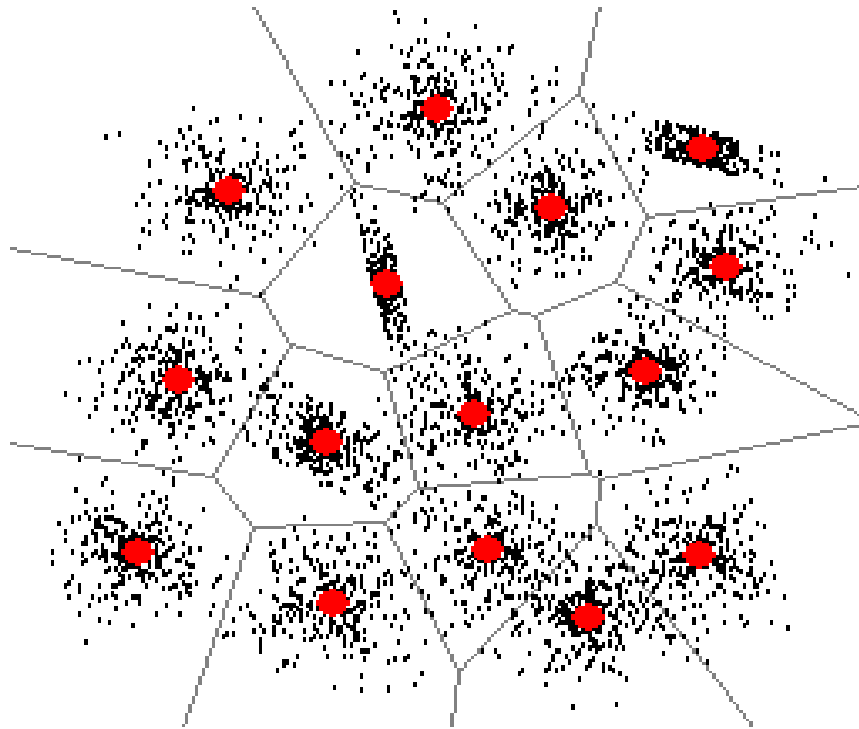




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΟΜΑΔΩΝ



ΚΑΛΙΝΤΖΕΟΣ ΑΓΓΕΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2007

Περιεχόμενα

Πρόλογος

Κεφάλαιο 1^ο *Μέθοδος Ταξινόμησης Ομάδων*

1.1. Εισαγωγή	1.1
1.2. Γενική Περιγραφή Ανάλυσης Ομάδων	1.8
1.3. Βασικά Χαρακτηριστικά του Αλγόριθμου K means	1.9
1.4. Εφαρμογές του Αλγόριθμου K means	1.12
1.5. Μειονεκτήματα του Αλγόριθμου K means	1.17
1.6. Παράμετροι Εκτίμησης Απόστασης	1.19
1.7. Διάφοροι Τύποι Κλάσεων	1.20
1.8. Εφαρμογή	1.23

Κεφάλαιο 2^ο *Μοντελοποίηση Απόκρισης Δυναμικών Σημάτων*

2.1. Στοχαστικό Πρότυπο Απόκρισης Ένσφαιρων Τριβέων	2.1
2.2. Πρότυπο Απόκρισης Γραναζιών	2.8

Κεφάλαιο 3^ο *Αλγόριθμος Ταξινόμησης*

3.1. Εισαγωγή	3.1
3.2. Πηγαίος Κώδικας Σταδιακής ταξινόμησης	3.2
3.3. Πηγαίος Κώδικας Άμεσης ταξινόμησης	3.7

Κεφάλαιο 4^ο *Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων*

4.1. Εισαγωγή	4.1
4.2. Παράμετροι Ταξινόμησης	4.9
4.3. Σταδιακή Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων	4.18
4.4. Άμεση Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων	4.33

Κεφάλαιο 5^ο *Ταξινόμηση Βιομηχανικών Σημάτων*

5.1. Εισαγωγή	5.1
5.2. Παράμετροι Ταξινόμησης	5.5
5.3. Σταδιακή Ταξινόμηση Βιομηχανικών Σημάτων	5.15
5.4. Άμεση Ταξινόμηση Βιομηχανικών Σημάτων	5.41

Βιβλιογραφία

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εκπόνηση της παρούσης διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Δυναμικής Μηχανών και Βιομηχανικών Συστημάτων του Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Αντικειμενικός σκοπός της διατριβής είναι η ανάπτυξη και η ορθή χρήση μαθηματικών εργαλείων στη διαγνωστική βλαβών ώστε να αναπτυχθεί σαφής και αξιόπιστη μελέτη στη δυναμική συμπεριφορά των μηχανών. Τα κεφάλαια που ακολουθούν πραγματεύονται μεθοδολογία που φιλοδοξεί να αντεπεξέλθει με αποτελεσματικότητα και να ερμηνεύσει με σαφήνεια κάποια από τα πολλά προβλήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι μηχανικοί μιας βιομηχανικής εγκατάστασης.

Η εργασία επικεντρώνεται στην προσπάθεια διαγνώσεως μηχανολογικών βλαβών με μεθόδους ταξινόμησης ομάδων δίδοντας την ευκαιρία στους μηχανικούς βιομηχανικών εγκαταστάσεων για γρήγορη έγκαιρη και εύκολη πρόβλεψη των βλαβών που μπορεί να εμφανίζονται σε μηχανολογικό εξοπλισμό. Η ταξινόμηση μελετήθηκε σε προσομοιωμένα και βιομηχανικά σήματα με τη μέθοδο kmeans και τα αποτελέσματα ήταν απόλυτα ικανοποιητικά. Οι αλγόριθμοι υπολογισμού σχεδιάστηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον LabVIEW και Matlab.

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας χρειάστηκε προσπάθεια. Κατω από αυτές τις συνθήκες θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με οποιονδήποτε τρόπο βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Πρώτον από όλους τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ι. Αντωνιάδη ο οποίος καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας σεβασμό και εμπιστοσύνη προς το πρόσωπο μου. Ευχαριστώ τον κ. Γιακόπουλο Χρήστο που μου παρείχε πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση και καλλιέργησε ένα ευχάριστο και δημιουργικό περιβάλλον στο εργαστήριο. Αισθάνομαι ιδιαίτερη ικανοποίηση προς το πρόσωπο του διότι μου έδωσε την ευκαιρία να βελτιώσω τις γνώσεις μου ως προς πρακτικά ζητήματα που σχετίζονται με μηχανολογικό εξοπλισμό και το χαρακτήρα μου. Τον ευχαριστώ για την ευγένεια και την υπομονή του.

Ακόμη αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τους Υ.Δ. Γρύλλια Κωσταντίνο και Παπασπυρίδη Φώτη για την συμπαράσταση και ηθική στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας.

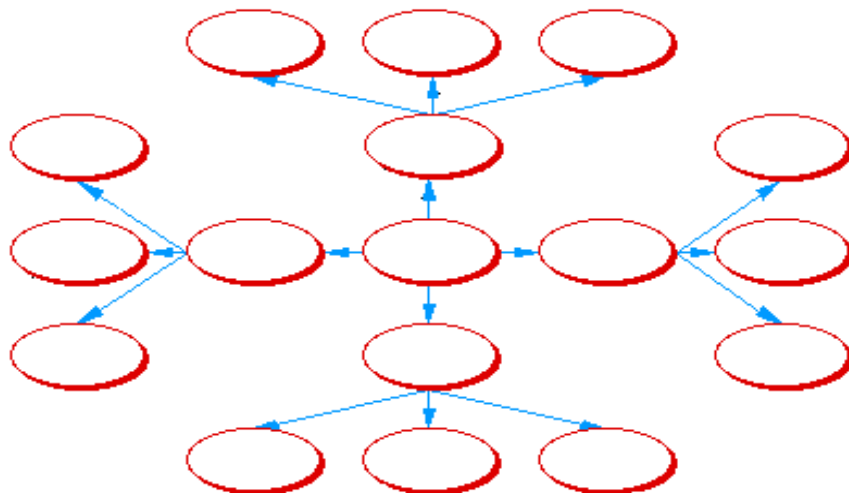
Θερμά ευχαριστώ τους Γονείς μου Παναγιώτη και Θεοκλεία-Μαρία καθώς και το θείο μου Αντώνιο Αντωνίου για την στήριξη και την ενθάρυνση κάθε φορά που προέκυπτε ανάγκη καθώς και για όλα όσα μου έχουν παράσχει έως σήμερα και συνεχίζουν να μου προσφέρουν.

Καλιντζέος Π. Άγγελος

Μέθοδος Ταξινόμησης Ομάδων

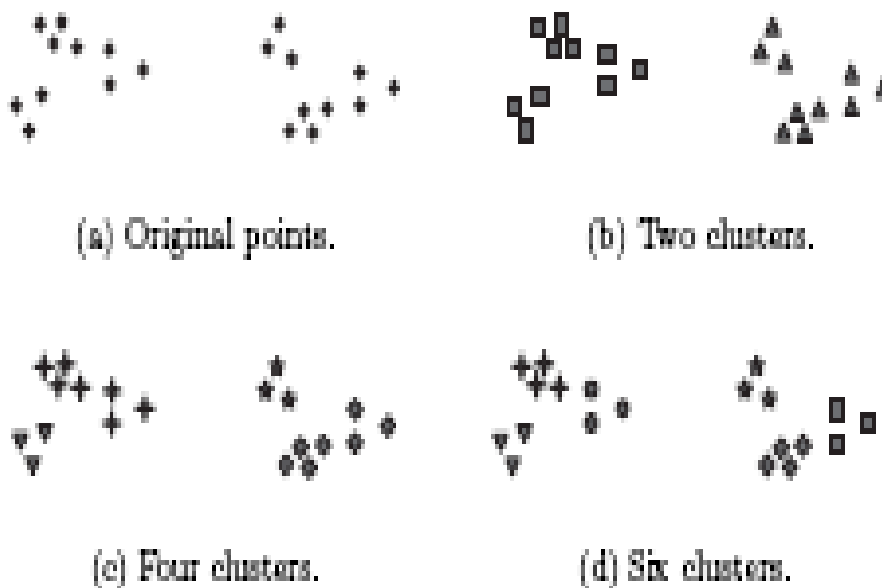
1.1. Εισαγωγή

Η Ταξινόμηση Ομάδων (*Cluster analysis*) είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται στην επίλυση προβλημάτων ομαδοποίησης και ταξινόμησης. Σκοπός της μεθόδου είναι η ομαδοποίηση δεδομένων σε ομοειδή σύνολα ώστε ο βαθμός ομοιότητας και σχέσης να είναι ισχυρός μεταξύ των μελών μιας ομάδας και ασθενής ανάμεσα στα μέλη διαφορετικών κατηγοριών. Κάθε κατηγορία επικαλείται ένα στοιχείο του οποίου τα χαρακτηριστικά είναι μοναδικά, και έτσι κάθε αντικείμενο που ανήκει σε αυτήν την ομάδα αποκτά τη δυνατότητα διάκρισής του από αντικείμενα που ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες. Παραστατικά η εικόνα της ταξινόμησης ομάδων φαίνεται στο σχήμα 1.1



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση ταξινόμησης ομάδων

Ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις η κεντρική ιδέα του σχηματισμού μιας κλάσης δεν είναι σαφώς ορισμένη. Για την κατανόηση της δυσκολίας της ιδέας σχηματισμού μιας κλάσης παραθέεται το σχήμα 1.2. Σε αυτό φαίνονται 20 διαφορετικά σημεία και τρεις διαφορετικοί τρόποι διαχωρισμού τους σε κλάσεις. Τα σχήματα τα οποία έχουν δοθεί δείχνουν στον αναγνώστη τον τρόπο σχηματισμού των κλάσεων. Ο τρόπος διαχωρισμού στο σχήμα θα μπορούσε να θεωρηθεί από κάποιους ως ένα παιχνίδι της ανθρώπινης κατανόησης του χώρου. Όμως κάποιιοι θα μπορούσαν να θεωρήσουν ότι δεν είναι εξωπραγματικό ότι τα σημεία σχηματίζουν τέσσερις κλάσεις όπως φαίνεται στο σχήμα. Από αυτό φαίνεται ότι ο σχηματισμός μιας κλάσης δεν είναι απόλυτα ακριβής και η καλύτερη κατανομή εξαρτάται κάθε φορά από τη φύση των δεδομένων και τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα.



Σχήμα 1. 2: Τρεις τρόποι διαχωρισμού των σημείων σε κλάσεις.

Πρακτικά η εφαρμογή του σχηματισμού κλάσεων μπορεί να βρει εφαρμογή σε πολλούς τομείς. Στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, σύγχρονα συστήματα συλλογής δεδομένων συγκεντρώνουν μετρήσεις, οι οποίες περιέχουν πολύτιμες πληροφορίες

σχετικά με την κανονική και μη λειτουργία του τεχνολογικού εξοπλισμού και των παραγωγικών διαδικασιών των μονάδων.

Θα ήταν ευεργετικό εάν υπήρχε η δυνατότητα οι μετρήσεις να ταξινομηθούν σε κατηγορίες που να χαρακτηρίζουν την κατάσταση λειτουργίας του μηχανολογικού εξοπλισμού, ώστε τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν κάθε ομάδα και οι πληροφορίες που περιέχονται σε αυτή να υποστηρίζουν επικουρικά την προσπάθεια των μηχανικών στην διάγνωση βλαβών. Έτσι, οι πληροφορίες και η γνώση που συγκεντρώνονται συστηματικά μέσω αυτής της τεχνικής γίνονται πολύτιμο εργαλείο στη διάγνωση βλαβών, όπου κάθε νέα κατάσταση λειτουργίας, την οποία χαρακτηρίζουν τα νέα μετρούμενα δεδομένα, ταξινομείται είτε σαν ήδη υπάρχουσα κατάσταση είτε σαν νέα κατάσταση.

Η ταξινόμηση ομάδων εφαρμόζεται σε ευρεία κλίμακα και με επιτυχία στην βιολογία, την ιατρική και την χημεία. Επίσης στο marketing βρίσκουμε γκρουπ από πελάτες με παρόμοια συμπεριφορά ανάμεσα σε σύνολο πελατών που συνιστούν την βάση δεδομένων. Αυτό γίνεται διατηρώντας αρχεία με την αγοραστική κίνηση όλων των πελατών και τη διαφοροποιημένη συμπεριφορά συγκεκριμένων ομάδων πελατών. Ακόμα ταξινόμηση ομάδων χρησιμοποιείται στις μελέτες σεισμογενών περιοχών. Εδώ έχουμε ταξινόμηση των περιοχών αυτών ανάλογα με το πόσο κοντά βρίσκεται σε αυτές το επίκεντρο σεισμών ώστε να χαρακτηριστούν επικίνδυνες ζώνες. Πάντως σε ότι αφορά μηχανολογικές εφαρμογές σπάνια παρατηρούνται διαγνωστικά προβλήματα.

Πληθώρα αλγορίθμων αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της ταξινόμησης χρησιμοποιώντας διάφορους συντελεστές ομοιότητας καθώς και συνδυασμούς αυτών. Στόχος της εργασίας είναι να αναπτυχθεί η μέθοδος ταξινόμησης βάσει δύο συντελεστών ομοιότητας. Ο πρώτος βασίζεται στην μέθοδο διαχωρισμού σημάτων Principal Component Analysis (PCA), ενώ ο δεύτερος υπολογίζει την απόσταση μεταξύ των σημείων που συνθέτουν διάφορα σύνολα δεδομένων με τη βοήθεια της μαθηματικής σχέσης που αφορά την εκτίμηση αποστάσεων κατά Mahalanobis.

Ο Krznowski το 1979 ανέπτυξε μια τεχνική υπολογισμού της ομοιότητας που παρουσιάζουν δύο σύνολα δεδομένων χρησιμοποιώντας την μέθοδο διαχωρισμού σημάτων PCA για να κατασκευάσει τον κατάλληλο συντελεστή ομοιότητας. Τα δύο σύνολα δεδομένων αποτελούνται από n μεταβλητές, αλλά όχι απαραίτητα και από το ίδιο

πλήθος μετρήσεων. Κάθε σύνολο δεδομένων περιέχει k διαφορετικά και μοναδικά στοιχεία ($k < n$). Το πλήθος των k στοιχείων επιλέγεται έτσι ώστε να εκπροσωπεί το 95% της συνολικής στατιστικής διακύμανσης κάθε συνόλου δεδομένων. Έτσι, η ομοιότητα των δύο συνόλων δεδομένων ποσοτικοποιείται με την σύγκριση των k διαφορετικών στοιχείων που επιλέχθηκαν στην αρχή της διαδικασίας. Η ευχρηστία της μεθοδολογίας βασίζεται στην ποσοτικοποίηση του βαθμού ομοιότητας μεταξύ των συνόλων.

Ο συντελεστής ομοιότητας σύμφωνα με τη μέθοδο διαχωρισμού σημάτων PCA δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S_{PCA} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (\lambda_i^l \lambda_j^m) \cos^2 \theta_{ij}}{\sum_{i=1}^k \lambda_i^l \lambda_i^m} \quad (1.1)$$

όπου θ_{ij} είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του i^{th} στοιχείου του X_1 συνόλου δεδομένων και του j^{th} στοιχείου του X_2 συνόλου δεδομένων, λ_i^l είναι η i^{th} ιδιοτιμή του υποδιαστήματος L και λ_j^m είναι η j^{th} ιδιοτιμή του υποδιαστήματος M , L και M είναι τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις πρώτες k ιδιοτιμές των πινάκων της στατιστικής διακύμανσης των συνόλων X_1 και X_2 αντίστοιχα. Ο συντελεστής ομοιότητας S_{PCA} λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1.

Η μαθηματική σχέση που αφορά την εκτίμηση αποστάσεων κατά Mahalanobis, από το κέντρο c_1 του συνόλου X_1 έως το κέντρο c_2 του συνόλου X_2 ορίζεται ως εξής:

$$S_{dist} = \sqrt{(c_1 - c_2)^T \Sigma_1^{*-1} (c_1 - c_2)} \quad (1.2)$$

όπου c_1 και c_2 είναι τα διανύσματα των μέσων τιμών των συνόλων X_1 και X_2 αντίστοιχα. Το μητρώο Σ_1 αντιπροσωπεύει το μητρώο διακύμανσης του συνόλου δεδομένων X_1 , ενώ το μητρώο Σ_1^{*-1} είναι το ψευδο-αντίστροφο μητρώο του Σ_1 και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας απλή αποσύνθεση τιμών.

Η απόσταση δεδομένων κατά Mahalanobis είναι ένα σημαντικό εργαλείο στον προσδιορισμό του βαθμού ομοιότητας μιας ομάδας τιμών από ένα άγνωστο δείγμα ενός συνόλου μετρούμενων δεδομένων.

Οι παραπάνω συντελεστές ομοιότητας μπορούν να συνδυαστούν με σκοπό την αύξηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου. Ο νέος συντελεστής ομοιότητας, που προκύπτει, μπορεί να αποδοθεί από τον τύπο:

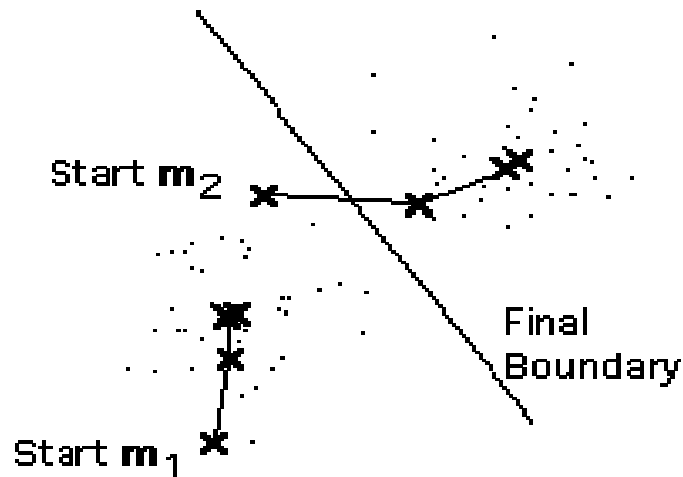
$$SF = \alpha_1 S_{PCA} + \alpha_2 S_{dist} \quad (1.3)$$

όπου $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

Για να κατανοήσουμε τη λογική της μεθόδου ταξινόμησης ως υποθέτουμε πως έχουμε n χαρακτηριστικά διανύσματα X_1, X_2, \dots, X_n , τα οποία ανήκουν στην ίδια κλάση C και διανέμονται σε K ομοειδή σύνολα, όπου $K < n$. Εάν τα ομοειδή σύνολα είναι σωστά καθορισμένα, μπορούμε να ορίσουμε έναν συντελεστή ταξινόμησης που θα μας επιτρέπει τον συστηματικό διαχωρισμό αυτών. Αρχικά, μπορούμε να θεωρήσουμε τους μέσους όρους $1 \dots k$ των K ομοειδών συνόλων. Ένας τρόπος να το επιτύχουμε είναι η απόδοση σε αυτούς τυχαίων τιμών. Θα πρέπει να είναι τοποθετημένα έξυπνα και με σωστό τρόπο καθώς διαφορετικές περιοχές προκαλούν διαφορετικά αποτελέσματα.

Έτσι η καλύτερη επιλογή είναι να τα βάζουμε όσο το δυνατόν πιο μακριά το ένα από το άλλο. Έπειτα προσδιορίζουμε τη σχέση των μελών κάθε διανύσματος X χρησιμοποιώντας τον τύπο $\|X - i\|$. Η ελάχιστη απόσταση των τιμών των διανυσμάτων X από τους μέσους όρους καθορίζει τα μέλη που ανήκουν σε κάποιο συγκεκριμένο σύνολο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε ένα από τα n διανύσματα.

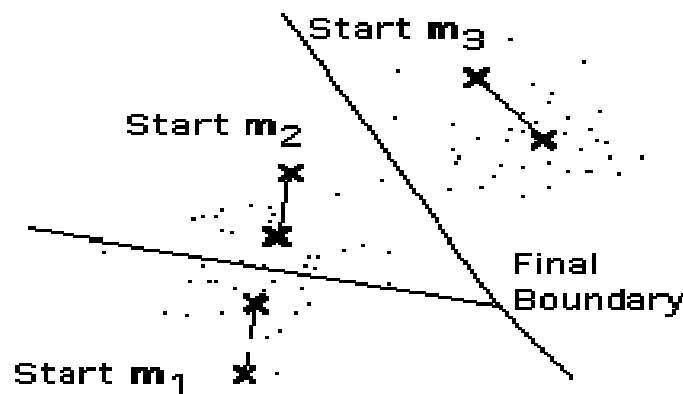
Στο σχήμα 1.4 παρατηρούμε τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου για $K=2$. Οι τιμές των μέσων όρων 1 και 2 επιλέγονται τυχαία και ο αλγόριθμος συγκλίνει όταν αυτοί πλέον δεν μεταβάλλονται. ($i = m_i$).



Σχήμα 1.4 : Ανάλυση Ταξινόμησης για $k=2$.

Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πλήθος των ομοειδών συνόλων που θα επιλέξουμε. Τις περισσότερες φορές δεν γνωρίζουμε τον αριθμό των ομοειδών συνόλων.

Στο σχήμα 1.5 παρατηρούμε τι συμβαίνει στην περίπτωση που επιλέξουμε $K=3$.

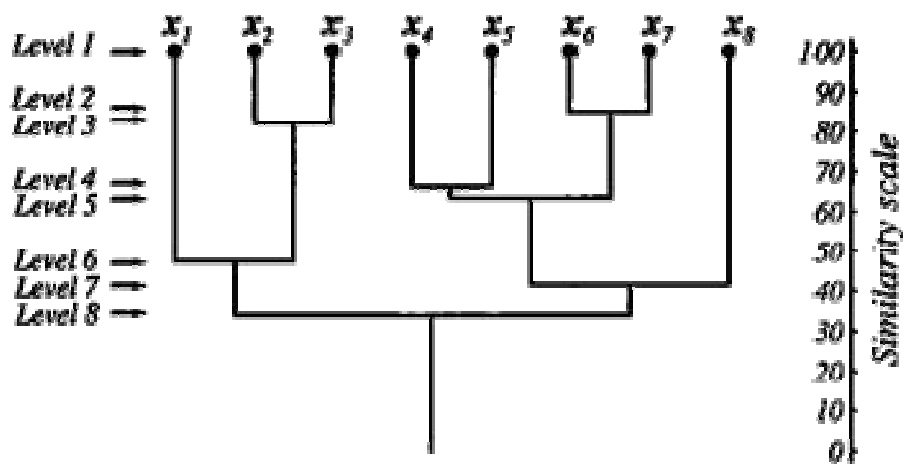


Σχήμα 1.5 : Ανάλυση Ταξινόμησης για $k=3$.

Πολλές φορές συμβαίνει ένα ομοειδές σύνολο να αποτελείται από υποσύνολα, τα οποία με τη σειρά τους να περιλαμβάνουν υποομάδες. Τέτοιου τύπου ταξινομήσεις ονομάζονται ιεραρχικές.

Μια ταξινόμηση ονομάζεται ιεραρχική όταν υπάρχουν δύο δείγματα, c_1 και c_2 , τα οποία ανήκουν στο ίδιο ομοειδές σύνολο για κάποιο επίπεδο K και παραμένουν στην ίδια ομάδα για κάθε επίπεδο μεγαλύτερο από K .

Στο σχήμα 1.6 μπορούμε να παρατηρήσουμε τον τρόπο ταξινόμησης ενός πλήθους δεδομένων, όπου με την αύξηση του επιπέδου K και τη μείωση του βαθμού ομοιότητας αυξάνεται και το πλήθος των δειγμάτων τα οποία ομαδοποιούνται μαζί με έναν ιεραρχικό τρόπο.



Σχήμα 1.6 Ιεραρχική Ταξινόμηση.

Ο αντικειμενικός σκοπός του έργου είναι η ανάπτυξη της μεθόδου ταξινόμησης ομάδων να συντελέσει στην δημιουργία ενός συστήματος αυτοματοποιημένης διάγνωσης βλαβών βιομηχανικού εξοπλισμού, όπου τα σήματα εισόδου θα είναι τα χρήσιμα χαρακτηριστικά που θα εξάγονται από τις διαγνωστικές μεθόδους που θα χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια του έργου.

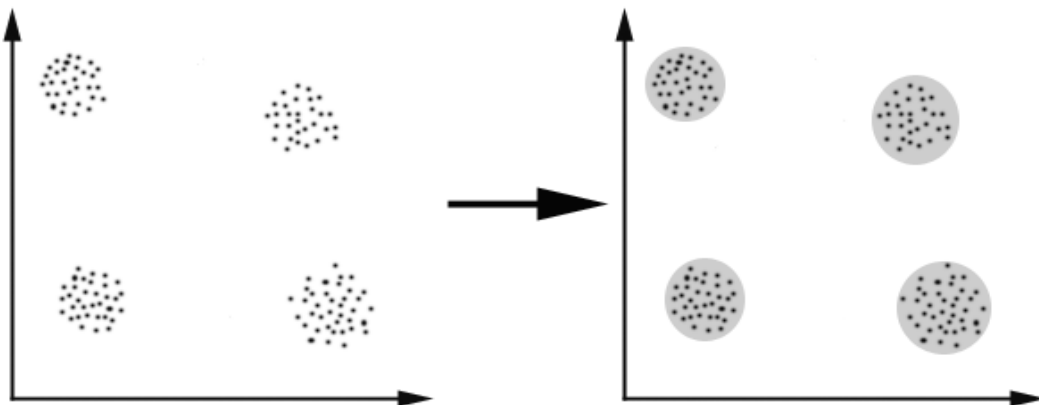
Τα χρήσιμα χαρακτηριστικά του σήματος που εξάγονται από τις επιστημονικές μεθόδους και αποτελούν τις εισόδους του συστήματος ταξινόμησης και χαρακτηρισμού της λειτουργικής κατάστασης του μηχανολογικού εξοπλισμού αναπτύσσονται στην ενότητα που αναφέρεται στα νευρωνικά δίκτυα.

1.2. Γενική Περιγραφή Ανάλυσης Ομάδων

Η ανάλυση σε ομάδες έχει σκοπό να διαχωρίσει το σύνολο των παρατηρήσεων σε φυσικές ομάδες, έτσι ώστε τα μέλη κάθε ομάδας να είναι όσο το δυνατό όμοια μεταξύ τους, ενώ τα μέλη διαφορετικών ομάδων να είναι όσο το δυνατό ανόμοια. Γεωμετρικά αυτό σημαίνει ότι δύο όμοιες παρατηρήσεις θα βρίσκονται σε γειτονικά σημεία, ενώ δύο ανόμοιες σεαπομακρυσμένα σημεία.

Η μέτρηση της απόστασης και της ομοιότητας είναι ουσιαστικής σημασίας αφού οι παρατηρήσεις ομαδοποιούνται με βάση αυτή την απόσταση. Υπάρχουν διάφορα μέτρα απόστασης, όπως η ευκλείδια απόσταση, η απόσταση Manhattan, η απόσταση Chebychev, ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson.

Στο σχήμα 1.7 μπορούμε εύκολα να αναγνωρίσουμε τις 4εις ομάδες στις οποίες τα δεδομένα μπορούν να διαχωριστούν. Το κριτήριο του διαχωρισμού τους είναι η απόσταση μεταξύ των σημείων. Δύο ή περισσότερα αντικείμενα ανήκουν στην ίδια κλάση αν είναι “κοντά” σύμφωνα με δεδομένη απόσταση. Ο τύπος αυτός δημιουργίας ομάδων ονομάζεται distance based clustering.



Σχήμα 1.7: Ταξινόμηση Ομάδων.

Ένας άλλος τύπος δημιουργίας ομάδων είναι ο conceptual clustering. Δύο ή περισσότερα αντικείμενα ανήκουν στην ίδια ομάδα με την ομάδα αυτή να καθορίζεται από ένα κοινό χαρακτηριστικό το οποίο έχουν τα αντικείμενα που ανήκουν σε αυτή. Δηλαδή τα αντικείμενα κατατάσσονται σύμφωνα με το αν ταιριάζουν με περιγραφικά δεδομένα και όχι με απλές μετρήσεις ομοιότητας.

Άλλη μέθοδος σχηματισμού των ομάδων είναι η ιεραρχική ανάλυση η οποία χρησιμοποιεί δύο τεχνικές, τη συσσωρευτική ανάλυση σε ομάδες ή την επιμεριστική ανάλυση σε ομάδες. Στη συσσωρευτική ανάλυση, οι ομάδες σχηματίζονται με την ομαδοποίηση των παρατηρήσεων σε όλο και μεγαλύτερες ομάδες, έως ότου όλες οι παρατηρήσεις γίνουν μέλη μιας και μόνο ομάδας. Η επιμεριστική ανάλυση αρχίζει με όλες τις παρατηρήσεις ομαδοποιημένες σε μια ομάδα και τις επιμερίζει μέχρις ότου γίνουν τόσες ομάδες όσες και οι παρατηρήσεις.

Υπάρχουν πολλά κριτήρια που καθορίζουν ποιες παρατηρήσεις ή ομάδες πρέπει να συνδυαστούν σε κάθε στάδιο, και διαφέρουν στον τρόπο με τον οποίο εκτιμούν τις αποστάσεις μεταξύ των ομάδων στα διαδοχικά στάδια. Ανάλογα με το κριτήριο που χρησιμοποιούμε μπορούμε να καταλήξουμε σε διαφορετικές κάθε φορά ομαδοποιήσεις. Όλα τα κριτήρια στηρίζονται σε πίνακα αποστάσεων μεταξύ ζευγών παρατηρήσεων. Έτσι έχουν δημιουργηθεί το κριτήριο του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbour) και το κριτήριο του απώτερου γείτονα (farthest neighbour). Με το κριτήριο του εγγύτερου γείτονα συνδυάζονται οι δύο πρώτες παρατηρήσεις που έχουν την μικρότερη απόσταση μεταξύ τους. Υπολογίζεται στη συνέχεια η μικρότερη απόσταση μεταξύ μιας παρατήρησης στη νέα ομάδα και μιας άλλης εξατομικευμένης παρατήρησης. Σε κάθε στάδιο η απόσταση μεταξύ δύο ομάδων θεωρείται η απόσταση μεταξύ των εγγύτερων σημείων τους. Με το κριτήριο του απώτερου γείτονα επικρατεί η ίδια λογική με την προηγούμενη με την διαφορά ότι η απόσταση μεταξύ των ομάδων υπολογίζεται ως αυτή των μακρύτερων σημείων τους.

Ακόμη υπάρχει και το κριτήριο του μέσου δεσμού. Ορίζει την απόσταση μεταξύ δύο ομάδων ως τη μέση τιμή των αποστάσεων μεταξύ όλων των ζευγών των παρατηρήσεων, όπου ένα μέλος ζεύγους προέρχεται από καθεμιά από τις ομάδες.

1.3. Βασικά Χαρακτηριστικά του Αλγόριθμου K means

Ο αλγόριθμος των k means clustering θα μπορούσε να περιγραφεί συντόμως από τα βήματα:

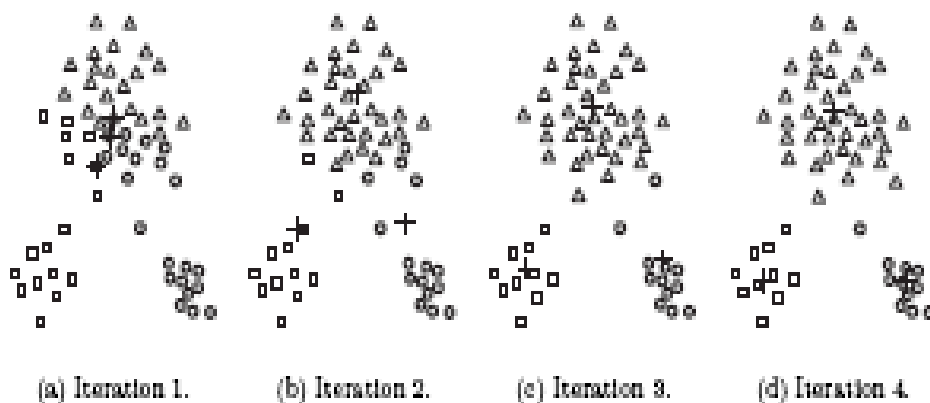
Τοποθετούμε K σημεία στο χώρο ο οποίος εκπροσωπείται από τα αντικείμενα τα οποία ομαδοποιούνται.

Αυτά τα σημεία εκπροσωπούν τα αρχικά κέντρα των κλάσεων. Κατανέμουμε κάθε αντικείμενο στο γκρουπ που έχει το κοντινότερο κέντρο σ αυτό. Όταν όλα τα σημεία έχουν κατανεμηθεί επανυπολογίζουμε τις θέσεις των K κέντρων.

Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 2 και 3 μέχρι τα κέντρα να μην μετακινούνται άλλο.

Αυτό παράγει διαχωρισμό των αντικειμένων σε γκρουπ από τα οποία μπορεί να υπολογιστεί η ελάχιστη τιμή της μέτρησης της μονάδος της απόστασης.

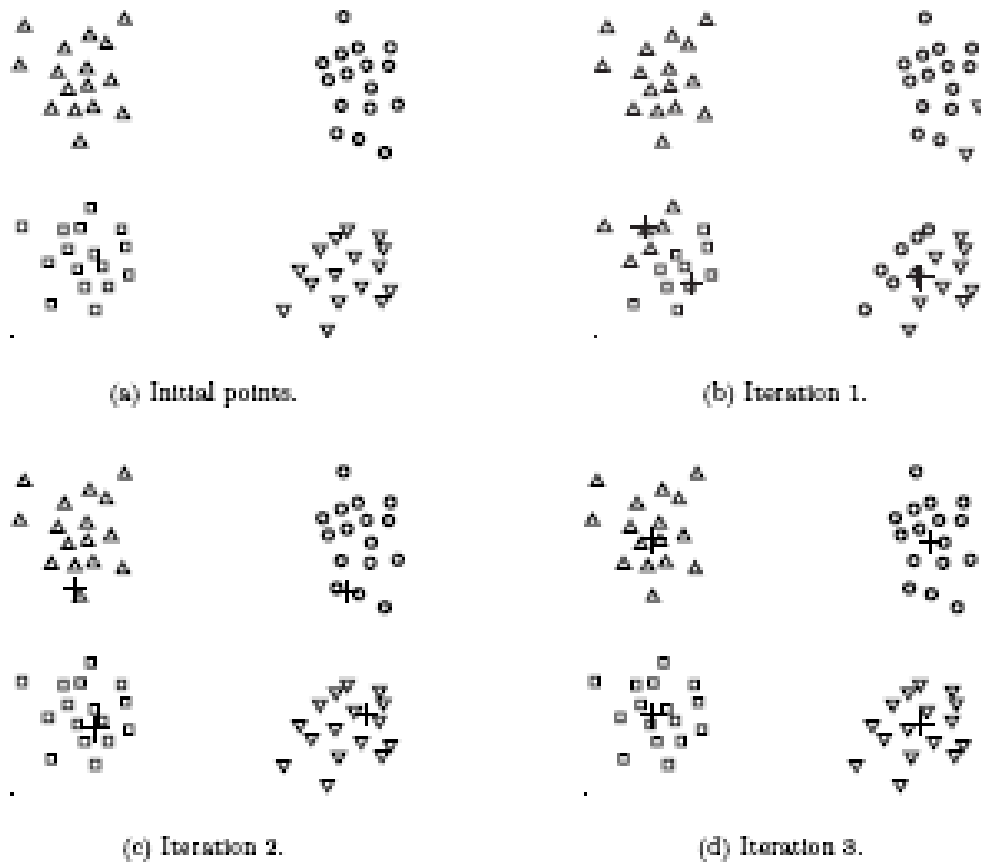
Στη συνέχεια παρατίθεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου των k means clustering στο απεικονιζόμενο σύνολο σημείων (σχήμα 1.8).



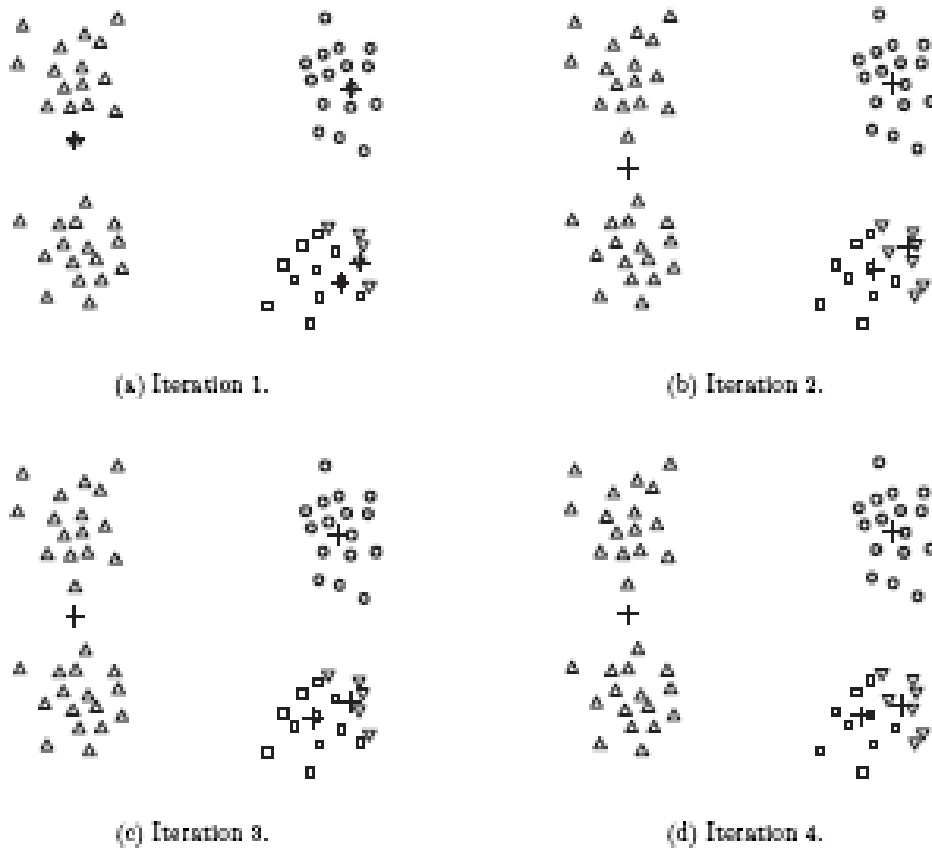
Σχήμα 1.8: Εφαρμογή του αλγορίθμου των k means.

Σε ένα σχηματικό παράδειγμα ίδιου τύπου με το 1.8 μπορούμε να δούμε τη συμπεριφορά του αλγορίθμου για το διαχωρισμό του σύνολου στοιχείων που παρατίθενται σε 4εις κλάσεις (σχήμα 1.9).

Βλέπουμε ότι ενώ αρχικά τοποθετούμε σε δύο κλάσεις δύο κέντρα, στη συνέχεια ο αλγόριθμος τα τοποθετεί στη σωστή τους θέση χωρίς να χάνει κάποια κλάση με την Τρίτη επανάληψη. Οστόσο δεν συμβαίνει το ίδιο με την περίπτωση διαχωρισμού των ίδιων δεδομένων με την τοποθέτηση δύο κέντρων κλάσεων σε δύο κλάσεις και άλλων δύο σε μία. Ειδικότερα όπως φαίνεται και από το σχήμα 1.10 ο αλγόριθμος χάνει μία κλάση τουλάχιστον στην τέταρτη επανάληψη.



Σχήμα 1.9 : Εφαρμογή του αλγόριθμου για τοποθέτηση 2 κέντρων σε δύο κλάσεις.



Σχήμα 1.10: Εφαρμογή του αλγόριθμου για τοποθέτηση 4 κέντρων σε 3εις κλάσεις.

1.4. Εφαρμογές του Αλγόριθμου K means

Ο K means clustering μπορεί να θεωρηθεί ως ένας από τα πιο σημαντικούς αλγόριθμους για την επίλυση του γνωστού προβλήματος της ταξινόμησης ο οποίος δεν χρειάζεται επίβλεψη. Η διαδικασία που ακολουθεί είναι ένας απλός και εύκολος τρόπος για να κατατάξει δεδομένα, τα οποία έχουν δοθεί ως κομμάτι ενός προβλήματος όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Έτσι δημιουργεί ένα συγκεκριμένο αριθμό κλάσεων που θα έχουν δημιουργηθεί εκ των προτέρων και ο αλγόριθμος προχωράει την διαδικασία πραγματοποιώντας ένα ένα τα βήματα για τα οποία έχει προγραμματιστεί.

Παρόλο που μπορεί να αποδειχθεί ότι η διαδικασία πάντα φτάνει σε τερματισμό, ο αλγόριθμος του clustering δεν βρίσκει πάντα απαραίτητα την βέλτιστη λύση, ανταποκρινόμενος στην αντικειμενική συνάρτηση με την οποία κάνει την επίλυση, καθώς είναι εξαιρετικά ευαίσθητος στα αρχικά, τυχαίως επιλεγόμενα κέντρα των κλάσεων. Μπορούμε να τρέξουμε τον αλγόριθμο των k means clustering πολλές φορές για να μειώσουμε το αποτέλεσμα αυτού του παράγοντα. Γενικά ο αλγόριθμος είναι απλός και χρησιμοποιείται για την επίλυση πολλών προβλημάτων. Ακόμη αποδεικνύεται στην πράξη ότι είναι ένα καλό εργαλείο για επίλυση προβλημάτων ταξινόμησης σε περίπτωση που τα δεδομένα είναι ιδιοδιανύσματα ασαφώς ορισμένα.

Ένα παράδειγμα που φαίνεται η χρησιμότητα του αλγορίθμου είναι το ακόλουθο:

Υποθέτουμε ότι έχουμε n διαφορετικά ιδιοδιανύσματα X_1, X_2, \dots, X_n όλα της ίδιας τάξεως και ξέρουμε ότι ταξινομούνται σε K συγκεκριμένες κλάσεις με $K \leq n$. Έστω ότι το m_i είναι το κέντρο των ιδιοδιανυσμάτων στην κλάση i . Εάν οι κλάσεις είναι σωστά διαμορφωμένες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το κριτήριο της ελάχιστης απόστασης για να τα ταξινομήσουμε. Κατά συνέπεια, ισχύει ότι το X είναι στην κλάση i εάν η απόλυτη τιμή της διαφοράς του από το κέντρο της κλάσης m_i

$$\|x - m_i\|$$

είναι η ελάχιστη από τις αποστάσεις των υπολοίπων κλάσεων.

Έτσι έχουμε την έναρξη της διαδικασίας για το σχηματισμό των κλάσεων όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα της θεωρίας. Στο σχήμα 1.3 σελίδα 1.7 φαίνεται πως κινούνται τα m_1, m_2 στο κέντρο των δύο κλάσεων.

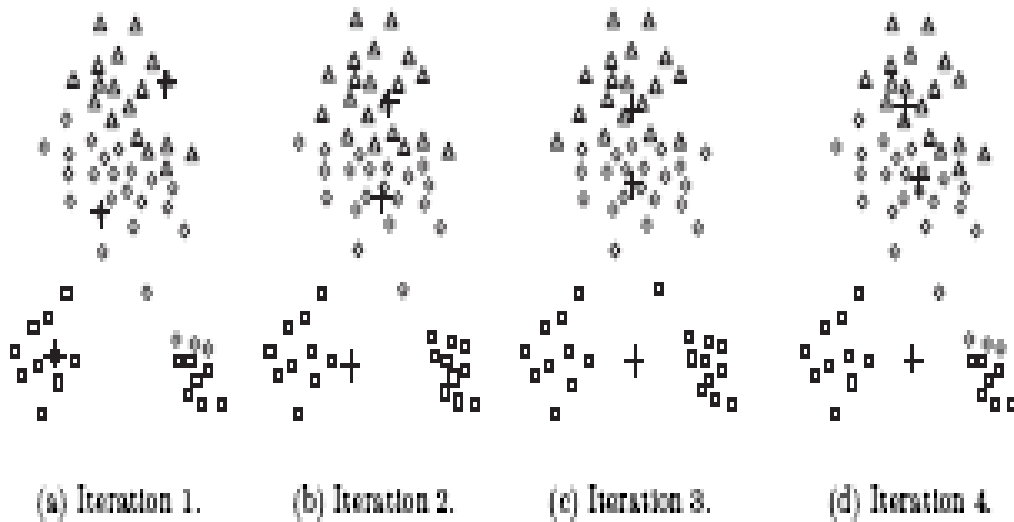
Αυτή ήταν μια απλή έκφραση του αλγορίθμου των k means clustering. Ο στόχος του αλγορίθμου είναι να ταξινομήσει τα n στοιχεία σε k κλάσεις ώστε να ελαχιστοποιήσει το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων τους από τα κέντρα των κλάσεων. Ο αλγόριθμος εκλαμβάνει το άθροισμα αυτό των τετραγώνων των αποστάσεων των στοιχείων από τα κέντρα των κλάσεων ως τιμή λάθους και το υπολογίζει σε κάθε επανάληψη. Στόχος του αλγορίθμου είναι καθώς συνεχίζει τις επαναλήψεις η τιμή του λάθους να σταθεροποιείται. Το τετραγωνικό λάθος προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο:

$$SSE = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} \text{dist}(c_i, x)^2 \quad (1.4)$$

- x : ένα στοιχείο των δεδομένων
- C_i : η κλάση i
- c_i : το κέντρο της κλάσης C_i
- K : ο αριθμός των κλάσεων
- m_i : ο αριθμός των στοιχείων στην κλάση i
- m : ο αριθμός όλων των στοιχείων

Στο σχήμα 1.12 φαίνεται ο αλγόριθμος, που με κάθε επανάληψη, υπολογίζει μία τιμή λάθους η οποία είναι το άθροισμα των τετραγώνων των μερικών αποστάσεων (κόκκινες γραμμές) μεταξύ των τρεχόντων διαμορφωμένων κέντρων των κλάσεων (πράσινες τελείες) για κάθε κλάση. Τα μέλη των κλάσεων είναι οι μωβ τελείες. Όταν έχουμε τυχαία αρχικοποίηση για τα κέντρα των κλάσεων και τρέχουμε τυχαία τον αλγόριθμο θα έχουμε τυχαία τιμή για το τετραγωνικό λάθος. Θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά η αρχική επιλογή των κέντρων καθώς είναι πολύ βασική για την ποιοτικότερη ταξινόμηση των δεδομένων.

Στο σχήμα 1.11 παρατίθενται μερικά παραδείγματα άστοχης αρχικοποίησης των κέντρων των κλάσεων.



Σχήμα 1.11: Άστοχη αρχικοποίηση κέντρων διαδικασίας ταξινόμησης.

Ένας προφανής τρόπος για να μειωθεί η τιμή του τετραγωνικού λάθους είναι να αυξήσουμε τον αριθμό των κλάσεων. Σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να θέλουμε να μειώσουμε την τιμή του τετραγωνικού λάθους χωρίς αύξηση του αριθμού των κλάσεων. Αυτό είναι εφικτό καθώς έχουν αναπτυχθεί στρατηγικές για την επίτευξη του. Ειδικότερα θα πρέπει να εστιαστεί η προσοχή σε κάθε μία από τις κλάσεις ξεχωριστά. Μειώνοντας το τετραγωνικό λάθος σε κάθε κλάση έχουμε μείωση του τετραγωνικού λάθους του συνόλου των δεδομένων. Ακόμη μπορεί να γίνει επέμβαση στις ίδιες τις κλάσεις δηλαδή είτε να τις χωρίζουμε είτε να τις ενσωματώνουμε σε άλλες. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να αλλάζουμε τις μεγάλες τιμές που μπορεί να υπάρχουν τοπικά για το τετραγωνικό λάθος ώστε να τείνουν προς μικρότερες.

Δύο στρατηγικές που χρησιμοποιούνται για τη μείωση του τετραγωνικού λάθους με την αύξηση του αριθμού των κλάσεων είναι οι ακόλουθες :

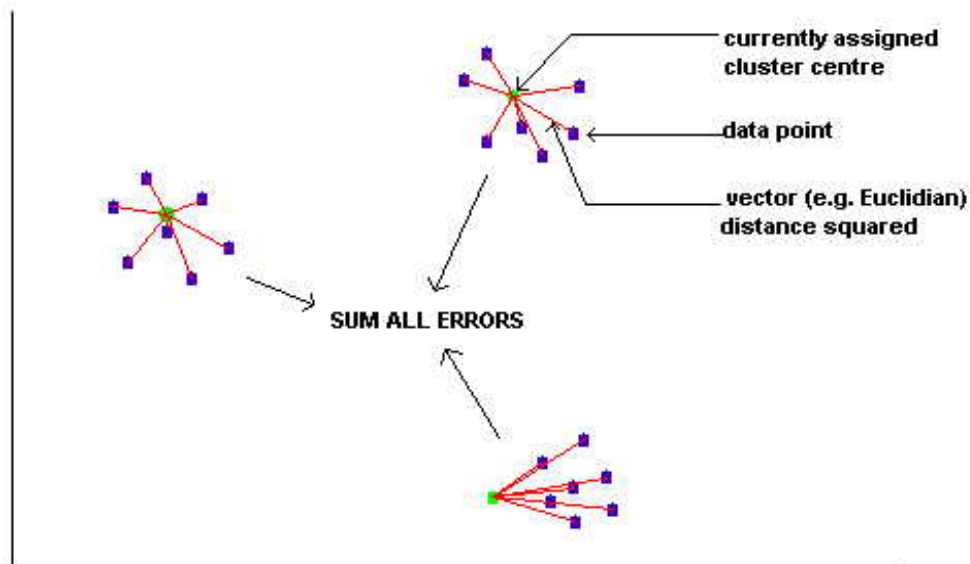
- Διαχωρισμός κλάσης : Η κλάση με το μεγαλύτερο τετραγωνικό λάθος συνήθως επιλέγεται, αλλά θα μπορούσαμε επίσης να διαχωρίσουμε επίσης και την κλάση με την μεγαλύτερη τυπική απόκλιση.

- Εισαγωγή νέου κέντρου κλάσης : Συνήθως επιλέγεται το σημείο το οποίο απέχει πιο μακριά από οποιαδήποτε άλλη κλάση έχει επιλεγεί. Το σημείο αυτό μπορεί εύκολα να καθοριστεί εάν έχουμε κρατήσει την τιμή του τετραγωνικού λάθους για κάθε σημείο των δεδομένων. Κάποια άλλη προσέγγιση είναι να επιλέξουμε τυχαία κάποιο από όλα τα στοιχεία με το μεγαλύτερο τετραγωνικό λάθος.

Δύο στρατηγικές που χρησιμοποιούν την μείωση του αριθμού των κλάσεων για τη μείωση του τετραγωνικού λάθους.

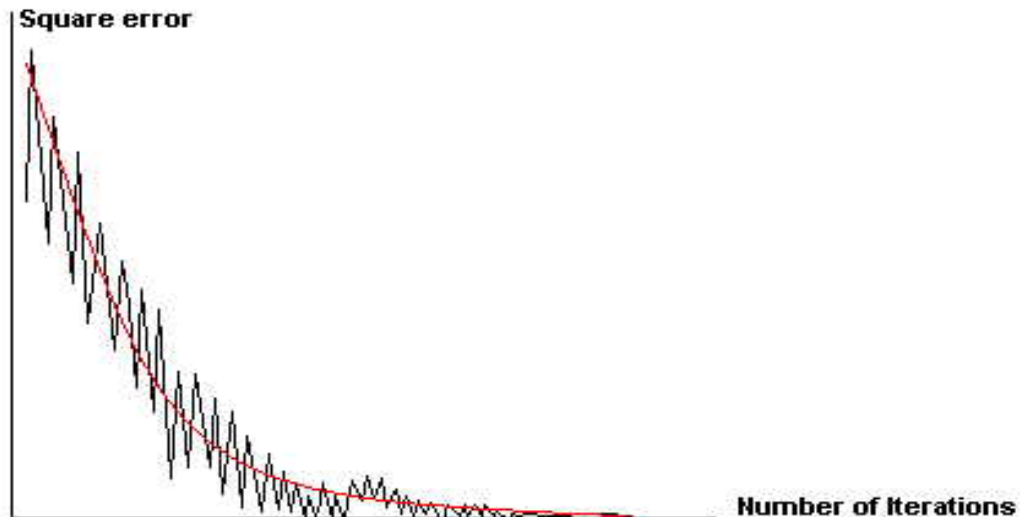
Διασκορπισμός της κλάσης: Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την μεταφορά του κέντρου το οποίο ανταποκρίνεται στα δεδομένα της κλάσης και αναθέτονται ξανά τα στοιχεία σε άλλες κλάσεις. Η κλάση η οποία έχει διασκορπιστεί ήταν αυτή που είχε το μεγαλύτερο τετραγωνικό λάθος.

Σύντμηση δύο κλάσεων: Οι κλάσεις με τα κοντινότερα κέντρα συνήθως επιλέγονται παρόλο που μία καλύτερη προσέγγιση θα μπορούσε να είναι να είναι να επιλεγούν αυτές που έχουν τη μικρότερη συμμετοχή στην αύξηση του τετραγωνικού λάθους όλων των δεδομένων.



Σχήμα 1.12: Άθροισμα των τετραγώνων μερικών αποστάσεων.

Στο σχήμα 1.13 έχουμε επιστροφή σε προηγούμενη χειρότερη κατάσταση της τιμής του λάθους για την εύρεση βέλτιστης επίλυσης στις κλάσεις που έχουν διαμορφωθεί με τον αλγόριθμο του k means clustering.



Σχήμα 1.13: Κατανομή σφάλματος.

1.5. Μειονεκτήματα του Αλγόριθμου K means

Ο αλγόριθμος παρόλη τη χρηστικότητα του έχει κάποια μειονεκτήματα. Δεν υπάρχει συγκεκριμένος τρόπος για να ορίσουμε τα βέλτιστα πρώτα κέντρα. Ένας δημοφιλής τρόπος για να αρχίσει αυτό είναι να επιλεγθούν τυχαία τα K δείγματα.

Τα αποτελέσματα που παράγονται στηρίζονται στις αρχικές τιμές για τα κέντρα και πολύ συχνά συμβαίνει να δημιουργούνται προβλήματα στον αλγόριθμο από άστοχη επιλογή των πρώτων τιμών των κέντρων. Ένας τρόπος για να αποφευχθεί αυτή η δυσάρεστη κατάσταση είναι να δοκιμαστεί ο αλγόριθμος κάποιες φορές με διαφορετικά αρχικά σημεία. Για τη βέλτιστη απόδοση του αλγορίθμου πρέπει να επιλέγεται η περίπτωση των αρχικών σημείων με το μικρότερο τετραγωνικό λάθος.

Ένας άλλος τρόπος για την κατάλληλη τοποθέτηση των αρχικών κέντρων ωστέ να έχουμε καλό αποτέλεσμα είναι διαλέξουμε ως πρώτο κέντρο το κεντρικότερο σημείο όλων. Στη συνέχεια κάθε διαδοχικό αρχικό κέντρο της επόμενης κλάσης λαμβάνεται ως το πιο απομακρυσμένο σημείο από τα υπόλοιπα κέντρα. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί ένα σύνολο από αρχικά απομακρυσμένα σημεία τα οποία όχι μόνο θα έχουν επιλεγεί τυχαία αλλά θα είναι και σωστά τοποθετημένα. Βέβαια με τη διαδικασία αυτή είναι πιο πιθανό να επιλεγούν σημεία τα οποία θα είναι στη περιφέρεια των κλάσεων και όχι στο κέντρο αυτών. Η διαδικασία αυτή πάντως έχει υπολογιστικές απαιτήσεις καθώς θα πρέπει να υπολογίζονται κάθε φορά τα νέα κέντρα τα οποία είναι σε μεγάλη απόσταση από τα προηγούμενα. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος η μέθοδος εφαρμόζεται σε ένα δείγμα των σημείων. Καθώς τα περιφερειακά σημεία των κλάσεων είναι λίγα συνήθως δεν εμφανίζονται σε τυχαίο δείγμα. Στον αντίποδα με αυτή τη μέθοδο στοιχεία από όλες τις σχηματιζόμενες περιοχές έχουν πολλές πιθανότητες να είναι στο σύνολο εκτός και αν το δείγμα είναι πολύ μικρό. Επίσης βοηθάει υπολογιστικά τον αλγόριθμο καθώς ο αριθμός των στοιχείων του δείγματος είναι πολύ μικρότερος από αυτόν ολόκληρου του συνόλου. Τα αποτελέσματα εξαρτώνται από το μετρητικό σύστημα που χρησιμοποιείται για να μετρήσει το $\|x - m_i\|$. Μία δημοφιλής λύση είναι να κανονικοποιήσουμε κάθε μεταβλητή με την τυπική απόκλιση της, παρόλο που δεν είναι πάντα επιθυμητό.

Τα αποτελέσματα στηρίζονται πάντα στην τιμή του k . Αυτό το τελευταίο πρόβλημα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο αφού συχνά δεν έχουμε τρόπο να ξέρουμε πόσες κλάσεις ακριβώς θα πρέπει να επιλεγούν. Στο σχήμα 1.3 που παραθέσαμε παραπάνω ο ίδιος αλγόριθμος εφαρμοζόμενος στην ίδια βάση δεδομένων παράγει τρία κέντρα για τρεις κλάσεις (σχήμα 1.4). Είναι καλύτερα ή χειρότερα από την προηγούμενη περίπτωση της ταξινόμησης δύο κέντρων κλάσεων; Δυστυχώς δεν υπάρχει γενικευμένη θεωρητική λύση για την εύρεση λύσης που να προτείνει συγκεκριμένο αριθμό κλάσεων σε καθορισμένη βάση δεδομένων. Μία απλή προσέγγιση θα μπορούσε να είναι να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα πολλών τρεξιμάτων με K διαφορετικές κλάσεις και να διαλέξουμε την καλύτερη σύμφωνα με τα δεδομένα τα οποία θα μας δίνει συγκεκριμένο κριτήριο. Οστόσο θα πρέπει να είμαστε προσεκτικοί γιατί αυξάνοντας τον αριθμό των K επηρεάζονται οι τιμές των συναρτήσεων λάθους. Ακόμη υπάρχει το αυξανόμενο ρίσκο της υπερπλήρωσης.

Η μεταβλητότητα των κλάσεων μετριέται σε σχέση με το μέσο όρο των ομαδοποιημένων μεταβλητών. Εάν πάνω από μία μεταβλητές χρησιμοποιούνται για να οριστούν οι κλάσεις, οι αποστάσεις μεταξύ κλάσεων μετριοούνται σε πολυδιάστατο χώρο.

Ενώ το ιεραρχικό clustering παίρνει τα δεδομένα χωρίς καθόλου επεξεργασία όπως είναι και προχωράει τη διαδικασία χωρίς γνώση των πόσων κλάσεων θα πρέπει να δημιουργηθούν, σε άλλους αλγόριθμους πρέπει να δοθεί μία αρχική εικόνα του τρόπου με τον οποίο θα πρέπει να καταναμηθούν τα δεδομένα. Ο αλγόριθμος K means είναι ένας τέτοιου τύπου αλγόριθμος. Ωστόσο ο αλγόριθμος των k means έχει λιγότερες υπολογιστικές απαιτήσεις από αυτόν του ιεραρχικού clustering. Ακόμη ο k means clustering αλγόριθμος συνήθως πραγματοποιείται σαν μία δευτερεύουσα διαδικασία, μετά από κάποια άλλη μέθοδο που να καθορίζει τις κλάσεις που θα ληφθούν, καθώς έχει την ικανότητα να πραγματοποιεί ποιοτική ταξινόμηση αλλά θα πρέπει με κάποιο τρόπο να καθοριστεί ο αριθμός των κλάσεων με τις οποίες θα ξεκινήσει να δουλεύει. Έτσι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μετά τη διαδικασία της ιεραρχικής ταξινόμησης.

1.6. Παράμετροι Εκτίμησης Απόστασης

Στην προσπάθεια ταξινόμησης των δεδομένων εισαγωγής που δίδονται στον αλγόριθμο των k means clustering έχουμε την χρήση παράμετρων εισαγωγής απόστασης στον κώδικα του. Ειδικότερα οι παράμετροι αυτοί είναι που θα καθορίσουν την απόσταση του κάθε στοιχείου των δεδομένων από το κοντινότερο κέντρο της κατάλληλης κλάσης στην οποία θα καταταχθεί.

Στην ιστορία της γεωμετρίας έχουν αναπτυχθεί οι αρκετοί παράμετροι για τον υπολογισμό της απόστασης 2 σημείων $x(X_1, X_2)$ και $y(Y_1, Y_2)$ και οι βασικότεροι από αυτούς είναι: Cityblock, Euclidean, SqEuclidean, Pearson, Cosine, Correlation, Minkowski. Στην προσπάθεια δημιουργίας κλάσεων για ταξινόμηση βιομηχανικών σημάτων θα χρησιμοποιήσουμε τις παραμέτρους

- Cityblock distance $|X_1 - Y_1| + |X_2 - Y_2|$
- SqEuclidean distance $\text{SQRT}((Y_1 - X_1)^2 + (Y_2 - X_2)^2)$

- Cosine distance

$$(X_1 \times Y_1 + X_2 \times Y_2) / (\text{SQRT}((X_1^2 + X_2^2) + \text{SQRT}(Y_1^2 + Y_2^2)))$$

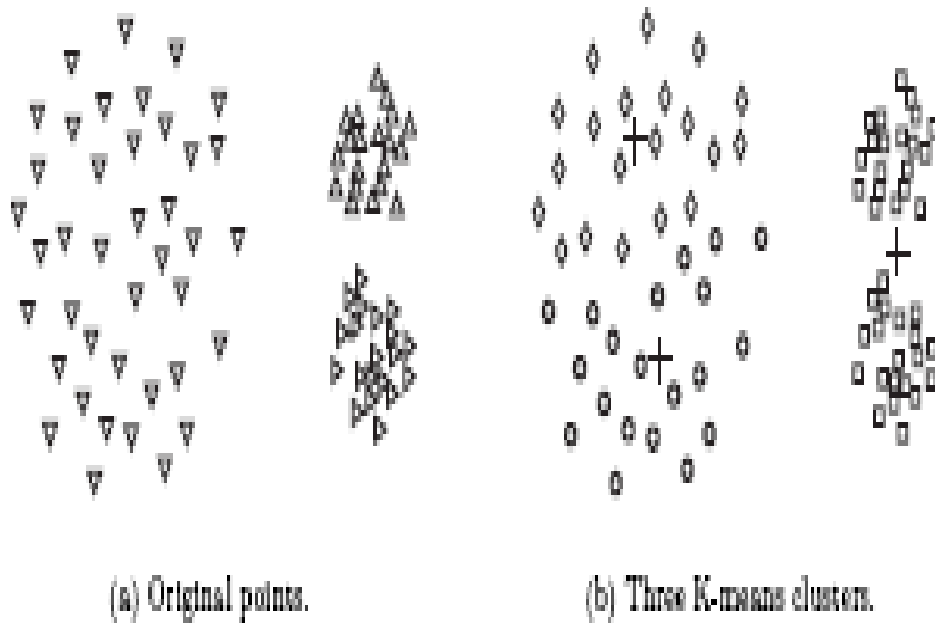
- Correlation distance

$$(X_1 \times Y_1 + X_2 \times Y_2) - (1/2) \times [(X_1 + X_2) \times (Y_1 + Y_2)] / (\text{SQRT}((X_1^2 + X_2^2) - 1/2(X_1 + X_2)) \times \text{SQRT}((Y_1^2 + Y_2^2) - 1/2(Y_1 + Y_2)))$$

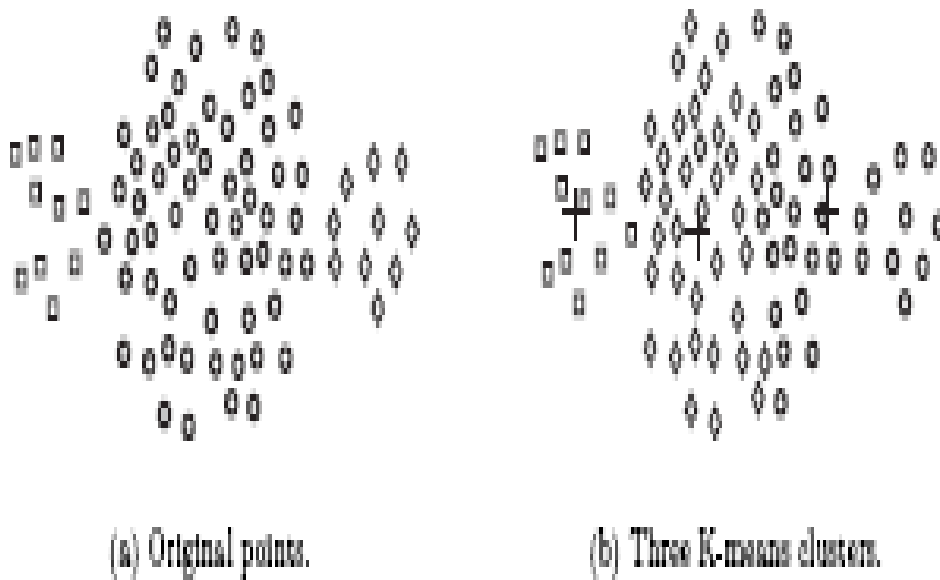
Αναλυτικότερα η χρήση των παραμέτρων αυτών παρουσιάζεται στα κεφάλαια που ακολουθούν.

1.7. Διάφοροι Τύποι Κλάσεων

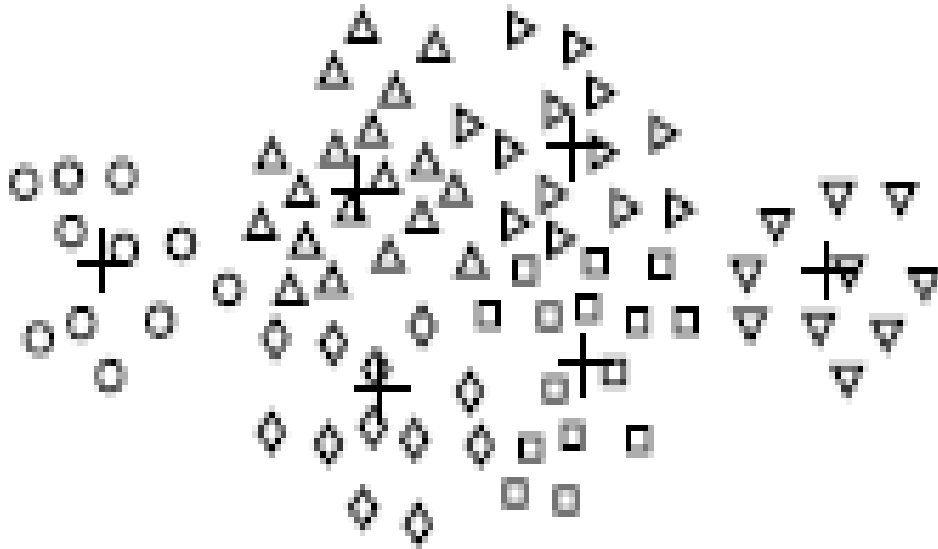
Ο αλγόριθμος έχει πρόβλημα στο να εντοπίσει φυσικές κλάσεις όταν η κατανομή τους δεν έχει σφαιρικό σχήμα ή όταν έχουν τελείως διαφορετικές διαστάσεις και σχήματα. Στο σχήμα 1.14 βλέπουμε την δυσκολία εύρεσης των φυσικών κλάσεων όταν η μεσσαία είναι πολύ μεγαλύτερη από τις άλλες δύο. Στη συνέχεια βλέπουμε ότι η μεγαλύτερη κλάση θα διασπαστεί και κομμάτι της θα δημιουργήσει με μία από τις άλλες δυο μικρές μία νέα κλάση. Στο σχήμα 1.15 δεν εντοπίζονται οι φυσικές κλάσεις καθώς οι δυο μικρότερες κλάσεις είναι πολύ πιο μαζεμένες από την μεγάλη. Μία ενδεχόμενη λύση θα ήταν να σπάσουν τις φυσικές κλάσεις σε μικρότερες. Στα σχήματα 1.16 και 1.17 φαίνεται ο τρόπος διαχείρισης του συνόλου των δεδομένων.



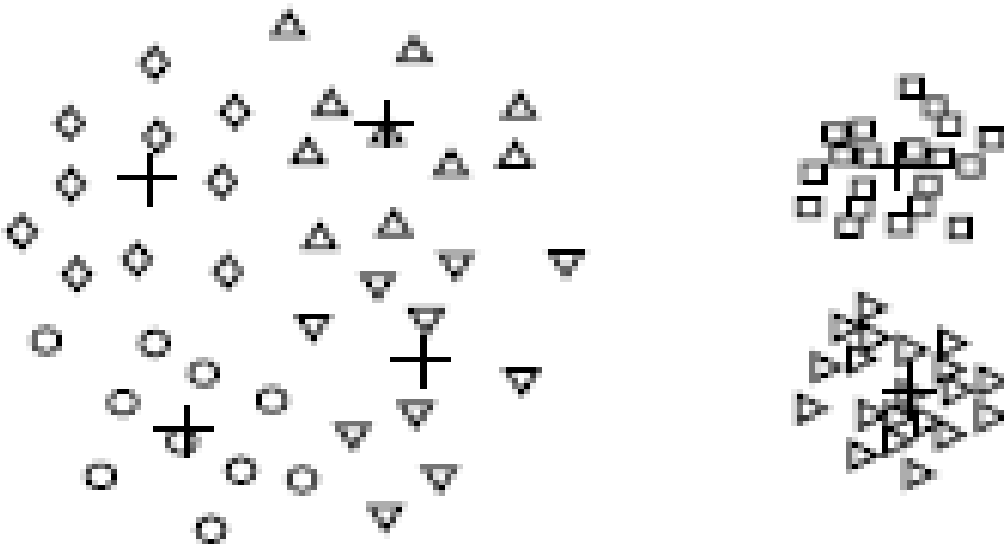
Σχήμα 1.14: Δυσκολία εύρεσης φυσικών κλάσεων.



Σχήμα 1.15: Εύρεση φυσικών κλάσεων.



Σχήμα 1.16: Τρόπος διαχείρισης δεδομένων.



Σχήμα 1.17: Τρόπος διαχείρισης δεδομένων.

1.8. Εφαρμογή

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα:

Δίνεται το σύνολο των σημείων $P_1 = [0\ 0; 0\ 1; 1\ 1; 1\ 0; 0.5\ 0.5; 5\ 5; 5\ 6; 6\ 6; 6\ 5; 5.5\ 5.5]$

Πραγματοποιείται αρχικοποίηση με K σύνολα. Στο παράδειγμα που εξετάζεται λαμβάνεται $K=2$ και αυθαίρετα επιλέγονται ως κέντρα τα $C_1=(0,0)$ και $C_2=(0,1)$. Ο αλγόριθμος προχωράει με τον υπολογισμό της απόστασης κάθε στοιχείου με το κέντρο της κάθε κλάσης. Το επόμενο βήμα είναι η ενσωμάτωση κάθε στοιχείου στην αντίστοιχη κλάση που ανήκει με γνώμονα την απόσταση του στοιχείου από το κέντρο της. Για παράδειγμα για το τρίτο στοιχείο ισχύει:

$$\text{Dis}(1,3) = |1-0| + |1-0| = 2$$

$$\text{Dis}(2,3) = |1-0| + |1-1| = 1$$

Οπότε το τρίτο στοιχείο θα ενσωματωθεί στο 2ο σύνολο καθώς η απόσταση του από το κέντρο του συγκεκριμένου συνόλου είναι μικρότερη. Ομοίως λειτουργεί ο αλγόριθμος για όλα τα στοιχεία του P και κατά συνέπεια αυτά θα ταξινομηθούν στα 2 σύνολα. Στη συνέχεια έχουμε τον υπολογισμό των αποστάσεων από τα δύο κέντρα για όλα τα στοιχεία:

$$\text{Dis}(1,4) = |1-0| + |0-0| = 1$$

$$\text{Dis}(2,4) = |1-0| + |0-1| = 2$$

Άρα κατατάσσουμε το 4 στο 1ο σύνολο

$$\text{Dis}(1,5) = |0.5-0| + |0.5-0| = 1$$

$$\text{Dis}(2,5) = |0.5-0| + |0.5-1| = 1$$

Μπορούμε να κατατάξουμε όπου θέλουμε το 5ο στοιχείο και αυθαίρετα επιλέγουμε το 1ο σύνολο

$$\text{Dis}(1,6) = |5-0| + |5-0| = 10$$

$$\text{Dis}(2,6) = |5-0| + |5-1| = 9$$

Κατατάσσουμε το 6^ο στοιχείο στο 2ο σύνολο

$$\text{Dis}(1,7)=|5-0| + |6-0|=11$$

$$\text{Dis}(2,7)=|5-0| + |6-1|=10$$

Κατατάσσουμε το 7^ο στο 2ο σύνολο

$$\text{Dis}(1,8)=|6-0| + |6-0|=12$$

$$\text{Dis}(2,8)=|6-0| + |6-1|=11$$

Κατατάσσουμε το 8^ο στοιχείο στο 2ο σύνολο

$$\text{Dis}(1,9)=|6-0| + |5-0|=11$$

$$\text{Dis}(2,9)=|6-0| + |5-1|=10$$

Κατατάσσουμε το 9^ο στοιχείο στο 1ο σύνολο

$$\text{Dis}(1,10)=|5.5-0| + |5.5-0|=11$$

$$\text{Dis}(2,10)=|5.5-0| + |5.5-1|=10$$

Κατατάσσουμε το 10^ο στοιχείο στο 2ο σύνολο

Οπότε τα δύο σύνολα διαμορφώνονται ως εξής::

$$C_1 = \{(0,0),(1,0),(0.5,0.5)\}$$

$$C_2 = \{(0,1),(1,1),(5,5),(5,6),(6,6),(6,5),(5.5,5.5)\}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τα νέα κέντρα για κάθε σύνολο

$$\text{Για το } C_1 \text{ έχω } \{(0+1+0.5)/3,(0+0+0.5)/3\}=(0.5,0.16)$$

$$\text{Για το } C_2 \text{ έχω } \{(0+1+5+5+6+6+5.5)/7,(1+1+5+6+6+5+5.5)/7\}=(4.1,4.2)$$

Αφού τα νέα κέντρα διαφέρουν από τα προηγούμενα ξαναρχίζουμε τη διαδικασία

$$\text{Dis}(1,C_1)=|0-0.5| + |0-0.16|=0.66$$

$$\text{Dis}(1,C_2)=|0-4.1| + |0-4.2|=8.3$$

Οπότε κατατάσσουμε το 1^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(2,C_1)=|0-0.5| + |1-0.16|=1.34$$

$$\text{Dis}(2,C_2)=|0-4.1| + |1-4.2|=7.3$$

Οπότε κατατάσσουμε το 2^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(3, C_1) = |1-0.5| + |1-0.16| = 1.34$$

$$\text{Dis}(3, C_2) = |1-4.1| + |1-4.2| = 6.3$$

Οπότε κατατάσσουμε το 3^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(4, C_1) = |1-0.5| + |0-0.16| = 0.66$$

$$\text{Dis}(4, C_2) = |1-4.1| + |0-4.2| = 7.3$$

Οπότε κατατάσσουμε το 4^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(5, C_1) = |0.5-0.5| + |0.5-0.16| = 0.34$$

$$\text{Dis}(5, C_2) = |0.5-4.1| + |0.5-4.2| = 8.3$$

Οπότε κατατάσσουμε το 5^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(6, C_1) = |0-0.5| + |0-0.16| = 0.66$$

$$\text{Dis}(6, C_2) = |0-4.1| + |0-4.2| = 8.3$$

Οπότε κατατάσσουμε το 6^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(7, C_1) = |5-0.5| + |6-0.16| = 11.34$$

$$\text{Dis}(7, C_2) = |5-4.1| + |6-4.2| = 2.7$$

Οπότε κατατάσσουμε το 7^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

$$\text{Dis}(8, C_1) = |6-0.5| + |6-0.16| = 6.34$$

$$\text{Dis}(8, C_2) = |6-4.1| + |6-4.2| = 3.7$$

Οπότε κατατάσσουμε το 8^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

$$\text{Dis}(9, C_1) = |6-0.5| + |5-0.16| = 10.34$$

$$\text{Dis}(9, C_2) = |6-4.1| + |5-4.2| = 2.7$$

Οπότε κατατάσσουμε το 9^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

$$\text{Dis}(10, C_1) = |5.5-0.5| + |5.5-0.16| = 10.34$$

$$\text{Dis}(10, C_2) = |5.5-4.1| + |5.5-4.2| = 2.7$$

Οπότε κατατάσσουμε το 10^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

Τα δύο νέα σύνολα διαμορφώνονται ως εξής:

$$C_1 = \{(0,0),(0,1),(1,1),(1,0),(0.5,0.5),(5,5)\}$$

$$C_2 = \{(5,6),(6,6),(6,5),(5.5,5.5)\}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τα νέα κέντρα για κάθε σύνολο

$$\text{Για το } C_1 \text{ έχω } \{(0+0+1+1+0.5+5)/6, (0+1+1+0+0.5+5)/6\} = (1.25, 1.25)$$

$$\text{Για το } C_2 \text{ έχω } \{(5+6+6+5.5)/4, (6+6+5+5.5)/4\} = (5.625, 5.625)$$

Αφού έχουμε νέα κέντρα αρχίζουμε τη διαδικασία από την αρχή

$$\text{Dis}(1, C_1) = |0-1.25| + |0-1.25| = 2.5$$

$$\text{Dis}(1, C_2) = |0-5.625| + |0-5.625| = 11.25$$

Οπότε κατατάσσουμε το 1^ο στοιχείο στο 1ο σύνολο

$$\text{Dis}(2, C_1) = |0-1.25| + |1-1.25| = 1.5$$

$$\text{Dis}(2, C_2) = |0-5.625| + |1-5.625| = 10.25$$

Οπότε κατατάσσουμε το 2^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(3, C_1) = |0-1.25| + |0-1.25| = 2.5$$

$$\text{Dis}(3, C_2) = |0-5.625| + |0-5.625| = 11.25$$

Οπότε κατατάσσουμε το 3^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(4, C_1) = |1-1.25| + |0-1.25| = 1.5$$

$$\text{Dis}(4, C_2) = |1-5.625| + |0-5.625| = 10.25$$

Οπότε κατατάσσουμε το 4^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(5, C_1) = |0.5-1.25| + |0.5-1.25| = 1.5$$

$$\text{Dis}(5, C_2) = |0.5-5.625| + |0.5-5.625| = 12.25$$

Οπότε κατατάσσουμε το 5^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(6, C_1) = |5-1.25| + |5-1.25| = 7.5$$

$$\text{Dis}(6, C_2) = |5-5.625| + |5-5.625| = 1.25$$

Οπότε κατατάσσουμε το 6^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

$$\text{Dis}(7, C_1) = |5-1.25| + |6-1.25| = 8.5$$

$$\text{Dis}(7, C_2) = |5 - 5.625| + |6 - 5.625| = 1$$

Οπότε κατατάσσουμε το 7^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

$$\text{Dis}(8, C_1) = |6 - 1.25| + |6 - 1.25| = 9.5$$

$$\text{Dis}(8, C_2) = |6 - 5.625| + |6 - 5.625| = 0.75$$

Οπότε κατατάσσουμε το 8^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

$$\text{Dis}(9, C_1) = |6 - 1.25| + |5 - 1.25| = 8.5$$

$$\text{Dis}(9, C_2) = |6 - 5.625| + |5 - 5.625| = 1$$

Οπότε κατατάσσουμε το 9^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

$$\text{Dis}(10, C_1) = |5.5 - 1.25| + |5.5 - 1.25| = 8.5$$

$$\text{Dis}(10, C_2) = |5.5 - 5.625| + |5.5 - 5.625| = 0.25$$

Οπότε κατατάσσουμε το 10^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τα νέα κέντρα για κάθε σύνολο

$$\text{Για το } C_1 \text{ έχω } \{(0+0+1+1+0.5)/5, (0+1+1+0+0.5)/5\} = (0.5, 0.5)$$

$$\text{Για το } C_2 \text{ έχω } \{(5+5+6+6+5.5)/5, (5+6+6+5+5.5)/5\} = (5.5, 5.5)$$

Αφού τα κέντρα αλλάζουν ξεκινάω τη διαδικασία από την αρχή.

$$\text{Dis}(1, C_1) = |0 - 0.5| + |0 - 0.5| = 1$$

$$\text{Dis}(1, C_2) = |0 - 5.5| + |0 - 5.5| = 11$$

Οπότε κατατάσσουμε το 1^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(2, C_1) = |0 - 0.5| + |1 - 0.5| = 1$$

$$\text{Dis}(2, C_2) = |0 - 5.5| + |1 - 5.5| = 10$$

Οπότε κατατάσσουμε το 2^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(3, C_1) = |1 - 0.5| + |1 - 0.5| = 1$$

$$\text{Dis}(3, C_2) = |1 - 5.5| + |1 - 5.5| = 9$$

Οπότε κατατάσσουμε το 3^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(4, C_1) = |1 - 0.5| + |0 - 0.5| = 1$$

$$\text{Dis}(4, C_2) = |1-5.5| + |0-5.5| = 10$$

Οπότε κατατάσσουμε το 4^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(5, C_1) = |0.5-0.5| + |0.5-0.5| = 0$$

$$\text{Dis}(5, C_2) = |0.5-5.5| + |0.5-5.5| = 10$$

Οπότε κατατάσσουμε το 5^ο στοιχείο στο 1^ο σύνολο

$$\text{Dis}(6, C_1) = |5-0.5| + |5-0.5| = 9$$

$$\text{Dis}(6, C_2) = |5-5.5| + |5-5.5| = 1$$

Οπότε κατατάσσουμε το 6^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

$$\text{Dis}(7, C_1) = |5-0.5| + |6-0.5| = 10$$

$$\text{Dis}(7, C_2) = |5-5.5| + |6-5.5| = 1$$

Οπότε κατατάσσουμε το 7^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

$$\text{Dis}(8, C_1) = |6-0.5| + |6-0.5| = 11$$

$$\text{Dis}(8, C_2) = |6-5.5| + |6-5.5| = 1$$

Οπότε κατατάσσουμε το 8^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

$$\text{Dis}(9, C_1) = |6-0.5| + |5-0.5| = 10$$

$$\text{Dis}(9, C_2) = |6-5.5| + |5-5.5| = 1$$

Οπότε κατατάσσουμε το 9^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

$$\text{Dis}(10, C_1) = |5.5-0.5| + |5.5-0.5| = 10$$

$$\text{Dis}(10, C_2) = |5.5-5.5| + |5.5-5.5| = 0$$

Οπότε κατατάσσουμε το 10^ο στοιχείο στο 2^ο σύνολο

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τα νέα κέντρα για κάθε σύνολο

$$\text{Για το } C_1 \text{ έχω } \{(0+0+1+1+0.5)/5, (0+1+1+0+0.5)/5\} = (0.5, 0.5)$$

$$\text{Για το } C_2 \text{ έχω } \{(5+5+6+6+5.5)/5, (5+6+6+5+5.5)/5\} = (5.5, 5.5)$$

Είναι ευδιάκριτο ότι τα νέα κέντρα δεν αλλάζουν οπότε η διαδικασία σταματάει.

Οι δύο κλάσεις που έχουν δημιουργηθεί έχουν ως κέντρα τα $C_1 = (0.5, 0.5)$, $C_2 = (5.5, 5.5)$.

Μοντελοποίηση

Απόκρισης Δυναμικών Σημάτων

2.1. Στοχαστικό Πρότυπο Απόκρισης Ένσφαιρων Τριβέων

Οι ένσφαιροι τριβείς αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο των μηχανολογικών κατασκευών λόγω των υψηλών αποδόσεων που επιδεικνύουν και του σχετικά μικρού κόστους τους. Ένας ένσφαιρος τριβέας αποτελεί μία πηγή δονήσεων κατά τη λειτουργία του. Οι κραδασμοί παράγονται από τις κρούσεις των στοιχείων κύλισης στη φθαρμένη μεταλλική επιφάνεια των συνεργαζόμενων δακτυλίων του ένσφαιρου τριβέα. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι η διέγερση ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής ή του ένσφαιρου τριβέα.

Κατά τη διάρκεια της μακράς ιστορίας της διαγνωστικής βλαβών, οι ερευνητές έχουν προσεγγίσει τις πληροφορίες που περικλείονται στην έμφυτη κρουστική απόκριση των ένσφαιρων τριβέων μέσω της μαθηματικής ερμηνείας με την ανάπτυξη αναλυτικών μοντέλων προσομοίωσης της συμπεριφοράς τους.

Η μαθηματική προσέγγιση που μελετάται σε αυτό το κεφάλαιο για την ερμηνεία της απόκρισης των ένσφαιρων τριβέων ως αποτέλεσμα διαφόρων τύπων βλαβών, σε αντίθεση με την πλειονότητα των μαθηματικών μοντέλων, λαμβάνει σοβαρά υπόψη: (α) το βαθμό έντασης και το ρυθμό εμφάνισης του μη γραμμικού φαινομένου της ολίσθησης, (β) την παρουσία ενός πεπερασμένου πλήθους ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής, οι οποίες διεγείρονται τυχαία, αλλά και σε συνάρτηση με τη θέση της φθοράς τη στιγμή της κρούσης, και (γ) το μονοπάτι μεταφοράς της δόνησης από τον ένσφαιρο τριβέα στο αισθητήριο διαμέσου ενός ή περισσότερων μέσων διάδοσης. Παράλληλα, το προτεινόμενο μοντέλο προσομοίωσης εξετάζει την επίδραση των γεωμετρικών μεγεθών του ένσφαιρου τριβέα, την ταχύτητα περιστροφής του

άξονα στον οποίο εδράζεται, την κατανομή του φορτίου στην περιφέρεια του ένσφαιρου τριβέα, το χρόνο άμβλυσης των κρουστικών παλμών, το συντελεστή ποιότητας που σχετίζεται με το μέσο διάδοσης του σήματος, και την περιοχή διέγερσης των ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής.

Κάθε φορά που τα στοιχεία κύλισης ενός ένσφαιρου τριβέα έρχονται σε επαφή με σημειακές φθορές ή ελαττώματα παράγεται μία δόνηση. Η δόνηση αυτή μπορεί να προσομοιωθεί με έναν κρουστικό παλμό, ο οποίος μαθηματικά εκφράζεται από την κρουστική συνάρτηση $\delta(t)$. Ο βαθμός βαρύτητας της βλάβης δηλώνεται με το γινόμενο της κρουστικής συνάρτησης $\delta(t)$ με μια σταθερά d_0 . Αυτός ο κρουστικός παλμός παριστάνει την εξωτερική διέγερση, δηλαδή τη δύναμη που εφαρμόζεται ως είσοδος στον ένσφαιρο τριβέα και γενικότερα στην κατασκευή. Κάθε τέτοια διέγερση προκαλεί μία απόκριση από τον ένσφαιρο τριβέα και την κατασκευή, η οποία λαμβάνεται υπόψιν για την ανάπτυξη του μοντέλου στη συνέχεια. Ο κρουστικός παλμός, εξαιτίας της περιστροφής του ένσφαιρου τριβέα, εκδηλώνεται περιοδικά με μία συχνότητα που εξαρτάται από τον τύπο της βλάβης. Οι χαρακτηριστικές συχνότητες, στις οποίες εκδηλώνονται οι βλάβες ενός ένσφαιρου τριβέα υπολογίζονται με βάση την ταχύτητα περιστροφής του άξονα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ένσφαιρου τριβέα.

Σε έναν ένσφαιρο τριβέα που παρουσιάζει βλάβη στον εσωτερικό ή εξωτερικό δακτύλιο, οι κρουστικοί παλμοί παράγονται κάθε φορά που η φθαρμένη επιφάνεια έρχεται σε επαφή με τα στοιχεία κύλισης του ένσφαιρου τριβέα στη ζώνη φόρτισης. Ο ρυθμός με τον οποίο επαναλαμβάνονται οι κρούσεις ονομάζεται συχνότητα διέλευσης των στοιχείων κύλισης από τον εσωτερικό/εξωτερικό δακτύλιο (Ball Pass Frequency inner/outer race).

Στην περίπτωση που ο εξωτερικός δακτύλιος θεωρείται ακίνητος και ο εσωτερικός περιστρέφεται, οι προαναφερθείσες χαρακτηριστικές συχνότητες ισούνται με:

$$BPFI = \frac{N}{2} \cdot f_{shaft} \cdot \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right) \quad (2.1)$$

$$BPFO = \frac{N}{2} \cdot f_{shaft} \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right) \quad (2.2)$$

Κεφάλαιο 2^ο – Μοντελοποίηση απόκρισης δυναμικών σημάτων

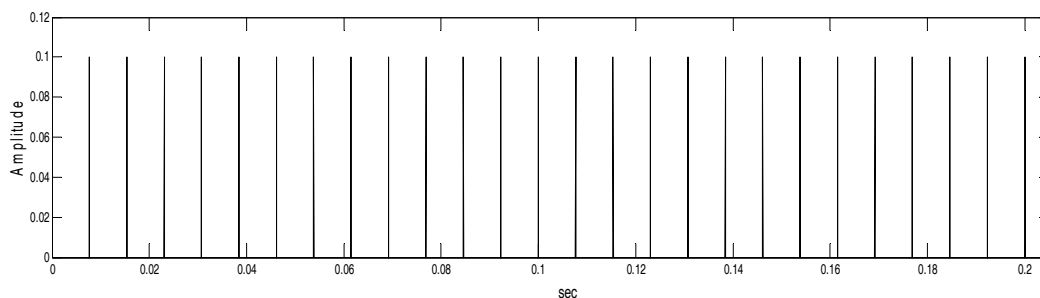
όπου: f_{shaft} είναι η συχνότητα περιστροφής του άξονα πάνω στον οποίο εδράζεται ο ένσφαιρος τριβέας, N είναι το πλήθος των στοιχείων κύλισης, BD είναι η διάμετρος των στοιχείων κύλισης, PD είναι η απόσταση των κέντρων δύο αντιδιαμετρικών στοιχείων κύλισης και β είναι η γωνία επαφής.

Αρχικά, θεωρείτε μοναδιαία ακτινική φόρτιση, η οποία αναπτύσσεται ομοιόμορφα ολόγυρα της περιφέρειας του ένσφαιρου τριβέα. Έτσι, ο κραδασμός, που παράγεται λόγω του προβλήματος που εξετάζεται, είναι δυνατόν να προσομοιωθεί με μία σειρά άπειρων κρουστικών παλμών ίσου πλάτους. Η περίοδος T_d των επαναλαμβανόμενων κρουστικών παλμών ισούται με την αντίστροφη τιμή της χαρακτηριστικής συχνότητας βλάβης (BPFO ή BRFI). Η προαναφερθείσα σειρά κρουστικών παλμών μπορεί μαθηματικά να εκφραστεί με τη σχέση:

$$d(t) = d_0 \cdot \sum_{k=0}^N \delta(t - k \cdot T_d) \quad (2.3)$$

Στο σχήμα 2.1 η χρονική ακολουθία $d(t)$ αναπαριστάται γραφικά ως μια σειρά κρουστικών παλμών με ίσο πλάτος d_0 .

Το πλάτος των κρουστικών παλμών εκφράζει την ένταση της σύγκρουσης των στοιχείων κύλισης με τη φθαρμένη επιφάνεια του ένσφαιρου τριβέα. Σύμφωνα με την πλειονότητα των μελετών που αφορούν τη δυναμική των ένσφαιρων τριβέων, το πλάτος των κρούσεων επηρεάζεται από τη θέση στην περίμετρο του ένσφαιρου τριβέα που συμβαίνει η σύγκρουση σε συνάρτηση με το κέντρο της ζώνης φόρτισης. Η περίπτωση αυτή θα σχολιασθεί και θα αναπτυχθεί στη συνέχεια αυτής της ενότητας.



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση των κρουστικών παλμών που εκφράζονται από τη σχέση 2.3.

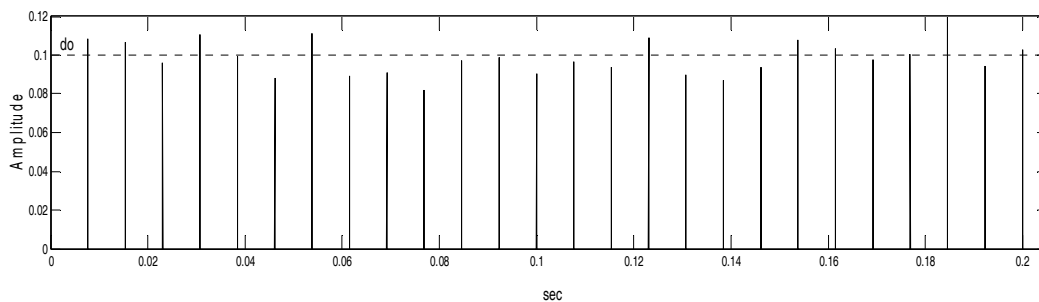
Κεφάλαιο 2^ο – Μοντελοποίηση απόκρισης δυναμικών σημάτων

Το πλάτος των κρουστικών παλμών διαμορφώνεται, εκτός από την προηγούμενη περίπτωση, κατά τυχαίο τρόπο από: (α) τις διακυμάνσεις της ακαμψίας που εμφανίζει η δομή του ένσφαιρου τριβέα, (β) την κυματιδιακή ανομοιομορφία των επιφανειών των δομικών στοιχείων, (γ) την ανομοιομορφία του μεγέθους των στοιχείων κύλισης, (δ) την κακή ευθυγράμμιση των διαδρόμων κύλισης και (ε) την εκκεντρότητα των διαδρόμων κύλισης.

Έτσι, για όλους τους παραπάνω λόγους, το πλάτος των κρουστικών παλμών εμφανίζει μία τυχαία διακύμανση περί μίας μέσης τιμής d_0 (σχήμα 2.2). Η τυχαία διακύμανση των κρούσεων θεωρείται ότι ακολουθεί κανονική κατανομή.

$$d(t) = \sum_{k=0}^N A_k \cdot \delta(t - k \cdot T_d) \quad (2.4)$$

όπου $A_k = d_0 \pm a_k$ είναι το πλάτος του k -οστού κρουστικού παλμού και a_k είναι η τυχαία απόκλιση του πλάτους της κρούσης από την μέση τιμή d_0 .



Σχήμα 2.2: Απεικόνιση των κρουστικών παλμών που εκφράζονται από τη σχέση 2.4.

Η κατανομή του φορτίου περιφερειακά του ένσφαιρου τριβέα όταν αυτός βρίσκεται υπό την επίδραση ακτινικής φόρτισης ορίζεται κατά προσέγγιση από τη συνάρτηση του Stribeck.

Η συνάρτηση του Stribeck δεν λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στην κατανομή του φορτίου, οι οποίες οφείλονται στο πλήθος και τη θέση των στοιχείων κύλισης εντός της ζώνης φόρτισης κάθε χρονική στιγμή. Έχει αποδειχθεί, όμως, ότι οι διακυμάνσεις της ακαμψίας, οι

Κεφάλαιο 2^ο – Μοντελοποίηση απόκρισης δυναμικών σημάτων

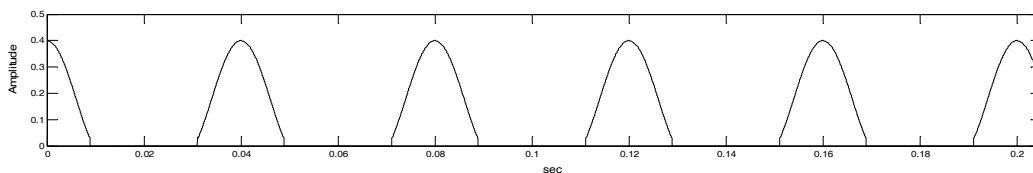
οποίες οφείλονται στην μεταβολή του πλήθους των στοιχείων κύλισης και της θέσης αυτών εντός της ζώνης φόρτισης, δεν υπερβαίνουν το 0,5% της συνολικής τιμής τους για μία δεδομένη φόρτιση. Έτσι, η εκδήλωση αυτών των μεταβολών αγνοείται κατά την ανάπτυξη του μοντέλου.

Επομένως, η κατανομή του φορτίου είναι δυνατόν να εκφρασθεί από τη σχέση:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 \cdot \left[1 - \frac{1}{2 \cdot \varepsilon} \cdot (1 - \cos \theta) \right]^n & , \text{για } |\theta| < \theta_{\max} \\ 0 & , \text{οπουδήποτε αλλού} \end{cases} \quad (2.5)$$

όπου q_0 ορίζει το μέγιστο φορτίο, ε είναι ο συντελεστής της κατανομής του φορτίου, ο όρος θ_{\max} παριστάνει τη μέγιστη γωνιακή έκταση της ζώνης φόρτισης, και $n=3/2$ για τριβέα με σφαιρικά στοιχεία κύλισης και $n=10/9$ για τριβέα με κυλινδρικά στοιχεία κύλισης. Η συνάρτηση $q(t)$ είναι περιοδική διότι η φθαρμένη επιφάνεια του εσωτερικού δακτυλίου του ένσφαιρου τριβέα διασχίζει τη ζώνη φόρτισης μία φορά σε κάθε περιστροφή του άξονα.

Στο σχήμα 2.3 αναπαρίστανται γραφικά η συνάρτηση $q(t)$. Συνίσταται από μία σειρά λοβών, όπου η απόσταση των κέντρων τους ισούται με την περίοδο περιστροφής του άξονα T_{shaft} .



Σχήμα 2.3: Καμπύλη κατανομής ακτινικού φορτίου περιφερειακά του ένσφαιρου τριβέα.

Στην περίπτωση που εξετάζεται φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο του ένσφαιρου τριβέα, οι κρουστικοί παλμοί διαμορφώνονται κατά πλάτος διότι η σημειακή φθορά στον εσωτερικό

δακτύλιο διέρχεται περιοδικά από τη ζώνη φόρτισης. Έτσι, το πλάτος των κρούσεων δύναται να ορισθεί από τη σχέση:

$$d(t) = q(t) \cdot \sum_{k=0}^N A_k \cdot \delta(t - k \cdot T_d) \quad (2.6)$$

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους, στους ένσφαιρους τριβείς αναπτύσσεται ολίσθηση στην κίνηση των στοιχείων κύλισης τους. Αποτέλεσμα αυτού του μη γραμμικού φαινομένου είναι οι κρούσεις των συνεργαζόμενων δομικών στοιχείων του ένσφαιρου τριβέα να μην επαναλαμβάνονται σε ίσες χρονικές περιόδους. Έτσι, εμφανίζεται μία χρονική υστέρηση τ_k μεταξύ των διαδοχικών κρούσεων. Η χρονική υστέρηση τ_k θεωρείται ως μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή. Έτσι, εισάγεται η στοχαστική ιδέα στο προτεινόμενο πρότυπο προσομοίωσης. Επομένως, η ακολουθία των χρονικών κρουστικών δονήσεων μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$d(t) = \begin{cases} q(t) \cdot \sum_{k=0}^N A_k \cdot \delta(t - k \cdot T_d - \tau_k) & , \text{για φθορά εσωτερικού δακτυλίου} \\ \sum_{k=0}^N A_k \cdot \delta(t - k \cdot T_d - \tau_k) & , \text{για φθορά εξωτερικού δακτυλίου} \end{cases} \quad (2.7)$$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κάθε φορά που η σημειακή φθορά έρχεται σε επαφή με κάποια συνεργαζόμενη επιφάνεια του ένσφαιρου τριβέα παράγεται κάποιος κρουστικός παλμός, ο οποίος προκαλεί τη διέγερση πεπερασμένου πλήθους ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής. Αυτή η διαδικασία μπορεί να προσομοιωθεί με την απόκριση ενός γραμμικού μηχανικού συστήματος ενός βαθμού ελευθερίας, η οποία εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$s(t) = B \cdot e^{-t/m} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t) \quad (2.8)$$

$$\text{με } m = \frac{Q}{\pi \cdot f_n}, f_0 = f_n \cdot \sqrt{1 - 1/4 \cdot Q^2} \text{ και } Q > 1/2 \quad (2.9)$$

όπου, m είναι ο χρόνος άμβλυνσης (relaxation time), f_0 είναι η συχνότητα ελεύθερης ταλάντωσης, f_n είναι η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής και Q είναι ο συντελεστής ποιότητας, ο οποίος σχετίζεται με το μέσο διάδοσης.

Στο προτεινόμενο στοχαστικό μοντέλο που αναπτύσσεται σε αυτό το κεφάλαιο, υιοθετείται το ενδεχόμενο οι κρουστικοί παλμοί να διεγείρουν ένα διαφορετικό πεπερασμένο πλήθος ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής ανάλογα με τη θέση της σύγκρουσης. Η υπόθεση αυτή υλοποιείται μέσω μιας τυχαίας διαδικασίας, η οποία λαμβάνει υπόψη τη θέση της σημειακής φθοράς ως προς το κέντρο της ζώνης φόρτισης τη στιγμή της σύγκρουσης. Επιπλέον, το στοχαστικό μοντέλο δύναται να υποθέσει τη διάδοση των δονήσεων διαμέσου διαφορετικών υλικών και μονοπατιών ανάλογα με το σημείο που πραγματοποιείται η επαφή των μεταλλικών επιφανειών του ένσφαιρου τριβέα. Η επίτευξη αυτής της διαδικασίας διενεργείται με την μεταβολή του συντελεστή ποιότητας Q συναρτήσει της θέσης της σύγκρουσης και των ιδιοσυχνοτήτων που διεγείρονται. Έτσι, οι σχέσεις 2.8 και 2.9 μπορούν να τροποποιηθούν ώστε να αξιοποιηθούν από το προτεινόμενο μοντέλο:

$$s(t) = \sum_{i=1}^M B_i \cdot e^{-t/m_i} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{0i} \cdot t) \quad (2.10)$$

$$\text{με } m_i = \frac{Q_i}{\pi \cdot f_{ni}}, f_{0i} = f_{ni} \cdot \sqrt{1 - 1/4 \cdot Q_i^2} \text{ και } Q_i > 1/2 \quad (2.11)$$

όπου m_i είναι ο χρόνος άμβλυνσης του i -στού κρουστικού παλμού, f_{0i} είναι η i -οστή συχνότητα ελεύθερης ταλάντωσης, f_{ni} είναι η i -οστή ιδιοσυχνότητα της κατασκευής που διεγείρεται, Q_i είναι ο i -οστός συντελεστής ποιότητας του μέσου διάδοσης των κραδασμών και ο όρος M ορίζει το πεπερασμένο πλήθος ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής που διεγείρονται από την i -οστή κρούση. Τελικά, με βάση τα παραπάνω, το προσομοιωμένο σήμα $d(t)$ που προκύπτει από το προτεινόμενο μοντέλο εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$d(t) = \begin{cases} \sum_{k=0}^N \left[q(t) \cdot A_k \cdot \delta(t - k \cdot T_d - \tau_k) \otimes \sum_{i=1}^M B_i \cdot e^{-t/m_i} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{oi} \cdot t) \right] + n(t) & (2.12\alpha) \\ \sum_{k=0}^N \left[A_k \cdot \delta(t - k \cdot T_d - \tau_k) \otimes \sum_{i=1}^M B_i \cdot e^{-t/m_i} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{oi} \cdot t) \right] + n(t) & (2.12\beta) \end{cases}$$

όπου ο μαθηματικός τελεστής \otimes συμβολίζει τη συνέλιξη της απόκρισης της κατασκευής και της κρουστικής δύναμης, και $n(t)$ είναι ο περιβάλλοντας θόρυβος που προστίθεται στη χρονική ακολουθία. Η σχέση 2.12α αναφέρεται σε φθορά εσωτερικού δακτυλίου και η σχέση 2.12β αναφέρεται σε φθορά εξωτερικού δακτυλίου.

2.2. Πρότυπο Απόκρισης Γραναζιών

Σε αυτήν την ενότητα περιγράφεται η απόκριση γραναζιών. Αρχικά, θεωρούνται δύο γρανάζια, τα οποία εμπλέκονται τέλεια μεταξύ τους. Τα δόντια τους είναι ισότιμα διαστασιολογημένα και εύρωστα με ακριβώς ελικοειδές προφίλ. Ένα τέτοιο ζευγάρι γραναζιών θα μετέδιδε ακριβώς ίδια ελικοειδή κίνηση στην απουσία κατανεμημένων φθορών, όπως κακή ευθυγράμμιση και αζυγοσταθμία. Οποιαδήποτε παρέκλιση από αυτήν την ιδεατή κατάσταση θα προκαλούσε διακυμάνσεις στη γωνιακή ταχύτητα και μετατόπιση, η οποία με τη σειρά της θα δημιουργούσε μεταβολή στη δύναμη που μεταδίδεται στα εμπλεκόμενα δόντια. Έπειτα, οι δονήσεις δύναται να μεταδοθούν οπουδήποτε εντός και εκτός του μειωτήρα.

Στη συνέχεια, υποτίθεται ένα νεό ζεύγος γραναζιών, των οποίων οι οδόντες δεν είναι εύρωστοι, αλλά κατά τα άλλα είναι ακριβώς ίδια όπως τα προαναφερθείσα. Έστω ότι οι οδόντες αυτοί εμπλέκονται υπό σταθερό φορτίο και ταχύτητα. Από τη στιγμή που η ακαμψία επαφής μεταβάλλεται περιοδικά, όπως το πλήθος των συνεργαζόμενων οδόντων και το σημείο επαφής στην επιφάνεια του οδόντα, η ένταση της δόνησης

αυξάνεται στη συχνότητα εμπλοκής των οδόντων και τις αρμονικές της. Η απόκριση των γραναζιών δύναται να παρουσιαστεί κατά προσέγγιση με τη μορφή σειρών Fourier ως σταθμισμένο άθροισμα των συναρτήσεων ημιτόνου και συνημιτόνου στη συχνότητα εμπλοκής των οδόντων και τις αρμονικές της.

$$x(t) = \sum_{m=0}^M X_m \cos(2\pi m T f_s t + \phi_m) \quad (2.13)$$

όπου $x(t)$ το αρχικό σήμα, M το πλήθος των αρμονικών συνιστωσών του σήματος, X_m και ϕ_m το πλάτος και η φάση της εκάστοτε αρμονικής, αντίστοιχα, T το πλήθος των οδόντων των γραναζιών και f_s είναι η συχνότητα περιστροφής του άξονα που εγράζονται τα γρανάζια. Στα γρανάζια του μειωτήρα αναπτύσσονται εκκοιλάνσεις και άλλες φθορές που μειώνουν την ακαμψία της εμπλοκής και προκαλούν μεταβολές στο πλάτος και στη φάση του αποδιαμορφωμένου χρονικού σήματος. Την κατάσταση απεικονίζει η ακόλουθη εξίσωση.

$$x(t) = \sum_{m=0}^M X_m (1 + a_m(t)) \cos(2\pi m T f_s t + \phi_m + b_m(t)) \quad (2.14)$$

όπου $a_m(t)$ και $b_m(t)$ είναι το διαμορφωμένο πλάτος και φάση του σήματος.

Εάν το διαμορφωμένο πλάτος και φάση του σήματος μπορούν να εξαχθούν από την απόκριση του μειωτήρα, τότε τοπικές φθορές μπορούν να εντοπιστούν ως μικρής διαρκείας διαταραχές σε αυτά τα φάσματα.

Αλγόριθμος Ταξινόμησης

3.1. Εισαγωγή

Ο αλγόριθμος ταξινόμησης είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται στην ομαδοποίηση μετρήσεων που καταγράφουν τους κραδασμούς του μηχανολογικού εξοπλισμού στη βιομηχανία ώστε να ταξινομηθούν σε κατηγορίες που να χαρακτηρίζουν την κατάσταση λειτουργίας τους και τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν κάθε ομάδα και οι πληροφορίες που περιέχονται σε αυτή να υποστηρίζουν επικουρικά την προσπάθεια των μηχανικών στην διάγνωση βλαβών. Έτσι, οι πληροφορίες που συγκεντρώνονται συστηματικά μέσω αυτής της διαδικασίας γίνονται πολύτιμο εργαλείο στη διάγνωση βλαβών.

Ο αλγόριθμος ταξινόμησης δυναμικών σημάτων *k means* δύναται να εκτελεστεί με δύο τρόπους:

(α) απευθείας ταξινόμηση των μετρούμενων σημάτων σε ένα στάδιο με απευθείας εισαγωγή όλων των υπολογιζόμενων στοιχείων εισόδου για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης (*correlation, cityblock, κλπ*) και

(β) σταδιακή ταξινόμηση των βιομηχανικών σημάτων σε *N* επίπεδα με την σταδιακή εισαγωγή διαφορετικών στοιχείων εισόδου σε κάθε επίπεδο της διαδικασίας και για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης.

Τα σήματα για να εισαχθούν στον αλγόριθμο ταξινόμησης θα πρέπει το συνολικό επίπεδο κραδασμών τους να υπερβαίνει τα 3 mm/sec rms. Τα υπόλοιπα σήματα θεωρούνται ότι είναι καταγραφές δονήσεων μηχανής που είναι εντός επιτρεπτών ορίων λειτουργίας.

Τα στάδια που πραγματοποιούνται πριν την επιλογή και την είσοδο των χαρακτηριστικών παραμέτρων στον αλγόριθμο διακρίνονται στο σχήμα 3.1.

Αρχικά, αναγνωρίζονται τα στοιχεία της μηχανής που θα ελεγχθεί. Έπειτα, εντοπίζονται οι πιθανές βλάβες που δύναται να αναπτυχθούν στη μηχανή και η εμφάνισή τους είναι κρίσιμη για τη λειτουργία αυτής και την παραγωγή. Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των ονομαστικών τιμών των χαρακτηριστικών συχνοτήτων που σχετίζονται με τις βλάβες που επιλέχθηκαν προηγουμένως. Κατόπιν, μελετάται η θέση αυτών και των 2 επόμενων αρμονικών τους στο φάσμα του αρχικού σήματος. Επίσης, το μετρούμενο σήμα φιλτράρεται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και στη συνέχεια αποδιαμορφώνεται. Ομοίως, μελετάται η θέση των χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης και των 2 επόμενων αρμονικών τους στο φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος. Παρατηρώντας τη σχετική απόσταση των αιχμών των χαρακτηριστικών συχνοτήτων των παραπάνω φασμάτων πραγματοποιείται η τελική επιλογή των περιοχών ενεργείας που θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στον αλγόριθμο. Οι περιοχές ενέργειας θα πρέπει να χαρακτηρίζουν όλους τους πιθανούς τύπους βλάβης και να μην υπερκαλύπτει η μία την άλλη.

3.2. Πηγαίος Κώδικας Σταδιακής Ταξινόμησης

Η σταδιακή ταξινόμηση των βιομηχανικών σημάτων πραγματοποιείται σε N επίπεδα με την σταδιακή εισαγωγή διαφορετικών στοιχείων εισόδου σε κάθε επίπεδο της διαδικασίας και για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης.

Στο 1^ο επίπεδο διαχωρίζονται τα σήματα που περιέχουν πληροφορίες για κακή ευθυγράμμιση και/ή αζυγοσταθμία από τις υπόλοιπες τυπικές βλάβες (φθαρμένοι ένσφαιροι τριβείς, ηλεκτρικό πρόβλημα, κλπ). Όπως, φαίνεται στο σχήμα 3.1, οι συχνότητες στο φάσμα του αρχικού σήματος, που αφορούν κακή ευθυγράμμιση και αζυγοσταθμία, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής $1x$ και οι αρμονικές της $2x$ και $3x$, είναι απομονωμένες από τις υπόλοιπες στην αρχή του φασματικού πεδίου. Έτσι, επιλέγοντας τις ενεργειακές περιοχές από $[1x \text{ έως } 3x]$ και $[f_o > 3x \text{ έως } f_i < f_s/2]$, πολύ εύκολα

επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός των δύο αρχικών κλάσεων A και B, αντίστοιχα. Η f_s είναι η συχνότητα δειγματοληψίας.

Τα σήματα της A κλάσης όπως προκύπτουν από το αρχικό επίπεδο ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες στο 2^ο επίπεδο. Η μία ομάδα περιέχει τα σήματα που αφορούν αζυγοσταθμία και η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει σήματα που σχετίζονται με κακή ευθυγράμμιση. Για το διαχωρισμό των δύο παραπάνω ομάδων επιλέγονται οι ενεργειακές περιοχές περί την [1x] και [2x έως 3x]. Τα σήματα που εμφανίζουν μεγαλύτερη τιμή στην πρώτη ενεργειακή περιοχή συγκαταλέγονται σε αυτά που σχετίζονται με αζυγοσταθμία. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή η δεύτερη ενεργειακή περιοχή να εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή, τα σήματα αφορούν αποκρίσεις μηχανής με κακή ευθυγράμμιση.

Τα σήματα της B κλάσης περιλαμβάνουν αποκρίσεις μηχανών με ηλεκτρικά προβλήματα, αεροδυναμικά προβλήματα, φθαρμένα γρανάζια και φθαρμένους ένσφαιρους τριβείς. Όλα τα παραπάνω σήματα είναι διαμορφωμένα κατά πλάτος. Επομένως, επιτρέπεται η αποδιαμόρφωση αυτών και η επεξεργασία των νέων σημάτων που θα οδηγήσει στον υπολογισμό της ενέργειας επιπλέον συχνοτικών περιοχών, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε βοηθητικά και αθροιστικά στις ενεργειακές περιοχές των αρχικών σημάτων είτε ως νέο και αυτόνομο στοιχείο εισόδου στον αλγόριθμο.

Στην περίπτωση φθαρμένων ένσφαιρων τριβέων μπορεί να μην έχουν αναπτυχθεί στο φάσμα οι αρμονικές της συχνότητας βλάβης BPF0/I, με αποτέλεσμα το άθροισμα των περιοχών $\Sigma_{\text{BPF0/I}}^{\text{MS}} = [\text{BPF0/I} \pm 10 \text{ Hz}] + [2\text{BPF0/I} \pm 10 \text{ Hz}] + [3\text{BPF0/I} \pm 10 \text{ Hz}]$ να μην είναι ικανό να υποδείξει το μηχανισμό αυτού του τύπου βλάβης. Όμως, η φθορά των ένσφαιρων τριβέων διεγείρει ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Οπότε, το μετρούμενο σήμα φιλτράρεται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n = 1000 \text{ Hz}$ και στη συνέχεια αποδιαμορφώνεται. Η επεξεργασία στο πεδίο της συχνότητας του αποδιαμορφωμένου σήματος θα αποκαλύψει τη συχνότητα BPF0/I και τις αρμονικές της. Επομένως, το άθροισμα των περιοχών του φάσματος του αποδιαμορφωμένου σήματος $\Sigma_{\text{BPF0/I}}^{\text{MD}} = [\text{BPF0/I} \pm 10 \text{ Hz}] + [2\text{BPF0/I} \pm 10 \text{ Hz}] + [3\text{BPF0/I} \pm 10 \text{ Hz}]$ θα εμφανίζει μια ικανοποιητική τιμή, ώστε να εντοπισθεί ο συγκεκριμένος μηχανισμός βλάβης. Η ενέργεια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε

αθροιστικά στην ενέργεια $\Sigma_{\text{BPFO}}^{\text{MS}}$ των αρχικών σημάτων είτε ως νέο και αυτόνομο στοιχείο εισόδου στον αλγόριθμο.

Ομοίως, στην περίπτωση των φθαρμένων γραναζιών, το μετρούμενο σήμα φιλτράρεται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και στη συνέχεια αποδιαμορφώνεται. Η επεξεργασία στο πεδίο της συχνότητας του αποδιαμορφωμένου σήματος θα αποκαλύψει τη συχνότητα $1x$ και τις αρμονικές της. Η ενέργεια $\Sigma_{1x}^{\text{MS}}=[1x\pm 10 \text{ Hz}]+ [2x\pm 10 \text{ Hz}]+ [3x\pm 10 \text{ Hz}]$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε αθροιστικά στην ενέργεια Σ_{1x}^{MD} των αρχικών σημάτων είτε ως νέο και αυτόνομο στοιχείο εισόδου στον αλγόριθμο.

Επίσης, στην περίπτωση ηλεκτρικού προβλήματος, το μετρούμενο σήμα φιλτράρεται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και στη συνέχεια αποδιαμορφώνεται. Η επεξεργασία στο πεδίο της συχνότητας του αποδιαμορφωμένου σήματος θα αποκαλύψει τη διπλάσια της συχνότητας του δικτύου $2f_L (=100 \text{ Hz})$ και τις αρμονικές της που διαμορφώνουν τη χαρακτηριστική συχνότητα ηλεκτρικής βλάβης, καθώς και τη χαρακτηριστική συχνότητα RBPF. Έτσι, η ενέργεια $\Sigma_{2f_L}^{\text{MD}}=[2f_L\pm 10 \text{ Hz}]+ [4f_L\pm 10 \text{ Hz}]$ και η $\Sigma_{\text{RBPF}}^{\text{MD}}=[\text{RBPF}\pm 10 \text{ Hz}]+ [2\text{RBPF}\pm 10 \text{ Hz}]+ [3\text{RBPF}\pm 10 \text{ Hz}]$ του αποδιαμορφωμένου σήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε αθροιστικά στην ενέργεια $\Sigma_{\text{RBPF}}^{\text{MS}}=[\text{RBPF}\pm 10 \text{ Hz}]+ [2\text{RBPF}\pm 10 \text{ Hz}]+ [3\text{RBPF}\pm 10 \text{ Hz}]$ των αρχικών σημάτων είτε ως νέο και αυτόνομο στοιχείο εισόδου στον αλγόριθμο.

Επίσης, στην περίπτωση φθαρμένου γραναζιού, το μετρούμενο σήμα φιλτράρεται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και στη συνέχεια αποδιαμορφώνεται. Η επεξεργασία στο πεδίο της συχνότητας του αποδιαμορφωμένου σήματος θα αποκαλύψει την ταχύτητα περιστροφής $1x$ και τις αρμονικές της που διαμορφώνουν τη χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης, καθώς και τη χαρακτηριστική συχνότητα f_{mesh} . Έτσι, η ενέργεια $\Sigma_{\text{GEAR}}^{\text{MD}}=[f_{\text{mesh}}\pm 10 \text{ Hz}]+[2 f_{\text{mesh}} \pm 10 \text{ Hz}]+[3 f_{\text{mesh}} \pm 10 \text{ Hz}]$ του αποδιαμορφωμένου σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε αθροιστικά στην ενέργεια $\Sigma_{\text{GEAR}}^{\text{MS}}=[f_{\text{mesh}}\pm 10 \text{ Hz}]+[2 f_{\text{mesh}} \pm 10 \text{ Hz}]+[3 f_{\text{mesh}} \pm 10 \text{ Hz}]$ των αρχικών σημάτων είτε ως νέο και αυτόνομο στοιχείο εισόδου στον αλγόριθμο.

Τέλος, στην περίπτωση αεροδυναμικού προβλήματος, το μετρούμενο σήμα φιλτράρεται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και στη συνέχεια αποδιαμορφώνεται. Η επεξεργασία στο πεδίο της συχνότητας του

αποδιαμορφωμένου σήματος θα αποκαλύψει τη συχνότητα BPF και τις αρμονικές της. Έτσι, η ενέργεια $\Sigma_{BPF}^{MD} = [BPF \pm 10 \text{ Hz}] + [2BPF \pm 10 \text{ Hz}]$ του αποδιαμορφωμένου σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε αθροιστικά στην ενέργεια Σ_{BPF}^{MS} των αρχικών σημάτων είτε ως νέο και αυτόνομο στοιχείο εισόδου στον αλγόριθμο.

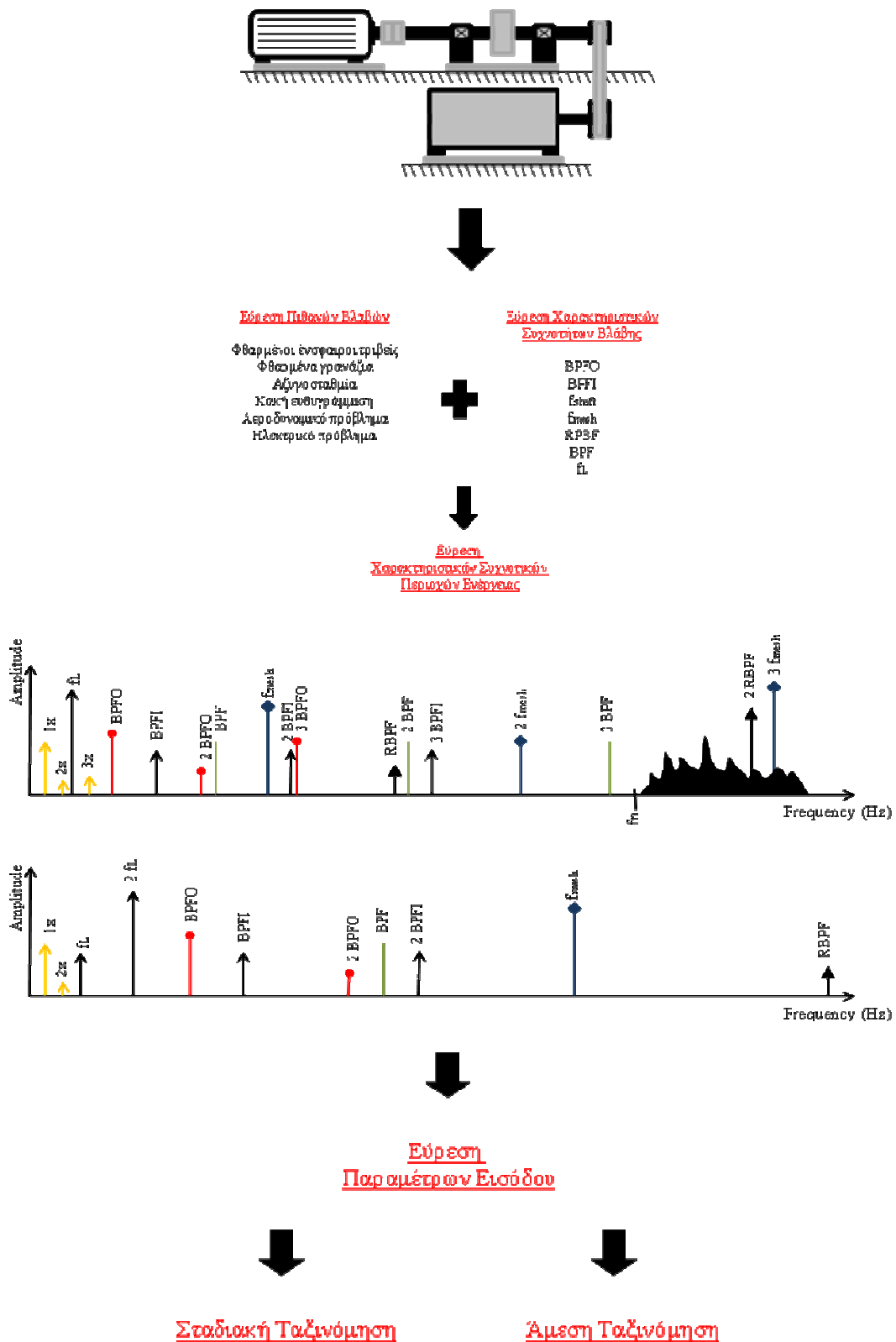
Στα επόμενα επίπεδα επιλέγονται οι κατάλληλες περιοχές ενέργειες που περιγράφουν παραπάνω ώστε να ταξινομηθούν ορθά όλα τα δυναμικά σήματα.

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται εκείνο το τμήμα του πηγαίου κώδικα που είναι υπεύθυνο για την ταξινόμηση των δυναμικών σημάτων.

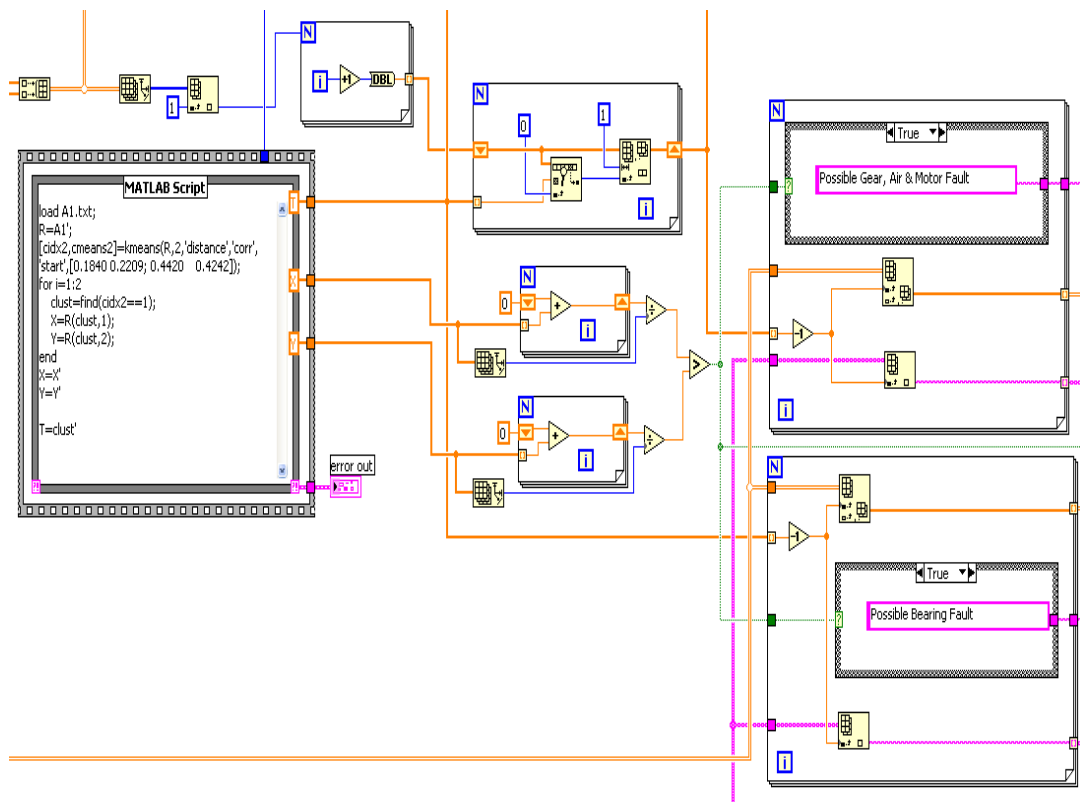
Αρχικά, επιλέγονται: (α) η κατάλληλη παράμετρος απόστασης (correlation, cityblock, euclidean και cosine), (β) το πλήθος των κλάσεων και (γ) τα αρχικά κέντρα. Η χρήση σταθερών αρχικών κέντρων σταθεροποιεί την αποτελεσματικότητα του αλγόριθμου. Το κριτήριο επιλογής των κατάλληλων στοιχείων εισόδου ως αρχικά κέντρα αποτελεί μελλοντική έρευνα.

Στη συνέχεια, για την κλάση των μετρήσεων που εξέρχεται από το 'MATLAB Script' εντοπίζεται και δίδεται ο τύπος της βλάβης που ταξινόμησε ο αλγόριθμος σε αυτό το επίπεδο.

Κεφάλαιο 3^ο – Αλγόριθμος Ταξινόμησης



Σχήμα 3.1: Σχηματική παράσταση του αλγόριθμου ταξινόμησης.



Σχήμα 3.2: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου ταξινόμησης δυναμικών σημάτων.

3.3. Πηγαίος Κώδικας Άμεσης Ταξινόμησης

Η άμεση ταξινόμηση των βιομηχανικών σημάτων πραγματοποιείται σε 1 επίπεδο με απευθείας εισαγωγή όλων των υπολογιζόμενων στοιχείων εισόδου για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης (correlation, cityblock, κλπ).

Η άμεση ταξινόμηση εμφανίζει μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας επιλογής των κατάλληλων περιοχών ενέργειας από την σταδιακή ταξινόμηση, καθώς όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1 κάποιες από τις παρακάτω περιοχές ενέργειας στο φάσμα του αρχικού σήματος ενδέχεται να καλύπτονται μεταξύ τους.

- (α) [1x],
- (β) [2x έως 3x],
- (γ) $\Sigma_{\text{BPFO/I}}^{\text{MS}} = [\text{BPFO/I} \pm 10 \text{ Hz}] + [2\text{BPFO/I} \pm 10 \text{ Hz}] + [3\text{BPFO/I} \pm 10 \text{ Hz}]$,
- (δ) $\Sigma_{\text{BPFO/I}}^{\text{MD}} = [\text{BPFO/I} \pm 10 \text{ Hz}] + [2\text{BPFO/I} \pm 10 \text{ Hz}] + [3\text{BPFO/I} \pm 10 \text{ Hz}]$,
- (ε) $\Sigma_{1x}^{\text{MS}} = [1x \pm 10 \text{ Hz}] + [2x \pm 10 \text{ Hz}] + [3x \pm 10 \text{ Hz}]$,
- (στ) $\Sigma 2f_L^{\text{MD}} = [2f_L \pm 10 \text{ Hz}] + [4f_L \pm 10 \text{ Hz}]$,
- (ζ) $\Sigma_{\text{RBPF}}^{\text{MD}} = [\text{RBPF} \pm 10 \text{ Hz}] + [2\text{RBPF} \pm 10 \text{ Hz}] + [3\text{RBPF} \pm 10 \text{ Hz}]$,
- (η) $\Sigma_{\text{RBPF}}^{\text{MS}} = [\text{RBPF} \pm 10 \text{ Hz}] + [2\text{RBPF} \pm 10 \text{ Hz}] + [3\text{RBPF} \pm 10 \text{ Hz}]$ και
- (θ) $\Sigma_{\text{GEAR}}^{\text{MS}} = [f_{\text{mesh}} \pm 10 \text{ Hz}] + [2 f_{\text{mesh}} \pm 10 \text{ Hz}] + [3 f_{\text{mesh}} \pm 10 \text{ Hz}]$,
- (ι) $\Sigma_{\text{GEAR}}^{\text{MD}} = [f_{\text{mesh}} \pm 10 \text{ Hz}] + [2 f_{\text{mesh}} \pm 10 \text{ Hz}] + [3 f_{\text{mesh}} \pm 10 \text{ Hz}]$,
- (κ) $\Sigma_{\text{BPF}}^{\text{MD}} = [\text{BPF} \pm 10 \text{ Hz}] + [2\text{BPF} \pm 10 \text{ Hz}]$

Μία καλή αντιμετώπιση του προβλήματος είναι η επιλογή των ακόλουθων περιοχών που προκύπτουν από το φιλτράρισμα του αρχικού σήματος μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n = 1000 \text{ Hz}$ και την αποδιαμόρφωση αυτού στη συνέχεια.

- (i) $[1x]^{\text{MD}}$,
- (ii) $[2x \text{ έως } 3x]^{\text{MD}}$,
- (iii) $\Sigma_{\text{BPFO}}^{\text{MD}} = [\text{BPFO} \pm 10 \text{ Hz}]$,
- (iv) $\Sigma_{\text{BPFI}}^{\text{MD}} = [\text{BPFI} \pm 10 \text{ Hz}]$,
- (v) $\Sigma_{\text{GEAR}}^{\text{MD}} = [f_{\text{mesh}} \pm 10 \text{ Hz}]$,
- (vi) $\Sigma 2f_L^{\text{MD}} = [2f_L \pm 10 \text{ Hz}]$,
- (vii) $\Sigma_{\text{RBPF}}^{\text{MD}} = [\text{RBPF} \pm 10 \text{ Hz}]$ και
- (viii) $\Sigma_{\text{BPF}}^{\text{MD}} = [\text{BPF} \pm 10 \text{ Hz}]$

Η ενέργεια της περιοχής (i) χαρακτηρίζει αζυγοσταθμία και φθαρμένα γρανάζια, η (ii) αφορά κακή ευθυγράμμιση, η (iii) φθαρμένο ένσφαιρο τριβέα στον εξωτερικό δακτύλιο, η (iv) φθαρμένο ένσφαιρο τριβέα στον εσωτερικό δακτύλιο, η (v) φθαρμένο γρανάζι, οι (vi) και (vii) ηλεκτρικό πρόβλημα και η (viii) αεροδυναμικό πρόβλημα.

Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων

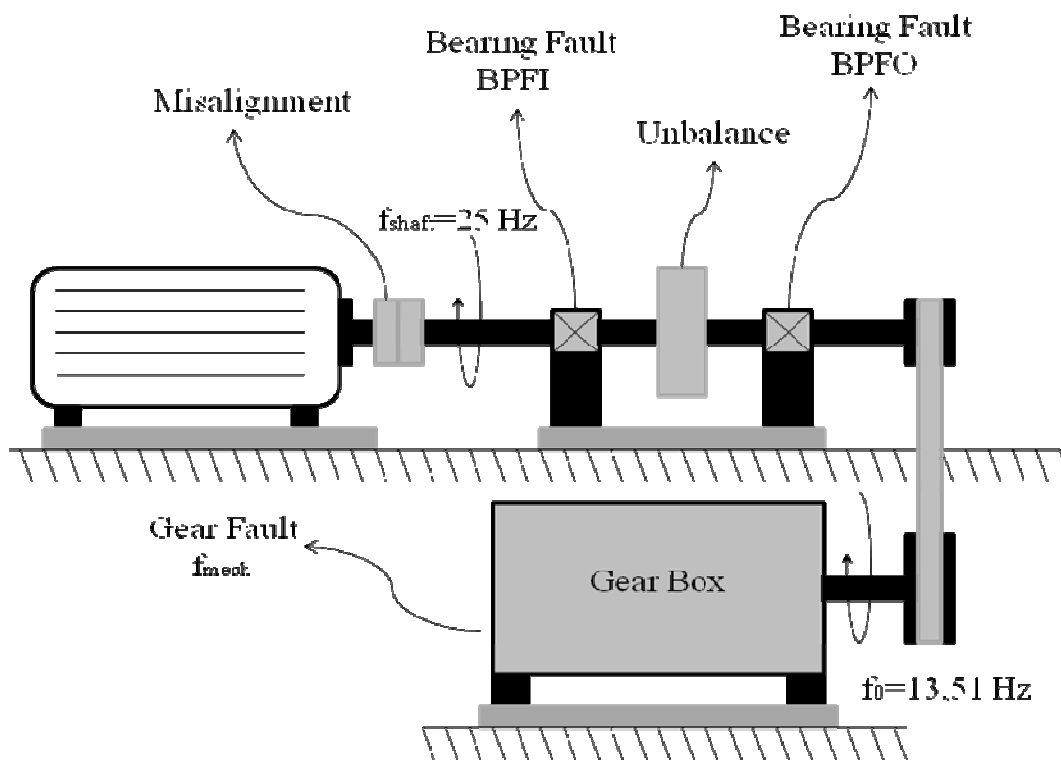
4.1. Εισαγωγή

Για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου ταξινόμησης χρησιμοποιούνται προσομοιωμένα σήματα τα οποία έχουν ληφθεί από τα σχετικά μοντέλα προσομοίωσης βλαβών του κεφαλαίου 2. Η υποτιθέμενη μηχανή από την οποία καταγράφονται οι υποτιθέμενες αποκρίσεις εμφανίζεται στο σχήμα 4.1. Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα ισούται με 1500 rpm ή 25 Hz ($=f_{\text{shaft}}$). Η έξοδος του κινητήρα συνδέεται με μεταλλικό σύνδεσμο με το στρεφόμενο τμήμα, το οποίο εδράζεται σε δύο ίδιου τύπου ένσφαιρους τριβείς. Το άκρο του άξονα του στροφιού δίδει κίνηση σε μειωτήρα μέσω μάντων με σχέση μετάδοσης ίση προς 1:1,85. Οπότε η συχνότητα περιστροφής στην είσοδο του μειωτήρα είναι $f_0=13,51$ Hz. Το πινιόν του μειωτήρα έχει $N=59$ οδόντες.

Η συχνότητα δειγματοληψίας των προσομοιωμένων σημάτων επιλέγεται ίση προς $f_s=10$ KHz και το πλήθος των δειγμάτων των σημάτων ίσο με $P=16.384$.

Κάθε φθαρμένο στοιχείο της μηχανής εκπέμπει σήμα που αποτελείται από χαρακτηριστικές συνιστώσες, οι οποίες μετά από επεξεργασία του δυναμικού σήματος με μετασχηματισμό Fourier εμφανίζονται στο φάσμα. Το πλήθος και το πλάτος των αιχμών του φάσματος που αναπτύσσονται σε χαρακτηριστικές συχνότητες αυξάνεται καθώς η βλάβη εξελίσσεται.

Οι βλάβες που θα ταξινομηθούν ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία του αλγορίθμου είναι: (α) φθορά γραναζιών, (β) φθορά εξωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα, (γ) κακή ευθυγράμμιση, (δ) αζυγοσταθμία και (ε) φθορά εσωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα. Το σύνολο των προσομοιωμένων σημάτων είναι 103, εκ των οποίων 20 ανήκουν στην ομάδα (α), 29 στην ομάδα (β), 20 στην ομάδα (γ), 9 στην ομάδα (δ) και 25 στην ομάδα (ε).



Σχήμα 4.1: Σκαρίφημα μηχανής.

Οι χαρακτηριστικές συχνότητες των παραπάνω προσομοιωμένων αποκρίσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Αναλυτικά, η χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης που σχετίζεται με φθορά εξωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα BPF0 θεωρείται ίση με 166 Hz και η χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης που σχετίζεται με φθορά εσωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα BPF1 λαμβάνεται ίση με 234 Hz. Τέλος, η δε χαρακτηριστική συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών f_{mesh} υπολογίζεται ίση προς 797,09

Hz, όπως προκύπτει από το γινόμενο της ταχύτητας περιστροφής του άξονα στον οποίο εδράζεται το πηνίο ($f_0=13,51$ Hz) επί των αριθμό οδόντων του πηνιόν ($N=59$).

Πίνακας 4.1

Συχνότητα	Τιμή (Hz)
BPFO	166
BPMI	234
f_{mesh}	797,09

Το συνολικό επίπεδο κραδασμών ΟΑ (mm/sec rms) των προσομοιωμένων σημάτων παρουσιάζεται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2

Σήμα	Συνολικό Επίπεδο Κραδασμών (mm/sec rms)
Gear-01	5,113
Gear-02	6,325
Gear-03	7,830
Gear-04	8,501
Gear-05	10,158
Gear-06	11,700
Gear-07	3,831

Κεφάλαιο 4^ο – Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων

Gear-08	4,068
Gear-09	4,455
Gear-10	5,623
Gear-11	6,602
Gear-12	7,711
Gear-13	9,09
Gear-14	10,917
Gear-15	3,392
Gear-16	4,265
Gear-17	6,014
Gear-18	7,371
Gear-19	9,381
BPFO-01	4,295
BPFO-02	11,146
BPFO-03	5,066
BPFO-04	7,050
BPFO-05	9,715
BPFO-06	4,037
BPFO-07	5,109
BPFO-08	7,735

Κεφάλαιο 4^ο – Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων

BPFO-09	11,276
BPFO-10	4,388
BPFO-11	6,977
BPFO-12	11,688
BPFO-13	4,931
BPFO-14	6,017
BPFO-15	7,131
BPFO-16	7,494
BPFO-17	9,755
BPFO-18	5,713
BPFO-19	10,379
BPFO-20	12,500
BPFO-21	7,599
BPFO-22	7,454
BPFO-23	8,928
BPFO-24	9,662
BPFO-25	3,948
BPFO-26	6,689
BPFO-27	6,057
BPFO-28	7,993

Κεφάλαιο 4^ο – Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων

BPFO-29	5,170
MIS-01	6,360
MIS-02	6,703
MIS-03	4,712
MIS-04	6,413
MIS-05	8,274
MIS-06	9,144
MIS-07	13,981
MIS-08	6,438
MIS-09	4,751
MIS-10	3,635
MIS-11	4,860
MIS-12	6,018
MIS-13	7,279
MIS-14	8,924
MIS-15	10,322
MIS-16	11,212
MIS-17	13,264
MIS-18	8,765
MIS-19	8,311

Κεφάλαιο 4^ο – Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων

MIS-20	8,576
UNBAL-01	4,808
UNBAL-02	5,945
UNBAL-03	8,467
UNBAL-04	11,692
UNBAL-05	5,124
UNBAL-06	7,323
UNBAL-07	8,707
UNBAL-08	10,962
UNBAL-09	13,212
BPFI-01	3,154
BPFI-02	3,530
BPFI-03	4,752
BPFI-04	5,403
BPFI-05	6,073
BPFI-06	8,663
BPFI-07	9,769
BPFI-08	3,490
BPFI-09	4,236
BPFI-10	5,216

Κεφάλαιο 4^ο – Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων

BPFI-11	6,062
BPFI-12	7,230
BPFI-13	8,762
BPFI-14	10,555
BPFI-15	12,056
BPFI-16	12,361
BPFI-17	3,855
BPFI-18	5,066
BPFI-19	5,613
BPFI-20	6,389
BPFI-21	7,363
BPFI-22	8,383
BPFI-23	9,717
BPFI-24	10,226
BPFI-25	10,893

4.2. Παράμετροι Ταξινόμησης

Ο αλγόριθμος ταξινόμησης δυναμικών σημάτων *k means* θα εκτελεστεί με δύο τρόπους. Αρχικά, θα πραγματοποιηθεί ταξινόμηση των μετρούμενων σημάτων σε ένα στάδιο με απευθείας εισαγωγή όλων των υπολογιζόμενων στοιχείων εισόδου για όλες τις παραμέτρους εκτίμησης απόστασης (correlation, cityblock, cosine, SqEuclidean).

Στη συνέχεια θα διεξαχθεί σταδιακή ταξινόμηση των βιομηχανικών σημάτων που θα ολοκληρωθεί σε 3 επίπεδα με την σταδιακή εισαγωγή διαφορετικών στοιχείων εισόδου σε κάθε επίπεδο της διαδικασίας και για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης.

Στο 1^ο επίπεδο διαχωρίζονται τα σήματα που περιέχουν πληροφορίες για φθαρμένους ένσφαιρους τριβείς και γρανάζια (A κλάση) από εκείνα που έχουν πληροφορίες για αζυγοσταθμία και κακή ευθυγράμμιση (B κλάση). Στο 2^ο επίπεδο ταξινόμησης διαχωρίζονται τα σήματα της A κλάσης του 1^{ου} επιπέδου σε αυτά που περιέχουν πληροφορίες για φθαρμένους ένσφαιρους τριβείς (C κλάση) και σε αυτά που αφορούν φθορά στα γρανάζια (D κλάση). Ομοίως, τα σήματα της B κλάσης του 1^{ου} επιπέδου ταξινόμησης διαχωρίζονται σε δύο νέες κλάσεις. Η κλάση (E) περιλαμβάνει σήματα που αφορούν αζυγοσταθμία και η κλάση (F) που περιέχει σήματα που σχετίζονται με κακή ευθυγράμμιση. Τέλος, στο 3^ο επίπεδο ταξινόμησης, τα σήματα της C κλάσης διαχωρίζονται στην κλάση (G) που περιλαμβάνει αποκρίσεις ένσφαιρων τριβέων με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο και στην κλάση (H) που περιλαμβάνει αποκρίσεις ένσφαιρων τριβέων με φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο.

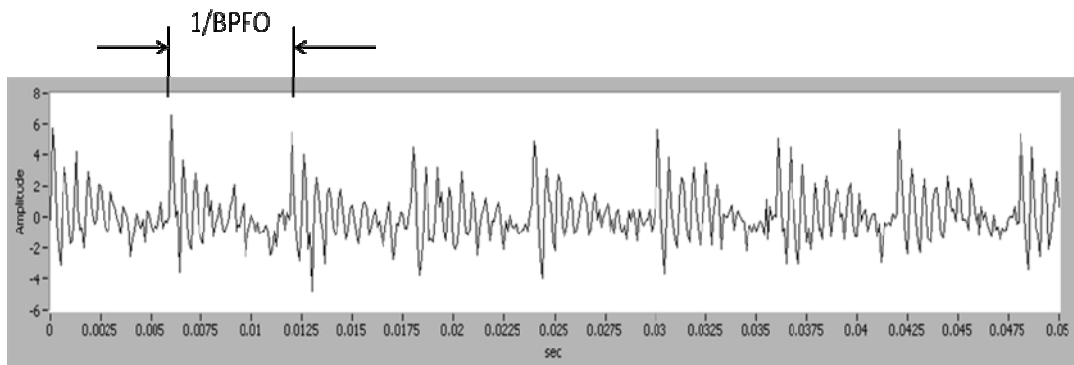
Τα στοιχεία εισόδου στον αλγόριθμο ταξινόμησης είναι η ενέργεια που συγκεντρώνεται σε χαρακτηριστικές συχνοτικές περιοχές του φάσματος του μετρούμενου και του αποδιαμορφωμένου χρονικού σήματος, οι οποίες σχετίζονται με την ανάπτυξη μιας πιθανής βλάβης.

Ως γνωστόν για να προκύψει το αποδιαμορφωμένο σήμα πραγματοποιείται επεξεργασία του αρχικού προσομοιωμένου σήματος. Το αρχικό σήμα $x(t)$ φιλτράρεται μέσω ενός υπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz. Στη συνέχεια το φιλτραρισμένο σήμα $u(t)$ επεξεργάζεται με μετασχηματισμό Hilbert. Το

σήμα $h(t)$ που προκύπτει από την προηγούμενη επεξεργασία μαζί με το φιλτραρισμένο σήμα $u(t)$ παράγουν το αναλυτικό σήμα $a(t)$, το οποίο είναι μιγαδικό με πραγματικό μέρος το φιλτραρισμένο σήμα και φανταστικό μέρος το $h(t)$. Το πλάτος του αναλυτικού σήματος $a(t)$ είναι το αποδιαμορφωμένο χρονικό σήμα. Το φάσμα του μετρούμενου και του αποδιαμορφωμένου χρονικού σήματος προκύπτει με επεξεργασία μέσω του μετασχηματισμού Fourier.

Για να γίνει αντιληπτή η επιλογή των στοιχείων εισόδου του αλγορίθμου ταξινόμησης που σχετίζονται με συχνοτικές περιοχές ενέργειας του φάσματος των παραπάνω χρονικών σημάτων θα υπάρξει μια σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών συχνοτήτων που παρέχουν μοναδικές πληροφορίες για κάθε τύπο βλάβης.

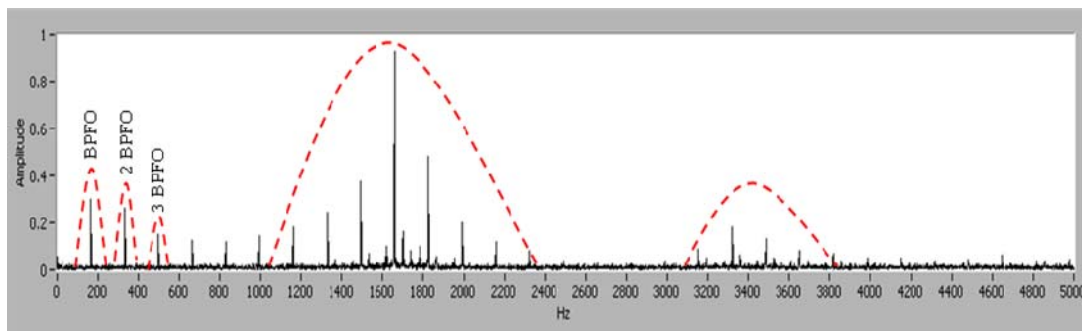
Στην περίπτωση φθοράς εξωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα αναπτύσσονται κρουστικοί παλμοί σε σταθερά χρονικά διαστήματα κάθε φορά που οι σφαίρες έρχονται σε επαφή με τη φθαρμένη μεταλλική επιφάνεια του εξωτερικού δακτυλίου. Η περίοδος αυτή σχετίζεται με τη χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης ένσφαιρου τριβέα και ισούται με $1/BPFO = 0,006 \text{ sec}$, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Οι κρούσεις διεγείρουν ιδιοσυχνότητες του ένσφαιρου τριβέα ή της κατασκευής.



Σχήμα 4.2: Χρονική κυματομορφή απόκρισης μηχανής με βλάβη ένσφαιρου τριβέα στον εξωτερικό δακτύλιο.

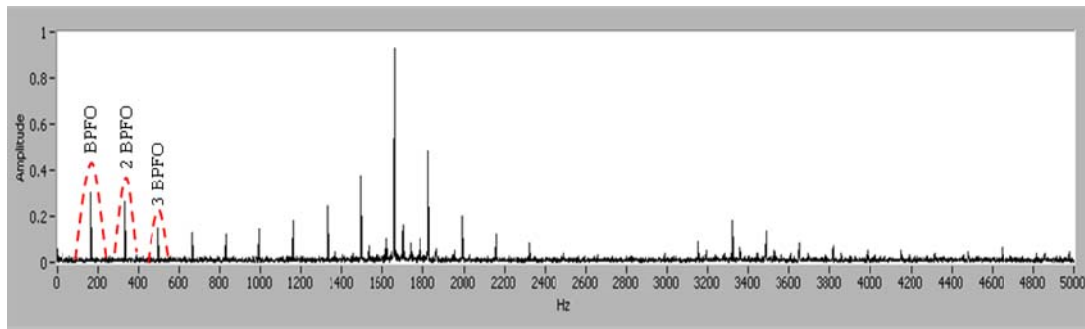
Στο φάσμα της απόκρισης φθαρμένου ένσφαιρου τριβέα, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 4.3, δεσπόζει μία σειρά από αιχμές, οι οποίες αναπτύσσονται στη χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης BPFO ($=166 \text{ Hz}$) και τις αρμονικές της. Ακόμη διακρίνεται μια ή

περισσότερες υψίσυχνες διεγερμένες περιοχές, οι οποίες αφορούν τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής που διεγείρονται. Η αιχμή με το μεγαλύτερο πλάτος f_c δύναται να ταυτιστεί με την ιδιοσυχνότητα. Περιφερειακά αυτής αναπτύσσονται πλευρικές αιχμές που ισαπέχουν απόσταση ίση με τη συχνότητα BPFO που την διαμορφώνει κατά πλάτος. Η εμφάνιση τέτοιου τύπου αιχμών προσδιορίζει τον μηχανισμό του συγκεκριμένου τύπου βλάβης.



Σχήμα 4.3: Φάσμα χρονικού σήματος του σχήματος 4.2.

Στη συνέχεια η αρχική απόκριση φιλτράρεται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και έπειτα αποδιαμορφώνεται. Το φάσμα του αποδιαμορφωμένου χρονικού σήματος (σχήμα 4.4) προκύπτει με επεξεργασία μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Στο φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος, είναι απόλυτα ευκρινές ότι υπάρχουν, επίσης, η χαρακτηριστική συχνότητα BPFO και οι αρμονικές της. Το άθροισμα των ενεργειών που συγκεντρώνεται στις συχνοτικές περιοχές που περικλείονται από τις διακεκομμένες κόκκινες καμπύλες αποτελεί στοιχείο εισόδου του αλγόριθμου ταξινόμησης.

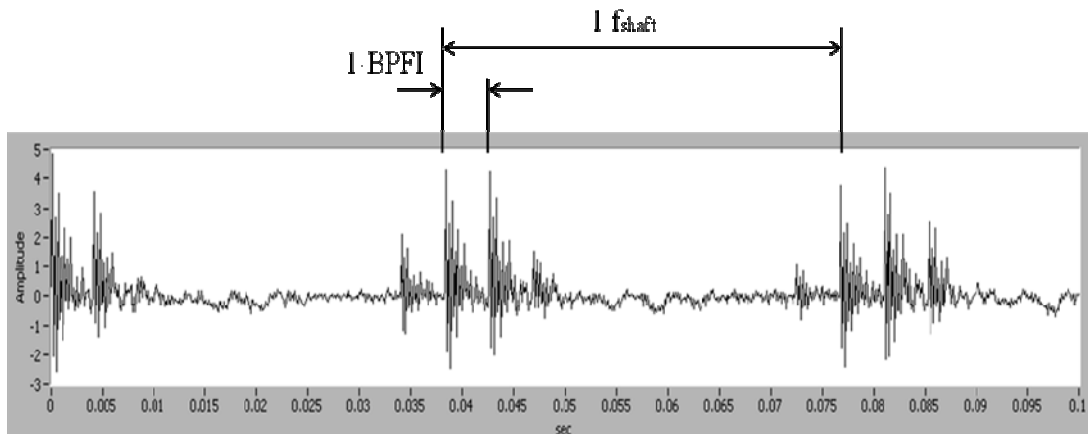


4.4: Φάσμα αποδιαμορφωμένου σήματος που προκύπτει από το σήμα του σχήματος 4.2.

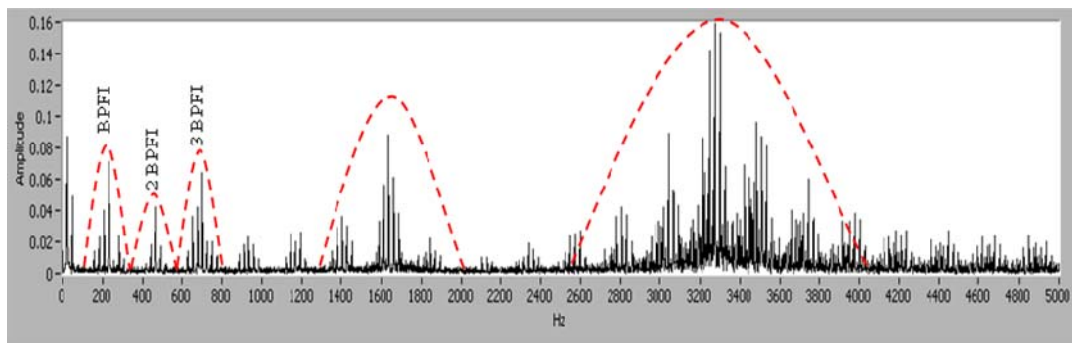
Επιπλέον, το συνολικό άθροισμα των παραπάνω ενεργειών που προκύπτει από το φάσμα του αρχικού και του αποδιαμορφωμένου σήματος δύναται να αποτελέσει ένα ακόμη στοιχείο εισόδου του αλγόριθμου ταξινόμησης.

Για την περίπτωση φθοράς στον εσωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα παρατηρείται ανάπτυξη κρουστικών παλμών σε σταθερά χρονικά διαστήματα κάθε φορά που οι σφαίρες έρχονται σε επαφή με τη φθαρμένη μεταλλική επιφάνεια του εσωτερικού δακτυλίου. Η περίοδος αυτή σχετίζεται με τη χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης BPF_I και ισούται με 0,00427 sec, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Οι ένταση των κρούσεων αυξάνει εντός της ζώνης φόρτισης του ένσφαιρου τριβέα και ελαττώνεται εκτός αυτής. Οι κρούσεις διεγείρουν ιδιοσυχνότητες του ένσφαιρου τριβέα ή της κατασκευής, το πλάτος των οποίων είναι διπλά διαμορφωμένο: (α) από το ρυθμό περάσματος των σφαιρών από τη φθαρμένη επιφάνεια και (β) από την ταχύτητα περιστροφής του άξονα στον οποίο εδράζεται ο ένσφαιρος τριβέας.

Στο φάσμα της απόκρισης του φθαρμένου ένσφαιρου τριβέα, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 4.6, δεσπόζει μία σειρά από αιχμές, οι οποίες αναπτύσσονται στη χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης BPF_I (=234 Hz) και τις αρμονικές της. Ακόμη διακρίνεται μια υψίσυχη διεγερμένη περιοχή, η οποία αφορά την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής που διεγείρεται. Η αιχμή με το μεγαλύτερο πλάτος f_c δύναται να ταυτιστεί με την ιδιοσυχνότητα. Περιφερειακά αυτής αναπτύσσονται πλευρικές αιχμές που ισαπέχουν απόσταση ίση με τη χαρακτηριστική συχνότητα BPF_I και την ταχύτητα περιστροφής f_{shaft} που την διαμορφώνουν κατά πλάτος. Η εμφάνιση τέτοιου τύπου αιχμών προσδιορίζει τον μηχανισμό του συγκεκριμένου τύπου βλάβης.

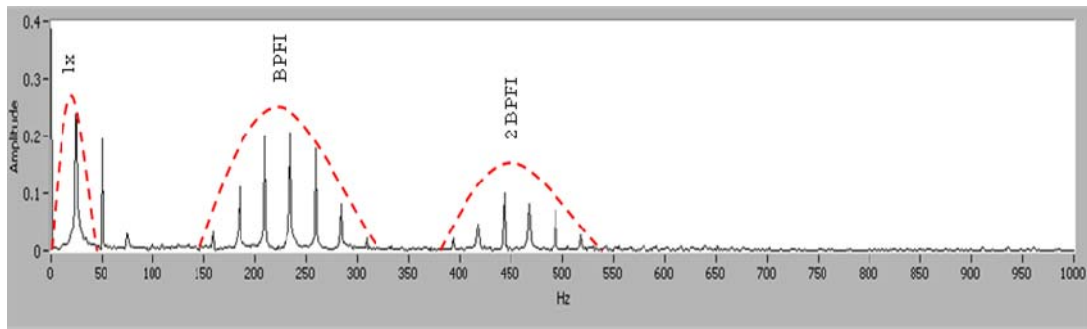


Σχήμα 4.5: Χρονική κυματομορφή απόκρισης μηχανής με βλάβη ένσφαιρου τριβέα στον εσωτερικό δακτύλιο.



Σχήμα 4.6: Φάσμα χρονικού σήματος του σχήματος 4.5.

Στη συνέχεια ακολουθείται η γνωστή διαδικασία ώστε να προκύψει το αποδιαμορφωμένο χρονικό σήμα. Έτσι το αρχικό προσομοιωμένο σήμα φιλτράρεται μέσω ενός υπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και κατόπιν αποδιαμορφώνεται. Το φάσμα του αποδιαμορφωμένου χρονικού σήματος (σχήμα 4.7) προκύπτει με επεξεργασία μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Στο φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος εμφανίζεται η χαρακτηριστική συχνότητα BPF1 και οι αρμονικές της. Ως στοιχείο εισόδου του αλγορίθμου λαμβάνεται το άθροισμα των ενεργειών που συγκεντρώνεται στις συχνοτικές περιοχές που περικλείονται από τις διακεκομμένες κόκκινες καμπύλες του φάσματος του σχήματος 4.7.



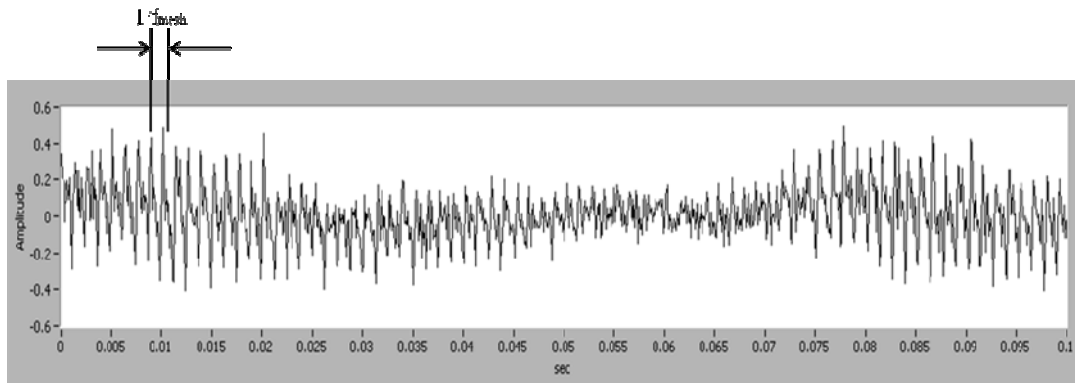
4.7: Φάσμα αποδιαμορφωμένου σήματος που προκύπτει από το σήμα του σχήματος 4.5.

Επιπλέον, το συνολικό άθροισμα των παραπάνω ενεργειών που προκύπτει από το φάσμα του αρχικού και του αποδιαμορφωμένου σήματος δύναται να αποτελέσει ένα ακόμη στοιχείο εισόδου του αλγόριθμου ταξινόμησης.

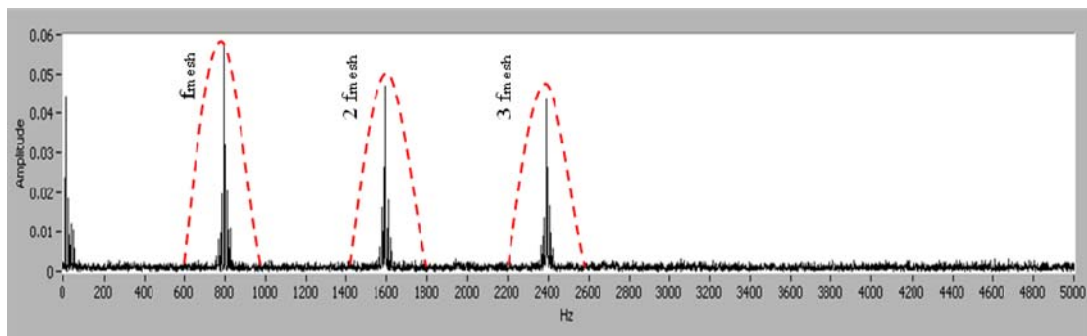
Στη συνέχεια μελετάται η περίπτωση φθοράς γραναζιών. Στη χρονική κυματομορφή του σχήματος 4.8 παρατηρείται μια χαρακτηριστική περιοδικότητα που σχετίζεται με τη συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών f_{mesh} . Το πλάτος της συνιστώσας f_{mesh} είναι διαμορφωμένο από την ταχύτητα περιστροφής f_0 της εισόδου του μειωτήρα. Η συχνότητα εμπλοκής f_{mesh} προκύπτει από το γινόμενο της ταχύτητας περιστροφής του άξονα στον οποίο εδράζεται το πινιόν επί το πλήθος των οδόντων του. Ειδικότερα, $f_{\text{mesh}} = f_0 \times N = 700 \text{ Hz}$, όπου $f_0 = 13,51 \text{ Hz}$.

Στο φάσμα του παραπάνω σήματος του σχήματος 4.9 δεσπόζει μία ομάδα από αιχμές, οι οποίες αναπτύσσονται στη συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών f_{mesh} και τις αρμονικές της. Περιφερειακά της f_{mesh} και των αρμονικών της παρατηρούνται πλευρικές αιχμές μικρότερου πλάτους που ισαπέχουν κατά f_0 . Αυτές οι χαρακτηριστικές αιχμές προσδιορίζουν τον μηχανισμό της βλάβης που προκύπτει από τη φθορά γραναζιών.

Ο αλγόριθμος ταξινόμησης χρησιμοποιεί ως στοιχείο εισόδου το άθροισμα των ενεργειών που συγκεντρώνεται στις συχνοτικές περιοχές που περικλείονται από τις διακεκομμένες κόκκινες καμπύλες (σχήμα 4.9)

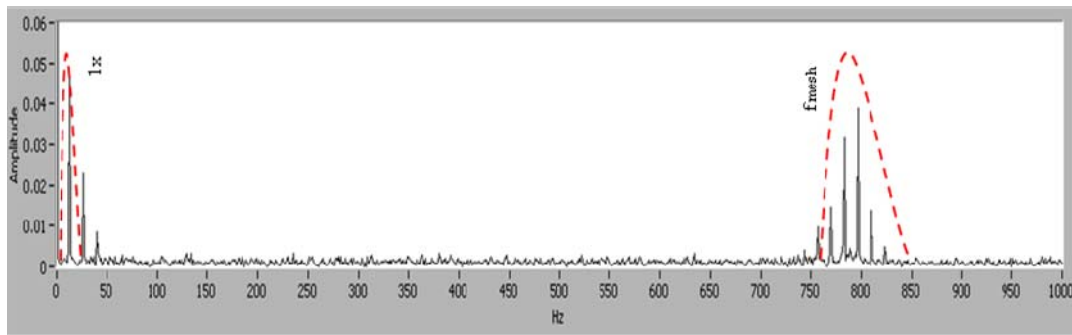


Σχήμα 4.8: Χρονική κυματομορφή απόκρισης μηχανής με βλάβη γραναζιού.



Σχήμα 4.9: Φάσμα χρονικού σήματος του σχήματος 4.8.

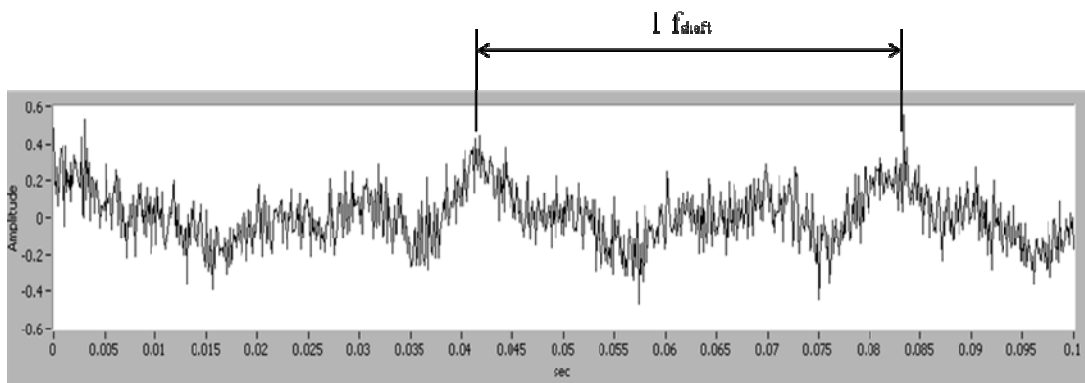
Καθώς, η απόκριση φθαρμένων γραναζιών είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος, το μετρούμενο σήμα μπορεί να αποδιαμορφωθεί αφού πρώτα φιλτραρισθεί μέσω ενός υπεραποδιαμορφωμένου φίλτρου. Το φάσμα του αποδιαμορφωμένου χρονικού σήματος (σχήμα 4.10) θα προκύψει με επεξεργασία μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Στο φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος, φαίνονται ευκρινέστερα η χαρακτηριστική συχνότητα f_{mesh} , οι αρμονικές της, και η συχνότητα περιστροφής στην είσοδο του μειωτήρα f_0 . Ομοίως με τις προηγούμενες περιπτώσεις βλάβων, το άθροισμα των ενεργειών που συγκεντρώνεται στις συχνοτικές περιοχές που περικλείονται από τις διακεκομμένες κόκκινες καμπύλες του σχήματος 4.10, αποτελεί ένα ακόμα στοιχείο εισόδου του αλγόριθμου ταξινόμησης.



4.10: Φάσμα αποδιαμορφωμένου σήματος που προκύπτει από το σήμα του σχήματος 4.8.

Επιπλέον, όπως, και στις προηγούμενες περιπτώσεις, το συνολικό άθροισμα των παραπάνω ενεργειών που προκύπτει από το φάσμα του αρχικού και του αποδιαμορφωμένου σήματος μπορεί να αποτελέσει ένα ακόμη στοιχείο εισόδου που μπορεί να εισαχθεί στον εξεταζόμενο αλγόριθμο ταξινόμησης.

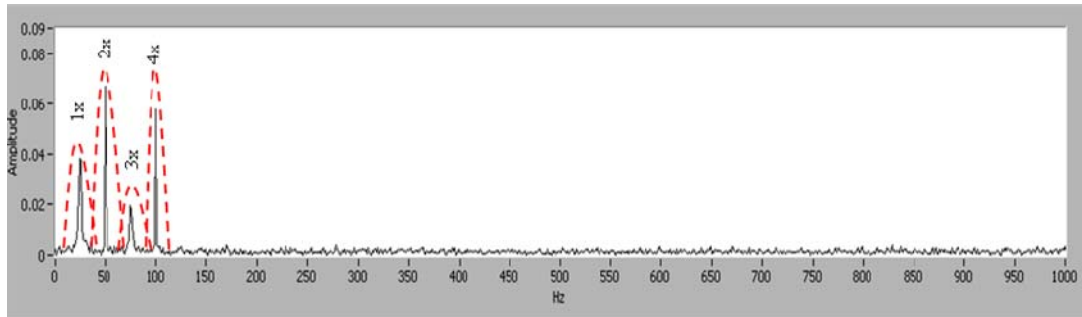
Στην συνέχεια παρατίθεται η μελέτη των αποκρίσεων της μηχανής στην περίπτωση κακής ευθυγράμμισης. Η απόκριση ενός τέτοιου τύπου βλάβης παρουσιάζεται στο σχήμα 4.11. Στη χρονική κυματομορφή του σήματος είναι ευδιάκριτη μια χαρακτηριστική περιοδικότητα που σχετίζεται με τη συχνότητα περιστροφής f_{shaft} και τις αρμονικές της.



Σχήμα 4.11: Χρονική κυματομορφή απόκρισης μηχανής με κακή ευθυγράμμιση.

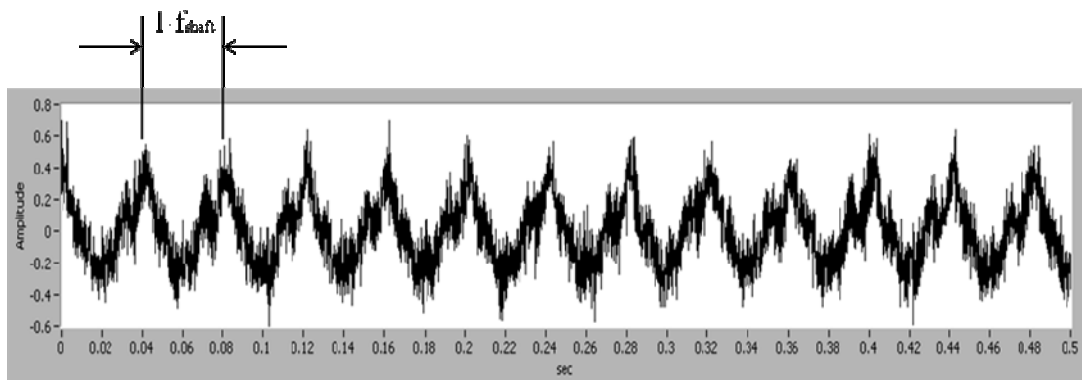
Στο φάσμα που προκύπτει από το αρχικό σήμα κακής ευθυγράμμισης μετά από επεξεργασία με μετασχηματισμό Fourier, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 4.12, δεσπόζει μία σειρά από αιχμές, οι οποίες αναπτύσσονται στη συχνότητα περιστροφής f_{shaft} και στις

αρμονικές της. Η εμφάνιση αυτού του τύπου αιχμών προσδιορίζει τον μηχανισμό των βλάβων που προκαλούνται από κακή ευθυγράμμιση.

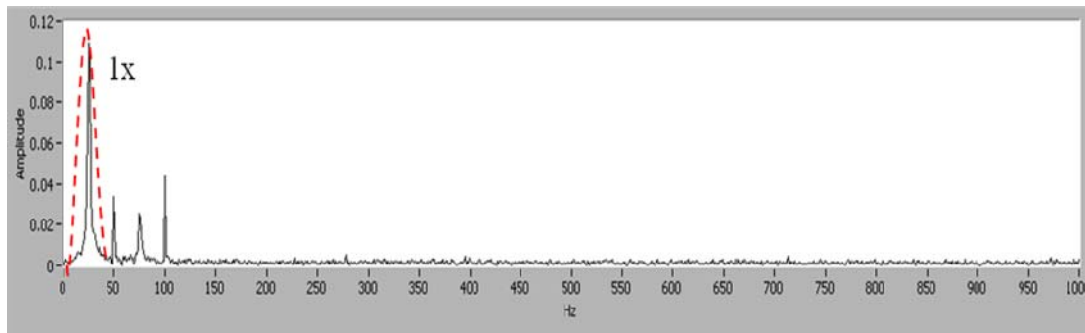


Σχήμα 4.12: Φάσμα χρονικού σήματος του σχήματος 4.11.

Στην περίπτωση που η μηχανή παρουσιάζει αζυγοσταθμία το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας της απόκρισης συγκεντρώνεται στην συχνότητα περιστροφής. Στο σχήμα 4.13 παρατίθεται η απόκριση ενός τέτοιου τύπου βλάβης, στο οποίο είναι ευδιάκριτη μία χαρακτηριστική περιοδικότητα, η οποία σχετίζεται με τη συχνότητα περιστροφής f_{shaft} .



Σχήμα 4.14: Χρονική κυματομορφή απόκρισης μηχανής με αζυγοσταθμία.



Σχήμα 4.15: Φάσμα χρονικού σήματος του σχήματος 4.14.

Στο φάσμα που προκύπτει από το αρχικό σήμα της αζυγοσταθμίας, μετά από επεξεργασία με μετασχηματισμό Fourier (σχήμα 4.14) δεσπόζει μία αιχμή, η οποία αναπτύσσεται στη συχνότητα περιστροφής f_{shaft} . Η εικόνα αυτού του τύπου φάσματος είναι ενδεικτική του μηχανισμού των βλάβων που προκαλούνται από αζυγοσταθμία.

Στις περιπτώσεις βλάβων που έχουν να κάνουν είτε με αζυγοσταθμία είτε με κακή ευθυγράμμιση δεν εξετάζεται το φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος, διότι οι αποκρίσεις αυτές δεν είναι διαμορφωμένες κατά πλάτος.

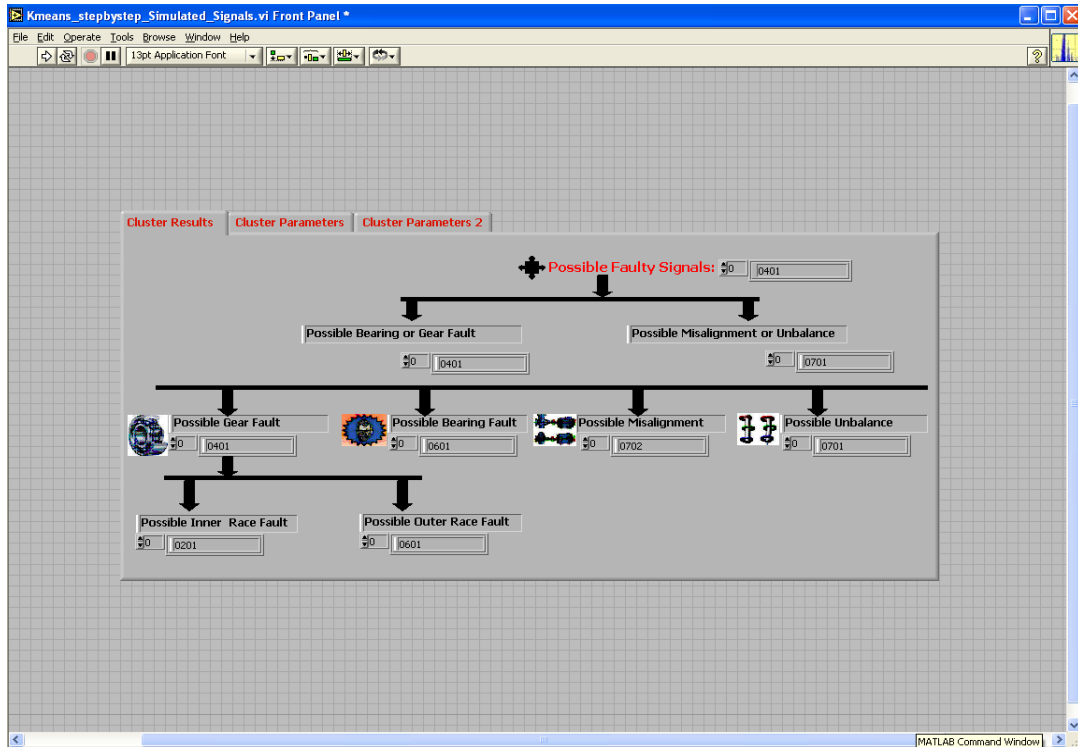
4.3. Σταδιακή Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων

Ο αλγόριθμος ταξινόμησης ομάδων λειτουργεί στο υπολογιστικό περιβάλλον των λογισμικών LabVIEW και Matlab. Μελετώνται για την αποτελεσματικότητα και την σταθερότητά τους δύο διαφορετικοί τρόποι εκτέλεσης του αλγόριθμου για όλες τις παραμέτρους εκτίμησης απόστασης: (α) σταδιακός και (β) άμεσος.

Στην περίπτωση της σταδιακής ταξινόμησης των βιομηχανικών σημάτων ο αλγόριθμος ολοκληρώνεται σε 3 επίπεδα με τη σταδιακή εισαγωγή διαφορετικών στοιχείων εισόδου σε κάθε επίπεδο της διαδικασίας και για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης (Correlation, Cosine, Cityblock, και SqEuclidean). Στο σχήμα 4.15 παρουσιάζεται η οθόνη ελέγχου του αλγόριθμου που επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει τα δεδομένα, να ελέγξει τη διαδικασία και τα αποτελέσματα. Διακρίνονται τα 3 επίπεδα σταδιακής ταξινόμησης των βιομηχανικών σημάτων, όπου κάθε κλάση πιθανής βλάβης

Κεφάλαιο 4^ο – Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων

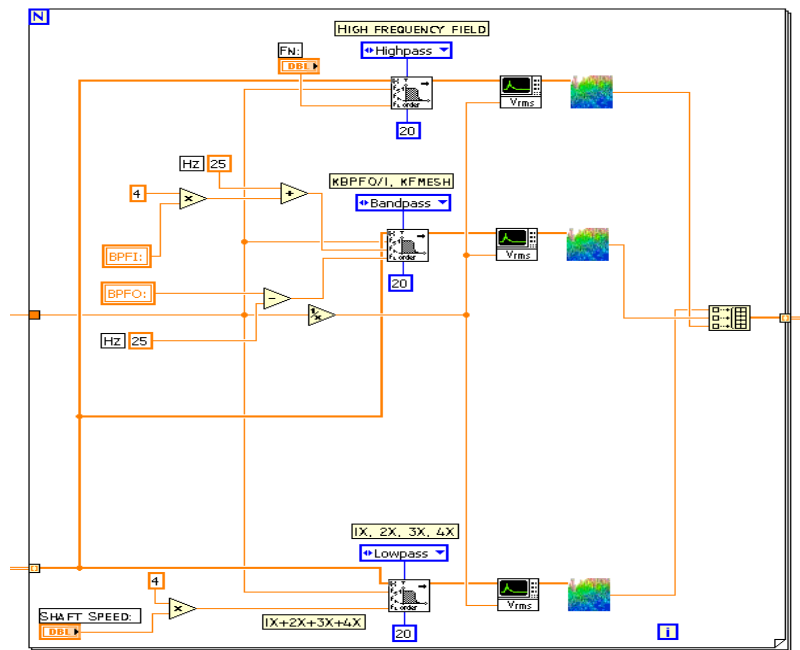
αποτελείται από έναν πίνακα που περιλαμβάνει ονομαστικά τα σήματα που ο αλγόριθμος του έχει κατανήμει. Επίσης, σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος εκτελείται κάθε φορά με τυχαία αρχικά κέντρα.



Σχήμα 4.15: Οθόνη ελέγχου προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων.

Στο 1^ο επίπεδο διαχωρίζονται τα σήματα που περιέχουν πληροφορίες για κακή ευθυγράμμιση και αζυγοσταθμία (κλάση A) από αυτά που αφορούν βλάβη στον εξωτερικό και εσωτερικό δακτύλιο του ένσφαιρου τριβέα και φθορά στα γρανάζια (κλάση B). Επομένως, σχηματίζονται αρχικά δύο μεγάλες κλάσεις.

Η συχνότητα f_{shaft} και οι αρμονικές της στο φάσμα του αρχικού σήματος χαρακτηρίζουν την αζυγοσταθμία και την κακή ευθυγράμμιση. Οι αιχμές αυτών των συχνοτήτων στο φάσμα είναι απομονωμένες στην αρχή του φάσματος από τις υπόλοιπες χαρακτηριστικές συχνότητες. Έτσι, η f_{shaft} και οι αρμονικές της φαίνεται πως είναι εύκολο να διαχωριστούν σε πρώτη φάση από τις υπόλοιπες χαρακτηριστικές συχνότητες που προσδιορίζουν τους υπόλοιπους τύπους βλαβών.

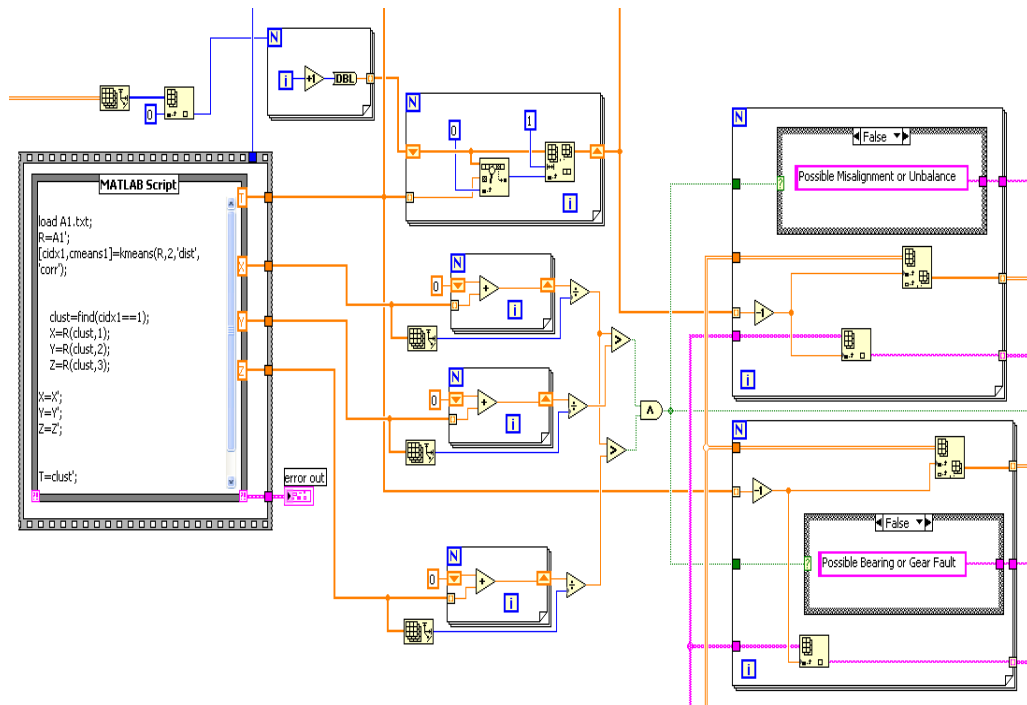


Σχήμα 4.16: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποκρίσεων κλάσης (A) και (B).

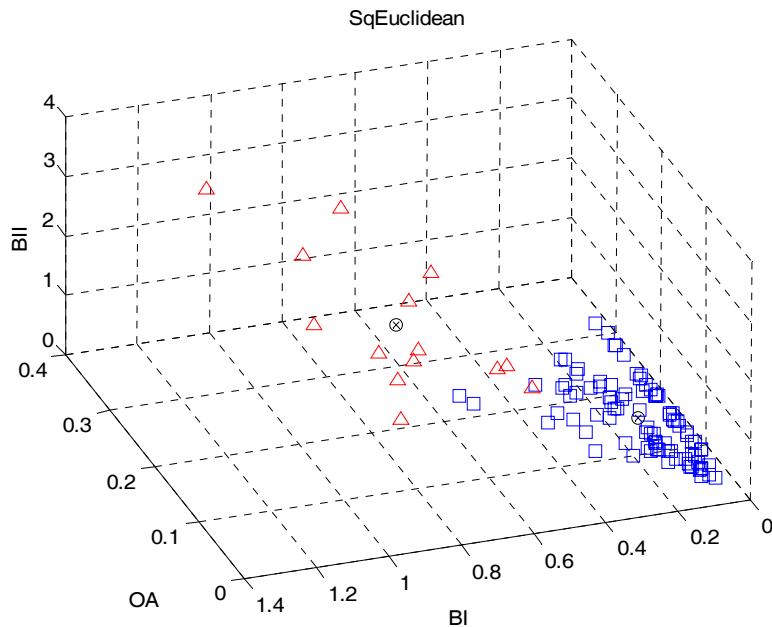
Έτσι, ο αλγόριθμος υπολογίζει την ενέργεια στις ακόλουθες περιοχές του φάσματος των αρχικών σημάτων, όπως φαίνεται και στο σχήματα 4.16: (A): από 0 Hz έως $4f_{\text{shaft}}$ (=100 Hz) και (B): BPF0-20 (=126 Hz) έως $4\text{BPF1}+25$ (=961 Hz) και (Γ) την υψίσυχη περιοχή άνω της f_n (=1000 Hz). Επομένως, εάν η ενέργεια της περιοχής (A) είναι μεγαλύτερη, τα σήματα ταξινομούνται ως απόκριση αζυγοσταθμίας ή κακής ευθυγράμμισης (κλάση A). Αναλόγως, εάν η ενέργεια της περιοχής (B) ή/και της περιοχής (Γ) είναι μεγαλύτερη, τα σήματα κατατάσσονται ως απόκριση φθαρμένων γραναζιών και ένσφαιρων τριβέων (κλάση B).

Στο σχήμα 4.17 παρατηρείται ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος που πραγματοποιεί την ταξινόμηση των προσομοιωμένων σημάτων κατά το 1^ο επίπεδο. Επίσης, διακρίνονται οι εντολές στο πλαίσιο ‘MATLAB Script’.

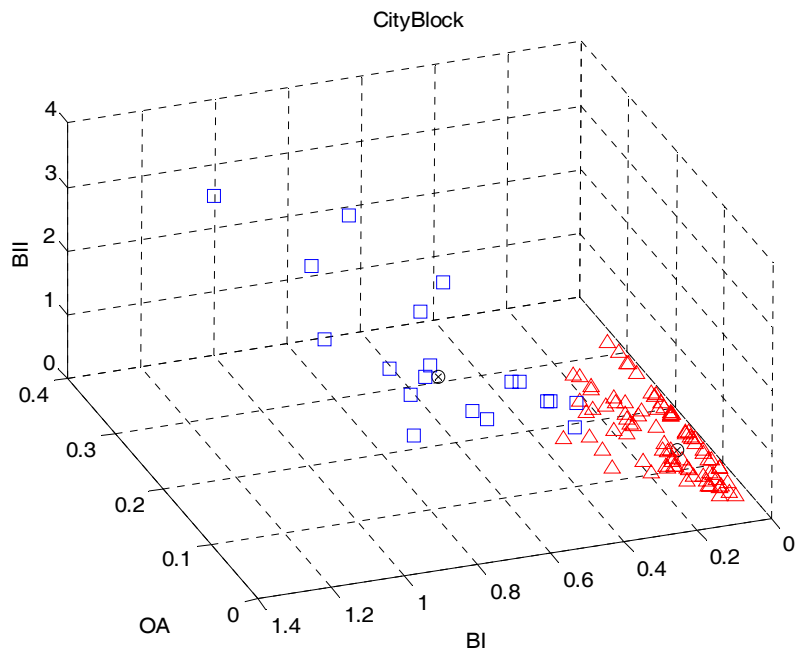
Στο σχήμα 4.18, 4.19, 4.20 και 4.21 παρουσιάζεται η κατανομή των στοιχείων εισόδου (A), (B) και (Γ) για τα σήματα του 1^{ου} επιπέδου για τις διάφορες παραμέτρους εκτίμησης απόστασης (Correlation, Cosine, Cityblock, και SqEuclidean) και τα τελικά κέντρα.



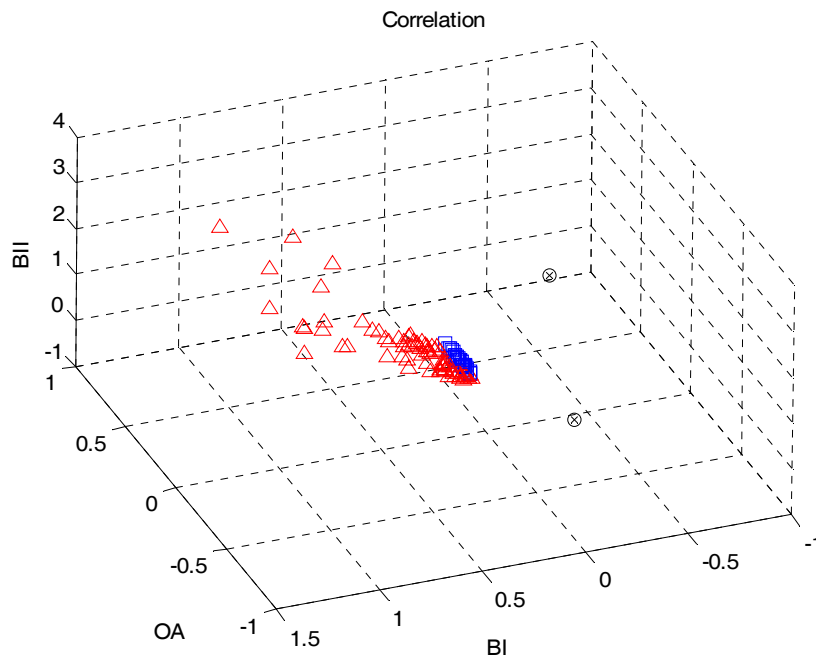
Σχήμα 4.17: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: 1^ο επίπεδο ταξινόμησης.



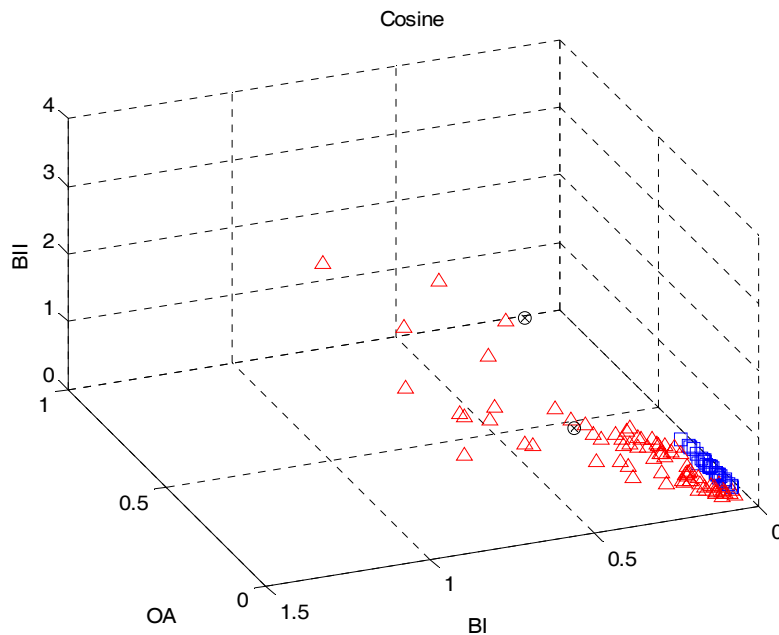
Σχήμα 4.18: Πρώτο επίπεδο ταξινόμησης προσομοιωμένων σημάτων με παράμετρο απόστασης euclidean.



Σχήμα 4.19: Πρώτο επίπεδο ταξινόμησης προσομοιωμένων σημάτων με παράμετρο απόστασης cityblock.



Σχήμα 4.20: Πρώτο επίπεδο ταξινόμησης προσομοιωμένων σημάτων με παράμετρο απόστασης correlation.



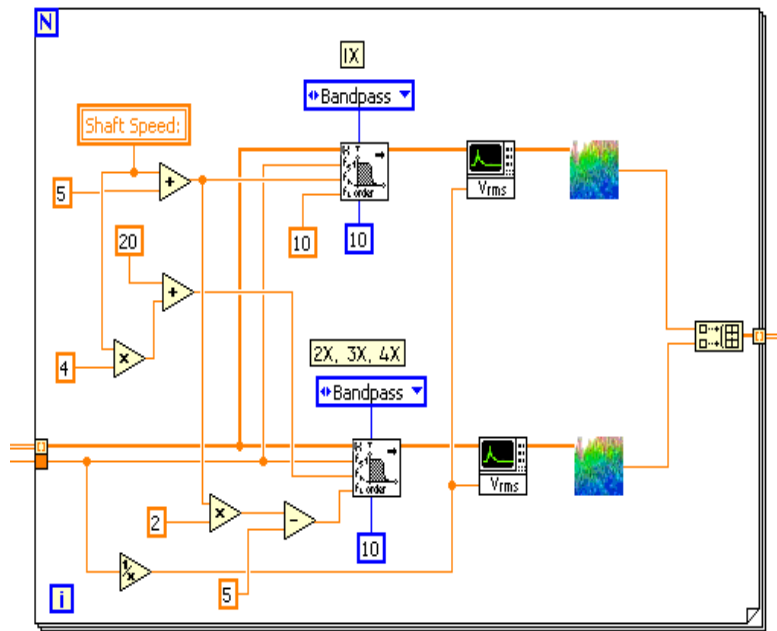
Σχήμα 4.21: Πρώτο επίπεδο ταξινόμησης προσομοιωμένων σημάτων με παράμετρο απόστασης cosine.

Οι δύο κλάσεις όπως προκύπτουν από το 1^ο επίπεδο χωρίζονται έκαστη σε δύο νέες κλάσεις στο 2^ο επίπεδο.

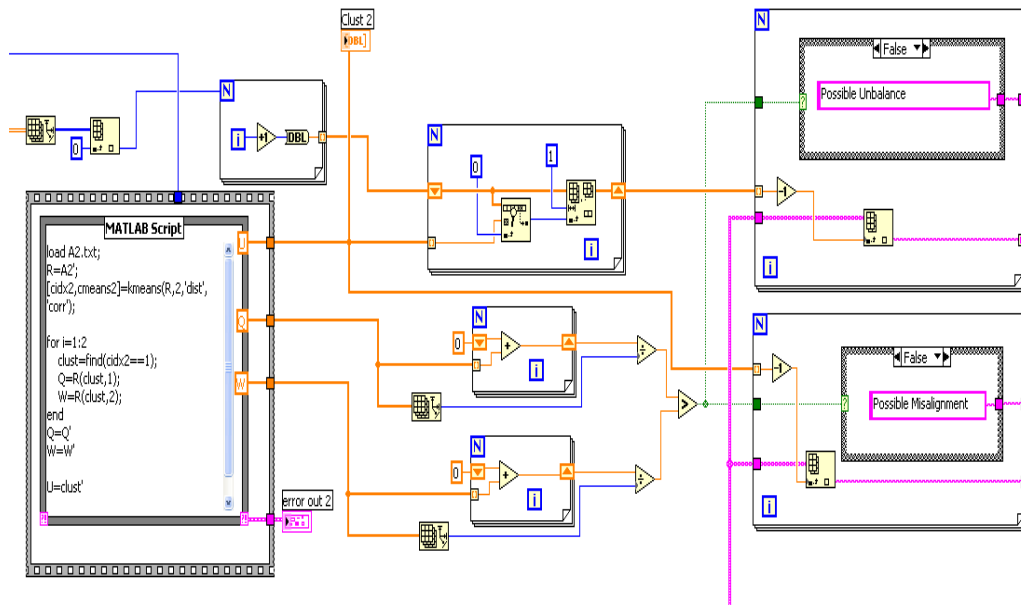
Ειδικότερα η Β κλάση που φιλοξενεί σήματα που αφορούν κακή ευθυγράμμιση και αζυγοσταθμία διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους κλάσεις (E) και (F). Όπως και στο προηγούμενο επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη τον μηχανισμό βλάβης των αποκρίσεων που μελετώνται, επιλέγεται ο υπολογισμός ενέργειας κατάλληλων συχνοτικών περιοχών στο φάσμα των αποδιαμορφωμένων σημάτων.

Έτσι, ο αλγόριθμος υπολογίζει στο φάσμα του αρχικού σήματος τις περιοχές (E): 10 Hz έως $f_{\text{shaft}}+5$ Hz και (F): $2f_{\text{shaft}}-5$ Hz έως $4f_{\text{shaft}}+20$ Hz. Στο σχήμα 4.22 φαίνεται ο αλγόριθμος που υπολογίζει τις παραπάνω περιοχές ενέργειας. Αν η ενέργεια της περιοχής (E) είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια της περιοχής (F) τότε πρόκειται για βλάβη αζυγοσταθμίας. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν η ενέργεια της περιοχής (F) είναι μεγαλύτερη της ενέργειας της περιοχής (E), πρόκειται για περίπτωση κακής ευθυγράμμισης.

Στο σχήμα 4.23 παρατηρείται ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος που πραγματοποιεί την ταξινόμηση των προσομοιωμένων σημάτων κατά το 2^ο επίπεδο στις κλάσεις E και F. Επίσης, διακρίνονται οι εντολές στο πλαίσιο ‘MATLAB Script’.



Σχήμα 4.22: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποκρίσεων κλάσης (E) και (F).



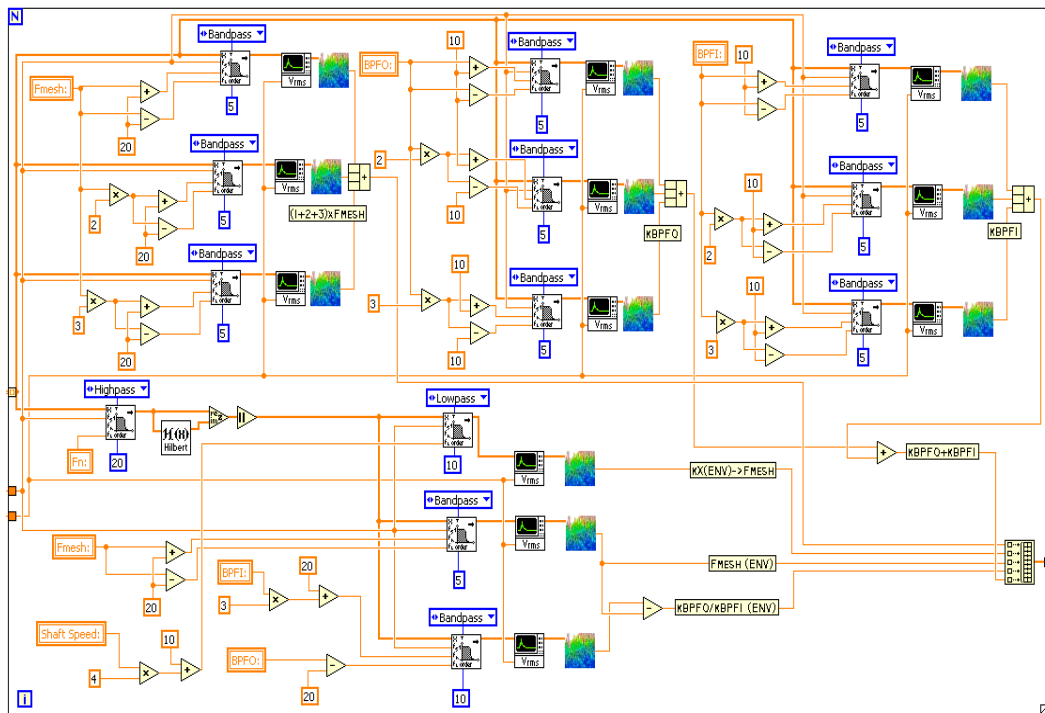
Σχήμα 4.23: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: 2^ο επίπεδο ταξινόμησης: ταξινόμηση κλάσεων (E) και (F).

Στη συνέχεια, οι αποκρίσεις όσων σημάτων ταξινομήθηκαν στην κλάση (A) κατά το 1^ο επίπεδο φιλτράρονται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και έπειτα αποδιαμορφώνονται. Έτσι, ο αλγόριθμος υπολογίζει την ενέργεια στις ακόλουθες περιοχές του φάσματος των αποδιαμορφωμένων προσομοιωμένων σημάτων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.24: (Δ) από 0 Hz έως $4f_{\text{shaft}}$ Hz, (E) $[f_{\text{mesh}} \pm 20$ Hz] και το (ΣΤ) $[BPFO-20$ έως $3BPFI+20$ Hz]. Στην περιοχή (Δ) κυριαρχεί η f_o , στην (E) δεσπόζει η f_{mesh} που αφορούν φθορά στα γρανάζια και στην περιοχή (ΣΤ) κυριαρχούν η BPFI και η BPFO που αφορούν βλάβη εσωτερικού και εξωτερικού δακτυλίου.

Παράλληλα, ο αλγόριθμος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.24, εξετάζει το φάσμα του αρχικού σήματος υπολογίζοντας την ενέργεια (Z) ως άθροισμα της f_{mesh} και των 2 επόμενων αρμονικών της, δηλαδή $[(f_{\text{mesh}} \pm 20 \text{ Hz}) + (2f_{\text{mesh}} \pm 20 \text{ Hz}) + (3f_{\text{mesh}} \pm 20 \text{ Hz})]$, την ενέργεια (H) ως άθροισμα της BPFO και των 2 επόμενων αρμονικών της, δηλαδή $[(BPFO \pm 10 \text{ Hz}) + (2BPFO \pm 10 \text{ Hz}) + (3BPFO \pm 10 \text{ Hz})]$ και την ενέργεια (Θ) ως άθροισμα

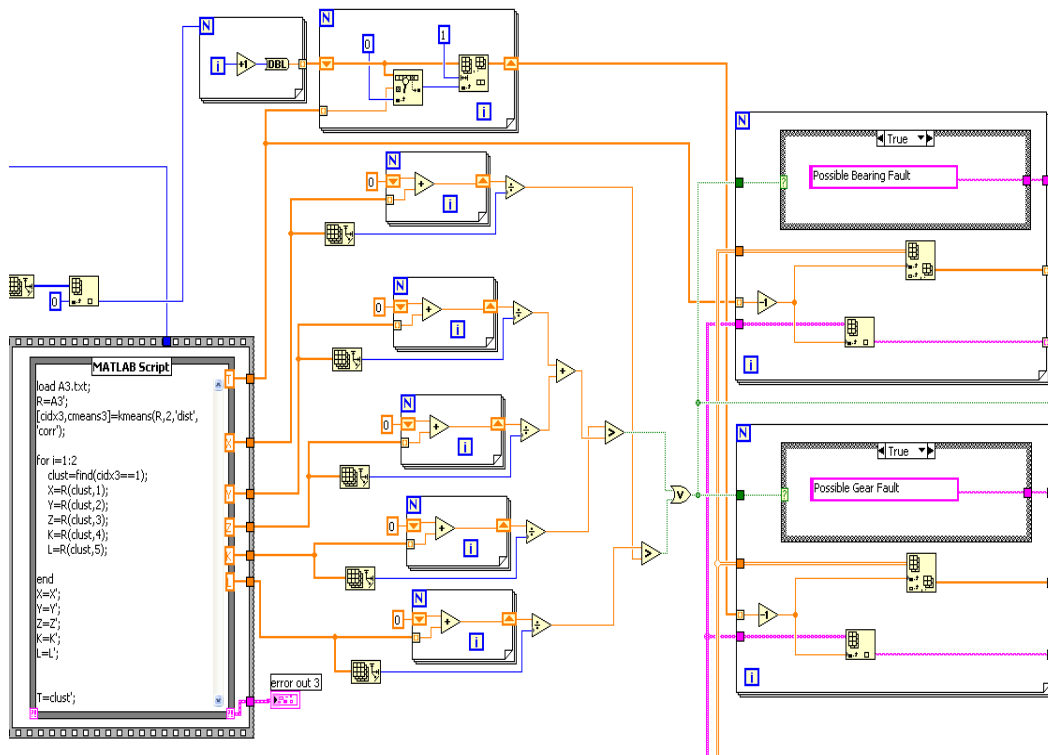
της BPF1 και των επόμενων 2 αρμονικών της, δηλαδή $[(BPF1 \pm 10 \text{ Hz}) + (2BPF1 \pm 10 \text{ Hz}) + (3BPF1 \pm 10 \text{ Hz})]$.

Επομένως, εάν η ενέργεια της περιοχής (Δ)+(Ε)+(Ζ) είναι μεγαλύτερη, τα σήματα ταξινομούνται ως απόκριση φθαρμένων γραναζιών. Ομοίως, στην περίπτωση που η ενέργεια της περιοχής (ΣΤ)+(Η)+(Θ) είναι μεγαλύτερη, τα σήματα ταξινομούνται ως απόκριση ένσφαιρου τριβέα με βλάβη εσωτερικού ή εξωτερικού δακτυλίου.



Σχήμα 4.24: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποκρίσεων κλάσης (D) και (C).

Στο σχήμα 4.25 παρατηρείται ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος που πραγματοποιεί την ταξινόμηση των προσομοιωμένων σημάτων κατά το 2^ο επίπεδο στις κλάσεις D και C. Επίσης, διακρίνονται οι εντολές στο πλαίσιο ‘MATLAB Script’.



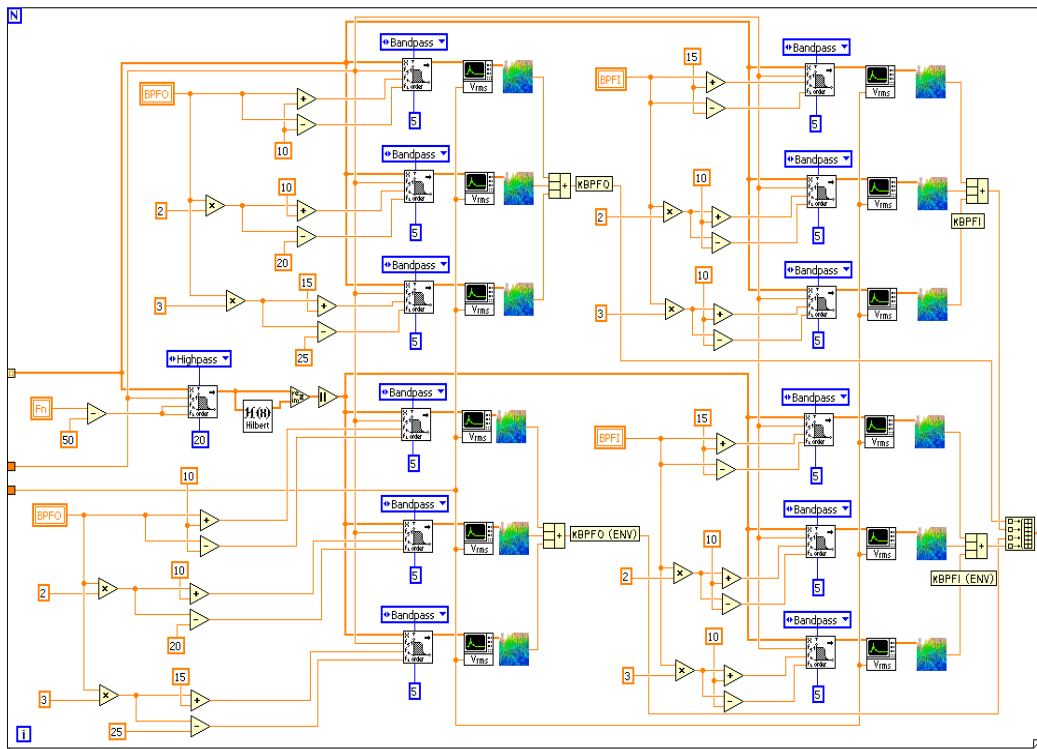
Σχήμα 4.25: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: 2^ο επίπεδο ταξινόμησης: ταξινόμηση κλάσεων (D) και (C).

Στο τελευταίο επίπεδο διαχωρίζεται η C κλάση που αφορά φθορά ένσφαιρου τριβέα σε δύο επιμέρους κλάσεις: (G) που περιλαμβάνει αποκρίσεις ένσφαιρων τριβέων με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο και (H) που περιλαμβάνει αποκρίσεις ένσφαιρων τριβέων με φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο.

Οι αποκρίσεις όσων σημάτων ταξινομήθηκαν στην κλάση (C) κατά το 2^ο επίπεδο φιλτράρονται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=50$ (=950 Hz) και έπειτα αποδιαμορφώνονται. Έτσι, ο αλγόριθμος υπολογίζει την ενέργεια στις ακόλουθες περιοχές του φάσματος των αποδιαμορφωμένων προσομοιωμένων σημάτων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.26: (I) άθροισμα της BPFO και των 2 επόμενων αρμονικών της, δηλαδή $[(BPFO \pm 10 \text{ Hz}) + (2BPFO \pm 10 \text{ Hz}) + (3BPFO \pm 10 \text{ Hz})]$ και την ενέργεια (K) άθροισμα της BPF1 και των επόμενων 2 αρμονικών της, δηλαδή $[(BPF1 \pm 10 \text{ Hz}) + (2BPF1 \pm 10 \text{ Hz}) + (3BPF1 \pm 10 \text{ Hz})]$.

Παράλληλα, ο αλγόριθμος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.26, εξετάζει το φάσμα του αρχικού σήματος υπολογίζοντας την ενέργεια (Λ) ως άθροισμα της BPFO και των 2 επόμενων αρμονικών της, δηλαδή $[(BPFO \pm 10 \text{ Hz}) + (2BPFO \pm 10 \text{ Hz}) + (3BPFO \pm 10 \text{ Hz})]$ και την ενέργεια (M) ως άθροισμα της BPF1 και των επόμενων 2 αρμονικών της, δηλαδή $[(BPF1 \pm 10 \text{ Hz}) + (2BPF1 \pm 10 \text{ Hz}) + (3BPF1 \pm 10 \text{ Hz})]$.

Επομένως, εάν η ενέργεια της περιοχής (I) και (Λ) είναι μεγαλύτερη, τα σήματα ταξινομούνται ως απόκριση φθαρμέρνου ένσφαιρου τριβέα με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο. Ομοίως, στην περίπτωση που η ενέργεια της περιοχής (K) και (M) είναι μεγαλύτερη, τα σήματα ταξινομούνται ως απόκριση φθαρμέρνου ένσφαιρου τριβέα με φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο.



Σχήμα 4.26: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποκρίσεων κλάσης (H) και (G).

Πίνακας 4.3

BPFO (29)	BPFI (25)	Gear (20)	Unbalance (10)	Misalignment (19)	
29/29	0	0	0	0	BPFO
0	25/25	0	0	0	BPFI
0	0	20/20	0	0	Gear
0	0	0	9/9	0	Unbalance
0	0	0	1/20	19/20	Misalignment

Στη συνέχεια επιλέγεται η παράμετρο εκτίμησης απόστασης Correlation. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.4 το ποσοστό επιτυχίας του αλγόριθμου με την παράμετρο correlation είναι 97,09%. Ο αλγόριθμος αποτυγχάνει να ταξινομήσει στη σωστή κλάση τρεις βλάβες κακής ευθυγράμμισης, τις οποίες λανθασμένα τοποθετεί στην κλάση της αζυγοσταθμίας.

Πίνακας 4.4

BPFO (29)	BPFI (25)	Gear (20)	Unbalance (10)	Misalignment (19)	
29/29	0	0	0	0	BPFO
0	25/25	0	0	0	BPFI
0	0	20/20	0	0	Gear
0	0	0	9/9	0	Unbalance
0	0	0	3/20	17/20	Misalignment

Η παράμετρος εκτίμησης απόστασης Cityblock έχει αισθητά μικρότερο ποσοστό επιτυχίας καθώς αγγίζει μόλις το 19,42%. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.5, ο αλγόριθμος, από τις 29 βλάβες που εμφανίζονται σε εξωτερικό δακτυλίο ένσφαιρου τριβέα, εντάσει μόνον τις 4 στη σωστή κλάση καθώς τοποθετεί τις υπόλοιπες 25 στην κλάση της κακής ευθυγράμμισης. Επίσης, από τις 25 βλάβες εσωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα εντάσει μόνον τις 7 στη σωστή κλάση, ενώ λανθασμένα τοποθετεί 6 βλάβες στη κλάση για βλάβες φθοράς γραναζιών και 12 βλάβες στη κλάση της αζυγοσταθμίας. Επιπλέον, ο αλγόριθμος ταξινομεί μόνον 9 από τις 20 βλάβες που οφείλονται σε φθορά γραναζιών στην σωστή κλάση. Ο αλγόριθμος ταξινόμησης τοποθετεί λάθος 7 σήματα στην κλάση της κακής ευθυγράμμισης και 4 στην κλάση των βλάβων εσωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα. Ακόμη, ο αλγόριθμος ταξινομεί λάθος και τις 9 βλάβες αζυγοσταθμίας στη κλάση των βλάβων φθοράς γραναζιών. Τέλος, ο αλγόριθμος τοποθετεί λάθος και τις 20 βλάβες κακής ευθυγράμμισης στην κλάση των βλάβων φθοράς γραναζιών.

Πίνακας 4.5

BPFO (29)	BPFI (25)	Gear (20)	Unbalance (10)	Misalignment (19)	
4/29	0	0	0	0	BPFO
0	7/25	6/25	12/25	0	BPFI
0	4/20	9/20	0	7/20	Gear
0	0	9/9	0	0	Unbalance
0	0	20/20	0	0	Misalignment

Ομοίως, απογοητευτικά ποσοστά ορθής ταξινόμησης εμφανίζει και η περίπτωση της παραμέτρου εκτίμησης απόστασης Euclidean. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.6 το ποσοστό της φτάνει το 16,50%. Έτσι, από τις 29 βλάβες που εμφανίζονται στον εξωτερικό δακτυλίο ένσφαιρου τριβέα, μόνον 4 ταξινομούνται στη σωστή κλάση, καθώς οι υπόλοιπες 11 περιλαμβάνονται στην κλάση βλάβεων που οφείλονται σε φθορά γραναζιών, 9 στην κλάση αζυγοσταθμίας και 5 στην κλάση κακής ευθυγράμμισης. Επίσης, από τις 25 βλάβες εσωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα, ο αλγόριθμος ταξινομεί μόνον τις 6 στη σωστή κλάση, ενώ λανθασμένα τοποθετούνται 12 βλάβες στη κλάση για βλάβες φθοράς γραναζιών και 7 βλάβες στη κλάση βλάβεων που εμφανίζονται σε εξωτερικό δακτυλίο ένσφαιρου τριβέα. Επιπλέον, 7 από τις 20 βλάβες που οφείλονται σε φθορά γραναζιών ταξινομούνται στη σωστή κλάση. Ο αλγόριθμος τοποθετεί εσφαλμένα 2 σήματα στην κλάση των βλάβεων εξωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα και 11 στην κλάση των βλάβεων εσωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα. Ακόμη, οι 9 βλάβες αζυγοσταθμίας ταξινομούνται εσφαλμένα στην κλάση των βλάβεων εσωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα. Τέλος, ο αλγόριθμος περιλαμβάνει λάθος τις 20 βλάβες κακής ευθυγράμμισης στην κλάση των βλάβεων εσωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα.

Πίνακας 4.6

BPFO (29)	BPFI (25)	Gear (20)	Unbalance (10)	Misalignment (19)	
4/29	0	11/29	9/29	5/29	BPFO
7/25	6/25	12/25	0	0	BPFI
2/20	11/20	7/20	0	0	Gear
0	9/9	0	0	0	Unbalance
0	20/20	0	0	0	Misalignment

4.4. Άμεση Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων

Στην περίπτωση της άμεσης ταξινόμησης των βιομηχανικών σημάτων ο αλγόριθμος ολοκληρώνεται σε 1 επίπεδο με την απευθείας εισαγωγή διαφορετικών στοιχείων εισόδου και για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης (Correlation, Cosine, Cityblock, και SqEuclidean).

Στο σχήμα 4.28 παρουσιάζεται η οθόνη ελέγχου του αλγόριθμου που επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει τα δεδομένα, να ελέγξει τη διαδικασία και τα αποτελέσματα. Διακρίνονται οι 5 κλάσεις πιθανής βλάβης, οι οποίες αποτελούνται από έναν πίνακα που περιλαμβάνει ονομαστικά τα σήματα που ο αλγόριθμος τους έχει κατανήμει. Ο αλγόριθμος επιτρέπει την είσοδο 2 διαφορετικών ομάδων στοιχείων εισόδου. Στην πρώτη ομάδα (RAW) περιλαμβάνονται περιοχές ενέργειας που έχουν υπολογισθεί από το φάσμα των μετρούμενων σημάτων, ενώ στη δεύτερη ομάδα (SUM) περιλαμβάνονται περιοχές ενέργειας που έχουν υπολογισθεί από το φάσμα των μετρούμενων και των αποδιαμορφωμένων σημάτων. Η δεύτερη ομάδα καλύπτει την περίπτωση των διαμορφωμένων σημάτων (ένσφαιροι τριβείς, γρανάζια, κλπ) που έχουν ελάχιστη ανάπτυξη των χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης στην συχνοτική περιοχή του φάσματος που αφορά την αιτία της βλάβης. Σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος δύναται να εκτελείται κάθε φορά με τυχαία αρχικά κέντρα.

Ο αλγόριθμος διαχωρίζει απευθείας τα δυναμικά σήματα σε 5 κλάσεις: (A) φθορά εξωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα, (B) φθορά εσωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα, (C) φθορά γραναζιών, (D) αζυγοσταθμία και (E) κακή ευθυγράμμιση.

Οι αποκρίσεις των περιπτώσεων βλαβών A , B και C που εξετάζονται είναι διαμορφωμένες κατά πλάτος. Έτσι, τα παραπάνω προσομοιωμένα σήματα φιλτράρονται μέσω ενός υπεραποκοπής (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και έπειτα αποδιαμορφώνονται. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος υπολογίζει την ενέργεια στις ακόλουθες περιοχές του φάσματος των αποδιαμορφωμένων σημάτων, όπως φαίνεται και στα σχήματα 4.29, 4.30 και 4.31. Από το φάσμα του χρονικού αποδιαμορφωμένου σήματος ο αλγόριθμος υπολογίζει την ενέργεια στις ακόλουθες φασματικές περιοχές :

(Α) άθροισμα περί την BPFO και τις αρμονικές της, δηλαδή $[(BPFO \pm 15 \text{ Hz}) + (2BPFO \pm 15 \text{ Hz}) + (3BPFO \pm 15 \text{ Hz})]$,

(Β) άθροισμα περί την BRFI και τις αρμονικές της, δηλαδή $[(BRFI \pm 30 \text{ Hz}) + (2BRFI \pm 30 \text{ Hz}) + (3BRFI \pm 30 \text{ Hz})]$ και

(Γ) περί την f_{mesh} , δηλαδή $(f_{\text{mesh}} \pm 30 \text{ Hz})$

Παράλληλα, ο αλγόριθμος υπολογίζει την ενέργεια στις ακόλουθες περιοχές του φάσματος των αρχικών σημάτων, όπως φαίνεται και στα σχήματα 4.29, 4.30 και 4.31. Από το φάσμα του χρονικού αρχικού σήματος ο αλγόριθμος υπολογίζει την ενέργεια στις ακόλουθες φασματικές περιοχές :

(Δ) άθροισμα περί την f_{mesh} και τις αρμονικές της, δηλαδή $[(f_{\text{mesh}} \pm 30 \text{ Hz}) + (2f_{\text{mesh}} \pm 30 \text{ Hz}) + (3f_{\text{mesh}} \pm 30 \text{ Hz})]$,

(Ε) άθροισμα περί την BRFI και τις αρμονικές της, δηλαδή $[(BRFI \pm 30 \text{ Hz}) + (2BRFI \pm 30 \text{ Hz}) + (3BRFI \pm 30 \text{ Hz})]$,

(ΣΤ) άθροισμα περί την BPFO και τις αρμονικές της, δηλαδή $[(BPFO \pm 15 \text{ Hz}) + (2BPFO \pm 15 \text{ Hz}) + (3BPFO \pm 15 \text{ Hz})]$,

(Ζ) άθροισμα περί των αρμονικών της f_{shaft} , δηλαδή $(2f_{\text{shaft}} - 5 \text{ Hz} \text{ έως } 4f_{\text{shaft}} + 20 \text{ Hz})$ και

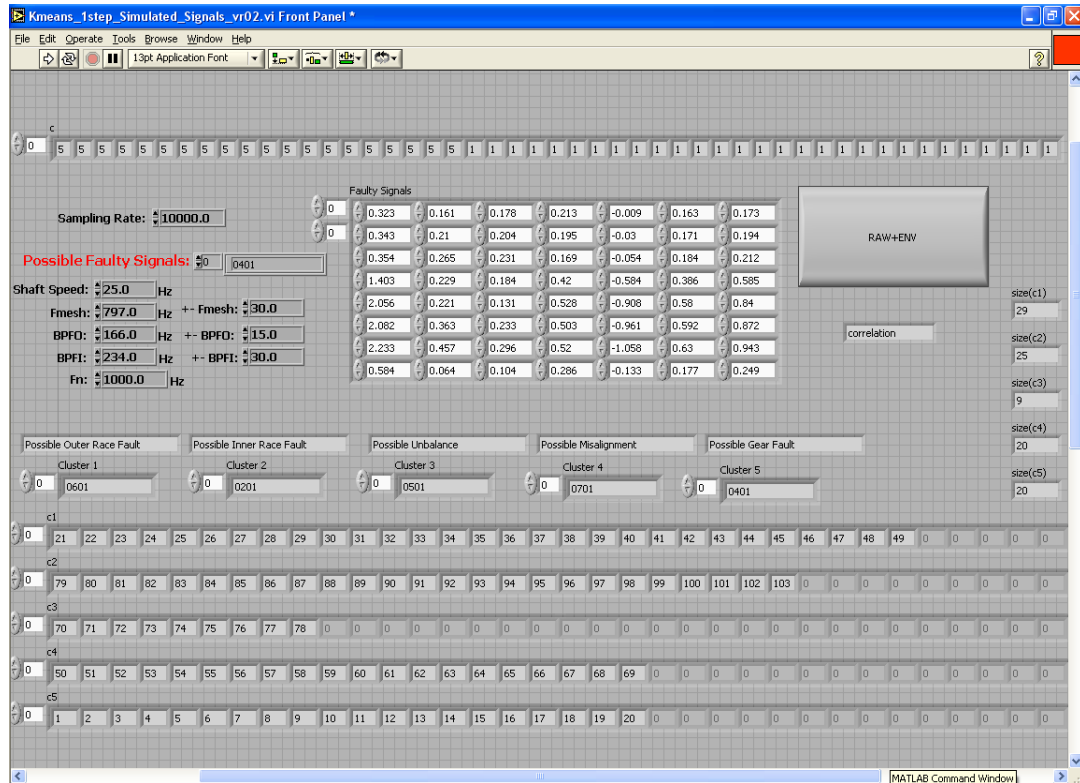
(Η) περί την f_{shaft} , δηλαδή $(10 \text{ Hz} \text{ έως } f_{\text{shaft}} + 10 \text{ Hz})$.

Έτσι, στην περίπτωση βλάβης στον εξωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα οι περιοχές ενέργειας (Α) και (ΣΤ) παρουσιάζουν υψηλές τιμές, Στην περίπτωση βλάβης στον εσωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα οι περιοχές ενέργειας (Β) και (Ε) εμφανίζουν υψηλές τιμές. Ομοίως, στην περίπτωση φθοράς στα γρανάζια οι περιοχές ενέργειας (Γ) και (Δ) αποκτούν υψηλές τιμές. Ακόμη, στην περίπτωση αζυγοσταθμίας η περιοχή (Η) παρουσιάζει υψηλές τιμές. Τέλος, στην περίπτωση κακής ευθυγράμμισης η περιοχή ενέργειας (Ζ) παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή από τις υπόλοιπες περιοχές ενέργειας.

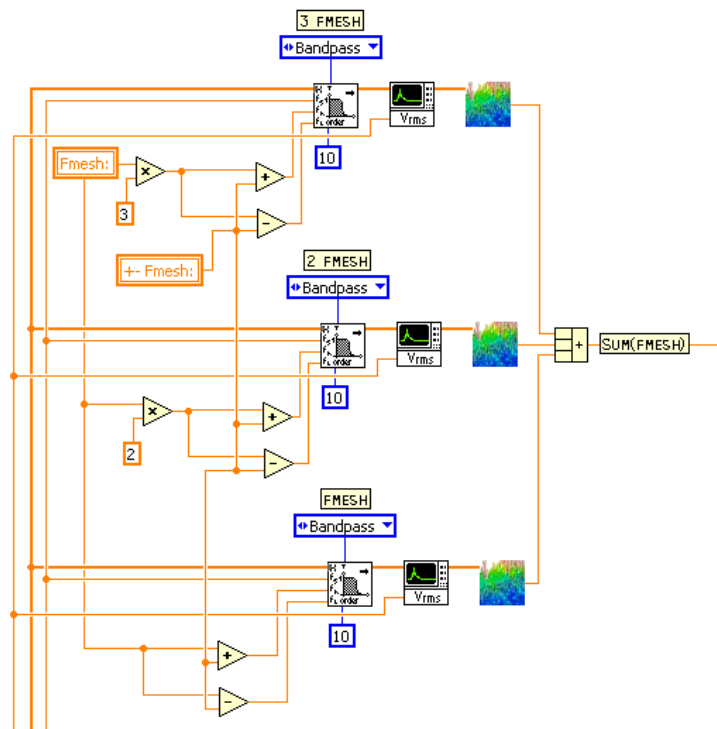
Όταν ο αλγόριθμος εκτελεί ταξινόμηση κατά RAW εισάγονται οι ενέργειες (Δ)-(ΣΤ), ενώ όταν εκτελεί ταξινόμηση κατά SUM εισάγονται οι ενέργειες όλων των παραπάνω περιοχών. Ειδικότερα, κατά τη διαδικασία ταξινόμησης κατά SUM, ο

Κεφάλαιο 4^ο – Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων

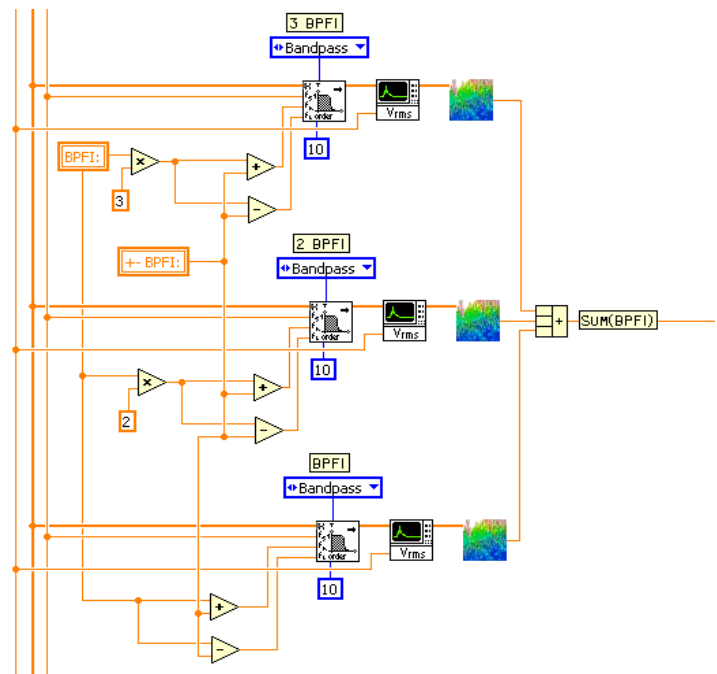
αλγόριθμος προσθέτει τις ενέργειες των περιοχών (A)+(ΣΤ), (B)+(Ε) και (Γ)+(Δ), που σχετίζονται με βλάβες στον εξωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα, στον εσωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα και στα γρανάζια, αντίστοιχα.



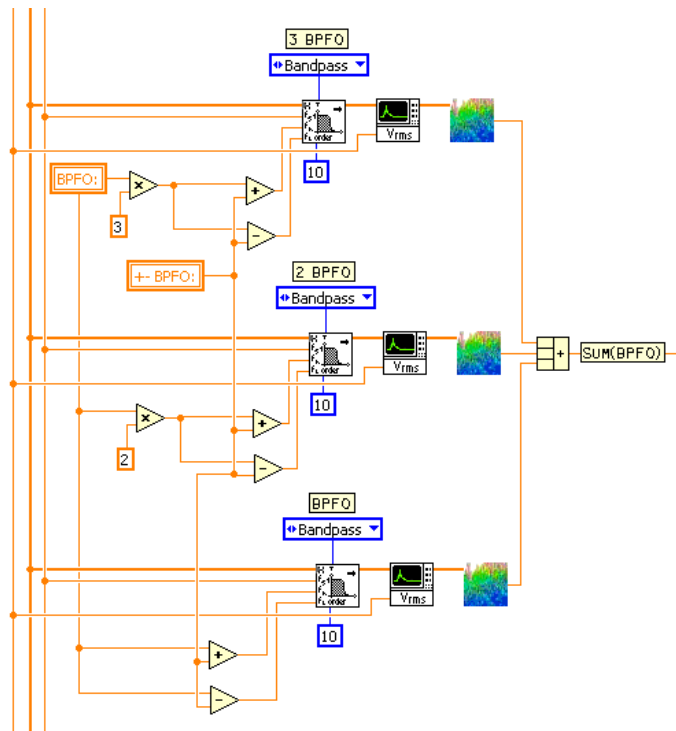
Σχήμα 4.28: Οθόνη ελέγχου προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων.



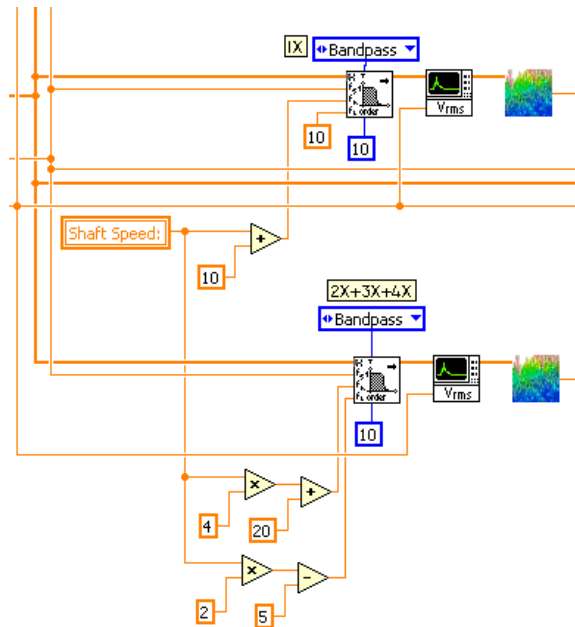
Σχήμα 4.29: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας που αφορούν γρανάζια.



Σχήμα 4.30: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας που αφορούν ένσφαιρους τριβείς με φθορά εσωτερικού δακτυλίου.

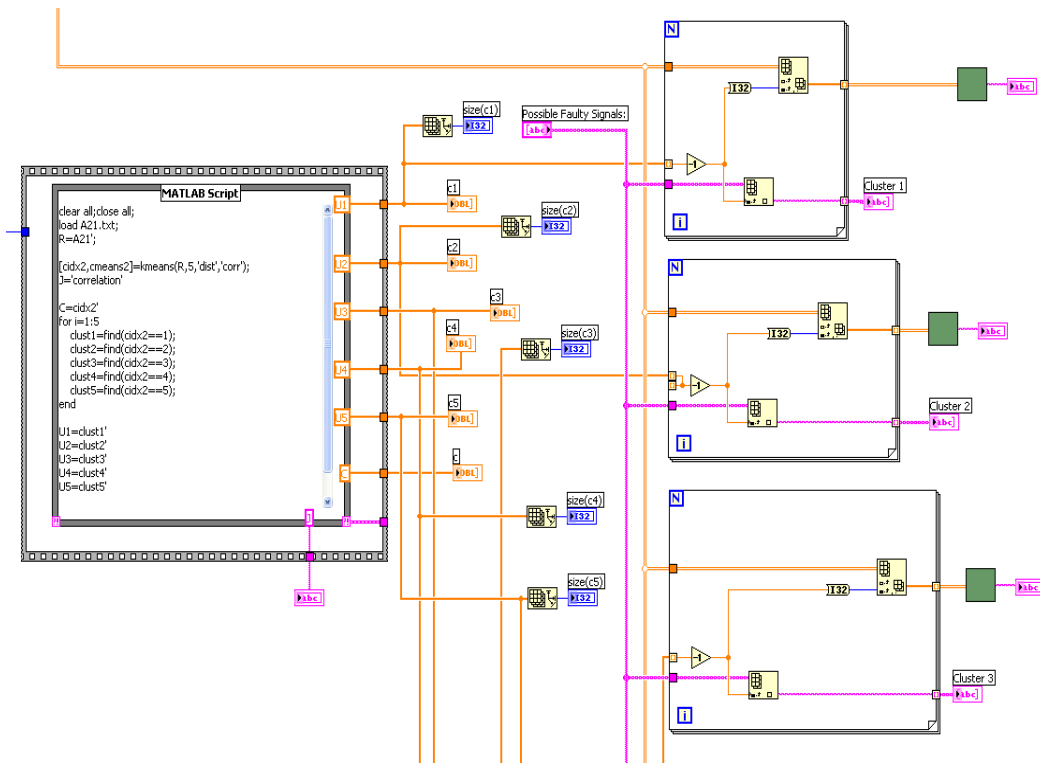


Σχήμα 4.31: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας που αφορούν ένσφαιρους τριβείς με φοθρά εξωτερικού δακτυλίου.

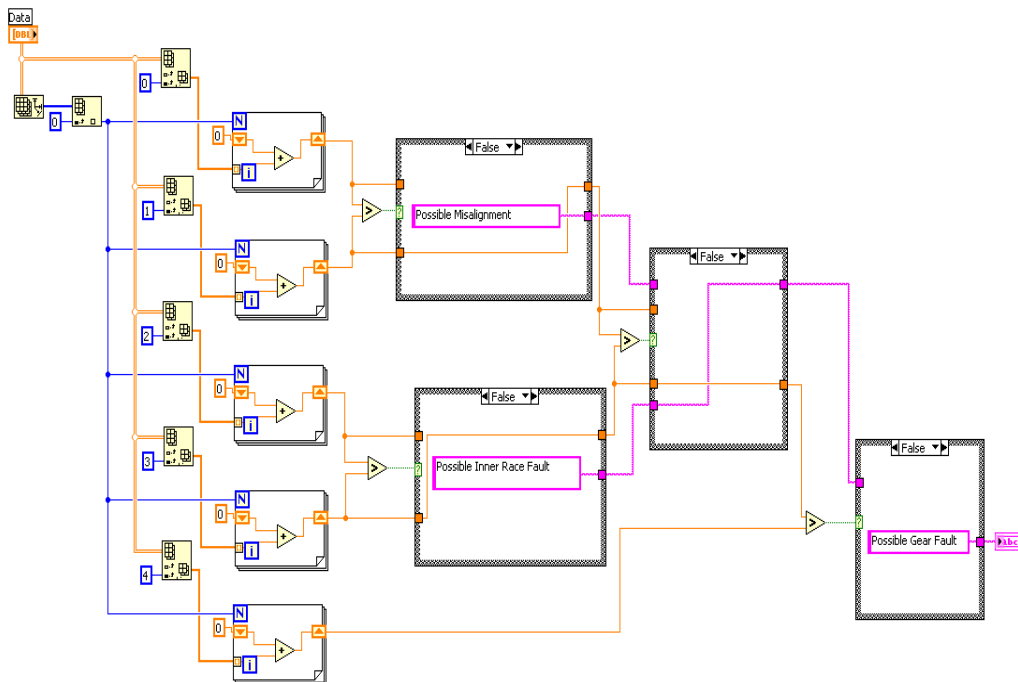


Σχήμα 4.32: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας που αφορούν αζυγοσταθμία και κακή ευθυγράμμιση.

Κεφάλαιο 4^ο – Ταξινόμηση Προσομοιωμένων Σημάτων



Σχήμα 4.33: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων.



Σχήμα 4.34: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης διαχωρισμού δυναμικών σημάτων.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος άμεσης ταξινόμησης ομάδων εκτελείται για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης (Correlation, Cosine, Cityblock, και SqEuclidean) και ελέγχεται για την αποτελεσματικότητα και την σταθερότητά του.

Αρχικά, επιλέγεται η παράμετρος εκτίμησης απόστασης Correlation. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 4.7.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.7 το μέγιστο ποσοστό επιτυχίας του αλγόριθμου προσεγγίζει το 100 % με ποσοστό επαναληψιμότητας μόλις 20 %, στην περίπτωση ταξινόμησης κατά SUM. Σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος δεν εμφανίζει σταθερότητα διότι κάθε φορά που εκτελείται επιλέγονται τυχαία αρχικά κέντρα, με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται η διαδικασία. Ο αλγοριθμός εμφανίζει μεγαλύτερη σταθερότητα που αγγίζει το 80 %, αλλά η αποτελεσματικότητά του μειώνεται στο 75 και 80 %, κατά Raw και SUM, αντίστοιχα.

Πίνακας 4.7

	Raw		Sum	
Αποτελεσματικότητα (%)	99%	75%	100%	80%
Σταθερότητα (%)	20%	80%	20%	80%

Στη συνέχεια επιλέγεται η παράμετρος εκτίμησης απόστασης Cosine. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.8 το βέλτιστο συνδυασμό αποτελεσματικότητας και σταθερότητας ο αλγόριθμος τον παρουσιάζει στην περίπτωση SUM με αποτελεσματικότητα που προσεγγίζει το 83 % και σταθερότητα στο 80 %.

Πίνακας 4.8

	Raw		Sum	
Αποτελεσματικότητα (%)	85%	71%	100%	83%
Σταθερότητα (%)	40%	60%	20%	80%

Στη συνέχεια επιλέγεται η παράμετρος εκτίμησης απόστασης cityblock. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.9 το βέλτιστο συνδυασμό αποτελεσματικότητας και σταθερότητας ο αλγόριθμος τον παραρροισιάζει και στις 2 περιπτώσεις με αποτελεσματικότητα που προσεγγίζει το 60 % και σταθερότητα στο 100 %.

Πίνακας 4.9

	Raw	Sum
Αποτελεσματικότητα (%)	60%	60%
Σταθερότητα (%)	100%	100%

Τέλος επιλέγεται η παράμετρος εκτίμησης απόστασης SqEuclidean. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.8 το βέλτιστο συνδυασμό αποτελεσματικότητας και σταθερότητας ο αλγόριθμος τον παραρροισιάζει στην περίπτωση SUM με αποτελεσματικότητα που προσεγγίζει το 62 % και σταθερότητα στο 100 %.

Πίνακας 4.10

	Raw	Sum
Αποτελεσματικότητα (%)	52%	62%
Σταθερότητα (%)	100%	100%

Ταξινόμηση

Βιομηχανικών Σημάτων

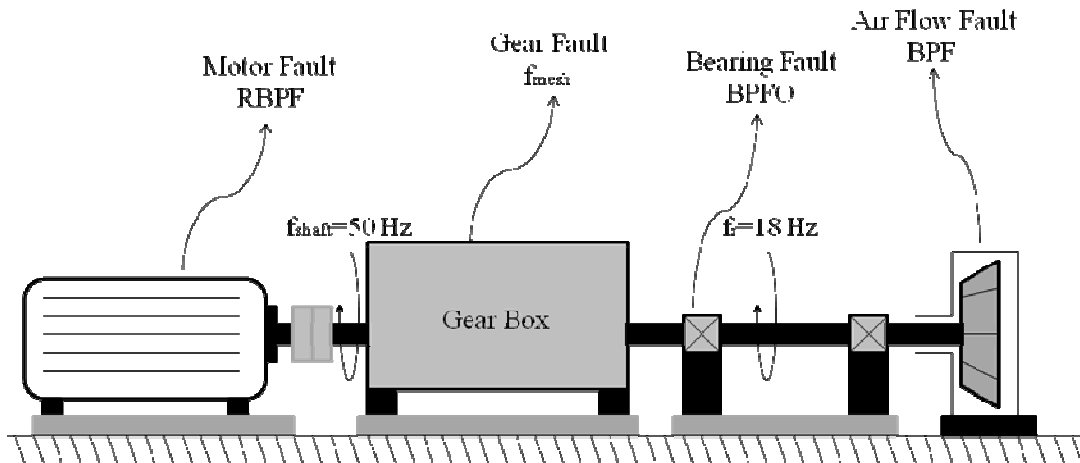
5.1. Εισαγωγή

Στην ενότητα που ακολουθεί μελετώνται βιομηχανικά σήματα τα οποία έχουν ληφθεί μετά από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα ικανό να μας δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα προς μελέτη. Η μηχανή που υπόκειται στη μελέτη εμφανίζεται στο σχήμα 5.1. Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα ισούται με 3000 rpm ή 50 Hz ($=f_{\text{shaft}}$). Ο δε κλωβός του κινητήρα αποτελείται από R=20 ράβδους. Ο κινητήρας συνδέεται μέσω μεταλλικού συνδέσμου με μονοβάθμιο μειωτήρα. Η σχέση μετάδοσης του μειωτήρα είναι 2,78:1. Το πινιόν του μειωτήρα έχει $N_1=14$ οδόντες και ο συνεργαζόμενος τροχός έχει $N_2=39$ οδόντες. Το στρεφόμενο τμήμα μετά το την έξοδο του μειωτήρα εδράζεται σε δύο ίδιου τύπου ένσαιρους τριβείς 1322 KM της SKF. Στο άκρο του άξονα εδράζεται πτερωτή με πλήθος πτερυγίων ίσο με B=26.

Η καταγραφή των σημάτων έχει πραγματοποιηθεί με την μετρητική συσκευή του Εργαστηρίου Δυναμικής και Κατασκευών η οποία αποτελείται από φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή Compaq Presario, με επεξεργαστή τύπου Pentium II στα 266 MHz, 64 Mbyte μνήμη RAM και 4,3 GB σκληρό δίσκο. Ο υπολογιστής συνοδεύεται από μετρητική κάρτα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων DAQCard-6024E της National instruments. Η μετρητική κάρτα έχει μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας 200 KHz, 16 αναλογικά κανάλια εισόδου και ανάλυση AD μετατροπέα 12 bits.

Οι κραδασμοί της μηχανής καταγράφονται με επιταχυνσιόμετρα τύπου 8325 της B&K, με ευαισθησία 100 mV/g και ωφέλιμη περιοχή από 1 έως 10000 Hz.

Η συχνότητα δειγματοληψίας των μετρήσεων επιλέχθηκε ίση με $f_{s1}=20$ KHz στην περίπτωση καταγραφής σημάτων που σχετίζονται με φθορά ένσφαιρου τριβέα, αεροδυναμικού και ηλεκτρικού προβλήματος, και $f_{s2}=25$ KHz στην περίπτωση φθοράς των γραναζιών. Το μήκος των σημάτων επιλέχθηκε ίσο με $P=16384$ δείγματα.



Σχήμα 5.1: Σκαρίφημα μηχανής.

Κάθε φθαρμένο στοιχείο της μηχανής εκπέμπει ένα σήμα το οποίο αποτελείται από χαρακτηριστικές συνιστώσες, οι οποίες μετά από επεξεργασία του δυναμικού σήματος με μετασχηματισμό Fourier εμφανίζονται στο φάσμα. Το πλήθος και το πλάτος των αιχμών του φάσματος που αναπτύσσονται σε χαρακτηριστικές συχνότητες αυξάνεται καθώς η βλάβη εξελίσσεται.

Οι βλάβες που θα ταξινομηθούν ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα του αλγόριθμου είναι: (α) φθορά εξωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα, (β) αεροδυναμικό πρόβλημα, (γ) ηλεκτρικό πρόβλημα του κινητήρα και (δ) φθορά γραναζιών. Το σύνολο των βιομηχανικών σημάτων είναι 43, εκ των οποίων 12 ανήκουν στην ομάδα (α), 11 στην ομάδα (β), 9 στην ομάδα (γ) και 11 στην ομάδα (δ). Το συνολικό επίπεδο κραδασμών OA (mm/sec rms) των μετρούμενων σημάτων παρουσιάζεται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1

Σήμα	Συνολικό Επίπεδο Κραδασμών (mm/sec rms)
BPFO-01	5,654
BPFO-02	6,283
BPFO-03	5,230
BPFO-04	4,566
BPFO-05	6,048
BPFO-06	8,470
BPFO-07	7,819
BPFO-08	6,454
BPFO-09	3,401
BPFO-10	3,923
BPFO-11	4,287
BPFO-12	5,009
BPF-01	4,130
BPF-02	7,810
BPF-03	3,372
BPF-04	8,012

BPF-05	6,443
BPF-06	3,663
BPF-07	4,418
BPF-08	4,790
BPF-09	3,714
BPF-10	8,362
BPF-11	5,272
RBPF-01	6,352
RBPF-02	6,522
RBPF-03	4,135
RBPF-04	7,392
RBPF-05	3,450
RBPF-06	5,108
RBPF-07	4,965
RBPF-08	8,564
RBPF-09	5,384
Gear-01	3,396
Gear-02	3,912
Gear-03	4,170
Gear-04	4,732

Gear-05	4,932
Gear-06	6,467
Gear-07	4,586
Gear-08	4,520
Gear-09	9,392
Gear-10	5,460
Gear-11	5,120

Η χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης που σχετίζεται με χαλαρότητα κάποιας ράβδου ή ανομοιομορφία στο διάκενο μεταξύ στάτη ρότορα είναι η RBPF η οποία ισούται με το γινόμενο της συχνότητας περιστροφής του κινητήρα με το πλήθος των ραβδών του κλωβού και ισούται με 1000 Hz. Η χαρακτηριστική συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών προκύπτει από το γινόμενο της ταχύτητας περιστροφής του άξονα στον οποίο εδράζεται το πινιόν επί το πλήθος των οδόντων. Ειδικότερα $f_{\text{mesh}} = f_{\text{shaft}} \times N_1$. Η συχνότητα περιστροφής στην έξοδο του είναι περίπου $f_r = 18$ Hz και η χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης των ρουλεμάν υπολογίζεται στα 129 Hz. Η χαρακτηριστική συχνότητα που σχετίζεται με πρόβλημα ροής ισούται με το γινόμενο της ταχύτητας περιστροφής του άξονα που εδράζεται η πτερωτή επί το πλήθος των πτερυγίων. Η ονομαστική τιμή της υπολογίζεται στα 468 Hz. Οι πραγματικές τιμές των παραπάνω χαρακτηριστικών συχνοτήτων όπως προκύπτουν από τη μελέτη των φασμάτων των μετρούμενων βιομηχανικών σημάτων παρουσιάζονται στο πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2

Συχνότητα	Ονομαστική Τιμή (Hz)	Μετρούμενη Τιμή (Hz)
BPFO	129	126
RBPF	1000	965
BPF	468	465
f_{mesh}	700	697

5.2. Παράμετροι Ταξινόμησης

Ο αλγόριθμος ταξινόμησης δυναμικών σημάτων *k means* θα εκτελεστεί με δύο τρόπους. Αρχικά, θα πραγματοποιηθεί ταξινόμηση των μετρούμενων σημάτων σε ένα στάδιο με απευθείας εισαγωγή όλων των υπολογιζόμενων στοιχείων εισόδου για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης (correlation, cityblock, κλπ). Στη συνέχεια θα διεξαχθεί σταδιακή ταξινόμηση των βιομηχανικών σημάτων που θα ολοκληρωθεί σε 3 επίπεδα με την σταδιακή εισαγωγή διαφορετικών στοιχείων εισόδου σε κάθε επίπεδο της διαδικασίας και για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης. Στο 1^ο επίπεδο διαχωρίζονται τα σήματα που περιέχουν πληροφορίες για φθαρμένους ένσφαιρους τριβείς από τα υπόλοιπα. Τα υπόλοιπα σήματα όπως προκύπτουν από το αρχικό επίπεδο ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες στο 2^ο επίπεδο. Η μία ομάδα περιέχει τα σήματα που αφορούν φθορά γραναζιών και η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει σήματα που σχετίζονται με αεροδυναμικά και ηλεκτρικά προβλήματα. Στο τελευταίο επίπεδο διαχωρίζεται η παραπάνω δεύτερη ομάδα σε δύο κλάσεις, εκ των οποίων η μία περιλαμβάνει σήματα με ηλεκτρικά προβλήματα και η άλλη σήματα με προβλήματα ροής ρευστού.

Τα στοιχεία εισόδου στον αλγόριθμο ταξινόμησης είναι η ενέργεια που συγκεντρώνεται σε χαρακτηριστικές συχνοτικές περιοχές του φάσματος του μετρούμενου και του αποδιαμορφωμένου χρονικού σήματος, οι οποίες σχετίζονται με την ανάπτυξη μιας πιθανής βλάβης.

Το αποδιαμορφωμένο σήμα προκύπτει μετά από επεξεργασία του μετρούμενου σήματος ως εξής. Σε πρώτη φάση το μετρούμενο σήμα $x(t)$ φιλτράρεται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz. Στη συνέχεια, το φιλτραρισμένο σήμα $u(t)$ επεξεργάζεται με μετασχηματισμό Hilbert. Το σήμα $h(t)$ που προκύπτει από την προηγούμενη επεξεργασία μαζί με το φιλτραρισμένο σήμα $u(t)$ παράγουν το αναλυτικό σήμα $a(t)$, το οποίο είναι μιγαδικό με πραγματικό μέρος το φιλτραρισμένο σήμα $u(t)$ και φανταστικό μέρος το $h(t)$. Το πλάτος του αναλυτικού σήματος $a(t)$ είναι το αποδιαμορφωμένο χρονικό σήμα. Το φάσμα του μετρούμενου και του αποδιαμορφωμένου χρονικού σήματος προκύπτει με επεξεργασία μέσω του μετασχηματισμού Fourier.

Για τη κατανόηση της επιλογής των στοιχείων εισόδου στον αλγόριθμο ταξινόμησης που σχετίζονται με συχνοτικές περιοχές ενέργειας του φάσματος των παραπάνω χρονικών σημάτων θα πραγματοποιηθεί μια σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών συχνοτήτων που παρέχουν μοναδικές πληροφορίες για κάθε τύπο βλάβης.

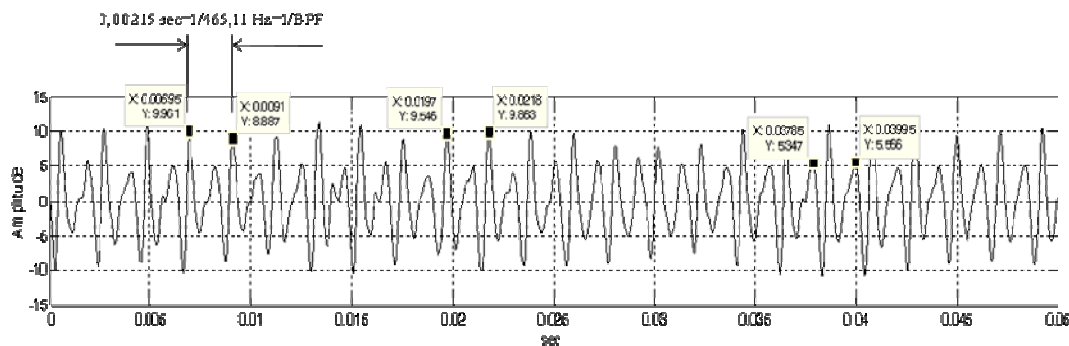
Στην περίπτωση αεροδυναμικού προβλήματος που αναπτύσσεται στην πτερωτή, το χρονικό σήμα που καταγράφεται εμφανίζει τη χαρακτηριστική κυματομορφή που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2. Παρατηρούνται χαρακτηριστικές περιοδικότητες ($T=0,00215$ sec) που σχετίζονται με τη συχνότητα ροής BPF (=468 Hz) και τις αρμονικές της. Στο φάσμα αυτού του σήματος, το οποίο εμφανίζεται στο σχήμα, δεσπόζει μία σειρά από αιχμές που αναπτύσσονται στη συχνότητα BPF και τις αρμονικές της. Η εμφάνιση αυτών των αιχμών προσδιορίζει τον μηχανισμό του συγκεκριμένου τύπου βλάβης. Το άθροισμα των ενεργειών που συγκεντρώνεται στις συχνοτικές περιοχές που περικλείονται από τις διακεκομμένες κόκκινες καμπύλες (σχήμα 5.3) αποτελεί ένα στοιχείο εισόδου του αλγόριθμου ταξινόμησης.

Στη συνέχεια το μετρούμενο σήμα φιλτράρεται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και έπειτα αποδιαμορφώνεται. Το φάσμα

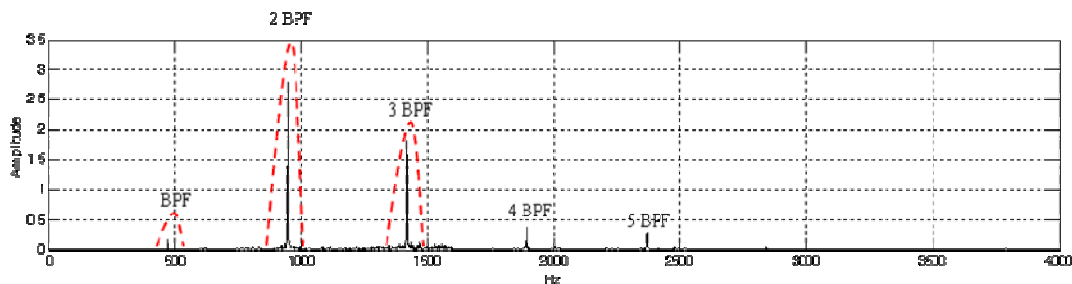
του αποδιαμορφωμένου χρονικού σήματος (σχήμα 5.4) προκύπτει με επεξεργασία μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Στο φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος, κυριαρχούν, επίσης, η χαρακτηριστική συχνότητα BPF και οι αρμονικές της. Ομοίως με την προηγούμενη παράγραφο, το άθροισμα των ενεργειών που συγκεντρώνεται στις συχνοτικές περιοχές που περικλείονται από τις διεκεκομμένες κόκκινες καμπύλες αποτελεί ένα ακόμα στοιχείο εισόδου του αλγόριθμου ταξινόμησης.

Επίσης, το συνολικό άθροισμα των παραπάνω ενεργειών που προκύπτει από το φάσμα του αρχικού και του αποδιαμορφωμένου σήματος αποτελεί ένα ακόμη στοιχείο εισόδου που μπορεί να εισαχθεί στον εξεταζόμενο αλγόριθμο ταξινόμησης.

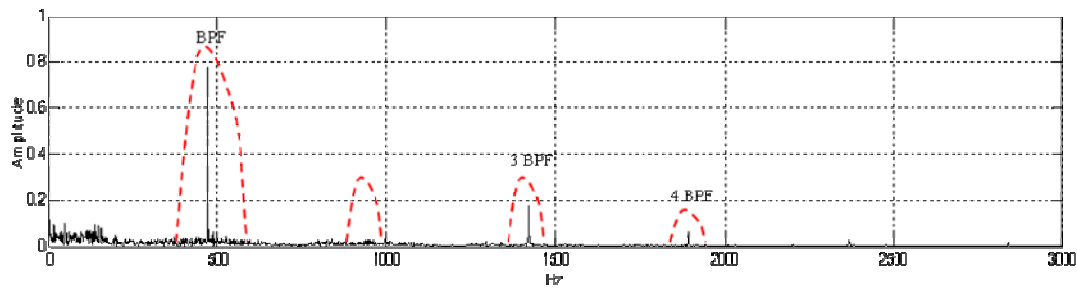
Στην περίπτωση φθοράς εξωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα αναπτύσσονται κρουστικοί παλμοί σε σταθερά χρονικά διαστήματα κάθε φορά που οι σφαίρες έρχονται σε επαφή με τη φθαρμένη μεταλλική επιφάνεια του εξωτερικού δακτυλίου. Η περίοδος αυτή σχετίζεται με τη χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης ένσφαιρου τριβέα και ισούται με $1/BPFO = 0,0078 \text{ sec}$, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5. Οι κρούσεις διεγείρουν ιδιοσυχνότητες του ένσφαιρου τριβέα ή της κατασκευής.



Σχήμα 5.2: Χρονική κυματομορφή απόκρισης μηχανής με αεροδυναμικό πρόβλημα.



Σχήμα 5.3: Φάσμα χρονικού σήματος του σχήματος 5.2.



Σχήμα 5.4: Φάσμα αποδιαμορφωμένου σήματος που προκύπτει από το σήμα του σχήματος 5.2.

Στο φάσμα της απόκρισης φθαρμένου ένσφαιρου τριβέα, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 5.6, δεσπόζει μία σειρά από αιχμές, οι οποίες αναπτύσσονται στη χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης BPFO (129 Hz) και τις αρμονικές της. Ακόμη διακρίνεται μια υψίσυχη διεγερμένη περιοχή, η οποία αφορά την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής που διεγείρεται. Η αιχμή με το μεγαλύτερο πλάτος f_c δύναται να ταυτιστεί με την ιδιοσυχνότητα. Περιφερειακά αυτής αναπτύσσονται πλευρικές αιχμές που ισαπέχουν απόσταση ίση με τη συχνότητα BPFO που την διαμορφώνει κατά πλάτος. Η εμφάνιση τέτοιου τύπου αιχμών προσδιορίζει τον μηχανισμό του συγκεκριμένου τύπου βλάβης.

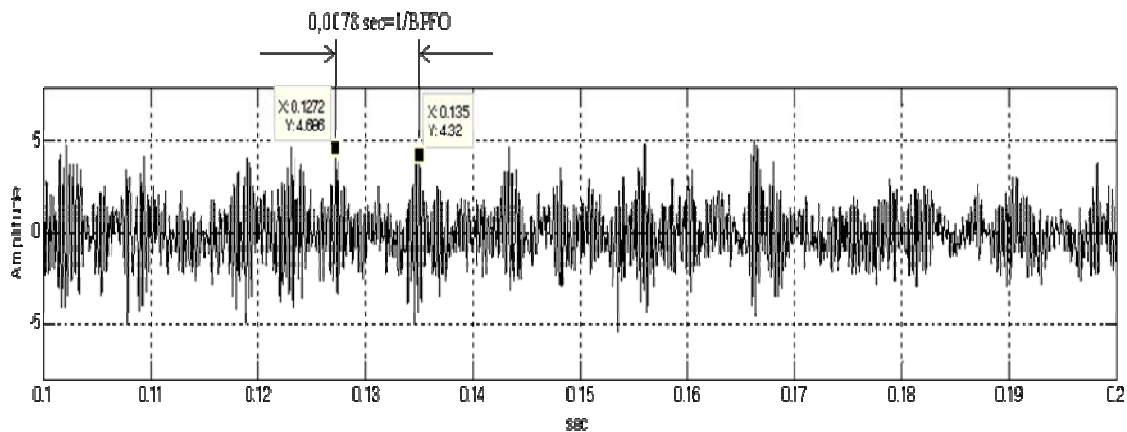
Το άθροισμα των ενεργειών που συγκεντρώνεται στις συχνοτικές περιοχές του φάσματος του σχήματος 5.6 και περικλείονται από διακεκομένες κόκκινες καμπύλες αποτελεί στοιχείο εισόδου του αλγόριθμου ταξινόμησης

Στη συνέχεια το μετρούμενο σήμα φιλτράρεται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και έπειτα αποδιαμορφώνεται. Το φάσμα του αποδιαμορφωμένου χρονικού σήματος (σχήμα 5.7) προκύπτει με επεξεργασία μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Στο φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος, κυριαρχούν, επίσης, η χαρακτηριστική συχνότητα BPFO και οι αρμονικές της. Ομοίως με την προηγούμενη παράγραφο, το άθροισμα των ενεργειών που συγκεντρώνεται στις συχνοτικές περιοχές που περικλείονται από τις διακεκομένες κόκκινες καμπύλες αποτελεί, επίσης, στοιχείο εισόδου του αλγόριθμου ταξινόμησης.

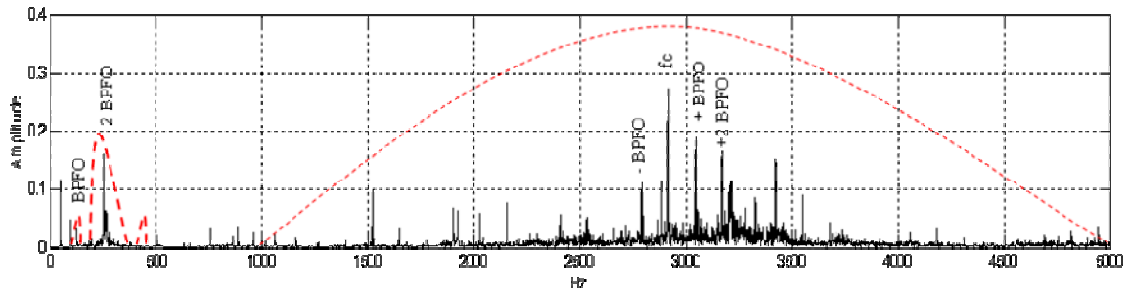
Επιπλέον, το συνολικό άθροισμα των παραπάνω ενεργειών που προκύπτει από το φάσμα του αρχικού και του αποδιαμορφωμένου σήματος δύναται να αποτελέσει ένα ακόμη στοιχείο εισόδου του αλγόριθμου ταξινόμησης.

Στη συνέχεια μελετάται η περίπτωση φθοράς γραναζιών. Η απόκριση ενός τέτοιου τύπου βλάβης παρουσιάζεται στο σχήμα 5.8. Στη χρονική κυματομορφή του σχήματος 5.8 παρατηρείται μια χαρακτηριστική περιοδικότητα που σχετίζεται με τη συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών f_{mesh} . Το πλάτος της συνιστώσας f_{mesh} είναι διαμορφωμένο από την ταχύτητα περιστροφής f_r της εξόδου του μειωτήρα. Η συχνότητα εμπλοκής προκύπτει από το γινόμενο της ταχύτητας περιστροφής του άξονα στον οποίο εδράζεται το πινιόν επί το πλήθος των οδόντων του. Ειδικότερα $f_{\text{mesh}} = f_{\text{shaft}} \times N_1 = f_r \times N_2 = 700 \text{ Hz}$. Η συχνότητα περιστροφής στην έξοδο του είναι περίπου $f_r = 18 \text{ Hz}$.

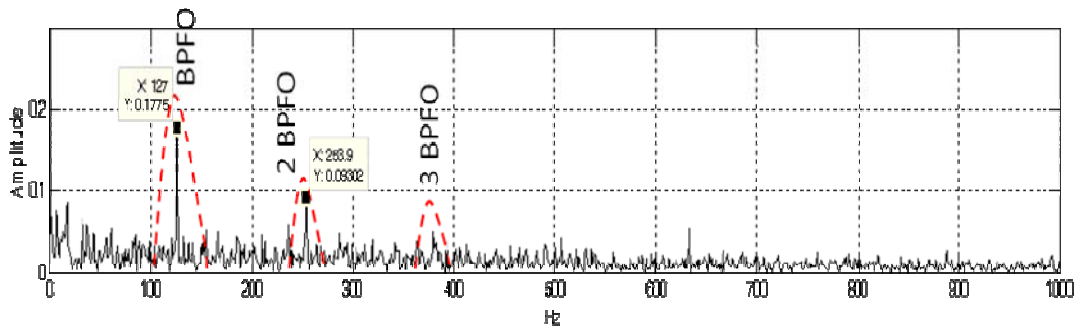
Στο φάσμα του σήματος του σχήματος 5.8 δεσπόζει μία ομάδα από αιχμές, οι οποίες αναπτύσσονται στη συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών f_{mesh} και τις αρμονικές της. Περιφερειακά f_{mesh} και των αρμονικών της παρατηρούνται πλευρικές αιχμές μικρότερου πλάτους που ισαπέχουν κατά f_r . Η παρουσία αυτών των χαρακτηριστικών αιχμών προσδιορίζει τον μηχανισμό της βλάβης που προκύπτει από φθορά γραναζιών.



Σχήμα 5.5: Χρονική κυματομορφή απόκρισης ρουλεμάν με φθορά εξωτερικού δακτυλίου.



Σχήμα 5.6: Φάσμα χρονικού σήματος του σχήματος 5.5.



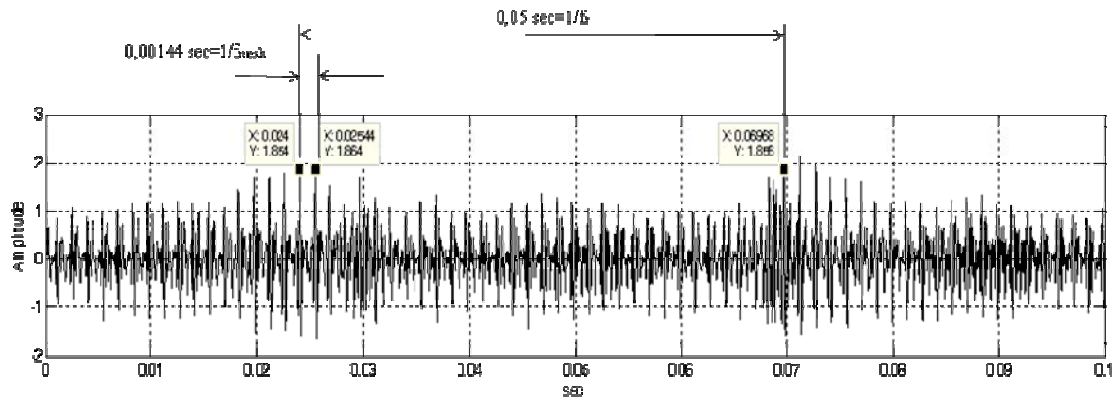
Σχήμα 5.7: Φάσμα αποδιαμορφωμένου σήματος που προκύπτει από το σήμα του σχήματος 5.5.

Το άθροισμα των ενεργειών που συγκεντρώνεται στις συχνοτικές περιοχές που περικλείονται από τις διακεκομμένες κόκκινες καμπύλες (σχήμα 5.9) αποτελεί πιθανό στοιχείο εισόδου στον εξεταζόμενο αλγόριθμο ταξινόμησης

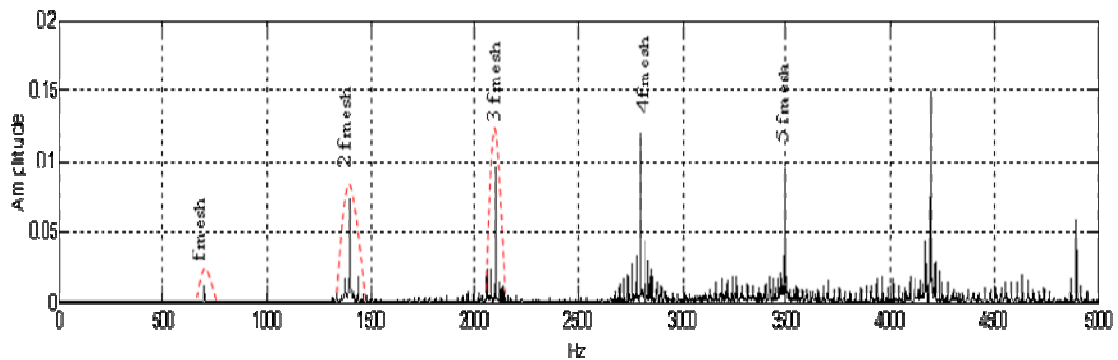
Επειδή, η απόκριση φθαρμένων γραναζιών είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος, το μετρούμενο σήμα δύναται να αποδιαμορφωθεί αφού πρώτα φιλτραρισθεί μέσω ενός υπεραποδιαμορφωμένου φίλτρου. Το φάσμα του αποδιαμορφωμένου χρονικού σήματος (σχήμα 5.10) προκύπτει με επεξεργασία μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Στο φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος, κυριαρχούν η χαρακτηριστική συχνότητα f_{mesh} , οι αρμονικές της, και η συχνότητα περιστροφής στην έξοδο του μειωτήρα f_r . Ομοίως με τις προηγούμενες περιπτώσεις βλάβων, το άθροισμα των ενεργειών που συγκεντρώνεται στις συχνοτικές περιοχές που περικλείονται από τις διακεκομμένες κόκκινες καμπύλες του σχήματος 5.10, αποτελεί ένα ακόμα στοιχείο εισόδου του αλγόριθμου ταξινόμησης.

Κεφάλαιο 5° – Ταξινόμηση Βιομηχανικών Σημάτων

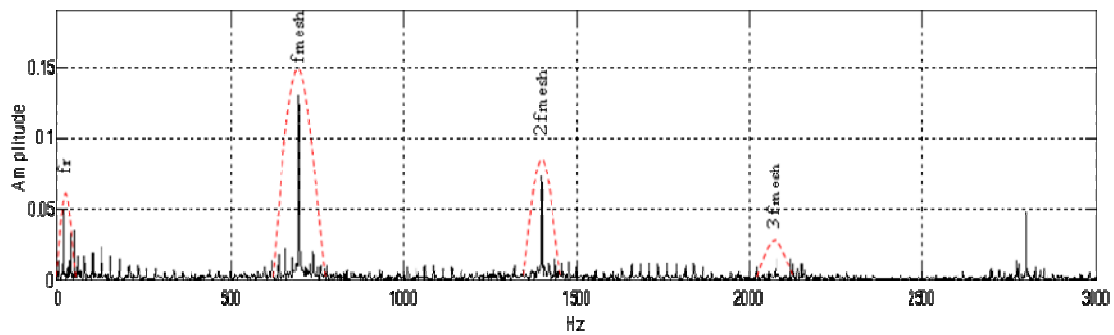
Επιπλέον, όπως, και στις προηγούμενες περιπτώσεις, το συνολικό άθροισμα των παραπάνω ενεργειών που προκύπτει από το φάσμα του αρχικού και του αποδιαμορφωμένου σήματος μπορεί να αποτελέσει ένα ακόμη στοιχείο εισόδου που μπορεί να εισαχθεί στον εξεταζόμενο αλγόριθμο ταξινόμησης.



Σχήμα 5.8: Χρονική κυματομορφή απόκρισης μηχανής με φθορά γραναζιών.



Σχήμα 5.9: Φάσμα χρονικού σήματος του σχήματος 5.8.



Σχήμα 5.10: Φάσμα αποδιαμορφωμένου σήματος που προκύπτει από το σήμα του σχ. 5.8.

Στη συνέχεια αναφέρεται η περίπτωση ηλεκτρικής βλάβης στον κινητήρα, η οποία σχετίζεται με χαλαρότητα κάποιας ράβδου ή ανομοιομορφία στο διάκενο μεταξύ στάτη ρότορα. Η χαρακτηριστική συχνότητα εμφάνισης της βλάβης αυτής είναι η RBPF η οποία ισούται με το γινόμενο της συχνότητας περιστροφής του κινητήρα με το πλήθος των ραβδών του κλωβού και η τιμή της είναι 1000 Hz.

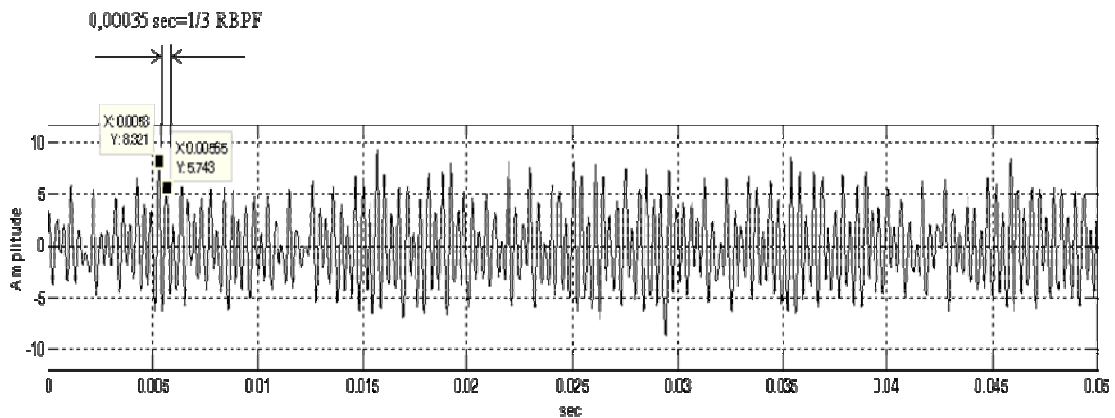
Στο χρονικό σήμα του σχήματος 5.11 είναι ευδιάκριτη μια περιοδικότητα η οποία αφορά την τρίτη αρμονική της χαρακτηριστική συχνότητας βλάβης RBPF. Στο φάσμα του σήματος του σχήματος 5.11, το οποίο εμφανίζεται στο σχήμα 5.12, παρατηρούνται κάποιες αιχμές οι οποίες είναι ενδεικτικές της συγκεκριμένης βλάβης. Ειδικότερα εμφανίζεται η RBPF και οι αρμονικές της 2RBPF και 3RBPF. Πλευρικά τους αναπτύσσονται αιχμές σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις, οι οποίες σχετίζονται με τη δεύτερη αρμονική του δικτύου $2f_L$ ($f_L=50$ Hz).

Το άθροισμα των ενεργειών που συγκεντρώνεται στις συχνοτικές περιοχές που περικλείονται από τις διακεκομένες κόκκινες καμπύλες (σχήμα 5.12) αποτελεί στοιχείο εισόδου του αλγόριθμου ταξινόμησης.

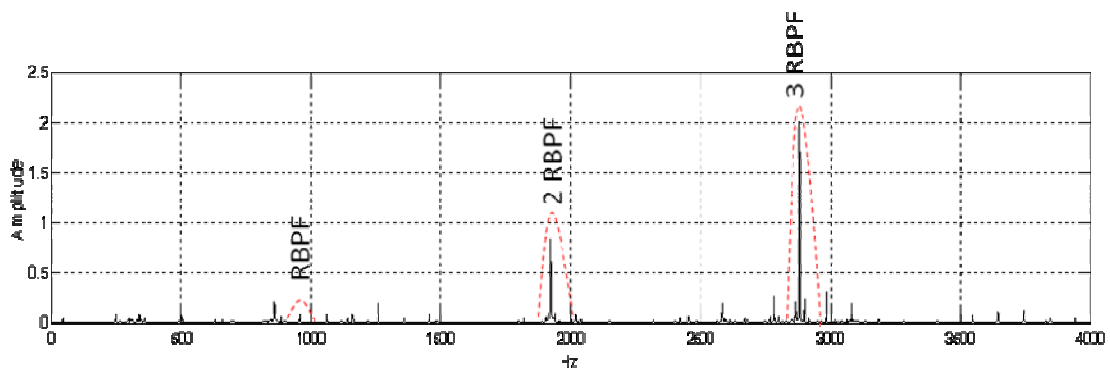
Στη συνέχεια το μετρούμενο σήμα, το οποίο είναι διαμορφωμένο κατά πλάτος, φιλτράρεται και έπειτα αποδιαμορφώνεται. Το φάσμα του αποδιαμορφωμένου χρονικού σήματος (σχήμα 5.13) προκύπτει με επεξεργασία μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Στο φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος, κυριαρχούν, επίσης, η χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης RBPF, η αρμονική της 2RBPF καθώς και η συχνότητα δικτύου f_L και την αρμονική της $2f_L$. Ομοίως με τις προηγούμενες περιπτώσεις βλάβων, το άθροισμα των ενεργειών που συγκεντρώνεται στις συχνοτικές περιοχές που περικλείονται από τις

διακεκομμένες κόκκινες καμπύλες αποτελεί ένα ακόμα στοιχείο εισόδου του αλγόριθμου ταξινόμησης.

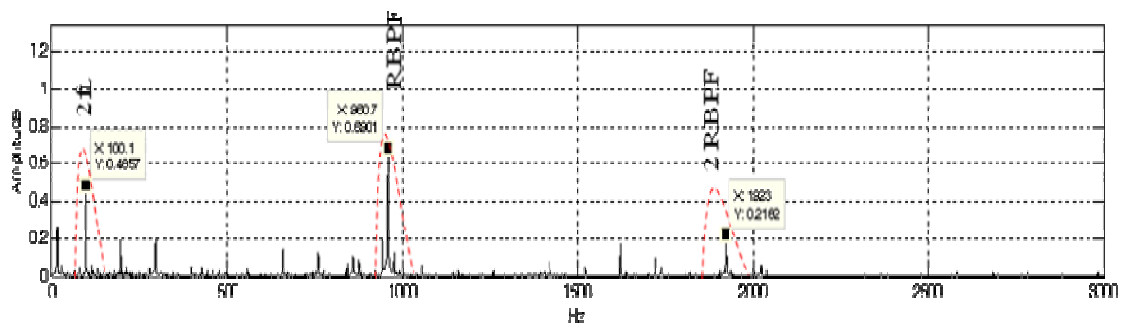
Επίσης, το συνολικό άθροισμα των παραπάνω ενεργειών που προκύπτει από το φάσμα του αρχικού και του αποδιαμορφωμένου σήματος μπορεί να αποτελέσει ένα ακόμη στοιχείο εισόδου που μπορεί να εισαχθεί στον εξεταζόμενο αλγόριθμο ταξινόμησης.



Σχήμα 5.11: Χρονική κυματομορφή απόκρισης κινητήρα μηχανής με ηλεκτρικό πρόβλημα.



Σχήμα 5.12: Φάσμα χρονικού σήματος του σχήματος 5.11.



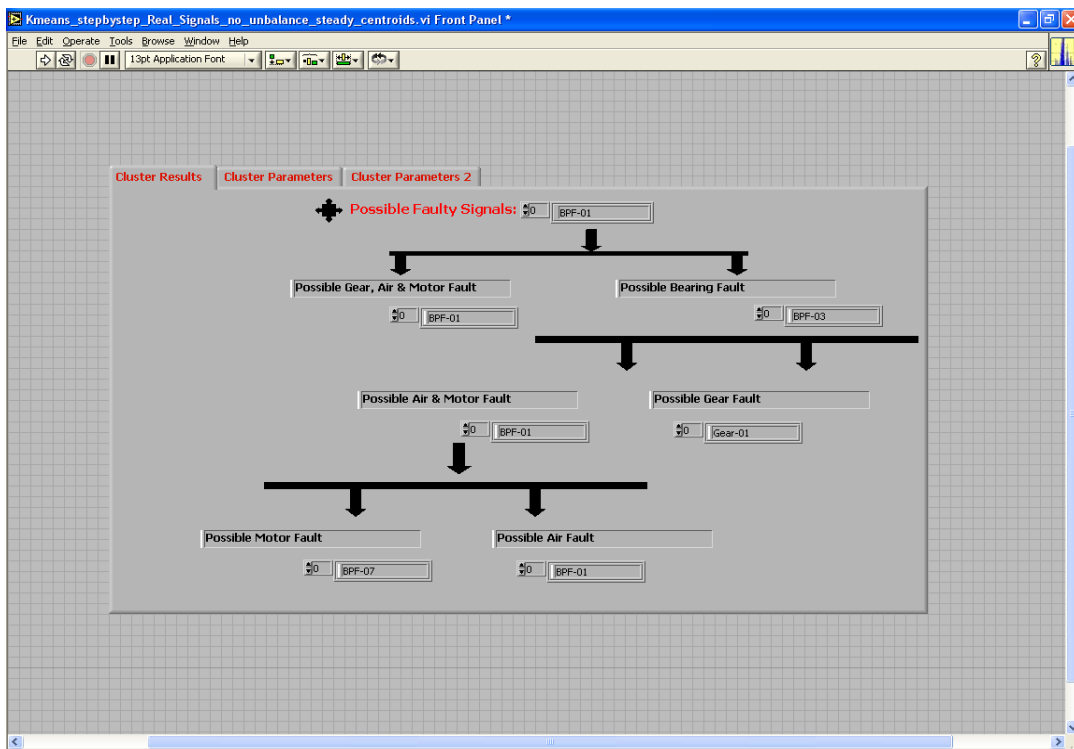
Σχήμα 5.13: Φάσμα αποδιαμορφωμένου σήματος που προκύπτει από το σήμα του σχ. 5.11.

5.3. Σταδιακή Ταξινόμηση Βιομηχανικών Σημάτων

Ο αλγόριθμος ταξινόμησης ομάδων λειτουργεί στο υπολογιστικό περιβάλλον των λογισμικών LabVIEW και Matlab. Μελετώνται για την αποτελεσματικότητα και την σταθερότητά τους δύο διαφορετικοί τρόποι εκτέλεσης του αλγόριθμου για όλες τις παραμέτρους εκτίμησης απόστασης: (α) σταδιακός και (β) άμεσος.

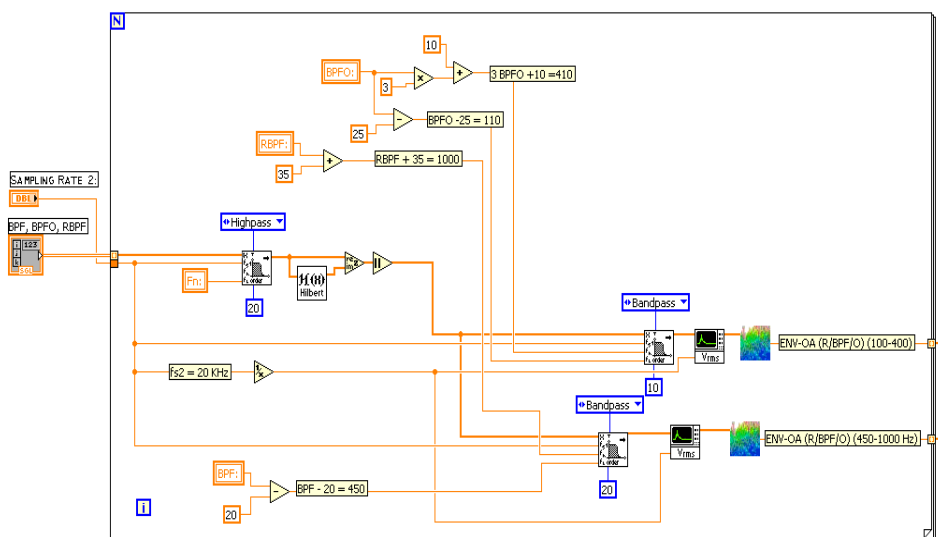
Στην περίπτωση της σταδιακής ταξινόμησης των βιομηχανικών σημάτων ο αλγόριθμος ολοκληρώνεται σε 3 επίπεδα με τη σταδιακή εισαγωγή διαφορετικών στοιχείων εισόδου σε κάθε επίπεδο της διαδικασίας και για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης (Correlation, Cosine, Cityblock, και SqEuclidean). Στο σχήμα 5.15 παρουσιάζεται η οθόνη ελέγχου του αλγόριθμου που επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει τα δεδομένα, να ελέγξει τη διαδικασία και τα αποτελέσματα. Διακρίνονται τα 3 επίπεδα σταδιακής ταξινόμησης των βιομηχανικών σημάτων, όπου κάθε κλάση πιθανής βλάβης αποτελείται από έναν πίνακα που περιλαμβάνει ονομαστικά τα σήματα που ο αλγόριθμος του έχει κατανήμει. Επίσης, σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος εκτελείται κάθε φορά είτε (α) με τυχαία αρχικά κέντρα είτε (β) με τυχαία προεπιλεγμένα αλλά σταθερά αρχικά κέντρα.

Στο 1^ο επίπεδο ο αλγόριθμος διαχωρίζει τα σήματα που περιέχουν πληροφορίες για φθαρμένους ένσφαιρους τριβείς από τα υπόλοιπα. Παρατηρώντας τα φάσματα των μετρούμενων σημάτων (σχ. 5.3, 5.6, 5.9 και 5.12) διαπιστώνεται η δυσκολία επιλογής κατάλληλων περιοχών ενέργειας που θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στον αλγόριθμο ταξινόμησης. Η αιτία είναι πολύ μικρή απόσταση που εμφανίζεται μεταξύ των περισσότερων χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης στο συχνοτικό πεδίο. Λαμβάνοντας υπόψη τον μηχανισμό βλάβης των αποκρίσεων που μελετώνται επιλέγεται ο υπολογισμός ενέργειας κατάλληλων συχνοτικών περιοχών στο φάσμα των αποδιαμορφωμένων σημάτων. Οι αποκρίσεις όλων των περιπτώσεων βλαβών που εξετάζονται είναι διαμορφωμένες κατά πλάτος. Αρχικά, τα μετρούμενα σήματα φιλτράρονται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και έπειτα αποδιαμορφώνονται. Έτσι, στο φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος που σχετίζεται με βλάβη ένσφαιρων τριβέων, κυριαρχούν η χαρακτηριστική συχνότητα BPFO και οι αρμονικές της (σχ. 5.7). Ομοίως, στα φάσματα των αποκρίσεων των υπολοίπων βλαβών κυριαρχούν οι χαρακτηριστικές συχνότητες: (α) στα φθαρμένα γρανάζια η f_{mesh} και η f_r (σχ. 5.10), (β) στο ηλεκτρικό πρόβλημα η RBPF, η f_L και η $2f_L$ (σχ. 5.13) και (γ) στο αεροδυναμικό πρόβλημα η BPF (σχ. 5.4).



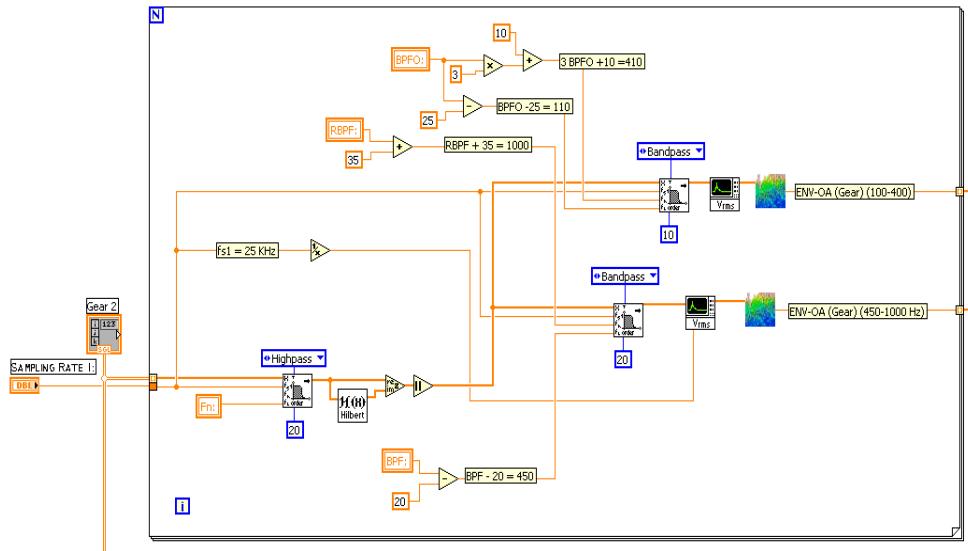
Σχήμα 5.14: Οθόνη ελέγχου προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων.

Έτσι, ο αλγόριθμος υπολογίζει την ενέργεια στις ακόλουθες περιοχές του φάσματος των αποδιαμορφωμένων σημάτων, όπως φαίνεται και στα σχήματα 5.15 και 5.16: (A) από $BPFO-25=110$ Hz έως $3BPFO+10=410$ Hz και (B) $BPF-20=450$ Hz έως $RBPF+35=1000$ Hz. Επομένως, εάν η ενέργεια της περιοχής (A) είναι μεγαλύτερη, τα σήματα ταξινομούνται ως απόκριση φθαρμένων ένσφαιρων τριβέων (κλάση A). Αναλόγως, εάν η ενέργεια της περιοχής (B) είναι μεγαλύτερη, τα σήματα κατατάσσονται ως απόκριση κινητήρα με ηλεκτρικό πρόβλημα, πτερωτής με αεροδυναμικό πρόβλημα και φθαρμένων γραναζιών (κλάση B). Στο σχήμα 5.17 παρατηρείται ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος που πραγματοποιεί την ταξινόμηση των βιομηχανικών σημάτων κατά το 1^ο επίπεδο. Επίσης, διακρίνονται τα προεπιλεγμένα σταθερά αρχικά κέντρα στο πλαίσιο ‘MATLAB Script’, όπως αυτά προκύπτουν μετά από την παραπάνω διαδικασία υπολογισμού ενεργειών. Η πρώτη τιμή αφορά την περιοχή ενέργειας (A) και η δεύτερη τιμή την περιοχή ενέργειας (B). Στον Πίνακα 5.3 με κίτρινο χρώμα, εμφανίζονται τα συγκεκριμένα επιλεγμένα κέντρα. Ο Πίνακας 5.3 περιλαμβάνει τις υπολογισμένες ενέργειες των περιοχών A και B όλων των βιομηχανικών σημάτων.

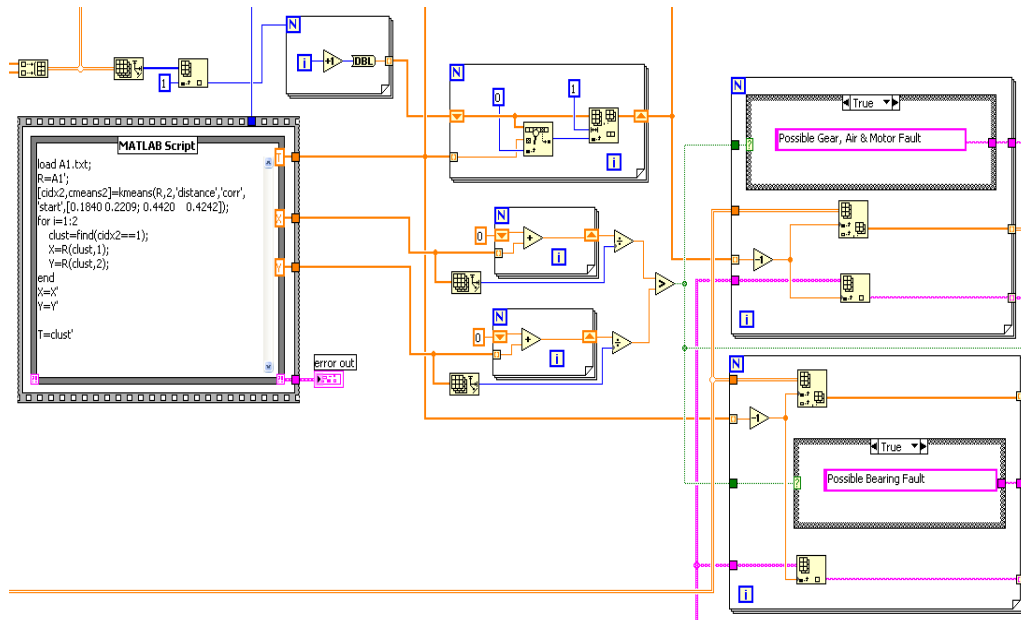


Κεφάλαιο 5^ο – Ταξινόμηση Βιομηχανικών Σημάτων

Σχήμα 5.15: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποκρίσεων φθαρμένων ένσφαιρων τριβέων, κινητήρα με ηλεκτρικό πρόβλημα και περωτής με αεροδυναμικό πρόβλημα.



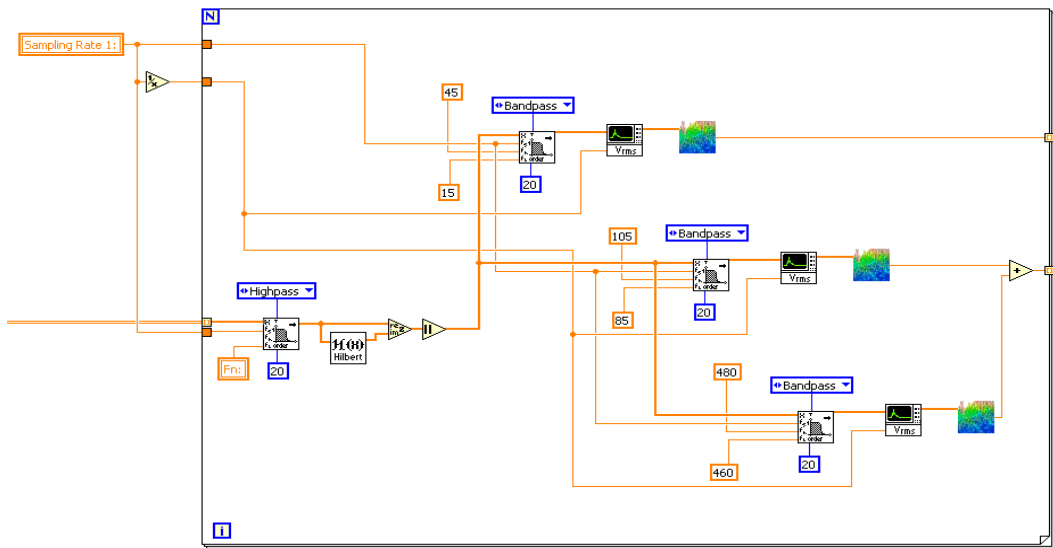
Σχήμα 5.16: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποκρίσεων φθαρμένων γραναζιών.



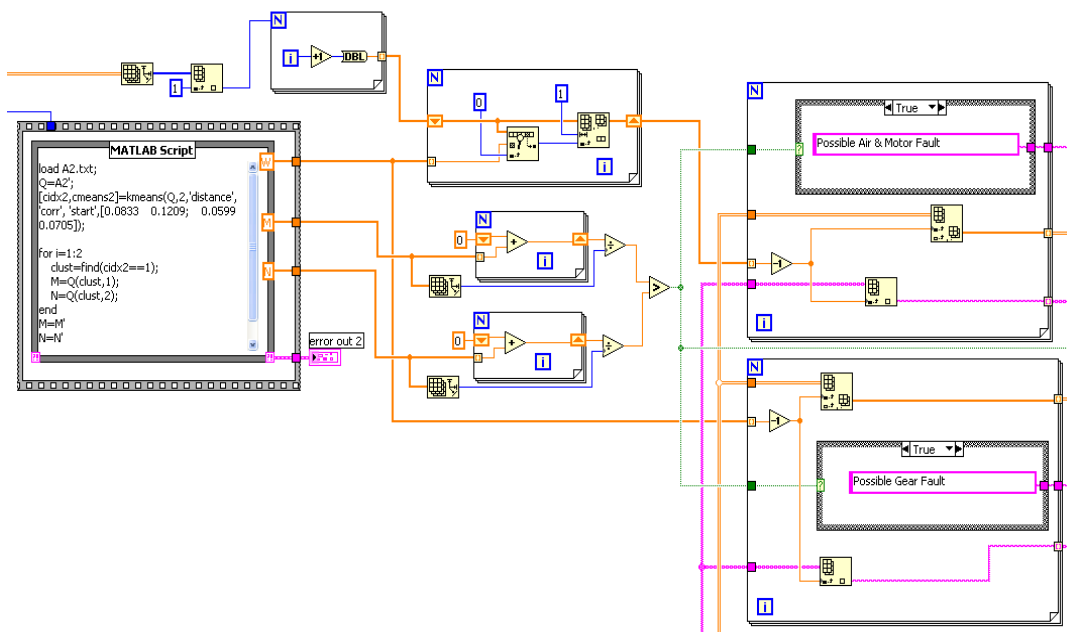
Σχήμα 5.17: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: 1^ο επίπεδο ταξινόμησης.

Στο 2^ο επίπεδο ο αλγόριθμος διαχωρίζει τα σήματα που περιέχουν πληροφορίες για φθαρμένα γρανάζια από τα υπόλοιπα που σχετίζονται με ηλεκτρικό και αεροδυναμικό πρόβλημα. Όπως και στην προηγούμενο επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη τον μηχανισμό βλάβης των αποκρίσεων που μελετώνται επιλέγεται ο υπολογισμός ενέργειας κατάλληλων συχνοτικών περιοχών στο φάσμα των αποδιαμορφωμένων σημάτων. Οι αποκρίσεις όσων σημάτων ταξινομήθηκαν στην κλάση (B) κατά το 1^ο επίπεδο φιλτράρονται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και έπειτα αποδιαμορφώνονται. Έτσι, στο φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος που σχετίζεται (α) με φθορά στα γρανάζια κυριαρχούν η f_{mesh} και η f_r (σχ. 5.10), (β) με ηλεκτρικό πρόβλημα στον κινητήρα δεσπόζουν η RBPF, η f_L και η $2f_L$ (σχ. 5.13) και (γ) με αεροδυναμικό πρόβλημα στην πτερωτή επικρατεί η BPF (σχ. 5.4).

Έτσι, ο αλγόριθμος υπολογίζει την ενέργεια στις ακόλουθες περιοχές του φάσματος των αποδιαμορφωμένων σημάτων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.18: (C) από 15 Hz έως 45 Hz και (D) το άθροισμα των πεδίων [85 – 45 Hz] και [460 - 480 Hz]. Στην περιοχή (C) κυριαρχεί η f_r που αφορά φθορά στα γρανάζια, ενώ στην περιοχή (D) κυριαρχούν η $2f_L$ και η BPF, που αφορούν ηλεκτρικό και αεροδυναμικό πρόβλημα. Επομένως, εάν η ενέργεια της περιοχής (C) είναι μεγαλύτερη, τα σήματα ταξινομούνται ως απόκριση φθαρμένων γραναζιών. Αναλόγως, εάν η ενέργεια της περιοχής (D) είναι μεγαλύτερη, τα σήματα κατατάσσονται ως απόκριση κινητήρα με ηλεκτρικό πρόβλημα και πτερωτής με αεροδυναμικό πρόβλημα. Στο σχήμα 5.19 παρατηρείται ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος που πραγματοποιεί την ταξινόμηση των βιομηχανικών σημάτων κατά το 2^ο επίπεδο. Επίσης, διακρίνονται τα προεπιλεγμένα σταθερά αρχικά κέντρα στο πλαίσιο ‘MATLAB Script’, όπως αυτά προκύπτουν μετά από την παραπάνω διαδικασία υπολογισμού ενεργειών. Η πρώτη τιμή αφορά την περιοχή ενέργειας (C) και η δεύτερη τιμή την περιοχή ενέργειας (D). Στον Πίνακα 5.4 με κίτρινο χρώμα, εμφανίζονται τα συγκεκριμένα επιλεγμένα κέντρα. Ο Πίνακας 5.4 περιλαμβάνει τις υπολογισμένες ενέργειες των περιοχών C και D των βιομηχανικών σημάτων που πέρασαν από το 1^ο επίπεδο στο 2^ο επίπεδο ταξινόμησης.



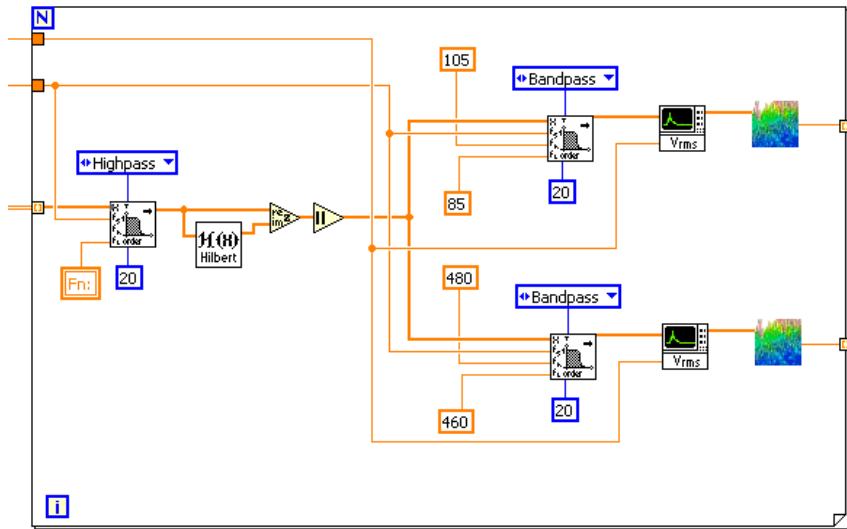
Σχήμα 5.18: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποκρίσεων φθαρμένων γραναζιών, κινητήρα με ηλεκτρικό πρόβλημα και περωτής με αεροδυναμικό πρόβλημα.



Σχήμα 5.19: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: 2^ο επίπεδο ταξινόμησης.

Στο 3^ο επίπεδο ο αλγόριθμος διαχωρίζει τα σήματα που περιέχουν πληροφορίες που αφορούν ηλεκτρικό πρόβλημα στον κινητήρα από αυτά που σχετίζονται με αεροδυναμικό πρόβλημα. Όπως και στην προηγούμενο επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη τον μηχανισμό βλάβης των αποκρίσεων που μελετώνται επιλέγεται ο υπολογισμός ενέργειας κατάλληλων συχνοτικών περιοχών στο φάσμα των αποδιαμορφωμένων σημάτων. Οι αποκρίσεις όσων σημάτων ταξινομήθηκαν στην κλάση (D) κατά το 2^ο επίπεδο φιλτράρονται μέσω ενός υψιπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και έπειτα αποδιαμορφώνονται. Έτσι, στο φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος που σχετίζεται (α) με ηλεκτρικό πρόβλημα στον κινητήρα δεσπόζουν η RBPF, η f_L και η $2f_L$ (σχ. 5.13) και (β) με αεροδυναμικό πρόβλημα στην πτερωτή επικρατεί η BPF (σχ. 5.4).

Έτσι, ο αλγόριθμος υπολογίζει την ενέργεια στις ακόλουθες περιοχές του φάσματος των αποδιαμορφωμένων σημάτων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.20: (E) από 85 Hz έως 105 Hz και (F) από 460 Hz έως 408 Hz. Στην περιοχή (E) κυριαρχεί η $2f_L$ που αφορά φθορά ηλεκτρικό πρόβλημα στον κινητήρα, ενώ στην περιοχή (F) κυριαρχεί η BPF που σχετίζεται με αεροδυναμικό πρόβλημα. Επομένως, εάν η ενέργεια της περιοχής (E) είναι μεγαλύτερη, τα σήματα ταξινομούνται ως απόκριση κινητήρα με ηλεκτρικό πρόβλημα. Αναλόγως, εάν η ενέργεια της περιοχής (F) είναι μεγαλύτερη, τα σήματα κατατάσσονται ως απόκριση πτερωτής με αεροδυναμικό πρόβλημα. Στο σχήμα 5.21 παρατηρείται ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος που πραγματοποιεί την ταξινόμηση των βιομηχανικών σημάτων κατά το 3^ο επίπεδο. Επίσης, διακρίνονται τα προεπιλεγμένα σταθερά αρχικά κέντρα στο πλαίσιο ‘MATLAB Script’, όπως αυτά προκύπτουν μετά από την παραπάνω διαδικασία υπολογισμού ενεργειών. Η πρώτη τιμή αφορά την περιοχή ενέργειας (E) και η δεύτερη τιμή την περιοχή ενέργειας (F). Στον Πίνακα 5.5 με κίτρινο χρώμα, εμφανίζονται τα συγκεκριμένα επιλεγμένα κέντρα. Ο Πίνακας 5.5 περιλαμβάνει τις υπολογισμένες ενέργειες των περιοχών E και F των βιομηχανικών σημάτων που πέρασαν από το 2^ο επίπεδο στο 3^ο επίπεδο ταξινόμησης.



Σχήμα 5.20: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποκρίσεων κινητήρα με ηλεκτρικό πρόβλημα και πτερωτής με αεροδυναμικό πρόβλημα.

Πίνακας 5.3

A (mm/sec rms)	B(mm/sec rms)
0.184	0.2209
0.5669	1.6442
0.442	0.4242
1.4711	1.168
1.0725	0.6483
0.1429	0.2024
0.0747	0.1072
0.2972	0.4787
0.1999	0.2672
0.8946	1.0802
0.2357	0.1473
1.989	0.8547
0.747	0.7161

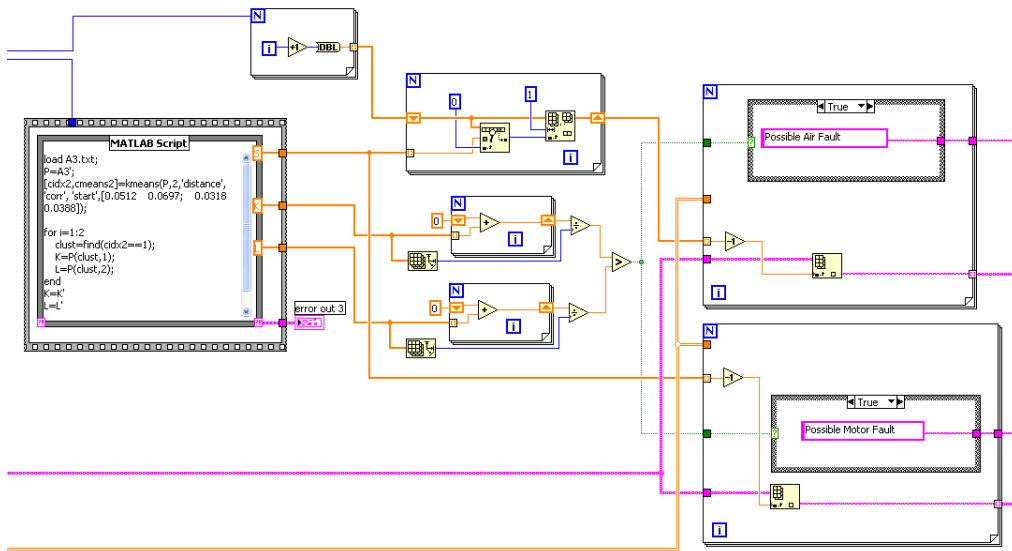
0.5382	0.3787
1.044	0.7338
2.1771	1.2099
1.6732	1.0057
3.9607	2.3858
0.5791	0.3822
1.0348	0.6955
0.6108	0.575
0.5068	0.4143
1.6467	1.2704
0.593	0.5222
0.2958	1.2231
0.5364	1.3138
1.4362	2.1541
0.184	0.0649
0.2907	0.6189
0.3282	0.6485
0.7039	1.1817
1.0623	0.8143
0.0324	0.1893
0.0551	0.2305
0.0725	0.2633
0.0328	0.2578
0.1198	0.7184
0.1022	0.5924
0.0335	0.2007
0.0143	0.0964
0.0939	0.7837
0.0374	0.2441
0.0391	0.2009

Πίνακας 5.4

C (mm/sec rms)	D (mm/sec rms)
0.0833	0.1209
0.3942	1.4937
0.0599	0.0705
0.0319	0.0397
0.127	0.3092
0.0922	0.1449

0.5161	0.8672
0.2253	0.8193
0.4777	0.6031
0.6343	1.6123
0.1939	0.7261
0.1038	0.3231
0.2641	0.6508
0.0858	0.0352
0.0779	0.0474
0.0803	0.0469
0.1279	0.0287
0.2546	0.1285
0.2876	0.1076
0.1145	0.0318
0.0494	0.0135
0.2884	0.0693
0.0365	0.0206
0.0619	0.0221

Κεφάλαιο 5^ο – Ταξινόμηση Βιομηχανικών Σημάτων



Σχήμα 5.21: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου σταδιακής ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: 3^ο επίπεδο ταξινόμησης.

Πίνακας 5.5

E (mm/sec rms)	F (mm/sec rms)
0.0512	0.0697
0.2152	1.2784
0.0318	0.0388
0.0216	0.0182
0.0532	0.256
0.0445	0.1004
0.2862	0.581
0.7944	0.0249
0.5464	0.0567
1.5052	0.1071
0.6614	0.0647
0.2853	0.0378
0.5568	0.094

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος σταδιακής ταξινόμησης ομάδων εκτελείται για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης (Correlation, Cosine, Cityblock, και SqEuclidean) και ελέγχεται για την αποτελεσματικότητα και την σταθερότητά του.

Αρχικά, επιλέγεται η παράμετρο εκτίμησης απόστασης Correlation. Τα αποτελέσματα σε κάθε επίπεδο ταξινόμησης εμφανίζονται στο σχεδιάγραμμα 5.24, ενώ η αποτελεσματικότητα και η σταθερότητα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.6 το μέγιστο ποσοστό επιτυχίας του αλγόριθμου προσεγγίζει το 82 % και με ποσοστό επαναληψιμότητας ίσο προς 87 % περίπου. Σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος δεν εμφανίζει σταθερότητα διότι κάθε φορά που εκτελείται επιλέγονται τυχαία αρχικά κέντρα, με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται η διαδικασία. Το αποτέλεσμα σταθεροποιείται με την επιλογή και την εισαγωγή σταθερών αρχικών κέντρων στον αλγόριθμο, όπως φαίνεται και στα σχήματα 5.17, 5.19 και 5.21. Το κριτήριο επιλογής των κατάλληλων αρχικών κέντρων αποτελεί μελέτη μελλοντικής έρευνας. Στο διάγραμμα του σχήματος 5.24 επιδुकνείονται τα ενδιάμεσα αποτελέσματα της σταδιακής ταξινόμησης που εκτελεί ο αλγόριθμος.

Στο 1^ο επίπεδο, ο αλγόριθμος ταξινομεί ορθά στην κλάση (A) όλες τις αποκρίσεις, οι οποίες σχετίζονται με φθορά εξωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα, αλλά επιλέγει λάθος τις βλάβες 3-5 και 11 που σχετίζονται με πρόβλημα ροής ρευστού καθώς και τις βλάβες 1, 5, 9 που σχετίζονται με ηλεκτρικό πρόβλημα στον κινητήρα. Επίσης, τοποθετεί ορθά στην κλάση (B) του 1^{ου} επιπέδου τις βλάβες 1, 2, 6-10 που σχετίζονται με πρόβλημα ροής ρευστού, τις βλάβες 2-4 και 6-8 που σχετίζονται με ηλεκτρικό πρόβλημα στο κινητήρα και όλες τις βλάβες που αφορούν φθορά στα γρανάζια. Στο σχήμα 5.28 παρουσιάζεται η κατανομή των στοιχείων εισόδου, τα τελικά κέντρα και το όριο των κλάσεων (A) και (B).

Στο 2^ο επίπεδο του αλγορίθμου επιτυγχάνεται ορθή κατανομή των βλάβων που σχετίζονται με αεροδυναμικό και ηλεκτρικό πρόβλημα στην κλάση (D) και όλων των αποκρίσεων που σχετίζονται με φθορά στα γρανάζια του μειωτήρα, οι οποίες ταξινομούνται στην κλάση (C). Στο σχήμα 5.32 παρουσιάζεται η κατανομή των στοιχείων εισόδου, τα τελικά κέντρα και το όριο των κλάσεων (C) και (D).

Στο τελευταίο επίπεδο ταξινόμησης ο αλγόριθμος επιτυγχάνει σωστό διαχωρισμό των λοιπών αποκρίσεων πλην της βλάβης 7 που αφορά αεροδυναμικό πρόβλημα και την οποία κατέταξε εσφαλμένα στην κλάση (E). Στο σχήμα 5.36 παρουσιάζεται η κατανομή των στοιχείων εισόδου, τα τελικά κέντρα και το όριο των κλάσεων (E) και (F).

Επομένως, ο αλγόριθμος σταδιακής ταξινόμησης με παράμετρο εκτίμησης απόστασης Correlation ταξινόμησε ορθά τις 35 από τις 43 βλάβες, δηλαδή ποσοστό επιτυχίας 81,40 %.

Στη συνέχεια, επιλέγεται η παράμετρο εκτίμησης απόστασης Cosine. Τα αποτελέσματα σε κάθε επίπεδο ταξινόμησης εμφανίζονται στο σχεδιάγραμμα 5.25, ενώ η αποτελεσματικότητα και η σταθερότητα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.6 το μέγιστο ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου προσεγγίζει το 70 % με 100 % ποσοστό επαναληψιμότητας. Σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος εμφανίζει απόλυτη σταθερότητα παρόλο που κάθε φορά εκτελείται για τυχαία αρχικά κέντρα. Στο διάγραμμα του σχήματος 5.25 επιδουκνούνται τα ενδιάμεσα αποτελέσματα της σταδιακής ταξινόμησης που εκτελεί ο αλγόριθμος.

Στο 1^ο επίπεδο, ο αλγόριθμος ταξινομεί ορθά στην κλάση (A) όλες τις αποκρίσεις, οι οποίες σχετίζονται με φθορά εξωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα, αλλά επιλέγει λάθος τις βλάβες 1, 3-7 και 9-11 που σχετίζονται με πρόβλημα ροής ρευστού καθώς και τις βλάβες 1, 4, 5 και 9 που σχετίζονται με ηλεκτρικό πρόβλημα στον κινητήρα. Επίσης, τοποθετεί ορθά στην κλάση (B) του 1^{ου} επιπέδου τις βλάβες 2, 8 που σχετίζονται με πρόβλημα ροής ρευστού, τις βλάβες 2, 3 και 6-8 που σχετίζονται με ηλεκτρικό πρόβλημα στο κινητήρα και όλες τις βλάβες που αφορούν φθορά στα γρανάζια. Στο σχήμα 5.29 παρουσιάζεται η κατανομή των στοιχείων εισόδου, τα τελικά κέντρα και το όριο των κλάσεων (A) και (B).

Στο 2^ο επίπεδο του αλγορίθμου επιτυγχάνεται ορθή κατανομή στην κλάση (D) των λοιπών βλαβών 2 και 8 που σχετίζονται με αεροδυναμικό πρόβλημα και των λοιπών αποκρίσεων 2, 3 και 6-8 που αφορούν ηλεκτρικό πρόβλημα. Στην κλάση (C) ταξινομούνται όλες οι βλάβες που αφορούν φθορά γραναζιών. Στο σχήμα 5.33 παρουσιάζεται η κατανομή των στοιχείων εισόδου, τα τελικά κέντρα και το όριο των κλάσεων (C) και (D).

Στο 3^ο επίπεδο ταξινόμησης ο αλγόριθμος επιτυγχάνει σωστό διαχωρισμό των λοιπών αποκρίσεων 2, 8 που αφορούν αεροδυναμικό πρόβλημα (κλάση F) και των σημάτων 2, 3, 6-8 που σχετίζονται με ηλεκτρικό πρόβλημα (κλάση E). Στο σχήμα 5.37 παρουσιάζεται η κατανομή των στοιχείων εισόδου, τα τελικά κέντρα και το όριο των

5.27

κλάσεων (E) και (F). Επομένως, ο αλγόριθμος σταδιακής ταξινόμησης με παράμετρο εκτίμησης απόστασης Correlation ταξινόμησε ορθά τις 30 από τις 43 βλάβες, δηλαδή ποσοστό επιτυχίας 69,77 %.

Κατόπιν, επιλέγεται η παράμετρο εκτίμησης απόστασης Cityblock. Τα αποτελέσματα σε κάθε επίπεδο ταξινόμησης εμφανίζονται στο σχεδιάγραμμα 5.22, ενώ η αποτελεσματικότητα και η σταθερότητα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.8.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.8 το μέγιστο ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου προσεγγίζει το 45 % με 60 % ποσοστό επαναληψιμότητας. Σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος δεν εμφανίζει σταθερότητα διότι κάθε φορά που εκτελείται επιλέγονται τυχαία αρχικά κέντρα, με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται η διαδικασία. Το αποτέλεσμα σταθεροποιείται με την επιλογή και την εισαγωγή σταθερών αρχικών κέντρων στον αλγόριθμο. Το κριτήριο επιλογής των κατάλληλων αρχικών κέντρων αποτελεί μελέτη μελλοντικής έρευνας. Στο διάγραμμα του σχήματος 5.22 επιδुकνεύονται τα ενδιάμεσα αποτελέσματα της σταδιακής ταξινόμησης που εκτελεί ο αλγόριθμος.

Στο 1^ο επίπεδο, ο αλγόριθμος ταξινομεί ορθά στην κλάση (A) τις αποκρίσεις, 1-2, 4-7, 9, 12 οι οποίες σχετίζονται με βλάβη εξωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα, αλλά αποτυγχάνει να κατατάξει σωστά τις βλάβες 2, 4, 5 και 10 που αφορούν πρόβλημα ροής ρευστού, καθώς και τις βλάβες 2-4, 8 και 9 που σχετίζονται με ηλεκτρικό πρόβλημα στον κινητήρα. Επίσης, ταξινομούνται ορθά στην κλάση (B) του 1^{ου} επιπέδου οι βλάβες 1, 3, 6-9 και 11 που σχετίζονται με πρόβλημα ροής ρευστού, οι βλάβες 1, 5, 6 και 7 που σχετίζονται με ηλεκτρικό πρόβλημα στον κινητήρα και όλες οι βλάβες που σχετίζονται με φθορά στα γρανάζια. Όμως, ταξινομούνται λανθασμένα οι βλάβες 3, 8, 10 και 11 που αφορούν απόκριση φθαρμένου ένσφαιρου τριβέα. Στο σχήμα 5.26 παρουσιάζεται η κατανομή των στοιχείων εισόδου, τα τελικά κέντρα και το όριο των κλάσεων (A) και (B).

Στο 2^ο επίπεδο του αλγορίθμου επιτυγχάνεται ορθή κατανομή στην κλάση (D) των βλάβων 3 και 8 που σχετίζονται με πρόβλημα στη ροή του ρευστού και της βλάβης 1 που αφορά ηλεκτρικό πρόβλημα στον κινητήρα. Όμως, ο αλγόριθμος ταξινομεί εσφαλμένα τις βλάβες 3, 8, 10 και 11 που αφορούν απόκριση φθαρμένου ένσφαιρου τριβέα, καθώς και τις βλάβες 3, 4 και 7 που σχετίζονται με φθορά στα γρανάζια. Στην

κλάση (C) ο αλγόριθμος κατατάσει σωστά τις υπόλοιπες βλάβες που σχετίζονται με φθορά στα γρανάζια του μειωτήρα (1, 2, 5, 6, 8, 9, 10 και 11), άλλα ταξινομεί λανθασμένα τις βλάβες 1, 6, 7, 9 και 11 που σχετίζονται με πρόβλημα στη ροή του ρευστού και τις βλάβες 5, 6 και 7 που αφορούν ηλεκτρικό πρόβλημα. Στο σχήμα 5.30 παρουσιάζεται η κατανομή των στοιχείων εισόδου, τα τελικά κέντρα και το όριο των κλάσεων (C) και (D).

Στο 3^ο επίπεδο ταξινόμησης ο αλγόριθμος επιτυγχάνει σωστό διαχωρισμό των αποκρίσεων 3 και 8 που αφορούν αεροδυναμικό πρόβλημα (κλάση F) και του σήματος 1 που σχετίζονται με ηλεκτρικό πρόβλημα (κλάση E). Λανθασμένα διαχωρίζονται στην κλάση (E) οι αποκρίσεις 3, 8, 10 και 11 που σχετίζονται με φθορά ένσφαιρου τριβέα και τα σήματα 3, 4 και 7 που αφορούν φθορά γραναζιών. Στο σχήμα 5.34 παρουσιάζεται η κατανομή των στοιχείων εισόδου, τα τελικά κέντρα και το όριο των κλάσεων (E) και (F). Επομένως, ο αλγόριθμος σταδιακής ταξινόμησης με παράμετρο εκτίμησης απόστασης Correlation ταξινόμησε ορθά τις 19 από τις 43 βλάβες, δηλαδή ποσοστό επιτυχίας 44,19 %.

Τέλος, επιλέγεται η παράμετρο εκτίμησης απόστασης Euclidean. Τα αποτελέσματα σε κάθε επίπεδο ταξινόμησης εμφανίζονται στο σχεδιάγραμμα 5.23, ενώ η αποτελεσματικότητα και η σταθερότητα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9.

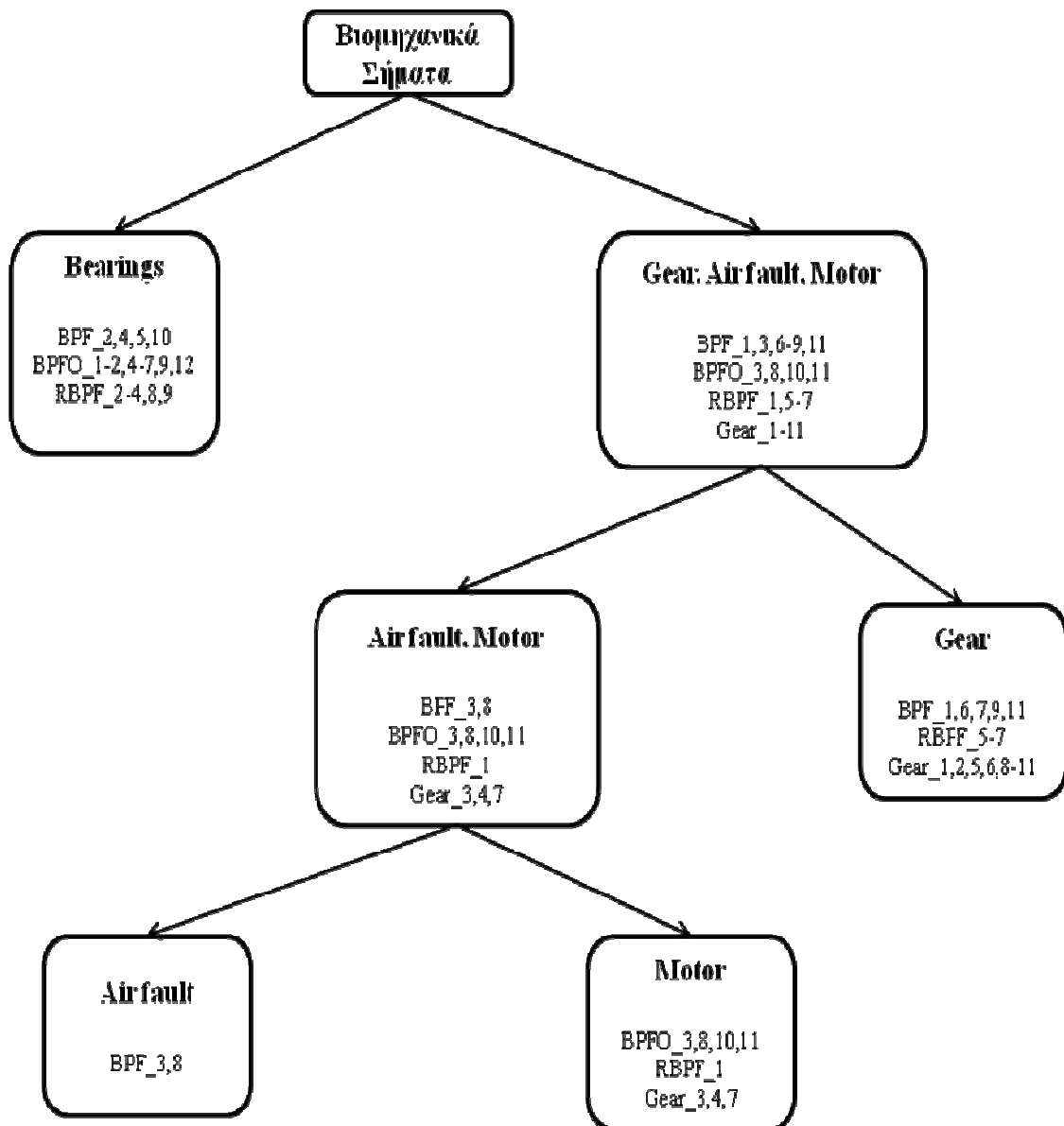
Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.9 με σχετική σταθερότητα ο αλγόριθμος παρουσιάζει χαμηλό ποσοστό επιτυχίας που αγγίζει μόλις το 45 %. Στο διάγραμμα του σχήματος 5.23 επιδुकνεύονται τα ενδιάμεσα αποτελέσματα της σταδιακής ταξινόμησης που εκτελεί ο αλγόριθμος.

Στο 1^ο επίπεδο, ο αλγόριθμος ταξινομεί ορθά στην κλάση (A) τις αποκρίσεις 1, 4-7, 9 και 12 οι οποίες σχετίζονται με φθορά εξωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα, αλλά επιλέγει λάθος τις βλάβες 2, 4, 5 και 10 που σχετίζονται με πρόβλημα ροής ρευστού καθώς και τις βλάβες 3, 4, 8 και 9 που σχετίζονται με ηλεκτρικό πρόβλημα στον κινητήρα. Επίσης, τοποθετεί ορθά στην κλάση (B) του 1^{ου} επιπέδου τις βλάβες 1, 3, 6-9 και 11 που σχετίζονται με πρόβλημα ροής ρευστού, τις βλάβες 1, 2 και 5-7 που σχετίζονται με ηλεκτρικό πρόβλημα στο κινητήρα, τις αποκρίσεις 2, 3, και όλες τις βλάβες που αφορούν φθορά στα γρανάζια. Στην κλάση (B) ταξινομούνται λανθασμένα οι

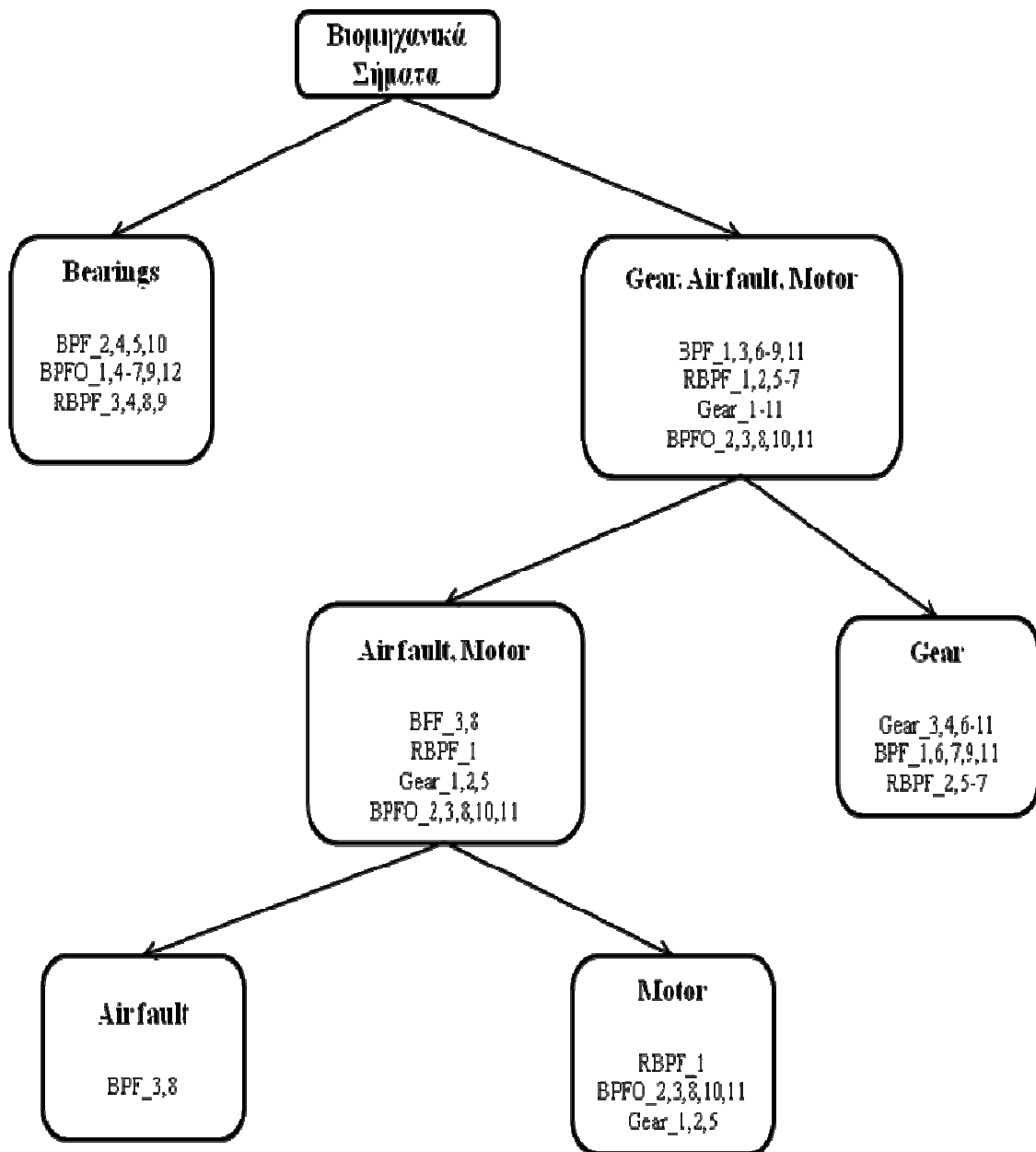
αποκρίσεις 8, 10 και 11 οι οποίες σχετίζονται με φθορά εξωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα Στο σχήμα 5.27 παρουσιάζεται η κατανομή των στοιχείων εισόδου, τα τελικά κέντρα και το όριο των κλάσεων (A) και (B).

Στο 2^ο επίπεδο του αλγορίθμου επιτυγχάνεται ορθή κατανομή στην κλάση (D) των βλαβών 3 και 8 που σχετίζονται με αεροδυναμικό πρόβλημα και της απόκρισης 1 που αφορά ηλεκτρικό πρόβλημα. Επίσης, στην κλάση (D) ταξινομούνται λανθασμένα τα σήματα 1, 2 και 5 που αφορούν φθορά γραναζιών και οι αποκρίσεις 2, 3, 8, 10 και 11 που σχετίζονται με φθαρμένους ένσφαιρους τριβείς. Στην κλάση (C) ταξινομούνται ορθά οι βλάβες 3, 4 και 6-11 που αφορούν φθορά γραναζιών. Παράλληλα, στην κλάση (C) ταξινομούνται λανθασμένα τα σήματα 1, 6, 7, 9 και 11 που αφορούν αεροδυναμικό πρόβλημα και οι αποκρίσεις 2 και 5-7 που σχετίζονται με ηλεκτρικό πρόβλημα. Στο σχήμα 5.31 παρουσιάζεται η κατανομή των στοιχείων εισόδου, τα τελικά κέντρα και το όριο των κλάσεων (C) και (D).

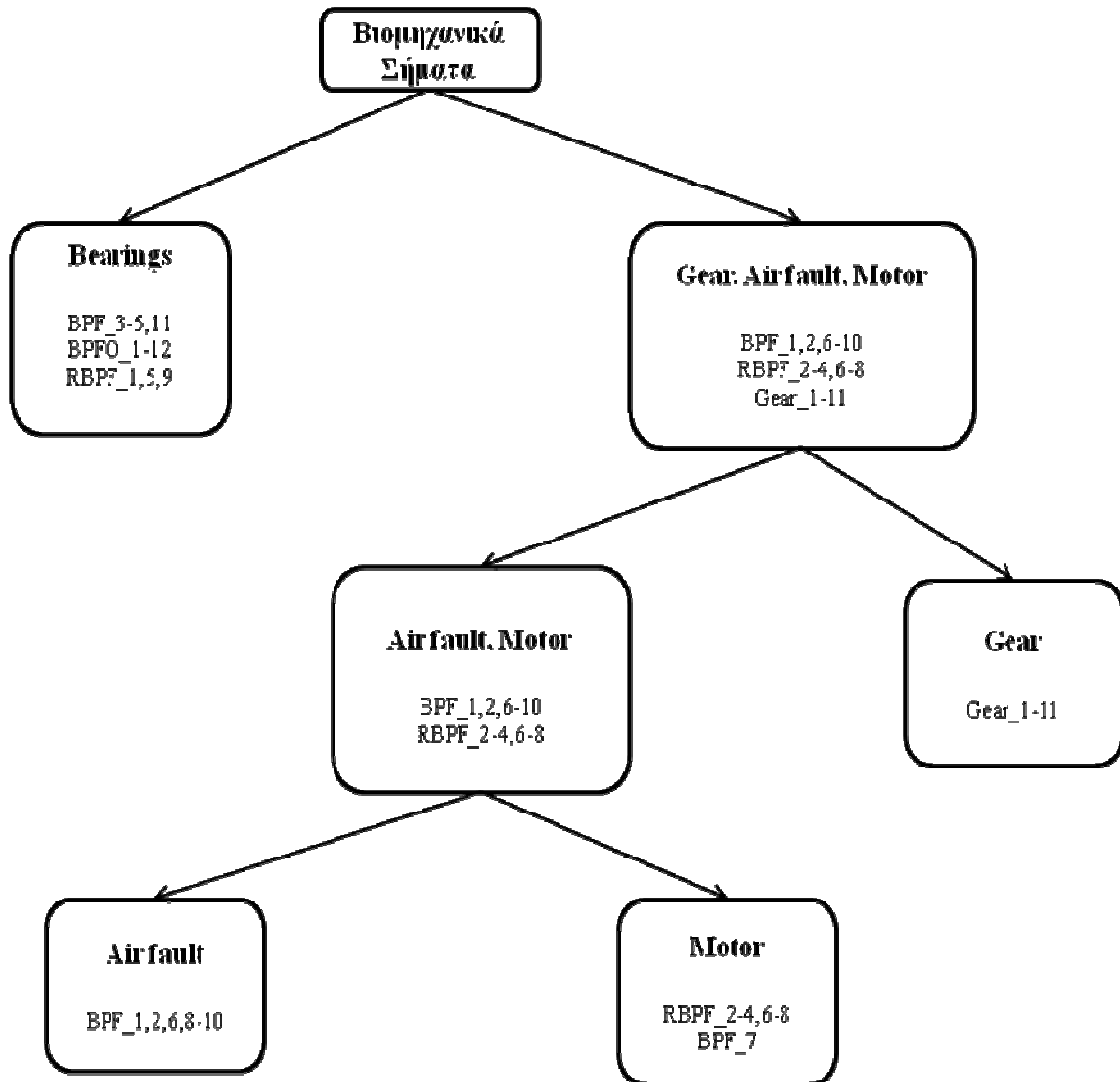
Στο 3^ο επίπεδο ταξινόμησης ο αλγόριθμος επιτυγχάνει σωστό διαχωρισμό των λοιπών αποκρίσεων 3 και 8 που αφορούν αεροδυναμικό πρόβλημα (κλάση F) και του σήματος 1 που σχετίζεται με ηλεκτρικό πρόβλημα (κλάση E). Τα σήματα 2, 3, 8, 10 και 11 που αφορούν φθορά ένσφαιρων τριβέων και οι αποκρίσεις 1, 2 και 5 που σχετίζονται με φθαρμένα γρανάζια ταξινομούνται λανθασμένα στην κλάση (E). Στο σχήμα 5.35 παρουσιάζεται η κατανομή των στοιχείων εισόδου, τα τελικά κέντρα και το όριο των κλάσεων (E) και (F). Επομένως, ο αλγόριθμος σταδιακής ταξινόμησης με παράμετρο εκτίμησης απόστασης Correlation ταξινόμησε ορθά τις 18 από τις 43 βλάβες, δηλαδή ποσοστό επιτυχίας 41,86 %.



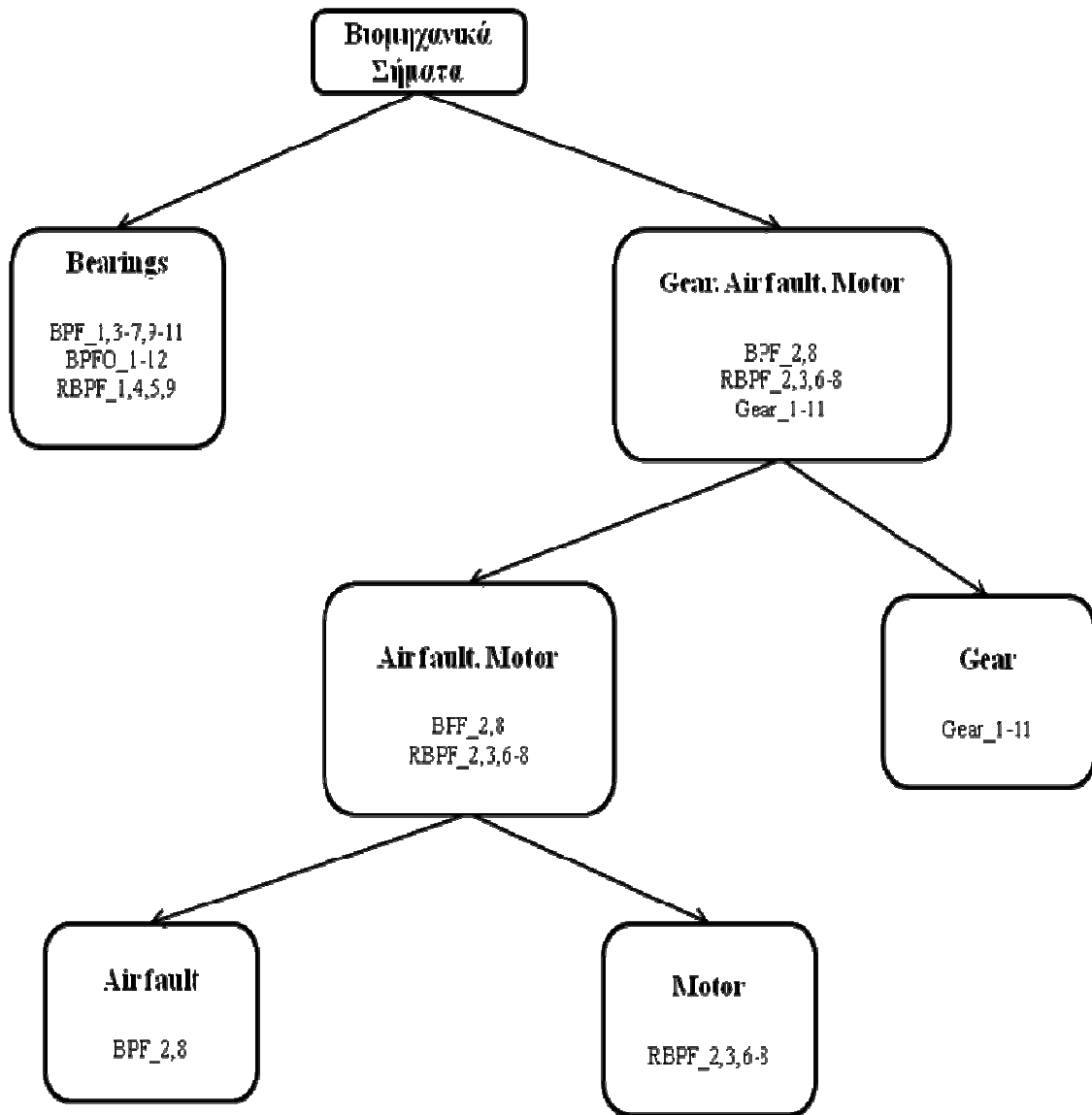
Σχήμα 5.22: Σχεδιάγραμμα σταδιακής ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με cityblock (44,19 % αποτελεσματικότητα ταξινόμησης).



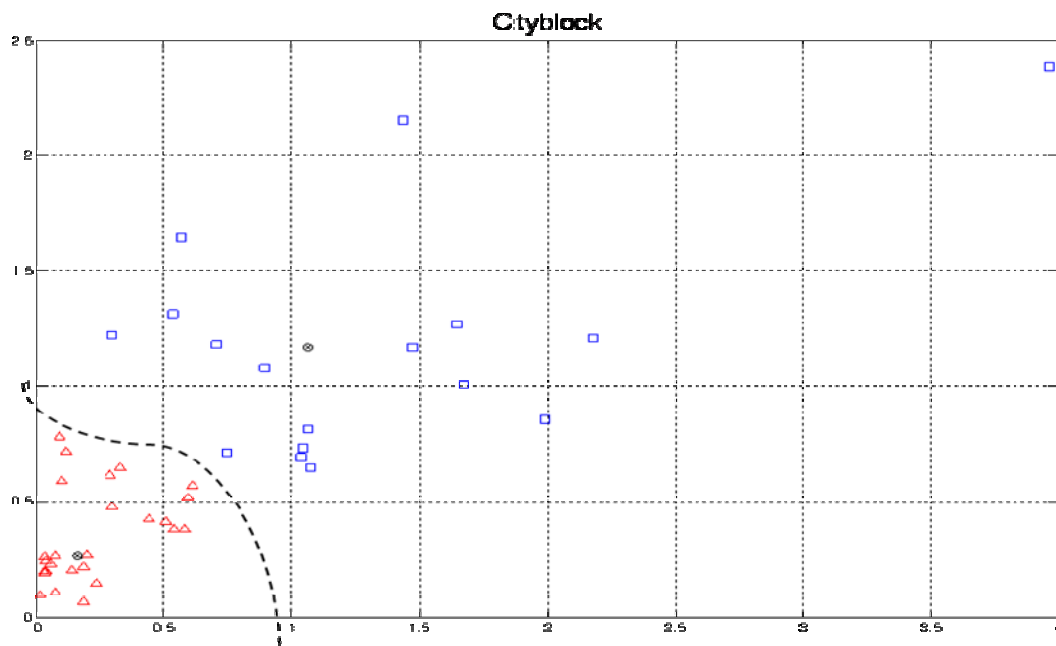
Σχήμα 5.23: Σχεδιάγραμμα σταδιακής ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με euclidean (41,6 % αποτελεσματικότητα ταξινόμησης).



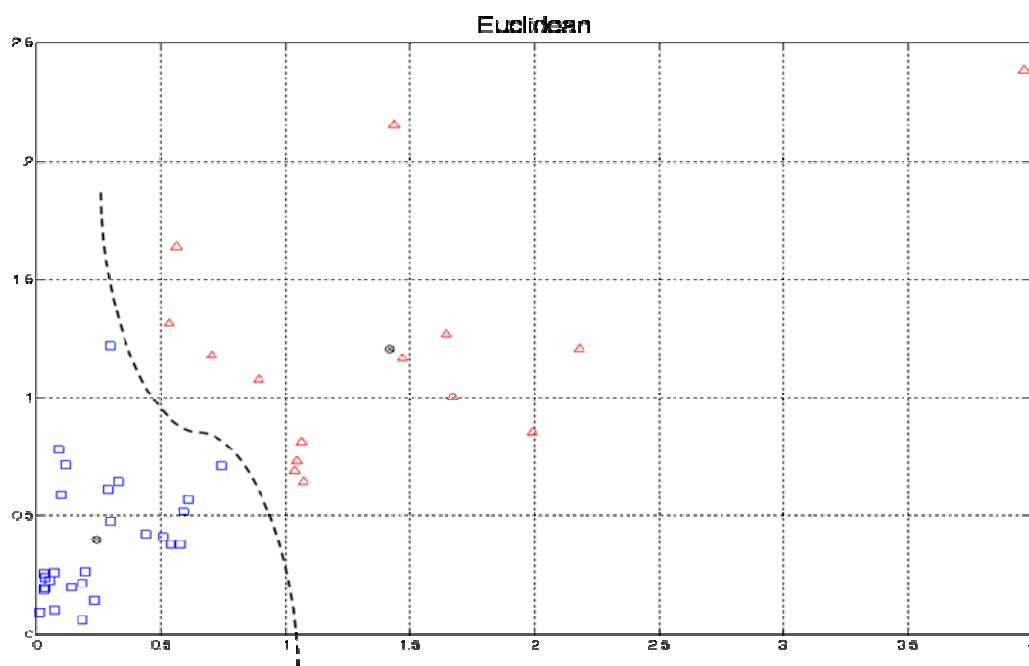
Σχήμα 5.24: Σχεδιάγραμμα σταδιακής ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με correlation (81,4 % αποτελεσματικότητα ταξινόμησης).



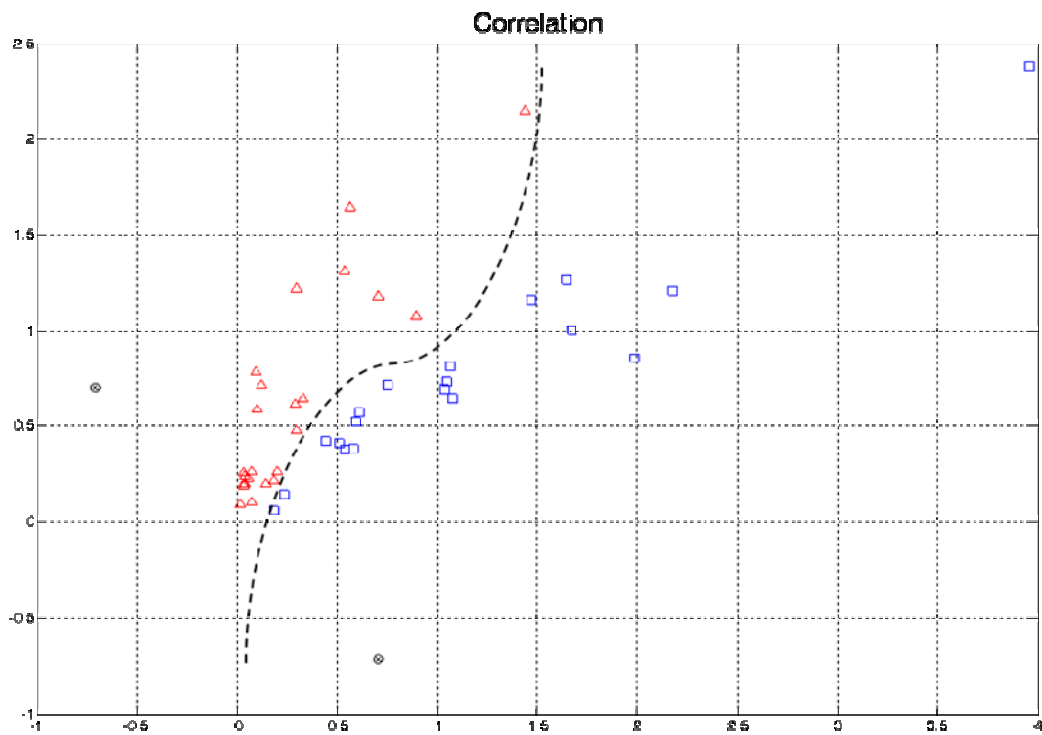
Σχήμα 5.25: Σχεδιάγραμμα σταδιακής ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με cosine (69,77 % αποτελεσματικότητα ταξινόμησης).



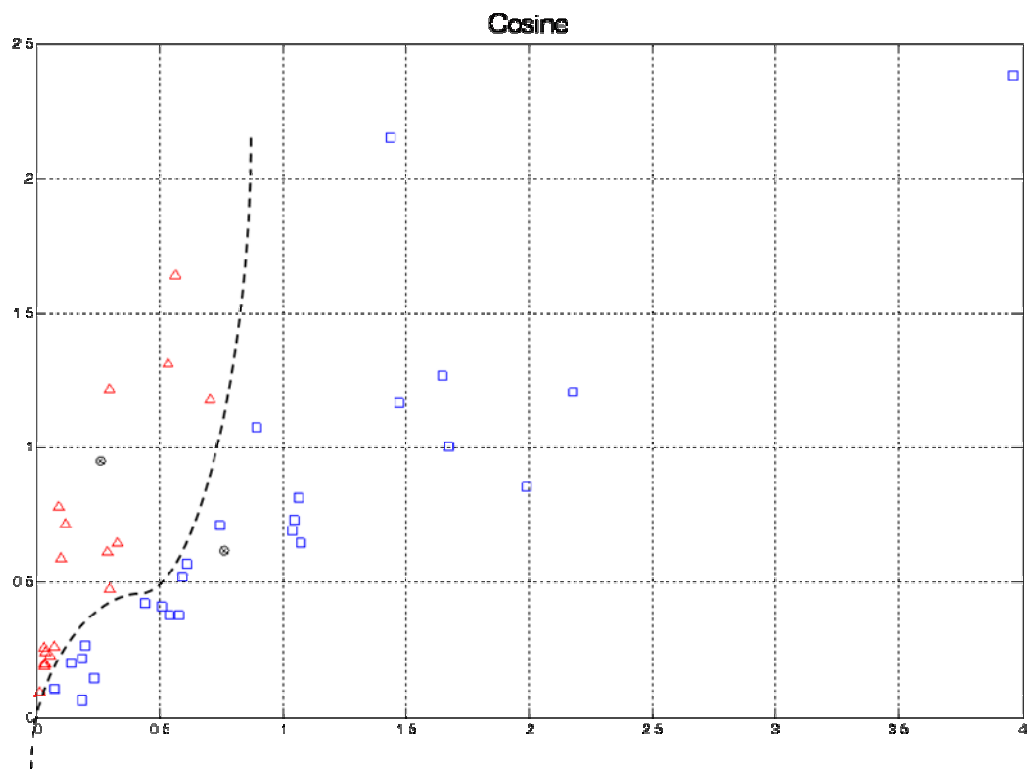
Σχήμα 5.26: Πρώτο επίπεδο ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με παράμετρο απόστασης cityblock.



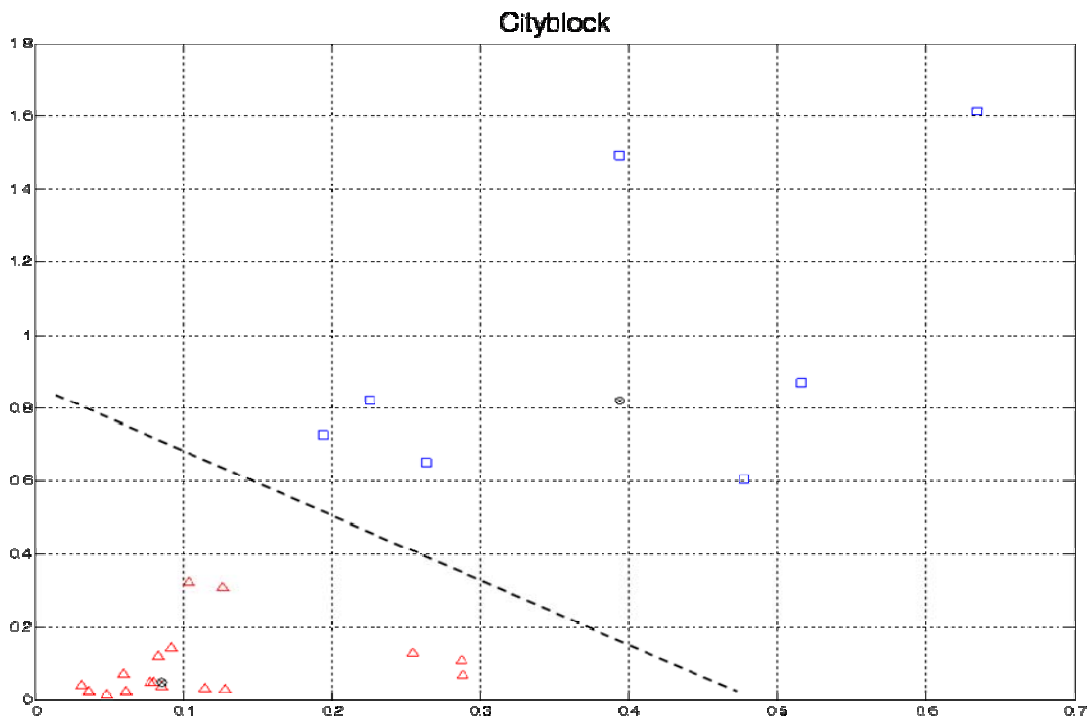
Σχήμα 5.27: Πρώτο επίπεδο ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με παράμετρο απόστασης euclidean.



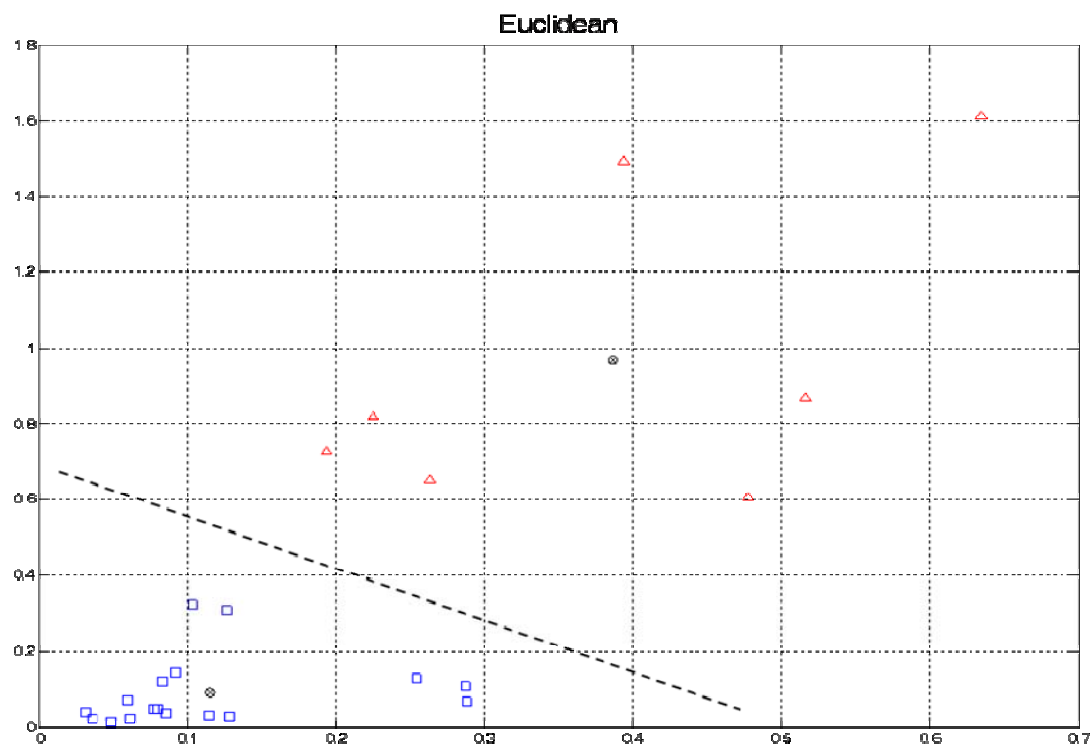
Σχήμα 5.28: Πρώτο επίπεδο ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με παράμετρο απόστασης correlation.



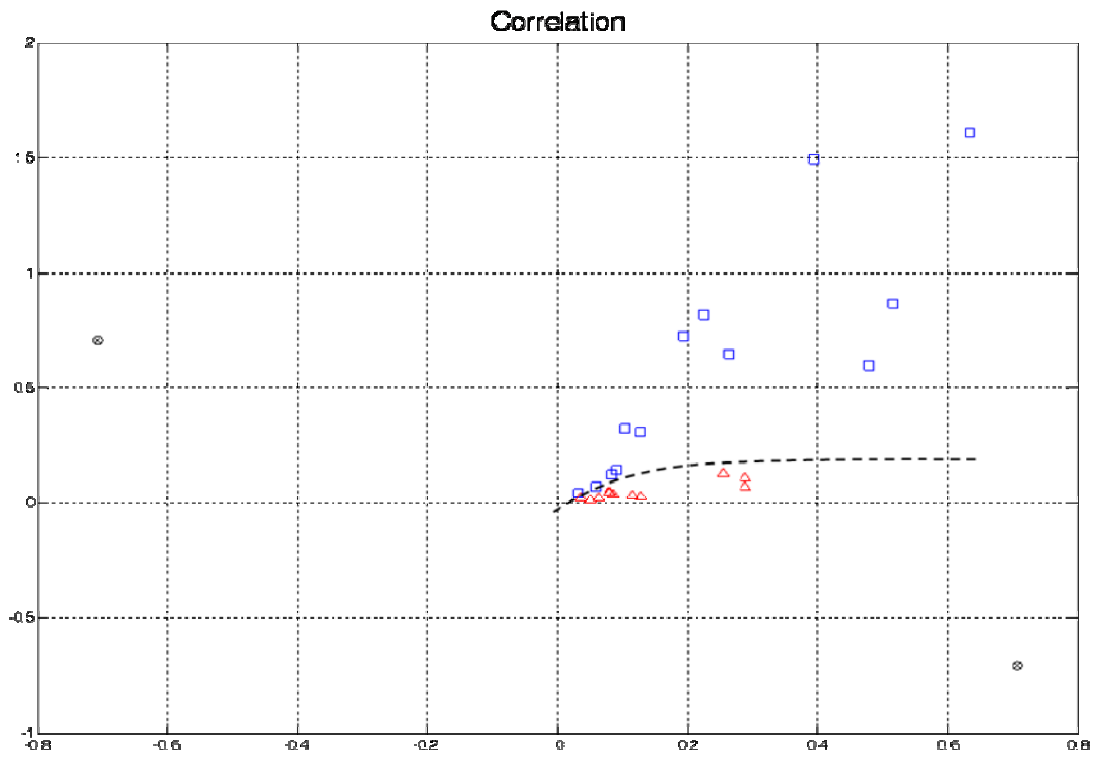
Σχήμα 5.29: Πρώτο επίπεδο ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με παράμετρο απόστασης cosine.



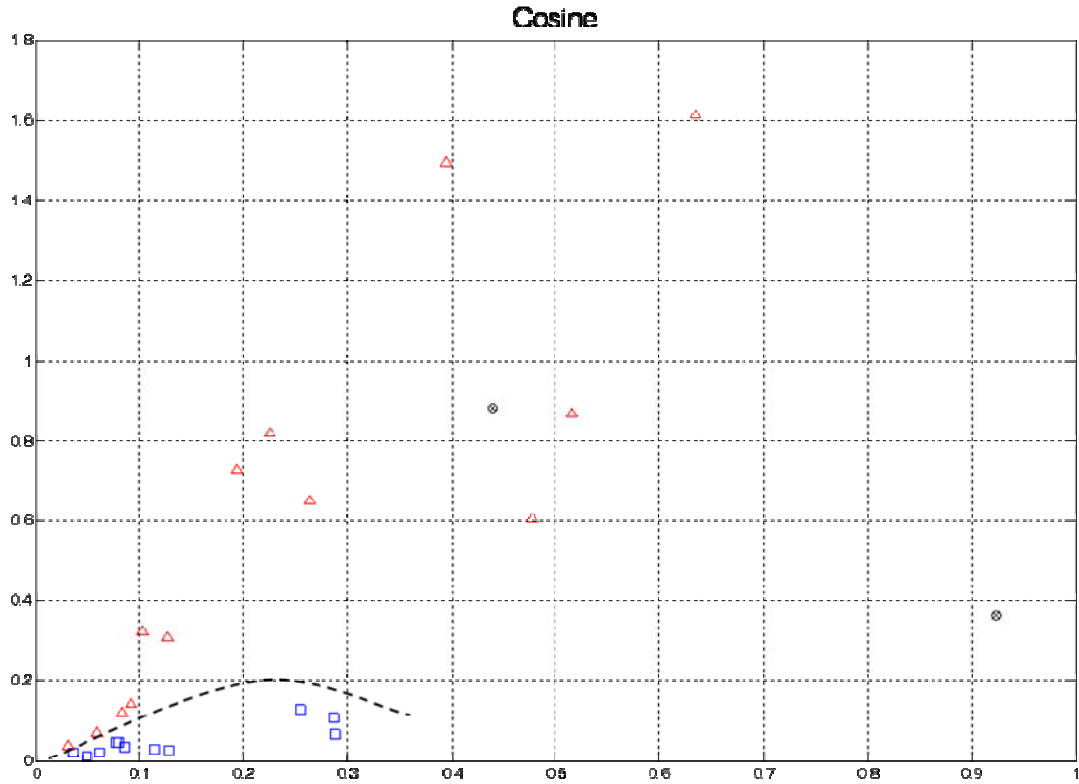
Σχήμα 5.30: Δεύτερο επίπεδο ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με παράμετρο απόστασης cityblock.



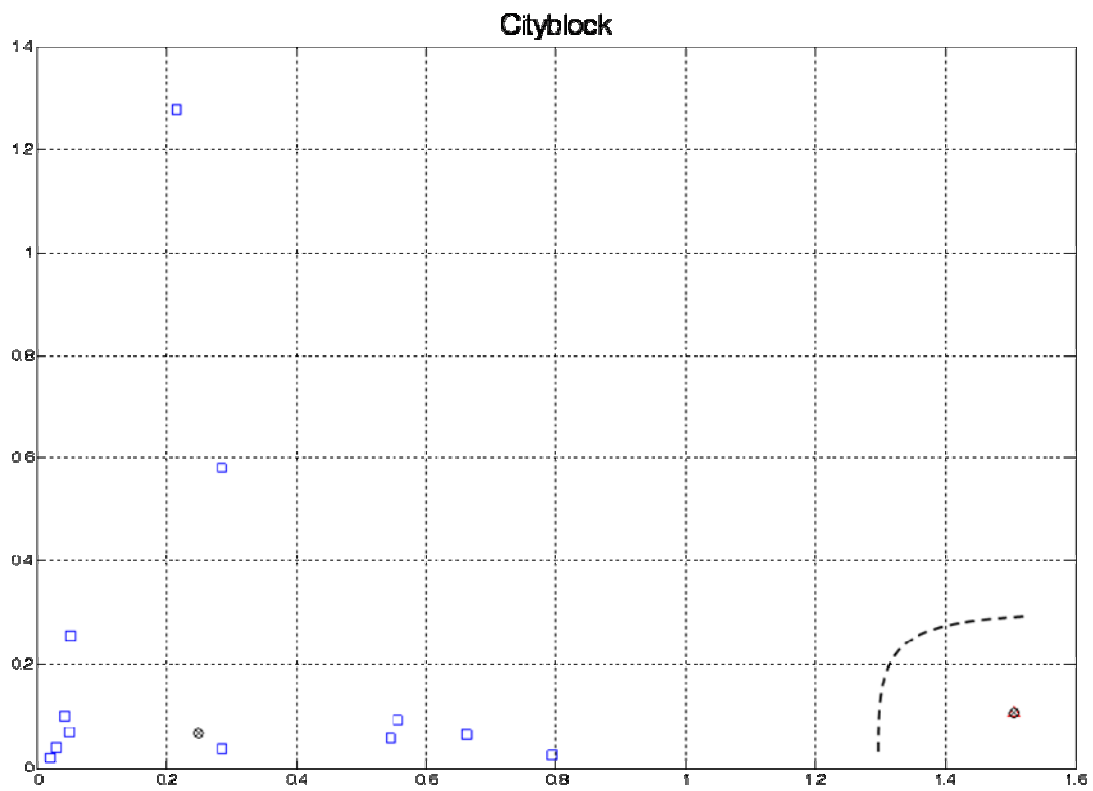
Σχήμα 5.31: Δεύτερο επίπεδο ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με παράμετρο απόστασης euclidean.



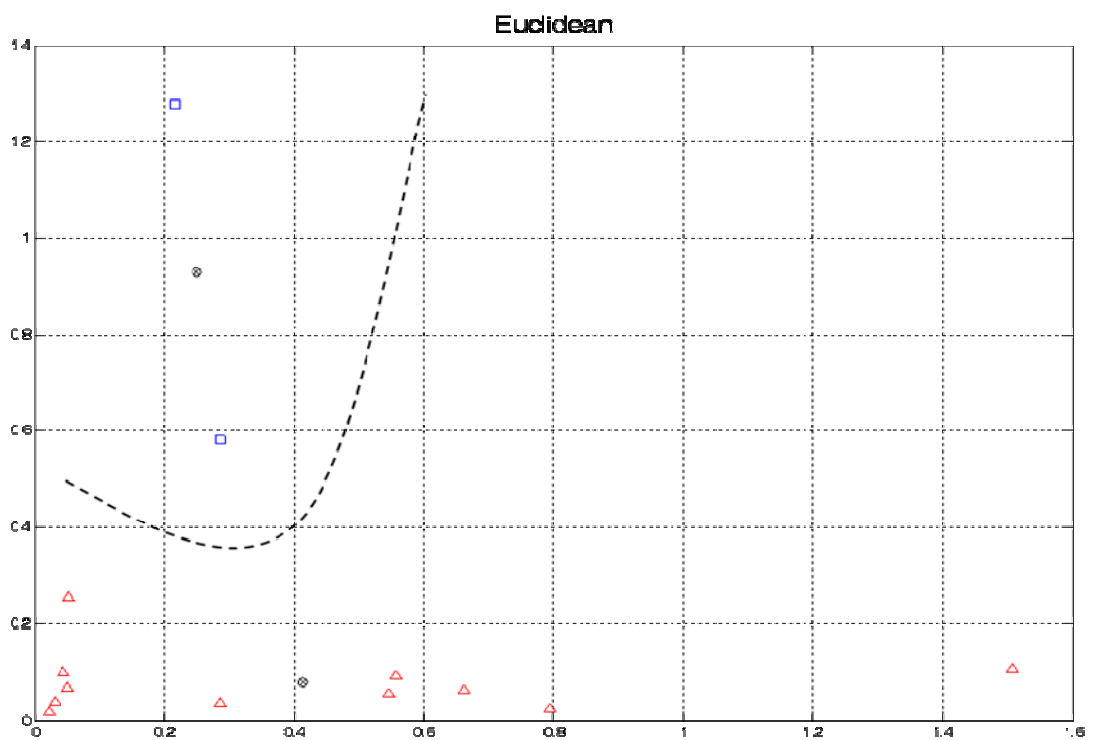
Σχήμα 5.32: Δεύτερο επίπεδο ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με παράμετρο απόστασης correlation.



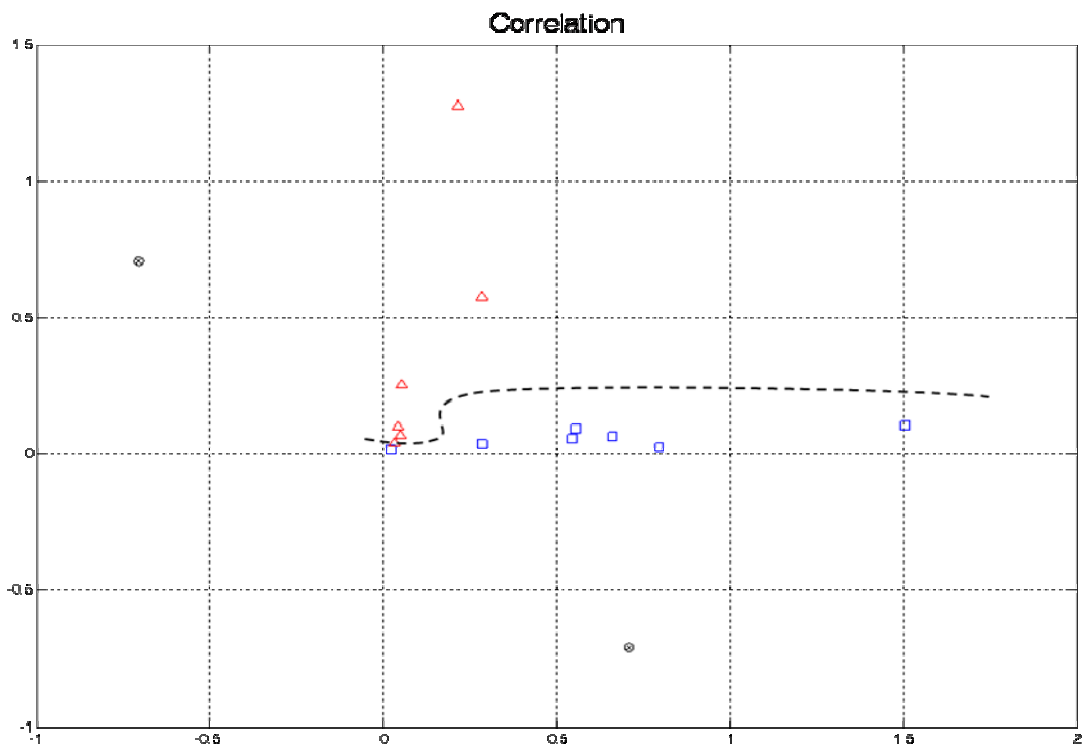
Σχήμα 5.33: Δεύτερο επίπεδο ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με παράμετρο απόστασης cosine.



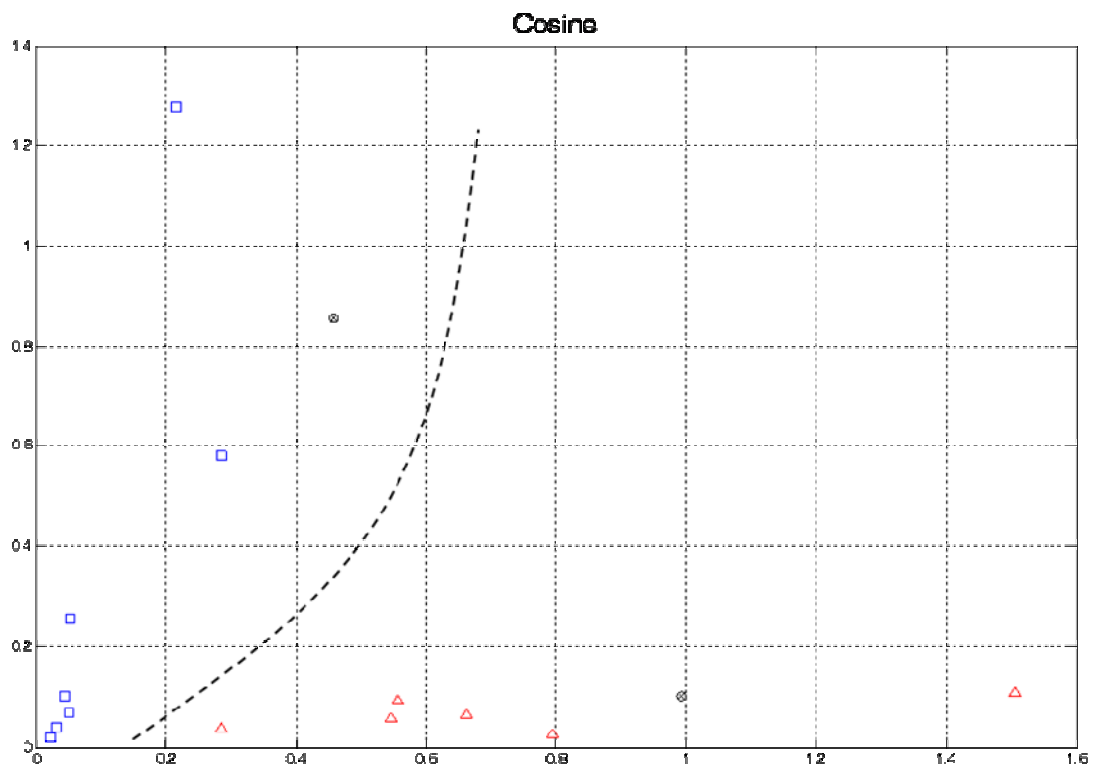
Σχήμα 5.34: Τρίτο επίπεδο ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με παράμετρο απόστασης cityblock.



Σχήμα 5.35: Τρίτο επίπεδο ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με παράμετρο απόστασης euclidean.



Σχήμα 5.36: Τρίτο επίπεδο ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με παράμετρο απόστασης correlation.



Σχήμα 5.37: Τρίτο επίπεδο ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με παράμετρο απόστασης cosine.

Πίνακας 5.6

Αποτελεσματικότητα (%)	Σταθερότητα (%)
48,84	6,67
81,4	86,67
41,86	6,67

Πίνακας 5.7

Αποτελεσματικότητα (%)	Σταθερότητα (%)
69,77	100

Πίνακας 5.8

Αποτελεσματικότητα (%)	Σταθερότητα (%)
41,86%	30
44,19%	60
39,53	10

Πίνακας 5.9

Αποτελεσματικότητα (%)	Σταθερότητα (%)
41,86	60
44,19	40

5.4. Άμεση Ταξινόμηση Βιομηχανικών Σημάτων

Στην περίπτωση της άμεσης ταξινόμησης των βιομηχανικών σημάτων ο αλγόριθμος ολοκληρώνεται σε 1 επίπεδο με την απευθείας εισαγωγή διαφορετικών στοιχείων εισόδου και για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης (Correlation, Cosine, Cityblock, και SqEuclidean). Στο σχήμα 5.38 παρουσιάζεται η οθόνη ελέγχου του αλγόριθμου που επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει τα δεδομένα, να ελέγξει τη διαδικασία και τα αποτελέσματα. Διακρίνονται οι 4 κλάσεις πιθανής βλάβης, οι οποίες αποτελούνται από έναν πίνακα που περιλαμβάνει ονομαστικά τα σήματα που ο αλγόριθμος τους έχει κατανήμει. Ο αλγόριθμος επιτρέπει την είσοδο 2 διαφορετικών ομάδων στοιχείων εισόδου. Στην πρώτη ομάδα (RAW) περιλαμβάνονται περιοχές ενέργειας που έχουν υπολογισθεί από το φάσμα των μετρούμενων σημάτων, ενώ στη δεύτερη ομάδα (SUM) περιλαμβάνονται περιοχές ενέργειας που έχουν υπολογισθεί από το φάσμα των μετρούμενων και των αποδιαμορφωμένων σημάτων. Η δεύτερη ομάδα καλύπτει την περίπτωση των διαμορφωμένων σημάτων (ένσφαιροι τριβείς, γρανάζια, κλπ) που έχουν ελάχιστη ανάπτυξη των χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης στην συχνοτική περιοχή του φάσματος που αφορά την αιτία της βλάβης. Επίσης, σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος δύναται να εκτελείται κάθε φορά είτε (α) με τυχαία αρχικά κέντρα είτε (β) με τυχαία προεπιλεγμένα αλλά σταθερά αρχικά κέντρα. Στα σχήματα 5.39 και 5.40 παρουσιάζεται ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος που πραγματοποιεί την ταξινόμηση των βιομηχανικών σημάτων. Επίσης, διακρίνονται τα προεπιλεγμένα σταθερά αρχικά κέντρα στο πλαίσιο 'MATLAB Script', όπως αυτά προκύπτουν μετά από την διαδικασία υπολογισμού ενεργειών. Η πρώτη τιμή αφορά την περιοχή ενέργειας X, η δεύτερη τιμή την περιοχή ενέργειας Y, η τρίτη την περιοχή ενέργειας Z και η τέταρτη τιμή την περιοχή ενέργειας V. Στον Πίνακα 5.14 με κίτρινο χρώμα, εμφανίζονται τα συγκεκριμένα επιλεγμένα κέντρα. Ο Πίνακας 5.14 περιλαμβάνει τις υπολογισμένες ενέργειες των περιοχών X, Y, Z και V όλων των βιομηχανικών σημάτων της πρώτης ομάδας RAW, ενώ ο Πίνακας 5.15 περιλαμβάνει τις αντίστοιχες υπολογισμένες ενέργειες P, Q, R και J όλων των βιομηχανικών σημάτων της δεύτερης ομάδας SUM.

Ο αλγόριθμος διαχωρίζει απευθείας τα δυναμικά σήματα σε 4 κλάσεις: (A) φθαρμένοι ένσφαιροι, (B) φθαρμένα γρανάζια, (C) αεροδυναμικό πρόβλημα και (D) ηλεκτρικό πρόβλημα. Οι αποκρίσεις των περιπτώσεων βλαβών που εξετάζονται είναι διαμορφωμένες κατά πλάτος. Τα μετρούμενα σήματα φιλτράρονται μέσω ενός υπερατού (highpass) φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_n=1000$ Hz και έπειτα αποδιαμορφώνονται. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος υπολογίζει την ενέργεια στις ακόλουθες περιοχές του φάσματος των αποδιαμορφωμένων σημάτων, όπως φαίνεται και στα σχήματα 5.45 και 5.46, αντίστοιχα: [BPFO ENV] το άθροισμα των περιοχών [BPFO-10 Hz έως BPFO+10 Hz]+ [2BPFO-10 Hz έως 2BPFO+10 Hz]+ [3BPFO-10 Hz έως 3BPFO+10 Hz], και [f_{mesh} ENV] η φασματική περιοχή [$f_{\text{mesh}}-10$ Hz έως $f_{\text{mesh}}+10$ Hz].

Έτσι, στις περιπτώσεις φθαρμένων ένσφαιρων τριβέων και φθαρμένων γραναζιών οι περιοχές ενέργειας [BPFO ENV] και [f_{mesh} ENV] παρουσιάζουν υψηλές τιμές, αντίστοιχα. Αντίθετα, στις υπόλοιπες περιπτώσεις βλαβών οι παραπάνω ενέργειες εμφανίζουν ελάχιστη τιμή. Έτσι, το άθροισμα αυτών των περιοχών ενέργειας ενισχύει τις σχετικές περιοχές που αφορούν φθαρμένους ένσφαιρους τριβείς και γρανάζια και παρουσιάζουν ελάχιστη ανάπτυξη των χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης στην συχνοτική περιοχή του φάσματος των μετρούμενων σημάτων.

Στο σχήμα 5.41 εμφανίζεται ο πηγαίος κώδικας που υπολογίζει στα δυναμικά σήματα την περιοχή ενέργειας που αφορά ηλεκτρικό πρόβλημα στον κινητήρα. Σύμφωνα με τον κώδικα υπολογίζεται στο φάσμα των μετρούμενων σημάτων η ενέργεια περί τη χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης RBPF και των επόμενων 2 αρμονικών της. Το άθροισμα αυτών των ενεργειών αποτελεί το στοιχείο εισόδου RBPF RAW στον αλγόριθμο άμεσης ταξινόμησης.

Ομοίως, στο σχήμα 5.42 εμφανίζεται ο πηγαίος κώδικας που υπολογίζει στα βιομηχανικά σήματα την περιοχή ενέργειας που αφορά αεροδυναμικό πρόβλημα στην περωτή. Σύμφωνα με τον κώδικα υπολογίζεται στο φάσμα των μετρούμενων σημάτων η ενέργεια περί τη χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης BPF και των επόμενων 2 αρμονικών της. Το άθροισμα αυτών των ενεργειών αποτελεί το στοιχείο εισόδου BPF RAW στον αλγόριθμο άμεσης ταξινόμησης.

Έπειτα, στο σχήμα 5.43 εμφανίζεται ο πηγαίος κώδικας που υπολογίζει στα βιομηχανικά σήματα την περιοχή ενέργειας που αφορά φθαρμένα γρανάζια. Σύμφωνα με

τον κώδικα υπολογίζεται στο φάσμα των μετρούμενων σημάτων η ενέργεια περί τη χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης f_{mesh} και των επόμενων 2 αρμονικών της. Το άθροισμα αυτών των ενεργειών αποτελεί το στοιχείο εισόδου f_{mesh} RAW στον αλγόριθμο άμεσης ταξινόμησης.

Τέλος, στο σχήμα 5.44 εμφανίζεται ο πηγαίος κώδικας που υπολογίζει στα βιομηχανικά σήματα την περιοχή ενέργειας που αφορά φθαρμένους ένσφαιρους τριβείς. Σύμφωνα με τον κώδικα υπολογίζεται στο φάσμα των μετρούμενων σημάτων η ενέργεια περί τη χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης BPFO και των επόμενων 2 αρμονικών της. Το άθροισμα αυτών των ενεργειών αποτελεί το στοιχείο εισόδου BPFO RAW στον αλγόριθμο άμεσης ταξινόμησης.

Όταν ο αλγόριθμος εκτελεί ταξινόμηση κατά RAW εισάγονται οι ενέργειες: BPF RAW, BPFO RAW, RBPF RAW και f_{mesh} RAW, οι οποίες αντιστοιχούν στα X, Y, Z και V του Πίνακα 5.14.

Ομοίως, όταν ο αλγόριθμος εκτελεί ταξινόμηση κατά SUM εισάγονται οι ενέργειες: BPF RAW, SUM(BPFO)=BPFO RAW + BPFO ENV, RBPF RAW και SUM(f_{mesh})= f_{mesh} RAW + f_{mesh} ENV, οι οποίες αντιστοιχούν στα P, Q, R και J του Πίνακα 5.15.

Επομένως, εάν η ενέργεια της περιοχής BPFO RAW ή SUM(BPFO) είναι μεγαλύτερη, τα σήματα ταξινομούνται ως απόκριση φθαρμένων ένσφαιρων τριβέων. Αναλόγως, εάν η ενέργεια της περιοχής RBPF RAW είναι μεγαλύτερη, τα σήματα κατατάσσονται ως απόκριση κινητήρα με ηλεκτρικό πρόβλημα. Έπειτα, όταν η ενέργεια της περιοχής BPF RAW είναι μεγαλύτερη, τα σήματα κατατάσσονται ως απόκριση πετρωτής με αεροδυναμικό πρόβλημα. Τέλος, εάν η ενέργεια της περιοχής SUM(f_{mesh}) ή f_{mesh} RAW είναι μεγαλύτερη, τα σήματα κατατάσσονται ως απόκριση φθαρμένων γραναζιών.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος άμεσης ταξινόμησης ομάδων εκτελείται για κάθε παράμετρο εκτίμησης απόστασης (Correlation, Cosine, Cityblock, και SqEuclidean) και ελέγχεται για την αποτελεσματικότητα και την σταθερότητά του. Αρχικά, επιλέγεται η παράμετρο εκτίμησης απόστασης Correlation. Τα αποτελέσματα σε κάθε επίπεδο ταξινόμησης εμφανίζονται στο σχεδιάγραμμα 5.49, ενώ η αποτελεσματικότητα και η σταθερότητα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.10 το μέγιστο ποσοστό επιτυχίας του αλγόριθμου προσεγγίζει το 100 % με ποσοστό επαναληψιμότητας ίσο προς 70 %, στην περίπτωση ταξινόμησης κατά SUM. Σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος δεν εμφανίζει σταθερότητα διότι κάθε φορά που εκτελείται επιλέγονται τυχαία αρχικά κέντρα, με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται η διαδικασία. Το αποτέλεσμα σταθεροποιείται 100 % με την επιλογή εκτέλεσης του αλγορίθμου κατά RAW, όπου η αποτελεσματικότητά του προσεγγίζει το 71 %.

Επίσης, σύμφωνα με το σχεδιάγραμμα 5.49, όλες οι βλάβες οι οποίες σχετίζονται με βλάβη εξωτερικού δακτυλίου ένσφαιρου τριβέα ταξινομούνται ορθά. Επίσης, σωστά κατατάσσονται οι 11 περιπτώσεις βλάβης που σχετίζονται με φθόρα γραναζιών, οι 11 βλάβες που σχετίζονται με πρόβλημα ροής ρευστού και οι 9 βλάβες που αφορούν ηλεκτρικό πρόβλημα στον κινητήρα.

Έπειτα, επιλέγεται η παράμετρο εκτίμησης απόστασης Cosine. Τα αποτελέσματα σε κάθε επίπεδο ταξινόμησης εμφανίζονται στο σχεδιάγραμμα 5.50, ενώ η αποτελεσματικότητα και η σταθερότητα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.11.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.11 το μέγιστο ποσοστό επιτυχίας του αλγόριθμου προσεγγίζει το 100 % με ποσοστό επαναληψιμότητας ίσο προς 72 %, στην περίπτωση ταξινόμησης κατά SUM. Σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος δεν εμφανίζει σταθερότητα διότι κάθε φορά που εκτελείται επιλέγονται τυχαία αρχικά κέντρα, με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται η διαδικασία. Το αποτέλεσμα σταθεροποιείται 100 % με την επιλογή εκτέλεσης του αλγορίθμου κατά RAW, όπου η αποτελεσματικότητά του προσεγγίζει το 88 %.

Έτσι, σύμφωνα με το σχεδιάγραμμα 5.50, όλες οι βλάβες στην παραπάνω περίπτωση ταξινομούνται ορθά.

Στη συνέχεια, επιλέγεται η παράμετρο εκτίμησης απόστασης Cityblock. Τα αποτελέσματα σε κάθε επίπεδο ταξινόμησης εμφανίζονται στο σχεδιάγραμμα 5.47, ενώ η αποτελεσματικότητα και η σταθερότητα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.12.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.12 το μέγιστο ποσοστό επιτυχίας του αλγόριθμου προσεγγίζει το 68 % με ποσοστό επαναληψιμότητας ίσο προς 40 %, στην περίπτωση ταξινόμησης κατά SUM. Σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος δεν εμφανίζει σταθερότητα διότι κάθε φορά που εκτελείται επιλέγονται τυχαία αρχικά κέντρα, με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται η διαδικασία. Το αποτέλεσμα αποκτά μεγαλύτερη σταθερότητα σταθεροποιείται που αγγίζει το 80 % με την επιλογή εκτέλεσης του αλγορίθμου κατά RAW, όπου η αποτελεσματικότητά του παραμένει σχεδόν σταθερή και ίση προς 65 %.

Έτσι, σύμφωνα με το σχεδιάγραμμα 5.47, κατατάσσονται ορθά οι 11 βλάβες που οφείλονται σε φθορά γραναζιού, οι 9 βλάβες που σχετίζονται με το ηλεκτρικό πρόβλημα στο κινητήρα και οι 7 από τις 11 που σχετίζονται με πρόβλημα ροής ρευστού. Ωστόσο ταξινομούνται λανθασμένα 3 βλάβες (6, 7, 9) που σχετίζονται με πρόβλημα ροής ρευστού και 11 που σχετίζονται με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο του ένσφαιρου τριβέα (πλην της 9).

Πίνακας 5.10

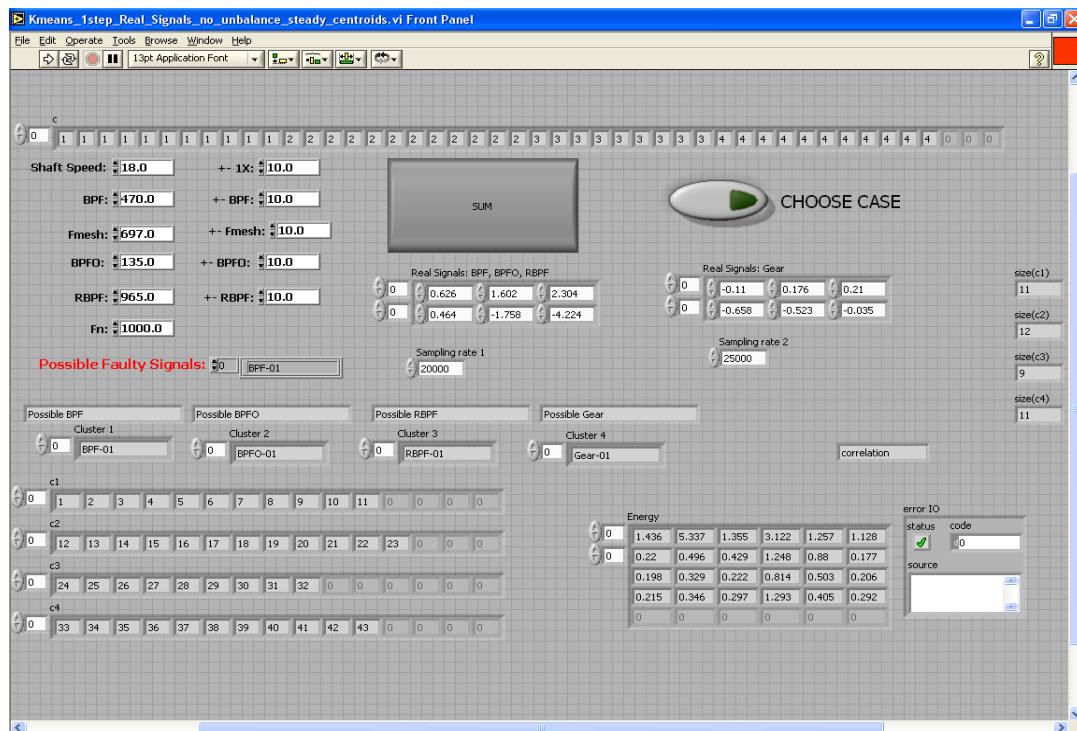
	Μετρούμενο	Μετρούμενο + Αποδιαμορφωμένο	
	Σήμα	Σήμα	
Αποτελεσματικότητα (%)	71	100	71
Σταθερότητα (%)	100	70	30

Πίνακας 5.11

	Μετρούμενο	Μετρούμενο + Αποδιαμορφωμένο	
	Σήμα	Σήμα	
Αποτελεσματικότητα (%)	88	100	70
Σταθερότητα (%)	100	72	30

Τέλος, επιλέγεται η παράμετρο εκτίμησης απόστασης Euclidean. Τα αποτελέσματα σε κάθε επίπεδο ταξινόμησης εμφανίζονται στο σχεδιάγραμμα 5.48, ενώ η αποτελεσματικότητα και η σταθερότητα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.13.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.12 το μέγιστο ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου προσεγγίζει το 57 % με ποσοστό επαναληψιμότητας ίσο προς 80 %, στην περίπτωση ταξινόμησης κατά SUM. Σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος δεν εμφανίζει σταθερότητα διότι κάθε φορά που εκτελείται επιλέγονται τυχαία αρχικά κέντρα, με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται η διαδικασία. Το αποτέλεσμα χειροτερεύει με την επιλογή εκτέλεσης του αλγορίθμου κατά RAW, όπου η σταθερότητα και η αποτελεσματικότητά φθίνουν στο 50 %.



Σχήμα 5.38: Οθόνη ελέγχου προγράμματος αλγορίθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων.

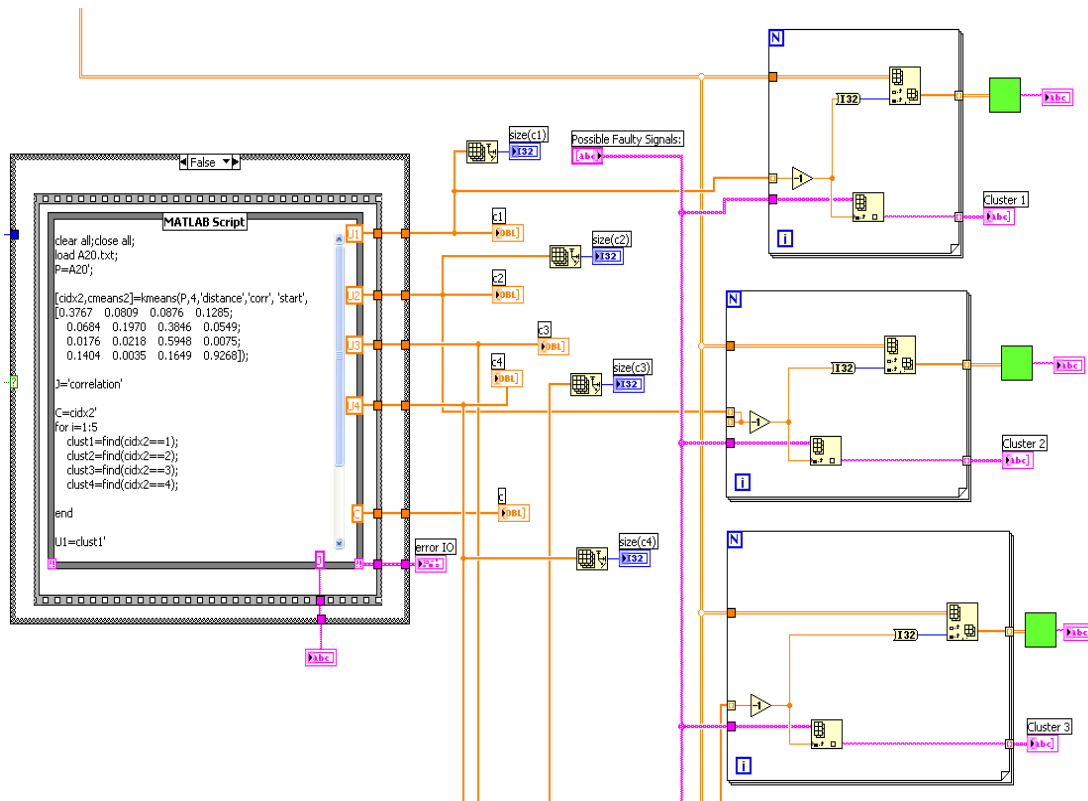
Πίνακας 5.12

	Μετρούμενο Σήμα		Μετρούμενο + Αποδιαμορφωμένο Σήμα		
	Αποτελεσματικότητα (%)	65	45	68	40
Σταθερότητα (%)	80	20	40	40	20

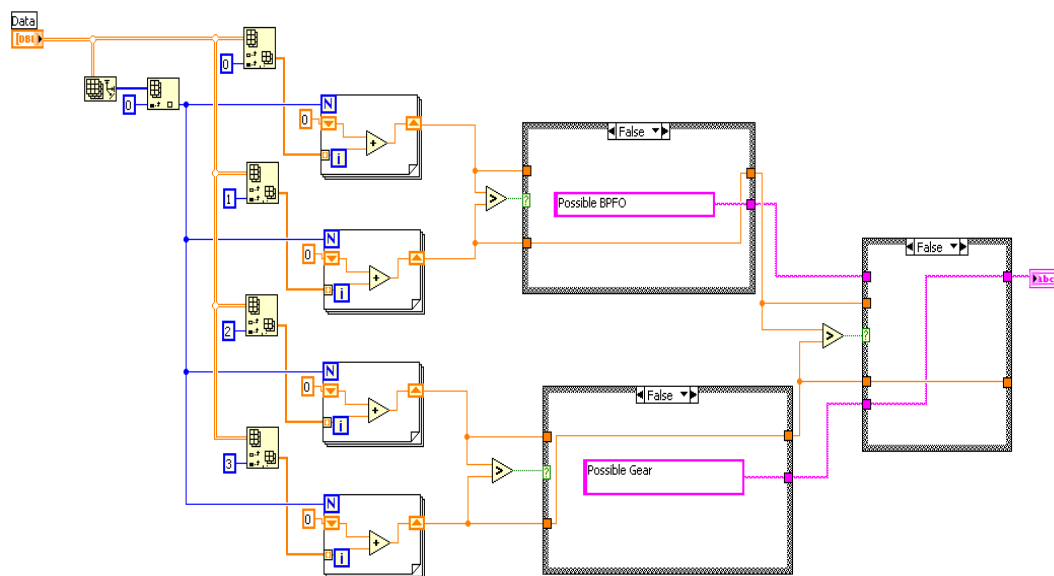
Πίνακας 5.13

	Μετρούμενο Σήμα		Μετρούμενο + Αποδιαμορφωμένο Σήμα	
	Αποτελεσματικότητα (%)	50	40	57
Σταθερότητα (%)	50	50	80	20

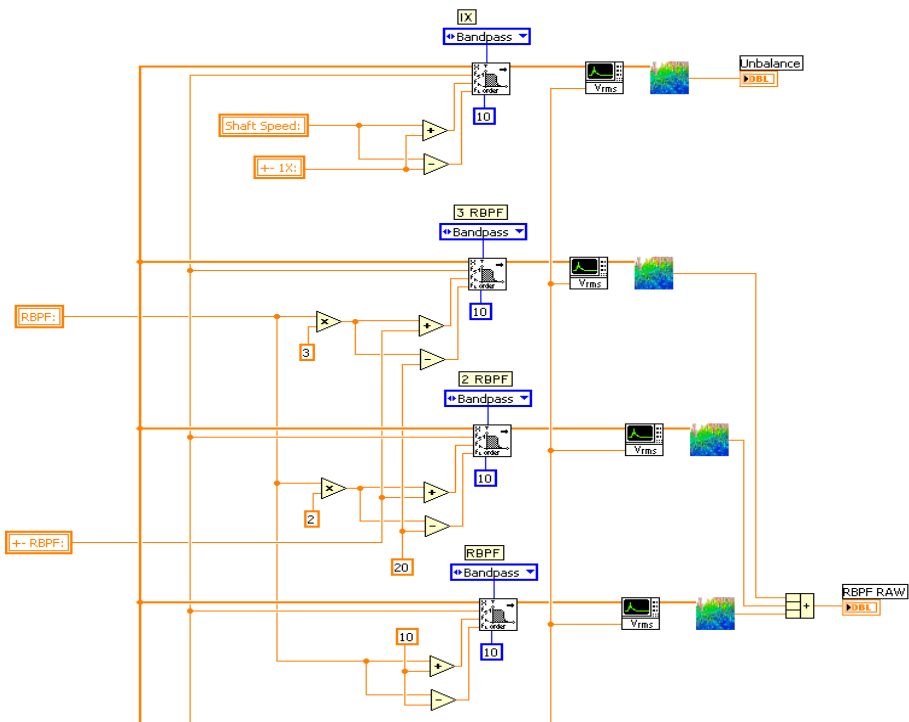
Κεφάλαιο 5^ο – Ταξινόμηση Βιομηχανικών Σημάτων



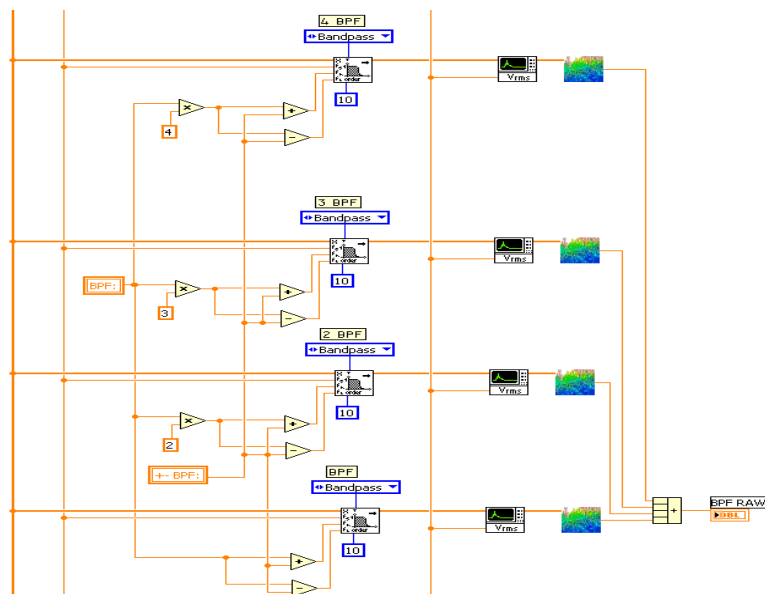
Σχήμα 5.39: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποκρίσεων βιομηχανικών σημάτων.



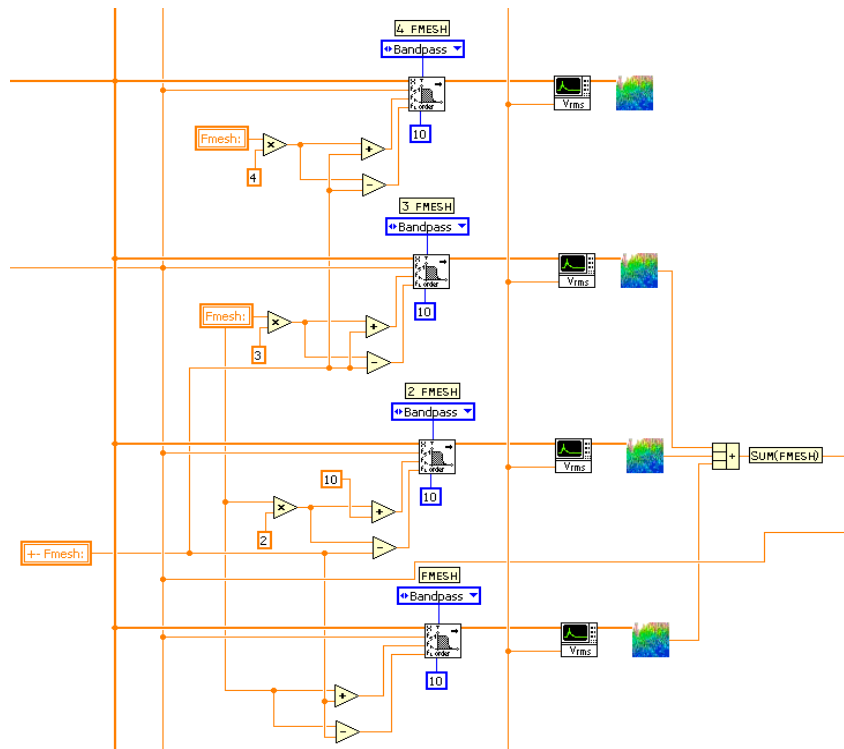
Σχήμα 5.40: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων.



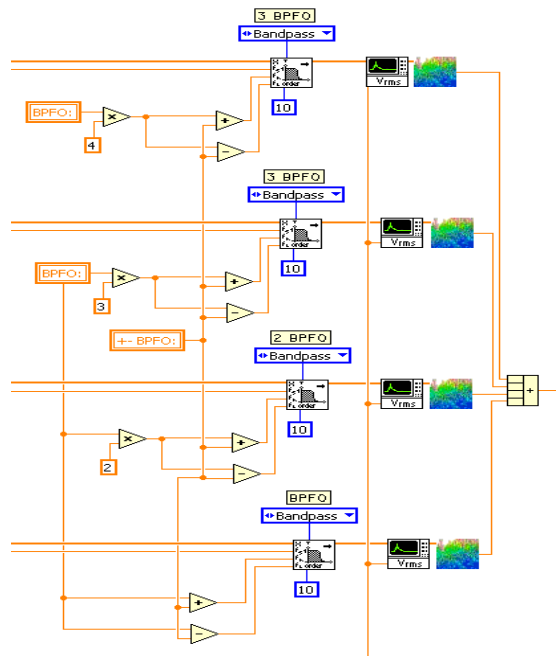
Σχήμα 5.41: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποκρίσεων κινητήρα με ηλεκτρικό πρόβλημα.



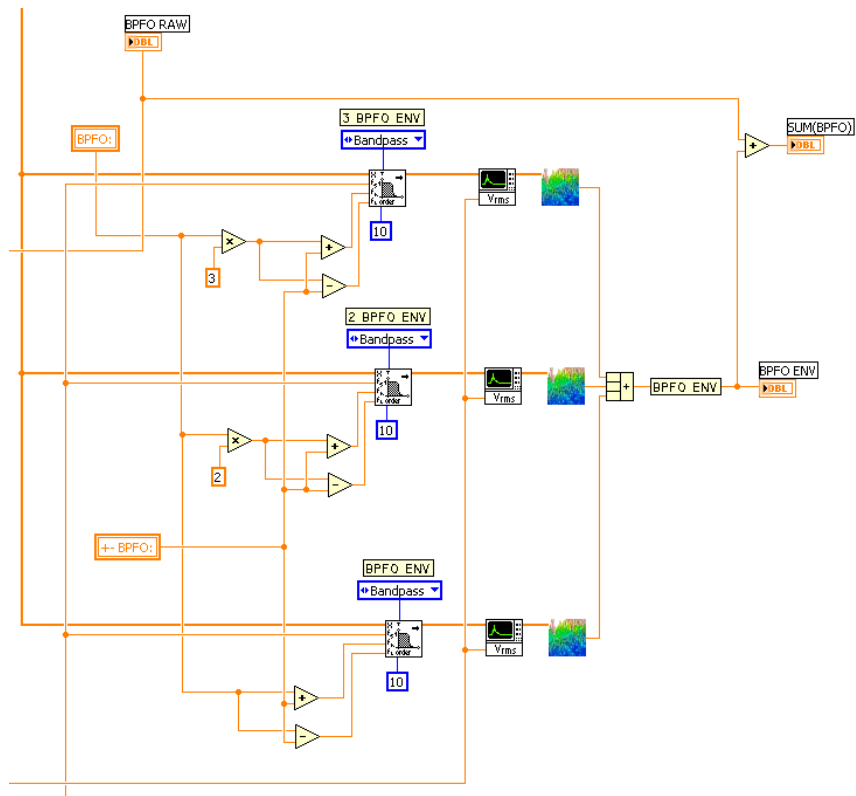
Σχήμα 5.42: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποκρίσεων πτερωτής με αεροδυναμικό πρόβλημα.



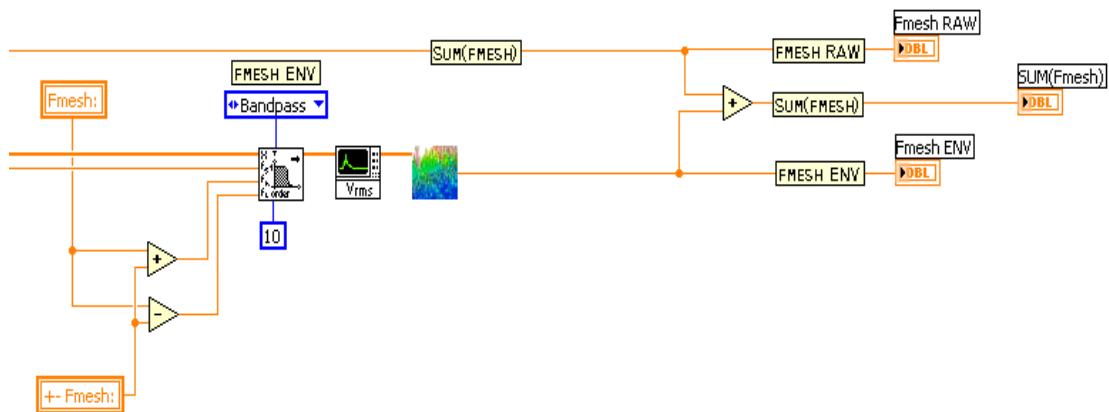
Σχήμα 5.43: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποκρίσεων γραναζιών.



Σχήμα 5.44: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποκρίσεων έσφαιρων τριβέων.



Σχήμα 5.45: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποδιαμορφωμένου σήματος ένσφαιρων τριβέων.



Σχήμα 5.46: Πηγαίος κώδικας προγράμματος αλγόριθμου άμεσης ταξινόμησης δυναμικών σημάτων: υπολογισμός περιοχών ενέργειας αποδιαμορφωμένου σήματος γραναζιών.

Πίνακας 5.14

X (mm/sec rms)	Y (mm/sec rms)	Z (mm/sec rms)	V (mm/sec rms)
1.4356	0.0979	0.198	0.187
5.3366	0.0794	0.3286	0.3127
1.355	0.1178	0.2218	0.2678
3.1223	0.3709	0.8138	1.0669
1.2572	0.1699	0.5029	0.3141
1.1283	0.0717	0.2057	0.244
0.3767	0.0809	0.0876	0.1285
2.0205	0.1163	0.3435	0.2935
0.6776	0.0912	0.1748	0.1299
3.0247	0.1812	0.8908	0.4066
0.3423	0.0616	0.082	0.1052
0.2741	0.1153	0.9664	0.2544
0.476	0.353	0.5382	0.33
0.0738	0.1647	0.2971	0.0779
0.1425	0.128	0.2631	0.2079
0.2826	0.0888	1.158	0.4182
0.3231	0.2099	0.4997	0.4667
0.6356	0.3115	1.0472	0.572
0.0684	0.197	0.3846	0.0549
0.098	0.0671	0.184	0.1204
0.2286	0.0497	0.3012	0.2229
0.159	0.0766	0.2585	0.3018
0.3232	0.1242	0.9222	0.308
0.1227	0.0824	1.7019	0.0725
0.1373	0.1657	2.7537	0.1026
0.1096	0.123	4.1685	0.0943
0.2677	0.4419	5.1378	0.2231
0.0176	0.0218	0.5948	0.0075
0.1716	0.0539	2.2385	0.0536
0.0425	0.0914	1.4596	0.03
0.2687	0.1761	2.389	0.16
0.0984	0.0756	1.5292	0.0849
0.0341	0.0008	0.0474	0.2537
0.046	0.0012	0.0543	0.285
0.044	0.0011	0.0498	0.2958
0.0306	0.0009	0.0427	0.3044
0.1404	0.0035	0.1649	0.9268
0.1409	0.0026	0.1604	0.7886
0.0317	0.0008	0.0457	0.2651

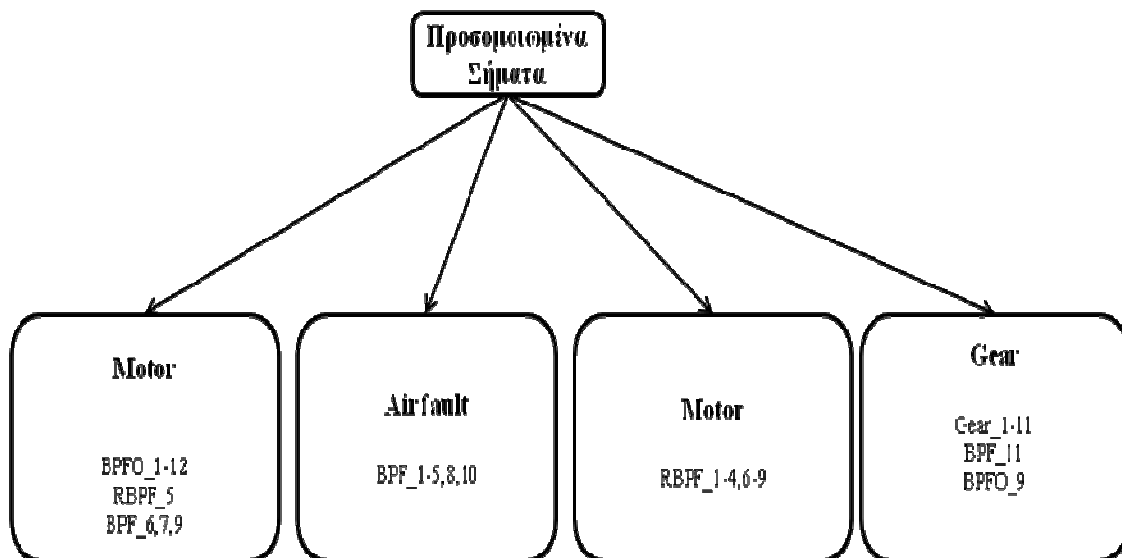
0.015	0.0004	0.0202	0.1212
0.1455	0.0045	0.1381	1.082
0.0181	0.0013	0.0241	0.2635
0.018	0.0015	0.0183	0.2297

Πίνακας 5.15

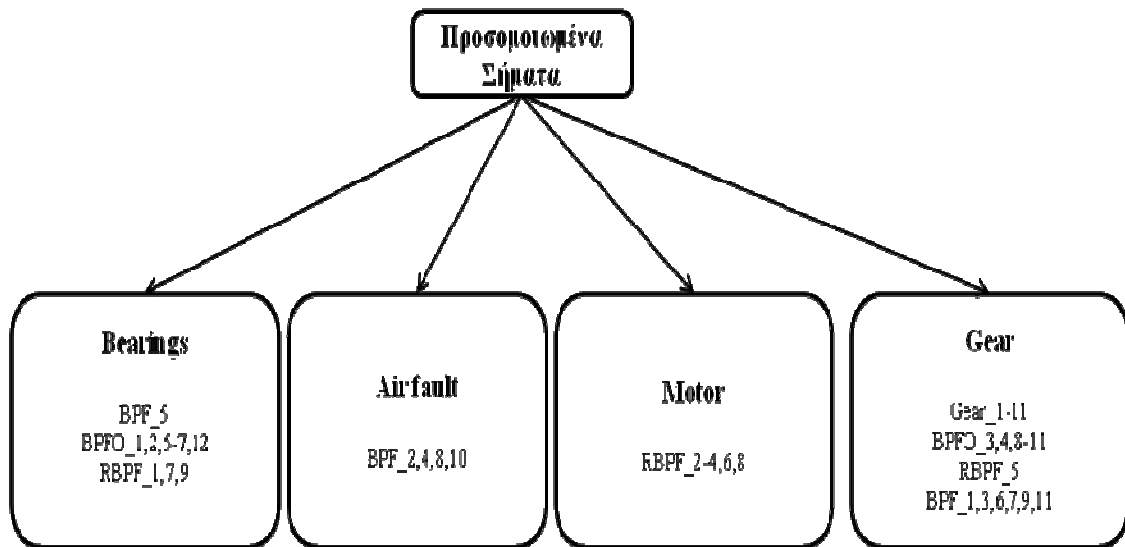
P (mm/sec rms)	Q (mm/sec rms)	R (mm/sec rms)	J (mm/sec rms)
1.4356	0.22	0.198	0.2153
5.3366	0.4957	0.3286	0.3462
1.355	0.4292	0.2218	0.2975
3.1223	1.2484	0.8138	1.2929
1.2572	0.8802	0.5029	0.4053
1.1283	0.1769	0.2057	0.2916
0.3767	0.1402	0.0876	0.1542
2.0205	0.3071	0.3435	0.33
0.6776	0.2399	0.1748	0.1688
3.0247	0.8237	0.8908	0.531
0.3423	0.2007	0.082	0.1273
0.2741	1.3053	0.9664	0.3935
0.476	0.8312	0.5382	0.4273
0.0738	0.5252	0.2971	0.1528
0.1425	0.9186	0.2631	0.3242
0.2826	1.6302	1.158	0.6472
0.3231	1.3508	0.4997	0.555
0.6356	3.2344	1.0472	1.0496
0.0684	0.6852	0.3846	0.1248
0.098	0.8145	0.184	0.2326
0.2286	0.4391	0.3012	0.3262
0.159	0.4512	0.2585	0.3704
0.3232	1.352	0.9222	0.5335
0.1227	0.3687	1.7019	0.1033
0.1373	0.3366	2.7537	0.1431
0.1096	0.3194	4.1685	0.1256
0.2677	0.7696	5.1378	0.3167
0.0176	0.0685	0.5948	0.0129
0.1716	0.2631	2.2385	0.0848
0.0425	0.1691	1.4596	0.055
0.2687	0.6076	2.389	0.2537
0.0984	0.2461	1.5292	0.1567
0.0341	0.0196	0.0474	0.4216

Κεφάλαιο 5^ο – Ταξινόμηση Βιομηχανικών Σημάτων

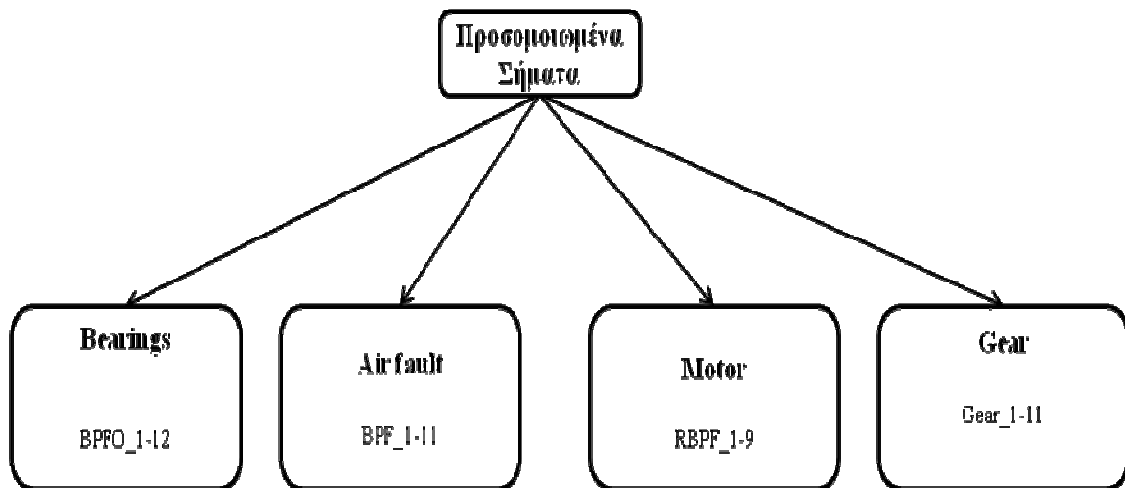
0.046	0.0403	0.0543	0.4896
0.044	0.0614	0.0498	0.5342
0.0306	0.0263	0.0427	0.5319
0.1404	0.0809	0.1649	1.5674
0.1409	0.0692	0.1604	1.305
0.0317	0.0237	0.0457	0.4365
0.015	0.011	0.0202	0.2047
0.1455	0.0819	0.1381	1.7987
0.0181	0.0306	0.0241	0.485
0.018	0.0312	0.0183	0.412



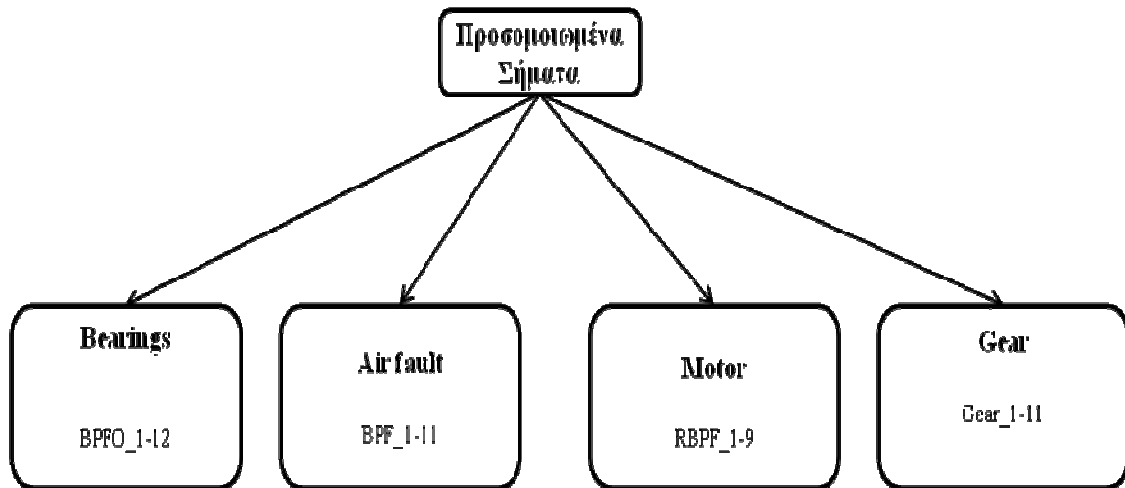
Σχήμα 5.47: Σχεδιάγραμμα άμεσης ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με cityblock.



Σχήμα 5.48: Σχεδιάγραμμα άμεσης ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με euclidean.



Σχήμα 5.49: Σχεδιάγραμμα άμεσης ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με correlation.



Σχήμα 5.50: Σχεδιάγραμμα άμεσης ταξινόμησης βιομηχανικών σημάτων με cosine.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M.R. Anderberg. Cluster analysis for Applications. Academic Press, New York, December 1973.
- [2] P.S. Bradley and U.M. Fayyad. Refining Initial Points for K-Means Clustering. In Proc. Of the 15th intl. Conf. on Machine Learning, pages 91-99, Madison, WI, July 1998. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [3] G. Hammerly and C. Eilkan. Alternatives to the k means algorithm that sind better clusterings. In Proc. Of the 11th Intl. Conf. on information and knowledge management, pages600-607, Mc Lean, Virginia, 2002. ACM Press.
- [4] A. K. Jain and R. C. Dubes. Algorithms for clustering data. Prentise Hall Advanced Reference Series. Prentice Hall, March 1988.
- [5] J. MacQueen. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In Proc. Of the 5th Berkley Symp. on Mathematical Statistics and Probability, Pages 281-297. University of California press, 1967.
- [6] D.Pelleg and A. W. Moore. X-means: Extending K-means with efficient Estimation of the Number of Clusters. In Proc. Of the 17th Intl. Conf. on Machine Learning, pages 727-734. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 2000
- [7] S. M. Savaressi and D. Boley. A comparative analysis on the bisecting K means and the PDDP clustering algorithms. Intelligent Data Analysis, 8(4) : 345-362, 2004
- [8] SKF, 'Bearing failures and their cases', Product Information 401.
- [9] McFadden P.D. and Smith J. D., 'Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing', Journal of Sound and Vibration, 1984, Vol.96, No 1, pp 69-82.
- [10] McFadden P.D. and Smith J. D., 'The vibration produced by multiple point defects in a rolling element bearing', Journal of sounds and vibrations, 1985, Vol. 98, No2, pp 263-273

- [11] Pachaud C., Salvetat R. and Fray C., 'Crestfactor and kurtosis contributions to identify defects inducing periodical impulsive forces' , Mechanical Systems and signal processing, 1997, Vol. 11, No6, pp 903-916.