



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

«Ανάλυση ταλαντώσεων και διάγνωση βλαβών σε ανεμογεννήτρια 660kW»



ΑΝΤΩΝΗΣ ΜΟΥΣΤΕΡΑΚΗΣ

ΑΜ: 2017010188

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

1ο μέλος εξεταστικής επιτροπής: Παναγιώτης Αλευράς

2ο μέλος εξεταστικής επιτροπής: Μαρία Μπακατσάκη

Χανιά, Μάρτιος 2023

«Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στην οικογένεια μου και στα κοντινά μου πρόσωπα»

Περίληψη

Στη διπλωματική εργασία που θα εκπονηθεί θα γίνει η ανάλυση της μεθόδου προληπτικής συντήρησης των μηχανημάτων, μία νέα τάση προσέγγισης στον τρόπο συντήρησης, θα περιγράφουν τα πρότυπα βάση των διεθνών κανονισμών, ο τρόπος λήψης των μετρήσεων σε ανεμογεννήτρια, η ανάλυση των αποτελεσμάτων και οι ενέργειες τις οποίες πρέπει να εκτελεστούν ώστε να επιδιορθωθούν οι βλάβες.

Η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί μελέτη περίπτωσης από πραγματικά δεδομένα τα οποία έχουν συλλεχθεί κατά τη διάρκεια λειτουργίας ανεμογεννήτριας εγκατεστημένης σε ελληνικό νησί με σκοπό την καθοδήγηση, μέσω των ευρημάτων, των συνεργείων συντήρησης για να επιτευχθεί ο ταχύτερος χρόνος επισκευής και επαναλειτουργίας.

Από την ανάλυση των δεδομένων θα αναδειχθούν φθορές στους τριβείς του κυρίου άξονα μετάδοσης της κίνησης, στα γρανάζια του κιβωτίου και στα ηλεκτρολογικά στοιχεία της γεννήτριας. Η προσέγγιση στη διάγνωση βλαβών θα γίνει με τη μέθοδο ανάλυσης ταλαντώσεων οι ενδείξεις της οποίας θα επαληθευτούν από τη μέθοδο ανάλυσης ελαίου (όπου αυτό είναι εφικτό) και από φωτογραφικό υλικό κατά τη διάρκεια της συντήρησης σε χώρο μηχανουργείου. Τέλος θα αναφερθούν τα οικονομικά οφέλη από την εφαρμογή της μεθόδου.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να αναδειχθούν οι δυνατότητες της ανάλυσης ταλαντώσεων και της ανάλυσης λιπαντελαίου στον έγκαιρο εντοπισμό μίας βλάβης, δίνοντας τον απαραίτητο χρόνο οργάνωσης του διαχειριστή για τον προγραμματισμό των εργασιών. Επίσης ένα ακόμα σημείο στο οποίο στοχεύει η παρούσα ανάλυση είναι η εύρεση των φθορών πριν την αύξηση εκτός ορίων των ταλαντώσεων.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε με την ύπαρξη ενός συνόλου ανθρώπων στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη του οποίου χωρίς τη πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση θα ήταν αδύνατη η διεκπεραίωση και ολοκλήρωση της. Ευχαριστώ για το ενδιαφέρον και τη πρόθεση του για περαιτέρω συνεργασία.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συνεργάτες μου, στην εταιρεία AdMeS, το προσωπικό της διαχειρίστριας εταιρείας του αιολικού πάρκου, το προσωπικό του μηχανουργείου που εκτέλεσε τις εργασίες επισκευής και τους επικεφαλής των ομάδων συντήρησης.

Τέλος, οφείλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου και στους κοντινούς μου φίλους για την συνεχή υποστήριξή τους.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iii
Ευχαριστίες	iv
Περιεχόμενα	v
Συντομογραφίες.....	vii
Κεφάλαιο 1ο: Αντικείμενο Εργασίας	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Δομή.....	2
Κεφάλαιο 2ο: Μεθοδολογία Προβλεπτικής Συντήρησης Condition Based Maintenance (CBM).....	3
2.1 Γενικά.....	3
2.1.1 Πεδία εφαρμογής, πλεονεκτήματα & συνήθεις βλάβες	5
2.2 Βασικές έννοιες ταλαντώσεων	6
2.2.1 Πλάτος ταλάντωσης (Amplitude).....	6
2.2.2 Συχνότητα.....	7
2.2.3 Μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση	8
2.3 Γενικές μετρήσεις (Overall readings).....	12
2.4 Εισαγωγή στο φάσμα (Spectrum)	13
2.5 Όρια ταλαντώσεων ISO 10816-3	18
Κεφάλαιο 3ο: Προετοιμασία μέτρησης.....	20
3.1 Συνήθεις βλάβες σε περιστροφικά μηχανήματα	20
3.1.1 Ηλεκτρικά προβλήματα.....	20
3.1.2 Προβλήματα σε γραναζοκιβώτια	24
3.1.3 Προβλήματα τριβέων κύλισης	28
3.2 Υπολογισμός παραγόμενων συχνοτήτων	33
3.3 Σημεία Μέτρησης.....	34
3.4 Εξοπλισμός.....	36
Κεφάλαιο 4ο: Ανάλυση ταλαντώσεων	38
4.1 Τριβείς κύλισης κύριου άξονα	38
4.1.1 Εμπρόσθιος τριβέας.....	39
4.1.2 Οπίσθιος τριβέας	42
4.2 Γραναζοκιβώτιο.....	45
4.2.1 Πλανητικό μέρος (Planetary / Low Speed Shaft):.....	45
4.2.2 Ενδιάμεσος άξονας (Intermediate Shaft):	48

4.2.3	Τελικός άξονας (High Speed Shaft):	50
4.2.4	Τριβείς κύλισης γραναζοκιβωτίου.....	52
4.3	Γεννήτρια	53
4.4	Οδηγίες.....	58
Κεφάλαιο 5ο:	Συμπεράσματα / Αποτελέσματα.....	59
5.1	Συμπεράσματα ανάλυσης.....	59
5.2	Αποτελέσματα	60
5.3	Ενέργειες	62
5.4	Οικονομικά οφέλη.....	64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		65

Συντομογραφίες

Ακρόνυμο	Ορισμός
Ax	Axial
BPM	Ball Pass Frequency Inner
BPFO	Ball Pass Frequency Outer
BSF	Ball Spin Frequency
DE	Drive End
FMB	Front Main Bearing
FTF	Failing Train Frequency
GMF	Gear Meshing Frequency
H	Horizontal
HSGM	High Speed Shaft Gear Meshing Stage
HSS	High Speed Shaft
HSS GS	High Speed Shaft Generator Side
HSS RS	High Speed Shaft Rotor Side
IMS	Intermediate Shaft
IMS GS	Intermediate Shaft Generator Side
IMS RS	Intermediate Shaft Rotor Side
ISGM	Intermediate Shaft Gear Meshing Stage
LSS	Low Speed Shaft
LSS GS	Low Speed Shaft Generator Side
LSS RS	Low Speed Shaft Rotor Side
NDE	Non Drive End
PLC	Planetary Carrier
PLTGM	Planetary Gear Meshing Stage
RG	Ring Gear
RMB	Rear Main Bearing
RMS	Root Mean Square
RPM	Rounds Per Minute
V	Vertical

Κεφάλαιο 1ο: Αντικείμενο Εργασίας

1.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος της προβλεπτικής συντήρησης (Condition Based Maintenance - CBM) αποτελεί το σύγχρονο δόγμα συντήρησης μηχανημάτων. Δύο γενεές μεταγενέστερη της μεθόδου της προγραμματισμένης συντήρησης (Programmed Maintenance System - PMS), η μέθοδος της προβλεπτικής συντήρησης δεν απαιτεί τη διακοπή λειτουργίας των μηχανημάτων ανά τακτά χρονικά διαστήματα προκειμένου να επιθεωρηθούν και να συντηρηθούν. Αντιθέτως είναι δυνατή η συνεχής λειτουργία τους όσο η κατάστασή τους το επιτρέπει. Τα βασικότερα εργαλεία της προβλεπτικής συντήρησης (CBM) για την αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασης ενός μηχανήματος, είναι η μέθοδος των ταλαντώσεων (Vibration analysis), θερμογραφίας (Infrared thermography), λιπαντελαίου (Oil analysis), υπερήχων (Ultrasound analysis). Στο εξωτερικό γνωρίζουν αυξανόμενη εφαρμογή σε πολλούς τομείς μεταξύ των οποίων η βιομηχανία, η ναυτιλία και τα τελευταία χρόνια και ο τομέας των ανεμογεννητριών. Νηογνώμονες όπως DNV, Lloyd's, ABS, BV, καθώς και κατασκευαστικοί οίκοι SKF, Siemens Energy & Automation, Wartsila εφαρμόζουν και ενθαρρύνουν τη μέθοδο ανάλυσης κραδασμών.

Η μέθοδος της προβλεπτικής συντήρησης τα τελευταία χρόνια είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στο χώρο των ανεμογεννητριών διότι τα κόστη οποιασδήποτε άλλης μορφής συντήρησης είναι ιδιαίτερα υψηλά και ο τρόπος προσέγγισης τους ενέχει κινδύνους και εκτελείται από εξειδικευμένο προσωπικό με ικανότητα εργασίας σε ύψος.

Στη συγκεκριμένη εργασία περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η προετοιμασία των μετρήσεων ανάλογα με τα μηχανικά μέρη και τα εξαρτήματα της κάθε ανεμογεννήτριας, η συλλογή των δεδομένων και η ανάλυση των ταλαντώσεων με στόχο την αποτελεσματικότερη και ταχύτερη συντήρηση από τα συνεργεία

Η εφαρμογή της μεθόδου σε ανεμογεννήτριες παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες συγκριτικά με την εφαρμογή της μεθόδου σε μηχανήματα της βιομηχανίας ή της ναυτιλίας λόγω φυσικών φαινομένων τα οποία μπορεί να αλλοιώσουν τις μετρήσεις οδηγώντας τον αναλυτή σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Αναφέρεται παραδειγματικά ότι κατά τη διάρκεια λήψης των δεδομένων οι στροφές της ατράκτου δεν παραμένουν πάντα σταθερές διότι εξαρτώνται από την ένταση και τις ριπές του ανέμου, συνεπώς και οι ταλαντώσεις δεν είναι σταθερού πλάτους. Παρακάτω θα αναλυθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια όλες οι δυσκολίες οι οποίες συναντώνται στο πεδίο και πως αυτές μπορούν να ξεπεραστούν ώστε η μέθοδος ανάλυσης κραδασμών να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και έγκυρη. Ένα άλλο σημείο στο οποίο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή και απαιτείται μεγάλη εμπειρία του χειριστή είναι η ανάλυση των διαγραμμάτων η οποία δεν πρέπει να σταματάει στα όρια των κανονισμών ή στους μετασχηματισμούς Fourier, αλλά να περιλαμβάνει κυματομορφές στο χρόνο (timewave analysis), διαγράμματα τροχιάς (orbit plots), αποδιαμόρφωση (demodulation) κ.α.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης περίπτωσης γίνεται αντιληπτό ότι οι μετρήσεις βάσει κανονισμών μπορεί να είναι εντός των ορίων που περιγράφονται σε αυτά, αλλά ταυτόχρονα υπάρχουν φθορές σε μηχανικά μέρη τα οποία μπορούν να προκαλέσουν πολύ σημαντικές βλάβες ή και καταστροφικά αποτελέσματα.

1.2 Δομή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μέτρηση των ταλαντώσεων σε ανεμογεννήτρια και σε συνδυασμό με την ανάλυση λιπαντελαίου να γίνει μία ασφαλή προσέγγιση στις βλάβες που έχουν προκληθεί, αλλά και στις εναπομένουσες ώρες λειτουργίας του μηχανήματος. Για να επιτευχθεί το παραπάνω η εργασία χωρίζεται σε τέσσερα κεφάλαια όπως περιγράφονται κάτωθι:

Κεφάλαιο 2: Μεθοδολογία προβλεπτικής συντήρησης (CBM). Είναι σημαντικό να κατανοηθεί γιατί γίνεται η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου, τι μπορεί να εντοπιστεί αποτελεσματικά, ποια είναι τα όρια και πώς γίνεται η αξιολόγηση των μηχανημάτων. Στο ίδιο κεφάλαιο συμπεριλαμβάνονται στοιχειώδεις γνώσεις ψηφιακής επεξεργασίας σήματος ώστε να βοηθήσουν περισσότερο τον αναγνώστη να κατανοήσει όρους που θα χρησιμοποιηθούν στην φάση της ανάλυσης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με αναφορά στον εξοπλισμό για την εκτέλεση της μέτρησης.

Κεφάλαιο 3: Προετοιμασία Μέτρησης & Συνήθη Σφάλματα. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται το στάδιο προετοιμασίας της μέτρησης, ο υπολογισμός των συχνотήτων και τα σημεία τοποθέτησης των αισθητήρων. Έπειτα το κεφάλαιο περιλαμβάνει και τα συνήθη σφάλματα στα μέρη του γκραναζοκιβωτίου και της γεννήτριας.

Κεφάλαιο 4: Ανάλυση δεδομένων (Case Study). Αποτελεί το βασικό μέρος της εργασίας στο οποίο γίνεται η ανάλυση των δεδομένων των ταλαντώσεων και των ευρημάτων στην κύρια άτρακτο, το γκραναζοκιβώτιο και την γεννήτρια.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Αποτελέσματα – Ενέργειες – Οικονομικά οφέλη. Ολοκληρώνοντας την παρούσα εργασία περιγράφονται οι ενέργειες που δόθηκαν στα συνεργεία συντήρησης, τα αποτελέσματα των αναλύσεων και τα οικονομικά οφέλη εφαρμογής της μεθόδου.

Αναφέρεται ότι όλα τα δεδομένα της ανάλυσης των ταλαντώσεων και των συμπερασμάτων ανήκουν στο προσωπικό μου αρχείο κατά τη διάρκεια της επαγγελματικής μου ενασχόλησης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ανώνυμα ως προς τις εταιρείες και μηχανές που αφορούν.

Κεφάλαιο 2ο: Μεθοδολογία Προβλεπτικής Συντήρησης Condition Based Maintenance (CBM)

2.1 Γενικά

Η μέθοδος του CBM αποτελεί τη νέα διεθνή φιλοσοφία στην εφαρμοσμένη συντήρηση. Προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης της λειτουργικής κατάστασης κάθε μηχανήματος χωρίς να απαιτείται η ανάγκη κράτησης αυτού. Η συντήρηση προκύπτει μόνο όταν αυτό είναι αναγκαίο. Οι τεχνολογίες με τις οποίες εφαρμόζεται η προβλεπτική συντήρηση στα μηχανήματα είναι οι εξής:

Ανάλυση Ταλαντώσεων (Vibration Analysis): Η παρακολούθηση των κραδασμών που παράγονται κατά την λειτουργία των περιστρεφόμενων μηχανημάτων είναι αξιόπιστη μέθοδος για τη διάγνωση βλαβών σε μηχανολογικές κατασκευές. Η εν λόγω τεχνική στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε στοιχείο μηχανής παράγει συγκεκριμένες δονήσεις σε συγκεκριμένες χαρακτηριστικές συχνότητες. Με τις απαραίτητες εξειδικευμένες γνώσεις, η ανάλυση του φάσματος των κραδασμών επιτρέπει την αξιολόγηση της κατάστασης της μηχανής. Η παρακολούθηση δονήσεων είναι η πιο αξιόπιστη μέθοδος αποτίμησης της γενικής κατάστασης μιας περιστρεφόμενης μηχανής. Η ανάλυση φάσματος παρέχει σαφείς, μετρήσιμες πληροφορίες και επιτρέπει στο μηχανικό να γνωρίζει την κατάσταση της μηχανής. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας αισθητήρες τοποθετημένους σε συγκεκριμένες θέσεις επί των μηχανών με δυνατότητα μέτρησης της μετατόπισης, επιτάχυνσης, ταχύτητας. Στη συνέχεια το σήμα από τους αισθητήρες επεξεργάζεται από εξειδικευμένους καταγραφείς σήματος (data collectors) με τη χρήση ψηφιακών φίλτρων και μετασχηματισμούς σήματος με ανάλυση Fourier (FFT Analysis), Wavelet και Hilbert-Huang (HHT Analysis). Το επεξεργασμένο σήμα μεταφέρεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και με την χρήση κατάλληλου λογισμικού ο εξειδικευμένος τεχνικός μπορεί να εξάγει ασφαλή συμπεράσματα για τη λειτουργική κατάσταση του μηχανήματος. Η επιλογή ψηφιακών φίλτρων και μετασχηματισμών έγκειται στην εμπειρία του αναλυτή καθώς η ορθή επιλογή των ανωτέρω βοηθάει στον ακριβή προσδιορισμό του προβλήματος.

Όταν ένα στοιχείο μηχανής έχει φθαρεί ή αστοχήσει, μία συγκεκριμένη συχνότητα στο φάσμα θα διεγερθεί, εμφανίζοντας μεγαλύτερο πλάτος. Στην πραγματικότητα κάθε φάσμα της περιστρεφόμενης μηχανής παράγει δονήσεις με διακριτά χαρακτηριστικά σε συγκεκριμένες συχνότητες. Οι δονήσεις αυτές μπορούν να μετρηθούν και να συγκριθούν με μεγέθη αναφοράς με σκοπό την ανίχνευση και τη διάγνωση του σφάλματος.

Ανάλυση Λιπαντελαίου (Oil Analysis): Η χημική ανάλυση λιπαντελαίου με τη χρήση χημικής και φασματοσκοπικής εξέτασης εφαρμόζεται επίσης επικουρικά ως διαγνωστικό εργαλείο όταν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης κραδασμών ανιχνευθούν προβλήματα.

Θερμική Απεικόνιση (Infrared Thermographic Analysis): Η τεχνολογία θερμικής απεικόνισης με την χρήση ψηφιακής θερμοκάμερας εφαρμόζεται επικουρικά ως διαγνωστικό εργαλείο όταν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης κραδασμών ανιχνευθούν προβλήματα.

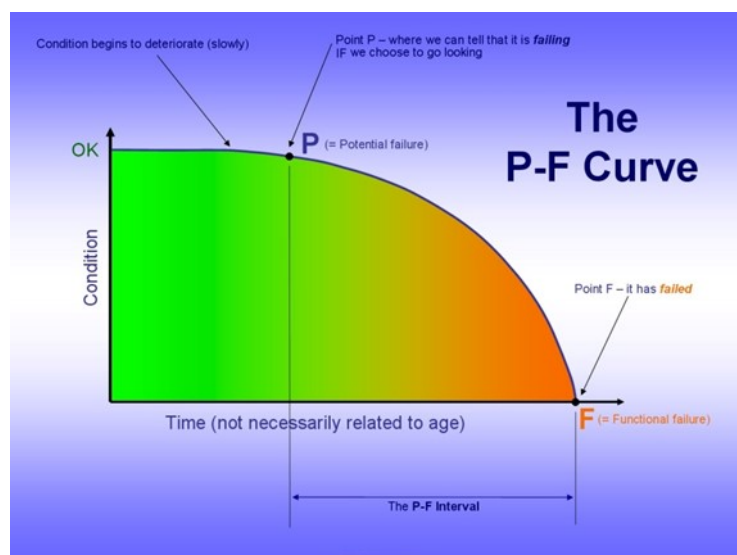
Ανάλυση Υπερήχων (Ultrasonic Analysis): Η ανάλυση υπερήχων ανιχνεύει προβλήματα σε πολύ υψηλές συχνότητες, στις οποίες δεν έχει εφαρμογή η μέθοδος της ανάλυσης κραδασμών.

Εκτροπή Λειτουργίας Μορφών (Operating Deflection Shapes - ODS): Η προσομοίωση της παραμόρφωσης γίνεται με την χρήση εξειδικευμένου λογισμικού το οποίο βασίζεται στη μέθοδο εκτροπής των στοιχειωδών μαζών του μηχανήματος από τη θέση τους, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η

προσομοίωση των παραμορφώσεων (animation), με αποτέλεσμα την απεικόνιση της συνολικής ταλάντωσης του μηχανήματος στο χώρο υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας εμφανίζοντας την πηγή των κραδασμών καθώς και τις δυνάμεις που επενεργούν σε αυτό.

Για τον έλεγχο λειτουργικής κατάστασης ανεμογεννήτριας η χρήση της τεχνολογίας των ταλαντώσεων και της χημικής ανάλυσης λιπαντελαίου κρίνεται αναγκαία για την έγκυρη καταγραφή των βλαβών και έπειτα τον έγκαιρο προγραμματισμό των εργασιών. Στην συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης θα γίνει επαλήθευση των ενδείξεων ταλαντώσεων από την ανάλυση λιπαντελαίου.

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω η επιλογή της στρατηγικής της προβλεπτικής συντήρησης για την παρακολούθηση μιας εγκατάστασης μέσω των τεχνολογιών της προσφέρει διάγνωση της γενικής κατάστασης ενός περιστροφικού μηχανήματος, αλλά και όλων των εσωτερικών εξαρτημάτων του. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η βέλτιστη λειτουργία των μηχανημάτων και η μακροζωία τους και επιτυγχάνεται η ασφαλής παράταση του χρόνου λειτουργίας τους. Η φιλοσοφία του CBM βασίζεται στον εντοπισμό μιας βλάβης όσο το δυνατόν νωρίτερα επί της καμπύλης πιθανότητας αστοχίας (P-F curve) που παρουσιάζει ένα μηχάνημα όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1 Καμπύλη πιθανότητας P-F

Ο έγκαιρος εντοπισμός της βλάβης είναι αυτό που θα ελαχιστοποιήσει το ρίσκο αιφνίδιας κράτησης του μηχανήματος καθώς και το κόστος αποκατάστασης της λειτουργίας του. Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου CBM είναι ότι εντοπίζει τα αίτια βλάβης (Root Cause Failure) ώστε να αποκατασταθούν αυτά και όχι απλά το αποτέλεσμα. Επιπρόσθετα αποτελεί βασικό εργαλείο για την επιβεβαίωση ορθής επισκευής ενός μηχανήματος, ελαχιστοποιώντας το ρίσκο εμφάνισης προβλημάτων που αρκετά συχνά παρουσιάζονται την αρχική περίοδο λειτουργίας ενός μηχανήματος (infant mortality) [1].

2.1.1 Πεδία εφαρμογής, πλεονεκτήματα & συνήθεις βλάβες

Η προβλεπτική / προγνωστική συντήρηση μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα περιστρεφόμενα μηχανήματα, είτε αυτά λειτουργούν αυτόνομα, είτε αποτελούν ένα κομμάτι μιας σειράς μηχανημάτων μαζικής παραγωγής. Τέτοια μηχανήματα μπορεί να είναι ηλεκτροκινητήρες AC/DC, γεννήτριες, μηχανές, κιβώτια ταχυτήτων, αεριοστροβίλοι, ανεμογεννήτριες, αξονικά συστήματα, ατμοστροβίλοι, υπερπληρωτές.

Χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα τις μεθόδου είναι ότι δεν απαιτείται η διακοπή λειτουργίας των μηχανημάτων με αποτέλεσμα να διατηρείται η βέλτιστη διαθεσιμότητα των μηχανών, μειώνεται το κόστος συντήρησης και επισκευής, ελαχιστοποιούνται τα αποθέματα ανταλλακτικών (προσεγγίζεται το διάστημα μέχρι την επόμενη συντήρηση) και τέλος εξαλείφεται το ρίσκο απρόβλεπτης βλάβης.

Οι συνηθισμένες βλάβες που εντοπίζονται είναι οι παρακάτω:

1. Αστοχία εδράνων κύλισης και ολίσθησης
2. Αζυγοσταθμία
3. Απευθυγράμμιση
4. Κάμψη ή στρέβλωση άξονα
5. Εσφαλμένη τοποθέτηση ρουλεμάν
6. Χαλάρωση εσωτερικών εξαρτημάτων
7. Χαλάρωση στήριξης μεταξύ μηχανήματος και βάσης
8. Ηλεκτρικά προβλήματα κινητήρων
9. Μη κανονική ροής σε αντλίες (turbulence, cavitations)

2.2 Βασικές έννοιες ταλαντώσεων

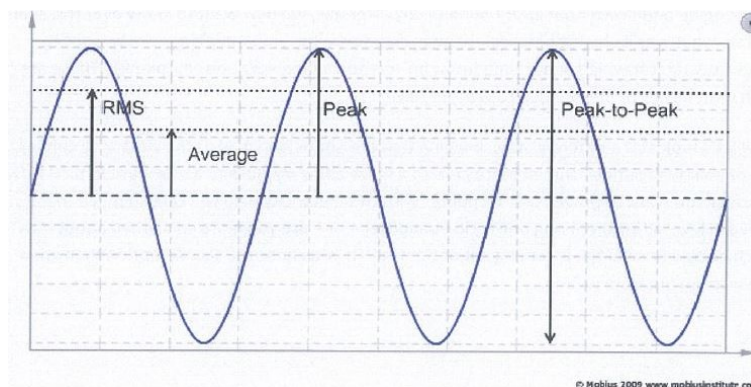
Τα περιστρεφόμενα μηχανήματα όπως αντλίες, ανεμιστήρες, ηλεκτροκινητήρες και οι αεριοστρόβιλοι ταλαντώνονται κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Πολλές από αυτές τις ταλαντώσεις μπορούν να ακουστούν με το αυτί ή τα μηχανικά προβλήματα να εντοπιστούν με το μάτι όμως όταν αυτό συμβεί οι συνέπειες, για το υπό εξέταση μηχανήμα, συνήθως είναι καταστρεπτικές. Χρησιμοποιώντας εξειδικευμένους αισθητήρες και ηλεκτρονικά συστήματα οι κραδασμοί και η ανάλυσή τους μπορούν να παρέχουν μία έγκυρη και ευρέος φάσματος διάγνωση βλάβης όπως κατεστραμμένα ρουλεμάν από απευθυγραμμισμένα μέρη, αζυγοστάθμιτους άξονες χαλαρές, συνδέσεις και βάσεις και πολλές άλλες διαφορετικές καταστάσεις. Οι ταλαντώσεις αλλάζουν καθώς αλλάζουν και οι συνθήκες λειτουργίας.

Οι δυνάμεις εντός των μηχανημάτων δημιουργούν κραδασμούς οι οποίοι μεταφέρονται στα ρουλεμάν και αυτές είναι το αποτέλεσμα των περιστρεφόμενων δυνάμεων και των δυνάμεων τριβής. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης οι ταλαντώσεις μετريούνται στις βάσεις των τριβών είτε ολίσθησης είτε κύλισης και ουσιαστικά μετريούνται οι δυνάμεις που παράγονται εσωτερικά του μηχανήματος. Οι τριβείς είναι οι αποδέκτες του προβλήματος εντός του μηχανήματος και όχι το πραγματικό πρόβλημα καθώς όλες οι δυνάμεις που βρίσκονται οι συσσωρευμένες στο μηχανήμα καταλήγουν στα σημεία στήριξης.

Παρακάτω θα αναφερθούν σύντομα βασικές έννοιες για την ανάλυση των ταλαντώσεων που θα χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, χωρίς να γίνει εκτενής περιγραφή σε όλα τα μεγέθη και τους παραμέτρους της ανάλυσης.

2.2.1 Πλάτος ταλάντωσης (Amplitude)

Το πλάτος ταλάντωσης εξαρτάται από την ένταση των ταλαντώσεων και η μορφή του παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Σε αυτό διακρίνονται οι τέσσερις μορφές μέτρησης: κορυφή (peak), κορυφή σε κορυφή (peak to peak), η μέση (average) και τέλος η μέση τετραγωνική ρίζα (RMS) [2].



Εικόνα 2.2 Πλάτη ταλάντωσης

Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι η μορφή peak to peak είναι δύο φορές μεγαλύτερη από την μορφή της κορυφής ή αλλιώς 0 σε κορυφή (0-peak). Ο παραπάνω ισχυρισμός όμως δεν είναι πάντα πραγματικός στην περίπτωση των κραδασμών και για αυτό πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι η μέτρηση κορυφής είναι η μέτρηση από το μηδέν προς κάποια κατεύθυνση μέχρι την κορυφή δηλαδή από το χαμηλότερο στο υψηλότερο σημείο ή από το μηδέν προς την υψηλότερη κορυφή.

Η μέτρηση της τετραγωνικής ρίζας (Root Mean Square) περιγράφει το μέσο ποσό της ενέργειας που εμπεριέχεται στην κυματομορφή (timewave) και υπολογίζεται από την Εξίσωση 2.1. Σε βάθος χρόνου είναι σημαντική η γνώση της μέσης ταλάντωσης και της ακραίας τιμής της κορυφής (peak). Εξαιτίας όμως του ότι κατά τη διάρκεια λειτουργίας ενός μηχανήματος και κατά τις διαφορετικές συνθήκες μπορούν να καταγραφούν πολλές ακραίες τιμές, είναι ορθότερο να χρησιμοποιείται η μέση τετραγωνική ρίζα καθώς οι τιμές των κορυφών θα οδηγήσουν σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Παρακάτω για την ανάλυση των ταλαντώσεων σε όλα τα μέρη της ανεμογεννήτριας το πλάτος ταλάντωσης περιγράφεται σε τιμές τετραγωνικής ρίζας (RMS).

$$RMS = \frac{Peak}{\sqrt{2}} \text{ Εξίσωση 2.1}$$

2.2.2 Συχνότητα

Ο σωστός υπολογισμός της συχνότητας περιστροφής ενός μηχανήματος είναι το κρισιμότερο σημείο για την ανάλυση και τον διαχωρισμό των συχνοτήτων. Κάθε ένα εξάρτημα παράγει διαφορετικές συχνότητες οι οποίες μαζί με τις συχνότητες περιστροφής συμπεριλαμβάνονται στα διαγράμματα ελέγχου. Πέρα από τις ονομαστικές στροφές που αναγράφονται στις ετικέτες των μηχανημάτων είναι απαραίτητη η μέτρηση τους με στροφόμετρα. Η χρήση τέτοιων μηχανημάτων βοηθάει και δίνει ακριβή αποτελέσματα όταν το φορτίο σε ένα μηχανήμα μεταβληθεί διότι με αυτό μεταβάλλεται και η ταχύτητα περιστροφής του.



Εικόνα 2.3 Στροφόμετρο συνδεδεμένο με τον data collector

Παρακάτω δίνεται ένας σύντομος πίνακας για τη διευκόλυνση υπολογισμού τις συχνότητας και μετατροπής της σε στροφές ανά λεπτό. Στο μεγαλύτερο μέρος της ανάλυσης γίνεται χρήση και αναφορά σε συχνότητες.

Hertz (Hz)	Στροφές ανά δευτερόλεπτο	CPS
RPM	Στροφές ανά λεπτό	
CPM	Κύκλοι ανά λεπτό	
CPM = RPM = Hz × 60		

Πίνακας 2.1 Περιγραφή όρων

2.2.3 Μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση

Το πλάτος μπορεί να μετρηθεί με διαφορετικούς τρόπους χρησιμοποιώντας διαφορετικούς αισθητήρες. Μπορεί επίσης να παρουσιαστεί με διαφορετικούς τρόπους διαφορετικά είναι εφικτό να μετατραπούν οι μονάδες στο λογισμικό ανάλυσης ή ωριότερα κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Σε αυτό το σημείο εισάγεται ένα παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης σε συνδυασμό με την ταλάντωση. Έστω στο απλοποιημένο παράδειγμα, μιας μάζας δεμένης στο ένα άκρο του ελατηρίου η οποία μετατοπίζεται από το ανώτερο στο κατώτερο σημείο, η μετακίνηση της οποίας περιγράφεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους [2].

Μετατόπιση είναι η απόσταση που ταξιδεύει η μάζα, πόσο πάνω και πόσο κάτω κινείται. Στην περίπτωση ενός ταλαντωμένου άξονα η μετατόπιση είναι το ποσό πάνω ή κάτω αυτός κινείται.

Στην περίπτωση των ταλαντώσεων σε περιστρεφόμενα μηχανήματα για τη μέτρηση της μετατόπισης χρησιμοποιούνται αισθητήρες μετατόπισης ή διαφορετικά, proximity probes τα οποία μετράνε την απόσταση ανάμεσα στον άξονα και τον αισθητήρα, μέσω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Επίσης η μετατόπιση μπορεί να υπολογιστεί με μετατροπή των σημάτων από αισθητήρες ταχύτητας ή επιταχυνσιόμετρα.

Metric	micron pk-pk
Imperial	mils pk-pk
1 Micron = $1\mu\text{m}$ = 1000th of a mm = 0.04 mils	

Πίνακας 2.2 Μονάδες μετατόπισης

Ταχύτητα η έννοια αυτή περιγράφει πόσο γρήγορα η μάζα μετακινείται από το ένα σημείο ή πόσο γρήγορα καλύπτει την απόσταση. Η ταχύτητα είναι ο ρυθμός μεταβολής της μετατόπισης ή για παράδειγμα πόση απόσταση μπορεί να καλυφθεί σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η ταχύτητα είναι μία ικανοποιητική μονάδα μέτρησης των ταλαντώσεων στα περισσότερα είδη μηχανημάτων και στις συχνότητες ενδιαφέροντος. Για το λόγο αυτό είναι η πιο συνηθισμένη μέτρηση για τους περισσότερους τύπους μηχανημάτων με έδρανα κύλισης.

Η ταχύτητα είναι ανάλογη της κόπωσης. Η τάση είναι αποτέλεσμα της μετατόπισης και οι κύκλοι τάσεως έχουν σαν αποτέλεσμα την κόπωση. Για το λόγο αυτό τα περισσότερα διαγράμματα ελέγχου ορίων ταλαντώσεων χρησιμοποιούν σαν μονάδα μέτρησης την ταχύτητα.

Metric	mm/sec RMS
Imperial	in/sec pk (or IPS pk)
1 inch = 25,4mm	

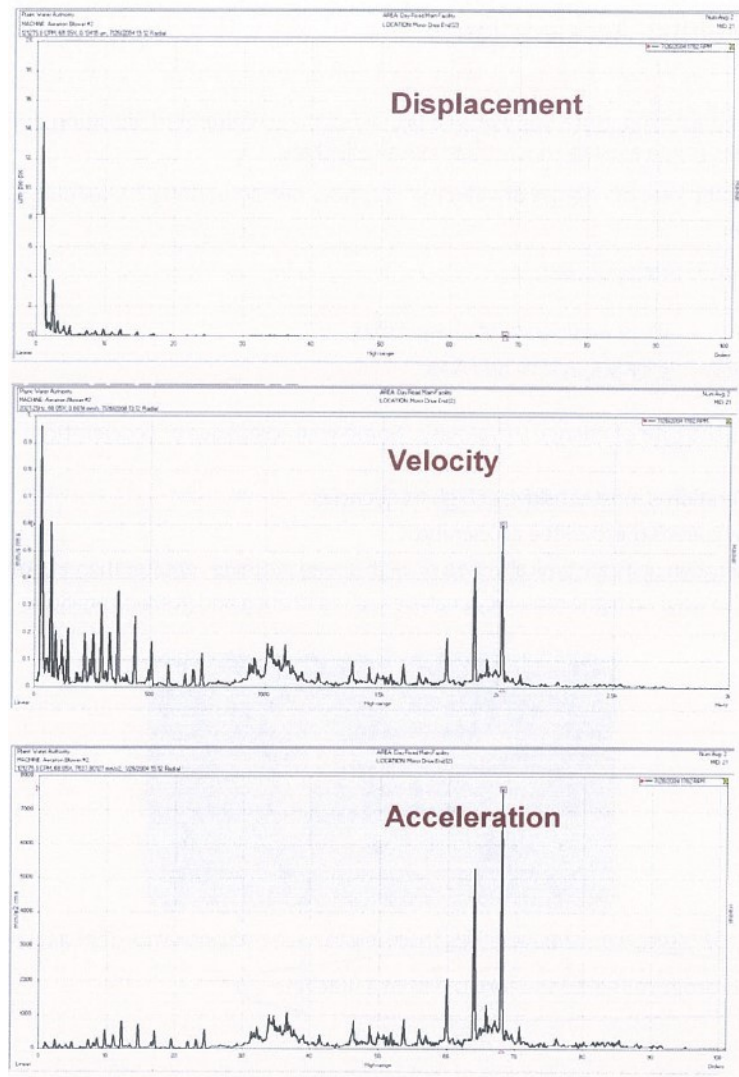
Πίνακας 2.3 Μονάδες ταχύτητας

Επιτάχυνση είναι ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας. Περιγράφει πόσο γρήγορα η μάζα επιταχύνει η επιβραδύνει.

Metric	g's or mm/sec ² RMS or m/sec ² RMS
Imperial	g's RMS, in/sec ² Pk and AdB

Πίνακας 2.4 Μονάδες επιτάχυνσης

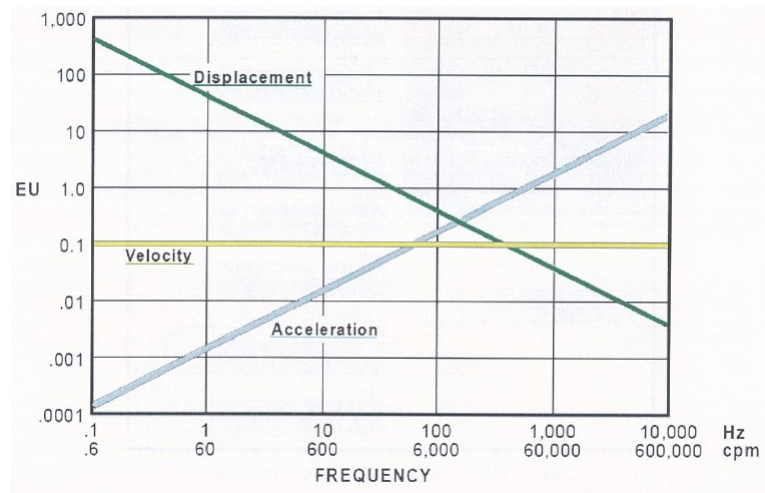
Όπως παρατηρήθηκε από τα ανώτερο η μετατόπιση είναι περισσότερο ευαίσθητη σε χαμηλότερες συχνότητες και η επιτάχυνση στις υψηλότερες ενώ η ταχύτητα είναι ευαίσθητη στις περισσότερες συχνότητες αλλά όχι τόσο αποδοτική στις πολύ υψηλές ή στις πολύ χαμηλές. Για την ανάδειξη της σημαντικότητας αυτών χαρακτηριστικών μετατρέπονται οι μονάδες από τη μία μορφή στην άλλη με τη χρήση λογισμικού εξαγοντας τα παρακάτω αποτελέσματα



Εικόνα 2.4 Τα ίδια δεδομένα σε μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση

Παρατηρώντας τα διαγράμματα στην παραπάνω εικόνα διαπιστώνεται ότι η μετατόπιση περιέχει συχνότητες στην αριστερή μεριά του διαγράμματος (χαμηλές συχνότητες), η επιτάχυνση παρουσιάζει τις συχνότητες στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος (πολύ υψηλές συχνότητες) και πολύ λίγες στην αριστερή πλευρά του, ενώ το διάγραμμα της ταχύτητας γίνεται αντιληπτό ότι περιέχει τις περισσότερες συχνότητες επομένως και τις περισσότερες πληροφορίες που μπορεί να αναδείξουν τις βλάβες σε ένα περιστροφικό μηχανήμα.

Συμπερασματικά των ανωτέρω πληροφοριών, από τα διαγράμματα της επιτάχυνσης της ταχύτητας και της μετατόπισης παρουσιάζεται το διάγραμμα συσχέτισης των τριών αυτών μεγεθών και η απόδοση τους ανάλογα το φάσμα συχνοτήτων



Εικόνα 2.5 Σχέση μεταξύ επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης.

2.3 Γενικές μετρήσεις (Overall readings)

Οι γενικές μετρήσεις ταλαντώσεων ή διαφορετικά overall readings είναι μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιούνται με χαμηλού κόστους μηχανήματα τα οποία εξάγουν αυτόματα μία τιμή ταχύτητας ταλαντώσεων μετρημένη σε RMS και αμέσως ο εκτελών τη μέτρηση μπορεί να διαπιστώσει αν είναι εντός ή εκτός ορίων σύμφωνα με το ISO 10816 ή το 7919. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει σύντομη καταγραφή και να διατηρηθεί ένα ιστορικό εξέλιξης ταλαντώσεων σε ένα μηχάνημα, χωρίς όμως να εξάγονται ασφαλή συμπεράσματα για την εγκυρότητα της μέτρησης και για τον εντοπισμό βλαβών. Η μοναδική δυνατότητα που δίνει στο χειριστή μία τέτοια συσκευή είναι για να διαπιστώσει ταχύτητα εάν πρέπει να εξακολουθήσει ή όχι να λειτουργεί το συγκεκριμένο μηχάνημα ή για να καταγράψει την τιμή των ταλαντώσεων στο ιστορικό συντήρησης του μηχανήματος. Είναι πολύ σύνηθες ένα μηχάνημα το οποίο βρίσκεται εντός ορίων κραδασμών σύμφωνα με το ISO 10816 να έχει βλάβες οι οποίες δεν μπορούν να εντοπιστούν από μία μέτρηση γενικού τύπου.



Εικόνα 2.6 Φορητή συσκευή μέτρησης ταλαντώσεων

Ο λόγος που υπάρχουν αυτού του τύπου οι μετρήσεις είναι εξαιτίας της χαμηλής υπολογιστικής ισχύος που απαιτείται για την εξαγωγή συμπερασμάτων ταλάντωσης χωρίς την απαίτηση χειρισμού από εξειδικευμένο προσωπικό.

Τα μειονεκτήματα τα οποία εμφανίζονται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ο περιορισμός στο εύρος συχνοτήτων, η εξάρτηση από μία μοναδική τιμή (είτε αυτή είναι σε μονάδες ταχύτητας, επιτάχυνσης, ή μετατόπισης) και η γενική μέτρηση δεν είναι για όλα τα υπό εξέταση μηχανήματα η ίδια.

Αναλύοντας το παραπάνω μειονεκτήματα η μέθοδος γενικής μέτρησης (overall reading) αποτελεί μία πληροφορία αλλά δεν αρκεί για ασφαλή συμπεράσματα. Το περιορισμένο εύρος συχνοτήτων στο οποίο είναι προγραμματισμένο να καταγραφούν αυτές οι μετρήσεις είναι ανάμεσα στα 2 και στα 1.000 Hertz. Αργότερα σε επόμενο κεφάλαιο θα διαπιστωθεί ότι υπάρχουν πολλές βλάβες παράγουν συχνότητες έξω από αυτά τα όρια.

Η συγκεκριμένη τιμή που δείχνει το μηχάνημα λήψης των ταλαντώσεων δεν μπορεί να διαχωρίσει το είδος του προβλήματος το οποίο επικρατεί στο μηχάνημα, δηλαδή δεν είναι εφικτό να ξεχωρίσει κάποιος αν πρόκειται για πρόβλημα χαλάρωσης, συντονισμού, χαλάρωσης η αλλού προβλήματος.

Μία γενική μέτρηση δεν είναι πάντα ίδια διότι οι συγκεκριμένες συσκευές προσφέρουν καταγραφή συχνοτήτων σε διαφορετικά παράθυρα πέρα από τα συνηθισμένα 2 έως 1.000 Hertz με αποτέλεσμα στα χέρια ενός μη εξειδικευμένου χειριστή είναι πιθανό να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα

2.4 Εισαγωγή στο φάσμα (Spectrum)

Η ανάλυση της καταγραφής κραδασμών ενός μηχανήματος, εκτελείται κυρίως επί του ονομαζόμενου «φάσματος» της καταγραφής δονήσεων. Το φάσμα είναι αποτέλεσμα ανάλυσης της κυματομορφής που έχει καταγραφεί (στο εξής time waveform) με τη μέθοδο FFT. Στον οριζόντιο άξονα των διαγραμμάτων του φάσματος, υποτυπώνεται η συχνότητα σε Hz ή εναλλακτικά αναλόγως της ρύθμισης που γίνεται στο λογισμικό ο αριθμός στροφών RPM (ή CPM cycles per minute), που πρακτικά ισούται με $\text{Hz} \times 60$. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το πλάτος (ένταση) δόνησης σε μονάδες ταχύτητας mm/sec ή σε λογαριθμική κλίμακα (αναλόγως της ρύθμισης του λογισμικού) σε dB.

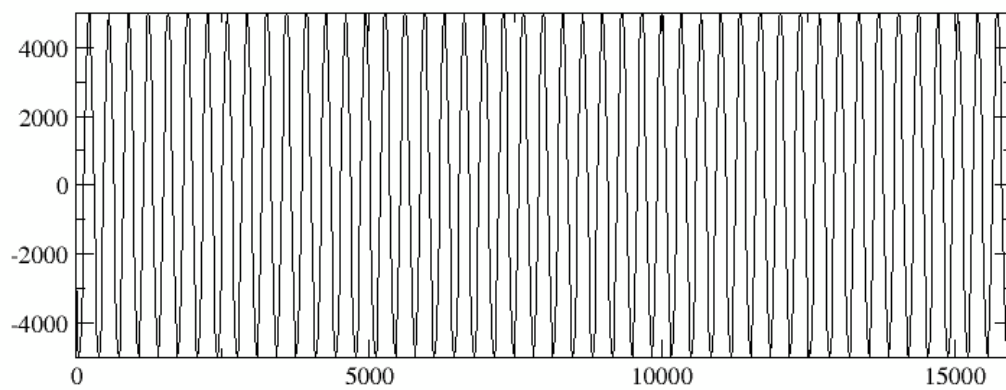
Το πρώτο βήμα πριν την εκτέλεση καταγραφής κραδασμών επί ενός μηχανήματος είναι οι ρυθμίσεις του συστήματος καταγραφής και του λογισμικού που θα εκτελέσει την ανάλυση. Απαιτείται προσεκτική παραμετροποίηση (setup) του συστήματος προκειμένου ληφθεί αξιοποιήσιμη καταγραφή και εν συνεχεία αξιόπιστη ανάλυση.

Η καταγραφή ενός φαινομένου υπό την μορφή time waveform όπως αυτό των κραδασμών ενός μηχανήματος, δεν μπορεί εύκολα να μελετηθεί από έναν αναλυτή, λόγω της πυκνής και πολύπλοκης στις περισσότερες των περιπτώσεων μορφής που παρουσιάζει. Η πιο απλή μορφή time waveform που μπορούμε να μελετήσουμε και να αναλύσουμε είναι η ημιτονοειδής. Δύο είναι τα χαρακτηριστικά με τα οποία προσδιορίζεται μια ημιτονοειδής κυματομορφή:

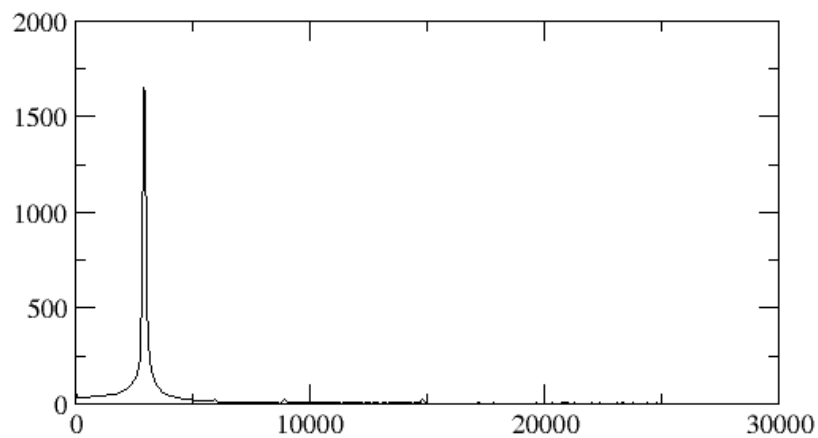
- το **πλάτος** που καθορίζει την ένταση του φαινομένου και
- η **συχνότητα** που δηλώνει το πόσο συχνά το φαινόμενο φτάνει στη μέγιστη τιμή του.

Τα δύο αυτά μεγέθη, μαζί με τη **φάση**, χρησιμοποιούνται στην ανάλυση κραδασμών. Η φάση, στην περίπτωση ανάλυσης κραδασμών, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της σχέσης που υπάρχει μεταξύ των κραδασμών δύο σημείων υπό την έννοια κατεύθυνσης που κινείται το ένα σημείο ως προς το άλλο. Δηλαδή μια τιμή διαφοράς φάσης 180° μεταξύ δύο σημείων επί ενός μηχανήματος σημαίνει ότι τη στιγμή που το ένα εκ των σημείων κινείται προς μια κατεύθυνση την ίδια ακριβώς στιγμή το άλλο σημείο κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η μελέτη του φάσματος μιας κυματομορφής είναι η εξέταση των δύο αυτών μεγεθών (συχνότητας και έντασης) επί ενός διαγράμματος το οποίο τα αναπαριστά.

Το φάσμα μιας καταγραφής δημιουργείται γίνεται με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier. Ο μετασχηματισμός Fourier είναι η διαδικασία συμφώνως της οποίας μια κυματομορφή αναλύεται σε άθροισμα πολλών ημιτονοειδών κυματομορφών και κατά συνέπεια η ανάλυση μιας πολύπλοκης καταγραφής εμπίπτει στην ανάλυση καθεμιάς εκ των απλούστερων ημιτονοειδών κυματομορφών. Η αναπαράσταση μιας ημιτονοειδούς κυματομορφής στο χρόνο και η αντίστοιχη αναπαράστασή της στη συχνότητα είναι αυτή που παρουσιάζεται παρακάτω στην εικόνα 2.7. Στο πρώτο διάγραμμα ο οριζόντιος άξονας είναι ο χρόνος μεταβολής του φαινομένου και έχει μονάδες χρόνου (sec), ενώ ο κατακόρυφος άξονας προσδιορίζει το πλάτος (ένταση) του φαινομένου κάθε χρονική στιγμή. Στο δεύτερο διάγραμμα ο οριζόντιος άξονας δίνει τη συχνότητα που το φαινόμενο συμβαίνει (στην προκειμένη περίπτωση 3KHz δηλαδή 3.000 φορές το δευτερόλεπτο το μέγεθος λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του) και ο κατακόρυφος άξονας δίνει την λεγόμενη rms τιμή του φαινομένου, μια σχετική τιμή έντασης που θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι το φαινόμενο αυτό παρουσιάζει συνεχώς.

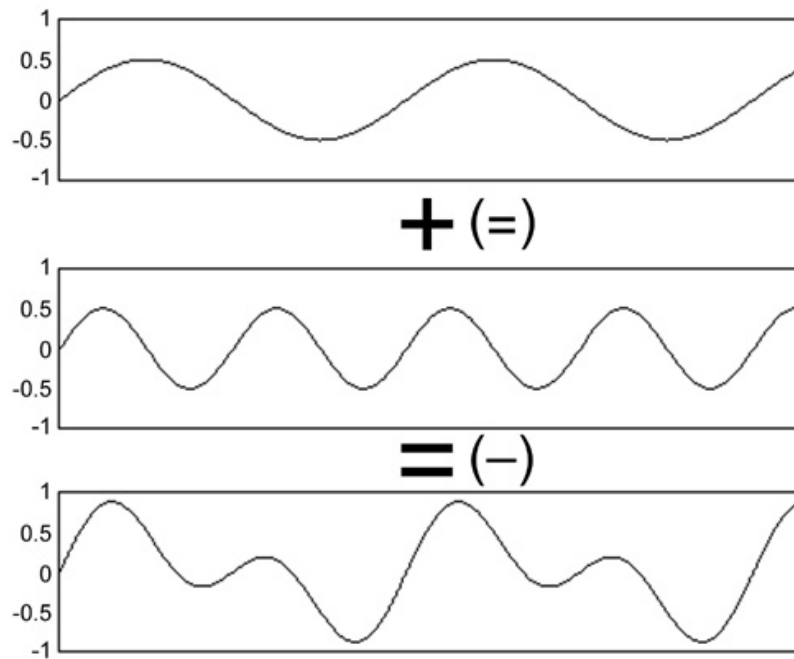


Εικόνα 2.7 Κυματομορφή (time waveform)



Εικόνα 2.8 Φάσμα (spectrum) .

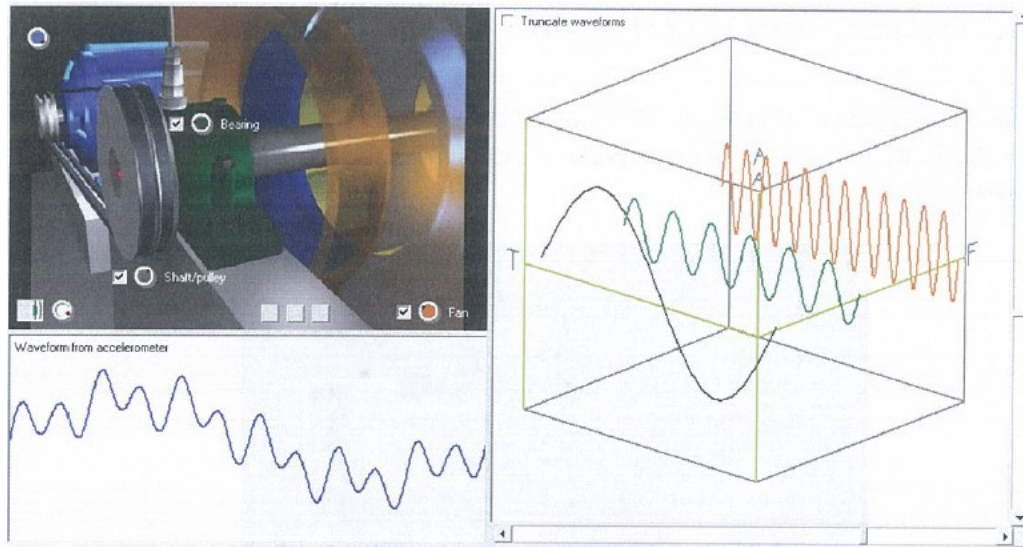
Στην εικόνα 2.9 παρουσιάζεται η ανάλυση μια πολύπλοκης κυματομορφής σε άθροισμα ημιτονοειδών κυματομορφών. Κάθε μια από τις εν λόγω κυματομορφές μπορεί να αναπαρασταθεί σε διάγραμμα με τη μορφή φάσματος (συχνότητα, πλάτος).



Εικόνα 2.9 Άθροισμα κυματομορφών

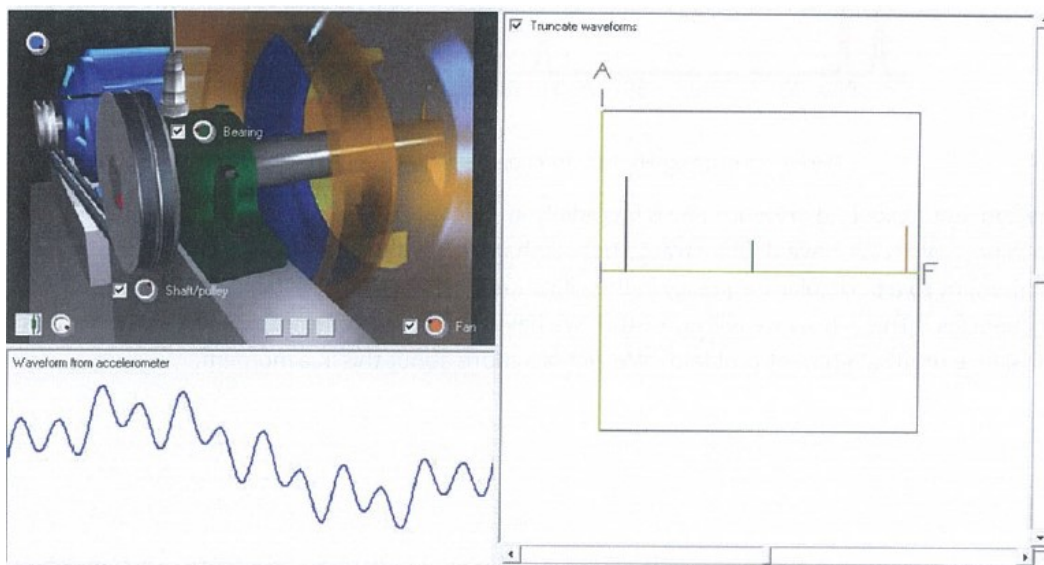
Στο ανωτέρω σχέδιο, η κάτω κυματομορφή είναι αυτή που αρχικά έχει καταγραφεί και χαρακτηρίζει πχ τον κραδασμό ενός σημείου σε ένα μηχάνημα και οι δύο πρώτες απλούστερες κυματομορφές είναι η ανάλυση αυτής στο άθροισμα δύο ημιτονοειδών κυματομορφών. Η πρώτη ημιτονοειδής ονομάζεται θεμελιώδης ή 1η αρμονική ή 1X (όπου X ο αριθμός RPM του μηχανήματος) και οι επόμενες χαρακτηρίζονται με έναν αύξοντα αριθμό αρχής γινομένης από το 2 που σημαίνει 2η αρμονική (ή 2X, 3X κ.τ.λ). Παρατηρείται ότι η πρώτη αρμονική (πάνω κυματομορφή) είναι αυτή με τη χαμηλότερη συχνότητα επανάληψης του φαινομένου (αραιό κύμα) ενώ όσο προχωράμε σε αρμονικές η συχνότητα αυξάνεται (δεύτερη κυματομορφή).

Στην παρακάτω εικόνα 2.10 παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές κυματομορφές η μία (πρώτη με μαύρο χρώμα) αφορά την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, η δεύτερη (πράσινο χρώμα) σε κάποια δυσλειτουργία της τροχαλίας και τέλος η τρίτη (κόκκινο χρώμα) σε κάποιο πρόβλημα στον τριβέα [2].



Εικόνα 2.10 Ξεχωριστές κυματομορφές σε 3-Δ

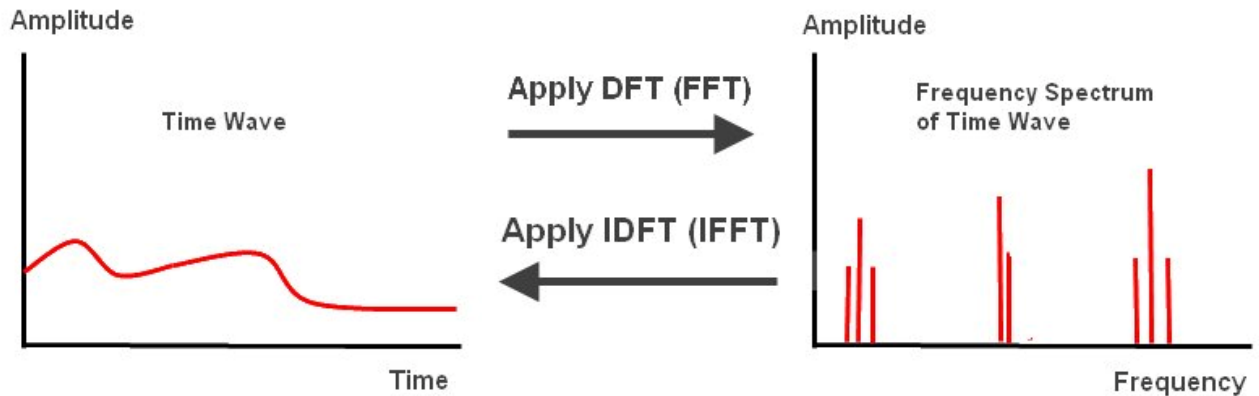
Συνοψίζοντας τις ανωτέρω δυσλειτουργίες σε ένα φάσμα με χρήση του μετασχηματισμού Fourier έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα.



Εικόνα 2.11 Εφαρμογή FFT

Στην εικόνα 2.12 παρουσιάζεται η απεικόνιση του φάσματος μιας κυματομορφής που καταγράφηκε, μετά την ανάλυσή της σε άθροισμα ημιτονοειδών κυματομορφών, με τη χρήση προγράμματος υπολογιστή. Ο υπολογιστής προκειμένου να εκτελέσει την εν λόγω μετατροπή χρησιμοποιεί μια μέθοδο που ονομάζεται Fast Fourier Transform (FFT).

Βασικές παράμετροι για τη χρήση του μετασχηματισμού FFT με υπολογιστή είναι ο καθορισμός του είδους του λεγόμενου window που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και ο αριθμός των lines που θα χρησιμοποιήσει για την εκτέλεση της ανάλυσης.



Εικόνα 2.12 Εφαρμογή FFT

Ο αριθμός των γραμμών της ανάλυσης είναι πάντοτε δύναμη του 2, μπορεί να είναι 512, 1024, 2048 κ.τ.λ και όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός αυτός τόσο καλύτερη ανάλυση γίνεται αλλά αυξάνεται ταυτόχρονα εκθετικά και ο χρόνος που απαιτείται για τον υπολογισμό. Υπάρχουν πολλά είδη window που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση FFT. Το καθένα από αυτά παρουσιάζει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στην περίπτωση μέτρησης κραδασμών κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούμε το hanning window το οποίο μας δίνει καλύτερη απεικόνιση του πλάτους των κραδασμών ανά συχνότητα του φάσματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως αυτές των bump test που εκτελούνται για τον προσδιορισμό συχνοτήτων συντονισμού ενός μηχανήματος, χρησιμοποιείται παραθυροποίηση τύπου rectangular ή uniform το οποίο κατ' ουσίαν είναι σαν να μην υπάρχει κανένα παράθυρο. Ο λόγος χρήσης τεχνικής windowing γίνεται για την εξάλειψη του φαινομένου διαρροών (leakage) αλλά το σύνολο του αντικειμένου στην λεπτομερή του μορφή εκφεύγει του σκοπού της εν λόγω εργασίας.

2.5 Όρια ταλαντώσεων ISO 10816-3

Τα όρια ταλαντώσεων περιγράφονται από το ISO 18106 με συγκεκριμένα διαγράμματα σε μονάδες ταχύτητες επιτάχυνση μετατόπισης.

Η κάθε ενότητα το ISO είναι για ξεχωριστούς τύπους μηχανημάτων και παρακάτω θα αναφερθεί το ISO 10819-3:2019 στο οποίο συμπεριλαμβάνονται βιομηχανικά μηχανήματα με ονομαστική ισχύ πάνω από 15 kW και ονομαστικές ταχύτητες ανάμεσα σε 120 - 15.000 rpm όταν μετρούνται στο πεδίο.

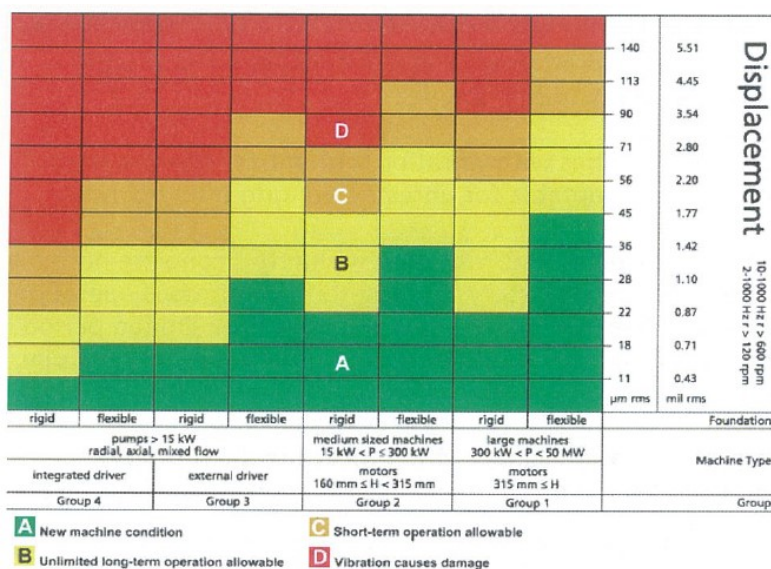
Τα μηχανήματα χωρίζονται σε τέσσερις ζώνες ως εξής

Ζώνη Α Βρίσκονται συνήθως τα καινούργια μηχανήματα

Ζώνη Β Σε αυτή τη ζώνη βρίσκονται τα μηχανήματα τα οποία θεωρούνται αποδεκτά για Απεριόριστο χρόνο Λειτουργίας

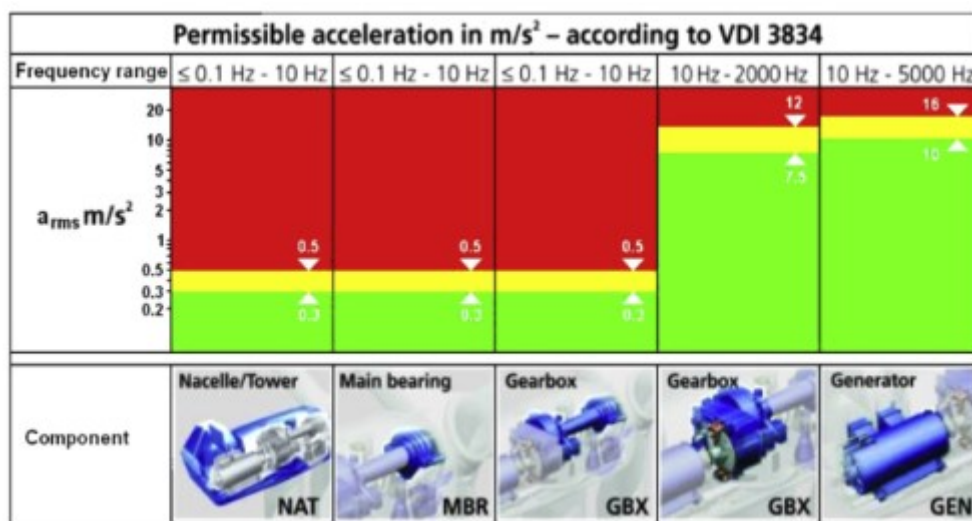
Ζώνη Γ Σε τι ζώνη βρίσκονται τα μηχανήματα τα οποία θεωρούνται μη αποδεκτά Για απεριόριστο χρόνο μακράς λειτουργίας

Ζώνη Δ Οι τιμές των κραδασμών σε αυτή τη ζώνη Είναι επαρκής σοβαρότητας ώστε να προκαλέσουν καταστροφή στο μηχάνημα



Εικόνα 2.13 Όρια ταλαντώσεων σε μονάδες μετατόπισης

Στον τομέα των ανεμογεννητριών τα όρια των ταλαντώσεων περιγράφονται από το VDI 3834 και παρακάτω παρατίθενται σε μονάδες επιτάχυνσης για κάθε ένα μέλος του συστήματος ξεχωριστά [6].



Εικόνα 2.14 Όρια ταλαντώσεων σύμφωνα με το VDI 3834

Τα παραπάνω όρια είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάρκεια της ανάλυσης αλλά δεν είναι τα μοναδικά κριτήρια που πρέπει να χρησιμοποιηθούν ώστε να αξιολογηθούν οι ταλαντώσεις εντός των μηχανημάτων.

Κεφάλαιο 3ο: Προετοιμασία μέτρησης

3.1 Συνήθεις βλάβες σε περιστροφικά μηχανήματα

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι βλάβες οι οποίες εμφανίζονται στην ανάλυση της ανεμογεννήτριας κατηγοριοποιώντας με αυτό τον τρόπο τις αστοχίες στους τριβείς, στα γρανάζια και στα ηλεκτρικά μέρη του κινητήρα. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας δεν είναι εφικτό να αναλυθούν εκτενώς οι συνήθεις βλάβες και πως αυτές γίνονται αντιληπτές μέσα από την ανάλυση φάσματος, αλλά θα γίνει εξακρίβωση της ανάλυσης μέσω των αποτελεσμάτων της επισκευής.

3.1.1 Ηλεκτρικά προβλήματα

Ο πλέον συνηθισμένος τρόπος για τον εντοπισμό των ηλεκτρικών προβλημάτων και το διαχωρισμό τους από τα μηχανολογικά, είναι η διακοπή ηλεκτρικής τροφοδότησης κατά τη διάρκεια μέτρησης. Στην περίπτωση που το πλάτος αυτομάτως μειωθεί, τότε το αίτιο ήταν ηλεκτρικό. Στην περίπτωση που υπάρξει βαθμιαία μείωση του πλάτους τότε το πρόβλημα είναι συνήθως μηχανικό. Στους επαγωγικούς κινητήρες με ηλεκτρικής φύσης πρόβλημα, το πλάτος των κραδασμών παρουσιάζει διαλειπτικότητα με συγκεκριμένο ρυθμό. Αυτό οφείλεται σε δύο κυρίαρχες πολύ κοντινές συχνότητες. Οι συχνότητες αυτές συνεχώς προστίθενται ή αφαιρούνται μεταξύ τους δημιουργώντας το φαινόμενο που ονομάζεται *χτύπημα* (*beats*). Η παρουσία του διαλειπτικού φαινομένου είναι βασική ένδειξη ηλεκτρικού προβλήματος σε ένα κινητήρα [4]. Οι βασικές συχνότητες που απαιτείται να υπολογίσουμε, για τη διερεύνηση ηλεκτρικής φύσεως προβλημάτων, είναι οι ακόλουθες:

$F_s = \text{Slip Frequency} = \text{Synchronous speed} - \text{Actual speed}$

Actual speed: Δεν είναι η ταχύτητα που αναγράφει το Nameplate του κινητήρα, αλλά η πραγματική μετρούμενη

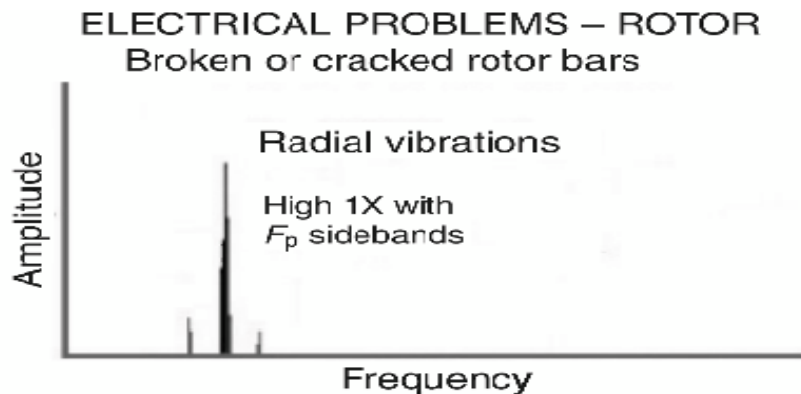
$F_p = \text{Pole Pass Freq} = \text{Slip Frequency} \times P$ FL=line freq

Synchronous speed = $120 \times \text{freq} / P$ όπου P ο αριθμός πόλων κινητήρα ή γεννήτριας

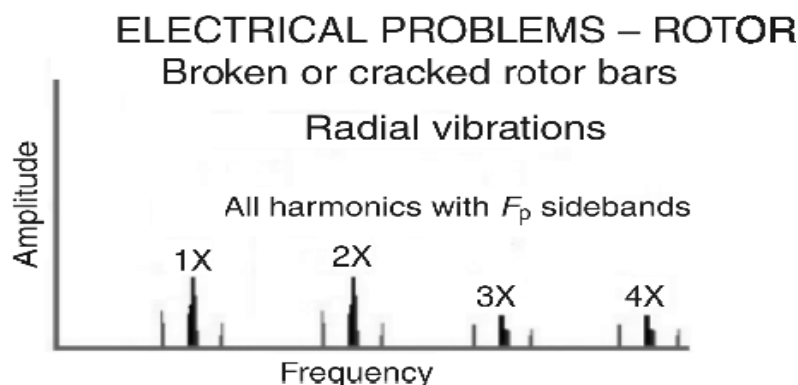
A. Rotor defects (Προβλήματα στροφέα)

Στροφέας με ρωγμή (crack) ή σπασμένη μπάρα μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα ζυγοστάθμισης. Παρουσιάζεται αυξημένη τιμή πλάτους κραδασμών στο 1X rpm με sidebands $\pm 2X$ slip. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση που υπάρχει προβληματική σύνδεση των μπαρών βραχυκυκλώσεως του κλωβού.

Επιπρόσθετα στην περίπτωση ραγισμένων μπαρών ρότορα (cracked rotor bars), δημιουργούνται συχνά πλευρικές συχνότητες (Pole Pass Freq - F_p) γύρω από 3η, 4η and 5η αρμονική της ταχύτητας περιστροφής στροφέα.



Εικόνα 3.1 Πρόβλημα στροφέα

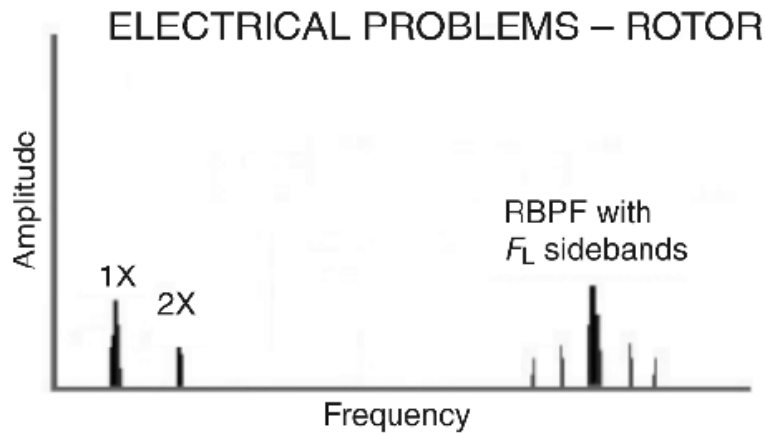


Εικόνα 3.2 Πρόβλημα με ραγισμένες μπάρες

Χαλάρωση σε μπάρες στροφέα (Loose rotor bars) παρουσιάζουν 2X συχνότητα γραμμής (line frequency - $2FL$) και πλευρικές (sidebands) περί της συχνότητας Rotor Bar Pass Frequency (RBPF) και/ ή τις αρμονικές της.

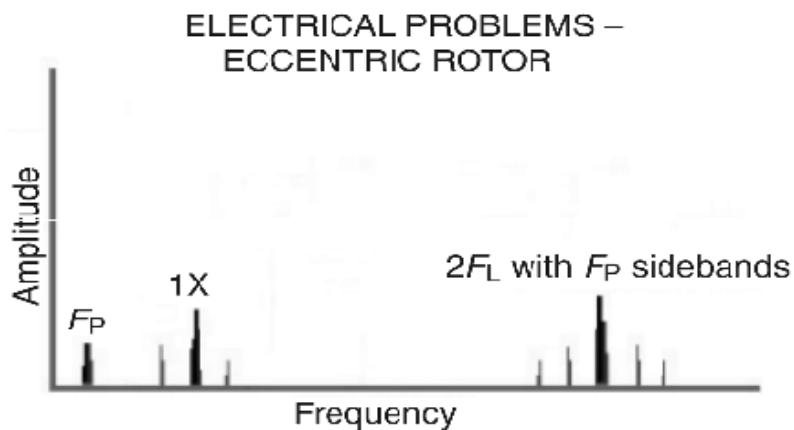
$$RBPF = \text{number of rotor bars} \times \text{rpm}$$

Μπορεί να υπάρχει μεγάλο πλάτος στη συχνότητα 2X RBPF με μικρό πλάτος στη 1X RBPF.



Εικόνα 3.3 Χαλάρωση στις μπάρες του στροφέα

Πρόβλημα εκκεντρότητας στροφέα (Eccentric rotors) δημιουργεί κραδασμούς στη συχνότητα $2F_L$ με sidebands pole pass frequency (δύνανται να υπάρχουν sidebands F_p και περί της συχνότητας 1X rpm). Μπορεί επίσης να παρουσιάζεται σε πολύ χαμηλή συχνότητα και η F_p .

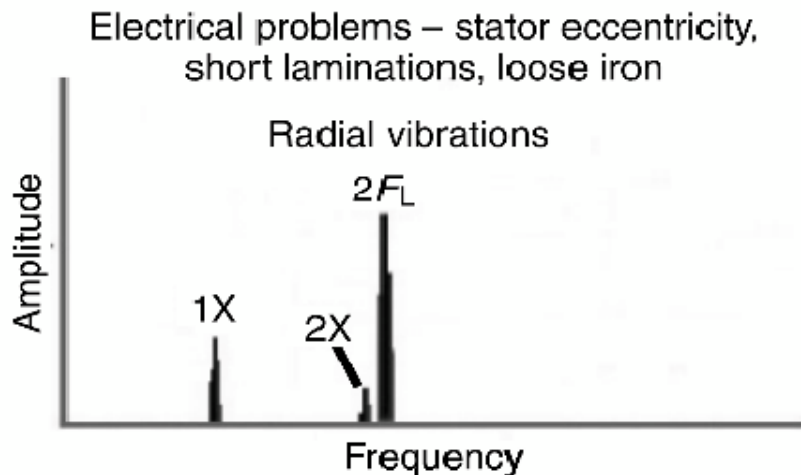


Εικόνα 3.4 Εκκεντρότητα του ρότορα

Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του στροφέα, μπορεί να υπάρχει κάμψη αυτού και κατά συνέπεια την παρουσία αζυγοσταθμίας και την παρουσία κραδασμών στη συχνότητα 1X rpm. Για τη διερεύνηση αν υπάρχει πραγματικό πρόβλημα ζυγοστάθμισης, γίνεται ξεχωριστή μέτρηση με κανονική θερμοκρασία στροφέα.

Β. Προβλήματα στάτη (Stator defects)

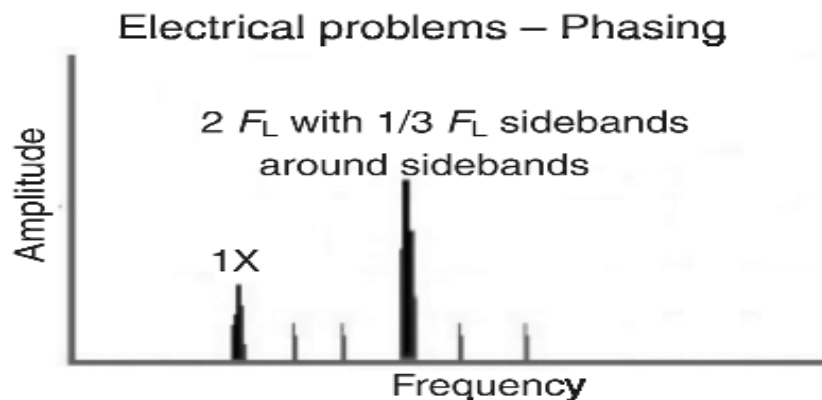
Στην περίπτωση που υπάρχει κάποιας μορφής χαλάρωση ή πλημμελής στήριξη του στάτη, παρατηρείται η δημιουργία κραδασμών στη συχνότητα $2X$ line frequency ($2FL$). Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό και ως *loose iron*. Αποτέλεσμα αυτού του προβλήματος είναι η δημιουργία ανομοιόμορφης (τοπικής) υπερθέρμανσης, που αυξάνεται σταδιακά.



Εικόνα 3.5 Εκκεντρότητα στάτη

Γ. Προβλήματα φάσης (Phasing problem (loose connector))

Προβλήματα φάσης, εξαιτίας αποσύνδεσης μιας εξ αυτών ή σπασίματος του συνδέσμου, προκαλούν κραδασμούς έντονου πλάτους στη συχνότητα $2FL$, με sidebands $\frac{1}{3} FL$. Το πλάτος των κραδασμών στη συχνότητα $2FL$ μπορεί να ξεπεράσει την τιμή 25 mm/s στην περίπτωση που δεν αποκατασταθεί.



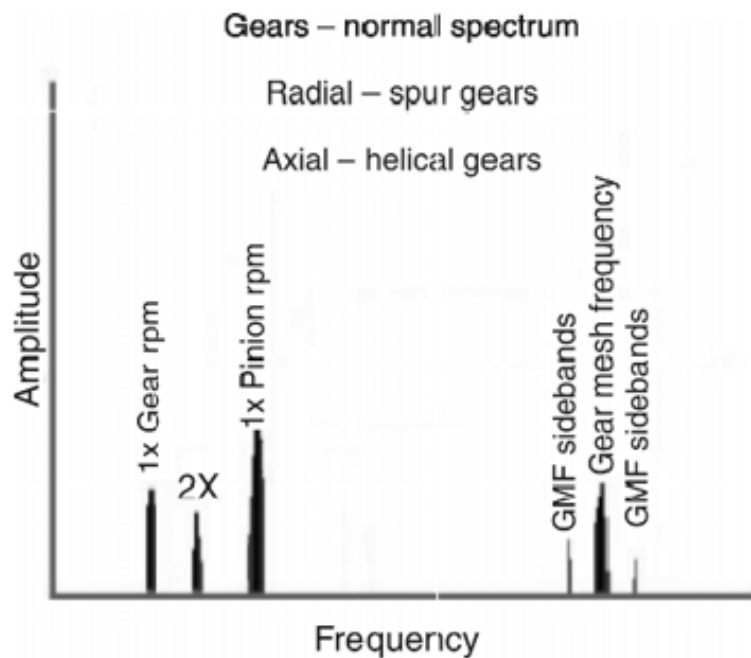
Εικόνα 3.6 Προβλήματα φάσης

3.1.2 Προβλήματα σε γραναζοκιβώτια

Οι βασικές σχέσεις για τον υπολογισμό παραγόμενων συχνοτήτων του γραναζοκιβωτίου είναι οι εξής [4]:

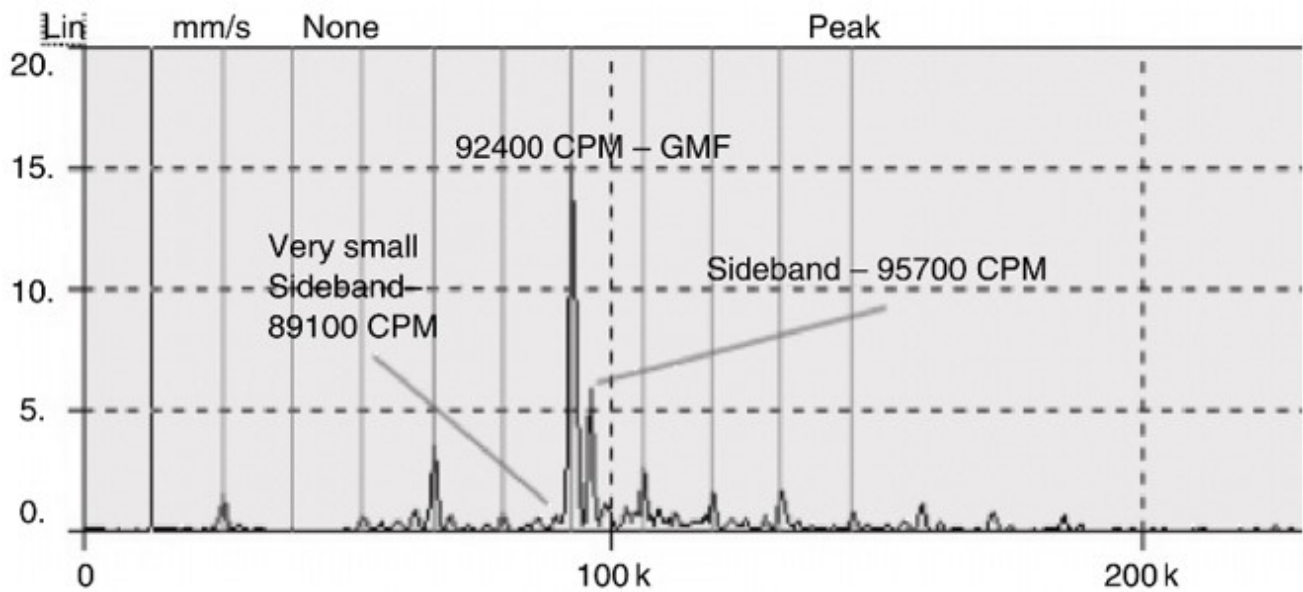
Gear Mesh Frequency (GMF) = number of teeth on pinion X pinion rpm

Output speed/Input Speed=#Input Teeth/#Input Teeth



Εικόνα 3.7 Φάσμα συχνοτήτων

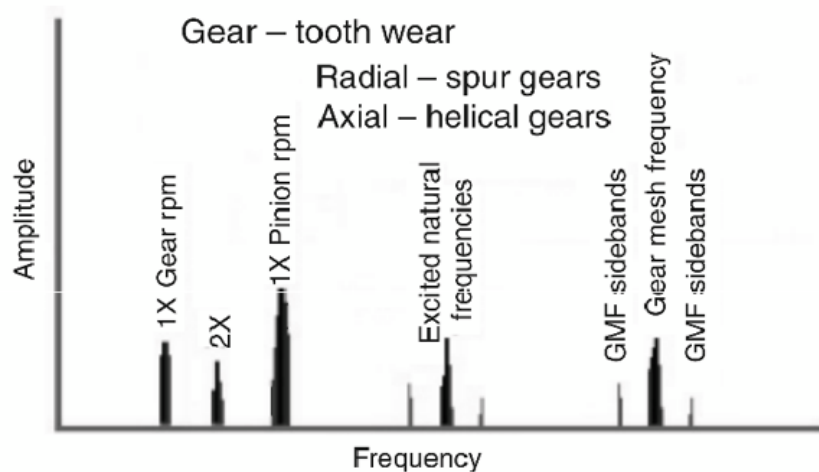
Γενικά, όταν υπάρχουν προβλήματα γενικής φύσης όπως εκκεντρότητας ή ευθυγράμμισης σε ένα μειωτήρα, παράγονται πλευρικές (sidebands) και αρμονικές μεγάλου πλάτους κοντά στη συχνότητα σύμπλεξης (gear mesh - GMF). Τοπικά προβλήματα επί ενός μειωτήρα όπως ρωγμή οδόντων παράγουν sidebands που είναι απλωμένα επί όλου του φάσματος.



Εικόνα 3.8 FFT φάσμα ενός θορυβώδους μειωτήρα με γρανάξι 28 οδόντων και ταχύτητα 3300 rpm

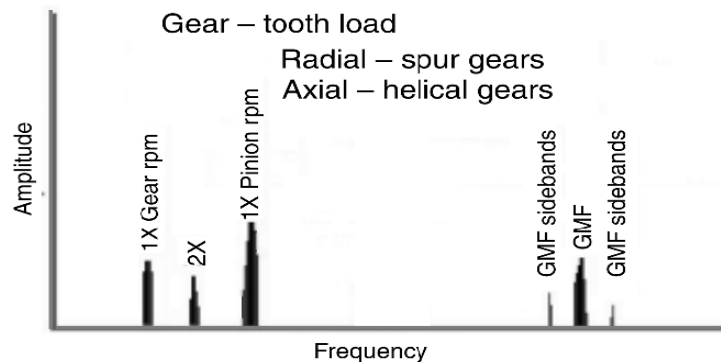
Φθορά οδόντος (Gear tooth wear)

Το βασικό χαρακτηριστικό της εν λόγω φθοράς, είναι η παρουσία της φυσικής συχνότητας μειωτήρα με sidebands εκατέρωθεν σε απόσταση ίση της ταχύτητας περιστροφής του βεβλαμένου γραναζιού. Η GMF μπορεί ή και όχι, να μεταβληθεί σε πλάτος, ωστόσο μεγάλου πλάτους sidebands θα παρουσιάζονται εκατέρωθεν στην περίπτωση προβλήματος. Αυτά αποτελούν τη βασική ένδειξη προβλήματος.



Εικόνα 3.9 Φθορά οδόντα Αυξημένο φορτίο επί οδόντος (Gear tooth load)

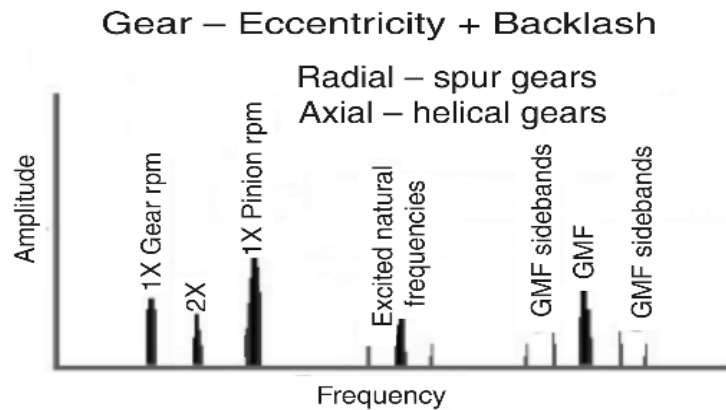
Μεγάλο πλάτος GMF δεν σημαίνει αναγκαία πρόβλημα, κυρίως στην περίπτωση που το πλάτος των sidebands είναι χαμηλό και δεν παρουσιάζεται διέγερση των natural frequencies. Κρίνεται σκόπιμη η εκτέλεση μετρήσεων επί μειωτήρα, όταν αυτός λειτουργεί στη μέγιστη της ισχύος παραγωγής.



Εικόνα 3.10 Φορτίο σε δόντι

Εκκεντρότητα οδόντα και backlash

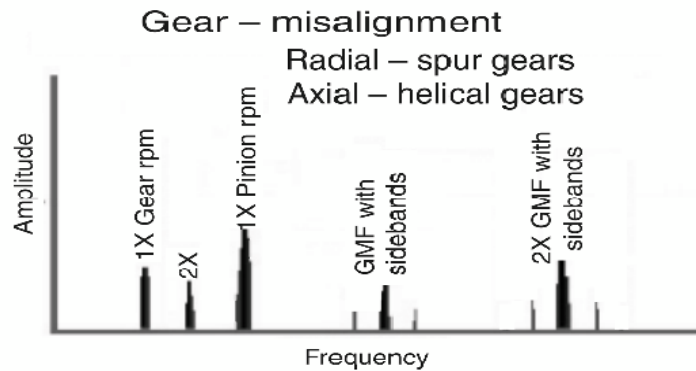
Σχετικά μεγάλου πλάτους πλευρικές γύρω από τη GMF, αποτελεί ένδειξη προβλήματος εκκεντρότητας, backlash ή μη παραλληλότητας αξόνων. Η απόσταση Δt των πλευρικών συχνοτήτων προσδιορίζει το γρανάζι με πρόβλημα. Σε περίπτωση backlash διεγείρεται η GMF και οι φυσικές συχνότητες οδόντων (gear natural frequencies), όπου σε όλες εμφανίζονται sidebands απόστασης 1X rpm. Το πλάτος της GMF συνήθως μειώνεται με την αύξηση φορτίου, αν το πρόβλημα είναι backlash.



Εικόνα 3.11 Εκκεντρότητα οδόντα και backlash

Πρόβλημα ευθυγράμμισης (Gear misalignment)

Προβλήματα ευθυγράμμισης, συνήθως διεγείρουν την 2XGMF αρμονική, με sidebands απόστασης 1Xrpm. Συχνά παρουσιάζεται μικρού πλάτους κραδασμός στη 1X GMF, αλλά μεγαλύτερος στις 2X ή 3X GMF. Για τη μέτρηση μειωτήρων θέτουμε στο μηχάνημα καταγραφών F-max $3,25 \times \text{GMF}$



Εικόνα 3.12 Απευθυγράμμιση οδόντων Σπάσιμο οδόντος ή έντονο crack (Gears – cracked or broken tooth)

Παράγει μεγάλου πλάτους 1X rpm, και διεγείρει επίσης τις natural frequency με sidebands σε απόσταση την ταχύτητα rpm. Στο διάγραμμα κυματομορφής, ξεχωρίζει καθόσον παρουσιάζει spike κάθε φορά που το γρανάζι με πρόβλημα ακουμπάει σε οδόντα του άλλου γραναζιού. Ο χρόνος μεταξύ των spikes είναι 1/rpm του γραναζιού με το πρόβλημα. Αυτός αποτελεί και τον καλύτερο τρόπο αναγνώρισης προβλήματος θραύσης οδόντος.



Εικόνα 3.13 Θραύση οδόντα

3.1.3 Προβλήματα τριβέων κύλισης

Οι παραγόμενες συχνότητες των τριβέων παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα [4].

$$\begin{aligned}\text{Defect on inner race (BPI)} &= \frac{1}{2} n \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \\ \text{Defect on outer race (BPO)} &= \frac{1}{2} n \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \\ \text{Defect on cage (FT)} &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \\ \text{Defect on ball (BS)} &= \frac{1}{2} \frac{D}{d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos^2 \alpha \right]\end{aligned}$$

Where: d = Ball diameter
 D = Pitch diameter
 n = Number of balls
 α = Contact angle

Εικόνα 3.14 Παραγόμενες συχνότητες

Κατά την ανάλυση φάσματος, στην περίπτωση βλάβης ενός ρουλεμάν παρουσιάζονται οι ονομαζόμενες defect frequencies μόνες τους ή με πλευρικές συχνότητες (sidebands) σε απόσταση ίση με τον αριθμό στροφών. Ο υπολογισμός των defect frequencies γίνεται με το ανωτέρω τυπολόγιο, ή με τη χρήση λογισμικού (bearing data base). Έκαστο ρουλεμάν παρουσιάζει τέσσερις χαρακτηριστικές συχνότητες αστοχίας [3].

Για τον έλεγχο ρουλεμάν το φάσμα χωρίζεται σε τέσσερις ζώνες (A, B, C and D), όπου επί αυτών παρακολουθούμε τη μεταβολή κατάστασης των ρουλεμάν. Οι ζώνες αυτές είναι:

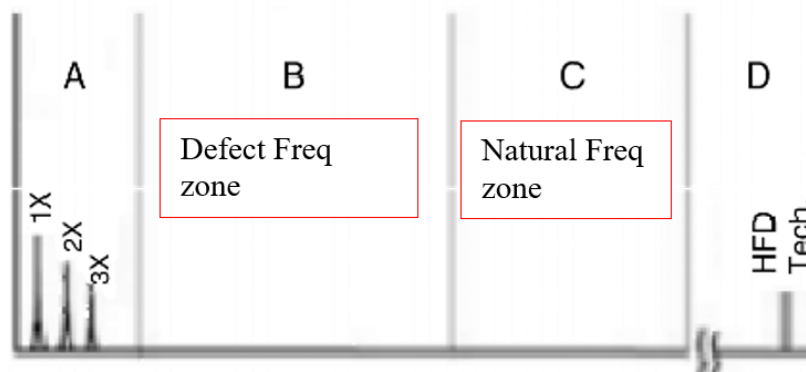
Zone A: Εμφάνιση αρμονικών συχνοτήτων στην ταχύτητα περιστροφής

Zone B: Εμφάνιση χαρακτηριστικών συχνοτήτων τριβέων (5–30 kcrpm)

Zone C: Εμφάνιση φυσικών συχνοτήτων εξαρτημάτων τριβέων (30–120 kcrpm)

Zone D: Εμφάνιση υψηλών συχνοτήτων (HFD) (πάνω από τις 120 kcrpm).

Στο πρώτο στάδιο η φθορά του ρουλεμάν παρουσιάζεται στην περιοχή υπερήχων (ultrasonic frequency ranges 20–60 kHz).

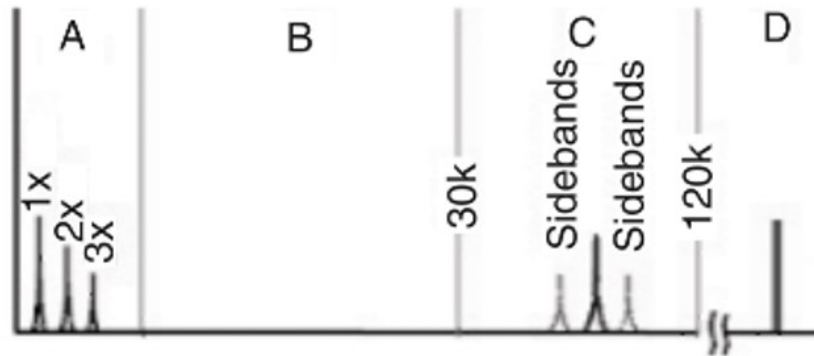


Εικόνα 3.15 Πρώτο στάδιο φθοράς τριβέα

Στο δεύτερο στάδιο, η φθορά πάνω στις επιφάνειες κύλισης (εσωτερικά και εξωτερικά) του ρουλεμάν

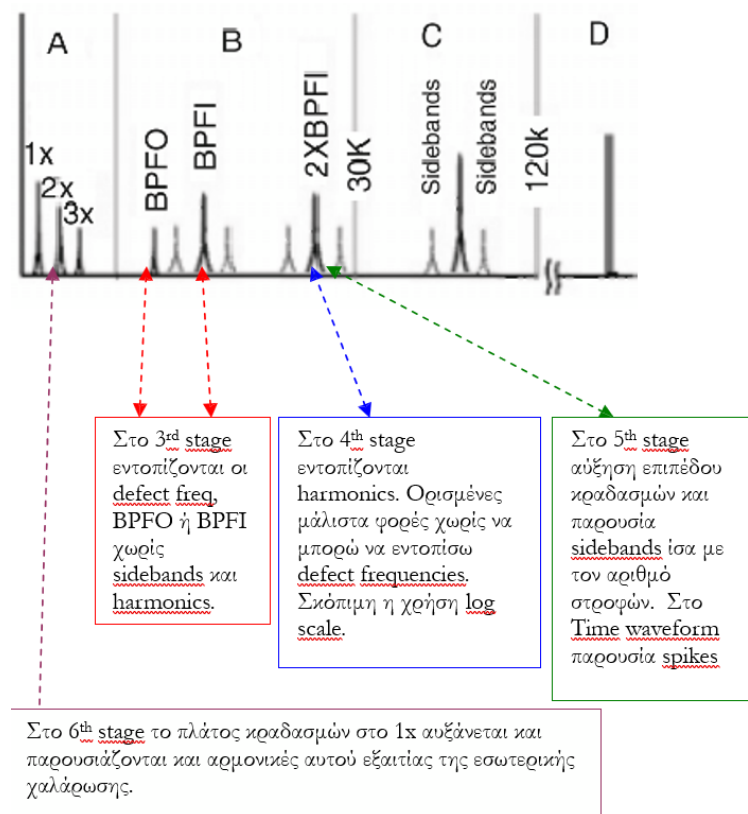
ξεκινάει να εμφανίζεται με τη μορφή μικρών εγκοπών.

Οι σφαίρες του ρουλεμάν, καθώς περνούν πάνω από αυτές τις εγκοπές δημιουργούν κουδουνισμό στην περιοχή των natural frequencies 30–120 kcpm. Αναλόγως της σοβαρότητας, είναι πιθανόν να παρουσιάζονται και πλευρικές συχνότητες (sideband frequencies (bearing defect frequency \pm rpm) αριστερά και δεξιά εκατέρωθεν των the natural frequency peak. Στην κατάσταση αυτή ο τριβέας βρίσκεται στα τελευταία στάδια του δεύτερου σταδίου.



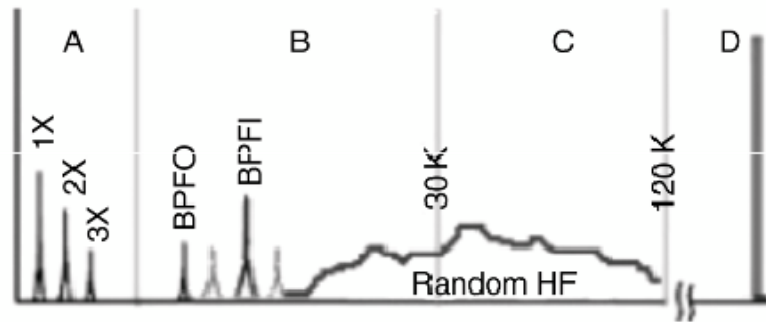
Εικόνα 3.16 Δεύτερο στάδιο φθοράς τριβέα

Στα στάδια τρίτα- τέσσερα – πέντε και έξι διακρίνονται οι χαρακτηριστικές συχνότητες συχνοτήτων και οι αρμονικές τους επί του φάσματος. Συνήθως συνοδεύονται με sidebands. Οι μικρές εγχοπές σε αυτά τα στάδια φθορά, έχουν μεγαλώσει, και πιθανόν έχουν αυξηθεί. Στην περίπτωση που διακρίνονται sidebands εκατέρωθεν των bearing defect frequency ή οι αρμονικές αυτών βρισκόμαστε σίγουρα σε προχωρημένο στάδιο φθοράς. Συνήθως απαιτείται η αντικατάσταση του ρουλεμάν, καθόσον από μελέτες προκύπτει ότι το υπόλοιπο ζωής στην περίπτωση αυτή δεν ξεπερνά το 1% της μέσης ζωής.



Εικόνα 3.17 Τρίτο και τέταρτο στάδιο φθοράς τριβέα

Στα στάδια έβδομο και όγδοο, οι εγκοπές έχουν αυξηθεί και ενωθεί μεταξύ τους, δημιουργώντας αυλακώσεις εντός του ρουλεμάν. Το ρουλεμάν απαιτεί άμεση αλλαγή. Ακόμη και το πλάτος του 1X rpm αυξάνεται. Στο στάδιο αυτό η εικόνα του φάσματος είναι αυτή που παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα. Η θερμοκρασία του είναι ιδιαίτερα υψηλή και η λειτουργία του ιδιαίτερα θορυβώδεις.

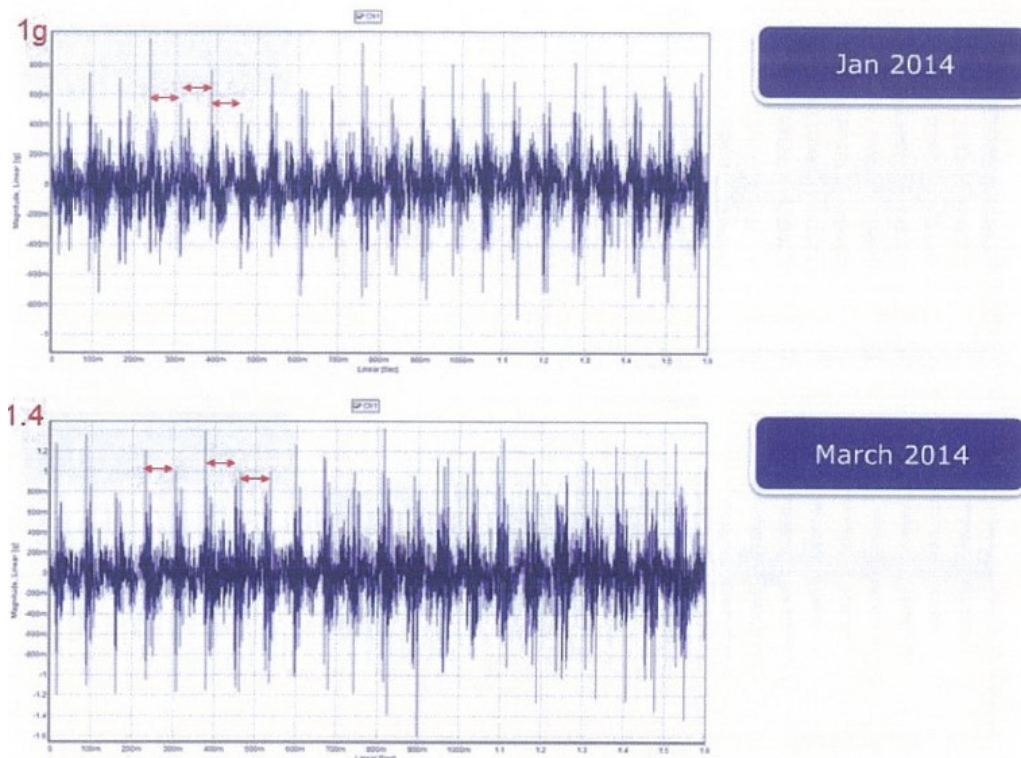


Εικόνα 3.18 Έβδομο και όγδοο στάδιο φθοράς τριβέα

Η ανάλυση των ταλαντώσεων σε αργόστροφο άξονα ο οποίος εδράζεται πάνω σε κυλινδροτριβείς απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και πολύ συγκεκριμένη προσέγγιση για τον εντοπισμό των βλαβών. Για το λόγο αυτό η ανάλυση ξεφεύγει από τον καθιερωμένο τρόπο ανάλυσης φάσματος χρησιμοποιώντας τεχνικές υψηλών συχνοτήτων δηλαδή με τη χρήση τεχνικών demodulation, envelope κ.α. στις οποίες γίνεται χρήση φίλτρων High Pas. Για τη διευκόλυνση των αναλυτών ορισμένοι κατασκευαστές καταγραφικών συστημάτων έχουν σχεδιάσει ξεχωριστές τεχνικές για τον εντοπισμό τέτοιων βλαβών όπως η μέθοδος shock pulse, peakvue, spike energy κ.α.

Στη συγκεκριμένη ανάλυση του κύριου άξονα της ανεμογεννήτριας θα χρησιμοποιηθεί ανάλυση φάσματος time waveform με τη βοήθεια ψηφιακών φίλτρων High Pass με σκοπό τον εντοπισμό των κυμάτων δύναμης (stress waves) τα οποία γίνονται πιο γρήγορα αντιληπτά όταν κατά τη διάρκεια της ψηφιακής επεξεργασίας του καταγραφόμενου σήματος χρησιμοποιηθούν μονάδες επιτάχυνσης. Οι τριβείς κύλισης στο αρχικό στάδιο φθοράς τους διεγείρουν συχνότητες πολύ υψηλά στο φάσμα το οποίο σε συνδυασμό με τις χαμηλές στροφές είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστούν. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας απελευθερώνονται stress waves τα οποία μπορούν να εντοπιστούν και να καταγραφούν χρησιμοποιώντας high pass φίλτρα και καταγράφοντας μονάδες επιτάχυνσης.

Στην ανάλυση των βασικών τριβέων της ανεμογεννήτριας δεν θα γίνει χρήση φάσματος αλλά κυματομορφής. Σε αυτή την περίπτωση είναι δύσκολο να εντοπιστεί σε ποιο εξάρτημα βρίσκεται η δυσλειτουργία (εσωτερικό, εξωτερικό δαχτυλίδι κλωβός κ.α.) και δεν είναι και τόσο ουσιαστικό, έτσι επικεντρώνεται το ενδιαφέρον της ανάλυσης στην διαμόρφωση παλμών σχετικά με την ταχύτητα περιστροφής και έπειτα η παρακολούθηση της εξέλιξης του.



Εικόνα 3.19 Εξέλιξη φθοράς τριβέα εντός τριμήνου [2]

3.2 Υπολογισμός παραγόμενων συχνοτήτων

Παρακάτω κατασκευάζεται πίνακας με τις συχνότητες οι οποίες αναμένεται να εμφανιστούν σε περίπτωση φθοράς ή αστοχίας στο γραναζοκιβώτιο της παρούσας μελέτης περίπτωσης. Για τις φθορές στους τριβείς οι συχνότητες εξάγονται αυτόματα από το λογισμικό ανάλυσης κάνοντας χρήση της μέτρησης των στροφών, για τον ακριβή προσδιορισμό τους. Για την υπό εξέταση ανεμογεννήτρια γνωρίζοντας τον αριθμό οδόντων και τις μετρούμενες στροφές εισόδου γίνεται υπολογισμός των συχνοτήτων στις μέγιστες τιμές.

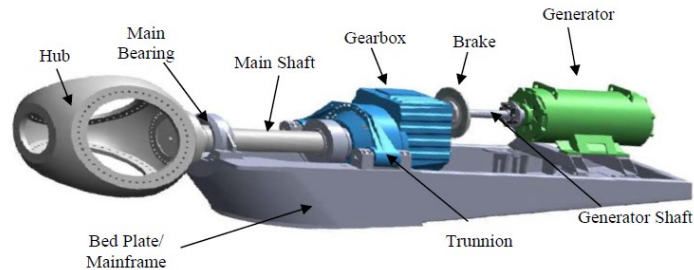
	Teeth (T)	Speed (rpm)	Speed (Hz)	1*GMF (Hz)
Carrier	-	30	0,5	1
Planet wheels	28	80,357	1,339	37,5
LSS gear	61	155	2,583	
IMS gear	71	556,176	9,269	157
HSS pinion	26	1518,789	25,313	658

Όπως είναι γνωστό το γραναζοκιβώτιο της ανεμογεννήτριας αποτελείται από ένα πλανητικό και ένα παράλληλο μέρος οδόντων.

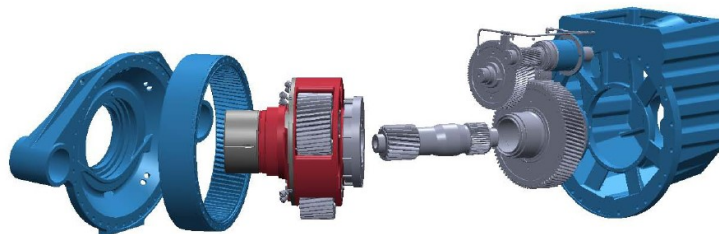
Για τα ηλεκτρικά μέρη του κινητήρα δεν υπάρχουν πληροφορίες για τις μπάρες στο ρότορα και αυτό εντοπίζεται εμπειρικά. Αναλυτικά στοιχεία για τους τριβείς και τα γρανάζια καθώς και για την κατασκευή γενικότερα δεν είναι εφικτό να παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία.

3.3 Σημεία Μέτρησης

Οι μετρήσεις εκτελούνται πάνω στα σημεία στήριξης των τριβέων δηλαδή στις εδράσεις αυτών, και στις τρεις διευθύνσεις. Παρακάτω φαίνονται σχηματικά τα μέρη της ανεμογεννήτριας και του γραναζοκιβωτίου.

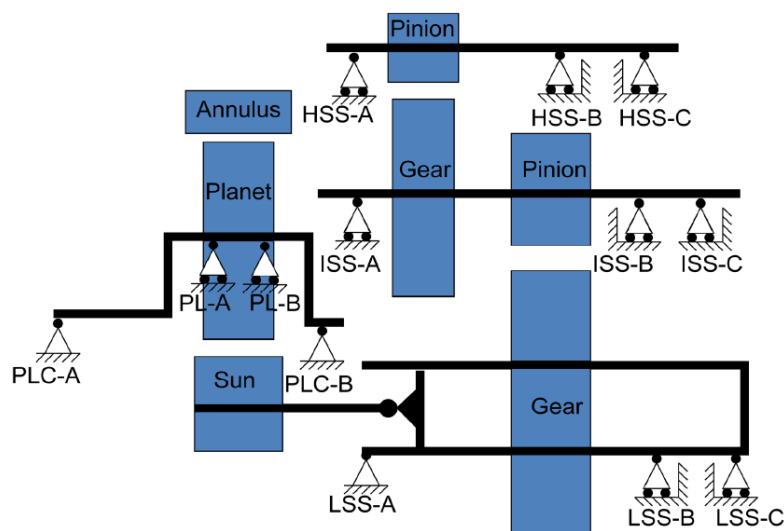


Εικόνα 3.20 Εσωτερικά μέρη ανεμογεννήτριας



Εικόνα 3.21 Ανάπτυγμα γραναζοκιβωτίου

Προς διευκόλυνση και για τη σωστή «επικοινωνία» μεταξύ εκτελών τη μέτρηση και αναλυτή χρησιμοποιούνται οι συντομογραφίες που βρίσκονται στην αρχή του παρόντος. Σχηματικά τα σημεία παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα. Οι μετρήσεις εκτελούνται όσο το δυνατό κοντά στις εδράσεις των αξόνων στις διευθύνσεις X, Y, Z σε γωνίες 0° , 90° και αξονικά αντίστοιχα.



Εικόνα 3.22 Σχηματική αναπαράσταση αξόνων

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο τρόπος μέτρησης στο πίσω άκρο της γεννήτριας (NDE). Η μέτρηση εκτελείται με τρεις αισθητήρες ταυτόχρονα για την συντομότερη παραμονή στο χώρο της Α/Γ.



Εικόνα 3.23 Σημεία τοποθέτησης των αισθητήρων

3.4 Εξοπλισμός

Για την εκτέλεση των μετρήσεων χρησιμοποιείται φορητός αναλυτής δονήσεων Adash VA4pro, στροφόμετρο για την καταγραφή των στροφών της ίδιας εταιρείας και επιταχυνσιόμετρα 100 και 500mV/g χαμηλών και πολύ χαμηλών συχνοτήτων.



Εικόνα 3.24 Καταγραφικό κατά τη διάρκεια της μέτρησης στον HSS

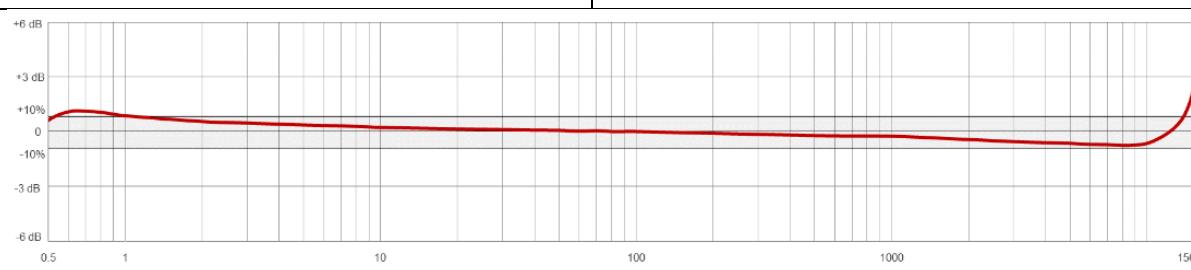


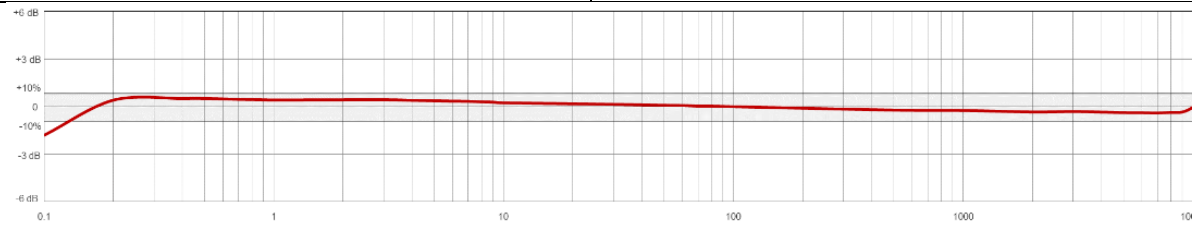
Εικόνα 3.25 Επιταχυνσιόμετρο

Δυνατότητες φορητού αναλυτή

FFT	3.276.800 Lines Of Resolution
Frequency Range	90kHz
AD conversion	24bit, 64bit internal signal processing

Στοιχεία αισθητήρων

Αισθητήρας 100mV/g	
Frequency Response	30-900.000CPM (± 3 dB)
Temperature Range	-50-121°C
	
Διάγραμμα απόκρισης αισθητήρα στο πεδίο της συχνότητας	

Αισθητήρας 500mV/g	
Frequency Response	6-600.000CPM ($\pm 3\text{dB}$)
Temperature Range	-50-121°C
 <p>The graph displays the frequency response of the sensor. The x-axis represents frequency in CPM on a logarithmic scale from 0.1 to 1000. The y-axis represents gain in dB on a linear scale from -6 dB to +6 dB. A red line shows the response, which is flat at 0 dB across the entire frequency range. A shaded gray area indicates the tolerance range, which is approximately ±3 dB.</p>	
Διάγραμμα απόκρισης αισθητήρα στο πεδίο της συχνότητας	

Κεφάλαιο 4ο: Ανάλυση ταλαντώσεων

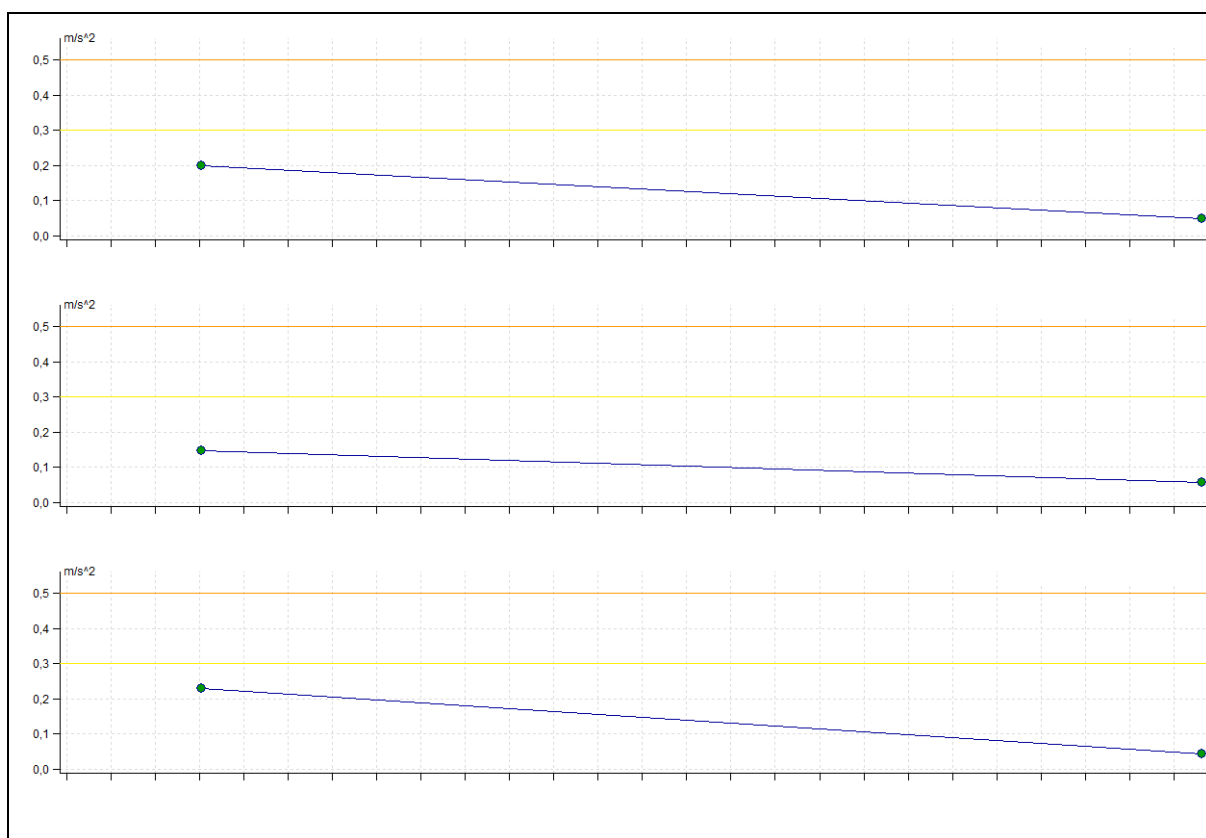
Η μέτρηση των ταλαντώσεων πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες σταθερού ανέμου με ένταση μεγαλύτερη από 7m/sec σε ανεμογεννήτρια με συνολική παραγόμενη ισχύ 660kW. Τα σχήματα και οι εικόνες που βρίσκονται στη συνέχεια της εργασίας ανήκουν στο συντάκτη και έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια της επαγγελματικής ενασχόλησης. Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν με περιοδικότητα περίπου 6 μηνών η οποία και επιλέχθηκε από τον διαχειριστή του αιολικού πάρκου. Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε τον 03/2019 και ο επανέλεγχος τον 10/2019

4.1 Τριβείς κύλισης κύριου άξονα

Στη συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια οι τριβείς κύλισης είναι δύο ο εμπρός (front main bearing – FMBR) από την πλευρά των πτερυγίων και ο οπίσθιος (rear main bearing - RMBR) από την πλευρά του γραναζοκιβωτίου. Για την ανάλυση τους υπάρχει ιστορικό μετρήσεων από παλαιότερες μετρήσεις. Παρακάτω φαίνονται τα δεδομένα ξεχωριστά για κάθε έναν τριβέα (FMBR, RMBR) και για κάθε μία διεύθυνση. Η διεύθυνση του άξονα X είναι η μέτρηση που πραγματοποιείται στο οριζόντιο επίπεδο, η Y στο κατακόρυφο επίπεδο ενώ η Z αντιστοιχεί την αξονική κατεύθυνση. Οι μονάδες μέτρησης σύμφωνα με το VDI 3834 είναι σε m/s^2

4.1.1 Εμπρόσθιος τριβέας

Η ανάλυση των δεδομένων αρχίζει από τα όρια ταλαντώσεων σύμφωνα με το VDI 3834 για να διαπιστωθεί σε άμεσο χρόνο αν πρέπει ο διαχειριστής να προβεί σε κάποια ενέργεια για την ασφάλεια της κατασκευής. Στον πίνακα 4.1 στον οριζόντιο άξονα αποτυπώνεται το διάστημα του χρόνου σε μήνες (χρόνος από την τελευταία φορά μέτρησης) και στον κατακόρυφο άξονα οι τιμές RMS οι οποίες αξιολογούνται αν είναι εντός ή εκτός ορίων. Στο αριστερό μέρος του διαγράμματος (αριστερή τελεία) βρίσκεται αποτυπωμένη η παλαιότερη μέτρηση και στην δεξιά πλευρά (δεξιά τελεία) η πιο πρόσφατη. Στην παρούσα κατάσταση όλες οι τιμές RMS είναι εντός ορίων. Το συνολικό πλάτος ταλάντωσης είναι μετρημένο σε m/s^2 ώστε να μπορεί ο αναγνώστης εύκολα, χωρίς μετατροπές μονάδων, να επαληθεύσει τα όρια με το διάγραμμα του 2^{ου} κεφαλαίου [2].



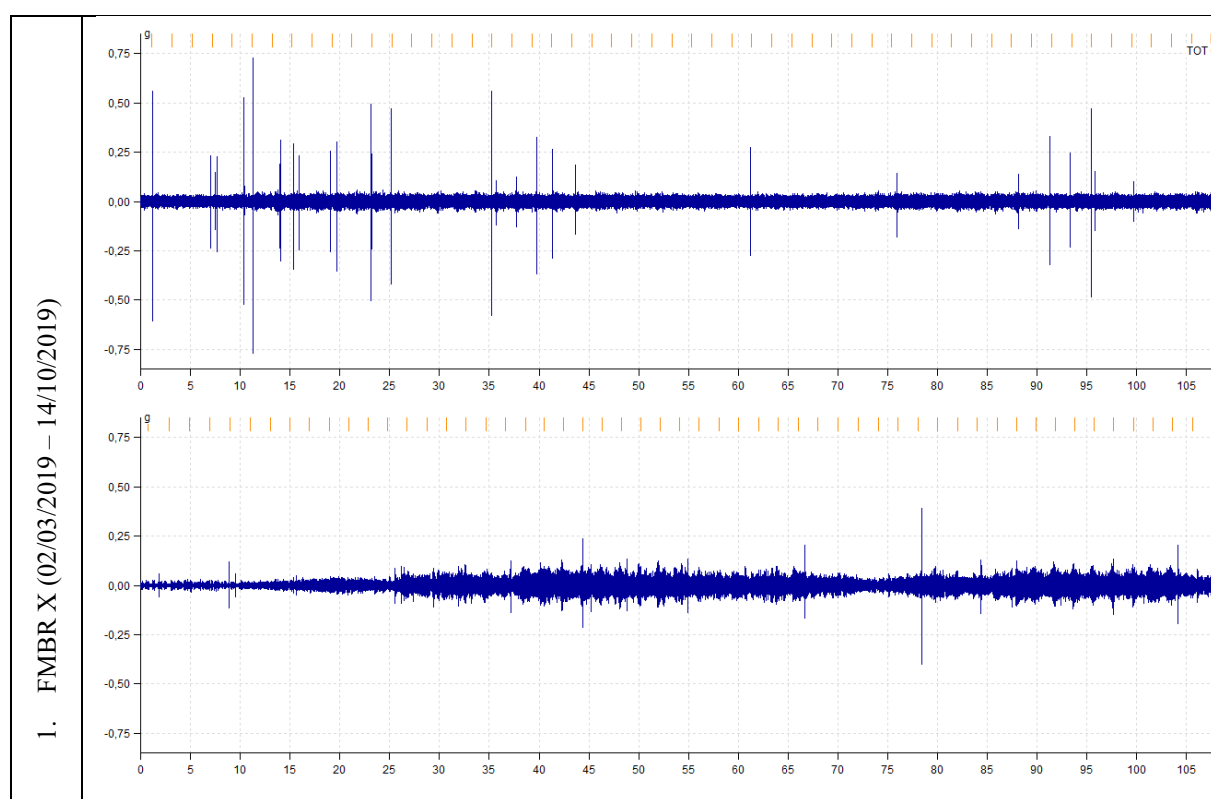
Πίνακας 4.1 Μετρήσεις RMS στο FMBR στις τρεις διευθύνσεις σύμφωνα με το VDI 3834

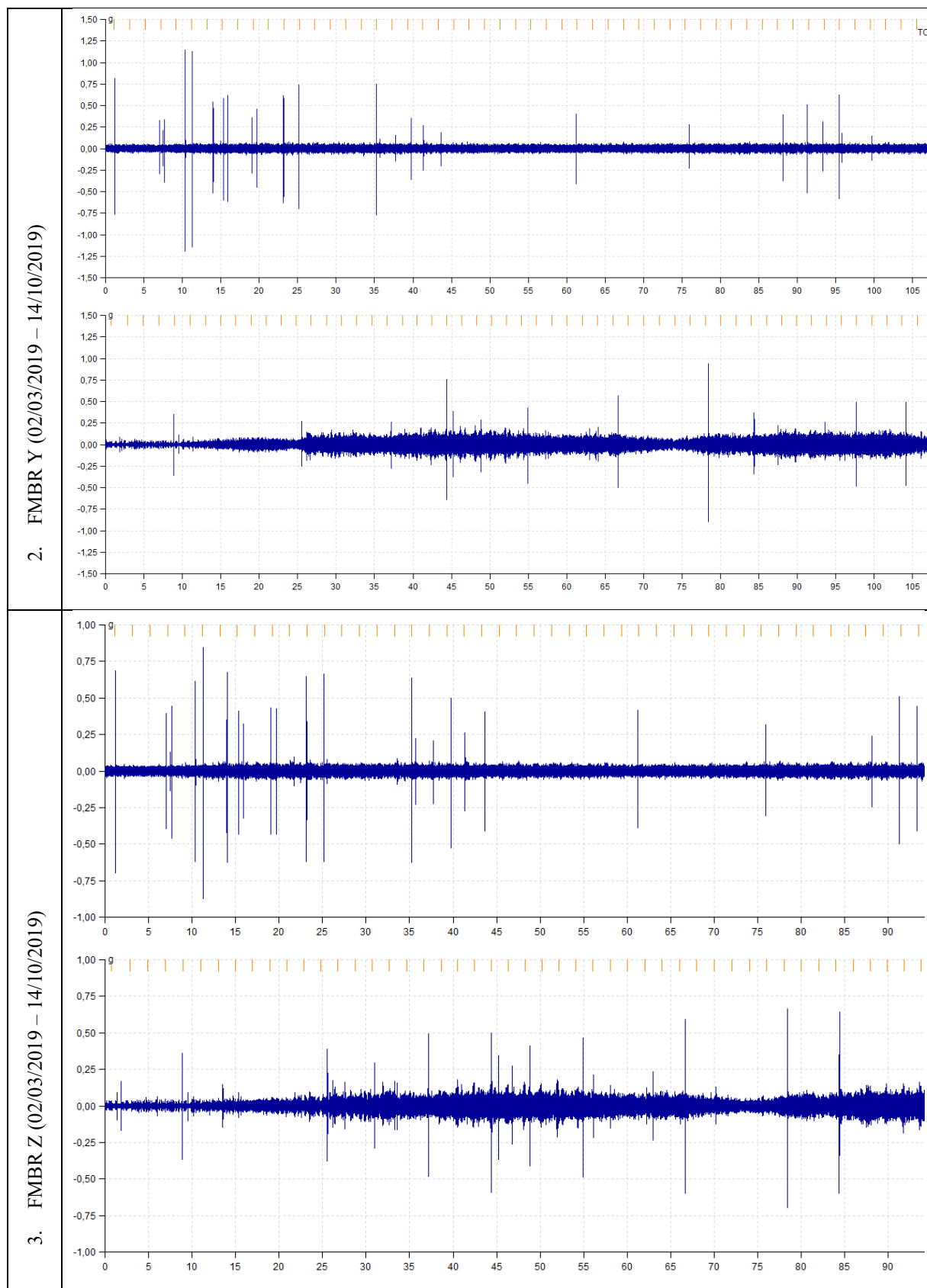
Η ανάλυση των δεδομένων της κυματομορφής παρουσιάζεται παρακάτω και είναι μετρημένη σε μονάδες επιτάχυνσης g. Στην κάθε γραμμή του πίνακα βρίσκονται δύο μετρήσεις με την ανώτερη να είναι η πιο πρόσφατη και η κατώτερη η παλαιότερη.

Από την ανάλυση Πίνακας 4.2 εντοπίζονται φθορές σε αρχικό στάδιο στους κυλίνδρους του τριβέα. Η ένταση του φαινομένου δεν είναι σημαντική όμως λόγω της κρισιμότητας του τριβέα συνίσταται παρακολούθηση σε περίπου 3.000 ώρες λειτουργίας ή σε 4 μήνες.

Στα διαγράμματα των μετρήσεων στις 02/03/2019 (κάτω διάγραμμα), διαπιστώνεται θόρυβος με διαμόρφωση μερικών χτυπημάτων (spikes). Οι ανώτερες τιμές αυτών έχουν καταγραφεί στα 0,4, 1 και 0,5g στις διευθύνσεις X, Y, Z αντίστοιχα ενώ οι τιμές RMS είναι στα 0,2, 0,15 και 0,25m/s².

Στις μετρήσεις στις 14/10/2019 (άνω διάγραμμα), διαπιστώνεται η διατήρηση του επιπέδου του θορύβου και η διαμόρφωση περισσότερων spikes με πολύ μεγαλύτερο πλάτος 0,75, 1,25 και 0,75g (μέγιστες τιμές) ενώ οι τιμές RMS είναι στα 0,05, 0,07 και 0,03m/s²..

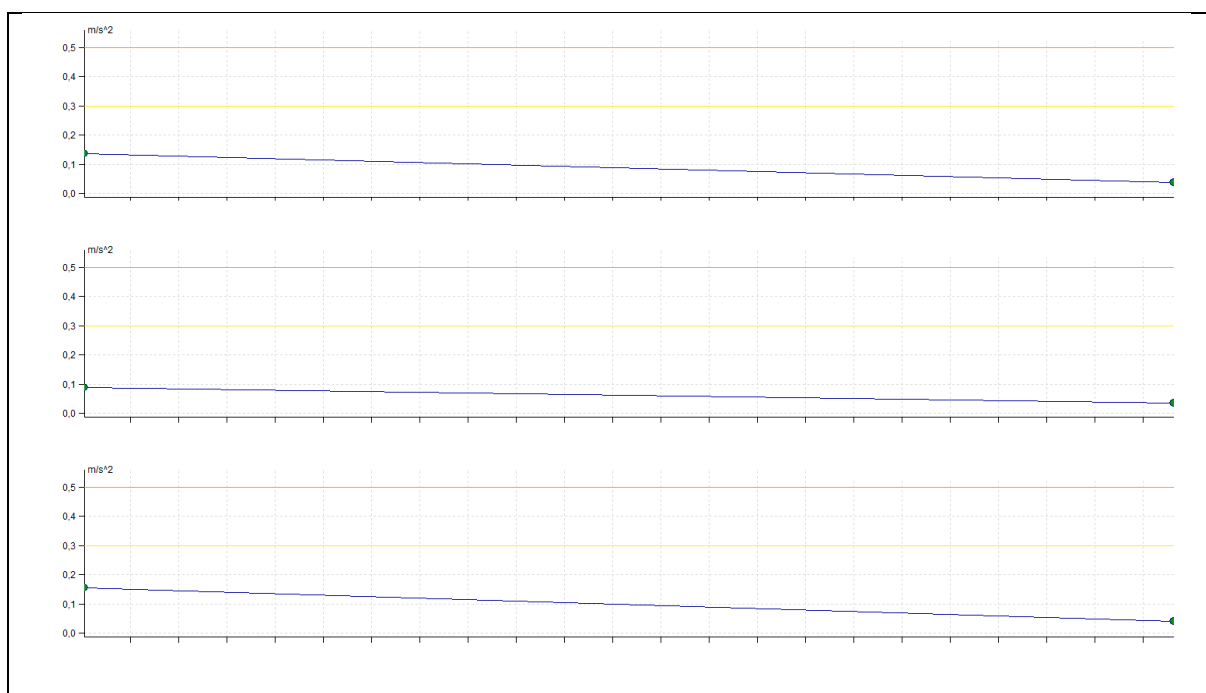




Πίνακας 4.2 Timewave analysis στο FMBR

4.1.2 Οπίσθιος τριβέας

Η ανάλυση των δεδομένων αρχίζει από τα όρια ταλαντώσεων σύμφωνα με το VDI 3834 για να διαπιστωθεί σε άμεσο χρόνο αν πρέπει ο διαχειριστής να προβεί σε κάποια ενέργεια για την ασφάλεια της κατασκευής. Στον πίνακα 4.3 στον οριζόντιο άξονα αποτυπώνεται το διάστημα του χρόνου σε μήνες (χρόνος από την τελευταία φορά μέτρησης) και στον κατακόρυφο άξονα οι τιμές RMS οι οποίες αξιολογούνται αν είναι εντός ή εκτός ορίων. Στο αριστερό μέρος του διαγράμματος βρίσκεται αποτυπωμένη η παλαιότερη μέτρηση και στην δεξιά πλευρά η πιο πρόσφατη. Στην παρούσα κατάσταση όλες οι τιμές RMS είναι εντός ορίων. Το συνολικό πλάτος ταλάντωσης είναι μετρημένο σε m/s^2 ώστε να μπορεί ο αναγνώστης εύκολα, χωρίς μετατροπές μονάδων, να επαληθεύσει τα όρια με το διάγραμμα του 2^{ου} κεφαλαίου [2].



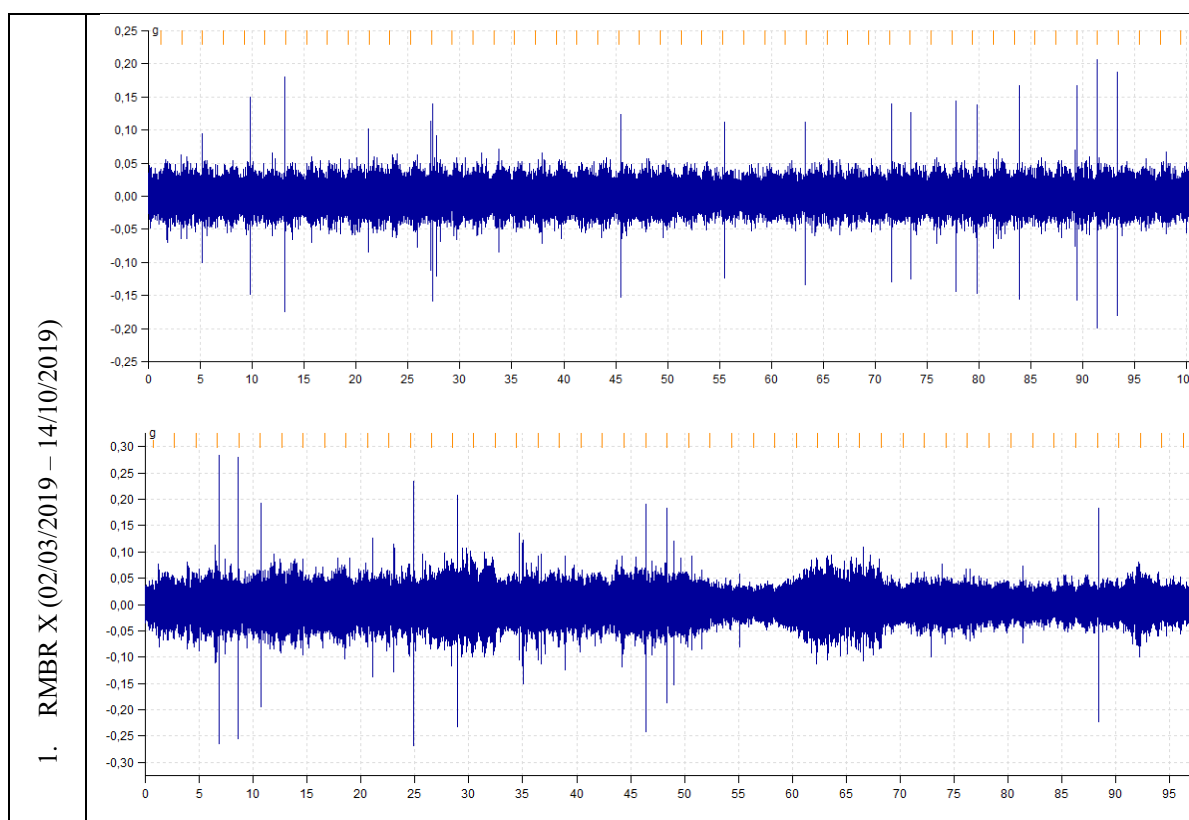
Πίνακας 4.3 Μετρήσεις RMS στο RMBR στις τρεις διευθύνσεις σύμφωνα με το VDI 3834

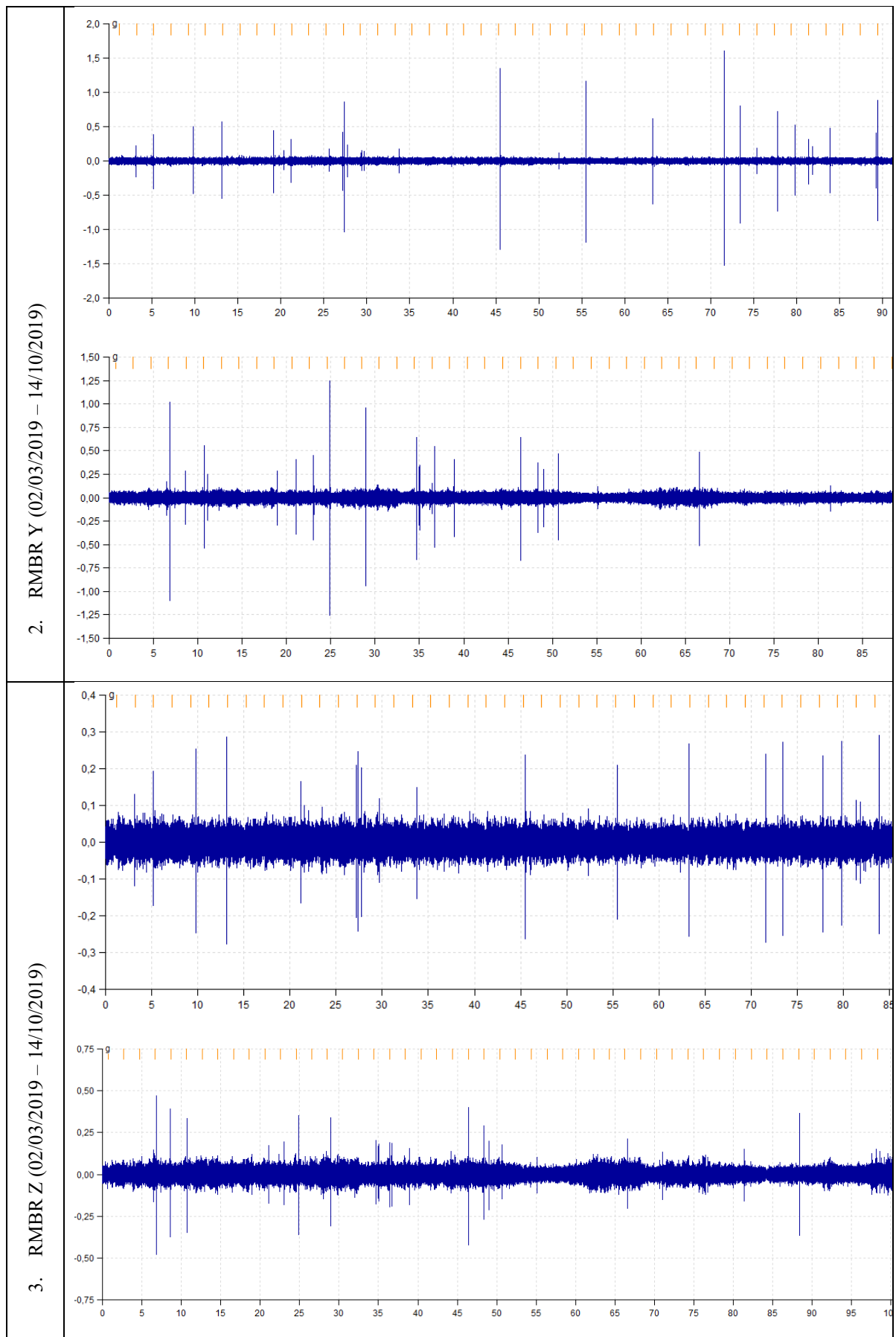
Η ανάλυση των δεδομένων της κυματομορφής παρουσιάζεται παρακάτω και είναι μετρημένη σε μονάδες επιτάχυνσης g. Στην κάθε γραμμή του πίνακα βρίσκονται δύο μετρήσεις με την ανώτερη να είναι η πιο πρόσφατη και η κατώτερη η παλαιότερη.

Από την ανάλυση που παρατίθεται παρακάτω Πίνακας 4.4 διαπιστώνεται η διαμόρφωση χαρακτηριστικών συχνοτήτων, δηλαδή σταδιακή εξέλιξη και του φαινομένου της φθοράς με την πάροδο του χρόνου [2]. Το φαινόμενο αυτό βρίσκεται ακόμα σε αρχικό στάδιο και δεν μπορεί να διερευνηθεί σε ποιο εξάρτημα του τριβέα εκδηλώνεται, συνδέεται όμως με την εξέλιξη που παρατηρήθηκε στον μπροστινό τριβέα το οποίο όμως εδώ δεν αυξάνεται σε πλάτος με τον ίδιο ρυθμό. Για αυτό το λόγο, δεν απαιτούνται ενέργειες από την πλευρά του διαχειριστή, αλλά η παρακολούθηση της λειτουργικής κατάστασης με το πέρασ 3.000 ωρών λειτουργίας ή 4 μηνών.

Στα διαγράμματα των μετρήσεων στις 02/03/2019 (κάτω διάγραμμα), διαπιστώνεται θόρυβος με διαμόρφωση μερικών χτυπημάτων (spikes). Οι ανώτερες τιμές αυτών έχουν καταγραφεί στα 0,3, 1,25 και 0,3g στις διευθύνσεις X, Y, Z αντίστοιχα ενώ οι τιμές RMS είναι στα 0,15, 0,1 και 0,14m/s².

Στις μετρήσεις στις 14/10/2019 (άνω διάγραμμα), διαπιστώνεται η διατήρηση του επιπέδου του θορύβου και η διαμόρφωση περισσότερων spikes με πολύ μεγαλύτερο πλάτος 0,75, 1,25 και 0,75g (μέγιστες τιμές), ενώ οι τιμές RMS είναι σε τιμές μικρότερες των 0,1m/s².



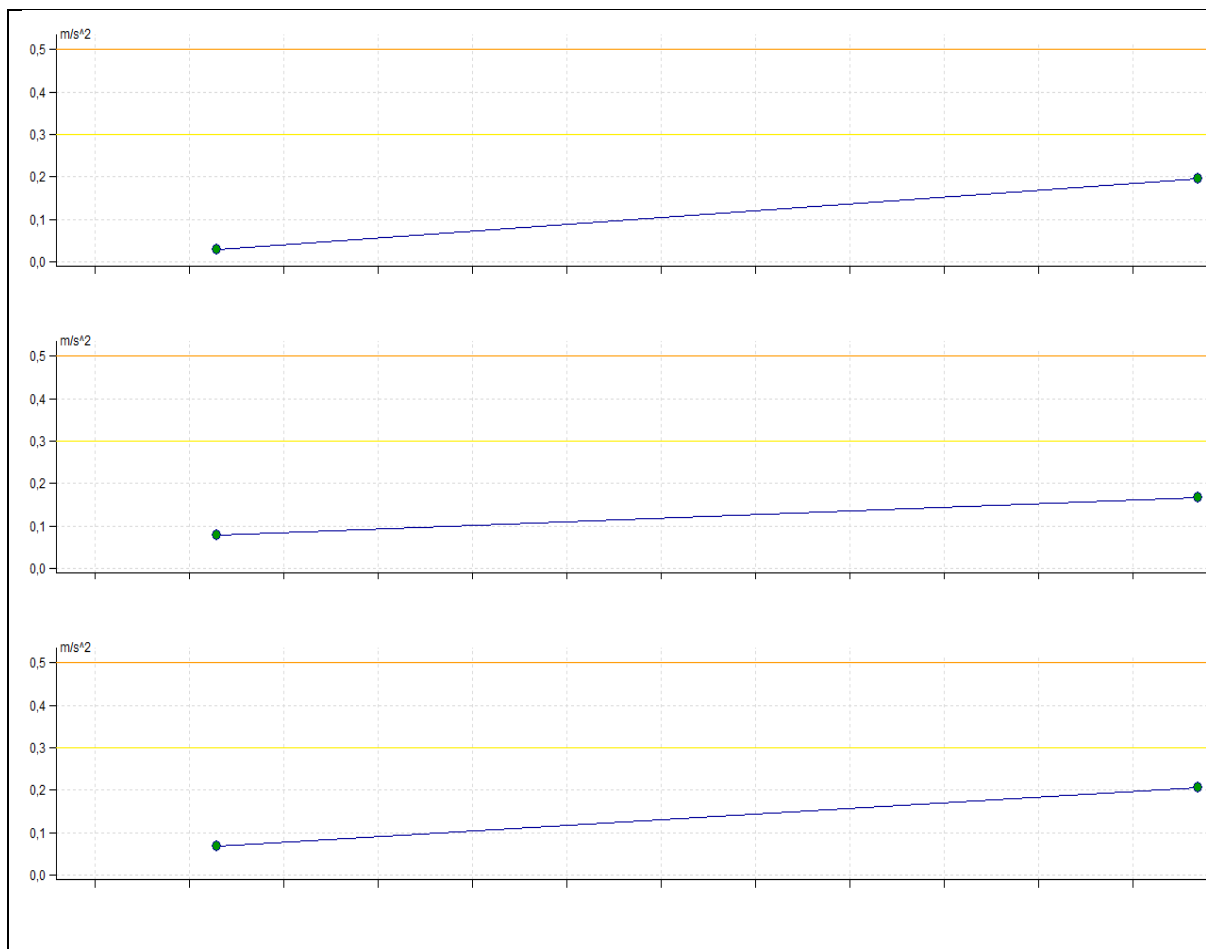


Πίνακας 4.4 Timewave analysis στο RMBR Γραναζοκιβότιο

4.2 Γραναζοκιβώτιο

4.2.1 Πλανητικό μέρος (Planetary / Low Speed Shaft):

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο γραναζοκιβώτιο της ανεμογεννήτριας παρουσιάζονται παρακάτω. Στο διάγραμμα που ακολουθεί τα δεδομένα καλύπτουν τις προδιαγραφές του VDI 3834, έχουν εκτελεστεί δηλαδή στα σημεία όπως αυτά περιγράφονται στην συγκεκριμένη οδηγία στις τρεις διευθύνσεις. Παρατηρείται ότι οι μετρήσεις στο διάστημα από 02/03/2019-14/10/2019 είναι εντός ορίων.



Πίνακας 4.5 Όρια ταλαντώσεων στη μέτρηση του γραναζοκιβωτίου σύμφωνα με το VDI 3834

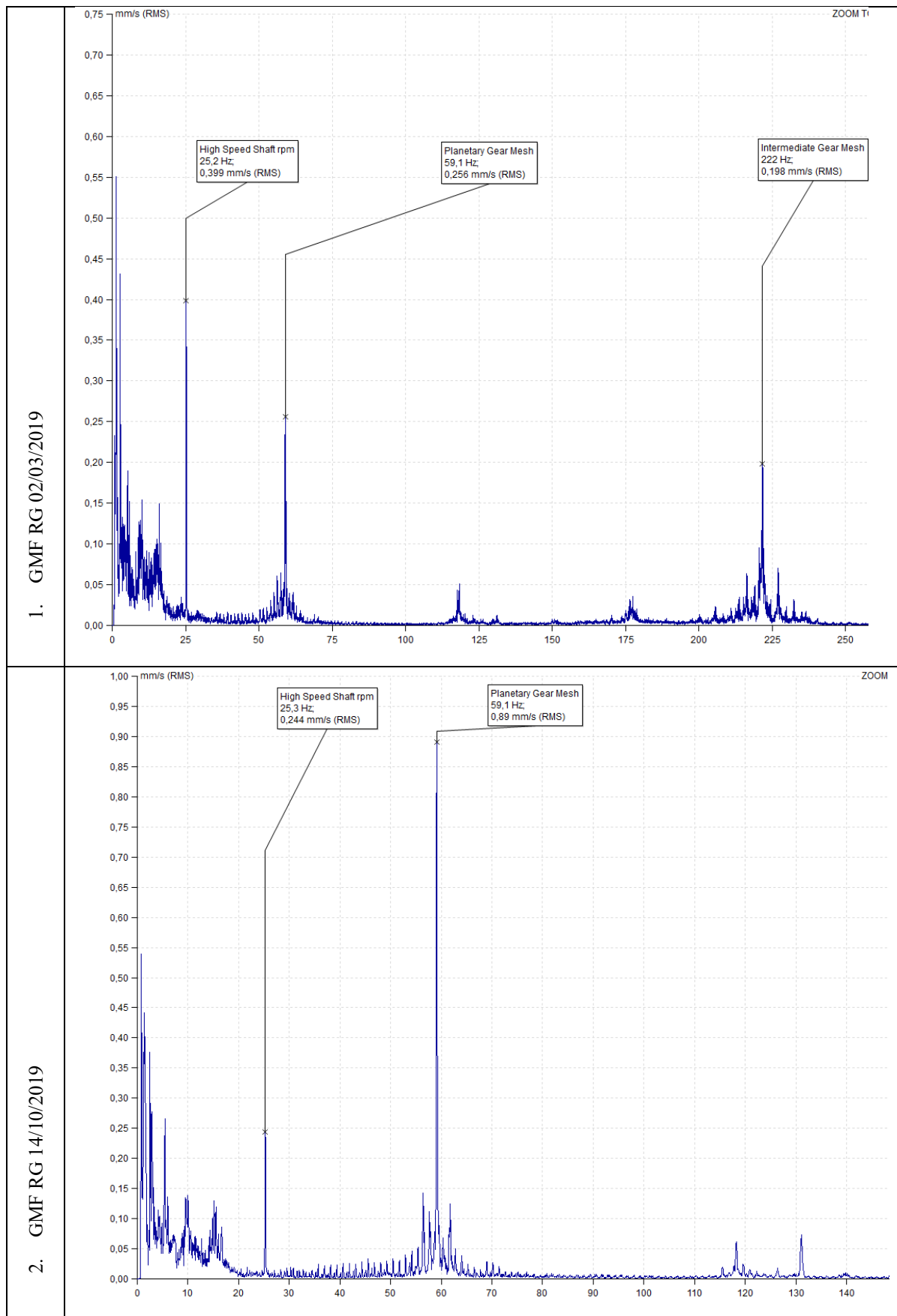
Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα ανάλυσης των δεδομένων ξεχωριστά ανά σύμπλεξη. Οι νεότερες μετρήσεις φαίνονται πρώτες στην κάθε γραμμή του πίνακα και έπειτα ακολουθούν οι παλαιότερες. Στους πίνακες που αντιστοιχούν σε κάθε έναν άξονα έχει τοποθετηθεί και το διάγραμμα των στροφών. Είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο σωστός μετασχηματισμός των στροφών ώστε να υπολογιστούν σωστά οι χαρακτηριστικές συχνότητες των τριβέων, των συμπλέξεων και των πλευρικών συχνοτήτων [3].

Διαπιστώνεται αρχικά η συχνότητα σύμπλεξης του πλανητικού κιβωτίου με τον ήλιο Πίνακας 4.6 στα 59,1Hz σε πλάτος 0,256mm/sec, το οποίο οφείλεται σε αυξημένο φορτίο σε δόντι [4]. Η ένταση όμως δεν είναι σημαντική και για αυτό οι οδηγίες που δόθηκαν προς τον διαχειριστή ήταν η συνέχιση λειτουργίας και επανέλεγχος σε 3.000 ώρες λειτουργίας ή 4 μήνες ώστε να παρατηρηθεί και ο ρυθμός εξέλιξης του φαινομένου. Τα παραπάνω δεδομένα σε συνδυασμό με τις μετρήσεις των τιμών RMS, σύμφωνα με την οδηγία του VDI 3834, «χαρακτηρίζουν» το διάστημα του επανελέγχου ασφαλές, δίνοντας χρόνο για την παρακολούθηση της εξέλιξης του φαινομένου.

Η δυσλειτουργία αυτή, καταγράφεται ως χαμηλής έντασης και συνδέεται από την φθορά που καταγράφηκε στους κυλίνδρους του μπροστινού τριβέα, η οποία δημιουργεί μεγαλύτερες ανοχές στο αξονικό σύστημα δικαιολογώντας με αυτό τον τρόπο και το αυξημένο φορτίο σε κάποιο δόντι του πλανητικού μέρους.

Στις μετρήσεις που ακολούθησαν με το πέρας του τετράμηνου διαπιστώνεται ότι η ίδια συχνότητα σύμπλεξης του πλανητικού μέρους (Planetary Gear Mesh Frequency 59Hz) έχει αυξηθεί σε πλάτος κατά 3 φορές (0,9mm/sec) γεγονός το οποίο απαιτεί συχνότερη παρακολούθηση και ενδελεχή έλεγχο στις υπόλοιπες συμπλέξεις και στους τριβείς. Ταυτόχρονα με την αύξηση του πλάτους ταλάντωσης της χαρακτηριστικής συχνότητας σύμπλεξης διαπιστώθηκε, ανωτέρω, και η αύξηση των spikes στους κύριους τριβείς (ενότητα 4.1.1 & 4.1.2 του παρόντος).

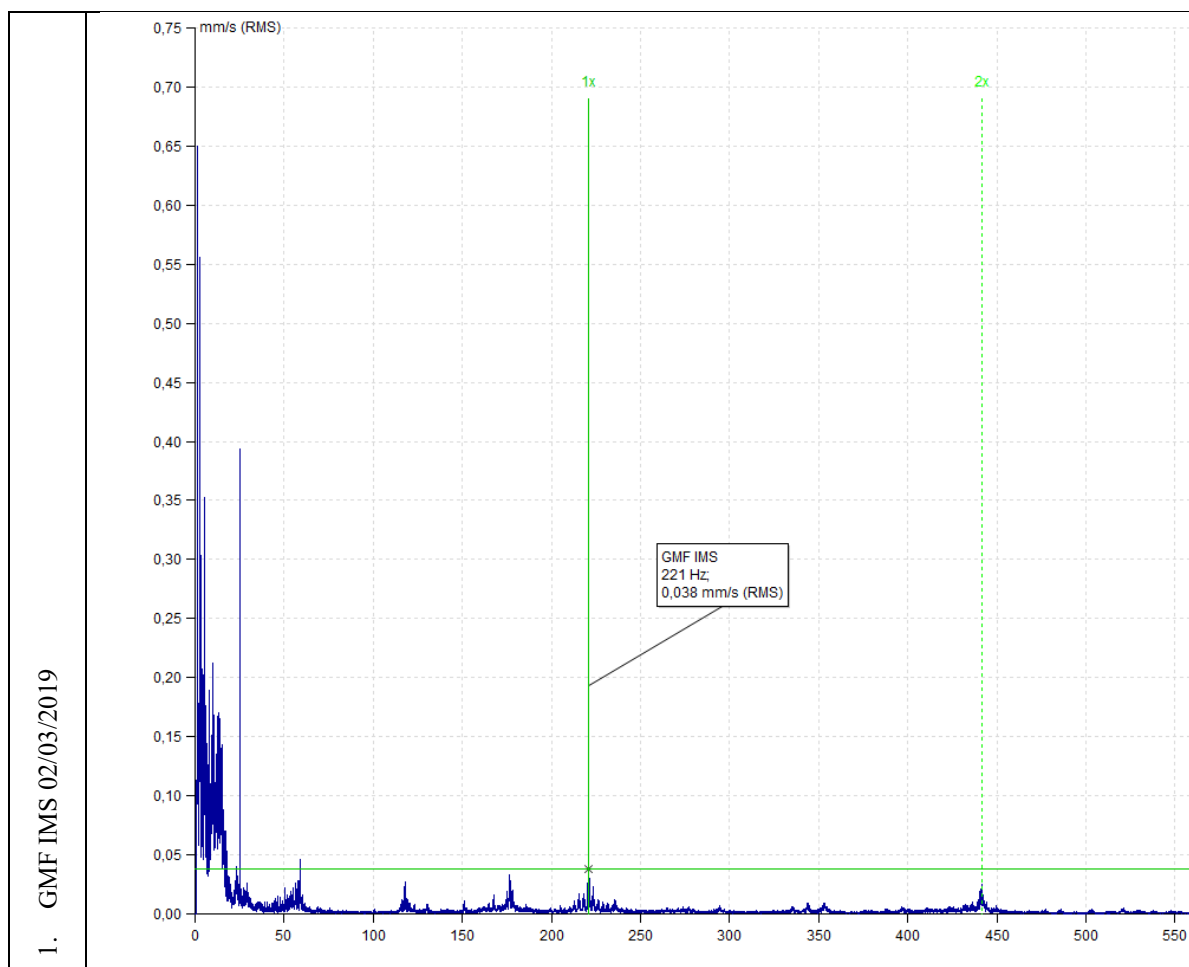
Οι οδηγίες που δόθηκαν για την παρούσα κατάσταση περιγράφονται στην ενότητα 4.4 (οδηγίες).

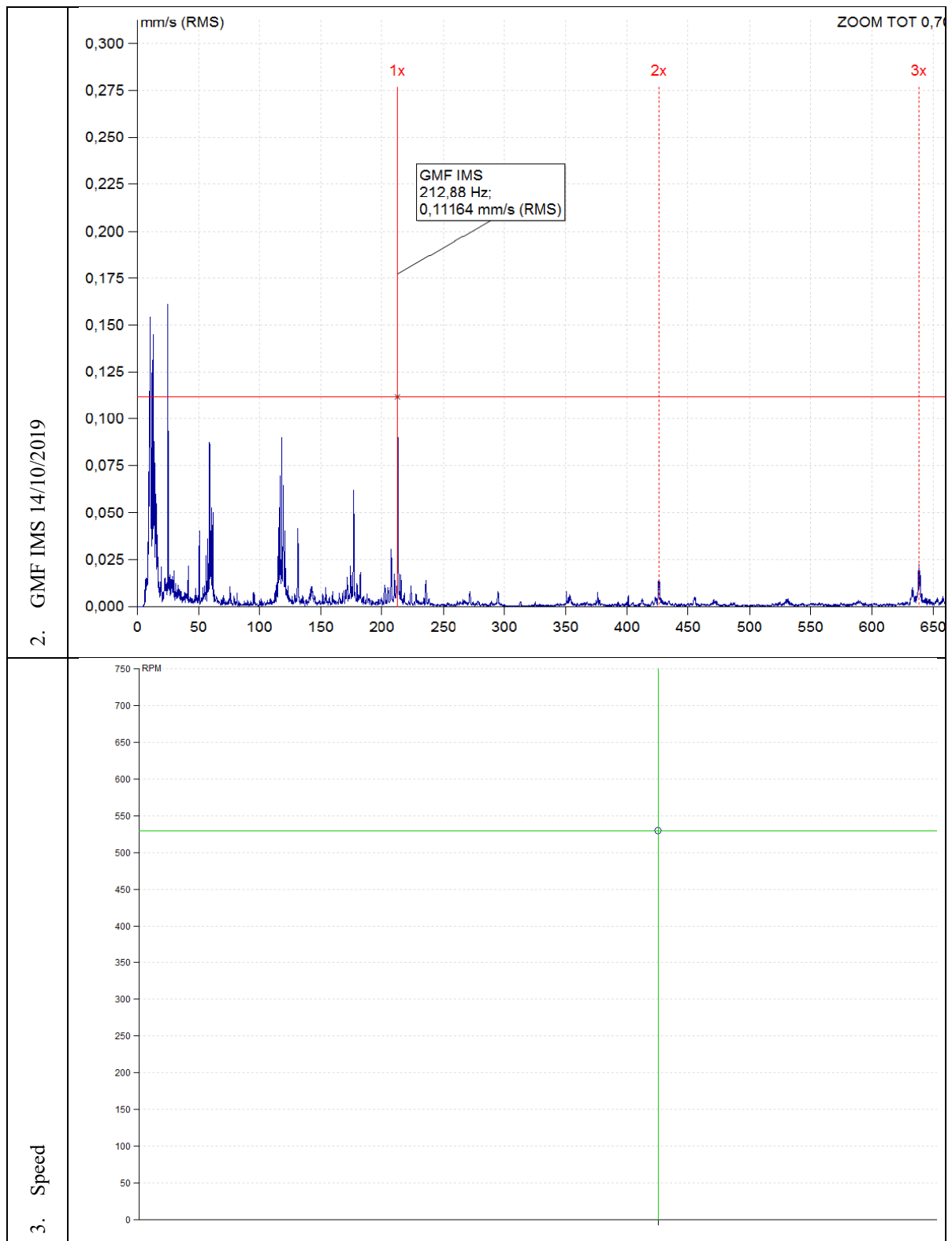


Πίνακας 4.6 Φάσμα συχνοτήτων στην μέτρηση του RG και του LSS

4.2.2 Ενδιάμεσος άξονας (Intermediate Shaft):

Στο φάσμα παρουσιάζεται η συχνότητα σύμπλεξης του LSS με τον IMS Πίνακας 4.7 και οι πρώτες 3 αρμονικές της. Δεν διαπιστώνεται κανένα πρόβλημα στην εν λόγω σύμπλεξη οδόντων, για κάποια άμεση παρέμβαση στο σύστημα. Η μεταβολή στο πλάτος ταλάντωσης της συχνότητας σύμπλεξης είναι αμελητέα, ενώ έχει αυξηθεί από τα 0,034mm/sec στα 0,112mm/sec βρίσκεται σε πολύ χαμηλή τιμή. Γενικότερα όμως παρατηρείται ότι η «δυσλειτουργία» στη σύμπλεξη του πλανητικού μέρους να έχει επηρεάσει ελάχιστα και τη λειτουργία του ενδιάμεσου άξονα [4].

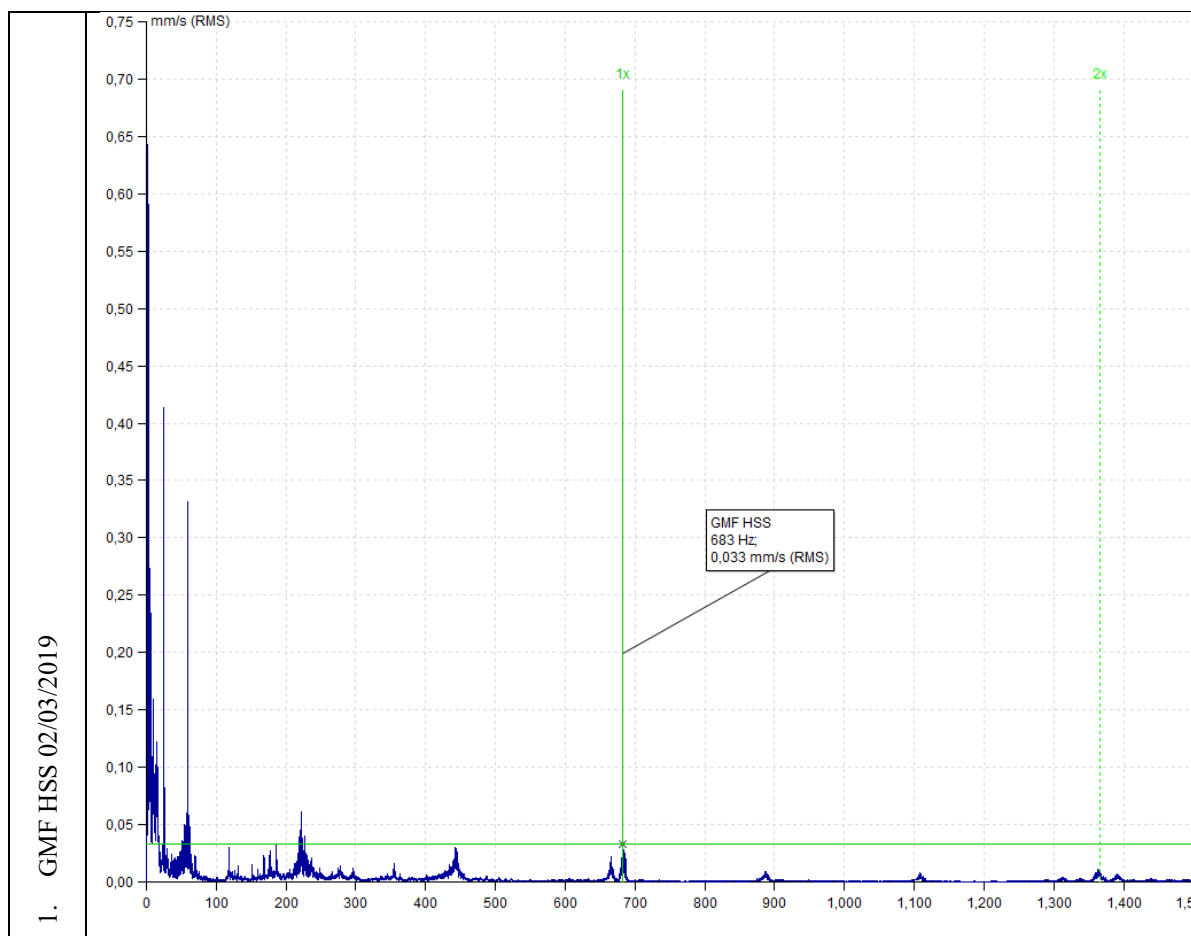


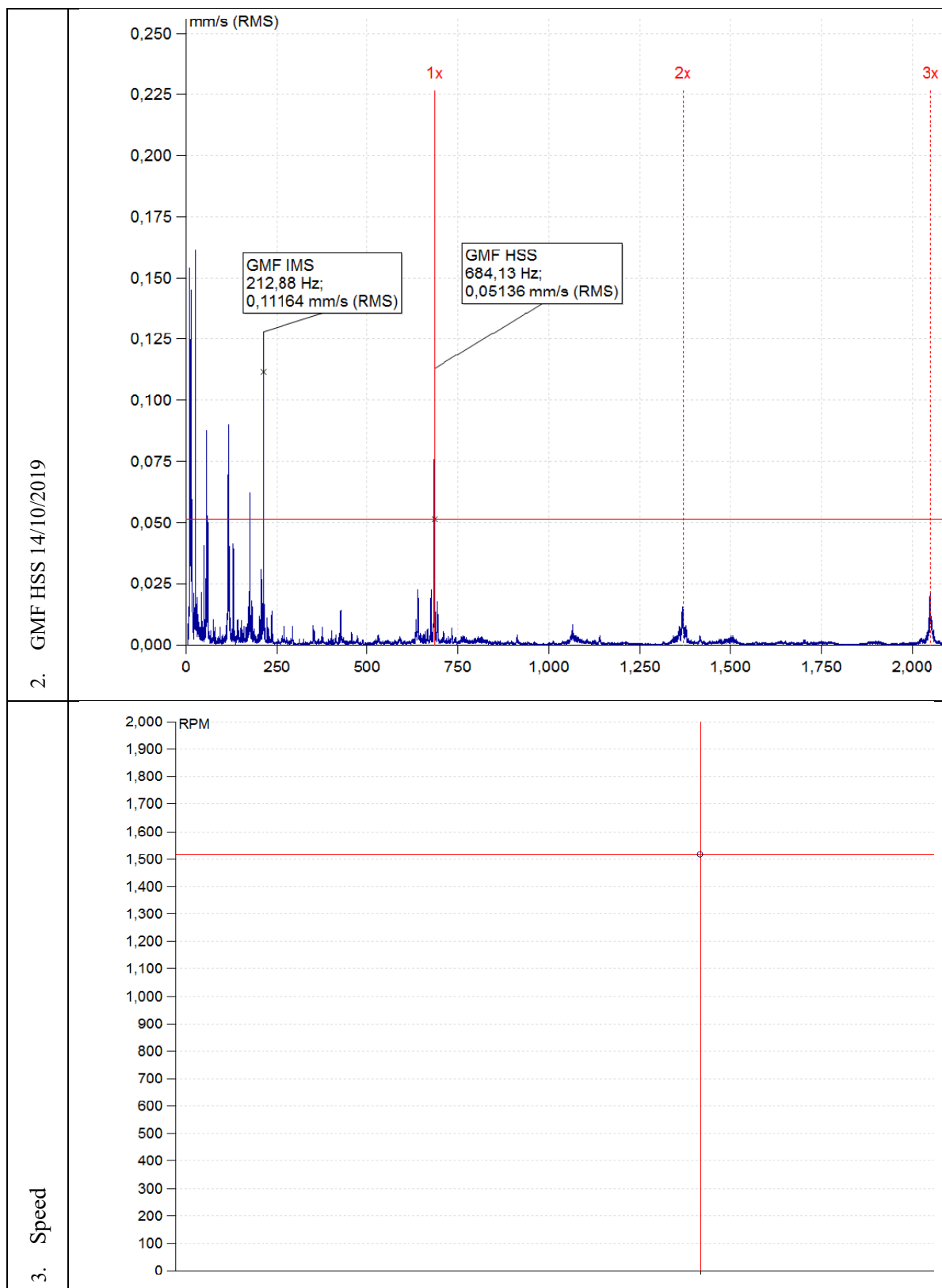


Πίνακας 4.7 Φάσμα συχνοτήτων στην μέτρηση του IMS

4.2.3 Τελικός άξονας (High Speed Shaft):

Η σύμπλεξη του HSS με τον IMS και οι πρώτες 3 αρμονικές της Πίνακας 4.8 παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα. Δεν διαπιστώνεται κανένα πρόβλημα στην εν λόγω σύμπλεξη οδόντων, για άμεση ενέργεια από τον διαχειριστή της ανεμογεννήτριας. Παρατηρείται και εδώ μία αμελητέα αύξηση στο πλάτος της σύμπλεξης του τελικού άξονα (GMF High Speed Shaft) από τα 0,033mm/sec στα 0,051mm/sec χωρίς όμως αυτό να είναι ανησυχητικό καθώς οι τιμές είναι σε πολύ χαμηλές στάθμες. Διαπιστώνεται επίσης ότι η «δυσλειτουργία» στη σύμπλεξη του πλανητικού μέρους έχει επηρεάσει λιγότερο τον τελικό άξονα από τον ενδιάμεσο [4].



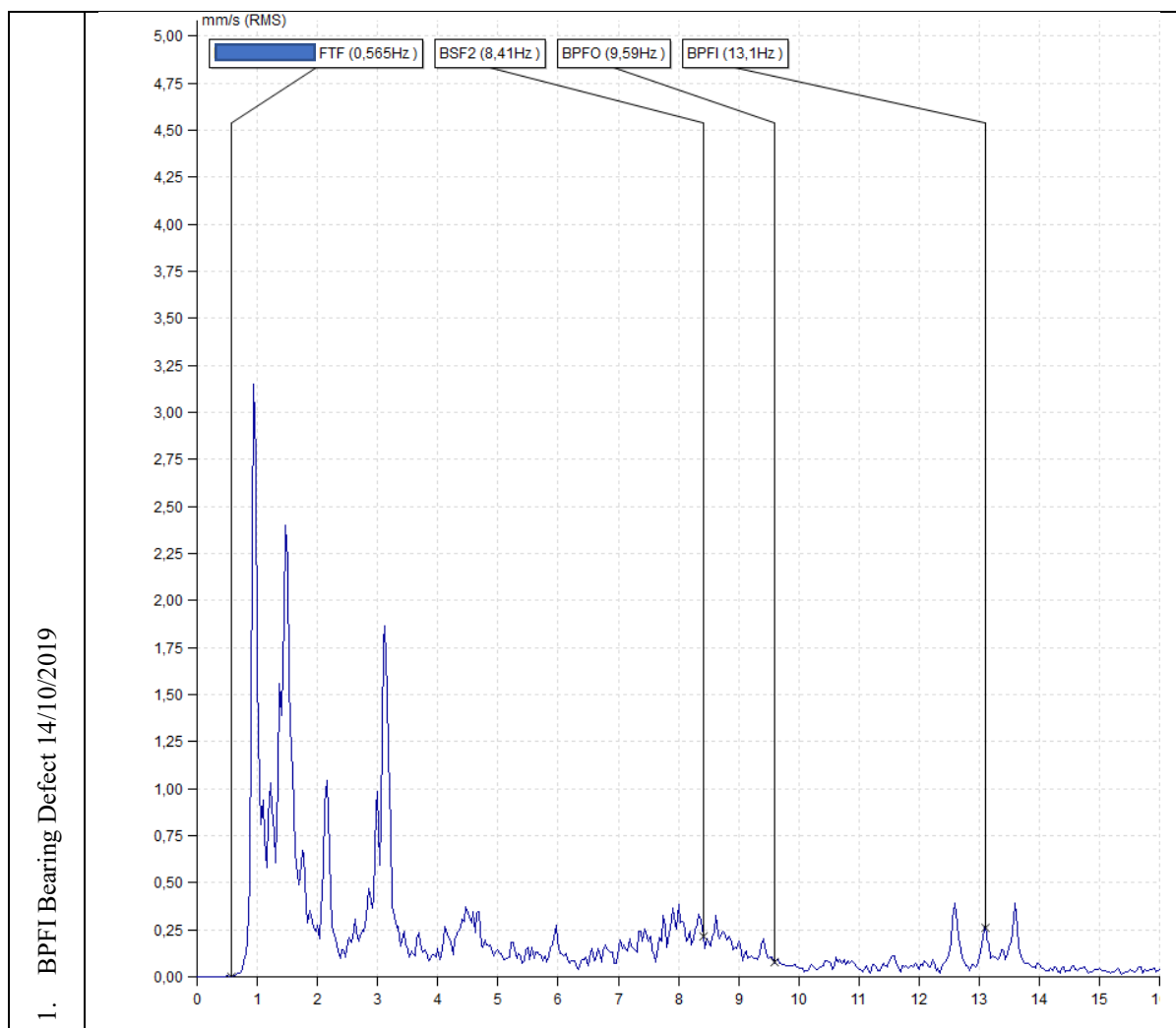


Πίνακας 4.8 Φάσμα συχνοτήτων στην μέτρηση του HSS

4.2.4 Τριβείς κύλισης γραναζοκιβωτίου

Από τον υπολογισμό όλων των χαρακτηριστικών συχνοτήτων καθώς και από την ανάλυση των δεδομένων δεν εντοπίζεται φθορά στους τριβείς κύλισης του γραναζοκιβωτίου εκτός από τον διπλό κυλινδροτριβέα στον οποίο εδράζεται ο ένας από τους τρεις πλανήτες.

Δεν υπάρχει διάγραμμα στο οποίο να μπορεί να διακριθεί η διαφορά στη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών συχνοτήτων του τριβέα των πλανητών από προγενέστερες μετρήσεις και έτσι το παρακάτω διάγραμμα δείχνει την τελευταία μέτρηση στην οποία εντοπίζεται και η φθορά. Από τον έλεγχο στους τριβείς παρατηρήθηκε ότι έχει επηρεαστεί μόνο ο διπλός κυλινδροτριβέας που φέρει έναν πλανήτη καθώς εντοπίζεται διαμόρφωση της χαρακτηριστικής συχνότητας του εσωτερικού δακτύλιου (BPFI 13,1Hz) Πίνακας 4.9 με τη διαμόρφωση πλευρικών συχνοτήτων στην ταχύτητα περιστροφής του άξονα [3]. Εύκολα διακρίνεται η διαμόρφωση πλευρικών συχνοτήτων και η χαμηλή συχνότητα στην οποία εξελίσσεται το πρόβλημα, συνιστώσες οι οποίες φανερώνουν ότι το στάδιο εξέλιξης φθοράς του τριβέα είναι το 3^ο με ζωή 1-5% του L_{10} της ζωής του [2].



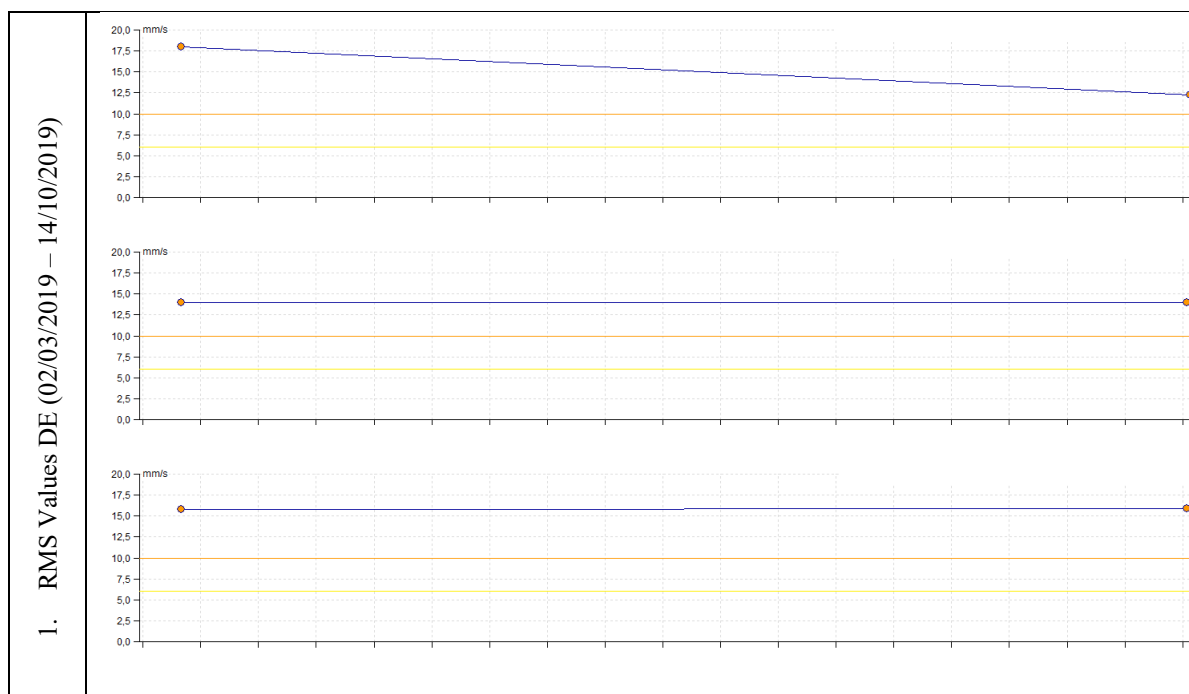
Πίνακας 4.9 Φάσμα συχνοτήτων κυλινδροτριβέα πλανήτη

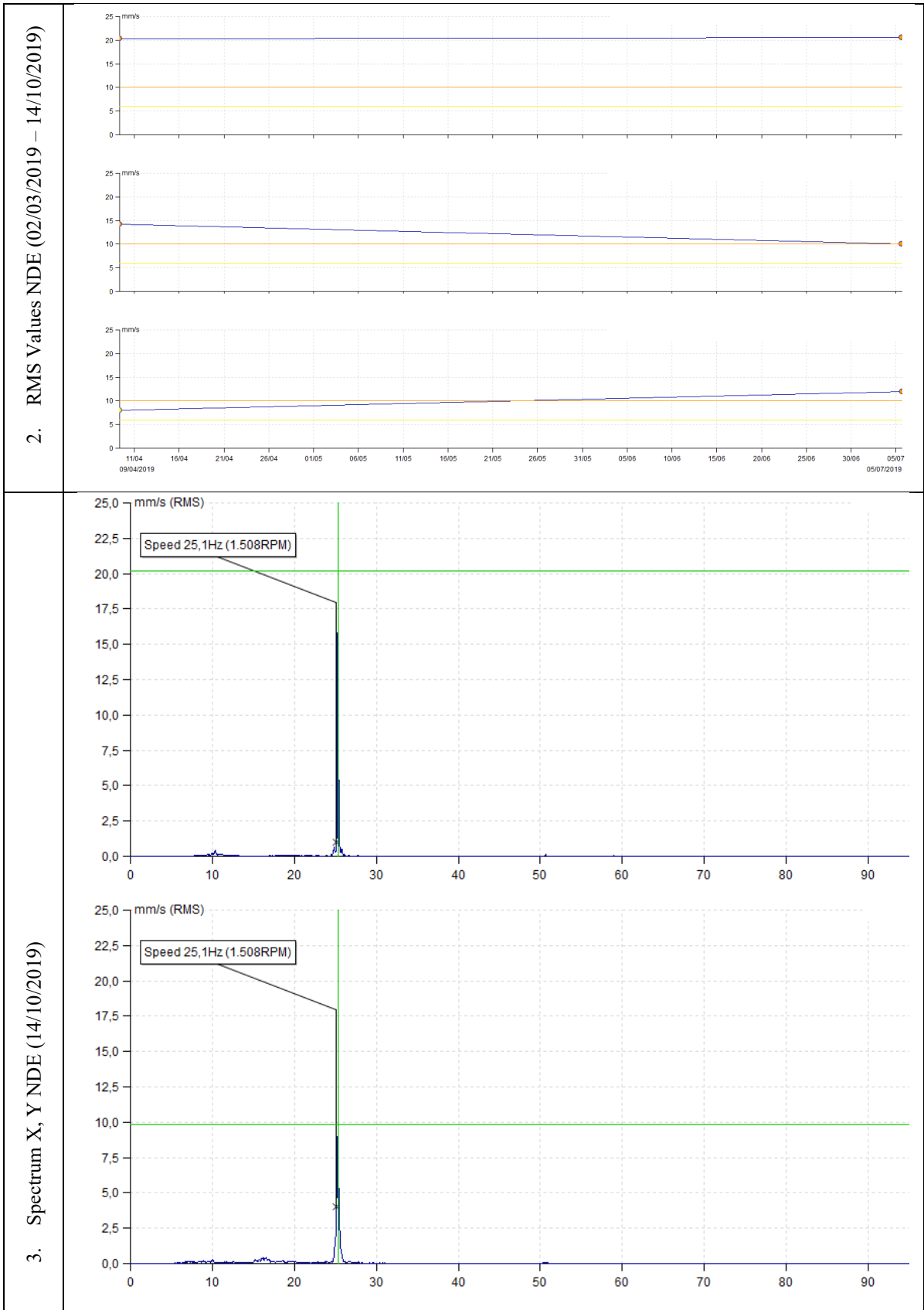
4.3 Γεννήτρια

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη γεννήτρια της ανεμογεννήτριας παρουσιάζονται παρακάτω. Γίνεται μετατροπή των τιμών της ταχύτητας που έχουν καταγραφεί σε μονάδες επιτάχυνσης όπως φαίνονται στις προδιαγραφές του VDI 3834 στο δεύτερο κεφάλαιο με αυτά να έχουν προσαρμοστεί στις μονάδες ταχύτητας. Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν στο εμπρός και πίσω άκρο της γεννήτριας (Drive End DE / Non Drive End NDE) αντίστοιχα, στα σημεία έδρασης του άξονα (φωλιές τριβών). Παρατηρείται ότι οι μετρήσεις εντός του τετράμηνου είναι σε όλα τα σημεία μέτρησης εκτός ορίων.

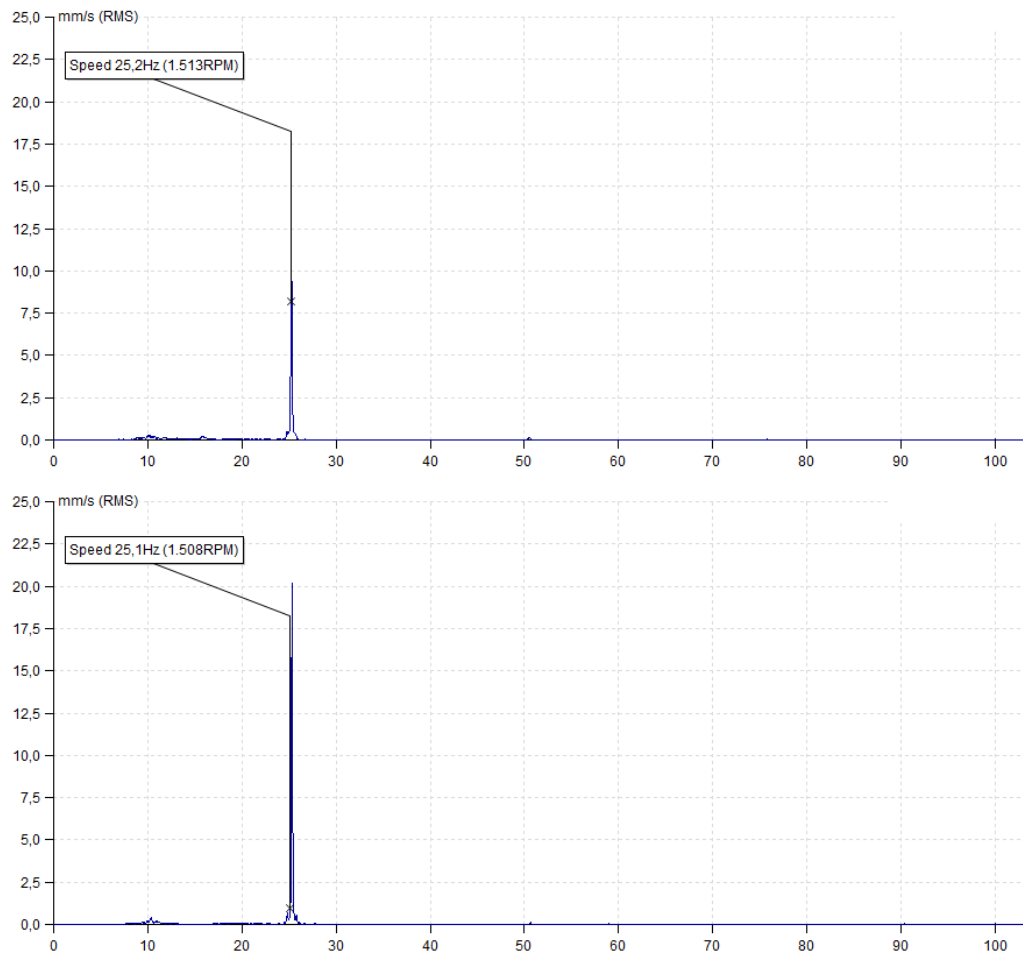
Από την ανάλυση των ταλαντώσεων διαπιστώνονται τα παρακάτω

- α) Δομική χαλάρωση στη βάση της γεννήτριας (διάγραμμα 3) με μεγαλύτερη ένταση στο πίσω άκρο NDE
- β) Αζυγοσταθμία στον άξονα (διαγράμματα 4 και 5) [5]
- γ) Χτύπημα στο εσωτερικό δαχτυλίδι του τριβέα (BPFI 125Hz) σε στάδιο φθοράς 2 έχοντας ακόμα διάρκεια ζωής περίπου 5-10% του L_{10} (διάγραμμα 6) [5]
- δ) Ελαφριά απευθυγράμμιση μεταξύ των άκρων η οποία σε συνδυασμό με τα ανωτέρω μπορεί να οφείλεται σε κακή λειτουργία των αντικραδασμικών βάσεων (διάγραμμα 7). Για τον εντοπισμό τέτοιων δυσλειτουργιών απαιτούνται διαφορετικού τύπου μετρήσεων που δεν αναλύονται στην παρούσα εργασία [5]
- ε) Από τα ανωτέρω έχει προκληθεί και δυσλειτουργία στις μπάρες του ρότορα (RBFR 1.308Hz) (διάγραμμα 8) [2]

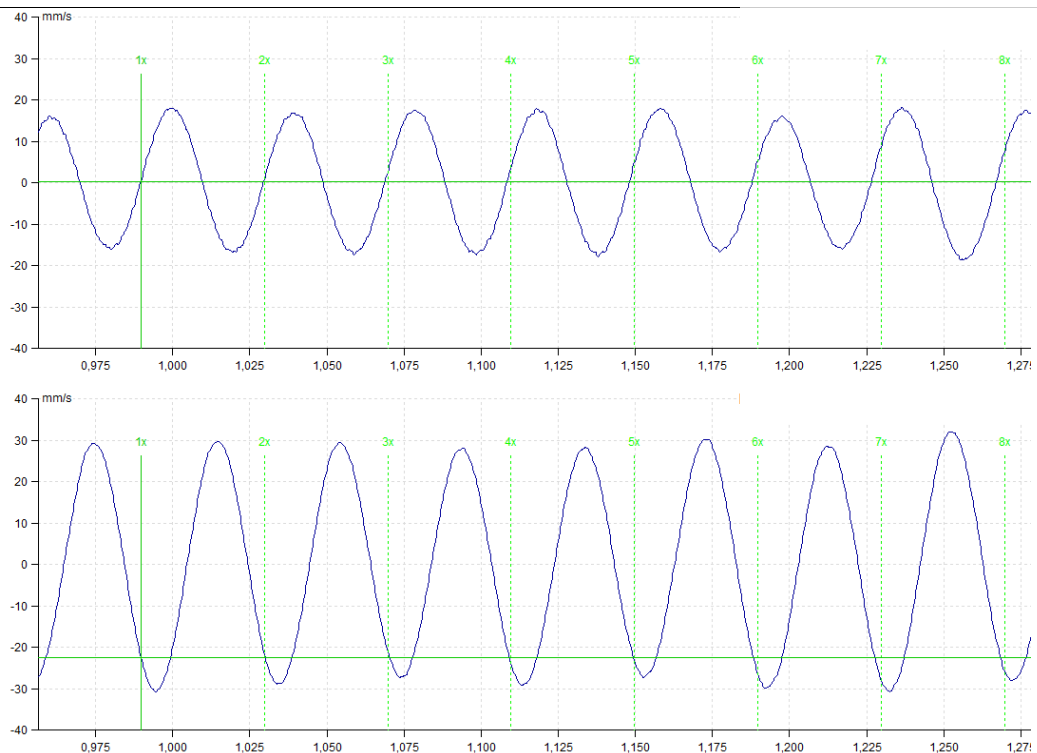




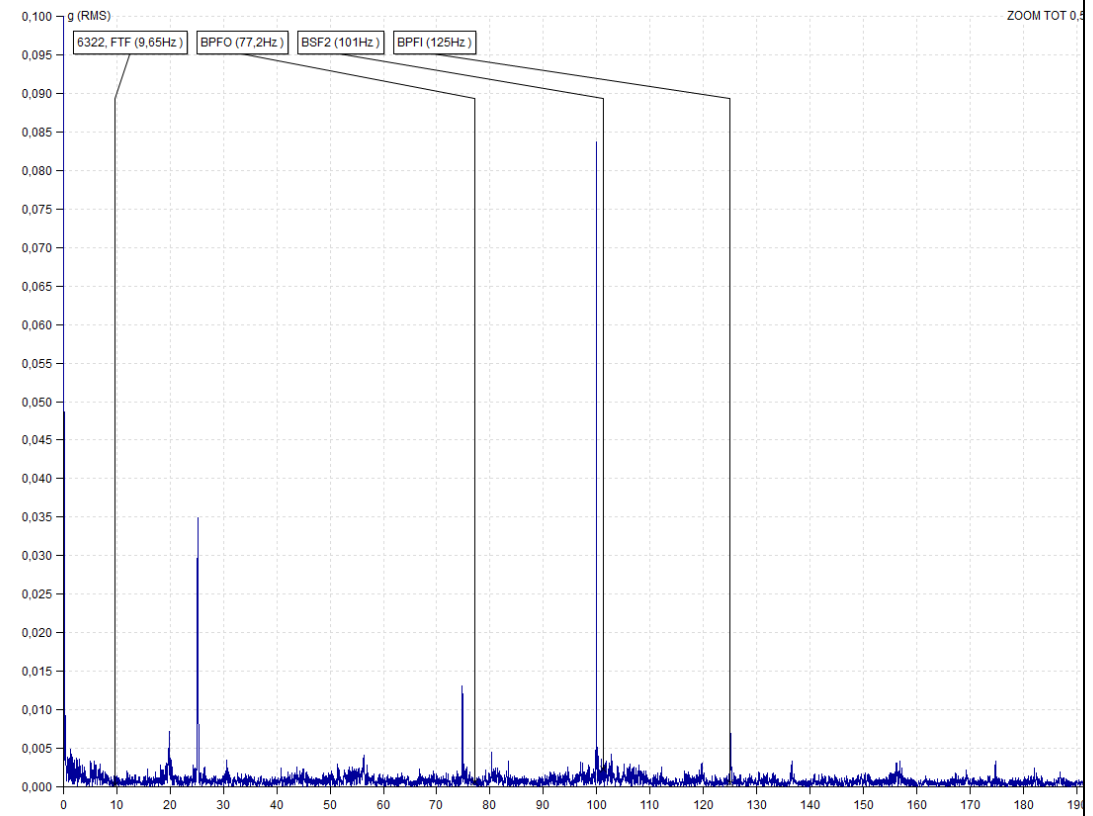
4. Spectrum Vertical DE – NDE (14/10/2019)



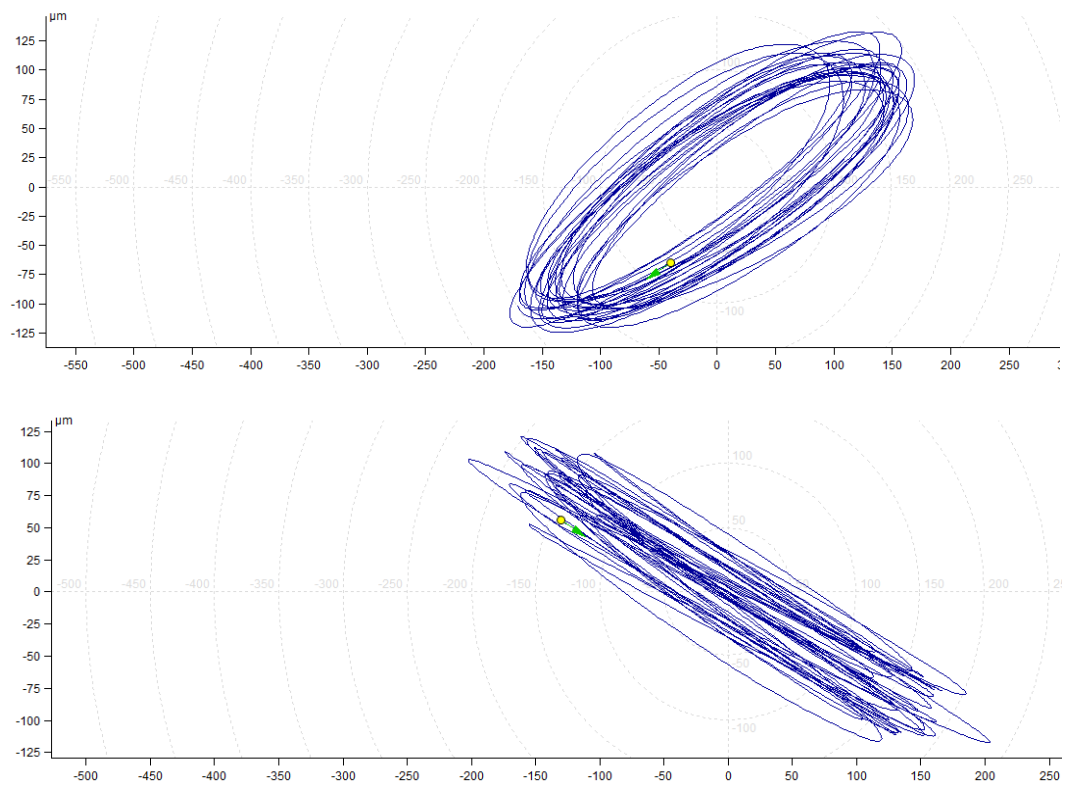
5. Timewave Vertical DE – NDE (14/10/2019)

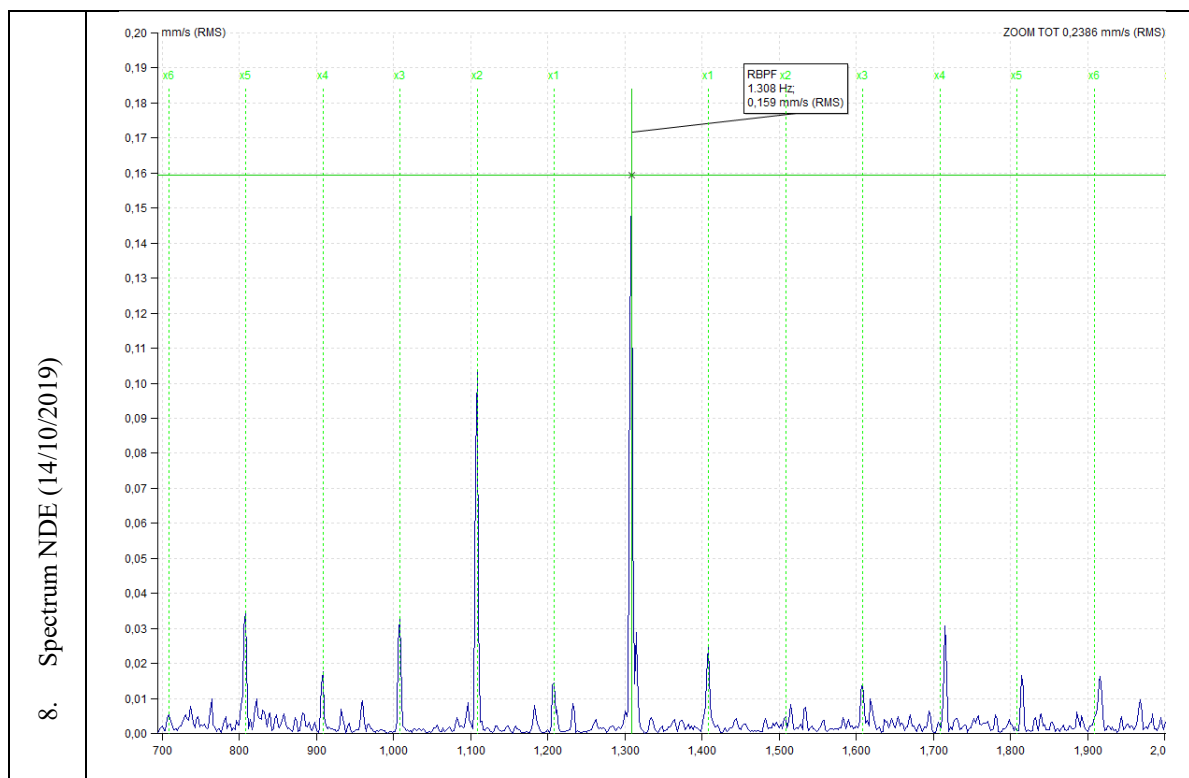


6. Bearing Spectrum NDE (14/10/2019)



7. Orbit plot DE – NDE (14/10/2019)





Πίνακας 4.10 Διαγράμματα συχνότητων γεννήτριας

4.4 Οδηγίες

Συμπερασματικά λοιπόν, προτάθηκαν στον διαχειριστή οι κάτωθι ενέργειες:

α) Διαρκής παρακολούθηση θερμοκρασία του στάτη της γεννήτριας και επανέλεγχος κραδασμών με το πέρας 1.000 ωρών λειτουργίας.

β) Άμεσος έλεγχος ρινισμάτων στο λάδι και ανάλυση αυτού (oil analysis)

γ) Σε περίπτωση υψηλής συγκέντρωσης ρινισμάτων σιδήρου (πέρα από το φυσιολογικό) και εύρεσης ρινισμάτων αλουμινίου, προγραμματισμός αντικατάστασης ή επισκευής γραναζοκιβωτίου. Η λειτουργία αυτού δεν θα έπρεπε να ξεπεράσει τις 500 ώρες.

δ) Σε περίπτωση μη εύρεσης ρινισμάτων αλουμινίου, αλλά υψηλής συγκέντρωσης ρινισμάτων σιδήρου το γραναζοκιβώτιο δεν θα έπρεπε να λειτουργήσει περισσότερες από 1.000 ώρες.

Για τα υπόλοιπα μέρη σε περίπτωση που επισκευαστεί το γραναζοκιβώτιο απαιτούνται τα παρακάτω:

α) Αντικατάσταση τριβέων κύριου άξονα.

β) Αντικατάσταση τριβέων γεννήτριας, ζυγοστάθμιση ρότορα και οπτικός έλεγχος μπαρών ρότορα,

γ) Αντικατάσταση ελαστικών βάσεων και έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια κολλήσεων βάσης στη γεννήτρια.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα / Αποτελέσματα

5.1 Συμπεράσματα ανάλυσης

Η φθορά στον εμπρόσθιο κύριο τριβέα της ανεμογεννήτριας είναι ιδιαίτερης κρισιμότητας αλλά δεν είναι υψηλής επικινδυνότητας για να απαιτούνται άμεσες ενέργειες. Το ίδιο διαπιστώνεται κρίνοντας τις μετρήσεις σύμφωνα με το VDI 3834.

Η «δυσλειτουργία» στη σύμπλεξη των οδόντων εντός τους πλανητικού μέρους αποτελεί την αιτία του προβλήματος σε μία σειρά από άλλες φθορές που πρόκειται να ακολουθήσουν στην πορεία λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Οι άμεσοι αποδέκτες στην παρούσα κατάσταση φθοράς να είναι οι τριβείς κύλισης των αξόνων του γραναζοκιβωτίου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου οι τριβείς λιπαίνονται από συνεχή κυκλοφορία ελαίου λίπανσης μέσω εξαρτημένης αντλίας τοποθετημένης στον τελικό άξονα (High Speed Shaft - HSS) ρινίσματα σιδήρου τα οποία μπορεί να διαπεράσουν τα φίλτρα λαδιού θα καταλήξουν στους τριβείς. Έχει διαπιστωθεί σε άλλες περιπτώσεις η επικόλληση ρινίσματος σιδήρου εντός του τριβέα, πάνω στο εξωτερικό δαχτυλίδι.

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός της πολύ καλής λίπανσης του τριβέα, καθώς όταν βρίσκεται στο κατώτατο σημείο του πλανητικού διέρχεται μέσα από την λεκάνη λαδιού του γραναζοκιβωτίου και ότι ο κάθε πλανήτης εδράζεται σε 2 κυλινδροτριβείς με διπλά ζεύγη κυλίνδρων, δεν χρειάζεται από τον διαχειριστή να προβεί σε άμεση κράτηση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.

Σε αυτό το επίπεδο ανάλυσης δεν γίνεται υπολογισμός για το ποιος από τους τρεις πλανήτες φέρει τη φθορά συνεπώς ούτε και ποιος τριβέας έχει χτυπημένο εσωτερικό δαχτυλίδι. Είναι εφικτό να προσδιοριστεί με μία σειρά διαφορετικού τύπου μετρήσεων, ακόμα και να αναλυθεί η σειρά της βλάβης, ώστε να γίνουν και κατασκευαστικές διορθωτικές ενέργειες αλλά είναι έξω από τα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.

Τα ευρήματα στην γεννήτρια είναι σημαντικά και μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή βλάβη στο συγκεκριμένο μηχάνημα, κρίνοντας όμως οικονομοτεχνικά την κατάσταση και υπολογίζοντας την εναπομένονσα διάρκεια ζωής του τριβέα της γεννήτριας κρίνεται ο επανέλεγχος της σε συντομότερο χρονικό διάστημα, μικρότερο των 1.000 ωρών λειτουργίας ανεξάρτητα του φορτίου.

Σε αυτό το σημείο είναι πολύ σημαντικό να εκτιμηθεί σωστά η σειρά και ο ρυθμός με τον οποίο οι βλάβες θα επηρεάσουν το σύστημα χρησιμοποιώντας όλα τα δυνατά μέσα, όπως την ανάλυση λιπαντελαίου, την ανάλυση των ταλαντώσεων την εμπειρία του διαχειριστή και την εμπειρία του αναλυτή. Ο σκοπός στην παρούσα κατάσταση είναι η ανεμογεννήτρια να λειτουργήσει όσο το δυνατό περισσότερες ώρες, να επισκευαστούν τα μηχανικά μέρη, όσο το δυνατό ταχύτερα και με το μικρότερο κόστος. Το κόστος αντικατάστασης ενός γραναζοκιβωτίου, το οποίο είναι διαθέσιμο στις βόρειες χώρες της Ευρώπης, και είναι επισκευασμένο από το εξωτερικό ανέρχεται περίπου στα 50.000€ και ο χρόνος παράδοσης του συνήθως είναι μεταξύ 1 και 1,5 μήνα, σε αντίθεση με την επισκευή του η οποία διαρκεί από 1 έως 2 εβδομάδες. Σε εκείνη την περίοδο στην Ελλάδα μπορούσαν να εκτελεστούν μόνο επισκευές μικρής κλίμακας στα γραναζοκιβώτια, με την κατασκευή γραναζιού να αποτελεί τη μεγαλύτερη δυσκολία. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ένα φθαρμένο πλανητικό γρανάτζι μπορούσε να κατασκευαστεί, αλλά ένα σπασμένο δόντι στο δαχτυλίδι του πλανητικού μέρους (ring gear) θα καθυστερούσε αρκετά. Οι λοιπές εργασίες όπως αντικατάσταση κύριων τριβέων και επισκευή στη γεννήτρια εκτελούνται στο ίδιο μηχανουργείο με το γραναζοκιβώτιο.

Εύκολα αντιλαμβάνεται κάποιος ότι οι μετρήσεις (overall readings) που εκτελούνται στο γραναζοκιβώτιο ήταν εντός ορίων αλλά οι φθορές εντός του μηχανήματος υπήρχαν. Στην περίπτωση

χειρισμού των δεδομένων από ένα μη έμπειρο αναλυτή η λειτουργία του γραναζοκιβωτίου και του κύριου τριβέα θα μπορούσε να συνεχιστεί, μέχρι οι τιμές να ήταν εκτός ορίων. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί η φθορά να είχε συμβεί σε απρόσμενο χρόνο ή σε διάστημα μικρότερο από αυτό του επανελέγχου και τελικά η βλάβη να ήταν καταστροφική. Επίσης ο διαχειριστής δεν θα είχε τη δυνατότητα να προγραμματίσει εργασίες ή να αγοράσει ανταλλακτικά κρατώντας έτσι την ανεμογεννήτρια για μεγάλο διάστημα εκτός λειτουργίας.

5.2 Αποτελέσματα

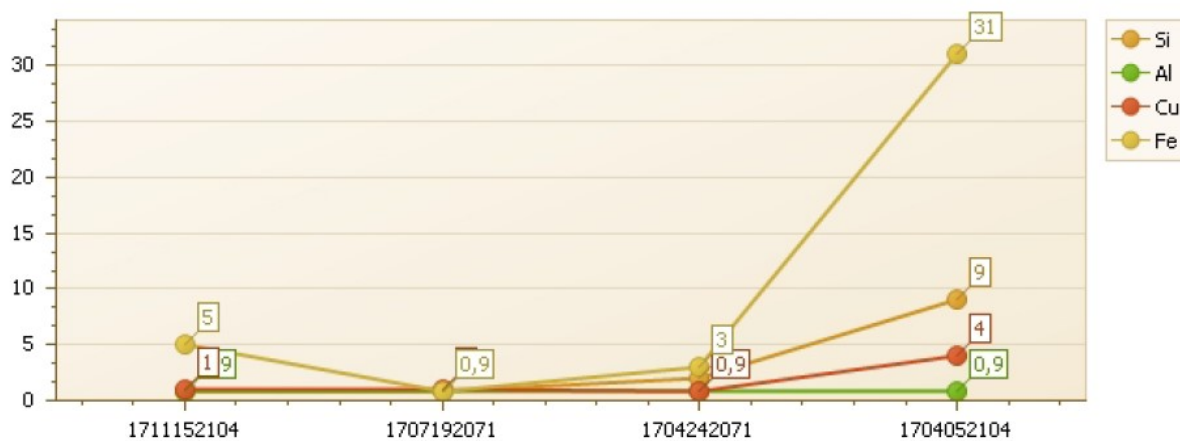
Με το πέρας της αναφοράς των ευρημάτων και των ενεργειών, εκτελέστηκε ο έλεγχος ρινισμάτων και ταυτόχρονα πάρθηκε δείγμα λαδιού για χημική ανάλυση. Τα αποτελέσματα από τον οπτικό έλεγχο του μαγνήτη φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες.



Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα ελέγχου ρινισμάτων

Από την χημική ανάλυση του λαδιού αναφέρονται τα εξής:

«Το ιξώδες και τα πρόσθετα του λαδιού είναι ικανοποιητικά. Ο βαθμός καθαρότητας κατά ISO παρουσιάζει αύξηση, φανερώνοντας ότι το σωματιδιακό φορτίο στο λάδι αυξήθηκε σημαντικά. Οι συγκεντρώσεις των μετάλλων φθοράς ακολουθούν φυσιολογικό ρυθμό εξέλιξης. Συνιστάται η αλλαγή του φίλτρου του λαδιού και η επανάληψη δειγματοληψίας σε 3 μήνες για παρακολούθηση».



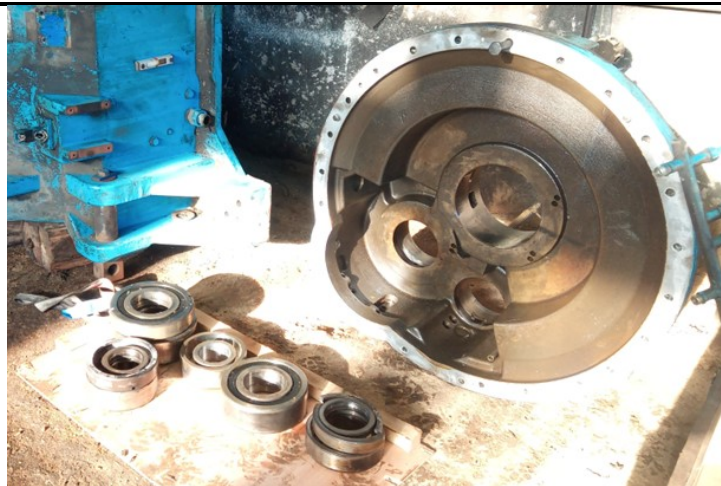
Πίνακας 5.2 Κατανομή περιεκτικότητας μετάλλων

5.3 Ενέργειες

Με τα παραπάνω ευρήματα και λαμβάνοντας υπόψη την χαμηλή ανεμόπτωση που είχε η συγκεκριμένη εποχή ο διαχειριστής προέβη σε επισκευή του γραναζοκιβωτίου, αντικατάσταση των τριβών του κυρίου άξονα και επισκευή της γεννήτριας. Εξαιτίας του υψηλού κόστους του γερανού που θα εκτελούσε τις παραπάνω ενέργειες και με σκοπό τη μείωση του ρίσκου για ενδεχόμενες βλάβες αποφασίστηκε η επισκευή όλων των μερών της ανεμογεννήτριας. Το ημερήσιο κόστος για τον γερανό ήταν στα 2.200€ ανά ημέρα και η χρέωση ξεκινούσε από την ημέρα που ο γερανός αναχωρούσε από το αμαξοστάσιο. Η γεννήτρια και το γραναζοκιβώτιο μεταφέρθηκαν στην Αθήνα ενώ οι τριβείς του κύριου άξονα επισκευάστηκαν στο πεδίο, με τον συνολικό χρόνο επισκευής και μεταφοράς πίσω στο αιολικό πάρκο να μην ξεπερνάει τις 8 ημέρες. Κατά τη διάρκεια της επισκευής διαπιστώθηκε ότι το έντονο φορτίο στο δόντι είχε επηρεάσει το «πάτημα» των πλανητών στον ήλιο, χωρίς όμως να χρειάζεται αντικατάσταση του γραναζιού και η φθορά του κυλινδροτριβέα των πλανητών. Έτσι αντικαταστάθηκαν όλοι οι τριβείς του γραναζοκιβωτίου και τέλος εκτελέστηκε έλεγχος καλής λειτουργίας. Στις φωτογραφίες διακρίνονται η διαδικασία εξάρμωσης και η φθορά των μηχανικών μερών.



Εικόνα 5.1 Κατά τη διάρκεια εξάρμωσης του γραναζοκιβωτίου



Εικόνα 5.2 Έλεγχος ευρημάτων στους τριβείς



Εικόνα 5.3 Κατανομή φθοράς στο μέσο του γραναζιού με πιο έντονη στη φορά περιστροφής. Περίπου το 50% του οδόντα μετέφερε το φορτίο



Εικόνα 5.4 Το χτύπημα στο εσωτερικό δαχτυλίδι του τριβέα του πλανητικού μέρους



Εικόνα 5.5 Επανελέγχος μετά την επισκευή

5.4 Οικονομικά οφέλη

Με την εφαρμογή της μεθόδου του CBM, εντοπίστηκαν έγκαιρα όλες οι δυσλειτουργίες των μηχανικών μερών και τελικά οι ενέργειες ήταν μικρής κλίμακας και μικρού κόστους. Σε αντίθετη περίπτωση το κόστος ενός νέου επισκευασμένου γραναζοκιβωτίου, το κόστος ολικής αντικατάστασης της γεννήτριας και το κόστος από τα διαφυγόντα κέρδη θα επιβάρυνε τον διαχειριστή. Μία απρόσμενη βλάβη σε ένα μέρος επηρεάζει και τα υπόλοιπα μηχανήματα που βρίσκονται στη σειρά αλλά προκαλεί και κράτηση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας για αρκετό χρόνο, μέχρι να προγραμματιστούν τα συνεργεία και οι ομάδες συντήρησης. Στην συγκεκριμένη κατάσταση, στον διαχειριστή το συνολικό κόστος της επισκευής όλων των μερών ήταν μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης ενός γραναζοκιβωτίου κερδίζοντας τέλος και τον χρόνο λειτουργίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

- [1] Ν. Γ. Τρουλάκης, Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων, Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης, Εργαστήριο Μικροκοπής & Κατασκευαστικής Προσομοίωσης 2012
- [2] Vibration Training Course Book, Category II, Mobius Institute Training Courses, 2016
- [3] Α. Κανάρχος, Ι. Αντωνιάδης, Δυναμική μηχανών, Αθήνα, Παπασωτηρίου, 1998
- [4] James Taylor, The vibration analysis handbook, first edition
- [5] William R. Finley, Mark M. Hodowanec, Warren G. Holter, An analytical approach to solving motor vibration problems, Material IEEE, Paper No. PCIC-99-20
- [6] Jinglong Chen, Jun Pan, Zipeng Li, Yanyang Zi, Xuefeng Chen, Generator bearing fault diagnosis for wind turbine via empirical wavelet transform using measured vibration signals, 2015