

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΟΝΗΣΕΩΝ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΠΑΝΟΛΙΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (Α.Μ. 5430)  
ΓΚΙΖΑΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ (Α.Μ. 5565)  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ  
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2015**

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο σκοπός της πτυχιακής άσκησης είναι η μελέτη και η κατανόηση των μεθόδων συντήρησης που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία σήμερα. Αυτό περιλαμβάνει τις προηγμένες μεθόδους όπως η συλλογή και η ανάλυση των μηχανικών ταλαντώσεων. Τα κινούμενα μέρη των μηχανών παράγουν ταλαντώσεις κατά την κίνηση τους. Η ανάλυση των σημάτων που παράγουν οι ταλαντώσεις αυτές εμπεριέχουν σημαντικές πληροφορίες για την δομική ακεραιότητα των κινούμενων μερών της μηχανής και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόγνωση βλαβών και την συντήρηση. Στην παρούσα πτυχιακή θα περιγραφούν αναλυτικά ο εξοπλισμός και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τους προαναφερθέντες σκοπούς, ανά περίπτωση πιθανής βλάβης.

**Πανολίας Νικόλαος**

**Γκίζας Διονύσιος**

**Φεβρουάριος 2015**

**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών:** Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

(Όνοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)

(Όνοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Καταρχήν θα αναφερθούν οι τεχνικές συντήρησης που έχουν χρησιμοποιηθεί από την αρχή της βιομηχανίας έως σήμερα. Αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Στην συνέχεια θα αναλυθούν τα βασικά των ταλαντώσεων όπως οι όροι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τα φαινόμενα και τις φυσικές ιδιότητες τους. Μετά αναφέρονται οι τεχνικές και ο εξοπλισμός της διαδικασίας συλλογής των σημάτων των ταλαντώσεων για την ανάλυση και αποθήκευση τους. Αργότερα αναφέρονται αναλυτικά όλα τα προβλήματα και οι βλάβες που εμφανίζονται στα μηχανήματα και πως μπορούν να προβλεφτούν και να διορθωθούν. Επίσης αναλύονται και οι τεχνικές όπως η ανάλυση των λιπαντικών των μηχανημάτων και λοιπές τεχνικές προγνωστικής συντήρησης.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφ.		Σελ.
<b>1</b>	<b>Τεχνικές προγνωστικής συντήρησης: μέρος 1 τα βασικά της προγνωστικής συντήρησης</b>	<b>1</b>
1.1	Φιλοσοφίες συντήρησης	1
1.2	Εξέλιξη των φιλοσοφιών συντήρησης	4
1.3	Ταξινόμηση και συστάσεις μηχανημάτων εργοστασίων	7
1.4	Οι αρχές της προγνωστικής συντήρησης	9
1.5	Τεχνικές προγνωστικής συντήρησης	10
1.6	Ανάλυση ταλάντωσης - τεχνική κλειδί της προγνωστικής συντήρησης	11
<b>2</b>	<b>Τεχνικές προγνωστικής συντήρησης: μέρος 2 τα βασικά των ταλαντώσεων</b>	<b>15</b>
2.1	Σύστημα ελατηρίου-μάζας: μάζα, ακαμψία, απόσβεση	15
2.2	Αντίδραση συστήματος	17
2.3	Τι είναι η δόνηση;	18
2.4	Η φύση της ταλάντωσης	19
2.5	Αρμονική	25
2.6	Περιορισμοί και προδιαγραφές των ταλαντώσεων	32
<b>3</b>	<b>Απόκτηση δεδομένων</b>	<b>42</b>
3.1	Εισαγωγή	42
3.2	Η συλλογή σήματος ταλαντώσεων - μετατροπείς ταλαντώσεων, χαρακτηριστικών και βάσεων	42
3.3	Μετατροπή ταλαντώσεων σε ηλεκτρικό σήμα	58
3.4	Συμπέρασμα	80
<b>4</b>	<b>Επεξεργασία σήματος, εφαρμογές και αναπαραστάσεις</b>	<b>81</b>
4.1	Ανάλυση ταχέως μετασχηματισμού Fourier (FFT)	81
4.2	Ανάλυση κυματομορφής χρόνου	95
4.3	Ανάλυση του σήματος φάσης	100
4.4	Ειδικές διαδικασίες σήματος	102
4.5	Συμπέρασμα	132
<b>5</b>	<b>Διάγνωση Βλαβών Μηχανημάτων με τη χρήση της ανάλυσης ταλαντώσεων</b>	<b>133</b>
5.1	Εισαγωγή	133
5.2	Συνήθη σφάλματα μηχανημάτων που η διάγνωση τους γίνεται με την ανάλυση ταλαντώσεων	133
<b>6</b>	<b>Αποκατάσταση βλαβών που προκαλούν ταλαντώσεις</b>	<b>198</b>

	6.1	Εισαγωγή	198
	6.2	Εξισορρόπηση	198
	6.3	Ευθυγράμμιση	213
	6.4	Έλεγχος συντονισμού ταλαντώσεων με δυναμικούς απορροφητές	240
<b>7</b>		<b>Η ανάλυση λαδιού και σωματιδίων</b>	<b>245</b>
	7.1	Εισαγωγή	245
	7.2	Θεμελιώδεις αρχές λαδιού	247
	7.3	Συντήρηση Βασισμένη στην κατάσταση και ανάλυση λαδιού	251
	7.4	Η δημιουργία ενός προγράμματος ανάλυσης λαδιού	255
	7.5	Ανάλυση λαδιού - μέθοδοι δειγματοληψίας	261
	7.6	Ανάλυση λαδιού - ιδιότητες του λιπαντικού	274
	7.7	Η ανάλυση λαδιού - προσμίξεις στα λιπαντικά	284
	7.8	Τεχνικές ανάλυσης σωματιδίων	292
	7.9	Τα όρια συναγερμού για διάφορες μηχανές (πηγή: Εθνική Υπηρεσία Τριβολογίας) Συμπιεστές	323
	7.10	Επίλογος	325
<b>8</b>		<b>Άλλες Τεχνικές Προγνωστικής Συντήρησης</b>	<b>326</b>
	8.1	Εισαγωγή	326
	8.2	Υπέρηχοι	326
	8.3	Η υπέρυθρη θερμογραφία	336
	8.4	Επίλογος	344
		Βιβλιογραφία	345

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ: ΜΕΡΟΣ 1<sup>ο</sup>

### ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΤΗΣ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

#### 1.1 Φιλοσοφίες συντήρησης

Αν ήταν να κάνουμε μια έρευνα των φιλοσοφιών συντήρησης που χρησιμοποιούνται από διαφορετικές μονάδες επεξεργασίας θα παρατηρούσαμε μεγάλες ομοιότητες στη διαδικασία παρά τις τεράστιες διαφορές στη φύση των δραστηριοτήτων τους. Αυτές οι φιλοσοφίες συντήρησης μπορούν συνήθως να χωριστούν σε τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες:

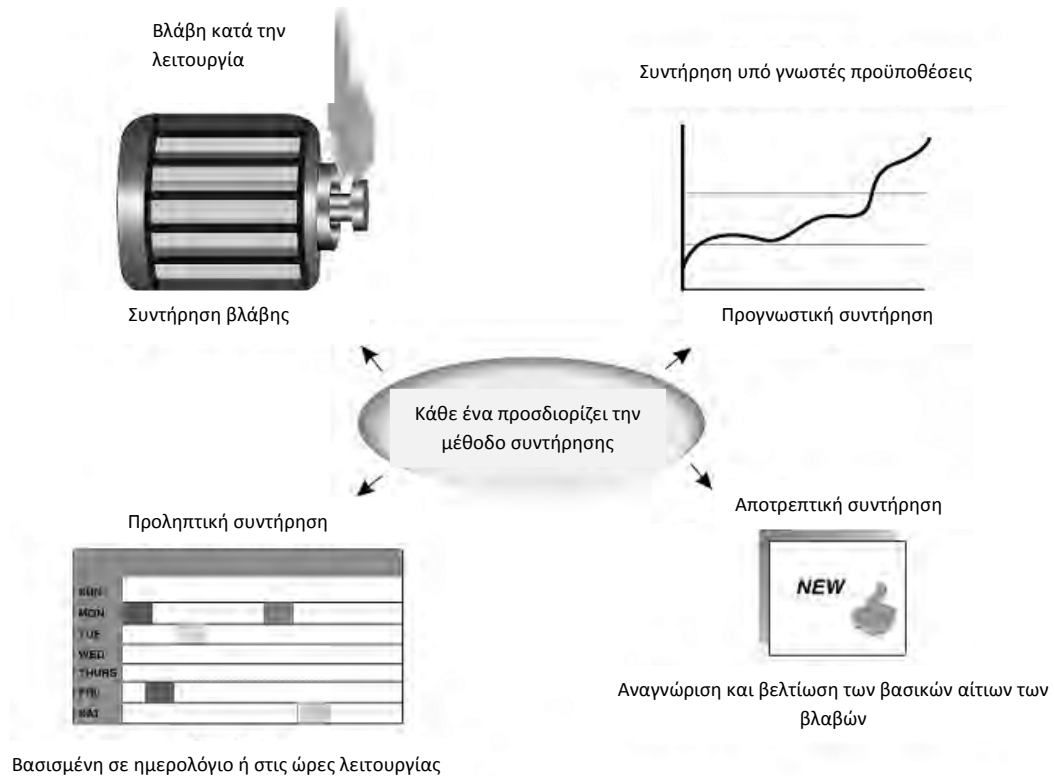
- Βλάβη ή συντήρηση βλάβης
- Χρονικά βασισμένη συντήρηση
- Προγνωστική ή συντήρηση υπό προϋποθέσεις
- Προβλεπτική συντήρηση

Οι κατηγορίες αυτές περιγράφονται συνοπτικά στο Σχήμα 1.1.

##### 1.1.1 Βλάβη ή συντήρηση βλάβης

Η βασική φιλοσοφία πίσω από την συντήρηση βλάβης είναι να επιτρέψουμε στα μηχανήματα να δουλέψουν μέχρι να παρουσιασθή βλάβη και να επισκευάσουμε ή να αντικαταστήσουμε τα πληγέντα εξαρτήματα λίγο πριν ή όταν ο εξοπλισμός σταματήσει να λειτουργεί εντελώς. Αυτή η προσέγγιση λειτουργεί καλά εάν η στάση λειτουργίας του εξοπλισμού δεν επηρεάζει την παραγωγή και αν το κόστος εργασίας και υλικών δεν έχει σημασία. Το μειονέκτημα είναι ότι το τμήμα συντήρησης λειτουργεί συνεχώς σε μια απρογραμμάτιστη κατάσταση «διαχείρισης κρίσεων». Όταν συμβαίνουν απροσδόκητες διακοπές της παραγωγής, οι εργασίες συντήρησης απαιτούν ένα μεγάλο απόθεμα ανταλλακτικών, ώστε να αντιδράσει άμεσα. Χωρίς αμφιβολία είναι ο πιο αναποτελεσματικός τρόπος για την διατήρηση μιας εγκατάστασης παραγωγής. Γίνονται μάταιες προσπάθειες για τη μείωση του κόστους με την αγορά φθηνότερων ανταλλακτικών και πρόσληψη περιστασιακής εργασίας που επιδεινώνει περαιτέρω το πρόβλημα.

Το προσωπικό σε τέτοιες περιπτώσεις έχει γενικά χαμηλό ηθικό διότι τείνει να είναι καταπονημένο, φτάνει στη δουλειά κάθε μέρα για να βρεθεί αντιμέτωπο με ένα μακρύ κατάλογο από ημιτελείς εργασίες και ένα σύνολο νέων εργασιών έκτακτης ανάγκης που συνέβησαν το προηγούμενο βράδυ.



**Σχήμα 1.1** Η φιλοσοφία της συντήρησης[1]

Παρά τις πολλές τεχνικές προόδους στη σύγχρονη εποχή, εξακολουθεί να μην είναι ασυνήθιστο να βρεθούν μονάδες παραγωγής που λειτουργούν με αυτή τη φιλοσοφία συντήρησης.

### 1.1.2 Προληπτική ή χρονικά βασισμένη συντήρηση

Η φιλοσοφία πίσω από την προληπτική συντήρηση είναι να προγραμματίζονται εργασίες συντήρησης σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, με βάση τις ημερολογιακές ημέρες ή ώρες λειτουργίας των μηχανών. Εδώ η επισκευή ή η αντικατάσταση του κατεστραμμένου εξοπλισμού πραγματοποιείται πριν τα προφανή προβλήματα συμβούν. Αυτή είναι μια καλή προσέγγιση για τον εξοπλισμό που δεν λειτουργεί συνεχώς, και όπου το προσωπικό έχει αρκετές ικανότητες-γνώσεις και το χρόνο για την εκτέλεση των προληπτικών εργασιών συντήρησης.

Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι η προγραμματισμένη συντήρηση μπορεί να οδηγήσει στην εκτέλεση των εργασιών συντήρησης πολύ νωρίς ή πολύ αργά. Ο εξοπλισμός βγαίνει για έλεγχο και συντήρηση σε ορισμένο αριθμό ωρών λειτουργίας. Είναι πιθανό ότι, χωρίς οποιαδήποτε ένδειξη λειτουργικής ανεπάρκειας, τα εξαρτήματα αντικαθίστανται όταν εξακολουθεί να υπάρχει κάποια υπολειπόμενη διάρκεια ζωής σε αυτά. Ως εκ τούτου, είναι αρκετά πιθανό ότι μπορεί να εμφανιστεί μειωμένη παραγωγή λόγω περιττής συντήρησης. Σε πολλές περιπτώσεις, υπάρχει επίσης η πιθανότητα της μειωμένης απόδοσης λόγω λανθασμένων μεθόδων επισκευής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, καλές μηχανές αποσυναρμολογούνται, καλά εξαρτήματα αφαιρούνται και απορρίπτονται, και νέα εξαρτήματα εγκαθίστανται λάθος με ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

### **1.1.3 Προγνωστική η συντήρηση υπό όρους**

Αυτή η φιλοσοφία αποτελείται από προγραμματισμό δραστηριοτήτων μόνο όταν ανιχνεύεται λειτουργική αστοχία. Οι μηχανικές και λειτουργικές συνθήκες εξετάζονται περιοδικά και όταν ανιχνεύονται ανθυγιεινές τάσεις, εντοπίζονται τα προβληματικά εξαρτήματα στη μηχανή και προγραμματίζεται συντήρηση. Η μηχανή στη συνέχεια τίθεται εκτός λειτουργίας όταν είναι πιο βολικό, και αντικαθίστανται τα κατεστραμμένα εξαρτήματα. Εάν δεν επισκευαστούν, αυτές οι βλάβες μπορεί να οδηγήσουν σε δαπανηρές δευτερογενείς βλάβες.

Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι ότι οι διαδικασίες συντήρησης μπορούν να προγραμματιστούν με μεθοδευμένο τρόπο. Αυτό επιτρέπει κάποιο χρονικό περιθώριο για να αγοραστούν ανταλλακτικά για τις αναγκαίες εργασίες επισκευής μειώνοντας έτσι την ανάγκη για ένα μεγάλο απόθεμα ανταλλακτικών. Αφού οι εργασίες συντήρησης εκτελούνται μόνο όταν χρειάζεται, υπάρχει μια πιθανή αύξηση της παραγωγής.

Ένα πιθανό μειονέκτημα είναι ότι οι εργασίες συντήρησης μπορούν πραγματικά να αυξηθούν λόγω εσφαλμένης εκτίμησης της φθοράς των μηχανημάτων. Για να παρακολουθηθούν οι ανθυγιεινές τάσεις των ταλαντώσεων, των θερμοκρασιών και της λίπανσης, απαιτείται να αποκτηθεί εξειδικευμένος εξοπλισμός που να παρακολουθεί αυτές τις παραμέτρους και η παροχή κατάρτισης στο προσωπικό (ή πρόσληψη ειδικευμένου προσωπικού).

Η εναλλακτική λύση είναι η ανάθεση του έργου αυτού σε έναν πεπειραμένο ανάδοχο για την εκτέλεση των εργασιών παρακολούθησης των μηχανημάτων.

Αν ένας οργανισμός λειτουργούσε με φιλοσοφία συντήρησης βλάβης ή προληπτικής συντήρησης η ομάδα παραγωγής και διαχείρισης της συντήρησης πρέπει αφενός να συμμορφώνεται προς αυτή τη νέα φιλοσοφία. Είναι πολύ σημαντικό η διοίκηση να



υποστηρίζει το τμήμα συντήρησης, παρέχοντας τον απαραίτητο εξοπλισμό μαζί με την κατάλληλη κατάρτιση του προσωπικού. Θα πρέπει να δοθεί στο προσωπικό αρκετός χρόνος για τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων και άδεια να μπορεί να κλείσει το μηχάνημα όταν εντοπίζονται προβλήματα.

### **1.1.4 Προβλεπτική συντήρηση**

Αυτή η φιλοσοφία δίνει κυρίως έμφαση στον εντοπισμό όλων των προβλημάτων-αποτυχιών με βάση την αιτία τους. Κάθε αποτυχία αναλύεται και λαμβάνονται προληπτικά μέτρα για να διασφαλιστεί ότι δεν θα επαναληφθεί. Χρησιμοποιεί όλες τις τεχνικές της προγνωστικής-προληπτικής συντήρησης που συζητήθηκαν παραπάνω σε συνδυασμό με την ανάλυση των αιτιών αποτυχίας (RCFA). Το RCFA ανιχνεύει και εντοπίζει τα προβλήματα που προκαλούν ελαττώματα. Διασφαλίζει ότι υιοθετούνται και υλοποιούνται οι κατάλληλες τεχνικές εγκατάστασης και επισκευής. Μπορεί επίσης να τονίσει την ανάγκη για επανασχεδιασμό ή την τροποποίηση του εξοπλισμού για την αποφυγή επανάληψης τέτοιων προβλημάτων. Όπως στο πρόγραμμα προγνωστικής συντήρησης, είναι δυνατόν να προγραμματιστούν επισκευές συντήρησης σε εξοπλισμό με μεθοδικό τρόπο, αλλά απαιτούνται επιπλέον προσπάθειες για βελτιώσεις με σκοπό τη μείωση ή την εξάλειψη των προβλημάτων που συμβαίνουν επανειλημμένως. Και πάλι, ο ομαλός προγραμματισμός της συντήρησης δίνει τον απαραίτητο χρόνο για να αγοραστούν ανταλλακτικά για τις απαραίτητες επισκευές. Αυτό μειώνει την ανάγκη για μεγάλα αποθέματα ανταλλακτικών, επειδή οι εργασίες συντήρησης εκτελούνται μόνο όταν αυτό απαιτείται. Επιπρόσθετες προσπάθειες καταβάλλονται για την διερεύνηση σε βάθος της αιτίας της αποτυχίας και για να καθοριστεί τρόπος για τη βελτίωση της αξιοπιστίας της μηχανής. Όλα αυτά τα στοιχεία οδηγούν σε σημαντική αύξηση της παραγωγικής ικανότητας.

Το μειονέκτημα είναι ότι χρειάζονται εξαιρετικά πεπειραμένοι εργαζόμενοι για την εφαρμογή της προβλεπτικής ή έξυπνης συντήρησης. Είναι επίσης πιθανό ότι μπορεί να χρειαστεί ανάθεση του έργου σε κάποιον πεπειραμένο ανάδοχο για να συνεργαστεί με το προσωπικό στη φάση του RCFA. Η προβλεπτική συντήρηση απαιτεί την προμήθεια εξειδικευμένου εξοπλισμού και κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό για την εκτέλεση όλων αυτών των καθηκόντων.

## **1.2 Εξέλιξη των φιλοσοφιών συντήρησης**

Η συντήρηση των μηχανημάτων στη βιομηχανία έχει εξελιχθεί από συντήρηση σε περίπτωση βλάβης σε χρονικά βασισμένη και σε προληπτική συντήρηση. Επί του παρόντος, είναι πιο δημοφιλής οι φιλοσοφίες της προγνωστικής και προβλεπτικής συντήρησης.

Η συντήρηση σε περίπτωση βλάβης ασκούνταν κατά τις πρώτες ημέρες της τεχνολογίας παραγωγής και ήταν αντιδραστικής φύσης. Ο εξοπλισμός αφηνόταν να λειτουργεί μέχρι να συμβεί μια λειτουργική αστοχία. Και συχνά παρατηρούνταν δευτερογενής βλάβη μαζί με την αρχική αποτυχία.

Αυτό οδήγησε σε χρονικά βασισμένη συντήρηση που ονομάζεται επίσης και προληπτική συντήρηση. Στην περίπτωση αυτή, ο εξοπλισμός έβγαινε από την παραγωγή για εξέταση μετά την ολοκλήρωση ενός ορισμένου αριθμού ωρών λειτουργίας, ακόμη και εάν δεν υπήρχε καμία υπόδειξη λειτουργικής ανεπάρκειας. Το μειονέκτημα αυτού του συστήματος ήταν ότι τα εξαρτήματα των μηχανημάτων αντικαθίστανται, ακόμη και αν υπάρχει κάποια λειτουργική διάρκεια ζωής σε αυτά. Η προσέγγιση αυτή, δυστυχώς, δεν μπορούσε να βοηθήσει στη μείωση του κόστους συντήρησης. Λόγω του υψηλού κόστους συντήρησης χρειάστηκε να τεθεί ένας προγραμματισμός συντήρησης με βάση την κατάσταση του μηχανήματος. Αυτό οδήγησε στην εξέλιξη της προγνωστικής συντήρησης και τις τεχνικές της.

Η προγνωστική συντήρηση απαιτεί εξοπλισμό για συνεχή παρακολούθηση του μηχανήματος για την ανίχνευση και τη διάγνωση ελαττωμάτων. Το έργο συντήρησης προγραμματίζεται και εκτελείται μόνο όταν ανιχνεύεται ελάττωμα. Σήμερα, η προγνωστική συντήρηση έχει φτάσει σε ένα εξελιγμένο επίπεδο στον τομέα της βιομηχανίας. Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 80' χρησιμοποιήθηκαν τα υπολογιστικά φύλλα αιτιολόγησης για την απόκτηση εγκρίσεων για προγράμματα συντήρησης που βασίζονται στην κατάσταση των μηχανημάτων. Ευτυχώς, αυτό δεν συμβαίνει πλέον. Τα πλεονεκτήματα της προγνωστικής συντήρησης είναι αποδεκτά στη βιομηχανία σήμερα, επειδή τα απτά οφέλη όσον αφορά την έγκαιρη προειδοποίηση για τα μηχανικά και τα κατασκευαστικά προβλήματα στα μηχανήματα είναι σαφή. Η μέθοδος αυτή θεωρείται σήμερα ως ένα ουσιαστικό εργαλείο ανίχνευσης και διάγνωσης και έχει μια ορισμένη επίδραση στη μείωση του κόστους συντήρησης λειτουργίας έναντι στάσης λειτουργίας για επισκευή και καθυστέρησης λόγω προμήθειας ανταλλακτικών. Στη συνεχή μεταποιητική βιομηχανία, όπως του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χάλυβα, χαρτιού, τσιμέντου, πετροχημικών, κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, αλουμινίου και άλλων, οι ποινές, ακόμη και για μία μικρή στάση λειτουργίας είναι τεράστιες. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται πάνω απ' όλα η υιοθέτηση της προγνωστικής συντήρησης. Με την πάροδο των χρόνων, η προγνωστική συντήρηση έχει βοηθήσει στη βελτίωση της παραγωγικότητας, τη ποιότητα των προϊόντων, της αποδοτικότητας και της συνολικής αποτελεσματικότητας των μονάδων παραγωγής. Η προγνωστική συντήρηση στην πραγματικότητα είναι μια φιλοσοφία που χρησιμοποιεί τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του εξοπλισμού και των συστημάτων των εργοστασίων για τη βελτιστοποίηση της συνολικής λειτουργίας αυτών. Έχει γενικά παρατηρηθεί ότι οι κατασκευαστές που προβαίνουν στο πρόγραμμα προγνωστικής συντήρησης αντιλαμβάνεται καλύτερα τα ειδικά προβλήματα του εξοπλισμού και στη συνέχεια προσπαθούν να

προσδιορίσουν τις βασικές αιτίες των αποτυχιών. Η τάση αυτή οδήγησε σε ένα εξελιγμένο είδος συντήρησης που ονομάζεται προβλεπτική συντήρηση.

Στην περίπτωση αυτή, οι υπηρεσίες συντήρησης λαμβάνουν επιπλέον χρόνο για να πραγματοποιήσουν εξισορρόπηση ακριβείας, πιο ακριβείς ευθυγραμμίσεις, να αλλάξουν τη συχνότητα συντονισμού στους σωλήνες, να τηρούν αυστηρά τον έλεγχο των αλλαγών των λαδιών κ.λπ. Αυτό εξασφαλίζει ότι θα εξαλειφθούν οι αιτίες που μπορεί να προκαλέσουν ελαττώματα στον εξοπλισμό τους στο μέλλον. Αυτή η εξέλιξη στη φιλοσοφία συντήρησης επέφερε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού, υψηλότερα επίπεδα ασφάλειας, τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων, μείωση του κόστους του κύκλου ζωής και τη μείωση καταστάσεων εκτάκτων αναγκών και αποφάσεων πανικού που προκαλούνται από μεγάλες και απρόσμενες μηχανικές αστοχίες.

Κοιτώντας όλα αυτά αντικειμενικά, μπορεί κανείς να απαριθμήσει τα οφέλη με τον ακόλουθο τρόπο:

- *Αύξηση της παραγωγικότητας της μηχανής:* με την εφαρμογή της προγνωστικής συντήρησης, μπορεί να είναι δυνατόν να εξαλείψει σχεδόν τον χρόνο διακοπής λειτουργίας των εργοστασίων λόγω απρόβλεπτων βλαβών του εξοπλισμού.
- *Επέκταση των διαστημάτων μεταξύ των γενικών επισκευών:* αυτή η φιλοσοφία συντήρησης παρέχει πληροφορίες που επιτρέπουν το προγραμματισμό δραστηριοτήτων συντήρησης ως κατ'ανάγκη επισκευές.
- *Μείωση του αριθμού «ανοίγματος, επιθεώρησης και επισκευής αν είναι απαραίτητο», ρουτινών αναμόρφωσης:* η προγνωστική συντήρηση εντοπίζει συγκεκριμένες ατέλειες και μπορεί έτσι να κάνει τις εργασίες συντήρησης πιο εστιασμένες, αντί να ερευνά όλες τις δυνατότητες για τον εντοπισμό των προβλημάτων.
- *Βελτίωση του χρόνου επισκευής:* αφού τα ειδικά προβλήματα του εξοπλισμού είναι γνωστά εκ των προτέρων, μπορούν να προγραμματιστούν οι εργασίες συντήρησης. Αυτό καθιστά τις εργασίες συντήρησης ταχύτερες και ομαλότερες. Καθώς οι μηχανές σταματούν πριν συμβούν βλάβες, δεν υπάρχει ουσιαστικά δευτερεύουσα ζημία, μειώνοντας έτσι το χρόνο επισκευής.
- *Αύξηση της ζωής του μηχανήματος:* ένα καλά διατηρημένο μηχάνημα γενικά διαρκεί περισσότερο.
- *Μπορούν να προσχεδιάζονται σωστά οι πόροι για τις επισκευές:* Η πρόβλεψη ελαττωμάτων του εξοπλισμού μειώνει το χρόνο ανίχνευσης μιας βλάβης, έτσι και το χρόνο υποβολής αναφοράς βλάβης, την ανάθεση της στο προσωπικό, την απόκτηση σωστών δεδομένων, την εξασφάλιση των αναγκαίων ανταλλακτικών, εργαλείων και άλλων αντικειμένων εξοπλισμού που απαιτούνται για την επισκευή.

- *Βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων:* συχνά, το συνολικό αποτέλεσμα της βελτιωμένης συντήρησης είναι βελτιωμένη ποιότητα του προϊόντος. Για παράδειγμα, οι ταλαντώσεις στις μηχανές χαρτιού έχει άμεση επίπτωση στην ποιότητά του.
- *Εξοικονόμηση κόστους συντήρησης:* μελέτες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή ενός σωστού σχεδίου συντήρησης έχει ως αποτέλεσμα την μέση εξοικονόμηση 20-25% στο άμεσο κόστος συντήρησης, σε συνδυασμό με το διπλάσιο της τιμής αυτής σε αυξημένη παραγωγή.

## **1.3 Ταξινόμηση και συστάσεις μηχανημάτων εργοστασίων**

### **1.3.1 Στρατηγική συντήρησης**

Οι προαναφερόμενες φιλοσοφίες συντήρησης έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και υλοποιούνται μετά τη διεξαγωγή μιας ανάλυσης κρισιμότητας του εργοστασιακού εξοπλισμού. Συνήθως, η ανάλυση κρισιμότητας κατηγοριοποιεί τον εξοπλισμό ως εξής:

- Κρίσιμος
- Απαραίτητος
- Γενικής κρίσεως

Ο κρίσιμος εξοπλισμός σε γενικές γραμμές επιλέγεται με τα ακόλουθα κριτήρια:

- Εάν η αποτυχία του μπορεί να επηρεάσει την ασφάλεια των εγκαταστάσεων.
- Τα μηχανήματα που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία της μονάδας και όπου ο τερματισμός θα περιορίσει τη διαδικασία παραγωγής.
- Κρίσιμα μηχανήματα περιλαμβάνουν αναπόσπαστες γραμμές μηχανημάτων και γραμμές μεγάλης ιπποδύναμης.
- Τα μηχανήματα αυτά έχουν υψηλό κόστος, και είναι πολύ ακριβά στην επισκευή τους (π.χ. στροβιλομηχανές υψηλής ταχύτητας ) ή παίρνει πολύ χρόνο η επισκευή τους.
- Πολυετείς "προβληματικές" ή μηχανές που χαλάνε με την παραμικρή πρόκληση σε μια λειτουργία εκτός της κανονικής.
- Τέλος, οι γραμμές μηχανημάτων όπου έχουν καλύτερη λειτουργία και μπορούν να εξοικονομήσουν ενέργεια ή να βελτιώσουν την παραγωγή.

Κατά πάσα πιθανότητα, για τον κρίσιμο εξοπλισμό υιοθετείται η προγνωστική και η προβλεπτική φιλοσοφία συντήρησης. Τα μέσα παρακολούθησης ταλάντωσης είναι εξοπλισμένα με δυνατότητες συνεχής παρακολούθησης για αυτά τα μηχανήματα. Ορισμένα συστήματα είναι ικανά να παρακολουθούν πολλά κανάλια ταυτόχρονα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ταχεία αξιολόγηση ολόκληρης της γραμμής μηχανημάτων.

Ο απαραίτητος εξοπλισμός επιλέγεται με τα ακόλουθα κριτήρια:

- Η αποτυχία τους μπορεί να επηρεάσει την ασφάλεια των εγκαταστάσεων.
- Τα μηχανήματα που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία της μονάδας και όπου ο τερματισμός τους θα περιορίσει μια λειτουργία της μονάδας ή και ένα μέρος της διαδικασίας της.
- Αν μπορούν ή δεν γίνεται να έχουν εγκατεστημένα ανταλλακτικά διαθέσιμα.
- Η εκκίνηση είναι δυνατή, αλλά μπορεί να επηρεάσει τη διαδικασία παραγωγής.
- Αν έχουν υψηλή ιπποδύναμη ή υψηλή ταχύτητα, αλλά δεν μπορούν να λειτουργούν συνεχώς.
- Ορισμένα μηχανήματα που απαιτούν χρονικά βασισμένη συντήρηση, όπως οι παλινδρομικοί συμπιεστές.
- Τα μηχανήματα αυτά απαιτούν μέτριες δαπάνες, τεχνογνωσία και χρόνο επισκευής.
- Πολυτελείς "προβληματικές" ή μηχανές χαλάνε σε συγκεκριμένο χρονικό όριο . Για παράδειγμα, οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες σε διαβρωτικό περιβάλλον.

Σε πολλές περιπτώσεις, υιοθετείται για τον εν λόγω εξοπλισμό η φιλοσοφία της προληπτικής συντήρησης, και μερικές φορές ακόμη και ένα λιγότερο εξελιγμένο πρόγραμμα προγνωστικής συντήρησης .Οι απαραίτητες μηχανές δεν χρειάζεται να έχουν τα ίδια όργανα και διαδικασία παρακολούθησης όπως οι κρίσιμες μηχανές. Τα συστήματα παρακολούθησης-ταλάντωσης που είναι εγκατεστημένα στα απαραίτητα μηχανήματα μπορούν να είναι σαρωτικού τύπου, όπου το σύστημα μεταβαίνει από έναν αισθητήρα στο επόμενο για να εμφανίσει τα επίπεδα εξόδου του αισθητήρα ένα-ένα.

Ο εξοπλισμός γενικής χρήσης κατηγοριοποιείται ως εξής:

- Η αποτυχία δεν επηρεάζει την ασφάλεια της εγκατάστασης.
- Δεν είναι κρίσιμης σημασίας για την παραγωγή των εγκαταστάσεων.
- Το μηχανήμα διαθέτει εγκατεστημένα ανταλλακτικά ή μπορεί να λειτουργήσει όταν χρειάζεται.
- Τα μηχανήματα αυτά απαιτούν χαμηλή έως μέτρια δαπάνη, εμπειρία και χρόνο επισκευής.
- Η δευτερογενής βλάβες δεν εμφανίζονται ή είναι ελάχιστες.

Συνήθως είναι αποδεκτό να υιοθετηθεί τη φιλοσοφία συντήρησης σε περίπτωση βλάβης, για τον εξοπλισμό γενικής χρήσης. Ωστόσο, σε σύγχρονες εγκαταστάσεις, τα μηχανήματα, ακόμα και αυτά που είναι γενικής χρήσης δεν αφήνονται στην τύχη.

Τα μηχανήματα αυτά δεν πληρούν τις προϋποθέσεις για να εγκατασταθούν μόνιμα όργανα ή συνεχές σύστημα παρακολούθησης. Συνήθως παρακολουθούνται με φορητά όργανα.

## 1.4 Οι αρχές της προγνωστικής συντήρησης

Η προγνωστική συντήρηση είναι μια προληπτική συντήρηση με γνώμονα την κατάσταση. Σε αυτή την περίπτωση δεν χρησιμοποιούνται στατιστικά της μέσης διάρκειας ζωής για τον προγραμματισμό των δραστηριοτήτων συντήρησης. Η προγνωστική συντήρηση παρακολουθεί την μηχανική κατάσταση, την απόδοση του εξοπλισμού και άλλες παραμέτρους και οι προσπαθεί να δώσει τον κατά προσέγγιση χρόνο μιας λειτουργικής αποτυχίας. Ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα προγνωστικής συντήρησης χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό των πιο οικονομικώς αποδοτικών εργαλείων για να αποκτήσει τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του εξοπλισμού και των συστημάτων του εργοστασίου. Τα χρονοδιαγράμματα συντήρησης επιλέγονται με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται. Για να αξιολογηθεί η κατάσταση του εξοπλισμού η προγνωστική συντήρηση χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές όπως η ανάλυση ταλαντώσεων, λαδιού και τη ανάλυση φθοράς συντριμμίων, υπέρηχους, θερμογραφία, αξιολόγηση επιδόσεων και άλλες τεχνικές.

Τεχνικές προβλεπτικής συντήρησης έχουν πραγματικά μια πολύ στενή αναλογία με τις ιατρικές διαγνωστικές τεχνικές. Όποτε ένα ανθρώπινο σώμα έχει ένα πρόβλημα, παρουσιάζει ένα σύμπτωμα. Το νευρικό σύστημα παρέχει την πληροφορία - αυτό είναι το στάδιο ανίχνευσης. Επιπλέον, εάν απαιτείται, γίνονται παθολογικές εξετάσεις για τη διάγνωση του προβλήματος. Με αυτό τον τρόπο, συνιστάται η κατάλληλη θεραπεία (βλέπε σχήμα 1.2).



**Σχήμα 1.2** Προγνωστική συντήρηση[1]

Με παρόμοιο τρόπο, τα ελαττώματα που συμβαίνουν σε μια μηχανή παρουσιάζουν πάντα ένα σύμπτωμα σε μορφή ταλάντωσης ή κάποια άλλη παράμετρο. Ωστόσο, αυτό μπορεί ή δεν μπορεί να ανιχνευτεί εύκολα στα μηχανολογικά συστήματα με την ανθρώπινη αντίληψη.

Εδώ βοηθούν οι τεχνικές προγνωστικής συντήρησης. Αυτές οι τεχνικές ανιχνεύουν τα συμπτώματα των ελαττωμάτων που έχουν παρουσιαστεί στις μηχανές και βοηθάει στη ακριβή διάγνωση των ελαττωμάτων που έχουν εμφανιστεί. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι επίσης δυνατό να εκτιμηθεί η σοβαρότητα των ελαττωμάτων.

Οι συγκεκριμένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται από τον τύπο του εξοπλισμού της μονάδας, τις επιπτώσεις τους στην παραγωγή ή άλλες βασικές παραμέτρους της λειτουργίας της εγκατάστασης. Περαιτέρω σημασία είναι οι στόχοι που σκοπεύει να επιτύχει το πρόγραμμα προγνωστικής συντήρησης.

## 1.5 Τεχνικές προγνωστικής συντήρησης

Υπάρχουν πολλές τεχνικές προγνωστικής συντήρησης, συμπεριλαμβανομένων των:

- a) *Παρακολούθηση ταλάντωσης*: Αυτή είναι αναμφίβολα η πιο αποτελεσματική τεχνική για να ανιχνευτούν μηχανικές βλάβες σε περιστροφικά μηχανήματα.
- b) *Ακουστική εκπομπή*: Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση, τον εντοπισμό και τη συνεχή παρακολούθηση των ρωγμών σε δομές και αγωγούς.
- c) *Ανάλυση λαδιού*: Εδώ, αναλύονται τα λιπαντικά και η εμφάνιση ορισμένων μικροσκοπικών σωματιδίων μπορεί να συνδεθεί με την κατάσταση των εδράνων και των γραναζιών.
- d) *Ανάλυση σωματιδίων*: Τα συντρίμια απελευθέρωσης των φθαρμένων εξαρτημάτων μηχανημάτων, σε παλινδρομικές μηχανές, κιβώτια ταχυτήτων ή υδραυλικά συστήματα. Η συλλογή και ανάλυση των συντριμμίων παρέχει ζωτικής σημασίας πληροφορίες σχετικά με την επιδείνωση των εν λόγω εξαρτημάτων.
- e) *Παρακολούθηση διάβρωσης*: Οι μετρήσεις πάχους με υπέρηχους διεξάγεται στους αγωγούς, υπεράκτιες κατασκευές και εξοπλισμό για να παρακολουθείτε η εμφάνιση διαβρωτικής φθοράς.
- f) *Θερμογραφία*: Η θερμογραφία χρησιμοποιείται για να αναλύει ενεργό ηλεκτρικό και μηχανολογικό εξοπλισμό. Αυτή η μέθοδος μπορεί να ανιχνεύσει θερμικές ή μηχανικές βλάβες σε γεννήτριες, εναέριες γραμμές, λέβητες, ευθυγραμμισμένους συνδέσμους και πολλά άλλα ελαττώματα. Μπορεί επίσης να ανιχνεύσει βλάβη των κυττάρων σε δομές από ανθρακονήματα σε αεροσκάφη.

g) *Παρακολούθηση απόδοσης*: Αυτή είναι μια πολύ αποτελεσματική τεχνική για να προσδιοριστούν λειτουργικά προβλήματα του εξοπλισμού. Η απόδοση των μηχανών παρέχει καλή εικόνα σχετικά με τις εσωτερικές συνθήκες τους.

Παρ'όλες αυτές τις μεθόδους, θα πρέπει να προειδοποιηθεί ότι υπήρξαν περιπτώσεις όπου τα προγράμματα προγνωστικής συντήρησης δεν ήταν σε θέση να προσδώσουν απτά οφέλη στην οργάνωση. Οι κυριότερες αιτίες που οδηγούν στην αποτυχία της προγνωστικής συντήρησης είναι η ανεπαρκής υποστήριξη της διαχείρισης, η κακή σχεδίαση, η έλλειψη εξειδικευμένου και εκπαιδευμένου εργατικού δυναμικού.

Κατά την ενεργοποίηση ενός προγράμματος προβλεπτικής συντήρησης, είναι πολύ σημαντικό να αποφασιστούν οι συγκεκριμένες τεχνικές που πρέπει να ληφθούν για την παρακολούθηση του εξοπλισμού της μονάδας. Οι διάφορες μέθοδοι εξαρτώνται επίσης από τον τύπο του κλάδου, τον τύπο των μηχανημάτων καθώς επίσης και σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα εκπαιδευμένου ανθρώπινου δυναμικού.

Είναι επίσης αναγκαίο να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι τεχνικές προβλεπτικής συντήρησης απαιτούν τεχνικά εξελιγμένα μέσα για να πραγματοποιηθεί η ανίχνευση και η διάγνωση των μηχανημάτων του εργοστασίου. Τα μέσα αυτά είναι γενικά πολύ ακριβά και χρειάζονται τεχνικά ικανούς ανθρώπους για να αναλυθεί η παραγωγή τους.

Οι επιπτώσεις του κόστους, είτε σε εξελιγμένα όργανα ή εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό, συχνά οδηγούν σε δίλλημα σχετικά με το σχέδιο της υιοθέτησης της φιλοσοφίας προγνωστικής συντήρησης.

Ωστόσο, με την υποστήριξη από την διοίκηση, επαρκείς επενδύσεις σε ανθρώπινο δυναμικό και εξοπλισμό, η προγνωστική συντήρηση μπορεί να αποδώσει πολύ καλά αποτελέσματα σε σύντομο χρονικό διάστημα.

## **1.6 Ανάλυση ταλάντωσης - τεχνική κλειδί της προγνωστικής συντήρησης**

### **1.6.1 Ανάλυση ταλαντώσεων (ανίχνευση)**

Η ανάλυση ταλαντώσεων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της λειτουργίας και τη μηχανική κατάσταση του εξοπλισμού. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι η ανάλυση ταλαντώσεων μπορεί να προσδιορίσει την ανάπτυξη προβλημάτων πριν γίνουν πολύ σοβαρά και να προκαλέσουν απρογραμμάτιστες διακοπές λειτουργίας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τακτική παρακολούθηση των ταλαντώσεων της μηχανής, είτε σε συνεχή βάση είτε σε προγραμματισμένα χρονικά διαστήματα. Η τακτική παρακολούθηση ταλάντωσης μπορεί να



ανιχνεύσει ελαττωματικά ρουλεμάν ή την επιδείνωση τους, μηχανική χαλαρότητα και φθαρμένα ή σπασμένα γρανάζια. Η ανάλυση ταλαντώσεων μπορεί επίσης να ανιχνεύσει την κακή ευθυγράμμιση και την ανισορροπία πριν φθαρουν τα ρουλεμάν ή οι άτρακτοι.

Οι τάσεις των επιπέδων των ταλαντώσεων μπορούν να προσδιορίσουν κακές πρακτικές συντήρησης, όπως ακατάλληλη εγκατάσταση και αντικατάσταση των εδράνων, ανακριβής ευθυγράμμιση των αξόνων ή ανακριβής εξισορρόπηση του ρότορα.

Όλα τα περιστρεφόμενα μηχανήματα παράγουν ταλαντώσεις που είναι συνάρτηση της δυναμικής της μηχανής, όπως η ευθυγράμμιση και η ισορροπία των περιστρεφόμενων εξαρτημάτων. Η μέτρηση του εύρους ταλάντωσης σε ορισμένες συχνότητες μπορεί να δώσει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την ακρίβεια της ευθυγράμμισης και της ισορροπίας της ατράκτου, την κατάσταση των ρουλεμάν ή των εργαλείων, καθώς και την επίδραση στη μηχανή λόγω συντονισμού από τα περιβλήματα, σωληνώσεις και άλλες δομές.

Η μέτρηση ταλαντώσεων είναι μία αποτελεσματική, μη παρεμβατική μέθοδος για την παρακολούθηση της κατάστασης της μηχανής κατά τη φάση της εκκίνησης, το κλείσιμο και την κανονική λειτουργία της. Η ανάλυση ταλαντώσεων χρησιμοποιείται κυρίως στον περιστρεφόμενο εξοπλισμό, όπως ατμοστρόβιλοι και αεριοστρόβιλοι, αντλίες, κινητήρες, συμπιεστές, μηχανήματα χαρτιού, ελασματουργεία, εργαλειομηχανές και κιβώτια ταχυτήτων.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία επιτρέπουν μια περιορισμένη ανάλυση του παλινδρομικού εξοπλισμού όπως μεγάλες μηχανές ντίζελ και παλινδρομικούς συμπιεστές. Τα μηχανήματα αυτά χρειάζονται και άλλες τεχνικές για την πλήρη παρακολούθηση της λειτουργίας τους. Ένα σύστημα ανάλυσης ταλαντώσεων αποτελείται συνήθως από τέσσερα βασικά μέρη:

1. Συλλέκτες σήματος, που ονομάζονται επίσης και μετατροπείς
2. Ένας αναλυτής σήματος
3. Λογισμικό ανάλυσης
4. Ένας υπολογιστής για την ανάλυση και την αποθήκευση των δεδομένων.

Αυτά τα βασικά εξαρτήματα μπορούν να ρυθμιστούν για να σχηματίσουν ένα συνεχές ηλεκτρονικό σύστημα, ένα περιοδικό σύστημα ανάλυσης με τη χρήση φορητού εξοπλισμού, ή ένα σύστημα πολυπλεξίας που παίρνει δείγματα από μια σειρά μετατροπέων σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα.

Τα συρματωμένα συστήματα και τα συστήματα πολυπλεξίας πιο ακριβά ανά θέση μέτρησης. Ο προσδιορισμός όσων αφορά πια ρύθμιση θα είναι πιο πρακτική και κατάλληλη εξαρτάται από την κρισιμότητα του εξοπλισμού, καθώς επίσης και την σημασία της συνεχούς ή ημισυνεχούς μέτρησης για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

### **1.6.2 Ανάλυση ταλαντώσεων (λειτουργία διάγνωσης)**

Οι χειριστές και οι τεχνικοί ανιχνεύουν συχνά ασυνήθιστους θορύβους ή κραδασμούς στο δάπεδο του χώρου εργασίας ή εργοστασίου όπου εργάζονται σε καθημερινή βάση. Για να προσδιοριστεί εάν ένα σοβαρό πρόβλημα υπάρχει στην πραγματικότητα, θα μπορούσε να προβεί σε μια ανάλυση ταλαντώσεων. Εάν ένα πρόβλημα πράγματι ανιχνευθεί, μπορούν να γίνουν επιπλέον φασματικές αναλύσεις για να καθοριστεί με ακρίβεια το πρόβλημα και να εκτιμηθεί πόσο καιρό το μηχάνημα μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί πριν δημιουργηθεί σοβαρή βλάβη. Οι μετρήσεις ταλαντώσεων στην λειτουργία ανάλυσης (διάγνωσης) μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτικό και για λιγότερο κρίσιμο εξοπλισμό, ιδιαίτερα εάν οι προϋπολογισμοί ή το εργατικό δυναμικό είναι περιορισμένα. Η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ανίχνευση ασυνήθιστων θορύβων ή τα επίπεδα ταλαντώσεων από κάποιον. Αυτή η προσέγγιση δεν είναι αξιόπιστη για μεγάλες ή πολύπλοκες μηχανές, ή σε θορυβώδη μέρη ενός εργοστασίου. Επιπλέον, ο χρόνος που χρειάζεται για να ανιχνευτεί το πρόβλημα, μπορεί να έχει προκληθεί ένα σημαντικό ποσό φθοράς ή βλάβης.

Μια άλλη εφαρμογή για την ανάλυση ταλαντώσεων είναι ένα τεστ αποδοχής για να βεβαιωθεί ότι η επισκευή του μηχανήματος έγινε σωστά. Η ανάλυση μπορεί να ελέγξει αν πραγματοποιήθηκε η σωστή συντήρηση ή εγκατάσταση σε ρουλεμάν και γρανάζια, ή αν η ευθυγράμμιση ή εξισορρόπηση γίνεται με τις απαιτούμενες ανοχές. Με την παρακολούθηση των μηχανημάτων μπορούν να ληφθούν πρόσθετες πληροφορίες, σε περιοδική βάση, για παράδειγμα, μια φορά το μήνα ή μία φορά ανά τρίμηνο. Με την περιοδική ανάλυση και των τάσεων των επιπέδων ταλαντώσεων μπορούν να προσφέρουν μια πιο λεπτή ένδειξη της επιδείνωσης των ρουλεμάν ή των γραναζιών, επιτρέποντας έτσι προσωπικό να προβάλλει την κατάσταση του μηχανήματος σε προβλεπτό μέλλον. Το συμπέρασμα είναι ότι οι επισκευές του εξοπλισμού μπορεί να προγραμματιστούν να ξεκινήσουν κατά τη διάρκεια της κανονικής διακοπής της λειτουργίας της μηχανής, και όχι μετά από μηχανική βλάβη που θα προκαλέσει απρογραμμάτιστες διακοπές λειτουργίας.

### **1.6.3 Ανάλυση ταλαντώσεων – οφέλη**

Η ανάλυση ταλαντώσεων μπορεί να προσδιορίσει τις κακές πρακτικές συντήρησης ή επισκευής. Αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν ακατάλληλη τοποθέτηση και αντικατάσταση των ρουλεμάν ανακριβής ευθυγράμμιση του άξονα ή ανακριβής εξισορρόπηση του ρότορα. Επειδή σχεδόν το 80% των κοινών προβλημάτων του περιστροφικού εξοπλισμού σχετίζεται με την κακή ευθυγράμμιση και την ισορροπία, η ανάλυση ταλαντώσεων είναι ένα σημαντικό εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειωθούν ή να εξαλειφθούν τα επαναλαμβανόμενα προβλήματα της μηχανής.

Οι τάσεις των επιπέδων ταλάντωσης μπορούν επίσης να προσδιορίσουν τις ατελέσφορες πρακτικές παραγωγής, όπως η χρήση εξοπλισμού πέρα από τις προδιαγραφές σχεδιασμού (υψηλότερες θερμοκρασίες, ταχύτητες ή φορτία) του.

Αυτές οι τάσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να συγκριθούν παρόμοιες μηχανές από διαφορετικούς κατασκευαστές προκειμένου να διαπιστωθεί εάν οι παροχές ή τα ελαττώματα σχεδιασμού αντικατοπτρίζονται σε αυξημένη ή μειωμένη απόδοση.

Τελικά, η ανάλυση ταλάντωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέρος ενός συνολικού προγράμματος για σημαντική βελτίωση της αξιοπιστίας του εξοπλισμού. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει πιο ακριβή ευθυγράμμιση και ζυγιστάθμιση, καλύτερης ποιότητας εγκαταστάσεις και επισκευές, και συνεχή τη μείωση του μέσου όρου των επιπέδων ταλάντωσης εξοπλισμού στο εργοστάσιο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

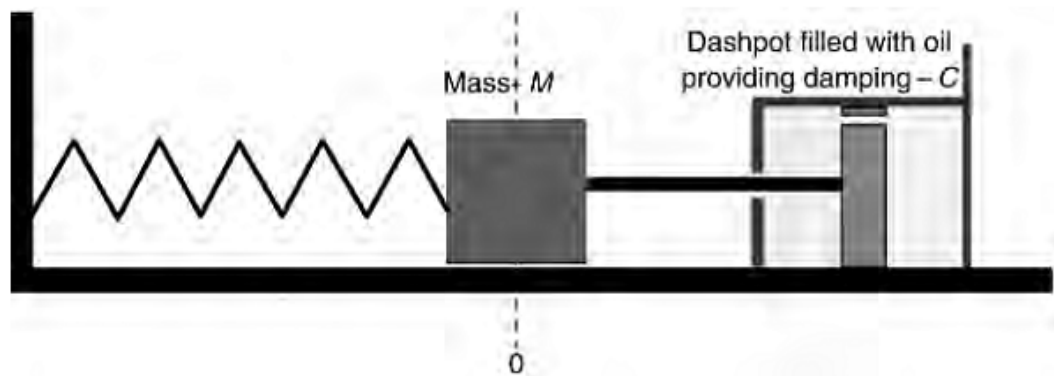
### ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ: ΜΕΡΟΣ 2°

#### ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΤΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ

##### 2.1 Σύστημα ελατηρίου-μάζας: μάζα, ακαμψία, απόσβεση

Για να αναγνωριστούν και επιλυθούν τα πολλά προβλήματα που συναντώνται κατά την μέτρηση και την ανάλυση των ταλαντώσεων, πρέπει να κατανοηθεί αρχικά πώς αντιδρά σε μία εξωτερική δύναμη ένα σύστημα ελατηρίου-μάζας-αποσβεστήρα.

Στο σχήμα 2.1 φαίνεται ένα σύστημα ελατηρίου-μάζας. Στο σύστημα αυτό υπάρχει μια μάζα  $M$  που στην δεξιά της πλευρά της συνδέεται με ένα έμβολο που έχει ένα μικρό διάκενο. Το έμβολο ολισθαίνει μέσα σε ένα περίβλημα γεμάτο με λάδι αυτό ονομάζεται μηχανισμός απόσβεσης και είναι παρόμοιο με τα αμορτισέρ που χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα.



**Σχήμα 2.1** Σύστημα ελατηρίου – μάζας[1]

Όταν μια εξωτερική δύναμη  $F$  κινεί τη μάζα  $M$  προς τα δεξιά, συμβαίνουν δύο πράγματα:

1. Το ελατήριο επιμηκώνεται.
2. Το λάδι από το δεξιό μέρος του εμβόλου κινείται προς το αριστερό μέρος μέσω του διακένου.

Μπορούμε να καταλάβουμε ότι η δύναμη  $F$ , προκειμένου να κινηθεί η μάζα, πρέπει να ξεπεράσει τρία πράγματα:

1. Την αδράνεια της μάζας  $M$
2. Την ακαμψία του ελατηρίου  $k$ .
3. Την αντίσταση λόγω εξαναγκασμένης ροής του λαδιού από το δεξιό προς το αριστερό μέρος του εμβόλου, ή με άλλα λόγια, την απόσβεση  $C$  του μηχανισμού απόσβεσης.

Όλα τα μηχανήματα/κατασκευές έχουν τις τρεις θεμελιώδεις ιδιότητες που συνδυάζονται για να καθορίσουν πως θα αντιδράσουν στις δυνάμεις που προκαλούν ταλαντώσεις, ακριβώς όπως στο σύστημα ελατηρίου-μάζας.

Οι τρεις θεμελιώδεις ιδιότητες είναι:

- a) Μάζα ( $M$ )
- b) Δυσκαμψία ( $k$ )
- c) Απόσβεση ( $C$ ).

Αυτές οι ιδιότητες είναι τα εγγενή χαρακτηριστικά μιας μηχανής ή κατασκευής με τα οποία θα αντισταθεί σε μία ταλάντωση.

- a) Μάζα: Η μάζα αντιπροσωπεύει την αδράνεια ενός σώματος να παραμείνει στην αρχική του κατάσταση. Μια δύναμη που προσπαθεί να επιφέρει αλλαγή σε αυτή την κατάσταση, η οποία αντιστέκεται από τη μάζα. Μετριέται σε χιλιόγραμμα ( $Kg$ ).
- b) Ακαμψία: Υπάρχει ένα συγκεκριμένο ποσό δύναμης που απαιτείται για να κάμψει ή να παραμορφώσει μια κατασκευή με ένα ορισμένο μήκος. Αυτό το μέτρο της δύναμης που απαιτείται για να προκληθεί μία ορισμένη παραμόρφωση ονομάζεται δυσκαμψία και μετριέται σε  $N / m$ .
- c) Απόσβεση: Οι κατασκευές και τα μέρη τους έχουν εγγενή χαρακτηριστικά που επιβραδύνουν την ταχύτητα που προκαλείται από εξωτερικές δυνάμεις. Αυτό το χαρακτηριστικό που μειώνει την ταχύτητα της κίνησης ονομάζεται απόσβεση και μετριέται σε  $N / (m / s)$ .

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αντίδραση ενός συστήματος σε μια εξωτερική δύναμη καθορίζεται από τον συνδυασμό των τριών αυτών χαρακτηριστικών.

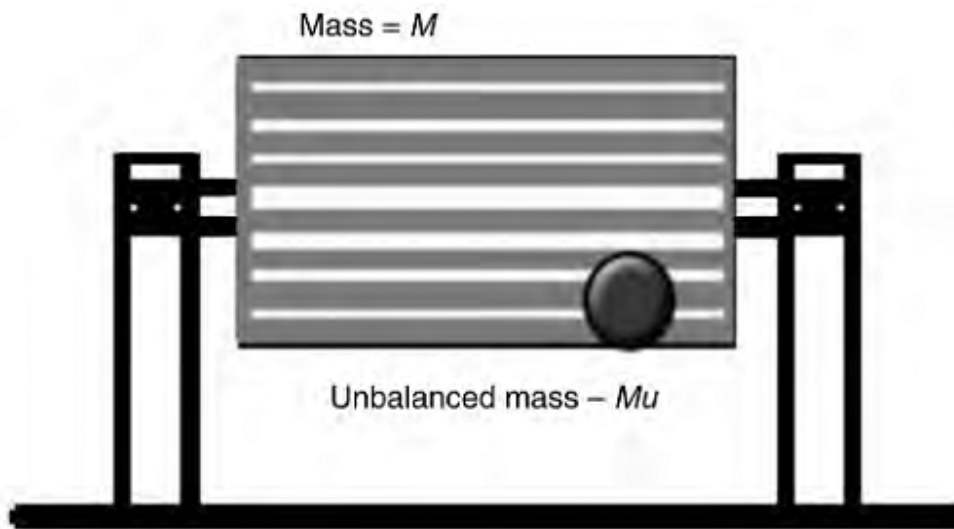
Με απλά λόγια, ένα ελάττωμα σε ένα μηχάνημα επιφέρει ταλάντωση. Η μάζα, η ακαμψία και η απόσβεση αντιστέκονται στις ταλαντώσεις που προκαλούνται από το ελάττωμα. Εάν οι ταλαντώσεις εξαιτίας των ελαττωμάτων είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι το καθαρό άθροισμα των τριών χαρακτηριστικών αντίστασης, το ποσό των προκυπτόντων ταλαντώσεων θα είναι υψηλότερο και το ελάττωμα μπορεί να εντοπιστεί.

## 2.2 Αντίδραση συστήματος

Θεωρήστε ένα σύστημα ρότορα (Σχήμα 2.2) που έχει μια μάζα  $M$  και υποστηρίζεται από δύο έδρανα. Η μάζα του ρότορα  $M$  θεωρείται συγκεντρωμένη μεταξύ των υποστηριζόμενων εδράνων και περιέχει μια ασύμμετρη μάζα ( $Mu$ ) που βρίσκεται σε μία σταθερή ακτίνα  $R$  και περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ , όπου:

$$\omega = 2 \pi \times \frac{rpm}{60}$$

rpm : στροφές ανά λεπτό



**Σχήμα 2.2** Η απόκριση του συστήματος ρότορα [1]

Η δύναμη ταλάντωσης που παράγεται από την ασυμμετρία της μάζας ( $Mu$ ) αντιπροσωπεύεται από:

$$F (\text{ανισορροπίας}) = Mu \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)$$

όπου  $t$  = χρόνος σε δευτερόλεπτα.

Η δύναμη αντίστασης που δημιουργείται από τα τρία χαρακτηριστικά του συστήματος είναι:

$$M x (\alpha) + C x (v) + k x (d)$$

όπου  $\alpha$  = επιτάχυνση,  $v$  = ταχύτητα,  $d$  = μετατόπιση.

Εάν το σύστημα είναι σε ισορροπία, οι δύο δυνάμεις είναι ίσες και η εξίσωση μπορεί να γραφεί ως:

$$M u \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) = M x (a) + C x (v) + k x (d)$$

Ωστόσο, στην πραγματικότητα οι δυνάμεις συγκράτησης δεν λειτουργούν σε συνδυασμό. Με κάποιες αλλαγές συνθηκών, ένας παράγοντας μπορεί να αυξηθεί, ενώ ένας άλλος μπορεί να μειωθεί. Στο καθαρό αποτέλεσμα μπορεί να εμφανιστεί μια μεταβολή στο άθροισμα αυτών των δυνάμεων.

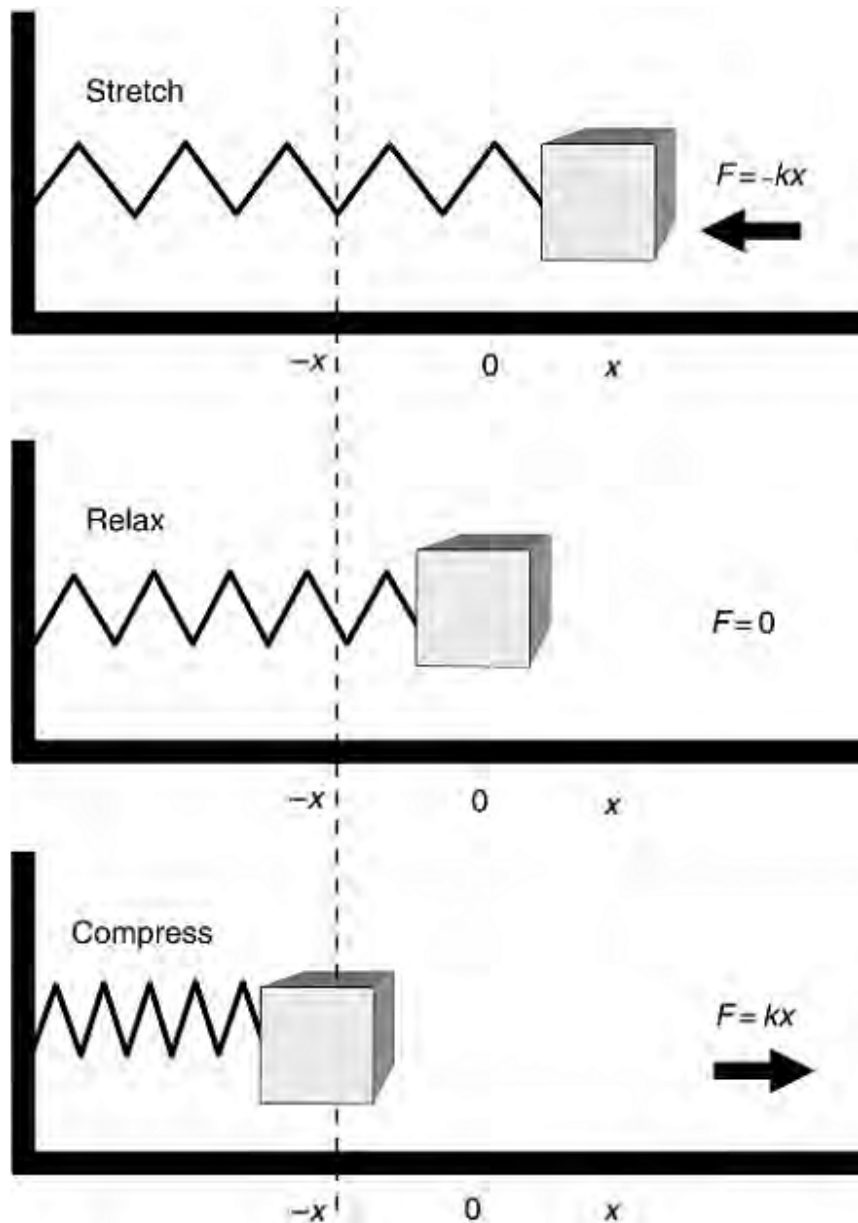
Αυτό με τη σειρά του διαφοροποιεί την απόκριση του συστήματος (επίπεδα ταλάντωσης) με δυνάμεις (ελαττώματα όπως ανισορροπίες που παράγουν ταλαντώσεις). Έτσι, η δόνηση που προκαλείται από την ασυμμετρία θα είναι μεγαλύτερη εάν το καθαρό άθροισμα των παραγόντων στην δεξιά πλευρά της εξίσωσης είναι μικρότερο από την δύναμη ασυμμετρίας. Έτσι, είναι πιθανό κάποιος να μην παρατηρήσει οποιαδήποτε ταλάντωση, αν το καθαρό σύνολο των παραγόντων της δεξιάς πλευράς γίνει κατά πολύ μεγαλύτερο από την δύναμη ασυμμετρίας.

### 2.3 Τι είναι η δόνηση;

Η δόνηση, με απλά λόγια, είναι η κίνηση μιας μηχανής ή μέρους της εμπρός και πίσω από τη θέση ηρεμίας.

Το πιο συνηθισμένο παράδειγμα είναι αυτό ενός σώματος μάζας  $M$  στο οποίο έχει συνδεθεί ένα ελατήριο δυσκαμψίας  $k$ . Δεν υπάρχει ταλάντωση, μέχρις ότου μια δύναμη εφαρμοσθεί στη μάζα  $M$  και την αναγκάσει να κινηθεί.

Στο Σχήμα 2.3 με την εφαρμογή μιας δύναμης στη μάζα, η μάζα κινείται προς τα αριστερά, συμπιέζοντας το ελατήριο. Όταν απελευθερώνεται η μάζα, κινείται πίσω στην ουδέτερη θέση του και στη συνέχεια ταξιδεύει περαιτέρω δεξιά μέχρι η τάση του ελατηρίου να την σταματήσει. Η μάζα στη συνέχεια γυρίζει προς τα πίσω και αρχίζει να κινείται πάλι προς τα αριστερά. Διασχίζει την ουδέτερη θέση και φτάνει στο αριστερό όριο. Αν δεν υπάρχει απόσβεση στο σύστημα και χωρίς εξωτερικές επιδράσεις (όπως η τριβή) αυτή η κίνηση μπορεί θεωρητικά να συνεχιστεί επ' άπειρον. Αυτή η κίνηση ονομάζεται ταλάντωση.



**Σχήμα 2.3** Η φύση της δόνησης [1]

## 2.4 Η φύση της ταλάντωσης

Σημειώνοντας τα χαρακτηριστικά των ταλαντώσεων ενός μηχανήματος μπορούμε να μάθουμε πολλά για την κατάσταση και τα πιθανά μηχανικά προβλήματα του. Τώρα μπορούμε να μάθουμε τα χαρακτηριστικά, τα οποία χαρακτηρίζουν ένα σήμα ταλάντωσης.



Αναφερόμενοι και πάλι στο σώμα μάζας-ελατηρίου, μπορούμε να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά των ταλαντώσεων με μια γραφική παράσταση της κίνησης της μάζας σε σχέση με το χρόνο. Αυτή η γραφική παράσταση φαίνεται στο Σχήμα 2.4.

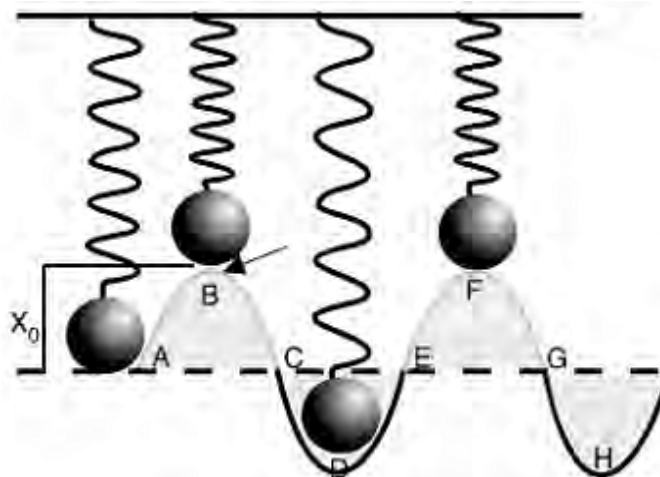
Η κίνηση της μάζας από την ουδέτερη θέση της, στο ανώτατο όριο της διαδρομής, πίσω στην ουδέτερη θέση, στο κάτω όριο της διαδρομής και η επιστροφή στην ουδέτερη θέση της, αντιπροσωπεύει έναν κύκλο κίνησης. Ένας κύκλος κίνησης περιέχει όλες τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για να μετρηθούν οι ταλαντώσεις του συστήματος. Η συνεχής κίνηση της μάζας απλά θα επαναλαμβάνει τον ίδιο κύκλο.

Αυτή η κίνηση ονομάζεται περιοδική και αρμονική, και η σχέση μεταξύ της μετατόπισης της μάζας και του χρόνου εκφράζεται υπό τη μορφή μίας ημιτονοειδούς εξίσωσης:

$$X = X_0 \sin \omega t$$

$X$  = μετατόπιση σε οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή  $t$ ,  $X_0$  = Μέγιστη μετατόπιση,  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ,  $f$  = συχνότητα (κύκλοι / s - hertz - Hz),  $t$  = χρόνος (δευτερόλεπτα).

Συχνότητα ( $\omega$ ) = 0,25 κύκλοι / s (15 κύκλοι/min rpm)					
Φάση	0	90	270	450	μοίρες
Χρόνος	1	2	4	6	δευτ/πτα



**Σχήμα 2.4** Απλό αρμονικό κύμα - θέση του ελατηρίου - κίνηση μάζας σε σχέση με το χρόνο[1]

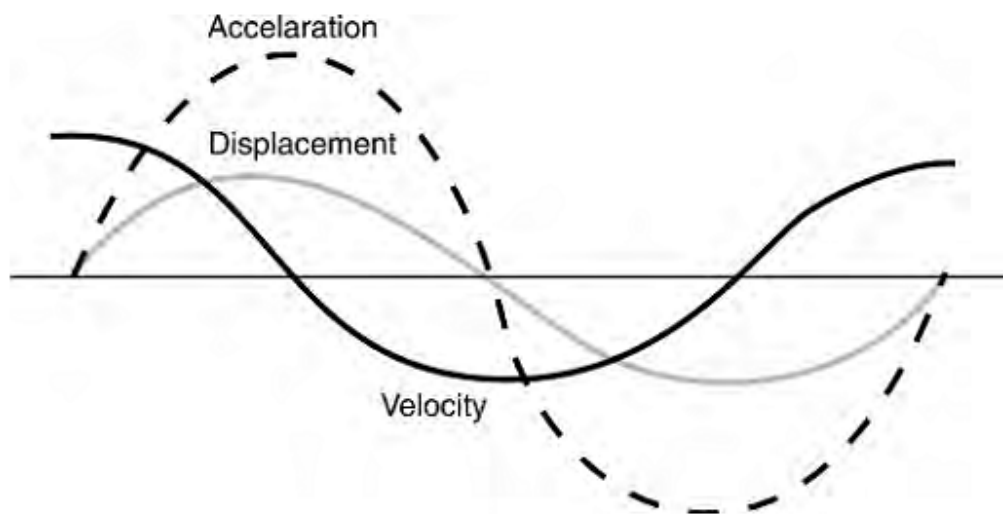
Καθώς η μάζα κινείται πάνω και κάτω, η ταχύτητα της αλλάζει από το μηδέν έως το ανώτατο όριο. Ταχύτητα μπορεί να ληφθεί από το χρόνο διαφοροποιώντας την εξίσωση μετατόπισης:

$$\text{ταχύτητα} = \frac{dX}{dt} = X_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t$$

Ομοίως, η επιτάχυνση της μάζας ποικίλλει και μπορεί να ληφθεί με διαφοροποίηση της εξίσωσης της ταχύτητας:

$$(\text{επιτάχυνση}) = \frac{d(\text{ταχύτητα})}{dt} = -X_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t$$

Στο Σχήμα 2.5: η μετατόπιση εμφανίζεται ως ημιτονοειδής καμπύλη, η ταχύτητα ως συνημιτονοειδής καμπύλη και η επιτάχυνση αντιπροσωπεύεται από μια ημιτονοειδής καμπύλη.



Acceleration: επιτάχυνση, Velocity: ταχύτητα, Displacement: μετατόπιση[1]

**Σχήμα 2.5** Κυματομορφή επιτάχυνσης, της ταχύτητας και της μετατόπισης της μάζας στην απλή αρμονική ταλάντωση

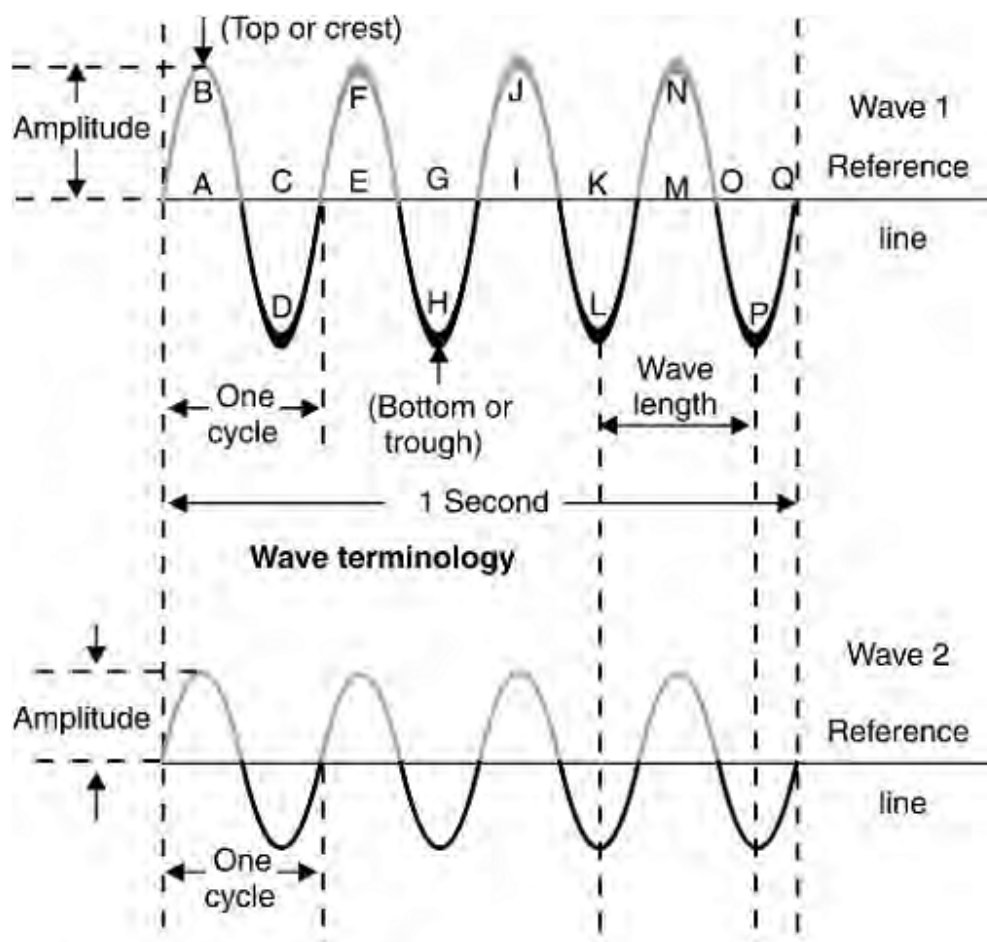
### 2.4.1 Βασικά των κυμάτων

Κατά την περιγραφή των κυματομορφών χρησιμοποιούνται συχνά όροι όπως κύκλος, συχνότητα, μήκος κύματος, εύρος και φάση. Θα συζητήσουμε τώρα αυτούς και άλλους όρους

διεξοδικά, δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται επίσης για να περιγραφεί η διάδοση των κυμάτων της ταλάντωσης.

Θα συζητήσουμε, επίσης για κυματομορφές, αρμονικές, μετασχηματισμούς Fourier και τιμές ταλαντώσεων, διότι αυτές είναι έννοιες που συνδέονται με τη διάγνωση της μηχανής με χρήση της μεθόδου ανάλυσης ταλαντώσεων.

Στο Σχήμα 2.6, τα κύματα 1 και 2 έχουν ίσες συχνότητες και μήκη κύματος αλλά διαφορετικό εύρος. Η γραμμή αναφοράς (η γραμμή μηδενικής μετατόπισης) είναι η θέση στην οποία θα ήταν ένα σωματίδιο ύλης αν δεν είχε διαταραχθεί από την κίνηση των κυμάτων.



Σχήμα 2.6 Σύγκριση των κυμάτων με διαφορετικά εύρη[1]

### 2.4.2 Συχνότητα (κύκλος)

Στο σημείο E, το κύμα αρχίζει να επαναλαμβάνει έναν δεύτερο κύκλο, ο οποίος ολοκληρώνεται στο σημείο I, έναν τρίτο κύκλο στο σημείο M, κ.λπ. Η κορυφή της θετικής εναλλαγής (μέγιστη τιμή πάνω από την γραμμή), μερικές φορές ονομάζεται λοφίο και η κορυφή της αρνητικής εναλλαγής (μέγιστη τιμή κάτω από την γραμμή) μερικές φορές ονομάζεται κάτω μέρος ή γούρνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Ως εκ τούτου, ένας κύκλος έχει ένα λοφίο και μια γούρνα.

### 2.4.3 Μήκος κύματος

Το μήκος κύματος είναι η απόσταση στον χώρο που καταλαμβάνεται από ένα κύκλο ενός εγκάρσιου κύματος σε οποιοδήποτε δεδομένη στιγμή. Εάν το κύμα μπορούσε να καταψυχθεί και να μετρηθεί, το μήκος κύματος θα ήταν η απόσταση από το εμπρόσθιο άκρο ενός κύκλου μέχρι το αντίστοιχο σημείο του επόμενου κύκλου. Τα μήκη κύματος, ανάλογα με το μέσο κυμαίνονται από μερικά εκατοστά της ίντσας σε εξαιρετικά υψηλές συχνότητες μέχρι και πολλά μίλια σε εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες. Στο Σχήμα 2.6 (κύμα 1), η απόσταση μεταξύ του A και E, ή B και F, κλπ, είναι ένα μήκος κύματος. Για τον συμβολισμό του μήκους κύματος συνήθως χρησιμοποιείται το ελληνικό γράμμα ( $\lambda$ ).

### 2.4.4 Εύρος

Δύο κύματα μπορεί να έχουν το ίδιο μήκος κύματος, αλλά η κορυφή του ενός μπορεί να ανέβει ψηλότερα από την κορυφή του άλλου, όπως για παράδειγμα, στα κύματα 1 και 2 στο σχήμα 2.6. Το ύψος ενός λοφίου κύματος πάνω από τη γραμμή αναφοράς ονομάζεται *εύρος του κύματος*. Το εύρος του κύματος δίνει μια σχετική ένδειξη της ποσότητας της ενέργειας που εκπέμπει το κύμα. Μια συνεχής σειρά των κυμάτων, όπως από το A μέχρι το Q, που έχουν το ίδιο πλάτος και μήκος κύματος, ονομάζεται *συρμός κυμάτων*.

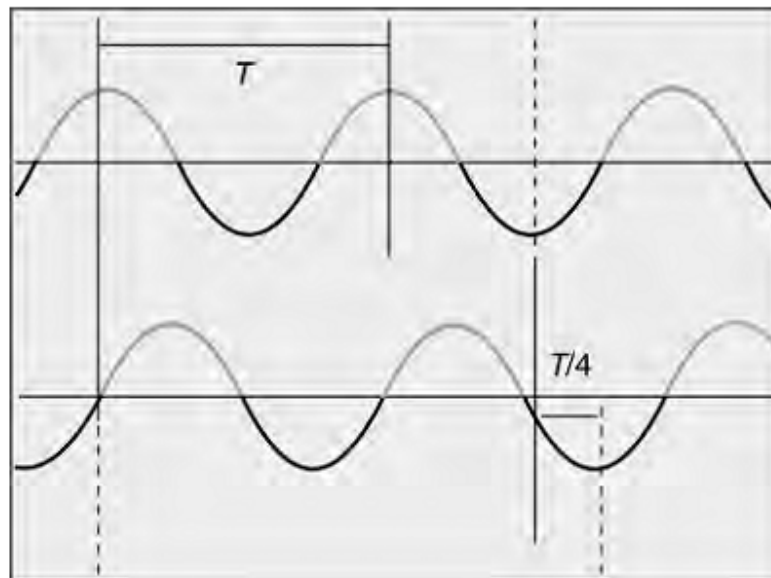
### 2.4.5 Συχνότητα και χρόνος

Όταν ένας συρμός κυμάτων περνά μέσα από ένα μέσο, ένας ορισμένος αριθμός μεμονωμένων κυμάτων περνούν ένα δεδομένο σημείο στη μονάδα του χρόνου. Για παράδειγμα, εάν ένας φελλός που βρίσκεται πάνω σε ένα κύμα νερού ανεβαίνει και πέφτει μια φορά κάθε δευτερόλεπτο, το κύμα κάνει μία ολόκληρη ταλάντωση κάθε δευτερόλεπτο. Ο αριθμός των ταλαντώσεων, ή κύκλων, ενός συρμού κυμάτων στη μονάδα χρόνου ονομάζεται *συχνότητα* του συρμού και μετριέται σε Hertz (Hz). Εάν πέντε κύματα περνούν από ένα σημείο σε ένα δευτερόλεπτο, η συχνότητα των κυμάτων είναι πέντε κύκλοι ανά δευτερόλεπτο. Στο Σχήμα 2.6, η συχνότητα των δύο κυμάτων 1 και 2 είναι τέσσερις κύκλοι ανά δευτερόλεπτο (οι κύκλοι ανά δευτερόλεπτο συμβολίζονται cps).

Το 1967, προς τιμήν του Γερμανού φυσικού Heinrich Hertz, ο όρος hertz ορίστηκε για χρήση αντί του όρου «κύκλοι ανά δευτερόλεπτο», όταν αναφέρεται στην συχνότητα των ραδιοφωνικών κυμάτων. Μπορεί να φαίνεται περίεργο ότι στη μια περίπτωση, χρησιμοποιείται ο όρος «κύκλος» για να ορίσει της θετικές και της αρνητικές εναλλαγές ενός κύματος, ενώ σε μία άλλη περίπτωση, χρησιμοποιείται ο όρος «hertz» για να ορίσει αυτό που φαίνεται ότι είναι το ίδιο πράγμα. Το κλειδί είναι ο παράγοντας χρόνος. Ο όρος κύκλος αναφέρεται σε οποιαδήποτε αλληλουχία γεγονότων, όπως οι θετικές και οι αρνητικές εναλλαγές, που περιλαμβάνει ένας κύκλος κάθε κύματος. Ο όρος hertz αναφέρεται στον αριθμό των περιστατικών που λαμβάνουν χώρα σε ένα δευτερόλεπτο.

### 2.4.6 Φάση

Αν λάβουμε υπόψη τα δύο κύματα, όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 2.7, διαπιστώνουμε ότι τα κύματα είναι ταυτόσημα σε εύρος και συχνότητα, αλλά οι κορυφές των κυμάτων αντισταθμίζονται από μια απόσταση  $T / 4$ . Αυτή η χρονική καθυστέρηση ονομάζεται *καθυστέρηση φάσης* και μετριέται με την γωνία φάσης.



**Σχήμα 2.7** Σχέση φάσης μεταξύ δύο παρόμοιων κυμάτων[1]

Μια χρονική καθυστέρηση  $T$  αντιστοιχεί σε γωνία φάσης  $360^\circ$ , έτσι μια χρονική καθυστέρηση  $T / 4$  αντιστοιχεί σε γωνία φάσης  $90^\circ$ .

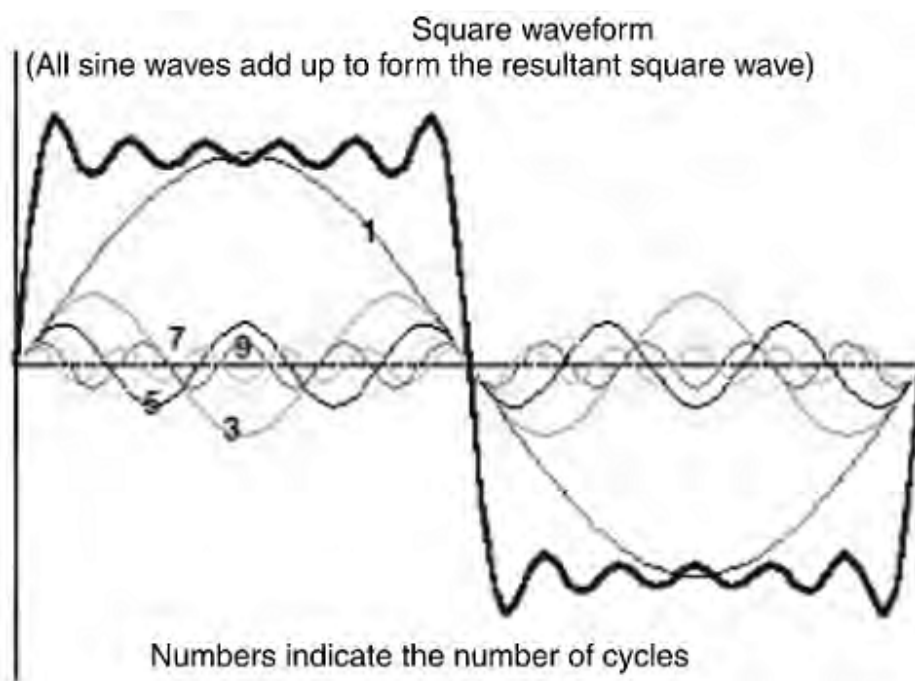
Κανονικά σε αυτή την περίπτωση θα περιγράφαμε τα δύο κύματα, ως εκτός φάσης κατά  $90^\circ$ .

## 2.4.7 Κυματομορφές

Είδαμε νωρίτερα στο θέμα της φύσης των ταλαντώσεων ότι η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση του συστήματος ελατηρίου-μάζας σε κίνηση μπορεί να απεικονιστούν από ημιτονοειδή και συνημιτονοειδή κύματα. Η *κυματομορφή* είναι μια οπτική αναπαράσταση (ή διάγραμμα) της στιγμιαίας τιμής της κίνησης συναρτήσει του χρόνου.

## 2.5 Αρμονική

Το σχήμα 2.8 απεικονίζει πολλές ενδιαφέρουσες κυματομορφές. Ας υποθέσουμε ότι η μετατόπιση παριστάνεται στον Y-άξονα. Δεδομένου ότι είναι μια αναπαράσταση συναρτήσει του χρόνου, ο X-άξονας θα είναι κλίμακας 1s.



**Σχήμα 2.8** Ενδιαφέρουσες κυματομορφές[1]

- Το πρώτο κύμα που πρέπει να παρατηρήσουμε είναι το [1]. Παριστάνεται από έναν κύκλο. Καθώς η κλίμακα του χρόνου είναι 1s, έχει συχνότητα 1 Hz.
- Το επόμενο κύμα που πρέπει να εξεταστεί είναι το [3]. Φαίνεται ότι έχει τρεις κύκλους κατά την ίδια περίοδο του πρώτου κύματος. Έτσι, έχει συχνότητα 3 Hz.
- Το τρίτο είναι το κύμα [5]. Εδώ μπορούν να ανιχνευθούν πέντε κύκλοι, και έτσι έχει συχνότητα 5 Hz.

- Το επόμενο είναι το κύμα [7]. Έχει επτά κύκλους και ως εκ τούτου, συχνότητα 7Hz.
- Το κύμα [9] είναι δίπλα με εννέα κύκλους και έχει συχνότητα 9 Hz.

Με αυτόν τον τρόπο παρατηρείται στο σχήμα μια περίεργη σειρά (1,3,5,7,9 ...) των κυμάτων. Μια τέτοια σειρά ονομάζεται περίεργη αρμονική της θεμελιώδους συχνότητας.

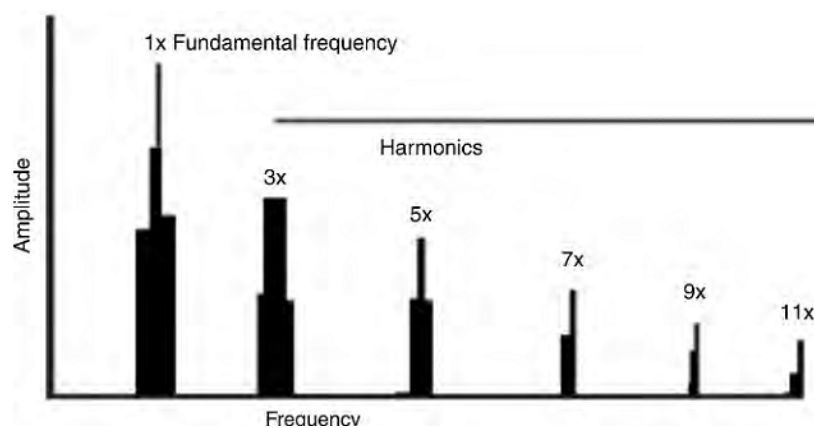
Αν ήταν να δούμε τις κυματομορφές με συχνότητες 1,2,3,4,5. . . Hz, τότε θα ήταν η αρμονική του πρώτου κύματος του ενός 1 Hz. Το πρώτο κύμα της σειράς ορίζεται συνήθως ως το κύμα με τη θεμελιώδη συχνότητα.

Επιστρέφοντας στο σχήμα, παρατηρείται, ότι αν προστεθούν οι θεμελιώδεις κυματομορφές με περίεργη αρμονική, το κύμα που προκύπτει φαίνεται στο σχήμα να μοιάζει σαν να έχει τετραγώνη κυματομορφή, η οποία είναι πιο πολύπλοκη.

Εάν μπορεί να προστεθεί μια σειρά ημιτονοειδών κυματομορφών για να σχηματίσει ένα κύμα με πολύπλοκη κυματομορφή, τότε είναι δυνατόν το αντίστροφο; Είναι δυνατόν και αυτό είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική που ονομάζεται μετασχηματισμός Fourier. Είναι μαθηματικός αυστηρή λειτουργία, η οποία μετατρέπει κυματομορφές από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων και αντίστροφα.

### 2.5.1 Ανάλυση Fourier

Η ανάλυση Fourier είναι ένας άλλος όρος για τον μετασχηματισμό ενός χρόνου κυματομορφής (Σχήμα 2.9) σε ένα φάσμα τιμών του εύρους συναρτήσεως της συχνότητας. Η ανάλυση Fourier μερικές φορές ονομάζεται και ανάλυση φάσματος, και μπορεί να γίνει με ένα γρήγορο αναλυτή μετασχηματισμού Fourier (FFT).



**Σχήμα 2.9** Ένας μετασχηματισμός Fourier του τετραγώνου κυματομορφής[1]

## 2.5.2 Συνολικό εύρος

Έχουμε δει πώς μοιάζει μια τετράγωνη κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου. Η κυματομορφή είναι μία εκπροσώπηση του στιγμιαίου εύρους της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης ως προς το χρόνο.

Το συνολικό επίπεδο των ταλαντώσεων της μηχανής είναι ένα μέτρο του συνολικού πλάτους δόνησης σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, και μπορεί να εκφραστεί σε επιτάχυνση, ταχύτητα ή μετατόπιση (Σχήμα 2.10).

Το συνολικό επίπεδο ταλαντώσεων μπορεί να μετρηθεί με έναν αναλογικό μετρητή ταλάντωσης, ή μπορεί να υπολογίζεται από το φάσμα της ταλάντωσης με πρόσθεση όλων των τιμών του εύρους του φάσματος σε ένα φάσμα συχνοτήτων.

Όταν συγκρίνουμε τα συνολικά επίπεδα ταλαντώσεων, είναι σημαντικό να βεβαιωθούμε ότι υπολογίζεται για την ίδια περιοχή συχνοτήτων.

## 2.5.3 Ορολογία ταλαντώσεων

Μετατόπιση ταλάντωσης (από κορυφή σε κορυφή).

Η συνολική απόσταση που διανύεται από ένα δονούμενο μέρος, από το ένα ακραίο όριο της διαδρομής προς το άλλο ακραίο όριο της διαδρομής ονομάζεται μετατόπιση «από κορυφή σε κορυφή».

- Σε μονάδες SI αυτό μετριέται συνήθως σε «μικρά» (1 / 1000 του χιλιοστού).
- Στις βρετανικές μονάδες που μετριέται σε «mils» ( 1 / 1000 της ίντσας).

Η μετατόπιση μερικές φορές αναφέρεται μόνο ως «αιχμή» (ISO 2372), η οποία είναι το μισό της «από κορυφή σε κορυφή».

## Ταχύτητα ταλαντώσεων (κορυφή)

Καθώς η παλλόμενη μάζα κινείται, η ταχύτητα αλλάζει. Όταν έρχεται σε ηρεμία και πριν αλλάξει κατεύθυνση τα άνω και κάτω όρια της κίνησης είναι μηδέν. Η ταχύτητα είναι μέγιστη όταν η μάζα περνά από την ουδέτερη θέση. Αυτή η μέγιστη ταχύτητα ονομάζεται μέγιστη ταχύτητα ταλάντωσης.

Μετριέται σε mm / s-rk ή ίντσες / s-rk (ips-rk).



## Ταχύτητα ταλάντωσης (rms)

Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO), ο οποίος καθιερώνει τις διεθνώς αποδεκτές μονάδες για τη μέτρηση της ταλάντωσης των μηχανημάτων, πρότεινε ως μονάδα μέτρησης την τετραγωνική ρίζα της ταχύτητας (rms). Αυτό αποφασίστηκε σε μια προσπάθεια να αντληθούν τα κριτήρια που θα προσδιορίσουν μια αποτελεσματική τιμή για την μεταβαλλόμενη συνάρτηση της ταχύτητας.

Η ταχύτητα - rms τείνει να παρέχει το ενεργειακό περιεχόμενο του σήματος δόνησης, ενώ η μέγιστη ταχύτητα συσχετίζεται καλύτερα με την ένταση της δόνησης. Μεγαλύτερη ταχύτητα - rms είναι γενικά πιο επιζήμια από μια παρόμοιου μεγέθους μέγιστη ταχύτητα.

*Crest factor.* Ο συντελεστής κορυφής μιας κυματομορφής είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της κυματομορφής προς την τιμή rms της κυματομορφής. Μερικές φορές ονομάζεται «αναλογία peak-to-rms». Ο συντελεστής κορυφής ενός ημιτονοειδούς κύματος είναι 1.414, δηλαδή η μέγιστη τιμή είναι 1.414 φορές η τιμή rms. Ο συντελεστής κορυφής είναι ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της κατάστασης μιας μηχανής.

## Επιτάχυνση ταλάντωσης (κορυφή)

Κατά τη συζήτηση για την ταχύτητα δόνησης, επισημάνθηκε ότι η ταχύτητα της μάζας πλησιάζει το μηδέν στα ακραία όρια της διαδρομής. Κάθε φορά που έρχεται σε στάση στο όριο της διαδρομής, θα πρέπει να επιταχύνει για να αυξήσει ταχύτητα ώστε να ταξιδέψει προς το αντίθετο όριο. Η επιτάχυνση ορίζεται ως ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας.

Αναφερόμενοι στο σύστημα ελατηρίου-μάζας, η επιτάχυνση της μάζας είναι μέγιστη στο ακραίο όριο της διαδρομής, όπου η ταχύτητα της μάζας είναι μηδέν. Καθώς η ταχύτητα προσεγγίζει την μέγιστη τιμή, η επιτάχυνση μειώνεται στο μηδέν και πάλι συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι την μέγιστη τιμή στο άλλο ακραίο όριο της διαδρομής.

Η επιτάχυνση κανονικά εκφράζεται σε g, η οποία είναι η επιτάχυνση που παράγεται από τη δύναμη της βαρύτητας στην επιφάνεια της γης. Η τιμή του g είναι  $9.80665 \text{ m / s}^2$ ,  $32.1739 \text{ ft / s}^2$  ή  $386.087 \text{ in / s}^2$ .

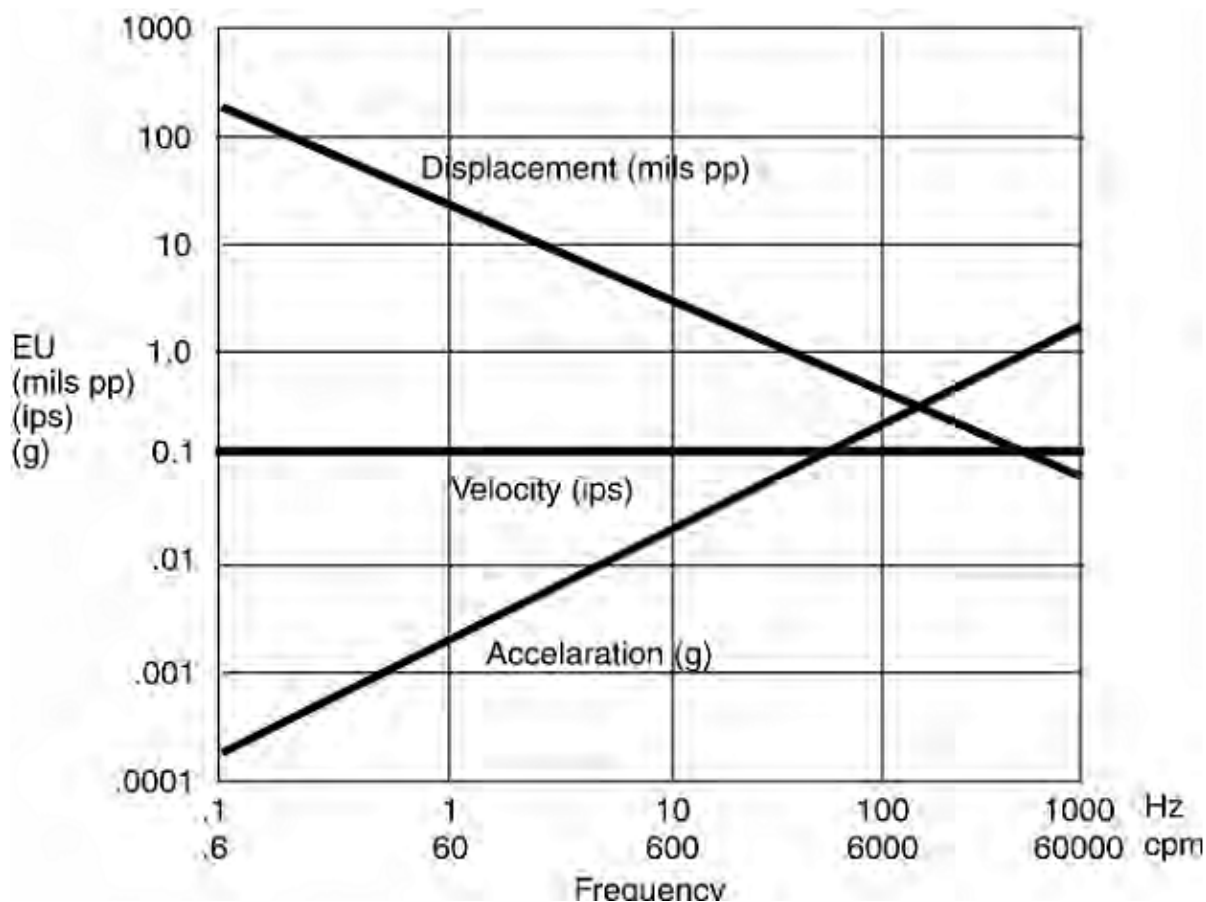
## **Μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση – Ποιά τιμή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί;**

Τα χαρακτηριστικά μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση της ταλάντωσης μετρούνται για τον προσδιορισμό της σοβαρότητας της ταλάντωσης και αναφέρονται συχνά ως «εύρος» της ταλάντωσης.

Από άποψη λειτουργίας της μηχανής, το εύρος ταλάντωσης είναι ο πρώτος δείκτης που υποδεικνύει πόσο καλή ή κακή μπορεί να είναι η κατάσταση της. Γενικώς, μεγαλύτερα εύροι ταλάντωσης αντιστοιχούν σε υψηλότερα επίπεδα ελαττωμάτων στα μηχανήματα.

Δεδομένου ότι το εύρος ταλάντωσης μπορεί να είναι είτε μετατόπιση, είτε ταχύτητα ή επιτάχυνση, το προφανές ερώτημα είναι, ποια παράμετρος πρέπει να χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της κατάστασης της μηχανής.

Η σχέση μεταξύ της επιτάχυνσης, της ταχύτητας και της μετατόπισης σε σχέση με το εύρος ταλάντωσης και την υγεία των μηχανημάτων επαναπροσδιορίζει τις τεχνικές που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των μετρήσεων και των δεδομένων. Η κίνηση κάτω από 10 Hz (600 cpm) παράγει πολύ λίγη δόνηση από την άποψη της επιταχύνσεως, μέτρια δόνηση από άποψη ταχύτητας και σχετικά μεγάλες δονήσεις από άποψη μετατόπισης (βλέπε σχήμα 2.11). Ως εκ τούτου, σε αυτό το εύρος χρησιμοποιείται η μετατόπιση.



**Σχήμα 2.11** Σχέσεις μεταξύ μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με σταθερή ταχύτητα. [1]

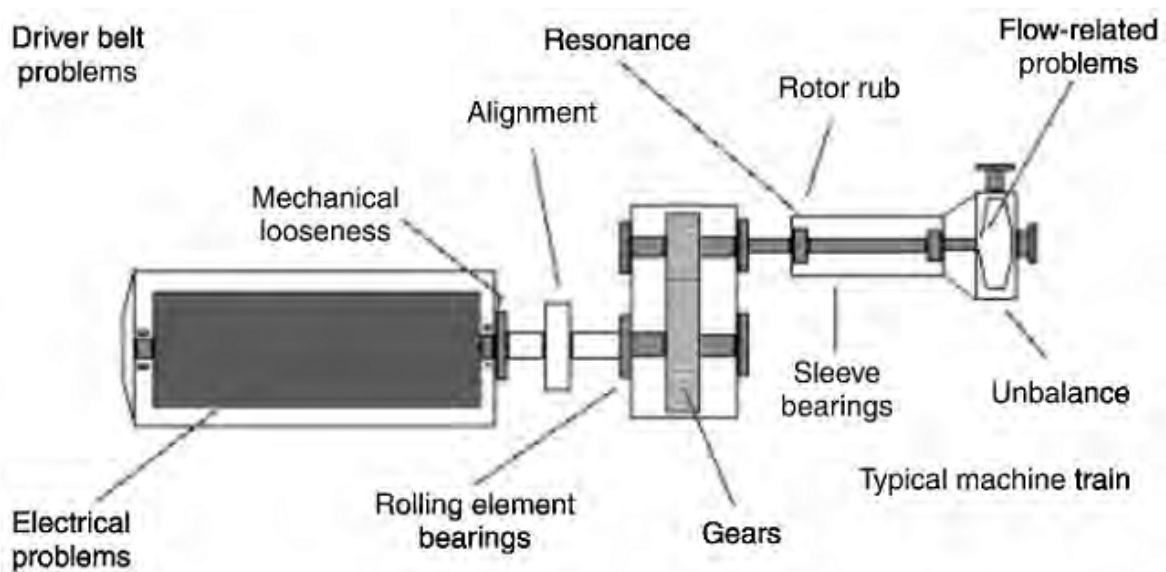
Στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων, οι τιμές της επιτάχυνσης είναι σημαντικότερες από αυτές της ταχύτητας και της μετατόπισης. Ως εκ τούτου, για συχνότητες πάνω από 1000 Hz (60 kcpm) ή 1500 Hz (90 kcpm), η προτιμώμενη μονάδα μέτρησης για τις ταλαντώσεις είναι η επιτάχυνση.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι μεταξύ 10 Hz (600 cpm) και 1000 Hz (60 kcpm) η ταχύτητα δίνει μια καλή ένδειξη της σοβαρότητας της ταλάντωσης, και πάνω από 1000 Hz (60 kcpm), η επιτάχυνση είναι ο μόνος καλός δείκτης.

Δεδομένου ότι η πλειοψηφία γενικά των μηχανημάτων περιστροφής (και των ελαττωμάτων τους) λειτουργούν στο εύρος 10-1000 Hz, συνήθως για την ανάλυση και τη μέτρηση των κραδασμών χρησιμοποιείται η ταχύτητα.

## 2.5.4 Χρησιμοποιώντας τη θεωρία της ταλάντωσης στην ανίχνευση σφαλμάτων των μηχανημάτων.

Στο Σχήμα 2.12, απεικονίζεται μια κοινή σειρά μηχανήματος. Αποτελείται από έναν οδηγό ή ένα κύριο κινητήριο μέσο, όπως ένα ηλεκτρικό μοτέρ. Άλλα κύρια κινητήρια μέσα περιλαμβάνουν πετρελαιοκινητήρες, κινητήρες αερίου, ατμοστρόβιλους και αεριοστρόβιλους. Ο κινούμενος εξοπλισμός θα μπορούσε να είναι αντλίες, συμπιεστές, μπετονιέρες, αναδευτήρες, ανεμιστήρες και άλλα. Κατά καιρούς, όταν ο κινούμενος εξοπλισμός πρέπει να κινείται σε ταχύτητες διαφορετικές από την κύρια κινητήρια δύναμη, χρησιμοποιείται ένα κιβώτιο ή ένας ιμάντας μετάδοσης κίνησης.



**Σχήμα 2.12** Ανίχνευση σφαλμάτων των μηχανημάτων[1]

Καθένα από αυτά τα περιστρεφόμενα μέρη αποτελείται περαιτέρω από απλά εξαρτήματα όπως:

- Στάτες (έλικες, διαφράγματα, διαχύτες, στάτες πόλους)
- Στροφεία (πτερωτές, ρότορες, λοβούς, βίδες, πτερύγια, ανεμιστήρες)
- Σφραγίδες
- Ρουλεμάν
- Ζεύξεις
- Γρανάζια
- Ζώνες.

Όταν αυτά τα εξαρτήματα λειτουργούν συνεχώς σε υψηλές ταχύτητες, η φθορά και η αποτυχία είναι επικείμενη. Όταν αναπτύσσονται ελαττώματα σε αυτά τα εξαρτήματα, οδηγούν σε υψηλότερα επίπεδα ταλάντωσης.

Με λίγες εξαιρέσεις, τα μηχανικά ελαττώματα σε μια μηχανή προκαλούν υψηλά επίπεδα κραδασμών.

Κοινά ελαττώματα που προκαλούν υψηλά επίπεδα κραδασμών στα μηχανήματα είναι:

- a) Ανισοσταθμίσεις σε περιστρεφόμενα μέρη
- b) Η μη σωστή ευθυγράμμιση των συνδέσμων και των ρουλεμάν
- c) Λυγισμένοι άξονες
- d) Φθαρμένα ή κατεστραμμένα γρανάζια και ρουλεμάν
- e) Κακής ποιότητας μίαντες μετάδοσης κίνησης και αλυσίδες
- f) Μεταβολές ροπής
- g) Ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις
- h) Αεροδυναμικές δυνάμεις
- i) Υδραυλικές δυνάμεις
- j) Χαλαρότητα
- k) Τρίψιμο
- l) Συντονισμός.

Για να γενικεύσουμε την παραπάνω λίστα, μπορούμε να πούμε ότι κάθε φορά που ένα ή περισσότερα τμήματα είναι ασύμμετρα, κακώς ευθυγραμμισμένα, χαλαρά, εκκεντρικά, εκτός ανοχής διαστάσεων, ελαττωματικά ή αντιδρούν σε κάποια εξωτερική δύναμη δημιουργούνται υψηλότερα επίπεδα ταλάντωσης.

Μερικά από τα κοινά ελαττώματα φαίνονται στο Σχήμα 2.12. Οι ταλαντώσεις που προκαλούνται από τα ελαττώματα εμφανίζονται σε συγκεκριμένες συχνότητες, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές των εξαρτημάτων, της λειτουργίας, της συναρμολόγησης και της φθορά τους.

Τα εύροι ταλάντωσης σε συγκεκριμένες συχνότητες είναι ενδεικτικά της σοβαρότητας των ελαττωμάτων. Η ανάλυση ταλαντώσεων στοχεύει να συσχετίσει την απόκριση ταλάντωσης του συστήματος με συγκεκριμένα ελαττώματα που εμφανίζονται στα μηχανήματα, στα εξαρτήματα τους ή ακόμα και σε μηχανικές κατασκευές.

## **2.6 Περιορισμοί και προδιαγραφές των ταλαντώσεων**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το εύρος ταλάντωσης (μετατόπιση, ταχύτητα ή επιτάχυνση) είναι μια ένδειξη της σοβαρότητας του ελαττώματος σε ένα μηχάνημα. Ένα κοινό πρόβλημα

για τους αναλυτές ταλαντώσεων είναι να διαπιστωθεί αν οι ταλαντώσεις είναι σε αποδεκτά επίπεδα για να επιτραπεί με ασφάλεια η περαιτέρω λειτουργία της μηχανής.

Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, είναι σημαντικό να έχουμε κατά νου ότι ο στόχος πρέπει να είναι η εφαρμογή τακτικών ελέγχων ταλαντώσεων για την ανίχνευση ελαττωμάτων σε πρώιμο στάδιο. Ο στόχος δεν είναι να καθοριστεί πόση ταλάντωση θα αντέξει ένα μηχάνημα πριν σταματήσει να λειτουργεί! Ο στόχος πρέπει να είναι να αποκτηθούν τα χαρακτηριστικά κραδασμών που μπορεί να προειδοποιούν για κάποιο επικείμενο πρόβλημα, ώστε να παρθούν μέτρα πριν την αστοχία.

Δεν είναι δυνατόν να υπάρξουν απόλυτες ανοχές ή όρια ταλάντωσης για κάθε δεδομένη μηχανή. Δηλαδή, είναι αδύνατο να οριστεί ένα όριο ταλάντωσης που θα οδηγήσει σε άμεση βλάβη του μηχανήματος όταν αυτό ξεπεραστεί. Οι εξελίξεις των μηχανικών βλαβών είναι πάρα πολύ σύνθετες για τη δημιουργία τέτοιων ορίων.





Ωστόσο, θα ήταν επίσης αδύνατον να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά οι κραδασμοί ως δείκτης της κατάστασης μηχανημάτων, εκτός εάν υπάρχουν ορισμένες αρχές, σύμφωνα με τις εμπειρίες όσων είναι εξοικειωμένοι με τις ταλαντώσεις στα μηχανήματα.

Έχουμε αναφερθεί νωρίτερα ότι η ταχύτητα είναι η πιο κοινή παράμετρος για την ανάλυση ταλαντώσεων, καθώς τα περισσότερα μηχανήματα και τα ελαττώματα τους δημιουργούν ταλαντώσεις στις συχνότητες που κυμαίνονται από 10 Hz (600 cpm) έως 1 kHz (60 kcpm).

### **2.6.1 ISO 2372**

Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο ως ένδειξη της δριμύτητας της ταλάντωσης είναι το ISO 2372 (BS 4675). Το πρότυπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστούν τα αποδεκτά επίπεδα ταλάντωσης για διάφορες κατηγορίες μηχανημάτων. Έτσι, για να χρησιμοποιηθεί το πρότυπο ISO, είναι απαραίτητο να ταξινομηθεί πρώτα η μηχανή. Διαβάζοντας όλο το γράφημα μπορεί να συσχετιστεί η σοβαρότητα της κατάσταση της μηχανής με την ταλάντωση. Το πρότυπο χρησιμοποιεί την παράμετρο της ταχύτητας-rms για να υποδείξει την σοβαρότητα. Τα γράμματα A, B, C και D, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13, κατατάσσουν τη σοβαρότητα.

ISO 2372 – ISO Guideline for Machinery Vibration Severity					
Ranges of Vibration severity		Examples of quality judgment for separate classes of machines			
Velocity – in/s – Peak	Velocity – mm/s – rms	Class I	Class II	Class III	Class IV
0.015	0.28	A	A	A	A
0.025	0.45	A	A	A	A
0.039	0.71	A	A	A	A
0.062	1.12	A	A	A	A
0.099	1.8	A	A	A	A
0.154	2.8	A	A	A	A
0.248	4.5	A	A	A	A
0.392	7.1	B	A	A	A
0.617	11.2	B	B	A	A
0.993	18	B	B	B	A
1.54	28	B	B	B	B
2.48	45	B	B	B	B
3.94	71	B	B	B	B

A – Good   
 B – Acceptable   
 C – Still acceptable   
 D – Not acceptable 

**Σχήμα 2.13** ISO 2372 - ISO κατευθυντήρια γραμμή για τη σοβαρότητα μηχανημάτων δόνησης.[1]

**Κατηγορία I** μεμονωμένα εξαρτήματα μηχανών και μηχανήματα αναπόσπαστα συνδεδεμένα με μια πλήρη μηχανή στην κανονική κατάσταση λειτουργίας τους (ηλεκτρικοί κινητήρες παραγωγής έως 15 kW αποτελούν τυπικά παραδείγματα μηχανημάτων σε αυτή την κατηγορία).

**Κατηγορία II** Μεσαίου μεγέθους μηχανές (συνήθως ηλεκτρικά μοτέρ με απόδοση 15-75 kW) χωρίς ειδικές θεμελιώσεις, σταθερά τοποθετημένοι κινητήρες ή μηχανές (μέχρι 300 kW) σε ειδικές βάσεις.

**Κατηγορία III** Κύριες μηχανές κίνησης και άλλες μεγάλες μηχανές με περιστρεφόμενες μάζες τοποθετούνται σε άκαμπτες και βαριές βάσεις, οι οποίες είναι σχετικά άκαμπτες στην κατεύθυνση της δόνησης.

**Κατηγορία IV** Κύριες μηχανές κίνησης και άλλες μεγάλες μηχανές με περιστρεφόμενες μάζες τοποθετούνται σε θεμέλια, τα οποία είναι σχετικά μαλακά στην κατεύθυνση της μέτρησης δονήσεων (για παράδειγμα - σετ στροβιλογεννήτριας, ειδικά εκείνα με ελαφριές υποδομές).

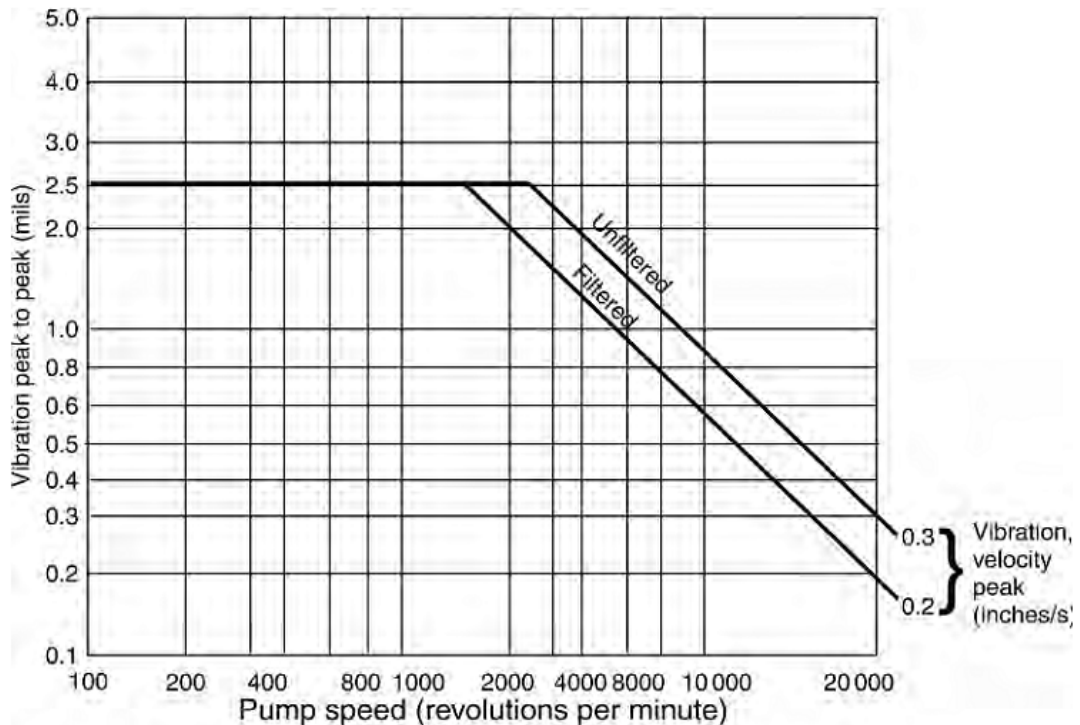
## American Petroleum Institute (API προδιαγραφές)

Το American Petroleum Institute (API) έχει καθορίσει μια σειρά από προδιαγραφές που αφορούν στροβιλομηχανές που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία πετρελαίου. Ορισμένες από τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί περιλαμβάνουν τις API-610, API-611, API-612, API-613, API-616 και API-617. Οι προδιαγραφές αυτές ασχολούνται κυρίως με τις πολλές πτυχές του σχεδιασμού μηχανημάτων, την εγκατάσταση, τις επιδόσεις αυτών των συστημάτων και την υποστήριξη τους. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης οι προδιαγραφές για την ισορροπία, την ποιότητα, τη δυναμική του ρότορα και τις ανοχές του στους κραδασμούς.

Τα πρότυπα API έχουν αναπτύξει όρια για το περίβλημα, καθώς και τις δονήσεις του άξονα (Σχήμα 2.14).

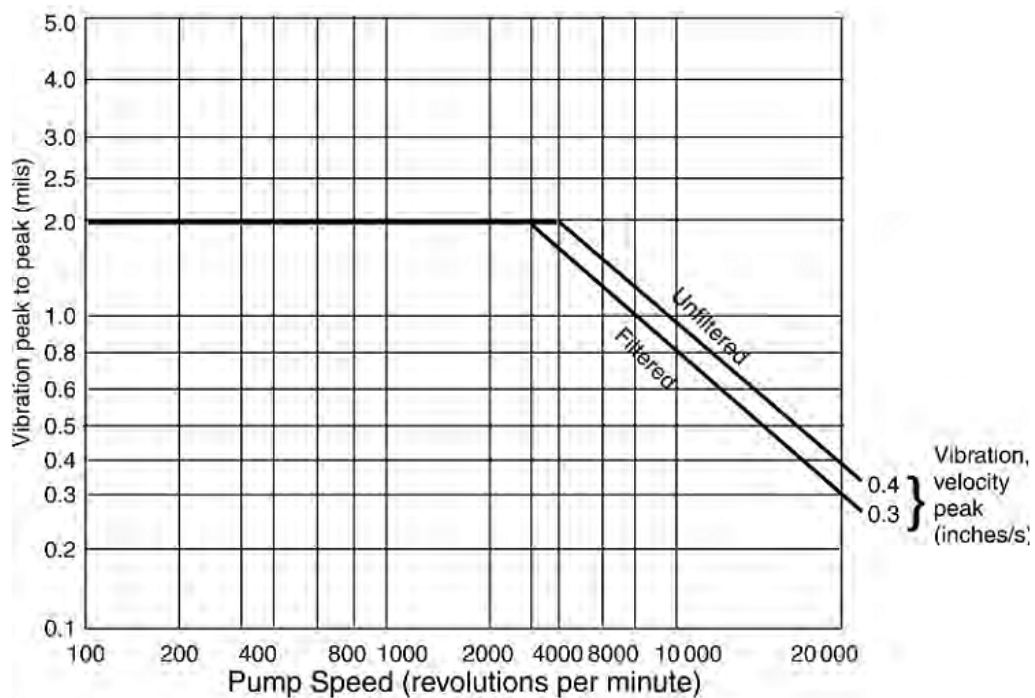
Η προδιαγραφή API για τα όρια των κραδασμών για μηχανές turbo είναι ευρέως αποδεκτή και ακολουθείται με φαινομενικά καλά αποτελέσματα.

Το πρότυπο API ορίζει ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση δόνησης ενός άξονα που μετράται σε mils (χιλιοστά της ίντσας = 0,001 inch = 0,0254 χιλιοστά) από κορυφή σε κορυφή δεν πρέπει να μεγαλύτερη από  $2,0 \text{ mils} \text{ ή } (12\ 000 / N)^{1/2}$ . Όπου N είναι η ταχύτητα της μηχανής, ανάλογα με το ποια είναι μικρότερη.



Bearing – housing vibration limits (anti-friction bearings)





Shaft vibration limits (sleeve bearings)

**Σχήμα 2.14** Τα όρια για κραδασμούς - API-610 φυγόκεντρες αντλίες σε λειτουργία διυλιστηρίου[1]

### Αμερικάνικη Ένωση Κατασκευαστών Γραναζιών (προδιαγραφές AGMA)

Το 1972, η AGMA διατύπωσε μια προδιαγραφή που ονομάζεται το πρότυπο AGMA για τη μέτρηση πλευρικών κραδασμών σε μειωτήρες υψηλών ταχυτήτων ελικοειδή και τύπου ψαροκόκαλου - AGMA 426,01 (το παρόν πρότυπο έχει πλέον αναθεωρηθεί στο AGMA 6000-B96).

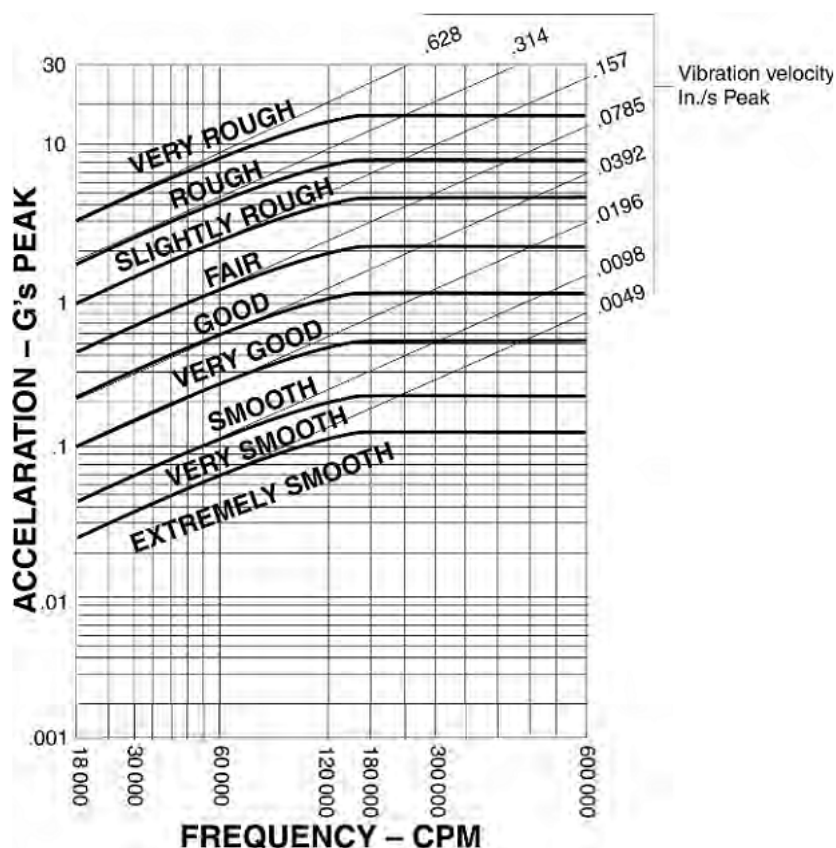
Παρουσιάζει μια μέθοδο για τη μέτρηση των γραμμικών δονήσεων σε ένα μειωτήρα. Συνιστά τα όργανα, τις μεθόδους μέτρησης, τις διαδικασίες δοκιμής και τα διακριτά όρια συχνότητας δονήσεων για τις δοκιμές αποδοχής. Επισυνάπτει μια λίστα αποτελεσμάτων σε συστήματα για τους κραδασμούς γραναζοκινήσεων και την απόκριση τους. Αναφέρονται επίσης οι δονήσεις των γραναζοκινήσεων κατά τη διάρκεια των δοκιμών αποδοχής.

## 2.6.2 Πρότυπα μηχανικής ανάλυσης δόνησης IRD.

### Διάγραμμα σοβαρότητας για γενικά μηχανήματα

Το διάγραμμα σοβαρότητας μηχανημάτων γενικής χρήσης (Σχήμα 2.15) ενσωματώνει τις μετρήσεις της ταχύτητας των κραδασμών μαζί με τις μετρήσεις μετατόπισης, όταν οι μετρήσεις του εύρους λαμβάνονται σε μονάδες του μετρικού συστήματος (microns-peak-peak ή mm/s-peak). Το διάγραμμα εξελίχθηκε μέσα από μια μεγάλη ποσότητα δεδομένων που η συλλογή τους έγινε από πολλά διαφορετικά μηχανήματα.

Στο διάγραμμα θα πρέπει να εφαρμόζονται μόνο φιλτραρισμένες μετρήσεις μετατόπισης (για μια συγκεκριμένη συχνότητα). Η συνολική ταχύτητα δόνησης μπορεί να εφαρμόζεται όταν οι γραμμές που χωρίζουν τις περιοχές σοβαρότητας είναι γραμμές σταθερής ταχύτητας. Το διάγραμμα χρησιμοποιείται για τις δονήσεις του περιβλήματος και δεν προορίζεται για τις δονήσεις άξονα.



Σχήμα 2.15 Διάγραμμα σοβαρότητας για γενικά μηχανήματα[1]

Το διάγραμμα ισχύει για μηχανήματα που είναι σταθερά τοποθετημένα ή βιδωμένα σε ένα αρκετά άκαμπτο θεμέλιο. Μηχανήματα τοποθετημένα σε ανθεκτικές αντικραδασμικές βάσεις, όπως ελατήρια ή μπλοκ από καουτσούκ έχουν γενικά υψηλότερα εύροι της δόνησης σε σχέση με μηχανήματα σε άκαμπτα συναρμολογημένα θεμέλια.

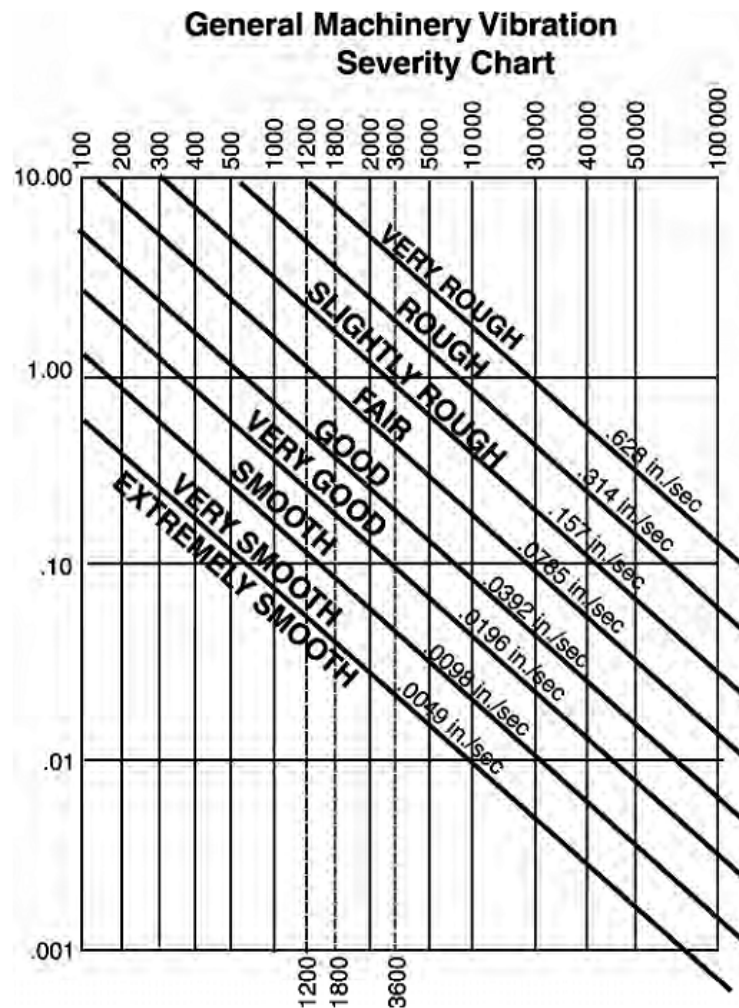
Ένας γενικός κανόνας είναι να επιτραπεί διπλάσια δόνηση για μια μηχανή τοποθετημένη σε μονωτές ταλαντώσεων. Δονήσεις υψηλής συχνότητας δεν θα πρέπει να υποβληθούν στα παραπάνω κριτήρια.

### **Γενικό διάγραμμα σοβαρότητας επιτάχυνσης δόνησης**

Το γενικό διάγραμμα σοβαρότητας επιτάχυνσης δόνησης χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου η δόνηση στα μηχανήματα μετράται σε μονάδες επιτάχυνσης (g-peak) (βλέπε σχήμα 2.16).

Για να παρέχεται ένα μέτρο σύγκρισης στο διάγραμμα περιλαμβάνονται γραμμές συνεχής ταχύτητας δόνησης, και μπορεί να σημειωθεί ότι για συχνότητες δόνησης κάτω 60000 rpm (1.000 Hz), οι γραμμές που χωρίζουν τις περιοχές σοβαρότητας έχουν σχετικά σταθερή ταχύτητα. Ωστόσο, οι περιοχές σοβαρότητας πάνω από αυτό το όριο, ορίζονται από σχεδόν σταθερές τιμές επιτάχυνσης.

Δεδομένου ότι η σοβαρότητα της επιτάχυνσης ταλάντωσης εξαρτάται από τη συχνότητα, μόνο οι φιλτραρισμένες αναγνώσεις επιτάχυνσης μπορούν να εφαρμοστούν στο διάγραμμα.



**Σχήμα 2.16** Διάγραμμα επιτάχυνσης της σοβαρότητας δόνησης - IRD mechnalysis[1]

### Ενδεικτικός οδηγός για τα όρια δονήσεων στις εργαλειομηχανές

Τα εύροι δόνησης εργαλειομηχανών πρέπει να είναι σχετικά χαμηλά προκειμένου να διατηρηθούν οι ανοχές και να παρέχουν αποδεκτές επιφάνειες φινιρίσματος στα τεμάχια.

Τα όρια δονήσεων στον παρακάτω πίνακα βασίστηκαν στην εμπειρία των κατασκευαστών και επιλέχθηκαν ως τυπικά όρια σύμφωνα με εκείνα που απαιτούνται προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι των εργαλειομηχανών.

Τα όρια αυτά θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μόνο ως οδηγοί – στα σύγχρονα μηχανήματα μπορεί να χρειαστούν ακόμη αυστηρότερα όρια για πιο αυστηρές προδιαγραφές κατεργασίας.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα όρια δόνησης είναι σε μονάδες μετατόπισης, ως πρωταρχική ανησυχία για δόνηση εργαλειομηχανών είναι η σχετική κίνηση μεταξύ του τεμαχίου και της αιχμής. Αυτή η σχετική κίνηση συγκρίνεται με την καθορισμένη επιφάνεια φινιρίσματος και τις ανοχές, τα οποία επίσης εκφράζονται σε μονάδες μετατόπισης.

Στην περίπτωση ενός σημαντικού μηχανήματος με μεγάλο χρόνο επισκευής, η απόφαση να διορθωθεί μια κατάσταση δόνησης είναι συχνά πολύ δύσκολο να παρθεί. Ως εκ' τούτου, κατά τον καθορισμό των αποδεκτών επιπέδων της κατάστασης των μηχανημάτων, λαμβάνονται υπόψη η εμπειρία και παράγοντες όπως η ασφάλεια, το κόστος εργασίας, ο χρόνος επισκευής και η κρισιμότητα του μηχανήματος.

Συνεπώς επαναλαμβάνουμε ότι τα πρότυπα θα πρέπει να είναι μόνο ένας δείκτης της κατάστασης της μηχανής και δεν αποτελεί βάση για την διακοπή της λειτουργίας του μηχανήματος. Αυτό που είναι εξαιρετικής σημασίας είναι ότι οι δονήσεις των μηχανών πρέπει να καταγράφονται και να συγκρίνονται με επιμέλεια.

Μετατόπιση των δονήσεων όπως διαβάζονται με αισθητήρα πάνω στην άτρακτο από το έδρανο περιβλήματος στην κατεύθυνση της κοπής.

Type of Machine	Tolerance Range (mils)
Grinders	
Thread grinder	0.01–0.06
Profile or contour grinder	0.03–0.08
Cylindrical grinder	0.03–0.10
Surface grinder (vertical reading)	0.03–0.2
Gardener or besly type	0.05–0.2
Centerless	0.04–0.1
Boring machine	0.06–0.1
Lathe	0.2–1

[1]

Μια ανοδική τάση είναι ιδιαίτερα ανησυχητική, ακόμη και όταν οι τιμές της ταχύτητας σύμφωνα με τα πρότυπα ακόμα είναι σε «καλά» επίπεδα. Ομοίως, μια μηχανή που λειτουργεί εδώ και χρόνια με τις τιμές της ταχύτητας να βρίσκονται σε «Μη αποδεκτά» επίπεδα δεν είναι πρόβλημα, αν δεν υπάρχει ανοδική τάση.

Όσοι έχουν εργαστεί στην παραγωγή για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα θα συμφωνήσουν ότι ακόμα και δύο παρόμοια μηχανήματα που κατασκευάζονται ταυτόχρονα από έναν

κατασκευαστή μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικά επίπεδα κραδασμών ακόμη και αν λειτουργούν συνεχώς χωρίς κανένα πρόβλημα. Κάποιος πρέπει να αποδεχθεί τους περιορισμούς αυτών των προτύπων, τα οποία δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα ευρύ φάσμα περίπλοκων μηχανημάτων. Ορισμένα μηχανήματα όπως μύλοι, σφυριά ή θραυστήρες πέτρας και άνθρακα ούτως ή άλλως θα έχουν υψηλότερα επίπεδα δόνησης.

Ως εκ' τούτου, οι τιμές που παρέχονται από αυτούς τους οδηγούς θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο αν η εμπειρία, τα αρχεία συντήρησης και η ιστορία τους αποδείχθηκε ότι είναι έγκυρη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### Απόκτηση δεδομένων

#### 3.1 Εισαγωγή

Τα θέματα που συζητήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες ήταν θεωρητικού χαρακτήρα, εισάγοντας τα βασικά στοιχεία της ταλάντωσης. Με την απόκτηση δεδομένων, κάνουμε τα πρώτα βήματα στον τομέα της πρακτικής ανάλυσης ταλαντώσεων. Περιλαμβάνει τα ακόλουθα κύρια καθήκοντα:

- Συλλογή των δεδομένων ταλάντωσης των μηχανημάτων
- Μετατροπή του σήματος ταλάντωσης σε ένα ηλεκτρικό σήμα
- Μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος στις συνιστώσες του
- Παροχή πληροφοριών και τεκμηρίωσης που σχετίζονται με τα δεδομένα των ταλαντώσεων.

Το παραπάνω συνεπάγεται όλο το υλικό του συστήματος ή προγράμματος ανάλυσης ταλαντώσεων. Περιλαμβάνει μετατροπείς, τα ηλεκτρονικά μέσα που αποθηκεύουν και να αναλύουν τα δεδομένα, το λογισμικό που βοηθά στην ανάλυση των ταλαντώσεων, την τήρηση αρχείων και τεκμηρίωση.

#### 3.2 Η συλλογή σήματος ταλαντώσεων - μετατροπείς ταλαντώσεων, χαρακτηριστικών και βάσεων

Για τη μέτρηση της ταλάντωσης των μηχανημάτων ή την δομική ταλάντωση, χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ή ένας συλλέκτης ταλάντωσης.

Ο μετατροπέας είναι μια συσκευή η οποία μετατρέπει έναν τύπο ενέργειας, όπως ταλάντωση, σε ένα διαφορετικό τύπο ενέργειας, συνήθως σε ηλεκτρικό ρεύμα ή τάση.

Οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι συλλέκτες ταχύτητας, επιταχυνσιόμετρα ή ανιχνευτές εγγύτητας. Κάθε τύπος του αισθητηρίου έχει σαφή πλεονεκτήματα για ορισμένες εφαρμογές, αλλά όλα έχουν περιορισμούς. Κανένας μετατροπέας μόνος του δεν ικανοποιεί όλες τις ανάγκες μέτρησης. Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα για κάθε εφαρμογή είναι η επιλογή του αισθητηρίου που είναι το καταλληλότερο για τη δουλειά.

Οι διάφοροι μετατροπείς ταλαντώσεων συζητούνται παρακάτω.

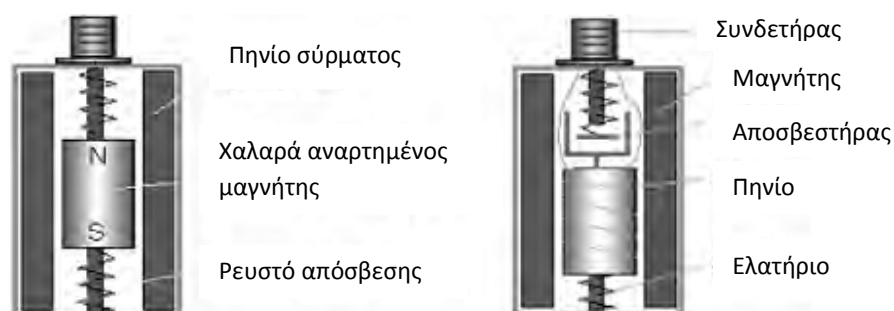
### 3.2.1 Συλλέκτης ταχύτητας

Ο συλλέκτης ταχύτητας είναι ένα πολύ κοινό αισθητήριο για τον έλεγχο της ταλάντωσης περιστροφικών μηχανημάτων. Αυτό το είδος του μετατροπέα ταλαντώσεων συνδέεται εύκολα στους περισσότερους αναλυτές, και είναι μάλλον φθηνός σε σύγκριση με άλλους αισθητήρες.

Για τους λόγους αυτούς, ο μετατροπέας ταχύτητας είναι ιδανικός για εφαρμογές παρακολούθησης σε μηχάνημα γενικής χρήσης. Οι συλλέκτες ταχύτητας χρησιμοποιούνται ως μετατροπείς ταλαντώσεων για περιστροφικές μηχανές για ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, και χρησιμοποιούνται για μια ποικιλία εφαρμογών σήμερα. Οι συλλέκτες ταχύτητας είναι διαθέσιμοι για πολλές διαφορετικές φυσικές διαμορφώσεις και ευαισθησίες εξόδου.

### 3.2.2 Θεωρία λειτουργίας

Όταν ένα πηνίο από σύρμα κινείται μέσω ενός μαγνητικού πεδίου (Σχήμα 3.1), επάγεται τάση κατά μήκος των άκρων των συρμάτων του πηνίου. Η μεταφορά ενέργειας από τη ροή του πεδίου του μαγνήτη προς το πηνίο σύρματος παράγει την επαγόμενη τάση. Καθώς η σπείρα εξαναγκάζεται με δονητική κίνηση διαμέσου του μαγνητικού πεδίου, παράγεται ένα σήμα τάσης που συσχετίζεται με την ταλάντωση.



**Σχήμα 3.1** Δύο είναι οι βασικοί τύποι συλλεκτών ταχυτήτων που μας απασχολούν για την αρχή της κίνησης του μαγνήτη-σε-πηνίο και του πηνίου-σε-μαγνήτη[1]

Ο τύπος του αισθητήρα μαγνήτη σε πηνίο αποτελείται από τρεις συνιστώσες: ένα μόνιμο μαγνήτη, ένα πηνίο από σύρμα και τα ελατήρια υποστήριξης του μαγνήτη. Ο συλλέκτης είναι γεμάτος με λάδι για να αποσβέσει τη δράση του ελατηρίου. Η σχετική κίνηση μεταξύ του μαγνήτη και του πηνίου που προκαλείται από την κίνηση ταλάντωσης επάγει ένα σήμα τάσης.



Ο συλλέκτης ταχύτητας είναι ένας αισθητήρας αυτοπαραγωγής και δεν απαιτεί εξωτερικές συσκευές για να παράγει ένα σήμα τάσης. Η τάση που παράγεται από τον συλλέκτη ταχύτητας είναι ευθέως ανάλογη προς την ταχύτητα της σχετικής κίνησης.

Λόγω των δυνάμεων της βαρύτητας, οι μετατροπείς της ταχύτητας κατασκευάζονται με διαφορετικό τρόπο για οριζόντιους ή κάθετους άξονες στήριξης. Ο αισθητήρας ταχύτητας έχει μια ευαισθησία στον άξονα που πρέπει να εξεταστεί κατά την εφαρμογή του σε περιστρεφόμενες μηχανές. Οι αισθητήρες ταχύτητας είναι επίσης ευαίσθητοι στην ταλάντωση κατά μήκος του άξονα, η οποία θα μπορούσε να βλάψει έναν αισθητήρα ταχύτητας.

Το σύρμα τυλίγεται σε μια μπομπίνα για να σχηματισθεί το πηνίο σύρματος. Μερικές φορές, το πηνίο σύρματος είναι μετρητής τραύματος (πληγής σε μία κατεύθυνση και έπειτα στην αντίθετη κατεύθυνση) για να αντισταθμίσει τα εξωτερικά ηλεκτρικά πεδία. Η μπομπίνα υποστηρίζεται από λεπτά, επίπεδα ελατήρια για να τοποθετηθεί με ακρίβεια στον τομέα του μόνιμου μαγνήτη.

Ένα σήμα ταχύτητας που παράγεται με δονητική κίνηση είναι συνήθως ημιτονοειδούς φύσης. Έτσι, σε έναν κύκλο ταλάντωσης, το σήμα φθάνει στην μέγιστη τιμή του δύο φορές. Η δεύτερη μέγιστη τιμή είναι ίση σε μέγεθος με την πρώτη μέγιστη τιμή, αλλά με αντίθετη διεύθυνση.

Μια άλλη σύμβαση που πρέπει να εξετασθεί είναι ότι η κίνηση προς το κάτω μέρος του μετατροπέα ταχύτητας δημιουργεί ένα θετικό σήμα εξόδου. Με άλλα λόγια, εάν ο μετατροπέας συγκρατείται στον ευαίσθητο άξονά του και η βάση έχει σπείρωμα, το σήμα εξόδου θα είναι θετικό, όταν δημιουργείται αρχικά σπείρωμα.

### **3.2.3 Απαραίτητος αριθμός αισθητήρων**

Όλοι οι αισθητήρες ταλαντώσεων μετρούν κίνηση κατά μήκος του κύριου άξονα τους. Αυτό το γεγονός θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή του αριθμού των αισθητήρων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Λόγω της διαρθρωτικής ασυμμετρίας των θηκών των μηχανών, τα σήματα ταλάντωσης στην κατακόρυφη, οριζόντια και αξονική κατεύθυνση (σε σχέση με τον άξονα) μπορεί να διαφέρουν. Όπου είναι δυνατόν, θα πρέπει να τοποθετείται ένας μετατροπέα ταχύτητας κατά τα κατακόρυφα, οριζόντια και αξονικά επίπεδα για τη μέτρηση της ταλάντωσης στις τρεις κατευθύνσεις. Οι τρεις αισθητήρες θα παρέχουν μια πλήρη εικόνα της ταλάντωσης του μηχανήματος.

## Τοποθέτηση

Για καλύτερα αποτελέσματα, η θέση τοποθέτησης πρέπει να είναι επίπεδη, καθαρή και ελαφρώς μεγαλύτερη από ό, τι ο αισθητήρας ταχύτητας. Εάν είναι δυνατόν, θα πρέπει να συσφίγγεται με ένα ξεχωριστό περίβλημα τοποθέτησης.

Η επιφάνεια θα πρέπει να τρυπηθεί και να δημιουργηθεί σπείρωμα για να φιλοξενήσει τη βίδα στερέωσης του αισθητήρα. Κάθε φορά που ένας αισθητήρας ταχύτητας εκτίθεται σε επικίνδυνα περιβάλλοντα, όπως η υψηλές θερμοκρασίες, ραδιενέργεια, νερό ή μαγνητικά πεδία, πρέπει να ληφθούν ειδικά μέτρα προστασίας.

Πρέπει ιδιαίτερα να λαμβάνονται υπόψη οι μαγνητικές παρεμβολές κατά τη μέτρηση ταλαντώσεων των μεγάλων AC κινητήρων και γεννητριών. Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγουν αυτές οι μηχανές μπορεί να επηρεάσει τον αγωγό του πηνίου προκαλώντας μια τάση στον συλλέκτη ταχύτητας που θα μπορούσε να συγχέεται με την πραγματική ταλάντωση. Προκειμένου να μειωθεί η επίδραση του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαγνητικές ασπίδες.

Μια γρήγορη μέθοδος για να καθοριστεί αν απαιτείται μαγνητική ασπίδα είναι να κρεμαστεί ο συλλέκτης κοντά στην περιοχή όπου πρέπει να ληφθούν ταλαντώσεις (με έναν σταθερό βραχίονα, ώστε να μην προκληθούν πραγματικές ταλαντώσεις). Εάν παρατηρούνται σημαντικές ταλαντώσεις, μπορεί να απαιτείται μαγνητική ασπίδα.

## Ευαισθησία

Μερικοί συλλέκτες ταχύτητας έχουν την υψηλότερη ευαισθησία παραγωγής από όλους τους συλλέκτες ταλαντώσεων που είναι διαθέσιμοι για την εφαρμογή των περιστροφικών μηχανών. Η υψηλότερη ευαισθησία εξόδου είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου υπάρχει πρόβλημα ηλεκτρικού θορύβου. Ένας αισθητήρας για μεγαλύτερες εξόδους για δεδομένα επίπεδα ταλαντώσεων θα επηρεαστεί λιγότερο από τον ηλεκτρικό θόρυβο.

Οι ευαισθησίες συνήθως εκφράζονται σε  $mV / in. / S$  ή  $mV / mm / s$ . Οι γενικές τιμές είναι στο φάσμα των  $500 mV / in. / s$  έως  $750 mV / in. / s$  ( $20-30 mV / mm / s$ ). Η ευαισθησία του συλλέκτη ταχύτητας είναι σταθερή σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων, συνήθως μεταξύ  $10 Hz$  και  $1 kHz$ . Σε χαμηλές συχνότητες ταλάντωσης, η ευαισθησία μειώνεται επειδή το πηνίο του συλλέκτη δεν είναι πλέον στάσιμο σε σχέση με τον μαγνήτη, ή αντιστρόφως. Αυτή η μείωση στην ευαισθησία του συλλέκτη ξεκινά συνήθως σε μία συχνότητα από περίπου  $10 Hz$ ,

κάτω από το οποίο η έξοδος του συλλέκτη μειώνεται εκθετικά. Η σημασία αυτού του γεγονότος είναι ότι οι μετρήσεις εύρους που λαμβάνονται σε συχνότητες κάτω των 10 Hz, χρησιμοποιώντας συλλέκτη ταχύτητας είναι ανακριβείς.

Ακόμα κι αν η ευαισθησία μπορεί να πέσει σε χαμηλότερες συχνότητες αυτό δεν εμποδίζει την χρήση αυτού του συλλέκτη για επαναλαμβανόμενες μετρήσεις ταλαντώσεων στην ίδια θέση μόνο για τις τάσεις ή την εξισορρόπηση.

### **Απόκριση συχνότητας**

Οι συλλέκτες ταχύτητας έχουν διαφορετική απόκριση συχνότητας ανάλογα με τον κατασκευαστή. Ωστόσο, οι περισσότεροι μαγνήτες έχουν ένα γραμμικό εύρος απόκρισης συχνότητας της τάξης των 10 Hz - 1 kHz. Αυτό είναι ένα σημαντικό στοιχείο κατά την επιλογή ενός συλλέκτη ταχύτητας για εφαρμογή σε περιστρεφόμενη μηχανή. Η απόκριση της συχνότητας του συλλέκτη πρέπει να είναι εντός του αναμενομένου φάσματος της συχνότητας του μηχανήματος.

### **Βαθμονόμηση**

Οι συλλέκτες ταχύτητας πρέπει να διακριβώνονται σε ετήσια βάση. Ο αισθητήρας πρέπει να αφαιρεθεί από την θέση του για επαλήθευση της βαθμονόμησης του. Η επαλήθευση είναι απαραίτητη, διότι οι συλλέκτες ταχύτητας είναι οι μόνοι βιομηχανικοί αισθητήρες ταλαντώσεων με εσωτερικά κινούμενα μέρη που υπόκεινται σε αστοχία λόγω κόπωσης.

Ο έλεγχος αυτός θα πρέπει να περιλαμβάνει απόκριση ευαισθησίας προς δοκιμή συχνοτήτων. Η δοκιμή αυτή θα καθορίζει αν οι εσωτερικές πηγές και το σύστημα απόσβεσης έχουν υποβαθμιστεί λόγω θερμότητας και ταλάντωσης. Η δοκιμή θα πρέπει να διεξάγεται με έναν αναδευτήρα ικανό μεταβλητού εύρους και συχνότητας δοκιμής.

### **Πλεονεκτήματα**

- Ευκολία στην εγκατάσταση
- Ισχυρά σήματα στο μέσο εύρος συχνοτήτων
- Δεν απαιτείται εξωτερική τροφοδοσία.

### **Μειονεκτήματα**

- Σχετικά μεγάλοι και βαριοί
- Ευαίσθητα σε συχνότητα εισόδου
- Περιορισμός στην απόκριση συχνότητας
- Κινητά μέρη
- Ευαίσθητοι σε μαγνητικά πεδία.

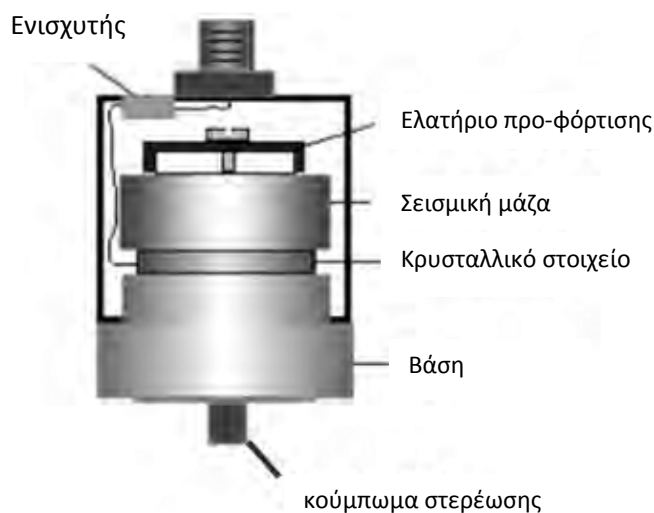
## Μετατροπείς /συλλέκτες Επιτάχυνσης

Τα επιταχυνσιόμετρα είναι οι πιο δημοφιλείς μετατροπείς που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε περιστροφικά μηχανήματα (Σχήμα 3.2). Είναι στιβαροί, συμπαγείς, ελαφριοί μετατροπείς με μεγάλη συχνότητα εύρους απόκρισης. Τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε πολλές καταστάσεις εφαρμογών παρακολούθησης.

Εξαρτήματα όπως έδρανα κύλισης ή σετ γραναζιών παράγουν υψηλές συχνότητες ταλάντωσης όταν είναι ελαττωματικά. Μηχανήματα με αυτά τα στοιχεία πρέπει να παρακολουθούνται με επιταχυνσιόμετρα.

Η εγκατάσταση ενός επιταχυνσιόμετρου πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά για ακριβή και αξιόπιστη μέτρηση.

Τα επιταχυνσιόμετρα είναι σχεδιασμένα για να τοποθετούνται σε θήκες μηχανημάτων. Αυτό μπορεί να παρέχει διαρκή ή περιοδική ανίχνευση της απόλυτης κίνησης της θήκης (κραδασμούς σε σχέση με τον ελεύθερο χώρο) σε μορφή επιτάχυνσης.



**Σχήμα 3.2** Επιταχυνσιόμετρο[1]

## Θεωρία λειτουργίας

Τα επιταχυνσιόμετρα είναι αδρανειακές συσκευές μέτρησης που μετατρέπουν τη μηχανική κίνηση σε σήμα τάσης. Το σήμα είναι ανάλογο με την επιτάχυνση της ταλάντωσης χρησιμοποιώντας την πιεζοηλεκτρική αρχή. Τα αδρανειακά συστήματα μέτρησης μετρούν την κίνηση σε σχέση με μια μάζα.

Αυτό ακολουθεί τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα: ένα σώμα που ενεργεί σε ένα άλλο σώμα, θα οδηγήσει σε μια ίση και αντίθετη αντίδραση στο πρώτο.

Τα επιταχυνσιόμετρα αποτελούνται από ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο (κατασκευασμένο από σιδηροηλεκτρικά υλικά όπως τιτανικό άλας μολύβδου ζirkονικό και τιτανικό βάριο) και μια μικρή μάζα που περικλείονται σε ένα προστατευτική μεταλλική θήκη.

Όταν το επιταχυνσιόμετρο υποβάλλεται σε ταλάντωση, η μάζα εξασκεί μία δύναμη στον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, η οποία είναι ευθέως ανάλογη προς την δονητική επιτάχυνση. Το φορτίο που παράγεται από τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο είναι ανάλογο προς τη μεταβολή της δονητικής δύναμης. Το φορτίο εξόδου μετράται σε Pico-coulombs ανά g (PC / g), όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Μερικοί αισθητήρες έχουν έναν εσωτερικό ενισχυτή φορτίου, ενώ άλλοι έχουν έναν ενισχυτή εξωτερικού φορτίου. Ο ενισχυτής φορτίου μετατρέπει τη φορτισμένη έξοδο του κρυστάλλου σε μία αναλογική τάση εξόδου σε mV / g.

## Τάση ή ρεύμα λειτουργίας

Αυτό το είδος της επιταχυνσιόμετρου έχει έναν εσωτερικό, ενισχυτή χαμηλής αντίστασης εξόδου και απαιτεί μια εξωτερική πηγή ενέργειας. Η εξωτερική πηγή ισχύος μπορεί να είναι είτε μία πηγή σταθερού ρεύματος ή μια πηγή ρυθμιζόμενης τάσης. Αυτό το είδος του επιταχυνσιόμετρου είναι κανονικά ένας δισύρματος μετατροπέας με ένα σύρμα για τη ενέργεια και το σήμα, και το δεύτερο σύρμα για τον ουδέτερο. Μπορεί να έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία λόγω του εσωτερικού κυκλώματος ενισχυτή. Τα μήκη καλωδίων εξόδου μέχρι 500 πόδια έχουν αμελητέα επίδραση στην ποιότητα του σήματος. Μεγαλύτερα μήκη καλωδίων θα μειώσουν το αποτελεσματικό εύρος απόκρισης συχνότητας.

## Κατάσταση φόρτισης

Τα επιταχυνσιόμετρα λειτουργίας φορτίου διαφέρουν ελαφρώς από αυτά λειτουργίας ρεύματος ή τάσης. Αυτοί οι αισθητήρες δεν έχουν εσωτερικό ενισχυτή και ως εκ τούτου έχουν υψηλότερες θερμοκρασίες. Ένας εξωτερικός ενισχυτής φορτίου παρέχεται με ένα ειδικό καλώδιο προσαρμογέα, το οποίο συνδέεται στο επιταχυνσιόμετρο.

Το πεδίο καλωδίωσης τερματίζεται στο τέλος εξωτερικού ενισχυτή. Όπως και με τα επιταχυνσιόμετρα λειτουργίας ρεύματος ή λειτουργίας τάσης, για μήκος καλωδίου έως και 500 πόδια έχουν αμελητέα επίδραση στην ποιότητα του σήματος εξόδου. Μεγαλύτερα μήκη καλωδίων θα μειώσουν το εύρος απόκρισης συχνότητας.

## Τοποθέτηση

Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τις πιθανές μεθόδους στερέωσης για αυτόν τον αισθητήρα ταλαντώσεων. Οι τέσσερις κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση αισθητήρων στις θέσεις παρακολούθησης. Αυτά συναρμολογημένα με κομβίο, συγκολλημένα, τοποθετημένα με μαγνήτη (διπλό πόδι ή επίπεδο) και μη τοποθετημένα π.χ. η χρήση φορητών ανιχνευτών ή στίνγκερ. Κάθε μέθοδος επηρεάζει την απόκριση υψηλής συχνότητας του επιταχυνσιόμετρου. Η τοποθέτηση κομβίου παρέχει την ευρύτερη απόκριση συχνότητας και την πιο ασφαλή και αξιόπιστη στερέωση.

Οι άλλες τρεις μέθοδοι μειώνουν την άνω περιοχή συχνοτήτων του αισθητήρα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο αισθητήρας δεν έχει μια ασφαλή άμεση επαφή με το σημείο μέτρησης. Τοποθετώντας κομμάτια συναρμολόγησης, όπως αυτοκόλλητα, μαγνήτες ή άκρες ανιχνευτών, παράγει συντονισμό τοποθέτησης. Ο συντονισμός τοποθέτησης είναι χαμηλότερος από τον φυσικό συντονισμό του αισθητήρα και μειώνει την άνω περιοχή συχνοτήτων. Ένα μεγάλο κομμάτι στερέωσης προκαλεί χαμηλότερο συντονισμό τοποθέτησης και μειώνει επίσης το χρησιμοποιήσιμο εύρος συχνοτήτων του μετατροπέα. Οι μέθοδοι στερέωσης που χρησιμοποιούνται συνήθως για εφαρμογές παρακολούθησης συζητούνται με περισσότερες λεπτομέρειες παρακάτω.

Η μέθοδος τοποθέτησης καρφιού /βίδας είναι η καλύτερη διαθέσιμη μέθοδος για εφαρμογές μόνιμης τοποθέτησης. Αυτή η μέθοδος επιτυγχάνεται με κοχλίωση του αισθητήρα σε ένα στήριγμα ή σε μηχανικά μπλοκ. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει στον μετατροπέα τη μέτρηση των ταλαντώσεων με τον πιο ιδανικό τρόπο, και θα πρέπει να χρησιμοποιείται όποτε είναι δυνατόν.

Η θέση τοποθέτησης για το επιταχυνσιόμετρο πρέπει να είναι καθαρή και χωρίς τη χρήση μπογιάς. Η επιφάνεια τοποθέτησης πρέπει να έχει λειανθεί για να επιτευχθεί μια ομαλή επιφάνεια. Η λειανθήσα διάμετρος πρέπει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από τη διάμετρο του επιταχυνσιόμετρου. Οποιοσδήποτε παρατυπίες στην προετοιμασία της επιφάνειας τοποθέτησης θα οδηγήσουν σε ακατάλληλες μετρήσεις ή βλάβη του επιταχυνσιόμετρου.

Η συγκολλητική μέθοδος παρέχει μια ασφαλή σύνδεση χωρίς εκτεταμένη μεταλλοτεχνία. Εντούτοις, όταν το επιταχυνσιόμετρο είναι κολλημένο, τυπικά μειώνει το λειτουργικό εύρος συχνότητας απόκρισης ή την ακρίβεια της μέτρησης. Αυτή η μείωση οφείλεται στις ιδιότητες απόσβεσης του συγκόλλησης. Επίσης, η αντικατάσταση ή αφαίρεση του επιταχυνσιόμετρου είναι πιο δύσκολο από ό, τι με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο προσάρτησης. Για σωστή κόλληση με συγκολλητικό μέσο, η καθαριότητα της επιφάνειας είναι εξαιρετικής σημασίας. Η μαγνητική μέθοδος τοποθέτησης χρησιμοποιείται τυπικά για την προσωρινή μέτρηση με ένα φορητό συλλέκτη δεδομένων ή αναλυτή. Η μέθοδος αυτή δεν συνιστάται για μόνιμη παρακολούθηση. Ο μετατροπέας μπορεί να μετακινηθεί κατά λάθος και οι πολλαπλές επιφάνειες και υλικά του μαγνήτη μπορεί να αλληλεπιδράσουν με σήματα υψηλής συχνότητας. Από τη σχεδίαση, επιταχυνσιόμετρα έχουν φυσικό συντονισμό που είναι 3-5 φορές υψηλότερος από ότι το υψηλότερο άκρο της ονομαστικής συχνότητας απόκρισης. Η απόκριση συχνότητας είναι περιορισμένη προκειμένου να παρέχει μία επίπεδη απόκριση σε δεδομένα εύρος τιμών. Η ονομαστική περιοχή είναι εφικτή μόνο μέσω κοχλιωτής στερέωσης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οποιαδήποτε άλλη μέθοδος στερέωσης επηρεάζει δυσμενώς τον συντονισμό του αισθητήρα, όπως την αξιόπιστο χρησιμοποιήσιμο φάσμα συχνοτήτων.

## **Ευαισθησία**

Τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των ταλαντώσεων και συνήθως είναι σχεδιασμένα με ευαισθησία 100 mV / g. Υπάρχουν άλλοι τύποι επιταχυνσιόμετρων με ένα ευρύ φάσμα ευαισθησιών για ειδικές εφαρμογές, όπως η δομική ανάλυση, γεωφυσικές μετρήσεις, ανάλυση πολύ υψηλής συχνότητας ή μηχανές με πολύ χαμηλή ταχύτητα.

## **Εύρος συχνοτήτων**

Τα επιταχυνσιόμετρα έχουν σχεδιαστεί για τη μέτρηση των ταλαντώσεων σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Μόλις η συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει για μια μηχανή είναι γνωστή, μπορεί να επιλεγεί και ένα επιταχυνσιόμετρο. Τυπικά, ένα επιταχυνσιόμετρο για τη μέτρηση των ταλαντώσεων της μηχανής θα έχει ένα εύρος συχνότητας από 1 ή 2 Hz έως 8 ή 10 kHz. Υπάρχουν επίσης επιταχυνσιόμετρα με κλίμακες υψηλότερης συχνότητας.

## **Βαθμονόμηση**

Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα δεν μπορούν να επαναρυθμιστούν. Σε αντίθεση με έναν συλλέκτη ταχύτητας, αυτό το αισθητήριο δεν έχει κινούμενα μέρη που υπόκεινται σε

κόπωση. Ως εκ τούτου, η ευαισθησία εξόδου δεν απαιτεί περιοδικές προσαρμογές. Ωστόσο, οι υψηλές θερμοκρασίες και το σοκ μπορεί να καταστρέψουν τα εσωτερικά εξαρτήματα ενός επιταχυνσιόμετρου.

Όταν η αξιοπιστία ενός επιταχυνσιόμετρου είναι αμφίβολη, μια απλή δοκιμή της τάσης πόλωσης του αισθητηρίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί εάν θα πρέπει να αποσυρθεί από την λειτουργία. Η τάση πόλωσης ενός επιταχυνσιόμετρου είναι η DC συνιστώσα του σήματος εξόδου του μετατροπέα.

Η τάση πόλωσης μετράται με ένα βολτόμετρο συνεχούς ρεύματος στην έξοδο του αισθητηρίου και του ουδέτερου οδηγεί στην παροχή του ηλεκτρικού ρεύματος. Συγχρόνως, η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος θα πρέπει επίσης να ελέγχεται για να εξαιληθεί το ενδεχόμενο ακατάλληλης τάσης ρεύματος που επηρεάζει το επίπεδο της τάσης πόλωσης του αισθητήρα.

### **3.2.4 Ανιχνευτές μετατόπισης - μετατροπείς δινορευμάτων - ανιχνευτές εγγύτητας**

Οι μετατροπείς δινορευμάτων (ανιχνευτές εγγύτητας), είναι οι προτιμώμενοι μετατροπείς ταλαντώσεων για την παρακολούθηση ταλάντωσης σε μηχανήματα περιστροφής εξοπλισμένα με έδρανα ολίσθησης. Τυπικές εφαρμογές τους είναι κατά κύριο λόγο στροβιλομηχανές υψηλής ταχύτητας.

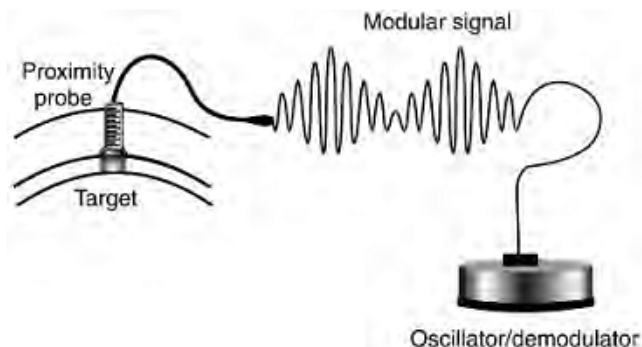
Οι μετατροπείς δινορευμάτων είναι οι μόνοι μετατροπείς που παρέχουν μετρήσεις ταλαντώσεων της μετατόπισης του άξονα ή σχετικής μετατόπισης του άξονα (άξονα σε σχέση με το έδρανο). Αρκετές μέθοδοι είναι συνήθως διαθέσιμες για την εγκατάσταση των μετατροπέων δινορευμάτων, συμπεριλαμβανομένων της εσωτερικής, εσωτερικής / εξωτερικής και εξωτερικής τοποθέτησης.

### **Θεωρία λειτουργίας**

Ένα σύστημα δινορευμάτων είναι ένα σύστημα ταιριασμένων εξαρτημάτων το οποίο αποτελείται από ένα ανιχνευτή, ένα καλώδιο επέκτασης και έναν ταλαντωτή / αποδιαμορφωτή (Σχήμα 3.3).

Ένα σήμα ραδιοσυχνότητας υψηλής συχνότητας (RF) σε 2 ΜΗζ δημιουργείται από τον ταλαντωτή / αποδιαμορφωτή. Αυτό στέλνεται μέσω του καλωδίου επέκτασης και ακτινοβολείται από την άκρη του αισθητήριου.





**Σχήμα 3.3** Αρχή ανιχνευτή εγγύτητας[1]

Τα δινορεύματα που παράγονται στην επιφάνεια της ατράκτου. Ο ταλαντωτής / αποδιαμορφωτής αποδιαμορφώνει το σήμα και παρέχει μια διαμορφωμένη τάση DC, όπου το τμήμα DC είναι ευθέως ανάλογο προς το διάκενο (απόσταση) και το τμήμα AC είναι ευθέως ανάλογο προς την ταλάντωση.

Με τον τρόπο αυτό, ένας μετατροπέας δινορευμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ακτινική ταλάντωση και για μετρήσεις εξ αποστάσεως, όπως αξονική θέση ώθησης άξονα και την θέση της ατράκτου .

### **Απαραίτητος αριθμός μετατροπών**

Όλοι οι μετατροπείς ταλαντώσεων μετρούν κίνηση στο πεδίο τοποθέτησής τους . Με άλλα λόγια, ο άξονας κίνησης είτε κατευθύνεται μακριά από ή προς το τοποθετημένο αισθητήριο δινορευμάτων, και ως εκ τούτου η ακτινική ταλάντωση μετράται με αυτόν τον τρόπο. Σε μικρότερες, λιγότερο κρίσιμες μηχανές, ένα ισχύον σύστημα μετατροπέα δινορευμάτων ανά έδρανο είναι επαρκές. Το ενιαίο αισθητήριο δινορευμάτων μετρά την ταλάντωση του άξονα σε αυτό το δεδομένο πεδίο. Ως εκ τούτου, το αισθητήριο δινορευμάτων πρέπει να τοποθετείται στο επίπεδο που αναμένονται οι μεγαλύτερες ταλαντώσεις.

Σε μεγαλύτερες, πιο κρίσιμες μηχανές, συνίσταται συνήθως δύο συστήματα αισθητηρίων δινορευμάτων ανά έδρανο . Οι ανιχνευτές αυτού του τύπου εγκατάστασης τοποθετούνται 90 ° χώρια ένας από τον άλλο. Δεδομένου ότι οι ανιχνευτές μετρούν τη ταλάντωση στα αντίστοιχα επίπεδά τους, μετριέται και η συνολική κίνηση του άξονα εντός του εδράνου. Κατασκευάζεται μια «τροχιά» ή καρτεσιανό παράγωγο των δύο σημάτων ταλαντώσεων όταν και οι δυο μετατροπείς δινορευμάτων συνδέονται με έναν παλμογράφο.

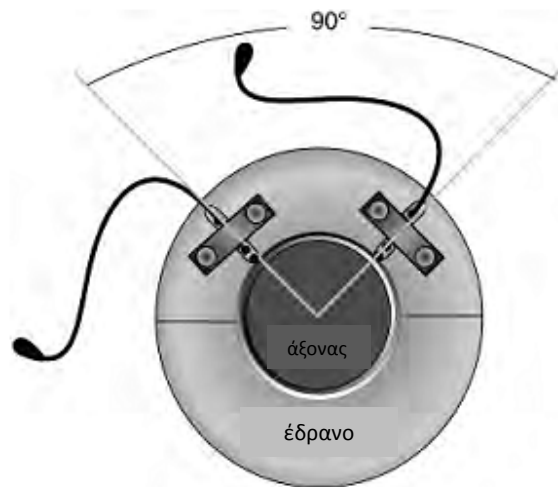
## Μέθοδοι τοποθέτησης

*Προσανατολισμός του μετατροπέα (s)* Δεδομένου ότι τα περισσότερα από τα περιβλήματα των εδράνων στα οποία υπάρχουν τοποθετημένοι ανιχνευτές είναι οριζόντια διαιρούμενα, οι μετατροπείς συνήθως τοποθετούνται σε 45° και στις δύο πλευρές του το κατακόρυφου επίπεδου. Αν είναι δυνατόν, ο προσανατολισμός των μετατροπέων πρέπει να είναι συνεπής κατά μήκος της σειράς της μηχανής για ευκολότερη διάγνωση. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι κατευθύνσεις θα πρέπει να είναι καλά τεκμηριωμένες.

*Κάθετα προς τον άξονα της ατράκτου* Προσοχή πρέπει να ασκείται σε όλες τις εγκαταστάσεις για να εξασφαλισθεί ότι οι αισθητήρες δινορευμάτων τοποθετούνται κάθετα προς τον άξονα της ατράκτου. Απόκλιση κατά περισσότερο από 1-2 ° θα επηρεάσει την ευαισθησία εξόδου του συστήματος.

*Εκκαθαρίσεις πλευράς ανιχνευτών* Το πεδίο ραδιοσυχνότητας που εκπέμπεται από το άκρο του αισθητήρα από έναν μετατροπέα δινορευμάτων έχει κωνικό σχήμα με περίπου 45 ° γωνία. Πρέπει να παρέχεται κάθαρση σε όλες τις πλευρές του άκρου του αισθητήρα για να αποφευχθεί παρεμβολή με το πεδίο RF. Για παράδειγμα, εάν μια οπή διανοίγεται σε ένα έδρανο για την τοποθέτηση του αισθητήρα, πρέπει να αντιτρυπηθεί για να αποφευχθούν οι παρεμβολές πλευρικής κάθαρσης. Είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι τα κολάρα ή οι ώμοι επί της ατράκτου δεν μεγαλώνουν λόγω θερμότητας κάτω από το άκρο του αισθητήρα, καθώς διαστέλλεται ο άξονας λόγω της θερμότητας.

*Εσωτερική τοποθέτηση* Κατά εσωτερική τοποθέτηση, οι αισθητήρες δινορευμάτων τοποθετούνται στο εσωτερικό του μηχανήματος ή στο περίβλημα του εδράνου με ένα ειδικό στήριγμα (Σχήμα 3.4). Το σύστημα του μετατροπέα έχει εγκατασταθεί με το σωστό διάκενο πριν επανεγκατασταθεί το καπάκι του εδράνου. Πρέπει να προβλεφτεί το καλώδιο του αισθητηρίου που προεξέχει από το περίβλημα του εδράνου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός υπάρχοντος πώματος ή εξαρτήματος, ή ανοίγοντας μια οπή πάνω από τη γραμμή του λαδιού.



**Σχήμα 3.4** Εσωτερικώς τοποθετούμενοι ανιχνευτές[1]

Τα καλώδια του μετατροπέα πρέπει να ασφαλιστούν μέσα στο περίβλημα εδράνου για την πρόληψη αποτυχίας των καλωδίων από «παρεκτροπή ανέμου». Για πρόσθετη ασφάλεια και αξιοπιστία, όλα τα δεσίματα στο εσωτερικό της στέγασης του εδράνου πρέπει να είναι ασφαλή.

#### *Πλεονεκτήματα της εσωτερικής στήριξης*

Απαιτείται λιγότερη κατεργασία για την εγκατάσταση. Είναι πιθανή πραγματική μέτρηση σχετική με το έδρανο. Ο ανιχνευτής δινορεύματος έχει αβίαστη θέα στην επιφάνεια του άξονα.

#### *Μειονεκτήματα της εσωτερικής στήριξης*

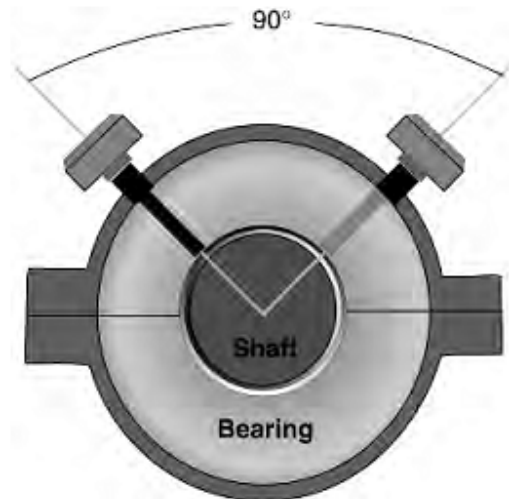
Δεν υπάρχει πρόσβαση για εξέταση, ενώ η μηχανή βρίσκεται σε λειτουργία. Τα καλώδια πρέπει να είναι δεμένα με μεγάλη προσοχή, γιατί μπορεί να σπάσουν λόγω «Παρεκτροπής ανέμου».

Πρέπει να υπάρχουν έξοδοι καλωδίου του αισθητηρίου. Πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να αποφευχθεί η διαρροή λαδιού.

#### *Εξωτερική / εσωτερική τοποθέτηση*

Η εξωτερική / εσωτερική τοποθέτηση επιτυγχάνεται όταν οι αισθητήρες δινορευμάτων συναρμολογούνται με έναν προσαρμογέα στερέωσης (Σχήμα 3.5). Αυτοί οι προσαρμογείς

επιτρέπουν εξωτερική πρόσβαση στον ανιχνευτή, αλλά το ίδιο το άκρο του ανιχνευτή είναι μέσα στο περίβλημα του μηχανήματος ή του εδράνου. Ενώ γίνεται η διάτρηση στο περίβλημα ή το κάλυμμα εδράνου, είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι οι ανιχνευτές δινορευμάτων εγκαθίστανται κάθετα: στον άξονα της ατράκτου.



**Σχήμα 3.5** Εξωτερικώς / εσωτερικώς τοποθετούμενοι ανιχνευτές[1]

Σε ορισμένες περιπτώσεις, λόγω των περιορισμών χώρου, η εξωτερική / εσωτερική στερέωση επιτυγχάνεται με διάτρηση ή κάνοντας χρήση των υφιστάμενων οπών στο ίδιο το έδρανο, συνήθως σε έναν αύλακα έλαιο-επιστροφής.

#### *Πλεονεκτήματα της εξωτερικής / εσωτερικής στερέωσης*

Η αντικατάσταση αισθητήρα δινορευμάτων είναι δυνατή, ενώ το μηχάνημα βρίσκεται σε λειτουργία. Ο αισθητήρας δινορευμάτων έχει αβίαστη θέα στον άξονα. Το διάκενο μπορεί να αλλαχθεί ενώ το μηχάνημα βρίσκεται σε λειτουργία.

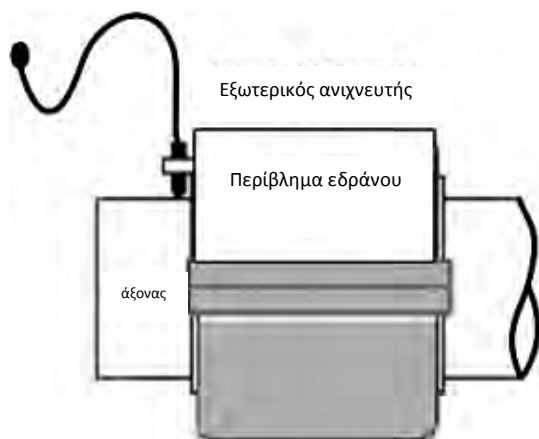
#### *Μειονεκτήματα τις εξωτερική / εσωτερική στερέωσης*

Μπορεί να μην είναι αληθείς η σχετική μέτρηση του εδράνου. Απαιτείται περισσότερη μεταλλοτεχνία. Μεγάλο μήκος αισθητήρα μπορεί να προκαλέσει συντονισμό.

#### *Εξωτερική τοποθέτηση*

Οι περισσότερες παλιές στροβιλομηχανές δεν ήταν εξοπλισμένες με ακτινικούς ανιχνευτές. Η κατασκευή παλιότερων μηχανημάτων μπορεί να μην παρέχουν ιδανική τοποθέτηση

ανιχνευτών. Οι εξωτερικοί ανιχνευτές δινορευμάτων τοποθετούνται σε τέτοιες μηχανές (Σχήμα 3.6). Είναι συνήθως η τελευταία λύση εγκατάστασης.



**Σχήμα 3.6** Εξωτερικώς τοποθετούμενοι ανιχνευτές[1]

Ο μόνος βάσιμος λόγος για τη χρήση αυτής της μεθόδου είναι ο ανεπαρκής χώρος στο εσωτερικό της στέγασης των εδράνων για εσωτερική τοποθέτηση. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην περιοχή προβολής του αισθητήρα δινορευμάτων, και την μηχανική προστασία που πρέπει να παρέχεται στον ανιχνευτή και το καλώδιο.

#### *Πλεονεκτήματα της εξωτερικής στήριξης*

Είναι η πιο ανέξοδη μέθοδος εγκατάστασης.

#### *Μειονεκτήματα της εξωτερικής στήριξης*

Μπορεί να καταγράψει ηλεκτρική ή / και μηχανική εκκεντρότητα του άξονα. Απαιτεί μηχανική προστασία.

### **Στοχευόμενο υλικό / στοχευόμενη περιοχή**

Οι αισθητήρες δινορευμάτων βαθμονομούνται κανονικά για 4140 (Carbon Steel) χάλυβα, εκτός αν οριστεί διαφορετικά. Επειδή τα δινορεύματα είναι ευαίσθητα στη διαπερατότητα και ειδική αντίσταση του υλικού του άξονα, οποιοδήποτε υλικό του άξονα, εκτός από χάλυβες της σειράς 4.000 πρέπει να καθορίζεται τη στιγμή της παραγγελίας. Σε περίπτωση άλλου είδους υλικού άξονα, ο προμηθευτής του ανιχνευτή μπορεί να απαιτήσει ένα δείγμα του υλικού του άξονα.

## **Μηχανική εκκεντρότητα**

Οι μετατροπείς δινορρευμάτων είναι επίσης ευαίσθητοι στην ομαλότητα του άξονα για την ακτινική ταλάντωση. Πρέπει να προβλέπεται μια ομαλή (λεία) περιοχή περίπου τρεις φορές η διάμετρος του αισθητήρα προσφέρεται ως περιοχή προβολής. Η επιλεγμένη περιοχή ολίσθησης για τις περισσότερες ατράκτους είναι πλατύτερη από το ίδιο το έδρανο, επιτρέποντας την εγκατάσταση ανιχνευτή γειτονικά με το έδρανο.

## **Ηλεκτρική εκκεντρότητα**

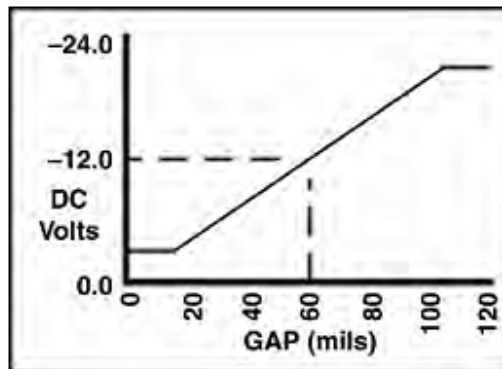
Αφού οι μετατροπείς δινορρευμάτων είναι ευαίσθητοι στην διαπερατότητα και αντίσταση του ζητούμενου υλικού και επίσης επειδή το πεδίο του μετατροπέα εκτείνεται εντός της επιφάνειας της ατράκτου κατά προσέγγιση 0,4 mm (15 mils), πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να αποφευχθούν τα μη-ομογενή υλικά στην περιοχή προβολής, όπως το χρώμιο. Μια άλλη μορφή της ηλεκτρικής εκκεντρότητας μπορεί να προκληθεί από μικρά μαγνητικά πεδία, όπως αυτά που αφήνει ο έλεγχος με δυνατό μαγνητικό πεδίο χωρίς την κατάλληλη απομαγνήτιση.

## **Βαθμονόμηση**

Όλα τα συστήματα αισθητήρων δινορρευμάτων (αισθητήρας, καλώδια και ταλαντωτής / αποδιαμορφωτής) πρέπει να βαθμονομηθούν πριν γίνει η ανάθεση τους. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας ένα στατικό βαθμονομητή, -24 V DC ένα τροφοδοτικό και έναν ψηφιακό βολτόμετρο. Ο καθετήρας τοποθετείται στον δοκιμαστή με στόχο την άκρη του αισθητήρα. Το μικρόμετρο στη συνέχεια περιστρέφεται μακριά από τον αισθητήρα με βήμα αύξησης 0,1 mm (ή 5 mils). Η ανάγνωση της τάσης καταγράφεται και απεικονίζεται σε κάθε αύξηση. Το γράφημα που λαμβάνεται για την καθορισμένη περιοχή πρέπει να είναι γραμμική.

## **Αισθητήρας διάκενου(GAP)**

Οι αισθητήρες δινορρευμάτων πρέπει πάντα να εγκαθίστανται με το κατάλληλο διάκενο. Στις περισσότερες εφαρμογές ακτινικής ταλάντωσης είναι επαρκής η ρύθμιση του διάκενου του αισθητήριου στο κέντρο της γραμμικής περιοχής. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7, ένα διάκενο καθορίζεται για -12,0 V DC χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό βολτόμετρο αντιστοιχεί σε ένα μηχανικό διάκενο περίπου 1,5 mm (ή 60 mils).



**Σχήμα 3.7** Τυπική καμπύλη βαθμονόμησης[1]

Η μέθοδος τάσης για την ρύθμιση διακένου του αισθητήρα συνιστάται πάνω από αυτή του μηχανικού διάκενου. Σε όλες τις περιπτώσεις, η τελική τάση του διάκενου του αισθητήρα πρέπει να καταγράφεται και να φυλάσσεται σε ασφαλές μέρος.

Οι ανιχνευτές εγγύτητας έχουν συνήθως ευαισθησία 10 mV / μm (ή 200 mV / mil) και γραμμική περιοχή περίπου από 2-2,5 mm (ή 80-100 mils).

Οι ανιχνευτές εγγύτητας ρυθμίζονται από -8 έως -9 V, το οποίο δημιουργεί μια έξοδο από 1,0-1,3 mm. Αυτή η ρύθμιση της τάσης τοποθετεί τον αισθητήρα στη μέση της γραμμικής περιοχής του, επιτρέποντας έτσι στον αισθητήρα να ανιχνεύει κίνηση και στην θετική και στην αρνητική κατεύθυνση.

Οι αισθητήρες εγγύτητας πρέπει να βρίσκονται στο έδρανο, και όχι περισσότερο από 25 mm (ή μια ίντσα) αξονικά από το έδρανο προς το κέντρο του άξονα.

### 3.3 Μετατροπή ταλαντώσεων σε ηλεκτρικό σήμα

Οι Μετατροπείς ταλαντώσεων μετατρέπουν τη φυσική κίνηση ταλάντωσης μιας μηχανής σε ηλεκτρικό σήμα. Ωστόσο, αυτό το σήμα δεν έχει καμία χρήση σε ακατέργαστη μορφή, εκτός αν επεξεργαστεί με σκοπό να παρέχει σημαντικές πληροφορίες που μπορεί να σχετίζονται με την κατάσταση του μηχανήματος. Έτσι, υπάρχει μια ανάγκη για εξοπλισμό παρακολούθησης που θα παίρνει ένα τέτοιο ηλεκτρικό σήμα από ένα αισθητήριο και θα το επεξεργάζεται κάνοντάς το ουσιαστικά δεδομένα.

Επίσης, σε προηγούμενα θέματα, έχουμε συζητήσει την υιοθέτηση διαφόρων φιλοσοφιών συντήρησης που εφαρμόζονται σε εργοστάσια ή σε μονάδες παραγωγής, βάσει της ταξινόμησης του εξοπλισμού. Ο μέθοδοι παρακολούθησης που πρέπει να χρησιμοποιούνται για κάθε διαφορετική μηχανή γίνεται επίσης με βάση την παραπάνω λογική. Μόλις καθιερωθούν οι ανάγκες παρακολούθησης των μηχανημάτων, το επόμενο βήμα είναι να

επιλεχθεί ο κατάλληλος εξοπλισμός παρακολούθησης που πληροί αυτές τις προϋποθέσεις όσο καλύτερα γίνεται.

Οι διάφορες επιλογές διαθέσιμες στο εμπόριο είναι:

- Φορητοί μετρητές και αναλυτές ταλάντωσης
- Φορητοί συλλέκτες / αναλυτές δεδομένων
- Το λογισμικό ανάλυσης ταλαντώσεων / διαχείρισης βάσεων δεδομένων
- Εξοπλισμός μόνιμης σύνδεσης απόκτησης και ανάλυσης δεδομένων.

### **3.3.1 Φορητοί μετρητές και αναλυτές ταλάντωσης**

Ένας φορητός μετρητής ταλάντωσης είναι ένα φθινό και απλό στη χρήση εργαλείο που είναι βασικό μέρος οποιουδήποτε προγράμματος ταλάντωσης. Οι τεχνικοί ταλαντώσεων φέρουν φορητούς μετρητές και αναλυτές ταλαντώσεων στους γύρους ελέγχου τους.

Όταν αυτοί βρίσκονται σε επαφή με τα μηχανήματα, παρέχουν μια απεικόνιση των επιπέδων ταλαντώσεων (ή αναλογικά ή ψηφιακά). Η ανάγνωση παρέχει άμεση πληροφόρηση που χρησιμοποιείται για να καθοριστεί αν τα συνολικά επίπεδα ταλάντωσης είναι φυσιολογικά ή αφύσικα. Οι μετρητές ταλάντωσης χειρός συνήθως λειτουργούν με μπαταρία και μετρούν με την βοήθεια ενός επιταχυνσιομέτρου. Μερικές φορές χρησιμοποιείται ένας συλλέκτης ταχύτητας. Είναι μικροί, ελαφριοί και στιβαροί για καθημερινή χρήση (Σχήμα 3.8).

Οι φορητοί μετρητές μπορούν να παράσχουν τα ακόλουθα δεδομένα (ανάλογα με το μοντέλο):

- Επιτάχυνση ( $p_k$ ) ( $\zeta$ )
- Ταχύτητα ( $p_k$ -rms) (mm / s ή. / S)
- Μετατόπιση ( $p_k$ - $p_k$ ) (μικρά ή mils)
- Κατάσταση εδράνου (που αναφέρεται αργότερα) (GSE, dB και άλλα).

#### *Πλεονεκτήματα*

Είναι βολικοί και ευέλικτοι, και απαιτούν πολύ λίγη επιδεξιότητα στη χρήση. Είναι μια ανέξοδη λύση για κάθε νέο σύστημα παρακολούθησης.

#### *Μειονεκτήματα*

Υπάρχει περιορισμός στο είδος των μετρήσεων που μπορούν να εκτελέσουν. Στερούνται επίσης την δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων (ωστόσο, είναι πλέον διαθέσιμα κάποια όργανα με μικρό χώρο αποθήκευσης).





**Σχήμα 3.8** Φορητός μετρητής ταλάντωσης από Vibrotip[1]

### **Συλλογή και υποβολή δεδομένων ταλάντωσης – μετρητές χειρός**

Οι φορητές μετρήσεις ταλαντώσεων είναι αρκετά κοινές. Αυτή η μέθοδος συλλογής δεδομένων είναι γρήγορη, εύκολη και απαιτεί ελάχιστες δεξιότητες. Το πρώτο βήμα είναι να προσδιοριστούν οι θέσεις στο μηχάνημα από όπου θα πρέπει να λαμβάνονται οι μετρήσεις.

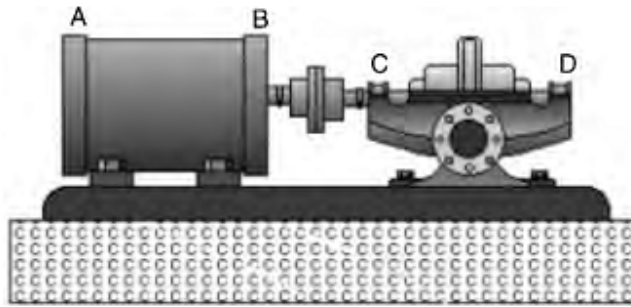
Οι Μηχανικές ταλαντώσεις έχουν μια αναλογία σε ηλεκτρικό ρεύμα. Ακριβώς όπως το ηλεκτρικό ρεύμα τείνει να πάει στη γη, έτσι και οι ταλαντώσεις που προκαλούνται από ελαττώματα σε περιστρεφόμενες μηχανές θα περάσουν στο έδαφος μέσω της στήριξής τους. Έχει δειχθεί ότι τα έδρανα είναι το σημείο όπου οι ταλαντώσεις κάνουν «άλμα» από το ρότορα στο στάτη και στην συνέχεια γειώνονται. Έτσι, τα καλύτερα σήματα για την παρακολούθηση της κατάστασης μιας μηχανής λαμβάνονται στα έδρανα και είναι οι καλύτερες θέσεις μέτρησης.

Είναι πάντα απαραίτητο να ακολουθείται μια συνθήκη για την σήμανση των διαφόρων εδράνων που γίνονται μετρήσεις σε μια σειρά μηχανής. Η γενική συνθήκη είναι να ξεκινάει σήμανση από εκεί που λαμβάνεται η ενέργεια. Για παράδειγμα, μια απλή σειρά μηχανής αποτελείται από έναν κινητήρα και μια αντλία, σημαίνονται με τον ακόλουθο τρόπο (Εικόνα 3.9):

- τελικό μη κινητήριο έδρανο κινητήρα- A
- τελικό κινητήριο έδρανο κινητήρα- B
- εξωλέμβιο έδρανο αντλίας (δίπλα στον σύνδεσμο) - C

- εσωλέμβιο έδρανο αντλίας (μακριά από τον σύνδεσμο) – Δ

Μόλις τα έδρανα σημανθούν, είναι σημαντικό οι ταλαντώσεις να λαμβάνονται σε τρεις καρτεσιανές κατευθύνσεις. Στην ονοματολογία ταλάντωσης, αυτές είναι η κάθετη, οριζόντια και αξονική κατεύθυνση. Αυτό είναι απαραίτητο, λόγω της κατασκευής των μηχανημάτων - ελαττώματα τους μπορεί να εμφανισθούν επάνω σε οποιαδήποτε από τις τρεις κατευθύνσεις και ως εκ τούτου πρέπει να μετρώνται.



**Σχήμα 3.9** Λήψη ονοματολογίας[1]

Ταχύτητα – mm/s – ρκ (20/8/01)	Κάθετος	Οριζόντιος	Άξονας
A	2.4	1.7	1.0
B	2.1	1.9	1.2
C	4.3	5.6	2.7
D	3.7	4.1	2.1

Οι μετρήσεις χειρός υπόκεινται σε έναν αριθμό σφαλμάτων. Είναι επομένως σημαντικό, το προσωπικό που εκτελεί το έργο αυτό, να έχει την επίγνωση των πιθανών σφαλμάτων που μπορούν να προκύψουν κατά την λήψη των μετρήσεων. Λάθη μπορεί να προκληθούν από:

- Η θέση στα μηχανήματα
- Η γωνία του αισθητήρα
- Τύπος αισθητήρα
- Μέθοδος τοποθέτησης του αισθητήρα (ή η πίεση που ασκείται αν είναι χειρός).

## **Θέση στα μηχανήματα**

Οι μετρήσεις θα πρέπει να λαμβάνονται στην ίδια ακριβώς θέση για να επιτρέψουν άμεσες συγκρίσεις των δεδομένων. Η μετακίνηση του αισθητήρα έστω και πολύ λίγο σε ένα μηχανήμα μπορεί να παράγει πολύ διαφορετικά επίπεδα ταλαντώσεων. Για να εξασφαλιστεί ότι οι μετρήσεις λαμβάνονται στο ίδιο σημείο, θα πρέπει να επισημαίνονται με χρώμα, ή μια ρηχή κωνική τρύπα που ανοίγεται για ταυτοποίηση.

## **Γωνία αισθητήρα**

Ο αισθητήρας ή ο ανιχνευτής θα πρέπει πάντα να προσανατολίζονται κάθετα προς την επιφάνεια του μηχανήματος. Έστω και μία ελαφριά απόκλιση του ανιχνευτή σε μία γωνία μπορεί να προκαλέσει σφάλμα.

## **Τύπος αισθητήρα**

Μερικοί μετρητές χειρός παρέχονται με αισθητήρες (που ονομάζονται stingers) και επίσης με στρογγυλούς μαγνήτες, το οποίο μπορεί να βιδωθεί σε μετατροπείς ταχύτητας ή επιταχυνσιόμετρα. Η μέτρηση ταλαντώσεων με μαγνητικά εξαρτήματα μπορούν να συλλέγουν υψηλότερες συχνότητες ταλάντωσης από ό, τι οι αισθητήρες χειρός. Κατά τη συλλογή δεδομένων σε μια μηχανή που παράγει υψηλές συχνότητες ταλαντώσεων με ένα φορητό μετρητή, αλλάζοντας τον τύπο του αισθητήρα θα δείξει μια δραστική διαφορά στα συνολικά επίπεδα.

## **Πίεση**

Ακόμα και η συνεπής πίεση του χεριού είναι απαραίτητη για να ληφθούν συγκρίσιμες μετρήσεις με μετρητές χειρός.

### **3.3.2 Φορητοί συλλέκτες / αναλυτές δεδομένων**

Οι σύγχρονοι συλλέκτες / αναλυτές δεδομένων μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για τυχόν χαρακτηριστικά ταλάντωσης σε οποιαδήποτε επιθυμητή μονάδα μέτρησης. Υπάρχουν βασικά δύο τύποι συλλεκτών δεδομένων και Αναλυτών (Σχήμα 3.10):

- Μονό κανάλι(single)
- Διπλό κανάλι(dual)



**Σχήμα 3.10** Συλλέκτες δεδομένων / αναλυτές με πακέτο αξεσουάρ που διατίθενται στο εμπόριο[1]

#### *Πλεονεκτήματα*

Μπορούν να συλλέγουν, να καταγράφουν δεδομένα και να απεικονίζουν ταλαντώσεις, όπως φάσματα FFT, συνολικά σχεδιαγράμματα τάσης και κυματομορφές στο πεδίο του χρόνου.

Παρέχουν ομαλή συλλογή των δεδομένων.

Αναφέρουν αυτόματα μετρήσεις που διαφέρουν από τα προκαθορισμένα όρια.

Μπορούν να εκτελέσουν την ανάλυση ταλαντώσεων πεδίου.

#### *Μειονεκτήματα*

Είναι σχετικά ακριβοί.

Ο χειριστής πρέπει να εκπαιδευτεί για την χρήση τους.

Περιορισμένη ικανότητα μνήμης και έτσι τα δεδομένα πρέπει να μεταφερθούν σε άλλο σύστημα μετά την συλλογή τους.

### **3.3.3 Ανάλυση ταλαντώσεων - λογισμικό διαχείρισης βάσεων δεδομένων**

Οι συλλέκτες / αναλυτές δεδομένων μπορούν να συλλέξουν και να αποθηκεύσουν μόνο ένα περιορισμένο όγκο δεδομένων. Ως εκ τούτου, τα στοιχεία που πρέπει να κατεβαστούν στον υπολογιστή για να σχηματίσουν ένα ιστορικό και μια μακροπρόθεσμη βάση δεδομένων με πληροφορίες για τη σύγκριση και την τάση των μηχανημάτων. Για την εκτέλεση των ανωτέρω καθηκόντων, καθώς επίσης και για βοήθεια στη συλλογή, διαχείριση και ανάλυση

των δεδομένων των μηχανημάτων, χρειάζονται πακέτα λογισμικού για την διαχείριση βάσεων δεδομένων.

Αυτά τα προγράμματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων για τα δεδομένα των ταλαντώσεων των μηχανημάτων αποθηκεύουν και κάνουν συγκρίσεις μεταξύ των πρόσφατων μετρήσεων, παρελθόντων μετρήσεων και των προκαθορισμένων ορίων συναγερμού. Οι μετρήσεις που μεταφέρονται στο λογισμικό ανάλυσης ταλαντώσεων ελέγχονται ταχύτατα για αποκλίσεις από τις κανονικές συνθήκες. Για να βοηθηθεί η διαδικασία εύρεσης αποκλίσεων παράγονται, τα συνολικά επίπεδα ταλάντωσης, φάσματα FFT, κυματομορφές χρόνου και άλλες παράμετροι.

Μπορούν να παραχθούν εκθέσεις με τα μηχανήματα των οποίων τα επίπεδα ταλαντώσεων ξεπερνούν τα κατώτατα όρια συναγερμού. Τα τρέχοντα δεδομένα συγκρίνονται με τις βασικές τιμές των δεδομένων για ανάλυση και συγκρίνονται με σκοπό να δείχνουν τις αλλαγές ταλάντωσης σε ένα χρονικό διάστημα. Τα διαγράμματα τάσης δίνουν έγκαιρη προειδοποίηση πιθανών ελαττωμάτων και χρησιμοποιούνται για να προγραμματίζεται η καλύτερη στιγμή για την επισκευή (Σχήμα 3.11). Επιπλέον, το λογισμικό βοηθά να προσδιοριστεί μία διαδρομή για τη συλλογή δεδομένων. Οι θέσεις από όπου πρέπει να συλλέγονται τα δεδομένα μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να αποτελεί μια αποτελεσματική ακολουθία. Η ακολουθία ή διαδρομή τότε κατεβαίνει στον συλλέκτη δεδομένων και στη συνέχεια μπορεί να βοηθήσει τον χειριστή για να καθορίσει σε ποια θέση θα πρέπει να ληφθεί η επόμενη μέτρηση. Αυτό εξασφαλίζει ότι όλα τα απαραίτητα στοιχεία συλλέγονται στο λιγότερο δυνατό χρόνο και με την ίδια ακολουθία κάθε φορά.

Εκτός από τα δεδομένα της διαδρομής, μετρήσεις ταλαντώσεων εκτός διαδρομής που γίνονται από τους συλλέκτες δεδομένων / αναλυτές για τη διάγνωση της κατάστασης της μηχανής μπορεί επίσης να κατέβει στο πρόγραμμα ως ιστορικό για σκοπούς ανάλυσης.

#### *Πλεονεκτήματα*

Βοηθούν στη συλλογή, την διαχείριση και την ανάλυση των δεδομένων μηχανημάτων.

Μπορούν να αποθηκεύσουν δεδομένα μηχανημάτων μεγάλων χρονικών διαστημάτων που βοηθά να συγκρίνουν τα παρόντα και τα παρελθόντα δεδομένα της παρακολούθησης κατάστασης τους.

Θα βοηθήσει στην ανάλυση ταλαντώσεων.

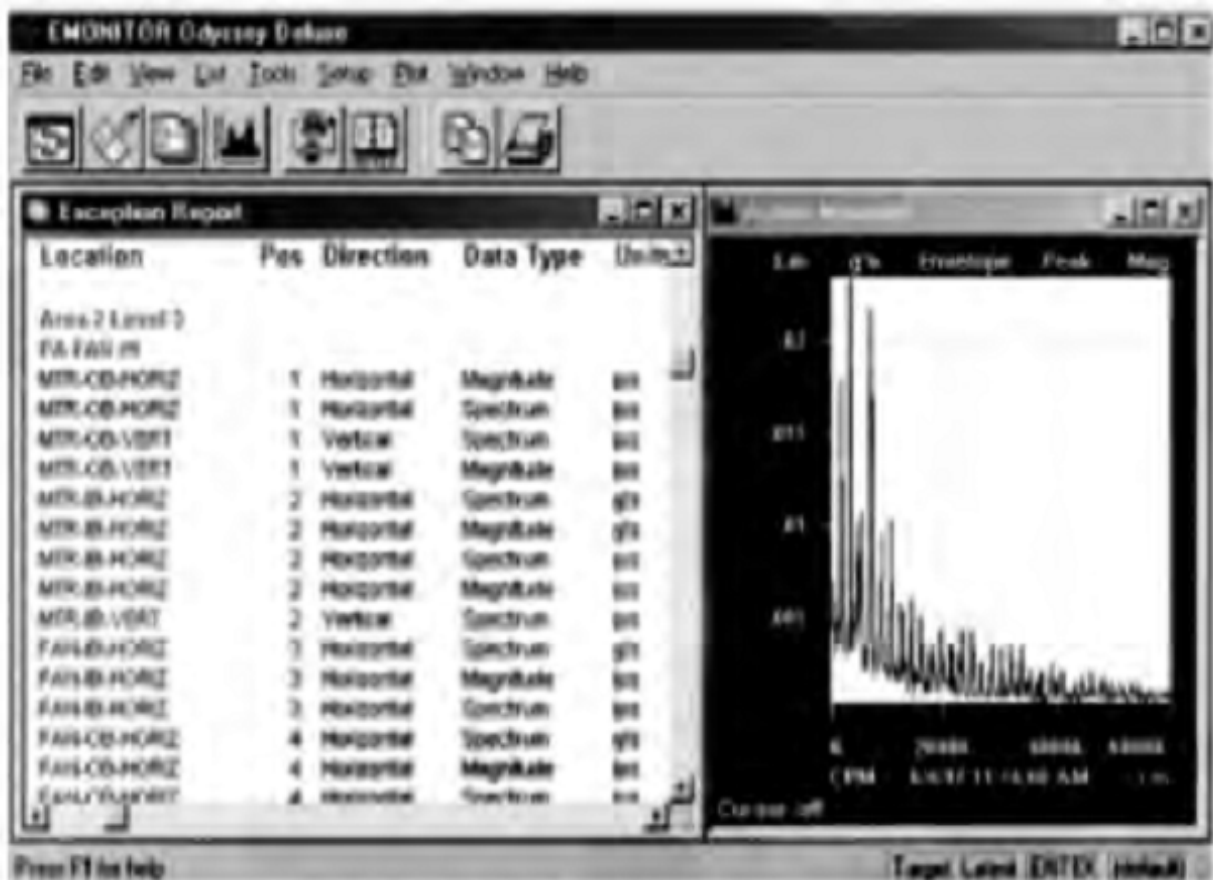
Παρέχουν εκθέσεις φιλικές προς τον χρήστη.

#### *Μειονεκτήματα*

Τα προγράμματα λογισμικού είναι ακριβά, και μερικές φορές έχουν σχεδόν το ίδιο κόστος με τους συλλέκτες δεδομένων / αναλυτές.

Θα πρέπει να διαμορφωθούν για ατομικές ανάγκες. Μια μεγάλη παρτίδα των πληροφοριών που απαιτείται ως αρχική είσοδο.

Προγράμματα από ένα συγκεκριμένο προμηθευτή δεν είναι συμβατά με άλλες μάρκες συλλεκτών / αναλυτών δεδομένων και τα προγράμματά τους. Γίνονται προσπάθειες για να επιλυθεί, αλλά μέχρι σήμερα παραμένει ένα πρόβλημα.



**Σχήμα 3.11** Χαρακτηριστική έξοδος από λογισμικό διαχείρισης βάσεων δεδομένων (πηγή: φυλλάδιο Entek EMONITOR Odessa)

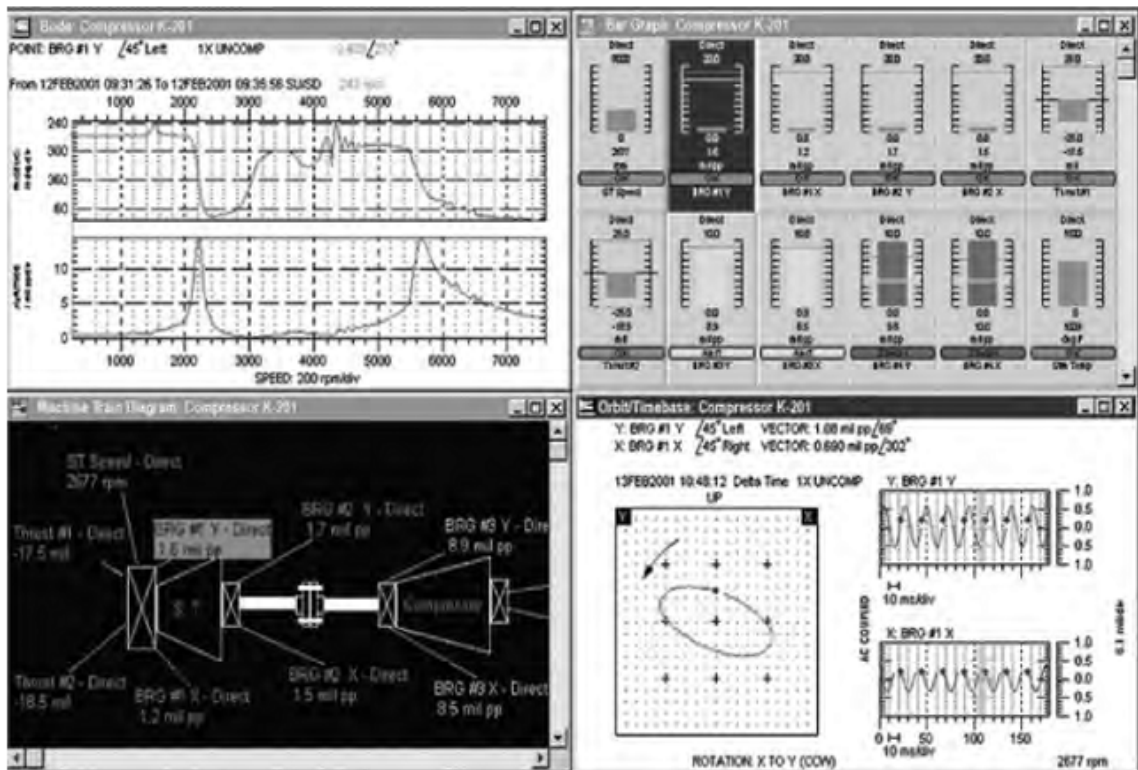
### 3.3.4 Απόκτηση και ανάλυση δεδομένων με σύνδεση δικτύου

Οι κρίσιμες μηχανές, όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες ενότητες, σχεδόν πάντοτε παρέχονται με συνεχή σύνδεση των συστημάτων παρακολούθησης. Εδώ οι αισθητήρες (π.χ.

ανιχνευτές δινορευμάτων εγκαθίστανται σε εγκαταστάσεις στροβιλομηχανών) είναι μόνιμα εγκατεστημένοι στα μηχανήματα σε κατάλληλες θέσεις μέτρησης και είναι σε απευθείας σύνδεση με τον εξοπλισμό απόκτησης και ανάλυσης δεδομένων. Τα δεδομένα λαμβάνονται αυτόματα για κάθε θέση και η ανάλυση μπορεί να εμφανιστεί σε έναν τοπικό εξοπλισμό παρακολούθησης, ή μπορούν να μεταφερθούν σε έναν απομακρυσμένο υπολογιστή με εγκατεστημένο λογισμικό διαχείρισης βάσεων δεδομένων. Επειδή ο εξοπλισμός παρακολούθησης είναι μόνιμα συνδεδεμένος με τους αισθητήρες, τα διαστήματα μεταξύ των μετρήσεων είναι σύντομα και η μέτρηση μπορεί να θεωρηθεί ως συνεχής. Αυτή η ικανότητα παρέχει έγκαιρη ανίχνευση των σφαλμάτων και παρέχει την ικανότητα για προστατευτική δράση στα κρίσιμα μηχανήματα.

Η προστατευτική δράση που λαμβάνεται με απευθείας σύνδεση με τον εξοπλισμό απόκτησης και ανάλυσης δεδομένων είναι στη μορφή συναγερμών προειδοποίησης των χρηστών για μία μη φυσιολογική κατάσταση (Σχήμα 3.12). Σε περιπτώσεις σοβαρών βλαβών, αυτή η προστατευτική δράση μπορεί να κλείσει αυτόματα τα μηχανήματα για την πρόληψη καταστροφικών βλαβών.

Η μεταφορά των πληροφοριών σε έναν υπολογιστή με λογισμικό διαχείρισης βάσεων δεδομένων βελτιώνει την άνεση και τη δύναμη των απόκτησης δεδομένων με άμεση σύνδεση. Είναι επίσης δυνατό να συνδεθούν πολλαπλές τοπικές μονάδες παρακολούθησης που μπορούν να στείλουν δεδομένα από διαφορετικές μηχανές σε ένα κεντρικό υπολογιστή. Έτσι, οι μηχανές σε διάφορες φυσικές τοποθεσίες μπορούν να παρακολουθούνται από μία τοποθεσία. Επίσης, μπορούν να μεταφερθούν πληροφορίες από τον κεντρικό υπολογιστή στην τοπική μονάδα παρακολούθησης χειρισμό εξ'αποστάσεως (βλέπε σχήμα 3.13).



**Σχήμα 3.12** Έξοδος λογισμικού απόκτησης δεδομένων (πηγή: Bently Nevada - φυλλάδιο λογισμικού διαχείρισης μηχανημάτων)

Το λογισμικό ανάλυσης ταλαντώσεων/ διαχείρισης βάσεων δεδομένων μπορεί επίσης να δικτυωθεί σε πολλαπλούς υπολογιστές με το τοπικό δίκτυο (LAN) ή δίκτυο ευρείας περιοχής (WAN) για να επιτρέψει σε πολλαπλούς χρήστες να εκτελούν την παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανημάτων.

#### Πλεονεκτήματα

Εκτελεί συνεχή, online παρακολούθηση των κρίσιμων μηχανημάτων.

Οι μετρήσεις λαμβάνονται αυτόματα, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Παρέχει σχεδόν στιγμιαία ανίχνευση των ελαττωμάτων.

#### Μειονεκτήματα

Η αξιοπιστία των ηλεκτρονικών συστημάτων θα πρέπει να είναι στο ίδιο επίπεδο με τα μηχανήματα που παρακολουθούν.

Η αποτυχία μπορεί να αποδειχθεί πολύ ακριβή.

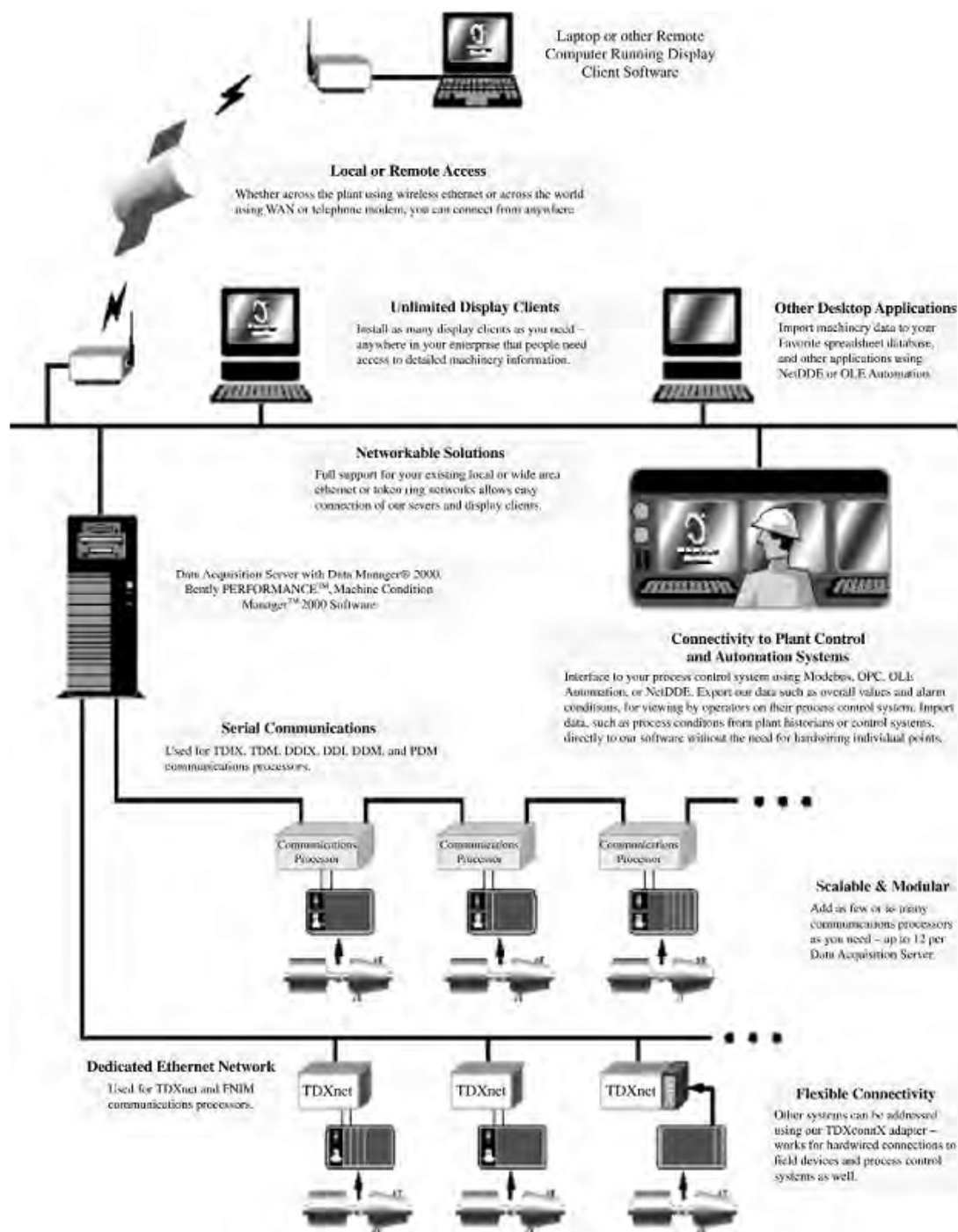


Η εγκατάσταση και ανάλυση απαιτεί ειδικές δεξιότητες.

Είναι ακριβά συστήματα.

### **3.3.5 Πληροφοριακά συστήματα που βασίζονται στη γνώση**

Εκτός από το βασικό λογισμικό που αναφέρθηκε παραπάνω, διατίθενται επίσης στο εμπόριο πληροφοριακά προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών που βασίζονται στην γνώση που χρησιμοποιούν τις αρχές της τεχνητής νοημοσύνης (AI). Χρησιμοποιώντας την εμπειρία των αναλυτών ταλαντώσεων, πληροφορίες από το σχεδιασμό της μηχανής και τα χαρακτηριστικά των ταλαντώσεων της, τα συστήματα αυτά αναλύουν αυτόματα και αξιολογούν την κατάσταση της μηχανής. Μετά την αξιολόγηση των πληροφοριών, το λογισμικό μπορεί να προσφέρει μια διάγνωση πιθανών προβλημάτων σε μια μηχανή, τη σοβαρότητα του προβλήματος και μπορεί ακόμη συνιστά δράσεις που μπορούν να αμβλύνουν το πρόβλημα.



**Σχήμα 3.13** Ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρονικής παρακολούθησης (πηγή: Bently Nevada - φυλλάδιο λογισμικού διαχείρισης μηχανημάτων)

Τα συχνά ονομαζόμενα ειδικά συστήματα, τα συστήματα αυτά απαιτούν να αναλύονται οι πληροφορίες της μηχανής και τα χαρακτηριστικά του, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα μαθηματικό μοντέλο της μηχανής. Το μοντέλο στη συνέχεια αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται από το ειδικό σύστημα για να αναλύσει τα τρέχοντα δεδομένα και να προβλέψει μια ένα πρόβλημα. Το σύστημα μελετά τα συμπτώματα της μηχανής και δίνει συστάσεις ανάλογα με τους παράγοντες εμπιστοσύνης σε σχέση με την σοβαρότητα του προβλήματος.

Τα ειδικά συστήματα αναλύουν τα τρέχοντα δεδομένα και τα συγκρίνουν με τα ιστορικά δεδομένα και αναζητούν οποιεσδήποτε αλλαγές. Τα συστήματα στη συνέχεια κάνουν αποτίμηση της σοβαρότητας των σημαντικών αλλαγών χρησιμοποιώντας τα απόλυτα κατώτατα όρια, τα στατιστικά όρια και τον ρυθμό μεταβολής στους υπολογισμούς. Στη συνέχεια εφαρμόζεται στα δεδομένα μια σειρά από αποδεδειγμένους κανόνες. Τέλος, όλες οι παραβάσεις κανόνων συνδυάζονται για να παράγουν μια πιθανότητα ότι η διάγνωση είναι σωστή.

### **3.3.6 Συστήματα μέτρησης φάσης**

Οι τεχνικές συλλογής δεδομένων που συζητήθηκαν νωρίτερα είχαν σχέση με τη μέτρηση της κίνηση ταλάντωσης, και ιδίως σε σχέση με το εύρος της ταλάντωσης. Μια πολύ σημαντική πτυχή του κύματος ταλάντωσης, μαζί με το εύρος και την συχνότητα της, είναι η σχέσεις φάσης. Στην ανάλυση ταλάντωσης, η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο διαφορετικών κυματομορφών χρησιμοποιείται για πολλές διαφορετικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα η διάγνωση ελαττωμάτων στα μηχανήματα.

Η φάση μπορεί να μετρηθεί με πολλούς τρόπους, και μερικοί από αυτούς συζητούνται παρακάτω. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην ανάλυση ταλαντώσεων, τα όργανα μέτρησης φάσης χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τους αναλυτές. Ο αναλυτής μαζεύει την κυματομορφή ταλάντωσης, και τα ακόλουθα όργανα μπορούν να παρέχουν πληροφορίες φάσης και rpm:

- Στροβοσκόπια(stroboscopes)
- Αναλυτές Διπλού καναλιού
- Φωτοκύτταρα (phototachometers)
- Ηλεκτρομαγνητικούς και μη-επαφής συλλέκτες (keyphasors / κωδικοποιητές άξονα).

#### **Στροβοσκόπια**

Τα στροβοσκόπια είναι κανονικά ένα μέρος του κιτ εξαρτημάτων που παρέχονται μαζί με έναν αναλυτή ταλάντωσης, αλλά είναι επίσης διαθέσιμα ως ξεχωριστά όργανα. Τα στροβοσκόπια έχουν μια υψηλής έντασης φως που εκτονώνεται σε μια ορισμένη συχνότητα,

ενεργοποιείται εσωτερικά ή από τον αναλυτή ταλάντωσης. Παρέχει μια οπτική μέθοδο για την παρατήρηση των διαφορών φάσεων (Σχήμα 3.14).



**Σχήμα 3.14** Στροβοσκόπιο (πηγή: Monarch Stroboscopes)

Για να ληφθεί μια ανάγνωση διαφοράς φάσεως, δημιουργείται ένα σημείο αναφοράς επάνω στον ρότορα . Ένα αυλάκι ή μια εγκοπή που φαίνεται εύκολα είναι επίσης μια καλή αναφορά. Μία άλλη μέθοδος είναι να γίνει μία γωνιακή κλίμακα με σημάνσεις 0-360 ° επί της ατράκτου. Έτσι γίνονται οι μετρήσεις φάσης με το μικρότερο δυνατό σφάλμα. Το στροβοσκόπιο ενεργοποιείται από το σήμα ταλάντωσης 1 × rpm του αναλυτή, και το σημείο αναφοράς φαίνεται να είναι σταθερό σε κάποια γωνιακή θέση. Αυτή η γωνιακή θέση στη συνέχεια καταγράφεται.

Στη συνέχεια, ο ανιχνευτής ταλάντωσης καθορίζεται σε μία άλλη θέση. Ο στρόβος ενεργοποιείται και πάλι από την ταλάντωση 1 × rpm στη θέση αυτή. Το σήμα αναφοράς πλέον, ανάλογα και με την κατάσταση, θα φαίνεται σταθερό κατά την ίδια ή κάποια άλλη γωνιακή θέση. Αυτή η ανάγνωση επίσης καταγράφεται. Η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο θέσεων όπου οι ανιχνευτές ταλαντώσεων τοποθετήθηκαν στην μηχανή δίνεται από τη διαφορά της γωνιακής θέσης των σημείων αναφοράς, όπως παρατηρείται με τον στρόβο.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, μόνο ένα τμήμα του άξονα μπορεί να είναι ορατό, ως μία πλαγία όψη από τον προστατευτικό συμπλέκτη. Σε περιπτώσεις όπου είναι ορατό μόνο το ήμισυ της περιφέρειας του άξονα, ένα ενιαίο σημείο αναφοράς μπορεί να είναι ανεπαρκές, ειδικά όταν το σημείο αναφοράς είναι στην την κρυμμένη πλευρά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα δύο σήματα μπορούν να γίνουν, για παράδειγμα, ένα μικρό «ο» και «x» σε απόσταση 180 °. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η μέθοδος αυτή είναι αξιόπιστη μόνο για συγκρίσεις γενικής φάσης επειδή αυτό είναι μια κατά προσέγγιση οπτική μέθοδος . Για μια πιο ακριβή ανάγνωση φάσης, μια ταινία που σημειωμένη με γωνιακές μοίρες εφαρμόζεται γύρω από την περιφέρεια

του άξονα. Ωστόσο, ακόμη και αυτό είναι λίγο δύσκολο όταν η διάμετρος του άξονα είναι μικρή.

#### *Πλεονεκτήματα*

Τα στροβοσκόπια είναι ελαφριά, εύκολα στη χρήση και φορητά.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα για τη μέτρηση rpm, χρησιμοποιώντας μία εσωτερική σκανδάλη για να κάνει την άτρακτο να εμφανίζεται σταθερή. Η συχνότητα της σκανδάλης είναι η ίδια με την ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου.

Με το «Πάγωμα» του συγκροτήματος των στρόβων μπορούν να παρατηρηθούν χαλαρές βίδες σύνδεσης, κατεστραμμένες ροδέλες ζεύξης και άλλα ελαττώματα .

Μερικά στροβοσκόπια μπορούν να λειτουργήσουν ως εξωτερικά ερεθίσματα όπως φωτοκύτταρα, ταχύμετρα λέιζερ ή keyphasors.

#### *Μειονεκτήματα*

Μια μηχανή που δεν έχει μια εγκοπή αναφοράς ή σφηνόδρομο πρέπει να σταματήσει να δημιουργηθεί ένα. Αυτό μπορεί να είναι δύσκολο σε εγκαταστάσεις συνεχούς λειτουργίας.

Μπορεί να παράσχει μόνο διαφορά φάσεως για ταλαντώσεις  $1 \times \text{rpm}$ . Εάν, για παράδειγμα, η ενδιαφέρουσα ταλάντωση είναι  $2 \times \text{rpm}$ , το στροβοσκόπιο θα αναβοσβήσει δύο φορές κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής του άξονα και το σημείο αναφοράς θα εμφανιστεί σε δύο θέσεις. Αυτό είναι πρόβλημα, ακόμη και με υπό-αρμονικές και υψηλότερες αρμονικές ταλαντώσεις.

Είναι δύσκολο να ληφθούν ακριβείς μετρήσεις φάσης σε μοίρες.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται για τη χρήση των στροβοσκοπίων σε επικίνδυνες περιοχές.

Για να μετρηθεί η φάση, πρέπει ο χειριστής να είναι σε κοντινή απόσταση από το μηχάνημα.

### **Αναλυτές διπλού καναλιού**

Ένας αναλυτής μονού καναλιού μπορεί να δεχθεί μόνο μία είσοδο από ένα επιταχυνσιόμετρο την φορά, ενώ ένα όργανο διπλού καναλιού (Σχήμα 3.15) μπορεί να δεχθεί εισόδους από δύο επιταχυνσιόμετρα ταυτόχρονα σε διαφορετικές θέσεις στο μηχάνημα. Έτσι, μπορούν να συλλεχθούν και να αναλυθούν δύο κυματομορφές ταλάντωσης. Όπως θα δούμε αργότερα, αυτό μπορεί να προσφέρει πολύ σημαντικά δεδομένα ταλαντώσεων.

#### *Πλεονεκτήματα*

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχει ανάγκη για τα σήματα αναφοράς επί της ατράκτου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ότι δεν υπάρχει ανάγκη να κλείσει το μηχάνημα για μπουκ σήμαδια στην άτρακτο.

Οι διαφορές φάσεως που λαμβάνονται είναι μεγάλης ακρίβειας.

Μπορεί να παρέχει διαφορές φάσεως σε οποιαδήποτε συχνότητα.



**Σχήμα 3.15** Αναλυτής διπλού καναλιού[1]

#### *Μειονεκτήματα*

Το μοντέλο διπλού καναλιού του αναλυτή είναι πιο ακριβά από τους αναλυτές μονού καναλιού.

### **Φωτοκύτταρο**

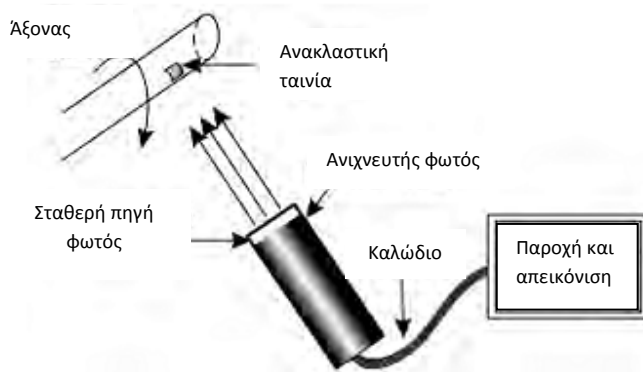
Όποτε απαιτούνται ακριβείς ή απομακρυσμένες ενδείξεις της φάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας ανιχνευτής φωτοκύτταρου, ένας ηλεκτρομαγνητικός ή συλλέκτης μη-επαφής. Αυτοί συνήθως εγκαθίστανται εντός της στενής εγγύτητας του άξονα (σχήμα 3,16). Όπως και με τα στροβοσκόπια, πρέπει να υπάρχει ένα σημείο αναφοράς στον άξονα για να συλλέξει στοιχεία. Ένας ανιχνευτής φωτοκύτταρου ανταποκρίνεται στην ανακλαστικότητα του στόχου. Ένας πολύ συνηθισμένος τρόπος είναι να τυλίξετε τον άξονα με μια μαύρη ταινία (π.χ. ηλεκτρικά μονωτική ταινία) και στη συνέχεια να κολληθεί μια λεπτή ανακλαστική επιφάνεια σε

όλη την ταινία, ή να ζωγραφίστει μια λευκή γραμμή στην ταινία. Ο στόχος είναι να παραχθεί μία απότομη αλλαγή στην ανακλαστικότητα στην περιοχή ενδιαφέροντος του φωτοκύτταρου κατά την διάρκεια κάθε περιστροφής της ατράκτου.



**Σχήμα 3.16** Πακέτο φωτοκυττάρου[1]

Το φωτοκύτταρο είναι κάπως παρόμοιο με το στροβοσκόπιο, εκτός από ότι τα ηλεκτρονικά του αφαιρούν το χειροκίνητο μέρος της διαδικασίας. Από τη συσκευή, μεταδίδεται μια σταθερή πηγή φωτός, παρά μια στροβοσκοπική πηγή φωτός. Ένας φωτογραφικός ανιχνευτής (ή φωτοκύτταρο) παράγει ένα παλμό κάθε φορά που το φως ανακλάται από την ανακλαστική επιφάνεια επί της περιστρεφόμενης ατράκτου (η αντανακλαστική ταινία). Όλες οι μετρήσεις φάσης γίνονται σε σχέση με την ανακλαστική ταινία, η οποία αντιμετωπίζεται ως μηδέν μοίρες. Δεδομένου ότι το ανακλώμενο φως παράγει έναν παλμό ανά περιστροφή, ο ρυθμός περιστροφής του άξονα μπορεί επίσης να καθοριστεί εύκολα (Σχήμα 3.17).



**Σχήμα 3.17** Αρχή φωτοκύτταρου[1]

### Ηλεκτρομαγνητικοί και συλλέκτες μη-επαφής (keyphasor)

Με τον αισθητήρα μη επαφής ή ηλεκτρομαγνητικό συλλέκτη, ο άξονας θα πρέπει να έχει μια εγκοπή, κατάθλιψη, κλειδί ή αύλακα. Μια προσωρινή μέθοδος είναι να επισυνάψετε ένα κλειδί γύρω από τον άξονα είναι με μία ταινία υψηλής αντοχής για να κρατάει το κλειδί στη θέση του. Αυτό δεν συνιστάται για άξονες υψηλής ταχύτητας.

Στον ηλεκτρομαγνητικό αισθητήρα (Σχήμα 3.18), η τάση εξόδου αλλάζει για να δείξει ότι έχει περάσει από το σημείο αναφοράς. Αυτή η αλλαγή του παλμού τάσεως εξόδου συγκρίνεται τότε με την εμφάνιση του μέγιστου εύρους ταλάντωσης για τον προσδιορισμό της διαφοράς φάσης σε διαφορετικές θέσεις. Το φωτοκύτταρο και ο συλλέκτης μη-επαφής δεν μπορούν να προβάλλουν ενδείξεις φάσης από μονοί τους. Πρέπει να διαβιβάζουν τα δεδομένα τους σε έναν αναλυτή ή παλμογράφο για ανάλυση.



**Σχήμα 3.18** Keyphasor[1]

Σε αντίθεση με το στροβοσκόπιο, με αυτά τα μέσα είναι δυνατό να προσδιοριστεί φάση  $2 \times \pi \text{ rad}$  και κάτω και επίσης υψηλότερες αρμονικές. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται ένα



σήμα αναφοράς στην επιθυμητή συχνότητα. Έτσι, αν ήταν επιθυμητό να παρακολουθηθεί η φάση  $2 \times \text{rpm}$ , πρέπει να δοθούν δύο σήματα αναφοράς στην άτρακτο. Με αυτόν τον τρόπο, θα παράγονται δύο ερεθίσματα ανά περιστροφή, και ο αναλυτής θα ενεργοποιείται σε 2 στροφές ανά λεπτό και, κατά συνέπεια, η ανάγνωση φάσης θα είναι  $2 \times \text{rpm}$ .

Όταν πρέπει να συγκριθούν υπό-πολλαπλάσια ή μη-αρμονικές συχνότητες ταλάντωσης, μπορεί να είναι χρησιμοποιείται ένας συλλέκτης αναφοράς ταλάντωσης και ένας αναλυτής αναφοράς ταλάντωσης με ρυθμιζόμενο φίλτρο για να παρέχει ένα σήμα αναφοράς σε οποιαδήποτε επιθυμητή συχνότητα της ταλάντωσης.

### 3.3.7 Στρεπτικές ταλαντώσεις

Οι στρεπτικές ταλαντώσεις είναι παρόμοιες με πλευρικές ταλαντώσεις που συζητήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Κάθε μηχανικό σύστημα που περιστρέφεται και μεταδίδει ισχύ υπόκειται σε ένα ορισμένο είδος της στρεπτικής συμπεριφοράς. Τα τρία σημαντικά είδη της στρεπτικής συμπεριφοράς που ως επί το πλείστον αναφέρονται στην ανάλυση είναι:

1. Αλλαγές στην περιστροφή
2. Στρεπτικές ταλαντώσεις
3. σφάλμα μετάδοσης.

Οι μετρητές στρεπτικής ταλάντωσης που μετρούν τα προαναφερθέντα φαινόμενα περιγράφονται παρακάτω.

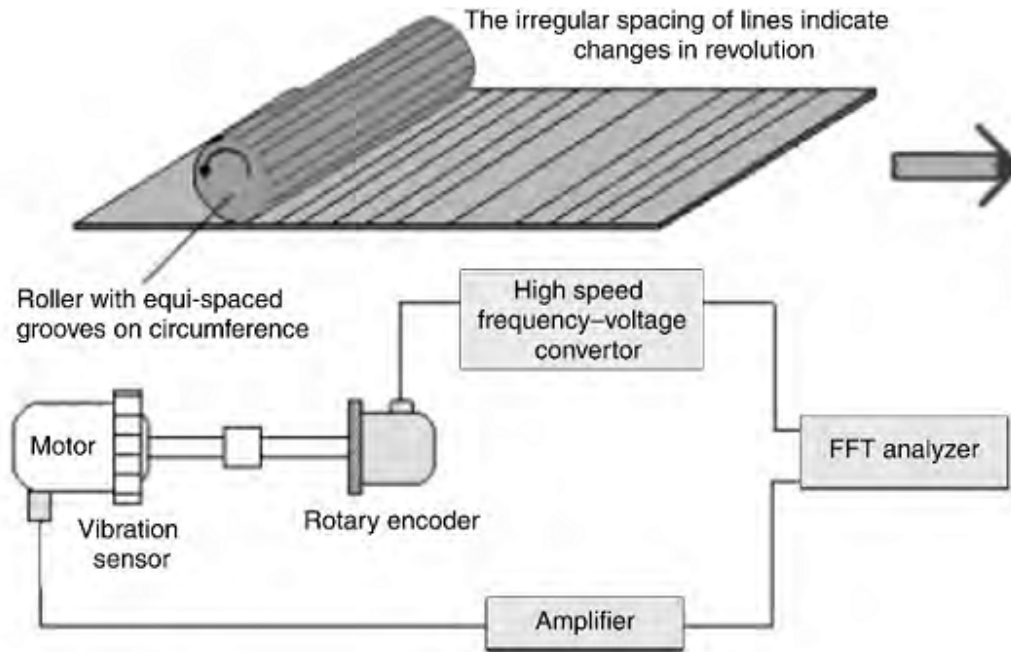
#### Αλλαγές στην περιστροφή

Για κάθε περιστροφή, οποιοδήποτε σημείο επί της περιφέρειας ενός άξονα πρέπει να καλύψει μια γωνιακή απόσταση  $360^\circ$  για να ολοκληρώσει μια περιστροφή. Ο ρυθμός με τον οποίο περιστρέφεται ονομάζεται τη γωνιακή ταχύτητα. Οι περισσότεροι από εμάς πιστεύουμε ότι αυτό συμβαίνει σχεδόν ομοιόμορφα. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει σε πολλές περιπτώσεις.

Ας υποθέσουμε ότι η ταχύτητα του άξονα είναι  $1 \text{ rpm}$ . Ας χωρίσουμε την διαδρομή από οποιοδήποτε σημείο της περιφέρειας της ατράκτου σε τέσσερις τομείς,  $90^\circ$  μεταξύ τους. Εάν η γωνιακή ταχύτητα είναι ομοιόμορφη, τότε κάθε τομέας θα πρέπει να καλύπτετε σε 15 δευτερόλεπτα ακριβώς. Αντ' αυτού, ας πούμε ότι η πρώτος τομέας καλύπτεται σε 10 s, ο επόμενος σε 20 s, ο τρίτος καλύπτεται πάλι σε 10 s και το τελικό τμήμα σε 20 s. Έτσι, σε ένα κύκλο γωνιακή ταχύτητα αυξάνεται και μειώνεται, δημιουργώντας αυτό που είναι γνωστό ως αλλαγές στην περιστροφή.

Για τη μέτρηση αυτής της αλλαγής στην περιστροφή, χρησιμοποιείται ένας υψηλής ανάλυσης περιστροφικός κωδικοποιητής. Το σήμα εξόδου από τον κωδικοποιητή

μετατρέπεται από συχνότητα σε τάση (P-V) σε υψηλή ταχύτητες, ανά παλμό, για να προσδιοριστούν οι αλλαγές σε κάθε περιστροφή (σχήμα 3,19).

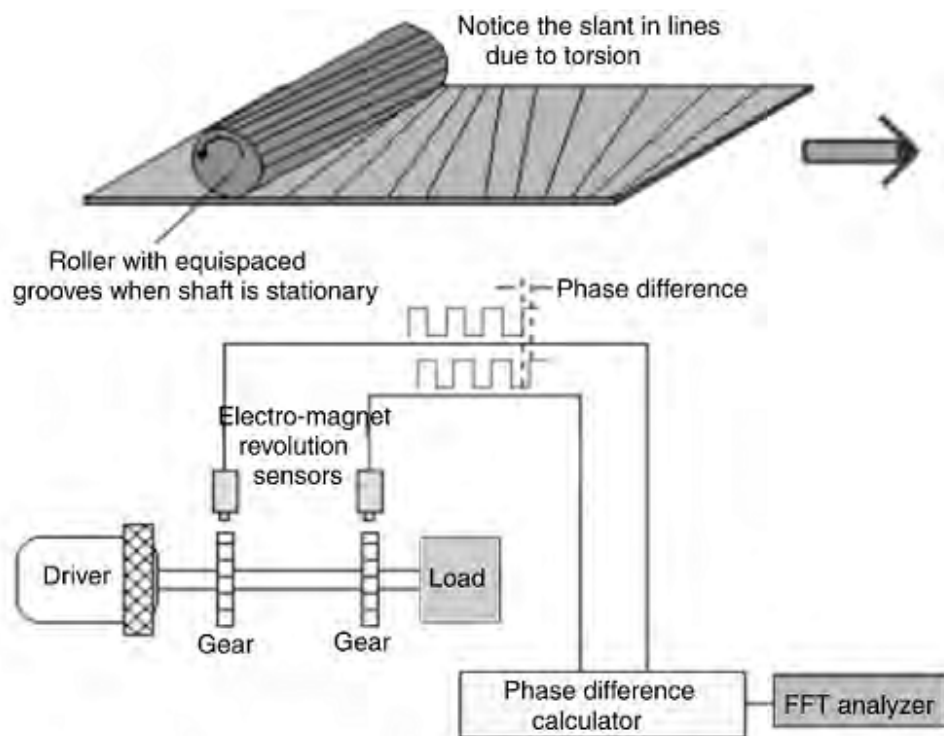


**Σχήμα 3.19** Γωνιακή ταχύτητα έναντι περιστροφών[1]

### Στρεπτικές ταλαντώσεις

Η στρεπτική ταλάντωση αντιπροσωπεύει μεταβολές στη σχετική γωνιακή μετατόπιση μεταξύ δύο σημείων σε έναν περιστρεφόμενο άξονα. Επιλέξτε δύο συγγραμμικά σημεία στην περιφέρεια ενός ακίνητου άξονα. όταν η άτρακτος αρχίζει να μεταδίδει ισχύ, μπορεί να στρίψει και τότε δεν υπάρχει πλέον μια ευθεία γραμμή που ενώνει τα δύο σημεία. Αυτή η γραμμή θα μπορούσε τότε να είναι κεκλιμένη ή σπειροειδές σχήμα (Σχήμα 3.20).

Κανονικά, χρησιμοποιείται ένα ζεύγος ηλεκτρομαγνητικών αισθητήρων περιστροφής για τη μέτρηση αυτή. Οι μετρητές ταλάντωσης μετρούν την ροπή που αναπτύσσεται μεταξύ των κινητηρίων και της πλευράς του φορτίου της η άτρακτος ως στρεπτική διαφορά φάσης. Η διαφορά φάσης που λαμβάνεται είναι F-V (συχνότητα σε τάση) μετατρέπονται σε υψηλές ταχύτητες και υφίστανται επεξεργασία σύμφωνα με τους υπολογισμούς της συχνότητας με καθοριστεί η στρεπτική ταλάντωση.



**Σχήμα 3.20** Στρεπτική ταλάντωση[1]

## Σφάλμα μετάδοσης

Σκεφτείτε ένα μηχάνημα πολλαπλών αξόνων περιστροφής. Ένα σφάλμα μετάδοσης είναι ο προπορεία ή καθυστέρηση στην γωνίας περιστροφής στις ανάντη και κατάντη περιοχές μιας μονάδας μεταφοράς ισχύος.

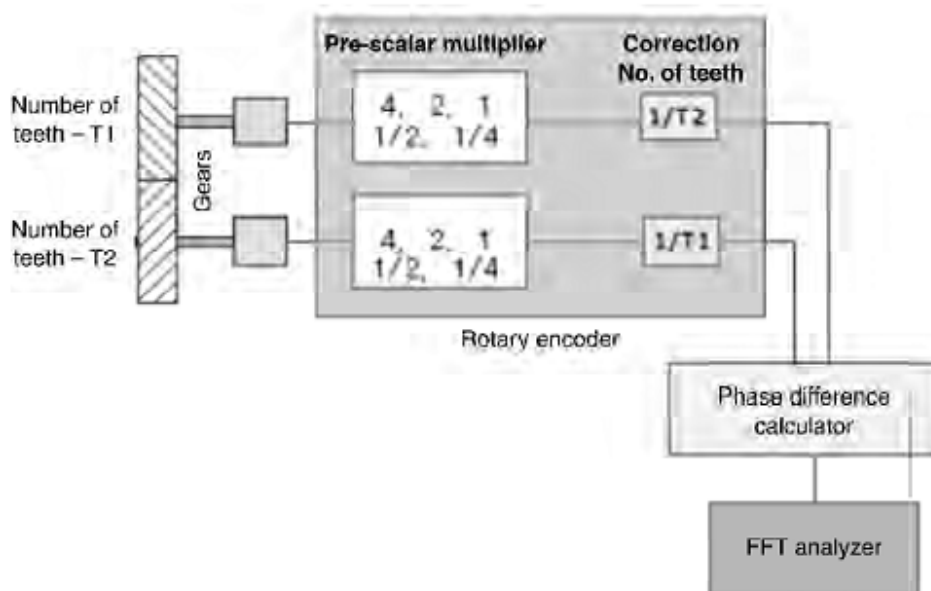
Αυτό μετράται με την διαφορά φάσης μεταξύ των ανάντη και κατάντη περιοχών μιας μετάδοσης ισχύος με τρόπο παρόμοιο με την ανίχνευση των στρεπτικών ταλαντώσεων, όπως συζητήθηκε νωρίτερα. Προσδιορίζεται το σφάλμα μετάδοσης ανά-βήμα από τη διαφορά φάσης, και στη συνέχεια σε επεξεργασία από τους υπολογισμούς της συχνότητας για τον προσδιορισμό του σφάλματος μετάδοσης (Σχήμα 3.21).

Σε ένα πολύ-άξονο σύστημα, όπου τα γρανάζια, μάντες και αλυσίδες διασυνδέονται, στρεπτικές ταλαντώσεις μπορεί να συμβούν λόγω της μεταφοράς σφάλματος που απορρέει από κακή ακρίβεια κατασκευής, μια παραμόρφωση στα συστήματα μετάδοσης ισχύος ή μια αλλαγή στην περιστροφή των περιστρεφόμενων εξαρτημάτων.

Κανονικά, οι αλλαγές περιστροφής, στρεπτική ταλάντωση και τα σφάλματα μετάδοσης συνδέονται με ένα πολύπλοκο τρόπο. Μια ποικιλία από δυσμενείς επιδράσεις αναπτύσσονται σε συστήματα τα οποία έχουν αλλαγές όπως:

- Αύξηση ταλάντωσης ή / και θορύβου
- Επιδείνωση στην ακρίβεια εντοπισμού θέσης
- Επιδείνωση στην ακρίβεια της διοχέτευσης
- Κατανομές λόγω κόπωσης.

Έτσι, κάθε σύστημα εκ περιτροπής που αποτελείται από περιστρεφόμενα μέρη και συστήματα μετάδοσης ισχύος, είναι σημαντικό να μετρηθούν αυτές τις τρεις παράμετροι: την αλλαγή περιστροφής, στρεπτική ταλάντωση και το σφάλμα μετάδοσης, προκειμένου να αναλύσει τις σχέσεις αιτίας-αποτελέσματος.



**Σχήμα 3.21** Καθορισμός σφάλματος μετάδοσης[1]

### Μετρητές στρεπτικής ταλάντωσης

Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα διπλού αισθητήρα, οι στρεπτικοί μετρητές (Σχήμα 3.22) μπορούν οπτικά να ανιχνεύσουν παλμούς περιστροφής, τη μέτρηση των μεταβολών της γωνιακής μετατόπισης και να αναλύσουν την στρεπτική ταλάντωση απλά κολλώντας μια ριγέ ταινία πάνω στον περιστρεφόμενο άξονα υπό εξέταση. Ο αναλυτής FFT που ενσωματωμένος μέσα στην κύρια μονάδα επιτρέπει την ανάλυση εντοπισμού ανάλυση συχνοτήτων και εκτύπωση ανάλυσης αποτελεσμάτων του πεδίου.



**Σχήμα 3.22** Μετρητές στρεπτικής ταλάντωσης (πηγή: Ονο Sokki, Ιαπωνία Τεχνική Έκθεση, ιστοσελίδα)

Στις σχηματικές αναπαραστάσεις στρεπτικής ταλάντωσης που είδαμε παραπάνω, ας υποθέσουμε ότι δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί η σχετική μετατόπιση μεταξύ δύο σημείων. Το συστατικό της στρεπτικής ταλάντωσης μπορεί να αναλυθεί, από τις μεταβολές της γωνιακής μετατόπισης απλά κολλώντας μια ριγέ ταινία σε μία συγκεκριμένη θέση στο αντικείμενο.

### **3.4 Συμπέρασμα**

Έτσι, το κεφάλαιο αυτό περικλείει τον τρόπο με τον οποίο συλλαμβάνεται η κίνηση ταλάντωσης του μηχανήματος χρησιμοποιώντας ανιχνευτές και μετατρέποντας την σε ηλεκτρικά σήματα. Αυτά τα σήματα κατόπιν συλλέγονται με συλλέκτες / αναλυτές που επεξεργάζονται τα σήματα των δεδομένων. Ο μετασχηματισμός του ηλεκτρικού σήματος στα συστατικά του με αναλυτές, και η πληροφορίες και η καταγραφή που σχετίζονται με δεδομένα της ταλάντωσης σχηματίζουν ένα τμήμα της επεξεργασίας σήματος.

Η επεξεργασία αυτών των σημάτων είναι η βάση της μελέτης στο επόμενο κεφάλαιο. Μετά την επεξεργασία των σημάτων, οι αναλυτές μπορούν να εκδώσουν τα πιο σημαντικά στοιχεία που μπορούν να συσχετιστούν με τα ελαττώματα που προκύπτουν σε μηχανήματα ή τα εξαρτήματα τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### Επεξεργασία σήματος, εφαρμογές και αναπαραστάσεις

#### 4.1 Ανάλυση ταχέως μετασχηματισμού Fourier (FFT)

Η ταλάντωση της μηχανής είναι μια φυσική κίνηση. Οι μετατροπείς ταλαντώσεων μετατρέπουν αυτήν την κίνηση σε ηλεκτρικό σήμα. Το ηλεκτρικό σήμα στη συνέχεια μεταφέρεται στους συλλέκτες δεδομένων ή αναλυτές. Οι αναλυτές στην συνέχεια επεξεργάζονται το σήμα αυτό για να παράγουν τις FFT και άλλες παραμέτρους. Θα ρίξουμε μια σύντομη ματιά στην επεξεργασία των σημάτων, η οποία θα μας δώσει τις απαραίτητες πληροφορίες για την παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανημάτων. Για να επιτευχθεί η τελική σχετική έξοδος, το σήμα υποβάλλεται σε επεξεργασία με τα ακόλουθα βήματα:

- Είσοδος αναλογικού σήματος
- Φίλτρο ομαλοποίησης
- Μετατροπέας A / D
- Επικάλυψη
- Windows
- FFT
- Μέσος όρος
- Εμφάνιση / αποθήκευση.

Πριν μπορέσουμε να συζητήσουμε τα προαναφερθέντα στάδια επεξεργασίας του ψηφιακού σήματος, θα πρέπει να μιλήσουμε για μερικούς ακόμα όρους και έννοιες.

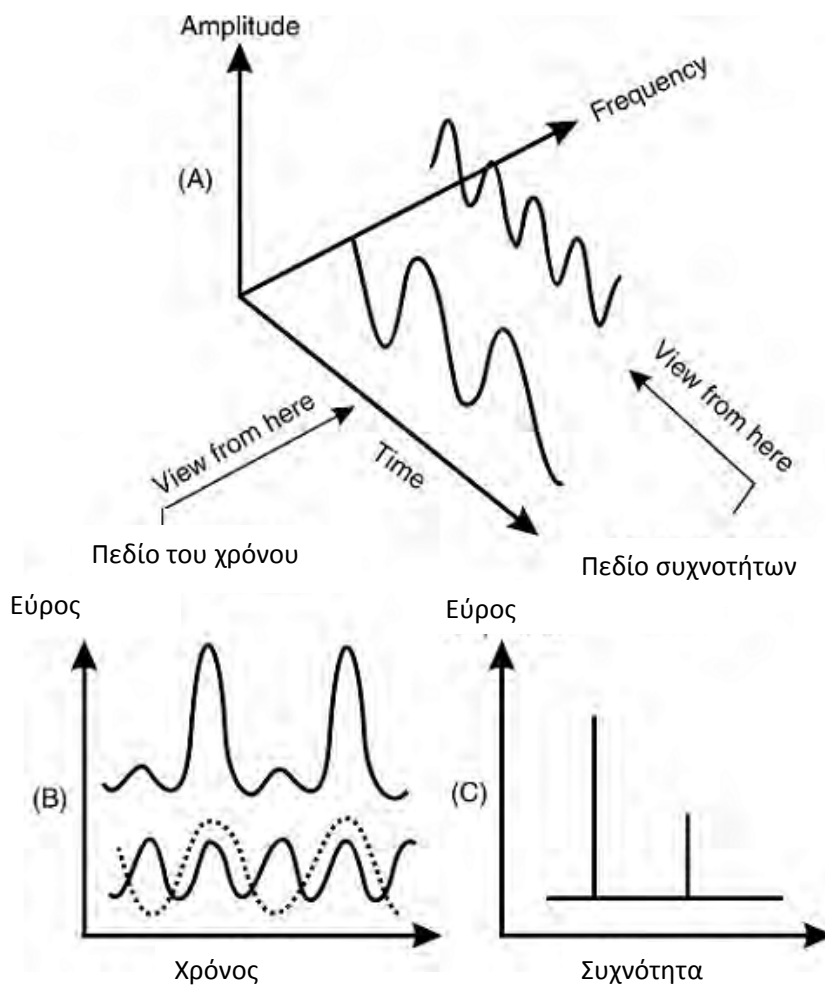
##### 4.1.1 Μετασχηματισμός Fourier

Μια ταλάντωση ή μία απόκριση του συστήματος μπορεί να αναπαρασταθεί με την μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση του εύρους στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας (Σχήμα 4.1).

*Το πεδίο του χρόνου* αποτελείται από το εύρος που ποικίλλει ανάλογα με τον χρόνο. Αυτό συνήθως ονομάζεται και ως φίλτρο εξόδου ή συνολική ένδειξη. *Το πεδίο της συχνότητας* είναι ο τομέας όπου τα εύρη εμφανίζονται ως σειρές από

ημιτονοειδή και συνημιτονοειδή κύματα. Τα κύματα αυτά έχουν ένα μέγεθος και μία φάση, η οποία ποικίλλει ανάλογα με τη συχνότητα.

Οι μετρούμενες ταλαντώσεις είναι πάντοτε σε αναλογική μορφή (στο πεδίο του χρόνου), και πρέπει να μετασχηματίζονται στο πεδίο συχνοτήτων. Αυτός είναι ο σκοπός του ταχέως μετασχηματισμού Fourier (FFT). Ο FFT είναι επομένως ο υπολογισμός σε ένα δείγμα σήματος. Αν ο FFT είναι ένας υπολογισμός για ένα δείγμα σήματος, το πρώτο ερώτημα που τίθεται είναι: πώς μπορούμε να καθορίσουμε το ρυθμό δειγματοληψίας;



**Σχήμα 4.1** Μετασχηματισμός Fourier[1]

### Ρυθμός δειγματοληψίας

Η δειγματοληψία είναι η διαδικασία της καταγραφής του εύρους ενός κύματος σε δεδομένες χρονικές στιγμές, και στη συνέχεια, δημιουργία μιας καμπύλης από τα καταγεγραμμένα

σημεία. Έτσι, τα σημεία (ψηφιακά) των συλλεγμένων δεδομένων της δειγματοληψίας χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή του κύματος, το οποίο ήταν αρχικά σε αναλογική μορφή.

Αν το ανακατασκευασμένο ψηφιακό κύμα πρέπει να μοιάζει με το αρχικό κύμα, τότε πόσο γρήγορα πρέπει να καταγράφουμε το εύρος, ή με άλλα λόγια, να λαμβάνουμε δείγματα έτσι ώστε το ψηφιοποιημένο κύμα είναι ένα ακριβές αντίγραφο του αρχικού αναλογικού κύματος;

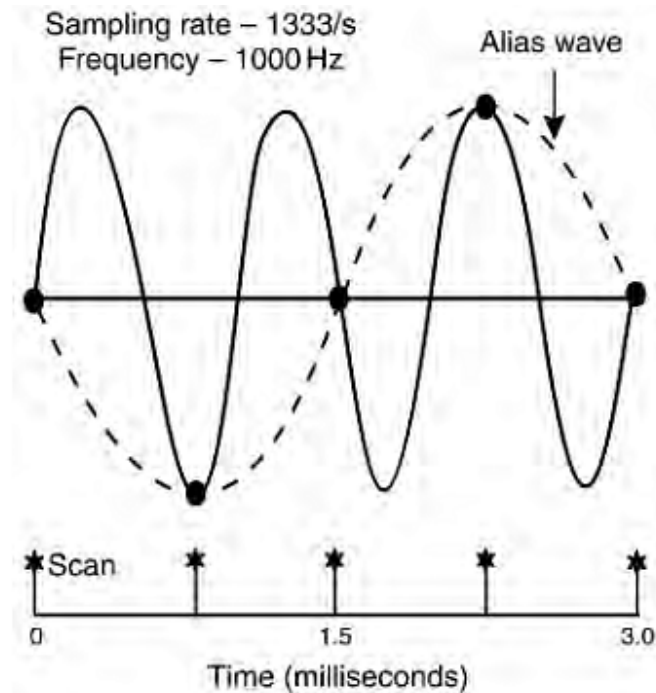
Η απάντηση βρίσκεται στο θεώρημα δειγματοληψίας Nyquist, το οποίο αναφέρει: «Αν δεν θέλουμε να χάσουμε καμία πληροφορία που περιέχεται σε ένα δειγματοληπτικό σήμα, τότε πρέπει να λαμβάνουμε δείγματα με ποσοστό συχνότητας τουλάχιστον δύο φορές την υψηλότερο συνιστώσα της συχνότητας που μας ενδιαφέρει». Το σχήμα 4.2 δείχνει μια περίπτωση όπου ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι μικρότερος από το διπλάσιο της συχνότητας των κυμάτων.

Μπορούμε να δούμε ότι συλλέγονται τέσσερα δείγματα σε 3 ms αυτό θα οδηγήσει σε ένα ανακατασκευασμένο κύμα (διακεκομμένο), όπως φαίνεται στο σχήμα. Αυτό το κύμα είναι χαμηλότερης συχνότητας και όχι μια πραγματική αναπαράσταση του πραγματικού κύματος.

Το φαινόμενο σχηματισμού ενός κύματος χαμηλότερης συχνότητας λόγω υποδειγματοληψίας ονομάζεται **aliasing**. Όλες οι συλλέκτες δεδομένων / αναλυτές έχουν αυτόματα επιλεγμένα ενσωματωμένους ρυθμούς δειγματοληψίας για να διασφαλίζεται ότι δεν υπάρχει aliasing. Θεωρητικά, πρέπει να υπάρχουν ταλαντώσεις με συχνότητες περισσότερο από το μισό του ρυθμού δειγματοληψίας. Ωστόσο, αυτό δεν εξασφαλίζεται ποτέ στην πράξη.

Ως εκ τούτου, όλοι οι αναλυτές είναι εφοδιασμένοι με φίλτρα anti-aliasing. Αυτά είναι κατωπερατά ηλεκτρονικά φίλτρα, τα οποία επιτρέπουν στις χαμηλές συχνότητες να περάσουν, αλλά μπλοκάρουν τις υψηλότερες. Τα φίλτρα αφαιρούν όλες τις ταλαντώσεις στο αναλογικό σήμα που έχουν συχνότητες μεγαλύτερες από το μισό του ρυθμού δειγματοληψίας. Τα φίλτρα αυτά συντονίζονται αυτόματα με τις κατάλληλες τιμές καθώς η συχνότητα δειγματοληψίας μεταβάλλεται (αυτό συμβαίνει όταν το εύρος συχνοτήτων του αναλυτή μεταβάλλεται από τον χρήστη). Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι το φιλτράρισμα πρέπει να γίνεται πριν αρχίσει η ψηφιοποίηση του αναλογικού.

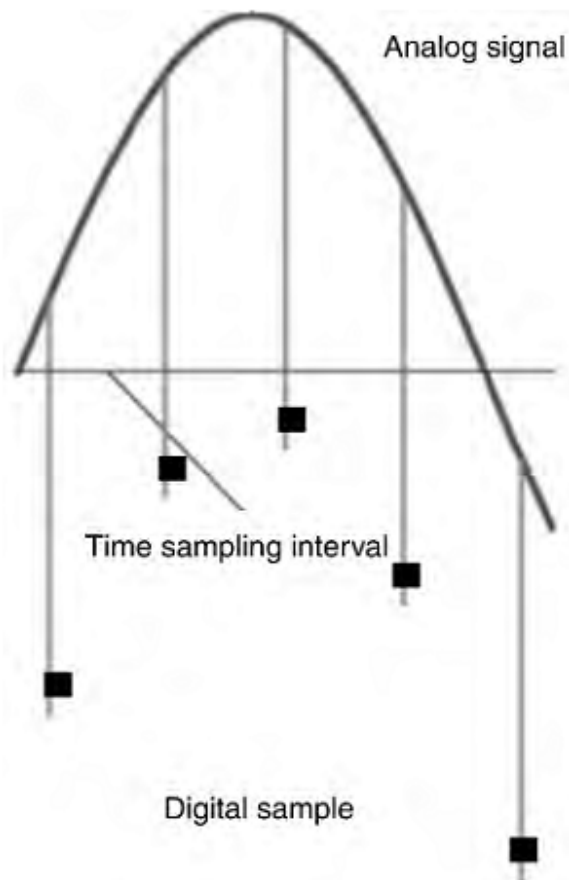




**Σχήμα 4.2** Παράδειγμα υποδειγματοληψείας[1]

#### 4.1.2 Μετατροπές αναλογικού σήματος σε ψηφιακό

Τα κύματα ταλαντώσεων που συλλέγονται από τους μετατροπείς είναι αναλογικά σήματα. Τα αναλογικά σήματα πρέπει να μετατρέπονται σε ψηφιακές τιμές για περαιτέρω επεξεργασία. Η μετατροπή ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό γίνεται από έναν μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (A / D). Η μετατροπή **A / D** ουσιαστικά γίνεται από μικροεπεξεργαστές. Όπως κάθε ψηφιακός επεξεργαστής, η μετατροπή **A / D** λειτουργεί με δυνάμεις του δύο (ονομάζονται δυαδικοί αριθμοί). Ένας μετατροπέας **A / D** των 12-bit παρέχει 4096 διαστήματα, ενώ ένας μετατροπέας **A / D** 16-bit παρέχει 65 536 διακριτά διαστήματα (Σχήμα 4.3).



**Σχήμα 4.3** Μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό[1]

Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των διαστημάτων, τόσο καλύτερη είναι η ανάλυση του εύρους του σήματος. Ένας μετατροπέας **A / D** 12-bit θα οδηγήσει στην ανάλυση του 0,025% της πλήρους κλίμακας, ενώ ένας μετατροπέας **A / D** 16-bit αποδίδει ανάλυση του 0,0015%. Έτσι είναι δυνατόν να συλλεχτεί με ακρίβεια σήμα με μεγάλα και μικρά εύρη.

### 4.1.3 Πλαισίωση

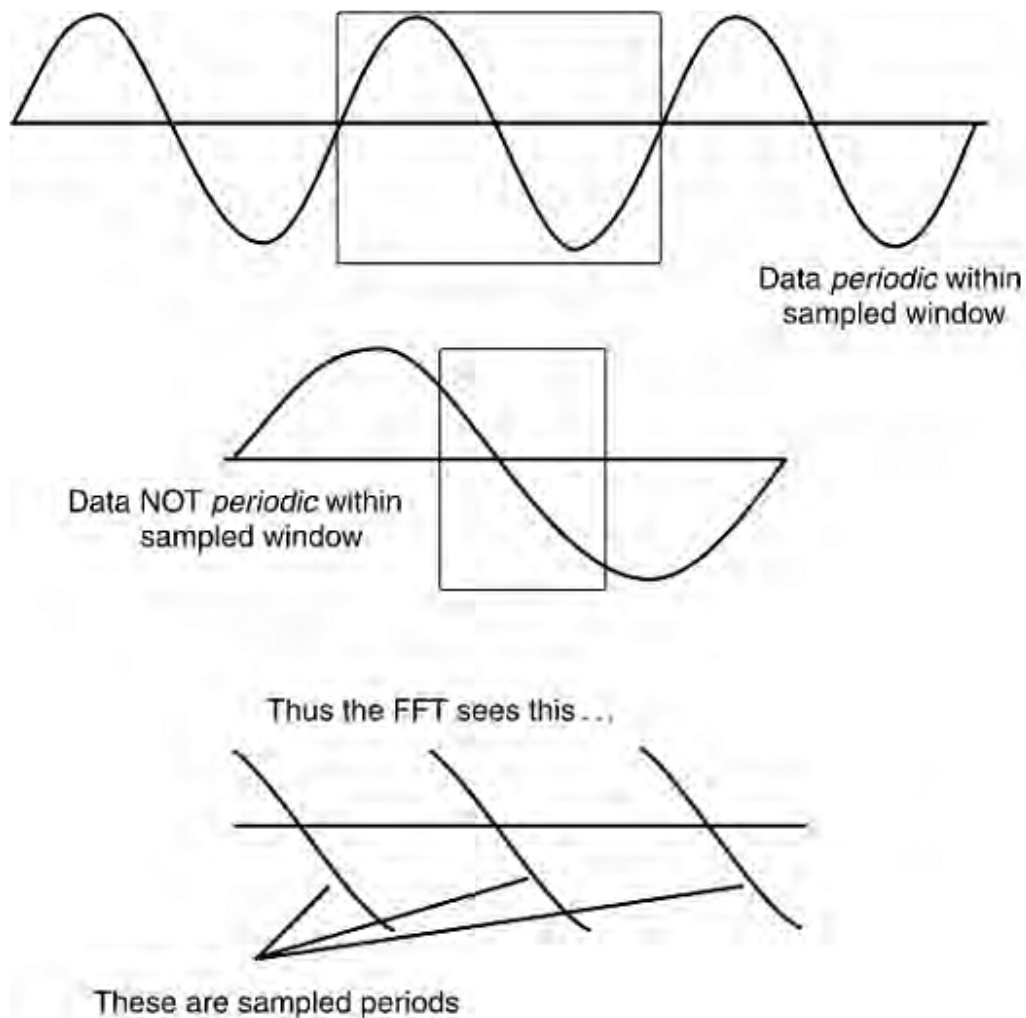
Αφού το σήμα ψηφιοποιήθηκε με τη χρήση ενός μετατροπέα **A / D**, το επόμενο βήμα στη διαδικασία (πριν μπορέσει να υποβληθεί στον αλγόριθμο FFT) ονομάζεται πλαισίωση. Ένα «πλαίσιο» πρέπει εφαρμόζεται στα δεδομένα ώστε να ελαχιστοποιείται η «διαρροή» σήματος. Το πλαίσιο είναι ισοδύναμο του να πολλαπλασιάσουμε το δείγμα σήματος με μια συνάρτηση πλαισίου του ίδιου μήκους.

Όταν λαμβάνεται ένα αναλογικό σήμα, είναι δείγμα με σταθερά χρονικά διαστήματα. Η δειγματοληψία με σταθερά χρονικά διαστήματα μπορεί να προκαλέσει την αποκοπή της

πραγματικής κυματομορφής στην αρχή και στο τέλος της. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται μπορεί να ποικίλουν ανάλογα με τη θέση του δείγματος σε σχέση με την περίοδο της κυματομορφής.

Αυτό οδηγεί σε ασυνέχειες της συνεχής κυματομορφής. Η πλαισίωση γεμίζει τις ασυνέχειες στα δεδομένα ρίχνοντας τα δεδομένα του δείγματος στο μηδέν στην αρχή και στο τέλος της περιόδου δειγματοληψίας.

Το Σχήμα 4.4 δείχνει τα αποτελέσματα του πλαισίου. Μπορούμε να θεωρήσουμε τα παράθυρα ως ένα τρόπο για να γεμίσουμε τις ασυνέχειες στα δεδομένα αναγκάζοντας δεδομένα του δείγματος στο μηδέν στην αρχή και τέλος της περιόδου δειγματοληψίας (ή χρονικό πλαίσιο), καθιστώντας με αυτόν τον τρόπο συνεχής την εμφάνιση της περιόδου δειγματοληψίας. Όταν το σήμα δεν είναι πλαισιωμένο και είναι ασυνεχές, δημιουργείται ένα «σφάλμα διαρροής» κατά την εφαρμογή του αλγόριθμου FFT.



**Σχήμα 4.4** Η αρχή της πλαισίωσης[1]

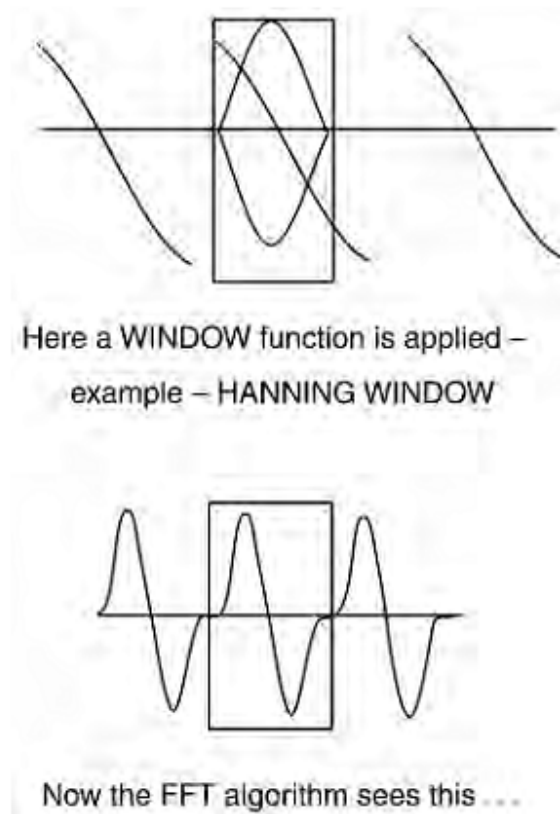
Ο αλγόριθμος FFT βλέπει τις ασυνέχειες, σαν διαμορφωμένες (κυμαινόμενες) συχνότητες και τις παρουσιάζει ως πλευρικές ζώνες στο φάσμα όταν καμία από αυτές τις συχνότητες δεν είναι πράγματι στο σήμα. Η χρήση των πλαισίων επηρεάζει επίσης την ικανότητα να επιλυθούν στενά απέχοντες συχνότητες, ενώ προσπαθούμε να διατηρήσουμε την ακρίβεια του εύρους. Ωστόσο, είναι δυνατόν να βελτιστοποιήσουμε την μία εις βάρος της άλλης.

Υπάρχουν πολλές συναρτήσεις πλαισίου. Κάποιες από αυτές που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία του σήματος ταλάντωσης είναι:

1. Ορθογώνια (όχι πλαίσιο)
2. Επίπεδη κορυφή
3. Hanning

4. Hamming (Σχήμα 4.5)
5. Kaiser Bessel
6. Blackman
7. Barlett.

Γενικά, στους περισσότερα αναλυτές είναι διαθέσιμες μόνο οι πρώτες τρεις συναρτήσεις πλαισίου που αναφέρονται παραπάνω.



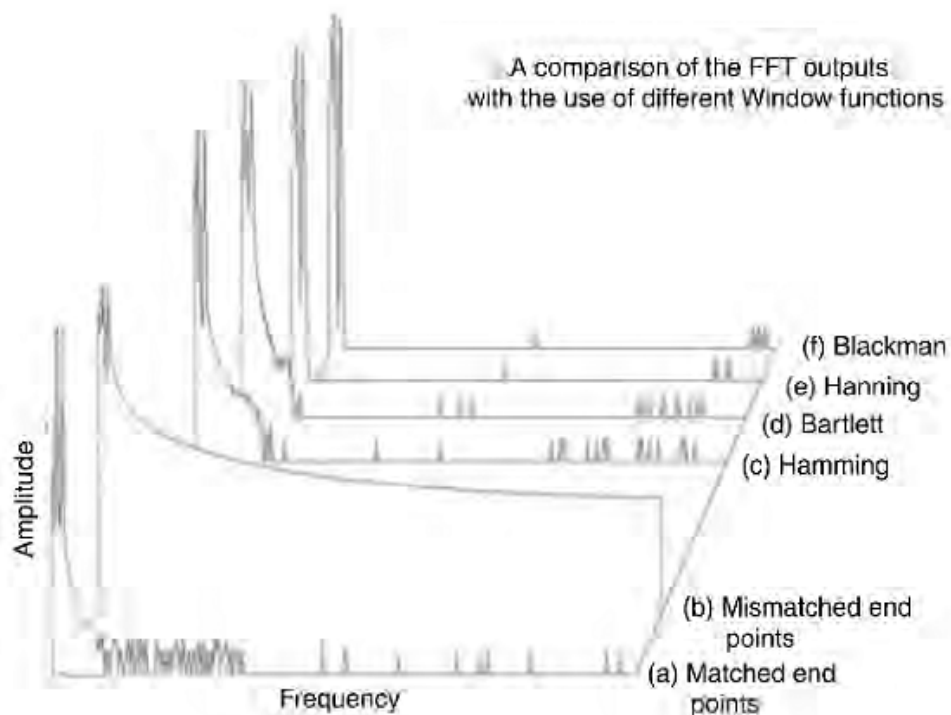
**Σχήμα 4.5** Συναρτήσεις πλαισίων[1]

Όταν συγκρίνεται η εφαρμογή της συνάρτησης επίπεδης κορυφής με την εφαρμογή της συνάρτησης (ορθογώνιου πλαισίου ή ενιαίων), παρατηρείται μία «ευρύτερη» κορυφή στην FFT. Το πλαίσιο Hanning έχει επίσης ως αποτέλεσμα τη διεύρυνση της κορυφής, αλλά σε μικρότερο βαθμό από ότι στην επίπεδη κορυφή.

Η παρατήρηση μεταξύ δύο πολύ κοντινών συχνοτήτων καθίσταται πολύ δύσκολη λόγω της διεύρυνσης των κορυφών. Όταν η πρόθεση είναι να προσδιορίσει η αναγνώριση ενός συστατικού του σήματος (μια κορυφή) σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, το καλύτερο είναι να εφαρμόσει ένα ορθογώνιο πλαίσιο για να γίνει η ανάλυση. Αλλά, αν είναι σημαντικό το

μέγεθος της κορυφής, είναι σαφώς καλύτερη η χρήση του πλαισίου επίπεδης κορυφής (Εικόνα 4.6).

Προφανώς, ούτε το ορθογώνιο πλαίσιο ούτε το πλαίσιο επίπεδης κορυφής είναι η καλύτερη λύση. Η πραγματική λύση εξαρτάται από το σκοπό της ανάλυσης. Για τις περισσότερες εφαρμογές, η καλύτερη λύση στην πραγματικότητα σημαίνει την επεξεργασία των δεδομένων με διάφορους τρόπους. Για τα πρώτα αποτελέσματα, το βέλτιστο πλαίσιο είναι το Hanning και συνήθως προεπιλέγεται, διότι παρέχει καλή ανάλυση των κορυφών και ελάχιστη διεύρυνση της κορυφής.



**Σχήμα 4.6** Σύγκριση εξόδων FFT[1]

#### 4.1.4 Οι γραμμές ανάλυσης, F-μέγιστο, εύρος ζώνης

Μετά τον υπολογισμό του FFT στο ψηφιακό σήμα, μπορούμε να εμφανίσουμε στην οθόνη του συλλέκτη / αναλυτή το πεδίο των συχνοτήτων του σήματος. Το FFT είναι ένα φάσμα του εύρους συναρτήσει της συχνότητας. Η ανάλυση είναι ο αριθμός των γραμμών που χρησιμοποιούνται για την εμφάνιση του φάσματος συχνοτήτων. Ο αριθμός των γραμμών μπορεί να είναι 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 και 12 800. Το F-μέγιστο η μέγιστη συχνότητα που επιλέγεται στον αναλυτή από το χρήστη κατά την οποία συλλέγονται τα δεδομένα. Το εύρος ζώνης υπολογίζεται διαιρώντας το F-μέγιστο με την ανάλυση.

Τώρα μπορεί να συναχθεί ότι όταν η ανάλυση είναι υψηλή, υπάρχει καλύτερη διάκριση μεταξύ της κορυφής της συχνότητας. Η επιλογή του F-μέγιστου κατά τη συλλογή των δεδομένων απαιτεί εμπειρία. Αν το F-μέγιστο ρυθμιστεί πολύ ψηλά, το εύρος ζώνης μεγαλώνει και επηρεάζεται η ανάλυση. Από την άλλη πλευρά, εάν το F-μέγιστο είναι πολύ χαμηλό, μπορεί να χαθούν πολύτιμα δεδομένα υψηλής συχνότητας ταλαντώσεων.

Επιπλέον, ορισμένοι μπορεί να θεωρήσουν διασκεδαστικό ότι ο χρόνος που απαιτείται για τη συλλογή των δεδομένων είναι αντιστρόφως ανάλογη με το F-μέγιστο. Όσο υψηλότερο είναι το F-μέγιστο, τόσο πιο γρήγορα μπορεί εμφανιστεί το FFT. Αυτό οφείλεται σε μια σταθερή μαθηματική σχέση μεταξύ του ρυθμού δειγματοληψίας και τον αριθμό των γραμμών στο FFT. Η ακόλουθη συμβουλή παρέχεται ως γενική αρχή, για την επιλογή των τιμών του F-μέγιστου:

- Για γενικά περιστροφικά μηχανήματα όπως αντλίες, ανεμιστήρες και κινητήρες, ρυθμίζουμε το F-μέγιστο σε  $20 \times$  ή  $40 \times$ , όπου  $\times$  η ταχύτητα κυκλοφορίας.
- Κατά τη μέτρηση των ταλαντώσεων για κιβώτια ταχυτήτων, η ρύθμιση F-μέγιστου πρέπει να είναι τουλάχιστον τρεις φορές υψηλότερη από τη συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών, όπου η συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών είναι ο αριθμός των δοντιών του πινιόν και του γραναζιού επί των ταχυτήτων λειτουργίας τους.
- Ωστόσο, εάν η ανάλυση σε ένα μηχάνημα διεξάγεται για πρώτη φορά, είναι σκόπιμο να ξεκινήσουμε με δύο φάσματα, ένα σε  $10 \times$  την ταχύτητα του και άλλο ένα σε  $100 \times$  την ταχύτητα λειτουργίας. Αυτό γίνεται για να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχουν σημαντικές συχνότητες που χάθηκαν στον τομέα της υψηλής ή χαμηλής ζώνης συχνότητας. Όταν σημειώνεται το εύρος των υποπτων συχνοτήτων, πρέπει να επιλέγεται ανάλογα και η ρύθμιση του F-μέγιστου.

#### 4.1.5 Χρήση του μέσου όρου

Η χρήση του μέσου όρου είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό που παρέχεται στους αναλυτές / συλλέκτες δεδομένων. Ο σκοπός είναι να λάβουμε περισσότερα επαναλήψιμα αποτελέσματα, αυτό καθιστά την ερμηνεία των πολύπλοκων και θορυβωδών σημάτων σημαντικά ευκολότερη. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μέσου όρου:

- Γραμμική χρήση του μέσου όρου
- Καταγραφή κορυφών
- Εκθετική
- Μέσος όρος σύγχρονου χρόνου.

## **Γραμμική χρήση του μέσου όρου**

Όλα τα φάσματα FFT που συλλέγονται κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης προστίθεται και, στη συνέχεια, διαιρούνται με τον αριθμό των φασμάτων. Αυτό βοηθά στην απόκτηση επαναλήψιμων δεδομένων και τείνει να δίνει τον μέσο όρο του τυχαίου θορύβου. Αυτή είναι η τεχνική μέσου όρου που χρησιμοποιείται πιο συχνά. Στα φάσματα τυπικά γίνεται μέσος όρος 2, 4, 8, 16 ή 32 φορές, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε αριθμός.

## **Καταγραφή κορυφών**

Με τη μέθοδο αυτή, η μέγιστη τιμή σε κάθε ανάλυση καταχωρείται και στη συνέχεια εμφανίζεται.

Με άλλα λόγια, αναπτύσσει ένα φάκελο του υψηλότερης φασματικής γραμμής εύρους που μετράται για κάθε μέσο όρο. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται για την προβολή μεταβατικών, όπως ελεύθερες κινήσεις ή τυχαίες διεγέρσεις που μπορεί να απαιτηθούν κατά τη διάρκεια της μελέτης της ανάλυσης τάσεων.

## **Εκθετική**

Σε αυτήν την μέθοδο, τα πιο πρόσφατα φάσματα που λαμβάνονται θεωρούνται πιο σημαντικά από ό, τι τα παλαιότερα, και έτσι δίνεται σε αυτά περισσότερο μαθηματικό βάρος κατά την πρόσθεση και τον μέσο όρο τους. Χρησιμοποιείται για την παρατήρηση συνθηκών που αλλάζουν πολύ αργά σε σχέση με το χρόνο δειγματοληψίας.

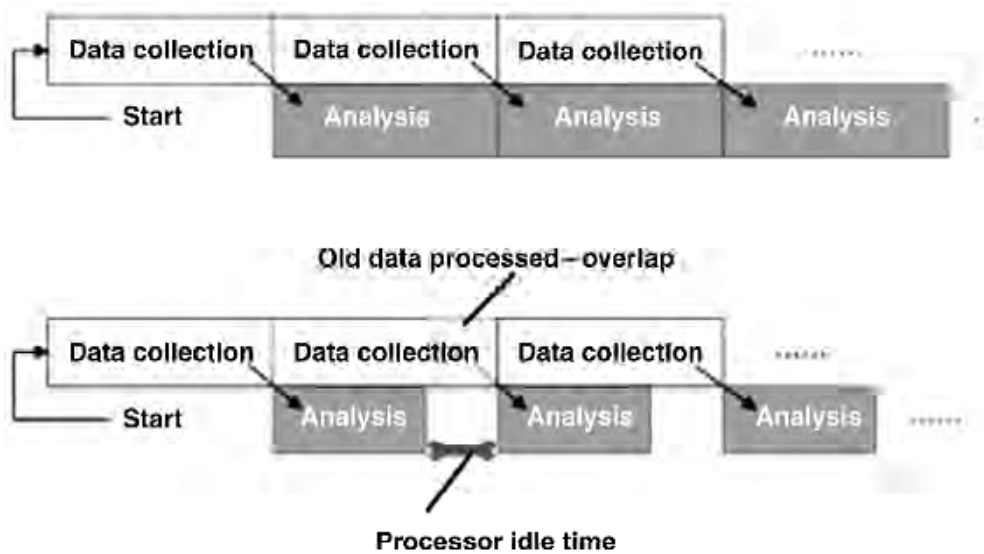
## **Σύγχρονος χρόνος**

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα σήμα συγχρονισμού από τη μηχανή που παρατηρείται, και χρησιμοποιείται για να γίνει ο μέσος όρος στο πεδίο του χρόνου. Το σήμα συγχρονισμού έχει συνήθως μορφή ενός παλμού που παράγεται από ένα φωτοκύτταρο ή έναν ηλεκτρομαγνητικό συλλέκτη σε μια θέση αναφοράς στην περιφέρεια της ατράκτου. Τα δείγματα ταλάντωσης με τον τρόπο αυτό μπορεί να λαμβάνονται την ίδια στιγμή σε σχέση με τον άξονα περιστροφής κατά τον υπολογισμό του μέσου όρου. Οι μη-σύγχρονες ταλαντώσεις στο σύστημα εξουδετερώνονται αποτελεσματικά από τη μέθοδο αυτή. Η μέθοδος χρησιμοποιείται γενικά αν μια μηχανή έχει πολλά περιστροφικά κομμάτια που περιστρέφονται με διαφορετικές ταχύτητες. Έτσι, οι ταλαντώσεις που είναι σύγχρονες με το σήμα συγχρονισμού τονίζονται, ενώ άλλες βγαίνουν εκτός λόγω του μέσου όρου.



#### 4.1.6 Επικάλυψη

Εξετάστε το ακόλουθο παράδειγμα: Αν υπάρχει ανάγκη για την συλλογή και την ανάλυση συχνότητας εύρους 1 kHz, ο χρόνος συλλογής δεδομένων (επίσης γνωστός ως χρόνος πλαισίου) για τη συλλογή 1024 δειγμάτων θα μπορούσε να είναι ακριβώς 40 ms. Ο επεξεργαστής FFT (Σχήμα 4.7) μπορεί να υπολογίσει και εμφανίσει ένα φάσμα σε 10 ms, μετά από αυτό έχει αδράνεια διάρκειας 30 ms μέχρι η συλλογή της επόμενης ομάδας να ολοκληρωθεί.



**Σχήμα 4.7** Επεξεργαστής δεδομένων FFT[1]

Όταν τελειώνει η συλλογή στο πρώτο μπλοκ, αντί να περιμένουμε να γίνει η συλλογή του επόμενου μπλοκ, είναι δυνατόν να προχωρήσουμε και να υπολογίσουμε ένα νέο φάσμα χρησιμοποιώντας μέρος των δεδομένων του νέου και του παλιού μπλοκ. Εάν η διαδικασία είναι στάσιμη (δεν μεταβάλλεται με το χρόνο), μπορούμε να βγάλουμε τον μέσο όρο των δεδομένων από των δύο μπλοκ.

Λαμβάνοντας υπόψη το παράδειγμα που αναφέραμε παραπάνω, θα μπορούσαμε να ξεκινήσουμε έναν νέο υπολογισμό FFT χρησιμοποιώντας 75% του προηγούμενου μπλοκ και 25% του νέου. Στην συνέχεια θα εκτελούσαμε ένα 75% της επεξεργασίας επικάλυψης και ο εμφανής χρόνος επεξεργασίας (μετά το πρώτο μπλοκ) θα ήταν 10 ms ανά φάσμα, αντί για 40 ms. Η μέθοδος επικάλυψης είναι ακόμα πιο σημαντική όταν λειτουργούμε πολύ χαμηλές συχνότητες, ή όταν θέλουμε να υπολογίσουμε πολλούς φασματικούς μέσους όρους.

Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι κάνουμε συλλογή δεδομένων σε μια περιοχή συχνοτήτων των 100 Hz και θέλουμε να υπολογίσουμε 16 μέσους όρους. Ο χρόνος συλλογής των δεδομένων είναι 4 s, και χωρίς την επεξεργασία επικάλυψης θα χρειαστούμε 64 s. Με 75% επικάλυψη, χρειαζόμαστε 4 s για το πρώτο μπλοκ και 1 s για κάθε ένα, ή  $4 \times 1 + 1 \times 15 = 19$  s για να εκτελέσουμε την ίδια εργασία. Κατά τη συλλογή δεδομένων μπορούμε να γλιτώσουμε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα με τη χρήση επικαλύψεων. Η μέθοδος επιτρέπει μια πιο αποτελεσματική χρήση των δεδομένων που συλλέγονται.

#### **4.1.7 Απεικόνιση / αποθήκευση**

Οι αναλυτές FFT έχουν οθόνες LCD και ενσωματωμένη μνήμη. Αυτό τους επιτρέπει να απεικονίζουν τα επεξεργασμένα σήματα σχεδόν αμέσως μετά την ανάλυση. Ο χρήστης μπορεί στη συνέχεια κατεβάσει αυτά τα στοιχεία στον κεντρικό υπολογιστή. Ορισμένες ειδικές λειτουργίες προβολής που είναι διαθέσιμες στους σύγχρονους αναλυτές είναι:

- Ζώνες συχνοτήτων / συναγερμοί
- Καταρράκτες.

#### **Ζώνες συχνοτήτων / συναγερμοί**

Σε αυτόν τον τύπο της οθόνης, το φάσμα FFT υποδιαιρείται σε έξι περιοχές που ονομάζονται συγκροτήματα, καθένα από τα οποία έχει το δικό του όριο συναγερμού. Αυτό παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να συγκεντρώσει πληροφορίες και θέτει τα όρια του συναγερμού με βάση τα ελαττώματα του εξαρτήματος. Για παράδειγμα, μπορεί να συσταθεί μία περιοχή ή ζώνη του φάσματος FFT για την παρακολούθηση των συχνοτήτων των ελαττωμάτων των ρουλεμάν. Υπάρχει μια τάση μεταξύ μερικών ανοχών των ταλαντώσεων προς τα όρια φιλτραρίσματος ταλαντώσεων με βάση τις συχνότητες και τις αρμονικές. Γενικά στα περιστροφικά μηχανήματα, τα επίπεδα ταλαντώσεων τείνουν να μειώνονται όσο αυξάνεται η συχνότητα.

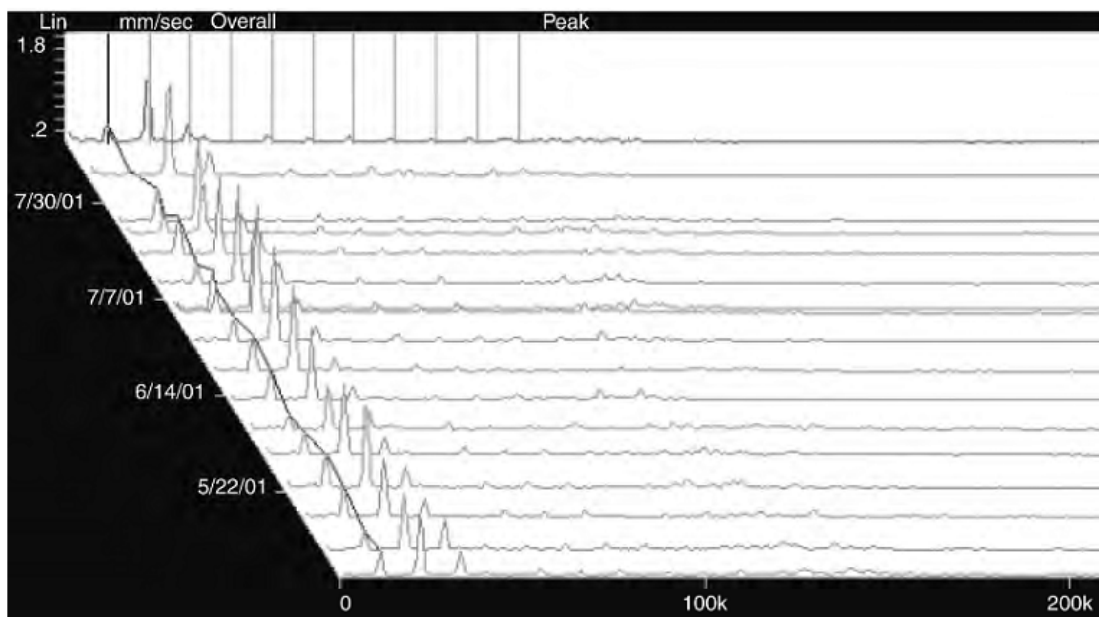
Κανονικά χρησιμοποιούνται δύο τύποι συναγερμού ζώνης. Ο ένας βασίζεται στο μέγιστο εύρος εντός της ζώνης και ο άλλος βασίζεται στο συνολικό περιεχόμενο καταστροφικής ενέργεια εντός της ζώνης.

Μερικές από τις οργανώσεις προτύπων ταλάντωσης έχουν αναπτύξει ανάλογα με τον τύπο του μηχανήματος πολύ καλούς κανόνες συναγερμού για τις διάφορες ζώνες των φασμάτων FFT.

Οι ζώνες συναγερμού συνήθως ενσωματώνονται αυτόματα κατά τη φόρτωση των δεδομένων του μηχανήματος στο λογισμικό που σχετίζεται με τους αναλυτές. Αυτό το στοιχείο φορτώνεται, μαζί με τα δεδομένα της διαδρομής στον αναλυτή που υποτίθεται ότι θα συλλεχθούν οι πληροφορίες της μηχανής.

## Καταρράκτες

Ο καταρράκτης είναι μια ειδική απεικόνιση των FFT που συλλέγονται επί ένα χρονικό διάστημα στην ίδια θέση σε μια μηχανή. Τα FFT χαράσσονται το ένα μετά το άλλο και δίνουν μια εντύπωση ενός καταρράκτη από FFT. Αυτό το είδος απεικόνισης καθιστά πολύ εύκολο να δούμε όλες τις παραλλαγές των ευρών σε οποιαδήποτε συχνότητα σε όλο το εύρος. Τα Φασματικά δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στους αναλυτές έχουν την τάση να χρησιμοποιούν πάρα πολύ από την πολύτιμη μνήμη του και συνεπώς είναι καλύτερα να τα μεταφέρουμε στον κεντρικό υπολογιστή και να χρησιμοποιήσουμε το λογισμικό του υπολογιστή για να απεικονίσουμε τα διαγράμματα καταρράκτη. Τα παραδείγματα των διαγραμμάτων καταρράκτη φαίνονται στο Σχήμα 4.8.



**Σχήμα 4.8** Διάγραμμα καταρράκτη κινητήριου ρουλεμάν τουρμπίνας ατμού[1]

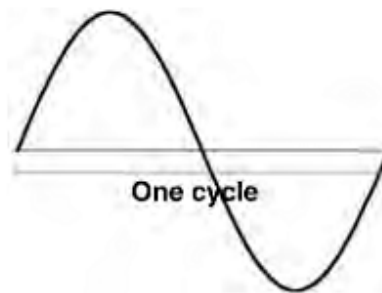
Το πρώτο είναι ενός μάντα ανεμιστήρα που παίρνει κίνηση από έναν κινητήρα. Έχει έναν ρότορα τύπου προβόλου που προεξέχει. Τα διαγράμματα καταρράκτη επιτρέπουν τη σύγκριση της παρούσας FFT με τις προηγούμενες. Σε αυτή περίπτωση, τα παλιά δεδομένα συλλέχθηκαν σχεδόν δύο χρόνια πριν από τα νέα δεδομένα. Από αυτό το διάγραμμα, μπορεί κανείς να δει εύκολα πότε ένας ρότορας απομακρύνθηκε για εξισορρόπηση!

Το δεύτερο διάγραμμα είναι από δεδομένα μιας τουρμπίνας ατμού υψηλής ταχύτητας με υδρόψυκτα στηρίγματα.

Είναι σαφώς ορατή η ανάπτυξη κορυφών που οφείλεται σε κακή ευθυγράμμιση. Μέσα από το διάγραμμα καταρράκτη, μπορούμε να παρατηρήσουμε αυτό το ελάττωμα και να προειδοποιηθούμε αν οι εμπλεκόμενες συχνότητες μεγαλώνουν ασυνήθιστα. Όπως φαίνεται, μπορούν να σημειώνονται στο διάγραμμα οι αρμονικές για γρήγορη ταυτοποίηση.

## 4.2 Ανάλυση κυματομορφής χρόνου

Η κυματομορφή χρόνου είναι το σήμα στο πεδίο του χρόνου. Σε όρους ταλάντωσης, είναι ένα γράφημα μετατόπισης, ταχύτητας ή επιτάχυνσης συναρτήσει του χρόνου. Το χρονικό διάστημα ενός τέτοιου σήματος είναι στην περιοχή των χιλιοστών του δευτερολέπτου (Εικόνα 4.9).



**Σχήμα 4.9** Κυματομορφή χρόνου[1]

Οι κυματομορφές χρόνου εμφανίζουν ένα σύντομο χρονικό διάστημα της ακατέργαστης ταλάντωσης. Αν και δεν είναι τόσο ευέλικτο όσο ο FFT, εξακολουθεί να έχει κάποιες συγκεκριμένες εφαρμογές και μπορεί να παράσχει ενδείξεις μιας κατάστασης του μηχανήματος που μπορεί να μην είναι εμφανής στο φάσμα συχνοτήτων. Η ανάλυση της κυματομορφής χρόνου δεν είναι νέα τεχνική. Κατά τις πρώτες ημέρες της ανάλυσης ταλαντώσεων, οι κυματομορφές χρόνου παρατηρούνταν με παλμογράφους και εξαρτήματα συχνότητας και υπολογίζονταν χειροκίνητα. Η σχέση μεταξύ της συχνότητας και του χρόνου είναι:

$$f = \frac{1}{T}$$

όπου  $f$  = συχνότητα σε Hz (CPM) και  $T$  = το χρονικό διάστημα σε δευτερόλεπτα, που απαιτείται για να ολοκληρωθεί ένας κύκλος του κύματος.

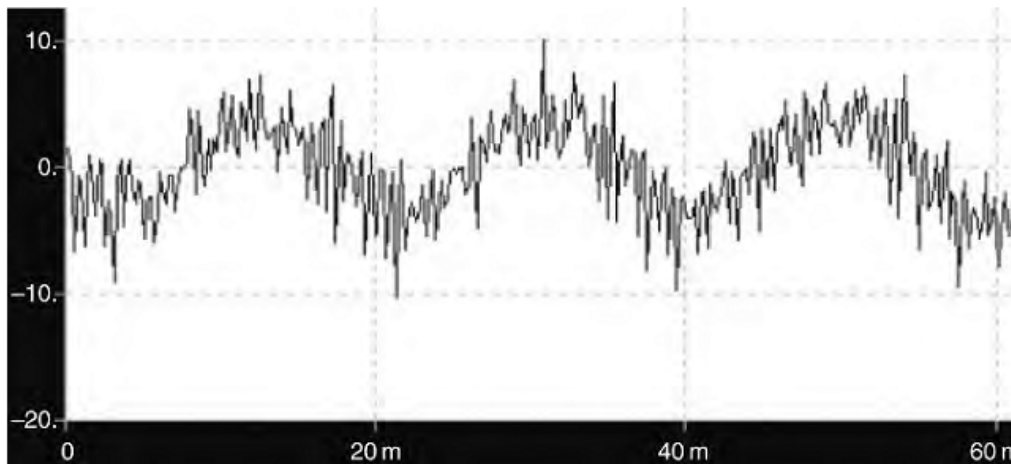
Έτσι, διαβάζοντας τα πρωτογενή δεδομένα σε έναν παλμογράφο ή σε σύγχρονους αναλυτές, μπορούν να υπολογιστούν οι κύκλοι ενός χρονικού διαστήματος  $T$  για την εκτίμηση της συχνότητας που θα ληφθεί. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η κυματομορφή χρόνου είναι αρκετά περίπλοκη και μέτρηση των είναι κύκλων για να καθοριστεί το περιεχόμενο της

συχνότητας είναι σχεδόν αδύνατη. Ωστόσο, η μελέτη κυματομορφών χρόνου δεν προορίζεται για υπολογισμούς συχνότητας και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι πιο κατάλληλος ένας υπολογισμός FFT.

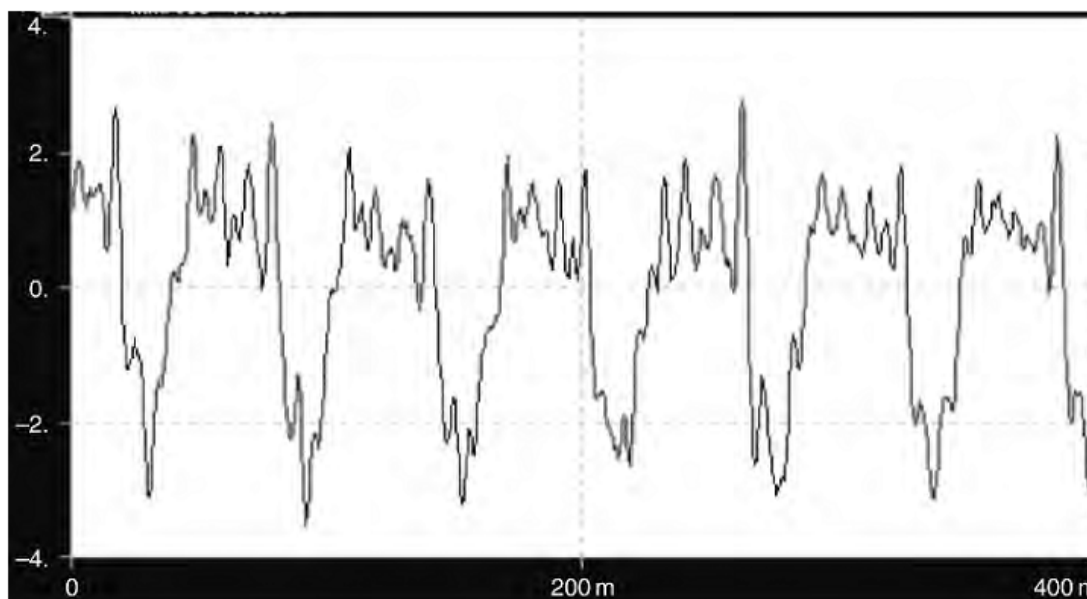
Η πιο κοινή χρήση των δεδομένων των κυματομορφών χρόνου είναι να συγκριθεί το πρότυπο κυματομορφής μιας μηχανής με αυτό που λαμβάνεται από ένα άλλο μηχάνημα με παρόμοια ελαττώματα. Εάν είναι απαραίτητο μπορούν να υπολογιστούν, οι συνιστώσες συχνότητας από τα σημαντικότερα γεγονότα στο πρότυπο κυματομορφής.

Το σχήμα 4.10 φαίνεται μια κυματομορφή που συλλέγεται από μία αντλία με κυματομορφή κυρίως  $1 \times \text{rpm}$  επί της οποίας υπερτίθεται ένα κύμα υψηλών συχνοτήτων.

Το σχήμα 4.11 δείχνει μια κυματομορφή που συλλέγεται στην μη-κινούμενη πλευρά ενός ανεμιστήρα διπλής αναρρόφησης σε ένα λέβητα. Είχε αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας. Να σημειωθεί ότι κατά μέσο όρο το θετικό εύρος είναι ελαφρώς μικρότερο από το μέσο εύρος του πυθμένα. Υπάρχουν επίσης επτά μετρήσιμες κορυφές στο κάτω μισό (ή επτά κύκλους), μετρούμενο σε διάρκεια 400 ms. Αυτό ισούται με 1050 κύκλους ανά λεπτό, και αντιστοιχεί στην ταχύτητα του ανεμιστήρα.



**Σχήμα 4.10** Παράδειγμα κυματομορφής χρόνου[1]

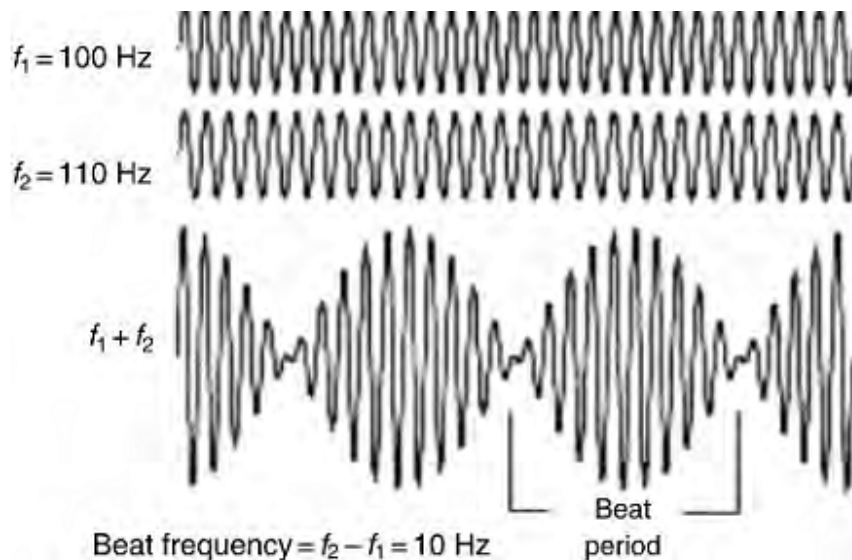


**Σχήμα 4.11** Παράδειγμα κυματομορφής χρόνου[1]

Το σχήμα 4.12 απεικονίζει μια ειδική κυματομορφή που περιγράφει ένα φαινόμενο που ονομάζεται «χτύπημα». Δυο κυματομορφές που έχουν σχεδόν ίδιες συχνότητες (διαφορά περίπου λιγότερο από 30 Hz ) και περίπου ίδιο εύρος παράγουν μια κυματομορφή με «χτύπημα». Αυτά είναι κυριολεκτικά παλμοί λόγω των εναλλαγών της ενίσχυσης και της ακύρωσης των ευρών. Η αλλαγή του εύρος ονομάζεται διαμόρφωση και έχει συχνότητα ίση με τη διαφορά μεταξύ των συχνοτήτων των δύο κυματομορφών. Εάν μειωθεί η διαφορά, θα μειωθεί επίσης και η συχνότητα παλμού.

Οι κυματομορφές με χτύπημα είναι κοινές σε συσκευές φυγοκέντρησης που έχουν μολ ή κύλιση σε οριακά διαφορετικές ταχύτητες, και αν υπάρχει κάποια ανισορροπία σε κάποια από αυτές, είναι πολύ φυσικό να ληφθεί η συχνότητα παλμού. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να γίνετε να χρονομετρηθούν τα χτυπήματα για να προσδιορίσουμε τη διαφορά μεταξύ των ταχυτήτων του μολ και της κύλισης.

Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει επίσης και σε κινητήρες που διαθέτουν ηλεκτρικά ελαττώματα. Τα ελαττώματα αυτά τείνουν να δημιουργούν διπλάσια συχνότητα ταλάντωσης από την συχνότητα της γραμμής μετάδοσης ισχύος. Εάν η συχνότητα της παροχής είναι 50 Hz (3000 rpm), η συχνότητα του ελαττώματος θα είναι 6000 rpm. Βέβαια αν η φυσική ταχύτητα του κινητήρα ήταν 2980 στροφές ανά λεπτό, τότε, η δεύτερη αρμονική της θα ήταν 5960 rpm. Έτσι, οι δύο κυματομορφές των 6000 και 5960 CPM θα δημιουργήσουν χτύπημα και διαμόρφωση του εύρους.



**Σχήμα 4.12** Κυματομορφή-παλμού[1]

Στους τομείς στους οποίους η κυματομορφή χρόνου παρέχει πρόσθετες πληροφορίες από αυτές που λαμβάνονται από τα FFT είναι:

- Εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας (λιγότερο από 100 rpm)
- Ένδειξη του πραγματικού εύρους σε καταστάσεις όπου έχουμε κρούσεις, όπως εκτίμηση της σοβαρότητας των ελαττωμάτων σε ρουλεμάν και εργαλεία
- Χαλαρότητα
- Τριψίματα
- Κτύπημα.

Στην περίπτωση ελαττωμάτων όπως ανισορροπία ή κακή ευθυγράμμιση, όπου η κυματομορφή χρόνου δεν είναι πολύ πολύπλοκη, η διάγνωση με κυματομορφή χρόνου δεν προσφέρει κανένα πλεονέκτημα.

Η καλύτερη τεχνική είναι η έρευνα του εύρους και της φάσης του FFT. Όταν σε έναν αναλυτή πραγματοποιείται ανάλυση μιας κυματομορφής χρόνου, υπάρχει μια σειρά από παραμέτρους που πρέπει να ρυθμιστούν. Είναι σημαντικό να έχουμε κάνει σωστές ρυθμίσεις για να πάρουμε ένα καλό στιγμιότυπο του εύρους ταλάντωσης. Αυτές οι παράμετροι είναι:

- Μονάδα μέτρησης
- Χρονική περίοδος δειγματοληψίας
- Ανάλυση
- Μέσος όρος
- Πλαίσια.

### 4.2.1 Μονάδα μέτρησης

Αυτό αναφέρεται στο χαρακτηριστικό της ταλάντωσης που μας ενδιαφέρει, δηλαδή η μετατόπιση σε μικρά (είναι δυνατές ρυθμίσεις για υψηλές και χαμηλές συχνότητες, που ορίζονται ως μΗ και μL), η ταχύτητα σε mm / s-rk ή επιτάχυνση σε g. Τα κριτήρια της επιλογής των μονάδων μέτρησης συζητήθηκαν και νωρίτερα στο θέμα 2 - Μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση – Ποια πρέπει να χρησιμοποιηθούν; Γενικά για την απεικόνιση της κυματομορφή χρόνου συνιστάται να χρησιμοποιείται η φυσική μονάδα του μετατροπέα.

Έτσι, αν απαιτείται κάποιο διάγραμμα μετατόπισης, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας μετατροπέας μετατόπισης. Στις περισσότερες περιπτώσεις των τρεχόντων εμπορικών συλλεκτών δεδομένων, αυτό θα σήμαινε ότι η μονάδα επιλογής θα είναι η επιτάχυνση. Εάν τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί από ανιχνευτές μη-επαφής για μηχανές με ρουλεμάν με μανίκι, τότε συνήθως χρησιμοποιείται η μετατόπιση.

### 4.2.2 Χρονική περίοδος του δείγματος

Για να αποκτηθεί μια εύχρηστη κυματομορφή χρόνου για ανάλυση, το όργανο πρέπει να ρυθμιστεί για να μετρά 5-10 κύκλους του κύματος ταλάντωσης ή τις περιστροφές της μηχανής.

Οι πληροφορίες αυτές παρέχονται επίσης στην λειτουργία βοήθειας μερικών αναλυτών, η οποία παρέχουν κάτι παρόμοιο με το παρακάτω πίνακα. Η επιθυμητή συνολική διάρκεια του δείγματος μπορεί να υπολογιστεί με αυτόν τον τύπο:

Σύνολο περιόδου δείγματος (ms) = 60 000 X ο επιθυμητός αριθμός στροφών / rpm

Στροφές μηχανής (rpm)	Χρονική περίοδος περιστροφών (ms) 5	Χρονική περίοδος περιστροφών (ms) 10
2900	103	206
1480	203	306
985	305	608
3600	83	167
1800	167	333
1200	250	500

### 4.2.3 Ανάλυση

Για την ανάλυση της κυματομορφής χρόνου, συνιστάται να χρησιμοποιούνται 1600 γραμμές (4096 δείγματα). Αυτό διασφαλίζει ότι τα δεδομένα που συλλέγονται έχουν επαρκή ακρίβεια και συλλαμβάνονται τα βασικά γεγονότα. Διατίθενται και άλλοι ρυθμοί δειγματοληψίας που συνήθως είναι 256, 512, 1024, 2048, 4096 και 8192.



#### 4.2.4 Μέσος όρος

Στις περισσότερες συλλογές δεδομένων, η ο μέσος όρος γίνεται κατά τη διαδικασία υπολογισμού του FFT. Εάν δεν γίνει επίκληση, της λειτουργία μέσου όρου σύγχρονου χρόνου και ακόμη και αν επιλέχθηκαν πολλαπλοί μέσοι όροι στην ρύθμιση του αναλυτή, η κυματομορφή χρόνου που απεικονίζεται στην οθόνη θα είναι η τελευταία που μετράται. Επομένως, είναι φυσιολογικό να λάβει ένα μόνο μέσο όρο κατά την ανάλυση κυματομορφών χρόνου.

Επικάλυψη του μέσου όρου πρέπει να απενεργοποιηθεί.

Ο μέσος όρος σύγχρονου χρόνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συγχρονίσει τα δεδομένα που λαμβάνονται με ένα συγκεκριμένο εξάρτημα που περιστρέφεται. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο κατά την παρακολούθηση κιβωτίων ταχυτήτων, για παράδειγμα για να εντοπίσουμε ένα ελαττωματικό δόντι σε σχετικά με ένα σημείο αναφοράς. Είναι επίσης χρήσιμο για παλινδρομικό εξοπλισμό για να «χρονιστούν» τα συμβάντα με μια συγκεκριμένη γωνία του στροφάλου.

#### 4.2.5 Πλαίσια

Όπως εξηγείται στην προηγούμενη παράγραφο, οι διάφορες λειτουργίες πλαισίου μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τα σφάλματα λόγω διαρροής κατά την εκτέλεση του FFT. Ορισμένα όργανα μπορούν να εφαρμόσουν αυτά τα παράθυρα και στα δεδομένα της κυματομορφής χρόνου. Αυτό θα εξαναγκάσει τα στοιχεία στην αρχή και στο τέλος του το δείγμα του χρόνου στο μηδέν και, συνεπώς, ορισμένες πληροφορίες της κυματομορφής θα χαθούν. Για να εξλειφθεί αυτό το φαινόμενο πρέπει να χρησιμοποιείται ένα ομοιόμορφο ή ορθογώνιο πλαίσιο.

### 4.3 Ανάλυση του σήματος φάσης

Η ανάλυση του σήματος φάσης, σε συνδυασμό με τα αρχικά στοιχεία που παρέχονται από τον FFT παρέχει πρόσθετες πληροφορίες για τη διάγνωση της μηχανής. Για παράδειγμα, τα φάσματα FFT ενός ανισόρροπου και ενός λυγισμένο άξονα μπορεί να φαίνεται ίδια. Για να επιλυθεί περαιτέρω το πρόβλημα, χρησιμοποιείται ανάλυση της φάσης. Η ανάλυση φάσης χρησιμοποιείται περαιτέρω για την τροχιακή ανάλυση, για την εξισορρόπηση του ρότορα, την μέτρηση της ταχύτητας και μπορεί επίσης να βοηθήσει στην ανάλυση των μηχανών μεταβλητής ταχύτητας. Αναλυτές χρησιμοποιούν την ανάλυση φάσης για να βοηθήσουν στην διάγνωση με τις ακόλουθες μεθόδους:

- Ανάλυση σειράς/λειτουργία εντοπισμού

- Τροχιές
- Αναγνώριση Συντονισμού
- Ιδιομορφική ανάλυση (MA)
- Ανάλυση λειτουργικού σχήματος εκτροπής (ODS).

Κατά την διάρκεια της ανάλυση σειράς, λαμβάνονται και η φάση και το εύρος. Η ανάλυση σειράς απαιτεί ένα εξωτερικό ερέθισμα, το οποίο συγχρονίζει και το δείγμα του χρόνου μηδέν στο ρυθμιστικό πεδίο του χρόνου και το ρολόι του δείγματος έτσι ώστε το εξάρτημα 1 × είναι πάντα πρώτο στην σειρά. Τα σφάλματα φάσης του φίλτρου παρακολούθησης ακυρώνεται από τις διορθώσεις του λογισμικού του αναλυτή. Αν και οι περισσότερες αναλύσεις πραγματοποιούνται σε φάση 1x rpm, δεν είναι περιορισμένες στο 1x rpm. Μπορούμε να μετρήσουμε και σε φάσεις 2 × 3 × ή και οποιαδήποτε άλλη συχνότητα. Πρέπει, επομένως, να τονιστεί ότι η ανάλυση φάσης δεν είναι τίποτα περισσότερο από την παρακολούθηση της σχετικής κίνησης διαφόρων τμημάτων μιας μηχανής σε μία δεδομένη συχνότητα, και δεν περιορίζεται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Ο σκοπός της ανάλυσης σειράς είναι να κλειδώσουμε την οθόνη με την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής, έτσι ώστε αν η ταχύτητα λειτουργίας ποικίλει, τα μέρη που βρίσκονται σε σειρά παραμένουν στο ίδια θέση στην οθόνη. Έτσι, το εξάρτημα 1 × δεν θα αλλάξει θέση όταν αλλάξουν οι στροφές. Δίνεται μια απεικόνιση φάσης συναρτήσε των σειρών, η οποία παρέχει την σχέση της φάσης με το ερέθισμα.

Ο εντοπισμός σειράς χρησιμοποιείται κυρίως για τη διεξαγωγή ανάλυσης ταλαντώσεων σε μηχανές μεταβλητής ταχύτητας. Η μέθοδος παρέχει δεδομένα στο πεδίο των σειρών αντί πεδίο του χρόνου.

Έτσι, το Χ-άξονας της γραφικής παράστασης της συνολικής ταλάντωσης δεν είναι το εύρος ταλάντωσης έναντι του χρόνου, αλλά του εύρους έναντι των σειρών των rpm (π.χ. 10 σειρές = 10 × 10 × = στροφές ανά λεπτό). Στο φάσμα των σειρών, τα σήματα που είναι περιοδικά με την περιστροφή της ατράκτου εμφανίζονται ως κορυφές και οι αρμονικές των στροφών της ατράκτου παραμένουν σταθερές ακόμη και αν η ταχύτητα της του άξονα μεταβληθεί. Κατά συνέπεια, η ανάλυση του φάσματος για μεταβλητές ταχύτητες είναι δυνατή μόνο με τη μέθοδο της παρακολούθησης των σειρών. Ωστόσο, αυτό είναι δυνατό μόνο με τη βοήθεια ενός εξωτερικού ερεθίσματος, όπως ένα φωτοκύτταρο ή ένα διανυσματικό μετατροπέα.

Στη λειτουργία παρακολούθησης, το ερέθισμα όχι μόνο συγχρονίζει το σήμα του πεδίου του χρόνου μηδέν, αλλά ρυθμίζει επίσης το ρολόι του δείγματος (όπως στο θεώρημα Nyquist, ο ρυθμός δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο φορές η μέγιστη συχνότητα) σε ένα τυπικό παράγοντα 2,56 των μέγιστων σειρών που έχουν επιλεγεί από το χρήστη. Ορισμένοι αναλυτές μπορούν να ανιχνεύσουν έως 20x rpm. Αυτό εξασφαλίζει ότι οι μετρήσεις φάσης

είναι αυτόματα επικεντρωμένες στις γραμμές και η ακρίβεια ενισχύεται περαιτέρω αποζημιώνοντας συνεισφορά του φίλτρου παρακολούθησης στο σφάλμα φάσης.

Μια τυπική απεικόνιση ενός αναλυτή παρακολούθησης σειράς θα μοιάζει με αυτό:

<b>Φίλτρο εντοπισμού</b>	
<b>Σημείο ελέγχου:</b>	
Μονάδες	ταχύτητα – κορυφή
Ταχύτητα	2900 rpm
συνολική	3.9 mm/s
1 ×	2 ×
Μέγεθος = 1.2 mm/s	μέγεθος = 0.6 mm/s
Φάση = 39°	Φάση= 81°

Οι χρήσεις της λειτουργίας εντοπισμού συχνά σχετίζονται με την εξισορρόπηση, προκειμένου να υπολογιστούν η συντελεστές επιρροής (πληροφορίες μηχανήματος, που βοηθά στην αποφυγή των δοκιμών λειτουργίας κατά εξισορρόπηση). Το πρόγραμμα υπολογίζει τους συντελεστές εξισορρόπησης του μηχανήματος με την εφαρμογή γνωστών δοκιμαστικών βαρών στο πεδίο της εξισορρόπησης. Η απόκριση του συστήματος με ένα δοκιμαστικό βάρος λαμβάνεται με την διαφορά των διανυσμάτων μεταξύ των δεδομένων της λειτουργίας αναφοράς και τα δεδομένα από την δοκιμαστική λειτουργία. Μόλις το πρόγραμμα υπολογίσει τους συντελεστές επιρροής, τότε μπορεί και να εκτιμηθούν τα διορθωτικά βάρη ή η μειώσεις βάρους χωρίς την βοήθεια άλλων δοκιμαστικών λειτουργιών.

Μια άλλη εφαρμογή είναι να διαπιστώσουμε αποκλίσεις σε μηχανές. Τοποθετούνται Δύο επιταχυνσιόμετρα σε αξονικές διευθύνσεις σε κάθε πλευρά του συνδέσμου. Η λειτουργία εντοπισμού μπορεί να καθορίσει εάν υπάρχει μετατόπιση φάσης 180 °, που προκύπτει λόγω του ελαττώματος κακής ευθυγράμμισης. Η άλλες εφαρμογές όπως οι τροχιές, η αναγνώριση συντονισμού, η τυπική ανάλυση και τα λειτουργικά σχήματα εκτροπής θα συζητηθούν λεπτομερώς αργότερα.

## **4.4 Ειδικές διαδικασίες σήματος**

### **4.4.1 Μέσος όρος σύγχρονου χρόνου**

Ο μέσος όρος σύγχρονου χρόνου είναι μια τεχνική ανάλυσης που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των πηγών που μπορεί να είναι υπεύθυνες για την παρακινητική ταλάντωση. Η

τεχνική αυτή συλλέγει κυματομορφές χρόνου συγχρονισμένες με ένα παλμό «δείκτη»  $1 \times$ . Μετά γίνεται ο μέσος όρος των κυματομορφών σύγχρονου χρόνου στο πεδίο του χρόνου, και τότε απεικονίζεται το φάσμα συχνοτήτων που προκύπτει. Ο μέσος όρος σύγχρονου χρόνου χρησιμοποιείται για τη μέτρηση ταλαντώσεων που σχετίζονται άμεσα και αρμονικά με την ταχύτητα περιστροφής ενός συγκεκριμένου εξαρτήματος ή μίας ατράκτου.

Χρησιμοποιείται επίσης συχνά όταν υπάρχουν περισσότερες από μία άτρακτοι σε ένα μηχάνημα που στρέφονται με διαφορετικές ταχύτητες, ή εάν υπάρχουν αρκετές μηχανές σε στενή εγγύτητα μεταξύ τους. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και για την απομάκρυνση των ταλαντώσεων από μη σύγχρονα συστατικά από το σήμα, έτσι ώστε να καταγράφεται η ταλάντωση μόνο από την άτρακτο αναφοράς.

Η τεχνική απαιτεί ένα στροφόμετρο ή οποιαδήποτε άλλη συσκευή για να παρέχει ένα παλμό  $1 \times$ . Αυτοί οι παλμοί χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση απόκτησης δεδομένων σε συγχρονισμό με την περιστροφή της ατράκτου αναφοράς. Το στροφόμετρο βρίσκεται στην άτρακτο αναφοράς. Κατά την διάρκεια της λήψης δεδομένων καταγράφονται όλες οι ταλαντώσεις της μηχανής. Οι συχνότητες δεν είναι συγχρονισμένες με την ταχύτητα της ατράκτου αναφοράς απομακρύνονται αποτελεσματικά από το σήμα μέσω του μέσου όρου.

Τα προβλήματα που σχετίζονται με την ταλάντωση στους ρότορες όπως, ανισορροπία, κακή ευθυγράμμιση, χαλαρότητα ρότορα και τριψίματα διατηρούνται στην απεικόνιση του φάσματος.

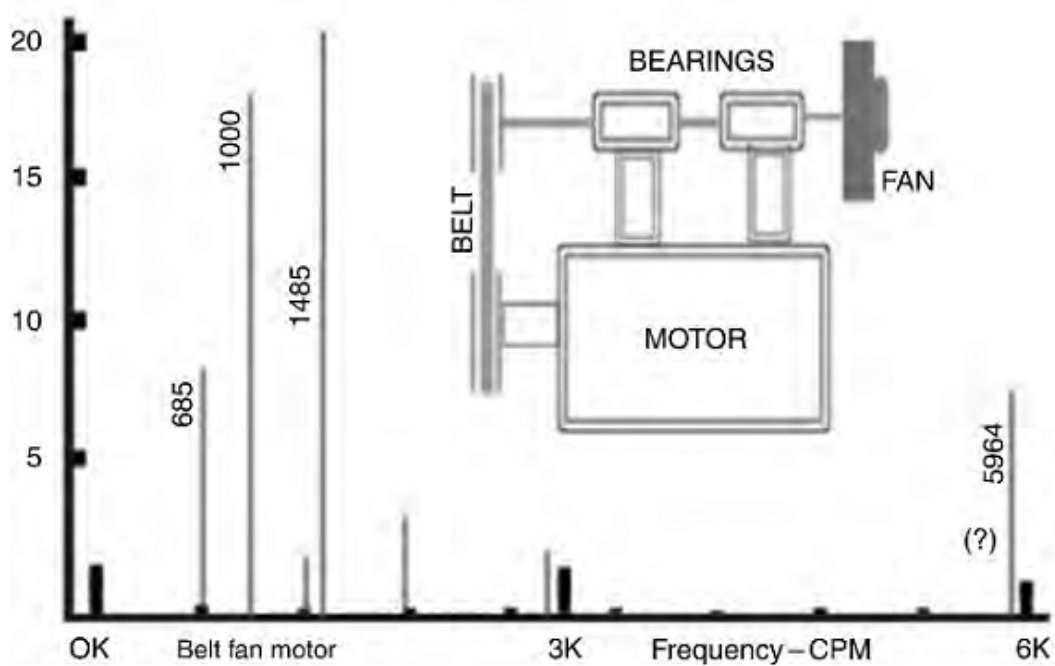
Ελαττώματα που δεν είναι συγχρονισμένα με την άτρακτο περιστροφής, όπως ρήγματα των ρουλεμάν, σπηλαίωση, ηλεκτρικός θόρυβος και συντονισμός παράγουν μη σύγχρονες συχνότητες που απομακρύνονται από το φάσμα με την χρήση του μέσου όρου. Με τον τρόπο αυτό, ο μέσος όρος σύγχρονου χρόνου είναι ένα αποτελεσματικό διαγνωστικό εργαλείο για την απομόνωση συγκεκριμένων σφαλμάτων.

Ο μέσος όρος σύγχρονου χρόνου εμφανίζει κορυφές που συγχρονίζονται με την άτρακτο αναφοράς. Επειδή είναι μία τεχνική μέσης τιμής, μπορεί να χρειαστεί ένας αριθμός μέσων όρων για να απομακρυνθούν οι μη-σύγχρονες κορυφές. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι χρειάζεται να γίνουν πολλοί μέσοι όροι για να απομακρυνθούν οι μη σύγχρονες κορυφές έξω από το φάσμα. Κατά καιρούς, απαιτούνται 100-1000 μέσοι όροι για την αναγνώριση των ταλαντώσεων των εξαρτημάτων που σχετίζονται με την άτρακτο αναφοράς.

Ο μέσος όρος σύγχρονου χρόνου μπορεί να πραγματοποιείται με τη χρήση αναλυτή για να απεικονιστούν οι σύγχρονες κορυφές που σχετίζονται με τον ρότορα αναφοράς. Για παράδειγμα, σκεφτείτε τον κινούμενο με ιμάντα ανεμιστήρα που φαίνεται στην Εικόνα 4.13. Όπως φαίνεται στην εικόνα, η μηχανή αποτελείται από δύο παράλληλους ιμάντες που

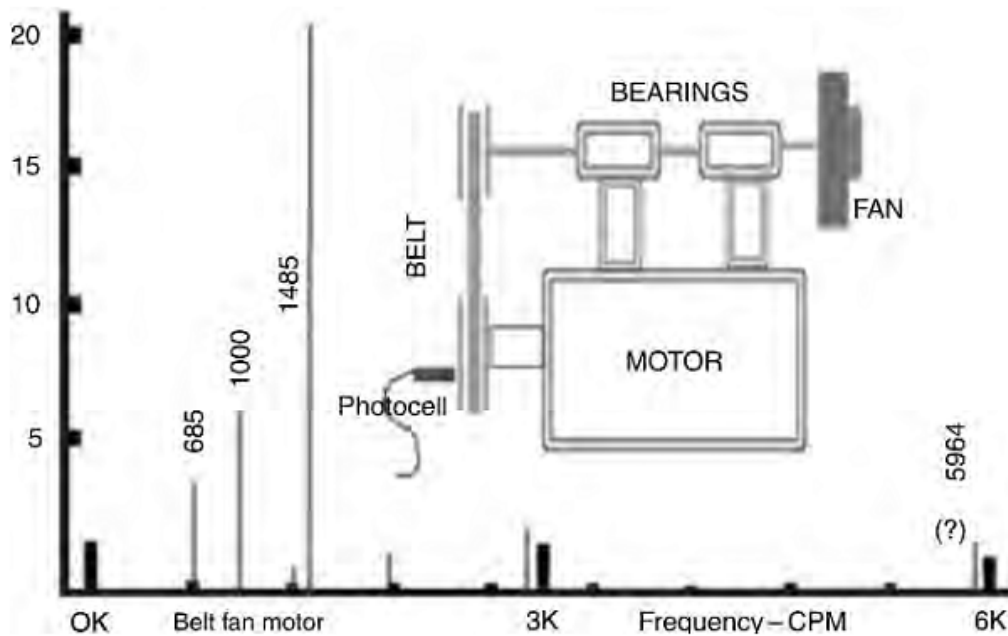
συνδέονται με ατράκτους με διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Οι άτρακτοι του κινητήρα και του ανεμιστήρα είναι συνδεδεμένοι με το ίδιο πλαίσιο στήριξης.

- Συχνότητα ιμάντα 685 cpm
- κινητήρας, 1 × rpm 1485 cpm
- Άτρακτος ανεμιστήρα, 1 × rpm 1000 cpm
- Κινητήρας, 4 × rpm ή ηλεκτρικός 5964 cpm.



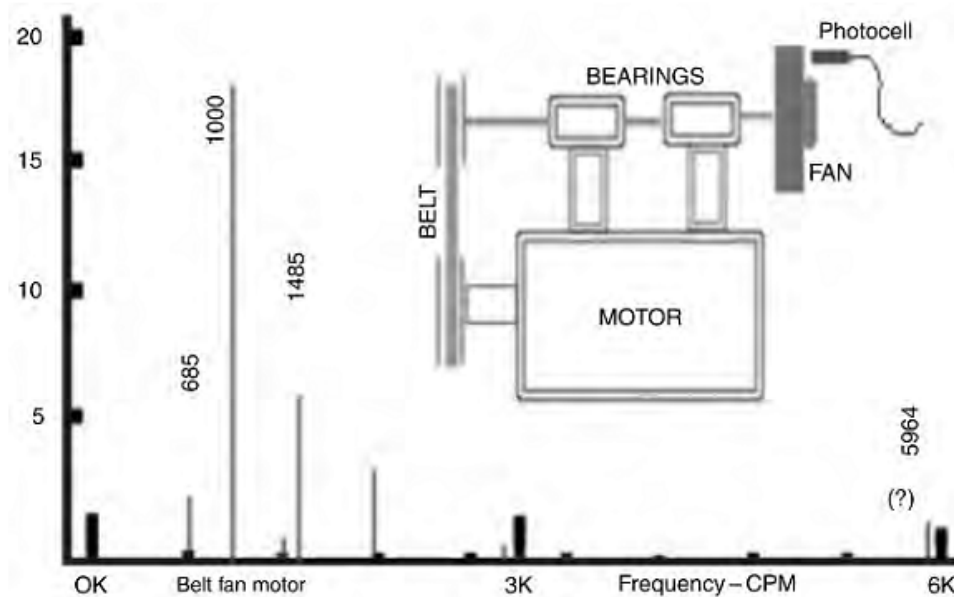
**Σχήμα 4.13** Κανονικό φάσμα FFT[1]

Η τεχνική μέσου όρου σύγχρονου χρόνου χρησιμοποιήθηκε και στις δύο ατράκτους για να προσδιοριστεί η ταλάντωση που προέρχεται από αυτές. Το σχήμα 4.14 δείχνει την ένδειξη του μέσου όρου σύγχρονου χρόνου χρησιμοποιώντας ένα έναυσμα στην άτρακτο του κινητήρα. Το μόνο που παραμένει τον μέσο όρο σύγχρονου χρόνου είναι οι συνιστώσες των ταλαντώσεων που προέρχονται από την άτρακτο του κινητήρα.



**Σχήμα 4.14** Συγχρονισμένο και μεσορισμένο φάσμα με ενεργοποιητή στην άτρακτο-να σημειωθεί ότι οι μη σύγχρονες συχνότητες μειώνονται[1]

Το σχήμα 4.15 είναι το φάσμα που προέρχεται από τον μέσο όρο σύγχρονου χρόνου στην άτρακτο του ανεμιστήρα. Και πάλι, οι ταλαντώσεις όλων των εξαρτημάτων έχουν απομακρυνθεί από το φάσμα εκτός εκείνες που προέρχονται από την άτρακτο του ανεμιστήρα. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι έχουν απομακρυνθεί δύο συγκεκριμένες συχνότητες από τα φάσματα του μέσου όρου σύγχρονου χρόνου. Η συχνότητα του ιμάντα, 685 rpm απομακρύνθηκε, επειδή δεν ήταν σύγχρονη με καμία άτρακτο. Η κορυφή 5964-CPM απομακρύνθηκε επίσης και από δύο φάσματα.



**Σχήμα 4.15** Συγχρονισμένο και μεσορισμένο φάσμα με ενεργοποιητή στην άτρακτο του ανεμιστήρα[1]

Η κορυφή 5964-CPM θα μπορούσε να μπερδευτεί με την ταχύτητα του κινητήρα 4 x. Αν αυτό είχε γίνει, η κορυφή δεν θα είχε απομακρυνθεί από το φάσμα. Εφόσον η κορυφή 5964-CPM απομακρύνθηκε, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι το αίτιο είναι μη-σύγχρονο και θα μπορούσε να είναι ένα ηλεκτρικό πρόβλημα στην περιέλιξη του στάτη του κινητήρα.

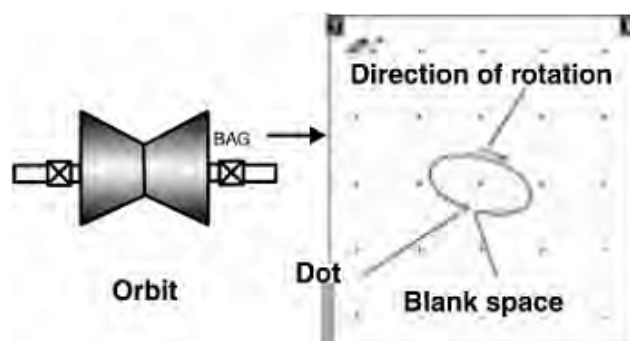
#### 4.4.2 Τροχιές

Οι τροχιές είναι πρότυπα Λισσαζού των σημάτων στο πεδίο του χρόνου που απεικονίζονται ταυτόχρονα στο επίπεδο X-Y των συντεταγμένων ενός παλμογράφου ή ενός αναλυτή ταλαντώσεων. Σε αυτή τη μορφή απεικόνισης, είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστεί η αρχή της τροχιάς καθώς εμφανίζεται να είναι ένας ατελείωτος βρόχος. Για να καθορίσουμε την κατεύθυνση της περιστροφής, χρησιμοποιείται ένα ερέθισμα φάσης. Το ερέθισμα δείχνει την κατεύθυνση περιστροφής κοιτάζοντας την τελεία στην τροχιά ως σημείο εκκίνησης του 1 x rpm και το κενό ως το τελικό σημείο.

Η ανάλυση τροχιών είναι το μέτρο ταλάντωσης κάθε συστήματος ρότορα σε ένα διάγραμμα X-Y (Σχήμα 4.16). Στις περισσότερες εφαρμογές του, η μονάδα μέτρησης είναι η μετατόπιση η οποία μετριέται απευθείας χρησιμοποιώντας ανιχνευτές εγγύτητας. Αυτά τα είδη μετρήσεων είναι σχετικές μετρήσεις ταλάντωσης. Οι σχετικές μετρήσεις θεωρούνται μετρήσεις ταλάντωσης της ατράκτου σε σχέση με το περίβλημα του εδράνου. Δεδομένου ότι οι

ανιχνευτές συσφίγγονται σταθερά με στο περίβλημα, δεν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του ανιχνευτή και του περιβλήματος. Έτσι, επιτυγχάνετε η τροχιά.

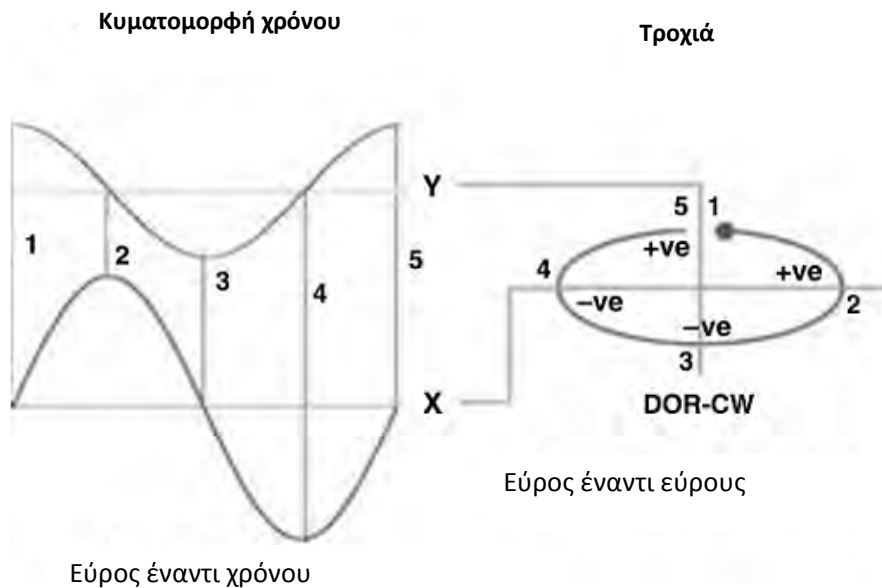
Με αυτό κατά νου, τα διαγράμματα τροχιών δίνουν μια οπτική γραφική παράσταση της πραγματικής κίνησης του άξονα της ατράκτου μέσα στο περίβλημα του εδράνου. Επίσης για να δημιουργήσουμε τις τροχιές μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε επιταχυνσιόμετρα και συλλέκτες ταχύτητας. Αυτά είναι εξωτερικοί μετατροπείς, οι οποίοι απαιτούν τοποθέτηση στο εξωτερικό του περιβλήματος του εδράνου. Αυτοί οι τύποι των μετρήσεων αποκαλούνται τροχιές περιβλήματος. Οι τροχιές περιβλήματος διαχωρίζουν τις ταλαντώσεις της ατράκτου και του περιβλήματος. Αυτό μπορεί να μας δώσει την απόλυτη κίνηση της ατράκτου (σε σχέση με το διάστημα).



**Σχήμα 4.16** Ανάλυση τροχιών[1]

Για να κατανοήσουμε τις τροχιές, πρέπει να εξηγηθούν οι κυματομορφές και η σχέση τους με τις τροχιές. Ας αρχίσουμε με τις κυματομορφές. Το διάγραμμα κυματομορφής που φαίνεται στο Σχήμα 4.17 έχει δύο ημιτονοειδή κύματα, Y και X. Το διάγραμμα Y βρίσκεται στην κορυφή και το διάγραμμα X είναι στο κάτω μέρος. Σε οποιαδήποτε περίπτωση η ένδειξη της κυματομορφής από τα αριστερά προς τα δεξιά και τα εύρη μεταβάλλονται από το αρνητικό στο θετικό. Οι αλλαγές στην κυματομορφή προκαλούν την δημιουργία της τροχιάς. Μια τροχιά αποτελείται έναν άξονα X, έναν άξονα Y και το μηδέν στο κέντρο. Ξεκινώντας από το κέντρο, προς πάνω είναι θετικό και προς τα κάτω αρνητικό. Δεξιά είναι θετικά και αριστερά είναι αρνητικά. Τώρα που γνωρίζουμε τις συμβάσεις της κυματομορφής και της τροχιάς, θα εντοπίσουμε τις κυματομορφές και να δημιουργήσουμε μια τροχιά.





**Σχήμα 4.17** Κυματομορφές και η σχέση τους με τις τροχιές[1]

Αν εντοπίσουμε την κυματομορφή του Y , μπορούμε να δούμε ότι αρχίζει στο σημείο 1, όπου το εύρος του αποτελεί το ανώτατο όριο του ας πούμε 25 μικρά, και πηγαίνει στο μηδέν στο σημείο 2. Φθάνει -25 μικρά στο σημείο 3, και πάλι στο μηδέν στο σημείο 4 και τελικά +25 μικρά στο σημείο 5. Ο παρών κύκλος συνεχίζεται πάνω και κάτω. Αν αυτό υπήρχε μόνο αυτό το ίχνος, θα περιέγραφε μια ευθεία γραμμή από τα +25 μικρά έως τα -25 μικρά.

Η X κυματομορφή ξεκινά με εύρος μηδέν στο 1, η οποία είναι  $90^\circ$  πίσω από το Y. Εδώ, η κυματομορφή X περνάει μέσω των 5 σημείων με μέγιστο εύρος 50 μικρών, για παράδειγμα. Μόνη της η κυματομορφή X θα παρήγαγε μια οριζόντια γραμμή από τα +50 μικρά στα -50 μικρά. Τώρα εξετάζουμε και τις δύο κυματομορφές καθώς κινούνται μέσα στο χρόνο. Αυτό θα ενώσει το σημείο X και Y στην τροχιά για να ολοκληρωθεί η έλλειψη.

Για να δούμε την τροχιά του, πρέπει να κοιτάξουμε το διάγραμμα και να παρατηρήσουμε ότι το Y είναι στο μέγιστο εύρος όταν το X είναι μηδέν. Στο σημείο 1, η κυματομορφή Y είναι στο μέγιστο εύρος και η κυματομορφή X είναι μηδέν. Καθώς προχωράμε στο σημείο 2, το οποίο είναι  $90^\circ$  προς τα δεξιά, η τροχιά X είναι στο μέγιστο εύρος 50 μικρά όταν το Y είναι μηδέν. Στο σημείο 3, και πάλι  $90^\circ$  προς τα δεξιά, η κυματομορφή X είναι μηδέν και η κυματομορφή Y είναι -25 μικρά. Στο σημείο 4, περαιτέρω  $90^\circ$ , η κυματομορφή X φθάνει -50 Μικρά αλλά τώρα η κυματομορφή Y είναι μηδέν. Το σημείο 5 είναι το ίδιο με το σημείο 1.

Η τροχιά αλλάζει καθώς οι γωνίες εύρους και φάσης αλλάζουν στις κυματομορφές. Όπως προαναφέρθηκε, η τελεία στην τροχιά σηματοδοτεί την έναρξη του κύματος και το κενό διάστημα υποδηλώνει το τέλος του. Σε αυτό το παράδειγμα τροχιάς, καθώς περάσαμε από

αριστερά προς τα δεξιά, τα σημεία 1-5 της τροχιάς κινούνται με αριστερόστροφη κατεύθυνση, όπως στη σύμβαση. Εάν η περιστροφή του άξονα τυγχάνει επίσης να κινείται σε μια δεξιόστροφη κατεύθυνση καθώς διέρχεται από τον ανιχνευτή Υ στον ανιχνευτή Χ, τότε η τροχιά μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει μετάπτωση προς τα εμπρός, αλλιώς η μετάπτωση θα ήταν αντίστροφη.

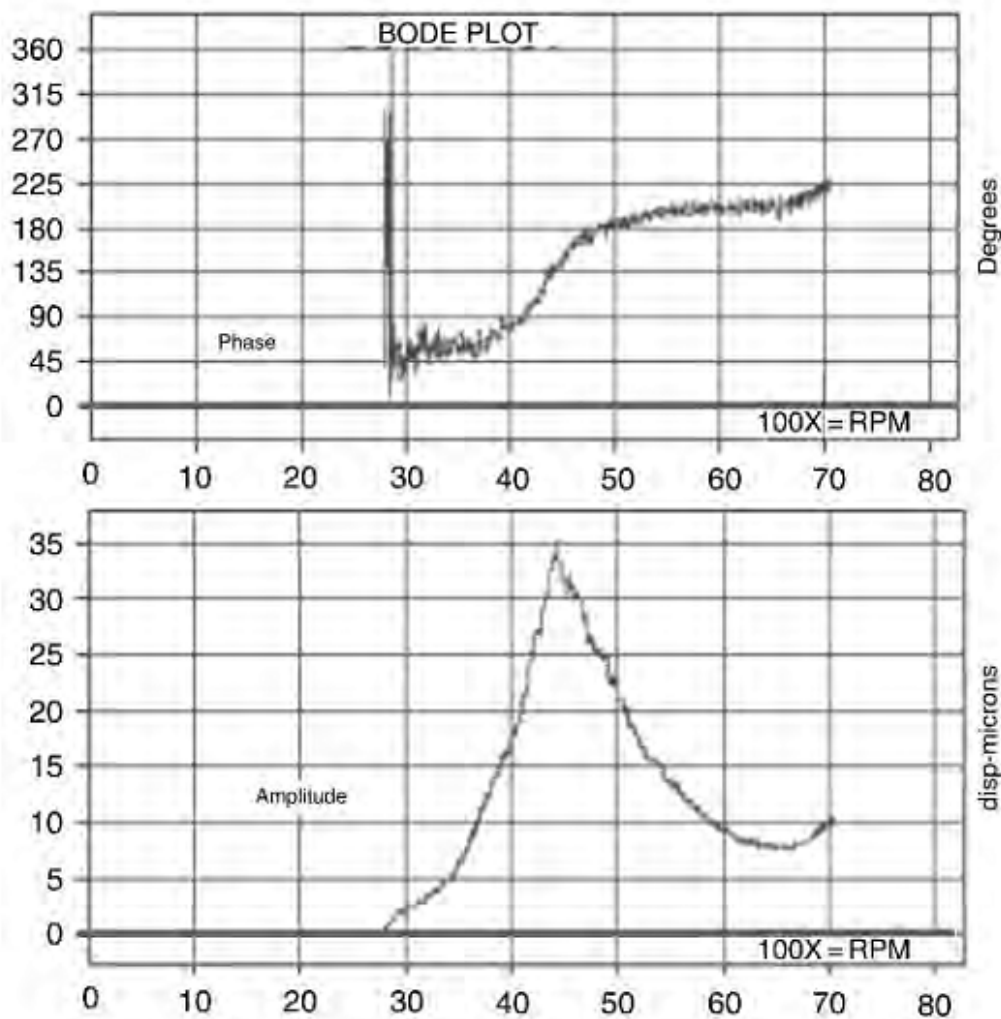
## **Διάγραμμα Bode**

Ένα διάγραμμα Bode αποτελείται από δύο γραφήματα:

- Εύρος συναρτήσει της ταχύτητα της μηχανής
- Φάση συναρτήσει της ταχύτητα της μηχανής.

Για να απεικονίσουμε ένα διάγραμμα Bode, χρησιμοποιείται ένα έναυσμα φάσης για να ληφθεί η αναφορά της ατράκτου για την μέτρηση της φάσης και την μέτρηση της ταχύτητας της μηχανής. Ο αναλυτής ενεργοποιεί και καταγράφει το εύρος και την φάση ταυτόχρονα σε συγκεκριμένα διαστήματα της ταχύτητας (το οποίο μπορεί να οριστεί από τον χρήστη), τα δύο γραφήματα εμφανίζονται το ένα πάνω από το άλλο.

Στην ροτοροδυναμική, το διάγραμμα Bode χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό της κρίσιμης ταχύτητας του ρότορα. Στο διάγραμμα, σημειώνεται η ταχύτητα στην οποία το εύρος ταλάντωσης είναι μέγιστο, για να επιβεβαιωθεί, ελέγχεται η γραφική παράσταση φάσης για να διαπιστωθεί εάν διαφέρει από την αρχική τιμή κατά  $90^\circ$  (Σχήμα 4.18).

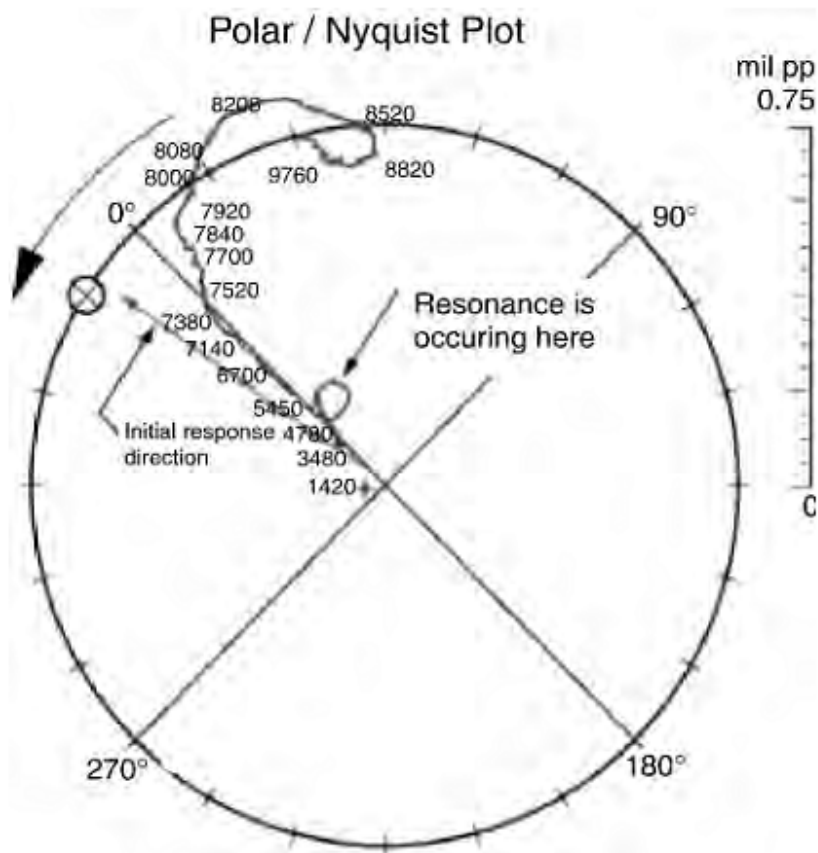


**Σχήμα 4.18** Διάγραμμα Bode που δείχνει την κρίσιμη ταχύτητα του ρότορα. Να σημειωθεί σε αυτήν την ταχύτητα το εύρος είναι μέγιστο στα 35 μικρά. Η φάση που στις 2900 rpm ήταν 45 μοίρες στις 4400 rpm είναι 135 που υποδεικνύει διαφορά 90 μοιρών[1]

Το διάγραμμα Bode μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει το ποσό της εκκεντρότητας που σχετίζεται με έναν ανιχνευτή εγγύτητας, την κατάσταση ισορροπίας, την απόσβεση του συστήματος και την γωνία φάσης λειτουργίας και το εύρος σε διάφορες ταχύτητες του μηχανήματος.

### Πολικό Διάγραμμα / Nyquist

Το πολικό διάγραμμα ή διάγραμμα Nyquist είναι επίσης μια αναπαράσταση των ίδιων τριών μεταβλητών όπως και στο διάγραμμα Bode. Οι μεταβλητές απεικονίζονται σε ένα μόνο κυκλικό διάγραμμα αντί των Καρτεσιανών αξόνων (Σχήμα 4.19).



**Σχήμα 4.19** Διάγραμμα Nyquist υποδεικνύει τη κρίσιμη ταχύτητα (συντονισμός) του ρότορα περίπου στις 5500 rpm[1]

Το κέντρο του διαγράμματος αντιπροσωπεύει μηδενική ταχύτητα και μηδενικό εύρος με τις επακόλουθες μετρήσεις της έντασης και της γωνίας φάσης να απεικονίζονται με τη σχετική ταχύτητα της μηχανής τους.

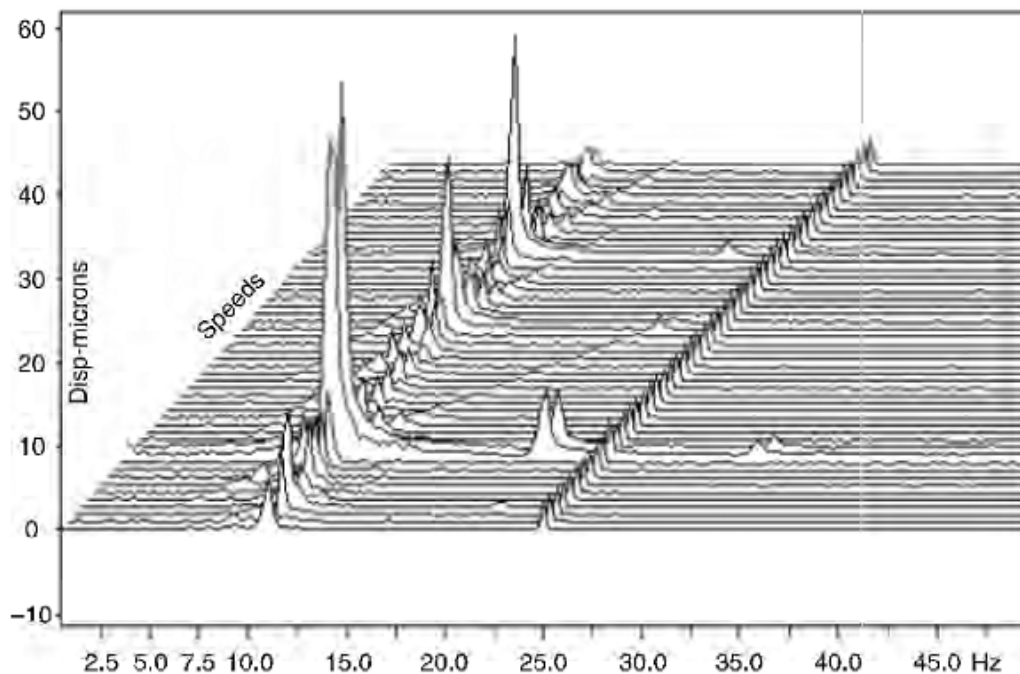
Είναι σαν να εντοπίζουμε την άκρη του διανύσματος ταλάντωσης , καθώς η ταχύτητα της μηχανής αυξάνει στην μέγιστη ταχύτητα. Οι μετρήσεις της γωνίας φάσεως χαράσσονται γύρω από την περιφέρεια του γραφήματος, κατά την κατεύθυνση περιστροφής της μηχανής. Τα πολικά διαγράμματα γίνονται πάντα με την ταχύτητα λειτουργίας της μηχανής ή κάποιο πολλαπλάσιο της, ανάλογα με το σφάλμα που διερευνάται.

Οι κρίσιμες ταχύτητες των μηχανών εμφανίζονται ως βρόχοι, με την κρίσιμη ταχύτητα να βρίσκεται 90° από η αρχή του βρόχου. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά την αναγνώριση του συντονισμού και των κρίσιμων ταχυτήτων εύκολη. Είναι δυνατόν να λάβουμε τις ίδιες πληροφορίες που λαμβάνονται με τη χρήση ενός διαγράμματος Bode και με το πολικό

διάγραμμα. Όπως φαίνεται, το Bode και τα διαγράμματα Nyquist είναι τα ίδια, εκτός από τον τρόπο παρουσίασής τους.

### Διάγραμμα κλιμάκωσης

Ένα διάγραμμα κλιμάκωσης (Σχήμα 4.20) είναι μια αναπαράσταση τριών παραμέτρων: το εύρος, την συχνότητα και η ταχύτητα της μηχανής. Ένα διάγραμμα FFT του εύρους συναρτήσει της συχνότητας καταγράφεται σε ειδικό διαστήματα ταχύτητα της μηχανής (που επιλέγονται από τον χρήστη). Μετά τη συλλογή όλων των FFT, κλιμακώνονται το ένα μετά το άλλο σε μια μορφή παρόμοια με διάγραμμα καταρράκτη.



**Σχήμα 4.20** Διάγραμμα κλιμάκωσης[1]

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ένα διάγραμμα καταρράκτη είναι ο FFT της ίδιας θέσης που συλλέγεται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Τα διαγράμματα καταρράκτη είναι τα διαγράμματα ενός μηχανήματος που λειτουργεί με την ίδια ταχύτητα. Ωστόσο, ένα διάγραμμα κλιμάκωσης, είναι μια συλλογή από FFT σε διαφορετικές ταχύτητες μιας μηχανής που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της μεταβολής ταχύτητας της μηχανής, για παράδειγμα κατά τη διάρκεια της εκκίνησης ή το κλείσιμο της. Στο διάγραμμα κλιμάκωσης, οι σειρές ( $1/2 \times$ ,  $1 \times$  ή υψηλότερες) εμφανίζονται υπό την μορφή γραμμών. Είναι προφανές ότι ένα διάγραμμα καταρράκτη είναι ένα εργαλείο για την παροδική ανάλυση, η οποία αποτελεί ένα ουσιαστικό εργαλείο για την διάγνωση των κρίσιμων μηχανημάτων. Τα διαγράμματα Bode και Nyquist

ανήκουν επίσης σε αυτήν ομάδα εργαλείων της παροδικής ανάλυσης.

## Πλήρες φάσμα

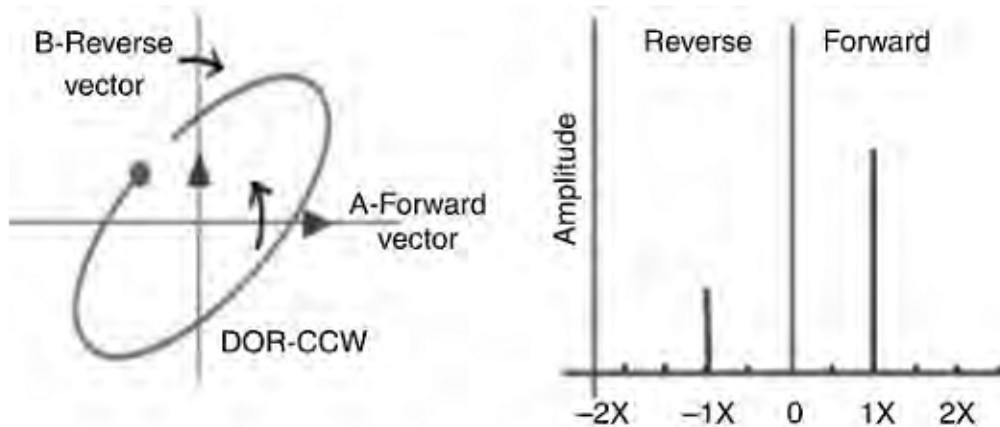
Το πλήρες φάσμα είναι ένα επιπλέον διαγνωστικό εργαλείο και ονομάζεται επίσης φάσμα μίας τροχιάς. Δείχνει τις ίδιες πληροφορίες με μια τροχιά, αλλά σε διαφορετική μορφή. Βοηθά στο να καθορίσουμε τον βαθμό ελλειπτικότητας (ή επιπέδωση) που σχετίζεται με τις διάφορες συνθήκες των μηχανημάτων μαζί με την κατεύθυνση μετάπτωσης για όλα τα παρόντα μέρη της συχνότητας.

Για να αποκτήσουμε το πλήρες φάσμα, τροφοδοτούνται τα ορθογώνια σήματα των μετατροπέων X και Y στο άμεσο μέρος και το μέρος τετραγωνισμού της εισόδου FFT. Λαμβάνεται η θετική και η αρνητική συνιστώσα ταλάντωσης για κάθε συχνότητα. Θετική ορίζεται η μετάπτωση προς τα εμπρός και η αρνητική συνιστώσα ως η αντίστροφη μετάπτωση. Αυτές οι συνιστώσες δίνουν τις ακόλουθες πληροφορίες ελλειπτικότητας και μετάπτωσης για μια δεδομένη τροχιά για οποιασδήποτε συγκεκριμένη συχνότητα (1 x ή 2 x ή ...):

- Το άθροισμα των δύο συνιστωσών, εμπρός και πίσω, είναι το μήκος της τροχιάς του μείζονα άξονα.
- Η διαφορά μεταξύ των δύο συνιστωσών είναι το μήκος του δευτερεύοντος άξονα της τροχιάς.
- Η μεγαλύτερη από τις δύο συνιστώσες, θετική ή αρνητική, καθορίζει την κατεύθυνση της μετάπτωσης που είναι προς τα εμπρός ή προς τα πίσω.

Μία από τις πιθανές εφαρμογές του πλήρους φάσματος είναι η ανάλυση της εκκεντρότητας του ρότορα που προκαλείται από μηχανικές, ηλεκτρικές ή μαγνητικές ανωμαλίες. Ανάλογα με τη συχνότητα της ανωμαλίας που διαπιστώνεται από τους ανιχνευτές εγγύτητας X-Y, παρατηρούνται διαφορετικοί συνδυασμοί συνιστωσών προς τα εμπρός και αντίστροφα. Η μέθοδος αποτελεί τη βάση για πολλά χρήσιμα διαγνωστικά μηχανήματα.

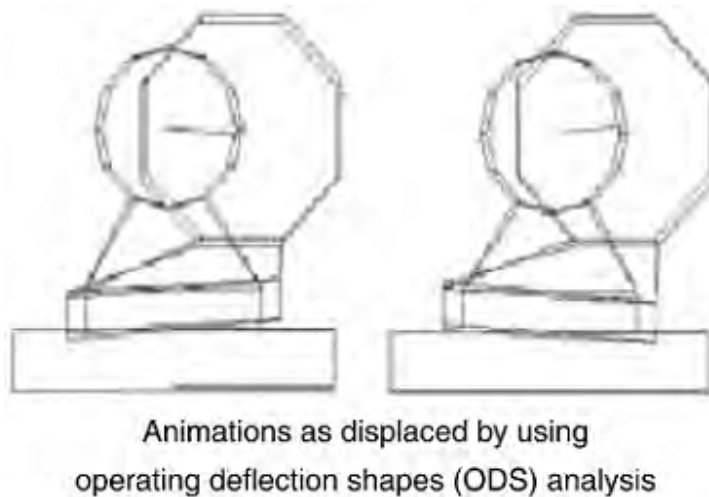
Το πλήρες φάσμα (ακριβώς όπως και το κανονικό FFT) μπορεί να ληφθεί σε σταθερή κατάσταση ανάλυσης (ένα ενιαίο FFT ή καταρράκτη) και ακόμα και σε παροδική ανάλυση, η οποία στη συνέχεια θα ονομάζεται πλήρες φάσμα κλιμάκωσης (Σχήμα 4.21).



**Σχήμα 4.21** Ένα πλήρες φάσμα με σταθερή κατάσταση[1]

#### 4.4.3 Ανάλυση λειτουργικού σχήματος εκτροπής

Η ανάλυση λειτουργικού σχήματος εκτροπής (ODS) (Σχήμα 4.22) είναι μια τεχνική οπτικοποίησης της παλμικής κίνησης της μηχανής υπό τις συνθήκες λειτουργίας της. Αυτή η μέθοδος είναι πραγματικά χρήσιμη για τον εντοπισμό των αιτιών των ελαττωμάτων, ή για να δείχνουν την συμπεριφορά της μηχανής σε άτομα τα οποία δεν είναι εξοικειωμένα με την ανάλυση ταλαντώσεων.



**Σχήμα 4.22** Ανάλυση ODS[1]

Σε αυτή τη μέθοδο, κατασκευάζεται μια εικόνα της κίνησης ταλάντωσης της μηχανής με την μέτρηση της ταλάντωσης και της φάση σε διάφορες θέσεις στο μηχάνημα. Οι πληροφορίες σχετικού εύρους και φάσης των διαφόρων θέσεων μετριοούνται και τα δεδομένα αυτά είναι δίνονται σε έναν κεντρικό υπολογιστή που έχει ειδικό λογισμικό για την προσομοίωση των δεδομένων απόκρισης. Το αποτέλεσμα είναι μια πραγματική, αλλά ιδιαίτερα υπερβολική εικόνα της κίνησης στα διαφορετικά σημεία στο μηχάνημα.

Ο όρος που χρησιμοποιείται για αυτήν την τεχνική οπτικοποίησης είναι ανάλυση ODS. Στηρίζεται στην πραγματική κίνηση ταλάντωσης του μηχανήματος κατά τη λειτουργία του για να δώσει πληροφορίες. Για το λόγο αυτό, είναι σχετικά μια απλή τεχνική στην εφαρμογή και δεν βασίζεται σε προσεγγιστικά μοντέλα φορτίων και των δομών. Τα δεδομένα πρέπει να συλλέγονται με το μηχάνημα να λειτουργεί *ως έχει*.

Η ανάλυση ODS είναι δυνατή με ένα αναλυτή μονού καναλιού με έναν σύγχρονο παλμό αναφοράς κάθε περιστροφής. Ωστόσο, η ODS διεξάγεται καλύτερα χρησιμοποιώντας ένα αναλυτή δύο καναλιών. Ένα από τα πλεονεκτήματα είναι ότι δεν απαιτείται τερματισμός του μηχανήματος για να εκτελεστεί.

Τα πακέτα λογισμικού οπτικοποίησης ODS για την στελέχωση της κίνησης του μηχανήματος είναι εμπορικά διαθέσιμα. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένα υπάρχον πακέτο απλού λογισμικού ιδιομορφικής ανάλυσης. Αυτό δεν σημαίνει ότι πρέπει να πραγματοποιηθεί ιδιομορφική ανάλυση, παρά μόνο ότι το ODS αντικαθιστά μια υπολογιστική λειτουργία σχήματος με σκοπό το animation. Το λογισμικό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν υπάρχουν πολλές θέσεις παρακολούθησης στο μηχάνημα.

## **ODS εναντίον ιδιομορφική ανάλυση**

Πρέπει να τονιστεί ότι η ODS διαφέρει από ιδιομορφική ανάλυση (MA). Η κύριες διαφορές τους αναφέρονται παρακάτω:

- Η ιδιομορφική ανάλυση χρησιμοποιείται συνήθως για την αξιολόγηση των διαρθρωτικών σχεδίων και την διερεύνηση τροποποιήσεων του σχεδιασμού πριν γίνουν διαρθρωτικές αλλαγές. Οι ODS χρησιμοποιείται για την ανάλυση και επίλυση σύνθετων λειτουργικών προβλημάτων στα μηχανήματα, με την δημιουργία ενός animation της κίνησής του.
- Η ιδιομορφική ανάλυση απαιτεί την εφαρμογή ειδικών ελεγχόμενων και μετρούμενων φορτίων στη δομή της μηχανής, κατά προτίμηση ενώ δεν είναι σε λειτουργία, και στη συνέχεια χρησιμοποιεί τις μετρήσεις ταλαντώσεων για τον υπολογισμό της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής. Με την χρήση αυτών των πληροφοριών, το MA δημιουργεί ένα μαθηματικό μοντέλο του μάζας, δυσκαμψίας και των χαρακτηριστικών



απόσβεσης της δομής και καθορίζει σχήματα λειτουργία της στις φυσικές της συχνότητες. Αυτές οι ιδιότητες είναι ανεξάρτητες από της συνθήκες λειτουργίας της δομής. Το ODS, από την άλλη πλευρά, είναι αρκετά απλή και βασίζεται εξ ολοκλήρου στα πραγματικά φορτία λειτουργίας της μηχανής για να διεγείρουν τις ταλαντώσεις. Οι μετρήσεις των ταλαντώσεων στη συνέχεια παρέχουν μια απεικόνιση της παλμικής κίνησης στις συνθήκες λειτουργίας. Με διαφορετικές συνθήκες φόρτωσης ή λειτουργίας, εμφανίζονται διαφορετικά σχήματα εκτροπής.

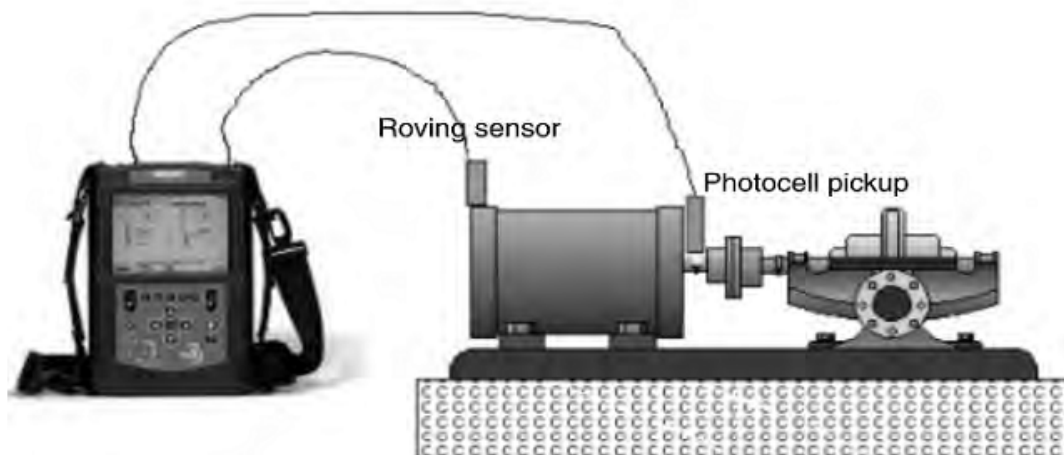
Οι μετρήσεις για την ODS συλλέγονται σε συγκεκριμένες συχνότητες ( $1 \times 2 \times$  ή οποιαδήποτε άλλη συχνότητα) χρησιμοποιώντας την ανάλυση φάσματος ταλαντώσεων για τον προσδιορισμό του εύρους για τις συχνότητες στις οποίες πρόκειται να κατασκευαστεί η ODS. Επιλέγεται μια θέση μέτρησης και προσδιορίζεται ως θέση αναφοράς και σε όλες τις υπόλοιπες θέσεις μετρούνται τα σχετικά επίπεδα ταλαντώσεων και φάσεων στην επιλεγμένη συχνότητα με τη χρήση ενός αισθητήρα.

Οι σχετικές τιμές εύρους και φάσης είναι επαρκής, και οι απόλυτες τιμές δεν έχουν συνέπειες. Εάν απαιτείται, οι απόλυτες τιμές μπορούν να αναπροσαρμόζονται με μια σταθερή θέση.

Συμπεριλαμβανομένης της συνολικής επίδρασης των πολλαπλών συχνοτήτων, σύγχρονων ή ασύγχρονων, ή ίσως όλων των συχνοτήτων κάτω από ένα ορισμένο όριο, μπορεί να περιλαμβάνει πιο πολύπλοκα σχήματα ταλάντωσης, αν και το τελευταίο δεν είναι και πολύ συχνό. Η ταλάντωση συνήθως συμβαίνει σε όλες τις κατευθύνσεις και η ανάλυση ODS μπορεί να διεξάγεται για 2 ή 3 κατευθύνσεις της κίνησης εάν χρειαστεί.

### **ODS με αναλυτές ενός καναλιού**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει ένας σύγχρονο παλμός αναφοράς για να ξεκινήσει την απόκτηση δεδομένων του αναλυτή, μπορούμε να μετρήσουμε το μέγεθος και την φάση των σύγχρονων ταλαντώσεων χρησιμοποιώντας πολλούς αναλυτές ενός καναλιού και κάποιους συλλέκτες δεδομένων (Σχήμα 4.23).

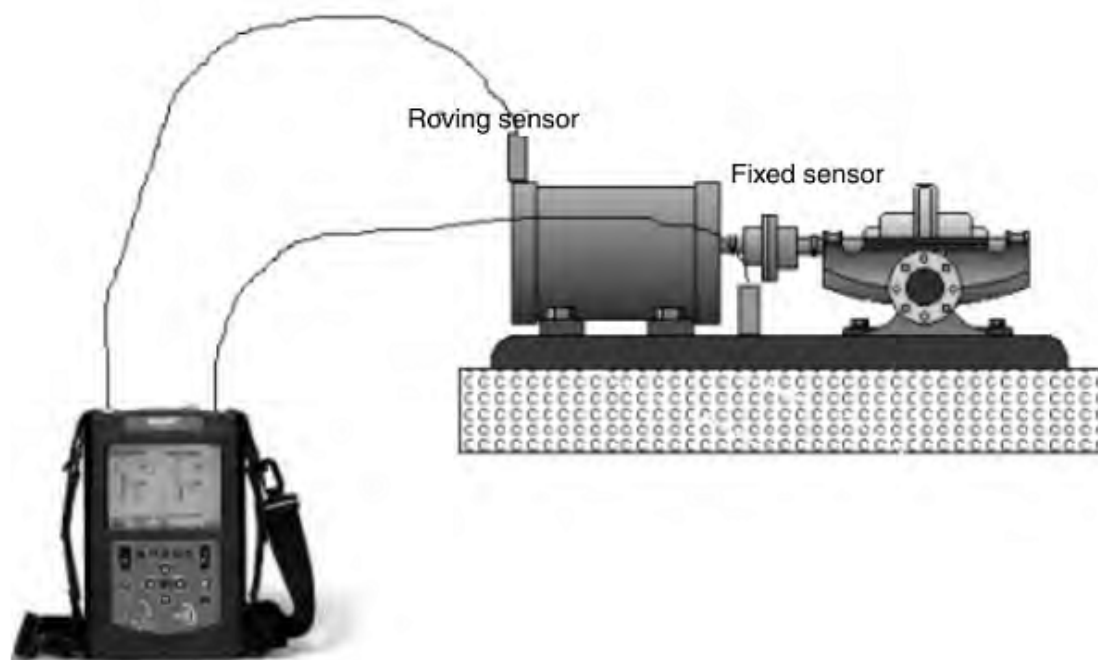


**Σχήμα 4.23** Ανάλυση ODS με αναλυτή μονού καναλιού[1]

Το σχετικό μέγεθος υπολογίζεται διαιρώντας το μετρούμενο μέγεθος σε κάθε θέση με το μέγεθος της ταλάντωσης στη θέση αναφοράς. Η φάση που μετρήθηκε σε αυτήν την περίπτωση είναι η φάση σε σχέση με την σκανδάλη. Η σχετική φάση είναι η διαφορά μεταξύ της φάσης σε σχέση με την σκανδάλη σε μια δεδομένη θέση και η φάση σε σχέση με την σκανδάλη στη θέση αναφοράς.

### **ODS με αναλυτές πολλαπλών καναλιών**

Δεν υπάρχει ανάγκη για την ενεργοποίηση των μετρήσεων με τη χρήση ενός αναλυτή πολλαπλών καναλιών, επειδή το σχετικό εύρος και η φάση μπορεί να μετρηθεί άμεσα και με ακρίβεια χρησιμοποιώντας την συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ των δύο καναλιών (Σχήμα 4.24).



**Σχήμα 4.24** Ανάλυση ODS με αναλυτή πολλαπλών καναλιών[1]

Μια απλή προσέγγιση είναι να κάνουμε διακαναλικές μετρήσεις μεταξύ της ταλάντωσης στο σημείο αναφοράς και της ταλάντωσης σε κάθε άλλη θέση. Η συνιστώσα της συχνότητας που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να επιλεγεί από μία διαφασματική γραφική παράσταση μεγέθους.

Το σχετικό μέγεθος και η φάση ακολουθούν από το διάγραμμα συνάρτησης μεταφοράς της θέσης αναφοράς στην τρέχουσα θέση. Ορισμένες από τις νέες ορολογίες που αναφέρονται εδώ θα εξηγηθούν στα ακόλουθα θέματα.

### **Διασταυρωμένο φάσμα**

Ένα διασταυρωμένο φάσμα είναι βασικά μια σύγκριση μεταξύ των σημάτων από δύο σημεία ενδιαφέροντος σε ένα μηχάνημα. Αποτελείται ουσιαστικά από δύο γραφικές παραστάσεις:

- Εύρος έναντι συχνότητας
- Φάσης έναντι συχνότητας.

Το διάγραμμα εύρους έναντι συχνοτήτων δείχνει τη σχέση μεταξύ των μεγεθών των δύο σημάτων. Για παράδειγμα, εάν και τα δύο σήματα έχουν ορατές κορυφές στα 1450 cpm, θα φάνει επίσης και στα 1450 cpm του διασταυρωμένου φάσματος. Εάν μόνο ένα σήμα έχει κορυφή στα 1450-CPM, δεν θα φανεί διασταυρωμένο φάσμα.

Η γραφική παράσταση της φάσης έναντι της συχνότητας είναι παράσταση της διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο σημάτων, όπως μία συνάρτηση της συχνότητας. Η ορολογία που χρησιμοποιείται για ένα διακαναλικό φάσμα με δύο κανάλια εισόδου A και B είναι μία από τις παρακάτω:

- Διασταυρωμένο φάσμα από το A στο B
- Διασταυρωμένο φάσμα από το B στο A

Αυτό εξαρτάται από το αν θέλουμε να συνδεθεί η φάση του καναλιού B με το κανάλι A, ή φάση του καναλιού A στο κανάλι B, αντίστοιχα.

Τα μεγέθη σε κάθε περίπτωση θα είναι η ίδια, αλλά η διαφορά φάσης θα έχει αντίθετα πρόσημα. Το μέγεθος του διασταυρωμένου φάσματος είναι το προϊόν των μεγεθών των δύο στιγμιαίων φασμάτων. Η φάση είναι η διαφορά μεταξύ της φάσης του καναλιού B και του καναλιού A. Έτσι, εάν δύο σήματα έχουν πανομοιότυπο εύρος και φάση σε μία συγκεκριμένη συχνότητα, τότε το μέγεθος του διασταυρωμένου φάσματος θα είναι ίσο με το φάσμα δύναμης του σήματος (η τετραγωνική ρίζα του φάσματος του εύρους, όχι το rms). Η φάση στη συγκεκριμένη συχνότητα στο διασταυρωμένο φάσματος θα είναι μηδέν.

### **Συνάρτηση απόκρισης συχνότητας (FRF)**

Η συνάρτηση απόκρισης συχνότητας (FRF) ενός συστήματος περιγράφει τη σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου του συστήματος ως συνάρτηση συχνότητας, όπου η είσοδος είναι συνήθως η δύναμη και η έξοδος είναι η επιτάχυνση. Η FRF δίνει το μέγεθος της εξόδου ανά μονάδα εισόδου και την σχετική φάση μεταξύ εισόδου και εξόδου, ως συνάρτηση συχνότητας. Η FRF περιγράφει μια σχέση αιτίου-αποτελέσματος.

### **Συνάρτηση μεταφοράς απόκρισης (TRF)**

Η συνάρτηση μεταφοράς απόκρισης (TRF) συγκρίνει δύο εξόδους του συστήματος που σχετίζονται με μία κοινή είσοδο. Τα αποτελέσματα είναι συνήθως η επιτάχυνση. Το TRF δίνει το μέγεθος των δύο εξόδων και η σχετική φάση μεταξύ τους. Δεν υπάρχει υποχρεωτικά μια σχέση αιτίου-αποτελέσματος μεταξύ των εξόδων.

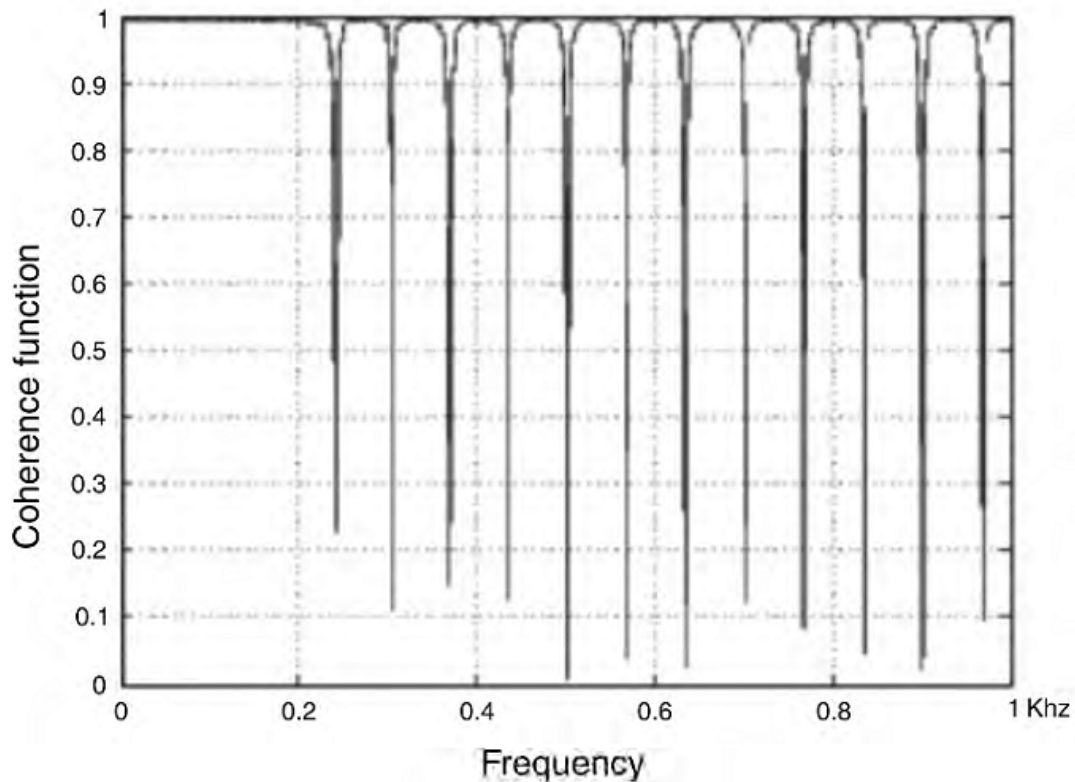
## Συνοχή

Η λειτουργία της συνοχής, ή η συνοχή είναι η μέτρηση του βαθμού γραμμικής σχέσης μεταξύ δύο σημάτων ως συνάρτηση συχνότητας. Με άλλα λόγια, η συνοχή αποτελεί ένδειξη της γραμμικότητας του συστήματος σε οποιαδήποτε συχνότητα. Έχει παρόμοιο ρόλο στην ανάλυση του πεδίου συχνοτήτων για τον συντελεστή συσχέτισης στην στατιστική ανάλυση.

Η συνοχή παίρνει τιμές μεγέθους από μηδέν έως ένα, όπου το μηδέν σημαίνει ότι δεν υπάρχει συνοχή και το ένα σημαίνει ότι υπάρχει συνολική συνοχή. Εάν υπάρχει μόνο ένα κανάλι, η συνοχή είναι ένα σε όλες τις συχνότητες, αυτό συμβαίνει εξαιτίας του τρόπου που ορίζεται η συνάρτηση. Για να είναι χρήσιμες, οι μετρήσεις της συνοχής πρέπει να συνδυαστούν με διακαναλική ανάλυση κατά προτίμηση με ενεργοποιημένο τον μέσο όρο.

Η μέτρηση συνοχής είναι επομένως δυνατή μόνο με αναλυτές διπλού καναλιού και είναι ένα πολύ βασικό χαρακτηριστικό στους περισσότερους αναλυτές.

Σκεφτείτε το εξής παράδειγμα. Ένας μετατροπέας είναι τοποθετημένος σε ένα φυσητήρα που έχει ταλαντώσεις που υπάρχουν υπόνοιες ότι προέρχονται από την δομή του. Άλλος ένας μετατροπέας τοποθετείται στην δομή όπου η ταλάντωση είναι στα υψηλότερα επίπεδα της. Έτσι, ένας αισθητήρας μετρά την αιτία και ο άλλος μετρά το αποτέλεσμα της. Η συνοχή μπορεί να αποδείξει αν, σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, τα δύο σήματα είναι αλληλένδετα ή ανεξάρτητα. Το διάγραμμα της συνοχής σχεδόν μοιάζει με ένα φάσμα (Σχήμα 4.25). Οι συχνότητες που είναι αλληλένδετες θα έχουν μία τιμή περίπου ένα, ενώ συχνότητες που είναι άσχετες μεταξύ τους θα έχουν πολύ χαμηλότερη τιμή, συχνά κοντά στο μηδέν.



**Σχήμα 4.25** Μία τυπική έξοδος συνοχής[1]

### Τα μαθηματικά της συνοχής

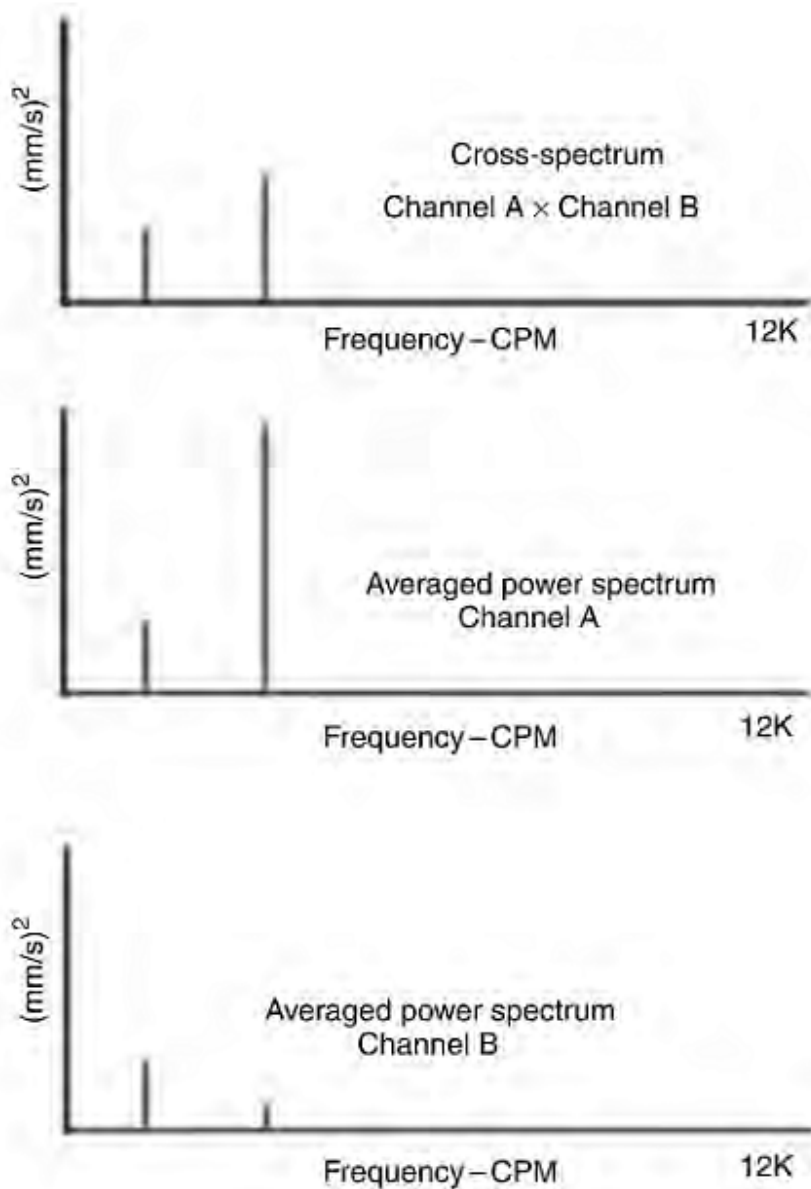
Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τη διαφορά μεταξύ των δύο τύπων των φασμάτων (Σχήμα 4.26):

1. Φάσμα ισχύος: Είναι το τετράγωνο του μεγέθους του μέσου όρου του φάσματος ενός σήματος. Η πληροφορία φάσης δεν εξετάζεται.
2. Διασταυρωμένο-φάσμα: Είναι το προϊόν του μέσου όρου διανύσματος του φάσματος δύο σημάτων (λαμβάνοντας υπόψη και την φάση και τις επιπτώσεις του μεγέθους).

Η συνοχή ορίζεται από το σύμβολο  $\gamma^2$

Η συνοχή μεταξύ δύο σημάτων A και B υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$\gamma^2 = \frac{(\text{το μέγεθος του διασταυρωμένου φάσματος απο το A στο B})^2}{(\text{φάσμα ισχύος A})^2 \times (\text{φάσμα ισχύος B})^2}$$



**Σχήμα 4.25** Τα φάσματα 3 δυνάμεων χρειάζονται υπολογισμό της συνοχής[1]

### Οι εφαρμογές της συνοχής

Μερικές από τις πρακτικές εφαρμογές της συνοχής συζητούνται παρακάτω.  
**Εφαρμογή 1** Ένας από τους τρόπους συνοχής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι για τον εντοπισμό της πηγή της μιας ταλάντωσης που φαίνεται άσχετη με οτιδήποτε στη μηχανή υπό εξέταση. Ένας αισθητήρας τοποθετείτε στο «αποτέλεσμα» και ένας άλλος αισθητήρας περιαγωγής κινείται γύρω (με ένα μακρύ καλώδιο), συνδέοντάς το με τις ενδεχόμενες

«πηγές». Η συνοχή θα πρέπει να ελεγχθεί σε κάθε θέση. Η τοποθεσία που να αποδίδει την μέγιστη συνοχή στην προβληματική συχνότητα είναι η πηγή της ανεπιθύμητης ταλάντωσης.

Η ίδια προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την εγκατάσταση ενός ευαίσθητου μηχανήματος για να εξασφαλιστεί ότι δεν υπάρχει καμία αξιοσημείωτη μετάδοση ταλάντωσης από ένα κοντινό μηχανήμα ή σύστημα μεταφοράς.

**Εφαρμογή 2** Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή της συνοχής είναι η επιλογή των θέσεων των αισθητήρων για την βέλτιστη διαδρομή μετάδοσης, είτε όταν προσπαθούμε να εντοπίσουμε την κατάλληλη θέση για μια μόνιμη τοποθέτηση ή όταν αναζητούμε την καλύτερη θέση για μια περιοδική μέτρηση ρουτίνας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τοποθετείται ένας αισθητήρας σε μία πιθανή θέση. Η μηχανή ή τη δομή μπορούν να διεγερθούν δυναμικά (π.χ. με ένα κρουστικό σφυρί) όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη θέση φόρτωσης, την πηγή της ταλάντωσης ή την είσοδο της ενέργειας ταλάντωσης. Τότε μπορεί να μετρηθεί το φορτίο εισόδου και η ταλάντωση στον αισθητήρα λήψης και να καθοριστεί η συνοχή. Η κατάλληλη θέση θα έχει συνοχή κοντά στην μονάδα στις περισσότερες συχνότητες ενδιαφέροντος. Η βέλτιστη επιλογή μπορεί να γίνει συγκρίνοντας διαφορετικές τοποθεσίες.

**Εφαρμογή 3** Μια τρίτη πιθανή εφαρμογή είναι όταν πρέπει να μειωθεί ο αριθμός των αισθητήρων που απαιτούνται για την παρακολούθηση σε απευθείας σύνδεση. Αντί να τοποθετούνται δύο ή τρεις ορθογωνιακά τοποθετημένους αισθητήρες, μπορούμε να προσδιορίσουμε την μετάδοση των ταλαντώσεων σε αυτή την περιοχή μέσω του περιβλήματος του μηχανήματος με την βοήθεια της συνοχής. Εάν η συνοχή είναι υψηλή, θα μπορούσαμε αντί για τρεις αισθητήρες, να χρησιμοποιήσουμε μόνο έναν αισθητήρα σε μία λοξή κατεύθυνση.

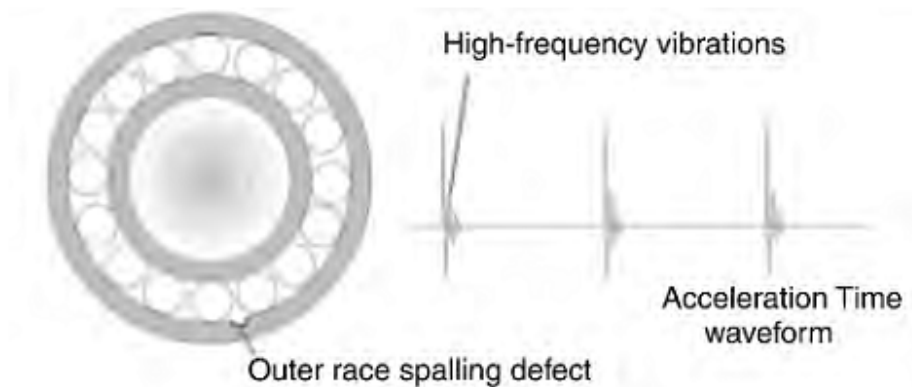
#### 4.4.4 Περικάλυψη και αποδιαμόρφωση

Αυτή η τεχνική της ανάλυσης ταλαντώσεων χρησιμοποιείται ευρέως για την ανίχνευση βλάβης στα ρουλεμάν και τα κιβώτια ταχυτήτων. Η μέθοδος αυτή επικεντρώνεται στην ζώνη υψηλής συχνότητας του φάσματος. Χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (επιτρέπει τις υψηλές συχνότητες, αλλά μπλοκάρει τις χαμηλότερες), ο αναλυτής κάνει ζουμ στα δεδομένα χαμηλού επιπέδου υψηλής συχνότητας. Ο αναλυτής προσπαθεί ουσιαστικά να συλλέξει μερικές κορυφές που διαφορετικά χάνονται στο δάπεδο του θορύβου (που μερικές φορές ονομάζεται και χαλί, το οποίο είναι εξαιρετικά μικρό σε εύρος σε όλο το φάσμα συχνοτήτων του φάσματος) μίας στενής ζώνης του φάσματος.

Για να κατανοήσουμε την έννοια της Περικάλυψης και της αποδιαμόρφωσης, ας εξετάσουμε το παράδειγμα ενός ελαττωματικού εδράνου που έχει έναν θρυμματισμό (ένα κομμάτι



μέταλλο που έχει αποκολληθεί) στην εξωτερική στεφάνη του (Σχήμα 4.27). Κάθε φορά που μια μπάλα περνά μέσα από το σημείο του θρυμματισμού, προκαλεί μία κρούση, ας το ονομάσουμε "κλικ" για απλότητα.



**Σχήμα 4.27** Μονός θρυμματισμός[1]

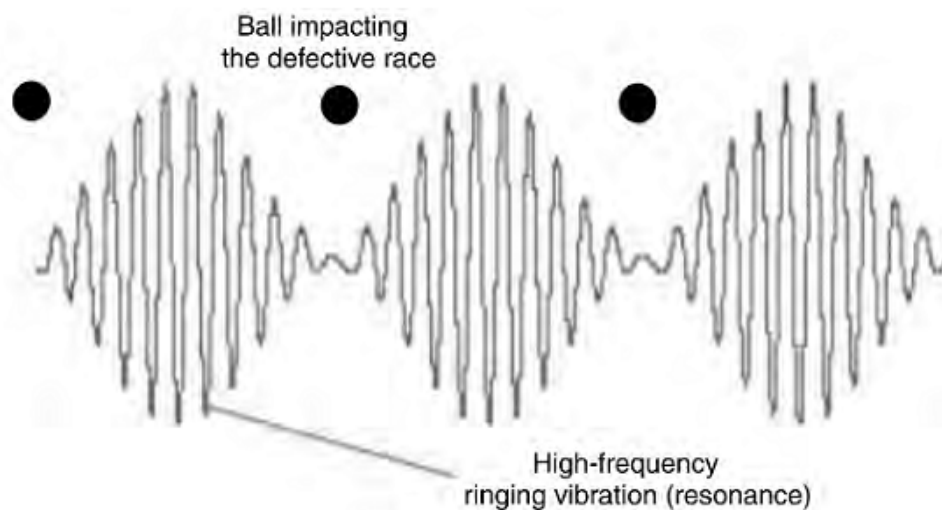
Για παράδειγμα, ας πούμε ότι σε αυτό το έδρανο περνούν κατά τη διάρκεια περιστροφής 6.3 μπάλες πάνω από το ελάττωμα θρυμματισμού. Στη συνέχεια, δημιουργούνται 6.3 κλικ ανά περιστροφή. Εάν ο άξονας περιστρεφόταν με 1000 rpm θα βλέπαμε στο FFT μια κορυφή των 6300 CPM. Αυτή η κορυφή μπορεί να είναι ορατή σε ένα κανονικό FFT, αλλά γενικά η περιοχή χαμηλών συχνοτήτων στα φάσματα είναι γεμάτη και μπορεί να είναι δύσκολο να παρατηρήσουμε μία μικρή κορυφή και να την συνδέσουμε με το ελάττωμα του εδράνου ή του κιβωτίου. Για αυτόν τον λόγο αυτό, χρησιμοποιείται η τεχνική της Περικάλυψης.

Επιστρέφοντας λοιπόν στις μπίλιες του ρουλεμάν που περνούν πάνω από την περιοχή του θρυμματισμού, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι μαζί με κορυφή χαμηλής συχνότητας, 6300-CPM υπάρχει και κάτι άλλο που συμβαίνει. Κάθε «κλικ» του το ρουλεμάν περνώντας πάνω από το ελάττωμα είναι ανάλογο με κάποιον που χτυπάει μια καμπάνα με ένα γκονγκ. Όταν κάποιος χτυπάει την καμπάνα, ακούμε δύο είδη ήχων. Η μία είναι η συχνότητα του γκονγκ και η άλλη είναι ο ήχος κουδουνίσματος της καμπάνας. Ο ήχος κουδουνίσματος είναι ο συντονισμός της καμπάνας, το οποίο είναι ουσιαστικά μια ταλάντωση υψηλής συχνότητας. Ας κάνουμε αυτήν την αναλογία με το ελαττωματικό ρουλεμάν. Κάθε «κλικ» της μπάλας που περνά πάνω από το ελάττωμα είναι παρόμοιο με το γκονγκ που χτυπάει την καμπάνα.

Ακριβώς όπως κουδουνίζει η καμπάνα, έτσι και το ρουλεμάν συντονίζεται με παρόμοιο τρόπο, δημιουργώντας ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας. Ο ήχος υψηλής συχνότητας του ρουλεμάν εξαρτάται από την μάζα και την ακαμψία του εδράνου.

Έτσι, η συχνότητα των 6300 cpm στο FFT είναι το ίδιο όπως η συχνότητα χτυπήματος του γκονγκ, και ο συντονισμός των εξαρτημάτων του ρουλεμάν σχετίζεται με τον ήχο της καμπάνας.

Για να κατανοήσουμε αυτή την τεχνική, θα πρέπει να εξετάσουμε τις ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας του εδράνου. Καθώς οι μπάλες περνούν πάνω από το μέρος του ελαττώματος, το έδρανο συνεχίζει να παράγει συχνότητα κουδουνίσματος. Τη στιγμή της κρούσης της μπίλιας με το ελάττωμα, το εύρος ταλάντωσης φτάνει στην μέγιστη τιμή, μετά την οποία αρχίζει να μειώνεται μέχρι την κρούση τις επόμενης μπίλιας που το εύρος αυξάνεται και πάλι. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται ασαμάτητα, δημιουργώντας μία κυματομορφή η οποία μοιάζει με αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.28.



**Σχήμα 4.28** Ταλάντωση- η επίδραση του θρυμματισμού στις σφαίρες[1]

### **Διαμόρφωση εύρους λόγω του περάσματος των σφαιρών από την ελαττωματική στεφάνη**

Αυτό το φαινόμενο του εύρους που αυξάνεται και μειώνεται με το χρόνο λέγεται διαφοροποίηση εύρους στην ορολογία κυμάτων. Το επόμενο βήμα είναι η αποδιαμόρφωση. Σε αυτή τη διαδικασία, οι ήχοι του εδράνου αφαιρούνται και η διαδικασία μας αφήνει με ένα ήχο που μοιάζει με το κύμα που φαίνεται στο Σχήμα 4.29.



**Σχήμα 4.29** Περικάλυψη[1]

### **Το ίχνος έφυγε αφού απομακρύνθηκε το τμήμα υψηλής συχνότητας του κύματος**

Αν αναλυθεί αυτό περικαλυμένο κύμα, θα φαίνεται στο διάγραμμα FFT σαν μια κορυφή εύρους με συχνότητα 6300 CPM, η οποία συμβαίνει να είναι η συχνότητα του 'κλικ'! Έτσι, κοιτάζοντας ένα μικρό εύρος ζώνης στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων, μπορούμε να ανιχνεύσουμε ένα κύμα χαμηλής συχνότητας. Είναι σημαντικό αυτή η ταλάντωση χαμηλής συχνότητας να είναι κρουστική για να προκαλέσει την διαμόρφωση του εύρους ενός κύματος υψηλής συχνότητας.

Αυτό είναι ακριβώς το είδος της ταλάντωσης που παράγεται από ελαττωματικά ρουλεμάν και γρανάζια. Έτσι, η μέθοδος των Περικάλυψης / αποδιαμόρφωσης χρησιμοποιείται για την ανάλυση των εδράνων και των γραναζιών.

Εμπορικά, υπάρχουν τέσσερις κυρίως τεχνικές Περικάλυψης / αποδιαμόρφωσης, που παρέχονται από όργανα CSI, Entek, SKF και SPM. Αυτά χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των ελαττωμάτων υψηλών συχνοτήτων. Οι τεχνικές αυτές είναι γνωστές ως PeakVue, Σπάικ Ενέργειας (gSE), Φασματική εκπομπή Ενέργειας (SEE) και η μέθοδος παλμού Σοκ (SPM). Κάθε μία από αυτές περιγράφεται εν συντομία παρακάτω.

### **PeakVue (σήμα κατατεθέν - Computational Systems Incorporated, ΗΠΑ)**

Η μέθοδος PeakVue προσφέρεται από το CSI περιγράφεται εν συντομία ως εξής:

- Ένα υπερυπερατό φίλτρο αφαιρεί το περιεχόμενο χαμηλής συχνότητας από το σήμα επιτάχυνσης.
- Διέρχεται από τον μετατροπέα σήματος αναλογικού σε ψηφιακό.

- Κάθε δείγμα εξετάζεται και μόνο το επίπεδο εύρους που υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο επίπεδο παίρνει ψηφιακή τιμή.

Δηλαδή, εάν ο αναλυτής έχει συσταθεί για να παραλάβει 1024 δείγματα από το αναλογικό σήμα, θα υπάρξουν 1024 ψηφιακές τιμές κορυφών εάν υπάρχουν ισχυρές κρούσεις. Η ψηφιακή κυματομορφή του χρόνου θα έχει τις υψηλότερες θετικές τιμές, μία φορά σε κάθε δείγμα. Αν δεν υπάρχουν ελαττώματα, δεν θα υπάρχουν υψηλοί παλμοί και θα φανούν μόνο χαμηλά επίπεδα θορύβου του εύρους (από το σήμα ή μέσο). Ένας κρουστικός παλμός που οφείλεται σε ελάττωμα ρουλεμάν ή γρανάζι έχει πολύ σύντομο χρονική διάρκεια και μπορεί να είναι περιοδικός. Έτσι θα υπάρχουν μόνο υψηλές τιμές κορυφών στα κελιά ή τα δείγματα όπου συνέβη το παλμός.

- Ο αλγόριθμος FFT στη συνέχεια επεξεργάζεται τις ψηφιακές πληροφορίες και το φάσμα δείχνει μόνο μια θεμελιώδη κορυφή και τις αρμονικές που έχουν συχνότητα ίση με εκείνη του παλμού. Στην μέθοδο PeakVue, το σήμα εξάγεται από τα δεδομένα υψηλής συχνότητας, αλλά δεν γίνεται ανόρθωση ή περικάλυψη από ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης.

## **Το φάσμα gSE (σήμα κατατεθέν - Entek IRD International Corporation)**

Το σπάικ ενέργειας, που ονομάζεται επίσης το φάσμα gSE, γίνεται ως εξής:

- Ένα υπερυπερατό φίλτρο αφαιρεί το περιεχόμενο χαμηλής συχνότητας (δεδομένα μεγάλου χρονικό διάστημα) από το σήμα επιτάχυνσης.
- Περνά μέσα από έναν ανορθωτή, ο οποίος έχει μία φθορά χρόνου RC για να τονίσει τις εκδηλώσεις των κρούσεων.

Το φιλτραρισμένο σήμα (στάδιο 1) διέρχεται μέσα από ένα ανιχνευτή «από κορυφή σε κορυφή», ο οποίος δεν κρατά μόνο το εύρος «από κορυφή σε κορυφή», αλλά θέτει επίσης και μια προσεκτικά επιλεγμένη σταθερά φθοράς χρόνου. Η σταθερά φθοράς χρόνου είναι άμεσα συνδεδεμένη με το φάσμα μέγιστης συχνότητας (F-max). Το σήμα εξόδου από τον ανιχνευτή σπάικ ενέργειας «από κορυφή σε κορυφή» είναι ένα σήμα πριονωτού σχήματος.

- Ακόμη και αν το διορθωμένο σήμα έχει μόνο θετικές τιμές, αυτό αποτελείται από πολλές περιόδους τιμών υψηλής συχνότητας. Στη συνέχεια, «περικαλύπτεται» ή λειαιίνεται ηλεκτρονικά και διέρχεται διαμέσου του μετατροπέα σήματος αναλογικού σε ψηφιακό.
- Αφού ο μετατροπέας σήματος αναλογικού-σε-ψηφιακό ψηφιοποιήσει το σήμα επιτάχυνσης, οι ψηφιακές τιμές αντιπροσωπεύουν το σύνολο της ενέργειας σε κάθε δείγμα χρόνου, όχι μόνο τις κορυφές. Αν δεν υπάρχουν ελαττώματα, δεν θα σημαντικοί

παλμοί, ίσως μόνο θόρυβος χαμηλής έντασης (ενέργεια) σε κάθε δείγμα από το σήμα / όργανο.

- Για να αφαιρεθεί το περιεχόμενο υψηλής συχνότητας, η ψηφιοποιημένη πληροφορία διέρχεται μέσα από ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης. Η προκύπτουσα κυματομορφή είναι το κέλυφος ή η περικάλυψη της διαφοροποίησης.
- Τα δεδομένα στη συνέχεια υποβάλλονται σε έναν ανιχνευτή «από κορυφή σε κορυφή» που καθορίζει πόσο συχνά εμφανίζεται ο παλμός (η βασική περίοδος), και καθορίζει επίσης το την διάρκεια του παλμού. Έτσι, όταν οι ψηφιακές πληροφορίες που υποβάλλονται σε επεξεργασία με τη χρήση του αλγόριθμου FFT, το φάσμα που προκύπτει θα δείξει μόνο μια θεμελιώδη κορυφή και τις αρμονικές που έχουν την συχνότητα παλμών.

Οι διαφορές μεταξύ των δύο είναι:

- Το σπάικ ενέργειας χρησιμοποιεί κάποιας μορφής ανορθωτή.
- Στο σπάικ ενέργειας, το σήμα είναι περικαλυμένο.
- Τα εύρη δεν είναι αληθινές τιμές μέγιστης επιτάχυνσης. Είναι τιμές GSE (σπάικ ενέργειας).

## **Φασματική εκπομπή ενέργειας - SEE (σήμα κατατεθέν - SKF Condition Monitoring)**

Μια συσκευή φασματικής εκπομπής ενέργειας (NAE) παίρνει υψηλής συχνότητας ακουστικές μετρήσεις και τις συνδυάζει με τεχνικές περικάλυψης με σκοπό την διάγνωση της κατάστασης του εδράνου. Κατά την διάρκεια της περικάλυψης, το σήμα ταλάντωσης φιλτράρεται και αφήνει μόνο τις υψηλές συχνότητες, απομακρύνει τις περισσότερες από τις ταλαντώσεις που προκαλούνται από ταλάντωση κατασκευών, κακή ευθυγράμμιση και άλλους παράγοντες. Τα υπόλοιπα σήματα ελάττωμα γίνονται ενεργειακό περιεχόμενο, αλλά εξακολουθούν να συμβαίνουν στα ίδια χρονικά διαστήματα. Κάθε φορά που ένα ελαττωματικό έδρανο μεταφερθεί δημιουργούνται υψηλής συχνότητας ταλαντώσεις. Η SEE παρέχει ανίχνευση «μέταλλο με μέταλλο» όταν το φιλμ λίπανσης έχει χαλάσει και οφείλεται σε ελάττωμα του εδράνου ή άλλα παρόμοια ελαττώματα. Αυτή η επαφή δημιουργεί υψηλές συχνότητες στην περιοχή 250-350 kHz. Η μέθοδος SEE παρακολουθεί τα ρουλεμάν χρησιμοποιώντας ανίχνευση υψηλής συχνότητας ακουστικής εκπομπής χρησιμοποιώντας ένα ευρυζωνικό πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο.

Η μέθοδος SEE διαφέρει από την κανονική φασματική ανάλυση που φτάνει μόνο έως 20 kHz και των τεχνικών περικάλυψης στα 5-60 kHz. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείτε, ένας ακουστικός μορφοτροπέας εκπομπών. Η επικοινωνία του αισθητήριου με το μηχάνημα θα

πρέπει να είναι απαλλαγμένη από γράσο ή από κενά αέρος που μπορούσαν να προκαλέσουν απώλεια ισχύος του σήματος.

Ένα σήμα από 250-350 kHz φιλτράρεται και περικαλύπτεται. Ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης τότε διασφαλίζει ότι παραμένουν μόνο τα στοιχεία χαμηλών συχνοτήτων. Το περικαλυμένο σήμα αναλύεται ψηφιακά χρησιμοποιώντας κανονικό εξοπλισμό ανάλυσης.

### **Μέθοδος Παλμού Σοκ - SPM (σήμα κατατεθέν - SPM Instruments)**

Η μέθοδος κρουστικών παλμών που είναι κατοχυρωμένη τεχνική για τη χρήση σημάτων ταλάντωσης που μετριοούνται σε περιστρεφόμενα έδρανα κύλισης ως βάση για την παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανών. Η τεχνική εφευρέθηκε το 1969. Σχετικά με την κρούση ενός στοιχείου κύλισης με ένα ελάττωμα στο εξωτερικό δαχτυλίδι, το αισθητήριο παλμών σοκ αντιδρά με ένα μεγάλο εύρος ταλάντωσης προς τους αδύναμους παλμούς σοκ, διότι διεγείρεται στη φυσική συχνότητα του στα 32 kHz. Η ταλάντωση της μηχανής που έχει πολύ χαμηλότερη συχνότητα.

Η ανάλυση περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Το σήμα ταλάντωσης της μηχανής, που είναι υπερθετικά παροδικές κατά τη συχνότητα συντονισμού που προκαλείται από τους παλμούς σοκ, διέρχεται από ένα ηλεκτρονικό φίλτρο.
- Το φίλτρο περνά ένα τρένο παροδικών στα 32 kHz. Τα εύρη τους εξαρτώνται από την ενέργεια των παλμών σοκ.
- Τα παροδικά μετατρέπονται σε αναλογικούς ηλεκτρονικούς παλμούς.
- Η μετατροπή του σήματος παλμού σοκ από το έδρανο μετατρέπεται τελικά σε μια γρήγορη ακολουθία των ισχυρότερων και ασθενέστερων ηλεκτρικών παλμών.

Το φιλτραρισμένο σήμα του μορφοτροπέα αντανακλά τη ταλάντωση της πίεσης στην κυλιόμενη διασύνδεση του ρουλεμάν. Όταν το φιλμ του λιπαντικού στο έδρανο είναι παχύ, το επίπεδο παλμών σοκ είναι χαμηλό και χωρίς διακριτικές κορυφές. Το επίπεδο αυξάνεται όταν το φιλμ του λιπαντικού μειώνεται, αλλά εξακολουθούν να μην υπάρχουν διακριτικές κορυφές. Οι ζημιές προκαλούν ισχυρούς παλμούς σε τακτά χρονικά διαστήματα. Οι μετρητές παλμών Σοκ μετρούν του σήμα σοκ στην κλίμακα ντεσιμπέλ, σε δύο επίπεδα.

#### **4.4.5 Ανάλυση σάφματος**

Το κοινό χαρακτηριστικό των φασμάτων των ταλαντώσεων στα έδρανα ή γρανάζια είναι ότι υπάρχει ένα είδος αρμονικής σειρά με τη δυνατότητα πολλαπλάσιων του θεμελιώδους τόνου

ή / και την ταχύτητα περιστροφής των εδράνων (η συχνότητα του ελαττώματος ή αρμονική, έτσι προσθέτουμε / η αφαιρούμε το  $1 \times$  της ατράκτου).

Αυτό μπορεί να περιγραφεί ως μια κοινή απόσταση διαχωρισμού συχνότητας των κορυφών των σημαντικών ομάδων. Η ανάλυση Σάφματος είναι το όνομα που δίνεται σε μια σειρά από τεχνικές που περιλαμβάνουν λειτουργίες η οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως «φάσμα λογαριθμικού φάσματος». Μετατρέπει ένα φάσμα στο πεδίο του χρόνου, και ως εκ τούτου έχει κορυφές που αντιστοιχούν στην περίοδο των κοινών αποστάσεων μεταξύ των συχνοτήτων στο φάσμα. Αυτές οι κορυφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βρεθούν οι συχνότητες φθοράς του εδράνου στο αρχικό φάσμα.

Τα φάσματα από περιστρεφόμενες μηχανές (σχήμα 4,30) μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκα, διότι περιέχουν διάφορα σύνολα αρμονικών των περιστρεφόμενων μερών και μπορεί να υπάρχουν αρκετές σειρές πλευρικών ζωνών που οφείλονται σε διακυμάνσεις της συχνότητας (οι αλλαγές στη συχνότητα οφείλονται σε ταλαντώσεις λόγω ροπών). Επειδή το σάφμα έχει κορυφές που αντιστοιχούν στην απόσταση των αρμονικών και των πλευρικές ζωνών, μπορούν να εντοπιστούν εύκολα.

Οι σημαντικές κορυφές στο σάφμα αντιστοιχούν σε ενδεχόμενες ουσιώδεις συχνότητες των ρουλεμάν. Χρησιμοποιώντας ένα σύνολο ενσωματωμένων κανόνων, ένα έμπειρο σύστημα μπορεί αυτόματα να συγκρίνει αυτές οι συχνότητες με τις κορυφές του φάσματος που δεν έχουν σχέση με οποιαδήποτε θεμελιώδη συχνότητα δύναμης μηχανή. Εάν βρεθεί μια αντιστοιχία, τότε θεωρείται ότι η φασματική κορυφή να είναι μια πιθανόν ο τόνος του ρουλεμάν, και περνά σε ένα άλλο μέρος του συστήματος με σκοπό την λήψη αποφάσεων βασιζόμενο σε κανόνες.

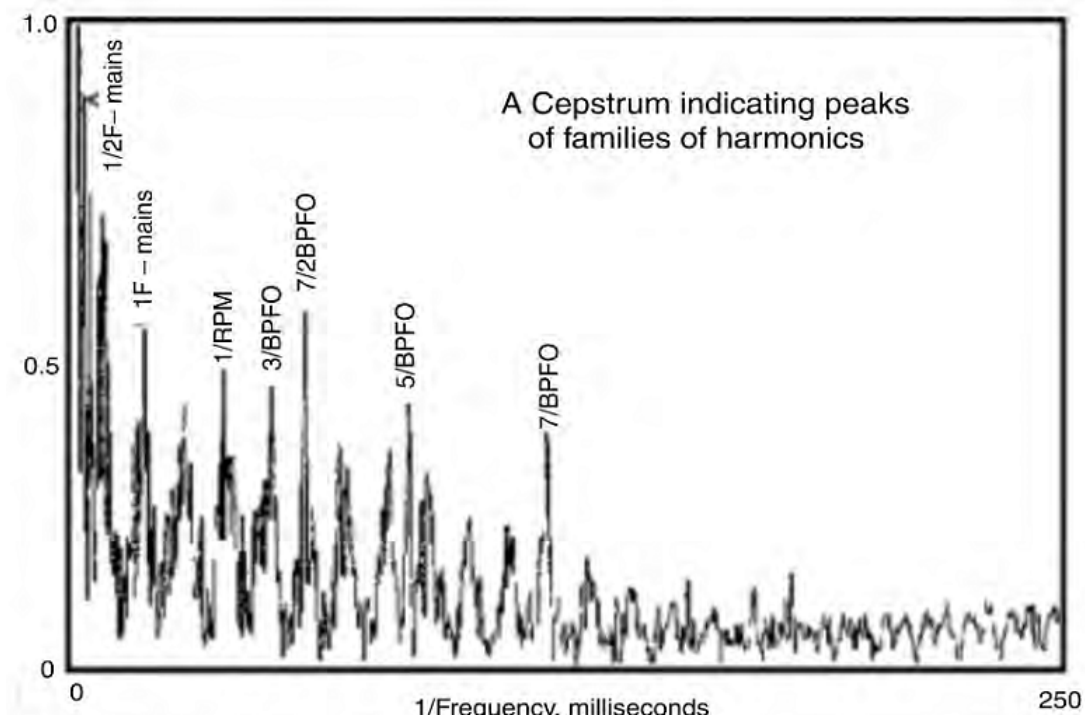
Μέσω της ανάλυσης φάσματος, το σύστημα έχει το πλεονέκτημα της ανίχνευσης της φθορά των εδράνων κύλισης χωρίς να γνωρίζουμε ακριβώς τι είδους ρουλεμάν χρησιμοποιεί το μηχάνημα. Το σάφμα διακρίνει επίσης την φθορά του ρουλεμάν από την ροή θορύβου ή την σπηλαίωση.

Η λέξη σάφμα είναι ο αναγραμματισμός της λέξης φάσμα.

#### **4.4.6 Ανάλυση τρίτης οκτάβας**

Η φασματική ανάλυση τρίτης οκτάβας χρησιμοποιείται στην ανάλυση ακουστικών δεδομένων (Σχήμα 4.31). Με αυτήν την μέθοδο, απεικονίζεται ένα αναλογικό και όχι ένα σταθερό εύρος ζώνης. Κατά μία έννοια, οι φασματικές τιμές υπολογίζονται σε εύρη ζώνης που αυξάνονται με τη συχνότητα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας σειράς από ζωνοπερατά φίλτρα που καλύπτουν διάφορες περιοχές συχνοτήτων. Η αναλογία των άνω προς τα κάτω άκρων της

ζώνης των συχνοτήτων είναι ακριβώς δύο, έτσι τα συνεχόμενα φίλτρα καλύπτουν μια πλήρη οκτάβα του φάσματος συχνοτήτων.



**Σχήμα 4.30** Φάσματα περιστρεφόμενων μηχανών[1]



**Σχήμα 4.31** Αναλυτής οκτάβας ζώνης πραγματικού χρόνου[1]

Η ανάλυση τρίτης οκτάβας παρέχει ελάχιστα διαγνωστικά πλεονεκτήματα από μία συμβατική ανάλυση του φάσματος. Η απεικόνιση δεδομένων τρίτης οκτάβας είναι σημαντική, κυρίως



επειδή πολλοί κατασκευαστές μηχανημάτων και οι υπηρεσίες ρυθμιστικών οργανισμών καθορίζουν τα κριτήρια αποδοχής σε τρίτες οκτάβες. Οι χρήστες που απαιτείται να κάνουν δοκιμές για την συμμόρφωση και με τα OSHA, FAA, ISO ή άλλες προδιαγραφές θορύβου πρέπει να υπάρχει δυνατότητα απεικόνισης δεδομένων τρίτης οκτάβας. Ένα η στάθμιση των δεδομένων τρίτης οκτάβας χρησιμοποιείται για να μιμηθεί την απόκριση του ανθρώπινου αυτιού.

## 4.5 Συμπέρασμα

Υπάρχουν βασικά μόνο δύο είδη ακατέργαστων σημάτων που εκπέμπονται από τις μηχανές. Αυτά είναι οι κυματομορφές χρόνου και η φάση αναφοράς. Τα σήματα αυτά είναι πολύ δύσκολο να ερμηνευτούν στην αρχική τους κατάσταση και επομένως υπόκεινται σε περαιτέρω επεξεργασία.

Ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier επεξεργάζεται τις κυματομορφές χρόνου για να παραχθεί μια εικόνα του πεδίου συχνότητας και αυτό το εργαλείο εξακολουθεί να είναι το πιο ισχυρό εργαλείο για την διάγνωση της ταλάντωσης των περιστρεφόμενων μηχανών. Κατά καιρούς, ο FFT φθάνει τα όρια του και καταλήγει να δίνει μια πιθανή λίστα ελαττωμάτων ανίκανος να επιλύσει το πρόβλημα περαιτέρω. Σε αυτό το στάδιο, ανάλυση φάσης επιτρέπει την επίλυση αυτών των ελαττωμάτων.

Η πληροφορίες φάσης χρησιμοποιούνται επίσης για να αντιπροσωπεύσουν τα σήματα με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολη η ανίχνευση και η διάγνωση των ελαττωμάτων. Οι παραστάσεις αυτές περιλαμβάνουν τις τροχιές, το ODS, την διακαναλική ανάλυση, το FRF, το TRF, την συνοχή, τα διαγράμματα Bode και Nyquist.

Επίσης φάνηκε πόσο βοηθούν ο μέσος όρος σύγχρονου χρόνου, η περικάλυψη και η ανάλυση σάφματος με τον «καθαρισμό» του σήματος εξόδου, έτσι ώστε να μπορεί να σχηματιστεί μια σαφής εικόνα των απαιτούμενων πληροφοριών. Οι ειδικές παραστάσεις, όπως τα διαγράμματα κλιμάκωσης και οι τρίτες οκτάβες έχουν τους δική του σημασία σε ορισμένες εφαρμογές.

Η κατανόηση και επεξεργασία του σήματος μας βοηθά να κατανοήσουμε πώς τα σήματα μεταμορφώνονται για να δημιουργήσουν διαφορετικές αναπαραστάσεις του σήματος. Κάθε παράσταση έχει τη δική της θέση και το επόμενο θέμα θα τις χρησιμοποιήσει για να ερμηνεύσει τα ελαττώματα των μηχανημάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

### Διάγνωση Βλαβών Μηχανημάτων με τη χρήση της ανάλυσης ταλαντώσεων

#### 5.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας, οι απαιτήσεις για την ενίσχυση της αξιοπιστίας του περιστροφικού εξοπλισμού είναι πιο κρίσιμες από ποτέ, και συνεχίζουν να αυξάνονται συνεχώς. Σε αυτόν τον τομέα πραγματοποιούνται συνεχώς πρόοδοι που οφείλονται κυρίως στη συνεχή ζήτηση από της βιομηχανίες υδρογονάνθρακα, παραγωγής ενέργειας, διεργασιών και μεταφορών.

Χάρη στη πρόοδο που έχει πραγματοποιηθεί στην μηχανική και στην επιστήμη των υλικών, οι περιστροφικές μηχανές γίνονται συνεχώς γρηγορότερες και πιο ελαφριές. Επίσης, απαιτείται να δουλεύουν για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Όλοι αυτοί οι παράγοντες σημαίνουν ότι η ανίχνευση, η θέση και η ανάλυση των λαθών παίζει ζωτικό ρόλο στην προσπάθεια για λειτουργίες υψηλότερης αξιοπιστίας.

Η κατάσταση μιας μηχανής μπορεί να παρακολουθείται συνεχώς χρησιμοποιώντας την ανάλυση ταλαντώσεων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν λεπτομερείς αναλύσεις για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής ενός μηχανήματος καθώς και για την αναγνώριση λαθών τα οποία ήδη υπάρχουν ή μπορεί να εμφανιστούν .

Σε αυτό το κεφάλαιο, δίνεται επιπλέον προσοχή στη μέθοδο του συσχετισμού των ελαττωμάτων περιστροφικών μηχανών με τις ταλαντώσεις που συλλέγονται και παρουσιάζονται από ποικίλους τύπους αναλυτών.

#### 5.2 Συνήθη σφάλματα μηχανημάτων που η διάγνωση τους γίνεται με την ανάλυση ταλαντώσεων

Μερικά από τα ελαττώματα των μηχανημάτων που εντοπίστηκαν χρησιμοποιώντας την ανάλυση ταλαντώσεων είναι τα εξής:

- Ανισορροπία(unbalance)
- Άξονας με μεγάλο βέλος κάμψης(Bent shaft)
- Εκκεντρότητα(eccentricity)
- Κακή ευθυγράμμιση(misalignment)

- Χαλαρότητα(looseness)
- Προβλήματα ιμαντοκίνησης (belt drive problems)
- Ελαττώματα γραναζιών(gear defects)
- Ελαττώματα εδράνων κύλισης(bearing defects)
- Ηλεκτρικά σφάλματα(electrical faults)
- Σπηλαίωση(cavitation)
- Ρωγμές ατράκτων(shaft cracks)
- Δίνες και μαστιγώματα λαδιού(oil whirl & oil whip)
- Τριψίματα ρότορα(rotor rubs)
- Υδραυλικές και αεροδυναμικές δυνάμεις(hydraulic and aerodynamic forces)
- Συντονισμός(resonance)

Ακολουθεί ανάλυση του κάθε προβλήματος ξεχωριστά.

### 5.2.1 Ανισορροπία

Η ταλάντωση εξαιτίας της ανισορροπίας ενός ρότορα είναι πιθανών το πιο κοινό ελάττωμα των μηχανημάτων. Από την άλλη όμως, είναι εύκολο να ανιχνευθεί και να διορθωθεί. Ο οργανισμός διεθνών προτύπων (ISO) ορίζει την ανισορροπία ως εξής:

Η κατάσταση η οποία υπάρχει σε ένα ρότορα όταν η δύναμη ή η κίνηση ταλάντωσης μεταδίδεται στα έδρανα κυλίσεως του ως αποτέλεσμα των φυγόκεντρων δυνάμεων.

Μπορεί επίσης να οριστεί ως: η άνιση κατανομή της μάζας στον άξονα περιστροφής του ρότορα.

Χρησιμοποιούνται δύο καινούργιες ορολογίες: άξονας περιστροφής και άξονας γεωμετρίας.

Ο άξονας περιστροφής ορίζεται ως ο άξονας γύρω από τον οποίο θα περιστρεφόταν ο ρότορας αν δεν περιοριζόταν από τα έδρανα κυλίσεώς του (επίσης αποκαλείται αρχή αδρανειακού άξονα – PIA).

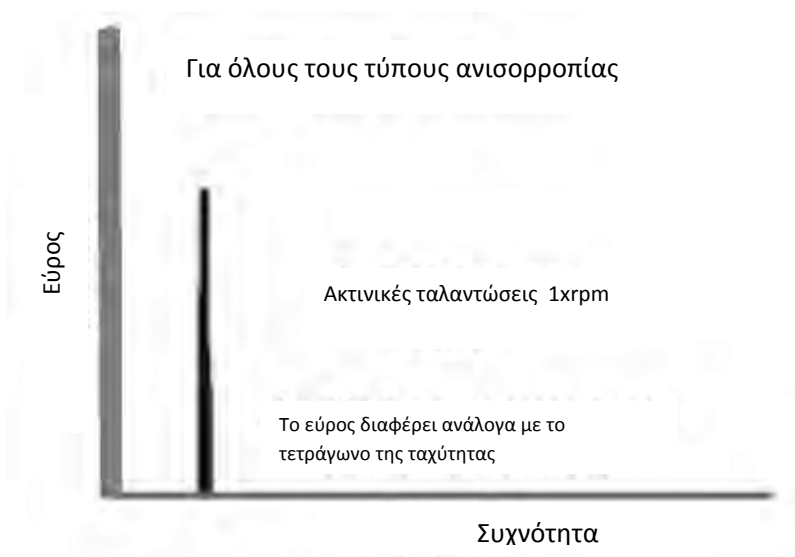
Ο γεωμετρικός άξονας (GCL) είναι ο φυσικός άξονας του ρότορα.

Όταν δύο άξονες συμπίπτουν τότε ο ρότορας βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Όταν δεν συμπίπτουν ο ρότορας δεν βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Υπάρχουν τρεις τύποι ανισορροπίας που μπορούμε να συναντήσουμε σε μηχανές, οι οποίοι είναι οι ακόλουθοι:

1. Στατική ανισορροπία (PIA και GCL είναι παράλληλοι)
2. Ανισορροπία σύζευξης (PIA και GCL διασταυρώνονται στο κέντρο)
3. Δυναμική ανισορροπία (PIA και GCL δεν τέμνονται ή δεν συμπίπτουν)

## Στατική ανισορροπία

Για όλους τους τύπους ανισορροπίας το φάσμα FFT δείχνει μια κυρίαρχη συχνότητα ταλάντωσης 1 x rpm. Το εύρος ταλάντωσης στην συχνότητα 1 x rpm θα διαφέρει ανάλογα με το τετράγωνο της περιστροφικής ταχύτητας. Είναι πάντα παρών και συνήθως κυριαρχεί το φάσμα ταλάντωσης. (Σχήμα 5.1)



**Σχήμα 5.1** Ανάλυση FFT - ελάττωμα ανισορροπίας (βλάβης) [1]

Η στατική ανισορροπία θα είναι σταθερή και σε φάση (15-20°). Αν ο συλλέκτης μετακινηθεί από τη κάθετη (V στο σχήμα) κατεύθυνση στην οριζόντια (H στο σχήμα) κατεύθυνση η φάση θα μετατοπιστεί κατά 90° (±30°). Όταν η επιτάχυνση μετακινείται από το ένα έδρανο κύλισης στο άλλο στο ίδιο επίπεδο (κάθετα ή οριζόντια) πραγματοποιείται ένα άλλο τεστ. Αν το σφάλμα είναι στατική ανισορροπία τότε η φάση θα παραμείνει η ίδια (Σχήμα 5.2).

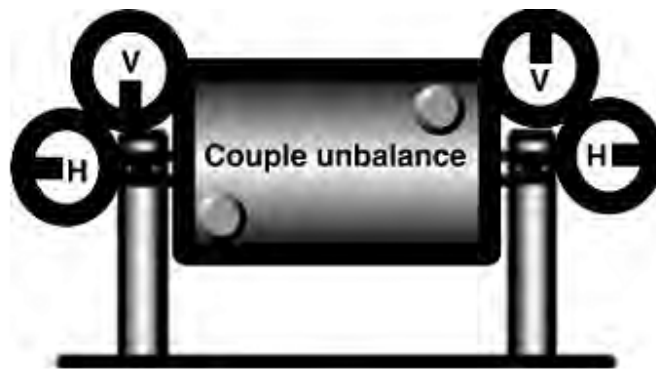


### **Σχήμα 5.2** Σχέση φάσης- στατική ανισορροπία[1]

Αν το μηχάνημα δεν έχει άλλα ελαττώματα εκτός της ανισορροπίας, η κυματομορφή χρόνου θα είναι μια καθαρή κυματομορφή SHM με συχνότητα ίδια όπως η ταχύτητα λειτουργίας.

### **Ανισορροπία σύζευξης**

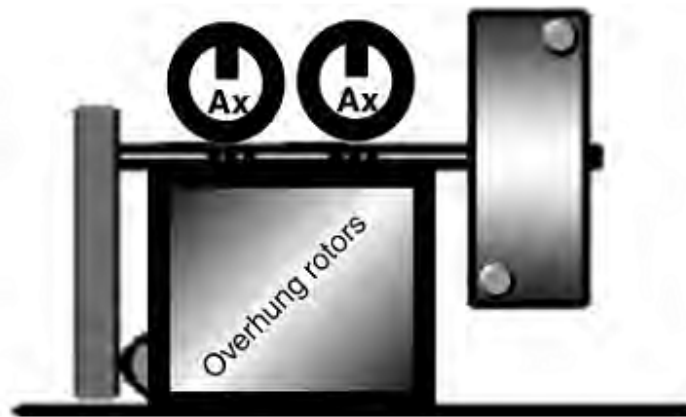
Στην ανισορροπία σύζευξης (Σχήμα 5.3) το φάσμα FFT απεικονίζει πάλι μία μονή κορυφή συχνότητας 1 x RPM. Το εύρος στο 1 x διαφέρει ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας. Αυτό το ελάττωμα μπορεί να προκαλέσει υψηλές αξονικές και ακτινικές ταλαντώσεις. Η ανισορροπία σύζευξης τείνει να είναι 180° εκτός φάσης στον ίδιο άξονα. Σημειώστε ότι μεταξύ των δύο εδράνων κύλισης στο οριζόντιο επίπεδο υπάρχει μια διαφορά φάσης σχεδόν 180°. Το ίδιο παρατηρείται και στο κάθετο επίπεδο. Είναι σκόπιμο να γίνεται ανάλυση λειτουργικού σχήματος εκτροπής (ODS) για να ελεγχθεί αν υπάρχει ανισορροπία σύζευξης σε ένα σύστημα.



### **Σχήμα5.3** Σχέση φάσης- ανισορροπία σύζευξης[1]

### **Ανισορροπία - ρότορες προβόλου**

Σε αυτή τη περίπτωση το φάσμα FFT απεικονίζει επίσης μία μονή κορυφή 1 x RPM, και πάλι το εύρος διαφέρει ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας του άξονα. Μπορεί να προκαλέσει υψηλές αξονικές και ακτινικές ταλαντώσεις. Η αξονική φάση στα δύο έδρανα κύλισης φαίνεται ότι βρίσκεται σε φάση, ενώ η ακτινική φάση τείνει να είναι ασταθής. Οι ρότορες προβόλου μπορούν να έχουν και στατική και ανισορροπία σύζευξης και πρέπει να ελέγχονται και να επιδιορθώνονται χρησιμοποιώντας αναλυτές ή εξοπλισμό σταθεροποίησης (Σχήμα 5.4).



**Σχήμα 5.4** Ένας ανεμιστήρας κινούμενος με μάντα με έναν ρότορα προβόλου - η φάση μετράται στην αξονική διεύθυνση[1]

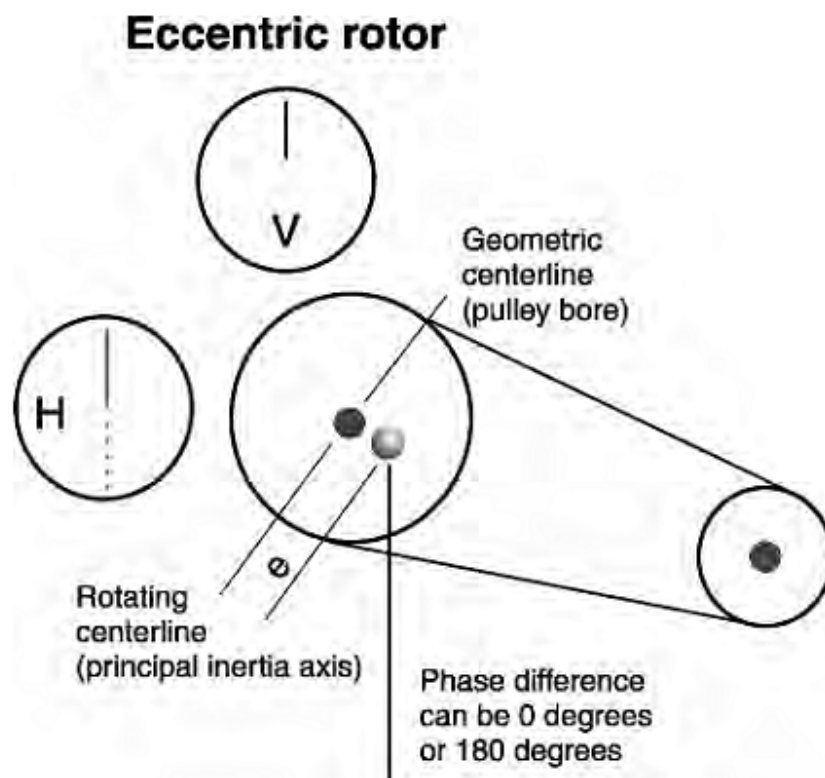
### 5.2.2 Έκκεντρος ρότορας

Η εκκεντρότητα εμφανίζεται όταν το κέντρο περιστροφής είναι σε άλλο σημείο από τον γεωμετρικό άξονα, μίας τροχαλίας, ενός γραναζιού, ενός εδράνου κύλισης, ενός σπλισμού κινητήρα, ή οποιοδήποτε άλλο ρότορα. Το μέγιστο εύρος εμφανίζεται στο 1 x RPM του έκκεντρου εξαρτήματος σε μια κατεύθυνση διαμέσω των κέντρων των δύο ροτόρων. Εδώ το εύρος διαφέρει με το φορτίο ακόμα και σε σταθερές ταχύτητες (Σχήμα 5.5).



**Σχήμα 5.5** Γράφημα ταλάντωσης[1]

Σε ένα κανονικό ελάττωμα ανισορροπίας όταν ο συλλέκτης μετακινείται από τη κάθετη στην οριζόντια κατεύθυνση παρατηρείται μια αλλαγή φάσης  $90^\circ$ . Ωστόσο, στην εκκεντρότητα οι μετρήσεις της φάσης διαφέρουν από  $0$  ή  $180^\circ$  (το καθένα υποδεικνύει αντίθετη κίνηση) όταν μετριοούνται στην οριζόντια ή κάθετη κατεύθυνση. Οι προσπάθειες για την εξισορρόπηση του εκκεντρικού ρότορα συχνά καταλήγουν στη μείωση των ταλαντώσεων σε μία μόνο κατεύθυνση, αλλά αυξάνοντάς την στην ακτινική κατεύθυνση (ανάλογα με τη σοβαρότητα της εκκεντρικότητας) (Σχήμα 5.6).

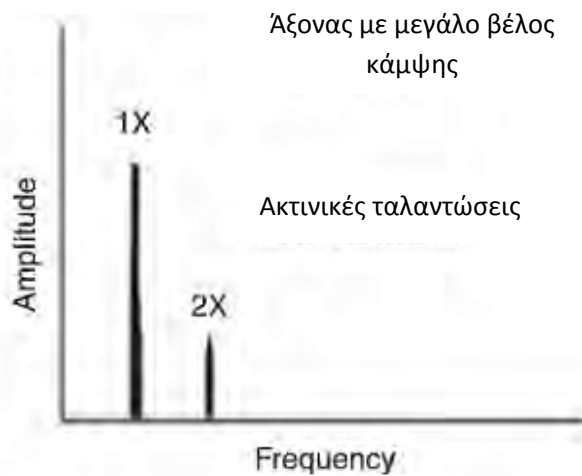


Σχήμα 5.6 Εκκεντρικός ρότορας[1]

### 5.2.3 Άξονας με μεγάλο βέλος κάμψης

Όταν συναντάται ένας άξονας με μεγάλο βέλος κάμψης οι ταλαντώσεις στην ακτινική και στην αξονική κατεύθυνση θα είναι υψηλές. Οι αξονικές ταλαντώσεις μπορεί να είναι υψηλότερες από τις ακτινικές ταλαντώσεις. Το FFT κανονικά θα έχει συνιστώσες  $1 \times$  και  $2 \times$ . Αν:

- Αν το εύρος  $1 \times$  RPM είναι κυρίαρχο τότε το βέλος είναι κοντά στο κέντρο του άξονα (Σχήμα 5.7).
- Αν το εύρος  $2 \times$  RPM είναι κυρίαρχο τότε το βέλος είναι κοντά στο τέλος του άξονα.

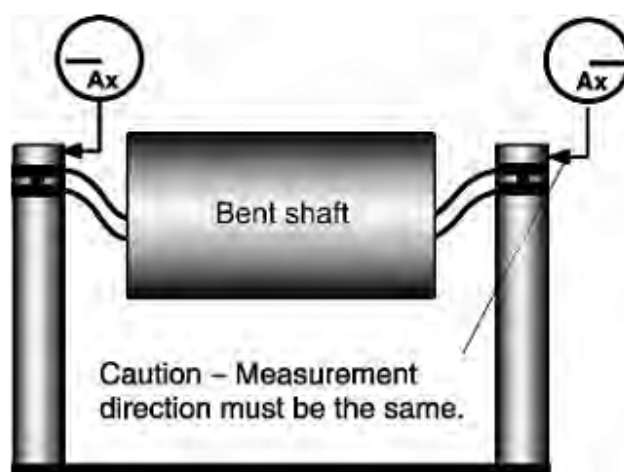


**Σχήμα 5.7** Ένα φάσμα FFT από ένα λυγισμένο άξονα με κάμψη κοντά στο κέντρο της ατράκτου[1]

Η διαφορά φάσης στην ακτινική και αξονική κατεύθυνση είναι  $180^\circ$ . Αυτό σημαίνει ότι όταν ένας ανιχνευτής μεταφέρεται από το κάθετο στο οριζόντιο επίπεδο, τότε δεν υπάρχει αλλαγή στα στοιχεία της φάσης.

#### 5.2.4 Κακή ευθυγράμμιση

Η κακή ευθυγράμμιση ακριβώς όπως και η ανισορροπία είναι ένα από τα κύρια αίτια της ταλάντωσης στα μηχανήματα. Κάποιες μηχανές έχουν εξοπλιστεί με αυτό-ευθυγραμμιζόμενα έδρανα κύλισης και ελαστικούς συνδέσμους που μπορούν να δεχθούν μεγάλο ποσοστό «κακής» ευθυγράμμισης. Παρόλα αυτά δεν είναι ασυνήθιστο να εμφανιστούν υψηλές ταλαντώσεις εξαιτίας της κακής ευθυγράμμισης



**Σχήμα 5.8** Σημείωση της διαφοράς φάσης  $180^\circ$  κατά την αξονική διεύθυνση[1]

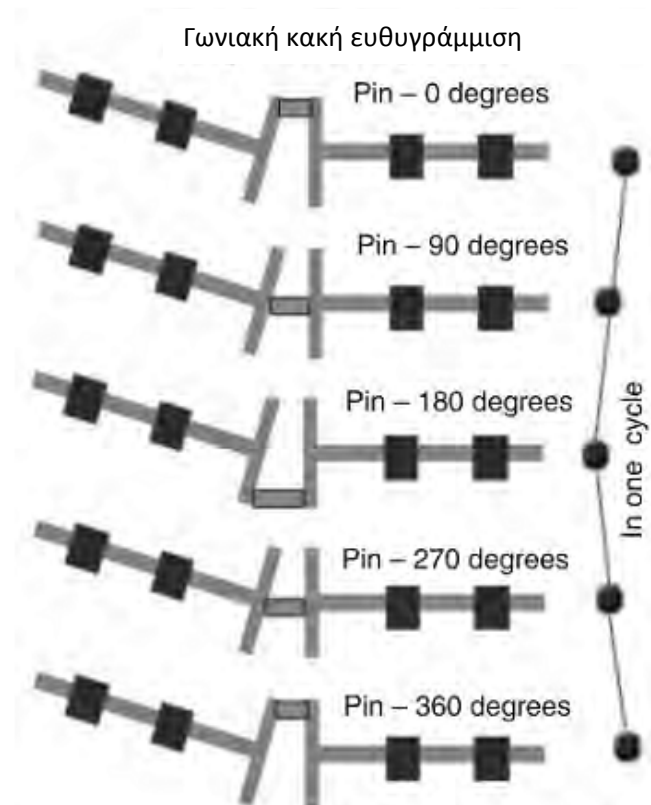


Βασικά υπάρχουν δύο τύποι «κακής» ευθυγράμμισης:

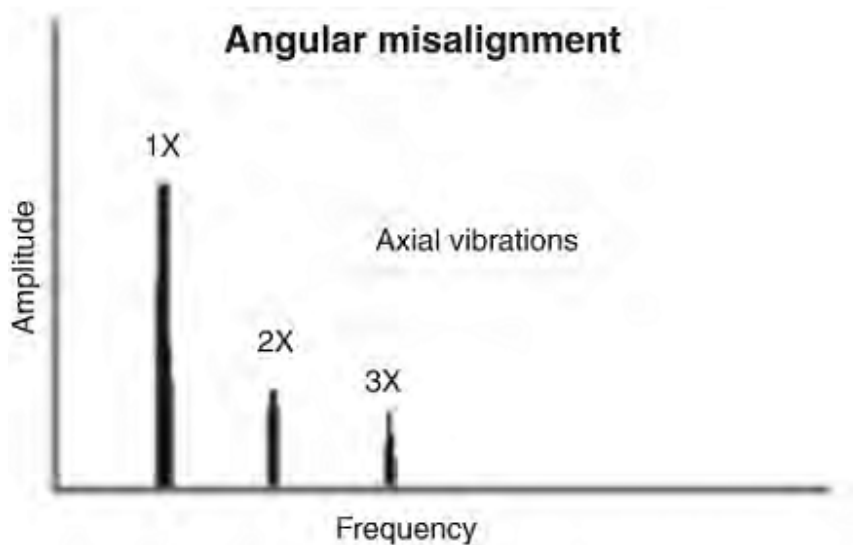
1. Η Γωνιακή «κακή» ευθυγράμμιση: Οι άξονες των ατράκτων συναντούνται σε γωνία.
2. Παράλληλη «κακή» ευθυγράμμιση: Η κεντρικές γραμμές των ατράκτων των δύο μηχανών είναι παράλληλες και έχουν απόσταση μεταξύ τους.

### Γωνιακή «κακή» ευθυγράμμιση

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9, στη συχνότητα  $1 \times \text{rpm}$  η γωνιακή κακή ευθυγράμμιση υποβάλλει πρωτίστως την κινητήρια και κινούμενη άτρακτο της μηχανής σε αξονικές ταλαντώσεις. Το σχέδιο είναι μια υπερβολική και απλοϊκή αναπαράσταση μονού πίν, ωστόσο μια «καθαρή» γωνιακή «κακή» ευθυγράμμιση σε μια μηχανή είναι σπάνια. Έτσι, η «κακή» ευθυγράμμιση σπάνια παρατηρείται μόνο σαν μία  $1 \times \text{rpm}$  κορυφή. Τυπικά, θα υπάρχει υψηλή αξονική ταλάντωση τόσο με  $1 \times$  και  $2 \times \text{rpm}$ . Ωστόσο, δεν είναι ασυνήθιστο να κυριαρχούν οι  $1 \times$ ,  $2 \times$  ή  $3 \times$ . Αυτά τα συμπτώματα μπορεί επίσης υποδεικνύουν προβλήματα σύζευξης, (π.χ. χαλαρότητα) (Σχήμα 5.10).

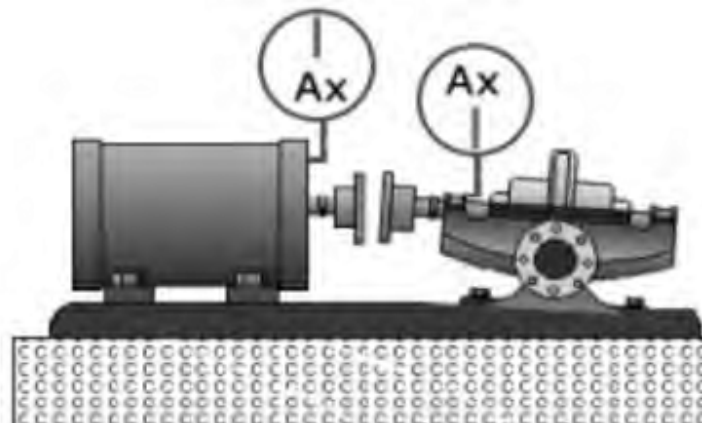


Σχήμα 5.9 Γωνιακή κακή ευθυγράμμιση[1]



**Σχήμα 5.10** Το FFT της γωνιακής «κακής» ευθυγράμμισης[1]

Κατά τη μέτρηση της αξονικής φάσης στα εδράνων των δύο μηχανών παρατηρείται σε όλη την σύζευξη μια διαφορά φάσης  $180^\circ$  (σχήμα 5.11).



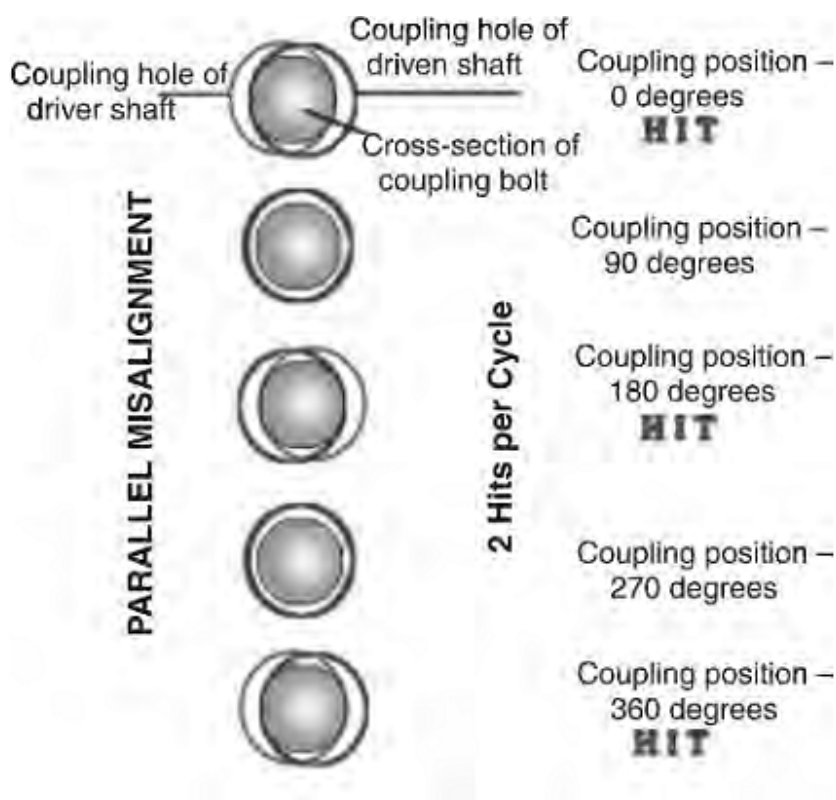
**Σχήμα 5.11** Γωνιακή κακή ευθυγράμμιση που επιβεβαιώθηκε με ανάλυση φάσης[1]

### Παράλληλη «κακή» ευθυγράμμιση

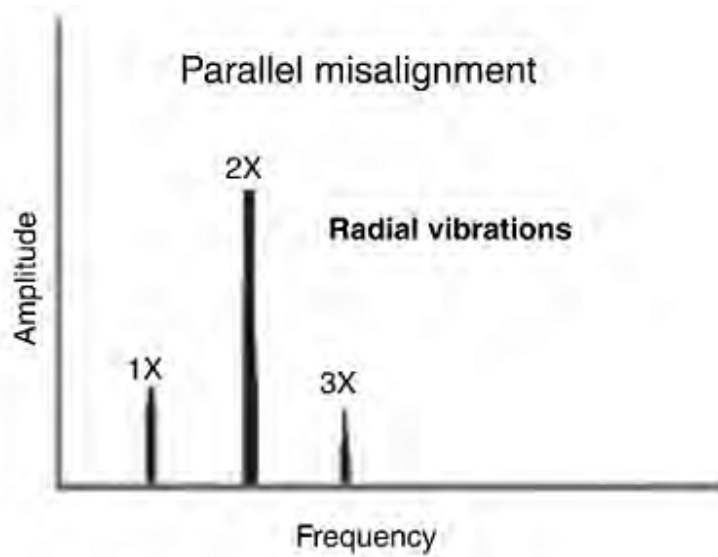
Η παράλληλη «κακή» ευθυγράμμιση, όπως δείχνεται στο Σχήμα 5.12, οδηγεί σε 2 χτυπήματα (hits) ανά κύκλο και ως εκ τούτου σε μία ταλάντωση  $2 \times \text{rpm}$  στην ακτινική κατεύθυνση. Η παράλληλη «κακή» ευθυγράμμιση έχει παρόμοια συμπτώματα ταλάντωσης σε σχέση με την γωνιακή, αλλά παρουσιάζει υψηλή ακτινική ταλάντωση που προσεγγίζει μία διαφορά φάσης  $180^\circ$  σε όλη την σύζευξη. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η «καθαρή» παράλληλη «κακή» ευθυγράμμιση σπάνια και παρατηρείται συνήθως να είναι σε συνδυασμό

με την γωνιακή. Έτσι, παρατηρούνται κορυφές 1 x και 2 x. Όταν κυριαρχεί η παράλληλη «κακή» ευθυγράμμιση, η 2 x είναι συχνά μεγαλύτερη από την 1 x, αλλά εύρος σε σχέση με το 1 x μπορεί συχνά να επηρεάζεται από τον τύπο σύζευξης και τον τύπο κατασκευής.

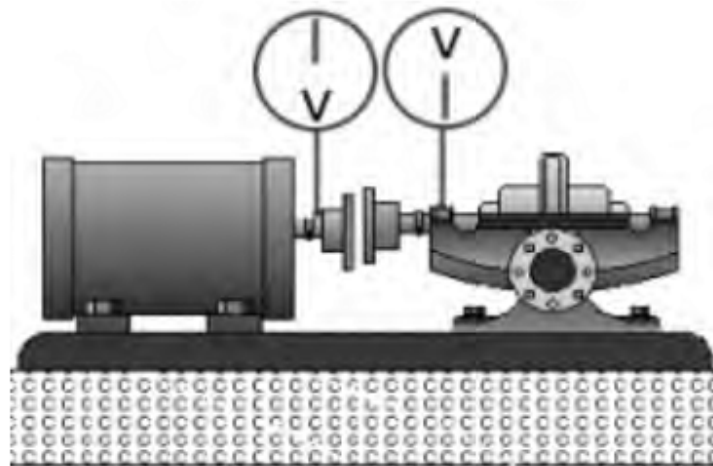
Όταν η γωνιακή ή η παράλληλη κακή ευθυγράμμιση σοβαρέψει, μπορεί να δημιουργήσει υψηλές κορυφές εύρους σε πολύ υψηλότερες αρμονικές (3 x έως 8 x) (Σχήμα 5.13) ή ακόμα και μια ολόκληρη σειρά αρμονικών υψηλής συχνότητας. Εάν η κακή ευθυγράμμιση είναι σοβαρή, η κατασκευή της σύζευξης επηρεάζει σημαντικά το σχήμα του φάσματος (Εικόνα 5.14).



Σχήμα 5.12 Παράλληλη κακή ευθυγράμμιση[1]



**Σχήμα 5.13** Το FFT της παράλληλης κακής ευθυγράμμισης[1]



**Σχήμα 5.14** Παρατηρείται ακτινική μετατόπιση φάσης 180 ° σε ολόκληρη την σύζευξη[1]

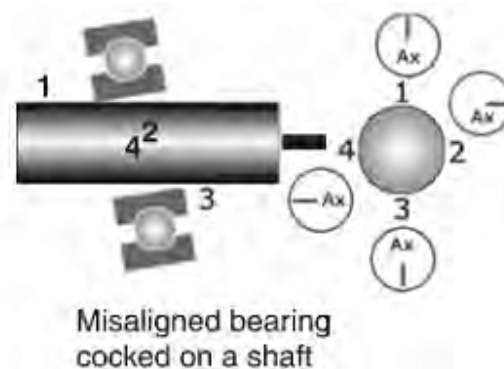
**«Κακή» ευθυγράμμιση έναντι ατράκτου με μεγάλο βέλος κάμψης**

Συχνά, μία άτρακτος με κάμψη και μια «κακή» γωνιακή ευθυγράμμιση δίνουν παρόμοια φάσματα FFT. Οι ταλαντώσεις είναι ορατές τόσο στις αξονικές όσο και στις ακτινικές μετρήσεις. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να επιλυθούν περαιτέρω με ανάλυση φάσης. Σε ένα μηχάνημα με λυγισμένη άτρακτο, θα παρατηρήσει στα δύο έδρανα μια διαφορά φάσης.

Στην περίπτωση της κακής ευθυγράμμισης, η διαφορά φάσης είναι ορατή στα έδρανα όλης της σύζευξης.

### Μη ευθυγραμμισμένα ρουλεμάν τοποθετημένα στραβά

Η «κακή» ευθυγράμμιση δεν εμφανίζεται μόνο στις ζεύξεις. Συχνά, τα ρουλεμάν δεν είναι με ακρίβεια ευθυγραμμισμένα με την άτρακτο. Τέτοια στραβά τοποθετημένα μπορούν να δημιουργήσουν σημαντική αξονική ταλάντωση. Μια στρεπτική κίνηση προκαλείται με περίπου 180° μετατόπιση φάσης από την κορυφή προς τον πυθμένα και / ή από πλευρά σε πλευρά, όταν μετράται κατά την *αξονική κατεύθυνση* του ίδιου του περιβλήματος του εδράνου (Σχήμα 5.15).



**Σχήμα 5.15** Μη ευθυγραμμισμένα έδρανα[1]

Ακόμη και αν το συναρμολόγηση είναι ισορροπημένη, μπορεί να μετρήσουμε υψηλές αξονικές ταλαντώσεις. Το FFT που λαμβάνεται στην αξονική κατεύθυνση θα δείξει συχνότητες ταλάντωσης της τάξης 1 x, 2 x και 3 x rpm.

Οι προσπάθειες για την ευθυγράμμιση του συνδέσμου ή την εξισορρόπηση του ρότορα δεν περιορίζουν το πρόβλημα. Το στραβά τοποθετημένο έδρανο πρέπει να αφαιρεθεί και να τοποθετηθεί σωστά.

Στην περίπτωση ενός ακτινικού εδράνου χιτωνίου, δεν παρατηρούνται ταλαντώσεις εξαιτίας της στραβής συναρμολόγησης. Το πρόβλημα πρέπει να συνοδεύεται από μια ανισορροπία. Θα παρατηρηθούν ακτινική και αξονική ταλάντωση, οι οποίες προκύπτουν από την αντίδραση του μη ευθυγραμμισμένου εδράνου με τη δύναμη της ανισορροπίας. Η εξισορρόπηση του ρότορα θα μειώσει τα επίπεδα των ταλαντώσεων και στις δύο κατευθύνσεις.

Αν υπάρχει πιθανότητα κακής ευθυγράμμισης, αλλά δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί μετά από έλεγχο για συνδέσμους και στραβά τοποθετημένα έδρανα, τότε καθίσταται αναγκαίο να διερευνηθεί μια κατάσταση γνωστή ως «μαλακό πόδι». Αυτό το φαινόμενο θα συζητηθεί σε ένα ακόλουθο μέρος του κεφαλαίου.

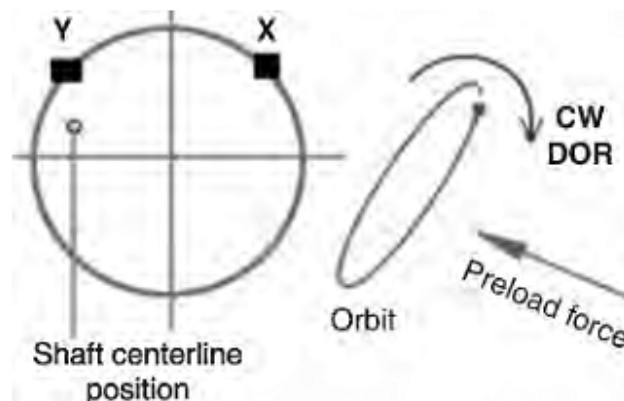
*Απόψεις:* Υπάρχουν διαφορές απόψεων μεταξύ των ειδικών σε σχέση με τη δημιουργία αρμονικών στο φάσμα FFT της τάξης των  $2 \times \text{rpm}$  και υψηλότερων που οφείλονται σε «κακή» ευθυγράμμιση.

Μια από τις σχολές σκέψεις συμφωνεί με την προηγούμενη συζήτηση. Ωστόσο, μια άλλη υπόθεση

είναι ότι η κυματομορφή λόγω της κακής ευθυγράμμισης παίρνει τροποποιήσεις λόγω των φορτίων που παράγονται από την «κακή» ευθυγράμμιση. Όταν υποβάλλονται σε αλγόριθμο FFT, οι παραμορφωμένες κυματομορφές όπως αυτή δείχνουν αρμονικές  $2 \times$  και υψηλότερες από την βασική  $1 \times \text{rpm}$ .

### **Η «κακή» ευθυγράμμιση και άλλες ακτινικές προφορτίσεις (αναπαράσταση τροχιάς)**

Στην προηγούμενη ενότητα, είδαμε πώς τα σήματα από τους δύο ανιχνευτές εγγύτητας που τοποθετούνται σε ένα έδρανο (συνήθως σε μια τουρμπίνα ) βοηθούν στη δημιουργία μιας τροχιάς. Η τροχιά είναι το ίχνος της κεντρικής ατράκτου για μία μόνο περιστροφή. Ωστόσο, εάν παίρναμε μια μέση θέση της κεντρικής γραμμής της ατράκτου για ένα *ορισμένο* χρονικό διάστημα, το αποτέλεσμα θα περιέγραφε κάτι σαν αυτό που φαίνεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 5.16. Εάν η κατεύθυνση περιστροφής (DOR) της ατράκτου είναι δεξιόστροφη (CW) και είναι φορτισμένη κανονικά, η ιδανική θέση της μέσης κεντρικής γραμμής της ατράκτου θα είναι περίπου στην ωρολογιακή θέση 7 με 8 .

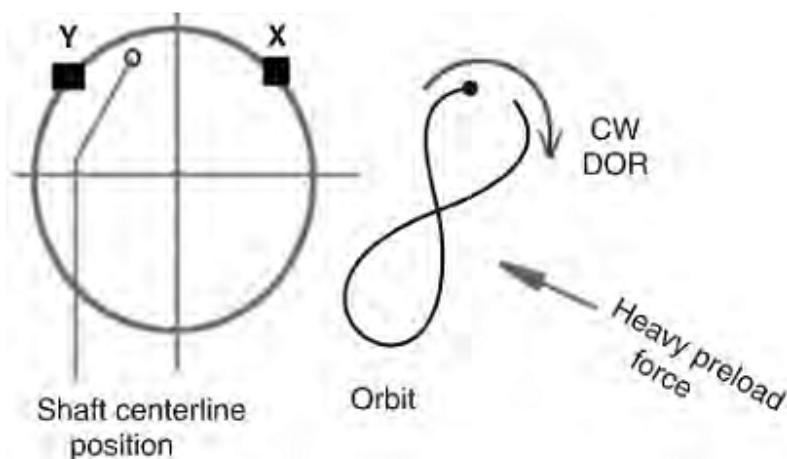


**Σχήμα 5.16** Διάγραμμα τροχιάς λόγω κακής ευθυγράμμισης[1]

Όταν οι ακτινικές προφορτίσεις λόγω της «κακής» ευθυγράμμισης, η βαρύτητα, οι δυνάμεις των υγρών και άλλα αίτια αυξηθούν σε μέγεθος, η τροχιά θα γίνει έντονα ελλειψοειδής. Η προφόρτιση των ρουλεμάν που οφείλεται σε στραβή συναρμολόγηση μπορεί επίσης να κάνει την τροχιά να έχει μικρότερο εύρος σε έναν άξονα που κάνει την έλλειψη να φαίνεται

λεπτότερη. Για παράδειγμα η μέση κεντρική γραμμή της ατράκτου θα κινηθεί από την κανονική θέση στο άνω αριστερό τεταρτημόριο,.

Στο σχήμα, όλα τα σημεία της τροχιάς κινούνται δεξιόστροφα (η οποία είναι και η κατεύθυνση περιστροφής) και ως εκ τούτου, η τροχιά είναι ακόμη σε μετάπτωση προς τα εμπρός. Εάν η προφόρτιση έχει περαιτέρω αυξήσεις, το αποτέλεσμα θα είναι το σχήμα της τροχιάς να μοιάζει με τον αριθμό 8. Στην περίπτωση αυτή, είναι επίσης ενδιαφέρον να παρακολουθήσουμε τη θέση της μέσης κεντρικής γραμμής της ατράκτου, η οποία έχει πλέον μετακινηθεί περισσότερο προς τα πάνω στο αριστερό τεταρτημόριο. Αν αυτή η τροχιά μελετηθεί προσεκτικά, παρατηρείται ότι, αν ένα σημείο της τροχιάς ξεκινά την διαδρομή του από την τελεία, κινείται αριστερόστροφα αρχικά, ενώ η άτρακτος περιστρέφεται δεξιόστροφα. Έτσι, η βαριά προφόρτιση εξαιτίας «κακής» ευθυγράμμισης μπορεί να πιέσει την άτρακτο να έχει αντίστροφη μετάπτωση. Η μπροστινή μετάπτωση είναι φυσιολογική, όμως η αντίστροφη δεν είναι. Εάν η πορεία προς ένα φανταστικό σημείο στο ίχνος της τροχιάς συνεχιστεί, τότε μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι μεταπτώσεις συνεχίζουν να αλλάζουν διαρκώς (Σχήμα 5.17).



**Σχήμα 5.17** Η τροχιά όταν αυξάνεται η προφόρτιση λόγω κακής ευθυγράμμισης[1]

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι βαριές προφορτίσεις συνήθως δεν προκαλούν τροχιές τέλειου σχήματος 8, αλλά προκαλούν διαφορετικού μεγέθους βρόχους. Αυτό το είδος της “φόρτισης”, τυπικώς σε μιας υψηλής ταχύτητας στροβιλομηχανή, μπορεί να είναι αρκετά επιζήμια και μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική φθορά των ρουλεμάν, της κόπωσης των αξόνων και πιθανώς ράγισμα της ατράκτου.

### 5.2.5 Μηχανική χαλαρότητα

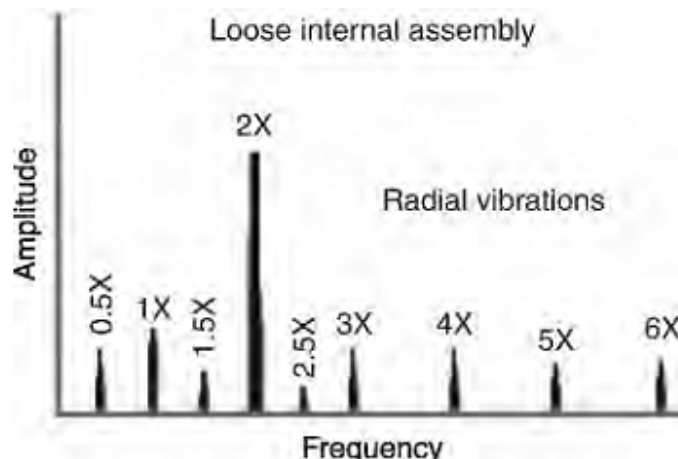
Αν σκεφτούμε κάθε περιστρεφόμενη μηχανή, η μηχανική χαλαρότητα μπορεί να συμβεί σε τρεις θέσεις:

- Εσωτερική χαλαρότητα συναρμολόγησης
- Χαλαρότητα του μηχανήματος με την πλάκα βάσης
- Χαλαρότητα της δομής.

#### Εσωτερική χαλαρότητα συναρμολόγησης

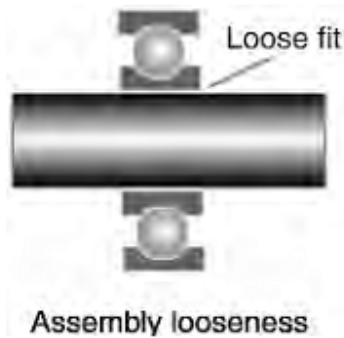
Αυτή η κατηγορία χαλαρότητας θα μπορούσε να είναι ανάμεσα σε μια επένδυση ενός εδράνου και το καπάκι του, ενός εδράνου χιτωνίου ή ενός εδράνου κύλισης, ή ένα στροφέιο σε μία άτρακτο. Συνήθως προκαλείται από μια «ανάρμοστη» συναρμολόγηση μεταξύ των εξαρτημάτων, τα οποία θα παράγουν πολλές αρμονικές στο FFT λόγω της μη γραμμικής απόκρισης των χαλαρών τμημάτων με τις διεγερτικές δυνάμεις από το ρότορα. Συμβαίνει μια περικοπή της κυματομορφής χρόνου, προκαλώντας αρμονικές. Η φάση αυτή είναι συχνά ασταθής και μπορεί να ποικίλει από την μια μέτρηση στην άλλη, ιδιαίτερα εάν ο ρότορας μεταβάλλει τη θέση του σχετικά με την άτρακτο ανάμεσα στις εκκινήσεις.

Η μηχανική χαλαρότητα είναι συχνά ιδιαίτερα κατευθυντική και μπορεί να προκαλέσει διαφορετικές μετρήσεις όταν λαμβάνονται σε βήματα 30° κατά την ακτινική κατεύθυνση γύρω από το περίβλημα του ρουλεμάν. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι η χαλαρότητα προκαλεί συχνά υπό-αρμονικά πολλαπλάσια ακριβώς σε  $\frac{1}{2} \times$  ή  $\frac{1}{3} \times$  rpm (π.χ.  $\frac{1}{2} \times$ ,  $1 \frac{1}{2} \times$ ,  $\times 2 \frac{1}{2}$  και παραπάνω) (Σχήματα 5.18 και 5.19).



**Σχήμα 5.18** Γράφημα χαλαρής εσωτερικής συναρμολόγησης[1]

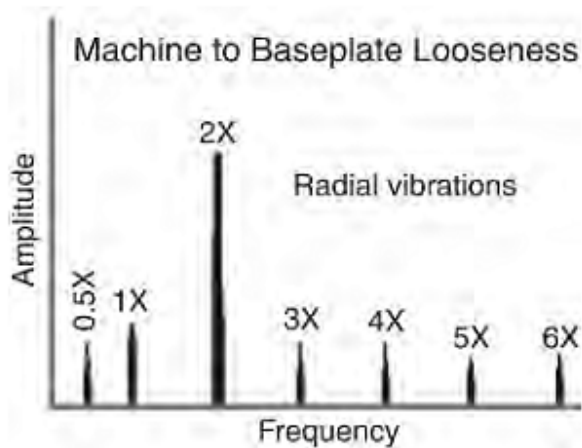




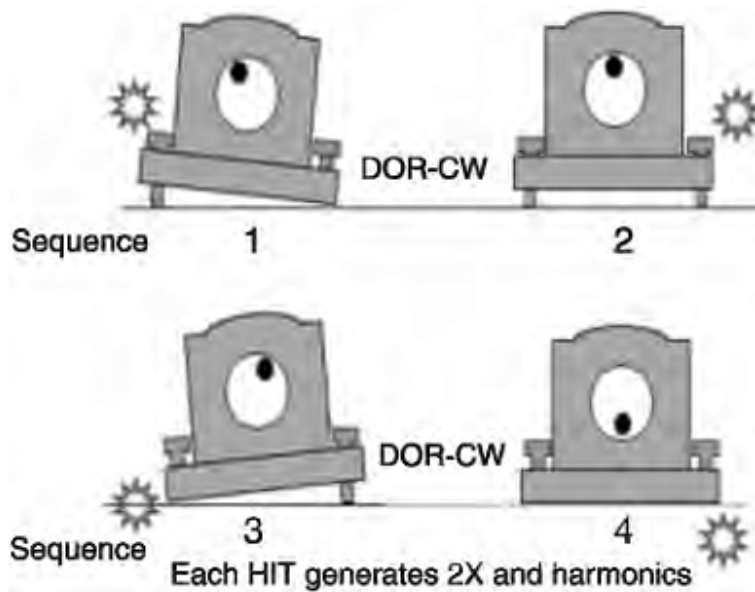
**Σχήμα 5.19** Χαλαρή εφαρμογή

### Χαλαρότητα μεταξύ μηχανήματος και πλάκας βάσης

Αυτό το πρόβλημα συνδέεται με χαλαρές βίδες μπλοκ, ρωγμές στη δομή του πλαισίου ή τη βάση του ρουλεμάν. Τα σχήματα 5.20 και 5.21 καθιστούν προφανές πώς υψηλότερες αρμονικές δημιουργούνται λόγω της ταλαντευόμενης κίνησης του μπλοκ με τις χαλαρές βίδες.



**Σχήμα 5.20** Γράφημα μηχανικής χαλαρότητας[1]



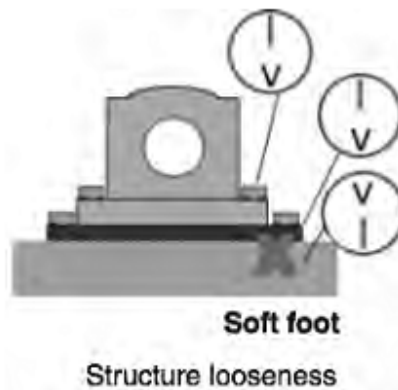
**Σχήμα 5.21** Μηχανική χαλαρότητα[1]

### Χαλαρότητα της δομής

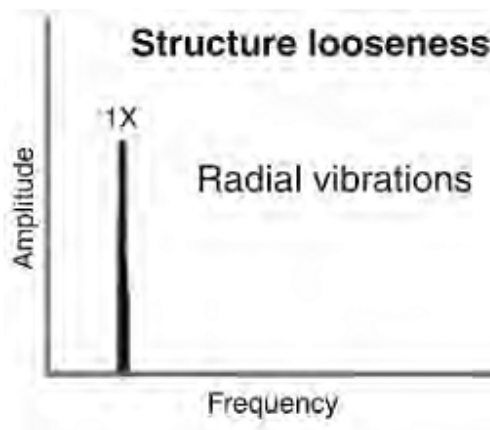
Αυτό το είδος της χαλαρότητας προκαλείται από χαλαρότητα στη δομή ή στις αδυναμίες των στηριγμάτων, στη βάση ή στο θεμέλιο του μηχανήματος . Μπορεί επίσης να προκληθεί από την επιδείνωση της αρμολόγησης, από χαλαρές βίδες συγκράτησης της βάσης και την παραμόρφωση του πλαισίου (γνωστό ως «μαλακό πόδι») (Σχήμα 5.22).

Η ανάλυση φάσης μπορεί να αποκαλύψει μετατόπιση φάσης περίπου 180° μεταξύ των κάθετων μετρήσεων στο στήριγμα, την πλάκα βάσης και την ίδια τη βάση του μηχανήματος, (Σχήμα 5.23).

Όταν υπάρχει υποψία για τη κατάσταση «μαλακού ποδιού», ένα εύκολο τεστ για να το επιβεβαιώσουμε είναι να χαλαρώσουμε κάθε μία από τις βίδες, μία κάθε φορά, και να δούμε αν αυτό επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην ταλάντωση. Σε αυτή τη περίπτωση, μπορεί να είναι αναγκαία μια επανακατεργασία της βάσης του μηχανήματος ή να τοποθετηθούν αποστάτες για να εξαλειφθεί η παραμόρφωση, όταν οι βίδες στερέωσης σφίγγονται ξανά.



Σχήμα 5.22 Χαλαρότητα δομής



Σχήμα 5.23 Διάγραμμα χαλαρότητας δομής[1]

### 5.2.6 Συντονισμός

Κάθε αντικείμενο έχει μια φυσική συχνότητα η οποία καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της μάζας, της δυσκαμψίας και της απόσβεσης.

Εάν ένα γκονγκ χτυπήσει μία καμπάνα , η καμπάνα χτυπά με τη δική της χαρακτηριστική συχνότητα που είναι γνωστή ως η φυσική του συχνότητα. Αυτό το γεγονός με το γκονγκ είναι *εξαναγκασμένη ταλάντωση*, ενώ το χτύπημα της καμπάνας είναι *ελεύθερη ταλάντωση*.

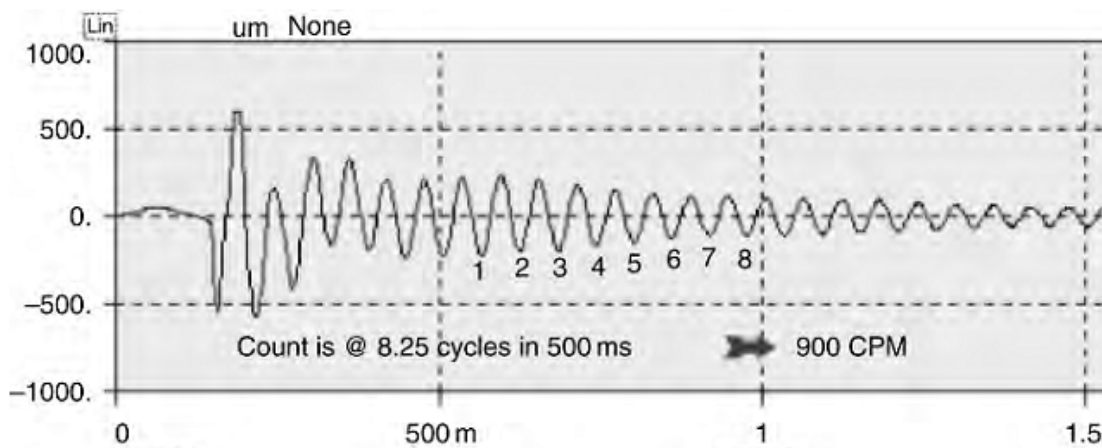
Μια ελεύθερη ταλάντωση σε φυσική συχνότητα ονομάζεται συντονισμός.

Υπάρχει μια απλή μέθοδος για να βρεθεί η φυσική συχνότητα οποιουδήποτε αντικειμένου ή συστήματος που ονομάζεται *δοκιμή πρόσκρουσης*. Με τη μέθοδο αυτή, ένας αισθητήρας ταλαντώσεων που είναι στερεωμένος στο σώμα του οποίου μετριέται η φυσική συχνότητα. Χρησιμοποιώντας ένα σφυρί κρούσης, χτυπάμε το σώμα και συλλέγονται η κυματομορφή χρόνου ή το FFT. Η κυρίαρχη συχνότητα που παρατηρήθηκε στις δύο γραφικές παραστάσεις

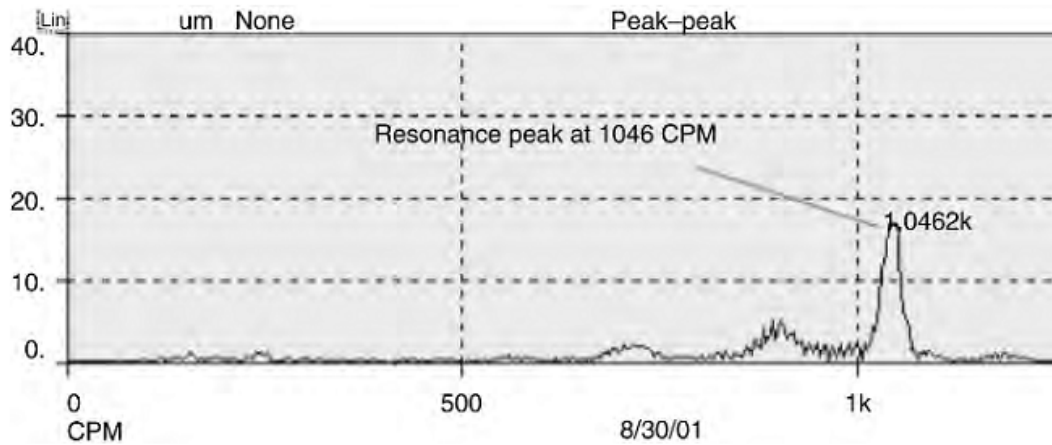
είναι η φυσική συχνότητα του σώματος. Τα Σχήματα 5.24 και 5.25 δείχνουν την κυματομορφή χρόνου και το φάσμα FFT από ένα τεστ που διεξάγεται σε ένα μεταλλικό τραπέζι μελέτης.

Όπως φαίνεται στην κυματομορφή χρόνου, η επίδραση παρουσιάζεται περίπου 100 ms μετά από τη στιγμή που άρχισαν να συλλέγονται τα δεδομένα. Αμέσως μετά την κρούση, το σώμα εκδηλώνει ελεύθερη ταλάντωση με τη δική του φυσική συχνότητα. Το εύρος της ταλάντωσης μειώνεται λογαριθμικά λόγω της επίδρασης της απόσβεσης. Το χρονικό διάστημα μεταξύ 500 ms και 1 s είναι αρκετά μεγάλο για να μετρηθεί ο αριθμός των κύκλων. Ο υπολογισμός δείχνει ότι η φυσική συχνότητα είναι περίπου 990 cpm. Για να αποκτηθεί το FFT, ο συλλέκτης δεδομένων που μηδενίζεται και γίνεται άλλη μία κρούση στο τραπέζι με το σφυρί. Το συλλεγόμενο φάσμα δείχνει μια δεσπόζουσα κορυφή στα 1046 cpm. Αυτό είναι κοντά στην τιμή που υπολογίστηκε πριν με την κυματομορφή χρόνου.

Η δοκιμή με το «χτύπημα» είναι απλή και χρησιμοποιείται εκτενώς. Είναι μια γρήγορη και υψηλής ακρίβειας μέθοδος για την μέτρηση των συχνοτήτων συντονισμού των δομών και των περιβλημάτων. Είναι δελεαστικό να χρησιμοποιήσετε τη δοκιμή αυτή σε μια εφεδρική αντλία ή σε άλλους ρότορες που δεν στηρίζονται σε έδρανα, για να γίνει μια εκτίμηση των κρίσιμων ταχυτήτων τους. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αυτό μπορεί να είναι πολύ ανακριβές. Για παράδειγμα, η κρίσιμη ταχύτητα του ρότορα με πτερωτές που λειτουργεί με ρευστό και υποστηρίζεται από έδρανα διαφέρει κατά πολύ από την κρίσιμη ταχύτητα που λαμβάνεται χρησιμοποιώντας μία δοκιμή πρόσκρουσης σε ρότορα που είναι εκτός λειτουργίας.



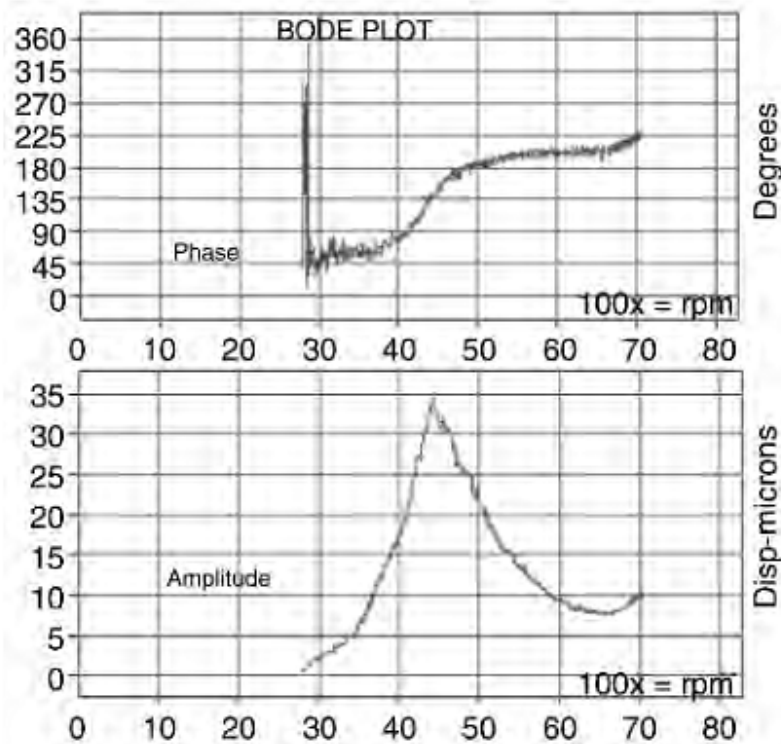
**Σχήμα 5.24** Κυματομορφή χρόνου μιας δοκιμής χτυπήματος[1]



**Σχήμα 5.25** Φάσμα FFT μιας δοκιμής χτυπήματος[1]

Ας υποθέσουμε ότι ένας πολυσταδιακός ρότορας αντλίας έχει μια φυσική συχνότητα των 2500 rpm κατά την άντληση ενός ρευστού. Ας υποθέσουμε επίσης ότι ο ρότορας έχει μια μικρή ανισορροπία, η οποία παράγει ανεκτά εύρη ταλάντωσης στο  $1 \times \text{rpm}$ . Σε αυτό το παράδειγμα, η ανισορροπία προκαλεί την αναγκαστική συχνότητα ταλάντωσης στο  $1 \times \text{rpm}$ . Όταν η αντλία τεθεί σε λειτουργία, η ταχύτητα αρχίζει να αυξάνεται και, μαζί με αυτή επίσης αυξάνεται το εύρος και η συχνότητα ταλάντωσης λόγω ανισορροπίας. Σε μια δεδομένη στιγμή, η εξαναγκασμένη συχνότητα των ταλαντώσεων που οφείλονται στην ανισορροπία θα είναι 2500 rpm. Η συχνότητα αυτή συμβαίνει επίσης να είναι η φυσική συχνότητα του ρότορα. Όποτε η εξαναγκασμένη συχνότητα ταλάντωσης ταιριάζει με τη φυσική συχνότητα του συστήματος, το εύρος αυξάνεται σημαντικά, γίνεται πολύ υψηλότερο από το αναμενόμενο σε σύγκριση με την επίδραση της ανισορροπίας. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται *κρίσιμη ταχύτητα*.

Οι κρίσιμες ταχύτητες του ρότορα επιβεβαιώνονται χρησιμοποιώντας το διάγραμμα Bode όπως φαίνεται στο σχήμα 5.26. Δεδομένου ότι ο ρότορας προσεγγίζει τη κρίσιμη ταχύτητα του, το εύρος αυξάνεται. Αυτό φθάνει σε ένα μέγιστο και έπειτα ελαττώνεται και πάλι. Η φάση αλλάζει σταθερά καθώς η διαφορά είναι  $90^\circ$  στη κρίσιμη ταχύτητα και σχεδόν  $180^\circ$  όταν έχει συντονισμό.



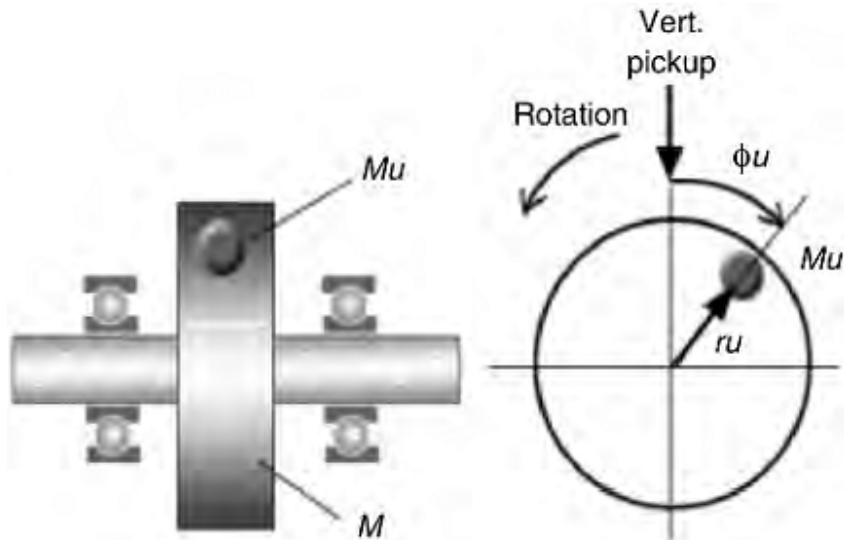
**Σχήμα 5.26** Η απόκριση του ρότορα που αντιπροσωπεύεται από Διάγραμμα Bode[1]

Τα εύρη υψηλής ταλάντωσης σε κρίσιμες ταχύτητες μπορεί να είναι καταστροφικά για κάθε σύστημα και πρέπει να αποφεύγονται με κάθε κόστος. Εκτός από το παράδειγμα της φυσικής συχνότητας ενός ρότορα, ο συντονισμός των δομών μπορεί επίσης να προέρχεται από τα θεμέλια πλαισίων στήριξης, από κιβώτια ταχυτήτων ή ακόμη και από τους μάντες κίνησης.

Οι φυσικές συχνότητες του συστήματος δεν μπορούν να εξαλειφθούν, αλλά μπορεί να μετατοπιστούν σε κάποια άλλη συχνότητα με διάφορες μεθόδους. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των φυσικών συχνοτήτων είναι ότι αυτές παραμένουν ίδιες ανεξάρτητα από την ταχύτητα, και αυτό βοηθά στην ανίχνευσή τους.

Για να κατανοήσουμε τον λόγο για το σχήμα του διαγράμματος Bode, πρέπει θυμηθούμε τα βασικά της ταλάντωσης. Έχουμε συζητήσει νωρίτερα πως η απόκριση ενός αντικειμένου ή μηχανικού συστήματος οφείλεται σε μια ισχυρή δύναμη όπως η ανισορροπία και μπορεί να αναπαρασταθεί έτσι:

$$Mu \cdot r \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) = M(a) + C(v) + k(d)$$



**Σχήμα 5.27** Ένα απλό σύστημα ρότορα[1]

Στο Σχήμα 5.27, όπου:

$M$  = μάζα ρότορα

$Mr$  = ανισορροπία μάζας

$r_u$  = ακτίνα ανισορροπίας

$\Phi_u$  = γωνιακή θέση της ασυμμετρίας

$\omega$  = γωνιακή ταχύτητα του ρότορα.

Το Σχήμα 5.27 απεικονίζει μία μάζα απλού ρότορα που υποστηρίζεται με δύο έδρανα. Η μάζα  $M$  έχει μια μη ισορροπημένη μάζα  $Mr$  σε μια ακτίνα  $r_u$  και σε μια γωνία  $\phi_u$  από τον κάθετο αισθητήρα. Αν ο ρότορας αναγκαστεί να περιστραφεί, η σύγχρονη απόκριση δίνεται από την εξίσωση:

$$Mr \cdot a + C \cdot v + K \cdot d = Mu \cdot r_u \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t - \Phi_u)$$

↑

Rotor mass

↑

Damping

↑

Spring stiffness

↑

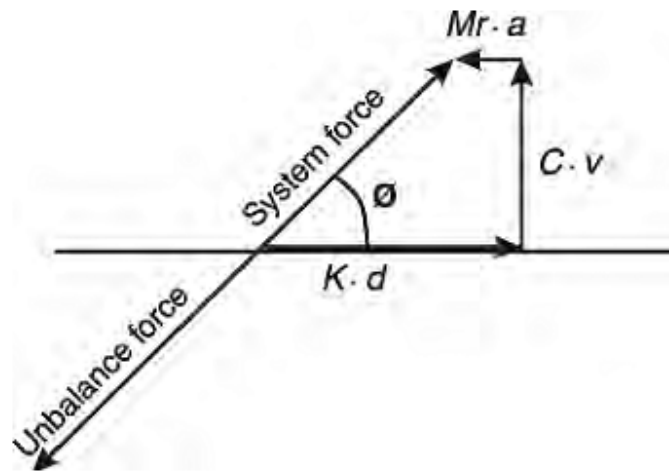
Unbalance force

[1]

Η παραπάνω εξίσωση σε διανυσματική μορφή φαίνεται γραφικώς στο σχήμα 5.28. Στην περίπτωση αυτή, η ισχυρή δύναμη είναι η δύναμη ανισορροπίας. Η μάζα, η απόσβεση και η

δυσκαμψία, είναι οι δυνάμεις συγκράτησης που προστίθενται σε μια ενιαία δύναμη που ονομάζεται η δύναμη του συστήματος. Προκειμένου να απλοποιηθεί αυτή η εξίσωση της κίνησης, θα αντικατασταθεί η επιτάχυνση με  $d \cdot \omega^2$  και η ταχύτητα με την  $d \cdot \omega$ . Η προηγούμενη εξίσωση έχει πλέον τροποποιηθεί ως:

$$(-Mr \cdot \omega^2 + C \cdot \omega + K) \cdot d = (Mu \cdot ru \cdot \omega^2) \cos(\omega t - \Phi u)$$



**Σχήμα 5.28** Γράφημα δυνάμεων συστήματος[1]

Ως εκ τούτου, με αναφορά στα Σχήματα 5.29 και 5.30:

**σύγχρονη δυναμική ακαμψία x μετατόπιση = δύναμη ανισορροπίας**

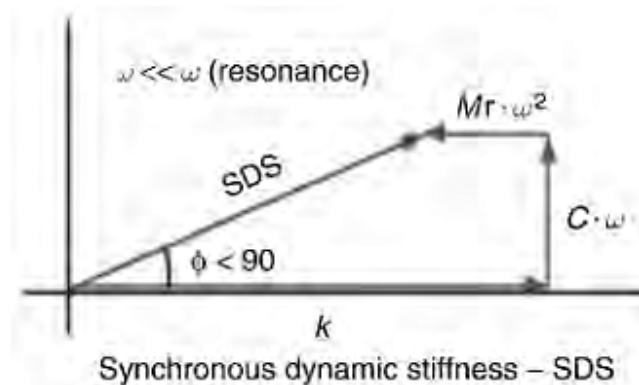
Αναδιατάσσοντας την παραπάνω εξίσωση λαμβάνουμε:

$$\text{Synchronous response} = \frac{(M \cdot ru \cdot \omega^2)}{(-Mr \omega^2 + C \cdot \omega + k)}$$

$$\text{Synchronous response} = \frac{\text{unbalance force}}{\text{synchronous dynamic stiffness}}$$

**Σχήμα 5.29** Τύποι SDS[1]





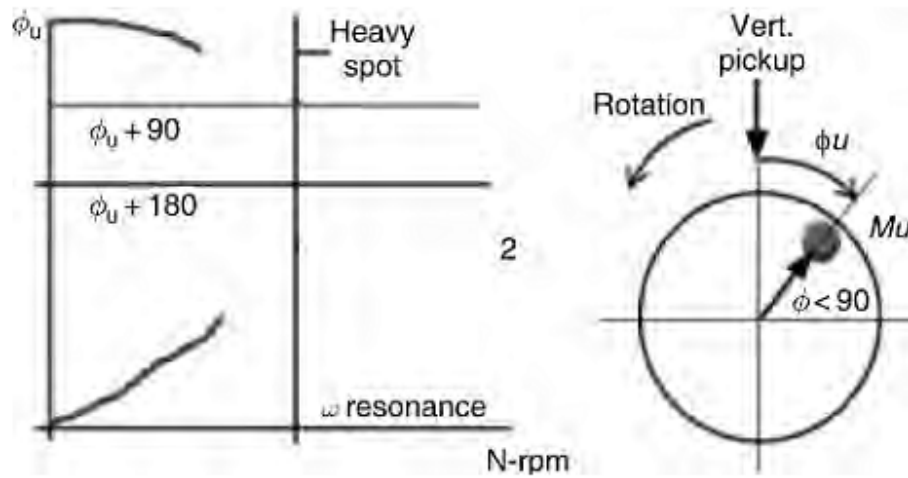
**Σχήμα 5.30** Διάγραμμα SDS[1]

Κατά συνέπεια, η σύγχρονη απόκριση δείχνει ότι το εύρος  $1 \times$  (μετατόπιση) αυξάνει όταν αυξάνεται η δύναμη ανισορροπίας (ή όταν η σύγχρονη δυναμική ακαμψία μειώνεται).

Εμείς θα διερευνήσουμε τώρα την απόκριση του ρότορα στις τρεις κλίμακες ταχυτήτων.

### **Περίπτωση 1 - Η ταχύτητα λειτουργίας $\omega$ είναι πολύ μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα**

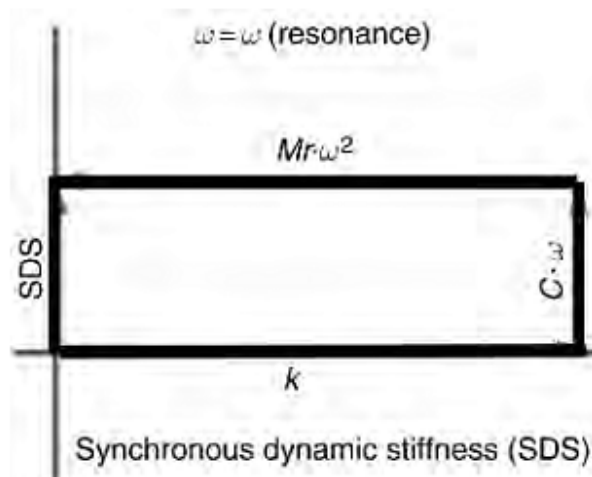
Όταν η ταχύτητα είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα, η μάζα και η συνεισφορά της απόσβεσης στην ακαμψία είναι μικρές. Η κυρίαρχη ακαμψία είναι η ακαμψία του ελατηρίου, η οποία διατηρεί τα εύρη σε χαμηλά επίπεδα. Σε αυτές τις χαμηλές ταχύτητες, η δύναμη ανισορροπίας αλλάζει και η δυσκαμψία του ελατηρίου υποτίθεται ότι δεν αλλάζει. Η απόκριση του ρότορα είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητα (σχήμα 5.31). Η σχέση της φάσης του σημείου αναφοράς του ρότορα και του βαρέως σημείου είναι τέτοια όπως οι καθυστερήσεις των ταλαντώσεων (διαφορά φάσης =  $\phi$ ) πίσω από την ανισορροπία (βαρύ σημείο) και σε αυτό το στάδιο είναι μικρότερη από  $90^\circ$ .



**Σχήμα 5.31** Απόκριση ρότορα έναντι της αύξησης της ταχύτητας[1]

**Περίπτωση 2 – Η ταχύτητα λειτουργίας  $\omega$  να είναι ίση με την κρίσιμη ταχύτητα (Σχήμα 5.32)**

Όταν η ταχύτητα λειτουργίας του ρότορα προσεγγίζει την κρίσιμη ταχύτητα, οι δυσκαμψίες της μάζας και του ελατηρίου στην εξίσωση είναι ίσες σε μέγεθος αλλά αντίθετες σε κατεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό αλληλοεξουδετερώνονται και ο μόνος παράγοντας που συνεισφέρει στον περιορισμό της δύναμης είναι η απόσβεση. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η σύγχρονη απόκριση του ρότορα (μετατόπιση  $1 \times$ ) είναι μέγιστη κατά την κρίσιμη ταχύτητα.



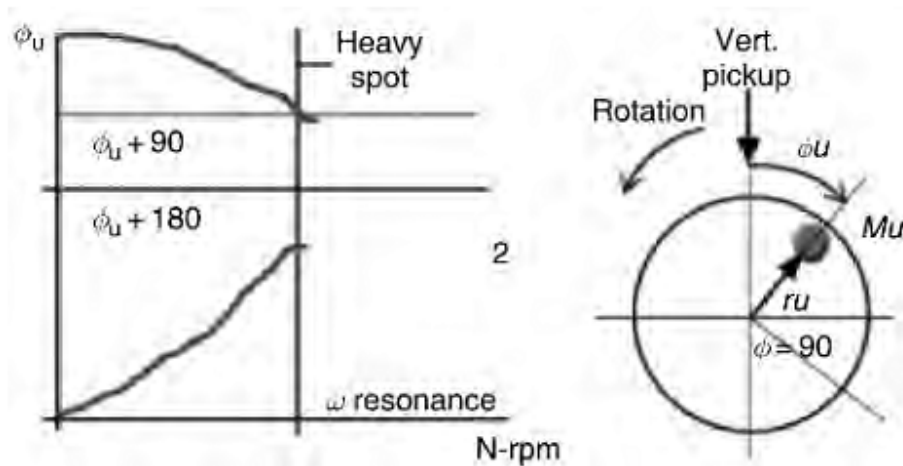
**Σχέση 5.32** Ταχύτητα του ρότορα φτάνει στην κρίσιμη ταχύτητα[1]

Η σχέση φάσης μεταξύ της απόκρισης και του βαρέως σημείου είναι τώρα ακριβώς  $90^\circ$  (Σχήμα 5.33). Κατά την κρίσιμη ταχύτητα παρατηρούμε ότι τα διανύσματα:

$$k - M \cdot \omega^2 = 0$$

$$\Leftrightarrow k = M \cdot \omega^2$$

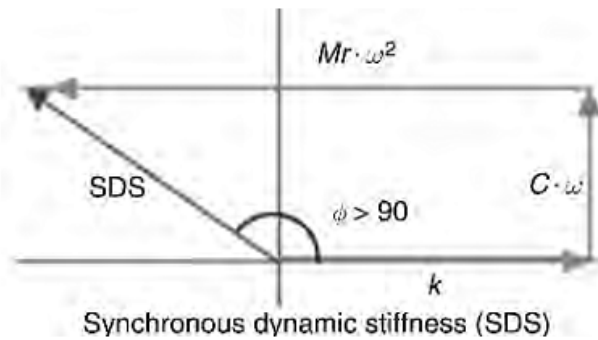
Έτσι, η κρίσιμη ταχύτητα θα είναι:  $\omega = k/Mr$ .



**Σχήμα 5.33** Σχέση φάσης στις  $90^\circ$  [1]

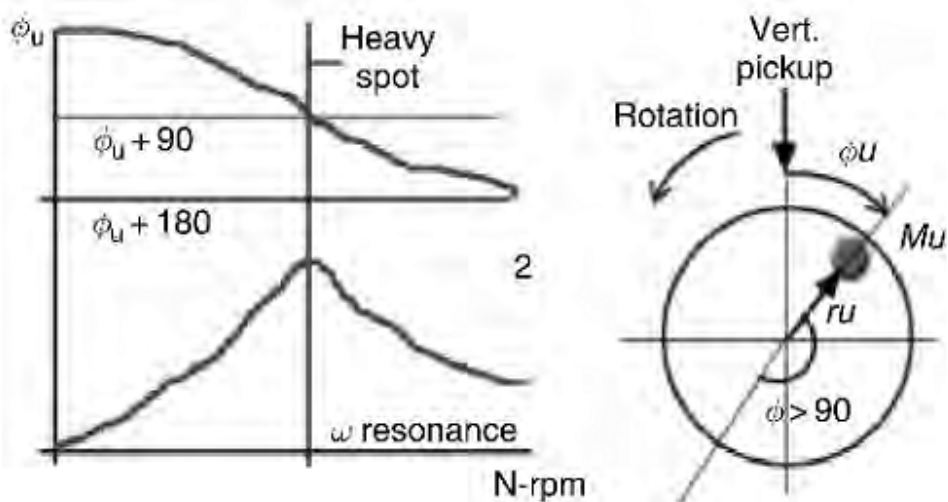
### Περίπτωση 3 – Η ταχύτητα λειτουργίας $\omega$ να μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα

Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα περισσότερο από την κρίσιμη ταχύτητα, η συμβολή στην ακαμψία της μάζας αυξάνεται πολύ γρήγορα (στο τετράγωνο) και γίνεται μεγαλύτερη σε μέγεθος από ό,τι η συνεισφορά της ακαμψίας του ελατηρίου, που σχεδόν παραμένει το ίδιο μέγεθος. Η απόσβεση της ακαμψίας αυξάνεται πάρα πολύ, αλλά γραμμικά ανάλογα με την ταχύτητα (Σχήμα 5.34).



**Σχήμα 5.34** Στις κρίσιμες ταχύτητες, η δυσκαμψία της μάζα γίνεται μεγαλύτερη από την δυσκαμψία του ελατηρίου.[1]

Με την αύξηση της συγχρονισμένης δυναμικής ακαμψίας, το εύρος ταλάντωσης του ρότορα μειώνεται και πάλι, η διαφορά φάσης συνεχίζει να αυξάνεται και σε αυτό το στάδιο, είναι κοντά στις 180°. Αυτό εξηγεί τη φύση του διαγράμματος Bode, η οποία είναι μια σχέση του εύρους και φάσης σε σύγκριση με τη ταχύτητα λειτουργίας. Η αύξηση και η μείωση του εύρους οφείλεται στις διακυμάνσεις στην σύγχρονη δυναμική ακαμψία που αλλάζει κατά τις διαφορετικές ταχύτητες του ρότορα (Σχήμα 5.35).



**Σχήμα 5.35** Πτώση του εύρους της ταλάντωσης του ρότορα[1]

### 5.2.7 Τριβές ρότορα

Οι τριβές του ρότορα παράγουν ένα φάσμα που είναι παρόμοιο με αυτό της μηχανικής χαλαρότητας. Μια τριβή μπορεί να είτε σε μερικό είτε σε ολόκληρο τον κύκλο. Αυτά παράγουν γενικά μια σειρά συχνοτήτων, και τείνουν να διεγείρουν μία ή περισσότερες φυσικές

συχνότητες. Μερικές φορές το φαινόμενο είναι παρόμοιο με αυτό της κιμωλίας στον πίνακα όπου τελικά παράγεται ένας θόρυβος στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων. Κανονικά, οι τριβές «διεγείρουν» τα ακέραια κλάσματα των υπό-αρμονικών της ταχύτητας λειτουργίας ( $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \dots, \frac{1}{n}$ ), ανάλογα με τη θέση των φυσικών συχνοτήτων του ρότορα.

Οι ακόλουθες σχέσεις βοηθούν να καθοριστεί μια τριβή. Αν  $N$  είναι η ταχύτητα της ατράκτου και  $N_c$  είναι η κρίσιμη ταχύτητα της ατράκτου, τότε η τριβή θα δημιουργήσει συχνότητες:

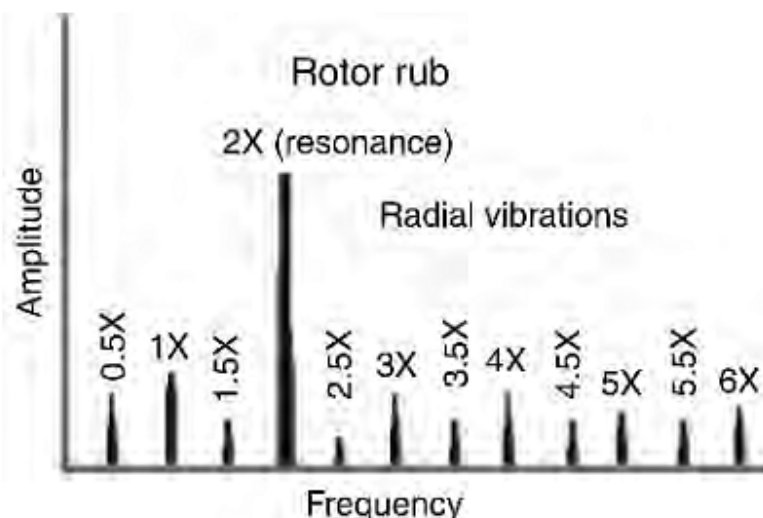
$$1 \times \text{όταν } N < N_c$$

$$\frac{1}{2} \times \text{ή } 1 \times \text{όταν } N > 2N_c$$

$$\frac{1}{3} \times, \frac{1}{2} \times \text{ή } 1 \times \text{όταν } N > 3N_c$$

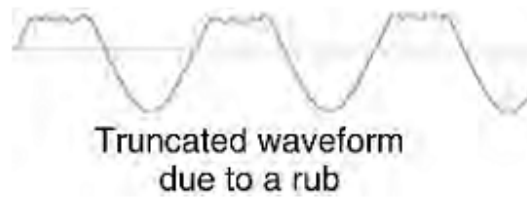
$$\frac{1}{4} \times, \frac{1}{3} \times, \frac{1}{2} \times \text{ή } 1 \times \text{όταν } N > 4N_c$$

Μια τριβή μπορεί να έχει μια σύντομη διάρκεια, αλλά μπορεί να είναι πολύ σοβαρή αν προκαλείται από την άτρακτο που αγγίζει ένα έδρανο (Σχήμα 5.36). Είναι λιγότερο σοβαρή όταν ο άξονας τρίβει ένα σφράγισμα, ή μια λεπίδα αναδευτήρα τρίβει το τοίχωμα ενός περιβλήματος ή το προστατευτικό σύζευξης πιέζει την άτρακτο.



**Σχήμα 5.36** Τριβές ρότορα[1]

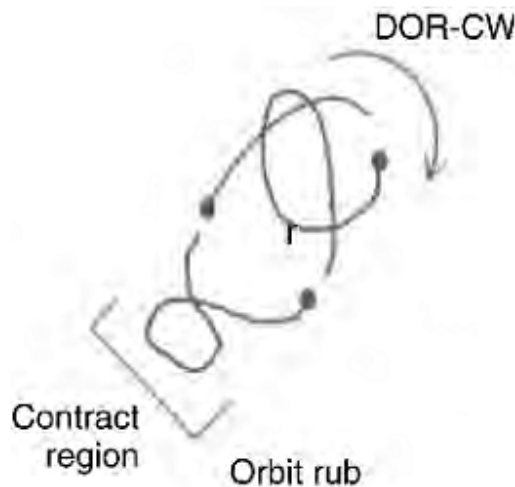
Η κυματομορφή είναι δίνει καλές ενδείξεις για μια τριβή και μπορεί να περικοπεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.37.



**Σχήμα 5.37** Περικομμένη κυματομορφή[1]

### Αναπαράσταση τροχιάς του τριψίματος ενός ρότορα

Η ανάλυση τροχιάς είναι ένα καλό εργαλείο για τον εντοπισμό των τριβών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μερική ή πλήρης τριβή μπορεί να συμβούν όταν μία περιστρεφόμενη άτρακτος έρχεται σε επαφή με σταθερά μέρη όπως σφραγίσματα ή σε μη φυσιολογικές περιπτώσεις που υπάρχουν έδρανα με βλάβες. Η τριβή κάνει την τροχιά να λάβει διάφορες μορφές. Από σχήμα 8 σε πλήρη κύκλο ή κάτι σαν την τροχιά που δείχνεται στο Σχήμα 5.38.



**Σχήμα 5.38** Τριβές τροχιάς[1]

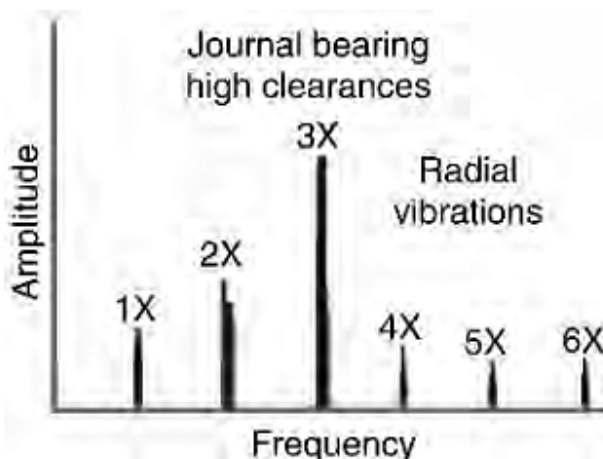
Μια μερική τριβή είναι πιο συχνή από ό, τι μια πλήρης ή μια πλήρης δακτυλιοειδή τριβή και εμφανίζεται όταν ο ρότορας αγγίζει περιστασιακά ένα σταθερό μέρος. Αυτό δημιουργεί συνήθως μία ταλάντωση  $\frac{1}{2}x$ . Η τροχιά μπορεί στη συνέχεια να μοιάζει με 8, με την διαφορά ότι μπορούμε να δούμε δύο τελείες στην τροχιά. Ένας πλήρης κύκλος τροχιάς μπορεί να είναι ενδεικτικό μιας πλήρους τριβής στην οποία ο ρότορας καλύπτει πλήρως το σφράγισμα

ή το έδρανο. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται ότι η μετάπτωση της ταλάντωσης είναι σε αναστροφή και ως εκ τούτου, πρέπει να διορθωθεί αμέσως.

### 5.2.8 Περιοδικά ρουλεμάν

#### Υψηλό διάκενο σε περιοδικά ρουλεμάν

Στα τελευταία στάδια της φθοράς του τα περιοδικά ρουλεμάν εμφανίζουν συνήθως μια ολόκληρη σειρά από αρμονικές ταχύτητας λειτουργίας, οι οποίες μπορεί να είναι μέχρι  $10 \times$  ή  $20 \times$ . Το φάσμα FFT μοιάζει πολύ με αυτό της μηχανικής χαλαρότητας. Ακόμη και μικρές ανισοροπίες ή κακή ευθυγράμμιση μπορούν να προκαλέσουν υψηλότερα επίπεδα εύρους ταλάντωσης σε σχέση με τα ρουλεμάν που έχουν κανονικό διάκενο. Αυτό οφείλεται στη μείωση της ακαμψίας του φιλμ του λαδιού εξ αιτίας του υψηλότερου διακένου (Σχήμα 5.39).



Σχήμα 5.39 Υψηλό διάκενο σε περιοδικά ρουλεμάν [1]

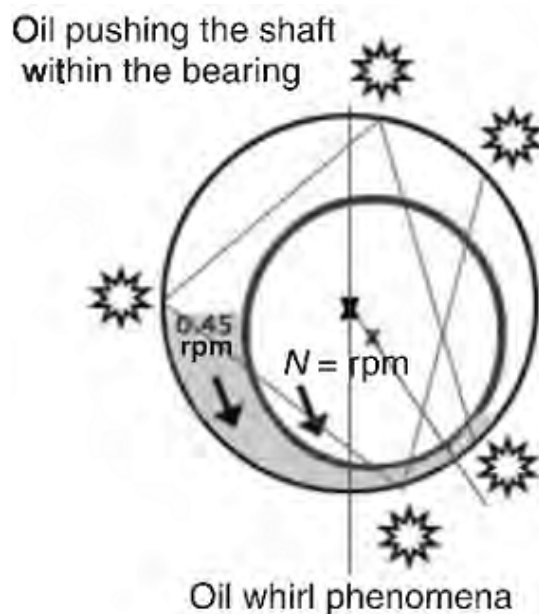
#### Δίνη του λιπαντικού

Η δίνη του λιπαντικού είναι μια ταλάντωση που διεγείρεται από το φιλμ του λιπαντικού. Είναι γνωστό ότι εμφανίζεται σε μηχανήματα που διαθέτουν πεπιεσμένη λίπανση εδράνων ολίσθησης που λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες (πέρα από την κρίσιμη ταχύτητα τους). Σκεφτείτε μία άτρακτο που περιστρέφεται μέσα σε ένα έδρανο με ταχύτητα  $N$ . Η ταχύτητα των εδράνων ολίσθησης είναι μηδέν. Το φιλμ του λιπαντικού “σφηνώνεται” μεταξύ της άτρακτου και του εδράνου και ιδανικά περιστρέφεται με ταχύτητα  $0,5 \times \text{rpm}$ . Ωστόσο, κάποιες απώλειες τριβής ωθούν το φιλμ του λιπαντικού να περιστρέφεται με  $0,42 - 0,48 \times \text{rpm}$ .

Υπό κανονικές συνθήκες, το φιλμ του λιπαντικού ωθεί τον ρότορα σε μία γωνία (5 η ώρα στο ρολόι, εάν ο άξονας περιστρέφεται αντιωρολογιακά - βλέπε σχήμα 5.40). Δημιουργείται μία

σφήνα εκκεντρική ημισελήνικου σχήματος η οποία έχει επαρκή πίεση ώστε να κρατήσει το ρότορα στην σηκωμένη (υψηλή) θέση. Υπό κανονικές συνθήκες, το σύστημα είναι σε ισορροπία και δεν υπάρχουν ταλαντώσεις

Ορισμένες συνθήκες θα έχουν την τάση να δημιουργήσουν μία πίεση στη σφήνα του φίλμ του λαδιού πολύ υψηλότερη από ότι απαιτείται για να κρατήσει μόνο την άτρακτο. Αυτές οι συνθήκες μπορούν να προκαλέσουν μια αύξηση στην φθορά των εδράνων ολίσθησης ως αποτέλεσμα η άτρακτος να έχει χαμηλότερη εκκεντρότητα (το κέντρο της άτρακτος είναι κοντά στο κέντρο του εδράνου ολίσθησης) προκαλώντας μείωση στην δυσκαμψία, στην πίεση του λαδιού ή στην πτώση της θερμοκρασίας του. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το φίλμ του λαδιού θα ωθήσει τον ρότορα σε μια άλλη θέση στην άτρακτο. Η διαδικασία συνεχίζεται ξανά και ξανά και η άτρακτος συνεχίζει να πιέζεται γύρω από το εσωτερικό του εδράνου ολίσθησης. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται δίνη του λιπαντικού - λαδιού. Αυτή η δίνη είναι εγγενώς ασταθής, δεδομένου ότι αυξάνει τις φυγόκεντρες δυνάμεις που θα αυξήσουν τις δυνάμεις της δίνης.



**Σχήμα 5.40** Η δίνη του λαδιού[1]

Η δίνη του λαδιού μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ή να εξαλειφθεί αλλάζοντας την ταχύτητα του λαδιού, την πίεση της λίπανσης, και τις εξωτερικές προ-φορτίσεις. Η αστάθεια της δίνης του λαδιού εμφανίζεται στις  $0.42 - 0,48 \times \text{rpm}$  και είναι συχνά αρκετά σοβαρή. Θεωρείται υπερβολική όταν το εύρος της μετατόπισης υπερβαίνει το 50% των εδράσεων των διάκενων.

Η δίνη του λαδιού είναι ουσιαστικά μία υπό-σύγχρονη αστάθεια του ρευστού. Όταν παρατηρείται στην τροχιά του τομέα, δείχνεται με τις δύο χαρακτηριστικές τελείες. Όταν παρατηρηθεί με έναν παλμογράφο, οι δύο τελείες δεν εμφανίζονται σταθερές, αλλά φαίνεται ότι περιστρέφονται. Αυτό συμβαίνει επειδή η συχνότητα είναι οριακά μικρότερη από  $0,5 \times$ .



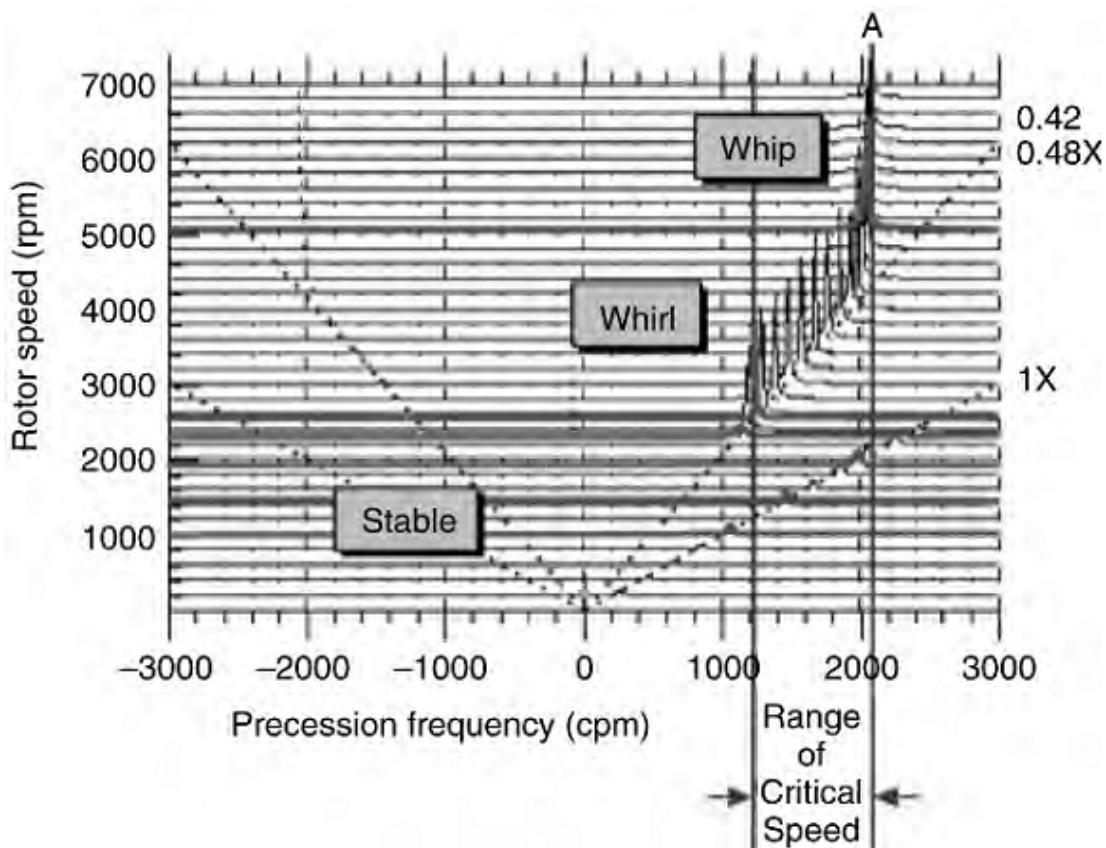
Ένα φαινόμενο δίνης λαδιού δημιουργεί μια μετάπτωση ταλάντωσης, η οποία είναι πάντα προς τα εμπρός (Σχήμα 5.41).



**Σχήμα 5.41** Αναπαράσταση τροχιάς μιας δίνης λαδιού[1]

### **Μαστίγιο λαδιού**

Η δίνη λαδιού μπορεί να προκληθεί όταν η άτρακτος δεν έχει επαρκή ποσότητα λιπαντικού, και μπορεί να γίνει ασταθής όταν η συχνότητα της δίνης συμπίπτει με την κρίσιμη ταχύτητα. Η ειδική αυτή σύμπτωση του συντονισμού της ατράκτου σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της συχνότητας της δίνης του λαδιού σε μια πιο σοβαρή μορφή της ονομάζεται μαστίγιο λαδιού. Η ταχύτητα της δίνης είναι ίδια με την κρίσιμη ταχύτητα και δεν θα εξαφανιστεί ακόμη και αν το μηχάνημα λειτουργεί σε όλο και υψηλότερες ταχύτητες (Σχήμα 5.42).



**Σχήμα 5.42** Δίνη λαδιού όπως φαίνεται σε πλήρες φάσμα - σημειώστε ότι η συχνότητα του λαδιού «Α» έχει κλειδωθεί ακόμα και μετά της αύξηση της ταχύτητας του ρότορα.[1]

Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν ο ρότορας περνάει με την κρίσιμη ταχύτητά του και η βλάβη που επιφέρει είναι ιδιαίτερα καταστροφική. Η μετάπτωση των ταλαντώσεων σε αυτή την περίπτωση στην μπροστινή κατεύθυνση, αλλά κάποια αντίστροφα 1 x και υπό-σύγχρονες συνιστώσες είναι παρόντες λόγω της ανισορροπίας (αλλαγές στην απόκριση όταν αλλάζουν οι συνθήκες λειτουργίας) στην ακαμψία του εδράνου.

Η περίοδος αυτή του αυτό διεγερμένου ελαττώματος μπορεί ή δεν μπορεί, να είναι αρμονικά συνδεδεμένη με τη ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου. Όταν δεν σχετίζεται αρμονικά, οι κουκίδες φαίνεται να είναι κινούνται τυχαία όπως φαίνεται στο σχήμα 5.43. Όταν είναι αρμονικά συνδεδεμένες εμφανίζονται στάσιμες.



**Σχήμα 5.43** Αναπαράσταση τροχιάς μιας δίνης λαδιού[1]

### Ξηρά δίνη

Μερικές φορές, η ανεπαρκής ή ακατάλληλη λίπανση μπορεί επίσης να προκαλέσει ταλαντώσεις σε ένα έδρανο. Αυτό συμβαίνει επειδή η έλλειψη λίπανσης καταλήγει σε τριβή μεταξύ της ατράκτου και του εδράνου. Η δύναμη τριβής τείνει επίσης να διεγείρει άλλα μέρη της μηχανής. Αυτή η ταλάντωση είναι παρόμοια με την εμπειρία της κινείται ενός υγρού δαχτύλου πάνω από ένα υαλοπίνακα. Η ταλάντωση που προκαλείται από το φαινόμενο αυτό είναι γνωστή ως ξηρά δίνη. Η ταλάντωση παραμένει γενικά σε υψηλές συχνότητες, και οι μπορεί να μην υπάρχουν αρμονικές συχνότητες. Η φάση δεν παρέχει καμία ουσιαστική πληροφορία.

### 5.2.9 Έδρανα κύλισης

Ένα κυλιόμενο στοιχείο αποτελείται από την εσωτερική και την εξωτερική στεφάνη, ένα περίβλημα και τα στοιχεία κύλισης. Οι βλάβες μπορεί να συμβούν σε οποιοδήποτε από τα τμήματα του εδράνου και θα προκαλέσουν υψηλής συχνότητας ταλαντώσεις. Στην πραγματικότητα, η σοβαρότητα της φθοράς αλλάζει συνεχώς το μοτίβο ταλάντωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί το μέρος του εδράνου που είναι ελαττωματικό λόγω των συγκεκριμένων συχνοτήτων ταλάντωσης που υπάρχουν. Οι βλάβες σε υποδοχές στεφάνης και κυλιόμενα στοιχεία ανιχνεύονται εύκολα. Ωστόσο, το ίδιο δεν μπορεί να ειπωθεί για τις βλάβες που εμφανίζονται στους κλωβούς του περιβλήματος. Αν και υπάρχουν πολλές διαθέσιμες τεχνικές για την ανίχνευση των βλαβών αυτών, δεν υπάρχουν καθιερωμένες τεχνικές για να προβλέψουν τότε η βλάβη θα μετατραπεί σε μια λειτουργική αστοχία.

Σε ένα προηγούμενο θέμα που ασχολείται με την περικάλυψη / αναδιαμόρφωση, είδαμε πώς τα ελαττώματα των εδράνων δημιουργούν τόσο τη συχνότητα των ελαττωμάτων καθώς και

τους τυχαίους ήχους ταλάντωσης που είναι οι συχνότητες συντονισμού των μερών του εδράνου.

Οι συχνότητες των ελαττωμάτων των εδράνων δεν είναι ολοκληρωτικά αρμονικές στην ταχύτητα λειτουργίας. Ωστόσο, οι παρακάτω τύποι χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις συχνότητες αυτές. Υπάρχει επίσης μια βάση δεδομένων που διατίθεται σε μορφή λογισμικού που παρέχει άμεσα τις τιμές κατά την είσοδο του απαιτούμενου αριθμού των εδράνων.

$$BPFI = \frac{Nb}{2} \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \cos \theta\right) \times \text{rpm}$$

$$BPFO = \frac{Nb}{2} \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cos \theta\right) \times \text{rpm}$$

$$FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cos \theta\right) \times \text{rpm}$$

$$BSF = \frac{Pd}{2Bd} \left[1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right)^2 (\cos \theta)^2\right] \times \text{rpm}$$

Nb = Number of Balls or Rollers

Bd = Ball / Roller diameter (inch or mm)

Pd = Bearing pitch diameter (inch or mm)

$\theta$  = Contact angle in degrees

BPFI = Ball pass frequency – Inner

BPFO = Ball pass frequency – Outer

FTF = Fundamental train frequency (Cage)

BSF = Ball spin frequency (rolling element)

[1]

Είναι πολύ ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι σε ένα φάσμα FFT, βρίσκουμε τις συχνότητες των ελαττωμάτων τόσο της εσωτερικής όσο και της εξωτερικής στεφάνης. Αν αυτές οι συχνότητες προστεθούν και, στη συνέχεια, διαιρεθεί το αποτέλεσμα με τις στροφές (rpm) του μηχανήματος – [(BPFI + BPFO) / rpm], η απάντηση θα δώσει τον αριθμό των στοιχείων κυλίσεως.

Η επιδείνωση της κατάστασης των εδράνων εξελίσσεται σε τέσσερα στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο, παρατηρείται μόνο μία ταλάντωση υψηλής συχνότητας. Στο επόμενο στάδιο, παρατηρούνται συχνότητες συντονισμού των εδράνων. Κατά τη διάρκεια του τρίτου σταδίου, μπορεί να παρατηρηθούν διακριτές συχνότητες και στο τελικό στάδιο παρατηρείται τυχαίος θόρυβος υψηλής συχνότητας, ο οποίος συνεχίζει να διευρύνεται και να αυξάνεται με μέσο εύρος με της αυξημένης βαρύτητας σφάλμα.

## 1<sup>ο</sup> Στάδιο των ελαττωμάτων των εδράνων

Το φάσμα FFT για τα ελαττώματα των εδράνων μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις ζώνες (A, B, C και D), όπου θα σημειωθούν οι αλλαγές καθώς εξελίσσεται η φθορά των εδράνων. Οι ζώνες αυτές περιγράφονται ως:

Ζώνη A: στροφές μηχανής και αρμονικές ζώνες

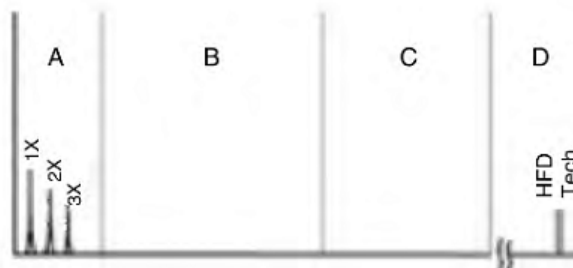
Ζώνη B: ζώνη συχνοτήτων των ελαττωμάτων των εδράνων (5-30 κrpm)

Ζώνη Γ: ζώνη φυσικών συχνοτήτων των μερών των εδράνων (30-120 κrpm)

Ζώνη Δ: ζώνη ανίχνευσης υψηλής συχνότητας (HFD) (πέραν των 120 κrpm).

Οι πρώτες ενδείξεις της φθοράς των εδράνων εμφανίζονται σε συχνότητα υπερήχων που κυμαίνεται από 20-60 kHz (120-360 κrpm). Αυτές είναι συχνότητες που αξιολογούνται από τεχνικές ανίχνευσης υψηλής συχνότητας, όπως gSE (Spike Energy), SEE, PeakVue, SPM και άλλες.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.44, οι υποδοχές στεφάνης ή τα κυλιόμενα στοιχεία του εδράνου δεν έχουν κανένα ορατό ελάττωμα κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου. Οι υποδοχές στεφάνης μπορεί να έχουν την λάμψη ενός νέου εδράνου και μπορεί να φαίνονται κάπως θαμπά και γκρι.



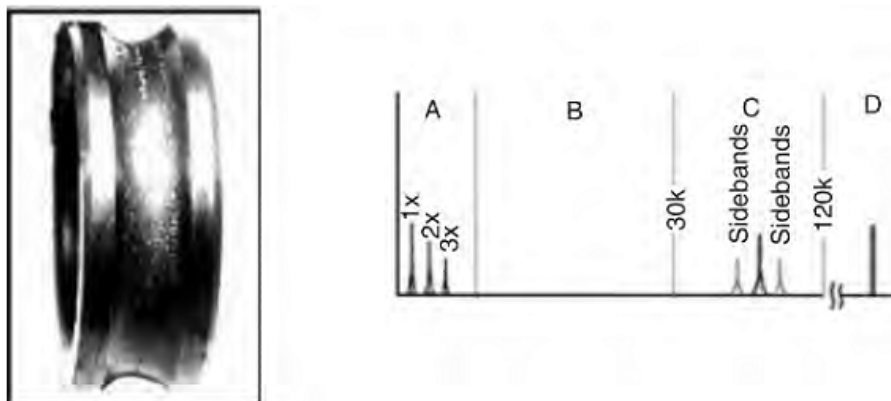
**Σχήμα 5.44** Μικρές ανωμαλίες στις υποδοχές της στεφάνης του εδράνου[1]

## 2° Στάδιο των ελαττωμάτων των εδράνων

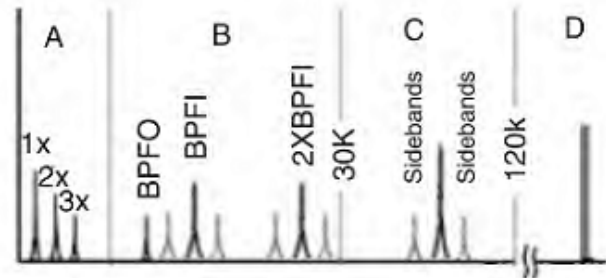
Στο επόμενο στάδιο (Σχήμα 5.45), οι υποδοχές της στεφάνης που έχουν υποστεί κόπωση αρχίζουν να αναπτύσσουν λάκκους. Τα στοιχεία κύλισης που διέρχονται πάνω από αυτούς τους λάκκους αρχίζουν να παράγουν κουδούνισμα ή τις φυσικές συχνότητες των εδράνων που εμφανίζονται κυρίως στην περιοχή 30-120 kcpm. Ανάλογα με τη σοβαρότητα, είναι πιθανό οι συχνότητες πλευρικής ζώνης (συχνότητα εδράνου  $\pm$  rpm) να εμφανίζονται πάνω και κάτω από τη κορυφή της φυσικής συχνότητας στο τέλος του 2° σταδίου. Οι τεχνικές ανίχνευσης υψηλής συχνότητας (HFD) μπορεί να διπλασιαστούν σε εύρος σε σχέση με τις μετρήσεις κατά το πρώτο στάδιο.

## 3° Στάδιο των ελαττωμάτων των εδράνων

Κατά το τρίτο στάδιο (Σχήμα 5.46), οι διακριτές συχνότητες του εδράνου και οι αρμονικές είναι ορατές στο FFT. Αυτές μπορεί να εμφανίζονται σε έναν αριθμό πλευρικών ζωνών. Η φθορά είναι συνήθως τώρα ορατή στο έδρανο και μπορεί να επεκταθεί μέχρι την άκρη της υποδοχής της στεφάνης. Οι λάκκοι από το προηγούμενο στάδιο τώρα εξελίσσονται σε μεγαλύτερους λάκκους και αυξάνεται ο αριθμός τους. Όταν οποιαδήποτε συχνότητα ελαττώματος του εδράνου ή των αρμονικών του συνοδεύεται από καλοσχηματισμένες πλευρικές ζώνες, οι συνιστώσες του HFD έχουν και πάλι σχεδόν διπλασιαστεί σε σύγκριση με το τρίτο στάδιο. Σε αυτό το στάδιο συνήθως συνιστάται να αντικατασταθεί το έδρανο. Ορισμένες μελέτες δείχνουν ότι μετά το τρίτο στάδιο, το υπόλοιπο της ζωής εδράνου μπορεί να είναι 1 ώρα έως 1% του μέσου όρου ζωής του.



**Σχήμα 5.45** Μεγαλύτερη φθορά υπό μορφή λάκκων[1]

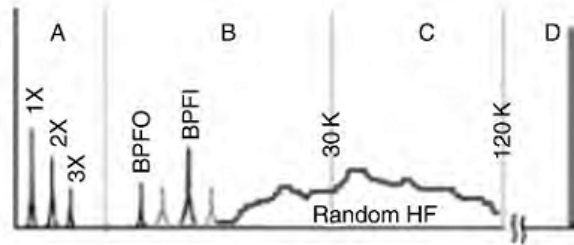


**Σχήμα 5.46** Η φθορά είναι πλέον ορατή πάνω στο πλάτος του εδράνου κύλισης[1]

#### 4<sup>ο</sup> Στάδιο των ελαττωμάτων των εδράνων

Στην τελική φάση (σχήμα 5,47), οι λάκκοι συγχωνεύονται μεταξύ τους, δημιουργώντας τραχιές διαδρομές και των θρυμματισμό των υποδοχών της στεφάνης ή και των στοιχείων κύλισης. Τα έδρανα κύλισης βρίσκονται σε σοβαρή κατάσταση από άποψη φθοράς. Αυξάνεται ακόμη και το εύρος του συστατικού  $1 \times \text{rpm}$ . Καθώς μεγαλώνει, μπορεί επίσης να προκαλέσει την ανάπτυξη πολλών αρμονικών ταχυτήτων λειτουργίας. Μπορεί να απεικονιστούν ως υψηλότερα διάκενα στα έδρανα επιτρέποντας υψηλότερη μετατόπιση στον ρότορα.

Οι διακριτές συχνότητες των ελαττωμάτων και οι φυσικές συχνότητες των συστατικών των εδράνων στη πραγματικότητα αρχίζουν να συγχωνεύονται σε μια τυχαία, ευρυζωνική θέση υψηλής συχνότητας ‘noise floor’. Αρχικά, το μέσο εύρος του ευρύ θορύβου μπορεί να είναι μεγάλο. Ωστόσο, αυτό θα πέσει και το εύρος του θορύβου θα αυξηθεί. Στο τελικό στάδιο, το εύρος θα αυξηθεί και πάλι και η διάρκεια του θορύβου θα αυξηθεί επίσης.



**Σχήμα 5.47** Κατεστραμμένα έδρανα κύλισης στο τελικό στάδιο της φθοράς[1]

Ωστόσο, τα εύρη υψηλής συχνότητας του «πατώματος θορύβου» και μερικά από τα HFD δύναται

να μειωθούν (λόγο της περαιτέρω φθοράς των λάκκων που γίνονται επίπεδοι) , αλλά μόλις πριν την αστοχία το σπάικ ενέργειας θα αυξηθεί σε ακραία εύρη.

Από εκείνη την στιγμή, το έδρανο θα ταλαντώνεται υπερβολικά, θα είναι ζεστό και θα κάνει πολύ θόρυβο. Αν επιτραπεί να λειτουργήσει περισσότερο, το περίβλημα θα σπάσει και τα στοιχεία κύλισης θα είναι χαλαρά. Τα στοιχεία στη συνέχεια θα κάνουν ελεύθερες κινήσεις και θα συγκολλούνται το ένα με το άλλο, έως ότου το μηχάνημα θα σταματήσει λόγω υπερφόρτωσης. Κατά πάσα πιθανότητα, θα υπάρξει σοβαρή βλάβη στην περιοχή της ατράκτου στην περιοχή του εδράνου.

### 5.2.10 Ελαττώματα γραναζιών

Ένα κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα κομμάτι περιστροφικού εξοπλισμού που μπορεί να προκαλέσει τις κανονικές χαμηλών συχνοτήτων αρμονικές στο φάσμα ταλάντωσης, αλλά δείχνει επίσης μια μεγάλη δραστηριότητα στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων που οφείλεται στα «δόντια» του γραναζιού και φέρει επιπτώσεις. Το φάσμα του κάθε κιβωτίου ταχυτήτων δείχνει το 1 x και 2 x rpm, μαζί με την συχνότητα της εμπλοκής του γραναζιού (GMF). Η GMF υπολογίζεται από το γινόμενο του αριθμού των «δοντιών» ενός πινιόν ή ενός γραναζιού, και της αντίστοιχης ταχύτητας λειτουργίας του:

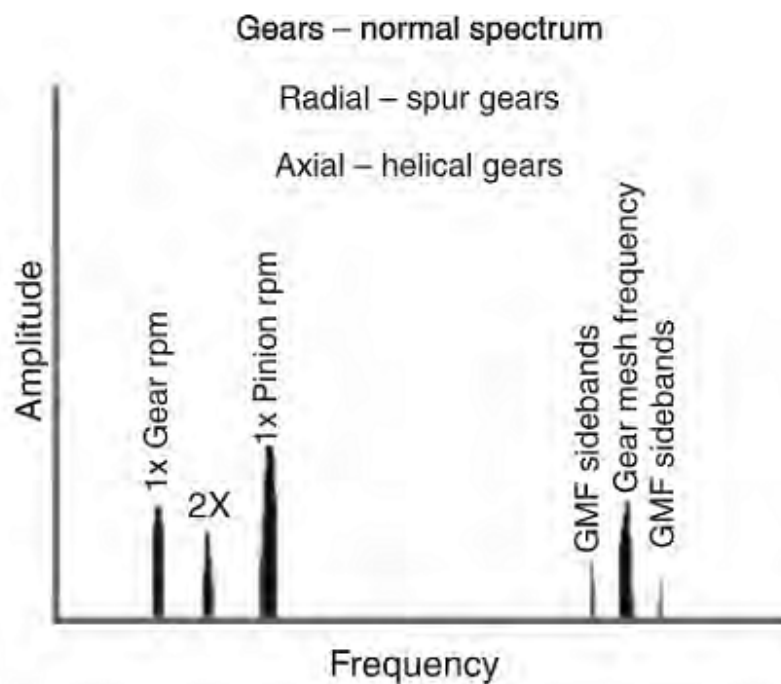
$$GMF = \text{αριθμός δοντιών γραναζιού} \times \text{rpm γραναζιού}$$

Η GMF θα έχει πλευρικές ζώνες ταχυτήτων λειτουργίας σχετικές με την ταχύτητα της ατράκτου στην οποία είναι τοποθετημένο το γρανάτζι. Τα φάσματα των γραναζιών περιλαμβάνουν ένα εύρος συχνοτήτων λόγω των διαφορετικών GMF και των αρμονικών τους. Όλες οι κορυφές έχουν χαμηλά εύρη και αν το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ακόμα σε καλή κατάσταση, δεν διεγείρονται οι φυσικές συχνότητες των γραναζιών . Οι πλευρικές ζώνες στην GMF και τις

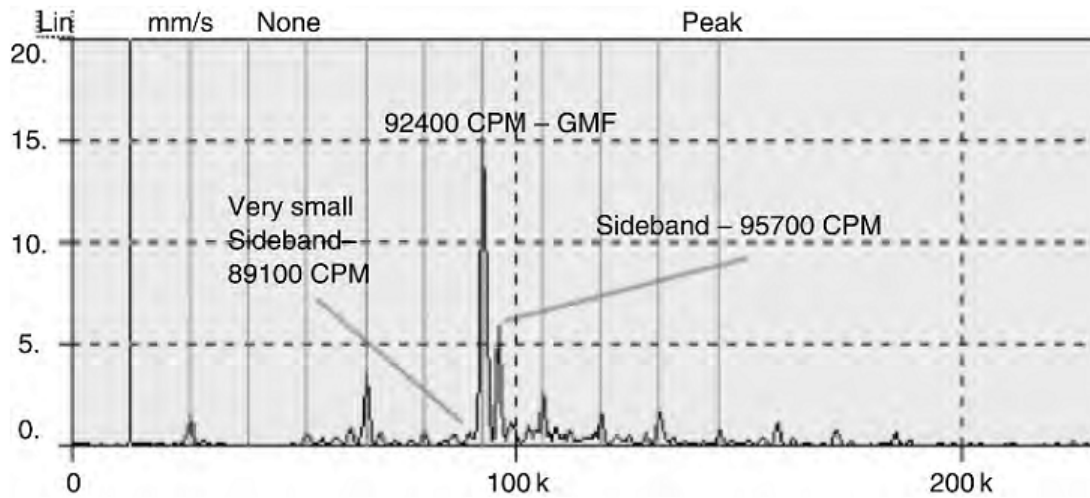


αρμονικές είναι αρκετά κοινές. Περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τα σφάλματα του κιβωτίου ταχυτήτων (Σχήμα 5.48).

Η φθορά των δοντιών του γραναζιού και η σπασμωδική κίνηση μπορεί να διεγείρουν τις φυσικές συχνότητες των γραναζιών, μαζί με τις συχνότητες εμπλοκής και τις πλευρικές ζώνες τους. Η ανάλυση της ενίσχυσης σήματος επιτρέπει τη συλλογή των ταλαντώσεων από μία άτρακτο μέσα σε στο κιβώτιο. Η σαφματική ανάλυση είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο για την ανάλυση της ισχύος σε κάθε οικογένεια ζωνών. Η χρήση της σαφματικής ανάλυσης, σε συνδυασμό με την ανάλυση σειράς και του μέσου όρου του πεδίου του χρόνου μπορεί να εξαλείψει την «κηλίδωση» από τις πολλές συνιστώσες της συχνότητας λόγω των διακυμάνσεων της ταχύτητας (Σχήμα 5.49). Κατά γενικό κανόνα, κατανεμημένα σφάλματα, όπως η εκκεντρικότητα και η κακή ευθυγράμμιση των γραναζιών παράγουν αρμονικές και πλευρικές ζώνες και που έχουν μεγάλο εύρος που είναι κοντά στην συχνότητα εμπλοκής των δοντιών. Οι εντοπισμένες βλάβες, όπως ραγισμένα δόντια παράγουν πλευρικές ζώνες που εξαπλώνονται ευρύτερα σε όλο το φάσμα.



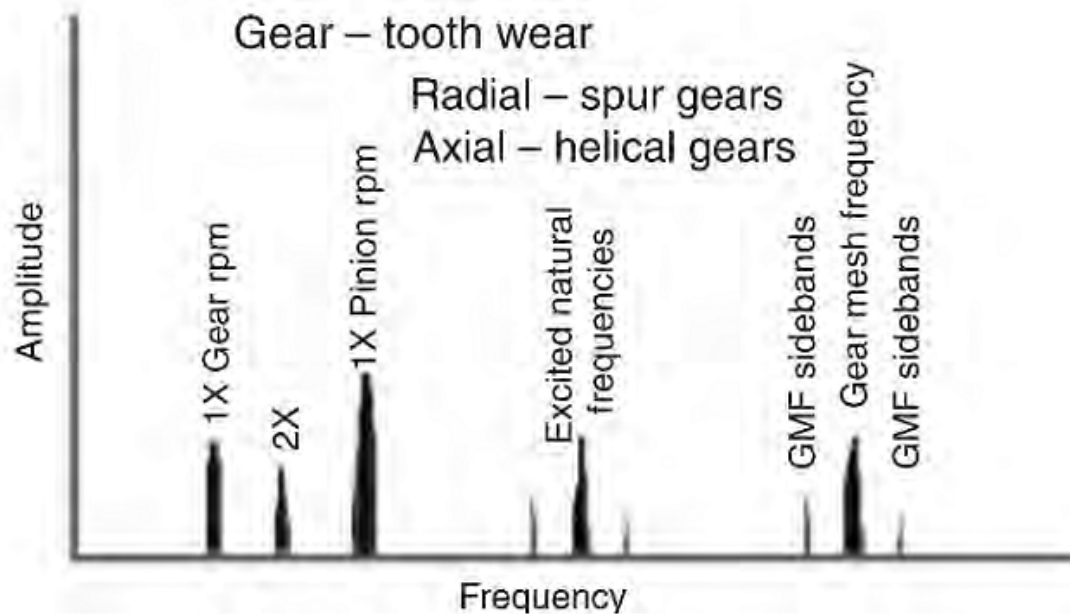
**Σχήμα 5.48** Γράφημα του φάσματος του κιβωτίου ταχυτήτων[1]



Σχήμα 5.49 Φάσμα FFT από ένα θορυβώδες κιβώτιο ταχυτήτων με πινιόν που έχει 28 δόντια και περιστρέφεται με 3300 rpm[1]

### Φθορά των δοντιών του γραναζιού

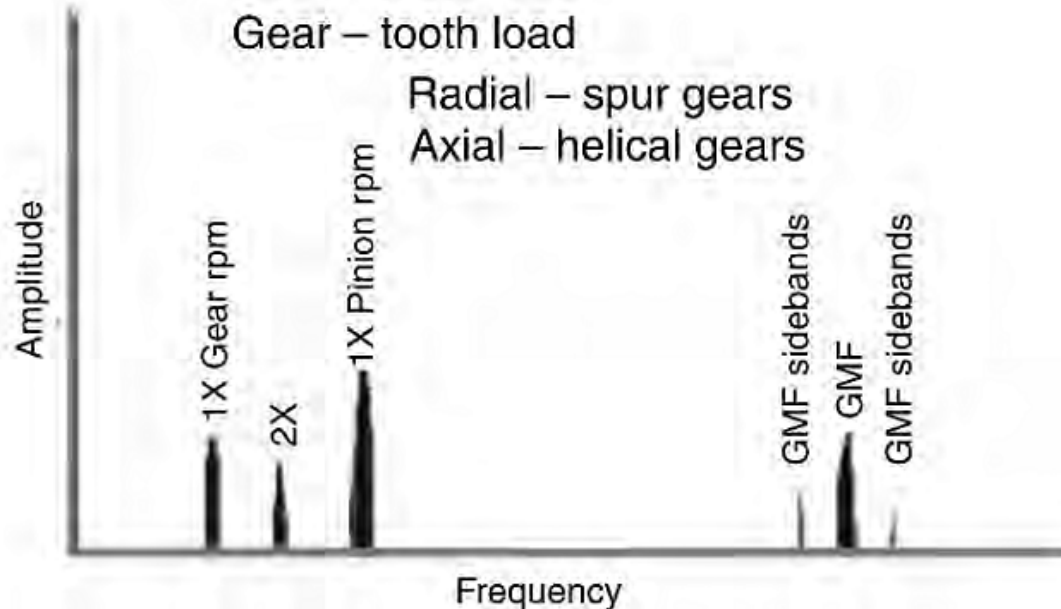
Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της φθοράς των δοντιών του γραναζιού είναι ότι οι φυσικές συχνότητες του γραναζιού διεγείρονται με πλευρικές ζώνες γύρω τους. Αυτά είναι τοποθετημένα με την ταχύτητα λειτουργίας του χαλασμένου γραναζιού. Η GMF και μπορεί και δεν μπορεί να αλλάξει σε εύρος, αν και οι πλευρικές ζώνες υψηλού εύρους γύρω από το GMF συνήθως συμβαίνουν όταν υπάρχει φθορά. Οι πλευρικές ζώνες είναι καλύτερος δείκτης φθοράς από την ίδια την GMF (Σχήμα 5.50).



*Σχήμα 5.50 Φθορά των δοντιών[1]*

### **Φορτίο των δοντιών του γραναζιού**

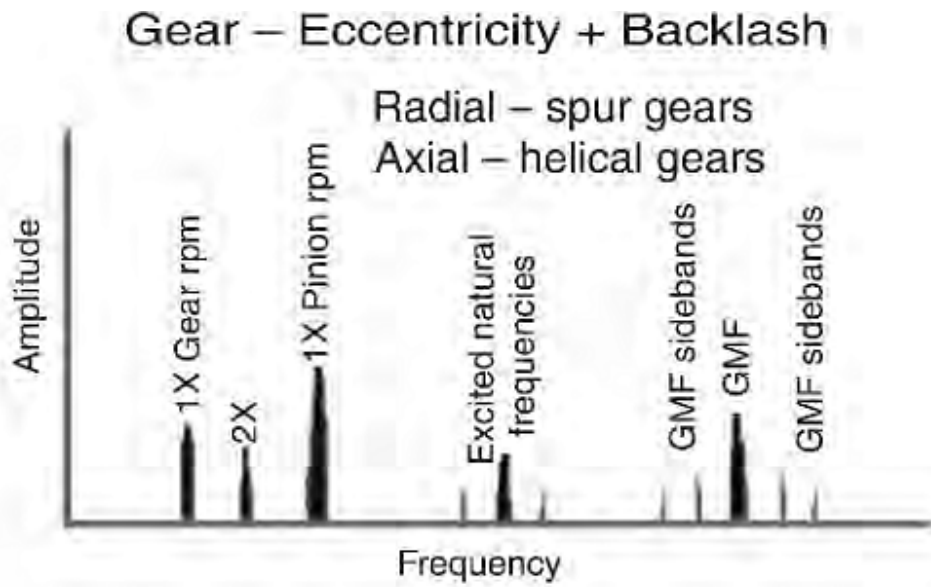
Καθώς αυξάνεται το φορτίο σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων, το εύρος GMF μπορεί επίσης να αυξηθεί. Υψηλά εύρη GMF δεν υποδεικνύουν απαραίτητα πρόβλημα, ιδιαίτερα αν οι συχνότητες πλευρικών ζωνών παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα και δεν διεγείρονται οι φυσικές συχνότητες γραναζιών. Συνιστάται ότι η ανάλυση ταλάντωσης σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων πρέπει να διεξάγεται όταν το κιβώτιο ταχυτήτων μεταδίδει τη μέγιστη ισχύ (Σχήμα 5.51)



**Σχήμα 5.51** Φορτίο των δοντιών[1]

### **Εκκεντρότητα γραναζιών και σπασμωδική κίνηση**

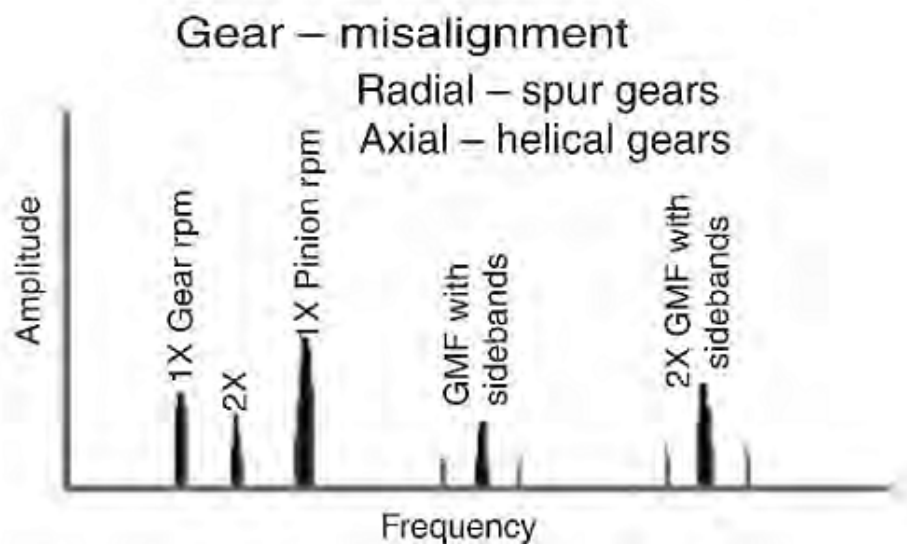
Όταν υπάρχουν αρκετές πλευρικές ζώνες υψηλού εύρους γύρω από την GMF συχνά υποδεικνύουν εκκεντρότητα των γραναζιών, η σπασμωδική κίνηση ή οι μη παράλληλες άτρακτοι. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η περιστροφή του ενός γραναζιού μπορεί να κάνει το εύρος ταλάντωσης του γραναζιού να διαμορφώνεται με την ταχύτητα λειτουργίας του άλλου. Αυτό μπορεί να φανεί στην κυματομορφή του πεδίου του χρόνου. Η απόσταση των συχνοτήτων των πλευρικών ζωνών υποδεικνύει το προβληματικό γρανάζι. Η ακατάλληλη σπασμωδική κίνηση συνήθως διεγείρει τη GMF και τις φυσικές συχνότητες των γραναζιών. Και τα δύο θα έχουν πλευρικές ζώνες στο  $1 \times \text{rpm}$ . Αν το πρόβλημα είναι η σπασμωδική κίνηση τα εύρη GMF συχνά μειώνονται με την αύξηση του φορτίου (Σχήμα 5.52).



**Σχήμα 5.52** Εκκεντρότητα γραναζιών και σπασμωδική κίνηση[1]

#### «Κακή» ευθυγράμμιση γραναζιών

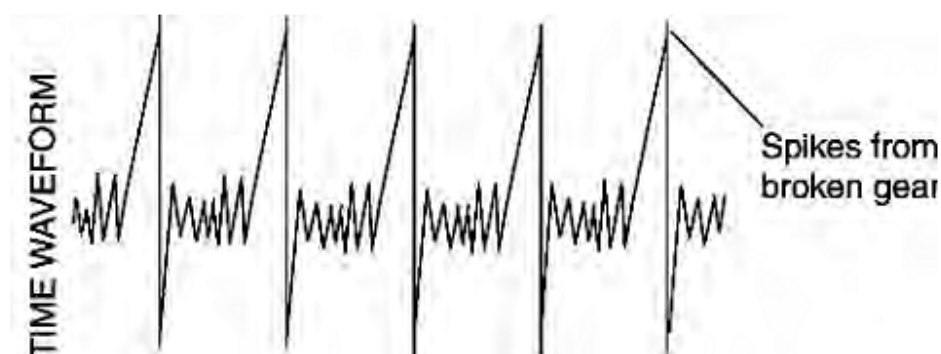
Η κακή ευθυγράμμιση γραναζιών διεγείρει σχεδόν πάντα τις δεύτερης σειράς ή ανώτερης αρμονικές GMF, οι οποίες έχουν πλευρικές ζώνες σε απόσταση από την ταχύτητα λειτουργίας. Συχνά παρουσιάζουν μόνο μικρά εύρη  $1 \times \text{GMF}$ , αλλά και πολύ υψηλότερα επίπεδα  $2 \times$  ή  $3 \times \text{GMF}$ . Είναι σημαντικό να οριστεί η F-max του φάσματος FFT για περισσότερο από  $3 \times \text{GMF}$  (Σχήμα 5.53).



**Σχήμα 5.53** «Κακή» ευθυγράμμιση γραναζιών[1]

## Γρανάζια – ραγισμένο ή σπασμένο «δόντι»

Ένα ραγισμένο ή σπασμένο δόντι γραναζιού δημιουργεί μεγάλο εύρος στις  $1 \times \text{rpm}$  του γραναζιού, καθώς και διεγείρει τη φυσική συχνότητα γραναζιών με πλευρικές ζώνες σε απόσταση με την ταχύτητα λειτουργίας του. Είναι καλύτερα ανιχνεύσιμα στο πεδίο του χρόνου, το οποίο θα δείξει μια έντονη ακίδα ενέργειας κάθε φορά που το «προβληματικό δόντι» προσπαθεί να εμπλακεί με άλλα δόντια στο άλλο γρανάτζι. Ο χρόνος μεταξύ των κρούσεων αντιστοιχεί στο  $1 / \text{ταχύτητα του γραναζιού με το σπασμένο δόντι}$ . Το εύρος των κρούσεων στην κυματομορφή του χρόνου συχνά θα είναι πολύ υψηλότερο από εκείνο του  $1 \times \text{rpm}$  γραναζιών στο φάσμα FFT (Σχήμα 5.54).



Σχήμα 5.54 Ραγισμένο – σπασμένο δόντι[1]

## Γρανάζια – προβλήματα εμπλοκής μεταξύ προβληματικών δοντιών

Η συχνότητα εμπλοκής προβληματικών δοντιών είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για την ανίχνευση σφαλμάτων τόσο στο γρανάτζι όσο και στο πινιόν που θα μπορούσαν να έχουν συμβεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής ή λόγω κακής διαχείρισης. Μπορεί να προκαλέσει αρκετά υψηλές ταλαντώσεις, αλλά δεδομένου ότι λαμβάνει χώρα σε χαμηλές συχνότητες, κυρίως λιγότερο από  $600 \text{ rpm}$ , συχνά δεν ανιχνεύεται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης ταλαντώσεων. Η συχνότητα αυτή υπολογίζεται με:

$$\text{Συχνότητα εμπλοκής προβληματικών γραναζιών} = \frac{(\text{GMF} \times N)}{[(\text{αριθμός δοντιών πινιόν}) \times (\text{αριθμός δοντιών γραναζιού})]} =$$

Στην παραπάνω εξίσωση, ο  $N$  είναι γνωστός ως παράγοντας φάσης συναρμολόγησης, που αναφέρεται επίσης ως το ελάχιστο κοινό ακέραιο πολλαπλάσιο μεταξύ του αριθμού των οδόντων του πινιόν και του γραναζιών. Αυτή η συχνότητα των δοντιών είναι συνήθως πολύ χαμηλή.

Για παράγοντες φάσης συναρμολόγησης ( $N > 1$ ), κάθε δόντι του γραναζιού δεν θα εμπλέκεται με κάθε δόντι του πινιόν. Εάν  $N = 3$ , οι αριθμοί δοντιών 1, 4, 7, κ.λπ. θα εμπλέκονται μεταξύ

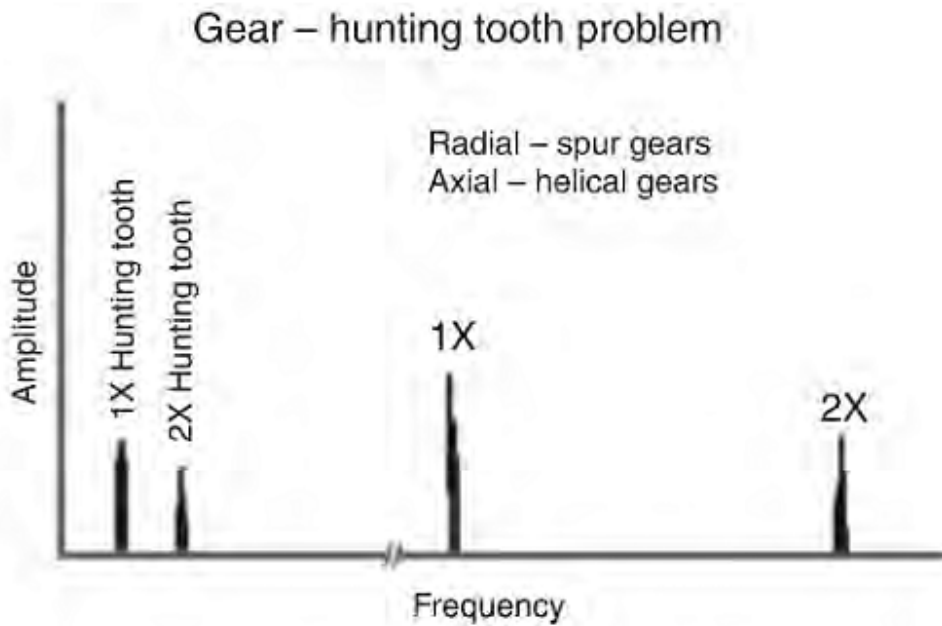
τους (ωστόσο, το δόντι 1του γραναζιού δεν θα εμπλέκεται με τα δόντια 2 ή 3 του πινιόν . Αντ' αυτού, θα εμπλέκεται με τα 1, 4, 7, κ.λπ.). Για παράδειγμα, ένα γρανάζι με 98 δόντια που λειτουργεί στις 5528 rpm και εμπλέκεται με ένα πινιόν με 65 δόντια και λειτουργεί στις 8334 rpm. Ο παράγοντας φάσης συναρμολόγησης είναι  $N = 1$ . Η συχνότητα (Fht) μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$Fht = \frac{(98 \times 5528) \times 1}{98 \times 65} = 85 \text{ cpm (1.42 Hz)}$$

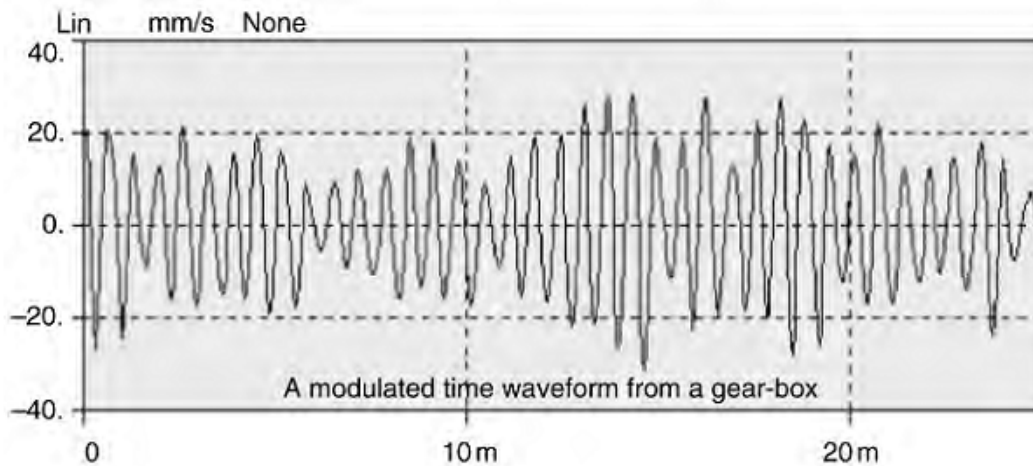
Ένας άλλος τύπος είναι η διαίρεση των rpm του γραναζιού με τον αριθμό των δοντιών του πινιόν ( $5528/65 = 85 \text{ cpm}$ ). Αυτή είναι μια ειδική περίπτωση και ισχύει για ένα συνδυασμό εμπλεκόμενων προβληματικών δοντιών μόνο όταν το  $N = 1$ .

Αν υπάρχει πρόβλημα επανάληψης συχνότητας του δόντι (Σχήμα 5.55), αυτό μπορεί κανείς συνήθως να ακούσει έναν χαρακτηριστικό ήχο, δεδομένου ότι είναι συχνότητα παλμών χτύπου. Ένα σετ γραναζιών με πρόβλημα επανάληψης συχνότητας των δοντιών συνήθως εκπέμπει ένα έντονο λεπτό ήχο από το κινούμενο μέρος. Ο ρυθμός επανάληψης του μπορεί συχνά να καθοριστεί με την απλή καταμέτρηση του ήχου χρησιμοποιώντας ένα χρονόμετρο. Το μέγιστο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται όταν το ελαττωματικό δόντι του πινιόν και του γραναζιού εμπλέκονται ταυτόχρονα (σε ορισμένους κινητήριους, αυτό μπορεί να συμβεί μία φορά κάθε 10 ή 20 στροφές, ανάλογα με τον τύπο Fht).

Τα κιβώτια ταχυτήτων μπορεί να δημιουργήσουν συνωστισμένα και πολύπλοκα φάσματα FFT με πολλές ασυνήθιστες και αδιευκρίνιστες συχνότητες. Μια άλλη ασυνήθιστη συχνότητα που αντιμετωπίζεται στο κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα υπό-πολλαπλάσιο της συχνότητας εμπλοκής των γραναζιών. Αυτή η ταλάντωση είναι γενικά το αποτέλεσμα μίας εκκεντρικής κακής ευθυγράμμισης ατράκτου γραναζιού ή, ενδεχομένως, μία λυγισμένη άτρακτος. Κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στα διάκενα των δοντιών για κάθε περιστροφή του οδοντωτού τροχού. Ως αποτέλεσμα, το εύρος της συχνότητας εμπλοκής των γραναζιών μπορεί να εμφανίζεται ως τροποποιημένο όπως δείχνεται στο Σχήμα 5.56.



**Σχήμα 5.55** Γρανάζια – πρόβλημα εμπλοκής προβληματικών δοντιών[1]



**Σχήμα 5.56** Διαμορφωμένο εύρος ενός κιβωτίου με GMF 92400 rpm[1]

Οι συγκρούσεις των δοντιών του γραναζιού μπορεί να είναι εκτεταμένες μόνο κατά τη διάρκεια μερών κάθε περιστροφής του γραναζιού. Ως εκ τούτου, η προκύπτουσα ταλάντωση θα έχει συχνότητα μικρότερη από τη συχνότητα εμπλοκής του γραναζιού. Ωστόσο, θα παραμείνει ένα πολλαπλάσιο των στροφών του γραναζιού.

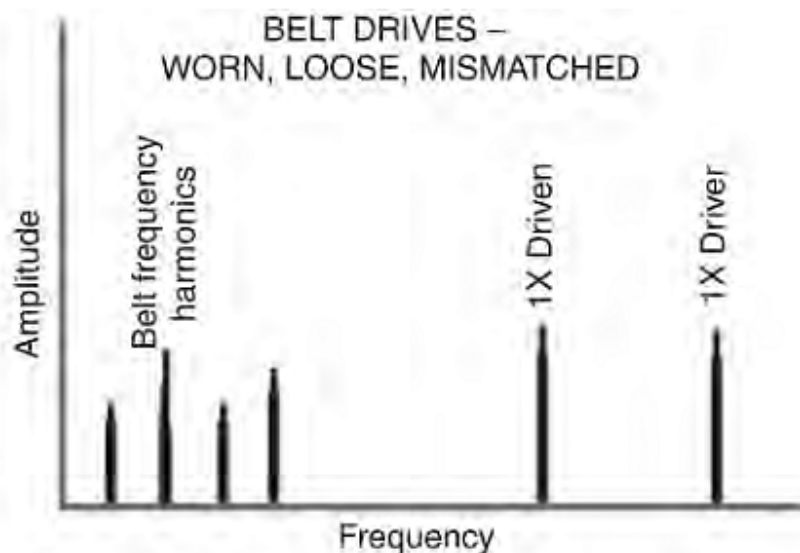


### 5.2.11 Ελαττώματα ιμάντων

#### Φθαρμένοι, χαλαροί, αταίριαστοι ιμάντες

Οι συχνότητες των ελαττωμάτων των ιμάντων είναι υπό-αρμονικού τύπου. Κατά την ανάλυση των ιμάντων κίνησης, είναι απαραίτητο να κρατηθεί το F-max χαμηλά για να μπορούμε να παρατηρούμε αυτές τις κορυφές. Όταν οι ιμάντες είναι φθαρμένοι, χαλαροί ή αταίριαστοι, μπορούν να παράγουν αρμονικές της συχνότητας του ιμάντα. Είναι δυνατόν να ληφθεί 3 × ή 4 × φορές τη συχνότητα του ιμάντα. Αρκετά συχνά, είναι κυρίαρχη η συχνότητα του ιμάντα 2 × . Η συχνότητα του ιμάντα (Σχήμα 5.57) δίδεται από τον τύπο:

$$\text{Belt frequency} = \frac{\pi \times \text{pulley rpm} \times \text{pitch dia.}}{\text{belt length}}$$

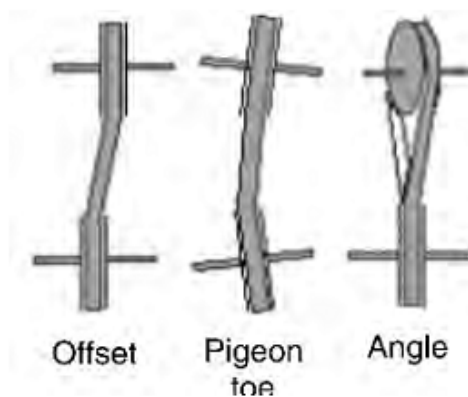


**Σχήμα 5.57** Υπό-αρμονικές συχνότητες ιμάντων[1]

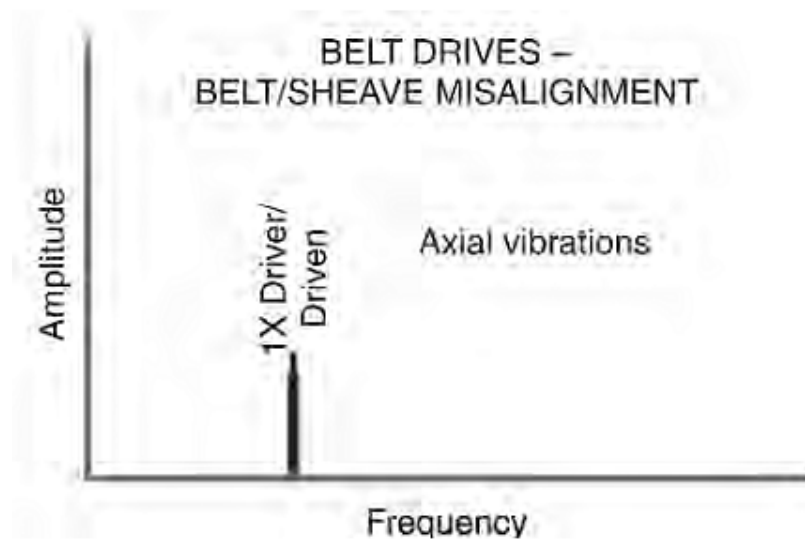
Τα εύρη είναι συνήθως ασταθή, μερικές φορές πάλλονται είτε με τις κινητήριες στροφές είτε με τις συνεργαζόμενες. Με τους ιμάντες χρονισμού, είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε ότι τα υψηλά εύρη στη συχνότητα του ιμάντα χρονισμού υποδεικνύουν φθορά ή λανθασμένη ευθυγράμμιση των τροχαλιών.

## Κακή ευθυγράμμιση ιμάντα / τροχαλιών

Οι διαφορετικοί τύποι των πιθανών κακών ευθυγραμμίσεων στους ιμάντες κίνησης φαίνονται στο Σχήμα 5.58. Αυτές οι συνθήκες όχι μόνο μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφική ταλάντωση, αλλά επίσης να προκαλέσουν ταχεία φθορά τόσο στους ιμάντες όσο και στις τροχαλίες. Η κακή ευθυγράμμιση των τροχαλιών παράγει υψηλή ταλάντωση στις  $1 \times \text{rpm}$ , κυρίως στην αξονική διεύθυνση (σχήμα 5.59). Ο λόγος των ευρών των κινητήριων στροφών και των συνεργαζόμενων εξαρτάται από τη θέση μέτρησης, τη σχετική μάζα και η δυσκαμψία του πλαισίου. Αν υπάρχει απόκλιση στις τροχαλίες ενός ανεμιστήρα, τότε η υψηλότερη αξονική ταλάντωση θα βρίσκεται στις κινητήριες στροφές. Όταν ο ιμάντας κινεί έναν ρότορα προβόλου ο οποίος βρίσκεται σε μια ανισόρροπη κατάσταση, αυτό το πρόβλημα πρέπει να επιλυθεί με την ανάλυση φάσης.



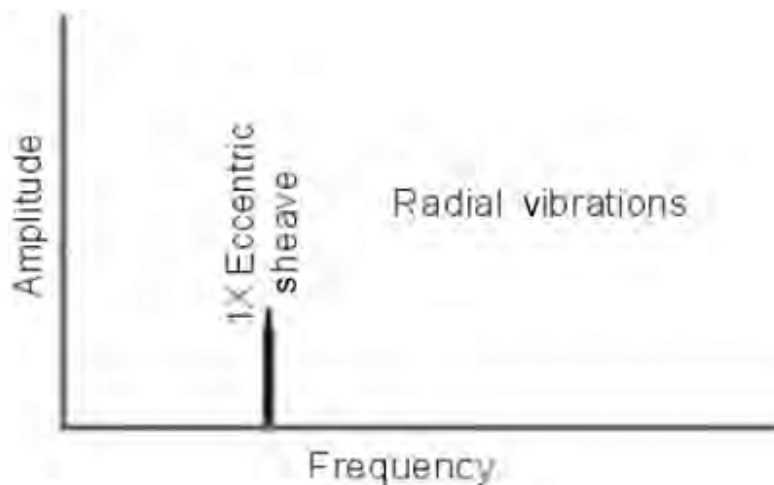
Σχήμα 5.58 Τύποι κακής ευθυγράμμισης[1]



**Σχήμα 5.59** Ταλαντώσεις λόγω κακής ευθυγράμμισης τροχαλιών[1]

### Εκκεντρικές τροχαλίες

Οι εκκεντρικές ή ασύμμετρες τροχαλίες έχουν μέγιστη ταλάντωση στις  $1 \times$  στροφές της τροχαλίας, προκαλώντας προβλήματα. Για να επιλυθεί αυτή την κατάσταση, μερικές φορές είναι δυνατόν να εξισορροπηθεί η εκκεντρική τροχαλία συνδέοντας ροδέλες με τις βίδες της τροχαλίας. Ωστόσο, ακόμη και αν εξισορροπηθεί, η εκκεντρικότητα θα εξακολουθεί να προκαλεί ταλαντώσεις και κόπωση στον ιμάντα (Σχήμα 5.60)

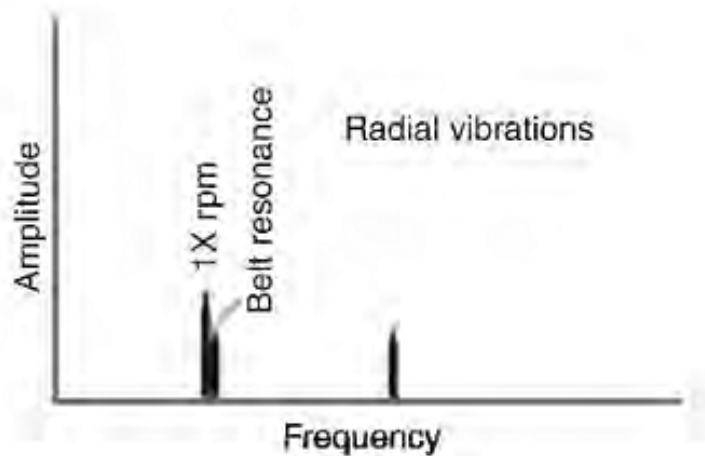


**Σχήμα 5.60** Συστήματα μετάδοσης με ιμάντα - εκκεντρικές τροχαλίες[1]

### Συντονισμός ιμάντων

Ο συντονισμός των ιμάντων (Σχήμα 5.61) μπορεί να συμβεί εάν η φυσική συχνότητα του ιμάντα είναι κοντά στις στροφές είτε της κινητήριας είτε της κινούμενης ατράκτου. Οι ιμάντες κίνησης, όταν η φυσική τους συχνότητα συμπίπτει με εκείνη του συνδεδεμένου εξοπλισμού βιώνουν επίσης υψηλές κάθετες και πλευρικές ταλαντώσεις. Το τέντωμα και η απελευθέρωση του ιμάντα, ενώ μετράται η απόκριση στα έδρανα ή στις τροχαλίες, μπορεί κανονικά να εντοπίσουν και να βοηθήσουν στο να διορθωθεί η κατάσταση.

Μια κοινή μέθοδος για τον έλεγχο της κατακόρυφης ταλάντωσης είναι η χρήση μιας συσκευής συγκράτησης (μεταλλική ράβδος ή αδρανή τροχαλία) που τοποθετούνται κάθετα προς το άνοιγμα του ιμάντα και κοντά (ή ελαφρά αγγίζοντας) στον ιμάντα. Αυτή η συσκευή πρέπει να τοποθετείται κατά προσέγγιση στο ένα τρίτο της απόστασης από την μεγαλύτερη τροχαλία.



**Σχήμα 5.61** Συντονισμός ιμάντων[1]

Άλλες εναλλακτικές λύσεις για την μείωση του εύρους των ταλαντώσεων είναι να τροποποιηθεί η συχνότητα του ιμάντα, το μήκος του ανοίγματος, το τύπο της ζώνης, την ευθυγράμμιση, την αδράνεια του κινητήριου ή του κινούμενου μηχανήματος, τη διάμετρο και το βάρος της τροχαλίας, την ταχύτητα, και τον αριθμό των ιμάντων.

### 5.2.12 Ηλεκτρικά προβλήματα

Οι ταλαντώσεις των ηλεκτρικών μηχανών, όπως οι κινητήρες, οι γεννήτριες και το δυναμό μπορεί να είναι είτε μηχανικής είτε ηλεκτρικής φύσης. Έχουμε συζητήσει τα πιο κοινά μηχανικά προβλήματα. Τα ηλεκτρικά προβλήματα εμφανίζονται επίσης στο φάσμα ταλαντώσεων και μπορεί να προσφέρουν πληροφορίες σχετικά με τη φύση των ελαττωμάτων. Τα ηλεκτρικά προβλήματα προκύπτουν λόγω των άνισων μαγνητικών δυνάμεων που ενεργούν στον ρότορα ή τον στάτορα. Αυτές οι άνισες μαγνητικές δυνάμεις μπορεί να οφείλονται σε:

- Ανοίγματα ή βραχυκυκλωμένα τυλίγματα του δρομέα και του στάτορα.
- Σπασμένη ράβδος του ρότορα
- Ασύμμετρες φάσεις
- Ή άνισα κενά αέρος.

Γενικότερα, το πρότυπο ταλάντωσης που εμφανίζεται λόγω των προαναφερθέντων ηλεκτρικών προβλημάτων θα είναι στις  $1 \times \text{rpm}$  και έτσι θα είναι παρόμοια με την ανισοροπία.

Μια συνήθης τεχνική για να εντοπιστούν αυτές οι συνθήκες είναι να βάλουμε τον αναλυτή να συλλέξει το φάσμα FFT στην λειτουργία «live» και στη συνέχεια να απενεργοποιήσουμε το ηλεκτρικό ρεύμα. Εάν η κορυφή εξαφανίζεται αμέσως, η πηγή είναι ηλεκτρικής φύσης. Από την άλλη πλευρά, εάν υπάρχει σταδιακή μείωση του εύρους  $1 \times$  είναι πιο πιθανό να είναι ένα μηχανικό πρόβλημα. Αυτή η τεχνική απαιτεί προσοχή. Αν υπάρχει μια χρονική καθυστέρηση

στην ίδια ανάλυση, μπορεί να καθυστερήσει η πτώση του εύρους ταλάντωσης. Επίσης είναι πιθανό ότι η συχνότητα συντονισμού μπορεί να πέσει γρήγορα με τις αλλαγές ταχύτητας.

Οι κινητήρες επαγωγής, οι οποίοι έχουν ηλεκτρικά προβλήματα, κάνει το εύρος ταλάντωσης να ταλαντεύεται με κυκλικό τρόπο. Οι μετρήσεις φάσης δείχνουν παρόμοιους κύκλους. Σύμφωνα με το στροβοσκόπιο, το σήμα αναφοράς θα προχωρήσει μπροστά και πίσω. Τα ταλαντευόμενα εύρη στις εφαρμογές επαγωγικού κινητήρα οφείλονται σε δύο κυρίαρχες συχνότητες που βρίσκονται πολύ κοντά η μία στην άλλη. Οι συχνότητες συνεχώς προστίθενται και αφαιρούνται σε ένα άλλο φαινόμενο γνωστό ως παλμοί. Μπορεί επίσης πιθανώς να είναι μια απλή συχνότητα της οποίας το εύρος διαμορφώνεται.

Στην πραγματικότητα, το εύρος είναι η πρώτη ένδειξη ενός πιθανού ηλεκτρικού προβλήματος στον κινητήρα. Η κατανόηση της φύσης αυτών των ταλαντώσεων μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό των ελαττωμάτων σε μια ηλεκτρική μηχανή. Τα παρακάτω είναι μερικοί όροι που απαιτούνται για να κατανοήσουμε τις ταλαντώσεις που οφείλονται στα ηλεκτρικά προβλήματα:

$F_L$  = electrical line frequency (50/60 Hz)

$F_s$  = slip frequency =  $\frac{2 \times F_L}{P}$  - rpm

$F_p$  = pole pass frequency =  $F_s \times P$

$P$  = number of poles.

[1]

### Προβλήματα του ρότορα

Κανονικά, τέσσερα είδη προβλημάτων μπορεί να δημιουργηθούν εντός του ρότορα:

1. Σπασμένες ράβδοι ρότορα
2. Ανοιγμένα ή βραχυκυκλωμένα τυλίγματα δρομέα
3. Κυρτωμένος ρότορας
4. Εκκεντρικός ρότορα.

### Ελαττώματα ρότορα

Μαζί με το στάτορα είναι και ένα ρότορας, ο οποίος είναι βασικά ένα σίδηρο που ακολουθεί την περιστροφή ενός μαγνητικού πεδίου. Καθώς το μαγνητικό πεδίο σαρώνει όλο τον αγωγό, αυτό δημιουργεί μια τάση σε όλο το μήκος της ράβδου του ρότορα. Αν η ράβδος είναι ανοιχτή-βραχυκυκλωμένη, δεν υπάρχει ροή ρεύματος και δεν δημιουργούνται δυνάμεις. Όταν η ράβδος είναι βραχυκυκλωμένη, το ρεύμα ρέει. Αυτό το ρεύμα είναι ανάλογο της ταχύτητας με την οποία το πεδίο περνάει διαμέσου του αγωγού και προς την ισχύ του πεδίου. Το πεδίο

αλληλεπιδρά με το πεδίο του στάτορα για να δημιουργήσει μία δύναμη επί της ράβδου του ρότορα. Αν όλα τα άλλα παραμένουν ίδια, θα αναπτυχθεί μια ίση και αντίθετη δύναμη για στην απέναντι πλευρά του ρότορα. Αυτές οι δύο δυνάμεις δημιουργούν τη ροπή που κινεί το φορτίο. Σε περίπτωση που κάτι διαταράσσει την ροή ή τα μαγνητικά πεδία και στις δύο πλευρές του ρότορα, οι δύο δυνάμεις θα γίνουν άνισες. Αυτό οδηγεί σε μια ακτινική δύναμη, η οποία είναι η αιτία της ταλάντωσης.

Μία ραγισμένη ή σπασμένη ράβδος μπορεί να προκαλέσει αυτή την κατηγορία των δυνάμεων ανισοροπίας. Οι δυνάμεις περιστρέφονται με τον ρότορα με ένα σταθερό φορτίο συν ένα φορτίο που ποικίλλει με  $2 \times$  ολίσθηση. Ως εκ τούτου, η δύναμη που δρα επί των εδράνων θα έχει συνιστώσες συχνότητας στις  $1 \times \text{rpm}$  και  $1 \times \text{rpm} \pm 2 \times$  ολίσθηση. Έτσι:

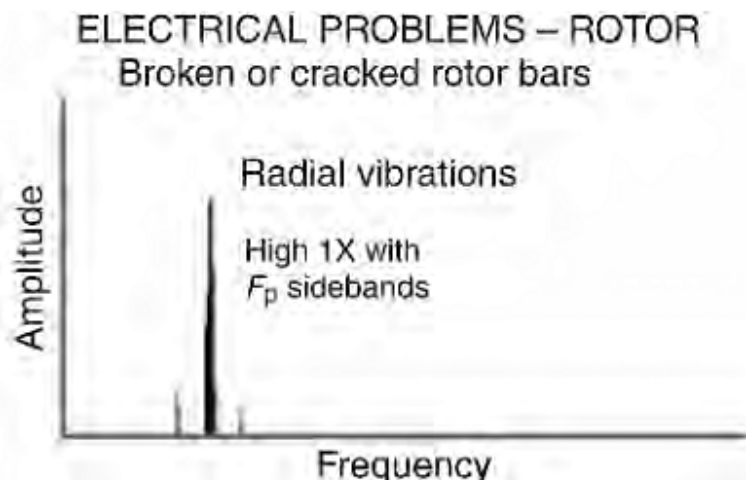
- Σπασμένη ή ραγισμένη ράβδος του ρότορα ή δαχτυλίδια βραχυκυκλώματος (Σχήματα 5.62 και 5.63)
- Κακές αρθρώσεις μεταξύ των πλευρών του ρότορα και των δαχτυλιδιών βραχυκυκλώματος
- Βραχυκύκλωμα πλαστικοποίησης ρότορα

Θα παράγουν υψηλή ταλάντωση  $1 \times$  την ταχύτητα λειτουργίας με πλευρικές ζώνες συχνότητων. Επιπλέον, οι ραγισμένες ράβδοι του ρότορα θα δημιουργήσουν συχνά πλευρικές ζώνες FP γύρω από τις  $3^\circ$ ,  $4^\circ$  και  $5^\circ$  αρμονικές ταχύτητες λειτουργίας.

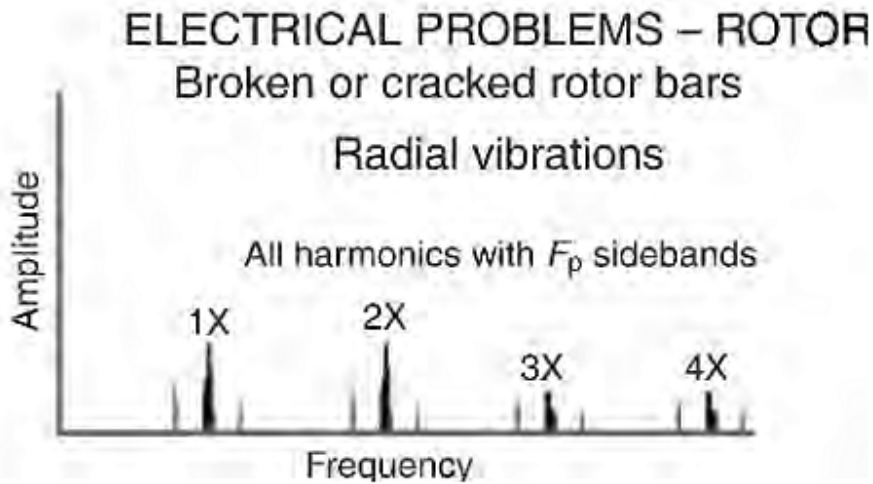
Οι χαλαρές ράβδοι του ρότορα υποδεικνύονται από την συχνότητα της γραμμής  $2 \times (2FL)$  πλευρικών ζωνών γύρω από τη συχνότητα της ράβδου του ρότορα (RBPF) ή / και των αρμονικών της (Σχήμα 5.64).

$$\text{RBPF} = \text{αριθμός των ράβδων του ρότορα} \times \text{rpm}$$

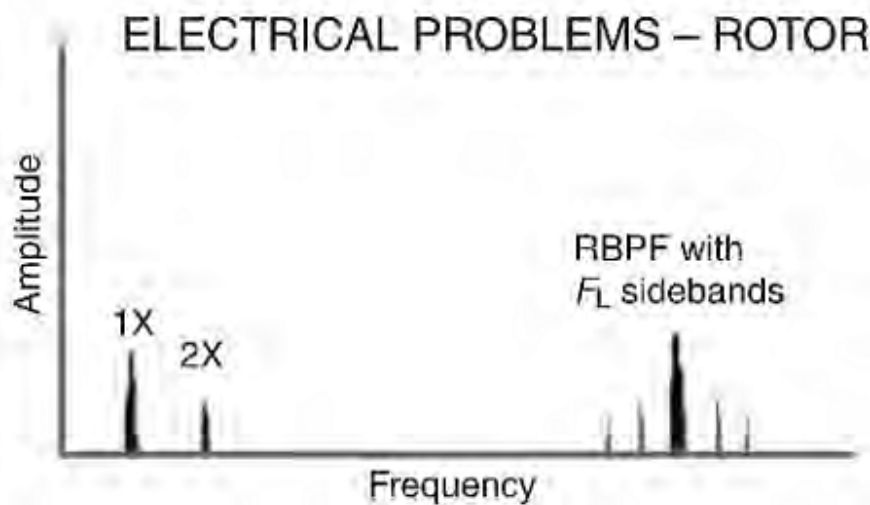
Μπορεί συχνά να προκαλέσει υψηλά επίπεδα σε  $2 \times \text{RBPF}$  με μόνο ένα μικρό εύρος σε  $1 \times \text{RBPF}$ .



Σχήμα 5.62 Υψηλή 1 × με πλευρικές ζώνες FP[1]



Σχήμα 5.63 Όλες οι αρμονικές με πλευρικές ζώνες FP[1]



Σχήμα 5.64 Συχνότητα ράβδου ρότορα[1]

### Εκκεντρικός ρότορας

Ο ρότορας υποτίθεται ότι είναι ομόκεντρος σε σχέση με τα πηνία του στάτορα. Αν δεν ισχύει αυτό, δημιουργείται μια μαγνητική δύναμη ανισορροπίας η οποία δίνεται από τον τύπο:

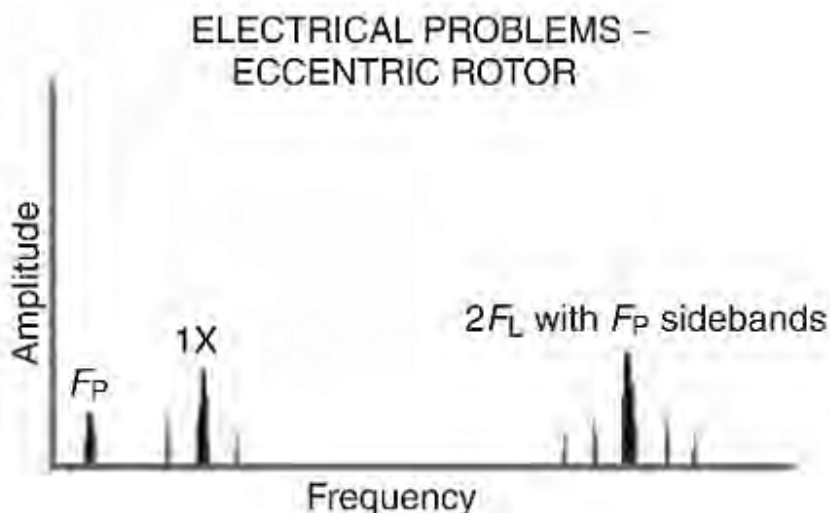
$$F = \frac{KI^2}{g^2} \left( \frac{4e}{(1-e)^2} \right)$$

Όπου,  $I$  = ρεύμα στάτορα,  $g$  = μέση διαφορά μεταξύ του στάτορα και του ρότορα,  $e$  = εκκεντρικότητα.

Από αυτή την εξίσωση, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η αύξηση του ρεύματος και στην εκκεντρικότητα μπορεί να παράγουν υψηλές ασύμμετρες μαγνητικές δυνάμεις. Υποτίθεται ότι η εκκεντρότητα του ρότορα θα παραταχθεί με το μαγνητικό πεδίο. Η στενότερη πλευρά του ρότορα θα έλκεται αντίστοιχα από το θετικό πόλο και από τον αρνητικό πόλο. Έτσι, η δύναμη θα μεταβάλλεται δύο φορές κατά τη διάρκεια ενός κύκλου. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τα ρουλεμάν, και ως εκ τούτου μπορεί να διαμορφώσει οποιαδήποτε άλλη συχνότητα που υπάρχει στο σύστημα.

Οι επιδράσεις αυτές προκαλούν γενικά πλευρικές ζώνες συχνοτήτων  $\pm 2 \times$  ολίσθηση περίπου  $1 \times$  rpm συχνότητα που προκαλείται από την ανισοροπία. Οι εκκεντρικοί ρότορες παράγουν ένα περιστρεφόμενο μεταβλητό κενό αέρος μεταξύ του ρότορα και του στάτορα, το οποίο επάγει παλλόμενες ταλαντώσεις (αυτό είναι ένα φαινόμενο που δημιουργείται ανάμεσα σε δύο συχνότητες, ένα είναι  $2F_L$  και είναι το πιο κοντινό στις αρμονικές των ταχυτήτων λειτουργίας). Αυτό μπορεί να απαιτήσει ένα φάσμα «ζουμ» για να διαχωρίσει το  $2F_L$  και την αρμονική ταχύτητα λειτουργίας.

Οι εκκεντρικοί ρότορες παράγουν  $2F_L$  που περιβάλλεται από πλευρικές ζώνες συχνοτήτων της ταχύτητας ολίσθησης ( $F_P$ , καθώς και πλευρικές ζώνες  $F_P$  περίπου στις  $1 \times$  rpm). Η ίδια η συχνότητα « $F_P$ » εμφανίζεται σε χαμηλή συχνότητα (Σχήμα 5.65).

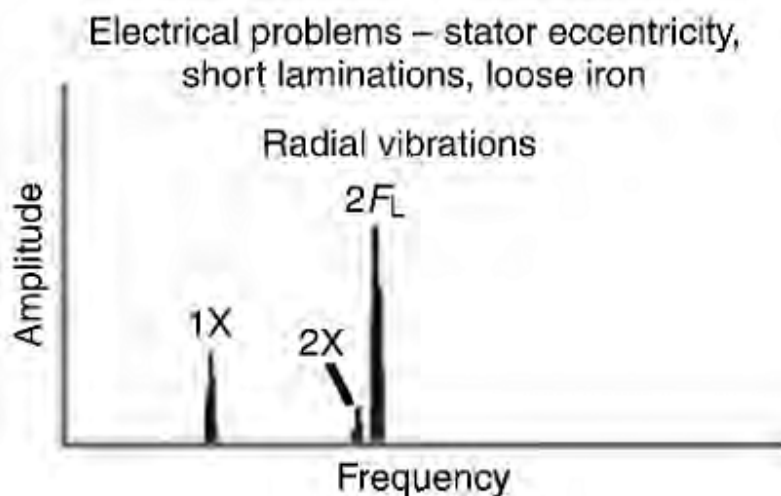


**Σχήμα 5.65** Εκκεντρικός ρότορας[1]



## Ελαττώματα Στάτορα

Ένας επαγωγικός κινητήρας περιλαμβάνει ένα σύνολο πηνίων του στάτορα, τα οποία παράγουν ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο προκαλεί εναλλασσόμενες δυνάμεις στο στάτορα. Αν υπάρχει κάποια χαλαρότητα ή αδυναμία στήριξης στο στάτορα, κάθε πόλος κάνει ένα τράβηγμα. Αυτό δημιουργεί μια γραμμή  $2 \times$  συχνότητας ( $2F_L$ ), επίσης γνωστή ως «χαλαρός σίδηρος - loose iron». Η βραχυκυκλωμένη πλαστικοποίηση του στάτορα μπορεί να προκαλέσει άνιση και τοπική θέρμανση, που μπορεί να αυξηθούν σημαντικά με το χρόνο (Σχήμα 5.66).

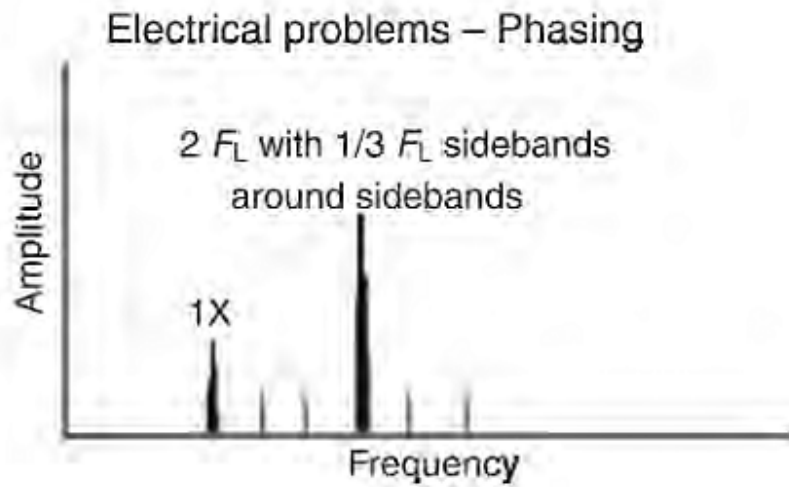


**Σχήμα 5.66** Ελαττώματα του στάτορα[1]

Τα προβλήματα στάτορα παράγουν υψηλή ταλάντωση στα  $2FL$ . Η εκκεντρικότητα παράγει άνισα σταθερά διάκενα αέρα μεταξύ του ρότορα και του στάτορα, τα οποία παράγουν μεγάλη κατευθυντική ταλάντωση. Τα διαφορικά κενά αέρος δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 5% για κινητήρες επαγωγής και το 10% για σύγχρονους κινητήρες. Το «μαλακό πόδι» και οι στρεβλωμένες βάσεις μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα έναν εκκεντρικό στάτορα.

### Σταδιακό πρόβλημα (χαλαρή υποδοχή)

Τα σταδιακά προβλήματα που οφείλονται σε χαλαρές ή σπασμένες συνδέσεις μπορεί να προκαλέσουν υπερβολική ταλάντωση σε  $2FL$ , τα οποία θα έχουν πλευρικές ζώνες γύρω του σε απόσταση  $\frac{1}{3}$  της συχνότητας γραμμής ( $\frac{1}{3} FL$ ). Τα επίπεδα στο  $2FL$  μπορεί να υπερβαίνουν τα  $25 \text{ mm / s}$  ( $1,0 \text{ in. / S}$ ), αν αφεθούν χωρίς διόρθωση. Αυτό είναι πρόβλημα αν ο ελαττωματικός «συνδετήρας» κάνει την επαφή σποραδικά και όχι περιοδικά (Σχήμα 5.67).



Σχήμα 5.67 Σταδιακά προβλήματα[1]

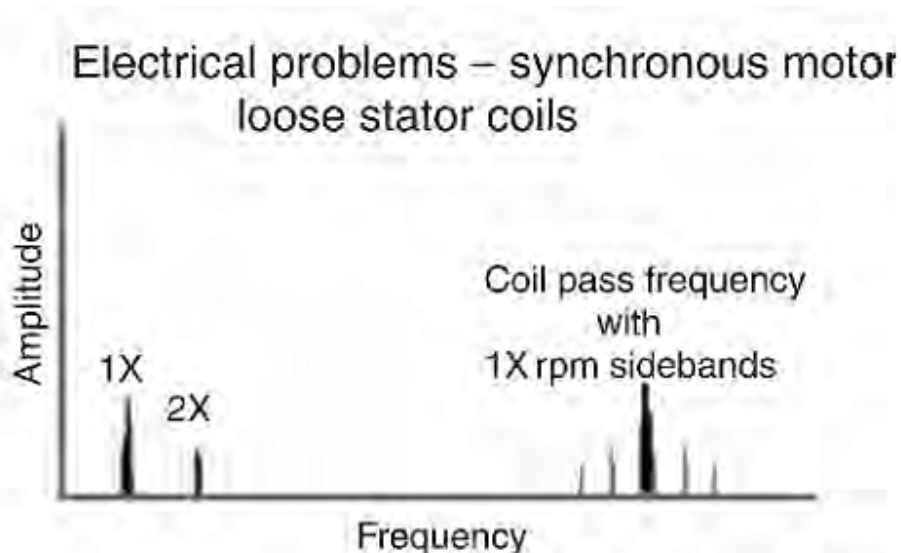
#### Σύγχρονοι κινητήρες (χαλαρά πηνία στάτορα)

Τα χαλαρά πηνία του στάτορα σε σύγχρονους κινητήρες θα δημιουργήσουν αρκετά υψηλές ταλαντώσεις στη συχνότητα του πηνίου (CPF), που ορίζεται ως:

$$CPF = \text{αριθμός των πηνίων στάτορα} \times rpm$$

(αριθμός των πηνίων του στάτορα = πόλοι  $\times$  αριθμός των πηνίων / πόλο)

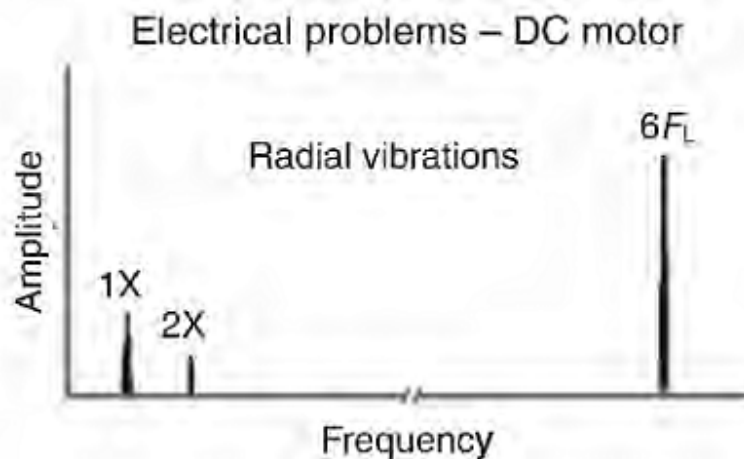
Η συχνότητα του πηνίου θα πρέπει να περιβάλλεται από 1  $\times$  πλευρικές ζώνες (Σχήμα 5.68).



Σχήμα 5.68 Σύγχρονοι κινητήρες[1]

## Προβλήματα κινητήρων DC

Τα ελαττώματα του κινητήρα DC μπορούν να ανιχνευτούν από τα υψηλά εύρη ταλάντωσης στην συχνότητα SCR ( $6F_L$ ) και τις αρμονικές. Αυτές οι ατέλειες περιλαμβάνουν σπασμένα τυλίγματα πεδίου, κακά SCR και χαλαρές συνδέσεις (Σχήμα 5.69)



Σχήμα 5.69 Κινητήρας DC [1]

Άλλα ελαττώματα, όπως χαλαρές ή καμένες ασφάλειες και βραχυκυκλωμένες κάρτες ελέγχου, μπορεί να προκαλέσουν υψηλές κορυφές στις  $1 \times$  και στην γραμμή  $5 \times$  των συχνοτήτων.

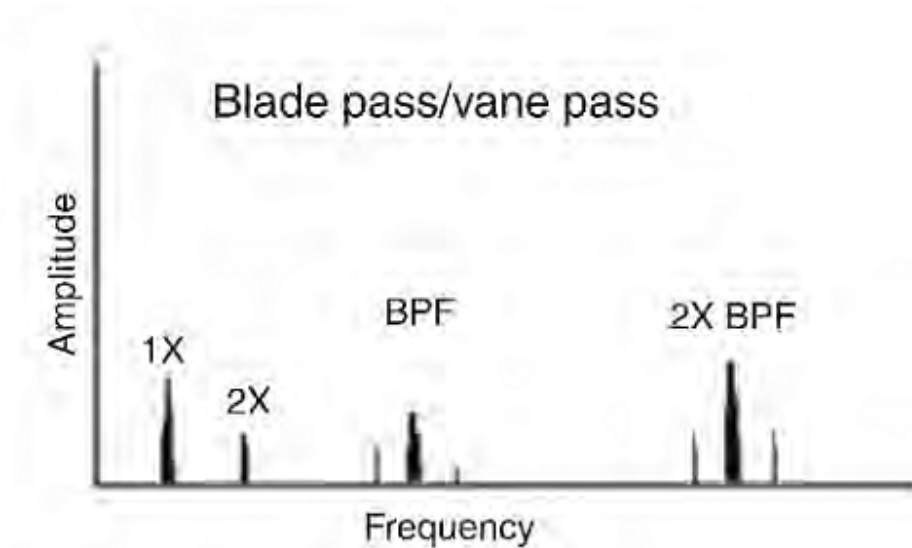
### 5.2.13 Ταλαντώσεις που σχετίζονται με τη Ροή

#### Ταλαντώσεις λεπίδων και πτερυγίων

Οι συχνότητες των λεπίδων ή των πτερυγίων (Σχήμα 5.70) είναι χαρακτηριστικά των αντλιών και των ανεμιστήρων. Συνήθως δεν είναι καταστροφικές από μόνες τους, αλλά μπορεί να δημιουργηθεί πολύς θόρυβος και ταλαντώσεις που μπορεί να είναι η πηγή που θα επιφέρει φθορά και αστοχία στα εξαρτήματα της μηχανής.

**Η συχνότητα διέλευσης λεπίδας (BPF) = αριθμός των πτερυγίων (ή πτερύγια)  $\times$  rpm**

Αυτή η συχνότητα που παράγεται οφείλεται κυρίως στα προβλήματα στο διάκενο μεταξύ του ρότορα και του στάτορα. Ένα μεγάλο εύρος BPF (και οι αρμονικές του) μπορεί να δημιουργηθεί στην αντλία εάν το διάκενο μεταξύ των περιστρεφόμενων πτερυγίων και των σταθερών διαχυτών δεν διατηρούνται ίσα σε όλη περίπου την διαδρομή.



**Σχήμα 5.70** Διέλευση λεπίδας / πτερυγίου[1]

Στις φυγόκεντρες αντλίες, το κενό μεταξύ των άκρων του στροφείου και της «γλώσσας της σπείρας – volute tongue» ή της εισόδου του διαχύτη είναι ένα ορισμένο ποσοστό (στην περιοχή 4-6% της διαμέτρου της πτερωτής), ανάλογα με την ταχύτητα της αντλίας. Εάν η διαφορά είναι μικρότερη από την συνιστώμενη τιμή, μπορεί να δημιουργηθεί ένας θόρυβος που μοιάζει με σπηλαίωση. Ωστόσο, ένα φάσμα FFT τονίζει αμέσως τη συχνότητα του πτερυγίου διελεύσεως του στροφείου. Επίσης, η BPF (ή αρμονικές της) μερικές φορές συμπίπτουν με κάποια φυσική συχνότητα του συστήματος, προκαλώντας υψηλές ταλαντώσεις.

Το υψηλό BPF μπορεί να παραχθεί αν ο δακτύλιος φθοράς εξαπλωθεί πάνω στον άξονα ή στις συγκολλήσεις επειδή απέτυχαν οι στερεωμένοι διαχύτες. Επιπλέον, μια υψηλή BPF μπορεί να προκληθεί από απότομες κλίσεις σε ένα σύμπλεγμα λεπτών γραμμών (ή αγωγών), από εμπόδια τα οποία διαταράσσουν τη ροή, ή αν ο ρότορας της αντλίας ή του ανεμιστήρα είναι τοποθετημένος εκκεντρικά εντός του περιβλήματος.

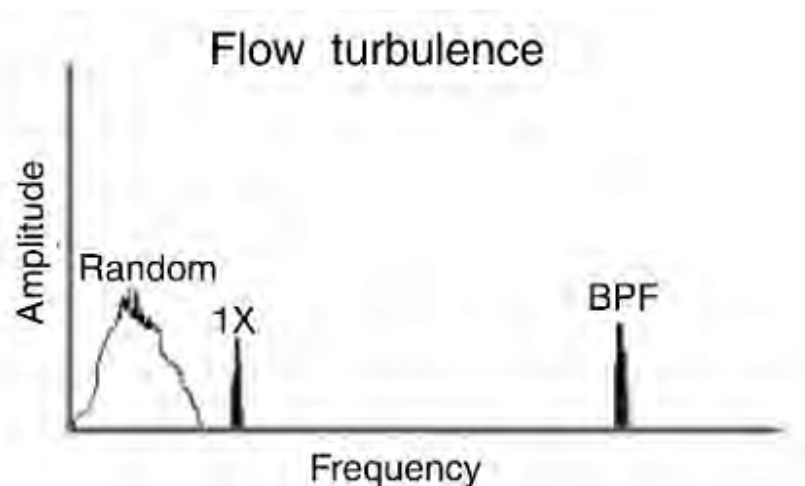
Παρόμοια με τη συχνότητα διελεύσεως των πτερυγίων, είναι οι φυγόκεντρικές αντλίες που είναι γνωστό ότι δημιουργούν μη ειδικές υπό-σύγχρονες ή ακόμη και υπερσύγχρονες (μεγαλύτερες από 1 x) διακριτές συχνότητες. Αυτές είναι σπάνιες περιπτώσεις, αλλά συμβαίνουν σε αντλίες δύο σταδίων (ή περισσότερων), οι οποίες έχουν ενδιάμεσα διάκενα «θάμνους» που δρουν ως επιπλέον συνιστώσες δυσκαμψίας. Μία αύξηση στα διάκενα εντός αυτών των θάμνων οδηγεί σε μια μείωση της δυσκαμψίας και αυτό οδηγεί σε διευρυμένες ταλαντώσεις.

Στην δύο σταδίων εγκάρσιων στροφών αντλία, ο ενδιάμεσος αντιτριβικός δακτύλιος παίζει σημαντικό ρόλο στην παροχή δυσκαμψίας, το οποίο περιγράφεται ως το φαινόμενο *Lomakin*. Όταν οι αποστάσεις είναι υψηλές, αυτή η επίδραση μπορεί να μειώσει και τις υψηλού εύρους

υπερσύγχρονες συχνότητες που δημιουργούνται. Όταν οι αποστάσεις ρυθμίζονται πάλι κανονικά, η λειτουργία της αντλίας σταθεροποιείται και η ελαττωματική συχνότητα εξαφανίζεται.

### Αναταράξεις ροής

Οι αναταράξεις ροής (Σχήμα 5.71) εμφανίζονται συχνά σε φυσητήρες και οφείλονται στις διακυμάνσεις της πίεσης ή της ταχύτητα του αέρα που περνά μέσα από τον ανεμιστήρα ή είναι συνδεδεμένη σε ένα σύμπλεγμα γραμμών. Στους ανεμιστήρες, οι ταλαντώσεις των αγωγών το μήκος του τυλίγματος, οι γωνίες των αγωγών, η ασυνήθιστη διαμόρφωση εισόδου του ανεμιστήρα και άλλοι παράγοντες μπορεί να είναι πηγή διέγερσης χαμηλής συχνότητας. Αυτή η διαταραχή της ροής προκαλεί αναταραχές, οι οποίες θα δημιουργήσουν τυχαίες, ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας, τυπικά στην περιοχή 20-2000 crm.



**Σχήμα 5.71** Αναταράξεις ροής[1]

Η καθυστέρηση περιστροφής είναι μία από τις ταλαντώσεις ροής που μπορεί να συμβεί σε ανεμιστήρες και συμπιεστές. Η καθυστέρηση περιστροφής είναι ένας διαχωρισμός ροής του ρευστού από τις λεπίδες υπό ορισμένες συνθήκες χαμηλής ροής. Η καθυστέρηση περιστροφής μερικές φορές συμβαίνει σε ένα σύστημα με μερικώς κλειστό αποσβεστήρα εισόδου. Η κατάσταση συνήθως εμφανίζεται ως συστατικό χαμηλής υπό-σύγχρονης συχνότητας του φάσματος ταλάντωσης του ρότορα (οι αναλογίες συχνότητας είναι τυπικά μεταξύ 8 και 40%, αλλά μπορεί να είναι τόσο υψηλό όσο και 80% της ταχύτητας περιστροφής).

Από διαγνωστικής απόψεως, η καθυστέρηση περιστροφής διαφέρει από τις υπόλοιπες αστάθειες δίνης λόγω της ισχυρής εξάρτησής της από τις συνθήκες λειτουργίας. Κανονικά, η διόρθωση της ροής λειτουργίας την εξαλείφει. Διαφέρει από το κύμα επειδή είναι ανάλογη

της ταχύτητας λειτουργίας του ανεμιστήρα ή του συμπιεστή. Τα κύματα βρίσκονται στην αξονική κατεύθυνση, το οποίο δεν συμβαίνει με την καθυστέρηση περιστροφής. Η καθυστέρηση περιστροφής εκδηλώνεται στο φάσμα ταλάντωσης του ρότορα με υπό-σύγχρονες συχνότητες, οι οποίες ακολουθούν την ταχύτητα του ρότορα. Η τροχιά θα αποκτήσει μια μετάπτωση προς τα εμπρός. Στις αντλίες, ο στροβιλισμός της ροής επάγει δίνες και αλλαγές στο διάκενο μεταξύ των πτερωτών και των διαχυτών ή των ελικοειδή χειλών. Οι δυναμικές διακυμάνσεις της πίεσης ή του παλμού που παράγεται με τον τρόπο αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ταλαντώσεις του άξονα επειδή οι παλμοί πίεσης προσκρούουν στο στροφέιο.

Η ροή που περνάει ένα σημείο περιορισμού στο σωλήνα μπορεί να προκαλέσει αναταραχή ή ταλαντώσεις λόγω της ροής. Ο παλμός μπορεί να παράγει θόρυβο και ταλάντωση σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Οι συχνότητες σχετίζονται με την ταχύτητα ροής και τη γεωμετρία της απόφραξης. Αυτά με τη σειρά τους διεγείρουν συχνότητες συντονισμού σε άλλα μέρη του σωλήνα. Η διατμητική δράση παράγει στροβίλους που μετατρέπονται σε διαταραχές της πίεσης στο τοίχωμα του σωλήνα, το οποίο μπορεί να προκαλέσει τοπική ταλάντωση διέγερση του σωλήνα ή των μερών του.

Έχει παρατηρηθεί ότι η ροή δίνης είναι ακόμη μεγαλύτερη όταν ο ακουστικός συντονισμός ενός συστήματος συμπίπτει με την συχνότητα που δημιουργείται από την πηγή. Οι στρόβιλοι παράγουν ευρυζωνική τυρβώδες ενέργεια που επικεντρώνεται γύρω από την συχνότητα και καθορίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$f = \frac{S_n \times V}{D}$$

όπου  $f$  = συχνότητα δίνης (Hz),  $S_n$  = αριθμός Strouhl (αδιάστατος, μεταξύ 0,2 και 0,5),  $D$  = χαρακτηριστική διάσταση της απόφραξης.

Για παράδειγμα, ένα υγρό που ρέει με 35 m / s πέραν μιας 6-in. γραμμής στελέχους θα παράγει ευρυζωνικές αναταράξεις σε συχνότητες από 40 έως 100 Hz.

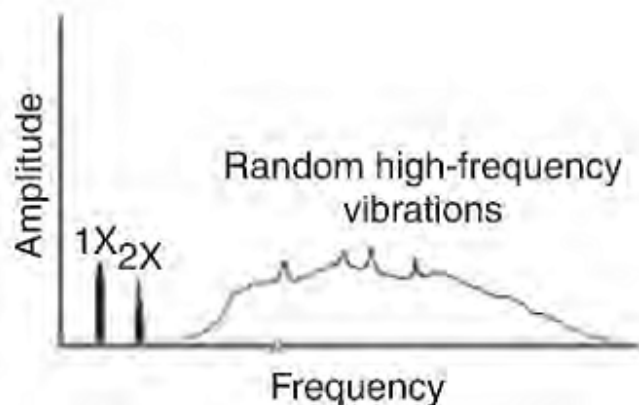
## Σπηλαιώση

Κανονικά η σπηλαιώση παράγει ευρυζωνική ,τυχαία και υψηλής συχνότητας ενέργεια, η οποία μερικές φορές υπερτίθεται με τις αρμονικές συχνότητες κατά το «πέραςμα» της λεπίδας. Τα αέρια μπορεί να διαλυθούν σε ένα υγρό εάν είναι υπό πίεση. Όταν η πίεση μειώνεται, βγαίνουν από το υγρό με την μορφή φυσαλίδων.

Με παρόμοιο τρόπο, όταν το υγρό αναρροφάται σε μία αντλία, η πίεση του υγρού πέφτει. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες όταν η μειωμένη πίεση προσεγγίζει την πίεση ατμών του υγρού (ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες), αναγκάζει το υγρό να εξατμιστεί. Δεδομένου ότι αυτές οι φυσαλίδες ατμού ταξιδεύουν περαιτέρω στο στροφέιο, η πίεση αυξάνεται και πάλι και αναγκάζει τις φυσαλίδες να καταρρεύσουν ή να εκραγούν.

Αυτή η κατάρρευση έχει τη δυνατότητα να διαταράξει την απόδοση της αντλίας και να προκαλέσει βλάβη στα εσωτερικά εξαρτήματα της. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται *σπηλαιώση*. Κάθε κατάρρευση μιας φυσαλίδας δημιουργεί ένα είδος κρούσης, η οποία τείνει να δημιουργήσει υψηλής συχνότητας τυχαίες ταλαντώσεις (Σχήμα 5.72).

Η σπηλαιώση, εάν αφεθεί χωρίς διόρθωση, μπορεί να είναι αρκετά καταστροφική για τα εσωτερικά εξαρτήματα της αντλίας. Συχνά είναι υπεύθυνη για τη διάβρωση των πτερυγίων της πτερωτής. Η σπηλαιώση ακούγεται συχνά σαν «χαλίκι» που διέρχεται μέσω της αντλίας. Οι μετρήσεις για την ανίχνευση της σπηλαιώσης δεν λαμβάνονται στα περιβλήματα των εδράνων, αλλά μάλλον στις σωληνώσεις αναρρόφησης ή στο περίβλημα της αντλίας.



**Σχήμα 5.72** Σπηλαιώση[1]

Η σπηλαιώση αναγνωρίζεται καλύτερα από την παρατήρηση του πολύπλοκου κύματος ή της διακύμανσης της δυναμικής πίεσης που λαμβάνεται με έναν παλμογράφο και ένα μετατροπέα πίεσης. Η κυματομορφή της πίεσης δεν είναι ημιτονοειδής, και τα μέγιστα εύρη εμφανίζονται ως αιχμηρές ακίδες. Μεταξύ αυτών των ακίδων υπάρχουν μικρού εύρους, ομαλές και στρογγυλεμένες κορυφές.

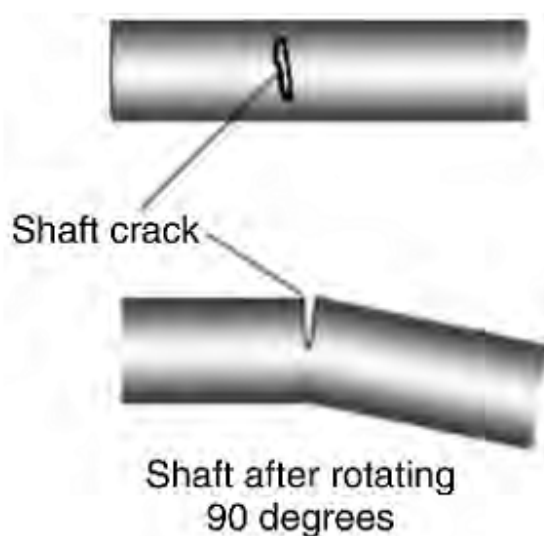
### 5.2.14 Ρωγμές ρότορα

Η βασική αρχή κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης μιας ρωγμής είναι ότι ο ρότορας χάνει τη δυσκαμψία σε μια κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση της ρωγμής. Φανταστείτε έναν επίπεδο χάρακα χάλυβα. Δέστε ένα βαρύ βαρίδι από το ένα άκρο του χάρακα με τη βοήθεια μιας χορδής. Όπως γυρίζουμε το χάρακα, βλέπουμε μια μεγάλη παραμόρφωση όταν η ευρεία και η επίπεδη επιφάνεια είναι στην κορυφή. Όταν στρέφεται κατά 90°, το λεπτό τμήμα του χάρακα είναι στην κορυφή και αυτή τη φορά μετά βίας παρατηρούμε οποιαδήποτε στρέψη.

Έτσι, σε μία περιστροφή του χάρακα θα δούμε δύο μεγάλες παραμορφώσεις, και σε δύο περιπτώσεις η παραμόρφωση θα είναι σχεδόν μηδενική. Οι δύο μεγάλες αποκλίσεις ανά περιστροφή θα μπορούσαν να προκαλέσουν συχνότητα ταλάντωσης  $2 \times rpm$ .

Αυτή η ίδια αρχή ισχύει για έναν άξονα κάτω από την επήρεια ενός πλευρικού βαρύ φορτίου, όπως ένας ρότορας στροβίλου ενεργώντας σύμφωνα με τη βαρύτητα. Εάν μια ρωγμή αναπτύσσεται στην περιφέρειας ενός ρότορα, εγκάρσια προς το άξονα του ρότορα, η δυσκαμψία στο επίπεδο είναι κάθετη προς τις μειώσεις στις ρωγμές και παραμένει ίδια στο άλλο ορθογωνικό επίπεδο (σχήμα 5.73).

Αυτό είναι παρόμοιο με το παράδειγμα του επιπέδου χαλύβδινου χάρακα, και ως εκ τούτου, θα παρατηρήσουμε ένα ανάλογο φαινόμενο. Για τη σωστή διάγνωση αυτού του σφάλματος, θα πρέπει να εξετάσουμε προσεκτικά όλες τις πληροφορίες που λαμβάνονται από το εύρος ταλάντωσης και τα δεδομένα φάσης.



**Σχήμα 5.73** Ρωγμές ρότορα[1]

Υπάρχουν δύο βασικά συμπτώματα μιας ρωγμής άξονα:

1. Ανεξήγητες αλλαγές στο σχετικό εύρος και φάση  $1 \times$  του άξονα
2. Εμφάνιση της συχνότητας ταλάντωσης  $2 \times$  rpm.

Το πρώτο ζωτικής σημασίας σύμπτωμα είναι οι αλλαγές στο  $1 \times$  σύγχρονο εύρος και φάση. Σε μια στροβιλομηχανή εγκαθιστάμενη με ανιχνευτές εγγύτητας μέτρησης ταλάντωσης του άξονα, μπορεί επίσης να είναι δυνατό να παρατηρήσετε το ελάττωμα σε ένα αργά κινούμενο διάλυσμα τόξου κύλισης (σε χαμηλή ταχύτητα περιστροφής).

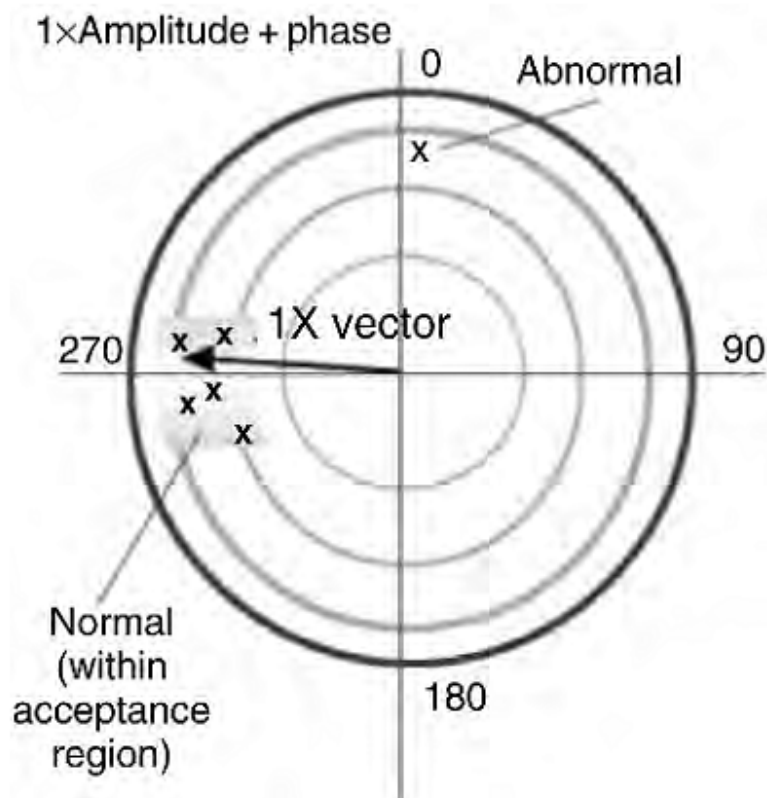
Η κάμψη της ατράκτου οφείλεται σε μια εγκάρσια ρωγμή που προκαλεί τις αλλαγές στο σύγχρονο  $1 \times$  εύρος και φάση. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το εύρος και η φάση μπορεί να είναι υψηλότερα ή ακόμα και χαμηλότερα. Έτσι, οποιαδήποτε αλλαγή στο  $1 \times$  εύρος και φάση θα πρέπει να προκαλέσει συναγερμό για τη δυνατότητα αυτού του ελαττώματος.

Το επόμενο κλασικό σύμπτωμα είναι η εμφάνιση του συστατικού  $2 \times$  rpm. Η αιτία για αυτή τη συνιστώσα (όπως εξηγήθηκε προηγουμένως) οφείλεται στην ασυμμετρία και στην οριζόντια



δυσκαμψία της ατράκτου στην οποία μπορεί να ενεργήσουν ακτινικές δυνάμεις όπως η βαρύτητα. Όταν απεικονίζεται σε ένα διάγραμμα κλιμάκωσης, κατά τη διάρκεια της έναρξης ή της ελεύθερης κίνησης, η συχνότητα  $2 \times$  είναι κυρίαρχη όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι στην περιοχή του μισού της κρίσιμης ταχύτητας.

Όταν η ταχύτητα αυξάνεται, η κορυφή  $2 \times$  μειώνεται. Όταν ο ρότορας ξεπερνά την κρίσιμη ταχύτητα, το εύρος  $2 \times$  αυξάνεται επίσης, και μπορεί να υπάρχουν επίσης οι συνιστώσες  $3 \times$  και  $4 \times$ . Όταν ο ρότορας φτάσει στην πλήρη ταχύτητα του, οι υψηλή  $1 \times$  μπορεί να συνοδεύεται από την συχνότητα  $2 \times$ . Αν και αυτό είναι μια παροδική παρατήρηση, μπορεί να παρακολουθηθεί το εύρος και η φάση  $1 \times$  υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς και για την παροχή συναγερμού και έγκαιρων προειδοποιήσεων μιας πιθανής ρωγμής του άξονα. Ένα πολικό διάγραμμα (Σχήμα 5.74) παρέχει μια καλή μορφή για την ανάδειξη της μεταβολής του εύρους και φάσης  $1 \times$ .



**Σχήμα 5.74** Πολικό Διάγραμμα[1]

Μια περιοχή με τη μορφή ενός τομέα μπορεί να σχεδιαστεί για να δείχνει την θέση του διανύσματος κανονικής λειτουργίας που περιγράφει το εύρος και η φάση  $1 \times$ . Αυτές ονομάζονται περιοχές αποδοχής. Οι περιοχές αποδοχής μπορούν επίσης να χαράσσονται για τη συνιστώσα  $2 \times$  κατά τη διάρκεια της μεταβατικής ανάλυσης που παρέχει αποδεικτικά στοιχεία της ρωγμής του άξονα.

Οποιαδήποτε αλλαγή στην θέση αυτού του διανύσματος θα το αναγκάσει να κινηθεί μακριά από τον τομέα. Μπορούν να δημιουργηθούν «Παράθυρα» συναγερμού γύρω από αυτόν τον τομέα για να επιστηθεί η προσοχή σε μια απόκλιση.

Θα πρέπει να έχουμε κατά νου ότι πολλοί άλλοι παράγοντες, όπως το φορτίο, το ρεύμα του τομέα, οι συνθήκες ατμού ή άλλες παράμετροι λειτουργίας θα μπορούσαν να έχουν αλλάξει και μπορεί να ευθύνονται για τις αλλαγές στο 1 x και 2 x του εύρους και φάσης. Ένα θερμικό πλήγμα σε μια μεγάλη τουρμπίνα ατμού μπορεί να προκαλέσει μία παρόμοια υψηλή συνιστώσα 1 x. Η κακή ευθυγράμμιση μπορεί να προκαλέσει μεγάλες συνιστώσες 1 x και 2 x. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το υψηλό εύρος 1 x συνδέεται με την έλλειψη ισορροπίας. Ωστόσο, εάν ένας άξονας δεν είναι ισορροπημένος σωστά, μια ρωγμή θα μπορούσε να είναι το πρόβλημα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°

# Αποκατάσταση βλαβών που προκαλούν ταλαντώσεις

### 6.1 Εισαγωγή

Κανένα πρόγραμμα προγνωστικής συντήρησης δεν είναι πλήρες, εάν δεν έχει τις τρεις βασικές συνιστώσες: τον εντοπισμό, την ανάλυση και τη διόρθωση. Στα προηγούμενα θέματα, συζητήσαμε για την ανίχνευση ταλαντώσεων και ανάλυση των σφαλμάτων μηχανημάτων λεπτομερώς. Στατιστικά υποδεικνύει ότι ένα πολύ μεγάλο ποσοστό ταλαντώσεων των μηχανημάτων οφείλονται μόνο σε ανισορροπία και κακή ευθυγράμμιση. Στην ενότητα αυτή, θα συζητηθεί η διόρθωση αυτών των κοινών σφαλμάτων.

Στον τομέα αυτό είναι δυνατή η εξισορρόπηση των στροφείων, αλλά μπορεί επίσης να γίνει με την χρήση ειδικών μηχανημάτων. Σε αυτή την ενότητα, θα συζητήσουμε αυτές τις τεχνικές.

Ομοίως, η κακή ευθυγράμμιση είναι επίσης μια σημαντική αιτία των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων. Η διόρθωση της ευθυγράμμισης απαιτεί επίσης ειδικές τεχνικές. Στην παρούσα ενότητα καλύπτονται επίσης οι πιο πρόσφατες τεχνικές που έχουν απλουστεύσει τις διαδικασίες αυτές.

Όταν συναντώνται υπερβολικές ταλαντώσεις λόγω συντονισμού, είναι συχνά δύσκολο να βρεθεί μια εύκολη λύση στο πρόβλημα. Θα συζητηθεί επίσης η χρήση δυναμικών αποσβεστήρων σαν πιθανό εργαλείο για τον έλεγχο συντονισμού που προκαλείται.

### 6.2 Εξισορρόπηση

Είναι πολύ σπάνιο να συναντηθεί ένα φάσμα ταλαντώσεων μιας μηχανής που δεν δείχνει ένα στοιχείο  $1 \times$  που να υποδεικνύει κάποια υπολειπόμενη ανισορροπία. Η ανισορροπία προκαλεί υψηλά επίπεδα πλάτους δόνησης στις  $1 \times rpm$  της μηχανής. Η ανισορροπία συχνά ορίζεται ως απλώς η άνιση κατανομή του βάρους στην κεντρική γραμμή ενός ρότορα. Το ISO την ορίζει ως μια κατάσταση που υπάρχει σε ένα ρότορα όταν η δύναμη ταλάντωσης ή κίνηση ταλάντωσης προσδίδεται στα ρουλεμάν του ως αποτέλεσμα των φυγόκεντρων δυνάμεων. Η διόρθωση της άνισης κατανομής του βάρους ενός ρότορα ονομάζεται εξισορρόπηση. Η εξισορρόπηση αντισταθμίζει για μια λιγότερο-από-τέλεια κατασκευή. Οι κύριες αιτίες της ανισορροπία κατά τη διάρκεια της κατασκευής είναι οι εξής:

Τα υλικά δεν έχουν ομοιόμορφη πυκνότητα

Οι τρύπες δεν γίνονται ακριβώς παράλληλα με το κέντρο

Οι ατέλειες που συμβαίνουν στις κυκλικές κατεργασίες ή σε συμμετρικά σχήματα

Λάθη στην Συναρμολόγηση.

Η ανισοροπία μπορεί επίσης να προκύψει κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας των μηχανημάτων. Αυτές οι αιτίες που αναγράφονται παρακάτω:

Η άνιση εναπόθεση προϊόντων γύρω από έναν ανεμιστήρα ή αντλία πτερωτής

Κατεστραμμένες ή λείπουν λεπίδες ή πτερύγια

Θερμική παραμόρφωση του ρότορα λόγω αποκλίσεων της θερμοκρασίας κατά τη διαδικασία.

### 6.2.1 Έννοιες εξισορρόπησης

Για να βελτιώσουμε έναν ασύμμετρο ρότορα, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η θέση και το βάρος του βαρέως σημείου. Το βαρύ σημείο είναι η ακτινική θέση όπου υπάρχει κατανομή υπερβολικής ακτινικής μάζας. Με την σύνδεση μιας ίσης μάζα σε αντίθετη θέση μπορεί να βελτιώσει το αποτέλεσμα της υπερβολική κατανομής. Το δίλημμα είναι ότι είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η θέση του βαρέως σημείου. Ωστόσο, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί το υψηλό σημείο. Το υψηλό σημείο είναι η ακτινική θέση όπου ο άξονας βιώνει την μέγιστη μετατόπιση κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής.

Υπάρχει ένας ντετερμινιστικός συσχετισμός μεταξύ του βαρέως σημείου και το υψηλού σημείου. Για ρότορες που λειτουργούν σε ταχύτητες κάτω από την κρίσιμη ταχύτητα, το βαρύ σημείο και το υψηλό σημείο είναι στην ίδια θέση. Ωστόσο, έχουμε δει σε προηγούμενη ενότητα για τον συντονισμό ότι το βαρύ σημείο και το υψηλό σημείο μπορεί να είναι μέχρι και  $180^\circ$  χωρία μετά την κρίσιμη ταχύτητα.

Αν ο ρότορας συνεχίζει να αυξάνει ταχύτητα και περάσει από άλλη μια κρίσιμη ταχύτητα, το υψηλό σημείο περιστρέφεται άλλες  $180^\circ$  μέχρι να συμπίπτει πάλι με το βαρύ σημείο. Αυτή η μετατόπιση φάσης μεταξύ του υψηλού σημείου και το βαρέως σημείου συνεχίζεται καθώς περνά τις επακόλουθες κρίσιμες ταχύτητες. Η επανόρθωση μιας κατάστασης ανισοροπίας περιλαμβάνει μετρήσεις φάσης για τον εντοπισμό του υψηλού σημείου, τον προσδιορισμό της σχέσης του υψηλό σημείο με το βαρύ σημείο, και εύρεση του μεγέθους της ανισοροπίας μετρώντας την επίδραση των διορθωτικών βαρών. Προκειμένου να προσδιοριστεί η ανισοροπία, είναι σημαντικό να δούμε πώς ένας απόλυτα ισορροπημένος ρότορας ανταποκρίνεται σε μια μάζα που τείνει να τον καθιστά ανισόρροπο. Όταν ένα βάρος ανισοροπίας προστίθεται σε ένα τέλεια ισορροπημένο ρότορα τότε:

Ταλαντώνεται σε συχνότητα  $1 \times \text{rpm}$ .

Η μετρούμενη φάση θα είναι σταθερή, και κάτω από το φως του στρόβου θα εμφανιστεί ένα σταθερό σημείο αναφοράς (σε οποιαδήποτε γωνία).

Εάν το βάρος της ασυμμετρίας διπλασιαστεί, το εύρος ταλάντωσης διπλασιάζεται επίσης, πράγμα που συνεπάγεται ότι το εύρος είναι ανάλογο προς την δύναμη ανισορροπίας. Ως παράδειγμα, δίνουμε ένα βάρος ανισορροπίας 30 g σε ένας τέλειο ρότορα και παρατηρούμε ότι το εύρος ταλάντωσης είναι 2. Μετά από αυτό, το βάρος 30-g αφαιρείται και ένα βάρος 60-g συνδέεται στην ίδια θέση. Το πλάτος ταλάντωσης θα είναι 4. Αυτό είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό γεγονός να σημειωθεί: Το πλάτος ταλάντωσης είναι δείκτης της σοβαρότητας της ανισορροπίας.

Εάν η θέση του βάρους ανισορροπίας αλλάξει, η ανάγνωση φάσης θα αλλάξει επίσης. Σύμφωνα με το στροβοσκόπιο, το σήμα αναφοράς θα εμφανιστεί σε διαφορετική θέση. Η φάση είναι μια ένδειξη της θέσης της ανισορροπίας.

Αν το βάρος ανισορροπίας κινηθεί δεξιόστροφα σε ένα ορισμένο αριθμό μοιρών, η ανάγνωση της φάσης ή το σημείο αναφοράς κάτω από το φως του στρόβου θα κινηθεί ισάριθμα, αλλά στην αντίθετη κατεύθυνση. Ας ξανά εξετάσουμε το προηγούμενο παράδειγμα και πάλι. Ας πούμε ότι το σημείο αναφοράς κάτω από το φως του στρόβου με το βάρος ανισορροπίας 30-g εμφανίστηκε στις 90°. Στη συνέχεια, τα 30 g κινούνται 50° με δεξιόστροφη κατεύθυνση. Τώρα, θα παρατηρήσετε ότι το σημείο αναφοράς κινήθηκε επίσης κατά 50 μοίρες, αλλά αντιωρολογιακά, για να δείχνει 40°.

Ως εκ τούτου, οι δύο σημαντικές βασικές αρχές της εξισορρόπησης είναι:

Το εύρος ταλάντωσης είναι ανάλογο με την σοβαρότητα της ανισορροπίας.

Τα σημεία αναφοράς μετατοπίζονται προς την αντίθετη κατεύθυνση ως προς το βαρύ σημείο. Ωστόσο, η γωνία της μετατόπισης του βαρέως σημείου και του σημείου αναφοράς είναι η ίδια.

### **6.2.2 Η επίδραση του δοκιμαστικού βάρους**

Θεωρούμε τώρα μια ρεαλιστική περίπτωση, όπου δεν έχουμε με έναν τέλεια ισορροπημένο ρότορα, αλλά ένα ρότορα που είναι εγγενώς ανισόρροπος. Στην αρχή, δεν έχουμε καμία ιδέα για τη θέση ή την σοβαρότητα της ανισορροπίας του ρότορα. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τη μέτρηση της ταλάντωσης και την φάση του ρότορα. Μετά τη λήψη μιας δοκιμαστικής μέτρησης παρατηρούμε ότι το εύρος ταλάντωσης είναι 5 και η γωνία φάσεως είναι 120°. Σε αυτό το στάδιο, τα παραπάνω στοιχεία δεν είναι αρκετά για να μας δώσουν τις πληροφορίες που απαιτούνται για τον προσδιορισμό της ανισορροπίας όσον αφορά την σοβαρότητα και την τοποθεσία της.

Για να αποκτήσουμε την πλήρη εικόνα της αρχικής ανισορροπίας, ο ρότορας πρέπει να διαταραχθεί για να προσδιοριστεί η ανταπόκριση του ρότορα λόγω της διαταραχής. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός δοκιμαστικού βάρους. Ένα δοκιμαστικό βάρος είναι μία μάζα γνωστού βάρους που είναι συνδεδεμένη σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία σε σχέση με το σημείο αναφοράς. Όταν προστίθεται ένα δοκιμαστικό βάρος, διαταράσσεται η αρχική

ανισορροπία. Μπορεί να αλλάξει προς το καλύτερο ή χειρότερο, ή και καθόλου. Εάν η αρχική ανισορροπία δεν αλλάζει καθόλου, αυτό σημαίνει ότι η επιλογή του δοκιμαστικού βάρους ή η θέση του σχετικά με τον ρότορα είναι ανεπαρκής. Πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα βαρύτερο δοκιμαστικό βάρος, ή μια διαφορετική αξονική θέση. Ως γενικός κανόνας, ένα δοκιμαστικό βάρος θα πρέπει να οδηγήσει σε αλλαγή του εύρους ταλάντωσης και της φάσης τουλάχιστον κατά 30%.

Η αλλαγή στην ανισορροπία μας παρέχει ένα διαφορετικό σύνολο αναγνώσεων ταλαντώσεων και φάσης. Στο παράδειγμά μας, δίνουμε τώρα στον ρότορα δοκιμαστικό βάρος μάζας 10-g. Το αποτέλεσμα είναι αναγνώσεις ταλάντωσης και φάσης 8 και 30°. Αφού έχουμε αποκτήσει αυτές τις πληροφορίες, είναι δυνατό να εντοπίσει το μέγεθος και η θέση του βαρέως σημείου χρησιμοποιώντας την διανυσματική μέθοδο.

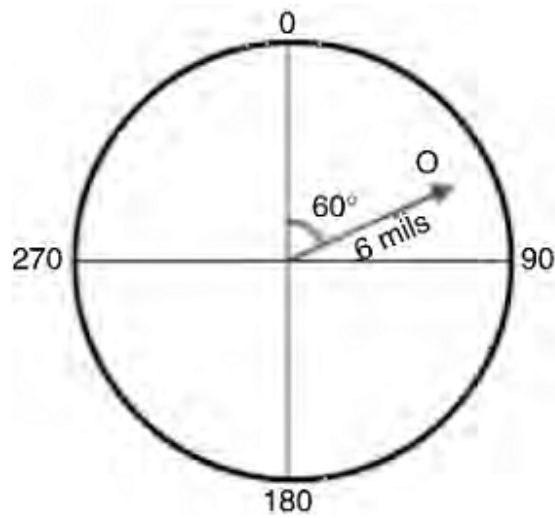
### 6.2.3 Μέθοδοι εξισορρόπησης

#### Εξισορρόπηση ενός πεδίου - διανυσματική μέθοδος

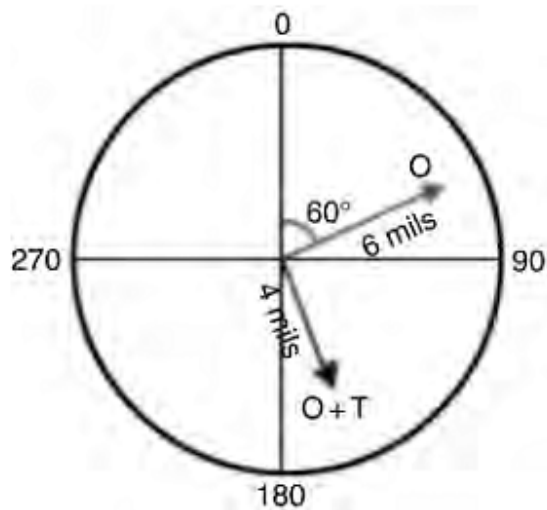
Η ενιαία εξισορρόπηση πεδίου χρησιμοποιείται για μηχανές που λειτουργούν κάτω από την κρίσιμη ταχύτητα τους και έχουν λόγο  $L / D$  χαμηλότερο από 0.5 ( $L$ , το μήκος του δρομέα, με εξαίρεση το μήκος υποστήριξης?  $D$ , διάμετρος του ρότορα). Συνιστάται επίσης, να αποφεύγεται η χρήση αυτής της μεθόδου για ρότορες που λειτουργούν σε ταχύτητες μεγαλύτερες από 1000 rpm. Για τις περιπτώσεις όπου ο λόγος  $L / D$  είναι μεγαλύτερος από 0,5, αλλά λιγότερο από 2, η μέθοδος αυτή πρέπει να εφαρμόζεται για ρότορες που δεν λειτουργούν πάνω από 150 rpm. Για λόγο  $L / D$  μεγαλύτερο από 2, το όριο είναι 100 rpm. Για αυτή τη μέθοδο εξισορρόπησης, λαμβάνονται τα ακόλουθα μέτρα:

Κατά την πρώτη λειτουργία καταγράφονται, οι πρωτότυπες μετρήσεις των ταλαντώσεων και φάσης. Για παράδειγμα, αν οι μετρήσεις που λαμβάνονται είναι 6 mils (χιλιοστά ή, μικρόν, κλπ) σε μία γωνία φάσης 60 °, μπορεί να κατασκευαστεί ένα πολικό διάγραμμα και να σχεδιαστεί ένα διάνυσμα ανάλογο με 6 mils σε γωνία 60 ° από το σημείο αναφοράς 0°. Αυτός ο φορέας ονομάζεται  $O$  (Σχήμα 6.1).

Στο επόμενο στάδιο, συνδέεται με το ρότορα σε οποιαδήποτε θέση ένα δοκιμαστικό βάρος 20 g. Κατά την επόμενη μέτρηση, έχουμε αποκτήσει αναγνώσεις της ταλάντωσης και της φάσης 4 mils στις 150°. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι νέες τιμές οφείλονται στο συνδυασμένο αποτέλεσμα της αρχικής έλλειψης ισορροπίας και του βάρους δοκιμής. Ας ονομάσουμε αυτό το διάνυσμα  $O + T$  (Σχήμα 6.2).



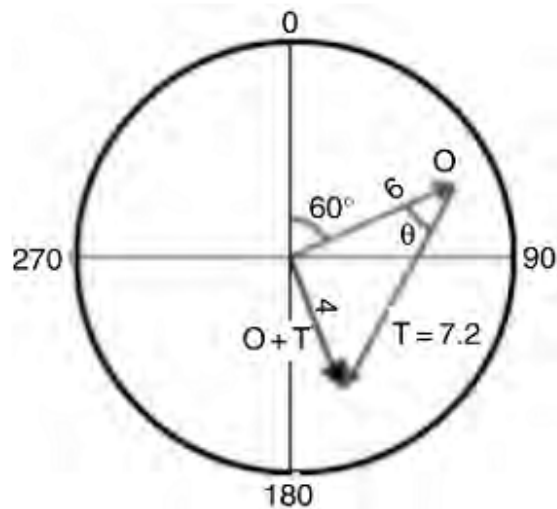
**Σχήμα 6.1** Διάνυσμα  $O[1]$



**Σχήμα 6.2** Διάνυσμα  $O+T[1]$

Το επόμενο βήμα είναι να ενταχθούν τα διανύσματα  $O$  και  $O + T$ . Το προκύπτον διάνυσμα είναι ένα αποτέλεσμα του δοκιμαστικού βάρους και ως εκ τούτου θα πρέπει να οριστεί ως διάνυσμα  $T$  (Σχήμα 6.3).

Το διάνυσμα  $T$  μετράται και κλιμακώνεται, και είναι μεγέθους 7,2 mils. Η γωνία μεταξύ του διανύσματος  $O$  και διανύσματος  $T$  και ονομάζεται  $\theta$  και είναι  $33,7^\circ$ .



**Σχήμα 6.3** Διάνυσμα  $T[1]$

Με τα παραπάνω αποτελέσματα είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε την διόρθωση που απαιτείται για να αποτραπεί η αρχική έλλειψη ισορροπίας του ρότορα. Το ερώτημα είναι, εάν ένα διάνυσμα  $T$  7,2 mils παράγεται από ένα δοκιμαστικό βάρος 20 g, πιο είναι το βάρος σε γραμμάρια που προκάλεσε το αρχικό διάνυσμα  $O$ ;

Από μαθηματικής άποψης, θα πρέπει να μετακινήσουμε το διάνυσμα  $T$  με τέτοιο τρόπο για να ακυρώσουμε το διάνυσμα  $O$ . Η κίνηση θα πρέπει να είναι ίση σε μέγεθος και αντίθετης κατεύθυνσης. Η γωνία μεταξύ του διανύσματος  $O$  και του διανύσματος  $T$  είναι  $33,7^\circ$ . Εδώ, το διάνυσμα  $T$  πρέπει να μετακινηθεί δεξιόστροφα για να καταστεί αντίθετο προς το διάνυσμα  $O$ .

Το νέο βάρος θα πρέπει να είναι 16,7 g. Θα πρέπει να μετακινηθεί  $33,7^\circ$  αριστερόστροφα από το αρχικό σημείο του. Τα μικρά σφάλματα κατά την μέτρηση της γωνίας οφείλονται στην τοποθέτηση και άλλους παράγοντες που θα οδηγήσουν σε μια μικρή υπολειμματική ανισορροπία. Στην περίπτωση αυτή η υπολειμματική ανισορροπία είναι εντός των καθορισμένων ορίων, η εξισορρόπηση είναι πλήρης. Διαφορετικά, η παραπάνω διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί.

### **Εξισορρόπηση Δύο πεδίων - διανυσματική μέθοδος**

Η ενιαία εξισορρόπηση πεδίου έχει πολύ περιορισμένη εφαρμογή. Σε γενικές γραμμές, όλα τα μηχανήματα που έχουν λόγο  $L / D$  περισσότερο από 0,5 θα πρέπει να αντισταθμίζονται με τη χρήση της μεθόδου δύο-πεδίων. Ωστόσο, εάν ένα μηχανήμα λειτουργεί πάνω από την κρίσιμη ταχύτητα, τότε ο κανόνας για την εξισορρόπηση είναι  $N + 2$  πεδία, όπου  $N$  ο αριθμός των



κρίσιμων ταχυτήτων κάτω από την ταχύτητα λειτουργίας. Για παράδειγμα, ένας συμπιεστής που λειτουργεί πάνω από την πρώτη κρίσιμη ταχύτητα του θα πρέπει να είναι ισορροπημένος χρησιμοποιώντας την μέθοδο εξισορρόπησης των τριών-πεδίων.

Η εξισορρόπηση δύο-πεδίων γίνεται με έναν τρόπο παρόμοιο με τη μέθοδο του μονού επιπέδου. Η εξισορρόπηση δύο-επιπέδων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή λόγω των εγκάρσιων ενεργειών ή της παρεμβολής διόρθωσης πεδίου. Εγκάρσιες ενέργειες συμβαίνουν όταν μια ένδειξη απώλειας της ισορροπίας στο ένα άκρο του ρότορα στην πραγματικότητα προκαλείται από την ανισορροπία στο αντίθετο άκρο. Είναι λόγω των εγκάρσιων ενεργειών ότι οι ενδείξεις ανισορροπίας σε κάθε άκρο του ρότορα δεν αντιπροσωπεύουν την ανισορροπία στα αντίστοιχα επίπεδα εξισορρόπησης.

Κάθε ένδειξη είναι αποτέλεσμα της έλλειψης ισορροπίας μαζί με τις εγκάρσιες ενέργειες του άλλου επιπέδου. Το φαινόμενο αυτό καθιστά τη μέθοδο δύο-επιπέδων πιο περίπλοκη από ό,τι η μέθοδος μονού επιπέδου. Αν δεν υπήρχαν οι εγκάρσιες ενέργειες, θα μπορούσε να γίνει εξισορρόπηση μονού επιπέδου σε κάθε επίπεδο. Δυστυχώς, αυτό δεν λειτουργεί.

Η μέθοδος διανύσματος δύο επιπέδων περιγράφεται κατωτέρω. Με τη μέθοδο του μονού επιπέδου, είχαμε κάνει τουλάχιστον δύο δοκιμές για την απόκτηση των απαιτούμενων δεδομένων. Η μέθοδος δύο-επιπέδων απαιτεί τουλάχιστον τρεις δοκιμές μέχρι να αποκτηθούν επαρκείς πληροφορίες για την διόρθωση εξισορρόπησης. Η διαδικασία περιγράφεται συνοπτικά ως εξής:

Η μηχανή τίθεται σε λειτουργία και οι αρχικές αναγνώσεις εύρους και φάσης καταγράφονται σε καθένα από τα επίπεδα.

Επιλέγεται και συνδέεται ένα δοκιμαστικό βάρος στο πρώτο πεδίο. Το βάρος και η γωνία φάσης πρέπει να καταγραφούν. Το μηχάνημα αρχίζει και πάλι, μετρώνται και καταγράφονται το εύρος και η γωνία φάσης σε κάθε επίπεδο. Το δοκιμαστικό βάρος στη συνέχεια απομακρύνεται για να εγκατασταθεί στο άλλο πεδίο εξισορρόπησης. Η μηχανή ξεκινάει ακόμα μια φορά και καταγράφονται το εύρος και η γωνία φάσης.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των ανωτέρω τριών δοκιμαστικών λειτουργιών, είναι δυνατό να λυθεί ένα σύστημα  $2 \times 2$  των συντελεστών επιρροής. Ο πολικός συμβολισμός είναι χρήσιμος στην έκφραση μιγαδικών αριθμών. Η εξίσωση πινάκων είναι:  $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{B}$ , όπου  $\mathbf{A}$  είναι το σύστημα  $2 \times 2$  των συντελεστών επιρροής,  $\mathbf{x}$  είναι το διάνυσμα  $2 \times 1$  της διόρθωσης της μάζας,  $\mathbf{B}$  είναι το διάνυσμα  $2 \times 1$  της ανάγνωση κραδασμών (τα  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{x}$  και  $\mathbf{B}$  εκφράζονται σε όρους των μιγαδικών αριθμών).

Μετά από αυτό το βήμα, θέτουμε το διάνυσμα  $\mathbf{B} = 0$  και να λύνουμε το διάνυσμα  $\mathbf{x}$ . Το προκύπτον διάνυσμα  $\mathbf{x}$  δίνει τη διόρθωση μάζας και την γωνία φάσης σε κάθε πεδίο διόρθωσης.

#### 6.2.4 Συντελεστές επιρροής

Μόλις οι μηχανές έχουν εξισοροπιστεί και τα στοιχεία τους έχουν καταγραφεί, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επακόλουθες εξισορροπήσεις. Το πλεονέκτημα είναι ότι με τα δεδομένα μπορούμε να αποφύγουμε μία δοκιμαστική λειτουργία με σκοπό την αξιολόγηση της επίδρασης του δοκιμαστικού βάρους. Η επίδραση του δοκιμαστικού βάρους σε έναν ρότορα παρέχει τις πληροφορίες σχετικά με την αλλαγή στην ταλάντωση που συμβαίνει λόγω της αύξησης ή της μεταβολής της μάζας. Έτσι:

$$\text{σταθερά βάρους} = \frac{\text{αλλαγή στο βάρος}}{\text{αλλαγή στην ταλάντωση}}$$

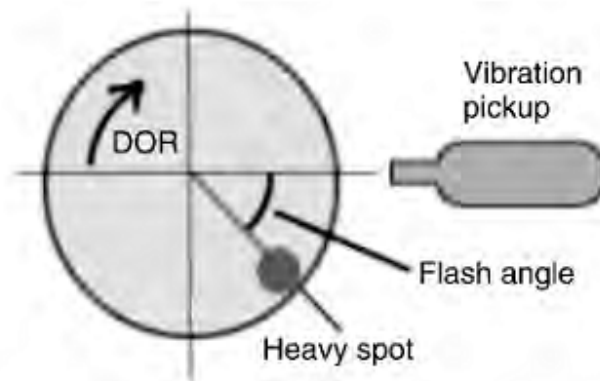
Εάν το δοκιμαστικό βάρος αυξάνεται από 2 έως 4 gr και οι κραδασμοί μειώνονται από 0,3 έως 0,6 mm, η σταθερά βάρους θα είναι:

$$\text{σταθερά βάρους} = \frac{4 - 2}{0,6 - 0,3} = 6,67 \text{ g/mm}$$

Σε περίπτωση που καταστεί αναγκαίο να ισοσκελιστεί ο ρότορας μιας μηχανής του οποίου η σταθερά βάρους είναι γνωστή, τότε το μόνο που χρειάζεται να γίνει είναι να πολλαπλασιάσει το εύρος ταλάντωσης λόγω ανισορροπίας, και να καθορίσει το σωστό βάρος που πρέπει να τοποθετηθεί στο ρότορα. Αυτό ονομάζεται επίσης συντελεστής απόκρισης ισορροπίας.

Κάθε ρότορας έχει διαφορετική σταθερά ανισορροπίας, και δίνεται σε μονάδες βάρους ανά εύρος (π.χ. lbs / mil, oz / mil, gm / in / s). Μια διαδικασία εξισορρόπησης πεδίου θα παράγει έναν συντελεστή απόκρισης ισορροπίας. Μια διαδικασία εξισορρόπησης διπλού πεδίου θα έχει τέσσερις συντελεστές. Η εξισορρόπηση πολλαπλών πεδίων θα παράγει οποιοδήποτε αριθμό συντελεστών ανάλογα με τον αριθμό των πεδίων εξισορρόπησης. Για παράδειγμα, μια διαδικασία εξισορρόπησης τριών πεδίων θα παράγει εννέα συντελεστές απόκρισης ισορροπίας. Η σχέση αυτή προκαλείται από το γεγονός ότι κάθε επίπεδο εξισορρόπησης αποδίδει δύο συντελεστές απόκρισης.

Το επόμενο κομμάτι των πληροφοριών που απαιτούνται σχετίζεται με τη φάση. Τα δεδομένα φάσης μετατρέπονται σε έναν άλλο συντελεστή που ονομάζεται γωνία φλας. Η γωνία φλας ενός ρότορα είναι η θέση του βαρέως σημείου σε σχέση με τη θέση του συλλέκτη ταλάντωσης. Αυτή η γωνία μετράται κατά τη διεύθυνση της περιστροφής του άξονα. Σε ένα ισορροπημένο ρότορα, το βαρύ σημείο είναι απέναντι από την θέση όπου συνδέεται το βάρος διόρθωσης (Σχήμα 6.4).



**Σχήμα 6.4** Συντελεστές επιρροής[1]

Αν έχουμε ολοκληρώσει με επιτυχία μια εξισορρόπηση, μπορούμε να ακολουθήσουμε την ακόλουθη διαδικασία για τον προσδιορισμό της γωνίας φλας:

Βήμα 1: Καταγράψτε τη γωνιακή θέση του σημείου αναφοράς, όταν η μηχανή είναι σε λειτουργία.

Βήμα 2: Απενεργοποιήστε το μηχάνημα και περιστρέψτε τον άξονα χειροκίνητα μέχρι το σημείο αναφοράς να είναι στην ίδια θέση όπως, όταν περιστρεφόταν.

Βήμα 3: Εντοπίστε το βαρύ σημείο με την εύρεση της θέσης ακριβώς απέναντι από την θέση που εφαρμόστηκαν τα βάρη εξισορρόπησης .

Βήμα 4: Μετρήστε την γωνία μεταξύ του συλλέκτη και του βαρέως σημείου, ως προς την κατεύθυνση της περιστροφής της ατράκτου.

Τώρα που έχουμε τη γωνία φλας του ρότορα της μηχανής στο αρχείο, θα μπορούσαμε να την εφαρμόσουμε με τον ακόλουθο τρόπο:

Ενεργοποιούμε το μηχάνημα και καταγράφουμε τις ταλαντώσεις και τη φάση.

Απενεργοποιούμε το μηχάνημα και περιστρέφουμε με το χέρι τον άξονα έως ότου το σημείο αναφοράς να είναι στην ίδια θέση, όπως φαίνεται, ενώ λειτουργεί.

Μετράμε τη γωνία φλας, ξεκινώντας από την πραγματική θέση του συλλέκτη ταλάντωσης προς την κατεύθυνση της περιστροφής της ατράκτου.

Αυτή η θέση δείχνει την θέση του βαρέως σημείου. Ένα βάρος διόρθωσης πρέπει να εφαρμοστεί ακριβώς απέναντι από αυτήν την τοποθεσία.

Είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι οι συντελεστές είναι έγκυροι μόνο όταν ο συλλέκτης τοποθετείται στην ίδια θέση κάθε φορά, και οι αναγνώσεις λαμβάνονται στην ίδια ταχύτητα.

Αυτές οι μέθοδοι είναι οι κλασική πρώτη αρχή για τις μεθόδους εξισορρόπησης. Ωστόσο, με την άφιξη των αναλυτών και το εξειδικευμένο λογισμικό εξισορρόπησης, η μέθοδος εξισορρόπησης πεδίου έγινε πολύ απλούστερη, διότι όλοι οι υπολογισμοί γίνονται στο πλαίσιο του αναλυτή. Ένας συλλέκτης φωτοκύτταρου με ένα επιταχυνσιόμετρο είναι επαρκής για την εξισορρόπηση πεδίου. Τα δεδομένα εισάγονται στο λογισμικό που παρέχει την κατάλληλη έξοδο. Οι αναλυτές διπλού καναλιού μπορούν να κάνουν αποτελεσματικά εξισορρόπηση μονού και διπλού πεδίου, με τη χρήση των συντελεστών επιρροής. Είναι επίσης δυνατή η χρήση ενός αναλυτή διπλού καναλιού για τη διεξαγωγή εξισορρόπησης δύο πεδίων χωρίς συντελεστές επιρροής. Αυτό επιτρέπει την κατάργηση των δοκιμαστικών λειτουργιών.

### **6.2.5 Η αρχή της εξισορρόπησης ενός βήματος χρησιμοποιώντας αναλυτές διπλού καναλιού.**

Όταν ο αριθμός των πεδίων εξισορρόπησης αυξάνεται, η κλασική προσέγγιση απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό δοκιμαστικών λειτουργιών για τον προσδιορισμό των συντελεστών επιρροής. Για μικρότερες μηχανές σε εφαρμογές γενικού σκοπού, μπορεί να μην έχει πολλές συνέπειες. Ωστόσο, σε κρίσιμα μηχανήματα, μπορεί να πάρει ώρες για να πραγματοποιηθεί μια δοκιμή. Η ζήτηση εξισορρόπησης πολλαπλών πεδίων απαιτείται για κρίσιμες μηχανές. Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη για μια γρήγορη μέθοδο που χρειάζεται ελάχιστες δοκιμές για την εξισορρόπηση των μηχανών.

Για μηχανές των οποίων οι ρότορες μπορούν να θεωρηθούν άκαμπτοι, υπάρχει μια τεχνική μέσω της οποίας είναι δυνατόν να γίνει εξισορρόπηση σε ένα μόνο βήμα, χωρίς δοκιμαστικές λειτουργίες. Αυτή η μέθοδος απαιτεί έναν αναλυτή διπλού καναλιού, ένα σφυρί κρούσης (ένα σφυρί που μπορεί να μετρήσει το μέγεθος της δύναμη κρούσης), ένα ή περισσότερα επιταχυνσιόμετρα και ένα φωτογραφικό ταχύμετρο (ή οποιαδήποτε άλλα μέσα για να δημιουργηθεί σήμα ανά περιστροφή).

Είδαμε ότι ο στόχος της εξισορρόπησης είναι να καθορίσει το μέγεθος και τον προσανατολισμό της ανισορροπίας των δυνάμεων που ενεργούν σε ένα πεδίο. Η συμβατική μέθοδος είναι να γίνονται δοκιμαστικές λειτουργίες με γνωστά βάρη και στη συνέχεια συνδέονται διορθωτικά βάρη στις κατάλληλες θέσεις για να αντισταθμιστεί η ανισορροπία. Οι συντελεστές επιρροής μπορούν να βοηθήσουν στην μείωση του αριθμού των δοκιμαστικών λειτουργιών για την εξομάλυνση των βραχυχρόνιων διακυμάνσεων και τις επακόλουθες εξισορρόπησης.

Στην εξισορρόπηση ενός βήματος, τα δοκιμαστικά βάρη αντικαθίστανται από ελεγχόμενη φόρτωση της δομής της μηχανής στις θέσεις των μετατροπών, συνήθως με χτύπημα της μηχανής με ένα σφυρί κρούσης. Ο αναλυτής μπορεί να μετρήσει και να συγκρίνει το φορτίο

εισόδου (δύναμη) και την απόκριση εξόδου (ταλαντώσεις) ταυτόχρονα με την χρήση λειτουργιών ανάλυσης με διασταύρωση καναλιών. Αυτό αποδίδει το μέγεθος και την φάση των σχέσεων μεταξύ δύναμης και ταλάντωσης σε ένα εύρος συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των σύγχρονων μερών της μηχανής.

Η πληροφορία αυτή επιτρέπει την ακριβή εκτίμηση των φορτίων ανισορροπίας που αναμένεται από μετρήσεις ταλαντώσεων κατά τη λειτουργία. Η κρούση θα πρέπει να πραγματοποιείται όταν η μηχανή δεν λειτουργεί έτσι μπορούν να εφαρμοστούν τα διορθωτικοί βάρη. Το μηχάνημα χρειάζεται να σταματήσει μόνο μια φορά. Στην περίπτωση διόρθωσης ενός πεδίου, μετρήσεις και οι υπολογισμοί είναι απλοί και εύκολοι. Εάν χρησιμοποιούνται περισσότερα πεδία διόρθωσης, η διαδικασία είναι ακόμη απλούστερη, αλλά οι υπολογισμοί είναι πιο περίπλοκοι. Ωστόσο, η διαδικασία είναι απλούστερη από τη μέθοδο εξισορρόπησης των συντελεστών επιρροής για τις εφαρμογές πολλαπλών πεδίων.

### **6.2.6 Η χρήση των μηχανημάτων εξισορρόπησης ενάντια της μεθόδου εξισορρόπησης πεδίου**

Οι τεχνικές που συζητήθηκαν νωρίτερα σχετίζονται με την εξισορρόπηση πεδίου. Κατά την διάρκεια εξισορρόπησης πεδίου ο ρότορας πρέπει να είναι τοποθετημένος στα δικά του έδρανα του και δουλεύει στην κανονική ταχύτητα λειτουργίας. Οι ρότορες εξισορροπούνται επίσης με την χρήση μηχανημάτων εξισορρόπησης. Στην περίπτωση αυτή, ο ρότορας παίρνει κίνηση από έναν ηλεκτρικό δίσκο συνδεδεμένο με μια σύζευξη ή έναν ιμάντα.

Η εξισορρόπηση ενός ρότορα με μηχανές εξισορρόπησης εκτελείται κατά τη διάρκεια την κατασκευής του, αφού ο ρότορας κατασκευάζεται πλήρως και πριν από την τελική συναρμολόγηση στη θήκη του. Αυτό αποζημιώνει για τα κατασκευαστικά λάθη και διασφαλίζει την ομαλή λειτουργία μετά την εκκίνηση. Οι ρότορες επίσης, εξισορροπούνται με μηχανές εξισορρόπησης μετά από επισκευές.

Κατά τη διάρκεια της εξισορρόπησης πεδίου, ο ρότορας δεν χρειάζεται να απομακρυνθεί από το περίβλημα του. Η αφαίρεση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγάλο ποσό χρόνου διακοπής λειτουργίας. Η εξισορρόπηση πεδίου συνήθως οδηγεί σε χαμηλότερα επίπεδα ταλαντώσεων, διότι η διαδικασία εξισορρόπησης εκτελείται στην τελική ταχύτητα λειτουργίας, με τα έδρανα και το σύστημα μετάδοσης κίνησης της μηχανής. Επίσης λαμβάνονται υπό ψην παράγοντες, όπως η αεροδυναμική, η ευθυγράμμιση και διαρθρωτικές επιπτώσεις.

Το μειονέκτημα είναι ότι είναι λιγότερο βολικό για το άτομο που κάνει την εξισορρόπηση επειδή το μηχάνημα εξισορρόπησης πρέπει να μεταφερθεί στο μέρος που βρίσκεται το μηχάνημα. Επιπλέον, υπάρχουν κίνδυνοι που εμπλέκονται, όπως χαλαρά βάρη εξισορρόπησης που ρίχνονται από ένα ρότορα υψηλής ταχύτητας.

## 6.2.7 Μηχανές εξισορρόπησης

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι μηχανημάτων εξισορρόπησης:

Στατικές βάσεις εξισορρόπησης

Μηχανές σκληρών εδράνων

Μηχανές μαλακών εδράνων

Μηχανές υψηλής ταχύτητας.

Οι στατικές βάσεις εξισορρόπησης δεν απαιτούν περιστροφή, αλλά μπορούν να διορθώσουν μόνο στατική ανισορροπία ή ανισορροπία ενός πεδίου. Είναι αρκετά ευαίσθητα για τροχιστικά. Το πλεονέκτημα τους είναι το χαμηλό κόστος και η ασφαλή λειτουργία.

Οι μηχανές ζυγοστάθμισης σκληρών εδράνων έχουν δύσκαμπτα στηρίγματα λειτουργίας, χαμηλότερη ευαισθησία και περισσότερα εξελιγμένα ηλεκτρονικά. Απαιτούν μια τεράστια, άκαμπτη βάση όπου στηρίζονται μόνιμα και είναι βαθμονομημένες σε αυτή τη θέση. Ταλαντώσεις από παρακείμενες μηχανές μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματά τους. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε γραμμές παραγωγής, όπου απαιτείται γρήγορος κύκλος (Εικόνα 6.5).



**Σχήμα 6.5** Μηχάνημα εξισορρόπησης σκληρών εδράνων (μηχάνημα εξισορρόπησης IRD) [1]

Οι κάθετοι ισορροπιστές (Σχήμα 6.6) είναι ιδανικοί για εφαρμογές που έχουν υψηλές απαιτήσεις αξιοπιστίας, απαιτήσεις υψηλής ακρίβειας, ή για ρότορες χωρίς έδρανα κύλισης, όπως συμπλέκτες, σφόνδυλοι, ανεμιστήρες και φυσητήρες.



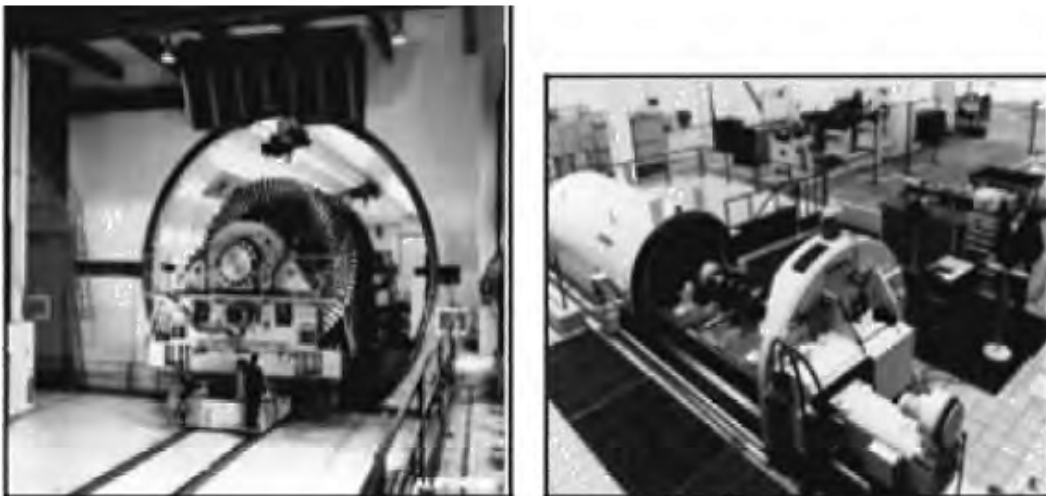
**Σχήμα 6.6** Μηχάνημα κάθετης εξισορρόπησης με προσθήκης κεφαλής τρυπανιού (μηχανές εξισορρόπησης Schmitt) [1]

Οι μηχανές εξισορρόπησης μαλακών εδράνων έχουν ευέλικτα στηρίγματα λειτουργίας, υψηλή ευαισθησία και απλά ηλεκτρονικά κυκλώματα. Μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε και μπορούν να μετακινηθούν χωρίς να επηρεαστούν οι ρυθμίσεις βαθμονόμησης τους. Τα ευέλικτα στηρίγματα λειτουργίας τους παρέχουν φυσική απομόνωση, ως εκ τούτου, οι κοντινές δραστηριότητες του χώρου εργασίας μπορούν να συνεχιστούν, ενώ η μηχανή εξακολουθεί να επιτυγχάνει τα ιδανικά επίπεδα ισορροπίας. Μια μηχανή εξισορρόπησης μαλακών εδράνων που παίρνει κίνηση με ιμάντα μπορεί πάντα να επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα ισορροπίας από μια μηχανή σκληρών εδράνων. Κάθε μονάδα επισκευής θα πρέπει να έχει μια μηχανή εξισορρόπησης μαλακών εδράνων και ίσως μια στατική βάση εξισορρόπησης (Σχήμα 6.7).

Η υψηλής ταχύτητας εξισορρόπηση των λεπίδων συνήθως γίνεται σε έναν θάλαμο κενού για να αποφευχθεί η απώλεια ισχύος λόγω υψηλής αναταραχής. Ένας θάλαμος κενού με ενσωματωμένη προστασία από έκρηξη καθιστά δυνατή την εξισορρόπηση υψηλής ταχύτητας και δοκιμή σε μικρού και μεσαίου-μεγέθους turbo-ρότορες στο χώρο λειτουργίας (Σχήμα 6.8). Η εξισορρόπηση υψηλής ταχύτητας συνεπάγεται τον κίνδυνο καταστροφής ή ακόμη και της καταστροφής του ρότορα κατά τη διάρκεια της εξισορρόπησης. Υπάρχουν μερικά καινοτόμα σχέδια με μοναδικά χαρακτηριστικά που είναι διαθέσιμα για να απορροφούν την ενέργεια που απελευθερώνεται όταν συμβεί μια έκρηξη ρότορα. Δημιουργούνται ζώνες ασφαλείας και εύκολα να αποκαθιστούνται εύκολα σε περίπτωση σημαντικής έκρηξης. Οι μηχανές εξισορρόπησης μπορούν τυπικά να ισορροπήσουν ρότορες έως 8 τόνους, μέχρι 1,7 m σε διάμετρο και σε ταχύτητες έως 60 000 rpm.



**Σχήμα 6.7** Μηχανές εξισορρόπησης μαλακών εδράνων (μηχανήματα εξισορρόπησης Shimadzu) [1]



**Σχήμα 6.8** Μηχανές εξισορρόπησης υψηλής ταχύτητας(Schenk Trebel) [1]

### 6.2.8 Όρια Εξισορρόπησης

Το ISO 1940 είναι ίσως το πιο ευρέως χρησιμοποιημένο πρότυπο εξισορρόπησης. Το πρότυπο αυτό ορίζει τον βαθμό ποιότητας εξισορρόπησης ( $G$ ) ως:

$$G=e \times \omega$$



όπου  $e$  = εκκεντρότητα σε mm  $\omega$  = η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα σε ακτίνια / δευτερόλεπτο. Το πρότυπο καθορίζει εννέα βαθμούς εξισορρόπησης που ισχύουν σε διάφορες εφαρμογές.

Οι βαθμοί αναφέρονται ως G 0.4, G 1, G 2.5, 6.3 G, G 16, G 40, G 100, G 250 και G 630. Η G 0.4 είναι η πιο αυστηρή τάξη και εφαρμόζεται στους ρότορες των γυροσκοπίων, αδραχιτών και στον σπλισμό αλεστών ακρίβειας, μεταξύ άλλων. Ο πιο επιεικής βαθμός είναι G 630 που ισχύει για στροφαλοφόρους των μεγάλων και άκαμπτα τοποθετημένων κινητήρων diesel. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι βαθμοί για κανονικές εφαρμογές είναι ο G 2,5 και ο G 6.3. Ο πρώτος εφαρμόζεται στους περισσότερους ρότορες στροβιλομηχανών και ο δεύτερος είναι για τους ανεμιστήρες, τις αντλίες, τους κινητήρες και γενικών μηχανημάτων. Το American Petroleum Institute (API), καθορίζει το βαθμό εξισορρόπησης με έναν διαφορετικό τρόπο που να είναι αυστηρότερος από τα πρότυπα ISO. Βιομηχανίες που επιδιώκουν υψηλότερα πρότυπα αξιοπιστίας από τις μηχανές τους ζητούν τώρα τη χρήση των προτύπων API.

Ας δούμε πώς το πρότυπο API διαφέρει από το πρότυπο ISO 1940 Ας υποθέσουμε ότι πρέπει να εξισοροπιστεί ένας ρότορας των 400 kg και θα λειτουργεί σε 10 000 rpm. Η αιτία της ασυμμετρίας βρίσκεται στα 50 mm και το επίπεδο είναι 10 g (0,01 kg). Λαμβάνοντας υπόψη ένα μισό πεδίο, το βάρος θα θεωρείτε δια του 2 δηλαδή 200 kg.

Η εκκεντρότητα:

$$e = \frac{0.01 \times 50}{200} = 0.0025\text{mm}(2.5 \text{ microns})$$

Γωνιακή ταχύτητα:

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times N}{60} = 2 \times 3,142 \times \frac{10000}{60} = 1047 \text{ rad/s}$$

Ο βαθμός ποιότητας εξισορρόπησης ISO:

$$G = e \times \omega = 1047 \times 0,0025 = 2,6$$

Το ISO 1940 καθορίζει για στροβιλομηχανές G 2.5 και έτσι το παράδειγμα μας είναι αρκετά σύμφωνο με το πρότυπο. Το API αναφέρεται στην ποιότητα εξισορρόπησης από την άποψη της

υπολειμματικής ανισορροπίας στον ρότορα. Καθορίζει το μέγιστο όριο με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$U - max = 6350 \times \frac{W}{N}$$

όπου  $U - max$  = η μέγιστη υπολειπόμενη ανισορροπία που επιτρέπεται ανά πεδίο (g-mm)  $W$  = το βάρος του ρότορα σε kg  $N$  = ταχύτητα σε στροφές ανά λεπτό. Έτσι:

$$U - max = 6350 \times \frac{200}{10000} = 127 \text{ g} - \text{mm}$$

Για τον υπολογισμό της εκκεντρικότητας χρειάζεται να διαιρέσουμε την υπολειμματική ανισορροπία με το βάρος του ρότορα που επιδρά ανά πεδίο, το οποίο σε αυτήν την περίπτωση είναι 200 kg. API εκκεντρότητα είναι:

$$e = \frac{U - max}{W} = \frac{127 \text{ g} - \text{mm}}{200 \text{ kg}(\text{microns})} = 0.63 \text{ microns}(0.00063 \text{ mm})$$

Ως εκ τούτου, η απαίτηση API για τον ρότορα μας σε μορφή του προτύπου ISO θα είναι:

$$G = e \times \omega = 0,00063 \times 1047 \text{ rad/s} = 0.66$$

Η τιμή αυτή είναι ισοδύναμη με το πρότυπο ISO G 0,66. Έτσι σημειώνουμε ότι η API είναι σχεδόν τέσσερις φορές αυστηρότερη από ότι το πρότυπο ISO! Αυτά τα πρότυπα εξισορρόπησης είναι ικανά για τον καθορισμό ροτόρων για εξισορρόπηση χαμηλής ταχύτητας. Ωστόσο, είναι σκόπιμο οι ρότορες στροβιλομηχανών να εξισορροπούνται σε υψηλές ταχύτητες. Αυτό βοηθά στο να διασφαλιστεί ότι η απόκριση του ρότορα (μέγιστη ταλάντωση) λόγω ανισορροπίας είναι εντός των ορίων σε ταχύτητες λειτουργίας και επίσης ενώ ξεπερνάει κρίσιμες ταχύτητες.

### 6.3 Ευθυγράμμιση

Μαζί με την ανισορροπία, η κακή ευθυγράμμιση είναι μια άλλη σημαντική αιτία των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων. Η κακή ευθυγράμμιση σε ένα μηχάνημα μπορεί να είναι εσωτερική ή εξωτερική. Η εσωτερική αναφέρεται στην ευθυγράμμιση των αξόνων των ρουλεμάν μεταξύ τους. Αυτό επιτυγχάνεται με τα περιβλήματα των εδράνων, τις θήκες, τα

υποστηρίγματα και άλλα στοιχεία, και εξαρτάται από την κατασκευή του εξοπλισμού. Η βασική απαίτηση είναι ότι η περιστροφή του άξονα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ομόκεντρη. Μια καλή εσωτερική ευθυγράμμιση εξαλείφει της τάσεις και, συνεπώς, εξασφαλίζει μια ομαλή, χωρίς κραδασμούς λειτουργία.

Τα μηχανήματα που είναι εγκατεστημένα σε ζεύγη ή σε σειρά, είτε κινούμενες ή κινητήριες μηχανές. Ακριβώς όπως και στην εσωτερικής ευθυγράμμισης, οι άξονες των ατράκτων των δύο μηχανημάτων σε κατάσταση συνδυασμού πρέπει επίσης να είναι όσο δυνατόν πιο συγγραμμικές κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας τους.

Συχνά, δεν εξασφαλίζεται η πολυσυγγραμμικότητα των αξόνων της ατράκτου, είτε με συνδέσμους ή αλλιώς. Αυτό συμβαίνει ειδικά στην περίπτωση που οι άξονες έχουν σημαντικές κλίσεις. Υπό αυτές τις συνθήκες, συγγραμμικότητας οι άξονες των ατράκτων δεν μπορούν να παράγουν καλή ευθυγράμμιση. Αυτό θα οδηγήσει σε ταλαντώσεις. Είναι επίσης σημαντικό η ευθυγράμμιση να επιτυγχάνεται για λειτουργικές και όχι για σταθερές συνθήκες. Η ευθυγράμμιση των άκρων της ατράκτου μπορεί να επηρεαστεί κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας λόγω των ακόλουθων λόγων:

- Η θερμική διαστολή των στηριγμάτων
- Τάσεις από σωλήνες
- Παραμόρφωση των κατασκευών
- Τροποποιήσεις στο κρέμασμα του ρότορα με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Η κίνηση των άκρων της ατράκτου που οφείλεται σε αυτές τις αιτίες μπορεί να υπολογιστεί σε ορισμένες περιπτώσεις. Οι υπολογισμοί αυτοί θα πρέπει να ενσωματωθούν. Για παράδειγμα, πολλές μηχανές πρέπει να μην είναι σωστά ευθυγραμμισμένες σε κρύα κατάσταση ώστε να είναι ευθυγραμμισμένες κατά τη διάρκεια των κανονικών συνθηκών λειτουργίας, όταν θερμαίνονται.

Όταν τα αίτια της κακής ευθυγράμμισης είναι πέρα από τον έλεγχο, μπορεί να μην είναι δυνατόν να γίνει τέλεια ευθυγράμμιση των μηχανημάτων. Συνιστάται τότε να λειτουργούν στο πλησιέστερη πιθανή απαιτούμενη κατάσταση, όπως την απαιτούμενη πίεση και θερμοκρασία στους σωλήνες και τα περιβλήματα των αντλιών, συμπιεστών, ανεμογεννητριών, κ.λπ.

### **6.3.1 Συνέπειες της ευθυγράμμισης**

Η κακή ευθυγράμμιση της μηχανής προκαλεί δυνάμεις τριβής και κάμψης στο εσωτερικό του συνδέσμου. Αυτό οδηγεί σε ανώμαλες καταπονήσεις στα έδρανα, καθώς και φθορά και θέρμανση στην σύζευξη. Η άτρακτος μπορεί επίσης να αποτύχει εξαιτίας της κόπωσης που προκαλείται από υψηλότερες από τις κυκλικές τάσεις από αυτές του σχεδιασμού. Οι Κυκλικές

τάσεις των εδράνων δημιουργούν αξονικές και ακτινικές ταλαντώσεις. Εκτός από τις υπερφορτώσεις, προκαλούν ταλαντώσεις που μεταδίδεται και σε άλλα μέρη του εξοπλισμού.

Οι αντλίες και στρόβιλοι, που είναι εξοπλισμένοι με ειδικές σφραγίδες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε αποτυχία που οφείλεται σε υπερβολικές ταλαντώσεις.

Οι ταλαντώσεις μπορεί να μεταδοθούν σε μηχανήματα που δεν λειτουργούν και να βλάψουν τα έδρανα τους (false brineling) καθώς επίσης και τις σφραγίδες τους. Έτσι, ακόμα και όταν απαιτούνται οι εφεδρικές μηχανές δεν είναι διαθέσιμες. Για να αποφευχθούν όλα τα προβλήματα που συνδέονται με κακή ευθυγράμμιση, καθίσταται απαραίτητη για τη διεξαγωγή αυτής της διαδικασίας συντήρησης με απόλυτη σοβαρότητα. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν χρειάζονται όλες οι μηχανές το ίδιο επίπεδο ακρίβειας στην ευθυγράμμιση. Η προσπάθεια που απαιτείται για την ευθυγράμμιση ενός μηχανήματος εξαρτάται από τον τύπο, την ταχύτητα και την αξιοπιστία που αναμένεται από αυτό.

### **6.3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία ευθυγράμμισης**

#### **Επίδραση της εκκεντρότητας**

Η ευθυγράμμιση των αξόνων γίνεται με τη χρήση σημείων αναφοράς που βρίσκονται στα άκρα της ατράκτου, στις πλήμνες σύζευξης ή οποιοδήποτε άλλο τμήμα συνδέεται στην άτρακτο. Οι ατέλειες που οφείλονται σε μηχανική κατεργασία μπορεί να κάνουν τα άκρα της ατράκτου να έχει έκκεντρο σχήμα. Για να ελεγχθεί, τοποθετείται στο ένα άκρο της ατράκτου Α ένα ρολόι μέτρησης διαμέτρου με τον δείκτη στο άλλο άκρο Β. Όταν άκρο Α με τη βάση του ρολογιού περιστρέφεται, η ανάγνωση από τον δείκτη του καντράν δείχνει την εκκεντρικότητα του άκρου Β.

Αυτές οι εκκεντρικότητες μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένες ενδείξεις και ως εκ τούτου να οδηγηθούμε σε λανθασμένη ευθυγράμμιση. Η λύση είναι να περιστρέφονται μαζί δύο άκρα για να ληφθεί η μετατόπιση τους. Αυτή η διαδικασία παραλείπει το σφάλμα της εκκεντρότητας και την εκκεντρικότητα στα άκρα της ατράκτου ή τους κόμβους σύνδεσης.

#### **Επίδραση της βάση έδρασης των μηχανημάτων (μαλακό πόδι)**

Είναι ουσιώδες τα στηρίγματα (πόδια) των μηχανών να τοποθετούνται στο ίδιο επίπεδο με την πλάκα βάσης για να αποφευχθεί οποιαδήποτε παραμόρφωση του σώματος ή το σπάσιμο του ποδιού. Ομοίως, αν τα τέσσερα στηρίγματα δεν είναι στο ίδιο επίπεδο, η θέση των αξόνων θα εξαρτάται από τη σειρά με την οποία σφίγγονται οι βίδες συγκράτησης. Η επαφή μεταξύ της πλατφόρμας και των ποδιών μπορεί να ελεγχθεί με ένα σύνολο από ροδέλες ή φίλερ.

Κατά τη διάρκεια μιας νέας εγκατάστασης, ή μετά από μια τροποποίηση ή αναθεώρηση της βάσης, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν ακριβείς ευθείες άκρες και επίπεδα για να βεβαιωθεί ότι όλα τα πόδια του μηχανήματος βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Τα επίπεδα στήριξης των μηχανημάτων που θα συζευχθούν πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο παράλληλες. Το αποδεκτό επίπεδο ανοχής για αυτά τα πεδία είναι συνήθως 0,1 mm. Σε ορισμένα βαρέα μηχανήματα, μπορεί να μην είναι δυνατόν να ανιχνεύσουμε ένα κενό κάτω από τα πόδια, ακόμη και όταν τα πέλματα δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

Ένα απλό τεστ για μαλακό πόδι γίνεται με τη δημιουργία μετρητών κλήσης με κάποια υπολειπόμενη εκκεντρότητα (όπως περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα). Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να τοποθετηθεί μια ροδέλα κάτω από ένα από τα μπροστινά πόδια και να σημειωθεί η ανάγνωση. Στη συνέχεια αφαιρείται και τοποθετείται κάτω από το επόμενο μπροστινό πόδι. Η ανάγνωση θα πρέπει να είναι η ίδια. Η ίδια διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί για τα πίσω πόδια.

Μια άλλη μέθοδος είναι να τοποθετηθούν μετρητές κλήσης όπως και πριν, αλλά ο δείκτης του επιλογέα πρέπει να τοποθετηθεί στην κατακόρυφη διεύθυνση. Το μηχάνημα στη συνέχεια βιδώνεται σφιχτά στη βάση. Τώρα χαλαρώνεται κάθε βίδα μια κάθε φορά και η διαφορά καταγράφεται από το μετρητή. Οποιαδήποτε ανάγνωση καντράν, η οποία είναι εμφανώς υψηλότερη από τους άλλους, είναι ένδειξη μαλακού ποδιού. Το μαλακό πόδι μπορεί να καθοριστεί από την τοποθέτηση ενός αποστάτη κατάλληλου πάχους (πάνω από το κενό) κάτω από αυτό.

## **Επίδραση της αξονικής θέσης των μηχανών**

Η αξονική θέση των άκρων του άξονα που αναφέρεται ως η απόσταση μεταξύ των άκρων άξονα (DBSE). Συνήθως, οι περισσότεροι σύνδεσμοι επιτρέπουν μια μεγάλη ανοχή στην αξονική θέση και συνεπώς δεν αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον έλεγχο. Ωστόσο, για συνδέσμους όπως ζεύξεις δίσκων, ένα σφάλμα στην αξονική θέση θέτει τους δίσκους υπό καταπόνηση και μειώνει τη διάρκεια ζωής τους. Επίσης, μπορεί να προκαλέσει αξονική ώθηση, που τελικά να προσθέσει επιπλέον φορτίο στα ρουλεμάν του μηχανήματος. Επομένως, είναι απαραίτητο να ληφθεί αυτό το στοιχείο υπόψη, ιδιαίτερα όταν τα μηχανήματα λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Αν  $X$  είναι η συνιστώμενη DBSE για τη ζεύξη,  $X + 0,5$  mm χρησιμοποιείται για μηχανήματα μεταφοράς ενός προϊόντος στο εύρος θερμοκρασίας 100-200 °C. Θα πρέπει να είναι  $X + 1$  mm όταν μεταφέρει το προϊόν σε θερμοκρασία μεταξύ 200 και 250 °C. Όταν τοποθετηθεί σε κινητήρες, πρέπει να είναι στο μηδέν αξονικής παραμόρφωσης με τον κινητήρα στο κέντρο του πλωτήρα. Τα άκρα, του κινητήρα του ρότορα της πλεύσης και το κέντρο πλεύσης θα πρέπει να επισημαίνονται στον άξονα του αποσυνδεδεμένου κινητήρα. Μετά από μαρκάρισμα, τους ενώνουμε και εφαρμόζουμε δύναμη ώθησης σε δύο

κατευθύνσεις. Θα πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι ούτε τα εσωλέμβια ούτε τα εξωλέμβια στοπ των ρουλεμάν να τρίβονται.

## Επίδραση του υποστηρίγματος

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ιδιαίτερα με τον αποστάτη ζεύξης, πρέπει να γίνει έλεγχος του κρεμάσματος του υποστηρίγματος δείκτη πρέπει να χρησιμοποιούνται για την ευθυγράμμιση. Η DBSE σε αυτές τις συζεύξεις μπορεί να είναι μεγάλη, και όταν οι βραχίονες ευθυγράμμισης σφίγγονται σε ένα κόμβο και να επεκτείνονται και σε άλλους κόμβους, υπάρχει μια τάση να κυρτώσουν. Το κύρτωμα μπορεί να επηρεάσει τις αναγνώσεις του μετρητή, που οδηγεί σε παρερμηνείες και σφάλματα. Για μήκη στηριγμάτων μεγαλύτερα από 25-30 cm, είναι απαραίτητο να δοθεί επιπρόσθετη ακαμψία για να ελαχιστοποιηθεί το κύρτωμα.

Ως εκ τούτου, είναι αναγκαίο να εκτελέσετε έναν έλεγχο κύρτωσης για το στήριγμα. Ο έλεγχος κύρτωσης είναι απαραίτητος μόνο για την ευθυγράμμιση οριζόντιων μηχανών, διότι η κύρτωση προκαλείται από τη βαρύτητα λόγω του βάρους της βάσης. Στα κάθετα μηχανήματα, το κύρτωμα της βάσης είναι ενιαία για όλη την περιστροφή του βραχίονα, και επομένως δεν χρειάζεται να ελεγχθεί. Για να κάνετε έλεγχο κύρτωσης χείλους, τοποθετήστε το στήριγμα σε ένα σκληρό σωλήνα, μηδενίστε το δείκτη στη μέση της επάνω θέσης και στρέψτε το σωλήνα από την κορυφή μέχρι κάτω επάνω σε στρίποδα πριονίσματος. Τώρα σημειώστε την ένδειξη στο κάτω μέρος. Η συνολική κύρτωση είναι η διπλάσια της κύρτωσης του υποστηρίγματος. Είναι πιθανόν ο σωλήνας που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο κύρτωσης να κυρτώσει και ο ίδιος. Για να περιοριστεί το πρόβλημα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα παρακάτω μεγέθη σωλήνων:

Σωλήνες(in)	Διάστημα μεταξύ στηριγμάτων	
2	0.76 m	2 ft 6 in.
3	0.91 m	3 ft
4	1.06 m	3 ft 6 in.
6	1.32 m	4 ft 4 in.

Για υποστηρίγματα τοποθέτησης προσώπου, κάνουμε τον ίδιο έλεγχο ανάμεσα στα κέντρα του τόννου ή τα τοποθετούμε μέσα σε έναν σωλήνα που είναι ταπωμένος στο ένα άκρο του. Η δεύτερη μέθοδος θα χρειαστεί αντιστροφή του σήματος άλλα τα νούμερα θα είναι σωστά. Η ένδειξη του οργάνου στην κορυφή είναι στο μηδέν. Ο σωλήνας τώρα περιστρέφεται 180° και οι ενδείξεις του οργάνου περιστρέφονται. Καταγράφουμε την καινούργια ένδειξη. Αν η ένδειξη είναι -0.4mm τότε η πραγματική κύρτωση του υποστηρίγματος είναι 0.2mm και πρέπει να διορθωθεί στην μηχανή.

### 6.3.3 Τεχνικές ευθυγράμμισης

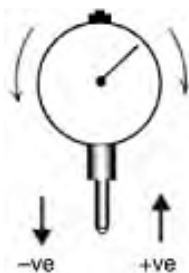
Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την ευθυγράμμιση μιας μηχανής. Η κατάλληλη μέθοδος επιλέγεται με βάση τον τύπο της μηχανής, την ταχύτητα περιστροφής, η σημασία της μηχανής στην παραγωγή, την πολιτική συντήρησης και τις ανοχές ευθυγράμμισης.

Μπορεί να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί απλώς μια ευθεία ακμή για να ευθυγραμμιστούν μηχανές που περιστρέφονται με λιγότερες από 1500 rpm, καθώς και για μηχανές σε χαμηλότερο εύρος υποδύναμης, η οποίες δεν είναι εύθραυστες στην κατασκευή τους. Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους, η ακρίβεια μπορεί να είναι στο εύρος 0,3-0,8 mm.

Μηχανές που λειτουργούν σε ταχύτητες από 3000 rpm και πάνω, οι οποίες είναι στο μέσο εύρος ισχύς 20 kW-1 MW και εγκαθιστούν με εύθραυστα εξαρτήματα, όπως μηχανικές σφραγίδες και παραλαβής διαστολών, θα πρέπει να ευθυγραμμίζονται με 0,1 mm. Η απαίτηση αυτή καθιστά αναγκαία τη χρήση συγκριτικών μέσων, όπως μετρητές διαμέτρου, και τις μεθόδους με το ελάχιστο εναπομένον σφάλμα. Μια πλειοψηφία μηχανών εμπίπτουν στην κατηγορία αυτή, και ως εκ τούτου, οι διαθέσιμες μέθοδοι εξηγούνται παρακάτω.

### Συμβάσεις ευθυγράμμισης χρησιμοποιώντας ένα ωρολογιακό μικρόμετρο

Ο ωρολογιακός μετρητής είναι το πιο κοινό συγκριτικό μέσο που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της ευθυγράμμισης. Ο μετρητής λειτουργεί με βάση την αρχή οδοντωτής ράβδου-γροναζιού. Οι συμβάσεις που ακολουθούνται εμφανίζονται στο σχήμα 6.9.

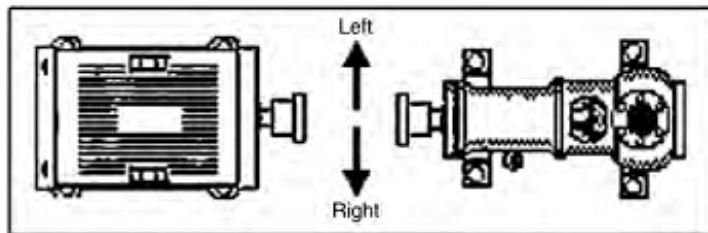


**Σχήμα 6.9** Ωρολογιακό μικρόμετρο [1]

Όταν το ελατήριο συμπιέζεται, ο δείκτης πιέζεται προς τα μέσα και η βελόνα του ρολογιού κινείται προς τα δεξιά, δείχνοντας θετική ένδειξη. Όταν ο δείκτης κινείται προς τα έξω, η βελόνα κινείται αριστερόστροφα, υποδεικνύοντας αρνητική ένδειξης.

Ο ωρολογιακός μετρητής κανονικά στερεώνεται σε έναν βραχίονα, και ο δείκτης τοποθετείται στο άκρο του άξονα ή στην πλήμνη συνδέσμου. Ο δείκτης πιέζεται προς κάπου στην μέση του. Αυτό είναι απαραίτητο για να καταστεί δυνατή η θετική και αρνητική ένδειξη χωρίς να φτάσει στο τέλος της διαδρομής του δείκτη. Σε αυτή τη θέση του δείκτη, η κλίμακα του ωρολογιακού μετρητή μπορεί να περιστραφεί για να φτάσει στο μηδέν με τη βελόνα του ρολογιού.

Συνιστάται να σπρώχνεται ο δείκτης από την κορυφή για να εξασφαλιστεί ότι δεν είναι κολλημένος, και ότι λαμβάνονται επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Μια άλλη σύμβαση για αναγνώσεις ευθυγράμμισης με στο οριζόντιο επίπεδο παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.10.



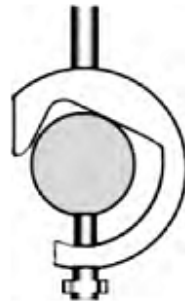
**Σχήμα 6.10** Μετρήσεις ευθυγράμμισης στο οριζόντιο επίπεδο[1]

Έτσι, η σύμβαση διατηρείτε αριστερά και δεξιά όταν στέκεται πίσω από τον οδηγό, αντικριστά με τον οδηγό. Οι αριστερές και δεξιές αναγνώσεις του μετρητή καταγράφονται αναλόγως. Εάν η σύμβαση δεν έχει υλοποιηθεί, θα πρέπει να αναφέρετε στο γράφημα, όπου καταγράφηκαν αυτές οι αναγνώσεις.

### **Ρύθμιση του άξονα για την ευθυγράμμιση**

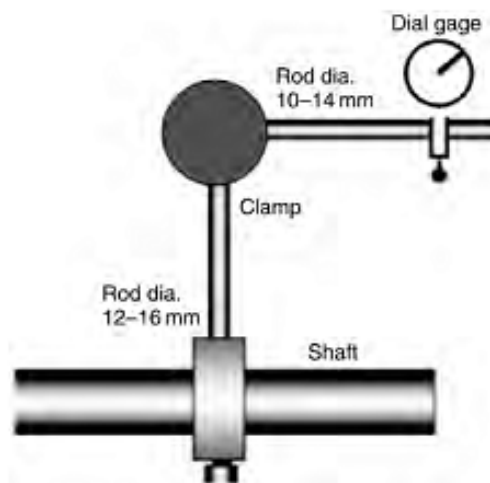
Η σύνδεση με τον άξονα πρέπει να είναι απλή και άκαμπτη. Ο σφιγκτήρας που φαίνεται στην Εικόνα 6.11 είναι ένα καλό παράδειγμα. Οι μαγνητικοί σφιγκτήρες πρέπει να αποφεύγονται, διότι οι συνδέσεις τους δεν είναι αξιόπιστες.





**Σχήμα 6.11** Ρύθμιση ατράκτου για ευθυγράμμιση [1]

Υπάρχουν πολλοί τύποι υποστηριγμάτων ευθυγράμμισης που διατίθενται στην αγορά, και ένα από αυτά φαίνεται στο Σχήμα 6.12. Η βασική αρχή για την επιλογή των υποστηριγμάτων είναι ότι πρέπει να είναι άκαμπτα και με ελάχιστη κύρτωση.



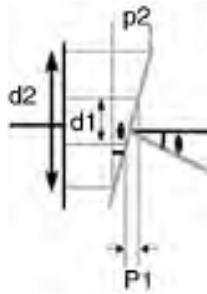
**Σχήμα 6.12** Υποστηρίγματα ευθυγράμμισης [1]

### Τύποι ευθυγράμμισης

Η απόκλιση στις μηχανές οφείλεται στην γωνία και το όφσετ , αλλά σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις η κακή ευθυγράμμιση των μηχανών είναι ένας συνδυασμός και των δύο.

Το γωνιώδες σχήμα είναι η διαφορά μεταξύ των τιμών του συγκριτή για μισή περιστροφή. Για μια δεδομένη γωνιακή μετατόπιση, το γωνιώδες εξαρτάται από τη διάμετρο που περιγράφεται από το ρολόι μέτρησης. Μπορεί να φανεί ότι όταν το  $d1$  αυξάνεται σε  $D2$ , το  $r1$

αυξάνεται με την ίδια αναλογία σε  $p2$ . Αυτή η τιμή πρέπει να καθοριστεί, όταν δίνεται ένα ορισμένο όριο ανοχής (Σχήμα 6.13).

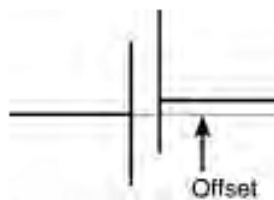


**Σχήμα 6.13** Γωνιώτητα (παραλληλισμός) [1]

Γωνία ευθυγράμμισης: όπου  $p1, p2$  = ένδειξη κλήσης μετρητή όταν περιστρέφεται κατά  $180^\circ$   
 $d1, d2$  = διάμετροι που περιγράφονται από τον μετρητή κλήσης.

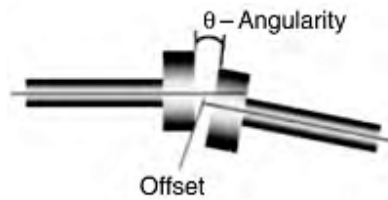
Όταν ο μετρητής κλήσης μετρά ομοκκεντρικότητα, η μετατόπιση γίνεται η ακτίνα περιστροφής του μετρητή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.14. Η ένδειξη του μετρητή θα υποδείξει την διάμετρο, και ως εκ τούτου θα πρέπει να μειωθεί κατά το ήμισυ για να αποκτηθεί το πραγματικό όφσετ.

$$\text{οφσετ} = \frac{\text{ένδειξη μετρητή}}{2}$$



**Σχήμα 6.14** Ακτινική μετατόπιση (ομοκκεντρικότητα) [1]

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στην πράξη η κακή ευθυγράμμιση των μηχανών οφείλεται σε ένα συνδυασμό των δύο αυτών παραγόντων, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6.15.



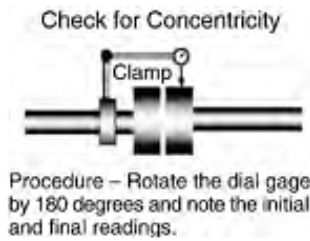
**Σχήμα 6.15** Κακή ευθυγράμμιση ατράκτων με γωνιότητα και όφσσετ[1]

## Μέθοδος ταχείας ευθυγράμμισης με δύο μετρητές

Τα αναγκαία βήματα για την ευθυγράμμιση μιας μηχανής είναι:

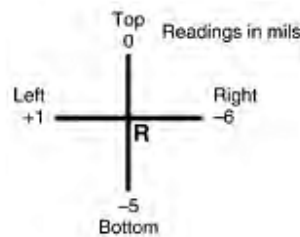
1. Το πρώτο βήμα είναι να χαλαρωθούν οι κοχλίες σύζευξης έτσι ώστε να μην υπάρχει κανένας περιορισμός κατά τη διάρκεια της μέτρησης της γωνιότητας της υπάρχουσας ευθυγράμμισης. Έπειτα περνάμε έναν μετρητή φίλερ ανάμεσα από τις πλήμνες των συνδέσμων για να διασφαλιστεί ότι οι διανομείς δεν ακουμπούν.
2. Ο μετρητής κλήσης συνδέεται όπως φαίνεται στο σχήμα 6.16. Το πρώτο βήμα είναι ο ακτινικός έλεγχος για τη μέτρηση του όφσσετ. Αυτό γίνεται στο κατακόρυφο και οριζόντιο επίπεδο. Για να αποκτηθεί το όφσσετ και στα δύο επίπεδα, πρέπει να παρθούν τέσσερις μετρήσεις. Η σύμβαση που πρέπει να χρησιμοποιείται είναι μία από της παρακάτω:
  - Κορυφή, κάτω, αριστερά και δεξιά (η σύμβαση αριστερά / δεξιά είναι όπως υποδεικνύεται νωρίτερα)
  - θέσεις δείκτη - 12:00, 3:00, 6:00 και 9:00.

Ο μετρητής τοποθετείται γενικά στην κορυφή (12:00), και το μηδέν στην κλίμακα είναι ρυθμιζόμενο ώστε να συμπίπτει με τη βελόνα. Ο δείκτης πρέπει να σπρωχθεί ελαφρώς για να εξασφαλιστεί ότι είναι ελεύθερος και ότι οι αναγνώσεις είναι επαναλαμβανόμενες.



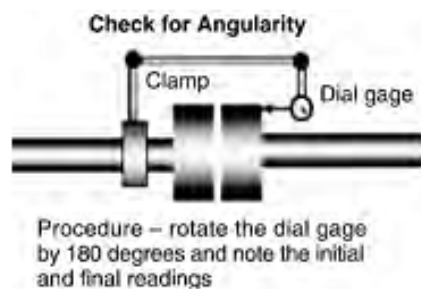
**Σχήμα 6.16** Η ρύθμιση του μετρητή στην άνω θέση. Η διαφορά των μετρήσεων μετά από 180 ° δείχνει όφσεντ σε κάθετα ή οριζόντια πεδία[1]

Σε αυτή τη θέση, και οι δύο άξονες στρέφονται με το χέρι για μια πλήρη περιστροφή, και αναγνώσεις σε κάθε τεταρτημόριο σημειώνονται. Οι μετρήσεις καταγράφονται στις τέσσερις θέσεις γραμμένα με τη μορφή που φαίνεται παρακάτω. Το «R» στο σχήμα 6.17 δείχνει ότι οι μετρήσεις είναι ακτινικές, που προορίζονταν για την αντιστάθμιση.



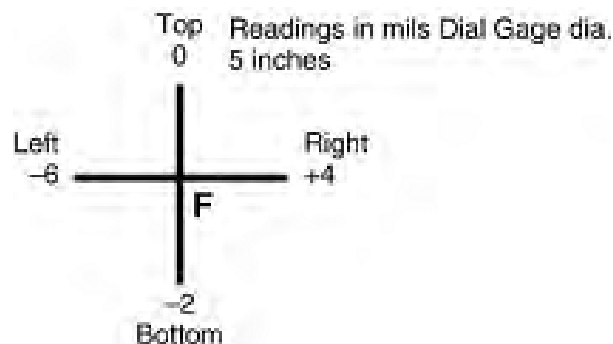
**Σχήμα 6.17** Μετρήσεις σε mils[1]

3. Ο σφιγκτήρας αναπροσαρμόζεται με τον δείκτη του μετρητή για να μετρηθεί η γωνιότητα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.18. Ο δείκτης (όπως φαίνεται στο σχήμα) είναι τώρα παράλληλος προς τους άξονες των ατράκτων. Ακριβώς όπως η μετατόπιση μετρήθηκε στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο, έτσι και η γωνιότητα πρέπει να μετράται σε δύο πεδία. Ο μετρητής περιστρέφεται μια φορά ακόμα κάνοντας μια πλήρη περιστροφή και σταματάει σε κάθε τεταρτημόριο για την σημείωση των αναγνώσεων.



**Σχήμα 6.18** Η ρύθμιση του μετρητή στην άνω θέση. Η διαφορά των μετρήσεων μετά από 180 ° δείχνει γωνιότητα στα κάθετα ή οριζόντια επίπεδα[1]

4. Μόλις καταγραφούν οι ακτινικές αναγνώσεις και οι αναγνώσεις προσώπου, το επόμενο βήμα είναι να μετατρέψουμε τις τιμές αυτές σε κατάλληλο πάχος ροδέλας που θα πρέπει να προστεθεί ή να αφαιρεθεί για να διορθωθεί η ευθυγράμμιση. Για να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα, απαιτούνται πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με την θέση των εμπρός και πίσω ποδιών από το δείκτη μετρητή (Σχήμα 6.19).

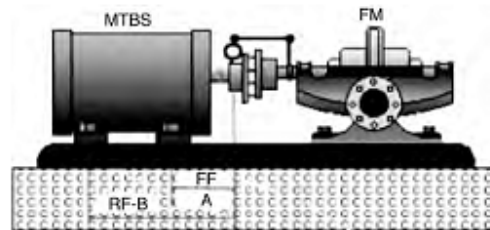


**Σχήμα 6.19** Το «F» υποδεικνύει μετρήσεις του προσώπου (να σημειωθεί η διάμετρον που υποδεικνύεται από τον μετρητή) [1]

Στο Σχήμα 6.20, η αντλία είναι το σταθερό μηχάνημα (FM) και ο κινητήρας είναι το μηχάνημα που θα τοποθετηθεί με ροδέλες (MTBS). Αυτό σημαίνει ότι όλες οι διορθώσεις θα πρέπει να γίνουν με την προσθήκη και την αφαίρεση ροδελών κάτω από τα πόδια του κινητήρα. Η αντλία δεν θα διαταραχθεί από τη θέση της.

Η απόσταση από το δείκτη του μετρητή στο μπροστινό πόδι (FF) του κινητήρα ορίζεται ως «Α». Η απόσταση του πίσω ποδιού (RF) προς το δείκτη του μετρητή ορίζεται ως «Β». Αυτό ολοκληρώνει το σύνολο των δεδομένων που απαιτούνται για να εκτελεστούν οι απαραίτητοι

υπολογισμοί. Τα σύνολα των υπολογισμών που απαιτούνται είναι δύο. Ένα σύνολο για το κατακόρυφο επίπεδο και το άλλο για το οριζόντιο επίπεδο.



**Σχήμα 6.20** Υπολογισμός ροδελών[1]

### Υπολογισμοί για το κατακόρυφο επίπεδο

*Διόρθωση όφσετ.*

Για παράδειγμα, ας πούμε ότι οι ενδείξεις όφσετ για την κορυφή και το κάτω μέρος είναι 0 και -5 mils, αντίστοιχα. Αν ο δείκτης του μετρητή είναι πάνω στον κινητήρα (MTBS), το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι ο άξονας του κινητήρα είναι ψηλότερα από τον άξονα της αντλίας. Είναι ψηλότερα κατά το ήμισυ της τελικής ανάγνωσης μείον τις αρχικές μετρήσεις. Έτσι:

$$\frac{(-5) - 0}{2} = -2,5\text{mils}$$

Ως εκ τούτου, οι ροδέλες 2,5 mils θα πρέπει να αφαιρεθούν από τα μπροστινά και πίσω πόδια.

*Διόρθωση γωνιότητας.*

Ας πούμε ότι οι ενδείξεις γωνιότητας για την κορυφή και κάτω ήταν 0 και -2 mils, αντίστοιχα. Αν ο δείκτης του μετρητή ακουμπάει με την πίσω όψη του κόμβου σύζευξης του μοτέρ, το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η σύζευξη έχει μικρότερο κενό στο το κάτω μέρος παρά στην κορυφή. Η γραμμή χαράσσει έναν κύκλο 5 in. Η γωνία  $\theta = \tan^{-1} (P1 / D1)$ . Επειδή η γωνία είναι πολύ μικρή, η αντίστροφη του tan μπορεί να αγνοηθεί:

$$p1 = 0 - (-0.002) \text{ in.}$$

(Ο τύπος θα αντιστραφεί, αν ο δείκτης ακουμπάει την μπροστινή όψη του κόμβου σύζευξης, το οποίο συνήθως συμβαίνει όταν υπάρχει ένα μεγάλο διαχωριστικό μεταξύ των συνδέσμων.)

$$d1 = 5 \text{ in.}$$

$$\theta = \frac{0,002}{5}$$

$$= 0,4 \text{ mili - radians}(0.023^\circ)$$

Αυτή η γωνία  $\theta$  είναι επίσης τη γωνία κλίσης του άξονα του κινητήρα σε σχέση με τον άξονα της αντλίας. Το τρίγωνο της γωνιακής θέσης στη σύζευξη είναι παρόμοιο με το τρίγωνο της κλίσης του κινητήρα. Η γραμμή AB είναι ο υπάρχων άξονας κλίσης του κινητήρα (Εικόνα 6.21). Πρέπει να ανυψωθεί κατά X στο FF (μπροστινό πόδι) και κατά Y στο RF (πίσω πόδι). Οι τιμές Y και X υπολογίζονται ως εξής. Το X και Y προσεγγίζονται ως τόξα και μπορεί να χρησιμοποιείται ο τύπος:

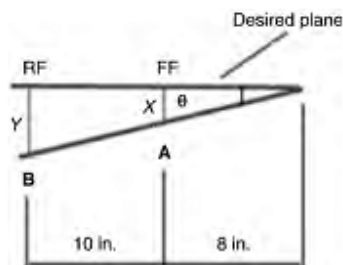
$$s = r \times \theta$$

Όπου  $s$  = μήκος τόξου,  $r$  = ακτίνα ,  $\theta$  = περιεχόμενη γωνία

Έτσι:

$$x = 8 \times 0.4 = 3.2 \text{ mils (πρόσθεση ροδέλας)}$$

$$y = 18 \times 0.4 = 7.2 \text{ mils (πρόσθεση ροδέλας)}$$



**Σχήμα 6.21** Υπολογισμός τιμών X και Y[1]

Τα τελικά αποτελέσματα θα πρέπει να περιλαμβάνουν διορθώσεις τόσο για το όφσετ και τη γωνιότητα.

Στο σημείο A:

Αποτελέσματα όφσετ – αφαιρούμε ροδέλες 2,5 mils

Αποτελέσματα γωνιότητας - προσθέτουμε ροδέλες 3,2 mils

Έτσι, τοποθετούμε ροδέλες 0,7 mils κάτω από το μπροστινό πόδι του κινητήρα.

Στο σημείο B:

Αποτελέσματα όφσετ - αφαιρούμε ροδέλες 2,5 mils

Αποτελέσματα γωνιακή - προσθέτουμε ροδέλες 7,2 mils

Έτσι, τοποθετούμε ροδέλες 4,7 mils κάτω από τα πίσω πόδια του κινητήρα.

### Υπολογισμοί για το οριζόντιο επίπεδο

Για να αναθεωρηθεί η διαδικασία, επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς για το οριζόντιο επίπεδο. Η σύμβαση είναι: πίσω από τον κινητήρα, αριστερά είναι η αρχική μέτρηση και δεξιά είναι η τελική μέτρηση.

Υπολογισμοί του όψετ:

Αριστερή μέτρηση: +1 mils

Δεξιά μέτρηση: -6 mils

Επειδή ο δείκτης του μετρητή είναι στον άξονα του κινητήρα, μια αρνητική δεξιά μέτρηση υποδεικνύει ότι ο άξονας της ατράκτου του κινητήρα είναι στα αριστερά του άξονα της ατράκτου της αντλίας.

$$\text{όψετ} = \frac{-6 - (+1)}{2} = -3.5 \text{ mils}$$

Μετακινούμε τα σημεία A και B του κινητήρα προς τα δεξιά κατά 3,5 mils.

Υπολογισμοί γωνιότητας:

Καθώς ο δείκτης του μετρητή αγγίζει την οπίσθια όψη της πλήμνης σύζευξης κινητήρα, ο άξονας της ατράκτου μοιάζει με αυτό που φαίνεται στο σχήμα 6.22.

Στην περίπτωση αυτή:

$$p1 = +4 - (-6) = +10$$

$$d1 = 5 \text{ in.}$$

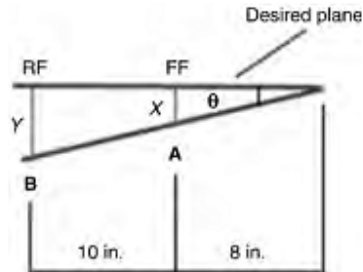
Έτσι:

$$\theta = \frac{0,001}{5}$$

$$= 2 \text{ mili} - \text{radians}(0.114^\circ)$$



Ως εκ τούτου:  $x = 2 \times 8 = 16$  mils - κίνηση προς τα αριστερά,  $y = 2 \times 18 = 36$  mils - κίνηση προς τα αριστερά.



**Σχήμα 6.22 [1]**

*Στο σημείο A:*

Αποτελέσματα όφσεντ – μετακινούμε 3,5 mils προς τα δεξιά  
 Αποτελέσματα γωνιότητας - μετακινούμε 16 mils προς τα αριστερά  
 Έτσι, μετακινούμε προς τα αριστερά κατά 12,5 mils.

*Στο σημείο B:*

Αποτελέσματα όφσεντ – μετακινούμε 3,5 mils προς τα δεξιά  
 Αποτελέσματα γωνιότητα – μετακινούμε 36 mils προς τα αριστερά  
 Έτσι, μετακινούμε προς τα αριστερά κατά 32,5 mils.

Οι κάθετες διορθώσεις των ροδελών θα πρέπει πάντα να γίνονται πριν από τις οριζόντιες. Μόλις οι κάθετες ροδέλες προσαρμοστούν, οι βίδες θα πρέπει να σφίγγονται και θα πρέπει να γίνεται ένα γρήγορο τεστ στο κατακόρυφο επίπεδο μέτρησης για να επιβεβαιωθεί η ακρίβεια. Εάν η ακρίβεια είναι ικανοποιητική, οι βίδες μπορεί να χαλαρώσουν και η οριζόντια ευθυγράμμιση πρέπει να γίνει με βίδες jack (εάν υπάρχουν). Οι περιορισμοί αυτής της μεθόδου είναι οι εξής:

- Οι υπολογισμοί είναι αναγκαίοι
- Είναι ευεργετικό να είμαστε σε θέση να φανταστούμε τον προσανατολισμό της ατράκτου από τις ενδείξεις του μετρητή κλήσης αλλά αυτό απαιτεί εμπειρία.
- Είναι επιρρεπής σε λάθη στους υπολογισμούς, το κρέμασμα του βραχίονα και τις ενδείξεις του μετρητή κλήσης.
- Αν ο άξονας της μίας ή και των δύο μηχανών έχουν σημαντική αξονική επίπλευση, η ένδειξη γωνιότητας μπορεί να είναι λανθασμένη.

## Μέθοδος ευθυγράμμισης τριών μετρητών

Στην ενότητα που ασχολείται με τη μέθοδο δύο μετρητών, θα χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα όργανο, αλλά με δύο μετρήσεις, το ένα με τον δείκτη στην την ακτινική κατεύθυνση και το άλλο παράλληλο προς τους άξονες της ατράκτου. Υπάρχουν διαθέσιμα υποστηρίγματα τα οποία μπορούν να φιλοξενήσουν δύο μετρητές σε τη φορά που μπορούν να μετρήσουν το όφσσετ και τη γωνιότητα της ευθυγράμμισης. Αυτό μειώνει το χρόνο που απαιτείται για τη συλλογή μετρήσεων. Στα όρια της μεθόδου δύο μετρητών, συναντήσαμε μια ειδική περίπτωση ευθυγράμμισης μηχανημάτων που έχουν υψηλή αξονική επίπλευση. Αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Κινητήρες επιπλεώμενης ατράκτου (η αξονική επίπλευση είναι 10 mm)
- Μηχανήματα με ρουλεμάν ώσης τύπου Kingsbury (η αξονική επίπλευση είναι 0,2-0,3 mm)
- Μηχανήματα με φθαρμένα έδρανα κύλισης ή κωνικά ρουλεμάν (0.05-0.1 mm).

Εάν οι άτρακτοι αυτών των μηχανημάτων κινούνται αξονικά, ενώ τις περιστρέφουμε χειροκίνητα για αποκτηθούν οι μετρήσεις του προσώπου, μπορεί να ληφθούν λανθασμένες ενδείξεις. Για να εξαλειφθεί αυτό το σφάλμα χρησιμοποιείται ένας επιπλέον μετρητής . Ο δείκτης του παρόντος μετρητή τοποθετείται σε 180 ° από τον δείκτη του άλλου μετρητικού οργάνου. Ως εκ τούτου, έχουμε τρεις μετρητές (Σχήμα 6.23). Ο ένας δείχνει το ακτινικό όφσσετ και τα άλλα δύο όργανα δείχνουν τις μετρήσεις γωνιότητας ή του προσώπου. Ορίζονται ως εξής:

F<sub>m</sub> – όργανο μέτρησης γωνιότητας

F<sub>r</sub> - όργανο μέτρησης που χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τη μέτρηση γωνιότητας (ο δείκτης στις 180° διαφορά).

Ρυθμίζουμε τους μετρητές στο μηδέν και γυρίζουμε τον άξονα κατά 180 °. Καταγράφουμε τις μετρήσεις και των δύο μετρητικών οργάνων. Η σωστή μέτρηση του προσώπου για γωνιότητα είναι:

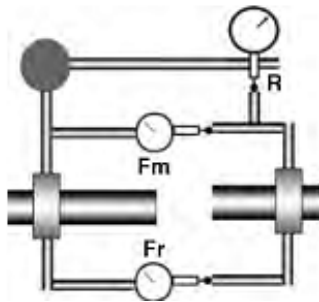
$$F = \frac{F_m - F_r}{2}$$

*Παράδειγμα:*

Το  $F_m$  και το  $F_r$  μηδενίζονται. Οι άτρακτοι περιστρέφονται κατά  $180^\circ$  και οι νέες μετρήσεις καταγράφονται. Αν  $F_m = -4$  και  $F_r = -20$ , η γωνιώτητα είναι:

$$F = \frac{-4 - (-20)}{2} = +8$$

Μόλις ληφθεί η σωστή γωνιώτητα, η υπόλοιπη διαδικασία είναι πανομοιότυπη με την τη μέθοδο δύο μετρητικών οργάνων.



**Σχήμα 6.23** Μια εγκατάσταση που δείχνει την ρύθμιση ευθυγράμμισης τριών μετρητών [1]

### Μέθοδος ευθυγράμμισης αντίστροφου μετρητή

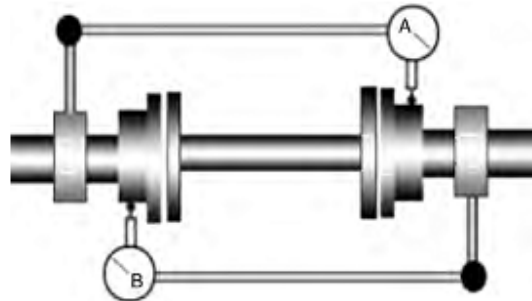
Η ρύθμιση για τη μέθοδο ευθυγράμμισης αντίστροφου δείχνεται στο Σχήμα 6.24. Η μέθοδος αντίστροφου μετρητή χρησιμοποιείται γενικά για άρθρωση με διπλούς συνδέσμους. Αυτοί είναι σύνδεσμοι που έχουν μεταξύ τους αποστάτες. Αυτή η μέθοδος παρέχει πολλά πλεονεκτήματα, τα οποία αναφέρονται παρακάτω:

- Η ακρίβεια δεν επηρεάζεται από την αξονική κίνηση των ατράκτων.
- Όταν και οι δύο άξονες περιστρέφονται μαζί, οι ασυμμετρίες των αξόνων στις πλήμνες των συνδέσμων δεν μετρώνται.
- Η γεωμετρική ακρίβεια είναι καλύτερη από αυτή της μεθόδου δύο-μετρητικών οργάνων.
- Οι σύνδεσμοι δεν χρειάζεται να ανοιχθούν για τη μέτρηση της απόκλισης.
- Οι διορθώσεις του 'κρεμάσματος' και της αύξησης της θερμοκρασίας μπορεί να ενσωματωθεί.

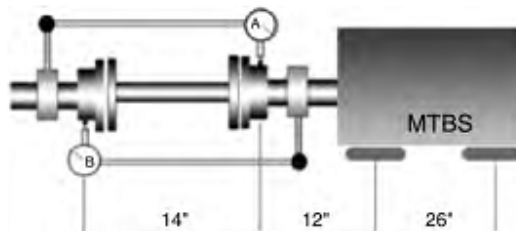
Σκεφτείτε την συνδεσμολογία στο σχήμα 6.25 για να αποκτηθούν οι διορθώσεις ροδέλας με την μέθοδο αντίστροφου μετρητή.

Χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες συμβάσεις:

- Όργανο B με δείκτη επί της σταθερής μηχανής (δεν φαίνεται) είναι στο επίπεδο B
  - Όργανο A με το δείκτη πάνω στον κινητήρα (MTBS) είναι στο επίπεδο A



**Σχήμα 6.24** Αντίστροφη μέθοδος μετρητή [1]



**Σχήμα 6.25** Ένα συγκρότημα που χρησιμοποιεί την μέθοδο αντίστροφου μετρητή[1]

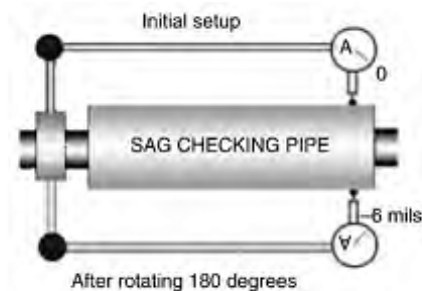
- Το πόδι της μηχανής που βρίσκεται κοντά στο όργανο A είναι το εσωτέρο πόδι και ονομάζεται πόδι IB
- Το εξωτερικό πόδι του κινητήρα ονομάζεται πόδι OB
- Απόσταση μεταξύ του επιπέδου A και B = 14 in.
- Απόσταση μεταξύ του επιπέδου A και IB = 12 in.
- Απόσταση μεταξύ IB και OB = 26 in.

Κατά τον έλεγχο για κρέμασμα έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις. Η σύνδεση με τον σφιγκτήρα τοποθετείτε όπως φαίνεται στο σχήμα 6.26 στην άνω θέση. Ο σωλήνας με τον σφιγκτήρα περιστρέφεται κατά 180°. Λόγω της κρεμάει του σφιγκτήρα, ο δείκτης του οργάνου κινείται προς τα έξω, δείχνοντας μια αρνητική τιμή -6 mils. Οι μετρητές A και B, στη συνέχεια, είναι συνδεδεμένοι με το μηχάνημα, όπως φαίνεται στο σχήμα. Το όργανο A έχει τον δείκτη του πάνω στον κόμβο σύζευξης του κινητήρα και βρίσκεται στην άνω θέση. Ο ο δείκτης του οργάνου B είναι στο σταθερό μηχάνημα και βρίσκεται στην κάτω θέση. Οι άτρακτοι στη συνέχεια περιστρέφονται κάνοντας μία πλήρη περιστροφή και ενδείξεις των οργάνων καταγράφονται για κάθε τεταρτημόριο. Αυτές οι μετρήσεις φαίνονται στο Σχήμα 6.27.

Οι μετρήσεις έχουν επηρεαστεί από το κρέμασμα. Ο έλεγχος κρεμάσματος έδειξε μια ένδειξη - 6 Mils. Αυτό ελήφθη μετά την περιστροφή του δείκτη του οργάνου από την κορυφή προς τον πυθμένα θέσεις (TB). Το όργανο μέτρησης A έχει και αυτό μετακινηθεί από τη θέση (TB). Αυτό σημαίνει ότι δείχνει 6 mils περισσότερο από την τιμή που οφείλεται στη μη ευθυγράμμιση. Η τιμή αυτή θα πρέπει, επομένως, να αφαιρείται για να επιτευχθεί η σωστή ένδειξη.

Οι ενδείξεις A είναι κορυφή 0 πυθμένας +20. Μετά τη διόρθωση κρεμάσματος οι μετρήσεις θα πρέπει να είναι: κορυφή 0 πυθμένας 14 Οι οριζόντιες μετρήσεις, όπως προαναφέρθηκε, δεν επηρεάζονται από κρέμασμα.

Το όργανο A είναι στην άτρακτο του κινητήρα (MTBS). Το κάτω ανάγνωση είναι θετική, υποδεικνύοντας ότι στο κατακόρυφο επίπεδο του δείκτη του οργάνου A (ας πούμε του επιπέδου A), είναι σε υψηλότερη θέση.



**Σχήμα 6.26** Κλήση με σφικκτήρα που περιστρέφεται 180°[1]



**Σχήμα 6.27** Οι ενδείξεις δείχνουν κρέμασμα στον μετρητή A[1]

Οι ενδείξεις (TB) του οργάνου B (Σχήμα 6.28), πρέπει επίσης να διορθωθούν για κρέμασμα. Στην περίπτωση αυτή, ο δείκτης ξεκινά την διαδρομή του στο κάτω μέρος και τελειώνει στην κορυφή. Για το λόγο αυτό, οι τεχνικοί συνήθως διατηρούν την ένδειξη του οργάνου στο μηδέν στην κάτω θέση. Η διαδικασία της διόρθωσης κρεμάσματος μπορεί να προκαλέσει σύγχυση σε αυτό το σημείο. Ο συγγραφέας προτείνει ότι η παραπάνω διαδικασία της αφαίρεσης της

ένδειξης του έλεγχου κρεμάσματος (6 mils σε αυτή την περίπτωση) πρέπει να επαναληφθεί για την ένδειξη του κάτω μέρους.

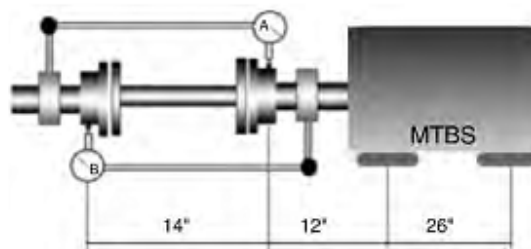


**Σχήμα 6.28** Οι ενδείξεις δείχνουν κρέμασμα στον μετρητή B[1]

Οι διορθωμένες ενδείξεις κρεμάσματος του οργάνου B είναι: κορυφή +18 πυθμένας -6. Τώρα προσθέτουμε +6 mils στις άνω και κάτω ενδείξεις: κορυφή: +24 πυθμένας: 0. Ο δείκτης του οργάνου B βρίσκεται στο σταθερό μηχάνημα (Σχήμα 6.29) και, ενώ κινείται από το κορυφή προς τον πυθμένα ο δείκτης πιέζεται προς τα μέσα για να δώσει μια θετική ανάγνωση. αυτό συνεπάγεται ότι στο κατακόρυφο επίπεδο του δείκτη του οργάνου B (ας πούμε επίπεδο B), είναι επίσης υψηλότερη.

Ως εκ τούτου, οι ενδείξεις που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τους υπολογισμούς είναι:

Όργανο A:	κορυφή: 0	πυθμένας: 14	θέση στο πεδίο: υψηλότερη
Όργανο B:	κορυφή: 24	πυθμένας: 0	θέση στο πεδίο: υψηλότερη



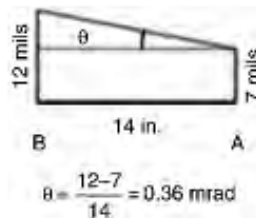
**Σχήμα 6.29**[1]

Τα υποδεικνυόμενες ενδείξεις των οργάνων είναι διπλάσιες από τις τιμές μετατόπισης, ως εκ τούτου:

το ακτινικό όφσσετ στο επίπεδο A είναι 7 mils

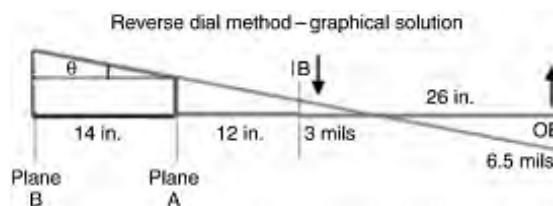
το ακτινικό όφσεν στο επίπεδο B είναι 12 mils

Η απόσταση μεταξύ των επιπέδων A και B, υποδεικνύεται ως 14 in. Κατά συνέπεια, η γωνιακή κακή ευθυγράμμιση λαμβάνετε (σχήμα 6.30):



**Σχήμα 6.30**[1]

Μόλις είναι γνωστή η γωνία, η γραμμή επεκτείνεται στο OB όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.31. Οι αποστάσεις στο IB και OB μπορεί να προσδιοριστούν από το γράφημα, και οι τιμές αυτές υποδηλώνουν το πάχος της ροδέλα που πρέπει να αφαιρεθεί ή να προστεθεί.

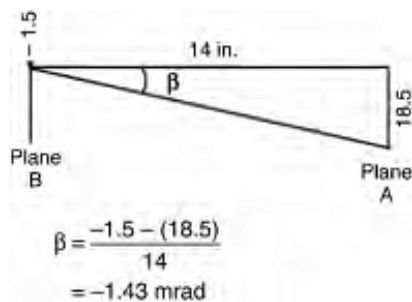


**Σχήμα 6.31** Διάγραμμα που δείχνει την γραμμή που φτάνει το OB [1]

Οι οριζόντιες κινήσεις υπολογίζονται με παρόμοιο τρόπο.

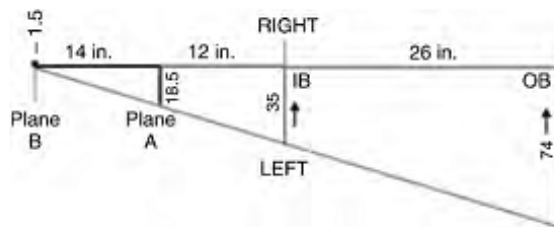
Οι ενδείξεις στο όργανο A είναι:	αριστερά: +29	δεξιά: -8
Αυτό μπορεί να μειωθεί σε:	αριστερά: +37	δεξιά: 0
Οι ενδείξεις στο όργανο B είναι:	αριστερά: +11	δεξιά: +8
Αυτό μπορεί να μειωθεί σε:	αριστερά: 0	δεξιά: -3

Το ακτινικό όφσεν (Σχήμα 6.32) στο οριζόντιο επίπεδο A (όργανο A)	=18.5
θέση δείκτη στο πεδίο:	=αριστερά
Το ακτινικό όφσεν στο οριζόντιο επίπεδο B (όργανο B)	=-1.5
θέση δείκτη στο πεδίο:	= δεξιά



**Σχήμα 6.32** Η γωνία της κακής ευθυγράμμισης στο οριζόντιο επίπεδο[1]

Έτσι, το πόδι IB πρέπει να μετακινηθεί προς τα δεξιά κατά 35 mils (Σχήμα 6.33) και το πόδι OB πρέπει επίσης να κινηθεί προς τα δεξιά κατά 74 mils.



**Σχήμα 6.33** Αντίστροφη μέθοδος μετρητή- γραφική λύση - οριζόντιο επίπεδο[1]

### Σημείωση - αποζημίωση για θερμική ανάπτυξη

Οι μηχανές που συνδέονται με ατράκτους, όπως τουρμπίνες ατμού, αντλίες που χειρίζονται ζεστά υγρά και υψηλής ταχύτητας κιβώτια ταχυτήτων λειτουργούν σε θερμοκρασίες αρκετά υψηλές ώστε να προκαλέσουν την διαστολή στο περίβλημα του μηχανήματος. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως θερμική ανάπτυξη. Η θερμική ανάπτυξη των συζευγμένων μηχανημάτων με αυτά τα παραδείγματα μπορεί να μην είναι ακριβώς η ίδια, το οποίο προκαλεί τη σχετική μετατόπιση των αξόνων από τις «κρύες» σταθερές θέσεις τους. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε επιδείνωση της κατάστασης της ευθυγράμμισης, εκτός και αν έχουν ληφθεί σωστά αντισταθμιστικά μέτρα.

Κατά συνέπεια, είναι αναγκαίο να αντισταθμίζουμε για θερμική ανάπτυξη. Η αποζημίωση κάνει τις μηχανές να μην είναι ευθυγραμμισμένες στην ψυχρή τους κατάσταση τους, αλλά υπό συνθήκες λειτουργίας να υπάρχει σωστή ευθυγράμμιση. Άμεσα διαθέσιμες προδιαγραφές για την κρύα ευθυγράμμιση μπορούν να ληφθούν από τους κατασκευαστές της μηχανής. Ωστόσο, όταν ο κατασκευαστής δεν παρέχει τις προδιαγραφές θερμικής ανάπτυξης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες οδηγίες.



Το βάθος του μηχανήματος μπορεί να θεωρηθεί ότι βιώνει μια μονόδρομη θερμική διαστολή. Ο τύπος της γραμμικής διαστολής χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η αύξηση σε μήκος.

$$dL = (L \times \alpha) dT$$

όπου  $dL$  = θερμική διαστολή  $L$  = ύψος άξονα στη βάση της μηχανής  $\alpha$  = συντελεστής θερμικής διαστολής του υλικού (0.0000118 χυτοσιδήρου σε μονάδες SI και 0.0000059 σε Μονάδες FPS)  $dT$  = αλλαγή στη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Παράδειγμα:

Έχουμε μια αντλία με υγρό στους 120° C. Το ύψος βάσης – προς – κέντρο είναι 500 mm (19,7 in.). Η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 20° C.

$$dL = (L \times \alpha) dT$$

$$dL = 500 \text{ mm} \times 0.0000118 \times (120 - 20) [19.7 \times 0.0000059 \times 212]$$

$$= 0.59 \text{ mm (24.6 mils)}$$

Υπάρχει επίσης ο εμπειρικός κανόνας, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια γρήγορη μέθοδος για να προσδιοριστεί η θερμική διαστολή. Ο κανόνας ορίζει ότι:

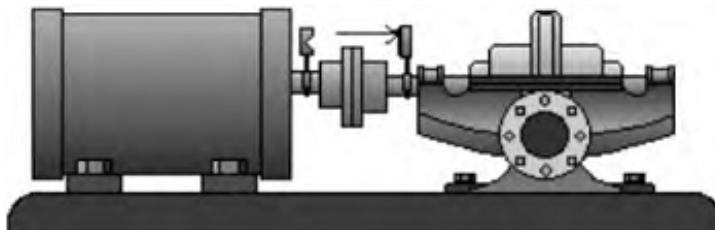
- Υπάρχει διαστολή από 1 mm για κάθε 1m μήκος για άνοδο θερμοκρασίας 100° C ή υπάρχει διαστολή 1 mil για μήκος 1 in. για άνοδο θερμοκρασίας 100° C
- Αύξηση του συνόλου κατά 20%. Στο παραπάνω παράδειγμα, η αύξηση της θερμοκρασίας ήταν 100° C. Μετά τον εμπειρικό κανόνα ,για μήκος 0,5 m, θα διασταλεί κατά 0,5 mm. Με αύξηση κατά 20%, η απάντηση είναι 0,6 mm. Σε ίντσες, προσεγγιστικά το μήκος είναι 20 in.. Έτσι για 100° C αύξηση θα είναι 20 mils. Τώρα αυξάνουμε το αποτέλεσμα κατά 20%, και η απάντηση είναι 24 mils. Αυτό είναι πολύ κοντά προς την απαντήσει παραπάνω! Μόλις γίνει γνωστή η θερμική ανάπτυξη, αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί με ροδέλες. Εάν τα αποτελέσματα της ευθυγράμμισης δείξουν ότι τα πόδια πρέπει να ανυψωθούν με την προσθήκη αποστατών 0, 85 mm και βλέπουμε ότι η θερμική αύξηση θα είναι 0,6 χιλιοστά, τότε θα πρέπει να τοποθετηθούν αποστάτες μόνο 0,25 χιλιοστά. Το υπόλοιπο της απαιτούμενης ανύψωσης θα συμβεί μέσω διαστολής. Εάν στην παραπάνω περίπτωση τα αποτελέσματα της ευθυγράμμισης δείχνουν ότι πρέπει να προστεθούν οι αποστάτες 0,4 mm, τότε πρέπει να αφαιρεθούν αποστάτες 0,2 χιλιοστών.

## Ευθυγράμμιση με λέιζερ

Ευθυγράμμιση με συγκριτές, όπως όργανα μέτρησης παρέχουν ένα καλό βαθμό ακρίβειας, αλλά αυτές οι μέθοδοι απαιτούν δεξιότητες, κατάρτιση και εμπειρία. Κατά συνέπεια, αυτές οι μέθοδοι είναι επιρρεπής σε λάθη και μπορεί να πάρουν ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Η μέθοδος ευθυγράμμισης με τη χρήση λέιζερ (Σχήμα 6.34) υπερνικά τα μειονεκτήματα που αναφέρονται παραπάνω και είναι σταδιακά γίνεται η προτιμώμενη μέθοδος ευθυγράμμισης για τα περισσότερα μηχανήματα. Λόγω των τελευταίων εξελίξεων σε αυτή την τεχνική, η ευθυγράμμιση, η συλλογή δεδομένων και οι υπολογισμοί έχουν γίνει γρήγοροι και ακριβείς.

Ορισμένα συστήματα λέιζερ χρειάζονται λιγότερο από το ένα τέταρτο της στροφής της ατράκτου για να παράγουν πολύ καλά δεδομένα διόρθωσης αποστατών. Έχουν ενσωματωμένες ανοχές ευθυγράμμισης, και ως εκ τούτου δεν υπάρχει ανάγκη για έναν εμπειρογνώμονα για να κρίνουμε την ποιότητα της υπολειμματικής ευθυγράμμισης.

Εκτός από το προφανές πλεονέκτημα στις κρίσιμες μηχανές, η ευθυγράμμιση λέιζερ είναι ιδανική για την ευθυγράμμιση σε πύργους ψύξης κιβώτιων ταχυτήτων με τους κινητήρες τους. Η απόσταση μεταξύ αυτών είναι τυπικά μέχρι 2-5 m. Η μέθοδος με όργανα μέτρησης για τις εφαρμογές αυτές είναι πολύ αργή.



**Σχήμα 6.34** Ευθυγράμμιση με λέιζερ[1]

Οι ακτίνες λέιζερ μπορούν να ταξιδέψουν σε μεγάλες αποστάσεις, και ως εκ τούτου, η ευθυγράμμιση των μηχανών με μεγάλη απόσταση μεταξύ τους μπορεί να γίνει με μεγάλη ακρίβεια και σχετική ευκολία.

Το σύστημα ευθυγράμμισης με λέιζερ περιλαμβάνει έναν αναλυτή (Σχήμα 6.35) και δύο κεφαλές λέιζερ. Οι κεφαλές λέιζερ συνδέονται με τις δύο ατράκτους. Οι κεφαλές λέιζερ πρέπει να είναι αντικριστά, και κάθε κεφαλή έχει ένα πομπό και έναν δέκτη. Όταν οι άτρακτοι περιστραφούν, οι δέκτες εντοπίζουν την κίνηση των ακτινών λέιζερ. Οι τιμές αυτές πάνε στον αναλυτή. Τα δεδομένα των μηχανημάτων και τις απαιτούμενες αποστάσεις μπαίνουν αρχικά στον αναλυτή. Τα δεδομένα από τις κεφαλές λέιζερ και τα δεδομένα του μηχανήματος

χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι διορθώσεις των αποστατών για το μηχάνημα. Οι ακτίνες λέιζερ δεν λυγίζουν σε μεγάλες αποστάσεις και για τον λόγο αυτό το κρέμασμα εξαλείφεται εντελώς.



**Σχήμα 6.35** Σύστημα ευθυγράμμισης με λέιζερ που αποτελείται από κεφαλή laser, ανακλαστήρα και αναλυτή (Prueftechnik - Optalign Plus system) [1]

Μερικά συστήματα ευθυγράμμισης λέιζερ έχουν μόνο μία κεφαλή λέιζερ με πομπό και ένα αντανακλαστικό πρίσμα από την άλλη. Ο αναλυτής στην περίπτωση αυτή παρέχεται με μόνο βασικά χαρακτηριστικά. Τα συστήματα αυτά είναι ιδανικά για μηχανήματα γενικής χρήσης. Καταργούν τα όργανα μέτρησης και να παρέχουν μια αριθμομηχανή ευθυγράμμισης. Η μεθοδολογία αυτών των συστημάτων είναι η ίδια. Μόλις εγκατασταθεί η κεφαλή λέιζερ και ο ανακλαστήρας, οι άτρακτοι πρέπει να περιστραφούν. Σε κάθε τέταρτο της περιστροφής, ο αναλυτής πρέπει να ενεργοποιείται για να αποκτηθούν οι μετρήσεις. Μετά από αυτό, ο αναλυτής παρέχει τις πληροφορίες διόρθωσης της ευθυγράμμισης.

Ορισμένα προηγμένα συστήματα περιλαμβάνουν επιπλέον χαρακτηριστικά που κάνουν την ευθυγράμμιση των μηχανημάτων εύκολο έργο. Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- Μπορούν να αντιμετωπιστούν και συγκροτήματα γραμμής που μπορεί αποτελούνται από έως και πέντε μηχανές.
- Οι επικοινωνίες RF εξαλείφουν τα καλώδια μεταξύ των κεφαλών λέιζερ και τον αναλυτή.
- Τα ενσωματωμένα κλισίμετρα μπορούν να βρουν αμέσως τη θέση της ατράκτου.
- Σφάλματα που οφείλονται σε ταλαντώσεις από άλλες μηχανές μπορούν επίσης να εξαλειφθούν με τον μέσο όρο.
- Μπορούν επίσης να ευθυγραμμιστούν μονά και μη περιστρεφόμενα μηχανήματα.

- Λιγότερο από το ένα τέταρτο της περιστροφής είναι επαρκής για να αποκτήσουν τα δεδομένα ευθυγράμμισης.
- Είναι δυνατόν να κάνει *απευθείας* ευθυγράμμιση. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει ανάγκη να λάβει μια ανάγνωση και να μεταφερθεί στον αναλυτή για τον υπολογισμό. Η άμεση επικοινωνία των κεφαλών και του αναλυτή το επιτυγχάνει αυτόματα.
- μπορούν να εντοπιστούν μία ή δύο συνθήκες μαλακού ποδιού.
- Θερμική ανάπτυξη των βάρων της μηχανής μπορεί να υπολογιστεί και να ενσωματωθεί στους υπολογισμούς.
- Τα πρότυπα των γνωστών γραμμών μηχανημάτων είναι προγραμματισμένα στον αναλυτή, και μπορούν να επιλεγούν για την καλύτερη κατανόηση και την υποβολή εκθέσεων.
- Όταν ευθυγραμμιστεί μια μηχανή, μπορούν να αποθηκευτούν το ιστορικό και τα δεδομένα της.
- Παρέχουν ενσωματωμένες ανοχές ευθυγράμμισης.

### 6.3.4 Ευθυγράμμιση ανοχές

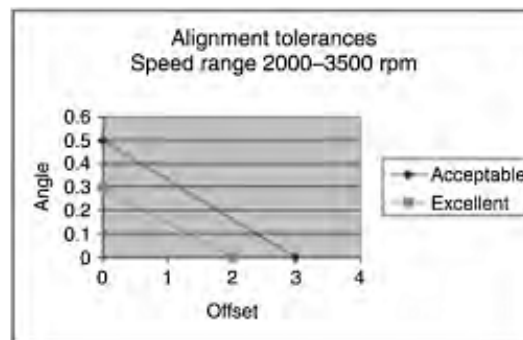
Στην πράξη, είναι σχεδόν αδύνατο να ληφθεί μία μηδενική μετατόπιση ή μηδενική γωνιώτητα, και έτσι μηχανήματα πρέπει να παραμείνουν με ορισμένη υπολειμματική κακή ευθυγράμμιση. Η υπολειπόμενη κακή ευθυγράμμιση έχει μικρές ή καθόλου αρνητικές συνέπειες για τη λειτουργία των μηχανών. Ο παρακάτω πίνακας (πηγή: CSI Ultraspec - Εγχειρίδιο Εύκολης Ευθυγράμμισης) μας παρέχει με τις τιμές εναπομένουσας κακής ευθυγράμμισης που είναι ασφαλή. Οι τιμές είναι με βάση την ταχύτητα λειτουργίας του μηχανήματος.

	Άψογη		Ικανοποιητική	
	Μετατόπιση (mils)	Γωνία (Mils/in.)	Μετατόπιση (mils)	Γωνία (Mils/in.)
<b>Ταχύτητα(rpm)</b>				
<b>&lt;500</b>	<b>5,0</b>	<b>1,5</b>	<b>6</b>	<b>2,0</b>
<b>500-1250</b>	<b>4,0</b>	<b>1,0</b>	<b>5</b>	<b>1,5</b>
<b>1250-2000</b>	<b>3,0</b>	<b>0,5</b>	<b>4</b>	<b>1,0</b>
<b>2000-3500</b>	<b>2,0</b>	<b>0,3</b>	<b>3</b>	<b>0,5</b>
<b>3500-7000</b>	<b>1,0</b>	<b>0,25</b>	<b>2</b>	<b>0,3</b>
<b>&gt;7000</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>1</b>	<b>0,25</b>

Αυτές οι τιμές υποτίθεται ότι είναι καθαρή μετατόπιση ή καθαρή γωνία. Στην πράξη, ο συνδυασμός των δύο είναι πιο κοινός και ανοχές πρέπει να αντιπροσωπεύουν αυτό συνδυασμό. Για παράδειγμα, μια μηχανή λειτουργεί στις 3000 rpm και τα δεδομένα υπολειμματικής κακής ευθυγράμμισης είναι:

Μετατόπιση: 2.6 mils γωνιότητα: 0.25 mil/in. (mrad)

Θεωρητικά ,αυτές οι τιμές θα είναι αποδεκτές. Παρ 'όλα αυτά, ας δούμε αν ο συνδυασμός των δύο είναι αποδεκτός. Για να επιτευχθεί αυτό, γίνεται ένα γράφημα XY όπως δείχνεται στο Σχήμα 6.36.



**Σχήμα 6.36** Ανοχές ευθυγράμμισης[1]

Αν χαραχτεί μια μετατόπιση 2,6 με γωνιότητα 0,25 mils / in. , θα μπορούσε να είναι πέρα από το αποδεκτό εύρος.

## 6.4 Έλεγχος συντονισμού ταλαντώσεων με δυναμικούς απορροφητές

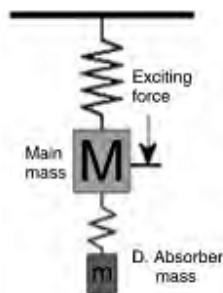
Σε μια προηγούμενη ενότητα, συζητήσαμε το φαινόμενο του συντονισμού με λεπτομέρεια. όταν μία ημιτονοειδής δύναμη δρα σε ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου χωρίς απόσβεση και η συχνότητα της δύναμης είναι ίση με τη φυσική συχνότητα της μάζας, η απόκριση (εύρος ταλάντωσης) είναι άπειρο. Αυτό ονομάζεται συντονισμός. Το πρόβλημα που συνδέεται με αυτό το φαινόμενο είναι ότι η απόκριση του συστήματος ή το εύρος της ταλάντωσης αυξάνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό. Αυτό μπορεί να προκαλέσει ζημιά στο μηχανικό σύστημα.

Στα στάδια του σχεδιασμού των μηχανικών συστημάτων γίνονται πολυάριθμες αναλυτικές μελέτες και δοκιμές προκειμένου να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο κατά την κανονική λειτουργία. Ο συντονισμός δεν μπορεί να εξαλειφθεί, αλλά μπορεί να αντιμετωπιστεί.

Όλα τα μηχανικά συστήματα έχουν μια φυσική συχνότητα. Κατά συνέπεια, αυτά σίγουρα αντιμετωπίζουν συντονισμό. Αν αυτή η φυσική συχνότητα αλλάξει αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες ή για κάποιο λόγο συμβαίνει να συμπίπτει με μια συχνότητα λειτουργίας, θα έχουμε συντονισμό. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να υπάρχει μια απλή λύση για να μετριάσει το σύστημα, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι απαραίτητες δαπανηρές τροποποιήσεις σε μηχανήματα ή / και τα εξαρτήματά τους.

Για αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιείται ένα απλό και φθινό εργαλείο που ονομάζεται δυναμικός απορροφητήρας. Η αρχή λειτουργίας του εξηγείται παρακάτω.

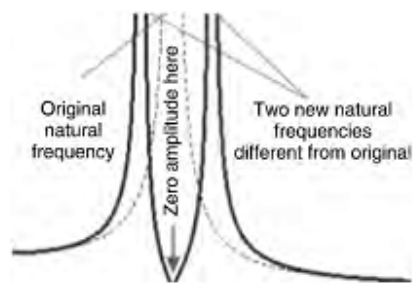
Σκεφτείτε το σύστημα ελατηρίου μάζας. Τώρα δίνουμε ένα άλλο σύστημα ελατηρίου-μάζας σε σειρά με το πρώτο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.37.



**Σχήμα 6.37** Έλεγχος συντονισμού ταλάντωσης[1]

Μετά την σύνδεση του αποσβεστικού συστήματος μάζας-ελατηρίου με την κύρια μάζα, ο συντονισμός του ο απορροφητήρας συντονίζεται για να ταιριάζει με τον συντονισμό της κύρια μάζας. Όταν αυτό επιτευχθεί, κατά τρόπο ενδιαφέροντα, η κίνηση της κύριας μάζας μειώνεται στο μηδέν κατά την προηγούμενη συχνότητα συντονισμού της.

Έτσι, η ενέργεια από την κύρια μάζα προφανώς «απορροφάται» από τον συντονισμένο δυναμικό αποσβεστήρα (Σχήμα 6.38). Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η κίνηση του αποσβεστήρα είναι πεπερασμένη σε αυτή τη συχνότητα συντονισμού, αν και δεν υπάρχει απόσβεση σε κανέναν από τους ταλαντωτές.



**Σχήμα 6.38** Δυναμικός απορροφητής[1]

Αυτό συμβαίνει επειδή το σύστημα αλλάζει από σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας σε σύστημα δύο βαθμών ελευθερίας. Το συνδυασμένο σύστημα μάζας έχει τώρα δύο συχνότητες συντονισμού. Καμία από τις συχνότητες συντονισμού δεν ισούται με την αρχική συχνότητα συντονισμού της κύριας μάζας όταν ήταν μόνη της (και επίσης ο απορροφητής).

Εάν το σύστημα δεν έχει καμία απόσβεση, η αντίδρασή του στον συνδυασμό του συστήματος δύο βαθμών ελευθερίας είναι άπειρη στις νέες φυσικές συχνότητες. Αυτό μπορεί να μην είναι πρόβλημα όταν ένα μηχάνημα δεν λειτουργεί στη φυσική συχνότητα του, αλλά μία μεγάλη άπειρη απόκριση μπορεί να προκαλέσει προβλήματα κατά τη διάρκεια της εκκίνησης και του τερματισμού.

Το πεπερασμένο ποσό της απόσβεσης και για τις δύο μάζες θα εμποδίσει το εύρος ταλάντωσης της μάζας από το να γίνει άπειρη στις νέες φυσικές συχνότητες. Ωστόσο, εάν υπάρχει απόσβεση σε οποιοδήποτε στοιχείο μάζας-ελατηρίου, η απόκριση της κύριας μάζας δεν θα είναι πλέον μηδέν στην επιθυμητή συχνότητα. Το σύστημα δύο βαθμών ελευθερίας έχει δύο φυσικές συχνότητες, που αντιστοιχούν στις δύο φυσικές καταστάσεις ταλάντωσης του συστήματος.

Κατά τη λειτουργία στην χαμηλότερη συχνότητα (συχνότητα μικρότερη από την αρχική φυσική συχνότητα) οι μάζες κινούνται σε φάση μεταξύ τους. Η αρχική μάζα ( $M$ ) και η μάζα απορροφητή ( $m$ ) θα κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση κατά την διάρκεια κάθε κύκλου. Σε υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας (συχνότητα μεγαλύτερη από την αρχική φυσική συχνότητα) οι δύο μάζες κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις,  $180^\circ$  εκτός φάσεως μεταξύ τους. Σε αυτήν την περίπτωση, όταν η αρχική μάζα ( $M$ ) κινείται προς τα πάνω, η μάζα απορρόφησης ( $m$ ) θα κινείται προς τα κάτω και αντίστροφα.

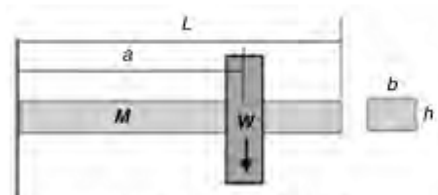
#### 6.4.1 Σχεδιάζοντας έναν δυναμικό απορροφητή

Ένας δυναμικός απορροφητής μπορεί να σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας ένα απλό μαθηματικό τύπο. Τα επίπεδο των δυναμικών δυνάμεων που εξάπτουν τον συντονισμό δεν είναι συνήθως γνωστά, και ως εκ τούτου, είναι απαραίτητες μερικές μικρές προσαρμογές στον τομέα.

Υλικό	Μέτρο του Young $E$ [lb / in. <sup>2</sup> ]	Πυκνότητα $m$ [lb / in. <sup>3</sup> ]
Χάλυβας	29 000 000	0.282
Αλουμίνιο	10 000 000	0.099
Χαλκός	16 000 000	0.321
Σίδηρος	18 000 000	0.260

Το σκίτσο και οι υπολογισμοί που απαιτούνται για να σχεδιαστεί ένας απλός δυναμικός απορροφητήρας παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.39. Είναι αναγκαίο να καθοριστεί το βάρος  $w$  που πρέπει να τοποθετείται στη θέση  $a$  σε ένα ορθογώνιο κομμάτι ράβδου μήκους  $L$  με

διατομή πλάτους ύψους ζώνης  $h$ . Η πρώτη παράμετρος που πρέπει να εκτιμηθεί είναι το ανεξάρτητο μήκος. Για παράδειγμα, ένας δυναμικός απορροφητής για φυσική συχνότητα 3000-cpm είναι στην περιοχή 12-18. Αυτό εξαρτάται από το υλικό και την ορθογώνια διατομή.



$$w = \frac{(2.114 \times 10^9) E \cdot I}{Nf^2 (3 \cdot a^2 L - a^3)} - \frac{0.75 \cdot m \cdot L}{(3 \cdot a^2 L - a^3)}$$

$Nf$  = Desired natural frequency (CPM)  
 $m = M/L$  – Weight per inch of bar (lbs)  
 $E$  = Young's modulus  
 $I = \frac{bh^3}{12}$  Moment of inertia – rectangular section  
 $w$  = Required weight (lbs)

**Σχήμα 6.39** Υπολογισμοί σχεδιασμού για έναν δυναμικό απορροφητή [1]

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται δύο δυναμικοί απορροφητές χάλυβα.

	<b>3000 cpm</b>	<b>3600 cpm</b>
b	0.75 in.	0.75 in.
h	0.5 in.	0.5 in.
L	14.0 in.	13.0 in.
a	12.0 in.	11.0 in.
M	1.48 lbs	1.375 lbs
w	0.527 lbs	0.422 lbs

	<b>1475 cpm</b>	<b>1750 cpm</b>
b	0.75 in.	0.75 in.
h	0.5 in.	0.5 in.
L	20.0 in.	18.0 in.
a	18.0 in.	16.0 in.
M	2.115 lbs	1.904 lbs
w	0.685 lbs	0.752 lbs

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω πίνακες είναι σχέδια μελέτης της συγκεκριμένης περίπτωσης. Με μεταλλαγές των ιδιοτήτων του υλικού, οι διαστάσεις  $L$ ,  $b$ ,  $h$  και  $a$  μπορούν να παράσχουν τον ζητούμενο δυναμικό απορροφητή. Είναι σημαντικό ο δυναμικός απορροφητής



να έχει ορθογωνική διατομή. Τα Διαρθρωτικά προβλήματα συντονισμού στη φύση τους είναι προβλήματα κατεύθυνσης. Ο δυναμικός απορροφητής πρέπει να σχεδιαστεί για να έχει μια φυσική συχνότητα σε μια καθορισμένη κατεύθυνση.

Αν χρησιμοποιείται μια ράβδος με κυκλική διατομή, η ακτινική ακαμψία της ράβδου θα είναι ομοιόμορφη σε όλες τις κατευθύνσεις, και η ράβδος θα πάλλεται σε ένα κυκλικό ή κωνικό σχήμα και όχι σε μία μόνο κατεύθυνση. Αυτό θα μειώσει το εύρος ταλάντωσης στην αρχική κατεύθυνση του συντονισμού, αλλά αυτό θα δημιουργήσει ένα πρόβλημα συντονισμού σε μία κατεύθυνση κάθετη προς τον αρχικό συντονισμό. Το ίδιο επιχείρημα ισχύει και για ένα τετράγωνη ράβδο.

#### **6.4.2 Εφαρμογές της δυναμικού απορροφητή**

Οι δυναμικοί απορροφητές είναι αρκετά αποτελεσματικοί στον έλεγχο συντονισμού σε μηχανήματα που πρέπει λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων λειτουργίας. Αυξάνοντας ή μειώνοντας την μάζα ή την δυσκαμψία μπορεί να εξασθενίσουν τους ανεπιθύμητους κραδασμούς, αλλά μπορεί να προκαλέσουν περαιτέρω προβλήματα συντονισμού σε μια νέα φυσική συχνότητα. Οι δυναμικοί απορροφητές χρησιμοποιούνται για την ελαχιστοποίηση των βλαβών σε αντλίες, αεροσυμπιεστές, μηχανήματα ψύξης, εργαλειομηχανές και άλλες μηχανές οι οποίες επανειλημμένα έχουν προβλήματα συντονισμού κάθε φορά που αρχίζουν ή σταματάνε.

Μια άλλη χρήσιμη εφαρμογή για τους δυναμικούς απορροφητές είναι να ελέγχουν ένα πρόβλημα συντονισμού όταν δεν είναι δυνατές άλλες τεχνικές ανάλυσης. Για παράδειγμα, δεν είναι δυνατόν να κλείσει ένα μηχάνημα και να γίνει ένα διάγραμμα Bode ή να κάνετε μία δοκιμή «Χτυπήματος». Αντιστρόφως, μπορεί να είναι δυνατόν να τοποθετηθεί προσωρινά ένας δυναμικός απορροφητής ενώ το μηχάνημα βρίσκεται σε λειτουργία. Αν το εύρος ταλάντωσης μειωθεί μετά την προσαρμογή του, απορροφητή, τότε ήταν πραγματικά ένα πρόβλημα συντονισμού. Εάν το πρόβλημα ταλάντωσης δεν οφείλεται σε συντονισμό, τοποθετώντας ένα δυναμικό απορροφητή μπορεί να δημιουργηθεί πραγματικά ένα πρόβλημα συντονισμού και να ενισχύσει ή να αυξήσει την υπάρχουσα ταλάντωση, κάνοντας τα πράγματα χειρότερα από ό, τι ήταν πριν από την σύνδεση του απορροφητή.

Οι προσωρινοί δυναμικοί απορροφητές μπορούν να προσκολληθούν σε μηχανές χρησιμοποιώντας ένα σφιγκτήρα-C ή με κοχλίωση τους στο μηχάνημα. Εάν οι ταλαντώσεις μειώνονται αποτελεσματικά, αυτά μπορούν να αφεθούν στην ίδια θέση μέχρι να συνδεθεί ένας μόνιμος απορροφητήρας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

### Η ανάλυση λαδιού και σωματιδίων

#### 7.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα θέματα, καλύψαμε εις βάθος την τεχνική ανάλυσης ταλαντώσεων. Είναι αναμφίβολα η πιο σημαντική προγνωστική τεχνική συντήρησης. Η ανάλυση λαδιού (λιπαντικού) είναι ακόμα μία έξυπνη τεχνική συντήρησης που εξελίχθηκε με τα χρόνια και αυτή τη στιγμή είναι μια αξιόπιστη πηγή πληροφοριών πρόβλεψης μηχανημάτων.

Η ανάλυση λαδιού δεν είναι απλώς ένα εργαλείο για την ανάλυση της κατάστασης του λιπαντικού. Με τα σύγχρονα διαγνωστικά εργαλεία, χρησιμοποιείται επίσης για την παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού. Με τη χρησιμοποίηση αυτών των προηγμένων τεχνικών, μπορεί να αυξηθεί η αξιοπιστία του εξοπλισμού, και να ελαχιστοποιούνται απροσδόκητες αποτυχίες και διακοπή λειτουργίας. Υπάρχουν πολλοί μηχανισμοί φθοράς που οδηγούν στην υποβάθμιση των εξαρτημάτων της μηχανής. Αν και υπάρχουν διάφοροι τύποι φθοράς, υπάρχουν μόνο λίγες πρωτογενείς πηγές της. Οι μηχανισμοί που συμβάλλουν στη φθορά ενός εξαρτήματος περιλαμβάνουν την κακή ευθυγράμμιση, την ανισορροπία και την ακατάλληλη χρήση του εξοπλισμού (όπως συνθηκών υπερφόρτωσης ή ταχείας θέρμανσης). Μια από τις πηγές της φθοράς μπορεί να είναι το ίδιο το λιπαντικό, π.χ. στις περιπτώσεις όπου το λιπαντικό έχει υποβαθμιστεί ή έχει μολυνθεί. Τα διάφορα είδη φθοράς που μπορεί να συμβούν είναι τα εξής:

- Λειαντική φθορά
- Φθορά κόλλας
- Σπηλαίωση
- Διαβρωτική φθορά
- Φθορά κοπής
- Φθορά κόπωσης
- Συρόμενη φθορά.

Σε μία μηχανή που βρίσκεται σε λειτουργία, υπάρχει μια συνεχής φθορά των εξαρτημάτων της λόγω της παραγωγής υπολειμμάτων φθοράς. Τα λιπαντικά συνήθως μεταφέρουν τα υπολείμματα μακριά. Η αναγνώριση και η ανάλυση αυτών των υπολειμμάτων φθοράς μπορεί να εντοπίσει τον τύπο της φθοράς και επίσης να προσδιορίσει την πηγή, η οποία θα μπορούσε να είναι οποιοδήποτε καταπονημένο εξάρτημα. Η ανάλυση λαδιού μπορεί να επισημάνει την ανάγκη να ξεκινήσει μια διορθωτική δράση για την πρόληψη πιθανών βλαβών.

Με τον τρόπο αυτό, γίνεται μια σημαντική προγνωστική τεχνική συντήρησης. Υπήρξαν περιπτώσεις όπου η ανάλυση λαδιού βοήθησε να προσδιοριστούν τα ελαττώματα περιστροφικού εξοπλισμού, ακόμη και πριν η ανάλυση ταλαντώσεων μπορούσε να τα

ανιχνεύσει. Αυτό ισχύει περισσότερο για να μηχανές χαμηλής ταχύτητας με υψηλά επίπεδα φορτίου, όπως πετρελαιοκινητήρες.

Κατά την εφαρμογή του προγράμματος παρακολούθησης-ανάλυσης λαδιού, είναι σημαντικό να επιλέξετε τις κατάλληλες δοκιμές που θα προσδιορίσουν ανώμαλα σωματίδια φθοράς στο λάδι. Το πρόγραμμα θα πρέπει να προσαρμοστεί με τον τύπο του εξοπλισμού που παρακολουθείται και τις πιθανές αποτυχίες που αναμένονται. Οι τύποι των δοκιμών, η θέση των σημείων δειγματοληψίας, οι αναλύσεις και η ερμηνεία της ανάλυσης λαδιού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το αν η εφαρμογή είναι στρόβιλος, ή τουρμπίνα ατμού, ή πετρελαιοκινητήρες, ή κιβώτιο ταχυτήτων ή ένα υδραυλικό σύστημα.

Όπως αναφέρθηκε, τα σωματίδια φθοράς είναι ο κύριος δείκτης της υγείας του μηχανήματος. Υπάρχουν πολλές τεχνικές για να αξιολογηθεί τον τύπο και την συγκέντρωση των εν λόγω σωματιδίων. Οι τεχνικές περιλαμβάνουν:

- Ανάλυση Φασματομετρίας
- Καταμέτρηση σωματιδίων
- Άμεση ανάγνωση φερρογράφου
- Αναλυτική τεχνική φερρογραφίας.

Επιπροσθέτως η ανάλυση των σωματιδίων φθοράς, είναι επίσης απαραίτητη για να εκτιμηθεί η ίδια η κατάσταση του λαδιού. Το καλό λάδι μπορεί να μειώσει τη δημιουργία της φθοράς σε μεγάλο βαθμό. Έτσι, η ανάλυση της κατάστασης του λαδιού αποτελεί ουσιώδες μέρος του προγράμματος. Κατά μία έννοια, είναι ένα προληπτικό πρόγραμμα συντήρησης. Ορισμένοι τύποι αναλύσεων λαδιού είναι:

- Ιξώδες
- Περιεκτικότητα σε στερεά
- Περιεκτικότητα σε νερό
- Ολικός βαθμός οξύτητας
- Συνολικός αριθμός βάσης
- Σημείο ανάφλεξης.

Μια άλλη πτυχή της ανάλυσης λαδιού του προγράμματος συντήρησης είναι η δειγματοληψία του λαδιού. Προκειμένου να γίνει μία αξιόπιστη ανάλυση λαδιού, είναι σημαντική η συλλογή του δείγματος να είναι τέτοια ώστε να υποδεικνύει την πραγματική κατάσταση της μηχανής. Κάθε εξωτερική μόλυνση, που δεν προέρχεται από το μηχανήμα, θα δώσει λανθασμένα αποτελέσματα. Η φροντίδα και η προσοχή απαιτούνται για να εξασφαλιστεί η πρόληψη της εξωτερικής μόλυνσης.

Εκτός από την πρόληψη της εξωτερικής μόλυνσης, είναι επίσης αναγκαίο τα συλλεγόμενα δείγματα να έχουν καλή συγκέντρωση των σωματιδίων. Το γεγονός αυτό δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην σημασία της θέσης όπου συλλέγεται το δείγμα λαδιού. Σε συστήματα κυκλοφορίας λαδιού, η καλύτερη θέση είναι σε μια ζωντανή ζώνη του συστήματος, πριν από τα φίλτρα, όπου συγκεντρώνονται τα σωματίδια εισροής και τα υπολείμματα φθοράς.

Συνήθως, αυτό θα σημαίνει ότι η δειγματοληψία του ρευστού πρέπει να γίνεται στην επιστροφή του λαδιού ή στις γραμμές στραγγισμού.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου το λάδι «στραγγίζεται» πίσω από τα φρεάτια χωρίς να κατευθύνεται μέσω μιας γραμμής (όπως στους κινητήρες ντίζελ ή στους παλινδρομικούς συμπιεστές), πρέπει να χρησιμοποιείται η γραμμή πίεσης προς τα κάτω της αντλίας από τη πάνω πλευρά του φίλτρου. Η δειγματοληψία από *στάσιμες ζώνες*, όπως η στατική δεξαμενή δεν είναι μια συνιστώμενη πρακτική δειγματοληψίας. Τα σταγονίδια, τα δαχτυλίδια ανάρτησης και τα πλήρως λιπασμένα εξαρτήματα είναι καλύτερα να δείγματολειπτούνται από τις τάπες αποστράγγισης μετά από σημαντική έκπλυση, ή κατά προτίμηση χρησιμοποιώντας ένα φορητό δειγματολήπτη που δεν είναι μέσα στο δίκτυο. Αυτοί οι παράγοντες συζητούνται με λεπτομέρεια σε αυτή την ενότητα. Ξεκινάμε με την κατανόηση των θεμελιωδών αρχών του ίδιου του λαδιού.

## **7.2 Θεμελιώδεις αρχές λαδιού**

Ένα λιπαντικό συνήθως έχει ένα βασικό ρευστό. Το βασικό ρευστό είναι γενικά πετρελαϊκής προέλευσης, σε συνδυασμό με την προσθήκη χημικών ουσιών που ενισχύουν τις διάφορες επιθυμητές ιδιότητες του βασικού ρευστού. Τα βασικά ρευστά λαμβάνονται ουσιαστικά από δύο κύριες πηγές. Η μία είναι η διύλιση του αργού πετρελαίου, και η δεύτερη είναι η σύνθεση σχετικώς καθαρών ενώσεων με ιδιότητες που είναι επιθυμητές για τα λιπαντικά.

### **7.2.1 Ορυκτέλαια**

Οι γενικές αρχές της κατασκευής βασικών λιπαντικών περιλαμβάνει μία σειρά από βήματα για να βελτιώνονται ορισμένες επιθυμητές ιδιότητες του λιπαντικού, όπως:

- Δείκτης ιξώδους
- Αντοχή στην οξείδωση
- Θερμική αντίσταση
- Ρευστότητα σε χαμηλή θερμοκρασία.

Ξεκινώντας με το αργό πετρέλαιο, η τυπική διαδικασία της παρασκευής λιπαντικών βασικών λαδιών περιλαμβάνει:

- Διαχωρισμός των ελαφρύτερων υλικών βρασμού, όπως η βενζίνη, καύσιμα αεριωθουμένων, πετρέλαιο, κ.λπ.
- Απομάκρυνση των ακαθαρσιών που περιλαμβάνουν αρωματικές και πολικές ενώσεις
- Απόσταξη που θα δώσει το επιθυμητό βαθμό ιξώδους στο βασικό λάδι
- Αποκλήρωση για να βελτιωθεί η ρευστότητα σε χαμηλή θερμοκρασία
- Βελτίωση της οξειδωτικής και θερμικής σταθερότητας.

### 7.2.2 Τα συνθετικά λάδια

Μια άλλη πηγή των βάσεων λιπαντικών είναι συνθετικής προέλευσης. Ένας κατάλληλος ορισμός για ένα συνθετικό υλικό είναι: «Είναι ένα προϊόν που παρασκευάζεται με μια χημική αντίδραση από χημικές ουσίες χαμηλότερου μοριακού βάρους για την παραγωγή ενός ρευστού υψηλότερου μοριακού βάρους σχεδιασμένο για να παρέχει ορισμένες προβλέψιμες ιδιότητες.» Αυτό βρίσκεται σε αντίθεση με τα εξευγενισμένα λιπαντικά πετρελαίου, τα οποία αποτελούνται από πολλές ενώσεις ποικίλης χημικής σύνθεσης, ανάλογα με τη μέθοδο διύλισης και το ακατέργαστο απόθεμα της πηγής. Τα τρία πιο κοινά είδη συνθετικών βασικών λαδιών είναι:

1. Πολυαλφολεφίνες
2. Οργανικοί εστέρες
3. Πολυγλυκόλες.

Άλλα συνθετικά υγρά βρίσκουν εξειδικευμένες χρήσεις σε πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές. Αυτά περιλαμβάνουν τους φωσφορικούς εστέρες, σιλικόνες, πυριτικούς εστέρες και πολυφαινυλικούς αιθέρες. Τα συνθετικά λιπαντικά έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών πετρελαιοειδών:

- Εξαιρετικά χαμηλή θερμοκρασία ρευστότητας
- Χαμηλό σημείο ενσταλάξεως
- Υψηλός φυσικός δείκτης ιξώδους
- Εξαιρετική σταθερότητα στην οξείδωση
- Υψηλά σημεία λάμψης, φωτιάς και αυτόματης ανάφλεξης
- Χαμηλή μεταβλητότητα
- Μη-διαβρωτικά και μη τοξικά.

Τα συνθετικά λιπαντικά όπως τα λιπαντικά χαμηλής θερμοκρασίας και τα ανθεκτικά στη φωτιά υδραυλικά υγρά χρησιμοποιούνται στην αεροπορική βιομηχανία εδώ και αρκετό καιρό. Πρόκειται για εφαρμογές που δικαιολογούν το υψηλό κόστος αυτών των λιπαντικών. Τα συνθετικά υλικά μπορούν γενικά να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύτερο φάσμα θερμοκρασιών από ότι με τα βασικά ρευστά πετρελαίου μέσα στην ίδια περιοχή ιξώδους. Ορισμένα αποθέματα συνθετικής βάσης λιπαντικού μπορεί να αναμιχθούν με λάδια πετρελαίου για να ληφθούν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά ιξώδους, μεταβλητότητας, υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας όταν είναι διαθέσιμα τα κατάλληλα λιπαντικά πετρελαιοειδή.

### 7.2.3 Πρόσθετα

Τα πρόσθετα ορίζονται ως υλικά που προσδίδουν νέες ιδιότητες στη βάση του ορυκτέλαιου. Τα πρόσθετα ενισχύουν τις υπάρχουσες ιδιότητες του λιπαντικού στο οποίο ενσωματώνονται. Η ποσότητα και ο τύπος των πρόσθετων υλών που αναμιγνύονται με το λιπαντικό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά απόδοσης που ζητούνται από το λιπαντικό. Διαφορετικά πρόσθετα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι:

**Απορρυπαντικά (μεταλλικοί διασπορείς).** Αυτά χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του σχηματισμού εναποθέσεων σε ολόκληρο το σύστημα. Κρατούν τα μέρη της μηχανής καθαρά και συγκρατούν τις καταθέσεις εάν έχουν σχηματιστεί. Απορρυπαντικά, όπως ουσίες διασποράς, αναμειγνύονται με τα λιπαντικά για την αφαίρεση και την εξουδετέρωση επιβλαβών προϊόντων. Επιπλέον, τα απορρυπαντικά σχηματίζουν ένα προστατευτικό στρώμα στις μεταλλικές επιφάνειες για να το προφυλάξουν από καταθέσεις λάσπης και βερνικιού. Σε κινητήρες, αυτό μπορεί να μειώσει το ποσό που παράγεται από τα όξινα υλικά. Η μεταλλική βάση για τα απορρυπαντικά περιλαμβάνει βάριο, ασβέστιο, μαγνήσιο και νάτριο. Οι τυπικές εφαρμογές για τα πρόσθετα απορρυπαντικών είναι κατά κύριο λόγο κινητήρες πετρελαίου και βενζίνης.

**Διασπορείς της τέφρας.** Ο σκοπός αυτού του προσθέτου είναι να αναστείλει ή να απομακρύνει τα βλαβερά προϊόντα από το λιπαντικό. Έτσι, το πρόσθετο εξουδετερώνει την επίδραση αυτών των προϊόντων. Τα επιβλαβή προϊόντα περιλαμβάνουν μολύνσεις όπως το χώμα, το νερό, τα καύσιμα, το υλικό επεξεργασίας, καθώς και τη λίπανση των προϊόντων αποδόμησης, όπως λάσπη, βερνίκια και τα προϊόντα οξείδωσης. Τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν τα λιπαντικά του κινητήρα ντίζελ και του βενζινοκινητήρα, τα υγρά μετάδοσης κίνησης, τα υγρά του τιμονιού και, σε ορισμένες περιπτώσεις, λιπαντικά γκρανζιού.

**Αναστολείς οξείδωσης και διάβρωσης των ρουλεμάν.** Η σκουριά και η διάβρωση είναι το αποτέλεσμα της επίθεσης στις μεταλλικές επιφάνειες με οξυγόνο και όξινα προϊόντα, και η διαδικασία επιταχύνεται με την παρουσία νερού και ακαθαρσιών. Οι αναστολείς σκουριάς και διάβρωσης εξουδετερώνουν τα οξέα και σχηματίζουν ένα προστατευτικό φιλμ πάνω από τις επιφάνειες ολίσθησης. Οι αναστολείς αυτοί πρέπει να είναι στο λιπαντικό και σε επιφάνειες πάνω από το επίπεδο του υγρού.

**Αντιοξειδωτικά.** Ένα αντιοξειδωτικό περιορίζει την οξείδωση των λαδιών που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης είναι γνωστά ως αναστολείς της οξείδωσης, που παρεμποδίζουν την οξειδωτική διαδικασία με χημική μετατροπή των προϊόντων οξείδωσης σε καλοήθη προϊόντα. Επιπλέον, μερικοί αναστολείς οξειδώσεως αλληλεπιδρούν με τα ελεύθερα καταλυτικά μέταλλα (κυρίως του χαλκού και του σιδήρου) για να τα αφαιρέσει από τη διαδικασία της οξείδωσης. Σχεδόν όλα τα εμπορικά διαθέσιμα λιπαντικά περιέχουν σε κάποιον βαθμό πρόσθετα αντί-οξείδωσης.

**Βελτιωτικά του δείκτη ιξώδους.** Αυτά τα πρόσθετα βελτιώνουν τη σχέση ιξώδους-θερμοκρασίας του λαδιού. Τα βελτιωτικά του ιξώδους προστίθεται σε ένα λιπαντικό για να διατηρήσει ικανοποιητικές τις λιπαντικές του ιδιότητες σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Σε χαμηλές θερμοκρασίες διατηρούνται τα χαρακτηριστικά του ιξώδους του βασικού αποθέματος, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες το βελτιωτικό ιξώδους διατηρεί το «σωστό» ιξώδες.

**Ενστάλαξη αντιτασικών σημείων.** Η ενστάλαξη αντιτασικών σημείων παρέχει βαρυτικές ιδιότητες ροής στα λιπαντικά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι ιδιότητες αυτές τείνουν να

αναστέλλουν το σχηματισμό του κήρου σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σε πολλές περιπτώσεις λαδιών, ειδικά εκείνων που περιέχουν βελτιωτικά του ιξώδους, δεν είναι αναγκαία συμπληρωματικά αντιτασικά σημεία δεδομένου ότι άλλα πρόσθετα διαθέτουν επίσης υποβιβαστικά σημεία απόχυσης.

**Ακραιάς πίεσης, πρόσθετα κατά της φθοράς.** Αυτά παρέχουν τις απαραίτητες δυνατότητες για τη μεταφορά του φορτίου για το λιπαντικό και την πρόληψη γδαρσιμάτων των κινούμενων μερών κάτω από την οριακή λίπανση.

**Αναστολείς αφρού.** Οι αναστολείς αφρού ελέγχουν τον σχηματισμό των αφρού. Οι ιδιότητες αυτές χρησιμοποιούνται για να μειώσουν τις τάσεις του αφρισμού στο λιπαντικό. Οι αναστολείς αφρού προστίθενται σε ένα λιπαντικό, όταν εντοπιστεί πρόβλημα αφρισμού. Θα πρέπει να ζητηθεί η γνώμη των κατασκευαστών εξοπλισμού των λιπαντικών πριν από την προσθήκη ενός αναστολέα αφρού διότι τη σωστή ποσότητα είναι εξαιρετικά σημαντική. Οι πλεονάζουσες ποσότητες προσθέτων κατά του αφρού μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε υπερβολικό αφρισμό.

**Γαλακτωματοποιητές.** Οι γαλακτωματοποιητές μειώνουν την επιφανειακή τάση του λαδιού.

**Απογαλακτωματοποιητές.** Οι απογαλακτωματοποιητές μειώνουν την τάση σχηματισμού γαλακτωμάτων και βοηθούν στον εύκολο διαχωρισμό από το νερό.

**Καταστολείς νέφους.** Αυτοί μειώνουν τον σχηματισμό νέφους λαδιού, ο οποίος είναι πηγή ρύπανσης του περιβάλλοντος, και μπορεί να προκαλέσει απώλεια του λιπαντικού.

**Παράγοντες Κολλητικότητας.** Αυτοί οδηγούν σε βελτίωση της πρόσφυσης και της κολλητικότητας σε μέταλλα.

**Βιοκτόνα.** Αυτά ελέγχουν την ανάπτυξη βακτηρίων και μυκήτων

Η παρακάτω λίστα περιέχει τα κοινά στοιχεία που βρίσκονται σε πρόσθετα και ο ρόλος των ιδιοτήτων που προσδίδουν στο έλαιο λίπανσης:

Βάριο (Ba): απορρυπαντικό ή πρόσθετο μέσο διασποράς

Βόριο (B): πρόσθετο ακραιάς πίεσης

Ασβέστιο (Ca): πρόσθετο διασκορπιστικό ή απορρυπαντικό

Χαλκός (Cu): πρόσθετο κατά της φθοράς

Μόλυβδος (Pb): πρόσθετο κατά της φθοράς

Μαγνήσιο (Mg): διασκορπιστικό ή απορρυπαντικό πρόσθετο

Μολυβδαίνιο (Mo): τροποποιητής τριβής

Φωσφόρος (P): αναστολέας διάβρωσης, πρόσθετο κατά της φθοράς

Πυρίτιο (Si): αντί-αφριστικό πρόσθετο

Νάτριο (Na): απορρυπαντικό ή πρόσθετο μέσο διασποράς

Ψευδάργυρος (Zn): πρόσθετο αντί-φθοράς ή αντί-οξειδωσης

Τα λιπαντικά με ορυκτή βάση αναμιγνύονται με ειδικά πρόσθετα και συνεπώς είναι κατάλληλα μόνο για συγκεκριμένες εφαρμογές. Οι διαφορετικοί τύποι των λιπαντικών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία είναι οι εξής:

- Λιπαντικά αυτοκινήτων (βενζίνη, πετρέλαιο)
- Λιπαντικά εργαλείων και μετάδοση λαδιών
- Λιπαντικά στροφαλοθαλάμου
- Λιπαντικά στροβίλων
- Λιπαντικά θερμικής επεξεργασίας
- Υγρά μεταφοράς θερμότητας
- Υδραυλικά λάδια
- Λάδι κοπής
- Λιπαντικά σιδηροδρομικών εγκαταστάσεων
- Λάδια ψύξης
- λιπαντικά πρόληψης σκουριάς
- Λιπαντικά επεξεργασίας καουτσούκ
- Λιπαντικά κλωστοϋφαντουργικών μηχανήματα
- Καταλύματα λαδιών

### **7.3 Συντήρηση Βασισμένη στην κατάσταση και ανάλυση λαδιού**

Οι πρώτες περιπτώσεις που η ανάλυση λαδιού χρησιμοποιήθηκε αφορούν τις αρχές του 1940, από τις σιδηροδρομικές εταιρείες στις δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες. Μετά την αγορά νέων μηχανών, οι τεχνικοί χρησιμοποιούσαν απλό σπεκτρογραφικό εξοπλισμό και έκαναν φυσικούς ελέγχους για την παρακολούθηση του λαδιού της ατμομηχανής του κινητήρα .

Όταν μηχανές πετρελαίου αντικατέστησαν τις ατμομηχανές, η τεχνική ανάλυσης λαδιού έγινε τακτική πρακτική από τις σιδηροδρομικές επιχειρήσεις. Από το 1980, η ανάλυση λαδιού αποτελούσε τη βάση των προγραμμάτων συντήρησης βασισμένης στην κατάσταση για τις περισσότερες σιδηροδρομικές επιχειρήσεις στη Βόρεια Αμερική.

Το αμερικανικό Ναυτικό υιοθέτησε τεχνικές Φασματομετρίας για την παρακολούθηση των κινητήρων τζετ για τα αεροσκάφη στα μέσα της δεκαετίας του 1950. Γύρω από αυτό το διάστημα, η Rolls Royce επίσης πειραματιζόταν με την ανάλυση λαδιού για την παρακολούθηση των τουρμπίνων των αεροπλάνων. Η έννοια της ανάλυσης λαδιού άρχισε να διαδίδεται και πολλά προγράμματα υλοποιήθηκαν από τον Αμερικανικό Στρατό και την Πολεμική Αεροπορία σε όλη τη δεκαετία του 1950 και στις αρχές της δεκαετίας του 1960.

Είναι προφανές ότι η τεχνολογία της ανάλυσης λαδιού ήταν γνωστή για πολλά χρόνια. Παρά το γεγονός αυτό, παρέμεινε δευτερεύουσα σε σχέση με την ανάλυση των ταλαντώσεων (ταλαντώσεων). Η ανάλυση ταλαντώσεων παρέμεινε η κύρια διαγνωστική τεχνική σε πολλές βιομηχανίες. Το πρόβλημα ήταν ότι πολλές ομάδες δεν γνώριζαν τη δύναμη της ανάλυσης του λαδιού. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις, όταν οι εταιρείες δεν είχαν το κατάλληλο προσωπικό



για να αναλάβει να εκτελέσει την ανάλυση λαδιού, αυτοί οι άνθρωποι δεν διασυνδέονταν με τις ομάδες που χρησιμοποιούσαν την ανάλυση των ταλαντώσεων.

Τελικά, η δεκαετία του 1990 επέφερε μια αλλαγή σε αυτή την αρνητική τάση. Πολλές εταιρείες πρόσθεσαν την ανάλυση λαδιού εκεί που ήθελαν να βελτιώσουν την ανάλυση των ταλαντώσεων. Επίσης, αρκετοί πωλητές υπηρεσιών και διαχείρισης δεδομένων ταλάντωσης άρχισαν να προσφέρουν τέτοιες επιλογές και για την ανάλυση του λαδιού. Με την ενσωμάτωση αυτή, η κατάσταση παρακολούθησης του αναλυτή μπορούμε να αποκτήσουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τη κατάσταση λειτουργίας του μηχανήματος και ως εκ τούτου να είμαστε σε καλύτερη θέση για να πάρουμε αποτελεσματικές αποφάσεις και να δώσουμε συστάσεις.

Οι αναλύσεις ταλάντωσης και λαδιού αλληλοσυμπληρώνονται. Όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό, μπορεί η μία να «βοηθήσει» την άλλη. Για παράδειγμα, η ανάλυση ταλάντωσης μπορεί να ανιχνεύσει τον συντονισμό, αλλά η ανίχνευση συντονισμού είναι πέρα από την ικανότητα της ανάλυσης λαδιού. Αντίστοιχα, η ανάλυση ταλάντωσης δεν είναι πλήρως επιτυχής στην ανίχνευση της φθοράς των ρουλεμάν, όπου η ανάλυση λαδιού είναι πολύ ικανοποιητική τόσο στην ανίχνευση της φθοράς και όσο και στην εκτίμηση της σοβαρότητας του συγκεκριμένου ελαττώματος. Όταν και οι δύο τεχνικές ανάλυσης εντοπίσουν το ίδιο πρόβλημα, η διάγνωση και οι συστάσεις σπάνια είναι ανακριβείς.

Η ενσωμάτωση των δύο τεχνικών ανάλυσης σε ένα πυρηνικό εργοστάσιο παρουσιάστηκε σε ένα έγγραφο που ονομάζεται «Ενσωμάτωση της λίπανσης και τεχνολογίες της ανάλυσης ταλαντώσεων» από τους Bryan Johnson και Howard Maxwell από το σταθμό παραγωγής πυρηνικής ενέργειας «Pale Verde». Επισημαίνονται τα πλεονεκτήματα των δύο τεχνικών και τη σημασία του να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό. Περιγράφεται η αποτελεσματικότητα της κάθε τεχνικής σε μορφή πίνακα και πώς η συνδυασμένη επίδραση τους είναι πολύ μεγαλύτερη. Ο πίνακας παρουσιάζεται παρακάτω.

Κατάσταση	Πρόγραμμα λαδιού	Πρόγραμμα ταλάντωσης	Συσχέτιση
Λάδι για λίπανση των εδράνων κύλισης	Ισχυρό	Ισχυρό	Ανάλυση του λαδιού θα / μπορεί να ανιχνεύσει μια μικρή κατάσταση αποτυχίας. Η ταλάντωση παρέχει πληροφορίες για ισχυρά όψιμο στάδιο αποτυχίας
Λάδι -λίπανση γραμμών στα έδρανα κύλισης	Ισχυρό	Μικτό	Θα δημιουργηθούν στο λάδι υπολείμματα φθοράς πριν από μια κατάσταση τριψίματος ή χαλαρότητας

έδρανα			
Μηχανική ανισορροπία	Δεν εφαρμόζεται	Ισχυρό	Το πρόγραμμα ταλάντωσης μπορεί να ανιχνεύσει μια κατάσταση ανισορροπίας. Η του λιπαντικού θα δείξει τελικά το αποτέλεσμα του αυξημένου φορτίου των ρουλεμάν
Νερό σε λάδι	Ισχυρό	Δεν εφαρμόζεται	Το νερό μπορεί να οδηγήσει σε ταχεία αποτυχία. Είναι απίθανο ένας τυχαίος μηνιαίος έλεγχος ταλάντωσης θα ανιχνεύσει την ανωμαλία.
Λαδωμένα έδρανα κυλίσεως	Μικτό	Ισχυρό	Είναι σωστό να βασιστούμε στην παρακολούθηση των ταλαντώσεων για τη συνήθη ανάλυση λαδωμένων ρουλεμάν. Πολλά εργαστήρια που ασχολούνται με λιπαντικά δεν έχουν αρκετή εμπειρία με τα λαδωμένα ρουλεμάν για την παροχή αξιόπιστων πληροφοριών
Λαδωμένες μηχανικά ελεγχόμενες βαλβίδες	Μικτό	Αδύναμο	Οι ενεργοποιητές είναι σημαντικά μηχανήματα στον τομέα της πυρηνικής βιομηχανίας. Τα δείγματα γράσου μπορεί είναι εύκολο να ελεγχθούν, αλλά μπορεί να είναι δύσκολο να ληφθεί ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα. Μπορεί να είναι δύσκολο να δούμε αυτές τις βαλβίδες σε λειτουργία, που

			καθιστούν δύσκολη τη παρακολούθηση με τεχνικές της ταλάντωσης.
Ρωγμές άξονα	Δεν εφαρμόζεται	Ισχυρό	Η ανάλυση ταλαντώσεων είναι πολύ αποτελεσματική για την παρακολούθηση ενός ραγισμένου άξονα
Φθορά γραναζιών	Ισχυρό	Ισχυρό	Οι τεχνικές ταλάντωσης μπορεί να συνδέσουν ένα ελάττωμα με ένα συγκεκριμένο γρανάζι. Η ανάλυση του λιπαντικού μπορεί να προβλέψει τον τύπο αποτυχίας
Ευθυγράμμιση	Δεν εφαρμόζεται	Ισχυρό	Το πρόγραμμα ταλάντωσης μπορεί να ανιχνεύσει μια κατάσταση κακής ευθυγράμμισης. Η ανάλυση του λιπαντικού θα δείξει τελικά το αποτέλεσμα της αυξημένης/ακατάλληλης φόρτωσης ρουλεμάν
Παρακολούθηση της κατάστασης του λιπαντικού	Ισχυρό	Δεν εφαρμόζεται	Το λιπαντικό μπορεί να γίνει μια σημαντική αιτία αποτυχίας.
Συντονισμός	Δεν εφαρμόζεται	Ισχυρό	Το πρόγραμμα ταλάντωσης μπορεί να ανιχνεύσει μια κατάσταση συντονισμού. Η ανάλυση του λιπαντικού θα δείξει τελικά την επίδραση
Ανάλυση των			Καλύτερο όταν τα δύο

βαθύτερων αιτίων	Ισχυρό	Ισχυρό	προγράμματα λειτουργούν μαζί
------------------	--------	--------	---------------------------------

Έτσι, ανάλογα με το μηχάνημα, το είδος και τη κατάσταση του ελαττώματος που αναμένεται, η ανάλυση λαδιού θα μπορούσε να υλοποιηθεί ως το μόνο μέσο παρακολούθησης, ή να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το πρόγραμμα ανάλυσης ταλαντώσεων, ή να μην θεωρείται καθόλου ικανοποιητική για ορισμένες εφαρμογές.

## 7.4 Η δημιουργία ενός προγράμματος ανάλυσης λαδιού

Για να δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα ανάλυσης λαδιού σε μια μονάδα παραγωγής απαιτείται συστηματική προσέγγιση. Αποτελείται από τέσσερα βασικά βήματα:

1. Έλεγχος εξοπλισμού
2. Έλεγχος λιπαντικού
3. Παρακολούθηση
4. Αξιολόγηση του προγράμματος.

### 7.4.1 Έλεγχος εξοπλισμού

Το πρώτο βήμα είναι να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος του εξοπλισμού. Ο έλεγχος του εξοπλισμού είναι μια μελέτη που πραγματοποιείται για να εντοπιστεί ο εξοπλισμός που θα πρέπει να παρακολουθηθεί με ανάλυση λαδιού. Η μελέτη ερευνά λεπτομερώς τις μηχανικές και λειτουργικές πτυχές του εξοπλισμού και στη συνέχεια καθορίζει την κατάλληλη προσέγγιση της ανάλυσης λαδιού. Θέτει τα όρια και τα επίπεδα των στόχων, που αποτελούν τη βάση για τον προγραμματισμό της συντήρησης. Ο έλεγχος εξοπλισμού περιλαμβάνει τα ακόλουθα.

#### Κρισιμότητα εξοπλισμού

Η ασφάλεια, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, το κόστος από τη διακοπή λειτουργίας, το κόστος επισκευής και συντήρησης και τελικά το ιστορικό της μηχανής καθορίζει την ένταση των μηχανών στον κατάλογο του κρίσιμου εξοπλισμού που επιλέγεται για το πρόγραμμα αυτό.

#### Αναγνώριση των μερών του εξοπλισμού και του συστήματος

Αυτό περιλαμβάνει τη συλλογή όλων των πληροφοριών σχετικά με τα μηχανήματα και την κατανόηση της πολυπλοκότητας τους.

#### Παράμετροι λειτουργίας

Αυτό το βήμα προσδιορίζει την εικόνα της λειτουργίας της μηχανής. Περιλαμβάνει τη ροή, την πίεση και τα όρια θερμοκρασίας.

## **Αξιολόγηση του εξοπλισμού λειτουργίας**

Αυτή είναι μια οπτική επιθεώρηση της μηχανής και ο στόχος της είναι να προσδιοριστούν τα μέρη όπως εξαεριστήρες, ψύκτες και φίλτρα. Πρέπει να καταγράφονται οι θερμοκρασίες και πιέσεις λειτουργίας, ο χρόνος του κύκλου, η κατεύθυνση περιστροφής, οι ταχύτητες, οι δείκτες φίλτρων και άλλοι σχετικοί παράγοντες.

## **Περιβάλλον λειτουργίας**

Τα εχθρικά περιβάλλοντα ή μόλυνση του περιβάλλοντος μπορεί να επηρεάσει την υποβάθμιση του λιπαντικού, και τελικά οδηγεί σε βλάβη του εξοπλισμού. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες όπως μέση θερμοκρασία, η υγρασία και οι τυχόν προσμείξεις πρέπει να καταγράφονται.

## **Ιστορικό συντήρησης**

Γενικότερα πρέπει να είναι γνωστές όλες οι προηγούμενες αποτυχίες της μηχανής λόγω φθοράς και όλα τα προβλήματα λίπανσης. Αυτό απαιτείται ώστε να τεθούν νέοι στόχοι και όρια. Αυτά τα όρια πρέπει να είναι αρκετά ευαίσθητα για τη πρόληψη πιθανών νέων αποτυχιών.

## **Θέση δειγματοληψίας λαδιού**

Η θέση δειγματοληψίας πρέπει να είναι μια βολική θέση, η οποία επιτρέπει ασφαλή και εύκολη συλλογή των δειγμάτων υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Το δείγμα θα πρέπει να έχει μια αντιπροσωπευτική συγκέντρωση σωματιδίων φθοράς, ώστε να παρέχει ακριβείς πληροφορίες για τη κατάσταση του μηχανήματος.

## **Έλεγχος του λαδιού**

Ο φυσικός έλεγχος λαδιού περιλαμβάνει τέσσερις κατηγορίες:

1. Τις φυσικές ιδιότητες του λαδιού
2. Τις χημικές ιδιότητες του λαδιού
3. Τη μόλυνση του λαδιού
4. Την ανίχνευση των σωματιδίων φθοράς.

Ο εξοπλισμός για τις ειδικές δοκιμές παράγει τα απαιτούμενα στοιχεία για την αποτελεσματική παρακολούθηση και τον έλεγχο της υγείας του λιπαντικού και του εξοπλισμού. Αυτοί οι έλεγχοι μπορούν να ελέγχουν τις αιτίες που επιφέρουν αλλαγές στο λιπαντικό.

## **Τεχνική για την ανάλυση ενός νέου λαδιού**

Απαιτείται το δείγμα του νέου λιπαντικού το οποίο παρέχει ένα σημείο εκκίνησης για τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του λιπαντικού. Οι ιδιότητες των λαδιών αλλάζουν με τις συνθήκες λειτουργίας και το χρόνο. Για να ληφθούν υπόψη αυτές οι αλλαγές, οι στόχοι του λιπαντικού και οι αντίστοιχες προειδοποιήσεις πρέπει να προσαρμοστούν αναλόγως.

### **Στόχοι και συναγερμοί**

Οι στόχοι και οι προειδοποιήσεις (Original equipment manufacturer's (OEM)), τα όρια και τα πρότυπα εξοπλισμού του κατασκευαστή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να οριστεί ο στόχος και τα επίπεδα «συναγερμού». Σε πολλές περιπτώσεις, τα όρια καθορίζονται εμπειρικά, και γενικά η εμπειρική είναι η καλύτερη μέθοδος για να καθορίσει κανείς τις αλλαγές που συμβαίνουν στην υγεία του μηχανήματος ή στην κατάσταση του λιπαντικού.

### **Ανάπτυξη βάσεων δεδομένων**

Οι βάσεις δεδομένων πρέπει να αναπτυχθούν για να οργανωθούν οι πληροφορίες του εξοπλισμού και τη συλλογή των αποτελεσμάτων από την ανάλυση του λαδιού, μαζί με τους στόχους και τα επίπεδα συναγερμού για το συγκεκριμένο μέρος του μηχανήματος. Αυτή η βάση δεδομένων πρέπει να είναι φιλική προς το χρήστη και να αναδεικνύει τις συνθήκες του μηχανήματος με ευκολία.

#### **7.4.2 Έλεγχος λιπαντικού**

Τα περισσότερα μηχανήματα απαιτούν ένα λιπαντικό με τις σωστές φυσικές και χημικές ιδιότητες για αξιόπιστη λειτουργία. Ακριβώς όπως οι μηχανές απαιτούν τακτική παρακολούθηση της «υγείας», τα λιπαντικά πρέπει επίσης να δείγματολειτουργούνται και να ελέγχονται σε τακτά χρονικά διαστήματα σε όλο τον κύκλο ζωής τους για να εξασφαλίζεται ότι είναι σε θέση να ανταποκρίνονται στις αναμενόμενες λειτουργικές τους απαιτήσεις.

### **Απαιτήσεις λιπαντικών**

Ο έλεγχος του εξοπλισμού που αναφέρθηκε πριν, παρέχει τις πληροφορίες σχετικά με τον απαιτούμενο τύπο του λιπαντικού που καθορίζεται από τον κατασκευαστή του εξοπλισμού. Αυτό το βήμα συνεπάγεται μία δοκιμή για να ελεγχθεί εάν το λιπαντικό είναι εντός των προδιαγραφών, όπως η σχέση του ιξώδους προς τη θερμοκρασία λειτουργίας.

### **Προμηθευτές λιπαντικών**

Τα λιπαντικά θα πρέπει να λαμβάνονται από γνωστούς προμηθευτές, προκειμένου να εξασφαλιστεί η συνοχή στην παρεχόμενη ποιότητα. Η δειγματοληψία και ο έλεγχος των λιπαντικών πραγματοποιείται για να ελεγχθεί την ποιότητα της προσφοράς.

## **Αποθήκευση λιπαντικού**

Οι οργανωμένες μέθοδοι αποθήκευσης, όπως η επισήμανση, είναι πολύ σημαντικές. Για τη χρήση λιπαντικού πρέπει να υλοποιηθεί πολιτική αυτό που έρχεται πρώτο χρησιμοποιείται πρώτο. Αυτό μειώνει τη δυνατότητα αποικοδόμησης των ιδιοτήτων του λιπαντικού στο χρονικό διάστημα της αποθήκευσης.

## **Μέθοδοι χειρισμού λιπαντικών**

Οι μέθοδοι χειρισμού πρέπει να σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχει μόλυνση, ανάμειξη ή σπατάλη των λιπαντικών. Πρέπει να καταγράφονται οι απογεμίσεις, οι πληρώσεις και οι αντικαταστάσεις των λιπαντικών.

## **Απόβλητα**

Όταν ένα λιπαντικό έχει φτάσει στο τέλος του κύκλου ζωής τους, πρέπει να απορρίπτεται με ασφαλή τρόπο. Ο τύπος του λιπαντικού πρέπει να προσδιοριστεί, να φέρει την κατάλληλη σήμανση και η ετικέτα πρέπει να αναφέρει τη μέθοδο της απόρριψης του λιπαντικού. Πρέπει να αποφεύγεται η παρατεταμένη αποθήκευση των παλαιών λαδιών.

## **Βασικές ενδείξεις**

Οι βασικές ενδείξεις είναι παράμετροι του υγιούς εξοπλισμού και τα λιπαντικών που λαμβάνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα. Κανονικά τρεις μετρήσεις που λαμβάνονται σε διαδοχικούς μήνες είναι επαρκείς για να σχηματίσουν μία βάση σύγκρισης για μελλοντικές μετρήσεις.

## **Αξιολόγηση του εξοπλισμού**

Μια ανάλυση δείγματος από ένα λιπαντικό μπορεί να προσφέρει μόνο μερική πληροφόρηση, εκτός αν συνοδεύεται από τα συναφή δεδομένα της μηχανής. Αυτά μπορεί να αναφέρουν τους λόγους για τις αποκλίσεις και τις πιθανές βασικές αιτίες για τυχόν αλλαγές.

## **Δειγματοληψία**

Οι διαδικασίες δειγματοληψίας προσδιορίζουν τη μέθοδο και τη συσκευή για τη συλλογή των δειγμάτων. Η λογική είναι να ληφθεί ένα «ευαίσθητο» δείγμα που να είναι σύμφωνο με τις αλλαγές που συμβαίνουν στο μηχανήμα και στο λιπαντικό του.

## **Δοκιμές**

Αυτές καθορίζουν το είδος των δοκιμών που πρέπει να πραγματοποιούνται για την απόκτηση των αποτελεσμάτων που συνδέονται με την κατάσταση των μηχανημάτων.

## **Δοκιμές εξαίρεσης**

Όποτε η ανάλυση λαδιού ανιχνεύει ανωμαλία σε οποιαδήποτε από τις μετρήσιμες παραμέτρους, πρέπει να γίνεται επαναληπτική δοκιμή και συγκεκριμένα η «εξαιρετική» δοκιμή. Αυτό είναι ένα πρόσθετο τεστ για τη διασφάλιση της επαναληψιμότητας και της ανάλυσης από την άποψη διάγνωσης.

## **Η καταχώρηση δεδομένων, αξιολόγηση και υποβολή εκθέσεων**

Τα αποτελέσματα όλων των δειγμάτων πρέπει να καταγραφούν στο σύστημα διαχείρισης δεδομένων. Αυτά πρέπει να επανεξετάζονται περιοδικά για αναδυόμενες τάσεις και σύγκριση με τα αρχικά δεδομένα.

Οι τακτικές εκθέσεις που δημιουργούνται πρέπει να περιλαμβάνονται σε ένα κατάλογο συστάσεων. Ο κατάλογος αυτός θα πρέπει να αναφέρει τη συχνότητα των δοκιμών και τις αναγκαίες βελτιώσεις που θα φέρουν τη παρούσα κατάσταση του λιπαντικού και / ή τους όρους λειτουργίας σε αποδεκτά πλαίσιο.

### **7.4.3 Παρακολούθηση**

Η παρακολούθηση είναι η διαδικασία συλλογής των δεδομένων των συνθηκών του μηχανήματος και των λιπαντικών. Αυτή η πληροφορία λειτουργεί ως οδηγός για τις δραστηριότητες συντήρησης που τελικά οδηγούν σε μια ασφαλή, αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία του εξοπλισμού της μονάδας.

## **Η τακτική παρακολούθηση**

Η τακτική παρακολούθηση είναι ένα καθορισμένο χρονοδιάγραμμα που καθορίζει τα χρονικά διαστήματα για τη συλλογή δεδομένων που τελικά καθορίζουν την υγεία του μηχανήματος.

## **Διαδρομές**

Μια διαδρομή είναι μια σειρά μηχανών που ευθυγραμμίζονται για τη συλλογή του δείγματος. Η ακολουθία της διαδρομής πρέπει να επιτρέπει την ασφαλή και μη παρεμβατική συλλογή δεδομένων στο συντομότερο δυνατό χρόνο.

## **Συχνότητα της παρακολούθησης**

Η συχνότητα της παρακολούθησης εξαρτάται από το είδος του εξοπλισμού και του λιπαντικού. Ωστόσο, αυτό μπορεί να αλλάξει καθώς το πρόγραμμα αναπτύσσεται ή παρατηρείται μια ελαττωματική κατάσταση.



## **Δοκιμές**

Οι δοκιμές αποτελούν την ίδια τη βάση του κάθε προγράμματος ανάλυσης λαδιού, το οποίο προσδιορίζει τη παρούσα κατάσταση του εξοπλισμού. Όταν οι δοκιμές δείχνουν ανωμαλίες, άμεσα πρέπει να γίνονται και άλλες ειδικές δοκιμές, οι οποίες είναι διαγνωστικές. Επίσης, συνιστάται να υπάρχει επιπλέον μια άλλη διαγνωστική τεχνική για να επιβεβαιωθούν οι ανώμαλες τάσεις. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές ρουτίνας είναι συνήθως διαθέσιμα μετά από 48 ώρες. Ωστόσο, σε επείγουσες περιπτώσεις, είναι δυνατόν να ληφθούν τα αποτελέσματα μέσα σε 24 ώρες.

## **Δοκιμές μετά την αναμόρφωση**

Μετά την γενική επισκευή του εξοπλισμού ή την αντικατάσταση των βασικών εξαρτημάτων του, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή ορισμένων δοκιμών λαδιού για να διασφαλιστεί ότι το πρόβλημα διορθώθηκε πλήρως. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αποκτηθούν νέες μετρήσεις αναφοράς και να εντοπιστούν οι πιθανές συνθήκες των βλαβών.

## **Η ανάλυση των δεδομένων**

Τα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου από την ανάλυση του λαδιού και άλλων τεχνικών που υποστηρίζουν την ανάλυση βοηθούν στη δημιουργία πολλών γνώσεων σχετικά με τα συγκεκριμένα μηχανήματα. Οι χειριστές των μηχανημάτων καθώς και το προσωπικό έχουν επίσης πολύτιμη εμπειρία με τον εξοπλισμό. Η γνώση τους, μαζί με τις γνωστές συνθήκες λειτουργίας της μηχανής, αποτελούν τη βάση για την επίλυση κάθε προβλήματος που μπορεί να προκύψει. Κατά καιρούς, επαναλαμβανόμενα προβλήματα με μια φαινομενικά άγνωστη αιτία μπορεί επίσης να λυθούν με τη συλλογή πληροφοριών και έτσι να φτάσει κανείς στη πραγματική αιτία του προβλήματος.

## **Αναφορές**

Όλες οι ολοκληρωμένες διαδρομές, οι ειδικές δοκιμές και η ανάλυση της αιτίας πρέπει να αναφερθούν και να καταγραφούν από τον ειδικό για την παρακολούθηση. Ο ειδικός θα πρέπει να περιγράφει την ανωμαλία που αναγνωρίζεται και τις διορθωτικές ενέργειες που απαιτούνται. Αυτές οι αναφορές πρέπει να υποβάλλονται με έναν οργανωμένο τρόπο για μελλοντική αναφορά. Οι εκθέσεις θα πρέπει να περιλαμβάνουν:

- Ταυτοποίηση του συγκεκριμένου εξοπλισμού
- Ημερομηνία του δείγματος
- Ημερομηνία της έκθεσης
- Όνομα αναλυτή
- Παρούσα κατάσταση του εξοπλισμού και του λιπαντικού
- Συστάσεις
- Τα αποτελέσματα της δοκιμής του δείγματος

- Ειδικές παρατηρήσεις.

Η χρήση ενός μηχανογραφικού συστήματος θα βελτιώσει τις εκθέσεις που πρέπει να σχεδιαστούν με συγκεκριμένο τρόπο και, σε πολλές περιπτώσεις, θα παραχθεί μια έκθεση επισκόπησης της κατάστασης του μηχανήματος.

## **Αξιολόγηση του προγράμματος**

Η πρωταρχική λειτουργία της παρακολούθησης της κατάστασης ή των προγραμμάτων προγνωστικής συντήρησης είναι να ανιχνεύσει την έναρξη της βλάβης που μπορεί να επηρεάσει την ασφάλεια, τους στόχους παραγωγής και προϋπολογισμούς συντήρησης. Τα καλό-διαχειρισμένα προγράμματα μπορούν εκτελέσουν αυτή τη λειτουργία. Το ποσοστό επιτυχίας του προγράμματος μπορεί να μετρηθεί από τη σχέση του αριθμού των μηχανών που παρακολουθούνται και από τον αριθμό των βλαβών που εμποδίζονται. Ωστόσο, δεν απαιτείται μεγάλη προσπάθεια για να μεταφραστεί το κέρδος από αυτά τα προγράμματα σε οικονομικούς όρους.

Μόνο όταν αποδεικνύονται τα οικονομικά οφέλη στα εν λόγω προγράμματα συνεχίζεται η υποστήριξη τους και δεν περικόπτονται ή τίθενται ως μέτρο μείωσης του κόστους. Ένα πρόγραμμα ανάλυσης λαδιού απαιτεί τεκμηρίωση για όλα τα οικονομικά οφέλη που συνδέονται με ένα σωστά εφαρμοσμένο πρόγραμμα.

## **7.5 Ανάλυση λαδιού - μέθοδοι δειγματοληψίας**

Ένα από τα βασικά στοιχεία κάθε προγράμματος ανάλυσης λαδιού είναι η λήψη ενός δείγματος το οποίο δεν έχει μολυνθεί από εξωτερικούς παράγοντες. Είναι σαφές ότι η ανάλυση του λαδιού μελετά φθορά στα μικροσκοπικά σωματίδια, έτσι εξωτερικοί μολυντές μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα, όταν παρατηρούνται με ένα μικροσκόπιο.

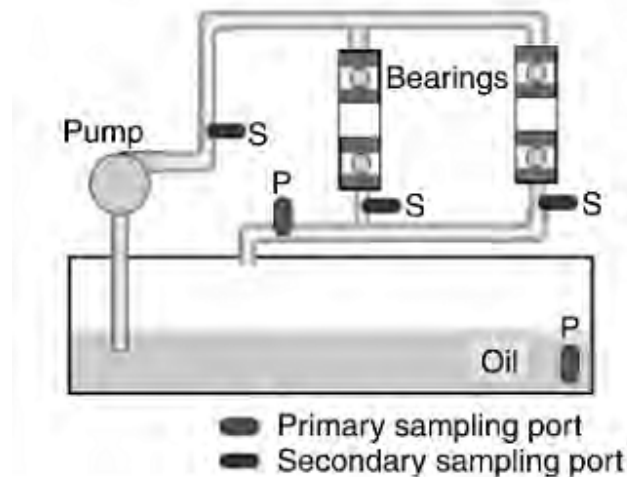
Έτσι, η μέθοδος της δειγματοληψίας, οι συσκευές, τα εξαρτήματα, και η συχνότητα της διαδικασίας της δειγματοληψίας καθορίζουν τα αποτελέσματα. Οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να αντιμετωπιστούν, ενώ σχεδιάζεται το πρόγραμμα της δειγματοληψίας είναι:

- Η κατάλληλη τοποθεσία - σε πολλές περιπτώσεις είναι ανάλογα με το μηχάνημα
- Τα καλύτερα εργαλεία - αντλίες κενού, φιαλίδια δειγματοληψίας, βαλβίδες, παγίδες, κλπ
- Ελαχιστοποίηση της μόλυνσης.

### **7.5.1 Θέση θυρών δειγματοληψίας**

Η διάγνωση της κατάστασης των μερών χρησιμοποιώντας την ανάλυση λαδιού ενισχύεται σε μεγάλο βαθμό με την παροχή θυρών δειγματοληψίας σε κατάλληλα σημεία. Οι θύρες πρέπει να είναι σε τέτοιες θέσεις έτσι ώστε να μπορεί να συλλεχθεί το λάδι από

μεμονωμένα μέρη. Αυτό παρέχει ένα αναλυτικό πλεονέκτημα για την ανίχνευση πιθανής μελλοντικής αποτυχίας και μια προσέγγιση για την αιτία των αποτυχιών. Οι θύρες δειγματοληψίας γενικά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, πρωτογενείς και δευτερογενείς (Σχήμα 7.1).



**Σχήμα 7.1** Θέση των θυρών[1]

### **Κύριες Θύρες δειγματοληψίας**

Από αυτή τη θύρα συλλέγονται τα τακτικά δείγματα λαδιού. Ο στόχος είναι η ανίχνευση της φθοράς των σωματιδίων, της μόλυνση του λαδιού και της δοκιμής των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του λαδιού. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτές συχνά εξαρτώνται από τον τύπο της μηχανής και μπορεί επίσης να ποικίλουν από σύστημα σε σύστημα. Ωστόσο, οι πρωτογενείς θύρες βρίσκονται συνήθως σε μία μόνο γραμμή από τη πάνω πλευρά του φρεατίου ή της δεξαμενής.

### **Δευτερεύουσες θύρες δειγματοληψίας**

Αυτές οι θύρες δειγματοληψίας υπάρχουν προκειμένου να συλλέγονται τα δείγματα από τη κάτω πλευρά των επιμέρους μερών. Τοποθετούνται στο σύστημα λίπανσης για την απομόνωση αυτών των μερών.

Σκεφτείτε το ακόλουθο παράδειγμα. Μία αντλία λαδιού τροφοδοτεί λάδι σε δύο έδρανα. Το λάδι που περισσεύει από τα έδρανα συλλέγεται σε μία μόνο γραμμή επιστροφής ακριβώς πριν εισέλθει το κάρτερ. Η κύρια θύρα της δειγματοληψίας θα πρέπει να βρίσκεται σε αυτή τη γραμμή «αποστράγγισης». Πάντως, η δευτερεύουσα θύρα δειγματοληψίας πρέπει να βρίσκεται κάτω από την αντλία λαδιού και ανεξάρτητη του λαδιού που περισσεύει από τα έδρανα.

Εφ 'όσον το δείγμα από την κύρια θύρα δεν δείχνει τάση επιδείνωσης, τα δείγματα από τη δευτερεύουσα θύρα δεν απαιτούνται. Όταν ανιχνεύεται μία ανωμαλία, τα δείγματα από τις δευτερεύουσες θύρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν την πηγή του προβλήματος. Η συχνότητα της δειγματοληψίας από τις προβληματικές θύρες και μπορεί να αυξηθεί για να παρακολουθείται η εξέλιξη της προβληματικής κατάστασης του εξαρτήματος.

Η κύρια θύρα υποδεικνύει τι θα συμβεί στα φίλτρα. Η Δευτερεύουσα θύρα δειγματοληψίας υποδεικνύει τι έρχεται από τα φίλτρα. Ως εκ τούτου, οι δευτερογενείς θύρες της δειγματοληψίας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της απόδοσης των φίλτρων. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει μια αλλαγή φίλτρου με βάση την κατάσταση τους, η οποία μπορεί να είναι πολύ πριν από όταν το υποδείξει ο δείκτης διαφορικής πίεσης.

### **7.5.2 Δειγματοληψία – τα καλύτερα εργαλεία**

#### **Δειγματοληψία απόθεσης-σωλήνα**

Η δειγματοληψία απόθεσης-σωλήνα κενού είναι μία από τις απλούστερες και πιο ανέξοδες μεθόδους για να συλλέξει κανείς τα δείγματα για ανάλυση λαδιού. Ωστόσο, ο καθένας πρέπει να είναι προσεκτικός κατά τη χρήση αυτής της μεθόδου δειγματοληψίας (σχήματα 7.2 και 7.3).



**Σχήμα 7.2** Φιαλίδιο δειγματοληψίας με αντλία κενού[1]



**Σχήμα 7.3** Μέθοδος δειγματοληψίας απόθεση-σωλήνα[1]

Κατά τη συλλογή του δείγματος, το μηχάνημα πρέπει να ανοιχθεί, και επομένως και το έλαιο θα έρθει σε επαφή με περιβάλλον. Ανοίγοντας ένα μηχάνημα μπορεί να μεταφέρει σημαντικές ποσότητες του αέρα που μεταδίδουν μόλυνση και έτσι καθώς προστίθεται το λάδι να προκληθεί ζημιά.

Το κλειδί για ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα ανάλυσης του λαδιού είναι η δυνατότητα να ληφθεί ένα δείγμα λαδιού σε μια συγκεκριμένη θέση, ενώ το μηχάνημα είναι σε λειτουργία και υπό κανονικό φορτίο. Η μέθοδος απόθεση-σωλήνα, όταν χρησιμοποιείται σε εξοπλισμό, όπως κιβώτια ταχυτήτων, παρουσιάζει αρκετές ανησυχίες:

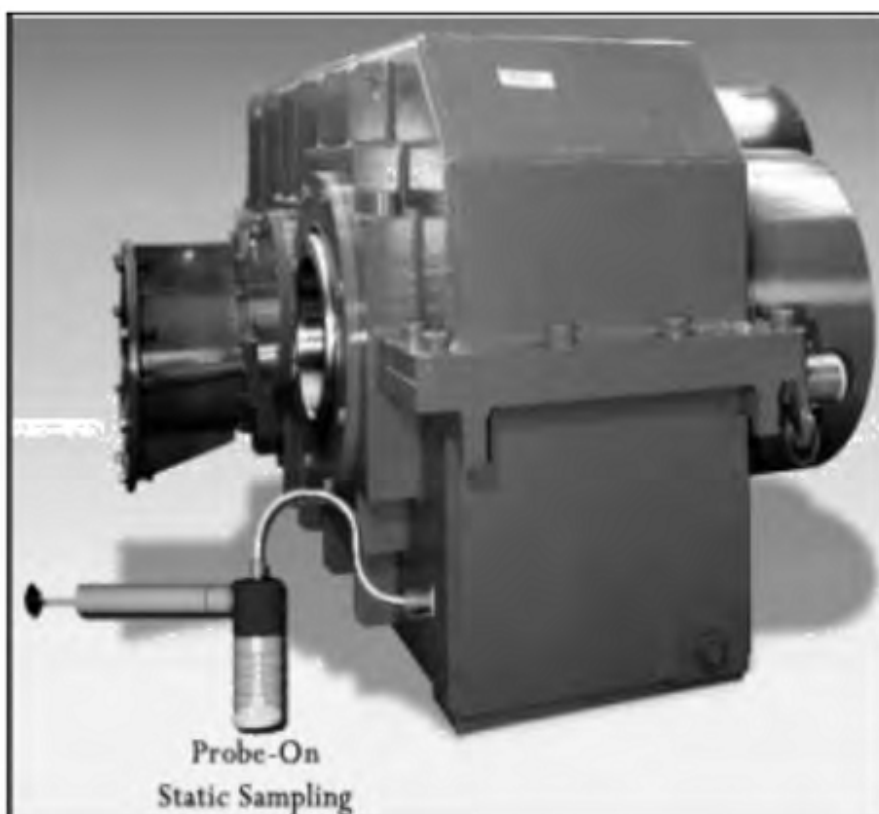
- Ο πλαστικός σωλήνας μπορεί να τραβηχτεί μέσα στο κιβώτιο ταχυτήτων. Αυτό αποτελεί κίνδυνο για την ασφάλεια του ατόμου που λαμβάνει το δείγμα
- Απαιτεί μεγάλο όγκο έκπλυσης
- Είναι δύσκολο να ληφθεί ένα σταθερό δείγμα από την ίδια θέση
- Προβλήματα με τη δειγματοληψία υγρών υψηλού ιξώδους.

### **Δειγματοληψία θύρας-αποστράγγισης**

Όπως αναφέρθηκε, η καλύτερη θέση για να ληφθεί το δείγμα λαδιού από ένα φρεάτιο ή μία δεξαμενή είναι από μια θέση πιο κοντά στη γραμμή επιστροφής, στα γρανάζια ή στα ρουλεμάν. Για τη κυκλοφορία των συστημάτων, η γραμμή επιστροφής είναι η πιο ιδανική θέση. Κατά τη συλλογή από το κάρτερ, το λάδι πρέπει να συλλέγεται κατά το ήμισυ του βάθους του φρεατίου. Σε γενικές γραμμές, τα φρεάτια αποστράγγισης ή οι δεξαμενές είναι μεγάλα και παρέχουν μια καλής ποιότητας καθίζηση. Αυτό επιτρέπει στους μολυντές να

κατακάθονται στον πυθμένα, και έτσι ο πυθμένας αποστράγγισης δεν αποτελεί καλή θέση δειγματοληψίας. Αν και αυτό είναι αρκετά βολικό δεν είναι αξιόπιστο, ακόμη και αν έχουν ξεπλυθεί μεγάλοι όγκοι.

Εάν η θύρα αποστράγγισης είναι η μόνη περιοχή για να ληφθεί ένα δείγμα από το κιβώτιο ταχυτήτων, υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμα σωληνάρια δείγματος που μπορεί να τοποθετηθούν στο κάτω μέρος ή από την πλευρά του φρεατίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4.



**Σχήμα 7.4** Εμπορικοί σωλήνες δείγματος που συνδέονται με το κιβώτιο ταχυτήτων[1]

Αυτοί οι σωλήνες με κατεύθυνση προς τα μέσα μπορούν να τοποθετηθούν σε μια θέση έτσι ώστε το δείγμα να έλκεται από το πιο κατάλληλη θέση μέσα στο φρεάτιο ή τη δεξαμενή. Είναι σημαντικό το δείγμα να συλλέγεται από την ίδια θέση στο εσωτερικό του συστήματος κάθε φορά. Αυτή η μέθοδος παρέχει έναν πιο συνεπή και αντιπροσωπευτικό τρόπο δειγματοληψίας λαδιού από τη δειγματοληψία θύρας αποστράγγισης.

### **Βαλβίδες δειγματοληψίας**

Υπάρχουν πολλές εμπορικά διαθέσιμες βαλβίδες δειγματοληψίας, οι οποίες προσφέρουν πολλά διαφορετικά χαρακτηριστικά (Σχήμα 7.5).



**Σχήμα 7.5** Εμπορικά διαθέσιμες βαλβίδες δειγματοληψίας[1]

Αυτές οι ειδικές βαλβίδες δειγματοληψίας είναι παρόμοιες με τις βαλβίδες ελέγχου. Η βαλβίδα είναι κανονικά κλειστή έως ότου το δείγμα της θύρας προσαρμογέα βιδώνεται ή ωθείται προς τα πάνω. Υψηλής ποιότητας θύρες δειγματοληψίας έχουν ένα κάλυμμα σκόνης με ένα δακτύλιο για προστασία έναντι των διαρροών δεύτερου σταδίου. Ο προσαρμογέας διαθέτει μία ακίδα (συνδετήρας) σωλήνα από τη μία πλευρά που δέχεται βασικούς πρότυπους πλαστικούς σωλήνες. Επειδή ο προσαρμογέας βιδώνεται στη θύρα δείγματος αυτό απομακρύνει την μπάλα ελέγχου στη βαλβίδα και επιτρέπει στο ρευστό να ρέει μέσα. Αυτές οι βαλβίδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλημμυρισμένες ασυμπίεστες γραμμές και γραμμές υπό πίεση έως 35 MPa (5000 psi).

Σε πεπιεσμένα συστήματα που κυμαίνονται πάνω από 13 MPa (2000 psi), η δειγματοληψία πρέπει να διεξάγεται με συγκεκριμένο μέτρο ασφάλειας. Συνίσταται να χρησιμοποιούνται φορητές βαλβίδες μείωσης της πίεσης, οι οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν με θύρες δειγματοληψίας και προσαρμογείς για να μειωθούν οι πιέσεις από 35 MPa έως λιγότερο από 0,35 MPa (50 psi). Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτού του τύπου μεθόδου δειγματοληψίας είναι ότι διατηρείται πολύ μικρό όγκος του στατικού λαδιού. Ως αποτέλεσμα, λιγότερο λάδι ξεπλένεται πριν από κάθε δείγμα που λαμβάνεται.



**Σχήμα 7.6** Διαδικασία για τη συλλογή του δείγματος λαδιού από τις βαλβίδες δειγματοληψίας[1]

Ένας άλλος τύπος βαλβίδας δειγματοληψίας σε γραμμή δείχνεται στο Σχήμα 7.6. Τα σχήματα 7.6 και 7.7 παρουσιάζουν τη δειγματοληψία λαδιού χρησιμοποιώντας ειδικές βαλβίδες δειγματοληψίας. Παρατηρήστε ότι το σημείο δειγματοληψίας είναι πάνω ή κοντά στην πλευρά εισόδου του φίλτρου γραμμής επιστροφής. Η διαδικασία τεσσάρων βημάτων περιγράφεται παρακάτω:

1. Αφαιρέστε το μεταλλικό καπάκι σκόνης.
2. Γυρίστε το διακόπτη ελατηρίου 90° και ξεπλύνετε την βαλβίδα. Όταν αφήσετε το κομβίο αυτό θα κλείσει αυτόματα.
3. Για άλλη μια φορά, γυρίστε το διακόπτη για να ληφθεί το δείγμα.
4. Αφήστε το κουμπί και αντικαταστήστε το μεταλλικό καπάκι σκόνης.

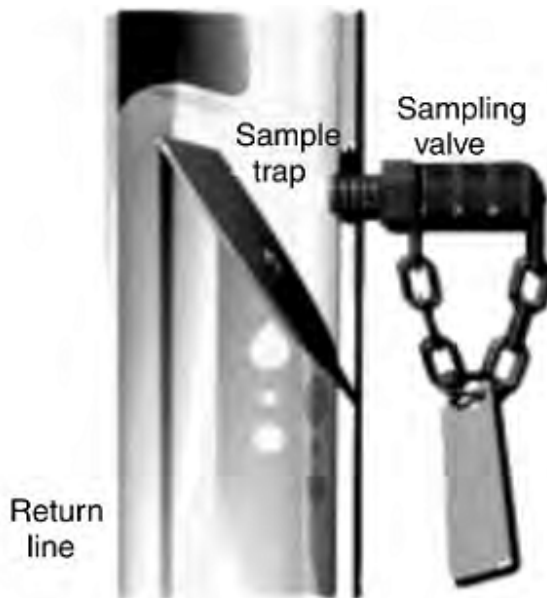


**Σχήμα 7.7** Βαλβίδα δειγματοληψίας λαδιού σε σειρά Hydra-Check®[1]



## Προσαρμογείς σωλήνων παγίδων

Αυτοί χρησιμοποιούνται όταν το λάδι πρέπει να δειγματοληφθεί από κάθετους σωλήνες και είναι βασικά για το είδος των εφαρμογών με περιορισμένη υγρασία. Σε τέτοιες σωληνώσεις, το λάδι συνήθως κινείται σπειροειδώς κατά μήκος του τοιχώματος του σωλήνα. Ο σωλήνας παγίδα συγκρατεί προσωρινά ένα μικρό όγκο του λαδιού υπό την μορφή ενός φράγματος. Από αυτό το φράγμα, συλλέγεται ένα δείγμα πλούσιων δεδομένων από το σωλήνα (Σχήμα 7.8).



Σχήμα 7.8 Προσαρμογείς σωλήνα – παγίδα[1]

## Φιαλίδια δειγματοληψίας λαδιού

Τα εργαστήρια παρέχουν για την ανάλυση λαδιού, φιαλίδια για τη λήψη του δείγματος. Το σοβαρό θέμα της καθαριότητας ισχύει και για τα φιαλίδια του δείγματος. Το πρότυπο ISO 3722 παρέχει τις κατευθυντήριες γραμμές για την καθαριότητα των μεθόδων δειγματοληψίας. Αυτό το πρότυπο χρησιμοποιείται επίσης για τα επίπεδα καθαριότητας του φιαλιδίου του δείγματος. Τα επίπεδα καθαριότητας κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Καθαρό - λιγότερο από 100 σωματίδια μεγαλύτερα από 10 μικρά / ml
- Υπέρ καθαρό - λιγότερο από 10 σωματίδια μεγαλύτερα από 10 μικρά / ml
- Εξαιρετικά καθαρό – Τα γυάλινα φιαλίδια πλένονται και ξηραίνονται σε «καθαρό» περιβάλλον.

Σε γενικές γραμμές, επιλέγονται οι φιάλες που υπάγονται στην κατηγορία «καθαρές» και κάτω. Δεν υπάρχει κανένα σημείο στην επιλογή «υπέρ-καθαρό» ή «εξαιρετικά καθαρό», διότι μόλις το φιαλίδιο ανοίξει έξω από το εργαστήριο, το χαρακτηριστικό αυτό χάνεται. Αποστειρωμένα ή απολυμασμένα φιαλίδια δεν έχουν καμία σημασία για την ανάλυση λαδιού.

Αυτά εξασφαλίζουν μόνο την απουσία των βακτηρίων και δεν συνδέονται με την ανάλυση του λαδιού.

Ένα «καθαρό» φιαλίδιο θα έχει 100 σωματίδια μεγαλύτερο από 10 μm / ml. Για παράδειγμα, εάν ο απαιτούμενος κώδικας καθαριότητας είναι το ISO 19/16 ή ISO 12/9, αυτός ο κώδικας ISO (για το φάσμα μεγέθους 10-micron) διευκρινίζει:

- ISO 19 / 16 - 1200 σωματίδια > 10 μm / ml
- ISO 12 / 9 - 9 σωματίδια > 10 μικρά / ml.

Προφανώς, η ένδειξη «καθαρό» για τα φιαλίδια φαίνεται να είναι ανεπαρκής για τις προδιαγραφές ISO 12/9. Υπάρχουν, επίσης, αμφιβολίες για το αν το καθαρό μπουκάλι είναι επαρκές για τον κωδικό καθαριότητας ISO 19/16. Για να αντιμετωπίσετε αυτό το πρόβλημα, ορίζεται μια παράμετρος που ονομάζεται ο λόγος σήματος προς τον θόρυβο (SNR).

$$SNR = \frac{\text{επίπεδο καθαριότητας λαδιού}}{\text{μέγιστη επιτρεπόμενη μόλυνση φιαλιδίου}}$$

Για την προδιαγραφή ISO 19/16, το επίπεδο - στόχος καθαριότητας λαδιού είναι 1200 σωματίδια > 10 μικρά / ml. Για ένα καθαρό φιαλίδιο, η μέγιστη επιτρεπόμενη μόλυνση του φιαλιδίου είναι 100 σωματίδια > 10 μικρά / ml. Έτσι, ο SNR στην περίπτωση αυτή θα είναι 12:1.

Για την προδιαγραφή ISO 12/9, η καθαρότητα λαδιού είναι 9 σωματίδια > 10 μm / ml. Για το καθαρό φιαλίδιο, η μέγιστη επιτρεπόμενη μόλυνση είναι 100 σωματίδια > 10 μικρά / ml. Ο SNR στην περίπτωση αυτή θα είναι περίπου 1:10.

Καλές πρακτικές δείχνουν ότι πρέπει να επιτευχθεί ένας SNR τουλάχιστον 5:1. Κάτω από αυτό το όριο μπορεί να προκληθεί μόλυνση του δείγματος που θα οδηγήσει σε λανθασμένες ενδείξεις. Ένας SNR της τάξης 5:1 σημαίνει ότι ο θόρυβος (αρχικά τα σωματίδια μέσα στο φιαλίδιο) μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια της καταμέτρησης των σωματιδίων κατά περίπου 20%. Έτσι, το καθαρό φιαλίδιο συμμορφώνεται με το πρότυπο ISO 19/16, αλλά δεν είναι αποδεκτό για το ISO 12/9.

Καθώς το SNR γίνεται μεγαλύτερο, η μόλυνση του φιαλιδίου έχει ασήμαντη επίδραση στην καταμέτρηση των σωματιδίων. Ωστόσο, εάν απαιτείται καθαρότερος στόχος, γίνεται πιο δύσκολο να διατηρηθεί υψηλός ο SNR. Οι φιάλες δειγματοληψίας κατασκευάζονται συνήθως από τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) και γυαλί. Κάθε ένα από αυτά παρέχει μια μεγάλη συμβατότητα ρευστού. Η προτιμώμενη ογκομετρική μέγεθος είναι 100 ml (ή 4 oz). Οι PET και οι γυάλινες φιάλες είναι καθαρά, αλλά οι HDPE είναι αδιαφανείς και έτσι είναι δυνατή μια άμεση οπτική εξέταση του δείγματος. Οι γυάλινες φιάλες παρέχουν εξαιρετική καθαρότητα, αλλά απαιτούν πολύ προσεκτικό χειρισμό. Ανάλογα με την απαίτηση, πρέπει να επιλέγεται η κατάλληλη φιάλη του δείγματος.

## Ταυτοποίηση του δείγματος

Ένα πρόγραμμα ανάλυσης λαδιού θα πρέπει να ενσωματώσει την πρακτική των θυρών δειγματοληψίας επισήμανσης με ανθεκτικές στη διάβρωση ετικέτες. Αυτές οι ετικέτες θα πρέπει να εμφανίζουν τις πληροφορίες που απαιτούνται από τον τεχνικό για να ληφθεί ένα σωστό δείγμα. Τα στοιχεία που πρέπει να περιλαμβάνονται είναι:

- Αναγνωριστικό της θύρας του δείγματος (ID)
- Αναγνωριστικό της μηχανής
- Αναγνωριστικό Λιπαντικό
- Το επίπεδο καθαρότητας.

Οι κωδικοποιημένες ετικέτες αναγνώρισης είναι επίσης ένας σπουδαίος τρόπος για να ονομαστούν οι θύρες.

Το πρότυπο ISO 4406 για την καταμέτρηση σωματιδίων

Αριθμός σωματιδίων ανά ml		Αριθμός κλίμακας
Περισσότερα από	Μέχρι και	

80 000	160 000	24
40 000	80 000	23
20 000	40 000	22
10 000	20 000	21
5 000	10 000	20
2 500	5 000	19
1 300	2 500	18
640	1 300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2.5	5	9
1.3	2.5	8
0.64	1.3	7
0.32	0.64	6
0.16	0.32	5
0.08	0.16	4
0.04	0.08	3
0.02	0.04	2
0.01	0.02	1
0.005	0.01	0
0.0025	0.005	0

Ο κωδικός ISO 4406 ορίζει δύο ή τρεις κλίμακες μεγέθους. Ο αριθμός κλίμακας αναφέρεται στον αριθμό των σωματιδίων ανά 1 ml σε κάθε κλίμακα μεγέθους. Οι αριθμοί κλίμακας αναφέρονται με μια αναστροφή μεταξύ τους με > 5 (ή > 2) μικρά. Ανατρέξτε στα παραδείγματα παρακάτω.

**2<sup>ος</sup> κωδικός καταμέτρησης σωματιδίων**

Μέγεθος	Καταμέτρηση	Κλίμακα
>5	3600	19
>15	28	12

Κώδικας ISO 19/12

### 3<sup>ος</sup> κώδικας καταμέτρησης σωματιδίων

Μέγεθος	Καταμέτρηση	Κλίμακα
2	11893	21
>5	3620	19
>15	28	12

Κωδικός ISO 29/19/12

Ο κώδικας ISO για τη μόλυνση των σωματιδίων προτείνει αναφορά δεδομένων κατά τη καταμέτρηση των σωματιδίων με τη μετατροπή των αποτελεσμάτων της καταμέτρησης σωματιδίων σε τάξεις ή κωδικούς. Μια αύξηση από έναν κωδικό αριθμό στον επόμενο υποδεικνύει διπλασιασμό του επιπέδου μόλυνσης των σωματιδίων. Οι κωδικοί αριθμοί της κλίμακας ISO βασίζονται στο σύνολο σωματιδίων που είναι ίσο ή μεγαλύτερο από μια δεδομένη τάξη μεγέθους.

Οι διακυμάνσεις μεγέθους πρόσφατα ενημερώθηκαν για 4, 6 και 14 microns. Οι προηγούμενες διακυμάνσεις ακόμα και σε χρήση είναι 2 (ανεπίσημα), 5 και 15 microns. Τα εργαστήρια μπορούν να αναφέρουν μετρήσεις ανά χιλιοστόλιτρο του δείγματος ή ανά 100 χιλιοστόλιτρα. Επίσης, η κάθε σειρά μπορεί να αναφερθεί ως «αθροιστική» (συνολικά σωματίδια ίσα ή μεγαλύτερα από το εύρος) ή «διαφορική» (μόνο ανάμεσα σε ένα εύρος και το επόμενο).

Για παράδειγμα, με το σύστημα του κώδικα 5/15, μία δυε-ευρική, 100 χιλιοστόλιτρων σωρευτική καταμέτρηση με ένα κώδικα ISO 14/12 θα αντιπροσωπεύει ένα δείγμα που έχει μεγαλύτερη από 8000 έως 16 000 σωματίδια τα οποία είναι 5 μικρά ή μεγαλύτερα σε μέγεθος. Σε αυτό το δείγμα, θα υπάρχουν περισσότερα από 2000 έως 4000 σωματίδια τα οποία είναι 15 μικρά ή μεγαλύτερα σε μέγεθος.

#### 7.5.3 Ελαχιστοποίηση της μόλυνσης του δείγματος

Το δείγμα λαδιού πρέπει να προστατεύεται από τη μόλυνση των σωματιδίων της ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια και μετά τη δειγματοληψία. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται για τη πρόληψη της μόλυνσης στο δείγμα του λαδιού. Αν τα ατμοσφαιρικά στοιχεία μολύνουν το δείγμα του λαδιού, γίνεται εξαιρετικά δύσκολη η διάκριση των προσμείξεων. Το πρόγραμμα ανάλυσης λαδιού μπορεί να παρεμποδιστεί σε μεγάλο βαθμό, λόγω αυτού του προβλήματος. Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες για την ελαχιστοποίηση της μόλυνσης. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Πιστοποιημένα αποστειρωμένα φιαλίδια
- Σωλήνες ανίχνευσης της φιάλης (τα καπάκια δεν αφαιρούνται)
- Έκπλυση της βαλβίδας δειγματοληψίας
- Συχνός καθαρισμός / έκπλυση των συσκευών δειγματοληψίας

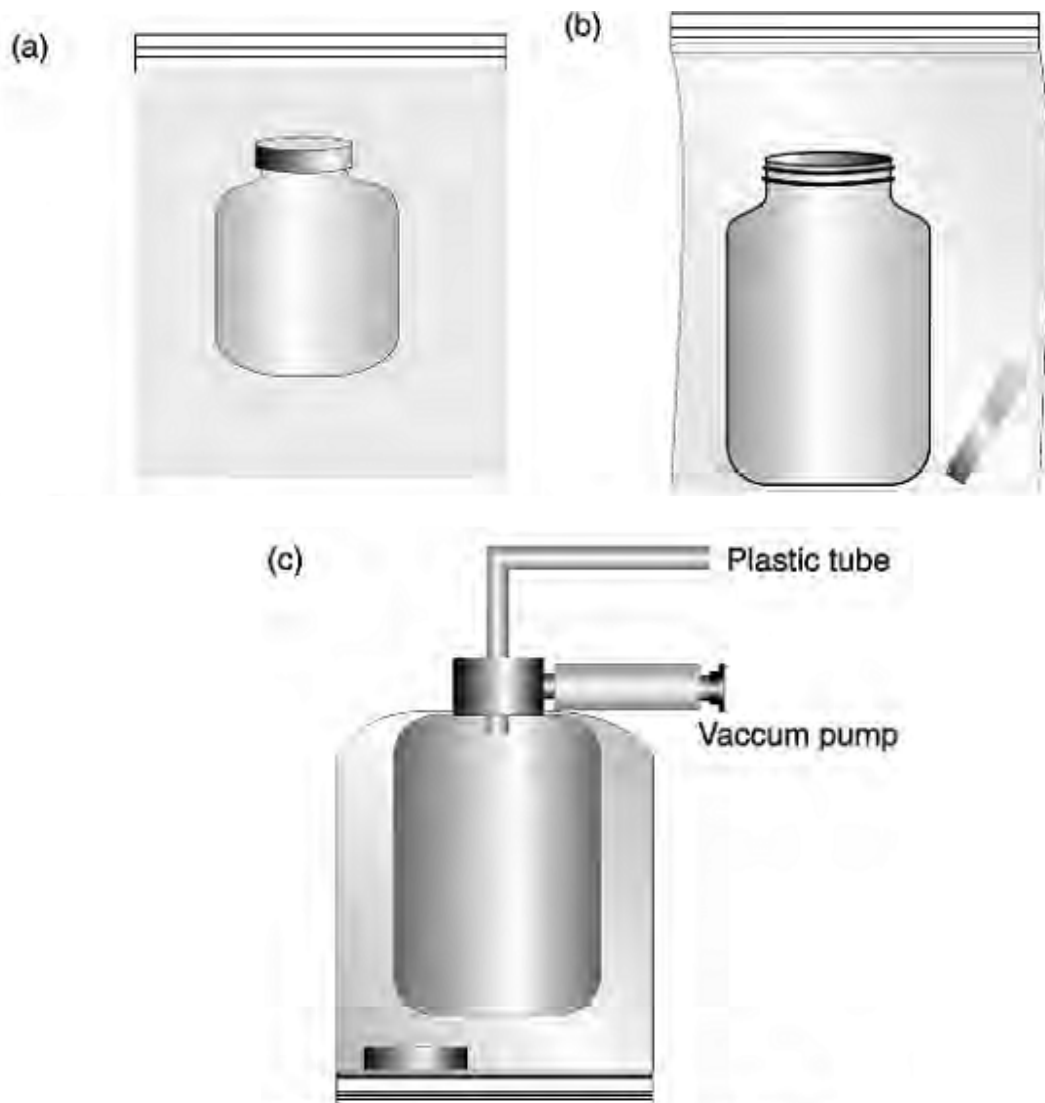
Μια μικρή απόκλιση σε οποιαδήποτε από τις προαναφερθείσες διαδικασίες θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο την ακεραιότητα του κάθε προγράμματος ανάλυσης λαδιού. Υπάρχουν πολλοί εξαιρετικοί τρόποι συλλογής των δειγμάτων του λαδιού και μέθοδοι για τον περιορισμό της εξωτερικής μόλυνσης. Μία μέθοδος απεικονίζεται στα Σχήματα 7.9A-C. Αυτές οι εικόνες δείχνουν πώς το εξωτερικό περιβάλλον δεν πρέπει να έρθει σε επαφή με το περιεχόμενο της

#### **7.5.4 Συνοψίζοντας τη δειγματοληψία λαδιού**

Η διαδικασία της δειγματοληψίας είναι ένα βασικό μέρος του προγράμματος ανάλυσης λαδιού. Παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα του προγράμματος. Απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και συστηματική προσέγγιση. Είναι απαραίτητο να περιλαμβάνει διαδικασίες και κατευθυντήριες γραμμές, όπως:

- Συχνότητα δειγματοληψίας
- Ποσότητα λαδιού για να ξεπλυθεί προτού εξαχθεί το δείγμα
- Τρόπος απόκτησης του δείγματος λαδιού
- Εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δειγματοληψία
- Ονοματισμός του δείγματος
- Τακτικές και απαιτήσεις των ειδικών δοκιμών
- Ειδικές παρατηρήσεις που θα μπορούσαν να ενισχύσουν τη βελτίωση στην αξιοπιστία του εξοπλισμού και την ακεραιότητα του δείγματος.

Οι ειδικοί πιστεύουν ότι ο χρόνος και τα χρήματα που δαπανώνται για την εξασφάλιση της ποιότητας ενός δείγματος λαδιού στο φιαλίδιο είναι κατά πολύ κερδοφόρες, όταν οι παροχές της ανάλυσης του λαδιού αξιολογούνται στο τέλος της ημέρας. Τελικά, αυτό επιτυγχάνεται καλύτερα μέσω κατάλληλης εκπαίδευσης όλων των ανθρώπων που συμμετέχουν σε δραστηριότητες δειγματοληψίας-λαδιού. Όλα τα οφέλη θα μπορούσαν να χαθούν, εάν παρά την φροντίδα ένα ζευγάρι βρώμικα χέρια συλλέξει το δείγμα.



**Σχήμα 7.9** Η συλλογή των δειγμάτων λαδιού χωρίς εξωτερική μόλυνση[1]

### 7.6 Ανάλυση λαδιού - ιδιότητες του λιπαντικού

Η ανάλυση του λαδιού είναι πρωτίστως ένας συνδυασμός δύο τύπων αναλύσεων. Η μία είναι η ανάλυση του ίδιου του λιπαντικού και η άλλη αφορά την ανάλυση των προσμειξεων στο λάδι. Οι δοκιμές του λιπαντικού σχετίζονται με την ανίχνευση οποιασδήποτε αποικοδόμησης του λαδιού. Μερικοί ρυπαντές είναι εσωτερικής φύσεως και ορισμένοι μολυντές είναι από το περιβάλλον, και αυτό είναι ακριβώς με αυτό που επικεντρώνεται η δεύτερη ανάλυση. Στην ενότητα αυτή, θα επικεντρωθούμε στην ανάλυση του ίδιου του λιπαντικού. Το λάδι είναι ουσιαστικά ένα χημικό υγρό και ορίζεται μέσω ενός αριθμού φυσικών και χημικών ιδιοτήτων. Δεν έχουν όλες αυτές οι ιδιότητες ενδιαφέρον, αν και μας απασχολεί μόνο η λιπαντική πτυχή των λαδιών.

Η ενότητα που ακολουθεί περιλαμβάνει έναν εξαντλητικό κατάλογο με τις περιγραφές των δοκιμών που διεξάγονται σε λιπαντικά και τις πιθανές πληροφορίες που προέρχονται από αυτές. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές αυτές παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το πώς η κατάσταση του λαδιού είναι πιθανό να επηρεάσει τη λειτουργία του εξοπλισμού.

### **7.6.1 Η εμφάνιση, το χρώμα, την οσμή**

Αυτή είναι η πιο στοιχειώδης δοκιμή που επιτυγχάνεται μέσω της φυσικής εμφάνισης:

- Το λάδι λογικά είναι διαυγές ή θολό. Η θαμπάδα ή η θολερότητα υποδεικνύουν την παρουσία νερού.
- Οι αιωρούμενες ακαθαρσίες θα μπορεί να υποδεικνύουν φθορά.
- Το άφρισμα δηλώνει απώλεια αντιαφριστικών ιδιοτήτων.
- Συνήθως τα λιπαντικά έχουν ευχάριστη οσμή. Ένα καμένο ή με έντονη οσμή λάδι αποτελεί ένδειξη οξειδωσης.
- Τα φωτεινά καθαρά λιπαντικά που έχουν συνήθως κιτρινωπό χρώμα θα μπορούσαν να εμφανίσουν σκούρο κόκκινο χρώμα λόγω οξειδωσης ή μεικτής μόλυνσης.

### **7.6.2 Οξύτητα ανόργανων**

Αυτή είναι η δοκιμή για την απελευθέρωση από υδατοδιαλυτά ισχυρά ανόργανα οξέα.

### **7.6.3 Οξύτητα οργανικών**

Η δοκιμή αυτή ανιχνεύει την παρουσία οργανικών οξέων (αδιάλυτα στο νερό αλλά διαλυτά σε αλκοόλη). Τα οξέα μπορεί να είναι παρόντα ως προστιθέμενα συστατικά ή μπορεί να έχουν σχηματιστεί κατά τη διάρκεια της οξειδωσης.

### **7.6.4 Συνολική Οξύτητα**

Αυτό είναι το άθροισμα των ανόργανων και οργανικών οξέων. Το αποτέλεσμα αυτής της δοκιμής αναφέρεται ως *αξία εξουδετέρωσης* ή *ολικός αριθμός οξέως* (total acid number-TAN).

Ο TAN δείχνει την ικανότητα του λαδιού να αντιδράσει με το βασικό αντιδραστήριο. Η δοκιμή μετρά το επίπεδο οξύτητας του συστήματος. Το επίπεδο οξύτητας των συστημάτων αυξάνει με το χρόνο, και η αύξηση αυτή μπορεί να ανιχνευθεί με τη δοκιμή αυτή. Επιπλέον, ορισμένες μορφές μόλυνσης μπορούν επίσης να αυξήσουν τα επίπεδα οξύτητας.



Για τον προσδιορισμό του TAN, μια ορισμένη ποσότητα λαδιού αραιώνεται με ένα εξουδετερωμένο μίγμα βενζολίου και ένα δείκτη που περιέχουν αλκοόλ, όπως φαινολοφθαλεΐνη. Αυτό το μίγμα κατόπιν τιτλοδοτείται έναντι ενός υδατικού βασικού διαλύματος υδροξειδίου του καλίου (KOH). Το αποτέλεσμα δίδεται ως ο αριθμός των mg KOH που απαιτούνται για την εξουδετέρωση 1 g λαδιού. Ο TAN είναι συνεπώς ένας αριθμός που εκφράζεται ως mg KOH / g λαδιού. Η αύξηση του TAN είναι συνήθως αργή αρχικά, αλλά η επακόλουθη άνοδος μπορεί να είναι αρκετά γρήγορη.

### 7.6.5 Ειδικό βάρος

Το ειδικό βάρος του λαδιού είναι ο λόγος της πυκνότητας του σε σχέση με το νερό. Χρησιμοποιείται μόνο για να προσδιορίσει το λάδι όταν η προέλευσή του είναι υπό αμφισβήτηση. Η δοκιμή γίνεται όταν υπάρχει υποψία ότι το λάδι είναι νοθευμένο με ελαφρύτερα ή βαρύτερα προϊόντα. Αλλιώς, η δοκιμή έχει μικρή σημασία σε σχέση με την απόδοση του λιπαντικού.

### 7.6.6 Κινηματικό ιξώδες

Το κινηματικό ιξώδες είναι ίσως η πιο σημαντική ιδιότητα του κάθε πετρελαιοειδούς λαδιού που χρησιμοποιείται ως λιπαντικό. Το ιξώδες είναι το μέτρο της αντίστασης του λαδιού στη ροή. Κανονικά, κάθε έλαιο που χρησιμοποιείται για μια συγκεκριμένη εφαρμογή θα έχει ιξώδες που διέπεται από τις προδιαγραφές της εφαρμογής. Το ιξώδες μπορεί είτε να αυξηθεί είτε να μειωθεί. Μια αύξηση του ιξώδους οφείλεται στην οξείδωση του λαδιού. Η οξείδωση του λαδιού είναι μια αναπόφευκτη, συνεχή διαδικασία, αλλά ο ρυθμός αύξησης καθορίζεται από:

- Τον ρυθμό επαφής με τον αέρα
- Την υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας
- Την καταλυτική επίδραση της παρουσίας μετάλλων όπως ο χαλκός, ο σίδηρος, ο μόλυβδος, ο ψευδάργυρος και η παρουσία υγρασίας.

Όταν μια αύξηση του ιξώδους λαμβάνει χώρα λόγω της οξείδωσης, αυτή συνοδεύεται από αύξηση της οξύτητας. Αυτό συμβαίνει επειδή η οξείδωση του λαδιού έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό των οξέων. Η οξείδωση είναι πιο πιθανό να συμβεί όταν η αύξηση του ιξώδους είναι μεγαλύτερη από 5% της κανονικής τιμής. Ωστόσο, μπορεί να είναι ακόμη χρησιμοποιήσιμο με σχεδόν μια αύξηση 10% από την σχετική αξία του. Μία μείωση στο ιξώδες μπορεί να οφείλεται σε:

- Μικτή μόλυνση με λάδι χαμηλότερου ιξώδους
- Αραίωση με ένα ελαφρύ υδρογονάνθρακα ως καύσιμο
- Προσθήκη βελτιωτικών του δείκτη ιξώδους.

Όταν μια μείωση στο ιξώδες του λαδιού συμβαίνει λόγω της αραίωσης με έναν υδρογονάνθρακα, παράλληλα δημιουργείται μια πτώση στο σημείο ανάφλεξης. Το κινηματικό ιξώδες του λαδιού συνήθως ορίζεται μεταξύ των θερμοκρασιών 40 και 100 ° C. Η μονάδα για το κινηματικό ιξώδες είναι cSt (centistokes).

### **7.6.7 Δείκτης Ιξώδους**

Ο δείκτης ιξώδους (Viscosity index-VI) είναι η σχέση μεταξύ του ιξώδους και της θερμοκρασίας για ένα ρευστό. Ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του ιξώδους που οφείλεται σε μια μεταβολή της θερμοκρασίας του λαδιού. Το ιξώδες του λαδιού θα αλλάξει με την αλλαγή στη θερμοκρασία. Ο ρυθμός μεταβολής εξαρτάται από τη σύνθεση του λαδιού. Λιπαντικά ναφθενικής βάσης αλλάζουν περισσότερο από τα λιπαντικά παραφινικής βάσης (ορυκτέλαια). Ορισμένα συνθετικά λιπαντικά αλλάζουν λιγότερο από παραφινέλαια.

Ένας χαμηλός VI σημαίνει μια σχετικά μεγάλη μεταβολή του ιξώδους σε σχέση με τη θερμοκρασία, και ένας υψηλός VI υποδηλώνει μια μικρότερη μεταβολή του ιξώδους σε σχέση με την θερμοκρασία. Ως εκ τούτου, ο VI του λαδιού είναι σημαντικός σε εφαρμογές όπου μια αισθητή αλλαγή στη θερμοκρασία του λιπαντικού λαδιού θα μπορούσε να επηρεάσει την εκκίνηση ή τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού. Τα μηχανήματα στο κατάστρωμα πλοίων και σημαντικός εξοπλισμός ενός πλοίου αποτελούν παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων.

### **7.6.8 Σημείο ανάφλεξης**

Το σημείο ανάφλεξης είναι η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία ένα ρευστό θα διατηρήσει στιγμιαία καύση (φλας), αλλά θα είναι πριν από την συνεχή καύση (το οποίο είναι το σημείο φωτιάς). Το σημείο ανάφλεξης είναι ένας σημαντικός δείκτης της φωτιάς και της έκρηξης που σχετίζονται με πετρελαϊκά προϊόντα. Σε χρησιμοποιημένα λάδια, συνδέεται με την αραίωση, όπου το σημείο ανάφλεξης είναι χαμηλότερο. Σε υψηλές θερμοκρασίες, η πυρόλυση του λαδιού συμβαίνει μερικές φορές, και αυτό μπορεί επίσης να μειώσει το σημείο ανάφλεξης.

### **7.6.9 Σημείο ροής**

Το σημείο ροής είναι δείκτης της ικανότητας ενός λαδιού ή απόσταγμα καυσίμου να ρέει ελεύθερα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία το ρευστό θα ρέει όταν ψύχεται κάτω από καθορισμένες συνθήκες. Σε πολλά λάδια, είναι δυνατόν να μειωθεί το σημείο ροής χρησιμοποιώντας πρόσθετα καταστολής.

### **7.6.10 Δοκιμή διάβρωσης λωρίδας χαλκού**

Μια ποιοτική μέτρηση της τάσης του πετρελαϊκού προϊόντος κατά τη διάβρωση καθαρού χαλκού, προσδιορίστηκε μέσω αυτής της δοκιμής. Ο χαλκός είναι πολύ ευαίσθητος έναντι σε διαβρωτικές θεικές ενώσεις.

### **7.6.11 Άφρισμα**

Όταν ο αέρας εμφυσεύεται διαμέσου εμπλουτισμένων, μολυσμένων ή οξειδωμένων λαδιών, παρατηρείται αφρισμός. Η δοκιμή διεξάγεται για να ελεγχθεί αν ο αφρισμός είναι εντός των ορίων. Τα αφρώδη λάδια παρουσιάζουν δυσλειτουργία ως λιπαντικά. Ο συνδυασμός του αέρα και του λαδιού μπορεί να συγκριθεί με ένα σφουγγάρι. Δεν είναι ικανό για την ανάληψη του φορτίου στα έδρανα. Για την καταστολή του αφρού, προστίθενται παράγοντες αντί-αφρισμού.

### **7.6.12 Αριθμός Σαπωνοποίησης**

Ο αριθμός σαπωνοποίησης είναι το μέτρο του ΚΟΗ που απαιτείται για να γίνει πλήρης σαπωνοποίηση του λαδιού. Ο αριθμός σαπωνοποίησης εκφράζεται ως mg ΚΟΗ / gr λαδιού. Η παρουσία των οξέων, των λιπών και των οξειδωμένων προϊόντων υποδεικνύεται με τη δοκιμή αυτή. Ο αριθμός σαπωνοποίησης είναι επομένως μία ένδειξη της ποσότητας του λιπαρού υλικού σε σαπωνοποιησίμα λάδια. Πρέπει να λαμβάνεται προσοχή κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των δοκιμών, αν είναι παρόντες στο λάδι ορισμένες ουσίες, όπως η ένωση του θείου ή τα αλογόνα. Αυτά αντιδρούν επίσης με ΚΟΗ, το οποίο τείνει να αυξήσει τον αριθμό της σαπωνοποίησης.

### **7.6.13 Χαρακτηριστικά πρόληψης - σκουριάς**

Πολλά λάδια όπως του στροβίλου και τα υδραυλικά λάδια συνδυάζονται με πρόσθετα για να μην σκουριάσει ο χάλυβας με τη παρουσία του νερού. Η δοκιμή αυτή διεξάγεται για να προσδιορισθεί αν η πρόληψη της σκουριάς είναι φυσιολογική ή μειωμένη.

### **7.6.14 Αριθμός απογαλακτωματοποίησης**

Αυτό είναι ένα μέτρο του πόσο γρήγορα το νερό θα διαχωρίζεται από το λάδι. Ο αριθμός απογαλακτωματοποίησης είναι ο χρόνος που θα χρειαστεί (σε δευτερόλεπτα) το λάδι να διαχωριστεί και πάλι μετά από αυτό που γαλακτωματοποιήθηκε υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Είναι μια κοινή δοκιμή για τα λάδια των στροβίλων, αλλά είναι ευαίσθητη στην γήρανση.

### **7.6.15 Δοκιμές οξείδωσης**

Ένας αριθμός των δοκιμών οξειδώσεων διεξάγεται για να προσδιοριστεί και να κριθεί η σταθερότητα των χαρακτηριστικών των χρησιμοποιούμενων λαδιών. Αυτά βοηθούν επίσης στον καθορισμό της αποτελεσματικότητας των αντιοξειδωτικών που χρησιμοποιούνται στα λάδια. Οι δείκτες μετρούν τους όρους οξύτητας, το ιξώδες, την αύξηση του κατάλοιπου άνθρακα ή μια αύξηση της τιμής της λάσπης. Μετρά επίσης τη διάβρωση των προϊόντων και τα προϊόντα ολικής οξείδωσης. Μερικές κοινές δοκιμές οξείδωσης δίνονται παρακάτω.

### **Σταθερότητα οξείδωσης με περιστρεφόμενο κέλυφος(D-2272)**

Χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί η ζωή της δοκιμής οξείδωσης σε λάδια τουρμπίνας ή άλλα λάδια. Η άλλη (υπόλοιπη) δοκιμασία οξείδωσης για την αξιολόγηση της «ζωής» μεταχειρισμένων λαδιών μπορεί να προσδιοριστεί με μέτρηση της πρόσληψης οξυγόνου από την πτώση πίεσεως κατά τη διάρκεια της δοκιμής του περιστρεφόμενου κελύφους.

### **Δοκιμή οξείδωσης των λαδιών αναστέλλουν την τουρμπίνα (D-943)**

Χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει την δοκιμή οξείδωσης που αφορά τη «ζωή» των λαδιών τουρμπίνων ή άλλων λαδιών. Επίσης, χρησιμοποιείται για να ελέγξει την υπολειπόμενη διάρκεια ζωής σε χρησιμοποιημένα λάδια.

### **7.6.16 Δοκιμή φθοράς αντλίας (D-2282)**

Η δοκιμή αυτή προσδιορίζει τις ιδιότητες κατά της φθοράς των υδραυλικών υγρών μέσω μιας περωτής αντλίας Vickers-Detroit (ή παρόμοιας) υπό τυποποιημένες συνθήκες πίεσης για καθορισμένη χρονική περίοδο. Προσδιορίζεται η σοβαρότητα της απώλειας λειτουργικών μερών της αντλίας και η μείωση στη ροή ρευστού.

### **7.6.17 Χαρακτηριστικά γαλακτώματος και διαχωρισμού**

Αυτή η δοκιμή υπολογίζει το πόσο γρήγορα το νερό θα διαχωριστεί από το λάδι κάτω από κανονικές συνθήκες. Το λάδι γαλακτωματοποιείται με το νερό υπό τυποποιημένες συνθήκες μηχανικής ανάδευσης, και καταγράφεται ο χρόνος για τον διαχωρισμό του λαδιού και του νερού. Η δοκιμή διεξάγεται κατά κύριο λόγο στην τουρμπίνα και στα υδραυλικά λάδια.

### **7.6.18 Τιμής απελευθέρωσης αέρα**

Η μέθοδος αυτή δίνει ένα μέτρο της ικανότητας του λαδιού να διαχωριστεί από το φερόμενο αέρα. Εφαρμόζεται συνήθως σε υδραυλικά λάδια και λάδια στροβίλων. Η τιμή απελευθέρωσης του αέρα ορίζεται ως ο αριθμός των λεπτών (min) που απαιτεί ο αέρας για να μειώσει σε όγκο το λάδι κατά 0,2% υπό τις συνθήκες δοκιμής.

### **7.6.19 Συμβατότητα τσιμούχας**

Η μέθοδος αυτή προσδιορίζει τη συμβατότητα των λαδιών με τσιμούχα ελαστικού υλικού του νιτριλίου όσον αφορά την αλλαγή του όγκου και της ξηρής σκληρότητας. Κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής, αρχικά προσδιορίζεται ο όγκος και η σκληρότητα του δείγματος των ελαστικών του νιτριλίου. Στη συνέχεια, τα δείγματα εμβαπτίζονται σε λάδι στους 80° C για 100 ώρες και στη συνέχεια ψύχονται σε θερμοκρασία δωματίου. Μετρώνται ξανά ο όγκος και η ξηρή σκληρότητα και η διαφορά καταχωρείται.

### **7.6.20 δοκιμή FZG (δοκιμή FZG-Niemon EP)**

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί για τη δοκιμή μια διάταξη γραναζιών EP. Ο σκοπός της δοκιμής αυτής είναι να προσδιοριστούν τα όρια του φορτίου, τα γδαρσίματα, τα όρια βαθμολόγησης στις πλευρές δοντιών και οι αλλαγές βάρους σε οδοντωτούς τροχούς με βηματικά αυξανόμενα φορτία κάτω από πρότυπες συνθήκες.

### **7.6.21 pH**

Η τιμή του pH είναι το μέτρο της συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου ( $H^+$ ) και δείχνει αν το υγρό έχει όξινο, ουδέτερο ή βασικό χαρακτήρα. Οι μετρήσεις του pH μερικές φορές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ποιότητας, αλλά δεν αποτελούν σημαντική ένδειξη από την άποψη της παρακολούθησης της κατάστασης.

### **7.6.22 Περιεκτικότητα σε νερό**

Τα νέα λιπαντικά δεν περιέχουν νερό. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, μπορούν να έρθουν σε επαφή με νερό από τους ψύκτες ή τους λαβύρινθους των τουρμπίνων ατμού. Το νερό κάνει το λάδι να φαίνεται θολό. Η δοκιμή «ραντίσματος» (ράντισμα μερικών σταγόνων λάδι σε μια εστία με θερμοκρασία  $120^{\circ} C$ ) μπορεί επίσης να ανιχνεύσει την παρουσία του νερού. Αυτή η δοκιμή είναι ευαίσθητη όταν η περιεκτικότητα σε νερό είναι υψηλότερη από 100 ppm. Εάν η περιεκτικότητα σε νερό είναι αρκετά υψηλή το λάδι θα αφρίσει και αρχίσει να «πιτσιλάει». Τα ίχνη του νερού μπορεί να ανιχνευθούν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Karl Fischer ή τη μέθοδο Dean και Stark.

### **Karl Fischer - ASTM D-1744**

Αυτή η δοκιμή μετρά το περιεχόμενο μεγέθους τόσο χαμηλό όσο 50 κομμάτια ανά εκατομμύριο (ppm), το οποίο είναι 0.005% νερό. Για την ανάλυση του συστήματος στροβίλου χρησιμοποιούνται συστήματα σερβομηχανισμού και οποιοδήποτε άλλο σύστημα το οποίο να έχει χαμηλή ανεκτικότητα σε νερό.

### **Dean και Stark**

Το λάδι θερμαίνεται υπό κάθετο ψυκτήρα με ένα μη αναμίξιμο υδατινό διαλύτη όπως το ξυλόλιο ή το τολουόλιο μεταξύ  $100$  και  $120^{\circ} C$ . Ο διαλύτης συν-αποσπάει με το νερό. Αυτός ο ατμός στη συνέχεια συμπυκνώνεται σε μια παγίδα. Η μη αναμιξιμότητα των δύο βοηθά στον καθορισμό της ποσότητας του νερού που εξάγεται από το λάδι.

### **7.6.23 Χαρακτηριστικά υδραυλικών σε ανθεκτικότητα στη φωτιά**

Τα υδραυλικά λάδια που είναι ανθεκτικά στη φωτιά είναι γαλακτώματα λαδιού σε νερό ή νερού σε λάδι. Χρησιμοποιούνται υδάτινες γλυκόλες ή μη-υδατικά συνθετικά υγρά κάθε φορά και υπάρχει κίνδυνος πυρκαγιάς σε υδραυλικά συστήματα. Τα χαρακτηριστικά ενάντια της φωτιάς είναι μια σημαντική ιδιότητα σε αυτές τις περιπτώσεις. Οι ιδιότητες αυτές καθορίζονται από τρεις δοκιμές:

1. Η εγγενής θερμοκρασία ανάφλεξης
2. Ψεκασμός
3. Δοκιμή διάδοσης της φλόγας

Αυτό γίνεται σε ένα μίγμα υγρού και σκόνης άνθρακα.

### **Η εγγενής θερμοκρασία ανάφλεξης**

Ο στόχος της δοκιμής αυτής είναι να προσδιοριστεί η χαμηλότερη εγγενή θερμοκρασία ανάφλεξης από ένα υδραυλικό υγρό σε ατμοσφαιρική πίεση.

### **Δοκιμή ψεκασμού θερμοκρασίας πίεσης της ανάφλεξης**

Το αντικείμενο που προσδιορίζεται με τη δοκιμή αυτή είναι η αναφλεξιμότητα ενός υδραυλικού ρευστού, όταν το ρευστό ψεκάζεται πάνω από τρεις διαφορετικές πηγές ανάφλεξης.

### **Δοκιμή πολλαπλασιασμού φλόγας σε ένα μίγμα υγρού και σκόνης άνθρακα**

Η διάδοση της φλόγας μετράται σε ένα μίγμα από 75 g άνθρακα και 37,5 ml υγρού. Η δοκιμή διεξάγεται σε ένα περίβλημα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χωρίς τεχνητό αερισμό.

### **7.6.24 Θειωμένη Γκρι στάχτη**

Η δοκιμή αυτή προσδιορίζει την περιεκτικότητα λαδιού στην τέφρα. Το λάδι πρώτα απανθρακώνεται και μετά το υπόλειμμα κατεργάζεται με θειικό οξύ και εξατμίστηκε μέχρι ξηρού. Η περιεκτικότητα σε τέφρα εκφράζεται ως ποσοστό κατά μάζα. Αυτή η τιμή καθορίζει τη φύση και την ποσότητα των όργανο-μεταλλικών προσθετικών. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ποιότητας των λιπαντικών που περιέχουν τέφρα από ρουλεμάν ή ως εξέταση για τη μόλυνση.

### **7.6.25 Ηλεκτρική ισχύς**

Η δοκιμή για την ηλεκτρική αντοχή είναι μια μέτρηση των ηλεκτρικών μονωτικών ιδιοτήτων των λαδιών. Είναι μια μέση τάση διάσπασης κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Οι ιδιότητες εύκολα επηρεάζονται από τη μόλυνση και τα ίχνη του νερού, την υγρασία, το οξειδωμένο υλικό και το ινώδες υλικό. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτό μπορεί να αναβαθμιστεί με διήθηση του λαδιού υπό θερμές συνθήκες κενού.

### **7.6.26 Ειδική αντίσταση**

Η ειδική αντίσταση είναι η αναλογία της κλίσης DC του δυναμικού σε V / cm παράλληλα με τη ροή του ρεύματος μέσα στο δείγμα: τη πυκνότητα ρεύματος σε Ampere / cm<sup>2</sup> σε μία δεδομένη στιγμή του χρόνου υπό καθορισμένες συνθήκες. Αυτό είναι αριθμητικά ίσο με την αντίσταση μεταξύ αντίθετων όψεων του ενός κυβικού εκατοστού υγρού. Εκφράζεται σε ohm εκατοστά.

### **7.6.27 Συντελεστής διηλεκτρικών απωλειών**

Ο συντελεστής διηλεκτρικών απωλειών είναι η εφαπτομένη της γωνίας με την οποία η διαφορά φάσης μεταξύ της εφαρμοζόμενης τάσης και το προκύπτον ρεύμα αποκλίνει από  $\pi / 2$  ακτίνια, όταν το διηλεκτρικό του πυκνωτή αποτελείται αποκλειστικά από το μονωτικό λάδι. Αυτές οι ιδιότητες καθορίζουν την καθαρότητα του μονωτικού λαδιού. Αυτές οι ιδιότητες επίσης σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της γήρανσης του μονωτικού λαδιού.

### **7.6.28 Επιφανειακή τάση**

Είναι η δύναμη που απαιτείται για να αποσπαστεί ένας δακτύλιος επίπεδου λευκόχρυσου σύρματος από την επιφάνεια του υγρού που έχει υψηλότερη επιφανειακή τάση από την επιφάνεια του νερού-λαδιού. Εκφράζεται σε newton / μέτρο (N / m). Για να προσδιοριστεί η έκταση της οξείδωσης του χρησιμοποιημένου λαδιού, στο παράδειγμα που χρησιμοποιείται τροποποιημένο λάδι, αυτή η δοκιμή είναι πολύ χρήσιμη. Η τιμή αυτή μειώνεται επαρκώς με το χρόνο κατά τη διάρκεια της χρήσης.

### **7.6.29 Ιδιότητες ακραίας πίεσης**

Τα πρόσθετα ακραίας πίεσης (EP) σχηματίζουν ένα προστατευτικό στρώμα από την αποσύνθεση και την απορρόφηση για τα μεταλλικά μέρη. Τα πρόσθετα αντί-φθοράς λειτουργούν σε μέτρια θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος, ενώ τα πρόσθετα EP είναι αποτελεσματικά σε πιο ακραία περιβάλλοντα.

Τα πρόσθετα του δισουλφιδίου του μολυβδαινίου και του γραφίτη είναι ειδικής μορφής πρόσθετα κατά της φθοράς γνωστά ως αντί-κατασχετικοί παράγοντες. Σχηματίζουν μια προστατευτική στρώση επί των μεταλλικών τμημάτων με απόθεση του γραφίτη ή του

διθειούχου μολυβδαινίου. Οι αντί-κατασχετικοί παράγοντες λειτουργούν ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία και την πίεση. Οι τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν λάδια του κινητήρα, υγρών μετάδοσης κίνησης υγρά από το υδραυλικό τιμόνι και υδραυλικά υγρά τρακτέρ. Τα πρόσθετα EP είναι κοινά σε λάδια κιβωτίων ταχυτήτων, υγρά επεξεργασίας μετάλλων και ορισμένα υδραυλικά υγρά.

### **Η τιμή της μεθόδου Timken OK**

Η δοκιμή αυτή προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά EP των λιπαντικών και το ωφέλιμο φορτίο μέχρι το οποίο δεν συγκρούεται στις μεταλλικές δοκιμές που θα συμβούν.

### **Μέθοδος τεσσάρων σφαιρών (παλαιότερα ονομαζόταν ως η μέσο φορτίο hertz)**

Αυτή η διάταξη δοκιμής καθορίζει την κατάσχεση ή / και τις ουλές των επιφανειών της σφαίρας χάλυβα κάτω από ένα βαρύ φορτίο.

#### **7.6.30 Αδιάλυτα (πεντάνιο και εξάνιο)**

Αυτή είναι μια δοκιμή για τις προσμείξεις των χρησιμοποιημένων λιπαντικών λαδιών. Το λάδι αραιώνεται πρώτα με πεντάνιο, έτσι αναγκάζεται να χάσει τη φερεγγυότητά του για ορισμένες ρητίνες οξείδωσης και προκαλεί τη καθίζηση των φερτών υλών, όπως χρώμα, αιθάλη και φθορές των μετάλλων. Αυτός ο ρύπος καλείται αδιάλυτο πεντάνιο. Το αδιάλυτο πεντάνιο κατόπιν υποβάλλεται σε επεξεργασία με τολουόλιο, το οποίο διαλύει τις ρητίνες οξείδωσης (το βενζόλιο χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν). Τα υπόλοιπα στερεά είναι ονομάζονται αδιάλυτο τολουόλιο. Η διαφορά βάρους μεταξύ των αδιάλυτων πεντανίων και των αδιάλυτων τολουολίου ονομάζονται αδιάλυτες ρητίνες.

#### **7.6.31 Συνολικός αριθμός βάσης (TBN)**

Ο TBN είναι μια ιδιότητα που συνήθως συνδέεται με τα λάδια του κινητήρα. Ορίζεται ως η ικανότητα του λαδιού να εξουδετερώσει το οξύ. Όσο υψηλότερος είναι ο TBN, τόσο περισσότερο οξύ μπορεί να εξουδετερωθεί με αυτό. Αυτή η ποιότητα επίσης αναφέρεται ως το αλκαλικό απόθεμα και είναι ευθέως ανάλογο προς την ποσότητα του δραστικού απορρυπαντικού που περιέχεται στο λάδι.

Τα νέα λάδια κινητήρων έχουν συνήθως TBN από 5,0 έως 15,0, ανάλογα με τον κατασκευαστή και την προβλεπόμενη υπηρεσία. Όταν χρησιμοποιείται το λάδι, αυτό μολύνεται με οξέα και ο TBN μειώνεται. Σε γενικές γραμμές, επίπεδα TBN κάτω από 3,0 θεωρούνται πολύ χαμηλά και δείχνουν ότι το λάδι πρέπει να αλλαχθεί. Μία αιτία της εξάντλησης του TBN σχετίζεται με τη χρήση χαμηλής ποιότητας καυσίμων με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καύσης, το θείο μετατρέπεται σε



θειικό οξύ και με τη σειρά του επιταχύνει την εξάντληση του TBN. Η υπερθέρμανση και υπερβολικά εκτεταμένη διαρροή μπορεί να προκαλέσει οξείδωση του λαδιού. Τα προϊόντα της οξείδωσης είναι όξινα και θα προκαλέσουν μείωση του TBN.

### **7.6.32 Αναλογία TAN-TBN**

Η TAN από μόνη της είναι περιορισμένης αξίας για τον καθορισμό της κατάστασης του λαδιού του κινητήρα λόγω του γεγονότος ότι αποτελεί έναν συνδυασμό διαφορετικών χημικών χαρακτηριστικών. Η όξινη φύση των προσθετικών κατά της φθοράς που βρίσκονται στα περισσότερα σύγχρονα λάδια των κινητήρων προκαλούν αρχικά μια αύξηση του TAN. Το μέγιστο όφελος αποκτήθηκε από το TAN συγκρίνοντάς το με το TBN. Η TAN αυξάνεται κατά τη διάρκεια της χρήσης του λαδιού και ο TBN μειώνεται. Το σημείο όπου συναντώνται οι δύο αυτοί αριθμοί έχει αποδειχθεί ότι είναι το ιδανικό διάστημα για την αλλαγή του λαδιού ενός ορισμένου κινητήρα με συγκεκριμένο φορτίο. Μελέτες έχουν δείξει ότι όταν το TAN υπερβαίνει το TBN, η φθορά του κινητήρα επιταχύνεται σε ασυνήθιστα υψηλά ποσοστά.

## **7.7 Η ανάλυση λαδιού - προσμείξεις στα λιπαντικά**

Μερικοί ρυπαντές είναι εσωτερικώς δημιουργούμενοι και μερικοί άλλοι προέρχονται από το περιβάλλον. Όσοι λοιπόν προέρχονται από το περιβάλλον ή από εξωτερικές πηγές περιλαμβάνουν τα καύσιμα, τη βρωμιά, το νερό, τα καύσιμα αιθάλης και τα προϊόντα της οξείδωσης, νίτρωσης, θείωσης ή κάποιας άλλης πηγής. Οι πλήρως δημιουργούμενοι μολυντές είναι σωματίδια που δημιουργούνται από τη φθορά των εξαρτημάτων. Η ανάλυση αυτών των ρυπαντών είναι ένδειξη της υγείας των μηχανημάτων και μπορεί να σχηματιστεί μια βάση για τον προγραμματισμό της συντήρησης.

### **7.7.1 Μόλυνση από εξωτερικές πηγές**

Η μόλυνση του λαδιού λίπανσης από εξωτερικές πηγές περιλαμβάνει πηγές όπως τα καύσιμα, τη βρωμιά, το νερό, τα καύσιμα αιθάλης, κ.λπ. Αυτός είναι ένας από τους πρωταρχικούς λόγους της ανικανότητας του λαδιού για την σωστή εκτέλεση του έργου. Η μόλυνση μπορεί να ανιχνευθεί με εργαστηριακή ανάλυση και θα πρέπει να ελέγχεται από τις διαδικασίες συντήρησης. Η μόλυνση του λαδιού από εξωτερικές πηγές μπορεί να εμφανιστεί σε οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Το καινούργιο λάδι είναι εξίσου ευαίσθητο σε αυτό το πρόβλημα. Το λάδι από τα βαρέλια συχνά θεωρείται ότι είναι φρέσκο και καθαρό. Ωστόσο, η διαδικασία της μεταφοράς του στη δεξαμενή, πρέπει να ελεγχθεί για πιθανές πηγές μόλυνσης. Οι πιθανές περιοχές για να αναζητήσει κανείς πιθανή μόλυνση περιγράφονται παρακάτω.

Το λάδι που λήφθηκε από τον προμηθευτή είναι «βρώμικο». Όταν το λάδι φεύγει από το διυλιστήριο, αυτό μπορεί να έχει ήδη μολυνθεί. Η μόλυνση μπορεί επίσης να προκύψει

κατά τη μεταφορά του. Δεν υπάρχουν σχεδόν καθόλου κατασκευαστές λαδιού, που να παρέχουν υψηλά επίπεδα καθαρότητας λαδιών.

Η άμεση αποθήκευση και η μεταφορά είναι μια άλλη σημαντική πηγή μόλυνσης του λαδιού. Το λάδι από τα βαρέλια συχνά αποθηκεύεται με τέτοιο τρόπο που οδηγεί σε μόλυνση. Μερικές φορές αντλείται από το βαρέλι μόνο μια μερική ποσότητα του λαδιού. Οι αντλίες στη συνέχεια απομακρύνονται από αυτό το βαρέλι προς το άλλο και στη συνέχεια τα βαρέλια δεν καλύπτονται σωστά. Και οι δύο δραστηριότητες οδηγούν σε μόλυνση. Δεν είναι μόνο ότι ο ένας τύπος λαδιού μπερδεύεται με τον άλλον (ακόμα και αν το ποσοστό είναι χαμηλό), αλλά και ότι το λάδι είναι επίσης εκτεθειμένο στο βρώμικο περιβάλλον του χώρου, στο νερό, στην αερομεταφερόμενη σκόνη και στα υπολείμματα.

Ο ίδιος ο εξοπλισμός είναι μια άλλη πιθανή πηγή μόλυνσης. Ανοίγματα, εξαεριστήρες, φίλτρα και τσιμούχες είναι όλες οι πιθανές πηγές μόλυνσης. Τα ανοίγματα αυτά παρέχουν μια δίοδο για τα αερομεταφερόμενα σωματίδια ή το νερό. Οι εξαεριστήρες και τα φίλτρα πρέπει να είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο για να διατηρούν τους εξωτερικούς παράγοντες μακριά από το σύστημα. Ομοίως, οι τσιμούχες που έχουν καταστραφεί ή δεν λειτουργούν σωστά επίσης επιτρέπουν στα σωματίδια σκόνης ή στο νερό να εισέλθουν στο σύστημα. Κατά τη διάρκεια της βροχής ή των διαδικασιών καθαρισμού, το νερό εύκολα εισέρχεται μέσα στο σύστημα του λαδιού.

Το λάδι μπορεί να έρθει σε επαφή με το καύσιμο, τη γλυκόλη ή το ψυκτικό μέσο, ιδιαίτερα στους κινητήρες. Ο ακατάλληλος ή ελαττωματικός εξοπλισμός μπορεί να οδηγήσει αυτά τα προϊόντα να εισέλθουν στο σύστημα και να προκαλέσει μόλυνση, οδηγώντας σε δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, η κακή καύση μπορεί να δημιουργήσει λάδι με υπερβολικά επίπεδα αιθάλης. Για να αποφευχθεί αυτό το είδος της μόλυνσης, θα μπορούσαν να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα.

Οι προδιαγραφές για την καθαριότητα λαδιού μπορεί να παρέχονται στον προμηθευτή λαδιού. Ο προμηθευτής μπορεί στη συνέχεια να φιλτράρει το λάδι ή μπορεί να χρειαστεί να διεξάγει οποιαδήποτε προ-επεξεργασία για να πληροί όλες τις προδιαγραφές. Έτσι, εξασφαλίζεται η παροχή καθαρού νέου λαδιού. Όλα τα νέα λάδια πρέπει να αποθηκεύονται σε ένα καθαρό και ελεγχόμενο περιβάλλον. Επιπλέον, όλα τα δοχεία αποθήκευσης πρέπει να καθαρίζονται πλήρως. Οι περιέκτες που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του λαδιού στον εξοπλισμό πρέπει να είναι καθαροί και να χρησιμοποιούνται μόνο για ένα λάδι. Το ίδιο ισχύει και για τα δοχεία λαδιού, τα μπουκάλια και αντλίες που χρησιμοποιούνται για τη συμπλήρωση των λαδιών. Οπές (ανοίγματα ή αεραγωγοί), εξαεριστήρες, φίλτρα και τσιμούχες πρέπει όλα να ελέγχονται για την αποτελεσματικότητά τους στη διατήρηση των προσμείξεων έξω από τον εξοπλισμό. Οι μηχανές που δεν έχουν εξαεριστήρες και φίλτρα πρέπει να αξιολογηθούν. Οι εξαεριστήρες μπορεί να εγκατασταθούν αντί των αεραγωγών, και εγκατάσταση νέων φίλτρων συμβάλλει σε πρόσθετη προστασία.

### **7.7.2 Διάφορες εξωτερικές προσμείξεις**

Υπάρχουν πολλά είδη από εξωτερικούς παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την διαδικασία λίπανσης μόλις μπουν σε ένα σύστημα. Επιπλέον, η μόλυνση μπορεί επίσης να προκαλέσει ζημιά και στον εξοπλισμό.

#### **Σωματίδια**

Η κύρια εξωτερική πρόσμειξη στα λάδια είναι τα σωματίδια. Τα σωματίδια αυξάνουν το ρυθμό της φθοράς και της οξείδωσης. Αυτό μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα των πρόσθετων στο λάδι. Τα σωματίδια που εντοπίζονται στο λιπαντικό είναι μοναδικά για κάθε τύπο μηχανής ή υδραυλικού συστήματος. Για παράδειγμα, στους κινητήρες τα σωματίδια έχουν την μορφή:

#### **Αιθάλη καυσίμου (κινητήρες ντίζελ)**

Η αύξηση του ιξώδους λόγω της αιθάλης μειώνει την ικανότητα του πρόσθετου να εκτελέσει και να επιδεινώνει το σχηματισμό των βερνικιών και λάσπης. Μπορεί να είναι λειαντικά στη φύση τους προκαλώντας βαθμολόγηση και φθορά. Η απόδοση της καύσης καθορίζει την έκταση της παραγωγής αιθάλης στους κινητήρες. Η φτωχή αποδοτικότητα οδηγεί σε περισσότερο σχηματισμό αιθάλης. Η αιθάλη είναι συνήθως το κύριο συστατικό των συνολικών στερεών στους πετρελαιοκινητήρες. Τα υψηλότερα επίπεδα αιθάλης έχουν επίσης αποδοθεί σε ακατάλληλο λόγο αέρα- καυσίμου, φθαρμένα ή κολλημένα δαχτυλίδια, υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, και υπέρ-εκτεταμένα διαστήματα αλλαγής λαδιών. Η υπέρυθρη ανάλυση είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του ποσού της αιθάλης καυσίμου στη συνολική περιεκτικότητα σε στερεά.

#### **Προϊόντα οξείδωσης και νίτρωσης**

Η σύνθεση του λαδιού μπορεί να αλλάξει λόγω των χημικών αντιδράσεων όπως η οξείδωση και η νίτρωση. Το λάδι αποτελείται από πρόσθετα τα οποία αναστέλλουν τέτοιες αντιδράσεις. Ωστόσο, όταν η υπερθέρμανση παρατείνεται με τη χρήση καυσίμων υψηλής περιεκτικότητας σε θείο μπορεί να μειώσει τις ιδιότητες αυτών των πρόσθετων τελικά να μην εμποδιστούν αυτές οι αντιδράσεις. Αυτό οδηγεί σε υπερβολική «πάχυνση» του λιπαντικού, σε διάβρωση των μετάλλων και στον σχηματισμό λάκας. Κάθε φορά που ανιχνεύεται μια σοβαρή κατάσταση από τη δοκιμή της ανίχνευσης του επιπέδου των φυσιολογικών συνολικών στερεών, μια υπέρυθρη ανάλυση εκτελείται για τη μέτρηση του βαθμού οξείδωσης και νίτρωσης.

## **Βρωμιά (ρύποι) και άλλα περιβαλλοντικά υπολείμματα**

- Η περιεκτικότητα της βρωμιάς είναι συνήθως ένα μικρό ποσοστό των συνολικών στερεών μέσα στο λάδι και μπορεί να προσδιοριστεί ποσοτικά με φασματοφωτομετρία - χημική ανάλυση για το πυρίτιο.
- Η βρωμιά είναι μακράν η πιο κοινή αιτία των φθαρμένων μεταλλικών σωματιδίων στο λάδι του κινητήρα. Υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ του ποσού της βρωμιάς που ανιχνεύεται και του ποσού των φθαρμένων μεταλλικών σωματιδίων που παρατηρείται. Ωστόσο, η βρωμιά (ή οποιοδήποτε άλλο σωματίδιο) δεν μπορεί να προκαλέσει φθορά εκτός εάν το σωματίδιο είναι μεγαλύτερο από το φίλμ λαδιού που διαχωρίζει τα τμήματα.
- Είναι σημαντικό το μέγεθος των σωματιδίων και η ποσότητα του ρύπου πρέπει να διατηρούνται όσο το δυνατόν χαμηλότερα. Μια υψηλότερη συγκέντρωση των μικρού μεγέθους σωματιδίων σκόνης οδηγεί στη δημιουργία συσσωματωμάτων και φθορά τριβής.
- Το διοξείδιο του πυριτίου (επίσης γνωστό ως χαλαζίας) ένα μέρος της βρωμιά προκαλεί επίσης φθορά τριβής. Το διοξείδιο του πυριτίου, σε συνδυασμό με μεταλλικά οξείδια γνωστά ως πυριτικά άλατα, είναι η βάση της άμμου και σχεδόν όλων των πετρωμάτων.
- Όταν το διοξείδιο του πυριτίου που συνδυάζεται με άνθρακα, αποτελεί ένα λειαντικό που ονομάζεται «ανθρακοπυρίτιο (carbogundum)» το οποίο έχει σκληρότητα συγκρίσιμη με εκείνη του διαμαντιού. Η σίλικα είναι ένα οξείδιο του πυριτίου και ονομάζεται διοξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>).
- Τα εργαστήρια ανάλυσης λαδιού δεν εξετάζουν άμεσα την βρωμιά. Το πυρίτιο που ανιχνεύεται από το εργαστήριο είναι από διοξείδιο του πυριτίου. Κατά συνέπεια, οι μετρήσεις του εργαστηρίου δείχνουν τη ποσότητα του διοξειδίου του πυριτίου στο λάδι. Για λόγους απλούστευσης, το πυρίτιο είναι ένας άλλος όρος που χρησιμοποιείται για την βρωμιά.
- Πρόσθετα σιλικόνης χρησιμοποιούνται σε λάδια για ιδιότητες αντί-αφρισμού και για την άμμο από νέες διεργασίες χύτευσης που είναι άλλες πιθανές πηγές διοξειδίου του πυριτίου.

## **Υγρασία**

Το νερό προκαλεί οξείδωση και σχηματισμό σκουριάς, που με τη σειρά τους επιταχύνουν τη φθορά. Η υγρασία επίσης επηρεάζει τις λιπαντικές ιδιότητες του λαδιού. Η υγρασία μπαίνει στα συστήματα λίπανσης των ρουλεμάν με διαφορετικούς τρόπους και γίνεται διαλυτή, ανεσταλμένη ή χωρίς νερό. Το διαλυμένο και ανεσταλμένο νερό οδηγεί σε ταχεία οξείδωση των πρόσθετων του λιπαντικού και της βασικής πρώτης ύλης. Αυτά υποβαθμίζουν την απόδοση του λιπαντικού. Όταν το νερό διαπερνά τις επιφάνειες των ρουλεμάν, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ευθραυστότητα του υδρογόνου το οποίο μπορεί μειώσει δραστικά την διάρκεια της ζωής του εδράνου (ρουλεμάν). Πολλές άλλες φθορές που

προκαλούνται από την υγρασία και τις διεργασίες διάβρωσης είναι κοινές στα στοιχεία κυλίσεως και περιοδικά έδρανα.

Η καλύτερη θωράκιση ενάντια της μόλυνσης από υγρασία είναι μία τριών-βημάτων στρατηγική προληπτικής συντήρησης, η οποία περιλαμβάνει στόχους, τον αποκλεισμό και την ανίχνευση (TED).

*Στόχος.* Ως ένας γενικός κανόνας, τα 100 ppm είναι ένα συντηρητικό όριο μόλυνσης για πολλές εφαρμογές από την άποψη της απόδοσης του λιπαντικού και της ζωής των ρουλεμάν. Ωστόσο, σε ορισμένες εφαρμογές, η είσοδος του νερού είναι αναπόφευκτη και σε αυτές τις περιπτώσεις, μπορεί να είναι πιο πρακτικό ένα υψηλότερο όριο.

*Αποκλεισμός* Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την αποτελεσματική χρήση των τσιμουχών και των εξαεριστήρων στα περιβλήματα των ρουλεμάν. Οι αποξηραντικοί εξαεριστήρες της μορφής πτερυγίου-βαλβίδας είναι αποτελεσματικοί σε αεριζόμενα συστήματα όπου είναι πιθανή η υγρή εισαγωγή αέρα και η συμπύκνωση / απορρόφηση. Εάν αφεθεί υγρό εναιώρημα, πρέπει να χρησιμοποιηθούν λιπαντικά, φίλτρα νερού, και αφαίρεση ή / και διαχωριστικά, όπως συσκευές φυγοκέντρησης.

*Εντοπισμός.* Ο εντοπισμός είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μέσα από τις δοκιμές που αναφέρονται παραπάνω ή είναι εμπορικά διαθέσιμος μέσω φορητών εξοπλισμών. Η ζωή των λιπαντικών και των εξαρτημάτων της μηχανής, όπως τα ρουλεμάν εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα μειωμένα επίπεδα υγρασίας στο λάδι.

## **Ρύπανση καυσίμου**

Η μόλυνση των καυσίμων προκαλεί δραστική μείωση στο ιξώδες του λαδιού (λέπτυνση του λιπαντικού). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αραιώση των πρόσθετων του λιπαντικού, αύξηση της φθοράς και επίσης κίνδυνος εμφάνισης πυρκαγιάς. Είναι σαφές ότι η μεγάλη αραιώση του λαδιού είναι δυσμενής για τις μηχανές, δεδομένου ότι μειώνει το ιξώδες και την αντίσταση της μεμβράνης λαδιού.

Οι κύριες αιτίες της αραιώσης είναι το ελαττωματικό σύστημα ψεκάσμου του καυσίμου, το ελαττωματικό σύστημα εισαγωγής αέρα, η ατελής καύση που οφείλεται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, άσχημα ρυθμισμένες βαλβίδες ή ανεπαρκής συμπίεση. Η αραιώση του χρησιμοποιημένου λαδιού του κινητήρα μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια με την αέρια χρωματογραφία (GC) ή με μετασχηματισμό Fourier με υπέρυθη φασματοσκοπία (FTIR). Η πιο κοινή τεχνική είναι να μετρηθεί το σημείο αναφλέξεως του λαδιού σε μια ορισμένη θερμοκρασία. Όταν ανιχνεύεται ένα σημείο ανάφλεξης, και η αραιώση είναι μεγάλη (πάνω από 4%) απορρίπτεται, διαφορετικά αν η αραιώση μικρή (λιγότερο από 4%) τότε είναι αποδεκτή.

## Μόλυνση γλυκόλης

Η μόλυνση γλυκόλης αυξάνει τη φθορά, τη διάβρωση και την οξείδωση. Η γλυκόλη είναι ένα σημαντικό συστατικό του κάθε ψυκτικού ή αντιψυκτικού υγρού. Η μόλυνση του ψυκτικού ενέχει σοβαρή απειλή για κάθε σύστημα λίπανσης. Μικρές ποσότητες αντιψυκτικού μπορεί να προκαλέσουν σοβαρή διάβρωση. Είναι ιδιαίτερα επιβλαβής για τη κύρια μηχανή και τα ρουλεμάν της ατράκτου, όπου η μόλυνση μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη του κινητήρα. Η γλυκόλη μπορεί να μπει σε ένα σύστημα από διάφορες πηγές. Σχεδόν όλα τα άλλα προβλήματα μπορεί να διορθώνονται με ελάχιστη δράση συντήρησης σε σύγκριση με την πλήρη αναμόρφωση. Όταν η μόλυνση γλυκόλης ανιχνεύεται, θα πρέπει να ελέγχονται τα εξής:

- Διαρροή των ψυγείων του λαδιού
- Ελαττωματικές τσιμούχες
- Οι καμένες φλάντζες κεφαλής ή τα ραγισμένες κεφαλές (κινητήρας)
- Διαρροή των σφραγίδων ή παρεμβύσματα στην υγρή πλευρά των χιτωνίων (κινητήρας)
- Ρωγμή στο μπλοκ (κινητήρας)
- Μόλυνση του νέου λαδιού από βρώμικα δοχεία.

Η ανίχνευση των διαρροών νερού / γλυκόλης απαιτεί ένα συνδυασμό δοκιμών. Η πρώτη είναι η δοκιμή με το κροτάλισμα του νερού. Είναι μια πολύ πρόχειρη δοκιμή και γίνεται με την τοποθέτηση μιας σταγόνας λαδιού σε μια καυτή επιφάνεια. Η παρουσία νερού υποδηλώνεται εάν υπάρχουν πιτσιλίσματα από το λάδι ή φυσαλίδες. Η δοκιμή με το κροτάρισμα μπορεί να συμβεί όταν το ποσοστό του νερού στο λάδι είναι περισσότερο από 0,1%.

Το μειονέκτημα είναι ότι το νερό που ανιχνεύεται μπορεί να είναι από συμπύκνωση, καθώς και από μόλυνση του ψυκτικού υγρού. Υπάρχει επίσης μια πιθανότητα ότι, ακόμη και με το ψυκτικού υγρού στο λάδι, μπορεί να μην υπάρχει καμία ανίχνευση νερού λόγω της εξάτμισης σε υψηλές θερμοκρασίες του κινητήρα. Ως εκ τούτου, αυτή η δοκιμή θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή. Το νερό μετράται επακριβώς μέσω της χρήσης της δοκιμής Karl Fisher.

Η τελική δοκιμασία για την ταυτοποίηση της γλυκόλης είναι μια χημική δοκιμή. Η δοκιμή περιλαμβάνει την ανακίνηση του δείγματος λαδιού με ένα διάλυμα χημικών ουσιών και την παρατήρηση του χρώματος. Μια θετική ανάγνωση σε αυτή τη δοκιμή θα πρέπει να σημειωθεί, αν υπάρχει μια περίσσεια 300 ppm (μέρη ανά εκατομμύριο) γλυκόλη. Αυτό το επίπεδο γλυκόλης απαιτεί επείγουσα δράση.

Η φασματο-χημική ανάλυση είναι καλή για την ανίχνευση πολύ μικρών ποσοτήτων γλυκόλης. Το κάλιο, το νάτριο και το βόριο είναι ίχνη μετάλλων που βρίσκονται στα περισσότερα σκευάσματα ψυκτικού. Η παρουσία τους σε λάδι μηχανής μπορεί να προηγείται της ανίχνευσης της ίδιας της γλυκόλης. Αυτά τα στοιχεία συνήθως δίνουν συντήρησης και επαρκής προειδοποίησης ότι υπάρχει ένα πρόβλημα σε εκκρεμότητα.

Χρειάζεται προσοχή όταν χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος για την παρακολούθηση της μόλυνσης της γλυκόλης. Μερικά λάδια χρησιμοποιούν νάτριο ή / και βόριο ως μέρος των επιπρόσθετων συστατικών τους. Αν χρησιμοποιούνται αυτά τα πρόσθετα τότε τα πρωτότυπα επίπεδα νατρίου και βορίου στο λάδι πρέπει να θεωρηθούν ως βάση που ανέρχεται πάνω από τα επίπεδα αυτά ως εισφορές από τη μόλυνση της γλυκόλης.

## **Εσωτερικά δημιουργούμενες προσμείξεις**

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν οι εξωτερικοί παράγοντες, αλλά υπάρχουν επίσης και προσμείξεις που δημιουργούνται, πλένονται και παρασύρονται από το λιπαντικό, καθώς κυκλοφορεί εντός του συστήματος. Συχνά, η μόλυνση των σωματιδίων είναι από μόνη της είναι αιτία για διαφορετικούς τύπους φθοράς.

Οι βασικοί τύποι φθοράς αναφέρονται παρακάτω, μαζί με την πιο κοινή αιτία του καθενός. Κάθε μία από αυτούς τους μηχανισμούς φθοράς βοηθούν στην παραγωγή σωματιδίων μόλυνσης που είναι ικανά να προκαλέσουν περαιτέρω ζημιά σε ένα εξάρτημα.

- Λειαντική φθορά (φθορά τριβής) / σωματίδια μεταξύ γειτονικών κινούμενων επιφανειών
- Συγκολλητική φθορά / επαφή επιφάνεια με επιφάνεια (απώλεια του φιλμ λαδιού)
- Διαβρωτική φθορά / σωματίδια και υψηλή ταχύτητα του ρευστού
- Φθοράς κόπωσης / σωματίδια κατεστραμμένα σε επιφάνειες που υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενη καταπόνηση
- Διαβρωτική φθορά / νερό ή χημικές ουσίες.

## **Φθορά τριβής**

Αυτή η μορφή της φθοράς έχει ως αποτέλεσμα την αυλάκωση της επιφάνειας ενός εξαρτήματος από σκληρή αποτράχυνση ή από διαφορετικούς τύπους σωματιδίων (σκουριά, σκόνη ή μέταλλα) που έχουν εισέλθει στο λάδι. Όταν Αυτά τα σωματίδια είναι πολύ μικρά, το φαινόμενο είναι γνωστό ως «λειαντική διάβρωση» (η οποία είναι ιδιαίτερα συχνή στα υδραυλικά συστήματα). Χρησιμοποιώντας μια διαδικασία φιλτραρίσματος μπορεί να μειώσει τη φθορά τριβής. Είναι επίσης σημαντικό να διασφαλιστεί ότι οι αεραγωγοί, οι αναπνευστήρες και οι τσιμούχες λειτουργούν σωστά.

## **Συγκολλητική φθορά**

Αυτό συμβαίνει ως αποτέλεσμα της επαφής μετάλλου-με-μέταλλο, λόγω υπερθέρμανσης ή ανεπαρκούς λίπανσης. Αυτό με τη σειρά του προκαλεί το σχηματισμό μικρο-συγκολλήσεων, με συχνά μια επακόλουθη εναπόθεση του «μαλακού» μετάλλου πάνω σε βαρύ μέταλλο (π.χ. αλουμίνιο επάνω σε σίδηρο, που οδηγεί σε χάλυβα). Κατά συνέπεια, δημιουργείται διάτμηση των κόμβων και μεταφορά των σωματιδίων μετάλλου.

## **Σπηλαιώση**

Όταν το ρευστό εισέρχεται σε μια περιοχή χαμηλής πίεσης, σχηματίζονται φυσαλίδες. Εντούτοις, όταν το ρευστό εισέρχεται εκ νέου στην περιοχή υψηλής πίεσης ο παγιδευμένος αέρας ή οι φυσαλίδες αέρα καταρρέουν. Όταν λαμβάνει χώρα η κατάρρευση στην επιφάνεια των εσωτερικών εξαρτημάτων, σχηματίζονται ρωγμές και κοιλότητες. Ο έλεγχος των χαρακτηριστικών του αφρισμού του λαδιού με ένα πρόσθετο αντί-αφρισμού μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της σπηλαιώσης.

## **Διαβρωτική φθορά**

Αυτού του είδους η φθορά προκαλείται από μια χημική ή γαλβανική αντίδραση. Έτσι οδηγεί στην απομάκρυνση του υλικού από την επιφάνεια ενός εξαρτήματος. Η διάβρωση μπορεί να είναι άμεσο αποτέλεσμα της όξινης οξειδωσης. Ένα τυχαίο ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί επίσης να προκαλέσει διάβρωση. Η παρουσία του νερού ή των προϊόντων καύσης μπορεί να ενισχύσουν την διαβρωτική φθορά. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση των πιο διαβρωτικά ανθεκτικών υλικών και επίσης μέσω της χρήσης των εξουδετερωτικών πρόσθετων στο λάδι ή της αντικατάστασής του στα κατάλληλα χρονικά διαστήματα.

Μια άλλη μορφή διάβρωσης οφείλεται στην επιφάνεια επαφής. Η απομάκρυνση του υλικού λαμβάνει χώρα μεταξύ των δύο επιφανειών που βρίσκονται σε σχεδόν στατική επαφή αλλά υποβάλλονται σε μηχανικές ταλαντώσεις και ταλαντεύσεις. Αυτό ονομάζεται *διάβρωση επαφής* ή *διάβρωση λόγω τριβής*. Κατά συνέπεια, υπάρχει οξείδωση ορισμένων σωματιδίων. Έτσι, για τα υλικά σιδήρου, υπάρχει μία συσσώρευση της «κόκκινης σκόνης». Σε μηχανικές τσιμούχες, η φθορά μεταξύ μιας δευτερεύουσας τσιμούχας όπως το Teflon και το χιτώνιο του άξονα είναι ένα παράδειγμα της διάβρωσης λόγω τριβής.

## **Φθορά κοπής**

Η φθορά κοπής προκαλείται όταν ένα διαβρωτικό σωματίδιο που είναι ενταγμένο σε μια μαλακή επιφάνεια. Η ανισορροπία ή κακή ευθυγράμμιση του εξοπλισμού μπορεί να συμβάλει στη φθορά. Το σωστό φιλτράρισμα και η συντήρηση είναι επιτακτική ανάγκη για να μειωθεί η φθορά κοπής.

## **Φθορά κόπωσης**

Αυτού του είδους η φθορά συμβαίνει όταν αναπτύσσονται ρωγμές στην επιφάνεια του εξαρτήματος που οδηγεί στην παραγωγή των σωματιδίων. Η ανεπαρκής λίπανση, η μόλυνση του λιπαντικού, η ταλάντωση, η υψηλή πίεση, η υψηλή θερμοκρασία και άλλες συνθήκες προκαλούν φθορά κόπωσης.



## **Συρόμενη φθορά**

Αυτό το είδος της φθοράς εξελίσσεται κατά τη διάρκεια της πίεσης του εξοπλισμού. Όταν οι μηχανές λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες και φορτία, εμφανίζεται η συρόμενη φθορά. Η πλεονάζουσα θερμότητα σε μια κατάσταση υπερφόρτωσης σπάει το λιπαντικό φιλμ και ως αποτελέσματα είναι η επαφή μέταλλο-με-μέταλλο. Η συρόμενη φθορά μπορεί επίσης να συμβεί όταν ένα στατικό μέρος έρχεται σε επαφή με ένα κινούμενο μέρος.

## **Ηλεκτρική φθορά**

Αυτό το είδος της φθοράς προκαλείται από την διάβρωση λόγω ηλεκτρικών σπινθήρων. Οι σπινθήρες παράγονται από ανεπαρκή ηλεκτρική μόνωση σε κινητήρες και δυναμό.

## **7.8 Τεχνικές ανάλυσης σωματιδίων**

Καθώς οι ρυπαντές εισάγονται στο κυκλοφορικό σύστημα τείνουν να προκαλούν φθορά και αποτυχία στα εξαρτήματα. Εν τούτοις, εάν αυτές οι προσμείξεις παγιδευτούν και στη συνέχεια αναλυθούν είναι δυνατόν να εντοπιστούν οι ρίζες τους και η έκταση των ζημιών που μπορεί να προκαλέσουν. Για να αναλυθούν οι ρύποι, χρησιμοποιούνται πολλές μέθοδοι, όπως η ανάλυση φασματομετρίας, η υπέρυθρη ανάλυση, η καταμέτρηση σωματιδίων, η ανάλυση της φθοράς των σωματιδίων και άλλες.

Κάθε τεχνική έχει εξειδικευμένες εφαρμογές και τα δικά της όρια. Οι περιορισμοί αυτοί μπορεί να αντισταθμίζονται μέσω της χρήσης άλλων τεχνικών. Αυτό καθιστά την ανάλυση λαδιού ένα ισχυρό εργαλείο προγνωστικής συντήρησης.

### **7.8.1 Ανάλυση φασματομετρίας**

Η φασματομετρική ανάλυση είναι μία από τις κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των σωματιδίων. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη ροή της συσσωμάτωσης της μικρής μεταλλικής φθοράς και των στοιχειακών συστατικών των πρόσθετων και για τον προσδιορισμό μιας πιθανής εισαγωγής των ρύπων. Τα αποτελέσματα μιας φασματομετρικής ανάλυσης εκφράζεται τυπικά σε ppm (μέρη ανά εκατομμύριο). Η φασματομετρική ανάλυση παρακολουθεί τα μικρότερα σωματίδια που υπάρχουν στο λάδι. Η φθορά των μεγάλων μεταλλικών σωματιδίων δεν θα πρέπει να ανιχνεύεται.

Στο φασματόμετρο, το λάδι διεγείρεται ηλεκτρικά με το σημείο που εκπέμπει φως. Κάθε στοιχείο που υπάρχει στο καύση του λαδιού εκπέμπει φως με χαρακτηριστικό χρώμα και συχνότητα. Το φασματόμετρο μεταφράσει την ένταση των χρωμάτων σε μια μηχανογραφημένη ένδειξη. Μια τυπική έκθεση από αυτή τη δοκιμή θα απαριθμήσει εννέα μεγάλες φθορές των μετάλλων για τις βιομηχανικές βαλβολίνες και τα υδραυλικά λάδια. Για τα

λιπαντικά αυτοκινήτων γίνεται μια δοκιμή δώδεκα στοιχείων. Ο υπολογιστής συγκρίνει την παρούσα ποσότητα των μετάλλων φθοράς με ένα φρέσκο δείγμα λαδιού και επίσης με δείγματα από παρόμοια μηχανήματα. Ο υπολογιστής συγκρίνει τέλος τα αποτελέσματα των προηγούμενων δειγμάτων που έχουν ληφθεί από τον ίδιο τον εξοπλισμό για να δημιουργήσει μια τάση φθοράς. Παρακάτω είναι μια λίστα των στοιχείων που μπορούν να ανιχνευθούν με τη χρήση της ανάλυσης φασματομετρίας και τα πιθανά μέρη από όπου θα μπορούσαν να προέρχονται τα στοιχεία αυτά.

<b>Φθορά στοιχείων</b>	<b>Πιθανή προέλευση</b>
Αλουμίνιο	Έμβολα, ρουλεμάν, ανεμιστήρες /αεροσυμπιεστές , πτερύγια αντλίας, ροδέλες πίεσης και τα έδρανα κυλίσεως, μπλοκ, χιτώνια αντλίας, περίβλημα συμπλέκτη, πτερωτές, ρότορες
Χρώμιο	Δαχτυλίδια, κωνικά έδρανα κυλίσεως, χιτώνια, βαλβίδες εξαγωγής, ψυκτικό υγρό, ράβδοι, πηνία, γρανάζια, άξονες, έδρανα κύλισης
Χαλκός	Ρουλεμάν, ροδέλες πίεσης, λίπανσης, ψυγεία λαδιού, πρόσθετα λαδιού, ακίδες δακτυλίων, χιτώνια έκκεντρου, βαλβίδα λίπανσης, αντλία λαδιού, δίσκοι διεύθυνσης, πλάκες αντλίας ώθησης και έμβολα, ασπίδες μπεκ, υγρό για συμπλέκτες
Σίδηρος	Κύλινδροι, στροφαλοφόροι άξονες, βαλβίδες τρένου, ελατήρια εμβόλων, έμβολα, ελατήρια, γρανάζια, έδρανα, χιτώνια, άξονες, πλάκες, μπλοκ, εκκεντροφόρα, αντλίες, μετατόπισης πηνίων, κυλινδρικές οπές και ράβδων, σωλήνων και εξαρτήματα του συστήματα της κυκλοφορίας λάδι
Μόλυβδος	Ρουλεμάν, πρόσθετα της βενζίνης και λαδιού
Μαγνήσιο	Απορρυπαντικό λαδιού, αλκαλικά αποθέματα λαδιού
Μολυβδαίνιο	Πρόσθετα λαδιού, τροποποιητής τριβής
Νικέλιο	Κράματα, εργαλεία επιμετάλλωσης, οδηγών βαλβίδων και ζώνες δαχτυλίδι, άξονες, αντι-τριβής έδρανα
Άργυρος	Ακίδων δακτυλίων, έδρανα κύλισης, συγκόλληση αργύρου
Κασσίτερος	Ρουλεμάν, επένδυση εμβόλων, κράματα χαλκού (χαλκός / κασσίτερος), δακτυλίου, διοξείδιο του πυριτίου (silicon - σιλικόνης). Η κατάποση χώματος και άμμου, στεγανοποιητικό λάστιχο, πρόσθετο αντι-αφρισμού στο

	λάδι, αντιψυκτικά πρόσθετα
ψευδάργυρος	πρόσθετα αντί-αφρισμού στο λάδι (ψευδαργύρου διαλκυλο-διθειο-φωσφορική), γαλβανισμένα μέρη σε συστήματα κυκλοφορίας λαδιού

Ωστόσο, κάθε λιπαντικό περιέχει πρόσθετα. Τα πρόσθετα συμβάλλουν στην εμφάνιση των στοιχείων που ανιχνεύθηκαν με τη μέθοδο της φασματομετρίας. Τα παρακάτω είναι μερικά από τα στοιχεία που περιέχονται εντός των πρόσθετων. Τα ανιχνευόμενα πρόσθετα στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της συνοχής του λιπαντικού, σε αντίθεση με την αποτελεσματικότητα της πρόσθετης ύλης.

Βάριο (Ba) απορρυπαντικό πρόσθετο ή πρόσθετο μέσο διασποράς

Βόριο (B) πρόσθετο ακραίας πίεσης

Ασβεστίου (Ca) διασκορπιστικό ή απορρυπαντικό πρόσθετο

Χαλκός (Cu) προσθέτου αντικαταπόνησης

Μόλυβδος (Pb) πρόσθετο κατά της φθοράς

Μαγνησίου (Mg) διασκορπιστικό ή απορρυπαντικό πρόσθετο

Το μολυβδαίνιο (Mo) τροποποιητής τριβής

Φωσφόρος (P) αναστολέας διάβρωσης, πρόσθετο κατά της φθοράς

Πυρίτιο (Si) αντι-αφριστικό πρόσθετο

Νάτριο (Na) πρόσθετο απορρυπαντικό ή μέσο διασποράς

Ψευδάργυρος (Zn) πρόσθετο αντι-φθοράς ή αντι-οξειδωτικό

Τα πιο κοινά στοιχεία που παρακολουθούνται μέσω της ανάλυσης της φασματομετρίας είναι ο σίδηρος, ο μόλυβδος, ο κασσίτερος και ο χαλκός. Η μόλυνση του ψυκτικού μέσου μπορεί να ανιχνευθεί με την παρακολούθηση των συγκεντρώσεων του νατρίου και του βορίου. Η μόλυνση μελετάται μέσω της ανίχνευσης του πυριτίου. Ο κύριος στόχος αυτής της ανάλυσης είναι η τάση της συσσώρευσης των μικρών σωματιδίων φθοράς των μετάλλων και των στοιχειωδών πρόσθετων συστατικών, καθώς και ο προσδιορισμός μιας πιθανής εισαγωγής των ρύπων. Η φασματομετρική ανάλυση είναι αποτελεσματική για σωματίδια σε μέγεθος μικρότερα από 5 μικρά. Αντίθετα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η φασματοσκοπία δεν είναι ευαίσθητη για την ανίχνευση μεγάλων σωματιδίων σε ένα δείγμα λαδιού. Δυστυχώς, τα μεγάλα σωματίδια είναι περισσότερο ένδειξη μιας ανώμαλης κατάστασης ή φθοράς λειτουργίας.

Οι πιο σοβαρές καταστάσεις φθοράς, όπως θρυμματισμός, σοβαρή συρόμενη φθορά και η φθορά κοπής δημιουργούν μεγάλα σωματίδια, τα οποία θα περάσουν απαρατήρητα από δοκιμές φασματοσκοπίας. Μεγάλα σωματίδια ρύπων επίσης δεν ανιχνεύονται από τη μέθοδο της φασματοσκοπίας. Το μέγεθος του σωματιδίου στο οποίο τα φασματόμετρα χάνουν την

ικανότητα ανίχνευσης τους εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων, όπως ο τύπος του φασματόμετρου και το μοντέλο. Παρ' όλα αυτά, είναι γενικά αποδεκτό ότι τα φασματόμετρα χάνουν την ικανότητα να ανιχνεύουν τα σωματίδια στην κλίμακα 5-10 micron.

Για την αξιολόγηση των σωματιδίων μεγαλύτερα από 5-10 microns, πρέπει να εξεταστούν άλλες μέθοδοι, όπως:

- Η μέθοδος πέψης οξέος
- Η μέθοδος πέψης των μικροκυμάτων
- Η άμεση ανάγνωση (DR) φερρογράμματος
- Φασματοσκοπία με φίλτρο Rotrode (RFS).

Οι δύο πρώτες μέθοδοι είναι δύσκολο να ενσωματωθούν ως εργαλεία προγνωστικής ανάλυσης λόγω του χρόνου που απαιτούν και του υψηλού κόστους τους. Αυτές οι μέθοδοι παρέχουν μια λίστα με το σύνολο της συγκέντρωσης των στοιχείων του δείγματος. Η μέθοδος πέψης του οξέως μπορεί να παρέχει την αναλογία των μεγάλων και μικρών σωματιδίων στο αρχικό δείγμα, αλλά κάτι τέτοιο δεν αποκτάται με τη μέθοδο της πέψης των μικροκυμάτων. Η τρίτη μέθοδος, που ονομάζεται φερρογράμμα DR, είναι ευαίσθητη σε μικρά και μεγάλα σωματίδια σιδηρούχων σε λιπαντικό λάδι, και είναι ικανή να προσδιορίσει μια αναλογία με την οποία μια μη φυσιολογική φθορά θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σε περιστρεφόμενες μηχανές.

Ωστόσο, η μέθοδος του DR φερρογράφου εξακολουθεί να βασίζεται στον μαγνητικό διαχωρισμό, και αυτό είναι το κύριο μειονέκτημα όταν το δείγμα περιέχει σωματίδια μη σιδηρούχα μέταλλα όλων των μεγεθών ή περιλαμβάνει μεγάλα μη μεταλλικά ανόργανα σωματίδια όπως άμμος ή χώμα.

Η Rotrode φασματοσκοπία φίλτρου (RFS) εισήχθη για πρώτη φορά το 1992. Αυτή η φασματομετρική τεχνική ανιχνεύει μεγάλα ή χοντροειδή μέταλλα φθοράς και προσμείξεις σε ένα δείγμα που χρησιμοποιείται λάδι. Όλα τα σωματίδια έως και 25 μικρά είναι οι πρώτοι δείκτες των μη φυσιολογικών καταστάσεων της φθοράς. Το RFS παρέχει μια χαμηλού κόστους και υψηλής αποτελεσματικότητας μέθοδο φερρογράφου και είναι ανώτερη από τη μέθοδο φερρογράφου DR επειδή ανιχνεύει σιδηρούχα, μη-σιδηρούχα και μολυσματικά στοιχεία (συνήθως 12 στοιχεία).

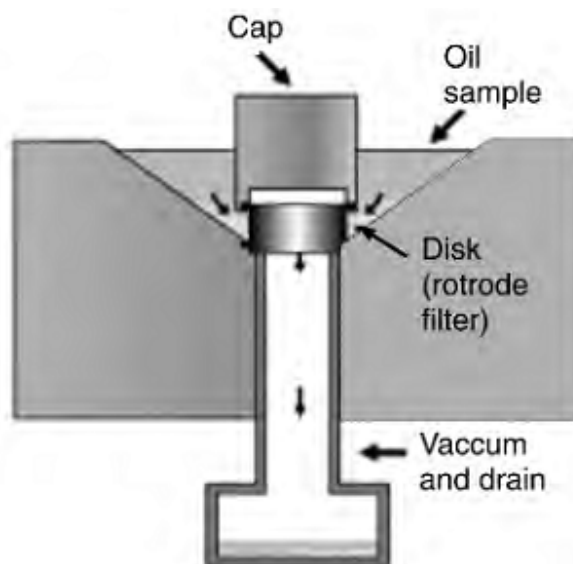
Η απόδοση ανίχνευσης των μεγάλων σωματιδίων μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους πάνω από 25 μm διάμετρο. Το εύρος της ακρίβειας είναι μέσα στο 15%.

Όπως αναφέρθηκε, η φασματοσκοπία ατομικής απορρόφησης (AAS) και οι επαγωγικές τεχνικές ανάλυσης φασματομετρίας συζευγμένου πλάσματος (ICP) δεν είναι ευαίσθητες σε σωματίδια πάνω από 5 μικρά. Φασματογράφοι περιστρεφόμενων ηλεκτροδίων του δίσκου (RDE) έχουν ένα μεγαλύτερο εύρος αλλά ακόμα και αυτοί περιορίζονται στα 10 μικρά.

Στο φασματόμετρο RDE, ένας δίσκος άνθρακα πιέζεται πάνω στο άκρο ενός περιστρεφόμενου άξονα. Ένας ορισμένος όγκος λαδιού χύνεται από τη φιάλη του δείγματος

μέσα στο πώμα φιάλης του δείγματος και τοποθετείται έτσι ώστε το κάτω μέρος του περιστρεφόμενου δίσκου να περνά μέσω του λαδιού. Ένα διάκενο σπινθηρισμού σχηματίζεται μεταξύ της κορυφής του περιστρεφόμενου δίσκου του άνθρακα και του άκρο του ηλεκτροδίου της ράβδου του άνθρακα. Μια ηλεκτρική εκκένωση διαμέσου του διάκενου εξατμίζει το λάδι που παραμένει κολλημένο πάνω στον περιστρεφόμενο δίσκο. Το εκπεμπόμενο φως περιέχει τα χαρακτηριστικά μήκη κύματος των στοιχείων του δείγματος του λαδιού. Τα οπτικά και τα ηλεκτρονικά φασματομέτρα ποσοτικοποιούν αυτά τα μήκη κύματος και μπορεί να αναφέρουν πάνω από 20 στοιχεία σε 30 ή 40 s σε rpm. Οι δίσκοι άνθρακα είναι γνωστοί ως rotrodes.

Μεταγενέστερες καινοτομίες άνοιξαν το δρόμο για μια νέα τεχνική που ονομάζεται Φασματοσκοπία rotrode φίλτρου (RFS), η οποία μπορεί να αναλύσει τα μεγαλύτερα σωματίδια φθοράς. Η RFS κάνει χρήση του χαρακτηριστικού ότι οι δίσκοι των ηλεκτροδίων του άνθρακα που χρησιμοποιούνται σε RDE έχουν πορώδη χαρακτήρα. Ένα εξάρτημα χρησιμοποιείται για να σφίξει τους δίσκους (Σχήμα 7.10). Τα δείγματα λαδιού προέρχονται από την εξωτερική περιφέρεια των δίσκων των ηλεκτροδίων όταν εφαρμόζεται κενό στο εσωτερικό τους.



**Σχήμα 7.10** Προετοιμασία του δείγματος RFS[1]

Το λάδι στη συνέχεια πλένεται με ένα διαλύτη, ο δίσκος αφήνεται να ξεραθεί και τα σωματίδια αφήνονται στην εξωτερική περιφέρεια, ώστε να μπορούν να εξατμιστούν και να ανιχνευθούν όταν πυροδοτηθούν σχετικά με την φασματοσκοπία RDE. Στην πράξη, μια ανάλυση λαδιού πρέπει να διεξάγεται πρώτα με χρήση της τεχνικής RDE, η οποία παρέχει μια ανάλυση των διαλυμένων σωματιδίων και των σωματιδίων φθοράς. Θα πρέπει στη συνέχεια να γίνει μια δεύτερη ανάλυση χρησιμοποιώντας την τεχνική RFS για να ποσοτικοποιηθούν τα μεγαλύτερα σωματίδια. Οι δύο δοκιμές παρέχουν μια ένδειξη της κατανομής μεγέθους των

σωματιδίων φθοράς στο δείγμα. Έτσι, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο RFS γρήγορα ανιχνεύεται μια ξαφνική έκρηξη σε μεγαλύτερα σωματίδια.

Με τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων των μεγάλων σωματιδίων με τη συμβατική ανάλυση RDE των διαλυμένων και λεπτών σωματιδίων στο δείγμα λαδιού, μια πλήρης εικόνα ανάλυσης της φθοράς μπορεί να ληφθεί για τη μηχανή που μελετάται. Η τεχνική έχει πολλά πλεονεκτήματα που την καθιστούν ένα ισχυρό εργαλείο για την παρακολούθηση των βλαβών της μηχανής. Οι περισσότερες μη φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας της φθοράς προκαλούν σημαντική αύξηση στη συγκέντρωση και στο μέγεθος των σωματιδίων φθοράς.

Η φασματοσκοπία φίλτρου Rotrode είναι γρήγορη και αποτελεσματική και χρησιμοποιείται ως πρότυπο δοκιμασίας διαλογής για κάθε δείγμα λαδιού που εισέρχεται στο εργαστήριο. Τα στοιχεία είναι επίσης εξαιρετικά για την ανάλυση της μόλυνσης, διότι παρέχει τη στοιχειακή σύνθεση προσμείξεων μεγάλων σωματιδίων (όπως το πυρίτιο). Το ευεργετικό χαρακτηριστικό αυτού του γεγονότος είναι ότι είναι δυνατόν να προσδιοριστεί εάν το στοιχείο είναι από ένα σύνολο πρόσθετων (όπως ένα πολυμερές σιλικόνης για αποαφρισμό) ή ένα μολυσματικό (σωματίδια άμμου / χώμα).

### 7.8.2 Η υπέρυθη ανάλυση

Η υπέρυθη ανάλυση (IR) είναι μια μορφή απορρόφησης της φασματομετρικής ανάλυσης. Αυτή η τεχνική δεν είναι μια τεχνική ατομικής απορρόφησης που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ειδικών στοιχείων, αλλά ανιχνεύει συγκεκριμένους συνδυασμούς ή ομάδες ατόμων που ονομάζονται λειτουργικές ομάδες. Οι διαφορετικές λειτουργικές ομάδες βοηθούν στον καθορισμό των ιδιοτήτων των υλικών και στην αναμενόμενη συμπεριφορά τους.

Κάθε λειτουργική ομάδα απορροφά σε ορισμένα υπέρυθρα μήκη κύματος. Έτσι, ένα κατάλληλο μήκος κύματος κατευθύνεται στο δείγμα που αναλύεται, και μετριέται η ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται από το δείγμα. Η ποσότητα της απορροφημένης ενέργειας είναι μία ένδειξη της έκτασης της παρουσίας για αυτή τη συγκεκριμένη λειτουργική ομάδα στο δείγμα. Ως εκ τούτου είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν τα αποτελέσματα. Η μονάδα μέτρησης συνήθως εκφράζεται σε μονάδες απορροφητικότητας (AU).

Η παρουσία (ή απουσία) των λειτουργικών ομάδων και των ποσοτήτων τους στο δείγμα λαδιού παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με το νέο ή το χρησιμοποιημένο λάδι. Είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η φυσική σύνθεση του λαδιού, τα πρόσθετα του λιπαντικού και, επίσης, η πιθανή μόλυνση και ή η αποικοδόμηση του λαδιού.

*Φυσική σύνθεση.* Τα περισσότερα από τα λιπαντικά αποτελούνται από το βασικό απόθεμα και ειδικά πρόσθετα. Τα διαφορετικά αποθέματα βάσης μπορούν να διακριθούν με

την χρήση υπέρυθρης ανάλυσης (IR). Αυτή μπορεί να ζητηθεί κατά τη διάρκεια της διασφάλισης της ποιότητας. Είναι επίσης χρήσιμη στην ανίχνευση της μόλυνσης από συνθετικά λιπαντικά με ορυκτέλαιο.

*Χημεία προσθέτων.* Η παρουσία και η ποσότητα οποιουδήποτε συγκεκριμένου προσθέτου μπορεί να προσδιοριστεί με ευκολία χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική. Ωστόσο, ένα αρχικό δείγμα του λαδιού είναι απαραίτητο για την σύγκριση. Η εξάντληση των ειδικών προσθέτων μπορεί να ελεγχθεί μέσω της χρήσης αυτής της τεχνικής.

*Σημείωση:* Το ποσό της πρόσθετης ύλης ή της εξάντλησης της μετράται από την ποσότητα των πρόσθετων μετάλλων που υπάρχουν στο λάδι. Είναι πιθανό οι δοκιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των εν λόγω μετάλλων να είναι παραπλανητικές. Τα πρόσθετα μέταλλα πιθανών να κυμαίνονται μεταξύ +20% και -20% κάτω από κανονικές συνθήκες. Πολλά στοιχεία όπως ο χαλκός, ο οποίος είναι παρόν στα πρόσθετα, είναι επίσης παρόν στα εξαρτήματα του μηχανήματος. Έτσι, είναι δυνατόν να έχουμε μια απώλεια ενός πρόσθετου μέταλλου και ένα δευτερεύον κέρδος από μια εσωτερική συνιστώσα. Κατά συνέπεια, δεν είναι δυνατόν να ανιχνεύσουμε την πραγματική απώλεια ενός πρόσθετου μετάλλου. Είναι επίσης πιθανό να χρησιμοποιείται μία ευρεία ποικιλία και ποσότητα των προσθέτων για την κάλυψη των προδιαγραφών του λαδιού. Ως εκ τούτου, το επίπεδο ενός μετάλλου που ανιχνεύεται για να καθοριστεί ένα πρόσθετο που δεν είναι κατ' ανάγκη χρήσιμο της εν λόγω πρόσθετης ύλης στο λάδι.

*Μόλυνση.* Τα οξειδωμένα λάδια μπορούν να ανιχνευθούν χρησιμοποιώντας την ανάλυση IR. Αυτή η τεχνική μπορεί επίσης να ανιχνεύσει τη μόλυνση του λαδιού από καύσιμο, γλυκόλη ή νερό. Μερικές φορές, ορισμένες χημικές ουσίες που κατασκευάζονται σε εργοστάσια πιθανών να καταλήξουν στα λιπαντικά. Αυτό το είδος της μόλυνσης μπορεί επίσης να διαπιστωθεί.

*Αποδόμηση λιπαντικού.* Η οξείδωση και τα παράγωγα της προκαλούν την αποικοδόμηση του λαδιού. Τα προϊόντα οξείδωσης είναι οργανικά οξέα. Όταν υπάρχει υπερβολική οξείδωση, τείνει να διαβρώνει τις επιφάνειες των εξαρτημάτων του εξοπλισμού. Η *νίτρωση* του λαδιού είναι επίσης πιθανή και αποτελεί κοινό χαρακτηριστικό σε κινητήρες φυσικού αερίου που χρησιμοποιείται ως καύσιμο, όπου μπορεί να συμβεί καθήλωση του αζώτου. Ελαττώματα όπως βερνίκωμα, καταθέσεις λάσπης, κολλώδη δαχτυλίδια, λακάρισμα και φράξιμο των φίλτρων συμβαίνουν σε συστήματα με προβλήματα οξείδωσης ή / και νίτρωσης. Η *θειώση* εμφανίζεται ως αποτέλεσμα «χτυπήματος» των προϊόντων της καύσης του λαδιού. Αυτά τα προϊόντα καύσης (και το ίδιο το καύσιμο) περιέχουν θείο. Το θείο αντιδρά και σχηματίζει όξινα προϊόντα, τα οποία μπορεί να δημιουργήσουν και να προκαλέσουν σοβαρή διάβρωση. Ο σχηματισμός αυτών των προϊόντων ονομάζεται θειώση και αποτελεί επίσης μια αιτία υποβάθμισης του λαδιού.

## Μετασχηματισμός Fourier - υπέρυθρη ανάλυση

Η ανάλυση IR παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1979. Η αρχική μέθοδος αντικαταστάθηκε αρκετά χρόνια αργότερα, από μια τεχνική που είναι πολύ πιο αποτελεσματική, ακριβής και εύκολη στη χρήση και ονομάζεται *μετασχηματισμός Fourier υπέρυθρης ανάλυσης (FT-IR)*. Με την τεχνική αυτή, μια δέσμη φωτός εστιάζεται μέσω ενός φιλμ του χρησιμοποιούμενου λαδιού και στη συνέχεια τα μήκη κύματος συγκρίνονται με το φως μεταδίδεται μέσω του νέου λαδιού του ίδιου τύπου.

Είναι καλή πρακτική για την συλλογή δείγματος από τις νέες παραδόσεις λαδιών που δημιουργηθούν τις βασικές πληροφορίες. Τα χρησιμοποιημένα λάδια μπορούν κατά συνέπεια πάντα να αναφέρονται ως οι βασικές ενδείξεις. Οι διαφορές στις μετρήσεις παρέχουν πληροφορίες σε σχέση με την αποδόμηση της χρησιμοποιημένου λαδιού. Οι διαφορές ή οι μεταβολές του ενδιαφέροντος στο FT-IR είναι η αιθάλη, η οξείδωση, τα προϊόντα θείωσης και νίτρωσης. Το όργανο FT-IR επίσης χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της παρουσίας του νερού, της γλυκόλης (αντιψυκτικό) και των καυσίμων. Αν υποδεικνύεται πιθανότητα νερού, γλυκόλης ή καύσιμου, μπορεί να απαιτούνται ξεχωριστές φυσικές εξετάσεις επιβεβαίωσης για το μολυσματικό.

Αυτή η τεχνική επίσης χρησιμοποιείται περιστασιακά για να προσδιοριστεί η βέλτιστη διάρκεια της ζωής του λιπαντικού. Αρχικά, το λάδι δοκιμάζεται για σύντομα χρονικά διαστήματα, όπως 50 ώρες. Μόλις ανιχνευθεί η πιθανή διάρκεια ζωής του λιπαντικού, η νέα συχνότητα των δοκιμών ή της αντικατάστασης αλλάζει ανάλογα με το ποιός θεωρείται ο βέλτιστος χρόνος ζωής του λαδιού. Η ανάλυση IR είναι η πιο αποδεκτή μέθοδος που χρησιμοποιείται σήμερα στη βιομηχανία για να προσδιοριστεί η κατάσταση των λιπαντικών. Η μέθοδος ερευνά τα πρόσθετα στο λάδι και τη πραγματική κατάσταση του ίδιου του λαδιού. Η τεχνική αυτή προσφέρει μια πλήρη και αληθή ανάλυση του λιπαντικού με έναν τρόπο που καμία άλλη δοκιμή δεν μπορεί να προσφέρει.

## Καταμέτρηση των σωματιδίων

Η καταμέτρηση των σωματιδίων είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την ανάλυση της φθοράς του μετάλλου. Η ανάλυση της φθοράς του μετάλλου δεν μπορεί να μετρήσει όλα τα σωματίδια. Ως εκ τούτου, η υπερβολική σωματιδιακή μόλυνση μπορεί να αγνοηθεί εάν η καταμέτρηση των σωματιδίων δεν είναι σε ένα συνηθισμένο μέρος του λαδιού. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται είναι ζωτικής σημασίας για να καθοριστεί εάν υπάρχει υπερβολική φθορά ή εισχώρηση ρύπων. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την ανάλυση της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων. Τα στοιχεία αυτά βασίζονται σε διαφορετικές αρχές και παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Η καταμέτρηση των σωματιδίων ανιχνεύει όλα τα σωματίδια μέσα σε ένα δείγμα που τυπικά κυμαίνονται σε μέγεθος από 5 έως 100 μικρά (κάποιες φορές έως και 200 μικρά).



Εντούτοις, η καταμέτρηση των σωματιδίων δεν διαφοροποιεί τη σύνθεση των παρόντων υλικών. Όλα τα σωματίδια μετρήθηκαν και αναφέρθηκαν σε ένα εύρος μεγέθους σωματιδίων.

Τύπος μέτρησης	Χαρακτηριστικά	Τεχνική μέτρησης
Οπτική	Απεικόνιση της απόσβεσης του φωτός περίθλαση σκέδαση	Μικροσκόπια HIAC και Royco Royco (φυσικό αέριο) Λέιζερ
Ηλεκτρική	αντίσταση	Coulter
Γεωμετρική	Οθόνη	Κοσκίνισμα
Βαρυτική	Καθίζηση	Andreason
Κυκλωνική	Αδράνεια	Donaldson Alpine
Μαγνητική	συντρίμια φθοράς	φερρογράφος

Σε μια από τις τεχνικές της καταμέτρησης-σωματιδίων, το φως από ένα λέιζερ στερεάς κατάστασης χρησιμοποιείται για να φωτίζει την περιοχή ανίχνευσης στο ρευστό. Το φως σκεδάζεται από τα σωματίδια που διέρχονται μέσω αυτής της εντατικής δέσμης και συλλέγεται σε ορθές γωνίες σε σχέση με την ακτίνα και επικεντρώνεται επάνω στον ανιχνευτή φωτογραφίας. Όλοι οι παλμοί πάνω από ένα προ-επιλεγμένο επίπεδο διάκρισης μετατρέπονται σε ψηφιακή μορφή. Μόλις γίνει η μετατροπή στην ψηφιακή μορφή, οι παλμοί μπορούν να μετρηθούν για να δώσουν κάποια ένδειξη για το μέγεθος του σωματιδίου (-ων). Σε μία άλλη τεχνική, ο απαριθμητής σωματιδίων λειτουργεί ρίχνοντας μία δέσμη λέιζερ μέσω του λαδιού. Τα σωματίδια μπλοκάρουν το λέιζερ και η τα αποτρέπει από το να ανιχνευθούν από τους ειδικούς ανιχνευτές.

Αυτή η συσκευή έχει αρκετούς περιορισμούς. Δεν μπορεί να μετρήσει σκοτεινά λάδια (π.χ. αιθάλη που περιέχουν λάδια του κινητήρα), σοβαρά μολυσμένα λάδια, ή δείγματα που περιέχουν νερό. Αυτή η δοκιμή μερικές φορές χρησιμοποιείται σε δοκιμές καθαριότητας του λαδιού και εκτελείται σε όλα τα μη-κινητήρα δείγματα.

### 7.8.3 Ανάλυση Φθοράς σωματιδίων / φερρογράφος

Η ανάλυση της φθοράς σωματιδίων (WPA) ή φερρογραφία είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί μικροσκοπική ανάλυση για τον προσδιορισμό της σύνθεσης των υλικών. Αυτή η μέθοδος δοκιμής αξιολογεί τον τύπο, το σχήμα, το μέγεθος και την ποσότητα των σωματιδίων. Η φερρογραφία είναι μια μη επεμβατική εξέταση από τα συστατικά των μηχανημάτων που διαβρέχονται με λάδι. Το μέγεθος, το σχήμα του σωματιδίου και η σύνθεση επιτρέπουν μια διαδικασία αποβολής κατά την οποία η μη φυσιολογική φθορά των συγκεκριμένων εξαρτημάτων μπορεί να εντοπιστεί. Χρησιμοποιώντας φερογγραφικές τεχνικές, είναι δυνατό να εντοπιστούν αποτυχίες φθοράς σε πρώιμο στάδιο, πριν συμβεί οποιοδήποτε βλάβη ή αστοχία. Η ανάλυση της φθοράς των σωματιδίων χρησιμοποιείται με δύο τρόπους.

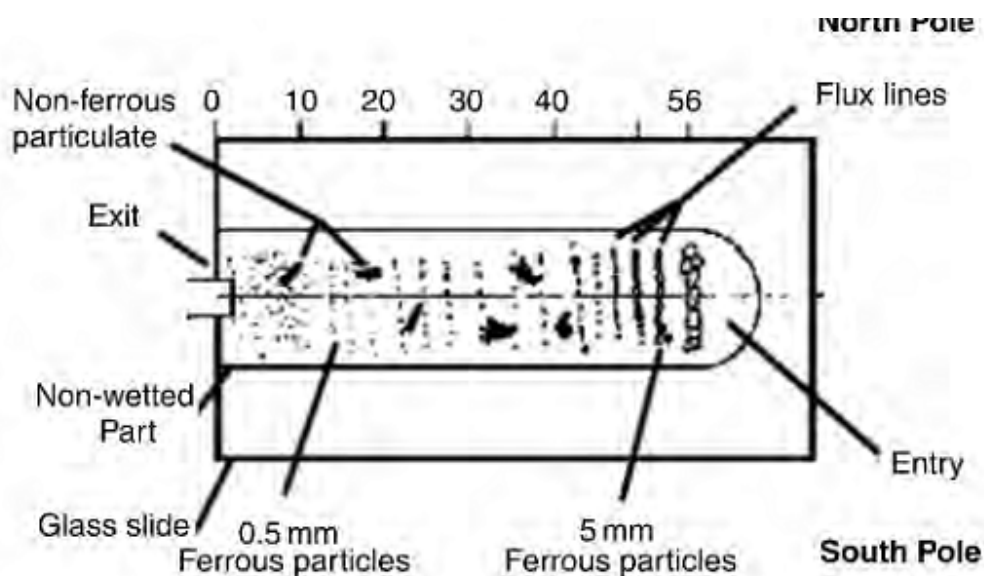
Στην πρώτη μέθοδο, ετοιμάζεται μια συνηθισμένη παρακολούθηση και μια τάση του στερεού περιεχομένου στο δείγμα του λιπαντικού. Το μέγεθος των σωματιδίων, το σχήμα και η ποσότητα είναι ενδεικτικά της κατάστασης του μηχανήματος. Μια υγιής μηχανή σπάνια εκτινάσσει σωματίδια μεγαλύτερα από 10 μικρά σε μέγεθος. Ωστόσο, εάν υπάρξει υποβάθμιση, το μέγεθος και ο αριθμός των σωματιδίων επίσης μπορεί να αυξηθεί.

Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει την παρατήρηση και την ανάλυση του τύπου της φθοράς (όπως περιγράφεται στο Τμήμα 7.6.3) από το σχήμα του σωματιδίου. Η ανάλυση των σωματιδίων με αυτήν την τεχνική περιλαμβάνει τον διαχωρισμό τους από το λιπαντικό με τον ακόλουθο τρόπο. Ένα δείγμα λιπαντικού αραιώνεται με ένα διαλύτη όπως το τετραχλωροαιθυλένιο (TCE) και αφήνεται να ρεύσει προς τα κάτω σε ένα ειδικά κατασκευασμένο χαμηλής κλίσης κεκλιμένο επίπεδο, ενώ διέρχεται από ένα μαγνητικό δίπολο.

Η δύναμη που έλκει τα σωματίδια είναι ανάλογη με τον όγκο τους, ενώ η ιξώδης αντοχή των σωματιδίων στην κίνηση είναι ανάλογη με το εμβαδόν της επιφανείας τους. Ο ρυθμός ροής τους είναι όπως στη μέθοδο των μη σιδηρούχων σωματιδίων και οι τυχαίες προσμίξεις εναποτίθενται λόγω της βαρύτητας προς τα κάτω στο μήκος του υποστρώματος ολίσθησης. Μετά από αυτή τη διαδικασία, χρησιμοποιείται ένας διαλύτης για να απομακρυνθεί το λιπαντικό που παραμένει στον ολισθητήρα. Αυτή η εναπόθεση των σωματιδίων στον ολισθητήρα ονομάζεται φερρογράφημα (Σχήμα 7.11). Όταν το φερρογράφημα έχει ξεραθεί, τα σωματίδια φθοράς και οι στερεοί ρύποι είναι κολλημένοι στην επιφάνεια ολίσθησης και είναι έτοιμοι για εξέταση με το μικροσκόπιο.

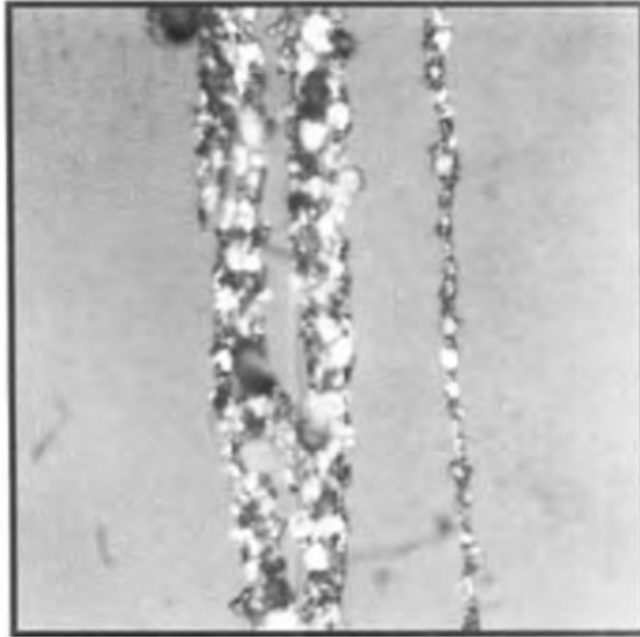
Χρησιμοποιείται μικροσκόπιο μεγέθυνσης 3 × βιοχρωματική για να προσδιορίσει και να εξετάσει τα σωματίδια που παραμένουν στη διαφάνεια. Τα σωματίδια που προκαλούνται από γνωστούς τρόπους φθοράς έχουν διακριτά χαρακτηριστικά, τα οποία αποκαλύπτουν τον μηχανισμό φθοράς. Οι αναλυτές ταξινομούν τη φθορά σωματιδίων μέσω μεγέθους, σχήματος, συγκέντρωσης και μεταλλουργίας. Μπορούν επίσης να ταυτοποιηθούν διάφοροι τύποι σωματιδιακής μόλυνσης. Η ταξινόμηση και η ταυτοποίηση των σωματιδίων βοηθά να αξιολογηθεί η κατάσταση της φθοράς του μηχανήματος και να γίνουν οι κατάλληλες συστάσεις.

Μόλις γίνει το φερρογράφημα, η θερμική επεξεργασία και η εισαγωγή διαλύματος οξέως / βάσης είναι δύο κοινές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση των μεμονωμένων σωματιδίων. Η θερμική αγωγή είναι μια διαδικασία με την οποία η γυάλινη πλάκα εκτίθεται σε μία πηγή ελεγχόμενης θερμότητας για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Θερμαίνοντάς το σε στάδια, παρατηρούνται τα αποτελέσματα της οξείδωσης λόγω της θερμότητας. Μια αλλαγή στον ορισμό της επιφάνειας των σωματιδίων μπορεί να είναι ένας δείκτης της σύνθεσης τους. Το χρώμα είναι μια άλλη σημαντική πτυχή της μορφολογίας των σωματιδίων.



**Σχήμα 7.11** Φερρόγραμμα[1]

Η εισαγωγή ενός διαλύματος οξέως / βάσης είναι μία ιδιαίτερα χρήσιμη μέθοδος όταν χρησιμοποιούνται μη-σιδηρούχα υλικά. Αυτά έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης από ότι τα σιδηρούχα σωματίδια, και η προσθήκη ενός διαλύματος οξέος ή βάσεως στη διαφάνεια μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό των σωματιδίων μέσω των παρατηρούμενων αντιδράσεων. Μια άλλη πτυχή της αναλυτικής φερρογραφίας είναι η ταυτοποίηση του μηχανισμού φθοράς ή του τύπου της σχετικής κίνησης που δημιουργήσε τα σωματίδια. Τα σωματίδια δεν δημιουργούνται μόνο μέσω των συστατικών της επιφάνειας που έρχονται σε επαφή. Οι ρυπογόνες ουσίες που περιέχονται στα λιπαντικά υγρά μπορεί να έρθουν σε επαφή με το συστατικό της επιφάνειας, δημιουργώντας πολύ συγκεκριμένα μοτίβα φθοράς. Παρακάτω παρουσιάζονται σύντομες περιγραφές μερικών από τα πολύ κοινά είδη της φθοράς. Αυτά καλύπτουν σχεδόν το 95% όλων των δυνατών προτύπων φθοράς που μπορεί να παρατηρηθούν στην πράξη. Τα σχήματα 7.12-7.29 και οι περιγραφές τους προέρχονται από ένα γράφημα ανάλυσης φερρογραφίας από Predict DLI, Cleveland Ohio, USA.



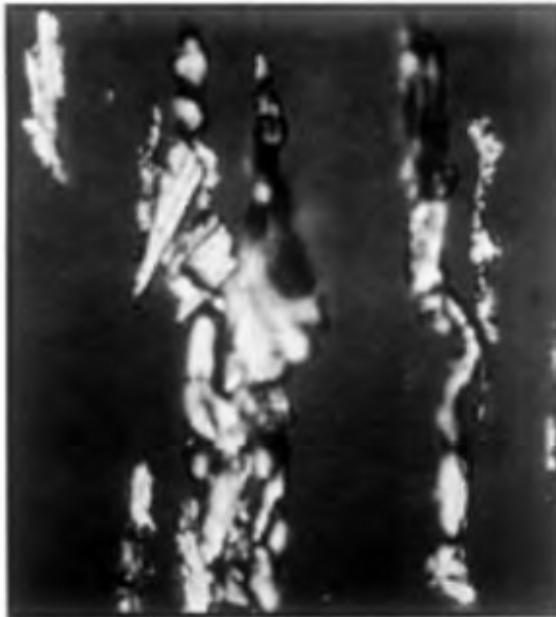
*Σχήμα 7.12 Κανονική φθορά τριβής[1]*

### **Κανονική φθορά τριβής**

Αυτά είναι επίπεδα αιμοπετάλια μικρότερα από 15 μικρά σε μεγάλες διαστάσεις. Θεωρείται μια φυσιολογική φθορά της μηχανής (Σχήμα 7.12).

### **Σοβαρή φθορά ολίσθησης**

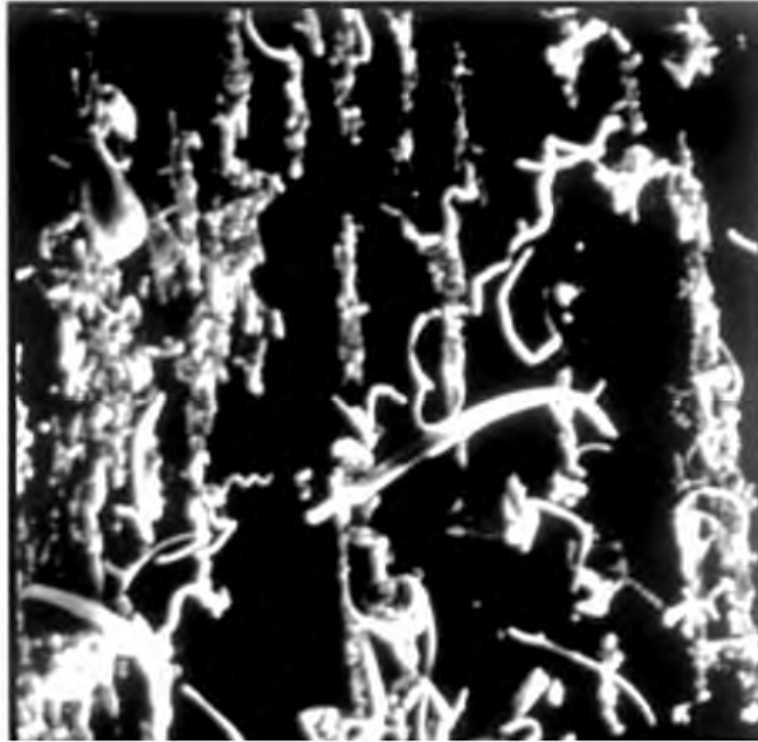
Επίπεδα, επιμήκη σωματίδια μεγαλύτερα από 20 μικρά με ραβδώσεις. Αυτά είναι ενδεικτικά του υπερβολικού φορτίου / της ταχύτητας στην επιφάνεια ολίσθησης (Σχήμα 7.13).



*Σχήμα 7.13 Σοβαρή φθορά ολίσθησης[1]*

### **Φθορά κοπής**

Μακριές, τσαλακωμένες λωρίδες μετάλλου. Αυτές είναι ενδείξεις της κακής ευθυγράμμισης ή της λειαντικής μόλυνσης στο λιπαντικό (σχήμα 7.14).



*Σχήμα 7.14 φθορά κοπής[1]*

### **Φθορά γранаζιών**

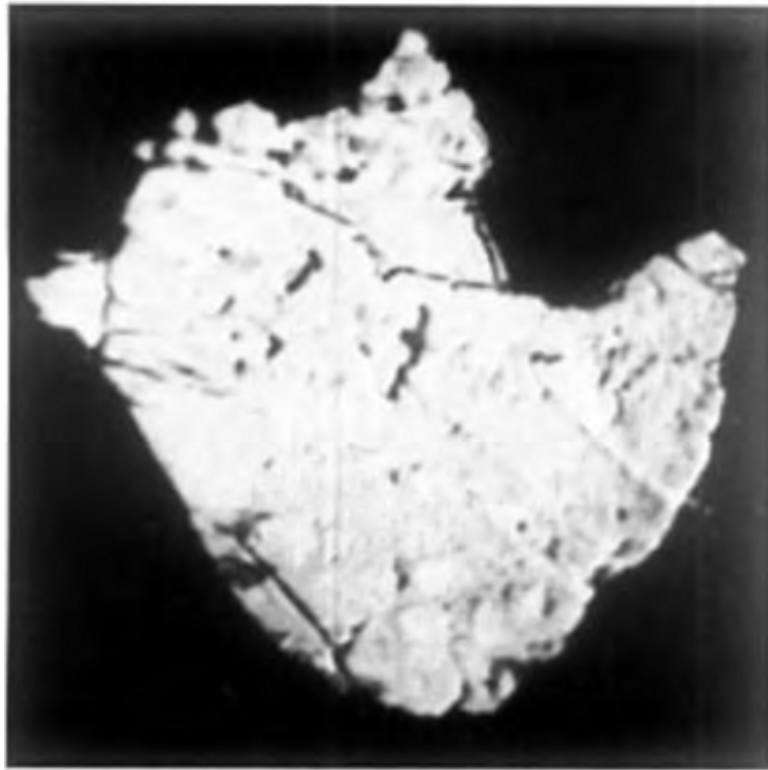
Τα Επίπεδα γραμμωτά σωματίδια παρατηρήθηκαν με μεγέθυνση 1000 ×. Αυτά προκαλούνται από κόπωση, γδαρσίματα ή βαθμολόγηση των δοντιών των γранаζιών (Σχήμα 7.15).



*Σχήμα 7.15 Φθορά γραναζιών[1]*

### **Φθορά ρουλεμάν**

Τα ελασματοειδή αιμοπετάλια, όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 7.16, είναι ορατά με 1000 X μεγέθυνση. Αυτά είναι ενδεικτικά της αποτυχημένης κύλισης.

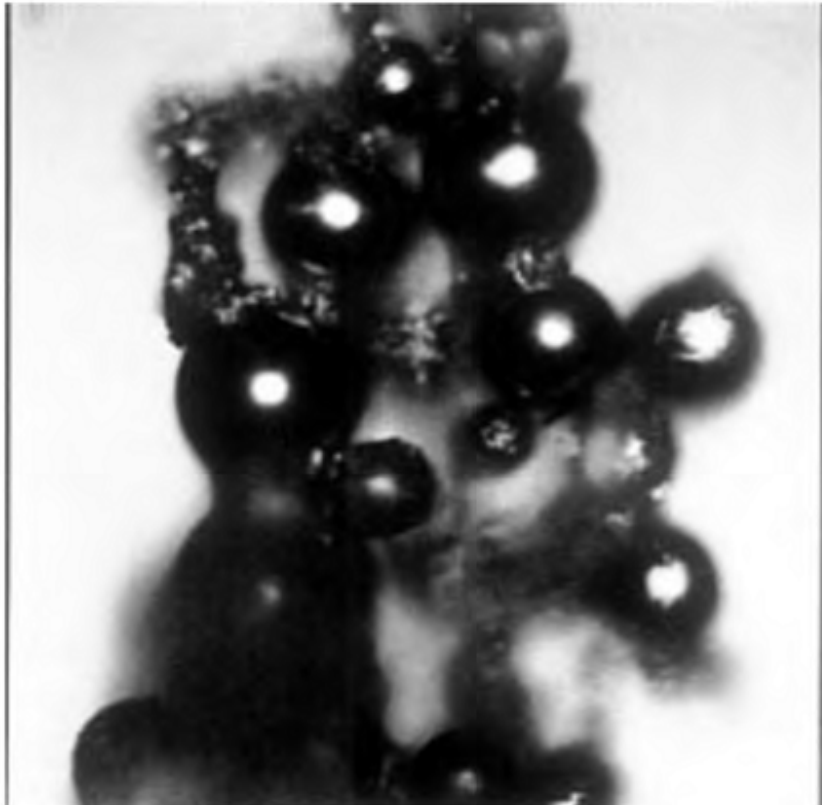


**Σχήμα 7.16** φθορά ρουλεμάν[1]

### **Σφαίρες**

Μικρές σφαίρες (λιγότερο από 5 μικρά) με συντελεστή μεγέθυνσης από 1.000 x. Αυτή είναι μια πρώιμη προειδοποίηση της αποτυχίας των στοιχείων κυλίσεως των ρουλεμάν (Σχήμα 7.17).

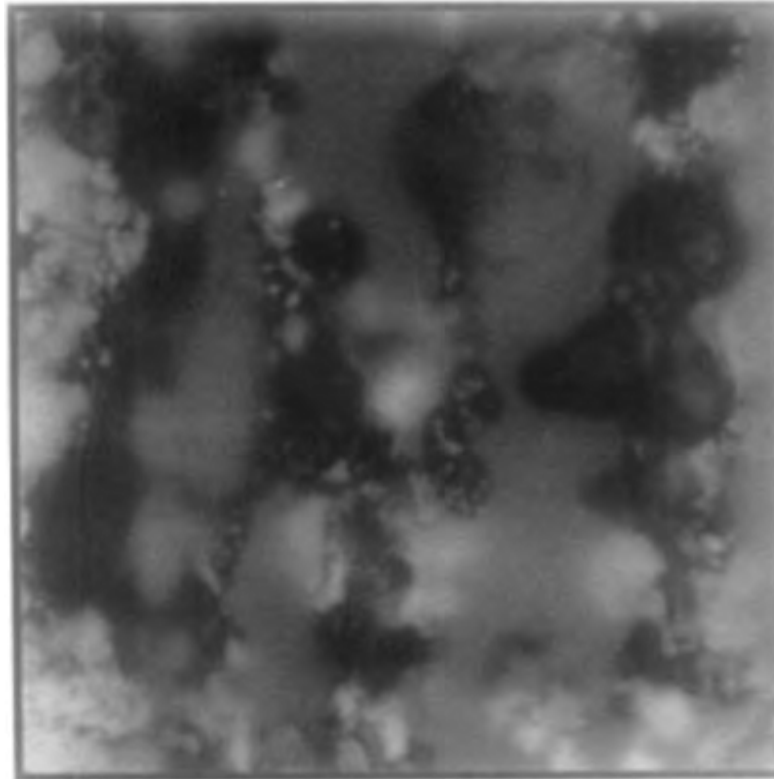




*Σχήμα 7.17 Σφαίρες[1]*

### **Μαύρα οξείδια**

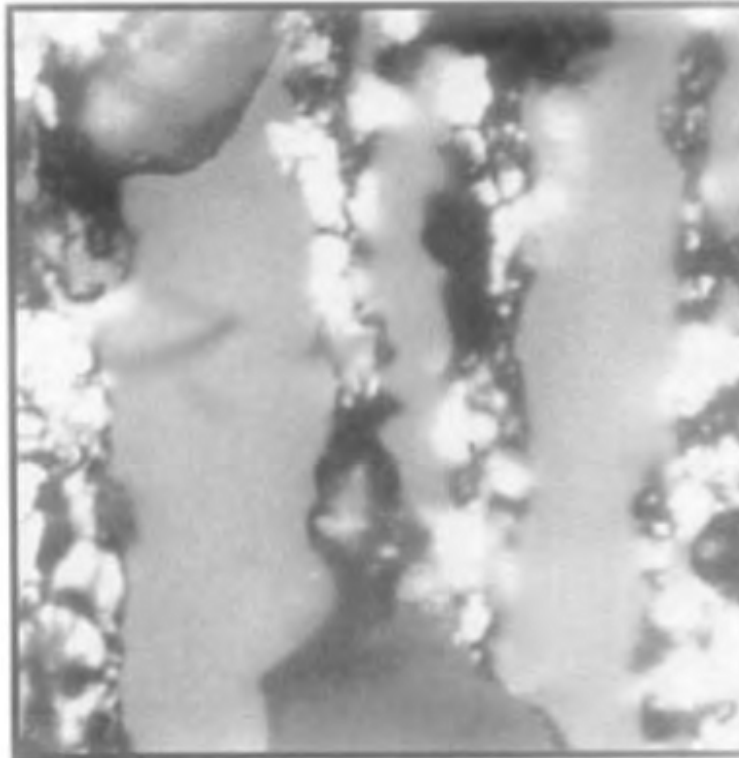
Τα μαύρα σωματίδια ευθυγραμμίζονται σε ένα μαγνητικό πεδίο με μεγέθυνση 1000 X. Αυτό αποτελεί ένδειξη ανεπαρκούς λίπανσης (Σχήμα 7.18).



*Σχήμα 7.18 Μαύρα οξειδία[1]*

### **Ερυθρά οξειδία**

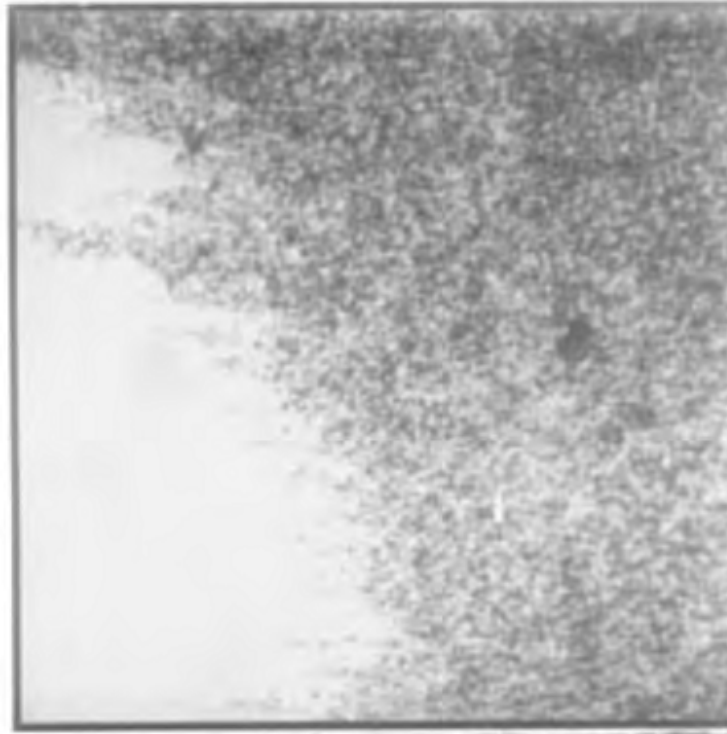
Σωματίδια κόκκινο-πορτοκαλί ευθυγραμμισμένα στο μαγνητικό πεδίο με ένα συντελεστή μεγέθυνσης  $\times 1000$ . Αυτά προκαλούνται από το νερό στο λάδι ή λόγω της κακής κατάστασης του λιπαντικού (Σχήμα 7.19).



**Σχήμα 7.19** Ερυθρά οξειδία[1]

### **Διαβρωτική φθορά**

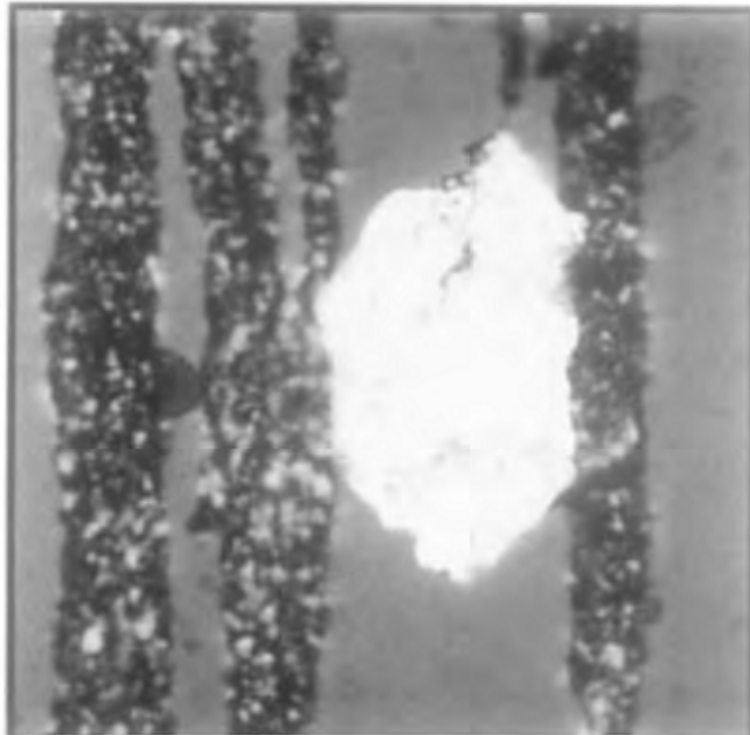
Με ένα συντελεστή μεγέθυνσης 100 x, ανιχνεύονται υψηλής συγκέντρωσης λεπτά σωματίδια στην έξοδο του φερρογράμματος. Αυτό δείχνει την εξάντληση των προσθέτων του λαδιού (Σχήμα 7.20).



*Σχήμα 7.20 Διαβρωτική φθορά[1]*

### **Φθορά αλουμινίου**

Με 500 × μεγέθυνση φαίνεται ένα λευκό μεταλλικό σωματίδιο το οποίο έχει ευθυγραμμισθεί εσφαλμένα σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο. Είναι ενδεικτικό της φθοράς ενός εξαρτήματος του αργιλίου (Σχήμα 7.21).



*Σχήμα 7.21 Φθορά αλουμινίου[1]*

### **Φθορά κράματος χαλκού**

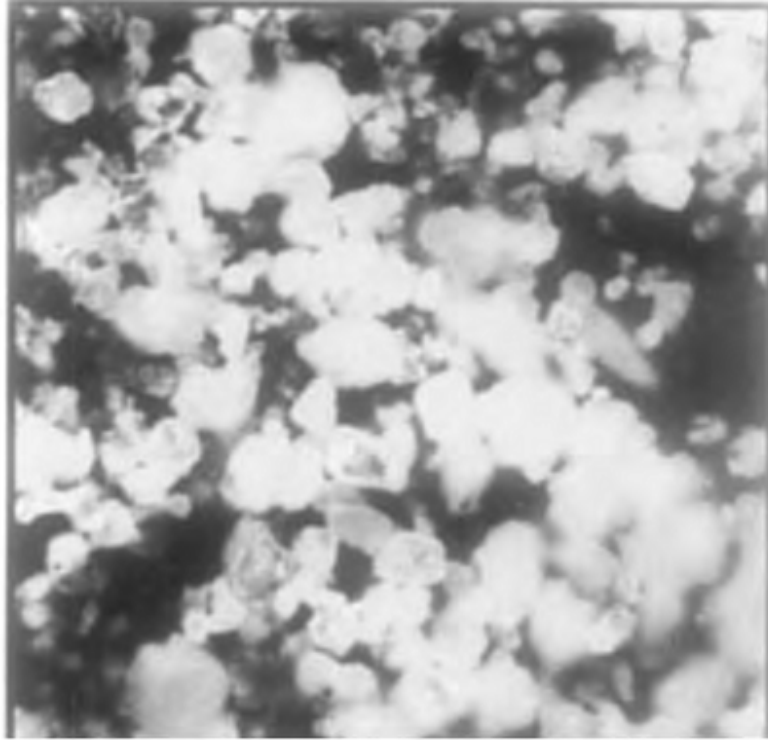
Τα χρυσό-χρωματισμένα σωματίδια δεν είναι ευθυγραμμισμένα με το μαγνητικό πεδίο. Αυτό οφείλεται σε φθορά από τον ορειχάλκινα ή τα χάλκινα εξαρτήματα. Η μεγέθυνση είναι  $100\times$  (Σχήμα 7.22)



**Σχήμα 7.22** Φθορά κράματος χαλκού[1]

### **Σκόνη / βρωμιά**

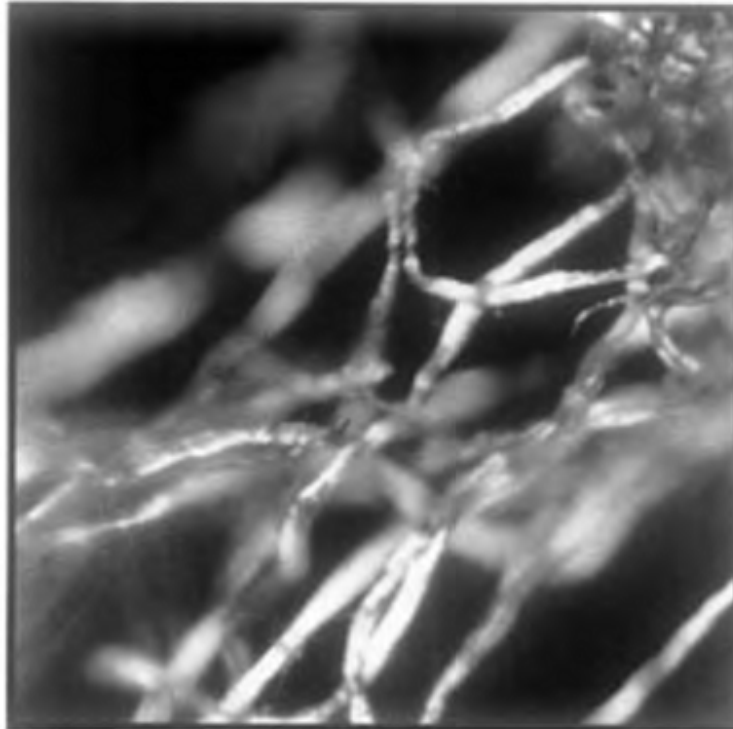
Τα ξένα σωματίδια του υλικού δεν είναι χαρακτηριστικά της μηχανής ή του λαδιού. Αυτά είναι συνήθως άμμος ή βρωμιά (Σχήμα 7.23).



**Σχήμα 7.23** Σκόνη / βρωμιά[1]

### **Ίνες**

Με 100 × μεγέθυνση, οι ίνες είναι ορατές ως μη ευθυγραμμισμένες και περνώντας διαμέσου του διερχόμενου φωτός. Αυτό δηλώνει αποτυχία των μέσων του φίλτρου στην περίπτωση αυτή (Σχήμα 7.24).

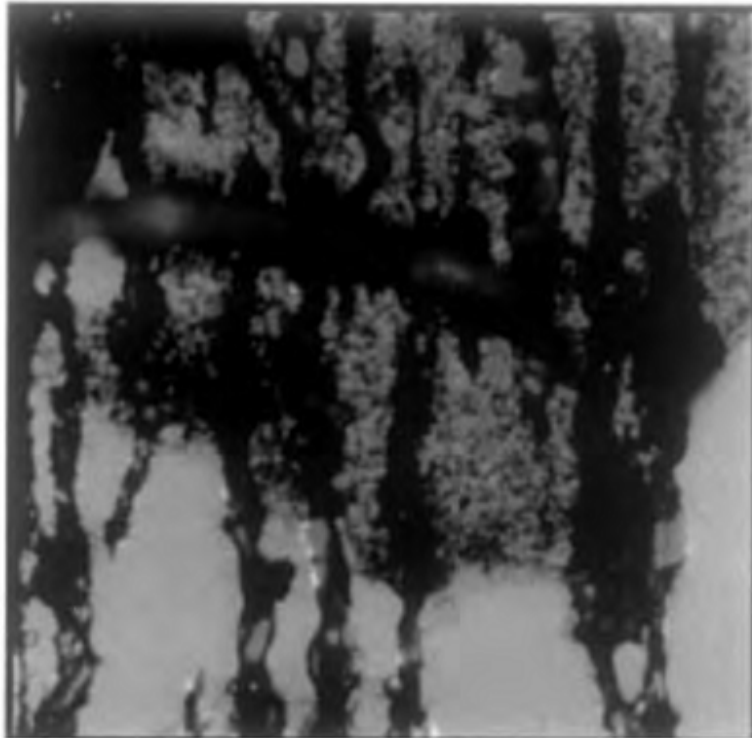


**Σχήμα 7.24** Ίνες[1]

### **Τριβή πολυμερούς**

Η εικόνα που φαίνεται στο σχήμα 7.25 ελήφθη μέσω ενός κόκκινου φίλτρου με 500 × μεγέθυνση. Τα άμορφα υλικά είναι ορατά επειδή περνούν μέσω του μεταδιδόμενου φωτός. Αυτό δείχνει υπερβολική πίεση ή φόρτωση επί του λιπαντικού.

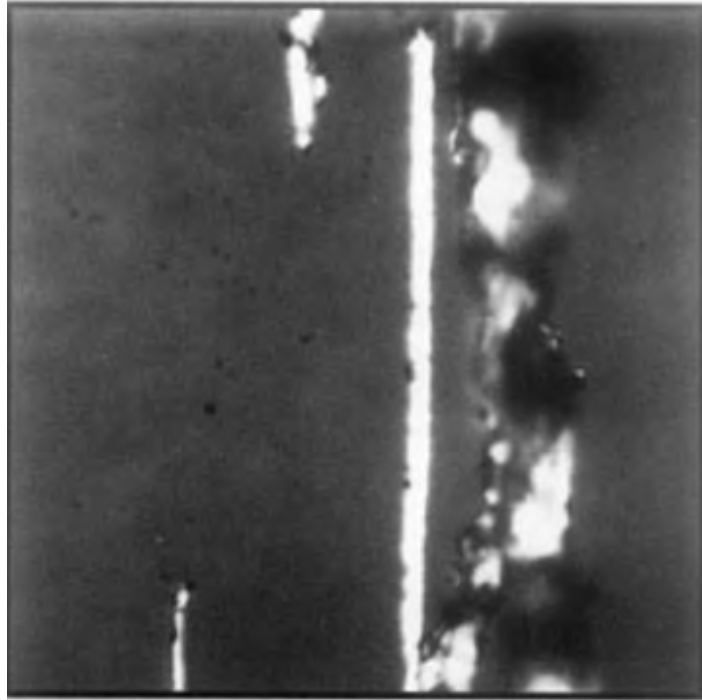




*Σχήμα 7.25 Τριβή πολυμερούς[1]*

### **Φθορά διάρρηξης**

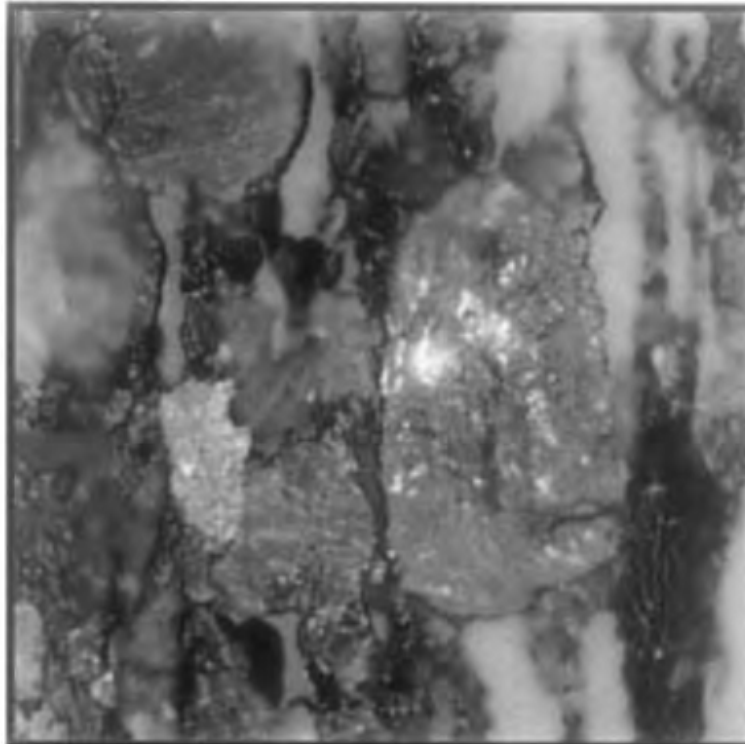
Υπό 1000 × μεγέθυνση, είναι ορατά μακριά και λεπτά σωματίδια σχήματος ράβδου. Αυτά γενικά παρατηρούνται με νέα μηχανήματα και προκαλούνται από την λεγόμενη φθορά διάρρηξης (σχήμα 7.26).



*Σχήμα 7.26 Φθορά διάρρηξης[1]*

### **Ανθεκτικά και χαμηλού κράματος σωματίδια χάλυβα**

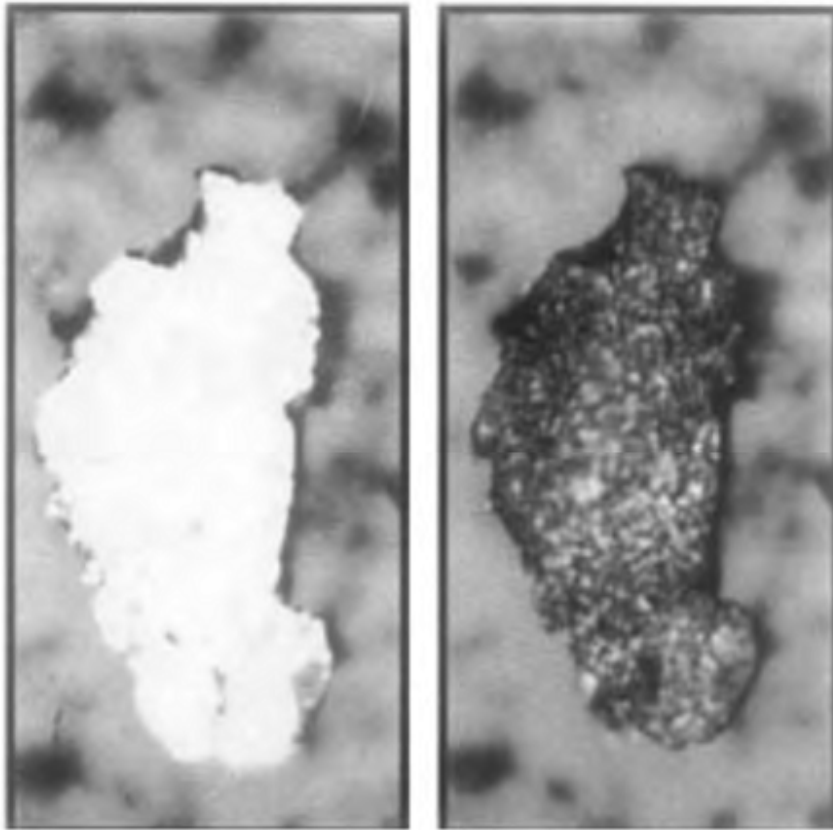
Η εικόνα που παρουσιάζεται στο σχήμα 7.27 ελήφθη με μεγέθυνση 400 ×. Είναι το αποτέλεσμα μιας θερμικής κατεργασίας (στους 330 ° C). Τα χρώματα που εμφανίζονται είναι μωβ και μπλε, τα οποία υποδεικνύουν την περίπτωση ανθεκτικών και χαμηλού κράματος χάλυβες. Συνήθως συλλέγονται από γρανάζια με μη φυσιολογικές συνθήκες φθοράς.



**Σχήμα 7.27** Ανθεκτικά και χαμηλού κράματος σωματίδια χάλυβα[1]

### **Αντιτριβικό μολύβδου / κασσίτερου**

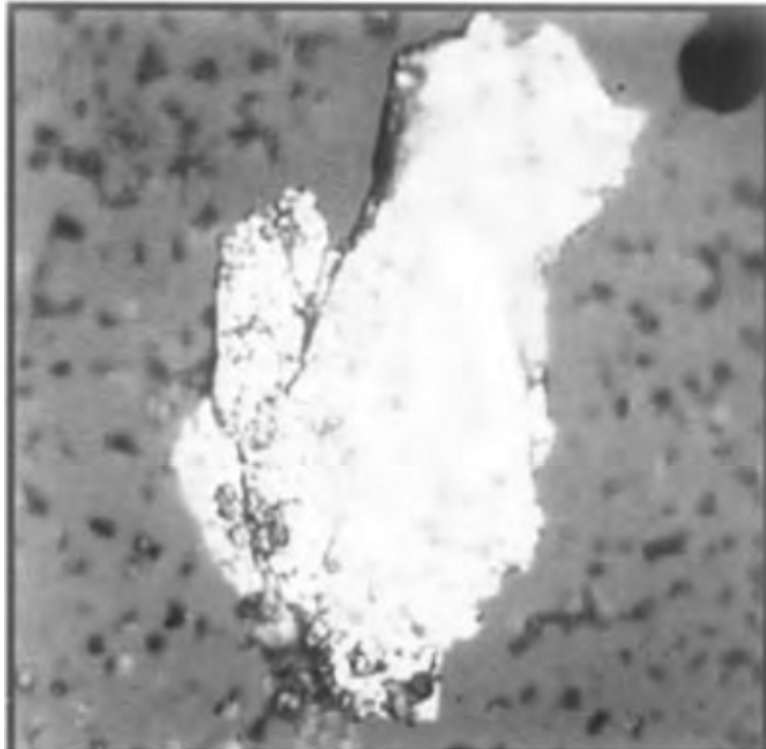
Το Σχήμα 7.28 δείχνει μη σιδηρούχα σωματίδια πριν και μετά τη θερμική επεξεργασία, με μεγέθυνση 500 X. Το αντιτριβικό είναι ένδειξη της φθοράς ρουλεμάν.



*Σχήμα 7.28 Αντιτιριβικό μολύβδου / κασσίτερου[1]*

### **Διθειούχο μολυβδαίνιο**

Ένα μη-σιδηρούχο σωματίδιο, γκρι στο χρώμα με πολλές διατμήσεις. Είναι ένα στερεό λιπαντικό πρόσθετο στο σύστημα. Η μεγέθυνση είναι 400 × (Σχήμα 7.29).



**Σχήμα 7.29** Διθειούχο μολυβδαίνιο[1]

## **DR φερρογράφου**

Στην προηγούμενη ενότητα, είδαμε ότι τα μαγνητικά σωματίδια φθοράς διαχωρίζονται από το λάδι και εναποτίθενται σε μια γυάλινη πλάκα. Το μοτίβο των σωματιδίων που λαμβάνονται στον ολισθητήρα είναι γνωστό ως φερρόγραμμα. Η μικροσκοπική εξέταση επιτρέπει τον χαρακτηρισμό του τρόπου φθοράς και τις πιθανές πηγές της στο μηχάνημα. Αυτή η τεχνική είναι η ανάλυση των σωματιδίων φθοράς και είναι επίσης γνωστή ως αναλυτική φερρογραφία. Μια αυτοματοποιημένη εκδοχή αυτής της τεχνικής μαγνητικού διαχωρισμού είναι η άμεσης ανάγνωσης φερρογραφία (DR).

Η φερρογραφία DR μετρά τις αναλογίες των μεγάλων και μικρών σωματιδίων στο δείγμα, και τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των σωματιδίων φθοράς και της σοβαρότητά τους.

Αυτές οι δύο παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ροή και αποτελούν εξαιρετικούς μη φυσιολογικούς δείκτες, για τη σιδηρούχα φθορά, αλλά ακατάλληλες για μη σιδηρούχα φθορά. Η δοκιμή είναι ιδιαίτερα πολύτιμη όταν η φθορά έχει καθιερωθεί. Σε κάθε μηχάνημα, τουλάχιστον μία από τις δύο επιφάνειες που έρχονται σε επαφή είναι σιδηρούχες. Το πλέγμα των γραναζιών ορείχαλκου με χάλυβα είναι φθαρμένα. Τα λεία έδρανα είναι πάντα σε επαφή με έναν σιδηρούχο άξονα. Παρά το γεγονός ότι η μη σιδηρούχα επιφάνεια των

γранаζιών θα φθαρεί πρώτη, η αντίστοιχη σιδηρούχα φθορά μπορεί να ανιχνευθεί και να παρακολουθηθεί μέσω του DR φερρογράφου.

Μία μέθοδος φερρογράφου DR πραγματοποιείται μέσω οπτικής εκπομπής πηγής φωτός για να ταξινομηθούν και να καταμετρηθούν τα σωματίδια σιδήρου. Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου παρέχει συνήθως δύο ξεχωριστές πηγές φωτός. Το παρασκευασμένο δείγμα ταξιδεύει μέσω ενός σωλήνα καθίζησης από γυαλί που στηρίζεται σε ένα μεγάλο μαγνήτη. Ο μαγνήτης με τη σειρά του παγιδεύει τα σιδηρούχα σωματίδια, και παράγεται μια αριθμητική τιμή αντιπροσωπευτική του ποσοστού του φωτός που μπλοκάρεται. Αυτή η αξία «πυκνότητας» αναφέρεται ως το *DL* ή *πυκνότητα των μεγάλων σωματιδίων* (πάνω από 5 μικρά σε μέγεθος) και *DS* ή *πυκνότητα των μικρών σωματιδίων* (κάτω από 5 μικρά σε μέγεθος). Με αυτές τις δύο τιμές, η *συγκέντρωση των σωματιδίων φθοράς (WPC)* υπολογίζεται ως εξής:

$$WPC = DL + DS$$

Η WPC ρέει για ένα χρονικό διάστημα για να εκτιμηθεί το ποσοστό της φθοράς. Πολλές αλλαγές μπορεί να παρατηρηθούν κατά την αύξηση ή τη μείωση της αξίας WPC. Πέραν του WPC, μπορεί επίσης να υπολογιστεί το ποσοστό των μεγάλων σωματιδίων (PLP) ή ενός δείκτη σοβαρότητας χρησιμοποιώντας τις τιμές πυκνότητας:

$$PLP = \frac{DL - DS}{WPC} \times 100$$

Το PLP είναι ένας δείκτης της σοβαρότητας της φθοράς. Η εμφάνιση της μη φυσιολογικής φθοράς έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή των σωματιδίων πάνω από 5 μικρά. Έτσι, ο καθορισμός του ποσοστού των μεγάλων σωματιδίων στα σωματίδια της ανάλυσης της φθοράς μπορεί να προσδιορίσει την ανάγκη για να πραγματοποιηθεί η αναλυτική φερρογραφία. Και οι δύο αυτές τιμές, δηλαδή η καταμέτρηση των σωματιδίων φθοράς και το ποσοστό των μεγάλα σωματιδίων, αποτελούν δείκτες της κατάστασης μηχανημάτων. Δυστυχώς δεν παρέχουν οποιεσδήποτε ενδείξεις για την αιτία της φθοράς. Προκειμένου να προσδιοριστεί η αιτία, πρέπει κανείς να επαναλάβει την αναλυτική φερρογραφία.

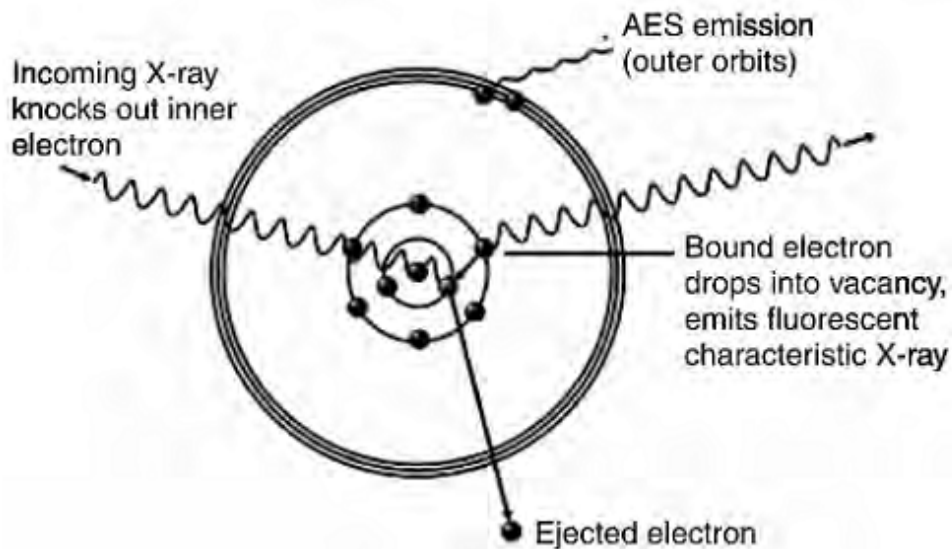
#### **7.8.4 Φασματοσκοπία XRF (φθορισμός ακτίνων X)**

Η ανάλυση λαδιού αποτελείται από την ανάλυση των σωματιδίων φθοράς που παράγονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φθοράς. Ωστόσο, οι σύγχρονες κρίσιμες μηχανές χρησιμοποιούν φίλτρα υψηλής απόδοσης ώστε παγιδεύουν σχεδόν όλα τα μεγάλα σωματίδια φθοράς, αφήνοντας πολύ λίγα για τον αναλυτή. Ως εκ τούτου, πρέπει να στρέψουμε την εστίαση στο φίλτρο όπου μπορεί να παγιδευτούν τα στοιχεία φθοράς. Τα υπολείμματα που εναποτίθενται στα φίλτρα μπορούν να αποκαλύψουν την υγεία του μηχανήματος. Αυτές οι πληροφορίες συνήθως χάνονται όταν το φίλτρο αλλάζεται. Η μέθοδος απαιτεί την άρση των αιωρούμενων σωματιδίων από την κυκλοφορία λαδιού και αναλύοντας τα χημικά συστατικά

των στοιχείων τους με φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων Χ (XRF). Τα υπολείμματα εναποτίθενται στα φίλτρα αποκαλύπτει την κατάσταση του μηχανήματος, καθώς και την ποσότητα των σωματιδίων φθοράς που δημιουργούνται ανάμεσα σε δύο αλλαγές φίλτρων.

Η φασματοσκοπία XRF, όπως και άλλες φασματομετρικές τεχνικές, συνεπάγεται την διέγερση των ηλεκτρονίων από τις τροχιές τους (Σχήμα 7.30). Αυτό οδηγεί στην εκπομπή των ακτινών UV με χαρακτηριστικές συχνότητες, οι οποίες μπορούν να αναλυθούν. Κατά τη διάρκεια της φασματοσκοπίας ατομικής εκπομπής Rotrode, η ηλεκτρική εκκένωση παράγει πλάσμα, προκαλώντας θερμική εκπομπή (παρόμοιο με τις ακραίες θερμοκρασίες του πλάσματος αργού). Όταν τα άτομα επιστρέφουν στην φυσιολογική κατάσταση, η περίσσεια ενέργεια εκπέμπεται ως φως. Κάθε στοιχείο εκπέμπει φως σε διαφορετικές συχνότητες στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Η ποσότητα του φωτός που εκπέμπεται σε μια δεδομένη συχνότητα αντιστοιχεί στη συγκέντρωση του στοιχείου που υπάρχει στο δείγμα.

Η XRF λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο. Η διαφορά είναι ότι η XRF διεγείρει τα άτομα με βομβαρδισμό ακτινών Χ. Τα άτομα με τη σειρά τους εκπέμπουν ακτίνες Χ που είναι χαρακτηριστικές του χημικού στοιχείου, σε ένα εύρος που αντιστοιχεί στη μάζα του χημικού στοιχείου στο δείγμα. Τα φασματόμετρα XRF έχουν ρυθμιστεί για να αναφέρουν τις συγκεντρώσεις των σημαντικών στοιχείων που υπάρχουν σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm).



**Σχήμα 7.30** Φασματόμετρο XRF[1]

Η XRF διεγείρει ηλεκτρόνια εντός του εσωτερικού φλοιού του ατόμου, κοντά στον πυρήνα. Η AES διεγείρει τα ηλεκτρόνια από τον εξωτερικό φλοιό, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή ορατού φωτός. Σε ένα φασματόμετρο Rotrode AES, τα σωματίδια διεγείρονται

από το πλάσμα. Αυτό το πλάσμα δημιουργείται μέσω ενός ηλεκτρικού τόξου σε μια διαδικασία που περιορίζεται σε σωματίδια μεγέθους μικρότερου ή ίσου με 10 μικρά.

Η διέγερση εσωτερικής στιβάδας, η οποία λαμβάνει χώρα σε ένα φασματομέτρο XRF, φέρεται με εκπομπές ακτινών X υψηλής ενέργειας. Η XRF είναι έτσι ικανή να μετρά τα λεπτά σωματίδια, όπως επίσης και τα μεγάλα μεταλλικά δείγματα (π.χ. μεταλλικές πλάκες). Η μέθοδος αυτή, ωστόσο, περιορίζεται από το βάθος από το οποίο οι ακτίνες X μπορούν να εισέλθουν και να βγουν από το υλικό του δείγματος. Στην περίπτωση μιας μεταλλικής πλάκας, ένα λεπτό δείγμα θα δώσει τα ίδια αποτελέσματα με ένα παχύτερο δείγμα. Αυτό οδηγεί σε ένα σωματιδιακό μέγεθος που η επίδρασή του εξαρτάται από το βάθος διείσδυσης των ακτινών X. Παρά το γεγονός αυτό, η XRF εξακολουθεί να παράγει μεγάλα σήματα για μεγάλα σωματίδια και μικρά σήματα για μικρά σωματίδια.

## 7.9 Τα όρια συναγερού για διάφορες μηχανές (πηγή: Εθνική Υπηρεσία Τριβολογίας) Συμπιεστές

Δοκιμή ανάλυσης λαδιού	Τυπικά όρια
Φασματοσκοπία - σιδήρου	15 ppm
Φασματοσκοπία - χαλκού	500 ppm
Φασματοσκοπία - μολύβδου	15 ppm
Φασματοσκοπία - αλουμινίου	15 ppm
Φασματοσκοπία - χρωμίου	15 ppm
Φασματοσκοπία – κασσίτερου	15 ppm
Φασματοσκοπία - ψευδαργύρου	500* ppm λεπτά
Φασματοσκοπία – νικελίου	15 ppm
Χλώριο	20 ppm
Ιξώδες	20% έως -10% της ονομαστικής ποιότητας ISO
Νερό	500 ppm max
TAN	1,0 mg KOH / g max

\*Αυτό ισχύει για το πακέτο πρόσθετων στο λιπαντικό και είναι ελάχιστο.



## Υπερσυμπιεστές

Δοκιμή ανάλυσης λαδιού	Τυπικά όρια
Φασματοσκοπία - σιδήρου	15 ppm
Φασματοσκοπία - χαλκού	500 ppm
Φασματοσκοπία - μολύβδου	15 ppm
Φασματοσκοπία - αλουμινίου	15 ppm
Φασματοσκοπία – χρωμίου	15 ppm
Φασματοσκοπία – κασσίτερου	15 ppm
Φασματοσκοπία - ψευδαργύρου	500 ppm λεπτά
Φασματοσκοπία – νικελίου	15 ppm
Χλώριο	20 ppm
Ιξώδες	+20% έως -10% της ονομαστικής ποιότητας ISO
Νερό	500 ppm max
TAN	1,0 mg KOH / g max

Δοκιμή ανάλυσης λαδιού	Τυπικά όρια	Περεταιίρω δράση από το εργαστήριο
Σπεκτροχημική αντίδραση πυριτίου	15 ppm	
Σπεκτροχημική αντίδραση χαλκού	12 ppm	
Σπεκτροχημική αντίδραση σιδήρου	26 ppm	
RFS (DoubleCheck)	2:1 αναλογία ή μεγαλύτερα αδρομερή έως λεπτά	Φερρογραφία
Ιξώδες	+20%, -10% της ονομαστικής ποιότητας ISO	
Οξείδωση	0,4 Abs / 0,1 mm πέρα του τελευταίου δείγματος	TAN 1,5 mg KOH / g max
Μέτρηση σωματιδίων*	17/14 κώδικας ISO	
Νερό	0,1% max	Karl Fisher

\*Η καταμέτρηση σωματιδίων για πολλά υδραυλικών συστημάτων είναι πολύ χαμηλότερη.

## Κινητήρες με αέριο καύσιμο

Δοκιμή ανάλυσης λαδιού	Τυπικά όρια	Περεταίρω δράση από το εργαστήριο
Φασματοφωτομετρική ανάλυση	10% αύξηση σε σχέση με το τελευταίο δείγμα	
RFS (DoubleCheck)	2:1 αναλογία ή μεγαλύτερα αδρομερή έως λεπτά	Συγκρινόμενο με τη τάση της φερρογραφίας
Ιξώδες	+20% ή -10% της ονομαστικής ποιότητας ISO	
Οξείδωση	0,2 Abs / 0,1 mm πέρα του τελευταίου δείγματος μέγιστο 1.00	TAN
Νίτρωση	0,2 Abs / 0,1 mm πέρα του τελευταίου δείγματος μέγιστο 1.00	TAN
TBN	Το μισό της νέας τιμής του λαδιού ή ίση προς 1.0 mg KOH/g λεπτά αξία	

### 7.10 Επίλογος

Στο παρελθόν, οι εταιρείες θεωρούσαν το πρόγραμμα ανάλυσης ταλαντώσεων ως τη κύρια μέθοδο στην φιλοσοφία προγνωστικής συντήρησης. Ωστόσο, με τις τεχνικές βελτίωσης, τα εξελιγμένα εργαστήρια και τον φορητό εξοπλισμό, την ανάλυση του λαδιού και της φθοράς των σωματιδίων αρχίζει να αποδίδει έργο και οικονομικές αποδόσεις. Η μέθοδος είναι πλέον ταχέως αναπτυσσόμενη και επιθυμητά έξυπνη τεχνική συντήρησης που πρέπει να είναι συμπληρωματική της ανάλυσης ταλαντώσεων.

Η εφαρμογή ενός προγράμματος ανάλυσης λαδιού μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος συντήρησης για ένα εργοστάσιο παραγωγής και μπορεί επίσης να βελτιώσει την αξιοπιστία και την ασφάλεια των εγκαταστάσεων. Η ανάλυση λαδιού που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της κατάστασης θα πρέπει να έχει μια βασική έδρα. Όταν συνδυάζεται με σημαντικά στοιχεία, παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την υγεία των μηχανημάτων.

Το κόστος μιας ορθής εφαρμογής του προγράμματος θα πρέπει να είναι ανακτήσιμο μέσω της επέκτασης των διαστημάτων αλλαγής του λιπαντικού. Η αυξημένη αξιοπιστία, διαθεσιμότητα, πρόληψη απρόβλεπτων αστοχιών και λιγότερος χρόνος εκτός λειτουργίας είναι ορισμένα από τα πρόσθετα οφέλη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>

### Άλλες Τεχνικές Προγνωστικής Συντήρησης

#### 8.1 Εισαγωγή

Υπάρχουν δεκάδες τεχνολογίες προγνωστικής συντήρησης, και μερικές έχουν γίνει «πρότυπο» σε πολλές βιομηχανίες. Οι «πρότυπες» τεχνολογίες περιλαμβάνουν την ανάλυση κραδασμών, υπερήχων, την ανάλυση του λαδιού (λιπαντικού), τη φθορά της ανάλυσης των σωματιδίων και τη θερμογραφία. Στα προηγούμενα θέματα, συζητήσαμε λεπτομερώς την τεχνική προγνωστικής συντήρησης της ανάλυσης κραδασμών και την ανάλυση σωματιδίων φθοράς του λαδιού. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα συζητήσουμε τις άλλες τεχνικές προγνωστικής συντήρησης όπως το υπερηχογράφημα και την θερμογραφία. Αυτές οι τεχνικές είναι αρκετά χρήσιμες για ορισμένες εφαρμογές και συμπληρώνουν τις μεγάλες τεχνικές πολύ καλά.

Πολλές τεχνικές παρακολούθησης κατάστασης μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση του ίδιου σφάλματος. Για παράδειγμα, ένα πρόβλημα που εντοπίστηκε από ένα δείγμα ελαίου μπορεί επίσης να διασταυρωθεί με την ανάλυση κραδασμών ή τη θερμογραφία. Ένα ηλεκτρικό πρόβλημα, διασταυρωμένο με υπερήχους, μπορεί να επιβεβαιωθεί μέσω της χρήσης της θερμογραφίας. Ως εκ τούτου, η επιβεβαίωση της διάγνωσης είναι δυνατή μέσω της χρήσης των διαφόρων τεχνικών προγνωστικής συντήρησης. Αυτό το γεγονός καθιστά την προγνωστική συντήρηση πιο πειστική, ειδικά όταν συμμετέχουν κρίσιμα μηχανήματα.

#### 8.2 Υπέρηχοι

Οι περισσότερες μηχανές υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας εκπέμπουν σταθερά μοτίβα ήχου. Αυτά τα μοτίβα ήχου (ηχητικά ίχνη) μπορεί να ορίζονται και να αναγνωρίζονται, και ως εκ τούτου οι αλλαγές σε αυτές τα μοτίβα μπορεί να θεωρηθούν ως συστατικά που αρχίζουν να φθείρονται ή να επιδεινώνονται. Κατά μία έννοια, αυτή είναι μία διαφορετική μορφή μηχανικών ταλαντώσεων. Ο ήχος είναι μια *μικροσκοπική* ταλάντευση του μοριακού επιπέδου μιας ουσίας. Η ταλάντωση είναι μια *μακροσκοπική* ταλάντευση δομής - με άλλα λόγια, φυσικές δομές που κινούνται. Το υπερηχογράφημα ορίζεται ως ηχητικό κύμα που έχει επίπεδα συχνότητας πάνω από 20 kHz, υψηλότερο δηλαδή από το εύρος της ανθρώπινης ακοής. Οι υπέρηχοι μεταδίδονται από τον αέρα και λειτουργούν σε χαμηλότερο φάσμα υπερήχων των 20-100 kHz και έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Μικρά αντικείμενα μπλοκάρουν εύκολα τον αέρα που μεταδίδονται οι υπέρηχοι.

- Δεν διεισδύουν σε στερεές επιφάνειες (αν και αυτό μπορεί να γίνει μέσω ρωγμών).
- Η αέριοι υπέρηχοι εκπέμπονται σε ευθεία γραμμή.
- Το υπερηχογράφημα δεν ταξιδεύει μεγάλες αποστάσεις.

Οι παραπάνω ιδιότητες των υπερήχων έχουν αξιοποιηθεί για να γίνει μια χρήσιμη τεχνική στην παροχή έγκαιρης πληροφόρησης σε περιπτώσεις:

- Η ανίχνευση διαρροών στα συστήματα πίεσης και κενού (π.χ. λέβητες, εναλλάκτες θερμότητας, συμπυκνωτές, ψύκτες, στήλες απόσταξης, φούρνοι κενού, συστήματα φυσικού αερίου)
- Επιθεώρηση ρουλεμάν
- Επιθεώρηση Ατμοπαγίδας
- Βαλβίδα αερίων
- Η ακεραιότητα των τσιμουχών και παρεμβυσμάτων σε δεξαμενές, συστήματα σωληνώσεων και τα μεγάλα κουτιά που μπορούμε να μπούμε μέσα
- Σηλαίωση αντλίας
- Ανίχνευση του στέμματος στον εξοπλισμό μεταγωγής
- Ανάλυση βαλβίδας συμπιεστή.

### **8.2.1 Μεταφραστής Υπερήχων**

Ο υπερηχητικός μεταφραστής (Σχήμα 8.1) είναι γενικά μια ελαφριά, φορητή συσκευή η οποία μπορεί εύκολα να μεταφερθεί εντός της εγκατάστασης και επίσης σε περιορισμένους χώρους.



**Σχήμα 8.1** Ένας υπερηχητικός ανιχνευτής[1]

Οι μεταφραστές υπερήχων που μεταδίδονται από τον αέρα είναι σχετικά απλοί στη χρήση. Αποτελούνται από μία βασική φορητή μονάδα με ακουστικά, ένα μέτρο, έναν ρυθμιστή ευαισθησίας και (συχνότερα) εναλλάξιμα δομοστοιχεία που χρησιμοποιούνται είτε ως τρόπος λειτουργίας σάρωσης είτε ως τρόπος επαφής. Μερικά όργανα έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν την συχνότητα απόκρισης μεταξύ 20 και 100 kHz. Συχνά περιλαμβάνεται επίσης ένας πομπός υπερήχων που ονομάζεται γεννήτρια τόνου.

Το υπερηχογράφημα μπορεί να «ακουστεί», αφού έχει τροποποιηθεί και μεταποιηθεί σε ηχητικό φάσμα από μια διαδικασία που ονομάζεται ετεροδύνωση. Η ετεροδύνωση, όπως συνεπάγει η λέξη, είναι η ανάμιξη των δύο κυμάτων. Η ανάμιξη των δύο κυμάτων παράγει το άθροισμα και τη διαφορά των αρχικών κυμάτων, τα οποία επιτρέπουν επίσης τη μετατόπιση του ενός ήχου υψηλής συχνότητας στο ακουστικό φάσμα. Ο μαθηματικός τύπος που χρησιμοποιείται για αυτή τη διαδικασία είναι ο εξής:

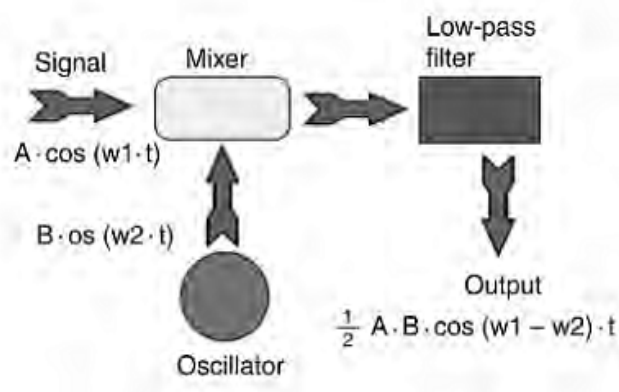
$$A \cos(\omega_1 t) \cdot B \cos(\omega_2 t) = 1/2 [AB \{ \cos(\omega_1 + \omega_2) \} t] + 1/2 [AB \{ \cos(\omega_1 - \omega_2) \} t] \quad [1]$$

όπου το A είναι το εύρος του πρώτου κύματος, B το εύρος του δεύτερου κύματος,  $\omega_1$  η συχνότητα του πρώτου κύματος,  $\omega_2$  η συχνότητα του δεύτερου κύματος.

Ως παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα έδρανο που παράγει ηχητικό σήμα από 31-33 kHz. Δεδομένου ότι οι άνθρωποι μπορούν μόνο να ακούσουν μέχρι περίπου 16-20 kHz, ο ήχος δεν μπορεί να ακουστεί. Η ανάμιξη ενός κύματος 30 kHz σταθερής

συχνότητας με αυτό το σήμα, θα έχουμε μια διαφορά 1-3 kHz, και όταν προστίθεται ένα σύνολο 61-63 kHz. Η πληροφορία 1-3 kHz μπορεί να ακουστεί και να ερμηνευθεί. Το άθροισμα είναι πολύ υψηλότερο από το ακουστικό φάσμα, και απορρίπτεται.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 8.2, η συχνότητα από τον ταλαντωτή, πρέπει να ρυθμίζεται κοντά στο σήμα εισόδου. Ωστόσο, υπάρχουν και κάποια μέσα τα οποία αναλύουν ένα ευρύ φάσμα των υπερήχων και επιλέγουν την κατάλληλη ζώνη συχνοτήτων του σήματος αυτόματα. Επειδή η λειτουργία τους είναι σαν αυτή ενός ραδιοφώνου AM, οι ετερόδουνοι ανιχνευτές υπερήχων ρυθμίζονται χειροκίνητα και μπορεί να χάσουμε βασικά σήματα εάν δεν έχουν ρυθμιστεί σωστά. Η αυτόματη επιλογή σε ορισμένα όργανα εξαλείφει την εικασία που συνδέεται με τη χειροκίνητη ρύθμιση συχνότητας. Μεταφράζει ήχους από 20 έως 100 kHz στο ηχητικό φάσμα, ανεξάρτητα από τη συχνότητα του αρχικού σήματος.



**Σχήμα 8.2** Ετεροδύνωση[1]

Η ένταση των υπερήχων μπορεί να προσδιοριστεί με παρατήρηση ενός μετρητή του οργάνου. Ορισμένα μέσα περιλαμβάνουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν την ένταση του σήματος. Για παράδειγμα, εάν η πηγή υπερήχων είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστεί λόγω του έντονου σήματος, ο χρήστης μπορεί να επικεντρωθεί στην ακριβή θέση με την ρύθμιση της ευαισθησίας χαμηλότερα. Αντιθέτως, όταν εμφανίζεται σε μία βαλβίδα νερού μια διαρροή χαμηλού επιπέδου, η ρύθμιση της συχνότητας μπορεί να ρυθμιστεί για να βοηθήσει τον χρήστη να ακούει τη στάλα από τη διαρροή νερού.

Οι εναλλασσόμενοι τρόποι επιτρέπουν στους χρήστες να προσαρμόσουν το μέσο για διαφορετικούς τύπους ελέγχων. Η λειτουργία σάρωσης χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει υπερήχους που ταξιδεύουν στην ατμόσφαιρα, όπως μια διαρροή πίεσης ή μία εκκένωση κορώνας, ενώ ο τρόπος επαφής χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των υπερήχων που παράγονται μέσα σε ένα περίβλημα όπως σε ένα ρουλεμάν, αντλία, βαλβίδα ή παγίδα στέγασης ατμού.

### **8.2.2 Τεχνικές ανίχνευσης υπερήχων**

Η ανίχνευση υπερήχων που μεταδίδονται στον αέρα ξεκινά με τη εγκατάσταση του ανιχνευτή. Αρχικά παραμένει στην λογαριθμική ρύθμιση στην επιλογή του μετρητή. Μία «σταθερή θέση της ζώνης» πρέπει να επιλεγεί στον επιλογέα συχνότητας. Η επιλογή της ευαισθησίας διατηρείται στο μέγιστο. Η σάρωση ξεκινά επισημαίνοντας τη μονάδα στην περιοχή δοκιμής. Η διαδικασία είναι να πάει από το «μεικτό» στο «λεπτό» με πιο λεπτές προσαρμογές καθώς προσεγγίζεται η διαρροή. Κατά τη διάρκεια αυτής της λειτουργίας, ο υψηλός θόρυβος του περιβάλλοντος, καθώς και τα σήματα χαμηλής έντασης μπορεί να συναντηθούν. Υπάρχουν τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ξεπεραστεί αυτό, οι οποίες περιγράφονται στην επόμενη ενότητα.

### **8.2.3 Υπερηχογραφήματα ανταγωνιστικής απομόνωσης**

Η ανίχνευση διαρροής χρησιμοποιώντας την τεχνική υπερήχων είναι ένας εύκολος στόχος. Η περιοχή σαρώνεται για να ανιχνευτεί ένας ξεχωριστός ήχος. Με τη συνέχιση της προσαρμογής της ευαισθησίας, η περιοχή σαρώνεται μέχρι να ακούγεται το δυνατότερο σημείο. Σε ορισμένα μέσα, παρέχεται ένας ανιχνευτής εστίασης - καουτσούκ. Αυτή η προσκόλληση περιορίζει τη περιοχή της υποδοχή για να εντοπίσει μια μικρή εκπομπή. Ο ανιχνευτής καουτσούκ είναι επίσης ένα εξαιρετικό εργαλείο για την επιβεβαίωση της θέσης της διαρροής. Αυτό γίνεται πιέζοντάς το κατά την επιφάνεια της ύποπτης περιοχής. Η διαρροή αυτή επιβεβαιώνεται αν ο ήχος της διαρροής παραμένει συνεπής. Εάν μειώνεται σε όγκο, η διαρροή βρίσκεται αλλού. Κατά καιρούς, τα ανταγωνιστικά υπερηχογραφήματα καθιστούν δύσκολο την απομόνωση μιας διαρροής. Σε μια τέτοια περίπτωση, θα μπορούσε να δοκιμάσει τα ακόλουθα.

Εάν είναι δυνατόν, απενεργοποιήστε τη συσκευή με την υποψία διαρροής. Αλλιώς, απομονώστε την περιοχή με ένα φυσικό εμπόδιο. Χειριστείτε τη συσκευή και χρησιμοποιήστε τεχνικές θωράκισης.

Η χειραγώγηση του μέσου επιτυγχάνεται με το να ληφθεί όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο σημείο της υποψίας της διαρροής και να διωχθεί μακριά από τους ανταγωνιστικούς υπερήχους. Απομονώστε τη περιοχή διαρροής μειώνοντας την ευαισθησία και πιέζοντας στην άκρη της εστίασης του ανιχνευτή με την εικαζόμενη περιοχή, ελέγχοντας μικρά τμήματα σε μια στιγμή. Από τη στιγμή που εμφανίζονται υπέρηχοι σε υψηλές συχνότητες, έχουν μικρό μήκος κύματος, και μπορεί συνήθως έτσι να μπλοκαριστούν ή θωρακιστούν.

Σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις, όταν η ανίχνευση διαρροών αποδεικνύεται δύσκολη στο συγκρότημα σταθερής λειτουργίας του επιλογέα συχνοτήτων, ο ήχος διαρροής θα πρέπει να παρακολουθείται από το «Φιλτράρισμα» των προβληματικών ήχων. Σε μια τέτοια περίπτωση,

ρυθμίστε τον επιλογέα συχνότητας μέχρι ο ήχος του φόντου να ελαχιστοποιηθεί και στη συνέχεια να προχωρήσει στο άκουσμα της διαρροής.

Μερικές από τις κοινές τεχνικές για την απομόνωση ανταγωνιστικών υπερηχογραφημάτων είναι:

- Χρησιμοποιήστε το σώμα σας για να προστατεύσετε την περιοχή δοκιμής για να ενεργήσει ως εμπόδιο για τους ανταγωνιστικούς ήχους.
- Τοποθετήστε ένα κουβά κοντά στην περιοχή της διαρροής και γυρίστε το έτσι ώστε να λειτουργεί ως ένα φράγμα μεταξύ της εξεταζόμενης περιοχής και των ανταγωνιστικών ήχων.
- Τυλίξτε το χέρι σας (με γάντια) γύρω από κορυφή του ανιχνευτή εστίασης-καουτσούκ έτσι ώστε ο δείκτης και ο αντίχειρας να βρίσκονται κοντά στο τέλος. Τοποθετήστε το υπόλοιπο χέρι σας στην περιοχή δοκιμής έτσι ώστε να υπάρχει ένα πλήρες φράγμα μεταξύ της εξεταζόμενης περιοχής και του θορύβου. Μετακινήστε το όργανο και το χέρι σας μαζί πάνω από τις διάφορες ζώνες δοκιμών.
- Μαζί με τη μέθοδο με το χέρι, ένα κουρέλι μπορεί να τυλιχτεί γύρω από τη κορυφή του ανιχνευτή εστίασης καουτσούκ. Πρέπει να ληφθεί κατάλληλη φροντίδα ώστε το άκρο του ρύγχους να μην μπλοκάρεται. Αυτή είναι συνήθως η πιο αποτελεσματική μέθοδος δεδομένου και χρησιμοποιεί τρία εμπόδια: τον ανιχνευτή εστίασης καουτσούκ, το χέρι και το κουρέλι.
- Όταν πρέπει να καλύπτεται μια μεγάλη περιοχή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανακλαστικό υλικό όπως συγκολλητή κουρτίνα ή ένα πανί για να ενεργήσουν ως εμπόδιο. Το φράγμα είναι σε θέση να ενεργεί ως ένα τείχος μεταξύ της εξεταζόμενης περιοχής και των ανταγωνιστικών ήχων. Μερικές φορές το εμπόδιο είναι ντυμένο από το ταβάνι μέχρι το πάτωμα, και άλλες φορές είναι κρεμασμένο πάνω από τα κάγκελα.

### **Ανίχνευση αδύναμων υπερήχων**

Η προηγούμενη συζήτηση επικεντρώθηκε στην περίπτωση που υπάρχει υπέρβαση των υπερήχων στο περιβάλλον και είναι δύσκολο να εντοπίσουμε την πηγή. Υπάρχουν επίσης και αντίθετες καταστάσεις, ειδικά στην ανίχνευση διαρροής, όταν ο σήμα του υπερήχου είναι ασθενές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι χειρισμοί που γίνονται για να δημιουργήσουν ή να ενισχύσουν την ένταση του υπερηχητικού σήματος. Η ανίχνευση διαρροών με υπερήχους με βάση την αναταραχή που δημιουργείται όταν ένα ρευστό εξέρχεται από ένα στενό άνοιγμα. Όταν η αναταραχή είναι υψηλή, το σήμα υπερήχων είναι αναλογικά δυνατό και αντίστροφα. Όταν ο ρυθμός διαρροής είναι χαμηλός, η αναταραχή είναι δύσκολα ανιχνεύσιμη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η πίεση στο σύστημα θα πρέπει να αυξηθεί (εάν είναι δυνατόν) για να ληφθεί



ένα καλύτερο σήμα. Εάν αυτή η μέθοδος δεν είναι πρακτική, ένας ενισχυτής διαρροής υγρού θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Ορισμένα ειδικά σχεδιασμένα υγρά παράγουν μια λεπτή μεμβράνη μέσω της οποίας διαφεύγει το αέριο. Υπό συνθήκες χαμηλής ροής, σχηματίζονται μικρές φυσαλίδες. Αυτές οι φυσαλίδες μπορεί να μην είναι ορατές με γυμνό μάτι. Ωστόσο, όταν αυτές οι φυσαλίδες καταρρέουν, δημιουργείται ένας υπέρηχος και μπορεί να διαβαστεί από τον ανιχνευτή ως τρίξιμο στα ακουστικά. Μπορεί να ανιχνευθούν διαρροές χαμηλής τάξης όπως  $1 \times 10^{-6}$  std. cc / s.

Μία άλλη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση ενός υπερηχητικού πομπού που ονομάζεται γεννήτρια τόνου. Αυτό χρησιμοποιείται συχνά με εξοπλισμό, όπως εναλλάκτες θερμότητας, δεξαμενές και τα κοίλα σκεύη. Η γεννήτρια τόνος τοποθετείται μέσα στη δεξαμενή. Θα δημιουργήσει ένα έντονο ομοιόμορφο σήμα υπερήχων. Ο ανιχνευτής τοποθετείται έξω. Εάν ανιχνεύσει το σήμα, αυτό αποτελεί ένδειξη διαρροής. Η προτιμώμενη μέθοδος για την ανίχνευση διαρροών είναι χρησιμοποιώντας πίεση ή κενό, αλλά η μέθοδος γεννήτριας τόνου είναι μια καλή εφεδρική μέθοδος για δύσκολες καταστάσεις.

## **8.2.4 Εφαρμογές υπερήχων**

### **Ανίχνευσης διαρροών**

Κατά την διάρκεια μιας διαρροής, ένα ρευστό (υγρό ή αέριο) κινείται από υψηλή πίεση σε μία χαμηλή πίεση. Όταν το αέριο ή το υγρό περνά διαμέσου του ελαττώματος στο σωλήνα ή του δοχείου, μια στροβιλώδης ροή δημιουργείται. Αυτή παράγει ένα ευρύ φάσμα του ήχου. Τα εξαρτήματα υπερήχων υψηλής συχνότητας των ήχων αυτών έχουν εξαιρετικά μικρά μήκη κύματος, και σύντομα τα σήματα του κύματος τείνουν να είναι αρκετά σχετικών κατευθύνσεων. Τα ισχυρά εξαρτήματα υπερήχων ακούγονται μέσα από ακουστικά και θεωρούνται ως προσαυξήσεις έντασης στο μετρητή υπερήχων. Μπορεί να δηλώσει ότι η υψηλή ένταση προκαλεί γενικά υψηλότερα επίπεδα υπερήχων.

### **Διαρροές Ατμού και αέρα**

Η ανίχνευση υπερήχων είναι πολύ αποτελεσματική για την ανίχνευση διαρροών, ιδιαίτερα για ανίχνευση διαρροών ατμού και αέρα. Αυτές οι διαρροές μπορεί να είναι ακριβές, αλλά πολλές εταιρείες τις αφήσουμε να περάσει απαρατήρητη. Το υπερηχογράφημα, όταν είναι κατάλληλα ανιχνεύσιμο και μετρήσιμο, παρέχει στο χρήστη τη θέση και τη σοβαρότητα της διαρροής. Κοινές εφαρμογές για το υπερηχογράφημα περιλαμβάνουν την ανίχνευση διαρροών για πεπιεσμένο αέρα και άλλα αέρια συστήματα, συστήματα κενού, φλάντζες και τσιμούχες, και παγίδες ατμού. Ο υπέρηχος μπορεί επίσης να ανιχνεύσει τη βαλβίδα εμφύσησης. Δεδομένου ότι πολλές μικρές διαρροές είναι δύσκολο να βρεθούν απλά με την ακρόαση, η τεχνική

υπερήχων βοηθά να ανακαλύψετε τις πολλές μικρές διαρροές που μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές απώλειες για μεγάλες χρονικές περιόδους.

### **Διαρροές σε εναλλάκτες θερμότητας, λέβητες και συμπυκνωτές**

Τα μονοπάτια διαρροής σε λέβητες, εναλλάκτες θερμότητας και συμπυκνωτές είναι ο σωλήνας, τα διάτρητα φύλλα και τα περιβλήματα. Ο ανιχνευτής υπερήχων εφαρμόζεται προκειμένου να εντοπιστούν διαρροές με τρεις τρόπους:

1. Διαρροές πίεσης
2. Διαρροές κενού
3. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο υπερήχων γεννήτριας τόνου.

Όταν ανιχνεύονται διαρροές κενού, ο στροβιλισμός θα συμβεί εντός του θαλάμου κενού. Για το λόγο αυτό, η ένταση του ήχου είναι μικρότερη από εκείνη της πίεσης διαρροής. Αν και η μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική για χαμηλές, μέτριες προς χονδρές διαρροές, η ευκολία της ανίχνευσης υπερήχων την καθιστά χρήσιμη για τα περισσότερα προβλήματα διαρροής κενού. Ενώ μπορεί να είναι αναγκαίο μια μονάδα να τεθεί εκτός δικτύου για να επιθεωρηθούν οι διαρροές, είναι συχνά δυνατό να εκτελεστεί επιθεώρηση, μέσα στο δίκτυο ή σε μερική φόρτωση με υπερήχους.

### **Μηχανική επιθεώρηση και επιθεώρηση ρουλεμάν**

Ο υπέρηχος είναι επίσης κατάλληλος στην ανίχνευση των πρόωρων αποτυχιών στα έδρανα. Η επιθεώρηση των υπερήχων των εδράνων είναι χρήσιμη για την αναγνώριση της αρχής της βλάβης κόπωσης, χάραξη από τις φέρουσες επιφάνειες, πλημμυρισμός ή έλλειψη λίπανσης. Στα σφαιρικά ρουλεμάν, όπως το μέταλλο του αυλακιού κύλισης, οι σφαίρες ή το ρουλεμάν υφίστανται κόπωση, και δημιουργείται μια λεπτή παραμόρφωση. Αυτή η παραμόρφωση του μετάλλου παράγει αύξηση στην εκπομπή των υπερηχητικών ηχητικών κυμάτων.

Κατά τη δοκιμή, μια αλλαγή εύρους 12-50 φορές της αρχικής μέτρησης είναι ένδειξη αρχόμενης αποτυχίας των ρουλεμάν. Όταν μια ένδειξη υπερβαίνει τις προηγούμενες κατά 12 dB, τότε μπορεί να υποθεθεί ότι στο έδρανο αρχίζει μια μορφή αστοχίας. Αυτό ισχύει και για την παρακολούθηση των εδράνων σε ένα εύρος συχνοτήτων από 24-50 kHz.

Στην περίπτωση της έλλειψης λίπανσης, τα επίπεδα ήχου αυξάνονται και η λιπαντική ταινία μειώνεται. Μια αύξηση της τάξης των 8 dB και πάνω από την αρχική τιμή συνοδεύεται από έναν ομοιόμορφο ήχο που υποδεικνύει έλλειψη λίπανσης. Για να αποφευχθεί η υπερλίπανση, δεν πρέπει να λιπαίνουμε αν διατηρούνται η βασική μέτρηση και η ποιότητα του ήχου.

Οι υπερηχητικές συχνότητες ανιχνεύονται από το σύστημα αναπαράγονται ως έντονοι ήχοι. Αυτό το σήμα μπορεί να βοηθήσει ένα χρήστη στον προσδιορισμό των προβλημάτων του ρότορα. Ακούγοντας, συνιστάται ο χρήστης να εξοικειώνεται με τους ήχους ενός υγιούς

ρουλεμάν, που ακούγονται συχνά ως ένας βιαστικός ή θόρυβος σαν σφύριγμα. Το τρίξιμο ή ο τραχύς ήχος υποδηλώνουν το στάδιο της αποτυχίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μια κατεστραμμένη σφαίρα εκπέμπει έναν ήχο «κλικ», ενώ μια υψηλή ένταση, ένας ομοιόμορφος και τραχύς ήχος μπορεί να υποδεικνύει ένα κατεστραμμένο αυλάκι ή μια ομοιόμορφη βλάβη της σφαίρας. Οι δυνατοί ορμητικοί ήχοι παρόμοιοι με τον κανονικό βιαστικό ήχο ενός υγιούς ρουλεμάν, ελαφρώς όμως σκληρότεροι μπορεί να υποδεικνύουν έλλειψη λίπανσης.

Η παρακολούθηση των ρουλεμάν χαμηλής ταχύτητας είναι επίσης δυνατή. Λόγω του εύρους ευαισθησίας και της ρύθμισης της συχνότητας, είναι πολύ πιθανό να ακούσει την ακουστική ποιότητα των εδράνων αργής ταχύτητας. Σε εξαιρετικά αργά έδρανα (λιγότερο από 25 στροφές ανά λεπτό), συχνά είναι απαραίτητο να αγνοήσουμε το μέτρο εξόδου και μόνο να ακούσουμε τον ήχο των ρουλεμάν (ακουστικά). Σε αυτές τις ακραίες καταστάσεις, τα ρουλεμάν είναι συνήθως μεγάλα (1-2 στο. και μεγαλύτερο) και αλειμμένα με λιπαντικό υψηλού ιξώδους.

Συχνά, δεν ακούγεται ήχος, μιας και το γράσο θα απορροφήσει το μεγαλύτερο μέρος της ακουστικής ενέργειας. Αν ακούγεται ήχος, συνήθως σαν τρίξιμο, είναι ένδειξη ελαττώματος. Στα περισσότερα έδρανα αργής ταχύτητας, είναι δυνατό να προσδιορισθεί ένα βασικό επίπεδο το οποίο θα παρακολουθείται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Προτείνεται να χρησιμοποιείται η μέθοδος αποσβεστήρα της καμπύλης μεταφοράς, δεδομένου ότι η ευαισθησία θα πρέπει συνήθως να είναι υψηλότερη από το κανονικό.

### **Επιθεώρηση βαλβίδας και παγίδας ατμού**

Η βαλβίδα ατμού και οι παγίδες έχουν μια τάση να διαρρέουν. Όταν συμβαίνει αυτό, μπορεί να αποδειχθεί αρκετά ακριβό από την άποψη της ποιότητας των προϊόντων, της ασφάλειας και της απώλειας ενέργειας. Η λειτουργία των βαλβίδων θα επηρεάσει τον τρόπο που ρέουν τα υγρά μέσα από ένα σύστημα. Οι βαλβίδες και ο ανιχνευτής επαφής στην κάτω πλευρά συνήθως ελέγχονται για διαρροές. Αυτό επιτυγχάνεται με την πρώτη ένδειξη της από πάνω πλευράς και ρυθμίζοντας την ευαισθησία να διαβάσει περίπου το μισό από τη πλήρη σκάλα. Η προς τα κάτω πλευρά μπορεί τότε να μετρηθεί και να η ένταση του ήχου μεταξύ των δύο να συγκριθεί. Εάν το σήμα είναι σημαντικά χαμηλότερο προς τα πάνω, η βαλβίδα θεωρείται κλειστή. Αν είναι πιο δυνατά από ό, τι προς τα πάνω και συνοδεύεται από έναν βιαστικό ήχο, θεωρείται ότι υπάρχει διαρροή.

Οι παγίδες ατμού μπορεί επίσης να ελεγχθούν εύκολα με μεταφραστές υπερήχων (όργανα αερομεταφερόμενων υπερήχων). Χρησιμοποιείται και πάλι ένας αισθητήρας επαφής για να επιθεωρήσει μια παγίδα ατμού. Ακούγοντας τη παγίδα λειτουργίας και παρατηρώντας το μετρητή μπορεί να ερμηνευθεί η κατάσταση της παγίδας. Η ταχύτητα και η απλότητα αυτού του τύπου επιτρέπει να επιθεωρείται τακτικά κάθε παγίδα σε ένα εργοστάσιο. Οι βαλβίδες και παγίδες ατμού λειτουργούν με διαφορετικούς τρόπους. Οι ανιχνευτές υπερήχων καθιστούν

εύκολο να προσαρμοστούν για τις διαφορές αυτές και να προσδιοριστεί εύκολα στις συνθήκες λειτουργίας, ενώ οι βαλβίδες και οι παγίδες είναι σε λειτουργία.

## Ηλεκτρική επιθεώρηση

Η τεχνική υπερήχων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση προβλημάτων σε ηλεκτρικά εξαρτήματα όπως μονωτήρες, καλώδια, πίνακες, ζυγούς, ηλεκτρονόμους, διακόπτες, και κουτιά διακλάδωσης. Στους υποσταθμούς, μπορούν να ελεγχθούν τα εξαρτήματα όπως μονωτήρες, μετασχηματιστές και οι δακτύλιοι. Η αποτυχία αυτών των συστατικών είναι απαράδεκτη σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, θα πρέπει να παρακολουθούνται σε τακτική βάση. Υπάρχουν βασικά τρεις τύποι των ηλεκτρικών προβλημάτων που μπορούν να ανιχνευθούν με τη χρήση υπερήχων:

1. Ηλεκτρικά τόξα: Ένα τόξο εμφανίζεται όταν ο ηλεκτρισμός ρέει μέσα στο χώρο, όπως μια αστραπή.
2. Κορόνα: Όταν η τάση σε ένα ηλεκτρικό αγωγό, όπως μία κεραία ή γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης, υπερβαίνει την ανώτατη τιμή, ο αέρας γύρω από αυτό αρχίζει να ιονίζεται για να σχηματιστεί μία μπλε ή μωβ λάμψη.
3. Εντοπισμός: Συχνά αναφέρεται ως «Baby Arcing» (μικρά ηλεκτρικά τόξα), που ακολουθεί την πορεία της κατεστραμμένης μόνωσης.

Αν και ο υπέρηχος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση των ηλεκτρικών προβλημάτων σε χαμηλής, μέσης και υψηλής τάσης συστήματα, χρησιμοποιείται γενικά σε συστήματα πάνω από 2 kV. Όταν η ηλεκτρική ενέργεια διαφεύγει σε γραμμές υψηλής τάσης ή όταν πηδάει ένα κενό στην ηλεκτρική σύνδεση, διαταράσσει τα μόρια του αέρα γύρω από αυτό και παράγει υπερήχους. Αυτός ο ήχος θα είναι συχνά αντιληπτός ως τρίξιμο ή ήχος «τηγανίσματος». Σε άλλες καταστάσεις αυτό ακούγεται σαν βουητό.

Η μέθοδος για την ανίχνευση του ηλεκτρικού τόξου και διαρροής κορόνας είναι παρόμοια με τη διαδικασία που περιγράφεται στην ανίχνευση διαρροών. Αντί να ακούσει ένα βιαστικό ήχο, ο χρήστης θα ακούσει παράσιτα ή βουητό. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στον εντοπισμό προβλημάτων εντοπισμού. Σε κλειστούς διακόπτες, η συχνότητα παρακολούθησης υπερβαίνει κατά πολύ τη συχνότητα των σοβαρών σφαλμάτων που προσδιορίζονται από το υπέρυθρο. Συνιστάται ότι και οι δύο δοκιμές να χρησιμοποιηθούν με κλειστούς διακόπτες.

Σε συστήματα χαμηλότερης τάσης, μια γρήγορη σάρωση του ζυγού συχνά θα συλλέξει μια χαλαρή σύνδεση. Ο έλεγχος των συστημάτων διακλάδωσης μπορεί να αποκαλύψει ηλεκτρικά τόξα. Όπως και με την ανίχνευση διαρροών, η όσο πιο κοντά γίνεται στην περιοχή διαρροής, τόσο πιο δυνατό είναι το σήμα. Εάν το δίκτυο ελέγχεται και το σήμα δεν φαίνεται να είναι αρκετά έντονο για να είναι ανιχνεύσιμο από το έδαφος, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε ένα

υπερηχητικό συγκεντρωτή κυματομορφής (ένα παραβολικό κάτοπτρο), ο οποίος θα διπλασιάσει την απόσταση ανίχνευσης του συστήματος και θα παράσχει πιο εντοπισμένη ανίχνευση. Επιπλέον, τα προβλήματα του RFI και επίσης του HBH έχουν επιπτώσεις στα δίκτυα επικοινωνιών. Οι καταστάσεις αυτές παράγουν υπέρηχους και μπορούν να ανιχνευθούν χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική.

### **Έλεγχος συμπίεσής**

Οι συμπίεστες είναι ζωτικής σημασίας για κάθε σύστημα πεπιεσμένου αερίου. Η ρουτίνα επιθεώρησης και συντήρησης μπορεί να αποτρέψει τον απροσδόκητο χρόνο διακοπής. Παρά το γεγονός ότι κάθε τύπος του συμπίεστή μπορεί να επιθεωρηθεί με υπέρηχους, η πιο κοινή εφαρμογή είναι σε μεγάλους παλινδρομικούς συμπίεστες. Συγκεκριμένα, η λειτουργία της βαλβίδας σε αυτούς τους συμπίεστες είναι κρίσιμη. Μικρές διαρροές βαλβίδων μπορεί γρήγορα να οδηγήσει σε μεγάλες διαρροές, οι οποίες επηρεάζουν την παραγωγή και την ασφάλεια των εγκαταστάσεων.

### **8.3 Η υπέρυθρη θερμογραφία**

Οποιοδήποτε αντικείμενο έχει θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπει ενέργεια. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία ανεβαίνει, η εκπομπή ενέργειας αυξάνεται επίσης. Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μια τεχνική που παράγει μια ορατή γραφική παράσταση ή μια θερμογραφική εικόνα της θερμικής ενέργειας που ακτινοβολείται από τα αντικείμενα. Η θερμογραφία χρησιμοποιεί ένα τμήμα της υπέρυθρου ζώνης του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεταξύ περίπου 1 και 14 μικρά (microns). Το εύρος ζώνης συνήθως συνδέεται με την υπέρυθρη εκπεμπόμενη ενέργεια που παράγεται από τις θερμοκρασίες του αντικειμένου από -20° C και υψηλότερες.

Τα ηλεκτρονικά όργανα που χρησιμοποιούνται στην υπέρυθρη θερμογραφία χρησιμοποιούν ένα σύστημα φακών για να επικεντρωθεί η αόρατη ενέργεια που ακτινοβολείται από την επιφάνεια ενός αντικειμένου πάνω στον υπέρυθρο ευαίσθητο ανιχνευτή (εξ). Τα διάφορα επίπεδα ενέργειας που μετρούνται από τον ανιχνευτή (εξ) και, στη συνέχεια, μετασχηματίζονται σε ορατή εικόνα με κάθε επίπεδο ενέργειας που αντιπροσωπεύεται από ένα διαφορετικό χρώμα ή επίπεδο κλίμακας του γκρι. Αυτή η εικόνα μπορεί να την δει ο χρήστης σε μια οθόνη LCD ή CRT. Η εικόνα μπορεί να αποθηκευτεί ψηφιακά ή σε βίντεο, για την αναθεώρηση, την ανάλυση και την υποβολή εκθέσεων σε μεταγενέστερο στάδιο. Όλα τα συστήματα υπέρυθρης ακτινοβολίας (από τα απλά μέχρι τα σύνθετα) είναι ευαίσθητα μόνο στην υπέρυθρη ενέργεια που ακτινοβολείται. Δεν μετρούν πραγματικά τη θερμοκρασία. Είναι χρήσιμες σε εφαρμογές όπου η μεταβολή της θερμοκρασίας, η αντανάκλαση του, η κατάσταση της επιφάνειας του υλικού μπορεί να προκαλέσει μια διαφορά στο εκπεμπόμενο επίπεδο ενέργειας που ανιχνεύεται από την υπέρυθρη κάμερα.

Η νέα γενιά των υπέρυθρων καμερών που είναι γνωστές ως συστοιχίες εστιακού επιπέδου (FPAs). Οι υψηλής ανάλυσης υπέρυθρες εικόνες είναι δυνατές τώρα με αυτά τα εμπορικά διαθέσιμα μέσα, λόγω του γεγονότος ότι οι περισσότερες FPA χρησιμοποιούν πάνω από 75000 στοιχεία ανίχνευσης στην παραγωγή κάθε υπέρυθρης εικόνας. Οι ραδιομετρικές FPA χρησιμοποιούν έναν σύστημα ηλεκτρονικού υπολογιστή on-μπόρντ για να εκτελέσουν μια σειρά από πολύπλοκες λειτουργίες για τον υπολογισμό θερμοκρασιών. Αυτές οι θερμοκρασίες ισχύουν μόνο όταν ένας εκπαιδευμένος και έμπειρος χειριστής εισάγει μια σειρά από εύστοχες παραμέτρους. Η θερμογραφία είναι μια χρήσιμη προγνωστική τεχνική συντήρησης με τους ακόλουθους τρόπους:

- Δεν κάνει επαφή με την επιφάνεια.
- Η τεχνική δεν περιλαμβάνει επικίνδυνες ενέργειες.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επικίνδυνες ζώνες.
- Δεν επηρεάζεται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.
- Όπως και σε άλλες προγνωστικές τεχνικές μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενώ τα συστήματα είναι σε λειτουργία.
- Παρέχει άμεση πληροφόρηση.
- Τα δεδομένα μπορούν να συλλέγονται και να αποθηκεύονται σε ψηφιακή μορφή.

Ωστόσο, η θερμογραφία έχει μερικά μειονεκτήματα, όπως:

- Το κόστος του υλικού μπορεί να είναι αρκετά υψηλό.
- Μερικά συστήματα έχουν περιορισμένα λογισμικά.
- Η ικανότητα ακτινοβολίας του αντικειμένου πρέπει να υπολογίζεται ή πρέπει να είναι γνωστή.
- Η ατμόσφαιρα θα πρέπει να είναι ομογενής σε σχέση με τη θερμική ενέργεια - οποιαδήποτε πηγή ακτινοβολίας κοντά στην περιοχή που παρακολουθείται μπορεί να επηρεάζει τις θερμικές σαρώσεις.
- Η απόσταση, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσουν τη ποιότητα των εικόνων.

### **8.3.1 Εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας**

Η θερμογραφία εφαρμόζεται για την ανίχνευση σφαλμάτων στους ακόλουθους τομείς.

#### **Ηλεκτρικός εξοπλισμός**

- Συστήματα ψύξης, σφάλματα γείωσης, κυκλοφορία ρευμάτων, πλαστικοποιήσεις, ρωγμές μόνωσης.

- Βοηθητικός εξοπλισμός όπως ασφάλειες, επαφές ρελέ, διακόπτες, πίνακες διανομής και μετασχηματιστές μπορεί να υποφέρουν από χαλαρές συνδέσεις, ανισόρροπα φορτία ή διάβρωση, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε θέρμανση αντίστασης (Σχήμα 8.3). Οι καταστάσεις αυτές μπορούν να προσδιοριστούν με τη θερμογραφία.
- Σε ένα τριφασικό σύστημα, οι άνισες θερμοκρασίες μπορεί να υποδεικνύουν ανισορροπία στις φάσεις.



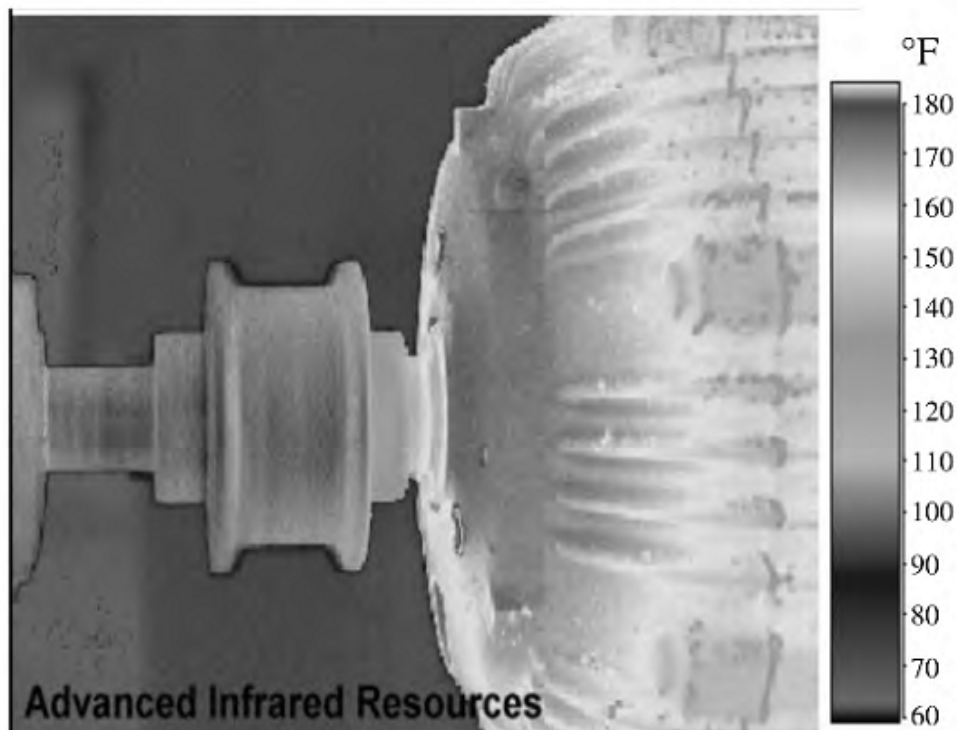
**Σχήμα 8.3** Θέρμανση ηλεκτρικής αντίστασης σε μια ηλεκτρική σύνδεση (πηγή: [www.cinde.ca](http://www.cinde.ca))

Οι θυρίστορες χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν την ταχύτητα των μεγάλων κινητήρων. Όταν αυτοί είναι συνδεδεμένοι παράλληλα καθίσταται δύσκολο να ανιχνευθεί αν ένας από αυτούς έχει ένα υποστεί κάποιο πρόβλημα. Είναι πιθανό ότι μια ασφάλεια έχει καεί, αλλά αυτό μπορεί να μην είναι δυνατόν για την ανίχνευση από την αλλαγή στην ταχύτητα του κινητήρα. Εκτός αυτού, είναι επικίνδυνο να επιθεωρηθεί ένα ζωντανό ηλεκτρικό σύστημα. Η

θερμογραφία είναι χρήσιμη, υπό αυτές τις συνθήκες. Σε συστήματα υψηλής τάσης, η θερμογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση των μετασχηματιστών, των γραμμών ισχύος, τις ασφάλειες, τις υποδοχές ασφαλειών, την υπερθέρμανση στους τελεστές ισχύος πυκνωτών, τους διακόπτες, τους πίνακες ελέγχου, τους μονωτές, τους αυτόματοι διακόπτες διαρροής, τις επαφές ρελέ και τις συνδέσεις.

Σε ηλεκτρικούς κινητήρες (Σχήμα 8.4), μπορεί να ανιχνευθούν τα ακόλουθα προβλήματα μέσω της χρήσης της θερμογραφίας:

- Προβλήματα στο σύστημα ψύξης του περιβλήματος του κινητήρα, κακές ηλεκτρικές συνδέσεις, υπερθέρμανση του πλαισίου, υπερθέρμανση του σώματος του δρομέα και των περιελίξεων, πλαστικοποίηση καυτών σημείων στους πυρήνες, προβλήματα στα τυλίγματα του στάτορα, ρωγμές μόνωσης στο τέλος των τυλιγμάτων του στάτορα, υπερθέρμανση των ρουλεμάν και τσιμουχών.
- Σε κινητήρες με συλλέκτες και ρουλεμάν, οι θερμικές εικόνες μπορεί να υποδεικνύουν ανομοιόμορφη φθορά. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω της κακής επαφής της «βούρτσας» με τα τμήματα του συλλέκτη.





**Σχήμα 8.4** Μία ζεστή «φωλιά» εδράνου ενός ηλεκτροκινητήρα (πηγή: [www.infraredthermography.com](http://www.infraredthermography.com))

### Μηχανολογικός εξοπλισμός

- Η λανθασμένη ευθυγράμμιση ή οι λυγισμένοι άξονες μπορούν να ανιχνευθούν με θερμογραφία. Στις περιπτώσεις της κακής ευθυγράμμισης, η θερμική τριβή δημιουργείται από την ολίσθηση που δημιουργείται με επαφή των γραναζιών σε μια σύζευξη γραναζιών ή από την τριβή μεταξύ των εύκαμπτων μελών άλλων τύπων συνδέσμων. Αυτό οδηγεί σε απώλεια ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, η οποία μπορεί να παρακολουθηθεί με θερμική απεικόνιση.
- Η ελαττωματική παλινδρομική συμπίεση των βαλβίδων αυξάνει τη θερμοκρασία επειδή το θερμό πεπιεσμένο αέριο κινείται μπρος πίσω κατά μήκος της βαλβίδας. Μερικοί συμπιεστές έχουν πολλές βαλβίδες ανά κύλινδρο. Μια θερμική σάρωση μπορεί να ανιχνεύσει πολύ γρήγορα την ελαττωματική βαλβίδα.
- Η ανεπαρκής λίπανση έχει ως αποτελέσματα τη θερμική τριβή, η οποία μπορεί να ανιχνευθεί με θερμογραφία.
- Τα κατεστραμμένα ρουλεμάν, τα γρανάζια, οι αλυσίδες, οι συμπλέκτες, η ολίσθηση του ιμάντα και η φθορά ζώνης μπορεί να ανιχνευθούν με τη χρήση θερμογραφίας.
- Μπορούν επίσης να εντοπιστούν διασυνδέσεις και ενεργοποιητές με υπερβολική τριβή επαφής.
- Μπορεί να εντοπιστεί διαρροή / πέρασμα των βαλβίδων.
- Η ανίχνευση διαρροών στα υδραυλικά συστήματα, τα οποία θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν διαρροές σε όλο το έμβολο και τη ράβδο, σε διάφορους τύπους βαλβίδων και κουτιά βαλβίδας, αντλίες, αγωγούς, εξαρτήματα και σωλήνες.
- Η μέτρηση της στάθμης της δεξαμενής είναι δυνατή με τη χρήση της θερμογραφίας (Σχήμα 8.5).



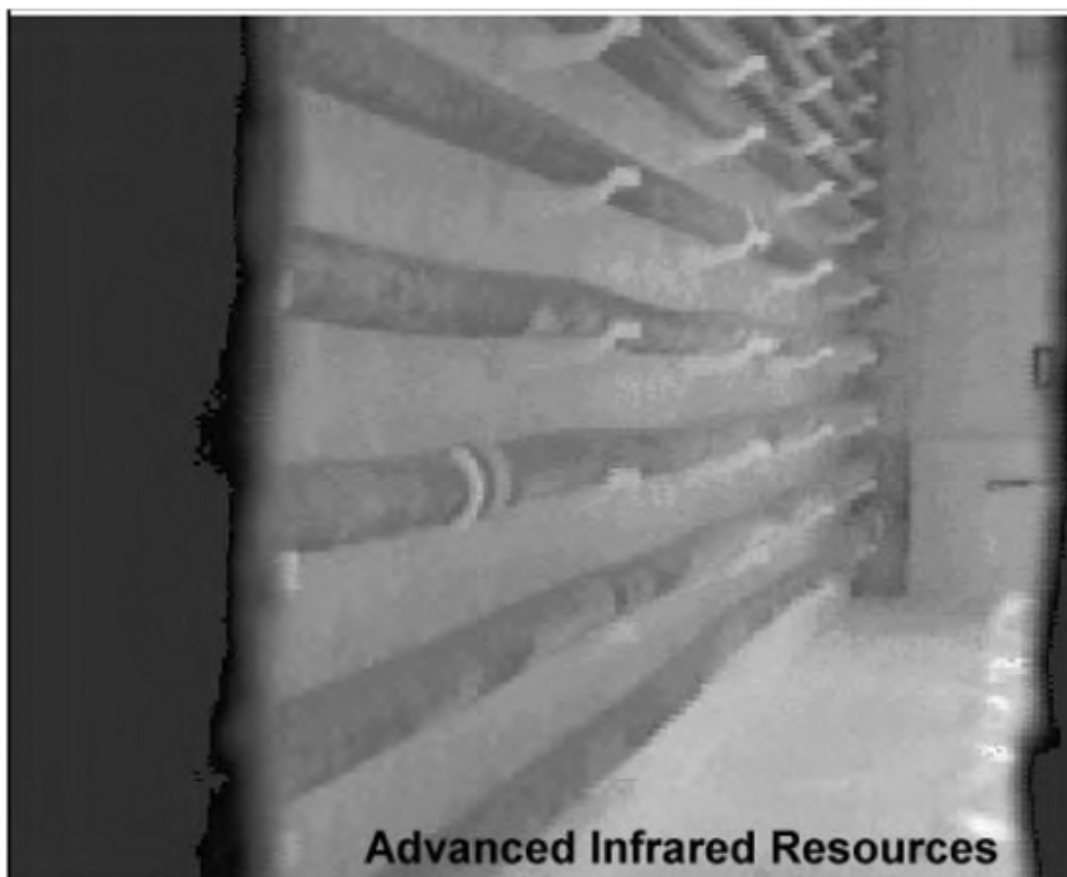
**Σχήμα 8.5** Παρατηρήστε τη στάθμη υγρού και την καθίζηση της δεξαμενής (εικόνα με την άδεια: [www.infraredthermography.com](http://www.infraredthermography.com))

### Τα ενεργειακά συστήματα

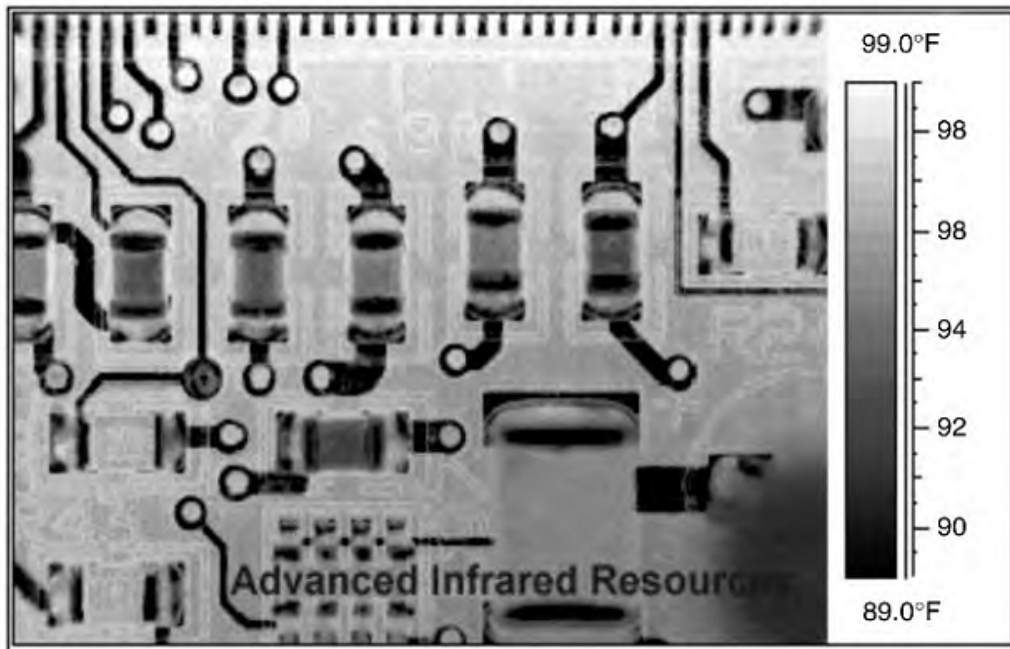
- Συστήματα λέβητα και ατμού, καπνοδόχοι, εναλλάκτες θερμότητας και ενισχυτές. Μπορούν σε αυτήν την περίπτωση, να αξιολογηθούν η ακεραιότητα της μόνωσης, της πλινθοδομής και η κακή άρθρωση στους φούρνους και στους κλιβάνους. Μπορεί να προσδιοριστεί η κατάσταση των πυρίμαχων αγωγών. Η λειτουργία των σομπών υψικαμίνου, των καυστήρων μοτίβων και των στοιχείων φλόγας και υδρόψυκτους μπορούν να παρακολουθούνται με θερμογραφία (Σχήμα 8.6).
- Μπορούν να παρακολουθούνται οι αναθερμαντήρες, η μόνωση, τα κτίρια, οι στέγες. Μπορούν να ανιχνευθούν οι διαρροές θέρμανσης και κλιματισμού.

## Ηλεκτρονικά συστήματα

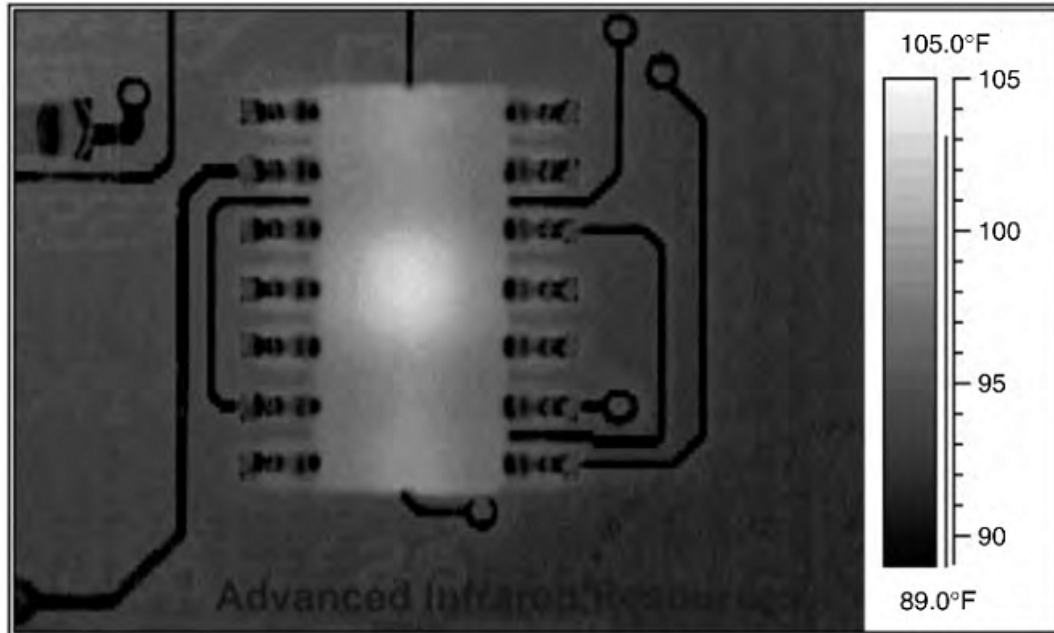
Στα διακριτά εξαρτήματα, στις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB) και στην ηλεκτρονική σύνδεση μπορεί να γίνει έλεγχος ποιότητας με θερμικές εικόνες. Τα ηλεκτρονικά και μικροηλεκτρονικά συστατικά όπως τα PCB από μικρά εξαρτήματα των οποίων η ατομική θερμοκρασία δεν μπορεί να παρακολουθείται. Είναι γνωστό ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες θα μπορούσαν εκθετικά να μειώσουν τη διάρκεια ζωής των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Εξελιγμένα θερμογραφικά συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για αυτόματη επιθεώρηση, συμπληρώνουν τα πλήρη PCB με τη μέτρηση του θερμικού περιεχομένου τους. Για πολύ μικρά εξαρτήματα, χρησιμοποιούνται για θερμική παρακολούθηση υπέρυθρα μικροσκόπια (Σχήμα 8.7).



**Σχήμα 8.6** Μια εικόνα κλιβάνου που επιθεωρείται η πυρίμαχη κατάσταση (εικόνα με την άδεια: [www.infraredthermography.com](http://www.infraredthermography.com))



Σχήμα 8.7 (α)



Σχήμα 8.7 (β) Θερμογραφικός έλεγχος των PCB (εικόνα με την άδεια: [www.infraredthermography.com](http://www.infraredthermography.com))

## 8.4 Επίλογος

Ο εξοπλισμός σε κίνδυνο στέλνει σήματα που δεν εμπίπτουν στο εύρος αντίληψης από τις ανθρώπινες αισθήσεις. Στην αναζήτηση για την έγκαιρη ανίχνευση αυτών των σημάτων, εξελίχθηκαν τεχνικές όπως οι υπέρηχοι και η υπέρυθρη θερμογραφία ως επιπλέον τεχνικές προγνωστικής συντήρησης.

Μέσα από την τεχνολογία των υπέρηχων, μπορούμε να ακούσουμε ήχους από το ακουστικό φάσμα. Αυτοί οι ήχοι μπορεί να υποδείξουν ελαττώματα στα μηχανήματα.

Ένας γρήγορος τρόπος για τους ανθρώπους να μάθουν και να πιστέψουν είναι η αίσθηση της όρασης. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να μεταφερθούν οπτικά παρά με οποιαδήποτε άλλη αίσθηση. Αυτή είναι η δύναμη της υπέρυθρης θερμογραφίας. Η τεχνική δημιουργεί εικόνες που γραφικά απεικονίζουν φαινόμενα που κανονικά δεν είναι ορατά στο ανθρώπινο μάτι.

Και οι δύο αυτές τεχνικές έχουν τα όριά τους, αλλά για ορισμένες εφαρμογές είναι η καλύτερη επιλογή.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] *Book-Cornelius Scheffer Ph.D MEng, Paresh Girdhar B.Eng MechEng Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance 2004*
- [2] *Bearings (mechanical)* [http://en.wikipedia.org/wiki/Bearing\\_%28mechanical%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Bearing_%28mechanical%29)
- [3] *Stroboscope* <http://en.wikipedia.org/wiki/Stroboscope>