



4

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η Κρίσιμη Συμβολή των Φυγοκεντρικών Αντλιών στη
Χειραγώγηση των Υγρών στις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας
Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου

The Critical Contribution of Centrifugal Pumps to Fluid Handling
in Oil and Natural Gas Processing Facilities

Στοιχεία φοιτητή

ΓΚΙΟΓΚΕΖΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Αριθμός μητρώου

51204389

Επιβλέπον καθηγητής

Ιωάννης Σαρρής

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2024

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Γκιόγκεζας Δημήτριος** , με αριθμό μητρώου 51204389 , φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνων υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο δηλών



Γκιόγκεζας Δημήτριος

| Α/α | ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ | ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ | ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ |
|-----|-----------------------|------------------|---------------------|
| 1 | ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ | | |
| 2 | ΚΑΡΒΕΛΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ | | |
| 3 | ΣΟΦΙΑΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ | | |

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη μοντελοποίηση και τη διάγνωση βλαβών στις φυγοκεντρικές αντλίες μέσω της χρήσης προηγμένων υπολογιστικών μεθόδων και συστημάτων παρακολούθησης. Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός δυναμικού μοντέλου που θα μπορεί να προβλέπει την απόδοση και τη συμπεριφορά των αντλιών υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Αυτό το μοντέλο βασίζεται σε παραμέτρους όπως η ταχύτητα, η πίεση και η ροή, και χρησιμοποιεί εξισώσεις ισοτιμίας για να αναλύει τη λειτουργία της αντλίας. Η σημασία της ανίχνευσης και της διάγνωσης βλαβών είναι καθοριστική, καθώς η αποδοτική λειτουργία των φυγοκεντρικών αντλιών συμβάλλει στη βελτίωση της παραγωγικότητας και στην αποφυγή δαπανηρών διακοπών λειτουργίας.

Στο πλαίσιο της εργασίας, πραγματοποιήθηκαν πειράματα και προσομοιώσεις για την εκτίμηση της απόδοσης των αντλιών και την ανίχνευση ανωμαλιών στη λειτουργία τους. Μέσω της χρήσης λογισμικού όπως το Simulink και άλλων εργαλείων μοντελοποίησης, εξετάστηκαν διάφορα σενάρια λειτουργίας αντλιών με σταθερή και μεταβλητή ταχύτητα, ενώ αναλύθηκαν οι συνέπειες της φθοράς στα διάφορα εξαρτήματα της αντλίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση προσεγγίσεων βασισμένων στη μοντελοποίηση είναι ιδιαίτερα αποδοτική για την πρόβλεψη βλαβών και την έγκαιρη παρέμβαση για την αποκατάσταση της αντλίας.

Τα βασικά συμπεράσματα της έρευνας αφορούν την αξιοπιστία και την ακρίβεια των μοντέλων ανάλυσης, καθώς και τη δυνατότητα χρήσης τους για τη βελτίωση της συντήρησης και της μακροχρόνιας λειτουργίας των αντλιών. Οι τεχνικές που αναπτύχθηκαν μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορους τύπους βιομηχανικών εφαρμογών, όπου οι φυγοκεντρικές αντλίες παίζουν σημαντικό ρόλο. Τέλος, η εργασία τονίζει τη σημασία της απομακρυσμένης επιτήρησης και της προγνωστικής συντήρησης, επιτρέποντας την πρόληψη προβλημάτων προτού αυτά προκαλέσουν σοβαρές βλάβες ή διακοπές στην παραγωγή.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Περίληψη | 4 |
| Περιεχόμενα | 5 |
| 1. Εισαγωγή..... | 7 |
| 2. Φυγοκεντρικές αντλίες | 9 |
| 2.1 Αρχή της φυγόκεντρης αντλίας | 9 |
| 2.2 Υδραυλικά εξαρτήματα..... | 10 |
| 2.2.1 Φλάντζα εισόδου και είσοδος | 11 |
| 2.2.2 Πτερωτή | 13 |
| 2.2.3 Σύζευξη και κίνηση | 16 |
| 2.2.4 Σφράγιση πτερωτής | 18 |
| 2.2.5 Κοιλότητες και αξονικό ρουλεμάν | 20 |
| 2.2.6 Περίβλημα Volute, διαχύτης και φλάντζα εξόδου | 23 |
| 2.2.7 Κανάλι επιστροφής και εξωτερικό χιτώνιο..... | 26 |
| 2.3 Τύποι και συστήματα αντλιών..... | 28 |
| 2.3.1. Η αντλία UP | 28 |
| 2.3.2 Η αντλία TP | 29 |
| 2.3.3 Η αντλία NB..... | 29 |
| 2.3.4 Η αντλία MQ | 29 |
| 2.3.5 Η αντλία SP..... | 30 |
| 2.3.6 Η αντλία CR | 30 |
| 2.3.7 Η αντλία MTA..... | 30 |
| 2.3.8 Η αντλία SE..... | 31 |
| 2.3.9 Η αντλία SEG | 31 |
| 3. Παρακολούθηση κατάστασης και ο ρόλος της στη συντήρηση και λειτουργία | 32 |
| 3.1 Τύποι συντήρησης..... | 33 |
| 3.1.1 Συντήρηση βλαβών | 33 |
| 3.1.2 Προληπτική συντήρηση | 34 |
| 3.2 Παρακολούθηση κατάστασης..... | 35 |
| 3.3 Οι τεχνικές της παρακολούθησης κατάστασης..... | 38 |
| 3.4 Τα οφέλη της παρακολούθησης κατάστασης..... | 41 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4. | Απόδοση αντλίας, επίδραση φθοράς και συνηθέστερες αστοχίες/σφάλματα | 45 |
| 4.1 | Επίδραση της φθοράς στην απόδοση της αντλίας | 48 |
| 4.2 | Η σχέση εσωτερική φθοράς και απόδοσης | 52 |
| 4.3 | Ρυθμός φθοράς | 54 |
| 4.4 | Τυπικές βλάβες σε φυγοκεντρικές αντλίες | 56 |
| 5. | Μοντελοποίηση της διαδικασίας παρακολούθησης φυγοκεντρικής αντλίας | 60 |
| 5.1 | Φυγοκεντρικές αντλίες | 60 |
| 5.1.1 | Σύγχρονη τεχνολογία στην επίβλεψη της αντλίας και στην ανίχνευση σφαλμάτων | 60 |
| 5.1.2 | Μοντέλα φυγόκεντρων αντλιών και συστημάτων σωληνώσεων | 64 |
| 5.1.3 | Ανίχνευση σφαλμάτων με εκτίμηση παραμέτρων | 70 |
| 5.1.4 | Ανίχνευση σφαλμάτων με μη γραμμικές εξισώσεις ισοτιμίας και εκτίμηση παραμέτρων | 81 |
| 5.1.5 | Ανίχνευση βλαβών με αισθητήρες κραδασμών | 91 |
| 6. | Δημιουργία αλγορίθμου και αποτελέσματα προσομοίωσης | 94 |
| 6.1 | Επίβλεψη αντλίας και ανίχνευση σφαλμάτων | 94 |
| 6.2 | Μαθηματικό μοντέλο αντλίας και συστήματος σωληνώσεων | 95 |
| 6.3 | Τεχνικές ανίχνευσης σφαλμάτων/ζημιών | 97 |
| 6.4 | Πειραματισμός σταθερής ταχύτητας: Ανάλυση σφάλματος με εκτίμηση παραμέτρων | 98 |
| 6.5 | Προκαταρκτική ανάλυση: Σύγκριση τιμών παραμέτρων | 101 |
| 6.6 | Ενσωμάτωση αβεβαιότητας | 102 |
| 6.7 | Ανίχνευση και ποσοτικοποίηση ανωμαλιών | 103 |
| 6.8 | Διάγνωση σφαλμάτων φυγοκεντρικών αντλιών με χρήση υπολειμματικής ανάλυσης: Μοντέλο και αποτελέσματα | 108 |
| 6.8.1 | Λειτουργίες αντλίας πολλαπλών ταχυτήτων - Διάγνωση με υπολειμματική ανάλυση | 109 |
| 6.8.2 | Αναγνώριση μοντέλου | 111 |
| 6.8.3 | Δημιουργία υπολειμματικών όρων και εξαγωγή χαρακτηριστικών | 119 |
| 6.8.4 | Δημιουργία ταξινομητή (classifier) | 122 |
| 7. | Συμπεράσματα | 129 |
| | Βιβλιογραφία | 132 |

1. Εισαγωγή

Η απομακρυσμένη επιτήρηση και διάγνωση βλαβών σε φυγοκεντρικές αντλίες έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς οι αντλίες αυτές χρησιμοποιούνται εκτενώς σε κρίσιμες βιομηχανικές εφαρμογές. Οι φυγοκεντρικές αντλίες αποτελούν τον βασικότερο τύπο αντλίας που χρησιμοποιείται παγκοσμίως, με εφαρμογές σε συστήματα ύδρευσης, αποχέτευσης, ψύξης και θέρμανσης, καθώς και σε βιομηχανίες πετρελαίου, φυσικού αερίου, χημικών και ηλεκτροπαραγωγής. Δεδομένης της πολυπλοκότητας και του κρίσιμου ρόλου τους, η αποδοτική λειτουργία τους είναι ζωτικής σημασίας για την ομαλή και απρόσκοπτη λειτουργία των βιομηχανικών εγκαταστάσεων

Η απομακρυσμένη επιτήρηση επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης των αντλιών σε πραγματικό χρόνο, ακόμα και σε απομακρυσμένες ή δύσκολα προσβάσιμες εγκαταστάσεις. Με τη χρήση αισθητήρων, συλλέγονται δεδομένα για παραμέτρους όπως η πίεση, η ροή, οι κραδασμοί και η θερμοκρασία της αντλίας, τα οποία αποστέλλονται σε κεντρικά συστήματα διαχείρισης για ανάλυση. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων, σε συνδυασμό με προηγμένες τεχνικές προγνωστικής συντήρησης, επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων, προτού αυτά εξελιχθούν σε σοβαρές βλάβες ή διακοπές λειτουργίας.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της απομακρυσμένης επιτήρησης είναι η δυνατότητα πρόληψης βλαβών και η ελαχιστοποίηση του χρόνου εκτός λειτουργίας των αντλιών. Μέσω της έγκαιρης ανίχνευσης ανωμαλιών στη λειτουργία τους, όπως η αύξηση των κραδασμών ή η πτώση της απόδοσης, οι υπεύθυνοι συντήρησης μπορούν να παρέμβουν προληπτικά, προγραμματίζοντας τις αναγκαίες επισκευές σε κατάλληλο χρόνο. Αυτό μειώνει το κόστος συντήρησης και αυξάνει την παραγωγική ικανότητα των εγκαταστάσεων.

Επιπλέον, η απομακρυσμένη διάγνωση βλαβών προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς δεν απαιτεί την παρουσία τεχνικών στο πεδίο για την επιθεώρηση των αντλιών. Οι ειδικοί μπορούν να αναλύουν δεδομένα και να δίνουν οδηγίες σε πραγματικό χρόνο, από απόσταση, κάτι που επιταχύνει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων και μειώνει τους χρόνους απόκρισης σε περίπτωση βλαβών. Ειδικά σε βιομηχανίες με υψηλές απαιτήσεις αξιοπιστίας, όπως η παραγωγή ενέργειας

και οι χημικές βιομηχανίες, η δυνατότητα αυτή συμβάλλει σημαντικά στη διασφάλιση της αδιάλειπτης λειτουργίας των εγκαταστάσεων.

Τέλος, η ενσωμάτωση της απομακρυσμένης επιτήρησης με συστήματα τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης μπορεί να βελτιώσει ακόμα περισσότερο την ακρίβεια στην πρόβλεψη βλαβών και την απόδοση της συντήρησης. Μέσω της ανάλυσης μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων, τα συστήματα αυτά μπορούν να εντοπίζουν μοτίβα που ενδεχομένως να μην είναι ορατά σε ανθρώπινους αναλυτές, επιτρέποντας έτσι τη λήψη καλύτερων αποφάσεων συντήρησης.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την ανάλυση και τη μοντελοποίηση της απόδοσης των φυγοκεντρικών αντλιών, των πιο διαδεδομένων τύπων αντλιών παγκοσμίως. Οι αντλίες αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία, ειδικά στον τομέα της ενέργειας, των χημικών, της κατασκευής και της εξόρυξης. Ο κύριος σκοπός της διπλωματικής είναι να μελετήσει τις συνθήκες λειτουργίας των αντλιών αυτών και να αναπτύξει μοντέλα τα οποία να προβλέπουν με ακρίβεια τη λειτουργία τους υπό διαφορετικά φορτία και συνθήκες και μέσω απομακρυσμένης παρακολούθησης των αντλιών.

Βασικός στόχος της διπλωματικής είναι η ανίχνευση βλαβών και σφαλμάτων στις φυγοκεντρικές αντλίες με απομακρυσμένη παρακολούθηση βασισμένη σε αισθητήρες IoT μέσω της χρήσης μοντέλων βασισμένων σε εξισώσεις ροής και ανάλυσης παραμέτρων. Η ανάπτυξη αλγορίθμων και μεθόδων ανίχνευσης σφαλμάτων θα επιτρέψει τη βελτίωση της λειτουργικής αποδοτικότητας και την αύξηση του χρόνου ζωής των αντλιών, κάτι το οποίο είναι κρίσιμης σημασίας για τη μείωση του κόστους συντήρησης και την αποφυγή διακοπών λειτουργίας.

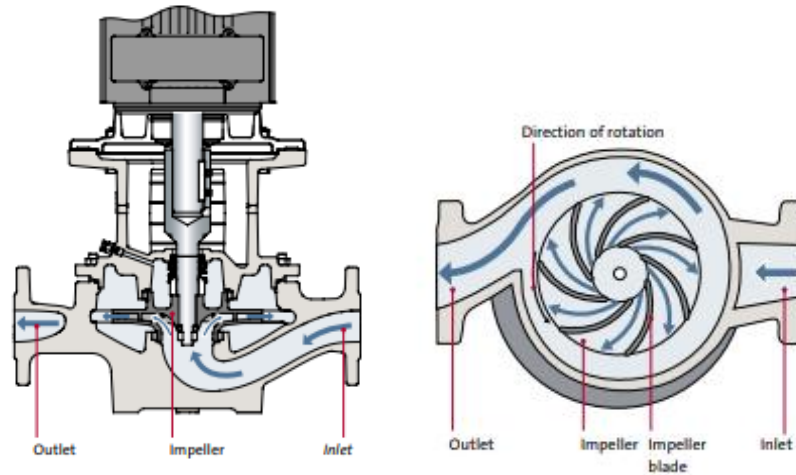
Τα αναμενόμενα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνουν τη δημιουργία ενός δυναμικού μοντέλου που θα μπορεί να προσομοιώνει την απόδοση των φυγοκεντρικών αντλιών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Αναμένεται ότι η εφαρμογή των μοντέλων αυτών θα συμβάλλει στην ανίχνευση βλαβών με μεγαλύτερη ακρίβεια, μειώνοντας έτσι το ρίσκο αστοχίας κατά τη λειτουργία τους.

2. Φυγοκεντρικές αντλίες

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα εξαρτήματα της φυγοκεντρικής αντλίας και μια σειρά από τους τύπους αντλιών που υφίστανται στην αγορά. Αυτό το κεφάλαιο παρέχει στον αναγνώστη μια βασική κατανόηση των αρχών της ορολογίας της φυγοκεντρικής αντλίας. Η φυγοκεντρική αντλία είναι ο πιο χρησιμοποιούμενος τύπος αντλίας στον κόσμο. Η αρχή λειτουργίας είναι απλή, καλά περιγραφόμενη και σχολαστικά ελεγμένη και η αντλία είναι στιβαρή, αποτελεσματική και σχετικά φθηνή στην παραγωγή. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα παραλλαγών που βασίζονται στην αρχή της φυγοκεντρικής αντλίας και αποτελούνται από τα ίδια βασικά υδραυλικά μέρη (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006).

2.1 Αρχή της φυγόκεντρης αντλίας

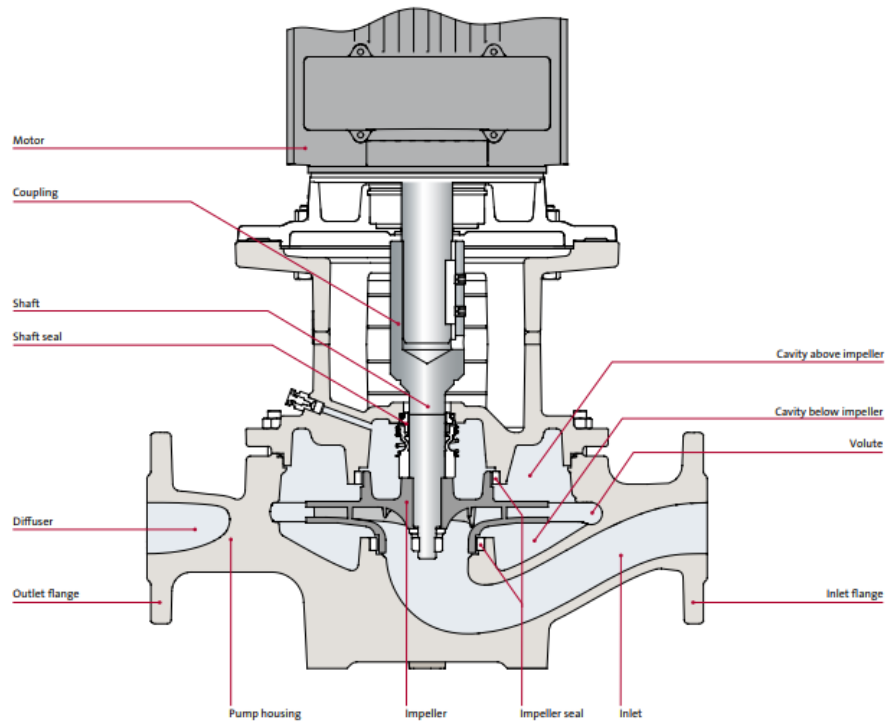
Όταν η αντλία είναι σε λειτουργία δημιουργείται μια αύξηση στην πίεση του ρευστού από την είσοδο της αντλίας στην έξοδο της. Αυτή η διαφορά πίεσης οδηγεί το ρευστό μέσω του συστήματος ή της εγκατάστασης. Η φυγοκεντρική αντλία δημιουργεί αύξηση της πίεσης μεταφέροντας μηχανική ενέργεια από τον κινητήρα στο ρευστό μέσω της περιστρεφόμενης περωτής. Το ρευστό ρέει από την είσοδο στο κέντρο της περωτής και προς τα έξω κατά μήκος των περυγίων της. Η φυγόκεντρος δύναμη αυξάνει την ταχύτητα του ρευστού και κατά συνέπεια η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε πίεση. Η εικόνα 11 δείχνει ένα παράδειγμα της διαδρομής του υγρού μέσω της φυγοκεντρικής αντλίας (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006).



Εικόνα 1 Διαδρομή υγρού μέσω της φυγοκεντρικής αντλίας.

2.2 Υδραυλικά εξαρτήματα

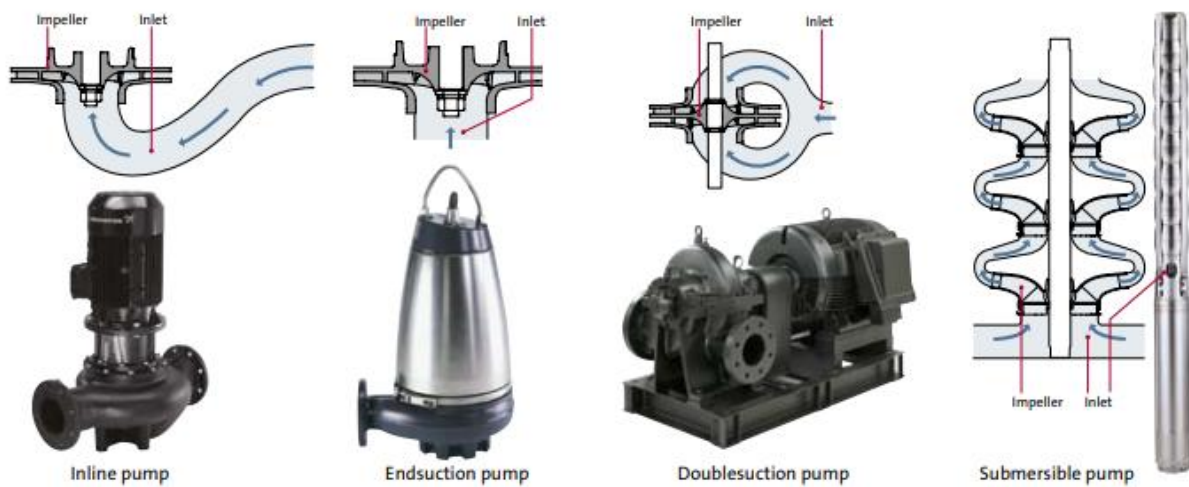
Οι αρχές των υδραυλικών εξαρτημάτων είναι κοινές για τις περισσότερες φυγοκεντρικές αντλίες. Τα υδραυλικά εξαρτήματα είναι τα μέρη που έρχονται σε επαφή με το υγρό. Η εικόνα 2 παρουσιάζει τα υδραυλικά εξαρτήματα σε μια μονοβάθμια εν σειρά αντλία. Οι επόμενες ενότητες περιγράφουν τα εξαρτήματα από τη φλάντζα εισόδου έως τη φλάντζα εξόδου (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 2 Υδραυλικά εξαρτήματα. φυγοκεντρικής αντλίας

2.2.1 Φλάντζα εισόδου και είσοδος

Η αντλία συνδέεται με το σύστημα σωληνώσεων μέσω των φλαντζών εισόδου και εξόδου της. Ο σχεδιασμός των φλαντζών εξαρτάται από την εφαρμογή της αντλίας. Ορισμένοι τύποι αντλιών δεν έχουν φλάντζα εισόδου επειδή η είσοδος δεν είναι τοποθετημένη σε σωλήνα αλλά βυθίζεται απευθείας στο ρευστό. Η είσοδος οδηγεί το υγρό στο κέντρο της περωτής. Ο σχεδιασμός της εισόδου εξαρτάται από τον τύπο της αντλίας. Οι τέσσερις πιο συνηθισμένοι τύποι εισαγωγών είναι η εν σειρά, η τελική αναρρόφηση, η διπλή αναρρόφηση και η είσοδος για υποβρύχιες αντλίες, που παρουσιάζονται στην εικόνα 3 (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 3 Τύποι εισόδου ανάλογα με το είδος της αντλίας

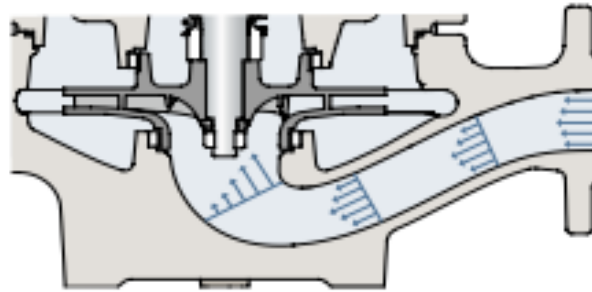
Οι αντλίες inline κατασκευάζονται για να τοποθετούνται σε ευθύγραμμο σωλήνα – εξ ου και το όνομα inline. Το τμήμα εισόδου οδηγεί το υγρό στο κέντρο της περωτής (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..

Οι αντλίες τελικής αναρρόφησης έχουν ένα πολύ κοντό και ευθύ τμήμα εισόδου επειδή το κέντρο της περωτής τοποθετείται στη συνέχεια της φλάντζας εισόδου.

Η περωτή στις αντλίες διπλής αναρρόφησης έχει δύο κέντρα φτερωτής. Η είσοδος χωρίζεται στα δύο και οδηγεί το υγρό από τη φλάντζα εισόδου και στα δύο κέντρα της περωτής.

Στις υποβρύχιες αντλίες, ο κινητήρας τοποθετείται συχνά κάτω από τα υδραυλικά μέρη με την είσοδο τοποθετημένη στο μεσαίο τμήμα της αντλίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 3. Ο σχεδιασμός αποτρέπει τις υδραυλικές απώλειες που σχετίζονται με την οδήγηση του υγρού κατά μήκος του κινητήρα. Επιπλέον, ο κινητήρας ψύχεται λόγω βύθισης στο ρευστό.

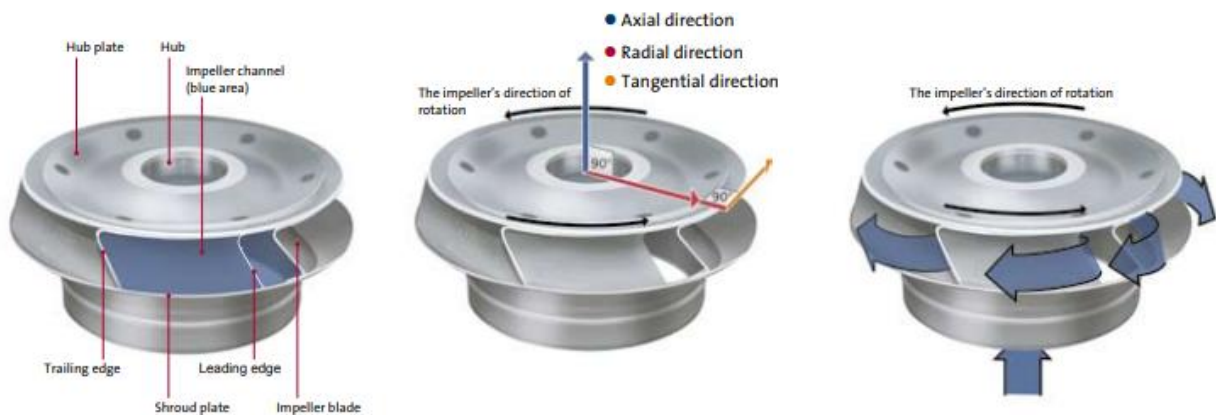
Ο σχεδιασμός της εισόδου στοχεύει στη δημιουργία ενός προφίλ ομοιόμορφης ταχύτητας στην περωτή, καθώς αυτό οδηγεί στην καλύτερη απόδοση. Η εικόνα 4 παρουσιάζει ένα παράδειγμα της κατανομής της ταχύτητας σε διαφορετικές διατομές στην είσοδο (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 4 Κατανομή ταχύτητας στην είσοδο

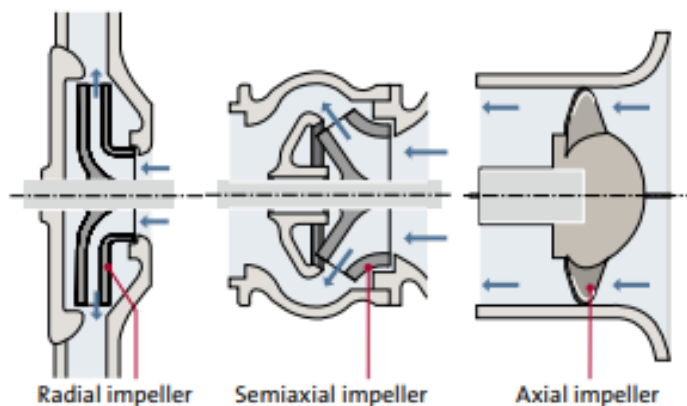
2.2.2 Πτερωτή

Τα πτερύγια της περιστρεφόμενης πτερωτής μεταφέρουν ενέργεια στο ρευστό αυξάνοντας την πίεση και την ταχύτητα του. Το υγρό αναρροφάται στην πτερωτή στο κέντρο της πτερωτής και ρέει μέσω των καναλιών της πτερωτής που σχηματίζονται από τις λεπίδες μεταξύ του περιβλήματος και της πλήμνης, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 5. Ο σχεδιασμός της πτερωτής εξαρτάται από τις απαιτήσεις για πίεση, ροή και εφαρμογή. Η πτερωτή είναι το κύριο εξάρτημα που καθορίζει την απόδοση της αντλίας. Οι παραλλαγές των αντλιών συχνά δημιουργούνται μόνο με την τροποποίηση της πτερωτής (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 5 Τα εξαρτήματα της πτερωτής, οι ορισμοί των κατευθύνσεων και η ροή σχετικά με την πτερωτή

Η ικανότητα της περωτής να αυξάνει την πίεση και να δημιουργεί ροή εξαρτάται κυρίως από το εάν το ρευστό διέρχεται ακτινικά ή αξονικά μέσω αυτής, όπως φαίνεται στην εικόνα 6. Σε μια ακτινωτή περωτή, υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ της διαμέτρου εισόδου και της διαμέτρου εξόδου, καθώς και μεταξύ της διαμέτρου εξόδου και του πλάτους εξόδου, που είναι το ύψος του καναλιού στην έξοδο της περωτής. Σε αυτή την κατασκευή, οι φυγόκεντρες δυνάμεις έχουν ως αποτέλεσμα υψηλή πίεση και χαμηλή ροή. Σχετικά χαμηλή πίεση και υψηλή ροή, αντίθετα, υφίστανται σε μια αξονική περωτή χωρίς αλλαγή στην ακτινική κατεύθυνση και μεγάλο πλάτος εξόδου. Οι ημιαξονικές περωτές χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται αντιστάθμιση μεταξύ της αύξησης της πίεσης και της ροής (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 6 Ακτινική, ημιαξονική και αξονική περωτή.

Η περωτή έχει μια σειρά από περύγια. Ο αριθμός εξαρτάται κυρίως από την επιθυμητή απόδοση και τους περιορισμούς θορύβου, καθώς και από την ποσότητα και το μέγεθος των στερεών σωματιδίων στο ρευστό. Οι περωτές με 5-10 κανάλια έχουν αποδειχθεί ότι παρουσιάζουν την καλύτερη απόδοση και χρησιμοποιούνται για ρευστά χωρίς στερεά σωματίδια. Οι περωτές ενός, δύο ή τριών καναλιών χρησιμοποιούνται για υγρά με σωματίδια όπως τα λύματα. Το μπροστινό άκρο τέτοιων περωτών έχει σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο τα σωματίδια να μπλοκάρουν την περωτή. Οι περωτές ενός, δύο και τριών καναλιών μπορούν να χειριστούν σωματίδια συγκεκριμένου μεγέθους που περνούν μέσα από την περωτή. Η εικόνα 7 δείχνει μια αντλία ενός καναλιού. Οι περωτές χωρίς κάλυμμα ονομάζονται ανοιχτές περωτές (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 7 Αντλία ενός καναλιού

Οι ανοιχτές περωτές χρησιμοποιούνται όπου είναι απαραίτητο να καθαριστεί η περωτή και όπου υπάρχει κίνδυνος μπλοκαρίσματος. Μια αντλία τύπου vortex με ανοιχτή περωτή χρησιμοποιείται για παράδειγμα σε εφαρμογές διαχείρισης λυμάτων. Σε αυτόν τον τύπο αντλίας, η περωτή δημιουργεί μια ροή που μοιάζει με τη δίνη σε έναν ανεμοστρόβιλο, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 8. Η αντλία vortex έχει χαμηλή απόδοση σε σύγκριση με τις αντλίες με κάλυμμα και στεγανοποίηση περωτής (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 8 Αντλία τύπου vortex

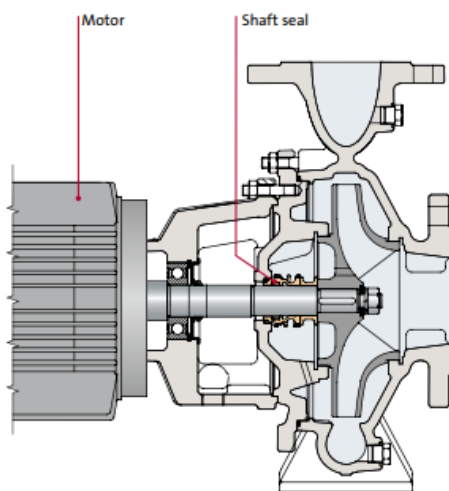
Αφού αποφασιστεί το βασικό σχήμα της περωτής, ο σχεδιασμός της περωτής είναι ένα ζήτημα εύρεσης ενός συμβιβασμού μεταξύ απώλειας τριβής και απώλειας ως συνέπεια μη ομοιόμορφων

προφίλ ταχύτητας. Γενικά, τα προφίλ ομοιόμορφης ταχύτητας μπορούν να επιτευχθούν με την επέκταση των περυγίων της περωτής, αλλά αυτό οδηγεί σε αυξημένη τριβή των τοιχωμάτων.

2.2.3 Σύζευξη και κίνηση

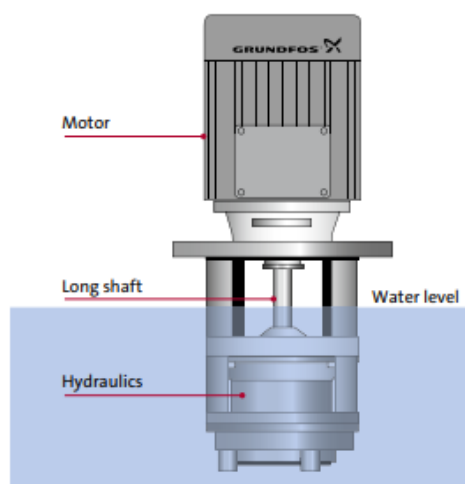
Η περωτή συνήθως κινείται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Η σύζευξη μεταξύ του τμήματος του κινητήρα και του υδραυλικού μέρους είναι ένα αδύναμο σημείο στο σχεδιασμό επειδή είναι δύσκολο να σφραγιστεί ένας περιστρεφόμενος άξονας. Σε σχέση με τη σύζευξη, γίνεται διάκριση μεταξύ δύο τύπων αντλιών: Αντλίες ξηρού δρομέα και αντλίες τύπου canned ρότορα. Το πλεονέκτημα του πρώτου είδους σε σύγκριση με την αντλία τύπου canned ρότορα είναι η χρήση τυποποιημένων κινητήρων. Το μειονέκτημα είναι η στεγανοποίηση μεταξύ του κινητήρα και της περωτής (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..

Στην αντλία ξηρού δρομέα, ο κινητήρας και το υγρό διαχωρίζονται είτε με ένα τσιμούχα άξονα, διαχωρισμό με μακρύ άξονα είτε με μαγνητικό σύνδεσμο. Σε μια αντλία με τσιμούχα άξονα, το υγρό και ο κινητήρας διαχωρίζονται με στεγανοποιητικούς δακτυλίους, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 9. Τα μηχανικά στεγανοποιητικά άξονα δεν χρειάζονται συντήρηση και έχουν μικρότερη διαρροή από τα κουτιά πλήρωσης με συμπιεσμένο υλικό συσκευασίας. Η διάρκεια ζωής των μηχανικών στεγανοποιήσεων άξονα εξαρτάται από το υγρό, την πίεση και τη θερμοκρασία (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



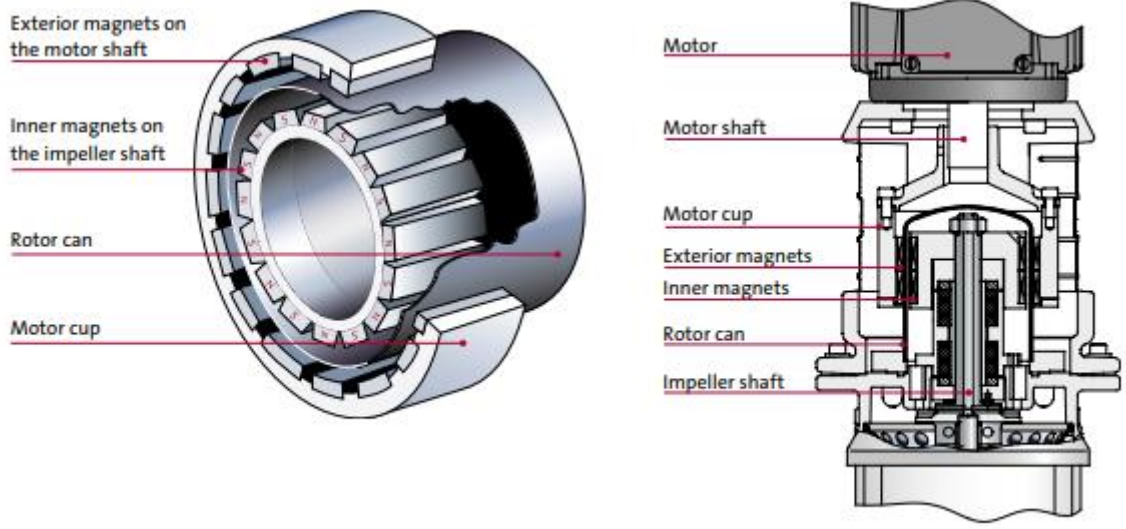
Εικόνα 9 Αντλία ξηρού δρομέα με τσιμούχα άξονα.

Εάν ο κινητήρας και το υγρό χωρίζονται από έναν μακρύ άξονα, τότε τα δύο μέρη δεν θα έρθουν σε επαφή, και συνεπώς η τσιμούχα του άξονα μπορεί να παραληφθεί, όπως φαίνεται στην εικόνα 10. Αυτή η λύση έχει περιορισμένες επιλογές τοποθέτησης επειδή ο κινητήρας πρέπει να τοποθετηθεί ψηλότερα από τα υδραυλικά μέρη και την επιφάνεια του υγρού στο σύστημα. Επιπλέον, η λύση αυτή έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη απόδοση λόγω της ροής διαρροής μέσω του διακένου μεταξύ του άξονα και του περιβλήματος της αντλίας και λόγω της τριβής μεταξύ του ρευστού και του άξονα (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



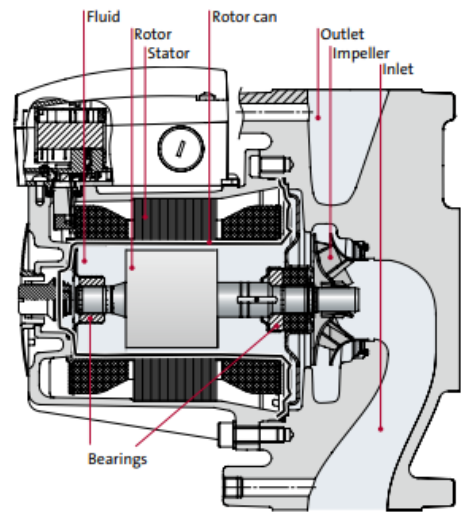
Εικόνα 10 Αντλία ξηρού δρομέα με σύζευξη με μακρύ άξονα

Σε αντλίες με μαγνητική κίνηση, ο κινητήρας και το ρευστό διαχωρίζονται από ένα μη μαγνητιζόμενο ρότορα, ο οποίος εξαλείφει το πρόβλημα στεγανοποίησης ενός περιστρεφόμενου άξονα. Σε αυτόν τον τύπο αντλίας, ο άξονας της περωτής έχει μια γραμμή σταθερών μαγνητών που ονομάζονται εσωτερικοί μαγνήτες. Ο άξονας του κινητήρα καταλήγει σε ένα κύπελλο όπου οι εξωτερικοί μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στο εσωτερικό του κυπέλλου, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 11. Το δοχείο του ρότορα είναι στερεωμένο στο περίβλημα της αντλίας μεταξύ του άξονα της περωτής και του κυπέλλου. Ο άξονας της περωτής και ο άξονας του κινητήρα περιστρέφονται και τα δύο μέρη συνδέονται μέσω των μαγνητών. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι ότι η αντλία είναι ερμητικά σφραγισμένη αλλά η παραγωγή της ζεύξης είναι ακριβή. Επομένως, αυτός ο τύπος σφράγισης χρησιμοποιείται μόνο όταν απαιτείται η ερμητική στεγανοποίηση της αντλίας (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 11 Αντλία ξηρού δρομέα με μαγνητική σύζευξη

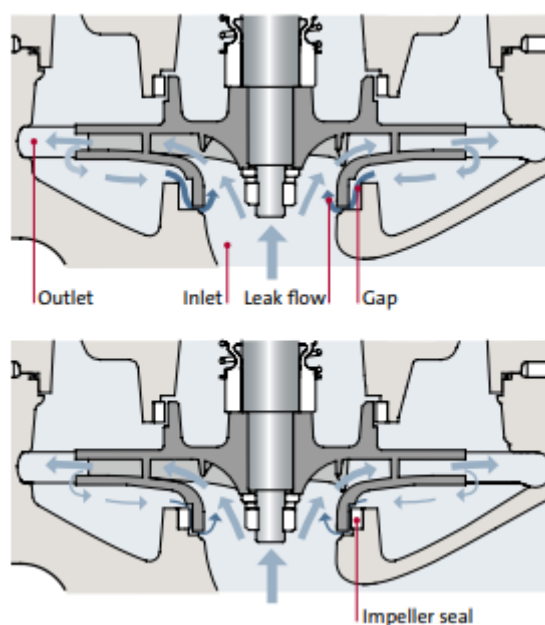
Στις αντλίες με cased ρότορα, ο ρότορας και η πτερωτή διαχωρίζονται από τον στάτορα του κινητήρα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 12, ο ρότορας περιβάλλεται από το υγρό που λιπαίνει τα ρουλεμάν και ψύχει τον κινητήρα. Το ρευστό γύρω από τον ρότορα έχει ως αποτέλεσμα την τριβή μεταξύ του ρότορα και του δοχείου ρότορα που μειώνει την απόδοση της αντλίας (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 12 Αντλία με cased ρότορα

2.2.4 Σφράγιση πτερωτής

Μια διαρροή παρουσιάζεται εν γένει στο διάκενο μεταξύ της περιστρεφόμενης περωτής και του ακίνητου περιβλήματος της αντλίας όταν η αντλία λειτουργεί. Ο ρυθμός της ροής της διαρροής εξαρτάται κυρίως από τον σχεδιασμό του διακένου και την άνοδο της πίεσης της περωτής. Η ροή της διαρροής επιστρέφει στο κέντρο της περωτής μέσω του διακένου, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 13. Έτσι, η περωτή πρέπει να αντλεί τόσο τη ροή διαρροής όσο και το υγρό μέσω της αντλίας από τη φλάντζα εισόδου στη φλάντζα εξόδου. Για να ελαχιστοποιηθεί η ροή διαρροής, τοποθετείται τσιμούχα στο στροφείο (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 13 Διαρροή μέσα από το διάκενο.

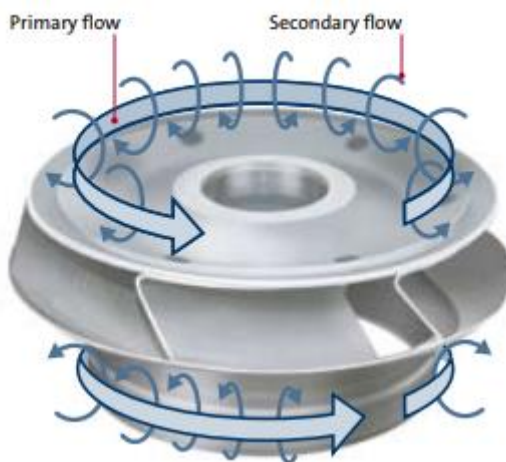
Η τσιμούχα της περωτής διατίθεται σε διάφορα σχέδια και συνδυασμούς υλικών. Η σφράγιση τυπικά περιστρέφεται απευθείας στο περίβλημα της αντλίας ή κατασκευάζεται ως μεταγενέστερος δακτύλιος. Οι τσιμούχες περωτής μπορούν επίσης να κατασκευαστούν με πλωτούς στεγανοποιητικούς δακτυλίους. Επιπλέον, υπάρχει μια σειρά στεγανοποιήσεων με δακτυλίους από καουτσούκ ιδιαίτερα κατάλληλα για το χειρισμό υγρών με λειαντικά σωματίδια όπως η άμμος (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..

Η επίτευξη μιας βέλτιστης ισορροπίας μεταξύ διαρροής και τριβής είναι ένας ουσιαστικός στόχος κατά το σχεδιασμό μιας τσιμούχας περωτής. Ένα μικρό κενό περιορίζει τη ροή διαρροής αλλά αυξάνει την τριβή και τον κίνδυνο οπισθέλκουσας και θορύβου. Ένα μικρό κενό

αυξάνει επίσης τις απαιτήσεις για ακρίβεια μηχανικής καταργασίας και συναρμολόγησης με αποτέλεσμα υψηλότερο κόστος παραγωγής. Για να επιτευχθεί η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ διαρροής και τριβής, πρέπει να ληφθούν υπόψη ο τύπος και το μέγεθος της αντλίας.

2.2.5 Κοιλότητες και αξονικό ρουλεμάν

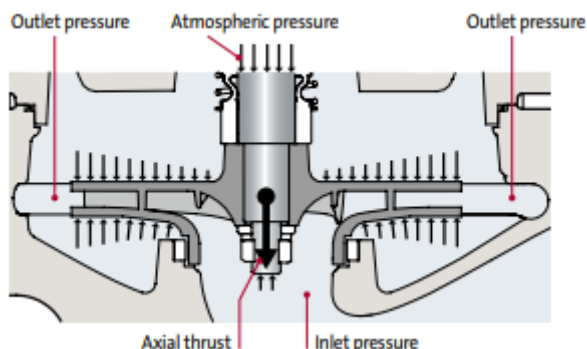
Ο όγκος των κοιλοτήτων εξαρτάται από τον σχεδιασμό της περωτής και του περιβλήματος της αντλίας και επηρεάζουν τη ροή γύρω από την περωτή και την ικανότητα της αντλίας να χειρίζεται την άμμο και τον αέρα. Η περιστροφή της περωτής δημιουργεί δύο τύπους ροών στις κοιλότητες: Πρωτογενείς ροές και δευτερεύουσες ροές. Οι πρωτογενείς ροές είναι δίνες που περιστρέφονται με την περωτή στις κοιλότητες πάνω και κάτω από την περωτή, και παρουσιάζονται στην εικόνα 14. Οι δευτερεύουσες ροές είναι σημαντικά πιο αδύναμες από τις πρωτογενείς ροές (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 14 Πρωτογενείς και δευτερεύουσες ροές στις κοιλότητες.

Οι πρωτογενείς και οι δευτερεύουσες ροές επηρεάζουν την κατανομή της πίεσης στο εξωτερικό της πλήμνης και του καλύμματος της περωτής επηρεάζοντας την αξονική ώθηση. Η αξονική ώθηση είναι το άθροισμα όλων των δυνάμεων στην αξονική διεύθυνση που προκύπτουν λόγω της συνθήκης πίεσης στην αντλία. Η κύρια συμβολή δύναμης προέρχεται από την αύξηση της πίεσης που προκαλείται από την περωτή. Το κέντρο της περωτής επηρεάζεται από την πίεση

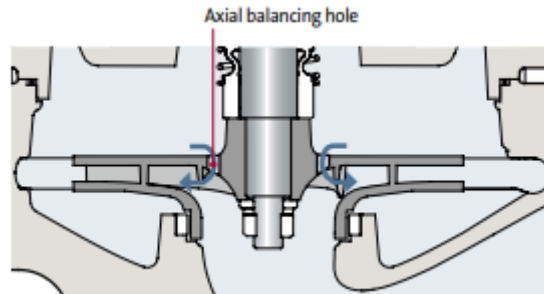
εισόδου ενώ οι εξωτερικές επιφάνειες της πλήμνης και του καλύμματος επηρεάζονται από την πίεση εξόδου, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 15. Το άκρο του άξονα εκτίθεται στην ατμοσφαιρική πίεση ενώ το άλλο άκρο επηρεάζεται από την πίεση του συστήματος. Η πίεση αυξάνεται από το κέντρο του άξονα και προς τα έξω (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 15 Δυνάμεις πίεσης που προκαλούν αξονική ώθηση.

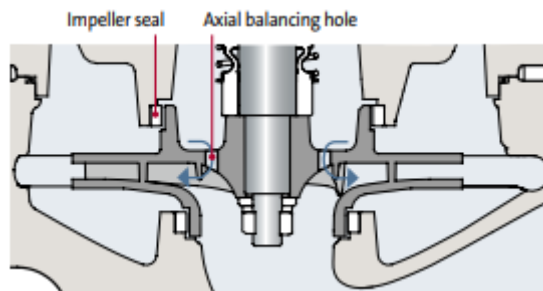
Το αξονικό ρουλεμάν απορροφά ολόκληρη την αξονική ώθηση και επομένως εκτίθεται στις δυνάμεις που επηρεάζουν την περωτή. Η περωτή πρέπει να είναι αξονικά ισορροπημένη εάν δεν είναι δυνατό να απορροφηθεί ολόκληρη η αξονική ώθηση στο αξονικό έδρανο. Υπάρχουν πολλές δυνατότητες μείωσης της ώθησης στον άξονα και επομένως εξισορρόπησης του αξονικού ρουλεμάν. Όλες οι μέθοδοι αξονικής εξισορρόπησης έχουν ως αποτέλεσμα υδραυλικές απώλειες.

Μια προσέγγιση για την εξισορρόπηση των αξονικών δυνάμεων είναι η δημιουργία μικρών οπών στην πλάκα της πλήμνης, όπως στην εικόνα 16. Η ροή διαρροής μέσω των οπών επηρεάζει τη ροή στις κοιλότητες πάνω από την περωτή και έτσι μειώνει την αξονική δύναμη αλλά έχει ως αποτέλεσμα διαρροή (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



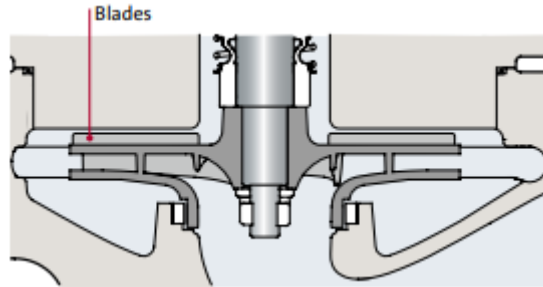
Εικόνα 16 Μείωση αξονικής ώθησης με χρήση οπών εξισορρόπησης

Μια άλλη προσέγγιση για τη μείωση της αξονικής ώθησης είναι ο συνδυασμός οπών εξισορρόπησης με μια τσιμούχα στο στροφείο στην πλάκα πλήμνης, όπως στην εικόνα 17. Αυτό μειώνει την πίεση στην κοιλότητα μεταξύ του άξονα και της στεγανοποίησης της περωτής και μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη ισορροπία. Η τσιμούχα της περωτής προκαλεί επιπλέον τριβή αλλά μικρότερη ροή διαρροής μέσω των οπών εξισορρόπησης σε σύγκριση με τη λύση χωρίς τη σφράγιση της περωτής.



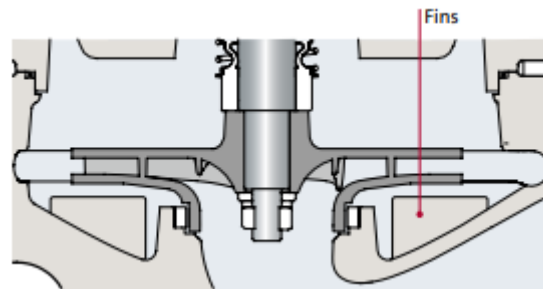
Εικόνα 17 Μείωση αξονικής ώθησης με χρήση τσιμούχας περωτής και οπών εξισορρόπησης

Μια τρίτη μέθοδος εξισορρόπησης των αξονικών δυνάμεων είναι η τοποθέτηση λεπίδων στο πίσω μέρος της περωτής, όπως φαίνεται στην εικόνα 18. Όπως και οι δύο προηγούμενες λύσεις, αυτή η μέθοδος αλλάζει τις ταχύτητες στη ροή στην πλάκα πλήμνης, οπότε η κατανομή της πίεσης αλλάζει αναλογικά. Ωστόσο, οι πρόσθετες λεπίδες χρησιμοποιούν ισχύ χωρίς να συμβάλλουν στην απόδοση της αντλίας. Επομένως, η κατασκευή θα μειώσει την απόδοση (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 18 Μείωση αξονικής ώθησης μέσω των λεπίδων στο πίσω μέρος της πλάκας πλήμνης

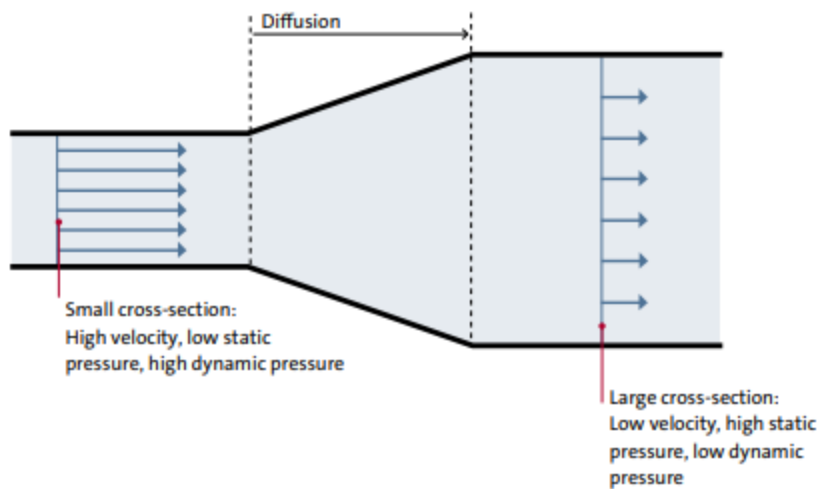
Μια τέταρτη μέθοδος εξισορρόπησης της αξονικής ώθησης είναι η τοποθέτηση περυγίων στο περίβλημα της αντλίας στην κοιλότητα κάτω από την περωτή, και εμφανίζεται στην εικόνα 19. Σε αυτή την περίπτωση, η κύρια ταχύτητα ροής στην κοιλότητα κάτω από την περωτή μειώνεται, οπότε η πίεση αυξάνεται στο κάλυμμα. Αυτός ο τύπος αξονικής εξισορρόπησης αυξάνει την τριβή του δίσκου και την απώλεια διαρροής λόγω της υψηλότερης πίεσης.



Εικόνα 19 Μείωση αξονικής ώθησης με χρήση περυγίων στο περίβλημα της αντλίας

2.2.6 Περίβλημα Volute, διαχύτης και φλάντζα εξόδου

Το σπειροειδές περίβλημα συλλέγει το υγρό από την περωτή και οδηγεί στη φλάντζα εξόδου. Το σπειροειδές περίβλημα μετατρέπει την αύξηση της δυναμική πίεσης στην περωτή σε στατική πίεση. Η ταχύτητα μειώνεται σταδιακά όταν αυξάνεται η περιοχή διατομής της ροής του ρευστού. Αυτός ο μετασχηματισμός ονομάζεται διάχυση ταχύτητας. Ένα παράδειγμα διάχυσης είναι όταν η ταχύτητα του ρευστού σε έναν σωλήνα μειώνεται λόγω της μετάβασης από μια μικρή περιοχή διατομής σε μια μεγάλη περιοχή διατομής, όπως στην εικόνα 20 (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 20 Αλλαγή της ταχύτητας του ρευστού σε έναν σωλήνα που προκαλείται από αλλαγή στην περιοχή της διατομής

Το περίβλημα αποτελείται από τρία κύρια εξαρτήματα: δακτυλιοειδής διαχύτης, σπειροειδές και διαχύτης εξόδου, που εμφανίζονται στην εικόνα 21. Μια μετατροπή ενέργειας μεταξύ ταχύτητας και πίεσης συμβαίνει σε καθένα από τα τρία συστατικά.

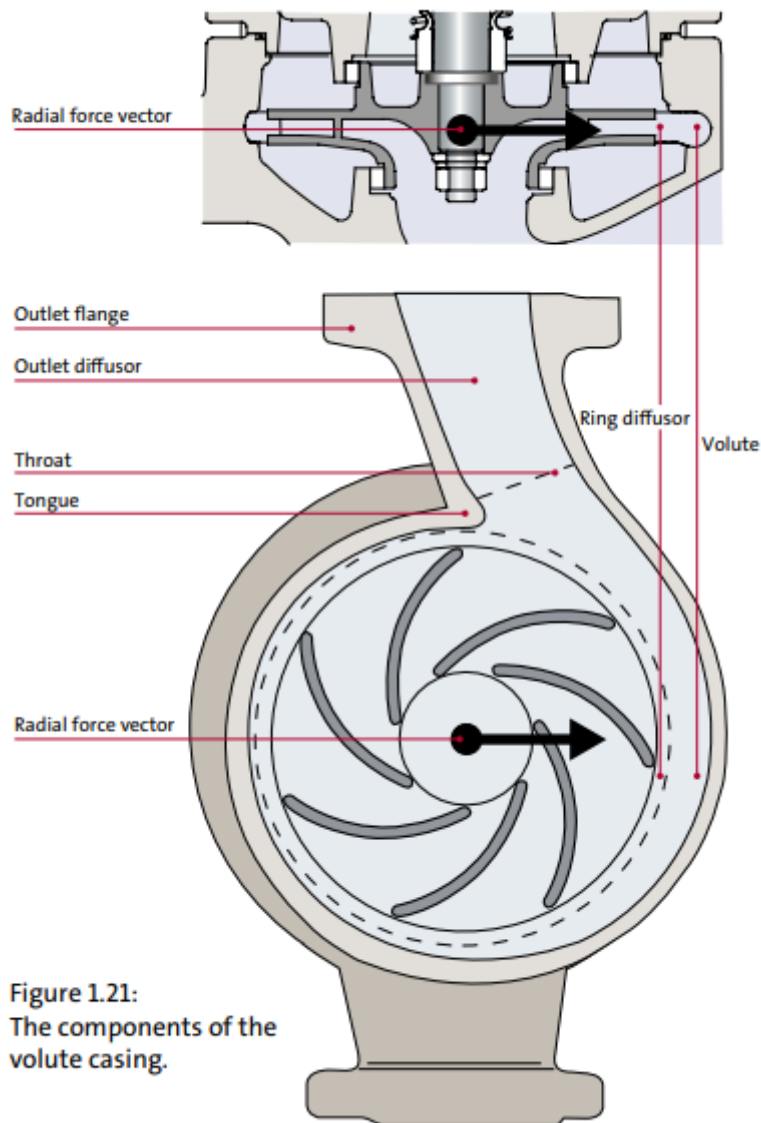


Figure 1.21:
The components of the
volute casing.

Εικόνα 21 Τα εξαρτήματα του περιβλήματος

Η κύρια λειτουργία του δακτυλιοειδή διαχύτη είναι να οδηγεί το υγρό από την πτερωτή στο σπειροειδές. Η διατομή στον δακτυλιοειδή διαχύτη αυξάνεται λόγω της αύξησης της διαμέτρου από την πτερωτή προς τον σπειροειδή. Μπορούν να τοποθετηθούν λεπίδες στον δακτυλιοειδή διαχύτη για να αυξηθεί η διάχυση. Το πρωταρχικό καθήκον του σπειροειδούς είναι να συλλέξει το υγρό από τον δακτυλιοειδή διαχύτη και να το οδηγήσει στον διαχύτη. Για να υπάρχει την ίδια πίεση κατά μήκος του σπειροειδούς, η διατομή στο σπειροειδές πρέπει να αυξηθεί κατά μήκος της περιφέρειας από τη γλώσσα προς το λαιμό. Ο λαιμός είναι το σημείο στο εξωτερικό της

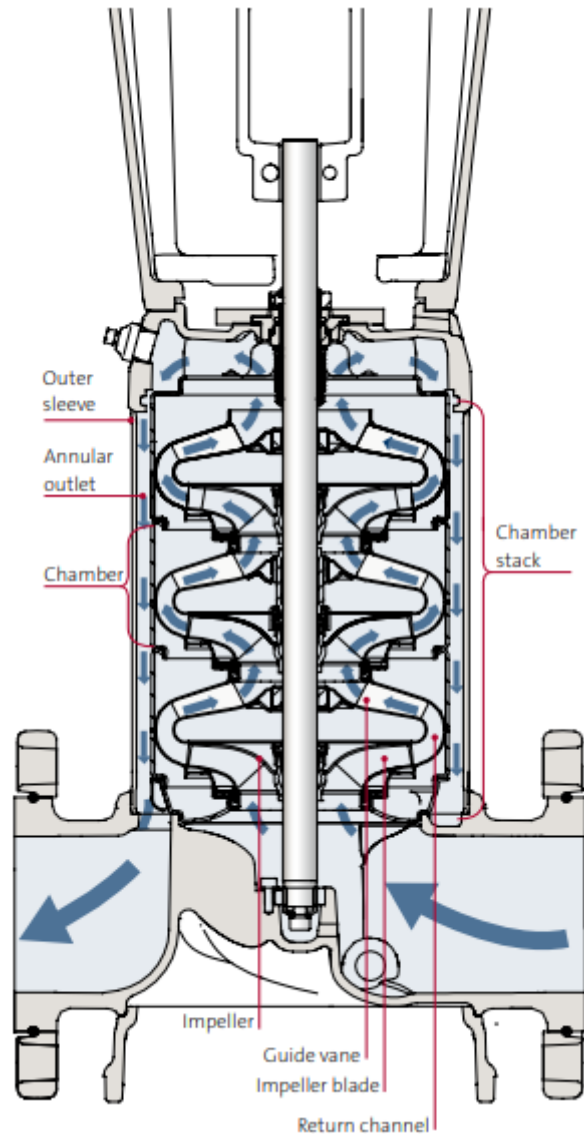
γλώσσας όπου βρίσκεται η μικρότερη περιοχή διατομής στον διαχύτη εξόδου (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..

Οι συνθήκες ροής στο σπειροειδές μπορούν να είναι βέλτιστες μόνο στο σημείο σχεδιασμού. Σε άλλες ροές, ακτινικές δυνάμεις εμφανίζονται στην περωτή λόγω της διακύμανσης της περιφερειακής πίεσης στο σπειροειδές. Οι ακτινικές δυνάμεις πρέπει, όπως και οι αξονικές δυνάμεις, να απορροφώνται στο ρουλεμάν, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 21. Ο διαχύτης εξόδου συνδέει το λαιμό με τη φλάντζα εξόδου. Ο διαχύτης αυξάνει τη στατική πίεση με μια σταδιακή αύξηση της περιοχής διατομής από το λαιμό έως τη φλάντζα εξόδου.

Το σπειροειδές περίβλημα έχει σχεδιαστεί για να μετατρέπει τη δυναμική πίεση σε στατική πίεση επιτυγχάνεται ενώ οι απώλειες πίεσης ελαχιστοποιούνται. Η υψηλότερη απόδοση επιτυγχάνεται με την εύρεση της σωστής ισορροπίας μεταξύ των αλλαγών στην ταχύτητα και της τριβής των τοιχωμάτων.

2.2.7 Κανάλι επιστροφής και εξωτερικό χιτώνιο

Για να αυξηθεί η άνοδος της πίεσης πάνω από την αντλία, μπορούν να συνδεθούν περισσότερες φτερωτές σε σειρά. Το κανάλι επιστροφής οδηγεί το ρευστό από τη μία περωτή στην άλλη, όπως φαίνεται στην εικόνα 22. Μια περωτή και ένα κανάλι επιστροφής ονομάζονται είτε στάδιο είτε θάλαμος. Οι θάλαμοι σε μια αντλία πολλαπλών σταδίων ονομάζονται συνολικά στοίβα θαλάμου. Εκτός από την οδήγηση του ρευστού από τη μία περωτή στην άλλη, το κανάλι επιστροφής έχει την ίδια βασική λειτουργία με το περίβλημα του σπειροειδούς: Μετατροπή της δυναμικής πίεσης σε στατική πίεση. Το κανάλι επιστροφής μειώνει την ανεπιθύμητη περιστροφή στο ρευστό επειδή μια τέτοια περιστροφή επηρεάζει την απόδοση της επόμενης περωτής. Η περιστροφή ελέγχεται από πτερύγια οδήγησης στο κανάλι επιστροφής (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..



Εικόνα 22 Υδραυλικά εξαρτήματα σε εν σειρά αντλία πολλαπλών σταδίων

Στις εν σειρά αντλίες πολλαπλών σταδίων το ρευστό οδηγείται από την κορυφή της στοίβας του θαλάμου προς την έξοδο στο κανάλι που σχηματίζεται από το εξωτερικό τμήμα της στοίβας θαλάμου και το εξωτερικό χιτώνιο, όπως παρουσιάζει η εικόνα 22. Κατά το σχεδιασμό ενός καναλιού επιστροφής, ισχύουν οι ίδιες σχεδιαστικές εκτιμήσεις της περωτής και του σπειροειδούς περιβλήματος. Σε αντίθεση με το σπειροειδές περίβλημα, ένα κανάλι επιστροφής δεν δημιουργεί ακτινικές δυνάμεις στην περωτή επειδή είναι συμμετρικό ως προς τον άξονα (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..

2.3 Τύποι και συστήματα αντλιών

Αυτή η ενότητα περιγράφει μια επιλογή των φυγοκεντρικών αντλιών που απαντώνται στην αγορά. Οι αντλίες χωρίζονται σε πέντε συνολικές ομάδες: Αντλίες κυκλοφορίας, αντλίες ενίσχυσης πίεσης και μεταφοράς υγρών, αντλίες παροχής νερού, βιομηχανικές αντλίες και αντλίες λυμάτων. Πολλοί από τους τύπους αντλιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές εφαρμογές. Οι αντλίες κυκλοφορίας χρησιμοποιούνται κυρίως για την κυκλοφορία του νερού σε κλειστά συστήματα π.χ. συστήματα θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού καθώς και συστήματα ζεστού νερού χρήσης.

Το νερό σε ένα σύστημα ζεστού νερού χρήσης κυκλοφορεί συνεχώς στους σωλήνες. Αυτό αποτρέπει τη μεγάλη αναμονή για ζεστό νερό όταν ανοίξει η βρύση. Οι αντλίες για την ενίσχυση της πίεσης χρησιμοποιούνται για την αύξηση της πίεσης του κρύου νερού και ως αντλίες συμπυκνώματος για λέβητες ατμού. Οι αντλίες είναι συνήθως σχεδιασμένες για να χειρίζονται υγρά με μικρά σωματίδια όπως η άμμος. Οι αντλίες παροχής νερού μπορούν να εγκατασταθούν με δύο τρόπους: Μπορούν είτε να συγχωνευθούν σε πηγάδι είτε να τοποθετηθούν στην επιφάνεια του εδάφους. Οι συνθήκες στο σύστημα ύδρευσης επιβάλλουν μεγάλες απαιτήσεις για στιβαρότητα έναντι της ώχρας, του ασβέστη και της άμμου. Οι βιομηχανικές αντλίες μπορούν, όπως υποδηλώνει το όνομα, να χρησιμοποιηθούν παντού στη βιομηχανία και αυτό σε ένα πολύ ευρύ τμήμα συστημάτων που χειρίζονται πολλά διαφορετικά ομοιογενή και ανομοιογενή ρευστά.

Αυστηρές απαιτήσεις περιβάλλοντος και ασφάλειας επιβάλλονται σε αντλίες που πρέπει να χειρίζονται διαβρωτικά, τοξικά ή εκρηκτικά υγρά, π.χ. ότι η αντλία είναι ερμητικά κλειστή και ανθεκτική στη διάβρωση. Οι αντλίες λυμάτων χρησιμοποιούνται για την άντληση μολυσμένου νερού σε εγκαταστάσεις αποχέτευσης και βιομηχανικά συστήματα. Οι αντλίες είναι κατασκευασμένες ώστε να είναι δυνατή η άντληση υγρών με υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά σωματίδια (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006).

2.3.1. Η αντλία UP

Οι αντλίες κυκλοφορίας χρησιμοποιούνται για συστήματα θέρμανσης, κυκλοφορίας κρύου νερού, αερισμού και κλιματισμού σε σπίτια, κτίρια γραφείων, ξενοδοχεία κ.λπ. Ορισμένες από τις αντλίες εγκαθίστανται σε συστήματα θέρμανσης στον τελικό χρήστη. Άλλα πωλούνται σε πελάτες OEM (Original Equipment Manufacturer) που ενσωματώνουν τις αντλίες σε συστήματα κλιβάνων αερίου. Είναι μια εν σειρά αντλία με canned ρότορα που έχει μόνο στατικές στεγανοποιήσεις. Η αντλία σχεδιάζεται για να ελαχιστοποιεί τον θόρυβο που μεταφέρεται από τον σωλήνα. Στην αγορά υπάρχουν αντλίες του τύπου με και χωρίς αυτόματη ρύθμιση της αντλίας. Με την αυτόματη ρύθμιση της αντλίας, είναι δυνατή η προσαρμογή της πίεσης και της ροής στις πραγματικές ανάγκες και εξοικονόμηση ενέργειας (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..

2.3.2 Η αντλία TP

Η αντλία TP χρησιμοποιείται για την κυκλοφορία ζεστού ή κρύου νερού κυρίως σε συστήματα θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού. Είναι μια εν σειρά αντλία και σε αντίθεση με τη μικρότερη αντλία UP, η αντλία TP χρησιμοποιεί τυπικό μοτέρ και τσιμούχα άξονα.

2.3.3 Η αντλία NB

Η αντλία NB προορίζεται για τη μεταφορά ρευστού σε εγκαταστάσεις τηλεθέρμανσης, συστήματα παροχής θερμότητας, ψύξης και κλιματισμού, συστήματα πλύσης και άλλα βιομηχανικά συστήματα. Η αντλία είναι μια αντλία τελικής αναρρόφησης και βρίσκεται σε πολλές παραλλαγές με διαφορετικούς τύπους στεγανοποιήσεων άξονα, πτερωτές και περιβλήματα που μπορούν να συνδυαστούν ανάλογα με τον τύπο του ρευστού, τη θερμοκρασία και την πίεση.

2.3.4 Η αντλία MQ

Η αντλία MQ είναι μια πλήρης μικροσκοπική μονάδα παροχής νερού. Χρησιμοποιείται για την παροχή νερού και τη μεταφορά υγρών σε ιδιωτικές κατοικίες, εξοχικές κατοικίες, γεωργία και κήπους. Το χειριστήριο της αντλίας διασφαλίζει ότι ξεκινά και σταματά αυτόματα όταν ανοίγει η βρύση. Το χειριστήριο προστατεύει την αντλία εάν προκύψουν σφάλματα ή εάν στεγνώσει. Το

ενσωματωμένο δοχείο διαστολής πίεσης μειώνει τον αριθμό των εκκινήσεων εάν υπάρχουν διαρροές στο σύστημα σωλήνων. Η αντλία MQ έχει αυτόνομη αναρρόφηση, και μπορεί να καθαρίσει έναν σωλήνα αναρρόφησης από τον αέρα και έτσι να αναρροφήσει από μια στάθμη που είναι χαμηλότερη από αυτή όπου είναι τοποθετημένη η αντλία (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..

2.3.5 Η αντλία SP

Η αντλία SP είναι μια υποβρύχια αντλία πολλαπλών σταδίων που χρησιμοποιείται για την παροχή ακατέργαστου νερού, τη μείωση του υπόγειου νερού και την ενίσχυση της πίεσης. Η αντλία SP μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την άντληση διαβρωτικών υγρών όπως το θαλασσινό νερό. Ο κινητήρας είναι τοποθετημένος κάτω από τη στοίβα θαλάμου και η είσοδος στην αντλία τοποθετείται μεταξύ του κινητήρα και της στοίβας θαλάμου. Η διάμετρος της αντλίας έχει σχεδιαστεί στο μέγεθος μιας τυπικής γεώτρησης. Η αντλία SP είναι εξοπλισμένη με μια ενσωματωμένη βαλβίδα αντεπιστροφής για να αποτρέψει την επιστροφή του αντλούμενου υγρού όταν η αντλία σταματά. Η βαλβίδα αντεπιστροφής βοηθά επίσης στην αποφυγή κρούσης νερού (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..

2.3.6 Η αντλία CR

Η αντλία CR χρησιμοποιείται σε πλυντήρια, συστήματα ψύξης και κλιματισμού, συστήματα επεξεργασίας νερού, συστήματα πυρόσβεσης, συστήματα τροφοδοσίας λέβητα και άλλα βιομηχανικά συστήματα. Η αντλία CR είναι μια κατακόρυφη εν σειρά αντλία πολλαπλών σταδίων. Αυτός ο τύπος αντλίας είναι επίσης ικανός να αντλεί διαβρωτικά υγρά επειδή τα υδραυλικά μέρη είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα ή τιτάνιο (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..

2.3.7 Η αντλία MTA

Η αντλία MTA χρησιμοποιείται στη μη φιλτραρισμένη πλευρά της διαδικασίας κατεργασίας για την άντληση ψυκτικού και λιπαντικού που περιέχει μοσχεύματα, ίνες και λειαντικά σωματίδια. Η αντλία MTA είναι μια αντλία ξηρού κυκλώματος με μακρύ άξονα και χωρίς στεγανοποίηση

άξονα. Η αντλία έχει σχεδιαστεί για να τοποθετείται κάθετα σε δεξαμενή. Το μήκος εγκατάστασης, το τμήμα της αντλίας που είναι βυθισμένο στη δεξαμενή, προσαρμόζεται στο βάθος της δεξαμενής έτσι ώστε να είναι δυνατή η αποστράγγιση της δεξαμενής ψυκτικού και λιπαντικού (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..

2.3.8 Η αντλία SE

Η αντλία SE χρησιμοποιείται για την άντληση λυμάτων, νερού που περιέχει λάσπη και στερεά. Η αντλία είναι μοναδική στην αγορά λυμάτων επειδή μπορεί να εγκατασταθεί βυθισμένη σε λάκκο λυμάτων καθώς και στεγνή σε σύστημα σωληνώσεων. Η σειρά αντλιών SE περιέχει αντλίες vortex και μονοκάναλες αντλίες. Οι μονοκάναλες αντλίες χαρακτηρίζονται από μεγάλη ελεύθερη δίοδο και οι προδιαγραφές της αντλίας δηλώνουν τη μέγιστη διάμετρο για τα στερεά που διέρχονται από την αντλία (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..

2.3.9 Η αντλία SEG

Η αντλία SEG είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την άντληση λυμάτων από τουαλέτες. Η αντλία SEG έχει ένα σύστημα κοπής που κόβει τα ευπαθή στερεά σε μικρότερα κομμάτια τα οποία στη συνέχεια μπορούν να οδηγηθούν μέσω ενός σωλήνα σχετικά μικρής διαμέτρου. Οι αντλίες με συστήματα κοπής ονομάζονται επίσης αντλίες μύλου (Tuzson, 2000, Lobanoff & Ross, 2013, Wilson et al., 2006)..

3. Παρακολούθηση κατάστασης και ο ρόλος της στη συντήρηση και λειτουργία

Ο θεμελιώδης σκοπός της συντήρησης σε κάθε επιχείρηση είναι να παρέχει την απαιτούμενη ικανότητα παραγωγής με το χαμηλότερο κόστος. Θα πρέπει να θεωρείται ως συνάρτηση ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ και όχι ως λειτουργία επισκευής. Η «παραγωγή» είναι ο λόγος ύπαρξης ενός οργανισμού. Είναι προφανές για εργοστάσια παραγωγής διεργασιών ή παρτίδων, αλλά άλλοι οργανισμοί όπως τα κτίρια, τα νοσοκομεία, ο στρατός, οι μεταφορές, χρειάζονται τα δικά τους μέτρα απόδοσης ή συνεχούς επιτυχίας, δηλαδή Βασικούς Δείκτες Απόδοσης (*Key Performance Indicators* - KPIs) (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

Οι εργασίες "συντήρησης" συχνά περιλαμβάνουν σημαντικές αντικαταστάσεις ή αναβαθμίσεις μηχανών, οι οποίες συχνά είναι πραγματικά έργα κεφαλαιουχικών έργων. Η αξιοπιστία μιας μηχανής μετράει εάν κάνει αυτό που απαιτείται να κάνει όποτε της απαιτείται. Στατιστικά, η αξιοπιστία είναι η πιθανότητα ότι ένα μηχάνημα θα παραμείνει στη γραμμή παραγωγής όπως απαιτείται για μια επιθυμητή χρονική περίοδο. Είναι συνάρτηση της σχεδίασης του μηχανήματος (τα υλικά που χρησιμοποιούνται, ποιότητα σχεδίασης, ποιότητα κατασκευής) αλλά και της φιλοσοφίας συντήρησης.

Όσο υψηλότερη είναι η αξιοπιστία, τόσο υψηλότερο είναι το κόστος κατασκευής του μηχανήματος και πιθανώς και συντήρησής του σε λειτουργία. Το βέλτιστο είναι ένας συμβιβασμός. Βραχυπρόθεσμα, χαμηλότερη αξιοπιστία σημαίνει αυξημένο κόστος παραγωγής ή αδυναμία κάλυψης της απαιτούμενης ζήτησης, εκτός ίσως από μεγαλύτερο κόστος. Μακροπρόθεσμα, η αυξημένη αξιοπιστία και ως εκ τούτου η παραγωγή μπορεί να εξοικονομήσει χρήματα αναβάλλοντας τις κεφαλαιουχικές δαπάνες για νέες εγκαταστάσεις (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

Ο θεμελιώδης σκοπός της συντήρησης μπορεί επίσης να δηλωθεί ότι συμβάλλει στους στόχους παραγωγής και κέρδους του οργανισμού, διατηρώντας την αξιοπιστία της εγκατάστασης στο βέλτιστο επίπεδο, σύμφωνα με την ασφάλεια των ανθρώπων και των εγκαταστάσεων. Η συντήρηση είναι ένα στρατηγικό εργαλείο ώστε μια επιχείρησή/οργανισμός να αποκτήσει

ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Έχει δηλωθεί ότι μόνο το 10-20% των μηχανών φτάνουν στη σχεδιαστική τους διάρκεια, επομένως υπάρχει άφθονο πεδίο!

Από αυτό προκύπτει ότι ο κύριος δείκτης απόδοσης της επιτυχίας της συντήρησης είναι η έκταση της διαθέσιμης παραγωγικής ικανότητας που επιτυγχάνεται σε σχέση με το κόστος επίτευξής της. Άλλα KPs, όπως ο αριθμός των εκκρεμών αιτημάτων εργασίας ή ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων ρουλεμάν είναι χρήσιμοι, αλλά αποτελούν μόνο δευτερεύοντες δείκτες στον κύριο στόχο (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

Η εφαρμογή αυτής της φιλοσοφίας στις αντλίες δεν είναι μια νέα ιδέα. Για πολλά χρόνια, ο αείμνηστος Igor Karassik, αναμφισβήτητα ο πιο διακεκριμένος και ευρέως διαβασμένος μηχανικός αντλιών, απάντησε σε ερωτήσεις σχετικά με τις επισκευές αντλιών λέγοντας ότι μια αντλία δεν πρέπει να ανοίγει για επιθεώρηση εκτός εάν τεκμηριωμένα ή περιστασιακά στοιχεία υποδεικνύουν ότι η γενική επισκευή είναι απαραίτητη (Karassik, 2001). Οι ενδείξεις που δίνονται είναι επιδείνωση της απόδοσης, αυξημένος θόρυβος ή προηγούμενη εμπειρία με παρόμοιο εξοπλισμό (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

3.1 Τύποι συντήρησης

3.1.1 Συντήρηση βλαβών

Η συντήρηση βλάβης είναι επίσης γνωστή ως Operate-to-failure, Corrective συντήρηση, επισκευή σε περίπτωση βλάβης, run-to-failure. Η συντήρηση σε βλάβες μπορεί μερικές φορές να είναι οικονομικά αποδοτική. Μπορεί να είναι δυνατό να αυξηθεί η δυνατότητα συντήρησης, όπως με βελτιωμένη πρόσβαση, εργαλεία ή χαρακτηριστικά σχεδιασμού για την επιτάχυνση του χρόνου και της προσπάθειας αλλαγής εξαρτημάτων.

Ο ορισμός της "αστοχίας" μπορεί επίσης να περιλαμβάνει "οικονομική αποτυχία" ή "οικονομική φθορά" όπου η παραγωγή συνεχίζεται, αλλά με μειωμένο ρυθμό. ή μειώνεται η ενεργειακή απόδοση, έτσι ώστε να αυξάνεται το κόστος κατανάλωσης ενέργειας ή συνδυασμός και των δύο. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τις αντλίες.

3.1.2 Προληπτική συντήρηση

Ως προληπτική συντήρηση ορίζεται εκείνη όπου αποφασίζει ο ιδιοκτήτης της εγκατάστασης και λαμβάνει κάποιες ενέργειες με στόχο να αποτρέψει την εμφάνιση αστοχίας ή τουλάχιστον να μειώσει την πιθανότητα αστοχίας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι:

- Συντήρηση σε καθορισμένο χρόνο ή βάση εργασίας

Η συντήρηση σε σταθερό χρόνο ή βάση εργασίας (περιοδική προληπτική συντήρηση, συντήρηση σταθερής συχνότητας) είναι συνήθως ένας καλύτερος τρόπος από το να αναμένεται η βλάβη της εγκατάστασης. Εν γένει, φαίνεται περίεργο να υπάρχει αλλαγή εξαρτημάτων όταν φαίνονται να λειτουργούν αρκετά αποδεκτά. Ωστόσο, μερικές φορές το μηχάνημα δεν λειτουργεί τόσο καλά στο βάθος του χρόνου και είναι απαραίτητη μια "μετα- γενική επισκευή". Η πρόκληση είναι να βρεθεί το σωστό χρονικό διάστημα: ορισμένα μηχανήματα θα αποσυναρμολογηθούν άσκοπα, άλλα θα αστοχήσουν επειδή δεν επιθεωρήθηκαν αρκετά συχνά, άλλα θα αστοχήσουν μετά από εργασίες συντήρησης επειδή έχει γίνει κάποιο ανθρωπογενές σφάλμα (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

Η προληπτική συντήρηση Σταθερού Χρόνου είναι αποτελεσματική εάν υπάρχει μια λειτουργία αστοχίας που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ηλικία, η οποία αποκαλύπτεται από την εμπειρία. Θα υπάρχουν επίσης τακτικές επισκευές, όπως λίπανση και ρυθμίσεις που μπορούν συχνά να γίνουν από τους χειριστές (και επομένως ίσως να μην θεωρούνται "συντήρηση").

Οι νόμιμες επιθεωρήσεις απαιτούνται εδώ και καιρό για ορισμένες εγκαταστάσεις (π.χ. δοχεία πίεσης και ορισμένες υπόγειες εγκαταστάσεις εξόρυξης) και είναι πιθανό να επεκταθούν και σε άλλους τύπους εγκαταστάσεων καθώς αναπτύσσεται η εστίαση στην υγεία και ασφάλεια στην εργασία και επεκτείνεται η «αυτορρύθμιση». Συνήθως με βάση σταθερά χρονικά διαστήματα, το διάστημα μπορεί να είναι διαπραγματεύσιμο σύμφωνα με τη μηχανική αξιοπιστία του ιδιοκτήτη της εγκατάστασης. Ορισμένες μηχανές σε ένα εργοστάσιο δεν θα δείξουν σημάδια επικείμενης αστοχίας και μπορεί να μην χρειαστεί ποτέ να λειτουργήσουν υπό συνθήκες κατάρρευσης (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

- Συντήρηση ευκαιρίας

Η συντήρηση ευκαιρίας εκμεταλλεύεται τη διακοπή λειτουργίας της εγκατάστασης από κάποια άλλη αιτία και όχι από το μηχάνημα στο οποίο λαμβάνει χώρα. Αυτό σημαίνει ότι καμία παραγωγή δεν θα χαθεί λόγω αυτού του μηχανήματος (εκτός εάν είναι κρίσιμο και η εργασία υπερβαίνει το αρχικό χρονικό παράθυρο).

- Συντήρηση σχεδιασμού

Η συντήρηση σχεδιασμού είναι μια στρατηγική βελτίωσης - επανασχεδιασμού ενός εξαρτήματος ή μηχανής για τη βελτίωση της απόδοσης ή της δυνατότητας συντήρησης - κυρίως μετά τον εντοπισμό της βασικής αιτίας της κακής απόδοσης.

- Απόφαση Διαχείρισης

Εργασίες συντήρησης που εκτελούνται για λόγους άλλους από τους καθαρά οικονομικούς (τουλάχιστον βραχυπρόθεσμα), όπως περιβαλλοντική/κοινωνική ευθύνη, εταιρική εικόνα, εργασιακές σχέσεις και σχέσεις τοπικής κοινότητας.

- Συντήρηση βάσει συνθηκών

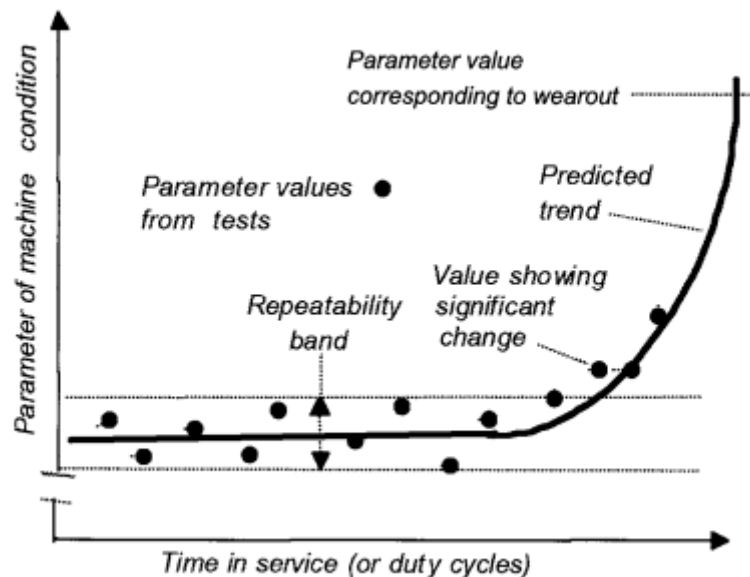
Η συντήρηση βάσει συνθηκών, που ονομάζεται επίσης προγνωστική συντήρηση, παρακολούθηση κατάστασης, διαγνωστικές δοκιμές, ανίχνευση αρχόμενης αστοχίας, ισχύει για το 80% και πλέον της συντήρησης, σύμφωνα με το International Foundation for Research in Maintenance (IFIRM). Η συντήρηση προγραμματίζεται ως αποτέλεσμα κάποιας τακτικής μέτρησης ή αξιολόγησης της κατάστασης της εγκατάστασης, συνήθως της τάσης μιας παραμέτρου ή παραμέτρων, και της πρόβλεψης του χρόνου έως την αστοχία. Η βάση είναι ότι τα περισσότερα μηχανικά εξαρτήματα προειδοποιούν για την επικείμενη αστοχία τους. Ωστόσο, τα ηλεκτρονικά είδη συχνά αποτυγχάνουν ξαφνικά. Ο απώτερος στόχος είναι να εκτελούνται εργασίες συντήρησης μόνο όταν είναι πραγματικά απαραίτητα. Το παλιό ρητό *«Αν δεν χάλασε, μην το φτιάξεις»* γίνεται *«παρακολούθησέ το και αν δεν χαλάει, άφησέ το ήσυχο»*. Η πρόκληση για τον συντηρητή είναι να βρει πώς να παρακολουθεί αυτήν την αναπόφευκτη επιδείνωση αξιόπιστα (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

3.2 Παρακολούθηση κατάστασης

Υπάρχουν πολλοί ορισμοί της παρακολούθησης της κατάστασης, συμπεριλαμβανομένου εκείνου του Kelly, (2000). Ο ορισμός που παρατίθεται παρακάτω τονίζει ότι η παρακολούθηση της κατάστασης είναι μέρος της συντήρησης και όχι κάτι που γίνεται από ειδικούς από το εξωτερικό (Beebe, 2001):

«Η παρακολούθηση κατάστασης, εντός ή εκτός σύνδεσης, είναι ένας τύπος επιθεώρησης συντήρησης όπου παρακολουθείται ένα λειτουργικό περιουσιακό στοιχείο και τα δεδομένα που λαμβάνονται αναλύονται για την ανίχνευση ενδείξεων υποβάθμισης, τη διάγνωση της αιτίας των βλαβών και την πρόβλεψη για πόσο χρόνο μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια ή οικονομικά.»

Η εικόνα 23 παρουσιάζει τη βασική αρχή. Επιλέγεται μια κατάλληλη παράμετρος που υποδεικνύει την εσωτερική κατάσταση του στοιχείου της εγκατάστασης. Για παράδειγμα, σε περιστρεφόμενα μηχανήματα, χρησιμοποιείται συνήθως το επίπεδο δόνησης. Τα αρχικά δείγματα χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό από την εμπειρία της ζώνης επαναληψιμότητας που μπορεί να ληφθεί υπό τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας όταν το είδος θεωρείται ότι είναι σε καλή κατάσταση. Πρέπει να ληφθεί υπόψη υπόψη ότι με νέο και επισκευασμένο εξοπλισμό, ενδέχεται να υπάρξει αλλαγή στις μετρούμενες τιμές έως ότου παρέλθει η περίοδος φθοράς (βρεφική θνησιμότητα) (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).



Εικόνα 23 Η αρχή της παρακολούθησης της κατάστασης

Οι μετρήσεις ρουτίνας λαμβάνονται σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα. Για τις περισσότερες περιπτώσεις όπου γίνεται παρακολούθηση κραδασμών, η μηνιαία είναι συνηθισμένη. Για άλλες παρακολουθήσεις, συνήθως είναι τριμηνιαία ή και ετήσια. Η συνεχής παρακολούθηση μπορεί να είναι κατάλληλη για κρίσιμα μηχανήματα. Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι για τη βελτιστοποίηση των διαστημάτων επιθεώρησης (Sherwin and Al-Najjar, 1998). Ζητήματα όπως η πρόσβαση, το μέγεθος της εγκατάστασης και η ευκολία δημιουργίας διαδρομών για συλλογή δεδομένων ή δοκιμές ενδέχεται να υπερισχύουν των θεωρητικά ιδανικών διαστημάτων (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

Όταν τελικά συμβεί υποβάθμιση, η παράμετρος πέφτει εκτός της ζώνης επαναληψιμότητας και η συχνότητα των μετρήσεων αυξάνεται συχνά για να επιτραπεί η πρόβλεψη του χρόνου έως ότου η παράμετρος ανταποκριθεί στην κατάσταση όπου απαιτείται ενέργεια συντήρησης. Η πρόβλεψη του υπολειπόμενου χρόνου μέχρι την αποτυχία είναι το πιο ανακριβές μέρος της διαδικασίας, αλλά παρόλα αυτά παρέχει συνήθως επαρκής ακρίβεια για να καλύψει τις ανάγκες μιας επιχείρησης. Η ανάπτυξη συνεχίζει να βελτιώνει αυτό το στάδιο, π.χ. ISO/ DIS13381-1, Hansen et al, (1995).

Η ανάπτυξη και η εφαρμογή υπολογιστών για τη διάγνωση σφαλμάτων και τη βοήθεια στη λήψη αποφάσεων συντήρησης αναμένεται να αυξηθεί, (π.χ. Iantunen, et al, 1998; Jardine, 2000; Gopalakrishnan, 2000). Η συνεχής ανάπτυξη μαθηματικών εργαλείων (όπως Barringer, 2003) που βοηθούν στη λήψη αποφάσεων συντήρησης είναι ευπρόσδεκτη, αλλά αυτά πρέπει να είναι πολύ φιλικά προς το χρήστη για να καλύπτουν τις ανάγκες των πολυάσχολων μηχανικών συντήρησης με φτωχό χρόνο.

Το ISO/DIS 13381-1 προτείνει ένα παράδειγμα προσδιορισμού επιπέδου εμπιστοσύνης πρόγνωσης, παραθέτοντας πηγές σφαλμάτων με σχετικές σταθμίσεις (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019):

- Ιστορικό συντήρησης (0,15)
- Ανάλυση τρόπου σχεδίασης και αστοχίας (0,10)
- Χρησιμοποιήθηκαν παράμετροι τεχνικής ανάλυσης (0,15)
- Όρια σοβαρότητας που χρησιμοποιούνται (0,10)
- Διάστημα μέτρησης (0,10)

- Ρύθμιση βάσης δεδομένων (0,5)
- Απόκτηση δεδομένων (0,5)
- Διαδικασία αξιολόγησης σοβαρότητας (0,5)
- Διαδικασία διάγνωσης (0 ,10) και
- Διαδικασία πρόγνωσης (0 ,15).

Αυτοί οι παράγοντες στάθμισης μπορεί να διαφέρουν μεταξύ διαγνώσεων και προγνώσεων. Γίνονται κατάλληλες συστάσεις ως προς την απαιτούμενη ενέργεια συντήρησης και η μετά την αστοχία εξέταση είναι απαραίτητη για την παροχή ανατροφοδότησης για μελλοντική παρακολούθηση.

3.3 Οι τεχνικές της παρακολούθησης κατάστασης

Πολλές τεχνικές είναι διαθέσιμες. Μερικά είναι επίσης πολύτιμες για τη δοκιμή αποδοχής νέας εγκατάστασης. Ορισμένες μπορούν να γίνουν από το προσωπικό συντήρησης της εγκατάστασης με την κατάλληλη εξειδικευμένη υποστήριξη, άλλες γίνονται καλύτερα από εξωτερικούς ειδικούς. Ένα αξιόλογο πλεονέκτημα είναι η τάση ενσωμάτωσης των δεδομένων από περισσότερες από μία τεχνικές σε μια κοινή βάση δεδομένων και είναι διαθέσιμα μόνιμα συστήματα. Η παρακολούθηση της κατάστασης απαιτεί δεδομένα καλής ποιότητας, όπως αυτά που λαμβάνονται από προσεκτικά εκτελούμενες δοκιμές. Ωστόσο, πολλές χρήσιμες πληροφορίες μπορούν συχνά να ληφθούν από τα μόνιμα όργανα ενός εργοστασίου μόλις διαπιστωθεί η επαναληψιμότητα. Συχνά μπορούν να ρυθμιστούν προηγμένα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου που βασίζονται σε υπολογιστή για να παρέχουν πληροφορίες παρακολούθησης κατάστασης. (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019)

Οι τεχνικές CM¹ εμπίπτουν σε πέντε γενικές κατηγορίες και ένα μηχάνημα μπορεί να έχει μία ή περισσότερες εφαρμοσμένες, ανάλογα με την κρισιμότητα και τους πιθανούς τρόπους υποβάθμισης και το κόστος της αστοχίας και της παρακολούθησης. Η ενσωμάτωση πληροφοριών από περισσότερες από μία τεχνικές είναι ιδιαίτερα επιθυμητή. Αρκετοί από τους προμηθευτές οργάνων ανάλυσης κραδασμών έχουν επεκτείνει το πεδίο τους στην ανάλυση σωματιδίων φθοράς, στη θερμογραφία και πιθανώς σε άλλους. Η ανάπτυξη συστημάτων

¹ Condition Monitoring – Παρακολούθηση Κατάστασης

συγγώνευσης δεδομένων προχωρά, ώστε να καταστεί δυνατή η εύκολη παρατήρηση της σχέσης μεταξύ των παραμέτρων (Hannah et al, 2001).

- Παρακολούθηση και ανάλυση κραδασμών

Η παρακολούθηση και η ανάλυση κραδασμών είναι ίσως η πιο γνωστή και δημοσιοποιημένη τεχνική και η πιο ισχυρή για περιστρεφόμενες μηχανές όπως οι αντλίες. Φαίνεται λογικό οι καλά ευθυγραμμισμένες και πιο ομαλές μηχανές να καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και γενικά να κοστίζουν λιγότερο στη συντήρηση.

Η εξισορρόπηση είναι μια κοινή λύση, προσωρινή ή μόνιμη, σε υψηλούς κραδασμούς. Τα όργανα δόνησης μπορούν συνήθως επίσης να χρησιμοποιηθούν για εξισορρόπηση, αλλά μερικές φορές είναι πιθανές και αποδεκτές πιο απλές μέθοδοι (Beebe, 2001).

Μπορούν να επιτευχθούν χρήσιμα αποτελέσματα με χαμηλού κόστους όργανα μόνο για ανάγνωση, αλλά για μεγάλες εγκαταστάσεις είναι πολύ πιο παραγωγικό η χρήση φορητών συστημάτων συλλογής/αναλυτών δεδομένων και συστημάτων επεξεργασίας υπολογιστών. Πολλά καλά συστήματα είναι διαθέσιμα, συνήθως με λογισμικό διαγνωστικής βοήθειας. Αυτά συνεχίζουν να βελτιώνονται στην ικανότητα (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

Τα μόνιμα συστήματα on-line παρακολούθησης μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτικά, ειδικά όταν η πρόσβαση είναι περιορισμένη ή επικίνδυνη για τους ανθρώπους. Ορισμένοι θεωρούν ότι το 10 έως 20% των μηχανών ενός εργοστασίου είναι αρκετά κρίσιμα ώστε να δικαιολογούν τα μόνιμα συστήματα. Οι σύνδεσμοι δεδομένων επιτρέπουν σε ειδικούς που βρίσκονται σε απόσταση από τον ιστότοπο να έχουν άμεση πρόσβαση σε πληροφορίες. Οι πληροφορίες μπορούν επίσης να κοινοποιηθούν σε μια εταιρεία μέσω του ενδοδικτύου της.

Τα πρότυπα κραδασμών περιλαμβάνονται συνήθως στις προδιαγραφές για περιστρεφόμενα μηχανήματα. Οι μετρήσεις του χώρου που λαμβάνονται για την αρχική αποδοχή μπορούν να είναι η αρχή των μετρήσεων ρουτίνας και θα πρέπει επίσης να αποτελούν μέρος του ποιοτικού ελέγχου μετά τη συντήρηση.

- Οπτική επιθεώρηση και μη καταστροφική δοκιμή

Η οπτική επιθεώρηση και οι μη καταστροφικές δοκιμές συνήθως απαιτούν τη μη λειτουργία της εγκατάστασης. Το NDT² είναι ένας πολύ γνωστός εξειδικευμένος τομέας με επίσημη εκπαίδευση και πιστοποίηση χειριστή. Οι τεχνικές καλύπτονται από διάφορα εθνικά πρότυπα. Έτσι, τα συστήματα ποιότητας εφαρμόζονται εύκολα. Η οπτική επιθεώρηση, με μια σειρά συσκευών από καθρέφτες έως μικροκάμερες, μπορεί παρέχουν πρόσβαση μέσω των διαθέσιμων θυρών, αλλά μπορεί να αξίζει να σχεδιαστούν ειδικές δυνατότητες πρόσβασης στο μηχάνημα. Η υπέρυθρη θερμική απεικόνιση ή η θερμογραφία είναι μια ισχυρή τεχνική που ταιριάζει σε αυτήν την ομάδα.

- Παρακολούθηση και ανάλυση απόδοσης

Η παρακολούθηση και η ανάλυση απόδοσης είναι λιγότερο γνωστές, ωστόσο όπου η επιδείνωση της κατάστασης ενός μηχανήματος οδηγεί σε αύξηση της χρήσης ενέργειας, είναι δυνατός ο υπολογισμός του βέλτιστου χρόνου για την αποκατάσταση της απόδοσης (για ελάχιστο συνολικό κόστος ανά χρονική περίοδο). Η εφαρμογή και οι παράμετροι αναπτύσσονται για κάθε τύπο μηχανής ή στοιχείου εγκατάστασης και συνήθως απαιτούν μέτρηση ποσοτήτων όπως θερμοκρασία, πίεση, ροή, ταχύτητα και μετατόπιση. Κατάλληλες μέθοδοι μέτρησης ή/και μόνιμα όργανα εγκατάστασης και εξοπλισμός επεξεργασίας δεδομένων μπορούν μερικές φορές να χρησιμοποιηθούν εάν αποδειχθεί ότι η επαναληψιμότητα των παραμέτρων παρακολούθησης είναι αρκετά περιορισμένη (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

Οι παράμετροι απόδοσης μπορούν επίσης να αποθηκευτούν και να διαμορφωθούν χρησιμοποιώντας το ίδιο λογισμικό που παρέχεται για την παρακολούθηση και την ανάλυση κραδασμών. Ως απλός τρόπος προτείνονται υπολογιστικά φύλλα με γραφήματα. Εάν το εύρος της χρονικής κλίμακας εισαχθεί στη στήλη του χρόνου, (ή τη σειρά) καθώς και πέρα από την ώρα μέχρι σήμερα, τότε νέα σημεία δεδομένων θα προστεθούν αυτόματα στο γράφημα τάσεων καθώς εισάγονται στο υπολογιστικό φύλλο.

- Ανάλυση σωματιδίων φθοράς σε λιπαντικά και ρύπων σε ρευστά διεργασίας

Η ανάλυση των σωματιδίων φθοράς στα λιπαντικά και των ρύπων στα υγρά διεργασίας παρέχει πιο προηγμένη προειδοποίηση (δηλαδή μεγαλύτερο χρόνο παράδοσης) από τις περισσότερες

² Non-Destructive Testing

άλλες μεθόδους πρόβλεψης. Καμία ενιαία τεχνική ανάλυσης δεν παρέχει όλες τις πιθανές διαγνώσεις και τα κρίσιμα μηχανήματα μπορεί να δικαιολογήσουν τη χρήση περισσότερων από μία τεχνικών. Διατίθενται απλές τεχνικές διαλογής, ενσωματωμένες με ανάλυση κραδασμών και παρέχουν μια γρήγορη επιτόπια αξιολόγηση

- Δοκιμές ηλεκτρικών εγκαταστάσεων

Η δοκιμή ηλεκτρικής εγκατάστασης για μηχανές χαμηλής τάσης είναι ευρέως γνωστή, αλλά απαιτούνται εξειδικευμένες τεχνικές για εγκαταστάσεις υψηλής τάσης. Το κύριο μέλημα είναι η αξιολόγηση της κατάστασης της μόνωσης, αλλά εφαρμόζεται και η παρακολούθηση της μηχανικής κατάστασης. Διατίθενται συσκευές για μόνιμη εγκατάσταση σε αντλίες που δοκιμάζουν αυτόματα τη μόνωση του κινητήρα, τον ρυθμό ροής και καταγράφουν τα δεδομένα. (MultiTrobe, 2003) (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019)

3.4 Τα οφέλη της παρακολούθησης κατάστασης

Η προσέγγιση παρακολούθησης συνθηκών έχει γίνει τόσο καλά αποδεκτή από πολλές εταιρείες και βιομηχανίες που έχει πλέον ενσωματωθεί στην εταιρική κουλτούρα και ορισμένοι μακροπρόθεσμοι χρήστες δεν μπαίνουν πλέον στον κόπο να καθορίσουν το κόστος και τα οφέλη της. Προτείνεται μια τέτοια αξιολόγηση να γίνεται ετησίως σε δειγματοληπτική βάση, ώστε να παρέχονται συνεχείς αποδείξεις για την αξία της προσέγγισης στην επιχείρηση. Αυτό προσφέρει προσωπική ικανοποίηση και διασφαλίζει επίσης τη συνέχιση σε περίπτωση αλλαγής της διοίκησης σε μια με ακατέργαστο τρόπο μείωσης του κόστους.

Εδώ προτείνεται μια απλή διαδικασία κατά περίπτωση για τον προσδιορισμό του κόστους/οφέλους. Πολλοί βρίσκουν ότι η συσσωρευμένη εξοικονόμηση είναι τόσο μεγάλη που η διαδικασία δεν χρειάζεται να γίνεται για κάθε περίπτωση και η διατήρηση της βαθμολογίας για μια περίοδο δείγματος μπορεί να είναι επαρκής.

A. Τι συνέβη στην πραγματικότητα:

- Εντοπίστηκε φθορά και προγραμματίστηκαν επισκευές.
- Το συνολικό κόστος εργασίας, υλικών, χαμένης παραγωγής κ.λπ. βρίσκεται άμεσα

B. Τι ήταν πιο πιθανό να είχε συμβεί εάν το πρόβλημα παρέμενε απαρατήρητο;

- Δεν πρέπει να θεωρείται το χειρότερο σενάριο. Μια βελτίωση είναι η εκτίμηση σε τρεις κατηγορίες: Καταστροφική, Μέτρια, Απώλεια απόδοσης (παρατηρήθηκε από τους χειριστές), με κατάλληλες εκτιμήσεις και πιθανότητες.
- Το πιθανό συνολικό κόστος υπολογίζεται για εργασία, υλικά, χαμένη παραγωγή για τις επισκευές.

Το κέρδος/κόστος για αυτήν την περίπτωση βρίσκονται στη συνέχεια αφαιρώντας το A από το B.

Στη συνέχεια, η απόδοση της επένδυσης μπορεί να υπολογιστεί:

Εκτιμώμενη συνολική εξοικονόμηση - Κόστος εκτέλεσης δραστηριοτήτων CM x 100% Κόστος εκτέλεσης δραστηριοτήτων CM

Εάν η εξοικονόμηση φαίνεται αδικαιολόγητα τεράστια (και επομένως μπορεί να θεωρηθεί ως μη ρεαλιστική), μπορεί να εφαρμοστεί ένας παράγοντας πιθανότητας. Όταν δικαιολογείται η εισαγωγή της παρακολούθησης της κατάστασης, προτείνεται να λαμβάνεται υπόψη η πιθανή πιθανότητα επιτυχίας (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

Εάν μια τεχνική παρακολούθησης κατάστασης, όταν εφαρμόζεται έμπειρα, θεωρείται, 80% επιτυχής στον εντοπισμό ενός αρχικού σφάλματος, και η υιοθέτηση αυτής της τεχνικής στην επιχείρηση βρίσκεται στο 75% των δυνατοτήτων της, τότε η συνολική πιθανότητα επίτευξης αρχικής επιτυχίας είναι το γινόμενο αυτών: δηλ. $0,75 \times 0,8 = 0,6$ ή 60% και μπορεί να εφαρμοστεί δίκαια στην εκτίμησή για τις προηγούμενες ζημίες. Είναι εύκολο να αντληθούν πολύ μεγάλα πιθανά θεωρητικά οφέλη που φαίνονται ύποπτα μόνο και μόνο επειδή είναι τόσο μεγάλα.

Ένα σημείο ιδιαίτερης σημείωσης είναι οι επαγγελματίες παρακολούθησης συνθηκών να αναφέρουν τα ευρήματα και τις συστάσεις τους απλά και ξεκάθαρα στους ιδιοκτήτες περιουσιακών στοιχείων σε μια εκτελεστική περίληψη και να αφήσουν τις τεχνικές λεπτομέρειες σε μεταγενέστερα μέρη μιας αναφοράς ή αρχείου ιστορικού εγκαταστάσεων. Πολύ συχνά, οι ειδικοί παρέχουν μια έμπειρη πραγματεία, όταν ο ιδιοκτήτης του περιουσιακού στοιχείου θέλει

απλώς να μάθει εάν χρειάζεται κάποια ενέργεια συντήρησης, τότε απαιτείται να γίνει και τις συνέπειες αν δεν ακολουθηθούν οι συστάσεις.

Εν γένει τα οφέλη της παρακολούθησης κατάστασης μπορούν να συνοψιστούν στα κάτωθι (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019):

- Η CM παρέχει έγκαιρη ανίχνευση φθοράς/αστοχίας/προβλημάτων (στις περισσότερες περιπτώσεις)
- Καλύτερη πρόβλεψη των απαιτήσεων συντήρησης
- Επίσης, πολλές μικρές βλάβες εντοπίζονται νωρίς όταν οι υπεύθυνοι της CM περιηγούνται μεθοδικά στο εργοστάσιο. Αυτή η πράξη εντοπίζει αναπτυσσόμενα σφάλματα που διαφορετικά θα περνούσαν απαρατήρητα.
- Η CM ελαχιστοποιεί την περιττή διακοπή λειτουργίας και το άνοιγμα της εγκατάστασης
- Η προσέγγιση βάσει συνθηκών είναι το πιο κοινό αποτέλεσμα από την ανάλυση συντήρησης με επίκεντρο την αξιοπιστία
- Οι μηχανές αγοράζονται για να φτιάχνουν προϊόντα, όχι για να επισκευάζονται
- Μεγαλύτερος χρόνος λειτουργίας, άρα λιγότερη απώλεια παραγωγής και μεγαλύτερες δυνατότητες κέρδους
- Λιγότερος φόρτος εργασίας συντήρησης - αλλά η εργασία CM απαιτεί προσπάθεια (η on-line παρακολούθηση μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτική)
- Πιο ικανοποιητική εργασία για τους συντηρητές, μικρότερη επίδραση σφαλμάτων λόγω της άμεσης ανατροφοδότησης για την ποιότητα της εργασίας
- Χρήση της CM για την αναβολή των σημαντικών προβλεπόμενων εργασιών (αλλά δεν μπορεί να αναβληθεί επ' αόριστον όλη η συντήρηση)
- Η συνετή χρήση της CM μπορεί να αποφέρει 10 έως 20 φορές την αρχική δαπάνη εντός του πρώτου έτους –(Έκθεση UK Dept Trade Et Industry, "Maintenance into the late 1990")
- Η CM παρέχει διαβεβαίωση για την ασφαλή συνέχιση της λειτουργίας
- Η CM μπορεί συχνά να εξαλείψει ορισμένες αιτίες που έχουν καταστροφικές συνέπειες.
- Η CM εξοικονομεί κόστος - μειωμένη χρήση ανταλλακτικών, ίσως χαμηλότερα ασφάλιστρα.
- Εξοικονόμηση ενέργειας από πιο ορθά λειτουργούντα μηχανήματα

- Εξοικονόμηση ενέργειας από τον προγραμματισμό της γενικής επισκευής για την αποκατάσταση της χαμένης απόδοσης στον βέλτιστο χρόνο
- Η CM βελτιώνει την ποιότητα των προϊόντων, τις σχέσεις με τους πελάτες, τον σχεδιασμό των εγκαταστάσεων, την αποτελεσματικότητα της εταιρείας (ακόμη και διασφαλίζει την επιβίωση της εταιρείας).

4. Απόδοση αντλίας, επίδραση φθοράς και συνηθέστερες αστοχίες/σφάλματα

Οι τέσσερις βασικές ποσότητες στην απόδοση μιας αντλίας είναι το μανομετρικό, η ισχύς, η απόδοση και η ροή. Μια διεξοδική εξήγηση δίνεται σε οποιοδήποτε γενικό εγχειρίδιο αντλίας, και συνοπτικά παρατίθεται στο τέλος αυτού του κεφαλαίου. Ο Πίνακας 1 δείχνει τους όρους, τα σύμβολα και τις μονάδες που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εργασία. Είναι γενικά επιθυμητό να χρησιμοποιούνται μανομετρικοί όροι για το μανομετρικό και όροι όγκου για τη ροή. Αυτό συμβαίνει επειδή η ίδια καμπύλη Head-Flow (μανομετρικού-ροής) ισχύει για υγρά σε ένα εύρος θερμοκρασιών (αγνοώντας τις επιπτώσεις του ιξώδους). Η καμπύλη ισχύος-ροής θα αλλάξει σε ευθεία αναλογία με την πυκνότητα του υγρού. Στην περίπτωση των αντλιών τροφοδοσίας λέβητα, είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται μονάδες πίεσης και ροής μάζας και οι καμπύλες μανομετρικού και ισχύος θα αλλάξουν εάν αλλάξει η πυκνότητα (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

Πίνακας 1 Βασικοί όροι και μονάδες στην απόδοση της αντλίας

| ΠΟΣΟΤΗΤΑ | ΆΛΛΟΙ ΟΡΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ | ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ | ΜΟΝΑΔΕΣ | ΆΛΛΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΟΥ ΑΞΙΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ |
|-------------|---|-------------|--|---------------------------------|
| Ροή | Ογκομετρικός ρυθμός ροής, Χωρητικότητα, Ποσότητα Εκφόρτισης | Q | m ³ /s, m ³ /h, ML/d, kg/s | IGPM, USGPM ³ |
| Μανομετρικό | Συνολικό μανομετρικό, Ολικό δυναμικό μανομετρικού, παραγόμενη πίεση, παραγόμενο μανομετρικό | H | M, kPa | Bars, ft, psi |
| Ισχύς | Απορροφούμενη ισχύς | P | W, kW | hp |
| Απόδοση | | η | Δεκαδικός | % |

Συνήθως, το μανομετρικό, η ροή και η ισχύς μετρώνται και η απόδοση υπολογίζεται από αυτήν τη θεμελιώδη εξίσωση (αλλά η απόδοση μπορεί να μετρηθεί απευθείας, όπως θα φανεί αργότερα):

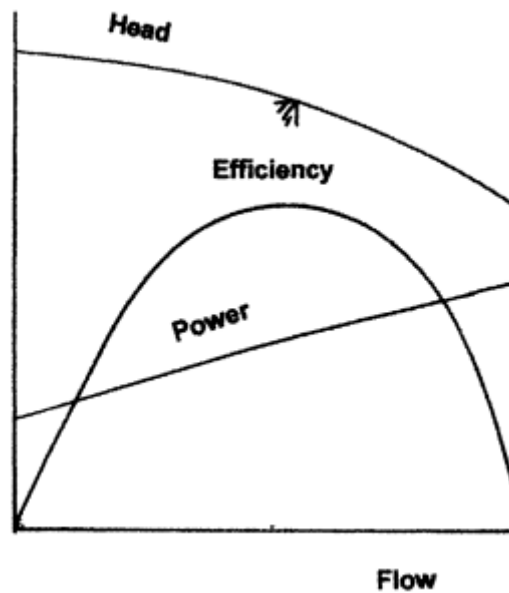
³ GPM: Gallon per Minute

$$h = (\text{Ισχύς εξόδου αντλίας}) / (\text{Είσοδος ισχύος αντλίας}) \quad (1)$$

Με σταθερές μονάδες SI (m^3/s , m , W που εμφανίζονται στον Πίνακα 1) και θεωρώντας γνωστή την επιτάχυνση της βαρύτητας g (συνήθως $9,81 \text{ m/s}^2$) και την πυκνότητα ρευστού (kg/m^3), με την απόδοση ως δεκαδικό, αυτή η εξίσωση γίνεται:

$$\eta = \frac{Q \rho g H}{P} \quad (2)$$

Το μανομετρικό, η ισχύς και η απόδοση σχεδιάζονται κανονικά έναντι της ροής για να δώσουν καμπύλες όπως αυτή που παρουσιάζεται στην εικόνα 24 για μια αντλία ακτινικής ροής. Το σημείο στην καμπύλη Head-Flow στη μέγιστη απόδοση ονομάζεται συχνά BEP - το Best Efficiency Point.



Εικόνα 24 Χαρακτηριστικά απόδοσης - φυγόκεντρες αντλίες (διαγραμματικά)

Όπως θα φανεί σε οποιοδήποτε εγχειρίδιο αντλίας (π.χ. Stepanoff, 1957; Karassik and Grieve, 1998) τα σχήματα των καμπυλών απόδοσης ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της πτερωτής. Το Specific Speed είναι ένας αδιάστατος αριθμός τύπου που χρησιμοποιείται για την έκφραση αυτής της σχέσης. Υπολογίζεται με δεδομένα σημείων βέλτιστης απόδοσης, χρησιμοποιώντας κατάλληλες μονάδες. Καθώς τα περισσότερα εγχειρίδια αντλιών χρησιμοποιούν μονάδες ΗΠΑ με χρήσιμα δεδομένα και γραφήματα, η χρήση των παρακάτω μετρικών μονάδων έχει ως

αποτέλεσμα έναν αριθμό που είναι αρκετά κοντά για τους σκοπούς αυτής της εργασίας (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019):

$$N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{0.75}} \quad (3)$$

όπου:

N = ταχύτητα περιστροφής της αντλίας, r/min;

Q = ροή ανά κρίκο της περωτής (δηλαδή η μισή συνολική ροή για περωτές διπλής αναρρόφησης), m³ /h.

H = μανομετρικό ανά στάδιο, m

Οι συγκεκριμένες τιμές ταχύτητας που υπολογίζονται με αυτές τις μονάδες υποδεικνύουν τον τύπο της αντλίας, αλλά τα όρια επικαλύπτονται:

- 500 έως 2000: Ακτινικές φτερωτές. (Αρκετά επίπεδες καμπύλες μανομετρικού/ροής, ανερχόμενη καμπύλη ισχύος)
- 2000 έως 8000: Πτερωτές μικτής ροής. (Πιο απότομη καμπύλη μανομετρικού /ροής, λιγότερο απότομη καμπύλη ισχύος)
- 8000 έως 16500: Πτερωτές αξονικής ροής. (Απότομη καμπύλη μανομετρικού /ροής, πτωτική καμπύλη ισχύος, μερικές φορές με ένα "χτύπημα" σε αυτήν)

Η συγκεκριμένη ταχύτητα μπορεί επίσης να ληφθεί με άλλους μετρικούς όρους. Εάν χρησιμοποιούνται τυπικές μονάδες SI (rad/s, m³ /s, m), οι αριθμοί που προκύπτουν για τις παραπάνω κατηγορίες είναι: 0,2 - 1,8; 1,8 - 3,0; 2,8 - 8,0 από αυτήν την εξίσωση:

$$N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{(gH)^{0.75}} \quad (4)$$

Με άλλες μονάδες SI (r/min, m³ /s, m) οι αριθμοί είναι από 12 έως 35. 35 έως 160; και 160 έως 400+

Οι αντλίες πλευρικού καναλιού διαθέτουν περωτή τροχού αστεριού ή πτερυγίου από ίσια ακτινικά πτερύγια χωρίς καλύμματα. Το υγρό μεταφέρεται σε ένα πλευρικό κανάλι τοποθετημένο δίπλα στην περωτή. Η κεφαλή που δημιουργείται είναι 5 έως και 15 φορές μεγαλύτερη από αυτή που δημιουργείται από μια ακτινική περωτή του ίδιου μεγέθους και ταχύτητας (KSB, 1990). Με συγκεκριμένες ταχύτητες μεταξύ 550 και 1700, έχουν δυνατότητα αυτόματης αναρρόφησης, αλλά η σχετικά χαμηλή απόδοσή τους περιορίζει το μέγεθός τους σε περίπου 4 kW.

4.1 Επίδραση της φθοράς στην απόδοση της αντλίας

Ο βαθμός στον οποίο μπορεί να γίνει ανεκτή η εσωτερική φθορά ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο της αντλίας και τα χαρακτηριστικά του συστήματος στο οποίο είναι εγκατεστημένη (Addie et al, 1996). Οι διάφορες επιδράσεις παρουσιάζονται στα επόμενα.

- Φθορά στα εξωτερικά άκρα των πτερυγίων

Η φθορά, η οποία μειώνει τη διάμετρο της περωτής, είναι πιο κοινή με λειαντικά ή διαβρωτικά υγρά. Οι καμπύλες κεφαλής και ισχύος είναι χαμηλότερες για όλες τις ροές: το ίδιο αποτέλεσμα σαν να είχε εγκατασταθεί μια περωτή μικρότερης διαμέτρου στο περίβλημα. Η απόδοση μπορεί να παρέχει ανεπαρκή ροή για την κάλυψη των αναγκών παραγωγής και σε κάθε περίπτωση η αντλία θα χρησιμοποιεί περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια για μια δεδομένη ροή. Παρόμοιο αποτέλεσμα συμβαίνει με τις περωτές ανοιχτής όψης, όπου το διάκενο μεταξύ των μπροστινών άκρων της περωτής και του περιβλήματος αυξάνεται.

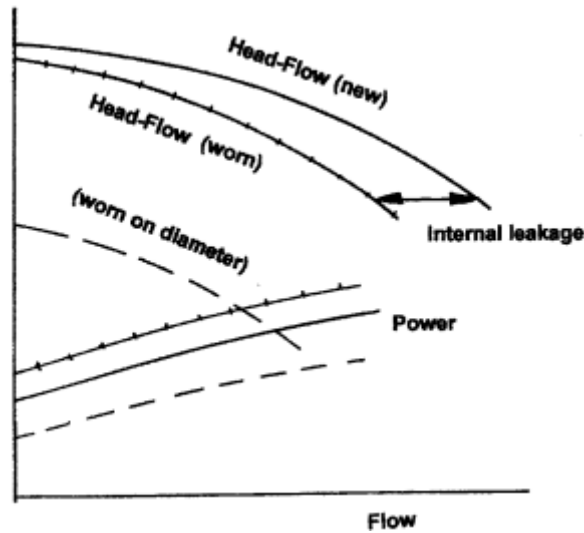
Αυτό θα είναι ιδιαίτερα έντονο εάν πρέπει να λειτουργήσει μια δεύτερη αντλία παράλληλα, επειδή καμία από τις δύο αντλίες δεν μπορεί πλέον να παρέχει μόνη της την απαιτούμενη ροή. Εάν μία από τις αντλίες είναι πολύ φθαρμένη, η λειτουργία και των δύο αντλιών μαζί μπορεί να σημαίνει ότι η φθαρμένη αντλία δεν συμβάλλει στη ροή, σπαταλώντας ενέργεια και πιθανώς καταστρέφοντας την αντλία. Μπορεί να προκύψει αντίστροφη ροή μέσω της φθαρμένης αντλίας, με αποτέλεσμα να λειτουργεί αντίστροφα. Μια αντλία που λειτουργεί σε αντίστροφη ροή δεν είναι πάντα εμφανής στην αρχή: το μεγαλύτερο μέρος του θορύβου που παράγεται προέρχεται από τον κινητήρα και τον ανεμιστήρα ψύξης του (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

- Εσωτερική φθορά

Η φθορά στη διεπαφή περωτής/δακτυλίου στεγανοποίησης (δηλαδή φθορά ή δακτύλιος στεγανοποίησης) επιτρέπει στο υγρό να επανακυκλοφορεί από την έξοδο της περωτής στην αναρρόφηση. Αυτή η ροή διαρροής είναι περίπου ανάλογη με το διάκενο και είναι περίπου σταθερή στο εύρος ροής της αντλίας. Η εσωτερική διαρροή εμφανίζεται επίσης από τη διάβρωση στην οριζόντια άρθρωση των αντλιών πολλαπλών σταδίων με χωρισμένο περίβλημα, επιτρέποντας σε κάποια ροή να παρακάμψει ένα στάδιο ή στάδια.

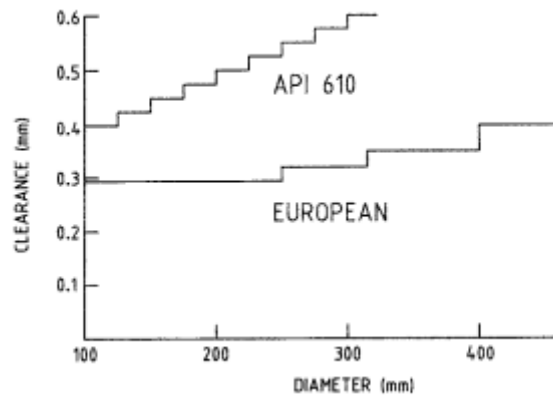
Στην περίπτωση που εμφανίζεται τόσο μειωμένη διάμετρος της περωτής και αυξημένη εσωτερική διαρροή, είναι φυσικά δυνατό και τα δύο αυτά φαινόμενα φθοράς να συμβαίνουν ταυτόχρονα. Σημειώνεται ότι η επίδραση της εσωτερικής διαρροής είναι η μείωση της ροής εξόδου, δηλαδή η ροή που αφήνει την αντλία να κάνει χρήσιμη εργασία, για ένα δεδομένο μονομετρικό. Δηλαδή, η συνολική ροή μέσω των ίδιων των περωτών ισούται με την ισχύ της αντλίας συν τις ροές διαρροής που ανακυκλώνονται μέσα στην αντλία. Το αποτέλεσμα είναι ουσιαστικά το ίδιο όπως εάν ο άξονας μηδενικής ροής εξόδου μετατοπιζόταν προς τα αριστερά από την ποσότητα της εσωτερικής διαρροής.

Αυτό δείχνει επίσης γιατί το μονομετρικό κατά την απενεργοποίηση (δηλαδή στη μηδενική ροή εξόδου) θα πέσει περισσότερο όταν φθαρεί όσο πιο απότομη είναι η καμπύλη μονομετρικού/ροής αντλίας. Ωστόσο, οι αντλίες που έχουν χαρακτηριστική καμπύλη ανερχόμενου μονομετρικού που αυξάνεται από την απενεργοποίηση για να φτάσει στο μέγιστο, στη συνέχεια μειώνεται καθώς αυξάνεται η ροή, θα παρουσιάσουν αύξηση του μονομετρικού διακοπής με εσωτερική φθορά Εικ 25) (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).



Εικόνα 25 Διαγραμματική επίδραση της εσωτερικής φθοράς της αντλίας στα χαρακτηριστικά απόδοσης

Οι συνιστώμενες αποστάσεις ποικίλλουν ανάλογα με τη λειτουργία της αντλίας, τα υλικά κατασκευής και την πηγή, και δίνονται σε γενικά εγχειρίδια αντλιών και σε άλλα μέρη (Karassik και Griene, 1998). Για αντλίες χημικής διεργασίας, το πρότυπο IS05199 δίνει 0,9 mm για διαμετρικό διάκενο ανεξάρτητα από τη διάμετρο και οι περισσότερες αντλίες διεργασίας έχουν τιμές μεταξύ 0,4 mm και 0,6 mm (Fabeck and Erickson, 1990). Η σύσταση του κατασκευαστή για τον τύπο της αντλίας, τα υλικά και τη λειτουργία πρέπει γενικά να τηρείται. Η εικόνα 26 (από Turton, 1994) δείχνει μια σύγκριση του API 610 και της ευρωπαϊκής πρακτικής.



Εικόνα 26 Σύγκριση των εκκαθαρίσεων API 610 με τη γενική ευρωπαϊκή πρακτική (Turton, 1994)

Ο σχεδιασμός ορισμένων αντλιών επιτρέπει την προσαρμογή των αποστάσεων, ορισμένων on-line. Ένα παράδειγμα είναι αυτό των κατακόρυφων μονοβάθμιων αντλιών νερού ψύξης μικτής

ροής, που αντλούν από ένα ποτάμι όπου η θερμοκρασία του νερού μπορεί να προβλεφθεί τρεις ημέρες πριν. Οι αντλίες μπορούν να ληφθούν από το σέρβις και να ρυθμιστούν κατά τη διάρκεια της νύχτας.

- Οζώδεις αναπτύξεις

Οζώδεις αναπτύξεις, επίσης γνωστές ως φυματίωση, μπορούν να εμφανιστούν σε χυτοσίδηρο με νερό, ιδιαίτερα σε αντλίες με μη συνεχή λειτουργία. Αυτές μειώνουν την αποτελεσματικότητα. Η εξομάλυνση των εσωτερικών της αντλίας έχει ως αποτέλεσμα βελτιώσεις απόδοσης, πιο εμφανείς σε αντλίες με χαμηλότερες ειδικές ταχύτητες (Ludwig et al, 2003).

- Σπηλαίωση

Η σπηλαίωση μπορεί να προκαλέσει διάβρωση, ακόμη και παραμόρφωση των στροφείων, και τοπική διάβρωση στα περιβλήματα. Στις αντλίες με χωρισμένο περίβλημα, η διάβρωση της μισής άρθρωσης μπορεί να επιτρέψει την παράκαμψη των σταδίων.

- Απόφραξη

Οι πτερωτές μπορούν να μπλοκαριστούν με την καθίζηση, περιορίζοντας έτσι τη ροή.

- Διάβρωση του περιβλήματος

Η διάβρωση και/ή η διάβρωση του περιβλήματος εμφανίζεται σε πολλές εφαρμογές αντλιών και είναι ιδιαίτερα εμφανής με τις χημικές αντλίες. Μπορεί να παρακολουθηθεί με μετρήσεις πάχους περιβλήματος.

- Ζημιά από κρούση

Ζημιά από κρούση από ξένα αντικείμενα που μεταφέρονται στο υγρό.

- Εξωτερική σφράγιση με διαρροή

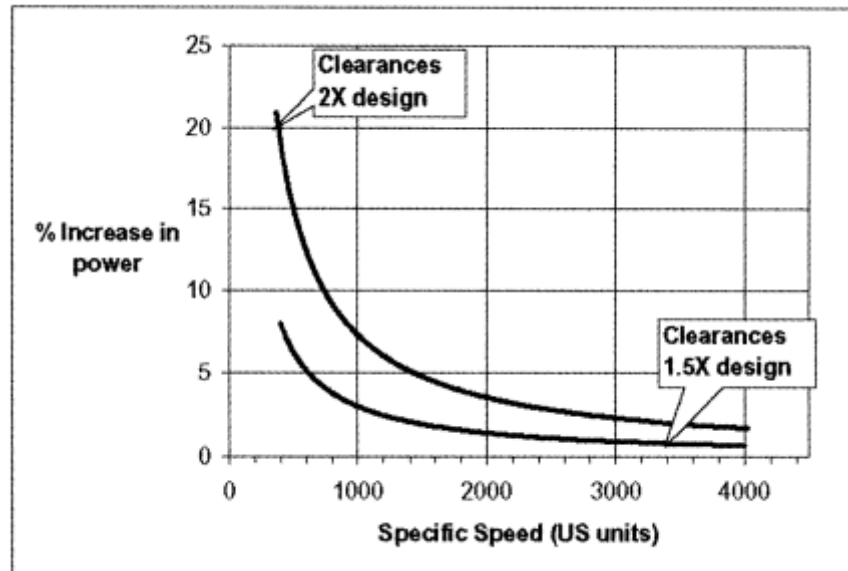
Μικρότερη διάρκεια ζωής από την αναμενόμενη μπορεί να προκληθεί από λανθασμένη εγκατάσταση, έτσι ώστε να παρουσιαστεί κακή ευθυγράμμιση ή υπερβολικός τζόγος μεταξύ των επιφανειών στεγανοποίησης.

- Σφάλματα συντήρησης

Η χρήση λανθασμένων εξαρτημάτων, όπως ένα παχύτερο παρέμβυσμα περιβλήματος από το καθορισμένο, ή η χρήση φλάντζας όταν δεν απαιτείται, μπορεί να μειώσει την απόδοση της αντλίας εισάγοντας υπερβολικά διάκενα μέσα σε μια αντλία ή ανεπαρκή σύσφιξη στα κελύφη των ρουλεμάν. Η αντίστροφη περιστροφή μπορεί να συμβεί με τις αντλίες, εάν τα καλώδια καλωδίωσης αντιστραφούν. Η αντλία ακινητοποιεί αντλεί υγρό, αλλά η απόδοση του μανομετρικού ροής είναι αρκετά χαμηλή. Οι περωτές διπλής εισόδου έχουν τοποθετηθεί ανάποδα, έτσι ώστε τα πτερύγια να γίνονται καμπυλωμένα προς τα εμπρός και να προκύπτει διαφορετική απόδοση ροής μανομετρικού. Μπορούν να τοποθετηθούν περωτές λανθασμένου μεγέθους. Αυτό γίνεται εύκολα, ιδιαίτερα εάν τα καλύμματα έχουν την αναμενόμενη διάμετρο, αλλά τα πτερύγια έχουν κοπεί (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

4.2 Η σχέση εσωτερική φθοράς και απόδοσης

Η σχετική επιπλέον ισχύς που απαιτείται με αυξημένες αποστάσεις δακτυλίου φθοράς είναι μεγαλύτερη με αντλίες χαμηλότερης Ειδικής Ταχύτητας. Τα αποτελέσματα που υπολογίζονται για αντλίες διπλής αναρρόφησης με απλούς επίπεδους δακτυλίους χρήσης (Stepanoff, 1957) εμφανίζονται σε άλλες μεταγενέστερες δημοσιεύσεις, μερικές φορές χωρίς να αναφέρεται η διπλή αναρρόφηση. Η εικόνα 27 χρησιμοποιεί δεδομένα από το γράφημα του Ινστιτούτου Υδραυλικών (HI).



Εικόνα 27 Επίδραση της εσωτερικής φθοράς στην κατανάλωση ενέργειας (και στην απόδοση)

Η κάτω καμπύλη δείχνει την αύξηση της ισχύος όταν τα διάκενα είναι 150% του σχεδιασμού. Η επάνω καμπύλη είναι για κενά 200% του σχεδιασμού. Σημειώνεται ότι οι αντλίες υψηλής Ειδικής Ταχύτητας παρουσιάζουν μια πολύ μικρότερη σχετική αύξηση, αλλά αυτή μπορεί να είναι ακόμα μεγάλη σε ενέργεια, καθώς αυτές οι αντλίες είναι συχνά πολύ μεγάλες. Εάν τα διάκενα, η ειδική ταχύτητα και το κόστος ισχύος για την εν λόγω αντλία είναι γνωστά, η αύξηση της κατανάλωσης ισχύος και στη συνέχεια το ετήσιο κόστος λειτουργίας μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας αυτές τις καμπύλες (Bloch and Geitner, 1985). Εκτός εάν ο μηχανικός έχει καλή συσχέτιση μεταξύ της κατάστασης των αποστάσεων και της ανιχνευμένης υποβάθμισης της απόδοσης, αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο εάν αποσυναρμολογηθεί η αντλία (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

Με αντλίες πολλαπλών σταδίων, οι δακτύλιοι στεγανοποίησης παρέχουν ένα πρόσθετο εφέ ρουλεμάν για τους μεγαλύτερους άξονές τους. Όταν τα διάκενα αυξηθούν σημαντικά, η δόνηση μπορεί να αυξηθεί. Η παρακολούθηση κραδασμών χρησιμοποιείται επίσης για τον εντοπισμό άλλων προβλημάτων που παρουσιάζονται στα περισσότερα περιστρεφόμενα μηχανήματα, όπως ανισορροπία, κακή ευθυγράμμιση, χαλαρότητα, φθορά ρουλεμάν. Συνιστάται η παρακολούθηση των συνολικών επιπέδων κραδασμών στα ρουλεμάν και επιλεγμένων συχνοτήτων ή ζωνών συχνοτήτων όπως για τα περισσότερα περιστρεφόμενα μηχανήματα.

4.3 Ρυθμός φθοράς

Η φθορά σε μια αντλία εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα και ο ρυθμός φθοράς είναι συνήθως ανάλογος με τις τοπικές ταχύτητες προς την ισχύ δύο ή περισσότερων. Η απαίτηση μανομετρικού υπαγορεύει τη φθορά στο περίβλημα καθώς σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα κορυφής της περωτής (Astell, 2000).

Ο ρυθμός φθοράς μιας αντλίας ποικίλλει επίσης ανάλογα με το υγρό που αντλείται και τα υλικά κατασκευής. Στην υπηρεσία πολτού, η ζωή μπορεί να είναι μόνο μερικές εκατοντάδες ώρες. Για παράδειγμα, σε ένα δίκτυο ύδρευσης με μακρά εμπειρία στην παρακολούθηση της κατάστασης των αντλιών, τα ποσοστά που σημειώνονται είναι: χάλυβας/ανοξείδωτος χάλυβας, 1% ετησίως. CI/χαλκός, 2,4%, CI/gunmetal, 2%.

Μια μέση επιδείνωση της απόδοσης από την παρεχόμενη κατάσταση της τάξης του 8% σε διάστημα 10 ετών διαπιστώθηκε στη βιομηχανία νερού από τη δοκιμή πάνω από 300 μεσαίων έως μεγάλων αντλιών διαιρούμενου περιβλήματος. Οι αντλίες είχαν τα συνηθισμένα περιβλήματα από χυτοσίδηρο και μπρούτζινες ή μεταλλικές περωτές, και μολυβδόρουχο που φορούσαν δακτυλίους και ψήκτρες (Fleming, 1992). Η επιδείνωση παρέμεινε σχετικά σταθερή στο 9% περίπου με την ηλικία μεταξύ 12 και 24 ετών και στη συνέχεια μειώθηκε ξανά σε 16% στα 40 έτη. Η φθορά θεωρείται ότι οφείλεται κυρίως στη διάβρωση του φινιρίσματος της επιφάνειας και στη συσσώρευση προϊόντων διάβρωσης στα περιβλήματα. Η ανάλυση μιας εγκατάστασης 6 αντλιών για 15 χρόνια έδειξε επίσης την αξία της ανακαίνισης, δεδομένου ότι το κόστος λειτουργίας είναι πολύ μεγαλύτερο από το αρχικό κόστος (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).

Οι εγκαταστάσεις έχουν συχνά εφεδρικές αντλίες που μπορούν να παραμείνουν σε αναμονή για μεγάλα χρονικά διαστήματα, αλλά προορίζονται να ξεκινήσουν αμέσως και να αναλάβουν τη λειτουργία τους με αξιοπιστία. Έχουν συμβεί φθορά στεγανοποίησης, εισροή ρύπων και άλμη των ρουλεμάν από μεταδιδόμενους κραδασμούς. Οι αντλίες αναμονής θα πρέπει να λειτουργούν τακτικά για τουλάχιστον μία ώρα περίπου κάθε τέσσερις έως έξι εβδομάδες (Bloch, 1997).

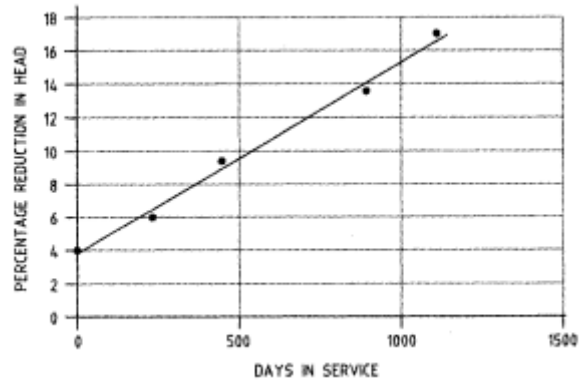
Ο Karassik θεωρεί ότι οι αντλίες τροφοδοσίας λέβητα από ανοξείδωτο χάλυβα θα πρέπει να διαρκούν από 50 000h έως 100 000h μεταξύ των επισκευών. Το API 610 (API, 1995) αναμένει

20 000h σε συνεχή λειτουργία. Η λειτουργία μακριά από το BEP μειώνει τη διάρκεια ζωής της αντλίας. Αυτό είναι πιο έντονο σε μεγάλες αντλίες. Ο Πίνακας 2 δίνει την άποψη των Bloch και Geitner (1985) σχετικά με την επίδραση ενός μεταβαλλόμενου προφίλ φορτίου, και κάπως παρόμοιες πληροφορίες δίνονται από τον Karrassik για αντλίες διαφορετικών τύπων και μεγεθών.

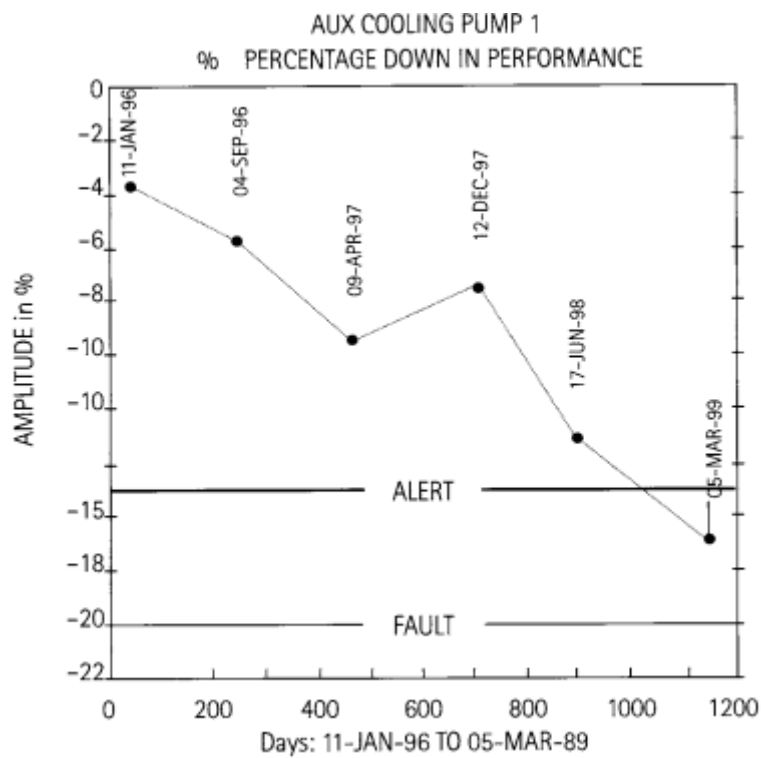
Πίνακας 2 Επίδραση στη διάρκεια ζωής της αντλίας που λειτουργεί μακριά από το BEP

| | % ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΕΑΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΜΕ 50% BEP | % ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΕΑΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΜΕ 30% BEP | % ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΕΑΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΜΕ 20% BEP |
|---------------------------------------|--|--|--|
| Μικρή αντλία (<30 kW) | 95% | 90% | 80% |
| (<450 kW) | 90% | 75% | 60% |
| (<3000kW) | 75% | 50% | 30% |
| αντλίες πολλαπλών σταδίων (<18500 kW) | 60% | 25% | 0 |

Τα δεδομένα από τις τακτικές δοκιμές παρακολούθησης της κατάστασης μιας αντλίας 230 kW σε νερό ψύξης (σχετική απόδοση 450L/s@ 41m) φαίνονται στις εικόνες 28 και 29. Η ποσοστιαία μείωση της απόδοσης υπολογίζεται για τις τιμές κεφαλής σε μια ροή δεδομένων, συνήθως τη ροή σχεδιασμού. Εάν τα σημεία δοκιμής είναι κάτω από τη ροή αναφοράς, το σχήμα της καμπύλης προεκτείνεται κατά μήκος της ροής. Ένα σημείο ήταν ασυνεπές (700 ώρες) και επομένως δεν περιλαμβάνεται (οι αντλίες δεν επισκευάζονται μόνες τους). Η συσχέτιση με τη γραμμική είναι $R^2=0,9884$ (Ahonen, 2011, Ahonen et al., 2012, Jamadar et al., 2019).



Εικόνα 28 Υποβάθμιση μιας αντλίας με το χρόνο (γραμμή τάσης)



Εικόνα 29 Υποβάθμιση μιας αντλίας με το χρόνο (πραγματικά αποτελέσματα)

4.4 Τυπικές βλάβες σε φυγοκεντρικές αντλίες

1. Μηχανική βλάβη
 - Σφάλμα ρουλεμάν

Το ρουλεμάν είναι ένα σημαντικό μέρος της φυγοκεντρικής αντλίας που υποστηρίζει τον ρότορα. Λόγω κακής λίπανσης, υπερφόρτωσης και άλλων λόγων, θα προκύψουν αστοχίες

ρουλεμάν. Τρυπήματα, ξεφλούδισμα, φθορά και άλλα χαρακτηριστικά εμφανίζονται στα εξαρτήματα του ρουλεμάν κύλισης, προκαλώντας φθορά, κραδασμούς και κρούση του ρουλεμάν. Καθώς η φθορά συνεχίζεται και εντείνεται, συχνά συνοδεύεται από αύξηση της θερμοκρασίας. Μπορεί να παρακολουθηθεί και να κριθεί από τη συνολική τιμή δόνησης, την τιμή δόνησης κάτω από τη συχνότητα στενής ζώνης και τον δείκτη κύρτωσης που αντανακλά τα χαρακτηριστικά κρούσης.

- Σφάλμα κακής ευθυγράμμισης

Εάν υπάρχει μετατόπιση ή γωνιακή απόκλιση της κεντρικής γραμμής του άξονα και στα δύο άκρα του συνδέσμου της φυγόκεντρης αντλίας, θα προκαλέσει κακή ευθυγράμμιση και θα αυξήσει τους κραδασμούς. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του φάσματος συχνοτήτων, συχνά προκαλεί αλλαγές στο πλάτος των κραδασμών διπλάσιο της συχνότητας λειτουργίας. Ανάλογα με την αιτία της κακής ευθυγράμμισης, της γωνιακής απόκλισης ή της απόκλισης μετατόπισης, η οποία προκαλεί αλλαγές κραδασμών στην αξονική, ακτινική ή δύο κατευθύνσεις ταυτόχρονα, μπορεί να παρακολουθηθεί και να κριθεί από τα δεδομένα των δύο αξονικών κατευθύνσεων των τριών - αισθητήρας άξονα.

- Ανισοροπία Σφάλμα

Λόγω σφαλμάτων επεξεργασίας ή συναρμολόγησης, ανομοιομόρφης κατανομής ποιότητας υλικού ή ελαττωμάτων της περωτής, ρύπανσης ή μπλοκαρίσματος κατά τη λειτουργία, τα περιστρεφόμενα μέρη της φυγόκεντρης αντλίας έχουν έκκεντρες ή μη ισοροπημένες μάζες, προκαλώντας μη ισοροπημένες δυνάμεις. Υπό τη διέγερση της μη ισοροπημένης δύναμης, η απόκριση δόνησης του συστήματος αλλάζει. Η αλλαγή της δόνησης που προκαλείται από την ανισοροπία εκδηλώνεται κυρίως στη συχνότητα ισχύος και το πλάτος της δόνησης αλλάζει με την αλλαγή της ταχύτητας.

- Αστοχία χαλάρωσης

Η αστοχία χαλάρωσης της φυγόκεντρικής αντλίας γενικά εκδηλώνεται ως δύο είδη χαλαρής βάσης ή χαλαρότητας που προκαλείται από την κακή εφαρμογή μεταξύ των εξαρτημάτων [27,28]. Μεταξύ αυτών, η χαλαρή βάση, όπως το χαλάρωση των βιδών θεμελίωσης, έχει τα χαρακτηριστικά εξαρτήματα συχνότητας εργασίας και σταθερή κατεύθυνση κραδασμών στα

χαρακτηριστικά δόνησης. Η χαλαρότητα που προκαλείται από κακή συναρμολόγηση έχει συχνά φασματικά χαρακτηριστικά υπερτιθέμενης συχνότητας εργασίας και αρμονικών υψηλής τάξης.

2. Σφάλμα υγρού

- Ανώμαλη διέλευση ροής

Κατά τη λειτουργία της φυγοκεντρικής αντλίας, λόγω μπλοκαρίσματος στο σπειροειδές, ακατάλληλης συναρμολόγησης της περωτής κ.λπ., η συνολική δόνηση της φυγοκεντρικής αντλίας θα αυξηθεί και η απόδοση της αντλίας θα μειωθεί. Τα χαρακτηριστικά του σήματος δόνησης εκδηλώνονται κυρίως καθώς η συχνότητα διέλευσης της λεπίδας στο σήμα δόνησης είναι εξαιρετική και η ένταση της δόνησης αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής της φυγοκεντρικής αντλίας

- Σφάλμα Water Hammer

Λόγω του ξαφνικού ανοίγματος και διακοπής λειτουργίας της φυγοκεντρικής αντλίας ή της ξαφνικής αλλαγής της βαλβίδας, το φαινόμενο του σοκ που προκαλείται από την ξαφνική αλλαγή της ροής στο σώμα της αντλίας και στον περιβάλλοντα αγωγό ονομάζεται «σφυρί νερού». Ένα ελαφρύ σφυρί νερού συνοδεύεται συχνά από σύντομη και ασθενή δόνηση και θόρυβο. Ένα ισχυρό σφυρί νερού μπορεί να κάνει την πίεση στο σώμα της αντλίας ή στον αγωγό εκατοντάδες φορές υψηλότερη από την κανονική, προκαλώντας ζημιά στα εξαρτήματα της φυγόκεντρης αντλίας ή εκρήξεις του αγωγού κ.λπ.. Όταν παρουσιάζεται αστοχία του σφυριού νερού της φυγόκεντρης αντλίας, εκδηλώνεται καθώς το πλάτος της κυματομορφής του σήματος δόνησης στο πεδίο του χρόνου αυξάνεται απότομα και στη συνέχεια μειώνεται γρήγορα. Είναι ένα τυπικό σήμα κρούσης και το πλάτος του τμήματος υψηλής συχνότητας είναι πιο εμφανές στον τομέα της συχνότητας.

- Σφάλμα σπηλαιώσης

Η σπηλαιώση είναι ένα κοινό πρόβλημα των φυγόκεντρων αντλιών, το οποίο μπορεί να προκαλέσει αύξηση των κραδασμών και του θορύβου της αντλίας, μείωση της απόδοσης και πρόκληση σοβαρής βλάβης στα μέρη της αντλίας. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τη σπηλαιώση, αλλά από την άποψη της απόκρισης δόνησης, είτε προκαλείται από αναταράξεις, εσωτερική παλινδρόμηση ή άλλους λόγους, θα δείξει μια απόκριση κραδασμών κραδασμών. Το

χαρακτηριστικό δόνησης ενός τέτοιου σφάλματος σπηλαίωσης είναι ένα συνεχές σήμα ευρείας ζώνης. Στο κάτω μέρος του φασματογράμματος, θα υπάρχει μια συνολική ανύψωση σε σχέση με το κανονικό σήμα. Γενικά, υπάρχει απόκριση από 300 Hz (ή και χαμηλότερα) στο ανώτερο όριο της ζώνης συχνοτήτων. Ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης μπορεί να προστεθεί στο σήμα και για ένα σήμα στη ζώνη διέλευσης, όπως 500–2000 Hz, εξάγονται χαρακτηριστικά για να προσδιοριστεί εάν συμβαίνει σπηλαίωση ή όχι.

5. Μοντελοποίηση της διαδικασίας παρακολούθησης φυγοκεντρικής αντλίας

Οι αντλίες είναι βασικά συστατικά στις περισσότερες τεχνικές διεργασίες, όπως στις βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας και χημικών, ορυκτών και εξόρυξης, κατασκευής, θέρμανσης, κλιματισμού και ψύξης κινητήρων. Οδηγούνται κυρίως από ηλεκτρικούς κινητήρες ή από κινητήρες εσωτερικής καύσης και καταναλώνουν υψηλό ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας. Διακρίνονται κυρίως ως φυγόκεντρες αντλίες για υψηλές αποδόσεις με χαμηλότερες πιέσεις και ως αντλίες υδροστατικής ή θετικής μετατόπισης (παλινδρομικές) για υψηλές πιέσεις και μικρές παροχές. Μεταφέρουν καθαρά υγρά, ή μείγματα υγρών και στερεών και με αυτό τον τρόπο αυξάνουν την πίεση για να αντισταθμίσουν, π.χ. για απώλειες αντίστασης ή ενεργοποίηση θερμοδυναμικών κύκλων.

Στο παρελθόν, οι φυγοκεντρικές αντλίες κινούνταν κυρίως με σταθερή ταχύτητα και ο ρυθμός ροής των ρευστών χειριζόταν από βαλβίδες με αντίστοιχες απώλειες στραγγαλισμού. Λόγω της διαθεσιμότητας φθηνότερων επαγωγικών κινητήρων ελεγχόμενης ταχύτητας, χρησιμοποιούνται πλέον και φυγοκεντρικές αντλίες με χαμηλότερη ισχύ για τον έλεγχο του ρυθμού ροής με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Η συνολική αξιοπιστία και ασφάλεια πολλών εγκαταστάσεων εξαρτάται από την υγεία των αντλιών. Επομένως, η επίβλεψη και η διάγνωση βλαβών των αντλιών είναι σχετικά μεγάλης σημασίας.

5.1 Φυγοκεντρικές αντλίες

5.1.1 Σύγχρονη τεχνολογία στην επίβλεψη της αντλίας και στην ανίχνευση σφαλμάτων

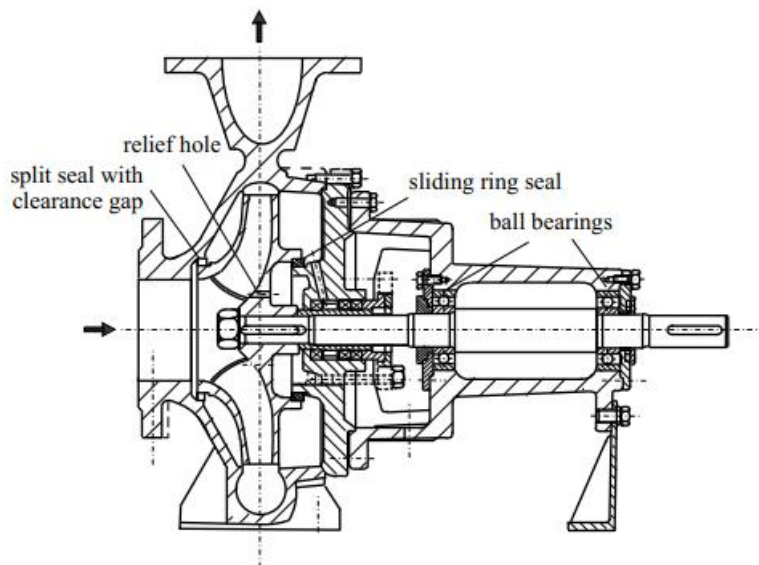
Μια βλάβη σε φυγοκεντρικές αντλίες λαμβάνει χώρα είτε στα υδραυλικά μέρη είτε στα μηχανικά μέρη. Μια έρευνα από τη γερμανική Fachgemeinschaft Pumpen, VDMA (VDMA , 1995), κυρίως μεταξύ χημικών βιομηχανιών και μονάδων επεξεργασίας νερού έδειξε το ακόλουθο αποτέλεσμα: 59% των αντλιών λειτουργούν συνεχώς, 19% καθημερινά και 22% για μικρό χρονικό διάστημα. Τα διαστήματα επιθεώρησης είναι τρεις μήνες κατά μέσο όρο. Οι απρογραμματίστες επισκευές λόγω ελαττωμάτων λαμβάνουν χώρα μέσα σε εννέα μήνες κατά

μέσο όρο. Ο Πίνακας 3 δείχνει τα ελαττωματικά εξαρτήματα ως αιτίες ζημιών στις φυγοκεντρικές αντλίες.

Πίνακας 3 Ελαττωματικά εξαρτήματα ως πηγές ζημιών σε φυγοκεντρικές αντλίες

| Ελαττωματικό εξάρτημα | Συχνότητα αναφοράς (%) |
|--------------------------------------|------------------------|
| στεγανοποιητικός δακτύλιος ολίσθησης | 31 |
| ρουλεμάν κύλισης | 22 |
| διαρροή | 10 |
| κινητήρας οδήγησης | 10 |
| ρότορας | 9 |
| ρουλεμάν ολίσθησης | 8 |
| συμπλέκτης | 4 |
| Σωληνώσεις | 3 |
| περίβλημα | 3 |

Επομένως, τα πιο συχνά ελαττωματικά εξαρτήματα είναι τα στεγανοποιητικά δακτυλίου ολίσθησης και τα ρουλεμάν, (βλέπε Εικόνα 6.1). Οι αιτίες για σφάλματα που οδηγούν τουλάχιστον σε διακοπές λειτουργίας ή συντήρησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Η σπηλαιώση, η ξηρή λειτουργία, η αυξημένη φθορά και οι εναποθέσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τον εντοπισμό σφαλμάτων.



Εικόνα 30 Σχέδιο τομής μιας τυπικής φυγοκεντρικής αντλίας (KSB Etanorm)

| Σφάλμα/ζημιά | Περιγραφή και επιπτώσεις |
|------------------|---|
| σπηλαίωση | ανάπτυξη φυσαλίδων ατμού μέσα στο ρευστό εάν η στατική πίεση πέσει κάτω από την πίεση ατμών. Οι φυσαλίδες καταρρέουν απότομα οδηγώντας σε ζημιά στους τροχούς της λεπίδας και παράγουν ήχο τριξίματος |
| αέριο στο ρευστό | Μια πτώση πίεσης οδηγεί στην εμφάνιση διαλυμένου αερίου στο μεταφερόμενο υγρό. Μπορεί να προκύψει διαχωρισμός αερίου και υγρού και μικρότερο μανομετρικό |
| Ξηρή λειτουργία | Η έλλειψη υγρού οδηγεί σε έλλειψη ψύξης και υπερθέρμανση του ρουλεμάν. Σημαντικό για την αρχική φάση |
| φθορά | Διάβρωση (erosion): μηχανική βλάβη στους τοίχους λόγω σκληρών σωματιδίων ή σπηλαίωσης Διάβρωση (corrosion): από επιθετικά υγρά ρουλεμάν: μηχανικές βλάβες λόγω κόπωσης και τριβής μετάλλων, δημιουργία τρυπημάτων και ενοικίων απόφραξη των οπών ανακούφισης: οδηγεί σε υπερφόρτωση των αξονικών ρουλεμάν και σε ζημιά τους βούλωμα στεγανοποιητικών δακτυλίων ολίσθησης: οδηγεί σε υψηλότερη τριβή και |

| | |
|-------------|--|
| | μικρότερη απόδοση |
| | αύξηση των σπασμένων σφραγίδων: οδηγεί σε μικρότερη απόδοση |
| Εναποθέσεις | εναποθέσεις οργανικού υλικού ή μέσω χημικών αντιδράσεων στην είσοδο ή την έξοδο του ρότορα οδηγούν σε μικρότερη απόδοση, υψηλότερες θερμοκρασίες μέχρι την πλήρη κατάρρευση της άντλησης |
| ταλαντώσεις | ανισορροπία του ρότορα λόγω βλάβης ή εναποθέσεων στο ρότορα, ζημιά στα ρουλεμάν |

Η επίβλεψη των αντλιών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα αξιοποιούμενα όργανα. Εάν, για παράδειγμα, μετράται μόνο η πίεση εξόδου για μια φυγοκεντρική αντλία με σταθερή γνωστή ταχύτητα, μόνο μεγάλες αποκλίσεις από την κανονική πίεση λειτουργίας δίνουν κάποια ένδειξη ότι κάπου συνέβησαν μεγάλα σφάλματα ή αστοχία. Η προσθήκη μέτρησης του ρυθμού ροής όγκου βελτιώνει την κατάσταση, καθώς τότε μπορούν να παρατηρηθούν αλλαγές στο χαρακτηριστικό του μανομετρικού, χωρίς όμως τη δυνατότητα διάγνωσης βλαβών. Η μέτρηση της πίεσης εισόδου επιτρέπει σε κάποιον να παρατηρήσει το NPSH (καθαρό θετικό μανομετρικό αναρρόφησης) σε σχέση με τη σπηλαιώση. Όλες αυτές οι απλές μέθοδοι επίβλεψης γενικά δεν επιτρέπουν την έγκαιρη ανίχνευση μικρών βλαβών και δεν παρέχουν πληροφορίες για τα αίτια των βλαβών (διάγνωση)

Η επίβλεψη των καλά εξοπλισμένων αντλιών βασίζεται συνήθως στη μέτρηση της πίεσης εισόδου και εξόδου ή μόνο στο μανομετρικό, στον ρυθμό ροής, στην ταχύτητα και στη θερμοκρασία του περιβλήματος των ρουλεμάν και στον έλεγχο ορίων αυτών των τιμών. Για παράδειγμα, εάν η πίεση εξόδου ή ο ρυθμός ροής είναι πολύ χαμηλή (ή πολύ υψηλή) σε σύγκριση με τις κανονικές ή ονομαστικές τιμές, αυτό μπορεί να είναι αποτέλεσμα περιβλημάτων αερίου, ξηρής λειτουργίας, μεγάλων εναποθέσεων ή ελαττωμάτων ρουλεμάν ή κινητήρα. Αυτές

οι μεγάλες αποκλίσεις από την κανονική λειτουργία είναι εύκολα παρατηρήσιμες με την υπέρβαση των προσαρμοσμένων ορίων. Αλλά η διάγνωση βλαβών και η έγκαιρη ανίχνευση σφαλμάτων δεν είναι γενικά δυνατή με αυτόν τον έλεγχο των ορίων.

Διάφορες ερευνητικές προσπάθειες έχουν δώσει μια εικόνα για τη συμπεριφορά της αντλίας υπό την επίδραση σφαλμάτων. Διερευνάται η εφαρμογή των αισθητήρων κραδασμών και η ανάλυση του θορύβου που μεταδίδεται από τη δομή, π.χ. με (Klockgether and Wesser, 2002), (Hellmann et al., 1998), (Nuglisch, 2006), (Michaelson, 2002), (Kallweit, 2002). Οι μέθοδοι απαιτούν ειδικούς αισθητήρες και μεθόδους αξιολόγησης για την αντλία και το σήμα και επιτρέπουν την ανίχνευση βλαβών που σχετίζονται με τους κραδασμούς υπό ορισμένες συνθήκες λειτουργίας.

Η ταυτόχρονη αξιολόγηση αρκετών μετρήσεων και η ανάπτυξη μεθόδων ανίχνευσης σφαλμάτων βάσει μοντέλου πραγματοποιήθηκε στα (αντλία με μεταβλητή ταχύτητα και εκτίμηση παραμέτρων), (αντλία με σταθερή ταχύτητα και εκτίμηση παραμέτρων), (αντλίες με διαφορετική ισχύ και συνδυασμός εξισώσεων ισοτιμίας και εκτίμηση παραμέτρων). Αυτά τα ερευνητικά έργα αποτελούν τη βάση για τις ακόλουθες ενότητες. Περαιτέρω δημοσιεύσεις για προσεγγίσεις που βασίζονται σε μοντέλα είναι η όπου τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν προσεγγίσεις που βασίζονται σε εκτίμηση παραμέτρων και στο (Dalton and Patton, 1996) όπου οι συγγραφείς εφαρμόζουν έναν παρατηρητή κατάστασης και εκτίμηση παραμέτρων.

5.1.2 Μοντέλα φυγόκεντρων αντλιών και συστημάτων σωληνώσεων

α) Αντλία

Η ροπή M που εφαρμόζεται στον ρότορα μιας ακτινικής φυγόκεντρης αντλίας οδηγεί σε ταχύτητα περιστροφής ω και μεταδίδει μια αύξηση της ορμής του υγρού από την είσοδο του ρότορα με μικρότερη ακτίνα r_1 στην έξοδο του ρότορα με μεγαλύτερη ακτίνα r_2 οδηγώντας το υγρό μέσω καναλιών που οριοθετούνται από τη φτερωτή. Η θεωρητικά απαιτούμενη ροπή προκύπτει από μια εξίσωση ισορροπίας γωνιακής ορμής, γνωστή ως εξίσωση στροβίλου του Euler. Αυτό οδηγεί στο θεωρητικό μανομετρικό της αντλίας

$$H_{th} = h_{th1}\omega^2 - h_{th2}\omega\dot{V} \quad (5)$$

όπου το μανομετρικό παράδοσης ορίζεται ως

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (6)$$

με p_1 την πίεση στην είσοδο και p_2 στην έξοδο. Επίσης dV/dt είναι ο ρυθμός ροής όγκου.

Λαμβάνοντας υπόψη έναν πεπερασμένο αριθμό πτερυγίων, απώλειες τριβής πτερυγίων και σωλήνων, απώλειες πρόσκρουσης λόγω μη επαπτομενικής ροής στην είσοδο του πτερυγίου, η βασική εξίσωση για το μανομετρικό παροχής της αντλίας γίνεται:

$$H = h_{nn}\omega^2 - h_{nv}\omega\dot{V} - h_{vv}\dot{V}^2 \quad (7)$$

Οι συντελεστές h_i προσδιορίζονται από τις βασικές εξισώσεις και περιέχουν εμπειρικά καθορισμένες παραμέτρους. Η αντίστοιχη ισχύς που μεταδίδεται στο ρευστό είναι

$$P = \rho g H \dot{V} = M\omega \quad (8)$$

Στη συνέχεια, η θεωρητική ροπή της αντλίας προκύπτει

$$M_{th} = \rho g \frac{\dot{V}}{\omega} H_{th} = \rho g \left(h_{th1}\omega\dot{V} - h_{th2}\dot{V}^2 \right) \quad (9)$$

Συμπεριλαμβανομένων των απωλειών ροής, η (7) πρέπει να εισαχθεί στην (8), με αποτέλεσμα την πραγματική ροπή:

$$M_P = \rho g \left(h_{nn}\omega\dot{V} - h_{nv}\dot{V}^2 - h_{vv}\frac{\dot{V}^3}{\omega} \right) \quad (10)$$

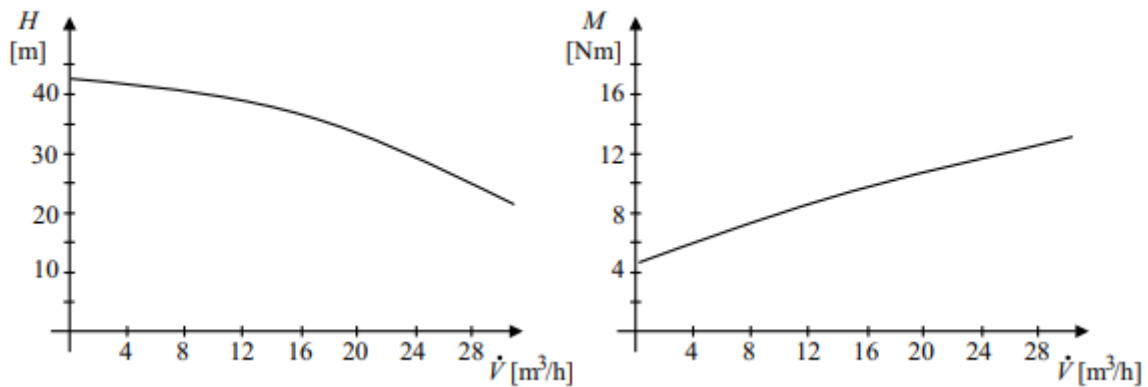
Το μηχανικό μέρος της αντλίας διαμορφώνεται από την ισορροπία περιστροφικών παλμών

$$J_P \frac{d\omega(t)}{dt} = M_{moi}(t) - M_P(t) - M_f(t) \quad (11)$$

όπου J_P είναι ο λόγος αδράνειας κινητήρα και αντλίας και M_f είναι η ροπή τριβής, που αποτελείται από τριβή Coulomb M_{f0} και ιξώδη τριβή $M_{f1\omega}$:

$$M_f(t) = M_{f0} \text{sign } \omega(t) + M_{f1}\omega(t) \quad (12)$$

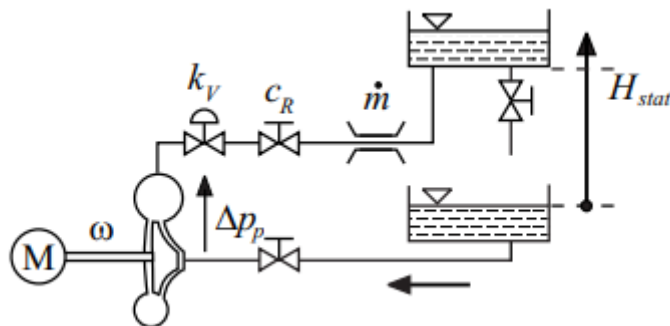
Η εικόνα 31 δείχνει τα προκύπτοντα χαρακτηριστικά του μανομετρικού παροχής H και της ροπής M μιας φυγοκεντρικής αντλίας.



Εικόνα 31 Προκύπτοντα χαρακτηριστικά του μανομετρικού παροχής H και της ροπής M μιας φυγοκεντρικής αντλίας

β) Σύστημα σωληνώσεων

Η αντλία θεωρείται τώρα ότι μεταφέρει ένα ρευστό σε ένα σύστημα σωληνώσεων από μια κάτω σε μια επάνω δεξαμενή αποθήκευσης, Εικόνα 32.



Εικόνα 32 Σχέδιο φυγοκεντρικής αντλίας με ηλεκτρική κίνηση, σύστημα σωληνών και αποθήκευση. Ανοιχτό κύκλωμα

Με βάση την εξίσωση ισορροπίας ορμής του σωλήνα μπορεί να δηλωθεί για τυρβώδη ροή

$$H(t) = \alpha_F \frac{d\dot{V}(t)}{dt} + h_{rr} \dot{V}^2(t) + H_{stat} \quad (13)$$

όπου h_r είναι ο συντελεστής αντίστασης του σωλήνα, λαμβάνοντας υπόψη τα μέρη του σωλήνα, τους γωνιακούς σωλήνες και τις βαλβίδες γκαζιού, $\alpha_F = l/gA$ με l το μήκος του σωλήνα και A την περιοχή διατομής του σωλήνα και H_{stat} είναι το μανομετρικό της αποθήκευσης πάνω από την αντλία (αντιστοιχο χαμηλότερο ύψος αποθήκευσης), που σημαίνει ότι η στατική πίεση είναι

$$p_{stat} = \rho g H_{stat} \quad (14)$$

Η υπόθεση ότι η (13) μπορεί να γραμμικοποιηθεί για μικρές αποκλίσεις γύρω από τη ροή όγκου μόνιμης κατάστασης dV/dt και $p_1 = \text{const}$: οδηγεί σε μια διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης

$$T_F \frac{d\Delta\dot{V}(t)}{dt} + \Delta\dot{V}(t) = K_F \Delta p_2(t) \quad (15)$$

με κέρδος και χρονική σταθερά

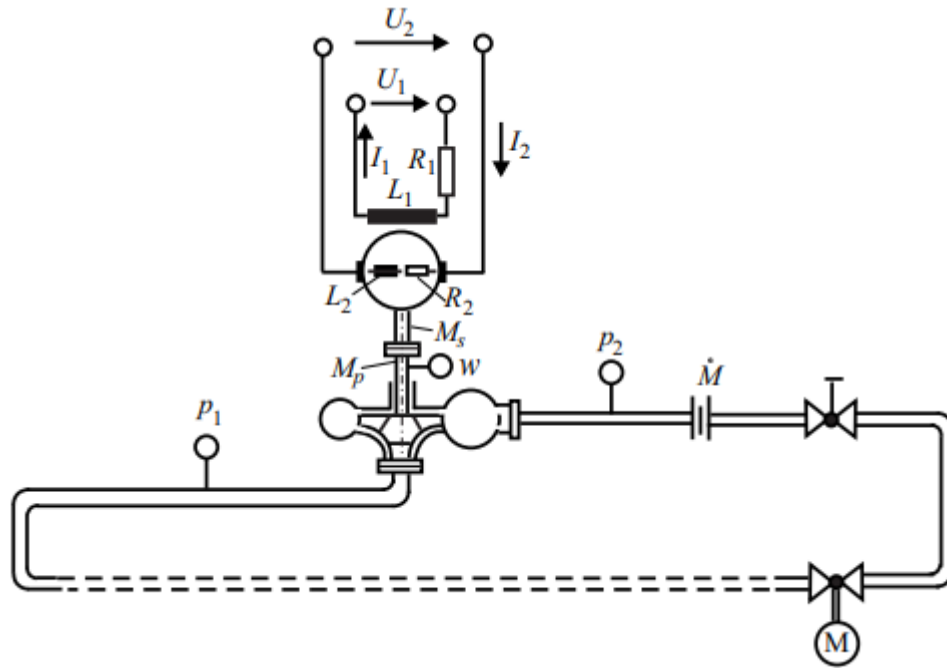
$$K_F = \frac{\Delta p_2}{\Delta \dot{V}} = \frac{1}{2\rho g h_{rr} \dot{V}} \quad (16)$$

$$T_F = \frac{\alpha_F}{2h_{rr} \dot{V}} = \frac{l}{2gAh_{rr} \dot{V}} \quad (17)$$

Ως εκ τούτου, η σταθερά χρόνου του ρευστού αυξάνεται με μεγαλύτερο μήκος σωλήνα l και μικρότερο όγκο ροής VP .

γ) Σύστημα κυκλώματος αντλίας και κλειστού αγωγού

Εάν η αντλία μεταφέρει το ρευστό μέσω συστήματος κυκλώματος κλειστού σωλήνα με σταθερές παραμέτρους αντίστασης, όπως φαίνεται στην εικόνα 33, η συμπεριφορά σταθερής κατάστασης ακολουθεί τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα με $d^2V/dt^2 = 0$ και $H_{stat} = 0$:



Εικόνα 33 Σχέδιο του κινητήρα DC με ελεγχόμενη ταχύτητα και της φυγοκεντρικής αντλίας. Κλειστό κύκλωμα. Κινητήρας: $P_{max} = 4 \text{ kW}$; $n_{max} = 3000 \text{ rpm}$; αντλία: $H = 39 \text{ m}$; $dV/dt \text{ max} = 160 \text{ m}^3/h$; $n_{max} = 2600 \text{ rpm}$. Ένας κινητήρας AC χρησιμοποιήθηκε για λειτουργία σταθερής κατάστασης και ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος για δυναμική λειτουργία

$$(h_{rr} + h_{vv}) \dot{V}^2 + h_{nv} \omega \dot{V} - h_{nn} \omega^2 = 0 \quad (18)$$

Η λύση αυτής της τετραγωνικής εξίσωσης αποδίδει

$$\dot{V} = \kappa \omega \quad (19)$$

με

$$\kappa = \frac{1}{2(h_{rr} + h_{vv})} \left(-h_{nv} + (-) \sqrt{h_{nv}^2 + 4h_{nn}(h_{rr} + h_{vv})} \right) \quad (20)$$

Εάν οι παράμετροι αντίστασης στον σωλήνα είναι σταθερές (δηλαδή δεν αλλάζει η θέση της βαλβίδας), η ροή όγκου είναι ανάλογη με την ταχύτητα της αντλίας.

Λόγω της μη γραμμικής ροπής της αντλίας, η δυναμική ταχύτητας είναι επίσης μη γραμμική. Ωστόσο, για μικρές αποκλίσεις $\Delta\omega$ γύρω από μια σταθερή κατάσταση ω η εξίσωση μπορεί να γραμμικοποιηθεί. Στην περίπτωση κυκλώματος κλειστού σωλήνα προκύπτει

$$\begin{aligned}
 M_P &= \rho g \kappa \left(h_{nn} - h_{nv} \kappa - h_{vv} \kappa^2 \right) \omega^2 \\
 &= k_m \omega^2
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Στη συνέχεια η (21) αλλάζει σε

$$J_P \frac{d\omega(t)}{dt} = M_{mot}(t) - k_m \omega^2(t) - M_{f0} \text{sign } \omega(t) - M_{f1} \omega(t)
 \tag{22}$$

Η γραμμικοποίηση αποδίδει τη διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης

$$T_P \frac{d\omega}{dt} + \Delta\omega(t) = K_P \Delta M_{mot}(t)
 \tag{23}$$

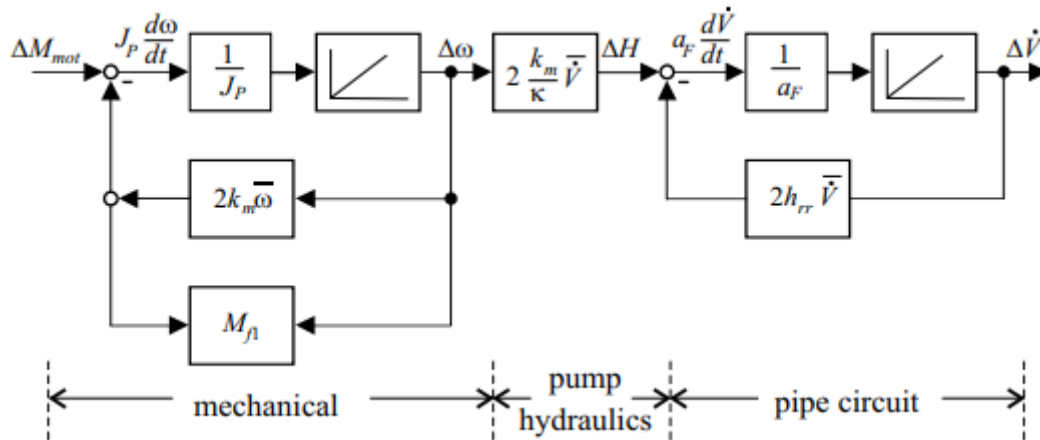
με το κέρδος

$$K_P = \frac{\Delta\omega}{\Delta M_{mot}} = \frac{1}{2k_m \bar{\omega} + M_{f1}}
 \tag{24}$$

και η χρονική σταθερά

$$T_P = \frac{J_P}{2k_m \bar{\omega} + M_{f1}}
 \tag{25}$$

Η σταθερά χρόνου του κινητήρα και της αντλίας γίνεται μικρή για μικρό λόγο αδράνειας J_P και μεγάλη ταχύτητα και πρέπει να συγκριθεί με τη σταθερά χρόνου του ρευστού T_F . Η εικόνα 34 δείχνει ένα διάγραμμα ροής σήματος για το γραμμικό σύστημα αντλίας-σωλήνων. Ως εκ τούτου, προκύπτει ένα δυναμικό σύστημα δεύτερης τάξης, σύμφωνα με την ορμή που αποθηκεύεται από τον ρότορα αντλίας-μοτέρ και τη μάζα του ρευστού στον σωλήνα.



Εικόνα 34 Ροή σήματος για τη γραμμική συμπεριφορά ενός συστήματος αντλίας-σωλήνων σε κλειστό κύκλωμα γύρω από τη μόνιμη κατάσταση για μια μικρή αλλαγή της ροπής του κινητήρα

5.1.3 Ανίχνευση σφαλμάτων με εκτίμηση παραμέτρων

Η ανίχνευση σφάλματος βάσει μοντέλου με εκτίμηση παραμέτρων περιγράφεται πρώτα για τη στατική συμπεριφορά και στη συνέχεια για τη δυναμική συμπεριφορά μιας φυγοκεντρικής αντλίας. Η εικόνα 33 δείχνει το σχήμα της αντλίας που ερευνήθηκε και του κυκλώματος του σωλήνα.

α) Λειτουργία και διακοπή με σταθερή ταχύτητα

Σε πολλές περιπτώσεις, ένας κινητήρας AC χωρίς έλεγχο ταχύτητας χρησιμοποιείται για να παραδώσει την κίνηση της αντλίας. Με την αλλαγή της θέσης μιας βαλβίδας στο σύστημα σωληνώσεων αλλάζει το χαρακτηριστικό της εγκατάστασης και επομένως το σημείο λειτουργίας της αντλίας, το οποίο καθορίζεται από τη διασταύρωση μεταξύ αντλίας και χαρακτηριστικού της εγκατάστασης. Έτσι, οι παράμετροι της στατικής καμπύλης μανομετρικού-ροής μπορεί να αναγνωριστούν. Εκτός από τις μικρές αλλαγές που οφείλονται στο χαρακτηριστικό ροπής ολίσθησης του κινητήρα AC, η ταχύτητα της αντλίας παραμένει σταθερή. Μια δεύτερη δυνατότητα συνίσταται στην αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς της αντλίας κατά τη διακοπή λειτουργίας. Έτσι, η αντλία κλείνει όταν λειτουργεί με κανονική ή μηδενική ροή. Εξετάστηκαν και οι δύο περιπτώσεις. Μετρήθηκαν τα ακόλουθα σήματα: U , τάση κινητήρα AC; dV/dt , ροή όγκου; I , ρεύμα κινητήρα AC, H , μανομετρικό αντλίας, ω , ταχύτητα.

Προσδιορίζοντας τη χαρακτηριστική στατικής αντλίας από τη μεταβολή της θέσης της βαλβίδας, προκύπτει ότι η ταχύτητα και η ροή δεν είναι πλέον ανάλογες μεταξύ τους. Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιηθεί το πλήρες μοντέλο φυγοκεντρικής αντλίας. Για το χαρακτηριστικό του μανομετρικού ισχύει

$$H = h_{nn}\omega^2 - h_{nv}\omega\dot{V} - h_{vv}\dot{V}^2 \quad (26)$$

και για τη ροπή

$$M_P = \rho g \left(h_{nn}\omega\dot{V} - h_{nv}\dot{V}^2 - h_{vv}\frac{\dot{V}^3}{\omega} \right) \quad (27)$$

Πειράματα έδειξαν, ότι η ροπή για την αντλία που ερευνήθηκε μπορεί να προσεγγιστεί καλύτερα από

$$M_P = k_0\omega\dot{V} - k_1\dot{V}^2 + k_2\omega^2 \quad (28)$$

Με την αλλαγή της θέσης της βαλβίδας με σταθερή ταχύτητα κινητήρα, το μανομετρικό H , η ροπή του κινητήρα M και η ροή όγκου dV/dt μεταβάλλονται κατά μήκος των χαρακτηριστικών καμπυλών. Στη συνέχεια, η εκτίμηση παραμέτρων ελαχίστων τετραγώνων βασίζεται σε

$$H = \Psi^T \Theta_H \quad (29)$$

$$M_P = \Psi^T \Theta_M \quad (30)$$

με το διάνυσμα δεδομένων

$$\Psi^T = \left[\omega^2 \quad \omega\dot{V} \quad \dot{V}^2 \right] \quad (31)$$

και το διάνυσμα παραμέτρων

$$\Theta_H^T = [h_{nn} \quad -h_{nv} \quad -h_{vv}] \quad (32)$$

$$\Theta_M^T = [k_2 \quad k_0 \quad -k_1]. \quad (33)$$

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για ένα εύρος ροής όγκου 0-150% σε σχέση με την ονομαστική ροή. Ωστόσο, ένα εύρος 60-150% είναι αρκετό για τον εντοπισμό σφαλμάτων.

Τα πειράματα διακοπής οδηγούν σε άλμα της ροπής οδήγησης στο μηδέν. Εάν υποθεθεί ότι η ταχύτητα της αντλίας και η ροή είναι ανάλογες μεταξύ τους επειδή η αντίσταση ροής παραμένει σταθερή, οι όροι $\omega dV/dt$ και $(dV/dt)^2$ μπορούν να αντικατασταθούν από ω^2 . Έτσι προκύπτει με παραβλέποντας τους όρους τριβής,

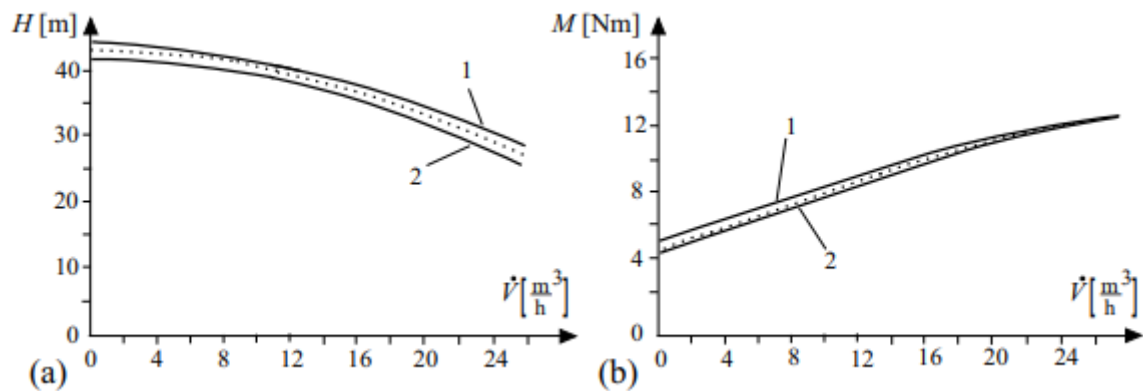
$$M_{mot}(t) = J_P d\omega/dt + k_m \omega^2 \quad (34)$$

Σημειώνεται ότι και οι δύο παράμετροι J_P και k_m μπορούν να αναγνωριστούν, αν και το $M(t)$ είναι μηδέν εκτός από το $t \leq 0$. Ο λόγος είναι ότι για την αναγνώριση οι τιμές $M(t)$ και $\omega(t)$ δεν χρησιμοποιούνται άμεσα αλλά αποστέλλονται πρώτα μέσω ενός (χαμηλοπερατού) φίλτρου μεταβλητής κατάστασης για να ληφθεί η παράγωγος $d\omega/dt$. Επομένως, η φιλτραρισμένη τιμή του $M(t)$ δεν είναι ένα άλμα στο μηδέν αλλά μια αργή μετάβαση στο μηδέν που παρέχει επαρκή διέγερση για την αναγνώριση παραμέτρων. Ο όρος $k_m \omega^2$ αντιπροσωπεύει το φορτίο κατά τη διακοπή λειτουργίας. Γενικά, αύξηση του φορτίου σημαίνει μείωση της περιόδου διακοπής λειτουργίας.

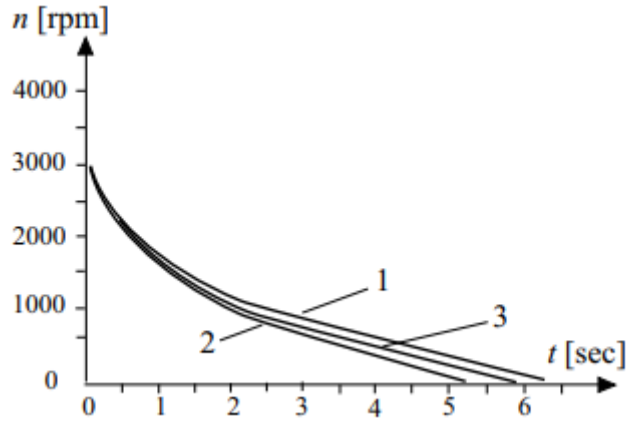
Το μοντέλο της φυγόκεντρης αντλίας χρησιμοποιήθηκε τώρα για τον αρχικό εντοπισμό σφαλμάτων. Η ιδέα ήταν να εντοπιστεί η αργά εξελισσόμενη επιδείνωση της κατάστασης της αντλίας λόγω φθοράς, διάβρωσης και σπηλαιώσης, προσδιορίζοντας τις παραμέτρους του μοντέλου της αντλίας. Ενσωματώθηκαν αρκετά σφάλματα στην αντλία για να δοκιμαστεί η αντίδραση της μεθόδου ανίχνευσης σφαλμάτων:

- 1) Φθορά στο διάκενο. Ο δακτύλιος διάκενου είναι ένα από τα πιο συχνά αλλαγμένα ανταλλακτικά μιας φυγόκεντρικής αντλίας. Η διεύρυνση του διάκενου αυξάνει τη ροή διαρροής από την εξωτερική διάμετρο της πτερωτής προς την πλευρά αναρρόφησης και μειώνει σημαντικά την απόδοση της αντλίας, ειδικά με αντλίες χαμηλής ειδικής ταχύτητας. Ωστόσο, ο βαθμός φθοράς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες λειτουργίας της αντλίας, ιδιαίτερα από την ποιότητα του ρευστού μέσου (συγκέντρωση

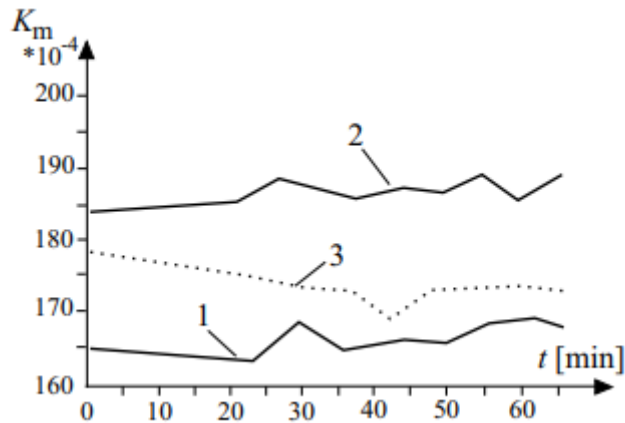
αλατιού, άμμου, στάχτης κ.λπ.) και το σημείο λειτουργίας (ροή παροχής αντλίας, διαθέσιμο καθαρό μανομετρικό αναρρόφησης υπό πίεση (NPSH)). Επομένως, δεν μπορεί να δοθεί καθολική σύσταση για το πότε πρέπει να αλλάξετε τον δακτύλιο διάκενου. Πραγματοποιήθηκαν αρκετά πειράματα με διαφορετικούς δακτυλίους. Η επίδραση ενός αυξημένου διακένου είναι μια μετατόπιση προς τα αριστερά των χαρακτηριστικών καμπυλών που φαίνεται στην εικόνα 35. Επιπλέον, η τριβή του δίσκου αυξάνεται για τις μονοβάθμιες αντλίες, επειδή η ροή του κενού ανοίγματος εισέρχεται στο πίσω μέρος της πτερωτής με περιφερειακή ταχύτητα, η οποία γίνεται ταχύτερη καθώς η ροή περνά από την εξωτερική διάμετρο στην εσωτερική διάμετρο. Η περίοδος διακοπής είναι μικρότερη (ειδικά με διακοπή σε μηδενική ροή), επειδή η ροή μέσω του διάκενου αντιπροσωπεύει ένα πρόσθετο φορτίο, βλέπε εικόνες 36 και 37. Έτσι, τα συμπτώματα για τη φθορά του διάκενου παρουσιάζονται στο πίνακα 5, μείωση του h_{nn} και αύξηση του h_{vv} , k_2 και k_m .



Εικόνα 35 Χαρακτηριστικά αντλίας ως συνάρτηση της φθοράς στο διάκενο: α) χαρακτηριστικό μανομετρικού ροής. Διακεκομμένη γραμμή: χαρακτηριστικό αναφοράς. β) χαρακτηριστικό ροπής-ροής. Διακεκομμένη γραμμή: χαρακτηριστικό αναφοράς. 1 πολύ μικρό διάκενο. 2 μεγάλο διάκενο



Εικόνα 36 Ταχύτητα για διακοπή της αντλίας σε περίπτωση διαφορετικών αποστάσεων. 1 πολύ μικρή απόσταση. 2 μεγάλο διάκενο? 3 κενό αναφοράς



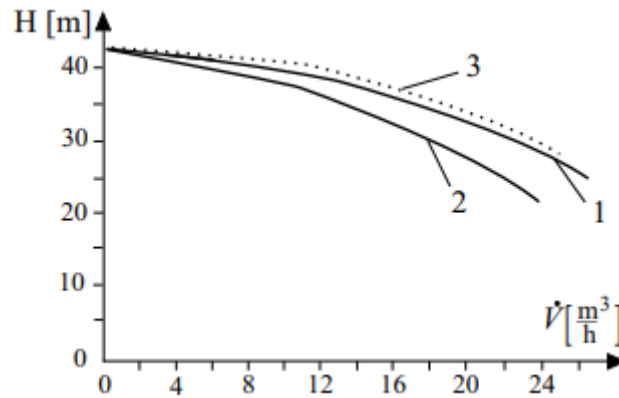
Εικόνα 37 Εκτιμώμενη παράμετρος k_m σε συνάρτηση με το διάκενο. Διακεκομμένη γραμμή: χαρακτηριστικό αναφοράς. 1 πολύ μικρή απόσταση. 2 μεγάλη απόσταση

Πίνακας 5 Συμπτώματα από εκτίμηση παραμέτρων στατικών χαρακτηριστικών και δυναμική διακοπής λειτουργίας

| Σφάλμα | Χαρακτηριστικά στατικού μανομετρικού | | | Χαρακτηριστικά στατικής ροπής | | | Δυναμική σημείου shut-off | |
|---|---|-----|-----|----------------------------------|----|----|------------------------------|----|
| | hnn | hvn | hnv | K0 | K1 | K2 | Jp | km |
| φθορά στο διάκενο | -- | - | ++ | 0 | + | ++ | 0 | ++ |
| μικρές αποθέσεις στην έξοδο της περωτής | - | 0 | ++ | + | + | 0 | 0 | 0 |
| εναποθέσεις στην είσοδο της περωτής | - | ++ | ++ | 0 | 0 | + | 0 | 0 |

| | | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| λειαντική φθορά στην έξοδο της περωτής | + | + | 0 | 0 | 0 | + | 0 | 0 |
| σπασμένη πτέρυγα | + | 0 | - | 0 | - | + | + | + |
| σπηλαίωση στην είσοδο της περωτής | - | - | 0 | 0 | 0 | - | 0 | + |

- 2) Φθορά στην έξοδο της περωτής. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με διαφορετικά σφάλματα της περωτής, από τα οποία η φθορά στην έξοδο της περωτής συζητείται περαιτέρω εδώ. Η λειαντική φθορά μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση στην πλευρά πίεσης των λεπίδων. Αυτό έχει παρόμοιο αποτέλεσμα με το ακόνισμα των πτερυγίων: Η μείωση του πλάτους του πτερυγίου στην έξοδο έχει θετική επίδραση στις συνθήκες ροής και έτσι πρώτα αυξάνει το μανομετρικό της αντλίας. Επομένως, το αυξημένο μανομετρικό της αντλίας δεν είναι πάντα ένδειξη βελτιωμένης κατάστασης της αντλίας. Η επίδραση στις παραμέτρους είναι κυρίως μια αύξηση στα h_{nn} , h_{nv} και k_2 .
- 3) Αποθέσεις στην είσοδο της περωτής. Αυτές μπορεί να παρεμποδίσουν σοβαρά τη λειτουργία μιας αντλίας και σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε πλήρη αστοχία της αντλίας. Σε πολλές περιπτώσεις αυτές οι αποθέσεις αποτελούνται από οργανικά απόβλητα, αλλά μπορεί επίσης να υπάρξει αργή καθίζηση από χημικές αντιδράσεις, ειδικά εάν η αντλία έχει ακινητοποιηθεί. Επομένως, η αναγνώριση αυτού του σφάλματος είναι ενδιαφέρουσα για τον περιοδικό έλεγχο των αντλιών αναμονής, ειδικά στη χημική βιομηχανία. Μια μερική απόφραξη της εισόδου της αντλίας εκδηλώνεται κυρίως σε ονομαστικό φορτίο ή υπερφόρτωση, όπως φαίνεται στην εικόνα 38. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων υπήρχαν πρώτα μερικές κλωστές στερεωμένες στην είσοδο των λεπίδων και μετά πολλές κλωστές. Και στις δύο περιπτώσεις, μπορεί να παρατηρηθεί μια καθορισμένη απόκλιση της χαρακτηριστικής καμπύλης της αντλίας. Υπήρξε έντονη αύξηση της παραμέτρου h_{nv} και μείωση της h_{nn} .



Εικόνα 38 Επίδραση των εναποθέσεων στην είσοδο της περωτής στο χαρακτηριστικό μανομετρικού ροής. Διακεκομμένη γραμμή: χαρακτηριστικό αναφοράς. 1 μικροκαταθέσεις? 2 μεγάλες καταθέσεις

Η στατιστική αξιολόγηση της προκύπτουσας συμπεριφοράς παραμέτρων έγινε για να γίνει διάκριση μεταξύ κανονικών τυχαίων διακυμάνσεων παραμέτρων και σημαντικών διακυμάνσεων σε περίπτωση σφάλματος. Ο Πίνακας 5 συνοψίζει τα αποτελέσματα ορισμένων πειραμάτων. Μπορεί να φανεί ότι η κύρια υδραυλική βλάβη λόγω φθοράς και διάβρωσης μπορεί να ανιχνευθεί ξεκάθαρα. Εάν ληφθεί υπόψη το μέγεθος των συμπτωμάτων, τα σφάλματα μπορούν να απομονωθούν. Αυτές οι έρευνες έχουν δείξει ότι μια αντλία σταθερής ταχύτητας μπορεί να διαγνωστεί με εκτίμηση παραμέτρων των χαρακτηριστικών με αλλαγή θέσης βαλβίδας και με πειράματα διακοπής λειτουργίας. Καθώς η βλάβη από τη διάβρωση είναι αργά εξελισσόμενη φύσης που συνήθως δεν αλλάζει σημαντικά τη λειτουργία της αντλίας, η διάγνωση βάσει μοντέλου με εκτίμηση παραμέτρων παρέχει μια αποτελεσματική μέθοδο για την εφαρμογή ενός χρονοδιαγράμματος πρόβλεψης συντήρησης

Η εφαρμογή της εκτίμησης παραμέτρων για την ανίχνευση σφαλμάτων φυγοκεντρικών αντλιών διερευνήθηκε επίσης. Χρησιμοποιώντας τη βασική εξίσωση στατικής αντλίας υπολογίστηκαν τρεις παράμετροι για διαφορετικές θέσεις μιας βαλβίδας ροής. Τα εναπομείναντα μικρά σφάλματα στο προκύπτουν μανομετρικό εξόδου προσεγγίζονται στη συνέχεια με ένα πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο perceptron. Αποκλίσεις του μετρούμενου μανομετρικού στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των παραμέτρων απόκλισης. Οι αποκλίσεις αυτών των τριών παραμέτρων επιτρέπουν στη συνέχεια να διακρίνει κανείς μεταξύ σφαλμάτων του ρότορα όπως εναποθέσεις, σπασμένο πτερύγιο, διάβρωση σπηλαίωσης και φθορά του διακένου. Η επίδραση της θερμοκρασίας του υγρού στην ακρίβεια του μοντέλου είναι παρατηρήσιμη για

$20^{\circ}\text{C} \leq T_{f1} \leq 80^{\circ}\text{C}$ και είναι, ωστόσο, αμελητέα για την τελική ταξινόμηση σφαλμάτων. Ως εκ τούτου, ελήφθησαν παρόμοια αποτελέσματα όπως περιεγράφηκε παραπάνω.

β) Δυναμική λειτουργία για σταδιακές αλλαγές ταχύτητας

Η φυγόκεντρη αντλία κινείται τώρα από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος ελεγχόμενης ταχύτητας και αντλεί νερό μέσω ενός κυκλώματος κλειστού σωλήνα. Τόσο ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος όσο και η αντλία θεωρούνται πλέον ως μονάδα.

Τα μετρούμενα σήματα είναι: U_2 , τάση οπλισμού. I_2 , ρεύμα οπλισμού. dV/dt , ταχύτητα ροής όγκου; ω , γωνιακή ταχύτητα; H , συνολικό μανομετρικό αντλίας.

Οι βασικές εξισώσεις μετά από κάποιες απλοποιητικές υποθέσεις είναι

α) κύκλωμα οπλισμού

$$L_2 \frac{dI_2(t)}{dt} = -R_2 I_2(t) - \Psi \omega(t) + U_2(t) \quad (35)$$

β) μηχανική κινητήρα και αντλίας

$$J_P \frac{d\omega}{dt} = \Psi I_2(t) - M_{f0} - \rho g h_{th1} \omega(t) \dot{V}(t) \quad (36)$$

γ) υδραυλικά της αντλίας, [6.26]

$$H(t) = h_{nn} \omega^2(t) - h_{nv} \omega(t) \dot{V}(t) - h_{vv} \dot{V}^2(t) = h'_{nn} \dot{V}^2(t) \quad (37)$$

Σε αυτήν την περίπτωση και οι τρεις όροι μπορούν και πάλι να συγκεντρωθούν, καθώς το dV/dt είναι ανάλογο του ω .

δ) υδραυλικά του σωλήνα

$$a_F \frac{d\dot{V}(t)}{dt} = -h_{rr} \dot{V}^2(t) + H(t) \quad (38)$$

Το συνολικό μοντέλο είναι βασικά μη γραμμικό αλλά γραμμικό στις παραμέτρους που πρέπει να εκτιμηθούν. Επομένως, η εκτίμηση παραμέτρων ελαχίστων τετραγώνων μπορεί να εφαρμοστεί στην άμεση, ρητή μορφή της. Τα μοντέλα περιέχουν εννέα συντελεστές διεργασίας:

$$\mathbf{p}^T = [L_2, R_2, \Psi, J_P, M_{f0}, h_{th1}, h'_{nn}, a_F, h_{rr}]. \quad (39)$$

Για την εκτίμηση των παραμέτρων οι εξισώσεις φέρονται στη μορφή

$$y_j(t) = \Psi_j^T(t) \hat{\Theta}_j, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (40)$$

όπου

$$\left. \begin{aligned} y_1(t) &= dI_2(t)/dt & y_2(t) &= d\omega(t)/dt \\ y_3(t) &= H(t) & y_4(t) &= d\dot{V}(t)/dt \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Οι παράμετροι του μοντέλου

$$\hat{\Theta}^T = [\hat{\Theta}_1^T, \hat{\Theta}_2^T, \hat{\Theta}_3^T, \hat{\Theta}_4^T] \quad (42)$$

εκτιμήθηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων με τη μορφή διακριτού φιλτραρίσματος τετραγωνικής ρίζας (DSFI). Με βάση τις εκτιμήσεις των παραμέτρων του μοντέλου, και οι εννέα συντελεστές διεργασίας του \mathbf{p} θα μπορούσαν να υπολογιστούν μοναδικά.

Ο κινητήρας DC ελέγχεται από έναν μετατροπέα AC/DC με διαδοχικό έλεγχο της ταχύτητας και του ρεύματος οπλισμού ως βοηθητική μεταβλητή ελέγχου. Η μεταβλητή που χειρίζεται είναι το ρεύμα οπλισμού U_2 . Ένας μικροϋπολογιστής DEC-LSI 11/23 συνδέθηκε διαδικτυακά στη διαδικασία. Για τα πειράματα η τιμή αναφοράς $W(t)$ του ρυθμιστή ταχύτητας έχει αλλάξει σταδιακά με μέγεθος 750 rpm κάθε 2 λεπτά. Το σημείο λειτουργίας ήταν $n = 1000$ rpm, $H = 5:4$ m και $dV/dt = 6:48$ m³/h. Η δειγματοληψία των σημάτων έλαβε χώρα με χρόνο δειγματοληψίας $T_0 = 5$ ms και 20 ms σε περίοδο 2,5 και 10 δευτερολέπτων, έτσι ώστε να ληφθούν 500 δειγματοληψίες. Αυτές οι μετρήσεις αποθηκεύτηκαν στη μνήμη πυρήνα πριν από την εκτίμηση. Ως εκ τούτου, ένα σύνολο παραμέτρων και συντελεστών διεργασίας λαμβανόταν κάθε 120 δευτερόλεπτα. Για τη φάση της εκπαίδευσης χρησιμοποιήθηκαν 50 σετ συντελεστών. Ο Πίνακας

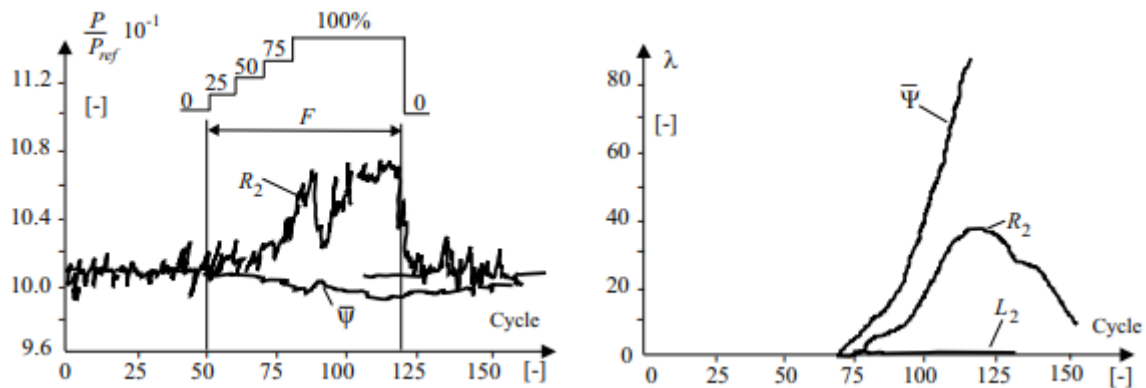
6 δίνει μια επισκόπηση των σημαντικών αλλαγών των συντελεστών διεργασίας για 19 διαφορετικά τεχνητά δημιουργούμενα σφάλματα.

Πίνακας 6 Εντοπίστηκαν συμπτώματα για τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος και τη φυγοκεντρική αντλία με βάση την εκτίμηση παραμέτρων για σταδιακές αλλαγές ταχύτητας.

| Fault | Symptom | | | | | | | | |
|--|---------|-------|--------|-------|----------|-----------|-----------|-------|----------|
| | L_2 | R_2 | Ψ | J_P | M_{f0} | h_{th1} | h'_{nn} | a_F | h_{rr} |
| A1: exc. resistance increase | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A2: armature resistance increase | 0 | + | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A3: affected brushes | - | + | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A4: new brushes | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A5: insufficient cooling | 0 | + | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A6: cold drive | 0 | 0 | + | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| K1: shaft displacement | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P1a: bearing without grease | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P1b: bearing with dirt | 0 | 0 | 0 | + | + | + | 0 | 0 | 0 |
| P2: side thrust compensation defective | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P3: splitting clearance increase | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | + | - | 0 | 0 |
| P4: affected impeller | 0 | 0 | 0 | - | 0 | + | - | 0 | 0 |
| P5a: pump casing defective I | 0 | 0 | 0 | 0 | + | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P5b: pump casing defective II | 0 | 0 | 0 | 0 | - | + | 0 | + | 0 |
| F1a: little cavitation | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | + | 0 |
| F1b: medium cavitation | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | + | - | + | - |
| F2: insufficient venting | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | + | - | - | - |
| F3: fluid temperature increase | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | - |
| F4: valve position increase | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | + | 0 | 0 | + |

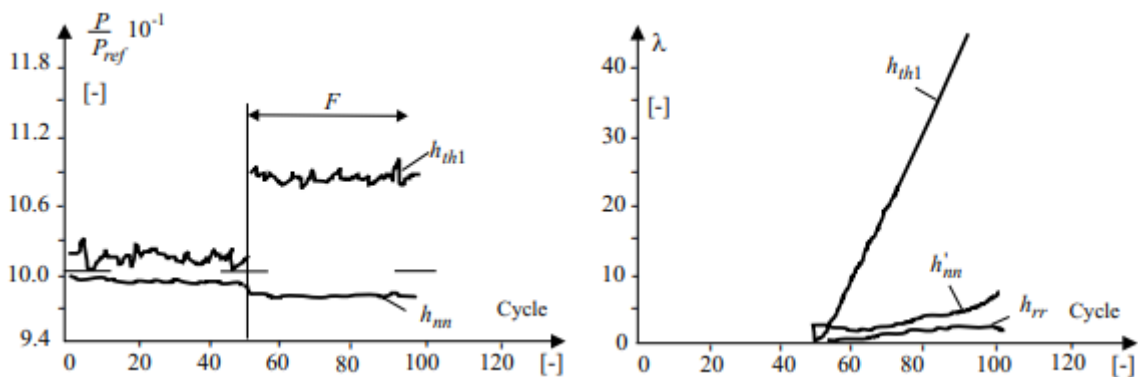
Μια επιλογή πειραμάτων θα εξεταστεί τώρα με περισσότερες λεπτομέρειες

1) Σφάλμα A5: Διαταραχή της ψύξης του αέρα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος, Εικόνα 39. Μια σταδιακή μείωση (20%, 50%, 75%, 100%) της ροής αέρα (π.χ. λόγω απόφραξης από βρωμιά) οδηγεί σε αλλαγή θερμοκρασίας ολόκληρου του κινητήρα και επομένως σε αύξηση της αντίστασης στο κύκλωμα οπλισμού και στο κύκλωμα διέγερσης. Επομένως, το R_2 αυξάνεται και ο δεσμός μαγνητικής ροής Ψ μειώνεται. Αυτό είναι ένα παράδειγμα όπου οι συντελεστές κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις.



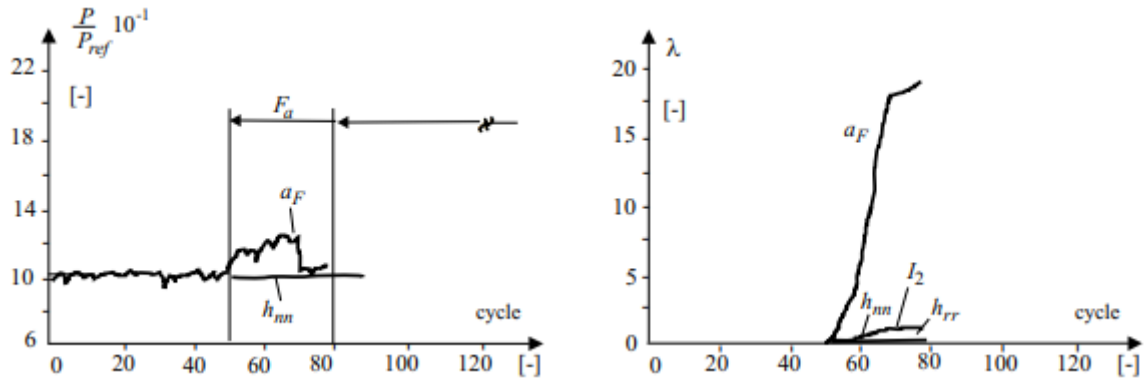
Εικόνα 39 Αλλαγή συντελεστών διεργασίας για μείωση της ροής του αέρα ψύξης. είναι η ποσότητα δοκιμής μιας δοκιμής απόφασης Bayes, [6.6]

2) Σφάλμα P3: Αύξηση του διακεκομμένου ανοίγματος της φυγοκεντρικής αντλίας, Εικόνα 40. Η αύξηση της απόστασης της σχισμής μεταξύ του τροχού της αντλίας και του περιβλήματος της αντλίας αυξάνει τις εσωτερικές απώλειες. Επομένως, το h_{th1} αυξάνεται και το $h_{0\,nn}$ μειώνεται.



Εικόνα 40 Αλλαγή των συντελεστών διεργασίας μετά την αύξηση της απόστασης της σχισμής της αντλίας

3) Σφάλμα F1a: Σπηλαίωση στη φυγόκεντρη αντλία, Εικόνα 41. Μια μικρή σπηλαίωση και δημιουργία φυσαλίδων αερίου στην αντλία με μείωση της πίεσης εισόδου υποδεικνύεται από έναν αυξανόμενο συντελεστή a_F , ο οποίος είναι ανάλογος με τη σταθερά χρόνου του συστήματος σωλήνων.

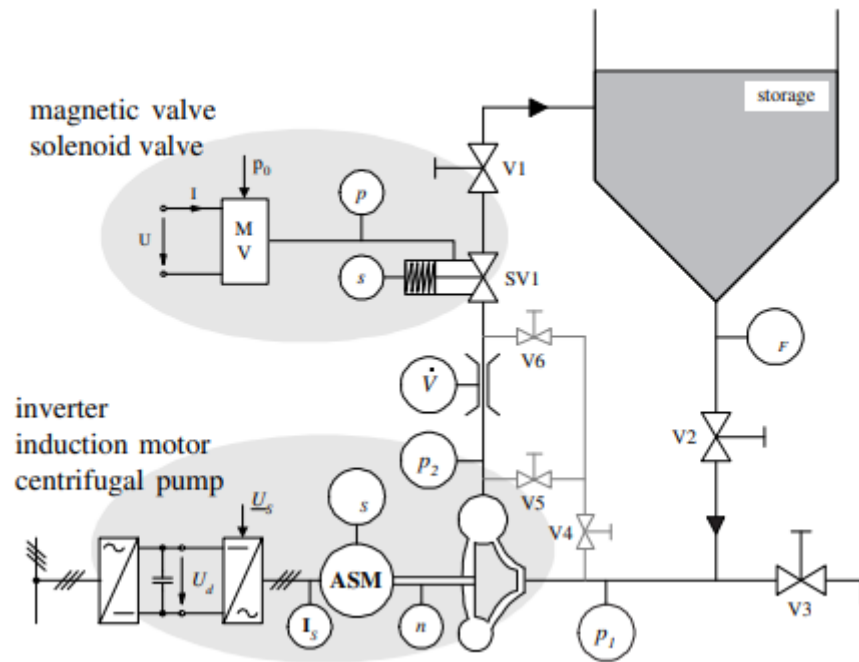


Εικόνα 41 Αλλαγή των συντελεστών διεργασίας σε περίπτωση μικρής σπηλαίωσης και δημιουργίας φυσαλίδων αερίου στην αντλία

Αυτά τα πειράματα έχουν δείξει ότι σε όλες τις περιπτώσεις, όπου θα μπορούσε να αναμένεται σημαντική αλλαγή των συντελεστών διεργασίας, το σφάλμα θα μπορούσε να ανιχνευθεί. Με βάση τα μοτίβα που δίνονται στον Πίνακα 6 μπορούν να απομονωθούν τα περισσότερα από τα σφάλματα. Τουλάχιστον τα σφάλματα του κινητήρα είναι ξεκάθαρα απομονωμένα από σφάλματα αντλίας.

5.1.4 Ανίχνευση σφαλμάτων με μη γραμμικές εξισώσεις ισοτιμίας και εκτίμηση παραμέτρων

Προκειμένου να αναπτυχθεί μια διαδικτυακή μέθοδος ανίχνευσης και διάγνωσης σφαλμάτων για ένα φυγοκεντρικό σύστημα αντλίας-σωλήνων-δεξαμενής σε μεγάλο εύρος λειτουργίας, εξετάζεται μια εγκατάσταση σύμφωνα με τις εικόνες 42,43.



Εικόνα 42 Εγκατάσταση φυγοκεντρικής αντλίας-σωλήνα-δεξαμενής με μετρήσεις: Κινητήρας AC: Siemens 1 LA 5090-2AA (κινητήρας) $P_N = 1.5 \text{ kW}$; $n_w = 2900 \text{ rpm}$; Μετατροπέας συχνότητας: Lust MC 7404; κυκλική αντλία: Hilge, $H_{max} = 130 \text{ m}$; $dV/dt = 14 \text{ m}^3/\text{h}$; $P_{max D} 5:5 \text{ kW}$



Εικόνα 43 Φωτογραφία της διερευνηθείσας μονάδας φυγοκεντρικής αντλίας-σωλήνων-δεξαμενής

Η αντλία κινείται από έναν επαγωγικό κινητήρα μεταβλητής ταχύτητας με τροφοδοσία αντιστροφέα (σκίουροκλωβό), ο οποίος ελέγχεται στην ταχύτητα από έναν ελεγκτή πεδίου. Το διάνυσμα ρεύματος στάτορα μετριέται και μετασχηματίζεται στο πλαίσιο αναφοράς που ορίζεται από τη ροή του ρότορα που λαμβάνεται χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο μοντέλο. Η ροπή του κινητήρα μπορεί στη συνέχεια να προσδιοριστεί από

$$M_{mot} = k_T \Psi_R I_{sq} \quad (43)$$

όπου το k_T είναι γνωστό από το φύλλο δεδομένων κινητήρα.

Περαιτέρω μετρήσεις αποτελούν τα:

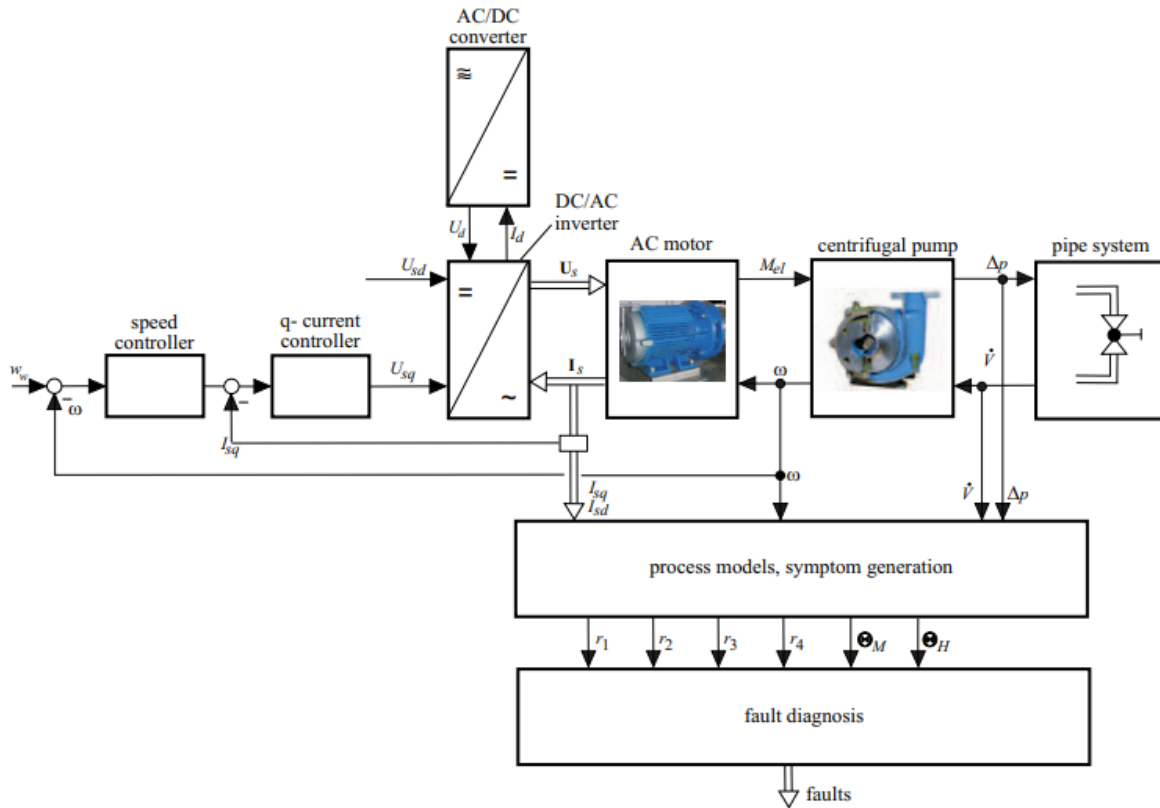
p_1 πίεση είσοδου αντλίας

p_2 πίεση έξοδου αντλίας

ω ταχύτητα αντλίας

dV/dt ροή όγκου.

Η εικόνα 44 δείχνει τη συνολική διαμόρφωση του εξεταζόμενου συστήματος αντλίας-σωλήνων. Τα μαθηματικά μοντέλα της αντλίας που χρησιμοποιούνται πρέπει να προσαρμοστούν στο σύστημα αντλίας-σωλήνων.



Εικόνα 44 Σχέδιο του συστήματος ανίχνευσης και διάγνωσης σφαλμάτων βάσει μοντέλου για μια φυγόκεντρη αντλία ελεγχόμενης ταχύτητας με εξισώσεις ισοτιμίας και εκτίμηση παραμέτρων

Με βάση τις θεωρητικά προερχόμενες εξισώσεις από την Ενότητα 6.1.2, χρησιμοποιούνται εδώ τα ακόλουθα μοντέλα:

$$H(t) = h_{nn}\omega^2(t) - h_{nv}\omega(t)\dot{V}(t) - h_{vv}\dot{V}^2(t) \quad (44)$$

$$H(t) = \frac{p_2(t) - p_1(t)}{\rho g} = \frac{\Delta p(t)}{\rho g} \quad (45)$$

$$H(t) = a_{Fd}\dot{V}(t)/dt + h_{rr}\dot{V}^2(t) \quad (46)$$

$$J_p\dot{\omega}(t) = M_{mot}(t) - M_{th}(t) - M_f(t) \quad (47)$$

$$M_{th}(t) = M_{th1}\omega(t)\dot{V}(t) - M_{th2}\dot{V}^2(t) \quad (48)$$

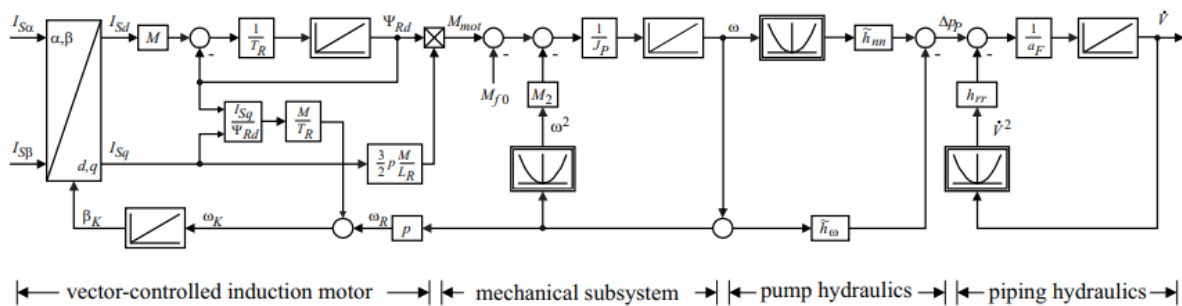
$$M_f(t) = M_{f0} \text{sign } \omega(t) + M_{f1}\omega(t) \quad (49)$$

Μια σύγκριση αυτών των θεωρητικά προερχόμενων εξισώσεων έδειξε ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες απλουστευμένες σχέσεις:

$$\Delta p(t) = \tilde{h}_{nn}\omega^2(t) - \tilde{h}_\omega\omega(t) \quad (50)$$

$$J_P\dot{\omega}(t) = M_{mot}(t) - M_{f0}(t) - M_2\omega^2(t) \quad (51)$$

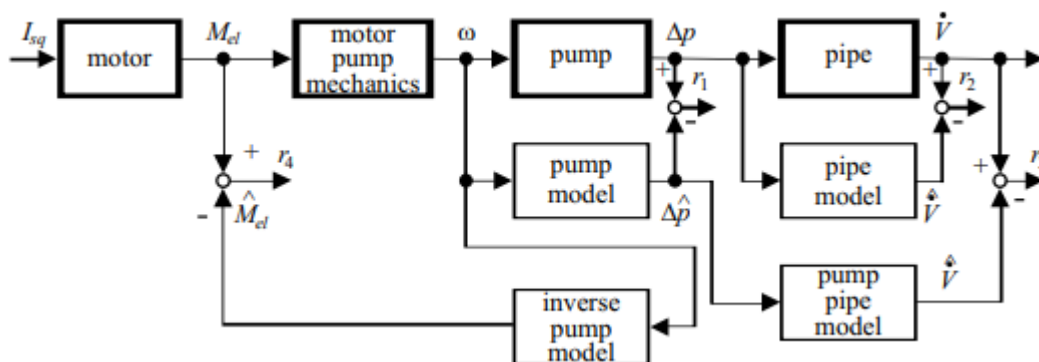
Αυτά τα μοντέλα συμφωνούν επίσης με ένα μεγαλύτερο σύστημα αντλίας-σωλήνων. Η εικόνα 45 δείχνει το διάγραμμα ροής σήματος που προκύπτει.



Εικόνα 45 Διάγραμμα ροής σήματος του απλοποιημένου μη γραμμικού συνολικού συστήματος κινητήρα-αντλίας-σωλήνων

α) Μέτρηση των I ; ω ; Δp ; dV/dt

Με βάση αυτά τα μοντέλα και μετά από διακριτοποίηση, μπορούν να ληφθούν τα ακόλουθα υπολείμματα, (Εικόνα 46) :



Εικόνα 46 Παράγωγη υπολειμμάτων με εξισώσεις ισοτιμίας για το σύστημα αντλίας-σωλήνων

Μοντέλο στατικής αντλίας:

$$r_1(k) = \Delta p(k) - w_1 \omega^2(k) + w_2 \omega(k) \quad (52)$$

Μοντέλο δυναμικού σωλήνα

$$r_2(k) = \dot{V}(k) - w_3 - w_4 \sqrt{\Delta \hat{p}(k)} - w_5 \dot{V}(k-1) \quad (53)$$

Μοντέλο δυναμικής αντλίας-σωλήνα

$$r_3(k) = \dot{V}(k) - w_3 - w_4 \sqrt{\Delta \hat{p}(k)} - w_5 \dot{V}(k-1) \quad (54)$$

$$\Delta \hat{p}(k) = w_1 \omega^2(k) - w_2 \omega(k) \quad (55)$$

Μοντέλο δυναμικής αντίστροφης αντλίας

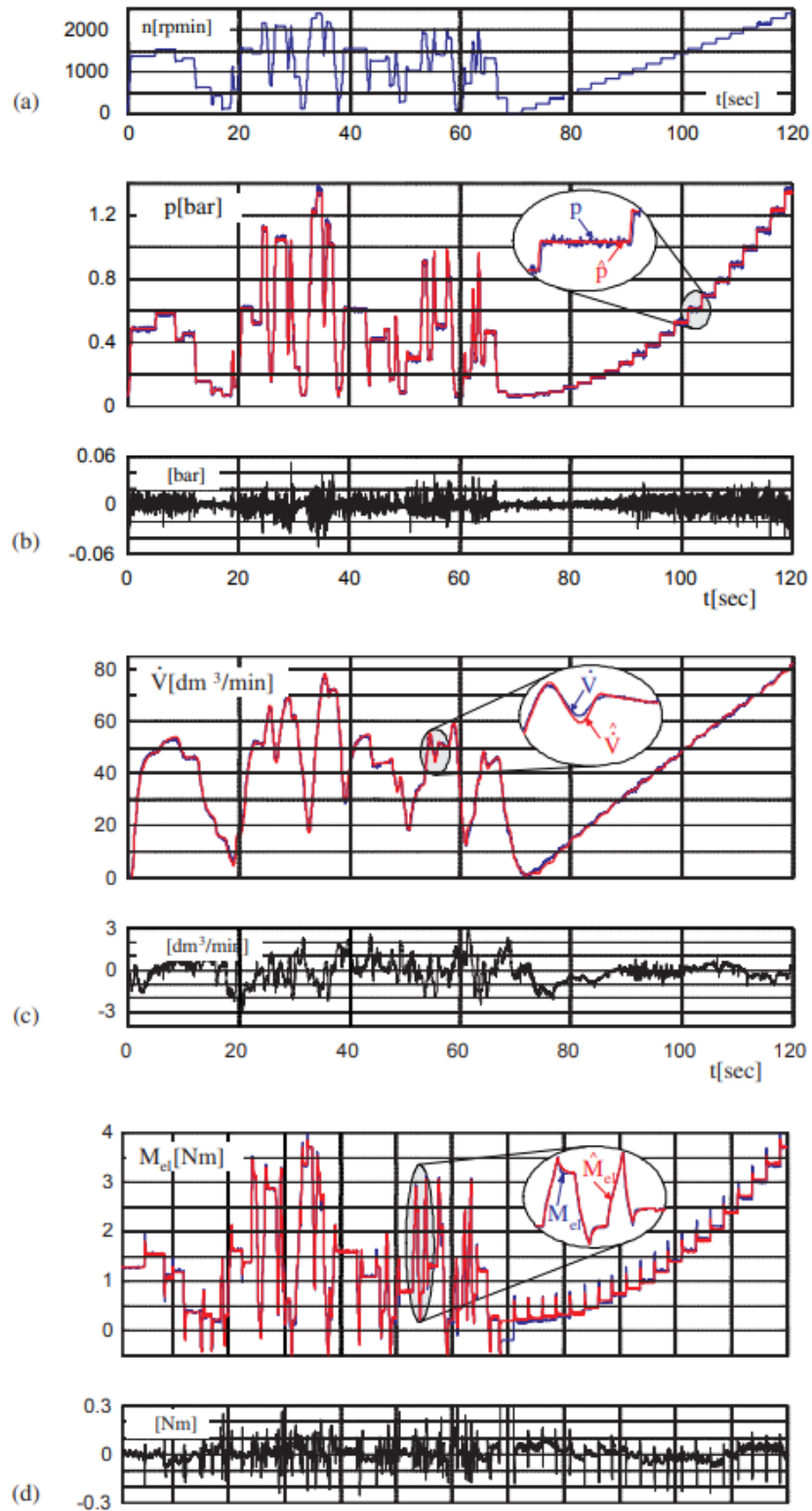
$$r_4(k) = M_{mot}(k) - w_6 - w_7 \omega(k) - w_8 \omega(k-1) - w_9 \omega^2(k) - w_{10} M_{el}(k-1) \quad (56)$$

Τα υπολείμματα $r_1(k)$, $r_2(k)$ και $r_3(k)$ είναι υπολείμματα εξόδου που ακολουθούν συγκρίνοντας τα μετρούμενα $\Delta p(k)$ και $dV/dt(k)$ με τις αντίστοιχες εξόδους του μοντέλου. Ωστόσο, το $r_4(k)$ είναι ένα υπόλοιπο εισόδου, επειδή το $M_{mot}(k)$ συγκρίνεται με την έξοδο ενός μοντέλου αντίστροφης αντλίας. Τα $r_2(k)$ και $r_3(k)$ περιλαμβάνουν δυναμική αισθητήρα ροής πρώτης τάξης. Ο χρόνος δειγματοληψίας είναι 10 ms.

Οι παράμετροι $w_1 \dots w_{10}$ προκύπτουν απευθείας από γνωστά φυσικά δεδομένα που περιγράφονται στις παραπάνω εξισώσεις ή εκτιμώνται, π.χ. με μεθόδους ελαχίστων τετραγώνων που βασίζονται στις μετρήσεις. Ωστόσο, οι παράμετροι εξαρτώνται, ειδικά για χαμηλή ταχύτητα στο σημείο λειτουργίας. Επομένως, για κάθε υπόλοιπο χρησιμοποιείται μια προσέγγιση πολλαπλών μοντέλων. Έχει αποδειχθεί ότι αρκεί να ληφθούν υπόψη οι παράμετροι που εξαρτώνται μόνο από τη γωνιακή ταχύτητα.

Το σύστημα αντλίας οδηγήθηκε με την αλλαγή της ταχύτητας σύμφωνα με ένα ρυθμισμένο πλάτος PRBS σε όλο το εύρος λειτουργίας και με το τοπικό γραμμικό μοντέλο δικτύου

LOLIMOT οι παράμετροι καθορίστηκαν χρησιμοποιώντας τρία τοπικά μοντέλα. Η εικόνα 47 δείχνει μια σύγκριση μετρούμενων και ανακατασκευασμένων τιμών με τα μοντέλα. Ως εκ τούτου, μπορεί να δηλωθεί μια πολύ καλή συμφωνία.



Εικόνα 47 Μετρημένα σήματα του συστήματος αντλίας-σωλήνα, έξοδοι μοντέλου LOLIMOT και οι διαφορές τους: α) γωνιακή ταχύτητα. β) διαφορά πίεσης παροχής. γ) ρυθμός ροής. δ) ροπή κινητήρα AC

Στο σύστημα αντλίας-σωλήνα παρουσιάστηκαν τα ακόλουθα σφάλματα:

- Βλάβες αισθητήρα μετατόπισης ω ; dV/dt ; p_1 ; p_2
- Αυξημένη αντίσταση με τμηματικό κλείσιμο μιας βαλβίδας μετά την αντλία
- Σπηλαιώση με τμηματικό κλείσιμο μιας βαλβίδας πριν από την αντλία
- Αύξηση τριβής ρουλεμάν με αφαίρεση γράσου και εισαγωγή επικαθήσεων σιδήρου
- Ελάττωμα της περωτής κλείνοντας ένα κανάλι ανάμεσα σε δύο πτερύγια με πυρίτιο
- Απώλειες στεγανοποίησης-κενού ανοίγοντας ένα βαλβίδα παράκαμψης
- Διαρροή μεταξύ αντλίας και μέτρησης ροής.

Ο Πίνακας 7 δείχνει τα συμπτώματα που προκύπτουν.

Πίνακας 7 Πίνακας συμπτωμάτων σφάλματος για το σύστημα αντλίας-σωλήνων που προκύπτει από την εξίσωση ισοτιμίας και την εκτίμηση παραμέτρων

| Fault | Symptoms | | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------------|---------|---------|---------|---------------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| | parity equations | | | | parameter estimates | | | | | | |
| | $ r_1 $ | $ r_2 $ | $ r_3 $ | $ r_4 $ | ΔJ_P | ΔM_{f0} | ΔM_2 | Δa_F | Δh_{rr} | Δh_{nn} | Δh_ω |
| Sensor ω | + / + + | 0 | + / + + | + / + + | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 / - | + / + + |
| Sensor \dot{V} | 0 | + / + + | + / + + | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 / - | + | 0 | 0 |
| Sensor p_1, p_2 | + / + + | + / + + | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 / + | 0 | 0 / - | + / + + |
| Gap losses | + | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | + |
| Leakage | + | + | + | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - | 0 | 0 |
| Incr. flow resist. 20–40% | + | + | + | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | + | 0 | 0 |
| Incr. flow resist. 40–60% | + | ++ | + | + | 0 | 0 | 0 | ++ | ++ | 0 | 0 |
| Incr. flow resist. 60–90% | ++ | ++ | ++ | ++ | 0 | 0 | + | ++ | ++ | 0 | 0 |
| Cavitation | + | ++ | ++ | + | 0 | 0 | + | -- | ++ | -- | ++ |
| Incr. bearing friction | 0 | 0 | 0 | + | 0 | + | + | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Impeller defect | + | + | + | + | + | 0 | 0 | - | - | - | + |

Τα υπολειμματικά των εξισώσεων ισοτιμίας μπορούν να ληφθούν χωρίς διέγερση εισόδου, δηλαδή σε λειτουργία σταθερής κατάστασης. Τα υπολειμματικά που προκύπτουν υποδεικνύουν ότι τα σφάλματα μετατόπισης του αισθητήρα, οι απώλειες στεγανοποίησης και η αυξημένη τριβή του ρουλεμάν είναι έντονα απομονωμένα. Ωστόσο, η αυξημένη αντίσταση ροής, η σπηλαιώση και το ελάττωμα του στροφείου είναι είτε ασθενώς είτε όχι απομονώσιμα. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα σφάλματα είναι ανιχνεύσιμα, αλλά μερικά από αυτά δεν μπορούν να διαφοροποιηθούν. Όπως και στην περίπτωση της δυναμικής διέγερσης, τα μη γραμμικά μοντέλα είναι πολύ ακριβή, με αποτέλεσμα παροδικές αποκλίσεις των υπολειμμάτων. Προκειμένου να αποφευχθούν υπερβολικά μεγάλα όρια, χρησιμοποιούνται προσαρμοστικά κατώφλια. Εκτός από μια σταθερή τιμή, τα κατώφλια εξαρτώνται από μια υψηλής διέλευσης φιλτραρισμένη τιμή της

ταχύτητας ω , η οποία αυξάνει το όριο σε περίπτωση αλλαγής ταχύτητας, (Wolfram, 2002), (Wolfram et al., 2001).

Μια δυναμική διέγερση με δοκιμαστικό PRBS για την ταχύτητα επιτρέπει επίσης την εκτίμηση των παραμέτρων των μοντέλων με μια αναδρομική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Οι αλλαγές αυτών των φυσικώς καθορισμένων παραμέτρων δίνονται στον Πίνακα 7 και δείχνουν ότι τώρα όλα τα σφάλματα είναι απομονωμένα και επομένως μπορούν να διαγνωστούν με συνδυασμό των δύο μεθόδων.

β) Μέτρηση των $I; \omega$

Εάν η πίεση παροχής Δp και ο ρυθμός ροής dV/dt δεν είναι μετρήσιμα, το υπολειπόμενο r_4 μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη μετρούμενη ταχύτητα ω και ρεύμα κινητήρα I_{sq} . Αυτό επιτρέπει σε κάποιον να εντοπίσει ένα σφάλμα αισθητήρα στο ω και κάποιες βλάβες της αντλίας. Η πρόσθετη εκτίμηση παραμέτρων επιτρέπει σε κάποιον να προσδιορίσει τις αποκλίσεις παραμέτρων των J_p , M_{f0} και M_2 και να απομονώσει μερικά ακόμη σφάλματα αντλίας.

Παρόμοια αποτελέσματα όπως περιγράφηκαν παραπάνω έχουν ληφθεί για μια μεγαλύτερη αντλία με $P = 3:3 \text{ kW}$ και $dV/dt_{\max} = 150 \text{ m}^3/\text{h}$ και ένα μεγαλύτερο σύστημα κυκλοφορίας σωλήνων με δύο εναλλάκτες θερμότητας. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικοί μετρητές ροής. Αυτό επέτρεψε τη δημιουργία έξι υπολειμμάτων και τεσσάρων εκτιμήσεων παραμέτρων. Μαζί με δύο διακυμάνσεις των υπολειμμάτων, μπορούσαν να ληφθούν συνολικά 13 συμπτώματα, τα οποία επέτρεψαν τη διάγνωση 11 διαφορετικών βλαβών αισθητήρων, αντλίας και συστήματος σωλήνων. Αυτά τα συμπτώματα χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για να εκπαιδεύσουν 20 ασαφείς κανόνες με τη διαδικασία SELECT αποδίδοντας 100% ακρίβεια ταξινόμησης.

Ελάχιστη μέτρηση της ροπής και της ταχύτητας v επιτρέπει σε κάποιον να εντοπίσει μερικά σφάλματα αλλά όχι να τα διαγνώσει. Με την προσθήκη ενός αισθητήρα για p_1 και p_2 ή για Δp , μπορούν να εντοπιστούν και να διαγνωστούν πολλά περισσότερα σφάλματα. Η πρόσθετη εφαρμογή ενός αισθητήρα ταχύτητας ροής έχει μικρή επίδραση στον αριθμό των ανιχνεύσιμων σφαλμάτων, αλλά επιτρέπει σε κάποιον να διαγνώσει πολλά περισσότερα σφάλματα. Αυτό δείχνει ότι η ανίχνευση σφαλμάτων βάσει μοντέλου είναι δυνατή με τρεις έως τέσσερις

αισθητήρες, αλλά ότι η διάγνωση σφαλμάτων βελτιώνεται σημαντικά με έναν επιπλέον αισθητήρα (εδώ ο ρυθμός ροής)

5.1.5 Ανίχνευση βλαβών με αισθητήρες κραδασμών

Τα περιστρεφόμενα μηχανήματα όπως οι φυγοκεντρικές και οι παλινδρομικές αντλίες δημιουργούν ορισμένες ταλαντώσεις. Στην περίπτωση των φυγοκεντρικών αντλιών, αυτές οι ταλαντώσεις δημιουργούνται από τους περιστρεφόμενους άξονες, τα περύγια των ρότορων, τα ρουλεμάν, την ανισοροπία και τις ταλαντώσεις ρευστού μέσω στροβιλισμού και δίνης ή σπηλαίωσης. Επομένως, οι προκύπτουσες συχνότητες εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής, τον ρυθμό ροής και τα ειδικά φαινόμενα ρευστού. Επομένως, είναι προφανές να ανιχνεύονται αλλαγές, δυσλειτουργίες και σφάλματα μέσω μετρήσεων κραδασμών και ταλαντώσεων, ειδικά καθώς ορισμένα σφάλματα μπορούν να ανιχνευθούν από το ανθρώπινο αυτί. Οι διαθέσιμοι αισθητήρες είναι π.χ. αισθητήρες ταχύτητας ταλάντωσης με αιωρούμενη σεισμική μάζα χαμηλής συχνότητας και επαγωγικά παραγόμενη τάση ή επιταχυνσιόμετρα ταλάντωσης με αιωρούμενη σεισμική μάζα υψηλής συχνότητας ή με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες με μικρή μάζα και μεγάλη ακαμψία ελατηρίου

Κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών αναφέρθηκαν αρκετές έρευνες για τον εντοπισμό σφαλμάτων με αισθητήρες κραδασμών.

Η εφαρμογή τεσσάρων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων επιτάχυνσης σε συνδυασμό με δύο αισθητήρες Hall φάσης πίεσης και ρεύματος κινητήρα για την ανίχνευση σφαλμάτων διερευνήθηκε. Η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 125 kHz σε χρονικό διάστημα 1,4 δευτερολέπτων ή 70 περιστροφών της αντλίας με σταθερή ταχύτητα (3000 rpm). Η αξιολόγηση του μεταφερόμενου θορύβου της δομής έγινε στις φασματικές περιοχές 5–10 kHz, 10–15 kHz και 15–20 kHz. Η διέλευση των περυγίων του ρότορα έχει ως αποτέλεσμα μια βασική συχνότητα στα φάσματα πίεσης και επηρεάζεται από σφάλματα όπως η σπηλαίωση και τα σπασμένα περύγια. Αρκετές βλάβες αντλίας θα μπορούσαν να διαφοροποιηθούν με μεθόδους ταξινόμησης και κάθε ένας αισθητήρας επιτάχυνσης για την πίεση και το περίβλημα της αντλίας μαζί με το ρεύμα φάσης του κινητήρα φαίνεται να είναι επαρκής.

Έχουν επίσης διερευνηθεί οι διακυμάνσεις της πίεσης και του περιβλήματος χρησιμοποιώντας ανάλυση σήματος για να συνδυαστεί με νευροασφαφείς μεθόδους. Η ανάλυση Fourier δύο ορθογώνιων αισθητήρων δόνησης για την ανίχνευση κινήσεων του άξονα σε σχέση με τα ρουλεμάν ολίσθησης έδειξε ανισορροπία, μπλοκάρισμα και φθορά.

Μια σειρά δημοσιεύσεων σχετικά με την ανάλυση του θορύβου που μεταδίδεται από τη δομή με διαφορετικά είδη αισθητήρων επιτάχυνσης στα περιβλήματα της αντλίας ή ενσωματωμένους στο κέλυφος συγκράτησης των αντλιών μαγνητικής ζεύξης (Nuglisch, 2006). Δείχνουν την εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων ανάλυσης σήματος, τη δημιουργία χαρακτηριστικών και μηχανογραφικών μεθόδων μάθησης. Πολλά σφάλματα θα μπορούσαν να ανιχνευθούν και να ταξινομηθούν για μια συγκεκριμένη ταχύτητα αντλίας. Ωστόσο, η εφαρμογή για αντλίες μεταβλητής ταχύτητας και η δυνατότητα μεταφοράς σε άλλα μεγέθη και τύπους αντλιών δεν φαίνεται να είναι άμεσα δυνατή. Επίσης, είναι σημαντική η εύρεση των καλύτερων θέσεων για την τοποθέτηση των επιταχυνσιομέτρων.

Παράλληλα αναφέρεται η ανάλυση συχνότητας της πίεσης και του ρυθμού ροής και δείχνει πώς αλλάζουν τα φάσματα συχνοτήτων λόγω βλάβης στην περωτή, σπηλαίωσης, ροής δύο φάσεων και περιορισμών.

Μια ανάλυση υψηλής συχνότητας του ρεύματος του κινητήρα επιτρέπει σε κάποιον να αποκτήσει πληροφορίες για στοχαστικές και περιοδικές διαταραχές της ροής. Μια εφαρμογή για αντλίες υποβρύχιων πηγαδιών έχει δείξει ότι το φάσμα συχνοτήτων ρεύματος μεταξύ 5 και 100 Hz επιτρέπει σε κάποιον να ανιχνεύσει αυξημένο διάκενο ρουλεμάν, αποτελέσματα ανακυκλοφορίας σε ροές χαμηλού όγκου και συμφορήσεις.

Το πλεονέκτημα των αισθητήρων κραδασμών είναι ότι μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα στο περίβλημα της αντλίας, εάν έχει βρεθεί η κατάλληλη θέση. Ωστόσο, οι δονήσεις που δημιουργούνται από τον ρότορα και από το ρέον μέσο είναι ανάλογες με το τετράγωνο της ταχύτητας και του ρυθμού ροής. Επομένως τα πλάτη των σημάτων είναι σχετικά μικρά για χαμηλότερες ταχύτητες και μερικό φορτίο και τείνουν να μην δίνουν χρήσιμα σήματα. Επιπλέον, η ανάλυση των σημάτων με FFT, παραμετρικά μοντέλα ARMA ή κυματίδια χρειάζεται δειγματοληψία υψηλής συχνότητας και υπολογιστική ισχύ. Υπόκειται περαιτέρω σε θόρυβο και δονήσεις από άλλο εξοπλισμό της εγκατάστασης. Η ανάλυση κραδασμών των αντλιών

περιορίζεται καταρχήν στην ανίχνευση σφαλμάτων που δημιουργούν ταλαντώσεις μέσω της περιστροφής, της ροής και των ειδικών φαινομένων ρευστού, όπως η σπηλαιώση. Επειδή πολλά άλλα σφάλματα δεν μπορούν να εντοπιστούν, θα πρέπει να συνδυαστεί με άλλες μεθόδους ανίχνευσης, εάν υπάρχουν άλλες μετρήσεις. Εάν, ωστόσο, οι αντλίες δεν είναι καλά εξοπλισμένες και λειτουργούν με σταθερή ταχύτητα, η ανάλυση κραδασμών είναι μια πρώτη επιλογή.

6. Δημιουργία αλγορίθμου και αποτελέσματα προσομοίωσης

Αυτό το παράδειγμα δείχνει μια προσέγγιση βασισμένη σε μοντέλο για τον εντοπισμό και τη διάγνωση διαφορετικών τύπων βλαβών που συμβαίνουν σε ένα σύστημα άντλησης. Το παράδειγμα ακολουθεί την ανάλυση της φυγόκεντρης αντλίας που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα.

6.1 Επίβλεψη αντλίας και ανίχνευση σφαλμάτων

Οι αντλίες είναι απαραίτητος εξοπλισμός σε πολλές βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας και των χημικών, των ορυκτών και της εξόρυξης, της κατασκευής, της θέρμανσης, του κλιματισμού και της ψύξης. Οι φυγόκεντρες αντλίες χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ρευστών με τη μετατροπή της περιστροφικής κινητικής ενέργειας στην υδροδυναμική ενέργεια της ροής του ρευστού. Η περιστροφική ενέργεια προέρχεται συνήθως από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης ή έναν ηλεκτροκινητήρα. Το υγρό εισέρχεται στην περωτή της αντλίας κατά μήκος ή κοντά στον άξονα περιστροφής και επιταχύνεται από την περωτή, ρέοντας ακτινικά προς τα έξω σε έναν διαχύτη.

Οι αντλίες παρουσιάζουν ζημιά στα υδραυλικά ή μηχανικά τους εξαρτήματα. Τα πιο συχνά ελαττωματικά εξαρτήματα είναι τα στεγανοποιητικά δακτυλίου ολίσθησης και τα ρουλεμάν, αν και οι αστοχίες σε άλλα εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένου του κινητήρα κίνησης, των περυγίων της περωτής και των ρουλεμάν ολίσθησης δεν είναι επίσης ασυνήθιστες. Ο παρακάτω πίνακας παραθέτει τους πιο συνηθισμένους τύπους βλαβών.

Σπηλαιώση: Ανάπτυξη φυσαλίδων ατμού μέσα στο υγρό εάν η στατική πίεση πέσει κάτω από την πίεση ατμών. Οι φυσαλίδες καταρρέουν απότομα οδηγώντας σε ζημιά στους τροχούς της λεπίδας.

Αέριο στο ρευστό: Μια πτώση πίεσης οδηγεί σε διαλυμένο αέριο στο ρευστό. Προκύπτει διαχωρισμός αερίου και υγρού και κάτω κεφαλή.

Dry Run (ξηρή λειτουργία): Η έλλειψη υγρού οδηγεί σε έλλειψη ψύξης και υπερθέρμανση του ρουλεμάν. Σημαντικό για την αρχική φάση.

Διάβρωση (Erosion): Μηχανική βλάβη στους τοίχους λόγω σκληρών σωματιδίων ή σπηλαιώσης

Διάβρωση (Corrosion): Βλάβη από επιθετικά υγρά

Φθορά ρουλεμάν: Μηχανική βλάβη λόγω κούρασης και τριβής μετάλλων, δημιουργία κοιλωμάτων και σχισμάτων

Βούλωμα οπών ανακούφισης: Οδηγεί σε υπερφόρτωση/ζημιά αξονικών ρουλεμάν

Βούλωμα στην σύνδεση στεγανοποιητικών δακτυλίων ολίσθησης: Οδηγεί σε υψηλότερη τριβή και μικρότερη απόδοση

Αύξηση σπασμένων στεγανοποιητικών : Οδηγεί σε απώλεια απόδοσης

Εναποθέσεις: Οι εναποθέσεις οργανικού υλικού ή μέσω χημικών αντιδράσεων στην είσοδο ή την έξοδο του ρότορα μειώνουν την απόδοση και αυξάνουν τη θερμοκρασία.

Ταλαντώσεις: Ανισορροπία του ρότορα λόγω ζημιάς ή εναποθέσεων στον ρότορα. Μπορεί να προκαλέσει ζημιά στο ρουλεμάν.

Διαθέσιμοι αισθητήρες

Συνήθως μετρώνται τα ακόλουθα σήματα:

Διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου Δp

Ταχύτητα περιστροφής ω

Ροπή κινητήρα M_{mot} και ροπή αντλίας M_p

Ρυθμός εκκένωσης (παροχή) υγρού στην έξοδο της αντλίας Q

Ρεύμα κινητήρα κίνησης, τάση, θερμοκρασία (δεν λαμβάνονται υπόψη εδώ)

Θερμοκρασία υγρού, ιζήματα (δεν λαμβάνονται υπόψη εδώ)

6.2 Μαθηματικό μοντέλο αντλίας και συστήματος σωληνώσεων

Μια ροπή που εφαρμόζεται στον ρότορα μιας ακτινικής φυγόκεντρης αντλίας οδηγεί σε ταχύτητα περιστροφής ω και μεταδίδει μια αύξηση της ορμής του ρευστού της αντλίας από την είσοδο του ρότορα μικρότερης ακτίνας στην έξοδο του ρότορα μεγαλύτερης ακτίνας. Οι εξισώσεις στροβίλου του Euler αποδίδουν τη σχέση μεταξύ του διαφορικού πίεσης Δp , της ταχύτητας ω και του ρυθμού εκκένωσης ρευστού (ρυθμός ροής) Q :

$$H_{th} = h_1\omega^2 - h_2\omega Q \quad (57)$$

όπου το H_{th} είναι το θεωρητικό (χωρίς απώλειες) μανομετρικό της αντλίας σε μέτρα και h_1 , h_2 είναι σταθερές αναλογικότητας. Όταν υπολογίζεται ένας πεπερασμένος αριθμός πτερυγίων πτερυγίων, απώλειες τριβής και απώλειες κρούσης λόγω μη εφαπτομενικής ροής, η πραγματική κεφαλή της αντλίας δίνεται από:

$$H = h_{m\omega}^2 - h_{m\omega}Q - h_{v\omega}Q^2 \quad (58)$$

όπου τα $h_{m\omega}$, $h_{m\omega}$, $h_{v\omega}$ είναι σταθερές αναλογικότητας που πρέπει να αντιμετωπίζονται ως παράμετροι μοντέλου. Η αντίστοιχη ροπή της αντλίας είναι:

$$M_P = \rho g (h_{m\omega}Q - h_{m\omega}Q^2 - h_{v\omega}\frac{Q^3}{\omega}) \quad (59)$$

Τα μηχανικά μέρη του κινητήρα και της αντλίας προκαλούν την αύξηση της ταχύτητας όταν εφαρμόζεται ροπή σύμφωνα με:

$$J_p \frac{d\omega(t)}{dt} = M_{mot}(t) - M_P(t) - M_f(t) \quad (60)$$

Όπου J_p είναι η ροπή αδράνειας του κινητήρα και της αντλίας και το M_f είναι η ροπή τριβής που αποτελείται από την τριβή Coulomb M_{f0} και την ιξώδης τριβή $M_{f1}\omega(t)$ σύμφωνα με:

$$M_f(t) = M_{f0} \text{sign } \omega(t) + M_{f1}\omega(t) \quad (61)$$

Η αντλία συνδέεται με ένα σύστημα σωληνώσεων που μεταφέρει το υγρό από μια κάτω δεξαμενή αποθήκευσης σε μια επάνω. Η εξίσωση ισορροπίας ορμής αποδίδει:

$$H(t) = a_F \frac{dQ(t)}{dt} + h_{rr} Q^2(t) + H_{static} \quad (62)$$

όπου το h_{rr} είναι ένας συντελεστής αντίστασης του σωλήνα, $a_F = l/gA$ με μήκος σωλήνα l και εμβαδόν διατομής A και H_{static} είναι το ύψος του αποθηκευτικού χώρου πάνω από την αντλία. Οι παράμετροι του μοντέλου είτε είναι γνωστές από τη φυσική είτε μπορούν να εκτιμηθούν προσαρμόζοντας τα μετρούμενα σήματα αισθητήρα στις εισόδους/εξόδους του μοντέλου. Ο τύπος του χρησιμοποιούμενου μοντέλου μπορεί να εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας υπό τις οποίες λειτουργεί η αντλία. Για παράδειγμα, το πλήρες μη γραμμικό μοντέλο του συστήματος αντλίας-σωλήνων μπορεί να μην απαιτείται εάν η αντλία λειτουργεί πάντα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα.

6.3 Τεχνικές ανίχνευσης σφαλμάτων/ζημιών

Τα σφάλματα μπορούν να ανιχνευθούν εξετάζοντας ορισμένα χαρακτηριστικά που εξάγονται από τις μετρήσεις και συγκρίνοντάς τα με γνωστά όρια αποδεκτής συμπεριφοράς. Η ανιχνευσιμότητα και η απομόνωση διαφορετικών σφαλμάτων εξαρτάται από τη φύση του πειράματος και τη διαθεσιμότητα των μετρήσεων. Για παράδειγμα, μια ανάλυση σταθερής ταχύτητας μόνο με μετρήσεις πίεσης μπορεί να ανιχνεύσει σφάλματα που προκαλούν μεγάλες αλλαγές πίεσης. Επιπλέον, δεν μπορεί να εκτιμήσει αξιόπιστα την αιτία της αποτυχίας. Ωστόσο, ένα πείραμα πολλαπλών ταχυτήτων με μετρήσεις διαφορικής πίεσης, ροπής κινητήρα και ταχύτητας ροής μπορεί να ανιχνεύσει και να απομονώσει πολλές πηγές σφαλμάτων, όπως αυτές που προέρχονται από περιβλήματα αερίου, ξηρή λειτουργία, μεγάλες αποθέσεις, ελαττώματα κινητήρα κ.λπ.

Μια προσέγγιση που βασίζεται σε μοντέλο χρησιμοποιεί τις ακόλουθες τεχνικές:

1. Εκτίμηση παραμέτρων: Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις από την υγιή (ονομαστική) λειτουργία του μηχανήματος, υπολογίζονται οι παράμετροι του μοντέλου και ποσοτικοποιείται η αβεβαιότητά τους. Στη συνέχεια, οι μετρήσεις του συστήματος δοκιμής χρησιμοποιούνται για να επανεκτιμηθούν οι τιμές των παραμέτρων και οι εκτιμήσεις που προκύπτουν συγκρίνονται με τις ονομαστικές τους τιμές. Αυτή η τεχνική είναι το κύριο θέμα αυτού του παραδείγματος.

2. Παραγωγή υπολειμματικών ποσοτήτων: Ένα μοντέλο εκπαιδεύεται όπως πριν για ένα υγιές μηχάνημα. Η έξοδος του μοντέλου συγκρίνεται με τις μετρημένες παρατηρήσεις από ένα σύστημα δοκιμής και υπολογίζεται ένα υπολειπόμενο σήμα. Αυτό το σήμα αναλύεται για το μέγεθος, τη διακύμανση και άλλες ιδιότητές του για την ανίχνευση σφαλμάτων. Ένας μεγάλος αριθμός υπολειμματικών μπορεί να σχεδιαστεί και να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση διαφορετικών πηγών σφαλμάτων.

6.4 Πειραματισμός σταθερής ταχύτητας: Ανάλυση σφάλματος με εκτίμηση παραμέτρων

Μια κοινή πρακτική για τη βαθμονόμηση και την επίβλεψη της αντλίας είναι να λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα και να καταγράφεται το στατικό μανομετρικό της αντλίας και ο ρυθμός παροχής του ρευστού. Με την αλλαγή της θέσης της βαλβίδας στο σύστημα σωληνώσεων, ρυθμίζεται ο όγκος εκκένωσης υγρού (GPM). Η αύξηση του ρυθμού εκφόρτισης προκαλεί μείωση στο μανομετρικό της αντλίας. Τα χαρακτηριστικά του μετρούμενου μανομετρικού της αντλίας μπορούν να συγκριθούν με τις τιμές που παρέχονται από τον κατασκευαστή. Οποιοσδήποτε διαφορές θα έδειχναν πιθανότητα σφαλμάτων. Οι μετρήσεις για το μανομετρικό παροχής και τον ρυθμό εκκένωσης της ροής λήφθηκαν με προσομοιώσεις ενός μοντέλου συστήματος αντλίας-σωλήνων στο Simulink και το οποίο είναι διαθέσιμο δωρεάν από την mathworks. .

Σε ονομαστική ταχύτητα 2900 RPM, τα ιδανικά χαρακτηριστικά μανομετρικού αντλίας για μια υγιή αντλία που παρέχεται από τον κατασκευαστή είναι όπως φαίνεται. Η κλήση των χαρακτηριστικών της αντλίας παρουσιάζεται στον ακόλουθο κώδικα:

```
url = 'https://www.mathworks.com/supportfiles/predmaint/fault-diagnosis-of-centrifugal-pumps-using-steady-state-experiments/PumpCharacteristicsData.mat';
websave('PumpCharacteristicsData.mat',url);
load PumpCharacteristicsData Q0 H0 M0 % manufacturer supplied data for pump's delivery head
figure
plot(Q0, H0, '--');
xlabel('Discharge Rate Q (m^3/h)')
ylabel('Pump Head (m)')
title('Pump Delivery Head Characteristics at 2900 RPM')
grid on
legend('Healthy pump')
```

Τα σφάλματα που προκαλούν μια αισθητή αλλαγή στα χαρακτηριστικά της αντλίας είναι:

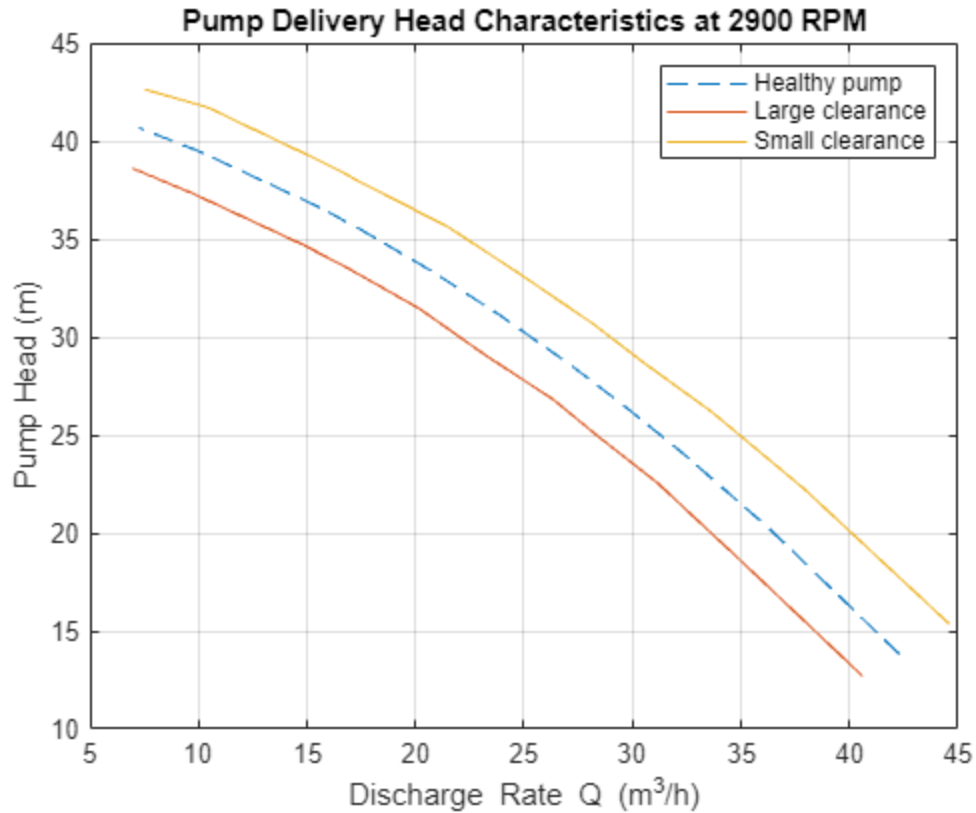
1. Φθορά στο διάκενο

2. Φθορά στην έξοδο της περωτής
3. Εναποθέσεις στην έξοδο της περωτής

Για την ανάλυση των ελαττωματικών αντλιών, συλλέχθηκαν οι μετρήσεις της ταχύτητας, της ροπής και του ρυθμού ροής για αντλίες που επηρεάζονται από διαφορετικά σφάλματα. Για παράδειγμα, όταν το σφάλμα που εισάγεται είναι στον δακτύλιο εκκαθάρισης, τα χαρακτηριστικά του μετρούμενου μανομετρικού για τις αντλίες δείχνουν μια σαφή μετατόπιση στη χαρακτηριστική καμπύλη (εικ. 48). Η φόρτωση των δεδομένων γίνεται με την χρήση του κώδικα που εμφανίζεται στην εικόνα που ακολουθεί.

```
load PumpCharacteristicsData Q1 H1 M1 % signals measured for a pump with a large clearance gap
hold on
plot(Q1, H1);

load PumpCharacteristicsData Q2 H2 M2 % signals measured for a pump with a small clearance gap
plot(Q2, H2);
legend('Healthy pump', 'Large clearance', 'Small clearance')
hold off
```



Εικόνα 48 Διάγραμμα μετρούμενου μανομετρικού και παροχής από την αντλία

Παρόμοιες αλλαγές μπορούν να παρατηρηθούν στα χαρακτηριστικά ροπής-ροής και για άλλους τύπους σφαλμάτων.

Για την αυτοματοποίηση της διάγνωσης βλαβών, οι παρατηρούμενες αλλαγές μετατρέπονται σε ποσοτικές πληροφορίες. Ένας αξιόπιστος τρόπος για να γίνει αυτό είναι η προσαρμογή μιας παραμετροποιημένης καμπύλης στα χαρακτηριστικά δεδομένα κεφαλής ροής που παρουσιάζονται παραπάνω. Χρησιμοποιώντας τη δυναμική αντλίας-σωλήνα που διέπει τις εξισώσεις, και χρησιμοποιώντας μια απλοποιημένη σχέση ροπής, προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$H \approx h_{m\omega}^2 - h_{m\omega}Q - h_{v\omega}Q^2 \quad (63)$$

$$M_p \approx k_0\omega Q - k_1Q^2 + k_2\omega^2 \quad (64)$$

Οι ποσότητες $h_{nn}, h_{nv}, h_{vv}, k_0, k_1, k_2$ είναι οι παράμετροι που πρέπει να εκτιμηθούν. Εάν μετρηθούν αντίθετα τα ω, Q, H και M_p , η παράμετρος μπορεί να εκτιμηθεί με γραμμικά ελάχιστα τετράγωνα στην εκάστοτε περίπτωση. Αυτές οι παράμετροι είναι τα χαρακτηριστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη ενός αλγόριθμου ανίχνευσης και διάγνωσης σφαλμάτων

6.5 Προκαταρκτική ανάλυση: Σύγκριση τιμών παραμέτρων

Αρχικά υπολογίζονται και σχεδιάζονται οι τιμές παραμέτρων που εκτιμήθηκαν για τις παραπάνω 3 καμπύλες. Χρησιμοποιούνται οι μετρούμενες τιμές Q, H και M_p ως δεδομένα και $\omega=2900$ RPM ως ονομαστική ταχύτητα αντλίας αξιοποιώντας τον κάτωθι κώδικα:

```
w = 2900; % RPM
% Healthy pump
[hnn_0, hnv_0, hvv_0, k0_0, k1_0, k2_0] = linearFit(0, {w, Q0, H0, M0});
% Pump with large clearance
[hnn_1, hnv_1, hvv_1, k0_1, k1_1, k2_1] = linearFit(0, {w, Q1, H1, M1});
% Pump with small clearance
[hnn_2, hnv_2, hvv_2, k0_2, k1_2, k2_2] = linearFit(0, {w, Q2, H2, M2});
X = [hnn_0 hnn_1 hnn_2; hnv_0 hnv_1 hnv_2; hvv_0 hvv_1 hvv_2]';
disp(array2table(X, 'VariableNames', {'hnn', 'hnv', 'hvv'}, ...
    'RowNames', {'Healthy', 'Large Clearance', 'Small Clearance'}))

Y = [k0_0 k0_1 k0_2; k1_0 k1_1 k1_2; k2_0 k2_1 k2_2]';
disp(array2table(Y, 'VariableNames', {'k0', 'k1', 'k2'}, ...
    'RowNames', {'Healthy', 'Large Clearance', 'Small Clearance'}))
```

Τα αποτελέσματα προκύπτουν ως:

| | hnn | hnv | hvv |
|-----------------|------------|------------|-----------|
| Healthy | 5.1164e-06 | 8.6148e-05 | 0.010421 |
| Large Clearance | 4.849e-06 | 8.362e-05 | 0.011082 |
| Small Clearance | 5.3677e-06 | 8.4764e-05 | 0.0094656 |

| | k_0 | k_1 | k_2 |
|-----------------|------------|----------|------------|
| Healthy | 0.00033347 | 0.016535 | 2.8212e-07 |
| Large Clearance | 0.00031571 | 0.016471 | 3.0285e-07 |
| Small Clearance | 0.00034604 | 0.015886 | 2.6669e-07 |

Οι πίνακες δείχνουν ότι οι τιμές h_{nn} και k_0 μειώνονται όταν το διάκενο είναι μεγάλο ενώ είναι μεγαλύτερες από τις ονομαστικές τιμές για το μικρό διάκενο. Από την άλλη πλευρά, οι τιμές h_{vv} και k_2 αυξάνονται για μεγάλο διάκενο και μειώνονται για μικρό διάκενο. Η εξάρτηση των h_{nn} και k_1 από το διάκενο είναι λιγότερο σαφής

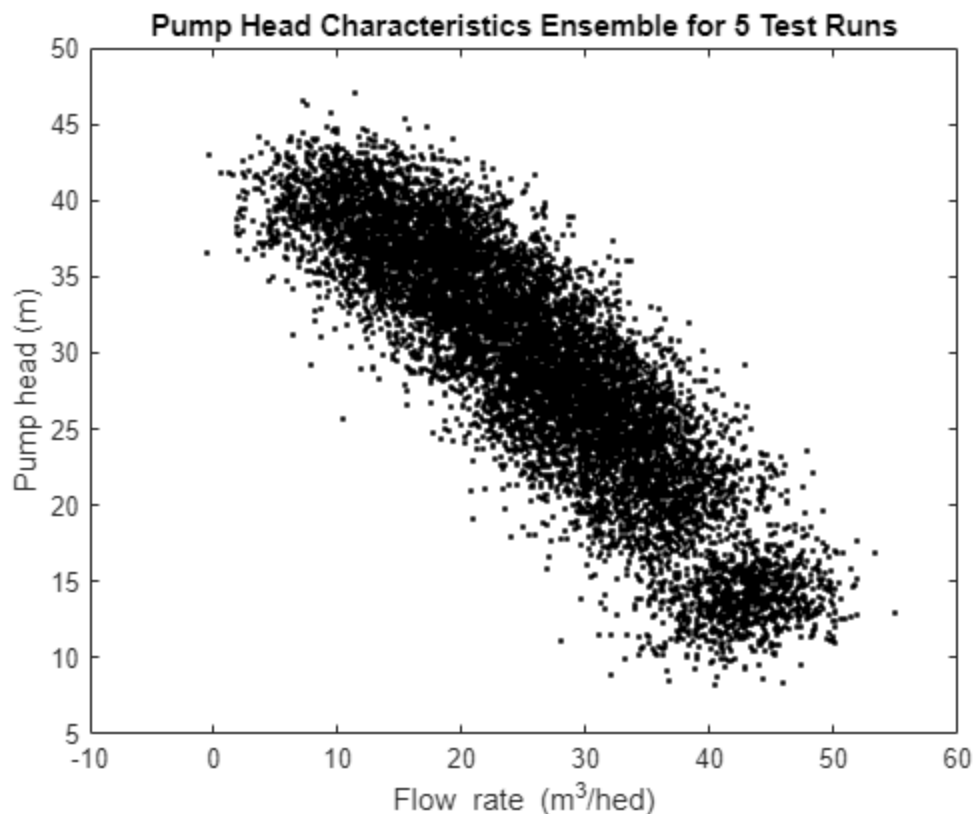
6.6 Ενσωμάτωση αβεβαιότητας

Η προκαταρκτική ανάλυση έδειξε πώς οι αλλαγές παραμέτρων μπορούν να υποδεικνύουν σφάλμα. Ωστόσο, ακόμη και για υγιείς αντλίες υπάρχουν διακυμάνσεις στις μετρήσεις λόγω του θορύβου μέτρησης, της μόλυνσης του υγρού και των αλλαγών του ιξώδους και των χαρακτηριστικών ροής ολίσθησης του κινητήρα που λειτουργεί την αντλία. Αυτές οι διακυμάνσεις μέτρησης εισάγουν αβεβαιότητα στις εκτιμήσεις παραμέτρων.

Στην συνέχεια συλλέγονται 5 σετ μετρήσεων από μια αντλία που λειτουργεί υπό συνθήκες χωρίς βλάβη, λειτουργώντας την στις 2900 RPM για 10 θέσεις βαλβίδας γκαζιού εκκένωσης, με την χρήση των ακόλουθων εντολών.

```
url = 'https://www.mathworks.com/supportfiles/predmaint/fault-diagnosis-of-centrifugal-pumps-using-steady-state-experiments/FaultDiagnosisData.mat';
websave('FaultDiagnosisData.mat',url);
load FaultDiagnosisData HealthyEnsemble
H = cellfun(@(x)x.Head,HealthyEnsemble,'uni',0);
Q = cellfun(@(x)x.Discharge,HealthyEnsemble,'uni',0);
plot(cat(2,Q{:}),cat(2,H{:}),'k.')
title('Pump Head Characteristics Ensemble for 5 Test Runs')
xlabel('Flow rate (m^3/hed)')
ylabel('Pump head (m)')
```

Το διάγραμμα των χαρακτηριστικών του μανομετρικού της αντλίας για τα 5 σετ φαίνεται στην εικόνα 49.



Εικόνα 49 Διάγραμμα των χαρακτηριστικών του μανομετρικού της αντλίας για τα 5 σετ μετρήσεων

Η γραφική παράσταση δείχνει διακύμανση στα χαρακτηριστικά ακόμη και για μια υγιή αντλία υπό ρεαλιστικές συνθήκες. Αυτές οι παραλλαγές πρέπει να ληφθούν υπόψη για να γίνει αξιόπιστη η διάγνωση βλαβών. Οι επόμενες ενότητες συζητούν τεχνικές ανίχνευσης σφαλμάτων και απομόνωσης για θορυβώδη δεδομένα.

6.7 Ανίχνευση και ποσοτικοποίηση ανωμαλιών

Σε πολλές περιπτώσεις, οι μετρήσεις μόνο των υγιών μηχανημάτων είναι διαθέσιμες. Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να δημιουργηθεί μια στατιστική περιγραφή της υγιούς κατάστασης, που περιλαμβάνει από τη μέση τιμή και τη συνδιακύμανση του διανύσματος των παραμέτρων του συστήματος, χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες μετρήσεις. Οι μετρήσεις της δοκιμαστικής αντλίας μπορούν να συγκριθούν με τις ονομαστικές στατιστικές για να ελεγχθεί εάν είναι εύλογο ότι η δοκιμαστική αντλία είναι μια υγιής αντλία. Μια ελαττωματική αντλία αναμένεται να ανιχνευθεί ως ανωμαλία σε σχέση με τα χαρακτηριστικά ανίχνευσης.

Αρχικά εκτιμάται ο μέσος όρος και η συνδιακύμανση των παραμέτρων της κεφαλής της αντλίας και της ροπής.

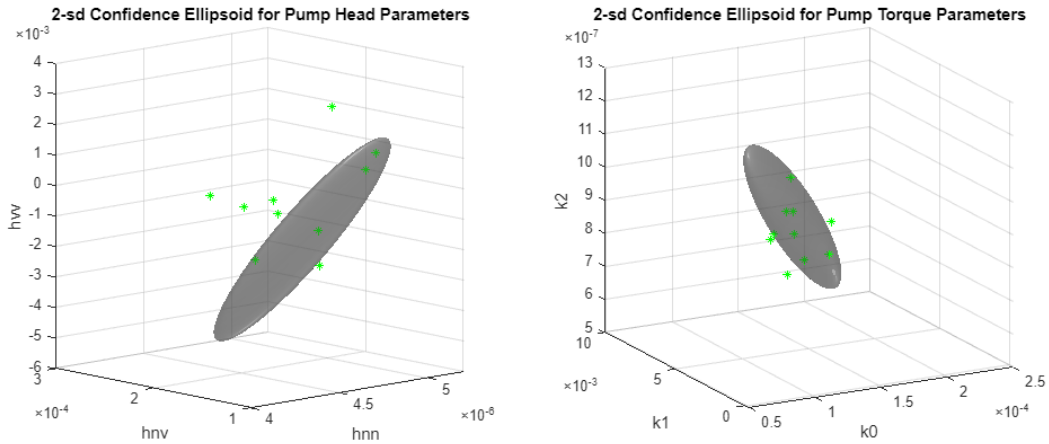
```
load FaultDiagnosisData HealthyEnsemble
[HealthyTheta1, HealthyTheta2] = linearFit(1, HealthyEnsemble);
meanTheta1 = mean(HealthyTheta1,1);
meanTheta2 = mean(HealthyTheta2,1);
covTheta1 = cov(HealthyTheta1);
covTheta2 = cov(HealthyTheta2);
```

Στην συνέχεια οπτικοποιείται η αβεβαιότητα της παραμέτρου ως περιοχές εμπιστοσύνης 74%, που αντιστοιχούν σε 2 τυπικές αποκλίσεις ($\sqrt{\chi^2_{inv}(0.74,3)} \approx 2$).

```
% Confidence ellipsoid for pump head parameters
f = figure;
f.Position(3) = f.Position(3)*2;
subplot(121)
helperPlotConfidenceEllipsoid(meanTheta1,covTheta1,2,0.6);
xlabel('hnn')
ylabel('hnv')
zlabel('hvv')
title('2-sd Confidence Ellipsoid for Pump Head Parameters')
hold on
```

```
% Confidence ellipsoid for pump torque parameters
subplot(122)
helperPlotConfidenceEllipsoid(meanTheta2,covTheta2,2,0.6);
xlabel('k0')
ylabel('k1')
zlabel('k2')
title('2-sd Confidence Ellipsoid for Pump Torque Parameters')
hold on
```

Τα γκριζα ελλειψοειδή σχήματα που παράγονται (εικ. 50) παρουσιάζουν περιοχές εμπιστοσύνης για υγιείς παραμέτρους αντλίας.



Εικόνα 50 Διαστήματα εμπιστοσύνης

Εν συνεχεία, εισάγονται τα δεδομένα δοκιμής μιας αντλίας προς εξέταση για σύγκριση με την υγιή περιοχή. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν ένα σύνολο μετρήσεων στροφών, ροπής, μανομετρικού και παροχής αντλίας σε διάφορες θέσεις βαλβίδων. Όλες οι μετρήσεις περιέχουν σφάλμα διάκενου διαφορετικού μεγέθους. Με βάση αυτά και την επιλογή 5 σετ μετρήσεων, υπολογίζονται οι παραμέτρους δοκιμής αξιοποιώντας την υφιστάμενη συνάρτηση γραμμικής προσέγγισης του matlab (linearFit.).

```
% TestTheta1: pump head parameters
% TestTheta2: pump torque parameters
[TestTheta1,TestTheta2] = linearFit(1, TestEnsemble);
subplot(121)
plot3(TestTheta1(:,1),TestTheta1(:,2),TestTheta1(:,3),'g*')
view([-42.7 10])
subplot(122)
plot3(TestTheta2(:,1),TestTheta2(:,2),TestTheta2(:,3),'g*')
view([-28.3 18])
```

Κάθε δείκτης με πράσινο χρώμα (εικ. 50) συνεισφέρεται από μια εξεταζόμενη αντλία. Οι δείκτες που βρίσκονται εκτός των ορίων εμπιστοσύνης μπορούν να αντιμετωπιστούν ως ακραίες τιμές, ενώ αυτοί που βρίσκονται εντός προέρχονται είτε από υγιή αντλία είτε από διαφυγή ανίχνευσης σφάλματος. Σημειώνεται ότι ένας δείκτης από μια συγκεκριμένη αντλία μπορεί να επισημανθεί ως ανώμαλος στην όψη του μανομετρικού της αντλίας αλλά όχι στην προβολή ροπής της αντλίας. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικές πηγές σφαλμάτων που εντοπίζονται από αυτές τις όψεις ή στην υποκείμενη αξιοπιστία των μετρήσεων πίεσης και ροπής.

Περαιτέρω, η τεχνική αφορά στον υπολογισμό της «απόστασης» ενός δείγματος δεδομένων δοκιμής από το μέσο ή το διάμεσο της κατανομής της υγιούς περιοχής. Η απόσταση πρέπει να είναι σχετική με την κανονική «διασπορά» των δεδομένων υγιών παραμέτρων που αντιπροσωπεύεται από τη συνδιακύμανσή της. Η συνάρτηση MAHAL υπολογίζει την απόσταση Mahalanobis των δειγμάτων δοκιμής από την κατανομή ενός συνόλου δειγμάτων αναφοράς:

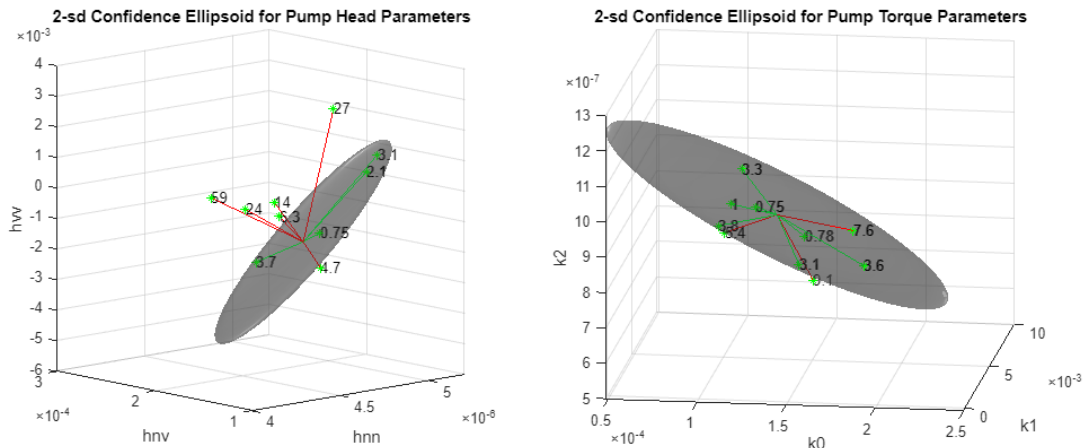
Θεωρώντας όριο εμπιστοσύνης το 74% (2 τυπικές αποκλίσεις) ως αποδεκτή παραλλαγή για υγιή δεδομένα, οποιεσδήποτε τιμές είναι μεγαλύτερες από $2^2 = 4$ θα πρέπει να επισημαίνονται ως ανώμαλες και επομένως ενδεικτικές λανθασμένης συμπεριφοράς. Κατά συνέπεια προκύπτουν τα κάτωθι αποτελέσματα.

| PumpNumber | SampleDistance | Anomalous |
|------------|----------------|-----------|
| 1 | 58.874 | true |
| 2 | 24.051 | true |
| 3 | 6.281 | true |
| 4 | 3.7179 | false |
| 5 | 13.58 | true |
| 6 | 3.0723 | false |
| 7 | 2.0958 | false |
| 8 | 4.7127 | true |
| 9 | 26.829 | true |
| 10 | 0.74682 | false |

Ομοίως για τη ροπή της αντλίας:

| PumpNumber | SampleDistance | Anomalous |
|------------|----------------|-----------|
| 1 | 9.1381 | true |
| 2 | 5.4249 | true |
| 3 | 3.0565 | false |
| 4 | 3.775 | false |
| 5 | 0.77961 | false |
| 6 | 7.5508 | true |
| 7 | 3.3368 | false |
| 8 | 0.74834 | false |
| 9 | 3.6478 | false |
| 10 | 1.0241 | false |

Κατά συνέπεια εισάγοντας τις αποστάσεις στο διάγραμμα της εικόνας 50, πλέον τα διαγράμματα τώρα όχι μόνο δείχνουν την ανίχνευση των ανώμαλων δειγμάτων αλλά και ποσοτικοποιούν τη σοβαρότητά τους (εικ. 51).

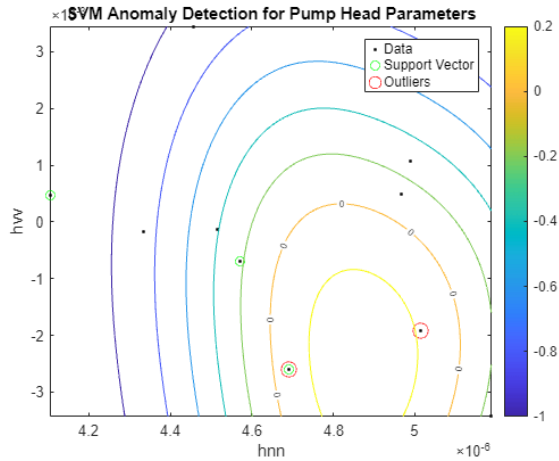


Εικόνα 51 Διαγράμματα αβεβαιότητας με ενσωματωμένες αποστάσεις

Μια άλλη αποτελεσματική τεχνική για την επισήμανση ανωμαλιών είναι η δημιουργία ενός ταξινομητή μιας κατηγορίας για το σύνολο δεδομένων υγιών παραμέτρων. Ο ταξινομητής SVM εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα παραμέτρων υγιούς αντλίας. Επειδή δεν χρησιμοποιούνται ετικέτες σφαλμάτων, όλα τα δείγματα θεωρούνται ως προερχόμενα από την ίδια (υγιή) κατηγορία. Επειδή οι αλλαγές στις παραμέτρους h_{nn} και h_{vv} είναι πιο ενδεικτικές πιθανών σφαλμάτων, αξιοποιούνται αντίστοιχα μόνο αυτές τις παραμέτρους για την εκπαίδευση του ταξινομητή SVM.

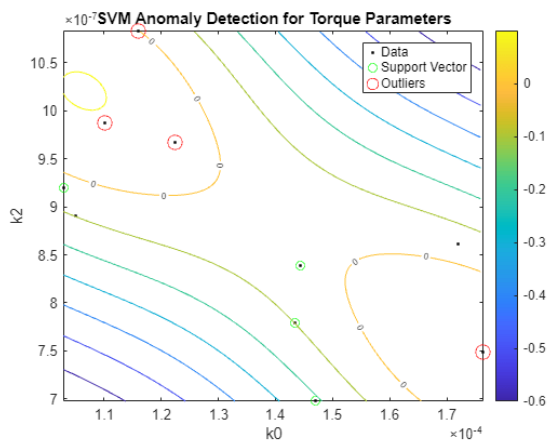
```
nc = size(HealthyTheta1,1);
rng(2) % for reproducibility
SVMOneClass1 = fitcsvm(HealthyTheta1(:,[1 3]),ones(nc,1),...
    'KernelScale','auto',...
    'Standardize',true,...
    'OutlierFraction',0.0455);
```

Μετά το πέρας, οπτικοποιούνται οι παρατηρήσεις του τεστ και το όριο απόφασης (εικ. 52).



Εικόνα 52 Οπτικοποίηση παρατηρήσεων του τεστ και όριο απόφασης

Το όριο που χωρίζει τις ακραίες τιμές από τα υπόλοιπα δεδομένα εμφανίζεται όπου η τιμή περιγράμματος είναι 0. Αυτή είναι η καμπύλη στάθμης που σημειώνεται με "0" στο διάγραμμα. Τα ακραία σημεία σημειώνονται με κόκκινους κύκλους. Μια παρόμοια ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί για τις παραμέτρους ροπής.



Εικόνα 53 Οπτικοποίηση παρατηρήσεων του τεστ και όριο απόφασης(ροπή)

Μια παρόμοια ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί για την ανίχνευση άλλων ειδών σφαλμάτων, όπως φθορά ή εναποθέσεις στην έξοδο της περωτής.

6.8 Διάγνωση σφαλμάτων φυγοκεντρικών αντλιών με χρήση υπολειμματικής ανάλυσης: Μοντέλο και αποτελέσματα

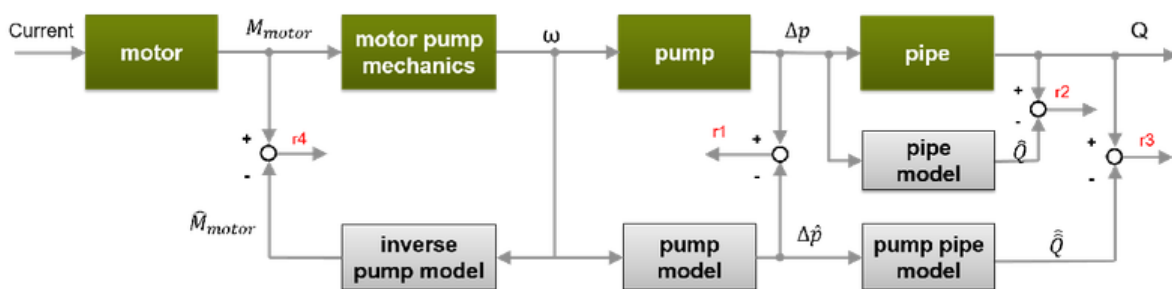
Το μοντέλο της εργασίας ακολουθεί την ανάλυση της φυγόκεντρης αντλίας που παρουσιάστηκε στο κεφ. 5. Χρησιμοποιεί λειτουργίες από System Identification Toolbox™, Statistics and Machine Learning Toolbox™, Control System Toolbox™ και Simulink™ και δεν απαιτεί το Predictive Maintenance Toolbox™.

6.8.1 Λειτουργίες αντλίας πολλαπλών ταχυτήτων - Διάγνωση με υπολειμματική ανάλυση

Οι εξισώσεις μανομετρικού και ροπής αντλίας σταθερής κατάστασης δεν παράγουν ακριβή αποτελέσματα εάν η αντλία λειτουργεί σε ταχέως μεταβαλλόμενες ή σε μεγαλύτερο εύρος στροφών. Η τριβή και άλλες απώλειες θα μπορούσαν να γίνουν σημαντικές και οι παράμετροι του μοντέλου εξαρτώνται από την ταχύτητα. Μια ευρέως εφαρμόσιμη προσέγγιση σε τέτοιες περιπτώσεις είναι η δημιουργία ενός μοντέλου «μαύρου κουτιού» της συμπεριφοράς.

Οι παράμετροι τέτοιων μοντέλων δεν χρειάζεται να έχουν φυσική σημασία. Το μοντέλο χρησιμοποιείται ως συσκευή για την προσομοίωση γνωστών συμπεριφορών. Οι έξοδοι του μοντέλου αφαιρούνται από τα αντίστοιχα μετρούμενα σήματα για τον υπολογισμό των υπολειμμάτων. Οι ιδιότητες των υπολειμμάτων, όπως ο μέσος όρος, η διακύμανση και η ισχύς τους χρησιμοποιούνται για τη διάκριση μεταξύ κανονικών και ελαττωματικών λειτουργιών.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση στατικού μανομετρικού αντλίας και τις δυναμικές εξισώσεις αντλίας-σωλήνα, μπορούν να υπολογιστούν οι 4 υπολειμματικές ποσότητες όπως φαίνεται στην εικόνα 54.



Εικόνα 54 Μοντέλο που εξετάζεται στην εργασία

Το μοντέλο περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

Μοντέλο στατικής αντλίας: $\Delta \hat{p}(t) = \theta_1 \omega^2(t) + \theta_2 \omega(t)$

Μοντέλο δυναμικού σωλήνα: $\hat{Q}(t)=\theta_3+\theta_4\sqrt{\Delta p(t)}+\theta_5\hat{Q}(t-1)$

Μοντέλο δυναμικής αντλίας-σωλήνα: $\hat{\hat{Q}}(t)=\theta_3+\theta_4\sqrt{\Delta p(t)}+\theta_5\hat{\hat{Q}}(t-1)$

Μοντέλο δυναμικής αντίστροφης αντλίας:

$\hat{M}_{motor}(t)=\theta_6+\theta_7\omega(t)+\theta_8\omega(t-1)+\theta_9\omega^2(t)+\theta_{10}\hat{M}_{motor}(t-1)$

Οι παράμετροι του μοντέλου $\theta_1, \dots, \theta_{10}$ δείχνουν την εξάρτηση από την ταχύτητα της αντλίας. Σε αυτό το μοντέλο, υπολογίζεται μια τμηματική γραμμική προσέγγιση για τις παραμέτρους. Για το λόγο αυτό, η περιοχή λειτουργίας χωρίζεται σε 3 καταστάσεις:

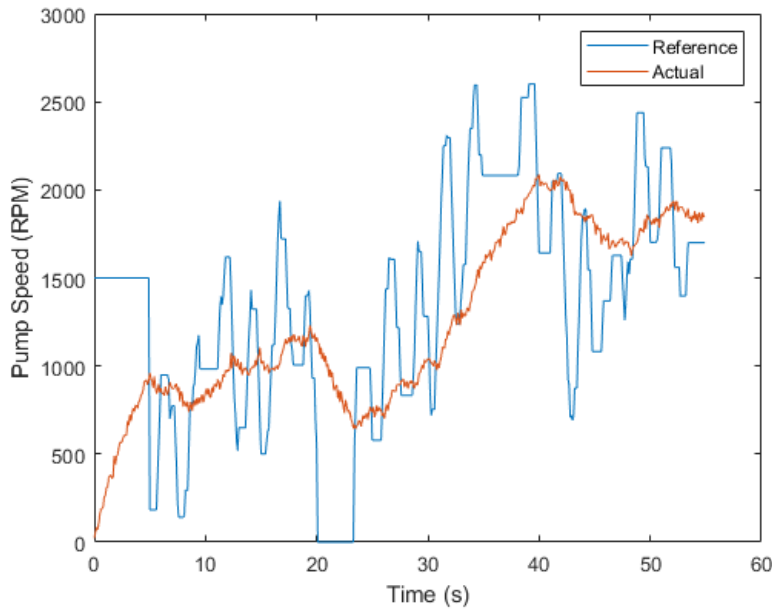
$\omega \leq 900 \text{RPM}$

$900 < \omega \leq 1500 \text{RPM}$

$\omega > 1500 \text{rpm}$

Μια υγιής αντλία λειτουργούσε σε ένα εύρος στροφών αναφοράς 0 - 3000 RPM σε κλειστό βρόχο με ελεγκτή κλειστού βρόχου. Η είσοδος αναφοράς ήταν ένα τροποποιημένο σήμα PRBS. Οι μετρήσεις για τη ροπή κινητήρα, τη ροπή της αντλίας, την ταχύτητα και την πίεση συλλέχθηκαν σε συχνότητα δειγματοληψίας 10 Hz. Τα δεδομένα, όπως αναφέρθηκε, είναι διαθέσιμα και μπορούν να κληθούν δωρεάν. Συνεπώς καλούνται και σχεδιάζονται οι ταχύτητες αναφοράς και οι πραγματικές ταχύτητες της αντλίας (Εικ. 55).

```
1
2
3 url = 'https://www.mathworks.com/supportfiles/predmaint/fault-diagnosis-of-centrifugal-pumps-using-residual-analysis/DynamicOperationData.mat';
4 websave('DynamicOperationData.mat',url);
5 load DynamicOperationData
6 figure
7 plot(t, RefSpeed, 'r', w)
8 xlabel('Time (s)')
9 ylabel('Pump Speed (RPM)')
10 legend('Reference','Actual')
```



Εικόνα 55 Διάγραμμα των ταχυτήτων που περιλαμβάνονται στα δεδομένα της αντλίας

6.8.2 Αναγνώριση μοντέλου

A. Αναγνώριση στατικού μοντέλου αντλίας

Υπολογίζονται οι παράμετροι θ_1 και θ_2 στην στατική εξίσωση αντλίας χρησιμοποιώντας τις μετρούμενες τιμές της ταχύτητας αντλίας $\omega(t)$ και του διαφορικού πίεσης $\Delta p(t)$ ως δεδομένα εισόδου-εξόδου (αξιοποιώντας τη βοηθητική συνάρτηση `staticPumpEst` που εκτελεί αυτήν την εκτίμηση):

```

14 I1 = w<=900;           % first operating regime
15 I2 = w>900 & w<=1500; % second operating regime
16 I3 = w>1500;         % third operating regime
17
18 %Estimate the parameters ?1 and ?2 in the static pump equation using the measured
19 %values of pump speed ?(t)and pressure differential ?p(t) as input-output data.
20
21 th1 = zeros(3,1);
22 th2 = zeros(3,1);
23 dpest = nan(size(dp)); % estimated pressure difference
24 [th1(1), th2(1), dpest(I1)] = staticPumpEst(w, dp, I1); % Theta1, Theta2 estimates for regime 1
25 [th1(2), th2(2), dpest(I2)] = staticPumpEst(w, dp, I2); % Theta1, Theta2 estimates for regime 2
26 [th1(3), th2(3), dpest(I3)] = staticPumpEst(w, dp, I3); % Theta1, Theta2 estimates for regime 3
27 figure
28 plot(t, dp, t, dpest) % compare measured and predicted pressure differential
29 xlabel('Time (s)')
30 ylabel('\Delta P')
31 legend('Measured','Estimated','Location','best')
32 title('Static Pump Model Validation')

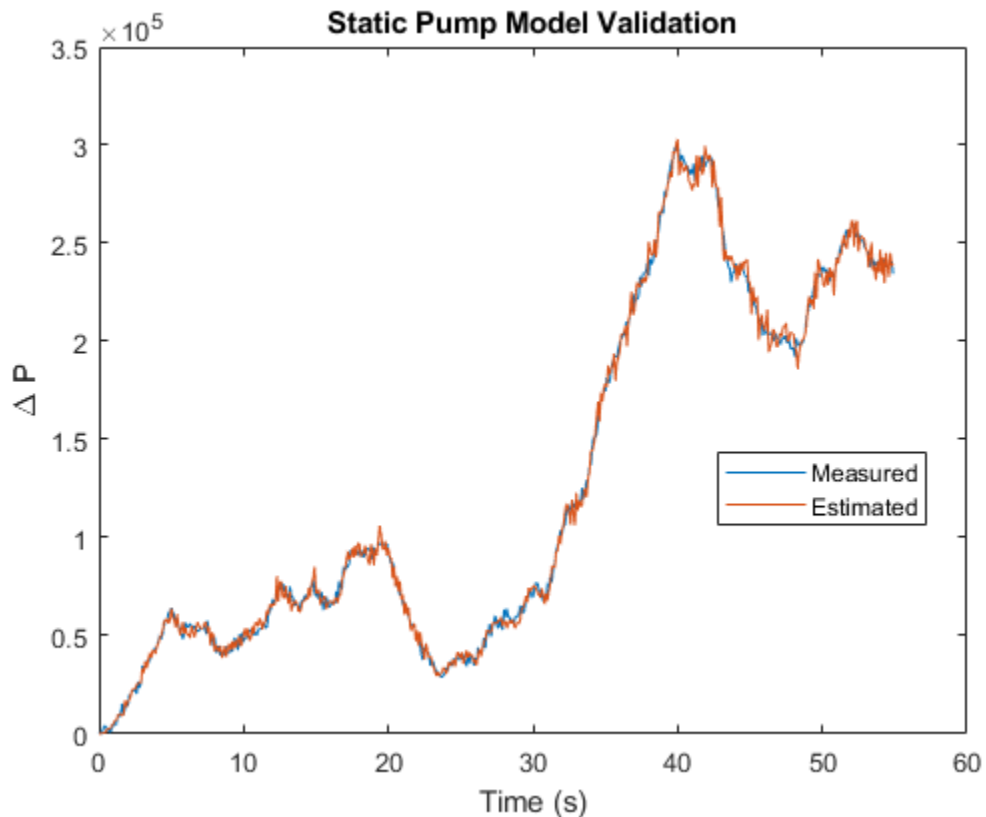
```

```

1 function [x1, x2, dpest] = staticPumpEst(w, dp, I)
2 %staticPumpEst Static pump parameter estimation in a varying speed setting
3 % I: sample indices for the selected operating region.
4
5 w1 = [0; w(I)];
6 dp1 = [0; dp(I)];
7 R1 = [w1.^2 w1];
8 x = pinv(R1)*dp1;
9 x1 = x(1);
10 x2 = x(2);
11
12 dpest = R1(2:end,:) * x;
13 end

```

Το διάγραμμα στην εικόνα 56 παρουσιάζει τα σχετικά αποτελέσματα.



Εικόνα 56 Διάγραμμα αποτελεσμάτων αναγνώρισης μοντέλου στατικής της αντλίας

B. Αναγνώριση δυναμικού μοντέλου σωλήνα

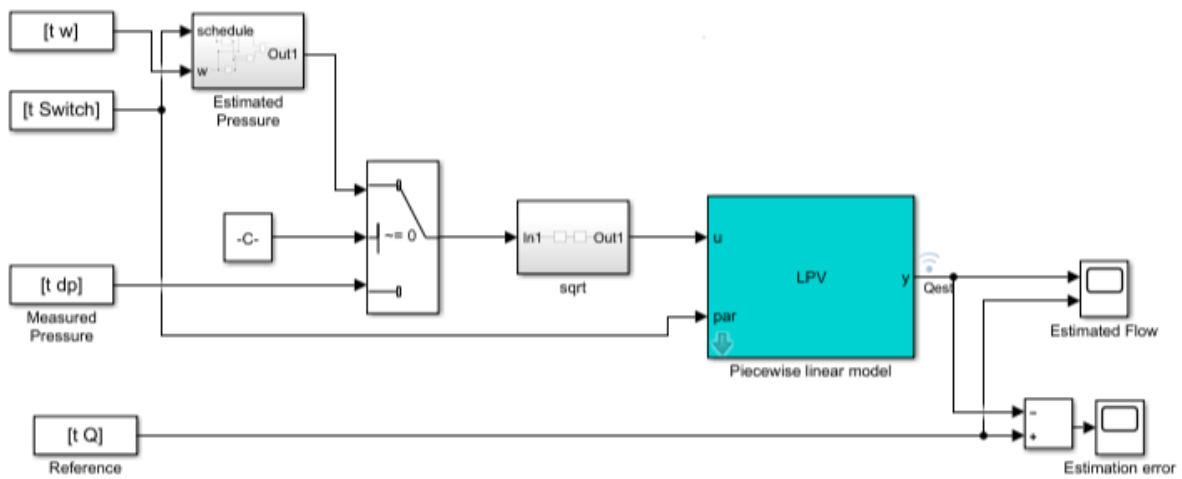
Υπολογίζονται οι παράμετροι θ_3 , θ_4 και θ_5 στην εξίσωση ροής εκκένωσης σωλήνα, χρησιμοποιώντας τις μετρούμενες τιμές του ρυθμού ροής $Q(t)$ και της διαφοράς πίεσης $\Delta p(t)$ ως

δεδομένα εισόδου-εξόδου Αξιοποιώντας την βοηθητική συνάρτηση dynamicPipeEst που εκτελεί αυτήν την εκτίμηση).

```
34 %Dynamic Pipe Model Identification
35 th3 = zeros(3,1);
36 th4 = zeros(3,1);
37 th5 = zeros(3,1);
38 [th3(1), th4(1), th5(1)] = dynamicPipeEst(dp, Q, I1); % Theta3, Theta4, Theta5 estimates for regime 1
39 [th3(2), th4(2), th5(2)] = dynamicPipeEst(dp, Q, I2); % Theta3, Theta4, Theta5 estimates for regime 2
40 [th3(3), th4(3), th5(3)] = dynamicPipeEst(dp, Q, I3); % Theta3, Theta4, Theta5 estimates for regime 3
```

```
1 function [x3, x4, x5, Qest] = dynamicPipeEst(dp, Q, I)
2 %dynamicPipeEst Dynamic pipe parameter estimation in a varying speed setting
3 % I: sample indices for the selected operating region.
4
5 Q = Q(I);
6 dp = dp(I);
7 R1 = [0; Q(1:end-1)];
8 R2 = dp; R2(R2<0) = 0; R2 = sqrt(R2);
9 R = [ones(size(R2)), R2, R1];
10
11 % Remove out-of-regime samples
12 ii = find(I);
13 j = find(diff(ii)~=1);
14 R = R(2:end,:); R(j,:) = [];
15 y = Q(2:end); y(j) = [];
16 x = R\y;
17
18 x3 = x(1);
19 x4 = x(2);
20 x5 = x(3);
21
22 Qest = R*x;
23 end
```

Σε αντίθεση με την περίπτωση του μοντέλου στατικής αντλίας, το μοντέλο δυναμικού σωλήνα δείχνει δυναμική εξάρτηση από τις τιμές παροχής. Για την προσομοίωση του μοντέλου σε διαφορετικά καθεστώτα ταχύτητας, δημιουργήθηκε ένα τμηματικά γραμμικό μοντέλο στο Simulink χρησιμοποιώντας το μπλοκ "LPV System" της Εργαλειοθήκης Συστήματος Ελέγχου (εικόνα 57)..



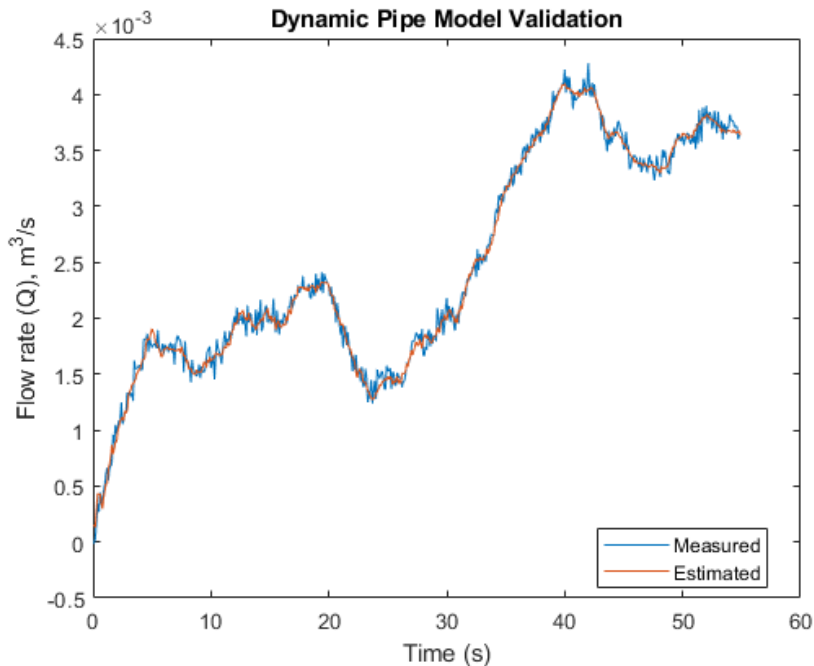
Εικόνα 57 Μοντέλο Simulink για το δυναμικό της αντλίας

```

41 % Check Control System Toolbox availability
42 ControlsToolboxAvailable = ~isempty(ver('control')) && license('test', 'Control_Toolbox');
43 figure
44 if ControlsToolboxAvailable
45     % Simulate the dynamic pipe model. Use measured value of pressure as input
46     Ts = t(2)-t(1);
47     Switch = ones(size(w));
48     Switch(I2) = 2;
49     Switch(I3) = 3;
50     UseEstimatedP = 0;
51     Qest_pipe = simulatePumpPipeModel(Ts,th3,th4,th5);
52     plot(t,Q,t,Qest_pipe) % compare measured and predicted flow rates
53 else
54     % Load pre-saved simulation results from the piecewise linear Simulink model
55     load DynamicOperationData Qest_pipe
56     Ts = t(2)-t(1);
57     plot(t,Q,t,Qest_pipe)
58 end
59 xlabel('Time (s)')
60 ylabel('Flow rate (Q), m^3/s')
61 legend('Measured','Estimated','Location','best')
62 title('Dynamic Pipe Model Validation')
63

```

Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται στην εικόνα 58.



Εικόνα 58 Διάγραμμα αποτελεσμάτων διαδικασίας αναγνώρισης δυναμικού μοντέλου σωλήνα

Γ. Αναγνώριση δυναμικού μοντέλου σωλήνα - αντλίας

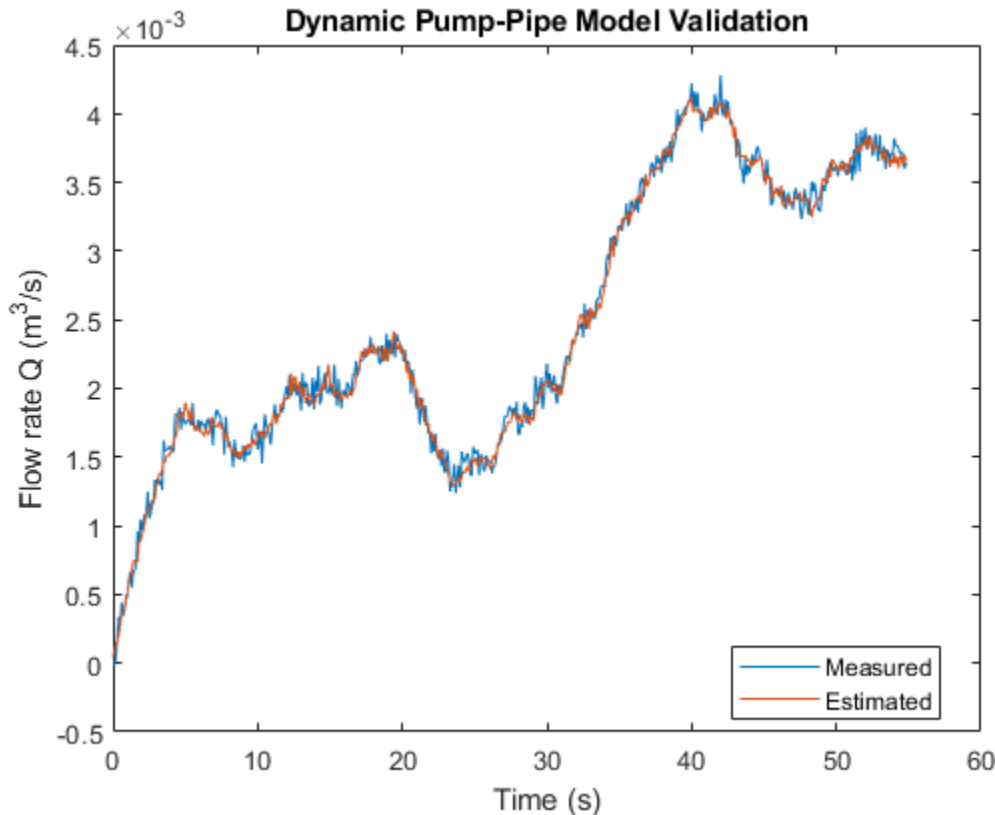
Το μοντέλο Dynamic pump-pipe χρησιμοποιεί τις ίδιες παραμέτρους που προσδιορίζονται παραπάνω ($\theta_3, \theta_4, \theta_5$) εκτός από το ότι η προσομοίωση του απαιτεί τη χρήση της εκτιμώμενης διαφοράς πίεσης και όχι της μετρούμενης. Ως εκ τούτου, δεν απαιτείται νέα αναγνώριση μοντέλου. Συνεπώς εξετάζεται απλά το κατά πόσο οι εκτιμώμενες τιμές των $\theta_3, \theta_4, \theta_5$ δίνουν καλή αναπαραγωγή της δυναμικής αντλίας-σωλήνα.

```

63
64   %Dynamic Pump Pipe Model Identification
65   figure
66   if ControlsToolboxAvailable
67       UseEstimatedP = 1;
68       Qest_pump_pipe = simulatePumpPipeModel(Ts,th3,th4,th5);
69       plot(t,Q,t,Qest_pump_pipe) % compare measured and predicted flow rates
70   else
71       load DynamicOperationData Qest_pump_pipe
72       plot(t,Q,t,Qest_pump_pipe)
73   end
74
75   xlabel('Time (s)')
76   ylabel('Flow rate Q (m^3/s)')
77   legend('Measured','Estimated','location','best')
78   title('Dynamic Pump-Pipe Model Validation')
79

```

Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 59.



Εικόνα 59 Διάγραμμα αποτελεσμάτων διαδικασίας αναγνώρισης δυναμικού μοντέλου σωλήνα - αντλίας

Η προσαρμογή είναι σχεδόν πανομοιότυπη με αυτή που λαμβάνεται με τη χρήση μετρούμενων τιμών πίεσης.

Δ. Αναγνώριση δυναμικού μοντέλου αντίστροφης αντλίας

Οι παράμετροι $\theta_6, \dots, \theta_{10}$ μπορούν να αναγνωριστούν με παρόμοιο τρόπο, με παλινδρόμηση των τιμών μετρούμενης ροπής στις προηγούμενες μετρήσεις ροπής και ταχύτητας. Ωστόσο, μια πλήρης προσομοίωση πολλαπλών ταχυτήτων του προκύπτοντος τμηματικά γραμμικού μοντέλου δεν παρέχει καλή προσαρμογή στα δεδομένα. Ως εκ τούτου, δοκιμάστηκε μια διαφορετική προσέγγιση μοντελοποίησης μαύρου κουτιού που περιλαμβάνει τον εντοπισμό ενός μη γραμμικού μοντέλου ARX με ορθολογικούς παλινδρομητές για να ταιριάζει στα δεδομένα.

```

80 %Dynamic Inverse Pump Model Identification
81 % Use first 300 samples out of 550 for identification
82 N = 350;
83 sys3 = identifyNonlinearARXModel(Mmot,w,Q,Ts,N)
84 Mmot_est = sim(sys3,[w Q]);
85 figure
86 plot(t,Mmot,t,Mmot_est) % compare measured and predicted motor torque
87 xlabel('Time (s)')
88 ylabel('Motor Torque (Nm)')
89 legend('Measured','Estimated','location','best')
90 title('Inverse pump model validation')
91
92 %Define residue of a model as the difference between a measured signal and the corresponding model-produced output.
93 %Compute the four residuals corresponding to the four model components.
94
95 r1 = dp - dpest;
96 r2 = Q - Qest_pipe;
97 r3 = Q - Qest_pump_pipe;
98
99 %For computing the inverse pump model residue, apply a smoothing operation on the model output using a moving average
100 %filter since the original residues show large variance.
101 r4 = Mmot - movmean(Mmot_est,[1 5]);

```

```

1 function sys3 = identifyNonlinearARXModel(Mmot,w,Q,Ts,N)
2 %identifyNonlinearARXModel Identify a nonlinear ARX model for 2-input (w, Q), 1-output (Mmot) data.
3 % Inputs:
4 % w: rotational speed
5 % Q: Flow rate
6 % Mmot: motor torque
7 % N: number of data samples to use
8 % Outputs:
9 % sys3: Identified model
10 %
11 % This function uses NLARX estimator from System Identification Toolbox.
12
13 sys = idnlarx([2 2 1 0 1],'','CustomRegressors',{'u1(t-2)^2','u1(t)*u2(t-2)','u2(t)^2'});
14 data = iddata(Mmot,[w Q],Ts);
15 opt = nlarxOptions;
16 opt.Focus = 'simulation';
17 opt.SearchOptions.MaxIterations = 500;
18 sys3 = nlarx(data(1:N),sys,opt);
19 end

```

Τα σχετικά αποτελέσματα για το μοντέλο αυτό ήταν:

sys3 =

Nonlinear ARX model with 1 output and 2 inputs

Inputs: u1, u2

Outputs: y1

Regressors:

1. Linear regressors in variables y1, u1, u2
2. Custom regressor: $u1(t-2)^2$

3. Custom regressor: $u1(t)*u2(t-2)$

4. Custom regressor: $u2(t)^2$

List of all regressors

Output function: Linear Function

Sample time: 0.1 seconds

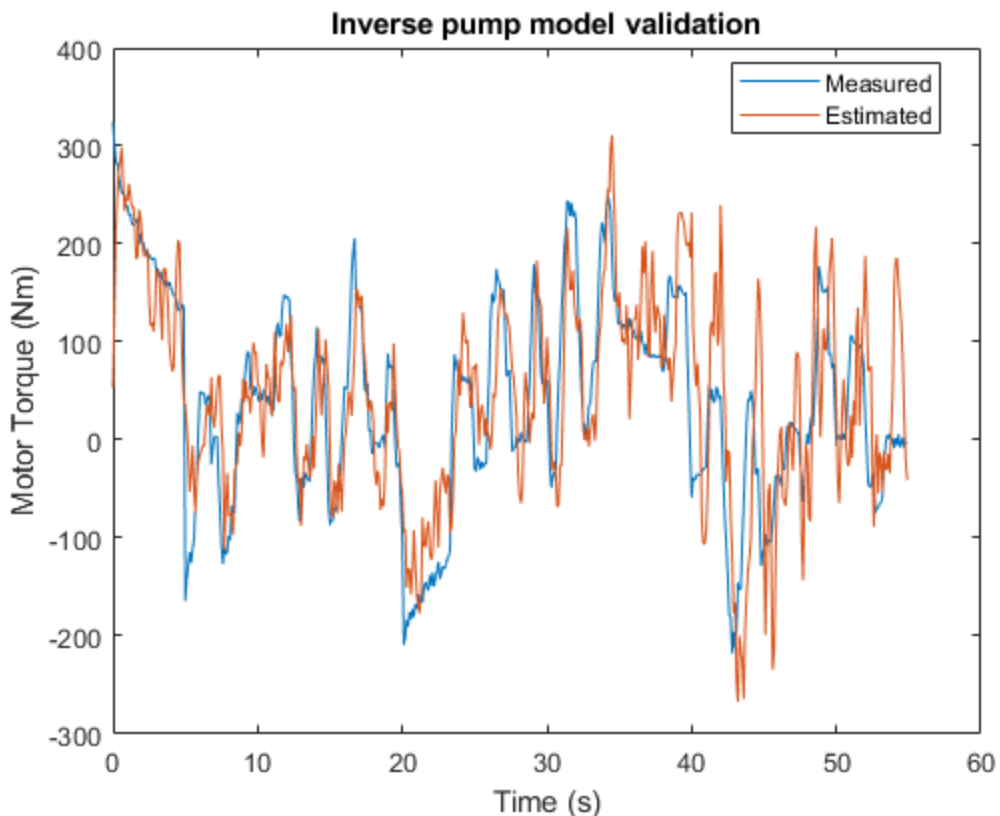
Status:

Estimated using NLARX on time domain data.

Fit to estimation data: 49.2% (simulation focus)

FPE: 1798, MSE: 3392

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την εξέταση της καταλληλότητας του μοντέλου παρουσιάζονται στην εικόνα 60.



Εικόνα 60 Αποτελέσματα για το μοντέλο ARX

6.8.3 Δημιουργία υπολειμματικών όρων και εξαγωγή χαρακτηριστικών

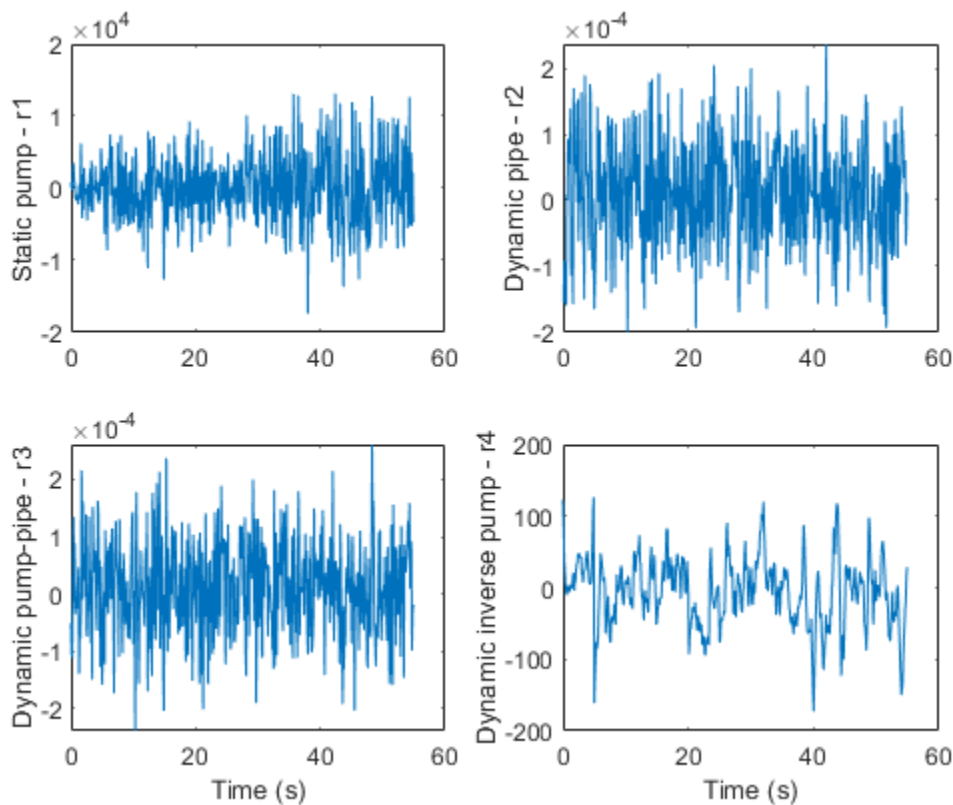
Ορίζεται η υπολειμματική ποσότητα ενός μοντέλου ως τη διαφορά μεταξύ ενός μετρούμενου σήματος και της αντίστοιχης εξόδου που παράγεται από το μοντέλο. Με βάση τον ορισμό αυτό υπολογίζονται τα τέσσερα υπολείμματα που αντιστοιχούν στα τέσσερα στοιχεία του μοντέλου.

Για τον υπολογισμό του υπολείμματος του μοντέλου αντίστροφης αντλίας, εφαρμόζεται μια λειτουργία εξομάλυνσης στην έξοδο του μοντέλου χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο κινητού μέσου όρου, καθώς τα αρχικά υπολείμματα παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση. Κατά συνέπεια προκύπτουν τα κάτωθι διαγράμματα για τις υπολειμματικές ποσότητες (εικ. 61).

```

95 r1 = dp - dpest;
96 r2 = Q - Qest_pipe;
97 r3 = Q - Qest_pump_pipe;
98
99 %For computing the inverse pump model residue, apply a smoothing operation on the model output using a moving average
100 %filter since the original residues show large variance.
101 r4 = Mmot - movmean(Mmot_est,[1 5]);
102
103 %A view of training residues:
104 figure
105 subplot(221)
106 plot(t,r1)
107 ylabel('Static pump - r1')
108 subplot(222)
109 plot(t,r2)
110 ylabel('Dynamic pipe - r2')
111 subplot(223)
112 plot(t,r3)
113 ylabel('Dynamic pump-pipe - r3')
114 xlabel('Time (s)')
115 subplot(224)
116 plot(t,r4)
117 ylabel('Dynamic inverse pump - r4')
118 xlabel('Time (s)')
119

```



Εικόνα 61 Διάγραμμα εμφάνισης διακύμανσης τιμών υπολειμματικών ποσοτήτων

Οι υπολειμματικές ποσότητες είναι σήματα από τα οποία εξάγονται κατάλληλα χαρακτηριστικά για την απομόνωση σφαλμάτων. Εφόσον δεν υπάρχουν διαθέσιμες παραμετρικές πληροφορίες, εξετάζονται χαρακτηριστικά που προέρχονται αποκλειστικά από ιδιότητες σήματος όπως το μέγιστο πλάτος ή η διακύμανση του σήματος. Για τον σκοπό αυτό μόνο 20 πειραμάτων στο

σύστημα αντλίας-σωλήνων ελέγχονται, χρησιμοποιώντας πραγματοποιήσεις εισόδου PRBS. Το σύνολο πειραμάτων επαναλαμβάνεται για καθεμία από τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Υγιής αντλία
- Σφάλμα 1: Φθορά στο διάκενο
- Σφάλμα 2: Μικρές αποθέσεις στην έξοδο της περωτής
- Σφάλμα 3: Καταθέσεις στην είσοδο της περωτής
- Σφάλμα 4: Λειαντική φθορά στην έξοδο της περωτής
- Σφάλμα 5: Σπασμένη λεπίδα
- Σφάλμα 6: Σπηλαιώση
- Σφάλμα 7: Προκατάληψη αισθητήρα ταχύτητας
- Σφάλμα 8: Προκατάληψη ροόμετρου
- Σφάλμα 9: Πόλωση αισθητήρα πίεσης

Η διαδικασία περιλαμβάνει τη φόρτωση των πραγματικών δεδομένων, και τον υπολογισμό των υπολειμματικών ποσοτήτων για κάθε σύνολο και κάθε τρόπο λειτουργίας.

```
120 url = 'https://www.mathworks.com/supportfiles/predmaint/fault-diagnosis-of-centrifugal-pumps-using-residual-analysis/MultiSpeedOperationData.mat';
121 websave('MultiSpeedOperationData.mat',url);
122 load MultiSpeedOperationData
123 % Generate operation mode labels
124 Labels = {'Healthy','ClearanceGapWear','ImpellerOutletDeposit',...
125 'ImpellerInletDeposit','AbrasiveWear','BrokenBlade','Cavitation','SpeedSensorBias',...
126 'FlowmeterBias','PressureSensorBias'};
127
128 % Load xxx-saved data from "helperComputeEnsembleResidues" run
129 url = 'https://www.mathworks.com/supportfiles/predmaint/fault-diagnosis-of-centrifugal-pumps-using-residual-analysis/Residuals.mat';
130 websave('Residuals.mat',url);
131 load Residuals
132
```

Το χαρακτηριστικό των υπολειμμάτων που θα είχαν τη μεγαλύτερη δύναμη διάκρισης δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων. Δημιουργήθηκαν για το λόγο αυτό λοιπόν πολλά υποψήφια χαρακτηριστικά: μέσος όρος, μέγιστο πλάτος, διακύμανση, κύρτωση και 1-norm για κάθε υπόλοιπο. Όλα τα χαρακτηριστικά κλιμακώθηκαν χρησιμοποιώντας το εύρος τιμών στο υγιές σύνολο

```

133 CandidateFeatures = {@mean, @(x)max(abs(x)), @kurtosis, @var, @(x)sum(abs(x))};
134 FeatureNames = {'Mean', 'Max', 'Kurtosis', 'Variance', 'OneNorm'};
135 % generate feature table from gathered residuals of each fault mode
136 [HealthyFeature, MinMax] = helperGenerateFeatureTable(HealthyR, CandidateFeatures, FeatureNames);
137 Fault1Feature = helperGenerateFeatureTable(Fault1R, CandidateFeatures, FeatureNames, MinMax);
138 Fault2Feature = helperGenerateFeatureTable(Fault2R, CandidateFeatures, FeatureNames, MinMax);
139 Fault3Feature = helperGenerateFeatureTable(Fault3R, CandidateFeatures, FeatureNames, MinMax);
140 Fault4Feature = helperGenerateFeatureTable(Fault4R, CandidateFeatures, FeatureNames, MinMax);
141 Fault5Feature = helperGenerateFeatureTable(Fault5R, CandidateFeatures, FeatureNames, MinMax);
142 Fault6Feature = helperGenerateFeatureTable(Fault6R, CandidateFeatures, FeatureNames, MinMax);
143 Fault7Feature = helperGenerateFeatureTable(Fault7R, CandidateFeatures, FeatureNames, MinMax);
144 Fault8Feature = helperGenerateFeatureTable(Fault8R, CandidateFeatures, FeatureNames, MinMax);
145 Fault9Feature = helperGenerateFeatureTable(Fault9R, CandidateFeatures, FeatureNames, MinMax);
146

```

Υπήρχαν 20 χαρακτηριστικά σε κάθε πίνακα χαρακτηριστικών (5 χαρακτηριστικά για κάθε σήμα υπολειμμάτων). Κάθε πίνακας περιέχει 50 παρατηρήσεις (σειρές), μία από κάθε πείραμα

```

147 N = 50; % number of experiments in each mode
148 FeatureTable = [...
149     [HealthyFeature(1:N,:), repmat(Labels(1), [N,1])];...
150     [Fault1Feature(1:N,:), repmat(Labels(2), [N,1])];...
151     [Fault2Feature(1:N,:), repmat(Labels(3), [N,1])];...
152     [Fault3Feature(1:N,:), repmat(Labels(4), [N,1])];...
153     [Fault4Feature(1:N,:), repmat(Labels(5), [N,1])];...
154     [Fault5Feature(1:N,:), repmat(Labels(6), [N,1])];...
155     [Fault6Feature(1:N,:), repmat(Labels(7), [N,1])];...
156     [Fault7Feature(1:N,:), repmat(Labels(8), [N,1])];...
157     [Fault8Feature(1:N,:), repmat(Labels(9), [N,1])];...
158     [Fault9Feature(1:N,:), repmat(Labels(10), [N,1])]];
159 FeatureTable.Properties.VariableNames{end} = 'Condition';
160
161 % Preview some samples of training data
162 disp(FeatureTable([2 13 37 49 61 62 73 85 102 120],:))

```

6.8.4 Δημιουργία ταξινομητή (classifier)

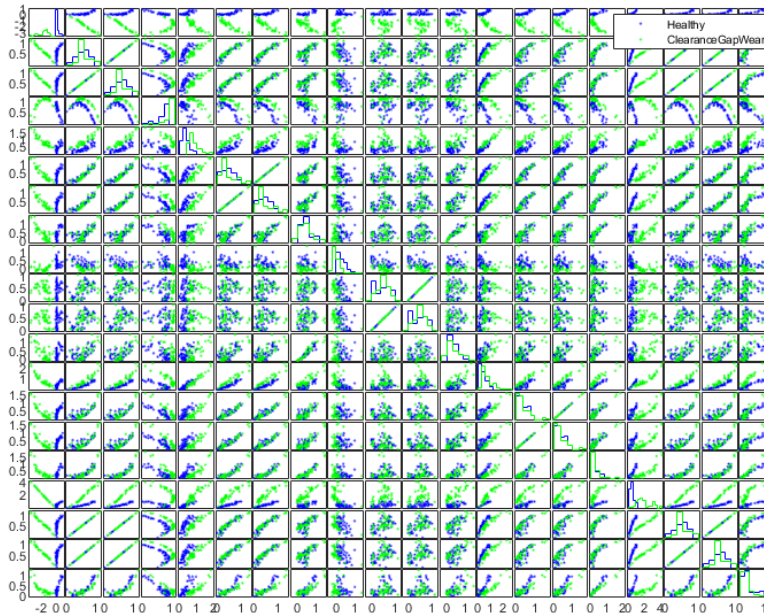
A. Οπτικοποίηση της δυνατότητας διαχωρισμού με χρήση διαγράμματος διασποράς

Η ανάλυση εκκινεί με την οπτική επιθεώρηση των χαρακτηριστικών. Για το λόγο αυτό, εξετάζεται το Σφάλμα 1: Φθορά στο διάκενο (εικ. 62). Με αυτό το τρόπο, είναι δυνατό να καθοριστεί ποιες λειτουργίες είναι πιο κατάλληλες για τον εντοπισμό αυτού του σφάλματος, και έτσι δημιουργείται μια γραφική παράσταση διασποράς χαρακτηριστικών με τις ετικέτες "Healthy" και "ClearanceGapWear".

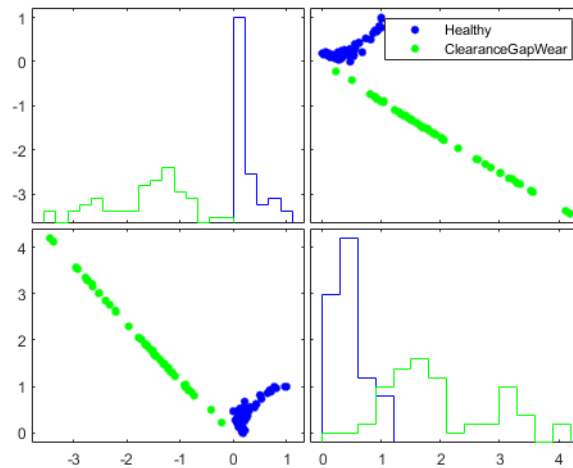
Αν και δεν είναι ευδιάκριτα, τα χαρακτηριστικά στις στήλες 1 και 17 παρέχουν τον μεγαλύτερο διαχωρισμό για την περίπτωση του Σφάλματος 1. Λαμβάνει χώρα περαιτέρω εξέταση των χαρακτηριστικών αυτών, επιλέγοντας τα: Mean1, OneNorm1 (εικ. 63)

Η γραφική παράσταση δείχνει τώρα ξεκάθαρα ότι οι λειτουργίες Mean1 και OneNorm1 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον διαχωρισμό της λειτουργίας υγιούς από τη λειτουργία σφάλματος κενού εκκαθάρισης. Μια παρόμοια ανάλυση πραγματοποιήθηκε για κάθε τρόπο λειτουργίας σφάλματος. Σε όλες τις περιπτώσεις, ήταν δυνατό να βρεθεί ένα σύνολο χαρακτηριστικών που διακρίνουν τις λειτουργίες σφάλματος. Ως εκ τούτου, η ανίχνευση μιας λανθασμένης συμπεριφοράς από το προτεινόμενο μοντέλο είναι πάντα δυνατή. Ωστόσο, η απομόνωση σφαλμάτων είναι πιο δύσκολη αφού τα ίδια χαρακτηριστικά επηρεάζονται από πολλαπλούς τύπους σφαλμάτων. Για παράδειγμα, οι δυνατότητες Mean1 (Μέσος όρος του r1) και OneNorm1 (1-norm του r1) δείχνουν μια αλλαγή για πολλούς τύπους σφαλμάτων. Ωστόσο, ορισμένα σφάλματα, όπως οι προκαταλήψεις αισθητήρων, μπορούν να απομονωθούν ευκολότερα όταν το σφάλμα μπορεί να διαχωριστεί σε πολλά χαρακτηριστικά.

```
164 %Classifier Design
165 T = FeatureTable(:,1:20);
166 P = T.Variables;
167 R = FeatureTable.Condition;
168 I = strcmp(R,'Healthy') | strcmp(R,'ClearanceGapWear');
169 f = figure;
170 gplotmatrix(P(I,:),[],R(I))
171 f.Position(3:4) = f.Position(3:4)*1.5;
172 f = figure;
173 Names = FeatureTable.Properties.VariableNames;
174 J = [1 17];
175 fprintf('Selected features for clearance gap fault: %s\n',strjoin(Names(J),' '))
176 gplotmatrix(P(I,[1 17]),[],R(I))
177
```



Εικόνα 62 Οπτικοποίηση για το Σφάλμα 1



Εικόνα 63 Οπτικοποίηση των επιλεγμένων μεγεθών μόνο για το σφάλμα 1

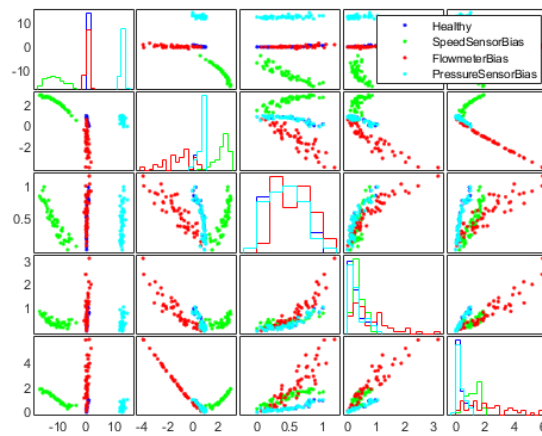
Για τα τρία σφάλματα πόλωσης αισθητήρα, επιλέχθηκαν χαρακτηριστικά από μια χειροκίνητη επιθεώρηση του σχεδίου διασποράς. Επιλεγμένα χαρακτηριστικά για την προκατάληψη των αισθητήρων: Mean1, Mean4, Max2, Variance4, OneNorm4

Η γραφική παράσταση διασποράς των επιλεγμένων χαρακτηριστικών (εικ. 64) δείχνει ότι οι 4 λειτουργίες μπορούν να διακριθούν σε ένα ή περισσότερα ζεύγη χαρακτηριστικών. Εκπαιδεύστε έναν ταξινομητή Tree Bagger 20 μελών για το μειωμένο σύνολο σφαλμάτων (μόνο προκαταλήψεις αισθητήρων) χρησιμοποιώντας ένα μειωμένο σύνολο χαρακτηριστικών.

```

178 figure;
179 I = strcmp(R,'Healthy') | strcmp(R,'PressureSensorBias') | strcmp(R,'SpeedSensorBias') | strcmp(R,'FlowmeterBias');
180 J = [1 4 6 16 20]; % selected feature indices
181 fprintf('Selected features for sensors' bias: %s\n',strjoin(Names(J),' '))
182 plotmatrix(P(I,J),[],R(I))

```



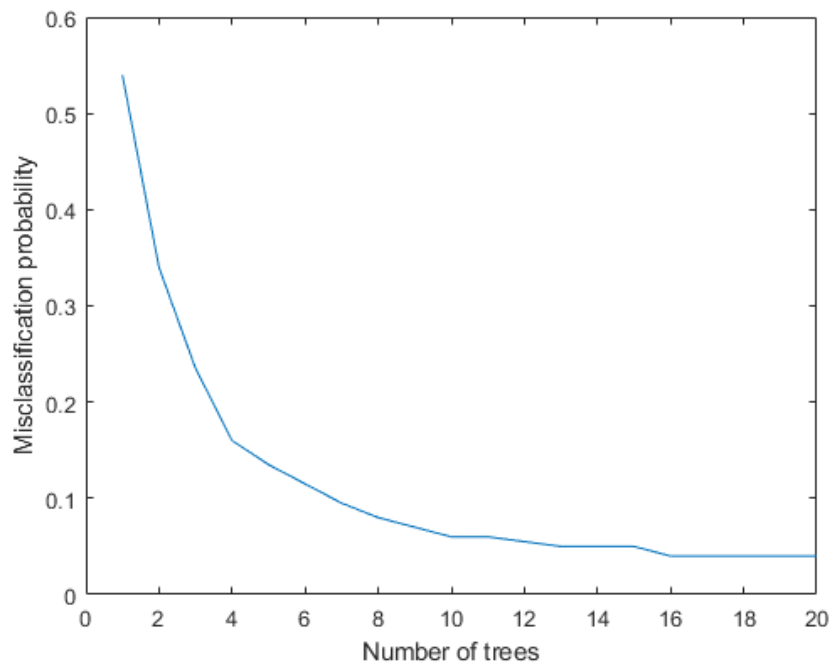
Εικόνα 64 Γραφική παράσταση διασποράς των επιλεγμένων χαρακτηριστικών

Το σφάλμα λανθασμένης ταξινόμησης είναι μικρότερο από 3% (εικ. 65). Έτσι, είναι δυνατό να επιλεγεί ένα μικρότερο σύνολο χαρακτηριστικών για την ταξινόμηση ενός συγκεκριμένου υποσυνόλου σφαλμάτων.

```

184 rng default % for reproducibility
185 Mdl = TreeBagger(20, FeatureTable(I,[J 21]), 'Condition',...
186     'OOBPrediction','on',...
187     'OOBPredictorImportance','on');
188 figure
189 plot(oobError(Mdl))
190 xlabel('Number of trees')
191 ylabel('Misclassification probability')

```

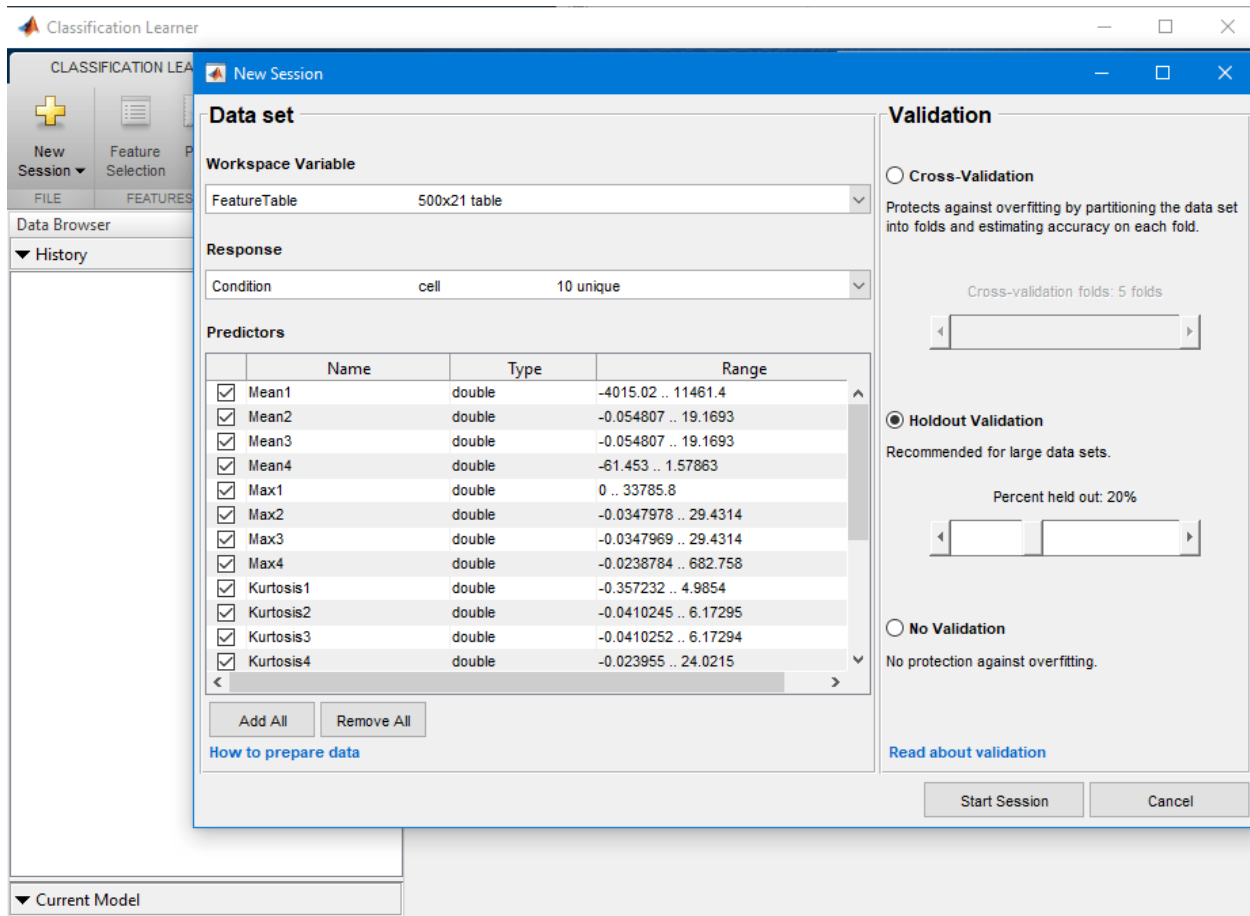


Εικόνα 65 Σφάλμα λανθασμένης ταξινόμησης

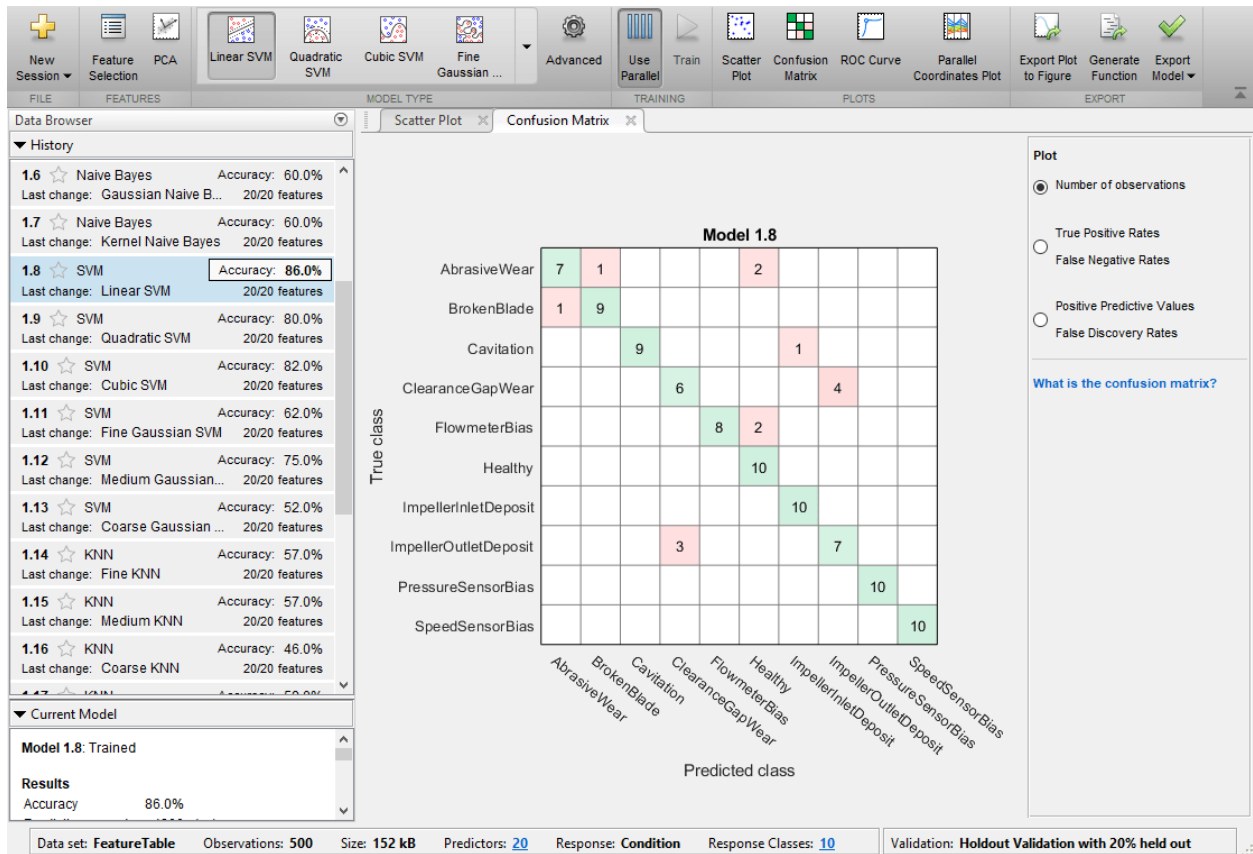
B. Ταξινόμηση πολλαπλών τάξεων με χρήση της εφαρμογής Classification Learner

Η προηγούμενη ενότητα επικεντρώθηκε στη χειροκίνητη επιθεώρηση των διαγραμμάτων διασποράς για τη μείωση του συνόλου χαρακτηριστικών για συγκεκριμένους τύπους σφαλμάτων. Ωστόσο η προσέγγιση μπορεί να γίνει κουραστική και μπορεί να μην καλύπτει όλους τους τύπους σφαλμάτων. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε ένας ταξινομητής που να μπορεί να χειριστεί όλες τις λειτουργίες σφάλματος με πιο αυτοματοποιημένο τρόπο; Υπάρχουν πολλοί ταξινομητές διαθέσιμοι στο Statistics and Machine Learning Toolbox.

Μέσω της εφαρμογής Classification Learner επιλέχθηκε το FeatureTable από τον χώρο εργασίας ως δεδομένα εργασίας για μια νέα περίοδο λειτουργίας. Περίπου το 20% των δεδομένων (10 δείγματα από κάθε λειτουργία) για επικύρωση διατήρησης έμεινε εκτός επιλογής..



Τα δεδομένα αξιοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των ταξινομητών αξιοποιώντας τις λειτουργίες της εφαρμογής. Σε σύντομο χρονικό διάστημα εκπαιδεύτηκαν περίπου 20 ταξινομητές. Οι ακρίβειές τους εμφανίζονται δίπλα στα ονόματά τους κάτω από τον πίνακα ιστορικού. Ένας γραμμικός ταξινομητής SVM έχει την καλύτερη απόδοση, παράγοντας ακρίβεια 86% στα δείγματα αναμονής. Αυτός ο ταξινομητής δυσκολεύεται να αναγνωρίσει το "ClearanceGapWear" το οποίο ταξινομεί ως "ImpellerOutletDeposit" στο 40% των περιπτώσεων.



Εικόνα 66 Αξιολόγηση εκπαιδευμένων ταξινομητών

7. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μοντελοποίηση των φυγοκεντρικών αντλιών, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης, της ανίχνευσης βλαβών και την κατανόηση των δυναμικών τους συμπεριφορών υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Τα αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση και την ανάλυση παρέχουν χρήσιμα συμπεράσματα που μπορούν να συμβάλλουν στην αύξηση της αποτελεσματικότητας της συντήρησης, στη μείωση του κόστους και στην πρόληψη των βλαβών, με άμεσο αντίκτυπο στην παραγωγικότητα και την ασφάλεια των εγκαταστάσεων.

Η ανάλυση και η μοντελοποίηση των φυγοκεντρικών αντλιών αποκάλυψε σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους. Τα δυναμικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν για τις αντλίες παρείχαν ακρίβεια στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς των αντλιών υπό διαφορετικά φορτία και συνθήκες. Αυτή η βελτιωμένη πρόβλεψη επιτρέπει την προσαρμογή των λειτουργιών των αντλιών, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και μεγιστοποιώντας την απόδοση.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η χρήση μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη τις μη γραμμικές συμπεριφορές των αντλιών σε συνθήκες μεταβαλλόμενης ταχύτητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παραδοσιακές προσεγγίσεις, που βασίζονται σε σταθερές ταχύτητες και εξισώσεις σταθερής κατάστασης, δεν μπορούν να δώσουν ακριβή αποτελέσματα όταν οι αντλίες λειτουργούν υπό δυναμικές συνθήκες. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στο Simulink, με τη χρήση εργαλείων όπως το "LPV System" για την προσομοίωση τμηματικά γραμμικών συστημάτων, έδειξαν καλύτερη προσαρμογή σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της ευελιξίας των φυγοκεντρικών αντλιών.

Μια από τις κύριες προκλήσεις στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις είναι η έγκαιρη ανίχνευση και η διάγνωση βλαβών. Οι φυγοκεντρικές αντλίες, λόγω της εκτεταμένης χρήσης τους και της πολυπλοκότητάς τους, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε φθορές και βλάβες που μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές διακοπές λειτουργίας. Η μελέτη ανέδειξε τη σημασία της παρακολούθησης κρίσιμων παραμέτρων, όπως η πίεση, η ροή και η ροπή, για την έγκαιρη ανίχνευση ανωμαλιών.

Οι τεχνικές ανίχνευσης βλαβών που βασίζονται στη μοντελοποίηση των παραμέτρων έδειξαν ότι η χρήση των δυναμικών μοντέλων σωλήνα και αντλίας μπορεί να αποδώσει ακριβείς εκτιμήσεις και να βοηθήσει στην ανίχνευση των βλαβών πριν αυτές προκαλέσουν σημαντικές βλάβες. Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι τα σφάλματα που προκαλούνται από τη φθορά της αντλίας, όπως οι φθορές στη φτερωτή ή στην έξοδο της περωτής, μπορούν να ανιχνευθούν έγκαιρα, επιτρέποντας στους υπεύθυνους συντήρησης να παρέμβουν πριν από την εκδήλωση σοβαρότερων προβλημάτων.

Ένα από τα κύρια συμπεράσματα της μελέτης είναι η δυνατότητα που προσφέρει η μοντελοποίηση για τη μείωση του κόστους συντήρησης. Οι ακριβείς προβλέψεις των μοντέλων επιτρέπουν τον προγραμματισμό της συντήρησης με βάση την πραγματική κατάσταση της αντλίας και όχι με βάση προκαθορισμένα χρονοδιαγράμματα. Αυτό σημαίνει ότι οι εργασίες συντήρησης μπορούν να πραγματοποιούνται μόνο όταν είναι πραγματικά απαραίτητες, μειώνοντας έτσι το κόστος και τις περιττές παρεμβάσεις.

Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει επίσης στην αύξηση της αξιοπιστίας των αντλιών. Η ανίχνευση ανωμαλιών και η πρόληψη βλαβών εξασφαλίζουν ότι οι αντλίες παραμένουν λειτουργικές για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, χωρίς απρόβλεπτες διακοπές λειτουργίας. Η αύξηση της διάρκειας ζωής των αντλιών και η μείωση του χρόνου εκτός λειτουργίας έχει άμεσο οικονομικό όφελος, ιδίως για βιομηχανίες που βασίζονται σε συνεχείς διαδικασίες παραγωγής.

Μια από τις σημαντικές συνεισφορές της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας ενσωμάτωσης μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης για την περαιτέρω βελτίωση των προγνωστικών μοντέλων. Η εφαρμογή νευρωνικών δικτύων και μοντέλων μαύρου κουτιού έδειξε ότι μπορούν να παρέχουν ακριβέστερες εκτιμήσεις για τις παραμέτρους της αντλίας, βοηθώντας στην πρόβλεψη πιθανών βλαβών και την αποδοτική λειτουργία των συστημάτων η προσέγγιση που ακολουθήθηκε έκανε χρήση διαφόρων τύπων μοντέλων ARX και νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη των τιμών πίεσης και ροής. Η προσέγγιση αυτή έδειξε πολύ καλή απόδοση, επιτρέποντας την πρόβλεψη σφαλμάτων με υψηλή ακρίβεια, ειδικά σε συνθήκες που περιλαμβάνουν μη γραμμικές αποκλίσεις.

Βιβλιογραφία

- Ahonen, T. (2011). *Monitoring of centrifugal pump operation by a frequency converter*. Lappeenranta University of Technology.
- Ahonen, T., Kortelainen, J. T., Tamminen, J. K., & Ahola, J. (2012). Centrifugal pump operation monitoring with motor phase current measurement. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 42(1), 188-195.
- Dalton, T. and Patton, R. Model-based fault diagnosis of a two-pump systems. In IFAC World Congress, pages 79–84, San Francisco, CA, USA, 1996.
- Dixon, S. Fluid mechanics, thermodynamics of turbomachinery. Pergamon Press, Oxford, 1966.
- Fritsch, H. Dosierpumpen. Verlag moderne industrie, Landsberg/Lech, 1989.
- Fuest, K. Elektrische Maschinen und Antriebe. Vieweg, Wiesbaden, 3rd edition, 1989.
- Fussel, D. " Fault diagnosis with tree-structured neuro-fuzzy systems. Fortschr.- Ber. VDI Reihe 8, 957. VDI Verlag, Dusseldorf, 2002.
- Geiger, G. Technische Fehlerdiagnose mittels Parameterschätzung und " Fehlerklassifikation am Beispiel einer elektrisch angetriebenen Kreiselpumpe. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8, 91. VDI Verlag, Dusseldorf, 1985
- Haus, F. Methoden zur Störungsfrüherkennung an oszillierenden " Verdrängerpumpen " . Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8, 1109. VDI Verlag, Dusseldorf, 2006.
- Hawibowo, S. Sicherheitstechnische Abschätzung des Betriebszustandes von " Pumpen zur Schadensfrüherkennung " . Doctoral thesis. Technische Universität Berlin, Berlin, 1997.
- Hellmann, D. Early fault detection – an overview. *Worldpumps*, (5):2, 2002.
- Hellmann, D., Kafka, D., Spath, D., and Kafka, C. Preisgünstige " Überwachungssystem durch intelligente Datenanalyse. " Technische Überwachung " , 39(7/8):45–50, 1998.

Higham, E. and Perovic, S. Predictive maintenance of pumps based on signal analysis of pressure and differential pressure (flow) measurements. *Trans. of the Institute of Measurement and Control*, 23(4):226–248, 2001.

Huhn, D. Störungsfrüherkennung an wellendichtungslosen Pumpen durch bauteilintegrierte Sensorik. Doctoral thesis. Technische Universität, Kaiserslautern, 2001.

Isermann, R. Fault-diagnosis systems – An introduction from fault detection to fault tolerance. Springer, Heidelberg, 2006.

Isermann, R. Mechatronic systems – fundamentals. Springer, London, 2003.

Isermann, R. Mechatronic systems – fundamentals. Springer, London, 2nd printing edition, 2005.

Jamadar, I. M., Bellary, S. A. I., Kanai, R. A., & Alrobaian, A. A. (2019). Model-based condition monitoring for the detection of failure of a ball bearing in a centrifugal pump. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 19, 1556-1568.

Kafka, T., editor. Aufbau eines Störungsfrüherkennungssystems für Pumpen der Verfahrenstechnik mit Hilfe maschinellen Lernens. Doctoral thesis. Univ. Kaiserslautern, Kaiserslautern, 1999.

Kallweit, S. Untersuchungen zur Erstellung wissensbasierter Fehlerdiagnosesysteme für Kreiselpumpen. Doctoral thesis. Technische Universität. "

Klockgether, J. and Wesser, U. Statistische Analyse von kavitationsspezifisches Schallsignalen aus Notkühlpumpen. Abschlussbericht des BMFT Forschungsvorhaben RS 284. Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik (FIZ), Leopoldshafen, 1981

Kollmar, D. Störungsfrüherkennung an Kreiselpumpen mit Verfahren des maschinellen Lernens. Doctoral thesis. Technische Universität, Kaiserslautern, 2002.

Lobanoff, V. S., & Ross, R. R. (2013). Centrifugal pumps: design and application. Elsevier.

Michaelsen, A. Untersuchung zur automatischen Diagnose von Kreiselpumpen mit Verfahren der Signalanalyse und Mustererkennung. Shaker, Doctoral thesis. TU Hamburg, Harburg. Aachen, 1999.

Muller-Petersen, R., Kenull, T., and Kosyna, G. Störungsfrüherkennung an Kreiselpumpen mit Hilfe der Motorstromanalyse. In Proc. VDI-Conference Elektrisch-mechanische Antriebssysteme Innovationen-Trends-Mechatronik, pages 441–453, VDI-Bericht Nr. 1963. Boblingen, Germany, September 2006

Nold, S. and Isermann, R. Die Beurteilung des Pumpenzustands durch Identifikation der Parameter von statischen und dynamischen Pumpenmodellen. In Vetter, G., editor, Pumpen. Vulkan-Verlag, Essen, 1992.

Nold, S. and Isermann, R. Model-based fault detection for centrifugal pumps and AC drives. In 11th IMEKO World Congress, Houston, TX, USA, October 1988.

Nold, S. Wissensbasierte Fehlererkennung und Diagnose mit den Fallbeispielen Kreiselpumpe und Drehstrommotor. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8, 273. VDI Verlag, Dusseldorf, 1991. "

Nuglisch, K. Entwicklung eines anlagenunabhängigen "Störungsfrüherkennungssystems für Pumpen auf der Basis des maschinellen "Lernens. Doctoral thesis. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, "2006.

Pfleiderer, C. and Petermann, H. Stromungsmaschinen ". Springer, Berlin, 7th edition, 2005.

Schlucker, E., Blanding, J., and Murray, J. Guidelines to maximize reliability "and minimize risk in plants using high pressure process diaphragm pumps. In 16th Pump User Symposium, pages 70–100, Houston, TX, USA, 1999.

Schroder, D. " Elektrische Antriebe 1. Springer, Berlin, 1995.

Tuzson, J. (2000). Centrifugal pump design. John Wiley & Sons.

VDMA Fachgemeinschaft Pumpen. Betreiberumfrage zur Störungsfrüherkennung bei Pumpen. VDMA, Frankfurt, 1995.

Wilson, K. C., Addie, G. R., Sellgren, A., & Clift, R. (2006). *Centrifugal pumps* (pp. 190-226). Springer US.

Wolfram, A. and Isermann, R. Component-based tele-diagnosis approach to a textile machine. In Proc. 1st IFAC Conference on Telematic Application, Weingarten, Germany, 2001.

Wolfram, A. Komponentenbasierte Fehlerdiagnose industrieller Anlagen am Beispiel frequenzumrichtergespeister Asynchronmaschinen und Kreiselpumpen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8, 967. VDI Verlag, Dusseldorf, 2002.

Wolfram, A., Fussel, D., Brune, T., and Isermann, R. Component-based multi-model approach for fault detection and diagnosis of a centrifugal pump. In Proc. American Control Conference (ACC), Arlington, VA, USA, 2001.