



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΜΣ :Ανάλυση και διαχείριση Ενεργειακών Συστημάτων

Διπλωματική Εργασία

<<Ανάλυση & εκτίμηση αστοχίας βιομηχανικού εξοπλισμού αντλίας –
ηλεκτρικού κινητήρα με χρήση μετρήσεων>>

Μπλέτσας Ευάγγελος

ΑΜ: M010521005

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Δρ. Κερμανίδης Αλέξης

Μέλη εξεταστικής επιτροπής : Δρ. Μπουζάκης Εμμανουήλ,

Δρ. Χαϊδεμενόπουλος Γρηγόρης

Λάρισα , Σεπτέμβριος 2023

Γνωρίζοντας τις συνέπειες της λογοκλοπής, δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα εργασία αποτελεί προϊόν αυστηρά προσωπικής εργασίας και όλες οι πηγές που έχω χρησιμοποιήσει έχουν δηλωθεί κατάλληλα στις βιβλιογραφικές παραπομπές και αναφορές. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Ο ΔΗΛΩΝ

Βαγγέλης Μπλέτσας

[Υπογραφή φοιτητή]

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το θέμα αστοχίας του συστήματος ηλεκτρικού κινητήρα-αντλίας. Γίνεται περιγραφή μεθόδων ανίχνευσης αστοχιών και ανάλυσης των αστοχιών. Οι μέθοδοι οι οποίοι αναλύονται είναι η ανάλυση ταλαντώσεων ,η θερμογραφία, το Temperature Monitoring, η ανάλυση ελαίων λίπανσης, το MCSA, το ESA(Electrical Signal Analysis) έως εκμετάλλευση δεδομένων μέσω μεθόδων Machine Learning.

Η χρήση μεθόδων Machine Learning φέρνει αποτελέσματα σήμερα τα οποία μπορούν να προβλέψουν την αστοχία αρκετό καιρό πριν αυτή πραγματοποιηθεί. Γίνεται ανάλυση των μεθόδων με χρήση Regression, Classification, Clustering. Αντίστοιχα το Regression προβλέπει την αλγεβρική τιμή της εναπομένουσας ζωής του εξαρτήματος, το Classification χωρίζει τα δεδομένα σε δυαδικές τιμές 0,1 π.χ. ομαλή λειτουργία και λειτουργία με σφάλμα. Τέλος το Clustering ομαδοποιεί τα δεδομένα και υποδηλώνει σε ποια ομάδα αστοχίας ανήκουν τα δεδομένα που καταγράφονται. Δηλαδή μπορεί να υποδηλώσει αν το πρόβλημα είναι στο ρουλεμάν, το κιβώτιο ταχυτήτων κλπ.

Επίσης γίνεται ανάλυση των πιο γνωστών αστοχιών του συστήματος , αστοχία ρουλεμάν, αστοχία ηλεκτρικού κινητήρα, αστοχία κιβωτίου ταχυτήτων, αστοχία

αντλιών. Επιπλέον γίνεται ανάλυση μεθόδων αξιοπιστίας συστημάτων καθώς και ανάλυση των ειδών και των τύπων συντήρησης που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία.

ABSTRACT

This paper addresses the topic of electric motor-pump system failure. It provides a description of fault detection and analysis methods, including vibration analysis, thermography, temperature monitoring, lubricant analysis, motor current signature analysis (MCSA), electrical signal analysis (ESA), and the utilization of machine learning techniques.

The use of machine learning methods has yielded results that can predict failures well in advance of their occurrence. The methods are analyzed using regression, classification, and clustering. Regression predicts the algebraic value of the remaining component life, classification categorizes data into binary values (0, 1), for example, normal operation and operation with faults, while clustering groups data and indicates which fault category the recorded data belongs to, such as bearing, motor, gearbox, etc.

Furthermore, the paper includes an analysis of the most common failures in the system, including bearing failure, electric motor failure, gearbox failure, and pump failure. Additionally, it explores reliability analysis methods and examines the types of maintenance used in the industry.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο τέρμα αυτού του δρόμου και στους νέους οι οποίοι ανοίγονται, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου η οποία με στήριξε στην πορεία των σπουδών μου και με βοήθησε να φτάσω ως εδώ. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Κερμανίδη Αλέξη για τις οδηγίες του και την όλη υποστήριξη στο διάβα αυτής της διαδικασίας.

Βαγγέλης Μπλέτσας
Λάρισα, Σεπτέμβριος 2023

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ABSTRACT	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1. Ιστορική αναδρομή.....	8
1.2. Επιστημονική προσέγγιση και στόχοι	9
2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΛΙΕΣ	10
2.1. Αντλίες	10
2.2. Αντλητικά συστήματα.....	11
2.2.1. Αντλίες δυναμικού τύπου	14
2.2.2. Αρχές λειτουργίας	15
2.3. Ηλεκτρικές μηχανές.....	19
3. ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΞΟΠΛΙΣΜΩΝ	25
3.1. Μεθοδολογίες συντήρησης βιομηχανικού εξοπλισμού.....	25
3.2. Αξιοπιστία και διαθεσιμότητα βιομηχανικού εξοπλισμού	30
3.3. Χρήση μεθόδων Machine Learning στην βιομηχανική συντήρηση	39
4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ	44
4.1. Ανάλυση αστοχιών ηλεκτρικού κινητήρα	44

4.2. Πρόβλεψη και έγκαιρη αποκατάσταση των ζημιών	49
5. ΣΥΝΟΨΗ	58
5.1. Συμπεράσματα.....	58
REFERENCES	59

Αυτή η σελίδα παραμένει σκόπιμα κενή.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ιστορική αναδρομή

Οι αντλίες για την άντληση του νερού επινοήθηκαν πριν από τις κινητήριες μηχανές. Τα βασικά εξαρτήματα των αντλιών αυτών ήταν δοχεία, τα οποία βυθιζόταν μέσα στο νερό και μετά ανυψωνόταν με τη βοήθεια απλών μηχανών.

Η επινοήση του ανυψωτικού τροχού πρέπει να θεωρηθεί σαν ένα σημαντικό βήμα προόδου στην άντληση του νερού για άρδευση. Στην περιφέρεια ενός μεγάλου τροχού ήταν τοποθετημένα δοχεία, που βυθίζονταν στο νερό, γέμιζαν και καθώς ο τροχός περιστρεφόταν, ανέρχονταν και άδειαζαν μέσα στο αυλάκι αρδεύσεως. Ως ενέργεια για την περιστροφή του τροχού χρησιμοποιήθηκε η ανθρώπινη ή ζωική δύναμη και η δύναμη του ανέμου. Αργότερα ο ανυψωτικός τροχός μετατράπηκε σε «αυτοκινούμενος» με την προσθήκη πτερυγίων στην περιφέρειά του. Καθώς το νερό των ποταμών έρεε, ωθούσε τα πτερύγια και ο τροχός περιστρεφόταν για την ανύψωση των δοχείων. Άλλες διατάξεις για άντληση του νερού ήταν ο κοχλίας, η αλυσίδα με βύσματα και η χειροκίνητη παλινδρομική αντλία.

Εφευρέτης της φυγοκέντρου αντλίας θεωρείται ο Γάλλος Denis Papin, που το 1687 περιέγραψε ένα τύπο αντλίας της οποίας η αρχή λειτουργίας ήταν η ίδια με τις σημερινές φυγόκεντρους αντλίες. Στο πειραματικό μοντέλο αυτό η περωτή είχε δύο πλήρως ακτινικά πετυγία. Το 1705 κατασκεύασε ο ίδιος το μοντέλο της πρώτη φυγοκέντρου αντλίας για άντληση νερού. Το βασικό πρόβλημα εκείνης της εποχής ήταν η αποφυγή εισχώρησης αέρα στο εσωτερικό της αντλίας που διέκοπτε τη λειτουργία της. Ένα άλλο σημαντικό τεχνολογικό πρόβλημα ήταν το γεγονός ότι οι φυγοκεντρικές αντλίες απαιτούσαν σχετικά μεγάλες ταχύτητες περιστροφής στη άτρακτο που ήταν δύσκολο να επιτευχθεί την εποχή εκείνη καθώς και η ανάπτυξη αξιόπιστων ιμάντων και εδράνων έγινε αργότερα. Πάντως οι ανάγκες της εποχής καλύπτονταν με τις εμβολοφόρες αντλίες. Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των φυγοκεντρικών αντλιών σημειώνεται στο 1839 στις Η.Π.Α. οπότε ο W. D. Andrews πρόσθεσε σπειροειδές κέλυφος γύρω από την φυγοκεντρική περωτή. Η αντλία αξονικής ροής με περωτή τύπου έλικας παρουσιάστηκε από τον J. Skeys το 1875. Αργότερα κατασκευάστηκαν και άλλες φυγόκεντροι αντλίες με μικρές βελτιώσεις, αλλά ο βαθμός αποδόσεώς τους ήταν πολύ μικρός.

1.2. Επιστημονική προσέγγιση και στόχοι

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, σκοπός είναι ανίχνευση αστοχιών σε βιομηχανικούς εξοπλισμούς και συγκεκριμένα στο σύστημα ηλεκτρικού κινητήρα-αντλίας. Γίνεται περιγραφή μεθόδων ανίχνευσης αστοχιών και ανάλυσης των αστοχιών. Από μεθόδους ανάλυσης ταλαντώσεων , Θερμογραφία, Temperature Monitoring, ανάλυση ελαίων λίπανσης, MCSA, ESA(Electrical Signal Analysis) [1],[2] έως εκμετάλλευση δεδομένων μέσω μεθόδων Machine Learning. Στην **εικόνα 1.1** φαίνεται διάταξη αντλίας και ηλεκτρικού κινητήρα σε βιομηχανικό χώρο όπως μας ενδιαφέρει η εφαρμογή στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 1.1: Αντλητικό σύστημα στη βιομηχανία

2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΛΙΕΣ

2.1. Αντλίες

Οι αντλίες είναι οι μηχανικοί εξοπλισμοί οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την μεταφορά ρευστών σε μεγαλύτερη πίεση σε μεγαλύτερο υψόμετρο ή και τα δύο. Αυτό το κατορθώνουν μέσω της αύξησης της μηχανικής ενέργειας των ρευστών, δηλαδή της πίεσης και της ταχύτητας. Οι συνηθέστεροι λόγοι για τους οποίους μπορεί να χρειαστεί να αυξηθεί η μηχανική ενέργεια ενός ρευστού είναι [1][3][4]:

- μεταφορά του ρευστού από ένα σημείο σε άλλο, π.χ. εκφορτώσεις/φορτώσεις προϊόντων, μεταφορά προϊόντων εντός μονάδων ή μεταξύ μονάδων, κυκλοφορία βοηθητικών παροχών βιομηχανικής εγκατάστασης.
- αύξηση της πίεσης, προκειμένου να ακολουθήσει μια διεργασία η οποία απαιτεί υψηλότερη πίεση
- ανάμιξη υγρών μέσω διέλευσης από βάννα που παράγει πτώση πίεσης

- ανάδευση στερεών στον πάτο δεξαμενών μέσω ακροφυσίων ανάδευσης
- δημιουργία ψεκασμού του υγρού μέσα από βαλβίδες εκκένωσης, π.χ. sprinkler καταιονισμού, ή βαλβίδες εκκένωσης για ξήρανση υγρών (spray dryer)

Η αντίθετη εφαρμογή των αντλιών είναι οι υδροστροβίλοι, οι οποίοι αναλαμβάνουν να μεταφέρουν την κινητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε ένα υγρό σε οποιαδήποτε άλλη μηχανική χρήση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τα υδροηλεκτρικά φράγματα που αξιοποιούν τις υδατοπτώσεις για παραγωγή ηλεκτρισμού.

2.2. Αντλητικά συστήματα

Μια διάταξη αντλητικού συστήματος αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Η αντλία

Διαχειρίζεται το υγρό και του προσδίδει μηχανική ενέργεια, την οποία λαμβάνει σαν περιστροφική κίνηση από τον άξονά της μέσω του ηλεκτροκινητήρα.

- Σύστημα φραγής (Sealing)

Φροντίζει την στεγανοποίηση του αντλούμενου υγρού ώστε να παραμένει μέσα στην αντλία και να μην διαρρέυσει προς το περιβάλλον από το διάκενο μεταξύ άξονα και κελύφους.

- Σύστημα λίπανσης

Πολλές αντλίες περιλαμβάνουν σύστημα λίπανσης για τα έδρανα με δεξαμενή λιπαντικού, κυκλοφορητή και ψυγείο. Ιδιαίτερα οι μεγάλες αντλίες σε διυλιστήρια, ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς κλπ. μπορεί να έχουν ξεχωριστή αντλία για την κίνηση των λαδιών στο σύστημα λίπανσης των εδράνων και ξεχωριστή αντλία για το σύστημα ψύξης των λαδιών μέσω εναλλάκτη με ψυκτικό υγρό.

- Κινητήρας

Προσδίδει στο σύστημα τη μηχανική ενέργεια περιστροφής την οποία χρειάζεται. Μπορεί να είναι ηλεκτροκινητήρας ή ατμοστρόβιλος ή συνδυασμός ηλεκτροκινητήρα με υδροστρόβιλο με κοινή σύμπλεξη, ή κάποιο είδος μηχανής εσωτερικής καύσης ή ακόμα και αεριοστρόβιλος. Σκοπός είναι η πρόσδοση μηχανικής ενέργειας η οποία θα μετατραπεί σε περιστροφική.

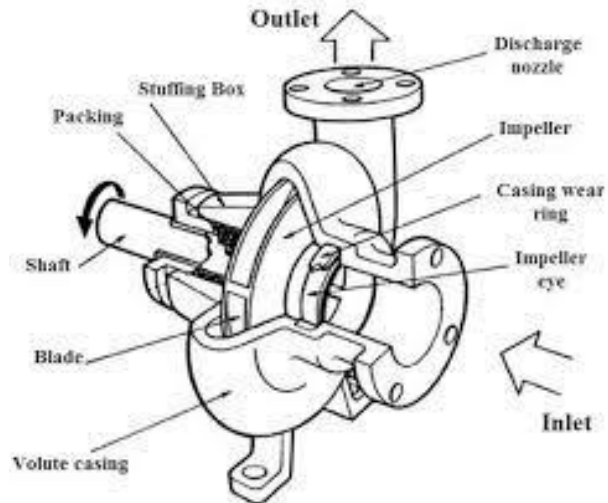
- Σύστημα μετάδοσης

Αναλαμβάνει να μεταφέρει την κίνηση από τον κινητήρα στην αντλία. Σε μια απλή διάταξη μπορεί να είναι 2 άξονες ένα από την πλευρά του κινητήρα και ένας από την πλευρά της αντλίας οι οποίοι ενώνονται μεταξύ τους με έναν σύνδεσμο (κόμπλερ).

Ένα αντλητικό σύστημα ενσωματώνεται σε ένα κύκλωμα σωληνώσεων προκειμένου να εκτελέσει τη λειτουργία η οποία επιθυμείται. Προ της αντλίας υπάρχει το κύκλωμα αναρρόφησης το οποίο παρέχει υγρό στην αντλία στην επιθυμητή παροχή και πίεση [4]. Μετά την αντλία υπάρχει το κύκλωμα κατάθλιψης το οποίο παραλαμβάνει το συμπιεσμένο υγρό στην υψηλή πίεση, ρυθμίζει την παροχή και το οδηγεί στον προορισμό του. Η ρύθμιση της παροχής εξαρτάται είτε από τις στροφές του κινητήρα είτε από ρυθμιστική βάννα στην κατάθλιψη της αντλίας.

Οι αντλίες χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες :

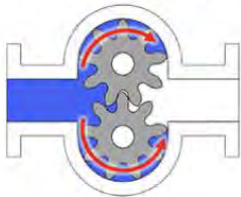
- **Τις Δυναμικές ή κινητικού τύπου:** Η μηχανική ενέργεια μεταφέρεται στο υγρό με μορφή αυξημένης ταχύτητας στην συνέχεια η ταχύτητα μειώνεται και από την Αρχή διατήρησης της ενέργειας αυξάνεται η πίεση.



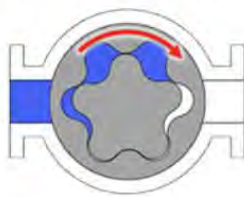
Εικόνα 2.1: Αντλία δυναμικού τύπου (φυγοκεντρική)

- Της **θετικής εκτόπισης ή στατικού τύπου**: Το υγρό εγκλωβίζεται σε στεγανό χώρο και του ασκείται δύναμη ώστε να μεταβεί σε υψηλότερη πίεση.

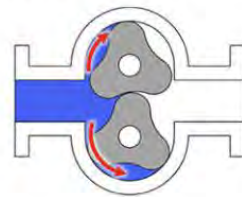
External Gear Pump



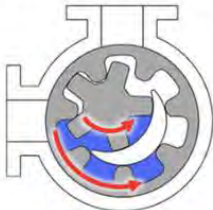
Gerotor Pump



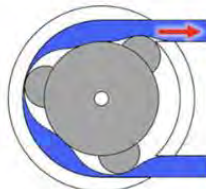
Lobe Pump



Internal Gear Pump



Peristaltic Pump



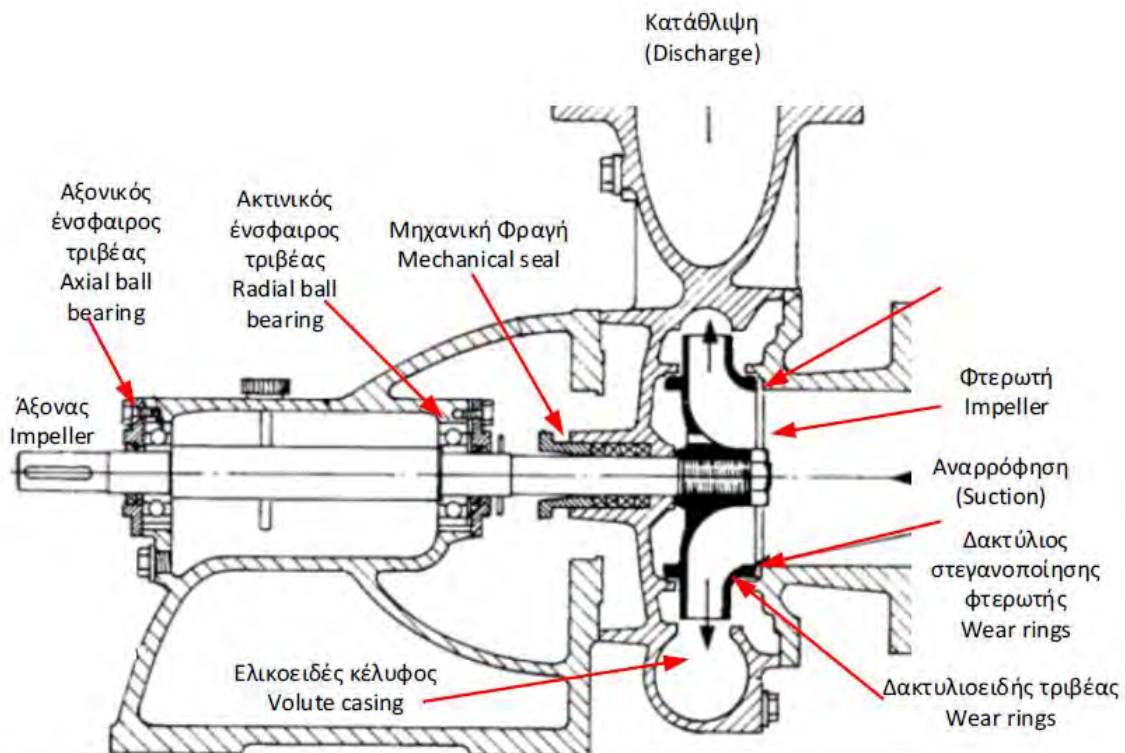
Vane Pump



Εικόνα 2.2: Τύποι ειδών αντλίας θετικής εκτόπισης (Positive displacement pumps)

2.2.1. Αντλίες δυναμικού τύπου

Ο πιο χαρακτηριστικός τύπος αντλίας δυναμικού τύπου είναι η φυγοκεντρική αντλία και είναι αυτή η οποία συναντάται πιο συχνά στην βιομηχανία σε πολλές εφαρμογές. Στην **εικόνα 2.3** φαίνονται όλα τα κύρια μέρη της φυγοκεντρικής αντλίας, τα οποία είναι:



Εικόνα 2.3: Τομή φυγοκεντρικής αντλίας

- **Φτερωτή (Impeller):** Μέσω της περιστροφής της επιτυγχάνεται η επιτάχυνση του υγρού.

- **Κέλυφος (volute):** Βάσει της γεωμετρίας του σε συνδυασμό με την φτερωτή οδηγεί το υγρό από την αναρρόφηση (είσοδο χαμηλής πίεσης) , στην κατάθλιψη (έξοδο υψηλής πίεσης).
- **Άξονας** Μεταφέρει την κίνηση από τον κινητήρα στην φτερωτή.
- **Ένσφαιροι τριβείς (ρουλεμάν).** Υπάρχουν τουλάχιστον ένας ακτινικός και ένα αξονικός για να παραλάβουν τις αντίστοιχες δυνάμεις. Πέρα από το βάρος του συστήματος, υπάρχουν και οι δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται λόγω της λειτουργίας του.
- **Μηχανική φραγή** ελαχιστοποιεί και διαχειρίζεται την όποια διαρροή μεταξύ άξονα και κελύφους. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι φραγής

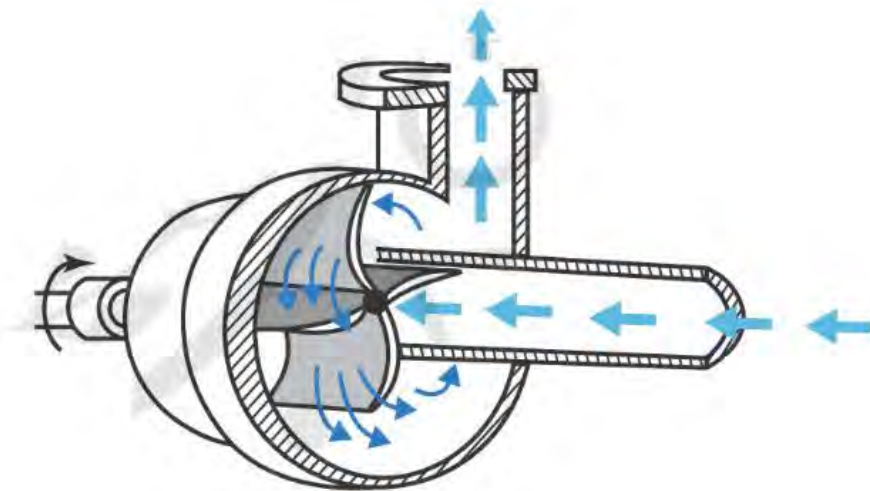
2.2.2. Αρχές λειτουργίας

Το υγρό εισέρχεται κάθετα στο κέλυφος της αντλίας και συναντάει το κέντρο της περιστρεφόμενης φτερωτής impeller (impeller). Η φτερωτή αλλάζει την φορά της κατεύθυνσης της ροής (από το κέντρο προς την περιφέρεια) και μέσω της γεωμετρίας των επιφανειών του impeller αυξάνεται η ταχύτητα του υγρού.

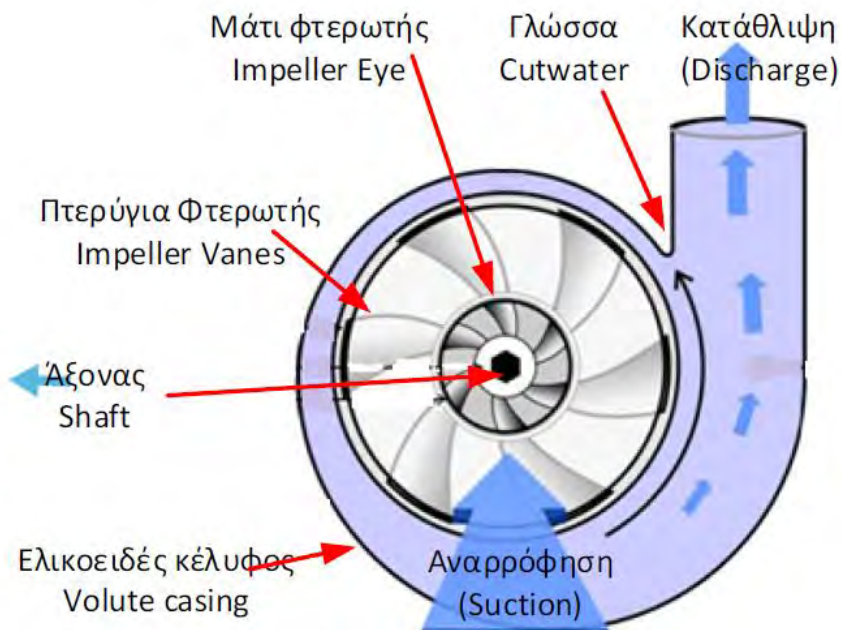


Εικόνα 2.4: Παράδειγμα φτερωτής-Impeller ανοιχτού τύπου

Το υγρό συναντά την περίμετρο του κελύφους (volute), όπου η κατεύθυνση της ροής αλλάζει από ακτινική σε περιστροφική. Η περιφέρεια του κελύφους έχει ελικοειδή διαμόρφωση για να συλλέξει το υγρό και να το οδηγήσει στην έξοδο. Σε αυτή τη διαδρομή η ταχύτητα μειώνεται σταδιακά και η πίεση αυξάνεται αντίστοιχα, για να διατηρηθεί σταθερή η μηχανική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο υγρό. Στο τέλος της ελικοειδούς διαδρομής, υπάρχει εμπόδιο στη ροή (γλώσσα – cutwater), που εμποδίζει την επανάληψη του στροβιλισμού και οδεύει το υγρό προς την έξοδο. Στην έξοδο η διατομή μειώνεται και η αυξημένη ταχύτητα μετατρέπεται σε αυξημένη πίεση.

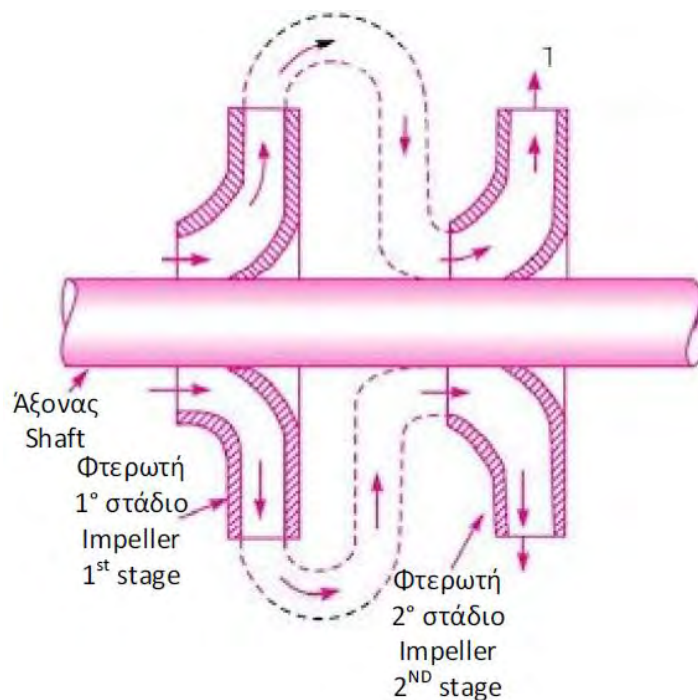


Εικόνα 2.5: Αλλαγή κατεύθυνσης της ροής και μετατροπή της από αξονική σε ακτινική



Εικόνα 2.6: Χαρακτηριστικά φτερωτής και κελύφους φυγοκεντρικής αντλίας

Σε πολλές βιομηχανίες μπορεί να χρειαστούν ρευστά σε πολύ υψηλή πίεση. Για παράδειγμα σε έναν θερμοηλεκτρικό σταθμό για την υψηλή πίεση του νερού που πρόκειται να γίνει ατμός το νερό θα πρέπει να συμπιεστεί πρώτα στα 170bar. Ένας διαδεδομένος τρόπος είναι να συνδυαστούν πολλά στάδια άντλησης στο ίδιο μηχάνημα, οπότε έχουμε μια πολυσταδιακή (multistage) αντλία. Με αυτό τον τρόπο περιορίζεται η διάμετρος της φτερωτής για να προκύψει διαχειρίσιμη κατασκευή. Υπάρχει μία αναρρόφηση στο πρώτο στάδιο και μια κατάθλιψη στο τελευταίο, ενώ η παροχή από στάδιο σε στάδιο οδεύει μέσω διαμόρφωσης του κελύφους (εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7: Γεωμετρία πολυσταδιακής αντλίας

Οι ακτινικές δυνάμεις που οφείλονται στο σχήμα του κελύφους, οι διαφορές ζυγοστάθμισης του άξονα, μαζί με το βάρος του συστήματος, κατανέμονται στα ακτινικά έδρανα (ένσφαιροι τριβείς). Σε περίπτωση που αυξηθεί υπέρμετρα κάποια από αυτές τις δυνάμεις, παρατηρούμε αύξηση του επιπέδου των δονήσεων. Στις μεγάλες αντλίες αυτές οι δονήσεις (vibration) παρακολουθούνται συνεχώς από αισθητήριο όργανο. Σε περίπτωση υπέρβασης σταματάει αυτόματα την αντλία για αποφυγή καταστροφικής βλάβης.

2.3. Ηλεκτρικές μηχανές

Οι ηλεκτρικές μηχανές είναι συσκευές που μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια. Αυτές οι μηχανές αποτελούν σημαντικό κομμάτι του μηχανολογικού και ηλεκτρολογικού κόσμου και χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπως σε ηλεκτρικά οχήματα, βιομηχανικές μηχανές, οικιακές συσκευές, ανεμιστήρες, αντλίες, και άλλα [5],[6].

Οι ηλεκτρικές μηχανές κατηγοριοποιούνται συνήθως σε δύο βασικές κατηγορίες:

Κινητήρες: Οι κινητήρες μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική κίνηση. Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους, μπορούν να είναι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) ή κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC). Οι κινητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές, αλλά και στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και μηχανάκια.

Γεννήτριες: Οι γεννήτριες μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, όπως στην παραγωγή ηλεκτρισμού από αιολικά πάρκα ή υδροηλεκτρικές δεξαμενές.

Οι ηλεκτρικές μηχανές μπορούν να βασίζονται σε διάφορες αρχές λειτουργίας, όπως ηλεκτρομαγνητισμός, μαγνητική απόρροια, ηλεκτροστατική φόρτιση, περιστροφική ενέργεια, κ.ά. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι ηλεκτρικές μηχανές έχουν γίνει πιο αποδοτικές και οικολογικές, με την χρήση προηγμένων υλικών και σχεδιασμών. Στο μέλλον, αναμένεται να συνεχίσουν να αποτελούν βασικό μέρος των βιώσιμων λύσεων για την κίνηση και την κατανάλωση ενέργειας.

Οι σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές αναφέρονται κυρίως στις προηγμένες εκδόσεις των κλασικών ηλεκτρικών μηχανών, όπως οι σύγχρονοι κινητήρες και γεννήτριες. Αυτοί οι κινητήρες και γεννήτριες έχουν βελτιστοποιηθεί ως προς την απόδοση, την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία [8].

Οι σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες:

- **Σύγχρονοι κινητήρες:**

Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC): Οι σύγχρονοι κινητήρες DC συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται ακρίβεια στον έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής. Χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, σε μηχανήματα CNC, ανελκυστήρες και ορισμένα οχήματα.

Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC): Οι κινητήρες AC είναι η πιο διαδεδομένη κατηγορία κινητήρων και μπορούν να χωριστούν σε διάφορους τύπους, όπως οι κινητήρες μεταβλητής συχνότητας (VFD), οι κινητήρες συγχρονισμού, κ.ά. Οι κινητήρες AC χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές και σε οικιακές συσκευές.

- **Σύγχρονες γεννήτριες:**

Οι σύγχρονες γεννήτριες λειτουργούν με βάση τον ίδιο τρόπο με τις παραδοσιακές γεννήτριες, δημιουργώντας ηλεκτρική ενέργεια μέσω μετατροπής μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές παραγωγής ενέργειας.

Επαγωγικοί κινητήρες

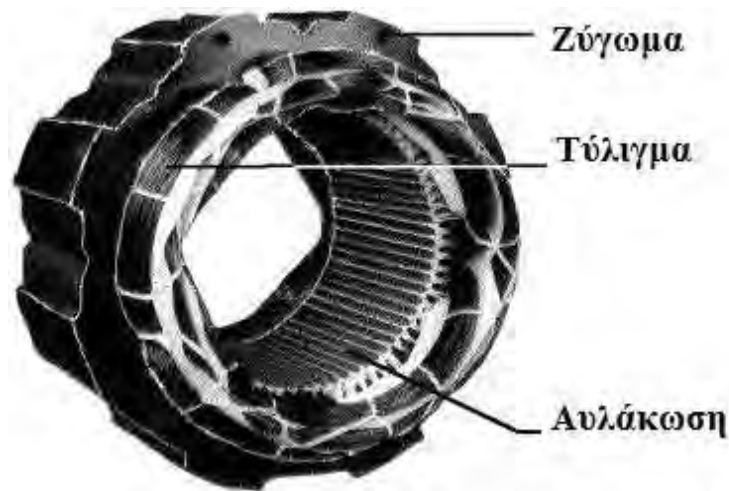
Οι επαγωγικοί κινητήρες είναι ο τύπος κινητήρων που αποτελούνται από έναν στάτορα και έναν δρομέα, και λειτουργούν βασιζόμενοι στην αρχή της επαγωγής. Αυτοί οι κινητήρες είναι οι πιο κοινοί και διαδεδομένοι τύποι κινητήρων που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανικές και οικιακές εφαρμογές.

Ο τρόπος λειτουργίας των επαγωγικών κινητήρων βασίζεται στον νόμο της επαγωγής του Faraday. Σύμφωνα με αυτόν τον νόμο, όταν μια μεταβαλλόμενη μαγνητική τάση περνά μέσα από ένα αγωγίμο σύρμα, προκαλείται επαγωγικό ρεύμα στο σύρμα. Αυτό δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από το σύρμα.

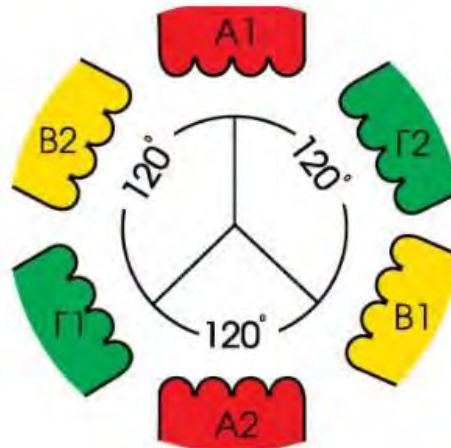
Στους επαγωγικούς κινητήρες, ο στάτορας είναι το σταθερό μέρος και περιέχει τρεις φάσεις αγωγίμων πηνίων που τροφοδοτούνται από ένα τριφασικό σύστημα.

Ο δρομέας ή ρότορας βρίσκεται μέσα στο στάτορα και είναι κινητός. Όταν τροφοδοτείται με τριφασικό ρεύμα, ο στάτορας προκαλεί ένα περιστροφικό μαγνητικό πεδίο περιμετρικά του δρομέα. Αυτό προκαλεί επαγωγικό ρεύμα στον δρομέα και, σύμφωνα με το νόμο του Lenz, το επαγωγικό ρεύμα δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που αντιδρά αντίθετα προς τη μεταβαλλόμενη μαγνητική τάση του στάτορα. Αυτή η αντίδραση τείνει να συγχρονίσει τον δρομέα με την μαγνητική τάση του στάτορα και προκαλεί την περιστροφική κίνησή του.

Οι επαγωγικοί κινητήρες είναι αξιόπιστοι και έχουν απλή κατασκευή, κάνοντάς τους κατάλληλους για πολλές εφαρμογές, όπως σε βιομηχανικές μονάδες παραγωγής, ανελκυστήρες, αντλίες, αλλά και σε οικιακές συσκευές, όπως πλυντήρια ρούχων και ανεμιστήρες.

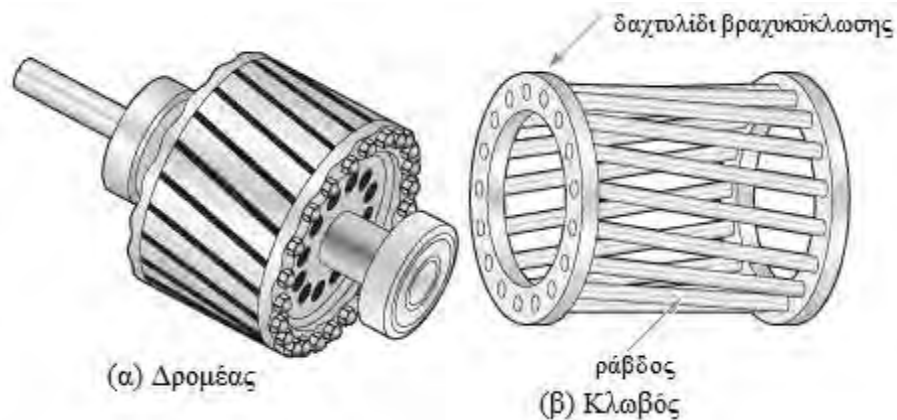


Εικόνα 2.8: Στάτορας κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα



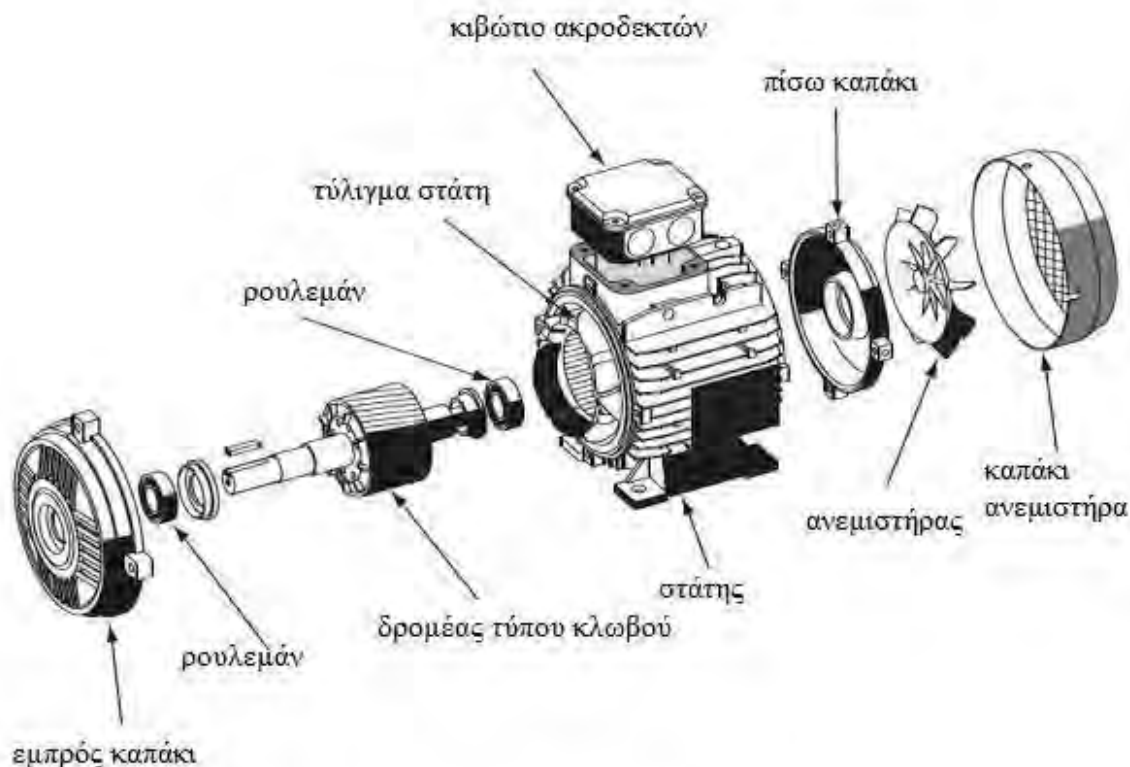
Εικόνα 2.9: Τυλίγματα κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα

Ο κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα αποτελείται από τον στάτη, τον δρομέα και τα μέρη τους. Τα μέρη του στάτη είναι το ζύγωμα, το επαγωγικό τύμπανο το οποίο περιλαμβάνει τον πυρήνα και το τριφασικό τύλιγμα, τα καπάκια αλλά και το κιβώτιο ακροδεκτών. Ο δρομέας αποτελείται από τον άξονα, το επαγωγικό τύλιγμα το οποίο περιλαμβάνει τον πυρήνα μαζί με αυτό του κλωβού, και τον ανεμιστήρα. Ο πυρήνας του δρομέα κατασκευάζεται από ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση των υλικών. Η γεωμετρία των οδοντώσεων του πυρήνα ποικίλει, επηρεάζοντας παράλληλα την λειτουργία του κινητήρα ανάλογα με τον τύπο που χρησιμοποιείται. Το τύλιγμα του κλωβού είναι ράβδοι πάνω στις οποίες υλοποιείται το φαινόμενο της επαγωγής με τα δαχτυλίδια βραχυκύκλωσης να ενώνουν τις ράβδους σχηματίζοντας έτσι τον κλωβό. Οι ράβδοι παρουσιάζουν μια ελαφρά κλίση σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Το υλικό με το οποίο κατασκευάζεται το τύλιγμα του κλωβού είναι χαλκός, μπρούτζος και αλουμίνιο. Στην **εικόνα 2.10** φαίνεται ο κλωβός και ολόκληρος ο δρομέας των κινητήρων αυτού του τύπου.



Εικόνα 2.10: Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα

Όσο μικρότερο είναι το διάκενο, τόσο καλύτερη είναι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Ένα τυπικό το διάκενο για έναν κινητήρα ισχύος μέχρι 10kW κυμαίνεται από 0.35-0.5mm.

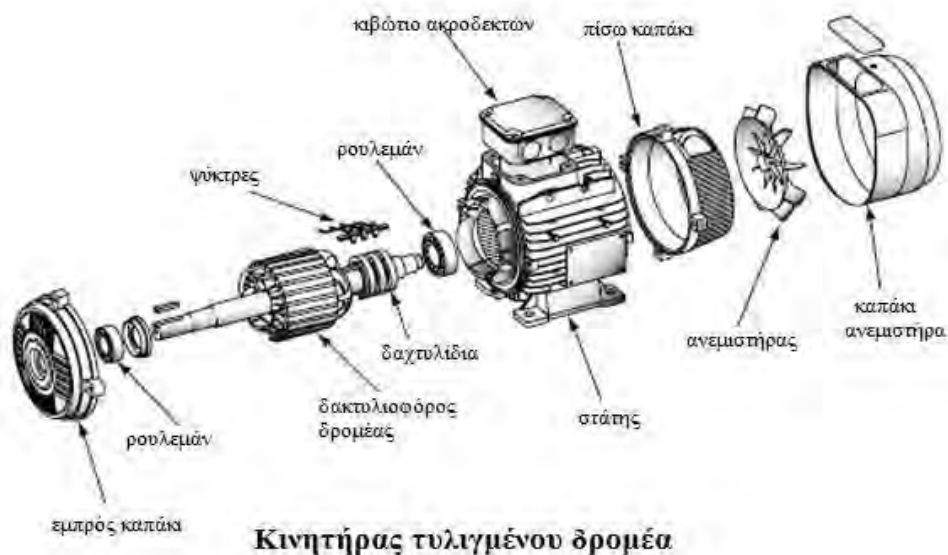


Κινητήρας βραχυκλωμένου δρομέα

Εικόνα 2.11: Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα

Οι επαγωγικοί κινητήρες τυλιγμένου δρομέα ή δακτυλιοφόροι κινητήρες αποτελούνται από τα μέρη του στάτη και του δρομέα τους. Ο στάτης περιλαμβάνει το ζύγωμα, το επαγωγικό τύμπανο που περιέχει τον πυρήνα και το τριφασικό τύλιγμα, τα καπάκια και το κιβώτιο των ακροδεκτών. Μερικές φορές μπορεί να υπάρχει στον στάτη και σύστημα ανύψωσης ψηκτρών. Ουσιαστικά το σύστημα αυτό μπορεί να μετατρέψει τον δακτυλιοφόρο κινητήρα σε έναν κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα. Δηλαδή ανυψώνοντας τις ψήκτρες δεν υπάρχει επαφή με τα δαχτυλίδια τα οποία ταυτόχρονα βραχυκυκλώνονται. Ο δρομέας αποτελείται από τα μέρη του άξονα και του τυμπάνου το οποίο αποτελείται από τον πυρήνα, το τύλιγμα των 3 φάσεων το οποίο είναι σε σύνδεση αστέρα και τα δαχτυλίδια τα οποία τοποθετούνται στον άξονα κίνησης (**εικόνα 2.12**).

Στους κινητήρες τυλιγμένου δρομέα τα τυλίγματα του δρομέα είναι παρόμοια με τα κατανεμημένα τυλίγματα του στάτη. Οι ακροδέκτες των τυλιγμάτων συνδέονται στα δαχτυλίδια. Οι δακτύλιοι αυτοί είναι απομονωμένοι ο ένας από τον άλλο αλλά και από τον άξονα του δρομέα. Στα τυλίγματα του δρομέα συνδέονται, μέσω των δακτυλίων, βαθμίδες εξωτερικών αντιστάσεων με σκοπό την αύξηση ροπής εκκίνησης, και περιορισμό του ρεύματος εκκίνησης και παράλληλα περιορίζεται η ταχύτητα του κινητήρα κατά την εκκίνηση.



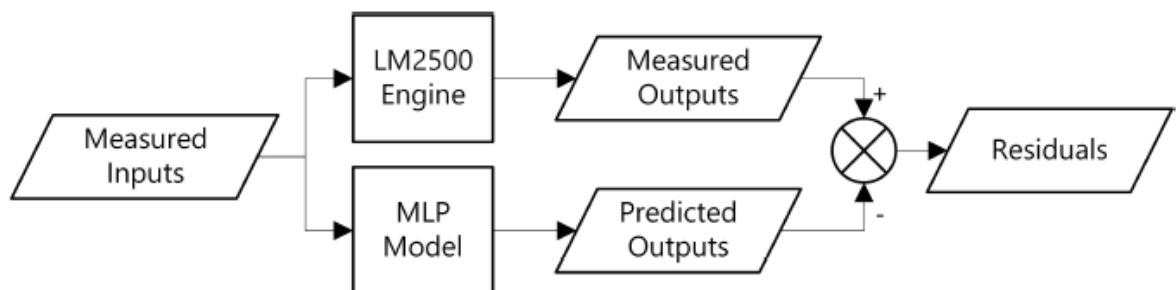
Εικόνα 2.12: Κινητήρας τυλιγμένου δρομέα

3. ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΞΟΠΛΙΣΜΩΝ

3.1. Μεθοδολογίες συντήρησης βιομηχανικού εξοπλισμού

Condition Monitoring

Η παρακολούθηση της κατάστασης (Condition monitoring - CM) είναι η διαδικασία παρακολούθησης ενός ή περισσότερων παραμέτρων κατάστασης για ένα σύστημα, προκειμένου να ανιχνευθούν αποκλίσεις που ενδέχεται να οφείλονται σε μια βλάβη. Με την ανίχνευση της βλάβης σε ένα πρώιμο στάδιο, η συντήρηση μπορεί να προγραμματιστεί και επομένως η παρακολούθηση της κατάστασης είναι σημαντικό μέρος της προληπτικής συντήρησης και της προβλεπτικής συντήρησης [2]. Η παρακολούθηση της κατάστασης δεν προβλέπει τη βλάβη· βοηθά μόνο στην πρόβλεψη του χρόνου μέχρι την εμφάνιση της βλάβης. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί μια απόκλιση από μια αναφορική τιμή (π.χ. θερμοκρασία ή συμπεριφορά δόνησης) για να ανιχνευθούν απειλούμενες βλάβες. Αυτά τα όρια μπορεί να προέλθουν είτε από ποσοτικές είτε από ποιοτικές μεθόδους, μεθόδους βασισμένες στα δεδομένα ή απλώς από την εμπειρία μόνη της. Στην **εικόνα 3.1** φαίνεται η αρχιτεκτονική ενός συστήματος με χρήση Condition Monitoring.

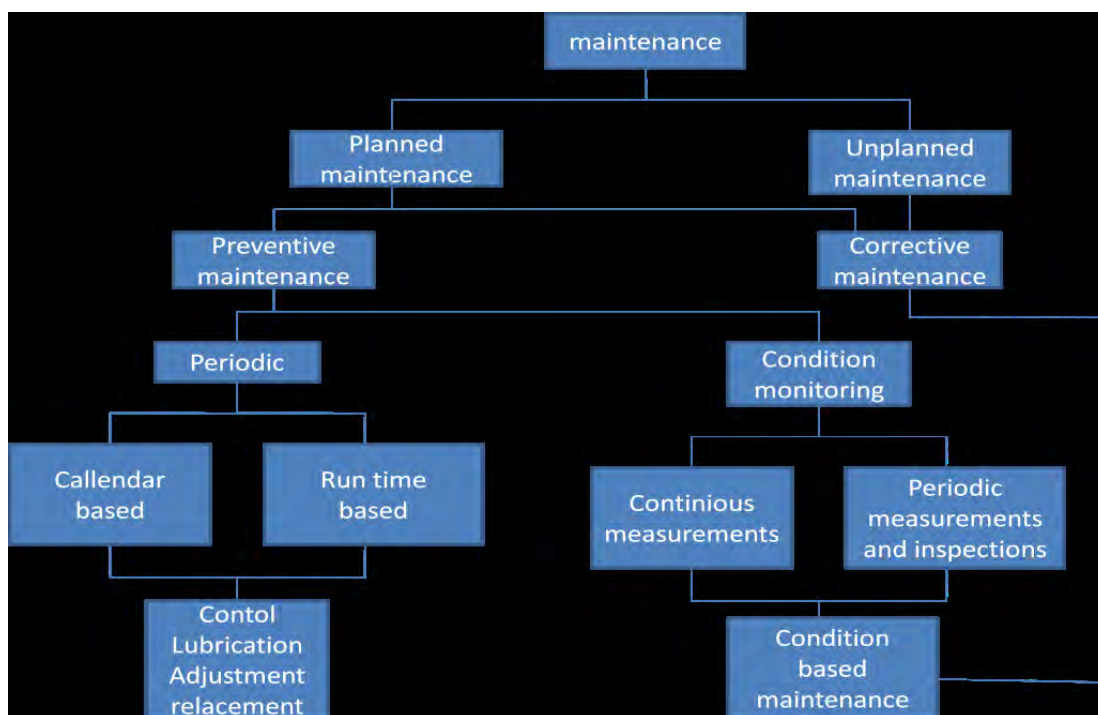


Εικόνα 3.1: Αρχιτεκτονική συστήματος Condition Monitoring

Όπως φαίνεται και στην **εικόνα 3.1**, από το σύστημα καταγράφονται συγκεκριμένες μετρήσεις (measured values), οι μετρήσεις αυτές στην συνέχεια εισέρχονται σε ένα μοντέλο το οποίο στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ένα MLP (Multilayer Perceptron) και το μοντέλο προβλέπει με βάσει τα δεδομένα εισόδου την απόκριση του συστήματος (Predicted Outputs). Από την άλλη πλευρά καταγράφεται η πραγματική απόκριση της μηχανής η οποία στο παράδειγμα είναι ένας αεριοστρόβιλος LM2500 της General Electric Αφαιρώντας την πρόβλεψη από την πραγματική μέτρηση (Residual) , παίρνουμε την διαφορά το μέγεθος της οποίας μπορεί να υποδηλώσει κάποια πιθανή βλάβη. Συγκεκριμένα αν το Residual ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο threshold αυτό μπορεί να υποδηλώνει μελλοντική αστοχία στο σύστημα. Ουσιαστικά, με το conditioned based maintenance προσπαθούμε να προβλέψουμε μια αστοχία, μετρώντας μακροσκοπικά μεγέθη βάσει ενός μαθηματικού μοντέλου.

Συντήρηση

Όλα τα συστήματα κατά τη λειτουργία τους θα υποστούν φθορά, και η κατάστασή τους θα χειροτερεύσει σταδιακά, φτάνοντας σε μια κατάσταση όπου απαιτείται ενέργεια συντήρησης για να συνεχιστεί η ασφαλής και οικονομική λειτουργία. Σήμερα υπάρχουν αρκετές στρατηγικές για τον προγραμματισμό και την εκτέλεση της συντήρησης. Στην **εικόνα 3.2** παρουσιάζονται οι κύριες στρατηγικές. Με την υλοποίηση της σωστής στρατηγικής συντήρησης, μπορούν να εξοικονομηθούν μεγάλα ποσά χρόνου και χρημάτων.



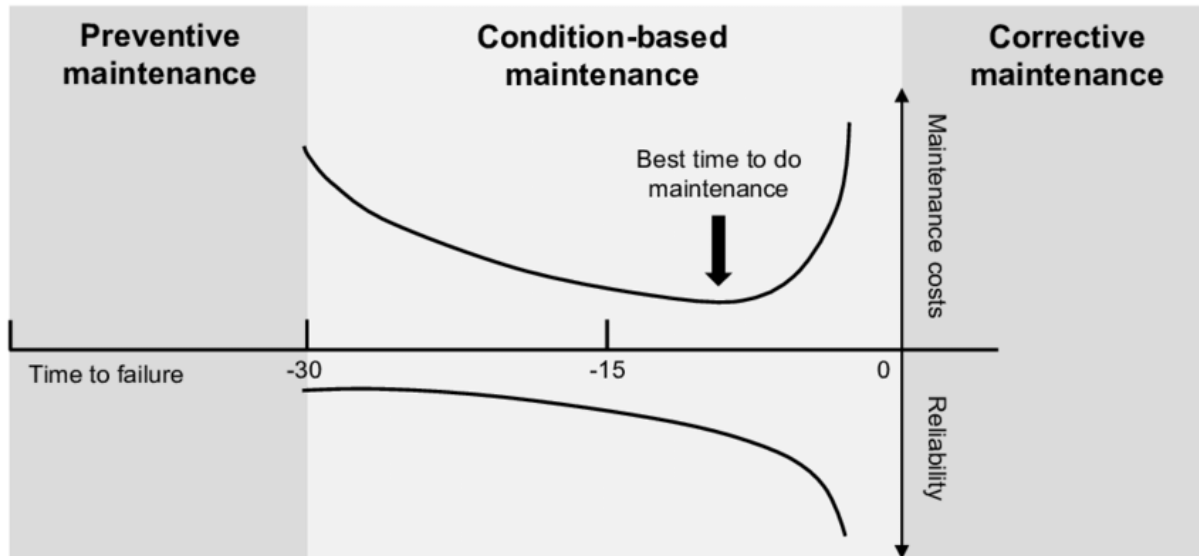
Εικόνα 3.2: Τύποι συντήρησης

Corrective Maintenance

Αυτή η πολιτική συντήρησης απλώς επιτρέπει σε έναν εξοπλισμό να λειτουργεί μέχρι να αστοχήσει, και στη συνέχεια να αντικατασταθεί ή να επισκευαστεί. Αυτή η πολιτική συντήρησης είναι κατάλληλη για εξοπλισμούς όπου η αστοχία τους δεν είναι κρίσιμη από πλευράς ασφάλειας, οικονομίας και διαθεσιμότητας. Ο συγκεκριμένος τύπος συντήρησης δεν χρησιμοποιείται σε κρίσιμες εγκαταστάσεις.

Preventive Maintenance

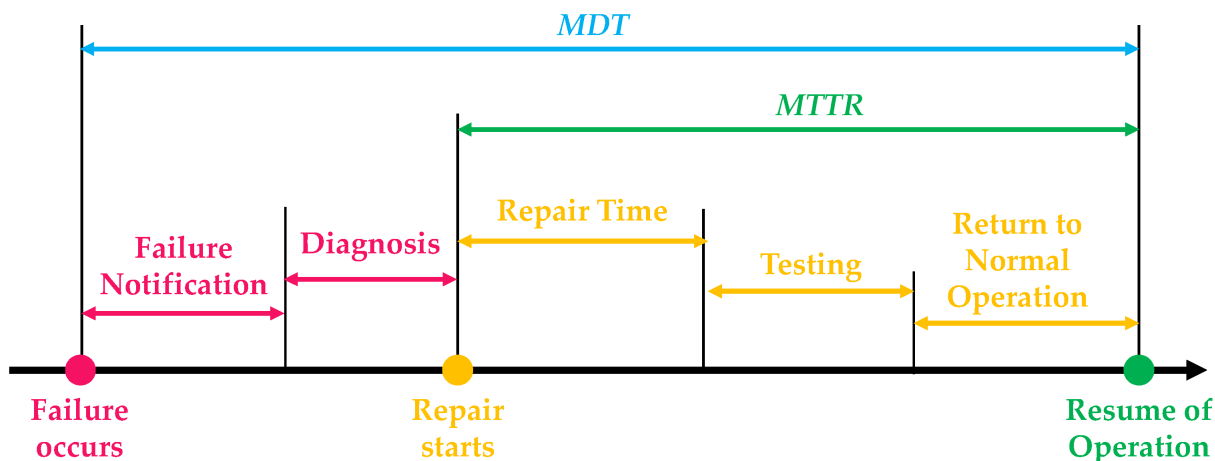
Αυτή η πολιτική συντήρησης γνωστή και ως προβλεπτική συντήρηση, όπως υποδηλώνει το όνομά της, στοχεύει στον εντοπισμό επιδεινούμενων ελαττωματικών συνθηκών πριν πραγματικά συμβεί μια αστοχία, αποτρέποντας έτσι την αστοχία του εξοπλισμού. Αυτή η πολιτική είναι η οποία εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο στην βιομηχανία, καθώς οι αστοχίες θεωρούνται κρίσιμες και μπορεί ολόκληρες μονάδες παραγωγής να σταματήσουν. Πρέπει επίσης να χρησιμοποιείται όταν μια αστοχία είναι κρίσιμη όσον αφορά την ασφάλεια, τη διαθεσιμότητα ή την οικονομία. Ο συγκεκριμένος τύπος συντήρησης δρα proactive, δηλαδή δεν περιμένουμε π.χ. να αστοχήσει ένα ρουλεμάν ενός ηλεκτρικού κινητήρα, αλλά βάσει συγκεκριμένων προδιαγραφών που δίνονται από το instruction manual του κατασκευαστή το εξάρτημα αντικαθίσταται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Τα διαστήματα αυτά μπορούν να είναι χρονικά (π.χ. 2 χρόνια) ή μπορεί να έχουν να κάνουν με τις ώρες λειτουργίας του εξοπλισμού. Υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι για την πραγματοποίηση προληπτικής συντήρησης. Είτε με την περιοδική συντήρηση είτε με την παρακολούθηση της κατάστασης και τη συντήρηση βάσει κατάστασης (CBM). Ο πρώτος τρόπος υπονοεί αντικατάσταση του εξαρτήματος σε προγραμματισμένα χρονικά διαστήματα μεταξύ κάθε ενέργειας. Ο δεύτερος βασίζεται σε αντικατάσταση ανάλογα με την τεχνική κατάσταση του στοιχείου. Ενώ ενδεχομένως φαίνεται ευκολότερο να προγραμματιστεί και να εκτελεστεί συντήρηση σε περιοδικά χρονικά διαστήματα, αυτή η τεχνική μπορεί να οδηγήσει σε μια κατάσταση όπου εξαρτήματα και εξοπλισμοί σε καλή τεχνική κατάσταση αντικαθίστανται. Αυτό φαίνεται στην έκθεση του **Finn are Michelsen [2]**, όπου αναφέρεται ένα παράδειγμα όπου αφαιρέθηκαν 600 βαλβίδες για περιοδική συντήρηση. Από αυτές, μόνο 180 χρειάστηκαν πραγματικά επισκευή, ενώ οι υπόλοιπες 420 ήταν σε καλή κατάσταση. Αυτό δείχνει την αδυναμία της μεθόδου και τις δυνητικές εξοικονομήσεις, τόσο σε χρόνο όσο και σε χρήματα, με την εφαρμογή της παρακολούθησης της κατάστασης και της συντήρησης βάσει κατάστασης (CM και CBM) όπως αυτή περιεγράφηκε πιο πάνω.



Εικόνα 3.3: Τύποι συντήρησης

Στην **εικόνα 3.3** φαίνονται και οι 3 τρόποι οι οποίοι περιεγράφηκαν πιο πάνω [3]. Στο σημείο 0 της εικόνας είναι το σημείο στο οποίο ο εξοπλισμός πρόκειται να αστοχήσει. Από πλευράς οικονομίας το βέλτιστο είναι ένας εξοπλισμός να εξαντλήσει τον μέγιστο ωφέλιμο χρόνο ζωής του. Όπως φαίνεται και στην εικόνα βάσει του Preventive maintenance το εξάρτημα του εξοπλισμού που πρόκειται να αστοχήσει θα αντικατασταθεί 30 κύκλους-ώρες πριν την αστοχία του. Βάσει του Condition Based Maintenance (CBM) το εξάρτημα θα αντικατασταθεί 8 κύκλους-ώρες πριν την αστοχία του (Best time to do maintenance) ενώ βάσει του Corrective maintenance θα αστοχήσει πρώτα, δηλαδή θα φτάσει στο μηδέν και τότε θα γίνει αντικατάσταση του εξοπλισμού.

3.2. Αξιοπιστία και διαθεσιμότητα βιομηχανικού εξοπλισμού



Εικόνα 3.4: Το mean down time

Στην **εικόνα 3.4** φαίνεται η δομή του Mean Downtime, δηλαδή όλα εκείνα τα στάδια στα οποία χωρίζεται η διαδικασία από την αστοχία του εξοπλισμού μέχρι την επαναφορά του σε ομαλή λειτουργία στο σύστημα. Βλέπουμε ότι σε πρώτο στάδιο και αφού αστοχήσει ο εξοπλισμός έχουμε το failure notification, όπου ουσιαστικά ο χρήστης-χειριστής ενημερώνεται ότι ο εξοπλισμός αστόχησε.

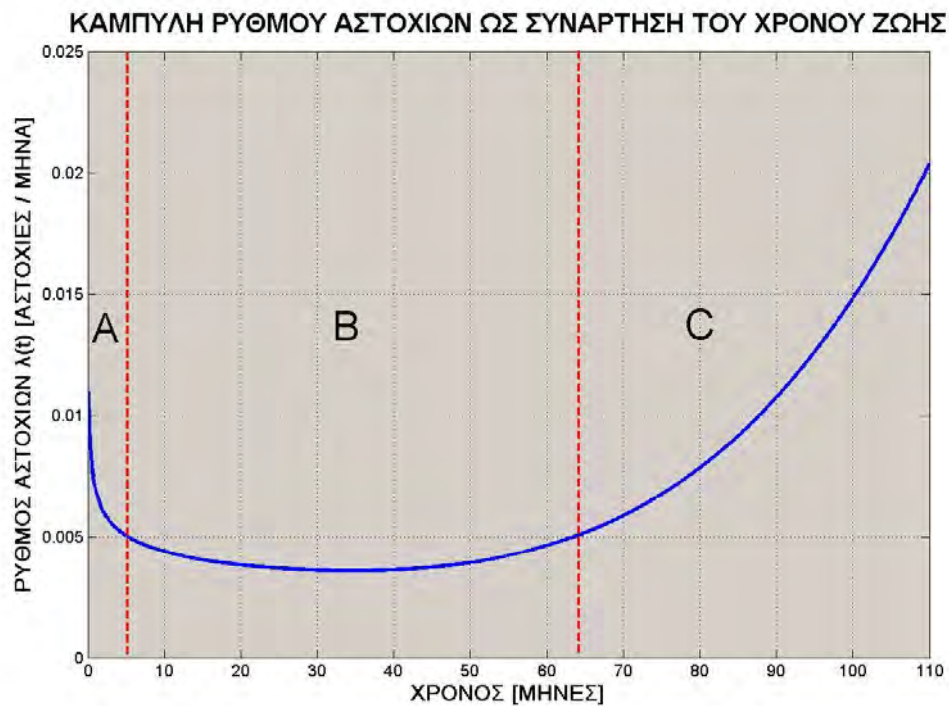
Στην συνέχεια είναι το κομμάτι της διάγνωσης κατά το οποίο θα πρέπει να γίνει το γνωστό troubleshooting δηλαδή να εντοπιστεί το πρόβλημα και να επιβεβαιωθεί ότι έχει γίνει σωστή εκτίμηση. Στην συνέχεια ξεκινάει η διαδικασία της επιδιόρθωσης του προβλήματος (Repair time) όπου αντικαθίσταται ο εξοπλισμός ο οποίος αστόχησε ενώ μετά και αφού γίνουν όλες οι τεχνικές διορθώσεις γίνεται test στον εξοπλισμό ότι δουλεύει σωστά. Αφού ολοκληρωθεί και αυτό το στάδιο τότε ο εξοπλισμός είναι έτοιμος να επανέλθει σε κανονική λειτουργία.

Όλες οι παραπάνω ενέργειες μπορεί να είναι πολύ χρονοβόρες. Π.χ. ανάλογα με σύστημα καταγραφής γεγονότων (SCADA/DCS) η πληροφορία η οποία θα πάρει ο χειριστής θα είναι πολύ γενική π.χ. αστοχία κινητήρα. Όσον αφορά το κομμάτι της διάγνωσης μπορεί ο εξοπλισμός να βρίσκεται πάρα πολύ μακριά, π.χ. να είναι ένας κινητήρας σε ένα αιολικό πάρκο στην μέση της βαλτικής (Off-shore Wind). Αφού φτάσει στο σημείο ο τεχνικός όσο απομακρυσμένο και αν είναι αυτό τότε θα πρέπει να κάνει την διάγνωση, πιθανόν η διάγνωση να χρειάζεται πάρα πολύ ώρα ή και μέρες

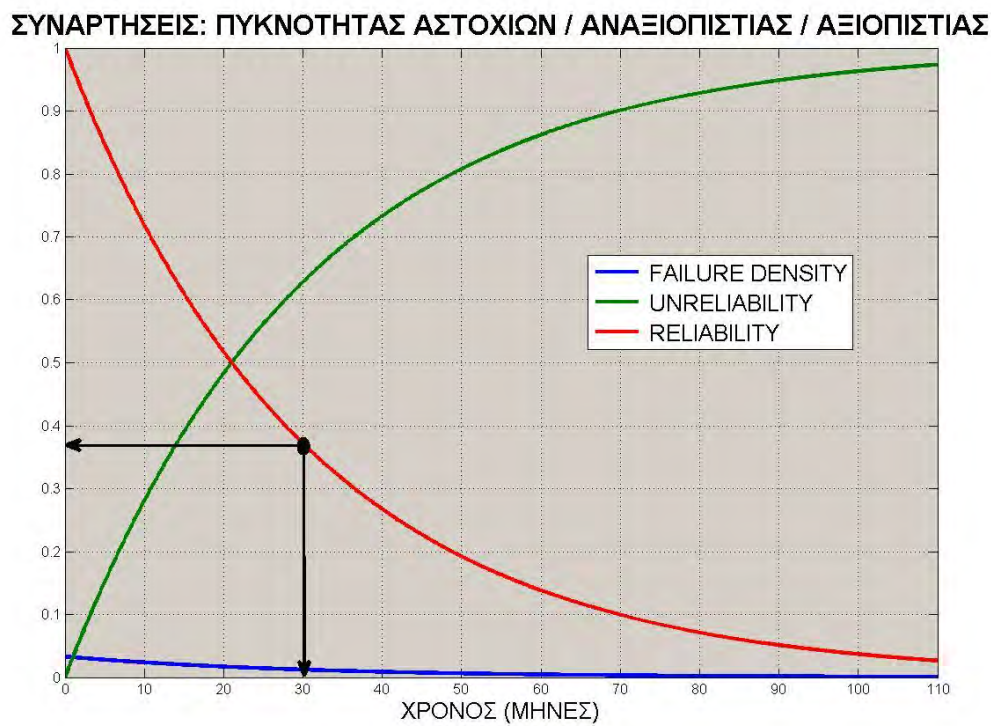
ακόμα ή να χρειάζεται κάποιον εξειδικευμένο τεχνικό πάνω σε συγκεκριμένο εξοπλισμό. Από την στιγμή που θα γίνει η διάγνωση τότε θα πρέπει να υπάρχει και διαθεσιμότητα σε ανταλλακτικά, αλλιώς ο χρόνος του Downtime για να επαναλειτουργήσει ο εξοπλισμός αυξάνεται ακόμα περισσότερο.

Για όλους τους παραπάνω λόγους θεωρείται ειδικά σε κρίσιμες βιομηχανικές μονάδες ως “μονόδρομος” η προληπτική συντήρηση.

Στην **εικόνα 3.5** φαίνεται ο ρυθμός αστοχιών ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Όπως φαίνεται στην αρχή της λειτουργίας του η ζωή του χωρίζεται σε 3 φάσεις. Στην φάση A υπάρχει μια σχετικά αυξημένη πιθανότητα αστοχίας του, η οποία αποδίδεται σε κατασκευαστικό λάθος. Είναι κάτι το οποίο μπορεί να συμβεί σε εξοπλισμούς. Στην B φάση της ζωής του φαίνεται η πιθανότητα αστοχίας του να έχει μειωθεί αισθητά καθώς έχει αποκλειστεί το ενδεχόμενο αστοχίας λόγω κατασκευαστικού λάθους και ο κινητήρας λειτουργεί βάσει προδιαγραφών. Στο διάβα του χρόνου και αφού ο εξοπλισμός έχει περάσει τους 65 μήνες ζωής μπαίνει στην C φάση όπου οι πιθανότητες αστοχίας του αυξάνονται πολύ και βάσει προληπτικής συντήρησης θα πρέπει να αντικατασταθεί.



Εικόνα 3.5: Καμπύλη ρυθμού αστοχιών ηλεκτρικού κινητήρα σε μήνες



Εικόνα 3.6: Καμπύλη αξιοπιστίας και αναξιοπιστίας εξοπλισμού

Η συνάρτηση αξιοπιστίας ενός εξοπλισμού είναι η

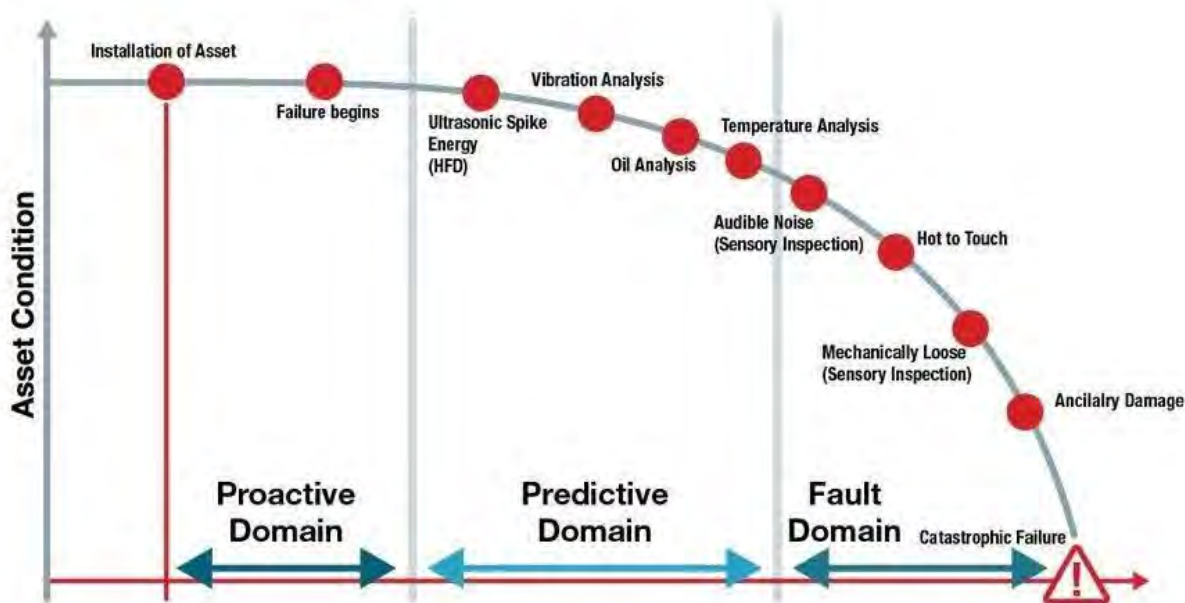
$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1)$$

Δηλαδή αξιοπιστία είναι η πιθανότητα να μην αστοχήσει ο εξοπλισμός

Ενώ η πιθανότητα αστοχίας είναι το ολοκλήρωμα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της αστοχίας του εξοπλισμού

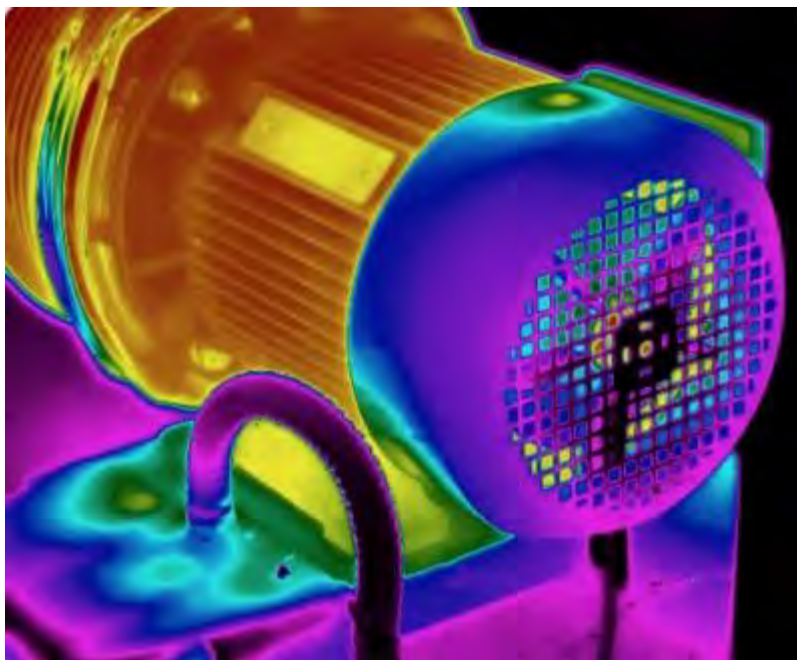
$$F(t) = \int_0^t f(s) ds \quad (2)$$

Με βάση τα παραπάνω υπολογίζεται και από την προληπτική συντήρηση πότε θα πρέπει να γίνει αλλαγή του εξοπλισμού. Από τον κατασκευαστή δίνεται ουσιαστικά το $f(s)$ και με βάση την αξιοπιστία (Reliability) την οποία θέλει να δουλεύει ο παραγωγός ρυθμίζει την προληπτική συντήρηση, π.χ. αξιοπιστία 99.9%.



Εικόνα 3.7: Καμπύλη αξιοπιστίας και αναξιοπιστίας εξοπλισμού

Στην **εικόνα 3.7** φαίνονται τα στάδια εξέλιξης μια αστοχίας. Αρχικά ο εξοπλισμός εγκαθίσταται και ξεκινάει η λειτουργία του. Στην πρώτη φάση η αστοχία μπορεί να προέρθει από κατασκευαστικό λάθος και είναι το σημείο failure begins. Στην συνέχεια φαίνεται ότι με διάφορες μεθόδους καταγραφής όπως ανάλυση δονήσεων στα ρουλεμάν του μοτέρ ή της αντλίας ή με θερμογράφημα του εξοπλισμού μπορεί να προβλεφθεί μια αστοχία (**εικόνα 3.8**). Επίσης πολλές φορές η ανάλυση λαδιού μπορεί να δείξει μελλοντική αστοχία(φθορά στα έδρανα) [9],[10],[11].



Εικόνα 3.8: Θερμογράφημα ηλεκτρικού κινητήρα

Στην συνέχεια και αφού συνεχίζεται η λειτουργία του εξοπλισμού χωρίς κάποια τεχνική επέμβαση, ο εξοπλισμός αρχίζει να έχει χαρακτηριστικό θόρυβο ο οποίος μπορεί να γίνει αντιληπτός στο πεδίο από έναν μηχανικό. Τέλος και με την πάροδο του χρόνου η αστοχία μπορεί να γίνει αντιληπτή ακόμα και με την επαφή του χεριού μας με τον εξοπλισμό.

Όλα τα παραπάνω στάδια περιγράφουν την διαδρομή μέχρι την αστοχία ενός εξοπλισμού. Σε όλη αυτή την διαδρομή υπάρχουν πολλοί τρόποι ώστε να προβλεφθεί η αστοχία και να αποφευχθεί σταμάτημα της παραγωγής.

Predictive Maintenance

Όπως αναφέρθηκε, το κρίσιμο σημείο για την επίτευξη μιας αποτελεσματικότερης συντήρησης είναι να βρεθούν εκείνες οι τεχνικές συντήρησης που από τη μια θα ταίριαζαν στη συγκεκριμένη δραστηριότητα της εκάστοτε επιχείρησης (βιομηχανική, μεταφορική, κατασκευαστική κ.λπ.) και από την άλλη θα διασφάλιζαν:

- Πρόβλεψη των επικείμενων προβλημάτων και σχεδιασμό της αντιμετώπισής τους πολύ πριν γίνουν καταστροφικά.
- Μείωση των πιθανοτήτων αστοχίας στο στάδιο της «νηπιακής» ηλικίας και περιορισμός των επιπτώσεων όταν αυτή υπάρξει.
- Εφαρμογή ενός προγράμματος ποιοτικής διασφάλισης και συνέχειας της λειτουργίας των καινούριων 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 τη βελτίωση της παραγωγικής δραστηριότητας.

Με στόχο όλα τα παραπάνω, τα οποία τελικά αποσκοπούν στη σταδιακή μετατόπιση των εργασιών συντήρησης από εργασίες αποκατάστασης-επισκευής σε διαδικασίες πρόληψης-πρόβλεψης, αναπτύχθηκε η Προβλεπτική Συντήρηση (Predictive Maintenance).

Η μέθοδος του Predictive Maintenance [7] βασίζεται στη χρήση συστημάτων μέτρησης και ελέγχου που επιτρέπουν την ουσιαστική διάγνωση της πραγματικής φυσικής κατάστασης του εξοπλισμού όσο αυτός βρίσκεται σε λειτουργία (μη παρεμβατική μέθοδος). Στόχος είναι η πρόγνωση του χρόνου επισκευής ή συντήρησης πριν από την εμφάνιση σοβαρών προβλημάτων ή βλαβών.



Εικόνα 3.9: Τα πλεονεκτήματα του Predictive Maintenance

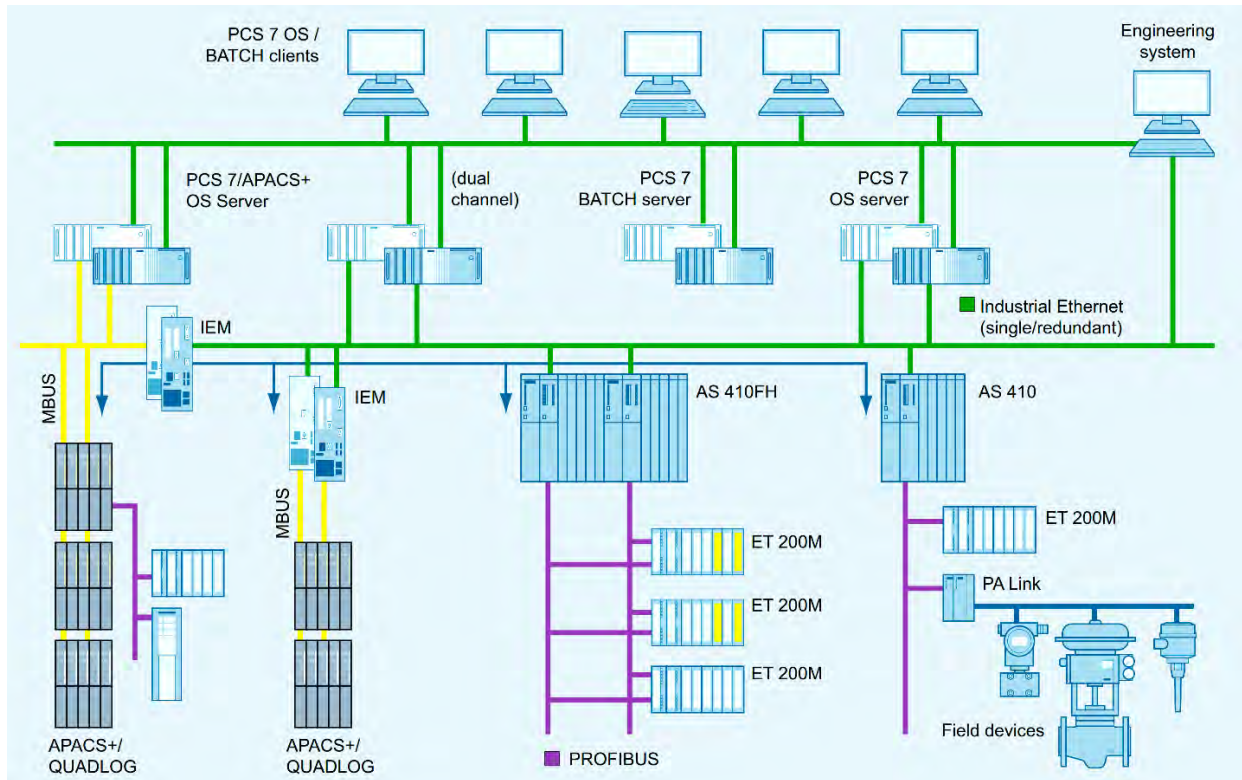
Η Προβλεπτική Συντήρηση επομένως κάνει χρήση των θετικών χαρακτηριστικών από τις δύο προηγούμενες μεθόδους με το βέλτιστο δυνατό συνδυασμό τους για να επιτύχει καλύτερα αποτελέσματα. Έχει το στοιχείο της πρόληψης στην εμφάνιση βλάβης (Προληπτική Συντήρηση), αλλά χρησιμοποιεί την πρόγνωση προκειμένου να επέμβει διορθώνοντας έγκαιρα τη βλάβη (Διορθωτική Συντήρηση) όταν πλέον αυτή είναι αναπόφευκτη. Αυτή η προσέγγιση έχει μειωμένο κόστος σε σχέση με κάποια συχνότητα επαναλαμβανόμενης Προληπτικής Συντήρησης επειδή οι δραστηριότητες της συντήρησης εκτελούνται μόνο όταν είναι δικαιολογημένες. Καθώς εδώ θα πρέπει να αναλογιστεί κανείς και τα τεράστια κόστη των ανταλλακτικών βιομηχανικών εξοπλισμών. Η εφαρμογή ενός συστήματος Προβλεπτικής Συντήρησης απαιτεί καλή οργάνωση και υποδομή των συνεργείων, τα οποία όμως δε 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 των μηχανημάτων γίνονται κατά τη 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 φιλοσοφία 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 εγκατάσταση αυτής της μεθόδου συντήρησης μπορούν να μειωθούν σημαντικά οι τυχαία εμφανιζόμενες αστοχίες και οι επιπτώσεις τους.

Σήμερα στις προηγμένες βιομηχανίες και ειδικά στην αεροπορική βιομηχανία έχει αρχίσει σε μεγάλο βαθμό η προβλεπτική συντήρηση να βασίζεται στο Machine Learning. Αυτό επιτυγχάνεται μέσα από την συνεχόμενη καταγραφή δεδομένων του εξοπλισμού. Στις βιομηχανίες ο έλεγχος του εξοπλισμού και του Process γίνεται μέσω συστημάτων DCS - Distributed Control Systems (**εικόνα 3.10**) τα δεδομένα των εξοπλισμών π.χ. για ένα σύστημα κινητήρα-ανλτίας καταγράφονται στην βάση δεδομένων βάσει του sampling rate (ανά 1 Sec) και είναι διαθέσιμα εκεί προς εκμετάλλευση.

Τα δεδομένα αυτά δίνονται ως Dataset εκπαίδευσης σε έναν αλγόριθμο machine learning ο οποίος αφού εκπαιδευτεί για τα νέα δεδομένα που θα εισέρχονται θα μπορεί να προβλέψει αν έπεται αστοχία ή όχι. Ένας αλγόριθμος Machine learning μπορεί να κάνει εκτίμηση με 3 διαφορετικούς τρόπους.

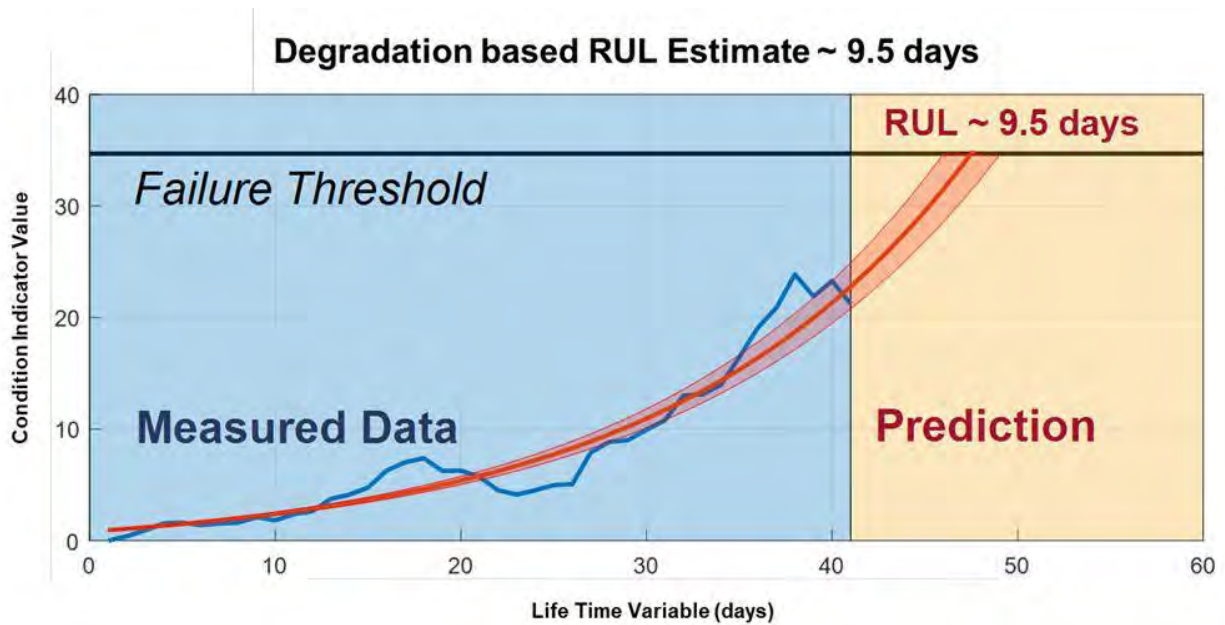
3.3. Χρήση μεθόδων Machine Learning στην βιομηχανική συντήρηση



Εικόνα 3.10: Η αρχιτεκτονική συστήματος DCS

Ένας αλγόριθμος Machine learning μπορεί να κάνει εκτίμηση με 3 διαφορετικούς τρόπους οι οποίοι αναγράφονται παρακάτω.

- **Regression:** Με αυτή τη μέθοδο, ο αλγόριθμος μπορεί να προβλέψει μια αλγεβρική τιμή εναπομένουσας ζωής του εξοπλισμού RUL (Remaining Useful Life). Δηλαδή να κάνει εκτίμηση ότι απομένουν ακόμα X κύκλοι κόπωσης οι Y ώρες μέχρι την αστοχία. Κατά την εκπαίδευση ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται δίνοντας του τα δεδομένα τα οποία καταγράφονται από την συσκευή και το πόσο ζωή είχε ακόμα μέχρι να αστοχήσει. Αν έχουμε αρκετά δεδομένα και καταγραφές αστοχιών της μηχανής τότε είναι εφικτό να εκπαιδευτεί ένας αλγόριθμος με πολύ καλή επίδοση. Όπως φαίνεται και στην **εικόνα 3.11** την 42^η ημέρα ο αλγόριθμος κάνει εκτίμηση ότι εναπομένουσα ζωή του εξοπλισμού είναι 9.5 ημέρες.

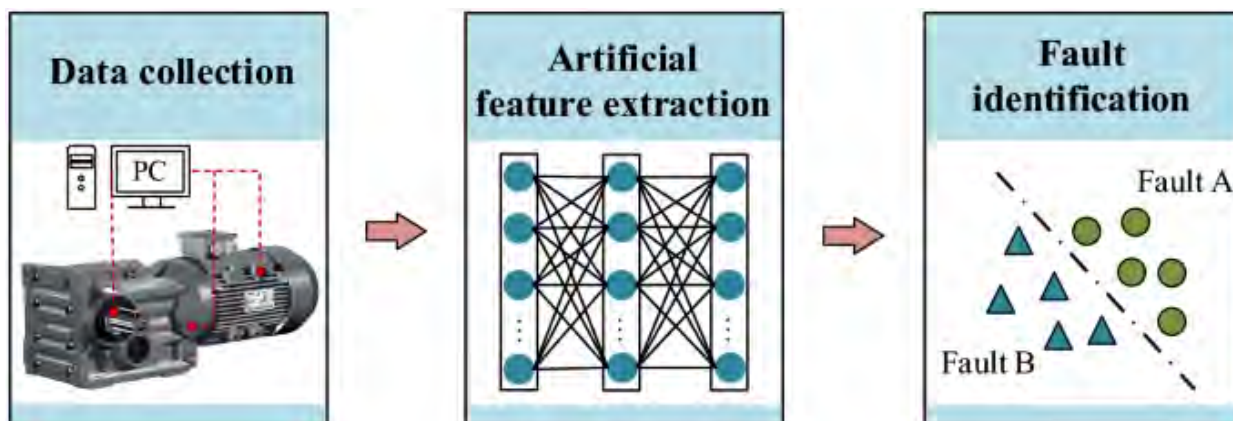


Εικόνα 3.11: Πρόβλεψη εναπομένουσας ζωής εξοπλισμού

Φαίνεται ότι αλγόριθμος λαμβάνοντας υπόψιν του τις μετρήσεις μέχρι και την 42^η ημέρα εκτιμά την εναπομένουσα ζωή.

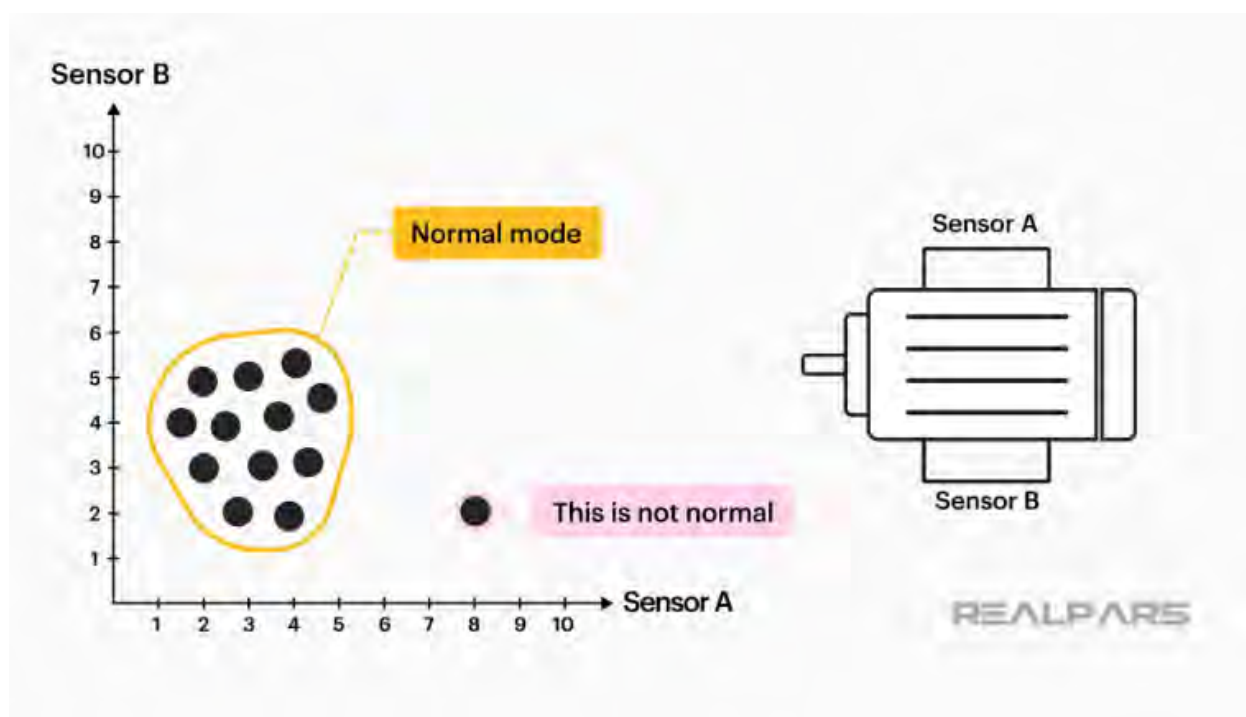
- **Classification:**

Όπου ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει αν μια μέτρηση η οποία καταγράφηκε υποδηλώνει ότι ο εξοπλισμός είναι σε ομαλή λειτουργία ή επίκειται βλάβη. (εικόνα 3.12, εικόνα 3.13)



Εικόνα 3.12: Χρήση μεθόδων ML για Classification

Όπως φαίνεται και στην **εικόνα 3.13** ο συνδυασμός καταγραφών οι οποίες αφορούν τους Sensor A και Sensor B για έναν ηλεκτρικό κινητήρα χωρίζεται σε ομαλή λειτουργία και σε λειτουργία η οποία επιφυλάσσει κινδύνους για αστοχία. Στην **εικόνα 3.13** φαίνονται οι καταγραφές.



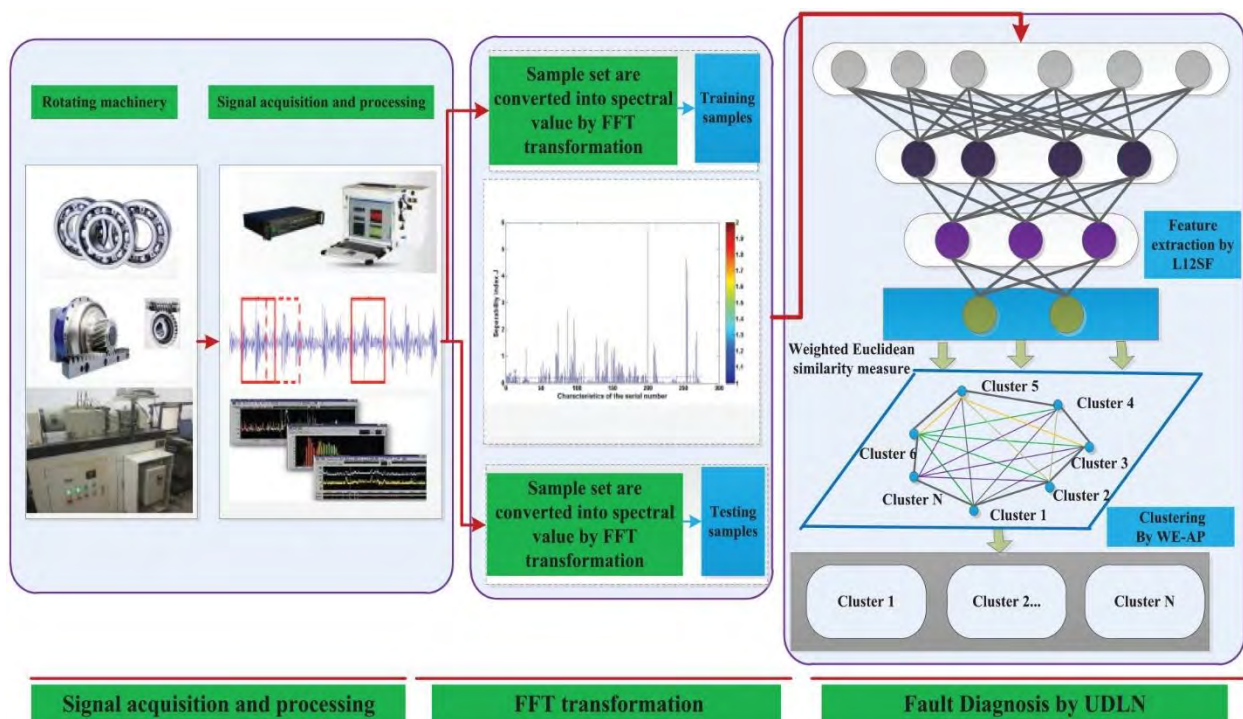
Εικόνα 3.13: Χρήση Classification για λειτουργία ηλεκτρικού κινητήρα

- **Clustering:**



Εικόνα 3.14: Χρήση Clustering για αναγνώριση τύπου σφαλμάτων

Στο Clustering η αστοχία ομαδοποιείται σε ομάδες-clusters όπου η κάθε ομάδα υποδηλώνει το εξάρτημα στο οποίο ανήκει η αστοχία της μηχανής. π.χ. στην **εικόνα 3.14** οι αστοχίες μπορούν να χωριστούν μετά την εφαρμογή του k-means σε αστοχία εδράνων, αστοχία φτερωτής, αστοχία κιβωτίου ταχυτήτων και αστοχία ηλεκτρικού κινητήρα (μοτέρ).



Εικόνα 3.15: Χρήση Clustering για αναγνώριση τύπου σφαλμάτων με χρήση FFT και NN

Όμοια στην **εικόνα 3.15** φαίνεται η χρήση νευρωνικών δικτύων για την αναγνώριση σφαλμάτων με ακουστικούς τρόπους σε στρεφόμενο εξοπλισμό. Συγκεκριμένα σε ρουλεμάν αντλίας και σε κιβώτιο ταχυτήτων. Με χρήση μετασχηματισμού Fourier οι ακουστικές συχνότητες σπάνε σε υποομάδες (Clusters) και το σφάλμα ταξινομείται σε N κατηγορίες.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

4.1. Ανάλυση αστοχιών ηλεκτρικού κινητήρα

Για την εύρεση μελλοντικών αστοχιών έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένες τεχνικές πολλές από τις οποίες αναφέρθηκαν πιο πάνω. Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές ανάλυσης αστοχιών είναι [11],[12],[13]:

1) Vibration analysis

Οι μηχανικές δονήσεις μετρούνται μέσω ενός μετατροπέα. Οι διάφορες μέθοδοι και πτυχές της ανάλυσης των δονήσεων περιγράφονται πιο κάτω στην εργασία. Αυτή η μέθοδος είναι γενικά η καλύτερη για την ανίχνευση προβλημάτων που σχετίζονται με μηχανολογικά εξαρτήματα, αλλά μπορεί να ανιχνεύσει και ορισμένα προβλήματα προελεύσεως ηλεκτρικής φύσης στους ασύγχρονους κινητήρες, σύμφωνα με τους **Hudson και τον Mellor [14]**. Παραδείγματα τέτοιων προβλημάτων είναι προβλήματα στους ρότορες και ανομοιόμορφες έκκεντρες αποστάσεις. Ξεκάθαρο είναι πως αν δεν έχει γίνει σωστή ευθυγράμμιση και ζυγοστάθμιση στο σύστημα τότε θα φανεί αμέσως από το Vibration Analysis. Εάν δεν είναι διαθέσιμα φάσματα υψηλής ανάλυσης, είναι δυνατό να διακρίνουμε μεταξύ ηλεκτρικών και μηχανικών βλαβών με την μέτρηση των δονήσεων κατά την απενεργοποίηση του κινητήρα. Οι μηχανολογικά επηρεασμένες δονήσεις θα μειώνονται σταδιακά μέχρι το σημείο όπου ο κινητήρας σταματά, ενώ οι ηλεκτρικά δονήσεις θα μειώνονται αμέσως από την στιγμή παύσης της τροφοδοσίας. Αυτή η διαφορά απεικονίζεται στην **εικόνα 4.1** παρακάτω.

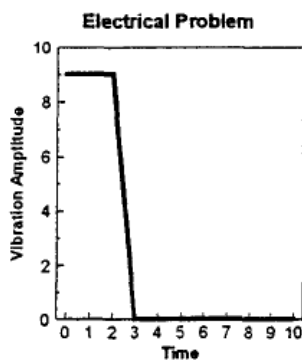


Figure 3
Coast Down - Electrical Faults

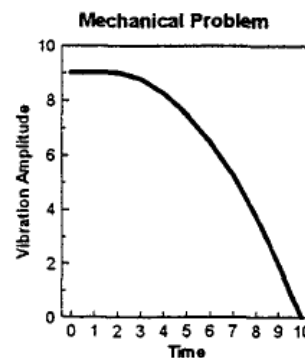


Figure 4
Coast Down - Mechanical Faults

Εικόνα 4.1: Διαφορά απόκρισης μεταξύ ηλεκτρολογικών και μηχανολογικών προβλημάτων κατά την παύση λειτουργίας του κινητήρα

2) Thermography:

Η θερμογραφία ενός κινητήρα μπορεί να ανιχνεύσει ανωμαλίες στην κατανομή της θερμοκρασίας. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορα ηλεκτρικά προβλήματα ή προβλήματα ψύξης. Πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ειδικό εξοπλισμό εικόνας που είναι ικανός να αιχμαλωτίσει την υπέρυθρη ακτινοβολία. Η γενική πορεία της θερμοκρασίας του κινητήρα μπορεί επίσης να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την κατάσταση του. Τέλος δύναται να ανιχνεύσει προβλήματα στα ρουλεμάν, αλλά ο χρόνος προειδοποίησης θα είναι γενικά μικρότερος από αυτόν που επιτυγχάνεται με την παρακολούθηση του εξοπλισμού μέσω ανάλυσης δονήσεων.

3) Temperature Monitoring: Είναι πιο περιορισμένη μέθοδος σε σχέση με αυτή της θερμογραφίας καθώς δεν εκτείνεται σε όλο το εύρος του κινητήρα, βασίζεται στην τοποθέτηση αισθητήρων θερμοκρασίας πάνω στο μοτέρ.

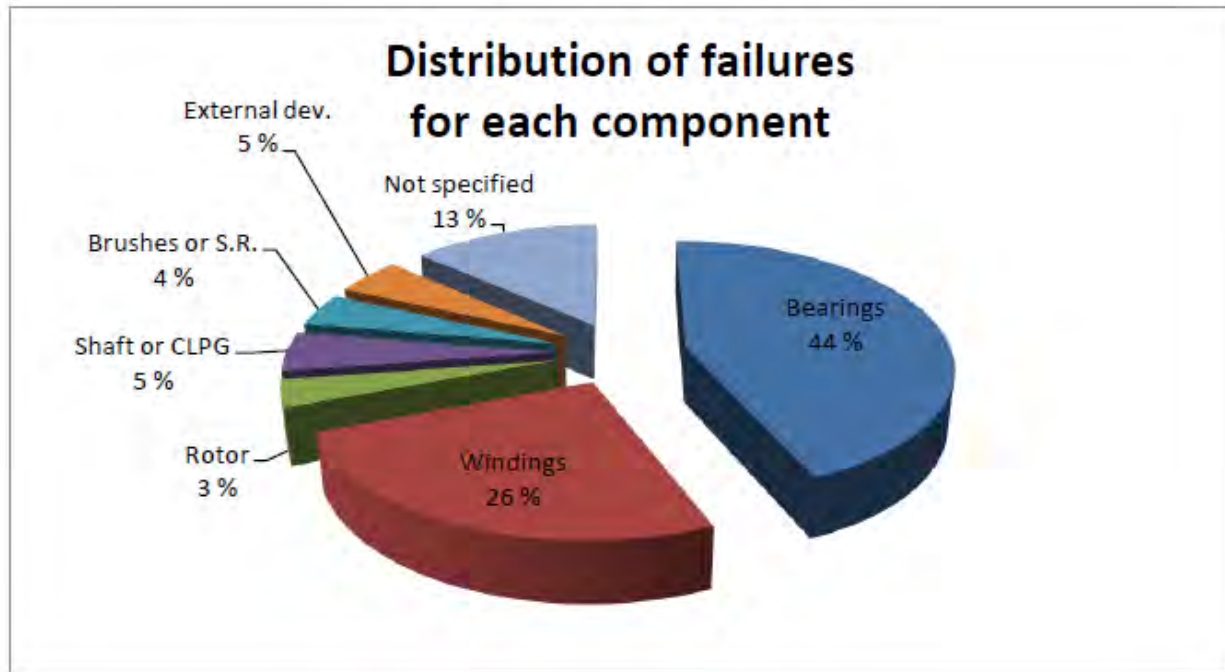
4) Oil Analysis: Για εξοπλισμούς με λάδι λιπάνσεως (όχι γράσο) η ανάλυση της χημικής σύστασης του λαδιού μπορεί να προσφέρει πολλές πληροφορίες ειδικά στο κομμάτι υγροποιήσεων και αν κάποιο ξένο σώμα φανεί μέσα στην χημική ανάλυση, σημαίνει ότι κάποιο κομμάτι του εξοπλισμού φθείρεται.

5) MCSA:

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τον ηλεκτρικό κινητήρα ως έναν μετατροπέα-transducer και είναι ικανή να ανιχνεύσει τόσο ηλεκτρικές όσο και μηχανικές βλάβες σε ολόκληρο το σύστημα. Το ρεύμα γραμμής, τουλάχιστον για τους ασύγχρονους κινητήρες, μπορεί να αναλυθεί με τον ίδιο τρόπο με τα σήματα δονήσεων. Συγκεκριμένες βλάβες προκαλούν συγκεκριμένες συχνότητες ρεύματος. Η μέθοδος μπορεί να εντοπίσει σπασμένους ρότορες ή με crack, διακυμάνσεις στο διάκενο αέρα και ηλεκτρική ανισορροπία, καθώς και μηχανικές συνθήκες που προκαλούν διακυμάνσεις στο φορτίο. Αυτή η μέθοδος περιγράφεται αργότερα στην αναφορά. Γενικά, τα προβλήματα που σχετίζονται με την ηλεκτρική πλευρά ανιχνεύονται πιο νωρίς με αυτήν τη μέθοδο από ό,τι με άλλες τεχνικές, ενώ τα μηχανικά προβλήματα, σύμφωνα με το [5], ανιχνεύονται γενικά σε μεταγενέστερο στάδιο από την ανάλυση των δονήσεων.

6) Electrical Signal Analysis(ESA): Η τεχνική του ESA ομοιάζει με αυτή του MCSA, ενώ η κύρια διαφορά είναι ότι εδώ γίνεται χρήση και του Voltage Level.

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούνται από κοινού από ηλεκτρολογικά και μηχανολογικά εξαρτήματα. Στατιστικά δεδομένα από την IEEE υποδηλώνουν [16], [17] ότι το 47% των αστοχιών οφείλονται σε ηλεκτρολογικούς παράγοντες ενώ το 53% σε μηχανολογικούς.



Εικόνα 4.2: Κατανομή αστοχιών σε ηλεκτρικό κινητήρα [16]

Οι αστοχίες για τα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα αφορούν:

- Βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγού και πηνίου
 - Μόλυνση-φθορά τυλίγματος (βιομηχανικό περιβάλλον π.χ. Refinery)
 - Αστοχία μόνωσης γείωσης
 - Αστοχία των κενών μεταξύ ρότορα - στάτορα και εκκεντρότητα
- Αυτά τα προβλήματα μπορούν να ανιχνευθούν σε πρώιμο στάδιο με την χρήση MCA. Η χρήση ESA μπορεί να εντοπίσει αστοχία ρότορα και αστοχία στάτορα σε τελικά στάδια. Η ανάλυση δονήσεων μπορεί να εντοπίσει σε μετέπειτα στάδιο αστοχίες οι οποίες έχουν εξελιχθεί και πλέον η εξέλιξη τους προκαλεί δονήσεις.

Οι αστοχίες για τα μηχανολογικά εξαρτήματα αφορούν:

- Έδρανα-ρουλεμάν, γενική φθορά, υπερφόρτωση, κόπωση
- Κακή εγκατάσταση άξονα και ρουλεμάν
- Κακή ευθυγράμμιση και ζυγοστάθμιση

Οι περισσότερες αστοχίες των μηχανολογικών εξαρτημάτων θα εμφανιστούν σαν προβλήματα στα έδρανα [14], και μπορούν να εντοπιστούν με χρήση Vibration Analysis σε πρώιμο στάδιο. Με χρήση ESA τέτοιου είδους προβλήματα μπορούν να εντοπιστούν σε πρώιμο στάδιο.

Στην **εικόνα 4.3** με X δηλώνεται η ανίχνευση σφάλματος σε πρώιμο στάδιο, με L υποδηλώνεται ότι η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου δεν είναι η πλέον κατάλληλη για το πρόβλημα αλλά μπορεί να το εντοπίσει σε ήδη εξελιγμένο στάδιο.

Ο πίνακας βασίζεται στην θεωρία η οποία αναπτύχθηκε πιο πάνω καθώς και στο [15]

Failure mode Detection method	Electrical problems				Mechanical problems		
	Stator	Rotor	Air gap	Insulation to ground	Bearings	Alignment	Load related
Vibration analysis	L	L	L		X	X	X
ESA	X	X	X		X	X	X
MCSA	L	X	X		L	L	L
MCA	X	X	X	X			
Temperature/Termography	L				L	L	L
Oil analysis					L		

Εικόνα 4.3: Βέλτιστοι τρόποι ανίχνευσης σφάλματος

4.2. Πρόβλεψη και έγκαιρη αποκατάσταση των ζημιών

Roller Bearings (ρουλεμάν)

Τα ρουλεμάν βρίσκονται στην πλειοψηφία του περιστρεφόμενου εξοπλισμού λόγω του χαμηλού κόστους τους και της υψηλής αξιοπιστίας τους. Διαχωρίζουν τα περιστρεφόμενα από τα μη περιστρεφόμενα μέρη, παίρνουν τα φορτία του άξονα και διατηρούν εσωτερικά την θέση του. Στην **εικόνα 4.4** παρακάτω, που παρέχεται από τον Kruger [9],[18], φαίνεται ένα ρουλεμάν με μια σύντομη περιγραφή των κύριων εξαρτημάτων. Τα ρουλεμάν είναι, όπως φαίνεται στα στατιστικά αποτυχίας για ηλεκτρικούς κινητήρες, ο λόγος για μεγάλο μέρος των αποτυχιών των ηλεκτρικών κινητήρων. Αυτό δείχνει πόσο σημαντική είναι η παρακολούθηση της κατάστασης των ρουλεμάν. Ένα άλλο γεγονός που καθιστά σημαντική την ανίχνευση των αστοχιών των ρουλεμάν είναι ότι σπάνια αποτυγχάνουν από μόνα τους. Αυτό δηλώνεται από τον **Howieson [19]**, ο οποίος αναφέρει δυνητικούς λόγους όπως η λειτουργία της μηχανής χωρίς ισορροπία, ή η λειτουργία σε κρίσιμη ταχύτητα. Έτσι, αν συμβεί αποτυχία του ρουλεμάν, πρέπει να βρεθεί η ρίζα του προβλήματος. Παραδοσιακά, η παρακολούθηση της κατάστασης των ρουλεμάν γίνεται μέσω της ανάλυσης των δονήσεων. Άλλες τεχνικές περιλαμβάνουν την ακουστική εκπομπή, τις υπερήχους μετρήσεις, την παρακολούθηση των κραδασμών, τη μέτρηση της κυρτότητας του σήματος και την ESA.

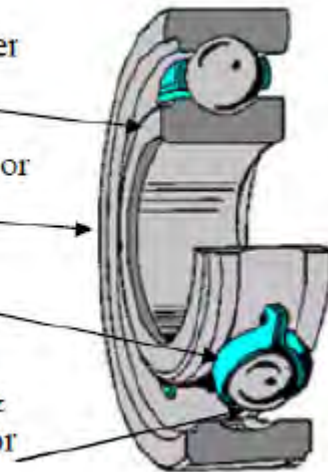
Major Bearing Components

The *inner ring (race)* normally has a very tight fit on to the shaft. It is also hardened to prevent premature wear. The inner ring normally rotates with the shaft.

The *outer ring (race)* is normally located inside the housing or the casing of the machine and is stationary.

The *cage* holds the rolling elements in place.

The *rolling elements* are rollers, balls or some other round device used to provide the rolling action between the inner & outer rings. The rolling elements reduce friction and allow for the difference in motion of these 2 components.



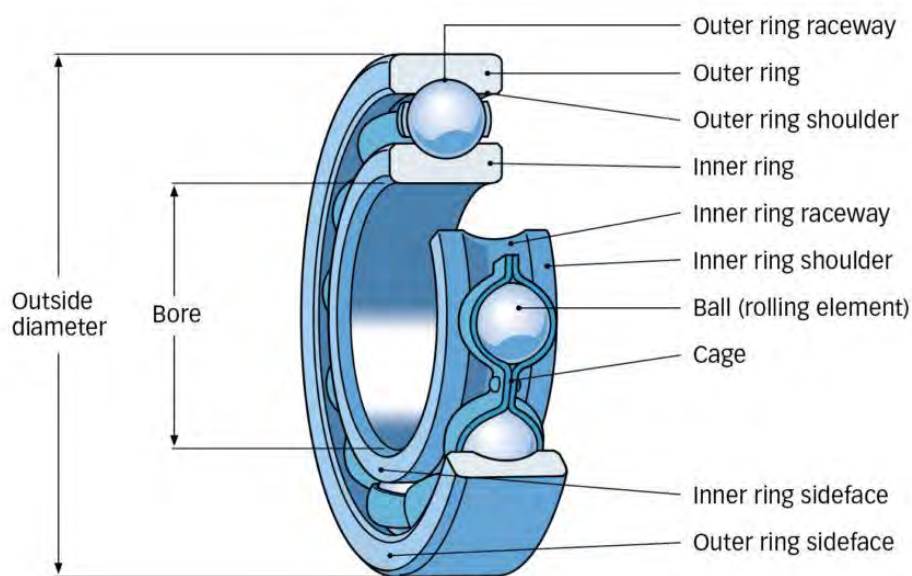
Εικόνα 4.4: Τα κύρια μέρη του ρουλεμάν

Το **inner ring** ουσιαστικά πιέζει τον άξονα και περιστρέφεται μαζί του. Για να επιτευχθεί αυτό το ρουλεμάν πρώτα θερμαίνεται ώστε να διασταλεί και αφού περάσει από μέσα ο άξονας τότε ψύχεται και γίνεται ένα με τον άξονα.

Το **Outer ring** ακουμπάει στο Casing της μηχανής και δεν περιστρέφεται.

Το **Cage** κρατάει τα στοιχεία κύλισης στην θέση τους

Τα **Rolling Elements**-στοιχεία κύλισης είναι ουσιαστικά μικρές μπάλες οι οποίες επιτρέπουν την περιστροφή μεταξύ inner και outer ring,



Εικόνα 4.5: Μέρη και στοιχεία του ρουλεμάν

Γενικά μια αστοχία ρουλεμάν σύμφωνα με το [19] χωρίζεται σε 4 φάσεις.

Φάση 1: Η αστοχία συνήθως συμβαίνει 0.1 έως 0.125 mm κάτω από την επιφάνεια του raceway. Όταν αυτή συμβεί απομένει περίπου 10-20% ωφέλιμη ζωή στο ρουλεμάν.

Φάση 2: Η αστοχία εξελίσσεται και μικροσκοπικές κοιλότητες εμφανίζονται στην εσωτερική επιφάνεια του ρουλεμάν. Σε αυτό το στάδιο απομένει περίπου 5-10% ωφέλιμη ζωή στο ρουλεμάν. Σύμφωνα με το [18] με χρήση μεθόδου ESA μπορεί να γίνει αντιληπτή μια τέτοια είδους αστοχία σε αυτό το στάδιο. Οι κοιλότητες κάνουν τα εξαρτήματα του ρουλεμάν να δονούνται κοντά στις ιδιοσυχνότητες τους. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι ακόμα στο σύστημα δεν εμφανίζονται δονήσεις.

Φάση 3: Σε αυτό το στάδιο εσωτερικά Cracks δημιουργούνται και η ωφέλιμη ζωή είναι περίπου 1-5%. Η αστοχία έχει πλέον εξελιχθεί τόσο πολύ όπου γίνεται

αντιληπτή στο φάσμα των δονήσεων αν υπάρχει αισθητήρα καταγραφής δονήσεων ή με ένα απλό vibration pen.

Φάση 4: Σε αυτή την φάση έχουμε την παρουσία πολλών Crack τα στοιχεία κύλισης αρχίζουν να βγαίνουν εκτός ομαλής λειτουργίας και το ρουλεμάν καταστρέφεται.

Η βέλτιστη αντιμετώπιση είναι το ρουλεμάν να αντικατασταθεί στην φάση 3. Σε αυτή την φάση η αστοχία παραμένει ακόμα μέσα στο ρουλεμάν και δεν επηρεάζει την λειτουργία του συστήματος. Στην φάση 1 είναι σχεδόν αδύνατον να εντοπιστεί η αστοχία, ενώ στην φάση 2 απαιτείται ειδικός εξοπλισμός ο οποίος δεν είναι εγκατεστημένος πάνω στην συσκευή. Όταν γίνουν αντιληπτές οι συχνότητες της φάσης 2 τότε έχει αρχίσει ήδη και εξελίσσεται η φάση 3.

Παρακάτω φαίνονται οι ιδιοσυχνότητες για τα 4 κυρίως μέρη του ρουλεμάν τα οποία εξηγήθηκαν πιο πάνω. Οι τιμές αυτές δεν είναι σταθερές και εξαρτώνται από την γεωμετρία του ρουλεμάν και τα χαρακτηριστικά του και κάθε φορά δίνονται από τον κατασκευαστή. Γενικά όμως κινούνται μέσα σε ένα εύρος 5-10%.

- Ball Pass Outer Race (BPOR) είναι η συχνότητα όπου μια αστοχία συμβαίνει στο outer race.
- Ball Pass Inner Race (BPIR) είναι η συχνότητα όπου μια αστοχία συμβαίνει στο inner race.
- 2x Ball Spinn Frequency (2xBSF) είναι η συχνότητα όπου μια αστοχία συμβαίνει στα στοιχεία κύλισης .
- Cage Frequency (FTF) είναι η συχνότητα όπου μια αστοχία συμβαίνει στο cage.

Gear (Κιβώτιο ταχυτήτων)

Σε συστήματα όπου συμπιεστές-αντλίες κινούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες, συχνά χρησιμοποιούνται γρανάζια λόγω του απλού γεγονότος ότι η ταχύτητα του ηλεκτρικού κινητήρα είναι συνήθως χαμηλότερη από την απαιτούμενη ταχύτητα του συμπιεστή. Τα γρανάζια είναι ένα κρίσιμο εξάρτημα στα μηχανικά συστήματα. Δημιουργούν μια μηχανική σύνδεση μεταξύ του φορτίου και της κίνησης, μεταδίδοντας ενέργεια, επομένως μια αποτυχία του γραναζιού θα είναι κρίσιμη και θα προκαλέσει διακοπή λειτουργίας και διακοπή παραγωγής. Επομένως, η παρακολούθηση της κατάστασης των γραναζιών είναι σημαντική, και σύμφωνα με το [20] υπάρχει ένα πολύ μεγάλο και ενεργό πεδίο έρευνας.

Λόγω του γεγονότος ότι οι αποτυχίες των γραναζιών προκαλούν δονήσεις και του γεγονότος ότι η ανάλυση των δονήσεων είναι μια αρκετά γνωστή και εφαρμοσμένη τεχνολογία, αυτή είναι η πιο τυπική λύση για την παρακολούθηση της κατάστασης των γραναζιών. Μια άλλη προσέγγιση για την παρακολούθηση των γραναζιών είναι η χρήση ανάλυσης του λαδιού, τόσο online όσο και offline. Η χρήση ηλεκτρικών κινητήρων για τον εντοπισμό αποτυχιών των γραναζιών, σύμφωνα με το [20], δεν έχει κερδίσει πολλή προσοχή από την κοινότητα της ηλεκτρολογίας. Ωστόσο, ορισμένες εργασίες περιγράφουν ότι οι συχνότητες της επαφής των γραναζιών μπορούν να παρατηρηθούν στο φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος. Ο **Rajagopalahn [20]** εξηγεί τα μέρη της συχνότητας με το γεγονός ότι μια αποτυχία όπως ένας κατεστραμμένο δόντι παράγει μια ανωμαλία στην ροπή φόρτου που "βλέπει" ο κινητήρας. Αυτό μεταφέρεται στο ρεύμα του κινητήρα από το φορτίο. Το ίδιο άρθρο αναφέρει επίσης ότι η διακύμανση της τάσης είναι ο πιο κοινός μηχανισμός δημιουργίας των συχνοτήτων.

Οι μέθοδοι Condition Monitoring οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τα κιβώτια ταχυτήτων είναι:

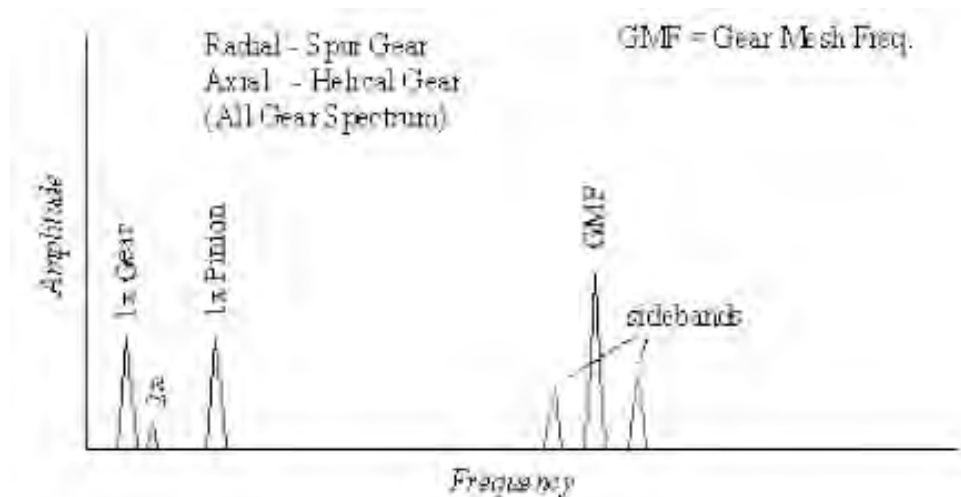
- Acoustic emission
- Vibration analysis (ανάλυση δονήσεων)
- Electrical signature analysis: Ικανότητα παρακολούθησης των δοντιών μέσω του ρεύματος το οποίο τραβάει ο κινητήρας όπως αυτό αναλύθηκε πιο πάνω.
- Ανάλυση λαδιού λίπανσης

Οι πιο τυπικές αστοχίες για ένα κιβώτιο ταχυτήτων είναι:

- Κόπωση (θερμική κόπωση, λόγω δυναμικής φόρτισης, λόγω κάμψης)
- Φθορά στην επιφάνεια των δοντιών
- Αστοχία λόγω μέγιστης φόρτισης

Για τον εντοπισμό και την διάγνωση αστοχιών στο κιβώτιο ταχυτήτων το φασματικό pattern των δονήσεων μπορεί να δώσει πολλές χρήσιμες πληροφορίες [21]. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό φάσμα των συχνοτήτων των δονήσεων του κιβωτίου ταχυτήτων είναι η συχνότητα όταν ενώνονται τα δόντια και οι αρμονικές της. Η συχνότητα αυτή μπορεί να παρατηρηθεί και στο φάσμα του ρεύματος και είναι απλά η συχνότητα σύμπλεξης των δοντιών των γραναζιών (tooth mesh frequency) [22]. Η τιμή μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των δοντιών με την ταχύτητα περιστροφής σε (Hz).

Ένα κλασσικό φάσμα κανονικής λειτουργίας κιβωτίου ταχυτήτων δίνεται στο [23]. Το φάσμα διακρίνεται στην **εικόνα 4.6**. Στην εικόνα φαίνονται peaks στην ταχύτητα rpm και στην διπλάσια ταχύτητα rpm καθώς και στην συχνότητα GMF. Φαίνεται ότι τα peaks έχουν χαμηλό πλάτος. Το GMF όπως είναι αναμενόμενο είναι ευαίσθητο στην αλλαγή φορτίου, και έτσι, κατά την αλλαγή φορτίου μεγαλύτερα πλάτη μπορούν να εντοπιστούν χωρίς αυτό να υποδηλώνει κάποια αστοχία.

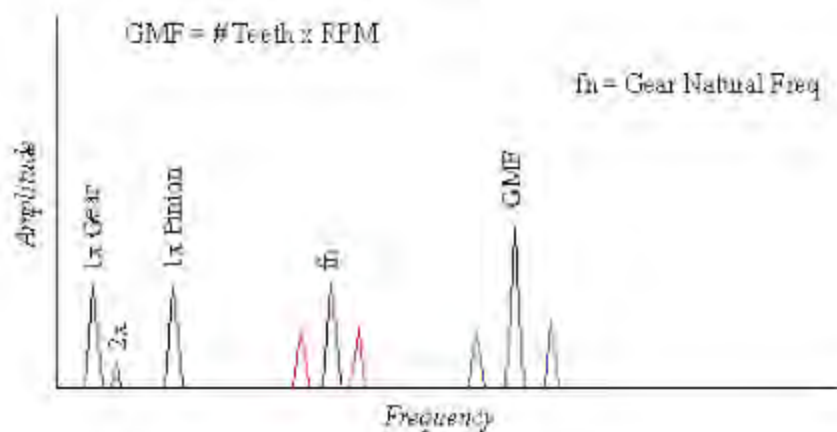


Εικόνα 4.6: Το φάσμα συχνοτήτων του κιβωτίου ταχυτήτων

Αστοχία λόγω φθοράς οδοντώσεως κιβωτίου ταχυτήτων

Για αυτό θα πρέπει οι μετρήσεις να παίρνονται σε σταθερό φορτίο ώστε να μπορούν να είναι αξιόπιστες και συγκρίσιμες με πρώιμες μετρήσεις. Αν το πλάτος της GMF αρχίζει να αυξάνεται χωρίς μεταβολή στο φορτίο τότε σημαίνει ότι υπάρχει πρόβλημα. Πιο κάτω ακολουθούν καταγραφές στο φάσμα των δονήσεων οι οποίες αναφέρονται σε αστοχίες [23].

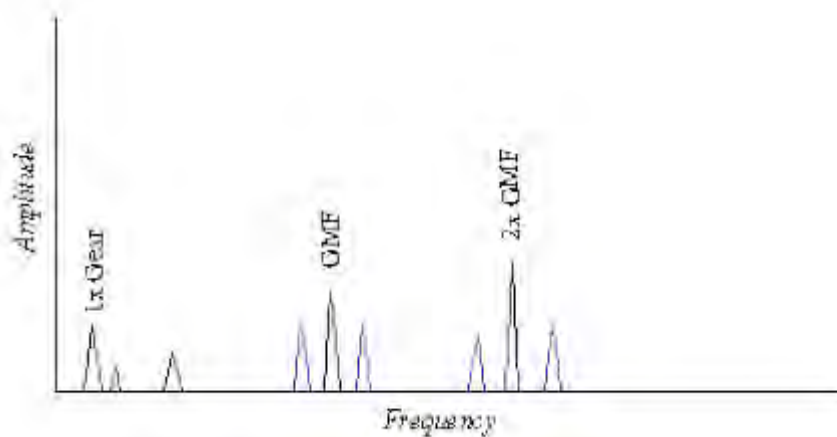
Στην **εικόνα 4.7** φαίνεται η καταγραφή στο φάσμα συχνοτήτων για αστοχία δοντιού στο κιβώτιο ταχυτήτων λόγω φθοράς. Φαίνεται διέγερση στην ιδιοσυχνότητα των δοντιών με δημιουργία sidebands εκατέρωθεν του peak του f_n . Το πλάτος του GMF μπορεί να αλλάξει μπορεί και όχι όμως ενώ συνήθως θα επηρεαστούν τα Sidebands του.



Εικόνα 4.7: Αστοχία δοντιού κιβωτίου ταχυτήτων λόγω φθοράς

Αστοχία ευθυγράμμισης κιβωτίου ταχυτήτων

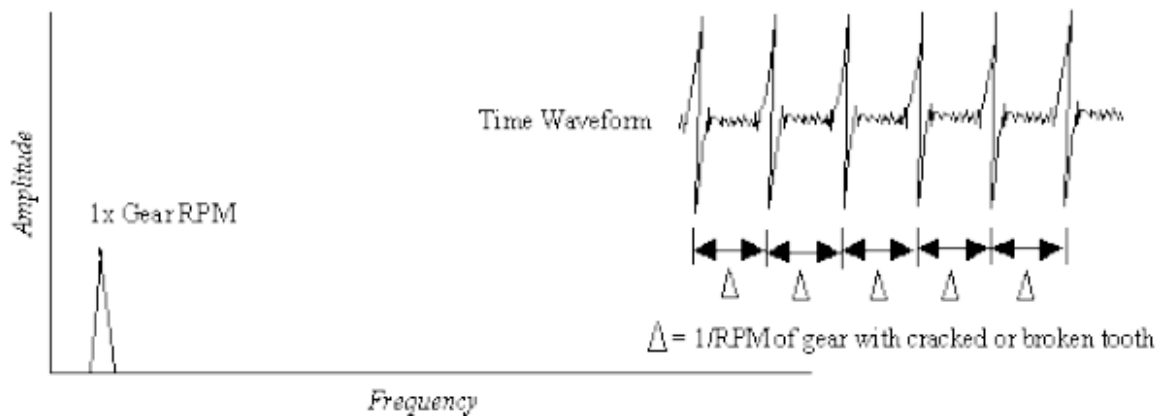
Για σφάλμα το οποίο αφορά την ευθυγράμμιση του κιβωτίου ταχυτήτων παρατηρείται διέγερση στην δεύτερη τάξη του GMF ενώ sidebands θα υπάρχουν και στην παρούσα ταχύτητα. Η πρώτη τάξη του GMF δεν θα επηρεαστεί [24].



Εικόνα 4.8: Αστοχία κιβωτίου λόγω ευθυγράμμισης

Αστοχία λόγω Crack κιβωτίου ταχυτήτων

Αν κάποιο δόντι αστοχήσει ή σπάσει ένα υψηλού πλάτους peak θα δημιουργηθεί στην 1xRPM ταχύτητα. Επίσης sidebands θα εμφανιστούν στην ταχύτητα λειτουργίας.



Εικόνα 4.9: Αστοχία δοντιού κιβωτίου ταχυτήτων λόγω φθοράς

5. ΣΥΝΟΨΗ

5.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε ανάλυση διάφορων αστοχιών του συστήματος αντλίας-ηλεκτρικού κινητήρα. Αναλύθηκαν διάφορες αστοχίες, αστοχίες ηλεκτρικού κινητήρα, αστοχίες ρουλεμάν, αστοχίες κιβωτίου ταχυτήτων και αστοχίες αντλίας. Αναλύθηκαν οι βέλτιστοι τρόποι εύρεσης των παραπάνω αστοχιών σε πρώιμα στάδια για το κάθε εξάρτημα του συστήματος αντλίας-ηλεκτρικού κινητήρα. Έγινε περιγραφή της εφαρμογής μεθόδων Machine Learning για την πρόβλεψη αστοχιών και των εξαιρετικών αποτελεσμάτων τα οποία οι μέθοδοι αυτοί φέρουν. Επιπλέον έγινε ανάλυση του πως η εκμετάλλευση των δεδομένων από τους αισθητήρες καταγραφής του συστήματος μπορεί να φέρει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα με χρήση μεθόδων Machine Learning.

Επιπλέον αναλύθηκαν οι 6 κύριες μέθοδοι ανάλυσης πρόβλεψης αστοχιών. Πρόκειται για τις μεθόδους ανάλυσης ταλαντώσεων, θερμογραφίας, Temperature Monitoring, ανάλυση ελαίων λίπανσης, MCSA, ESA (Electrical Signal Analysis). Η κάθε μέθοδος είναι χρήσιμη σε διαφορετικά στάδια εξέλιξης μιας αστοχίας, καθώς επίσης η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται και από το είδος της αστοχίας. Τέλος έγινε ανάλυση των κύριων αστοχιών του συστήματος κινητήρα-αντλίας.

REFERENCES

1. Rasmussen, Magnus. Kompendium Driftsteknikk Grunnkurs. s.l. : NTNU, 2003.
2. Michelsen, F.A. State-of-the-art Early Fault Detection- with emphasis on offshore topside experience. s.l. : Sintef, 2007.
3. WBDG. [Online] <http://www.wbdg.org/resources/rcm.php?r=om>.
4. Boyce, D.M. Centrifugal Compressors: a basic guide. s.l. : Penwell Corporation, 2003.
5. ALL-TEST PRO. The Multi-Technology Approach to Motor Diagnostics. [Online] <http://01f53f0.netsolhost.com/new/documents/TheMultitechnologyapproachRev4aprill9.pdf>.
6. U.S. Department of Energy. nrel.gov. Improving Motor and Drive System Performance. [Online] <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/39770.pdf>.
7. Electric Power Research Institute. epri.com. Electric Motor Predictive and Preventive Maintenance Guideline. [Online] <http://mydocs.epri.com/docs/public/NP-7502.pdf>.
8. Baldor Electric company. reliance. [Online] 2007. <http://www.reliance.com/mtr/mtrthrmn.htm>.
9. SKF . bearings.com. Maintenance Tips for Electric Motor Bearings. [Online] April 2002. http://www.bearings.com/publications_and_reports/pdfs/tech_tips/TechTipsv12_1.pdf.

10. Gas Machinery Research Council Southwest Research Institute. gmrc.org. Application Guideline for Electric Motor Drive Equipment For Natural Gas Compressors. [Online] May 2009.
<http://www.gmrc.org/documents/APPLICATIONGUIDELINEFORELECTRICMOTORDRIVEEQUIPMENTFORNATURALGASCOMPRESSORS.pdf>.
11. Brderer, Chriatian. gaselectricpartnership.com. VFD Compressor Drives. [Online] February 8,2008.
<http://www.gaselectricpartnership.com/ABB%202009%RevA.pdf>.
12. Teotrakool, Kaptan. Adjustable Speed Drive Bearing Fault Detection via support Vector Machine Incorporating Feature Selection Using Generic Algorithm. 2007.
13. Wikipedia. [Online] http://en.wikipedia.org/wiki/Variable_frequency_drive.
14. Brian G. Hudson, Andy Mellor. IEEE Xplore: HV Motor Condition Monitoring The end user's view. [Online] 1999. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=771845>.
15. Penrose, Howard W. reliabilityweb.com. Basic Overview of RCM Based Approach for Motor Management Programs. [Online]
http://www.reliabilityweb.com/art04/motor_rcm.htm.
16. ALL-TEST PRO. ALL-TEST PRO. Tchnology Overview. [Online]
<http://www.alltestpro.com/new/overview.asp>.
17. Hamid A. Toliyat, Gerald B. Kliman. Handbook of Electric Motors. s.l. : Marcel Dekker, 2004.
18. Kruger, William. Alltestpro.com. [Online] 2009.
<http://www.alltestpro.com/documents/RollingElementBearingFailureswithESAandMVA2009.pdf>.
19. Howieson, Donald D. A Practical Introduction to Condition Monitoring of Rolling Element Bearings Using Envelope Signal Processing.

20. Satish Rajagopalan, Thomas G. Habetler, Ronald G. Harley, Tomy Sebastian, Bruno Lequesne. IEEEExplore. Current/Voltage-Based Detection of Faults in Gears Coupled to Electric Motors. [Online] November 2006.
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4012304&tag=1>.
21. Wowk, Victor. Machinery Vibration: Measurement and Analysis. s.l. : McGraw-Hill, 1991.
22. G. Dalpiaz, A. Rivola, R. Rbini. unibo.it. Gear Fault Monitoring: Comparison of Vibration analysis Techniques. [Online] <http://diem1.ing.unibo.it/mechmach/rivola/pub13.pdf>.
23. Stevens, David. vibanalysis.co.uk. Equipment Condition Monitoring. [Online] <http://www.vibanalysis.co.uk/>.
24. Eidsmoen, Ø. [Online] <http://www.ipt.ntnu.no/~jsg/undervisning/naturgass/lysark/LysarkEidsmoen2005.pdf>.