



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΕΛΛΑΔΟΣ

ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ,
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΗΣ
ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ
ΡΕΥΜΑΤΟΣ**

Πτυχιακή Εργασία του
Εφραιμίδα Αγησίλαου (0067)

Επιβλέπων: Στ. Βολογιαννίδης, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήματος
Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών

Θεσσαλονίκη, Ιανουάριος 2022

Υπεύθυνη Δήλωση : Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην πτυχιακή εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η πτυχιακή εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδας.

Αυτή η σελίδα είναι εσκεμμένα κενή

Περίληψη

Με την παρούσα εργασία ερευνήσαμε τις παραμέτρους που ένας βιομηχανικός κινητήρας μικρής και μέτριας ισχύος που επηρεάζουν τη διάρκειά ζωής του και πως μπορούμε να προβλέψουμε μία αστοχία στα υλικά που απαρτίζουν μία κινούμενη κατασκευή δια μέσου της παρατήρησής της και των διαφόρων κραδασμών που αναπτύσσονται σε αυτή, κάτω από φυσιολογικές ή μη, συνθήκες. 54

Κατασκευάστηκε μία πειραματική διάταξη από έναν κινητήρα 0,75kW, αναρτημένο σε έναν μειωτήρα με $i=80$ που λιπαινόταν με ορυκτό λιπαντικό. Στην έξοδο του κινητήρα τοποθετήθηκε σύνδεσμος για προσάρτηση άξονα με διαμορφώσεις ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν ρουλεμάν διαφορετικής διαμέτρου. Οι κραδασμοί μετρούνταν από έναν αισθητήρα κραδασμών και τα αναλογικά δεδομένα που εξήγαγε, μεταφέρονταν σε ένα PLC S7 – 1200 όπου γινόταν ο μετασχηματισμός τους σε ψηφιακό σήμα. Τα ψηφιακά, πλέον σήματα οδηγούνταν μέσω ενός raspberry Pi στο cloud της Amazon για περαιτέρω επεξεργασία.

Το πείραμα διήρκησε δύο μήνες και περιελάμβανε μετρήσεις κραδασμών του μειωτήρα, μετρήσεις ρουλεμάν με εργοστασιακή λίπανση ώστε να έχουμε ένα baseline για τις μετρήσεις μας. Έπειτα είχαμε μετρήσεις χωρίς λιπάντικο κι εν συνεχεία πήραμε δεδομένα κραδασμών για διάφορους τύπους ελλατωμάτων που εμείς δημιουργήσαμε σε εσωτερικό, εξωτερικό δακτύλιο και στις μπίλιες κύλισης.

Με το πέρας των πειραμάτων παρατηρήσαμε τις διαφορές στις μετρήσεις που είχαμε από τα επιμέρους πειράματα και διαπιστώσαμε πως οι αναμμενόμενες τιμές ταχύτητας κι επιτάχυνσης των ταλαντώσεων ήταν παρόμοιες με τις μετρήσιμες, γεγονός που μας οδήγησε στο συμπέρασμα ότι μπορούμε να αξιοποιήσουμε τα δεδομένα και σε άλλες εφαρμογές, διαφορετικής κλίμακας.

Τα συμπεράσματα που απορρέουν από μία εργασία στην οποία μετρήθηκε τέτοιος όγκος δεδομένων είναι ποικίλα και δεν περιορίζονται στα στενά όρια μόνο της παρούσας και κάλλιστα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από εφαρμογές ελέγχου ποιοτικού ελέγχου, εφαρμογές διαχείρισης ποιότητας και λοιπές παρεμφερείς.

Περιεχόμενα

Περίληψη4

Ευχαριστίες6

Εισαγωγή7

1. Θεωρία9

2. Πρακτικό μέρος28

 2.1 Διάταξη εξοπλισμού28

Βιβλιογραφία38

Παράρτημα ΑΣφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω την ομάδα των καθηγητών που ασχολήθηκαν με τη συγκεκριμένη εργασία, είτε κατά την συγγραφή, είτε κατά την εξέταση και την αξιολόγηση.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο Κουτσοδάκη Γ. για την πολύτιμη συμβολή του καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, και τον χρόνο που διέθεσε για τις αποσφαλματώσεις του εξοπλισμού.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Παρασκευά Χ. για την παρακίνηση του, από την αρχή ακόμα, αυτής της προσπάθειας και τις πολύτιμες συμβουλές του στον τρόπο συγγραφής και παρουσίασης.

Τέλος το μεγαλύτερο και πιο απαραίτητο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου και συγκεκριμένα την σύζυγό μου που στάθηκε δίπλα μου και βοήθησε σε πολύ μεγάλο βαθμό την ολοκλήρωση αυτού του «ονείρου» που είχα εδώ και πολλά χρόνια.

Εισαγωγή

Η συντήρηση του εξοπλισμού είναι μια διαδικασία η οποία είναι αναγκαστική και γίνεται με συνήθως με έναν από τους τρεις ακόλουθους τρόπους:

- Αντιδραστική συντήρηση

Η αντιδραστική συντήρηση συντηρεί/αντικαθιστά τον εξοπλισμό μετά την αστοχία, μεγιστοποιώντας έτσι το χρόνο λειτουργίας του εξοπλισμού αλλά διακινδυνεύοντας την διακοπή της παραγωγής χωρίς καμία προειδοποίηση και για μεγάλο χρονικό διάστημα.

- Προληπτική συντήρηση

Η προληπτική συντήρηση βασίζεται στην προγραμματισμένη συντήρηση/αντικατάσταση του εξοπλισμού ανάλογα με τις εντολές του κατασκευαστή. Η γραμμή παραγωγής διακόπτεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα για συντήρηση, ενώ απρόβλεπτες βλάβες είναι δυνατόν να εμφανιστούν ξαφνικά και να σταματήσουν την γραμμή παραγωγής.

- Προβλεπτική συντήρηση

Η προβλεπτική συντήρηση έχει σαν στόχο με την χρήση εξειδικευμένων αισθητήρων και λογισμικών, την πρόβλεψη των βλαβών πριν αυτές συμβούν, δίνοντας έτσι την επιλογή του χρόνου συντήρησης, μεγιστοποιώντας ταυτόχρονα και τον χρόνο αδιάλειπτης λειτουργίας της γραμμής παραγωγής. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της προβλεπτικής συντήρησης που συμβάλει στην μείωση των δαπανών για μια επιχείρηση είναι πως γίνεται εκμετάλλευση της μέγιστης διάρκειας ζωής RUL (remaining useful life) των εξαρτημάτων, καθώς το σύστημα εκμεταλλεύεται πλήρως ένα εξάρτημα πριν την αντικατάστασή του.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση των πρακτικών συντήρησης κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος και η εύρεση των βέλτιστων τεχνικών προβλεπτικής συντήρησης που θα έχουν ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της αξιοπιστίας του εξοπλισμού και την μείωση βλαβών.

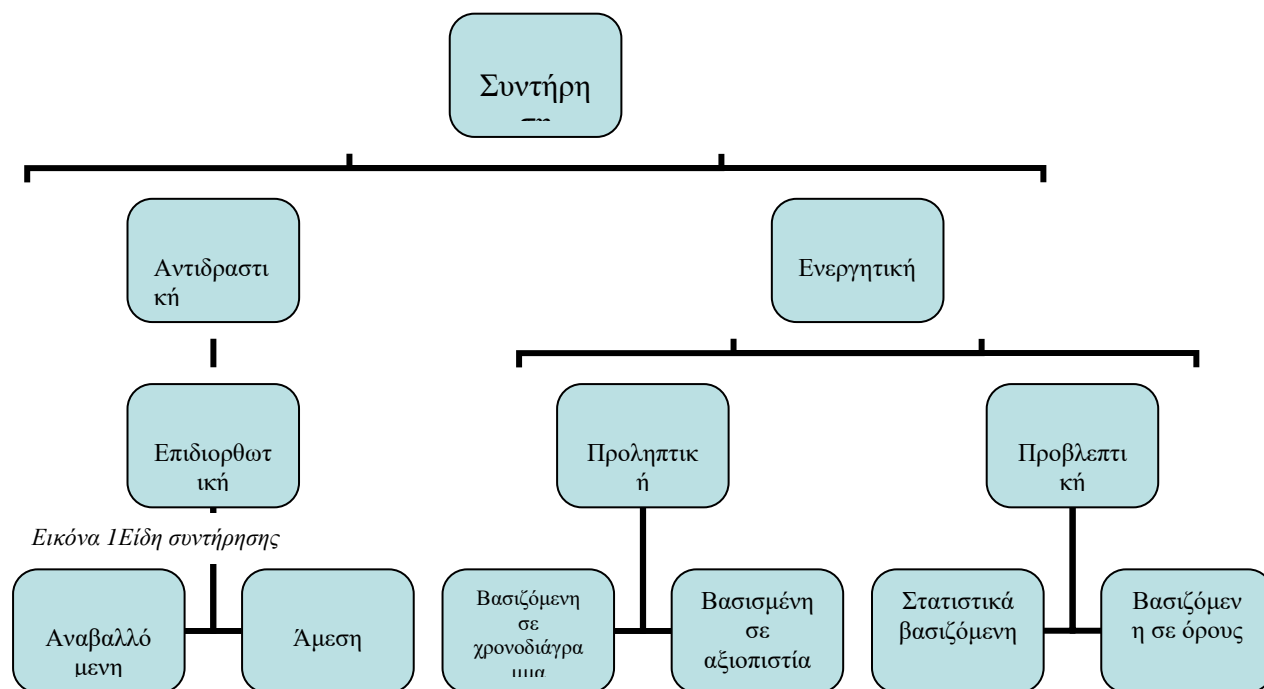
Πιο συγκεκριμένα οι στόχοι της εργασίας είναι:

- Διερεύνηση των υφιστάμενων πρακτικών συντήρησης.
- Ανάπτυξη αλγορίθμων για προβλέψεις. Για την εύρεση των βέλτιστων αλγορίθμων θα γίνουν συσχετίσεις ελλαττωματικού στοιχείου μηχανήματος με δεδομένα που θα ληφθούν από αισθητήρια και θα αναλυθούν στον χρόνο και την συχνότητα και εν συνεχεία θα δοκιμαστούν τεχνικές νευρωνικών δικτύων, ασαφείς λογικές και τεχνικές επεξεργασίας σήματος.
- Εύρεση δεδομένων συσχέτισης μεταξύ ελλαττωματικού στοιχείου μηχανήματος και προσδιορισμός βασικής αίτιας αστοχίας.

1. Θεωρία

1.1 Είδη συντήρηση και γιατί τα ξεχωρίζουμε

Υπάρχουν πολλοί τρόποι να προσδιορίσουμε τις διαδικασίες της συντήρησης. Σε γενικές γραμμές μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε 2 τύπους: την (1) Αντιδραστική συντήρηση και την (2) Ενεργητική συντήρηση. Παρακάτω φαίνεται η κατηγοριοποίηση της Συντήρησης



1) Αντιδραστική συντήρηση

Η αντιδραστική συντήρηση γνωστή και σαν επισκευαστική συντήρηση είναι οι επισκευές που γίνονται ενώ ο εξοπλισμός έχει ήδη χαλάσει.

Το είδος αυτό της συντήρησης στόχο έχει να επιδιορθώσει τον εξοπλισμό στην αρχική του κατάσταση. Ο χαλασμένος εξοπλισμός επιστρέφει σε λειτουργία μετά από αντικατάσταση ή επισκευή των φθαρμένων ή

κατεστραμμένων μερών του. Η μέθοδος αυτή είναι η πιο ακριβή γιατί τα σταματήματα του εξοπλισμού συμβαίνουν σε παραγωγικές ώρες και συνυπολογίζεται και το κόστος από την απώλεια της παραγωγής. Επίσης οι ειδικές αποστολές ανταλλακτικών είναι πολύ ακριβότερες από τις απλές αποστολές και τέλος επειδή το προσωπικό που θα κληθεί να επιδιορθώσει τη βλάβη θα χρειαστεί πιθανότατα να εργαστεί υπερωριακά ώστε να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες από το χρόνο της παραγωγής.

2) Ενεργητική Συντήρηση

Η ενεργητική συντήρηση είναι η πρόληψη των αστοχιών και των αιτιών τους και να προληφθούν πρωτού εμφανιστούν.

Η ενεργητική συντήρηση αποτελείται από απο την προληπτική και την προβλεπτική συντήρηση

3) Προληπτική και Προβλεπτική συντήρηση

i) Προληπτική συντήρηση

- Περιγραφή: Εκτέλεση προγραμματισμένων επεμβάσεων πριν εμφανιστεί η βλάβη.
- Χαρακτηριστικά: Απλή και εύκολη στην εκτέλεση, αξιόπιστη αλλά χαμηλής απόδοτικότητας.

ii) Προβλεπτική συντήρηση

- Περιγραφή: Περικλείει την φιλοσοφία «εκτέλεση τη σωστή στιγμή. Οι επιδιορθωτικές ενέργειες εκτελούνται μόνο όταν είναι απαραίτητο
- Χαρακτηριστικά: Υψηλή απόδοση, αξιόπιστη μέθοδος, αλλά χρειάζεται μεγάλο όγκο δεδομένων και περίπλοκα μοντέλα ανάλυσης.

iii) Η υλοποίηση της προβλεπτικής συντήρησης αντιμετωπίζεται με πολλές ανησυχίες, με ανάγκες πελατών, με απαιτήσεις οργάνωσης, και με τις διαθέσιμες τεχνολογίες. Συνοψίζοντας θα λέγαμε πως χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες: α) την προβλεπτική συντήρηση που βασίζεται σε στατιστικά δεδομένα που έχουν καταγραφεί κατά τις διάφορες διακοπές λειτουργίας από βλάβες που έχουν παρουσιαστεί κατά καιρούς και β) την προβλεπτική συντήρηση που βασίζεται στη κατάσταση του εξοπλισμού και στην περιοδική καταγραφή παραμέτρων και προσπαθεί να εντοπίσει πιθανά σημάδια κόπωσης του

εξοπλισμού. Η κατηγορία αυτή προσανατολίζεται στην παρακολούθηση των παραμέτρων και την απόφαση για τη συντήρηση την παίρνει ο άνθρωπος, ενώ η προληπτική συντήρηση εστιάζει περισσότερο στην ανάλυση των δεδομένων και την άντληση αυτών για να υποβοηθήσει την αυτοματοποίησή της.

Συγκρινόμενη με άλλες στρατηγικές συντήρησης η προβλεπτική συντήρηση έχει τα εξής προτερήματα: ο εξοπλισμός που χρειάζεται συντήρηση, σταματά μόνο όταν έχει φτάσει το απόλυτο όριο πριν την κατάρρευση, μειώνοντας έτσι το συνολικό χρόνο για την συντήρηση του μηχανήματος, μειώνοντας το κόστος συντήρησης, αποφεύγοντας ταυτόχρονα και τις καταστροφικές ζημιές του εξοπλισμού, αυξάνοντας το συνολικό διαθέσιμο χρόνο της μηχανής, αυξάνοντας το προσδόκιμο ζωής της. Παρόλα αυτά αντιμετωπίζει και κάποιες δυσκολίες όπως:

- 1) Μεγάλη ζήτηση σε ποσότητα και ποιότητα δεδομένων καθώς και σύνδεση πολλών πηγών δεδομένων για το διαμοιρασμό και την δημοσίευση αυτών. Καθώς αυτές οι πηγές δρουν σε διαφορετικά περιβάλλοντα, ο συνδυασμός αυτών των δεδομένων είναι συνήθως προβληματικός [7]
- 2) Η ικανότητα να ανταπεξέρχεται σε βιομηχανικά δεδομένα. Για να διαχειριστεί τα μεγάλα δεδομένα οι βιομηχανίες χρειάζονται την δυνατότητα να υποστηρίζουν διαφορετικούς τύπους πληροφορίας καθώς και το υπόβαθρο να αποθηκεύουν μεγάλο όγκο δεδομένων, και την ευελιξία να διαχειρίζονται την πληροφορία από την ώρα που θα συλλεχθεί και θα αποθηκευτεί, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την ιστορική ανάλυση κρίσιμων τάσεων ώστε να γίνει η, σε πραγματικό χρόνο, προληπτική ανάλυση.[8]
- 3) Η ακρίβεια της προβλεπτικής συντήρησης. Η ανακριβής προβλεπτική πληροφορία μπορεί να μας οδηγήσει σε αχρείαστη συντήρηση εξοπλισμού, όπως πρόωρη αντικατάσταση εξαρτημάτων ή σε σταμάτημα της παραγωγής λόγω απροσδόκητων βλαβών. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι η ακρίβεια του υπολοιπούμενου χρόνου ζωής, ειδικά των μακροχρόνιων προβλέψεων, που δίνει χρόνο για τη σωστή προετοιμασία της συντήρησης, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική πραγματοποίηση των δυνατοτήτων της προβλέπτικής συντήρησης. [9]

4) Βιομηχανία 4.0

Στη Βιομηχανία 4.0 μπορούμε να κατασκευάσουμε ανεξάρτητα και εξατομικευμένα αντικείμενα στο κόστος που θα είχε μία μαζική παραγωγή, κατασκευζόμενα σε μία ευφυή βιομηχανία με μεγάλο εύρος αυτοματισμών.

Τα επιμέρους τμήματα που απαρτίζουν την Βιομηχανία 4.0 είναι:

- 1) Κυβερνο-φυσικά συστήματα (cyber- physical systems)
- 2) Διαδίκτυο των συσκευών (Internet of things IOT)
- 3) Big data και data mining
- 4) Internet of Service (IOS)

a) Εξόρυξη δεδομένων

Η συλλογή «μεγάλων δεδομένων» (big data) δεν είναι απλά μία διαδικασία για αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων σε μία βάση δεδομένων ή σε μία αποθήκη δεδομένων. Η συλλογή big data μας επιτρέπει να αναλύουμε και να ανακαλύπτουμε κανόνες και γνώση συλλέγοντας δεδομένα από πολλαπλές πηγές. Έτσι μπορούμε να κάνουμε τη σωστή επιλογή, τη σωστή στιγμή και στο σωστό μέρος.

b) Αποκέντρωση (decentralization)

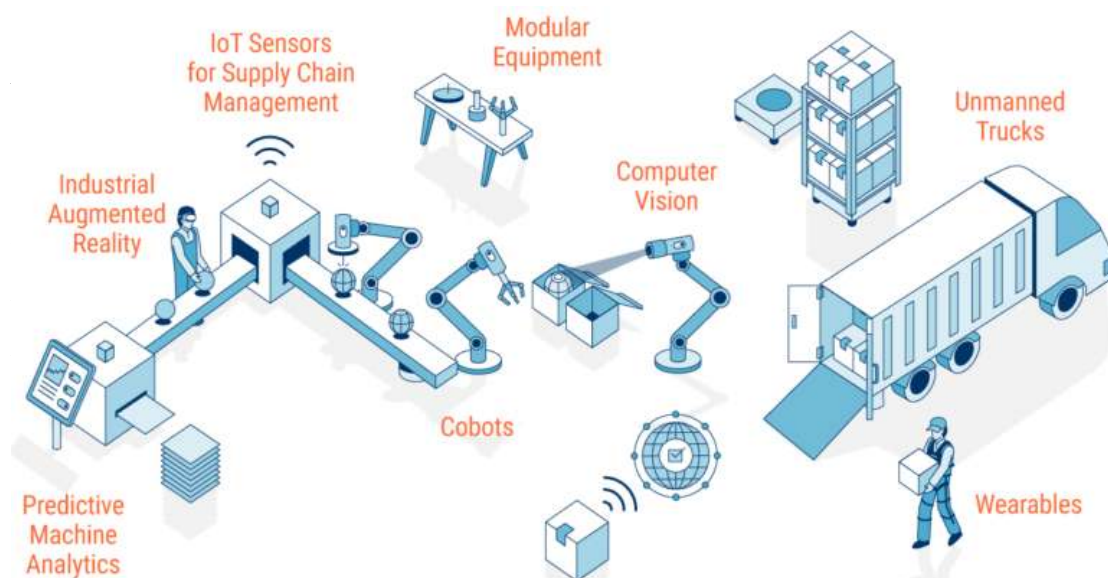
Η αυξημένη ζήτηση για ανεξάρτητα προϊόντα κάνει διαρκώς αυξανόμενη τη δυσκολία να ελέγξουμε όλα τα συστήματα κεντρικά. Οι ενσωματωμένοι υπολογιστές επιτρέπουν τα κυβερνο-φυσικά συστήματα (CPS) να λαμβάνουν μόνα τους αποφάσεις. Μόνο σε περιπτώσεις αποτυχίας οι διεργασίες μεταπηδούν σε υψηλότερο επίπεδο. Ωστόσο για τη διασφάλιση της ποιότητας και την ιχνηλάτηση είναι απαραίτητο να καταγράφεται ολοκληρω το σύστημα κάθε στιγμή.

5) Περίγραμμα προβλεπτικής συντήρησης

Η προγνωστική συντήρηση είναι ένα σύνολο δραστηριοτήτων που ανιχνεύουν αλλαγές στη φυσική κατάσταση του εξοπλισμού (σημάδια αστοχίας) προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες εργασίες συντήρησης για μεγιστοποίηση της

διάρκειας ζωής του εξοπλισμού χωρίς αύξηση του κινδύνου αποτυχίας. Διακρίνεται σε δύο είδη σύμφωνα με τις μεθόδους ανίχνευσης των σημείων αστοχίας: (1) Προγνωστική συντήρηση βάσει στατιστικών και (2) Προγνωστική συντήρηση βάσει συνθηκών. Η πρόβλεψη που βασίζεται σε στατιστικά δεδομένα (SBM) εξαρτάται από το πόσο σχολαστική καταγραφή έγινε στα στατιστικά δεδομένα κατά την αναγνώριση των σταματημάτων των μετρούμενων ειδών και εξαρτημάτων για την ανάπτυξη μοντέλων για την πρόβλεψη αστοχιών, ενώ η προγνωστική συντήρηση βασίζεται στη συνεχή ή περιοδική παρακολούθηση των συνθηκών του εξοπλισμού ώστε να εντοπιστούν τα σημάδια αστοχίας και παρθούν αποφάσεις για τη συντήρηση ή όχι, χρησιμοποιώντας τεχνολογία εξόρυξης δεδομένων.

Συνοψίζοντας θα λέγαμε πως το πιο δύσκολο κομμάτι της προβλεπτικής συντήρησης είναι η ανάλυση των δεδομένων



ελαττώματα και τη συντήρηση κατά την παραγωγική διαδικασία. Συνάμα, η RFID τεχνολογία εφαρμόζεται ώστε να αναγνωριστούν τα εξαρτήματα εκείνα τα οποία να έχουν πιθανά σφάλματα.[10]

7) Profit Loss Indicator

Στο πλαίσιο του High Performance Industrial Manufacturing (HPIM) και του Industry_4.0 δημιουργήθηκε το πρότυπο PLI (Profit Loss Indicator) σε σχέση με το Overall Equipment Effective (OEE) το οποίο απευθύνεται σε όλες τις εγκαταστάσεις και όλες τις βιομηχανικές διεργασίες, και όχι μόνο σε κάποια αυτοματοποιημένα συστήματα. Το OEE είναι ένα ευρέως γνωστό εργαλείο το οποίο αποσκοπεί στο να σταντάρει την μέτρηση της απόδοσης στο σύνολο της βιομηχανίας. Για να γίνει αυτο

θα πρέπει συστήματα όπως ERP (Enterprise Resource Planning), PLM (Product Lifecycle Management) και CMMS (Computerized Maintenance Management System) να είναι ήδη εισαγμένα στη δομή της εκάστοτε εταιρείας.

Στην πραγματικότητα, αυτό υποδεικνύεται και από την McKinsey & Company ότι η τυπική προβλεπτική συντήρηση μπορεί να βελτιώσει τη χρήση του ενεργητικού κατά 30 έως 50 % και μείωση του συνολικού χρόνου διακοπής λειτουργίας του μηχανήματος και αύξηση της διάρκειας ζωής του από 20 έως 40 % [11].

Η προβλεπτική συντήρηση είναι μια φιλοσοφία που, απλά, χρησιμοποιεί την πραγματική κατάσταση λειτουργίας της εγκατάστασης και του εξοπλισμού και συστήματα για τη βελτιστοποίηση της συνολικής λειτουργίας της μονάδας. Η προβλεπτική συντήρηση βασίζεται στις συνθήκες λειτουργίας για να δημιουργήσει το πρόγραμμα συντήρησης. Αντί να βασίζομαστε σε βιομηχανικές ή στατιστικά χρήσης των δεδομένων εγκαταστάσεων μέσου όρου ζωής (μέσος χρόνος έως την αποτυχία) για να προγραμματίσουμε τις εργασίες συντήρησης, η προγνωστική συντήρηση χρησιμοποιεί την απευθείας παρακολούθηση της μηχανικής κατάστασης, της απόδοσης του συστήματος και άλλους δείκτες για τον προσδιορισμό του πραγματικού μέσου χρόνου έως την αποτυχία ή την απώλεια απόδοσης για κάθε μηχανή και σύστημα στη μονάδα. Οι παραδοσιακές μέθοδοι που βασίζονται στο χρόνο παρέχουν μια κατευθυντήρια γραμμή κανονικής διάρκειας ζωής του μηχανήματος.

Ένα πρόγραμμα προβλεπτικής συντήρησης παρέχει στοιχεία για την πραγματική μηχανική κατάσταση κάθε μηχανής και τη λειτουργική αποτελεσματικότητα των παραγωγικών διαδικασιών. Το πρόγραμμα μπορεί επίσης να προβλέψει τα προβλήματα του μηχανήματος πριν γίνουν σοβαρά. Τα περισσότερα μηχανικά προβλήματα μπορούν να ελαχιστοποιηθούν εάν εντοπιστούν και επισκευαστούν εγκαίρως. Φυσιολογικές μηχανικές αστοχίες υποβαθμίζονται με ταχύτητα ευθέως ανάλογη με τη σοβαρότητά τους. Τα τελευταία χρόνια, μια ποικιλία μεθόδων Διαχείρισης, όπως η Ολική Παραγωγική Συντήρηση (TPM) και η με επίκεντρο την αξιοπιστία συντήρηση (RCM), έχουν εξελιχθεί για αναποτελεσματική συντήρηση. Πολλές παραγωγικές μονάδες έχουν υιοθετήσει εν μέρει μία από αυτές τις Γρήγορες επιδιορθώσεις.

Η ιαπωνική προσέγγιση για αποτελεσματική συντήρηση είναι η TPM - Συνολική Παραγωγική Συντήρηση. Αναπτύχθηκε από τον Deming στις αρχές της δεκαετίας του '50 (1951). Οι γενικές ιδέες του, όπως υιοθετήθηκαν από τους Ιάπωνες, τονίζουν την

απόλυτη τήρηση των βασικών κανόνων, όπως λίπανση, οπτικοί έλεγχοι και καθολική χρήση βέλτιστων πρακτικών σε όλες τις πτυχές της συντήρησης.

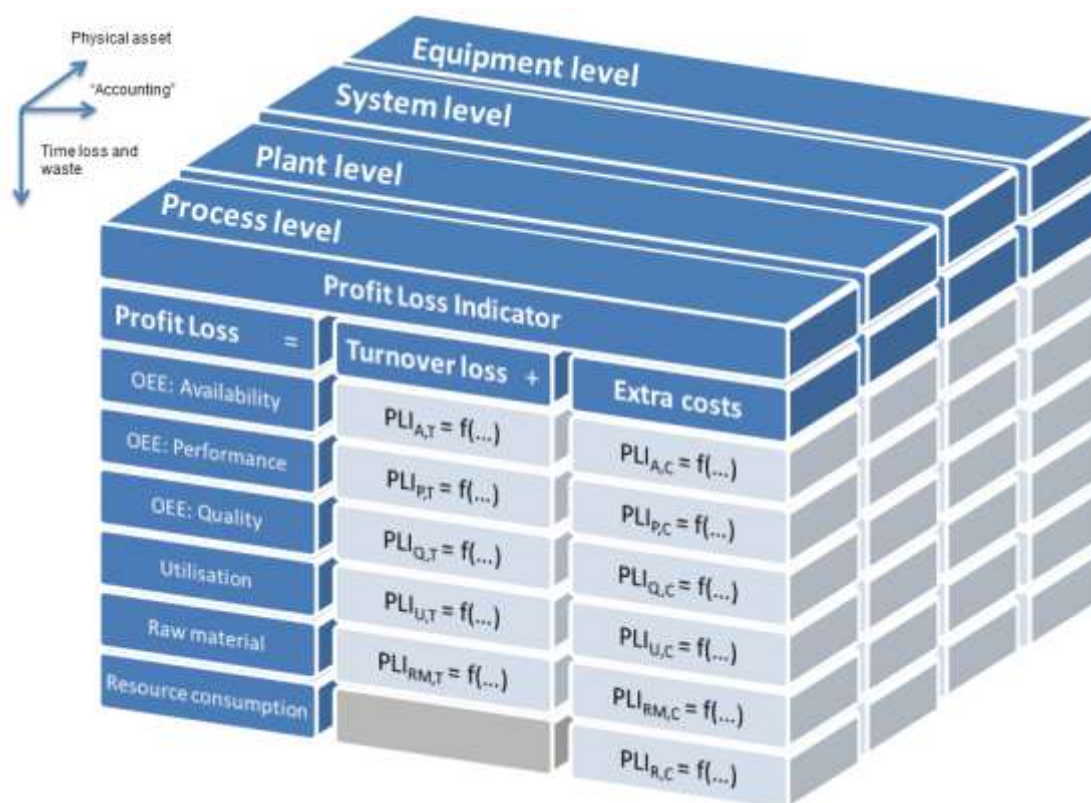
Σύμφωνα με το ΟΕΕ Προβλεπτική συντήρηση σημαίνει βελτίωση της παραγωγικότητας, της ποιότητας του προϊόντος και συνολική αποτελεσματικότητα (ΟΕΕ) σε εργοστάσια παραγωγής. Η προβλεπτική συντήρηση χρησιμοποιεί παρακολούθηση κραδασμών, θερμική απεικόνιση και ανάλυση, ανάλυση λιπαντικού και μη καταστροφικές τεχνικές δοκιμών.

Πυλώνες TPM:

- ✓ Βελτίωση της αποτελεσματικότητας του εξοπλισμού. Βρίσκοντας τις έξι μεγάλες απώλειες και τι προκαλεί τον εξοπλισμό να είναι μη αποδοτικός και κάνοντας συνεχείς βελτιώσεις.
- ✓ Συμμετοχή χειριστών στην καθημερινή συντήρηση.
- ✓ Βελτίωση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας συντήρησης.
- ✓ Εκπαίδευση και κατάρτιση προσωπικού.
- ✓ Σχεδιασμός και διαχείριση προβλεπτικής συντήρησης.

Οι λόγοι μπορεί να είναι πολλοί, αλλά περιμένουμε ότι η ανάπτυξη της ομάδας συνήθως δεν είναι ο πρωταρχικός στόχος του επικεφαλής κάθε εταιρίας. Πολλοί θεωρούν ότι η ανάπτυξη μίας ομάδας είναι πολύ χρονοβόρα ή γνωρίζει ήδη την ικανότητα στην επιχείρησή του. Η εμπειρία μας δείχνει ότι η πραγματικότητα είναι διαφορετική οι περισσότεροι ηγέτες και μέλη της ομάδας χρειάζονται εκπαίδευση για να είναι αποτελεσματικοί.

Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα για το Profit Loss Indicator.



Εικόνα 3 Διάγραμμα Profit Loss Indicator

8) Εφαρμογές σε τουρμπίνες υδροστροβίλων

Η τρέχουσα πρακτική συντήρησης που εφαρμόζεται στις τουρμπίνες υδροστροβίλων (HTG) είναι κυρίως η προληπτική συντήρηση [14]. Για να μειωθεί η πιθανότητα αστοχίας ή υποβάθμισης της λειτουργίας ενός αντικειμένου, η προληπτική συντήρηση πραγματοποιείται σε προκαθορισμένα διαστήματα ή σύμφωνα με προκαθορισμένα κριτήρια. Ωστόσο, η προληπτική συντήρηση δεν μπορεί να εξαλείψει την εμφάνιση τυχαίας καταστροφικής αστοχίας. Επιπλέον, το κόστος της συχνής συντήρησης αυξάνεται με την αυξανόμενη ζήτηση για προϊόν τόσο σε ποιότητα όσο και σε πολυπλοκότητα. [15] έδειξε ότι το κόστος συντήρησης για τις βιομηχανικές επιχειρήσεις στις ΗΠΑ έχει αυξηθεί κατά 10 - 15% ετησίως από το 1979. Η συντήρηση μπορεί να κοστίσει έως και 70% του συνολικού κόστους λειτουργίας, εάν δεν είναι εκτελεστεί σωστά [16].

Η προγνωστική συντήρηση είναι μια πιο αποτελεσματική προσέγγιση για τις τουρμπίνες υδροστροβίλων. Χρησιμοποιώντας την φιλοσοφία του «εκτέλεση την κατάλληλη στιγμή» και υλοποιώντας τις κατάλληλες εργασίες συντήρησης, μεγιστοποιούμε την διάρκεια ζωής των μηχανημάτων, χωρίς να αυξάνουμε την πιθανότητα αποτυχίας σύμφωνα με την κατάσταση του μηχανήματος και την

Εναπομείνουσα Χρήσιμη Ζωή του μηχανήματος. Υπάρχουν δύο τύποι σημαντικών εργασιών στις ενέργειες της πρόβλεπτικής συντήρησης.

- i) Τα διαγνωστικά ασχολούνται με την ανίχνευση, την απομόνωση και τον εντοπισμό σφαλμάτων όταν αυτά παρουσιαστούν.
- ii) Τα προγνωστικά ασχολούνται με την ανίχνευση σφαλμάτων πριν αυτά συμβούν [17].

9) Ο ρόλος της συντήρησης παίζει καθοριστικό ρόλο στο δρόμο για την βιώσιμη παραγωγή. Για να μπορέσουμε να επιτύχουμε πράσινη παραγωγή, χρειάζονται περισσότερες στρατηγικές προληπτικής συντήρησης με βάση τα δεδομένα και αναμένεται να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, τους πόρους συντήρησης όσο αφορά τα ανταλλακτικά και τα αναλώσιμα όσο αφορά την λίπανση για παράδειγμα.

Η Ευρωπαϊκή κοινότητα έχει θέσει τους παρακάτω [18] στόχους βιωσιμότητας:

- i) 20% της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- ii) 20% άυξηση της ενεργειακής απόδοσης

Η κατασκευή προϊόντων που χρησιμοποιούν τακτικές οι οποίες ελαχιστοποιούν τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εξοικονομούν ενέργεια και φυσικούς πόρους, καθώς και να είναι ασφαλείς για τους εργαζομένους, τις κοινότητες και τους καταναλωτές, είναι οικονομικά σταθερές.[19]

Σαν παράδειγμα τέτοιας τεχνολογίας είναι η κατεργασία εν ξηρώ, όπου εφαρμόζεται το αναλυτικό μοντέλο της πρόβλεψης της διάρκειας ζωής των εργαλείων.

1.2 Πρότυπο μετρήσεων

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν σύμφωνα με το ISO 20816-2018. Το πρότυπο υποδουκνείει να παίρνονται οι μετρήσεις ακτινικά του άξονα με αισθητήρα επαφής. Πρέπει όλες οι μετρήσεις να παίρνονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο ρουλεμάν, κάτι που ήταν εύκολο για τη δική μας διάταξη γιατί τοποθετήθηκε κατ'ευθείαν επάνω του. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να βρίσκονται τα ευαίσθητα τμήματα της διάταξης όσο το δυνατόν πιο μακριά από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και υλοποιήθηκε απομονώνοντας τον αισθητήρα από όλα τα ισχυρά ρεύματα.

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε και στην εξασφάλιση της στιβαρότητας του αισθητήρα, ο οποίος είναι αναρτημένος επάνω στην μεταλλική βάση στήριξης του μειωτήρα, καθώς και στην μεγάλη απόστασή του από μεταλικές επιφάνειες για την ελαχιστοποίηση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών

1.2.1 Εισαγωγή στο πρότυπο

Το ISO 20716-1 είναι το βασικό έγγραφο το οποίο περιγράφει τις γενικές απαιτήσεις για την αξιολόγηση των κραδασμών διαφόρων τύπων μηχανών. Παρέχει σαφείς οδηγίες για τους κραδασμούς των κουζινέτων και των αξόνων, μηχανών και μηχανικών συνόλων εγκατεστημένα σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας και σε αποθήκες ενέργειας.

Δύο κριτήρια χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των μηχανικών κραδασμών:

- α) το πρώτο κριτήριο λαμβάνει υπ' όψη του το επίκεντρο των μετρούμενων κραδασμών
- β) το δεύτερο κριτήριο λαμβάνει υπ' όψη του τις αλλαγές του επίκεντρου και της φάσης των μετρούμενων δονήσεων

Τα κριτήρια κραδασμών έχουν εδραιωθεί για οριζόντιους και κάθετους άξονες μηχανών κι έχουν εξελιχθεί για κάθε τύπο στροβίλου όταν χρησιμοποιούνται για παραγωγή ή άντληση, ότι είναι πιο σωστό. Τα κριτήρια επικέντρου κραδασμών που παρουσιάζονται εδώ, είναι απλα οδηγίες βασισμένες σε στατιστικές δοκιμές. Οι τιμές επικέντρου δεν θα πρέπει να λαμβάνονται ως δεδομένες. Συστήνεται να γίνονται οι δοκιμές από κάποιον έμπειρο αναλυτή κραδασμών. Για να αναγνωριστεί η καλή λειτουργία του μηχανήματος είναι απαραίτητο να δούμε τις παρακάτω παραμέτρους ταυτόχρονα:

- Το επίκεντρο της σχετικής ταλάντωσης του άξονα
- Το επίκεντρο της ταλάντωσης του κελύφους του ρουλεμάν
- Το ποσοστό της ανοχής του ρουλεμάν- οδηγό σε κρύα κατάσταση
- Τη θερμοκρασία λειτουργίας των μεταλλικών μερών των οδηγών των ρουλεμάν
- Το καθεστός λειτουργίας, ώστε να διασφαλιστεί ότι η μηχανή λειτουργεί μέσα στο σωστό εύρος λειτουργίας

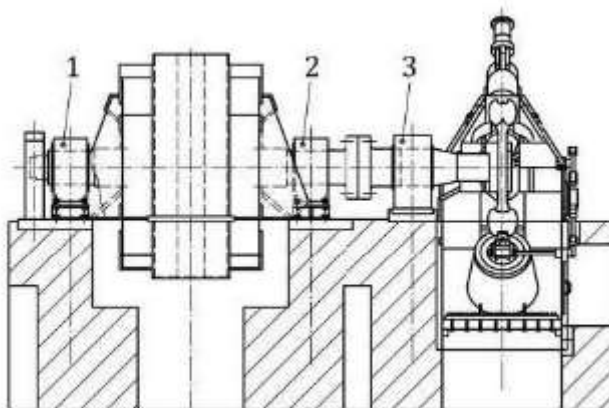
Οι προτεινόμενες ενέργειες δίνονται γι' αυτές τις περιπτώσεις όπου το επίκεντρο κραδασμών είναι πάνω από τα όρια του πίνακα Α ώστε να διασφαλιστεί αν η μηχανή είναι κατάλληλη για συνεχή μακροχρόνια λειτουργία χωρίς περιορισμούς.

Οι κατευθυντήριες γραμμές παρουσιάζονται όταν οι μηχανές λειτουργούν καθώς και για κάθε αλλαγή στο μέγεθος ή τη φάση των κραδασμών που μπορεί να παρουσιαστούν.

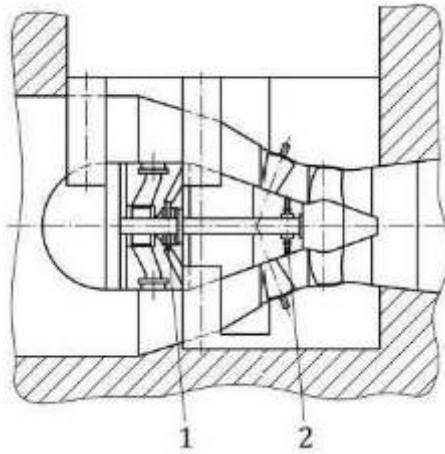
1.2.2α Διατάξεις μηχανών

Οι μηχανές μπορούν να ταξινομηθούν σε 4 μεγάλες κατηγορίες ανάλογα τη διάταξη των ρουλεμάν και το μέρος που παίρνουμε τις μετρήσεις

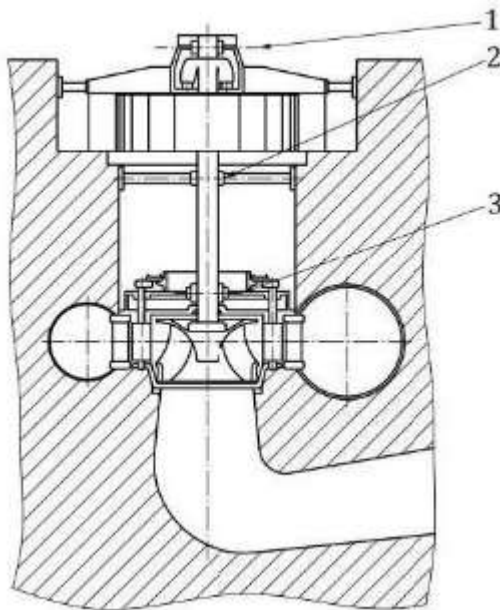
- Group 1: Οριζόντιες μηχανές με το ρουλεμάν τοποθετημένο σε σταθερό υπόβαθρο



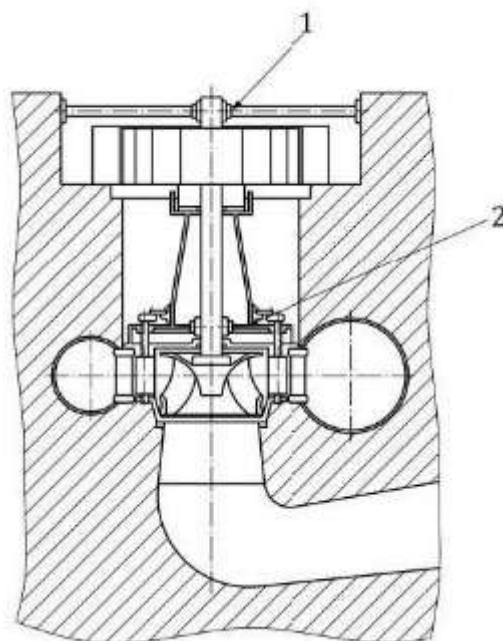
- Group 2: οριζόντιες μηχανές με το ρουλεμάν να είναι αναρτημένο πάνω στη μηχανή



- Group 3: κάθετες μηχανές όπου τα ρουλεμάν αναρτώνται από τη βάση



- Group 4: κάθετες μηχανές όπου το κάτω ρουλεμάν αναρτάται από τη βάση και το πάνω ρουλεμάν αναρτάται από το πλαίσιο του στάτορα



Σημείωση: Στα παραπάνω σχέδια οι αριθμοί δείχνουν τις πιθανές θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων μέτρησης κραδασμών

Οι μετρήσεις, παίρνονται ακολουθώντας το πρότυπο ISO 20816-1 το οποίο περιγράφει και τον μετρητικό εξοπλισμό που πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Στο πείραμά μας χρησιμοποιήσαμε και το ISO 10817-1 το οποίο δίνει κατευθυντήριες οδηγίες για το πως πρέπει να προσαρτηθεί το επιταχυνσιόμετρο.

1.2.2 Τύποι μετρήσεων

1.2.2.1 Δονήσεις κουζινέτων ρουλεμάν

Χρησιμοποιούνται κυρίως για τις μετρήσεις υδραυλικών συστημάτων, με σεισμικούς ανιχνευτές (πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα ή ηλεκτροδυναμικοί μετατροπείς ταχύτητας) οι οποίοι μετράνε την τετραγωνική μέση τιμή της ταχύτητας v_{rms} σε mm/s.

1.2.2.2 Ακτινικές δονήσεις άξονα.

Γενικά:

Οι σχετικές και απόλυτες μετρήσεις δονήσεων κραδασμών γίνονται σε μηχανές χρησιμοποιώντας ανέπαφους μετατροπείς για να μετρήσουν την απόσταση από κορυφή σε κορυφή την μετατόπιση του άξονα. Οι μετρητές επαφής με σεισμικούς μετατροπείς δεν συνιθίζεται να χρησιμοποιούνται λόγω του πολύ μικρού εύρους συχνοτήτων που απαιτείται για να παρθούν μετρήσεις σε μηχανές χαμηλής ταχύτητας.

Σχετικές μετρήσεις κραδασμών άξονα.

Για τις σχετικές μετρήσεις είναι σύνηθες να εγκαθιστούμε τους αναλυτές επάνω στο ρουλεμάν, όσο πιο κοντά γίνεται στον οδηγό του ρουλεμάν. Έτσι μετά μπορούμε να μετρήσουμε κατευθείαν στα δαχτυλίδια των ρουλεμάν, ή επάνω σε ειδικές περιοχές του άξονα (διαμορφώσεις κτλ) που έχουν κατασκευαστεί ειδικά ώστε να περιορίζουν τις ηλεκτρικές και μηχανικές παρεμβολές. Στην περίπτωση των τμηματοποιημένων οδηγών ρουλεμάν, οι μετρητές μπορούν να τοποθετηθούν ανάμεσα από τις θέσεις των ρουλεμάν, χρησιμοποιώντας τους οδηγούς αυτούς ως υποστήριξη αλλά αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σπάνια

Είναι σημαντικό να διασφαλίζεται πάντα ότι οι βάσεις των αναλυτών είναι πολύ στιβαρές. Σε περίπτωση που δεν είναι, το μετρούμενο σήμα δεν θα είναι αντιπροσωπευτικό της σχετικής κίνησης, μεταξύ του άξονα και της βάσης του ρουλεμάν. Αυτό μπορεί να διασφαλιστεί με την στατική ανάλυση της κατασκευής της επαλήθευση της φυσικής ταλάντωσης των υποστηριγμάτων με μία κρούση της κατασκευής. Η μικρότερη φυσική ακτινική ταλάντωση της βάσης του αναλυτή θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από τη συγχρονισμένη περιστροφή έτσι ώστε να εξαλειφθεί κάθε περίπτωση αντήχησης στις υποστηρικτικές κατασκευές. Αν υπάρχει υπόνοια για αντήχηση στις βάσεις που τοποθετείται ο αναλυτής κραδασμών, θα πρέπει να το γνωρίζουμε πριν να παρθεί οποιαδήποτε μέτρηση. Επίσης η κατασκευή της έδρασης του ρουλεμάν θα πρέπει να έχει την μικρότερή της ακτινική συχνότητα τουλάχιστον 10 φορές την σύγχρονη περιστροφική συχνότητα.

Θα πρέπει να φροντίζουμε ώστε να συμφωνούν όλες οι οδηγίες του κατασκευαστή του αναλυτή ώστε να υπάρχει αρκετός χώρος γύρω από τον αναλυτή ώστε να αποφευχθούν μαγνητικές παρεμβολές. Είναι σημαντικό, η επιφάνεια του άξονα, να

είναι καθαρή από ρωγμές, γρατζουνιές και αλλοιώσεις. Είναι συνηθισμένο να είναι προετοιμασμένος ο άξονας για χρήση με αξονικούς αναλυτές έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα παρεμβολών, μηχανικών και ηλεκτρικών. Καλό είναι οι άξονες να ετοιμάζονται για τις διαμορφώσεις του αναλυτή ενέργειας, την ίδια στιγμή που γίνονται και οι κατεργασίες για τις εδράσεις των ρουλεμάν.

Απόλυτες μετρήσεις κραδασμών άξονα

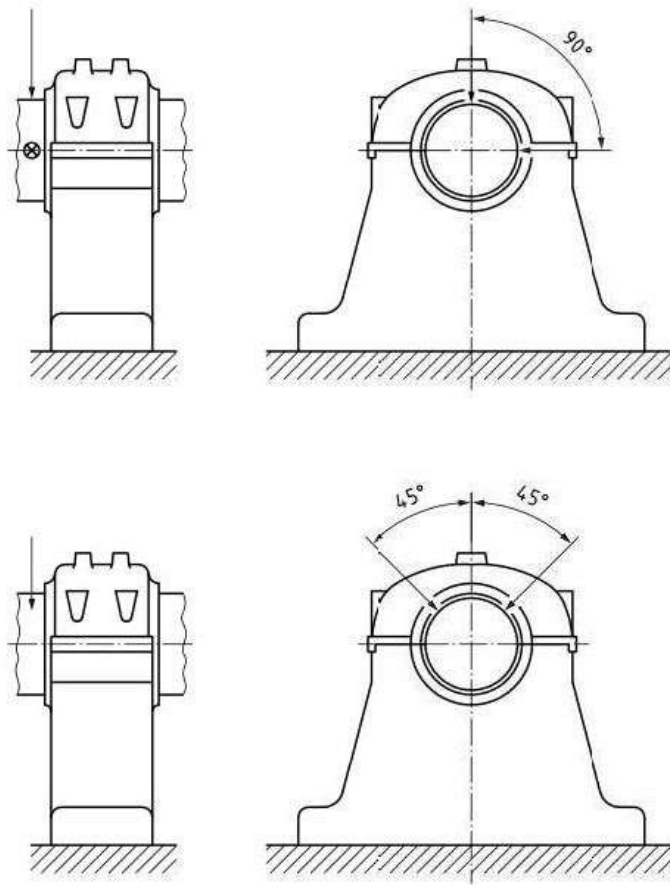
Οι απόλυτες τιμές ταλάντωσης μπορούν να παρθούν από ένα εξωτερικό σταθερό σημείο στο οποίο θα τοποθετηθεί ο μετρητής (π.χ. ένα κομμάτι εκτός κατασκευής όπως είναι ένας τοίχος). Οι απόλυτες τιμές ταλάντωσης δεν είναι συνηθισμένες γιατί είναι πολύ δύσκολό να ικανοποιηθούν οι παραπάνω συνθήκες.

1.2.3 Τοποθεσίες και κατεύθυνση μετρήσεων

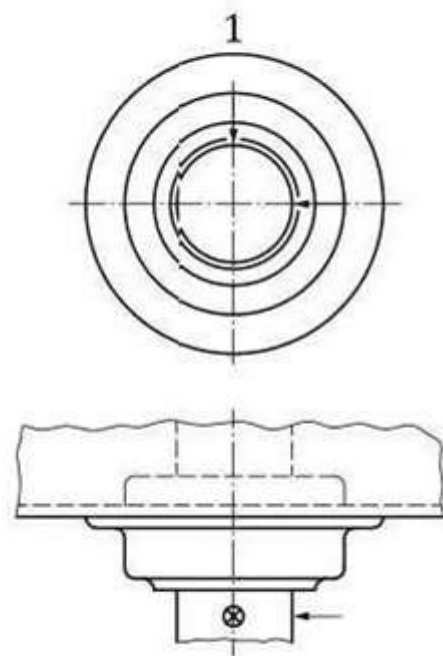
Γενικά

Οι τυπικές θέσεις που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των κραδασμών σε συστοιχίες μηχανών φαίνονται στα παρακάτω σχήματα 1-5 και με περισσότερη λεπτομέρεια στα σχήματα 6 και 7

ISO 20816-5:2018(E)



a) On horizontal machines



b) On vertical machines

1.2.4 μετρήσεις των σχετικών ταλαντώσεων του άξονα

Για όλες τις μηχανές, οι μετρήσεις κραδασμών θα πρέπει να παίρνονται με διαφορά 90° . Η τοποθεσία και ο προσανατολισμός των αναλυτών πρέπει να επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να πιανουν τις μέγιστες τιμές κραδασμών.

Στα οριζόντια μηχανήματα οι αναλυτές κραδασμών πρέπει να τοποθετούνται οριζόντια και κάθετα γιατί μπορούμε να πάρουμε σημαντικές ενδείξεις αν οι αναλυτές είναι τοποθετημένοι στις δύο κατευθύνσεις του κελύφους του ρουλεμάν.

Εναλλακτικά οι αναλυτές μπορούν να τοποθετηθούν ως εξής: ο πρώτος αναλυτής να τοποθετηθεί σε κάποια τυχαία θέση, και ο δεύτερος σε φάση 90° από τον πρώτο.

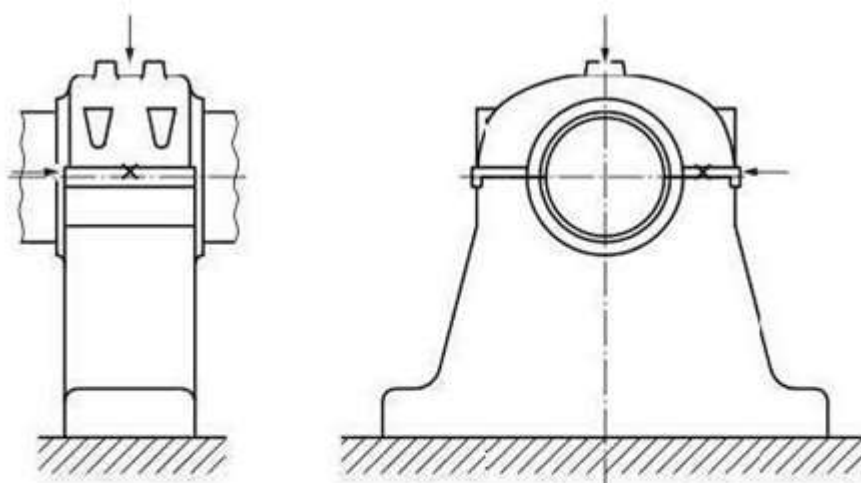
1.2.5 Μετρήσεις απόλυτων κραδασμών κελύφους ρουλεμάν

Για τις οριζόντιες μηχανές ακτινικές μετρήσεις μπορούμε να πάρουμε από την οριζόντια και την κάθετη θέση. Επίσης αν είναι εφικτό και στον ρουλεμάν που δέχεται φορτίο σε παράλληλο του άξονα επίπεδο. Σημαντικές πληροφορίες μπορούν

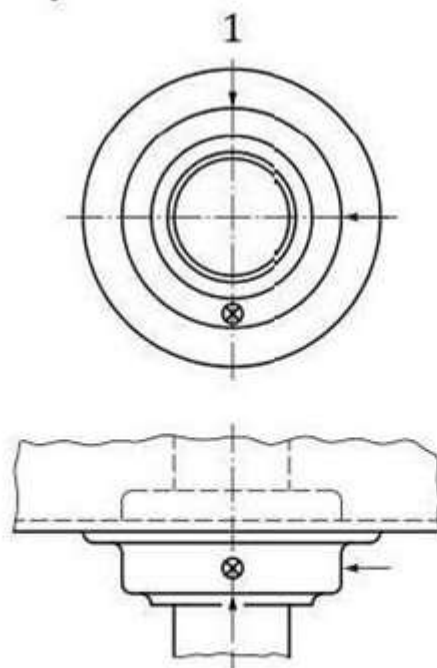
να αλιευθούν από μετρήσεις του ρουλεμάν αν οι μεταξύ τους γωνία των αναλυτών είναι 45° .

Για αργόστροφες μηχανές οι τοποθεσίες μέτρησης και οι κατεθύνσεις καθορίζονται με μεγάλη προσοχή εξ' αιτίας της ευκαμψίας της υποστηρικτικής κατασκευής.

Για κάθετες μηχανές, σε κάθε κύριο ρουλεμάν οι αναλυτές πρέπει να είναι τοποθετημένοι ως εξής: ο πρώτος πρέπει να είναι τοποθετημένος σε ανοδική θέση και ο δεύτερος πρέπει να είναι σε 90° από τον πρώτο (σε δεξιόστροφη κίνηση κοιτώντας το από πάνω, ανεξάρτητα από την φορά περιστροφής) αν είναι εφικτό θα πρέπει οι αναλυτές να είναι τοποθετημένοι επάνω ή πολύ κοντά στα ρουλεμάν.



a) On horizontal machines



b) On vertical machines

1.2.4 Μετρητικός εξοπλισμός

Γενικά.

Ο μετρητικός εξοπλισμός πρέπει να είναι ικανός να μετρήσει το εύρος των δονήσεων για τουλάχιστον 10 περιστροφές της μηχανής. Αυτό μας δίνει αρκετό χρόνο να πιάσουμε και τις πρόχειρες δονήσεις που συμβαίνουν από 0,25- 0,33 της συχνότητας περιστροφής. Η υψηλότερη συχνότητα ενδιαφέροντος είναι και η μεγαλύτερη συχνότητα που συνδέετε με τη μηχανή και δίνεται από τον τύπο

$$\max [3 z_R f_{rot}, 3 z_G f_{rot}]$$

Όπου z_R είναι ο αριθμός των λεπίδων ή προεξοχών της μηχανής.

f_{rot} είναι η περιστροφική συχνότητα της μηχανής σε Hertz (Hz)

z_G είναι ο αριθμός των κύριων βανών

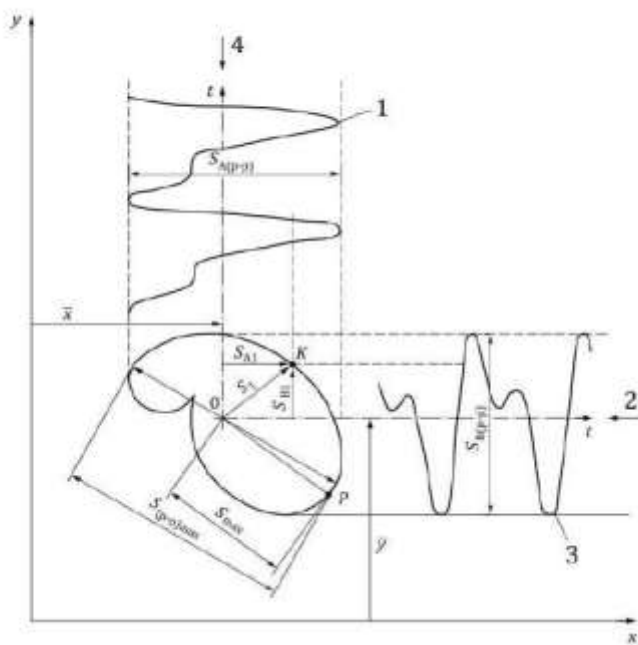
Συνθήκες μετρήσεων

Οι μετρήσεις πρέπει να λαμβάνονται όταν όλα τα επιμέρους κομμάτια της εφαρμογής έχουν φτάσει τη φυσιολογική θερμοκρασία λειτουργίας (περίπου $\pm 1,5\%$)

1.2.9 Αξιοποίηση δεδομένων

Συμφωνα με το πρότυπο θα πρέπει οι συχνότητες να είναι ανάμεσα από $0,1 \cdot 18,125 = 1,8125 \text{ Hz}$ και από $3 \cdot 18,125 = 54,375 \text{ Hz}$ και να έχουν κυματομορφή όπως το παρακάτω σχήμα

ISO 20816-5:2018(E)



οσανατολισμό του
ε το περίγραμμα
α είναι μικροτερη
νής (aircondition)
ός 27 βαθμούς της

2. Πρακτικό μέρος

2.1 Διάταξη εξοπλισμού

Σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος είναι η διερεύνηση των πρακτικών συντήρησης κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος και η εύρεση των βέλτιστων τεχνικών προβλεπτικής συντήρησης που θα έχουν ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της αξιοπιστίας του εξοπλισμού και την μείωση βλαβών. Πιο συγκεκριμένα οι στόχοι της εργασίας είναι:

- Διερεύνηση των υφιστάμενων πρακτικών συντήρησης.
- Ανάπτυξη αλγορίθμων για προβλέψεις. Για την εύρεση των βέλτιστων αλγορίθμων θα γίνουν συσχετίσεις ελαττωματικού στοιχείου μηχανήματος με δεδομένα που θα ληφθούν από αισθητήρια και θα αναλυθούν στον χρόνο και την συχνότητα και εν συνεχεία θα δοκιμαστούν τεχνικές νευρωνικών δικτύων, ασαφείς λογικές και τεχνικές επεξεργασίας σήματος.
- Εύρεση δεδομένων συσχέτισης μεταξύ ελαττωματικού στοιχείου μηχανήματος και προσδιορισμός βασικής αίτιας αστοχίας.

Η πειραματική διάταξη που έχουμε κατασκευάσει αφορά τον εντοπισμό αστοχιών σε ρουλεμάν που έχουν ένα μεγάλο εύρος χρήσης στην βιομηχανία.

Η παρακάτω πειραματική διάταξη αφορά πειράματα που έγιναν με την χρήση ρουλεμάν κατηγορίας 6204 2RS μονόσφαιρα.



ευρη χρήση και
ναι εφοδιασμένα



Η πειραματική διάταξη αποτελείται από:

- PLC – SIEMENS S7 1200
- IO-LINK Master – IFM AL1300
- Vibration IO-LINK Sensor VVB001
- Μειωτήρας κινητήρα με 1/80
- Κινητήρας 0,75kW 1450 rpm
- Raspberry Pi 3
- Μηχανικό σύστημα μετάδοσης κίνησης και τοποθέτησης ρουλεμάν coupler

Ουσιαστικά το σύστημα αποτελείται από έναν μικρού μεγέθους βιομηχανικό κινητήρα για εφαρμογές όπως διακίνηση, αερισμός και άλλες μικρές λειτουργίες κίνησης σε μηχανήματα παραγωγής. Στο κινητήρα υπάρχει ένας μειωτής 1/80 με πλάγια μετάδοση κίνησης όπως συνηθίζεται σε βιομηχανικές εφαρμογές. Στην έξοδο του μειωτή έχει τοποθετηθεί ένα coupler το οποίο έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για να μπορεί να τοποθετηθεί ρουλεμάν για τα διάφορα πειράματα. [1,2,3,4,5,6,7,8]



Εικόνα αισθητήρα κραδασμών

Στο ρουλεμάν έχει τοποθετηθεί ο αισθητήρας κραδασμών ο οποίος στέλνει τα δεδομένα ανά δέκα δευτερόλεπτα σε έναν io-link master. Η επιλογή χρήσης πρωτοκόλλου io-link έγινε για να υπάρχει αυτοδιάγνωση του αισθητηρίου και επιβεβαίωση σωστών μετρήσεων καθώς και μικρότερο σφάλμα μετρήσεων διότι δεν απαιτούνται μετατροπές του σήματος όπως analog - digital converter. Είναι σημαντικό για την ανάλυση και την δημιουργία σωστών τεχνικών προβλεπτικής συντήρησης η αξιόπιστη πηγή σημάτων με μικρό σφάλμα.

Ο IO-LINK Master στέλνει τα δεδομένα στο PLC με χρήση Profinet επικοινωνίας. Εν συνεχεία το PLC συλλέγει τα δεδομένα και με κατάλληλο αλγόριθμο μετατρέπει τα δεδομένα σε string μεταβλητές ώστε να γίνουν πακέτα MQTT JSON και να αποσταλούν από το PLC στο Raspberry. Το Raspberry είναι υπεύθυνο για την αποστολή των δεδομένων στο Cloud της AWS.

Όλα τα δεδομένα που μαζεύονται στο cloud συλλέγονται σε συγκεκριμένα buckets ανάλογα με το πείραμα που πραγματοποιείται ώστε να είναι εύκολη η επεξεργασία τους.

Τα πειράματα που πραγματοποιούνται αφορούν την συμπεριφορά του ρουλεμάν και είναι:

1. Μετρήσεις σε κανονική λειτουργία
2. Μετρήσεις με έλλειψη γράσου
3. Μετρήσεις με περίσσεια γράσου



Εικόνα 7- Ρουλεμάν με έλλειψη γράσου

4. Μετρήσεις με υπερτροφοδοσία γράσου



Εικόνα 8 - Ρουλεμάν με υπερτροφοδοσία γράσου

5. Μετρήσεις με τραυματισμό των εσωτερικών σφαιρών του ρουλεμάν



Εικόνα 9 - Ρουλεμάν με τραυματισμό των εσωτερικών σφαιρών του ρουλεμάν

6. Μετρήσεις με τραυματισμό του εσωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν

7. Μετρήσεις με τραυματισμό του εξωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν

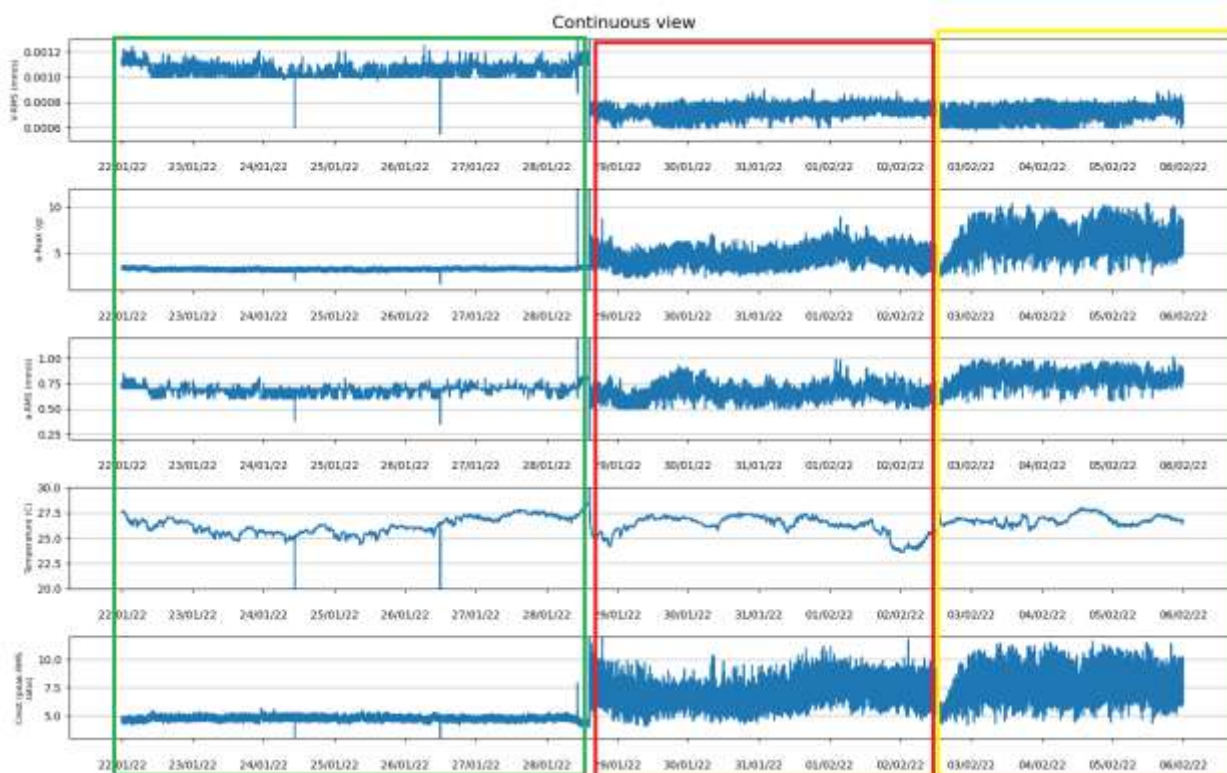


Κεφάλαιο 2

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έως σήμερα είναι:

1. Μετρήσεις σε κανονική λειτουργία
2. Μετρήσεις με έλλειψη γράσου
3. Μετρήσεις με υπερτροφοδοσία γράσου

Και απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα



Δεν υπάρχει απλός τρόπος να αντιστοιχίσουμε τις δονήσεις του ρουλεμάν με τις δονήσεις του άξονα και το αντίθετο. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν να καταγράψουμε τις δονήσεις του άξονα χωρίς ρουλεμαν για αρχή ώστε να γνωρίζουμε τις βασικές δονήσεις. Στο τελικό στάδιο υπολογισμού χρησιμοποιήσαμε και τις δύο αυτές τιμές για την εξαγωγή των συμπερασμάτων.

Τα κριτήρια του συγκεκριμένου προτύπου περιορίζονται σε αναλύσεις μεγάλου εύρους κραδασμών και χωρίς αναφορά στην ιδιοσυχνότητα των επιμέρους εξαρτημάτων ούτε στη φάση που ακολουθεί το κάθε σήμα από τους αισθητήρες. Αυτή η τακτική είναι κοινά αποδεκτή για μετρήσεις λειτουργικότητας και διαγνώσεις σφαλμάτων που γίνονται σε καθημερινή βάση.

Για μακροχρόνιες μετρήσεις και για πιο ασφαλή συμπεράσματα καλό είναι να λαμβάνεται υπ' όψη και το επίκεντρο των κραδασμών αλλά και η φασή των επιμέρους κραδασμών, με απότερο σκοπό την ασφαλέστερη κι εγκυρότερη διάγνωση των βλαβών.

2.2 Διαχείριση δεδομένων πειραματικής διάταξης

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής της πειραματικής διάταξης σειρά έχει η διαχείριση των συλλεγόμενων δεδομένων. Για να υλοποιηθεί αυτό «στήθηκε» ένας server στο Amazon Web Services (AWS για συντομία στο εξής)

Τα δεδομένα που έπαιρνε ο αισθητήρας μεταφερόντουσαν μέσω ενός IO Master της IFM σε ένα PLC S7 – 1200 της Siemens, όπου γινόταν ο μετασχηματισμός από αναλογικό σήμα (που έδινε ο αισθητήρας) σε ψηφιακό (που είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμο και άμεσα χρησιμοποιούμενο από όλες σχεδόν τις πλατφόρμες cloud computing, συμπεριλαμβανομένης και της AWS που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία.

Εν συνεχεία τα δεδομένα από το S7 – 1200 μεταφερόντουσαν μέσω ενός raspberry pi στο cloud της AWS, με πρωτόκολλο MQTT.

2.3 Συνοπτικά το MQTT.

Το MQTT είναι ένα πρωτόκολλο μεταφοράς μηνυμάτων δημοσίευσης/εγγραφής διακομιστή πελάτη. Είναι ελαφρύ, ανοιχτό, απλό και σχεδιασμένο να είναι εύκολο

στην εφαρμογή του. Αυτά τα χαρακτηριστικά το καθιστούν ιδανικό για χρήση σε πολλές καταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων περιβαλλόντων περιορισμού, όπως για επικοινωνία σε περιβάλλοντα Machine to Machine (M2M) και Internet of Things (IoT), όπου απαιτείται μικρό αποτύπωμα κώδικα ή/και το εύρος ζώνης δικτύου είναι υψηλότερο. Το πρωτόκολλο εκτελείται μέσω TCP/IP ή μέσω άλλων πρωτοκόλλων δικτύου που παρέχουν διατεταγμένες, αμφίδρομες συνδέσεις χωρίς απώλειες. Τα χαρακτηριστικά του περιλαμβάνουν:

- Χρήση του μοτίβου μηνυμάτων δημοσίευσης/εγγραφής που παρέχει διανομή μηνυμάτων ένα προς πολλά και αποσύνδεση εφαρμογών.
- Μια μεταφορά μηνυμάτων που είναι αγνωστική ως προς το περιεχόμενο του ωφέλιμου φορτίου.
- Τρεις ιδιότητες υπηρεσίας για την παράδοση μηνυμάτων: ο "Το πολύ μια φορά", όπου τα μηνύματα παραδίδονται σύμφωνα με τις καλύτερες προσπάθειες του λειτουργικού περιβάλλοντος. Μπορεί να προκύψει απώλεια μηνύματος. Αυτό το επίπεδο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, για παράδειγμα, με δεδομένα αισθητήρα περιβάλλοντος όπου δεν έχει σημασία αν χαθεί μια μεμονωμένη ανάγνωση, καθώς η επόμενη θα δημοσιευτεί αμέσως μετά. ο "Τουλάχιστον μία φορά", όπου τα μηνύματα είναι βέβαιο ότι φτάνουν αλλά μπορεί να προκύψουν διπλότυπα. ο "Ακριβώς μία φορά", όπου τα μηνύματα είναι σίγουρο ότι φτάνουν ακριβώς μία φορά. Αυτό το επίπεδο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, για παράδειγμα, με συστήματα χρέωσης όπου διπλότυπα ή χαμένα μηνύματα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε εσφαλμένες χρεώσεις.
- Μια μικρή επιβάρυνση μεταφοράς και ανταλλαγές πρωτοκόλλων ελαχιστοποιημένες για τη μείωση της κυκλοφορίας του δικτύου.
- Ένας μηχανισμός για την ειδοποίηση των ενδιαφερομένων σε περίπτωση μη φυσιολογικής αποσύνδεσης.

2.4 Επεξεργασία δεδομένων στο cloud

Μετά το upload τα δεδομένα τα παραλαμβάνει η εφαρμογή IoT core της Amazon. Το AWS IoT Device SDK μας βοηθά να συνδέσουμε εύκολα και γρήγορα τη συσκευή υλικού ή την εφαρμογή για κινητά με το AWS IoT Core. Το AWS IoT Device SDK επιτρέπει στις συσκευές μας να συνδέονται, να ελέγχουν ταυτότητα και

να ανταλλάσσουν μηνύματα με το AWS IoT Core χρησιμοποιώντας τα πρωτόκολλα MQTT, HTTP ή WebSockets. Το AWS IoT Device SDK υποστηρίζει C, JavaScript και Arduino και περιλαμβάνει τις βιβλιοθήκες πελατών, τον οδηγό προγραμματιστή και τον οδηγό μεταφοράς για κατασκευαστές. Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε μια εναλλακτική λύση ανοιχτού κώδικα SDK.

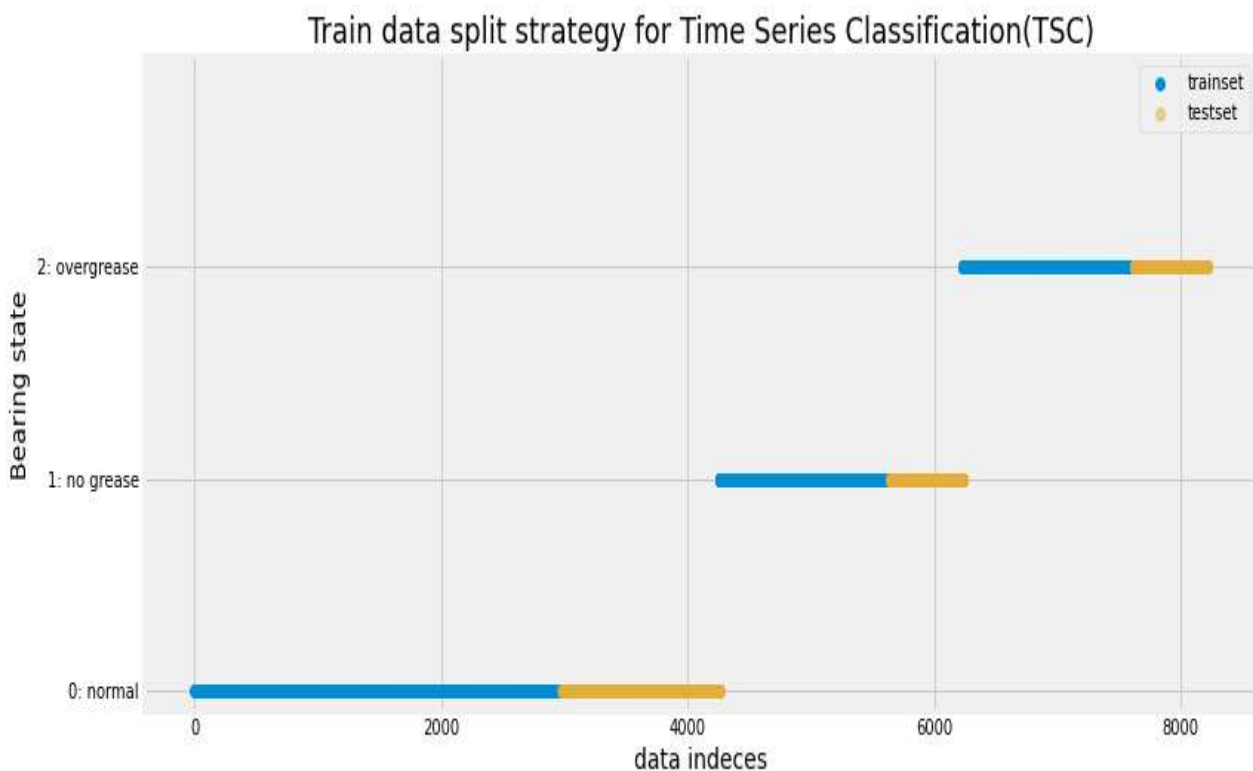
Στη συνέχεια τα δεδομένα αποθηκεύονταν στο cloud με την βοήθεια του Simple Storage Service (S3) της Amazon που μας εξασφαλίζει την ασφαλή κι εύχρηστη διαχείρισή τους.

Τέλος με το Amazon Kinesis Data Streams μπορέσαμε να κατασκευάσουμε τα γραφήματα σε πραγματικό χρόνο και να έχουμε και την επιτήρηση του συστήματος βλέποντας και τις αλλαγές στις τιμές ανάλογα των δεδομένων που λάμβανε, αλλά και εξεύρεση απροσδόκητων σταματημάτων (ειδοποιηθήκαμε κατά τη διάρκεια ενός εκ των πειραμάτων ότι δεν λάμβανε ο server δεδομένα, κάτι το οποίο οφείλονταν σε διακοπή ρεύματος. Εν συντομία το Kinesis:

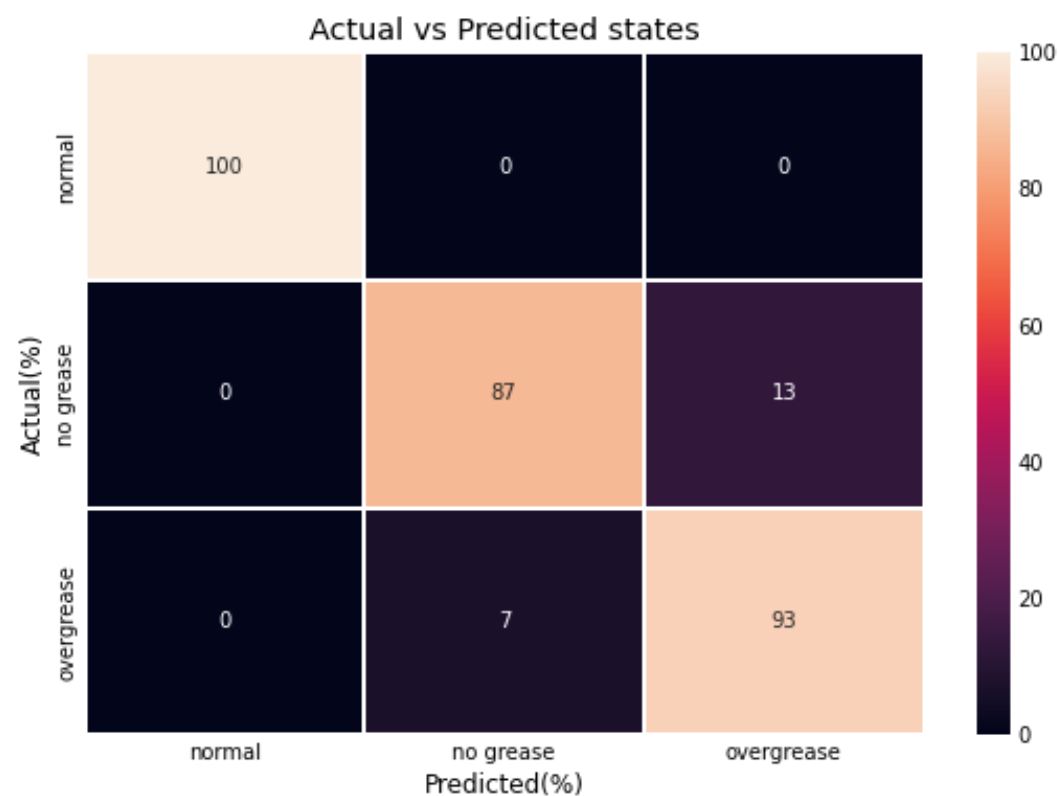
Το Amazon Kinesis Data Streams είναι μια εξαιρετικά επεκτάσιμη, ανθεκτική και χαμηλού κόστους υπηρεσία ροής δεδομένων. Το Kinesis Data Streams μπορεί να συλλαμβάνει συνεχώς gigabyte δεδομένων ανά δευτερόλεπτο από εκατοντάδες χιλιάδες πηγές, όπως ροές κλικ ιστότοπου, ροές συμβάντων βάσης δεδομένων, οικονομικές συναλλαγές, ροές μέσω κοινωνικής δικτύωσης, αρχεία καταγραφής πληροφορικής και συμβάντα παρακολούθησης τοποθεσίας. Τα δεδομένα που συλλέγονται είναι διαθέσιμα σε χιλιοστά του δευτερολέπτου για να επιτρέπουν περιπτώσεις χρήσης αναλυτικών στοιχείων σε πραγματικό χρόνο, όπως πίνακες εργαλείων σε πραγματικό χρόνο, ανίχνευση ανωμαλιών σε πραγματικό χρόνο και δυναμική τιμολόγηση.

Οι τεχνικές data classification που θα χρησιμοποιηθούν αφορούν Convolutional Neural Networks [9,10,11,12]. Ακολουθεί η ανάλυση δεδομένων Time Series Classification (TSC) δημιουργίας αλγόριθμου με χρήση λ-function για την εύρεση αστοχιών.

Όπου από τα συνολικά δεδομένα έγινε διαχωρισμός σε trainset και testset για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου τα αποτελέσματα είναι τα παρακάτω:



Εικόνα 11 - διαχωρισμός δεδομένων για εκπαίδευση

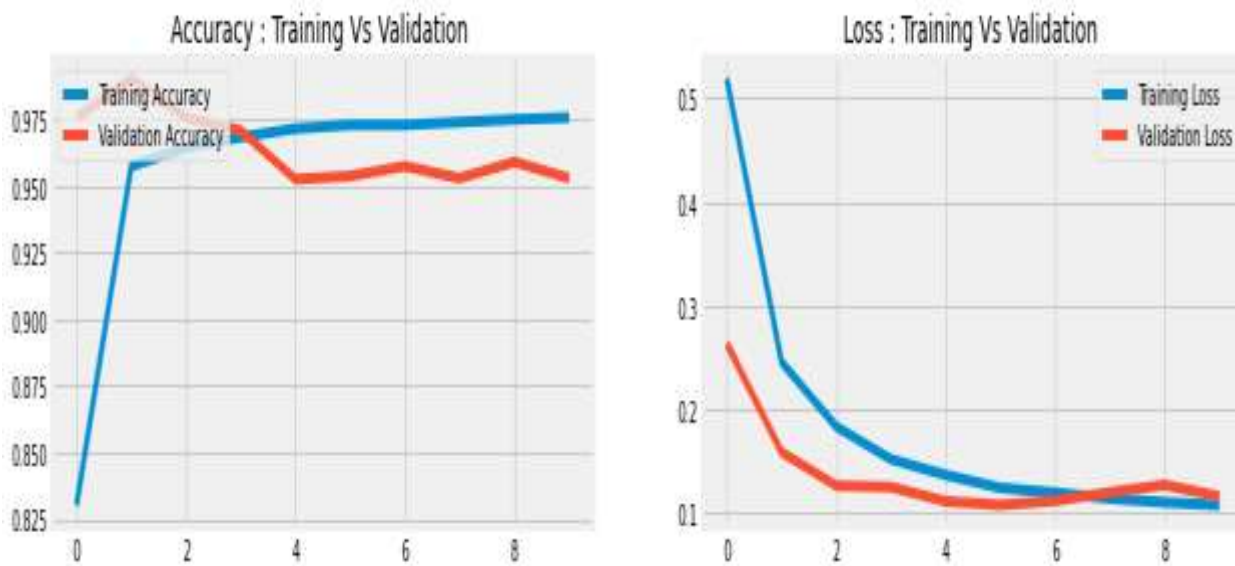


Εικόνα 12 - training vs validation

Στην εικόνα 12 μπορούμε να παρατηρήσουμε την στρατηγική χωρίσματος των δεδομένων. Στην περίπτωση μας μετά από αρκετές δοκιμές παρατηρήσαμε ότι το πιο

σωστό set για τεστ αφορά το 30% των τελευταίων δεδομένων από κάθε state του πειράματος.

Συνολικά αποτελέσματα πρόβλεψης αλγόριθμου:



Εικόνα 13 - Predict State

Με βάση τον παραπάνω πίνακα μπορεί να αντιληφθεί κανείς πως ο αλγόριθμος σε ένα μεγάλο ποσοστό μπορεί να εντοπίσει την αστοχία που αφορά την έλλειψη γράσου, την υπερτροφοδοσία του καθώς και εάν ο κινητήρας δουλεύει σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Το παραπάνω πείραμα αφορά κινητήρες μικρού μεγέθους (<50kW) αν και μεγαλύτεροι κινητήρες πιθανότατα να δίνουν αντίστοιχα αποτελέσματα, εν τούτοις δεν έχει ελεγχθεί, καθώς βασικός περιοριστικός παράγοντας είναι η έλλειψη τυποποίησης κατά ISO.

Βιβλιογραφία

[1] K. Holmberg, A. Adgar, A. Arnaiz, E. A. M. J. Jantunen, and S. Mekid, *E-maintenance*, London: Springer London, (2010).

[2] T. Lenahan, *Turnaround, shutdown and outage management: effective planning and step-by-step execution of planned maintenance operations*, Amsterdam: Elsevier, 2006.

[3] H. P. Bloch and F. K. Geitner, *Machinery failure analysis and troubleshooting*, Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann, (2012).

[4] S. K. Pinjala, L. Pintelona, and A. Vereecke, "An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies" *Int. J. Production Economics*, pp. 214-229, 2006.

[5] K. Wang, "Intelligent predictive maintenance (IPdM) system - Industry 4.0 scenario", *Advanced Manufacturing and Automation V*, WIT transaction on Engineering Science Vol. 113, pp. 259-268, 2016.

[6] K. Wang "Towards zero-defect manufacturing (ZDM) - a data mining approach" *Journal of Advanced in manufacturing*, Vol.1 pp. 62-74, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.

[7] M. Aljumaili, K. Wandt, R. Karim, and P. Tretten, "eMaintenance ontologies for data quality support," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 21, pp. 358-374, 2015.

[8] The Rise of Industrial Big Data. Available at: leadwise.mediadroit.com/files/19174the_rise_of_industrial_big_data_wp_gft834.pdf

- [9] J. Liu, D. Djurdjanovic, J. Ni, N. Casoetto, and J. Lee, "Similarity based method for manufacturing process performance prediction and diagnosis," *Computers in Industry*, vol. 58, pp. 558-566, 8// 2007.
- [10] K. Wang, "Intelligent Predictive maintenance (IPdM) system □ Industry 4.0 scenario", editors: K. Wang, Y. Wang, J. O. Strandhagen and T. Yu, *Proceedings of Advanced Manufacturing and Automation V*, WIT Transaction on Engineering Science, Vol 113, pp. 259-268, 2016
- [11] McKinsey&Company, *Industry 4.0 - How to navigate digitization of the manufacturing sector*. 2015.
- [12] Wang, J. et al.: A new paradigm of cloud-based predictive maintenance for intelligent manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015: p. 1-13.
- [13] Rødseth, H., P. Schjøberg, and L.T. Larsen, *Industrie 4.0 - A new trend in predictive maintenance and maintenance management*, in *EuroMaintenance 2016*. 2016: Greece.
- [14] Jiang, W. Research on predictive maintenance for hydropower plant based on MAS and NN. in *Pervasive Computing and Applications*, 2008. ICPCA 2008. Third International Conference on. 2008. IEEE.
- [15] Yam, R., et al., Intelligent predictive decision support system for condition-based maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001. 17(5): p. 383-391.
- [16] Hu, Q., et al. A novel hybrid intelligent maintenance system and its application. in *Services Systems and Services Management*, 2005. *Proceedings of ICSSSM'05*. 2005 International Conference on. 2005. IEEE.
- [17] Jardine, A.K., D. Lin, and D. Banjevic, A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*, 2006. 20(7): p. 1483-1510.
- [18] European Commission. *Europe 2020 targets*. 2015; Available from: http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index_en.htm.
- [19] International Trade Administration. *How does Commerce define Sustainable Manufacturing*. 2007; Available from: http://www.trade.gov/competitiveness/sustainablemanufacturing/how_d oc_defines_SM.asp

1. Osman, S., Wang, W.: A normalized Hilbert-Huang transform technique for bearing fault detection. *J. Vib. Control*. 22(11), 2771–2787 (2016)
2. Lughofer, Edwin, and Moamar Sayed-Mouchaweh, eds. *Predictive Maintenance in Dynamic Systems: Advanced Methods, Decision Support Tools and Real-World Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2019
3. Osman, S., Wang, W.: An enhanced Hilbert-Huang transform technique for bearing condition monitoring. *Meas. Sci. Technol.* 24(8), 1–13 (2013)
4. Wang, W., Lee, H.: An energy kurtosis demodulation technique for signal denoising and bearing fault detection. *Meas. Sci. Technol.* 24(2), 025601 (2013)
5. Randall, R.B., Antoni, J.: Rolling element bearing diagnostics—a tutorial. *Mech. Syst. Signal Process.* 25(2), 485–520 (2011)
6. Mohanty, S., Gupta, K.K., Raju, K.S.: Adaptive fault identification of bearing using empirical mode decomposition–principal component analysis-based average kurtosis technique. *IET Sci. Meas. Technol.* 11(1), 30–40 (2017)
7. Borghesani, P., Pennacchi, P., Chatterton, S.: The relationship between kurtosis and envelopebased indexes for the diagnostic of rolling element bearings. *Mech. Syst. Signal Process.* 43(1–2), 25–43 (2014)
8. Borghesani, P., Pennacchi, P., Randall, R.B., Sawalhi, N., Ricci, R.: Application of cepstrum pre-whitening for the diagnosis of bearing faults under variable speed conditions. *Mech. Syst. Signal Process.* 36(2), 370–384 (2013)
9. Bagnall, Anthony, Aaron Bostrom, James Large, and Jason Lines. “The Great Time Series Classification Bake Off: An Experimental Evaluation of Recently Proposed Algorithms. Extended Version,” February 4, 2016.
10. Fawaz, Hassan Ismail, Germain Forestier, Jonathan Weber, Lhassane Idoumghar, and Pierre-Alain Muller. “Deep Learning for Time Series Classification: A Review.” *Data Mining and Knowledge Discovery* 33, no. 4 (July 2019): 917–63.
11. Eren, Levent. “Bearing Fault Detection by One-Dimensional Convolutional Neural Networks.” *Mathematical Problems in Engineering* 2017 (2017): 1–9.
12. Michael Nielsen, 2015, *Neural Networks and Deep Learning*
13. Elisavet Karapalidou, Agisilaos Efrimidis, Stavros Vologianidis and Efsthios Antoniou “*Modeling the Health Status of a Ball Bearing for Predictive Maintenance Purposes*” *9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, July, 2023, Rome, Italy*