



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Τομέας Τεχνολογίας Πληροφορικής & Υπολογιστών

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Επίβλεψη υγείας περιστρεφόμενων μερών με επιταχυνσιόμετρο

Ρούσσος Αντώνης

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Χριστοφόρου**

Αθήνα, 2021





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Τομέας Τεχνολογίας Πληροφορικής & Υπολογιστών

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Επίβλεψη υγείας περιστρεφόμενων μερών με επιταχυνσιόμετρο

Ρούσσος Αντώνης

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Χριστοφόρου**

**Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21η Απριλίου 2021.**

.....  
Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Γκόνος

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Παναγιώτης Τσαραμπάρης

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2021

.....  
Ρούσσος Αντώνης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε. Μ. Π.

Copyright © Ρούσσος Αντώνης, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η χρήση κινητήρων και περιστρεφόμενων μερών παρουσιάζεται διαρκώς αυξανόμενη στο πλαίσιο της βιομηχανίας. Για αυτό η σημαντικότητα των κινητήρων, αλλά και οι σοβαρές επιπτώσεις από την κακή λειτουργία τους δημιουργούν την ανάγκη για τον συνεχή έλεγχο της "υγείας" τους. Η ικανότητα πρόβλεψης μηχανικών βλαβών σε αρχικά στάδια είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση του κόστους συντήρησης, του χρόνου διακοπής λειτουργίας αλλά και των κινδύνων ασφαλείας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται αναφορά στην επίβλεψη υγείας περιστρεφόμενων μερών με επιταχυνσιόμετρο μέσα από τις δονήσεις που παράγονται από την περιστροφή. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα που συλλέγονται από ένα επιταχυνσιόμετρο τοποθετημένο πάνω σε ένα περιστρεφόμενο ανεμιστήρα σε σύνδεση με ένα Arduino το οποίο με χρήση αλγόριθμου θα επεξεργάζεται τα δεδομένα από τον αισθητήρα και θα ελέγχει για τη σωστή λειτουργία του κινητήρα και των υπόλοιπων περιστρεφόμενων μερών.

## Λέξεις κλειδιά

Αισθητήρας, Επιταχυνσιόμετρο, Μικροελεγκτής, Κινητήρας, Κινούμενο μέρος

# **Abstract**

In recent years, the use of motors and rotating parts has been increasing in the industry. That is why the importance of the engines, but also the serious effects of their poor operation create the need for continuous control of their "Health". The ability to forecast motor mechanical faults at incipient stages is vital to reduce maintenance costs, operation downtime and safety hazards. In the present diploma thesis we will refer to the monitoring of the health of rotating parts with accelerometer through the vibrations produced by the rotation. For the purposes of this diploma thesis, data collected from an accelerometer mounted on a rotating fan will be used in conjunction with an Arduino board which will process the data from the sensor and check for the proper motor and rotating parts operation.

## **Keywords**

Sensor, Accelerometer, Arduino, Motor, Moving Part

# Ευχαριστίες

Με τη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας μου δίνεται η ευκαιρία να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέπων καθηγητή Ευάγγελο Χριστοφόρου, που μου παρείχε την δυνατότητα να ασχοληθώ ενεργά με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, καθώς και για την πολύτιμη και ουσιαστική βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Εν κατακλείδι, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, τη σύντροφο μου αλλά και τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξη και ενθάρρυνση τους όλα αυτά τα χρόνια.





# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή & Βιβλιογραφική Αναθεώρηση.....	11
1.1 Εισαγωγή .....	11
1.2 Τεχνολογίες επίβλεψης υγείας περιστρεφόμενων μερών .....	13
1.3 Αισθητήρες .....	14
1.4 Αισθητήρες για επίβλεψη υγείας περιστρεφόμενων μερών .....	15
1.5 Επιταχυνσιόμετρο.....	16
1.5.1 Τι είναι το επιταχυνσιόμετρο; .....	16
1.5.2 Πού χρησιμοποιείται .....	17
1.5.3 Βασικές κατηγορίες & Λειτουργία.....	18
1.6 Κίνητρο & Σκοπός Εργασίας .....	22
Κεφάλαιο 2: Ανάπτυξη Διάταξης.....	23
2.1 Συνοπτική Παρουσίαση.....	23
2.2 Arduino .....	24
2.3 LCD Screen.....	26
2.4 Επιταχυνσιόμετρο ADXL 335.....	27
2.5 Παρουσίαση Διάταξης .....	31
2.6 Αλγόριθμος .....	33
Κεφάλαιο 3: Πείραμα, Μετρήσεις & Κριτική.....	43
3.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	43
3.2 Πειραματική διαδικασία & Μετρήσεις .....	45
3.2.1 Γραφική Απεικόνιση Λειτουργίας Συστήματος .....	45
3.2.2 Βαθμονόμηση Συστήματος.....	52
3.2.3 Πειράματα & Μετρήσεις.....	57
3.2.4 Αποτελέσματα Πειραμάτων .....	61
3.3 Προβλήματα & Κριτική.....	62
3.4 Συμπεράσματα .....	63
3.5 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	65

Κεφάλαιο 4 .....	66
4.1 Κώδικας .....	66
Βιβλιογραφία .....	76

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή & Βιβλιογραφική Αναθεώρηση

## 1.1 Εισαγωγή

Οι κινητήρες και οι μηχανές με περιστρεφόμενα μέρη χρησιμοποιούνται παντού στη βιομηχανία σε διάφορες εφαρμογές, όπως σε πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, αεροπορική βιομηχανία, μεταφορική βιομηχανία, μεταλλευτική βιομηχανία, εργοστάσια χημικής επεξεργασίας, χαρτοποιίες και βιομηχανία πετρελαίου κλπ. Η ικανότητα πρόβλεψης μηχανικών βλαβών είναι υψίστης σημασίας για τη μείωση του κόστους συντήρησης, του χρόνου διακοπής λειτουργίας, αλλά και των κινδύνων ασφαλείας.

Η λειτουργία μηχανών με περιστρεφόμενα μέρη στο «σκληρό» βιομηχανικό περιβάλλον επηρεάζει την αξιοπιστία τους και η απροσδόκητη βλάβη οποιουδήποτε μέρους είναι κρίσιμο ζήτημα, αφού μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχή κρίσιμων υπηρεσιών, όπως ιατρικές εφαρμογές, στρατιωτικές επιχειρήσεις μεταφοράς και αεροπορικές μεταφορές. Μια απροσδόκητη βλάβη ενός κινητήρα μπορεί να οδηγήσει σε δαπανηρή συντήρηση ή απώλεια ζωής σε εφαρμογές, όπου απαιτείται συνεχής διαδικασία και όπου ο χρόνος διακοπής λειτουργίας δεν είναι ανεκτός. Κατά συνέπεια, η διάγνωση των αρχικών βλαβών θα αποτρέψει τα προβλήματα απροσδόκητων βλαβών των μηχανών και θα βοηθήσει στη μείωση του κόστους συντήρησης. Από έρευνες που έχουν γίνει, το 50% του λειτουργικού κόστους των μονάδων παραγωγής και επεξεργασίας σχετίζεται με τη συντήρηση. Επομένως, αυτός είναι ένας σημαντικός τομέας ανησυχίας των βιομηχανιών. Οι ερευνητές αναζητούν συνεχώς νέες τεχνικές για την ελαχιστοποίηση των απροσδόκητων βλαβών του μηχανήματος και του κόστους συντήρησης. [1]

Υπάρχουν τρεις κύριες τεχνικές συντήρησης:

- Προληπτική συντήρηση :  
Η συντήρηση του μηχανήματος πριν από την εμφάνιση οποιασδήποτε βλάβης.
- Προγνωστική συντήρηση :  
Η παρακολούθηση της κατάστασης του μηχανήματος και η πρόβλεψη πρόωρης βλάβης.
- Αντιδραστική συντήρηση :  
Η άμεση συντήρηση ή αντικατάσταση του μηχανήματος, όταν εμφανιστεί βλάβη.

Όλες αυτές οι τεχνικές έχουν τα θετικά και τα αρνητικά τους. Η προληπτική και η προγνωστική συντήρηση έχουν κάποιο μικρό κόστος, αντίθετα με την αντιδραστική συντήρηση η οποία έχει μηδενικό κόστος, αλλά βοηθάνε να αποφευχθεί μια ξαφνική μεγάλη βλάβη, που θα είναι κατά πάσα πιθανότητα πιο ακριβή και θα σταματήσει και την παραγωγή για μεγαλύτερο διάστημα, για αυτό και γενικά προτιμούνται. [2, 3]

Στην προγνωστική συντήρηση εντάσσεται η παρακολούθηση της επίβλεψης υγείας περιστρεφόμενων μερών από αυτοματοποιημένα συστήματα, το οποίο είναι και το θέμα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

## 1.2 Τεχνολογίες επίβλεψης υγείας περιστρεφόμενων μερών

Η παρακολούθηση της επίβλεψης υγείας περιστρεφόμενων μερών είναι η διαδικασία παρακολούθησης της λειτουργίας μηχανημάτων με διαφορές μεθόδους για τον εντοπισμό μιας σημαντικής αλλαγής που θα μπορούσε να υποδηλώνει ένα αναπτυσσόμενο σφάλμα ή κάποια πιθανή βλάβη. Είναι ένα σημαντικό συστατικό της προγνωστικής συντήρησης και αντικατάστασης. Η χρήση της παρακολούθησης των συνθηκών επιτρέπει τον προγραμματισμό της συντήρησης ή άλλες ενέργειες για την αποφυγή αστοχίας και κυρίως την αποφυγή των συνεπειών της, όπως ήδη αναφέρθηκαν. [3,4]

Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες επίβλεψης με χρήση διαφόρων αισθητήρων και τεχνολογιών, όπως :

- Συστήματα επίβλεψης Θερμοκρασίας, τα οποία ελέγχουν για βλάβες που έχουν να κάνουν με την ξαφνική αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας μιας μηχανής.
- Συστήματα επίβλεψης Δονήσεων, που μέσα από τις αλλαγές στην συχνότητα και στην ένταση των δονήσεων από τα κινούμενα μέρη επιβλέπουν την ομαλή λειτουργία.
- Συστήματα επίβλεψης Θορύβου, τα οποία ελέγχουν μέσω της έντασης του ήχου την υγεία ενός συστήματος.
- Συστήματα επίβλεψης Ταχύτητας & Ροπής, που επεξεργάζονται την κίνηση και την περιστροφή των κινούμενων μερών και βγάζουν συμπεράσματα για πιθανές βλάβες.
- Συστήματα επίβλεψης Πίεσης, που με χρήση κατάλληλων αισθητήρων και κυκλωμάτων επιβλέπουν τα μέρη στα οποία η πίεση δεν πρέπει να ξεπεράσει κάποια επίπεδα. [5, 6, 7]

## 1.3 Αισθητήρες

Αισθητήρας ονομάζεται μία συσκευή που ανιχνεύει ένα φυσικό μέγεθος και από μια είσοδο του περιβάλλοντος παράγει μία μετρήσιμη έξοδο. Για παράδειγμα, το θερμόμετρο μετατρέπει μια διαστολή λόγω θερμότητας σε μετρούμενη θερμοκρασία σε βαθμούς. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως σε καθημερινή βάση, όπως αισθητήρες κίνησης που συνδεδεμένοι με κατάλληλο κύκλωμα ανοίγουν αυτόματα το φως ή αισθητήρες θερμοκρασίας που χρησιμοποιεί το κλιματιστικό. Υπάρχει μια τεράστια ποικιλία από αισθητήρες, ακόμη και για χρήσεις που οι περισσότεροι άνθρωποι δεν γνωρίζουν. Αισθητήρες συναντούνται σε σπίτια, κινητά, αυτοκίνητα, μηχανές, ιατρική μηχανήματα, αλλά και σχεδόν παντού στη βιομηχανία και τη ρομποτική. Τα συστήματα αισθητήρων χρησιμοποιούνται, γενικά, για τη διεξαγωγή ελέγχων και μετρήσεων. [8]

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων είναι:

- Το Εύρος στο οποίο η συσκευή λειτουργεί αξιόπιστα.
- Το Σφάλμα ανάμεσα στη μετρούμενη τιμή και την πραγματική τιμή.
- Η Ευαισθησία, η σχέση δηλαδή ανάμεσα στην αλλαγή της εξόδου και την αντίστοιχη αλλαγή της εισόδου.
- Η Απόκριση και ο χρόνος που απαιτείται για να λάβει την τελική τιμή η έξοδος.
- Η Διακριτική Ικανότητα που είναι η μικρότερη ανιχνεύσιμη αλλαγή τιμής εισόδου. [8]

Οι αισθητήρες διακρίνονται σε θερμικούς, μηχανικούς, χημικούς, μαγνητικούς και ακτινοβολίας. Μια άλλη μέθοδος διαχωρισμού των αισθητήρων βασίζεται στο κατά πόσο χρησιμοποιούν ή όχι βοηθητική πηγή ενέργειας. Παθητικοί λέγονται οι αισθητήρες που παράγουν ηλεκτρικό σήμα εξόδου χωρίς βοηθητική πηγή ενέργειας και ενεργητικοί καλούνται οι αισθητήρες που παράγουν ηλεκτρικό σήμα εξόδου με βοηθητική πηγή ενέργειας ή διαμορφωμένου σήματος. Στους ενεργητικούς αισθητήρες η βοηθητική πηγή ενέργειας είναι η κύρια πηγή για το σήμα εισόδου του αισθητήρα και η μετρούμενη φυσική ποσότητα το διαμορφώνει ανάλογα ή αυξάνοντάς το ή μειώνοντάς το στην έξοδο. [9]

## 1.4 Αισθητήρες για επίβλεψη υγείας περιστρεφόμενων μερών

Η λογική της ανίχνευσης και της επεξεργασίας μέσω αισθητήρων είναι απαραίτητη για την υγεία του κινητήρα και όλων των περιστρεφόμενων μερών. Όλα τα συστήματα διαχείρισης της λειτουργίας, της κατάστασης και της υγείας χρησιμοποιούν μια πληθώρα αισθητήρων για να επιτύχουν το στόχο τους. Οι αισθητήρες τέτοιων συστημάτων είναι :

- **Θερμοκρασίας :** Η θερμοκρασία του κινητήρα και των περιστρεφόμενων μερών πρέπει να ελέγχεται ώστε το σύστημα να λειτουργεί στα επιθυμητά όρια για την αποφυγή ζημίας.
- **Κίνησης :** Με χρήση τέτοιων αισθητήρων κατάλληλα συστήματα ελέγχουν τη σωστή κίνηση όλων των περιστρεφόμενων μερών σε ένα σύστημα.
- **Πίεσης :** Συστήματα με αισθητήρες πίεσης ελέγχουν και προσαρμόζουν την πίεση σε υδραυλικά συστήματα, όποτε κρίνεται αναγκαίο.
- **Θέσης :** Με τα γυροσκόπια παρέχονται πληροφορίες για την ακριβή θέση στον τρισδιάστατο χώρο των περιστρεφόμενων μερών ενός συστήματος και για να μπορούν να γίνονται διορθώσεις, ώστε να αποφευχθεί κάποια βλάβη.
- **Ροής :** Επειδή πολλά συστήματα κινούμενων μερών χρειάζονται λάδι ή κάποιο λιπαντικό για την ομαλή κίνηση τους, πρέπει να ελέγχεται η ροή του στο σύστημα συνέχεια, ώστε να έχουμε σωστή λειτουργία.
- **Περιστροφής :** Κυκλώματα με αυτούς τους αισθητήρες ελέγχουν τη σωστή ταχύτητα περιστροφής για τη ομαλή λειτουργία όλων των κινούμενων μερών.
- **Επιτάχυνσης :** Με κατάλληλα συστήματα λαμβάνονται μετρήσεις για τη στατική επιτάχυνση, καθώς και τη δυναμική επιτάχυνση που προκύπτει από κίνηση των μερών, αλλά και ελέγχεται η ομαλή λειτουργία μέσω των δονήσεων. [10, 11]

## 1.5 Επιταχυνσιόμετρο

### 1.5.1 Τι είναι το επιταχυνσιόμετρο;

Το Επιταχυνσιόμετρο είναι ένας αισθητήρας που συνδεδεμένος σε κατάλληλο κύκλωμα επιτρέπει τη μέτρηση δυνάμεων επιτάχυνσης. Τέτοιες δυνάμεις μπορεί να είναι είτε στατικές, όπως είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, είτε δυναμικές, όταν προέρχονται από αλλαγές στην ταχύτητα ή στη διεύθυνση της κίνησης (επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις κλπ). Υπάρχουν διάφορα επιταχυνσιόμετρα, ενός, δύο, τριών ακόμα και έξι αξόνων, με τα πιο διαδομένα να είναι τα επιταχυνσιόμετρα τριών αξόνων. [12]

Ως γνωστόν, η επιτάχυνση ορίζεται ως η μεταβολή της ταχύτητας ως προς τον χρόνο, για αυτό και το επιταχυνσιόμετρο μετράει και την επιτάχυνση που συνδέεται με τις δυνάμεις βάρους. Έτσι, ένα επιταχυνσιόμετρο που βρίσκεται σε ηρεμία στην επιφάνεια της γης θα μετρήσει επιτάχυνση  $g = 9.81 \text{ m / s}^2$  λόγω του βάρους του. Αντίθετα, όταν το επιταχυνσιόμετρο βρίσκεται σε ελεύθερη πτώση, θα μετρήσει τιμή ίση με το μηδέν. Παρόλα αυτά ένα επιταχυνσιόμετρο δεν μπορεί να μετρήσει την περιστροφή και για αυτόν τον λόγο η ταχύτητα περιστροφής στους 3 άξονες μετρείται με το γυροσκόπιο. [13]

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υλοποίησης ενός επιταχυνσιόμετρου.

Μια υλοποίηση είναι η αξιοποίηση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, όπου ένας πιεζοκρύσταλλος, ο οποίος πιέζεται από μάζα ανάλογη της επιτάχυνσης που δέχεται αυτή, παράγει τάση λόγω πιεζοηλεκτρικού φαινομένου ανάλογη της επιτάχυνσης.

Μια άλλη υλοποίηση, όπως αυτή που παρουσιάζεται και στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία με το ADXL 335, είναι η μέτρηση αλλαγών στη χωρητικότητα ενός πυκνωτή. Ο πυκνωτής αποτελεί μέρος της ανάρτησης μάζας και η τιμή του μεταβάλλεται με την κίνηση αυτής της μάζας. Η αξιοποίηση της μεταβολής της χωρητικότητας του πυκνωτή παρέχει μέτρηση επιτάχυνσης.

Υπάρχουν και άλλοι τρόποι υλοποίησης, όπως η χρήση της αλλαγής της αντίστασης κάποιου υλικού ανάλογη της πίεσης που δέχεται, η χρήση φουσαλίδας ζεστού αέρα, και η χρήση των ιδιοτήτων του φωτός. [14, 15]



## 1.5.2 Πού χρησιμοποιείται

Υπάρχουν δύο τύποι δυνάμεων επιτάχυνσης: στατικές δυνάμεις και δυναμικές δυνάμεις. Οι στατικές δυνάμεις είναι δυνάμεις που εφαρμόζονται συνεχώς στο αντικείμενο (όπως τριβή ή βαρύτητα). Οι δυναμικές δυνάμεις είναι «κινούμενες» δυνάμεις που ασκούνται στο αντικείμενο με διάφορους ρυθμούς (όπως η δόνηση ή η δύναμη που ασκείται σε μια μπίλια σε ένα παιχνίδι μπιλιάρδου). Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται σε συστήματα ασφαλείας σύγκρουσης αυτοκινήτων, για παράδειγμα. Όταν ένα αυτοκίνητο ενεργοποιείται από μια ισχυρή δυναμική δύναμη, ειδικό σύστημα με επιταχυνσιόμετρο (ανιχνεύοντας μια γρήγορη επιβράδυνση) στέλνει ένα ηλεκτρονικό σήμα σε έναν ενσωματωμένο υπολογιστή, ο οποίος με τη σειρά του ενεργοποιεί τους αερόσακους. [12]

Οι αισθητήρες κίνησης στα επιταχυνσιόμετρα μπορούν ακόμη και να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση σεισμών, καθώς και σε ιατρικές συσκευές, όπως τα βιονικά άκρα και άλλα τεχνητά μέρη του σώματος .

Επίσης, το επιταχυνσιόμετρο χρησιμεύει κυρίως σε Αδρανειακά συστήματα πλοήγησης που υπολογίζουν τη θέση ενός οχήματος στον χώρο, καθώς και τη στάση και ταχύτητα αυτού με πολύ μεγάλη ακρίβεια, παράμετροι που είναι απολύτως απαραίτητοι για τη λειτουργία του αυτόματου πιλότου και τη ναυσιπλοΐα αεροπλάνων, πλοίων και υποβρυχίων. [16]

Λόγω του μεγέθους και της οικονομικής προσιτότητάς τους, είναι ενσωματωμένα σε πληθώρα ηλεκτρονικών συσκευών χειρός (όπως τηλέφωνα, tablet και χειριστήρια βιντεοπαιχνιδιών). Σε τηλέφωνα και τάμπλετ, το επιταχυνσιόμετρο είναι υπεύθυνο για την "ανατροπή" της οθόνης, όταν περιστρέφεται η συσκευή. Τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται επίσης από ζωολόγους (για την παρακολούθηση της κίνησης των ζώων στην άγρια φύση), μηχανικούς (ειδικά σε πειράματα σύγκρουσης) και εργοστάσια (για την παρακολούθηση των κραδασμών των μηχανημάτων).

Τέλος, στα λάπτοπ τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται ώστε με ανάλογο κύκλωμα να εντοπίζουν κάποια απότομη πτώση και ο σκληρός δίσκος να σβήνει, ώστε να αποφευχθεί η απώλεια δεδομένων, αλλά και σε οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή απαιτείται η μέτρηση της επιτάχυνσης.

### 1.5.3 Βασικές κατηγορίες & Λειτουργία

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι επιταχυνσιόμετρων, και ο καθένας έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί αποτελεσματικά στο περιβάλλον για το οποίο προορίζονται. Οι τρεις τύποι είναι τα πιεζοηλεκτρικά, τα πιεζοαντίστασης και τα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα. Προτού γίνει η ανάλυση των διαφορετικών τύπων επιταχυνσιόμετρου, είναι σημαντικό να καθοριστούν οι διαφορές μεταξύ DC και AC.

Ένα σύστημα με επιταχυνσιόμετρο απόκρισης DC μπορεί να μετρήσει έως τα 0 hertz που απαιτείται για τη μέτρηση του φορέα βαρύτητας και άλλων παρατεταμένων επιταχύνσεων. Απαιτείται επίσης για εφαρμογές, όπου χρειάζεται να ενσωματωθούν δεδομένα επιτάχυνσης για ταχύτητα ή μετατόπιση. Τα επιταχυνσιόμετρα που δεν έχουν απόκριση DC θα έχουν ενδογενή συνάρτηση αποσύνθεσης, που θα έχει ως αποτέλεσμα σημαντικό σφάλμα κατά την αριθμητική ολοκλήρωση, ειδικά σε συμβάντα μεγάλης διάρκειας. [17]

Ένα σύστημα με επιταχυνσιόμετρο απόκρισης AC σημαίνει ότι είναι συνδεδεμένο με εναλλασσόμενο ρεύμα και συνεπώς δεν μπορεί να μετρήσει τις στατικές επιταχύνσεις, όπως η βαρύτητα και οι συνεχείς επιταχύνσεις. Γενικά, δεν μπορεί επίσης να μετρήσει τις αργές δονήσεις (κάτω από μερικά hertz). Αλλά υπάρχουν επιταχυνσιόμετρα υψηλής ευαισθησίας που φθάνουν στα 0,1 hertz. Τα επιταχυνσιόμετρα απόκρισης AC είναι η προτιμώμενη επιλογή για όλες τις δοκιμές δόνησης και σοκ λόγω της ευρείας απόκρισης συχνότητας και της υψηλής αναλογίας σήματος προς θόρυβο. [18]

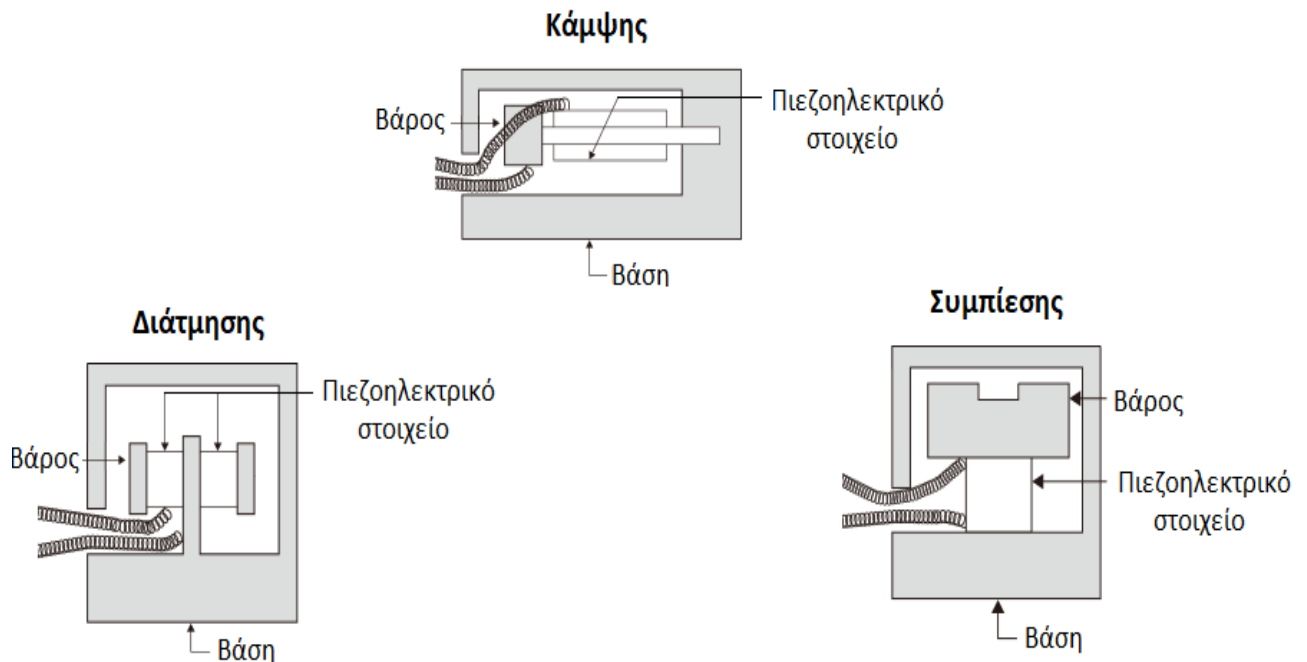


Επιταχυνσιόμετρο DC

Επιταχυνσιόμετρο AC

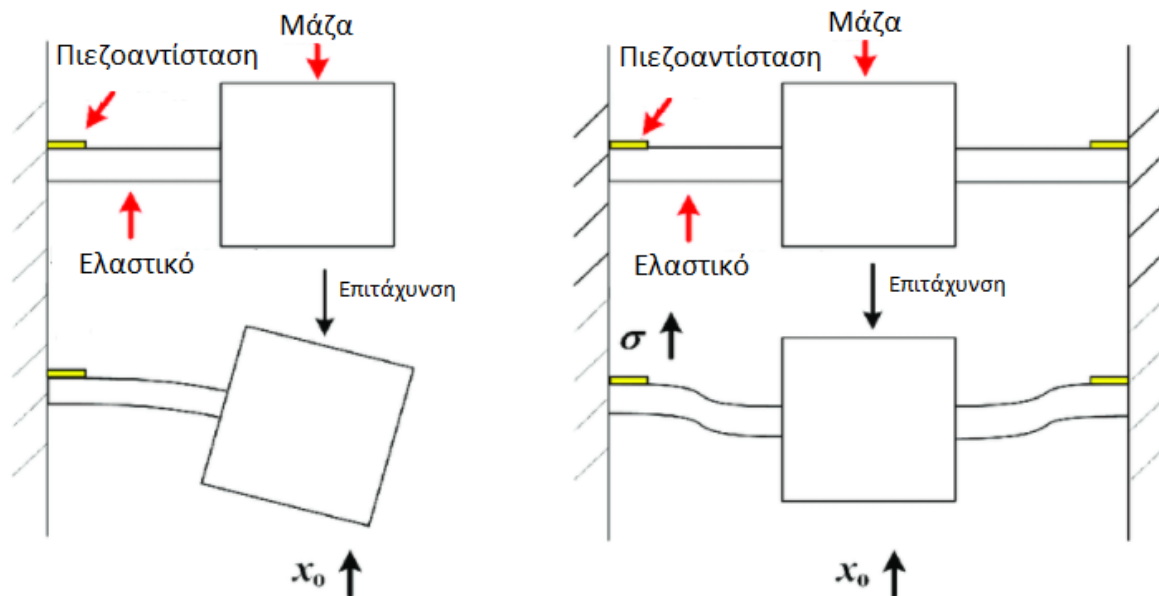
**Εικόνα 1: Τύποι Επιταχυνσιόμετρου**

Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα βασίζονται στη χρήση ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου, πάνω στον οποίο τοποθετείται το σώμα μάζας  $M$ . Η κατασκευή γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε ο κρύσταλλος να βρίσκεται σε τάση, ακόμη και για μηδενική επιτάχυνση. Με τον τρόπο αυτό δεν καταπονείται στον εφελκυσμό. Ένα πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο χρησιμοποιεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (τα πιεζοηλεκτρικά υλικά παράγουν ηλεκτρισμό, όταν τεθεί υπό φυσική πίεση) για να «αισθανθεί» την αλλαγή στην επιτάχυνση. Με την επίδραση της επιτάχυνσης παράγεται ηλεκτρική τάση συγκεκριμένης τιμής. Στοιχείο μετρήσεων τέτοιων αισθητήρων είναι συνήθως το PZT, (κράμα ζirkονίου, τιτανίου, μολύβδου). Με την παραμόρφωσή του, το υλικό παράγει ηλεκτρικό φορτίο. Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα χαρακτηρίζονται από υψηλή ευαισθησία και ακρίβεια, χάριν των οποίων βρίσκουν εφαρμογή σε πολλές χρήσεις – από ασυνήθιστα εξελιγμένες και ακριβείς μετρήσεις σεισμών σε δοκιμές κρούσεων και καταστροφών που διεξάγονται σε αντίξοες συνθήκες. Το σήμα εξόδου των επιταχυνσιόμετρων τίθεται σε ενίσχυση και αντιστάθμιση θερμοκρασίας και μετρούν επιταχύνσεις μέχρι μερικές δεκάδες  $g$ . [19]



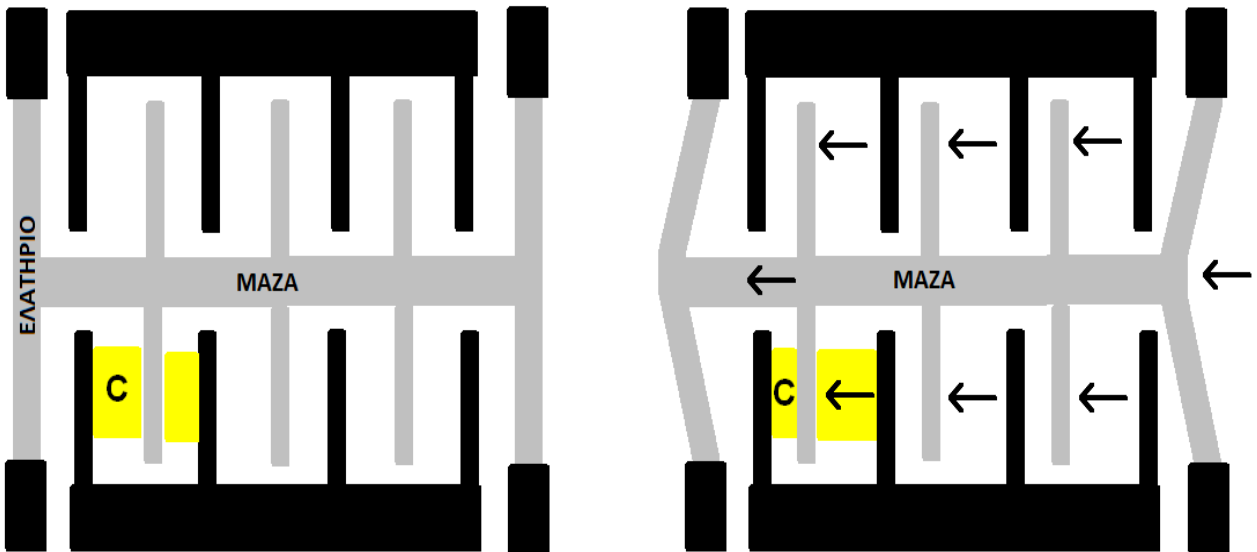
Εικόνα 2: Πιεζοηλεκτρικά Επιταχυνσιόμετρα

Τα επιταχυνσιόμετρα πιεζοαντίστασης που στερεώνονται σε αντικείμενα και συνδέονται με συστήματα που υπολογίζουν τις αλλαγές μεγέθους τους λόγω παραμόρφωσης. Ένα επιταχυνσιόμετρο πιεζοαντίστασης αυξάνει την αντίστασή, που παίζει τον ρόλο του ελατηρίου ανάλογα με την πίεση που ασκείται σε αυτό. Η αλλαγή στην αντίσταση στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο λαμβάνεται από τον ενσωματωμένο στο επιταχυνσιόμετρο δέκτη. Μετρούν επιταχύνσεις μέχρι μερικές εκατοντάδες g. Είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητα από τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα, χαρακτηρίζονται από μεγάλο φάσμα μετρήσεων, και χάρη αυτού είναι σε θέση να καταγράψουν δονήσεις σε υψηλό πλάτος και συχνότητες, κάτι που είναι χρήσιμο μεταξύ άλλων κατά τη διάρκεια διαφορετικών δοκιμών κρούσης, όπως δοκιμές σύγκρουσης οχήματος. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των επιταχυνσιόμετρων είναι η δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων σημάτων χαμηλής αλλαγής, κάτι που επιτρέπει τη χρήση τους σε συστήματα αδρανειακής πλοήγησης, με σκοπό τη μέτρηση ταχύτητας και μετακίνησης των στοιχείων των κυκλωμάτων. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί το πιεζοαντιστατικό επιταχυνσιόμετρο έχει ως συνέπεια το ότι το όργανο δεν είναι ανθεκτικό σε αλλαγές θερμοκρασίας περιβάλλοντος, κάτι που απαιτεί αντιστάθμιση θερμοκρασίας. Πέραν αυτού, τέτοιου τύπου επιταχυνσιόμετρα έχουν προβλήματα με την ανίχνευση ασθενών σημάτων, ενώ είναι επίσης πολύ ακριβότερα από τα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα. [20]



Εικόνα 3: Επιταχυνσιόμετρα Πιεζοαντίστασης

Ο τρίτος και πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος επιταχυνσιόμετρου είναι το χωρητικό επιταχυνσιόμετρο. Συστήματα με χωρητικά επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούν αλλαγή στην χωρητικότητα ενός πυκνωτή για να προσδιορίσουν την επιτάχυνση ενός αντικειμένου. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην τοποθέτηση βάρους που στηρίζεται σε ελατήρια. Ένα άκρο ελατηρίων είναι στερεωμένο σε πυκνωτή τύπου χτένας, το άλλο άκρο στο τοποθετημένο βάρος. Με την επιρροή στον αισθητήρα δυνάμεων, το βάρος μετακινείται στα ελατήρια, το οποίο με την σειρά του έχει επίδραση στους πυκνωτές, μέσω της αλλαγής απόστασης μεταξύ των στελεχών του πυκνωτή. Όταν ο αισθητήρας υφίσταται επιτάχυνση, η απόσταση μεταξύ των πλακών του πυκνωτή αλλάζει, καθώς κινείται το διάφραγμα του αισθητήρα και, ως εκ τούτου, αλλάζει η χωρητικότητα. Χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε κινητά, φορητό εξοπλισμό, καθώς και στα ευρέως καταναλωτικά ηλεκτρονικά λόγω του μικρού κόστους και μεγέθους τους. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των χωρητικών επιταχυνσιόμετρων είναι η δυνατότητα της ενσωμάτωσής τους απευθείας σε πλακέτα τυπωμένου. Στα μειονεκτήματά τους θα πρέπει να αναφερθεί η μικρή ακρίβεια μέτρησης, ειδικά σε περιπτώσεις υψηλού πλάτους και συχνοτήτων, κάτι που τα καθιστά μη χρηστικά για ειδικευμένες βιομηχανικές εφαρμογές. [20]



Εικόνα 4: Χωρητικό Επιταχυνσιόμετρο

## 1.6 Κίνητρο & Σκοπός Εργασίας

Οι κινητήρες και τα μηχανήματα με περιστρεφόμενα μέρη βρίσκονται παντού και ο ρόλος τους στη βιομηχανία είναι κρίσιμος. Σε αρκετές περιπτώσεις «εργάζονται» συνεχώς και οποιαδήποτε διακοπή στην εργασία τους μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα. Για παράδειγμα, στις βιομηχανίες χημικών και διεργασιών, υπάρχουν τεράστιες απώλειες εσόδων εάν οι αντλίες ψύξης με κινητήρα σταματήσουν να λειτουργούν σωστά. [21]

Οι στατιστικές δείχνουν ότι κινητήρες, όπως και άλλα περιστρεφόμενα μέρη, πάσχουν από σοβαρά σφάλματα που μπορούν να προβλεφθούν εγκαίρως με ένα απλό σύστημα παρακολούθησης της υγείας τους. [22]

Λόγω αυτού, γίνονται συνέχεια μελέτες για φθηνά και αποτελεσματικά συστήματα επίβλεψης υγείας σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπου ένα αξιόπιστο σύστημα παρακολούθησης συνθηκών είναι πολύτιμο για την ανίχνευση σφάλματος σε κινούμενα μέρη στο νωρίτερο στάδιο, προκειμένου να αποφευχθεί η μείωση της απόδοσης και η δυσλειτουργία των μηχανημάτων. Θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον προγραμματισμό προληπτικών εργασιών συντήρησης, χωρίς να περιορίζονται οι βιομηχανίες σε χειροκίνητους ελέγχους. Το κόστος συντήρησης μπορεί να μειωθεί περαιτέρω αναγνωρίζοντας γρήγορα τα ελαττωματικά εξαρτήματα, χωρίς να επιθεωρείται όλο το μηχάνημα. [23]

Με αυτές λοιπόν τις σκέψεις και εντοπίζοντας την αυξανόμενη ανάγκη που έχει δημιουργηθεί για φθηνές, αξιόπιστες και αποτελεσματικές λύσεις, σε αυτήν την εργασία θα γίνει αναφορά σε ένα σύστημα επίβλεψης της υγείας περιστρεφόμενων μερών μέσω των δονήσεων που δημιουργούνται κατά τη λειτουργία. Με τη βοήθεια ενός επιταχυνσιόμετρου συνδεδεμένο σε ένα μικροελεγκτή arduino, που θα «διαβάζει» και θα επεξεργάζεται τις δονήσεις λόγω περιστροφής, θα γίνεται επίβλεψη της ομαλής και σωστής λειτουργίας ενός περιστρεφόμενου μέρους. Όποτε το σύστημα διαπιστώσει δυσλειτουργία, θα ενημερώνει αυτόματα τον χρήστη για την υγεία του συστήματος, ώστε να προβεί σε ενέργεια αντικατάστασης και συντήρησης.

# Κεφάλαιο 2: Ανάπτυξη Διάταξης

## 2.1 Συνοπτική Παρουσίαση

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η παρουσίαση της διάταξης επίβλεψης υγείας περιστρεφόμενων μερών με επιταχυνσιόμετρο, οι δυνατότητές της, καθώς και τα υποσυστήματα που την απαρτίζουν. Στη συνέχεια, θα αναφερθεί ο αλγόριθμος στον οποίο στηρίζεται η λειτουργία της διάταξης. Τέλος, θα αναφερθούν προβλήματα τα οποία παρουσιάστηκαν, αλλά και οι τρόποι με τους οποίους αντιμετωπίστηκαν.

Για την υλοποίηση του πειράματος, έγινε η κατασκευή ενός συστήματος επίβλεψης υγείας περιστρεφόμενων μερών με επιταχυνσιόμετρο με τη χρήση ενός μικροελεγκτή arduino . Το σύστημα επίβλεψης, υλοποιήθηκε πάνω σε ένα πλαστικό 3d εκτυπωμένο σκελετό στον οποίο τοποθετήθηκε το arduino μαζί με μια lcd οθόνη, ενώ στη συνέχεια τοποθετήθηκε ο αισθητήρας του επιταχυνσιόμετρου πάνω σε έναν ανεμιστήρα 12 Volt ο οποίος προσημειώνει το κινούμενο μέρος τους συστήματος. Παρουσιάστηκαν κάποιες δυσκολίες στην τοποθέτηση του αισθητήρα και στη λειτουργία του ανεμιστήρα, που θα αναλυθούν εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο.

Τα στοιχεία της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκαν, είναι τα παρακάτω:

- Arduino Uno R3 με μικροελεγκτή ATmega 328
- Επιταχυνσιόμετρο 3 αξόνων ADXL 335
- LCD Οθόνη 20x4
- Ανεμιστήρας 12v
- Καλώδια M-F

## 2.2 Arduino

Το Arduino είναι ένας μικροελεγκτής μονής πλακέτας, δηλαδή μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή ATmega328 και εισόδους/εξόδους, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring (ουσιαστικά πρόκειται για τη γλώσσα προγραμματισμού C++ και ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, υλοποιημένες επίσης στην C++). Πρόκειται για μια πλατφόρμα υπολογιστή ανοικτού κώδικα που αποτελείται από μια απλή πλακέτα μικροελεγκτή και ένα περιβάλλον ανάπτυξης για τη σύνταξη του κώδικα. [24]

Το Arduino μπορεί να μπορεί να προγραμματιστεί λαμβάνοντας δεδομένα από το περιβάλλον, από τις εισόδους, από διάφορους διακόπτες ή αισθητήρες να τα επεξεργάζεται και με τις εξόδους να κάνει έλεγχο ποικίλων οθονών, οργάνων, κινητήρων και άλλων φυσικών εξόδων. Οι εφαρμογές του Arduino είναι πραγματικά αναρίθμητες και μπορούν να είναι αυτόνομες ή μπορούν να επικοινωνούν με υπολογιστή ή κινητό ενσύρματα, με usb serial και ασύρματα με wifi , Bluetooth, Lora κλπ. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του Arduino είναι η μεγάλη ποικιλία add-ons και modules και η εύκολη σύνδεσή τους, αλλά και οι έτοιμες μονάδες προέκτασης που κουμπώνουν πάνω στην πλακέτα του arduino , τα λεγόμενα shields που προσφέρουν πολλές επιπλέον λειτουργίες και δυνατότητες σύνδεσης. [25]

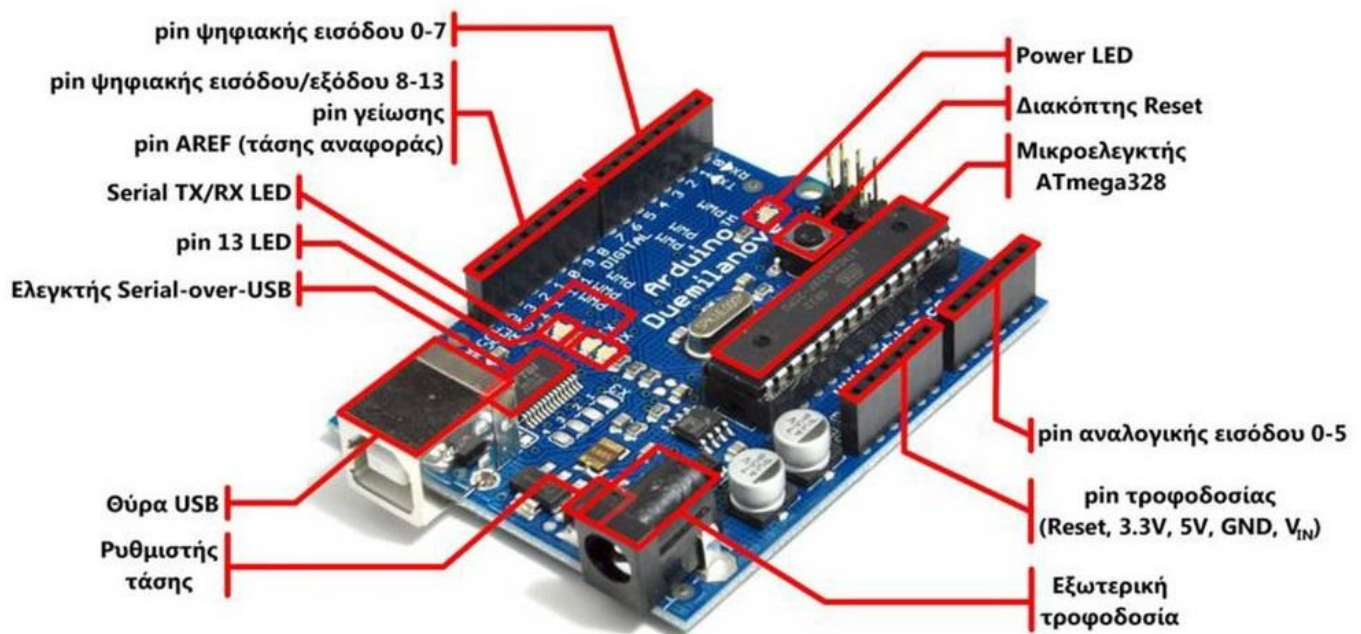
Το περιβάλλον ανάπτυξης του Arduino (Arduino IDE) είναι δωρεάν λογισμικό γραμμένο σε Java και έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιείται με σχετική ευκολία τόσο από ανθρώπους με βασικές γνώσεις προγραμματισμού, όσο και από επαγγελματίες με την ανάπτυξη κώδικα.

Σε κάθε εκτελέσιμο πρόγραμμα χρειάζονται 2 λειτουργίες. Το setup() που εκτελείται μία φορά στην αρχή ενός προγράμματος, που αρχικοποιεί και σετάρει τις ρυθμίσεις και το loop(), που καλείται επανειλημμένα, όταν η πλακέτα βρίσκεται σε λειτουργία. Επίσης, στην αρχή του κάθε προγράμματος αρχικοποιούνται global μεταβλητές και προστίθενται οι βιβλιοθήκες, άμα χρειάζονται.



Για την παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε η πλακέτα Arduino Uno R3 με τις εξής προδιαγραφές που καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες του πειράματος:

Μικροεπεξεργαστής	ATmega328
Ταχύτητα ρολογιού	16 MHz
Flash Μνήμη	32 KB
SRAM Μνήμη	2 KB
EEPROM Μνήμη	1KB
Τάση Λειτουργίας	5V
Τάση Εισόδου	7-12V
Ψηφιακοί Ακροδέκτες Εισόδου-Εξόδου	12
Αναλογικοί Ακροδέκτες Εισόδου	6
Βάρος	25 g
Μήκος	6.8 cm
Πλάτος	5.3 cm



Εικόνα 5: Πλακέτα Arduino

## 2.3 LCD Screen

Η οθόνη LCD είναι ένας τύπος οθόνης που βασίζεται στην τεχνολογία υγρών κρυστάλλων. Είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία οθονών τα τελευταία χρόνια.

Η οθόνη που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία είναι η LCD I2C Display 20x4 η οποία έχει 4 γραμμές από 20 χαρακτήρες η καθεμία και λειτουργεί στα 5 Volt. Έχει εγκατεστημένο το i2c module που διαθέτει ποτενσιόμετρο για τη ρύθμιση της αντίθεσης της οθόνης. Με το πρωτόκολλο επικοινωνίας i2c μπορεί να συνδεθεί η οθόνη με το Arduino μόνο με δυο καλώδια (SDA, SCL) εκτός του ρεύματος (Vin) και της γείωσης (GND). Λειτουργεί με τη χρήση των βιβλιοθηκών Wire.h και LiquidCrystal\_I2C.h. Κάθε i2c συσκευή διαθέτει μια διεύθυνση που είναι by default την 0x27, η οποία μπορεί να αλλάξει βραχυκυκλώνοντας τα pins A0, A1, A2. [26]



Εικόνα 6: Lcd Οθόνη

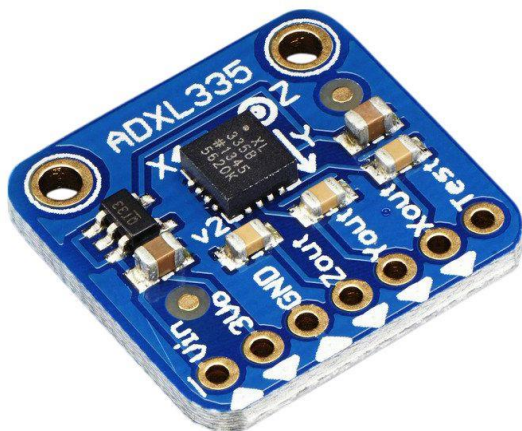
Για την ορθή επικοινωνία του arduino με την οθόνη γίνεται η παρακάτω σύνδεση με τη βοήθεια του i2c module.

Arduino	LCD Display
5v	Vin
GND	GND
A4	SDA
A5	SCL

## 2.4 Επιταχυνσιόμετρο ADXL 335

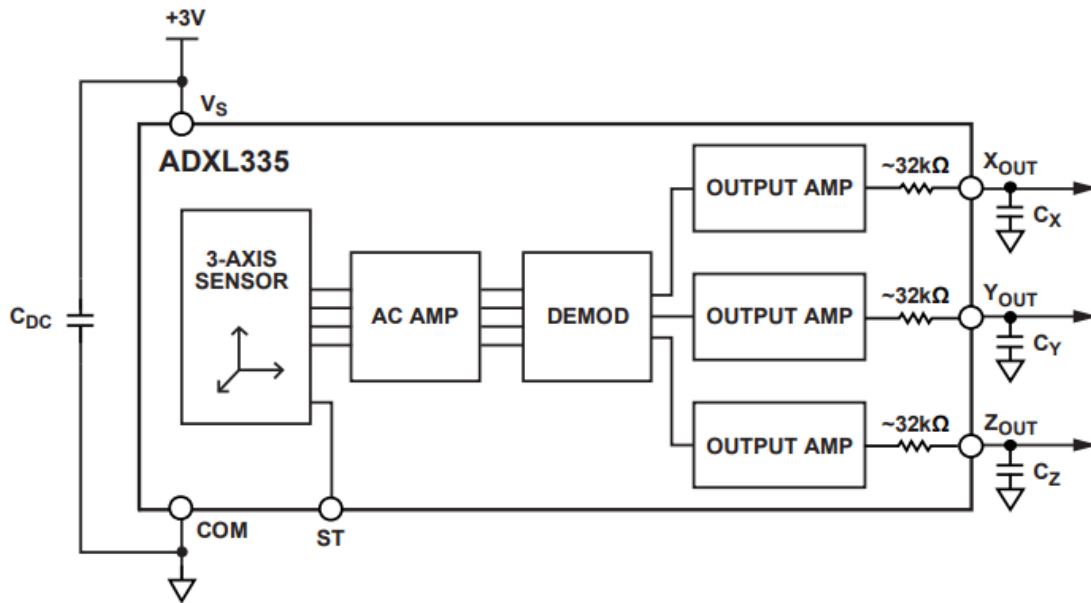
Το επιταχυνσιόμετρο όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που συνδεδεμένο με κατάλληλο κύκλωμα μετρά τη δύναμη επιτάχυνσης. Μετρά την επιτάχυνση λόγω της βαρύτητας σε μονάδα g. Το επιταχυνσιόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές ανίχνευσης κλίσης, καθώς και για δυναμική επιτάχυνση που προκύπτει από κίνηση, σοκ ή κραδασμούς. [27]

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε το επιταχυνσιόμετρο ADXL 335. Είναι ένα μικρό, λεπτό, χαμηλής ισχύος, πλήρες επιταχυνσιόμετρο 3 αξόνων. Το ADXL 335 χρησιμοποιείται για μέτρηση της επιτάχυνσης με ελάχιστο εύρος πλήρους κλίμακας  $\pm 3$  g. Μπορεί να μετρήσει τη στατική επιτάχυνσή, καθώς και τη δυναμική επιτάχυνση.



Εικόνα 7: Επιταχυνσιόμετρο ADXL 335

Όπως φαίνεται και στο κύκλωμα που ακολουθεί, το ADXL 335 περιέχει έναν αισθητήρα πυριτίου και κύκλωμα αναλογικού σήματος για την υλοποίηση αρχιτεκτονικής ανοιχτού βρόχου. Τα σήματα εξόδου είναι αναλογικές τάσεις ανάλογες προς την επιτάχυνση. Ο χρήστης μπορεί να επιλέγει το εύρος ζώνης του επιταχυνσιόμετρου χρησιμοποιώντας τους πυκνωτές CX, CY και CZ στους ακροδέκτες Xout, Yout και Zout. [28]



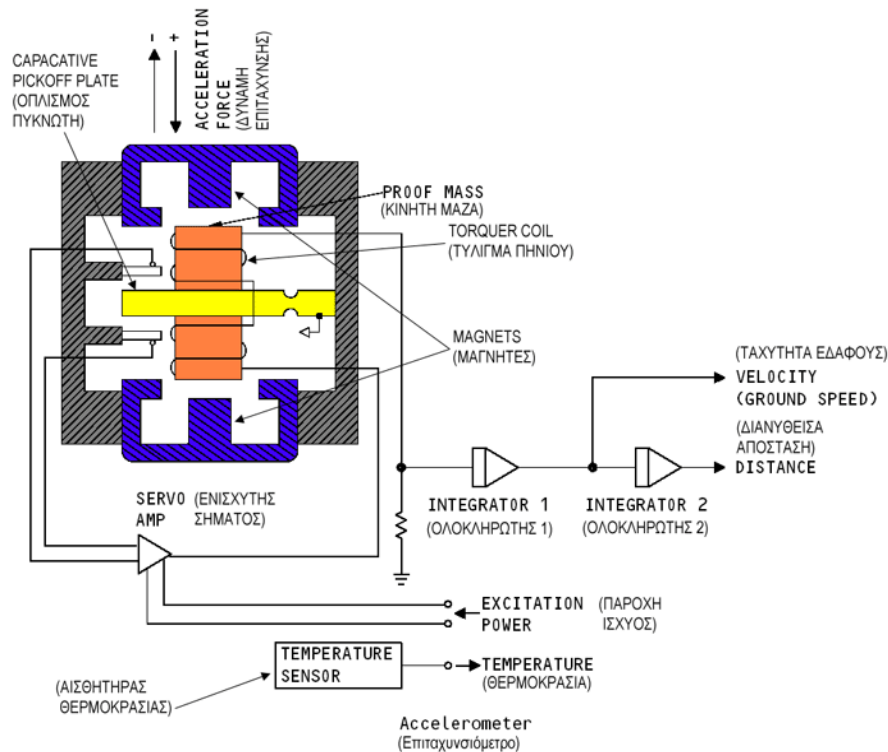
Εικόνα 8: Κύκλωμα του ADXL 335

Για την παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε το επιταχυνσιόμετρο της Analog Devices με τις εξής προδιαγραφές που καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες του πειράματος:

Κατασκευαστής	Adafruit
Μοντέλο	ADXL 335
Εύρος ανίχνευσης	$\pm 3g$
Τύπος αισθητήρα	Accelerometer 3 αξόνων
Ευαισθησία	300mV/g
Έξοδος	Αναλογική
Τάση Λειτουργίας	5V
Τάση Εξόδου	3.3V
Εύρος θερμοκρασίας	-40 με +85°C
Βάρος	1.27 g
Διαστάσεις	4mm x 4mm x 1.45mm

Στο σχηματικό διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η αρχή λειτουργίας ενός επιταχυνσιόμετρου που λειτουργεί κάνοντας χρήση της διάταξης πυκνωτή και μάζας αδράνειας, όπως το ADXL 335. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι υπάρχει αναρτημένη μάζα ανάμεσα στους πόλους δυο μαγνητών. Γύρω από τη μεταλλική μάζα υπάρχει τύλιγμα πηνίου. Το έλασμα ανάρτησης της μεταλλικής μάζας, σε συνδυασμό με δυο αγωγικές πλάκες άνω και κάτω, σχηματίζει πυκνωτές. Η επιτάχυνση κατά τον διαμήκη άξονα της μάζας, μετακινεί τη μάζα υπερνικώντας την αντίσταση του ελατηρίου της ανάρτησης, μετακινώντας τη από το σημείο μηδέν στο σημείο ισορροπίας. Αυτή η μετακίνηση προκαλεί αλλαγή στις χωρητικότητες των δυο πυκνωτών, που στο σημείο ισορροπίας της μάζας είναι ίσες. Ο ενισχυτής σήματος αντιλαμβάνεται τη διαφοροποίηση αυτή και στέλνει κατάλληλο ηλεκτρικό ρεύμα στο πηνίο που περιβάλλει τη μάζα, με σκοπό να την επαναφέρει στο σημείο ισορροπίας. Η τιμή του ρεύματος που στέλνεται στο πηνίο για να επαναφέρει τη μάζα στο σημείο ισορροπίας είναι η αναλογική έξοδος της συσκευής που αντιστοιχεί στην επιτάχυνση.

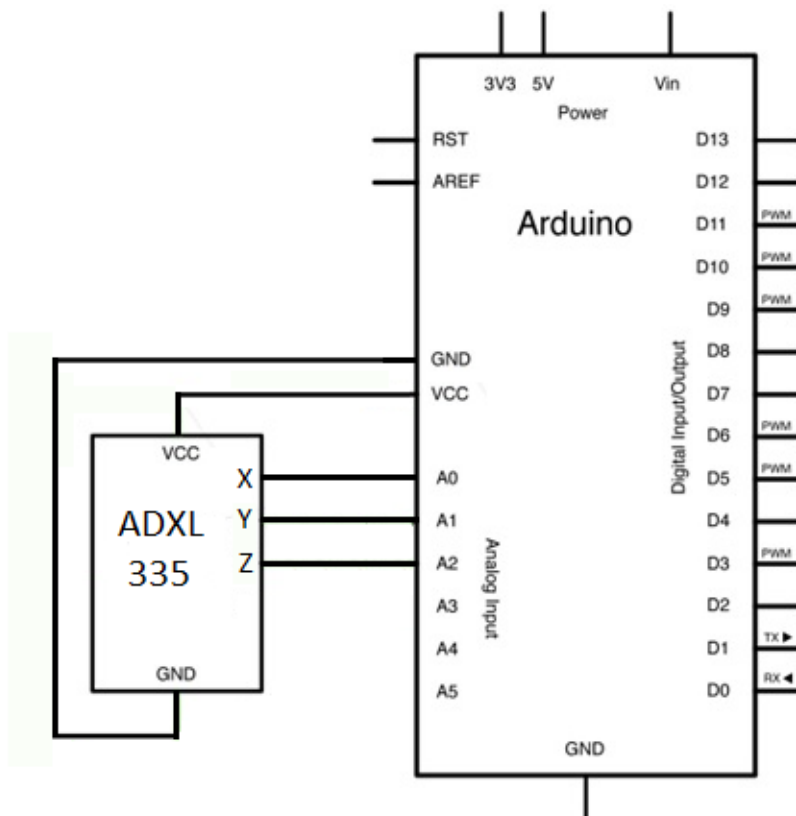
Το αναλογικό αυτό σήμα ολοκληρώνεται συναρτήσεως του χρόνου μια φορά για να δώσει ταχύτητα και επιτάχυνση σε g. Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας είναι εγκατεστημένος μαζί με το επιταχυνσιόμετρο με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας του επιταχυνσιόμετρου. Το σήμα από τον αισθητήρα θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για τη διόρθωση του σφάλματος θερμοκρασίας του επιταχυνσιόμετρου. [29, 30]



**Εικόνα 9: Επιταχυνσιόμετρο Πυκνωτή**

Για να χρησιμοποιηθεί σωστά το ADXL 335 επιταχυνσιόμετρο, απαιτείται ένας ελεγκτής για διασύνδεση. Μπορεί να συνδεθεί με οποιονδήποτε τύπο ελεγκτή, αλλά εδώ επιλέχθηκε η πλακέτα Arduino. Για την ορθή επικοινωνία του arduino με τον αισθητήρα γίνεται η παρακάτω σύνδεση.

Arduino	ADXL 335
5v	Vin
GND	GND
A0	Xout
A1	Yout
A2	Zout

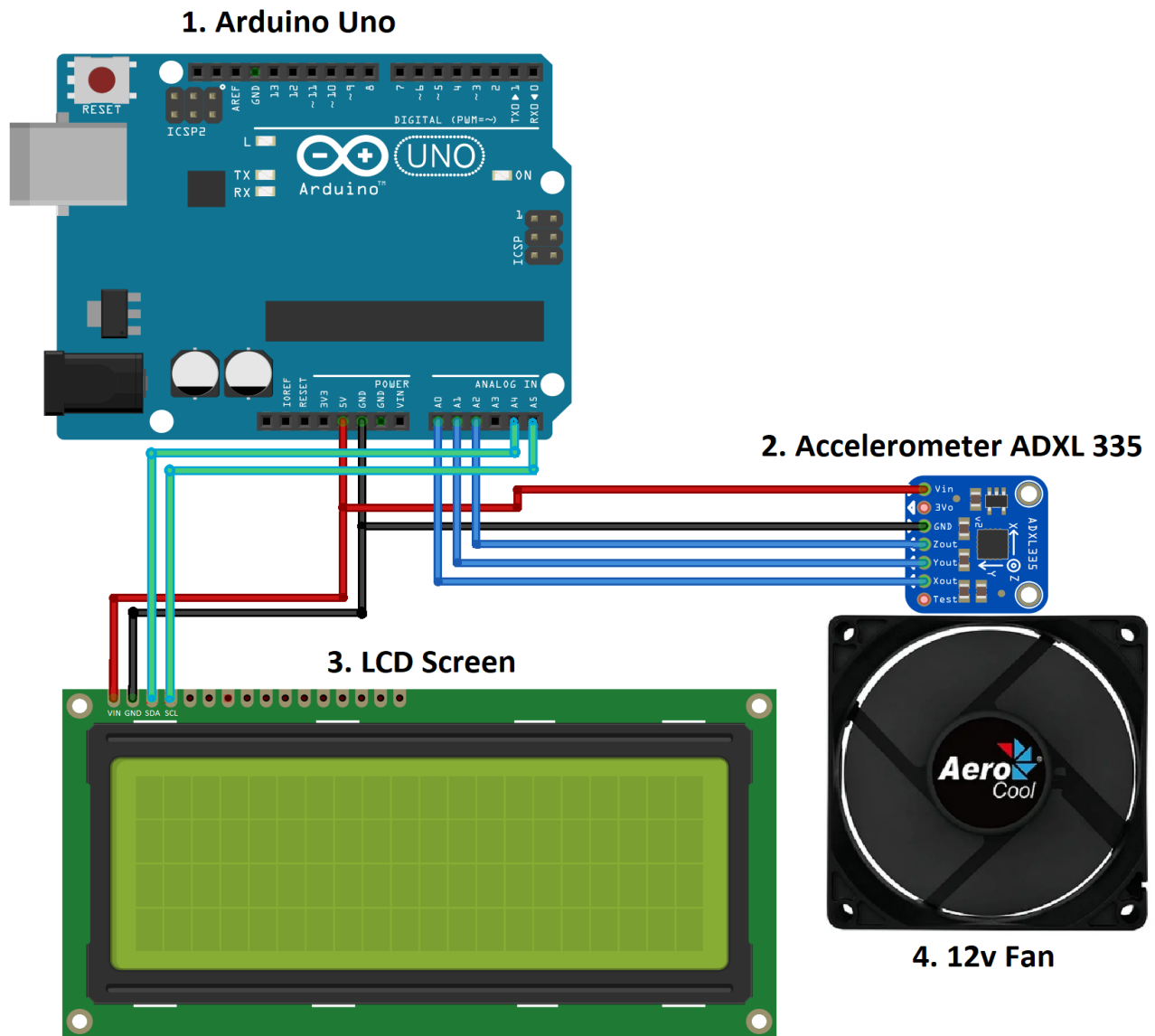


Εικόνα 10: Σύνδεση Επιταχυνσιόμετρου με Arduino

## 2.5 Παρουσίαση Διάταξης

Τα στοιχεία της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκαν, όπως προαναφέρθηκαν είναι:

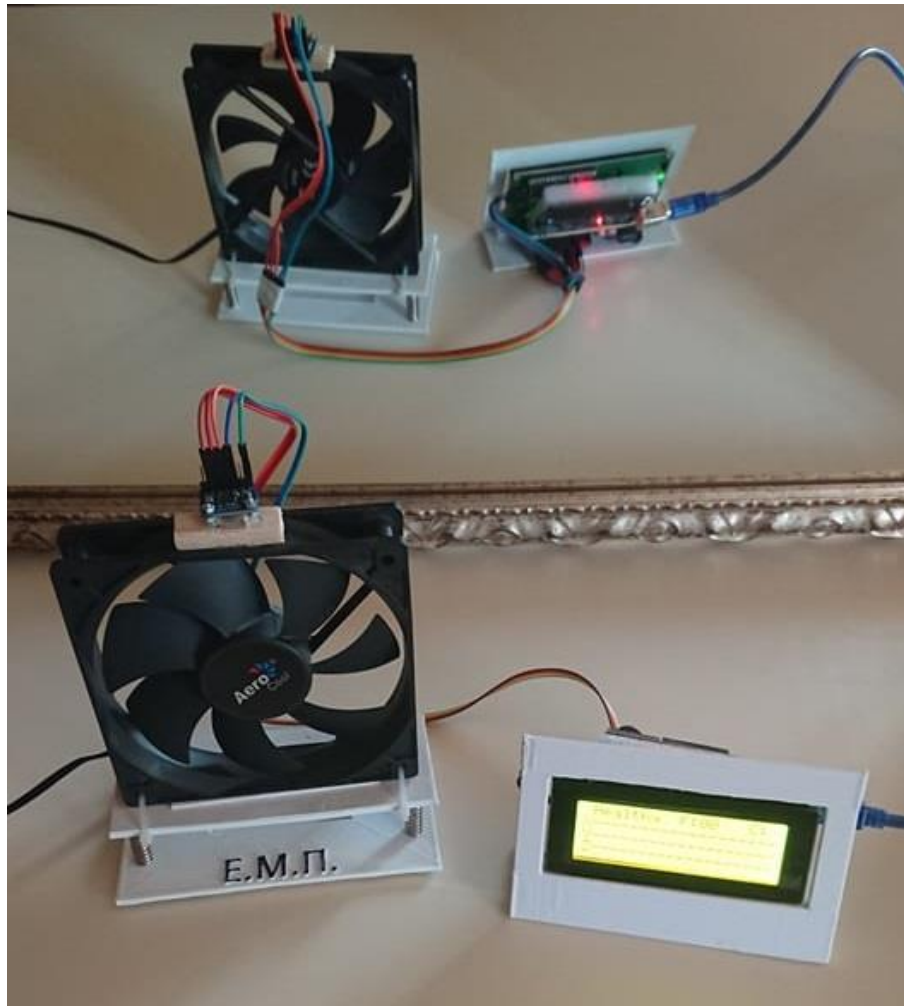
1. Arduino Uno
2. Επιταχυνσιόμετρο ADXL 335
3. Οθόνη LCD
4. Ανεμιστήρας 12v



Εικόνα 11: Σχεδιάγραμμα Πειραματικής Διάταξης

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχεδιάγραμμα γίνεται σύνδεση του επιταχυνσιόμετρου ADXL 335 και της οθόνης lcd στο arduino με καλώδια M-F. Η πλακέτα του arduino πρέπει να συνδεθεί σε κάποια πηγή τάσης 5V μέσω της θύρας USB που διαθέτει και με τη σειρά της αυτή θα παρέχει τάση 5V στον αισθητήρα και την οθόνη. Η οθόνη lcd με το arduino τοποθετήθηκαν σε μια 3d εκτυπωμένη πλαστική βάση, για να πιάνουν όσο το δυνατό λιγότερο χώρο.

Στη συνέχεια στερεώθηκε το επιταχυνσιόμετρο καλά πάνω στον ανεμιστήρα που θα χρησιμοποιηθεί για το πείραμα και ο οποίος συνδέθηκε με ένα ξεχωριστό τροφοδοτικό των 12 Volt. Αντίστοιχα, το επιταχυνσιόμετρο θα μπορούσε να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε κινούμενο μέρος υπήρχε ανάγκη επίβλεψης της υγείας του, όπως ένα κουζινέτο.



**Εικόνα 12: Φωτογραφία Τελικής Πειραματικής Διάταξης**



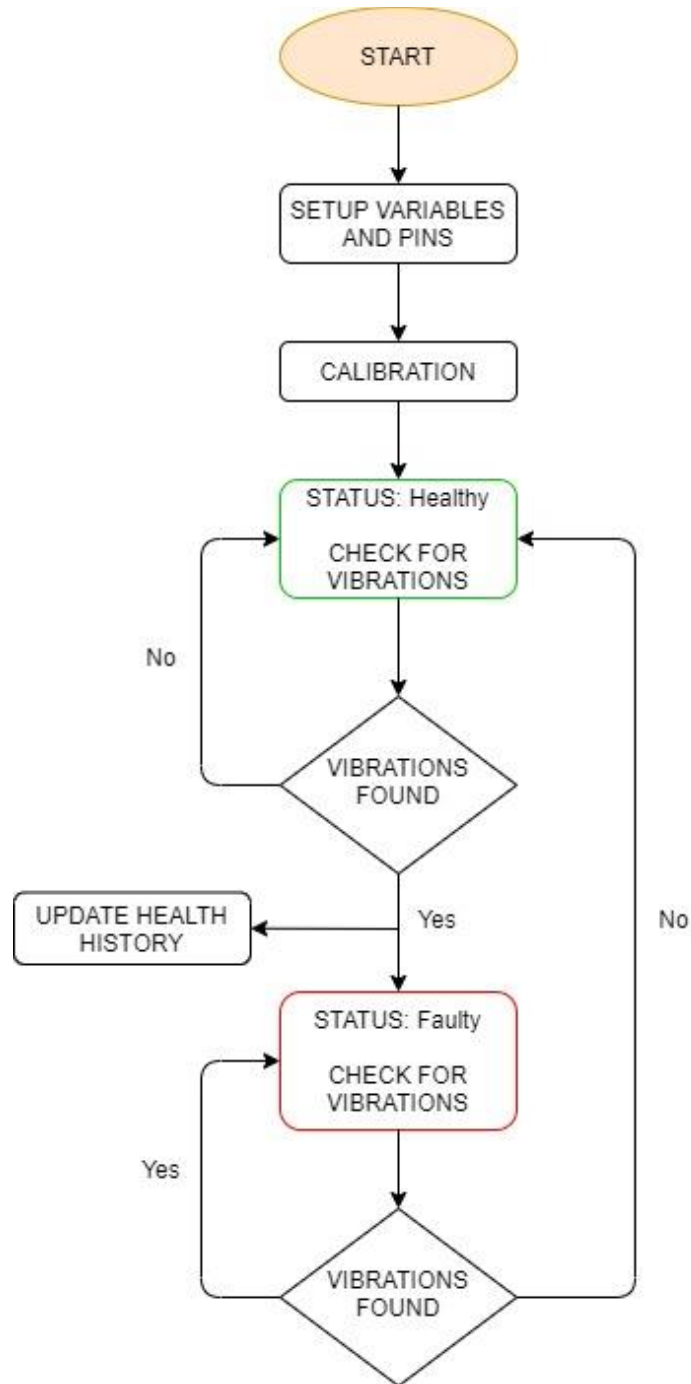
## 2.6 Αλγόριθμος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σκοπός της διπλωματικής είναι η παρουσίαση μιας διάταξης επίβλεψης της υγείας κινούμενων μερών με τη χρήση ενός μικροελεγκτή arduino και ενός επιταχυνσιόμετρου. Ο χρήστης θα ενημερώνεται για την υγεία του συστήματος και άλλες σχετικές πληροφορίες (όπως το ιστορικό υγείας και οι δονήσεις ανά άξονα) μέσω μιας lcd οθόνης.

Η λογική, στην οποία στηρίζεται ο αλγόριθμος που ελέγχει την υγεία του συστήματος, είναι μέσω της ανάλυσης των δονήσεων, οι οποίες προκαλούνται από τα κινούμενα μέρη. Όπως είναι γνωστό ένα κινούμενο μέρος όσο φθείρεται και δεν λειτουργεί σωστά τόσο παραπάνω δονήσεις προκαλεί, είτε σε μεγαλύτερη ένταση είτε σε μεγαλύτερη συχνότητα. Με το συγκεκριμένο σύστημα λαμβάνονται μετρήσεις αρκετές φορές το δευτερόλεπτο σε όλες του άξονες (X, Y, Z), ώστε να γίνονται αντιληπτές και οι παραμικρές δονήσεις που προκαλούνται στο σύστημα από την κίνηση και γίνεται έλεγχος το κατά πόσο αυτές οι δονήσεις θεωρούνται φυσιολογικές σε ένταση και συχνότητα.

Στην αρχή μέσω του συστήματος λαμβάνονται κάποιες αρχικές καμπύλες δονήσεων, για να γίνει η βαθμονόμηση του αισθητήρα και να οριστούν στον αλγόριθμο οι ιδανικές συνθήκες λειτουργίας του κινούμενου μέρους που επιβλέπεται. Ύστερα ξεκινά η διαδικασία επίβλεψης της υγείας του συστήματος. Όταν ο αλγόριθμος κρίνει ότι οι δονήσεις που προκαλούνται στο κινούμενο μέρος δεν είναι φυσιολογικές ή δεν τις προκάλεσε κάποιος εξωτερικός παράγοντας, τότε ενημερώνει τον χρήστη για σφάλμα στο κινούμενο μέρος και αποθηκεύει στο ιστορικό υγείας το σφάλμα για πιο ενδελεχή έλεγχο. Από την στιγμή που ο αλγόριθμος εντοπίσει σφάλμα ξεκινά τη διαδικασία έλεγχου για το αν αυτό το σφάλμα συνεχίζει να υπάρχει και άρα θα χρειαστεί άμεση αντικατάσταση του ελαττωματικού κινούμενου μέρους ή αν ήτανε κάτι παροδικό. Στην περίπτωση που οι δονήσεις επιστέψουν σε φυσιολογικά επίπεδα έντασης και συχνότητας, ο αλγόριθμος ενημερώνει τον χρήστη ότι η υγεία του συστήματος επανήλθε στο φυσιολογικό, αλλά μέσω του ιστορικού υγείας φαίνεται ότι υπήρξε κάποιο σφάλμα, το οποίο ήταν είτε παροδικό είτε προκλήθηκε από κάποια εξωτερική πηγή που πια δεν υπάρχει. Όλη αυτή η διαδικασία βρίσκεται μέσα σε έναν συνεχόμενο βρόγχο ο οποίος «τρέχει» συνέχεια και ελέγχει την υγεία του συστήματος και ενημερώνει τον χρήστη ανάλογα.

Οι βασικές λειτουργίες του αλγόριθμου για την επίβλεψη της υγείας των κινούμενων μερών που αναφέρθηκαν φαίνονται στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί.

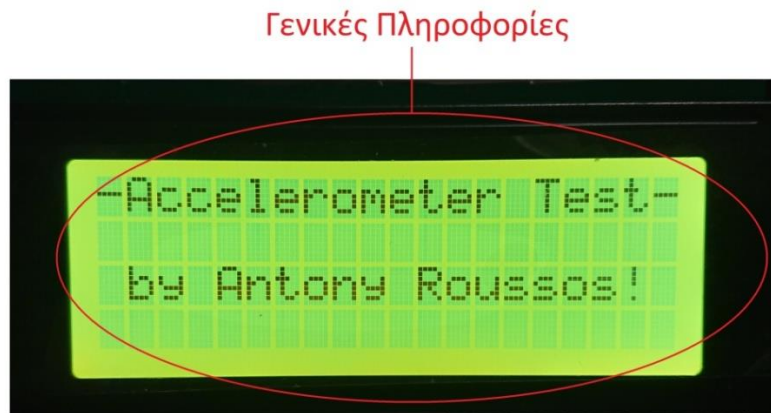


Εικόνα 13: Διάγραμμα ροής του Προγράμματος

Για να γίνου πλήρως κατανοητές οι λειτουργίες του αλγόριθμου για την επίβλεψη της υγείας των κινούμενων μερών, πρέπει να μελετηθούν αναλυτικά τα βήματα που ακολουθούν. Μέσω της οθόνης Lcd ο χρήστης ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο για όλα τα βήματα και τα στάδια της διαδικασίας της επίβλεψης.

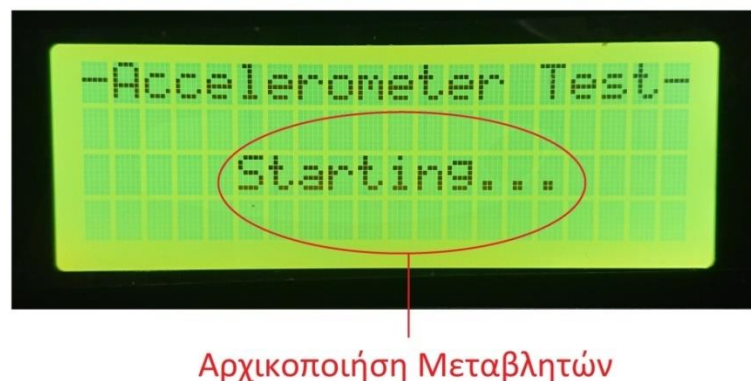
Τοποθετώντας το arduino στο ρεύμα εκκινεί η διαδικασία με τα εξής στάδια:

1. Στο πρώτο στάδιο γίνεται εκκίνηση του συστήματος και παρουσιάζονται κάποιες αρχικές γενικές πληροφορίες του συστήματος.



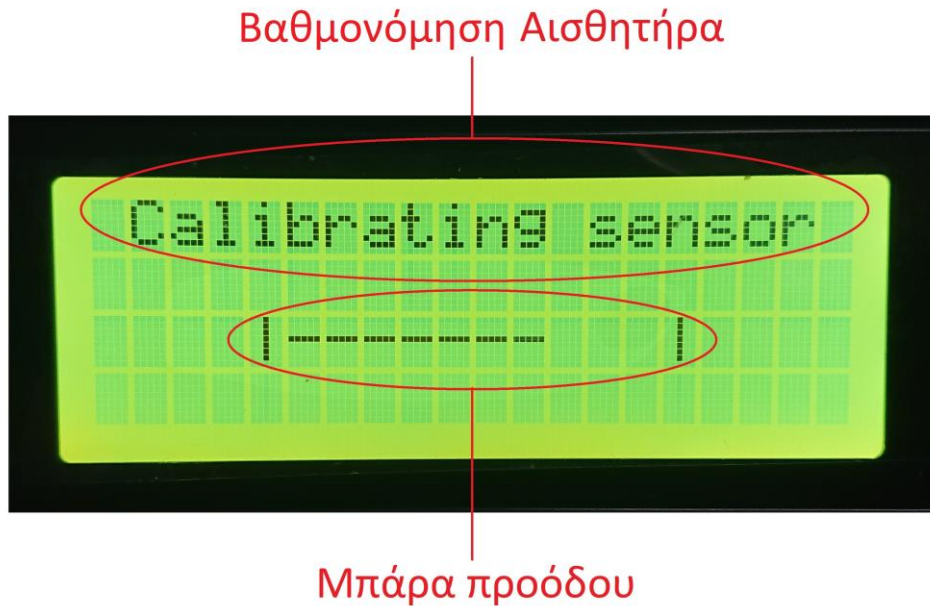
Εικόνα 14: Εκκίνηση Προγράμματος

2. Αμέσως μετά ξεκινά η ρύθμιση του αλγόριθμου και η αρχικοποίηση των μεταβλητών του προγράμματος.



Εικόνα 15: Εγκατάσταση και Αρχικοποίηση Μεταβλητών

3. Στο τρίτο στάδιο ξεκινά η βαθμονόμηση του αισθητήρα. Με τη χρήση του επιταχυνσιόμετρου λαμβάνονται για μερικά δευτερόλεπτα οι δονήσεις, για να οριστούν οι αρχικές συνθήκες του συστήματος και στην οθόνη φαίνεται η προόδος της βαθμονόμησης.



**Εικόνα 16: Βαθμονόμηση Αισθητήρα**

4. Στο επόμενο στάδιο ξεκινά η διαδικασία επίβλεψης του κινούμενου μέρους. Στην πάνω γραμμή της οθόνης υπάρχουν οι πληροφορίες για την κατάσταση υγείας που αρχικά είναι Healthy (Υγιής), το ιστορικό υγείας, όπου φαίνονται τα συνολικά σφάλματα που αρχικά είναι μηδέν, και το σήμα ελέγχου που δείχνει πότε υπάρχει δόνηση εκτός των επιθυμητών ορίων. Στις επόμενες τρεις γραμμές φαίνεται η γραφική απεικόνιση των δονήσεων και στους 3 άξονες (X, Y, Z) σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 17: Εκκίνηση Επίβλεψης

5. Από την πρώτη στιγμή ξεκινάνε να αναβοσβήνουν σε διάστημα του ενός δευτερολέπτου Βελάκια δεξιά και αριστερά της κατάστασης της υγείας ως ένδειξη του χρόνου.



Εικόνα 18: Λειτουργία Βέλων Χρόνου

6. Όταν λοιπόν ο αλγόριθμος εντοπίσει δονήσεις, ενεργοποιείται κατευθείαν ο εντοπισμός δόνησης (Check) και ενεργοποιείται το πρώτο στάδιο του ελέγχου. Εύκολα διακρίνονται στις γραφικές απεικονίσεις οι δονήσεις που προκλήθηκαν στο επιταχυνσιόμετρο ανάλογα με την ένταση, τη συχνότητα και την κατεύθυνση. Όμως το ιστορικό παραμένει στο 0 σφάλματα ακόμα και η κατάσταση στο Healthy.



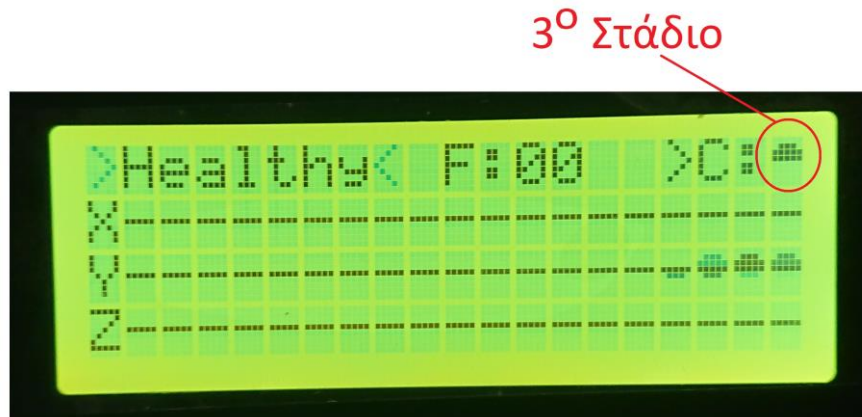
Εικόνα 19: Εντοπισμός Δόνησης

7. Από την στιγμή λοιπόν που θα γίνει εντοπισμός της πρώτης δόνησης ο αλγόριθμος ξεκινά έναν μετρητή, μέχρι να βρει την επομένη δόνηση, ώστε να κρίνει το κατά πόσο η δόνηση ήταν τυχαίο γεγονός ή οφείλεται σε σφάλμα του κινούμενου μέρους. Όταν βρεθεί πάλι δόνηση μέσα σε ένα συγκεκριμένο «παράθυρο», περνάει στο δεύτερο στάδιο.



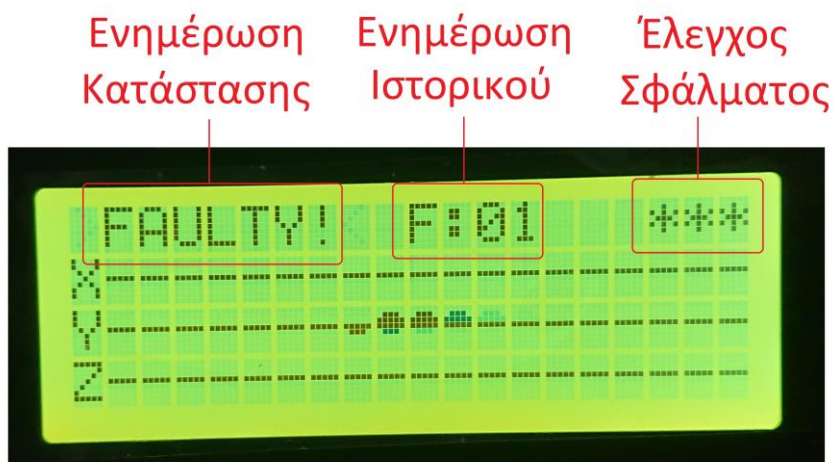
Εικόνα 20: Εντοπισμός επόμενης Δόνησης

8. Στην περίπτωση που οι δονήσεις εκτός φυσιολογικών ορίων συνεχίζονται, ο αλγόριθμος καταλαβαίνει ότι αυτές δεν ήταν ένα μεμονωμένο περιστατικό κι ίσως υπάρχει κάποια βλάβη που τις προκαλεί. Όταν λοιπόν φτάσουν στο τρίτο Στάδιο οι δονήσεις, ο αλγόριθμος μετράει τη συχνότητα (F) και την ένταση των δονήσεων, για να εντοπίσει κάποιο σφάλμα.



Εικόνα 21: Εντοπισμός Σφάλματος

9. Όταν ο αλγόριθμος εντοπίσει σφάλμα από τις δονήσεις, απευθείας προειδοποιεί για την Κατάσταση Υγείας του συστήματος (Faulty), προσθέτει το σφάλμα στο Ιστορικό και ξεκινά έλεγχο για το αν το σφάλμα παραμένει.



Εικόνα 22: Αλλαγή Κατάστασης Υγείας

10. Σε αυτό το στάδιο το πρόγραμμα ελέγχει αν συνεχίζονται οι δονήσεις για τη συχνότητα που έχει εντοπίσει. Αν δεν εντοπιστούν δονήσεις για 1 Περίοδο (T), περνάει στο επόμενο στάδιο.

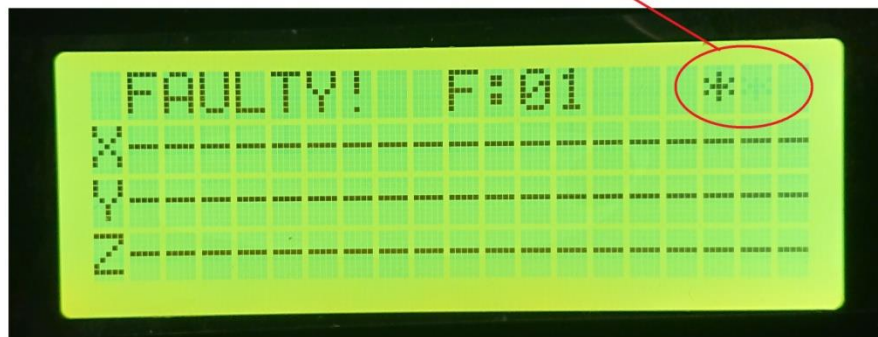
### Έλεγχος για 1 Περίοδο



Εικόνα 23: Έλεγχος 1<sup>ης</sup> Περιόδου

11. Άμα δεν υπάρχουν μη φυσιολογικές δονήσεις για 2 Περιόδους ( 2T ), τότε ο αλγόριθμος κρίνει ότι η βλάβη στο κινούμενο μέρος δεν υφίσταται πια ή η πηγή που προκαλούσε τις δονήσεις δεν επηρεάζει πια το σύστημά μας.

### Έλεγχος για 2 Περίοδο

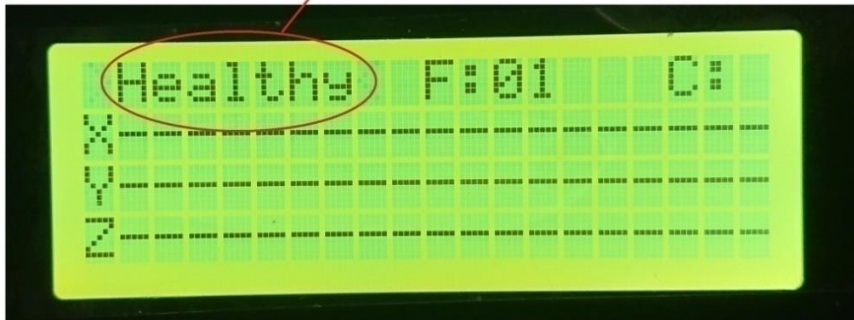


Εικόνα 24: Έλεγχος 2<sup>ης</sup> Περιόδου



12. Στην περίπτωση που ο αλγόριθμος κρίνει ότι το σύστημα λειτουργεί επιθυμητά, τότε ενημερώνει τον χρήστη ότι η υγεία του κινούμενου μέρους είναι καλή (Healthy), αλλά από το Ιστορικό ο χρήστης μπορεί να ενημερωθεί ότι υπήρξαν σφάλματα και πόσα.

### Ενημέρωση Κατάστασης Υγείας



Εικόνα 25: Επαναφορά σε Υγιή Κατάσταση

13. Οπότε ο αλγόριθμος ξεκινά πάλι την ίδια διαδικασία επίβλεψης της υγείας του κινούμενου μέρους και, όποτε βρίσκει δονήσεις που δεν πληρούν τις προϋποθέσεις του σφάλματος σε Ένταση, Συχνότητα και Εύρος, κάνει μηδενισμό του έλεγχου και επανεκκινεί τη διαδικασία επίβλεψης.

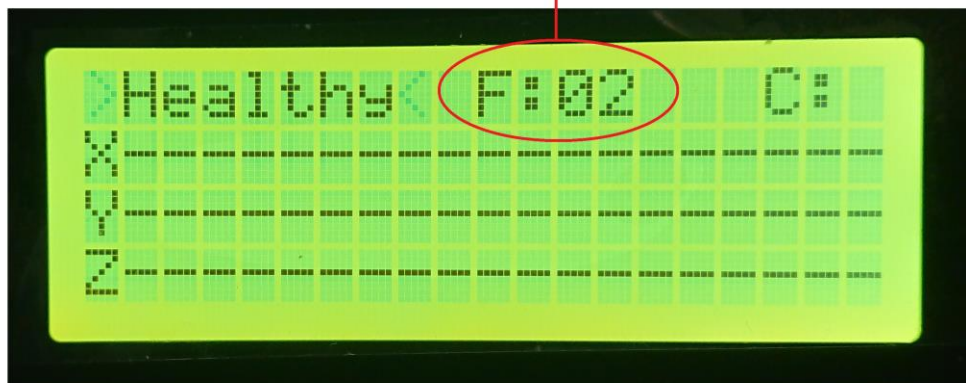
### Μηδενισμός Ελέγχου



Εικόνα 26: Μηδενισμός Ελέγχου

14. Ο αλγόριθμος τρέχει συνεχόμενα σε βρόγχο πλήρως αυτοματοποιημένα χωρίς να χρειάζεται καμία επίβλεψη ή ρύθμιση από τον χρήστη, που η μόνη προεργασία που χρειάζεται να κάνει είναι η τοποθέτηση του επιταχυνσιόμετρου στο κινούμενο μέρος, την υγεία του οποίου θα ήθελε να επιβλέψει, και η σύνδεση του arduino στην τροφοδοσία. Οποιαδήποτε στιγμή ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει στην οθόνη του συστήματος και να ενημερωθεί άμεσα για την Υγεία του κινούμενου μέρους τη δεδομένη στιγμή, αλλά και για το αν υπήρξαν σφάλματα και πόσα από το ιστορικό υγείας, ώστε να κρίνει ο ίδιος άμα χρειάζεται να προβεί σε κάποια ενέργεια (αντικατάσταση ή service).

## Ενημέρωση Ιστορικού Υγείας



Εικόνα 27: Ενημέρωση του Ιστορικού

# Κεφάλαιο 3: Πείραμα, Μετρήσεις & Κριτική

## 3.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν, για να φανεί και στην πράξη η χρησιμότητα αλλά και η αναγκαιότητα της επίβλεψης των κινούμενων μερών, έχουν να κάνουν με τη μέτρηση των δονήσεων του κινούμενου μέρους. Με τη χρήση του συστήματος που αποτελείται από έναν μικροελεγκτή arduino συνδεδεμένο με ένα επιταχυνσιόμετρο έγινε επίβλεψη της υγείας ενός κινούμενου μέρους και συγκεκριμένα ενός ανεμιστήρα 12 Volt στον οποίο και τοποθετήθηκε το επιταχυνσιόμετρο.

Για την καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων και του εύρους χρήσης του συστήματος πραγματοποιήθηκαν δυο διαφορετικά πειράματα. Στο πρώτο πείραμα ελέγχτηκε η λειτουργία του συστήματος επίβλεψης υγείας, όταν στον ανεμιστήρα προκλήθηκε μια συνεχόμενη διαταραχή στην ομαλή περιστροφή του με την προσθήκη ανισόπεδου βάρους σε ένα από τα πτερύγια, κάτι το οποίο θα μπορούσε να προκληθεί εύκολα και σε πραγματικές συνθήκες. Στο δεύτερο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένα τεχνητό εμπόδιο, το οποίο ήρθε σε επαφή με το κινούμενο μέρος κατά την περιστροφή του σε τακτά χρονικά διαστήματα, για να προκαλέσει διακοπτόμενες διαταραχές στην ομαλή λειτουργία του ανεμιστήρα.

Σκοπός των δυο πειραμάτων ο έλεγχος της σωστής και άμεσης λειτουργίας του συστήματος επίβλεψης υγείας σε διαφορετικού τύπου σφαλμάτων και διαταραχών της ομαλής κίνησης του κινούμενου μέρους, καθώς και η παραγωγή μετρήσεων για περαιτέρω έρευνα και κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος.

Προτού πραγματοποιηθεί όμως η πειραματική διαδικασία και οι μετρήσεις, χρειάστηκε αρχικά να γίνουν έλεγχοι συμπεριφοράς του αισθητήρα και να γίνει μια καταγραφή κάποιων κυματομορφών σε γραφικές παραστάσεις με τη χρήση ενός λογισμικού γραφικής απεικόνισης σε τρισδιάστατο χώρο, για να ρυθμιστεί κατάλληλα ο αλγόριθμος και ο αισθητήρας, αλλά και για καλύτερη κατανόηση της λειτουργία του συστήματος επίβλεψης της υγείας.

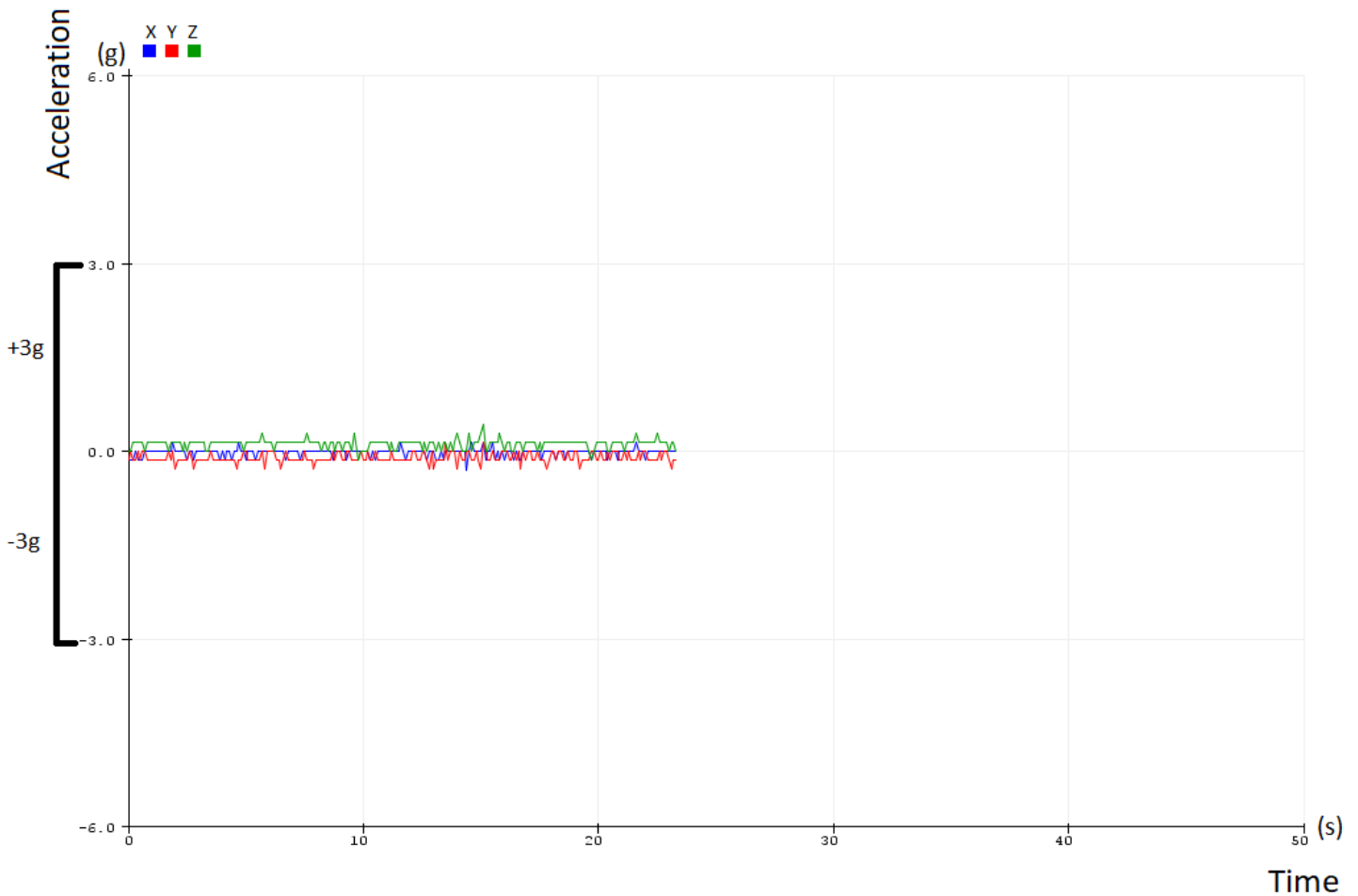
Η πειραματική διαδικασία που ακολουθεί αποτελείται από τρία στάδια:

- **1° Στάδιο:** Επεξήγηση της δομής των γραφικών παραστάσεων από το ειδικό λογισμικό απεικόνισης.
- **2° Στάδιο:** Παρουσίαση της διαδικασίας ρύθμισης και βαθμονόμησης του αλγόριθμου και του αισθητήρα μέσω γραφικών παραστάσεων.
- **3° Στάδιο:** Τέλος η παρουσίαση των πειραμάτων και των μετρήσεων στις οποίες και θα φανεί το κατά πόσο λειτούργησε σωστά το σύστημα επίβλεψης υγείας κινούμενων μερών σε όλα τα πειράματα και από τις οποίες προκύπτουν και τα τελικά συμπεράσματα.

## 3.2 Πειραματική διαδικασία & Μετρήσεις

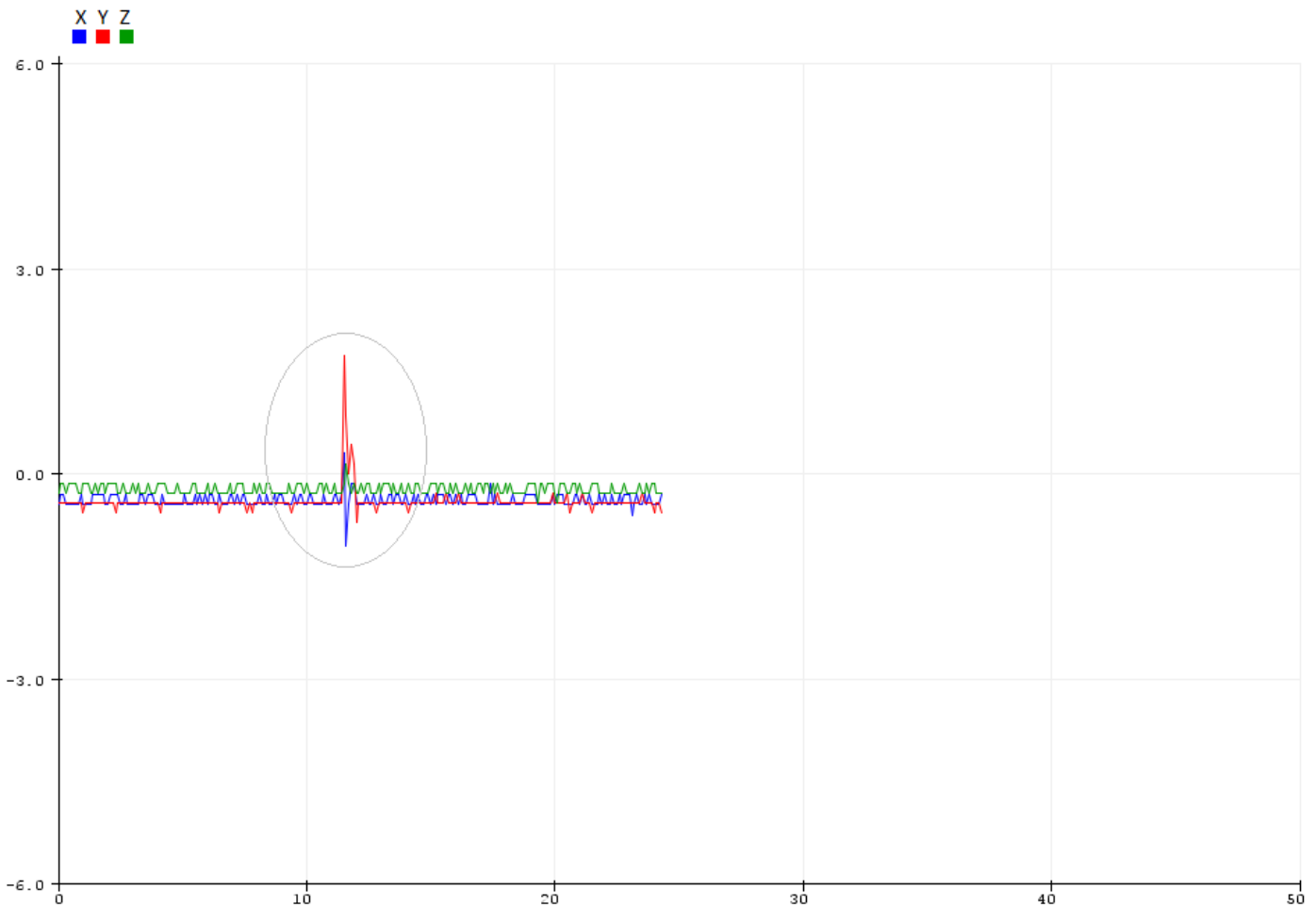
### 3.2.1 Γραφική Απεικόνιση Λειτουργίας Συστήματος

Με τη σύνδεση της πλακέτα του arduino σε ένα πρόγραμμα γραφικής απεικόνισης παράχθηκαν σε πραγματικό χρόνο οι γραφικές παραστάσεις για κάθε έναν από τους τρεις άξονες του επιταχυνσιόμετρου (X, Y, Z). Όπως φαίνεται στη γραφική παράσταση που ακολουθεί, κάθε άξονας έχει δικιά του συνάρτηση της επιτάχυνσης (g) προς τον χρόνο (s) σε διαφορετικό χρώμα για κάθε άξονα. Όπως αναφέρθηκε το ADXL 335 μπορεί να μετρήσει επιταχύνσεις από +3g μέχρι -3g σε κάθε άξονα. Αρχικά λοιπόν όλες οι συναρτήσεις βρίσκονται κοντά στο 0, διότι υπάρχουν ελάχιστες διαταραχές στην κίνηση του υγιούς μέρους που γίνεται επίβλεψη.



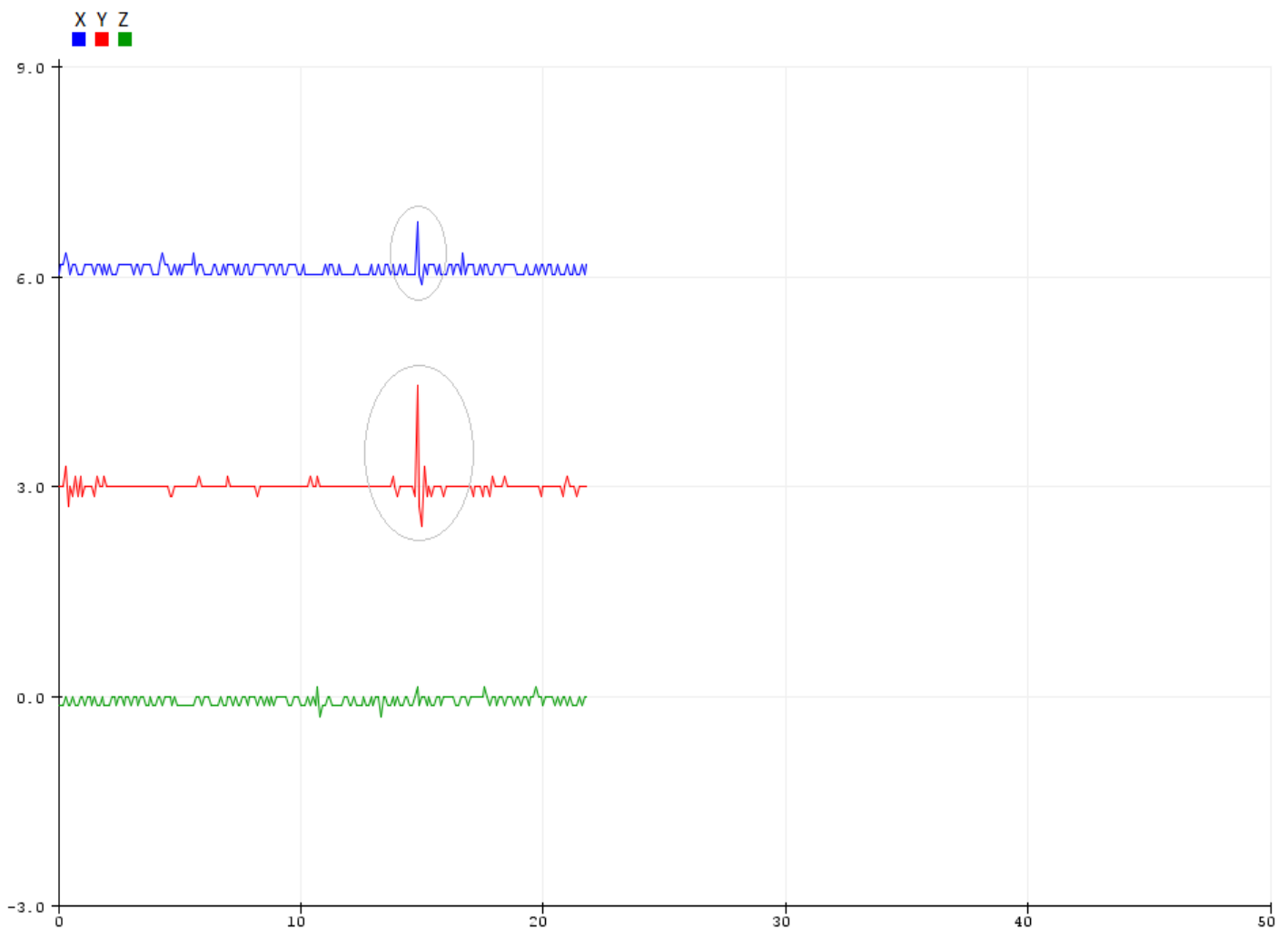
Εικόνα 28: Παρουσίαση Γραφικής Παράστασης

Έστω και μια μικρή ξαφνική διαταραχή στην ομαλή κίνηση, η οποία προκαλείτε χτυπώντας το ελαφρά με το χέρι, διακρίνεται με σχετική ευκολία το πότε ακριβώς έγινε, πόση ένταση είχε, πόση διάρκεια και ποιους άξονες επηρέασε, όπως φαίνεται και στη γραφική παράσταση που ακολουθεί. Παρ' όλα αυτά, επειδή και οι τρεις συναρτήσεις έχουν αρχική κατάσταση το 0, δεν ξεχωρίζουν εύκολα οπτικά κάποιες λεπτομέρειες και ειδικά, όταν υπάρχουν διαταραχές που συνήθως επηρεάζουν πάνω από έναν άξονα .



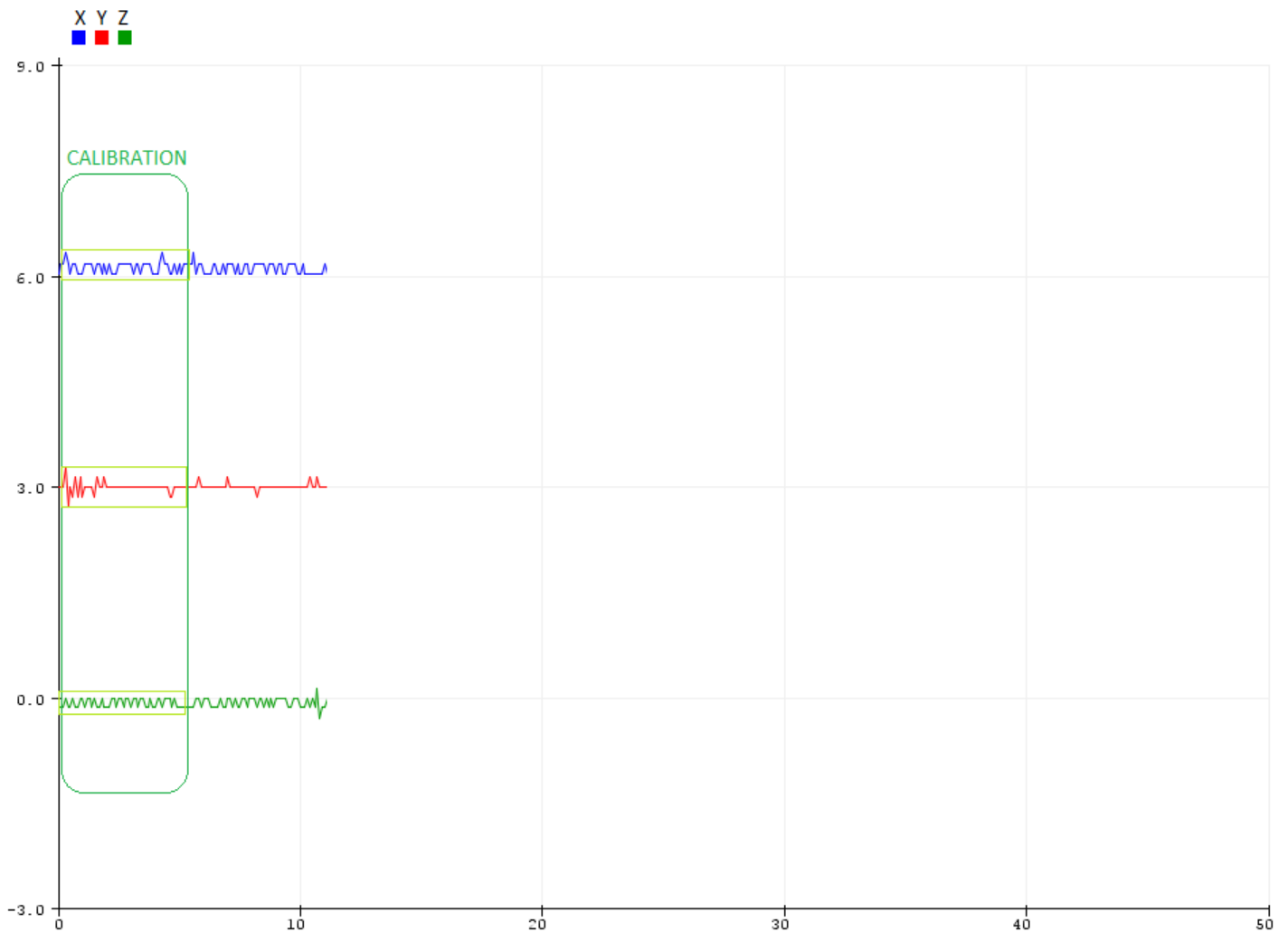
Εικόνα 29: Δοκιμή Δόνησης

Για τον λόγο λοιπόν που ειπώθηκε προηγουμένως, από εδώ και πέρα, στις όλες τις γραφικές παραστάσεις, θα προστίθενται τεχνητά 6g στη συνάρτηση του X άξονα και 3g στη συνάρτηση του Y, έτσι ώστε να απομακρυνθούν οι συναρτήσεις μεταξύ τους, για να μην καλύπτει η μια την άλλη. Έτσι γίνεται ευκολότερη η διάκριση κάθε άξονα ξεχωριστά, αλλά και σε σχέση με τους υπόλοιπους. Οπότε στη γραφική παράσταση που ακολουθεί φαίνεται η ίδια διαταραχή με πριν, όμως τώρα φαίνεται καλύτερα το πώς επηρεάστηκε ο κάθε άξονας.



Εικόνα 30: Διαχωρισμός αξόνων

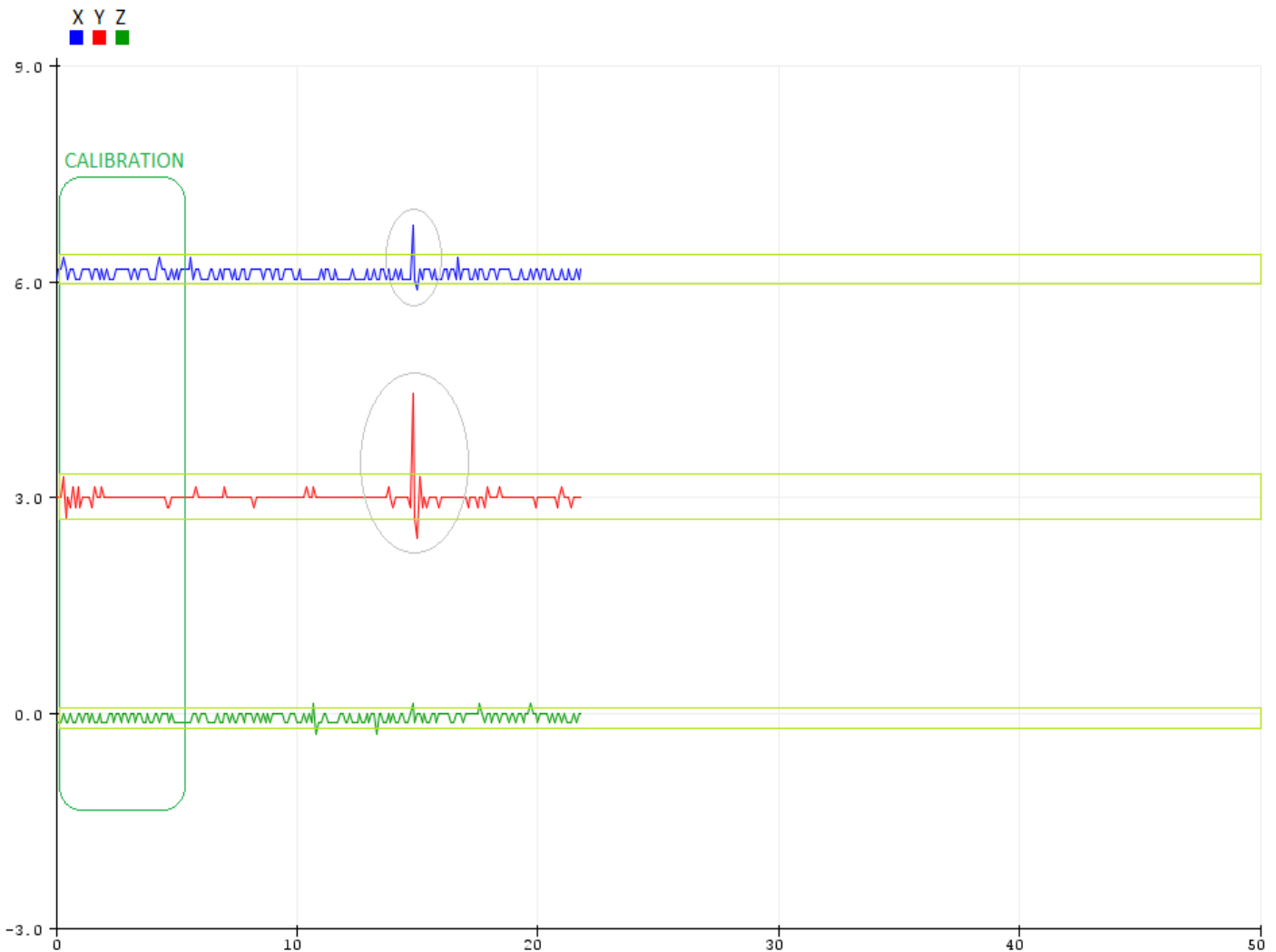
Σε αυτό το σημείο γίνεται πολύ κατανοητό το πώς πρέπει να λειτουργεί ο αλγόριθμος, έτσι ώστε να γίνουν οι τελικές ρυθμίσεις πριν το πείραμα. Όπως φαίνεται, σε κάθε μέτρηση τα πρώτα 5 δευτερόλεπτα το σύστημά κάνει βαθμονόμηση (calibration), δηλαδή «διαβάζει» τις πρώτες τιμές και βρίσκει τα όρια τιμών που πρέπει να έχουν οι δονήσεις ξεχωριστά για κάθε άξονα σε ένα «υγιές» κινούμενο μέρος που κινείται φυσιολογικά χωρίς διαταραχές.



**Εικόνα 31: Βαθμονόμηση αισθητήρα**



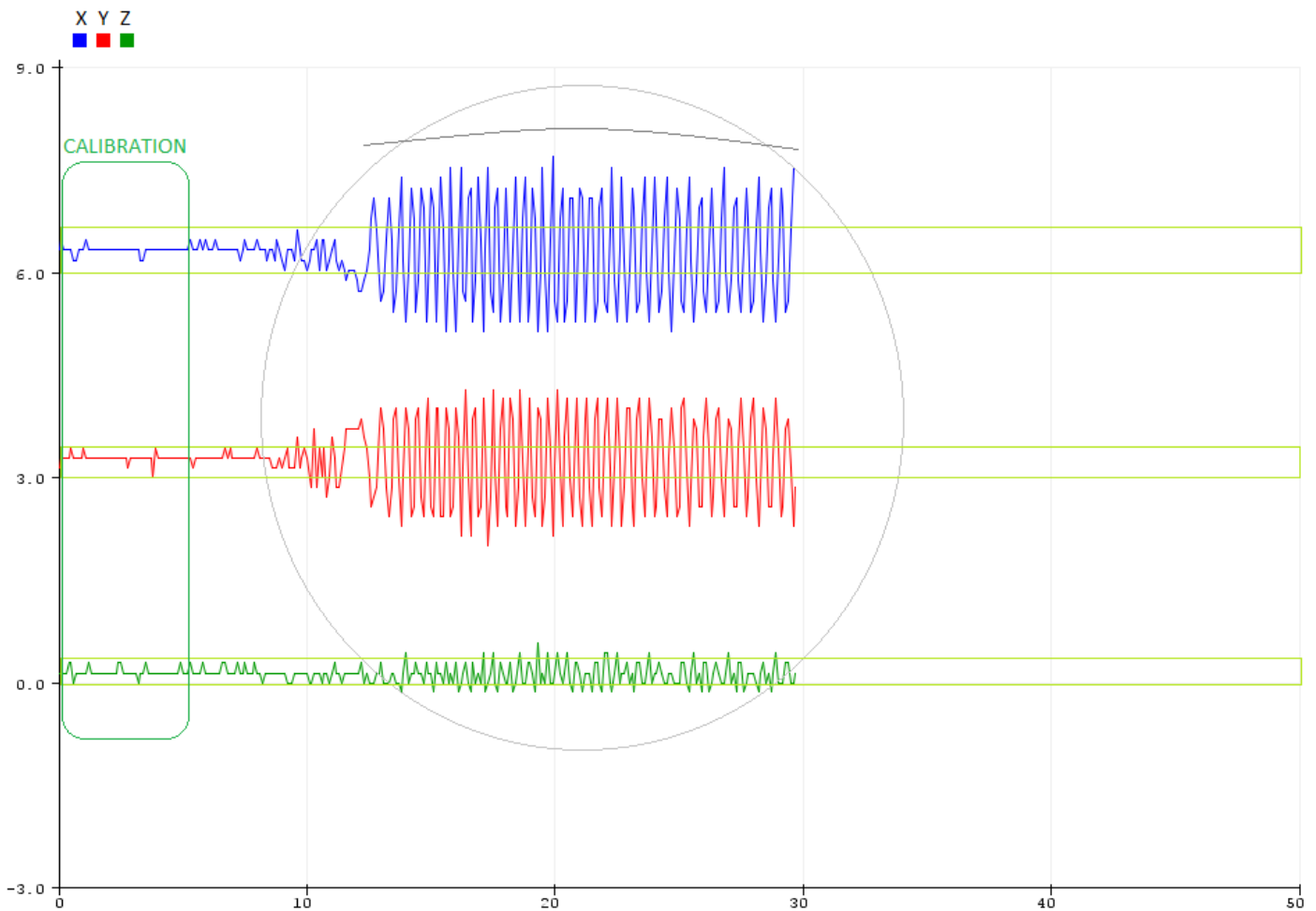
Όταν ολοκληρωθεί η βαθμονόμηση του αισθητήρα, μετά το σύστημά μας είναι έτοιμο να εντοπίσει και την παραμικρή δόνηση σε οποιονδήποτε από τους 3 άξονες, η οποία ξεφεύγει από τα φυσιολογικά όρια και προκλήθηκε πιθανόν από κάποια διαταραχή στην ομαλή κίνηση του κινούμενου μέρους που επιβλέπουμε. Στη γραφική παράσταση μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε τη διαταραχή, όπως κάνει και το σύστημά μας.



**Εικόνα 32: Απεικόνιση Μοναδιαίας Διαταραχής**

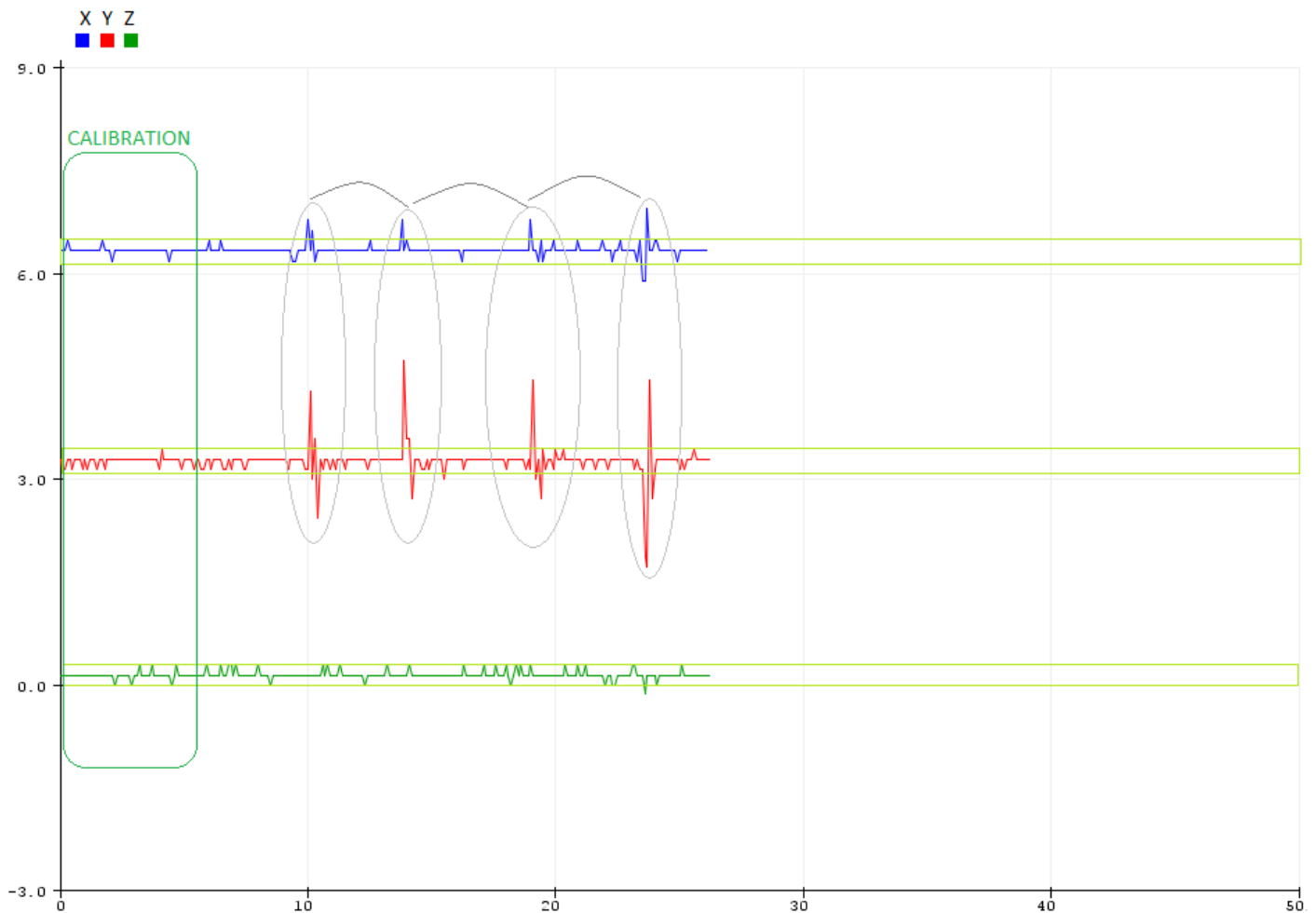
Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν διακρίνονται δυο βασικές περιπτώσεις διαταραχών οι οποίες ξεχωρίζουν οπτικά.

Στην πρώτη περίπτωση, όπως παρατηρείται στη γραφική παράσταση που ακολουθεί, υπάρχουν συνεχόμενες δονήσεις που προκαλούνται από μια διαρκή διαταραχή στην κίνηση του συστήματος που γίνεται η επίβλεψη. Ο αλγόριθμος πρέπει να είναι σε θέση να εντοπίσει τέτοιου τύπου διαταραχές και να υπολογίσει τη συχνότητα, την ένταση και τη διάρκειά τους όσο γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια.



**Εικόνα 33: Απεικόνιση Συνεχόμενης Διαταραχής**

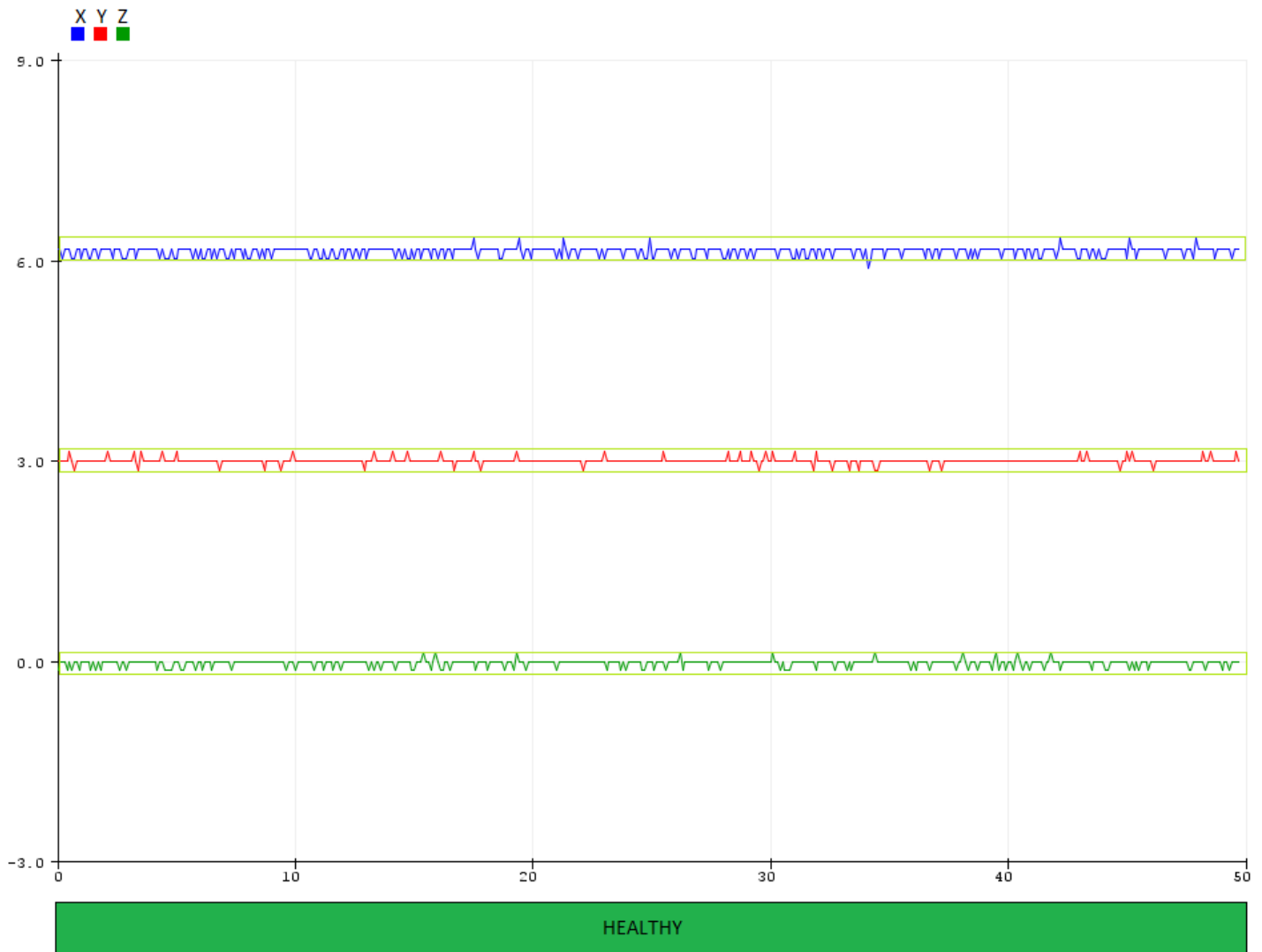
Στη δεύτερη περίπτωση που διακρίνεται στη γραφική παράσταση που ακολουθεί, διακρίνονται διακοπτόμενες διαδοχικές διαταραχές στην κίνηση του κινούμενου μέρους, που προκαλούν αντίστοιχες δονήσεις. Ο αλγόριθμος πρέπει να μπορεί να διαχωρίσει τις διακοπτόμενες διαταραχές από τις συνεχόμενες που αναφέρθηκαν πριν και να είναι ρυθμισμένος να εντοπίσει και να υπολογίσει τη συχνότητα τους, καθώς και την ένταση και τη διάρκειά τους.



**Εικόνα 34: Απεικόνιση Διακοπτόμενων Διαταραχών**

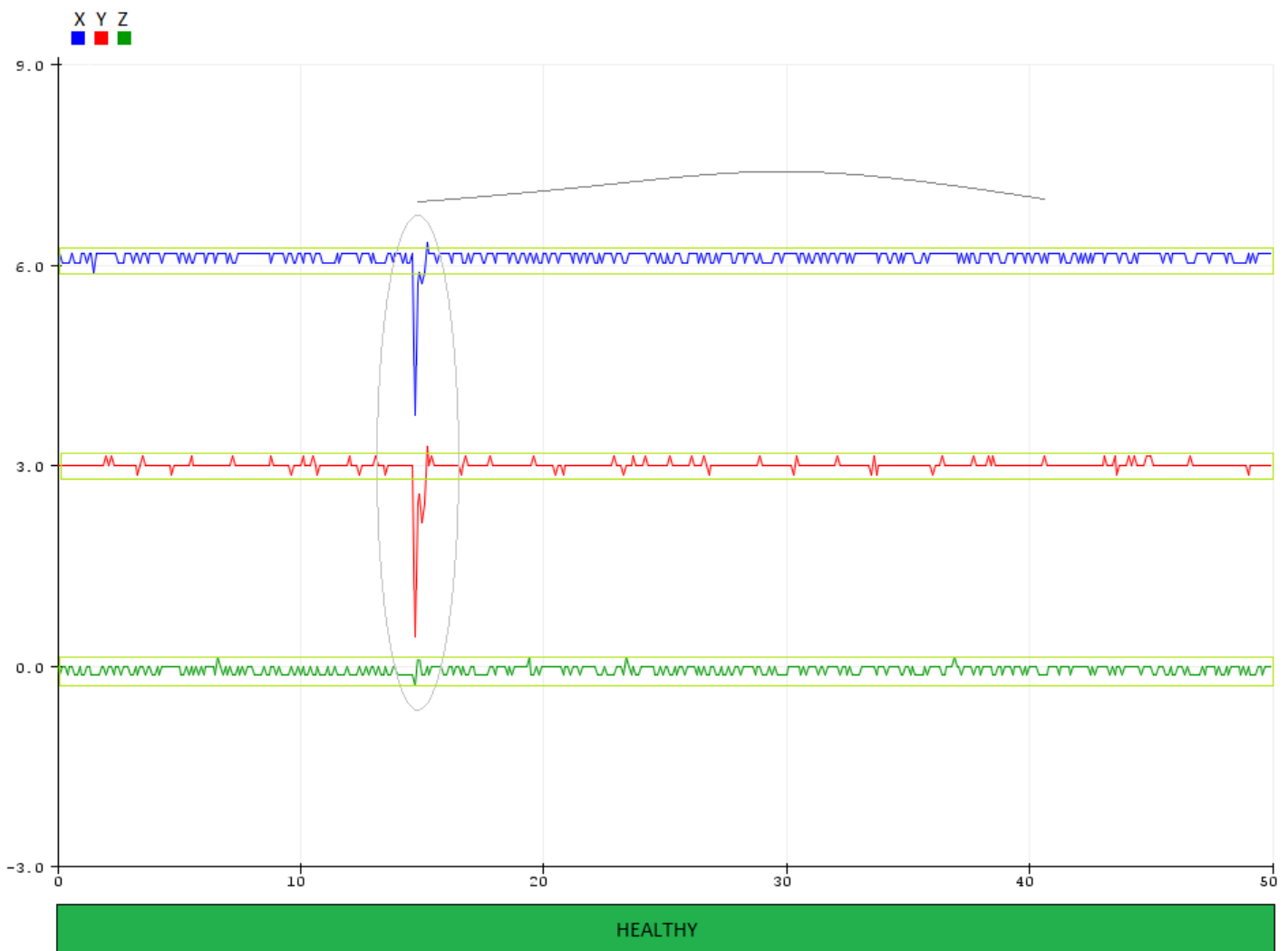
### 3.2.2 Βαθμονόμηση Συστήματος

Με την πλήρη κατανόηση του πως ακριβώς πρέπει να δουλεύει ιδανικά το σύστημά πραγματοποιούνται οι τελικές ρυθμίσεις και η βαθμονόμηση του αισθητήρα για όσο πιο δυνατόν ακριβέστερες μετρήσεις. Στη γραφική παράσταση που ακολουθεί φαίνεται μια ολοκληρωμένη μέτρηση του συστήματός, όταν το κινούμενο μέρος κινείται ομαλά, χωρίς καμία διαταραχή και κανένα σφάλμα στην υγεία του.



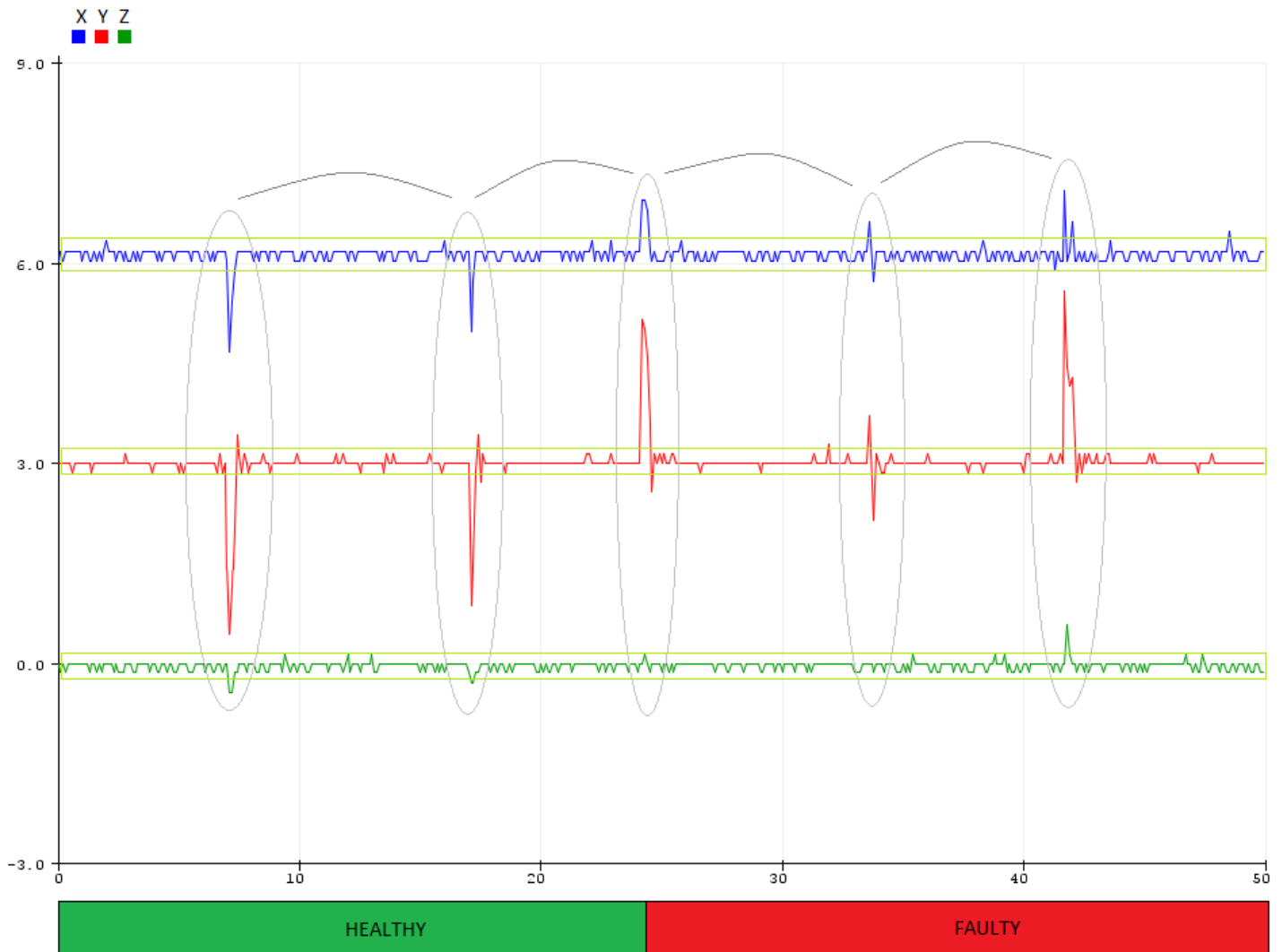
Εικόνα 35: Ρύθμιση αλγόριθμου σε κατάσταση υγείας

Στη συνέχεια πρέπει να γίνουν ρυθμίσεις για την περίπτωση στην οποία, ενώ το κινούμενο μέρος κινείται φυσιολογικά, προκαλείται τεχνητά μια διαταραχή, η οποία, όπως παρατηρεί ο καθένας στη γραφική παράσταση που ακολουθεί, επηρεάζει τον X και Y άξονα. Παρ' όλα αυτά το σύστημα πρέπει να αντιλαμβάνεται αυτήν την ξαφνική δόνηση σαν ένα μεμονωμένο γεγονός που δεν προέρχεται από κάποιο σφάλμα στην υγεία του κινούμενου μέρους, αλλά πιθανότερα από το περιβάλλον του και για αυτό το σύστημά παραμένει υγιές καθ' όλη τη διάρκεια της επίβλεψης.



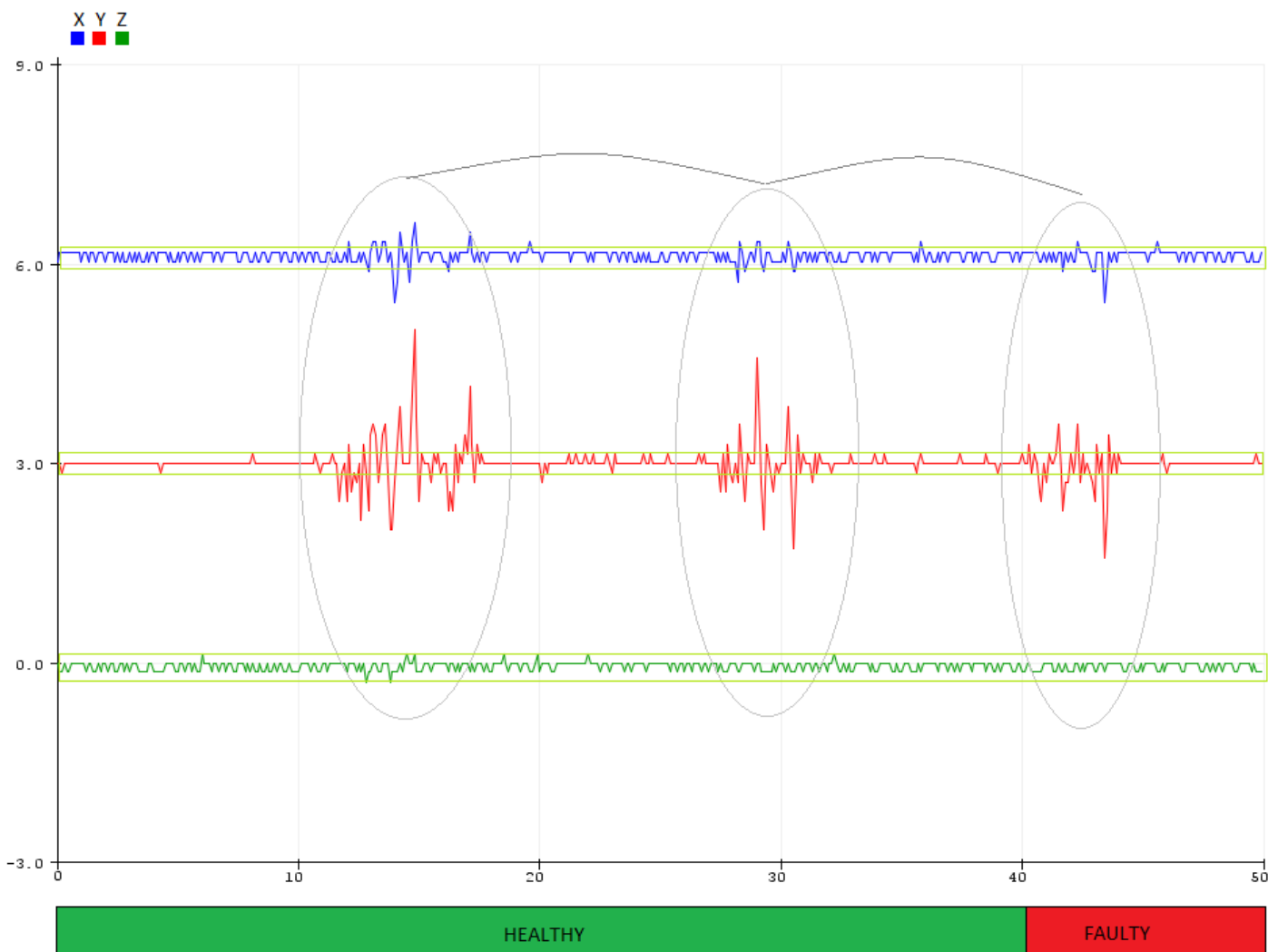
Εικόνα 36: Ρύθμιση αλγόριθμου σε κατάσταση υγείας με διαταραχή

Στην επόμενη γραφική παράσταση φαίνονται διακοπτόμενες διαταραχές σε τακτά χρονικά διαστήματα στο κινούμενο μέρος που επιβλέπει το σύστημά και με τις συνεχείς αυτές δονήσεις πρέπει, υπολογίζοντας τη συχνότητα και την ένταση των διαταραχών, να βγάλει το συμπέρασμα ότι το κινούμενο μέρος αντιμετωπίζει κάποιο σφάλμα στην κίνηση του και, άρα, η κατάσταση του παύει να είναι υγιής.



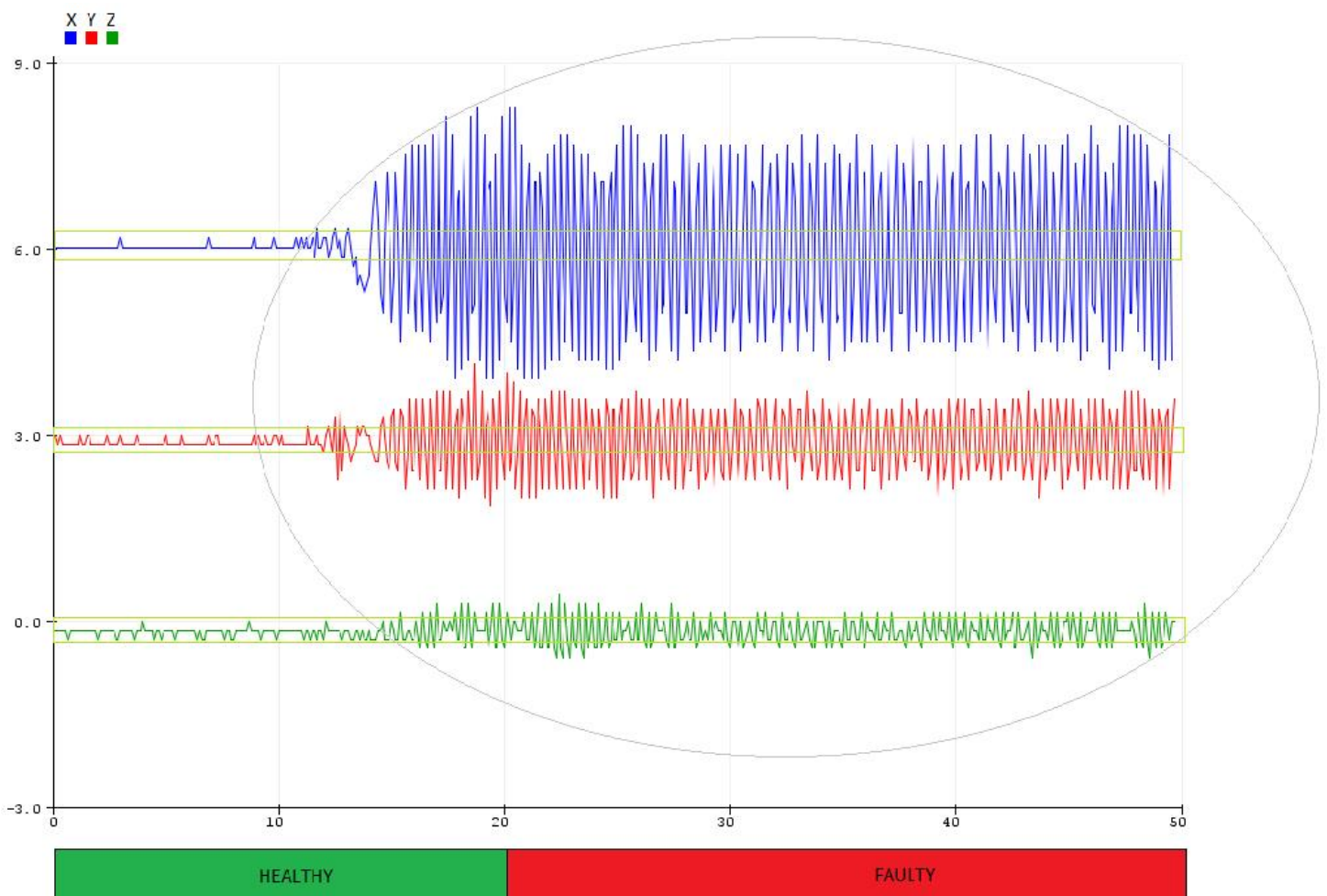
Εικόνα 37: Ρύθμιση αλγόριθμου για εντοπισμό διακοπτόμενων διαταραχών

Σε μια διαφορετική περίπτωση προκαλώντας πιο μεγάλες διαταραχές σε διαφορετική συχνότητα ανά τακτά χρονικά διαστήματα στο κινούμενο μέρος, όπως και φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση, πρέπει το σύστημά να εντοπίζει και να υπολογίζει τη συχνότητα και την ένταση αυτών των διαφορετικών δονήσεων, αλλά και τη μεγαλύτερη διάρκειά τους. Έτσι βγάζει πάλι το συμπέρασμα ότι το κινούμενο μέρος αντιμετωπίζει κάποιο σφάλμα στην κίνηση του και, άρα, η κατάσταση του παύει να είναι και σε αυτήν την περίπτωση υγιής.



Εικόνα 38: Ρύθμιση αλγόριθμου για εντοπισμό διακοπτόμενων διαταραχών

Τέλος, χρειάζεται μια τελευταία ρύθμιση πριν την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση προκαλώντας μια συνεχόμενη διαταραχή, την οποία με τις κατάλληλες ρυθμίσεις εντοπίζει το σύστημά, σε ελάχιστο χρόνο κρίνει ότι οι συνεχόμενες αυτές δονήσεις προκαλούνται από σφάλμα στην υγεία του κινούμενου μέρους και βγάζει ανάλογη ενημέρωση.



Εικόνα 39: Ρύθμιση αλγόριθμου για εντοπισμό συνεχόμενης διαταραχής



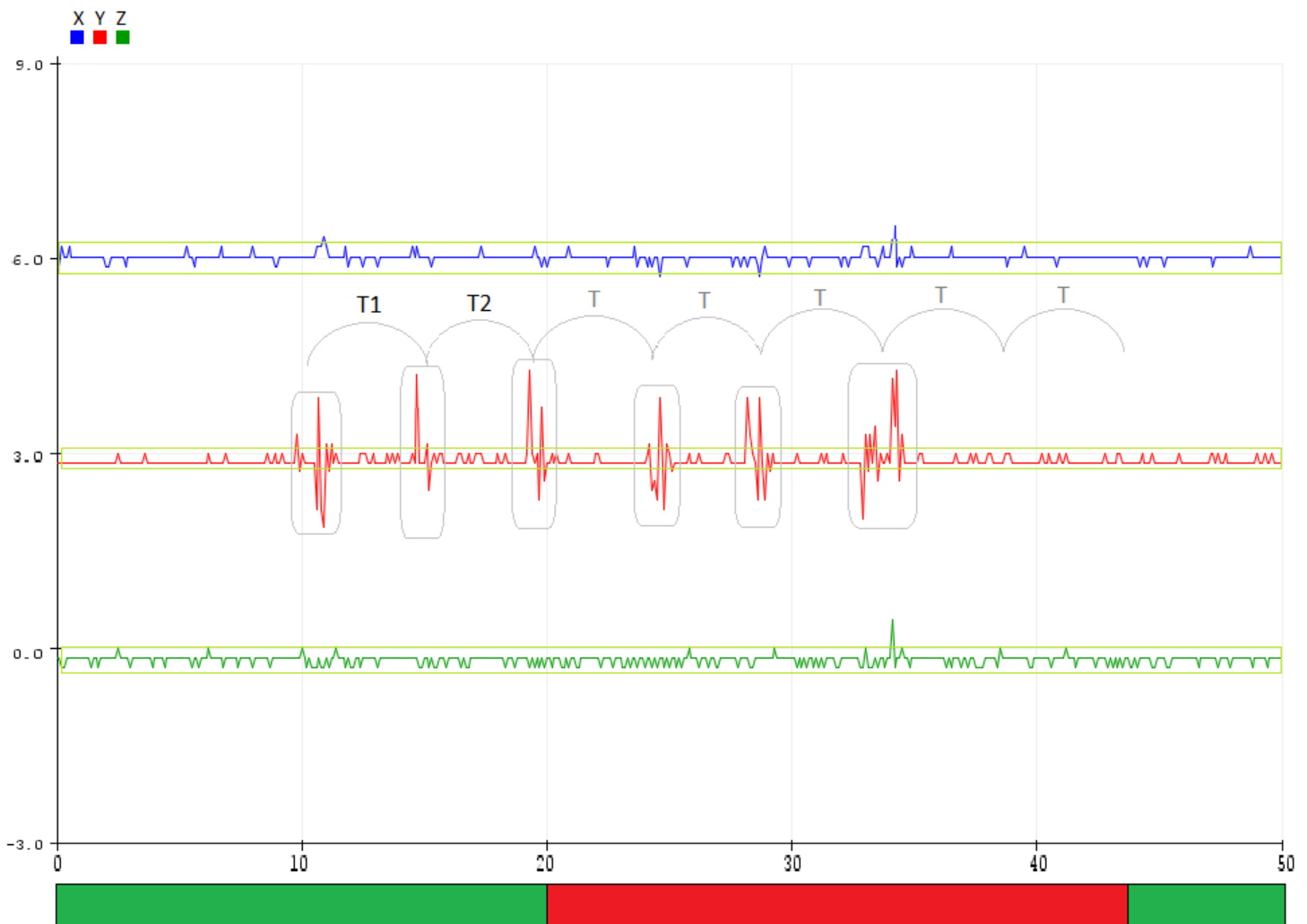
### 3.2.3 Πειράματα & Μετρήσεις

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε αποτελείται από δυο διαφορετικά και ξεχωριστά πειράματα, τα οποία έχουν σκοπό να ελέγξουν το σύστημά σε διαφορετικού τύπου σφάλματα, τα οποία είναι πιθανό να συμβούν σε κάποιο κινούμενο μέρος σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του.

#### 1° Πείραμα

Για το πρώτο πείραμα η διαδικασία είναι η εξής. Αρχικά, μπαίνει το υγιές κινούμενο μέρος σε λειτουργία. Στη συνέχεια, γίνεται η σύνδεση του συστήματος επίβλεψης, που είναι πλέον ρυθμισμένο για όλα τα διαφορετικά είδη δονήσεων, στο κινούμενο μέρος και στην τροφοδοσία. Εφόσον τελειώσει η βαθμονόμηση του συστήματος, το οποίο αρχικά δεν εντοπίζει κάποιο σφάλμα στο κινούμενο μέρος, και μετά από μερικά δευτερόλεπτα λειτουργίας, δημιουργούνται τεχνητές διαταραχές στην ομαλή κίνηση του κινούμενου μέρους με κάποιο αντικείμενο, με σκοπό να δημιουργηθούν δονήσεις και να προσομοιωθεί κάποιο σφάλμα στο κινούμενο μέρος που θα προκαλούσε αντίστοιχες δονήσεις στην πραγματικότητα. Μετά από ένα εύλογο χρονικό διάστημα γίνεται διακοπή των τεχνητών διαταραχών και τελειώνει το πρακτικό μέρος του πειράματος. Με το πέρα της πειραματικής διαδικασίας μπορεί να φανεί πόσο γρήγορα το σύστημά αντιλήφθηκε το σφάλμα που υπέστη η υγεία του κινούμενου μέρους, αλλά και το αν εντόπισε το ότι το σφάλμα αυτό διορθώθηκε όπως έχει καταγραφεί και στην γραφική παράσταση που ακολουθεί. Το πείραμα αυτό έχει διάρκεια περίπου ένα λεπτό και έχει σαν σκοπό να δείξει την αμεσότητα, αλλά και την εγκυρότητα του συστήματός στην επίβλεψη της υγείας κινούμενων μερών σε τέτοιου τύπου διαταραχές.

Όπως λοιπόν φαίνεται και στη μέτρηση που έγινε παράλληλα με το πείραμα, το σύστημά εντόπισε τις συνεχείς διαταραχές και στην τρίτη διαταραχή στα 20 δευτερόλεπτα περίπου έβγαλε σφάλμα στην υγεία του κινούμενου μέρους έχοντας υπολογίσει και τη συχνότητα τους από την περίοδο  $T = (T1+T2)/2$ . Στη συνέχεια του πειράματος διακρίνεται ότι, μετά από χρονικό διάστημα 2 περιόδων ( $2T$ ) χωρίς διαταραχές, το σύστημά κρίνει σωστά πως το κινούμενο μέρος είναι και πάλι υγιές και ενημερώνει την κατάσταση υγείας άμεσα.



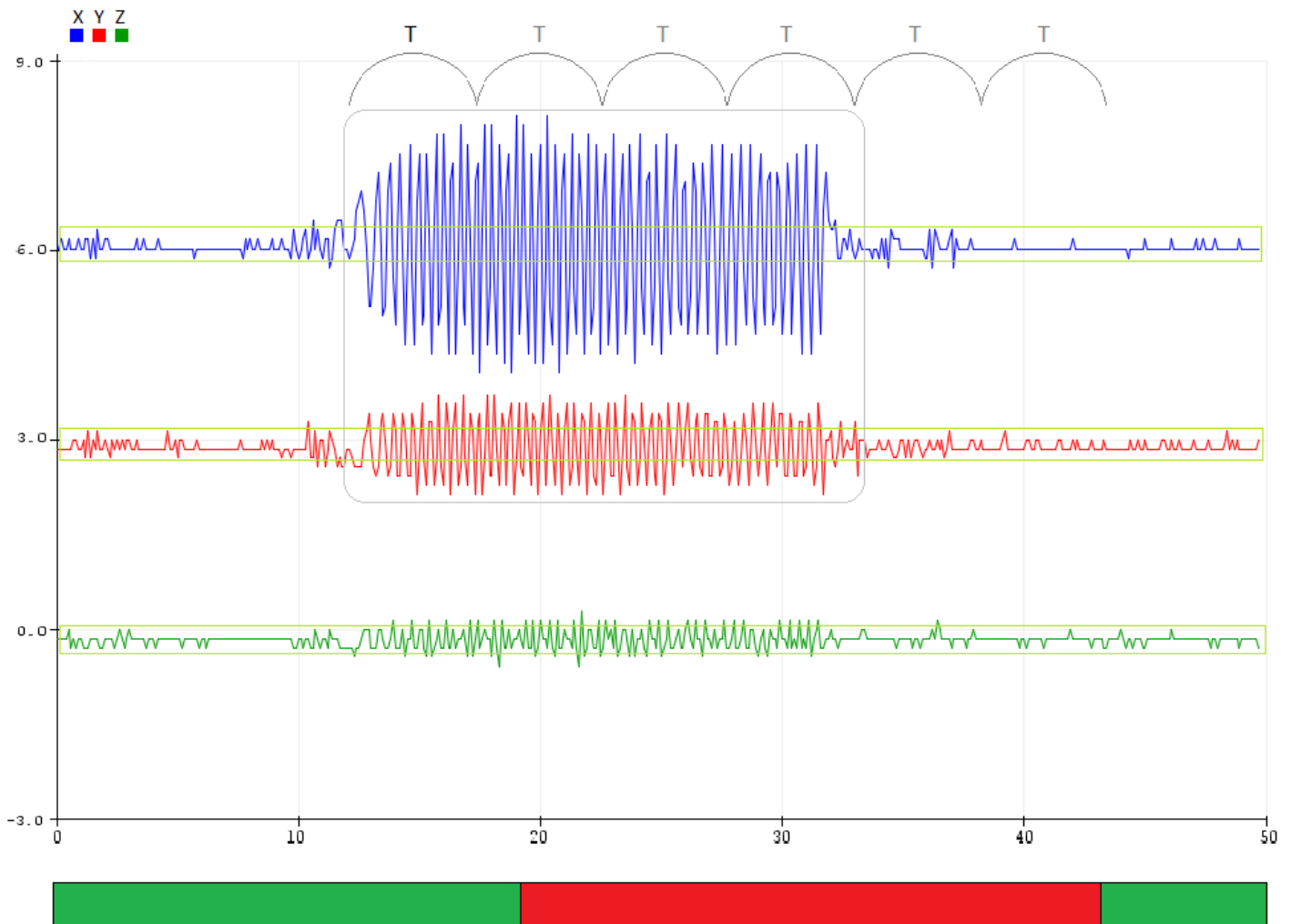
Εικόνα 40: Μέτρηση 1<sup>ου</sup> πειράματος

## 2° Πείραμα

Για το δεύτερο πείραμά λαμβάνει χώρα μια παρόμοια διαδικασία με το πρώτο πείραμά, με τη διαφορά ότι θα παρουσιαστεί διαφορετικού τύπου σφάλμα στην υγεία του κινούμενου μέρους, με μια συνεχόμενη διαταραχή, όπως έχει αναφερθεί.

Αρχικά, μπαίνει το υγιές κινούμενο μέρος και πάλι σε λειτουργία. Στη συνέχεια, συνδέεται στο κινούμενος μέρος και ενεργοποιείται το σύστημα επίβλεψης. Εφόσον τελειώσει η βαθμονόμηση του συστήματος, αρχικά δεν εντοπίζεται κάποιο σφάλμα στο κινούμενο μέρος. Στη συνέχεια μετά από μερικά δευτερόλεπτα λειτουργίας δημιουργούνται και πάλι τεχνητές διαταραχές στην ομαλή κίνηση του κινούμενου μέρους με την τοποθέτηση ενός μικρού τεχνητού βάρους στη μία μόνο μεριά του κινούμενου μέρους με σκοπό να υπάρχει άνιση κατανομή βάρους και να προσομοιωθεί κάποιο σφάλμα στο κινούμενο μέρος που θα προκαλούσε αντίστοιχες δονήσεις στην πραγματικότητα. Μετά από ένα εύλογο χρονικό διάστημα αφαιρείται το βάρος και αυτόματα σταματάνε οι διαταραχές και το κινούμενο μέρος κινείται και πάλι ομαλά. Αφού λοιπόν περάσουν μερικά δευτερόλεπτα τελειώνει και η δεύτερη πειραματική διαδικασία και από τα αποτελέσματα του πειράματος θα φανεί το κατά πόσο το σύστημα αντιλήφτηκε και αυτή τη φορά το σφάλμα που υπέστη η υγεία του κινούμενου μέρους, αλλά και το αν εντόπισε τότε το σφάλμα αυτό διορθώθηκε. Το πείραμα θα διαρκέσει και αυτό περίπου ένα λεπτό και έχει σαν σκοπό να επιβεβαιωθεί η αμεσότητα, αλλά και η εγκυρότητα του συστήματός επίβλεψης της υγείας κινούμενων μερών σε συνεχόμενες δυνατές διαταραχές. Αυτό το πείραμα είναι και το πιο πιθανό σενάριο που θα αντιμετώπιζε το σύστημά στην πραγματικότητα, αφού θα μπορούσε να προκληθεί εύκολα σε κάθε κινούμενο μέρος μετά από κάποια φθορά ενός ρουλεμάν για παράδειγμα.

Όπως λοιπόν φαίνεται στη μέτρηση που έγινε παράλληλα με το δεύτερο πείραμα, αλλά και στη γραφική παράσταση που ακολουθεί, το σύστημά εντόπισε τη συνεχόμενη διαταραχή που προκλήθηκε από το άνισο βάρος και μετά από μερικά δευτερόλεπτα έβγαλε σφάλμα στην υγεία του κινούμενου μέρους, έχοντας υπολογίσει και τη συχνότητα από την περίοδο  $T$  των δονήσεων. Στη συνέχεια του δεύτερου πειράματος παρατηρείται ότι, μετά από χρονικό διάστημα 2 περιόδων ( $2T$ ) χωρίς διαταραχές, το σύστημά κρίνει σωστά πως το κινούμενο μέρος είναι και πάλι υγιές και ενημερώνει τον χρήστη άμεσα.



Εικόνα 41: Μέτρηση 2<sup>ου</sup> πειράματος

### 3.2.4 Αποτελέσματα Πειραμάτων

Με την επιτυχημένη ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας παράχθηκαν κάποια σημαντικά αποτελέσματα για το σύστημα επίβλεψης υγείας περιστρεφόμενων μερών με επιταχυνσιόμετρο. Και στα δυο πειράματα που εκτελέστηκαν το σύστημά επίβλεψης λειτούργησε άμεσα και αψευγάδιαστα εντοπίζοντας έγκαιρα σε ελάχιστο χρόνο τα σφάλματα στην υγεία του κινούμενου μέρους μέσω των δονήσεων που προκληθήκαν, αλλά και ενημέρωσε επίσης άμεσα, μέσω της οθόνης, όταν τα σφάλματα απαλείφθηκαν και αποκαταστάθηκε η υγεία του κινούμενου μέρους. Όπως προαναφέρθηκε, τα πειράματα ήταν όσο πιο πιστή προσομοίωση πραγματικών συνθηκών μπορούσε να γίνει, όπου, λόγω κάποιας ζημίας ή φθοράς σε ένα κινούμενο μέρος, θα υπήρχαν ανάλογες δονήσεις και διαταραχές και τότε το σύστημά θα τις εντόπιζε το ίδιο εύκολα.

Η πειραματική διαδικασία που παρουσιάστηκε δείχνει αποτελέσματα που χρειάστηκαν μικρό χρονικό διάστημα για να εξαχθούν, όμως αυτό έγινε για τους σκοπούς της παρουσίασης στην παρούσα διπλωματική. Τα συγκεκριμένα πειράματα επαναλήφθηκαν αρκετές φορές και με ικανοποιητική διάρκεια αρκετών ωρών για να διασφαλιστεί η αρτιότητα και η φερεγγυότητα του συστήματός. Το σύστημά επίβλεψης δούλεψε απροβλημάτιστα καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας και των μετρήσεων με τα αποτελέσματα που εξήχθηκαν να αγγίζουν πάνω από το 90% της σωστής διάγνωσης στην υγεία των κινούμενων μερών. Συνοψίζοντας λοιπόν, η πειραματική διαδικασία στέφθηκε με απόλυτη επιτυχία.

### 3.3 Προβλήματα & Κριτική

Καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής κλήθηκα να αντιμετωπίσω αρκετές δυσκολίες όσον αφορά στην επιλογή των κατάλληλων υλικών, στην οποία με καθοδήγησε ο επιβλέπων καθηγητής, κ. Χριστοφόρου, αλλά και στη σύνδεση των υποσυστημάτων και τη γενική κατασκευή του συστήματος επίβλεψης υγείας με επιταχυνσιόμετρο, όπου χρειάστηκαν αρκετές δοκιμές μέχρι τη δημιουργία της τελικής διάταξης. Τέλος, στην πειραματική διαδικασία αντιμετώπισα δυσκολία στην προσομοίωση των σφαλμάτων στην υγεία του κινούμενου μέρους, ώστε να επιτευχθεί η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στα πειράματα και να εξαχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Στο τέλος της παρούσας διπλωματικής, κάνοντας μια ανασκόπηση όλης της πορείας από την αρχή και αξιολογώντας κάθε στάδιο ξεχωριστά, διαπιστώνω αβίαστα πόσο πολύ εξελίχθηκα σε σκέψη και πιο εξειδικευμένες γνώσεις πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Κάνοντας λοιπόν την αυτοκριτική μου, αν μπορούσα να γυρίσω πίσω τον χρόνο και να ξεκινούσα από την αρχή, θα αφιέρωνα ακόμα μεγαλύτερη προσοχή στο πειραματικό στάδιο που θεωρώ ότι είναι και το πιο καταλυτικό.

## 3.4 Συμπεράσματα

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας έγινε προσπάθεια δημιουργίας μίας ολοκληρωμένης διάταξης, ικανής να επιβλέπει την υγεία των κινούμενων μερών και να ενημερώνει άμεσα τον χρήστη σχετικά σε πραγματικό χρόνο για κάθε πιθανό σφάλμα.

Το τελικό σύστημα είναι ικανό:

- Να επιβλέπει αδιάλειπτα την υγεία του κινούμενου μέρους που μας ενδιαφέρει 24 ώρες το 24ωρο.
- Να παρέχει σχετικές πληροφορίες στον χρήστη μέσω οθόνης lcd.
- Να ενημερώνει άμεσα τον χρήστη για κάθε σφάλμα και να κρατά ιστορικό όλων των σφαλμάτων.

Ο αλγόριθμος επίβλεψης του συστήματός είναι προγραμματισμένος να εντοπίζει σχεδόν κάθε πιθανό σφάλμα που μπορεί να προκύψει σε κάποιο κινούμενο μέρος, μέσω των δονήσεων από τις διαταραχές, και να ενημερώσει άμεσα τον χρήστη μετά από μερικά δευτερόλεπτα. Παράλληλα, το σύστημά είναι ικανό να εντοπίσει αν η υγεία του κινούμενου μέρους αποκαταστάθηκε πλήρως και να ενημερώσει τον χρήστη πάλι, μετά από ένα σύντομο χρονικό διάστημα κάποιων δευτερόλεπτων. Μια ακόμα γρηγορότερη μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων θα ήταν άστοχη, καθώς η ακρίβεια θα μειωνόταν παραπάνω και το σύστημά ίσως έβγαζε λάθος συμπέρασμα για την υγεία του κινούμενου μέρους, γεγονός που δεν είναι επιθυμητό.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ικανότητα πρόβλεψης μηχανικών βλαβών έχει τεράστια σημασία για τη μείωση του κόστους συντήρησης, του χρόνου διακοπής λειτουργίας, αλλά και των κινδύνων ασφαλείας στη βιομηχανία. Για αυτόν τον λόγο ένα αυτόματο σύστημα επίβλεψης της υγείας των κινούμενων μερών, όπως το συγκεκριμένο, είναι ιδιαίτερα χρήσιμο.

Επιπροσθέτως, η παρούσα υλοποίηση είναι πολύ εύχρηστη, καθώς χρειάζεται μόνο να συνδεθεί με ένα τροφοδοτικό σε μια απλή πρίζα το Arduino και ύστερα απλά να τοποθετηθεί ο αισθητήρας πάνω στο κινούμενο μέρος που ενδιαφέρει τον χρήστη. Επίσης, το κόστος υλοποίησης μια παρόμοιας διάταξης είναι σχετικά μικρό,

λόγω των λίγων περιφερειακών συστημάτων που χρειάζεται, καθώς τα πιο ακριβά υλικά είναι η πλακέτα του Arduino και το επιταχυνσιόμετρο ADXL 335.

Συμπερασματικά, σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, το σύστημα λειτουργεί σε άρτιο βαθμό και εκπληρώνει επιτυχώς τις αρχικές προδιαγραφές που είχαν τεθεί.



### 3.5 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Από την παρούσα εργασία παράχθηκαν σημαντικά δεδομένα, τα οποία μια μελλοντική εργασία θα μπορούσε να αξιοποιήσει κατάλληλα. Ένας τρόπος που θα μπορούσε να επιτευχθεί αυτό θα ήταν να παραχθούν περισσότερα σχετικά δεδομένα με τη διεξαγωγή κάποιου παρομοίου πειράματος με διαφορετικό κινούμενο μέρος. Έτσι τα καινούργια δεδομένα θα μπορούν να συγκριθούν με τα υπάρχοντα με σκοπό την εξαγωγή επιπλέον συμπερασμάτων.

Παράλληλα, θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η χρήση κάποιας τεχνολογίας ασύρματης επικοινωνίας του arduino με κάποιο κινητό η υπολογιστή μέσω Bluetooth και τη δημιουργία κάποιας σχετικής εφαρμογής.

# Κεφάλαιο 4

## 4.1 Κώδικας

Ακολουθεί ο κώδικας του Arduino, που γράφτηκε σε γλώσσα wiring C++ στο περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE, και περιέχει όλες τις εντολές που αποτελούν τον πυρήνα του συστήματος επίβλεψης υγείας του κινούμενου μέρους.

Αρχικά γίνεται αρχικοποίηση των μεταβλητών και εισαγωγή των κατάλληλων βιβλιοθηκών για την σύνδεση με την οθόνη lcd και το επιταχυνσιόμετρο Adxl 335.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
const int xpin = A0; // x-axis
const int ypin = A1; // y-axis
const int zpin = A2; // z-axis
int xmax=0, xmin=1000;
int ymax=0, ymin=1000;
int zmax=0, zmin=1000;
int x,y,z,gx[19],gy[19],gz[19];
int flag,XYZ,j,F,k,f1,f2,check,count,flagc,checkT=0;
int flage=1;
```

Στη συνέχεια γίνεται δημιουργία των ειδικών χαρακτήρων για την απεικόνιση των γραφικών παραστάσεων στην lcd οθόνη.

```
byte M[] = {
  B00000,
  B00000,
  B00000,
  B11111,
  B00000,
  B00000,
  B00000,
  B00000};
byte H1[] = {
  B00000,
  B00000,
  B01110,
  B11111,
  B00000,
  B00000,
```

```

    B00000,
    B00000};
byte H2[] = {
    B00000,
    B01110,
    B11111,
    B11111,
    B00000,
    B00000,
    B00000,
    B00000};
byte L1[] = {
    B00000,
    B00000,
    B00000,
    B11111,
    B01110,
    B00000,
    B00000,
    B00000};
byte L2[] = {
    B00000,
    B00000,
    B00000,
    B11111,
    B11111,
    B01110,
    B00000,
    B00000};

```

Ξεκινά η εγκατάσταση όλων των σημαντικών λειτουργιών του προγράμματος.

```

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    lcd.begin(20,4);
    lcd.createChar(0, M);
    lcd.createChar(1, H1);
    lcd.createChar(2, H2);
    lcd.createChar(3, L1);
    lcd.createChar(4, L2);
    lcd.backlight();
    lcd.clear();
    delay(400);
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.write("-Accelerometer Test-");
    lcd.setCursor(1, 2);

```

```

lcd.write("by Antony Roussos!");
delay(1000);
lcd.setCursor(1, 2);
lcd.write(" Starting... ");
delay(2000);
lcd.clear();
}

```

Στη συνέχεια ξεκινά το βασικό κομμάτι του αλγόριθμου επίβλεψης της υγείας του κινούμενου μέρους.

```

void loop() {
  for(int i=0;i<19;i++){
    gx[i]=0;
    gy[i]=0;
    gz[i]=0;
  }
}

```

Ξεκινάει η αυτόματη βαθμονόμηση του αισθητήρα για τα πρώτα 4 δευτερόλεπτα.

```

lcd.setCursor(1, 0);
lcd.write("Calibrating sensor");
delay(500);
lcd.setCursor(4, 2);
lcd.write("|   |");
delay(200);
int j=5;
for(int i=0;i<40;i++){
  z = analogRead(xpin);
  y = analogRead(ypin);
  x = analogRead(xpin);
  Serial.print(((float)x - 300)/65*9.8); //print x value on serial monitor
  Serial.print("\t");
  Serial.print(((float)y - 311)/68.5*9.8); //print y value on serial monitor
  Serial.print("\t");
  Serial.print(((float)z - 350)/68*9.8); //print z value on serial monitor
  Serial.print("\n");
  delay(100);
  if (x>xmax) xmax=x;
  if (x<xmin) xmin=x;
  if (y>ymax) ymax=y;
  if (y<ymin) ymin=y;
  if (z>zmax) zmax=z;
  if (z<zmin) zmin=z;
  if(i%4==0){
    lcd.setCursor(j, 2);

```

```

    lcd.write("-");
    j++;
  }
}
delay(200);
lcd.clear();
lcd.setCursor(1, 0);
lcd.write("Healthy");
Function_FaultsHistory();
lcd.setCursor(17, 0);
lcd.write("C: ");
delay(500);

```

Γίνεται η έναρξη του βρόγχου επίβλεψης της υγείας με μετρήσεις 5 φορές το δευτερόλεπτο.

```

while(1){
  z = analogRead(xpin);
  y = analogRead(ypin);
  x = analogRead(xpin);

```

Έλεγχος μετά από κάθε μέτρηση για σφάλματα στο κινούμενο μέρος.

```

if(flage==1){
  //Vibration Check
  if (x>xmax+2||x<xmin-2||y>ymax+2||y<ymin-2||z>zmax+2||z<zmin-2){
    XYZ++;
    flag=1;
    lcd.setCursor(16, 0);
    lcd.write(">");
    lcd.setCursor(19, 0);
    lcd.write(check);
  }
  if(flag==1)k++;
  if(k==9){
    k=0;
    flag=0;
    lcd.setCursor(16, 0);
    lcd.write(" ");
    if(XYZ>1)check++;
    XYZ=0;
  }
  if (check>0)count++;
  //Faulty Check
  if (check>2){
    flagc=1;

```

```

    checkT=(count-9)/2;
    if (checkT<10)checkT=10;
    delay(100);
}
//Timer Reset
if (count>140){
    check=0;
    count=0;
    lcd.setCursor(19, 0);
    lcd.write("X");
    delay(500);
    lcd.setCursor(19, 0);
    lcd.write(" ");
}
}

```

Αυτό το κομμάτι κώδικα «τρέχει» όταν γίνει εντοπισμός σφάλματος στο κινούμενο μέρος για να ενημερωθεί το ιστορικό και η κατάσταση υγείας σε “Faulty”.

```

if (flagc==1 && flage==1){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(1, 0);
    lcd.write("FAULTY!");
    F++;
    Function_FaultsHistory();
    lcd.setCursor(17, 0);
    lcd.write("***");
    flage=0;
    count=0;
    check=0;
}

```

Υστερα ξεκινά ο έλεγχος για επαναφορά της υγείας του κινούμενου μέρους σε “Healthy”.

```

if(flage==0){
    //Vibration Check
    if (x>xmax+2||x<xmin-2||y>ymax+2||y<ymin-2||z>zmax+2||z<zmin-2){
        XYZ++;
        if(XYZ>1){
            count=0;
            XYZ=0;
        }
        lcd.setCursor(16, 0);
        lcd.write(">***");
    }
    count++;
}

```

```

if (count>checkT/2){
  lcd.setCursor(16, 0);
  lcd.write(" ");
}
if (count>checkT){
  lcd.setCursor(17, 0);
  lcd.write("*** ");
}
if (count>(checkT*1.5)+2){
  lcd.setCursor(17, 0);
  lcd.write("* ");
}
//Healthy Check
if (count>(checkT*2)+5){
  flage=1;
  flagc=0;
  XYZ=0;
  count=0;
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.write(" ");
  lcd.setCursor(1, 0);
  lcd.write("Healthy");
  Function_FaultsHistory();
  lcd.setCursor(17, 0);
  lcd.write("C:");
  lcd.setCursor(19, 0);
  lcd.write(" ");
  delay(100);
}
}

```

Κάλεσμα των συναρτήσεων για τη δημιουργία των γραφικών παραστάσεων των 3 αξόνων.

```

Function_CalculateGraph();
Function_PrintGraph();
for(int i=0;i<18;i++){
  gx[i]= gx[i+1];
  gy[i]= gy[i+1];
  gz[i]= gz[i+1];
}
Function_Flash();
delay(100);
}
}

```

Συνάρτηση για την εμφάνιση των βέλων χρόνου

```
int Function_Flash(){
    if(f1<4){
        f1++;
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.write(">");
        lcd.setCursor(8, 0);
        lcd.write("<");
        if(f1==4)f2=0;
    }
    if(f2<4){
        f2++;
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.write(" ");
        lcd.setCursor(8, 0);
        lcd.write(" ");
        if(f2==4)f1=0;
    }
}
```

Συνάρτηση για τον υπολογισμό των γραφικών παραστάσεων.

```
int Function_CalculateGraph(){
    //X axis
    if(x<=xmax+2 && x>=xmin-2)gx[18]=0;
    if(x>xmax+2 && x<=xmax+7)gx[18]=1;
    if(x>xmax+7)gx[18]=2;
    if(x<xmin-2 && x<=xmax-7)gx[18]=-1;
    if(x<xmin-7 )gx[18]=-2;
    //Y axis
    if(y<=ymax+2 && y>=ymin-2)gy[18]=0;
    if(y>ymax+2 && y<=ymax+7)gy[18]=1;
    if(y>ymax+7)gy[18]=2;
    if(y<ymin-2 && y<=ymax-7)gy[18]=-1;
    if(y<ymin-7)gy[18]=-2;
    //Z axis
    if(z<=zmax+2 && z>=zmin-2)gz[18]=0;
    if(z>zmax+2 && z<=zmax+7)gz[18]=1;
    if(z>zmax+7)gz[18]=2;
    if(z<zmin-2 && z<=ymax-7)gz[18]=-1;
    if(z<zmin-7)gz[18]=-2;
}
```



Συνάρτηση για την εκτύπωση των γραφικών παραστάσεων στην οθόνη.

```
int Function_PrintGraph(){
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write("X");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.write("Y");
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.write("Z");
    for(int i=0;i<19;i++){
        //X axis
        if ( gx[i]==0){
            lcd.setCursor(i+1, 1);
            lcd.write((byte)0); }
        if ( gx[i]==1){
            lcd.setCursor(i+1, 1);
            lcd.write((byte)1);}
        if ( gx[i]==2){
            lcd.setCursor(i+1, 1);
            lcd.write((byte)2);}
        if ( gx[i]==-1){
            lcd.setCursor(i+1, 1);
            lcd.write((byte)3);}
        if ( gx[i]==-2){
            lcd.setCursor(i+1, 1);
            lcd.write((byte)4);}
        //Y axis
        if ( gy[i]==0){
            lcd.setCursor(i+1, 2);
            lcd.write((byte)0);}
        if ( gy[i]==1){
            lcd.setCursor(i+1, 2);
            lcd.write((byte)1);}
        if ( gy[i]==2){
            lcd.setCursor(i+1, 2);
            lcd.write((byte)2);}
        if ( gy[i]==-1){
            lcd.setCursor(i+1, 2);
            lcd.write((byte)3);}
        if ( gy[i]==-2){
            lcd.setCursor(i+1, 2);
            lcd.write((byte)4);}
        //Z axis
        if ( gz[i]==0){
            lcd.setCursor(i+1, 3);
```

```

    lcd.write((byte)0);}
if ( gz[i]==1){
    lcd.setCursor(i+1, 3);
    lcd.write((byte)1);}
if ( gz[i]==2){
    lcd.setCursor(i+1, 3);
    lcd.write((byte)2);}
if ( gz[i]==-1){
    lcd.setCursor(i+1, 3);
    lcd.write((byte)3);}
if ( gz[i]==-2){
    lcd.setCursor(i+1, 3);
    lcd.write((byte)4);}
}
}

```

Συνάρτηση για τον υπολογισμό του ιστορικού υγείας.

```

int Function_FaultsHistory(){
if(F>99){
    lcd.setCursor(10, 0);
    lcd.write("F:");
    lcd.setCursor(12, 0);
    lcd.write("99+");
}else{
    lcd.setCursor(10, 0);
    lcd.write("F:");
    lcd.setCursor(12, 0);
    if(F/10==0)lcd.write("0");
    if(F/10==1)lcd.write("1");
    if(F/10==2)lcd.write("2");
    if(F/10==3)lcd.write("3");
    if(F/10==4)lcd.write("4");
    if(F/10==5)lcd.write("5");
    if(F/10==6)lcd.write("6");
    if(F/10==7)lcd.write("7");
    if(F/10==8)lcd.write("8");
    if(F/10==9)lcd.write("9");
    lcd.setCursor(13, 0);
    if (F%10==0)lcd.write("0");
    if (F%10==1)lcd.write("1");
    if (F%10==2)lcd.write("2");
    if (F%10==3)lcd.write("3");
    if (F%10==4)lcd.write("4");
    if (F%10==5)lcd.write("5");

```

```
if (F%10==6)lcd.write("6");  
if (F%10==7)lcd.write("7");  
if (F%10==8)lcd.write("8");  
if (F%10==9)lcd.write("9");  
}  
}
```

# Βιβλιογραφία

- [1] O'Donnell P. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, Part I. IEEE Trans. Ind. Appl. 1985, 853–864.
- [2] Peña H, Ramirez C, Ledezma E. Maintenance Testing and Failure. *Energía y Computación* 1994, 71–76.
- [3] Wang W, Dezhi Li D. Health Condition Monitoring of Induction Motors. Published: November 18th 2015.
- [4] Bellini A, Filippetti F, Tassoni C, Capolino G. Advances in diagnostic techniques for induction machines. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008, 55, 4109–4126.
- [5] Nandi S, Toliyat H, Li X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2005, 20, pp. 719–729.
- [6] Szabó L, Tóth F, Kovács E, Fekete G. An overview on induction machine's diagnosis methods. *J. Comput. Sci. Control Syst.* 2008, 1, pp. 229–234.
- [7] Baranski M, Decner A, Polak A. Selected diagnostic methods of electrical machines operating in industrial conditions. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2014, 21, 2047–2054.
- [8] Μαναφης Γ, Μητροπούλου Μ. Αισθητήρες και Εφαρμογές τους στα Συστήματα Αυτομάτου Έλεγχου, ΤΕΙ Καβάλας, Πτυχιακή Εργασία, 2011.
- [9] Τριτσώνης Α, Τέρτης Γ. Αισθητήρες Κίνησης και Μετατόπισης. ΤΕΙ Κρήτης, Πτυχιακή Εργασία, Ιούνιος 2012.
- [10] Subhasis N, Hamid T, Xiaodong L. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review. January 2006. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 20(4) pp. 719 – 729.
- [11] Frederic C. Condition Monitoring of Induction motors using Vibration and Electrical signature Analysis, EE mods Conference, Nantes, France, 14-17 September 2009.
- [12] Ιστοσελίδα: <https://en.wikipedia.org/wiki/Accelerometer>
- [13] Ιστοσελίδα: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/accelerometer-basics/all>
- [14] Ιστοσελίδα: <https://blog.endaq.com/accelerometer-selection>
- [15] Ιστοσελίδα: <https://www.k-makris.gr/accelerometer-gr/>

- [16] Narwade S, Kulkarni P, Partil C. Fault detection of induction motor using current and vibration monitoring. *Int. J. Adv. Comput. Res.* 2013, 3, pp. 272.
- [17] Ιστοσελίδα: <https://www.te.com/usa-en/industries/sensor-solutions/insights/types-of-accelerometers.html>
- [18] Dr. S Shrivastava. "Vibration Signature Analysis of Ball Bearing of Three Phase Induction Motor", *IOSR Journal of Electrical and Electronics*, vol. 1, no. 3, 2012.
- [19] Ιστοσελίδα: <https://media.neliti.com/media/publications/287655-health-monitoring-of-induction-motor-thr-bbd02f2d.pdf>
- [20] Πελενδρίτης Ι. Μελέτη Πιεζοηλεκτρικού Επιταχυνσιόμετρου, ΕΜΠ, Τμήμα ΗΜΜΥ, Διπλωματική Εργασία, 2005.
- [21] Νερούτσος Π. Ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής χαρακτηριστικών δονήσεων με χρήση αδρανειακών αισθητήρων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2012.
- [22] Bonnett A. Root cause AC motor failure analysis with a focus on shaft failures. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2000,36, 1435–1448.
- [23] Boukra T, Lebaroud A. Classification of induction machine faults, *Systems Signals and Devices (SSD)*. In *Proceedings of the 7th IEEE International Multi-Conference*, Amman, Jordan, 27–30 June 2010 pp. 1–6.
- [24] Ιστοσελίδα: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [25] Galeriu C, Edward S, Esper G. An arduino investigation of simple harmonic motion. *Physics Teache*, 52, 2014, 157-159.
- [26] Alt P M, Pleshko P. 'Scanning limitations of liquid crystal displays', *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-21, February 1974, 146–155
- [27] Ιστοσελίδα: <https://microcontrollerslab.com/adxl-335-accelerometer-interfacing/>
- [28] Ιστοσελίδα: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-analog-accelerometer-breakouts.pdf>
- [29] Ιστοσελίδα: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl335.pdf>
- [30] Ιστοσελίδα: <https://learn.adafruit.com/adafruit-analog-accelerometer-breakouts>
- [31] Zhang P, Du Y, Habetler T, Lu B. A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2011, 47, 34–46.

- [32] Bianchini F, Monteiro P, Pederiva R, Diniz V. An empirical demodulation for electrical fault detection in induction motors. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2016, 65, 559–569.
- [33] Haji M, Toliyat H. Pattern recognition—A technique for induction machines rotor broken bar detection. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2001, 16, 312–317.
- [34] Das A, Maiti J, Banerjee R. Process monitoring and fault detection strategies: A review. *Int. J. Q. Res. Manag.* 2012, 29, 720–752.
- [35] Thomson W, Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults. *IEEE Ind. Appl. Mag.* 2001, 7, 26–34.
- [36] Jayaswal P, Verma S, Wadhvani A. Application of ANN, fuzzy logic and wavelet transform in machine fault diagnosis using vibration signal analysis. *J. Q. Maint. Eng.* 2010 190–213.