεκτρική ή μηχανική βλάβη που να σχετίζεται με τον κινητήρα ή τον τροχό κοπής.

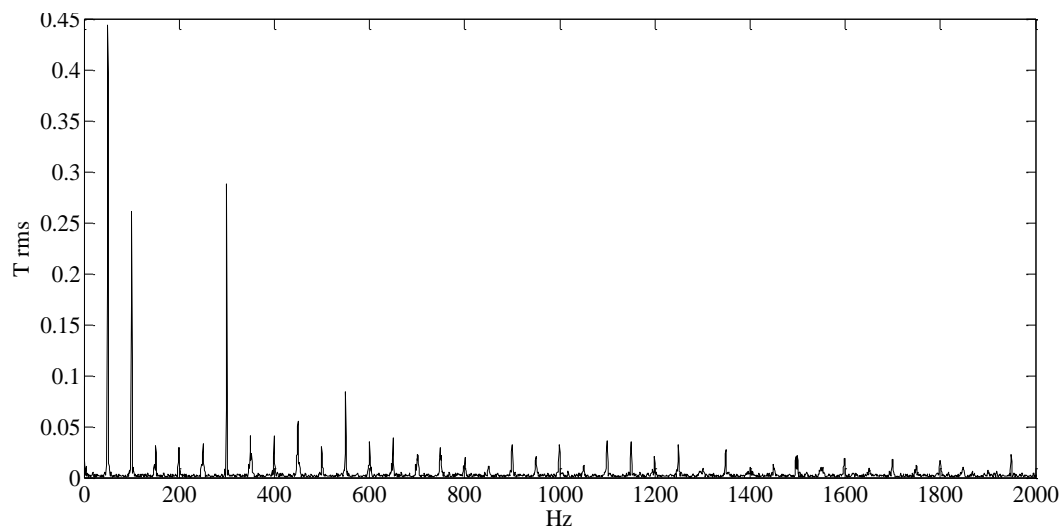
Στη συνέχεια, γίνεται επεξεργασία του χρονικού σήματος της ροπής του σχήματος 5.19 και προκύπτει το γραμμικό φάσμα της ροπής που φαίνεται στο σχήμα 5.21. Σε αυτό, διακρίνονται η συχνότητα του δικτύου και οι αρμονικές της, ενώ δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερα διεγερμένη περιοχή που να υποδεικνύει κάποιου είδους βλάβη.



Σχήμα 5.19: Χρονική κυματομορφή της μετρούμενης ροπής.



Σχήμα 5.20: Επεξεργασία κυματομορφής ροπής (Torque Ripple).



Σχήμα 5.21: Φάσμα μετρούμενης ροπής σε εύρος 2000 Hz.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης του ρεύματος και της ροπής, προκύπτει το συμπέρασμα ότι στον συγκεκριμένο κινητήρα δεν υπάρχει ηλεκτρική ή μηχανική βλάβη.

5.3 Δράπανο.

Στον κινητήρα που κινεί το δρέπανο που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.22 και βρίσκεται στο συνεργείο επισκευής οχημάτων (τοποθεσία: 301EB) πραγματοποιήθηκε καταγραφή ρεύματος με τον εξοπλισμό EXP3000, με τη σύνδεση των αισθητηρίων όπως φαίνεται στο σχήμα 5.23.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα σύμφωνα με τον κατασκευαστή (name plate data) είναι τα ακόλουθα:

- Ονομαστικός αριθμός στροφών : 1420 rpm
- Συχνότητα : 50 Hz
- Τάση Λειτουργίας : 400 V
- Ονομαστική Ισχύς : 1 HP (0,75 KW)
- Συντελεστής Ισχύος cosφ: 0,70
- Ονομαστική ένταση ρεύματος : 2 A
- Αριθμός πόλων: 4
- Προστασία: IP 44

Οι τιμές των παραμέτρων που εισήχθησαν στη βάση δεδομένων για την μέτρηση του ρεύματος είναι:

- Ονομαστικά στοιχεία κινητήρα: Όπως αναγράφονται στα τεχνικά του χαρακτηριστικά του (nameplate data).
- Όρια μετρούμενων μεγεθών: Όπως φαίνονται στον πίνακα 5.1
- Βρόχοι συλλογής δεδομένων (loop acquisition): 10 Τεστ, συνεχόμενα (continuous).
- Χρόνος συλλογής δεδομένων (acquisition time): 10sec
- Αριθμός αρμονικών προς αποθήκευση: 51
- Χρόνος συλλογής δεδομένων φάσματος: 1,37sec
- Μέγιστη συχνότητα φάσματος: 3000Hz
- Αυτόματη επιλογή φάσεων: NAI
- Επιλογή αισθητηρίων: Φορητοί
- Επιλογή αμπεροτσιμπίδων: 10 A
- Έλεγχος συνδέσεων: NAI

Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης, στην επιφάνεια εργασίας του EXP 3000 εμφανίζονται τα αποτελέσματα του σχήματος 5.24.

Από την εικόνα του σχήματος 5.24, γίνεται φανερό ότι υπάρχει προειδοποίηση (κίτρινη ένδειξη) στο τεστ που επεξεργάζεται τα στοιχεία του ρεύματος, όπου και θα εστιαστεί η περαιτέρω ανάλυση.

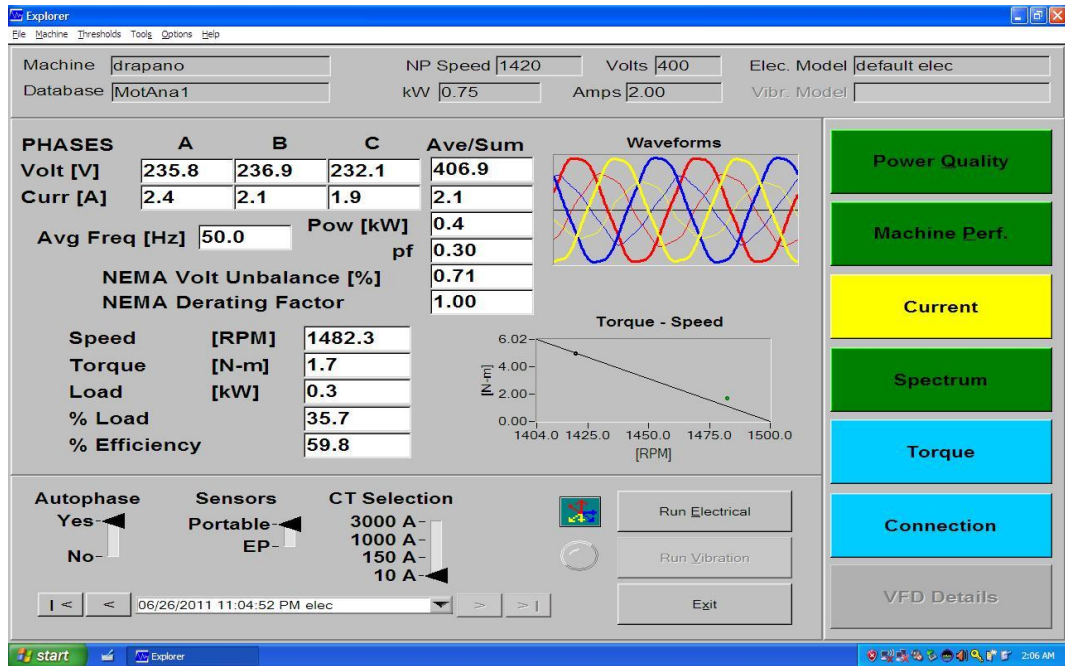
Τα σημαντικότερα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη μέτρηση, συνοψίζονται στον πίνακα 5.4.



Σήμα 5.22: Δράπανο.



Σχήμα 5.23: Σύνδεση αισθητηρίων καταγραφής ρεύματος.



Σχήμα 5.24: Αποτελέσματα μέτρησης με ανάλυση ρεύματος.

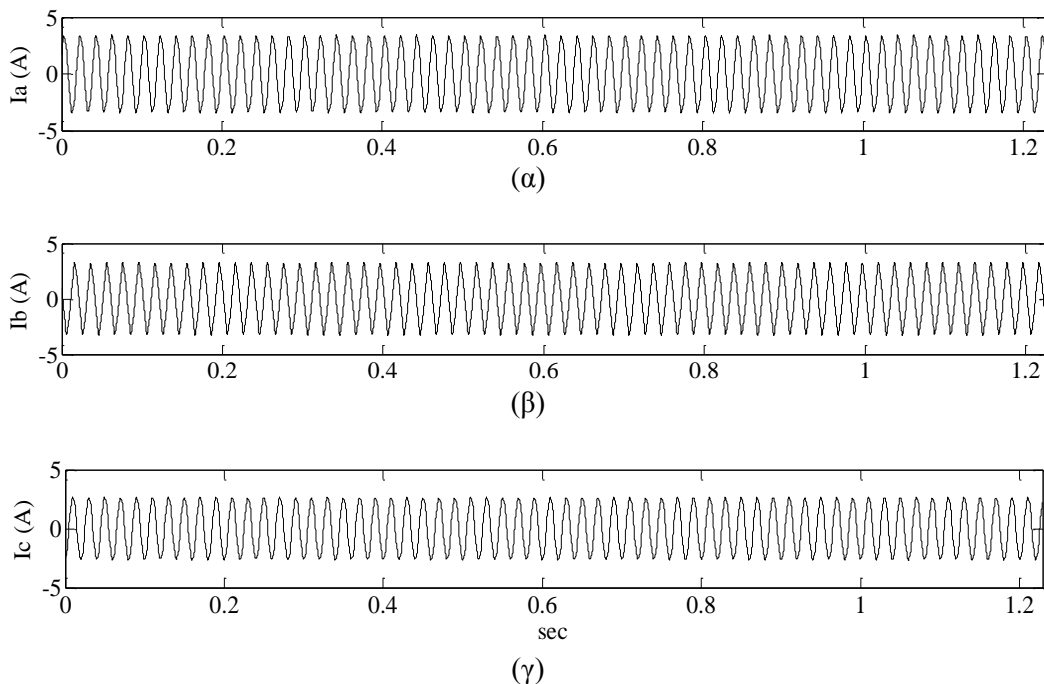
Πίνακας 5.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέτρησης κινητήρα δραπεάνου.

Τεστ	Μέτρηση	Κατάσταση
Υπέρβαση Τάσης (Over Voltage)	1,73%	Καλή
Ασυμμετρία Τάσης (Voltage Unbalance)	0,71%	Καλή
Σύνολο Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD _V)	3,15%	Καλή
Σύνολο Παραμόρφωσης (TD _V)	3,16%	Καλή
Υπέρβαση Έντασης (Over Current)	118,74% (της ονομαστικής τιμής)	Υπέρβαση ορίου
Συντελεστής Αποτελεσματικότητας (esf)	0,36	Καλή
Ράβδοι Δρομέα (Rotor Bar)	47,70db	Καλή
Ασυμμετρία Έντασης (Current Unbalance)	12%	Υπέρβαση ορίου
Φορτίο (Load)	35,7%	Καλή
Απόδοση (Efficiency)	59,8%	Μέτρια

Από τα αποτελέσματα αυτά, παρατηρείται υπέρβαση του ορίου στο επίπεδο έντασης και την ασυμμετρία έντασης, μετρήσεις που λαμβάνονται υπόψη καθώς το φορτίο είναι

μεγαλύτερο από 25% που απαιτείται. Επίσης, είναι ιδιαίτερα χαμηλή η απόδοση του κινητήρα.

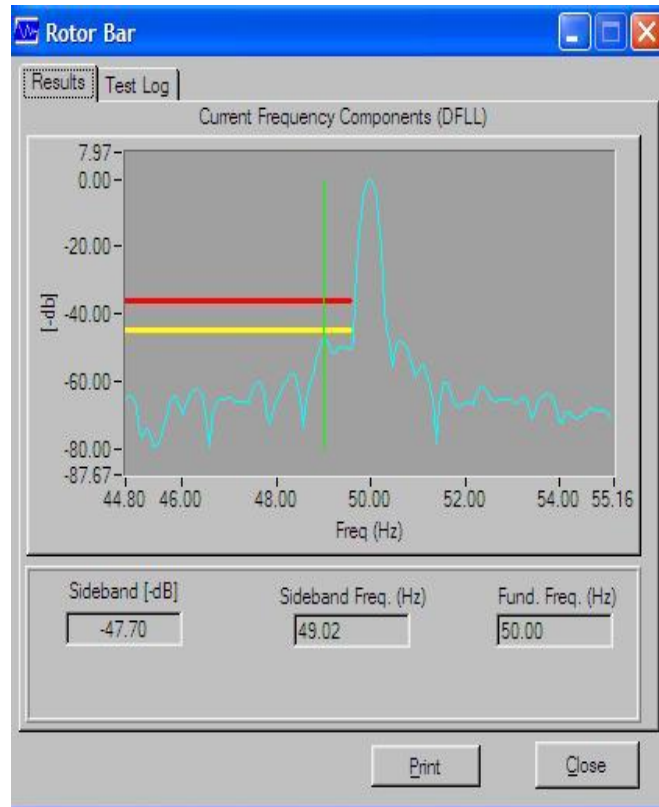
Στο σχήμα 5.25 φαίνεται η χρονική κυματομορφή του σήματος της καταγραφόμενης έντασης στις τρεις φάσεις. Η διαφορά φάσης μεταξύ των τριών φάσεων δεν είναι σταθερή, κάτι που προκαλεί την καταγραφόμενη ασυμμετρία έντασης. Συγκεκριμένα, η διαφορά φάσης μεταξύ των φάσεων B και C είναι 119° , η φυσιολογική διαφορά φάσης είναι $120 \pm 3^\circ$ όπως και η μικρή διαφορά στο μέγεθός τους (0,2 A). Αντίθετα, η διαφορά φάσης μεταξύ των φάσεων A και C είναι 114° και η διαφορά των πλατών είναι αρκετά μεγάλη (0,5 A). Σε όλα τα σήματα παρατηρείται περιοδικότητα 0,02 sec που αντιστοιχεί στη συχνότητα του δικτύου.



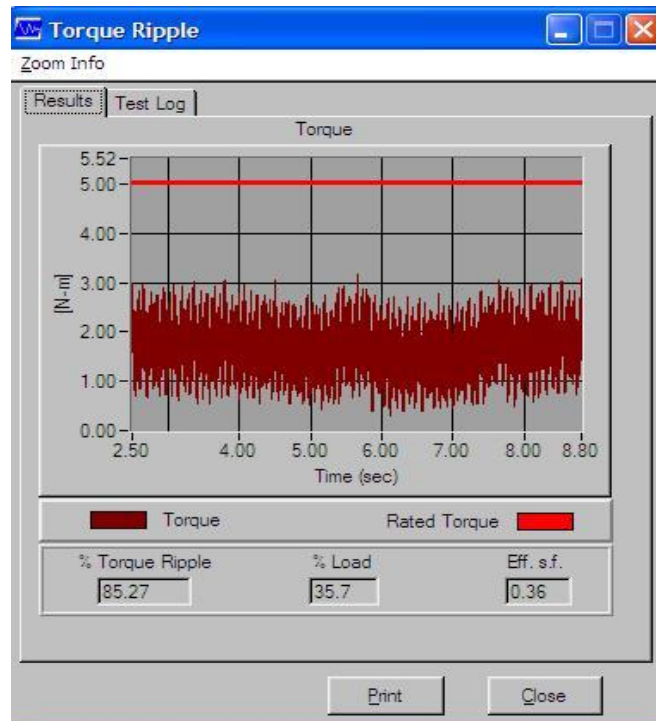
Σχήμα 5.25: Χρονική κυματομορφή της μετρούμενης έντασης (α) I_a , (β) I_b και (γ) I_c .

Η κατάσταση της ποιότητας του ρεύματος από το δίκτυο (Power Quality) όπως έδειξαν τα αποτελέσματα των υπολοίπων μετρήσεων στο συγκεκριμένο κινητήρα είναι καλή. Επίσης, η κατάσταση των ράβδων του δρομέα είναι ικανοποιητική, καθώς όπως φαίνεται στο σχήμα 5.26, η $f_{\text{rotor}} = 49,02 \text{ Hz}$ έχει πλάτος 47,7 db, που είναι εντός των αποδεκτών ορίων. Επομένως, τα αίτια που προκαλούν την υπέρβαση στις τιμές της έντασης και της ασυμμετρίας της, πρέπει να αναζητηθούν στο φορτίο όπως αυτό αποτυπώνεται στην κυματομορφή της ροπής (Torque Ripple) στο σχήμα 5.27.

Στο σχήμα 5.27 διαπιστώνεται πως η ροπή κατά τη μέτρηση δεν παραμένει σταθερή, ενώ το πλάτος της διακύμανσης είναι μεγάλο και ανέρχεται σε ποσοστό 85%. Επίσης, η εμφάνιση των αιχμών οφείλεται σε προβλήματα σχετικά με το φορτίο και οι περιοδικότητές τους αναλύονται τόσο στη χρονική καταγραφή της ροπής, μέρος της οποίας φαίνεται στο σχήμα 5.28, όσο και στο φάσμα της ροπής που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.29.

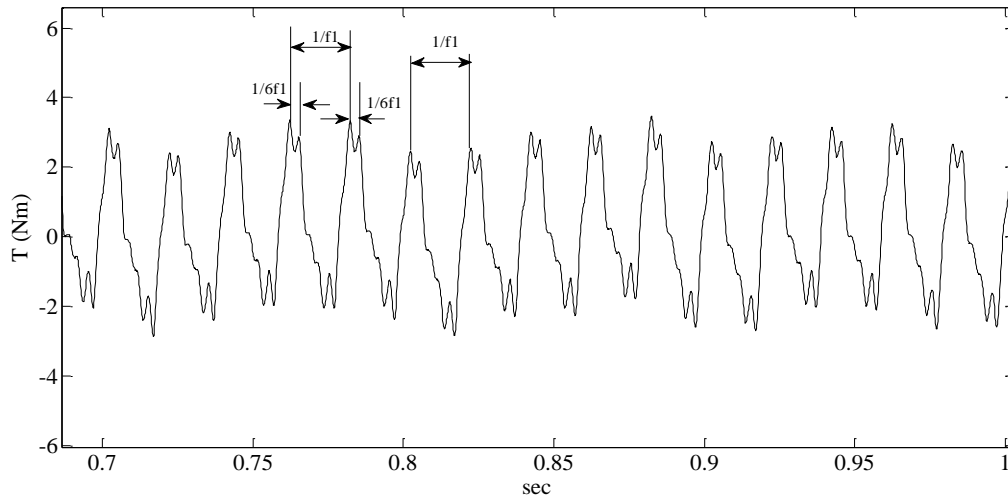


Σχήμα 5.26: Επεξεργασία ρεύματος με το φίλτρο DFLL (Rotor Bar Test).



Σχήμα 5.27: Επεξεργασία κυματομορφής ροπής (Torque Ripple).

Από το χρονικό σήμα της ροπής που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.28, διακρίνονται δύο περιοδικότητες. Η πρώτη είναι ίση με 0,02 sec και αντιστοιχεί στη συχνότητα του δικτύου, και η άλλη έχει τιμή 3×10^{-3} και αντιστοιχεί στην 6^η αρμονική της συχνότητας του δικτύου.



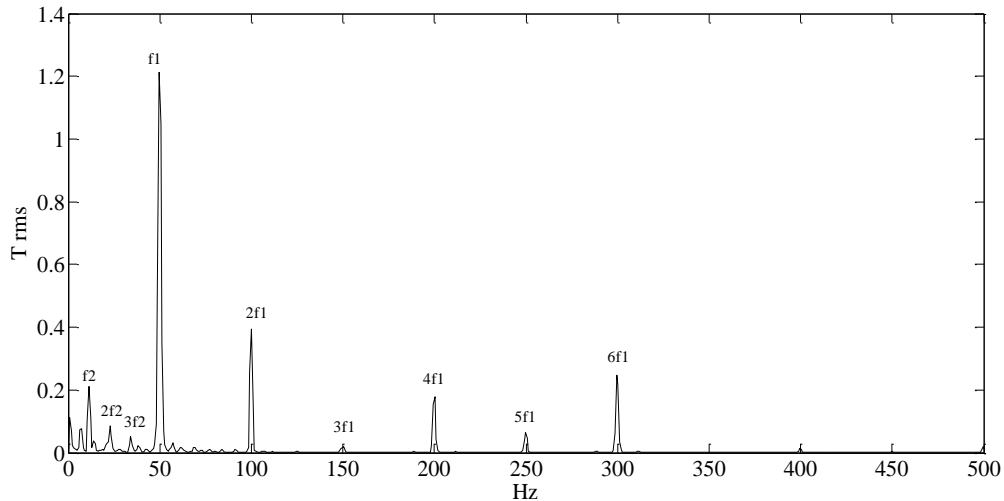
Σχήμα 5.28: Χρονική κυματομορφή της μετρούμενης ροπής.

Στη συνέχεια, γίνεται επεξεργασία του χρονικού σήματος της ροπής και προκύπτει το γραμμικό φάσμα της ροπής, μέρος του οποίου φαίνεται στο σχήμα 5.29, όπου εμφανίζονται οι μεγαλύτερες αιχμές.

Οι χαρακτηριστικές συχνότητες του κινητήρα που ενδέχεται να εμφανιστούν στα φάσματα είναι:

- Η συχνότητα του δικτύου $f_1 = 50$ Hz.
- Η σύγχρονη συχνότητα του κινητήρα $f_N = 1500/60 = 25$ Hz, καθώς αυτός είναι τετραπολικός.
- Η συχνότητα περιστροφής f_{shaft} προκύπτει από την πραγματική συχνότητα περιστροφής (1482,3 rpm): $f_{shaft} = 1482,3 \text{ rpm}/60 \text{ sec} = 24,705 \text{ Hz}$.
- Η συχνότητα ολίσθησης f_{slip} προκύπτει από τη διαφορά της σύγχρονης από τη συχνότητα περιστροφής: $f_{slip} = f_N - f_{shaft} = 25 - 24,705 = 0,295$ Hz.
- Η συχνότητα του ρυθμού περάσματος από τους πόλους:
PPF = Αριθμός πόλων $\times f_{slip} = 4 \times 0,295 = 1,18$ Hz.

Στο φάσμα, δεσπόζουν εκτός από συχνότητα του δικτύου και τις αρμονικές του, και η συχνότητα $f_2 = 11,39 \text{ Hz}$ με τη δεύτερη και την τρίτη αρμονική της. Η συχνότητα f_2 δεν συνδέεται με κάποια από τις αναμενόμενες συχνότητες του κινητήρα όπως αυτές υπολογίστηκαν, επομένως η εμφάνιση της στο φάσμα της ροπής με τις αρμονικές της οφείλεται σε μηχανικούς λόγους που σχετίζονται με το φορτίο.



Σχήμα 5.29: Φάσμα μετρούμενης ροπής σε εύρος 500 Hz.

5.4 Πλάνη.

Η εργαλειομηχανή που φαίνεται στο σχήμα 5.30 και εκτελεί πλάνισμα στις κυλινδροκεφαλές των κινητήρων εσωτερικής καύσης βρίσκεται στο κτήριο επισκευής κινητήρων στο 301ΕΒ. Η εργασία του πλάνιματος περιλαμβάνει την αφαίρεση υλικού από την επιφάνεια της κυλινδροκεφαλής έτσι ώστε αυτή να ικανοποιεί τις προδιαγραφές επιπεδότητας. Στον ηλεκτροκινητήρα που κινεί την κύρια κεφαλή η οποία φέρει τα κοπτικά εργαλεία πραγματοποιήθηκε καταγραφή και ανάλυση ρεύματος με το διαγνωστικό εξοπλισμό EXP3000.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα σύμφωνα με τον κατασκευαστή (name plate data) είναι τα ακόλουθα:

- Κατασκευαστής : ISGEV (Italy)
- Τύπος : 132 NA 4
- Ονομαστικός αριθμός στροφών : 1450 rpm
- Συχνότητα : 50 Hz
- Τάση Λειτουργίας : 380 V
- Ονομαστική Ισχύς : 10 HP (7,5 KW)
- Συντελεστής Ισχύος $\cos\phi$: 0,85
- Ονομαστική ένταση ρεύματος : 15,4 A
- Αριθμός πόλων: 4
- Μόνωση: F

Οι τιμές των παραμέτρων που εισήχθησαν στη βάση δεδομένων για την μέτρηση του ρεύματος είναι:

- Ονομαστικά στοιχεία κινητήρα: Όπως αναγράφονται στα τεχνικά του χαρακτηριστικά του (nameplate data).
- Όρια μετρούμενων μεγεθών: Όπως φαίνονται στον πίνακα 5.1

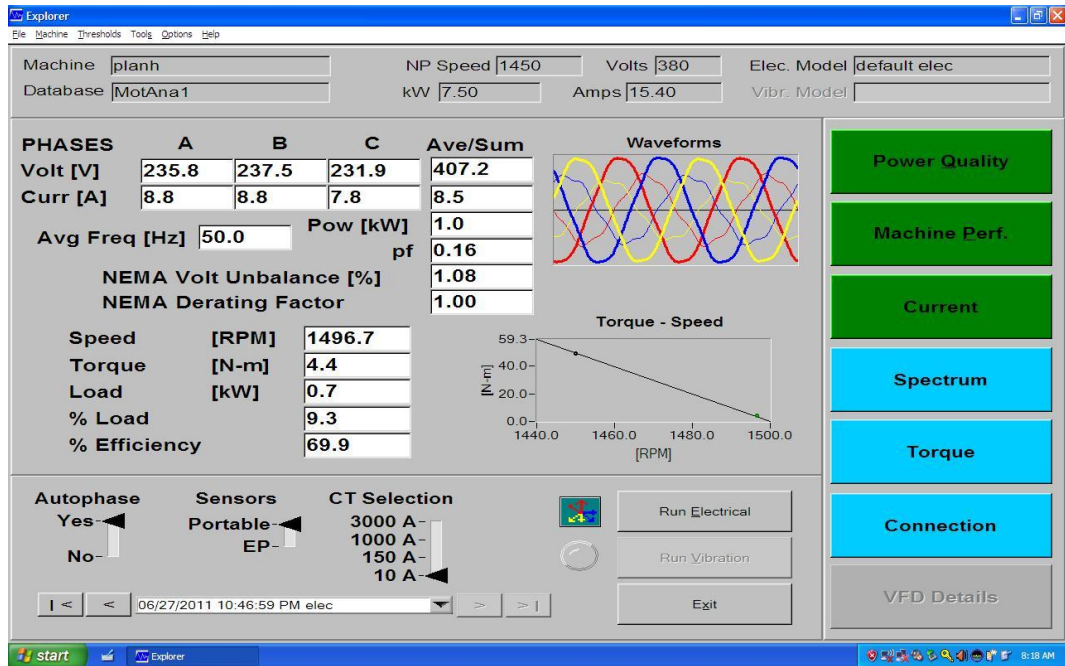
- Βρόχοι συλλογής δεδομένων (loop acquisition): 10 Τεστ, συνεχόμενα (continuous).
- Χρόνος συλλογής δεδομένων (acquisition time): 10sec
- Αριθμός αρμονικών προς αποθήκευση: 51
- Χρόνος συλλογής δεδομένων φάσματος: 1,37sec
- Μέγιστη συχνότητα φάσματος: 3000Hz
- Αυτόματη επιλογή φάσεων: ΝΑΙ
- Επιλογή αισθητηρίων: Φορητοί
- Επιλογή αμπεροτσιμπίδων: 10 A
- Έλεγχος συνδέσεων: ΝΑΙ



Σχήμα 5.30: Πλάνη.

Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης, στην επιφάνεια εργασίας του EXP 3000 εμφανίζονται τα αποτελέσματα του σχήματος 5.31.

Από την εικόνα του σχήματος 5.27, είναι φανερό ότι η κατάσταση του κινητήρα δεν παρουσιάζει προβλήματα, καθώς όλες οι ενδείξεις είναι πράσινες. Η ένδειξη για το φάσμα (Spectrum) είναι μπλε καθώς λόγω του χαμηλού φορτίου (σε ποσοστό 9,3% επί του συνολικού) δεν υπάρχει δυνατότητα για πραγματοποίηση του Rotor Bar Test. Τα σημαντικότερα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη μέτρηση, συνοψίζονται στον πίνακα 5.5.

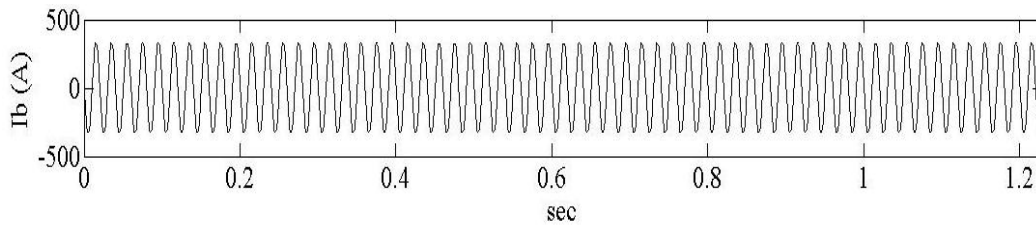


Σχήμα 5.31: Αποτελέσματα μέτρησης με ανάλυση ρεύματος.

Πίνακας 5.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέτρησης κινητήρα πλάνης.

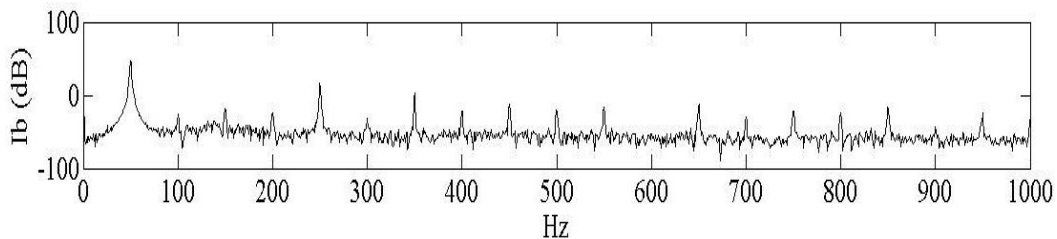
Τεστ	Μέτρηση	Κατάσταση
Υπέρβαση Τάσης (Over Voltage)	7,14%	Καλή
Ασυμμετρία Τάσης (Voltage Unbalance)	1,08%	Καλή
Σύνολο Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD _V)	2,92%	Καλή
Σύνολο Παραμόρφωσης (TD _V)	2,95%	Καλή
Υπέρβαση Έντασης (Over Current)	57,31% (της ονομαστικής τιμής)	Καλή
Συντελεστής Αποτελεσματικότητας (esf)	0,09	Καλή
Ράβδοι Δρομέα (Rotor Bar)	0	Δεν υπάρχει μέτρηση
Ασυμμετρία Έντασης (Current Unbalance)	8,1%	Καλή
Φορτίο (Load)	9,3%	Χαμηλή ένδειξη
Απόδοση (Efficiency)	69,9%	Μέτρια

Στο σχήμα 5.32 παρουσιάζεται η χρονική κυματομορφή της καταγραφής της έντασης για τη φάση Β όπου καταγράφονται οι μεγαλύτερες τιμές. Η περιοδικότητα του χρονικού σήματος ισούται με 0,02 sec που αντιστοιχεί στη συχνότητα του δικτύου.



Σχήμα 5.32: Χρονική κυματομορφή της μετρούμενης έντασης I_b .

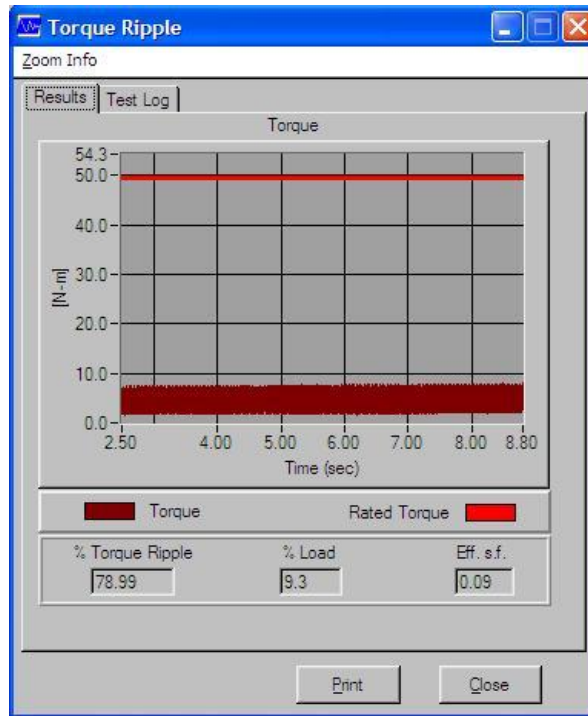
Στη συνέχεια, το μετρούμενο χρονικό σήμα με την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier αναλύονται στο πεδίο της συχνότητας για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης. Στο σχήμα 5.33 εμφανίζεται το φάσμα της έντασης για τη φάση Β με πλάτος σε dB. Σε αυτό δεσπόζουν η συχνότητα του δικτύου και οι αρμονικές της, ενώ δεν υπάρχει διεγερμένη περιοχή με αυξημένη ενέργεια που να υποδεικνύει κάποιο σφάλμα.



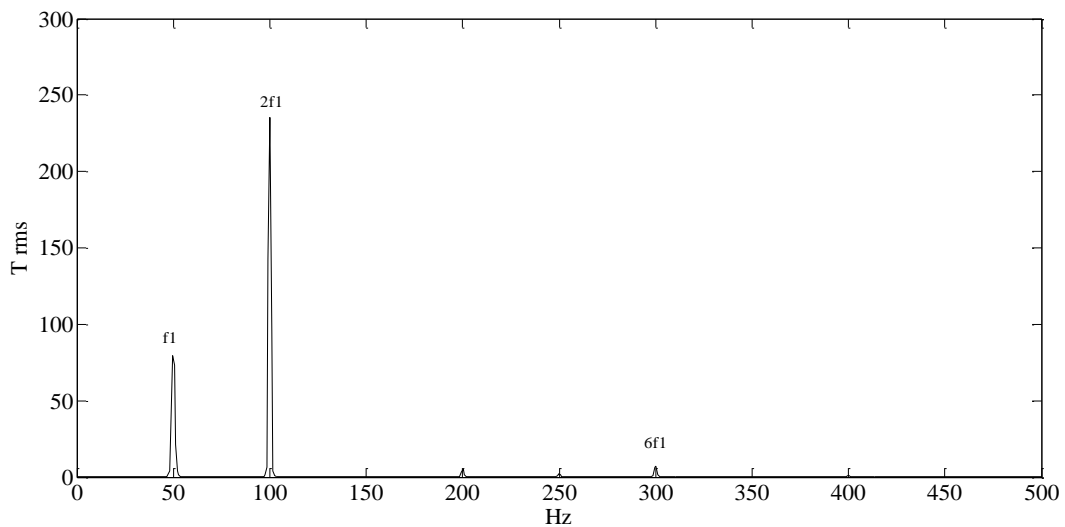
Σχήμα 5.33: Φάσμα μετρούμενης έντασης I_b σε dB και σε εύρος 1000 Hz.

Στο σχήμα 5.34 εμφανίζεται η κυματομορφή της ροπής, Torque Ripple, όπου γίνεται αντιληπτό πως η μέση της τιμή της ροπής παραμένει σταθερή και χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις, ωστόσο το ποσοστό του επιβαλλόμενου φορτίου είναι αρκετά μικρό, γεγονός που δεν επιτρέπει την μέτρηση των ράβδων του δρομέα (Rotor Bar Test).

Στη συνέχεια, γίνεται επεξεργασία του χρονικού σήματος της ροπής και προκύπτει το γραμμικό φάσμα της ροπής, τμήμα του οποίου παρουσιάζεται στο σχήμα 5.35, όπου δεσπόζουν η συχνότητα του δικτύου και οι αρμονικές της, γεγονός που δεν υποδεικνύει κάποιου είδους βλάβη στον κινητήρα.



Σχήμα 5.34: Επεξεργασία κυματομορφής ροπής (Torque Ripple).



Σχήμα 5.35: Φάσμα μετρούμενης ροπής σε εύρος 500 Hz.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, δεν προκύπτει κάποια ηλεκτρική ή μηχανική βλάβη του κινητήρα, οπότε η λειτουργία του κρίνεται άριστη.

5.5 Αντλία απορρόφησης σκόνης.

Καταγραφή κραδασμών και ρεύματος πραγματοποιήθηκε στον ηλεκτροκινητήρα μιας αντλίας απορρόφησης σκόνης για να ελεγχθεί η λειτουργική του κατάσταση. Η αντλία απορρόφησης σκόνης από κοπή ξύλων βρίσκεται στο ξυλουργείο (τοποθεσία: 301EB) και παρουσιάζεται στις εικόνες των σχημάτων 5.36 και 5.37.

Ο κινητήρας, που παρουσιάζεται στα σχήματα 5.38 και 5.39, παράγει κίνηση στην αντλία απορρόφησης της σκόνης και των υπολειμμάτων από την κοπή ξύλων, τα οποία μεταφέρονται σε δύο σάκους που προσαρμίζονται στην άκρη της αντλίας. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα σύμφωνα με τον κατασκευαστή (name plate data) είναι τα ακόλουθα:

- Κατασκευαστής : Βαλιάδης κ Σία
- Τύπος : K100L-2, IEC 34-1/VDE 0530
- Είδος κινητήρα : Ασύγχρονος, επαγωγικός βραχυκυκλωμένου δρομέα.
- Σύγχρονος αριθμός στροφών : 3000 rpm
- Ονομαστικός αριθμός στροφών : 2850 rpm
- Συχνότητα : 50 Hz
- Τάση Λειτουργίας : 380 V Δ
- Συνδεσμολογία στάτη : Δ
- Ονομαστική Ισχύς : 4 HP (2.98 KW)
- Συντελεστής Ισχύος cosφ: 0,86
- Ονομαστική ένταση ρεύματος : 6,6A
- Αριθμός πόλων: 2
- Έδραση: B 14A κατά DINIEC 42950 (IMB 14 κατά DIN IEC 34).

Στην αντλία υπάρχουν 3 θυρίδες για απορρόφηση από 3 διαφορετικές θέσεις εργασίας κοπής ξύλου, που μπορεί να κλείνουν ή να παραμένουν ανοιχτές (σχ. 5.37).

Στη συγκεκριμένη μηχανή εκτελέστηκε καταγραφή και ανάλυση ρεύματος με το διαγνωστικό εξοπλισμό EXP 3000 της εταιρίας BAKER, εφαρμόζοντας τη διαδικασία Electric Test. Συγχρόνως, καταγράφηκαν και κραδασμοί με τη χρήση πολυκάναλου συστήματος καταγραφής δονήσεων και συναφών δεδομένων. Στα σχήματα 5.38 και 5.39 εμφανίζονται ο τρόπος, οι θέσεις μέτρησης και οι χωρικές κατευθύνσεις των αισθητηρίων μέτρησης κραδασμών (τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα) και ρεύματος (αμπεροτσιμπίδες και τσιμπίδες τάσης).

Οι τιμές των βασικών παραμέτρων που επιλέχθηκαν για την καταγραφή των κραδασμών είναι:

- Συχνότητα δειγματοληψίας: 20 KHz
- Πλήθος δειγμάτων: 10.000
- Antialiasing φίλτρο: NAI
- Σύγχρονη καταγραφή δεδομένων σε όλες τις θέσεις μέτρησης: NAI



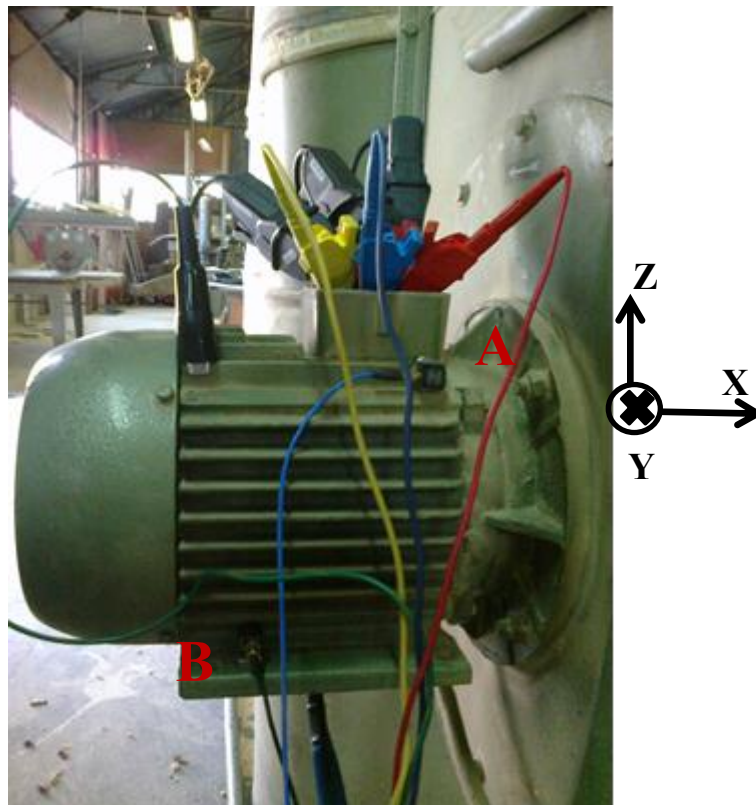
Σχήμα 5.36: Αντλία απορρόφησης σκόνης από κοπή ξύλων.



Σχήμα 5.37: Θυρίδες απορρόφησης σκόνης.



Σχήμα 5.38: Έδραση Η/Κ επί της αντλίας.



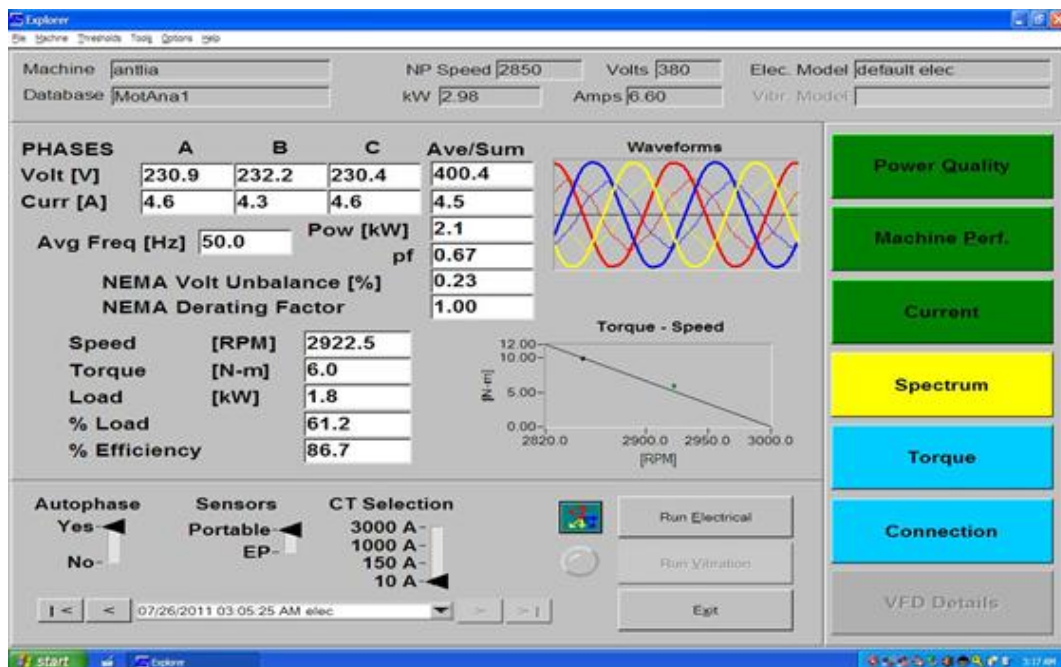
Σχήμα 5.39: Αισθητήρια καταγραφής ρεύματος και κραδασμών.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση του ρεύματος είναι:

- Ονομαστικά στοιχεία κινητήρα: Όπως αναγράφονται στα τεχνικά του χαρακτηριστικά του (nameplate data).
- Όρια μετρούμενων μεγεθών: Όπως φαίνονται στον πίνακα 5.1
- Βρόχοι συλλογής δεδομένων (loop acquisition): 10 Τεστ, συνεχόμενα (continuous).
- Χρόνος συλλογής δεδομένων (acquisition time): 10sec
- Αριθμός αρμονικών προς αποθήκευση: 51
- Χρόνος συλλογής δεδομένων φάσματος: 0,82 sec
- Μέγιστη συχνότητα φάσματος: 5000Hz
- Αυτόματη επιλογή φάσεων: NAI
- Επιλογή αισθητηρίων: Φορητοί
- Επιλογή αμπεροτσιμπίδων: 10 A
- Έλεγχος συνδέσεων: NAI

Εφόσον, εισήχθησαν τα στοιχεία καταγραφής και τοποθετήθηκαν τα αισθητήρια στις κατάλληλες θέσεις, ο Η/Κ τέθηκε σε λειτουργία. Η θυρίδα που ήταν συνδεδεμένος ο ελαστικός σωλήνας παρέμεινε ανοιχτή και η αντλία απορροφούσε τη σκόνη από την κοπή, την ίδια ώρα που οι άλλες δύο θυρίδες παρέμειναν κλειστές (σχ. 5.37). Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης, στην επιφάνεια εργασίας του εξοπλισμού EXP 3000 εμφανίσθηκαν τα αποτελέσματα του σχήματος 5.40. Παρατηρώντας την εικόνα του σχήματος 5.40, είναι φανερό πως υπάρχει προειδοποίηση (κίτρινη ένδειξη), στη μεθοδολογία που επεξεργάζεται τα φάσματα (Spectrum).

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.6.



Σχήμα 5.40: Αποτελέσματα μέτρησης με ανάλυση ρεύματος.

Πίνακας 5.6: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέτρησης κινητήρα αντλίας.

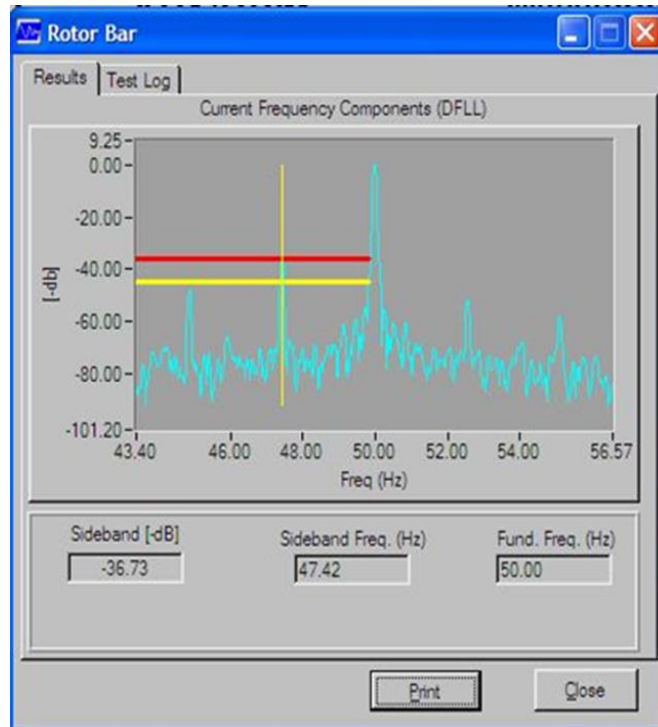
Τεστ	Μέτρηση	Κατάσταση
Υπέρβαση Τάσης (Over Voltage)	5,37%	Καλή
Ασυμμετρία Τάσης (Voltage Unbalance)	0,23%	Καλή
Σύνολο Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD _V)	1,64%	Καλή
Σύνολο Παραμόρφωσης (TD _V)	1,63%	Καλή
Υπέρβαση Έντασης (Over Current)	69,7% (της ονομαστικής τιμής)	Καλή
Συντελεστής Αποτελεσματικότητας (esf)	0,61	Καλή
Ράβδοι Δρομέα (Rotor Bar)	36,73db	Προσοχή
Ασυμμετρία Έντασης (Current Unbalance)	4,1%	Καλή
Φορτίο (Load)	61,2%	Καλή
Απόδοση (Efficiency)	86,7%	Καλή

Η προειδοποιητική ένδειξη στο Φάσμα (Spectrum) που εμφανίζεται στην εικόνα του σχήματος 5.40, συνιστά σφάλμα στην κατάσταση του κινητήρα (Motor Condition) και πιο συγκεκριμένα στις ράβδους του δρομέα.

Η ανάλυση του Rotor Bar Test, πραγματοποιείται με την εφαρμογή της μεθοδολογίας Digital Filter Locked Looped (DFLL), όπου χρησιμοποιώντας την ετεροσυσχέτιση σημάτων ελέγχεται ο βαθμός συμμετοχής κάθε συχνότητας στο μετρούμενο σήμα (σε αυτή την περίπτωση η f_{rotor}). Στο διάγραμμα του σχήματος 5.41, παρατηρείται πως στη συχνότητα $f_{\text{rotor}} = 47,42 \text{ Hz}$ εμφανίζει πλάτος -36.73dB που είναι πέραν των επιτρεπτών ορίων.

Οι χαρακτηριστικές συχνότητες του κινητήρα που ενδέχεται να εμφανιστούν στα φάσματα είναι:

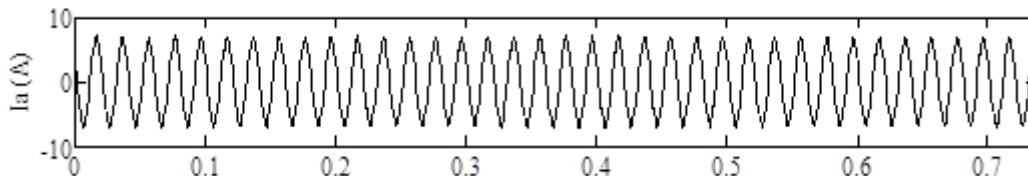
- Η συχνότητα του δικτίου $f_1 = 50\text{Hz}$ που συμπίπτει με τη σύγχρονη συχνότητα του κινητήρα (f_N), καθώς είναι διπολικός.
- Η συχνότητα περιστροφής που προκύπτει από την πραγματική συχνότητα περιστροφής (2922,5 rpm): $f_{\text{shaft}} = 2922,5 \text{ rpm}/60 \text{ sec} = 48,71\text{Hz}$.
- Η συχνότητα ολίσθησης: $f_{\text{slip}} = f_N - f_{\text{shaft}} = 50 - 48,71 = 1,29 \text{ Hz}$.
- Η συχνότητα περάσματος από τους πόλους: $\text{PPF} = 2 \times f_{\text{slip}} = 2,6 \text{ Hz}$.
- Η συχνότητα περάσματος των ράβδων του δρομέα:
 $\text{RBPF} = \text{αριθμός ράβδων} \times f_{\text{shaft}}$, που όμως δεν μπορεί να υπολογιστεί καθώς είναι άγνωστος ο αριθμός των ράβδων του δρομέα.



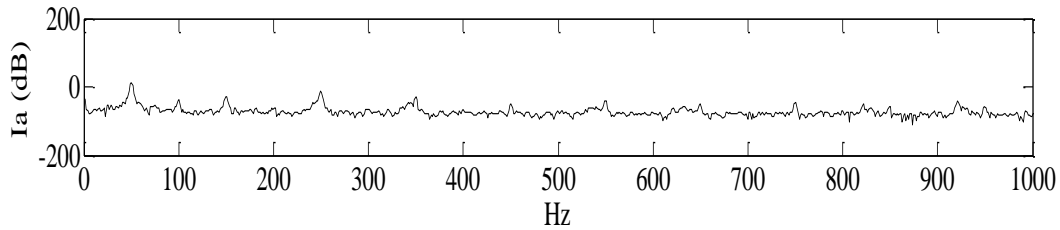
Σχήμα 5.41: Επεξεργασία ρεύματος με το φίλτρο DFLL (Rotor Bar Test).

Στο σχήμα 5.42 παρουσιάζεται η χρονική κυματομορφή της καταγραφής της έντασης για τη φάση A όπου καταγράφηκαν οι μεγαλύτερες τιμές τους. Η περιοδικότητα της χρονικής κυματομορφής ισούται με 0,02 sec που αντιστοιχεί στη συχνότητα του δικτύου.

Στη συνέχεια, το μετρούμενα χρονικό σήμα του σχήματος 5.42 με την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier αναλύεται στο πεδίο της συχνότητας για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης. Στο σχήμα 5.43 τα πλάτη των συχνοτήτων εμφανίζονται σε dB και εξετάζεται η διαφορά πλατών ανάμεσα σε χαρακτηριστικές συχνότητες. Στο φάσμα δεσπόζουν η συχνότητα του δικτύου και οι αρμονικές της, ενώ δεν υπάρχει διεγερμένη περιοχή με αυξημένη ενέργεια που να υποδεικνύει κάποιο σφάλμα



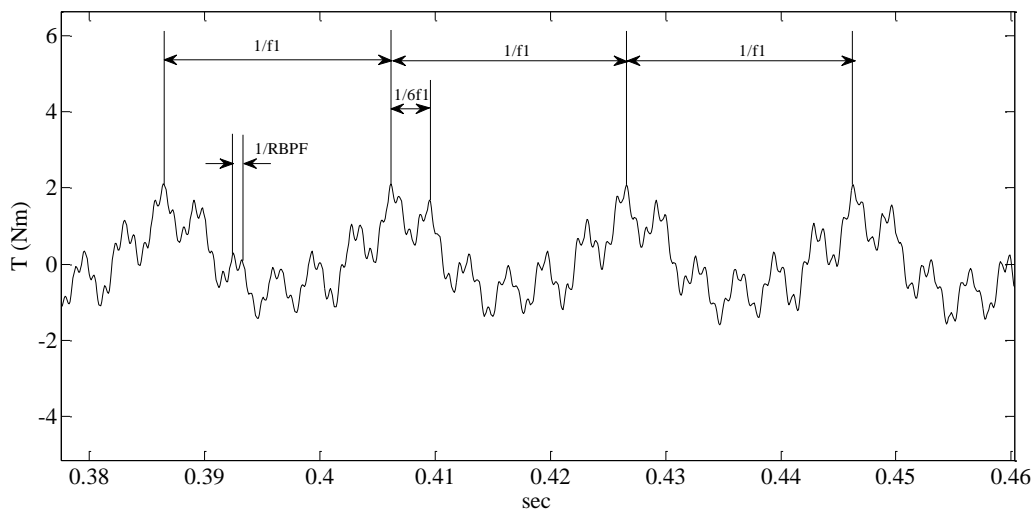
Σχήμα 5.42: Χρονική κυματομορφή της μετρούμενης έντασης I_a .



Σχήμα 5.43: Φάσμα μετρούμενης έντασης I_a σε dB και σε εύρος 1000 Hz.

Κατόπιν, αναλύεται η μετρούμενη ροπή. Στο σχήμα 5.44 εμφανίζεται μέρος της χρονικής κυματομορφής της ροπής και στο σχήμα 5.45 η φασματική επεξεργασία του.

Από την ανάλυση του χρονικού σήματος προκύπτουν διάφορες χαρακτηριστικές περιοδικότητες, όπως της συχνότητας του δικτύου και της 6^{ης} αρμονικής της, και της συχνότητας βλάβης RBPF.

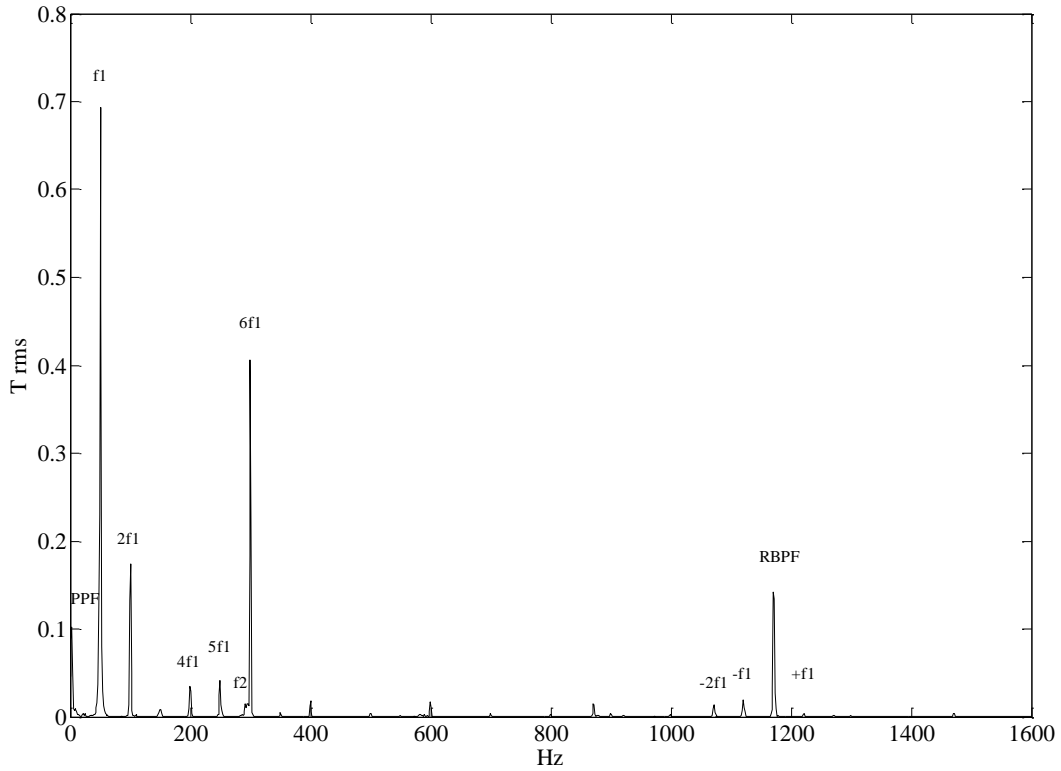


Σχήμα 5.44: Τμήμα της χρονικής κυματομορφής της μετρούμενης ροπής.

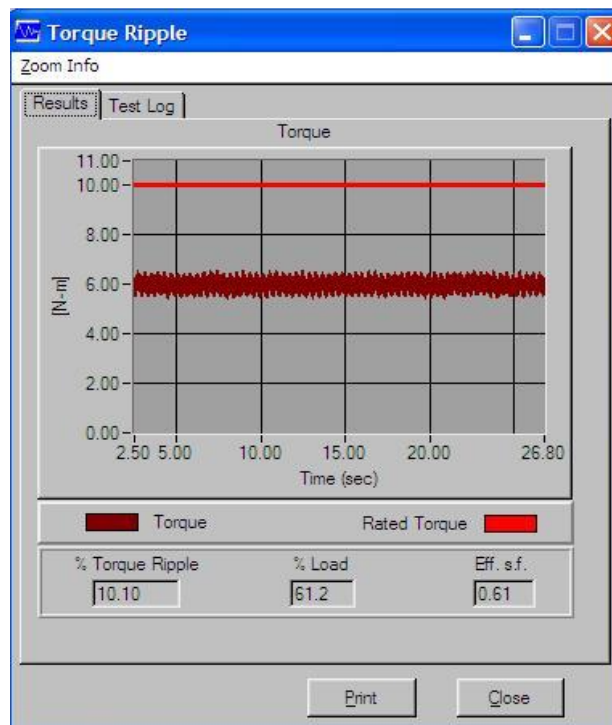
Στο φάσμα του σχήματος 5.45 δεσπόζει η συχνότητα του δικτύου f_1 και κυρίως η 6^η αρμονική της. Στην χαμηλόσυχη περιοχή αναπτύσσεται η συχνότητα PPF = 2,6 Hz και μία συχνότητα $f_2 = 292$ Hz η οποία πιθανόν να οφείλεται σε μηχανική αιτία που προέρχεται από το φορτίο. Στην υψίσυχη περιοχή αναπτύσσεται η RBPF περιβαλλόμενη από πλευρικές αιχμές μικρότερου πλάτους που ισαπέχουν κατά f_1 .

Στο σχήμα 5.46 φαίνεται η διακύμανση της ροπής (Torque Ripple). Το φορτίο είναι σε ικανοποιητικό ποσοστό για έκδοση ασφαλών συμπερασμάτων και η ροπή διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Ωστόσο, παρατηρούνται περιοδικοί παλμοί (αιχμές) της ροπής, οι οποίοι προέρχονται από κάποια μηχανική συχνότητα προερχόμενη από το φορτίο. Προφανώς, πρόκειται για τη συχνότητα f_2 που εμφανίστηκε στο φάσμα της ροπής και ενδεχομένως να οφείλεται στη συχνότητα των πτερυγίων της αντλίας:

$$\text{BPF} = \text{αριθμός πτερυγίων} \times f_{\text{shaft}}$$

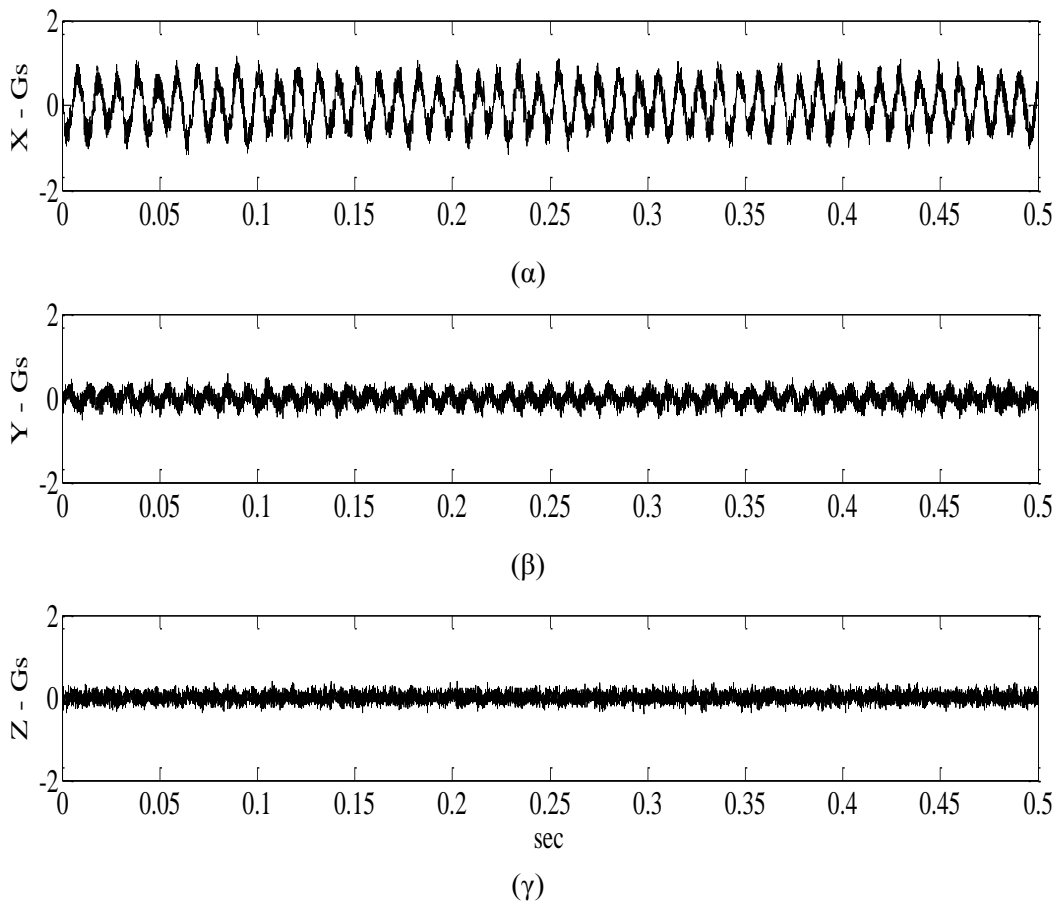


Σχήμα 5.45: Φάσμα μετρούμενης ροπής σε εύρος 1600 Hz.



Σχήμα 5.46: Επεξεργασία κυματομορφής ροπής (Torque Ripple).

Στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα από την καταγραφή των κραδασμών. Στο σχήμα 5.47 εμφανίζονται οι χρονικές καταγραφές στη θέση μέτρησης Α του Η/Κ και στις τρεις χωρικές κατευθύνσεις, όπου φαίνεται ότι οι ταλαντώσεις στη αξονική χωρική κατεύθυνση X είναι εντονότερες από αυτές που αναπτύσσονται στην οριζόντια κατεύθυνση Y και την κατακόρυφη κατεύθυνση Z. Το συνολικό επίπεδο κραδασμών (πίνακας 5.7) εκτιμάται πολύ υψηλό στην κατεύθυνση X, υπερβαίνει τα 9 mm/sec rms. Για τους λόγους αυτούς αναλύεται η κυματομορφή στην αξονική διεύθυνση. Ο Η/Κ βάσει των χαρακτηριστικών του, ανήκει στην κλάση II (μεσαίες μηχανές) και από το διεθνή κανονισμό συνολικού επιπέδου κραδασμών ISO 10816 (πίνακας 5.8) συμπεραίνεται ότι είναι εκτός των αποδεκτών ορίων υποδुकνεύοντας σημαντική βλάβη. Η κυματομορφή του σχήματος 5.48 κυριαρχείται από μια ημιτονοειδή κυματομορφή με περιοδικότητα ίση με $2f_1$ και πλάτος περίπου 1g rms. Επίσης, στο σχήμα 5.49 διακρίνονται περιοδικότητες ίσες με τις αρμονικές συνιστώσες της 1/RBPF, των οποίων το πλάτος διαμορφώνεται από την $2f_1$.



Σχήμα 5.47: Μετρούμενοι κραδασμοί του κινητήρα στη θέση Α στις τρεις χωρικές κατευθύνσεις (α) X, (β) Y και (γ) Z σε μονάδες επιτάχυνσης (Gs).

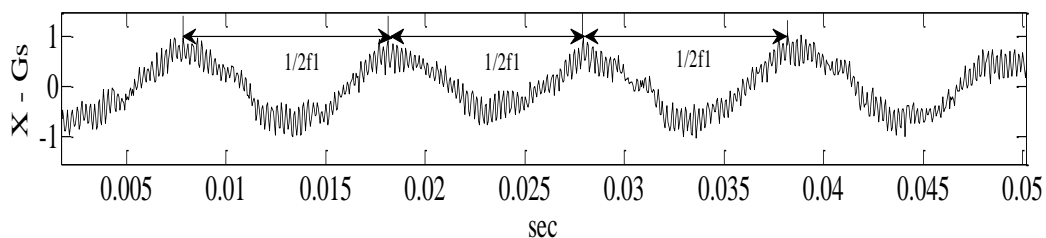
Πίνακας 5.7: Συνολικό επίπεδο κραδασμών σε κάθε θέση και κατεύθυνση της αντλίας (mm/sec rms).

	Αξονική X	Οριζόντια Y	Κατακόρυφη Z
A	9,04	0,56	2,08
B	6,70	6,35	4,18

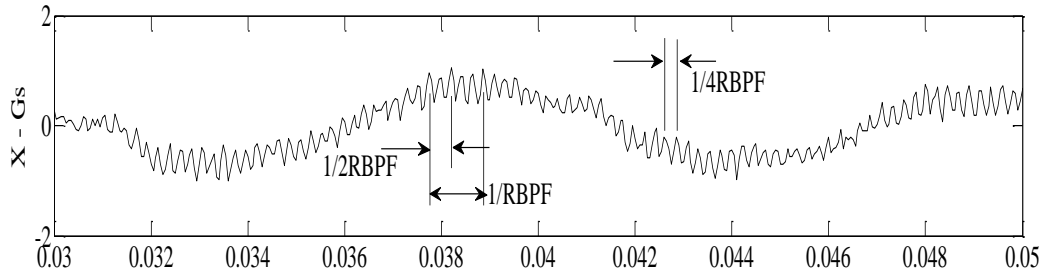
Πίνακας 5.8: Διεθνής κανονισμός συνολικού επιπέδου κραδασμών ISO 10816.

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816					
Machine		Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
in/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28			
	0.02	0.45			
	0.03	0.71		good	
	0.04	1.12			
	0.07	1.80			
	0.11	2.80		satisfactory	
	0.18	4.50			
	0.28	7.10		unsatisfactory	
	0.44	11.2			
	0.70	18.0			
	0.71	28.0		unacceptable	
	1.10	45.0			

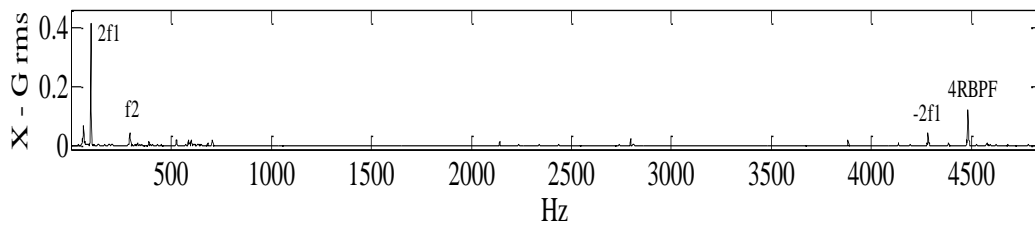
Στο σχήμα 5.50 εμφανίζεται το φάσμα της μέτρησης στη χωρική κατεύθυνση X. Στο φάσμα η ενέργεια συγκεντρώνεται σε δύο περιοχές, μια χαμηλόσυχη κάτω από τα 100 Hz και μια υψίσυχη περί τα 4,5 KHz. Επίσης, στο φάσμα εμφανίζονται η συχνότητα $2f_1$, η συχνότητα $f_2 = 292$ Hz και η 4^η αρμονική συνιστώσα της συχνότητας RBPf διαμορφωμένη από την $2f_1$. Επιβεβαιώνεται λοιπόν η βλάβη στις ράβδους του δρομέα του κινητήρα, αλλά και η ύπαρξη βλάβης στο φορτίο που προκαλείται από τη λειτουργία της αντλίας.



Σχήμα 5.48: Τμήμα χρονικού σήματος που καταγράφηκε στη χωρική κατεύθυνση X.



Σχήμα 5.49: Τμήμα χρονικού σήματος που καταγράφηκε στη χωρική κατεύθυνση X.



Σχήμα 5.50: Φάσμα μέτρησης στη χωρική κατεύθυνση X.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε, διαπιστώνεται ότι με την εφαρμογή και των δυο μεθόδων εντοπίστηκε το πρόβλημα στις ράβδους του δρομέα και η μηχανική βλάβη στην αντλία, που κατά πάσα πιθανότητα αφορά τα πτερύγιά της (δεν είναι γνωστός ο αριθμός των πτερυγίων αλλά η συχνότητα των 292 Hz προκύπτει εάν η αντλία έχει 6πτερύγια). Η μέθοδος της ανάλυσης ρεύματος ανέδειξε εξ αρχής τη βλάβη στις ράβδους του δρομέα δείχνοντας προειδοποίηση (κίτρινη ένδειξη) στον έλεγχο ‘Rotor Bar Test’ και ανέδειξε το πρόβλημα στο φορτίο με την ανάλυση της διακύμανσης της ροπής κατά τη διάρκεια της μέτρησης, η δε μέθοδος της ανάλυσης των κραδασμών εντόπισε τις χαρακτηριστικές συχνότητες βλάβης και το υψηλό συνολικό επίπεδο κραδασμών.

5.6 Ρεκτιφιέ στροφαλοφόρου άξονα.

Η εργαλειομηχανή που φαίνεται στο σχήμα 5.51 και βρίσκεται στο κτίριο επισκευής κινητήρων του 301EB, εκτελεί ρεκτιφιέ στα κομβία στροφαλοφόρων αξόνων, δηλαδή μειώνει τη διάμετρό τους αφαιρώντας υλικό και προσδίδει την κατάλληλη τραχύτητα στην τελική επιφάνεια. Σε αυτή, εξετάστηκε ο ηλεκτροκινητήρας που αναλαμβάνει την περιστροφή των κεφαλών της εργαλειομηχανής, στις οποίες προσδένεται ο στροφαλοφόρος άξονας. Ο συγκεκριμένος κινητήρας επιλέχθηκε για μέτρηση επειδή κατά το παρελθόν εμφάνισε βλάβη, διακόπηκε η λειτουργία του και μετά την επισκευή του (αφορούσε περιέλιξη στα τυλίγματα του στάτη), τοποθετήθηκε εκ νέου στην ίδια θέση.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα σύμφωνα με τον κατασκευαστή (name plate data) είναι τα ακόλουθα:

- Κατασκευαστής : LAFERT (Italy)
- Τύπος : 100C8

- Σύγχρονος αριθμός στροφών : 750 rpm
- Ονομαστικός αριθμός στροφών : 695 rpm
- Συχνότητα : 50 Hz
- Τάση Λειτουργίας : 400 V
- Συνδεσμολογία στάτη : Αστέρας (Y)
- Ονομαστική Ισχύς : 1 HP (0,74 KW)
- Ονομαστική ένταση ρεύματος : 2,3 A
- Αριθμός πόλων: 8
- Προστασία: IP 44
- Μόνωση: B

Στη συγκεκριμένη μηχανή εκτελέστηκε καταγραφή και ανάλυση ρεύματος με το διαγνωστικό εξοπλισμό EXP 3000, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.52. Συγχρόνως, καταγράφηκαν κραδασμοί με τη χρήση πολυκάναλου συστήματος καταγραφής δονήσεων και συναφών δεδομένων. Στο σχήμα 5.53 εμφανίζονται ο τρόπος, οι θέσεις μέτρησης και οι χωρικές κατευθύνσεις των αισθητηρίων μέτρησης κραδασμών (τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα).

Οι τιμές των βασικών παραμέτρων που επιλέχθηκαν για την καταγραφή των κραδασμών είναι:

- Συχνότητα δειγματοληψίας: 20 KHz
- Πλήθος δειγμάτων: 10.000
- Antialiasing φίλτρο: NAI
- Σύγχρονη καταγραφή δεδομένων σε όλες τις θέσεις μέτρησης: NAI

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση του ρεύματος είναι:

- Ονομαστικά στοιχεία κινητήρα: Όπως αναγράφονται στα τεχνικά του χαρακτηριστικά του (nameplate data).
- Όρια μετρούμενων μεγεθών: Όπως φαίνονται στον πίνακα 5.1
- Βρόχοι συλλογής δεδομένων (loop acquisition): 10 Τεστ, συνεχόμενα (continuous).
- Χρόνος συλλογής δεδομένων (acquisition time): 10sec
- Αριθμός αρμονικών προς αποθήκευση: 51
- Χρόνος συλλογής δεδομένων φάσματος: 0,82 sec
- Μέγιστη συχνότητα φάσματος: 5000Hz
- Αυτόματη επιλογή φάσεων: NAI
- Επιλογή αισθητηρίων: Φορητοί
- Επιλογή αμπεροτσιμπίδων: 10 A
- Έλεγχος συνδέσεων: NAI

Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης με την καταγραφή ρεύματος, στην επιφάνεια εργασίας του εξοπλισμού EXP 3000 εμφανίσθηκαν τα αποτελέσματα του σχήματος 5.54.



Σχήμα 5.51: Ρεκτιφιέ στροφαλοφόρου άξονα.

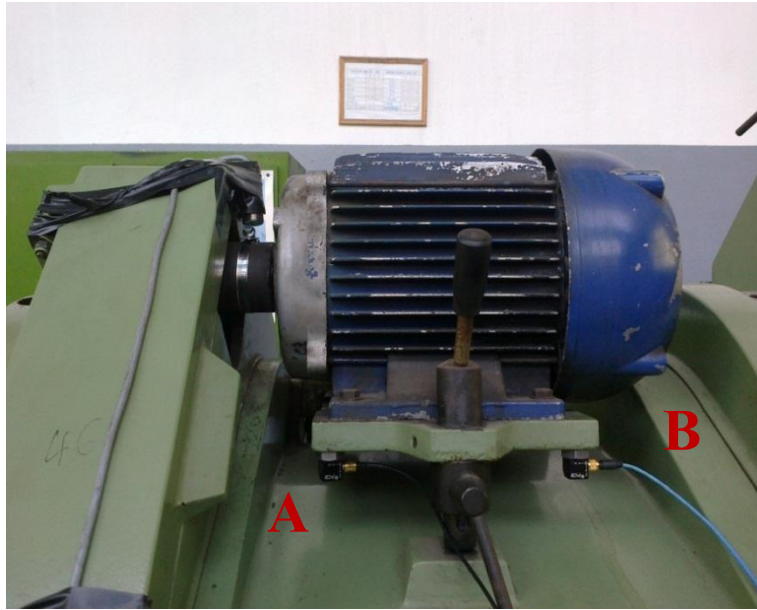


Σχήμα 5.52: Καταγραφή ρεύματος στη μηχανή ρεκτιφιέ στροφαλοφόρου άξονα.

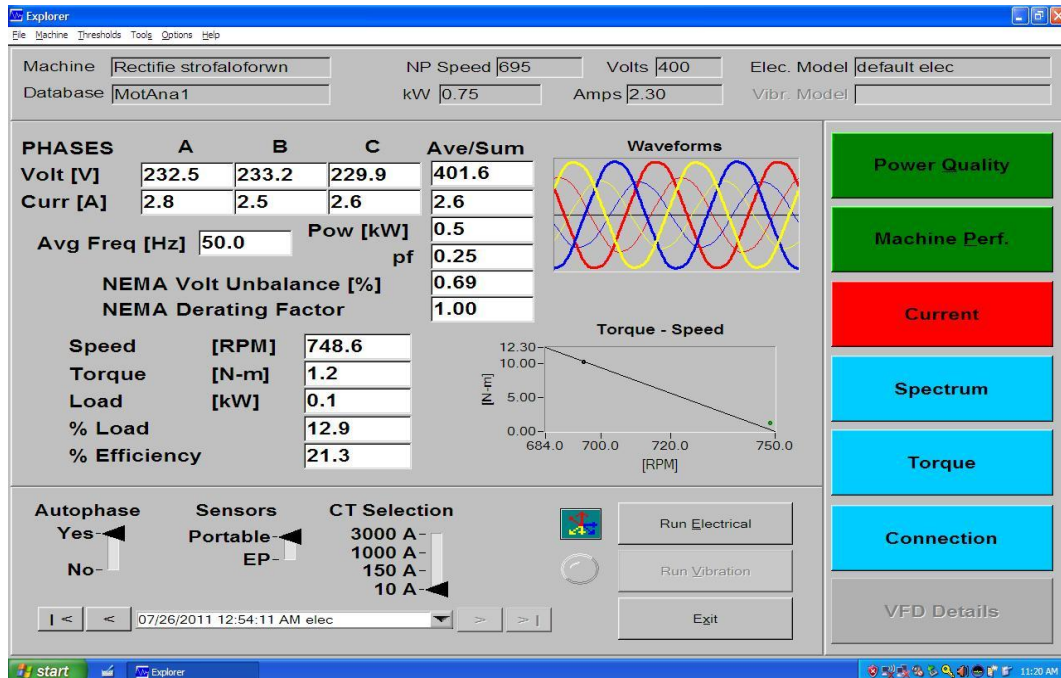
Παρατηρώντας την εικόνα του σχήματος 5.36, είναι φανερό πως υπάρχει προειδοποίηση (κόκκινη ένδειξη), στη μεθοδολογία που επεξεργάζεται την ένταση του ρεύματος (Current). Συγκεκριμένα, υποδεικνύεται υπέρβαση του ορίου της έντασης του

εισερχόμενου ρεύματος στον κινητήρα. Επίσης, η ένδειξη στο φάσμα (Spectrum) είναι μπλε καθώς το επίπεδο του φορτίου είναι χαμηλότερο από το απαραίτητο για τους υπολογισμούς του Rotor Bar Test. Τέλος, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική του και πολύ κοντά στις σύγχρονες στροφές.

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9.



Σχήμα 5.53: Αισθητήρια καταγραφής ρεύματος και κραδασμών.



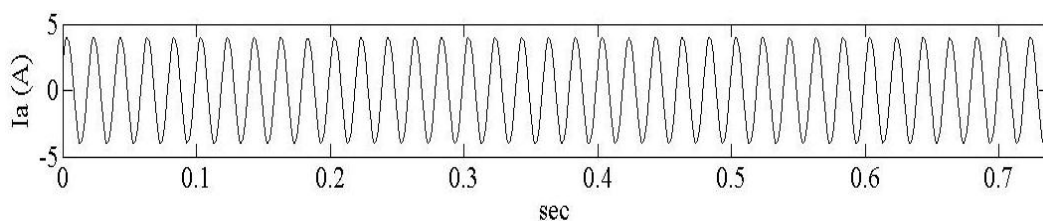
Σχήμα 5.54: Αποτελέσματα μέτρησης με ανάλυση ρεύματος.

Πίνακας 5.9: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέτρησης κινητήρα ρεκτιφιέ στροφαλοφόρων.

Τεστ	Μέτρηση	Κατάσταση
Υπέρβαση Τάσης (Over Voltage)	0,40%	Καλή
Ασυμμετρία Τάσης (Voltage Unbalance)	0,69%	Καλή
Σύνολο Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD _v)	1,83%	Καλή
Σύνολο Παραμόρφωσης (TD _v)	1,86%	Καλή
Υπέρβαση Έντασης (Over Current)	123,03% (της ονομαστικής τιμής)	Προειδοποίηση
Συντελεστής Αποτελεσματικότητας (esf)	0,13	Καλή
Ράβδοι Δρομέα (Rotor Bar)	0	Δεν υπάρχει μέτρηση
Ασυμμετρία Έντασης (Current Unbalance)	7,3%	Καλή
Φορτίο (Load)	12,9%	Χαμηλή ένδειξη
Απόδοση (Efficiency)	21,3%	Κακή

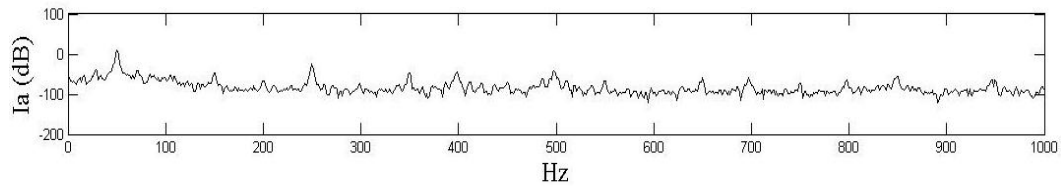
Στα αποτελέσματα των μετρήσεων, επιβεβαιώνεται η υπέρβαση του επιπέδου της έντασης και το χαμηλό επίπεδο του φορτίου, που οδηγεί σε πολύ μικρή απόδοση του κινητήρα.

Στο σχήμα 5.55 παρουσιάζεται η χρονική κυματομορφή της καταγραφής της έντασης για τη φάση Α όπου εμφανίστηκε η μεγαλύτερη τιμή της. Η περιοδικότητα της χρονικής κυματομορφής ισούται με 0,02 sec που αντιστοιχεί στη συχνότητα του δικτύου, δηλαδή 50 Hz.



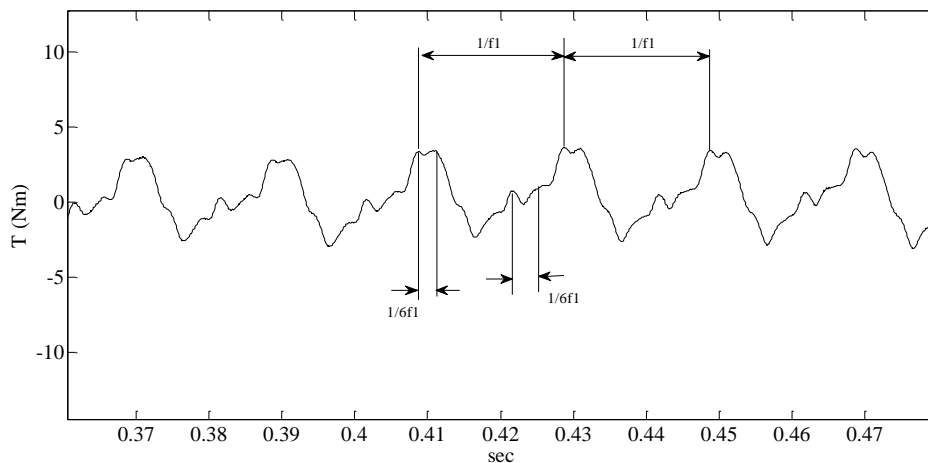
Σχήμα 5.55: Χρονική κυματομορφή στη φάση Α της μετρούμενης έντασης (α) I_a .

Στη συνέχεια, με την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier αναλύεται το χρονικό σήμα του σχήματος 5.55 στο πεδίο της συχνότητας για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης. Τα πλάτη των συχνοτήτων της έντασης εμφανίζονται σε dB και σε εύρος έως 1000 Hz. Από τη μορφή του φάσματος, δεν υπάρχει κάποια διεγερμένη περιοχή ή συχνότητες, πλην της συχνότητας δικτύου και των αρμονικών της, που να είναι έντονα υποδεικνύοντας κάποια βλάβη του κινητήρα.



Σχήμα 5.56: Φάσμα μετρούμενης έντασης της φάσης A σε dB και σε εύρος 1000 Hz.

Κατόπιν, αναλύεται η μετρούμενη ροπή. Στο σχήμα 5.57 εμφανίζεται μέρος της χρονικής κυματομορφής όπου προκύπτουν οι χαρακτηριστικές περιοδικότητες που αντιστοιχούν στην συχνότητα του δικτύου και την 6^η αρμονική της.



Σχήμα 5.57: Τμήμα της χρονικής κυματομορφής της μετρούμενης ροπής.

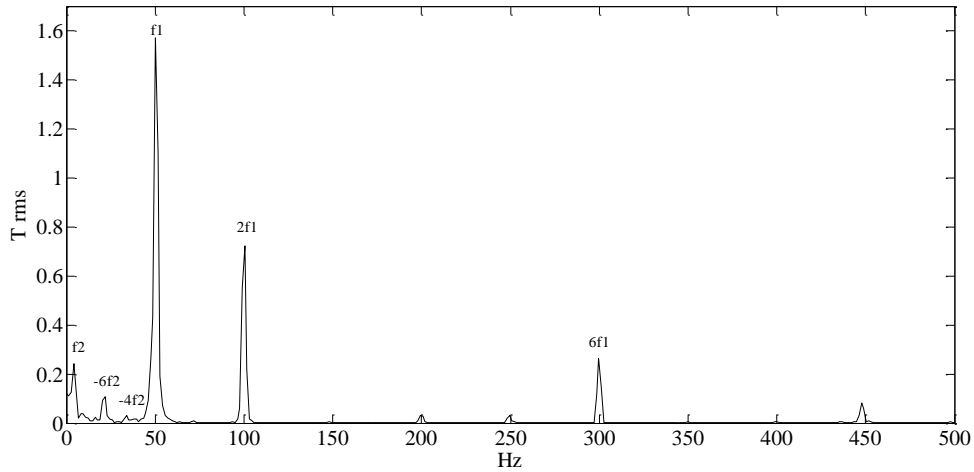
Το επόμενο βήμα είναι η φασματική επεξεργασία της ροπής του σχήματος 5.57. Στο σχήμα 5.58 εμφανίζεται το φάσμα της ροπής με γραμμικό πλάτος σε εύρος συχνότητας έως 500Hz.

Οι χαρακτηριστικές συχνότητες του κινητήρα που ενδέχεται να εμφανιστούν στο φάσμα είναι:

- Η συχνότητα του δικτύου $f_1 = 50$ Hz.
- Η σύγχρονη συχνότητα του κινητήρα $f_N = 750/60 = 12,5$ Hz, καθώς αυτός είναι οκταπολικός.
- Η συχνότητα περιστροφής f_{shaft} προκύπτει από την πραγματική συχνότητα περιστροφής (748,6 rpm): $f_{\text{shaft}} = 748,6 \text{ rpm}/60 \text{ sec} = 12,48$ Hz.
- Η συχνότητα ολίσθησης f_{slip} προκύπτει από τη διαφορά της σύγχρονης από τη συχνότητα περιστροφής: $f_{\text{slip}} = f_N - f_{\text{shaft}} = 12,5 - 12,48 = 0,02$ Hz.
- Η συχνότητα του ρυθμού περάσματος από τους πόλους:
PPF = Αριθμός πόλων $\times f_{\text{slip}} = 8 \times 0,02 = 0,16$ Hz.

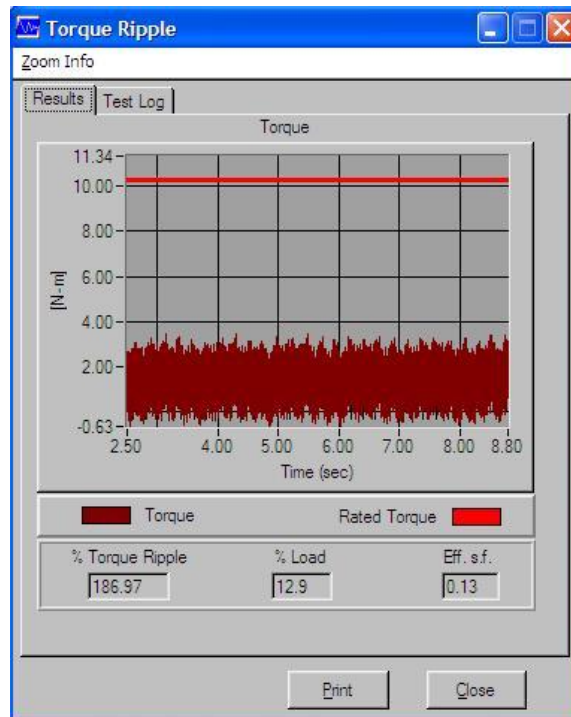
Στο φάσμα, εμφανίζεται η συχνότητα $f_2 = 4,069$ Hz που δεν αποτελεί κάποια από τις αναμενόμενες συχνότητες του κινητήρα. Επίσης, δεσπόζει η συχνότητα του δικτύου f_1

που διαμορφώνεται από τη συχνότητα f_2 , και οι αρμονικές της f_1 , με μεγάλα πλάτη στην 2^η και 6^η αρμονική.



Σχήμα 5.59: Φάσμα μετρούμενης ροπής σε εύρος 500 Hz.

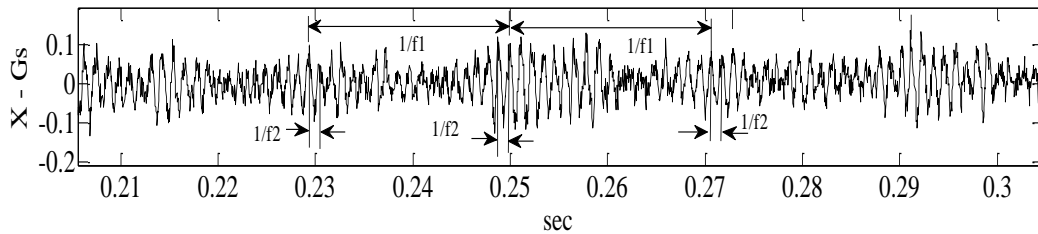
Στο σχήμα 5.60 εμφανίζεται η μεγάλη κυμάτωση της ροπής (Torque Ripple) που μετρήθηκε σε ποσοστό 186,97% και δείχνει πόσο ασταθής ήταν η ροπή κατά τη διαδικασία της καταγραφής, παρόλο που το ποσοστό του φορτίου ήταν ιδιαίτερα χαμηλό. Οι παλμοί που εμφανίζονται στη ροπή υποδεικνύουν κάποιο σφάλμα στο φορτίο, γεγονός που επιβεβαιώνεται με την εμφάνιση της συχνότητας f_2 στο φάσμα της ροπής.



Σχήμα 5.60: Επεξεργασία κυματομορφής ροπής (Torque Ripple).

Στη συνέχεια αναλύονται οι μετρούμενοι κραδασμοί. Στο σχήμα 5.60 εμφανίζεται τμήμα της χρονικής καταγραφής στη θέση μέτρησης A του Η/Κ και στη χωρική

κατεύθυνση X. Το συνολικό επίπεδο κραδασμών (πίνακας 5.10) είναι μεγαλύτερο στην κατεύθυνση Z, (0,18 mm/sec rms). Ο Η/Κ βάσει των χαρακτηριστικών του, ανήκει στην κλάση II (μεσαίες μηχανές) και από το διεθνή κανονισμό συνολικού επιπέδου κραδασμών ISO 10816 (πίνακας 5.8) συμπεραίνεται ότι είναι εντός των αποδεκτών ορίων.



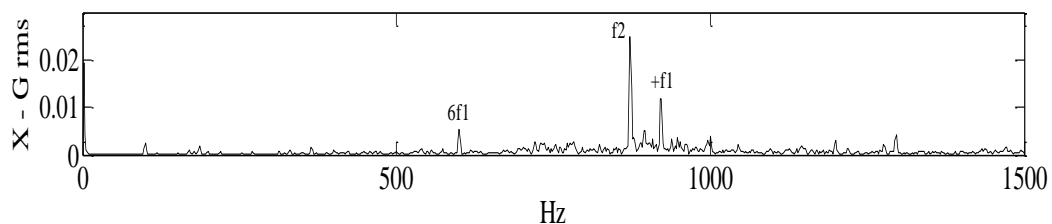
Σχήμα 5.60: Τμήμα χρονικού σήματος που καταγράφηκε στη χωρική κατεύθυνση X.

Πίνακας 5.10: Συνολικό επίπεδο κραδασμών σε κάθε θέση και κατεύθυνση του κινητήρα του ρεκτιφέ στροφαλοφόρου άξονα (mm/sec rms).

	Αξονική X	Οριζόντια Y	Κατακόρυφη Z
A	0,10	0,07	0,18
B	0,09	0,06	0,15

Η κυματομορφή του σχήματος 5.60 κυριαρχείται από μια ημιτονοειδή κυματομορφή με περιοδικότητα ίση με $1/f_1$ και πλάτος περίπου 0,1g rms. Επίσης, διακρίνονται περιοδικότητες ίσες με τις αρμονικές συνιστώσες της $1/f_2$, όπου $f_2 = 872$ Hz.

Στο σχήμα 5.61 εμφανίζεται τμήμα του φάσματος που προκύπτει από την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier στο χρονικό σήμα του σχήματος 5.60. Στο φάσμα η ενέργεια συγκεντρώνεται σε μια υψίσυχη περιοχή περί τα 1000Hz, όπου δεσπόζει η συχνότητα f_2 , η οποία ενδεχομένως να είναι η RBPF ή μια συχνότητα που προέρχεται από μηχανικά αίτια που αφορούν το φορτίο, για τις οποίες όμως δεν διατίθενται περισσότερες πληροφορίες.



Σχήμα 5.61: Φάσμα μέτρησης στη τρεις χωρική κατεύθυνση X.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων, εντοπίστηκε και στις δυο περιπτώσεις η ύπαρξη κάποιου μηχανικού προβλήματος του φορτίου, που όμως λόγω των περιορισμένων δεδομένων δεν μπορεί να εντοπιστεί με ακρίβεια. Δεδομένου του ιστορικού του Η/Κ αλλά και της παρούσης μέτρησης, προτείνεται ο επανέλεγχος τόσο του ίδιου του κινητήρα, όσο και της μηχανής με την οποία αυτός συνδέεται για την

εξέλιξη της βλάβης. Τέλος, η υπέρβαση του ορίου της έντασης του ρεύματος ενδεχομένως να προέρχεται από την επισκευή του κινητήρα, οπότε και υπήρξαν αναπόφευκτα αλλαγές στα ονομαστικά του στοιχεία.

5.7 Ρεκτιφιέ.

Η συγκεκριμένη εργαλειομηχανή βρίσκεται στο κτίριο επισκευής κινητήρων στο 301EB, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.62 εκτελεί εσωτερική τόννευση στα χιτώνια ή και στους κύλινδρους των μηχανών εσωτερικής καύσης. Η εργασία γίνεται ώστε τα χιτώνια ή οι κύλινδροι να ικανοποιούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές και περιλαμβάνει την αφαίρεση υλικού. Ο ηλεκτροκινητήρας που κινεί τον άξονα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου έχει τη δυνατότητα κίνησης σε δύο ταχύτητες περιστροφής. Ο κινητήρας μελετήθηκε με καταγραφή και ανάλυση ρεύματος και κραδασμών. Στο σχήμα 5.63 φαίνεται η σύνδεση των αισθητήρων καταγραφής ρεύματος καθώς και ο τρόπος, οι θέσεις μέτρησης και οι χωρικές κατευθύνσεις των αισθητηρίων μέτρησης κραδασμών (τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα).

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα σύμφωνα με τον κατασκευαστή (name plate data) είναι τα ακόλουθα:

- Κατασκευαστής : DAE (Denmark)
- Τύπος : OK7B
- Ονομαστικός αριθμός στροφών : 1400 rpm και 700 rpm ανάλογα με την επιλογή.
- Συχνότητα : 50 Hz
- Τάση Λειτουργίας : 380 V
- Ονομαστική Ισχύς : 2HP και 1 HP ανάλογα με την επιλογή.
- Ονομαστική ένταση ρεύματος : 3,2 A και 2,7A ανάλογα με την επιλογή.
- Αριθμός πόλων: 6 και 8 ανάλογα με την επιλογή.
- Συντελεστής Ισχύος $\cos\phi$: 0,83

Οι τιμές των βασικών παραμέτρων που επιλέχθηκαν για την καταγραφή των κραδασμών είναι:

- Συχνότητα δειγματοληψίας: 20 KHz
- Πλήθος δειγμάτων: 10.000
- Antialiasing φίλτρο: NAI
- Σύγχρονη καταγραφή δεδομένων σε όλες τις θέσεις μέτρησης: NAI



Σχήμα 5.62: Ρεκτιφιέ.

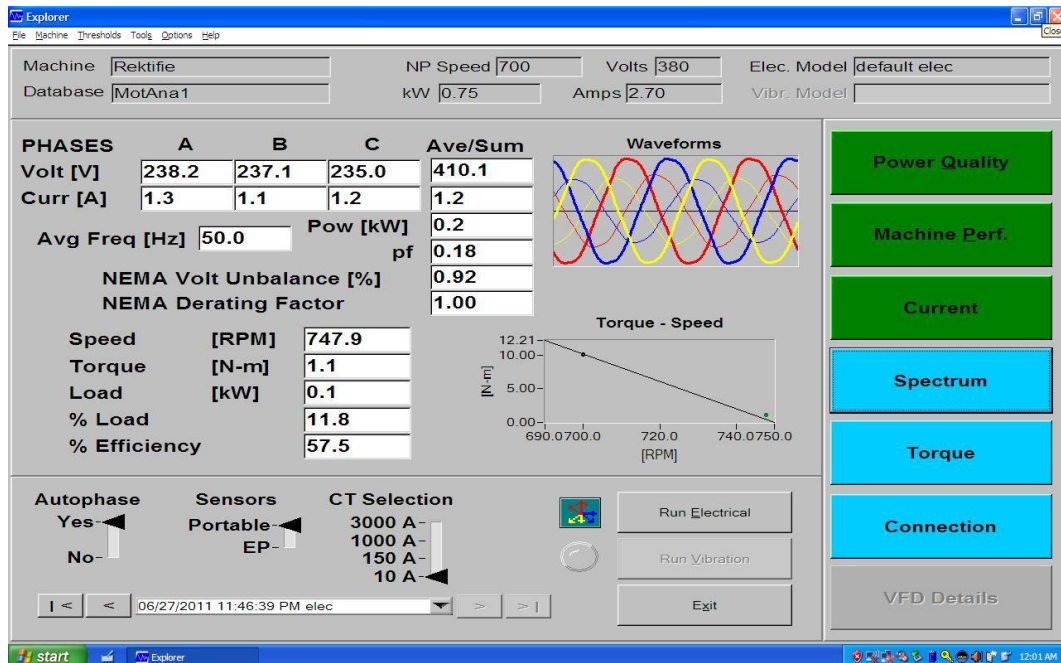


Σχήμα 5.63: Αισθητήρια καταγραφής ρεύματος και κραδασμών.

Οι τιμές των παραμέτρων που εισήχθησαν στη βάση δεδομένων για την μέτρηση του ρεύματος είναι:

- Ονομαστικά στοιχεία κινητήρα: Όπως αναγράφονται στα τεχνικά του χαρακτηριστικά του (nameplate data).
- Όρια μετρούμενων μεγεθών: Όπως φαίνονται στον πίνακα 5.1
- Βρόχοι συλλογής δεδομένων (loop acquisition): 10 Τεστ, συνεχόμενα (continuous).
- Χρόνος συλλογής δεδομένων (acquisition time): 10sec
- Αριθμός αρμονικών προς αποθήκευση: 51
- Χρόνος συλλογής δεδομένων φάσματος: 1,37sec
- Μέγιστη συχνότητα φάσματος: 3000Hz
- Αυτόματη επιλογή φάσεων: NAI
- Επιλογή αισθητηρίων: Φορητοί
- Επιλογή αμπεροτσιμπίδων: 10 A
- Έλεγχος συνδέσεων: NAI

Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης με την καταγραφή ρεύματος, στην επιφάνεια εργασίας του εξοπλισμού EXP 3000 εμφανίσθηκαν τα αποτελέσματα του σχήματος 5.64. Παρατηρώντας την εικόνα του σχήματος 5.64, είναι φανερό πως δεν υπάρχει προειδοποίηση για κάποια βλάβη του κινητήρα. Επίσης, το μικρό ποσοστό του φορτίου κάνει αδύνατη την ένδειξη αποτελέσματος για το Rotor Bar Test, γι' αυτό και η ένδειξη στη μέτρηση του φάσματος (Spectrum) είναι μπλε.



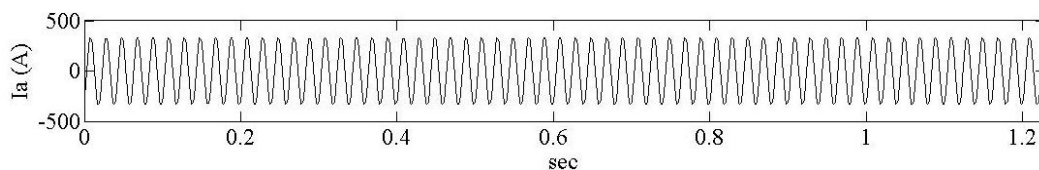
Σχήμα 5.64: Αποτελέσματα μέτρησης με ανάλυση ρεύματος.

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.11. Στα αποτελέσματα των μετρήσεων, επιβεβαιώνεται η υπέρβαση του επιπέδου της έντασης και το χαμηλό επίπεδο του φορτίου, που οδηγεί σε πολύ μικρή απόδοση του κινητήρα.

Στο σχήμα 5.65 παρουσιάζεται η χρονική κυματομορφή της καταγραφής της έντασης για τη φάση Α όπου εμφανίστηκε η μεγαλύτερη τιμή της. Η περιοδικότητα της χρονικής κυματομορφής ισούται με 0,02 sec που αντιστοιχεί στη συχνότητα του δικτύου, δηλαδή 50 Hz.

Πίνακας 5.11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέτρησης κινητήρα ρεκτιφεί στροφαλοφόρων.

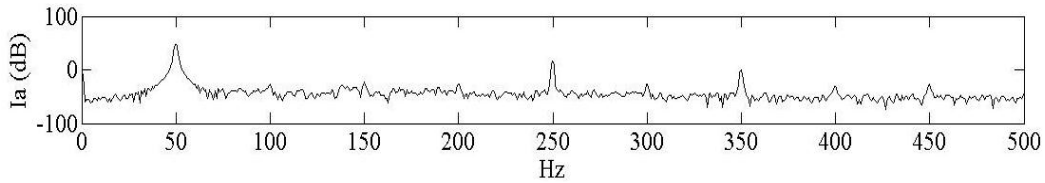
Τεστ	Μέτρηση	Κατάσταση
Υπέρβαση Τάσης (Over Voltage)	7,91%	Καλή
Ασυμμετρία Τάσης (Voltage Unbalance)	0,92%	Καλή
Σύνολο Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD _V)	2,72%	Καλή
Σύνολο Παραμόρφωσης (TD _V)	2,74%	Καλή
Υπέρβαση Έντασης (Over Current)	47,56% (της ονομαστικής τιμής)	Καλή
Συντελεστής Αποτελεσματικότητας (esf)	0,12	Καλή
Ράβδοι Δρομέα (Rotor Bar)	0	Δεν υπάρχει μέτρηση
Ασυμμετρία Έντασης (Current Unbalance)	7,6%	Καλή
Φορτίο (Load)	11,8%	Χαμηλή ένδειξη
Απόδοση (Efficiency)	57,5%	Κακή



Σχήμα 5.65: Χρονική κυματομορφή στη φάση Α της μετρούμενης έντασης (α) I_a .

Στη συνέχεια, με την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier αναλύεται το χρονικό σήμα του σχήματος 5.66 στο πεδίο της συχνότητας για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης. Τα πλάτη των συχνοτήτων της έντασης εμφανίζονται σε dB και σε εύρος έως 500 Hz. Από τη μορφή του φάσματος, δεν υπάρχει κάποια διεγερμένη περιοχή

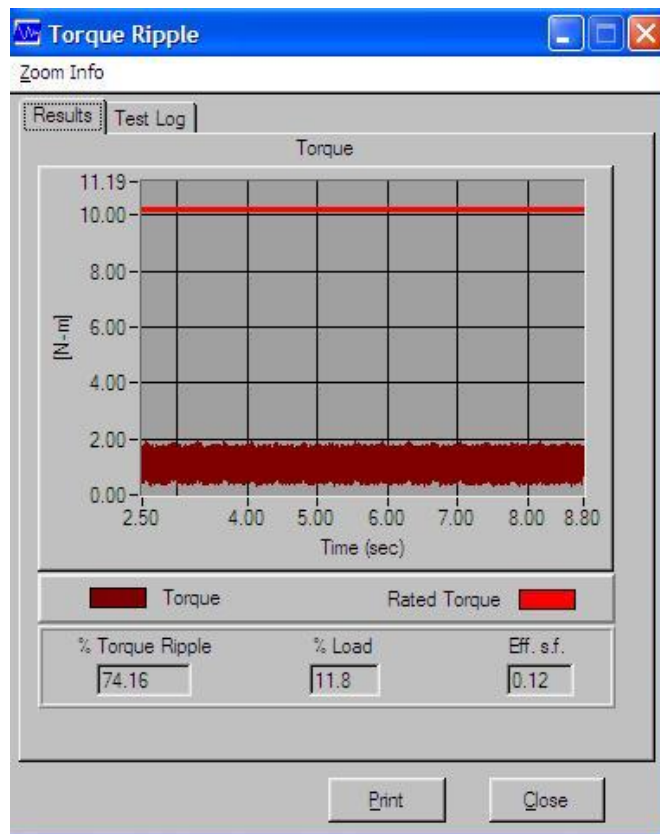
ή συχνότητες, πλην της συχνότητας δικτύου και των αρμονικών της, που να είναι έντονες υποδεικνύοντας κάποια βλάβη.



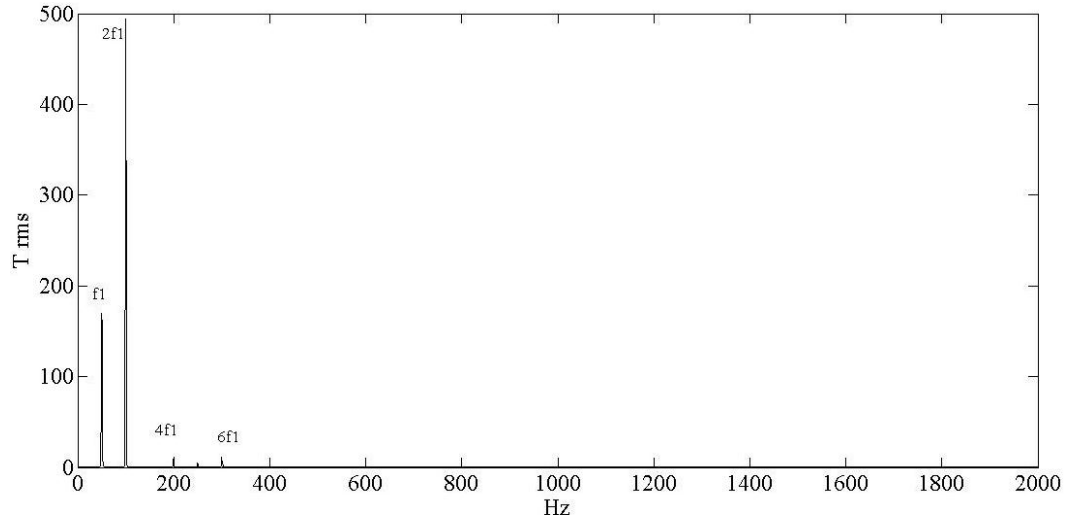
Σχήμα 5.66: Φάσμα μετρούμενης έντασης της φάσης A σε dB και σε εύρος 500 Hz.

Στο σχήμα 5.67 εμφανίζεται η κυματομορφή της ροπής, Torque Ripple, όπου γίνεται αντιληπτό πως η μέση της τιμή της ροπής παραμένει σταθερή και χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις, ωστόσο το ποσοστό του επιβαλλόμενου φορτίου είναι αρκετά μικρό, γεγονός που δεν επιτρέπει την μέτρηση των ράβδων του δρομέα (Rotor Bar Test).

Στη συνέχεια, γίνεται επεξεργασία του χρονικού σήματος της ροπής και προκύπτει το γραμμικό φάσμα της ροπής, τμήμα του οποίου παρουσιάζεται στο σχήμα 5.68, όπου δεσπόζουν η συχνότητα του δικτύου και οι αρμονικές της, γεγονός που δεν υποδεικνύει κάποιου είδους βλάβη στον κινητήρα.



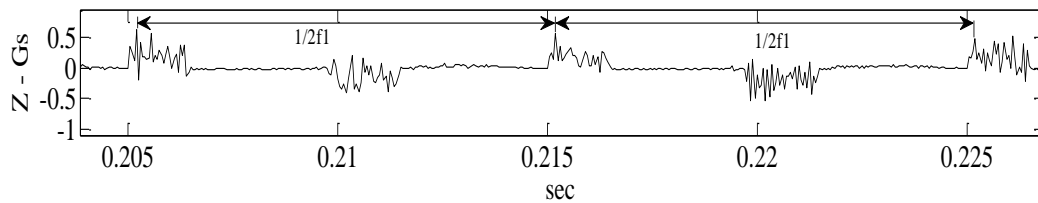
Σχήμα 5.67: Επεξεργασία κυματομορφής ροπής (Torque Ripple).



Σχήμα 5.68: Φάσμα μετρούμενης ροπής σε εύρος 500 Hz.

Στη συνέχεια αναλύονται οι μετρούμενοι κραδασμοί. Στο σχήμα 5.69 εμφανίζεται μέρος της χρονικής καταγραφής στη θέση μέτρησης A στην κατακόρυφη χωρική κατεύθυνση Z όπου οι ταλαντώσεις είναι εντονότερες από αυτές που αναπτύσσονται στην αξονική κατεύθυνση X και την οριζόντια κατεύθυνση Y. Το μεγαλύτερο συνολικό επίπεδο κραδασμών (πίνακας 5.12) καταγράφεται στην κατεύθυνση Z (1,62 mm/sec rms). Ο Η/Κ βάσει των χαρακτηριστικών του, ανήκει στην κλάση II (μεσαίες μηχανές) και από το διεθνή κανονισμό συνολικού επιπέδου κραδασμών ISO 10816 (πίνακας 5.8) συμπεραίνεται ότι είναι εντός των αποδεκτών ορίων.

Η κυματομορφή του σχήματος 5.69 εμφανίζει περιοδικότητα ίση με $1/2f_1$ και πλάτος περίπου 0,5g rms.



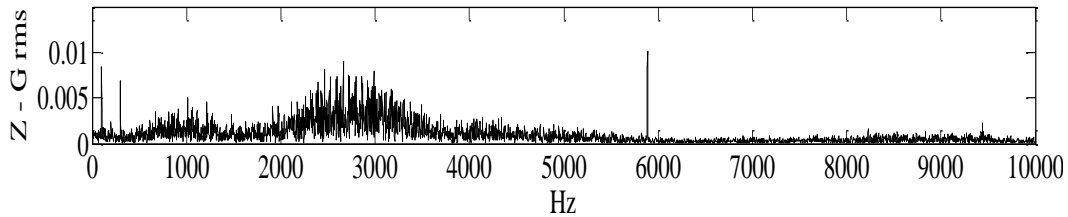
Σχήμα 5.69: Τμήμα χρονικού σήματος που καταγράφηκε στη χωρική κατεύθυνση Z.

Πίνακας 5.12: Συνολικό επίπεδο κραδασμών σε κάθε θέση και κατεύθυνση του κινητήρα του ρεκτιφιέ (mm/sec rms).

	Αξονική X	Οριζόντια Y	Κατακόρυφη Z
A	0,39	1,42	1,62
B	0,39	0,11	0,38

Στο σχήμα 5.70 εμφανίζεται το φάσμα του σήματος του σχήματος 5.69. Η ενέργεια συγκεντρώνεται σε δύο περιοχές, μια περί τα 1000Hz και η άλλη γύρω από τα 2,5 KHz, ενώ υπάρχει και μια μεμονωμένη αιχμή στα 5888 Hz. Στις διεγερμένες περιοχές δεν υπάρχει διακριτή συχνότητα είτε διαμόρφωση συγκεκριμένης συχνότητας. Αν και δεν

υπάρχουν στοιχεία για το κιβώτιο ταχυτήτων της εργαλειομηχανής με το οποίο γίνεται η μείωση των στροφών του ηλεκτροκινητήρα, εκτιμάται πως οι κρούσεις αυτές οφείλονται σε φθορά στους οδόντες των εμπλεκόμενων τροχών.



Σχήμα 5.70: Φάσμα μέτρησης στη χωρική κατεύθυνση Z.

Από την ανάλυση τόσο του ρεύματος όσο και των κραδασμών, η κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα κρίνεται ικανοποιητική. Από την καταγραφή του ρεύματος δεν εντοπίστηκε κάποιο ηλεκτρικό πρόβλημα, ενώ από την καταγραφή των κραδασμών διαπιστώθηκε πως υπάρχει ανάπτυξη δονήσεων που ενδεχομένως να οφείλονται σε φθορά στο κιβώτιο της μηχανής όπου γίνεται η μείωση των ταχυτήτων.

5.8 Λείανση.

Η συγκεκριμένη εργαλειομηχανή βρίσκεται στο κτίριο επισκευής κινητήρων στο 301EB, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.71 εκτελεί εσωτερική λείανση των κυλίνδρων των μηχανών εσωτερικής καύσης. Ο ηλεκτροκινητήρας που κινεί τον άξονα περιστροφής του λειαντικού τροχού μελετήθηκε με καταγραφή και ανάλυση ρεύματος και κραδασμών. Στο σχήμα 5.72 φαίνεται ο τρόπος, οι θέσεις μέτρησης και οι χωρικές κατευθύνσεις των αισθητηρίων μέτρησης κραδασμών (τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα).

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα σύμφωνα με τον κατασκευαστή (name plate data) είναι τα ακόλουθα:

- Τύπος : NUVF40/6
- Ονομαστικός αριθμός στροφών : 950 rpm.
- Συχνότητα : 50 Hz
- Τάση Λειτουργίας : 380 V
- Ονομαστική Ισχύς : 1 HP (0,75KW).
- Ονομαστική ένταση ρεύματος : 3,2 A.
- Αριθμός πόλων: 6.

Οι τιμές των βασικών παραμέτρων που επιλέχθηκαν για την καταγραφή των κραδασμών είναι:

- Συχνότητα δειγματοληψίας: 20 KHz
- Πλήθος δειγμάτων: 10.000
- Antialiasing φίλτρο: NAI
- Σύγχρονη καταγραφή δεδομένων σε όλες τις θέσεις μέτρησης: NAI

Οι τιμές των παραμέτρων που εισήχθησαν στη βάση δεδομένων για την μέτρηση του ρεύματος είναι:

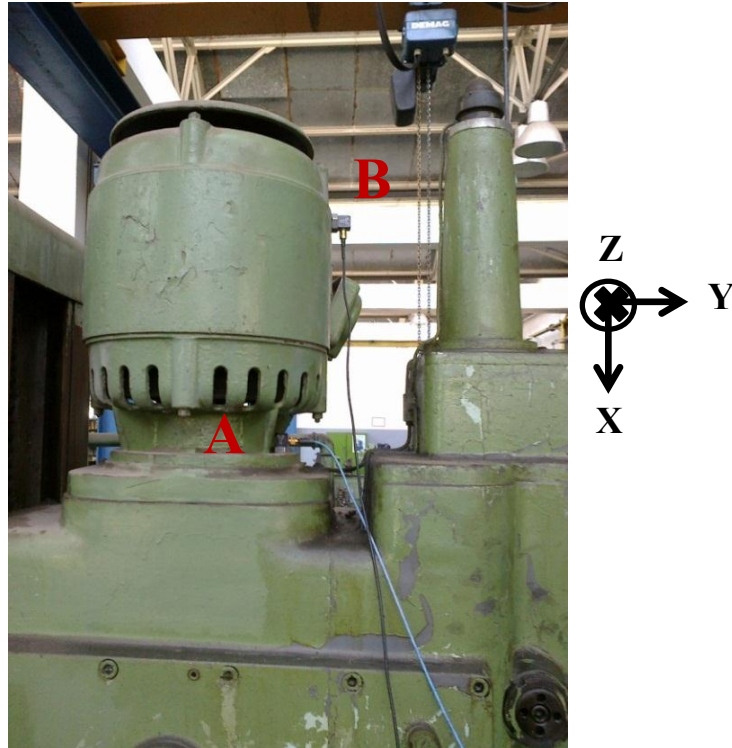
- Ονομαστικά στοιχεία κινητήρα: Όπως αναγράφονται στα τεχνικά του χαρακτηριστικά του (nameplate data).
- Όρια μετρούμενων μεγεθών: Όπως φαίνονται στον πίνακα 5.1
- Βρόχοι συλλογής δεδομένων (loop acquisition): 10 Τεστ, συνεχόμενα (continuous).
- Χρόνος συλλογής δεδομένων (acquisition time): 10sec
- Αριθμός αρμονικών προς αποθήκευση: 51
- Χρόνος συλλογής δεδομένων φάσματος: 0,82sec
- Μέγιστη συχνότητα φάσματος: 5000Hz
- Αυτόματη επιλογή φάσεων: NAI
- Επιλογή αισθητηρίων: Φορητοί
- Επιλογή αμπεροτσιπιδών: 10 A
- Έλεγχος συνδέσεων: NAI

Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης με την καταγραφή ρεύματος, στην επιφάνεια εργασίας του εξοπλισμού EXP 3000 εμφανίσθηκαν τα αποτελέσματα του σχήματος 5.73. Παρατηρώντας την εικόνα του σχήματος 5.73, είναι φανερό πως δεν υπάρχει προειδοποίηση για κάποια βλάβη του κινητήρα. Τα σημαντικότερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.13.

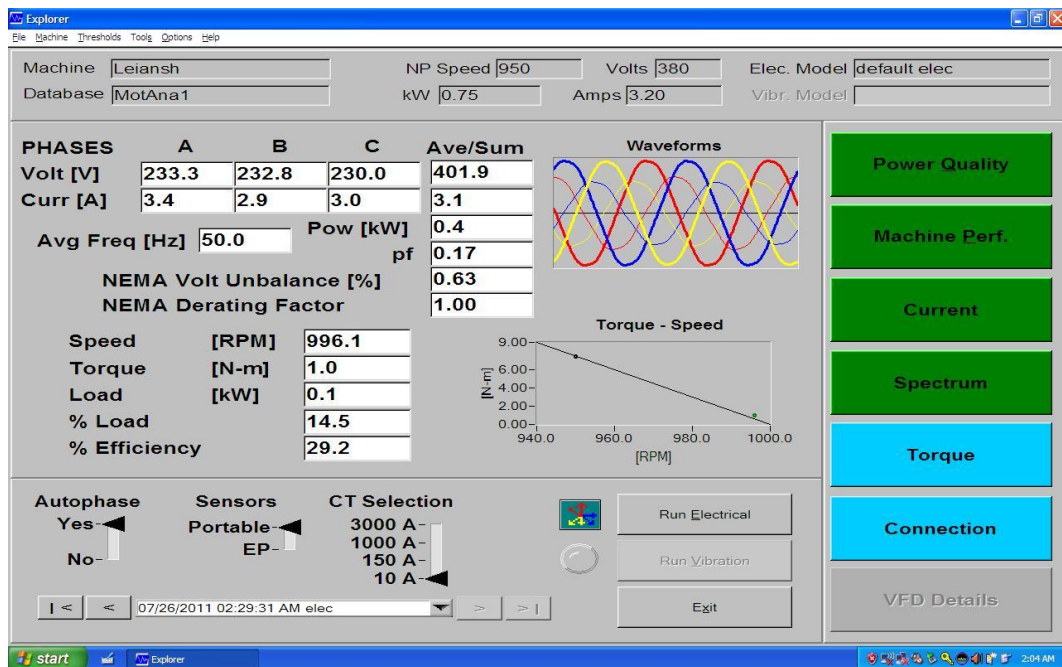
Το επίπεδο του φορτίου δεν αρκεί για την πραγματοποίηση του Rotor Bar Test και αυτός είναι ο λόγος της χαμηλής απόδοσης που καταγράφεται για τον κινητήρα.



Σχήμα 5.71: Λείανση.



Σχήμα 5.72: Αισθητήρια καταγραφής κραδασμών.



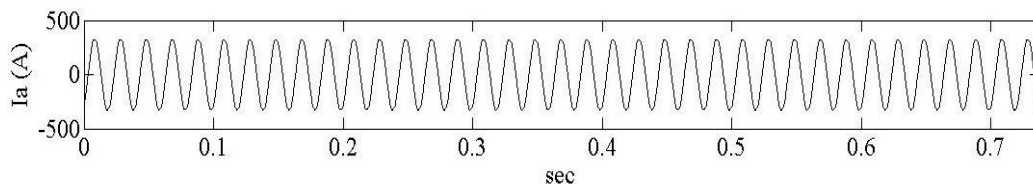
Σχήμα 5.73: Αποτελέσματα μέτρησης με ανάλυση ρεύματος.

Πίνακας 5.13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέτρησης κινητήρα λείανσης.

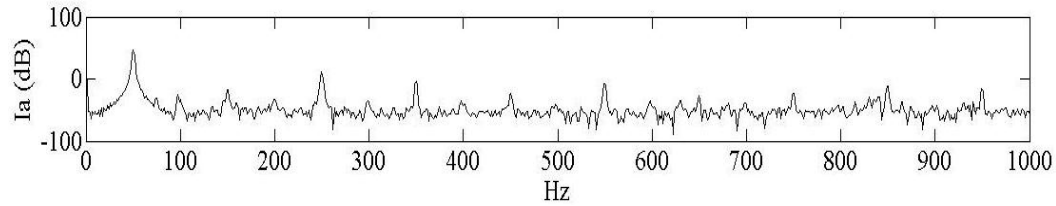
Τεστ	Μέτρηση	Κατάσταση
Υπέρβαση Τάσης (Over Voltage)	5,57%	Καλή
Ασυμμετρία Τάσης (Voltage Unbalance)	0,63%	Καλή
Σύνολο Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD _v)	1,70%	Καλή
Σύνολο Παραμόρφωσης (TD _v)	1,71%	Καλή
Υπέρβαση Έντασης (Over Current)	104,83% (της ονομαστικής τιμής)	Καλή
Συντελεστής Αποτελεσματικότητας (esf)	0,15	Καλή
Ράβδοι Δρομέα (Rotor Bar)	0	Δεν υπάρχει μέτρηση
Ασυμμετρία Έντασης (Current Unbalance)	9,1%	Καλή
Φορτίο (Load)	14,5%	Χαμηλή ένδειξη
Απόδοση (Efficiency)	29,2%	Κακή

Στο σχήμα 5.74 παρουσιάζεται η χρονική κυματομορφή της καταγραφής της έντασης για τη φάση Α όπου εμφανίστηκε η μεγαλύτερη τιμή της. Η περιοδικότητα της χρονικής κυματομορφής ισούται με 0,02 sec που αντιστοιχεί στη συχνότητα του δικτύου.

Στη συνέχεια, με την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier αναλύεται το χρονικό σήμα του σχήματος 5.75 στο πεδίο της συχνότητας για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης. Τα πλάτη των συχνοτήτων της έντασης εμφανίζονται σε dB. Από τη μορφή του φάσματος, δεν υπάρχει κάποια διεγερμένη περιοχή ή συχνότητες, πλην της συχνότητας δικτύου και των αρμονικών της, που να είναι έντονες υποδεικνύοντας κάποια βλάβη.



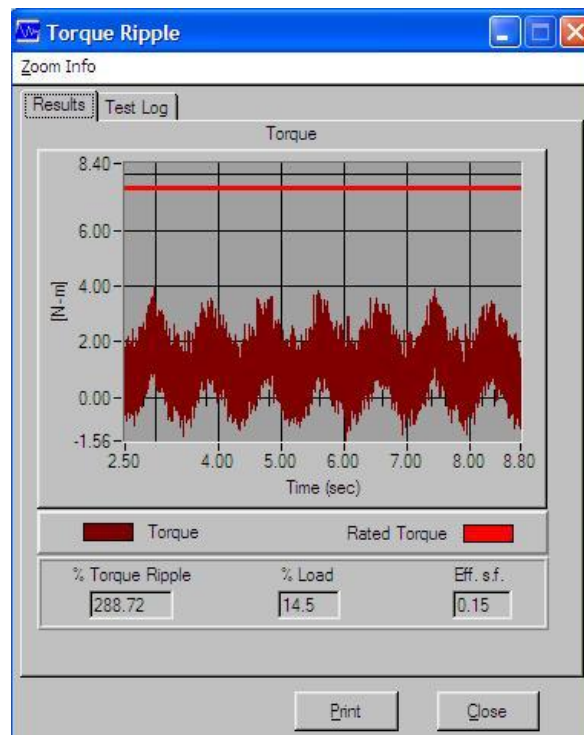
Σχήμα 5.74: Χρονική κυματομορφή της μετρούμενης έντασης I_a .



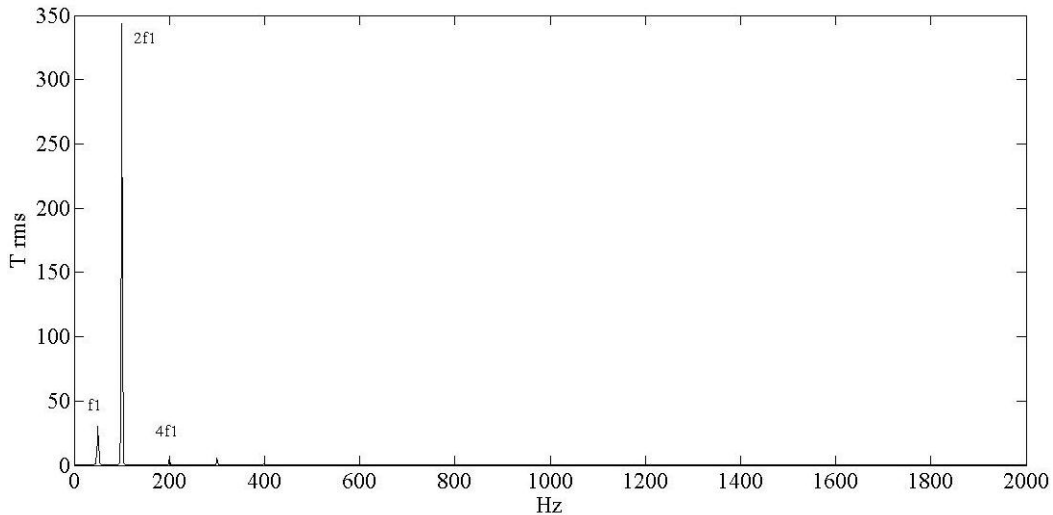
Σχήμα 5.75: Φάσμα μετρούμενης έντασης της φάσης Α σε dB και σε εύρος 1000 Hz.

Στο σχήμα 5.76 εμφανίζεται η κυματομορφή της ροπής, Torque Ripple, όπου παρατηρείται μεγάλη κυμάτωση που μετρήθηκε σε ποσοστό 288,7% και δείχνει πόσο ασταθής ήταν η ροπή κατά τη διαδικασία της καταγραφής, παρόλο που το ποσοστό του φορτίου ήταν ιδιαίτερα χαμηλό. Οι παλμοί που εμφανίζονται στη ροπή υποδεικνύουν κάποιο σφάλμα που σχετίζεται με το φορτίο. Ωστόσο το ποσοστό του επιβαλλόμενου φορτίου είναι αρκετά μικρό, γεγονός που δεν επιτρέπει την μέτρηση των ράβδων του δρομέα (Rotor Bar Test).

Στη συνέχεια, γίνεται επεξεργασία του χρονικού σήματος της ροπής και προκύπτει το γραμμικό φάσμα της ροπής, τμήμα του οποίου παρουσιάζεται στο σχήμα 5.77, όπου δεσπόζουν η συχνότητα του δικτύου και οι αρμονικές της, γεγονός που δεν υποδεικνύει κάποιου είδους βλάβη στον κινητήρα.



Σχήμα 5.76: Επεξεργασία κυματομορφής ροπής (Torque Ripple).



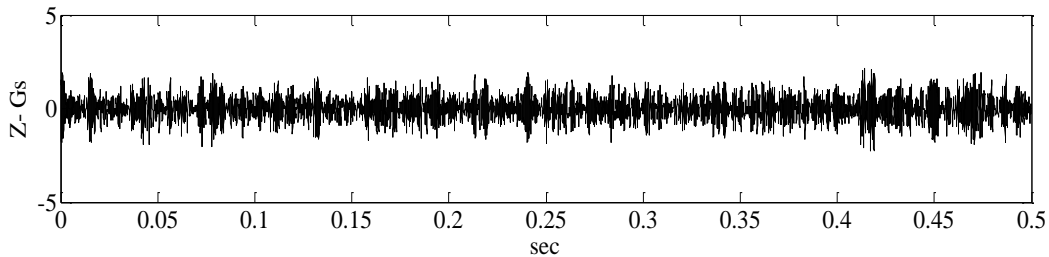
Σχήμα 5.77: Φάσμα μετρούμενης ροπής σε εύρος 2000 Hz.

Στη συνέχεια αναλύονται οι μετρούμενοι κραδασμοί. Στο σχήμα 5.78 εμφανίζεται η χρονική καταγραφή στη θέση μέτρησης A στην κατακόρυφη χωρική κατεύθυνση Z όπου οι ταλαντώσεις είναι εντονότερες από αυτές που αναπτύσσονται στην αξονική κατεύθυνση X και την οριζόντια κατεύθυνση Y. Το μεγαλύτερο συνολικό επίπεδο κραδασμών (πίνακας 5.14) καταγράφεται στην κατεύθυνση Z (0,87 mm/sec rms). Ο Η/Κ βάσει των χαρακτηριστικών του, ανήκει στην κλάση II (μεσαίες μηχανές) και από το διεθνή κανονισμό συνολικού επιπέδου κραδασμών ISO 10816 (πίνακας 5.8) συμπεραίνεται ότι είναι εντός των αποδεκτών ορίων.

Πίνακας 5.14: Συνολικό επίπεδο κραδασμών σε κάθε θέση και κατεύθυνση του κινητήρα της λείανσης (mm/sec rms).

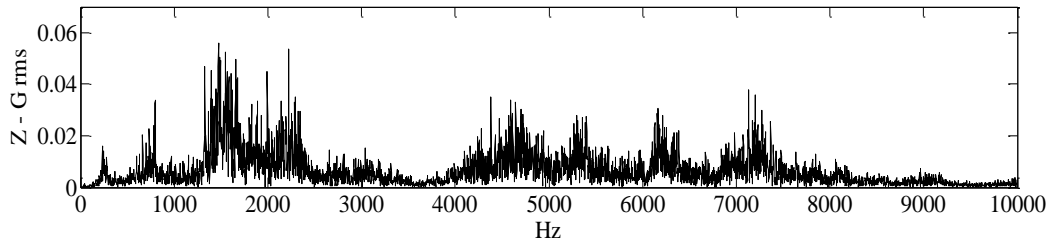
	Αξονική X	Οριζόντια Y	Κατακόρυφη Z
A	0,43	0,71	0,87
B	0,26	0,31	0,14

Στην κυματομορφή του σχήματος 5.78 δεν παρατηρείται κάποια περιοδικότητα στους κρουστικούς παλμούς.



Σχήμα 5.81: Μετρούμενοι κραδασμοί του κινητήρα στη θέση A στην χωρική κατεύθυνση Z σε μονάδες επιτάχυνσης (Gs).

Στο σχήμα 5.82 εμφανίζεται το φάσμα του σήματος του σχήματος 5.81. Η ενέργεια συγκεντρώνεται σε αρκετές υψισυχνες περιοχές. Οι συχνότητες που διεγείρονται είναι αρκετές και δεν έχουν σταθερή διαμόρφωση. Είναι γνωστό πως η μείωση των στροφών του ηλεκτροκινητήρα γίνεται με κιβώτιο. Αν και δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για τα γρανάζια του κιβωτίου, η μορφή του φάσματος υποδεικνύει φθορά των οδόντων.



Σχήμα 5.82: Φάσμα μέτρησης στη χωρική κατεύθυνση Z.

Συμπερασματικά, από την ανάλυση του ρεύματος δεν εντοπίστηκε κάποιο ηλεκτρικό σφάλμα, ενώ από την κυματομορφή της ροπής διαπιστώθηκε ότι υπάρχει μηχανική βλάβη που αφορά στο φορτίο. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώθηκε από την ανάλυση των κραδασμών και εντοπίζεται στη φθορά των οδόντων των γραναζωτών τροχών στο κιβώτιο από όπου γίνεται η μείωση των στροφών του κινητήρα. Συνιστάται η επανάληψη των μετρήσεων στη συγκεκριμένη μηχανή και η λήψη στοιχείων που αφορούν στη λειτουργία της.

6. Συμπεράσματα.

6.1 Ανασκόπηση.

Η παρούσα εργασία αποτελείται από δυο ουσιαστικά τμήματα. Στο πρώτο, παρουσιάστηκε η θεωρία της διάγνωσης βλαβών σε ηλεκτροκινητήρες τόσο με την καταγραφή ρεύματος όσο και με την καταγραφή κραδασμών. Αναλύθηκε η μέθοδος της ανάλυσης ρεύματος «MCSA» και πως επηρεάζει κάθε ένας από τους παράγοντες που η μέθοδος εξετάζει στη λειτουργία του κινητήρα. Στο δεύτερο, γίνονται μετρήσεις σε βιομηχανικό περιβάλλον, όπου διαπιστώθηκαν στην πράξη τα όσα αναφέρθηκαν θεωρητικά για τους συγκεκριμένους τρόπους μέτρησης και διαπιστώθηκαν συγκεκριμένοι τύποι βλαβών στους εξεταζόμενους κινητήρες.

6.2 Συμπεράσματα.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των εκτελούμενων μετρήσεων με τους δύο τρόπους που αναπτύχθηκαν, συμπεραίνεται πως βλάβες που σχετίζονται με προβλήματα των ράβδων του δρομέα διαγιγνώσκονται και με τις δυο μεθόδους. Ωστόσο, το αποτέλεσμα είναι πολύ ταχύτερο με τη χρήση του εξοπλισμού EXP3000, καθώς υπάρχει απευθείας ένδειξη της μέτρησης με το Rotor Bar Test. Επίσης, η διάγνωση μηχανικών προβλημάτων είναι πιο εύκολη με την μέθοδο της καταγραφής κραδασμών, ενώ αντίθετα, προβλήματα που σχετίζονται με την κατάσταση ισχύος του δικτύου ή άλλα ηλεκτρικά σφάλματα εντοπίζονται άμεσα με την καταγραφή του ρεύματος.

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

Κατά την εκτέλεση των μετρήσεων για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας με τον εξοπλισμό EXP3000, δεν έγινε καταγραφή ρεύματος σε κινητήρα που οδηγείται με μεταβλητή συχνότητα. Η μέθοδος της οδήγησης μεταβλητής συχνότητας (χρήση inverter) είναι ευρέως διαδεδομένη σε βιομηχανικές εφαρμογές και η καταγραφή του ρεύματος σε κινητήρες που οδηγούνται με αυτό τον τρόπο μπορεί να οδηγήσει έγκαιρα στη διάγνωση σφαλμάτων.

Στον πρόσθετο εξοπλισμό του EXP3000, που δεν διατίθενται στο εργαστήριο, περιλαμβάνονται αισθητήρες καταγραφής κραδασμών. Η καταγραφή κραδασμών από το ίδιο διαγνωστικό μηχάνημα που εκτελεί και την καταγραφή ρεύματος θα κάνει πιο εύκολη τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων, χωρίς την ανάγκη απόκτησης πρόσθετου εξοπλισμού για την καταγραφή των κραδασμών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ε. Παπαδόπουλος. *Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας*. Μάρτιος. 2000.
2. Stephen J. Charman. *Ηλεκτρικές Μηχανές, Εκδόσεις Τζιόλα 2010*.
3. Πέτρος Ντοκόπουλος. *Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών, Εκδόσεις Ζήτη 2009*.
4. <http://evolution.skf.com>
5. Howard W Penrose. *Motor Current Signature Analysis and Interpretation*.
6. Neelam Mehala, Ratna Dahiya. *Motor Current Signature Analysis and its Applications in Induction Motor Fault Diagnosis, Aug. 2007*.
7. Aditya Korde B.E. *On-line condition monitoring of motors using electrical signature analysis, Diagnostic Technologies India Pvt.Ltd*.
8. W T Thomson and A Barbour: *On-line Current Monitoring and Application of a Finite Element Method to Predict the Level of Airgap Eccentricity in 3-Phase Induction Motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 13, No 4, December 1998, pp 347-357*.
9. S Fruchenecht, E Pittius and H Seinsch. *A Diagnostic System for Three-Phase Asynchronous Machines”, Proc IEEE Conf, EMDA '89, Vol. 310, IEEE Savoy Place, London, 1989, pp 163-171*.
10. Α. Κανάραχος, Ι. Αντωνιάδης. *Δυναμική Μηχανών, Εκδ. Παπασωτηρίου, 1998*.
11. Σημειώσεις Εργαστηρίου Δυναμικής ΙΙ. *Φασματική Ανάλυση Δυναμικών Σημάτων από Φθαρμένα Ηλεκτρομηχανολογικά Στοιχεία*.
12. Θεόδωρος Κωστόπουλος. *Διάγνωση βλαβών και Συντήρηση Περιστροφόμενων Μηχανών, , Εκδ. Συμεών 2009*.
13. *Τεχνικό Εγχειρίδιο Dynamic Motor Monitor EXP 3000, Φεβ. 2009*.
14. *NEMA Standard MG1, Motors and Generators, Part 1, 12, 14,20, 31*.
15. E. Wiedenbrug, Ph.D. SM IEEE. *Instantaneous Torque as Predictive Maintenance Tool for Variable Frequency Drives and Line Operated Motors*.
16. *Voltage Unbalance, Technical Note No 6, Integral Energy Power Centre, University of Wollongong, Okt 2002*.
17. Vamsi Krishna. *Effects of unbalance voltage on induction motor current and its operation performance, Lecon Systems*.
18. *Harmonic Distortion in the electric supply system, Technical Note No 3, Integral Energy Power Centre, University of Wollongong, March 2000*.
19. Ernesto J. Wiedenbrug. *Measurement, Analysis and Efficiency Estimation of Three Phase Induction Machines Using Instantaneous Electrical Quantities, Oregon State Univercity, 1988*.
20. www.motor.doe.gov. Office of Industrial Technologies, *Optimizing Electric Motor Systems at a Corporate Campus Facility, Sept. 1996*.
21. IEEE Std. 112.
22. Ernesto J. Wiedenbrug, *Three phase induction motor field and laboratory efficiency testing*.
23. Motor Challenge, *Buying an Energy-Efficient Electric Motor, September 1996*.

24. Motor Challenge, *Replacing an Oversized and Underloaded Electric Motor*.
25. Office of Industrial Technologie. *United States Industrial Motor Systems Market Opportunities Assessment, Dec. 1998*.
26. Ernesto Wiedenbrug. *Instantaneous Torque as Predictive Maintenance Tool for Variable Frequency Drives and Line Operated Motors*.
27. R. Krishnan. *Electric Motor Drives Modeling Analysis and Control, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 2001 Prentice Hall. Inc.*