



ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΣΕΡΡΕΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη λογισμικού λήψης, επεξεργασίας, ανάλυσης σημάτων και
διάγνωσης σφαλμάτων σε αντλητικά συγκροτήματα

ΕΚΠΟΝΗΤΗΣ: Χριστοφόρου Ιωάννης (ΑΜ: 6743)

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δαυΐδ Κωνσταντίνος

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους, που με υποστήριξαν με κάθε τρόπο κατά την εκπόνηση της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δαυίδ Κωνσταντίνο, που μου έδωσε την ευκαιρία να εντρυφήσω στις μεθόδους διάγνωσης και επιτήρησης της κατάστασης λειτουργίας μηχανών με χρήση τεχνικών ανάλυσης σημάτων που παράγονται από διεγέρσεις. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Μητέρα μου, τον Πατέρα μου και τα αδέρφια μου για την ηθική συμπαράσταση και τεχνική υποστήριξη που μου παρείχαν.

Σέρρες, Νοέμβριος 2023

Χριστοφόρου Ιωάννης

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή:

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος φοιτητής, έχοντας επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής, δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία προερχόμενο από βιβλία, άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, διατυπωμένο αυτούσια ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο φοιτητής: (Ονοματεπώνυμο – Υπογραφή)

Χριστοφόρου Ιωάννης

Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των διαθέσιμων εργαλείων και τεχνικών διάγνωσης της κατάστασης περιστρεφόμενου εξοπλισμού και πιο συγκεκριμένα αντλητικών συγκροτημάτων, η σύγκριση τους, και η ανάπτυξη ενός νέου διαγνωστικού εργαλείου, το οποίο να προσφέρει πλεονεκτήματα, όπως η φορητότητα και το κόστος. Τα περισσότερα διαθέσιμα σήμερα εμπορικά εργαλεία απευθύνονται κυρίως σε βιομηχανίες, και δεν δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στα παραπάνω θέματα, τα οποία εντούτοις είναι σημαντικά για μία μικρή βιομηχανική μονάδα όπως οι τοπικές εταιρίες μεταφοράς και επεξεργασίας νερού. Η συνεχόμενη εξέλιξη των τεχνολογιών πληροφορικής και ηλεκτρονικών συστημάτων απαιτεί και την αντίστοιχη εξέλιξη στις μεθόδους παρακολούθησης και διάγνωσης της κατάστασης λειτουργίας βιομηχανικού εξοπλισμού. Σε μία σύγχρονη βιομηχανία η απαίτηση διατήρησης υψηλής ποιότητας προϊόντων, απαιτεί ταυτόχρονα και την ομαλή λειτουργία των μηχανημάτων. Η χρήση πολλαπλών εργαλείων διάγνωσης της κατάστασης λειτουργίας προσφέρει δυνατότητες πολυδιάστατης διάγνωσης, καθώς εισάγει στοιχεία και δεδομένα από διάφορες πηγές. Είναι γνωστό ότι ένα αντλητικό σύστημα που αποτελείται από μηχανές με διαφορετικές αρχές λειτουργίας η κάθε μία, η μέθοδος διάγνωσης της κατάστασης να εξειδικεύεται με βάση την αρχή λειτουργίας του κάθε μηχανήματος. Για παράδειγμα ο ηλεκτροκινητήρας είναι μία ηλεκτρική μηχανή, ενώ η αντλία είναι μία μηχανή ρευστών. Η πρώτη παίρνει ηλεκτρική ενέργεια και την μετατρέπει σε μηχανικό έργο, ενώ η δεύτερη παίρνει μηχανικό έργο και το μετατρέπει σε αύξηση της εσωτερικής ενέργειας ενός ρευστού. Στην συγκεκριμένη εργασία, παρουσιάζονται τα διαθέσιμα εμπορικά εργαλεία διάγνωσης με βάση τις δονήσεις και τις μετρήσεις τάσης και έντασης. Επίσης, αναπτύσσεται ένα εργαλείο διάγνωσης με βάση τις ακουστικές εκπομπές. Τέλος, για την επίδειξη των αποτελεσμάτων της εργασίας, συγκρίνονται και αξιολογούνται τα διαθέσιμα εμπορικά εργαλεία με το λογισμικό εργαλείο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μέσα από ένα πείραμα υπό πραγματικές συνθήκες.

English Summary (Αγγλική Περίληψη)

Thesis Title: Development of a software tool for usage as condition based monitoring system in pumping stations

Abstract

The purpose of this thesis is to study the nowadays available tools and techniques for condition diagnosing of rotating equipment and more specifically pumping units and more over to create a novel tool facing with some problems such as portability and cost. Most available tools are mainly focusing on stationary industrial applications, while portability and cost are two factors of lesser importance, which is not the case for small-sized industries such as the local water treatment and supply companies. The breakthrough development of information technologies and electronics, requires the corresponding adaptation of the methods used in condition based monitoring (CBM) systems. In a modern industry the requirement to maintain high quality production standards also requires the undisturbed operation of the machinery. To establish a multi-variable diagnosis the use a set of CBM tools is mandatory combining the specific advantages from several measurement principles. Knowing that a pumping system consists of various machines based on various operating principles, that the method of condition monitoring should be complied. The electric motor is an electrical machine while the pump is a fluid machine. The former takes electrical energy and converts it into mechanical work, while the latter takes mechanical work and converts it into an increased internal energy of a fluid. In this particular thesis, the available diagnostic tools based on vibrations, AC voltage and current measurements are assessed. Furthermore, a diagnostic tool based on acoustic emissions is also being developed. Finally, for a better understanding, the available commercial diagnostic tools, as well as the developed software tool are compared and demonstrated by means of an experiment conducted under real conditions.

Πίνακας Περιεχομένων

	Περίληψη	3
	Πίνακας Περιεχομένων	5
	Γλωσσάρι	7
1	Εισαγωγή	9
2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	11
2.1	Ενέργεια Ταλαντώσεων	11
2.2	Ενέργεια Ακουστικών Εκπομπών	15
2.3	Θεωρία Παλμών	16
2.3.1	Αιτίες που προκαλούν παλμούς	17
2.3.2	Επιφανειακή Τριβή	18
2.4	Συνήθεις Βλάβες Η/Μ εξοπλισμού σε αντλιοστάσια	20
2.4.1	Προβλήματα Ηλεκτρικών κινητήρων	25
2.4.2	Προβλήματα Αντλιών	30
2.4.3	Προβλήματα Τριβέων Κύλισης	34
3	Διαγνωστικά Εργαλεία	37
3.1	Βιομηχανικές Εφαρμογές	37
4	Ανάπτυξη Λογισμικού Διάγνωσης Λειτουργίας Αντλιοστασίων	54
4.1	Γενική Παρουσίαση	54
4.2	Αρχή Λειτουργίας	55
4.3	Λειτουργίας	56
4.4	Διάγραμμα Ροής Λογισμικού	66
5	Εφαρμογή χρήσης Λογισμικού σε πραγματικό πρόβλημα	68
5.1	Πειραματικός Εξοπλισμός	69
5.2	Πείραμα	80

5.2.1	Ανάλυση	84
5.2.2	Σύγκριση	94
5.2.3	Διάγνωση	99
5.2.4	Επαλήθευση	100
6	Συμπεράσματα	106
6.1	Αξιολόγηση Λογισμικού	106
	Βιβλιογραφία	108

Γλωσσάρι

Σύμβολο / Συντομογραφία Περιγραφή

A/D	Analog to Digital
AF	Amplification Factor
Bd	Διάμετρος του στοιχείου κύλισης
BP	British Pounds
BPF	Blade Pass Frequency
BRF	Blade Rate Frequency
BS	British Standard
BSF	Ball Spin Frequency
CPS	Cycles per second
DAQ	Data Acquisition
ED	Eddy Current
Fbd	Frequency Ball Defect
Fc	Frequency Cage
FFT	Fast Fourier Transformation
FL	Συχνότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας
FP	Συχνότητα περάσματος των πόλων
FS	Συχνότητα ολίσθησης
FTF	Fundamental Train Frequency
GMF	Gear mesh frequency
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transformation
ISO	International Organization for Standardization
LASER	Light amplification by stimulated emission of radiation
LTS	Long Term Support

N	Αριθμός των στοιχείων κύλισης
P	Αριθμός πόλων
Pd	Η διάμετρος της τροχιάς των στοιχείων κύλισης
RBPF	Rotor Bar Passing Frequency
RMS	Root Mean Square
RPM	Revolutions per Minute
SHM	Structural Health Monitoring
AC	Alternating Current
Φ	Γωνία επαφής

1. Εισαγωγή

Μία σύγχρονη βιομηχανική μονάδα αν θέλει να είναι κερδοφόρα θα πρέπει να μειώσει τα έξοδα παραγωγής της. Ένα μεγάλο ποσοστό των εξόδων λειτουργίας της προέρχονται από την ενέργεια που αυτή καταναλώνει, την αύξηση του κόστους παραγωγής λόγω της συντήρησης του εξοπλισμού καθώς και της προμήθειας ανταλλακτικών για την αποκατάσταση των βλαβών.

Ειδικά, οι επιχειρήσεις διαχείρισης νερού συχνά δεν είναι συγκεντρωμένες σε μία εγκατάσταση, όπως άλλες βιομηχανίες, αλλά οι μονάδες επεξεργασίας, αποθήκευσης και άντλησης είναι διασκορπισμένες σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό κάνει πιο δύσκολη την επιτήρηση λειτουργίας του εξοπλισμού, καθώς η πρόσβαση σε αυτές τις διασκορπισμένες μονάδες πολλές φορές είναι αδύνατη και ως εκ τούτου δεν γίνεται σε πραγματικό χρόνο. Επίσης η εγκατάσταση μόνιμου εξοπλισμού κινδυνεύει από τα ακραία καιρικά φαινόμενα τα οποία επικρατούν στις περιοχές όπου συνήθως υπάρχουν αυτές οι εγκαταστάσεις, με αποτέλεσμα για την προστασία αυτών το κόστος να αυξάνετε αρκετά.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη λογισμικού για τη λήψη, επεξεργασία και αξιολόγηση μετρήσεων σημάτων επιτάχυνσης και ακουστικής εκπομπής που παράγονται σε συστήματα κινητήρων/αντλιών κατά τη λειτουργίας τους.

Ειδικότερα, στόχος της εργασίας είναι να μελετήσει τη δυνατότητα, η αξιολόγηση της κατάστασης λειτουργίας των παραπάνω συστημάτων να γίνεται αποκλειστικά από την ανάλυση των ακουστικών σημάτων χωρίς να απαιτείται η λήψη και ανάλυση των ταλαντωτικών σημάτων του εξοπλισμού και σε ποιόν βαθμό αυτό είναι εφικτό.

Το λογισμικό που θα αναπτυχθεί ενσωματώνει τις δύο παραπάνω αναφερθείσες μεθόδους διάγνωσης, δηλαδή ακουστική και δονητική και ταυτόχρονα προσφέρει άμεση διάγνωση της κατάστασης του εξοπλισμού για τεχνικά θέματα που εμφανίζονται συχνά, όπως εκκεντρότητα και αζυγοσταθμία, αλλά και την “υγεία” επιμέρους εξαρτημάτων, όπως σώματα τριβής κύλισης, ηλεκτρικοί κινητήρες, αντλίες και οδοντωτροχί.

Η χρήση ακουστικών εκπομπών παρέχει έναν φθηνό τρόπο γρήγορης διάγνωσης της κατάστασης λειτουργίας και αξιολόγησης βασικών παραμέτρων λειτουργίας του μηχανήματος, προκειμένου να παρθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα από τον τεχνικό συντήρησης, έτσι ώστε να γίνει ο ακριβέστερος και οικονομικότερος προγραμματισμός της συντήρησης. Η χρήση αισθητήρων δόνησης προσφέρει απόλυτες μετρήσεις, οι οποίες μπορούν άμεσα να συγκριθούν μεταξύ τους με βάση το ISO 10816.

Η παρακολούθηση και η καταγραφή της κατάστασης, υγείας των περιστρεφόμενων στοιχείων μίας μηχανής είναι βασικό στοιχείο για τον προγραμματισμό της στρατηγικής συντήρησης. Μια αστοχία της μηχανής μπορεί να οδηγήσει σε αναγκαστική παύση λειτουργίας ή ακόμη και σε

ολική καταστροφή του μηχανήματος. Έτσι είναι προφανές ότι η χρήση ενός συστήματος ανάλυσης της κατάστασης του μηχανήματος μπορεί να προβλέψει μια επερχόμενη βλάβη που θα προκαλέσει ακόμη και πολλαπλές βλάβες στο μηχάνημα.

Η διαδικασία ανάλυσης δονήσεων είναι μία από της πιο παλιές και ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές ανάλυσης της κατάστασης λειτουργίας μηχανολογικού εξοπλισμού. Αυτή σκοπεύει στην αναγνώριση και ομαδοποίηση των σφαλμάτων που προκύπτουν λόγω ταλαντωτικών διεγέρσεων. Η χρήση των δονήσεων αν και αποτελεσματική απαιτεί την άμεση τοποθέτηση ενός αισθητήρα από τον τεχνικό στον εξοπλισμό, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο και το κόστος εφόσον η λειτουργία του εξοπλισμού θα πρέπει να διακοπεί προκειμένου να γίνει η τοποθέτηση του επιταχυνσιομέτρου.

Η διάγνωση με χρήση ακουστικών εκπομπών λόγω της φύσης τους, δεν απαιτεί την άμεση επαφή του τεχνικού με τον εξοπλισμό, ούτε παύση λειτουργίας για θέματα ασφαλείας. Πολλές φορές η εγκατάσταση του επιταχυνσιομέτρου απαιτεί ειδικές γνώσεις από τον τεχνικό, καθώς η λάθος τοποθέτηση του επιταχυνσιομέτρου μπορεί να οδηγήσει σε λάθος μετρήσεις. Για παράδειγμα η ασταθής στερέωση του επιταχυνσιομέτρου με μαγνητική βάση εμφανίζει συμπτώματα χαλαρής στήριξης του μηχανήματος χωρίς να υπάρχει πραγματικά πρόβλημα. Η μέθοδος διάγνωσης με χρήση ακουστικών εκπομπών μειώνει τον χρόνο παραμονής του τεχνικού στον χώρο του μηχανήματος και κατ' επέκταση μειώνει την πιθανότητα ατυχήματος. Επιπλέον η απλότητα του συστήματος καθώς και η ευκολία χρήσης απαιτεί λιγότερη εξειδίκευση από τον τεχνικό, καθώς απλά χρειάζεται να στοχεύσει το μικρόφωνο στον μηχανολογικό εξοπλισμό για τον οποίο πρέπει να γίνει η μέτρηση.

Όπως και στην διάγνωση με χρήση δονήσεων, έτσι και στη διάγνωση με χρήση ακουστικών εκπομπών, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην περίπτωση που το προς εξέταση μηχάνημα είναι κοντά με άλλο μηχάνημα ή μηχανήματα που είναι σε λειτουργία. Τότε οι μετρήσεις θα πρέπει να πραγματοποιηθούν με το γειτονικό μηχάνημα ή μηχανήματα εκτός λειτουργίας. Μία μέθοδος μείωσης των παρεμβολών θορύβου από τα γειτονικά μηχανήματα είναι η χρήση ενός μικροφώνου με μικρή γωνία κώνου ακρόασης. Αυτό σκοπεύει στην απομόνωση του σήματος που προέρχεται από το μηχάνημα από τους εξωτερικούς θορύβους, όπως ένα διπλανό μηχάνημα. Αυτή η μέθοδος απαιτεί μεγαλύτερη εξειδίκευση του τεχνικού που κάνει την μέτρηση, καθώς μπορεί πολύ εύκολα να αστοχήσει. Έτσι αυτή η μέθοδος συνιστά την τοποθέτηση του μικροφώνου πάνω σε τρίποδα με προεγκατεστημένη τροchioδεικτική μηχανή τύπου L.A.S.E.R. για την ακριβέστερη στόχευση του μικροφώνου. Αντίθετα, κατά τη μέθοδο διάγνωσης με χρήση δονήσεων, το γειτονικό μηχάνημα θα πρέπει να τεθεί εκτός λειτουργίας αν η πλήρης απομόνωση των κραδασμών δεν είναι δυνατή μέσω της βάσης στήριξής του.

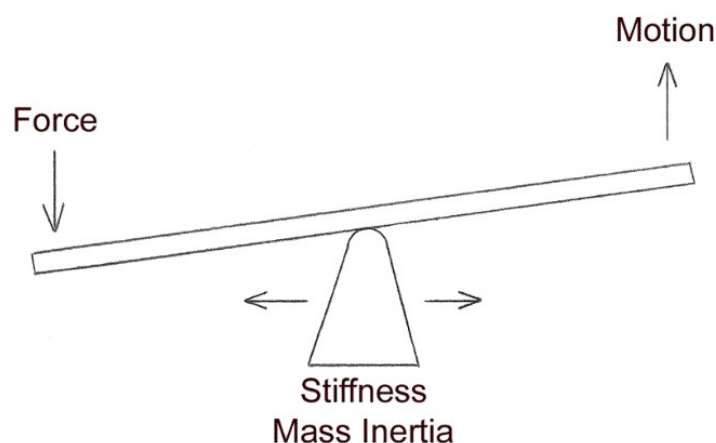
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται συνοπτικά τα πιο συνήθη θέματα βλαβών που μπορούν να συναντηθούν σε ένα σύστημα κινητήρα/αντλία. Η θεωρία που αφορά σε βλάβες γενικότερου μηχανολογικού εξοπλισμού έχει αναλυθεί σε προηγούμενη πτυχιακή εργασία του συντάκτη της παρούσας διπλωματικής εργασίας [17].

2.1. Ενέργεια Ταλαντώσεων

Μηχανές ονομάζονται τα συστήματα μετατροπής μίας μορφής ενέργειας σε μία άλλη. Όμως λόγω της λειτουργίας των μηχανών ένα ποσοστό της ενέργειας χάνεται υπό μορφή ταλαντωτικών διεγέρσεων. Οι ταλαντώσεις επομένως αποτελούν τμήμα των απωλειών ενέργειας κατά τη λειτουργία της μηχανής. Αυτές οι ταλαντωτικές διεγέρσεις δημιουργούν δονήσεις, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν. Βέβαια, υπάρχουν και μηχανές που λόγω της αρχής λειτουργίας τους παράγουν ταλαντώσεις. Στην περίπτωση αυτή εξετάζονται οι ταλαντωτικές διεγέρσεις που πιθανώς θα προκύψουν από την κακή λειτουργία της μηχανής ως ανεπιθύμητες. Η ενέργεια μίας ταλάντωσης έχει άμεση σχέση με το πλάτος αυτής. Το πλάτος της ταλάντωσης έχει άμεση σχέση με τις παρακάτω παραμέτρους του συστήματος:

- τη μάζα η οποία τίθεται σε ταλάντωση
- τη στιβαρότητα του συστήματος και
- τη συχνότητα διέγερσης



Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ των παραπάνω παραμέτρων πλην της συχνότητας διέγερσης. Μία δόνηση είναι ο συνδυασμός δυνάμεων και κινήσεων σε διάφορους βαθμούς. Μία ταλαντωτική δύναμη είναι η αιτία μίας κίνησης, η οποία και μετριέται. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα, $F=m*a$, δίνει ένα χρήσιμο ορισμό της δύναμης υπό την έννοια της σύνδεσης της δύναμης με την κίνηση. Αντίστοιχα και ο νόμος του Hook, $F=k*x$, συνδέει την δύναμη με το αποτέλεσμα που είναι η μετατόπιση ανάλογα με την στιβαρότητα του συστήματος. Τα δύο

μετρούμενα μεγέθη στις προηγούμενες σχέσεις είναι η επιτάχυνση και η μετατόπιση αντίστοιχα, θεωρώντας ότι το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία. Επομένως καθώς δεν μπορεί να υπάρξει μεταβολή στον ρυθμό είτε της επιτάχυνσης είτε της μετατόπισης, τότε οι δύο σχέσεις εφαρμόζονται στην περίπτωση όπου η συχνότητα ταλάντωσης είναι μηδέν.

Στο παραπάνω σχήμα η στιβαρότητα του συστήματος παρουσιάζεται ότι είναι συγκεντρωμένη στο σημείο περιστροφής της τραμπάλας. Η μεταβολή του σημείου περιστροφής προς τα δεξιά συνεπάγεται και σε μείωση της κίνησης. Αντίστοιχο αποτέλεσμα προκαλεί και η αύξηση της μάζας, περισσότερη μάζα επίσης σημαίνει μικρότερη κίνηση. Η στιβαρότητα της κατασκευή συνήθως εσφαλμένα θεωρείται σταθερή σε όλες τις συχνότητες ταλάντωσης. Η μεταβολή της στιβαρότητας σε σχέση με την συχνότητα ταλάντωσης ονομάζεται δυναμική στιβαρότητα και υπολογίζεται ως το λόγο της δύναμης που προκαλεί την κίνηση προς την μετατόπιση.

$$Dk(\text{Hz}) = F/x$$

Γενικά η ενέργεια ορίζεται ως το γινόμενο της δύναμης που ασκείται σε ένα σώμα επί τη μετατόπιση του (Ενέργεια = Δύναμη * Μετατόπιση).

Αν η κίνηση μετριέται σε μονάδες μετατόπισης, τότε η ενέργεια είναι το παραγόμενο έργο. Αν η κίνηση μετριέται σε μονάδες ταχύτητας τότε η ενέργεια ορίζεται ως η παραγόμενη ισχύς. Η μέτρηση της ενέργειας είναι η μόνη πραγματική παράμετρος του συστήματος η οποία μας δίνει την πραγματική εικόνα του προβλήματος. Η χρήση των παραπάνω σχέσεων υπολογίζουν μέρος της πραγματικής ενέργειας καθώς είναι ιδανικές εξισώσεις για στατικά συστήματα. Για δυναμικά συστήματα, η ενέργεια ταλάντωσης μπορεί πρακτικά να υπολογιστεί μόνο μέσου του θεωρήματος διατήρησης της ενέργειας.

Σε ένα δονούμενο σύστημα, συνεχόμενα γίνεται μετατροπή δυναμικής ενέργειας σε κινητική ενέργεια, με την συνολική ενέργεια να παραμένει σταθερή. Στο παράδειγμα ενός πακτωμένου ελατηρίου και μίας αδρανειακής μάζας στο ελεύθερο άκρο του ελατηρίου η μέγιστη δυναμική ενέργεια εμφανίζεται στις θέσεις μέγιστης μετατόπισης. Αντίστοιχα η μέγιστη κινητική ενέργεια εμφανίζεται όταν η αδρανειακή μάζα διέρχεται από την θέση ηρεμίας του συστήματος. Με βάση τα προηγούμενα πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$PE_{MAX} = KE_{MAX} \quad PE_{MAX} = \frac{k \cdot x^2}{2} \quad KE_{MAX} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Όπου:

PE: Δυναμική ενέργεια

KE: Κινητική ενέργεια

k: Η στιβαρότητα του συστήματος

x: Η απόλυτη μετατόπιση

m: Η ισοδύναμη αδρανειακή μάζα

v: Η ταχύτητα της μάζας m

Με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας Η συνολική εσωτερική ενέργεια του συστήματος για κάθε χρονική στιγμή είναι:

$$U = PE + KE$$

Στο παραπάνω παράδειγμα η κινητική και δυναμική ενέργεια είναι σε συνάρτηση με την θέση του συστήματος. Έτσι όταν παρατηρείται μέγιστη κίνηση, η κινητική ενέργεια είναι μέγιστη και η δυναμική ενέργεια είναι μηδέν. Αντίστοιχα στις θέσεις μέγιστης μετατόπισης η δυναμική ενέργεια είναι μέγιστη ενώ η κινητική είναι μηδέν καθώς η μάζα δεν κινείται. Στην περίπτωση της μέγιστης δυναμικής ενέργειας η συνολική ενέργεια του συστήματος είναι:

$$U = \frac{k \cdot x^2}{2} + 0 \quad (1)$$

Στη σχέση (1), από τον νόμο του Hook αντικαθίσταται όπου k με $k = \frac{F}{x}$ και από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα αντικαθίσταται όπου F με $F = m \cdot a$ και από την μετατροπή της μετατόπισης σε επιτάχυνση $x = c \cdot \frac{a}{f^2}$, όπου c η σταθερά της μετατροπής.

Με βάση τις παραπάνω αντικαταστάσεις στον τύπο (A), η συνολική ενέργεια της ταλάντωσης υπολογίζεται με:

$$U_{total} = c \cdot \frac{m \cdot a^2}{2 \cdot f^2} \quad (\text{Vibration Energy}) \quad [Kg \cdot \frac{m^2}{s^2}] \quad \text{ή} \quad [Nt \cdot m] \quad \text{ή} \quad \text{Joules} \quad (2)$$

Στην παραπάνω σχέση (2):

c: ίσον με τη μονάδα για μονάδες S.I

m: Συνολικά δονούμενη μάζα [Kg]

a: Μέγιστη επιτάχυνση [m/s^2]

f: Στιγμιαία συχνότητα δόνησης [Hz ή s^{-1}]

Από την σχέση (2) διαπιστώνεται ότι η ενέργεια δόνησης είναι ανάλογη της μάζας, ανάλογη με το τετράγωνο της επιτάχυνσης και αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της συχνότητας. Για κάθε τιμή της συχνότητας μπορεί να γίνει και ο αντίστοιχος υπολογισμός της επιτάχυνσης χρησιμοποιώντας τον γρήγορο μετασχηματισμό Fourier ή FFT. Η δονούμενη μάζα θα πρέπει να υπολογιστεί προσεγγιστικά αν δεν είναι δυνατή η μέτρηση της. Το σύστημα θεωρείται πλήρως στιβαρό αν δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός της στιβαρότητας του.

Για την ποσοτικοποίηση της έντασης της δόνησης και τον υπολογισμό της συνολικής της ενέργειας η σχέση (2) θα πρέπει να ολοκληρωθεί για κάθε τιμή των συχνοτήτων. Δηλαδή από την ελάχιστη συχνότητα, (0 Hz), έως τη μέγιστη συχνότητα που μας επιτρέπουν τα συστήματα δειγματοληψίας. Έτσι ο τύπος (2) μετασχηματίζεται σε:

$$SumVibrationEnergy (VE) = \frac{c \cdot m}{2} \cdot \int_0^{F_{max}} \frac{a^2}{f^2} df \quad (3)$$

Στις εφαρμογές διάγνωσης της κατάστασης, η συνολική ενέργεια δονήσεων είναι μέρος των συνολικών απωλειών ενέργειας του συστήματος. Με βάση το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα όλες οι απώλειες του συστήματος κάποια στιγμή θα μετασχηματιστούν σε θερμική ενέργεια.

Για ένα ταλαντωτικό σύστημα, μάζα θεωρείται οτιδήποτε αναρτάται στο ελατήριο. Για μία μηχανή πακτωμένη σε μία βάση στο έδαφος, ως μάζα ταλάντωσης μπορεί να θεωρηθεί η συνδεδεμένη μάζα στον χαλαρότερο σύνδεσμο, δηλαδή, οτιδήποτε πάνω από το έδαφος. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα χαλαρής πάκτωσης, σε σύγκριση με μία στιβαρή πάκτωση, ο χαλαρότερος σύνδεσμος είναι η ίδια η πάκτωση της βάσης με το έδαφος, αυξάνοντας έτσι την συνολική δονούμενη μάζα άρα και τις συνολικές απώλειες ενέργειας του συστήματος σε σχέση με μία στιβαρή πάκτωση όπου ως χαλαρότερος σύνδεσμος μπορεί να είναι ένας τριβέας κύλισης ή ένα νεύρο όπου η δονούμενη μάζα θα είναι είτε ένας άξονας είτε τμήμα του μηχανήματος και όχι όλο το μηχάνημα με την βάση του.

Αν οι δονήσεις δεν είναι γραμμικές ή αλληλεπιδρούν μεταξύ τους δύο σώματα, τότε εμφανίζονται πέρα από τις διακριτές αρμονικές συχνότητες και υψίσυχνοι παλμοί με ευρύ πεδίο ενέργειας.

2.2. Ενέργεια Ακουστικών Εκπομπών

Ο ήχος είναι ένα μηχανικό κύμα και ως τέτοιο συνίσταται φυσικά σε ταλαντευόμενη ελαστική συμπίεση και σε ταλαντωτική μετατόπιση ενός μέσου, συνήθως ρευστό μέσο, όπως είναι ο αέρας και το νερό αλλά και σε στερεά. Για το λόγο αυτό το μέσο μετάδοσης δρα ως μία μορφή αποθήκευσης δυναμικής και κινητικής ενέργειας. Συνεπώς, η ηχητική ενέργεια σε έναν όγκο ενδιαφέροντος ορίζεται ως το άθροισμα της επιμέρους δυναμικής και κινητικής ενέργειας που ενσωματώνονται σε αυτόν τον όγκο. Όπως και προηγουμένως, για τον υπολογισμό της συνολικής ακουστικής ενέργειας εφαρμόζεται η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$AE = PE + KE \quad (\text{Συνολική Ακουστική Ενέργεια})$$

$$AE = \int_V \frac{p^2}{2 \cdot \rho_0 \cdot c^2} dV + \int_V \frac{\rho \cdot u^2}{2} dV$$

Όπου:

V: ο όγκος ενδιαφέροντος

p: πίεση ήχου

u: η ταχύτητα του στοιχειώδους σωματιδίου.

ρ_0 : η πυκνότητα του μέσου χωρίς την επιρροή του ήχου

ρ : η τοπική πυκνότητα του μέσου

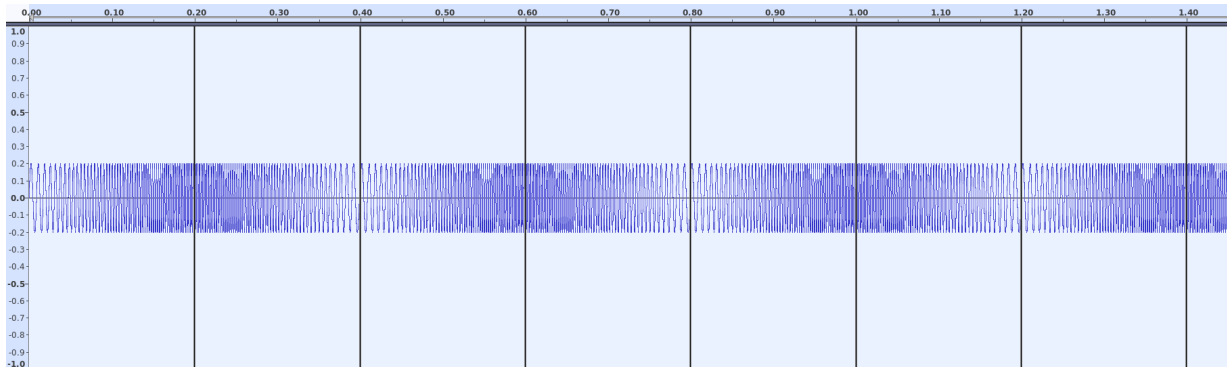
c: η ταχύτητα του ήχου στο μέσο

Όπως και οι μετρήσεις δονήσεων, έτσι και οι ακουστικές εκπομπές μεταφέρουν αρκετές πληροφορίες για την αξιολόγηση των αιτιών που προκαλούν τις δονήσεις.

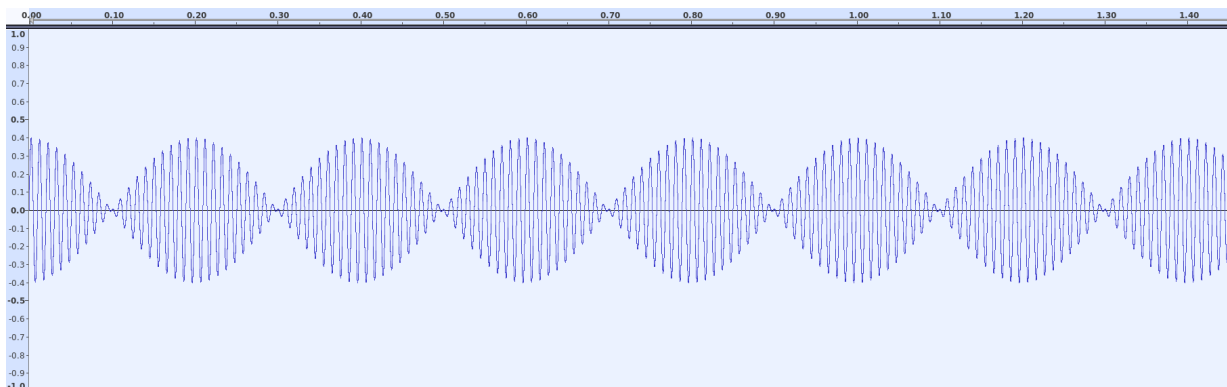
2.3. Θεωρία Παλμών

Ως παλμός θεωρείται οποιαδήποτε μη γραμμική μεταβολή της απόλυτης ενέργειας ενός σήματος. Μία μεταβολή μπορεί να προκαλείται σε τυχαία ή σε τακτικά χρονικά διαστήματα. Η τακτικότητα των παλμών ονομάζεται περίοδος και μετριέται σε παλμούς ανά δευτερόλεπτο ή Herz. Στο διάγραμμα χρόνου ενέργειας ένας παλμός μπορεί να έχει πολλές μορφές. Μερικές από τις βασικότερες είναι οι εξής:

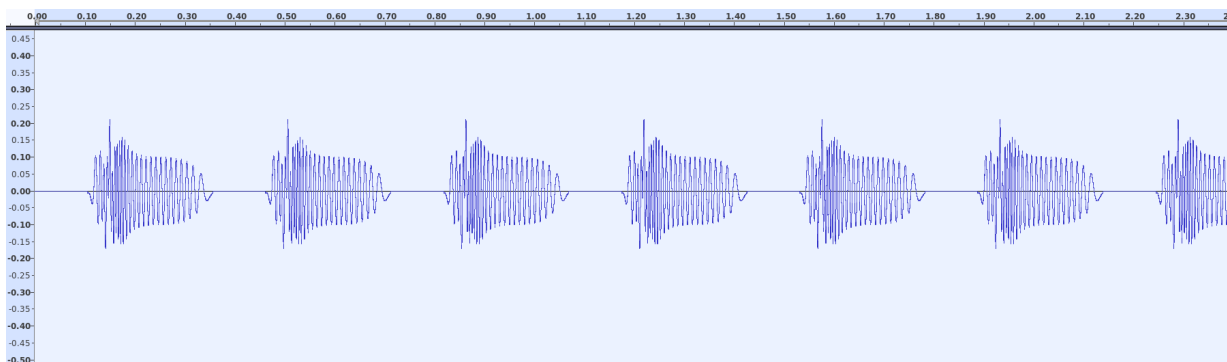
- Περιοδική μεταβολή στην συχνότητα.



- Περιοδική μεταβολή στο πλάτος του σήματος.



- Περιοδική διέγερση μίας ή και πολλών ιδιοσυχνοτήτων. Αυτή η μορφή παλμών θεωρείται ως συνδυαστική των δύο προηγούμενων. Καθώς συνδυάζει και μεταβολή του πλάτους αλλά και την μεταβολή της συχνότητας.



Η περιοδική μεταβολή της συχνότητας δημιουργεί μία μεταβολή ίση με την διαφορά της ενέργειας στην χρονική στιγμή όπου παρατηρείται η χαμηλότερη συχνότητα και της ενέργειας την χρονική στιγμή που παρατηρείται η υψηλότερη ενέργεια. Έτσι με βάση τους παρακάτω τύπους μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της απόλυτης μεταβολής της ενέργειας.

$$\text{Για τις δονήσεις: } dVE = \frac{c \cdot m}{2} \cdot \left(\int_0^{F_{max}} \frac{a_{max}^2}{f_{MAX}^2} df - \int_0^{F_{max}} \frac{a_{min}^2}{f_{MIN}^2} df \right)$$

$$\text{Για τον ήχο: } dAE = \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \left(\int_V \rho_{max} \cdot u_{MAX}^2 dV - \int_V \rho_{min} \cdot u_{MIN}^2 dV \right) + (2 \cdot \rho_0 \cdot c^2) \cdot \left(\int_V p_{MAX}^2 dV - \int_V p_{MIN}^2 dV \right)$$

2.3.1. Αιτίες που προκαλούν παλμούς

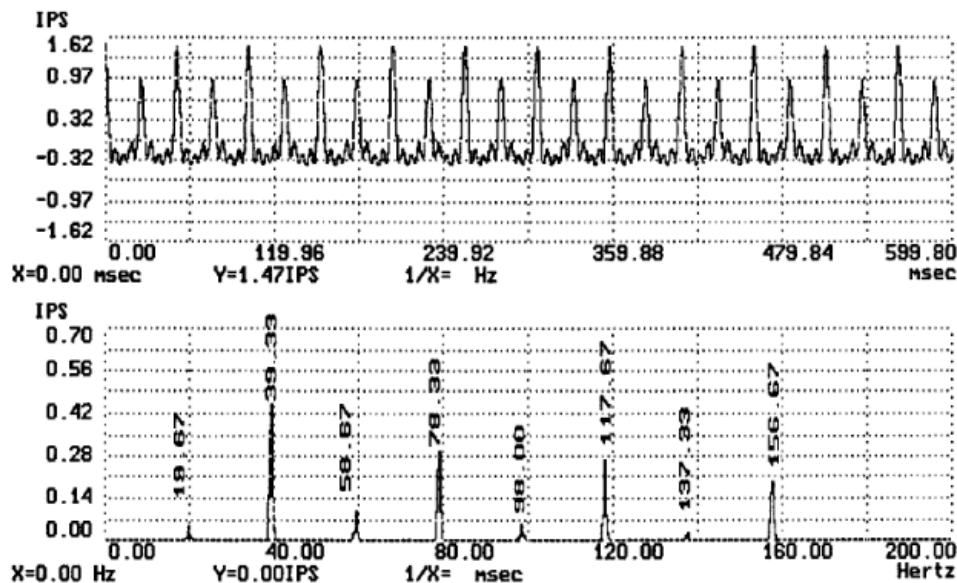
Για τη διάγνωση της κατάστασης λειτουργίας, μας ενδιαφέρουν οι παλμοί που δημιουργούνται όταν δύο ή περισσότερα ταλαντωτικά σώματα αλληλεπιδρούν ή προσκρούουν μεταξύ τους λόγω της ύπαρξης εσωτερικών ασταθειών που οφείλονται στη δυναμική ταλαντωτική κατάσταση του συστήματος. Εσωτερικές αστάθειες, λόγω δυναμικών καταστάσεων μπορούν να δημιουργηθούν από ηλεκτρολογικά προβλήματα ηλεκτρικών μηχανών, ή άλλα μηχανολογικά προβλήματα όπως οι παλμοί που δημιουργούνται λόγω της διέλευσης πτερυγίων στο εσωτερικό μίας αντλίας ή και προβλήματα εμπλοκής οδοντοτροχών. Ένας παλμός μετρείται από τέσσερα μεγέθη τα οποία τον χαρακτηρίζουν.

Αυτά είναι:

- Η συχνότητα επανάληψης
- Το πλάτος
- Την βασική συχνότητα ή ιδιοσυχνότητα και
- η διάρκεια

Η συχνότητα επανάληψης των παλμών είναι πόσο συχνά προκύπτει ένας παλμός. Όταν υπάρχουν παραπάνω από μία πηγή παλμών τότε στο διάγραμμα χρόνου οι παλμοί φαίνεται να προκύπτουν τυχαία στο χρόνο. Αντίστοιχα, στο διάγραμμα πεδίου συχνοτήτων, αυτοί οι τυχαίοι παλμοί εμφανίζονται, ως μία αρμονική σειρά με την κύρια συχνότητα διέγερσης και τις πολλαπλάσιες με διαφορά τη συχνότητα περιστροφής.

Στην περίπτωση μίας πηγής παλμών αν προκύπτουν δύο παλμοί ανά περιστροφή, τότε κάθε δεύτερη κορυφή στο διάγραμμα συχνοτήτων θα έχει μεγαλύτερο πλάτος. Αντίστοιχα αν προκύπτουν τέσσερις παλμοί ανά περιστροφή, τότε κάθε τέταρτη κορυφή στο διάγραμμα θα έχει μεγαλύτερο πλάτος. Επίσης οι παλμοί μπορεί να δημιουργούνται και σε άλλες συχνότητες, όπως τις βασικές συχνότητες σφαλμάτων ενός τριβέα κύλισης, ή την συχνότητα εμπλοκής δύο



οδοντοτροχών. Επιπλέον, οι παλμοί μπορεί να δημιουργούνται και τυχαία. Όταν οι παλμοί δημιουργούνται τυχαία, το διάγραμμα συχνοτήτων εμφανίζεται να περιέχει θόρυβο. Αυτό σημαίνει ότι ένα εξάρτημα αλληλεπιδρά με τυχαίο τρόπο ένα άλλο και συνήθως το αποτέλεσμα είναι η πλήρης καταστροφή του.

2.3.2. Επιφανειακή τριβή

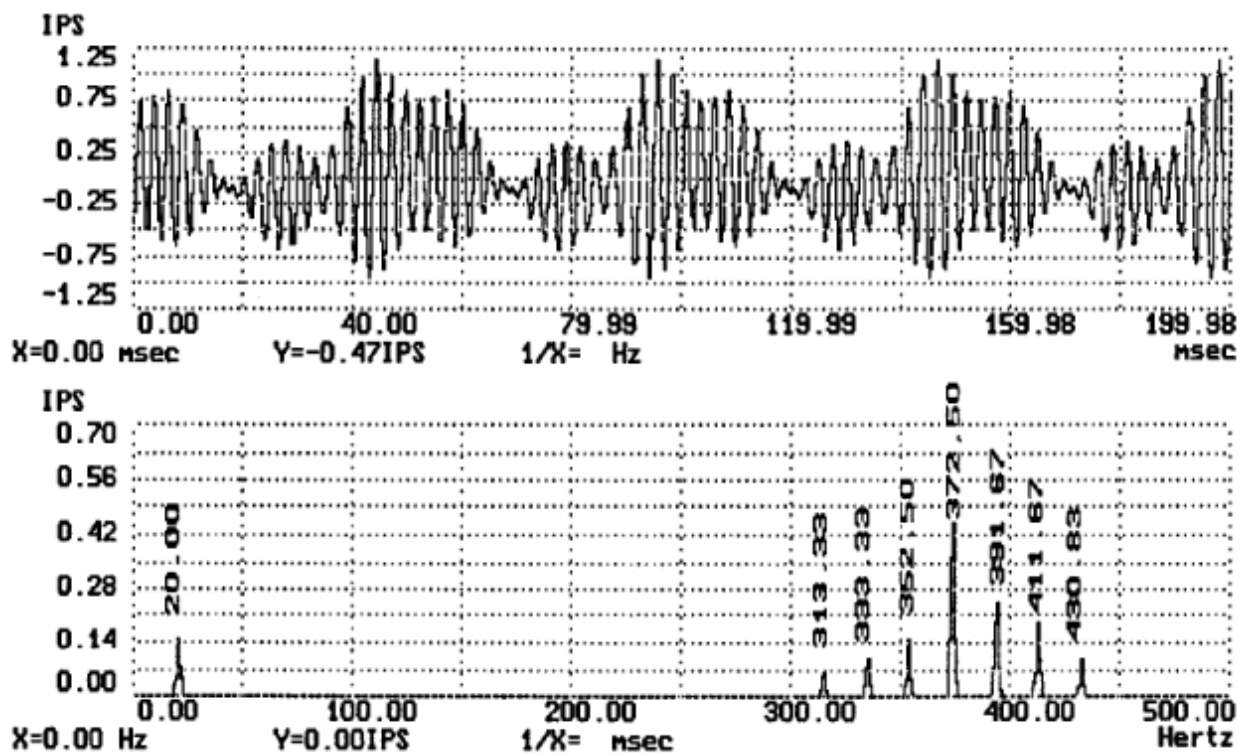
Η επαφή με ταυτόχρονη σχετική κίνηση δύο επιφανειών για μεγάλα ή μικρά χρονικά διαστήματα ορίζεται ως επιφανειακή τριβή. Η επιφανειακή τριβής προκαλείται εξαιτίας της εμπλοκής των τραχυτήτων των δύο επιφανειών. Το παραγόμενο σήμα αυτής της διεργασίας χαρακτηρίζεται από την υπέρθεση μεγάλου εύρους υψηλών συχνοτήτων με τυχαίο τρόπο ανάλογα με το βαθμό εμπλοκής των κορυφών των τραχυτήτων.

Ο ρυθμός φθοράς στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να είναι πολύ υψηλός και για το λόγο αυτό το μηχάνημα και ειδικότερα κάποιο εξάρτημά του που καταπονείται με τριβή να καταστρέφεται σε σύντομο χρονικό διάστημα ή και ξαφνικά.

Μία από τις γνωστότερες περιπτώσεις επιφανειακής τριβής είναι στην περίπτωση όπου ένα περιστρεφόμενο εξάρτημα έρχεται σε επαφή με κάποιο άλλο εξάρτημα, όπως το κέλυφος της μηχανής, μία ή και πολλές φορές ανά περιστροφή. Αυτού του είδους η εμπλοκή θεωρείται μικρής χρονικής διάρκειας και το σήμα που παράγεται έχει τη μορφή παλμού.

Όπως έχει προαναφερθεί τέτοιες καταστάσεις μπορούν επίσης να προκαλούνται πολλές φορές ανά περιστροφή. Για παράδειγμα, αν τα πτερύγια της περωτής ψύξης ενός ηλεκτροκινητήρα προσκρούουν σε κάποιο αντικείμενο τότε η συχνότητα των χτυπημάτων είναι το γινόμενο του αριθμού των πτερυγίων επί την συχνότητα περιστροφής. Η ανάλυση ενός τέτοιου σήματος στο πεδίο συχνοτήτων μπορεί να εμφανίσει πρόσθετες πλευρικές συχνότητες (sidebands) της συχνότητας των χτυπημάτων οι οποίες οφείλονται στις ιδιοσυχνότητες των εμπλεκόμενων μαζών. Έτσι η βασική συχνότητα θα είναι ο αριθμός των χτυπημάτων επί τη συχνότητα περιστροφής ή η ιδιοσυχνότητες ενός ή περισσότερων εξαρτημάτων.

Παράδειγμα στην παρακάτω εικόνα.



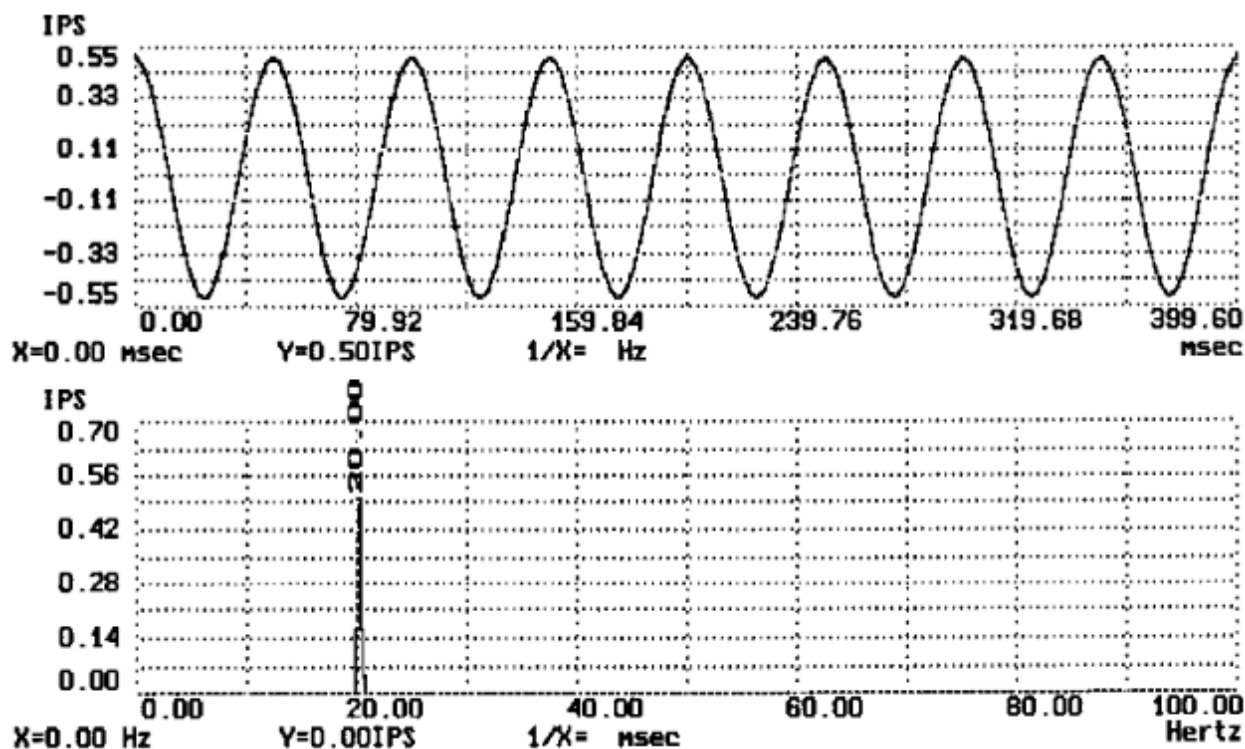
2.4. Συνήθεις Βλάβες Η/Μ εξοπλισμού σε αντλιοστάσια

Οι συνήθεις βλάβες είναι μία κατηγορία βλαβών που εμφανίζονται σε πολλές μηχανές. Είναι δηλαδή κοινές σε μηχανήματα που αποτελούνται από υποσυστήματα. Μέσα σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται βλάβες όπως: Προβλήματα αζυγοσταθμίας, προβλήματα στραβωμένου ή λυγισμένου άξονα, χαλαρότητα μεταξύ του μηχανήματος και της βάσης πάκτωσης, εσωτερικής χαλαρότητας του μηχανήματος, συντονισμοί, τριβή και άλλα προβλήματα που προκαλούν παλμούς όπως τα προβλήματα σε έναν τριβέα κύλισης.

Αζυγοσταθμία

Η αζυγοσταθμία είναι ένα γραμμικό πρόβλημα. Αυτό σημαίνει ότι ένας ένα αζυγοστάθμιτο περιστροφικό σώμα, είναι αζυγοστάθμιτο καθ' όλη την πλήρη περιστροφή του 360 μοιρών γύρω από τον άξονα περιστροφής. Σε κάθε περιστροφή θα εμφανίζεται ένα ημιτονοειδές ταλαντωτικό σήμα με σταθερό πλάτος στο διάγραμμα χρόνου και συχνότητας. Το ημιτονοειδές αυτό σήμα έχει συχνότητα την συχνότητα περιστροφής του σώματος.

Στο παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνεται μία αζυγοσταθμία στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων.

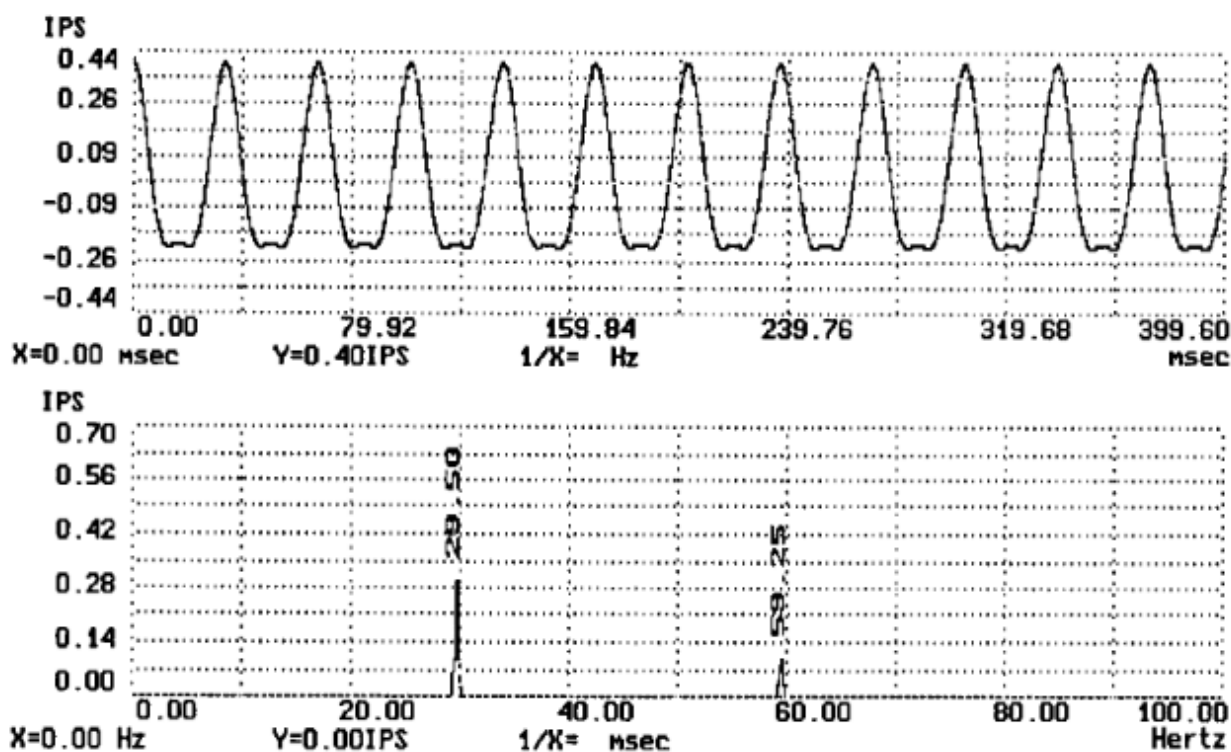


Λυγισμένος Άξονας

Το κάμψη ενός άξονα μπορεί να θεωρηθεί και ως μία μορφή αζυγοσταθμίας, όπου η ζυγοστάθμιση του μειώνει τα επίπεδα των δονήσεων. Όμως η ζυγοστάθμιση ενός λυγισμένου άξονα δεν διορθώνει το πρόβλημα, δηλαδή, δεν ευθυγραμμίζεται ο άξονας. Αλλά ο λυγισμένος άξονας εξακολουθεί να προκαλεί ταλαντωτικά προβλήματα. Επίσης προκαλεί προβλήματα συναρμογής, ανάλογα με την θέση του λυγίσματος.

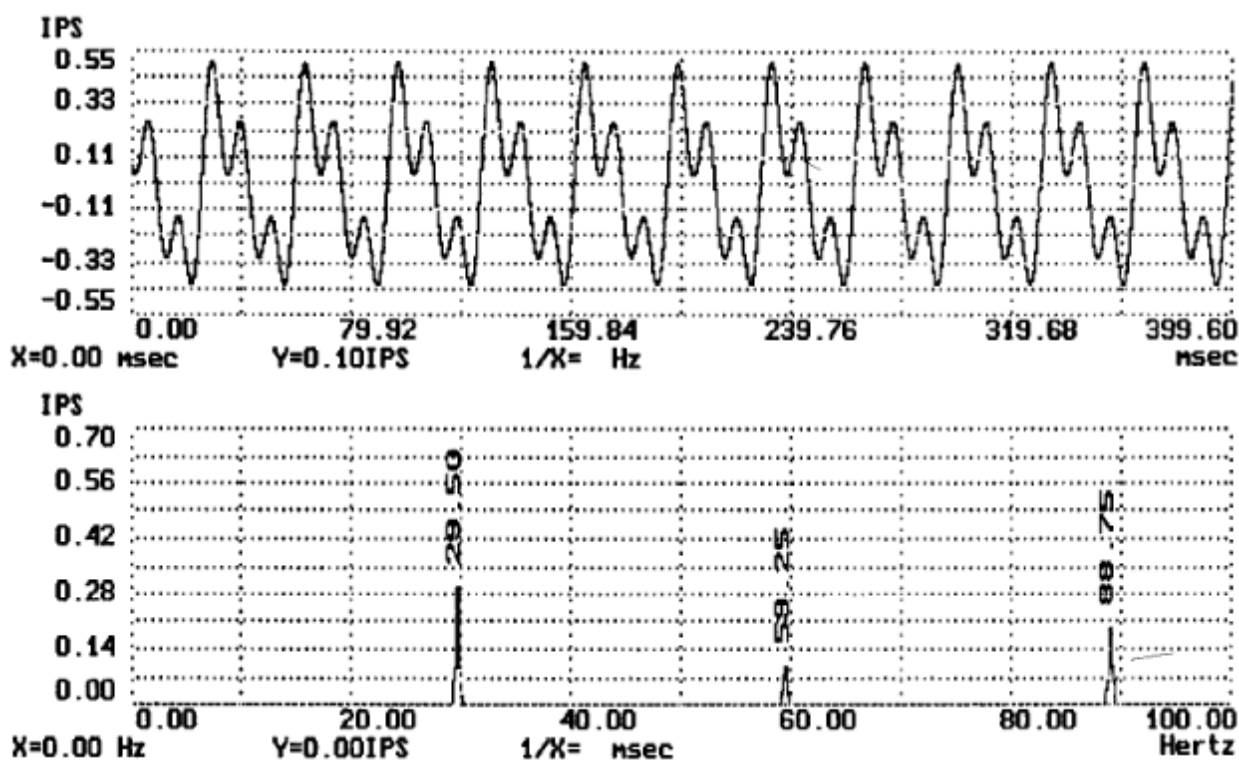
Στο διάγραμμα κατανομής συχνοτήτων, ένας λυγισμένος άξονας, εμφανίζεται ως δεύτερη αρμονική της συχνότητας περιστροφής του άξονα. Αυτό διότι το πρόβλημα του λυγισμένου άξονα ανάλογα με την σοβαρότητα μετατρέπεται σε πρόβλημα ευθυγράμμισης.

Στο παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνεται η χαρακτηριστική δεύτερη αρμονική του προβλήματος λυγισμένου άξονα στο διάγραμμα του πεδίου χρόνου και συχνοτήτων.



Εκκενρότητα

Η έλλειψη ομοαξονικότητας ή εκκενρότητα μπορεί να εντοπισθεί σε πολλαπλά σημεία μίας περιστροφικής μηχανής. Για παράδειγμα, εκκενρότητα μπορεί να προκύψει καθ' όλο το μήκος του άξονα που βρίσκεται μεταξύ δύο τριβέων. Επίσης εκκενρότητα μπορεί να προκύψει ανάμεσα σε ζεύγος οδοντροχών. Όμως, η πιο συνήθης περίπτωση εκκενρότητας συναντιέται μεταξύ δύο μηχανών που συνδέονται με κάποιο σύνδεσμο. Όταν προκύπτει εκκενρότητα, κατά βάση, διεγείρονται η πρώτη, δεύτερη και η τρίτη αρμονική της συχνότητας περιστροφής. Αντίστοιχα, αν το πρόβλημα αναφέρεται σε ζεύγος οδοντοτροχών τότε διεγείρονται οι αντίστοιχες τρεις πρώτες αρμονικές της συχνότητας συμπλοκής.



Χαλαρότητα

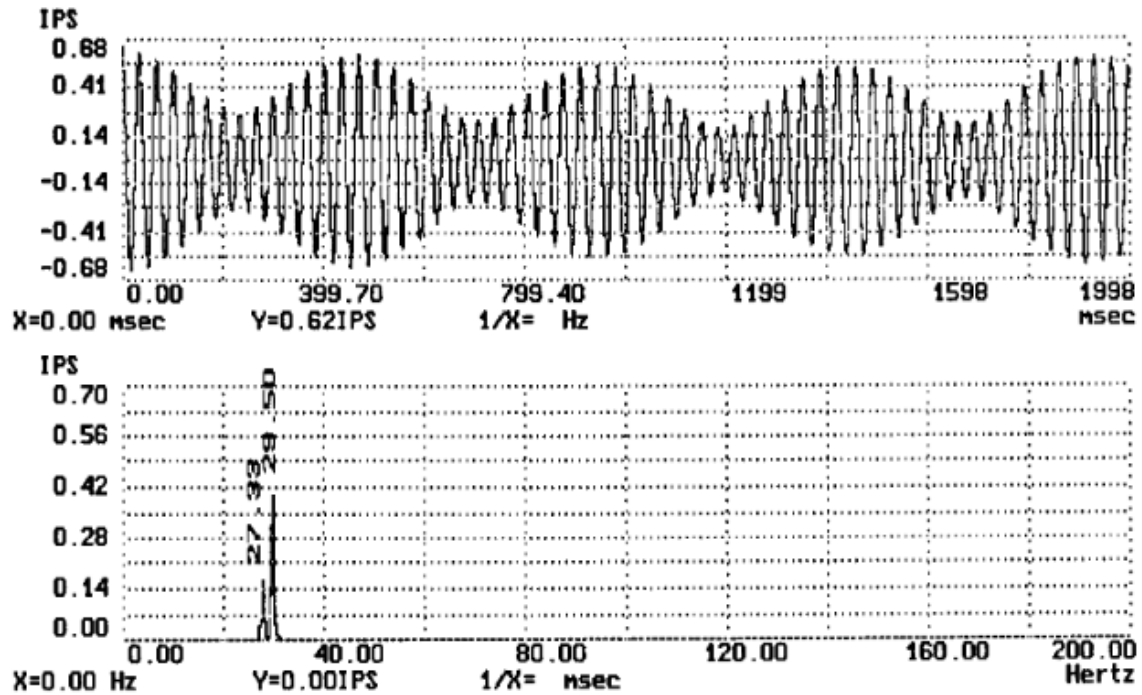
Η μηχανική χαλαρότητα μπορεί και εμφανίζεται με πολλές μορφές. Οι διάφορες αυτές μορφές δημιουργούνται ανάλογα με την προέλευση της χαλαρότητας. Για παράδειγμα λόγω αζυγοσταθμίας, εκκεντρότητας ή προβληματικού τριβέα.

Χαλαρότητα μεταξύ του μηχανήματος και της βάσης πάκτωση

Όταν υπάρχει χαλαρότητα μεταξύ του μηχανήματος και της βάσης πάκτωσης δημιουργούνται υψηλά πλάτη δόνησης σε συχνότητα της πρώτης και της δεύτερης αρμονικής. Ο καλύτερος τρόπος απόδειξης ότι η παρατηρούμενη δόνηση προέρχεται από χαλαρότητα μεταξύ τους μηχανήματος και της βάσης πάκτωσης του, είναι η παρατήρηση του πλάτους της δόνησης ενώ ταυτόχρονα γίνεται σύσφιξη των κοχλιών πάκτωσης του μηχανήματος. Το πλάτος της δόνησης θα πρέπει να αυξάνεται ή να μειώνεται σημαντικά όταν προεντείνονται οι κοχλίες σύσφιξης. Πολλές φορές όταν υπάρχει χαλαρότητα μεταξύ του μηχανήματος και της βάσης πάκτωσης, στο διάγραμμα συχνότητων εμφανίζονται χαρακτηριστικά αζυγοσταθμίας, χαλαρότητα, ακόμη και έλλειψη ευθυγράμμισης, ανάλογα με το πώς τελικά πατάει το μηχάνημα στην βάση του. Γι αυτό καλό είναι να βγει το μηχάνημα και να επανατοποθετηθεί.

Χαλαρός τριβέας ολίσθησης στον άξονα

Όταν ένας τριβέας ολίσθησης έχει αρκετά χαλαρή συναρμογή, η χαλαρότητα δημιουργεί ταλαντωτικό σήμα διέγερσης που περιλαμβάνει επιπλέον συχνότητες διέγερσης πέρα από την κύρια συχνότητα περιστροφής. Δηλαδή, εμφανίζεται και μία δεύτερη συχνότητα αρκετά κοντά στη συχνότητα περιστροφής του άξονα, όπου στην ουσία είναι η διαφορά της συχνότητας περιστροφής του τριβέα πάνω στον άξονα σε σχέση με την συχνότητα περιστροφής του άξονα, όπως στο παρακάτω διάγραμμα.



Χαλαρός τριβέας ολίσθησης στη φωλιά

Αντίστοιχα όταν ο τριβέας γυρνάει μέσα στην φωλιά του, στο διάγραμμα συχνοτήτων εμφανίζονται οι πρώτες τρεις αρμονικές και πιθανώς η τέταρτη. Οι δεύτερη, τρίτη και τέταρτη κανονικά δεν θα έπρεπε να εμφανίζονται αν το μηχάνημα είχε ζυγοσταθμιστεί και ευθυγραμμιστεί σύμφωνα με τα πρότυπα.

2.4.1. Προβλήματα Ηλεκτρικών κινητήρων

Οι ηλεκτροκινητήρες αποτελούν τον πλέον διαδεδομένο τύπο μηχανής στις ημέρες μας. Οι εφαρμογές τους εκτείνονται από βιομηχανικές εγκαταστάσεις κάθε τύπου και μεγέθους μέχρι κινούμενα οχήματα ξηράς, αέρα και θάλασσας. Τα μεγέθη τους καλύπτουν όλα τα εύρη των ισχύων πρακτικού ενδιαφέροντος, ενώ ως προς την αρχή λειτουργίας τους διατίθενται διάφοροι τύποι των οποίων τα χαρακτηριστικά βελτιστοποιούνται για κάποιο εύρος λειτουργικών παραμέτρων, παρέχοντας τη δυνατότητα βέλτιστης επιλογής αναλόγως των απαιτήσεων της εφαρμογής.

Από τους πλέον διαδεδομένους είναι οι τριφασικοί σύγχρονοι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα, οι οποίοι και θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια, λόγω της ευρείας χρήσης τους σε εφαρμογές αντλιοστασίων.

Τα συνήθη για ηλεκτροκινητήρες προβλήματα μπορούν να ταξινομηθούν στα παρακάτω είδη:

1. Έκκεντρο μαγνητικό πεδίο
2. Σπασμένες ράβδοι στον δρομέα (ρότορας)
3. Βραχυκύκλωμα στην περιέλιξη του δρομέα ή του στάτη
4. Δονήσεις στην συχνότητα τροφοδοσίας, (Ευρώπη 50Hz, Αμερική 60Hz)
5. Φαινόμενο σειρήνας
6. Υπερφόρτωση

Οι επαγωγικοί σύγχρονοι κινητήρες από την κατασκευή τους ισορροπούν (συντονίζονται) κατά τη λειτουργία τους σε μία σταθερή ονομαστική συχνότητα περιστροφής, η οποία είναι συνάρτηση της συχνότητας τροφοδοσίας και του αριθμού των πόλων του κινητήρα. Για παράδειγμα, τροφοδοσία 50Hz σε κινητήρα 2 πόλων έχει ως αποτέλεσμα ονομαστική ταχύτητα περιστροφής 3000rpm (=50 Hz), ενώ ίδια τροφοδοσία σε εξαπολικό κινητήρα έχει ως αποτέλεσμα ταχύτητα περιστροφής 750 rpm (=50/3 Hz). Ωστόσο, αυτοί οι κινητήρες σπάνια δουλεύουν στην ονομαστική συχνότητα συγχρονισμού. Γενικά ισορροπούν σε χαμηλότερη συχνότητα εξαιτίας του φαινομένου της “ολίσθησης” το οποίο παράγει μια διαφορά (υστέρηση) μεταξύ της ονομαστικής και της πραγματικής συχνότητας λειτουργίας. Η διαφορά αυτή εκφραζόμενη σε Hz ονομάζεται συχνότητα ολίσθησης. Η πραγματική συχνότητα λειτουργίας εξαρτάται από το βαθμό απόδοσης του κινητήρα και το πραγματικό φορτίο (αποδιδόμενη στον άξονα του κινητήρα μηχανική ισχύς). Έτσι ένας κινητήρας υψηλού βαθμού απόδοσης σε συνθήκες χαμηλού φορτίου, μπορεί να δουλεύει σχεδόν στην συχνότητα συγχρονισμού.

Ο υπολογισμός της θεωρητικής συχνότητας περιστροφής ενός κινητήρα με βάση την συχνότητα τροφοδοσίας και τον αριθμό των πόλων του είναι:

$$F_r = \frac{2 * F_s}{P}$$

Όπου:

F_r : Η συχνότητα περιστροφής του άξονα του κινητήρα [Hz]

F_s : Η συχνότητα τροφοδοσία του κινητήρα [Hz]

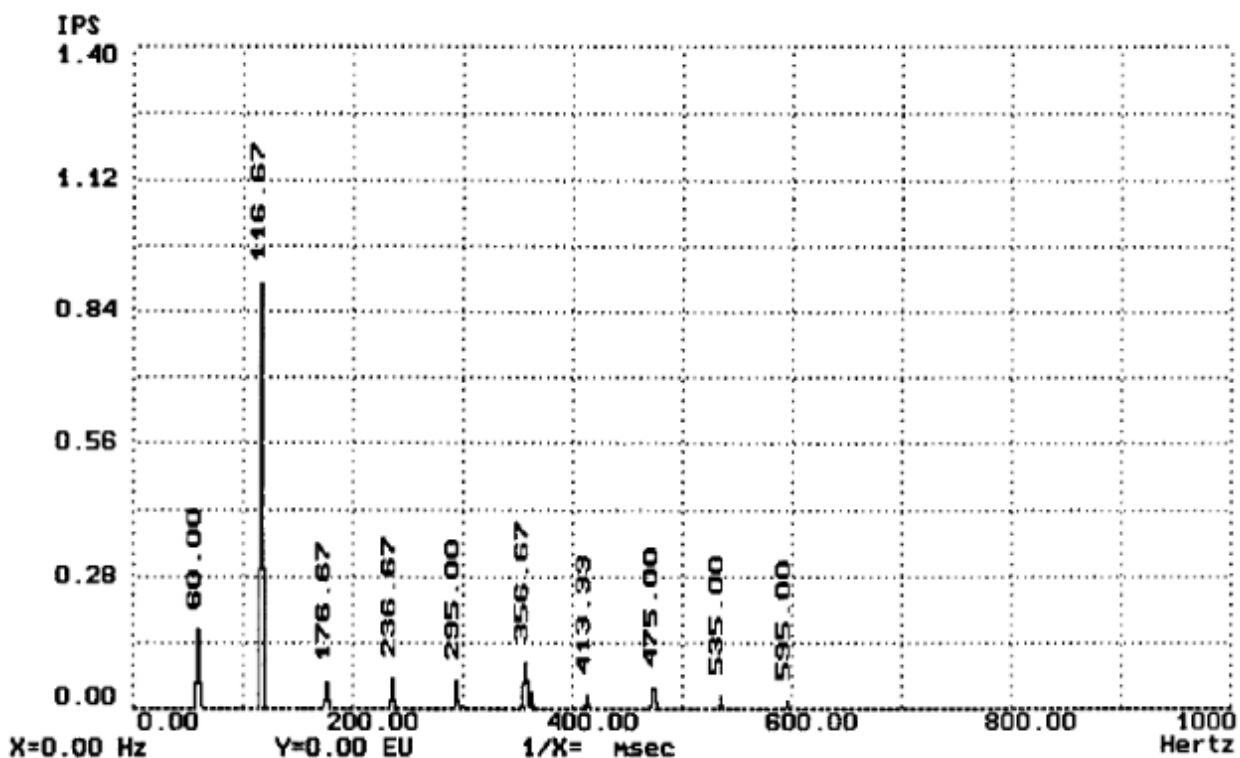
P : Αριθμός πόλων του κινητήρα

Έκκεντρο μαγνητικό πεδίο

Η εκκεντρότητα του μαγνητικού πεδίου συνήθως προκύπτει από:

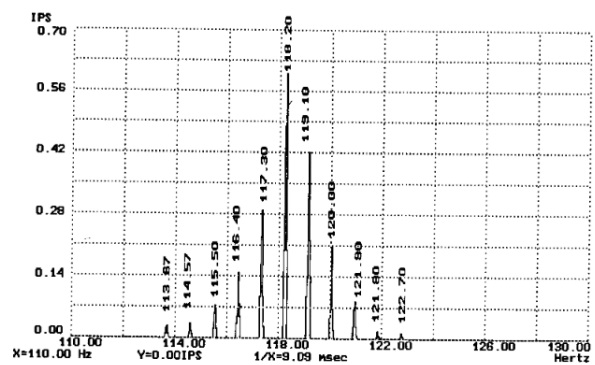
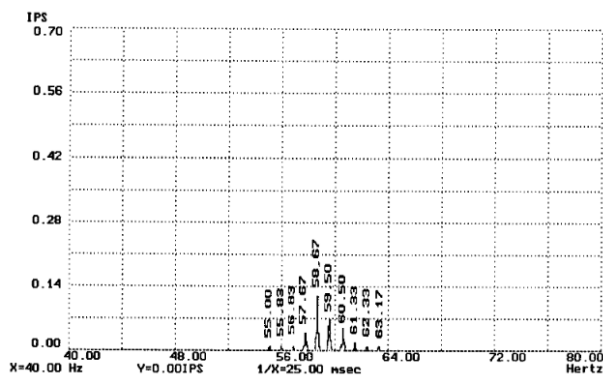
- έκκεντρη τοποθέτηση του δρομέα σε σχέση με το ηλεκτρομαγνητικό κέντρο του στάτη (είτε αξονικά, είτε ακτινικά).
- ασυμμετρία κατασκευαστική ή προκύπτουσα κατά τη λειτουργία, του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του στάτη.

Το σφάλμα αυτό προκαλεί συνήθως υψηλές δονήσεις, οι οποίες συνδυαζόμενες με μετρητικά σφάλματα μπορούν να οδηγήσουν σε λάθος διάγνωση. Από το παρακάτω διάγραμμα πιθανώς να συμπεράνει κανείς πρόβλημα χαλαρότητας, ενώ στην πραγματικότητα η μέτρηση προήλθε από έκκεντρο μαγνητικό πεδίο.



Σπασμένες ράβδοι στον δρομέα

Αυτό το πρόβλημα μοιάζει αρκετά με το προηγούμενο, όμως έχει μερικές βασικές διαφορές. Η ομοιότητα του είναι ότι η συχνότητα περιστροφής μεταβάλλεται κατά τη συχνότητα ολίσθησης επί τον αριθμό των πόλων. Μία σπασμένη ράβδος στον δρομέα, δημιουργεί ένα “νεκρό” σημείο στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Έτσι ο δρομέας του κινητήρα επιβραδύνει και επιταχύνει. Αυτή η ηλεκτρική αστάθεια έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία σημαντικών δονήσεων σε συχνότητες ίση με την συχνότητα περιστροφής, καθώς και τη διπλάσια συχνότητα περιστροφής. Αυτό το πρόβλημα δεν σχετίζεται με την συχνότητα συγχρονισμού ή την συχνότητα τροφοδοσίας, αυτές μπορεί να μην είναι ορατές στο διάγραμμα του χρόνου. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το αποτύπωμα του προβλήματος στο διάγραμμα συχνοτήτων.



Βραχυκύκλωμα στην περιέλιξη του δρομέα

Οι περιελίξεις του δρομέα συνήθως ονομάζονται και πόλοι. Όταν κάποιοι κλώνοι της περιέλιξης ή του πόλου δημιουργούν βραχυκύκλωμα, ο κινητήρας τείνει να δουλεύει σε μικρότερη συχνότητα από την ονομαστική. Έτσι με την μείωση της συχνότητας περιστροφής αυξάνεται η συχνότητα ολίσθησης. Αντίστοιχα με τα προηγούμενα προβλήματα στο διαγράμματα συχνοτήτων εμφανίζονται πλευρικές συχνότητες γύρω από την συχνότητα περιστροφής. Η απόσταση των πλευρικών συχνοτήτων από την κύρια είναι η συχνότητα ολίσθησης επί τον αριθμό των πόλων του κινητήρα.

Φαινόμενο σειρήνας

Το φαινόμενο της σειρήνας σε έναν ηλεκτροκινητήρα έχει ακριβώς την ίδια αρχή λειτουργίας όπως και μια συμβατική σειρήνα. Όταν ο αριθμός των αυλακώσεων μεταξύ του στάτη και του δρομέα σε συνδυασμό με τις στροφές και το διάκενο δημιουργούν έντονα κύματα πίεσης, εμφανίζεται το φαινόμενο της σειρήνας. Καθότι αυτό το φαινόμενο προκαλείται εξαιτίας παλμών στο χρόνο μπορεί να υπολογιστεί και η συχνότητα του. Έτσι, αν ένας κινητήρας έχει 38 ράβδους με συχνότητα περιστροφής τα 50Hz, αναμένεται η συχνότητα της σειρήνας να είναι στα 1900Hz. Το πλάτος αυτής της συχνότητας μεταβάλλεται στο χρόνο με συχνότητα την συχνότητα περιστροφής. Έτσι στο διάγραμμα συχνοτήτων γύρω από αυτήν την συχνότητα θα υπάρχουν πλευρικές συχνοτήτας με απόσταση την συχνότητα λειτουργίας.

Σύνοψη προβλημάτων επαγωγικού κινητήρα

Οι παραπάνω περιγραφές των πιθανών προβλημάτων ενός επαγωγικού κινητήρα μπορεί να συνοψισθεί στα παρακάτω σημεία:

1. Οι κινητήρες με έκκεντρο μαγνητικό πεδίο ή με σπασμένες ράβδους στον δρομέα ή με βραχυκυκλωμένο πηνίο στον στάτη, όλα αυτά εμφανίζουν πλευρικές συχνοτήτες με απόσταση την συχνότητα ολίσθησης επί των αριθμό των πόλων γύρω από την συχνότητα περιστροφής και τις αρμονικές αυτής.
2. Οι κινητήρες με έκκεντρο μαγνητικό πεδίο γενικά εμφανίζουν στο διάγραμμα συχνοτήτων μεγάλο πλάτος στην συχνότητα τροφοδοσίας.
3. Οι κινητήρες με σπασμένες τις ράβδους του δρομέα συνήθως στο διάγραμμα συχνοτήτων εμφανίζουν μεγάλο πλάτος στην συχνότητα περιστροφής ή και στην δεύτερη αρμονική αυτής.
4. Οι κινητήρες με βραχυκύκλωμα στον δρομέα έχουν μικρότερη συχνότητα περιστροφής και ταυτόχρονα εμφανίζουν μεγαλύτερη συχνότητα ολίσθησης.

2.4.2. Προβλήματα Αντλιών

Επιπροσθέτως στα σφάλματα των μηχανών εντάσσονται και τα συνήθη προβλήματα στις αντλίες. Αυτά προκαλούν είτε διακύμανσεις στο πλάτος του σήματος είτε κάποιον παλμό στην συχνότητα διέλευσης των πτερυγίων. Προβλήματα σε μεμονωμένα πτερύγια όπως χτύπημα πτερωτής με άλλο σώμα αλλά και προβλήματα ροής όπως σπηλαίωσης και ασιτία.

Επαφή πτερωτής

Όταν τα πτερύγια μίας πτερωτής έρχονται σε επαφή με το κέλυφος ή άλλο τμήμα του εξοπλισμού τότε δημιουργείται σειρά παλμών συχνότητας ίσης με το ρυθμό διέλευσης των πτερυγίων από το σημείο επαφής. Η συχνότητα διέλευσης των πτερυγίων είναι ίση με τον αριθμό των πτερυγίων επί την συχνότητα περιστροφής του στροφίου. Για παράδειγμα, μία αντλία με επτά πτερύγια όταν περιστρέφεται με γωνιακή συχνότητα 50Hz, τότε η αναμενόμενη συχνότητα διέλευσης των πτερυγίων θα είναι 350Hz.

Η συχνότητα διέλευσης των πτερυγίων ή “Blade Pass Frequency BPF”, υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$BPF = \text{Αριθμός πτερωτών} * RPS$$

Συνήθως όταν η πτερωτή έρχεται σε επαφή με ένα σταθερό σημείο της αντλίας, τότε είναι δυνατόν να εμφανιστούν δύο προβλήματα:

1. Επαφή μόνο των πτερυγίων, γεγονός που προκαλεί την εμφάνιση παλμών στην συχνότητα διέλευσης των πτερυγίων από το σημείο επαφής.
2. Πρόβλημα αζυγοσταθμίας που μπορεί να συνοδεύεται (λόγω αυξημένου πλάτους ταλάντωσης) και με επαφή πτερυγίων, οπότε θα πρέπει να εμφανίζεται αυξημένο πλάτος στην συχνότητα λειτουργίας αλλά και εμφάνιση παλμών στην συχνότητα διέλευσης των πτερυγίων.

Σε αυτήν την περίπτωση συνυπάρχουν δύο συχνότητες και δύο προβλήματα. Έτσι στο διάγραμμα συχνοτήτων θα πρέπει να διακρίνονται τόσο η συχνότητα περιστροφής (ως ίχνος της αζυγοσταθμίας) όσο και η συχνότητα διέλευσης των πτερυγίων. Η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο θα είναι μηδενική, επειδή τα στοιχεία της μηχανής παραμένουν σταθερά (στατική αζυγοσταθμία).

Χαλαρή πτερωτή στον άξονα.

Όταν η πτερωτή είναι χαλαρή στον άξονα της, το πλάτος της συχνότητας διέλευσης των πτερυγίων μεταβάλλεται με ρυθμό την συχνότητα περιστροφής του άξονα. Αντίστοιχα η διαφορά φάσης μεταξύ της συχνότητας λειτουργίας και της συχνότητας διέλευσης των πτερυγίων αλλάζει, καθώς η πτερωτή είναι χαλαρή στον άξονα και ολισθαίνει. Η μεταβολή του πλάτους της συχνότητας διέλευσης των πτερυγίων στο πεδίο συχνοτήτων εμφανίζει πλάγιες συχνότητες με απόσταση την συχνότητα περιστροφής και πλάτος αυτήν στην οποία το σύστημα τείνει να δουλεύει πιο συχνά, καθώς η πτερωτή περιστρέφεται με ίση ή μικρότερη συχνότητα από την συχνότητα περιστροφής του άξονα.

Μερική παροχή της αντλίας.

Η αντλία υποσιτίζεται όταν δεν υπάρχει αρκετό ρευστό για να γεμίσει τα πτερύγια της πτερωτής ανά περιστροφή. Όταν συμβαίνει αυτό, το πλάτος της συχνότητας περιστροφής μεγαλώνει αρκετά. Για αυτό καμία φορά ο υποσιτισμός της αντλίας μπορεί να θεωρηθεί εσφαλμένα και ως αζυγοσταθμία. Όμως ο υποσιτισμός έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά που τον κάνουν να ξεχωρίζει:

1. Καθώς κάθε πτερύγιο της πτερωτής γεμίζει σε διαφορετικό βαθμό ανά κάθε περιστροφή, αναμένεται το πλάτος της συχνότητας περιστροφής να μεταβάλλεται ανά περιστροφή.
2. Το σήμα μπορεί να αποκλείει από το καθαρό ημίτονο και να έχει παραμορφώσεις.
3. Στην περίπτωση που η αντλία οδηγείται από ηλεκτροκινητήρα, εμφανίζεται μείωση στην κατανάλωση ρεύματος του ηλεκτροκινητήρα.

Επίσης ο υποσιτισμός μίας αντλίας μπορεί να προκύψει όταν το ρευστό έχει αναμειχθεί με αφρό ή πολύ.

Σπηλαίωση

“Σπηλαίωση” (cavitation) ονομάζεται η μετάβαση του ρευστού από την υγρή στην αέρια φάση. Αυτό συμβαίνει όταν η τοπική (στατική) πίεση της ροής πέσει κάτω από την τάση ατμών του ρευστού. Από την αρχή διατήρησης της ενέργειας και την εξίσωση Bernoulli είναι προφανές ότι αυτό είναι πιο πιθανό να συμβεί σε περιοχές επιτάχυνσης της ροής και όχι επιβράδυνσης (οπότε και έχουμε ανάκτηση πίεσης).

Κατ’ αντιστοιχία όταν μία αντλία λειτουργεί σε συνθήκες υψηλής παροχής τότε μπορεί να δημιουργηθεί σπηλαίωση. Το φαινόμενο συνήθως προκαλείται αμέσως μετά την είσοδο του ρευστού στη φτερωτή και στην πλευρά αναρρόφησης των πτερυγίων. Η φάση της σπηλαίωσης αίρεται στην έξοδο της φτερωτής όταν η πίεση αρχίζει και πάλι να υπερβαίνει την τάση ατμών του ρευστού. Κατά την επιστροφή στην υγρή φάση (που είναι και η καταστροφική) έχουμε την κατάρρευση φυσαλίδων αέριας φάσης σε μικροσταγονίδια υγρού με αποτέλεσμα το δημιουργούμενο κενό να καλύπτεται βίαια από γειτονικό νερό. Η βίαιη αυτή κίνηση και η “σύγκρουση” στο κέντρο κυμάτων νερού ισοδυναμεί με μια τοπική μικροέκρηξη ενός κύματος πίεσης, το οποίο εκτός από τοπική αύξηση θερμοκρασίας και το θόρυβο, έχει ως αποτέλεσμα σημαντική και χαρακτηριστική φθορά, εφόσον συμβαίνει κοντά ή πάνω στην επιφάνεια της φτερωτής ή του κελύφους.

Η σπηλαίωση στη δεύτερη φάση της δημιουργεί χαρακτηριστικό θόρυβο μεταλλικής κρούσης, ο οποίος αποτυπώνεται και στο ακουστικό φάσμα που γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο. Η ύπαρξη των φυσαλίδων αέρα εμφανίζεται ως αυξημένο πλάτος ενός εύρους συχνοτήτων γύρω από την συχνότητα διέλευσης της φτερωτής ανάλογο της σοβαρότητας του προβλήματος.

Τα πιο συχνά χαρακτηριστικά εμφάνισης σπηλαίωσης στο φάσμα συχνοτήτων είναι τα τυχαία πεδία ενεργειών σε συχνότητες μεταξύ των 340Hz και 2000Hz. Ο ήχος που εκλύεται όταν δημιουργείται το φαινόμενο της σπηλαίωσης μοιάζει με τον ήχο που κάνει η άμμος ή τα χαλίκια όταν αυτά κυκλοφορούν μέσα στην αντλία ή στους σωλήνες.

2.4.3. Προβλήματα Τριβέων Κύλισης

Όπως και με τα προαναφερθέντα σφάλματα έτσι και τα σφάλματα των τριβέων κύλισης αποτυπώνονται με συγκεκριμένες συχνότητες, όπου με την χρήση των παρακάτω τύπων μπορούν να υπολογιστούν. Όταν οι συχνότητες προβλημάτων συμπίπτουν με το ένα μέγιστο στο διάγραμμα συχνοτήτων, είναι κοινώς αποδεκτό ότι υπάρχει πρόβλημα με τον συγκεκριμένο τριβέα. Να σημειωθεί ότι η συχνότητα προβλήματος ενός στοιχείου κύλισης, εξ' ορισμού, είναι διπλάσια από την συχνότητα περιστροφής του στοιχείου κύλισης γύρω από τον εαυτό του, καθώς το εσφαλμένο στοιχείο κύλισης χτυπάει στον εσωτερικό και στον εξωτερικό δακτύλιο καθώς περιστρέφεται. Έτσι με το χτύπημα του στοιχείου, τα σφάλματα του τριβέα κύλισης προκαλούν παλμούς. Για αυτό τον λόγο είναι προτιμότερο οι παρακάτω συχνότητες να αναζητηθούν στο διάγραμμα συχνοτήτων του σήματος μετά τον μετασχηματισμό Hilbert (Envelope Analysis). Τα σφάλματα των τριβέων κύλισης και η συντομογραφία τους είναι:

- Σφάλμα στο εξωτερικό δακτύλιο F_{ord}
- Σφάλμα στο εσωτερικό δακτύλιο F_{ird}
- Σφάλμα σε στοιχείο κύλισης F_{bd}
- Σφάλμα στον κλωβό F_c

Στα βιβλία μηχανολογίας είναι σύνηθες να παρουσιάζονται τα παραπάνω σφάλματα με τις παρακάτω ονομασίες.

$$F_{ord} = BPFO$$

$$F_{ird} = BPF I$$

$$F_{bd} = 2 * BSF$$

$$F_c = FTF$$

Όπου:

- BPFO: Ball Pass Frequency Outer, δηλαδή, η συχνότητα διέλευσης σφαιριδίου από ένα σφάλμα στον δρόμο του εξωτερικού δακτυλίου.
- BPF I: Ball Pass Frequency Inner, δηλαδή, η συχνότητα διέλευσης σφαιριδίου από ένα σφάλμα στον δρόμο του εσωτερικού δακτυλίου.
- BSF: Ball Spin Frequency, δηλαδή, η συχνότητα περιστροφής ενός στοιχείου κύλισης σε κάθε περιστροφή του άξονα.
- FTF: Fundamental Train Frequency, δηλαδή, η συχνότητα περιστροφής του κλωβού σε κάθε περιστροφή του άξονα.

Οι βασικές συχνότητες των προβλημάτων υπολογίζονται μαθηματικά με τις παρακάτω σχέσεις:

$$F_{ord} = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left[1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \right) \cdot \cos(\varphi) \right]$$

$$F_{ird} = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left[1 + \left(\frac{Bd}{Pd} \right) \cdot \cos(\varphi) \right]$$

$$F_{bd} = 2 \cdot \left(\frac{Pd}{Bd} \right) \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left[1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \right)^2 \cdot \cos^2(\varphi) \right]$$

$$F_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left[1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \right) \cdot \cos(\varphi) \right]$$

Όπου:

- n – Αριθμός των στοιχείων κύλισης
- Bd – Η διάμετρος του στοιχείου κύλισης
- Pd – Η διάμετρος της τροχιάς των στοιχείων κύλισης
- Φ – Η γωνία επαφής
- RPM – Οι στροφές ανά λεπτό

Επίσης για την προσέγγιση των BPFO, BPF1 και της FTF μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω εμπειρικοί τύποι:

$$BPFO = 0.4 \cdot N_B \cdot RPM$$

$$BPF1 = 0.6 \cdot N_B \cdot RPM$$

$$FTF = 0.4 \cdot RPM$$

Όπου:

- NB – Αριθμός στοιχείων κύλισης

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα σφάλματα που προαναφέρθηκαν στις προηγούμενες σελίδες, καθώς και το είδος της κυματομορφής που παράγεται.

Όπου 1x, 2x.: Αναγράφεται ως το πολλαπλάσιο της κύριας συχνότητας περιστροφής

Συνοπτικός Πίνακας στις Συνήθεις βλάβες και Σφάλματα.

Σφάλμα	Αρμονικές σε FFT	Κυματομορφή
Αζυγοσταθμία	1x	Ημίτονο
Λυγισμένος Άξονας	1x	Ημίτονο
Παράλληλη Εκκεντρότητα	2x	Ημίτονο
Γωνιακή Εκκεντρότητα	1x	Ημίτονο
Χαλαρότητα	0.5x, 1x, 2x, 3x ... 20x.	Παλμός
Έκκεντρο Μαγνητικό πεδίο	SB (Slip x NoPoles)@1x	Ημίτονο με μεταβολή της συχνότητας
Σπασμένες Μπάρες Δρομέα	SB @1x	Ημίτονο με μεταβολή στο πλάτος
Συχνότητα περωτής	NoVanes x RPM	Παλμός
Τριβέας Κύλισης	FTF, BPFO, BPFI, BSF	Παλμός

Όπου:

- SB: SideBand, δηλαδή, πλάγιες συχνότητες
- Slip: Διαφορά στην συχνότητα περιστροφής του άξονα με τη συχνότητα τροφοδοσίας του στάτη (Ολίσθηση)
- NoPoles: Αριθμός πόλων στον δρομέα
- NoVanes: Αριθμός περυγίων

3. Διαγνωστικά Εργαλεία

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια καταγραφή διαθέσιμων βιομηχανικών εργαλείων παρακολούθησης και διάγνωσης της κατάστασης περιστρεφόμενων μηχανών. Γίνεται επίσης αναφορά στα χαρακτηριστικά τους, τη βασική αρχή λειτουργίας τους. Τέλος δίνουμε και ένα παράδειγμα χρήσης – εφαρμογής.

Τέλος παρουσιάζεται το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας, τα χαρακτηριστικά του, η αρχή λειτουργίας του καθώς και τα αποτελέσματα τυπικής εφαρμογής του.

3.1. Βιομηχανικές Εφαρμογές

Στην αγορά υπάρχουν διαθέσιμα πολλά εργαλεία και συστήματα κατάλληλα για την διάγνωση και παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας βιομηχανικών συστημάτων κίνησης.

Η εξέλιξή τους οδήγησε σε πολλούς τύπους και παραλλαγές ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής, χωρίς όμως απαραίτητα να στηρίζονται σε διαφορετικές αρχές λειτουργίας. Έτσι μπορεί να έχουμε για παράδειγμα διατάξεις μέτρησης ταλαντώσεων, εντεταγμένες σε συστήματα μόνιμης εγκατάστασης, πλάι στον υπό παρακολούθηση εξοπλισμό για συνεχή (εικοσιτετράωρη) παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας του εξοπλισμού σε πραγματικό χρόνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα παρακολούθησης της εξέλιξης της κατάστασης του εξοπλισμού, η οποία στη συνέχεια δίνει τη δυνατότητα έγκαιρης επέμβασης αφενός όταν χρειάζεται, αλλά πριν προκληθεί κάποια μεγάλη βλάβη, και αφετέρου σε χρόνο που δεν επιβαρύνει (με καθυστερήσεις) την υπόλοιπη διαδικασία παραγωγής (conditional maintenance). Τελικό ζητούμενο είναι η αύξηση της παραγωγικότητας και η βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους συντήρησης μιας γραμμής παραγωγής. Η συνεχής παρακολούθηση αποτελεί ζωτικό στοιχείο των βιομηχανιών ή κρίσιμων τμημάτων τους, καθώς τις επιτρέπει την εντατική χρήση του εξοπλισμού τους, και πλήρους εκμετάλλευσης της ωφέλιμης ζωής των μηχανημάτων.

Η εισαγωγή τελευταία των αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης έχει δώσει νέα ώθηση στα συστήματα, δεδομένου ότι μπορούν να προβλέψουν, με σχετικά καλή ασφάλεια, επερχόμενες βλάβες πριν αυτές αρχίσουν να αφήνουν ίχνη σε κλασικά συστήματα διάγνωσης.

Συμπερασματικά, θα λέγαμε, ότι το κόστος εγκατάστασης μόνιμης υποδομής παρακολούθησης της κατάστασης λειτουργίας θα πρέπει να αντισταθμίζει το συνολικό κόστος συντήρησης και αυτό που προέρχεται από τις απρόβλεπτες αστοχίες.

Στον αντίποδα των συστημάτων μόνιμης εγκατάστασης, λόγω του υψηλού τους κόστους, έχουν αναπτυχθεί και φορητά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται με δύο τρόπους:

1. Απευθείας μέτρηση δείχνει ότι κάποια παράμετρος του εξοπλισμού είναι εκτός ορίων, οπότε και στο αμέσως επόμενο παράθυρο συντήρησης ο υπόψιν εξοπλισμός συντηρείται (και πάλι πριν η βλάβη τον ακινητοποιήσει).
2. Με σύγκριση περιοδικών μετρήσεων (π.χ. ανά εξάμηνο) προκύπτει το συμπέρασμα ότι η προοδευτική φθορά του εξοπλισμού είναι τέτοια ώστε να υπάρχει αυξημένη πιθανότητα σοβαρής βλάβης π.χ. στο διάστημα 7-12 μήνες από σήμερα. Έτσι και πάλι προγραμματίζεται συντήρηση σε κατάλληλο χρόνο και πριν εμφανισθεί βλάβη ακινητοποίησης.

Η πρόβλεψη μια επερχόμενης αστοχίας αποτελεί σημαντική παράμετρο - στοιχείο για την οργάνωση του προγράμματος συντήρησης, καθώς τα μηχανήματα δεν θα πρέπει να σταματήσουν απρόβλεπτα πολλές φορές κατά τη διάρκεια ζωής τους.

Τα πλέον διαδεδομένα σήμερα συστήματα βασίζονται συνήθως σε ανάλυση της ταλαντωτικής συμπεριφοράς του εξοπλισμού (δονήσεις), καθώς έχει αποδειχτεί στην πράξη ως ένα αξιόπιστο και σχετικά φθινό μέσο παρακολούθησης της κατάστασης.

Άλλα ανάλογα συστήματα στηρίζονται σε θερμοκρασιακές μετρήσεις, οπτική ή ηχητική ανάλυση, αλλά δεν έχουν ακόμη τον βαθμό ωρίμανσης των συστημάτων ανάλυσης ταλαντωτικής συμπεριφοράς, αφού επηρεάζονται και από εξωγενείς παράγοντες (π.χ. η θερμοκρασία επιφάνειας εξαρτάται όχι μόνο από τη λίπανση του εδράνου, αλλά και από την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα κ.λ.π.).

Από την άλλη μεριά, η βιομηχανική ανάπτυξη οδήγησε αυτά τα συστήματα να είναι αρκετά “κλειστά” για τον χρήστη, καθώς βασίζονται όλο και περισσότερο σε λογισμικό κλειστού κώδικα και εξειδικευμένα ηλεκτρονικά (hardware). Η χρήση κλειστού λογισμικού δυσκολεύει την βελτίωση του συστήματος από το χρήστη με ενσωμάτωση τοπικών συνθηκών και απαιτήσεων, καθώς οποιαδήποτε αλλαγή είναι δυνατή μόνο μέσω της εταιρίας που συντηρεί το λογισμικό.

Ένα άλλο μειονέκτημα, είναι ότι η συντήρηση και αναβάθμιση του κώδικα παρέχεται υποχρεωτικά συνδρομητικά, πράγμα που αυξάνει σημαντικά το κόστος χρήσης του συστήματος διάγνωσης. Αυτός είναι και ο λόγος που η ανάπτυξη τεχνογνωσίας γύρω από το θέμα καθίσταται όλο και πιο ενδιαφέρουσα για μικρομεσαίες και αναπτυσσόμενες εταιρείες που δεν θα είχαν την οικονομική δυνατότητα να υποστηρίξουν ένα αντίστοιχο εμπορικά διαθέσιμο προϊόν.

Παράδειγμα Βιομηχανικού Λογισμικού Δονήσεων

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας ενός βιομηχανικού εργαλείου επιλέχτηκε ως παράδειγμα το σύστημα παρακολούθησης και διάγνωσης της εταιρίας “iFM”. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως φορητό είτε ως μόνιμο. Αποτελείται από ένα πρόγραμμα για ηλεκτρονικό υπολογιστή, μία δειγματοληπτική κάρτα με δυνατότητες επεξεργασίας σήματος, ένα επιταχυνσιόμετρο και έναν αισθητήρα τύπου hall ο οποίος λειτουργεί ως μία παλμογεννήτρια για την μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής. Οι λεπτομέρειες των επιμέρους εξαρτημάτων περιγράφονται στον πειραματικό εξοπλισμό σε παρακάτω κεφάλαιο.

Με βάση τις οδηγίες χρήσης του εξοπλισμού, αρχικά ο χρήστης πρέπει να εγκαταστήσει το πρόγραμμα οδήγησης σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, προκειμένου να ρυθμίσει τις παραμέτρους και να προγραμματίσει τον δειγματοληπτικό εξοπλισμό. Ο δειγματοληπτικός εξοπλισμός συνδέεται μέσω θύρας Ethernet σε τοπικό δίκτυο. Γεγονός που επιτρέπει την ταυτόχρονη σύνδεση πολλαπλών συστημάτων δειγματοληψίας σε δίκτυο για την παρακολούθηση πολλαπλών μηχανημάτων.

Αρχικά, ο χρήστης προγραμματίζει τις ψηφιακές και αναλογικές εισόδους και εξόδους, έτσι ώστε η δειγματοληπτική μονάδα να είναι σε θέση να δίνει και να δέχεται σήματα. Στην περίπτωση του παραδείγματος, η μονάδα προγραμματίζεται έτσι ώστε να δεχτεί έναν αναλογικό αισθητήρα επιταχύνσεων και μία ψηφιακή παλμογεννήτρια για τον υπολογισμό της συχνότητας λειτουργίας.

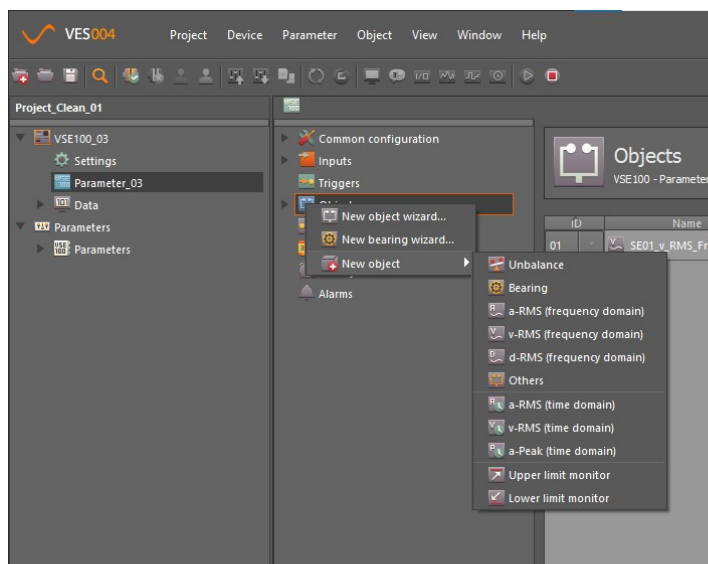
Η παρακολούθησή του πλάτους της επιτάχυνσης ή της ταχύτητας σε συγκεκριμένη συχνότητα αποτελεί και την βάση για τον υπολογισμό της σοβαρότητας και για την εκτίμηση της “υγείας” του εξοπλισμού που εξετάζεται. Όπως έχει προαναφερθεί στο κεφάλαιο της θεωρητικής ανασκόπησης των σφαλμάτων, τα σφάλματα αποτυπώνονται με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στο πεδίο συχνοτήτων του σήματος του επιταχυνσιόμετρου. Το παρόν εργαλείο παρέχει έτοιμες ρουτίνες που βοηθούν τον χρήστη σε σύντομο χρόνο να προγραμματίσει τις παραμέτρους προς παρακολούθηση που τον ενδιαφέρουν.

Έτσι συνοπτικά με βάση τον οδηγό χρήσης του προγράμματος VSE004 οι έτοιμες ρουτίνες για τον προγραμματισμό των παραμέτρων και μεγεθών προς παρακολούθηση είναι οι:

- Unbalance: Αζυγοσταθμία
- Rolling element bearing: Υπολογισμός σε τριβέα κύλισης
- a-RMS (frequency range): Υπολογισμός της δρώσας τιμής της επιτάχυνσης στο πεδίο συχνοτήτων των επιταχύνσεων
- v-RMS (frequency range): Υπολογισμός της δρώσας τιμής της ταχύτητας στο πεδίο συχνοτήτων
- d-RMS (frequency range): Υπολογισμός της δρώσας τιμής της μετατόπισης στο πεδίο συχνοτήτων

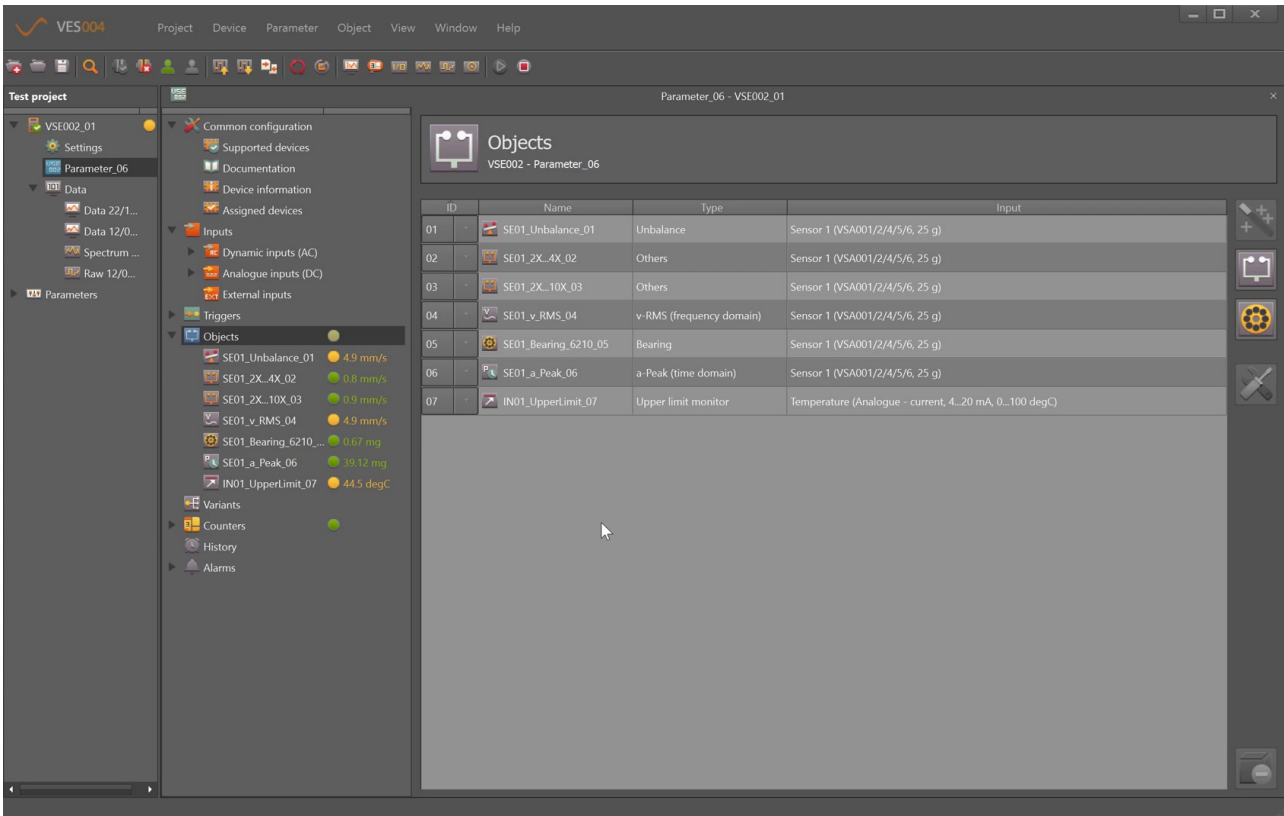
- a-RMS (time domain): Υπολογισμός της δρώσας τιμής της επιτάχυνσης στο πεδίο χρόνου
- v-RMS (time domain): Υπολογισμός της δρώσας τιμής της ταχύτητας στο πεδίο χρόνου
- a-Peak (time domain): Εύρεση τοπικού μεγίστου μεγαλύτερο από προκαθορισμένη τιμή στο πεδίο χρόνου των επιταχύνσεων
- Upper limit monitor: Άνω όριο Συχνότητας ως προς την οποία θα εκτελείται η παρακολούθηση
- Lower limit monitor: Κάτω όριο Συχνότητας ως προς την οποία θα εκτελείται η παρακολούθηση
- Others: Προγραμματισμός μίας ρουτίνας προσαρμοσμένη από τον χρήστη.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η καρτέλα για την επιλογή ρουτίνας διάγνωσης.

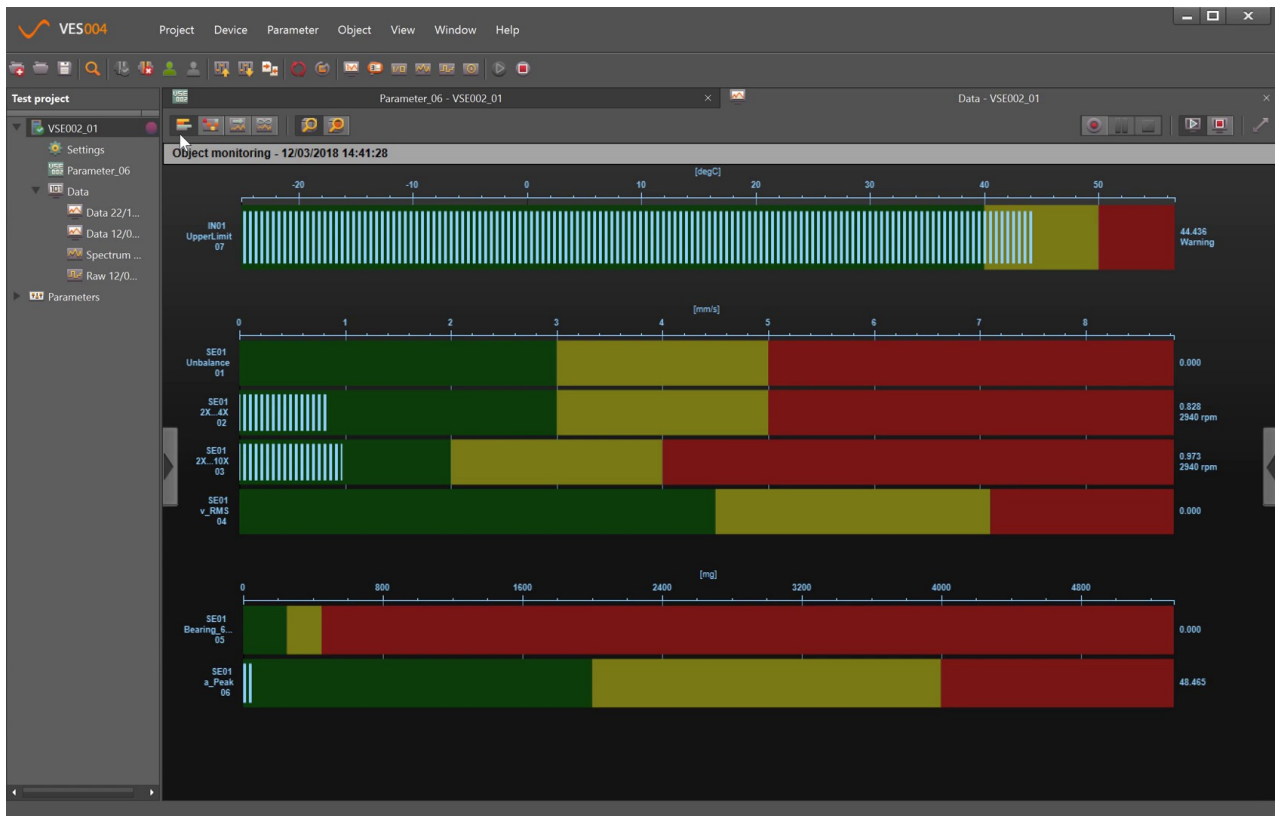


Μετά τον προγραμματισμό των απαραίτητων μεγεθών προς παρακολούθηση, δίνεται η δυνατότητα σύνδεσης των δεδομένων που προκύπτουν από τις διάφορες ρουτίνες με μία βάση δεδομένων με χρήση διακομιστή τύπου OPC “Open Platform Communications”. Η συγκέντρωση των δεδομένων σε βάση δεδομένων επιτρέπει τη διαχρονική παρακολούθηση της κατάστασης καθώς και την σύγκριση δεδομένων.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι επιλεγμένες ρουτίνες και η κατάστασή τους όταν το μηχάνημα είναι σε λειτουργία.



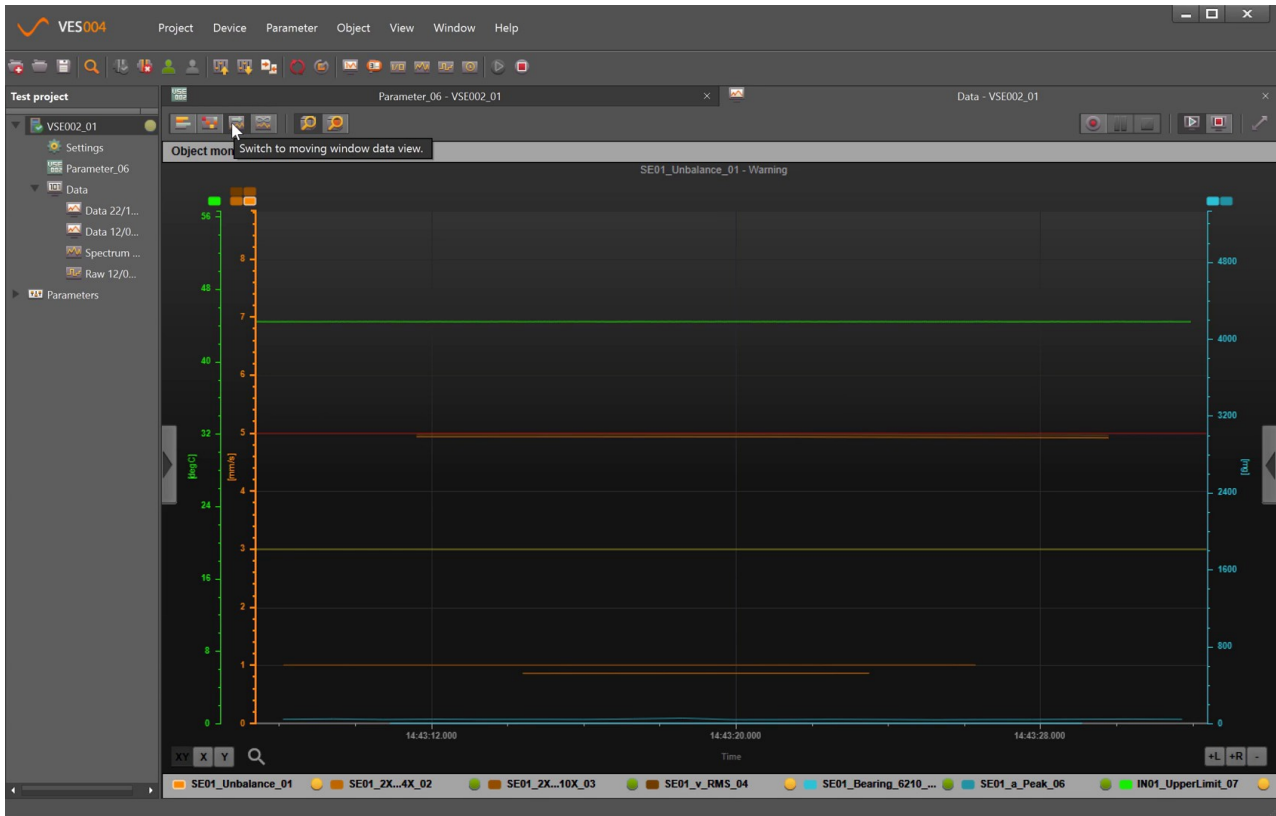
Το πρόγραμμα της iFM δίνει επίσης τη δυνατότητα προβολής της κατάστασης των αποτελεσμάτων κάθε ρουτίνας και με μορφή διαγραμμάτων. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι



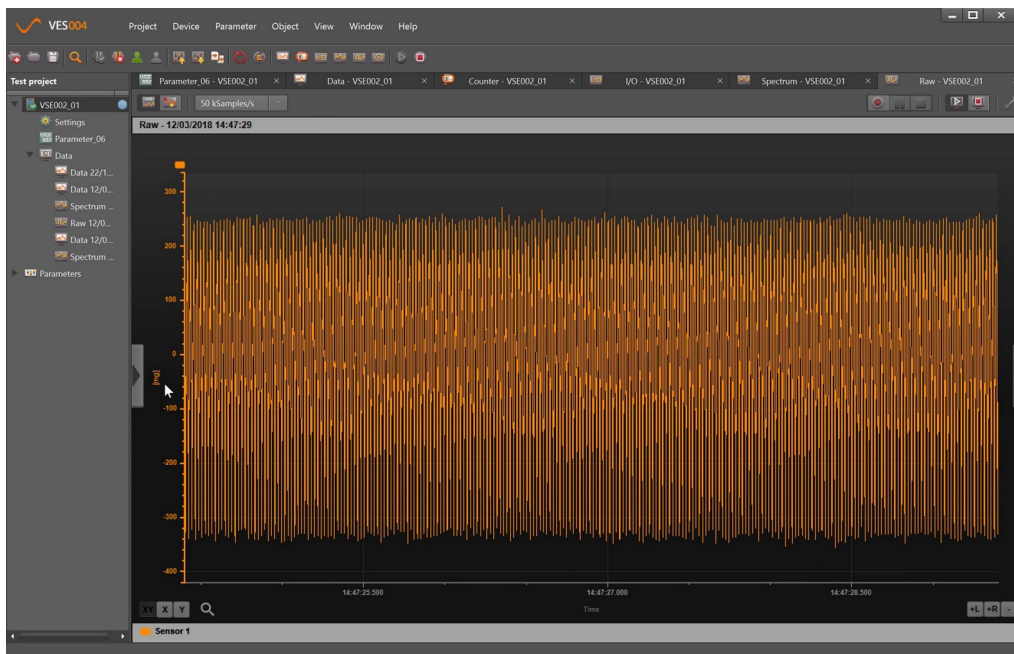
τιμές των μεγεθών υπό τη μορφή μπαρών. Με χρώμα πράσινο παριστάνεται η ασφαλής περιοχή τιμών.

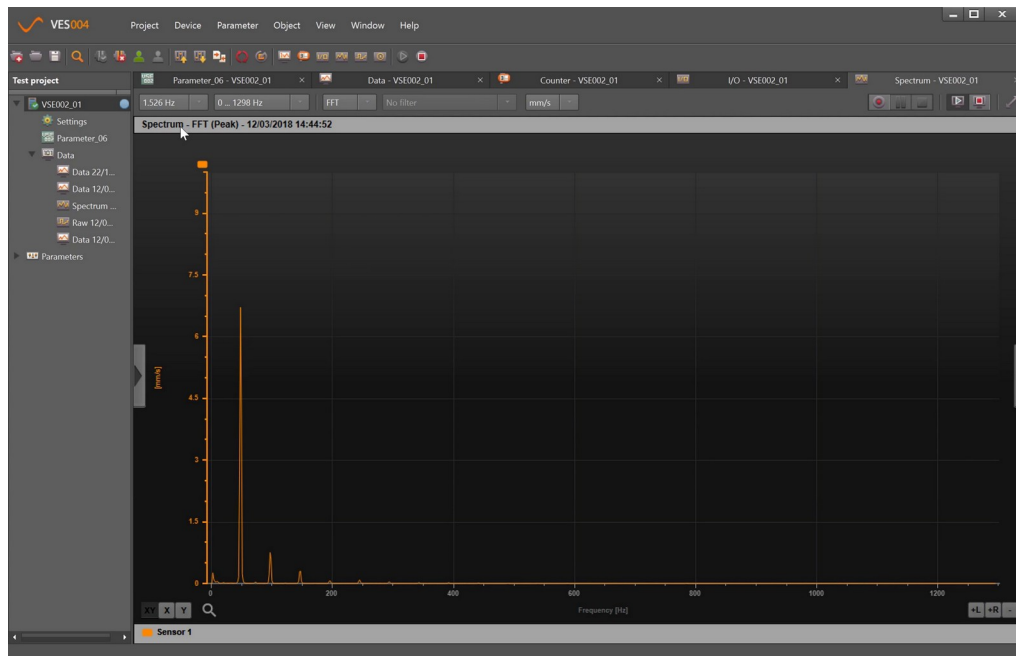
Με χρώμα κίτρινο παριστάνεται η περιοχή όπου ο επιβλέπων μηχανικός θα πρέπει να προγραμματίσει έλεγχο στο μηχάνημα. Με κόκκινο παριστάνεται η περιοχή αυξημένου κινδύνου για βλάβη. Σε αυτήν την περιοχή το μηχάνημα κινδυνεύει να σταματήσει χωρίς άλλη προειδοποίηση, προκαλώντας αβαρία στη γραμμή παραγωγής. Τα όρια κάθε περιοχής μπορεί να ρυθμιστούν ανεξάρτητα.

Επίσης τα δεδομένα μπορούν να παρουσιαστούν και σε γράφημα παρατήρησης των τιμών σε βάθος χρόνου. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα κάθε ρουτίνας σε ένα διάγραμμα αυτού του τύπου. Οι τιμές κάθε ρουτίνας παριστάνονται με διαφορετικό χρώμα.



Τέλος δίνεται η δυνατότητα προβολής της χρονοσειράς (time domain) του σήματος από το αισθητήριο επιταχύνσεων, καθώς και το φάσμα συχνοτήτων του σήματος μετά από τον μετασχηματισμό Fourier (FFT).





Συμπεράσματα

Το πακέτο παρακολούθησης της κατάστασης από την εταιρία “iFM” προσφέρει αρκετά χρήσιμα εργαλεία και βοηθήματα στον χρήστη για τη δημιουργία του βέλτιστου προγράμματος παρακολούθησης με βασικό σκοπό την ακριβέστερη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της κατάστασης ενός συγκεκριμένου μηχανήματος και των επιμέρους εξαρτημάτων του, όπως τριβέων κύλισης, πτερωτές κ.α.

Οι απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης ενός τέτοιου συστήματος είναι αυξημένες, καθώς η διαχείριση του απαιτεί καλές γνώσεις σε πολλαπλούς τομείς όπως:

- Γνώσεις διαχείρισης δικτύων για την σωστή επικοινωνία των μονάδων με έναν κεντρικό διακομιστή
- Μηχανολογικές γνώσεις για την ορθή τοποθέτηση των διαφόρων αισθητηρίων.
- Γνώσεις ανάλυσης και επεξεργασίας σήματος για την σωστή κατανόηση των λειτουργιών του προγράμματος
- Εμπειρία στον σχεδιασμό του προγράμματος συντήρησης για την ορθότερη κρίση των δεδομένων που παράγει ένα τέτοιο σύστημα

Από τα παραπάνω απαιτείται η ύπαρξη εξαιρετικά εξειδικευμένου προσωπικό σε πολλά επίπεδα. Από το επίπεδο ενός τεχνίτη, ο οποίος θα πρέπει να γνωρίζει να τοποθετεί αισθητήρες ή να αναγνωρίζει αποκλίσεις από τα όρια κανονικής λειτουργίας, έως και τον προϊστάμενο της τεχνικής

υπηρεσίας του οργανισμού, ο οποίος θα πρέπει να οργανώνει, να επιβλέπει, να αξιολογεί και να αναθεωρεί τις διαδικασίες συντήρησης και τις παραμέτρους παρακολούθησης της κατάστασης των μηχανημάτων που παρέχονται μέσω του εξοπλισμού του παραδείγματος.

Το κόστος εγκατάστασης αν και αυξημένο μπορεί να δικαιολογηθεί σε μεγάλες μονάδες παραγωγής, όπου η διακοπή λειτουργίας ενός μηχανήματος μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο κόστος λόγω αβαρίας μίας γραμμής παραγωγής. Σε μικρές μονάδες όπου η διακοπή ενός μηχανήματος δεν επηρεάζει σημαντικά την παραγωγική διαδικασία, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας δεν μπορεί εύκολα να αποσβεστεί.

Παράδειγμα Βιομηχανικού Εργαλείου Ηλεκτρικών Μεγεθών

Ένα ακόμη παράδειγμα ενός βιομηχανικού εργαλείου διάγνωσης της κατάστασης κυρίως για ηλεκτρικές μηχανές όπως ηλεκτρικούς κινητήρες και μετασχηματιστές είναι το πακέτο της εταιρίας “Enging”.

Το στοιχείο που διαφοροποιεί αυτό το σύστημα με όλα τα υπόλοιπα είναι η χρήση ηλεκτρικών μεγεθών για την διάγνωση. Χρησιμοποιεί μετρήσεις τάσεων και εντάσεων ρεύματος. Οι μετρήσεις γίνονται παράλληλα με την ηλεκτρική τροφοδοσία του μηχανήματος γεγονός που το κάνει μη παρεμβατικό, καθώς δεν απαιτεί μετατροπές και αλλαγές στους ήδη υπάρχοντες πίνακες ισχύος.

Το σύστημα διάγνωσης αποτελείται από ένα φορητό βαλιτσάκι με όλα τα συστήματα δειγματοληψίας, επαγωγικούς αισθητήρες μέτρησης έντασης και αισθητήρες επαφής για τη μέτρηση τάσης. Για την οπτικοποίηση των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων της διάγνωσης της κατάστασης παρέχεται ένα γραφικό περιβάλλον υπό τη μορφή ιστοσελίδας, προσβάσιμη από ηλεκτρονικούς υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα. Το βαλιτσάκι συνδέεται σε έναν κεντρικό server με χρήση κάποιου τοπικού δικτύου ή δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Έτσι το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μόνιμο αλλά και ως ημιμόνιμο σε απομακρυσμένες περιοχές.

Οι λεπτομέρειες των επιμέρους εξαρτημάτων περιγράφονται στον πειραματικό εξοπλισμό σε παρακάτω κεφάλαιο.

Με βάση τις οδηγίες χρήσης του εξοπλισμού απαιτείται μία προεργασία, καθώς θα πρέπει η ομάδα τεχνικών στο πεδίο και η ομάδα τεχνικών της εταιρίας “Enging” να συνεργαστούν για την σωστή τοποθέτηση και ρύθμιση του εξοπλισμού. Επίσης απαιτείται και η αποστολή των ονομαστικών χαρακτηριστικών της ηλεκτρικής μηχανής στην παραπάνω εταιρία.

Την προκαθορισμένη ημέρα αρχικά εξειδικευμένος τεχνικός ηλεκτρολόγος πρέπει να τοποθετήσει τους αισθητήρες μέτρησης με την ηλεκτρική μηχανή εκτός λειτουργίας στις κατάλληλες θέσεις όπως υποδεικνύουν οι οδηγίες χρήσης. Ταυτόχρονα γίνεται επιβεβαίωση της τοποθέτησης από τεχνικό της εταιρίας “Enging”. Μετά την επιβεβαίωση της καλής τοποθέτησης γίνεται εκκίνηση του εξοπλισμού και παράλληλα συγκρίνονται οι μετρήσεις τάσης και έντασης μεταξύ του τεχνικού στο πεδίο και του τεχνικού της εταιρίας “Enging”. Σε περίπτωση μη ταύτισης ή απόκλισης γίνονται οι απαραίτητες αλλαγές. Με αυτό το τελευταίο βήμα ολοκληρώνεται η εγκατάσταση του μετρητικού εξοπλισμού. Ο κάθε κύκλος διάγνωσης ολοκληρώνεται κάθε δέκα λεπτά. Γενικά ο προτεινόμενος ελάχιστος χρόνος παρακολούθησης είναι η μία εβδομάδα έτσι ώστε να αποτυπωθούν γεγονότα μιας μεγάλης περιόδου.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει την κατάσταση της υγείας του μηχανήματος ή των μηχανημάτων στα οποία έχει εγκαταστήσει τον διαγνωστικό εξοπλισμό μέσω της ιστοσελίδας της εταιρίας “Enging”.

Η ιστοσελίδα χωρίζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε 4ης κατηγορίες:

1. Severity Factors
2. Electrical Parameters
3. Mechanical Parameters
4. Power Quality

Τα “Severity Factors” αποτελούν την τελική έξοδο του διαγνωστικού εργαλείου με την έννοια ότι με βάση αυτά διαπιστώνονται επερχόμενες βλάβες. Δίνουν αδιαστατοποιημένους δείκτες για την διάγνωση βλαβών. Είναι σε ποσοστό επί % και η τιμή τους δηλώνει την κατάσταση του δείκτη. Από 0% έως 1% η κατάσταση θεωρείται καλή και απεικονίζεται με πράσινο χρώμα. Από 1% έως 2% η κατάσταση θεωρείται ανησυχητική και απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα. Τέλος από 2% και πάνω η κατάσταση θεωρείται επικίνδυνη και απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Είναι στην κρίση του μηχανικού συντήρησης να κρίνει αυτές τις πληροφορίες κατάλληλα και να κάνει τις απαραίτητες μετατροπές στο πρόγραμμα συντήρησης αν χρειάζεται.

Τα “Severity Factors” στοχεύουν σε συγκεκριμένα σημεία του εξοπλισμού. Έτσι για ηλεκτρικούς κινητήρες τα “Severity Factors” είναι τα εξής:

“Supply”: Αυτός ο δείκτης δείχνει την ποιότητα του ρεύματος από το δίκτυο τροφοδοσίας. Αυτά τα προβλήματα συνδέονται με τον πάροχο της ηλεκτρικής ενέργειας και η επίλυση τους πρέπει να γίνεται σε συνεργασία αυτού. Τα προβλήματα από της παροχή μπορεί να δημιουργούνται από πολλές αιτίες. Χαρακτηριστικές είναι η ασυμμετρία των φάσεων και ο υψηλός αρμονικός θόρυβος.

“Rotor”: Αυτός ο δείκτης δείχνει την κατάσταση της υγείας του δρομέα του κινητήρα. Τα προβλήματα αυτά προέρχονται από πιθανές βλάβες στον δρομέα όπως βραχυκύκλωμα ή εκκεντρότητα του μαγνητικού πεδίου.

“Mechanical”: Αυτός ο δείκτης συνοψίζει την υγεία του μηχανήματος από μηχανολογικής άποψης. Τα μηχανολογικά προβλήματα μπορεί να είναι θέματα εκκεντρότητας ή και αζυγοσταθμίας.

“Load Variation”: Ο δείκτης δείχνει την διακύμανση του φορτίου. Αν υπάρχει μεγάλη διακύμανση σε μικρό χρόνο αυτό ταλαιπωρεί επιπλέον την ηλεκτρική μηχανή. Γρήγορες μεταβολές στο φορτίο μπορεί να δημιουργούνται σε συστήματα σπαστήρων.

Η επιβεβαίωση αυτών των προβλημάτων γίνεται στη φάση της προγραμματισμένης συντήρησης. Αν το πρόβλημα είναι μεγάλο, δηλαδή ο δείκτης κατάστασης είναι πάνω από 2%, τότε θα πρέπει να προγραμματιστεί η ταχεία ακινητοποίηση του μηχανήματος για τον έλεγχο της κατάστασης.

Το πρόγραμμα παρέχει και ηλεκτρολογικές πληροφορίες όπως την τάση, ένταση, ηλεκτρική ισχύς, φορτίο και ποιότητα ρεύματος, αλλά και μηχανολογικές πληροφορίες όπως ταχύτητα περιστροφής, ροπή, μηχανική ισχύς και βαθμός απόδοσης. Επιπλέον διατίθενται και οι χρονοσειρές από τις μετρήσεις των εντάσεων και των τάσεων, οι αναλύσεις στο πεδίο συχνοτήτων με την μέθοδο EPVA και MCSA και η ανάλυση της χρονοσειράς της ηλεκτρικής ισχύος στο πεδίο συχνοτήτων.

Ο χρήστης έχει δυνατότητα να περιηγηθεί σε ιστορικά δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις, έτσι ώστε να συγκρίνει δεδομένα και να δημιουργήσει προβολές για το μέλλον.

Παρακάτω παρουσιάζεται η κεντρική οθόνη της ιστοσελίδας με μερικές εικόνες. Οι δείκτες κατάστασης με το αντίστοιχο χρώμα τους

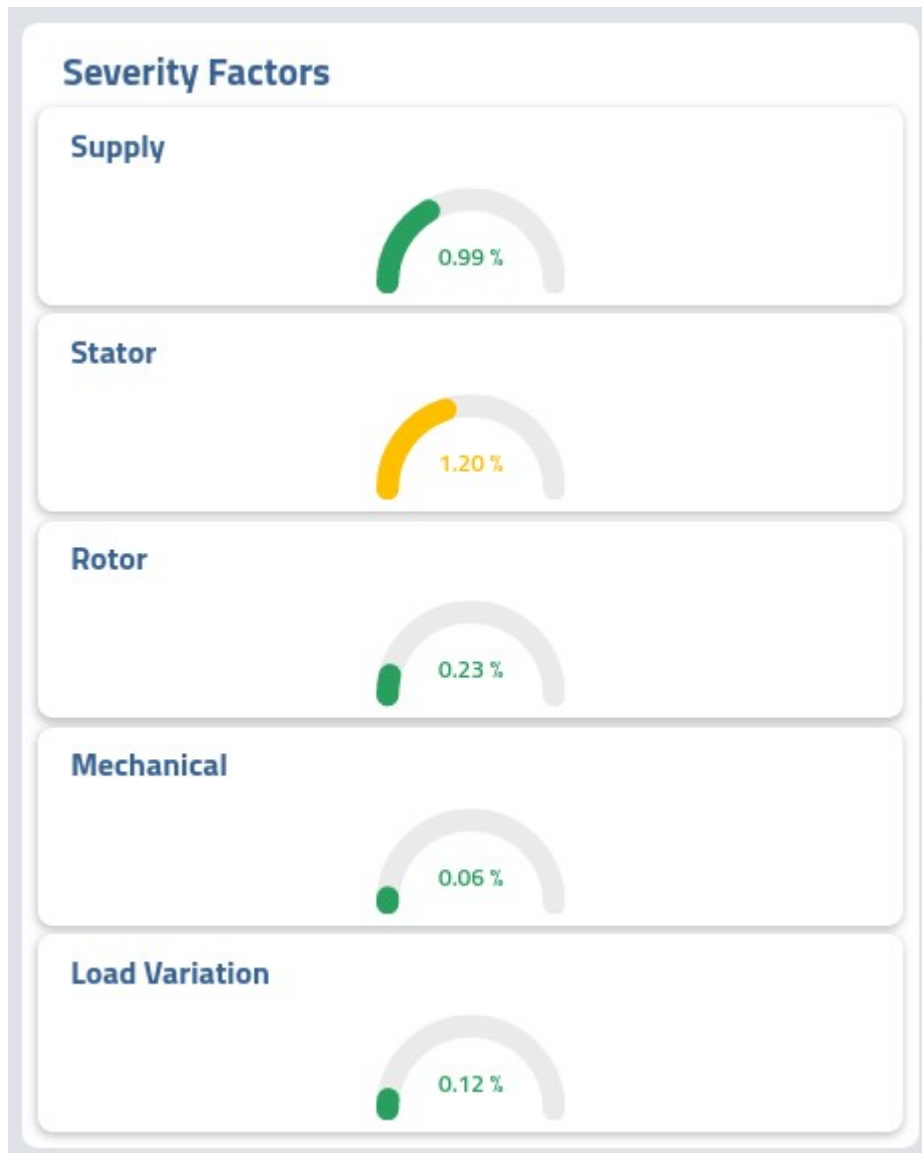


Figure 1: Δείκτες κατάστασης από το διαγνωστικό της εταιρίας Enging

Οι ηλεκτρολογικές παράμετροι με το φορτίο της ηλεκτρικής μηχανής

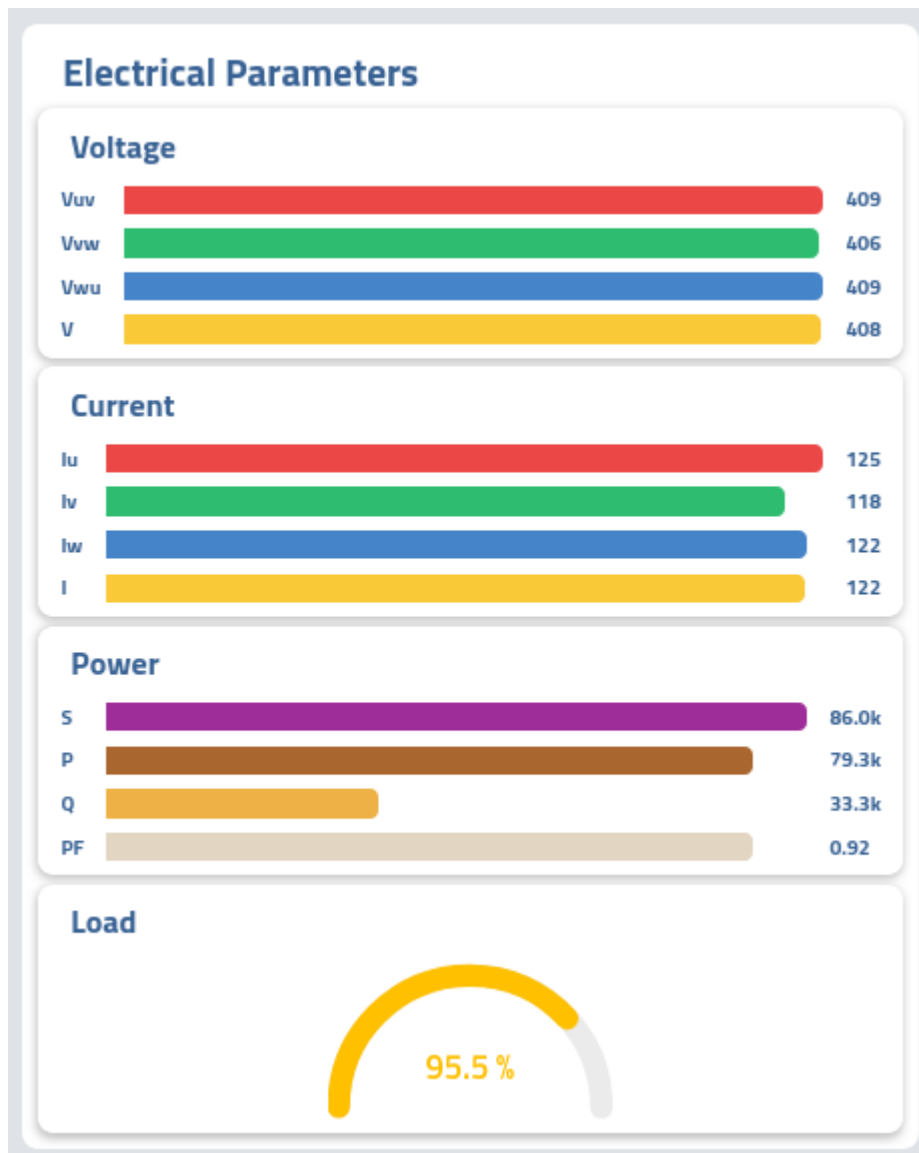


Figure 2: Ηλεκτρολογικές Παράμετροι από το διαγνωστικό της εταιρίας Enging

Οι μηχανολογικές παράμετροι με τον βαθμό απόδοσης της ηλεκτρικής μηχανής

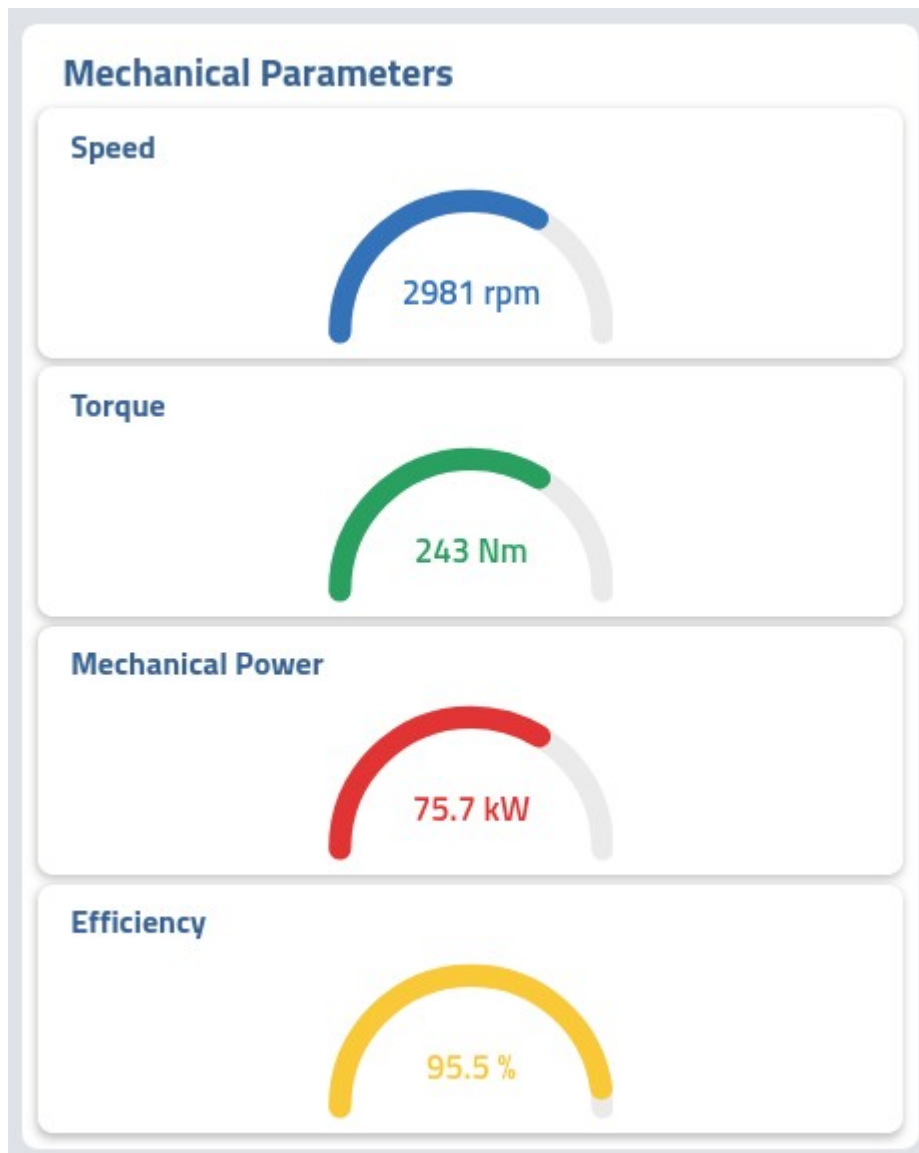


Figure 3: Μηχανολογικές Παράμετροι από το διαγνωστικό της εταιρίας Enging

Οι παράμετροι ποιότητας τροφοδοσίας.

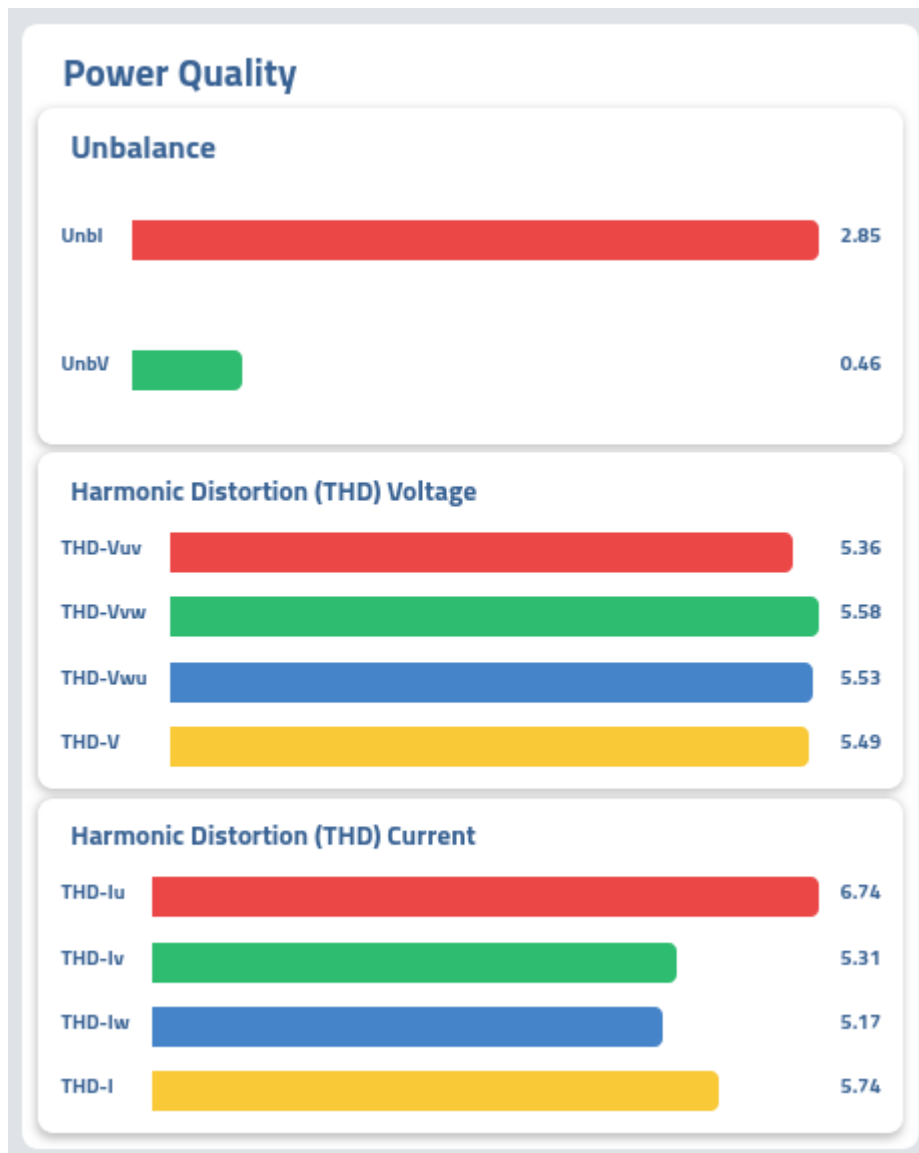


Figure 4: Ποιότητα Τροφοδοσίας από το διαγνωστικό της εταιρίας Enging

Συμπεράσματα

Το πακέτο παρακολούθησης της κατάστασης από την εταιρία “Enging” προσφέρει αρκετά εργαλεία και βοηθήματα στον χρήστη για τη δημιουργία του βέλτιστου προγράμματος με βασικό σκοπό την ακριβέστερη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της κατάστασης ενός συγκεκριμένου μηχανήματος και των επιμέρους εξαρτημάτων του, όπως τριβών κύλισης, πτερωτές κ.α.

Οι απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης ενός τέτοιου συστήματος είναι αυξημένες καθώς η διαχείριση του απαιτεί καλές γνώσεις σε πολλαπλούς τομείς.

- Γνώσεις διαχείρισης δικτύων για την σωστή επικοινωνία των μονάδων με έναν κεντρικό διακομιστή
- Μηχανολογικές γνώσεις για την ορθή τοποθέτηση των διαφόρων αισθητηρίων.
- Γνώσεις ανάλυσης και επεξεργασίας σήματος για τη σωστή κατανόηση των λειτουργιών του προγράμματος
- Εμπειρία στον σχεδιασμό του προγράμματος συντήρησης για την ορθότερη κρίση των δεδομένων που παράγει ένα τέτοιο σύστημα.

Από τα παραπάνω απαιτείται η ύπαρξη εξαιρετικά εξειδικευμένου προσωπικού σε πολλά επίπεδα. Από το επίπεδο ενός τεχνήτη, ο οποίος θα πρέπει να γνωρίζει να τοποθετεί αισθητήρες ή να αναγνωρίζει αποκλείσεις από τα όρια κανονικής λειτουργίας, έως και τον προϊστάμενο της τεχνικής υπηρεσίας του οργανισμού ο οποίος θα πρέπει να οργανώνει, να επιβλέπει, να αξιολογεί και να αναθεωρεί τις διαδικασίες συντήρησης και τις παραμέτρους παρακολούθησης της κατάστασης των μηχανημάτων που παρέχονται μέσω του εξοπλισμού του παραδείγματος.

Το κόστος εγκατάστασης αν και αυξημένο μπορεί να δικαιολογηθεί σε μεγάλες μονάδες παραγωγής, όπου η διακοπή λειτουργίας ενός μηχανήματος μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο κόστος λόγω αβαρίας μίας γραμμής παραγωγής. Σε μικρές μονάδες όπου η διακοπή ενός μηχανήματος δεν επηρεάζει σημαντικά την παραγωγική διαδικασία, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας δεν μπορεί εύκολα να αποσβεστεί.

4. Ανάπτυξη Λογισμικού Διάγνωσης Λειτουργίας Αντλιοστασίων

4.1. Γενική Παρουσίαση

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η δημιουργία ενός διαγνωστικού εργαλείου, το οποίο προορίζεται να χρησιμοποιηθεί από έναν μηχανικό συντήρησης ενός μικρού αντλητικού συστήματος, ή μίας βιομηχανίας που αντιμετωπίζει προβλήματα συντήρησης μηχανημάτων, όπως τα παραπάνω, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει την ευκολία της άμεσης διάγνωσης της κατάστασης λειτουργίας του εξοπλισμού. Το εργαλείο λογισμικού που αναπτύχθηκε παρέχει μεγάλο εύρος πληροφοριών που παρέχονται από παρόμοια εμπορικά βιομηχανικά πακέτα, όπως, διάγνωση:

- Αζυγοσταθμία
- Εκκεντρότητα

Επιπλέον είναι δυνατή η διάγνωση βλαβών σε:

- Τριβείς κύλισης
- Φυγοκεντρικές αντλίες
- Ηλεκτροκινητήρες

Λόγω του περιορισμένου όγκου της διπλωματικής εργασίας το πρόγραμμα δεν εμβαθύνει στη διάγνωση:

- Οδοντοτροχών
- Ιμαντοκινήσεις

Ο προγραμματισμένος τεχνικός έλεγχος που προβλέπεται, πολλές φορές από τους κατασκευαστές, παρέχει αρκετές πληροφορίες για την πρόληψη αρκετών επερχόμενων βλαβών. Με τις τακτικές επισκέψεις στις εγκαταστάσεις, όπως προδιαγράφονται από το πρόγραμμα συντήρησης, το εργαλείο αυτό με χρήση ακουστικών εκπομπών πετυχαίνει ανέπαφη δειγματοληψία η οποία μπορεί γίνει και από έναν τεχνίτη χωρίς ιδιαίτερη εξειδίκευση με την χρήση μίας δειγματοληπτικής συσκευής ακουστικών εκπομπών, όπως ένα κινητό τηλέφωνο. Έτσι η διάγνωση γίνεται ασφαλέστερη και χωρίς την ανάγκη παύσης λειτουργίας του μηχανήματος, όπου πολλές φορές απαιτείται για την τοποθέτηση μετρητικού εξοπλισμού με δονήσεις.

Χωρίς την απαίτηση σημαντικού χρόνου, ο τεχνικός συντήρησης καταγράφει το ηχητικό αποτύπωμα του μηχανήματος και στη συνέχεια γίνεται η διάγνωση, μεταφέροντας στον τεχνίτη με απλό και άμεσο τρόπο μία γενική εικόνα της κατάστασης λειτουργίας του μηχανήματος. Ο συνδυασμός αυτών των πληροφοριών σε συνδυασμό με τις γνώσεις ενός έμπειρου τεχνίτη, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους λειτουργίας, των απρόβλεπτων αβारीών και συνολικά τη βελτίωση λειτουργίας του εξοπλισμού.

4.2. Αρχή Λειτουργίας

Η δομή και λειτουργία του λογισμικού αναπτύχθηκε με βάση την απαίτηση για δημιουργία ενός διαγνωστικού εργαλείου για εφαρμογή στη βιομηχανία, και το οποίο να προσφέρει άμεση και επί τόπου διάγνωση. Η δυνατότητα αποτύπωσης της κατάστασης ενός μηχανήματος χωρίς την περίπλοκη προεργασία που απαιτούν τα βιομηχανικά εργαλεία εξοικονομεί αρκετό χρόνο. Ταυτόχρονα, μειώνει τις πιθανότητες σφάλματος λόγω ανθρώπινου λάθους. Η ανάγκη καταγραφής ιστορικών δεδομένων για τη λειτουργία του μηχανήματος δεν απαιτείται, καθώς γίνεται χρήση μεθόδων διάγνωσης σε αυστηρά προσδιορισμένο περιβάλλον και όχι στατιστικών μεθόδων όπως τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης (AI).

4.3. Λειτουργία

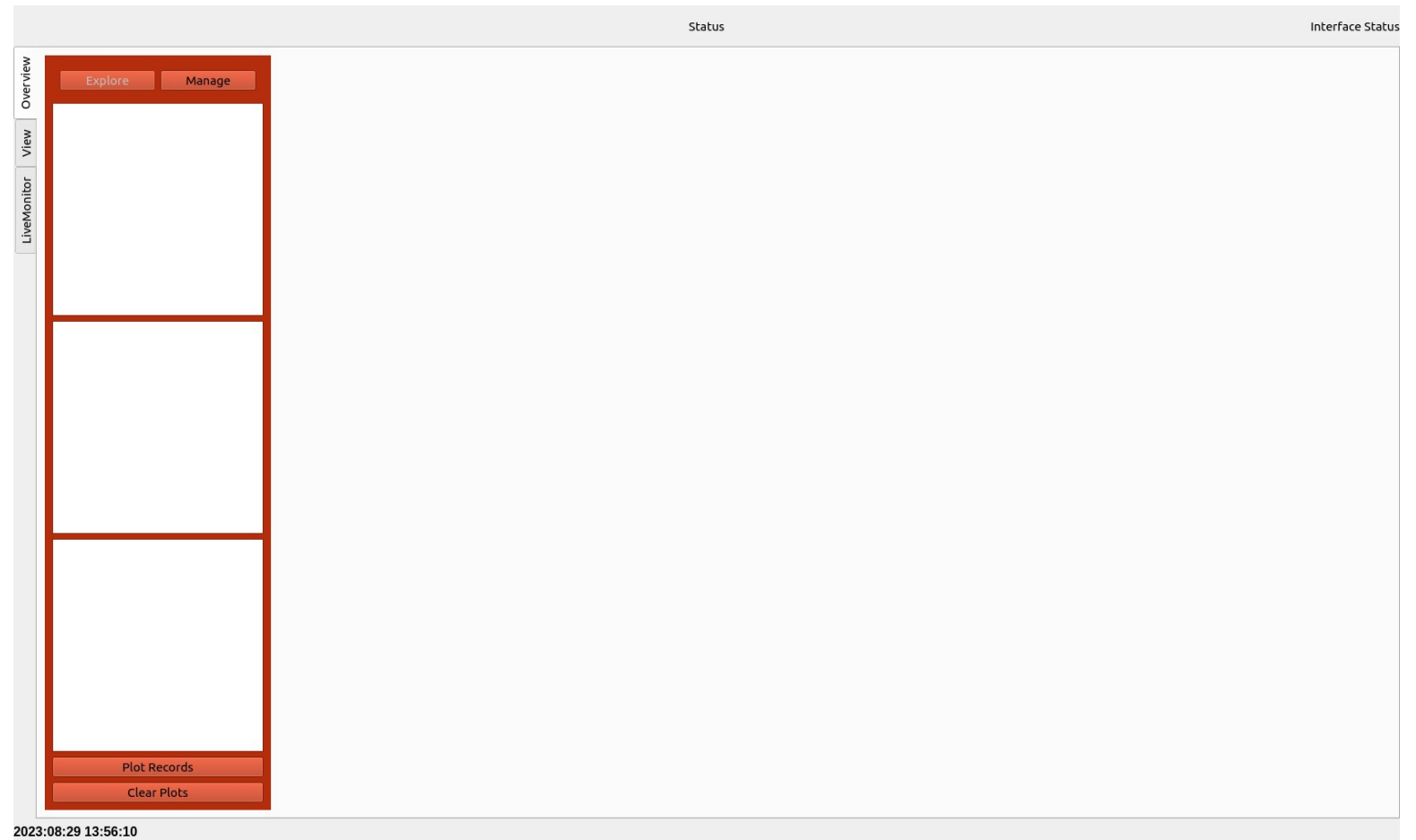
Με την εκτέλεση του προγράμματος εμφανίζεται η παρακάτω επιφάνεια εργασίας.

Στα αριστερά της επιφάνειας εργασίας υπάρχουν τρεις καρτέλες

- Overview
- View
- LiveMonitor
-

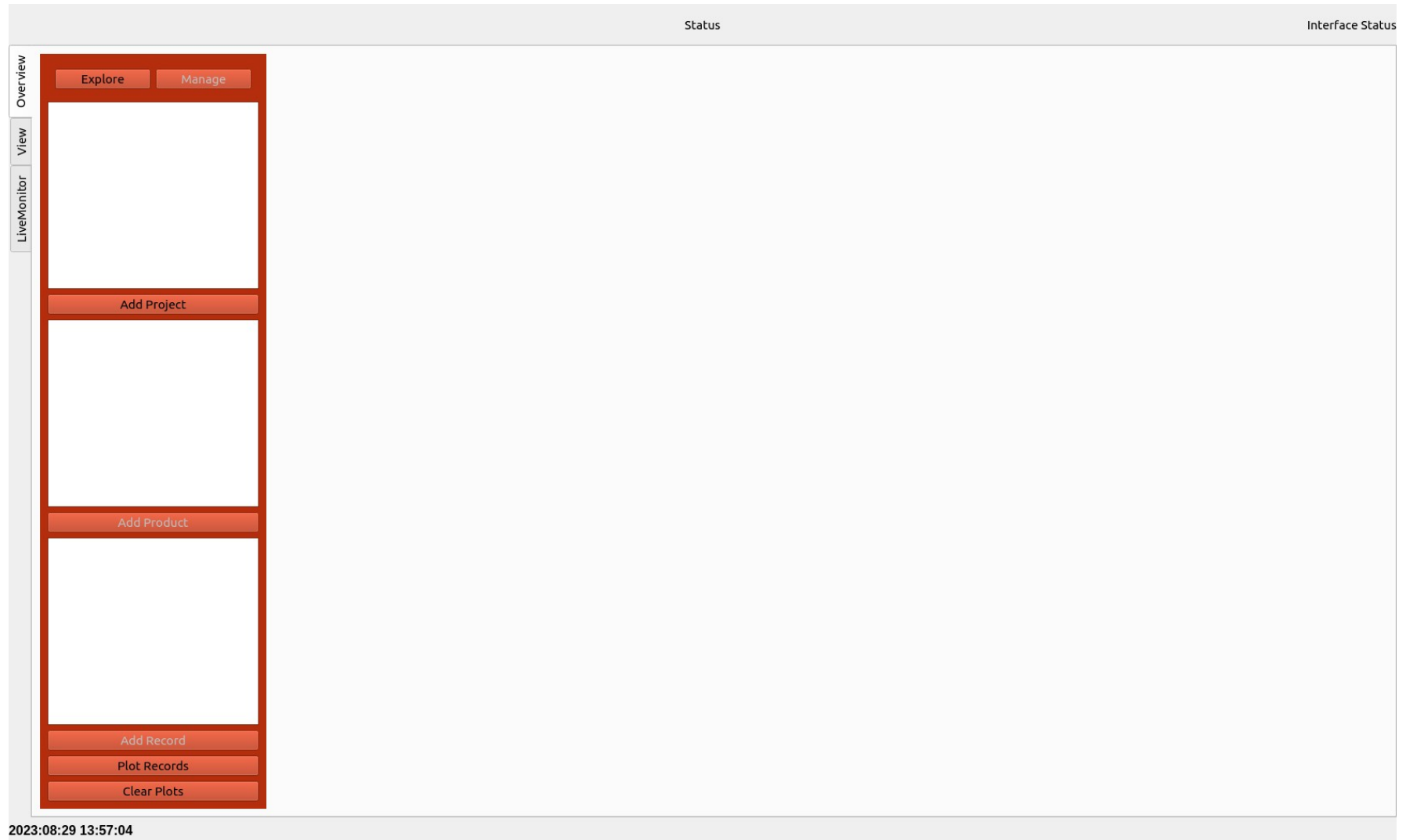
Η πρώτη καρτέλα λειτουργεί και ως αρχική οθόνη. Σε αυτή, ο χρήστης μπορεί να δει τα υπάρχοντα Projects, τα Products ανά Project και τα Records ανά Product.

Επίσης μπορεί να δημιουργήσει νέο Project, Product και Record.



Διαχείριση Δεδομένων

Με το πάτημα του κουμπιού “Manage”, δίνεται η δυνατότητα επεξεργασίας των υπαρχόντων “Projects”, “Products” και “Records”. Αν δεν υπάρχει κανένα “Project” τότε η μόνη επιλογή είναι η δημιουργία ενός νέου Project. αντίστοιχα για τα “Products” και τα “Records”.

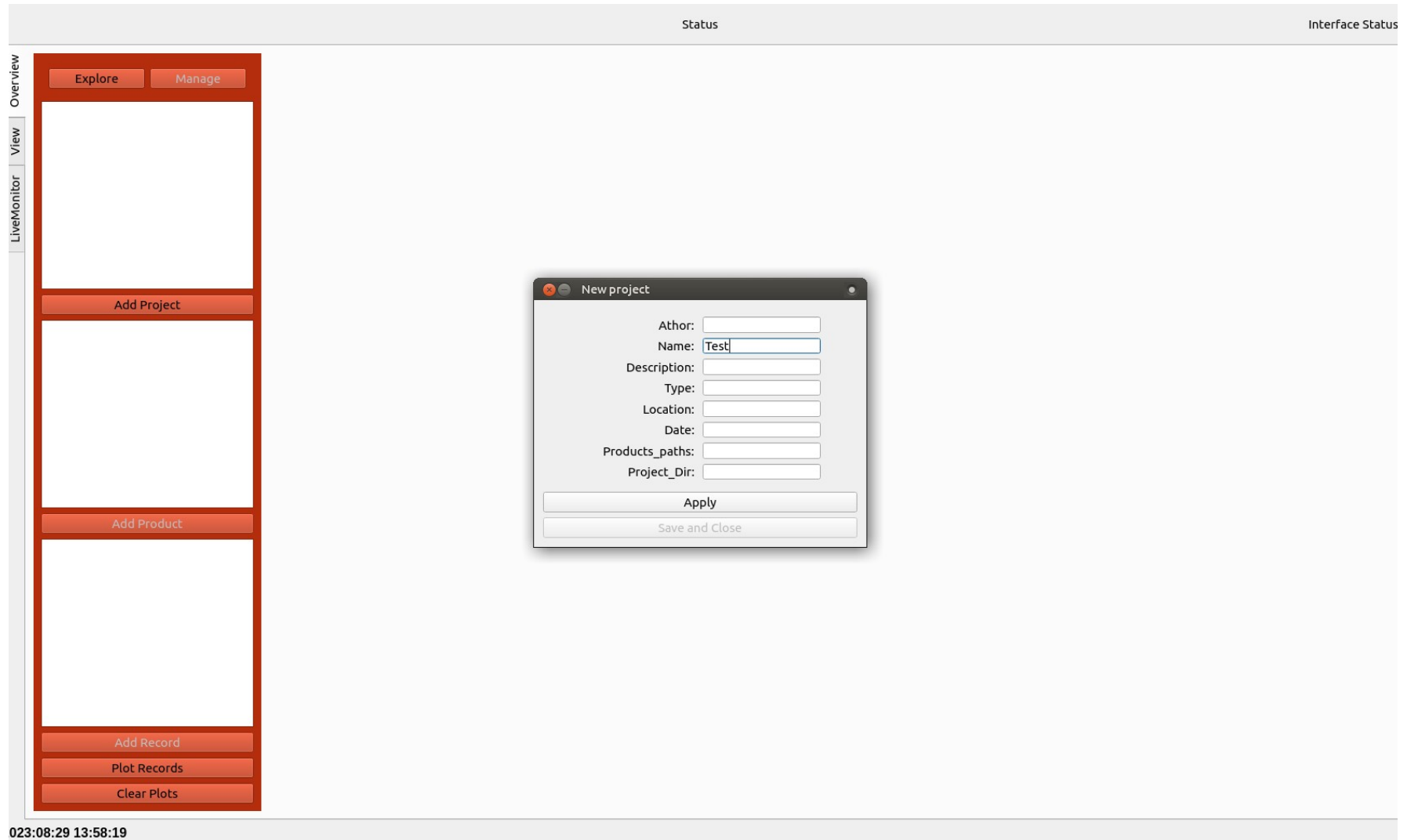


Δημιουργία Project

Με το πάτημα του κουμπιού “Add Project”, εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο για την εισαγωγή των στοιχείων του νέου “Project”. Τα στοιχεία είναι:

- Author
- Name
- Description
- Type
- Location
- Data
- Products_paths
- Project_Dir

Για την δημιουργία ενός “Project”, το ελάχιστο στοιχείο που μπορεί να εισάγει ο χρήστης είναι το όνομα του “Project” στο πεδίο “Name”.



Δημιουργία Product

Η δημιουργία ενός “Project” επιτρέπει την δημιουργία εντός αυτού ενός “Product”. Με το πάτημα του κουμπιού “Add Product”, εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο για την εισαγωγή των στοιχείων του νέου “Product”. Τα στοιχεία είναι:

- Name
- Description
- Type
- Location
- Data
- Records_paths
- Product_Dir
- Project_Dir

Για τη δημιουργία ενός “Product”, το ελάχιστο στοιχείο που μπορεί να εισάγει ο χρήστης είναι το όνομα του “Product” στο πεδίο “Name”.

The screenshot shows the software interface with the 'New Product' dialog box open. The dialog box contains the following fields and buttons:

- Name: Product_1
- Description: [Empty]
- Type: [Empty]
- Location: [Empty]
- Date: [Empty]
- Records_paths: [Empty]
- Product_Dir: [Empty]
- Project_Dir: [Empty]
- Buttons: Apply, Save and Close

The main window shows a sidebar with 'Overview', 'View', and 'LiveMonitor' tabs. The 'Overview' tab is active, showing a tree view with 'Test' selected. The 'Add Product' button is highlighted in the tree view.

Δημιουργία Record

Η δημιουργία ενός “Product” επιτρέπει την δημιουργία εντός αυτού ενός “Record”. Με το πάτημα του κουμπιού “Add Record”, εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο για την εισαγωγή των στοιχείων του νέου “Product”. Τα στοιχεία είναι:

- Name
- Description
- MeasuredValue
- Position
- Data
- Record_Dir
- Product_Dir

Για τη δημιουργία ενός “Record”, το ελάχιστο στοιχείο που μπορεί να εισάγει ο χρήστης είναι το όνομα του “Record” στο

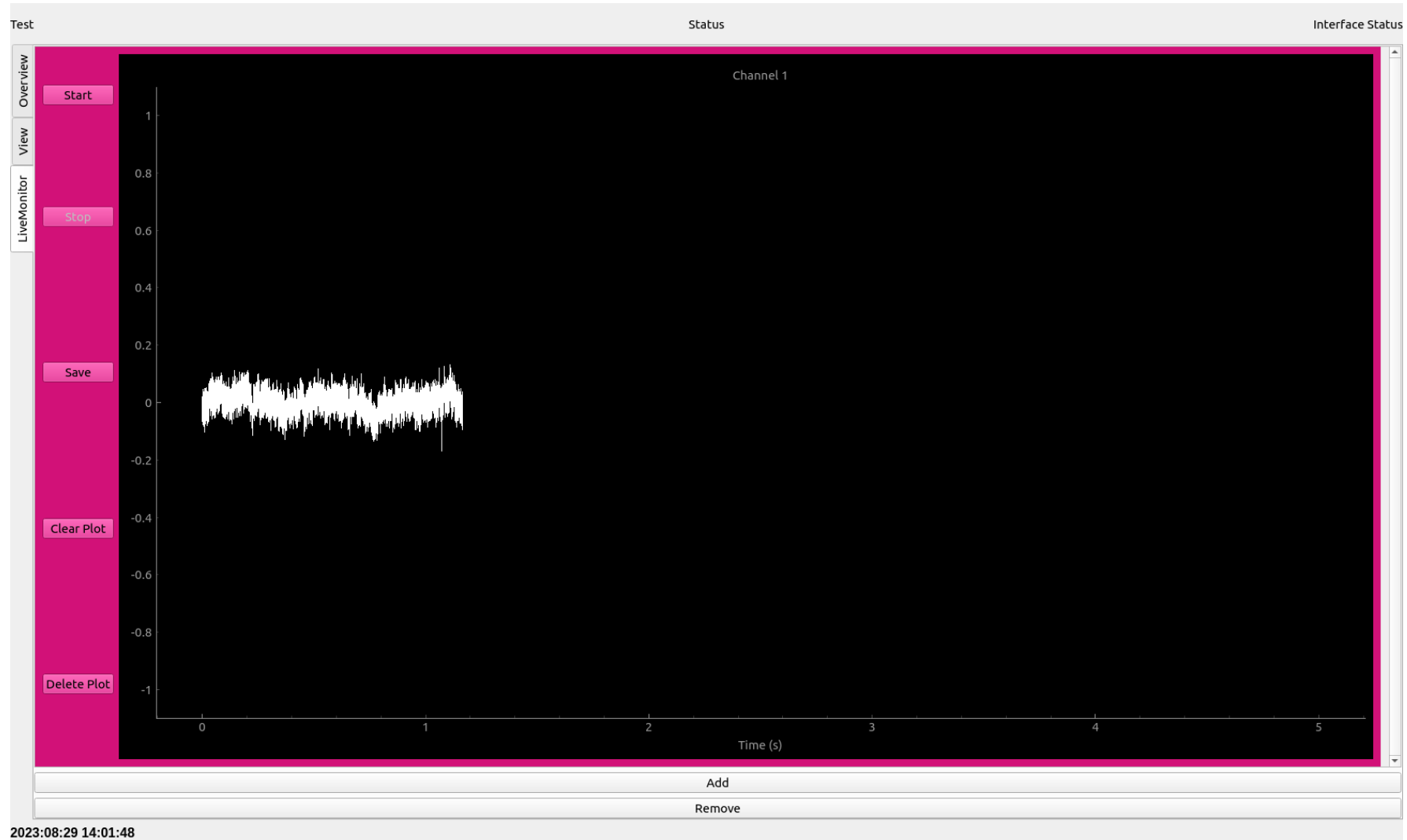
The screenshot displays a software interface with a sidebar on the left containing 'Explore' and 'Manage' buttons. The main area shows a 'Test' window with a 'Test' tab and a 'Product 1' tab. Below the tabs are buttons for 'Add Project', 'Add Product', 'Add Record', 'Plot Records', and 'Clear Plots'. A 'New Record' dialog box is open in the center, featuring input fields for Name (containing '1'), Description, MeasuredValue, Position, Date, Record Dir, and Product Dir. Below these fields are buttons for 'Start Recording', 'Apply', 'Save and Close', and 'Import'. The status bar at the bottom left shows the date and time: 2023:08:29 14:01:17.

πεδίο “Name”. Η διαδικασία δημιουργίας νέου “Record” επιτρέπει, είτε την άμεση καταγραφή ενός δείγματος πατώντας το κουμπί “Start Recording” είτε την εισαγωγή μιας άλλης δειγματοληψίας από αρχείο της μορφής “.csv” ή “.wav”.

Άμεση Καταγραφή

Με το πάτημα του κουμπιού “Start Recording” ο χρήστης μεταφέρεται αυτόματα στην καρτέλα “LiveMonitor”. Σε αυτή την καρτέλα ο χρήστης μπορεί να καταγράψει την κυματομορφή του σήματος στο πεδίο του χρόνου με χρήση των εξής κουμπιών:

- “Start” για Έναρξης καταγραφής
- “Stop” για Παύσης καταγραφής
- “Save” για Αποθήκευσης δεδομένων
- “Clear Plot” για Καθαρισμού δεδομένων
- “Delete Plot” για Διαγραφής καταγραφής



Εισαγωγή αποθηκευμένης Καταγραφής

Με το πάτημα του κουμπιού “Import” εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο περιήγησης στα αρχεία του υπολογιστή. Στο παράδειγμα επιλέγεται μία καταγραφή με όνομα “2023_08_17_13_04_53_K1.wav”.

Στην περίπτωση εισαγωγής μίας καταγραφής το “Record” παίρνει το όνομα του αρχείου.



Διαδικασία Διάγνωσης Σφαλμάτων σε μία Καταγραφή

Με την δημιουργία ενός “Record” κλείνει η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων στο πρόγραμμα.

Στη συνέχεια με την επιλογή ενός από τα διαθέσιμα “Record” ο χρήστης μπορεί να πατήσει το κουμπί “Plot Records”. Με αυτό το κουμπί ξεκινάει η διαδικασία απεικόνισης του επιλεγμένου “Record” στην καρτέλα “View”.

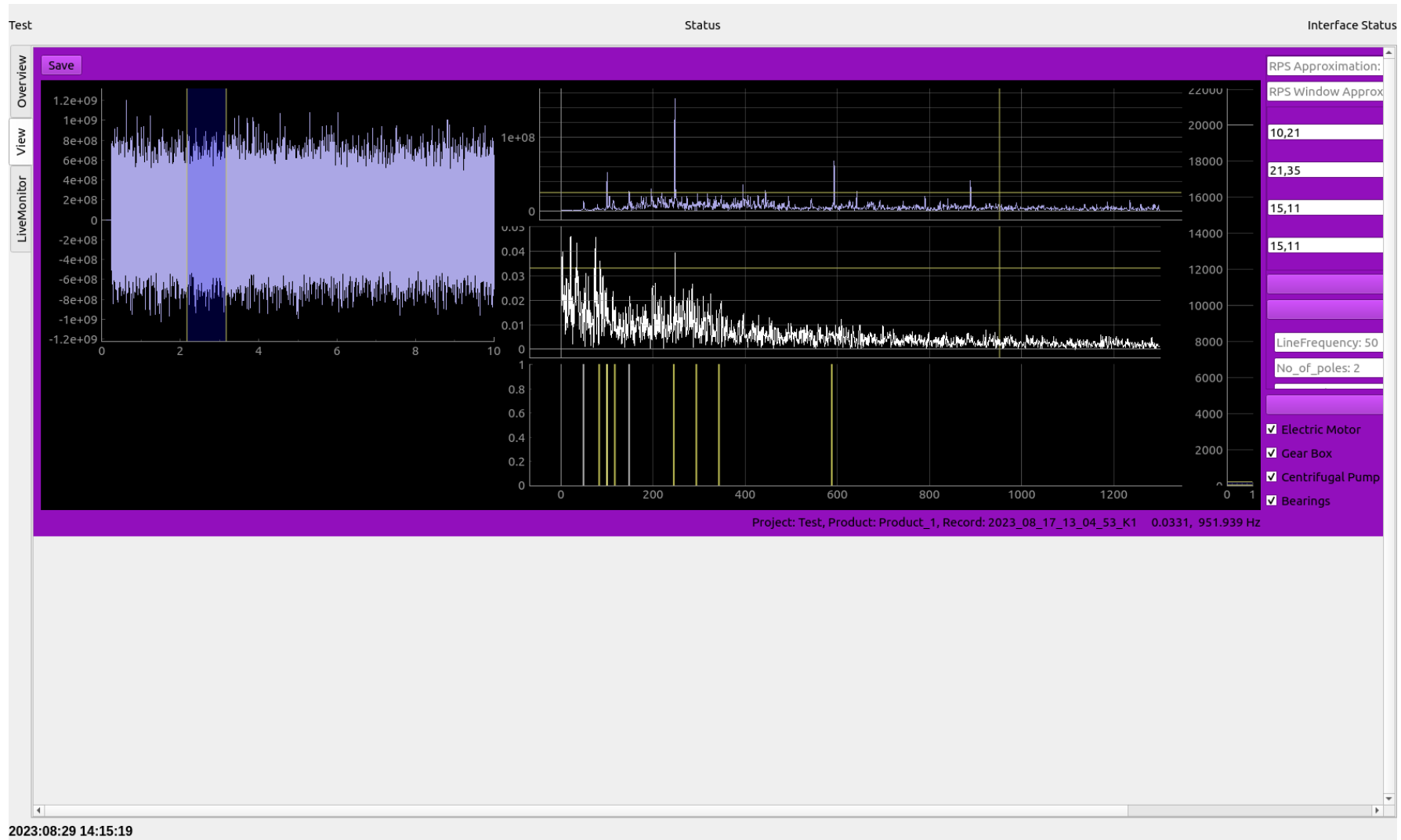
The screenshot displays a software interface for fault diagnosis. The interface is organized into three main vertical sections: Overview, View, and LiveMonitor. The Overview section features buttons for 'Explore' and 'Manage', and a list of records including 'Test', 'Add Project', 'Product 1', 'Add Product', and '2023_08_17_13_04_53_K1'. The View section shows a detailed view of the selected record 'Test', with fields for 'Athor:', 'Name: Test', 'Description:', 'Type:', and 'Location: None'. The LiveMonitor section is currently empty. The interface also includes a top bar with 'Test', 'Status', and 'Interface Status' labels, and a timestamp '2023:08:29 14:14:49' at the bottom left.

Διαδικασία Διάγνωσης Σφαλμάτων σε μία Καταγραφή

Με την μετάβαση στην καρτέλα “View” ο χρήστης παρουσιάζεται με ένα σύνολο διαγραμμάτων στην αριστερή πλευρά και κεντρικά της οθόνης καθώς και με μία λίστα με πεδία στην δεξιά πλευρά της οθόνης, για την ρύθμιση των παραμέτρων της αυτόματης διάγνωσης. Τα διαγράμματα από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω είναι τα εξής:

- Κυματομορφή
- FFT
- H-FFT
- Σφάλματα

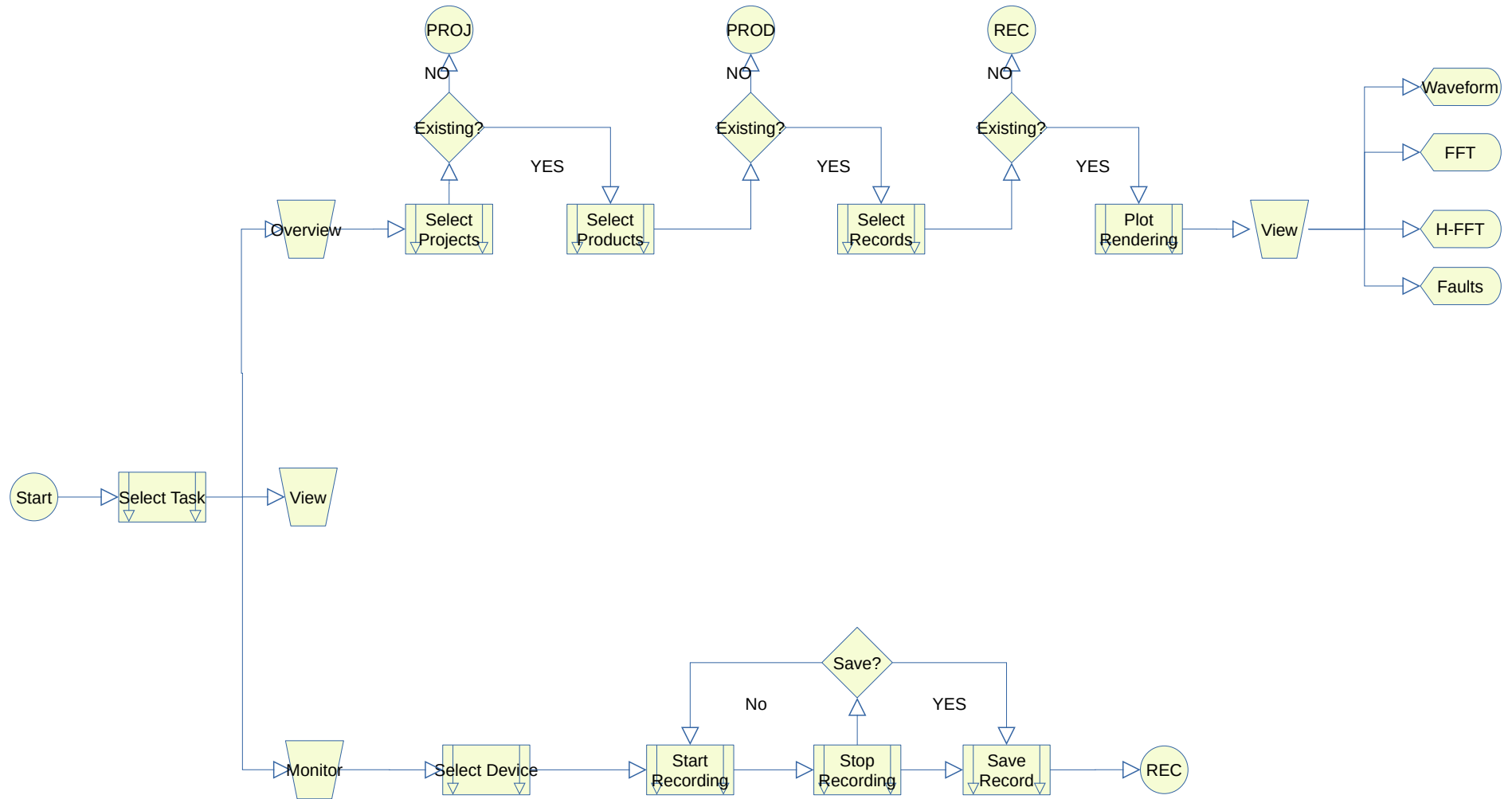
Στο διάγραμμα της κυματομορφής προβάλλεται το σήμα από το πεδίο του χρόνου. Σε

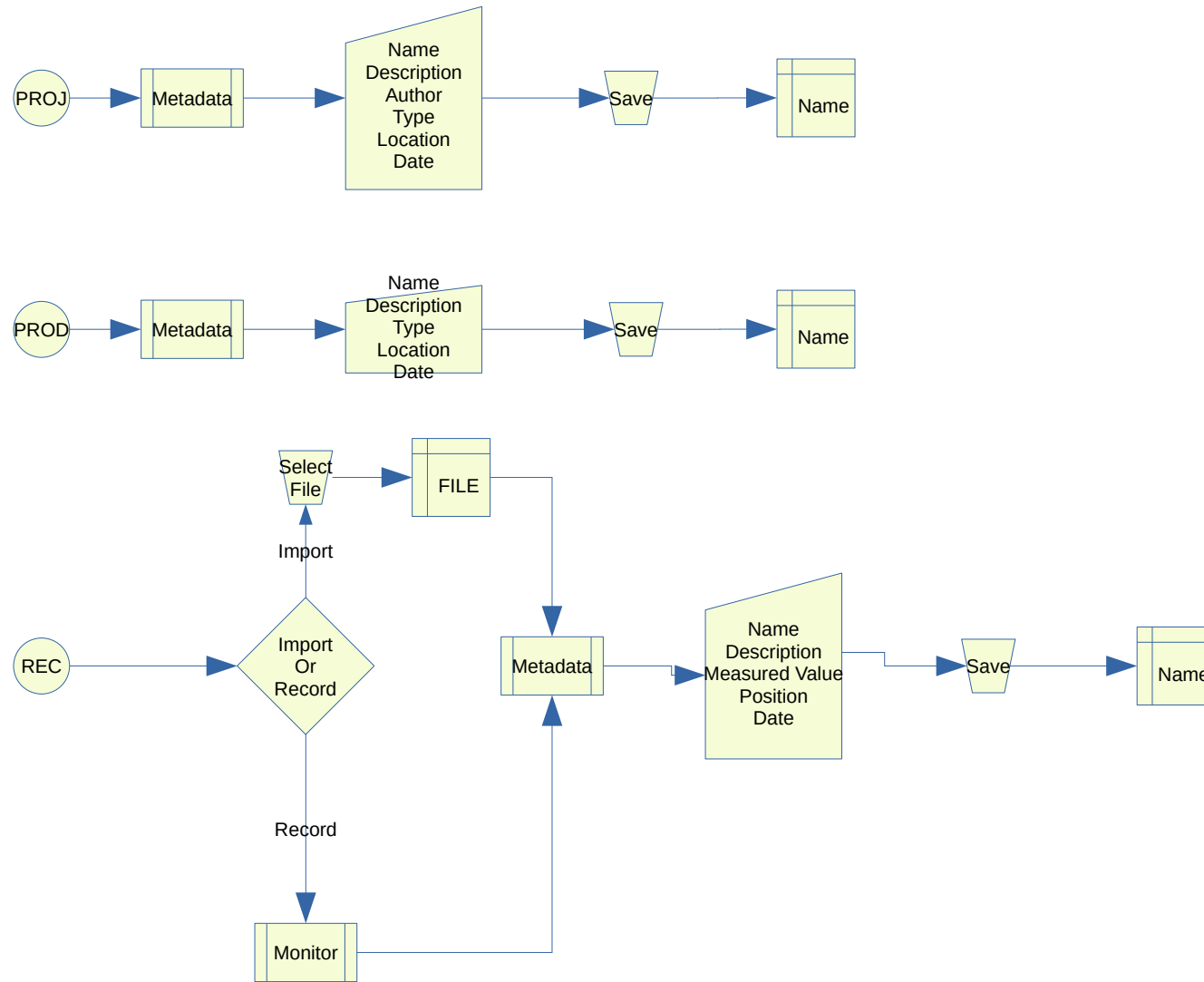


αυτό ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επιλογής τμήματος αυτού με τη χρήση του μπλε πεδίου. Το διάγραμμα της κυματομορφής έχει χρώμα ίδιο με το χρώμα του “Record”. Στο διάγραμμα FFT προβάλλεται το επιλεγμένο τμήμα του σήματος από τον χρήστη, μετά τον μετασχηματισμό Fourier. Σε αυτό ο χρήστης μπορεί να διακρίνει τις κύριες συχνότητες που είναι χαρακτηριστικές του σήματος. Το διάγραμμα Fourier έχει χρώμα ίδιο με το χρώμα του “Record”. Στο Διάγραμμα H-FFT προβάλλεται το επιλεγμένο τμήμα του σήματος από τον χρήστη μετά τον μετασχηματισμό Hilbert στο πεδίο συχνοτήτων. Σε αυτό, ο χρήστης μπορεί να διακρίνει τον ρυθμό εμφάνισης περιοδικών μη αρμονικών φαινομένων, δηλαδή παλμών. Με τη δεξιά κατακόρυφη στήλη ο χρήστης μπορεί να απομονώσει ορισμένο εύρος από το πεδίο συχνοτήτων του σήματος, έτσι ώστε ο μετασχηματισμός Hilbert να γίνεται με ποιο καλή ακρίβεια, απομονώνοντας έτσι περιοδικά φαινόμενα με βάση την ιδιοσυχνότητά τους. Αυτό είναι σημαντικό εργαλείο για τη διάγνωση τριβών κύλισης. Το τελευταίο διάγραμμα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της αυτόματης διάγνωσης. Με κατακόρυφες γραμμές εμφανίζονται τα σφάλματα στις συχνότητες στις οποίες εντοπίζονται και με ανάλογο χρώμα ως προς την κατηγορία του εξαρτήματος π.χ. με κίτρινο σκιαγραφούνται τα σφάλματα του ηλεκτροκινητήρα.

4.4. Διάγραμμα Ροής Προγράμματος Εργασίας

Το παρακάτω διάγραμμα ροής προβάλλει τα βήματα για την ορθής χρήσης του προγράμματος από τον χρήστη.





5. Εφαρμογή χρήσης του Λογισμικού σε πραγματικό πρόβλημα

Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας διάγνωσης μέσω του αναπτυχθέντος λογισμικού, καθώς και του θεωρητικού υπόβαθρου στο οποίο αυτό στηρίχθηκε, έγινε ένα πείραμα σε βιομηχανική εγκατάσταση επεξεργασίας και μεταφοράς νερού. Η διάγνωση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος αυτής της εργασίας, καθώς και των δύο διαγνωστικών εμπορικών πακέτων για βιομηχανίες των εταιριών “iFM” και “Enging”.

5.1. Πειραματικός Εξοπλισμός

Παρακάτω παρατίθεται συνοπτικά ο εξοπλισμός με τις ρυθμίσεις στις οποίες έγιναν οι μετρήσεις. Στη συνέχεια παρατίθενται οι απαραίτητες λεπτομέρειες.

Ηλεκτρικός Κινητήρας

- Κατασκευαστής: N/A
- Μοντέλο: 280
- Ισχύς: 75KW
- Ονομαστικές Στροφές: 2980rpm
- Πόλοι: 2
- Συχνότητα Τροφοδοσίας: 50 Hz
- Τριβείς Κύλισης: SKF 6314

Αντλία

- Κατασκευαστής: N/A
- Μοντέλο: N/A
- Αριθμός πτερωτών: 7
- Αριθμός βαθμίδων: 7
- Τριβέας στην έδραση εκτόνωσης: SKF 6306
- Τριβέας στην έδραση αναρρόφησης: SKF 6306

Μικρόφωνο

- Κατασκευαστής: AKG
- Μοντέλο: C417 PP
- Εύρος μέτρησης: 20 – 20000 Hz
- Ευαισθησία: 7mV/Pa

Επιταχυνσιόμετρο

- Κατασκευαστής: IFM
- Μοντέλο: VSA001
- Εύρος μέτρησης: +- 25g, 2 – 6000 Hz
- Ευαισθησία: 100mV/g

Accelerometer Interface

- Κατασκευαστής: iFM
- Μοντέλο: VSE100
- Εύρος μέτρησης: 0 – 12000 Hz
- Ευαισθησία: 16bit
- Κανάλια: 1
- Ρυθμός δειγματοληψίας: 100000 Sps
- Μέθοδος δειγματοληψίας: -

Audio Interface

- Κατασκευαστής: Focusrite
- Μοντέλο: Clarett 2Pre USB
- Εύρος μέτρησης: 0 – 35000 Hz
- Ευαισθησία: 24bit
- Κανάλια: 2
- Ρυθμός δειγματοληψίας: 96000 Sps
- Μέθοδος δειγματοληψίας: -

H/Y

- Κατασκευαστής: DELL
- Μοντέλο: -
- RAM: 8gb
- SSD: 256gb
- Αριθμός πυρήνων: 2

Αισθητήρας Hall

- Απόσταση αναγνώρισης : 3 (mm)
- Εύρος λειτουργίας : 0 – 2.43 (mm)
- Μέγιστη ταχύτητα : 2000 (Hz)
- Μορφή σήματος : Παλμός

Accelerometer Interface

Το σύστημα VSE100 της iFM, είναι ένας μικρο-υπολογιστής με τη δυνατότητα μετατροπής αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά, καθώς και την ανάλυση σημάτων. Τα χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται παρακάτω :

- Εύρος συχνοτήτων : 0 – 12000 (Hz)
- Αριθμός ψηφιακών εισόδων και εξόδων : 8
- Αριθμός αναλογικών εισόδων και εξόδων : 2
- Αριθμός αισθητηρίων δονήσεων : 4
- Ανάλυση ψηφιακών εισόδων : 12 (bit)
- Μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας : 100000 δείγματα το δευτερόλεπτο
- Σύνδεση με ηλεκτρονικό υπολογιστή : Ethernet TCP/IP
- Τροφοδοσία αναλογικών εξόδων: IEPΕ Σταθερής έντασης (4mA)



Figure 5: Αναλυτής σημάτων VSE 100

Audio Interface

Το σύστημα Clarett 2Pre USB της Focusrite, είναι ένας μικρο-υπολογιστής με τη δυνατότητα μετατροπής αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Τα χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται παρακάτω :

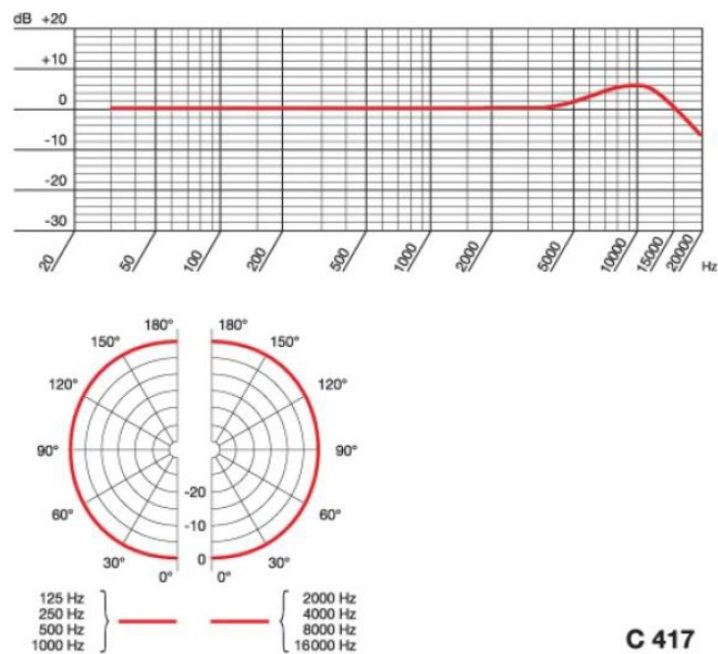
- Εύρος συχνοτήτων : 0 – 35000 (Hz)
- Αριθμός αναλογικών εισόδων: 2.
- Αριθμός αναλογικών εξόδων: 4.
- Ανάλυση ψηφιακών εισόδων : 24 (bit)
- Μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας : 192 χιλιάδες δείγματα το δευτερόλεπτο.
- Σύνδεση με ηλεκτρονικό υπολογιστή : USB-C 3.0 Gen 2
- Τροφοδοσία αναλογικών εξόδων: Phantom +48VDC



Μικρόφωνο C417 PP

Το μικρόφωνο, C417 PP της AKG, είναι χωρητικό με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Μοτίβο εστίασης: Πολυκατευθυντικό
- Εύρος συχνοτήτων : 0 – 20000 (Hz)
- Ευαισθησία: 7 mV/Pa
- Διάμετρος: 7.5 mm
- Ύψος: 15 mm



Επιταχυνσιόμετρο VSA 001

Ο αισθητήρας επιτάχυνσης, VSA 001, είναι πιεζοηλεκτρικός με τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- Εύρος επιταχύνσεων : +/- 25 (g ή 9.81 m/s²)
- Εύρος συχνοτήτων : 0 – 6000 (Hz)
- Βάρος 48 (grams)
- Αριθμός αξόνων : 1



Figure 6: Αισθητήριο Επιταχύνσεων VSA 001.

Στροφόμετρο

Ο επαγωγικός αισθητήρας, IES 200, λειτουργεί ως στροφόμετρο με έναν λογικό παλμό ανά περιστροφή. Τα χαρακτηριστικά του είναι :

- Απόσταση αναγνώρισης : 3 (mm).
- Εύρος λειτουργίας : 0 – 2.43 (mm).
- Μέγιστη ταχύτητα : 2000 (Hz).
- Μορφή σήματος : Παλμός.



Figure 7: Hall Effect Αισθητήρας IES 200.

Ηλεκτρονικός Υπολογιστής

Ο φορητός Ηλεκτρονικός Υπολογιστής, Dell Inspiron 3521, χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό και ρύθμιση των επιμέρους συστημάτων, όπως τη διεπαφή ήχου και τον διακομιστή δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται παρακάτω :

- Επεξεργαστής : Intel Pentium 2127U.
- Μνήμη RAM : 8 GB.
- Σκληρός Δίσκος : 240 GB Kingston A400.
- Ανάλυση Οθόνης : 1366 x 768 εικονοστοιχεία.
- Λειτουργικό : Windows 10 & Ubuntu 18.04 LTS



Figure 8: Φορητός Η/Υ Inspiron 3521.

Κινητήρας Πειράματος

Ο κινητήρας είναι ένας τριφασικός κινητήρας δύο πόλων με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Τύπος : 280S
- Τάση : 3Φ 400 (VAC)
- Ισχύς : 100 (Hp) ή 75 (Kw)
- $\cos\phi$: 0.9
- Ταχύτητα περιστροφής : 2980 (RPM)
- Τριβέας: 6314/C3

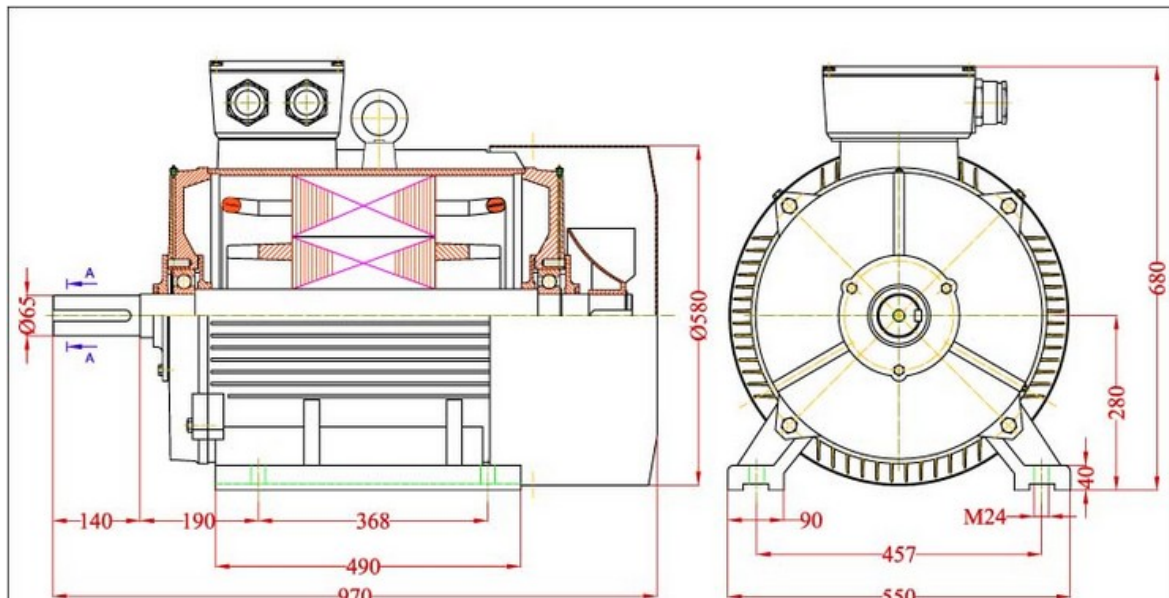


Figure 9: Σχέδιο Κινητήρα Πειράματος

Αντλία Πειράματος

Η αντλία είναι επιφανειακή οριζόντια τοποθέτησης με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Κατασκευαστής: JET
- Τύπος : MH 50-80/07.
- Αριθμός Βαθμίδων: 7
- Τριβέας έδρασης Αναρρόφησης: 6306/C3
- Τριβέας έδρασης Κατάθλιψης: 6306/C3

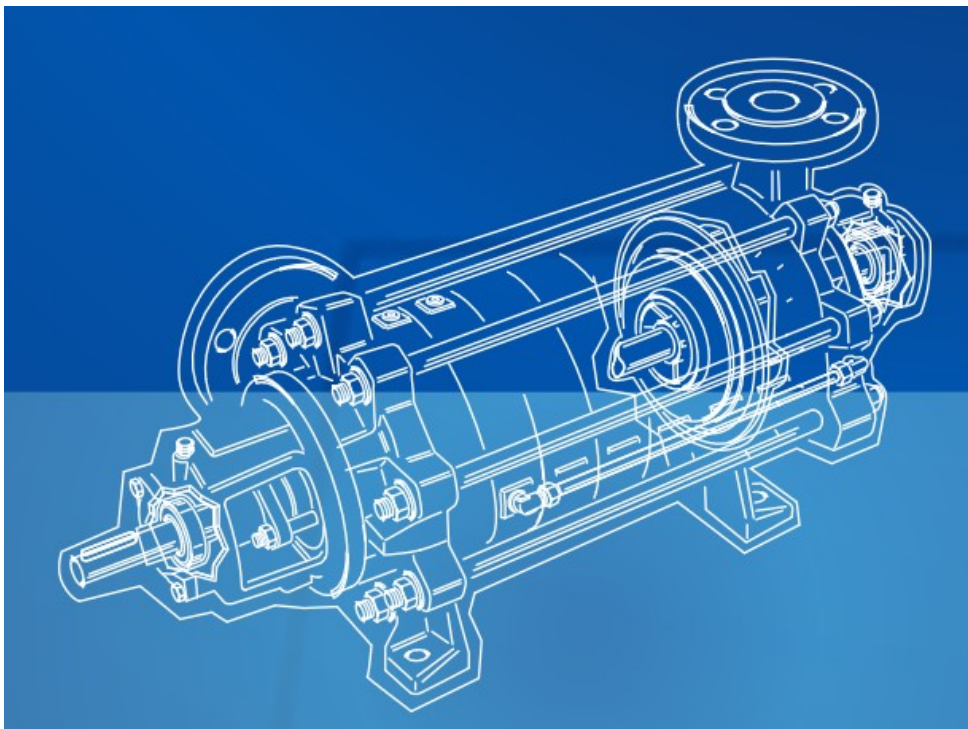


Figure 10: Φωτογραφία Αντλίας Πειράματος

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες της αντλίας ανά βαθμίδα. Από πάνω προς τα κάτω τα διαγράμματα απεικονίζουν τα εξής μεγέθη:

1. Μανομετρική πίεση ανά βαθμίδα “H”
2. Προσδιδόμενη ισχύς στο ρευστό ανά βαθμίδα “P”
3. Βαθμός απόδοσης “η”
4. Απόλυτο ύψος αναρρόφησης “NPSH”
5. Παροχή σε κυβικά ανά ώρα [m^3/h]

Οι μπλε γραμμές σημαδεύουν το θεωρητικό σημείο λειτουργίας της αντλίας με βάση τον κατασκευαστή.

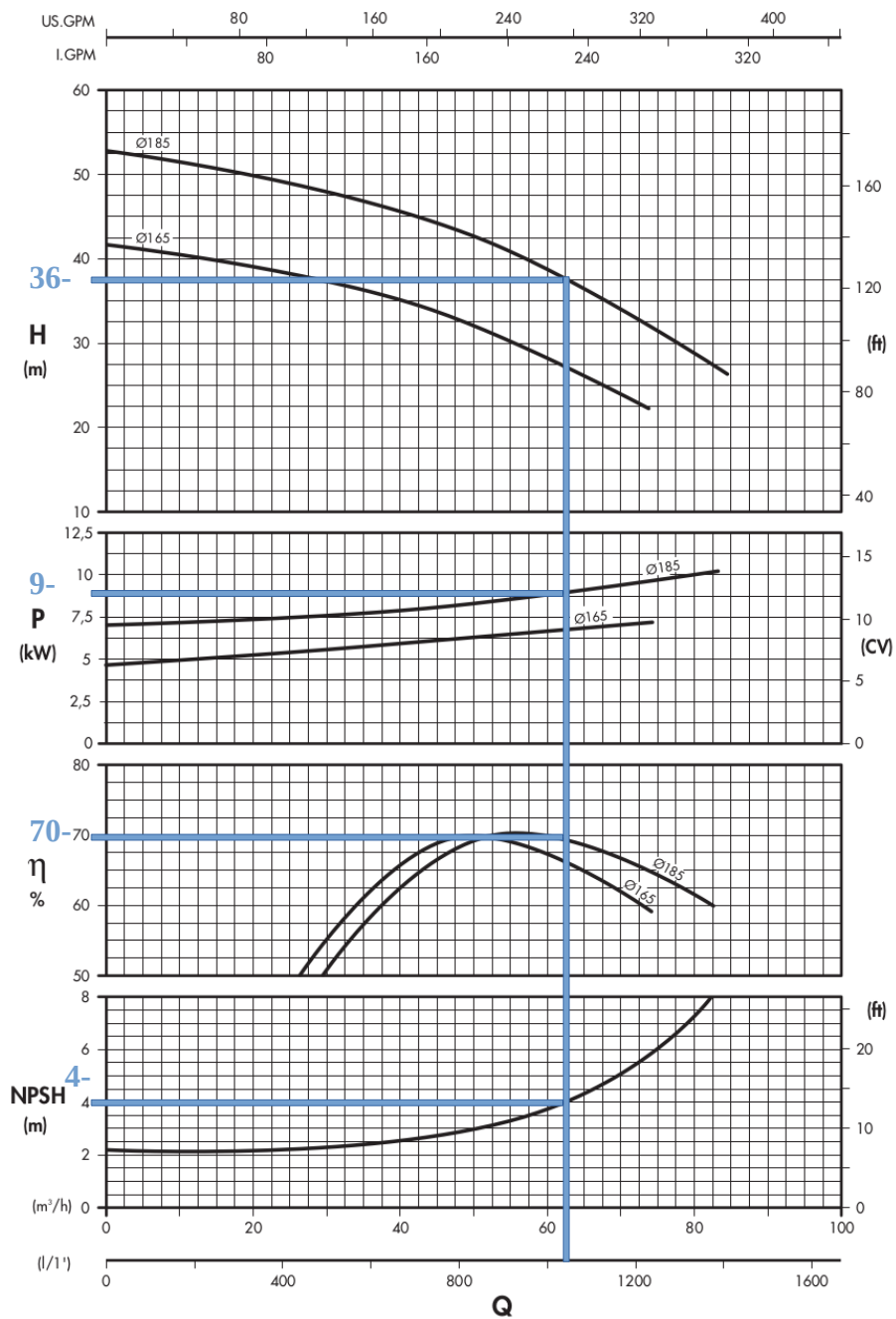


Figure 11: Διάγραμμα απόδοσης αντλίας πειράματος

Με βάση το προηγούμενο διάγραμμα η αντλία δουλεύει στις εξής συνθήκες:

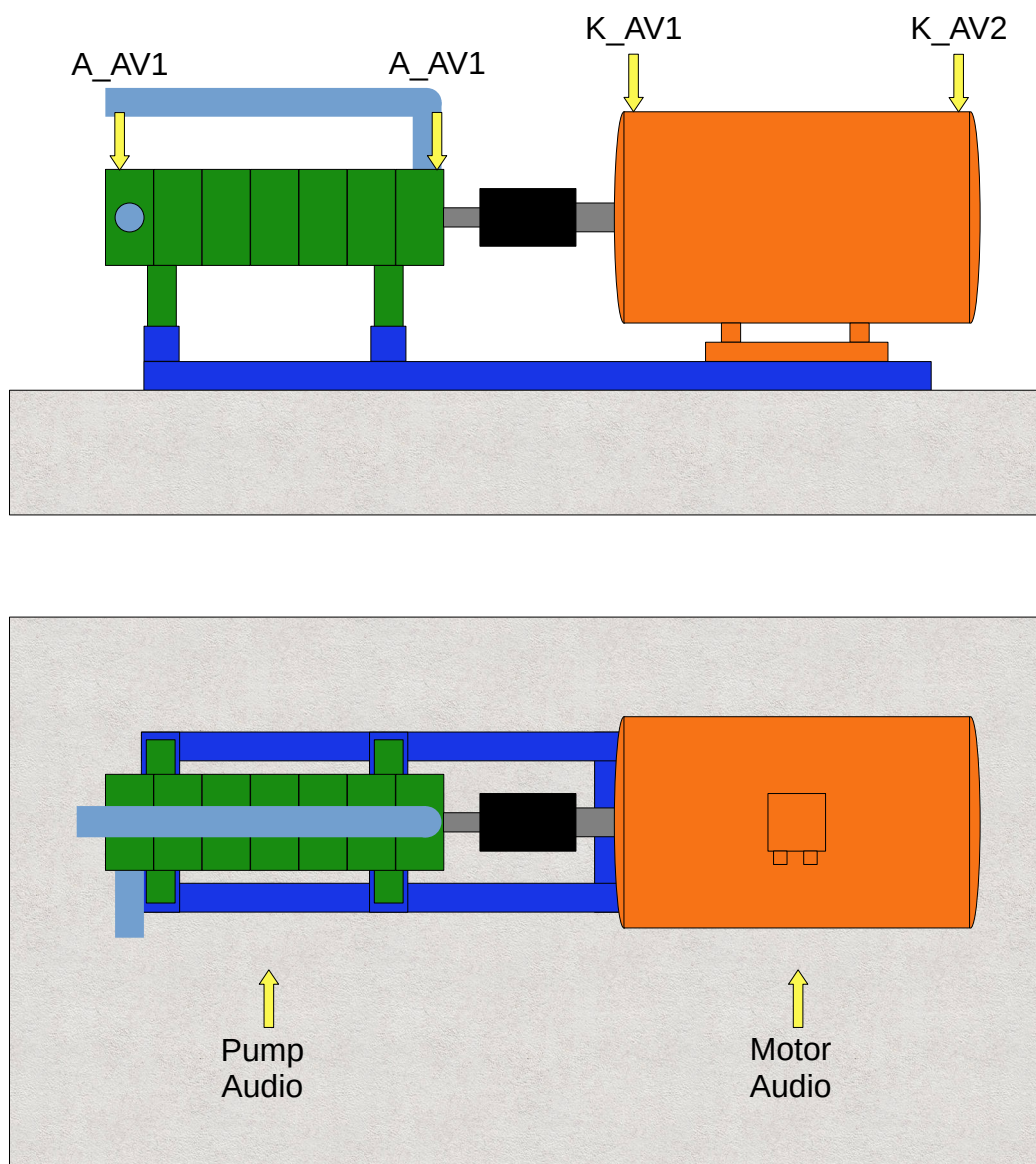
- Μανομετρικό: 252 Μέτρα ή 25.6 Bar
- Παροχή: 17.2 Λίτρα ανά δευτερόλεπτο ή 62 m³/h

5.2. Πείραμα

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με χρήση ενός τριφασικού κινητήρα ισχύος 75kW, οδηγούμενος από έναν εκκινητή αστερά τρίγωνου. Ο κινητήρας συνδέεται μέσω ημιεύκαμπτου συνδέσμου με μία πολυβάθμια αντλία νερού επτά βαθμίδων. Σκοπός του πειράματος είναι η έγκαιρη διάγνωση της κατάστασης του συστήματος κινητήρα/αντλία, καθώς και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με χρήση σημάτων επιτάχυνσης, ηλεκτρικών μεγεθών και ακουστικής εκπομπών.

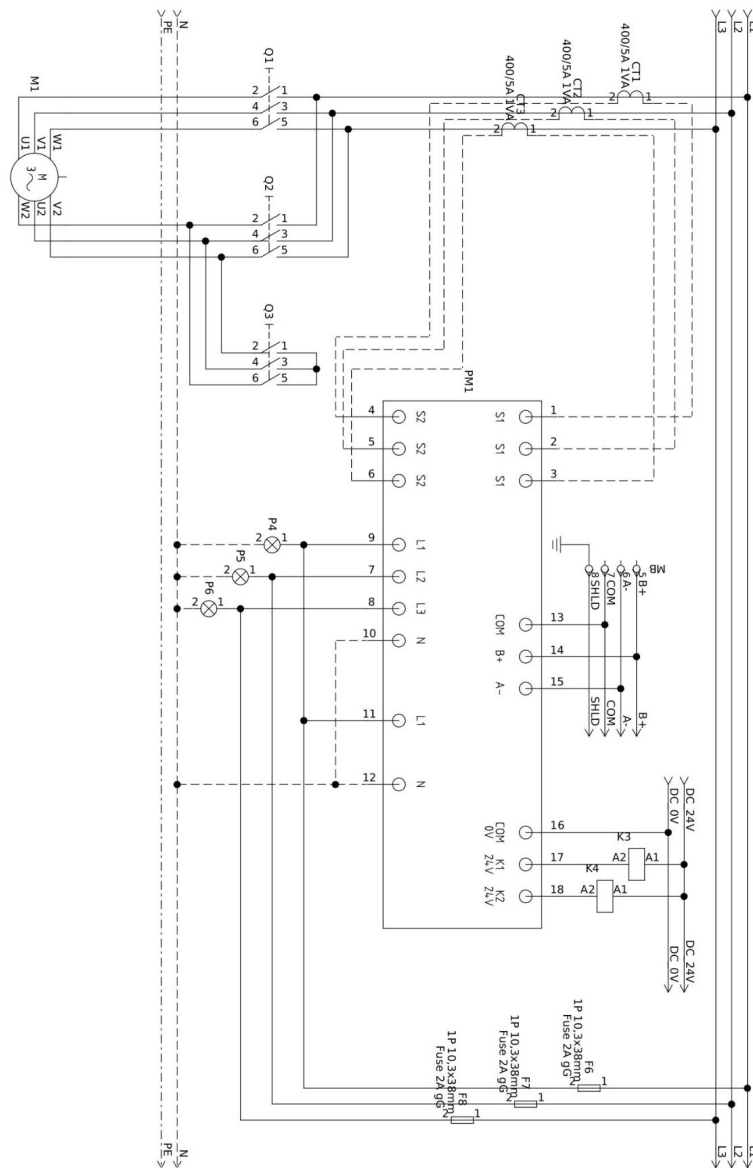


Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται σχηματικά η διάταξη του συστήματος κινητήρα/αντλίας, καθώς και οι θέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των επιταχύνσεων και των ακουστικών εκπομπών αντίστοιχα. Οι ονοματολογίες των θέσεων για τη μέτρηση των σημάτων επιτάχυνσης έγιναν με βάση το ISO 10816-7. Οι μετρήσεις επιταχύνσεων έγιναν ακτινικά σε κατακόρυφο επίπεδο, πάνω από την θέση των τριβών κύλισης. Οι μετρήσεις ακουστικών εκπομπών έγιναν σε απόσταση 1 μέτρου σε οριζόντιο επίπεδο από την πηγή στόχο και 1,5 μέτρων καθ' ύψος από το έδαφος για την αποφυγή αντανάκλασεων. Μία φορά με στόχο το σώμα του κινητήρα και μία φορά με στόχο το σώμα της αντλίας. Για κάθε θέση έγινε η μέτρηση στο σύστημα και η αντίστοιχη καταγραφή με ανενεργό το σύστημα, έτσι ώστε να καταγραφεί το επίπεδο θορύβου. Ο προσδιορισμός του επιπέδου του θορύβου βοηθάει στην σύγκριση των μετρήσεων σε επόμενο κεφάλαιο.



Ηλεκτρική Καλωδίωση

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται σχηματικά η διάταξη του συστήματος τροφοδοσίας του κινητήρα καθώς και οι θέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση των τάσεων και των εντάσεων του ρεύματος αντίστοιχα. Χρονικά οι μετρήσεις έγιναν μετά από 30 λεπτά από την μεταγωγή του αστέρα σε τρίγωνο στην εκκίνηση, έτσι ώστε ο κινητήρας να φτάσει σε θερμοκρασία λειτουργίας. Οι ηλεκτρικές μετρήσεις έγιναν για 10 δευτερόλεπτα κάθε 10 λεπτά, όσο δηλαδή χρειάζεται το πρόγραμμα διάγνωσης της εταιρίας Enging, με τον κινητήρα σε συνεχόμενη λειτουργία υπό σταθερό φορτίο.



Στο προηγούμενο διάγραμμα με L1, L2, L3 αναγράφονται οι τρεις φάσεις τροφοδοσίας και με CT1, CT2, CT3 αναγράφονται οι τρεις μετασχηματιστές έντασης για κάθε φάση αντίστοιχα. Τα σήματα των τάσεων και των εντάσεων συνδέονται στο βαλιτσάκι καταγραφής της εταιρίας “Enging” με την ένδειξη PM1.

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα οι μετρήσεις λήφθηκαν πριν από τις μεταγωγικές επαφές του αστέρα-τριγώνου Q1, Q2, Q3. Στις παρακάτω εικόνες, αριστερά φαίνεται η θέση και ο τρόπος με τον οποίον τοποθετήθηκαν οι μετασχηματιστές έντασης πάνω στα καλώδια τροφοδοσίας. Στην δεξιά εικόνα φαίνεται η θέση και ο τρόπος με την οποία έγινε η δειγματοληψία των τριών τάσεων πάνω από τα καλώδια τροφοδοσίας.



Figure 12: Θέση μετασχηματιστών έντασης.

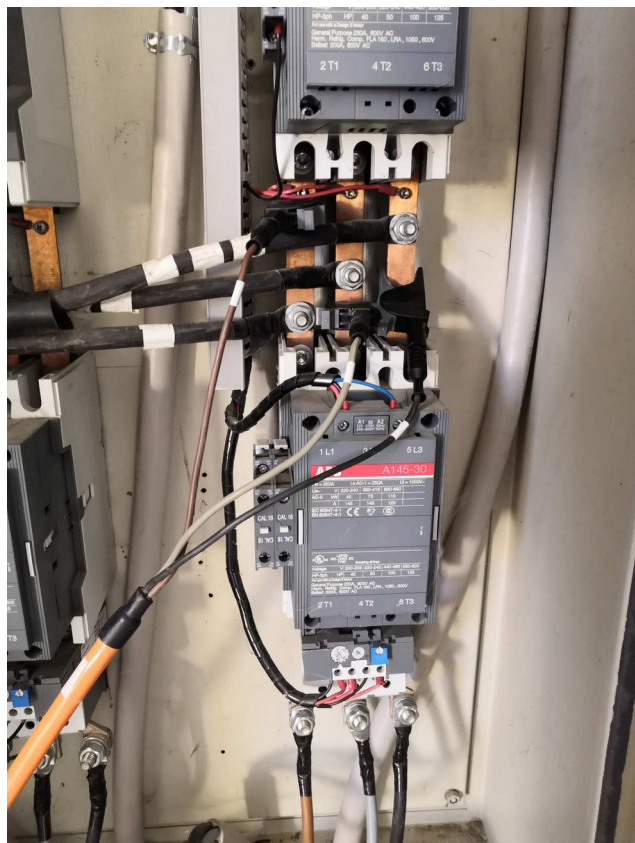


Figure 13: Θέση τσιμπιδών δειγματοληψίας τάσεων.

5.2.1 Ανάλυση

Με βάση τη θεωρία που αναπτύχθηκε στις προηγούμενες σελίδες, καθώς και σε προηγούμενη εργασία [17], η ανάλυση των δονητικών σημάτων ξεκινά με την εύρεση της βασικής συχνότητας λειτουργίας, δηλαδή, της συχνότητας περιστροφής του άξονα του συστήματος αντλία/κινητήρα. Αυτή ονομάζεται και ως πρώτη αρμονική (ή κύρια) καθώς είναι η βάση μίας σειράς αρμονικών συχνοτήτων. Η πρώτη αρμονική σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να είναι κοντά στην συχνότητα περιστροφής του άξονα κινητήρα (50Hz). Η θεωρητική συχνότητα περιστροφής του κινητήρα δεν ταυτίζεται πλήρως με την πραγματική, η οποία είναι μικρότερη καθώς ο κινητήρας δουλεύει με ολίσθηση.

Διαβάζοντας το διάγραμμα συχνοτήτων από το σήμα των δονήσεων στην θέση K_AV1 του κινητήρα, εντοπίζεται η πρώτη αρμονική στα 49.7 Hz ή 2982 RPM. Η τιμή των στροφών λειτουργίας που υπολογίζεται συμβαδίζει με τις ονομαστικές στροφές του κινητήρα, περίπου 2980 RPM.

Η διαφορά των στροφών λειτουργίας που υπολογίζεται ως προς την ένδειξη του κατασκευαστή είναι της τάξης του 0.033Hz ή 0.067%. Η απόκλιση αυτή δεν εισάγει κάποιο πραγματικό σφάλμα στους παρακάτω υπολογισμούς. Επομένως, μπορούν να υπολογιστούν και οι υπόλοιπες αρμονικές συχνότητες, καθώς και οι συχνότητες των πιθανών σφαλμάτων των επιμέρους στοιχείων του συστήματος.

Τα σφάλματα αζυγοσταθμίας, εκκεντρότητας και χαλαρότητας του συστήματος κινητήρα/αντλίας, εμφανίζονται με την μορφή πολλαπλάσιων αρμονικών της συχνότητας περιστροφής. Σύμφωνα με την θεωρία που αναπτύχθηκε στο σχετικό κεφάλαιο γίνεται και η ταυτοποίησή τους. Ενδεικτικά στον παρακάτω πίνακα υπολογίζονται οι συχνότητες των πρώτων 5 αρμονικών, καθώς και οι ενδιάμεσες αρμονικές. Δηλαδή αυτές που χρειάζονται για την ταυτοποίησή των σφαλμάτων αζυγοσταθμίας, εκκεντρότητας και χαλαρότητας έδρασης.

Αρμονικές της Συχνότητας Περιστροφής	Συχνότητες [Hz]
0.5x	24.85
1x	49.7
1.5x	74.55
2x	99.4
2.5x	124.25
3x	149.1
3.5x	173.95

4x	198.8
4.5x	223.65
5x	248.5

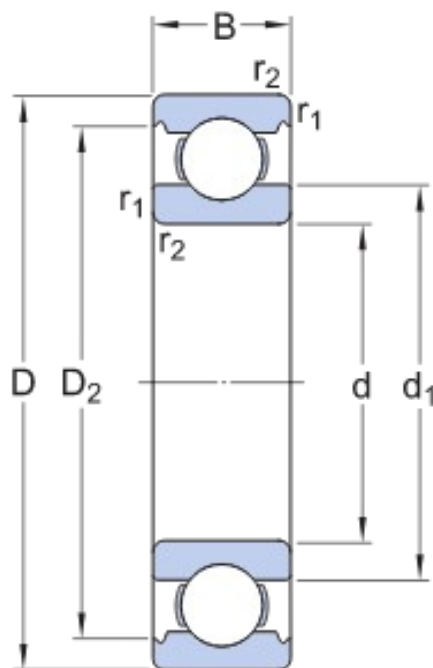
Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται οι χρήσιμες συχνότητες για τα σφάλματα λόγω κακής εγκατάστασης:

Σφάλματα εγκατάστασης	Συχνότητες [Hz]
Αζυγοσταθμία	49.7
Παράλληλη εκκεντρότητα	99.4
Γωνιακή εκκεντρότητα	49.7
Χαλαρότητα στην βάση	24.85, 49.7, 99.4, 149.1, 198.8, 248.5
Εσωτερική χαλαρότητα του συστήματος	24.85, 74.55, 124.25, 173.95, 223.65

Για τον υπολογισμό των αντίστοιχων συχνοτήτων σφαλμάτων των τριβών κύλισης, η γεωμετρία αυτών λήφθηκε από τον κατασκευαστή.

Οι συχνότητες σφαλμάτων των τριβών κύλισης του συστήματος υπολογίζονται παρακάτω με βάση την αντίστοιχη γεωμετρία και την συχνότητα λειτουργίας που έχει υπολογιστεί.

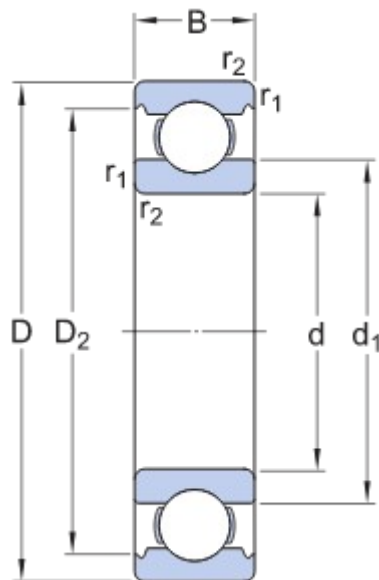
Ο κινητήρας χρησιμοποιεί δύο ίδιους τριβείς κύλισης 6314 για την έδραση του δρομέα. Παρακάτω απεικονίζεται σχηματικά ο τριβέας 6314 μαζί με τις βασικές διαστάσεις του.



Διαστάσεις Τριβέα 6314 [mm]	
d	70
D	150
B	35
d ₁	94.95
D ₁	129.9
r _{1,2}	Min 2.1

Συχνότητες Τριβέα 6314	Συχνότητες [Hz]
BPFI	244.5
BPFO	152.8
FTF	19.1
BSF	101.8
REF	203.6

Αντίστοιχα οι τριβείς της αντλίας στη θέση της αναρρόφησης και της κατάθλιψης είναι οι ίδιοι. Παρακάτω απεικονίζονται σχηματικά ο τριβέας 6306 μαζί με τις βασικές του διαστάσεις.



Διαστάσεις Τριβέα 6306 [mm]	
d	30
D	72
B	19
d ₁	46.6
D ₁	61.88
r _{1,2}	Min 1.1

Συχνότητες Τριβέα 6306	Συχνότητες [Hz]
BPFI	245.67
BPFO	151.6
FTF	18.9
BSF	99.08
REF	198.17

Επιπλέον, υπολογίζονται παρακάτω και οι συχνότητες για πιο ειδικά θέματα ταλαντωτικής διέγερσης, όπως οι συχνότητες σφαλμάτων του ηλεκτρικού κινητήρα και της αντλίας.

Συχνότητες σφαλμάτων του Ηλεκτρικού Κινητήρα:

Συχνότητες Ηλ. Κινητήρα	Συχνότητες [Hz]
Ελάττωμα στον Στάτη	100
Χαλαρές επαφές στον Στάτη	83.3 και 116.67
Συχνότητα περάσματος των πηνίων	298.2
Χαλαρότητα στα τυλίγματα του Στάτη	248.5 και 347.9
Εκκεντρότητα στον δρομέα	49.1 και 50.3
Ρωγμή στον δρομέα	99.4
Ολίσθηση	0.3

Συχνότητες σφαλμάτων της Αντλίας:

Συχνότητες Αντλίας	Συχνότητες [Hz]
Συχνότητα περάσματος των πτερυγίων	347.9

Διαγράμματα συχνοτήτων Δονήσεων, Ακουστικών εκπομπών, ηλεκτρικής ισχύος και κατανομής σφαλμάτων ανά είδος και συχνότητα.

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι αναλύσεις των μετρήσεων δονήσεων και ακουστικών εκπομπών. Η ανάλυση των σημάτων χωρίζεται σε 6 πεδία συχνοτήτων:

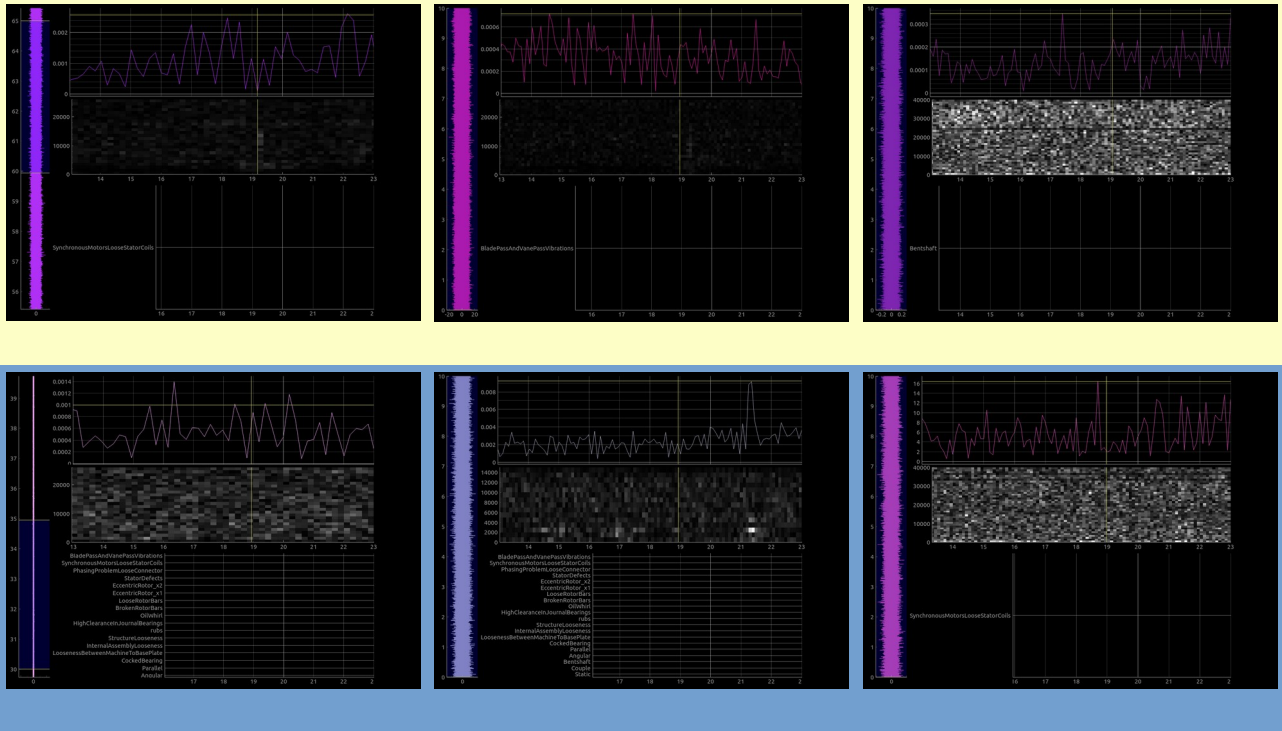
1. 13 με 23 Hz
2. 40 με 60 Hz
3. 90 με 110 Hz
4. 140 με 160 Hz
5. 190 με 210 Hz
6. 240 με 260 Hz

Η επιλογή των πεδίων συχνοτήτων έγινε με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς ως προς τη λειτουργία του συστήματος κινητήρα/αντλίας καθώς και με βάση τις πληροφορίες που αντλούνται από το φάσμα των σημάτων. Για κάθε πεδίο συχνοτήτων εμφανίζονται τα διαγράμματα των αναλύσεων των μετρήσεων, από αριστερά προς τα δεξιά, με την εξής σειρά:

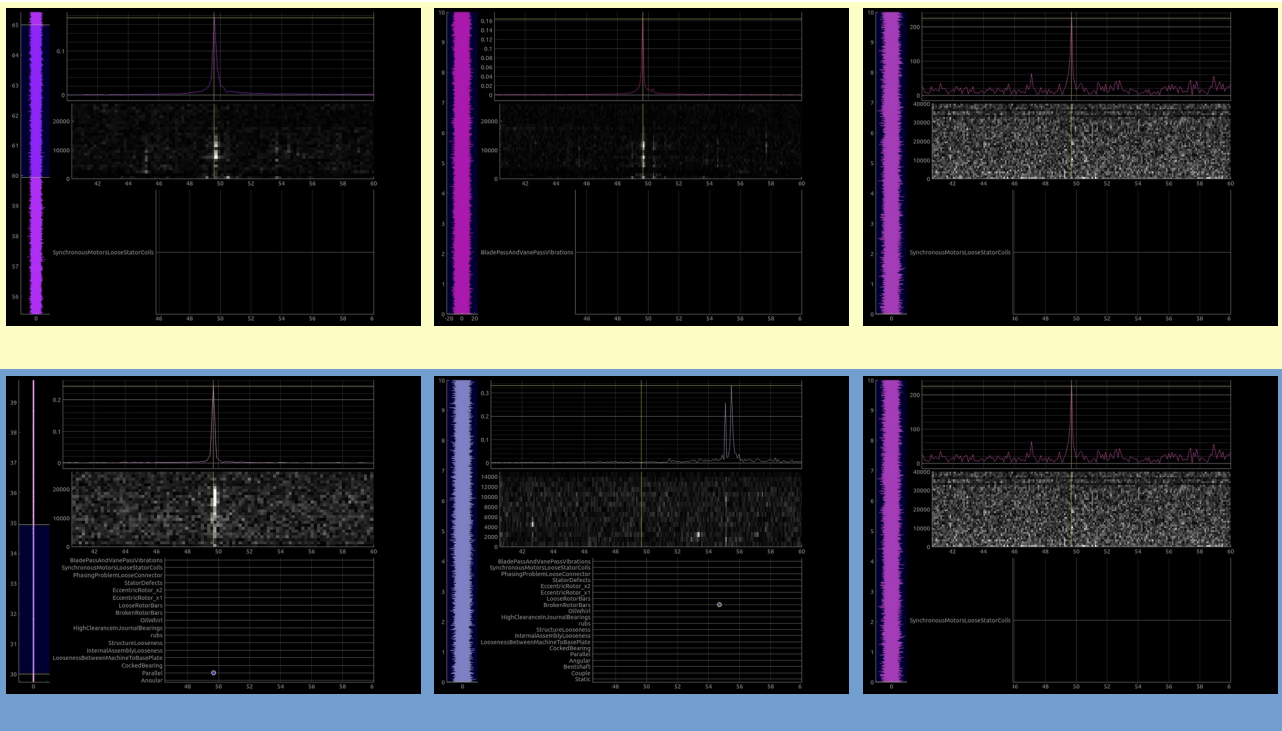
1. Δόνηση στην θέση AV1
2. Δόνηση στην θέση AV2
3. Ακουστικές εκπομπές

Στην πρώτη γραμμή με κίτρινο χρώμα, παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν τον κινητήρα και στη δεύτερη γραμμή με ανοιχτό μπλε χρώμα, παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν την αντλία του συστήματος για το εύρος:

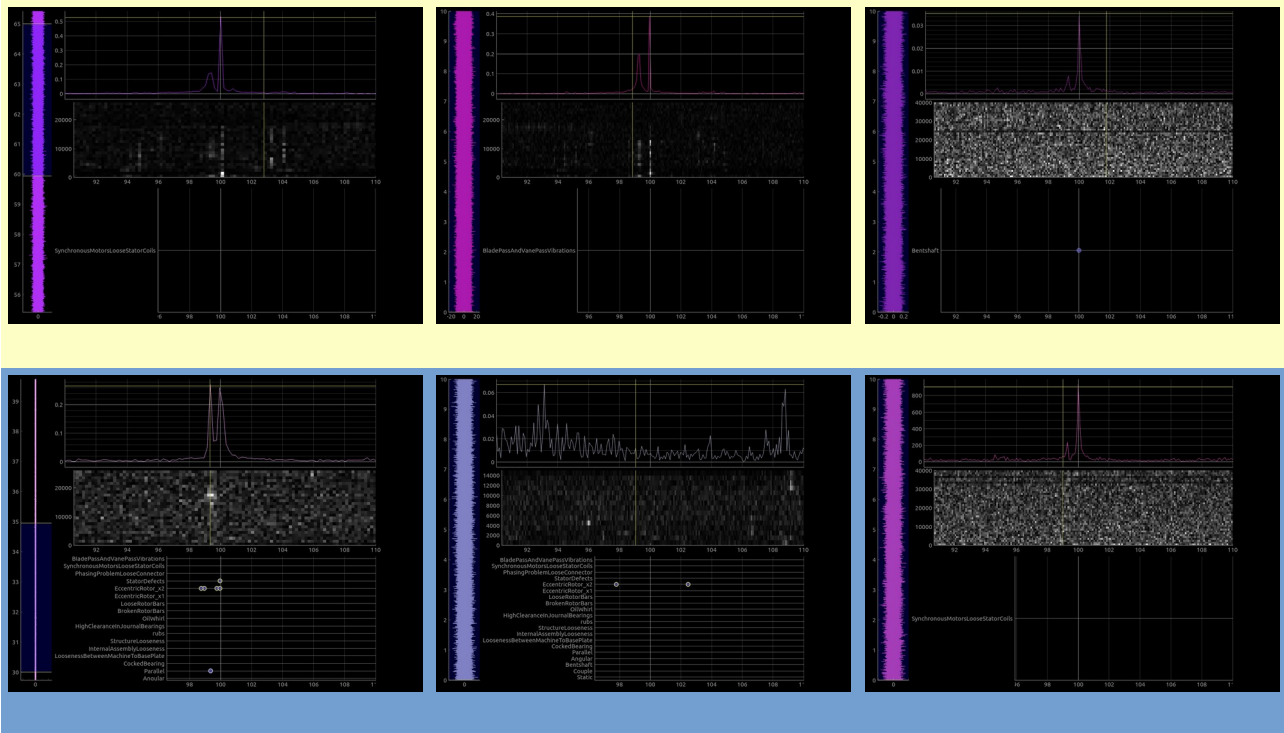
13 με 23 Hz.



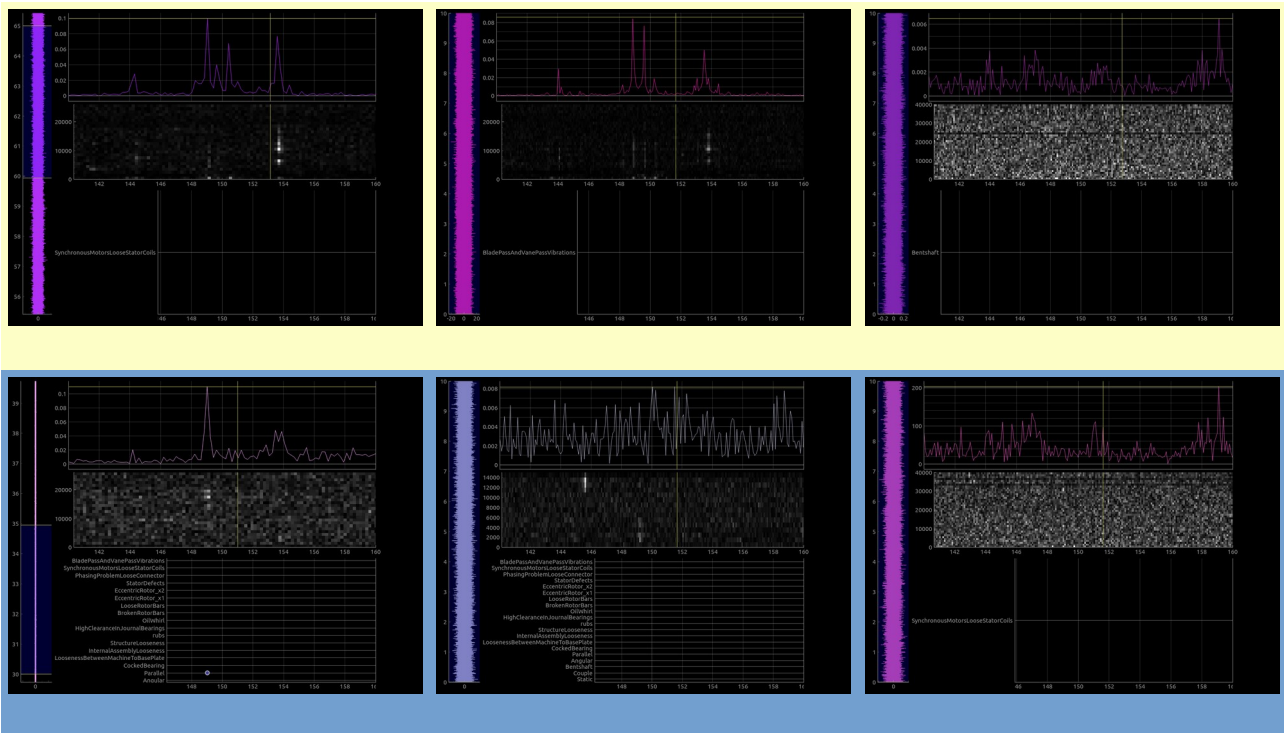
40 με 60 Hz.



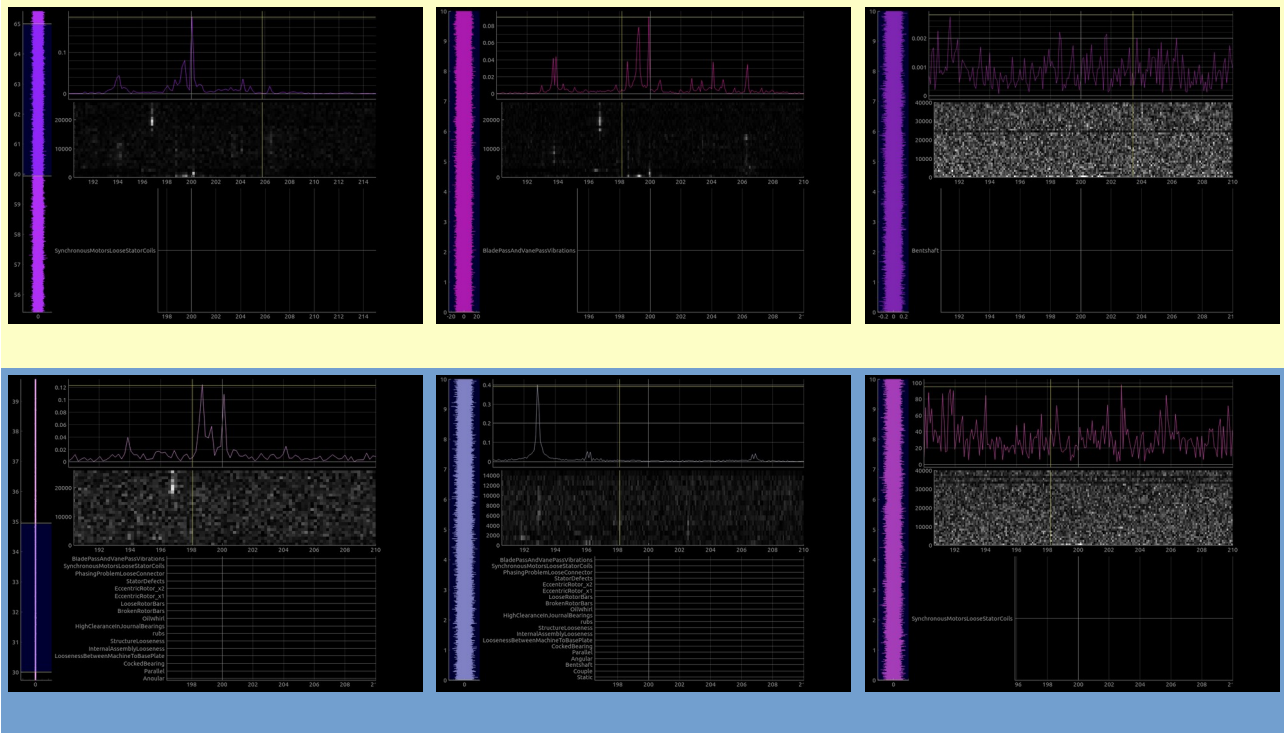
90 με 110 Hz.



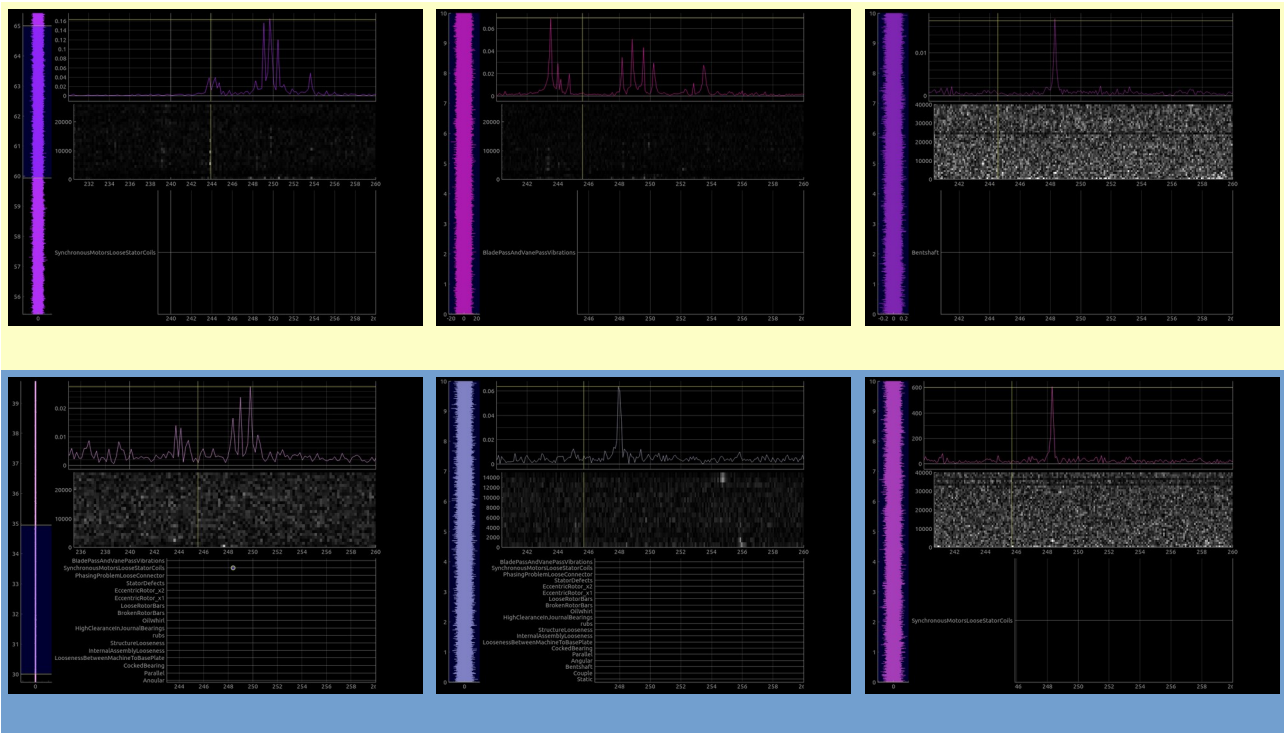
140 με 160 Hz.



190 με 210 Hz.

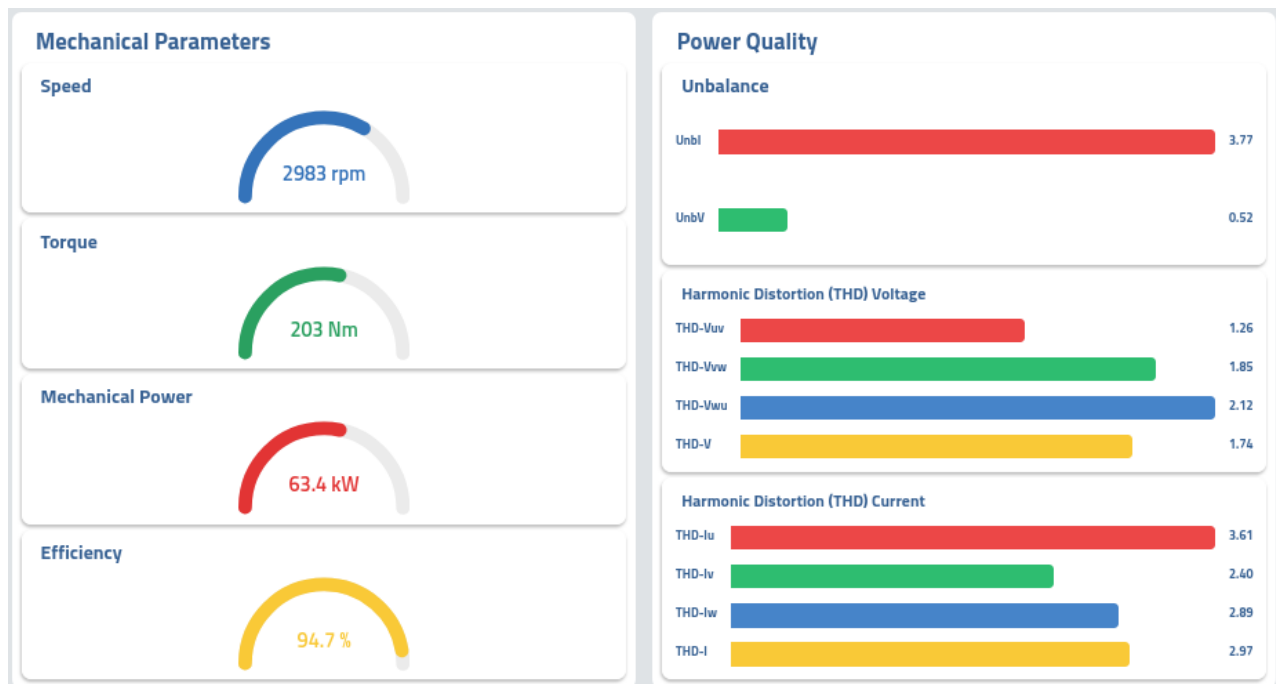
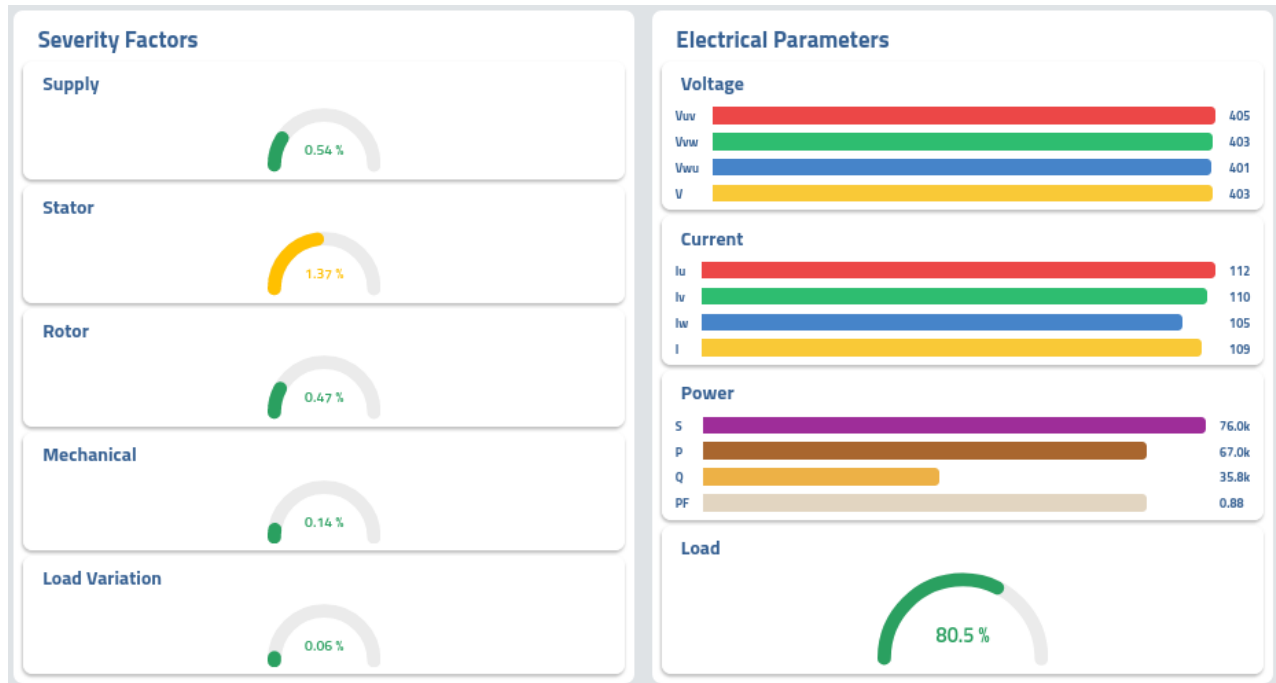


420 με 260 Hz.

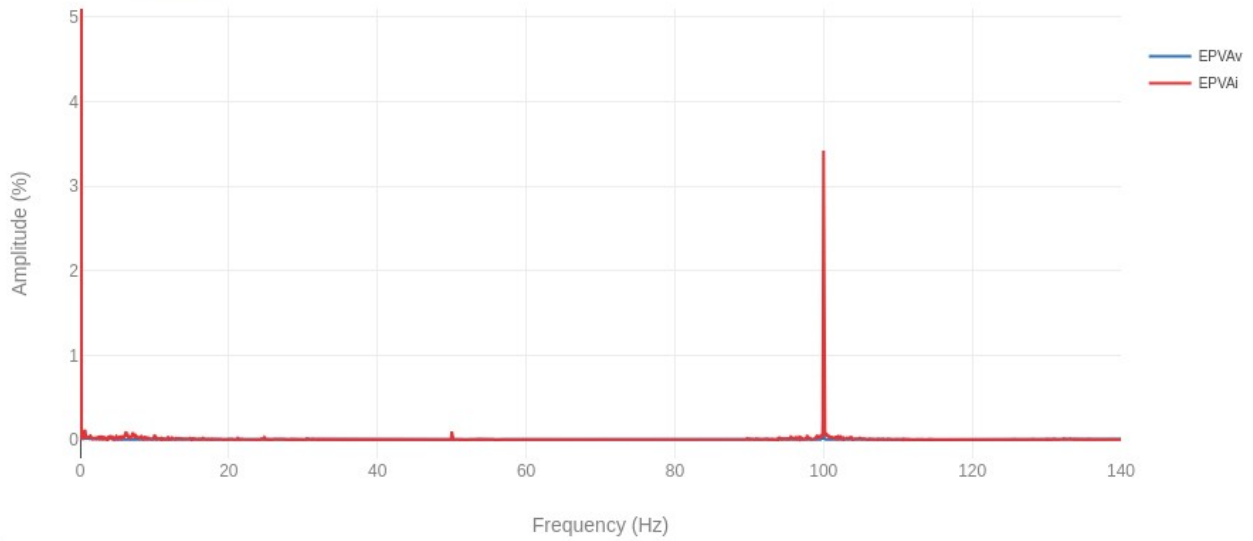


Ηλεκτρικές παράμετροι, “Severity Factors” και Ηλεκτρικής ισχύς

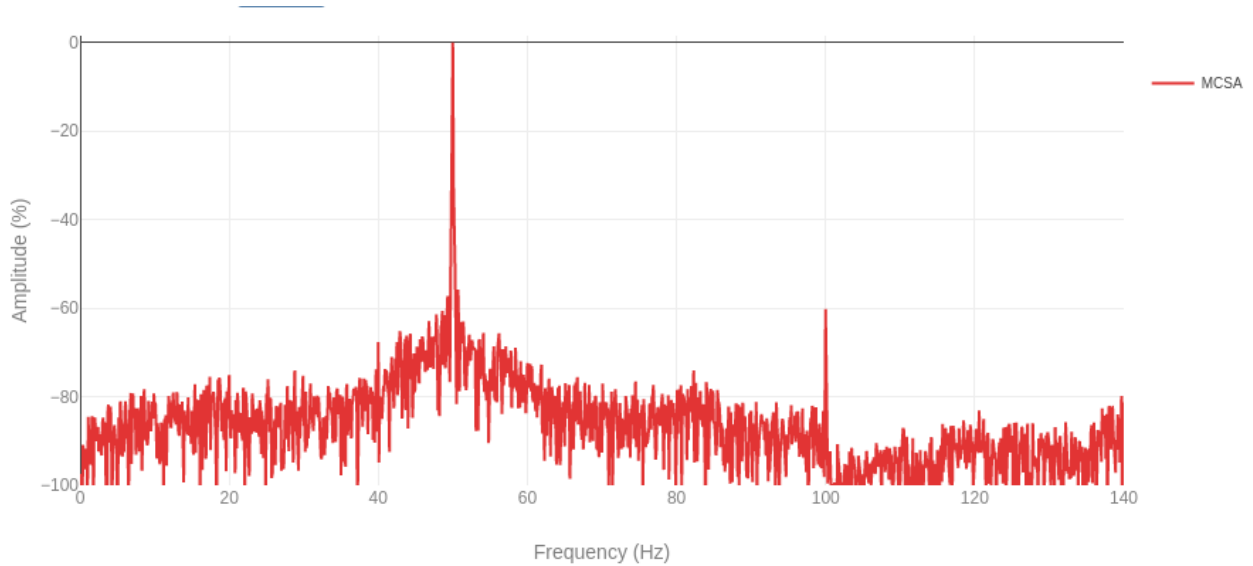
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μίας μέτρησης 10 δευτερολέπτων από το διαγνωστικό πρόγραμμα της εταιρίας Enging. Η μέτρηση έγινε την ίδια χρονική στιγμή με τις μετρήσεις επιταχύνσεων και ακουστικών εκπομπών, έτσι ώστε να είναι πραγματική η σύγκρισή τους.



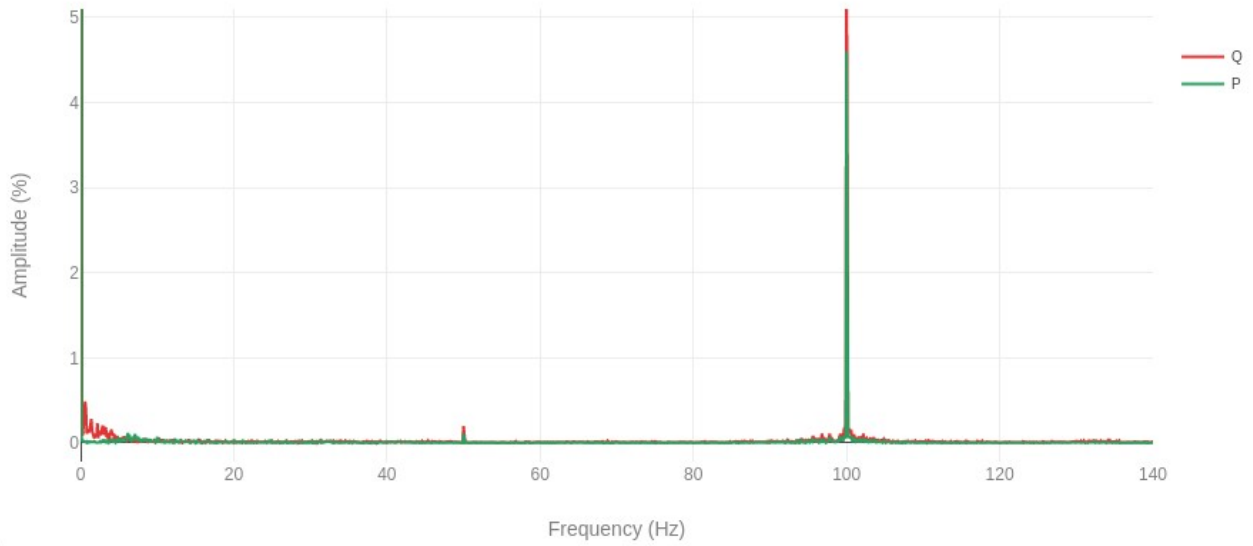
Διάγραμμα EPVA (Extended Park's Vector Approach).



Διάγραμμα MCSA (Motor Current Signature Analysis).



Διάγραμμα ανάλυσης συχνοτήτων PQ, πραγματικής ισχύος και φαινόμενης ισχύος.



5.2.2. Σύγκριση

Η καταγραφή των σημάτων κατά τη λειτουργία του εξοπλισμού έγινε με σκοπό τη διάγνωση της κατάστασης του με τρεις μεθόδους. Η πρώτη είναι η καταγραφή των δονήσεων του μηχανήματος με το σύστημα της εταιρίας “iFM”, η δεύτερη είναι η καταγραφή των ακουστικών εκπομπών με το σύστημα που αναπτύχθηκε για αυτήν την εργασία και η τρίτη είναι η καταγραφή των ηλεκτρικών μεγεθών τάσης και έντασης του ρεύματος τροφοδοσίας με το σύστημα της εταιρίας “Enging”.

Αρχικά γίνεται η σύγκριση των σημάτων δονήσεων με τα σήματα των ακουστικών εκπομπών. Στη συνέχεια γίνεται η σύγκριση των ηλεκτρικών μετρήσεων με τα προηγούμενα αποτελέσματα.

Με μία πρώτη ματιά φαίνεται ότι από τις ακουστικές εκπομπές εξάγεται παρόμοια πληροφορία με αυτή των μετρήσεων επιταχύνσεων. Για την καλύτερη σύγκριση των καταγραφών, η ανάλυση γίνεται με βάση τις κατηγορίες σφαλμάτων, όπως αυτές αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις γίνονται πιο ασφαλή, καθώς αντιστοιχίζεται κάθε φορά το φαινόμενο που δημιουργεί το σφάλμα, παλμός ή αρμονική κίνηση, με την πηγή του σφάλματος.

Σφάλματα λόγω κακής εγκατάστασης

Συγκεκριμένα τα σφάλματα λόγω κακής τοποθέτησης/εγκατάστασης του μηχανήματος, όπως έχει προαναφερθεί, εμφανίζουν μεγάλα πλάτη στις πρώτες τρεις αρμονικές και σε σειρά αρμονικών συχνοτήτων με βήμα τη συχνότητα περιστροφής. Κατά βάση η ταλάντωση, η οποία λαμβάνει χώρα είναι αρμονική. Αυτό σημαίνει ότι αναμένεται αυτά τα σφάλματα να εμφανίζονται κυρίως στα διαγράμματα συχνοτήτων του απλού μετασχηματισμού Fourier.

Αν αυτού του είδους τα σφάλματα αρχίζουν να εμφανίζονται και στα διαγράμματα συχνοτήτων με τον μετασχηματισμό Hilbert τότε αυτά τα σφάλματα δεν είναι καθαρά αρμονικά, αλλά πιο σύνθετα, καθώς πλέον ο άξονας του συστήματος συγκρούεται με ρυθμό ανάλογο του πολλαπλάσιου της πρώτης αρμονικής στην φωλιά του τριβέα ή το σύστημα δεν είναι στιβαρά εδρασμένο στην βάση του. Αυτό συμβαίνει σε ακραίες μόνο καταστάσεις και έχει σαν αποτέλεσμα η ταλαντωτική κίνηση να γίνεται μη γραμμική, παλμική με τακτικότητα την συχνότητα περιστροφής.

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω, αρχίζοντας με τις καταγραφές δονήσεων, τα πλάτη των πρώτων τριών αρμονικών της συχνότητας περιστροφής και στις δύο θέσεις μέτρησης στον κινητήρα εμφανίζουν τις παρακάτω αναλογίες πλατών.

Η δεύτερη αρμονική είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την πρώτη, με την τρίτη να είναι αρκετά μικρότερη. Επίσης είναι εμφανής και μία σειρά αρμονικών συχνοτήτων με βήμα τη συχνότητα περιστροφής. Αντίστοιχα οι πρώτες τρεις αρμονικές στις μετρήσεις των ακουστικών εκπομπών

εμφανίζουν αντίστοιχα πλάτη με αυτά των δονήσεων και ταυτόχρονα εμφανίζεται και η σειρά αρμονικών με βήμα τη συχνότητα περιστροφής. Άρα, σε αυτό τον τομέα φαίνεται να υπάρχουν αντίστοιχες πληροφορίες μεταξύ των σημάτων δονήσεων και των σημάτων ακουστικών εκπομπών.

Αντίστοιχα και στις δύο θέσεις μέτρησης ταλαντώσεων της αντλίας, από τις μετρήσεις επιταχύνσεων, φαίνεται ότι η πρώτη αρμονική είναι αρκετά μικρότερη από τη δεύτερη και αντίστοιχα η τρίτη αρμονική έχει σχεδόν το μισό πλάτος σε σύγκριση με την πρώτη αρμονική. Επίσης, η αναλογία του πλάτους των τριών αρμονικών υπολογίζεται να είναι ίδια σε σχέση με το πλάτος της δεύτερης αρμονικής και στις μετρήσεις των ακουστικών εκπομπών. Άρα και σε αυτό το τομέα φαίνεται να υπάρχουν αντίστοιχες πληροφορίες από την ανάλυση του σήματος της ακουστικής εκπομπής. Επιπλέον από τις μετρήσεις επιταχύνσεων και ακουστικών εκπομπών της αντλίας, ξεχωρίζει επίσης και μία σειρά αρμονικών συχνοτήτων με βήμα την συχνότητα περιστροφής.

Με βάση τα παραπάνω, συνάγεται ότι η πληροφορία για τα σφάλματα λόγω κακής τοποθέτησης ή εγκατάστασης μεταφέρονται από τις δονήσεις και στις ακουστικές εκπομπές.

Σφάλματα στους τριβής κύλισης

Λόγω της φύσης των σφαλμάτων αυτών, το σήμα που παράγεται είναι παλμός, έτσι οι αντίστοιχες συχνότητες σφάλματος πρέπει να ξεχωρίζουν στα διαγράμματα συχνοτήτων του μετασχηματισμού Fourier μετά τον μετασχηματισμό Hilbert. Στην ακραία περίπτωση, όπου το σφάλμα είναι σε πολύ προχωρημένο επίπεδο, λόγω του ότι ο τριβέας έχει φθαρεί αρκετά, τότε μπορεί από την ανάλυση του σήματος να εμφανίζονται χαρακτηριστικές συχνότητες διέγερσης στα διαγράμματα Fourier ως σφάλμα εσωτερικής χαλαρότητας. Αν η φθορά εντοπίζεται μεταξύ του εξωτερικού δακτυλίου του εδράνου και της φωλιάς, τότε η συχνότητα διέγερσης προσομοιάζει στην συχνότητα μείωσης της στιβαρότητας λόγω ύπαρξης χαλαρότητας.

Από την περαιτέρω ανάλυση των μετρήσεων των δονήσεων, οι διεγέρσεις των σφαλμάτων του τριβέα 6314 του κινητήρα στη θέση K_AV1 εμφανίζονται στα αντίστοιχα πεδία συχνοτήτων, ως συχνότητες σφαλμάτων των τύπων “FTF”, “BSF” και “BPFI”. Αντίστοιχα, από την ανάλυση των δονήσεων στην θέση K_AV2 του τριβέα 6314 εμφανίζεται η συχνότητα “BSF”. Στην ανάλυση των ακουστικών εκπομπών εμφανίζει μόνο η “BSF” και στους δύο τριβής.

Η ανάλυση των δονήσεων από την αντλία, στην θέση A_AV1 του τριβέα 6306 εκτόνωσης, εμφανίζει τις συχνότητες σφαλμάτων τύπου “BSF” και “BPFI”. Στην θέση A_AV2 του τριβέα 6306 στην αναρρόφηση, εμφανίζεται η συχνότητα σφάλματος “FTF” και ελαφρώς η “BPFI”. Η ανάλυση των ακουστικών εκπομπών εμφανίζει τη συχνότητα “BPFI”.

Επομένως διαπιστώνουμε ότι η ανάλυση του ακουστικού σήματος εντοπίζει το κοινό σφάλμα που απαντάται και στα δύο έδρανα της μονάδος (κινητήρα ή αντλία), διότι πρόκειται για κοινή

διέγερση που προκαλείται από τα δύο έδρανα και άρα το ακουστικό σήμα ενισχύεται στην ανάλογη συχνότητα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω φαίνεται ότι μεταφέρονται πληροφορίες για τα σφάλματα των τριβέων από τις δονήσεις στις ακουστικές εκπομπές. Στην απόσταση του ενός μέτρου που έγιναν οι μετρήσεις, φαίνεται να εμφανίζονται μόνο οι συχνότητες με την μεγαλύτερη ενέργεια. Στην προκειμένη περίπτωση, όπου οι τριβείς είναι ίδιοι και στις δύο θέσεις μέτρησης AV1 και AV2 στον κινητήρα, όπως και στην αντλία, η συχνότητα με την μεγαλύτερη ενέργεια είναι η συχνότητα κάποιου κοινού σφάλματος.

Στις ηλεκτρολογικές μετρήσεις δεν μεταφέρεται κάποια πληροφορία σχετικά με την κατάσταση των τριβέων κύλισης. Μία εξήγηση είναι ότι η αντίσταση κύλισης στα έδρανα είναι αρκετά μικρή για να επηρεάσει σημαντικά τα σήματα τάσης και έντασης του ρεύματος τροφοδοσίας.

Σφάλματα στον Ηλεκτρικό Κινητήρα

Αναλύοντας τις μετρήσεις των επιταχύνσεων στις δύο θέσεις μέτρησης K_AV1 και K_AV2 του κινητήρα, είναι εμφανές ότι ο κινητήρας πιθανώς να εμφανίζει πρόβλημα στο δρομέα λόγω κατασκευαστικών σφαλμάτων ή αστοχιών (εμφάνιση ρωγμών στις ράβδους). Τόσο στις αρμονικές δονήσεις, όσο και στις παλμικές, εμφανίζονται υψηλά πλάτη δονήσεων στο διπλάσιο της συχνότητας τροφοδοσίας, μαζί με τις αντίστοιχες αρμονικές. Συγκριτικά, στις μετρήσεις των ακουστικών εκπομπών του κινητήρα εμφανίζεται αντίστοιχα υψηλό πλάτος στον δεύτερο αρμονικό όρο της συχνότητας τροφοδοσίας στο φάσμα FFT του σήματος.

Αντίστοιχα, άξιο μελέτης είναι το γεγονός, ότι υψηλό πλάτος της δεύτερης αρμονικής συχνότητας τροφοδοσίας 100Hz του κινητήρα εμφανίζεται μόνο στις φασματικές αναλύσεις στις μετρήσεις επιταχύνσεων των δύο εδράνων και στις ακουστικές εκπομπές, αλλά το πλάτος στη συχνότητα τροφοδοσίας του κινητήρα, δηλαδή στα 50Hz, είναι χαμηλό. Πιθανώς, αυτές διαταραχές που καταγράφονται υπό μορφή δονήσεων και ακουστικών εκπομπών, να οφείλονται στις αρμονικές παραμορφώσεις του ρεύματος τροφοδοσίας.

Συμπληρωματικά, στις ακουστικές εκπομπές εμφανίζονται και πολλές πλευρικές συχνότητες (sideband frequencies) γύρω από το διπλάσιο την συχνότητας τροφοδοσίας με απόσταση 1/3 της συχνότητας τροφοδοσίας. Αυτό υποδηλώνει χαλαρές επαφές στα καλώδια τροφοδοσίας του κινητήρα. Αυτή η πληροφορία δεν εμφανίζεται σε καμία από τις μετρήσεις των επιταχύνσεων στον κινητήρα. Από την άλλη μεριά, η πληροφορία για σφάλμα λόγω χαλαρών επαφών μπορεί και να προέρχεται από άλλη πηγή όπως η ποιότητα του ρεύματος. Αυτό θα πρέπει να επιβεβαιωθεί στην ανακατασκευή του κινητήρα.

Η ανάλυση ηλεκτρικών σημάτων παρουσιάζει “severity factor” του στάτη πάνω από 1%. Παράλληλα όμως διαπιστώνεται ότι είναι αρκετά αυξημένος ο αρμονικός θόρυβος στην τροφοδοσία του κινητήρα. Συγκεκριμένα, ο μέσος αρμονικός θόρυβος στην τάση και στην ένταση είναι 2% και 3.5% αντίστοιχα. Επίσης εμφανίζεται και ασυμμετρία στην ένταση του συστήματος περίπου 4%. Επομένως οι ηλεκτρολογικές μετρήσεις συμβαδίζουν περισσότερο με τις μετρήσεις των ακουστικών εκπομπών σε σχέση με τις μετρήσεις δονήσεων.

Σφάλματα στην Αντλία

Όπως και τα σφάλματα του κινητήρα, έτσι και τα σφάλματα της αντλίας επικεντρώνονται σε αυτήν. Στα σφάλματα της αντλίας φαίνεται μόνο η συχνότητα περάσματος των πτερυγίων. Αυτό δεν υποδηλώνει άμεσα κάποιο σφάλμα με την αντλία, απλά τα ισχυρά κύματα πίεσης που δημιουργούνται στην συμπίεση της τελευταίας βαθμίδας δημιουργούν ισχυρούς κραδασμούς.

Συγκρίνοντας τις μετρήσεις των επιταχύνσεων και στις δύο θέσεις μέτρησης με τις ακουστικές εκπομπές, υπάρχει άμεση ταύτιση, καθώς και στα δύο σήματα, το πλάτος στην συχνότητα περάσματος των πτερυγίων είναι ανάλογο και ως προς το επίπεδο θορύβου του διαγράμματος, αλλά και ως προς τα πλάτη των αρμονικών όρων.

Στις ηλεκτρολογικές μετρήσεις δεν φαίνεται να μεταφέρεται κάποια πληροφορία από την αντλία.

5.2.3. Διάγνωση

Διάγνωση για τον Κινητήρα

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις συμπεραίνεται ότι ο κινητήρας του συστήματος παρουσιάζει σφάλματα, κυρίως λόγω χαλαρής πάκτωσης στο έδαφος, καθώς οι αρμονικές συχνότητες, μέχρι και την έβδομη, εμφανίζουν μεγάλα πλάτη. Επίσης, λόγω του ότι το πλάτος της δεύτερης αρμονικής της συχνότητας λειτουργίας είναι μεγαλύτερη από το πλάτος της πρώτης αρμονικής, φαίνεται ότι ο κινητήρας χρειάζεται καλύτερη παράλληλη ευθυγράμμιση. Επίσης και στις μετρήσεις της αντλίας υπάρχει αντίστοιχο μοτίβο. Ηλεκτρολογικά ο κινητήρας φαίνεται να είναι σε καλή κατάσταση με πιθανά σφάλματα να υπάρχουν ρωγμές στον δρομέα και χαλαρότητα στις επαφές των καλωδίων τροφοδοσίας του στάτη. Ο θόρυβος και η ποιότητα της τροφοδοσίας φαίνεται ότι επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα της διάγνωσης σφαλμάτων, καθώς και τα δύο φαίνεται να αφήνουν το ίδιο αποτύπωμα στις μετρήσεις με αυτά των ρωγμών στον δρομέα και των χαλαρών επαφών.

Οι τριβείς του κινητήρα φαίνεται να εμφανίζουν πρόβλημα από υπερθέρμανση λόγω κακής λίπανσης, καθώς δεν εμφανίζονται μεμονωμένα σφάλματα στα έδρανα, αλλά σχεδόν όλα μαζί. Έτσι οι τριβείς του κινητήρα χρειάζονται άμεση αντικατάσταση. Τέλος σύμφωνα με το ISO 10816-7 ο κινητήρας κατατάσσεται στην κατηγορία “Α”, καθώς έχει μέγιστη ταχύτητα ταλάντωσης 0,937 mm/s. Η κατηγοριοποίηση αυτή δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική κατάσταση του κινητήρα, καθώς σύμφωνα με την παραπάνω διαγνωστική ανάλυση ο κινητήρας θα πρέπει να ελεγχθεί και να επισκευασθεί, ειδικά όσον αφορά τον δρομέα, τις επαφές τροφοδοσίας και τα έδρανα.

Διάγνωση για την Αντλία

Σε αντίθεση με τον κινητήρα, η αντλία δεν εμφανίζει τόσο μεγάλα πλάτη στις υψηλές αρμονικές συχνότητες. Άρα η βάση της αντλίας είναι καλύτερα πακτωμένη στο έδαφος από την αντίστοιχη του κινητήρα. Όμως προέκυψε, ότι η αντλία χρειάζεται ευθυγράμμιση, καθώς οι δύο πρώτες αρμονικές της συχνότητας λειτουργίας εμφανίζουν μεγάλα πλάτη. Επιπλέον, η αντλία εμφανίζει αζυγοσταθμία, καθώς το πλάτος της πρώτης αρμονικής είναι αντίστοιχο με αυτό της δεύτερης αρμονικής. Το μεγάλο πλάτος στην συχνότητα περάσματος των πτερυγίων μαζί με την ανάγκη ζυγοστάθμισης μπορεί να δηλώνει την εναπόθεση λάσπης πάνω στην πτερωτή είτε ακόμη και σπασμένη πτερωτή.

Ο τριβέας στην πλευρά αναρρόφησης της αντλίας φαίνεται να είναι σε καλή κατάσταση. Από τις μετρήσεις που έγιναν δεν ανιχνεύονται σημαντικές διεγέρσεις στον τριβέα από την πλευρά της κατάθλιψης. Να σημειωθεί επίσης, ότι βάσει των μετρήσεων δεν εμφανίζονται διεγέρσεις στην αξονική διεύθυνση, γεγονός που παραπέμπει σε ελλιπή έδραση του άξονα της αντλίας με αποτέλεσμα το μηχάνημα να κινδυνεύει, καθώς δουλεύει χωρίς αξονικό τριβέα. Αυτό έχει ως

αποτέλεσμα το σύστημα να μην μπορεί παραλάβει αξονικά φορτία. Τέλος σύμφωνα με το ISO 10816-7 η αντλία κατατάσσεται στην κατηγορία “Α”, καθώς έχει ταχύτητα ταλάντωσης 1,093mm/s.

5.2.4. Επαλήθευση

Μετά τη θεωρητική ανάλυση των σφαλμάτων του συστήματος κινητήρα-αντλίας, με βάση τις μετρήσεις δονήσεων και ακουστικών εκπομπών, τα αποτελέσματα πρέπει να επιβεβαιωθούν με οπτικό έλεγχο μετά την αποσυναρμολόγηση του εξοπλισμού και την ανάλυση της κατάστασης των επιμέρους στοιχείων.

Η επαλήθευση των σφαλμάτων ξεκινάει από τη διαδικασία αφαίρεσης του συστήματος αντλία κινητήρα από το αντλιοστάσιο.

Αρχικά, αφαιρείται το προστατευτικό καπάκι από το μπαρο-κιβώτιο του κινητήρα. Στο εσωτερικό του μπαρο-κιβωτίου βρίσκονται οι κλέμμες σύνδεσης των τυλιγμάτων του στάτη. Φαίνεται ότι οι κλέμμες σύνδεσης έχουν μερικά σπασίματα, τα οποία όμως δεν πρέπει να επηρεάζουν την λειτουργία του κινητήρα. Αποσυνδέονται τα καλώδια τροφοδοσίας και τα τυλίγματα υποβάλλονται σε έλεγχο με εργαλείο “megger”. Αυτός ο έλεγχος αποσκοπεί στην εύρεση βραχυκυκλωμένων τυλιγμάτων στον στάτη, είτε μείωση στην αποτελεσματικότητα της μόνωσης μίας φάσης ως προς την άλλη φάση ή μίας φάσης ως προς το σώμα του κινητήρα. Ο έλεγχος αποδείχθηκε επιτυχής, καθώς όλα τα τυλίγματα είχαν αντίσταση ηλεκτρικής μόνωσης περισσότερο των 500MΩ σε τάση δοκιμής τα 1000Volt, όπου θεωρείται αποδεκτό.

Κατόπιν, γίνεται αφαίρεση των κοχλιών σύσφιξης του κινητήρα με τη βάση, αποσυνδέεται ο ελαστικός σύνδεσμος (coupler) του άξονα, αποκαλύπτοντας τα ελαστικά μέρη του συνδέσμου. Αυτά έχουν υποστεί μικρές αναμενόμενες φθορές χωρίς σημάδια υπερθέρμανσης, όπου θα δήλωναν μεγάλα πλάτη εκκεντρότητας και δονήσεων.

Στην συνέχεια αφαιρείται η αντλία και επιθεωρείται η βάση του συστήματος. Η βάση αποτελείται από ένα μεταλλικό πλαίσιο εμβαπτισμένο σε ένα τσιμεντένιο υπόβαθρο. Όμως, λόγω του σχεδιασμού, της ηλικίας και της ποιότητας των υλικών, οι κραδασμοί διέυρυναν τα κενά μεταξύ του μεταλλικού πλαισίου και του τσιμεντένιου υποβάθρου με αποτέλεσμα το σύστημα να μην πακτώνεται επαρκώς. Γεγονός που αποδεικνύεται με την εμφάνιση της αντίστοιχης αρμονικής σειράς στα διαγράμματα ανάλυσης συχνοτήτων των σημάτων επιταχύνσεων και ακουστικών εκπομπών. Η αντλία και ο κινητήρας μεταφέρονται σε εργαστήριο για περαιτέρω ανάλυση.

Ο κινητήρας του συστήματος αποσυναρμολογείται και ελέγχεται στη συνέχεια. Το σώμα του κινητήρα γενικά είναι σε καλή κατάσταση, χωρίς ρωγμές και σπασίματα, πλην μερικών σκουριών λόγω αφαίρεσης της προστατευτικής μπογιάς. Από το σώμα του κινητήρα, αφαιρείται το προστατευτικό εξωτερικό κάλυμμα του ανεμιστήρα. Ο ανεμιστήρας δεν εμφανίζει να έχει σπασμένα ή λυγισμένα πτερύγια αλλά ούτε και σημάδια χτυπήματος. Άρα η πτερωτή έχει μικρές πιθανότητες ανάπτυξης φυγοκεντρικών δυνάμεων αζυγοσταθμίας.



Στη συνέχεια επιθεωρούνται εξωτερικά τα καπάκια του κινητήρα, όπου εμφανίζεται να λείπουν οι τσιμούχες στεγανοποίησης του άξονα. Αυτό προϋποθέτει για την ύπαρξη ξένων σωμάτων και υγρών, όπως νερό, στο εσωτερικό του κινητήρα. Ανοίγοντας το καπάκι εξόδου του κινητήρα αποκαλύπτεται αρχικά ο τριβέας εξόδου του κινητήρα και η μία πλευρά του στάτη και του δρομέα.

Τόσο στο εσωτερικό του τριβέα, όσο και στο εξωτερικό αυτού φαίνεται να υπάρχουν επικαθήσεις αλάτων. Επίσης το γράσο φαίνεται να έχουν αναμιχθεί με νερό, καθώς έχει σκούρο καφέ γαλακτερό χρώμα με ασυνήθιστη γυαλάδα.

Ο τριβέας φαίνεται να έχει ασυνήθιστα μεγάλο τζόγο, μεγαλύτερο από το επιτρεπτό για το μέγεθος του τριβέα και το χρόνο λειτουργίας, γεγονός που υποδηλώνει εσωτερική χαλαρότητα και μειωμένη στιβαρότητα του άξονα ως προς το καπάκι του κινητήρα (φωλιά).

Στη συνέχεια αφαιρέθηκε ο δρομέας για καλύτερη παρατήρηση και μελέτη και το πίσω καπάκι του κινητήρα. Ανοίγοντας το πίσω καπάκι αποκαλύπτεται ο πίσω τριβέας του κινητήρα και η άλλη πλευρά του στάτη.



Τόσο στο εσωτερικό του τριβέα, αλλά όσο και στο εξωτερικό υπάρχουν εμφανείς επικαθήσεις αλάτων, σημαντικά λιγότερες από αυτές της εξόδου. Το γράσο του τριβέα έχει την ίδια εμφάνιση με αυτό του τριβέα εξόδου. Ο πίσω τριβέας έχει σχεδόν μηδενικό τζόγο, φυσιολογικό για το μέγεθος του και τον χρόνο λειτουργίας, καθώς το πίσω έδρανο φορτίζεται λιγότερο σε σχέση με το έδρανο εξόδου του κινητήρα. Τόσο από την μεριά της εξόδου, αλλά τόσο και από την πίσω μεριά, τα τυλίγματα του στάτη φαίνονται ακέραια, χωρίς σημάδια υπερθέρμανσης ή σπασίματα. Αντίστοιχη εικόνα επικρατεί και στα τυλίγματα του δρομέα.

Ο άξονας του κινητήρα δεν έχει υποστεί λυγισμό ή στρέβλωση. Οι θέσεις των τριβέων έχουν καλή επιφάνεια καθώς δεν υπάρχουν χαράξεις και η μέτρηση κυλινδρικότητας είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια.

Στην συνέχεια αποσυναρμολογείται και ελέγχεται η αντλία του συστήματος . Το σώμα της αντλίας είναι σε κακή κατάσταση, καθώς πέρα από εμφανείς φθορές στην μπογιά και την επιφανειακή σκουριά, η αντλία χάνει νερό από τις σαλαμάστρες στεγανοποίησης, τόσο στην αναρρόφηση όσο και στην κατάθλιψη. Η αποσυναρμολόγηση της αντλίας ξεκινάει από την μεριά της κατάθλιψης, δηλαδή από την πλευρά σύνδεσης με τον κινητήρα. Αρχικά αφαιρείται το άλλο μισό του ελαστικού συνδέσμου από τον άξονα και στη συνέχεια αφαιρείται το κέλυφος του τριβέα, ο οποίος και εξάγεται. Ο τριβέας είναι σε κακή κατάσταση, καθώς όλα τα μέρη του, εξωτερικός, εσωτερικός δακτύλιος, στοιχεία κύλισης κ.α, έχουν σκουριάσει.



Με την αφαίρεση του κελύφους του τριβέα κατάθλιψης, εμφανίζεται και ο προεντατήρας της σαλαμάστρας στεγανοποίησης της κατάθλιψης. Όπως και ο τριβέας, έτσι και ο προεντατήρας έχει σκουριάσει και ένας από τους δύο κοχλίες προέντασης έχει σπάσει. Αυτό εξηγεί και την ανεξέλεγκτη διαρροή νερού από την μεριά της κατάθλιψης. Αφαιρώντας τον προεντατήρα και την σαλαμάστρα εμφανίζεται και το χιτώνιο στεγανοποίησης.



Λόγω της διαρροής νερού με μεγάλη ταχύτητα, στο χιτώνιο έχουν δημιουργηθεί αύλακες από τη ροή του νερού.

Κατόπιν αφαιρείται και το κέλυφος της τελευταίας βαθμίδας κατάθλιψης και εμφανίζεται η περωτή της. Η περωτή της αντλίας δεν εμφανίζει σημάδια σπηλαιώσης, αλλά ούτε κάποια προσβολή από ξένο σώμα. Οι επικαθήσεις στην περωτή είναι φυσιολογικές, καθώς η αντλία μεταφέρει μη χλωριωμένο νερό με μεγάλη συγκέντρωση σε άλατα μαγνατίου.

Οι βαθμίδες συμπίεσης είναι εν σειρά στην αντλία. Για τον έλεγχο των περωτών, αφαιρείται το πρώτο και το τελευταίο στάδιο συμπίεσης και δεν γίνεται η αφαίρεση των ενδιάμεσων σταδίων. Όμως λόγω του ότι θα πρέπει να ελεγχθεί και ο άξονας της αντλίας, αφαιρούνται και οι ενδιάμεσες βαθμίδες. Η διαδικασία αφαίρεσης των ενδιάμεσων σταδίων είναι παρόμοια με αυτή της αφαίρεσης του πρώτου. Αυτό γίνεται καθώς η αντλία δεν εμφανίζει σημάδια αζυγοσταθμίας, άρα υπάρχουν μικρές πιθανότητες για σπασμένη περωτή, όπως επίσης και για άλλες πιθανές βλάβες όπως σπηλαιώση και χτυπήματα. Οι δύο τελευταίες βλάβες θα εμφανίζονταν από την πρώτη έως και την τελευταία βαθμίδα, καθώς η σπηλαιώση εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας και οποιαδήποτε βλάβη από χτυπήματα σε κάποια βαθμίδα θα είχε ως αποτέλεσμα και την εμφάνιση όμοιας βλάβης και στις υπόλοιπες βαθμίδες συμπίεσης, καθώς είναι εν σειρά, επομένως αν αναρροφηθεί κάποιο ξένο σώμα όπως άμμος θα πρέπει να βγει από την κατάθλιψη της αντλίας, περνώντας από όλες τις ενδιάμεσες βαθμίδες.

Η αποσυναρμολόγηση της αντλίας τελειώνει με την αφαίρεση του τριβέα και της σαλαμάστρας από την μεριά της αναρρόφησης. Ο τριβέας αναρρόφησης δεν έχει σκουριάσει αλλά έχει μεγάλο τζόγο για το μέγεθός του.



Εδώ σημαντικό είναι να σημειωθεί, ότι η αντλία δεν έχει αξονικό τριβέα κύλισης ούτε ολίσθησης, καθώς και στις δύο θέσεις (αναρρόφηση και κατάθλιψη) υπάρχει ο ίδιος τύπος ακτινικού τριβέα κύλισης 6306. Η ύπαρξη νερών οδηγεί στην έλλειψη σωστής λίπανσης. Έτσι ο συνδυασμός των φορτίων και της ανεπαρκούς λίπανσης προκάλεσε την πλήρη καταστροφή του τριβέα από την μεριά της κατάθλιψης. Επίσης είναι εμφανείς οι προσμείξεις νερού στο γράσο του τριβέα, το οποίο είναι λογικό καθώς από την σαλαμάστρα αναρρόφησης έρεαν νερά.

Ο προεντατήρας της σαλαμάστρας αναρρόφησης φαίνεται να είναι λειτουργικός, αλλά σε κακή κατάσταση καθώς έχει σκουριάσει. Το χιτώνιο της σαλαμάστρας είναι σε καλύτερη κατάσταση σε σχέση με αυτό του χιτωνίου της κατάθλιψης, καθώς η πίεση λειτουργίας σε αυτή τη μεριά της αντλίας είναι μικρότερη σε σχέση με την πίεση λειτουργίας στη μεριά της κατάθλιψης της αντλίας. Τέλος ο άξονας της αντλίας δεν φαίνεται να έχει υποστεί λυγισμό, αλλά στις θέσεις των τριβέων υπάρχουν κρατήρες, σημάδια τοπικής υπερθέρμανσης. Επίσης οι σφήνες για την μεταφορά ισχύος από τον άξονα στις πτερωτές έχουν σκουριάσει και χρειάζονται αντικατάσταση.

6. Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω ευρήματα επιβεβαιώνεται ότι η διάγνωση με χρήση ακουστικών εκπομπών αποτελεί μία αρκετά ακριβή και αξιόπιστη διάγνωση που διεξάγεται με πολύ πιο εύκολο τρόπο σε σχέση με τη διάγνωση με χρήση δονήσεων και τη διάγνωση βασισμένη στη λήψη και αξιολόγηση ηλεκτρολογικών μεγεθών (τάσης και έντασης). Ο λόγος είναι ότι δεν απαιτείται εγκατάσταση αισθητήρων πάνω στο μηχάνημα ή στην τροφοδοσία. Έτσι η διάγνωση γίνεται πιο ασφαλής και πιο άμεση.

Η σύγκριση των μετρήσεων είναι δυνατή, όπως ακριβώς και στις άλλες δύο μεθόδους διάγνωσης. Οι απαιτήσεις είναι παρόμοιες. Η θέση και οι συνθήκες κατά την μέτρηση πρέπει να είναι όμοιες. Η σύγκριση των ακουστικών εκπομπών μεταξύ μετρήσεων γίνεται με βάση την αναλογία των μεγεθών προς σύγκριση.

Για παράδειγμα, η σύγκριση του πλάτους της πρώτης αρμονικής μεταξύ δύο μετρήσεων στα διαγράμματα FFT, μπορεί να γίνει αρχικά συγκρίνοντας το επίπεδο θορύβου γύρω από την πρώτη αρμονική, έτσι ώστε να βρεθεί η αύξηση του πλάτους λόγω περιβαλλοντολογικού θορύβου και στη συνέχεια τα πλάτη στην θέση της πρώτης αρμονικής. Έτσι η διαστασιολόγηση των μετρήσεων δεν είναι απαραίτητη καθώς συγκρίνονται απευθείας οι λόγοι των ενεργειών που μεταφέρονται από το μηχάνημα μέσω του αέρα στο μικρόφωνο.

6.1. Αξιολόγηση Λογισμικού

Συστήματα στα οποία δεν απαιτείται εικοσιτετράωρη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, όπως συστήματα μεταφοράς νερού σε αγροτικές επιχειρήσεις και επιχειρήσεις ύδρευσης, η χρήση ενός εργαλείου το οποίο προτείνεται για βιομηχανικές εφαρμογές, αυξάνει την περιπλοκότητα και το κόστος στην συντήρηση, καθώς, και τα πιθανά ανθρώπινα σφάλματα.

Η εξάρτηση από την ποιότητα του ρεύματος αυξάνει τα σφάλματα στην διάγνωση και ταυτόχρονα το κόστος καθώς στην περίπτωση “βρώμικου” ρεύματος πρέπει να γίνεται η χρήση φίλτρων ή η εξυγίανση του από τον πάροχο. Ταυτόχρονα η διακοπτόμενη τροφοδοσία σε απομακρυσμένες περιοχές αυξάνει επιπλέον το κόστος, καθώς για την αντιμετώπισή της πρέπει να γίνει χρήση τροφοδοτικών αδιάλειπτης τροφοδοσίας για την προστασία των ευαίσθητων ηλεκτρονικών συστημάτων.

Το **προτεινόμενο σύστημα διάγνωσης** δίνει γρήγορη διάγνωση και αποτύπωση της κατάστασης λειτουργίας ενός αντλιοστασίου μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα από τη στιγμή που ο τεχνικός συντήρησης εισέλθει στο χώρο του αντλιοστασίου. Η δυνατότητα δειγματοληψίας από φορητή συσκευή ανεξαρτητοποιεί τη μέτρηση από την ποιότητα του ρεύματος. Διευκολύνοντας τον τεχνικό, ο οποίος φέρει λιγότερες και ελαφρύτερες συσκευές μαζί του. Επιπλέον μειώνεται δραματικά ο όγκος της απαραίτητης προεργασίας, καθώς δεν χρειάζεται η εγκατάσταση κάποιου αισθητήρα ή ο προγραμματισμός μίας τηλεδιάσκεψης στο πεδίο για την ρύθμιση του εξοπλισμού καθώς απαιτείται επικοινωνία με τον κατασκευαστή του μετρητικού εξοπλισμού.

Ταυτόχρονα, με βάση το αναπτυχθέν λογισμικό, η οργάνωση των μετρήσεων σε “Records”, μηχανήματα σε “Products”, ανά εγκαταστάσεις “Projects”, βοηθάει στη γρήγορη σύγκριση των μετρήσεων μεταξύ τους αλλά και σύγκριση των μετρήσεων ανάμεσα σε παρόμοια μηχανήματα. Σε σχέση με τα διαθέσιμα βιομηχανικά εργαλεία τα οποία απευθύνονται σε ένα μόνο μηχάνημα κάθε φορά. Η χρήση ενός εργαλείου για την παρακολούθηση πολλαπλών μηχανημάτων μειώνει το κόστος λειτουργίας λόγω της μειωμένης πολυπλοκότητας του συστήματος.

Η δειγματοληψία των ακουστικών εκπομπών από τη φύση της αδιαστατοποιεί τις μετρήσεις. Με την έννοια ότι το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από τον βαθμό ενίσχυσης του μικροφώνου, από την ευαισθησία του μικροφώνου (mV/Pa) και την απόσταση από την πηγή των ακουστικών εκπομπών (m). Η ανάλυση γίνεται σε όλη την ενέργεια του σήματος που φτάνει στο μικρόφωνο και τα αποτελέσματα που προκύπτουν βγαίνουν ως ποσοστό αυτής. Σε σύγκριση με τα βιομηχανικά εργαλεία όπου η δειγματοληψία γίνεται με αισθητήρα επιταχύνσεων και τα αποτελέσματα της μέτρησης βγαίνουν σε μονάδες με βάση την επιτάχυνση. Η μετρήσεις που γίνονται με χρήση σημάτων επιτάχυνσης προσφέρουν μεγαλύτερη σιγουριά, επειδή βασίζονται σε ένα φυσικό μέγεθος που είναι άμεσα διαστασιολογίσιμο καθώς λαμβάνεται από διακριβωμένο μετατροπέα. Όμως και στην περίπτωση αυτή, σύμφωνα με τον κανονισμό ISO 10816 οι μετρήσεις αυτού του τύπου, προκειμένου να αξιολογηθούν, θα πρέπει να κατηγοριοποιηθούν με προσοχή και με βάση διάφορα αυστηρά κριτήρια, όπως το είδος της έδρασης, της ισχύος και της τοποθέτησης (κάθετα ή οριζόντια) του μηχανήματος.

Βιβλιογραφία

- 1) Scheffer Cornelius and Girdhar Paresh “Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance”. Ver. 1.03, IDC tec.
- 2) “An Engineers Guide to Vibration Analysis”. PRÜFTECHNIK
- 3) “Noise and Vibration. Measurement Handbook”. 6th edition. PROSIG
- 4) Crowe Feinberg. “Design for Reliability”
- 5) Suri Ganeriwala. “Vibration and Force Signatures of Bent Shaft”. SpectraQuest Inc.
- 6) “Vibration and Force Signatures of Bent Shaft”. SKF.
- 7) Derek Norfield. “Practical Balancing of Rotating Machinery”.
- 8) Heinz P. Bloch and Freq K. Geitner. “Machinery Component Maintenance and Repair”.
- 9) A. S. Rangwala. “Turbo-Machinery Dynamics Design and Operation”.
- 10) Robert H. Bishop. “THE MECHATRONICS HANDBOOK”.
- 11) Ricky Smith and R. Keith Mobley. “Industrial Machinery Repair Best Maintenance Practices Pocket Guide”.
- 12) Paul Robert Houlston. “Active Vibration Control of Rotating Machines”. BEng (Hons.).
- 13) Kevin P. Menard. “Dynamic Mechanical Analysis. A Practical Introduction”.
- 14) John A. Houldsworth and Duncan A. Grant. “The Use of Harmonic Distortion to Increase the Output Voltage of a Three-Phase PWM Inverter”.
- 15) Chu E. and George A. “Inside the FFT Black Box”.
- 16) Möser, M. and Müller, G. (2012) “Handbook of Engineering Acoustics”.

ISBN 9783540694601.

- 17) Χριστοφόρου Ιωάννης (2019) Πτυχιακή Εργασία. “Διάγνωση Ταλαντωτικής Συμπεριφοράς Αντλιών με Χρήση Τεχνικών Ανάλυσης Δονήσεων”. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κεντρικής Μακεδονίας