



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών

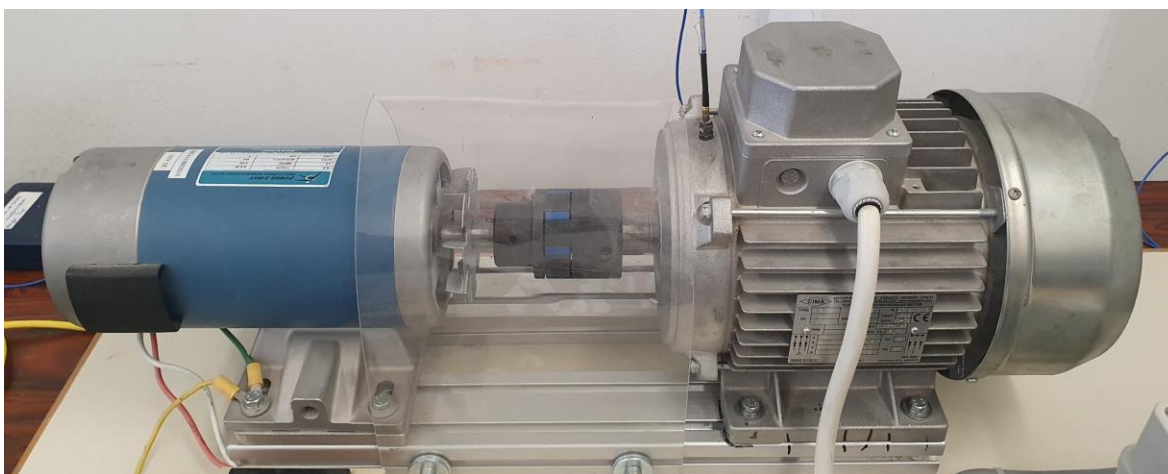
Κατασκευαστικός Τομέας

Εργαστήριο Στοχαστικών Μηχανολογικών Συστημάτων
& Αυτοματισμού

Εύρωστη ανίχνευση εναρκτήριων βλαβών σε περιστρεφόμενο μηχανισμό υπό μεταβαλλόμενη ταχύτητα λειτουργίας μέσω σημάτων ταλάντωσης και προηγμένων στατιστικών μεθόδων χρονοσειρών

Μπούρδαλος Δημήτριος

[Αριθμός Μητρώου 1054526]



**Εκτενής περίληψη διπλωματικής εργασίας
στην Ελληνική Γλώσσα**

Επιβλέπων: Ι. Σ. Σακελλαρίου, Επίκουρος Καθηγητής

Πάτρα, Φεβρουάριος 2022

Κατάλογος Συμβάσεων

Πίνακες - διανύσματα υποδεικνύονται με παχείς (bold) χαρακτήρες, μικρούς για διανύσματα, κεφαλαίους για πίνακες.

Εκτιμήσεις/-τριες υποδεικνύονται μέσω καπέλου (hat), για παράδειγμα το $\hat{x}$ αποτελεί εκτιμήτρια/-ηση του μεγέθους x .

Ο χρόνος, ως όρισμα συναρτήσεως, παριστάνεται σε παρενθέσεις στην αναλογική περίπτωση, π.χ. $x(t)$, αλλά σε αγκύλες στην διακριτή/ψηφιακή περίπτωση, π.χ. $x[t]$.

Κατάλογος Συμβόλων

a_{ij}	Παράμετροι Πολυωνύμου (AR) Αυτοπαλινδρόμησης
$e_k[t]$	Υπόλοιπα μοντέλου FP-AR για την κατάσταση λειτουργίας k
$G_i(k)$	i -οστή συναρτησιακή βάση
k	Διάνυσμα μεταβαλλόμενων συνθηκών λειτουργίας μοντέλου FP-AR
M	Αριθμός σημάτων ταλάντωσης για την εκπαίδευση των μεθόδων ανίχνευσης
n_a	Τάξη μοντέλου AR
ρ	Διάσταση συναρτησιακού υποχώρου μοντέλου FP-AR
D	Χαρακτηριστική ποσότητα στατιστικού ελέγχου
$y_k[t]$	Στοχαστικό σήμα απόκρισης υπό την συνθήκη λειτουργίας k
$y_u[t]$	Στοχαστικό σήμα απόκρισης υπό άγνωστη συνθήκη λειτουργίας
α	Όριο στατιστικού ελέγχου
θ	Διάνυσμα παραμέτρων
τ	Χρονική καθυστέρηση

1. Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η δυνατότητα αυτοματοποιημένης ανίχνευσης εναρκτήριων βλαβών σε περιστρεφόμενους μηχανισμούς υπό μεταβαλλόμενη ταχύτητα λειτουργίας, με βάση σήματα ταλάντωσης και προηγμένες στατιστικές μεθόδους χρονοσειρών. Οι εξεταζόμενες βλάβες δεν προκαλούν εμφανείς επιδράσεις στα ταλαντωτικά σήματα στο πεδίο του χρόνου ούτε και στα χαρακτηριστικά τους (π.χ. rms, διασπορά), ενώ οι επιδράσεις τους στα φάσματα των σημάτων καλύπτονται σχεδόν πλήρως από τις επιδράσεις των διαφορετικών ταχυτήτων λειτουργίας, καθιστώντας έτσι την ανίχνευσή τους ιδιαίτερα απαιτητική. Το ειδικό πρόβλημα που εξετάζεται δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, παρά την σημαντικότητά του ως προς την μείωση του κόστους συντήρησης, καθώς και την αύξηση της ασφάλειας. Στην παρούσα μελέτη για την αντιμετώπισή του χρησιμοποιούνται τρεις ισχυρές στατιστικές μέθοδοι χρονοσειρών. Τα ταλαντωτικά σήματα συλλέγονται μέσω ενός αισθητηρίου από τον εξεταζόμενο εργαστηριακό περιστροφικό μηχανισμό, ο οποίος αποτελείται από δύο ηλεκτρικούς κινητήρες συνδεδεμένους μέσω κόμπλερ. Η αξιολόγηση της απόδοσης των μεθόδων πραγματοποιείται μέσω χιλιάδων περιπτώσεων ελέγχου, τόσο με τον υγιή μηχανισμό, όσο και με τρεις εναρκτήριες βλάβες, υπό 21 διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Η πρώτη και η δεύτερη βλάβη δημιουργούνται μέσω μείωσης της ροπής σύσφιξης δύο κοχλίων στήριξης του κινητήρα, ενώ η τρίτη μέσω επιφανειακής φθοράς στο ελαστικό στοιχείο (spider) του κόμπλερ.

Οι περιστρεφόμενες μηχανές και τα περιστρεφόμενα στοιχεία μηχανών αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι σχεδόν κάθε μηχανολογικής κατασκευής ή εγκατάστασης. Συστήματα αξόνων, ηλεκτρικών μηχανών, αντλιών, κιβωτίων μετάδοσης ισχύος γραμμών παραγωγής, ανεμογεννητριών, ελικοπτέρων και σιδηροδρομικών οχημάτων είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα με πολυπλοκότητα που συνεχώς αυξάνεται. Ως εκ τούτου η εύρυθμη λειτουργία τους, αποτελεί πρόκληση για τον σύγχρονο μηχανικό. Οι μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας (πχ. ταχύτητα περιστροφής, θερμοκρασία, φορτίο), η κόπωση (κοχλίων, εδράνων, γραναζιών, αξόνων) και οι αστοχίες υλικών, οδηγούν σε βλάβες οι οποίες αν δεν ανιχνευτούν έγκαιρα μπορεί να αποδειχθούν καταστροφικές, τόσο σε οικονομικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο ασφάλειας εργαζομένων και χειριστών.

Στο πλαίσιο πρόληψης των παραπάνω, έχουν αναπτυχθεί τακτικές και μέθοδοι συντήρησης, που ανά τα χρόνια αλλάζουν και εξελίσσονται. Ολοένα και περισσότερα δεδομένα έχουν έρθει στο χώρο, με νέες τεχνικές και φιλοσοφίες να εφαρμόζονται σε διεθνές επίπεδο, με κύριο στόχο την έγκαιρη ανίχνευση εναρκτήριων βλαβών. Ειδικά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, σύμφωνα με τους, το ενδιαφέρον της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας στην συντήρηση των περιστρεφόμενων μηχανών έχει αυξηθεί. Υπό το πρίσμα της ραγδαίας τεχνολογικής εξέλιξης αλλά και της πολυπλοκότητας των συστημάτων περιστροφικών μηχανισμών που συνεχώς αυξάνεται, η συντήρηση αποκτά την μορφή διαγνωστικών συστημάτων, τα οποία παρακολουθούν την δυναμική της κατασκευής κάθε στιγμή σε «on-line» μορφή ώστε να ανιχνεύουν έγκαιρα τις βλάβες.

Ωστόσο, με παρόμοιο τρόπο με τις βλάβες επηρεάζουν την δυναμική της κατασκευής οι συνθήκες λειτουργίας και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες (Environmental and Operating Conditions, EOCs), όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ταχύτητα και το φορτίο. Ειδικότερα, η ταχύτητα περιστροφής αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα λειτουργίας όσον αφορά τους περιστρεφόμενους μηχανισμούς, καθώς οι συχνότητες της μετρούμενης ταλάντωσης, επηρεάζονται άμεσα από την συχνότητα περιστροφής. Έτσι, οι μεταβολές που επιφέρουν στα δυναμικά χαρακτηριστικά του υπό εξέταση μηχανισμού, μπορούν να ανιχνευτούν λανθασμένα ως βλάβες και να προκληθεί εσφαλμένος συναγερμός. Στις περισσότερες εφαρμογές τους τόσο στη βιομηχανία όσο και σε άλλες κατασκευές, οι μηχανές περιστρέφονται με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, οπότε και η διερεύνηση της επίδρασης της στα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής με σκοπό την εύρωστη ανίχνευση πρώιμων βλαβών και την προληπτική της συντήρηση υπό την αβεβαιότητα της ταχύτητας περιστροφής, αποτελεί ιδιαίτερα ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης.

2. Επισκόπηση βιβλιογραφίας

Οι μέθοδοι για την ανίχνευση εναρκτήριων βλαβών υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας μπορούν να ταξινομηθούν σε μη παραμετρικές και παραμετρικές. Οι μη παραμετρικές μέθοδοι αντιμετωπίζουν το πρόβλημα με την εξαγωγή κατάλληλων χαρακτηριστικών από το πεδίο του χρόνου, συχνότητας ή χρόνου-συχνότητας μέσω πολύπλοκων τεχνικών επεξεργασίας σήματος προκειμένου να εκπαιδεύσουν μεθόδους ταξινόμησης μηχανικής μάθησης, όπως τα Support Vector Machine (SVM) [1], k-Nearest Neighbor (k-NN) [2, 3] ή νευρωνικά δίκτυα (CNN) [4, 5], προκειμένου να επιτύχουν επιτηρούμενη ανίχνευση συγκεκριμένων βλαβών. Τέτοιες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση αρχικών ρωγμών οδοντωτών τροχών και βλαβών σε έδρανα κύλισης υπό διαφορετικές ταχύτητες λειτουργίας και φορτία, απαιτώντας σημαντικό όγκο δεδομένων για την εκπαίδευσή τους, που συχνά συλλέγονται από πολλαπλούς αισθητήρες. Επιπλέον, αυτές οι μέθοδοι αν και μπορεί να είναι αποτελεσματικές, απαιτούν να είναι εκ των προτέρων γνωστοί οι τύποι των επιδράσεων των εξεταζόμενων βλαβών στα χαρακτηριστικά των ταλαντωτικών σημάτων, όπως η χαρακτηριστική συχνότητα σφάλματος (FCF) που προκύπτει από τις περιοδικές ώσεις που προκαλούνται από ελαττωματικά ρουλεμάν (εσωτερικός δακτύλιος, εξωτερικός δακτύλιος, στοιχείο κύλισης) ή ρωγμές οδοντωτών τροχών. Επιπλέον, εκπαιδεύονται για την ανίχνευση μιας συγκεκριμένης βλάβης, γεγονός που καθιστά αδύνατη την ανίχνευση διαφόρων άλλων πιθανών μηχανισμών φθοράς (π.χ. ελαφρά διάδοση της φθοράς) στα ίδια στοιχεία (έδρανα, γρανάζια).

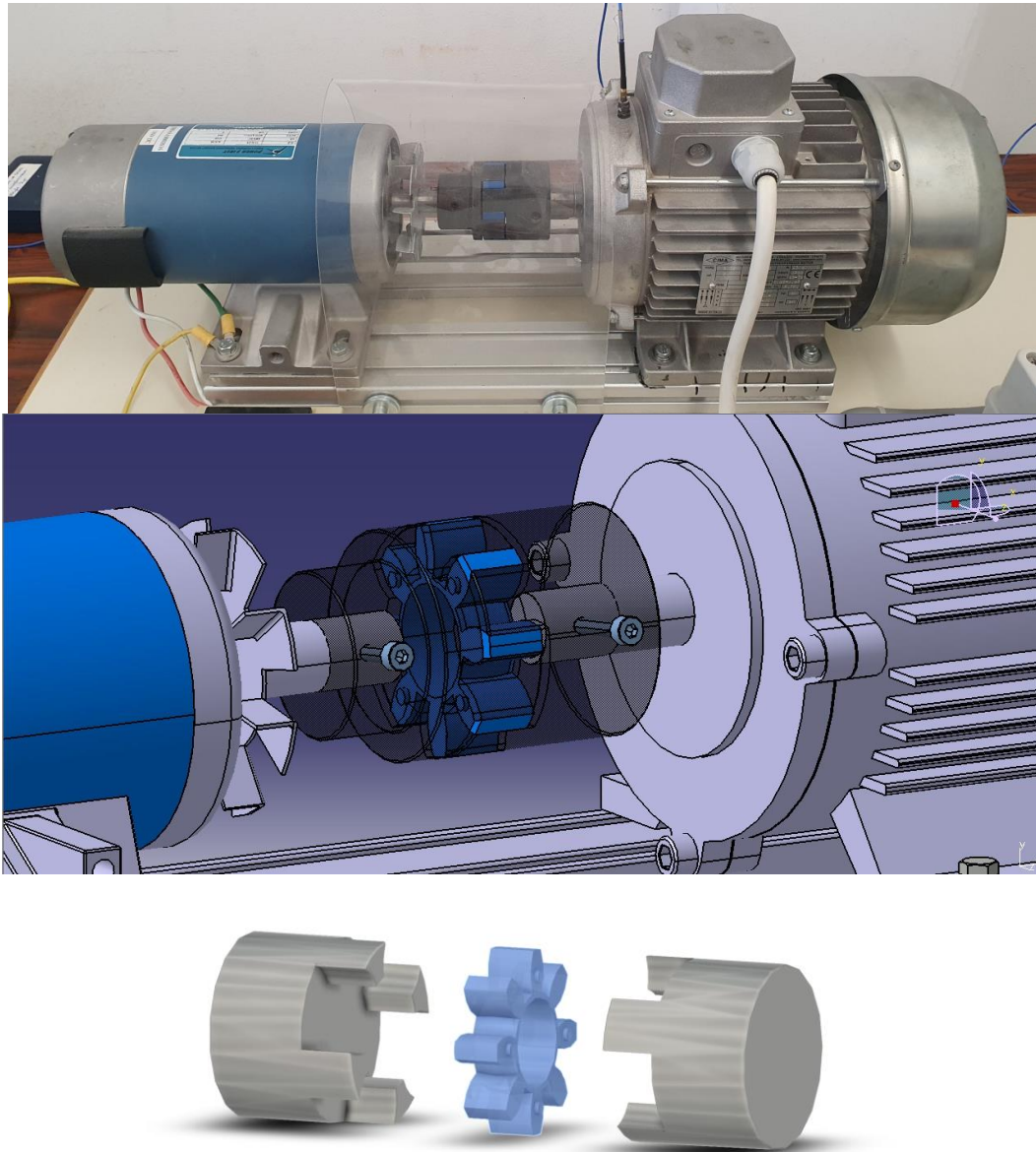
Από την άλλη πλευρά, οι παραμετρικές μέθοδοι επιχειρούν τη μη επιτηρούμενη ανίχνευση βλαβών υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, χρησιμοποιώντας αρχικά τεχνικές μείωσης θορύβου για την εξαγωγή επαναληπτικών σημάτων ταλάντωσης από πρόσθετο θόρυβο, υπό την προϋπόθεση ότι η επαναλαμβανόμενη συχνότητα είναι επακριβώς γνωστή, και έπειτα με τη χρήση κατάλληλων χαρακτηριστικών ποσοτήτων (π.χ. διασπορά) του σήματος των υπολοίπων, όπως αυτό προκύπτει από μοντέλα τύπου AutoRegressive (AR), Moving Average (MA) με εξωγενή (ARMAX) είσοδο. Ειδικότερα, έχουν ανιχνευθεί με τη χρήση μοντέλων ARMA [6] ή AR [7] βλάβες, με ωστόσο αξιοσημείωτη επίδραση στα σήματα ταλάντωσης στο πεδίο του χρόνου και στα φάσματά τους, σε περιορισμένο αριθμό διαφορετικών φορτίσεων. Πιο πρόσφατα, μοντέλα AR [8], ARX [9] ή διανυσματικά AR (VAR) [10] έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση βλαβών υπό λίγες διαφορετικές φορτίσεις κατά τη διάρκεια πειραμάτων run-to-failure, τα οποία οδηγούν σε ολική ρωγμή και αφαίρεση των δοντιών του οδοντωτού τροχού όντας έτσι ασαφές αν η ανίχνευση έχει επιτευχθεί σε αρχικό στάδιο της βλάβης.

3. Στόχος εργασίας

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι να εξετάσει για πρώτη φορά τις δυνατότητες αυτοματοποιημένης ανίχνευσης εναρκτήριων βλαβών σε μια περιστρεφόμενη μηχανή που λειτουργεί σε ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών ταχυτήτων μέσω τριών μη επιτηρούμενων στατιστικών μεθόδων χρονοσειρών βάση σήματα ταλαντώσεων, χωρίς καμία γνώση της εξεταζόμενης βλάβης και χωρίς τη χρήση απαιτητικών διαδικασιών επεξεργασίας σήματος και αποθορυβοποίησης. Η πρώτη, που είναι γνωστή ως Functional Model Based Method (FMBM) [11, 12] χρησιμοποιεί ένα συναρτησιακό μοντέλο FP-AR για την αναπαράσταση της δυναμικής του υγιούς μηχανήματος σε κάθε τιμή εντός του συνεχούς εύρους ταχυτήτων λειτουργίας, ενώ η ανίχνευση βλαβών βασίζεται στον έλεγχο της υπόθεσης λευκότητας των υπολοίπων του μοντέλου που λαμβάνεται μέσω μιας μη γραμμικής εκτιμήτριας. Η δεύτερη και η τρίτη μέθοδος βασίζονται σε μία αναπαράσταση πολλαπλών μοντέλων (MM) [13] μέσω της οποίας η υγιής δυναμική αναπαρίσταται μέσω πολλαπλών, διακριτών, τυπικών μοντέλων AR και η ανίχνευση επιτυγχάνεται μέσω μιας μετρικής απόστασης ομοιότητας. Η διαφορά μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης μεθόδου έγκειται στο γεγονός πως η Τρίτη ενισχύεται επιπλέον μέσω ανάλυσης κύριων συνιστωσών (PCA).

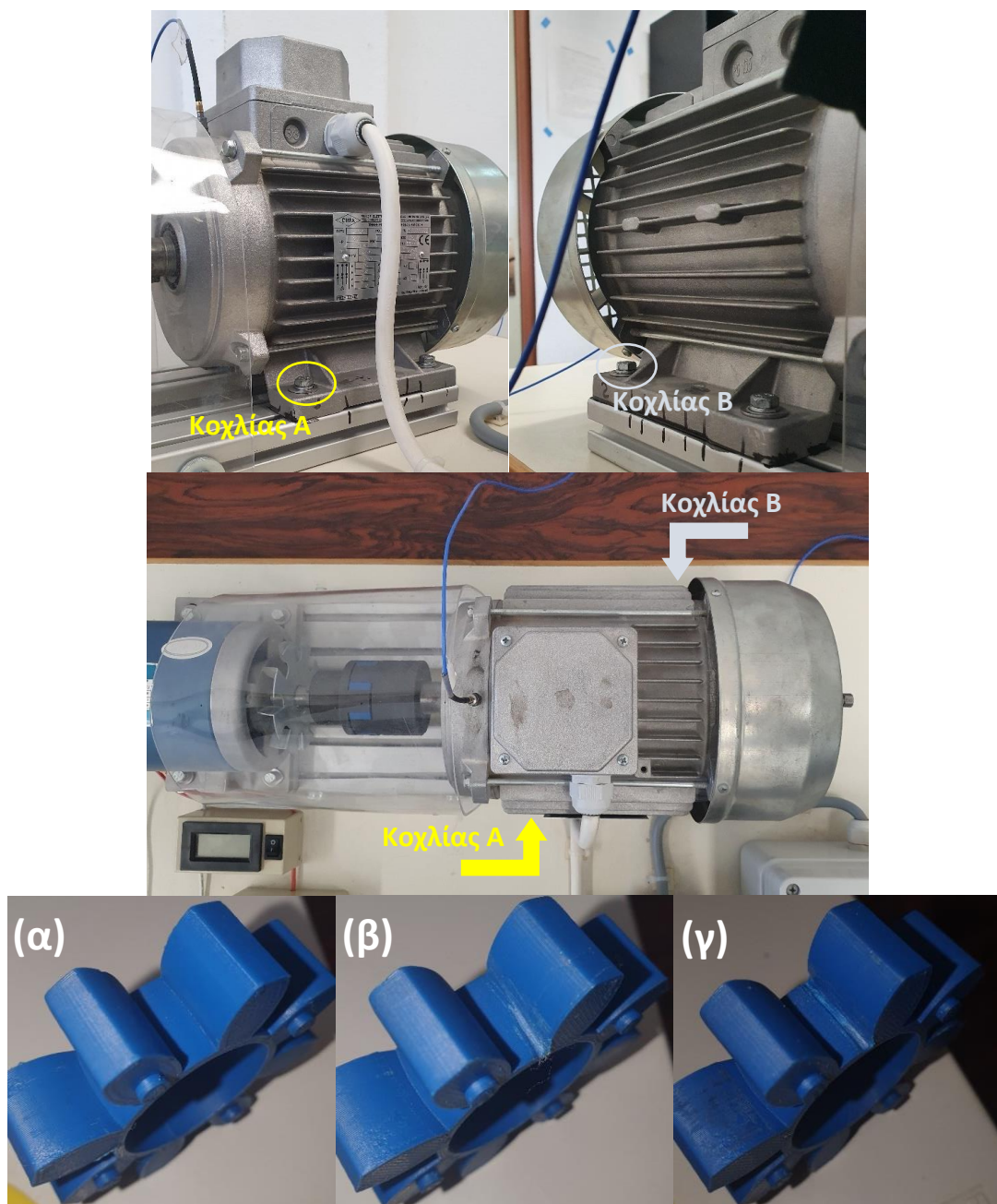
4. Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από δύο ηλεκτρικούς κινητήρες, συνδεδεμένους μέσω ενός κόμπλερ εμπλοκής αξόνων. Το κόμπλερ αποτελείται από 3 μέρη όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. Ο ρόλος του είναι να συνδέει τον άξονα του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα με τον άξονα της γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη. Η ροπή μεταφέρεται από το μεσαίο στοιχείο του κόμπλερ, που ονομάζεται Spider και στην παρούσα εργασία είναι εκτυπωμένο μέσω 3D εκτυπωτή.



Εικόνα 1. Εργαστηριακός περιστρεφόμενος μηχανισμός και τρισδιάστατη αναπαράσταση κόμπλερ.

Ο μηχανισμός λειτουργεί σε 21 διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής που κυμαίνονται από 800 (RPM) έως 2 800 (RPM), με βήμα 100 (RPM), ενώ οι περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία και υγρασία) θεωρούνται σταθερές. Ο κινητήρας είναι στερεωμένος στη βάση του με τέσσερις βίδες, οι οποίες, κατά την κανονική λειτουργία (υγιής κατάσταση) της περιστρεφόμενης μηχανής, σφίγγονται στα 5 (Nm) με τη χρήση δυναμόκλειδου. Τρία σενάρια βλάβης εξετάζονται το καθένα με δύο ποσοστά επιδείνωσης της βλάβης. Το πρώτο σενάριο βλάβης προκαλείται από τη μείωση της ροπής σύσφιξης του κοχλίου Α κατά 50% (2.5 Nm) και 100% (0 Nm) και συμβολίζεται ως D_1^{50} και D_1^{100} , αντίστοιχα. Ομοίως, το δεύτερο σενάριο βλάβης προκαλείται με τη μείωση της ροπής σύσφιξης του κοχλίου Β, και συμβολίζεται ως D_2^{50} και D_2^{100} . Το τελευταίο σενάριο βλάβης προκαλείται με τη χειροκίνητη ανάπτυξη ελαφριάς φθοράς στη βάση ενός από τα δόντια του spider του κόμπλερ σε δύο διαφορετικά ποσοστά, 50% και 100% του συνολικού πλάτους του δοντιού, και συμβολίζονται ως D_3^{50} και D_3^{100} , αντίστοιχα.



Εικόνα 2. Σενάρια βλάβης: Αρίθμηση κοχλίων και διάδοση επιφανειακής φθοράς στο spider του κόμπλερ.

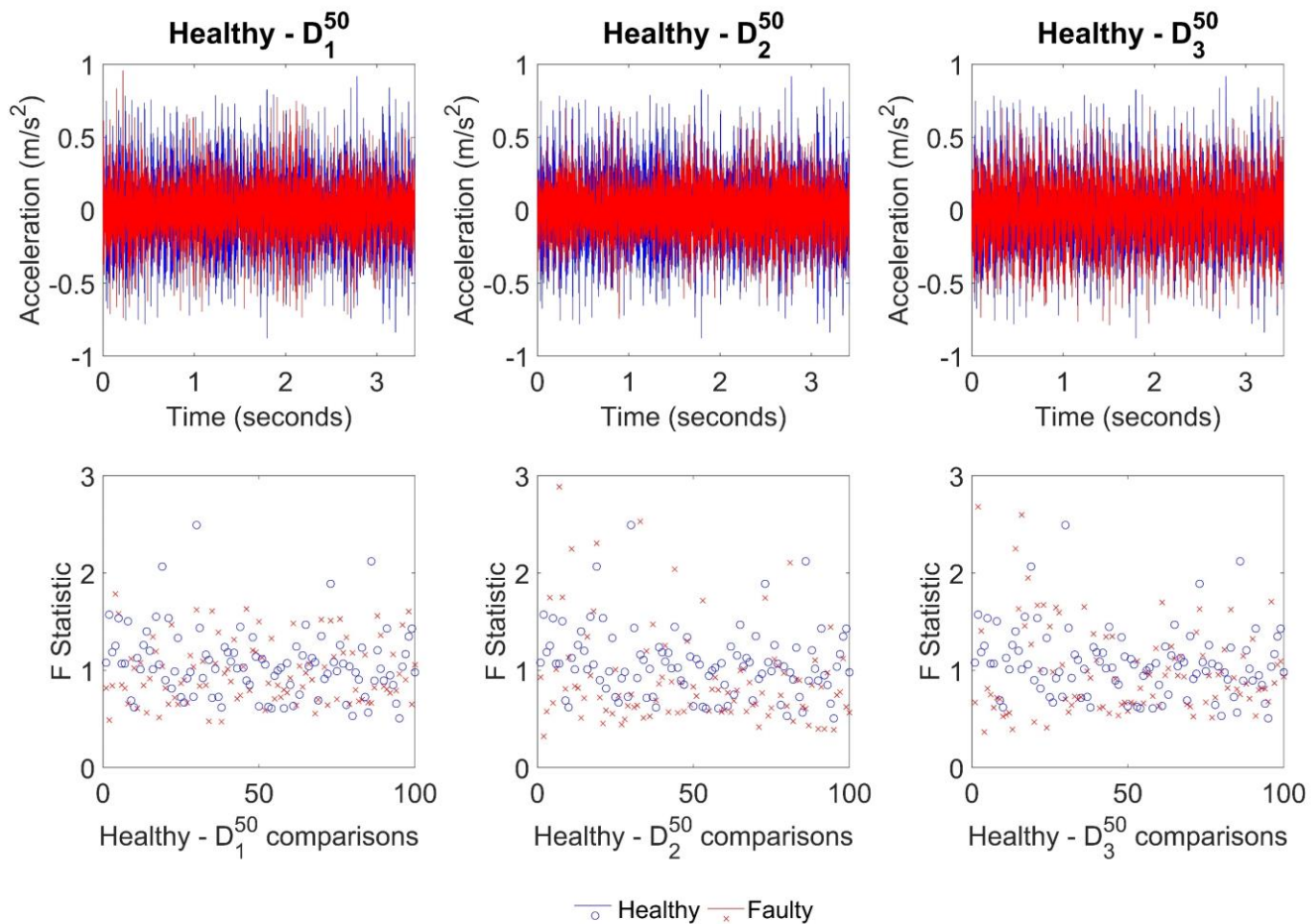
Σε κάθε μία από τις 21 εξεταζόμενες ταχύτητες περιστροφής διεξάγονται 6 πειράματα με τον υγιή μηχανισμό, που αντιστοιχούν σε συνολικά 126 πειράματα. Για κάθε σενάριο βλάβης, διεξάγονται 6 πειράματα σε κάθε ταχύτητα περιστροφής, με συνολικά 756 πειράματα (126 ανά σενάριο βλάβης). Από κάθε πείραμα λαμβάνεται ένα σήμα μήκους 30 720 δειγμάτων, το οποίο χωρίζεται σε 8 μέρη, μήκους 3 500 δειγμάτων το καθένα. Μόνο 21 σήματα με τον υγιή μηχανισμό (ένα ανά ταχύτητα περιστροφής) χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση των μεθόδων, ενώ 336 σήματα μαζί με 2 016 υπό-βλάβη σήματα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στη φάση ελέγχου (διάγνωσης). Λεπτομέρειες σχετικά με τα πειράματα και τα μετρούμενα σήματα παρουσιάζονται στον πίνακα.

Πίνακας 1. Λεπτομέρειες πειραμάτων και σημάτων

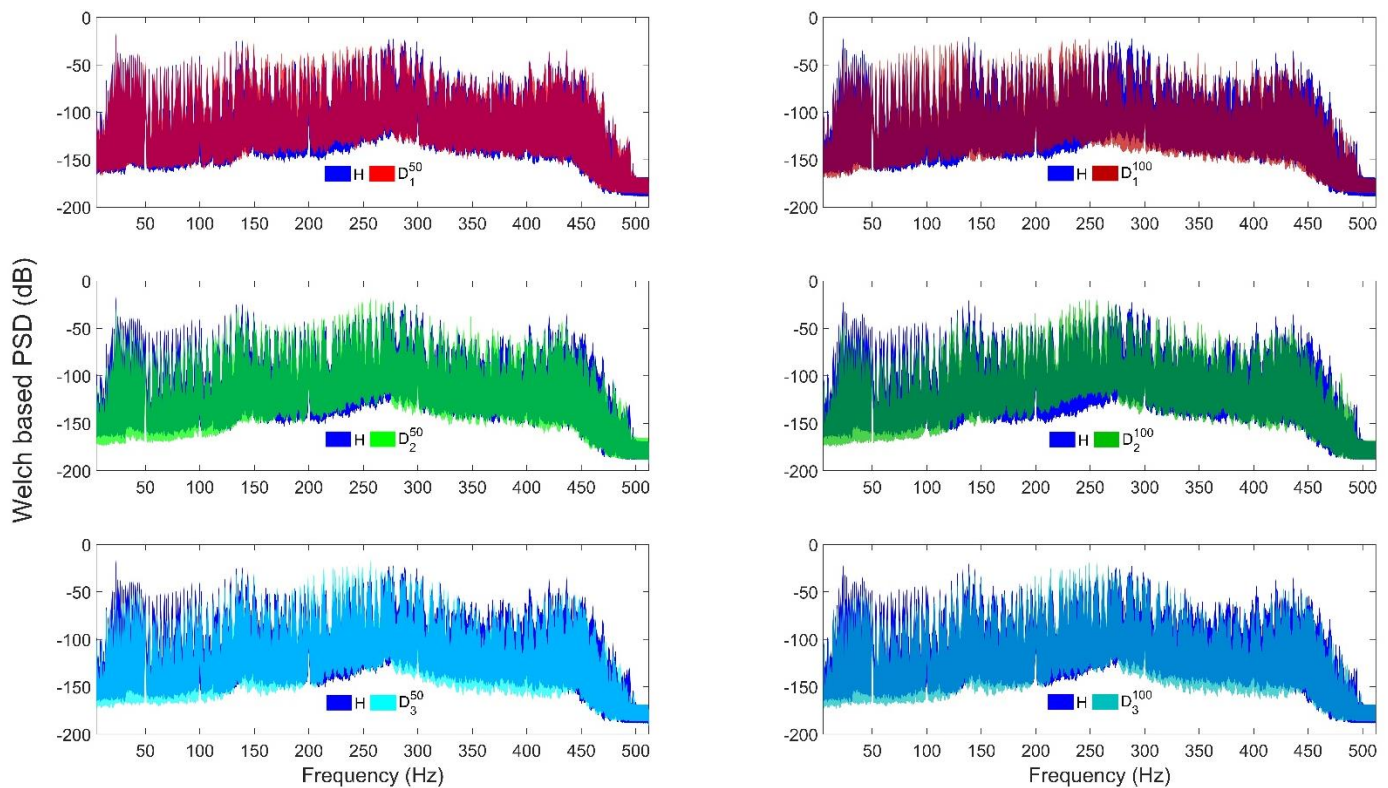
Κατάσταση μηχανισμού	Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	Ροπή σύσφιξης κοχλία A, B (Nm) ^c	Διάδοση φθοράς (%)	Αριθμός σημάτων
Φάση εκπαίδευσης				
Υγιής	Σετ A = [800 – 2 800] με βήμα 100	5, 5	0	21 ^a
Φάση Ελέγχου				
Υγιής (H)	A	5, 5	0	336 ^b
Βλάβη (D_1^{50})	-/-	2.5, 5	-/-	-/-
Βλάβη (D_1^{100})	-/-	0, 5	-/-	-/-
Βλάβη (D_2^{50})	-/-	5, 2.5	-/-	-/-
Βλάβη (D_2^{100})	-/-	5, 0	-/-	-/-
Βλάβη (D_3^{50})	-/-	5, 5	50	-/-
Βλάβη (D_3^{100})	-/-	5, 5	100	-/-

^a 1 πείραμα ανά ταχύτητα
^b 16 περιπτώσεις ελέγχου ανά ταχύτητα (6 ξεχωριστά πειράματα ανα ταχύτητα)
^c Newton-meter
 Συχνότητα δειγματοληψίας: $f_s = 1\,024\text{ Hz}$, μήκος σήματος: $N = 3\,500\text{ samples}$ (3.42 s), συχνοτικό εύρος: [5 – 512] Hz

Ενδεικτικά σήματα ταλάντωσης του μηχανισμού που λειτουργεί στις 800 (RPM) υπό υγιείς συνθήκες και υπό τα τρία διαφορετικά σενάρια βλάβης παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα. Όπως φαίνεται, οι εξεταζόμενες βλάβες δεν προκαλούν εμφανείς επιδράσεις στα σήματα στο πεδίο του χρόνου, γεγονός που καταδεικνύει το ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα ανίχνευσης. Αυτό υποστηρίζεται περαιτέρω από τα αποτελέσματα ενός τυπικού στατιστικού ελέγχου F-test για τη σύγκριση της δειγματικής διασποράς των σημάτων από τον υγιή και τον υπό βλάβη μηχανισμό. Στο διάγραμμα παρακάτω παρουσιάζονται 300 περιπτώσεις ελέγχου σημάτων σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής, αποδεικνύοντας ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις τιμές της στατιστικής ποσότητας F, γεγονός που υποδεικνύει ότι τα σήματα επιτάχυνσης είναι "ανεπηρέαστα". Επιπλέον, οι επιδράσεις των εξεταζόμενων βλαβών και της μεταβαλλόμενης ταχύτητας περιστροφής στη παρατηρούμενη δυναμική παρουσιάζονται μέσω εκτιμήσεων της φασματικής πυκνότητας ισχύος (PSD) με βάση την εκτίμηση Welch (μήκος σήματος $N = 3\,500$ δείγματα (3,42 s), παράθυρο Hamming, FFT=2 048, επικάλυψη = 95%, συχνοτική διακρισιμότητα: $\delta f = 0,5\text{ Hz}$) για τον υγιή και τον υπό-βλάβη μηχανισμό σε όλες τις εξεταζόμενες ταχύτητες. Οι επιδράσεις των βλαβών αποκρύπτονται σχεδόν πλήρως από τη σημαντική μεταβολή της δυναμικής που προκαλείται από τη μεταβολή της ταχύτητας.



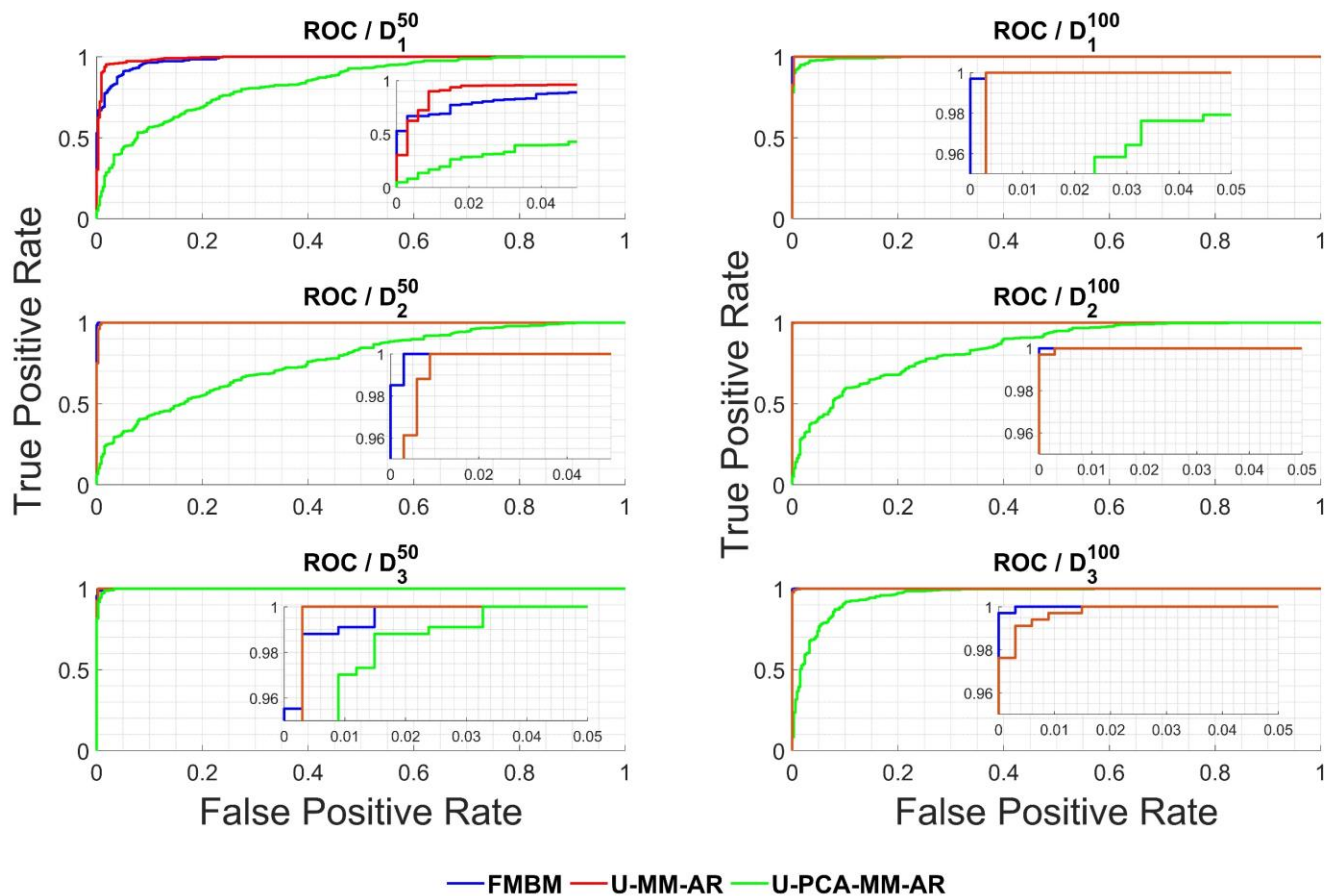
Εικόνα 3. Ενδεικτικά σήματα ταλάντωσης και αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου διασποράς.



Εικόνα 4. Φάσματα σύμφωνα με εκτίμηση Welch για όλα τα σενάρια βλάβης και όλες τις ταχύτητες περιστροφής.

5. Συγκριτικά αποτελέσματα ανίχνευσης

Συγκριτικά τα αποτελέσματα ανίχνευσης ανά μέθοδο ανίχνευσης και σενάριο βλάβης παρουσιάζεται μέσω των καμπυλών ROC και του αντίστοιχου ποσοστού σωστής και εσφαλμένης ανίχνευσης. Με βάση το διάγραμμα, είναι προφανές ότι η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται από τη μέθοδο FMBM και τη μέθοδο που βασίζεται στην U-MM-AR. Η απόδοση της μεθόδου που βασίζεται στην U-PCA-MM-AR είναι πολύ κατώτερη. Γενικά, τόσο η μέθοδος FMBM όσο και η μέθοδος U-MM-AR επιτυγχάνουν τέλεια ανίχνευση για τα σενάρια βλαβών, αποδεικνύοντας την υψηλή ευαισθησία και την ευρωστία τους στην ανίχνευση διαφόρων τύπων εναρκτήριων βλαβών σε περιστρεφόμενους μηχανισμούς σε διαφορετικές ταχύτητες λειτουργίας, χωρίς την ανάγκη για πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τις επιδράσεις των βλαβών στα χαρακτηριστικά των σημάτων. Η FMBM έχει υψηλότερο επίπεδο πολυπλοκότητας λόγω της απαίτησης εμπειρίας του χρήστη για τον προσδιορισμό της δυναμικής μέσω του μοντέλου FP-AR, καθώς και της απαίτησης των τιμών της ταχύτητας κατά τη φάση εκπαίδευσης, ενώ η κατασκευή της αναπαράστασης πολλαπλών μοντέλων είναι πιο απλή και δεν απαιτεί πρόσθετες πληροφορίες. Παρ' όλα αυτά, οι τιμές της ταχύτητας περιστροφής δεν χρειάζεται να είναι γνωστές κατά την κανονική λειτουργία και των δύο μεθόδων (φάση ελέγχου). Μια τελική παρατήρηση είναι ότι εάν ο μηχανισμός έχει επιβεβαιωθεί ως υγιής, η FMBM εκτιμά την ταχύτητα περιστροφής.



Εικόνα 5. Αποτελέσματα ανίχνευσης ανά σενάριο βλάβης και μέθοδο.

6. Συμπεράσματα

Το πρόβλημα της ανίχνευσης εναρκτήριων βλαβών σε περιστρεφόμενους μηχανισμούς υπό διαφορετικές ταχύτητες λειτουργίας βάση σημάτων ταλαντώσεων ενός επιταχυνσιομέτρου από μια πειραματική διάταξη και τρεις προηγμένες μεθόδους στατιστικών χρονοσειρών (STS) διερευνήθηκε επιτυχώς. Οι επιδράσεις των τεχνητά προκαλούμενων εναρκτήριων βλαβών στα μετρούμενα σήματα ταλάντωσης διερευνήθηκαν διεξοδικά, υποδεικνύοντας τη μηδενική επίδρασή τους στα χαρακτηριστικά των σημάτων στο πεδίο του χρόνου. Επιπλέον, η φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD) των σημάτων, αποκάλυψε τη σχεδόν πλήρη επικάλυψη αυτών των επιδράσεων από εκείνες που αντιστοιχούν στις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής, καταδεικνύοντας έτσι το ιδιαίτερα απαιτητικό πρόβλημα ανίχνευσης. Η απόδοση των χρησιμοποιούμενων μεθόδων αξιολογήθηκε συγκριτικά μέσω στατιστικά αξιόπιστων διαδικασιών με βάση χιλιάδες περιπτώσεις ελέγχου με τον υγιή μηχανισμό καθώς επίσης και με τρία σενάρια βλάβης. Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλή απόδοση ανίχνευσης τόσο για τη μέθοδο FMBM όσο και για τη μέθοδο που βασίζεται στην U-MM-AR, με τη μέθοδο FMBM να έχει ελαφρώς καλύτερες επιδόσεις και να παρέχει επίσης ακριβή εκτίμηση της ταχύτητας περιστροφής. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος με βάση την U-PCA-MM-AR κρίθηκε ακατάλληλη. Τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας μελέτης μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Η ανίχνευση εναρκτήριων βλαβών σε περιστρεφόμενους μηχανισμούς μπορεί να αντιμετωπιστεί με επιτυχία μέσω στατιστικών μεθόδων χρονοσειρών, παρά τις σημαντικές επιδράσεις της μεταβαλλόμενης ταχύτητας λειτουργίας (διαφορετικά επίπεδα σταθερής ταχύτητας) στην εξεταζόμενη δυναμική.
2. Η απόδοση της FMBM είναι σχεδόν ίδια με εκείνη της μεθόδου που βασίζεται στην U-MM-AR, αλλά και οι δύο, υπερτερούν της μεθόδου που βασίζεται στην U-PCA-MM-AR, με την FMBM να έχει ελαφρώς καλύτερη απόδοση και να παρέχει επίσης ακριβή εκτίμηση της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής.
3. Η αποτελεσματική ανίχνευση εναρκτήριων βλαβών σε περιστρεφόμενους μηχανισμούς, που λειτουργούν υπό διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής, μπορεί να επιτευχθεί χωρίς καμία εκ των προτέρων πληροφορία σχετικά με την επίδραση των βλαβών στα μετρούμενα σήματα ταλάντωσης.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Tabrizi, A., Garibaldi, L., Fasana, A., Marchesiello, S, "Early damage detection of roller bearings using wavelet packet decomposition, ensemble empirical mode decomposition and support vector machine", *Meccanica*, vol. 50, pp. 865-874, 2014.
- [2] Lei, Y., Zuo, M., "Gear crack level identification based on weighted K nearest neighbor classification algorithm", *Mechanical Systems and Signal Processing* vol. 23, pp. 1535-1547, 2009.
- [3] Wang, D. "K-nearest neighbors based methods for identification of different gear crack levels under different motor speeds and loads: revisited", *Mechanical Systems and Signal Processing* vol. 70-71, pp. 201-208, 2016.
- [4] Lei, Y., Zuo, M., He, Z., Zi, Y. "A multidimensional hybrid intelligent method for gear fault diagnosis", *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 1419-1430, 2010.
- [5] Xu, W., Jing, L., Tan, J. Dou, L., "A multimodel decision fusion method based on DCNN-IDST for fault diagnosis of rolling bearing", *Shock and Vibration*, vol. 2020, pp. 1-12, 2020.
- [6] Lin, C., Makis, V., "Application of vector time series modeling and T-squared control chart to detect early gearbox deterioration", *International Journal of Performability Engineering*, vol. 10, pp. 105-114, 2014.
- [7] Rofo, S., "Signal processing methods for gear box fault detection", *Defence Science and Technology Organization Technical Report*, DSTO-TR-0476, Australia 1997.
- [8] Wang, W., Wong, A., "Autoregressive model-based gear fault diagnosis", *Journal of Vibration and Acoustics* vol. 124, pp. 172-179, 2002.
- [9] Zhan, Y., Mechefske, C., "Robust detection of gearbox deterioration using compromised autoregressive modeling and Kolmogorov Smirnov test statistic. Part II: experiment and application", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol.21, pp. 1983-2011, 2007.

- [10] M. Yang and V. Makis, "ARX model-based gearbox fault detection and localization under varying load conditions", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 329, no. 24, pp. 5209-5221, November 2010.
- [11] T.-C. I. Aravanis, J. S. Sakellariou and S. D. Fassois, "A stochastic Functional Model based method for random vibration based robust fault detection under variable non-measurable operating conditions with application to railway vehicle suspensions", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 466, p. 115006, February 2020.
- [12] T.-C. Aravanis, J. Sakellariou and S. Fassois, "On the functional model-based method for vibration-based robust damage detection: versions and experimental assessment", *Structural Health Monitoring*, vol. 20, no. 2, pp. 456-474, March 2021.
- [13] J. S. S. F. K.J. Vamvoudakis-Stefanou, "Vibration-based damage detection for a population of nominally identical structures: Unsupervised Multiple Model (MM) statistical time series type methods", *Mechanical Systems and Signal Processing*, pp. 149-171, 2018.