

Πρώιμη Ανίχνευση Βλάβης σε Μηχανολογικές Κατασκευές με Χρήση Φασματικής Ανάλυσης

Επιβλέπων Καθηγητής: Προβιδάκης Κωνσταντίνος

11/10/2013

Περιεχόμενα

1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Συντήρηση Μηχανών.....	6
1.2.1 Εισαγωγή.....	6
1.2.2 Η σημασία της λειτουργίας της συντήρησης	7
1.2.3 Η αναγκαιότητα της συντήρησης	7
1.2.4 Η διαχρονική εξέλιξη της συντήρησης	9
1.3 Κυριότερες προσεγγίσεις της συντήρησης.....	11
1.3.1 Λειτουργία ως την βλάβη(Breakdown Maintenance)	11
1.3.2 Προληπτική συντήρηση(Preventive Maintenance)	12
1.3.3 Προβλεπτική Συντήρηση (Predictive Maintenance).....	14
1.3.4 Συντήρηση Ακριβείας (Design-out Maintenance)	16
1.4 Προβλεπτική Συντήρηση	17
1.4.1 Εισαγωγή.....	17
1.4.2 Κατηγορίες Βλαβών	18
1.4.3 Η Μέθοδος της Προβλεπτικής Συντήρησης	19
1.4.4 Διάγνωση κατά την Λειτουργία	19
1.4.5 Παρακολούθηση κατάστασης της μηχανής(condition monitoring).....	20
1.5 Η πρόοδος στην παρακολούθηση κατάστασης της μηχανής και στη διάγνωση βλάβης	21
1.5.1 Έρευνα μηχανικών βλαβών	21
1.5.2 Προηγμένες μέθοδοι εξαγωγής χαρακτηριστικών από τη επεξεργασία του σήματος.....	22
1.5.3 Έρευνα στα αίτια της βλάβης	23
1.5.4 Έρευνα και ανάπτυξη των συσκευών, για την διάγνωση βλάβης.....	24
1.5.5 Συμπεράσματα.....	24
1.6 Μεθοδολογίες και Μετρητικές Τεχνικές για την Παρακολούθηση της Κατάστασης Μηχανής.....	26
1.6.1 Παρακολούθηση κραδασμών (Vibration Monitoring)	27
1.6.2 Ακουστική εκπομπή(acoustic emission)	27
1.6.3 Μέτρηση κρουστικών παλμών (Shock Pulse Method).....	28
1.6.4 Ανάλυση λιπαντικού (Oil analysis) ή Τριβολογία (Tribology).....	28
1.6.5 Θερμογραφία(Thermography)	31
1.6.6 Μέτρηση παραμόρφωσης (Strain Measurement)	31
1.6.7 Μέτρηση παραμέτρων λειτουργικής διαδικασίας (Process Parameters).....	32
1.6.8 Δοκιμές με υπέρηχους (Ultrasonic Testing)	33
1.7 Μέθοδοι επεξεργασίας κύματος (digital signal process)	34

1.7.1 Στατιστική ανάλυση της δομικής ακεραιότητας των υλικών	37
1.8 Μηχανή Κόπωσης (Rotating Fatigue Machine) TeqQuipment SM1090	38
1.8.1 Εισαγωγή.....	38
1.8.2 Περιγραφή μηχανής	39
1.8.3 Ευέλικτο σύστημα καταγραφής δεδομένων-Versalite Data Acquisition System (VDAS).....	40
1.8.4 Δοκίμιο	42
1.8.5 Περιστρεφόμενη άτρακτος τύπου προβόλου (rotating cantilever)	43
1.8.6 Τάσεις.....	44
Τάση κατά μήκος κυλινδρικού δοκιμίου	44
Τάση στο δοκίμιο	45
2.0 Προβλεπόμεν διαδικασία (normal procedure)	46
2.1 Οπτική επίβλεψη αλλαγών συχνοτήτων του φάσματος κατά την προβλεπόμενη διαδικασία.....	52
Σκοπός του πειράματος	52
Θόρυβος περιβάλλοντος	52
2.1.1 Περιγραφή πειράματος	53
2.1.2 Visual Analyser (VA)	53
2.1.3 Διαδικασία Πειράματος.....	54
2.1.4 Συμπεράσματα.....	56
2.2 Φασματική επεξεργασία και στατιστική ανάλυση ηχητικού σήματος σε περιβάλλον MATLAB	57
2.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο επεξεργασίας σήματος	57
2.2.2 Αναлого-ψηφιακή μετατροπή	57
2.2.3 Μετασχηματισμός Fourier (Fourier transform).....	58
2.2.4 Φασματική πυκνότητα (Power Spectral Density).....	60
2.2.5 Συχνότητα Δειγματοληψίας.....	62
2.2.6 Φασματογράφημα (spectrogram).....	63
2.3 Φασματική και ψηφιακή επεξεργασία ακουστικού σήματος σε περιβάλλον MATLAB	65
2.3.1 Περιγραφή και επεξήγηση διαδικασίας.....	66
2.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων με δείκτες στατιστικής ανάλυσης.....	71
2.4.1 Στατιστική ανάλυση ηχητικών σημάτων στο πεδίο του χρόνου	71
2.4.1.1 Εντολή smooth.....	72
2.4.1.2 Αριθμητικός μέσος (Mean Value)	73
2.4.1.3 Μέση τετραγωνική τιμή (Root Mean Square RMS).....	75
2.4.1.4 Τυπική απόκλιση (Standard Deviation)	77
2.4.1.5 Κύρτωση (Kurtosis)	79
2.4.1.6 Λοξότητα (Skewness)	81

2.4.1.7 Συντελεστής κορυφής (Crest Factor)	83
2.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον δείκτη κυρτότητας	85
2.5 Συμπεράσματα.....	86
Βιβλιογραφία	87

1.1 Εισαγωγή

Την παρούσα εποχή, όπου το κόστος είναι αναπόφευκτο κομμάτι της κάθε επιχείρησης, υπάρχει η ανάγκη για την δημιουργία προϋποθέσεων με σκοπό την οικονομική βιωσιμότητα. Η συντήρηση όσον αφορά τους μηχανικούς εξοπλισμούς, αποτελεί κρίσιμης σημασίας παράγοντα στη ζωή της επιχείρησης και σχετίζεται με την συνολική απόδοση της.

Η συντήρηση είναι μια συνετή προσέγγιση στη φροντίδα του εξοπλισμού. Πριν από μερικές δεκαετίες η συντήρηση ήταν μια διαδικασία κατά την οποία ένα τμήμα του εξοπλισμού πάθαινε βλάβη, γινόταν αντικατάσταση του τμήματος αυτού και ο εξοπλισμός ξαναέμπαινε σε λειτουργία. Από τότε εξελίχθηκε, παίρνοντας μορφή μεθοδικών προληπτικών ενεργειών με σαφείς στόχους, ακολουθώντας τις προόδους της τεχνολογίας. Τα τελευταία χρόνια η συντήρηση θεωρείται το σύνολο των προγραμμάτων και των μεθόδων που μπορούν να ανακαλύπτουν την έναρξη των βλαβών στον εξοπλισμό και που βοηθούν: στη διατήρηση της καλής λειτουργίας, στην ελαχιστοποίηση της εκτός λειτουργίας παραμονής του εξοπλισμού, στην αύξηση της αξιοπιστίας και της διαθεσιμότητας του εξοπλισμού, με γνώμονα το ελάχιστο κόστος.

Μία στρατηγική συντήρησης περιλαμβάνει την ταυτοποίηση, την αναζήτηση και την εκτέλεση πολλών αποφάσεων σχετικών με επισκευές, αντικαταστάσεις και ελέγχους. Ασχολείται με την εκπόνηση του καλύτερου πλάνου λειτουργικής ζωής για κάθε μονάδα του εξοπλισμού και του βέλτιστου προγράμματος συντήρησης για τον εξοπλισμό σε συνεργασία με την παραγωγή και άλλες λειτουργίες. Μια στρατηγική συντήρησης περιγράφει ποια περιστατικά (αστοχία, πάροδος ορισμένου χρόνου ,κατάσταση) χρήζουν κάποιας δραστηριότητας συντήρησης ,όπως έλεγχος, επισκευή ή αντικατάσταση. Αποτελείται από τεχνικές που ποικίλουν ανάλογα με το είδος του εξοπλισμού. Τέλος, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τους στόχους της επιχείρησης, τη φύση του εξοπλισμού που συντηρείται και το περιβάλλον εργασίας.

Μια προσέγγιση της συντήρησης που έχει επικρατήσει είναι η προβλεπτική συντήρηση όπου ασχολείται κυρίως με την αναγνώριση κρυμμένων ή πιθανών επικείμενων αστοχιών και την πρόβλεψη της κατάστασης του εξοπλισμού.

Κάθε μηχανικό μέσο πρέπει να συντηρείται επιτυχώς, ώστε να βρίσκεται σε ικανοποιητική κατάσταση λειτουργίας. Μία απρόσμενη βλάβη στον μηχανικό εξοπλισμό είναι δυνατόν να επιφέρει οικονομική και φυσική αναστάτωση σε μία επιχείρηση. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων απρόβλεπτων καταστάσεων έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνικές, που εντάσσονται στην μέθοδο της προβλεπτικής συντήρησης (predictive maintenance).

Το condition monitoring, που είναι μέθοδος προβλεπτικής συντήρησης, βασίζεται στη χρήση συστημάτων μέτρησης και ελέγχου που επιτρέπουν την ουσιαστική διάγνωση της πραγματικής φυσικής κατάστασης του εξοπλισμού όσο αυτός βρίσκεται σε λειτουργία. Στόχος είναι η πρόγνωση της συντήρησης πριν από την εμφάνιση σοβαρών προβλημάτων ή βλαβών.

Με την ανάπτυξη της σύγχρονης επιστήμης και της τεχνολογίας, τα μηχανήματα και η λειτουργικότητα των εξοπλισμών, τελειοποιούνται όλο και περισσότερο,

καθώς η κατασκευή τους γίνεται σε πιο μεγάλη και ολοκληρωμένη κλίμακα, ευφυείς και περίπλοκη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, την σημαντική αύξηση του αριθμού των εξαρτημάτων. Η πιθανότητα βλάβης όπως και οι κατηγορίες των εξαρτημάτων, αυξάνονται σημαντικά. Επιβλαβή ατυχήματα που προκαλούνται από δυσλειτουργία των εξαρτημάτων μιας μηχανής, συμβαίνουν συχνά σε παγκόσμια κλίμακα, καθώς και μια μικρή μηχανική βλάβη μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις. Συνεπώς, η αποτελεσματική ανίχνευση βλάβης σε αρχικό στάδιο αλλά και η διάγνωση της, είναι ζωτικής σημασίας για την ομαλή λειτουργία. Αν και οι τεχνικές βελτιστοποίησης που έχουν πραγματοποιηθεί κατά τη διαδικασία σχεδίασης της μηχανής και της παρασκευής της είναι τέτοιες ώστε να προσπαθούν να βελτιώσουν την ποιότητα των μηχανικών προϊόντων, οι μηχανικές αστοχίες είναι ακόμη δύσκολο να αποφευχθούν λόγω της πολυπλοκότητας του σύγχρονου εξοπλισμού. Η παρακολούθηση της κατάστασης (condition monitoring) και η διάγνωση βλαβών (fault diagnosis) βρίσκεται σε προχωρημένη επιστημονική έρευνα και βασίζεται σε προηγμένη τεχνολογία και έτσι δρα ως ένα αποτελεσματικό μέσο για την πρόβλεψη πιθανών βλαβών και την μείωση του κόστους που προκαλείται από την δυσλειτουργία της συσκευής. Αυτός είναι ο αποκαλούμενος μηχανολογικός εξοπλισμός, τεχνικής διάγνωσης βλαβών, ο οποίος χρησιμοποιείται εδώ και τρεις δεκαετίες.

1.2 Συντήρηση Μηχανών

1.2.1 Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι σήμερα υπάρχουν όλο και περισσότερες απαιτήσεις για την αξιοπιστία του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού και μπορεί να τεθούν τόσο από το σχεδιαστή και τον κατασκευαστή όσο και από το χρήστη. Η αξιοπιστία όμως κοστίζει. Μπορεί να μειώνει το κόστος των επισκευών και των συντηρήσεων αλλά αυξάνει το αρχικό κόστος. Επιπλέον όσο και να αυξηθεί το αρχικό κόστος η ανάγκη για συντήρηση δεν εξαλείφεται.

Η συντήρηση είναι μια συνετή προσέγγιση στη φροντίδα του εξοπλισμού. Πριν από μερικές δεκαετίες η συντήρηση ήταν μια διαδικασία κατά την οποία ένα τμήμα του εξοπλισμού πάθαινε βλάβη, γινόταν αντικατάσταση του τμήματος αυτού και ο εξοπλισμός ξαναέμπαινε σε λειτουργία. Από τότε εξελίχθηκε, παίρνοντας μορφή μεθοδικών προληπτικών ενεργειών με σαφείς στόχους, ακολουθώντας τις προόδους της τεχνολογίας. Τα τελευταία χρόνια η συντήρηση θεωρείται το σύνολο των προγραμμάτων και των μεθόδων που μπορούν να ανακαλύπτουν την έναρξη των βλαβών στον εξοπλισμό και που βοηθούν:

- στη διατήρηση της καλής λειτουργίας,
- στην ελαχιστοποίηση της εκτός λειτουργίας παραμονής του εξοπλισμού,
- στην αύξηση της αξιοπιστίας και της διαθεσιμότητας του εξοπλισμού, με γνώμονα το ελάχιστο κόστος.

Σύμφωνα με τον L. R. Higgins (1995): «Η συντήρηση είναι επιστήμη επειδή η εκτέλεσή της στηρίζεται σε πολλές επιστήμες. Η συντήρηση είναι τέχνη διότι φαινομενικά όμοια προβλήματα συχνά απαιτούν και δέχονται διαφορετικές προσεγγίσεις και ενέργειες και διότι κάποιοι παρουσιάζουν μεγαλύτερη επιδεξιότητα σε αυτή από άλλους. Πάνω από όλα όμως η συντήρηση είναι φιλοσοφία γιατί είναι μια γνώση που μπορεί να εφαρμοσθεί εντατικά, μέτρια ή καθόλου εξαρτώμενη από άλλες παραμέτρους».

Πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφερθούν όσον αφορά τη λειτουργία της συντήρησης οι εξής παραδοχές:

- Όταν ακόμα σχεδιάζεται ο εξοπλισμός, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μέθοδος και το κόστος συντήρησης.
- Η συντήρηση δεν μπορεί να αντισταθμίσει την κακή σχεδίαση ή τη χαμηλή ποιότητα υλικών.
- Η συντήρηση είναι ένας κρίκος στην σύνθετη αλυσίδα πολυάριθμων παραμέτρων όπως η καταπόνηση, η ηλικία, η ποιότητα, οι διαστάσεις, η σχεδίαση και η φιλοσοφία συγκρότησης του συστήματος στο οποίο ανήκει ο εξοπλισμός.
- Η συντήρηση οφείλει να προσαρμόζεται διαρκώς στις νέες τεχνολογίες.
- Οι οδηγίες συντήρησης που δίνονται από τον κατασκευαστή πρέπει να προσαρμόζονται από το χρήστη με βάση την εμπειρία του.
- Η συντήρηση πρέπει να είναι μέρος της στρατηγικής μιας επιχείρησης.

1.2.2 Η σημασία της λειτουργίας της συντήρησης

Όσο τεχνολογικά εξελιγμένα και να είναι τα μηχανήματα παραγωγής, είναι αδύνατον να λειτουργούν και να αποδίδουν, τουλάχιστον στο επίπεδο που είναι σχεδιασμένα να το κάνουν, χωρίς την απαραίτητη επίβλεψη και συντήρηση. Η συντήρηση σε μία βιομηχανική επιχείρηση έχει στόχο να υποστηρίξει την παραγωγή έτσι ώστε να παράγονται προϊόντα συνεχώς, με το μικρότερο δυνατό κόστος και την καλύτερη ποιότητα σύμφωνα με τα πρότυπα της εταιρίας. Έτσι λοιπόν επιγραμματικά η συντήρηση πρέπει να εξασφαλίζει:

- Απρόσκοπτη λειτουργία-Μείωση νεκρού χρόνου.
- Οικονομική λειτουργία-Μέγιστη παραγωγικότητα.
- Βέλτιστο αποτέλεσμα από πλευράς ποιότητας.
- Πληροφορίες για παραπέρα βελτίωση του εξοπλισμού και της οργάνωσης.

1.2.3 Η αναγκαιότητα της συντήρησης

Το κόστος της συντήρησης σήμερα μπορεί και να αντιπροσωπεύει μέχρι και το 40% των εξόδων λειτουργίας μιας επιχείρησης. Με τον όρο συντήρηση εννοούμε:

- Τεχνικό και χρονικό σχεδιασμό εργασιών.
- Διαχείριση υλικών και ανταλλακτικών.
- Διαχείριση εργαλείων και παραγωγικών μέσων γενικότερα.
- Προληπτικούς, προγνωστικούς και διαγνωστικούς ελέγχους.
- Προληπτικές ενέργειες και αντικαταστάσεις.

- Προγραμματισμό και εκτέλεση προγραμμάτων λίπανσης.
- Επισκευές, βελτιώσεις, κατασκευές.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η συντήρηση δεν έχει στόχο μόνο τις επισκευές, όπως γενικά πιστεύεται από πολλούς, αλλά αποτελεί έναν κρίσιμης σημασίας παράγοντα στην ζωή της επιχείρησης, που σχετίζεται με το σύνολο της απόδοσής της.

Η διατήρηση του εξοπλισμού και των στοιχείων του σε ικανοποιητική κατάσταση λειτουργίας μέσω της συντήρησης (συστηματικές επιθεωρήσεις, εντοπισμοί και διορθώσεις επικείμενων αστοχιών πριν εφαρμοστούν ή προτού εξελιχθούν σε μεγάλες καταστροφές) αποδεικνύεται ότι:

- Μειώνει το επενδυόμενο κεφάλαιο.
- Μειώνει την ποιοτική υποβάθμιση του εξοπλισμού.
- Αυξάνει την διάρκεια ζωής των μηχανών.
- Αυξάνει την παραγωγικότητα του προσωπικού της συντήρησης.
- Βελτιώνει την συμμόρφωση σε νόμους και κανονισμούς.
- Μειώνει τις περιττές επισκευές μηχανών.
- Μειώνει την επανάληψη δραστηριοτήτων συντήρησης.
- Μειώνει την απόρριψη (ελαττωματικών) προϊόντων.
- Αυξάνει την αξιοπιστία.
- Μειώνει τις υπερωρίες.
- Αυξάνει την ασφάλεια.
- Μειώνει τους τραυματισμούς.
- Μειώνει την κατανάλωση ενέργειας.
- Μειώνει την ποσότητα των απαραίτητα διαθέσιμων ανταλλακτικών.
- Μειώνει τα ελαττώματα σε καινούργιες μηχανές.
- Μειώνει τις λανθασμένες ενέργειες συντήρησης.
- Μειώνει τα ασφάλιστρα.

1.2.4 Η διαχρονική εξέλιξη της συντήρησης

Η συντήρηση από την εμφάνισή της μέχρι σήμερα έχει εξελιχθεί κατά πολύ. Νέα δεδομένα έχουν έρθει στο χώρο, ολοένα περισσότερα συστήματα και παραγωγικές μονάδες απαιτούν συντήρηση και φυσικά νέες τεχνικές και φιλοσοφίες εφαρμόζονται σε όλον τον κόσμο.

Στρατηγικές/φιλοσοφίες	Εμφανίστηκε	Εφαρμόστηκε
Λειτουργία ως τη Βλάβη <i>(Breakdown Maintenance)</i>	-Με την εμφάνιση των πρώτων μηχανών	
Προληπτική Συντήρηση <i>(Preventive Maintenance)</i>	-Με την υψηλή μηχανοποίηση αμέσως μετά το 2 ^ο Παγκόσμιο Πόλεμο –Η.Π.Α	
Ολική Παραγωγική Συντήρηση <i>(Total Productive Maintenance-TPM)</i>	-Η ιδέα υπάρχει από το 1951 (Ιαπωνία) -Δεκαετία 60: η ιαπωνική εταιρία Nipponondenso εξελίσσει την Προληπτική Συντήρηση στην Παραγωγική Συντήρηση -Δεκαετία 70: το Ιαπωνικό Ινστιτούτο Συντήρησης- Θέτει τις αρχές της TRM-την εξελίσσουν σταδιακά ιαπωνικές επιχειρήσεις μικρού μεγέθους	-αρχές με μέσα δεκαετίας 80: η TRM είναι συνήθως στην Ιαπωνία και γίνεται δημοφιλής στις δυτικές χώρες.
Συντήρηση με γνώμονα την Αξιοπιστία <i>(Reliability Centered Maintenance-RCM)</i>	-δεκαετίες 60-70 : οι εμπορικές αερογραμμές και η αεροπορία των ΗΠΑ προσπαθούν να βελτιώσουν την αξιοπιστία αεροσκάφους τους -δημοσιεύσεις στελεχών United Airlines χρησιμοποιούν	-αρχές δεκαετίας 80 και εφεξής ευρεία εφαρμογή

	για πρώτη φορά τον όρο RCM (ΗΠΑ) -1978: δημοσιεύσεις των United Airlines και Rand Corp. Βιβλίου και αναφοράς εκτίμησης για την RCM αντίστοιχα με χρηματοδότηση του Υπουργείου Εθνικής – Άμυνας των ΗΠΑ.	
Προβλεπτική Συντήρηση(Predictive Maintenance)	-δεκαετία του 50: Στατιστικοί μηχανισμοί του Υπουργείου Εθνικής Άμυνας των ΗΠΑ αναπτύσσουν τις αρχές της αξιοπιστίας στη Στατιστική	-δεκαετία του 60: στη βιομηχανία αεροπορίας και συστημάτων ασφάλειας. -δεκαετία 70: στην πολιτική αεροπορία και πυρηνική βιομηχανία -τέλη δεκαετίας 80- αρχες 90 : με το τέλος του Ψυχρού Πολέμου στην παραγωγική βιομηχανία με τη συμμετοχή σε αυτή στελεχών των παραπάνω βιομηχανιών
Συντήρηση Ακριβείας (Design – Out Maintenance)	-Τα τελευταία χρόνια	- δεν είναι διαδεδομένη ακόμη- αποτελεί το μέλλον της συντήρησης

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην πράξη σε μία εγκατάσταση χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα περισσότερες από μία προσεγγίσεις. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να εξετάζεται ποια από τις διάφορες προσεγγίσεις αποδίδει καλύτερα οικονομικά και ταιριάζει περισσότερο σε κάθε τεχνικό σύστημα και στο λειτουργικό του περιεχόμενο.

1.3 Κυριότερες προσεγγίσεις της συντήρησης

Παρακάτω γίνεται μια σύντομη αναφορά στις κυριότερες προσεγγίσεις συντήρησης με βάση τον πίνακα που παρουσιάστηκε στην παράγραφο για την διαχρονική εξέλιξη των μεθόδων συντήρησης.

1.3.1 Λειτουργία ως την βλάβη(Breakdown Maintenance)

Λειτουργία ως την βλάβη σημαίνει διορθωτική επέμβαση σε μία βλάβη όταν και μόνον αν προκύψει και μέχρι τότε δεν γίνεται καμία εργασία συντήρησης.

Η λογική αυτής της μεθόδου συντήρησης είναι ιδιαίτερα απλή: Τα μηχανήματα αφήνονται να λειτουργούν χωρίς κάποια επέμβαση ή έλεγχο μέχρι την εμφάνιση βλάβης ή την παραγωγή προϊόντων κακής ποιότητας. Τότε μόνο γίνεται αναγκαστική επέμβαση για την αποκατάσταση του προβλήματος.

Στην βιβλιογραφία αναφέρεται και ως «Διορθωτική συντήρηση», με την έννοια ότι επεμβαίνει μόνο για να διορθώσει τις βλάβες και «συντήρηση εξ'αντιδράσεως», με την έννοια ότι αντιδρά στις βλάβες αντί να τις προλαμβάνει.

Πρόκειται για την πρώτη χρονικά θεωρία που εφαρμόστηκε σε μηχανές. Όπως είναι φανερό, δεν λαμβάνεται κανενός είδους χρονικός προγραμματισμός καθώς η χρονική στιγμή που θα προκύψει η βλάβη είναι άγνωστη και δεν υπάρχει κανένα είδος προειδοποίησης. Επιπλέον πολλές φορές η διορθωτική επέμβαση δεν επαναφέρει τη μηχανή σε άριστη λειτουργική κατάσταση, αλλά σε απλά αποδεκτή αν αφεθούν κατά μέρος οι περιπτώσεις που η αστοχία ενός εξαρτήματος συμπαρασύρει και άλλα μαζί του με αποτέλεσμα την καταστροφή της μηχανής. Για τους δύο ανωτέρω λόγους η προσέγγιση αυτή είναι ανεπαρκής, οικονομικά ασύμφορη και ίσως επικίνδυνη τόσο για τον εξοπλισμό όσο και για την ασφάλεια των εργαζομένων. Αποδεκτή ίσως για μηχανήματα η χρήση των οποίων δεν έχει σημαντικό αντίκτυπο στην παραγωγή και η αστοχία τους δεν θέτει θέμα ασφαλείας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι εδώ γίνεται ελάχιστη αξιοποίηση του εργατικού δυναμικού που εμπλέκεται στη διαδικασία αυτή. Ακόμη πρέπει να κρατείται μεγαλύτερο απόθεμα ανταλλακτικών για όταν προκύψει η βλάβη. Και εκτός των άλλων ο ιδιοκτήτης του εξοπλισμού, όταν θα σταματήσει απρόβλεπτα η μηχανή του, θα πληρώσει πολλαπλάσια τιμή, συνήθως, για την επισκευή της, αφού και οι επισκευές ακολουθούν το νόμο προσφοράς και ζήτησης. Και αυτό δεν είναι καθόλου αμελητέο. Επιπλέον η όποια επισκευή χρειαστεί θα γίνει σε κλίμα χρονικής πίεσης, κάτι που δεν αφήνει περιθώρια για ενδεχόμενο προσδιορισμό της αιτίας της βλάβης και εύρεσης εναλλακτικής λύσης ώστε να αποφευχθεί η

επανεμφάνισή της. Γενικά κυριαρχεί αβεβαιότητα και έλλειψη εμπιστοσύνης για την κατάσταση του εξοπλισμού.

Είναι λοιπόν σαφές ότι η φυσική κατάληξη της εφαρμογής αυτής της θεωρίας δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα. Ένα βήμα προς τη βελτίωση αυτής της κατάστασης είναι η φιλοσοφία της προληπτικής συντήρησης.

1.3.2 Προληπτική συντήρηση(Preventive Maintenance)

Η μέθοδος αυτή ακολουθεί χρονικά την πρώτη. Διεθνώς έχουν καθιερωθεί πολλοί ορισμοί αυτής της μεθόδου. Κοινό σημείο όλων είναι η ένταξη των διαδικασιών συντήρησης σε ένα χρονικά προγραμματισμένο πλαίσιο.

Η λογική της μεθόδου βασίζεται στον Προγραμματισμένο περιοδικό έλεγχο του εξοπλισμού. Κάθε σημαντικό μηχάνημα σταματά και επιθεωρείται επισταμένως μετά από συγκεκριμένες ώρες λειτουργίας (η προληπτική συντήρηση αποτελεί παρεμβατική μέθοδο συντήρησης). Εάν υπάρξει κάποιο φθαρμένο εξάρτημα, αντικαθίσταται και το μηχάνημα παραδίδεται σε λειτουργία.

Επομένως, η προληπτική συντήρηση συνίσταται σε μια σειρά από δραστηριότητες οι οποίες προγραμματίζονται με συχνότητα που υπαγορεύεται από το συνολικό χρονικό διάστημα από την προμήθεια ενός μηχανήματος, τις ώρες λειτουργίας του και την παραγωγική του ικανότητα και:

- Είτε παρατείνουν τη ζωή ενός εξαρτήματος/μηχανήματος (για παράδειγμα, η λίπανση σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων παρατείνει την ζωή του)
- Είτε αποκαλύπτουν ότι ένα εξάρτημα/μηχάνημα έχει φθαρεί σημαντικά και πρόκειται να αστοχήσει. (για παράδειγμα, τρίμηνη επιθεώρηση έδειξε ότι υπάρχει ρήγμα στο στεγανοποιητικό μιας αντλίας-η εύρεση του ρήγματος επιτρέπει την επισκευή προτού εμφανιστεί καταστροφική βλάβη).

Σύμφωνα επομένως με αυτήν την μέθοδο, η συντήρηση σχεδιάζεται έτσι ώστε να διορθώνει είτε να προλαμβάνει καταστάσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε βλάβες με αποτέλεσμα την απώλεια παραγωγής, με όλα τα δυσάρεστα επακόλουθα, ακόμα και αν αυτό σημαίνει ότι ορισμένα εξαρτήματα πιθανόν να αντικατασταθούν πριν εξαντλήσουν τα αξιόπιστα λειτουργίας. Όμως, πρέπει να ληφθεί υπόψη πως όταν η παραγωγική διαδικασία σταματά, η παραγωγή που χάνεται σε μια στάση-βλάβη είναι πολύ περισσότερη από ότι σε μια στάση που γίνεται προγραμματισμένα. Η λογική πίσω απ' αυτήν την πρακτική συντήρησης είναι ότι αυτοί οι ρυθμοί βλαβών του εξοπλισμού, ακολουθούν μια πορεία στην οποία ο μόνος παράγοντας που ουσιαστικά επιδρά είναι ο χρόνος.

Τα διαστήματα της συντήρησης προκαθορίζονται είτε κυρίως από την εμπειρία του κατασκευαστή του συγκεκριμένου εξοπλισμού είτε, σε μικρότερο βαθμό, από την συστηματική τήρηση αρχείων στην εγκατάσταση. Με αυτόν τον τρόπο θεωρητικά οι διαδικασίες συντήρησης μπορούν να προγραμματιστούν σε νεκρούς

χρόνους λειτουργίας και τα απαραίτητα ανταλλακτικά να παραγγελθούν σε κατάλληλο χρονικό διάστημα. Η λογική της επισκευής πριν πραγματοποιηθεί η βλάβη αποτελεί την ουσιαστική διαφοροποίηση από τη Λειτουργία ως τη Βλάβη και πέρα από την σημαντική μείωση του κόστους που προκύπτει από την παραμονή της μονάδας εκτός λειτουργίας (downtime cost) και τη δυνατότητα προγραμματισμού των χρόνων επισκευής και προμήθειας ανταλλακτικών, υπάρχει ένας ακόμα λόγος που την επιβάλλει: η καταστροφή συνδεόμενων στοιχείων του συστήματος. Όταν κάποιο εξάρτημα αστοχεί, συχνά καταστρέφει τα στοιχεία που συνδέονται με αυτό, γεγονός που πολλαπλασιάζει το κόστος για την αποκατάσταση της (ολικής) βλάβης. Για παράδειγμα, εάν δεν αντικατασταθεί έγκαιρα το ρουλεμάν μιας αντλίας, θα χρειαστεί έπειτα να αντικατασταθούν τα πτερύγια, το κέλυφος και άλλα στοιχεία.

Μερικές φορές η βλάβη δεν επιδεινώνεται και έτσι το κόστος αποκατάστασης και το κόστος από την βλάβη είναι περίπου τα ίδια.

Όμως η αναβολή της δράσης δημιουργεί ένα διαρκώς αυξανόμενο πρόβλημα στο μελλοντικό τμήμα συντήρησης. Για να είναι αποδοτική (και οικονομική) η Προληπτική Συντήρηση απαιτείται εκπαιδευόμενο προσωπικό, αξιόπιστο και οργανωμένο σύστημα διακίνησης πληροφοριών, οι οποίες να υποστηρίζουν το σύστημα συντήρησης, τακτικές προγραμματισμένες επιθεωρήσεις και προληπτικές εργασίες συντήρησης.

Όπως έχει προαναφερθεί, ακρογωνιαίος λίθος της Προληπτικής Συντήρησης είναι η διενέργεια ελέγχων, Σε αυτό το σημείο είναι εύλογο να οριστεί η έννοια έλεγχου. Έλεγχος λοιπόν, είναι η διαδικασία εκείνη που:

- Εξετάζει εάν ο σχεδιασμός ή οι προδιαγραφές ενός μηχανήματος είναι τα απαιτούμενα.
- Αναγνωρίζει όλους τους παράγοντες και τα αίτια και μπορούν να οδηγήσουν σε διακοπή της λειτουργίας και εκτιμά το χρόνο όταν αυτό συμβεί.

Οι έλεγχοι θα πρέπει να προγραμματίζονται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία των μηχανημάτων και οι επεμβάσεις επισκευές ή αντικαταστάσεις που πιθανά χρειάζονται να μην έρχονται σε αντίθεση με το πρόγραμμα παραγωγής.

Υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί όσον αφορά την εφαρμογή της προληπτικής συντήρησης. Αυτοί είναι:

- Οι αστοχίες που δεν εξαρτώνται από τον χρόνο, δηλαδή εμφανίζονται τυχαία και μετά από ίσα χρονικά διαστήματα.
- Οι εξαρτώμενες από τον χρόνο αστοχίες που σχετίζονται από την διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και οι οποίες δεν είναι δυνατόν να προβλεφτούν γιατί και αυτές δεν εμφανίζονται μετά από ίσα χρονικά διαστήματα. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό και οφείλονται κυρίως στον τρόπο λειτουργίας και σε εξωτερικούς παράγοντες, όπως κακή τοποθέτηση του εξαρτήματος, απώλεια λαδιών κλπ.

- Η διαδικασία της διακοπής της λειτουργιάς του εξοπλισμού και της επανεκκίνησης του κάθε φορά που πραγματοποιείται μια επιθεώρηση, Μάλιστα όσο πιο μεγάλα και πιο βαριά είναι τα μηχανήματα που σταματούν, τόσο πιο δύσκολη και ακριβή είναι η επανεκκίνηση τους.

Συμπερασματικά, είναι φανερό πως ενώ η συγκεκριμένη προσέγγιση συντήρησης είναι σαφώς προτιμότερη από την λειτουργία μέχρι τη βλάβη, είναι δαπανηρή λόγω του αυξημένου κόστους των περιοδικών σταματημάτων της μηχανής και της αντικατάστασης εξαρτημάτων που βρίσκονται σε καλή κατάσταση.

1.3.3 Προβλεπτική Συντήρηση (Predictive Maintenance)

Η θεωρία αυτή αποτελεί νέα διεθνή τάση στην εφαρμοσμένη συντήρηση και αποτελεί μετάβαση από τη συντήρηση που βασίζεται σε χρονικά διαστήματα (time based) προς τη συντήρηση που βασίζεται στην λειτουργική κατάσταση των μηχανών (condition based).

Κατά τη μέθοδο αυτή κάθε μηχανή, παρακολουθείται ξεχωριστά με μετρήσεις από κατάλληλα όργανα, ώστε να γίνεται γνωστή η λειτουργική της κατάσταση, ενώ βρίσκεται σε λειτουργία. Έτσι ορίζεται ο χρόνος συντήρησης μόνον όταν αυτό είναι αναγκαίο. Η μέθοδος αυτή συμφωνεί με την κοινή πεποίθηση των μηχανικών ότι δεν είναι φρόνιμο να λύνεται συχνά μια μηχανή παρά μόνο όταν είναι ανάγκη και επίσης βοηθάει το προσωπικό των εργοστασίων να μειώσουν την πιθανότητα καταστροφικής ζημιάς, να παραγγέλλουν ανταλλακτικά στην ώρα τους, να προγραμματίζουν τις ανάγκες σε ανθρώπινο δυναμικό για την επισκευή.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το κρίσιμο σημείο για την επίτευξη μιας αποτελεσματικότερης συντήρησης ήταν να βρεθούν εκείνες οι τεχνικές συντήρησης που από την μία θα ταίριαζαν στην συγκεκριμένη δραστηριότητα της εκάστοτε επιχείρησης (βιομηχανική, μεταφορική, κατασκευαστική κλπ.) και από την άλλη θα διασφάλιζαν:

- Πρόβλεψη των επικείμενων προβλημάτων και σχεδιασμό της αντιμετώπισής τους πριν αυτά γίνουν καταστροφικά.
- Μείωση των πιθανοτήτων αστοχίας στο στάδιο της «νηπιακής» ηλικίας και περιορισμός των επιπτώσεων όταν αυτή συμβεί.
- Εφαρμογή ενός προγράμματος ποιοτικής διασφάλισης και συνέχειας της λειτουργίας των καινούργιων ιδιαίτερα μηχανημάτων και γενικά όλου του μηχανολογικού εξοπλισμού.
- Παρακολούθηση και καταγραφή όλων των παραμέτρων της συντήρησης έτσι ώστε τα στοιχεία που συλλέγονται να αξιοποιούνται και τα συμπεράσματα να αποτελούν οδηγό δράσης για την βελτίωση της παραγωγικής δραστηριότητας.

Με στόχο τα παραπάνω, τα οποία τελικά αποσκοπούν στην σταδιακή μετατόπιση των εργασιών συντήρησης από εργασίες αποκατάστασης-επισκευής σε διαδικασίες πρόληψης-πρόβλεψης, αναπτύχθηκε η Προβλεπτική συντήρηση.

Συμπερασματικά λοιπόν, η μέθοδος της Προβλεπτικής συντήρησης βασίζεται στην χρήση συστημάτων μέτρησης και ελέγχου που επιτρέπουν την ουσιαστική διάγνωση της πραγματικής φυσικής κατάστασης του εξοπλισμού όσο αυτό βρίσκεται σε λειτουργία (μη παρεμβατική μέθοδος). Στόχος είναι η πρόγνωση του χρόνου επισκευής ή συντήρησης πριν από την εμφάνιση σοβαρών προβλημάτων ή βλαβών.

Η Προβλεπτική συντήρηση επομένως κάνει χρήση των θετικών χαρακτηριστικών από τις δύο προηγούμενες μεθόδους με το βέλτιστο δυνατό συνδυασμό τους για να επιτύχει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Έχει το στοιχείο της πρόληψης στην εμφάνιση βλάβης (Προληπτική Συντήρηση), αλλά χρησιμοποιεί την πρόγνωση προκειμένου να επέμβει διορθώνοντας έγκαιρα την βλάβη (Διορθωτική Συντήρηση) όταν πλέον αυτή είναι αναπόφευκτη.

Αυτή η προσέγγιση έχει μειωμένο κόστος σε σχέση με την κατά βάση επαναλαμβανόμενη Προληπτική Συντήρηση επειδή οι δραστηριότητες της συντήρησης εκτελούνται μόνο όταν είναι δικαιολογημένες. Η εφαρμογή ενός συστήματος Προβλεπτικής Συντήρησης απαιτεί καλή οργάνωση και υποδομή συνεργείων, τα οποία όμως δεν διαχωρίζονται σε συνεργεία ελέγχου και επεμβάσεων. Χωρίζονται και αποκεντρώνονται σε μικρότερους τομείς ευθύνης που εκτελούν όλους τους ελέγχους και επεμβάσεις.

Ακολουθείται πρόγραμμα το οποίο προκύπτει σε συνεργασία με τους υπεύθυνους παραγωγής για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της λειτουργίας του εξοπλισμού. Η κατάσταση και η απόδοση του εξοπλισμού παρακολουθούνται συνεχώς δυναμικά (condition monitoring) . Οι περισσότεροι έλεγχοι μηχανημάτων γίνονται κατά την διάρκεια που αυτά λειτουργούν. Τα στοιχεία που προκύπτουν δίνουν πληροφορίες για την κατάσταση του μηχανήματος και βοηθούν στην πρόβλεψη του χρόνου επέμβασης για συντήρηση ή διόρθωση. Μόνο όταν προγραμματιστεί η επισκευή γίνεται διακοπή της λειτουργίας του.

Ο απώτερος σκοπός της Προβλεπτικής Συντήρησης είναι να πραγματοποιεί τις εργασίες συντήρησης σε μια προγραμματισμένη χρονική στιγμή πριν ο εξοπλισμός αστοχήσει εν λειτουργία και όταν η συντήρηση είναι οικονομικά δικαιολογημένη, δηλαδή όταν το κόστος της δεν υπερβαίνει αυτό που θα επέφερε η βλάβη του εξοπλισμού. Ενώ η μέθοδος της προληπτικής συντήρησης αφορά περισσότερο τις εξαρτώμενες από το χρόνο αστοχίες, η προβλεπτική συντήρηση ασχολείται με τα τυχαία και ξαφνικά εμφανιζόμενα προβλήματα τα οποία προσπαθεί να εντοπίσει και να διορθώσει εγκαίρως. Αν και οι αστοχίες δεν είναι δυνατό να ελεγχθούν πλήρως, με την υιοθέτηση αυτής της μεθόδου συντήρησης μπορούν να μειωθούν σημαντικά οι τυχαία εμφανιζόμενες αστοχίες και οι επιπτώσεις τους.

1.3.4 Συντήρηση Ακριβείας (Design-out Maintenance)

Η συντήρηση ακριβείας αποτελεί μια νέα μεθοδολογία συντήρησης η οποία αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια. Προσανατολίζεται στο σχεδιασμό, έχει δηλαδή σκοπό να διορθώσει ελαττώματα του σχεδιασμού, που μπορεί να προέρχονται από ακατάλληλη μέθοδο εγκατάστασης, επιλογή λάθος υλικών κατασκευής, ασαφή καθορισμό προδιαγραφών λειτουργίας κ.α. Προφανώς αυτό αποτελεί μηχανικό πρόβλημα, αλλά ευθύνη εξακολουθεί να έχει και το τμήμα της συντήρησης. Γι αυτόν το λόγο απαιτείται, σε μεγάλο βαθμό, αλληλεπίδραση των τμημάτων συντήρησης και σχεδιασμού έτσι ώστε ο μηχανικός συντήρησης να συνεργάζεται στενά με τον μηχανικό σχεδιασμού.

Σε ορισμένες περιπτώσεις είτε είναι αδύνατο να βρεθεί μια δραστηριότητα συντήρησης ρουτίνας που να εξασφαλίζει το επιθυμητό επίπεδο διαθεσιμότητας του εξοπλισμού είτε δεν είναι πρακτικό αυτή να διενεργείται με την απαιτούμενη συχνότητα. Όμως και σε αυτές τις περιπτώσεις κάτι πρέπει να γίνεται, ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος πολλαπλής αστοχίας σε ένα ανεκτό επίπεδο. Σε αυτές τις περιπτώσεις καθίσταται αναγκαία η επανεξέταση του σχεδιασμού.

Ο επανασχεδιασμός αφορά κυρίως κάποιες επεμβάσεις σε νευραλγικά σημεία της μηχανής και την αντικατάσταση και επιλογή ίσως άλλων εναλλακτικών λύσεων. Εάν η αστοχία έχει συνέπειες στην ασφάλεια του προσωπικού ή το περιβάλλον, τότε ο επανασχεδιασμός είναι αναγκαστικός. Εάν η αστοχία έχει μόνο οικονομικές επιπτώσεις, τότε η ανάγκη επανασχεδιασμού εκτιμάται με βάση οικονομικά κριτήρια.

Η λογική αυτής της μεθόδου είναι διαφορετική από των υπολοίπων. Ενώ οι περισσότερες μέθοδοι συντήρησης έχουν σαν στόχο την εξάλειψη των αστοχιών ή των επιπτώσεων των αστοχιών, η συντήρηση ακριβείας αποσκοπεί μεν στην ελαχιστοποίηση των αστοχιών, αλλά μέσω της εξάλειψης των αιτιών της συντήρησης, δηλαδή των αιτιών που οδηγούν στην ανάγκη για συντήρηση.

Η συντήρηση ακριβείας στοχεύει στην καρδιά της αξιοπιστίας με την βελτίωση ατελειών στον σχεδιασμό. Πλεονεκτεί σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους συντήρησης στο ότι εφαρμόζεται μία μόνο φορά για να φέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Ο στόχος της είναι να «χτυπήσει» την εξάλειψη της αξιοπιστίας και όχι τα αποτελέσματα αυτής της έλλειψης, δηλαδή την πηγή που προκαλεί τα προβλήματα. Υπάρχουν όμως δύο προαπαιτούμενα για την εφαρμογή της συντήρησης ακριβείας, τα οποία είναι:

1. Η απαραίτητη ύπαρξη μιας διευθυντικής ομάδας η οποία να πιστεύει στην καινοτομία και να ακολουθεί την αγορά. Χωρίς την παρακολούθηση της αγοράς δεν είναι δυνατή και η καινοτομία, αφού αυτή αποτελεί απάντηση στις απαιτήσεις του πελάτη.

2. Η εφαρμογή της συντήρησης ακριβείας απαιτεί ικανούς και πεπειραμένους ερευνητές στους οποίους να παρέχεται ο χρόνος και τα κεφάλαια για να κάνουν την ανάλυση-σύνθεση που θα οδηγήσει στις επιθυμητές βελτιώσεις. Οι ερευνητές πρέπει να ξέρουν σε βάθος τους νόμους και τις αρχές της φυσικής και της χημείας για να επιλύουν μηχανικά προβλήματα. Γενικά, εφαρμόζεται σε εταιρίες που βλέπουν την όλη λειτουργία ενός οργανισμού σαν ένα δυναμικό σύστημα και πιστεύουν ότι η επένδυση θα αποδώσει. Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω είναι προφανές πως η Προβλεπτική συντήρηση και η συντήρηση Ακριβείας είναι

αποτελεσματικότερες από τις προηγούμενες μεθόδους, δυστυχώς όμως έχουν αρκετά υψηλό κόστος εφαρμογής.

1.4 Προβλεπτική Συντήρηση

1.4.1 Εισαγωγή

Η πρόβλεψη ή πρόγνωση της αστοχίας με τη λειτουργική παρακολούθηση (real time monitoring), είναι μία πρακτική που αναπτύχθηκε από την ανάγκη βελτιστοποίησης της χρήσης των μέσων παραγωγής σε συνδυασμό με το οικονομικό αποτέλεσμα. Είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο έλεγχος κρίσιμων σημείων μιας παραγωγικής γραμμής, ώστε να προλαμβάνονται βλάβες με έγκαιρες επεμβάσεις. Η πείρα έχει αποδείξει ότι το συνολικό κέρδος μιας επιχείρησης μπορεί να αυξηθεί έως και 3% με τη συστηματική χρήση των μέσων πρόβλεψης, γεγονός που οφείλεται τόσο στη μείωση των νεκρών χρόνων όσο και στη μείωση των δαπανών συντήρησης.

Οι κύριες δραστηριότητες της συντήρησης αφορούν σε αντικαταστάσεις, τακτικές ενέργειες και επισκευές. Από τις τακτικές ενέργειες οι έλεγχοι και η λίπανση αποτελούν τη βάση της πρόβλεψης με την έννοια της εξακρίβωσης μελλοντικών αναγκών. Εκτελούνται με απλά μέσα ή με ειδικές συσκευές και μεθόδους.

Η βασική μεθοδολογία της Προβλεπτικής συντήρησης είναι η συγκέντρωση πληροφοριών της συμπεριφοράς των μηχανών με ελέγχους και επιθεωρήσεις που γίνονται σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Επακολουθεί η επεξεργασία τους με συγκεκριμένες μεθόδους. Η γενική μεθοδολογία έχει σχέση με την παρακολούθηση της εξέλιξης των διαφόρων φαινομένων ή ευρημάτων που αφορούν πρόοδο φθορών ή γεγονότων που οδηγούν σε βλάβες, καθώς βασίζεται στο γεγονός ότι οι αστοχίες δε συμβαίνουν στιγμιαία αλλά εξελίσσονται μέσα σε κάποιο χρονικό διάστημα. Τα ευρήματα αυτά οφείλονται συνήθως σε μηχανικά ή λειτουργικά αίτια, στην επίδραση του περιβάλλοντος ή και στα δύο μαζί. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση η εξέλιξή τους κρίνεται φυσιολογική ενώ στη δεύτερη περίπτωση κρίνεται απότομη. Επομένως η εμφάνιση και η πρόοδός τους εξετάζονται σε συνάρτηση με το χρόνο. Με την έννοια αυτή καθορίζονται χρονικά όρια επεμβάσεων ή αντικαταστάσεων πριν το γεγονός συγκεκριμένης αστοχίας δημιουργήσει ευρύτερα σφάλματα.

Ανάλογα με τα συμπεράσματα, επιλέγονται οι κατάλληλες ενέργειες που εξασφαλίζουν την όσο το δυνατό μεγαλύτερη παραμονή της λειτουργίας ενός συστήματος στα φυσιολογικά όρια. Με την εμπειρία που θα αποκτηθεί από την εφαρμογή του προγράμματος είναι δυνατός και ο προσδιορισμός της «φυσιολογικής» ή «απότομης» εξέλιξης των φθορών.

Ένα άλλο σημαντικό μέγεθος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η συχνότητα των ελέγχων και των επιθεωρήσεων. Οι τακτικοί έλεγχοι σημαίνουν σημαντική οικονομική επιβάρυνση, ενώ σε αντίθετη περίπτωση αύξηση των αστοχιών. Η καλύτερη προσέγγιση και των δύο περιπτώσεων βασίζεται στην έρευνα

της συμπεριφοράς του εξοπλισμού και σε δοκιμές κατά τα αρχικά στάδια της εφαρμογής.

1.4.2 Κατηγορίες Βλαβών

Οι τακτικοί έλεγχοι και επιθεωρήσεις παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα ως προς την έγκαιρη ανακάλυψη ιχνών που είναι δυνατό να οδηγήσουν σε βλάβη. Θα πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη ότι ο έγκαιρος εντοπισμός δεν είναι πάντα δυνατός. Με την έννοια αυτή οι βλάβες διακρίνονται σε απρόβλεπτες και σε φυσιολογικές.

Απρόβλεπτες Βλάβες

Εμφανίζονται κατά τρόπο τυχαίο έτσι ώστε κάθε έννοια πρόβλεψης δεν είναι δυνατή. Διακρίνονται σε:

- Εμφανείς, οι οποίες είναι δυνατό να εντοπιστούν επειδή δεν εξελίσσονται απότομα, αλλά χρειάζονται κάποιο χρόνο. Προκειμένου να προληφθούν απαιτείται συνεχής παρακολούθηση.
- Αφανείς, οι οποίες δεν εντοπίζονται και εξελίσσονται απότομα. Στην περίπτωση αυτή οι βλάβες καταγράφονται και προσδιορίζονται τα αίτια. Γίνεται η διάγνωση και στη συνέχεια λαμβάνονται τα απαραίτητα διορθωτικά μέτρα.

Φυσιολογικές Βλάβες

Εξελίσσονται χρονικά με γνωστό τρόπο και ρυθμό. Οφείλονται κύρια στις φθορές, σε αλλαγή της δομής των υλικών κατά τη λειτουργία, σε χημικές επιδράσεις, σε μηχανικές καταπονήσεις, θερμοκρασίες. Διακρίνονται σε:

- Εμφανείς, οι οποίες εντοπίζονται και ανιχνεύονται με επιθεωρήσεις και ελέγχους. Έτσι είναι δυνατή η λήψη κατάλληλων μέτρων, ώστε να μην εξελιχθούν.
- Αφανείς, οι οποίες δεν εντοπίζονται και προλαμβάνονται μόνο με προγραμματισμένες αντικαταστάσεις και επισκευές. Στην πρώτη κατηγορία βλαβών είναι απαραίτητη η διάγνωση και οι διορθωτικές ενέργειες.

1.4.3 Η Μέθοδος της Προβλεπτικής Συντήρησης

Βασική επιδίωξη της εφαρμογής συστήματος της Προβλεπτικής συντήρησης είναι η πρόβλεψη (prevention) και η εξάλειψη των αιτιών που οδηγούν ένα λειτουργικό σύστημα σε αστοχία (βλάβη). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται γι αυτόν το σκοπό δε βασίζονται μόνο σε στατικά ή στατιστικά δεδομένα, όπως για παράδειγμα, συστάσεις κατασκευαστών, εμπειρία, συνήθειες, ιστορικά στοιχεία κτλ, αλλά έχουν σχέση με την παρακολούθηση της κατάστασης (condition monitoring) του μηχανολογικού εξοπλισμού. Με τη βοήθεια των συστημάτων συγκέντρωσης των πληροφοριών (integrated systems, real time monitors κλπ.) και ελέγχου συνθηκών λειτουργίας (condition control), πραγματοποιείται πρόληψη μέσω προβλέψεων και προγνώσεων. Τα πληροφοριακά αυτά συστήματα σε συνδυασμό με τα ανάλογα του ελέγχου παραγωγής (production control) συνθέτουν το φάσμα της πραγματικής παρακολούθησης της απόδοσης των εγκαταστάσεων. Έτσι είναι δυνατός ο προσδιορισμός του ωφέλιμου χρόνου ζωής των εξαρτημάτων ή των μηχανημάτων μέχρι την προσεχή επέμβαση, πριν η λειτουργία τους καταστεί κρίσιμη καθώς επίσης και ο εκ των προτέρων σχεδιασμός και προγραμματισμός των εργασιών. Η διασύνδεσή τους (interface) με ολοκληρωμένα πληροφοριακά συστήματα ελέγχου της συντήρησης είναι πολύ σημαντική για την έγκαιρη λήψη σωστών σοβαρών αποφάσεων.

Η Προβλεπτική συντήρηση ως σχεδιασμός, περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία του μακροχρόνιου προγραμματισμού υποστήριξης του εξοπλισμού. Γίνεται δε χρήση εξελιγμένων μεθόδων προσδιορισμού της βέλτιστης λύσης (επιχειρησιακός σχεδιασμός). Τα κριτήρια είναι οικονομοτεχνικά με την έννοια της αύξησης των εσόδων από τα οποία αφαιρούνται κάθε φορά οι δαπάνες βελτίωσης της συντήρησης.

1.4.4 Διάγνωση κατά την Λειτουργία

Από τον όρο της προβλεπτικής συντήρησης η λέξη «προβλεπτική» προέρχεται από το σκοπό αυτής, που είναι η πρόβλεψη της μελλοντικής τάσης της κατάστασης του εξοπλισμού. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί στατιστικές διαδικασίες ελέγχου για να καθορίσει σε ποια χρονική στιγμή στο μέλλον είναι κατάλληλο να γίνει η συντήρηση. Οι τεχνικές που χρησιμοποιεί η Προβλεπτική συντήρηση είναι προηγμένες τεχνικές περιοδικού ή συνεχούς (on-line) ελέγχου της κατάστασης του εξοπλισμού (machinery condition monitoring) οι οποίες μπορούν να προβλέψουν την αρχή μιας βλάβης πριν τις ανθρώπινες αισθήσεις και επιτρέπουν τον προγραμματισμό των επισκευών ή άλλων ενεργειών, ώστε να αποφευχθεί η παύση της παραγωγής. Ελέγχουν μια παράμετρο της κατάστασης του εξοπλισμού έτσι ώστε μια σημαντική αλλαγή αυτής να είναι ενδεικτική μιας εξελισσόμενης αστοχίας. Η αλλαγή αυτή καταγράφεται, παρακολουθείται και εφόσον αυτή διαρκεί στη συνέχεια γίνεται διάγνωση και πρόγνωση του πιθανού χρόνου βλάβης και της αιτίας. Αυτός ο τρόπος ελέγχου και συντήρησης έρχεται σε αντίθεση με την Προληπτική μέθοδο συντήρησης που πραγματοποιείται μόνο μετά την πάροδο

ορισμένου χρόνου και στην οποία ο εξοπλισμός συντηρείται είτε είναι απαραίτητο είτε όχι. Η Προληπτική συντήρηση απασχολεί εντατικά το προσωπικό της, είναι αναποτελεσματική στον εντοπισμό προβλημάτων που εξελίσσονται μεταξύ προγραμματισμένων ελέγχων και οικονομικά μη αποδοτική. Πρόσφατες έρευνες αναφέρουν ότι το ένα τρίτο του συνολικού κόστους συντήρησης οφείλεται σε περιττές και λανθασμένα εφαρμοζόμενες συντηρήσεις. Η κυριότερη αιτία είναι η έλλειψη πραγματικών δεδομένων που να ποσοτικοποιούν την πραγματική ανάγκη για επισκευή ή συντήρηση. Σύμφωνα με την Προβλεπτική συντήρηση, ο τακτικός έλεγχος της πραγματικής κατάστασης του εξοπλισμού εξασφαλίζει μεγαλύτερο διάστημα μεταξύ των επισκευών, ελαχιστοποιεί τον αριθμό και το κόστος των στάσεων-βλαβών και βελτιώνει τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού.

Η Προβλεπτική συντήρηση προηγείται της προληπτικής με τη χρήση μη-καταστροφικών μεθόδων για να ανακαλύψει επικείμενες αστοχίες στο πρωταρχικό τους στάδιο.

1.4.5 Παρακολούθηση κατάστασης της μηχανής(condition monitoring)

Είναι η παρακολούθηση μιας παραμέτρου της κατάστασης μιας μηχανής, έτσι ώστε μια συγκεκριμένη μεταβολή της να είναι ενδεικτική μιας αναπτυσσόμενης αστοχίας. Η χρήση του Condition monitoring επιτρέπει τον προγραμματισμό της συντήρησης της μηχανής, ή άλλες ενέργειες που πρέπει να ληφθούν ,ώστε να αποφευχθούν οι συνέπειες της τελικής αστοχίας ,πριν από την τελική αστοχία. Με αυτήν την μέθοδο μας δίνεται μια μοναδική δυνατότητα πρόβλεψης μιας επικείμενης αποτυχίας στη μηχανή.

Στην παρακολούθηση της λειτουργίας μιας μηχανής, οι σχετικές πληροφορίες αποκτούνται από διάφορους αισθητήρες ώστε να αναλυθεί και να κριθεί η κατάσταση υγείας των εξαρτημάτων μιας μηχανής, τα οποία συνήθως είναι προσιτά χωρίς να χρειάζεται η αποσυναρμολόγηση της. Η δόνηση και τα ηχητικά σήματα έχουν άμεση σχέση με την δυναμική δομή της μηχανής, ουσιαστικά παρέχουν την δυνατότητα απόκτησης άφθονων πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση υγείας της μηχανής. Συνεπώς ,η εκχύλιση από την αξιόπιστη λειτουργία αυτών των δυο τύπων σημάτων είναι ένας τρόπος για την παρακολούθηση της κατάστασης της μιας μηχανής. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός και άλλων χαρακτηριστικών για την παρακολούθηση, αλλά έτσι επηρεάζεται πολύ το κόστος και ο χρόνος. Η ευαισθησία των χαρακτηριστικών ,όσον αφορά τις δονήσεις και τα ηχητικά σήματα ποικίλει σημαντικά κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Επομένως, για να γίνει εξαγωγή ασφαλών και ποιοτικών αποτελεσμάτων θα πρέπει υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες.

1.5 Η πρόοδος στην παρακολούθηση κατάστασης της μηχανής και στη διάγνωση βλάβης

Ο μηχανολογικός εξοπλισμός τεχνικής διάγνωσης βλαβών, χρησιμοποιεί τις μετρήσεις της παρακολούθησης της μηχανικής λειτουργίας και την σταθερών της, για να αναλύσει και να εξαγάγει σημαντικά χαρακτηριστικά για την αξιολόγηση της κατάστασης των βασικών μερών της μηχανής. Συνδυάζοντας τα δεδομένα του ιστορικού, μπορεί να αναγνωρίσει ποσοτικά τις τρέχουσες συνθήκες των βασικών συνιστωσών, να προβλέπει τις επικείμενες ανωμαλίες και τα μελλοντικά σφάλματα. Με αυτόν τον τρόπο, οι βελτιστοποιημένες στρατηγικές συντήρησης μπορεί να ρυθμιστούν, έτσι ώστε οι βιομηχανίες να επωφεληθούν αισθητά [3, 4]. Το περιεχόμενο της διάγνωσης μηχανικών ελαττωμάτων περιλαμβάνει τέσσερα σημεία:

- Την έρευνα της βλάβης του μηχανισμού.
- Την επεξεργασία των σημάτων και την εξαγωγή χαρακτηριστικών.
- Την έρευνα των λόγων που σφάλει ο μηχανισμός.
- Την ανάπτυξη του εξοπλισμού παρακολούθησης της κατάστασης και της διάγνωσης σφαλμάτων.

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος σε αυτόν τον τομέα από πολλούς ερευνητές. Ορισμένα κεντρικά σημεία που εξετάζονται στην παρούσα εισαγωγή αφορούν τις νέες τεχνικές επεξεργασίας σήματος, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των καινούριων αυτών εξελίξεων στην επεξεργασία, αλλά και στις μεθόδους εξαγωγής χαρακτηριστικών, τους λόγους βλάβης, τις διαγνωστικές συσκευές και τέλος, μελλοντικά ερευνητικά θέματα που περιγράφονται για την μελλοντική γενιά του της έρευνας στην πρόγνωση ελαττωμάτων

1.5.1 Έρευνα μηχανικών βλαβών

Η έρευνα στις μηχανικές βλάβες είναι ένα πολύ δύσκολο και σημαντικό έργο, τόσο δύσκολο όσο και η έρευνα της παθολογίας για την ιατρική. Αμερικανός επιστήμονας John Sohré δημοσίευσε ένα άρθρο με τίτλο “causes and treatment of high speed turbo machinery operating systems” στις Ηνωμένες Πολιτείες στο institute of Mechanical Engineering at the Petroleum Mechanical Engineering το 1968 και έδωσε μια σαφή και συνοπτική περιγραφή σε τυπικά συμπτώματα και πιθανές αιτίες της μηχανικής βλάβης. Πρότεινε ότι τυπικές βλάβες μπορούν να ταξινομηθούν 9 διαφορετικούς τύπους και 37 διαφορετικά είδη[..7]. Ακολουθώντας ο Shiraki συντέλεσε σημαντικό έργο στην έρευνα μηχανικής βλάβης (mechanical failure) στην Ιαπωνία μεταξύ του 1960 και 1970 ,και κατέληξε σε άφθονες

πληροφορίες για την υποστήριξη της θεωρίας της μηχανικής βλάβης. Η BENTLY NEVADA corporation έχει επίσης πραγματοποιήσει σειρά πειραμάτων για την μελέτη του συστήματος rotor-bearing. Ένα μεγάλο ποσό σχετικών έχει γίνει στην Κίνα ,καθώς και ο Gao [..10] ερευνήσε το vibration fault mechanism σε υψηλή ταχύτητας turbo μηχανών, διερεύνησε την σχέση μεταξύ της συχνότητας της δόνησης της παραγωγής δονήσεων και κατάρτισε πίνακα of the vibration fault reasons,mechanism and recognition features for susynchronous, synchronous and super-synchronous vibrations .Με βάση τον πίνακα που δημιούργησε ταξινομήσε κάποιες τυπικές βλάβες σε 10 τύπους και 58 είδη ,και συνέστησε προληπτικές θεραπείες κατά τον σχεδιασμό ,την λειτουργία και την υποβάθμιση της μηχανής. Ο Xu [11] κατέληξε στα συνηθισμένα σφάλματα των περιστρεφόμενων μηχανών. Chen [12] χρησιμοποίησε τη μη γραμμική θεωρία για να αναλύσει τα βασικά προβλήματα κραδασμών στην άτρακτο μιας γεννήτριας .Δημιούργησε ένα μοντέλο ρότορα μη γραμμικής δυναμικής για την γεννήτρια ώστε να διερευνήσει διεξοδικά την δυναμική συμπεριφορά του ρότορα ,κάτω από διαφορετικές επιρροές, και πρότεινε εφικτές λύσεις για την πρόληψη βλάβης του ρότορα .Ο Yang [13] υιοθέτησε την ανάλυση κραδασμών για να μελετήσει τις μηχανικές βλάβες κάπου στο 1980, και δημοσίευσε πάρα πολλά αξιόλογα άρθρα ώστε να βοηθήσει θεωρητικά και πρακτικά στη διάγνωση μηχανικών σφαλμάτων. Ωστόσο το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας είναι πάνω στο στάδιο της αριθμητικής και ποιοτικής προσομοίωσης, διότι το πρακτικό κομμάτι είναι σαφέστατα πιο δύσκολο στην εφαρμογή. Επιπλέον , οι πληροφορίες που μας δίνει κάποιο εξεταζόμενο σφάλμα ,συχνά παρουσιάζουν ισχυρά μη γραμμικά ,ασταθή και μη Gaussian χαρακτηριστικά .Οι δοκιμές με προσομοίωση δεν μπορούν να αντικατοπτρίσουν τα χαρακτηριστικά αυτά με ακρίβεια. Ως αποτέλεσμα , η ανάπτυξη της τεχνικής για την διάγνωση βλαβών εξακολουθεί να αντιμετωπίζει μεγάλες δυσκολίες.

1.5.2 Προηγμένες μέθοδοι εξαγωγής χαρακτηριστικών από τη επεξεργασία του σήματος

Προηγμένη τεχνολογία επεξεργασίας σήματος χρησιμοποιείται για να εξάγει χαρακτηριστικά που είναι ευαίσθητα σε συγκεκριμένα σφάλματα με την χρησιμοποιώντας τεχνικές ανάλυσης σήματος. Οι πληροφορίες της κατάστασης μιας μονάδας εμπεριέχονται σε ένα ευρύ φάσμα σημάτων ,όπως ο θόρυβος κραδασμών (vibration noise), η θερμοκρασία , η πίεση ,strain ,τάση κλπ. Η πληροφορία μιας συγκεκριμένης βλάβης μπορεί να αποκτηθεί μέσω της μεθόδου ανάλυσης σήματος, και έτσι μπορεί να γίνει αντίστοιχα η διάγνωση της βλάβης. Προκειμένου να γνωρίσουμε τις ειδικές ανάγκες για την διάγνωση μιας βλάβης , η εξαγωγή χαρακτηριστικών σφάλματος και η τεχνολογία ανάλυσης is undergoing the process από το πεδίο του χρόνου μέχρι το πεδίο ανάλυσης συχνοτήτων του Fourier , από την γραμμική στατική ανάλυση μέχρι την μη γραμμική μη στατική ανάλυση ,από την ανάλυση πεδίων συχνοτήτων μέχρι την ανάλυση χρόνου-συχνότητας (time-frequency).

Οι πρώτες έρευνες στην ανάλυση σήματος των δονήσεων εστιάζονται στην κλασσική ανάλυση του σήματος όπου δονήσεις από μηχανές περιστρεφόμενου

άξονα (rotating machines), συνήθως είναι ισχυρά αρμόνικες ,έτσι η βλάβη εντοπίζεται με αλλαγές που συμβαίνουν σε αυτήν την αρμονικότητα. Η κλασσική ανάλυση φάσματος βασίζεται πάνω στους μετασχηματισμούς Fourier (όπως οι τεχνικές average time-domain, ανάλυση spectrum, ανάλυση cepstrum και τεχνικές demodulation), όπου εξάγονται σημαντικές και αποτελεσματικές πληροφορίες. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως στις μηχανές και είναι ακόμα η κύρια μέθοδος για την παρακολούθηση και για την εξαγωγή χαρακτηριστικών σφάλματος. Ωστόσο η κλασσική ανάλυση σήματος έχει και κάποια μειονεκτήματα. Ο μετασχηματισμός Fourier εκφράζει τις συνολικές στατιστικές ιδιότητες ενός σήματος και είναι κατάλληλος για ανάλυση σταθερού σήματος .Στην πραγματικότητα τα σήματα που καταγράφονται και μετρώνται είναι μη σταθερά, μη Gaussian και μη γραμμικές κατανομές. Ειδικά όταν ο εξοπλισμός αρχίζει να καταρρέει η απροσδιόριστη αυτή κατάσταση φαίνεται να είναι πιο εμφανή. Για μη σταθερά σήματα κάποιες λεπτομέρειες χρόνου-συχνότητας (time-frequency) μπορεί να μην εμφανίζονται στο φάσμα ,οπότε η ανάλυση τους από μετασχηματισμό Fourier να είναι περιορισμένη. Νέες μέθοδοι ανάλυσης σήματος για μη σταθερά σήματα (non-stationary) και μη γραμμικά συστήματα (non linear) εμφανίζονται συνεχώς ,οι οποίες σύντομα θα χρησιμοποιούνται στο πεδίο της μηχανικής για την διάγνωση βλάβης.

1.5.3 Έρευνα στα αίτια της βλάβης

Στις μέρες μας, χρησιμοποιούνται πολλές μέθοδοι για την πρόοδο στη διάγνωση αιτιών. Η διάγνωση σφάλματος ανάλογα με τα υποκειμενικά συστήματα που ανήκει μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες:

- Η διάγνωση της βλάβης βασίζεται σε συστήματα ελέγχου
- Η διάγνωση της βλάβης βασίζεται στην αναγνώριση προτύπων (pattern recognition)
- Η διάγνωση της βλάβης βασίζεται στη τεχνητή νοημοσύνη(artificial intelligence)

Η διάγνωση της βλάβης που βασίζεται σε συστήματα ελέγχου, είναι απαραίτητο να δημιουργήσει μοντέλο μέσω θεωρητικών ή πειραματικών μεθόδων. Οι μεταβολές στις παραμέτρους ή στην κατάσταση του συστήματος μπορούν άμεσα να αντικατοπτρίσουν τις αλλαγές της φυσικής κατάστασης του εξοπλισμού, επομένως έτσι τίθεται η βάση για την διάγνωση κάποιας βλάβης. Η τεχνολογία αυτή αφορά την δημιουργία μοντέλου, την εκτίμηση παραμέτρων, την εκτίμηση κατάστασης, την εφαρμογή παρατηρητών κλπ. Δεδομένου ότι απαιτεί το ακριβές μοντέλο του συστήματος, πρακτικά , αυτή η μέθοδος δεν είναι οικονομικά εφικτή για περίπλοκες συσκευές.

Η διάγνωση της βλάβης που βασίζεται στην αναγνώριση προτύπων, πραγματοποιεί περιγραφή συμπλεγμάτων, για μια σειρά διαδικασιών ή γεγονότων. Κυρίως χωρίζεται σε στατιστικές και γλωσσικά δομημένες(language structure)

μεθόδους. Η διάγνωση βλάβης σε εξοπλισμούς, μπορεί να αναγνωρίζεται με την διαδικασία αναγνώρισης προτύπων, δηλαδή, να αναγνωρίζεται η βλάβη, βάση χαρακτηριστικών που εξάγονται. Υπάρχουν πολλές παραπλήσιες μέθοδοι συμπεριλαμβανόμενου την κατηγορία Bayes, την κατηγορία συναρτήσεων απόστασης, την fuzzy diagnosis, την fault tree analysis, την grey theory diagnosis κλπ. Τα τελευταία χρόνια κάποιες νέες τεχνολογίες έχουν επίσης εφαρμογή στο πεδίο της διάγνωσης βλάβης σε περιστροφικές μηχανές, όπως ο συνδυασμός των fuzzy set και neural network, η δυναμική αναγνώριση προτύπων (dynamic pattern recognition) βασίζεται σε κρυφά μαρκοβιανά μοντέλα κλπ.

1.5.4 Έρευνα και ανάπτυξη των συσκευών, για την διάγνωση βλάβης.

Η τεχνολογία της διάγνωσης βλάβης τελικά υιοθετείται από πραγματικές συσκευές. Επί του παρόντος η έρευνα και η ανάπτυξη των συσκευών για την διάγνωση βλάβης έχει τις εξής δυο κατηγορίες:

- φορητή συσκευή για παρακολούθηση και διάγνωση (συμπεριλαμβανομένου και του συστήματος συλλογής δεδομένων),
- on-line παρακολούθηση της κατάστασης της μηχανής.

το φορητό όργανο περιλαμβάνει single-chip μικροϋπολογιστή για να ολοκληρώνει την απόκτηση δεδομένων, ώστε να μπορεί να αναλύει το κάθε σήμα και να μπορεί να διαγνώσει μελλοντικό σφάλμα. Στην on-line παρακολούθηση το όργανο για την διάγνωση βλάβης είναι εξοπλισμένο με διάφορους αισθητήρες που αποκτούν συνεχώς δεδομένα, συναγερμό προειδοποίησης βλάβης, υποσύστημα condition monitoring κ.α. Επίσης είναι εξοπλισμένο με λογισμικό με πλούσια δεδομένα για την ανάλυση σημάτων. Αυτό το λογισμικό περιλαμβάνεται στα America Bently Corporation 3300,3500 και DM2000 συστήματα, στο America Westinghouse Company PDS σύστημα, στο 5911 σύστημα που αναπτύχτηκε από τη Enteck and IRD company, Ιαπωνία Mitsubishi MHM κλπ.

Διαδικτυακά κέντρα διάγνωσης, παρακολουθούν κάθε στιγμή την λειτουργία των μηχανών. Επίσης μέσω του διαδικτύου μπορεί να επιτευχθεί μεταφορά πληροφοριών σε μεγάλες αποστάσεις, όπου μας βοηθούν για την συλλογική διάγνωση της κατάστασης σε απομακρυσμένους εξοπλισμούς.

1.5.5 Συμπεράσματα

Για να επιτύχεις ένα δυναμικό σύστημα παρακολούθησης για την κατάσταση μιας μηχανής ή ενός εξοπλισμού, χρειάζεται να έχεις πάρει αρκετές αξιόπιστες πληροφορίες από τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά του. Λόγο των διακυμάνσεων του ιδίου του συστήματος και των διαταραχών που υπάρχουν στο περιβάλλον, η συλλογή σήματος είναι μια πολύ ευαίσθητη διαδικασία, κάτι που την καθίστα ιδιαίτερα δύσκολη. Συνεπώς, είναι απαραίτητη μια προηγμένη τεχνολογία επεξεργασίας σήματος για την εξάλειψη του θορύβου. Κάθε τεχνολογία, είτε είναι η κλασσική συλλογή είτε είναι η προηγμένη συλλογή σήματος, αποτελεί μέρος των

διαγνωστικών συστημάτων και η αποτελεσματική εκμετάλλευση της παρέχει καλύτερη απόδοση για την παρακολούθηση της κατάστασης και την διάγνωση βλάβης. Η έρευνα στην επεξεργασία του σήματος με την εξαγωγή χαρακτηριστικών γνωρισμάτων και η έρευνα των λόγων βλάβης με την ανάπτυξη εξοπλισμού διάγνωσης, θα συνδεθούν ακόμη πιο στενά, για να σχηματίσουν ένα αποτελεσματικό και έμπειρο σύστημα διάγνωσης για το μέλλον.

Για την υλοποίηση ενός έμπειρου συστήματος ,υπάρχει ως βασικό ζήτημα να «σπάσει» το εμπόδιο απόκτησης αξιόπιστων γνώσεων για την ενημέρωση των δεδομένων ,ώστε να εμπλουτιστεί το σύστημα παρακολούθησης και να είναι πιο αποτελεσματικό. Με αυτόν τον τρόπο η εμπειρία στην διάγνωση του συστήματος μπορεί να προσφέρει εκτιμήσεις ακριβείας για ανωμαλίες που μπορεί να εξελιχθούν, και να αποτρέψει το σπάσιμο, προκειμένου να εξασφαλίσει την σωστή λειτουργία των μηχανημάτων. Έτσι το κόστος που προκύπτει από βλάβες μηχανημάτων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί σημαντικά.

1.6 Μεθοδολογίες και Μετρητικές Τεχνικές για την Παρακολούθηση της Κατάστασης Μηχανής

Οι σχετικές μεθοδολογίες της προβλεπτικής συντήρησης που μετρούν τη λειτουργική δυναμική του εξοπλισμού στηρίζονται σε ένα σύνολο Μετρητικών Τεχνικών συνοδευόμενων από κατάλληλες Διαγνωστικές Μεθοδολογίες. Καθώς καθεμιά από τις μεθοδολογίες της προβλεπτικής συντήρησης χρησιμοποιείται για ένα συγκεκριμένο τύπο φθοράς, σε ένα πρόγραμμα προβλεπτικής συντήρησης τυπικά χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός μεθόδων.

Η σημαντικότερη κατηγορία Μετρητικών Τεχνικών έχει αναπτυχθεί για τη διάγνωση βλαβών του μηχανολογικού εξοπλισμού ο οποίος, δεδομένης της δομής των βιομηχανικών εγκαταστάσεων, αποτελεί την κύρια κατηγορία εξοπλισμού. Σήμερα εμφανίζεται μία μεγάλη ποικιλία τεχνολογιών που μπορούν και πρέπει να χρησιμοποιούνται στη διάγνωση βλαβών και στη μέτρηση της φθοράς των βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Υπάρχει ποικιλία στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανών (condition monitoring), σχεδόν όλες από αυτές που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα είναι:

- Παρακολούθηση του επιπέδου των δονήσεων – κραδασμών (Vibration Monitoring)
- Ακουστική εκπομπή (Acoustic Emission)
- Δοκιμές με υπέρηχους (Ultrasonic Testing)
- Ανάλυση λιπαντικού (Oil analysis) ή Τριβολογία (Trivology)
- Μέτρηση παραμόρφωσης (strain measurement)
- Επιθεωρήσεις ραδιογραφήματος (Radiographic Inspection)
- Μέτρηση κρουστικών παλμών (Shock Pulse Measurements)
- Ανίχνευση βλαβών με θερμογράφηση (Thermograph)
- Μέτρηση παραμέτρων λειτουργικής διαδικασίας (Process Parameters)
- Στατιστική ανάλυση της δομικής ακεραιότητας των υλικών

1.6.1 Παρακολούθηση κραδασμών (Vibration Monitoring)

Η παρακολούθηση των κραδασμών που παράγουν κατά τη λειτουργία τους τα περιστρεφόμενα στοιχεία μηχανών είναι μια αρκετά αξιόπιστη μέθοδος για τη διάγνωση βλαβών σε μηχανολογικές κατασκευές. Στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε στοιχείο μηχανής παράγει συγκεκριμένες δονήσεις σε συγκεκριμένες χαρακτηριστικές συχνότητες που καλούνται συχνότητες αναμονής. Με τις απαραίτητες γνώσεις η ανάλυση του φάσματος των κραδασμών παρέχει ποσοτικά στοιχεία που επιτρέπουν την αξιολόγηση της κατάστασης της μηχανής.

Γίνεται χρήση συσκευών λήψεως και καταγραφής σημάτων κραδασμών από κατάλληλα όργανα μέτρησης και ακολουθεί ανάλυση με μετασχηματισμό Fourier (FFT).

Η ανάλυση δε συνεχίζεται παραπάνω καθώς η εργασία αυτή εντάσσεται στα πλαίσια της παρακολούθησης δονήσεων, προσπαθώντας να κατασκευαστεί ένα απλό και πάνω από όλα χρηστικό εργαλείο διάγνωσης βλαβών.

1.6.2 Ακουστική εκπομπή(acoustic emission)

Η Ακουστική Εκπομπή (AE) περιλαμβάνει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη δημιουργία και μετάδοση των ελαστικών κυμάτων που παράγονται μέσα σε ένα υλικό με απότομη απελευθέρωση ενέργειας. Η πηγή αυτών των κυμάτων μπορεί να είναι τοπική μετατόπιση που συνοδεύει την πλαστική παραμόρφωση, ή η έναρξη και διάδοση αστοχίας στο υλικό. Πηγές Ακουστικής Εκπομπής μπορεί να δημιουργηθούν και κατά την τήξη του υλικού και την αλλαγή φάσεως, λόγω θερμικών τάσεων.

Η Ακουστική Εκπομπή, ως μέθοδος Μη-Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ) βασίζεται στη μετατροπή των ελαστικών κυμάτων αυτών σε ηλεκτρικά σήματα με τη χρήση κατάλληλων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων που διεγείρονται σε συχνότητες υπερήχων από 25 ως 1200 kHz. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην επιφάνεια της υπό εξέταση κατά-σκευής, ενώ στο σημείο επαφής τους με την κατασκευή τοποθετείται συνήθως κάποιο παχύρρευστο υγρό (couplant). Το ηλεκτρικό σήμα κάθε αισθητήρα ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία από κατάλληλο ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

Τα όργανα Ακουστικής Εκπομπής πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν κάποιο μέτρο για τη συνολική ποσότητα των σημάτων που ανιχνεύθηκαν με σκοπό το συσχετισμό τους με το αντίστοιχο φορτίο.

1.6.3 Μέτρηση κρουστικών παλμών (Shock Pulse Method)

Η μέθοδος εφαρμόζεται επιτυχημένα για περισσότερο από 30 χρόνια και συνεχίζει να χρησιμοποιείται ευρέως στις μεθόδους διάγνωσης βλαβών κυρίως των ρουλεμάν. Βασικό πλεονέκτημα είναι η ταχύτητα των μετρήσεων και η ευκολία στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων της.

Ακόμη διερευνά την ύπαρξη ή μη του κατάλληλου λιπαντικού στρώματος μεταξύ των επιφανειών των σωμάτων κύλισης ενός εδράνου.

Στα πλαίσια αυτής της μεθόδου δεν ενδιαφερόμαστε για τη δόνηση που προκαλείται από κάποιον κρουστικό παλμό αλλά για τον κρουστικό παλμό αυτόν καθαυτόν.

Η ανάλυση συνίσταται στα ακόλουθα στάδια:

- Το σήμα που διεγείρεται από μια μηχανή και το οποίο προκαλεί κάποιος κρουστικός παλμός περνά μέσα από ένα ηλεκτρονικό φίλτρο.
- Μέσα από το φίλτρο περνούν κρουστικοί παλμοί στα 32 kHz, το πλάτος των οποίων εξαρτάται από την ενέργεια τους.
- Οι κρουστικοί παλμοί μετατρέπονται σε αναλογικούς ηλεκτρονικούς παλμούς.
- Το αλλαγμένο σήμα των κρουστικών παλμών μετατρέπεται τελικά σε μια ακολουθία ισχυρότερων και ασθενέστερων ηλεκτρονικών παλμών.

Τα όργανα που μετράνε τους κρουστικούς παλμούς (ή αλλιώς θορύβους) το σήμα τους μετριέται στην κλίμακα decibel (dB)

1.6.4 Ανάλυση λιπαντικού (Oil analysis) ή Τριβολογία (Tribology)

Η ανάλυση λιπαντικού είναι η εργαστηριακή ανάλυση της ποιότητας ενός λιπαντικού, των ρύπων και των υπολειμμάτων φθοράς, που εξάγονται από την μηχανή. Η ανάλυση λιπαντικού γίνεται για την προσκόμιση πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση της μηχανής. Με παρακολούθηση των αποτελεσμάτων δείγματος λιπαντικού, κατά την ζωή μιας συγκεκριμένης μηχανής, δημιουργούνται τάσεις όπου μπορούν να βοηθήσουν στην εξάλειψη δαπανηρών επισκευών.

Η δειγματοληψία λιπαντικού είναι μια διαδικασία off-line, όπου γίνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα και συλλέγονται δείγματα από το υγρό που λιπαίνει κάποιο υδραυλικό ή μη μηχανήμα με σκοπό την ανάλυση του. Το δείγμα λιπαντικού που συλλέγεται στέλνεται σε εργαστήρια όπου και αναλύεται. Υπάρχει και η on-line παρακολούθηση στο υγρό λιπαντικό με την χρήση ειδικών αισθητήρων, όπου παρακολουθείται η θερμοκρασία του, τα επίπεδα υγρασίας του και η μόλυνση του από ρύπους που παράγει η μηχανή. Η on-line παρακολούθηση του λιπαντικού είναι πιο σύγχρονη μέθοδος, με μεγαλύτερο κόστος αλλά με πολύ καλή απόδοση χαρακτηριστικών για την προβλεπτική συντήρηση του εκάστοτε μηχανήματος.

Η τριβολογία αναφέρεται στην τριβή που δημιουργείται κατά τη λειτουργία περιστρεφόμενων τμημάτων των μηχανών καθώς και στον τρόπο λίπανσης τους ώστε να περιοριστούν οι φθορές λόγω τριβής.

Βασική αρχή είναι η ανάλυση του ελαίου λίπανσης, που λαμβάνεται από τα κινούμενα τμήματα των μηχανών και περιλαμβάνει :

- Αναλύσεις που έχουν σχεδιαστεί για τον έλεγχο της κατάστασης του λιπαντικού (ιξώδες, οξύτητα, αλκαλικότητα, βαθμό οξείδωσης, περιεκτικότητα νερού και στοιχειά προσθέτων) και το συσχετισμό αυτής με την κατάσταση λειτουργίας του μηχανήματος
- Αναλύσεις που έχουν σχεδιαστεί για να ελέγχουν το λιπαντικό για την παρουσία στοιχείων φθοράς και υπολειμμάτων διάβρωσης που δημιουργούνται από την κύλιση και ολίσθηση των επιφανειών των εμπλεκόμενων εξαρτημάτων.

Οι περισσότεροι τύποι φθοράς και διάβρωσης έχουν σταδιακό ρυθμό ανάπτυξης για κάποιο χρονικό διάστημα προτού αποκτήσουν εκθετικό βαθμό ανάπτυξης όπου φτάνει ως την ολοσχερή αστοχία. Κατά το διάστημα αυτό μικρά θραύσματα αποκολλώνται από την επιφάνεια που έχει προσβληθεί και ανακυκλώνονται μέσα στο σύστημα λίπανσης. Αυτά τα προϊόντα φθοράς ή διάβρωσης μπορούν να αναγνωριστούν με φασματοσκοπική φερρογραφία ή φιλτράρισμα και έλεγχο με μικροσκόπιο. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για να αναγνωριστεί ποιά διαδικασία φθοράς ενεργεί.

Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι παρακολούθησης της κατάστασης της μηχανής με τριβολογία είναι:

- Ανάλυση των μέσων λίπανσης: με την τεχνική αυτή, προβλέπεται η πιθανή μελλοντική βλάβη η οποία θα οφείλεται στο ότι τα μέσα λίπανσης έχουν χάσει πλέον τις λιπαντικές τους ιδιότητες.
- Φασματογραφική ανάλυση: με την τεχνική αυτή, επιτρέπεται ο εντοπισμός των διαφόρων συστατικών που υπάρχουν στα λιπαντικά έλαια, προσδιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο εάν το λιπαντικό ανταποκρίνεται πλέον στην επιθυμητή σωστή λειτουργία. Με βάση τα αποτελέσματα υπάρχει η ανάλογη αντίδραση, αντικαθιστώντας το λιπαντικό άπου είναι απαραίτητο, ή αναβαθμίζοντας το. Για τον εντοπισμό της αιτίας που επέφερε την αλλοίωση στο λιπαντικό θα πρέπει να χρησιμοποιείται η φασματογραφική ανάλυση σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές για την εξαγωγή συγκεκριμένων συμπερασμάτων.
- Φερρογραφία: Με αυτήν την τεχνική γίνεται διαχωρισμός των σωματιδίων ου προκαλούν μόλυνση στο λιπαντικό χρησιμοποιώντας μαγνητικό πεδίο αντί για καύση του δείγματος του λιπαντικού, όπως συμβαίνει στην φασματογραφική ανάλυση. Έτσι η φερρογραφία επικεντρώνεται στον

εντοπισμό της ύπαρξης μεταλλικών ή μαγνητικών σωματιδίων στο λιπαντικό. Μία άλλη διαφορά έγκειται στο ότι, παρέχει τη δυνατότητα εντοπισμού σωματιδίων στο λιπαντικό διαστάσεων από 10 έως 100 μm , οπότε είναι δυνατή μία σφαιρικότερη εικόνα της ολικής μόλυνσης στο λιπαντικό.

- Ανάλυση των σωματιδίων που προκαλούν φθορά: μέχρι πρόσφατα οι διάφορες μέθοδοι ανάλυσης του λιπαντικού στον τομέα της τριβολογίας γινόταν με παραδοσιακές εργαστηριακές μεθόδους από εξειδικευμένο προσωπικό και ήταν εξαιρετικά χρονοβόρες και ακριβές διαδικασίες. Η σύγχρονη πρακτική όμως αυτών των μεθόδων, βασίζεται σε συστήματα μικροεπεξεργαστών τα οποία αυτοματοποίησαν αυτές τις διαδικασίες με αποτέλεσμα να γίνουν ταχύτερες και λιγότερο ακριβές. Κάνοντας ανάλυση των σωματιδίων που προκαλούν φθορά και με βάση τη σύνθεση, το μέγεθος και την ποσότητα τους, δίνονται πληροφορίες για την κατάσταση στερεών σωματιδίων στο λιπαντικό της τα οποία θα έχουν μέγεθος μικρότερο 10 μm . Όσο αυξάνεται το μέγεθος και η ποσότητα αυτών των σωματιδίων εντός του λιπαντικού, τόσο η κατάσταση της μηχανής θα επιδεινώνεται. Μία άλλη μέθοδος της τεχνικής αυτής ασχολείται με τον προσδιορισμό του υλικού αυτών των σωματιδίων που υπάρχουν στο δείγμα του λιπαντικού.

Η χρήση των παραπάνω μεθόδων περιοδικής δειγματοληψίας και χημικής ανάλυσης των λαδιών συνεπάγεται ένα κόστος που εντοπίζεται όχι μόνο στον απαραίτητο πάγιο εξοπλισμό και προσωπικό, αλλά και στο κόστος των σχετικών αναλώσιμων που χρησιμοποιούν. Το γεγονός όμως ότι οι αλλαγές λαδιών δεν γίνονται πλέον με τη συμπλήρωση καθορισμένων ωρών λειτουργίας, όπως προβλέπουν τα προγράμματα της Προληπτικής Συντήρησης, αλλά μόνο εάν απαιτείται από τα αποτελέσματα των αναλύσεων, εξασφαλίζει καλύτερη προστασία στα μηχανήματα, αφού τυχόν προβλήματα εντοπίζονται έγκαιρα και επιπλέον παρατείνει τη διάρκεια χρήσης του λιπαντικού.

1.6.5 Θερμογραφία(Thermography)

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην τεχνολογία των υπέρυθρων ακτινοβολιών , όπου όλα τα σώματα ,που έχουν θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν , εκπέμπουν ενέργεια ή ακτινοβολία .Η ανίχνευση των περιοχών με υψηλότερη ή με χαμηλότερη θερμοκρασία από την προβλεπόμενη, οδηγούν στο συμπέρασμα για την ύπαρξη απώλειας ενέργειας, λόγω αύξησης απωλειών και άρα ύπαρξη κάποιου προβλήματος.

Η υπέρυθρη ακτινοβολία αποτελεί μια μορφή της εκπεμπόμενης ενέργειας. Η ένταση της υπέρυθρης ακτινοβολίας ενός σώματος είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας της επιφάνειάς του. Υπάρχουν τρεις μορφές εκπεμπόμενης θερμικής ενέργειας από ένα σώμα οι οποίες μπορούν να ανιχνευτούν:

- Η ενέργεια που εκπέμπεται από το ίδιο το σώμα.
- Η ενέργεια που ανακλάται από το σώμα.
- Η ενέργεια που μεταβιβάζεται από το σώμα.

Κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας με τη μέθοδο των υπέρυθρων, φιλτράρονται οι δυο τελευταίες μορφές εκπεμπόμενης ενέργειας και μετράται μονό η πρώτη μορφή ενέργειας. Λαμβάνεται υπόψη το υλικό.

1.6.6 Μέτρηση παραμόρφωσης (Strain Measurement)

Η μέτρηση παραμόρφωσης είναι μια μέθοδος όπου επιτυγχάνεται με την χρήση αισθητήρα παραμόρφωσης ή αλλιώς όργανο μέτρησης επιμήκυνσης (εναλλακτικές ονομασίες : strain gage ή strain gauge) είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της επιμήκυνσης ενός αντικείμενου. Εφευρέθηκε από Edward E. Simmons και Arthur C. Ruge το 1938. Ο πιο κοινός τύπος του οργάνου μέτρησης επιμήκυνσης αποτελείται από εύκαμπτο μονωτικό που υποστηρίζει ένα μοτίβο μεταλλικού φύλλου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1. Το όργανο μέτρησης επιμήκυνσης είναι προσαρτημένο στο αντικείμενο από κατάλληλη κολλητική ταινία, όπως superglue. Καθώς το αντικείμενο παραμορφώνεται , το μοτίβο μεταλλικού φύλλου παραμορφώνεται επίσης, προκαλώντας την αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση. Αυτή η αλλαγή της αντίστασης, που συνήθως μετريέται με χρησιμοποιώντας μια γέφυρα Wheatstone, συνδέεται με το στέλεχος από την ποσότητα γνωστή ως μετρητής παράγοντα. Το όργανο μέτρησης επιμήκυνσης (strain gauge) είναι πολύ πιο ευαίσθητο σε στέλεχος σε κατακόρυφη διεύθυνση από ότι στην οριζόντια διεύθυνση. Τα σημάδια έξω από την ενεργητική περιοχή βοηθούν στην ευθυγράμμιση του μετρητή επιμήκυνσης κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης του στο εκάστοτε αντικείμενο.

Ένα όργανο μέτρησης της επιμήκυνσης εκμεταλλεύεται την ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία αποτελεί φυσική ιδιότητα των υλικών. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα, δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό του αγωγού, αλλά και από τη γεωμετρία του αγωγού. Όταν ένα ηλεκτρικός αγωγός τεντωθεί εντός των ορίων της ελαστικότητας του έτσι ώστε να μην σπάσει ή παραμορφωθεί μόνιμα και γίνει λεπτότερος και μακρύτερος, οι αλλαγές αυτές του αυξάνουν την ηλεκτρική αντίσταση από άκρο σε άκρο. Αντίθετα, όταν ένας ηλεκτρικός αγωγός συμπιεστεί έτσι ώστε να μειωθεί το μήκος του χωρίς όμως να παραμορφωθεί μόνιμα, οι αλλαγές αυτές μειώνουν την ηλεκτρική αντίσταση από άκρο σε άκρο. Από τη μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση του οργάνου μέτρησης επιμήκυνσης, μπορεί να μετρηθεί και το ποσό της εφαρμοσμένης επιμήκυνσης. Ένα τυπικό όργανο μέτρησης επιμήκυνσης έχει τη μορφή ενός μακρού και λεπτού αγώγιμου καλωδίου σε διαμόρφωση ζικ-ζακ (βλ. σχήμα) παράλληλων γραμμών, έτσι ώστε μια μικρή παραμόρφωση στη κατεύθυνση του προσανατολισμού των παράλληλων γραμμών να επιφέρει πολύ μεγαλύτερη παραμόρφωση στον αγωγό του οργάνου μέτρησης επιμήκυνσης και κατά συνέπεια μια πολύ μεγαλύτερη αλλαγή στην αντίσταση-από ό, τι θα πρέπει να εμφανιζόταν αν χρησιμοποιούταν το καλώδιο σε μία ευθεία γραμμή. Τα αισθητήρια όργανα διακρίνονται βασικά σε δύο κατηγορίες αναλόγως το είδος του ηλεκτρικού σήματος που παρέχουν στην έξοδο τους αισθητήρια αναλογικής εξόδου, όπου σήμα στην έξοδο είναι αναλογικό (analog) με την έννοια του συνεχούς και αισθητήρια ψηφιακής εξόδου, όπου το σήμα στην έξοδο είναι ψηφιακό δηλαδή παίρνει διακριτές τιμές. Η πληροφορία για το μέγεθος του μετρούμενου μεγέθους είναι υπό μορφή δυαδικού αριθμού ή σειράς παλμών.

1.6.7 Μέτρηση παραμέτρων λειτουργικής διαδικασίας (Process Parameters)

Η αποδοτικότητα μιας μηχανής εξαρτάται από το επίπεδο αποδοτικότητας που έχει σχεδιαστεί από τον κατασκευαστή της και από τις συνθήκες λειτουργίας που καταγράφονται αναλυτικά στο βιβλιάριο κάθε μηχανής, που πρέπει να τηρούνται αυστηρά. Ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα συντήρησης θα πρέπει να περιλαμβάνει και τη συστηματική παρακολούθηση των παραμέτρων αυτών, σε μηχανές οι οποίες είναι πρωταρχικής σημασίας για τη λειτουργία μιας εγκατάστασης. Παρατηρώντας το βαθμό απόδοσης μιας μηχανής και συγκρίνοντάς τον με προηγούμενες μετρήσεις είναι εφικτό να βρεθεί σε ποιο επίπεδο αποδοτικότητας δουλεύει η μηχανή (ικανοποιητικό ή όχι). Σε περίπτωση που ο βαθμός απόδοσης είναι πολύ χαμηλότερος σε σχέση με προηγούμενες μετρήσεις, τότε υπάρχει μια δυσλειτουργία στη μηχανή που θα πρέπει να επισκευαστεί άμεσα.

Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει ζημιά στην εγκατάσταση, που αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου αλλά υπάρχει και ζημιά στην παραγωγικότητα της εταιρίας που περιορίζεται λόγω λειτουργίας με χαμηλό βαθμό απόδοσης.

1.6.8 Δοκιμές με υπέρηχους (Ultrasonic Testing)

Υπάρχουν πολλές τεχνικές ελέγχου με χρήση υπερήχων αλλά όλες χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν σφάλματα ή ανωμαλίες σε συγκολλήσεις, επιστρώσεις, σωληνώσεις, αγωγούς, άξονες κ.ο.κ. Ρήγματα, κενά, συσσωρεύσεις ουσιών, διαβρώσεις και σκουριές ανακαλύπτονται με τη μετάδοση υπερηχητικών παλμών ή κυμάτων διαμέσου του υλικού και αποτιμώντας το εξερχόμενο σήμα ώστε να προσδιοριστεί η θέση και η έκταση της ασυνέχειας του υλικού

1.7 Μέθοδοι επεξεργασίας κύματος (digital signal process)

Λαμβανομένου υπόψη του μεγάλου όγκου των μετρήσεων που προέρχονται από τις μετρητικές τεχνικές, έχει αναπτυχθεί μια μεγάλη κατηγορία μεθόδων επεξεργασίας των λαμβανόμενων σημάτων με στόχο την ελάττωση των σχετικών προς παρακολούθηση παραμέτρων και τον καλύτερο συσχετισμό τους με το αίτιο της βλάβης.

Η συνηθέστερη μέθοδος στηρίζεται στη ανάλυση συχνοτήτων των λαμβανόμενων σημάτων με τον Ταχύ Μετασχηματισμό Fourier (FFT-Fast Fourier Transform). Τυπική εφαρμογή της αποτελεί η ανάλυση μετρήσεων κραδασμών. Έτσι συνιστώσες ή ομάδες συνιστωσών του λαμβανομένου φάσματος μετρήσεων μπορούν να συσχετίσουν με συγκεκριμένο τύπο βλάβης. Πρόκειται για μια από τις ευρέως διαδεδομένες μεθόδους ανάλυσης σημάτων.

Συμπληρωματικά έχει αναπτυχθεί μια μεγάλη ομάδα μεθόδων επεξεργασίας σήματος, με στόχο την διευκόλυνση ειδικών διαγνωστικών προβλημάτων. Πολλές από αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

1. Ανίχνευση βλαβών με τη Χρήση Στατιστικών Παραμέτρων

Όταν κάποια περιοδικά χτυπήματα (ringings) εξαιτίας κάποιας τοπικής βλάβης στο έδρανο κύλισης γίνουν κυρίαρχα, τότε το σήμα αποκτά απότομες κορυφές (ώσεις). Έτσι έχουν χρησιμοποιηθεί κάποια στατιστικά μεγέθη ως διαγνωστικές παράμετροι με σκοπό την ανίχνευση τοπικών βλαβών στα έδρανα κύλισης. Κάποιες από αυτές είναι η ενεργός τιμή (RMS), ο παράγοντας τοπικών μεγίστων, η κύρτωση και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability density function). Αφού υπολογιστεί κάποιο από αυτά τα μεγέθη, η τιμή του συγκρίνεται με αντίστοιχες τιμές υγιών εξαρτημάτων. Για παράδειγμα, η κύρτωση πρέπει να έχει μία τιμή γύρω στο 3,0 για κάποιο σχετικά τυχαίο σήμα από ένα υγιές έδρανο κύλισης. Αν μετρηθεί για κάποιο λόγο κάτι σημαντικά υψηλότερο, π.χ. 4,5, τότε θεωρείται ότι υπάρχει κάποιο σφάλμα στο υπό παρακολούθηση έδρανο κύλισης. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι αδυνατούν να παρέχουν πληροφορίες για την τοπολογία της βλάβης, αφού δεν εκμεταλλεύονται τις τιμές των χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης του εκάστοτε εδράνου κύλισης. Επίσης ο παράγοντας τοπικών μεγίστων, η κύρτωση και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι πιθανόν να πέσουν σε τιμές υγιών εδράνων κύλισης σε περίπτωση που οι βλάβες αυξηθούν στους δακτυλίους και στα σώματα κύλισης (μπίλιες), κάτι που οδηγεί σε λανθασμένα συμπεράσματα.

2. Ανάλυση cepstrum (Λογαριθμικό φάσμα ισχύος)

Καταρχάς πρέπει να τονιστεί ότι το όνομα cepstrum ανάλυση, δόθηκε για την τεχνική υπολογισμού μιας συνάρτησης που είναι το φάσμα ενός λογαριθμικού φάσματος. Λόγω του ότι το cepstrum είναι το φάσμα ενός φάσματος, η λέξη cepstrum προέκυψε από τη λέξη spectrum, και οι επόμενες ονομασίες δόθηκαν για τις παραμέτρους της ανάλυσης cepstrum:

- Quefreny αντί frequency (συχνότητα)
- Raymonics αντί harmonics (αρμονικές)
- Gamnitude αντί magnitude (πλάτος)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι τοπικές βλάβες παράγουν περιοδικά χτυπήματα. Το φάσμα μιας τέτοιας δόνησης λοιπόν περιέχει μία χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης και τις αρμονικές τις, με το μεγαλύτερο πλάτος να βρίσκεται γύρω από την ενεργοποιημένη ραδιοσυχνότητα (excited resonance frequency). Επειδή όμως η ενέργεια αυτού του σήματος απλώνεται σε μία μεγάλη περιοχή συχνοτήτων, μπορεί εύκολα να καλυφθεί από θόρυβο. Συνεπώς η απλή ανάλυση φάσματος δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική. Η ανάλυση cepstrum είναι χρήσιμη στην εύρεση περιοδικοτήτων στο φάσμα, για

παράδειγμα στον εντοπισμό οικογενειών των αρμονικών των χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης, περιορίζοντας μια ολόκληρη οικογένεια αρμονικών σε μια απλή cepstral γραμμή. Οι μαθηματικές σχέσεις που δίνουν το cepstrum είναι:

$$\text{Αρχικός ορισμός } X_c(\tau) = F[\ln |X(\omega)|^2]$$

ή εναλλακτικά,

$$X_c(\tau) = F^{-1}[\ln |X(\omega)|^2]$$

Όπου,

$$X(\omega) = F(x(t))$$

Η ανάλυση cepstrum, είναι πολύ αποτελεσματική στη διάγνωση της κατάστασης των εδράνων κύλισης. Δεν έχει λάβει όμως μεγάλης αποδοχής, εξαιτίας της πολυπλοκότητας των υπολογισμών αλλά και της δυσκολίας στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων της σε σχέση με παρόμοιες μεθόδους.

3. Μέθοδος HFRT

Η μέθοδος HFRT (αναλυτικά high-frequency resonance technique), αποτελεί ίσως έναν από τους καλύτερους διαγνωστικούς αλγόριθμους στο πεδίο των εδράνων κύλισης. Το σήμα φιλτράρεται έτσι ώστε να αφαιρεθεί ο μηχανικός θόρυβος που βρίσκεται στις χαμηλές συχνότητες και έπειτα υπολογίζεται η περιβάλλουσα (envelope) του καινούριου σήματος. Η περιοδικότητα του σήματος περιβάλλουσας βρίσκεται είτε με ανάλυση φάσματος είτε με αυτοσυσχέτιση και συγκρίνεται με τις χαρακτηριστικές συχνότητες βλάβης. Αν βρεθεί κάποια ταύτιση, τότε το έδρανο κύλισης θεωρείται ελαττωματικό.

Αν και έχει εξαιρετικά αποτελέσματα, ο αλγόριθμος HFRT απαιτεί πολλούς υπολογισμούς. Επίσης πρέπει να γίνουν αρκετά τεστ έτσι ώστε να βρεθούν οι ιδιοσυχνότητες του εκάστοτε εδράνου κύλισης, συνεπώς η μέθοδος κοστίζει και από άποψη πρόσθετου εξοπλισμού.

4. Σύγχρονος Μέσος Όρος

Αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται ως μία τεχνική προεπεξεργασίας με σκοπό τη βελτίωση της αναλογίας σήματος- θορύβου (signal-to-noise ratio). Πρώτα υπολογίζεται η περίοδος των επαναλαμβανόμενων χτυπημάτων αντιστρέφοντας τη χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης και έπειτα υπολογίζεται ο μέσος όρος διαδοχικών τμημάτων του σήματος, καθένα με διάρκεια μιας περιόδου. Έπειτα γίνεται η εύρεση του RMS ή χρησιμοποιούνται άλλοι διαγνωστικοί αλγόριθμοι.

5. Ανάλυση στο Πεδίο Χρόνου-Συχνότητας

Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας έχουν τη δυνατότητα να παρουσιάσουν τον τρόπο με τον οποίο η διανομή της ενέργειας του σήματος σε διαφορετικές συχνότητες αλλάζει από τη μία στιγμή στην άλλη. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι αλγόριθμοι όπως ο STFT (Short-Time Fourier Transform) και οι μέθοδοι Wigner-Ville και Choi-Williams (CWD).

Για μια ακόμη φορά το υπολογιστικό κόστος αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα για την επιλογή αυτών των μεθόδων.

6. Βλάβες Κλωβού

Έχουν ήδη αναφερθεί τα είδη σφαλμάτων στα έδρανα κύλισης. Τα σφάλματα στον κλωβό είναι ιδιαίτερα καθώς ουσιαστικά κάνουν διαμόρφωση του σήματος στη συχνότητα περιστροφής του κλωβού. Έτσι οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι εύρεσης σφαλμάτων δεν είναι αποτελεσματικοί. Μία μέθοδος που εφαρμόζεται είναι η εξής: Υπολογίζεται ο σύγχρονος μέσος όρος του σήματος σε μία περίοδο περιστροφής του κλωβού και έπειτα ελέγχεται για φαινόμενα σφάλματος κλωβού.

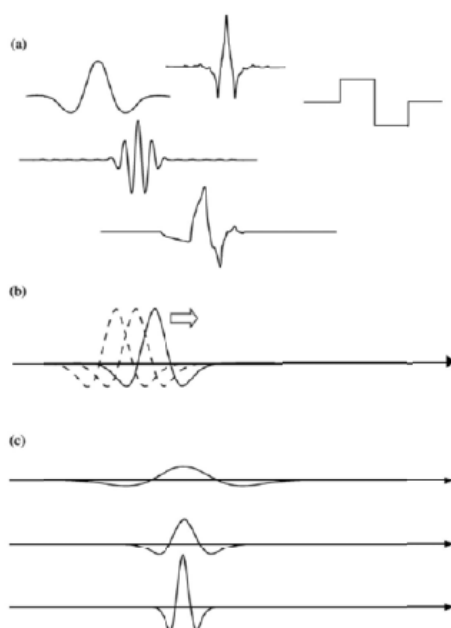
7. Μετασχηματισμός Κυματιδίου

Ο μετασχηματισμός κυματιδίου (Wavelet Transform), είναι ιδιαίτερα χρήσιμος στην ανάλυση σημάτων που χαρακτηρίζονται ως απεριοδικά, ασυνεχή, με απότομες αλλαγές και θόρυβο. Η ικανότητά του να εξετάζει το σήμα ταυτόχρονα στο πεδίο του χρόνου και στο

πεδίο της συχνότητας είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών εξελιγμένων μεθόδων βασισμένων στα κυματίδια. Σήμερα ο WT, έχει εφαρμογές σε πάρα πολλούς τομείς και βοηθάει στην ανάλυση πληθώρας φυσικών φαινομένων με μεγάλη επιτυχία. Κάποια παραδείγματα αποτελούν η ανάλυση κλιματικών φαινομένων, οικονομικών μεγεθών, καρδιολογικών σημάτων, μηχανικών διατάξεων, η αποθρομβοποίηση σεισμικών και αστρονομικών σημάτων, η συμπίεση βίντεο κ.α.

Πιο συγκεκριμένα η ανάλυση μετασχηματισμού κυματιδίου, χρησιμοποιεί μικρές κυματοειδείς συναρτήσεις γνωστές ως κυματίδια. Το Σχήμα 3.8 (α), δείχνει μερικά παραδείγματα κάποιων κοινών κυματιδίων που χρησιμοποιούνται στην πράξη. Τα κυματίδια μετασχηματίζουν το υπό ανάλυση σήμα με τέτοιο τρόπο ώστε να παρουσιάζει την πληροφορία με μία πιο χρήσιμη μορφή. Αυτός ο μετασχηματισμός είναι γνωστός ως μετασχηματισμός κυματιδίου. Μιλώντας με μαθηματικούς όρους, ο WT αποτελεί ουσιαστικά τη συνέλιξη του κυματιδίου με το σήμα.

Ένα κυματίδιο μπορεί να μεταλλαχθεί με δύο τρόπους. Πρώτον μπορεί να μεταφερθεί σε διάφορες τοποθεσίες του σήματος (Σχήμα 3.8 (β)) και δεύτερον μπορεί να απλωθεί ή να συμπιεστεί (Σχήμα 3.8 (γ)). Το Σχήμα 3.9, αποτελεί μια σχηματική αναπαράσταση του WT, ο οποίος βασικά υπολογίζει την τοπική ομοιότητα του κυματιδίου με το σήμα. Αν το κυματίδιο ταιριάζει αρκετά με το σχήμα του σήματος σε συγκεκριμένη κλίμακα και τοποθεσία, όπως συμβαίνει στην πρώτη απεικόνιση του Σχήματος 3.9, τότε λαμβάνεται μια μεγάλη τιμή του μετασχηματισμού. Αντίθετα, αν το κυματίδιο και το σήμα δεν συσχετίζονται ικανοποιητικά, τότε λαμβάνεται μια χαμηλή τιμή μετασχηματισμού. Κατόπιν, η τιμή του μετασχηματισμού τοποθετείται σε ένα δισδιάστατο πεδίο μετασχηματισμού όπως φαίνεται στη δεύτερη απεικόνιση του Σχήματος 3.9 (μαύρη τελεία). Ο μετασχηματισμός υπολογίζεται σε διάφορες τοποθεσίες του σήματος και για διάφορες κλίμακες του κυματιδίου, συμπληρώνοντας έτσι το πεδίο μετασχηματισμού. Αυτό μπορεί να γίνει είτε σε συνέχεια, οπότε πρόκειται για συνεχή μετασχηματισμό κυματιδίου (CWT), είτε με διακριτά βήματα, οπότε πρόκειται για διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίου (DWT). Σχεδιάζοντας τον WT καθίσταται ικανή η συσχέτιση του κυματιδίου και του σήματος, σε διάφορες κλίμακες και σημεία. Παρακάτω ο WT καλύπτεται και από μαθηματική σκοπιά.



Σχήμα 3.8 α)κύματα ,β)αλλαγή τοποθεσίας, γ)αλλαγή κλίμακας

1.7.1 Στατιστική ανάλυση της δομικής ακεραιότητας των υλικών

Με την εφαρμογή νέων στατιστικών συναρτήσεων έγινε δυνατή η ανάλυση της δομικής ακεραιότητας του αλουμινίου και κατ'επέκταση όλων των υλικών με παρόμοιες ιδιότητες από την κατηγορία των μετάλλων. Ουσιαστικά σκοπός μας η κατανόηση, η καταγραφή και η ποσοτικοποίηση των αλλαγών στο φάσμα συχνοτήτων και σε διαγράμματα με νέες παραμέτρους, στην φάση όπου αλλάζει η δομική ακεραιότητα του υλικού και αστοχεί. Αυτή η νέα τεχνική για την παρακολούθηση της κατάστασης υλικού με σκοπό την προβλεπτική συντήρηση του και μακροσκοπικά για την συντήρηση μιας ολόκληρης μηχανής, μπορεί να αποφέρει τεράστιες αλλαγές στην μέχρι πρότινος αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων και να βοηθήσει στην επιστήμη της μηχανικής. Η τεχνική αυτή θα αναλυθεί εκτενέστερα και θα αποτυπωθούν λεπτομερώς οι διαδικασίες και τα πειράματα που ολοκληρώθηκαν.

Οι νέες στατιστικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία του καταγραφόμενου σήματος από αισθητήρα (μικρόφωνο) είναι kurtosis, crest factor, Skewness και RMS (Root Mean Square).

1.8 Μηχανή Κόπωσης (Rotating Fatigue Machine) TeqQuipment SM1090

1.8.1 Εισαγωγή

Οι κατασκευαστές γνωρίζουν ότι όταν ένα στερεό σώμα δέχεται τάσεις πάνω από το όριο διαρροής, συνήθως σπάει ή υπόκειται σε μόνιμη παραμόρφωση. Παρόλα αυτά, στερεά σώματα που δέχονται συνεχόμενες τάσεις κάτω από το όριο διαρροής για μεγάλες χρονικές περιόδους επίσης σπάνε, λόγω της κόπωσης. Πολλές κατασκευές, για να λειτουργούν σωστά, θα πρέπει να περιλαμβάνουν εξαρτήματα που κάμπτονται, στρέφονται και συστρέφονται συνεχόμενα.

Οι ζωές των ανθρώπων βασίζονται στον καλό σχεδιασμό και στην διάρκεια ζωής των υλικών. Έτσι οι μηχανικοί πρέπει να γνωρίζουν τα χρονικά διαστήματα που κάνει ένα σημαντικό εξάρτημα για την κατασκευή να σπάσει λόγω επαναλαμβανόμενης τάσης.

Τον δέκατο ένατο αιώνα ο γερμανός μηχανικός August Wohler δημιούργησε το πρώτο τυποποιημένο κριτήριο για την αποτυχία ενός υλικού λόγω κόπωσης. Ανακάλυψε τον λόγο της τάσης προς τον αριθμό των περιόδων (S/N).

Βασιζόμενη στον Wohler, η μηχανή κόπωσης SM1090 της TeqQuipment , προκαλεί επαναλαμβανόμενη τάση σε ένα περιστρεφόμενο δοκίμιο για γνωστό αριθμό στροφών. Έτσι βοηθάει τους μηχανικούς να καταλάβουν στην πράξη την αποτυχία λόγω κόπωσης και να καταλάβουν πως χρησιμοποιείται η μέθοδος του Wohler και να συγκρίνουν τα αποτελέσματα.

1.8.2 Περιγραφή μηχανής



Η Μηχανή Κόπωσης SM1090

Η μηχανή κόπωσης SM1090 απαρτίζεται από δύο βασικά μέρη: από την βασική μονάδα και από την μονάδα ελέγχου.

Η βασική μονάδα έχει τον κινητήρα που περιστρέφει το δοκίμιο κάτω από συνθήκες σταθερής τάσης. Ο κινητήρας περιστρέφει ένα μικρό σε μήκος ημιαξόνιο. Το ημιαξόνιο περιστρέφει σφιγκτήρα (τσοκ) όπου εφαρμόζει η μια μεριά (driven end) του δοκιμίου. Το δοκίμιο δέχεται ομοιόμορφη δύναμη στην περιφέρεια της επιφάνειας, που έρχεται σε επαφή. Αυτό είναι σημαντικό γιατί είναι ομοιόμορφη η κατανομή της τάσης και έτσι υπάρχει μεγαλύτερη σταθερότητα και ελάχιστη εκκεντρικότητα. Στην άλλη μεριά του δοκιμίου (loading end) ένα ρυθμιζόμενο βάρος (dead weight) εφαρμόζει κάθετη δύναμη στο δοκίμιο. Αυτό γίνεται μέσω ρουλεμάν (self-aligning) που βρίσκεται πάνω σε αναρτήρα. Ο αναρτήρας είναι σημαντικός διότι επιτρέπει κίνηση αλλά εξασφαλίζει και ότι η δύναμη που ασκείται θα είναι σίγουρα κάθετη. Το οδηγούμενο μέρος και το φορτισμένο μέρος κάνουν το δοκίμιο ένα αξονικά περιστρεφόμενο στήριγμα με σημείο φόρτισης κοντά στο τέλος του.

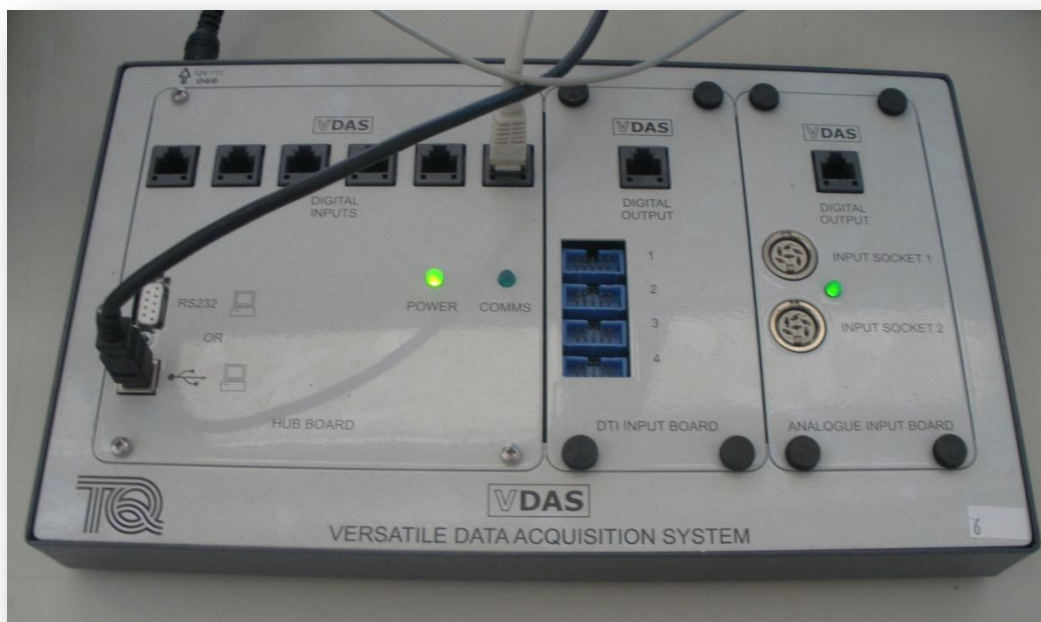
Ένας αισθητήρας μετράει τις περιστροφές (κύκλους) που κάνει το δοκίμιο και a load cell μετράει την δύναμη που εφαρμόζεται στο δοκίμιο (η οποία καθορίζεται από την θέση του νεκρού βάρους) . Ένα ξεχωριστό κουτί ελέγχου που περιλαμβάνει ηλεκτρονικό επεξεργαστή όπου επεξεργάζεται και παρουσιάζει το φορτίο (cycle rate), την ταχύτητα των περιστροφών και τον αριθμό περιστροφών (cycle count) από την αρχή του πειράματος μέχρι το τέλος. Υποδοχή στο κουτί ελέγχου επιτρέπει την σύνδεση στον υπολογιστή μας με το software VDAS (Versalite Data Acquisition System) της TecQuipments για αυτόματη απόκτηση δεδομένων.

Ένα διαφανές προστατευτικό κάλυμμα προστατεύει τον χρήστη σε περίπτωση όπου πεταχτούν θραύσματα από το δοκίμιο την στιγμή που σπάει. Το προστατευτικό κάλυμμα έχει διακόπτη ασφαλείας και αποσυνδέει ολόκληρη την μηχανή κόπωσης σε περίπτωση που δεν ασφαλίζει σωστά.

Όταν το δοκίμιο σπάσει, ένας διακόπτης στο φορτισμένο μέρος (loading end) της μηχανής σταματά την λειτουργία της αλλά και οι μετρήσεις, έτσι ξέρεις ακριβώς πόσους κύκλους έκανε το δοκίμιο μέχρι την στιγμή της αστοχίας του. Επίσης υπάρχει και χρονικός

μετρητής όπου καταγράφονται ο χρόνος που έκανε το δοκίμιο μέχρι την αστοχία του, αλλά σε περίπτωση που δεν τον έχουμε ενεργοποιήσει, μπορούμε απλά να τον υπολογίσουμε από τον αριθμό των στροφών.

1.8.3 Ευέλικτο σύστημα καταγραφής δεδομένων-Versalite Data Acquisition System (VDAS)



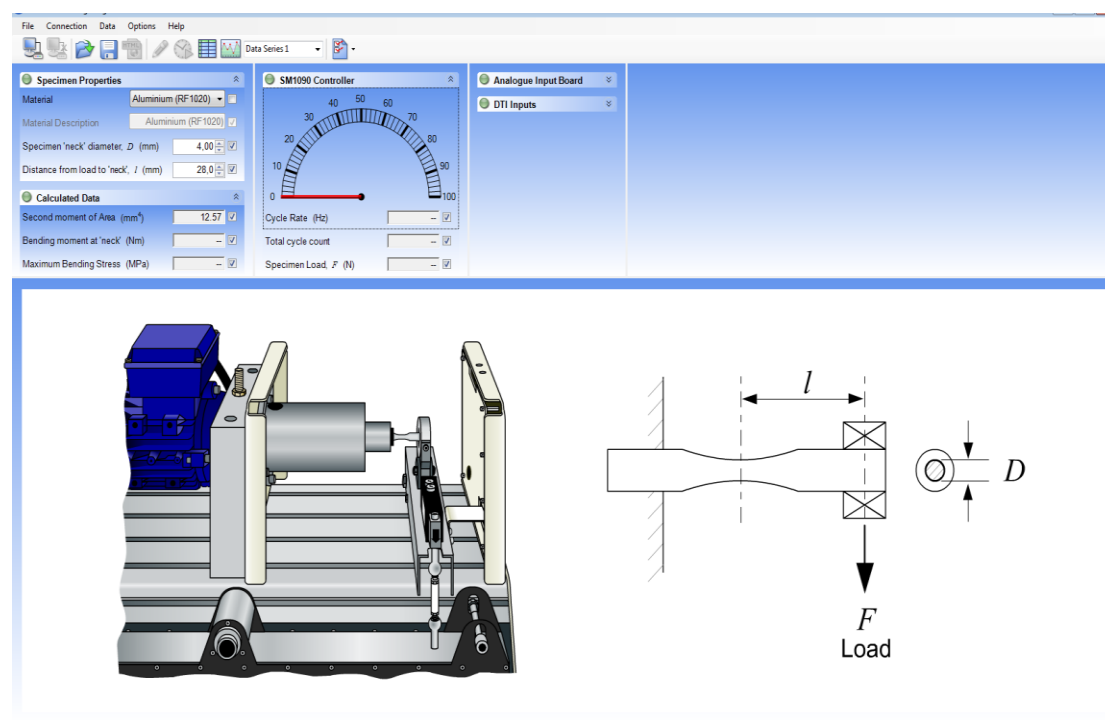
Το κουτί ελέγχου (hardware VDAS)

Ευέλικτο σύστημα καταγραφής δεδομένων (VDAS) είναι το κουτί ελέγχου (hardware) και το πρόγραμμα (software), που περιλαμβάνει η μηχανή κόπωσης και οι διεργασίες που κάνει είναι :

- Αυτόματη καταγραφή δεδομένων από τα πειράματα.
- Αυτόματος υπολογισμός δεδομένων.
- Αποθηκεύει τον χρόνο του πειράματος.
- Ελαττώνει τα λάθη.
- Δημιουργεί διαγράμματα και πίνακες από τα δεδομένα.
- Εξάγει τα δεδομένα σε μορφές που μπορούν να κατεργαστούν από άλλα προγράμματα.

Τεχνικές λεπτομέρειες VDAS

Μέρος εγκατάστασης	Λεπτομέρειες
Κύρια μονάδα	600 mm x 350 mm x 400 mm ύψος 30 kg
Μονάδα ελέγχου	400 mm x 350 mm x 180 mm 7.5 kg
Παροχή ρεύματος	200 VAC to 240 VAC 50 Hz to 60 Hz Μονοφασικό ή διφασικό στα 5 A
Διακόπτης ασφαλείας	F6.3 A 20 mm x 1 (παροχή μονοφασικό) F6.3 A 20 mm x 2 (παροχή διφασικό)
Μέγιστη τάση	350 MPa
Μέγιστη καταγραφή περιστροφών	9.99×10^8
Είδη δοκιμίου	Ατσάλι RF1010 Αλουμίνιο RF1020
Προαιρετικό δοκίμιο	Ορείχαλκος RF1030
Λιπαντικό για το ρουλεμάν	Καλής ποιότητας μεταξύ SAE 30 και SAE 50



Περιβάλλον εργασίας του προγράμματος Versalite Data Acquisition System (VDAS)

1.8.4 Δοκίμιο



Δοκίμιο αλουμινίου RF1010

συνήθως ο λαιμός (λεπτότερο σημείο) που έχει το κάθε δοκίμιο είναι μεταξύ των τιμών 4.05 mm και 3.95 mm

πάντα μετράμε τον λαιμό πριν κάνουμε κάποιο πείραμα.

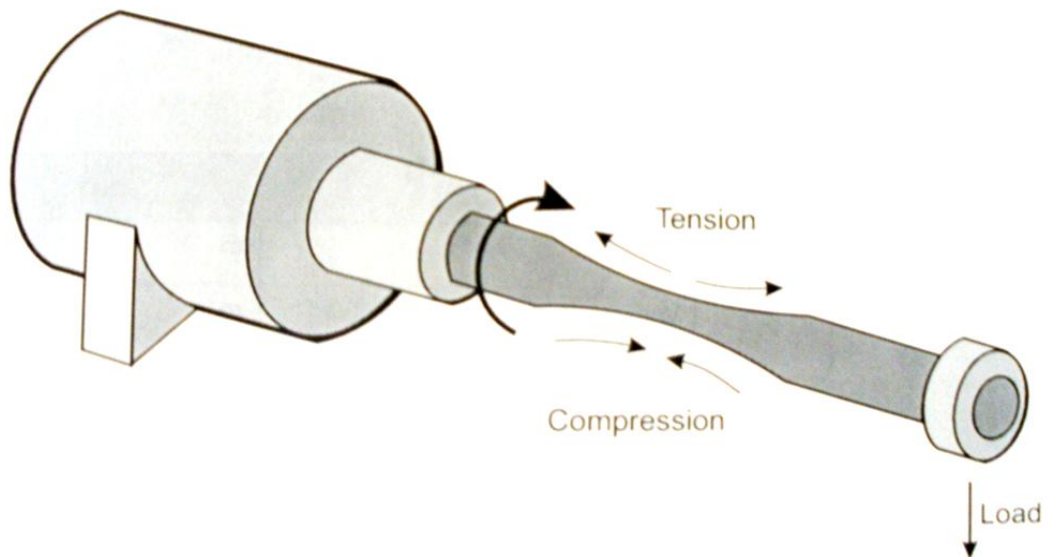
Η διάμετρος στα άκρα του για να χωράει να μπει στην μηχανή πρέπει να είναι μεταξύ των τιμών 8.99 mm και 8.96 mm.

Πολλές φορές μας έτυχε να είναι μεγαλύτερη η διάμετρος από αυτές τις τιμές, οπότε χρειαστήκαμε και μια λίμα.

Τεχνικές λεπτομέρειες

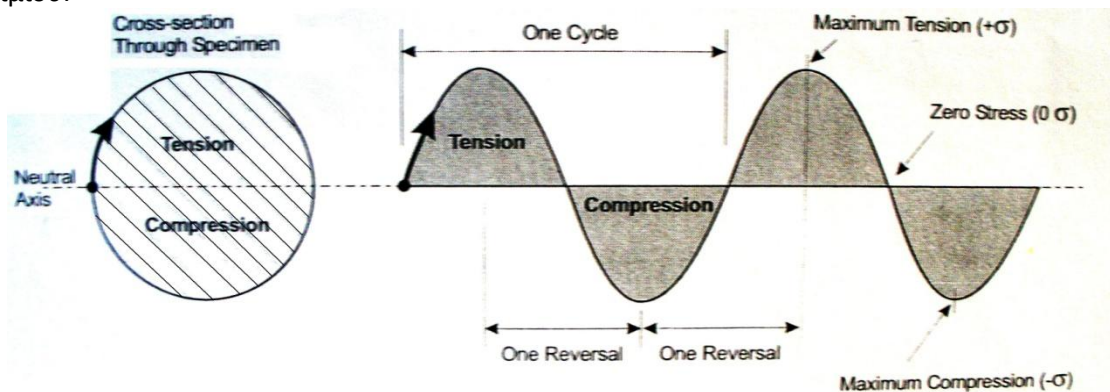
Κωδικός ονομασίας	Λεπτομέρειες
RF1010	Μαλακό ατσάλι BS 970 230M07 Αντοχή εφελκυσμού 460 MPa Τάση διαρροής 310 MPa
RF1020	Κράμα αλουμινίου 2011 T6 Αντοχή εφελκυσμού 395 MPa Τάση διαρροής 220 MPa
RF1030	Κράμα ορείχαλκου CZ121 Αντοχή εφελκυσμού 410 MPa Τάση διαρροής 160 MPa

1.8.5 Περιστρεφόμενη άτρακτος τύπου προβόλου (rotating cantilever)



Περιστρεφόμενη άτρακτος τύπου προβόλου και οι τάσεις της

Η μηχανή κόπωσης σφίγγει το δοκίμιο σαν πρόβολο. Το φορτίο στο ελεύθερο τέλος τεντώνει το πάνω μισό μέρος του δοκιμίου και πιέζει το κάτω μισό. Παρόλα αυτά επειδή περιστρέφεται γίνεται εναλλαγή στην τάση θλίψεως και εφελκυσμού κατά μήκος του δοκιμίου.



Τάσεις θλίψεως και εφελκυσμού κατά μήκος του δοκιμίου

Το σχήμα δείχνει την πλάγια τομή του δοκιμίου όταν περιστρέφεται. Βλέπουμε σε κάθε κύκλο που κάνει πως αλλάζουν ημιτονικά οι τάσεις θλίψεως και εφελκυσμού, με μέγιστη τάση εφελκυσμού (maximum tension) $+\sigma$, με μέγιστη θλιπτική τάση (maximum compression) $-\sigma$ και μηδενική τάση (zero stress). Όταν η τάση αντιστρέφεται πλήρως από την αρνητική στην θετική ή από την θετική στην αρνητική, αυτό ονομάζεται αντιστροφή (reversal). Κάθε κύκλος έχει δύο περιστροφές.

1.8.6 Τάσεις

Τάση σ στερεού σώματος ορίζεται ως η δύναμη που ασκείται ανά μονάδα επιφάνειας της διατομής και έχει τύπο:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{ή} \quad \text{Πίεση} = \text{Δύναμη} / \text{Επιφάνεια}$$

μονάδες μέτρησης της τάσεις είναι το Pa(Pascal)=N/m²

Τάση εφελκυσμού (tensile stress) είναι όταν το στερεό σώμα τεντώνεται. Έχει θετική τιμή

Θλιπτική τάση (compressive stress) είναι όταν το στερεό σώμα συμπιέζεται. Έχει αρνητική τιμή

Τάση κατά μήκος κυλινδρικού δοκιμίου

Σε ένα ομοιόμορφο δοκίμιο, χωρίς λαιμό, η τάση είναι:

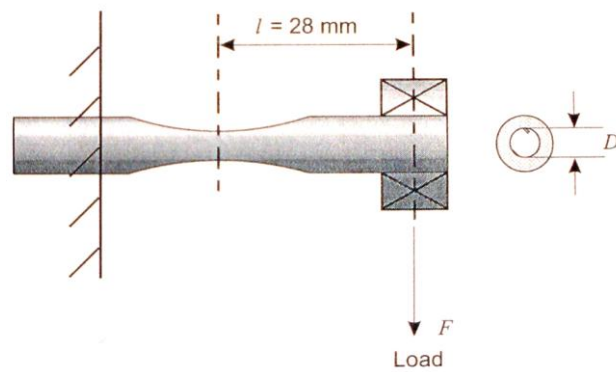
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

όπου F , όπου ροπή της κυλινδρικής επιφάνειας ως προς τον άξονα x , η διάμετρος του λαιμού του δοκιμίου.

$$J_x = \frac{\pi d^4}{32}$$

όπου W στρεπτική ροπή, m το βάρος που ρυθμίσαμε και l η απόσταση από τον λαιμό μέχρι το σημείο εφαρμογής του βάρους

$$\sigma = \frac{F}{A}$$



Το βάρος και η απόσταση που ασκείται από τον λαιμό του δοκιμίου

Η πρότυπη εξίσωση της τάσης για το δοκίμιο(με λαιμό) είναι :

2.0 Προβλεπόμεν διαδικασία (normal procedure)

Σε αυτό το πεδίο θα αναφέρουμε την διαδικασία, που ακολουθούμε πάντα, για την ρύθμιση και τον προγραμματισμό των παραμέτρων του πειράματος.

1. Αρχικά δημιουργούμε τον εξής πίνακα

Πείραμα		
Δοκίμιο	Τύπος	
	Υλικό	
	Τάση διαρροής	
	Αντοχή στον εφελκυσμό	
	Φινίρισμα επιφάνειας (surface finish)	
	Διάμετρος λαιμού	
Πείραμα	Βάρος (N)	
	Τάση (MPa)	
	Συχνότητα περιστροφών (Hz)	
	Τοπική ώρα που άρχισε το πείραμα	
	Τοπική ώρα που τελείωσε το πείραμα	
	Κύκλοι μέχρι την αστοχία λόγω κόπωσης	
	Ώρα μέχρι την αστοχία	

2. Μετά διαλέγουμε δοκίμιο το οποίο είναι ευθυγραμμισμένο και ακέραιο.

3. Πέρνουμε μετρήσεις από τον λαιμό του δοκιμίου και τις γράφουμε στον πίνακα.

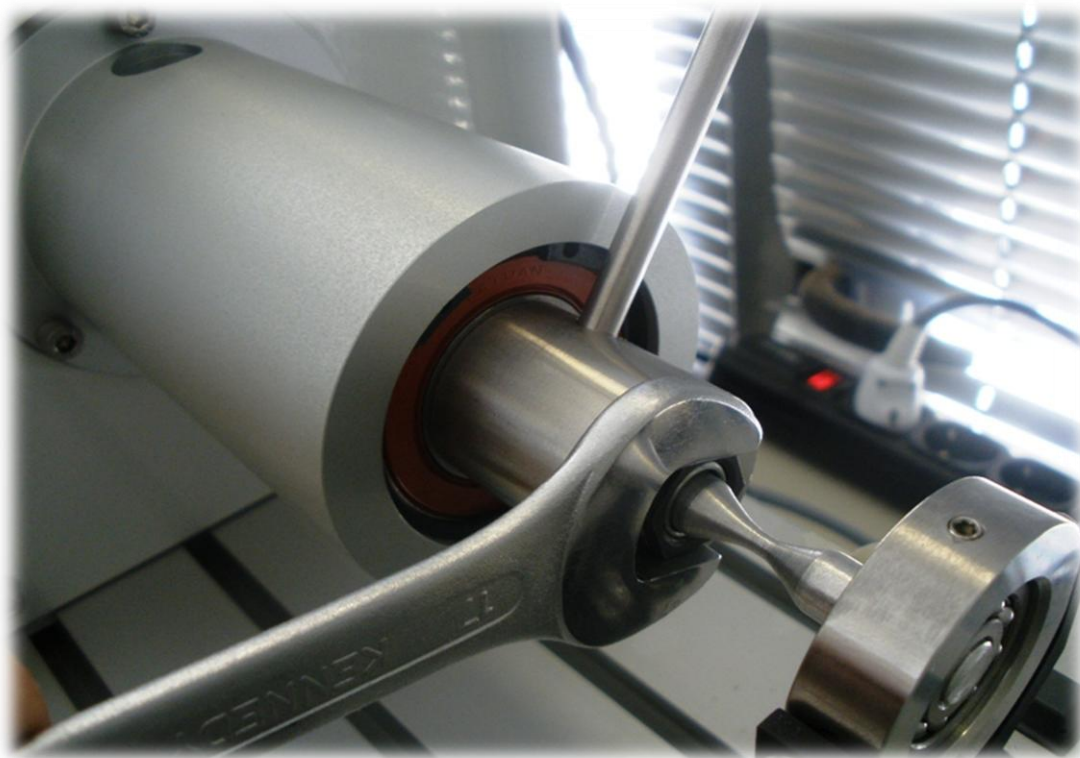
4. Μετακινούμε το βαρίδιο ή νεκρό βάρος της μηχανής προς τέρμα αριστερά (θέση ελάχιστου βάρους). (Εικόνα 2.1)



Εικόνα 2.1

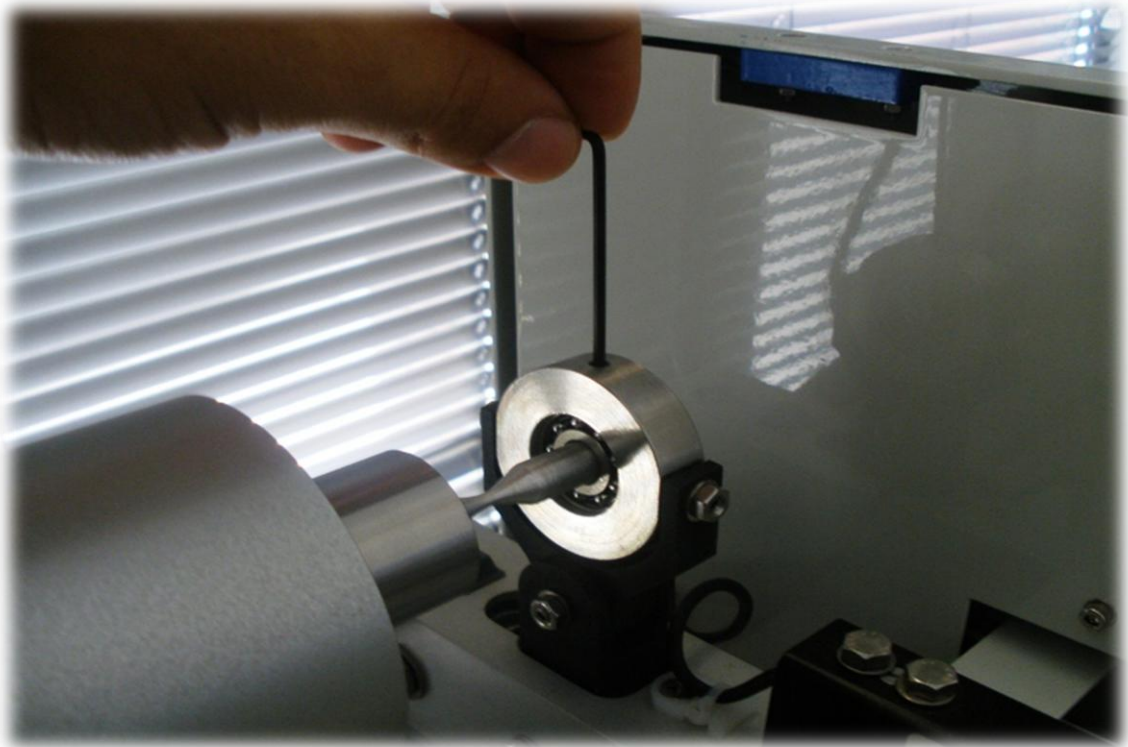
5. Κλείνουμε την λειτουργία της μηχανής και μετακινούμε το προστατευτικό κάλυμμα από το κυρίως μέρος της μηχανής.

6. Προσαρμόζουμε την μανέλα στη τρύπα του ημιαξονίου, αποτρέποντας την περιστροφή του κατά το σφίξιμο ή την χαλάρωση του τσοκ. Στο τσοκ χρησιμοποιούμε γαλλικό κλειδί. (Εικόνα 2.2)

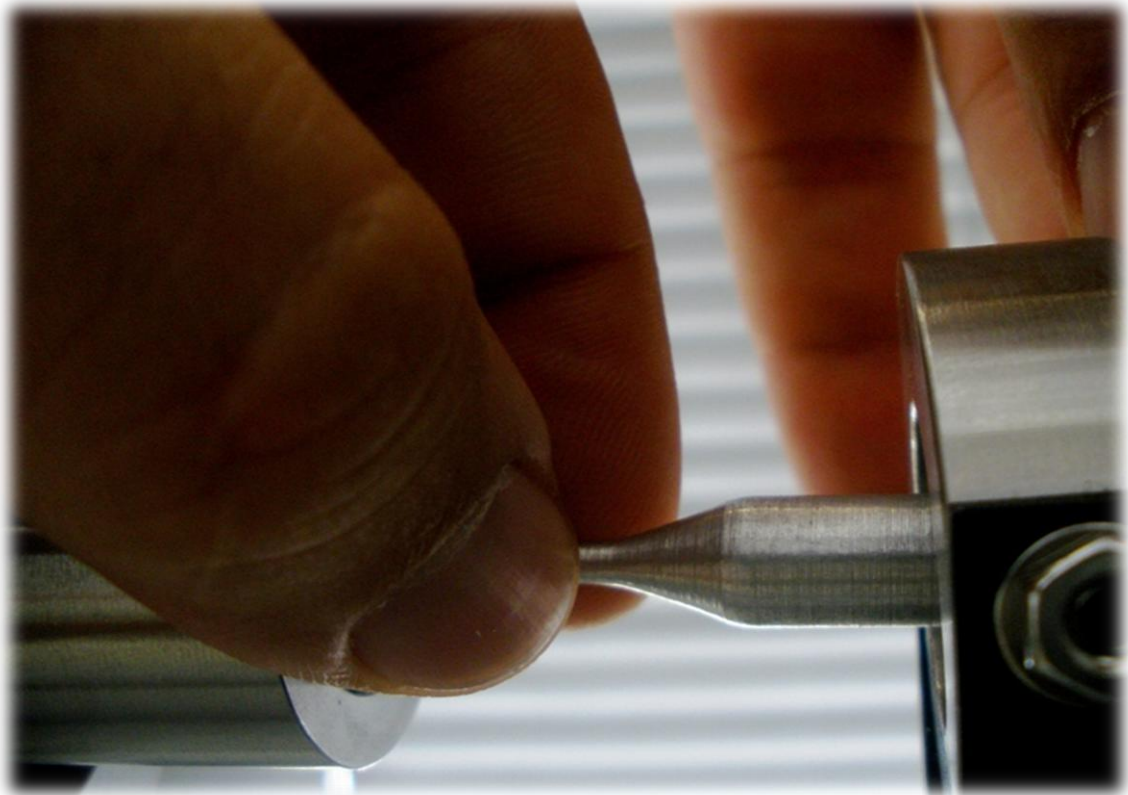


Εικόνα 2.2

7. Χρησιμοποιώντας εξαγωνο κλειδί (Άλεν) ,χαλαρώνουμε την βίδα που βρίσκεται πάνω στον αναρτήρα, ο οποίος περιλαμβάνει και το ρουλεμάν (Εικόνα 2.3). Με προσοχή σπρώχνουμε το δοκίμιο, ώστε να αφαιρεθεί εντελώς από το ρουλεμάν. (Εικόνα 2.4)



Εικόνα 2.3

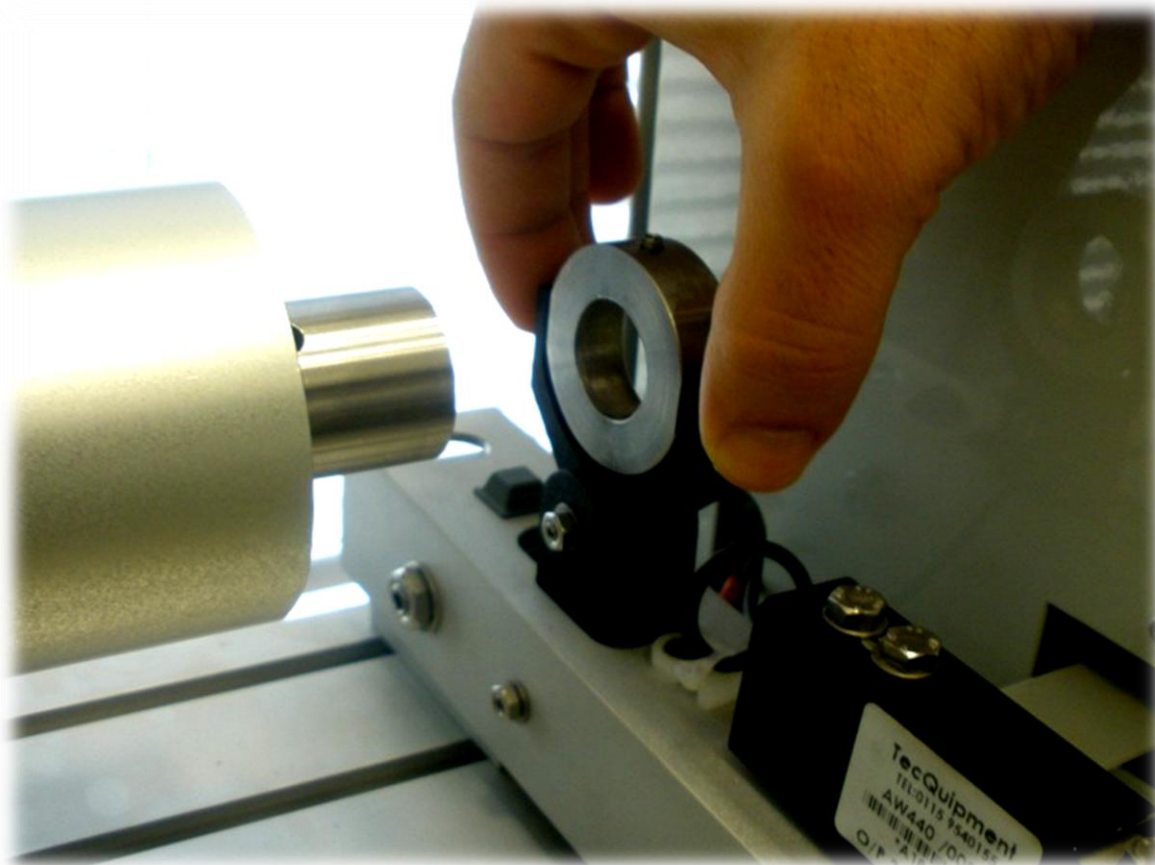


Εικόνα 2.4

8. Στην περίπτωση σπασμένου δοκιμίου, αφαιρούμε και το άλλο μισό από το τσοκ.

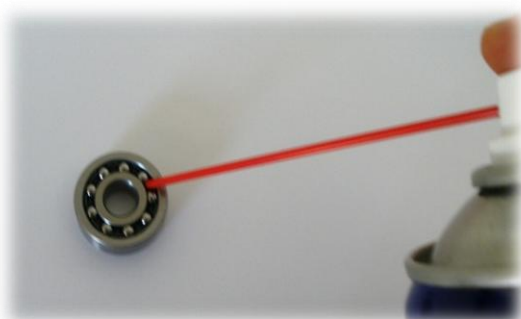
9. Σιγουρευόμαστε ότι η μανέλα είναι εκτός του τσοκ και ενεργοποιούμε την μηχανή από το κουτί ελέγχου.

10. Στηρίζουμε με το χέρι μας τον αναρτήρα και πατάμε για λίγα δευτερόλεπτα το κουμπί “reset button” του κουτιού ελέγχου ώστε να μηδενίσουν τα δεδομένα, που έχουν αποθηκευτεί από προηγούμενο πείραμα.

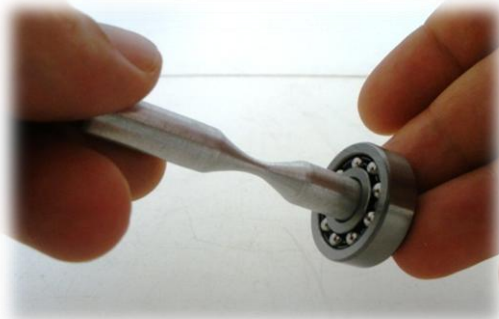


Εικόνα 2.5-Αναρτήρας

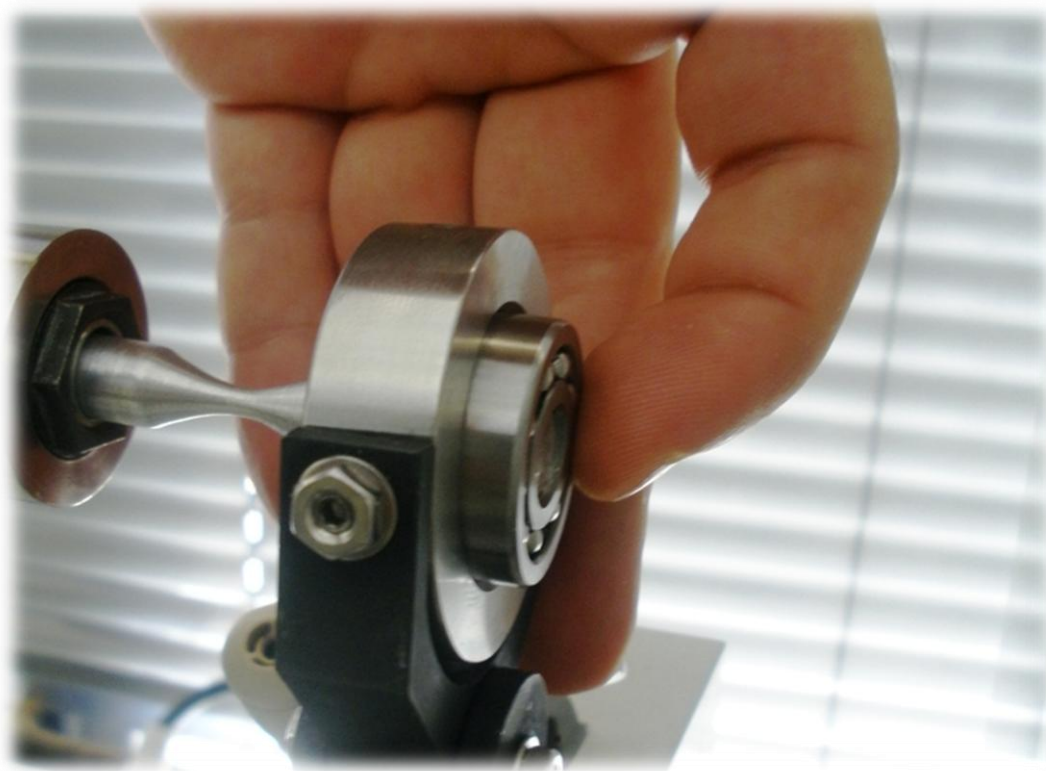
11. Λιπαίνουμε το ρουλεμάν (Εικόνα 2.6) στις σφαίρες του δακτυλίου και εισχωρούμε στην οπή του, το νέο δοκίμιο(Εικόνα 2.7). Ενώ έχουμε σιγουρευτεί ότι το δοκίμιο ταιριάζει και έχει την σωστή διάμετρο. Με προσοχή τοποθετούμε το ρουλεμάν μαζί με το δοκίμιο, στον αναρτήρα. (Εικόνα 2.8)



Εικόνα 2.6



Εικόνα 2.7



Εικόνα 2.8

12. Χρησιμοποιούμε την μανέλα και το γαλλικό κλειδί για να σφίξουμε το δοκίμιο στο τσοκ. Επίσης σιγουρευόμαστε ότι είναι ευθυγραμμισμένα στο ίδιο επίπεδο το ρουλεμάν και το τέλος του δοκιμίου, αλλιώς θα έχουμε λάθος μήκος l . (Εικόνα 2.9)



Εικόνα 2.9

Επισήμανση: το δοκίμιο προσπαθεί να βγει προς τα έξω όταν το σφίγγουμε , έτσι πρέπει να πατήσουμε «ευγενικά» το πίσω μέρος με το γαλλικό κλειδί, ώστε να ευθυγραμμιστεί.

Προσοχή: δεν βάζουμε πολύ δύναμη όταν σφίγγουμε στο τσοκ το δοκίμιο, διότι μπορεί να του προκαλέσουμε ζημιά.

13. Αν υπάρχει πρόβλημα στην εφαρμογή του δοκιμίου στο τσοκ, αφαιρούμε το τσοκ και κοιτάμε αν έχει συναρμολογηθεί σωστά, όπως στην παρακάτω εικόνας. (Εικόνα 2.10 και Εικόνα 2.11)



Εικόνα 2.10



Εικόνα 2.11

14. Χρησιμοποιούμε το Άλεν κλειδί για να σφίξουμε την βίδα και να συγκρατείται το ρουλεμάν στο σωστό σημείο του αναρτήρα.

Προσοχή: δεν το σφίγγουμε πολύ σφιχτά ,διότι μπορεί να υπάρξει πρόβλημα στο ρουλεμάν και να μην γυρνάει σωστά

15. Κοιτάμε τον βραχίονα φόρτισης καθώς περιστρέφουμε με το χέρι το τσοκ. Παρακολουθούμε ότι ο βραχίονας δεν κινείται και το δοκίμιο φαίνεται να γυρνάει ομαλά χωρίς διαταράξεις.

16. Σιγουρευόμαστε ότι η ταχύτητα περιστροφής στο κουτί ελέγχου είναι γυρισμένη στο ελάχιστο σημείο (αντίθετα του ρολογιού).

17. Προσαρμόζουμε σωστά το προστατευτικό κάλυμμα.

18. Μετακινούμε το ρυθμιζόμενο βαρίδιο πάνω στον βραχίονα φόρτισης και επιλέγουμε το σωστό βάρος που μας ενδιαφέρει για το πείραμα, το οποίο σαφώς και είναι ανάλογο του υλικού του δοκιμίου.

19. Με μαλακό τρόπο στηρίζουμε τον βραχίονα φόρτισης ώστε να θέσουμε το μηδέν στο βάρος και να ξεκινάμε την λειτουργία της μηχανής.

Προσοχή: ο βραχίονας φόρτισης μπορεί να κινείτε πάνω-κάτω με μεγάλο πλάτος όταν θα ξεκινήσουμε το πείραμα για κάποιες λίγες περιστροφές και μετά σταματάει. Αν συνεχίζει όμως να κινείται βίαια πάνω-κάτω για πολύ ώρα, σταματάμε το πείραμα και αλλάζουμε δοκίμιο.

20. Σιγά σιγά ανεβάζουμε την ταχύτητα περιστροφής μέχρι να φτάσει 60 Hz.

21. Δεν αγγίζουμε το βραχίονα φόρτισης κατά την διάρκεια του πειράματος. Καταγράφουμε την απόδοση των στροφών.

22. Όταν το δοκίμιο σπάσει καταγράφουμε το συνολικό αριθμό των περιστροφών.

2.1 Οπτική επίβλεψη αλλαγών συχνοτήτων του φάσματος κατά την προβλεπόμενη διαδικασία.

Σκοπός του πειράματος

Ο σκοπός αυτού του πειράματος είναι να διαπιστωθεί αν σε κάποιο σημείο από το πεδίο συχνοτήτων υπάρχει κάποια πολύ συγκεκριμένη αλλαγή στην ένταση (dB) κατά την πρόοδο της διαδικασίας της κόπωσης του δοκιμίου αλουμινίου. Δηλαδή να διαπιστωθεί αν το δοκίμιο μας, την ώρα που πάει να σπάσει, παράγει ήχους σε συγκεκριμένο πεδίο συχνοτήτων, που μπορούμε να καταγράψουμε και να παρατηρήσουμε, ώστε να μας βοηθήσει αρχικά να βάλουμε μια βάση στην θεωρία μας και συνεχίσουμε πάνω σε αυτόν τον τομέα για την παρακολούθηση της κατάστασης του. Οι συχνότητες που ασχολούμαστε βρίσκονται στο φάσμα του ακουστικού πεδίου διότι με αυτήν την επιλογή μας δίνεται η δυνατότητα να παρέχουμε πολύ χαμηλό κόστος. Επιπλέον στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας καταγραφής ηχητικού σήματος, δηλαδή μικρόφωνο. Είναι λοιπόν πολύ σημαντικό να επαληθευτεί η θεωρία στην πράξη και να βγάλουμε τα πρώτα συμπεράσματα.

Δυσκολία παρουσιάζεται στην καταγραφή ηχητικού σήματος που εκπέμπεται συγκεκριμένα από το δοκίμιο. Όταν λειτουργεί η μηχανή κόπωσης εκπέμπει και τους δικούς της ήχους, κάτι που επηρεάζει την καταγραφή του σήματος και περιπλέκει την κατάσταση. Έτσι ως πρώτη φάση αποφασίσαμε να κάνουμε το πείραμα υπό αυτές τις συνθήκες, χωρίς την χρησιμοποίηση κάποιου φίλτρου, κάτι το οποίο ουσιαστικά δεν μας επηρέασε, διότι το δοκίμιο βγάζει τους δικούς του συγκεκριμένους ήχους την ώρα που πάει να σπάσει και επικαλύπτουν τους ήχους της μηχανής λόγω μεγαλύτερης έντασης στις συγκεκριμένες συχνότητες οι οποίες μας ενδιαφέρουν και μελετάμε.

Σημαντική είναι και η τοποθέτηση του μικροφώνου στον χώρο. Το μικρόφωνο πρέπει να είναι σε τέτοια θέση ώστε να μην επηρεάζεται από τις δονήσεις που παράγει η μηχανή κόπωσης και αποπροσανατολίζουν το σήμα μας. Δηλαδή να μην είναι σε επαφή το μικρόφωνο με την μηχανή. Εμείς για αυτό το σκοπό, προσπαθήσαμε να βάλουμε σε τέτοια θέση το μικρόφωνο, ώστε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη η επιρροή από τις δονήσεις, μιας και η κατασκευή της μηχανής κόπωσης δεν μας επέτρεπε να θέσουμε το μικρόφωνο σε κάποιο άλλο επίπεδο πέρα της μηχανής. Σε όλα τα στάδια του πειράματος η θέση του μικροφώνου παρέμεινε σταθερή.

Θόρυβος περιβάλλοντος

Ο **θόρυβος περιβάλλοντος** (environmental noise) ή **θόρυβος παρεμβολή** (interference noise) αποτελεί τυπική περίπτωση εξωγενούς, μη θεμελιώδους θορύβου και κατά κανόνα ανθρωπογενούς προέλευσης.

Το πείραμα

Το πειραματικό στάδιο της διπλωματικής εργασίας αποτελείται από τρία αλληλοσυνδεόμενα σκέλη. Αυτό σημαίνει ότι κάθε στάδιο που ακολουθήσαμε είχε άμεση σχέση με το προηγούμενο. Οπότε για να προχωρήσουμε σε επόμενο στάδιο ήταν απαραίτητη η απόδειξη του αντίστοιχα προηγούμενου. Τα τρία αυτά στάδια αποκαλύπτονται αναλυτικά στην συνέχεια.

2.1.1 Περιγραφή πειράματος

Για την επίτευξη του πρώτου σκέλους του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν, η περιστροφική μηχανή κόπωσης από την εταιρία TecQuipement η SM1090 Rotating Fatigue Machine , 10 δοκίμια αλουμινίου RF1020, ένα απλό μικρόφωνο και υπολογιστής με τα προγράμματα Visual Analyser και Versatile Data Acquisition System (VDAS).

Σε αυτό το πρώτο σκέλος του πειράματος έγιναν 10 διαφορετικές δοκιμές υπό σταθερή τάση 21 kN (kilonewton) και υπό σταθερή συχνότητα περιστροφής 60 Hz (Hertz).

Οι επιλογή των συγκεκριμένων τιμών είναι αποτέλεσμα διαχείρισης ενός μέσου χρόνου (15 λεπτά), που μας βολεύει για την ζωντανή παρακολούθηση του πειράματος.

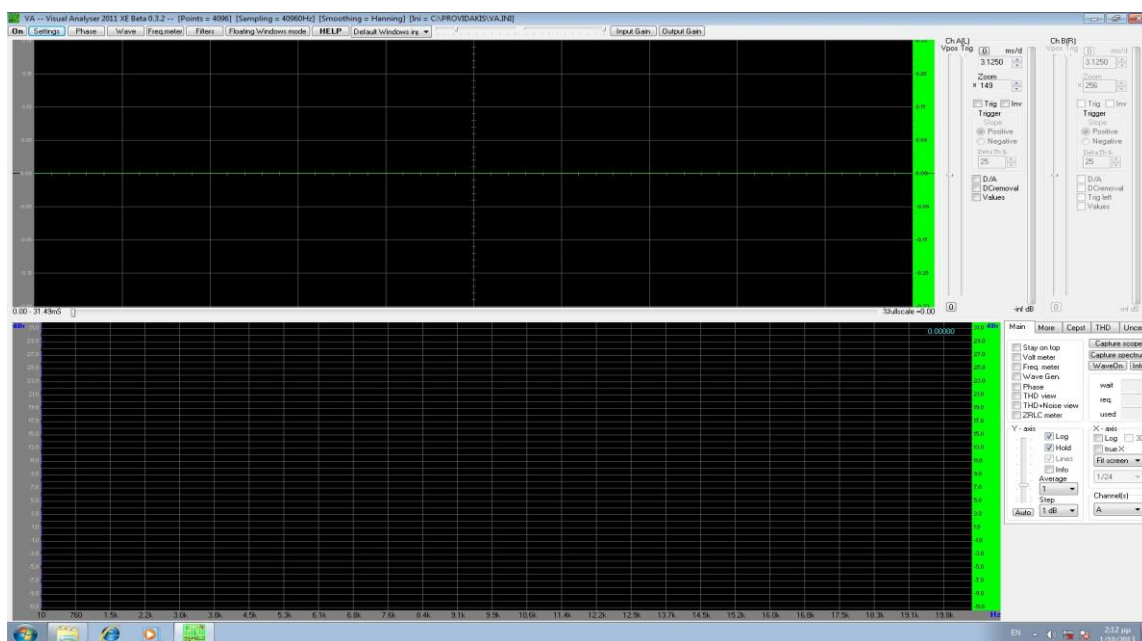
2.1.2 Visual Analyser (VA)

Το πρόγραμμα VA έχει ακατανίκητα χαρακτηριστικά ώστε να παρουσιάσει σε πραγματικό χρόνο την μετατροπή ψηφιακού-αναλογικού σήματος. Η συχνότητα δειγματοληψίας του προγράμματος είναι 44.100 Hz, οπότε σύμφωνα και με τον νόμο του Nyquist, είναι το μισό, δηλαδή 22.050 Hz. Στην συγκεκριμένη περίπτωση μας, η ανάλυση είναι τα 16 bit , κάτι που εξαρτάται από την κάρτα γραφικών του H/Y. Η ανάλυση μπορεί να είναι 8 μέχρι 24 bit. Έτσι παρουσιάζεται η κυματομορφή με πολύ υψηλή ανάλυση , με όλα τα σημεία του αυθεντικού σήματος, που λαμβάνουμε από το μικρόφωνο, ακόμα και σε συχνότητες από 15 μέχρι 20 kHz.

- Ο Χ άξονας είναι σε Hz, λογαριθμικός είτε γραμμικός με zoom μέχρι και x16.
- Ο Υ άξονας είναι σε Db, λογαριθμικός είτε γραμμικός με zoom μέχρι και x16.

Το VA σε σχέση με άλλα προγράμματα της ίδιας κατηγορίας, είναι αρκετά ευαίσθητο, κάτι που σίγουρα εξαρτάται από την ποιότητα του μικροφώνου και την κάρτα ήχου του H/Y, και παρουσιάζει το ακουστικό σήμα με ρεαλιστικότητα και απόλυτη λεπτομέρεια.

Ο αναλυτής φάσματος (spectrum analyzer) του VA είναι ακριβώς αυτό που χρειαζόμαστε για να βγάλουμε σε πρώτη φάση συμπεράσματα. Το περιβάλλον του Visual Analyser παρουσιάζεται στην εικόνα



Το περιβάλλον του Visual Analyser

2.1.3 Διαδικασία Πειράματος

Σε κάθε πειραματικό σκέλος είναι προφανές ότι ακολουθούμε κατά κόρον την προβλεπόμενη διαδικασία για την έναρξη κάθε δοκιμής. Έτσι όλες οι διαδικασίες που γίνονται σε κάθε πειραματική διαδικασία πρέπει να συμφωνούν με την ομαλή διαδικασία της λειτουργίας της μηχανής κόπωσης.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επίτευξη του πειράματος, αντίστοιχα και στις 10 δοκιμές είναι η εξής:

Αρχικά, γίνεται η μέτρηση του πάχους του λαιμού του αλουμινένιου δοκιμίου, η σωστή τοποθέτηση του στην μηχανή κόπωσης SM1090 και η μέτρηση του μήκους \square . Αφού ανοίξουμε το πρόγραμμα VDAS στον υπολογιστή του εργαστηρίου και κάνουμε on-line σύνδεση με την μηχανή SM1090 ρυθμίζουμε σωστά το βάρος και την συχνότητα περιστροφής, στα 21 kN και στα 60 Hz αντίστοιχα. Επίσης, ενεργοποιούμε το πρόγραμμα Visual Analyser και τοποθετούμε το μικρόφωνο σε μια σταθερή και κοντινή απόσταση (σ.σ. 5 εκατοστά του μέτρου) από το δοκίμιο αλουμινίου που εξετάζουμε.

Σε κάθε μέτρηση που πραγματοποιούμε είναι απαραίτητο να μετράμε τις στροφές και πόση ώρα έκανε το δοκίμιο μέχρι να σπάσει.

Με την έναρξη της μηχανής δίνουμε εντολή στο πρόγραμμα Visual Analyser να καταγράφει τον ήχο που εξάγεται από το τρέχων δοκίμιο κατά την λειτουργία της περιστροφικής μηχανής. Επίσης χρησιμοποιούμε την λειτουργία hold στο Visual Analyser, όπου μας δίνεται η δυνατότητα να διαφαίνεται μόνο η μέγιστη τιμή του πλάτους σε όλες τις συχνότητες του φάσματος με αποτέλεσμα να αναγνωρίζεται ευκολότερα με γυμνό μάτι ποιες αλλαγές συμβαίνουν στο φάσμα συχνοτήτων κατά την ζωντανή παρακολούθηση του.

Με αυτές τις προεργασίες προχωράμε στην ενεργοποίηση της μηχανής και την περιστροφή του δοκιμίου με το μικρόφωνο ενεργό να καταγράφει οποιαδήποτε ηχητικό σήμα.

Να αναφέρουμε ότι στην διάρκεια του πειράματος μέσα στον χώρο του εργαστηρίου, που διατελούμε το πείραμα, προσπαθούμε να επιβάλουμε την απόλυτη ησυχία διότι οποιαδήποτε ακουστική παρενόχληση προέλθει από το περιβάλλον είναι δυνατόν να μας αποπροσανατολίσει τα δεδομένα και να μας οδηγήσει σε λάθος αποτελέσματα.

Η κάθε ηχογράφιση, που κάνουμε σε αυτό το πρώτο σκέλος του πειράματος ξεκινάει όταν σταθεροποιηθεί η λειτουργία της μηχανής στα 60 Hz και έχει μια σταθερή ροή. Λόγω του ότι η περιστροφική μηχανή κόπωσης του εργαστηρίου έχει αρκετά ευσταθή λειτουργία, μας παρέχει την εγγύηση των αποτελεσμάτων που εξάγουμε.

Έτσι λοιπόν σταθεροποιείται η λειτουργία στα 60 Hz και ξεκινάμε την καταγραφή των ηχητικών σημάτων που εκπέμπονται από το δοκίμιο. Το τέλος της καταγραφής και συνάμα εκεί που τελειώνει το πείραμα είναι όταν το δοκίμιο σπάσει. Το σπάσιμο του δοκιμίου συμβαίνει κατά μέσο όρο στα 763 δευτερόλεπτα της ώρας της λειτουργίας της μηχανής. Δείγμα φάσματος συχνοτήτων που καταγράψαμε παρουσιάζεται στην εικόνα.

Αναλυτικά τα δεδομένα της κάθε δοκιμής.

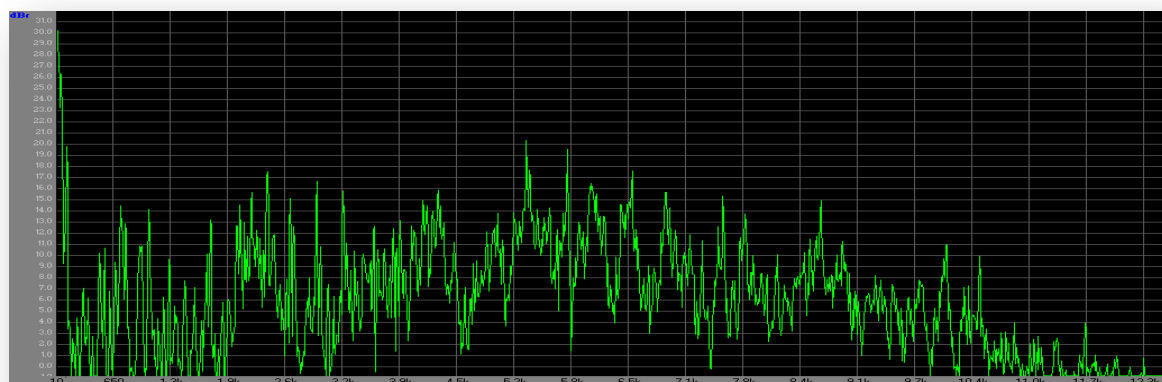
Δοκίμια	Αριθμός περιστροφών μέχρι την αποτυχία του δοκιμίου	Χρόνος (sec) μέχρι την αποτυχία του δοκιμίου	Πάχος λεπτότερου σημείου του δοκιμίου (λαιμός)
1 ^ο	29.427	486	2.90 mm
2 ^ο	41.791	677	2.95 mm
3 ^ο	19.775	316	2.70 mm
4 ^ο	63.221	993	3.00 mm
5 ^ο	72.265	1.263	3.10 mm
6 ^ο	50.502	805	2.92 mm
7 ^ο	43.652	738	3.00 mm
8 ^ο	48.094	795	2.95 mm
9 ^ο	39.249	648	2.90 mm
10 ^ο	55.134	916	3.00 mm

Τα δεδομένα που εμφανίζονται ουσιαστικά δεν μας ενδιαφέρουν σε αυτή την φάση του πειράματος διότι ο ρόλος που είχαμε ήταν «του παρατηρητή» και απλά με τη οπτική παρακολούθηση προσπαθήσαμε να καταλάβουμε σε ποια σημεία στο φάσμα συχνοτήτων συμβαίνουν αλλαγές. Παρόλα αυτά είναι σημαντικό να εμφανίσουμε τα δεδομένα για στατιστικούς λόγους.

Στις 10 δοκιμές που κάναμε, παρατηρήσαμε ότι αλλάζει απότομα το φάσμα, λίγο πριν την πλήρη καταστροφή του δοκιμίου στο πεδίο μεταξύ 10 Hz με 1.3 kHz και 1,9 kHz με 3,2 kHz. Αυτό μας βοήθησε να συμπεράνουμε, ότι η ακουστική ενέργεια, που προέρχεται από τις ταλαντώσεις του δοκιμίου, όταν δημιουργούνται αστοχίες κατά την κόπωση του, μπορούν να καταγραφούν στο ακουστικό φάσμα και να μας βοηθήσουν στην πρόβλεψη της πλήρους καταστροφής του.

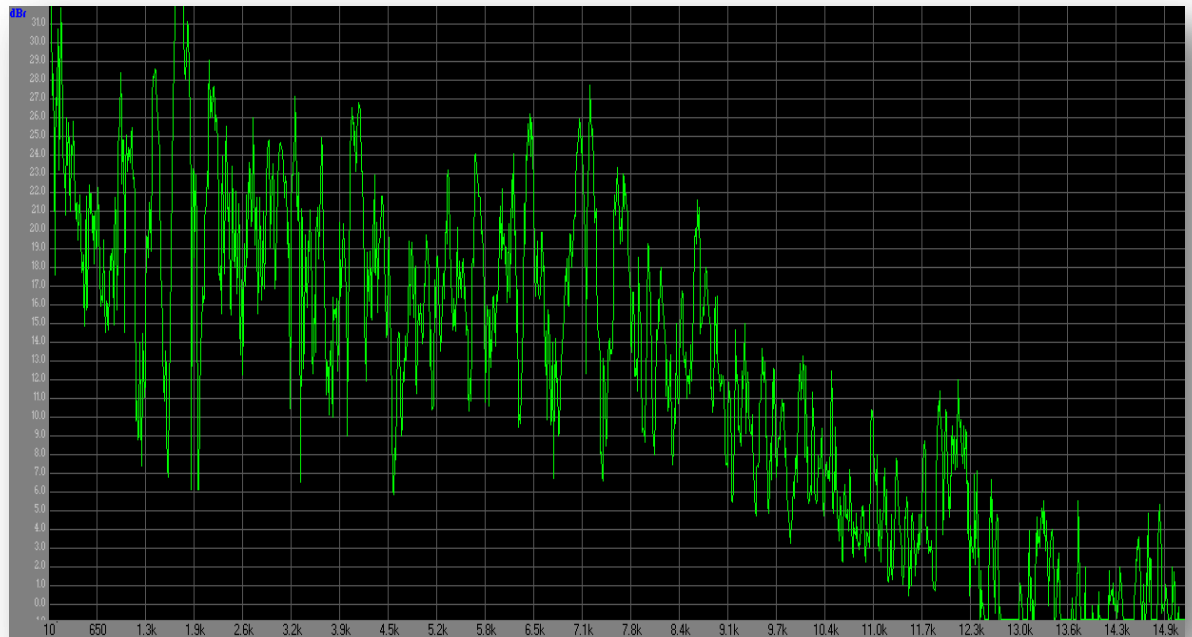
Κάθε αποτέλεσμα που εξάγαμε από τις δοκιμές μας έδωσε τα χαρακτηριστικά που περιμέναμε. Στο φάσμα συχνοτήτων από 10 Hz με 1.3 kHz και 1,9 kHz με 3,2 kHz υπήρξε αλλαγή στα decibel κατά τα τελευταία 40 δευτερόλεπτα (κατά μέσο όρο) της ζωής του δοκιμίου αλουμινίου, έτσι αυτή η αλλαγή μας προμήνυε ότι το δοκίμιο είναι στην τελευταία του φάση πριν σπάσει.

Αυτό το screenshot που παρουσιάζουμε από κάτω, είναι οι συχνότητες που εμφανίστηκαν όταν αρχίσαμε να καταγράφουμε το πείραμα



Συχνότητες που εμφανίστηκαν όταν αρχίσαμε να καταγράφουμε το πείραμα

Και ακολουθεί το τελευταίο screenshot όπου βλέπουμε ξεκάθαρα τις συχνότητες που εξάγονται όταν σπάει το δοκίμιο.



Συχνότητες που εξάγονται κατά την αστοχία του δοκιμίου

2.1.4 Συμπεράσματα

Σε αυτό το πρώτο σκέλος του πειράματος συνειδητοποιήσαμε ότι μπορούμε να συνεχίσουμε σε αυτήν την πορεία και να αναζητήσουμε νέες τεχνικές ώστε να συμβάλουμε στην ποσοτικοποίηση των δεδομένων μας. Ξεφεύγοντας από τον ρόλο του παρατηρητή και μέσω προγραμμάτων που διαμορφώσαμε σε περιβάλλον της MATLAB, φτιάξαμε δείκτες και στατιστικές παραμέτρους όπου μας βοήθησαν στην συνέχεια για την επίτευξη του στόχου μας.

2.2 Φασματική επεξεργασία και στατιστική ανάλυση ηχητικού σήματος σε περιβάλλον MATLAB

Σε αυτό το πεδίο, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή για την εξαγωγή γόνιμων πληροφοριών από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας του ηχητικού σήματος, με αποτέλεσμα η παρακολούθηση της κατάστασης του δοκιμίου αλουμινίου, στην περίπτωση της κόπωσης, να γίνει εφικτή.

2.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο επεξεργασίας σήματος

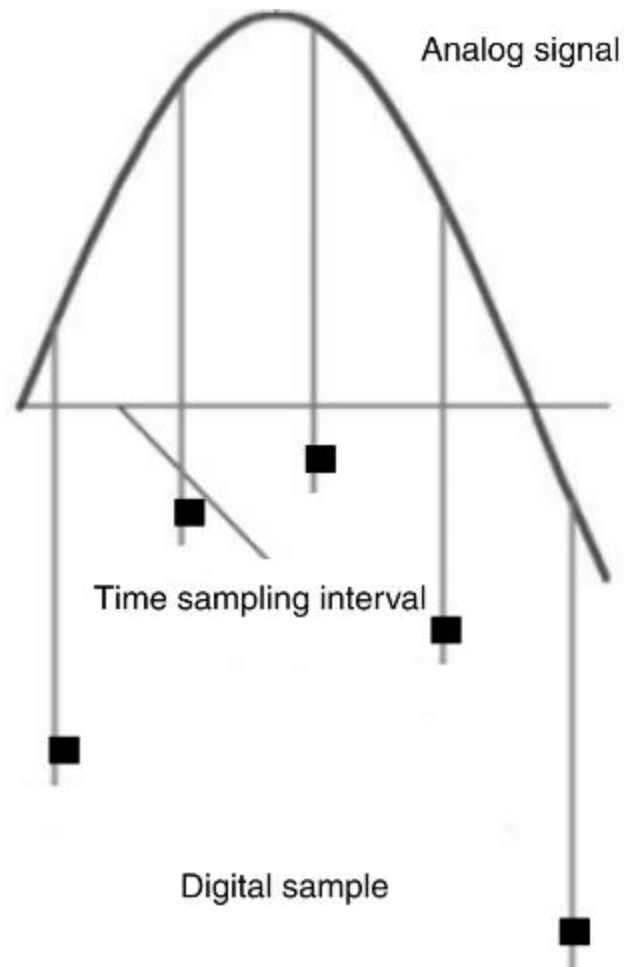
Ο θόρυβος και οι ήχοι κατά την λειτουργία της μηχανής κοπώσεως και αντίστοιχα και του δοκιμίου αλουμινίου, είναι ένα φυσικό αποτέλεσμα. Οι αισθητήρες ηχητικού σήματος μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο εν συνεχεία συλλέγεται και περνάει από ανάλυση. Οι αναλυτές επεξεργάζονται το σήμα για να δώσουν το φάσμα FFT και άλλες παραμέτρους.

Θα κάνουμε μια σύντομη αναφορά στην επεξεργασία του σήματος, η οποία τελικά θα μας δώσει τις απαραίτητες πληροφορίες για την παρακολούθηση των μηχανών. Για να επιτύχουμε την τελική επιθυμητή μορφή, το σήμα επεξεργάζεται διερχόμενο από τα παρακάτω βήματα :

- Αναλογική είσοδος ηχητικού σήματος
- Αναлого-ψηφιακή μετατροπή
- Προβολή Φασματογραφίας (spectrogram)
- Αποθήκευση
- Τελική επεξεργασία και εξαγωγή αποτελεσμάτων

2.2.2 Αναлого-ψηφιακή μετατροπή

Τα ηχητικά σήματα που συλλέγονται από το μικρόφωνο είναι αναλογικά σήματα, τα οποία όπως έχουμε προαναφέρει πρέπει να μετατραπούν σε ψηφιακά για περαιτέρω επεξεργασία. Αυτή η μετατροπή γίνεται από έναν Αναлого-Ψηφιακό μετατροπέα (Analog to Digital Converter). Η AD μετατροπή γίνεται υποχρεωτικά από μικροεπεξεργαστές. Όπως κάθε ψηφιακός επεξεργαστής η αναлого-ψηφιακή μετατροπή γίνεται με χρήση του δυαδικού συστήματος. Ένας 12-μπιτος μετατροπέας παρέχει 4096 διαστήματα και ένας 16-μπιτος 65536 διακριτά διαστήματα (Εικόνα 3.2-3).



Εικόνα 1 Αναлого-ψηφιακή μετατροπή

Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των διαστημάτων τόσο καλύτερη η ανάλυση του πλάτους του σήματος. Ένας 16-μπιτος ADC έχει αποτέλεσμα ανάλυσης 0,0015% του πλήρους μεγέθους.

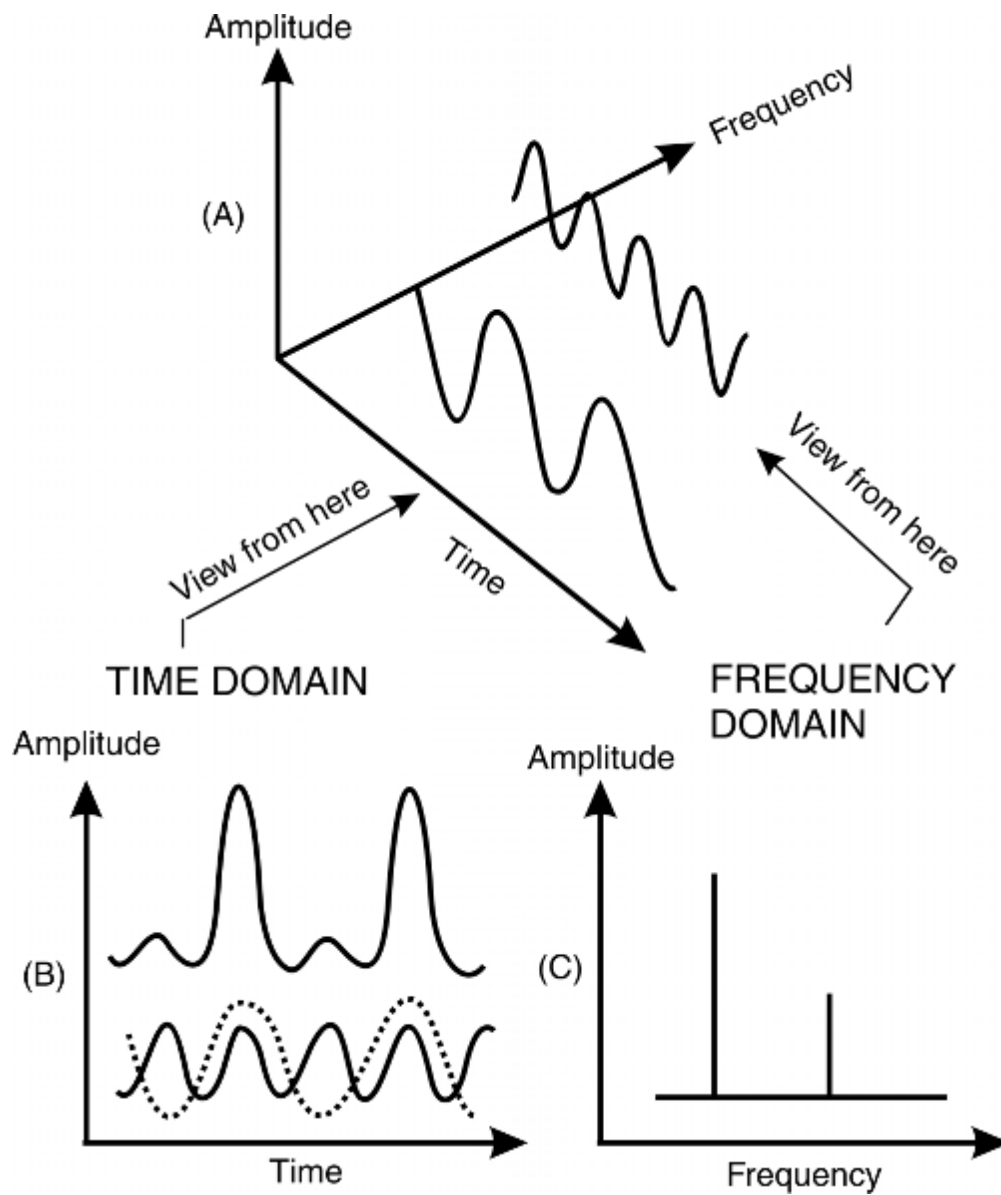
2.2.3 Μετασχηματισμός Fourier (Fourier transform)

Η απόκριση ενός ταλαντωτικού συστήματος μπορεί να μετρηθεί σε πλάτη μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης προβεβλημένα είτε στο πεδίο του χρόνου (χρονικό σήμα), είτε στο πεδίο των συχνοτήτων.

Το πεδίο του χρόνου αποτελείται από πλάτος που μεταβάλλεται με το χρόνο.

Το πεδίο των συχνοτήτων είναι το πεδίο όπου τα πλάτη προβάλλονται σαν σειρά ημιτονοειδών και συνημιτονοειδών κυμάτων. Αυτά τα κύματα έχουν πλάτος και φάση, η οποία μεταβάλλεται με τη συχνότητα.

Οι μετρημένες συχνότητες είναι πάντοτε μετρημένες στο πεδίο του χρόνου και χρειάζεται να μετασχηματισθούν στο πεδίο των συχνοτήτων. Αυτός είναι ο σκοπός του μετασχηματισμού Fourier (FFT). Άρα πρόκειται για έναν υπολογισμό σε ένα δειγματοληπμένο σήμα. Και αν συμβαίνει αυτό, πώς καθορίζουμε συχνότητα δειγματοληψίας;



Εικόνα 2.2 Μετασχηματισμός Fourier

2.2.4 Φασματική πυκνότητα (Power Spectral Density)

Ένας τρόπος για να εξετάσουμε ένα σήμα είναι να το εξετάσουμε στο διακριτό πεδίο του χρόνου, το οποίο θέτει μια σειρά αξιών διαδοχικά στο χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για το σήμα σε κάθε χρονική στιγμή και να μπορούμε να κάνουμε κάποιες υποθέσεις για τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του. Ωστόσο είναι μάλλον δύσκολο να κρίνουμε τη βραχυπρόθεσμη συμπεριφορά η οποία σχετίζεται με τη βραχυπρόθεσμη ανάπτυξη του σήματος. Ένας άλλος τρόπος να δούμε και να μελετήσουμε το σήμα είναι μέσα από την φασματική πυκνότητα, δηλαδή τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier του σήματος. Με τον μετασχηματισμό Fourier βλέπουμε το σήμα ως προς το σύνολο του. Αλλάζουμε δηλαδή τη διάσταση του χρόνου με τη διάσταση της συχνότητας. Μπορούμε να θεωρήσουμε τον μετασχηματισμό Fourier ως ένα συνδυασμό από αργές και γρήγορες ταλαντώσεις με διαφορετική ένταση. Μια πολύ υψηλή και μια αργή συνιστώσα στο πεδίο της συχνότητας σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των μεγάλων κομματιών του σήματος στο πεδίο του χρόνου. Επομένως αν το σήμα μας $f(t)$ παίρνει τιμές σε κάθε στιγμή του χρόνου τότε ο μετασχηματισμός του Fourier $F(\omega)$ μας δείχνει τη δύναμη της κάθε ταλάντωσης στο πεδίο των συχνοτήτων για το συγκεκριμένο πεδίο χρόνου. Αυτά τα δύο σήματα συνδέονται μεταξύ τους με τον ακόλουθο τύπο :

Κάποιος μπορεί να σκεφτεί την ανάπτυξη του σήματος στο χρόνο σαν να ακούει μια μελωδία ενώ τη φασματική πυκνότητα μπορεί να τη θεωρήσει σαν να ακούει μια χορδή.

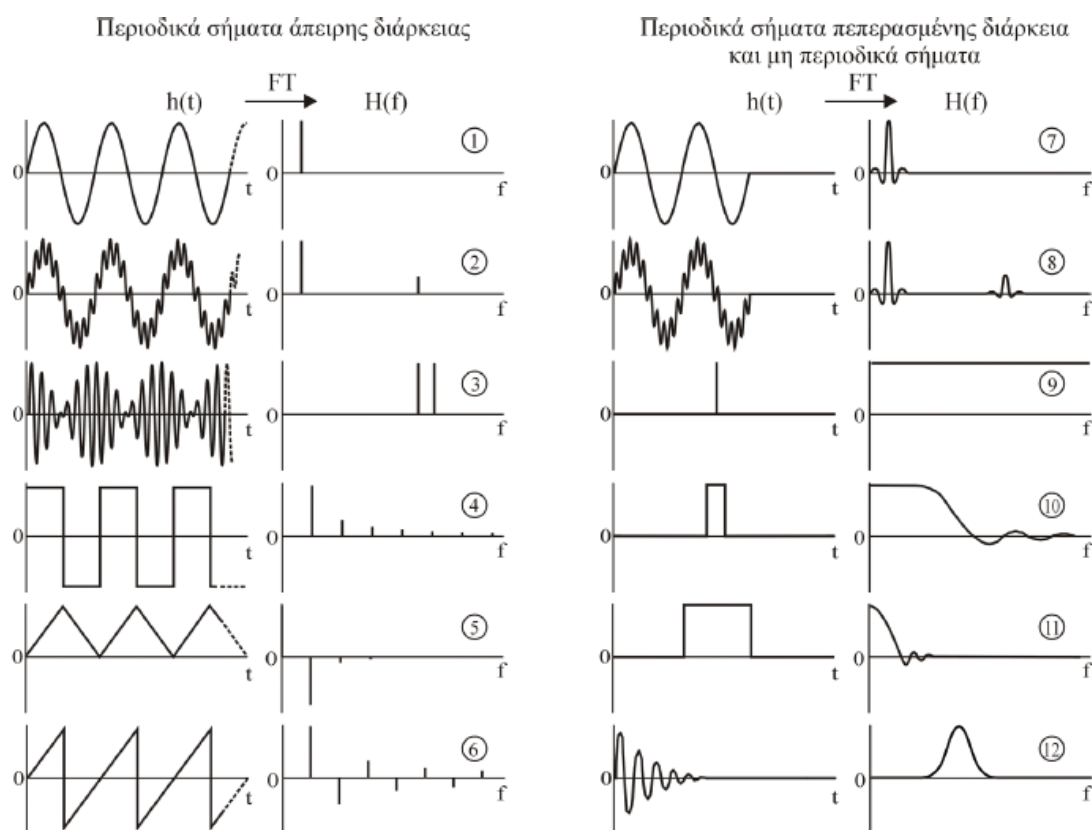
Στον μετασχηματισμό του Fourier οι ταλαντώσεις χαρακτηρίζονται με ημιτονοειδής συναρτήσεις. Η μέση τιμή της οποιαδήποτε λείας ταλάντωσης, γρήγορης ή αργής, ισχυρής ή αδύναμης, είναι μηδέν. Άμα χρησιμοποιήσουμε την τετράγωνο των αξιών στο χρόνο μπορούμε να μελετήσουμε τη δύναμη αυτών των ταλαντώσεων με τον ίδιο τρόπο που μελετούμε το αυθεντικό σήμα. Η θεωρία του Parseval για σήματα ενέργειας αναφέρει ότι:

—

Η ανάλυση με τη μέθοδο μετασχηματισμού Fourier θεωρεί τα χρονικά πλαίσια της ζωής του σήματος από το μείον άπειρο έως το συν άπειρο. Για τον λόγο αυτό όταν η ανάλυση γίνεται για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα θεωρούμε είτε ότι το σήμα είναι περιοδικό είτε ότι έχει ένα πεπερασμένο ποσό ενέργειας. Θεωρητικά ένα σωστό φάσμα ισχύος ενός σήματος πρέπει να εξετάσει το σήμα από το συν άπειρο έως το μείον άπειρο. Ωστόσο, δεν είμαστε πάντα σε θέση να παρατηρήσουμε ένα σήμα με αυτό τον τρόπο η' να αντλήσουμε ακριβείς λειτουργίες για αυτό. Μπορούμε να ορίσουμε ποιος είναι ο μετασχηματισμός Fourier του σήματος σε περίοδο T και να ορίσουμε το φάσμα ισχύος ως εξής:

Το ίδιο το φάσμα ισχύος προκύπτει από τον μετασχηματισμό Fourier της αυτοσυσχέτισης.

Το **φάσμα πυκνότητας πλάτους** (amplitude density spectrum), ή απλά φάσμα πλάτους, αντιπροσωπεύει τη γραφική παράσταση της πυκνότητας πλάτους (π.χ. σε μονάδες Volt/Hz) ως προς τη συχνότητα (σε μονάδες Hz). Τυπικά παραδείγματα ζευγών συναρτήσεων $h(t)$ και $H(f)$ σημάτων που ανήκουν και στις δύο κατηγορίες δείχνονται στο παρακάτω σχήμα.



Τυπικά παραδείγματα μετασχηματισμού Fourier (FT) σημάτων διαφόρων μορφών.

Χαρακτηριστική είναι η διαφορά των φασμάτων των σημάτων της πρώτης κατηγορίας, όπου οι επιμέρους συνιστώσες συχνότητες διακρίνονται μεταξύ τους (γραμμωτά φάσματα), ενώ τα φάσματα των σημάτων της δεύτερης (γενικότερης) κατηγορίας δεν περιέχουν διακριτές συχνότητες, αλλά ζώνες συχνοτήτων (ταινιωτά φάσματα). Τα ζεύγη συναρτήσεων 1, 2 και 3 αποτελούν περιπτώσεις καθαρού ημιτονικού σήματος και σύνθεσης δύο ημιτονικών σημάτων με απέχουσες και παραπλήσιες συχνότητες. Τα ζεύγη συναρτήσεων 4, 5 και 6 αφορούν σε μη ημιτονικά περιοδικά σήματα και τα φάσματά τους περιέχουν απειρία γραμμών σε αντίθεση με τα προηγούμενα. Είναι χαρακτηριστική η παρουσία της

συνεχούς συνιστώσας ($f = 0$) στην περίπτωση του τριγωνικού σήματος και η παρουσία θετικών και αρνητικών τιμών $H(f)$.

Η διεύρυνση των φασματικών γραμμών και η εμφάνιση δορυφορικών λοβών εναλλασσόμενου πρόσημου, είναι χαρακτηριστική στα φάσματα ημιτονικών σημάτων πεπερασμένης διάρκειας (ζεύγη 7 και 8). Εάν το σήμα είναι ένας παλμός απειροστά μικρής διάρκειας (ζεύγος 9), τότε το αντίστοιχο φάσμα είναι **λευκό** (white spectrum). Επομένως, για να διέλθει ένα τέτοιο σήμα μέσω μιας μονάδας χωρίς καμιά παραμόρφωση, η μονάδα θα έπρεπε να διαθέτει άπειρο εύρος ζώνης διέλευσης συχνοτήτων. Όσο ο παλμός διευρύνεται χρονικά (ζεύγη 10 και 11), τόσο το περιεχόμενό του σε υψηλές συχνότητες μειώνεται και το φάσμα συχνοτήτων τείνει να “συρρικνωθεί” προς την περιοχή της μηδενικής συχνότητας, αφού το σήμα τείνει να γίνει συνεχές.

Αποδεικνύεται ότι το φασματικό εύρος Δf που καταλαμβάνουν οι συνιστώσες ενός παλμικού σήματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της χρονικής διάρκειας του παλμού.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση ημιτονικού σήματος που αποσβήνεται εκθετικά (ζεύγος 12). Το φάσμα συχνοτήτων του σήματος αυτού αποδίδεται από μια κορυφή Lorentz. Οι κορυφές Lorentz και οι παρόμοιες με αυτές κορυφές Gauss, αποτελούν (κατά προσέγγιση) τα στοιχειώδη συστατικά κάθε ηλεκτρονικού ή μόρια

2.2.5 Συχνότητα Δειγματοληψίας

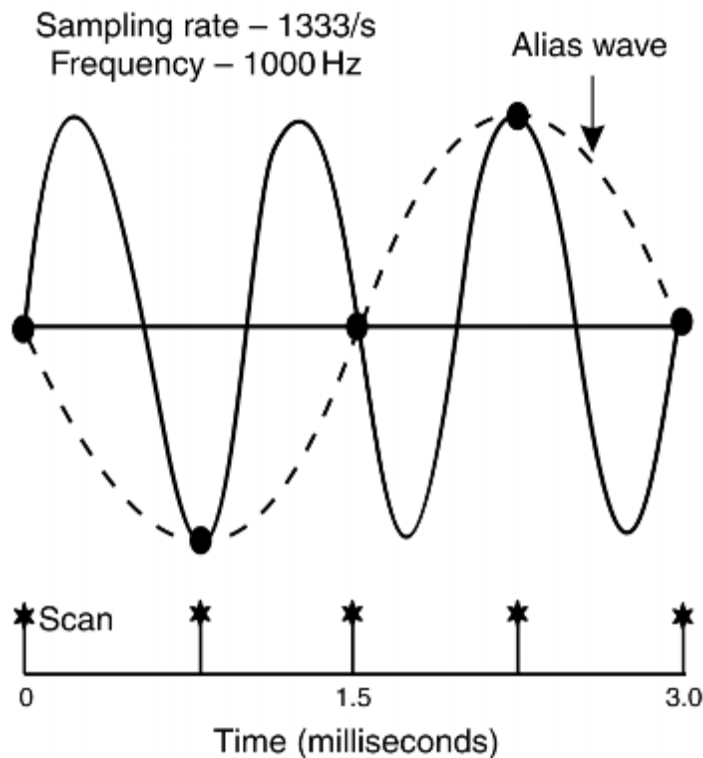
Δειγματοληψία είναι η διαδικασία καταγραφής του πλάτους του κύματος σε συγκεκριμένες στιγμές και εν συνεχεία να παράγουμε μία καμπύλη από τα σημεία που έχουμε καταγράψει. Έτσι η διακριτή καταγεγραμμένη πληροφορία (ψηφιακή) χρησιμοποιείται για να ξανακατασκευάσουμε το κύμα, το οποίο αρχικά ήταν αναλογικό. Πόσο συχνά πρέπει να λαμβάνουμε λοιπόν δείγματα ώστε το ψηφιακό σήμα να είναι όσο πιο πιστό αντίγραφο του αναλογικού;

Η απάντηση βρίσκεται στη θεωρία δειγματοληψίας του Nyquist, η οποία αναφέρει: ‘Αν δεν θέλουμε να χάσουμε καθόλου πληροφορία, πρέπει να δειγματίζουμε σε συχνότητα τουλάχιστον δύο φορές υψηλότερη από την υψηλότερη συχνότητα που μας ενδιαφέρει.’

Στο συγκεκριμένο πείραμα η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 8000 δειγματα το δευτερόλεπτο, δηλαδή το εύρος συχνοτήτων που καταγράφουμε είναι από 0 μέχρι 4000 Hz. Αυτό προέκυψε διότι κατά την οπτική επίβλεψη της προβλεπόμενης διαδικασίας, μεταξύ των συχνοτήτων 10 Hz με 1.3 kHz και 1,9 kHz με 3,2 kHz υπήρξαν οι μεγαλύτερες και πιο έντονες αλλαγές του πλάτους της κυματομορφής.

Η εικόνα 3.2.2-2 δείχνει μία περίπτωση όπου η συχνότητα δειγματοληψίας δεν είναι διπλάσια της συχνότητας του σήματος.

Αυτό το φαινόμενο δειγματοληψίας με συχνότητα λιγότερη από την ενδεδειγμένη ονομάζεται ψευδοσυχνότητα. Όλοι οι συλλέκτες έχουν αυτόματη επιλογή της συχνότητας δειγματοληψίας για να αποφεύγεται αυτό το φαινόμενο. Στη θεωρία λοιπόν δεν θα έπρεπε να υπάρχουν συχνότητες μεγαλύτερες από το μισό της δειγματοληψίας, αυτό όμως απέχει από την πραγματικότητα.



Εικόνα 2.3 Παράδειγμα μικρής συχνότητας δειγματοληψίας

Για το λόγο αυτό οι περισσότερες συσκευές συλλογής σήματος έχουν φίλτρα (anti-aliasing filters) που εμποδίζουν το φαινόμενο των ψευδοσυχνοτήτων. Πρόκειται για φίλτρα που αφήνουν τις χαμηλές συχνότητες και μπλοκάρουν τις πολύ υψηλές. Τέτοια φίλτρα υπάρχουν και στις κάρτες ήχου των ηλεκτρονικών υπολογιστών με τις οποίες θα κάνουμε τη δειγματοληψία στα προγράμματα που έχουν σχεδιασθεί.

Τα δείγματα ηχητικού σήματος που να λαμβάνει η κάρτα ήχου του υπολογιστή, δεν έχουν κάποιον περιορισμό και μπορούν ρυθμιστούν σε οποιοδήποτε χρονική περίοδο, αρκεί να μπορεί να ανταποκριθεί στα χαρακτηριστικά του εκάστοτε υπολογιστή.

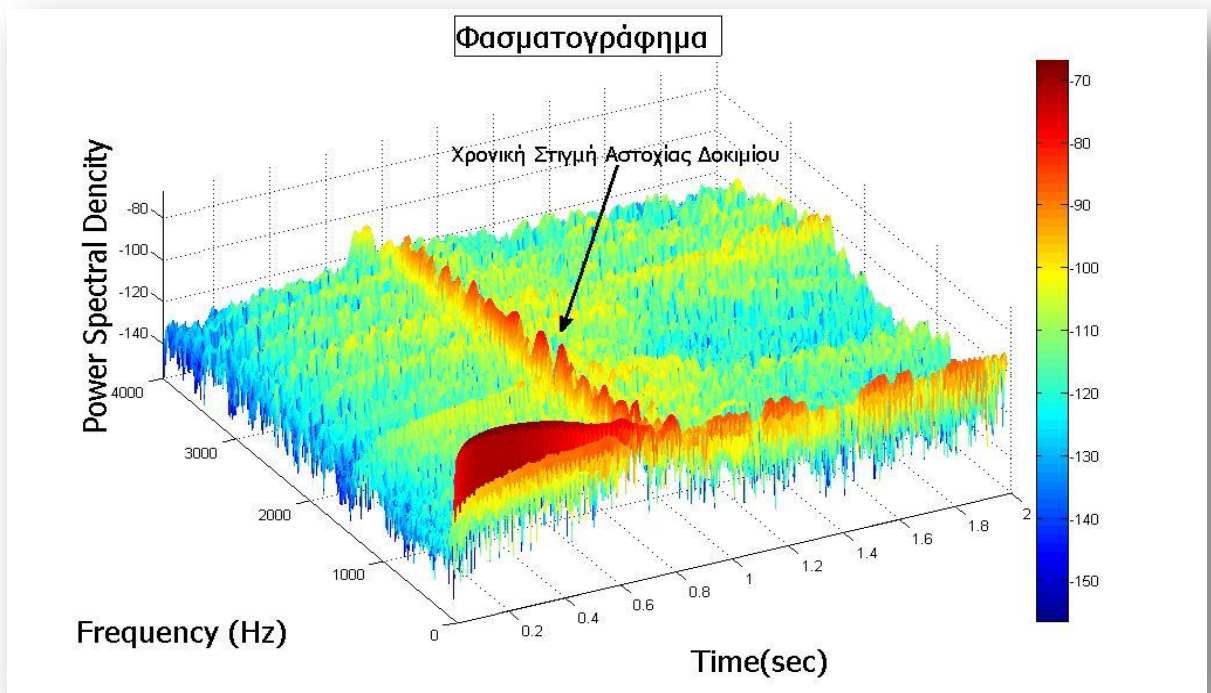
Στις πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήσαμε οι χρονικές περίοδοι για την καταγραφή ηχητικού σήματος κινήθηκαν μεταξύ ενός, δύο και τριών δευτερολέπτων.

2.2.6 Φασματογράφημα (spectrogram)

Κάθε φασματογράφημα που δημιουργείται από το πρόγραμμα, που έχουμε δημιουργήσει στη MATLAB, παρουσιάζεται σε τρισδιάστατο διάγραμμα όπου παρίσταται:

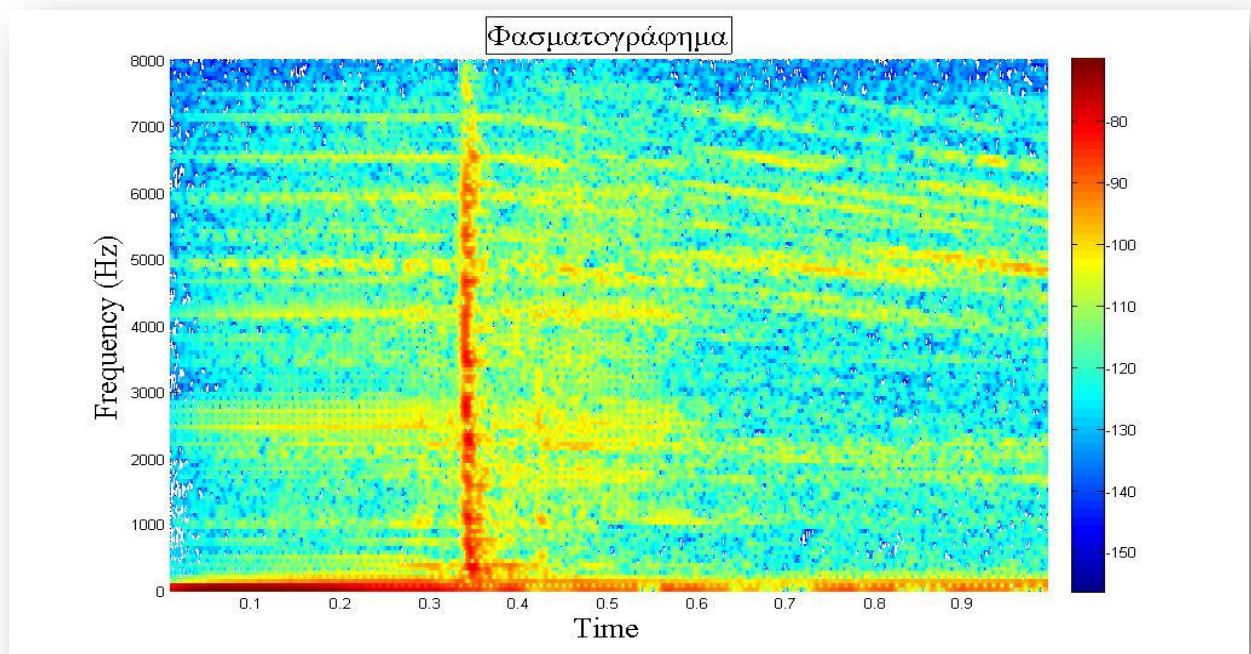
- Στον Χ-άξονα, ο χρόνος του δείγματος σε sec (1 ή 2 sec).
- Στον Υ-άξονα, η τιμή της συχνότητας (από 0 Hz μέχρι 4000 Hz).
- Στον Ζ-άξονα, το πλάτος (amplitude, η τιμή Fourier) της συχνότητας, με το αντίστοιχο χρωματισμό.

Στην παρακάτω εικόνα ακολουθεί ένα παράδειγμα φασματογραφήματος.



Εικόνα 2- Παράδειγμα τρισδιάστατου φασματογραφήματος.

Ακολουθεί εικόνα δισδιάστατου φασματογραφήματος με χρωματική μπάρα για την απεικόνιση του πλάτους.



Εικόνα 3- Παράδειγμα δισδιάστατου φασματογραφήματος με χρωματική μπάρα για την απεικόνιση του πλάτους.

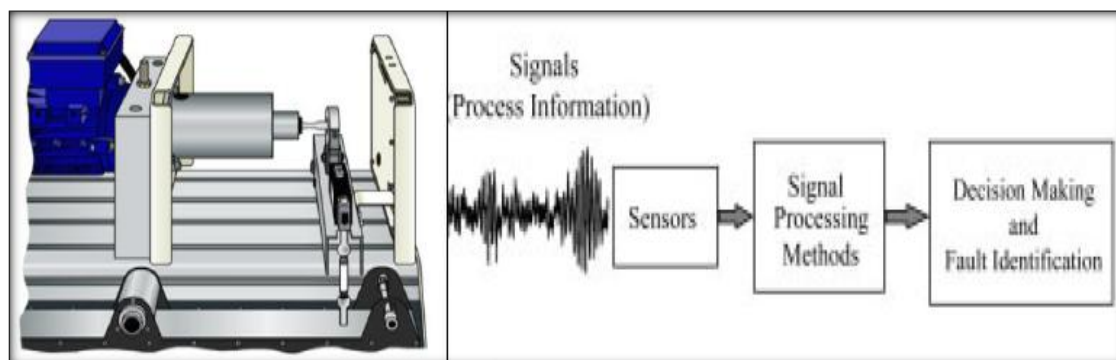
Σε αυτή την εικόνα παρατηρούμε ότι όλες οι συχνότητες κοντά στα 0,35 second κοκκινίζουν. Αυτό συμβαίνει διότι την συγκεκριμένη χρονικά στιγμή σε αυτό το χρονικό παράθυρο το δοκίμιο αστοχεί. Έτσι έχουμε ως αποτέλεσμα ο ήχος που εξαγάγετε να αυξάνει το power spectral density επηρεάζοντας όλες τις συχνότητες .

2.3 Φασματική και ψηφιακή επεξεργασία ακουστικού σήματος σε περιβάλλον MATLAB

Ο σκοπός αυτού του πειράματος η φασματική επεξεργασία ακουστικού σήματος και η εξαγωγή αποτελεσμάτων με δείκτες στατιστικής ανάλυσης, κατά την προβλεπόμενη διαδικασία του πειράματος. Αφορά λοιπόν, την φασματογραφική απεικόνιση για την οπτική επαλήθευση του πειράματος και την αποθήκευση διαδοχικών δειγμάτων ηχητικού σήματος, ώστε να χρησιμοποιηθούν για την στατιστική ανάλυση της δομικής ακεραιότητας του υλικού μας για την ουσιαστική παρακολούθηση της κατάστασης του, μέχρι και την αστοχία του.

Για την επίτευξη αυτού του σκέλους του πειράματος, χρησιμοποιήθηκαν, η περιστροφική μηχανή κόπωσης SM1090 Rotating Fatigue Machine, αρκετά δοκίμια αλουμινίου RF1020, ένα απλό μικρόφωνο και η υπολογιστική μονάδα (PC) με πρόγραμμα, που έχει δημιουργηθεί σε περιβάλλον MATLAB.

2.3.1 Περιγραφή και επεξήγηση διαδικασίας



Εικόνα 2.2.7.1 Η γενική δομή της παρακολούθησης της κατάστασης της μηχανής

Το βασικό σημείο του πειράματος είναι ότι κατά την προβλεπόμενη διαδικασία, ηχογραφήσαμε τους θορύβους της μηχανής μαζί με τον ήχο που βγάζει το δοκίμιο λόγω της ταλάντωσης του. Η αποθήκευση του ακουστικού σήματος γίνεται στον Η/Υ, όπου πρώτα, έχει γίνει η κατάλληλη μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Το μικρόφωνο ηχογραφεί όλη την λειτουργία της μηχανής κόπωσης κατά την προβλεπόμενη διαδικασία, από την αρχή μέχρι να φτάσει το δοκίμιο στο όριο διαρροής του και να αστοχήσει. Η καταγραφή και η αποθήκευση των αναλογικών ηχητικών σημάτων για να γίνει, θα πρέπει πρώτα να ψηφιοποιηθούν τα σήματα, δηλαδή να μεταφραστούν στο δυαδικό σύστημα. Η ψηφιοποίηση του αναλογικού σήματος διαθέτει μεγάλο εύρος επιλογών.

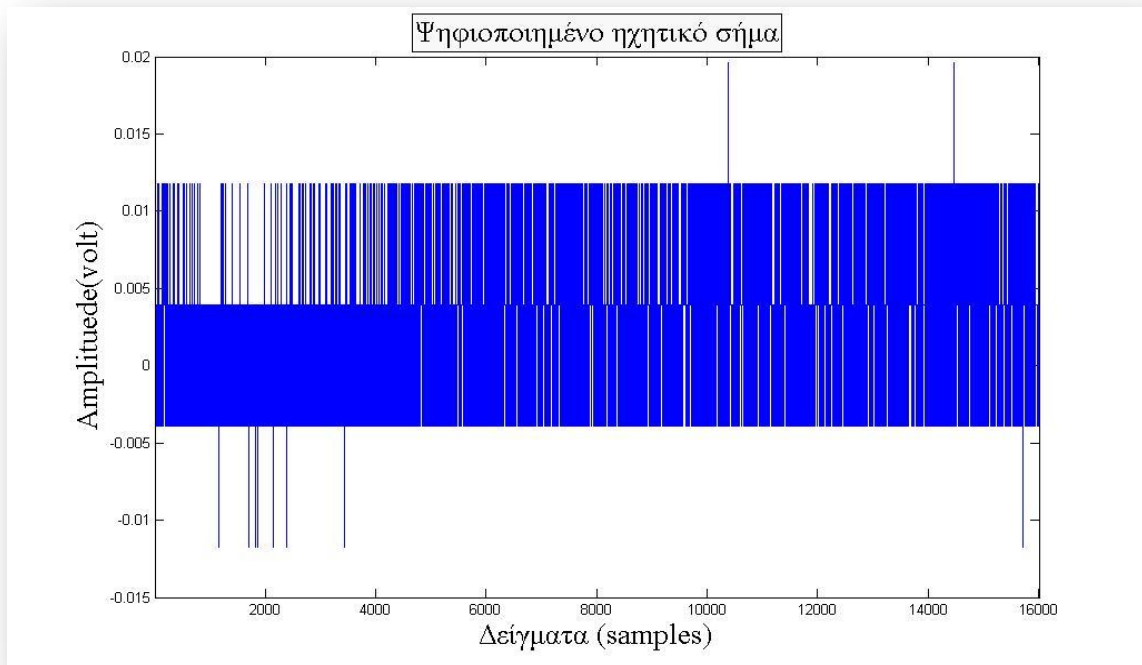
Η ποιότητα της ψηφιοποίησης του αναλογικού σήματος ώστε η καταγραφή και η αποθήκευση του να είναι μια εύπλαστη και διαχειρίσιμη πληροφορία αποτελεί ένα λεπτό ζήτημα. Παλαιότερες έρευνες που έγιναν πάνω σε αυτό το πεδίο της διαχείρισης ψηφιοποιημένης ακουστικής πληροφορίας, έδειξαν ότι υψηλή ανάλυση στην καταγραφή ηχητικού σήματος χωρίς φίλτρα αποκοπής θορύβου, δεν είναι δυνατή η εξαγωγή από σαφή συμπεράσματα για την κατάσταση στην οποία βρίσκετε μια μηχανή ή κάποιο εξάρτημα της. Στην περίπτωση μας που θέλουμε εξ ορισμού ένα low-cost σύστημα πρόβλεψης αστοχίας, θεωρήσαμε ότι είναι απόλυτα θεμιτό να χαμηλώσουμε, συνειδητά, την ποιότητα του σήματος και να δοκιμάσουμε αν η επεξεργασία της «ελαφριάς» πληροφορίας μας δώσει αποτελέσματα, που εν τέλει θα τεθεί άλλη ερμηνεία στον κανόνα.

Η πραγματικότητα είναι ότι εξάγαμε σημαντικά αποτελέσματα για την πρόβλεψη της αστοχίας του δοκιμίου αλουμινίου, που λειτουργεί ως περιστρεφόμενη άτρακτος τύπου προβόλου.

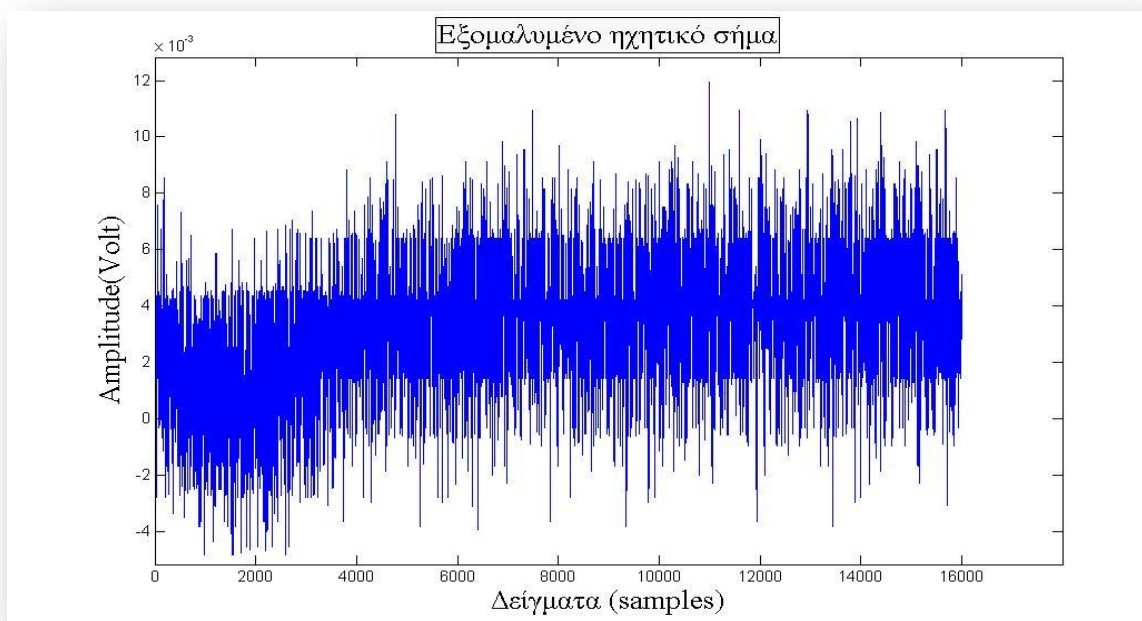
Η ψηφιοποίηση του αναλογικού ηχητικού σήματος (εικόνα 2.2.7.2) έγινε στην ανάλυση των 8-bit, δηλαδή 256 διακριτά διαστήματα ανά ένα δείγμα, τα δείγματα το δευτερόλεπτο είναι 8000 που σημαίνει συχνότητα 4 kHz. Πολύ χαμηλής ποιότητας σήμα αλλά αρκετά χρήσιμο και «εύπλαστο» για την εισαγωγή του σε συναρτήσεις στατιστικής ανάλυσης. Λόγω της προσπάθειας μας να χαθεί όσο το δυνατόν λιγότερη ηχητική πληροφορία (on-line) κατά την καταγραφή στον Η/Υ, η χαμηλή ποιότητα τείνει προς αυτή την κατεύθυνση.

Η διαδικασία της αποθήκευσης του ηχητικού σήματος δεν ήταν μονοκόμματη. Δηλαδή δεν καταγράψαμε από την αρχή έως το τέλος του πειράματος (αστοχία δοκιμίου) ένα δείγμα, αλλά χωρίσαμε την καταγραφή σε επιμέρους σήματα του ενός ή δύο δευτερολέπτων, ώστε να έχουμε την δυνατότητα πιο «εύπλαστης»

πληροφορίας για την ευκολότερη ενεργοποίηση της στατιστικής ανάλυσης του ηχητικού σήματος. Το κάθε επιμέρους σήμα που αποθηκεύσαμε στον Η/Υ μέσω της γλώσσας προγραμματισμού της MATLAB, έχει στον άξονα Υ το πλάτος (amplitude) με μονάδες μέτρησης Βολτ (Volt) με τιμές πραγματικών αριθμών από -1 μέχρι 1 και στον άξονα Χ έχει τις τιμές του χρόνου σε δευτερόλεπτα.



Εικόνα 2.2.7.2- Παράδειγμα μορφής ηχητικού σήματος



Εικόνα 2.2.7.3- Παράδειγμα εξομαλυνμένης μορφής ηχητικού σήματος

Ο επεξεργαστής του Η/Υ δεν χρειάζεται να έχει υπερβολικές δυνατότητες για να διαχειριστεί όλη την διαδικασία του πειράματος αλλά και με συμβατικές δυνατότητες, εισάγει την αναλογική ηχητική πληροφορία και την μεταφράζει σε ψηφιακή εξίσου εύκολα.

Η στατιστική ανάλυση του ηχητικού σήματος στο πεδίο του χρόνου κατά την προβλεπόμενη διαδικασία, εν τέλει μας έδωσε τις βασικότερες πληροφορίες για να συμπεράνουμε την πρόβλεψη της αστοχίας του δοκιμίου. Δείκτες που θέσαμε ως προς αυτή την κατεύθυνση και θα αναλυθούν εκτενέστερα στην συνέχεια, είναι Crest Factor, Kurtosis ,Skewness, RMS , Standar Deviation και σαφώς Mean Value.

Τα δείγματα ηχητικών σημάτων (Εικόνα 2.2.7.2 και Εικόνα 2.2.7.3) αποθηκεύονται στην μνήμη του υπολογιστή σε κάθε δοκιμή υπό την μορφή “signal .mat” όπου το είναι το σύνολο των επαναλήψεων δειγματοληψίας που έκανε το πρόγραμμα της MATLAB μέχρι την πλήρη αστοχία του δοκιμίου.

Δηλαδή όταν ο χρόνος δείγματος ηχητικού σήματος, που έχουμε δηλώσει είναι 2 δευτερόλεπτα και ο συνολικός χρόνος που κάνει η μηχανή κόπωσης να σπάσει το δοκίμιο είναι 200 δευτερόλεπτα τότε θα υπάρχουν 100 επαναλήψεις, έτσι και το .

Παρουσιάζονται τα διαγράμματα φασματικής πυκνότητας ,που εξάγονταν από το πρόγραμμα SpecAnalysis που διατελέσαμε στην γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, στην στιγμή όπου γίνεται αντιληπτή η παρουσία αλλαγών στην δομή του δοκιμίου και αυξάνονται οι αστοχίες.

Από την αρχή λειτουργίας της μηχανής κόπωσης μέχρι την τελική ολοκληρωτική αστοχία του δοκιμίου, δημιουργούνται και παρουσιάζονται ζωντανά, φασματογραφίες όπου μας προειδοποιούν για την κατάσταση της μηχανής.

Με αντίστοιχη παρακολούθηση, όπου κάναμε στο πρώτο σκέλος του πειράματος, δηλαδή με οπτική παρακολούθηση, διαπιστώσαμε ότι όταν αυξάνονται οι αστοχίες στην δομή του δοκιμίου μας και πάει να σπάσει, αυξάνεται το πλάτος της φάσματος σε συγκεκριμένες συχνότητες. Η διαπίστωση αυτή ήταν πολύ σημαντική διότι μας επαλήθευσε τα συμπεράσματα του προηγούμενου σκέλος του πειράματος, με την διαφορά ότι αποθηκεύσαμε τα δείγματα ηχητικών σημάτων, με σκοπό την περεταίρω αποτίμηση τους και επεξεργασία τους, με την βοήθεια του δεύτερου μέρους του προγράμματος, που δημιουργήσαμε στην MATLAB.

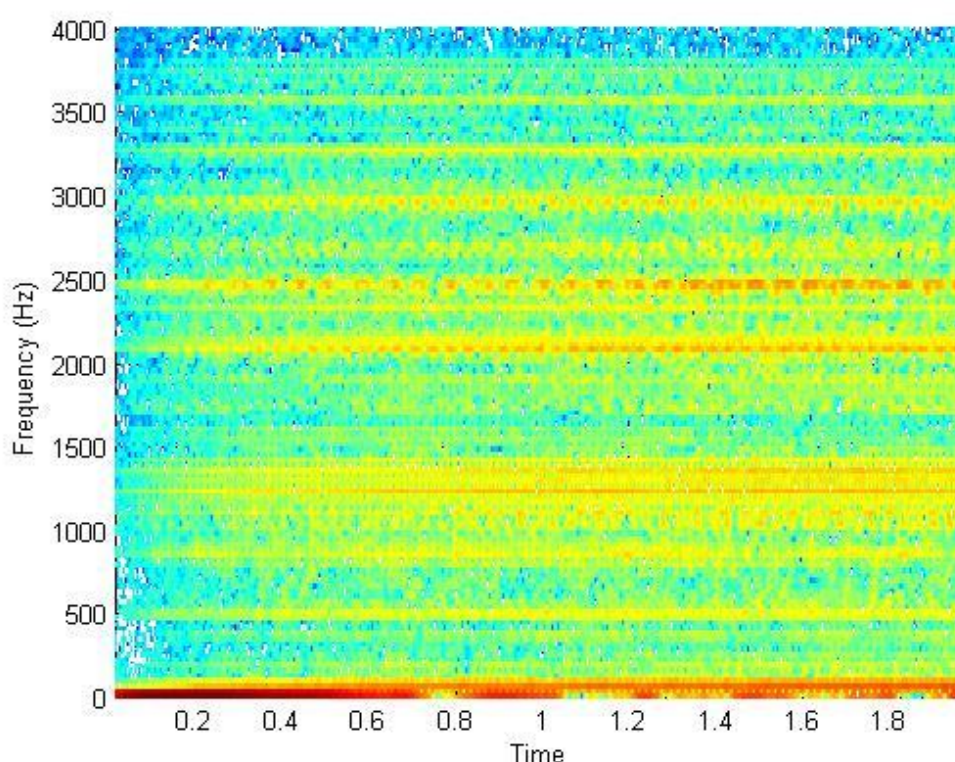
Αναλυτικά τα δεδομένα της κάθε δοκιμής σε αυτό το σκέλος του πειράματος:

Δοκίμια	Αριθμός περιστροφών μέχρι την αποτυχία του δοκιμίου	Χρόνος (sec) μέχρι την αποτυχία του δοκιμίου	Πάχος λεπτότερου σημείου του δοκιμίου (λαίμος)	Βάρος	Χρόνος(s ec) δείγματος ηχητικού σήματος
11°	22.718	383	3.00 mm	21 N	2
12°	64.871	1.083	3.00 mm	21N	2
13°	29.971	502	3.00 mm	21 N	2
14°	68.891	1.146	2.90 mm	21 N	2
15°	44.143	738	2.90 mm	22 N	2
16°	26.271	434	3.00 mm	22 N	2
17°	19.687	332	2.90 mm	22 N	2
18°	44.523	742	2.95 mm	22 N	1
19°	32.037	524	3.08 mm	22 N	2
20°	21.430	356	3.00 mm	24 N	2
21°	12.049	204	3.00 mm	26 N	2

Σε κάθε δοκιμή που εκτελέσαμε, υπήρξαν παρόμοια αποτελέσματα. Βέβαια υπήρξαν και δοκιμές όπου δεν πήραμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα, αλλά αυτές ήταν δύο από τις έντεκα. Αυτό συνέβη λόγω παράλειψης κάποιων διαδικασιών αλλά και από ηχητικές παρεμβολές ανθρωπογενούς προέλευσης. Σε όσα πειράματα επικράτησαν ιδανικές καταστάσεις, τα αποτελέσματα τους ανταποκρίθηκαν πλήρως στις απαιτήσεις μας.

Οι χρονικές περίοδοι των 1 ή 2 δευτερολέπτων δεν ήταν τυχαία επιλογή. Σε αυτές τις τιμές το πρόγραμμα της MATLAB μπορούσε να ανταποκριθεί σε μεγαλύτερο βαθμό για την ανάλυση των δεδομένων μας και στην δημιουργία αντίστοιχων διαγραμμάτων με τις στατιστικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήσαμε.

Το φασματογράφημα (spectrogram) που δημιουργείτε σε κάθε λήψη δείγματος ηχητικού σήματος είναι το εξής:



Φασματογράφημα (spectrogram)

Σε αυτή την εικόνα παρατηρούμε ότι κάποια πεδία είναι ελαφρώς πιο κόκκινα. Αυτά τα πεδία μας δείχνουν ότι σε αυτές τις συγκεκριμένες συχνότητες το πλάτος είναι μεγαλύτερο, δηλαδή υπάρχει μεγαλύτερη ένταση ήχου. Επίσης το σήμα που αποθηκεύουμε είναι διάρκειας δύο δευτερολέπτων. Βλέπουμε συγκεκριμένα στα 2.500 Hz μία γραμμή, αυτή είναι οι ήχοι που παράγει η λειτουργία της μηχανής κόπωσης και στις χαμηλές συχνότητες

από 0 μέχρι 500 Hz είναι οι ήχοι που μας αφορούν. Ο πίνακας αυτός απεικονίζει την κατάσταση του πειράματος 12, που βρίσκεται χρονικά στη μέση του.

Στην συνέχεια θα δούμε ότι κατά την πορεία του πειράματος μέχρι να σπάσει, πως αυξάνονται οι εντάσεις και κοκκινίζει το πεδίο από 0 μέχρι 500 Hz.

Το δεύτερο μέρος του προγράμματος αφορά την επανεπεξεργασία των δειγμάτων ηχητικού σήματος, που αποθηκεύσαμε, με νέες εξισώσεις κατανομής και σκοπό την δημιουργία διαγραμμάτων με τις νέες παραμέτρους για την στατιστική ανάλυση της δομικής ακεραιότητας του υλικού και την παρακολούθηση της κατάστασης του.

2.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων με δείκτες στατιστικής ανάλυσης

Δημιουργήσαμε ένα επιπρόσθετο πρόγραμμα όπου επανεπεξεργάζεται τα αποθηκευμένα δείγματα ηχητικού σήματος (ανά 1 ή 2 δευτερόλεπτα) της όλης διάρκειας του κάθε πειράματος, δηλαδή το **“signal .mat”**.

Αυτές οι λήψεις δείγματος ηχητικού σήματος μας βοήθησαν στο να ποσοτικοποιήσουμε και να αναλύσουμε τις παραμέτρους που εξάγονται κατά την διάρκεια τέλεσης του πειράματος.

Οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την στατιστική ανάλυση είναι: **Kurtosis, Crest Factor, RMS, Mean Value, Standard Deviation, Skewness**.

2.4.1 Στατιστική ανάλυση ηχητικών σημάτων στο πεδίο του χρόνου

Η στατιστική ανάλυση έγινε πάνω σε χρονικά παράθυρα που εκμαιεύσαμε από κάθε ηχητικό σήμα. Τα ηχητικά αυτά σήματα προήλθαν, όπως έχουμε επισημάνει ξανά από την ηχογράφηση της κάθε προβλεπόμενης διαδικασίας που εκτελέστηκε στο εργαστήριο. Η πρόβλεψη επικείμενης αστοχίας του υλικού και η αναγνώριση της χρονικής περιοχής όπου τα δομικά χαρακτηριστικά του αλλάζουν, έγινε χάρη στους δείκτες στατιστικής ανάλυσης που χρησιμοποιήσαμε, σε πρώιμο στάδιο. Η συντήρηση του δοκιμίου αλουμινίου που συνεπάγεται σε άτρακτο (με ίδια χαρακτηριστικά) μιας μηχανής ή κάποιου μηχανικού συστήματος, γίνεται μονόδρομος όταν διαπιστωθεί σύμφωνα με τους δείκτες μας ότι αλλάζει η πλαστικότητα του. Για αυτόν τον σκοπό, οι στατιστικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής :

- Αριθμητικός μέσος (Mean)
- Μέση τετραγωνική τιμή (Root Mean Square RMS)
- Τυπική απόκλιση (Standard Deviation)
- Κύρτωση (Kurtosis)
- Ασυμμετρία (Skewness)
- Crest Factor

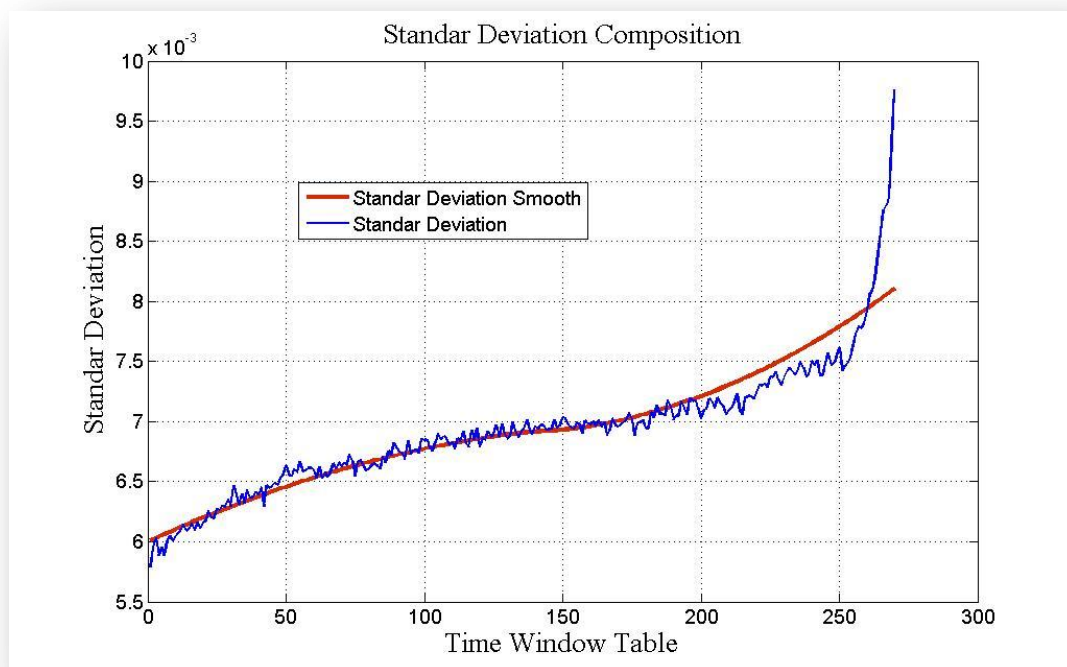
Όλοι οι δείκτες που αναφέραμε, ήταν ζωτικής σημασίας για την έκβαση των συμπερασμάτων για την διάγνωση της φθοράς και την πρόβλεψη αστοχίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω στατιστικών μεγεθών.

Πρέπει να επισημανθεί ότι κατά τη πειραματική διαδικασία δεν έγινε χρήση φίλτρου αποκοπής του θορύβου από τα δεδομένα αλλά στην συνέχεια του πειράματος έγινε χρήση εντολής της MATLAB πάνω στις ίδιες στατιστικές συναρτήσεις για την εξομάλυνση του θορύβου στα αποτελέσματα μας. Για τον σκοπό αυτόν χρησιμοποιήθηκε η εντολή της MATLAB `smooth`.

2.4.1.1 Εντολή smooth

Η εντολή smooth κάνει εξομάλυνση του σετ των δεδομένων. Σε πολλές περιπτώσεις κατά την εκτέλεση του πειράματος, χρησιμοποιείται υψηλός ρυθμός δειγματοληψίας (δηλαδή πολλά δείγματα ανά δευτερόλεπτο). Στις περιπτώσεις αυτές συνήθως εμφανίζεται ενισχυμένος θόρυβος, ο θόρυβος αυτός σε πολλές περιπτώσεις αποκρύπτει την γενικότερη τάση των καταγραφών δημιουργώντας έτσι πρόβλημα στην εξαγωγή της επιθυμητής πληροφορίας, για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται εργαλεία εξομάλυνσης των δεδομένων (χρονικά παράθυρα ηχητικού σήματος) τα smoothing tools, τα οποία είτε με τεχνικές παραθύρων κινούμενου μέσου είτε με τεχνικές πολυωνυμικής παλινδρόμησης σε κινούμενα παράθυρα δεδομένων, απαλείφουν τις ανεπιθύμητες μετρήσεις. Ακολουθεί διάγραμμα με την στατιστική συνάρτηση της τυπικής απόκλισης (εικόνα 2.4.2).

Για την παρουσίαση των διαγραμμάτων και την κατανόηση της διαδικασίας, επιλέξαμε ένα συγκεκριμένο τυχαίο πείραμα το οποίο αναλύεται σε όλες του τις εκφάνσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες στατιστικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν, μαζί με την «μετάφραση» τους από την εντολή smooth.



Εικόνα 4.2.4- Παράδειγμα σύνθεσης τυπικής απόκλισης

Σε αυτό το μέρος παραθέτουμε και παρουσιάζουμε τις στατιστικές συναρτήσεις με τους μαθηματικούς τύπους τους και τα διαγράμματα, τυχαίου πειράματος, που προέκυψαν από τα αποτελέσματα κατά την προβλεπόμενη διαδικασία.

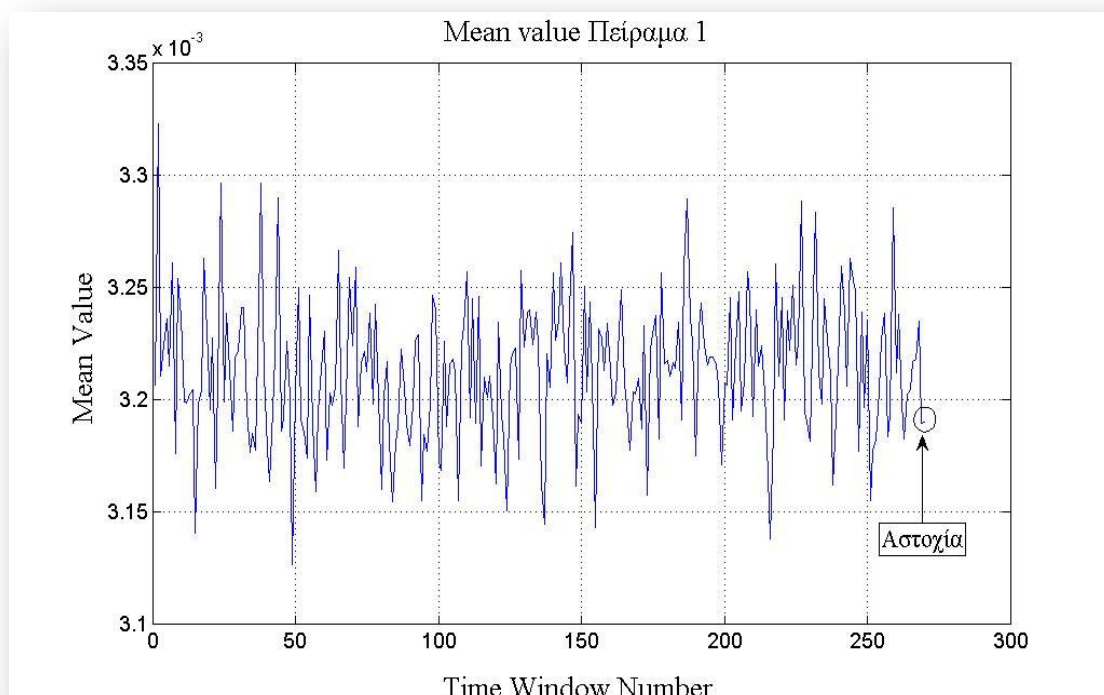
2.4.1.2 Αριθμητικός μέσος (Mean Value)

Η μέση τιμή, των τιμών ενός δείγματος N είναι ο **αριθμητικός μέσος ή μέση τιμή (Mean Value)** και υπολογίζεται από τον ακόλουθη σχέση:

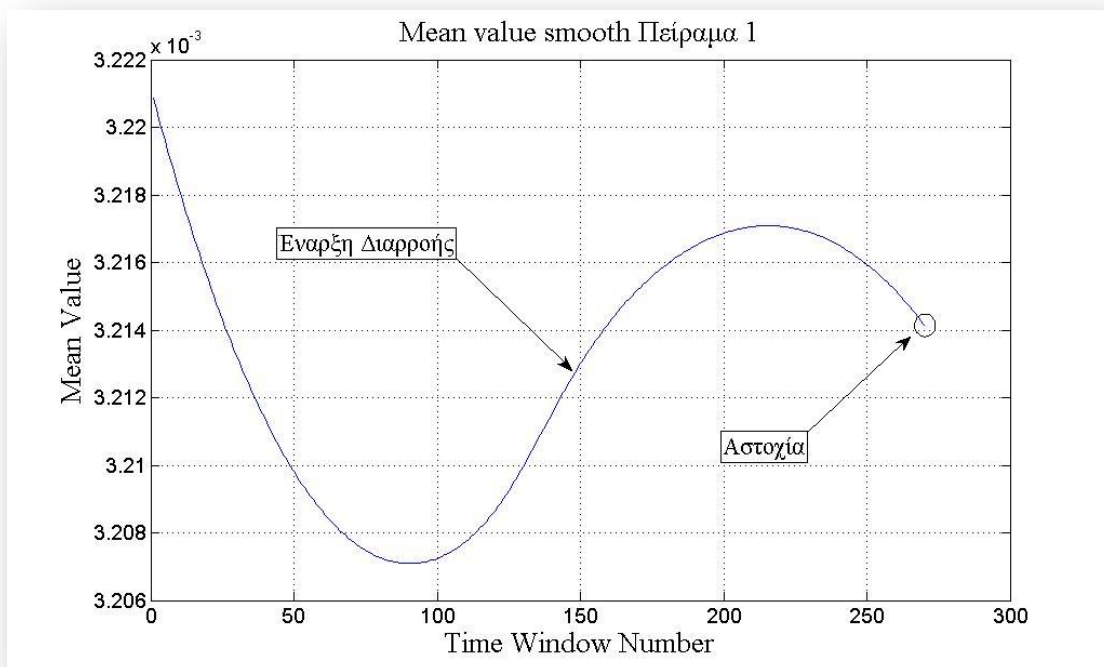
$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Οι μεταβλητές παίρνουν αντίστοιχες τιμές από την μέση τιμή του κάθε χρονικού παράθυρου δεδομένων, που εξάγεται από τον αλγόριθμο μας.

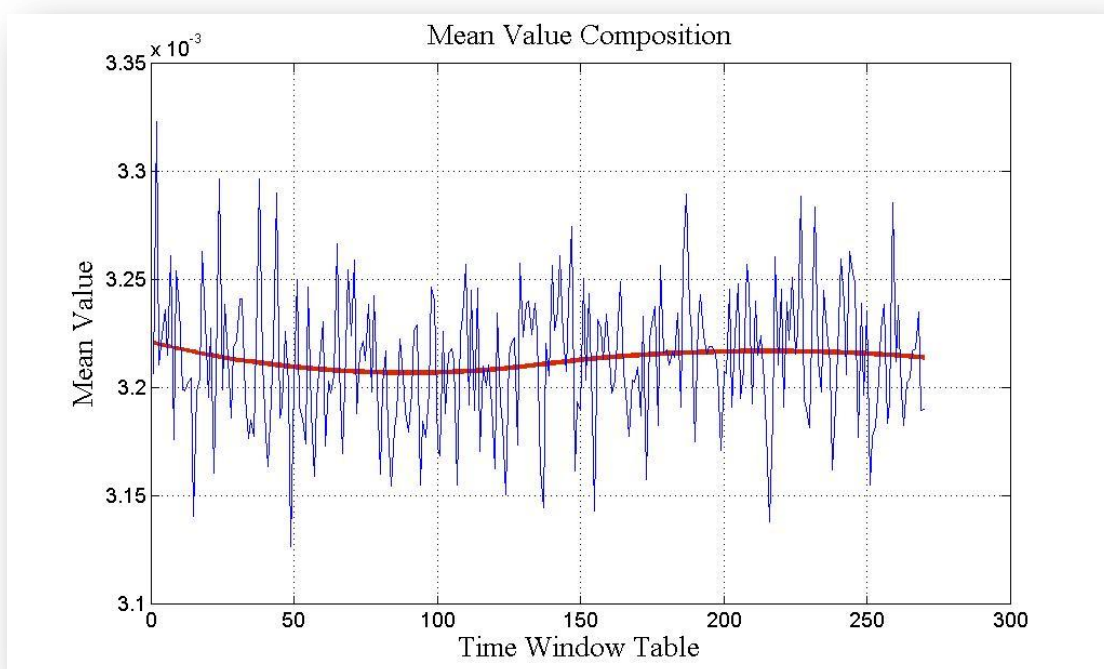
Ο αριθμητικός μέσος των ηχητικών σημάτων που παράγονται κατά τη διάρκεια του πειράματος κόπωσης δεν έχει άμεση συσχέτιση με τη φθορά του δοκιμίου (Εικόνα 4.2.4.1). Παρόλα αυτά με την χρήση της εντολής smooth μας δίνει ξεκάθαρες πληροφορίες για το πότε το δοκίμιο αλουμινίου που χρησιμοποιούμε μπαίνει στην πλαστική περιοχή και αλλάζει δομικά χαρακτηριστικά μέχρι να υποκύψει στη αστοχία του (Εικόνα 4.2.4.2). Χαρακτηριστική είναι η αλλαγή καμπυλότητας όπου μας προειδοποιεί για την έναρξη της διαρροής των δομικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου.



Εικόνα 4.2.4.1-Μέση τιμή ή αριθμητικός μέσος



Εικόνα 4.2.4.2- Μέση τιμή ή αριθμητικός μέσος με χρήση εντολής smooth



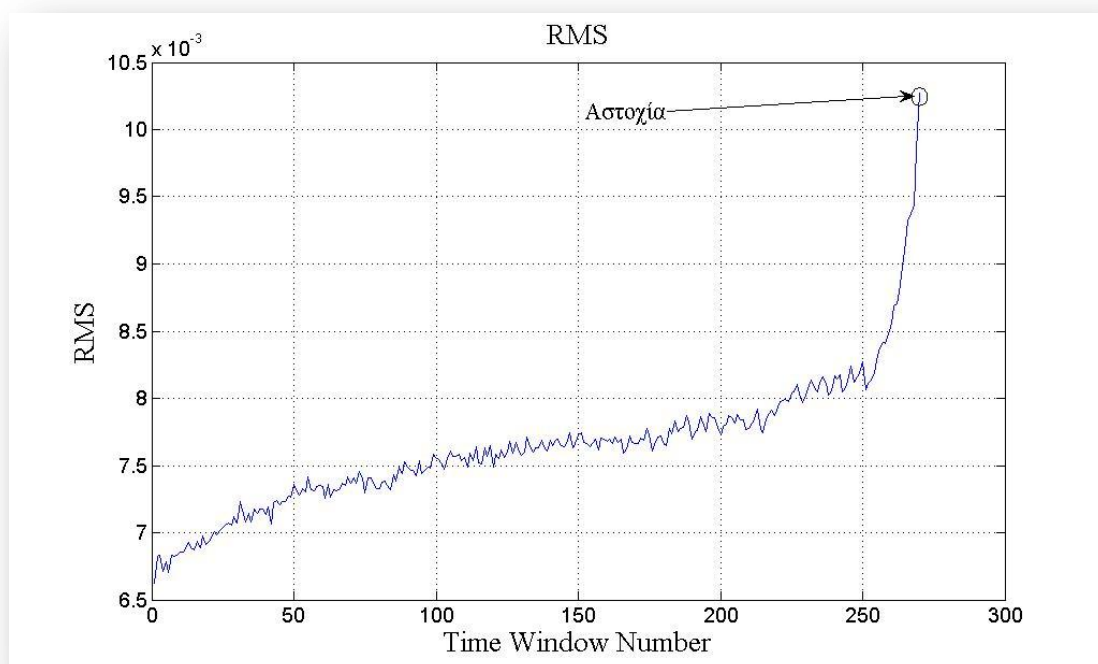
Εικόνα 4.2.4.3- Μέση τιμή σύνθεση διαγραμμάτων

2.4.1.3 Μέση τετραγωνική τιμή (Root Mean Square RMS)

Η μέση τετραγωνική τιμή των τιμών ενός δείγματος N είναι η τετραγωνική ρίζα του αριθμητικού μέσου των τετραγώνων των τιμών, **RMS(Root Mean Square)**, και υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

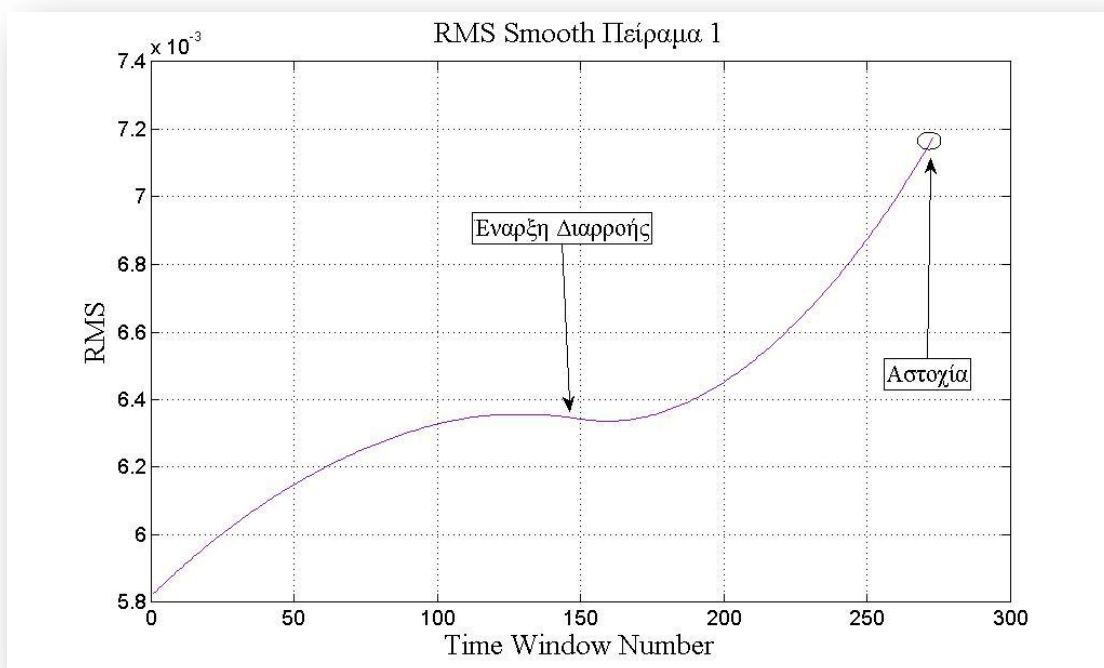
$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

Η ρίζα του μέσου όρου των τετραγώνων των τιμών, είναι ένα αξιόπιστο στατιστικό μέγεθος διάγνωσης της φθοράς. Η απλούστερη προσέγγιση για τη μέτρηση των ελαττωμάτων στο πεδίο του χρόνου γίνεται με την προσέγγιση του RMS.

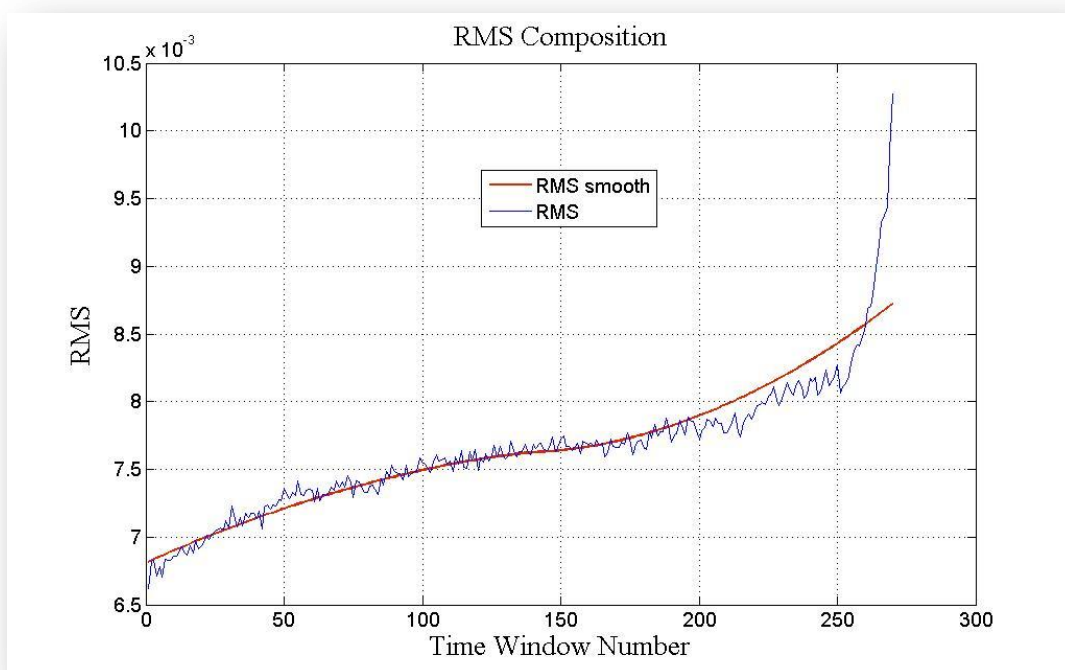


Εικόνα 4.2.4.4- RMS

Παρατηρούμε στο διάγραμμα (εικόνα 4.2.4.4), όπου δεν έχει γίνει ακόμα η χρήση της εντολής smooth, ότι οι τιμές του δείκτη RMS αυξάνονται μέχρι και την αστοχία του δοκιμίου. Με την χρήση της εντολής smooth (εικόνα 4.2.4.5), βγαίνουν πολύ πιο εύκολα συμπεράσματα για την δομική κατάσταση του δοκιμίου.



Εικόνα 4.2.4.5-RMS Smooth



Εικόνα 4.2.4.6-RMS Composition

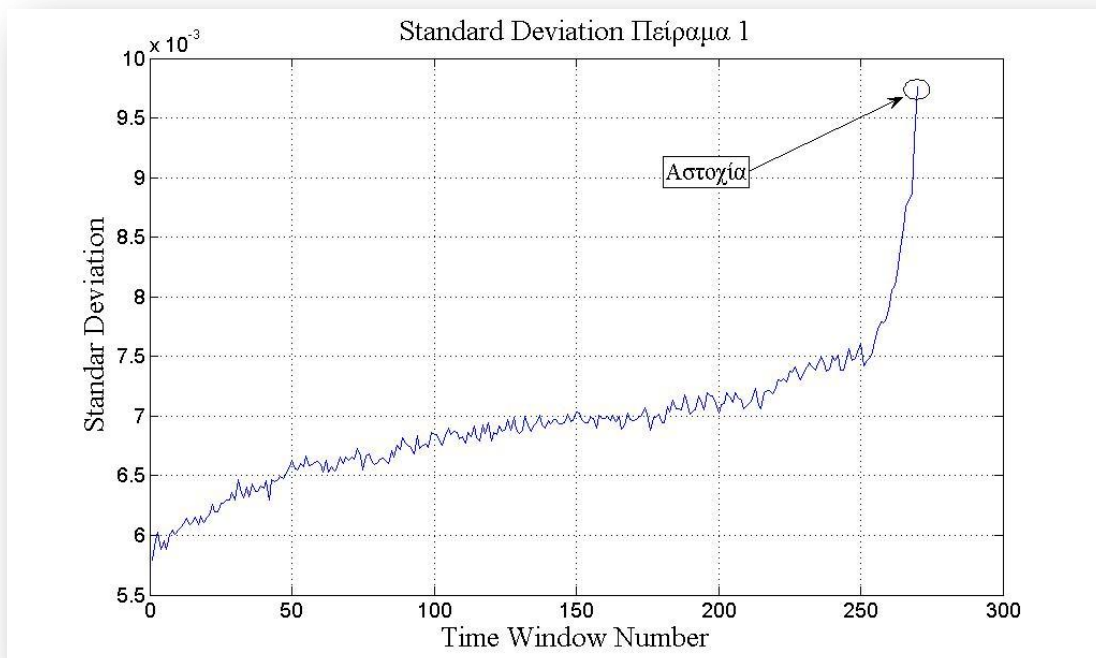
2.4.1.4 Τυπική απόκλιση (Standard Deviation)

Η **τυπική απόκλιση (Standard Deviation)** των τιμών ενός δείγματος N είναι η διακύμανση ή διασπορά του πληθυσμού N υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

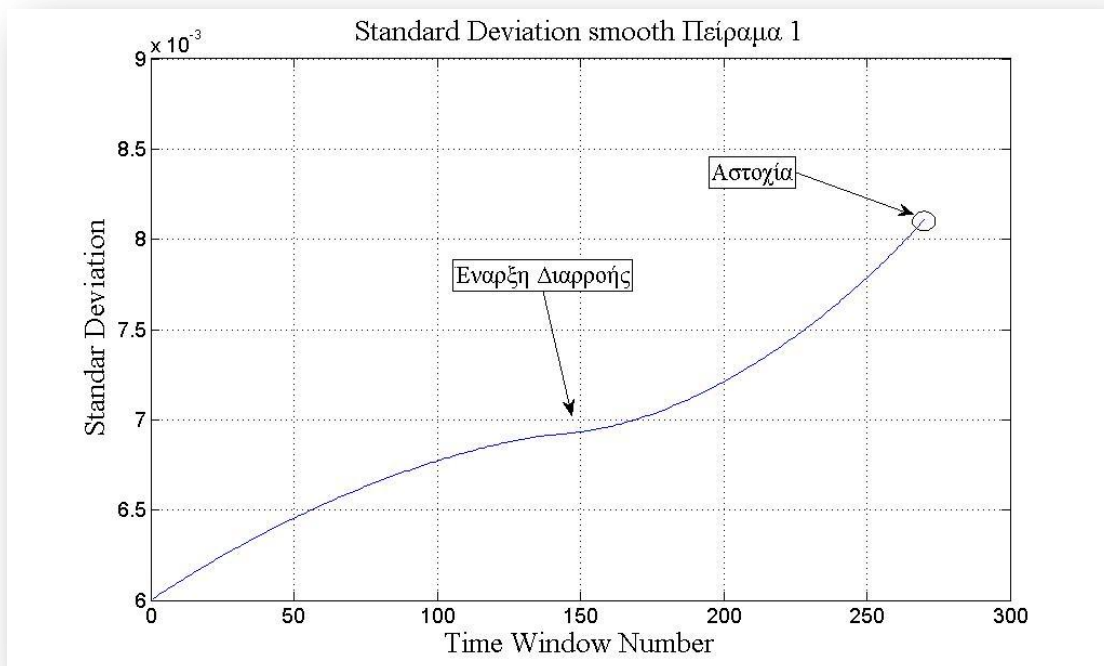
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

όπου είναι ο αριθμητικός μέσος και οι μεταβλητές παίρνουν αντίστοιχες τιμές από την μέση τιμή του κάθε χρονικού παράθυρου δεδομένων (N το σύνολο των δεδομένων), που εξάγεται από τον αλγόριθμο μας

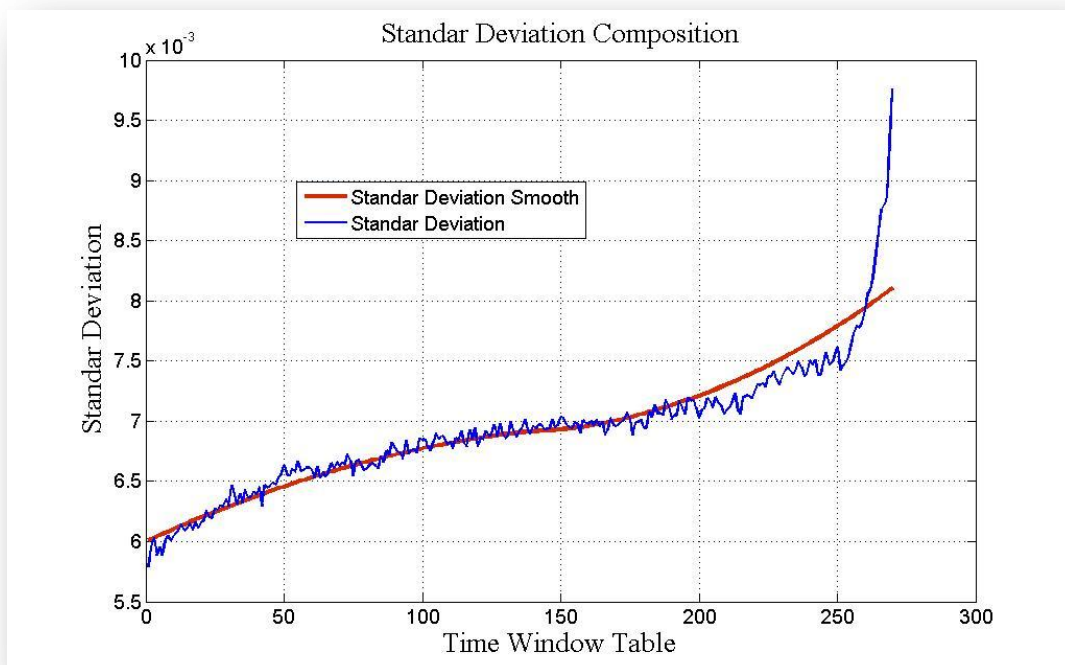
Η σχέση της τυπικής απόκλισης προσεγγίζει τη σχέση της μέσης τετραγωνικής τιμής. Για το λόγο αυτό οι τιμές RMS είναι περίπου ίδιες με αυτές των τυπικών αποκλίσεων. Ως εκ τούτου η αύξηση των αστοχιών του δοκιμίου μπορεί να διαπιστωθεί και από τις τιμές που προέκυψαν κατά την ανάλυση του RMS.



Εικόνα 2.4.2.7- Standar deviation



Εικόνα 2.4.2.8- Standar deviation smooth



Εικόνα 2.4.2.9- Standar deviation composition

2.4.1.5 Κύρτωση (Kurtosis)

Κύρτωση ή αλλιώς αιχμηρότητα ονομάζεται ο βαθμός οξύτητας της κορυφής μιας κατανομής. Η αιχμηρότητα εκφράζεται συνήθως ως προς την κανονική κατανομή.

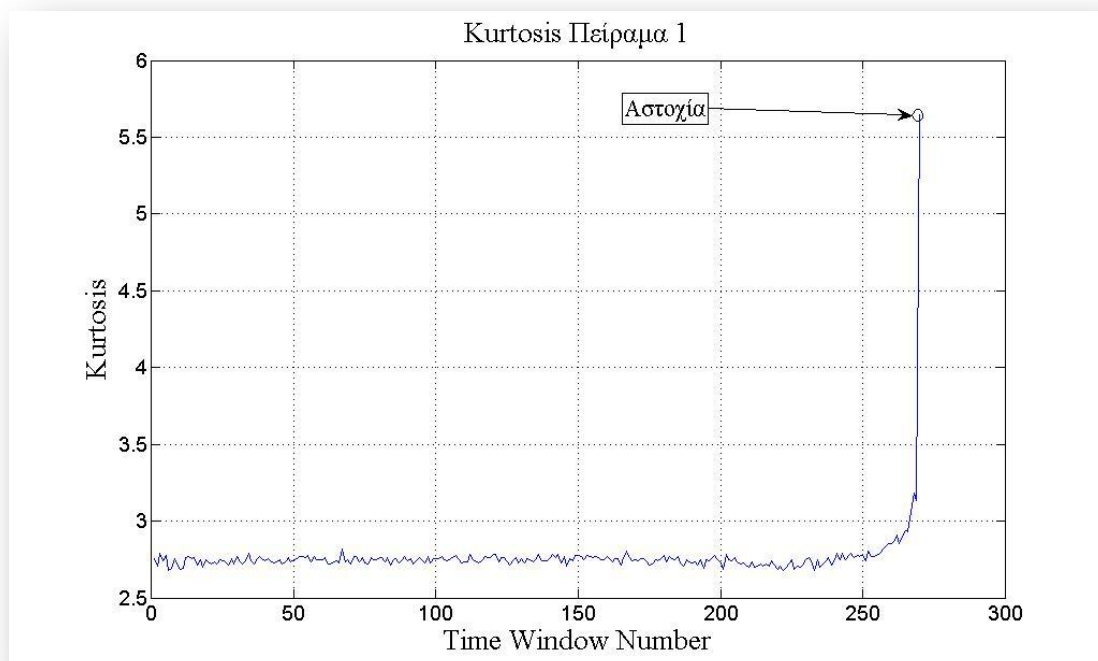
Η **κύρτωση(Kurtosis)** υπολογίζεται από τον ακόλουθο μαθηματικό τύπο:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4$$

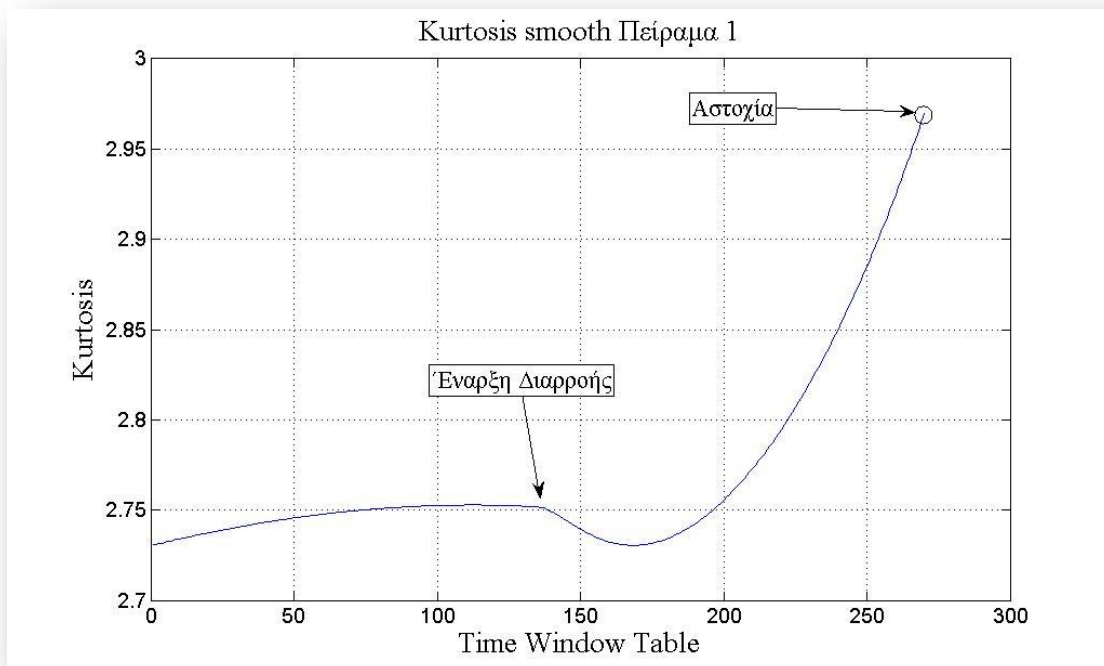
όπου \bar{x} είναι ο αριθμητικός μέσος, s η τυπική απόκλιση, και n το πλήθος των δειγμάτων.

Η τιμή της κύρτωσης είναι χρήσιμη στον προσδιορισμό των αιφνίδιων μεταβολών και των τυχαίων γεγονότων που προκύπτουν από τα ηχητικά σήματα, έχοντας μεγάλη ευαισθησία στις απότομες αιχμές (Spikes).

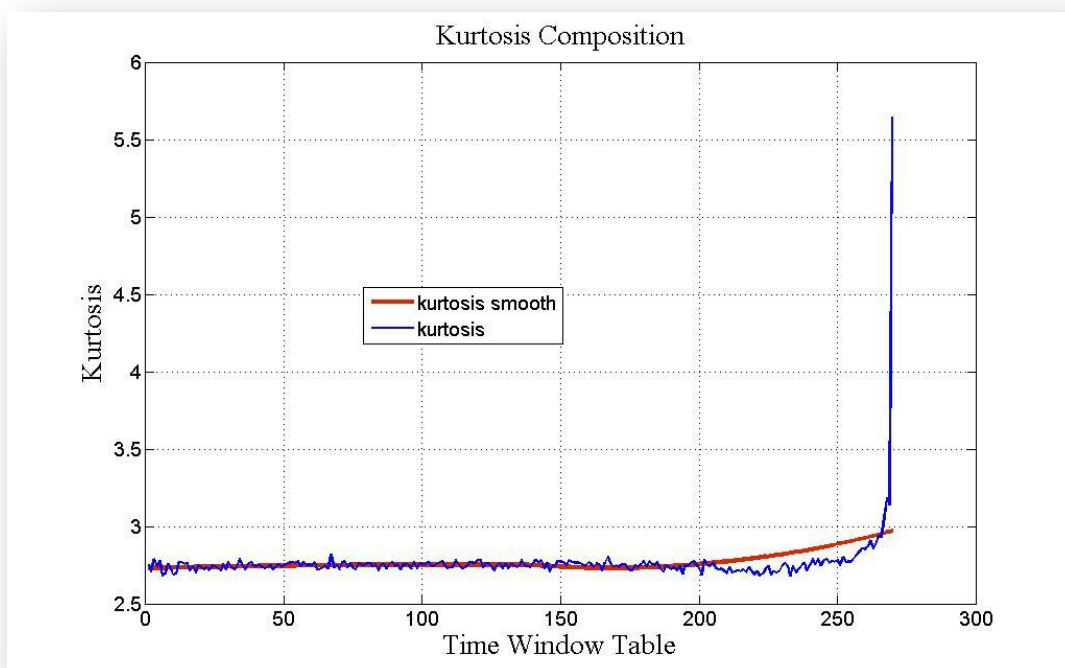
Στο σχήμα που ακολουθεί, η τιμή της κύρτωσης βλέπουμε ότι αρχίζει και αυξάνεται, μέχρι εκεί που κάνει την απότομη μεγίστη αλλαγή και αστοχεί το δοκίμιο(εικόνα 2.4.2.10). Παρακάτω παρουσιάζεται εξομαλυμένο το διάγραμμα, όπου τα αποτελέσματα είναι αρκετά πιο φανερά (εικόνα 2.4.2.11). Ακολουθεί και η σύνθεση των διαγραμμάτων (εικόνα 2.4.2.12).



Εικόνα 2.4.2.10-Kurtosis



Εικόνα 2.4.2.11-Kurtosis smooth



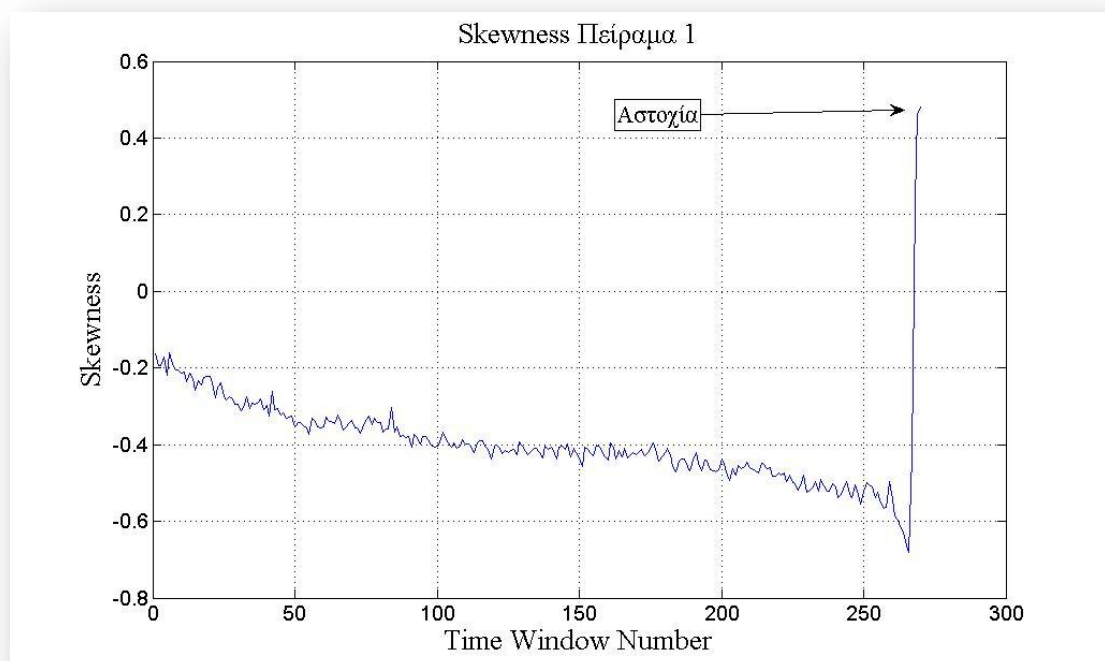
Εικόνα 2.4.2.12-Kurtosis Composition

2.4.1.6 Λοξότητα (Skewness)

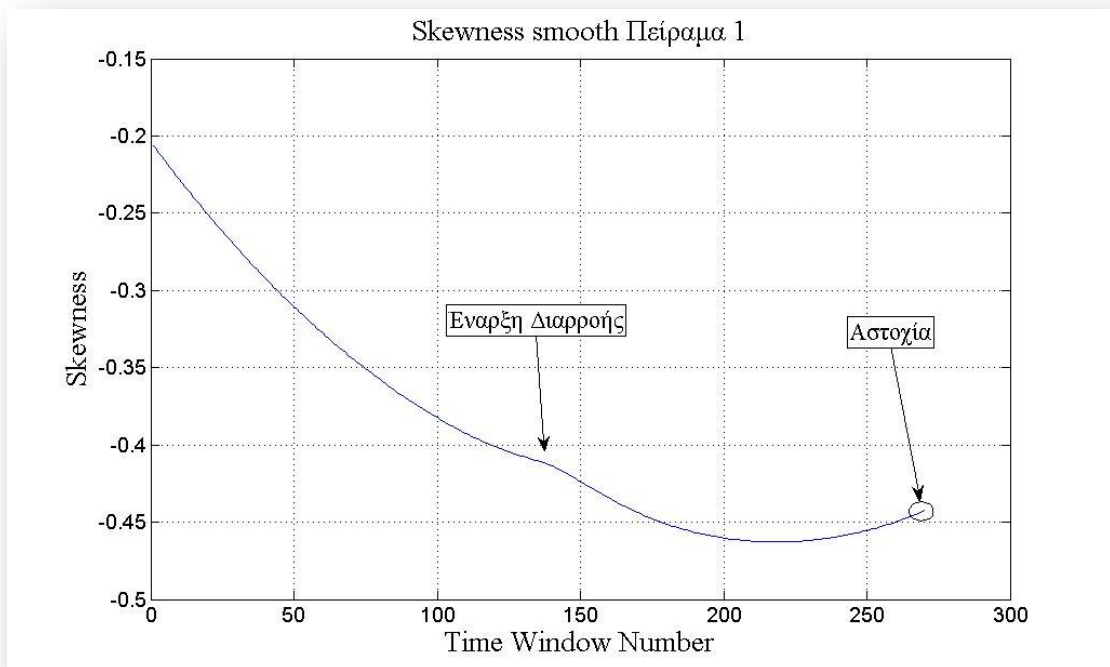
Ο βαθμός ασυμμετρίας μιας κατανομής ονομάζεται λοξότητα. Διακρίνεται σε θετική ή αρνητική, ανάλογα με την κατεύθυνση στην οποία βρίσκεται το μεγαλύτερο άκρο της σε σχέση με το μέγιστο της κατανομής. Η θετική και αρνητική λοξότητα λέγεται συχνά και λοξότητα προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά αντίστοιχα. Η **λοξότητα (Skewness)** υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

Όπου \bar{x} είναι ο αριθμητικός μέσος, s η τυπική απόκλιση, και n το πλήθος των δεδομένων ακριβώς όπως στις προηγούμενες στατιστικές συναρτήσεις.

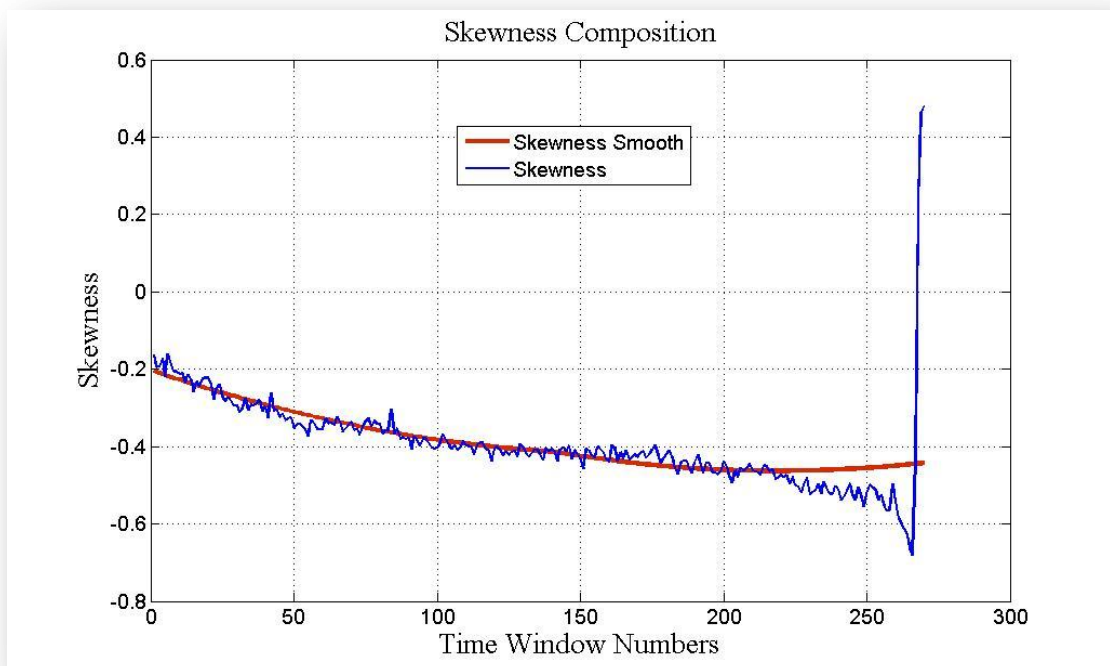
Στο διάγραμμα (εικόνα 2.4.2.13) παρατηρούμε ότι η τιμή της λοξότητας καθώς προχωράει χρονικά το πείραμα μειώνεται. Με την εντολή `smooth` γίνονται σαφή τα σημεία στα οποία αλλάζει η πλαστικότητα του δοκιμίου (εικόνα 2.4.2.14). Ακολουθεί και η σύνθεση των διαγραμμάτων (εικόνα 2.4.2.15).



Εικόνα 4.2.4.13-Λοξότητα



Εικόνα 2.4.2.14-Εξομαλυμένη Λοξότητα με χρήση εντολής Smooth



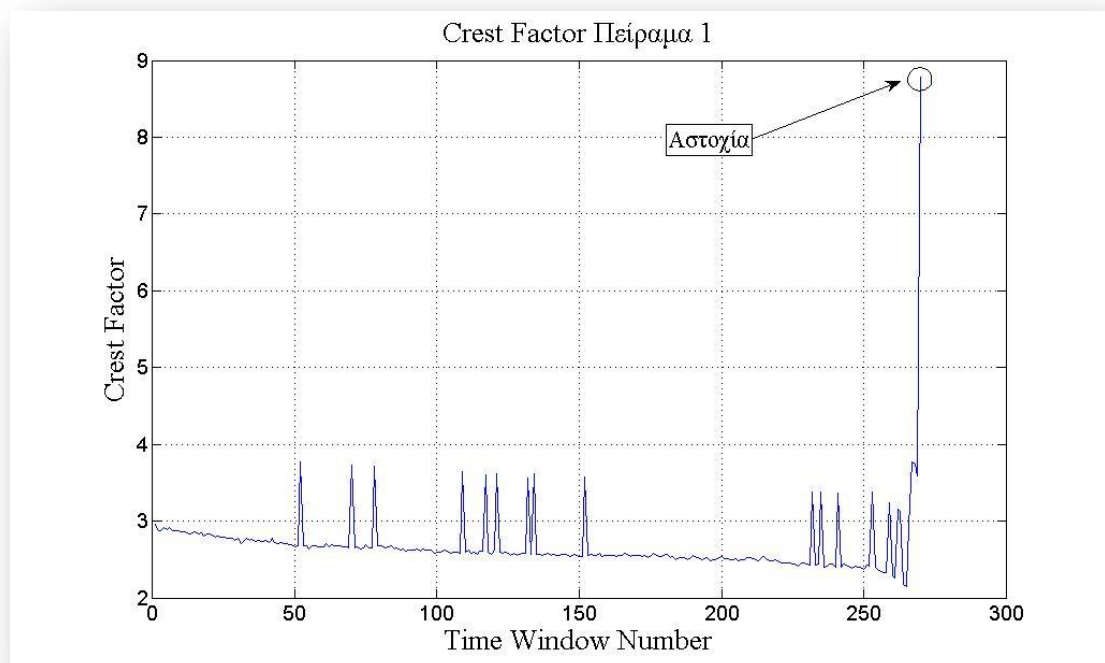
Εικόνα 2.4.2.15-Σύνθεση Λοξότητας

2.4.1.7 Συντελεστής κορυφής (Crest Factor)

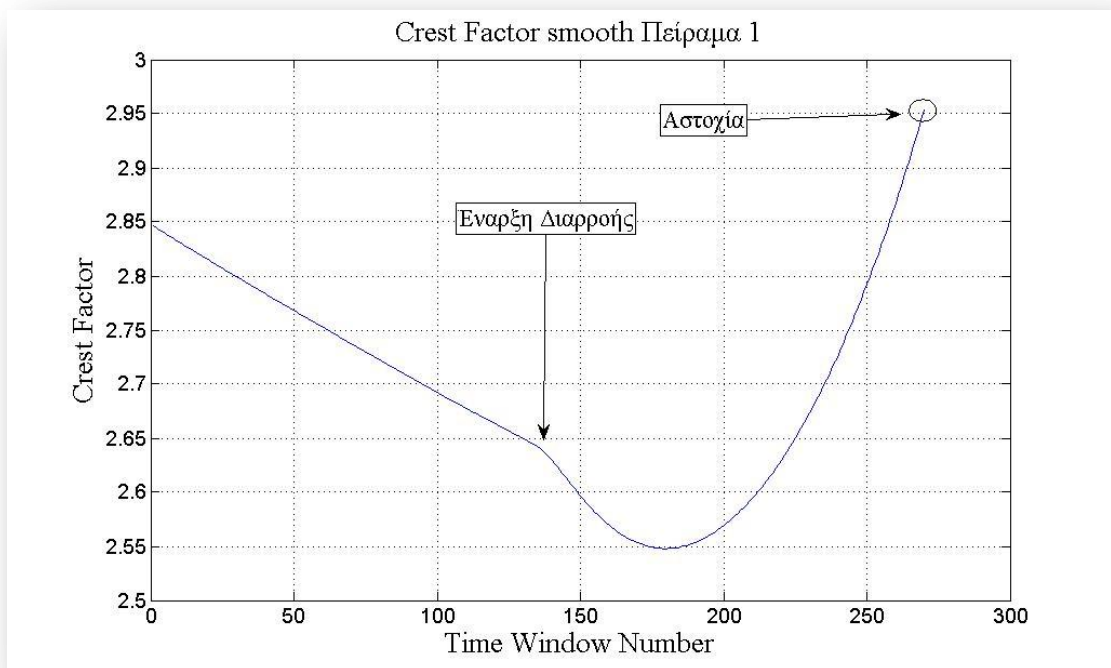
Ο **συντελεστής κορυφής Crest Factor** είναι η αναλογία της κορυφής του σήματος προς την μέση τετραγωνική τιμή RMS δηλαδή:

Crest Factor —————

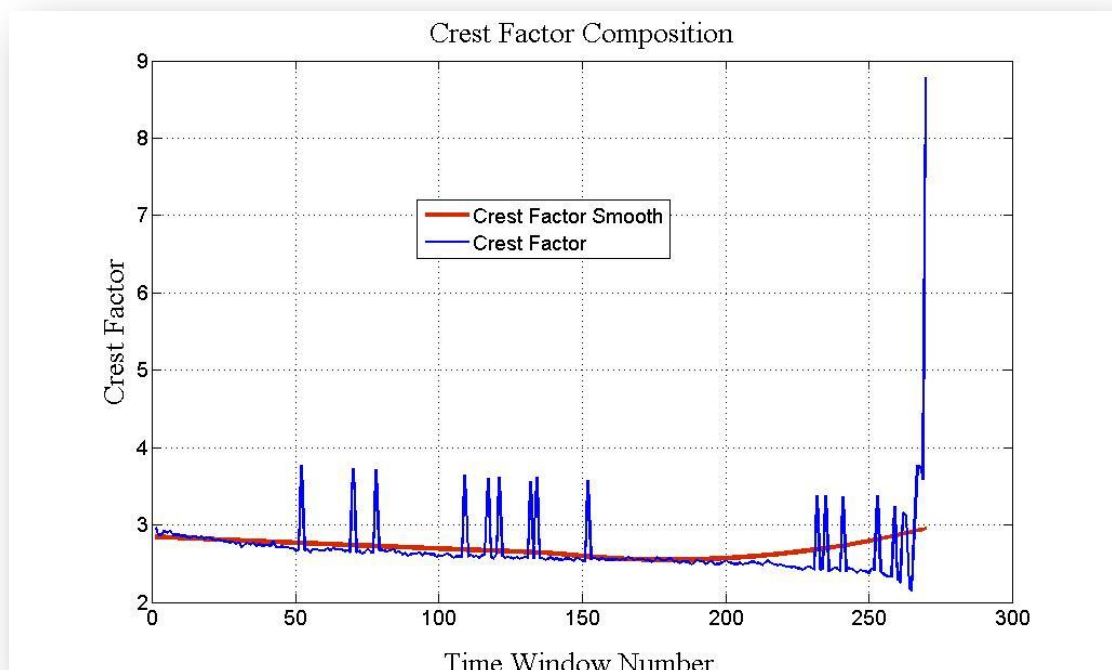
Σε φυσιολογική λειτουργία η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 2 και 6. Όπως βλέπουμε και στο κάτω διάγραμμα η τιμή του φτάνει σχεδόν το 19 όταν σπάει το δοκίμιο. Ο δείκτης αυτός υπό προϋπόθεση να αναλύει σήματα δονήσεων μιας μηχανολογικής εγκατάστασης και όποτε παίρνει τιμή πάνω από 6, σημαίνει ότι κάτι δεν λειτουργεί σωστά.



Εικόνα 2.4.2.16- Συντελεστής κορυφής (Crest Factor)



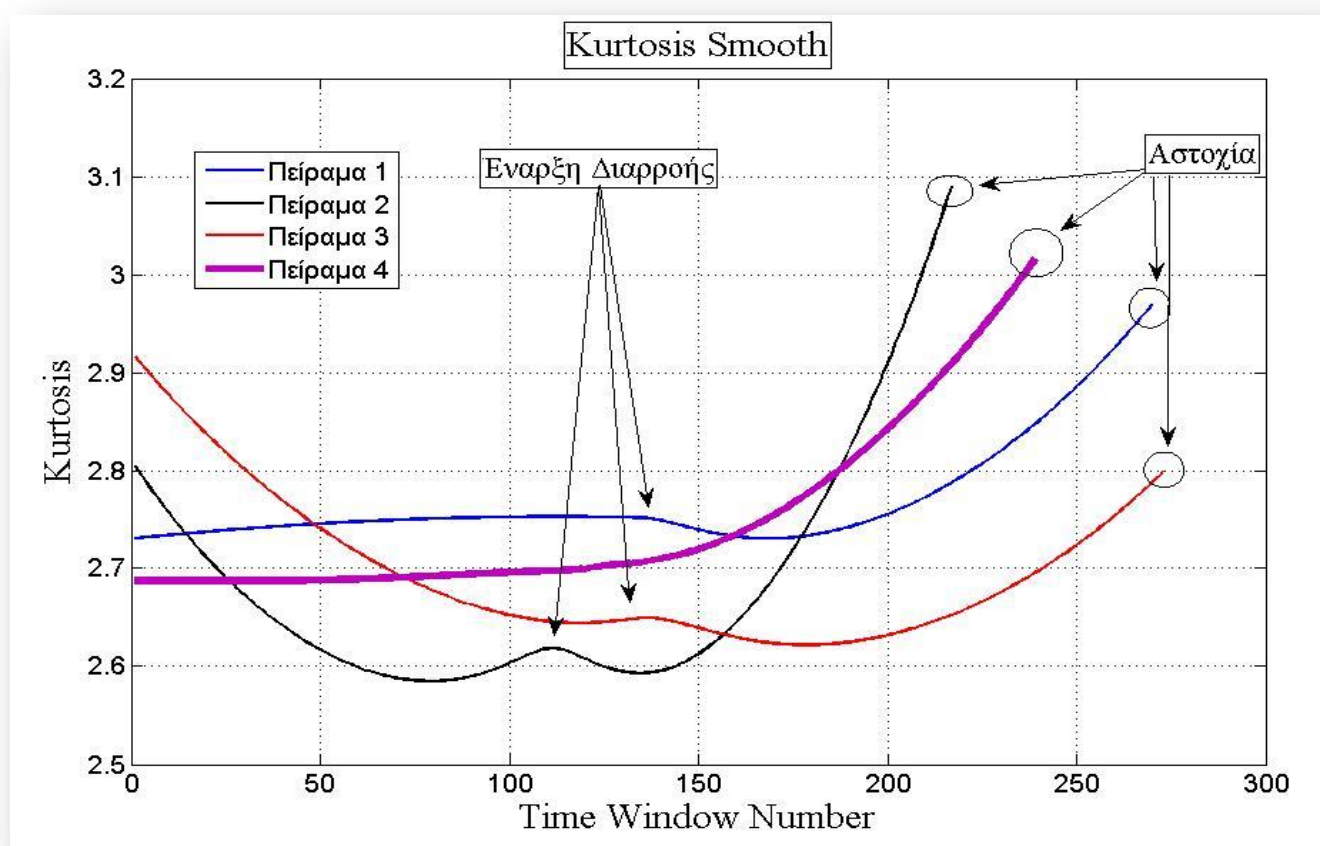
Εικόνα 2.4.2.17- Εξομαλυνμένος συντελεστής κορυφής (Crest Factor Smooth)



Εικόνα 2.4.2.18-Σύνθεση εξομαλυνμένου συντελεστή κορυφής (Crest Factor Composition)

2.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον δείκτη κυρτότητας

Σε αυτό το πεδίο της εργασίας παρουσιάζονται και συγκρίνονται σε ένα διάγραμμα (Εικόνα 2.4.3.1), τέσσερα πειράματα. Το πείραμα 1,2,3 έχουν τις ίδιες ακριβώς προδιαγραφές κατά την προβλεπόμενη διαδικασία και στο πείραμα 4 έχει γίνει καταγραφή σήματος με καλύτερη ποιότητα. Τα πειράματα 1,2,3 αξίζει να αποτυπωθούν, διότι παρατηρούμε ότι και στις ίδιες προδιαγραφές(τάσεις, συχνότητα περιστροφής, ανάλυση ηχητικού σήματος) παρουσιάζουν τα ίδια χαρακτηριστικά ,όσον αφορά την αλλαγή καμπυλότητας πάνω στην αλλαγή δομικών χαρακτηριστικών από τη έναρξη της διαρροής μέχρι και να φτάσουν στο όριο διαρροής και τέλος, να αστοχήσουν. Η αλλαγή της καμπυλότητας είναι εξαιρετικά πιο έντονη σε σχέση με το πείραμα 4, όπου έχει υψηλή ανάλυση και συγκεκριμένα 16 bit δηλαδή 65.536 διακριτά διαστήματα ανά δείγμα ενώ τα υπόλοιπα έχουν ανάλυση 8 bit (256 διακριτά διαστήματα ανά δείγμα). Η ανωμαλία (δείχνεται με βελάκι πάνω στο διάγραμμα), που παρουσιάζεται σε κάθε πείραμα χαμηλής ανάλυσης, πριν αλλάξει καμπυλότητα, δεν μπορεί να γίνει διακριτό στο πείραμα 4, που είναι υψηλής ανάλυσης. Αυτό συμβαίνει διότι με υψηλότερη ανάλυση έχουμε πολύ περισσότερη πληροφορία να επεξεργαστούμε, που συνεπάγεται με περισσότερο θόρυβο σε κάθε ηχητική χρονο-ιστορία που λαμβάνουμε από το κάθε πείραμα. Αυτό δυσκολεύει αρκετά την συνάρτηση μας να βγάλει ευδιάκριτα αποτελέσματα και ενώ θεωρητικά παίρνουμε περισσότερη πληροφορία, στην παρουσίαση του διαγράμματος υπάρχουν αντίθετα αποτελέσματα. Έτσι αποδεικνύουμε ότι με χαμηλότερης ανάλυσης δείγματα κερδίζουμε πληροφορία.



Εικόνα 2.4.3.1- Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον δείκτη κυρτότητας

2.5 Συμπεράσματα

Για την ολοκλήρωση του πειράματος και επαλήθευση της θεωρίας ως προς τα αποτελέσματα, εκτελέστηκαν 34 πειράματα κατά την προβλεπόμενη διαδικασία κόπωσης του δοκιμίου αλουμινίου. Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης του κάθε ηχητικού σήματος, που λάβαμε από ένα απλό μικρόφωνο, ήταν ικανοποιητικά. Σχεδόν όλα τα πειράματα ανταποκρίθηκαν στον κώδικα που εφαρμόσαμε. Η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία θα ήταν ενδιαφέρον να επεκταθεί στη μελέτη της συμπεριφοράς και άλλων τύπων μηχανολογικών στοιχείων όπως είναι τα έδρανα κύλισης, τροχαλίες, σε άλλους τύπους ατράκτων κ.α. Με επεξεργασία ηχητικού σήματος και με την προϋπόθεση πολύ χαμηλού κόστους, προσεγγίσαμε σε κάποιο βαθμό την πρόβλεψη της αστοχίας του δοκιμίου, δηλαδή μιας ατράκτου τύπου προβόλου σε κλίμακα. Έγινε διάγνωση της έναρξης της διαρροής του δοκιμίου για να μην φτάσει στο όριο του αστοχήσει, θα πρέπει να συντηρηθεί.

Βιβλιογραφία

1. Chenxing Shenga*, Zhixiong Lia, Li Qinb, Zhiwei Guoa, Yuelei Zhanga, “Recent Progress on Mechanical Condition Monitoring and Fault diagnosis” , 2011 Published by Elsevier Ltd.
2. A.Al-Habaibeh and R.M.Parkin “Low-Cost Mechatronic Systems for Teaching Condition Monitoring”, 2003 TEMPUS Publications
3. Arturo Garcia-Perez, Rene J. Romero-Troncoso, Eduardo Cabal-Yepez, Roque A. Osornio-Rios and Jose A. Lucio-Martinez “Application of high-resolution spectral-analysis for identifying faults in induction motors by means of sound”, Journal of Vibration and Control published online 18 October 2011
4. Διδακτορική διατριβή με θέμα «Πρόγνωση και διαγνωση βλαβων σε ηλεκτρομηχανικά συστήματα με συνδυασμένη επεξεργασία του σήματος στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας», Σ.Ι.Λουτρίδης- Δεκέμβριος 2003
5. Ian Howard A Review Of Rolling Element Bearing Vibration “Detection, Diagnosis and Prognosis”, Οκτώβριος 1994
6. Bankim Shikari , “Automation in Condition Based Maintenance Using Vibration Analysis”, Department of Mechanical Engineering, Maulana Azad National Institute of Technology, Bhopal, India 2004
7. Διπλωματική εργασία με θέμα «Προβλεπτική συντήρηση μηχανών με διάγνωση σφάλματος σε έδρανα κύλισης μέσω ανάλυσης FFT», Γιούργα Ηλιάνα- Απρίλιος 2012
8. Διπλωματική εργασία με θέμα «Μεθοδολογία συντήρησης μηχανών και σύγχρονες τάσεις», Τσώλη Ασημίνα- Νοέμβριος 2007
9. Joel Levitt , “Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance”, Industrial Press, USA 2003
10. Cornelius Scheffer, Paresh Girdhar, “Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance”, IDC Technologies 2004
11. Dimitris C. Tsantiotis, Theodore N. Costopoulos, and Ioannis S. Zotos , “Applied Methods of Maintenance by the Use of Test Rig Measurements”, Machine Elements Laboratory, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens 2006
12. John Morris , “Preventative Maintenance as a Means to Reduce Cost”, Tele-Workshop, Colorado Governor’s Office of Energy Management and Conversation 2006