

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΠΙΤΑΡΑΚΗΣ Κ. ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΡ. ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

ΠΑΤΡΑ 2015

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στον έλεγχο ταλαντώσεων σε μηχανές με περιστρεφόμενα στοιχεία. Σκοπός της εργασίας είναι να κατανοήσουμε τη διαδικασία της ζυγοστάθμισης. Θα περιγράψουμε τα είδη της όπως και βασικές της έννοιες καθώς και τρόπους επίλυσης της αζυγοσταθμίας.

Αρχικά γίνεται αναφορά στην έννοια της ζυγοστάθμισης και σε διάφορες αιτίες που δημιουργούν αζυγοσταθμίες καθώς και στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη διαδικασία της ζυγοστάθμισης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διάφορα είδη αζυγοσταθμιών και το πως πρέπει να τις μετράμε και να τις διορθώνουμε. Ακόμα γίνεται αναφορά σε πρότυπα όπως το ISO 1940 καθώς και στα δύο είδη ζυγοστάθμισης. Τέλος, μέσα από όλη την εργασία προκύπτουν και ορισμένα συμπεράσματα.

Η παρούσα πτυχιακή βοήθησε τον συγγραφέα στην απόκτηση γνώσεων, στην έννοια της ζυγοστάθμισης καθώς και στη κατανόηση των διαφόρων αποτελεσμάτων από αυτή τη διαδικασία.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Τσινόπουλο Στέφανο, καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε για τη καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη συμπαράσταση και την υπομονή που έδειξαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας ιδιαίτερα το τελευταίο διάστημα της συγγραφής της.

Πιταράκης Εμμανουήλ
Σεπτέμβριος 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι ο έλεγχος ταλαντώσεων σε μηχανές με περιστρεφόμενα στοιχεία.

Στην αρχή της εργασίας γίνεται μια εισαγωγή για την έννοια και τον ορισμό της ζυγοστάθμισης καθώς και αιτίων και αποτελεσμάτων από αυτήν. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε διάφορα είδη αζυγοσταθμιών και προτύπων.

Εν συνέχεια η εργασία επικεντρώνεται στα δύο είδη της ζυγοστάθμισης, τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνονται και τα αποτελέσματα που επιφέρει η διαδικασία αυτή στις μηχανές που αποτελούνται από περιστρεφόμενα μέρη. Επιπλέον αναφορά γίνεται και στους τρόπους με τους οποίους πρέπει να κάνουμε τις μετρήσεις των αζυγοσταθμιών και με ποιον τρόπο να τις διορθώνουμε. Ακολουθεί η περιγραφή των βασικών αρχών της ζυγοστάθμισης καθώς και τι πρότυπα να ακολουθούμε, όπως και τι ανοχές να επιλέγουμε.

Στα τελευταία κεφάλαια της εργασίας παρουσιάζονται οι προδιαγραφές των μηχανών ζυγοστάθμισης και κάποια συμπεράσματα που προκύπτουν μέσα από αυτή την εργασία.

ABSTRACT

The present postgraduate thesis deals with the vibration control in rotating machines.

In the first chapter there is an introduction in the significance and definition of balancing as well as the causes and effects that it provokes. Furthermore, there is a reference to different types of unbalance.

Moreover, the study concentrates on the two type of balancing, the way that they can be achieved and how this procedure affects the rotating machines. The analysis focuses on the way the unbalance measurements are done and how some refinements should be made. Finally, there is a report of the basic principle of balancing and a statement of templates that should be followed and to which extent some tolerance can be allowed.

In the final chapters the standards of balancing machines are specified as well as some states that come to a conclusion from the previous analysis.

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ABSTRACT

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΣΗ.....	1
1.1 Η έννοια της ζυγοστάθμισης.....	1
1.2 Η ζυγοστάθμιση δεν αποτελεί μια επιπρόσθετη δαπάνη.....	2
1.3 Δόνηση, αιτίες, αποτελέσματα.....	3
1.3.1 Τι είναι δόνηση.....	3
1.3.2 Απλή δόνηση.....	4
1.3.3 Σύνθετη δόνηση.....	4
1.4 Απόσβεση.....	5
1.5 Ποια είναι η αιτία των κραδασμών.....	5
2. ΔΙΑΦΟΡΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	6
2.1 Δοκιμαστική ρότορας και παρουσία διαφόρων προβλημάτων	6
2.2 Ορισμός ενός αζυγοστάθμητου ρότορα.....	7
2.3 Συγκεκριμένη αζυγοσταθμία.....	7
2.4 Πηγές αζυγοσταθμίας.....	8
2.5 Δύναμη, αζυγοσταθμία και ταχύτητα	9
2.6 Πως ζυγοσταθμούμε. Τι είναι ζυγοστάθμιση.....	10
2.7 Ζυγοστάθμιση ρότορα.....	11
2.8 Άξονες ρότορα.....	12
2.9 Ανασκόπηση ορισμών.....	12
2.10 Ζυγοστάθμιση στο πεδίο εφαρμογής.....	13
2.11 Δύναμη/Δόνηση.....	14
2.12 Χαρακτηριστικά ακαμψίας ρότορας.....	14
3. ΕΙΔΗ ΑΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΩΝ.....	15
3.1 Στατική αζυγοσταθμία.....	15
3.1.1 Ζεύγος αζυγοσταθμίας.....	16
3.2 Δυναμική αζυγοσταθμία.....	17
3.3 Αζυγοσταθμία ενός επιπέδου- 1.....	18
3.3.1 Αζυγοσταθμία ενός επιπέδου- 2.....	19
3.3.2 Αζυγοσταθμία ενός επιπέδου- 1α.....	19
3.3.3 Αζυγοσταθμία ενός επιπέδου- 2α.....	20
3.3.4 Δύο αζυγοσταθμίες.....	21
3.4 Διανυματική πρόσθεση.....	21
3.5 Αζυγοσταθμία σε δύο επίπεδα.....	22
3.6 Αζυγοσταθμία έξω από τα ρουλεμάν.....	23
3.7 Διαχωρισμός επιπέδου.....	24
4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ.....	25
4.1 Ρύθμιση της μηχανής.....	25
4.2 Μετράμε και έπειτα διορθώνουμε την αζυγοσταθμία.....	26
4.3 Διόρθωση.....	26
4.3.1 Τρόποι διόρθωσης.....	27
4.4 Ποια είναι τα όρια.....	28
4.5 Καταγραφή του θορύβου.....	29

5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΟΧΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΑ.....	30
5.1 Η σωστή ανοχή.....	30
5.2 Πρότυπα.....	31
5.2.1 ISO 1940.....	31
5.2.2 API 610.....	32
6. ΕΙΔΗ ΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΣΗΣ.....	33
6.1 Ζυγοστάθμιση ενός επιπέδου.....	33
6.2 Ζυγοστάθμιση δύο επιπέδων.....	37
7. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΣΗΣ.....	45
7.1 Σημασία της γωνίας.....	45
7.2 Σφάλμα φάσης.....	45
7.3 Μετατροπή φάσης.....	46
7.4 Αποδοτικότητα διόρθωσης.....	47
7.5 Αζυγοστάθμητο διάνυσμα.....	49
7.6 Πίνακας σφάλματος γωνίας.....	50
7.7 Αναλογία διόρθωσης.....	50
7.8 Γιατί όχι “μηδέν”.....	52
7.9 Σφάλματα μέτρησης.....	52
7.10 Διαχωρισμός επιπέδου.....	53
7.11 Είναι η διαδικασία υπό έλεγχο;.....	53
7.12 Μέτρηση R&R (repeatability & reproducibility) επαναλαλημότητας και αναπαραγωγιμότητας.....	54
7.13 Cpk (Process carability index) Δείκτης ικανότητας της διαδικασίας.....	56
7.14 Αποδοτικότητα ζυγοστάθμισης.....	57
8.ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΣΗΣ.....	58
8.1 Πως να βεβαιωθούμε πως η μηχανή μας κάνει ότι χρειαζόμαστε.....	58
8.2 Προδιαγραφές μηχανής ζυγοστάθμισης.....	59
8.3 Απαιτήσεις δοκιμής και προδιαγραφές.....	59
8.4 Τύποι μηχανών ζυγοστάθμισης.....	60
8.5 Διόρθωση αζυγοσταθμίας.....	62
8.6 Στη θέση ζυγοστάθμισης.....	64
8.7 Στη θέση διαδικασιών ζυγοστάθμισης και παγίδων.....	64
8.8 Ενεργή ζυγοστάθμιση.....	66
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
9.1 Γενικά συμπεράσματα.....	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	69

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΣΗ

1.1 Η έννοια της ζυγοστάθμισης

Η περιστροφή ενός σώματος δημιουργεί φυγόκεντρες δυνάμεις σε κάθε στοιχειώδη μάζα του σώματος, οι οποίες όπως ξέρουμε είναι ακτινικές και κάθετες στον άξονα περιστροφής. Αν η κατανομή της μάζας του σώματος είναι συμμετρική γύρω από τον άξονα περιστροφής τότε η συνισταμένη των φυγόκεντρων δυνάμεων των στοιχειωδών μαζών μηδενίζεται. Όμως για λόγους κατασκευαστικών ατελειών, συνήθως υπάρχει κάποια μικρή ασυμμετρία στην κατανομή της μάζας, και τότε λέμε ότι το σώμα έχει αζυγοσταθμία ή είναι αζυγοστάθμιτο. Η διαδικασία που κάνουμε για το μηδενισμό της συνισταμένης των φυγόκεντρων δυνάμεων λέγεται ζυγοστάθμιση.

Η αζυγοσταθμία των περιστρεφόμενων σωμάτων μπορεί να δημιουργηθεί κατά την επεξεργασία στις εργαλειομηχανές (άνοιγμα σφηνόδρομου, τρύπας, σπειρώματος, κλπ). Επίσης από επικάθηση σκόνης ή λάσπης σε φτερωτές κινητήρων ή ανεμιστήρες. Οι φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται επί των μη ζυγοσταθμισμένων μαζών είναι ανάλογες του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής του σώματος, άρα στις μεγάλες ταχύτητες οι καταπονήσεις πάνω στην κατασκευή είναι πάρα πολύ μεγάλες.

Οι δυνάμεις αυτές δημιουργούν ταλαντώσεις, καταστρέφουν τα ρουλεμάν και αυξάνουν τον θόρυβο λειτουργίας. Για να ζυγοσταθμίσουμε το περιστρεφόμενο σώμα δεν έχουμε παρά να προσθέτουμε ή αφαιρούμε μάζα κατάλληλης ποσότητας σε κατάλληλο σημείο του σώματος, ώστε να εξαλείψουμε την αρχική αζυγοσταθμία.

Η ζυγοστάθμιση είναι ένας τρόπος να μειώσουμε τους κραδασμούς καθώς και τα φορτία των ρουλεμάν, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση και την αξιοπιστία. Υπάρχουν τρία σημαντικά οφέλη από τη διαδικασία της ζυγοστάθμισης με τις κατάλληλες ανοχές. Όπως προαναφέραμε μπορούμε να μειώσουμε τα φορτία στα ρουλεμάν. Η ζωή του ρουλεμάν είναι ανάλογη με το φορτίο και την ταχύτητα. Περιορίζοντας τις δυνάμεις σε λιγότερο από το 100% του στατικού φορτίου, η ζωή του ρουλεμάν μεγιστοποιείται. Επίσης, μπορούμε να μειώσουμε τη δόνηση, η οποία δημιουργεί στα εξαρτήματα χαλάρωση, παράγεται θόρυβος, δημιουργείται η αντίληψη ότι υπάρχει χαμηλή ποιότητα και στην περίπτωση κάποιων προϊόντων όπως τα ηλεκτρικά εργαλεία, μπορεί ακόμη και να τα καθιστά επιβλαβής για την υγεία.

Η ζυγοστάθμιση επιτρέπει την απόδοση που πρέπει να βελτιωθεί με την αύξηση της ταχύτητας λειτουργίας. Οι υψηλότερες ταχύτητες είναι δυνατές λόγω των μειωμένων φορτίων των ρουλεμάν καθώς και την εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων κάμψης για μεγαλύτερους ρότορες.

Όταν κοιτάζουμε προϊόντα όπως ηλεκτρικά τρυπάνια, κινητήρες αεροσκαφών ακόμα και ανεμιστήρες ψύξης για κινητήρες αυτοκινήτων, θα καταλάβουμε σύντομα ότι κανένα από αυτά τα προϊόντα δε θα αποδίδουν καλά, ή ακόμη και να μην είναι πρακτικά, χωρίς την κατάλληλη ζυγοστάθμιση.

1.2 Η ζυγοστάθμιση δεν αποτελεί μια επιπρόσθετη δαπάνη

Είθισται να λέγεται πως η ζυγοστάθμιση θεωρείται ως ένας παράγοντας κόστους, αλλά στην πραγματικότητα πρόκειται για μια διαδικασία μείωσης κόστους.

Συνήθως όταν πρόκειται να γίνει ζυγοστάθμιση υπάρχουν πάρα πολλά ερωτήματα, όπως για παράδειγμα, εάν κατασκευάζαμε τέλειους ρότορες αν θα πρέπει και τότε να κάνουμε ζυγοστάθμιση, ποιο θα είναι το κόστος κατασκευής τέλειων ρότορων και τέλος ποιο θα ήταν το κόστος και η διαθεσιμότητα ενός τέλειου υλικού.

Τα ελάσματα για τους ρότορες που προαναφέραμε έχουν ανοχές όσον αφορά την ομοκεντρικότητα και το πάχος. Αγοράζοντας ελάσματα με αυστηρότερες προδιαγραφές, αυξάνεται το κόστος, μειώνεται ο αριθμός των προμηθευτών, τίθεται σε κίνδυνο η αξιοπιστη παράδοση και αυξάνονται οι απαιτήσεις επιθεώρησης.

Εξ'ορισμού η ζυγοστάθμιση είναι η διόρθωση των κατασκευαστικών προβλημάτων. Όταν το κατασκευαστικό υλικό ή η διαδικασία δεν είναι τέλεια, και τα προβλήματα στην κατασκευή και στη συναρμολόγηση συνδιαστούν, τότε το τελικό προϊόν θα παρουσιάζει πάρα πολύ θόρυβο, δόνηση, κάμψη του άξονα, φόρτιση των ρουλεμάν ή έλλειψη απόδοσης, ώστε να καλύψουν τις τελικές απαιτήσεις των δοκιμών. Η ζυγοστάθμιση είναι μια πολυλειτουργική τεχνολογία και όχι ένα επιπρόσθετο κόστος.

Ένας μηχανικός πρέπει να ψάχνει τον πιο οικονομικό τρόπο για την κατασκευή ενός προϊόντος και πρέπει να εξετάζει τις σχέσεις κόστους – οφέλους της κάθε διαδικασίας και λειτουργίας. Από μία πρώτη εκτίμηση, μπορεί να μην συμπεριληφθεί η ζυγοστάθμιση, και μόνο η έλλειψη απόδοσης του προϊόντος να αναγκάσει για μία επιπρόσθετη διαδικασία ζυγοστάθμισης. Αυτό όμως είναι λάθος να θεωρείται ως μια πρόσθετη δαπάνη. Η σωστή κατάσταση είναι ότι η αρχική διαδικασία δεν ήταν ικανή να παράγει ένα αποδεκτό μέρος.

Λύσεις όπως αλλαγή του υλικού, σφίξιμο των μηχανικών ανοχών ή αλλαγή της διαδικασίας παραγωγής είναι πολύ πιο δαπανηρές από την προσθήκη της λειτουργίας της ζυγοστάθμισης. Η ζυγοστάθμιση προστίθεται σε μια διαδικασία κατασκευής διότι είναι η μέθοδος με το μικρότερο κόστος ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη απόδοση.

1.3 Δόνηση, αιτίες και αποτελέσματα

Ένας αζυγοστάθμιτος ρότορας, τείνει να δονείται καθώς περιστρέφεται. Τότε, πρέπει να μετρήσουμε την αζυγοσταθμία, μετρώντας αυτή τη δόνηση. Ωστόσο πρέπει να σημειώσουμε πως δεν προκαλούνται όλες οι δονήσεις από τον αζυγοστάθμιτο ρότορα. Από αυτό πρέπει να συνειδητοποιήσουμε ότι για να κατανοήσουμε τη ζυγοστάθμιση θα πρέπει πρώτα να έχουμε μία γνώση για τις δονήσεις.

1.3.1 Τι είναι η δόνηση;

- Μία τακτική αναστροφή κίνησης
- Ένα μετρήσιμο εύρος
- Ένα μετρήσιμο εύρος συχνοτήτων
- Μία μετρήσιμη ένταση
- Μία μετρήσιμη επιτάχυνση

Η δόνηση είναι μία επαναληπτική παλινδρομική κίνηση. Εν προκειμένω και με τον όρο δονήσεις χαρακτηρίζονται οι γρήγορες ταλαντώσεις μικρού όμως πλάτους. Είναι είτε εξαναγκασμένες είτε φυσικές. Για παράδειγμα, μια μηχανή ντίζελ δονείται λόγω των δυνάμεων καύσης για παραγωγή ενέργειας και κίνησης του εμβόλου. Φυσικά κάποιοι κραδασμοί είναι επιθυμητοί ενώ άλλοι είναι μη αποδεκτοί.

Οι κραδασμοί προέρχονται συνήθως από τέσσερις αιτίες, όπως, τα ρουλεμάν, την κακή ευθυγράμμιση, την χαλαρότητα και την αζυγοσταθμία. Πρέπει να είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε την ανεπιθύμητη δόνηση. Πρέπει να μάθουμε σχετικά με τα χαρακτηριστικά των δονήσεων και να ξέρουμε πως να επιλέξουμε το εργαλείο που θα χρησιμοποιηθεί για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

1.3.2 Απλή δόνηση

Μια μάζα που αναρτάται από ένα ελατήριο είναι το απλούστερο σύστημα δόνησης. Αν προστίθεται ενέργεια, τότε το αποτέλεσμα θα είναι μια δόνηση σε μία συχνότητα που καθορίζεται από το μέγεθος της μάζας και από τη δύναμη του ελατηρίου.

Σε όλες τις περιπτώσεις των κραδασμών και της ισορροπίας ασχολούμαστε με τη μάζα και όχι με το βάρος. Η μάζα είναι σταθερή, ενώ το βάρος είναι μόνο η αντίδραση λόγω της βαρύτητας. Έχουμε λοιπόν ένα αντικείμενο που μπορεί να ονομαστεί βάρος, αλλά στην πραγματικότητα έχει μία μάζα. Αν πάρουμε το ελατήριο και τη μάζα στο διάστημα ώστε να έχουμε ένα περιβάλλον μικροβαρύτητας, τότε το βάρος εξαλείφεται, αλλά η μάζα είναι αμετάβλητη.

Το βάρος μπορεί να μετρηθεί σε μία κλίμακα. Το βάρος θα ποικίλει ανάλογα με την τοποθεσία. Η μάζα είναι σταθερή. Το βάρος είναι μία στατική κατάσταση. Η κίνηση είναι ένα δυναμικό περιβάλλον.

Η απλή δόνηση ορίζεται ως ένα ημιτονοειδές κύμα και αποτελείται από μόνο μία συχνότητα. Όταν η δόνηση περιέχει περισσότερες από μία συχνότητες, είναι σύνθετη.

1.3.3 Σύνθετη δόνηση

Εάν προσθέσουμε ένα δεύτερο ελατήριο και μάζες διαφόρων μεγεθών στο σύστημα μας, θα δονούνται με διαφορετικά πλάτη και διαφορετικές συχνότητες. Αν συνδυάσουμε τις δύο δονήσεις, το αποτέλεσμα είναι ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο, αλλά δεν είναι ένα ημιτονοειδές κύμα.

Ένα μεγάλο μέρος της εργασίας με τη δόνηση, είναι ότι χωρίζει τη δόνηση στα συστατικά μέρη της. Ο σύγχρονος εξοπλισμός ανάλυσης κραδασμών χρησιμοποιεί τις τεχνικές που διατυπώθηκαν από έναν μηχανικό, τον Jean Baptiste Fourier, ο οποίος είχε προσληφθεί από τον Ναπολέοντα. Ο Fourier εργαζόταν πάνω στη θερμική αγωγιμότητα για την βελτίωση των κανονιών του Ναπολέοντα από την υπερθέρμανση. Αργότερα διαπιστώθηκε πως οι ίδιες τεχνικές ανάλυσης χρησιμοποιούνται και για τους κραδασμούς. Ο μετασχηματισμός Fourier ουσιαστικά επιτρέπει μια σύνθετη δόνηση που πρέπει να αναλυθεί σε μια σειρά από ημιτονοειδή κύματα, το καθένα με μία συγκεκριμένη συχνότητα, πλάτος και φάση. Αυτές οι συχνότητες μπορούν να συγκριθούν με ταχύτητες περιστροφής και πολλαπλάσιά τους, έτσι ώστε να μπορέσει να προσδιοριστεί η πηγή της δόνησης.

1.4 Απόσβεση

Ένα σύστημα δόνησης θα συνεχίσει να δονείται εκτός και αν αφαιρεθεί ενέργεια. Ο παράγοντας που αφαιρεί την ενεργειακή δόνηση, είναι η απόσβεση. Τα αποτελέσματα του συντονισμού των κραδασμών είναι πολύ μειωμένα με την προσθήκη της απόσβεσης.

Κατά τα τελευταία 20 χρόνια, τεράστιες προόδους στην τεχνολογία απόσβεσης έχουν βελτιώσει την οδηγική άνεση και συμπεριφορά των αυτοκινήτων μας. Μερικά συστήματα απόσβεσης χρησιμοποιούν ενεργό έλεγχο δυσκαμψίας των αμορτισέρ που υπολογίζονται από την έξοδο των αισθητήρων δόνησης. Σε μόλις χιλιοστά του δευτερολέπτου μετά από ένα χτύπημα της ρόδας, τα αμορτισέρ σκληραίνουν για τον έλεγχο της κίνησης του τροχού, και στη συνέχεια χαλαρώνουν ώστε να διατηρήσουν μια ομαλή οδήγηση.

Βιομηχανικά συστήματα επίσης χρειάζονται την απόσβεση για να διαχέει την ενεργειακή δόνηση. Η απόσβεση συνήθως περιλαμβάνει υλικά που απορροφούν ενέργεια μέσω της τριβής.

Σε γενικές γραμμές, ένα σύστημα χωρίς απόσβεση θα έχει την τάση να δονείται σε μία μόνο συχνότητα, η οποία ονομάζεται “φυσική” συχνότητα, ηχηρή συχνότητα ή κρίσιμη συχνότητα. Η προσθήκη απόσβεσης μειώνει το πλάτος ταλάντωσης και επίσης διαδίδει την ενέργεια σε ένα εύρος συχνοτήτων.

1.5 Ποια είναι η αιτία των κραδασμών

Πολλά πράγματα μπορούν να δημιουργήσουν δονήσεις. Κάποια από αυτά είναι η κακή ευθυγράμμιση, ο λυγισμένος άξονας, τα κατεστραμμένα ρουλεμάν, οι αναταράξεις, η σπηλαίωση, η ανεπαρκής λίπανση και η αζυγοσταθμία.

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι εξαιτίας της αζυγοσταθμίας μερικές φορές έχουμε προβλήματα κραδασμών, αλλά οι κραδασμοί οφείλονται περισσότερο σε άλλες αιτίες, γιατί η ζυγοστάθμιση δεν μπορεί να επιδιορθώσει τίποτε άλλο παρά μόνο την αζυγοσταθμία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

ΔΙΑΦΟΡΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

2.1 Δοκιμαστικός ρότορας και παρουσίαση διαφόρων προβλημάτων

Μέχρι το 1955 περίπου, η πρότυπη δοκιμή σχεδιασμού του ρότορα για τη ζυγοστάθμιση ενός στροβιλοκινητήρα ήταν ένας μακρύς σωλήνας με βαριά άκρα, εξοπλισμένα με διπλά ρουλεμάν σε κάθε άκρο. Το σχέδιο αναπτύχθηκε γύρω στο 1950 για να μεγιστοποιηθεί η ροπή αδράνειας και να ταιριάζει με τα χαρακτηριστικά των μηχανών ζυγοστάθμισης με μαλακό ρουλεμάν με «3 βαθμούς ελευθερίας». Μέχρι το 1985, η βιομηχανία είχε αλλάξει σε προηγμένης τεχνολογίας ρουλεμάν με πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία της μηχανής και ακρίβεια. Σύντομα έγινε αντιληπτό ότι ο ρότορας που είχε σχεδιαστεί για δοκιμή, είχε μεγάλα προβλήματα. Το πρώτο πρόβλημα ήταν η συντήρηση των σφαιρικών ρουλεμάν. Θα μπορούσε να πάρει μέρες για την αφαίρεση, την εκκαθάριση, την επανασυναρμολόγηση και τον επανέλεγχο, έτσι ώστε να μπορέσουμε να πάρουμε την απόδοση που το κάνει αρκετά σταθερό, με σκοπό να επιτύχει στη δοκιμή. Το δεύτερο πρόβλημα ήταν η αστάθεια του τμήματος μήκους του σωλήνα του ρότορα.

Υπάρχουν δύο πρόσθετα προβλήματα μόλις ο ρότορας έχει ζυγοσταθμιστεί. Η συναρμογή μεταξύ του ρότορα και του άξονα λειτουργίας καθώς και η εκκεντρότητα του εν λόγω άξονα μπορεί να προκαλέσει αζυγοσταθμία σε συνθήκες λειτουργίας που είναι αρκετές φορές υψηλότερη από την πραγματική αζυγοσταθμία του ρότορα.

Εδώ να σημειώσουμε ότι, δεν μιλάμε για την ευαισθησία και την ακρίβεια του ζυγοσταθμιστή, η οποία μπορεί εύκολα να είναι 10 φορές καλύτερη από ότι των καλύτερων εργαλείων, αλλά την πραγματική ακρίβεια του επιπέδου ζυγοστάθμισης σε έναν ρότορα, όπως ένα βολάν. Σε πραγματικές συνθήκες αυτή είναι η πραγματική διανυσματική διαφορά ανάμεσα σε μία μέτρηση και μία επακόλουθη μέτρηση.

Για ρότορες με άξονα που πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με ρουλεμάν υπάρχει ένα άλλο πρόβλημα. Εκεί η εκκεντρότητα του εσωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν, έχει άμεση επίδραση στην ισορροπία της συνδεσμολογίας.

2.2 Ορισμός ενός αζυγοστάθμητου ρότορα



Σχήμα 2.1. Ρότορας με μονή αζυγοσταθμία

Κανονικά, δεν μπορούμε να δούμε την πραγματική αζυγοσταθμία, η οποία είναι το σύνολο μιας σειράς μικρών σφαλμάτων κατασκευής. Ένα από τα προβλήματα με την ζυγοστάθμιση είναι ότι δεν μπορούμε να δούμε άμεσα ή να μετρήσουμε την αζυγοσταθμία, αλλά μόνο τα αποτελέσματα της. Για να αναπαραστήσουμε το συνολικό άθροισμα όλων των αζυγοσταθμιών του ρότορα, θα δείξουμε μία ενιαία μάζα σε μία καθορισμένη ακτίνα.

$U = m * r$. Όπου U = ταχύτητα, m = μάζα και r = ακτίνα. Αυτό καθορίζει το μέγεθος της αζυγοσταθμίας.

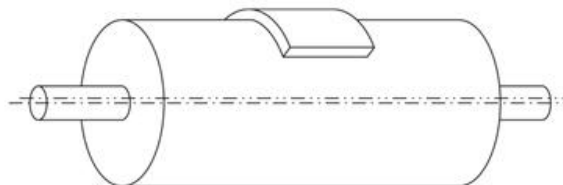
Σημειώνουμε ότι η αζυγοσταθμία βρίσκεται σε μία συγκεκριμένη γωνιακή θέση που πρέπει επίσης να είναι γνωστή αλλιώς δεν υπάρχει κανένας τρόπος για να γίνουν διορθώσεις.

Εάν χρειάζεται να γνωρίζουμε αν το επίπεδο αζυγοσταθμίας μας ικανοποιεί ή όχι, μπορούμε να αγνοήσουμε τη γωνία, σε αυτή τη περίπτωση.

2.3 Συγκεκριμένη αζυγοσταθμία

Η αζυγοσταθμία της μάζας και της ακτίνας προκαλεί μία αντίστοιχη μετατόπιση στη θέση της συνολικής μάζας του ρότορα.

Αζυγοσταθμία $U = M * e$



Σχήμα 2.2. Ρότορας με συγκεκριμένη αζυγοσταθμία

Σε πολλές περιπτώσεις η αζυγοσταθμία προκύπτει από σφάλματα τοποθέτησης (άρμωσης) όπως οι διαμετρικές ελευθερίες ή η εκκεντρότητα του άξονα. Αν ο ρότορας είναι (ας πούμε) βολάν (σφόνδυλος), τότε πρέπει να υπάρχει ένα διάκενο μεταξύ της διαμέτρου του άξονα και της οπής του βολάν. Αυτό το διάκενο μπορεί να προκαλέσει το βολάν να τοποθετηθεί εκτός κέντρου. Αυτό το σφάλμα τοποθέτησης είναι η εκκεντρότητα (e) και η μάζα είναι η μάζα του ρότορα (M). Η λάθος τοποθέτηση έχει ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα όπως η αζυγοσταθμία. Το βολάν και ο κινητήρας μπορεί και οι δύο να έχουν ισορροπημένη ακρίβεια αλλά η λάθος τοποθέτηση μπορεί να προκαλέσει ανεπίτρεπτες δονήσεις.

Μεμονωμένα συγκροτήματα ρότορα μπορεί να απορριφθούν σε τελικό έλεγχο λόγω κραδασμών του συστήματος. Ο λόγος για τον οποίον υπάρχει αρκετή δόνηση εκεί, είναι ένα πρόβλημα και πηγάζει από την έλλειψη κατανόησης της επίδρασης των μικρών ποσοτήτων εκκεντρότητας, διάκενα οπής και παραλλαγών συναρμολόγησης. Στον τομέα της ζυγοστάθμισης ακόμη και ένα σφάλμα της τάξεως των 0,001'' (0,025χιλιοστά) μπορεί να είναι ένα σημαντικό πρόβλημα!

2.4 Πηγές αζυγοσταθμίας



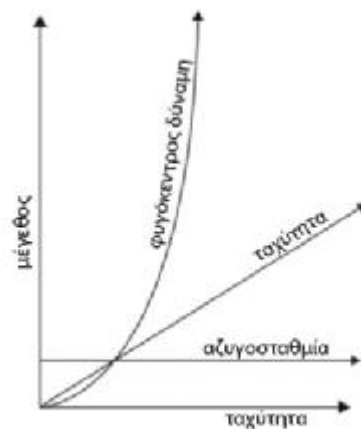
Εικόνα 2.1. Οπλισμός από έναν ηλεκτρικό κινητήρα

Στην εικόνα 2.1 βλέπουμε ένα παράδειγμα από έναν οπλισμό. Αυτό θα μπορούσε να είναι ένας στροβιλοκινητήρας, ανεμιστήρας, αντλία ή βολάν. Τα σφάλματα προκύπτουν από το γεγονός ότι καμία από τις λειτουργίες δεν είναι τέλεια. Κάθε ένα έχει μία ανοχή. Αν ο άξονας είναι λυγισμένος τότε οι επάλληλες στρώσεις θα λειτουργήσουν εκκεντρικά, δημιουργώντας αζυγοσταθμία. Εάν η οπτική πυκνότητα (η οποία εκφράζει τη διαπερατότητα ενός μέσου στο φως κάποιου συγκεκριμένου μήκους κύματος. Όσο αυξάνεται η οπτική πυκνότητα τόσο μειώνεται η διαπερατότητα. Οπτική πυκνότητα = $\log_{10} (1/T)$ όπου T = Διαπερατότητα), είναι ενεργοποιημένη, μπορεί να βοηθήσει ώστε να μειώσει την αζυγοσταθμία, αλλά οι υποδοχές για τα καλώδια θα εξακολουθούν να είναι εκκεντρικά

τοποθετημένα στα ρουλεμάν. Οι εκκεντρότητες, οι εκκαθαρίσεις και οι στρεβλώσεις, αθροίζονται σε τυχαίους τρόπους, έτσι ώστε μια παρτίδα θεωρητικών ταυτόσημων στροφών μπορούν να έχουν ένα ευρύ φάσμα των αρχικών τιμών ισορροπίας. Η διαδικασία ζυγοστάθμισης δεν είναι μία ενιαία πράξη, αλλά ένας κύκλος μετρήσεων και διορθώσεων.

2.5 Δύναμη, αζυγοσταθμία και ταχύτητα

Τώρα καταλαβαίνουμε ότι ο κύριος λόγος για τη ζυγοστάθμιση είναι να μειωθεί η καταπόνηση των ρουλεμάν και να έρθει η δόνηση σε επιτρεπτά επίπεδα. Η ζυγοστάθμιση επίσης παράγει μείωση του θορύβου που οφείλεται στη μείωση των δονήσεων. Η αζυγοσταθμία στερεί ενέργεια από το σύστημα που διαχέεται με τη μορφή δονήσεων και θορύβου και μπορεί να δημιουργήσει άλλα προβλήματα όπως την τριβή του στάτη και την πρόωρη αποτυχία των ρουλεμάν. Η αζυγοσταθμία δεν αλλάζει με την ταχύτητα, αλλά τα αποτελέσματα αλλάζουν. Η φυγόκεντρη (προς τα έξω) δύναμη είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας.



Διάγραμμα 2.1. Διάγραμμα μεγέθους συναρτήσει ταχύτητας

Η μηχανή ζυγοστάθμισης μετρά την ποσότητα και τη γωνία της αζυγοσταθμίας έτσι ώστε να μπορεί να διορθωθεί με την προσθήκη, την αφαίρεση ή την μετακίνηση της μάζας. Χρησιμοποιούμε μάζα αφού δεν μιλάμε για βαρύτητα αλλά για περιστροφικές συνθήκες. Η ζυγοστάθμιση είναι η διόρθωση της κατανομής μάζας που διαχέεται στον ρότορα σε σχέση με τον προσδιορισμένο άξονα περιστροφής του ρότορα.

2.6 Πως ζυγοσταθμούμε. Τι είναι η ζυγοστάθμιση

Ένας ρότορας που βρίσκεται έξω από το σχήμα του περιστρεφόμενου άξονα (Σχ.2.3), δεν θα κινηθεί ομαλά.



Σχήμα 2.3. Άξονας ρότορα που περνάει εκτός σημείου περιστροφής των ρουλεμάν

Είναι προφανές πως ένας ρότορας χωρίς ευθυγραμμισμένα τα ρουλεμάν δε θα λειτουργήσει με κανέναν τρόπο. Είναι αζυγοστάθμιτος και έτσι θα πρέπει να το φέρουμε σε ισορροπία με την ευθυγράμμιση της μάζας του ρότορα με το κέντρο του ρουλεμάν. Η αρχική έκδοση, δεν θα λειτουργήσει. Θα χαλάσει τα ρουλεμάν και θα καταστρέψει τα πάντα γύρω από αυτό.



Σχήμα 2.4. Άξονας ρότορα που περνάει από το σημείο περιστροφής των ρουλεμάν

Αυτό ακριβώς συμβαίνει όταν τα σφάλματα είναι λίγες δεκάδες χιλιοστά της ίντσας. Όλη αυτή η φασαρία για τη ζυγοστάθμιση είναι σφάλματα που σπάνια πάνε πάνω από 0,005'' και κυμαίνονται σε λιγότερο από ένα δεκάκις χιλιοστό της ίντσας. Αν προσπαθήσουμε να κατασκευάσουμε μία μηχανή υψηλής ταχύτητας με ανοχές αρκετά κοντά, που θα μπορούσε να εξαλείψει την αζυγοσταθμία, θα κόστιζε ένα τεράστιο ποσό και θα μπορούσε να ήταν αδύνατο να υλοποιηθεί. Η ζυγοστάθμιση δεν είναι ένα πρόσθετο στοιχείο κόστους, αλλά μια διαδικασία που επιτρέπει άλλες λειτουργίες να είναι λιγότερο ακριβές και ως εκ τούτου το προϊόν να είναι λιγότερο ακριβό στην παραγωγή του.

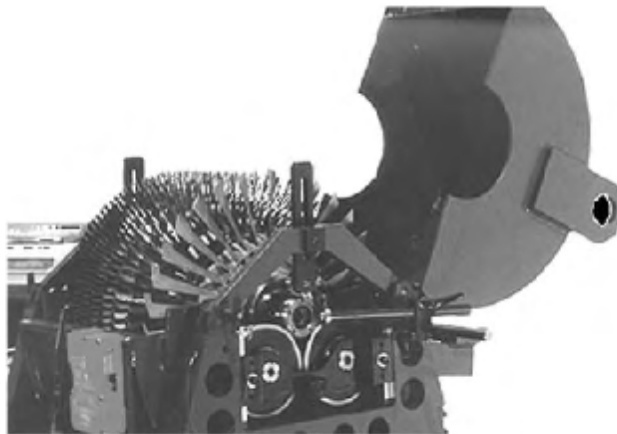
Η ζυγοστάθμιση είναι μια πολυλειτουργική τεχνολογία, που αποτέλεσε το κλειδί για τις γυροσκοπικές πλοηγήσεις, τους κινητήρες τζετ, τις αντλίες τούρμπο για

πυραυλοκινητήρες (όπως το διαστημικό λεωφορείο) ακόμη και τον κινητήρα του αυτοκινήτου.

2.7 Ζυγοστάθμιση του ρότορα

Η παρακάτω εικόνα(Εικ.2.3) δείχνει ένα τυπικό στροφείο κινητήρα αεροσκάφους τοποθετημένο σε οριζόντια μηχανή ζυγοστάθμισης. Ο άξονας βρίσκεται σε κυλίνδρους.

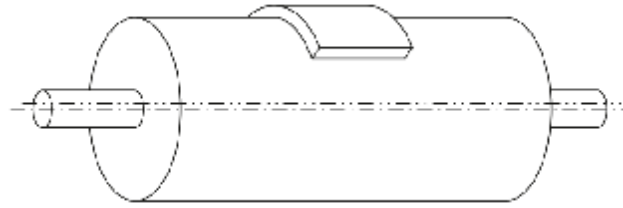
Υπάρχει ακραία ώθηση του κυλίνδρου για να περιορίσει την αξονική κίνηση. Υπάρχει ένα κάλυμμα ασφαλείας με διακόπτη ασφάλισης. Το κάλυμμα κρατά ο χειριστής αγγίζοντας τον περιστρεφόμενο ρότορα και συγκρατεί τα αντικείμενα, όπως είναι τα αντίβαρα. Το κάλυμμα επίσης μειώνει την ποσότητα της κινητήριας ισχύς που απαιτείται και αποφεύγει τη δημιουργία της ροής αέρα. Μη ορατό στην εικόνα, είναι ο μάντας μετάδοσης κίνησης γύρω από τον άξονα για να γυρίσει τον ρότορα.



Εικόνα 2.3. Κινητήρας αεροσκάφους στη μηχανή ζυγοστάθμισης

Αυτή η εγκατάσταση μας δίνει την δυνατότητα να γυρίσει το ρότορα έτσι ώστε η αζυγοσταθμία να δημιουργήσει φυγόκεντρες αντιδράσεις δύναμης στα ρουλεμάν και έτσι να οδηγήσει σε σήματα που παράγονται από τους αισθητήρες δονήσεων. Με άλλα λόγια παίρνουμε σήματα που μπορούμε να τα φιλτράρουμε για να δούμε το ποσό και τη γωνία της αζυγοσταθμίας.

2.8 Άξονες ρότορα



Σχήμα 2.5. Συμμετρικός ρότορας με μάζα στην αξονική κεντρική γραμμή

Θα τοποθετηθεί σε λειτουργία, στη μηχανή ζυγοστάθμισης. Σε αυτή την περίπτωση, δεν έχουμε να ανησυχούμε για εργαλεία κλπ. Ο ρότορας έχει έναν άξονα ρουλεμάν που ορίζεται από τις κεντρικές γραμμές των δύο ρουλεμάν. Έχει έναν άξονα μάζας που ορίζεται από την κατανομή μάζας του ρότορα. Εδώ βλέπουμε έναν συμμετρικό ρότορα αλλά με μία μεγάλη επιπρόσθετη μάζα στην αξονική κεντρική γραμμή. Αυτό θα εκτοπίσει τη μάζα του άξονα παράλληλα προς τον άξονα του ρουλεμάν (ίδιο ποσό και γωνία σε κάθε άκρο).

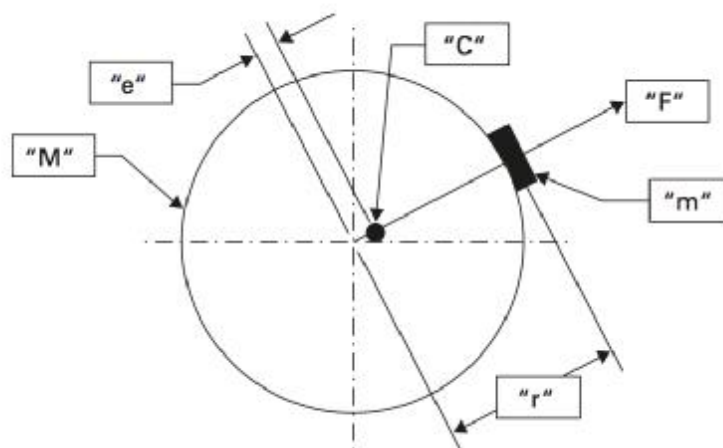
2.9 Ανασκόπηση ορισμών

Ο ρότορας είναι συμμετρικός εκτός από την αζυγοσταθμία m στην ακτίνα r .

$$U = m * r = M * e$$

$$U = M * e \text{ έτσι } e = U/M = m * r/M$$

Η αζυγοστάθμιτη μάζα m επί την ακτίνα r είναι ίση με την ταχύτητα U . Αδιαστοποιώντας με τη μάζα του ρότορα M , παίρνουμε 'e' το οποίο είναι ένα μέτρο της αζυγοσταθμίας που είναι ανεξάρτητο από τη μάζα του ρότορα. Ονομάζεται εκκεντρική μάζα ή συγκεκριμένη αζυγοσταθμία. Είναι η μετατόπιση του κέντρου μάζας από το κέντρο του ρουλεμάν.



- ‘M’=μάζα ρότορα
- ‘m’=αζυγοστάθμιτη μάζα
- ‘C’=κέντρο μάζας
- ‘e’=μετατόπιση κέντρου μάζας
- ‘r’=απόσταση από το κέντρο του ρότορα
- ‘F’=δύναμη που οφείλεται στην αζυγοσταθμία
- ‘U’=αζυγοσταθμία ρότορα
- ‘N’=ταχύτητα ρότορα

Μια αζυγοσταθμία του 1 oz.in (720 γραμ.χιλιοστά) μπορεί να είναι ασήμαντη για τον ρότορα της γεννήτριας, αλλά θα ήταν καταστροφική σε ένα ηλεκτρικό τρυπάνι.

2.10 Ζυγοστάθμιση στο πεδίο εφαρμογής

Ο ρότορας θέλει να περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της μάζας του αλλά εμείς θέλουμε να περιστρέφεται γύρω από τον άξονα των ρουλεμάν. Τα αποτελέσματα είναι, δύναμη στα ρουλεμάν, δονήσεις των ρουλεμάν ή ο συνδυασμός και των δύο.

Εδώ σημειώνουμε ότι τα πιο άκαμπτα ρουλεμάν εμφανίζουν λιγότερους κραδασμούς και μεγαλύτερη δύναμη.

Ο δικός μας ορισμός έχει ληφθεί απευθείας από το πρότυπο ISO 1925, παράγραφος 3.1.

Ο ορισμός του ISO 1925 της ζυγοστάθμισης είναι: Μια διαδικασία με την οποία η κατανομή της μάζας του ρότορα ελέγχεται και εάν απαιτείται, προσαρμόζεται προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η δόνηση των τριβέων (ρουλεμάν) του άξονα ή/και οι δυνάμεις επί των ρουλεμάν σε μία συχνότητα που αντιστοιχεί στην ταχύτητα λειτουργίας, είναι εντός καθορισμένων ορίων.

2.11 Δύναμη/Δόνηση

Επακριβώς καταγράφηκε στο ISO 1925 ότι η κατάσταση της αζυγοσταθμίας είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη δύναμη επί του ρουλεμάν η οποία ευθέως σχετίζεται με την ακαμψία του ρουλεμάν. Η αζυγοσταθμία δεν φαίνεται από την εξωτερική εμφάνιση, αλλά από την δόνηση ή τη δύναμη που παράγει. Ο ρότορας μπορεί να έχει μία τρύπα στο εξωτερικό. Αυτό μπορεί να είναι εκεί για να διορθώσει την αζυγοσταθμία αντί να είναι η αιτία της αζυγοσταθμίας.

2.12 Χαρακτηριστικά ακαμψίας του ρότορα

Υπάρχει ένας αριθμός ταξινομήσεων των ρότορων, ανάλογα με την ευελιξία, την ταχύτητα λειτουργίας, καθώς και άλλους παράγοντες (ISO 5343).

Κατηγορία 1 είναι οι άκαμπτοι ρότορες - αυτοί καλύπτουν το 90% του συνόλου των εφαρμογών.

Κατηγορία 2 είναι οι ρότορες που δεν είναι άκαμπτοι ή που έχουν ειδικά χαρακτηριστικά της μαζικής διανομής, αλλά που μπορεί να ζυγοσταθμιστούν με τη χρήση μιας τροποποιημένης τεχνικής ζυγοστάθμισης.

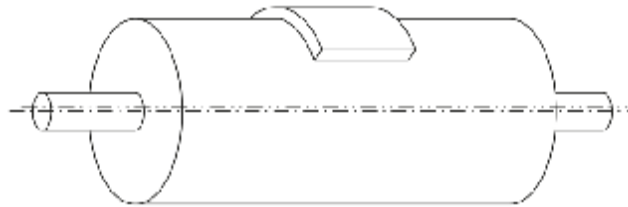
Κατηγορίες 3 και 4 είναι οι ευέλικτοι ρότορες.

Το αναφέρουμε αυτό έτσι ώστε να έχουμε επίγνωση ότι κάποιοι ρότορες μπορούν να ζυγοσταθμιστούν σε συγκεκριμένες ταχύτητες, σε δύο ταχύτητες ή ακόμα και όταν είναι ζεστοί. Θερμικές επιδράσεις μπορεί να προκαλέσουν παραμόρφωση, που με τη σειρά τους προκαλούν αζυγοσταθμία, η οποία μπορεί να προκαλέσει περισσότερη παραμόρφωση. Ορισμένοι ονομάζουν αυτό το είδος λειτουργίας ‘δυναμική ευθυγράμμιση’ παρά ζυγοστάθμιση, εφόσον ο σκοπός είναι να κρατήσει τον ρότορα σε σωστή λειτουργία με την ελαχιστοποίηση των εσωτερικών τάσεων κάμψης του ρότορα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΙΔΗ ΑΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΩΝ

3.1 Στατική αζυγοσταθμία

Στατική αζυγοσταθμία ορίζεται η δράση μέσα από το κέντρο της μάζας του ρότορα και εξορισμού μπορούν να διορθωθούν σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία, με την προσθήκη ή την αφαίρεση υλικού σύμφωνα με το κέντρο μάζας. Είναι ευνόητο ότι σε αυτό τον ορισμό, είναι γεγονός ότι ο άξονας μάζας παραμένει παράλληλος προς τον άξονα έδρασης. Η στατική αζυγοσταθμία μπορεί να ανιχνευθεί χωρίς περιστροφή του ρότορα, εξού και το όνομα.

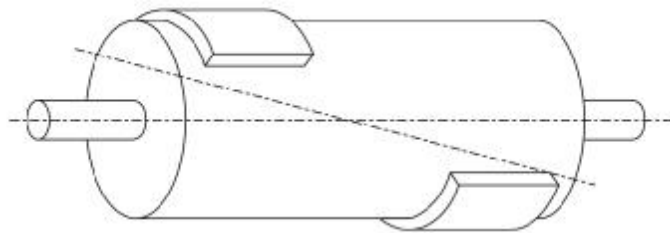


Σχήμα 3.6. Ρότορας με στατική αζυγοσταθμία

Η ζυγοστάθμιση σε δύο σημεία εδράσεως μπορεί να διορθωθεί για στατική αζυγοσταθμία αλλά χωρίς καμία ποιοτική μέτρηση του υπόλοιπου ποσού της αζυγοσταθμίας - εξαρτάται από την τριβή, τον άνεμο, τη μάζα του ρότορα κλπ. Αυτό δεν ορίζει το βασικό ορισμό του ελέγχου της αζυγοσταθμίας κατά ένα γνωστό πρότυπο. Οι περισσότερες ζυγοσταθμίσεις ενός επιπέδου γίνονται σε εκ περιστροφής (φυγόκεντρος) μηχανήματα ζυγοστάθμισης. Μη περιστρεφόμενες μηχανές ζυγοστάθμισης χρησιμοποιούνται για παραγωγή μεγάλου όγκου ρότορων με τεράστια ανοχή. Οι δείκτες αυτοί μετρούν την βαθμονομημένη εκτροπή ενός ελατηρίου ή την μετατόπιση ισχύος χρησιμοποιώντας δύο αισθητήρια φορτίου.

3.1.1 Ζεύγος αζυγοσταθμίας

Το ζεύγος αζυγοσταθμίας είναι αυτό που παίρνουμε όταν ισορροπήσουμε σε δύο σημεία εδράσεως και δεν διορθώνουμε την πραγματική πηγή της αζυγοσταθμίας. Το σχήμα παρακάτω δείχνει ένα ρότορα που είχε μια αζυγοσταθμία στο ένα άκρο και ήταν στατικά ζυγοσταθμισμένη με διόρθωση στο απέναντι άκρο από την αζυγοσταθμία. Το αποτέλεσμα είναι ότι φαίνεται καλό στα δύο σημεία εδράσεως αλλά θα τινάζετε σαν τρελό μόλις περιστρέφεται. Σημειώνουμε ότι οι αξονικές μαζικές διασταυρώσεις έχουν το γεωμετρικό άξονα στο κέντρο και έτσι δεν υπάρχει στατική αζυγοσταθμία.

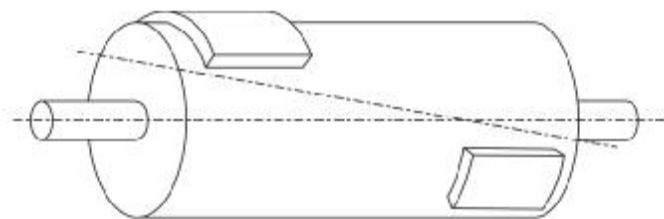


Σχήμα 3.7. Ρότορας με ζεύγος αζυγοσταθμίας

Το μέγεθος του ζεύγους εξαρτάται όχι μόνο από τη μάζα και την ακτίνα, αλλά επίσης από την απόσταση μεταξύ των μαζών. Αν μετακινήσουμε τα σημεία εδράσεως έτσι ώστε να ήταν αντίθετοι (μηδενική απόσταση) θα ακυρώσει το ένα το άλλο, δεδομένου ότι έχουν την ίδια μάζα και ακτίνα. Το μέτρο του ζεύγους είναι η μάζα επί την ακτίνα επί την απόσταση από το κέντρο του βάρους. Μονάδες ως εκ τούτου είναι οι ίντσες, ουγγιά, τετράγωνο ή γραμ.χιλιοστά εις στο τετράγωνο. Σε ένα στενό ρότορα οι δυνάμεις στα ρουλεμάν είναι μικρές, όπως και τα ρουλεμάν είναι εκτός του πεδίου των αζυγοστάθμιτων μαζών. Σε έναν αλτήρα, σχήματος ρότορα, το ζεύγος αζυγοσταθμίας είναι καταστροφικό, καθώς τα ρουλεμάν έχουν έναν πολλαπλασιασμό της αζυγοσταθμίας, επειδή είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, ενώ οι αζυγοστάθμιτες μάζες είναι πολύ μακριά. Για εγκάρσιους άτρακτους, το ζεύγος δεν είναι ένα σημαντικό πρόβλημα, καθώς το ζευγάρι των ροπών κάμψεων απορροφώνται στους άξονες και τα ρουλεμάν είναι ευρέως καταναμεημένα. Για ζεύγος αζυγοσταθμίας πρέπει να εξετάσουμε τα σημεία όπου η αζυγοσταθμία προκύπτει σε συνδυασμό με τις θέσεις των ρουλεμάν. Σε πολλές εφαρμογές το ζεύγος αζυγοσταθμίας μπορεί να είναι υψηλό σε σύγκριση με την στατική αζυγοσταθμία καθώς οι δυνάμεις είναι εσωτερικές στον ρότορα και δεν επηρεάζουν τα ρουλεμάν.

3.2 Δυναμική αζυγοσταθμία

Η δυναμική αζυγοσταθμία είναι ο γενικός συνδυασμός των στατικών και των ζευγών αζυγοσταθμιών. Στην πραγματικότητα οι ρότορες ξεκινούν με άγνωστη αζυγοσταθμία. Το σχήμα παρακάτω παρουσιάζει τις διορθώσεις που απαιτούνται για να έρθει ο ρότορας σε ισορροπία. Το βασικό με την δυναμική αζυγοσταθμία σε ένα άκαμπτο ρότορα είναι ότι όλες οι τυχαίες ανισορροπίες σε όλο τον ρότορα, όπως είναι η εκκεντρότητα, τρύπες βαθύτερες από τις άλλες, κενά στο υλικό κλπ. μπορούν να συνδυαστούν και να επιλυθούν σε δύο μάζες διόρθωσης σε προκαθορισμένες αξονικά διαχωρισμένες θέσεις.

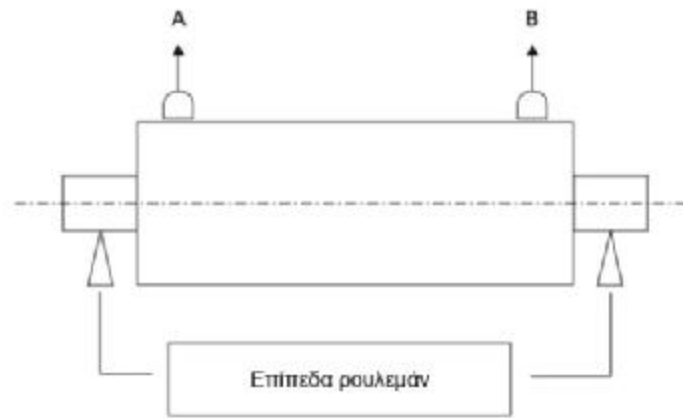


Σχήμα 3.8. Ρότορας με δυναμική αζυγοσταθμία

Επιπλέον το διάλυμα των αζυγοσταθμιών δίνει ένα αποτέλεσμα που αντιπροσωπεύει τις δυνάμεις (ή τη δόνηση) στα ρουλεμάν και μπορεί να μεταφραστεί μαθηματικά με τις κατάλληλες μάζες στα διορθωμένα επίπεδα. Οι ανοχές σχετίζονται με τις δυνάμεις των ρουλεμάν αλλά η διόρθωση σχετίζεται με τα διορθωμένα επίπεδα. Η μέτρηση της αζυγοσταθμίας αρχικά μας δείχνει αν είναι εντός ανοχής ή τις ανάγκες διόρθωσης. Εάν απαιτείται διόρθωση πρέπει να γνωρίζουμε πόσο υλικό πρέπει να προστεθεί ή να αφαιρεθεί και πρέπει να γνωρίζουμε την αξονική και ακτινική θέση για την πρόσθεση ή την αφαίρεση υλικού.

Ας θεωρήσουμε έναν τυπικό ρότορα.

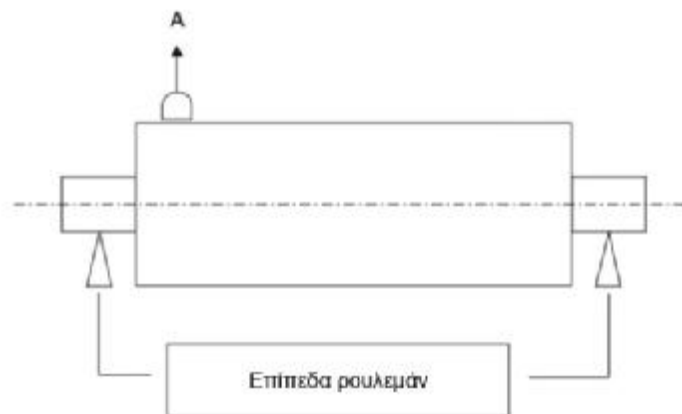
Το επόμενο σχήμα(Σχ.3.9) μπορεί να είναι από έναν οπλισμό, ένα στροφέιο αντλίας ή έναν κύλινδρο εκτύπωσης. Η διαμόρφωση είναι με δύο ρουλεμάν και δύο επίπεδα διόρθωσης (A και B) στο εσωτερικό των ρουλεμάν. Μια αζυγοσταθμία σε οποιοδήποτε σημείο του ρότορα θα δημιουργήσει δυνάμεις στα ρουλεμάν. Οι δυνάμεις στα ρουλεμάν μπορούν να ταξινομηθούν με βάση το ποσό και τη γωνία χρησιμοποιώντας άμεση μέτρηση. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να μεταφραστούν σε αντίστοιχα ποσά και γωνίες στα διορθωμένα επίπεδα.



Σχήμα 3.9. Στροφέιο σε στήριξη ρουλεμάν με δύο σημεία

3.3 Αζυγοσταθμία ενός επιπέδου-1

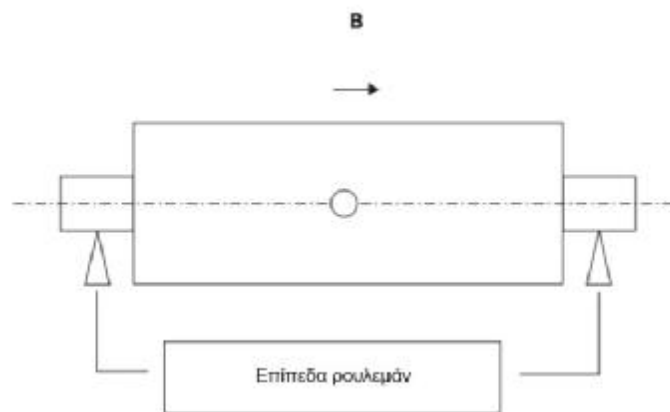
Στη συνέχεια έχουμε ένα ζυγοσταθμισμένο ρότορα με μία προστιθέμενη αζυγοσταθμία των 10 μονάδων στις 0 μοίρες(Σχ.3.10). Με τις διαστάσεις που παρουσιάζονται, το 80% της αζυγοσταθμίας θα φορτίσει το αριστερό ρουλεμάν και το 20% το δεξί ρουλεμάν. Η γωνία θα είναι μηδέν και στα δύο άκρα. Από αυτό βλέπουμε ότι εάν μετρήσαμε την αζυγοσταθμία ως 8 στην αριστερή και 2 στη δεξιά σε 0 μοίρες θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε τη διόρθωση που απαιτείται ως 10 στις 180 μοίρες, που βρίσκεται το 20% της απόστασης του ρουλεμάν από το αριστερό ρουλεμάν.



Σχήμα 3.10. Στροφέιο σε στήριξη ρουλεμάν με ένα σημείο

3.3.1 Αζυγοσταθμία ενός επιπέδου-2

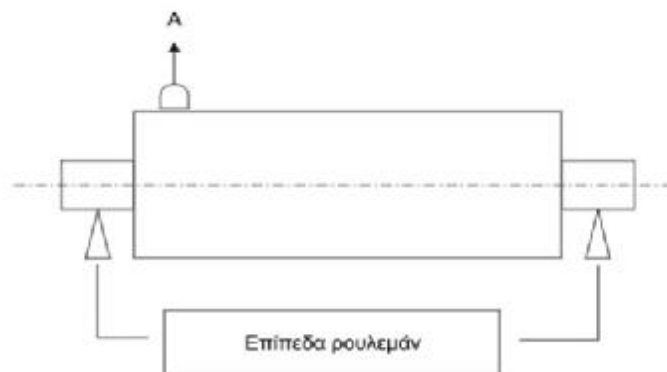
Τώρα κοιτάζουμε μια διαφορετική κατάσταση της αζυγοσταθμίας(Σχ.3.11). Έχουμε αζυγοσταθμία B 6 μονάδες, στο κέντρο του ρότορα και μία γωνία 90 μοιρών. Η κατεύθυνση του βέλους το δείχνει αυτό. Δεν (θα πρέπει να) είναι δύσκολο να αντιληφθούμε ότι κάτι τέτοιο θα δώσει μια αζυγοσταθμία των 3 μονάδων στις 90 μοίρες σε κάθε ρουλεμάν. Αυτό είναι στατική αζυγοσταθμία. Αζυγοσταθμία στο επίπεδο του κέντρου της μάζας.



Σχήμα 3.11. Αζυγοσταθμία στο κέντρο του ρότορα

3.3.2 Αζυγοσταθμία ενός επιπέδου-1a

Κοιτάζοντας το επόμενο σχήμα(Σχ.3.12), βλέπουμε ένα μονό επίπεδο αζυγοσταθμίας, που θα μπορούσε να διορθωθεί με μία ενιαία διορθωμένη μάζα - δεξιά. Αν προσπαθούσαμε να διορθώσουμε την αζυγοσταθμία στο κέντρο στις 180 μοίρες, θα είχαμε ζεύγος αζυγοσταθμίας. Έτσι αυτό που θα έπρεπε να κάνουμε προκειμένου να διορθώσουμε αυτή την αζυγοσταθμία με μία ενιαία μάζα είναι να μετακινήσουμε το διορθωμένο επίπεδο στα αριστερά.

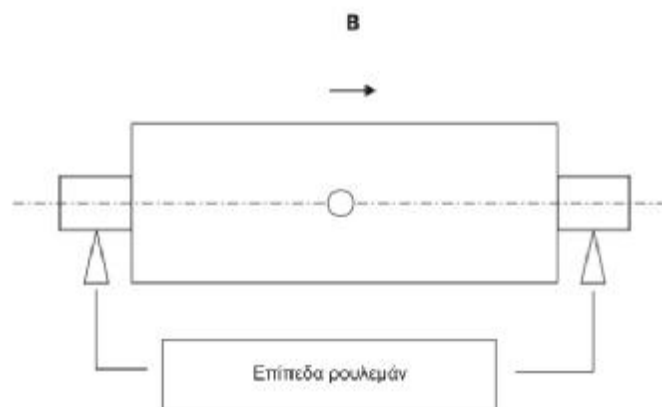


Σχήμα 3.12. Στροφέιο με μονό επίπεδο αζυγοσταθμίας

Αυτό δεν είναι στατική αζυγοσταθμία καθώς δεν είναι συμμετρικό, αλλά μπορεί να διορθωθεί σε ένα ενιαίο επίπεδο, και το οποίο ονομάζεται μερική στατική αζυγοσταθμία. Το δίδαγμα από αυτό είναι ότι αν μία διάταξη του ρότορα περνά μέσα από μία λειτουργία που αλλάζει την αζυγοσταθμία σε μία αξονική θέση, τότε μπορούμε να κάνουμε ζυγοστάθμιση, χρησιμοποιώντας ένα μόνο επίπεδο διόρθωσης. Θεωρούμε ένα μοτέρ που είναι εφοδιασμένο με τροχαλία μετάδοσης κίνησης. Αν ο ρότορας είναι συνέχεια εκτός προδιαγραφών δόνησης, ξέρουμε ότι ήταν η τροχαλία που το προκάλεσε και επομένως μπορούμε να κάνουμε μονού επιπέδου διόρθωση αζυγοσταθμίας στην τροχαλία.

3.3.3. Αζυγοσταθμία ενός επιπέδου-2a

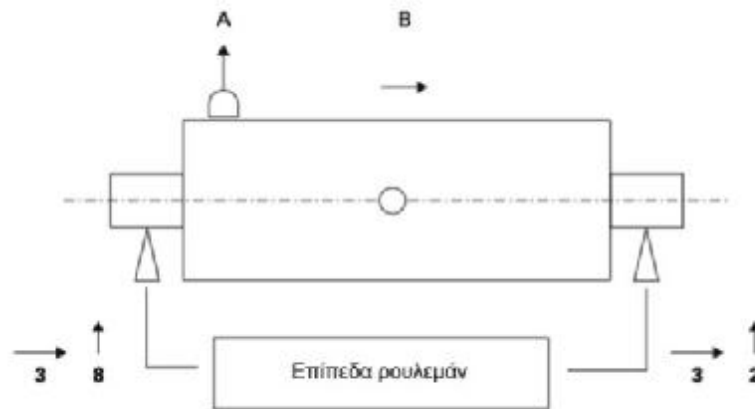
Επιστροφή στην στατική αζυγοσταθμία. Κοιτάζουμε το σχήμα(Σχ.3.13) και σκεφτόμαστε αν είναι αυτό στατική αζυγοσταθμία. Θα μπορούσαμε να το διορθώσουμε με μία ενιαία μάζα στο κέντρο ή με μισού μεγέθους μάζα σε κάθε άκρο. Αυτή η κατάσταση προκύπτει συνήθως με έναν ρότορα σχήματος δίσκου, όπως μία τροχαλία, ένα αξονικό ανεμιστήρα ή ένα βολάν. Είναι πιο απλό να εξηγηθεί όταν χρησιμοποιούμε τον ίδιο ρότορα για όλες τις εικόνες.



Σχήμα 3.13. Αζυγοσταθμία στο κέντρο του ρότορα

3.3.4 Δύο αζυγοσταθμίες

Χρειάζεται να προσθέσουμε τις αζυγοσταθμίες σε κάθε άκρο(Σχ.3.14). Έτσι, έχουμε στα αριστερά $8+3=11$, κάτι όμως που είναι λάθος. Στην πραγματικότητα, έχουμε 8 στις 0 μοίρες και 3 στις 90 μοίρες στα αριστερά, και στα δεξιά 2 στις 0 μοίρες και 3 στις 90 μοίρες.

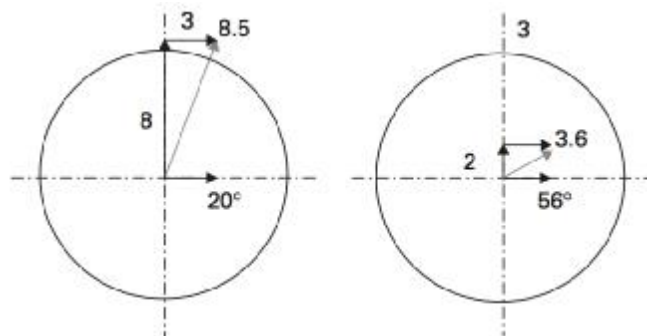


Σχήμα 3.14. Στροφέιο με δύο αζυγοσταθμίες

Θα πρέπει να προσθέσουμε τα διανύσματα.

3.4 Διανυσματική πρόσθεση

Ας δούμε το αποτέλεσμα από 2 αζυγοσταθμίες σε έναν ρότορα (Σχ. 3.15).



Σχήμα 3.15. Όψη του ρότορα και των επιπτώσεων αζυγοσταθμίας στα ρουλεμάν

Από το παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι μία αζυγοσταθμία των 8,5 μονάδων στις 20 μοίρες μπορεί να αναλυθεί στα μέρη των 8 μονάδων κάθετα και 3 μονάδων οριζόντια. Βλέπουμε επίσης τη σημασία διόρθωσης της αζυγοσταθμίας στη δεξιά γωνιακή θέση. Μία αζυγοσταθμία των 8,5 διορθώθηκε από 8 μονάδες με 20 μοίρες σφάλμα και δεν αφήνει 0,5 μονάδες αλλά 3 μονάδες.

Προς το παρόν, πρέπει να καταλάβουμε ότι μπορούμε να μετατρέψουμε την επίδραση μιας αζυγοσταθμίας σε μία θέση σε σχέση με μία διαφορετική αζυγοσταθμία σε μία διαφορετική θέση αλλά με το ίδιο αποτέλεσμα. Αυτό που μόλις κάναμε ήταν να πάρουμε έναν ζυγοσταθμισμένο ρότορα, να προσθέσουμε 2 αζυγοσταθμίες και να μάθουμε την επίδραση στα ρουλεμάν. Σε μία μηχανή ζυγοστάθμισης κάνουμε την αντίστροφη λειτουργία, μετράμε την αζυγοσταθμία στα ρουλεμάν και μεταφράζουμε την αποτελεσματική αζυγοσταθμία στα επίπεδα διόρθωσης.

3.5 Αζυγοσταθμία σε δύο επίπεδα

Με δύο επίπεδα διόρθωσης μπορούμε να ζυγοσταθμίσουμε οποιοδήποτε άκαμπτο ρότορα.

Αυτή η γενική περίπτωση ενός ρότορα με αζυγοσταθμία και δύο επίπεδα διόρθωσης καλύπτει το 90% του συνόλου των εφαρμογών ζυγοστάθμισης. Σε τι διαφέρει; Οι θέσεις των ρουλεμάν, οι θέσεις διόρθωσης, ένα επίπεδο ή δύο επίπεδα. Με δύο επίπεδα διόρθωσης μπορούμε να ζυγοσταθμίσουμε οποιοδήποτε άκαμπτο ρότορα. Με μονό επίπεδο διόρθωσης μπορούμε να ζυγοσταθμίσουμε στενούς ρότορες ή ρότορες που η αξονική θέση της αζυγοσταθμίας είναι γνωστή.

3.6 Αζυγοσταθμία έξω από τα ρουλεμάν

Παρακάτω (Σχ. 3.16) έχουμε έναν ρότορα και μία τροχαλία, και η τροχαλία έχει μία αζυγοσταθμία των 10 μονάδων στις 0 μοίρες.



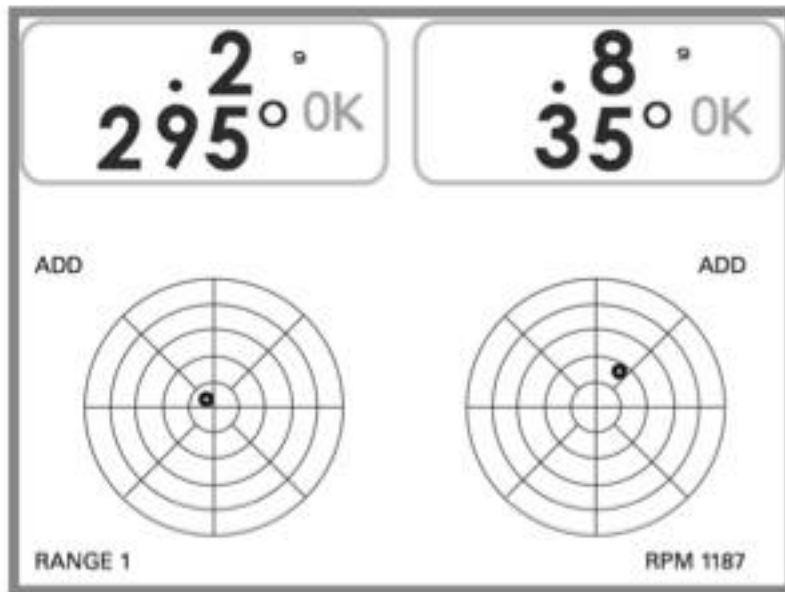
Σχήμα 3.16. Στροφείο με την αζυγοσταθμία έξω από τα ρουλεμάν

Δεδομένου ότι η τροχαλία είναι έξω από τα ρουλεμάν η επίδραση της αζυγοσταθμίας μεγεθύνεται στη δεξιά στήριξη και αρνητικά στην αριστερή.

Έχουμε δύο προφανείς μεθόδους διόρθωσης.

Μπορούμε να κάνουμε μία ζυγοστάμιση δύο επιπέδων με διόρθωση στον ρότορα ή μπορούμε να κάνουμε μονού επιπέδου διόρθωση στην τροχαλία. Το πλεονέκτημα της διόρθωσης της τροχαλίας είναι ότι ο ρότορας παραμένει σε ισορροπία. Υποθέτοντας ότι ο ρότορας ζυγοσταθμίστηκε πριν από την προσθήκη της τροχαλίας, η συνδεσμολογία θα είναι σε ισορροπία, εάν μόνο η τροχαλία είναι διορθωμένη.

Αυτό που χρειάζεται είναι μία μέθοδος για να μειωθεί ένα επίπεδο χωρίς να επηρεάζει το άλλο. Αυτό μπορεί να γίνει μαθηματικώς με χρήση λογισμών ή έξι ταυτόχρονων εξισώσεων. Ένας άλλος τρόπος είναι να χρησιμοποιήσουμε μία μηχανή ζυγοστάμισης με εγκατεστημένο το υπολογιστικό σύστημα. Δε θέλουμε να έχουμε να κάνουμε υπολογισμούς κάθε φορά που χρησιμοποιούμε μηχανή ζυγοστάμισης. Αυτό που χρειαζόμαστε είναι η μηχανή ζυγοστάμισης να κάνει τους υπολογισμούς για εμάς. Παρακάτω (Σχ. 3.17) βλέπουμε μία τυπική οθόνη μέτρησης, που δείχνει τις διορθώσεις των αζυγοσταθμιών που πρέπει να γίνουν. Αυτή η οθόνη δε δείχνει τη γεωμετρία του ρότορα (χρειάζεται να το δούμε αυτό μόνο κατά την εγκατάσταση).



Σχήμα 3.17. Οθόνη μέτρησης που δείχνει τις διορθώσεις των αζυγοσταθμιών

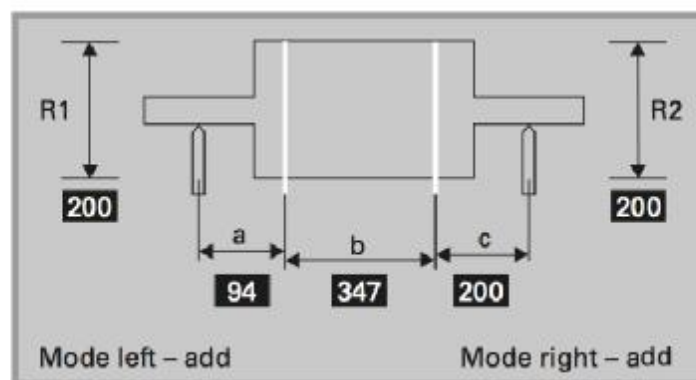
3.7 Διαχωρισμός επιπέδου

Μια μηχανή ζυγοστάθμισης για να είναι εύκολη στη χρήση, θα πρέπει με πολύ απλό τρόπο να μεταφράζει τα δεδομένα. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν σήματα από τους αισθητήρες δονήσεων και την αναφορά φάσης. Από αυτό γνωρίζουμε τις στροφές, τη μηδενική γωνία και τα σχετικά ποσά καθώς και τις γωνίες της αζυγοσταθμίας σε κάθε ρουλεμάν. Αλλά συνήθως δε διορθώνουμε την αζυγοσταθμία στα ρουλεμάν. Το άλλο μισό των όσων γνωρίζουμε περιλαμβάνει τις διαστάσεις του ρότορα και τις θέσεις όπου η διόρθωση της αζυγοσταθμίας είναι δυνατή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ

4.1 Ρύθμιση της μηχανής

Στο πάνω μέρος της οθόνης είναι τα δεδομένα της αζυγοσταθμίας για τις συνθήκες εγκατάστασης παρακάτω. Σε έναν σύγχρονο εξοπλισμό, αλλάζοντας τα δεδομένα ρύθμισης θα ενημερώνεται αυτόματα η οθόνη χωρίς να χρειάζεται να βάλουμε τη μηχανή ξανά σε λειτουργία.



Σχήμα 4.18. Οθόνη μηχανής ζυγοστάθμισης

Βλέπουμε εδώ την εικόνα του ρότορα (Σχ.4.18). Σε κάθε άκρο της εικόνας του ρότορα, η διάμετρος για τη διόρθωση έχει εγγραφεί (το μηχάνημα τη μετατρέπει σε κατάλληλο αριθμό ακτίνας). Έχουμε τη μέτρηση 'a', αυτή είναι η απόσταση που μετράται από τα σημεία επαφής των αριστερών κυλίνδρων στήριξης προς το αριστερό επίπεδο διόρθωσης. Στη συνέχεια έχουμε το επίπεδο διόρθωσης, απόστασης 'b'. Τέλος, η απόσταση από το δεξί επίπεδο διόρθωσης στο σημείο επαφής των δεξιών κυλίνδρων στήριξης είναι 'c'.

Μόλις οι πέντε τιμές δεδομένων αποτελούν την είσοδο, ο υπολογιστής της μηχανής ζυγοστάθμισης θα είναι σε θέση να μετατρέψει τα σήματα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες δονήσεων άμεσα, για να διαβάσουμε την πραγματική διόρθωση που απαιτείται για τα δύο επίπεδα διόρθωσης. Επειδή έχουμε την ακτίνα, η μηχανή μπορεί να κάνει την μετατροπή από γραμ.χιλιοστά σε γραμμάρια, συγγιές ή άλλη βολική μονάδα.

Η μηχανή ζυγοστάθμισης ασχολείται με τις σχέσεις μεταξύ 'a', 'b' και 'c' διαστάσεις, ώστε να μπορούν να είναι σε οποιαδήποτε κατάλληλη μονάδα, υπό τον όρο ότι όλα είναι

στην ίδια μονάδα. Από πρακτική άποψη, είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτεροι αριθμοί από αυτούς που επιτρέπει η μηχανή. Για παράδειγμα, με το 'a'=1, το 'b'=2, 'το 'c'=1 οι μόνες επιλογές για να κάνουν μία προσαρμογή της 'a' διάστασης είναι 0 ή 2. Αν οι αντίστοιχοι αριθμοί είναι 100, 20, 100 τότε το 'a' μπορεί να ρυθμιστεί σε 99 ή 101 το οποίο είναι 1% της αξίας. Με αναλογικά συστήματα αυτό θα ήταν πιο κρίσιμο, δεδομένου ότι τα ποτενσιόμετρα χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των τιμών και έχουν ένα ορισμένο ποσό για τη μη γραμμικότητα που ενισχύεται όταν χρησιμοποιείται μόνο το 10% της μέγιστης τιμής.

4.2 Μετράμε, και έπειτα διορθώνουμε την αζυγοσταθμία

Όταν η μηχανή είναι ρυθμισμένη θα παρέχει άμεση ανάγνωση της αζυγοσταθμίας για τα επιλεγμένα επίπεδα. Το ποσό που αναγνώνεται δείχνει πόση αζυγοσταθμία υπάρχει στα επιλεγμένα επίπεδα διόρθωσης. Είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι πρέπει να διορθωθεί για να φέρει τον ρότορα σε ανοχή, παρά στο 'μηδέν'. Αφαιρώντας περισσότερο υλικό κοστίζει σε χρόνο και αυξάνει την πιθανότητα καταστροφής της απόδοσης του ρότορα. Για παράδειγμα, αν έχουμε ζυγοστάθμιση σε οπλισμό ηλεκτρικού κινητήρα, τότε η αφαίρεση υλικού μπορεί να επηρεάσει τη ροπή του κινητήρα. Συστήματα μικροεπεξεργαστών με ένα πολικό γράφημα θα δώσει μια άμεση οπτική ένδειξη της απαιτούμενης δράσης.

4.3 Διόρθωση

Πρώτα χρειάζεται να ρυθμίσουμε τη μηχανή ζυγοστάθμισης. Όταν η μηχανή ρυθμιστεί, ο ρότορας έχει τοποθετηθεί και μετρηθεί. Όταν δε βρίσκεται εντός των ανοχών, πρέπει να κάνουμε κάποια διόρθωση. Μέχρι τώρα η διαδικασία ήταν απλή, η μηχανή είχε σχεδιαστεί με αυτόν τον τρόπο. Η διόρθωση είναι συχνά δύσκολο να επιτευχθεί. Οι σχεδιαστές δεν κάνουν πάντοτε (επαρκής) πρόβλεψη για διόρθωση αζυγοσταθμίας κατά τον σχεδιασμό ρότορων. Μερικές φορές δεν υπάρχει κανένας τρόπος για να αφαιρεθεί ή να προστεθεί αρκετό υλικό. Μερικές φορές το διαθέσιμο υλικό δεν είναι σε περιοχές που είναι αποτελεσματικές (μικρή ακτίνα, κοντά μεταξύ τους, δεν διαχωρίζεται από το κέντρο μάζας).

Μερικές φορές, επίσης, το πρόβλημα είναι με την ακρίβεια που απαιτείται σε μαζική απομάκρυνση. Η διόρθωση της αζυγοσταθμίας είναι όπου υπάρχει ένα τεράστιο ποσό μεταβλητότητας. Η ζυγοστάθμιση συχνά λαμβάνει χώρα σε σχεδόν ολοκληρωμένες συνδεσμολογίες και η εμφάνιση μετά τη ζυγοστάθμιση είναι σημαντική. Η δυναμικότητα

παραγωγής μπορεί να σημαίνει ότι υπάρχουν μόνο λίγα δευτερόλεπτα για να γίνει η διόρθωση. Σε πολλές περιπτώσεις, ένα σύστημα ζυγοστάθμισης της παραγωγής μπορεί να περιλαμβάνει μια γραμμή μεταφοράς πολλαπλών θέσεων. Για να έχουμε μια αποτελεσματική διόρθωση της αζυγοσταθμίας πρέπει να σπάσουμε το πρόβλημα σε μία σειρά μικρότερων αποφάσεων.

4.3.1.3 τρόποι διόρθωσης

Υπάρχουν μόνο τρεις επιλογές:

1^η επιλογή- προσθήκη μάζας - προσθέτουμε μια βίδα σε ένα περιστρεφόμενο κομμάτι, προσθέτουμε μια ροδέλα κάτω από ένα παξιμάδι, ανακατεύουμε λίγη εποξική κόλα και στόκο και τα εφαρμόζουμε ή συγκολλούμε ένα κομμάτι στη θέση που θέλουμε λαμβάνοντας υπόψη να μην εμποδίσουμε την περιστροφή του άξονα και να είμαστε βέβαιοι να μην αποκολληθεί το κομμάτι ή να μην αποδυναμωθεί ο άξονας με τρύπημα ή με το κολαούζο, στην προσπάθειά μας να φτιάξουμε μια τρύπα για αυξομείωση βάρους.

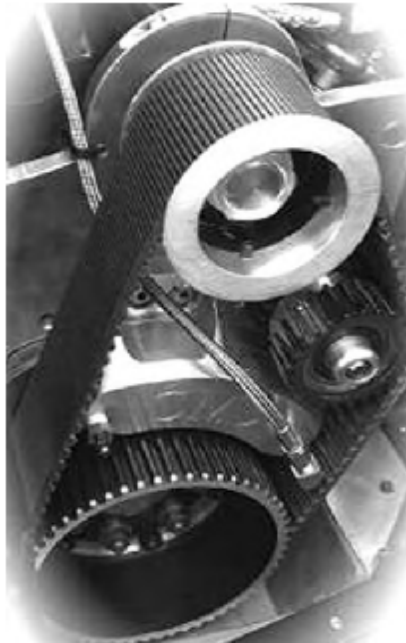
2^η επιλογή- αφαίρεση μάζας – τρύπημα, επεξεργασία επιφάνειας, τρόχισμα, αφαίρεση αντίβαρου (ίσως μια ροδέλα κάτω από μια βίδα). Θα πρέπει να προσέξουμε να μην κόψουμε πάρα πολύ βαθιά, αποδυναμώνοντας μέρος του ρότορα που μπορεί να στρεβλώσει την ταχύτητα λειτουργίας, καταστρέφοντας έτσι τα τυλίγματα οπλισμού, και αφήνοντας σημάδια στα κομβία, τα οποία θα μπορούσε να προκαλέσουν βλάβη στη μηχανή ή στον ρότορα στην επόμενη μέτρηση.

3^η επιλογή- ανακατανομή της μάζας – ασύμμετρα δαχτυλίδια που γυρίζουν, ποικίλα μήκη μπουλονιών που συγκρατούν την τροχαλία στον άξονα, περιστρέφουμε την τροχαλία στον άξονα ή ανοίγουμε μια μικρότερου μεγέθους τρύπα με μια ακτινική μετατόπιση σε σωστή αζυγοσταθμία (κέντρο της μάζας) - κοιτάζουμε για σφύξιμο των ρυθμιζόμενων κομματιών, έχοντας πολλές έκκεντρες μετατοπίσεις (όρια ακρίβειας). Είναι κρίσιμης σημασίας να εξασφαλιστεί ότι τα ρυθμιζόμενα κομμάτια δεν κινούνται κατά τη λειτουργία, δεδομένου ότι αυτό μπορεί να προκαλέσει μεγάλη αζυγοσταθμία ή το αποτέλεσμα είναι η επαφή με μη περιστρεφόμενα εξαρτήματα με καταστροφικά αποτελέσματα. Κοιτάζοντας σε ένα συγκεκριμένο ρότορα πρέπει πρώτοι να αποφασίσουμε ποια από τις τρεις επιλογές είναι πλέον η κατάλληλη. Στο πλαίσιο αυτής της επιλογής, εμείς σπάμε τις επιλογές και κοιτάζουμε τον όγκο παραγωγής.

4.4 Ποια είναι τα όρια

Πρέπει να καθιερώσουμε ένα ζευγάρι σημείων αναφοράς. Υπάρχουν διεθνή πρότυπα που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ως κατευθυντήριες γραμμές για ανοχές ισορροπίας αλλά είναι από τη φύση τους πολύ γενικές. Βασιζόμενοι μόνο σε ένα από αυτά τα πρότυπα μπορούν να μας δώσουν μία ανοχή που είναι αρκετά μακριά από το βέλτιστο.

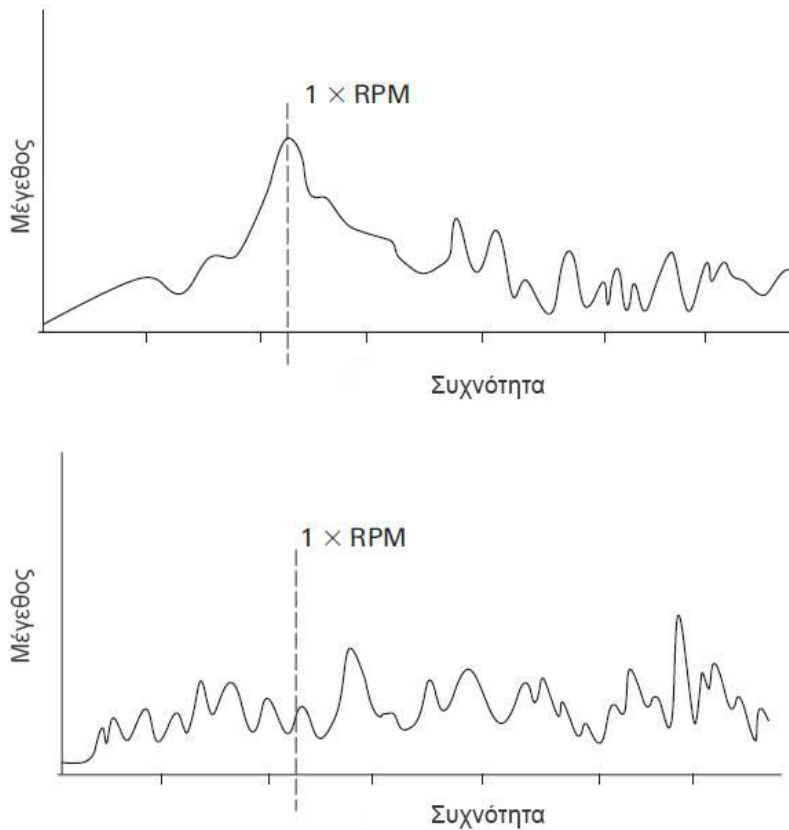
Όταν βρίσκεται σε λειτουργία μια μηχανή υπάρχει μία δόνηση στο βάθος σε πολλές διαφορετικές συχνότητες. Ορισμένες από αυτές προέρχονται από τα ρουλεμάν, ίσως από τον ιμάντα μετάδοσης κίνησης (Σχ.4.19), ειδικά όταν έχουν φθαρεί. Μερικές φορές οι κινητήρες έχουν μια μαγνητική αζυγοσταθμία.



Σχήμα 4.19. Ιμάντας μετάδοσης κίνησης σε κινητήρα

Οι ανεμιστήρες - φτερωτές μπορεί να έχουν ένα πτερύγιο που είναι έξω από τη γραμμή. Τα γρανάζια έχουν εκκεντρότητα. Όλα αυτά οδηγούν σε μια υπογραφή δόνησης. Οι υπογραφές, όπως τα δαχτυλικά αποτυπώματα, είναι μοναδικά. Όπως τα δαχτυλικά αποτυπώματα, έτσι και οι υπογραφές μπορούν να αποκωδικοποιηθούν αλλά αντί για την ανάλυση χειρογράφου, χρησιμοποιούμε την ανάλυση συχνοτήτων. Η μέτρηση της δόνησης και η ανάλυση εξοπλισμού μπορεί να σπάσει τη δόνηση σε ένα φάσμα που δείχνει τα ποσά σε πολλές διαφορετικές συχνότητες.

4.5 Καταγραφή του θορύβου



Διάγραμμα 2.2. Διάγραμμα μεγέθους συναρτήσει συχνότητας

Το πρώτο γράφημα (Διαγ. 2.2) δείχνει υψηλή δόνηση σε 1 επί τις στροφές. Αυτό σημαίνει πως είναι πιθανό ότι υπάρχει σημαντική έλλειψη ισορροπίας. Μπορεί να υπάρχουν και άλλες αιτίες για αυτή τη δόνηση, αλλά ψάχνουμε ειδικά μόνο σε ισορροπία τώρα.

Το δεύτερο διάγραμμα δείχνει σημαντικές δονήσεις. Δεδομένου ότι η δόνηση στην ταχύτητα κυκλοφορίας είναι χαμηλότερη από την δόνηση σε άλλες συχνότητες δε θα υπάρξει μεγάλη βελτίωση από την περαιτέρω ζυγοστάθμιση.

Υπάρχει ακόμα αζυγοσταθμία και θα μπορούσαμε να την μειώσουμε περαιτέρω. Δεν είναι ικανότητα της μηχανής ζυγοστάθμισης, που είναι το όριο. Το θέμα εδώ είναι ότι χαμηλότερη ζυγοστάθμιση δε θα βελτιώσει τον θόρυβο, τη δόνηση ή την ποιότητα του προϊόντος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΟΧΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΑ

5.1 Η σωστή ανοχή

Ψάχνουμε για την ανοχή που είναι πιο οικονομική και με αποτελεσματική απόδοση.

Θα μπορούσε να είχε πιο ικανοποιητική λειτουργία χωρίς να δημιουργήσει πρόωρη φθορά στους τριβείς (ρουλεμάν) ή υπερβολικούς κραδασμούς. Θα είναι τέτοια η απώλεια που θα δημιουργήσει ικανό βιομηχανικό κόστος. Δυστυχώς, κάθε φορά που υπάρχει ένα πρόβλημα δόνησης, η αντίδραση είναι να κόψουμε την ανοχή της ισορροπίας στο μισό. Στη συνέχεια, αν αυτό δε λειτουργήσει το κόβουμε στο μισό και πάλι. Δεδομένου ότι οι κίνδυνοι από μία χαλαρή ανοχή είναι εγγυημένα αποτυχημένοι, υπάρχει πάντα απροθυμία να χαλαρώσει μια εφικτή μικρή ανοχή. Μόνο όταν καθίσταται ανέφικτο το ξανακοιτάζουμε. Ο σωστός τρόπος για να καθοριστεί η ιδανική ανοχή ισορροπίας είναι να πάρουμε μια παρτίδα καλά κατασκευασμένων ρότορων, να τους ζυγοσταθμίσουμε και στη συνέχεια να τους θέσουμε σε λειτουργία, και προοδευτικά να προσθέσουμε αζυγοσταθμία μέχρι η απόδοση να είναι αποδεκτή. Τώρα η αζυγοσταθμία μπορεί να μετρηθεί, και ένα όριο να καθοριστεί δίνοντας καλά αποτελέσματα χωρίς το θέμα να έχει λάβει τέλος. Οι ρότορες θα πρέπει επίσης να ελέγχονται για τα διαγράμματα των δονήσεων κάτω από συνθήκες λειτουργίας και να ταξινομήσουμε τι άλλες δονήσεις που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση. Αυτό μπορεί να φαίνεται σαν ένα μεγάλο πρόβλημα, αλλά το αποτέλεσμα αξίζει τον κόπο. Αρχικά έχουμε το χαμηλότερο κόστος ανοχής ζυγοστάθμισης, έπειτα έχουμε τη βάση για τεκμηριωμένη ανοχή και τέλος όταν υπάρχει μια μεταβολή στο σχεδιασμό του ρότορα υπάρχουν δεδομένα για να αξιολογηθεί η επίδραση επί της ζυγοστάθμισης.

Μια άλλη μεταβλητή που πρέπει να εξετασθεί στο πλαίσιο της διαδικασίας παραγωγής είναι οι μεταβολές που συμβαίνουν μετά τη ζυγοστάθμιση λόγω συναρμολόγησης και συσσώρευσης ανοχών. Οι οπλισμοί είναι ζυγοσταθμισμένοι και έπειτα προστίθενται ρουλεμάν. Ο κινητήρας είναι εφοδιασμένος με μια τροχαλία κίνησης ή έναν σφόνδυλο που έχει μια κατάλληλη ανοχή. Το αποτέλεσμα είναι η υψηλή δόνηση σ'ένα ποσοστό των συναρμολογήσεων.

5.2 Πρότυπα

Πρότυπα όπως το ISO 1940 αναπτύχθηκαν ώστε να βοηθηθεί ο καθορισμός των ανοχών. Αυτό το πρότυπο ISO βασίζεται στη μέτρηση μηχανημάτων ταχύτητας δόνησης. Το ANSI είναι ταυτόσημο αλλά εκτυπώνεται από το Αμερικάνικο Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων.

Η προδιαγραφή API είναι γραμμένη γύρω από τις απαιτήσεις της αντλίας - στις πετροχημικές βιομηχανίες και ταξινομεί τα αζυγοστάθμιτα επίπεδα ως συνάρτηση της μάζας του ρότορα και της ταχύτητας λειτουργίας. Έγγραφα ARP είναι χτισμένα γύρω από τις απαιτήσεις των κινητήρων αεροσκαφών. Διευκρινίζονται οι απαιτήσεις της μηχανής ζυγοστάθμισης, έτσι ώστε οι μηχανές να μπορούν να εγκριθούν για την ικανοποίηση των αναγκών της βιομηχανίας, ενώ κάθε κατασκευαστής μπορεί να θέσει τις δικές του απαιτήσεις. Κάθε μία από αυτές τις οργανώσεις προτύπων χρηματοδοτούνται εν μέρη από τις πωλήσεις αυτών των προτύπων.

5.2.1 ISO 1940

Το ISO 1940 είναι διάσημο για την ταξινόμηση της δόνησης από την άποψη των κωδικών G παρόλο που πολλοί άνθρωποι δεν ξέρουν τι σημαίνει αυτό, είναι εύκολο να καταλάβουμε ότι G2.5 είναι αυστηρότερη ανοχή από G6.3. Διευκρινίζουμε εδώ, ότι αυστηρότερο δεν σημαίνει απαραίτητα και καλύτερο. G2.5 σημαίνει ταχύτητα δόνησης 2.5 χιλιοστά ανά δευτερόλεπτο υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Δυστυχώς, είναι η θεωρητική τιμή υποθέτοντας ότι ο ρότορας περιστρέφεται στον ελεύθερο χώρο ώστε να μην έχει σχέση με τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Το ISO 1940 χρησιμοποιεί ένα σύνολο κριτηρίων για την ταξινόμηση του αποδεκτού βαθμού δόνησης – μια χαμηλή ταχύτητα ντίτζελ πλοίων έχει μεγάλη ποιότητα, ενώ μια υψηλής ταχύτητας λείανση ατράκτου - άξονα έχει ένα πολύ σφιχτό βαθμό. Οι σφιχτοί βαθμοί απαιτούν ζυγοστάθμιση του ρότορα στα δικά του ρουλεμάν και υπό τους όρους συνθηκών λειτουργίας.

5.2.2 API 610

Το API 610 βασίζεται σε μία πολύ απλή εξίσωση:

$T = 4W/n$ με βάρος ρότορα (W) σε λίβρες, ταχύτητα (n) σε στροφές και η ανοχή που προκύπτει (T) σε oz.in

Μια απλή εξίσωση δεν εγγυάται εύκολη ζυγοστάθμιση. Για αντλίες υψηλής ταχύτητας, ειδικά η ανοχή μπορεί να είναι πολύ σφιχτή. Η μετάδοση κίνησης στην πετροχημική βιομηχανία είναι συχνά πολύπλοκη και μπορεί να παράγει δονήσεις οι οποίες εκδηλώνονται με άλλο κομμάτι του εξοπλισμού μέσω των συνδεδεμένων σωλήνων, κοινών βάσεων κλπ. Ένα πολύ συγκεκριμένο πρόβλημα με την προδιαγραφή API είναι ότι δε κάνει καμία συγκατάβαση για σφάλματα ισορροπίας εργαλείων. Η ιδέα είναι να ζυγοσταθμίσει σε σχεδόν 'μηδέν' στον ισορροπιστή προκειμένου να καταστεί δυνατή για σφάλματα συναρμολόγησης. Το αποτέλεσμα είναι ότι μια αντλία υψηλής δόνησης μπορεί να αφαιρεθεί, και το υπόλοιπο στροφείο να ελεγχθεί μόνο για να βρεθεί η υψηλή αζυγοσταθμία (στην πραγματικότητα οφείλεται σε μη επαναληψιμότητα της τοποθέτησης). Μετά την ζυγοστάθμιση και την επανασυναρμολόγηση μπορεί να εξακολουθεί να υπάρχει μεγάλη αζυγοσταθμία ή αντίθετα μπορεί να είναι εντάξει. Ένα δευτερεύον αποτέλεσμα μπορεί να είναι ότι ο χειριστής χάνει την εμπιστοσύνη στη μηχανή ζυγοστάθμισης και στα εργαλεία.

Εάν εργαστούμε σε ένα διωλιστήριο μπορεί να ενθουσιαστούμε με την ικανοποίηση των απαιτήσεων API. Θα πρέπει τουλάχιστον να βεβαιωθούμε ότι ο εξοπλισμός είναι καλός και ταιριάζει καλά έτσι ώστε η σκληρή δουλειά μας να αντανakλάται σε χαμηλή δόνηση των τελικών συστημάτων. Είναι πάντα καλό να ελέγχουμε τα δεδομένα της μηχανής ζυγοστάθμισης όπως την ελάχιστη ταχύτητα μέτρησης, τη λειτουργία μέτρησης, την ανοχή κλπ. και να προσαρμοζόμαστε ανάλογα με τις ανάγκες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΕΙΔΗ ΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΣΗΣ

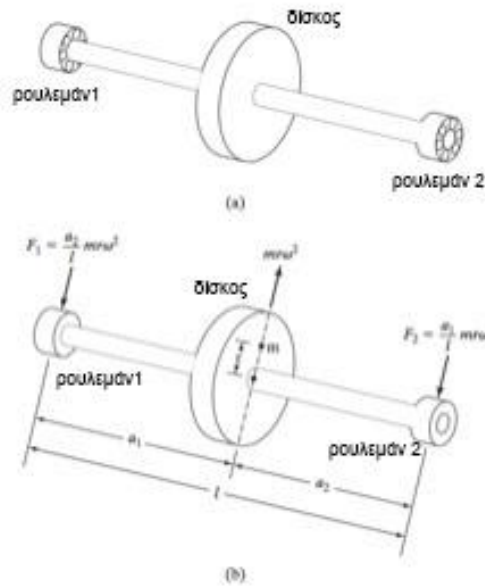
6.1 Ζυγοστάθμιση ενός επιπέδου

Θεωρούμε ένα στοιχείο της μηχανής, με τη μορφή ενός λεπτού κυκλικού δίσκου, όπως ένας ανεμιστήρας, ένας σφόνδυλος, ένα γρανάζι ή ένας τροχός λειάνσεως τοποθετημένο πάνω σε μία άτρακτο. Όταν το κέντρο της μάζας μετατοπίζεται από τον άξονα περιστροφής, λόγω των σφαλμάτων κατασκευής, το στοιχείο της μηχανής λέγεται ότι είναι στατικά αζυγοστάθμιτο. Για να καθοριστεί αν ένας δίσκος είναι ζυγοσταθμισμένος ή όχι, τοποθετούμε τον άξονα σε δύο ρουλεμάν χαμηλής τριβής, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.20(a).

Περιστρέφουμε τον δίσκο και του επιτρέπουμε να ηρεμήσει. Σημαδεύουμε το χαμηλότερο σημείο επί της περιφέρειας του δίσκου, πχ με κιμωλία. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία πολλές φορές, κάθε φορά που σημαδεύουμε με κιμωλία το χαμηλότερο σημείο του δίσκου. Εάν ο δίσκος έχει ζυγοσταθμιστεί, τότε τα σημάδια της κιμωλίας θα είναι διάσπαρτα τυχαία σε όλη την περιφέρεια. Από την άλλη πλευρά, αν ο δίσκος δεν έχει ζυγοσταθμιστεί, όλα τα σημάδια της κιμωλίας θα συμπίπτουν.

Η αζυγοσταθμία που ανιχνεύεται με αυτή τη διαδικασία είναι γνωστή ως στατική αζυγοσταθμία. Η στατική αζυγοσταθμία μπορεί να διορθωθεί με αφαίρεση μετάλλου στο σημάδι της κιμωλίας ή προσθέτοντας ένα βάρος στις 180° από το σημάδι της κιμωλίας. Δεδομένου ότι το μέγεθος της αζυγοσταθμίας δεν είναι γνωστό, η ποσότητα του υλικού που πρέπει να προστεθεί ή να αφαιρεθεί πρέπει να προσδιορίζεται με δοκιμή και σφάλμα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ζυγοστάθμιση ενός επιπέδου, δεδομένου ότι όλη η μάζα βρίσκεται πρακτικά σε ένα μόνο επίπεδο. Η ποσότητα της αζυγοσταθμίας μπορεί να βρεθεί με την περιστροφή του δίσκου σε μια γνωστή ταχύτητα ω και με μέτρηση των αντιδράσεων στα δύο ρουλεμάν, Σχήμα 6.20(b). Αν μια αζυγοστάθμιτη μάζα m βρίσκεται σε μια ακτίνα r του δίσκου, η φυγόκεντρος δύναμη θα είναι $m r \omega^2$. Έτσι οι μετρούμενες αντιδράσεις των ρουλεμάν F_1 και F_2 δίνουν m και r :

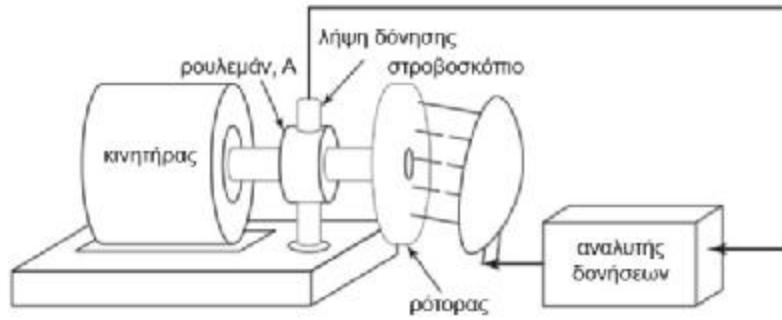
$$F_1 = \frac{a_2}{l} m r \omega^2 \quad , \quad F_2 = \frac{a_1}{l} m r \omega^2 \quad (6.1)$$



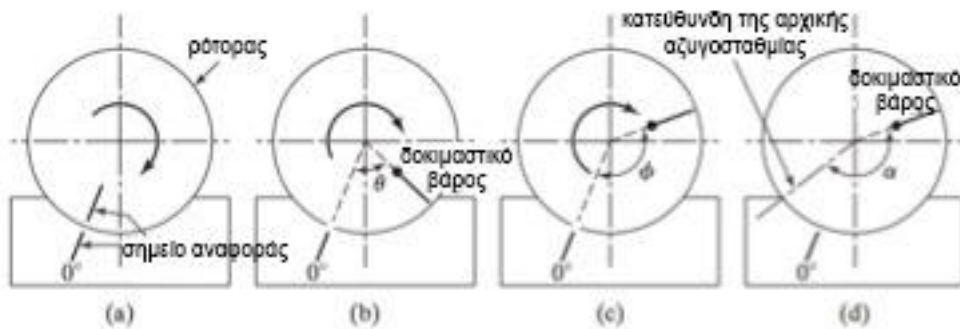
Σχήμα 6.20. Ζυγοστάθμιση ενός επιπέδου

Μια άλλη διαδικασία για ζυγοστάθμιση ενός επιπέδου, με χρήση αναλυτή δόνησεων, απεικονίζεται στο σχήμα 6.21. Εδώ ένας τροχός λειάνσεως (δίσκος) είναι συνδεδεμένος με έναν περιστρεφόμενο άξονα, ο οποίος εδράζεται μέσω ενός ρουλεμάν (σημείο A) και κινείται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω .

Πριν από την έναρξη της διαδικασίας, σημάδια αναφοράς, επίσης γνωστά ως σημάδια φάσης, τοποθετούνται τόσο στον ρότορα όσο και στο στάτη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.22(a). Ένας αισθητήρας δόνησης έχει τοποθετηθεί σε επαφή με το ρουλεμάν, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.21, και ο αναλυτής δόνησης έχει οριστεί σε μια συχνότητα που αντιστοιχεί στην γωνιακή ταχύτητα του τροχού λειάνσεως. Το σήμα της δόνησης (το εύρος μετατόπισης) που παράγεται από την αζυγοσταθμία, μπορεί να διαβαστεί από την ένδειξη του μετρητή του αναλυτή δόνησεων. Ένα στροβοσκοπικό φως τροφοδοτείται από τον αναλυτή δόνησης στη συχνότητα του περιστρεφόμενου τροχού. Όταν ο ρότορας περιστρέφεται με ταχύτητα ω το σημάδι φάσης πάνω στον ρότορα φαίνεται ακίνητο υπό το στροβοσκοπικό φως, αλλά έχει περιστραφεί κατά μια γωνία θ σε σχέση με το σημάδι επί του στάτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.22(b), λόγω φάσης υστέρησης στην απόκριση. Τόσο η γωνία θ όσο και το πλάτος A_u (που διαβάζεται από τον αναλυτή δόνησεων) που προκαλείται από την αρχική αζυγοσταθμία, καταγράφονται. Ο ρότορας στην συνέχεια σταματά και ένα γνωστό δοκιμαστικό βάρος W τοποθετείται στον ρότορα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.22(b). Όταν ο ρότορας λειτουργεί σε μια ταχύτητα ω , η νέα γωνιακή θέση του σημαδιού φάσεως του ρότορα ϕ και του πλάτους δόνησης A_{u+w} , που προκαλείται από την συνδυασμένη αζυγοσταθμία του ρότορα και του δοκιμαστικού βάρους, καταγράφονται (βλ. στο σχήμα 6.22(c)) επίσης.



Σχήμα 6.21. .Ενός επιπέδου ζυγοστάθμιση με χρήση αναλυτή δονήσεων



Σχήμα 6.22. Χρήση σημάτων φάσης

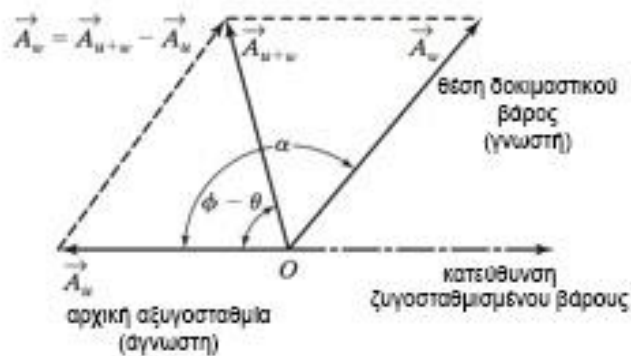
Για να βρούμε το μέγεθος και τη θέση της μάζας διόρθωσης για τη ζυγοστάθμιση του τροχού κατασκευάζουμε ένα διανυσματικό διάγραμμα(Σχ.6.23). Το αρχικό αζυγοστάθμιτο διάνυσμα A_u σχεδιάζεται σε μια αυθαίρετη κατεύθυνση, με το μήκος του να ισούται με A_u . Τότε το συνδυασμένο αζυγοστάθμιτο διάνυσμα συντάσσεται ως A_{u+w} σε μια γωνία $\varphi - \theta$ από την κατεύθυνση του A_u με μήκος του A_{u+w} .

Η διανυσματική διαφορά $A_w = A_{u+w} - A_u$ στο διάγραμμα αντιπροσωπεύει το αζυγοστάθμιτο διάνυσμα λόγω του δοκιμαστικού βάρους W . Το μέγεθος του A_w μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον νόμο των συνημιτόνων:

$$A_w = [A_u^2 + A_{u+w}^2 - 2A_u A_{u+w} \cos(\varphi - \theta)]^{1/2} \quad (6.2)$$

Δεδομένου ότι το μέγεθος του δοκιμαστικού βάρους W και η κατεύθυνση του σε σχέση με την αρχική αζυγοσταθμία είναι γνωστές, η ίδια η αρχική αζυγοσταθμία πρέπει να είναι σε μια γωνία α μακριά από τη θέση του δοκιμαστικού βάρους, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.22(d). Η γωνία α μπορεί να ληφθεί από τον νόμο των συνημιτόνων:

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{A_u^2 + A_w^2 - A_{u+w}^2}{2A_u A_w} \right] \quad (6.3)$$

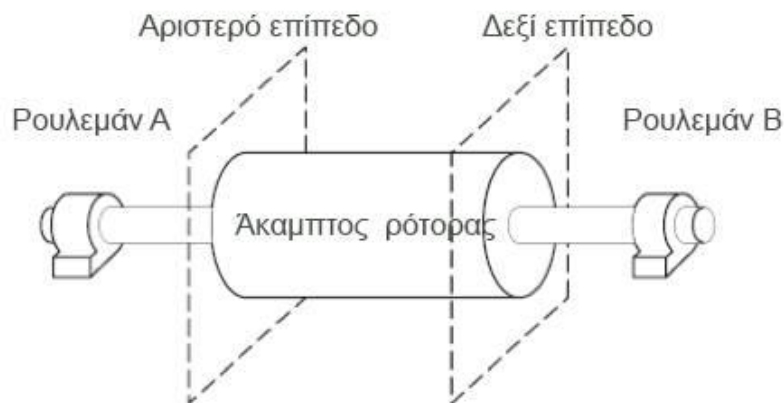


Σχήμα 6.23. Αζυγοσταθμία εξαιτίας του δοκιμαστικού βάρους

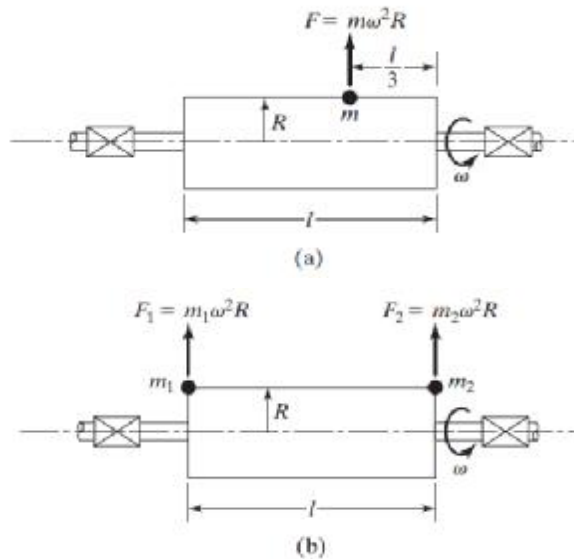
Το μέγεθος της αρχικής αζυγοσταθμίας είναι $W_0 = (A_u/A_w) * W$ και βρίσκεται στην ίδια ακτινική απόσταση από τον άξονα περιστροφής του ρότορα ως προς το βάρος W . Μόλις γίνουν γνωστά η θέση και το μέγεθος της αρχικής αζυγοσταθμίας, μπορεί να προστεθεί το βάρος διόρθωσης για να γίνει σωστά η ζυγοστάθμιση του τροχού.

6.2 Ζυγοστάθμιση δύο επιπέδων

Η διαδικασία ζυγοστάθμισης ενός επιπέδου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ζυγοστάθμιση σε ένα επίπεδο, για ρότορες τύπου άκαμπτου δίσκου. Αν ο ρότορας είναι ένα επίμηκες άκαμπτο σώμα όπως φαίνεται στο σχήμα 6.24, η αζυγοσταθμία μπορεί να είναι οπουδήποτε κατά μήκος του ρότορα. Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να ζυγοσταθμιστεί με την προσθήκη ζυγοσταθμισμένων βαρών σε οποιοδήποτε από τα δύο επίπεδα. Για λόγους ευκολίας, τα δύο επίπεδα συνήθως επιλέγονται ως τα ακραία επίπεδα του ρότορα (φαίνονται με διακεκομμένες γραμμές στο σχήμα 6.24). Για να καταλάβουμε ότι κάθε αζυγοστάθμιτη μάζα του ρότορα μπορεί να αντικατασταθεί από δύο ασύμμετρες μάζες (σε οποιοδήποτε από τα δύο επίπεδα) θεωρούμε έναν ρότορα με την αζυγοστάθμιτη μάζα m σε απόσταση $1/3$ από το δεξί άκρο όπως φαίνεται στο σχήμα 6.25(a). Όταν ο ρότορας περιστρέφεται με ταχύτητα ω , η δύναμη που οφείλεται στην αζυγοσταθμία θα είναι $F = m\omega^2 R$, όπου R είναι η ακτίνα του ρότορα. Η αζυγοστάθμιτη μάζα m μπορεί να αντικατασταθεί από δύο μάζες m_1 και m_2 που βρίσκονται στα άκρα του ρότορα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.25(b).



Σχήμα 6.24. Ζυγοστάθμιση δύο επιπέδων.



Σχήμα 6.25. Απεικόνιση μιας αζυγοστάθμητης μάζας σε δύο ισοδύναμες αζυγοστάθμητες μάζες.

Οι δυνάμεις που ασκούνται στον ρότορα από αυτές τις μάζες είναι

$$F_1 = m_1\omega^2 R \text{ και } F_2 = m_2\omega^2 R.$$

Από την ισορροπία των δυνάμεων στα σχήματα 6.25(a) και (b), έχουμε

$$m\omega^2 R = m_1\omega^2 R + m_2\omega^2 R \quad \text{ή} \quad m = m_1 + m_2 \quad (6.4)$$

Αντίστοιχα από την ισορροπία των ροπών έχουμε:

$$m\omega^2 R \frac{l}{3} = m_1\omega^2 R l \quad \text{ή} \quad m = 3m_1 \quad (6.5)$$

Οι εξισώσεις 6.4 και 6.5 δίνουν $m_1 = m/3$ και $m_2 = 2m/3$.

Έτσι κάθε αζυγοστάθμητη μάζα μπορεί να αντικατασταθεί από δύο ισοδύναμες αζυγοστάθμητες μάζες στα άκρα του ρότορα.

Πραγματοποιούμε τώρα τη διαδικασία ζυγοστάθμισης σε δύο επίπεδα χρησιμοποιώντας αναλυτή δόνησεων. Στο σχήμα 6.26 η συνολική αζυγοσταθμία του ρότορα αντικαταστάθηκε από δύο αζυγοστάθμιτα βάρη U_L και U_R και στο δεξί και στο αριστερό άκρο, αντιστοίχως. Στην ταχύτητα λειτουργίας ω του ρότορα, το πλάτος της δόνησης και η φάση λόγω της αζυγοσταθμίας, μετρούνται στα δύο ρουλεμάν A και B, και τα αποτελέσματα καταγράφονται ως διανύσματα \vec{V}_A και \vec{V}_B . Το μέγεθος του διανύσματος δόνησης λαμβάνεται ως πλάτος ταλάντωσης, ενώ η κατεύθυνση του διανύσματος λαμβάνεται ως το αρνητικό της

γωνίας φάσης που παρατηρήθηκε από το στροβοσκοπικό φως έχοντας ως σημείο αναφοράς τη γραμμή του στάτη. Τα διανύσματα \vec{V}_A και \vec{V}_B που μετρήθηκαν μπορούν να εκφραστούν

$$\vec{V}_A = \vec{A}_{AL} \vec{U}_L + \vec{A}_{AR} \vec{U}_R \quad (6.6)$$

$$\vec{V}_B = \vec{A}_{BL} \vec{U}_L + \vec{A}_{BR} \vec{U}_R \quad (6.7)$$

Όπου το \vec{A}_{ij} μπορεί να θεωρηθεί ως διάνυσμα, που αντικατοπτρίζει την επίδραση της αζυγοσταθμίας στο επίπεδο j ($j=L,R$) σχετικά με τη δόνηση στο επίπεδο i ($i=A,B$).

Πρέπει να αναφέρουμε πως το \vec{U}_L και \vec{U}_R και όλα τα διανύσματα \vec{A}_{ij} είναι άγνωστα στις εξισώσεις 6.6 και 6.7.

Όπως και στην περίπτωση της ζυγοστάθμισης ενός επιπέδου, προσθέτουμε γνωστά δοκιμαστικά βάρη και παίρνουμε μετρήσεις για να λάβουμε πληροφορίες σχετικά με τις αζυγοσταθμίτες μάζες.



Σχήμα 6.26. Ζυγοστάθμιση δύο επιπέδων

Πρέπει πρώτα να προσθέσουμε ένα γνωστό βάρος \vec{W}_L στο αριστερό επίπεδο σε μια γνωστή γωνιακή θέση, και μετράμε τη μετατόπιση και τη φάση της δόνησης στα δύο ρουλεμάν, ενώ ο ρότορας περιστρέφεται με ταχύτητα ω . Δηλώνουμε αυτές τις μετρούμενες δονήσεις ως διανύσματα, και εκφράζονται ως

$$\vec{V}_A' = \vec{A}_{AL} (\vec{U}_L + \vec{W}_L) + \vec{A}_{AR} \vec{U}_R \quad (6.8)$$

$$\vec{V}_B' = \vec{A}_{BL} (\vec{U}_L + \vec{W}_L) + \vec{A}_{BR} \vec{U}_R \quad (6.9)$$

Αφαιρώντας τις εξισώσεις 6.6 και 6.7 από τις εξισώσεις 6.8 και 6.9 αντίστοιχα, επιλύοντας, έχουμε

$$\vec{A}_{AL} = \frac{\vec{V}_{A'} - \vec{V}_A}{\vec{W}_L} \quad (6.10)$$

$$\vec{A}_{BL} = \frac{\vec{V}_{B'} - \vec{V}_B}{\vec{W}_L} \quad (6.11)$$

Έπειτα, αφαιρούμε το \vec{W}_L και προσθέτουμε ένα γνωστό βάρος \vec{W}_R στο δεξί επίπεδο, σε μια γνωστή γωνιακή θέση, και μετράμε τις δονήσεις που προκύπτουν, ενώ ο ρότορας περιστρέφεται με ταχύτητα ω . Οι μετρούμενες δονήσεις σημειώνονται και μπορούν να εκφραστούν ως διανύσματα:

$$\vec{V}_A'' = \vec{A}_{AR} (\vec{U}_R + \vec{W}_R) + \vec{A}_{AL} \vec{U}_L \quad (6.12)$$

$$\vec{V}_B'' = \vec{A}_{BR} (\vec{U}_R + \vec{W}_R) + \vec{A}_{BL} \vec{U}_L \quad (6.13)$$

Όπως και πριν αφαιρούμε τις εξισώσεις 6.6 και 6.7 από τις εξισώσεις 6.12 και 6.13 αντίστοιχα, για να βρούμε

$$\vec{A}_{AR} = \frac{\vec{V}_A'' - \vec{V}_A}{\vec{W}_R} \quad (6.14)$$

$$\vec{A}_{BR} = \frac{\vec{V}_B'' - \vec{V}_B}{\vec{W}_R} \quad (6.15)$$

Όταν οι διανυσματικοί τελεστές \vec{A}_{ij} είναι γνωστοί, οι εξισώσεις 6.6 και 6.7 μπορούν να επιλυθούν για να βρούμε τα αζυγοστάθμιτα διανύσματα \vec{U}_L και \vec{U}_R

$$\vec{U}_L = \frac{\vec{A}_{BR} \vec{V}_A - \vec{A}_{AR} \vec{V}_B}{\vec{A}_{BR} \vec{A}_{AL} - \vec{A}_{AR} \vec{A}_{BL}} \quad (6.16)$$

$$\vec{U}_R = \frac{\vec{A}_{BL} \vec{V}_A - \vec{A}_{AL} \vec{V}_B}{\vec{A}_{BL} \vec{A}_{AR} - \vec{A}_{AL} \vec{A}_{BR}} \quad (6.17)$$

Ο ρότορας μπορεί να ζυγοσταθμιστεί με την προσθήκη ίσων και αντίθετων αντίβαρων σε κάθε επίπεδο. Τα αντίβαρα στο δεξί και το αριστερό επίπεδο μπορούν να συμβολιστούν και διανυσματικά ως $\vec{B}_L = -\vec{U}_L$ και $\vec{B}_R = -\vec{U}_R$.

Μπορεί να φανεί ότι η διαδικασία ζυγοστάθμισης δύο επιπέδων είναι μια απλή επέκταση της διαδικασίας ζυγοστάθμισης ενός επιπέδου. Παρόλο που οι ρότορες υψηλής ταχύτητας έχουν ζυγοσταθμιστεί κατά την διάρκεια της κατασκευής, συνήθως καθίσταται αναγκαίο να τους ζυγοσταθμίσουμε ξανά στο πεδίο εξαιτίας των ελαφρών αζυγοσταθμιών που προκαλούνται από τον ερπυσμό, την υψηλής θερμοκρασίας λειτουργία και λοιπά.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Σε μια ζυγοστάθμιση δύο επιπέδων ενός στροφείο στροβίλου, τα στοιχεία που προέκυψαν από την αρχική αζυγοσταθμία καθώς και το δοκιμαστικό βάρος τόσο στο δεξί όσο και στο αριστερό επίπεδο, παρουσιάζονται παρακάτω. Το εύρος μετατόπισης είναι σε χιλιοστά της ίντσας(1/1000). Καθορίστε το μέγεθος και τη θέση των αντίβαρων που απαιτούνται.

Κατάσταση	Πλάτος Ταλάντωσης		Γωνία Φάσης	
	Στο Ρουλεμάν Α	Στο Ρουλεμάν Β	Στο Ρουλεμάν Α	Στο Ρουλεμάν Β
Αρχική αζυγοσταθμία	8.5	6.5	60°	205°
$W_L = 10.0$ oz προστίθονται στις 270° από το σημάδι αναφοράς	6.0	4.5	125°	230°
$W_R = 12.0$ oz προστίθονται στις 180° από το σημάδι αναφοράς	6.0	10.5	35°	160°

Όπου 1oz = 28.35 γρ.

ΛΥΣΗ:

Τα δεδομένα που μας δίνονται μπορούν να εκφραστούν σε μορφή διανυσμάτων ως εξής

$$\vec{V}_A = 8.5 \angle 60^\circ = 4.2500 + i7.3612$$

$$\vec{V}_B = 6.5 \angle 205^\circ = -5.8910 - i2.7470$$

$$\vec{V}'_A = 6.0 \angle 125^\circ = -3.4415 + i4.9149$$

$$\vec{V}'_B = 4.5 \angle 230^\circ = -2.8926 - i3.4472$$

$$\vec{V}''_A = 6.0 \angle 35^\circ = 4.9149 + i3.4472$$

$$\vec{V}''_B = 10.5 \angle 160^\circ = -9.8668 + i3.5912$$

$$\vec{W}_L = 10.0 \angle 270^\circ = 0.0000 - i10.0000$$

$$\vec{W}_R = 12.0 \angle 180^\circ = -12.0000 + i0.0000$$

Οι εξισώσεις (6.10) και (6.11) δίνουν

$$\vec{A}_{AL} = \frac{\vec{V}_A' - \vec{V}_K}{\vec{W}_L} = \frac{-7.6915 - i2.4463}{0.0000 - i10.0000} = 0.2446 - i0.7691$$

$$\vec{A}_{BL} = \frac{\vec{V}_B' - \vec{V}_B}{\vec{W}_L} = \frac{2.9985 - i0.7002}{0.0000 - i10.0000} = 0.0700 + i0.2998$$

Η χρήση των εξισώσεων (6.14) και (6.15) μας οδηγούν σε

$$\vec{A}_{AR} = \frac{\vec{V}_A'' - \vec{V}_A}{\vec{W}_R} = \frac{0.6649 - i3.9198}{-12.0000 + i0.0000} = -0.0554 + i0.3266$$

$$\vec{A}_{BR} = \frac{\vec{V}_B'' - \vec{V}_B}{\vec{W}_R} = \frac{-3.9758 + i6.3382}{-12.0000 + i0.0000} = 0.3313 - i0.5282$$

Τα αζυγοστάθμιτα βάρη μπορούν να προσδιοριστούν από τις εξισώσεις (6.16) και (6.17)

$$\vec{U}_L = \frac{(5.2962 + i0.1941) - (1.2237 - i1.7721)}{(-0.3252 - i0.3840) - (-0.1018 + i0.0063)} = \frac{(4.0725 + i1.9661)}{(-0.2234 - i0.3903)}$$

$$= -8.2930 + i5.6879$$

$$\vec{U}_R = \frac{(-1.9096 + i1.7898) - (3.5540 + i3.8590)}{(-0.1018 + i0.0063) - (-0.3252 - i0.3840)} = \frac{(1.6443 - i2.0693)}{(0.2234 + i0.3903)}$$

$$= -2.1773 - i5.4592$$

Έτσι τα απαιτούμενα αντίβαρα δίνονται από

$$\vec{B}_L = -\vec{U}_L = (8.2930 - i5.6879) = 10.0561 \angle 145.5548^\circ$$

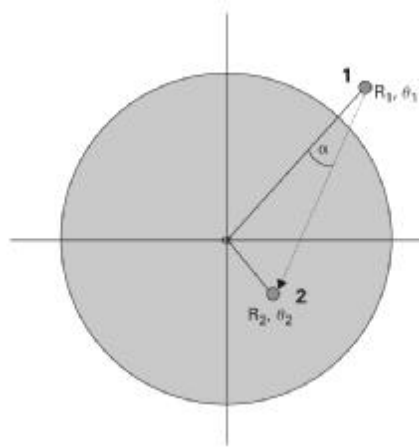
$$\vec{B}_R = -\vec{U}_R = (2.1773 + i5.4592) = 5.8774 \angle 248.2559^\circ$$

Έτσι προκύπτει πως ένα βάρος 10.0561 oz στο αριστερό επίπεδο στις 145.5548° καθώς και ένα βάρος 5.8774 oz στο δεξί επίπεδο στις 248.2559° από τη θέση αναφοράς, θα ζυγοσταθμίσει το στροφείο του στροβίλου. Υπονοείται ότι τα αντίβαρα προστίθενται στην ίδια ακτινική απόσταση όπως και τα δοκιμαστικά βάρη. Εάν ένα αντίβαρο βρίσκεται σε μια διαφορετική ακτινική θέση, το απαιτούμενο αντίβαρο πρόκειται να τροποποιηθεί αντιστρόφως ανάλογα με την ακτινική απόσταση από τον άξονα περιστροφής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΣΗΣ

7.1 Η σημασία της ΓΩΝΙΑΣ

Η ενότητα αυτή θα εξερευνήσει τη σημασία της γωνίας στη ζυγοστάθμιση. Εάν υπάρχει ένα πρόβλημα στη ζυγοστάθμιση που εμφανίζεται ασήμαντο, αλλά έχει σημαντικές συνέπειες, είναι η λάθος γωνία. Συνήθως είναι εύκολο να δούμε πότε μία διόρθωση αζυγοσταθμίας είναι πολύ μικρή - το ποσό της αζυγοσταθμίας μειώνεται και η γωνία μένει η ίδια. Εάν η διόρθωση είναι πολύ μεγάλη, τότε υπάρχει μια αλλαγή φάσης 180 μοιρών. Όταν υπάρχει ένα σφάλμα με τη γωνία, το ποσό μπορεί να υπερδιορθωθεί ή να υποδιορθωθεί, αλλά υπάρχει μια σημαντική αλλαγή στη γωνία, που δημιουργεί σύγχυση. Μετά τη διόρθωση της αζυγοσταθμίας, το ποσό μειώνεται ελαφρά αλλά η γωνία είναι πολύ διαφορετική. Πρέπει να θυμόμαστε ότι η αζυγοσταθμία είναι ένα διανυσματικό μέγεθος και αυτό σημαίνει ότι πρέπει να γνωρίζουμε το μέγεθος και τη κατεύθυνση. Ποιο από αυτά είναι περισσότερο σημαντικό; Είναι εξίσου σημαντικά.



Σχήμα 7.27 Γωνία της αζυγοσταθμίας

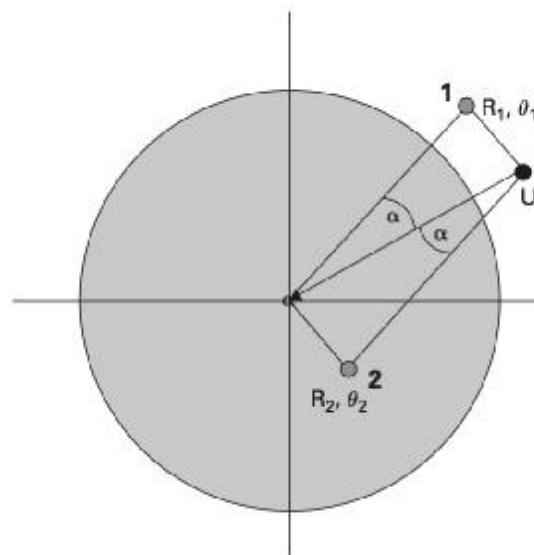
7.2 Σφάλμα φάσης

Στο παραπάνω σχήμα(Σχ.7.27) έχουμε μια κατάσταση όπου η αζυγοσταθμία ήταν προφανώς σε μία γωνία περίπου 45 μοιρών. Μετά τη διόρθωση το ποσό ήταν μικρότερο, αλλά ήταν πλέον στις 140 μοίρες. Αυτό, μπορεί να μην είναι αμέσως προφανές, αλλά το πραγματικό ποσό της διόρθωσης ήταν πολύ κοντά στο τέλειο. Η σωστή ποσότητα του υλικού

απομακρύνθηκε. Ωστόσο απομακρύνθηκε σε λάθος γωνία. Για την ακρίβεια υπήρχε μια μικρή διόρθωση κατά περίπου 5%, αλλά δεν ήταν αυτό το πρόβλημα. Το πρόβλημα ήταν ότι η αζυγοσταθμία ήταν στην πραγματικότητα στις 55 μοίρες και έτσι υπήρχε ένα σφάλμα 10 μοιρών σε γωνία διόρθωσης. Πρέπει να εξετάσουμε την τριγωνομετρία και να αξιολογήσουμε το ημίτονο και το συνημίτονο. Για το σφάλμα γωνίας 10 μοιρών που φαίνεται παραπάνω, το συνημίτονο της γωνίας μας δίνει το σφάλμα στο ποσό διόρθωσης της λάθος γωνίας (η διόρθωση ήταν λιγότερο αποτελεσματική λόγω του λάθους). Το συνημίτονο των 10 μοιρών είναι 0.98, έτσι υπάρχουν σημαντικά σφάλματα (2%) στο ποσό της διόρθωσης που οφείλεται στο σφάλμα γωνίας (το συνημίτονο των 0 είναι 1). Το ημίτονο της γωνίας σφάλματος μας δίνει την τιμή του σφάλματος κατά 90 μοίρες προς τη διόρθωση. Αυτή είναι μια νέα αζυγοσταθμία που δημιουργείται κάνοντας τη διόρθωση σε λάθος γωνία. Το ημίτονο των 10 μοιρών είναι 0.17, οπότε το ποσό σφάλματος στις 90 μοίρες της αρχικής αζυγοσταθμίας είναι 17% της αρχικής αζυγοσταθμίας.

7.3 Μετατόπιση φάσης

Κοιτάζοντας σε αυτό το σχήμα πιο προσεκτικά (Σχ.7.28), βλέπουμε την αρχική αζυγοσταθμία (U) και την διόρθωση (1) η οποία αποδίδει το τελικό αποτέλεσμα (2).



Σχήμα 7.28. Μετατόπιση φάσης

Η διόρθωση ήταν μέσα στο σφάλμα 5-10%. Αυτό που κάνει είναι να αυξήσει την αλλαγή γωνίας για πάνω από 90 μοίρες. Εάν είχαμε κάνει μια υποδιόρθωση η αλλαγή γωνίας θα ήταν μικρότερη από 90 μοίρες. Το σφάλμα γωνίας είναι περίπου 10 μοίρες και αυτό σημαίνει ότι το ποσό θα είχε υποδιορθωθεί από το συνημίτονο των 10 μοιρών, το οποίο είναι 0.98 ή ένα σφάλμα 2%. Στις 90 μοίρες ως προς την αζυγοσταθμία το αποτέλεσμα θα είναι το σήμα των 10 μοιρών, το οποίο είναι 0.173 ή 17%. Με μία ακριβή διόρθωση θα περιμέναμε η αζυγοσταθμία να μειωθεί κατά ένα συντελεστή 10 λόγω της κανονικής μέτρησης και της διόρθωσης σφαλμάτων. Εάν η γωνία δεν έχει βαθμονομηθεί σωστά τότε τα σφάλματα είναι πολύ μεγαλύτερα.

7.4 Αποδοτικότητα διόρθωσης

Με ένα σύστημα που λειτουργεί σωστά και έχει την ικανότητα της βαθμονομημένης διόρθωσης (π.χ. διάτρηση ή προσθήκη βαρών) περιμένουμε να μειωθεί η αζυγοσταθμία κατά ένα παράγοντα περίπου 10:1. Η αρχική αζυγοσταθμία U θεωρείται ότι είναι ένα σημείο αλλά αν κάνουμε μία δεύτερη μέτρηση η τιμή θα αλλάξει ελαφρώς. Μετά τη διόρθωση η αζυγοσταθμία θα πρέπει να είναι μέσα στο σκούρο κύκλο (Σχ. 7.29).



Σχήμα 7.29. Αναλογία διόρθωσης

Εάν έχουμε ένα σφάλμα γωνίας (μετακίνηση φωτοκύτταρου, για παράδειγμα) θα έχουμε το 10% της εναπομένουσας μετατόπισης από το ημίτονο της γωνίας σφάλματος. Αυτό θα θέσει την εναπομένουσα αζυγοσταθμία στον λευκό κύκλο.

Εάν η διόρθωση γίνεται με μη βαθμονομημένη μέθοδο, η διόρθωση σφάλματος θα είναι μεγαλύτερη και οι επιπτώσεις του σφάλματος της γωνίας θα είναι πιο δύσκολο να εντοπιστούν. Εάν έχουμε προβλήματα στις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις, το αποτέλεσμα θα είναι το ίδιο. Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν το αποτέλεσμα 5:1 αναλογία διόρθωσης.

Μεγαλύτερα ποσοστά λαθών είναι πιθανά όταν εργαζόμαστε σε πολύ σκληρά όρια ανοχής, ισορροπώντας σε πολύ χαμηλή ταχύτητα ή όταν υπάρχουν άλλα προβλήματα. Μπορεί να είναι δύσκολο να προσδιοριστεί το πραγματικό πρόβλημα, στην πραγματικότητα το πρώτο βήμα είναι να βελτιωθεί η επαναληψιμότητα. Αυτό μπορεί να σημαίνει την βαθμονόμηση της γωνίας με μία μεγαλύτερη αζυγοσταθμία για να δώσει μικρότερα ποσοστά λαθών.

Για να τοποθετήσουμε το φωτοκύτταρο σωστά ακολουθούμε τις συστάσεις του κατασκευαστή. Με παραλλαγές στους τύπους και τα μεγέθη των μονάδων υπάρχουν αρκετά πιθανές σωστές ρυθμίσεις. Μόλις το φωτοκύτταρο ανταποκρίνεται στο σήμα αναφοράς μπορούμε να ελέγξουμε την γωνία.

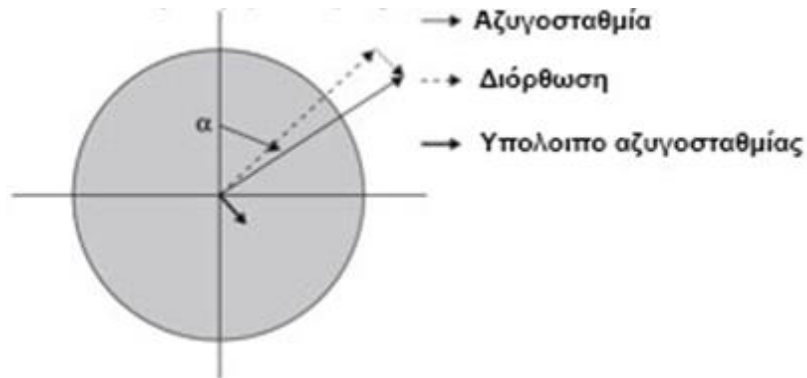
Βάζουμε σε λειτουργία τη μηχανή με έναν ρότορα που έχει χαμηλή αζυγοσταθμία και στη συνέχεια προσθέτουμε μια μεγάλη αζυγοσταθμία. Είναι πιθανόν να χρησιμοποιηθούν δύο μάζες ελέγχου (ένα σε κάθε άκρο του ρότορα) αλλά αν είναι ένας δοκιμαστικός ρότορας θα μπορούσε να υπάρξει μια διαφορά γωνίας στη θέση δοκιμαστικής μάζας.

Η μηχανή θα πρέπει να διαβάσει την ίδια γωνία για κάθε επίπεδο διόρθωσης (υπάρχει μόνο μια αζυγοσταθμία). Για λόγους ασφαλείας, δεν συνιστάται να ρυθμίζεται η θέση του φωτοκύτταρου με τη λειτουργία της μηχανής. Μπορεί να χρειαστεί να αφαιρέσουμε την δοκιμαστική μάζα και να ζυγοσταθμίσουμε ξανά τον ρότορα, και να επαναλάβουμε την διαδικασία για να πάρουμε ένα ακριβές αποτέλεσμα. Εάν η ανάγνωση της γωνίας σε δύο επίπεδα λειτουργίας δεν είναι ίδια και για τα δύο επίπεδα, τότε η μηχανή χρειάζεται αναβαθμονόμηση της γωνίας. Όταν η ανάγνωση της γωνίας είναι σωστή είναι πολύ πιο εύκολο να κάνουμε αποτελεσματικές διορθώσεις ποσοτήτων.

7.5 Αζυγοστάθμιτο διάνυσμα

Με ένα ακριβές ποσό διόρθωσης αζυγοσταθμίας η εναπομένουσα αζυγοσταθμία οφείλεται στη διόρθωση που γίνεται σε λάθος γωνία.

Το ποσό του σφάλματος είναι άμεσα συνδεδεμένο με το σφάλμα της γωνίας ή ακριβέστερα προς το ημίτονο της γωνίας σφάλματος.



Σχήμα 7.30. Διάνυσμα αζυγοσταθμίας

Εάν κοιτάξουμε το παραπάνω σχήμα (Σχ. 7.30), θα δούμε ότι η μετακίνηση της γωνίας είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση με το σφάλμα. Εάν η διόρθωση προκαλεί την γωνία να αυξηθεί, τότε η ένδειξη της μηχανής για τη γωνία πρέπει να αυξηθεί.

Μια μετατόπιση γωνίας μικρότερη από 90 μοίρες σημαίνει ότι η αζυγοσταθμία είχε υποδιορθωθεί. Όταν οι μετατοπίσεις γωνιών είναι περισσότερες από 90 μοίρες αυτό σημαίνει ότι το ποσό της αζυγοσταθμίας είχε υποδιορθωθεί.

7.6 Πίνακας σφάλματος γωνίας

Σφάλμα γωνίας	
Γωνία	Μέγεθος
1	0.02
2	0.035
3	0.05
4	0.07
5	0.09
6	0.1
7	0.12
8	0.14
9	0.155
10	0.175

Πίνακας 7.1. Συσχετισμός της λάθος γωνίας με το ποσό σφάλματος

Υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ σφάλματος γωνίας και η επίδραση του σφάλματος γωνίας αντανακλάται στην υπολειπόμενη ποσότητα αζυγοσταθμίας. Στις 10 μοίρες το ποσό σφάλματος είναι 2%, το οποίο εξακολουθεί να είναι μικρό σε σύγκριση με ένα σφάλμα άνω του 17%, λόγω των 10 μοιρών λάθους γωνίας. Σφάλματα γωνίας μικρότερες από 3 μοίρες είναι αποδεκτά για τις περισσότερες εφαρμογές. Εάν η γωνία είναι κρίσιμη, λόγω της υψηλής αναλογίας διόρθωσης ή περιορισμένων διαθέσιμων υλικών για την αφαίρεση, τότε ένα ηλεκτρονικό γωνιόμετρο θα βελτιώσει τις αποδόσεις.

7.7 Αναλογία διόρθωσης

Έχουμε αναφερθεί στην αναλογία διόρθωσης αρκετές φορές. Τώρα πρέπει να τη μελετήσουμε πιο διεξοδικά. Για να ζυγοσταθμίσουμε ένα ρότορα πρέπει πρώτα να μετρήσουμε την αζυγοσταθμία. Αφού γνωρίζουμε το μέγεθος της αζυγοσταθμίας η επόμενη κίνηση μας είναι να δούμε εάν βρίσκεται σε ανοχή. Εάν βρίσκεται σε ανοχή δεν κάνουμε καμία ενέργεια, ενώ εάν δεν βρίσκεται τότε κάνουμε διορθώσεις.

Μετά τη διόρθωση της αζυγοσταθμίας θα πρέπει να κάνουμε έναν έλεγχο για να βεβαιωθούμε ότι η διόρθωση έγινε σωστά. Μια σημαντική μέτρηση της

αποτελεσματικότητας του μέτρου και της διόρθωσης είναι η αναλογία διόρθωσης. Η αναλογία διόρθωσης είναι πολύ σημαντική όταν η αρχική αζυγοσταθμία είναι υψηλή. Αυτή είναι απλά η αναλογία μεταξύ της αρχικής αζυγοσταθμίας και της τελικής αζυγοσταθμίας μετά από μία απλή διόρθωση. Με ένα καλά προσαρμοσμένο σταθμό μέτρησης και σύστημα διόρθωσης είναι φυσιολογικό να είναι σε θέση να επιτύχει ένα ποσοστό διόρθωσης 10:1.

Εάν η αρχική αζυγοσταθμία είναι υψηλή και υπάρχει αρκετό διαθέσιμο υλικό για να προσθέσουμε ή να αφαιρέσουμε, η αναλογία διόρθωσης μπορεί να είναι πολύ υψηλότερη από αυτό. Με ημι-αυτόματες και αυτόματες πλήρως μηχανές μπορούμε να δούμε αρκετές φορές αναλογίες μεταξύ 20:1 και 50:1. Εάν υπάρχει κάποιο πρόβλημα με τον ρότορα που επηρεάζει την μέτρηση της επαναληψιμότητας ή την ακρίβεια διόρθωσης, αυτό μπορεί να μειώσει την αναλογία διόρθωσης κάτω από 5:1.

Όταν η αρχική αζυγοσταθμία είναι χαμηλή, οι ποσοστιαίες μεταβολές στις αναγνώσεις θα είναι υψηλότερες και η αναλογία διόρθωσης θα είναι χαμηλότερη. Δεν έχει σημασία αν οι ρότορες εξακολουθούν να είναι εντός ανοχής μετά από μία διόρθωση. Δεδομένου ότι οι διαδικασίες παραγωγής μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου, οι μέσες και μέγιστες τιμές της αρχικής αζυγοσταθμίας μπορεί να διαφέρουν από μέρα σε μέρα και ως εκ τούτου η αναλογία διόρθωσης να μην είναι η μόνη παράμετρος που χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση της λειτουργίας ζυγοστάθμισης.

Προκειμένου να ποσοτικοποιήσουμε την απόδοση της μηχανής, αυτό που χρειάζεται να κάνουμε είναι να ελέγξουμε το σταθμό μέτρησης κάνοντας μια δοκιμή μείωσης της αναλογίας αζυγοσταθμίας. Δεδομένου ότι αυτή η δοκιμή χρησιμοποιεί έναν δοκιμαστικό ρότορα και δοκιμαστικά βάρη είναι ένα επαναλαμβανόμενο πρότυπο.

Για την βαθμονόμηση ενός σταθμού διόρθωσης θα χρησιμοποιήσουμε αυτή τη δοκιμή για να κάνουμε αλλαγές στην αζυγοσταθμία του ρότορα και να συσχετίσουμε τις αλλαγές στην αζυγοσταθμία στα επίπεδα διόρθωσης. Εμείς συνήθως ξεκινάμε με έναν ρότορα που είναι ζυγοσταθμισμένος στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο και κάνουμε προοδευτικά βαθύτερες περικοπές στην ίδια γωνία για να παράγουμε δεδομένα ρύθμισης, χωρίς να θέσουμε πολλούς ρότορες εκτός λειτουργίας.

7.8 Γιατί όχι ‘μηδέν’

Υπάρχουν τρεις μεταβλητές που περιορίζουν την απόδοση της μηχανής, όπως η μέτρηση των σφαλμάτων, η μαζική διόρθωση, το σφάλμα γωνίας και το επίπεδο διαχωρισμού. Το τελευταίο από αυτά δεν είναι μια παράμετρος ρύθμισης σταθμού μέτρησης, αλλά μια σημαντική παράμετρος διόρθωσης.

Ένας από τους παράγοντες που διαχωρίζουν τις μηχανές ζυγοστάθμισης από τις περισσότερες άλλες διεργασίες είναι ότι κάθε ρότορας είναι μοναδικός. Οι περισσότερες επιχειρήσεις παραγωγής κάνουν το ίδιο πράγμα κάθε φορά. Κατά την ζυγοστάθμιση κάθε διόρθωση είναι ένα διαφορετικό ποσό και μια διαφορετική γωνία σε σύγκριση με τον προηγούμενο ρότορα. Με δύο επίπεδα ζυγοστάθμισης υπάρχει επίσης η σχετική ποσότητα και γωνία μεταξύ των επιπέδων για να εξετάσει. Ο πρώτος ρότορας μπορεί να έχει τις αζυγοστάθμιτες γωνίες στις 30 μοίρες και στις 50 μοίρες, ενώ ο επόμενος μπορεί να έχει τις γωνίες στις 30 μοίρες και στις 210 μοίρες και οι αναλογίες διόρθωσης μπορεί να είναι πολύ διαφορετικές.

7.9 Σφάλματα μέτρησης

Ο πρώτος λόγος για την κακή αναλογία διόρθωσης είναι ότι η μηχανή δε μετρά με επαρκή ακρίβεια, για κάτι όμως που δεν ευθύνεται απαραίτητα το σφάλμα του συστήματος μέτρησης της μηχανής. Εδώ πιθανότατα να φταίνε η εγκατάσταση και οι λειτουργικές παράμετροι.

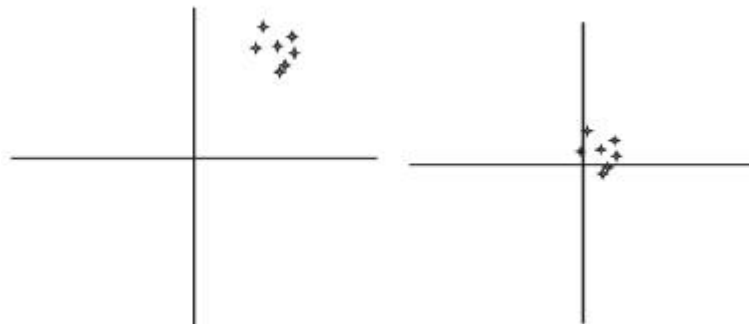
Σε ένα περιβάλλον υψηλής παραγωγής ο μετρήσιμος χρόνος μπορεί να είναι πάρα πολύ μικρός για ακριβή συλλογή δεδομένων. Ίσως ο ιμάντας κίνησης είναι πάρα πολύ σφιχτός ή έχει καταστραφεί. Μια μηχανή μετάδοσης κίνησης μπορεί να έχει ένα κινητήριο άξονα που είναι πολύ βαρύς ή βρίσκεται σε κακή κατάσταση. Ένας άλλος λόγος μπορεί να είναι ότι η μηχανή δεν έχει βαθμονομηθεί σωστά και εμφανίζει ύψος ή γωνία σφάλματος. Σε μικρότερους ρότορες η μάζα του σήματος αναφοράς μπορεί να είναι σημαντική και η εκ νέου εφαρμογή ενός συστήματος μπορεί να είναι ένα πρόβλημα.

7.10 Διαχωρισμός επιπέδου

Προβλήματα διαχωρισμού επιπέδου μπορεί να οφείλονται στο βαθμό μέτρησης, στη διαμόρφωση εγκατάστασης ή σε ένα πρόβλημα διόρθωσης. Η πρώτη ενέργεια είναι να εξασφαλιστεί ότι ο σταθμός μέτρησης είναι σωστός (με δοκιμαστικό ρότορα). Ένας δοκιμαστικός ρότορας είναι ειδικά σχεδιασμένος για να επιτρέψει έναν απλό έλεγχο του σταθμού λειτουργίας, της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας. Χωρίς ακριβή μέτρηση τίποτε άλλο δεν θα είναι ακριβές. Η δεύτερη δράση είναι να ελέγξουμε την εγκατάσταση, δηλαδή εάν είναι τα διορθωμένα επίπεδα πολύ κοντά ή σε κακή θέση. Η τρίτη δράση είναι να βεβαιωθούμε ότι έχει οριστεί η διόρθωση της μηχανής για τα σωστά επίπεδα. Η τέταρτη δράση είναι να ελέγξουμε τη μέση θέση διόρθωσης σε σύγκριση με τις μέγιστες και ελάχιστες διορθώσεις. Μερικές φορές αναπόφευκτοι παράγοντες, όπως το βάθος μιας τρύπας, αλλάζει το κέντρο μάζας της διόρθωσης. Η λύση είναι να βελτιστοποιηθεί ο διαχωρισμός επιπέδου για το πιο κρίσιμο αζυγοστάθμιτο επίπεδο.

7.11 Είναι η διαδικασία υπό έλεγχο;

Σε μια μηχανή ζυγοστάθμισης η ακρίβεια δεν αλλάζει με το ποσό της αζυγοσταθμίας εκτός και αν είναι απαραίτητο να αλλάξουμε περιοχές μέτρησης. Στη θεωρητική περίπτωση της μηδενικής αζυγοσταθμίας η γωνία είναι εντελώς τυχαία. Στην πράξη, οι ποσότητες αζυγοσταθμίας μπορεί να κυμαίνονται από 0 έως (ας πούμε) 5% της ανοχής, αλλά αυτή είναι σχεδόν μια άπειρη αναλογία. Παρακάτω θα εξετάσουμε δυο γραφικές παραστάσεις (Διαγ. 7.3).



Διάγραμμα 7.3. Διαγράμματα μεταβολής γωνίας

Η γραφική παράσταση στα αριστερά έχει μια μεταβολή στη γωνία η οποία είναι μεγάλη αλλά και η ποσοστιαία μεταβολή είναι επίσης μεγάλη. Ωστόσο, θεωρούμε επίσης, ότι όλα αυτά τα σημεία θα μπορούσαν να είναι εντός των ανοχών. Η γραφική παράσταση στα δεξιά δείχνει ένα πολύ στενότερο εύρος της γωνίας και ένα μικρότερο ποσοστό μεταβολής των ποσών. Είναι πιθανό πως κάθε ένα από αυτά τα σημεία θα μπορούσαν να είναι εκτός ανοχής. Τώρα και οι δύο γραφικές παραστάσεις έχουν το ίδιο άθροισμα σημείων δεδομένων.

Είχαν κατασκευαστεί με το ίδιο γραφικό αρχείο. Στατιστικά προγράμματα θα δώσουν μια μηχανή χαμηλότερης βαθμολογίας εάν τα δεδομένα έχουν αζυγοσταθμία η οποία είναι χαμηλή επίσης. Αυτό που πραγματικά θέλουμε είναι η ακρίβεια της μηχανής να είναι 1 επί της ανοχής. Ένα συνεπές μέγεθος της αζυγοσταθμίας θα δώσει καλές αναγνώσεις σ' ένα στατιστικό πρόγραμμα αφού η γωνία αγνοείται.

7.12 Μέτρηση R&R (repeatability & reproducibility) επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας

Αυτή είναι μια πρότυπη δοκιμή για τον εξοπλισμό μέτρησης. Η διαδικασία χρησιμοποιεί πολλαπλές δοκιμασίες σε κάθε ένα από διάφορα μέρη με αρκετούς χειριστές και χαρακτηρίζει το σύνολο των λαθών που εξαρτάται από τον χειριστή και την μηχανή. Εάν δεν είμαστε εξοικειωμένοι με τη μέτρηση R&R τότε μάλλον δεν είναι σημαντική για τη λειτουργία μας (στη δεδομένη στιγμή). Συνήθως σε μια μηχανή ζυγοστάθμισης υπάρχει πολύ μικρή μεταβολή του χειριστή. Λόγω των εξαιρετικά αυστηρών ορίων ανοχής, αυτή η δοκιμή μπορεί να είναι μια δοκιμασία του ρότορα και όχι της μηχανής ζυγοστάθμισης. Για να περάσει μια ταχύτερη R&R δοκιμή στο 10% της ανοχής, η μηχανή πρέπει να είναι σε θέση να επαναλάβει το 2% της ανοχής με τους ρότορες των πελατών.

Σημειώνουμε εδώ πως αυτό δεν είναι μια δοκιμή ακρίβειας. Η μηχανή μπορεί να περάσει αυτή τη δοκιμή και να είναι 20% μακριά από τις πραγματικές τιμές. Αυτή η δοκιμή θα δείξει αν είναι σταθερά ανοιχτά προς την ίδια κατεύθυνση. Η δοκιμή αυτή γίνεται συνήθως μετά από έλεγχο βαθμονόμησης που έχει επαληθεύσει ότι τα αποτελέσματα είναι σωστά.

Μια μηχανή ζυγοστάθμισης είναι ένα όργανο μέτρησης με ακρίβεια. Ως εκ τούτου, πρέπει να ελέγχονται τακτικά για τη βαθμονόμηση, την επαναληψιμότητα κλπ. Η δοκιμή R&R δεν έχει σχεδιαστεί για τη μηχανή ζυγοστάθμισης. Μετρά μόνο το μέγεθος της

αζυγοσταθμίας χωρίς καμία αναφορά για τη σταδιακή γωνία. Εάν ο ρότορας μετράται και το αποτέλεσμα είναι 0.5 γραμ.χιλιοστά σε 120 μοίρες η αζυγοσταθμία είναι 0.5 γραμ.χιλιοστά. Εάν επανακαταμετρηθεί και το αποτέλεσμα είναι 0.5 γραμ.χιλιοστά σε 300 μοίρες, η αζυγοσταθμία είναι 0.5 γραμ.χιλιοστά. Για τους σκοπούς της R&R το αποτέλεσμα είναι το ίδιο. Οποιοσδήποτε είναι εξοικειωμένος με τη ζυγοστάθμιση καταλαβαίνει ότι η διανυσματική διαφορά ανάμεσα στις δύο αναγνώσεις είναι 0.1 γραμ.χιλιοστά. Κρίσιμο στοιχείο στο πέρασμα της δοκιμής είναι η προετοιμασία και η αλλαγή των δοκιμαστικών ρότορων που χρησιμοποιούνται στη δοκιμή.

Η δοκιμή R&R είναι ο έλεγχος της επαναληψιμότητας. Εάν οι ρότορες έχουν αζυγοσταθμία σε 10 φορές επί της ανοχής τότε το αποτέλεσμα δεν έχει καμία σχέση με την ικανότητα της μηχανής για να καθοριστεί εάν ο ρότορας είναι στην πραγματικότητα σε ανοχή. Οι ρότορες θα πρέπει να κατασκευάζονται έτσι ώστε η αζυγοσταθμία να είναι κοντά στην πραγματική ανοχή. Εάν η ανοχή είναι 1.00 τότε οι ρότορες θα πρέπει να είναι κάτω από αυτό το επίπεδο δεδομένου ότι η ανάλυση της οθόνης θα μειωθεί κατά ένα σημαντικό ψηφίο (η μηχανή θα διαβάσει 1.00 ή 0.999 και σε μία περίπτωση η ανάλυση είναι ένα τις εκατό, ενώ στην άλλη είναι ένα τις χιλιάδες). Αυτό δεν επηρεάζει την ακρίβεια της μηχανής αλλά επηρεάζει την ικανότητα να εμφανίσει τα δεδομένα.

Συχνά, όταν κάνουμε μία δοκιμή μέτρησης, ο ένας ρότορας θα παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση στις ενδείξεις από τους άλλους. Γι'αυτό το λόγο ανταλλάσσουμε τον ρότορα με έναν άλλον ή χρησιμοποιούμε έναν από τους άλλους δύο ρότορες (μετράμε δύο φορές, δεν αντιγράφουμε απλά τους αριθμούς). Η δοκιμή χρησιμοποιείται για να βρεθεί η απόδοση της μηχανής, για να ανακαλυφθεί πόσο ανεπαρκής είναι οι ρότορες. Συχνά, ένας πελάτης θα απορρίψει ρότορες (για προφανείς λόγους οικονομίας), αλλά ο λόγος της απόρριψης θα πρέπει να είναι άσχετος με τη λειτουργία ζυγοστάθμισης. Εάν απορριφθούν για ένα κακό σπείρωμα βίδας σε ένα άκρο του άξονα είναι αποδεκτό, αλλά να απορριφθούν για κακά κομβία, διαψεύδει το αντικείμενο του ελέγχου. Είναι επιτρεπτό να επιλεγθούν οι καλύτεροι δέκα ρότορες από μία παρτίδα (ας πούμε) 50, επειδή η δοκιμή χρησιμοποιείται για να βρεθεί το όριο της μηχανής με ρότορες που είναι όσο πιο κοντά στο τέλειο δυνατό.

Η δοκιμή ακολουθεί στατιστικές μεθόδους. Δε χρειάζεται να ξέρουμε οτιδήποτε σχετικά με τα στατιστικά στοιχεία για να κάνουμε τη δοκιμή και για να υπολογίσουμε το αποτέλεσμα. Εάν θέσουμε τον ρότορα σε λειτουργία δύο φορές και τα αποτελέσματα διαφέρουν περισσότερο από 2% (της ανοχής) δεν υπάρχει κανένας λόγος να συνεχίσουμε από την στιγμή που πιθανότατα έχουμε αποτύχει στην δοκιμή.

\

7.13 Cpk (Process capability index) Δείκτης ικανότητας της διαδικασίας

Το Cpk είναι μια δοκιμή ικανότητας της διαδικασίας. Ισχύει μόνο για μηχανή ζυγοστάθμισης με μία διάταξη διόρθωσης καθώς μετρά τον συνδυασμό μέτρησης και διόρθωσης. Το μεγάλο πρόβλημα με αυτή τη δοκιμή που σχετίζεται με τη ζυγοστάθμιση είναι ότι τα εισερχόμενα μέρη δεν ελέγχονται. Το πρόβλημα δεν είναι η μηχανή ζυγοστάθμισης, αλλά η αρχική αζυγοσταθμία. Στην πραγματικότητα, το πρόβλημα είναι ο ορισμός της διαδικασίας. Αν μια μηχανή ζυγοστάθμισης είναι σχεδιασμένη για μία αναλογία διόρθωσης 10:1 (αναλογία από αρχική στην τελική αζυγοσταθμία) τότε η αρχική αζυγοσταθμία πρέπει να περιορίζεται σε 10 επί την ανοχή. Και οτιδήποτε υψηλότερο από αυτό πρέπει να εξαιρείται από τη δοκιμή.

Με Cpk μια παρτίδα με ρότορες που έχουν ούτε έναν απορρίψιμο ρότορα είναι ένα διαφορετικό πράγμα με μία παρτίδα με ένα απορριπτό. Εάν δεν έχουμε κανένα απορριπτό και η μέγιστη αζυγοσταθμία είναι κάτω από 90% τότε έχουμε φτάσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

Εάν είμαστε αναγκασμένοι να χρησιμοποιήσουμε δοκιμή Cpk τότε η κατάσταση εισόδου πρέπει να ελέγχεται. Πρώτο βήμα είναι να ταξινομήσουμε τους αζυγοστάθμιτους ρότορες για να εξαλειφθούν αυτοί που δεν μπορούν να διορθωθούν, και εκείνοι με πολύ χαμηλή αζυγοσταθμία. Διατηρούμε τα δεδομένα εισόδου για τη δοκιμή. Σημειώνουμε τα στοιχεία όπως η κατάσταση του άξονα, το βερνίκι για πλαστικοποίηση κλπ. Τραβάμε φωτογραφίες, εάν είναι απαραίτητο για την τεκμηρίωση των συνθηκών δοκιμής.

Είναι σημαντικό να αφαιρεθούν οι ρότορες με πολύ χαμηλή αζυγοσταθμία. Αυτά θα έχουν ένα αποτέλεσμα πολύ κοντά σε μηδενική αζυγοσταθμία που θα παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση της διαδικασίας. Εάν ταξινομήσουμε τους ρότορες, το ιδανικό είναι να βρούμε αυτούς που είναι περίπου 5 φορές την ανοχή και διευρύνουμε μεταξύ 3 επί και 8 επί την ανοχή. Κάθε ένα από αυτά θα πρέπει να είναι σε ανοχή μετά τη ζυγοστάθμιση, εάν η μηχανή λειτουργεί σωστά.

Στη ζυγοστάθμιση χρησιμοποιούμε μια μονόπλευρη μέτρηση. Το ελάχιστο είναι το μηδέν και το μέγιστο η ανοχή. Αυτό καλύπτει ορισμένες από τις διαφορές. Για παράδειγμα, έχουμε δύο ρότορες που έχουν αρχική αζυγοσταθμία 5 φορές την ανοχή. Μετά τη διόρθωση είναι και οι δύο στο 50% της ανοχής. Αν κοιτάξουμε προσεχτικά τα δεδομένα βλέπουμε ότι ένας διορθώθηκε από 4.5 επί την ανοχή και ο άλλος από 5.5 επί την ανοχή. Ο εμπειρογνώμονας ζυγοστάθμισης γνωρίζει ποια είναι η πραγματική απόδοση της μηχανής. Ο στατιστικολόγος που ασχολείται με την ποιότητα βλέπει δύο πανομοιότυπους ρότορες

δεδομένου ότι το σύστημα του δε λαμβάνει υπόψη την αλλαγή της γωνίας φάσης που οφείλεται στην ζυγοστάθμιση.

7.14 Αποδοτικότητα ζυγοστάθμισης

Αν είχαμε τη δυνατότητα να αγοράσουμε απόλυτα ομοιογενές υλικό και μηχανή με τέλεια ακρίβεια τότε δε θα υπήρχε η ανάγκη να ζυγοσταθμούμε ρότορες. Το κόστος μιας τέτοιας ακρίβειας (εάν επιτευχθεί) θα είναι απαγορευτικό.

Με την προσθήκη μιας λειτουργίας ζυγοστάθμισης μπορούμε να επιτρέψουμε τις προδιαγραφές του υλικού, τις μηχανικές ανοχές και τα διάκενα συναρμολόγησης να είναι χαλαρά και να μειώσουν το κόστος κατά πολύ μεγαλύτερο ποσό από το κόστος ζυγοστάθμισης. Αυτό είναι σημαντικό, να το συνειδητοποιήσουμε από την στιγμή που αρκετοί θεωρούν την ζυγοστάθμιση ένα επιπρόσθετο κόστος και δεν την καταλαβαίνουν σαν ένα τρόπο να μειώσουν το συνολικό κόστος του προϊόντος χωρίς να μειώσουν την ποιότητα του. Εάν το προϊόν φτάνει στο τελικό σταθμό ισορροπίας με πολύ υψηλό επίπεδο αζυγοσταθμίας τότε το κόστος διόρθωσης θα είναι υπερβολικό, η διόρθωση μπορεί να βλάψει τον ρότορα ή μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του, προκαλώντας πρόσθετα κόστη λόγω των απορριφθέντων.

Διορθώσεις, όπως τρύπες σε ένα ρότορα αντλίας μπορεί να προκαλέσει θόρυβο και/ή σπηλαιώση, επίσης η επεξεργασία ενός οπλισμού μπορεί να μειώσει την απόδοση, και έτσι αυξάνονται οι απώλειες ενέργειας και προκαλούνται διακυμάνσεις ροπής (οδοντώσεις). Το πρόβλημα μπορεί να μην είναι στη μηχανή ζυγοστάθμισης αλλά στην υψηλή αρχική αζυγοσταθμία

Δε χρειάζεται να διορθώσουμε το ανεπανόρθωτο. Εάν η μέγιστη αφαίρεση υλικού είναι 5 γραμμάρια τότε δε χρειάζεται καν να προσπαθήσουμε να ζυγοσταθμίσουμε τον ρότορα που έχει 6 γραμμάρια αζυγοσταθμία. Ο ρότορας δεν είναι άχρηστος, μέχρι να τον καταστρέψουμε εμείς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΣΗΣ

8.1 Πως να βεβαιωθούμε ότι η μηχανή μας κάνει ότι χρειαζόμαστε.

Όταν αγοράζουμε μια μηχανή ζυγοστάθμισης οι προδιαγραφές που αναφέρονται θα περιλαμβάνουν την ακρίβεια της μηχανής. Αυτό που μπορεί να δοθεί είναι γραμ.χιλιοστά για ένα δεδομένο βάρος του ρότορα ή η μετατόπιση του κέντρου της μάζας για ένα καθορισμένο εύρος βάρους του ρότορα. Για να δοκιμάσουμε μια μηχανή ζυγοστάθμισης, είναι απαραίτητο να έχουμε ένα κατάλληλο μέγεθος δοκιμαστικού ρότορα. Κανονικά, η μάζα του δοκιμαστικού ρότορα θα είναι περίπου το 30% της μέγιστης χωρητικότητας του βάρους της μηχανής. Οι περισσότερες μηχανές δε λειτουργούν με ρότορες με μέγιστη χωρητικότητα βάρους πολύ συχνά, επειδή οι αγοραστές ήθελαν να έχουν ένα περιθώριο ασφαλείας σε περίπτωση που έχουν να κάνουν με έναν μεγαλύτερο ρότορα στο μέλλον. Οι πιο συχνές μηχανές είναι μεγάλου μεγέθους και ο μέσος ρότορας είναι μικρότερος από 30% της χωρητικότητας της μηχανής.

Εδώ να επισημάνουμε ότι, όταν αγοράζουμε μια μηχανή ζυγοστάθμισης πρέπει να σκεφτούμε πόσο συχνά θα χρειαστούμε να ζυγοσταθμίσουμε πολύ βαρύν ρότορες. Αν δεν έχουμε παρά να κάνουμε δύο κατά έτος θα είναι καλύτερα να τις αναθέσουμε υπεργολαβικά και να αγοράσουμε μια μικρότερη μηχανή για πιο ελαφρύν ρότορες. Πρώτον, η επένδυση κεφαλαίου είναι χαμηλότερη. Δεύτερον, η μικρότερη μηχανή θα είναι πιο ευαίσθητη, πιο ακριβής, και γρηγορότερη στην εγκατάσταση (τα τμήματα είναι μικρότερα και ελαφρύτερα). Το πλεονέκτημα εδώ είναι ότι θα εξοικονομήσουμε χρόνο σε κάθε εγκατάσταση και θα έχουμε μια πιο ευαίσθητη μηχανή για τους μικρύν ρότορες.

Ο δοκιμαστικός ρότορας επιτρέπει στη μηχανή ζυγοστάθμισης να μπορεί να συγκριθεί με το πρότυπο ISO ή άλλα πρότυπα και να δοκιμάζει την πραγματική ικανότητα της μηχανής κάτω από συνθήκες που είναι κοντά στο ιδανικό.

8.2 Προδιαγραφές μηχανής ζυγοστάθμισης

Το πρώτο μέρος του συνόλου των προδιαγραφών αφορά την ικανότητα του βάρους, την ικανότητα των διαστάσεων και την ικανότητα κίνησης. Αυτό συνήθως επαληθεύεται με οπτικό έλεγχο.

Η δοκιμή απόδοσης χρησιμοποιεί έναν 'πρότυπο δοκιμαστικό ρότορα' και βαθμονομημένα δοκιμαστικά βάρη. Η μάζα των δοκιμαστικών βαρών, η θέση του κέντρου μάζας και η αποτελεσματική ακτίνα τοποθέτησης πρέπει να είναι επαληθεύσιμα και ανιχνεύσιμα στα εθνικά πρότυπα. Αυτό γίνεται για να διαπιστωθεί η απόδοση της ίδιας της μηχανής.

Προκειμένου να εξετάσουμε την απόδοση που αναγράφεται ή να βρούμε ότι η μηχανή δε πληροί τις προδιαγραφές, η δοκιμή θα πρέπει να είναι σε ένα σύνολο συγκεκριμένων προτύπων, έτσι ώστε οι μηχανές να μπορούν να συγκριθούν, να ελέγχονται και να πιστοποιούνται.

8.3 Απαιτήσεις δοκιμής και προδιαγραφές

Κατά τη δοκιμή μιας μηχανής ζυγοστάθμισης, ή μιας διαδικασίας, πρέπει να έχουμε μια αναφορά για να μας καθοδηγήσει για το τι είναι καλό αποτέλεσμα. Το πιο ευρέως χρησιμοποιημένο πρότυπο είναι το πρότυπο ISO 1940 το οποίο παρέχει ένα εξαιρετικό οδηγό για ανοχές ζυγοστάθμισης που βασίζονται σε μόλις δύο παραμέτρους, που είναι ο τύπος της εφαρμογής και η μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας.

Αυτές οι δύο παράμετροι μπορούν να μας δώσουν μια ανοχή ισορροπίας που αναφέρεται στην μετατόπιση του κέντρου μάζας του ρότορα. $U = M * e$
Πολλαπλασιάζουμε την εκκεντρότητα σε μικρά κατά μάζα του ρότορα σε κιλά και το αποτέλεσμα είναι η ισορροπία για την ανοχή του ρότορα με μονάδες σε γραμ.χιλιοστά. Άλλες βιομηχανίες, όπως πετροχημικές, έχουν τις δικές τους προδιαγραφές όπως API 610 οι οποίες χρησιμοποιούν τον τύπο 4W/n η οποία δίνει ένα αποτέλεσμα σε ίντσες, ουγγιά, το βάρος του ρότορα σε κιλά και της ταχύτητας σε στροφές.

Υπάρχει ένας αριθμός από άλλες προδιαγραφές για ειδικές βιομηχανίες - ARP 4048 για παράδειγμα στον τομέα της αεροναυπηγικής - Αεροδιαστημικές Συνιστώμενες Πρακτικές -Μηχανές Ζυγοστάθμισης, οριζόντιες, δύο επιπέδων, απόδοση και αξιολόγηση. Αυτή είναι μια πλήρης προδιαγραφή μηχανής ζυγοστάθμισης από μόνη της. Δίνει τα μεγέθη της μηχανής, την ικανότητα κίνησης, την ακρίβεια, την επαναληψιμότητα και τις διαστάσεις

διεπαφής του ρότορα και μία σχετική διαδικασία ελέγχου για την επαλήθευση των επιδόσεων.

Για πολλαπλές εφαρμογές, δεν υπάρχει συγκεκριμένο βιομηχανικό πρότυπο και μια νέα μηχανή είναι πιθανό να αντικαθιστά μία πιο παλιά μηχανή με λιγότερη ακρίβεια και με λιγότερα χαρακτηριστικά.

Μια μηχανή ζυγοστάθμισης είναι ένα πολύπλοκο όργανο μέτρησης σε συνδυασμό με μηχανικά εξαρτήματα κίνησης και εξαρτήματα στήριξης του ρότορα. Μετράμε με ακρίβεια ισοδύναμη με εκείνη μιας υψηλής ποιότητας Μηχανής Μέτρησης Συντεταγμένων (CMM).

8.4 Τύποι μηχανών ζυγοστάθμισης

Οι μηχανές ζυγοστάθμισης, από μόνες τους έχουν χαρακτηριστεί από 4 βασικά κριτήρια.

1. Οριζόντιου ή κατακόρυφου προσανατολισμού του άξονα του ρότορα

Οι περισσότεροι οριζόντιοι ζυγοσταθμιστές χρησιμοποιούνται για ρότορες που έχουν αναπόσπαστα κομβία που μπαίνουν κατευθείαν στα ρουλεμάν των στηριγμάτων της μηχανής. Μετά τη ζυγοστάθμιση, ο ρότορας μπορεί να αφαιρεθεί από τη μηχανή, να αντικατασταθεί αργότερα και να δίνει σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα. Οι κάθετοι ζυγοσταθμιστές και κάποιες οριζόντιες μηχανές έχουν ακρίβεια ατράκτου σαν μέλος της μηχανής. Αυτό παρέχει ένα σημείο τοποθέτησης για ειδικά εργαλεία του ρότορα. Οι ρότορες που παίρνουν ζυγοστάθμιση σε αυτές τις μηχανές δεν έχουν ενσωματωμένο ρουλεμάν και έτσι ο ρότορας θα πρέπει να τοποθετηθεί σε κάποιο τύπο εργαλείων.

Μηχανές με ενσωματωμένες ατράκτους συνήθως περιορίζονται στην ακρίβεια, από την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα των εργαλείων. Αυτό είναι σημαντικό. Ένας οριζόντιος ζυγοσταθμιστής χρησιμοποιείται για να εξισορροπήσει έναν ρότορα με το δικό του άξονα και ρουλεμάν, μπορεί να εξισορροπηθούν σε μια μαζική εκκεντρότητα 4-20 μικροίντσες.

Αυτό είναι το όριο της μηχανής ζυγοστάθμισης για να διαχωρίσει το σημείο από το θόρυβο. Ένας ρότορας που τοποθετείται σε εργαλεία μπορεί να ζυγοσταθμιστεί μόνο με την επαναληψιμότητα των εργαλείων. Μπορεί να είναι ισορροπημένος σε μία χαμηλή ένδειξη στον ζυγοσταθμιστή αλλά μετά την αφαίρεση και αντικατάσταση θα δείξει ένα πολύ υψηλότερο επίπεδο ισορροπίας.

Προσοχή στις υποθέσεις σχετικά με την πραγματική αζυγοσταθμία του ρότορα όταν γίνεται μέρος του συστήματος ή της συναρμολόγησης. Μετά τη ζυγοστάθμιση, στον ρότορα μπορεί να έχουν τοποθετηθεί ρουλεμάν. Η εκκεντρότητα του εσωτερικού ρουλεμάν θα προκαλέσει μια αλλαγή στην αζυγοσταθμία. Το άλλο πρόβλημα με τα ρουλεμάν είναι ότι τα αποτελέσματα θα είναι διαφορετικά με οποιαδήποτε μεταβολή στη σχετική θέση των εσωτερικών και εξωτερικών ρουλεμάν. Δεν είναι υπερβολικό για έναν ρότορα που ζυγοσταθμίζετε με μια υψηλή ακρίβεια να παρουσιάζεται υπερβολική δόνηση στην τελική δοκιμή. Όταν τα ρουλεμάν αφαιρεθούν και ο ρότορας αντικατασταθεί, στον ζυγοσταθμιστή φαίνεται να είναι καλή (η δόνηση). Τώρα τα ρουλεμάν έχουν επανατοποθετηθεί και η εκκεντρότητα είναι πιθανό να είναι σε μια διαφορετική γωνία και ο ρότορας μπορεί να περάσει με επιτυχία. Είναι τα ρουλεμάν που προκαλούν την αλλαγή και όχι η μηχανή ζυγοστάθμισης.

2. Μαλακό ρουλεμάν ή σκληρό ρουλεμάν

Μαλακά μηχανήματα ρουλεμάν έχουν συνήθως μια ελαφρύτερη κατασκευή και μπορεί να έχουν μια χαμηλότερη τιμή αγοράς, αλλά πρέπει να ρυθμίζονται για κάθε ρότορα και κάθε ταχύτητα ζυγοστάθμισης. Σκληρά μηχανήματα ρουλεμάν είναι μόνιμα βαθμονομημένα, το οποίο επιτρέπει την ταχύτερη εγκατάσταση και καλύτερη απόδοση με μεγαλύτερους ρότορες, υψηλές δυνάμεις κίνησης και υψηλά φορτία παρεκτροπής ανέμου.

Λόγω της βαρύτερης κατασκευής και αυξημένης ανάγκης για μια καλή βάση, το αρχικό κόστος της σκληρής μηχανής ρουλεμάν είναι συνήθως υψηλότερη από εκείνο μιας μαλακής μηχανής ρουλεμάν (ειδικά με μεγαλύτερα μεγέθη μηχανής). Η σκληρή μηχανή ρουλεμάν προσφέρει για τον εαυτό της μικρότερους χρόνους εγκατάστασης, χαμηλότερες ταχύτητες ζυγοστάθμισης (ασφάλεια, κινητήρια ισχύ, αξιοπιστία) και ευκολότερη λειτουργία (λιγότερη εκπαίδευση χειριστή).

3. Ένα ή δύο επίπεδα

Στατική ή δυναμική ζυγοστάθμιση - οι ζυγοσταθμιστές ενός επιπέδου είναι συνήθως κάθετες μηχανές. Αυτή είναι η ιδανική μηχανή για ρότορες σχήματος δίσκου χωρίς άξονα, όπως είναι οι δίσκοι φρένων, οι σφόνδυλοι και οι φτερωτές αντλίες. Οι περισσότερες μηχανές δύο επιπέδων έχουν την δυνατότητα να ρυθμιστούν με ζυγοστάθμιση ενός επιπέδου.

Στενοί ρότορες απαιτούν ζυγοστάθμιση μόνο ενός επιπέδου. Ένας στενός ρότορας είναι γενικά εντάξει για ζυγοστάθμιση ενός επιπέδου, όταν η διάμετρος του είναι μεγαλύτερη από τρεις φορές το πλάτος του. Θα εξετάσουμε επίσης την απόσταση μεταξύ των ρουλεμάν σε συνθήκες λειτουργίας. Για παράδειγμα, ένα μοτέρ με 21 ρουλεμάν κατά μέρος μπορεί να τοποθετηθεί με μια τροχαλία μετάδοσης κίνησης με ιμάντα 6" διάμετρο. Ακόμη και μια μεγάλη τροχαλία που θα μπορούσε να κάνει ζυγοστάθμιση δύο επιπέδων, είναι περιορισμένη σε σχέση με την απόδοση των ρουλεμάν. Εάν η τροχαλία είχε πλάτος 2.5, θα μπορούσαμε να σκεφτούμε ότι χρειάζεται ζυγοστάθμιση δύο επιπέδων, αλλά η εφαρμογή καθιστά λογικό να απαιτείται ζυγοστάθμιση μόνο ενός επιπέδου.

Όταν έχουμε να κάνουμε με ρότορες υψηλής ταχύτητας, όπως αυτές σε μικρούς στροβιλοκινητήρες, η ταχύτητα λειτουργίας μπορεί να είναι στην κλίμακα των 50000 σαλ. Ακόμη και πολύ λεπτοί ρότορες μπορεί να απαιτούν ζυγοστάθμιση δύο επιπέδων σε πολύ υψηλές ανοχές. Σχετικά με αυτό, μπορεί να είναι απαιτήσεις για τελειώματα συναρμολόγησης ζυγοστάθμισης διαφόρων ρότορων για να εξασφαλιστεί η απόδοση του κινητήρα σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

4. Ζυγοσταθμιστές ενός επιπέδου

Περαιτέρω ταξινομούνται ως περιστρεφόμενα ή μη περιστρεφόμενα. Μη περιστρεφόμενες μηχανές χρησιμοποιούνται συνήθως για παραγωγή ρότορων μεγάλου όγκου με χοντρές ανοχές ισορροπίας, όπως τύμπανα φρένων αυτοκινήτου. Ο χρόνος κύκλου είναι σύντομος, καθώς δεν υπάρχει επιτάχυνση και επιβράδυνση, και τα εργαλεία δεν πρέπει να σφίγγουν τον ρότορα, απλά να τον κρατούν.

Η έλλειψη της φυγόκεντρης δύναμης για να ενισχύσει το αποτέλεσμα της αζυγοσταθμίας καθιστά αυτές τις μηχανές κατάλληλες για ρότορες με σχετικά χοντρή ανοχή.

8.5 Διόρθωση αζυγοσταθμίας.

Υπάρχουν μόνο τρεις δυνατότητες - προσθήκη, αφαίρεση ή μετακίνηση μάζας. Η μετακίνηση της μάζας συνήθως αναφέρεται σε βάρη στις υποδοχές που μπορεί να επανατοποθετηθούν ή σε αζυγοστάθμιτους δαχτυλίους που μπορεί να περιστραφούν. Αυτό είναι καλό για υψηλής ταχύτητας εργαλειοθήκες και τροχιστικά, που πρέπει να ζυγοσταθμίζονται συχνά.

Η αφαίρεση υλικού σημαίνει συνήθως τρύπημα, επεξεργασία ή τρίψιμο. Τα προβλήματα για τη διόρθωση είναι ενδεχόμενο αποδυνάμωσης του ρότορα, ή της καταστροφής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Μια οπή, μπορεί να προκαλέσει θόρυβο ή παρεκτροπή.

Η προσθήκη υλικού μπορεί να είναι ένα πρόβλημα. Εκτιμήσεις όπως τα βάρη που έρχονται από την τριβή στα στατικά μέρη από την συναρμολόγηση, εμπλέκονται. Προσθέτοντας μια μεγάλη μάζα σε μια αδύναμη δομή μπορεί να προκαλέσει τοπική κάμψη. Εάν υπάρχει μια μεγάλη αρχική αζυγοσταθμία τότε η διόρθωση είναι πιθανό να είναι ένα πρόβλημα. Λίγοι σχεδιαστές εξοπλισμού είναι έμπειροι στη ζυγοστάθμιση και είναι σε θέση να προβλέψουν αρχικά επίπεδα αζυγοσταθμίας και να σχεδιάσουν τις κατάλληλες διατάξεις για διόρθωση στον ρότορα. Ο σχεδιασμός της χορήγησης για το υλικό διόρθωσης είναι σε σύγκρουση με άλλες απαιτήσεις για ελάχιστο υλικό, ελάχιστο μέγεθος, ελάχιστο κόστος. Δυστυχώς, αυτό είναι σύνηθες όταν ο σχεδιασμός έχει ολοκληρωθεί, όλες οι δοκιμές στα πρότυπα έχουν τελειώσει και η πρώτη παρτίδα παραγωγής μας αποκαλύπτει ότι δεν υπάρχει αρκετό υλικό που είναι διαθέσιμο για να διορθώσει την αζυγοσταθμία. Το άλλο πρόβλημα, που σχετίζεται, με το πρώτο, είναι ότι η αρχική αζυγοσταθμία είναι πολύ υψηλή σε σχέση με την ανοχή, για τη διόρθωση ενός περάσματος.

Φυσικά τα μοντέλα παραγωγής έχουν μικρή σχέση με τα δείγματα που παρέχονται στον κατασκευαστή της μηχανής ζυγοστάθμισης και επίσης δεν υπήρχαν ρότορες παραγωγής διαθέσιμοι, προκειμένου να ελεγχθεί η μηχανή πριν από την αποστολή.

Δεν έχει τόση σημασία ποια είναι η πραγματική αιτία - αλλά είναι ζωτικής σημασίας να κατηγορηθεί ο κατασκευαστής της μηχανής ζυγοστάθμισης για όλες τις ελλείψεις της διαδικασίας.

Αυτοματοποιημένα συστήματα είναι συνήθως προσαρμοσμένα για το συγκεκριμένο ρότορα, της οικογενείας των ρότορων, να είναι ζυγοσταθμισμένοι. Ο χρόνος κύκλου, η μέθοδος και το ποσό της διόρθωσης που απαιτείται, ο βαθμός αυτοματοποίησης και ο χρόνος εγκατάστασης είναι όλα ένα μέρος του συνόλου των παραμέτρων που πρέπει να βελτιστοποιηθούν.

8.6 Στη θέση ζυγοστάθμισης.

Ένας επιπρόσθετος τύπος του εξοπλισμού ζυγοστάθμισης είναι ο φορητός ζυγοσταθμιστής. Ορισμένες καταστάσεις απαιτούν τακτοποίηση της ζυγοστάθμισης στην τελική θέση λειτουργίας. Μεγάλοι ανεμιστήρες ψύξης απαιτούν υψηλή ισχύ κίνησης και είναι μεγάλης διαμέτρου, κάτι που σημαίνει ότι απαιτείται μια μεγάλη και βαρέως τύπου μηχανή ζυγοστάθμισης. Σε περίπτωση διάβρωσης και συσσώρευσης ακαθαρσιών αλλάζει η αζυγοσταθμία τόσο συχνά που επαναζυγοσταθμίζεται το πεδίο απαιτώντας να διατηρηθούν οι επιδόσεις.

Φυγόκεντρες αντλίες μπορούν να έχουν υδραυλική αζυγοσταθμία - η μάζα του ρευστού στα άνισα περάσματα αλλάζει την κατάσταση αζυγοσταθμίας - αυτό μπορεί να διορθωθεί μόνο με τακτοποίηση της ζυγοστάθμισης με τις μετρήσεις που έγιναν υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Ρότορες υψηλής ταχύτητας μπορεί να χρειαστεί να τακτοποιήσουν την ισορροπία λόγω των θερμικών και πολλαπλών αλληλεπιδράσεων των ρουλεμάν.

Ένας φορητός ζυγοσταθμιστής περιλαμβάνει λήψη δονήσεων, μηδενική φάση αναφοράς και ένα πακέτο οργάνων. Μια ρουτίνα βαθμονόμησης χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση του συστήματος, για κάθε συγκεκριμένο ρότορα. Η ζυγοστάθμιση δύο επιπέδων είναι συχνά πρακτική, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις, η διαμόρφωση του ρότορα δεν ενδείκνυται για συνεπή διαχωρισμό επιπέδου. Ένας κρίσιμος παράγοντας είναι ότι θα πρέπει να καθοριστεί ότι το πρόβλημα είναι πραγματικά η αζυγοσταθμία και όχι η χαλαρότητα, η έλλειψη ευθυγράμμισης ή τα κακά ρουλεμάν.

Η ζυγοστάθμιση ενός επιπέδου δεν είναι συνήθως πολύ δύσκολη με ένα καλό κομμάτι που διατίθεται στον εξοπλισμό.

8.7 Στη θέση διαδικασιών ζυγοστάθμισης και παγίδων.

Μια μηχανή ζυγοστάθμισης έχει σχεδιαστεί για να απομονώνει τα σήματα αζυγοσταθμίας. Η ακρίβεια στα ρουλεμάν εξαλείφει το θόρυβο και το σύστημα κίνησης είναι καλά ζυγοσταθμισμένο.

Στη θέση ισορροπίας δεν είναι τόσο απλό. Οι αισθητήρες δονήσεων συνήθως μετρούν ένα θορυβώδες σήμα και μπορεί να υπάρχουν σήματα υψηλής δόνησης με χαμηλή αζυγοσταθμία. Ο θόρυβος μπορεί να προέρχεται από άλλες μηχανές, κακά ρουλεμάν χαλαρής συναρμολόγησης, φθαρμένο κινητήριο άξονα ή κατεστραμμένο ιμάντα κίνησης και άλλες

αιτίες. Προκειμένου να αξιολογηθεί αν η ισορροπία είναι ένα πρόβλημα, το πρώτο βήμα που πρέπει να κάνουμε είναι να ελέγξουμε τη συνολική δόνηση. Εάν αυτή είναι αρκετά χαμηλή, δεν απαιτείται καμία ενέργεια. Εάν η δόνηση είναι πολύ υψηλή, τότε προσθέτοντας ένα σύγχρονο φίλτρο στο σύστημα θα αναφερθεί το ποσοστό της δόνησης σε ταχύτητα λειτουργίας. Εάν το φιλτραρισμένο σήμα είναι αρκετά χαμηλότερο από τη συνολική δόνηση τότε το πρόβλημα δεν είναι πιθανώς η αζυγοσταθμία.

Αν οι τιμές που φιλτράρονται και αυτές που δεν φιλτράρονται είναι παραπλήσιες τότε η αζυγοσταθμία είναι μια πιθανή αιτία. Η προσπάθεια για ισορροπία θα το αποκαλύψει σύντομα αυτό. Εάν ο ρότορας δεν ανταποκρίνεται στις προσπάθειες για ζυγοστάθμιση, το επόμενο βήμα είναι να ελέγξουμε για άλλες αιτίες, όπως η μετατόπιση, και ίσως μετακινήσουμε τον αισθητήρα δόνησης από οριζόντιο σε κατακόρυφο προσανατολισμό για να προσδιοριστεί αν είναι ένα κατασκευαστικό πρόβλημα.

Εν ολίγοις, χρησιμοποιώντας φορητό εξοπλισμό ζυγοστάθμισης, εξαρτάται πολύ περισσότερο από την εμπειρία και τη διάγνωση, παρά από την αγορά της ζυγοστάθμισης. Τα αποτελέσματα είναι απρόβλεπτα. Κρατώντας καλές επιδόσεις σε κάθε ενέργεια, μετά από προσεχτικές διαδικασίες θα βοηθήσει να αποφευχθεί η απογοήτευση και η απώλεια της εμπιστοσύνης και της αξιοπιστίας.

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές όπου η μέθοδος ζυγοστάθμισης που προτιμάται είναι στη θέση ζυγοστάθμισης. Μεγάλα κομμάτια του εξοπλισμού είναι δύσκολο να μετακινηθούν και η πράξη της μεταφοράς μπορεί να στρεβλώσει, έτσι ώστε να μην είναι πλέον σε ισορροπία μετά από την συναρμολόγηση. Αυτές δεν είναι εφαρμογές για έναν αρχάριο.

Συνήθως αυτό το είδος ζυγοστάθμισης γίνεται από άρτια εκπαιδευμένο και εξειδικευμένο προσωπικό που έχει μεγάλη εμπειρία από αυτές τις μηχανές επεξεργασίας, και που να κατανοεί την ευθυγράμμιση, τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας και τα αποτελέσματα των μεταβολών του φορτίου καθώς και τη συμπεριφορά των συστημάτων των ρουλεμάν. Αυτές οι μεγάλες μηχανές συχνά αποτελούνται από μια αλυσίδα πολλών ρότορων που συνδέονται μεταξύ τους, και αλλάζοντας την αζυγοσταθμία μιας μονάδας μπορούν να επηρεάσουν τους άλλους στην αλυσίδα.

Στη θέση ζυγοστάθμισης μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα απλό φορητό σύστημα. Η ζυγοστάθμιση ενός επιπέδου, ενός ανεμιστήρα, είναι σχετικά απλή. Η ζυγοστάθμιση δύο επιπέδων, ενός μεγάλου χειρισμού αέρα σ' ένα βιομηχανικό σύστημα, είναι ήδη πάρα πολύ σύνθετη. Η δόνηση μπορεί να οφείλεται στον κινητήρα, στον ανεμιστήρα ή στον ιμάντα κίνησης. Μπορεί να είναι η αζυγοσταθμία, η κακή ευθυγράμμιση, τα χαλαρά εξαρτήματα ή ένας κατεστραμμένος ιμάντας. Σε αυτό το στάδιο χρειάζεται να αναλύσουμε τις δονήσεις και

να καθορίσουμε τις συχνότητες όπου έχουμε υπερβολικές δονήσεις. Οι δονήσεις πρέπει να αποδοθούν στα διάφορα εξαρτήματα και στις σχέσεις τους.

Για τις μεγαλύτερες μηχανές, οι υπολογισμοί ζυγοστάθμισης βασίζονται σε εκτενή ανάλυση μέσου υπολογιστή, με μια μεγάλη βάση δεδομένων από ιστορικά δεδομένα και αποτελέσματα δοκιμών από πολλαπλά επίπεδα διόρθωσης και πολλαπλές ταχύτητες. Οι κατασκευαστές εξοπλισμού συχνά συλλέγουν δεδομένα από κάθε εγκατάσταση ενός συγκεκριμένου τύπου μηχανής και τα χρησιμοποιούν για να βελτιώσουν την απόδοση των μελλοντικών ζυγοσταθμίσεων, ευθυγραμμίσεων και άλλων διαδικασιών συντήρησης.

Οι συναρμολογήσεις του ρότορα με κιβώτια ταχυτήτων έχουν πολλαπλές ταχύτητες και παράγοντες, όπως η ευθυγράμμιση του συμπλέκτη. Ο θόρυβος του ρουλεμάν, ο θόρυβος του γραναζιού και η λειτουργία του εξοπλισμού παράγουν χαρακτηριστικές δονήσεις. Αυτά πρέπει να διερευνηθούν και να εξαλειφθούν πριν την τελική ζυγοστάθμιση.

8.8 Ενεργή ζυγοστάθμιση.

Μερικές φορές υπάρχει ένα πρόβλημα αζυγοσταθμίας που δεν ανταποκρίνεται καλά είτε με τη χρήση μιας μηχανής ζυγοστάθμισης είτε στη θέση ζυγοστάθμισης.

Ένα παράδειγμα, θα μπορούσε να είναι οι υψηλές εργασίες παραγωγής άλεσης. Οι τροχοί λείανσης είναι μεγάλοι και εύθραυστοι και λειτουργούν με συνεχή εφαρμογή του ψυκτικού υγρού. Μετά από λίγες ώρες λειτουργίας, ο τροχός έχει αναπτυγμένη αζυγοσταθμία. Διακόπτουμε τον τροχό, τον αφαιρούμε από τη μηχανή, κάνουμε ζυγοστάθμιση και θα δούμε ότι η επανασυναρμολόγηση δεν είναι πρακτική διότι υπάρχει η πιθανότητα βλάβης, γιατί θα υπάρξουν νέες εκκεντρότητες από τις ανοχές συναρμολόγησης και τις αποχετεύσεις ψυκτικού μέσου στο κάτω μέρος του τροχού, και καθιστά αδύνατο να λειφθεί μια σωστή ανάγνωση της αζυγοσταθμίας.

Η λύση είναι να προσθέσουμε τη λειτουργία ζυγοστάθμισης στη μηχανή λείανσης. Αυτό απαιτεί την προσθήκη κατάλληλων αισθητήρων δόνησης, ένα δακτύλιο διόρθωσης ισορροπίας, που μπορούν να τροποποιηθούν με τη λειτουργία των τροχών και ένα σύστημα ελέγχου. Στη δεκαετία του 1980 ένα δημοφιλές σύστημα χρησιμοποίησε ένα σύστημα ψεκασμού νερού σε τέσσερις θαλάμους για να τακτοποιήσει την αζυγοσταθμία. Όταν ο τροχός σταμάτησε το νερό αποστραγγίστηκε και το σύστημα τότε ήταν έτοιμο για έναν νέο τροχό. Τα κύρια προβλήματα με αυτό το σύστημα ήταν τα ακροφύσια, που ήταν φραγμένα και συσσωρεύαν ιζήματα στους θαλάμους, κάτι που περιόριζε τη διόρθωση της

αζυγοσταθμίας. Αντιστρόφως, αυτό ήταν ένα πολύ γρήγορο σύστημα που θα μπορούσε να αποκαταστήσει την αζυγοσταθμία ενός τροχού σε 5 δευτερόλεπτα.

Αυτή η μέθοδος διόρθωσης αντικαταστάθηκε τη δεκαετία του 1990 από κλειστά συστήματα , που δεν χάνουν τις επιδόσεις λόγω της συσσώρευσης των ιζημάτων. Δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται με το κλειστό σύστημα όπου μετακινούμενες μηχανικές μάζες και υγρών (Freon) έχουν μετακινηθεί από θάλαμο σε θάλαμο μέσω ηλεκτρικής θερμότητας. Και τα δύο συστήματα ήταν κάτι λιγότερο από το τέλειο. Η διαρροή των μηχανικών συστημάτων οδήγησε σε κόλλημα και έλλειψη ακρίβειας, και το υγρό σύστημα άργησε να ανταποκριθεί.

Τώρα βρισκόμαστε στον 21^ο αιώνα, και η νέα γενιά συστημάτων ζυγοστάθμισης είναι πλήρως σφραγισμένη, έχει γρήγορη ανταπόκριση και αξιοπιστία και είναι σε θέση να εργαστούν σε ταχύτητες πάνω από 42000 σαλ. Τη σήμερα ημέρα, ενεργά συστήματα ζυγοστάθμισης χρησιμοποιούνται στους ανεμιστήρες, στους στροβίλους, στις αντλίες, στις εργαλειομηχανές και σε πολλές άλλες εφαρμογές όπου η διατήρηση της ακριβούς ισορροπίας μπορεί να εξαλείψει τη διαμπερή και πρόωρη διακοπή λειτουργίας ή την απώλεια απόδοσης.

Μια τυπική εφαρμογή είναι η κατεργασία ενός ανεμιστήρα εξαερισμού. Αν αυτό σταματήσει, η γραμμή σταματά. Καθώς το υλικό συσσωρεύεται στον ανεμιστήρα, η αζυγοσταθμία αλλάζει σταδιακά, αλλά το πραγματικό πρόβλημα προκύπτει όταν ένα κομμάτι από τη συσσώρευση υλικού διακοπεί, κάτι το οποίο προκαλεί μια ξαφνική και μεγάλη αλλαγή στην αζυγοσταθμία που καταστρέφει τα ρουλεμάν και αναγκάζει στην άμεση διακοπή λειτουργίας του συστήματος, κάτι που κοστίζει πάρα πολλές χιλιάδες ευρώ.

Με την προσθήκη ενός ενεργούς συστήματος ζυγοστάθμισης, η σταδιακή συσσώρευση του υλικού μπορεί να αντισταθμιστεί και έτσι τα ρουλεμάν να μην ζορίζονται. Όταν το υλικό εξαλείφει την αζυγοσταθμία είναι αυτόματα διορθωμένα σε λιγότερο χρόνο από ότι χρειαζόταν προηγουμένως που έπρεπε να κλείσουμε ολόκληρο το σύστημα.

Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν στροβίλους οι οποίοι μπορούν να αντισταθμιστούν για τις επιδράσεις της θερμοκρασίας και της αλλαγής φορτίου, και μπορούν επίσης να ζυγοσταθμιστούν όταν είναι κοντά σε μια κρίσιμη ταχύτητα. Με την αναπροσαρμογή κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης, τα επίπεδα δόνησης μπορούν να διατηρηθούν σε ασφαλή επίπεδα ακόμα και όταν διέρχονται μέσω ενός συντονισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

9.1 Γενικά συμπεράσματα

Μέσα από την διαδικασία της ζυγοστάθμισης έως και την ολοκλήρωση της εργασίας, έγινε ιδιαίτερα σαφές ότι χωρίς την διαδικασία της ζυγοστάθμισης ένας πολύ μεγάλος αριθμός εργασιών, κατεργασιών θα ήταν αδύνατο να διεξαχθεί με επιτυχία. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτό από το γεγονός ότι κανένα μηχανουργικό εργαλείο δεν θα ήταν σε θέση να εκτελέσει εργασίες ακριβείας αν και εφόσον ήταν αζυγοστάθμητο, όπως και οι τροχοί από τα αυτοκίνητα δεν θα ήταν σε θέση να λειτουργήσουν χωρίς να προκληθούν ζημίες από τους κραδασμούς και την αζυγοσταθμία τους.

Αν και θα μπορούσαμε να αναφερθούμε σε αμέτρητα παραδείγματα, γίνεται ιδιαίτερα σαφές η χρησιμότητα αλλά και η αναγκαιότητα της ζυγοστάθμισης σαν εργαλείο, όχι μόνο στην βιομηχανία αλλά και στην καθημερινή μας ζωή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Derek Norfield (2006), Practical Balancing of Rotating Machinery, Elsevier, Oxford
- [2] Singiresu S. Rao (2004), Mechanical Vibrations, Pearson Prentice Hall, New Jersey
- [3] Διάφορα επιστημονικά άρθρα, <http://dide.ker.sch.gr/>
- [4] Βικιπαίδεια, <https://el.wikipedia.org>
- [5] <http://www.iso.org/>