



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ  
ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ  
ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ**

**Κωνσταντίνος Κωστάκης**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος (Επιβλέπων)**

**Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος**

**Καθηγητής Αριστομένης Αντωνιάδης (ΜΠΔ)**

**Χανιά 2019**

## Πρόλογος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Κώστα Καλαϊτζάκη, για την βοήθεια, την υποστήριξη και την ενθάρρυνση που μου πρόσφερε καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας, και τους κ. Ευτύχιο Κουτρούλη και κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, μέλη της τριμελούς επιτροπής, για την σημαντική βοήθεια και συμβολή τους. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον αδερφό μου Φίλιππο, τους φίλους και τους γονείς μου, για την πολυετή υποστήριξη και αντοχή τους.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα σύστημα μέτρησης ταλαντώσεων σε μηχανολογικές διατάξεις. Η διάταξη αποτελείται από έναν μικροελεγκτή με δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας με τον υπολογιστή όπου εκτελείται το πρόγραμμα διεπαφής χρήστη για την προβολή και την καταγραφή των μετρήσεων και τους αισθητήρες επιτάχυνσης. Το πλεονέκτημα της προτεινόμενης υλοποίησης σε σχέση με τις υπάρχουσες λύσεις στην αγορά είναι το χαμηλό της κόστος. Το προτεινόμενο σύστημα μέτρησης ελέγχθηκε με την χρήση πειραματικής διάταξης παραγωγής ταλαντώσεων. Οι πειραματικές μετρήσεις υποδεικνύουν ότι το σύστημα είναι αξιόπιστο για την διάγνωση ενός σημαντικού μέρους των βλαβών που παρουσιάζονται σε στρεφόμενο μηχανολογικό εξοπλισμό.

## Abstract

In this thesis, a low-cost data acquisition system is designed to measure vibrations in mechanical arrays. The measurement device consists of a microcontroller which is wirelessly connected to a computer. The measured vibration data can be visualized in real time and saved for post-processing on the computer with the help of a GUI. The proposed data acquisition system is significantly cheaper compared to similar commercially available products for fault detection. The accuracy and reliability of the system was tested by measuring known synthetic vibration signals. The signals were generated by an experimental device specifically designed for the purpose of testing the proposed vibration measurement system. Experimental results indicate that the designed system can be used for the detection of a wide range of mechanical faults in rotation equipment.

# Περιεχόμενα

<b>1. Εισαγωγή .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Τύποι Βλαβών και Διάγνωση .....</b>	<b>9</b>
2.1 Κακή Ευθυγράμμιση .....	9
2.2 Αζυγοσταθμία .....	13
2.3 Μηχανική Χαλαρότητα .....	18
2.4 Τεχνικές Ψηφιακής Επεξεργασίας Σήματος .....	20
2.4.1 Μετασχηματισμός Fourier .....	20
2.5 Αισθητήρες Επιτάχυνσης .....	21
2.5.1 Τεχνολογίες Επιταχυνσιόμετρων .....	21
2.5.2 MEMS Επιταχυνσιόμετρα .....	22
2.6 Τα Πρωτόκολλα UDP και TCP .....	23
<b>3. Περιγραφή του προτεινόμενου συστήματος διάγνωσης βλαβών .....</b>	<b>24</b>
3.1 Δομή του συστήματος .....	24
3.2 Προδιαγραφές του Προτεινόμενου Συστήματος .....	24
3.3 Επιλογή του Επιταχυνσιόμετρου .....	25
3.4 Επιλογή Μικροελεγκτή .....	28
<b>4. Κόστος Υλικών .....</b>	<b>31</b>
<b>5. Υλοποίηση του Συστήματος .....</b>	<b>32</b>
5.1 Block diagram της Προτεινόμενης Υλοποίησης .....	32
5.2 Συνοπτικά η Λειτουργία του Συστήματος .....	33
5.2.1 Εκκίνηση των ESP32 και ADXL345 .....	33
5.2.2 Εκκίνηση της εφαρμογής GUI .....	34
5.2.3 Ανάλυση των μετρήσεων .....	35
5.3 Λεπτομερής Περιγραφή .....	37
5.3.1 ESP32: Ανάγνωση και Αποστολή Μετρήσεων .....	37
5.3.2 Μορφοποίηση των Πακέτων από τον ESP32 .....	38
5.3.3 GUI Threads και Παραλαβή Πακέτων .....	39
5.3.4 Περιγραφή του GUI .....	41
5.3.5 Ποσοτικά η Ροή των Δεδομένων .....	47
5.3.6 SPI 4-Wire Data Read για τα ADXL345 .....	47
5.3.7 Χρήση του FIFO του ADXL345 .....	49
5.3.8 Πρόβλημα Συγχρονισμού και Διαφορά Φάσης .....	51

5.3.9	Ρυθμίσεις των ADXL345.....	53
5.3.10	Μορφή Δεδομένων των ADXL345 .....	54
<b>6.</b>	<b>Αποτελέσματα.....</b>	<b>55</b>
6.1	Πειραματική Διάταξη Δοκιμής Επιταχυνσιομέτρου.....	55
6.2	Δοκιμή Διάταξης σε Μονή Συχνότητα .....	59
6.3	Δοκιμή σε πιο Σύνθετα Σήματα.....	67
6.4	Χρονισμός Ταυτόχρονων Μετρήσεων .....	69
<b>7.</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>74</b>
7.1	Μελλοντικές επεκτάσεις .....	74
<b>8.</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>75</b>

# 1. Εισαγωγή

---

Οι εργασίες συντήρησης σε μια οποιαδήποτε μηχανολογική εγκατάσταση καταναλώνουν ένα σημαντικό ποσοστό του συνολικού χρόνου ζωής του εξοπλισμού. Ιδιαίτερα σε γραμμές παραγωγής, η συντήρηση τυπικά πραγματοποιείται σε τακτά χρονικά διαστήματα, καθώς καταστροφική αστοχία κάποιου υποσυστήματος μπορεί να θέσει όλη τη γραμμή εκτός λειτουργίας για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η παραγωγή προφανώς διακόπτεται κατά τη διάρκεια συντήρησης των μηχανημάτων, οπότε η τακτική συντήρηση δεν πρέπει να πραγματοποιείται συχνότερα απ' ό τι είναι απαραίτητο.

Συχνά δεν είναι εφικτό να εκτιμηθεί ο ακριβής χρόνος κατά τον οποίο ένα σύστημα χρειάζεται συντήρηση. Επίσης, όταν τα αποτελέσματα φυσιολογικής φθοράς αρχίσουν να γίνονται αισθητά στην ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος ή στις προδιαγραφές λειτουργίας του συστήματος (επίπεδα θορύβου, αύξηση θερμοκρασίας κλπ.), η βλάβη βρίσκεται ήδη σε προχωρημένο στάδιο, και οι εργασίες επισκευής ή αντικατάστασης των προβληματικών υποσυστημάτων απαιτούν περισσότερο χρόνο και κόστος συγκριτικά με τις εργασίες τακτικής συντήρησης.

Η βέλτιστη λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνεται από την έγκαιρη διάγνωση βλαβών, τη διαδικασία δηλαδή εντοπισμού της βλάβης στα πρώτα στάδια εμφάνισης της, όταν είναι ευκολότερα αντιμετωπίσιμη. Με αυτό τον τρόπο, αποφεύγεται η απώλεια λόγω καταστροφικών αστοχιών του παραγωγικού συστήματος καθώς και η απώλεια παραγωγικού χρόνου για τακτική συντήρηση μηχανημάτων που δεν έχουν υποστεί ακόμα φθορά σε επίπεδα που να χρειάζεται επέμβαση.

Η πλέον διαδεδομένη τεχνική διάγνωσης βλαβών είναι η μέτρηση και ανάλυση κραδασμών. Το μεγαλύτερο ποσοστό αστοχιών σε μηχανολογικά συστήματα παρατηρείται σε κινούμενα (συνήθως στρεφόμενα) υποσυστήματα, όπως για παράδειγμα άξονες μεταφοράς ισχύος, διατάξεις μείωσης στροφών, αντλίες και περωτές. Η φυσιολογική λειτουργία στρεφόμενων υποσυστημάτων παράγει ταλαντώσεις - κραδασμούς σε συχνότητες που είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις γνωστές ταχύτητες περιστροφής καθώς και με γενικά άγνωστες ιδιοσυχνότητες ταλάντωσης. Στην περίπτωση εμφάνισης κάποιας βλάβης η συνολική ενέργεια κραδασμών αυξάνεται σταδιακά καθώς η βλάβη - φθορά επιδεινώνεται. Ήδη όμως από τα πολύ αρχικά στάδια εμφάνισης μια βλάβης, συχνότητες που σχετίζονται με το μηχανισμό εμφάνισής της μπορούν να εντοπιστούν στους παραγομένους κραδασμούς.

Η διαδικασία εντοπισμού βλαβών μέσω της ανάλυσης κραδασμών περιγράφεται στη συνέχεια. Αρχικά, οι παραγόμενοι κραδασμοί από μια μηχανολογική διάταξη καταγράφονται με τη βοήθεια κατάλληλου μετρητικού εξοπλισμού. Τα μετρούμενα σήματα αναλύονται και αναγνωρίζονται οι συχνότητες στις οποίες εμφανίζεται μεγάλη ενέργεια ταλάντωσης. Το τελικό στάδιο είναι η κατανόηση και ερμηνεία αυτών των σημάτων. Για παράδειγμα, αν γίνει μέτρηση κραδασμών σε ένα ναυτικό κινητήρα και παρατηρηθεί υψηλή ενέργεια ταλάντωσης σε συχνότητα 73 Hz πρέπει να ερευνηθεί κατά ποσό αυτό εξηγείται βάσει φυσιολογικής λειτουργίας (πχ. συχνότητα εμβολισμού των κυλίνδρων) ή σχετίζεται με κάποια βλάβη.

Η διαδικασία λοιπόν περιλαμβάνει τα κύρια υποσυστήματα που ενδέχεται να εμφανίσουν βλάβη καθώς και την ανάλυση των σχετικών μηχανισμών βλάβης. Για αυτό το κομμάτι υπάρχει

εκτεταμένη βιβλιογραφία η οποία καλύπτεται μερικώς και περιληπτικά στο σχετικό κεφάλαιο αυτής της εργασίας, χωρίς να είναι το βασικό αντικείμενο μελέτης.

Το σύστημα για διάγνωση βλαβών που αναπτύσσεται σε αυτή την εργασία είναι η διαδικασία μέτρησης και επεξεργασίας κραδασμών. Προφανώς στην αγορά διατίθεται πληθώρα συσκευών μέτρησης ταλαντώσεων, σχεδιασμένων αποκλειστικά για τη διάγνωση βλαβών, συνήθως όμως το κόστος τέτοιου εξοπλισμού είναι υψηλό (τάξης μεγέθους των χιλιάδων ευρώ). Στην παρούσα μελέτη διερευνάται η δυνατότητα σχεδιασμού ενός συστήματος καταγραφής κραδασμών χαμηλού κόστους με δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας με Η/Υ.



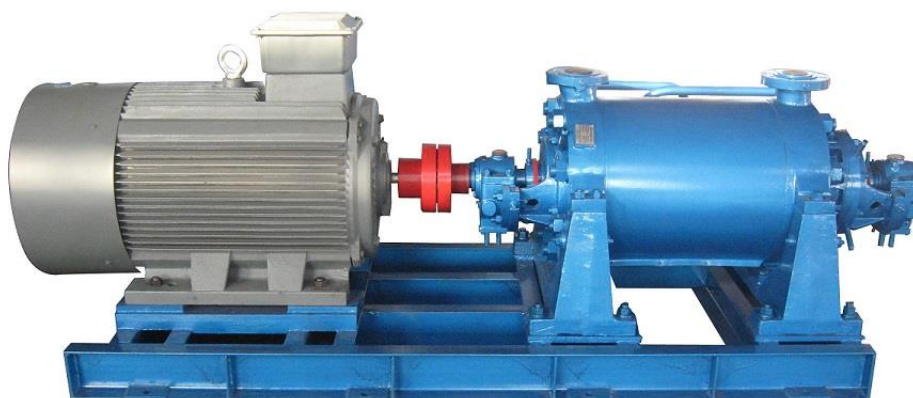
## 2. Τύποι Βλαβών και Διάγνωση

---

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθεται σύντομη βιβλιογραφική έρευνα που σχετίζεται με τις βλάβες των μηχανολογικών συστημάτων και τη διάγνωση των βλαβών αυτών. Παρατίθενται συνοπτικά συνήθεις βλάβες μηχανολογικών εγκαταστάσεων, τα βασικά αίτια που τις προκαλούν, ο μηχανισμός δημιουργίας κραδασμών και η απόκριση στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Οι βλάβες που αναπτύσσονται (κακή ευθυγράμμιση, αζυγοσταθμία και μηχανική χαλαρότητα) είναι αυτές με τους πλέον απλούς μηχανισμούς εμφάνισης. Σε αυτή την οικογένεια βλαβών, οι παραγόμενες ταλαντώσεις (κραδασμοί) είναι άμεσα συσχετισμένοι με το μηχανισμό της βλάβης και εμφανίζουν σημαντικά πλάτη ταλάντωσης. Σε αντίθεση, στις πιο συνθέτες βλάβες, δεν παράγονται άμεσα ταλαντώσεις υψηλής ενέργειας (υψηλό πλάτος ταλάντωσης) αλλά διεγείρονται ιδιοσυχνότητες της μηχανολογικής διάταξης (πχ. φθορά εδράνων κύλισης, και ολίσθησης). Για πληρέστερη λίστα βλαβών καθώς και για λεπτομερέστερη περιγραφή, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία [2].

### 2.1 Κακή Ευθυγράμμιση

Η κακή ευθυγράμμιση είναι μία από τις συνηθέστερες βλάβες στρεφόμενων μηχανών. Εμφανίζεται στη σύνδεση των αξόνων δύο διαφορετικών μηχανών. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 2-1 τυχόν προβλήματα ευθυγράμμισης θα εμφανιστούν στη σύνδεση ανάμεσα στον ηλεκτροκινητήρα και το συμπιεστή (κόκκινο coupler). Η κακή ευθυγράμμιση μπορεί να οφείλεται είτε σε κακή αρχική τοποθέτηση της διάταξης, είτε σε θερμοκρασιακές συστολές – διαστολές είτε λόγω εξωτερικών φορτίσεων. Οποιαδήποτε από τις παραπάνω αίτιες προκαλούν παραμορφώσεις στους άξονες των συνεργαζόμενων μηχανών με συνέπεια την εμφάνιση ισχυρών καμπτικών τάσεων που φορτίζουν τα έδρανα στήριξης κατά την ακτινική και αξονική διεύθυνση.

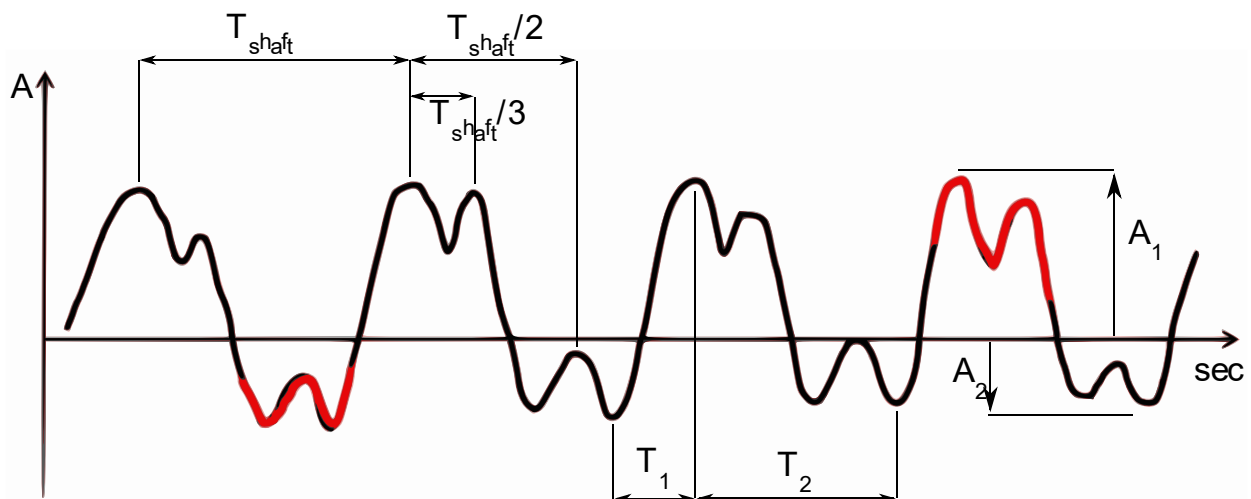


Εικόνα 2-1. Ηλεκτρικός κινητήρας συνδεδεμένος με συμπιεστή [3].

#### Κυματομορφή Απόκρισης:

Η κυματομορφή της απόκρισης μιας μηχανής με κακή ευθυγράμμιση εμφανίζει περιοδικότητα κατά  $T_{shaft}$  (περίοδος περιστροφής του άξονα) και των αρμονικών της,  $T_{shaft}/2$ ,  $T_{shaft}/3$  όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-1. Ένας κύκλος  $T_{shaft}$  του χρονικού σήματος αποτελείται από δύο χρονικές περιόδους  $T_1$  και  $T_2$ . Την χρονική περίοδο  $T_1$  παρατηρείται μία ταχύρρυθμη γνησίως αύξουσα μεταβολή του πλάτους της ταλάντωσης μέχρι το μέγιστο  $A_1$ . Την χρονική περίοδο  $T_2$  παρατηρείται μεταβολή του πλάτους μέχρι το ελάχιστο  $A_2$  με την ταυτόχρονη παρουσία  $N$  κορυφών.

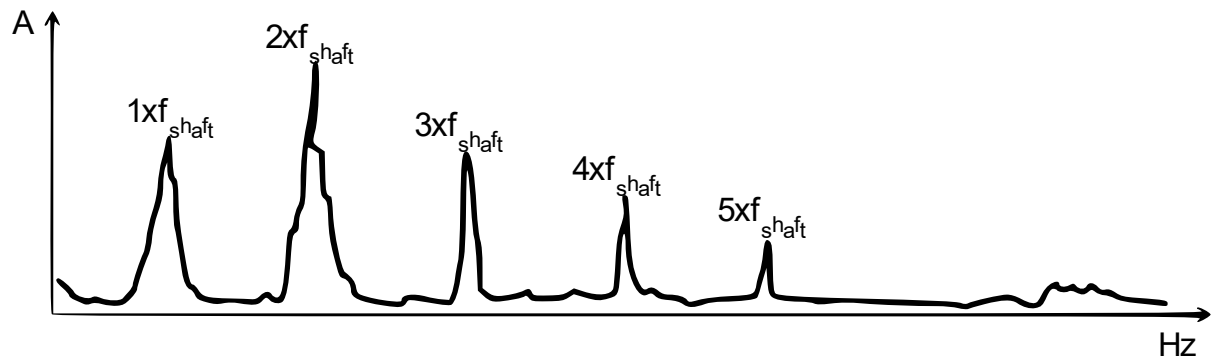
Κάθε περιστροφή του άξονα ολοκληρώνεται σε χρόνο  $T_{shaft}$ . Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα δεν είναι σταθερή κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου. Την περίοδο  $T_2$  η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται λόγω των καμπτικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στον απευθυγραμμισμένο άξονα συνεπώς και στο coupler. Κατά την κάμψη του coupler παράγονται επιπλέον ταλαντώσεις με αρμονικές συχνότητες της  $T_{shaft}$ . Αυτές εμφανίζονται στην χρονική κυματομορφή μέσω των  $N$  κορυφών. Στην περίοδο  $T_1$  δεν ασκούνται πλέον στο coupler καμπτικές δυνάμεις, με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα. Σε αυτή την περίοδο οι δύο άξονες και το coupler ταλαντώνονται στην συχνότητα περιστροφής τους. Έτσι η περίοδος  $T_1$  είναι μικρότερη από την περίοδο  $T_2$ . Οι παραγόμενες αρμονικές ταλαντώσεις της  $T_{shaft}$  έχουν ίδια φάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό του πλάτους της ταλάντωσης στην αρνητική πλευρά του άξονα του πλάτους  $A$ , δηλαδή  $A_1 > A_2$ .



Σχήμα 2-1. Χρονική κυματομορφή απόκρισης μηχανής με κακή ευθυγράμμιση.

#### Φάσμα:

Το φάσμα του σήματος αποτελείται κυρίως από αιχμές στην συχνότητα περιστροφής του άξονα  $f_{shaft}$  και στις αρμονικές της. Με την χειροτέρευση της βλάβης αυξάνεται το πλάτος των αιχμών καθώς και το πλήθος των αρμονικών της  $f_{shaft}$ . Κυρίως η 2<sup>η</sup> αρμονική αλλά και 3<sup>η</sup> αρμονική έχουν μεγαλύτερο πλάτος από την συχνότητα  $f_{shaft}$  όσο η φθορά εξελίσσεται.

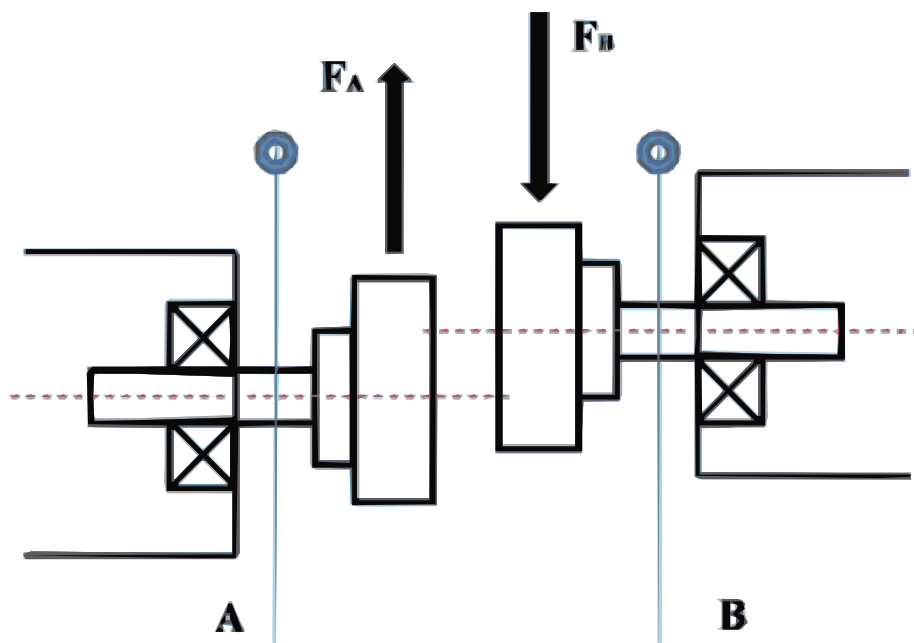


Σχήμα 2-2. Φάσμα Απόκρισης Μηχανής με Κακή Ευθυγράμμιση.

### Διαφορά Φάσης:

Για τον εντοπισμό της κακής ευθυγράμμισης μπορεί να βοηθήσει η μέτρηση της διαφοράς φάσης μεταξύ των ταλαντώσεων σε κατάλληλες θέσεις. Αυτή η διαφορά περιγράφει τον τρόπο ταλάντωσης της μηχανής. Έτσι δρα βοηθητικά όταν η επεξεργασία του μετρούμενου σήματος και του φάσματός του δεν επαρκούν.

Στην παράλληλη κακή ευθυγράμμιση, στις δύο πλευρές (A: κινητήρας, B: στρεφόμενη μηχανή όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-3) του coupler ασκούνται δύο αντίθετες φορές δυνάμεις στην κατεύθυνση (κατακόρυφη ή οριζόντια) στην οποία εμφανίζεται η παράλληλη απόκλιση των δύο αξόνων.



Σχήμα 2-3. Παράλληλη κακή ευθυγράμμιση.

Παράλληλη κακή ευθυγράμμιση:

$$|H_A - V_A| = 90^\circ \pm 30^\circ \quad (2.1)$$

$$|H_B - V_B| = 90^\circ \pm 30^\circ \quad (2.2)$$

$$|V_A - V_B| = 180^\circ \pm 30^\circ \quad (2.3)$$

Όπου:

$H$  Horizontal

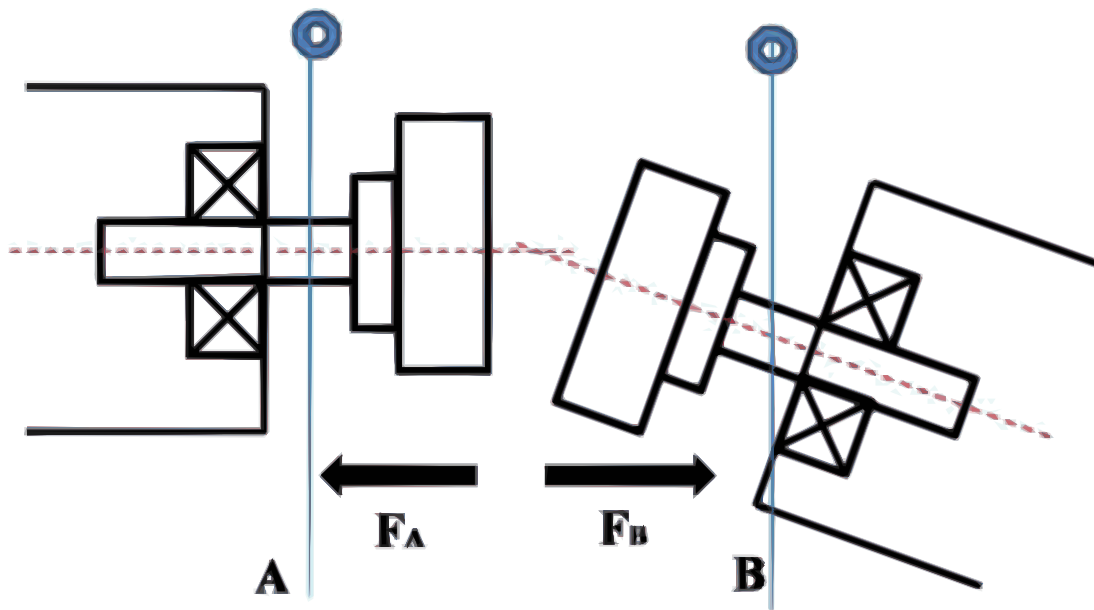
$V$  Vertical

$H_A$  η οριζόντια ταλάντωση στη θέση  $A$

$V_A$  η κάθετη ταλάντωση στην θέση  $A$

Αντίστοιχα και για την θέση  $B$  με  $H_B$  και  $V_B$ .

Στη γωνιακή κακή ευθυγράμμιση όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4, ασκούνται δυνάμεις αντίθετης φοράς στο coupler λόγω της κάμψης των αξόνων των δύο μηχανών στην αξονική χωρική κατεύθυνση.



Σχήμα 2-4. Γωνιακή κακή ευθυγράμμιση.

Γωνιακή κακή ευθυγράμμιση:

$$|H_A - V_A| = 90^\circ \pm 30^\circ \quad (2.4)$$

$$|H_B - V_B| = 90^\circ \pm 30^\circ \quad (2.5)$$

$$|Ax_A - Ax_B| = 180^\circ \pm 30^\circ \quad (2.6)$$

όπου:

$H$  Horizontal

$V$  Vertical

$Ax$  Axial

$H_A$  η οριζόντια ταλάντωση στη θέση  $A$

$V_A$  η κάθετη ταλάντωση στην θέση  $A$

$Ax_A$  η ταλάντωση στην κατεύθυνση του άξονα στην θέση  $A$

Αντίστοιχα και για την θέση  $B$  με  $H_B$ ,  $V_B$  και  $Ax_B$ .

### Παρατηρήσεις:

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας προκαλούν μεταβολές στο πλάτος της απόκρισης μιας μηχανής με κακή ευθυγράμμιση. Οι μηχανολογικές διατάξεις αποτελούνται από μεταλλικά μηχανικά στοιχεία. Αυτά διαστέλλονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η αρχική ευθυγράμμιση γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή κοινώς εν ψυχρώ. Κατά την λειτουργία της η μηχανολογική διάταξη ισορροπεί σε μία θερμοκρασιακή κατάσταση υψηλότερη από την εν ψυχρώ. Η διαστολή των μεταλλικών μερών έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση τους σε σχέση με την αρχική ευθυγράμμιση, άρα και άμεσο αντίκτυπο στην ταλάντωση της μηχανολογικής διάταξης. Έτσι αν η ταλάντωση μιας μηχανολογικής διάταξης της παραπάνω μορφής μεταβάλλεται κατά την μεταβολή των συνθηκών θερμοκρασίας είναι ισχυρή ένδειξη κακής ευθυγράμμισης.

Στην περίπτωση κακής ευθυγράμμισης, οι μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής του άξονα της μηχανής δεν επηρεάζουν την απόκρισή της.

## 2.2 Αζυγοσταθμία

Εκτός από την κακή ευθυγράμμιση, μία συνηθισμένη βλάβη των στρεφόμενων μηχανών είναι και η αζυγοσταθμία. Προκαλείται από την ανομοιόμορφη κατανομή της μάζας ενός μηχανικού στοιχείου, π.χ. παραμόρφωση στο περύγιο ενός ανεμιστήρα.

### Αιτίες:

Βασικές αιτίες της εμφάνισης της αζυγοσταθμίας είναι:

- Ατέλειες του υλικού του μηχανικού στοιχείου (διάκενα, μη σταθερή πυκνότητα).
- Φθορές κατά τη λειτουργία της μηχανής.
- Επικαθήσεις πρόσθετων υλικών σε κάποιο μηχανικό στοιχείο.
- Εσφαλμένες ενέργειες στη συντήρηση της μηχανής.

### Μηχανισμός Βλάβης:

Το μη επιθυμητό αποτέλεσμα των παραπάνω αιτιών είναι η ανομοιόμορφη κατανομή της μάζας ενός μηχανικού στοιχείου (Σχήμα 2-5). Απαραίτητη προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία ενός στρεφόμενου μηχανικού στοιχείου είναι το κέντρο περιστροφής  $g_c$  να ταυτίζεται με το κέντρο μάζας  $m_c$ . Κατά την ταύτιση των δύο κέντρων, η συνισταμένη των φυγόκεντρων δυνάμεων ισούται με μηδέν. Αν δεν συμβαίνει αυτό αναπτύσσονται φυγόκεντρες δυνάμεις  $F_c$ , οι οποίες στρέφονται με την ταχύτητα του άξονα περιστροφής  $f_{shaft}$  του μηχανικού στοιχείου. Η φυγόκεντρος δύναμη αναπτύσσεται στο σημείο που παρουσιάζεται η επιπλέον μάζα  $m$ , έχει φορά από το κέντρο περιστροφής προς την περιφέρεια του άξονα και είναι ανάλογη του τετραγώνου της κυκλικής συχνότητας περιστροφής του άξονα, δηλαδή:

$$F_c = m R \omega^2 \quad (2.7)$$

όπου:

$F_c$  η φυγόκεντρος δύναμη

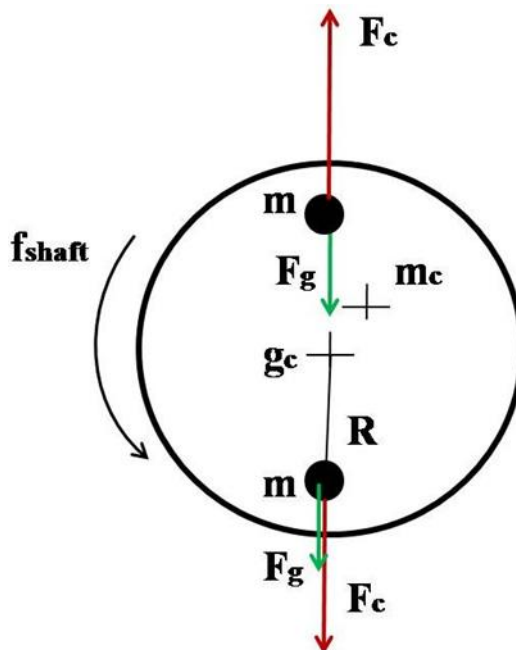
$m$  η επιπλέον μάζα

$R$  η απόσταση της μάζας από το κέντρο περιστροφής

$\omega$  η κυκλική συχνότητα περιστροφής

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εξίσωση μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής του άξονα προκαλούν ανάλογες μεταβολές του πλάτους της ταλάντωσης του μηχανικού στοιχείου.

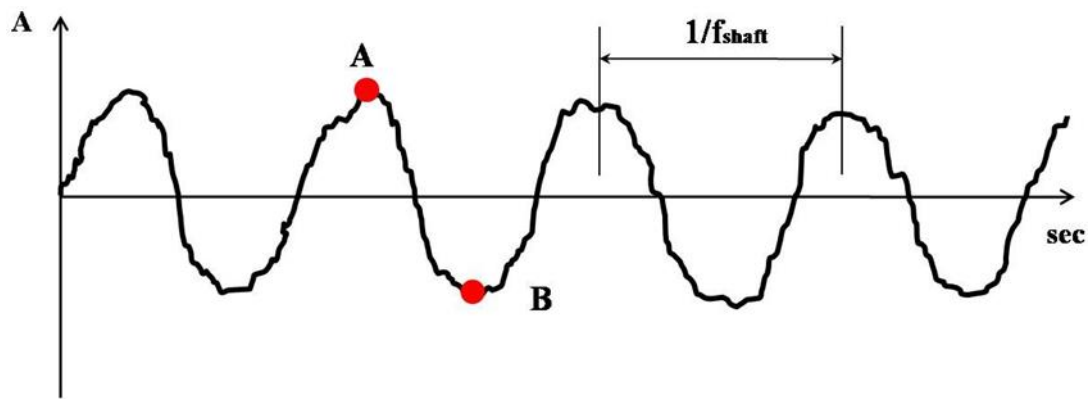
Στη φυγόκεντρο δύναμη προστίθεται διανυσματικά και το βάρος  $F_g$  της μάζας  $m$ .



Σχήμα 2-5. Ανάπτυξη φυγόκεντρων δυνάμεων στην αζυγοσταθμία.

### Κυματομορφή απόκρισης:

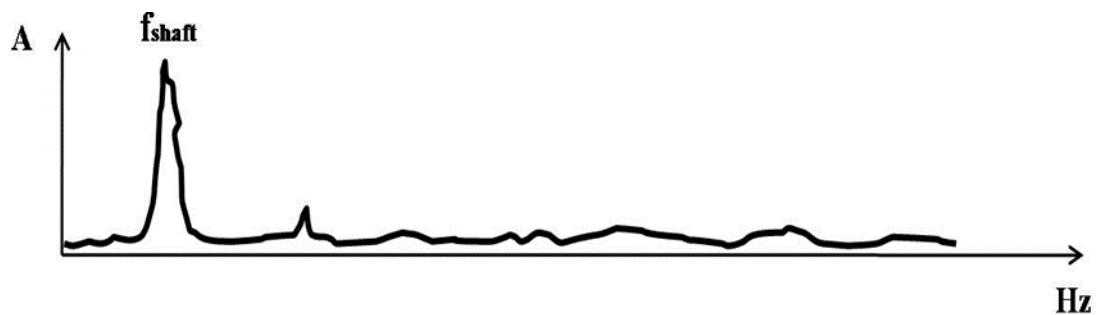
Στην περίπτωση αζυγοσταθμίας, το πλάτος των κραδασμών αυξάνεται κατά την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του αζυγοστάθμητου μηχανικού στοιχείου (συνήθως άξονα της μηχανής). Κύριο χαρακτηριστικό της κυματομορφής των κραδασμών είναι η αποτύπωση μιας ταλάντωσης συχνότητας ίδιας με την συχνότητα περιστροφής του μηχανικού στοιχείου. Αυτή η ταλάντωση είναι ημιτονοειδής και φέρει θόρυβο από τις ταλαντώσεις - δονήσεις των υπόλοιπων (πιθανώς 'υγιών) μηχανικών στοιχείων της μηχανής. Η ταλάντωση αποκτά το μέγιστο πλάτος της όταν το βάρος της πρόσθετης μάζας  $m$  αθροίζεται με τη φυγόκεντρο δύναμη (Σχήμα 2-5). Στο Σχήμα 2-6 παρουσιάζεται η μέγιστη απόσταση (σημείο A) από τη θέση ισορροπίας ή αλλιώς μέγιστο πλάτος ταλάντωσης. Το ελάχιστο πλάτος ταλάντωσης της μηχανής συναντάται στην κατακόρυφη θέση τη στιγμή που το βάρος της μάζας  $m$  αφαιρείται ολόκληρο από τη φυγόκεντρο δύναμη (Σχήμα 2-5). Στο Σχήμα 2-6 παρουσιάζεται το ελάχιστο πλάτος ταλάντωσης στο σημείο B. Ανάλογα με το πλάτος του διανύσματος του βάρους της μάζας  $m$  στα διάφορα σημεία περιστροφής, μειώνεται το πλάτος της φυγόκεντρης δύναμης και της ταλάντωσης του άξονα.



Σχήμα 2-6. Χρονική κυματομορφή απόκρισης μηχανής με αζυγοσταθμία.

#### Φάσμα:

Στο φάσμα του σήματος παρουσιάζεται μια αιχμή στη συχνότητα περιστροφής του μηχανικού στοιχείου. Το πλάτος της αυξάνεται με την πρόοδο της βλάβης. Η ενέργεια που συγκεντρώνει η ταλάντωση του αζυγοστάθμητου μηχανικού στοιχείου τείνει να καταλάβει έως και το 90% της συνολικής ενέργειας του μετρούμενου σήματος.



Σχήμα 2-7. Φάσμα απόκρισης μηχανής με αζυγοσταθμία.

#### Διαφορά φάσης:

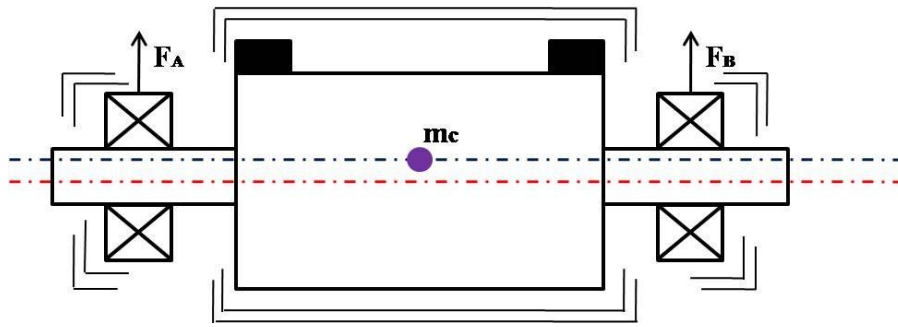
Γενικά με την μελέτη και την περιγραφή του τρόπου ταλάντωσης της μηχανής μπορεί να εντοπιστεί η αζυγοσταθμία. Μερικές φορές όμως δεν αρκεί αυτό. Σε αυτή την περίπτωση επικουρικά η μέτρηση της φάσης της ταλάντωσης σε κατάλληλες θέσεις της μηχανής μπορεί να περιγράψει καλύτερα τον τρόπο ταλάντωσης ως σύνολο και να βοηθήσει στον εντοπισμό της αζυγοσταθμίας.

Υπάρχουν τρεις τύποι αζυγοσταθμίας:

- Η στατική αζυγοσταθμία.
- Η αζυγοσταθμία ροπής.
- Η δυναμική αζυγοσταθμία.

#### Στατική αζυγοσταθμία:

Στη στατική αζυγοσταθμία ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος με τον άξονα του κέντρου βάρους της μηχανής (Σχήμα 2-8). Οι φυγόκεντρες δυνάμεις  $F_A$  και  $F_B$  στα σημεία A (κινητήρας) και B (στρεφόμενη μηχανή) έχουν την ίδια φάση και ταλαντώνουν την μηχανή στο ίδιο επίπεδο και κατεύθυνση.



Σχήμα 2-8. Στατική αζυγοσταθμία.

Διαφορά φάσης μεταξύ χωρικών θέσεων:

$$|H_A - V_A| = 90^\circ \pm 30^\circ \quad (2.8)$$

$$|H_B - V_B| = 90^\circ \pm 30^\circ \quad (2.9)$$

$$|H_A - H_B| - |V_A - V_B| = 0^\circ \pm 30^\circ \quad (2.10)$$

όπου:

$H$  Horizontal

$V$  Vertical

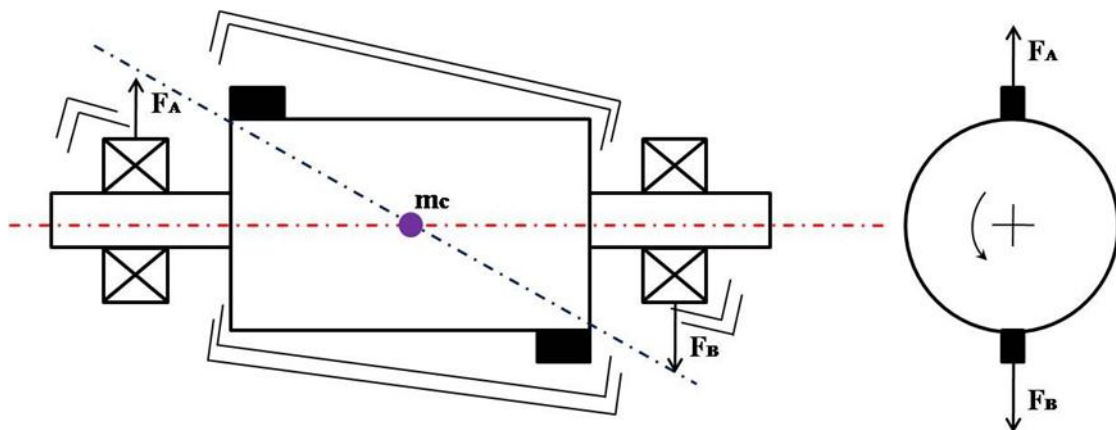
$H_A$  η οριζόντια ταλάντωση στη θέση  $A$

$V_A$  η κάθετη ταλάντωση στην θέση  $A$

Αντίστοιχα και για την θέση  $B$  με  $H_B$  και  $V_B$ .

#### Αζυγοσταθμία ροπής:

Στην αζυγοσταθμία ροπής ο άξονας του κέντρου βάρους της μηχανής τέμνει τον άξονα περιστροφής (Σχήμα 2-9). Στο σημείο τομής τους εμφανίζεται το κέντρο βάρους  $m_c$  της μηχανής. Οι φυγόκεντρες δυνάμεις  $F_A$  και  $F_B$  στα σημεία  $A$  (κινητήρας) και  $B$  (στρεφόμενη μηχανή) έχουν διαφορά φάσης  $180^\circ$  και ταλαντώνουν την μηχανή 'πάνω - κάτω'.



Σχήμα 2-9. Αζυγοσταθμία ροπής.

Αζυγοσταθμία ροπής



$$|H_A - V_A| = 90^\circ \pm 30^\circ \quad (2.11)$$

$$|H_B - V_B| = 90^\circ \pm 30^\circ \quad (2.12)$$

$$|H_A - H_B| - |V_A - V_B| = 180^\circ \pm 30^\circ \quad (2.13)$$

όπου:

$H$  Horizontal

$V$  Vertical

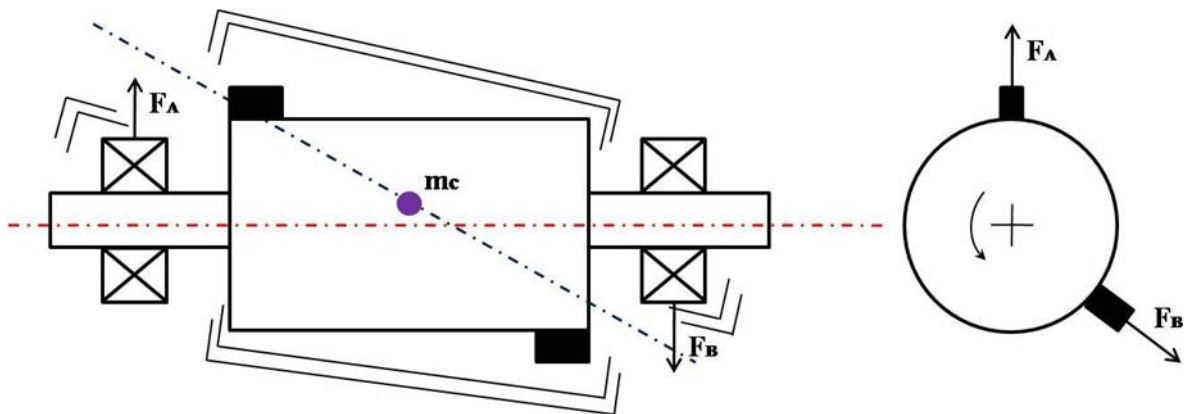
$H_A$  η οριζόντια ταλάντωση στη θέση  $A$

$V_A$  η κάθετη ταλάντωση στην θέση  $A$

Αντίστοιχα και για την θέση  $B$  με  $H_B$  και  $V_B$ .

### Δυναμική αζυγοσταθμία:

Στις πραγματικές εφαρμογές συνήθως συναντάται η δυναμική αζυγοσταθμία που είναι ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων τύπων αζυγοσταθμίας (Σχήμα 2-10). Στη δυναμική αζυγοσταθμία ο άξονας του κέντρου βάρους της μηχανής τέμνει τον άξονα περιστροφής. Το κέντρο βάρους  $m_c$  της μηχανής δεν εμφανίζεται στο σημείο τομής. Τα διανύσματα των φυγόκεντρων δυνάμεων  $F_A$  και  $F_B$  στα σημεία  $A$  (κινητήρας) και  $B$  (στρεφόμενη μηχανή) έχουν διαφορά φάσης μεταξύ  $0^\circ$  έως  $180^\circ$  και ταλαντώνουν την μηχανή περίπου 'πάνω - κάτω' συνδυάζοντας τις ταλαντώσεις των δύο προηγούμενων τύπων αζυγοσταθμίας.



Σχήμα 2-10. Δυναμική αζυγοσταθμία.

Δυναμική αζυγοσταθμία

$$|H_A - V_A| = 90^\circ \pm 30^\circ \quad (2.14)$$

$$|H_B - V_B| = 90^\circ \pm 30^\circ \quad (2.15)$$

$$|H_A - H_B| - |V_A - V_B| = (0^\circ \text{ έως } 180^\circ) \pm 30^\circ \quad (2.16)$$

όπου:

$H$  Horizontal

$V$  Vertical

$H_A$  η οριζόντια ταλάντωση στη θέση  $A$

$V_A$  η κάθετη ταλάντωση στην θέση  $A$

Αντίστοιχα και για την θέση  $B$  με  $H_B$  και  $V_B$ .

### Παρατηρήσεις:

Όταν οι μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής του άξονα της μηχανής προκαλούν μεταβολές στο πλάτος της απόκρισης μιας μηχανής υπάρχει ισχυρή ένδειξη αζυγοσταθμίας.

Οι θερμοκρασιακές μεταβολές δεν επηρεάζουν την απόκριση μιας μηχανής με αζυγοσταθμία.

## 2.3 Μηχανική Χαλαρότητα

Η χαλαρότητα στη σύνδεση ενός μηχανικού στοιχείου της μηχανής προκαλεί κρούσεις και τριβές. Αυτές εμφανίζονται στο φάσμα της απόκρισής της (Σχήμα 2-13) με συχνότητες ίσες με κάποια αρμονική της συχνότητας περιστροφής της μηχανής.

### Αιτίες:

Βασικά αίτια της εμφάνισης της μηχανικής χαλαρότητας είναι:

- Η χαλαρή σύσφιξη και έδραση των διαφόρων μηχανικών στοιχείων της μηχανής.
- Ρωγμές στα έδρανα.
- Φθορά στα στοιχεία απόσβεσης δονήσεων (isolators).
- Η επίδραση του περιβάλλοντος (αυξομείωση θερμοκρασίας με αποτέλεσμα τη διαστολή συστολή, κυρίως των μεταλλικών συνδέσμων – διάβρωση – οξείδωση κ.α.).

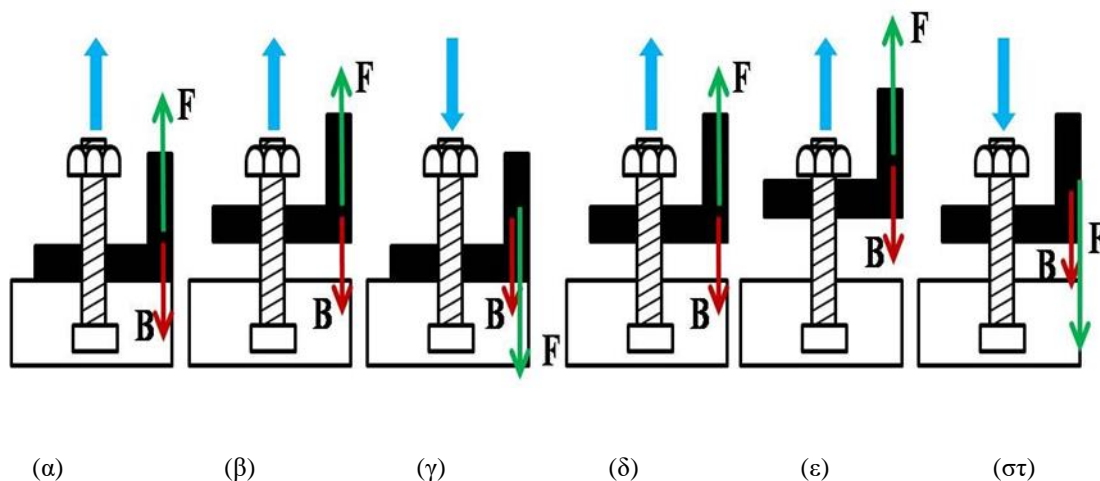
Η μεταβολή του φορτίου προκαλεί αντιστρόφως ανάλογη μεταβολή της ταλάντωσης του μηχανικού στοιχείου.

### Μηχανισμός βλάβης:

Ανάλογα με τη φύση του χαλαρού μηχανικού στοιχείου που δονείται και το πως αλληλοεπιδρά με την αζυγοσταθμία της μηχανής, η απόκριση συνθέτεται από  $2/f_{shaft}$  ή  $1/f_{shaft}$  αρμονικές ταλαντώσεις (Σχήμα 2-13).

Στο Σχήμα 2-11 παρουσιάζεται ένας κύκλος ταλάντωσης ενός μηχανικού στοιχείου λόγω της χαλαρής σύσφιξης της βίδας. Σε μία περιστροφή του άξονα της μηχανής πραγματοποιείται ένας κύκλος ( $1/T$ ) της ταλάντωσης του χαλαρού μηχανικού στοιχείου (Σχήμα 2-11 (α), (β) και (γ)). Η δύναμη  $F$  προκαλεί την ανοδική κίνηση του μηχανικού στοιχείου. Η συνολική δύναμη ανόδου του στοιχείου ελαττώνεται σε  $F - B$  ( $B$ : βάρος στοιχείου). Το μηχανικό στοιχείο δεν ταλαντώνεται έως την κεφαλή της βίδας σε αυτήν την 1η περιστροφή του άξονα. Στον επόμενο κύκλο, η ανοδική κίνηση διακόπτεται απότομα και βίαια (κρούση) από το κεφάλι της βίδας που αποτελεί το άνω όριο. Για το λόγο αυτό 'ψαλιδίζεται' η κορυφή (μέγιστο πλάτος) της ταλάντωσης (Σχήμα 2-12). Ο δεύτερος κύκλος ταλάντωσης του μηχανικού στοιχείου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-11 (δ), (ε) και (στ). Τη στιγμή αυτή ολοκληρώνεται η δεύτερη περιστροφή του άξονα της μηχανής από την έναρξη της ταλάντωσης του μηχανικού στοιχείου. Η συνολική δύναμη καθόδου του μηχανικού στοιχείου αυξάνεται σε  $F + B$ .

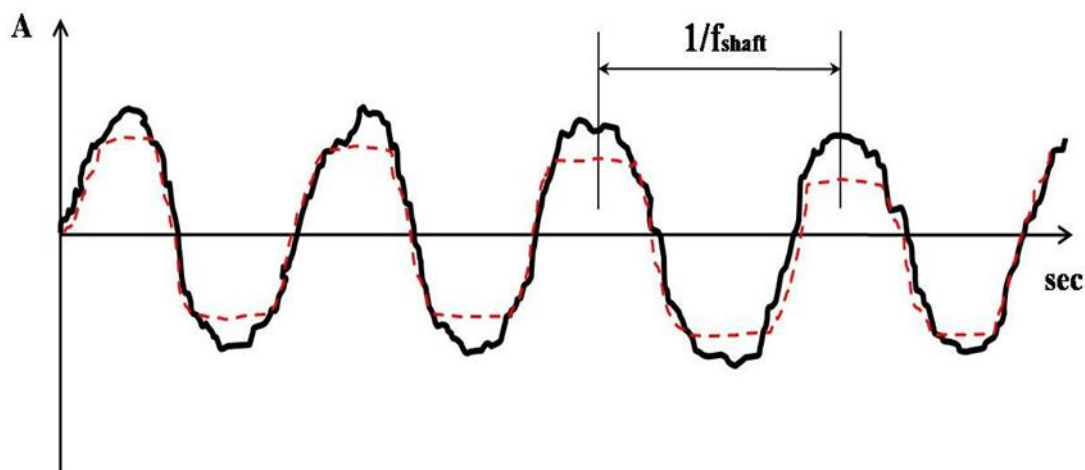
Έτσι, κατά τη διάρκεια δύο κύκλων ταλάντωσης του άξονα της μηχανής προκαλείται ένα 'κτύπημα' του χαλαρού μηχανικού στοιχείου στο άνω όριο με περιοδικότητα  $2 * (1/f_{shaft})$ .



Σχήμα 2-11. Μηχανική χαλαρότητα συνδέσμων.

**Κυματομορφή απόκρισης:**

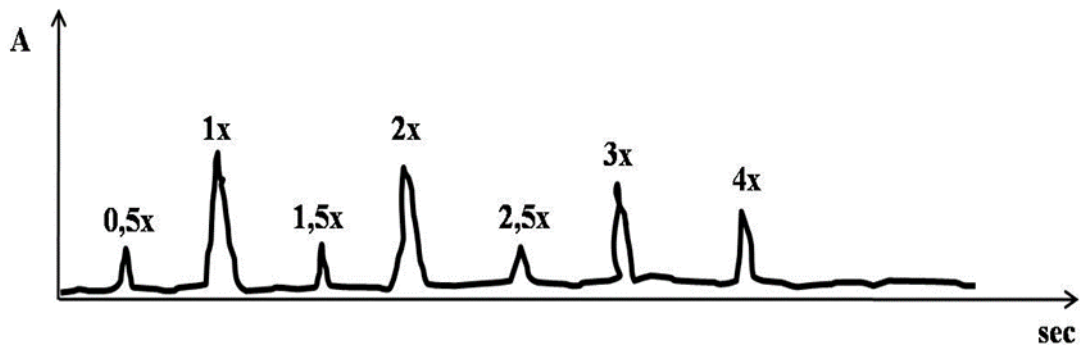
Η κυματομορφή της απόκρισης μιας μηχανής με μηχανική χαλαρότητα είναι σύνθεση ημιτονοειδών αρμονικών συνιστωσών με βασικές περιοδικότητες  $1/f_{shaft}$  και  $2 * (1/f_{shaft})$  (Σχήμα 2-12). Τα πλάτη των κορυφών είναι 'ψαλιδισμένα' λόγω της απότομης διακοπής της ταλάντωσης του χαλαρού μηχανικού στοιχείου.



Σχήμα 2-12. Κυματομορφή απόκρισης μηχανής με μηχανική χαλαρότητα.

**Φάσμα:**

Στο φάσμα της απόκρισης μηχανής με μηχανική χαλαρότητα δεσπόζουν οι αρμονικές της συχνότητας  $f_{shaft}$  και  $f_{shaft}/2$  ανάλογα με τη φύση του χαλαρού μηχανικού στοιχείου. Χειροτέρευση της βλάβης αυξάνει τα πλάτη των αιχμών και το πλήθος των αρμονικών συνιστωσών των χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης.



Σχήμα 2-13. Φάσμα απόκρισης μηχανής με μηχανική χαλαρότητα.

### Παρατηρήσεις:

Σε όλους τους τύπους μηχανών, η μηχανική χαλαρότητα μπορεί να ελεγχθεί με μεταβολή του φορτίου και παρατήρηση των κραδασμών. Αύξηση του φορτίου προκαλεί μείωση του πλάτους της απόκρισης της μηχανής. Δηλαδή, η μείωση του φορτίου της μηχανής ‘απελευθερώνει’ το χαλαρό μηχανικό στοιχείο και του επιτρέπει να ταλαντωθεί ελεύθερα και περισσότερο.

## 2.4 Τεχνικές Ψηφιακής Επεξεργασίας Σήματος

### 2.4.1 Μετασχηματισμός Fourier

Γενικότερα κάθε χρονικό σήμα  $f(t)$  μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα συνημιτονοειδών όρων της μορφής [6]:

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + \dots + A_N \cos(\omega_N t + \varphi_N) \quad (2.17)$$

όπου:

$A_0$  η μέση τιμή του σήματος  $f(t)$

$A_i$  το πλάτος του συνημιτονοειδούς όρου  $A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$ , με  $A_i \geq 0$

$\omega_i$  η κυκλική συχνότητα του συνημιτονοειδούς όρου  $A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$ , με  $\omega_i \geq 0$

$\varphi_i$  η φάση του συνημιτονοειδούς όρου  $A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$ , με  $\varphi_i \geq 0$

με  $i = 1, 2, \dots, N$

Το  $A_0$  μπορεί να θεωρηθεί ως το πλάτος του συνημιτονοειδούς όρου συχνότητας 0 Hz. Άρα για την έκφραση του σήματος με συνημιτονοειδείς όρους χρειάζεται ένα σύνολο δυάδων

$$(A_i, \varphi_i) \forall \omega_i \quad (2.18)$$

όπου:

$\omega_i$  η γωνιακή ταχύτητα με  $\omega_i = 2\pi f_i$

$f_i$  η συχνότητα

Οι συντελεστές  $A_i$  είναι μέγιστης σημασίας κατά την ανάλυση του σήματος καθώς παρέχουν την πληροφορία για το συχνотικό περιεχόμενο του σήματος.

Μέσω του μετασχηματισμού Fourier λαμβάνεται η πληροφορία για τα  $(A_i, \varphi_i)$  είτε ως μία αναλυτική συνάρτηση της συχνότητας  $f$ , είτε ως ένα αριθμητικό σήμα.

## 2.5 Αισθητήρες Επιτάχυνσης

Τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της επιτάχυνσης ενός σώματος. Από την επιτάχυνση προκύπτουν [1]:

- Η ταχύτητα του σώματος με ολοκλήρωση.
- Η μετατόπιση του σώματος με διπλή ολοκλήρωση.
- Ο τρόπος δόνησης του σώματος (vibration).
- Η ύπαρξη κρούσης (shock) ή κίνησης.
- Η μέτρηση της κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Η λειτουργία των επιταχυνσιομέτρων βασίζεται στον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F \quad (2.19)$$

όπου:

$F$  είναι η συνολική δύναμη που επενεργεί σε μία μάζα  $m$  και

$x$  η μετατόπισή της ως προς κάποιο σημείο αναφοράς

Σε κάθε επιταχυνσιόμετρο υπάρχει μία γνωστή μάζα  $m$  η οποία μπορεί να κινηθεί ως προς μία κατεύθυνση. Η μάζα αυτή συγκρατείται από ένα ελαστικό υλικό το οποίο παραμορφώνεται και αντιστέκεται στην κίνηση της μάζας. Η δύναμη  $F$  μπορεί να υπολογιστεί με μεθόδους που καθορίζονται από την φύση του ελαστικού υλικού. Έτσι αφού τα μεγέθη  $F$  και  $m$  είναι γνωστά μέσω του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα υπολογίζεται η επιτάχυνση.

### 2.5.1 Τεχνολογίες Επιταχυνσιομέτρων

Οι κυριότεροι τύποι επιταχυνσιομέτρων είναι [1]:

- Πιεζοηλεκτρικά Piezoelectric (PE).
- Επιταχυνσιόμετρα με πιεζοαντιστάτη Piezoresistive (PR).
- Μεταβλητής χωρητικότητας Variable capacitance (VC).
- Επιταχυνσιόμετρα με ποτενσιόμετρο.
- Επιταχυνσιόμετρα με Γραμμικό Μεταβλητό Διαφορικό Μετασχηματιστή.
- Μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης Variable Reluctance.

Οι τεχνολογίες των τριών πρώτων τύπων είναι οι πιο δημοφιλείς [4][11].

#### **Piezoelectric (PE):**

Αυτού του τύπου οι αισθητήρες βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μετατρέπουν εσωτερικές μηχανικές τάσεις σε ηλεκτρική ενέργεια και το αντίστροφο. Το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται είναι ανάλογο της μηχανικής παραμόρφωσης του πιεζοηλεκτρικού υλικού, άρα και της επιτάχυνσης του αισθητήρα.

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες. Προσφέρουν ένα μεγάλο εύρος μετρούμενων συχνοτήτων από μερικά Hz έως δεκάδες kHz. Δεν μπορούν όμως να μετρήσουν στατικές επιταχύνσεις όπως αυτήν της βαρύτητας. Ποικίλουν ως προς την ευαισθησία τους (mV ανά g), το βάρος, το μέγεθος και το σχήμα.

Είναι διαθέσιμοι σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την έξοδό τους: φορτίου ή τάσης.

Οι αισθητήρες εξόδου φορτίου είναι εξαιρετικά ανθεκτικοί. Λόγω της απουσίας ηλεκτρονικών στο εσωτερικό τους, μπορούν να λειτουργήσουν σε περιβάλλοντα εχθρικά για κάθε ηλεκτρονική συσκευή καθώς και ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες ( $-200^{\circ}\text{C}$  έως  $+400^{\circ}\text{C}$ ). Μερικοί είναι δυνατό να λειτουργούν ακόμα σε περιβάλλοντα με μεγάλα επίπεδα ακτινοβολίας όπως κοντά σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Κύριο μειονέκτημά τους είναι η μεγάλη αντίστασή τους ως πηγή σήματος. Για την σύνδεση τους με το μετρητικό σύστημα απαιτούνται καλώδια υψηλών προδιαγραφών. Η μέτρηση του φορτίου (της τάξης του pico Coulomb) επιτυγχάνεται μόνο με ενισχυτές σήματος υψηλής αντίστασης εισόδου (charge amplifiers).

Οι αισθητήρες εξόδου τάσης έχουν μεγάλη ομοιότητα με αυτούς της εξόδου φορτίου αλλά ενσωματώνουν τον ενισχυτή φορτίου. Αυτή η ενσωμάτωση απλοποιεί την καλωδιακή σύνδεση του αισθητήρα με το μετρητικό σύστημα, το οποίο πλέον πρέπει να τον τροφοδοτεί με μια σταθερή τάση. Η ενσωμάτωση ηλεκτρονικών στον αισθητήρα τους καθιστά λιγότερο ανθεκτικούς σε σχέση με τους αισθητήρες εξόδου φορτίου. Οι τυπικές θερμοκρασίες λειτουργίας περιορίζονται στο εύρος των  $-40^{\circ}\text{C}$  έως  $+125^{\circ}\text{C}$  το οποίο είναι ικανοποιητικό για μια πληθώρα εφαρμογών.

### **Piezoresistive (PR):**

Βασίζονται στο φαινόμενο κατά το οποίο η ηλεκτρική αντίσταση ενός υλικού μεταβάλλεται όταν εφαρμοστεί σε αυτό μηχανική τάση. Το υλικό μπορεί να είναι ημιαγωγός ή μέταλλο.

Οι αισθητήρες με πιεζοαντιστάτη έχουν μικρή ευαισθησία. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους περισσότερο για βίαιες επιταχύνσεις (shock measurements) πολλών g, παρά για μετρήσεις ταλαντώσεων (vibrations). Χρησιμοποιούνται ευρέως στις καταστρεπτικές δοκιμές οχημάτων (crash tests). Παρέχουν ένα μεγάλο εύρος μετρούμενων συχνοτήτων, από μερικά εκατοντάδες Hz έως μερικές εκατοντάδες kHz. Είναι δυνατό να μετρήσουν στατικές επιταχύνσεις, όπως αυτή της βαρύτητας, και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παρατήρηση παροδικών φαινομένων μεγάλης διάρκειας.

### **Variable capacitance (VC):**

Βασίζονται στην μέτρηση της χωρητικότητας για τον προσδιορισμό της μετατόπισης μιας κινούμενης μάζας. Η κινούμενη μάζα συγκρατείται από ένα ελαστικό υλικό και η μετατόπιση της είναι ανάλογη της επιτάχυνσης που δέχεται. Είναι η πιο σύγχρονη τεχνολογία επιταχυνσιόμετρων. Έχουν μεγάλη ευαισθησία, αλλά μικρό εύρος ζώνης από λίγα Hz έως μερικά kHz. Επηρεάζονται ελάχιστα από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Η έξοδος μηδενικής επιτάχυνσης καθώς και η ευαισθησία μπορεί να μεταβάλλονται κατά 1.5% σε ένα εύρος θερμοκρασιών  $180^{\circ}\text{C}$ . Είναι δυνατό να μετρήσουν στατικές επιταχύνσεις. Είναι κατάλληλοι για την μέτρηση ταλαντώσεων χαμηλής συχνότητας, κίνησης και σταθερών επιταχύνσεων.

## **2.5.2 MEMS Επιταχυνσιόμετρα**

Ο όρος Μικροηλεκτρομηχανικά Συστήματα (Microelectromechanical systems ή MEMS) αναφέρεται στην τεχνολογία ανάπτυξης μηχανικών μερών, αισθητήρων, ενεργοποιητών, διατάξεων ρύθμισης, ενίσχυσης και επεξεργασίας σήματος (συνήθως μικροεπεξεργαστών) πάνω σε ένα κοινό υπόστρωμα πυριτίου. Οι αισθητήρες που κατασκευάζονται με την τεχνολογία των MEMS έχουν διαστάσεις από μερικά μικρόμετρα ( $\mu\text{m}$ ) έως μερικά mm [1].

Μερικές εφαρμογές των MEMS είναι [12]:

- Επιταχυνσιόμετρα.
- Εκτυπωτές ψεκασμού μελάνης.
- Συστήματα αδρανειακής πλοήγησης.

- Μικρόφωνα.
- Αισθητήρες πίεσης.
- Συσκευές απεικόνισης.
- Οπτικοί διακόπτες.
- Βιοαισθητήρες.
- Συλλογή ενέργειας σε μικρή κλίμακα.

Με την χρήση της τεχνολογίας των MEMS είναι δυνατή η κατασκευή αισθητήρων επιτάχυνσης μικρής κλίμακας. Η αρχές λειτουργίας (Piezoelectric, Piezoresistive, Variable Capacitance) παραμένουν ίδιες αλλά η κλίμακα μεταφέρεται στο μέγεθος ενός μικρού ολοκληρωμένου. Γενικότερα η πλειοψηφία MEMS επιταχυνσιομέτρων που κυκλοφορούν στην αγορά είναι τύπου Variable Capacitance.

Στην προτεινόμενη υλοποίηση γίνεται χρήση MEMS επιταχυνσιομέτρων για τους παρακάτω λόγους [7]:

- Χαμηλότερο κόστος.
- Υψηλότερη ακρίβεια.
- Πολύ χαμηλός θόρυβος.
- Συμβατότητα με πλατφόρμες IOT.
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

## 2.6 Τα Πρωτόκολλα UDP και TCP

Τα πρωτόκολλα UDP (User Datagram Protocol) και TCP (Transmission Control Protocol) ανήκουν στο τέταρτο επίπεδο (layer) του προτύπου OSI. Βρίσκονται ένα επίπεδο πάνω από το IP layer και χρησιμοποιούνται για την αποστολή δεδομένων στο Internet.

Το πρωτόκολλο TCP είναι το πιο συνηθισμένο πρωτόκολλο για μεταφορά δεδομένων στο Internet. Χρησιμοποιώντας αρίθμηση των πακέτων εγγυάται ότι ο παραλήπτης θα λάβει το πακέτο σε σωστή σειρά. Ο παραλήπτης στέλνει μηνύματα επιβεβαίωσης για κάθε πακέτο που παραλήφθηκε. Αν δεν ληφθεί επιβεβαίωση από τον αποστολέα, αυτός στέλνει το πακέτο για να εξασφαλίσει την επιτυχημένη αποστολή. Τα πακέτα ελέγχονται για την ύπαρξη σφαλμάτων. Έτσι το πρωτόκολλο καθίσταται αξιόπιστο για την μεταφορά δεδομένων που δεν είναι επιθυμητό να χαθούν κατά την μεταφορά.

Το πρωτόκολλο UDP λειτουργεί παρόμοια με το TCP μόνο που δεν διαθέτει μηχανισμό για την εγγύηση μεταφοράς δεδομένων. Τα πακέτα στέλνονται στον παραλήπτη χωρίς αυτός να στέλνει μηνύματα επιβεβαίωσης. Επίσης δεν υπάρχει τρόπος να ζητήσει την επανάληψη αποστολής ενός πακέτου. Η τυχόν απώλεια ενός πακέτου δεν γίνεται αντιληπτή από καμία πλευρά. Τα πακέτα ελέγχονται για την ύπαρξη σφαλμάτων. Το αντισταθμιστικό όφελος της έλλειψης αξιοπιστίας είναι η μεγαλύτερη ταχύτητα επικοινωνίας και η γρηγορότερη απόκριση.

Το UDP χρησιμοποιείται όταν η ταχύτητα επικοινωνίας είναι σημαντικότερη από την αποφυγή σφαλμάτων. Για παράδειγμα σε ζωντανές μεταδόσεις και online παιχνίδια [5].

### 3. Περιγραφή του προτεινόμενου συστήματος διάγνωσης βλαβών

#### 3.1 Δομή του συστήματος

Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη (Σχήμα 3-1. Η δομή του προτεινόμενου συστήματος μέτρησης, Σχήμα 3-1). Το υπολογιστή όπου εκτελείται ένα πρόγραμμα graphical user interface ή απλούστερα GUI. Τα επιταχυνσιόμετρα που καταγράφουν τους κραδασμούς μιας μηχανολογικής διάταξης. Έναν μικροελεγκτή που συλλέγει τα δεδομένα από τα επιταχυνσιόμετρα και μέσω μίας ασύρματης σύνδεσης τα αποστέλλει στον υπολογιστή.



Σχήμα 3-1. Η δομή του προτεινόμενου συστήματος μέτρησης.

#### 3.2 Προδιαγραφές του Προτεινόμενου Συστήματος

Η προτεινόμενη υλοποίηση πρέπει να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Φορητότητα
- Χαμηλό κόστος
- Αξιοπιστία

Οι παραπάνω απαιτήσεις καθορίζουν άμεσα το υλικό (hardware) που χρησιμοποιείται.



### 3.3 Επιλογή του Επιταχυνσιόμετρου

Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιείται MEMS αισθητήρας επιτάχυνσης για τους λόγους που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2. Τα κριτήρια για την επιλογή του αισθητήρα είναι τα εξής:

- Ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας 3Khz.
- Τρεις άξονες μέτρησης της επιτάχυνσης.
- Ψηφιακή έξοδος σήματος.
- Υψηλή ευαισθησία.
- Κόστος χαμηλότερο των 15 ευρώ.

Η ψηφιακή έξοδος τέθηκε ως κριτήριο για την απλούστευση της σύνδεσης του αισθητήρα στον Microcontroller. Στην περίπτωση αναλογικής εξόδου είναι αναγκαία η χρήση κατάλληλων καλωδίων που δεν επηρεάζονται από τον θόρυβο και η ύπαρξη ADC (Analog to Digital Converter) με διακριτικότητα αντίστοιχων bit στον microcontroller.

Οι αισθητήρες που πληρούν τα παραπάνω κριτήρια είναι οι εξής [8]:

<b>Πίνακας 3-1. Χαρακτηριστικά του LIS2DE12TR.</b>	
Όνομα	LIS2DE12TR
Κατασκευαστής	STMicroelectronics
Μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας	5376 Hz
Μέγιστο εύρος	$\pm 16$ g
Ευαισθησία <sup>1</sup>	187,5 mg
Άξονες	x, y, z
Τύπος εξόδου	I <sup>2</sup> C, SPI
Κόστος <sup>2</sup>	1,15 ευρώ

<sup>1</sup> Η ευαισθησία του αισθητήρα στο μέγιστο εύρος μέτρησης.

<sup>2</sup> Συνήθως τα ολοκληρωμένα πωλούνται μαζικά, σε πολλαπλάσια κάποιων χιλιάδων. Η παρούσα τιμή αφορά την αγορά ενός μεμονωμένου αισθητήρα.

**Πίνακας 3-2. Χαρακτηριστικά του ADXL344.**

Όνομα	ADXL344
Κατασκευαστής	Analog Devices Inc.
Μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας	3200 Hz
Μέγιστο εύρος	$\pm 16$ g
Ευαισθησία	3.9 mg
Άξονες	x, y, z
Τύπος εξόδου	I <sup>2</sup> C, SPI
Κόστος	2,53 ευρώ

**Πίνακας 3-3. Χαρακτηριστικά του ADXL345.**

Όνομα	ADXL345
Κατασκευαστής	Analog Devices Inc.
Μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας	3200 Hz
Μέγιστο εύρος	$\pm 16$ g
Ευαισθησία	3.9 mg
Άξονες	x, y, z
Τύπος εξόδου	I <sup>2</sup> C, SPI
Κόστος	6 ευρώ

<b>Πίνακας 3-4. Χαρακτηριστικά του MIS2DH.</b>	
Όνομα	MIS2DH
Κατασκευαστής	STMicroelectronics
Μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας	5300 Hz
Μέγιστο εύρος	$\pm 16$ g
Ευαισθησία	11,72 mg
Άξονες	x, y, z
Τύπος εξόδου	I <sup>2</sup> C, SPI
Κόστος	11,7 ευρώ

Από τους παραπάνω αισθητήρες επιλέχθηκε ο ADXL345. Μπορεί να υστερεί των MIS2DH και LIS2DE12TR στην συχνότητα δειγματοληψίας αλλά υπερτερεί στην ευαισθησία. Επιπλέον είναι διαθέσιμος στην αγορά ως έτοιμο Arduino module, άρα δεν είναι αναγκαία η κατασκευή πλακέτας για την τοποθέτηση του αισθητήρα.

Ο αισθητήρας, εκτός από μεμονωμένο ολοκληρωμένο, είναι διαθέσιμος στην αγορά ως μέρος μίας πλακέτας μικρών διαστάσεων.



Εικόνα 3-1. Η πλακέτα του αισθητήρα ADXL345.

Ο κατασκευαστής των ADXL345 (Analog Devices) παρέχει δύο επιλογές για τον συγκεκριμένο ολοκληρωμένο. Το απλό ολοκληρωμένο ADXL345 και το ADXL345-EP (Extended Performance). Το ADXL345-EP υπερτερεί του απλού στα παρακάτω [9]:

- Υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας (-50°C έως +105°C έναντι -40°C έως +85°C).

- Πληροί το πρότυπο AQEC (Avionics Qualified Electronic Component).
- Αυστηρότερες προδιαγραφές κατασκευής.

Το κόστος του ολοκληρωμένου ADXL345-EP ανέρχεται στα 13 ευρώ.

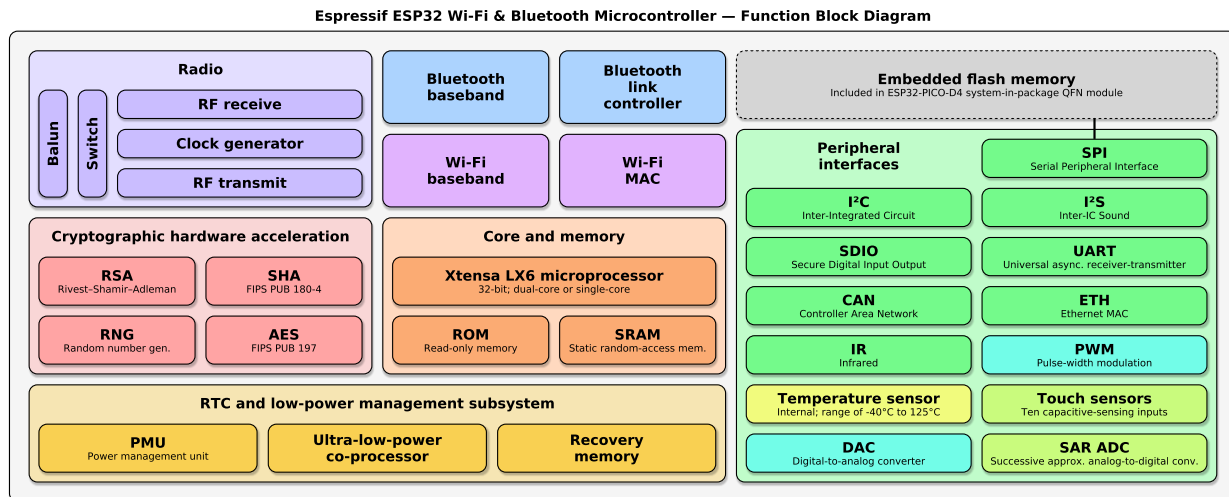
Στην παρούσα εργασία έγινε προμήθεια πλακετών με απλούς αισθητήρες ADXL345 και στη συνέχεια αντικατάσταση των ολοκληρωμένων με ADXL345-EP, για λόγους αξιοπιστίας. Η τοποθέτηση των ADXL345-EP πραγματοποιήθηκε με χρήση κόλλησης χαμηλής θερμοκρασίας κασσίτερου και βισμούθιου Sn42Bi68. Η χρήση αυτής της κόλλησης εκμηδενίζει τις πιθανότητες αλλοίωσης των χαρακτηριστικών του αισθητήρα λόγω θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία τήξης της είναι 138°C ενώ η μέγιστη θερμοκρασία αποθήκευσης του ADXL345-EP είναι 150°C, σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

### 3.4 Επιλογή Μικροελεγκτή

Για την συλλογή των δεδομένων από τα επιταχυνσιόμετρα είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός Microcontroller μαζί με διεπαφή Wi-Fi για την αποστολή δεδομένων στον υπολογιστή.

Στην κατηγορία χαμηλού κόστους υπερτερεί ξεκάθαρα όλων των λύσεων ο μικροελεγκτής ESP32. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιείται ο ESP32 S0WD. Τα χαρακτηριστικά του παρατίθενται παρακάτω [10]:

<b>Πίνακας 3-5. Χαρακτηριστικά του ESP32.</b>	
Όνομα	Esp32
Κατασκευαστής	Espressif Systems
Επεξεργαστής	CPU: Xtensa single-core 32-bit LX6 microprocessor, operating at 160 or 240 MHz and performing at up to 600 DMIPS Ultra-low power (ULP) co-processor
Μνήμη	520 KiB SRAM
Ασύρματες διεπαφές	Wi-Fi: 802.11 b/g/n Bluetooth: v4.2 BR/EDR and BLE
Περιφερειακά	12-bit SAR ADC up to 18 channels 2 × 8-bit DACs 10 × touch sensors (capacitive sensing GPIOs) 4 × SPI 2 × I <sup>2</sup> S interfaces 2 × I <sup>2</sup> C interfaces 3 × UART SD/SDIO/CE-ATA/MMC/eMMC host controller SDIO/SPI slave controller Ethernet MAC interface with dedicated DMA and IEEE 1588 Precision Time Protocol support CAN bus 2.0 Infrared remote controller (TX/RX, up to 8 channels) Motor PWM LED PWM (up to 16 channels) Hall effect sensor Ultra-low power analog pre-amplifier



Σχήμα 3-2. Block Diagram λειτουργιών του ESP32 [10].

## 4. Κόστος Υλικών

Το κόστος των υλικών που χρησιμοποιούνται φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4-1. Πίνακας κόστους υλικών.			
Περιγραφή	Ποσότητα	Τιμή Μονάδας	Τιμή
ESP32s	1	€ 5.00	€ 5.00
ADXL345 module	4	€ 0.88	€ 3.52
ADXL345-EP chip	4	€ 13.02	€ 52.08
διάφορα (καλώδια, connectors)	1	€ 5.00	€ 5.00
Σύνολο			€ 65.60

## 5. Υλοποίηση του Συστήματος

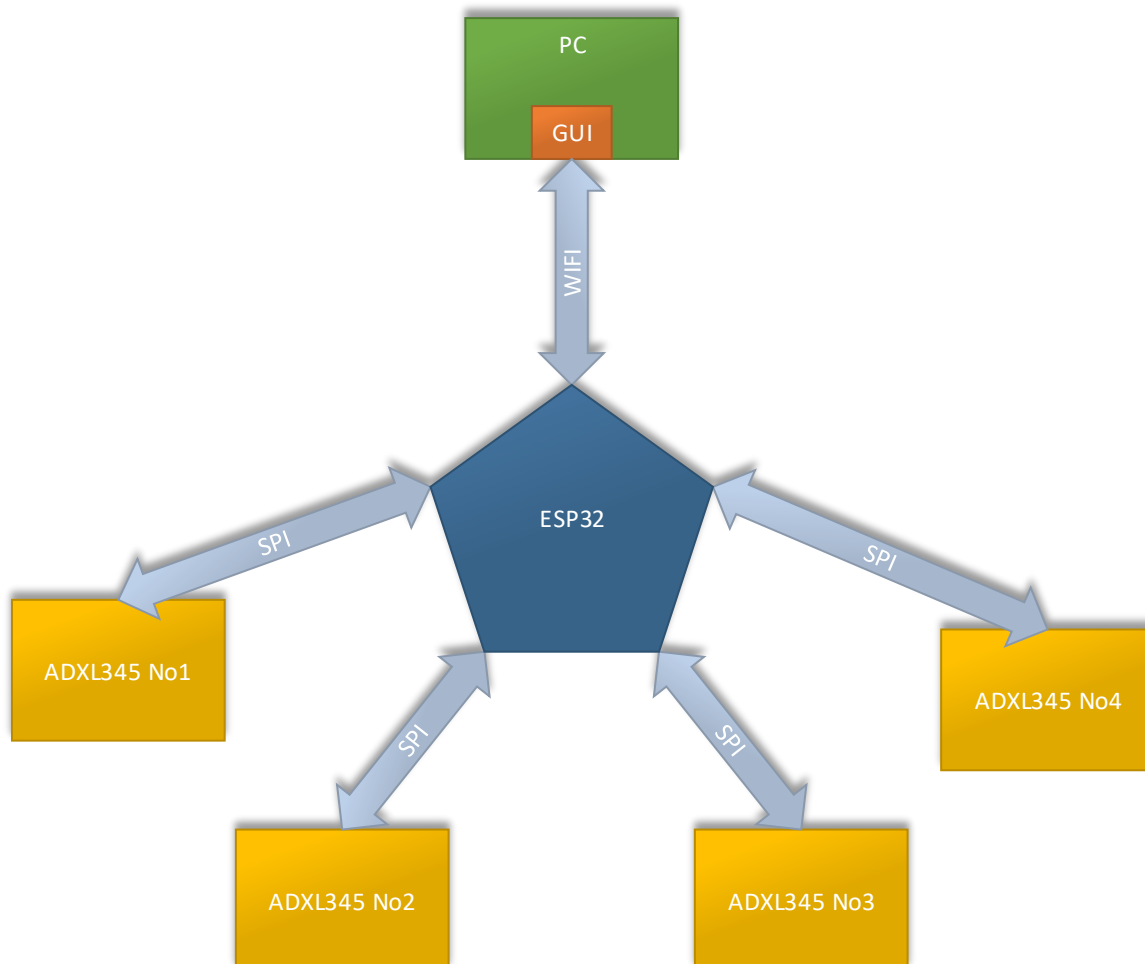
---

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της λειτουργίας του προτεινόμενου συστήματος μέτρησης και της υλοποίησής του.

### 5.1 Block diagram της Προτεινόμενης Υλοποίησης

Συνοπτικά το προτεινόμενο σύστημα μέτρησης αποτελείται από τρία βασικά μέρη.

- Τους τέσσερις αισθητήρες επιτάχυνσης ADXL345.
- Τον μικροελεγκτή ESP32 με ενσωματωμένη διεπαφή Wi-Fi.
- Τον υπολογιστή όπου εκτελείται το γραφικό πρόγραμμα διεπαφής χρήστη (GUI).



Σχήμα 5-1. Block Diagram Συστήματος.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω Σχήμα 5-1:



- Τα ADXL345 συνδέονται με τον ESP32 μέσω του πρωτοκόλλου SPI (Serial Peripheral Interface).
- Ο ESP32 συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω Wi-Fi.

## 5.2 Συνοπτικά η Λειτουργία του Συστήματος

Το σύστημα χωρίζεται σε δύο υποσυστήματα:

- Τον ESP32 και τα τέσσερα επιταχυνσιόμετρα ADXL345.
- Το γραφικό περιβάλλον χρήστη στον υπολογιστή.

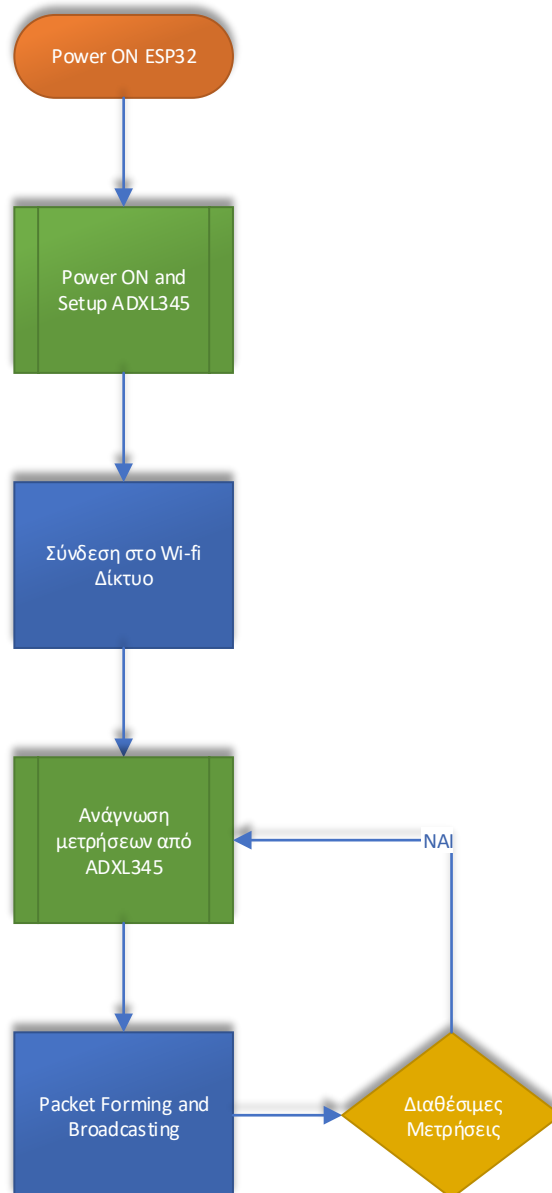
Για την λήψη των μετρήσεων πρέπει να εκκινήσουν και τα δύο υποσυστήματα. Τα βήματα που πραγματοποιούνται περιγράφονται στην Υποενότητα 5.2.1.

Αφού πραγματοποιηθεί η αποθήκευση των μετρήσεων ακολουθεί η ανάλυση τους.

### 5.2.1 Εκκίνηση των ESP32 και ADXL345

Τα βήματα της εκκίνησης των ESP32 και ADXL345 είναι τα εξής:

1. Παροχή τροφοδοσίας στον ESP32 και στα ADXL345.
2. Παραμετροποίηση ADXL345.
3. Σύνδεση ESP32 στο τοπικό Wi-Fi δίκτυο.
4. Ανάγνωση των δεδομένων από τα ADXL345.
5. Δημιουργία και broadcast αριθμημένων πακέτων.
6. Ατέρμονη επανάληψη των βημάτων 4 έως 6.

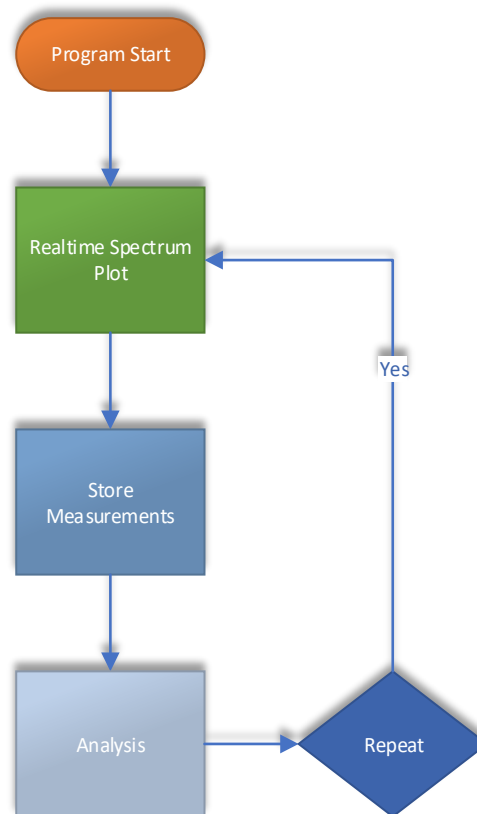


Σχήμα 5-2. Γενικά η διαδικασία αποστολής των μετρήσεων.

### 5.2.2 Εκκίνηση της εφαρμογής GUI

Τα βήματα της εκκίνησης της εφαρμογής GUI είναι τα εξής:

1. Εκκίνηση του προγράμματος χρήστη.
2. Εμφάνιση του φάσματος του μετρούμενου σήματος σε πραγματικό χρόνο.
3. Αποθήκευση των μετρήσεων.
4. Εμφάνιση της ανάλυσης των μετρήσεων.
5. Δυνατότητα επανάληψης των βημάτων 2 έως 4.



Σχήμα 5-3. Γενικά η λειτουργία επεξεργασίας των μετρήσεων.

### 5.2.3 Ανάλυση των μετρήσεων

Αφού ολοκληρωθεί η καταγραφή των μετρήσεων, δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα να προβάλλει:

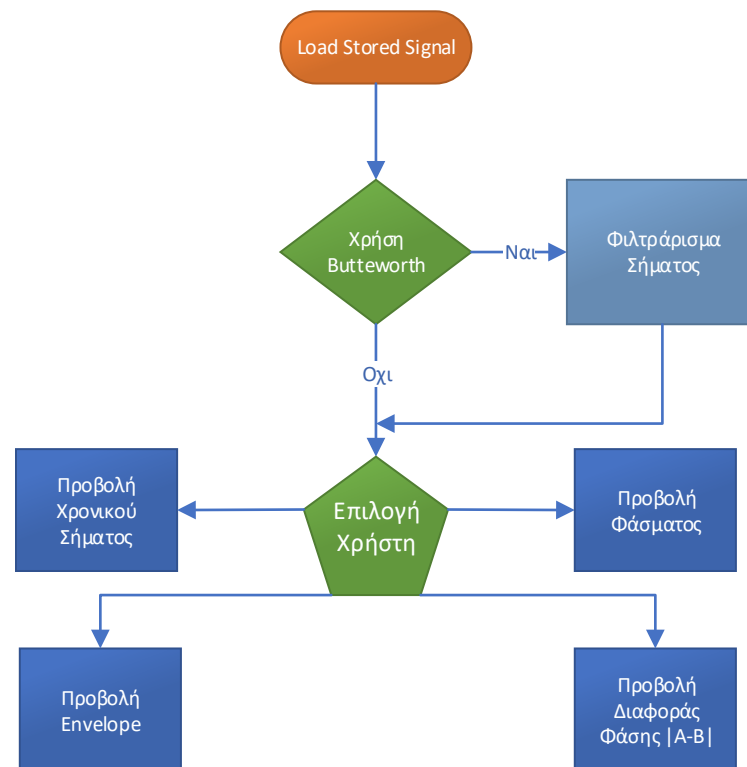
- Το φάσμα της μέτρησης από κάθε επιταχυνσιόμετρο.
- Τη διαφορά φάσης μεταξύ των μετρήσεων  $|A-B|^3$ .
- Το Envelope της μέτρησης από κάθε επιταχυνσιόμετρο μέσω του μετασχηματισμού Hilbert.
- Το χρονικό σήμα της μέτρησης από κάθε επιταχυνσιόμετρο σε ορισμένο παράθυρο<sup>4</sup>.

Όλες οι παραπάνω μετρήσεις είναι δυνατό να περάσουν από ένα ζωνοπερατό φίλτρο τύπου Butterworth κατ' επιλογή του χρήστη. Οι επιλογές για το φίλτρο είναι:

- 1<sup>ης</sup> τάξης, 2<sup>ης</sup> τάξης ή 3<sup>ης</sup> τάξης.
- Χαμηλή και υψηλή συχνότητα αποκοπής.

<sup>3</sup> Οι μετρήσεις από τα επιταχυνσιόμετρα No1, No2, No3, No4 αναφέρονται ως A, B, C, D αντίστοιχα.

<sup>4</sup> Στην ουσία γίνεται εστίαση στο χρονικό σήμα για να είναι ευδιάκριτη η κυματομορφή του.

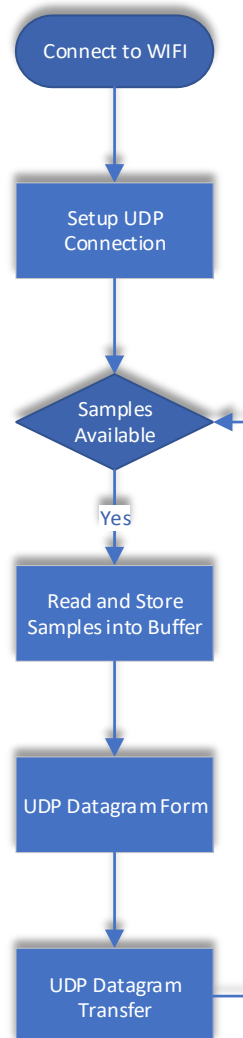


Σχήμα 5-4. Οι δυνατότητες ανάλυσης των μετρήσεων.

## 5.3 Λεπτομερής Περιγραφή

Ακολουθεί μια πιο λεπτομερής περιγραφή της λειτουργίας του προτεινόμενου συστήματος μέτρησης.

### 5.3.1 ESP32: Ανάγνωση και Αποστολή Μετρήσεων



Σχήμα 5-5. Ανάγνωση και αποστολή των μετρήσεων από τον μικροελεγκτή ESP32.

Τα βήματα αποστολής πακέτου από τον ESP32 είναι:

1. Σύνδεση στο τοπικό δίκτυο Wi-Fi.
2. Αποκατάσταση UDP σύνδεσης.
3. Αναμονή για συλλογή δειγμάτων από τα ADXL345.
4. Ανάγνωση και προσωρινή αποθήκευση των δειγμάτων.
5. Σχηματισμός UDP πακέτου.
6. Αποστολή UDP πακέτου.

Στο βήμα 3:

Αναμένεται η συλλογή οκτώ δειγμάτων από το κάθε ADXL345. Κάθε δείγμα από τους τρεις άξονες X, Y, Z αποθηκεύεται αρχικά στην στοίβα FIFO του επιταχυνσιόμετρου. Οπότε και ο εσωτερικός μετρητής της στοίβας (FIFO Status) αυξάνεται κατά μία μονάδα. Όταν η τιμή του μετρητή γίνει μεγαλύτερη ή ίση του οκτώ μπορεί να ακολουθήσει η συλλογή των δειγμάτων από τον ESP32. Αφού όλα τα επιταχυνσιόμετρα έχουν την ίδια ταχύτητα δειγματοληψίας, όταν το πρώτο ADXL345 έχει διαθέσιμα οκτώ δείγματα, έχουν σίγουρα και τα υπόλοιπα. Έτσι με τη μέθοδο polling γίνεται έλεγχος του FIFO status για το πρώτο επιταχυνσιόμετρο μόνο.

Τα βήματα 3 έως 6:

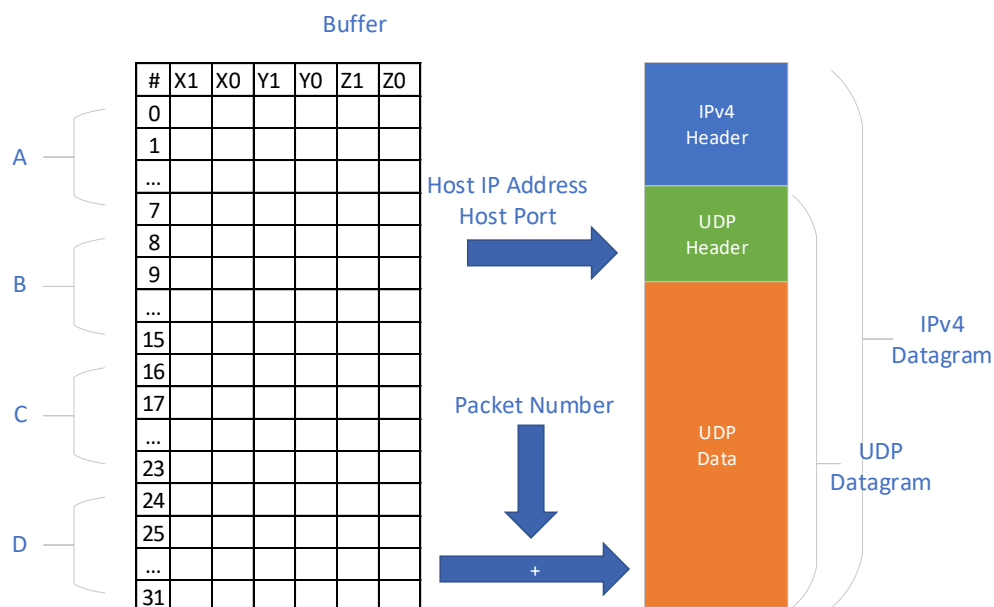
Επαναλαμβάνονται ατέρμονα. Με αυτό τον τρόπο ο ESP32 κάνει broadcast στο τοπικό δίκτυο τις μετρήσεις.

Στο βήμα 6:

Κατά την αποστολή του πακέτου δηλώνεται κατάλληλα η διεύθυνση IP του προορισμού, η θύρα (port) του παραλήπτη και ο αύξων αριθμός πακέτου. Ο τελευταίος είναι ένας ακέραιος αριθμός που αυξάνεται κατά ένα για κάθε πακέτο που αποστέλλεται. Έτσι τα πακέτα είναι αριθμημένα και είναι δυνατός ο εντοπισμός απώλειας πακέτου από το πρόγραμμα στον υπολογιστή.

Για την αποστολή των δεδομένων μετρήσεων επιλέχθηκε το πρωτόκολλο UDP. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 το πρωτόκολλο UDP παρέχει ταχύτερη επικοινωνία σε σχέση με το TCP. Αφού τα δεδομένα στέλνονται σε πραγματικό χρόνο στον υπολογιστή είναι σημαντική και η ελάχιστη καθυστέρηση. Επίσης στην περίπτωση χρήσης TCP θα έπρεπε να προστεθούν επιπλέον buffers από την πλευρά του ESP32 για την διασφάλιση της σωστής ροής δεδομένων.

### 5.3.2 Μορφοποίηση των Πακέτων από τον ESP32



Σχήμα 5-6. Μορφοποίηση του UDP datagram.

Τα δεδομένα από τα επιταχυνσιόμετρα A, B, C, D αποθηκεύονται αρχικά σε ένα buffer. Στην μέγιστη ανάλυση χρησιμοποιούνται 13bit από το ADXL345 για κάθε τιμή x, y και z. Οι τιμές διαβάζονται σε bytes. Άρα αντιστοιχούν δύο bytes για κάθε τιμή. Στο πρώτο byte τα πρώτα 8 bit ( $x_0, y_0, z_0$ ) και στο δεύτερο τα υπόλοιπα 5 bit με sign extension ( $x_1, y_1, z_1$ ).

Το buffer αντιγράφεται στα δεδομένα του πακέτου μαζί με τον αύξοντα αριθμό πακέτου. Η διεύθυνση προορισμού (Host IP Address) και η θύρα προορισμού (Host Port) αντιγράφονται στο UDP Header.

### 5.3.3 GUI Threads και Παραλαβή Πακέτων

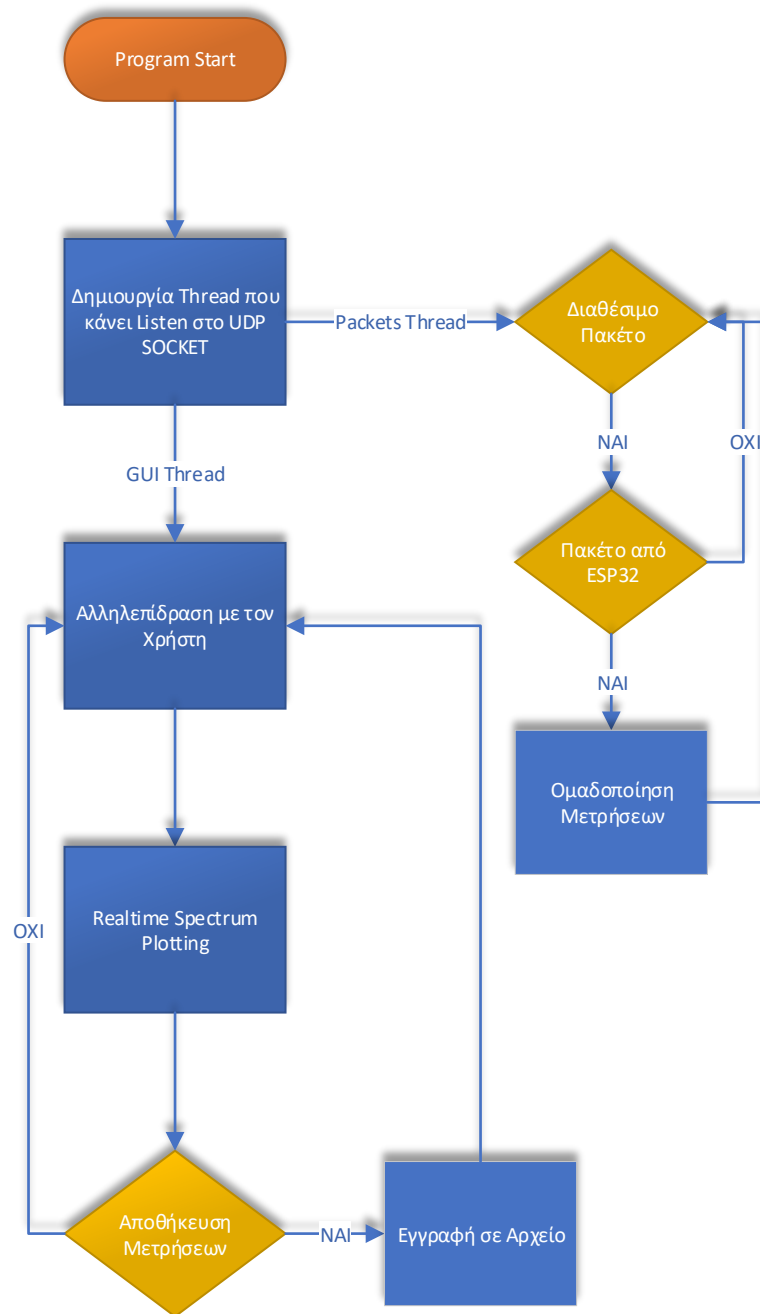
Η εφαρμογή εκτελείται σε δύο threads (νήματα) για την επίτευξη της επιθυμητής απόκρισης. Το πρωτεύον ονομάζεται GUI thread και το δευτερεύον Packet thread. Αφού εκκινήσει η εφαρμογή το πρωτεύον δημιουργεί το δευτερεύον thread.

GUI Thread:

Είναι υπεύθυνο για το γραφικό περιβάλλον, το plot του φάσματος σε πραγματικό χρόνο, την αποθήκευση των μετρήσεων σε αρχείο και την περεταίρω μαθηματική επεξεργασία τους.

Packet Thread:

Λειτουργεί ως listener του UDP socket. Κατά την άφιξη ενός πακέτου γίνεται trigger και ελέγχει αν το εισερχόμενο πακέτο προέρχεται από τον ESP32. Αν ναι, διαβάζει τα δεδομένα των μετρήσεων και τα ομαδοποιεί. Αν όχι, απλώς αγνοεί το πακέτο.



Σχήμα 5-7. Η λειτουργία των δύο threads.

Η εφαρμογή λαμβάνει τα αριθμημένα πακέτα και ταξινομεί τις μετρήσεις από τα επιταχυνσιόμετρα. Ταυτόχρονα, σε πραγματικό χρόνο, υπολογίζει το φάσμα των μετρούμενων σημάτων και το παρουσιάζει στο χρήστη. Αυτό δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα της προεπισκόπησης των μετρήσεων. Αν ο χρήστης θελήσει, μπορεί να αποθηκεύσει τα μετρούμενα σήματα. Αφού γίνει αποθήκευση, η εφαρμογή παρέχει τη δυνατότητα περαιτέρω επεξεργασίας όπως αναφέρεται και στην Υποενότητα 5.3.4.

Οι μετρήσεις από τα τέσσερα επιταχυνσιόμετρα αποθηκεύονται σε ένα αρχείο κειμένου τύπου csv (comma separated values). Με την αποθήκευση είναι δυνατή η επεξεργασία των μετρήσεων από το προτεινόμενο πρόγραμμα ή από άλλα προγράμματα προτίμησης του χρήστη.

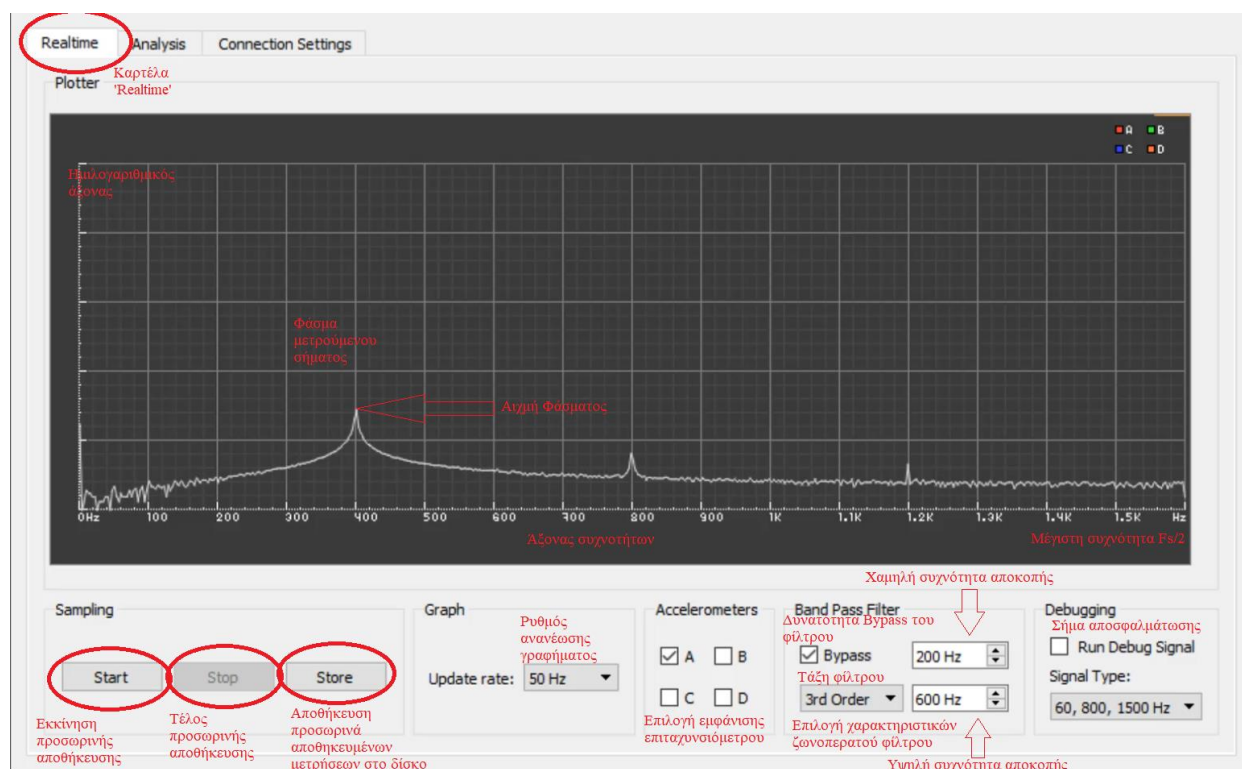


### 5.3.4 Περιγραφή του GUI

Το πρόγραμμα γραφικής διεπαφής χρήστη (Graphical User Interface ή GUI) αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα Qt Creator. Η πλατφόρμα παρέχεται σε δύο εκδόσεις. Την Commercial και την Open Source. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η δεύτερη έκδοση η οποία είναι δωρεάν. Η πλατφόρμα υποστηρίζει μία πληθώρα από γλώσσες προγραμματισμού, όπως C++, C#, Java, Python, Go και Javascript.

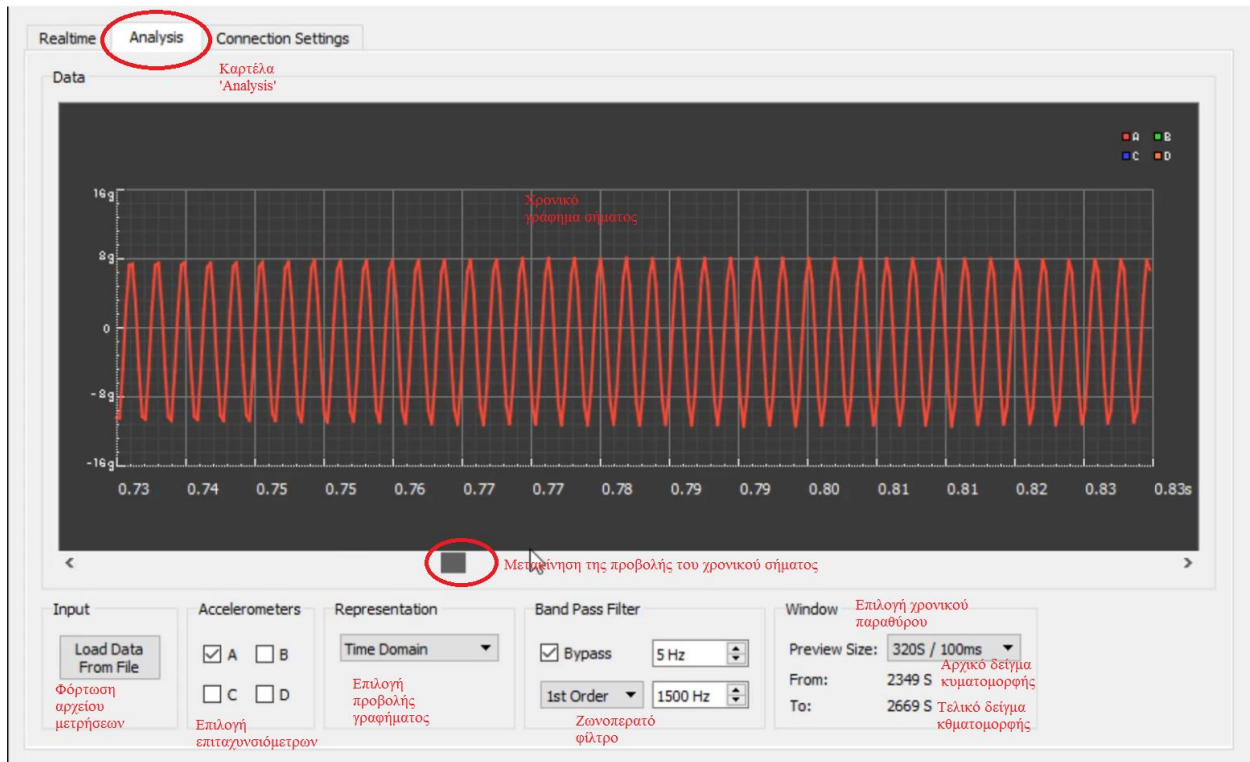
Η εφαρμογή αναπτύσσεται σε γλώσσα προγραμματισμού C++. Για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Fourier χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη kissfft από το GitHub. Για την εφαρμογή ψηφιακών φίλτρων επεξεργασίας σήματος γίνεται χρήση της βιβλιοθήκης DSPFilters επίσης από το GitHub. Για όλη την υπόλοιπη λειτουργικότητα, αναπτύσσεται κώδικας για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Το GUI είναι χωρισμένο σε τρεις καρτέλες. Στην πρώτη καρτέλα, που ονομάζεται 'Realtime', παρουσιάζεται το φάσμα του σήματος σε πραγματικό χρόνο και σε ημιλογαριθμικό άξονα όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-1. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ποια από τα φάσματα των τεσσάρων επιταχυνσιομέτρων επιθυμεί να προβάλει στο πεδίο Accelerometers. Μπορεί να αποθηκεύσει τις μετρήσεις σε ένα αρχείο \*.csv (comma separated values) μέσω του πεδίου Sampling. Το γράφημα μπορεί να ανανεώνεται κάθε 100Hz, 50Hz, 20Hz ή 10Hz (πεδίο Graph). Το σήμα είναι δυνατό να διαμορφώνεται από ζωνοπερατό φίλτρο Butterworth πρώτης, δεύτερης ή τρίτης τάξης, με επιλογή της χαμηλής και υψηλής συχνότητας αποκοπής, σε πραγματικό χρόνο (πεδίο Band Pass Filter). Για την δοκιμή της εφαρμογής είναι δυνατή η παραγωγή ενός εσωτερικού σήματος αποσφαλμάτωσης που απαρτίζεται είτε από σύνθετο σήμα συχνοτήτων 60Hz, 800 Hz και 1500Hz είτε από θόρυβο (πεδίο Debugging). Τα μετρούμενα σήματα αποθηκεύονται χωρίς να επηρεάζονται από την εφαρμογή του ζωνοπερατού φίλτρου, το οποίο χρησιμεύει μόνο για την καλύτερη προβολή των σημάτων στον χρήστη.



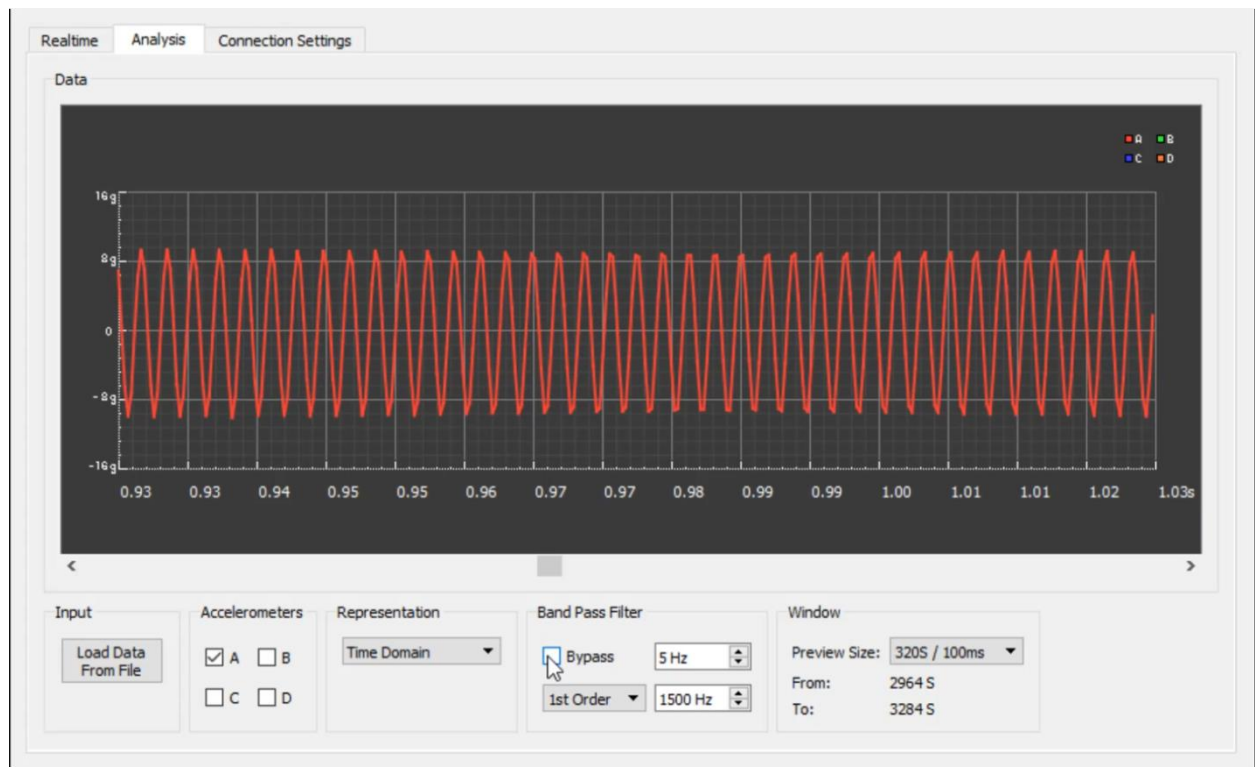
Εικόνα 5-1. GUI Realtime

Στην δεύτερη καρτέλα, που ονομάζεται 'Analysis', γίνεται η ανάλυση του μετρούμενων σημάτων. Αρχικά επιλέγεται το αρχείο των μετρήσεων από το πεδίο Input, πατώντας το κουμπί 'Load Data From File'. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τα επιταχυνσιόμετρα των οποίων τις μετρήσεις θέλει να επεξεργαστεί (πεδίο Accelerometers). Στο πεδίο Representation επιλέγεται είτε η προβολή των σημάτων στο πεδίο του χρόνου, είτε του φάσματος των σημάτων στο πεδίο της συχνότητας, είτε η φάση των σημάτων στο πεδίο της συχνότητας, είτε η διαφορά φάσης A-B. Το πεδίο Band Pass Filter χρησιμοποιείται για την εφαρμογή ζωνοπερατού φίλτρου όπως και στην καρτέλα 'Realtime'. Στο πεδίο 'Window' επιλέγεται το χρονικό παράθυρο αναπαράστασης του σήματος.



Εικόνα 5-2. GUI Analysis – Time Domain

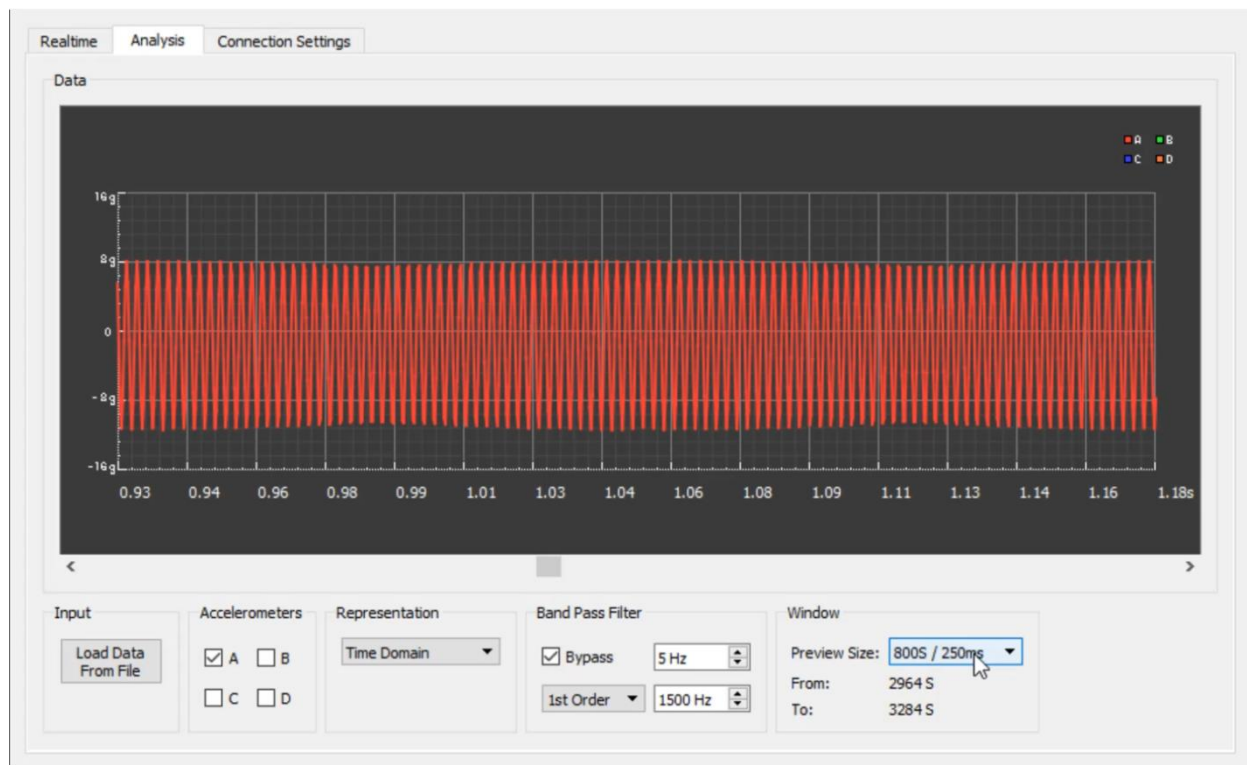
Εφαρμογή του ζωνοπερατού φίλτρου:



Εικόνα 5-3. GUI Analysis - Time Domain Filtered Signal

Με την εφαρμογή του ζωνοπερατού φίλτρου η σταθερή επιτάχυνση της βαρύτητας στον z άξονα απαλείφεται. Όπως και στην καρτέλα 'Relatime' μπορούν να επιλεγούν η άνω και κάτω συχνότητα αποκοπής, καθώς και η τάξη του φίλτρου.

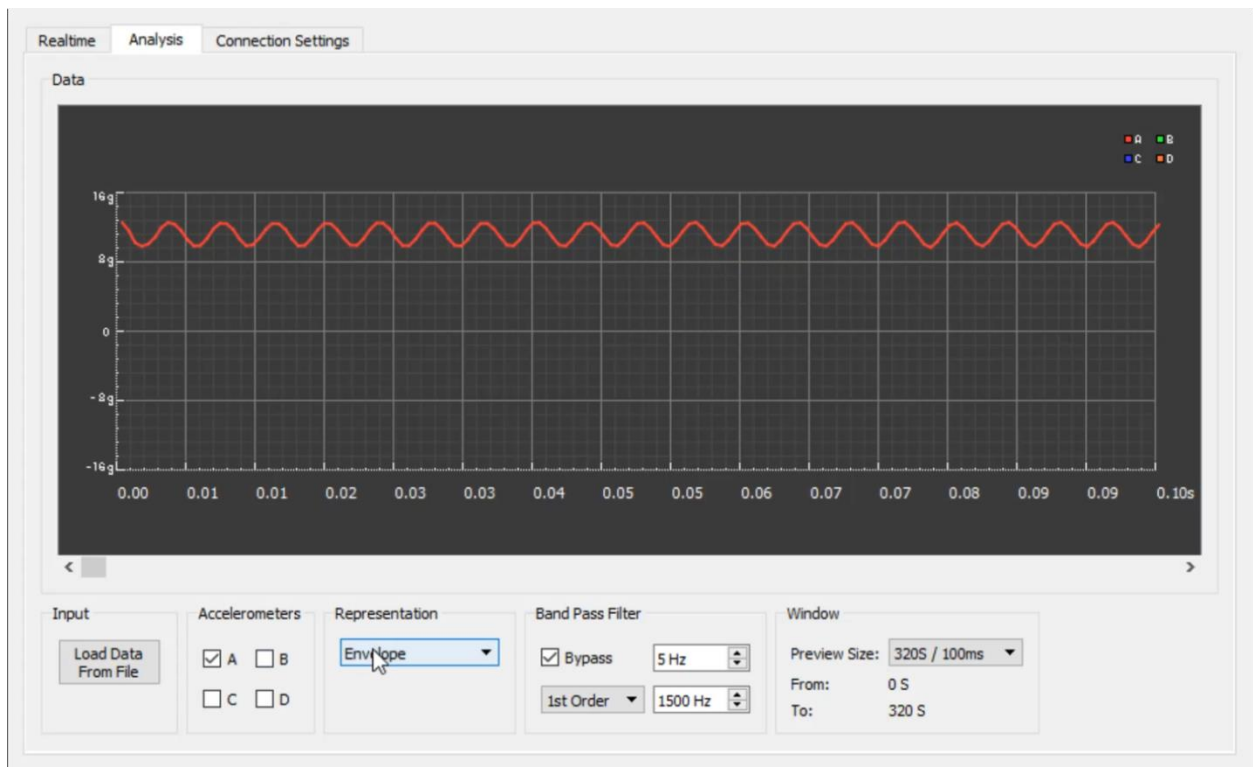
Αλλαγή του χρονικού παραθύρου:



Εικόνα 5-4. GUI Analysis Αλλαγή χρονικού παράθυρου

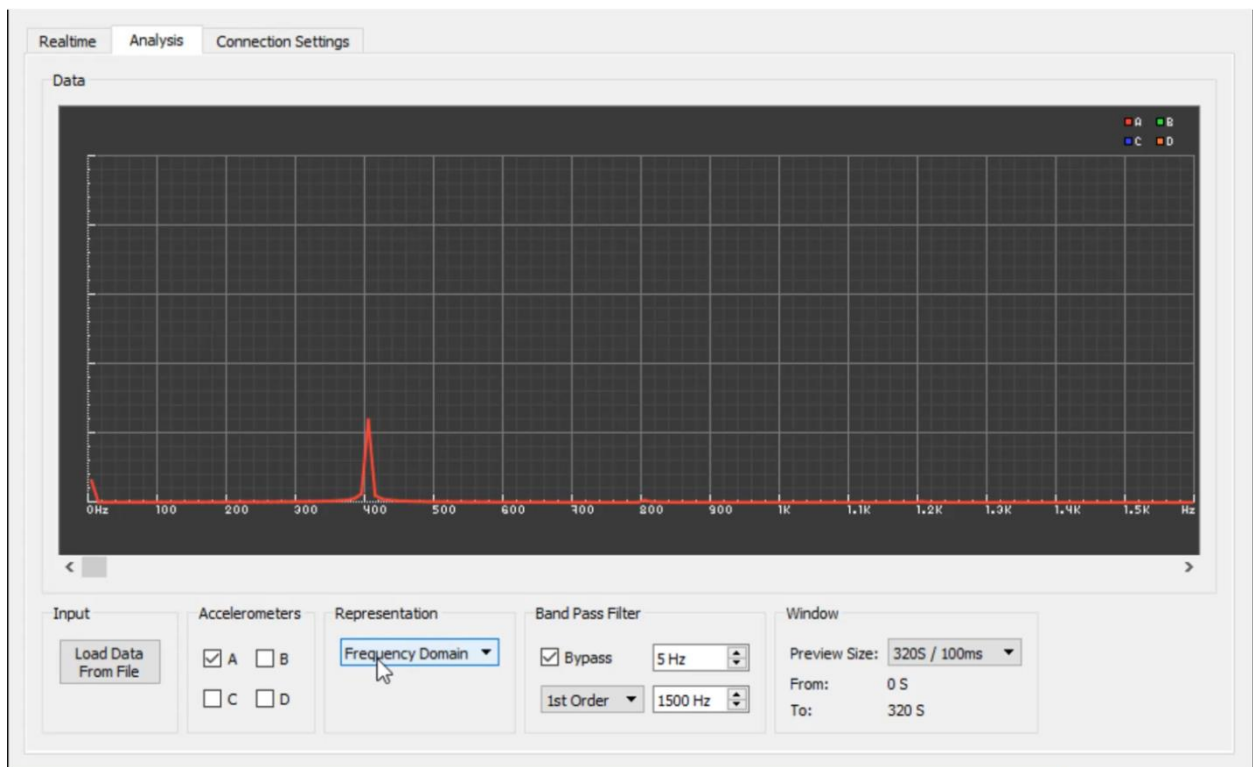
Με την αλλαγή του χρονικού παραθύρου ο χρήστης μπορεί να έχει καλύτερη εποπτεία του χρονικού σήματος της μέτρησης.

Προβολή του Envelope του μετρούμενου σήματος:



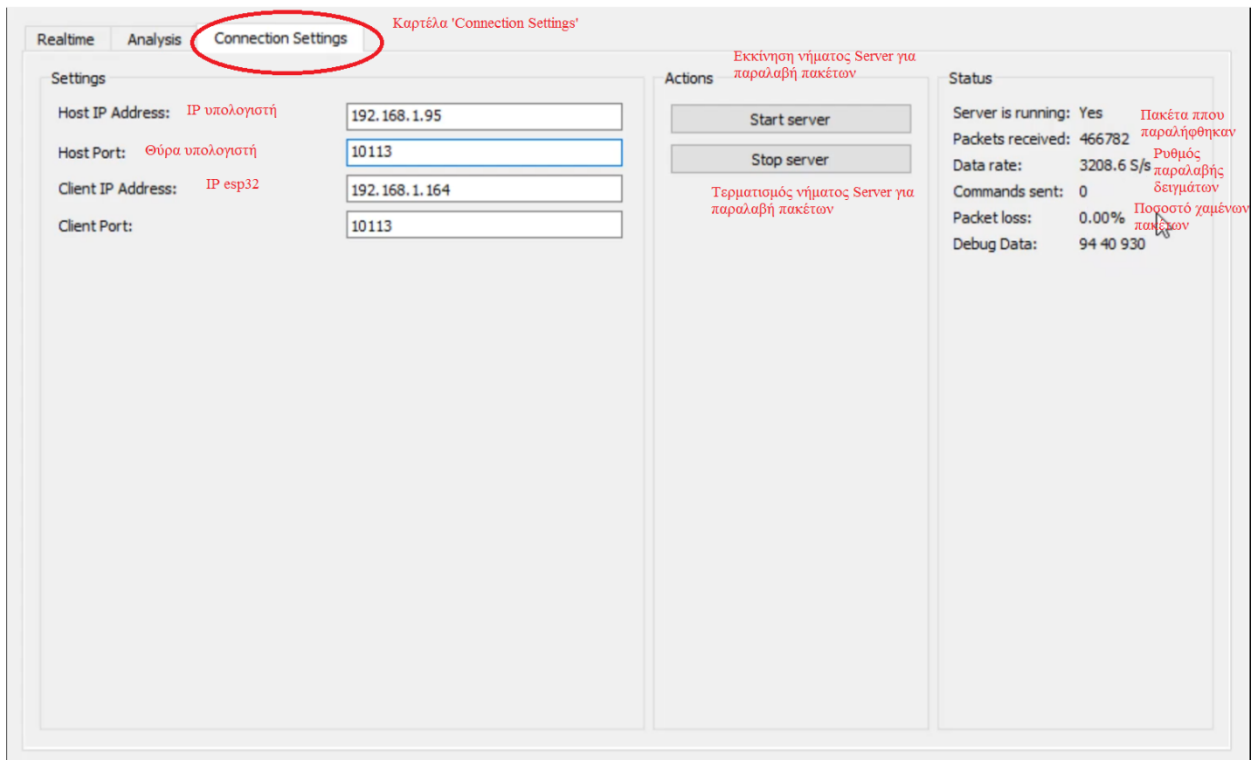
Εικόνα 5-5. GUI Analysis - Envelope

Προβολή του φάσματος του σήματος:



Εικόνα 5-6. GUI Analysis – Frequency Domain

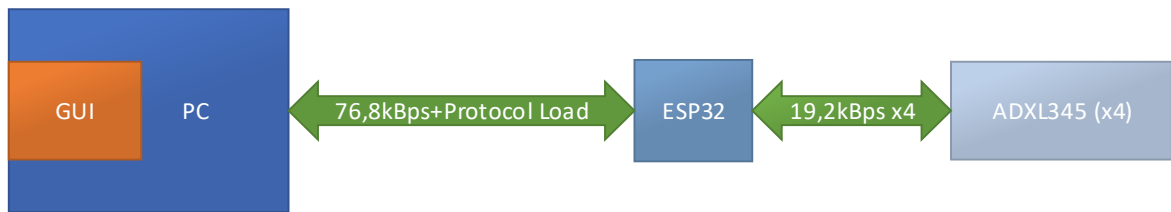
Η τρίτη καρτέλα, που ονομάζεται 'Connection Settings', αφορά στην σύνδεση του προγράμματος με τον ESP32. Το πεδίο settings χρησιμοποιείται για τις ρυθμίσεις των διευθύνσεων αποστολής και παραλαβής των UDP πακέτων. Το πεδίο 'Actions' για την εκκίνηση ή τον τερματισμό του νήματος παραλαβής πακέτων (όταν το πρόγραμμα εκκινεί το νήμα εκτελείται αυτόματα με τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις). Το πεδίο 'Status' παρέχει πληροφορίες για την ποιότητα της σύνδεσης μεταξύ του προγράμματος και του ESP32. Η τιμή 'Packets received' αντιπροσωπεύει τον αριθμό των πακέτων που έχουν ληφθεί, η τιμή 'Data rate' τα δείγματα ανά δευτερόλεπτο που λαμβάνονται μέσω των πακέτων και η τιμή 'Packets loss' το ποσοστό των πακέτων που χάθηκαν κατά την μεταφορά. Για την επισκόπηση της σύνδεσης σε περίπτωση σφάλματος χρησιμεύει η τιμή 'Debug Data' η οποία παρουσιάζει την τιμή του πρώτου δείγματος x, y, z του πρώτου επιταχυνσιομέτρου του πακέτου που λήφθηκε. Η τιμές x, y, z που παρουσιάζονται αν διαιρεθούν με το 256 δίνουν την μετρούμενη επιτάχυνση σε g στους αντίστοιχους άξονες.



Εικόνα 5-7. GUI Connection Settings



### 5.3.5 Ποσοτικά η Ροή των Δεδομένων



Σχήμα 5-8. Ποσοτικά η ροή των δεδομένων.

Κάθε ADXL345 παράγει 3200 δείγματα ανά δευτερόλεπτο για τους τρεις άξονες. Κάθε δείγμα αναπαρίσταται με 13bit, το οποίο στρογγυλοποιείται σε 16bit ή δύο bytes.

$$3200 \left( \frac{\text{samples}}{s} \right) * 3(\text{axis}) * 2 \left( \frac{\text{bytes}}{\text{sample}} \right) = 19200 \left( \frac{\text{bytes}}{s} \right) \quad (5.1)$$

Στον ESP32 είναι συνδεδεμένα τέσσερα ADXL345.

$$19200 \left( \frac{\text{bytes}}{s} \right) * 4 = 76800 \left( \frac{\text{bytes}}{s} \right) \quad (5.2)$$

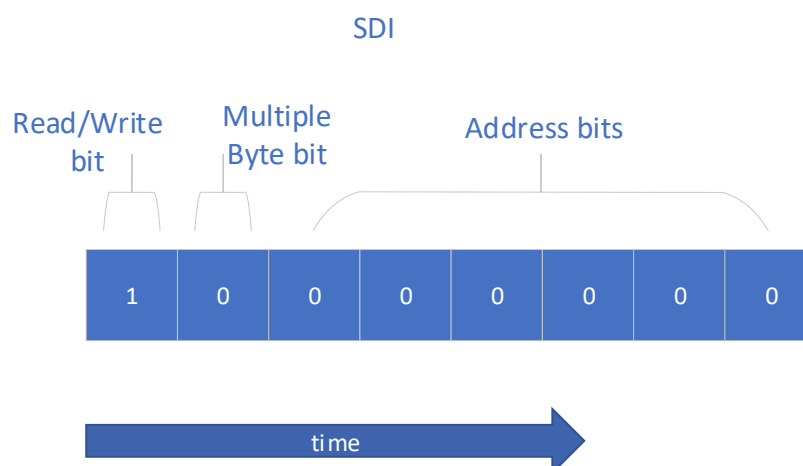
Στη ροή των δεδομένων προς τον υπολογιστή προστίθεται και το κόστος χρήσης του πρωτόκολλου UDP.

### 5.3.6 SPI 4-Wire Data Read για τα ADXL345

Στην επικοινωνία του ESP32 με τα ADXL345, ο ESP32 είναι ο master και τα ADXL345 τα slaves.

Ακολουθεί ένα παράδειγμα ανάγνωσης του καταχωρητή Device ID (DEVID) μέσω SPI σε 4-wire mode. Ο καταχωρητής βρίσκεται στην διεύθυνση 0x00 του ADXL345.

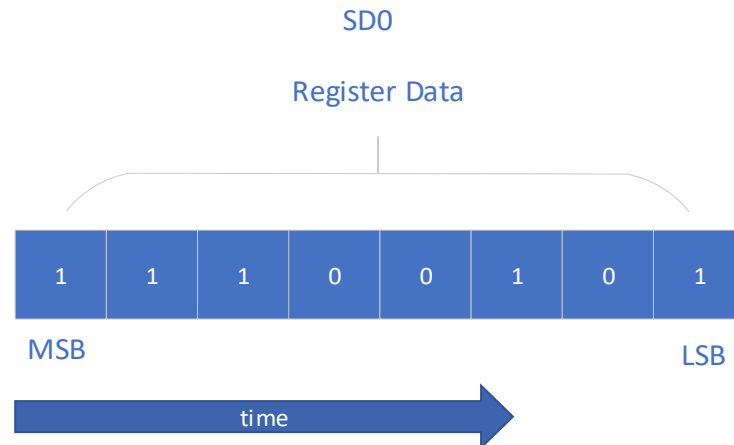
Μεταφορά των πρώτων 8 bit, με οδήγηση του SDI από τον ESP32:



Σχήμα 5-9. Παράδειγμα οδήγησης του SDI από τον ESP32.

- Το Read/Write bit έχει την τιμή 1, αφού πρόκειται για ανάγνωση και όχι εγγραφή καταχωρητή.
- Το Multiple Byte bit έχει την τιμή 0 αφού γίνεται ανάγνωση ενός byte.
- Τα Address bits, 6 στο σύνολο, σχηματίζουν την διεύθυνση του DEVID.

Το ADXL345 ανταποκρίνεται στο αίτημα του ESP32 με την οδήγηση του SDO:



Σχήμα 5-10. Παράδειγμα οδήγησης του SDO από το ADXL345.

Η τιμή του καταχωρητή DEVID είναι πάντα 0xE5 (11100101 b).

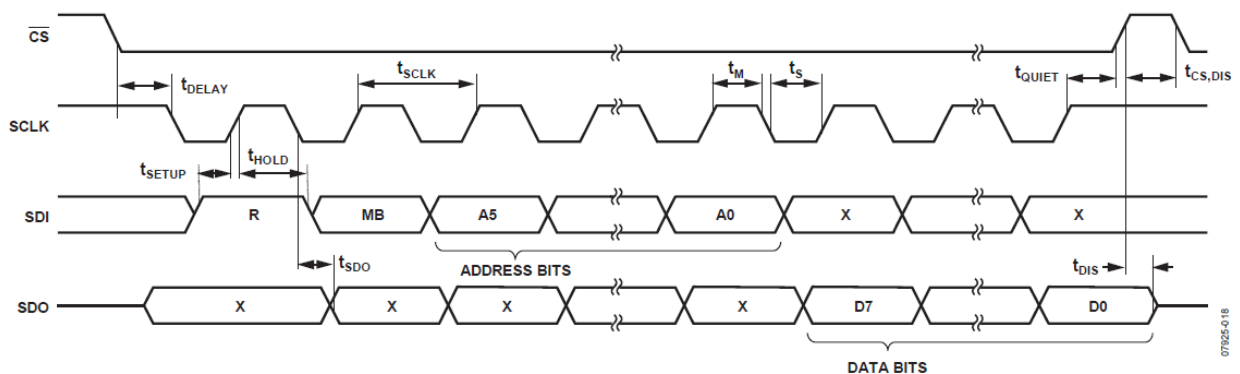
Στην προτεινόμενη υλοποίηση χρησιμοποιείται η μέγιστη συχνότητα του SPI clock, η οποία είναι 5 MHz. Η ανάγνωση των x, y, z είναι διαδοχική.

Συνολικά για την ανάγνωση ενός δείγματος (x, y, z) χρειάζονται:

- Αποστολή 8 bits από τον ESP32 (R/W bit, Multiple Bytes bit, Address bits).
- Αποστολή 48 bits από το ADXL345 (3\*16 bits για κάθε άξονα).

Συνολικά 56 bits μεταδίδονται σε 11,2  $\mu$ s με το SPI clock στα 5 MHz.

Στο datasheet του ADXL345 παρέχεται με λεπτομέρεια η λειτουργία ανάγνωσης σε 4-wire SPI mode.



Σχήμα 5-11. Adxl324 SPI 4-Wire Read [9].



Πίνακας 5-1. SPI Timing για το ADXL345 [9].

Parameter	Limit		Unit	Description
	Min	Max		
$f_{SCLK}$		5	MHz	SPI clock frequency
$t_{SCLK}$	200		ns	1/(SPI clock frequency) mark-space ratio for the SCLK input is 40/60 to 60/40
$t_{DELAY}$	5		ns	$\overline{CS}$ falling edge to SCLK falling edge
$t_{QUIET}$	5		ns	SCLK rising edge to $\overline{CS}$ rising edge
$t_{DIS}$		10	ns	$\overline{CS}$ rising edge to SDO disabled
$t_{CS,DIS}$	150		ns	$\overline{CS}$ deassertion between SPI communications
$t_S$	$0.3 \times t_{SCLK}$		ns	SCLK low pulse width (space)
$t_M$	$0.3 \times t_{SCLK}$		ns	SCLK high pulse width (mark)
$t_{SETUP}$	5		ns	SDI valid before SCLK rising edge
$t_{HOLD}$	5		ns	SDI valid after SCLK rising edge
$t_{SDO}$		40	ns	SCLK falling edge to SDO/SDIO output transition
$t_{R^4}$		20	ns	SDO/SDIO output high to output low transition
$t_{F^4}$		20	ns	SDO/SDIO output low to output high transition

Όπως υπολογίστηκε παραπάνω ο συνολικός χρόνος για την ανάγνωση 56 bit είναι 11,2  $\mu$ s. Σε αυτόν το χρόνο πρέπει να προστεθούν και οι χρόνοι  $t_{delay}$  και  $t_{quiet}$  η οποίοι όμως είναι πολύ μικρότεροι του συνολικού χρόνου ανάγνωσης άρα, παραλείπονται. Ο χρόνος  $t_{cs,dis}$  επίσης παραλείπεται αφού δεν γίνονται δύο διαδοχικές αναγνώσεις στο ίδιο ADXL345.

### 5.3.7 Χρήση του FIFO του ADXL345

Το κάθε επιταχυνσιόμετρο διαθέτει μία στοίβα τύπου First In First Out (FIFO) 32 (x, y, z) θέσεων. Μέσω του FIFO CTL καταχωρητή (Register 0x38) είναι δυνατή η επιλογή του τρόπου που καταχωρούνται οι τιμές των μετρήσεων στην στοίβα:

Πίνακας 5-2. Τρόποι Λειτουργίας FIFO – FIFO Modes.	
Mode	Λειτουργία – Function
Bypass	Η στοίβα γίνεται bypass.
FIFO	Η στοίβα συλλέγει μέχρι 32 τιμές και σταματά όταν γεμίσει. Νέες τιμές συλλέγονται μόνο όταν η στοίβα δεν είναι γεμάτη.
Stream	Η στοίβα κρατά τις τελευταίες 32 τιμές. Όταν είναι γεμάτη, οι νέες τιμές αντικαθιστούν τις παλαιότερες.
Trigger	Όταν υπάρξει εσωτερικό γεγονός (trigger event), π.χ. ανίχνευση ελεύθερης πτώσης, η στοίβα κρατά τις τελευταίες n τιμές πριν από το γεγονός και συνεχίζει με την συλλογή νέων τιμών. Νέες τιμές συλλέγονται έως ότου να γεμίσει η στοίβα. Το n ορίζεται από 0 έως 32 στον αντίστοιχο καταχωρητή.

Οι τιμές παράγονται στο ADXL345 και καταναλώνονται από τον ESP32. Η στοίβα χρησιμοποιείται ως ένα ενδιάμεσο buffer για την ομαλή ροή των τιμών. Στην προτεινόμενη υλοποίηση χρησιμοποιείται το 'FIFO mode'. Ο λόγος θα φανεί στην συνέχεια.

Η προσπέλαση των καταχωρητών των τεσσάρων επιταχυνσιόμετρων γίνεται κυκλικά. Μετά την παραμετροποίηση των ADXL345 ξεκινά η λήψη των δειγμάτων και η αποθήκευση στην στοίβα FIFO. Καθώς η FIFO λειτουργεί σε FIFO mode όταν γεμίσουν οι στοίβες τα επιταχυνσιόμετρα σταματούν να συλλέγουν δείγματα.

Σε χρόνο  $10\text{ms}^5$  μετά την παραμετροποίηση οι στοίβες είναι γεμάτες:

	FIFO A	FIFO B	FIFO C	FIFO D
	1	1	1	1
	2	2	2	2
	.	.	.	.
	.	.	.	.
	.	.	.	.
	31	31	31	31
	32	32	32	32
FIFO STATUS	32	32	32	32

Σχήμα 5-12. Οι στοίβες των ADXL345 μετά την παραμετροποίηση.

Η τιμή του καταχωρητή FIFO status ανταποκρίνεται στον αριθμό των τριάδων (x, y, z) που είναι αποθηκευμένα στην στοίβα ως δείγματα.

Η κατανάλωση των δεδομένων από τον ESP32 έχει αρχίσει. Ο χρόνος που χρειάζεται για μια διαδοχική ανάγνωση δειγμάτων από τα ADXL345 είναι (SPI clock στα 5 MHz):

$$11,2 \left( \frac{\mu\text{s}}{\text{adxl345}} \right) * 4(\text{adxl345}) = 44,8 \mu\text{s} \quad (5.3)$$

Για την ακρίβεια, μεταξύ των διαδοχικών αναγνώσεων από τα επιταχυνσιόμετρα χρειάζονται επιπλέον εντολές που εκτελούνται από τον ESP32. Η συχνότητα του ρολογιού του ESP32 είναι 240 MHz. Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος εκτέλεσης μερικών εκατοντάδων εντολών (πλεονασμός για την συγκεκριμένη περίπτωση) είναι της τάξεως των λίγων ms. Έτσι μπορεί να αγνοηθεί με ασφάλεια αυτός χρόνος και να γίνει η παραδοχή ότι η διαδοχική ανάγνωση ενός δείγματος από τα τέσσερα ADXL345 διαρκεί 50  $\mu\text{s}$ .

Κάθε ADXL345 παράγει ένα δείγμα (x, y, z) ανά  $(1/3200) \text{ s} = 312,5 \mu\text{s}$ . Άρα ο ESP32 διαβάζει τις μετρήσεις ταχύτερα από ότι παράγονται. Έτσι μπορεί να διαβάζει μαζικά ένα αριθμό μετρήσεων από τις στοίβες και μέχρι αυτές να ξαναγεμίσουν να διευθετεί την αποστολή των πακέτων στο δίκτυο.

<sup>5</sup> Για λήψη 32 δειγμάτων χρειάζονται:  $32(\text{δείγματα}) * \frac{1}{3200} \left( \frac{\text{δείγματα}}{\text{s}} \right) = 0,01\text{s}$  ή 10ms

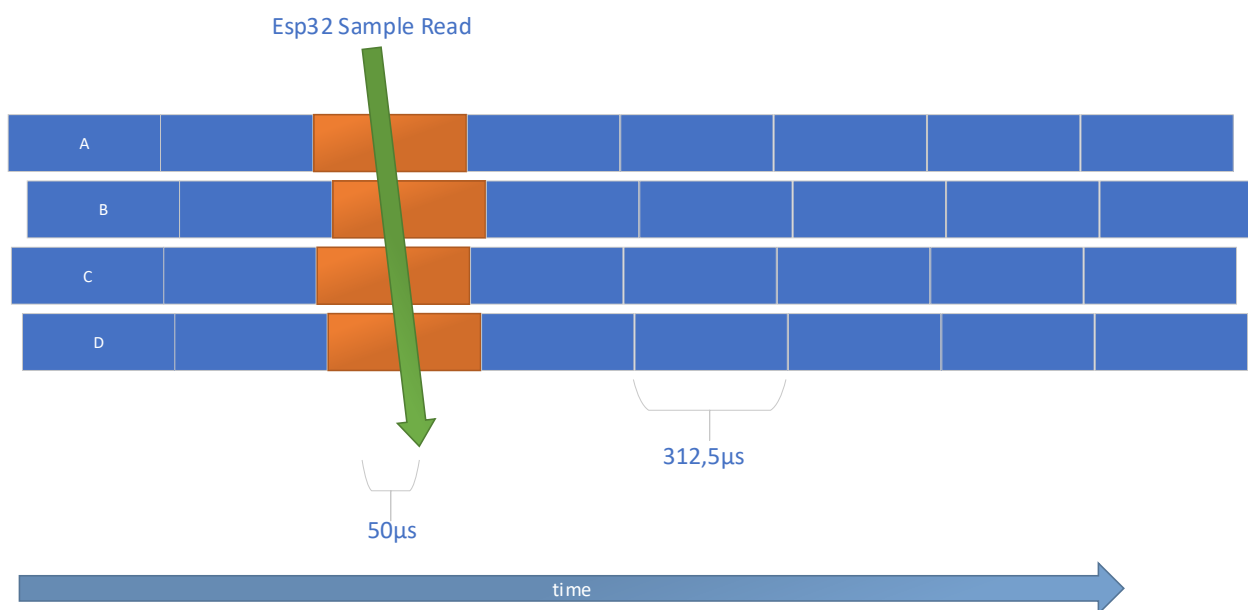
### 5.3.8 Πρόβλημα Συγχρονισμού και Διαφορά Φάσης

Η ανάγνωση των μετρήσεων ξεκινά από τις γεμάτες στοίβες και συνεχίζει με την συνεχή ανάγνωση δειγμάτων. Με το που γίνει η πρώτη ανάγνωση η στοίβα δεν είναι πλέον γεμάτη και νέα δείγματα εισάγονται σε αυτή.

Η δειγματοληψία στον εσωτερικό ADC του ADXL345 γίνεται με έναυσμα ενός εσωτερικού σήματος. Το ADXL345 δεν διαθέτει κάποια είσοδο σήματος εξωτερικού ρολογιού. Αυτό σημαίνει ότι τα εσωτερικά ρολόγια των τεσσάρων ADXL345 είναι αδύνατο να συγχρονιστούν μεταξύ τους.

Όταν είναι απαραίτητη μία συγχρονισμένη μέτρηση για την εξαγωγή διαφοράς φάσης μεταξύ των μετρήσεων, τα ασυγχρόνιστα ρολόγια εισάγουν μια επιπλέον διαφορά φάσης μεταξύ των μετρήσεων.

Στην καλύτερη περίπτωση η λήψη των δειγμάτων περιγράφεται παρακάτω:

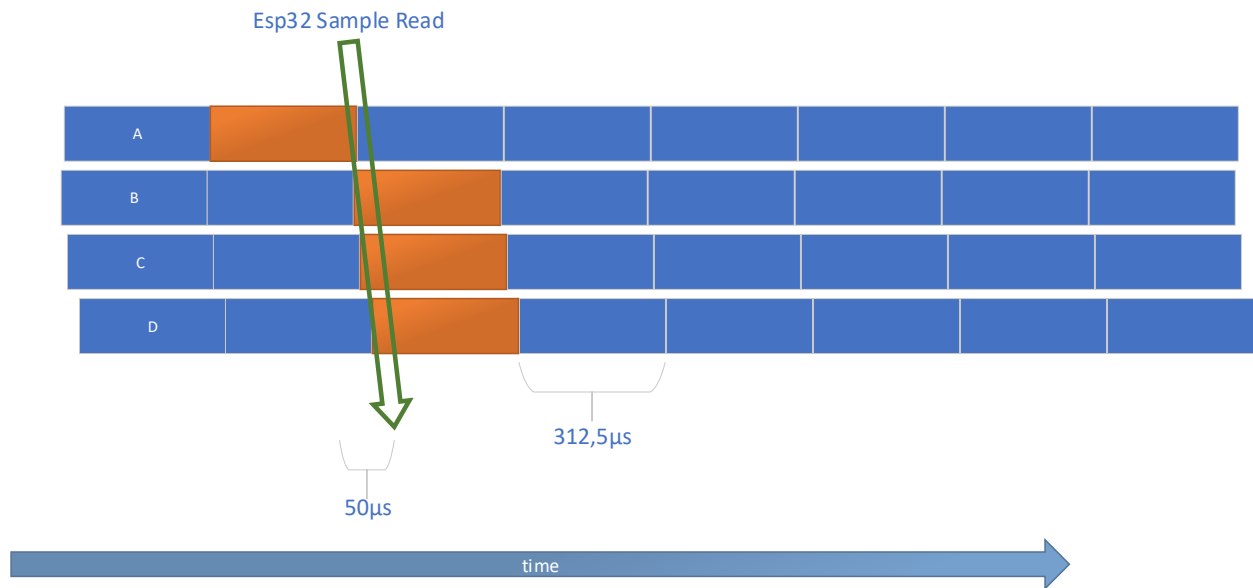


Σχήμα 5-13. Ομαδοποίηση των δειγμάτων στην καλύτερη περίπτωση.

Κάθε κουτί αναπαριστά ένα δείγμα. Το αριστερό άκρο ενός κουτιού είναι η στιγμή τοποθέτησής του στην έξοδο της στοίβας. Το κουτιά τα οποία τέμνει το πράσινο βέλος είναι τα δείγματα που διαβάζει ο ESP32 και τα ομαδοποιεί ως ταυτόχρονη μέτρηση μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-13 ο ESP32 ομαδοποιεί ως ταυτόχρονες μετρήσεις δείγματα που έχουν μερικά μs απόκλιση από τον βέλτιστο χρονισμό.

Στην χειρότερη περίπτωση η λήψη δειγμάτων περιγράφεται παρακάτω:



Σχήμα 5-14. Ομαδοποίηση δειγμάτων στην χειρότερη περίπτωση.

Το ESP32 διαβάζει το δείγμα από το A τη στιγμή μόλις πριν να εισαχθεί στην έξοδο της στοίβας. Στη συνέχεια διαβάζει τα δείγματα από τα B, C και D αμέσως μετά την εισαγωγή τους στην έξοδο της.

Ο ESP32 στην παραπάνω περίπτωση έχει ομαδοποιήσει ως ταυτόχρονα δείγματα, μετρήσεις που έχουν μη-αμελητέα χρονική απόσταση μεταξύ τους. Αυτή ισοδυναμεί με το χρόνο διατήρησης του δείγματος στην κορυφή της στοίβας  $312,5 \mu s$ <sup>6</sup> συν τη διαφορά συγχρονισμού των  $50 \mu s$ . Άρα η μέγιστη χρονική διαφορά μεταξύ δύο μετρήσεων λόγω του συστήματος μέτρησης είναι  $317,5 \mu s$ .

Αυτή χρονική διαφορά εισάγει εσφαλμένη διαφοράς φάσης μεταξύ δύο μετρήσεων. Έστω οι μετρήσεις A και B στο ίδιο σημείο. Οι phasors για συχνότητα  $f_0$  για τις μετρήσεις A και B έχουν ως εξής:

$$A_{f_0} \cos(2\pi f_0 t) \quad (5.4)$$

$$B_{f_0} \cos(2\pi f_0 t + \varphi_{f_0}) \quad (5.5)$$

όπου:

$A_{f_0}$  το πλάτος του phasor συχνότητας  $f_0$  για την μέτρηση A

$B_{f_0}$  το πλάτος του phasor συχνότητας  $f_0$  για την μέτρηση B

$\varphi_{f_0}$  η διαφορά φάσης των δύο μετρήσεων

Αφού οι μετρήσεις γίνονται στο ίδιο σημείο, η διαφορά φάσης προκύπτει από την χρονική διαφορά των δειγμάτων.

Δηλαδή:

$$\varphi_{f_0} = 2\pi f_0 \Delta t \quad (5.6)$$

όπου:

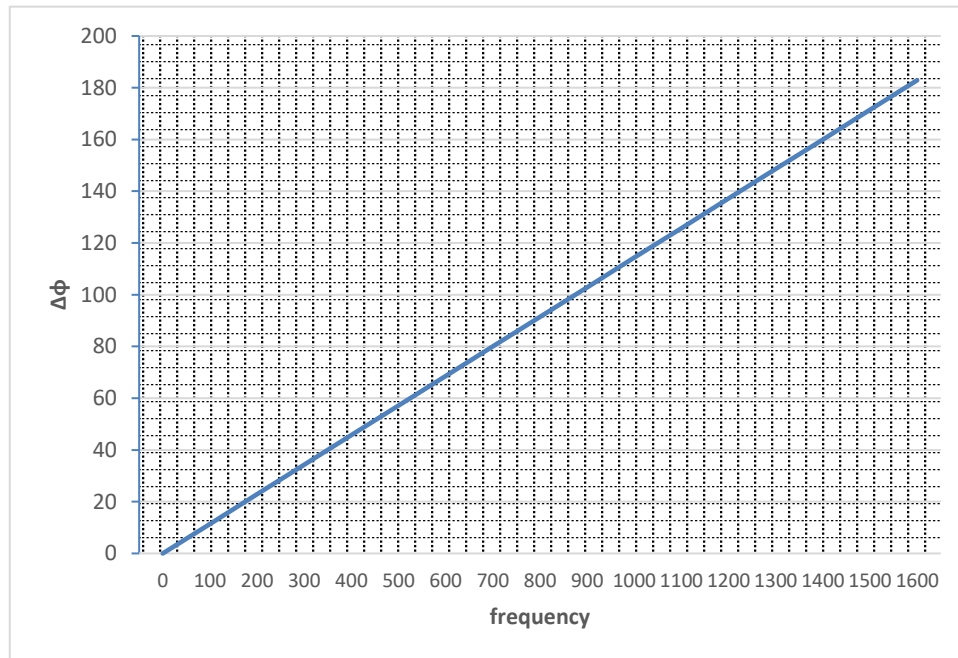
<sup>6</sup>  $1/3200 = 312,5 \mu s$  όπου 3200 η μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας.

$\Delta t$  η χρονική διαφορά

Η διαφορά φάσης εκφρασμένη σε μοίρες:

$$\varphi_{f_0} = 360f_0\Delta t \quad (5.7)$$

Άρα η διαφορά φάσης που προκύπτει στη χειρότερη περίπτωση είναι ανάλογη της συχνότητας  $f_0$ .



Διάγραμμα 5-1. Εσφαλμένη διαφορά φάσης ως προς τη συχνότητα.

### 5.3.9 Ρυθμίσεις των ADXL345

Πριν από την έναρξη των μετρήσεων, πρέπει να γίνει παραμετροποίηση του ADXL345. Αφού συνδεθεί με την τροφοδοσία εισέρχεται σε standby mode. Σε αυτό το mode η κατανάλωση ενέργειας είναι η ελάχιστη, δεν πραγματοποιούνται μετρήσεις και αναμένεται το command για measurement mode. Κάθε command αντιστοιχεί στην εγγραφή ενός ή περισσότερων bit κάποιου register του ADXL345. Οι ενέργειες που εκτελούνται κατά την εκκίνηση από τον ESP32 μέσω commands είναι οι παρακάτω. Για κάποιες από τις ενέργειες χρειάζονται παραπάνω από ένα command. Έτσι θέτει:

1. Το ADXL345 σε measurement mode.
2. Τον τρόπο επικοινωνίας σε 4 wire SPI.
3. Το κατάλληλο DataFormat.
4. Την αναπαράσταση των αριθμών σε μέγιστη ανάλυση.
5. Το μέγιστο εύρος μέτρησης.
6. Το κατάλληλο FIFO Mode, στο Stream Mode.
7. Τη συχνότητα δειγματοληψίας στο μέγιστο, τα 3200 Hz.

Ενέργεια 2: Το ADXL345 υποστηρίζει 3 Wire Mode SPI και 4 Wire Mode SPI. Στην προτεινόμενη υλοποίηση χρησιμοποιείται το 4 Wire Mode SPI.

Ενέργεια 3: Η αναπαράσταση των αριθμών μπορεί να είναι left-justified και right-justified. Στην προτεινόμενη υλοποίηση χρησιμοποιείται η right-justified αναπαράσταση.

Ενέργεια 4: Το ADXL345 χρησιμοποιεί για την αναπαράσταση ενός αριθμού 10 έως 13 bit. Στην προτεινόμενη υλοποίηση χρησιμοποιείται η μέγιστη ανάλυση με 13 bit αναπαράσταση.

Ενέργεια 5: Τα εύρη μέτρησης του ADXL 345 είναι  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 8$ ,  $\pm 16$  g. Στην προτεινόμενη υλοποίηση χρησιμοποιείται το μέγιστο εύρος  $\pm 16$  g.

### 5.3.10 Μορφή Δεδομένων των ADXL345

Όπως αναφέρεται στην Υποενότητα 5.3.9 το επιταχυνσιόμετρο είναι ρυθμισμένο στα  $\pm 16$ g και στη μέγιστη ανάλυση των 13 bit. Αυτό σημαίνει ότι για τα  $+16$  g υπάρχουν διαθέσιμες  $2^{12}$  ή 4096 διακριτές τιμές και αντίστοιχα για τα  $-16$  g. Αν διαιρεθεί το εύρος με τον πλήθος των διακριτών τιμών  $16/4096=0,00390625$  προκύπτει στην ουσία η διακριτική ικανότητα του ADXL345, η οποία είναι 3,9 mg. Εναλλακτικά διατυπωμένο: 256 διακριτές τιμές ή 8 bit αντιστοιχούν στην αναπαράσταση 1 g.

Οι τιμές εξόδου του ADXL345 για τις μετρήσεις x, y, z είναι ακέραιοι αριθμοί right justified με sign extension. Οι ακέραιοι πλάτους 16 bit προκύπτουν με την ένωση των δύο byte από τα δύο SPI transfers. Η μετατροπή από τα 13 bit στα 16 bit με sign extension γίνεται εσωτερικά στο ADXL345. Ο ακέραιος δηλώνει τον αριθμό των 3,9 mg ( $3.9 = 1/256$ ) που μετρήθηκαν, άρα από την διαίρεσή του με το 256 προκύπτει η τιμή της μετρούμενης επιτάχυνσης.

## 6. Αποτελέσματα

---

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα. Η αξιοπιστία της μετρητικής διάταξης που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε, ελέγχθηκε για μια σειρά σύνθετων ταλαντώσεων. Οι ταλαντώσεις παράγονται από ένα ηχείο συνδεδεμένο σε Η/Υ που δημιουργεί σήματα με τη βοήθεια μιας γεννήτριας συχνοτήτων. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η προσομοίωση κραδασμών που θα μπορούσαν να αντιστοιχούν σε οποιαδήποτε βλάβη μηχανολογικής διάταξης.

### 6.1 Πειραματική Διάταξη Δοκιμής Επιταχυνσιόμετρου

Η πειραματική διάταξη που δημιουργήθηκε για τη δοκιμή του μετρητικού συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-1 έως την Εικόνα 6-5. Το ηχείο συνδέεται σε ενισχυτή και ο ενισχυτής συνδέεται στην κάρτα ήχου του Η/Υ. Στο κέντρο του ηχείου, όπου η μετατόπιση είναι μέγιστη τοποθετήθηκε, με λεπτή στρώση θερμόκολλας, το επιταχυνσιόμετρο ADXL345. Το επιταχυνσιόμετρο, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο Κεφάλαιο, συνδέεται στον ESP32, όπου καταγράφεται το μετρούμενο σήμα. Το βάρος του επιταχυνσιόμετρου μαζί με το καλώδιο σύνδεσης είναι μόλις λίγα γραμμάρια, οπότε δεν επηρεάζει ουσιαστικά την ταλάντωση του ηχείου. Το ηχείο είναι επίσης στηριγμένο σε υλικό που αποσβένει κραδασμούς οπότε αποφεύγεται μετάδοση κραδασμών από την επιφάνεια στήριξης.

Το κύκλωμα ενίσχυσης υλοποιείται με το ολοκληρωμένο κύκλωμα Toshiba TA8201AK. Ο ενισχυτής γενικά δεν αλλοιώνει το σήμα εξόδου από την κάρτα ήχου. Το εύρος συχνοτήτων του ενισχυτή είναι από λίγα Hz έως μερικές εκατοντάδες kHz, το οποίο υπερκαλύπτει το ωφέλιμο εύρος συχνοτήτων της μετρητικής διάταξης 0-1600 Hz.

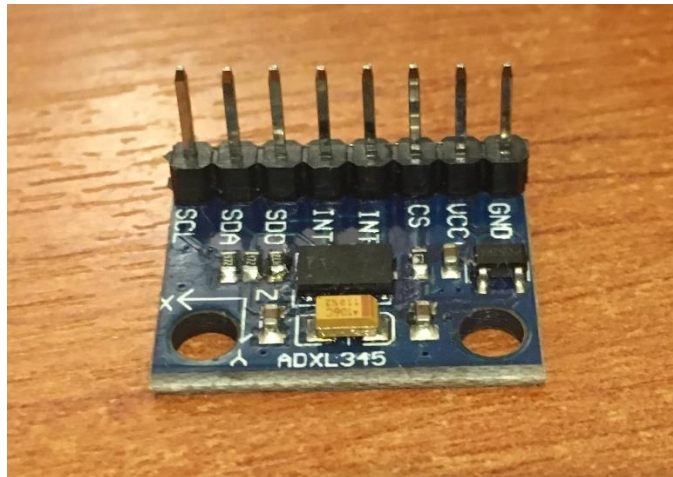
Το τροποποιημένο ηχείο με προσθήκη επίπεδης πλαστικής επιφάνειας φαίνεται στην Εικόνα 5-1.



*Εικόνα 6-1. Το ηχείο για την παραγωγή των ταλαντώσεων.*

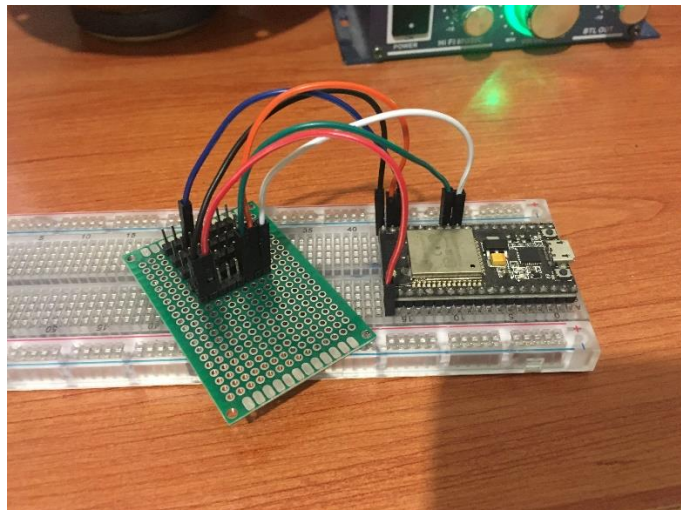
Το ADXL345 φαίνεται στην Εικόνα 5-2.





*Εικόνα 6-2. Το επιταχυνσιόμετρο ADXL345.*

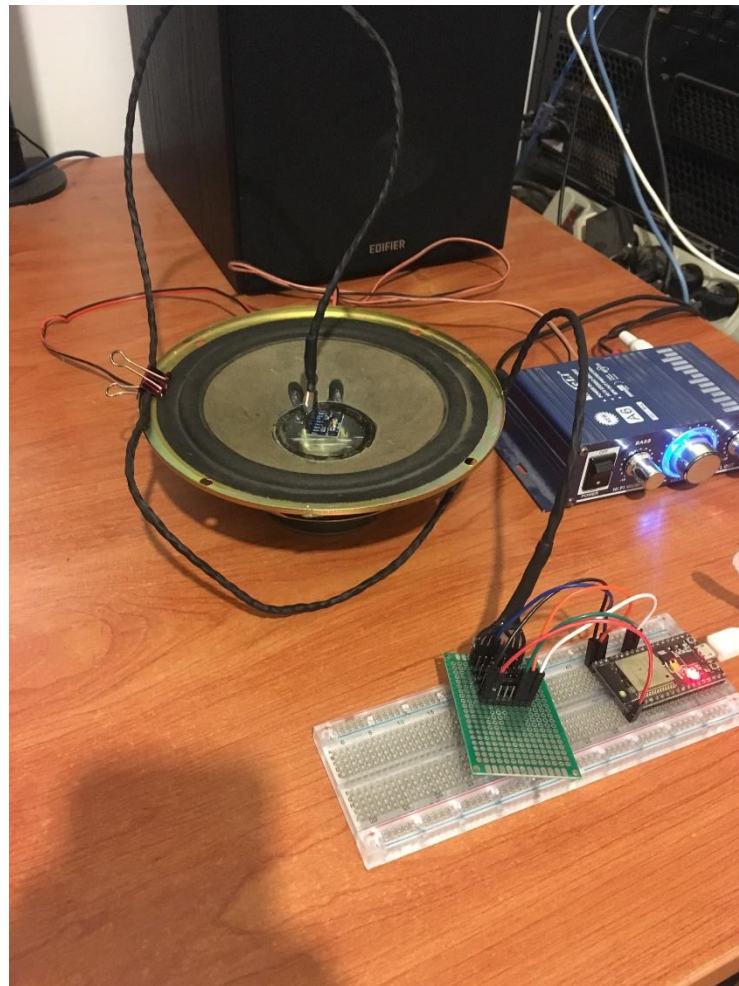
Ο ESP32 φαίνεται στην Εικόνα 5-3.



*Εικόνα 6-3. Ο μικροελεγκτής ESP32.*

Η ολοκληρωμένη σύνδεση φαίνεται στην Εικόνα 5-3.

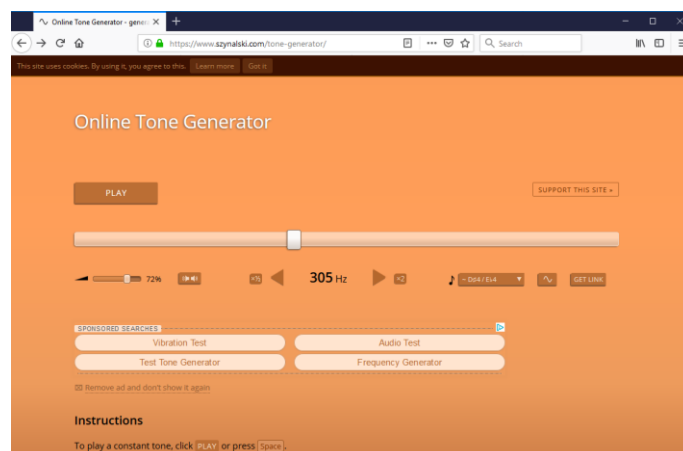




*Εικόνα 6-4. Η διάταξη παραγωγής και μέτρησης δονήσεων.*

Το ADXL345 τοποθετείται πάνω στην πλαστική διάφανη επιφάνεια, όπου κολλάται με θερμόκολλα.

Η εφαρμογή online tone generator που χρησιμοποιείται για την παραγωγή συγκεκριμένων συχνοτήτων φαίνεται στην Εικόνα 5-5.



*Εικόνα 6-5. Online tone generator.*

Συνδέοντας τον ενισχυτή ήχου στην έξοδο του υπολογιστή, οι συχνότητες οι οποίες παράγονται πρέπει να καταγράφονται από το ADXL345.

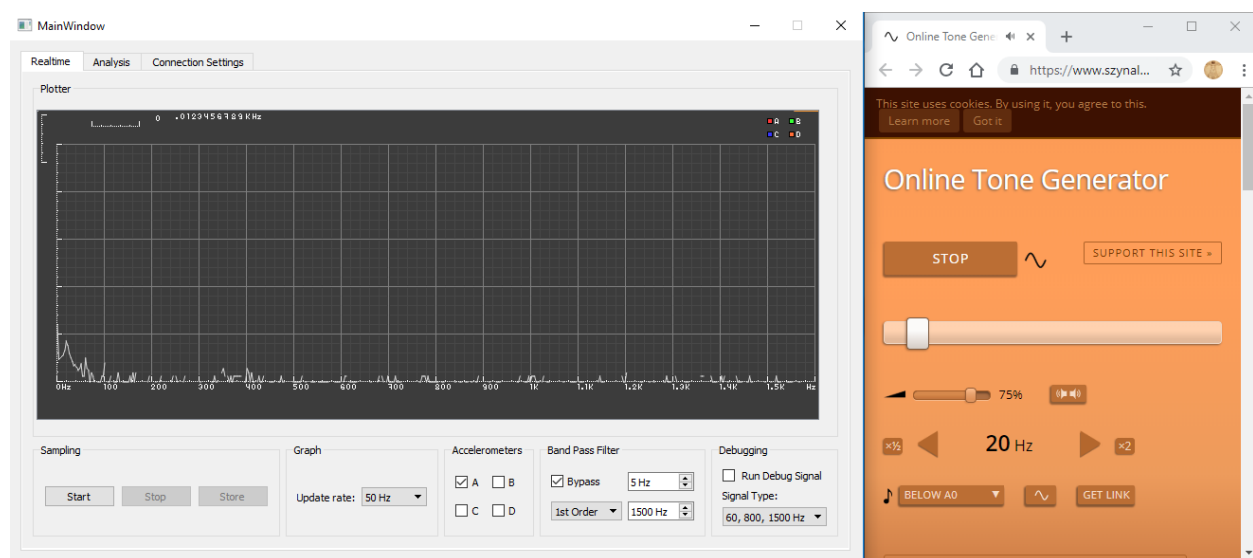
## 6.2 Δοκιμή Διάταξης σε Μονή Συχνότητα

Αρχικά προσδιορίζεται η ευαισθησία του συστήματος σε ένα εύρος παραγομένων συχνοτήτων. Χρησιμοποιώντας τη γεννήτρια συχνοτήτων παράγεται ένα ημιτονοειδές σήμα σταδιακά αυξανόμενης συχνότητας και καταγράφεται το μετρούμενο σήμα από το επιταχυνσιόμετρο. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι να επαληθευτεί το θεωρητικό ωφέλιμο εύρος συχνοτήτων της μετρητικής διάταξης και να ελεγχθεί η ακρίβειά της έναντι γνωστών απλών σημάτων. Η ελάχιστη συχνότητα δοκιμής της διάταξης είναι τα 20 Hz. Δεν παρουσιάζεται δοκιμή του συστήματος σε χαμηλότερες συχνότητες, λόγω ανεπαρκούς απόκρισης του ενισχυτή. Επίσης, είναι σπάνιο ταλαντώσεις τόσο χαμηλής συχνότητας να σχετίζονται με βλάβες μηχανολογικών διατάξεων.

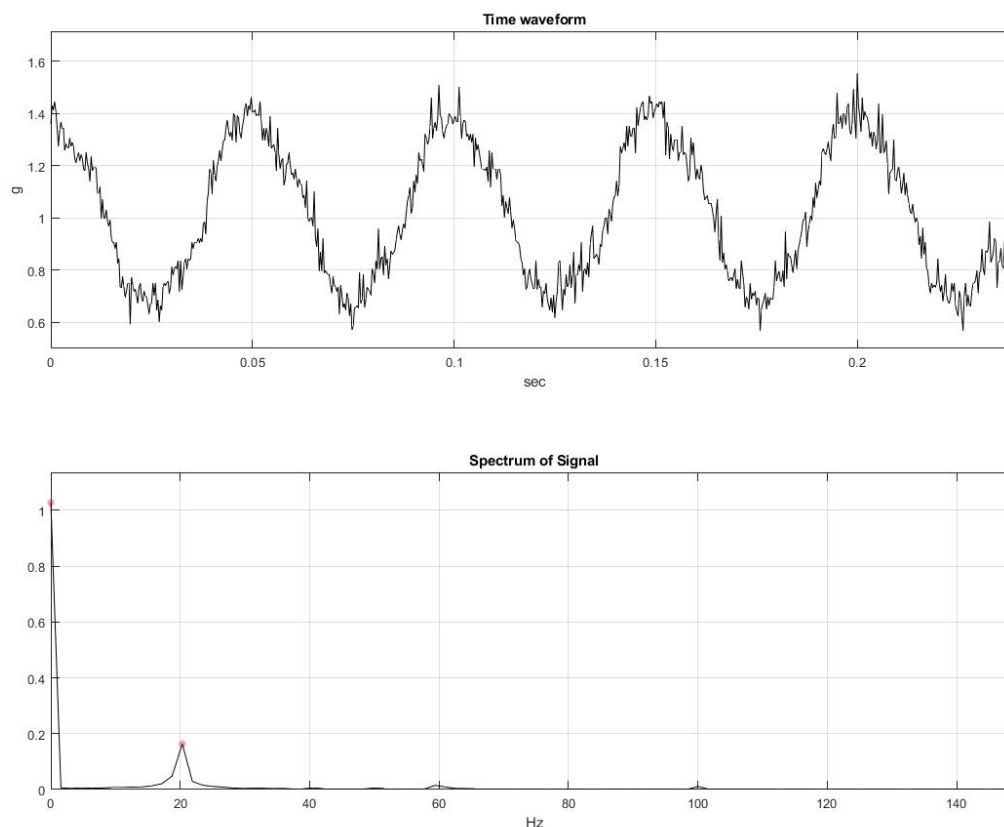
Στην Εικόνα 6-6 παρουσιάζεται το φάσμα του σήματος που μετρήθηκε ένα απλό ημιτονοειδές σήμα συχνότητας 20Hz, το οποίο δημιουργήθηκε από τη γεννήτρια συχνοτήτων. Το φάσμα αυτό δημιουργείται σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια λήψης της μέτρησης και με αυτό τον τρόπο ο χρήστης έχει μια αρχική εικόνα ότι η μέτρηση έγινε σωστά. Στη συνέχεια το μετρούμενο σήμα αποθηκεύεται για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση.

Στην Εικόνα 6-7 παρουσιάζεται offline επεξεργασία του αποθηκευμένου σήματος (ταλάντωση ηχείου) όπως καταγράφηκε από τη μετρητική διάταξη, καθώς και το φάσμα του, μετά από ανάλυση Fourier. Η offline επεξεργασία των μετρήσεων έγινε στο λογισμικό MATLAB. Το φάσμα του σήματος παρουσιάζει, όπως αναμένεται, μια αιχμή στα 20 Hz καθώς και μια επιπλέον στα 0 Hz που αντιστοιχεί στην επιτάχυνση της βαρύτητας (υπενθυμίζεται ότι οι αισθητήρες επιτάχυνσης που χρησιμοποιούνται μετρούν και σταθερές επιταχύνσεις). Το χρονικό σήμα που μετρήθηκε (Εικόνα 6-7) παρουσιάζεται ως ένα ημιτονοειδές σήμα συχνότητας 20 Hz με μέσο πλάτος 1g (επιτάχυνση της βαρύτητας) και πλάτος ταλάντωσης περίπου 0.4g. Η ύπαρξη μετρητικού θορύβου είναι εμφανής, χωρίς όμως να επηρεάζει ουσιαστικά την ποιότητα των μετρήσεων.

Αρχικά στο ηχείο παράγεται ήχος προερχόμενος από τόνους μονής συχνότητας:

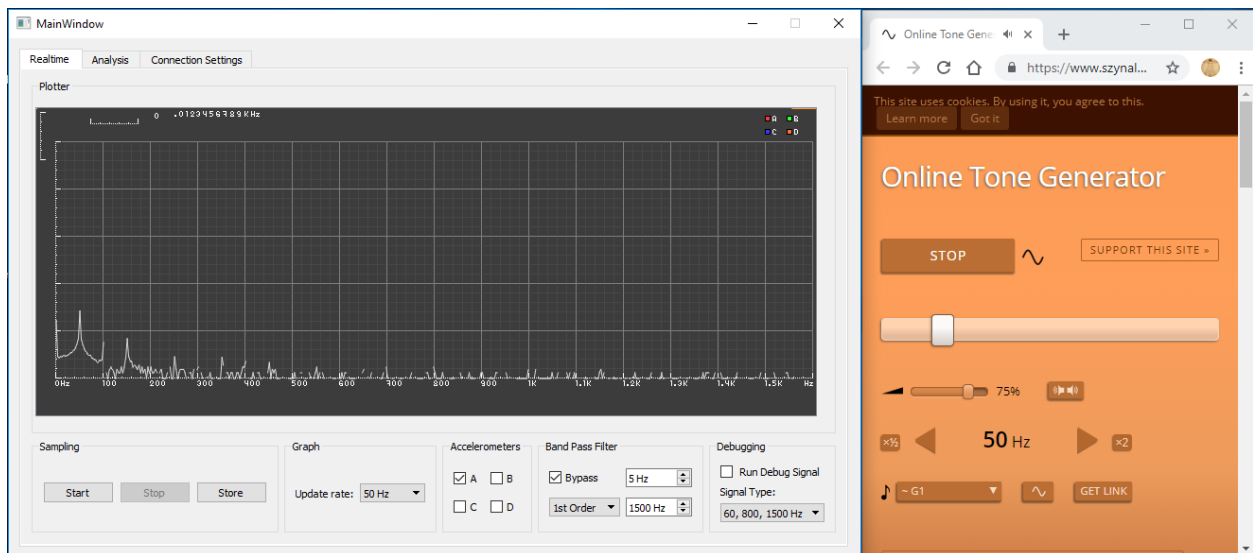


Εικόνα 6-6. Το σήμα διέγερσης στα 20 Hz

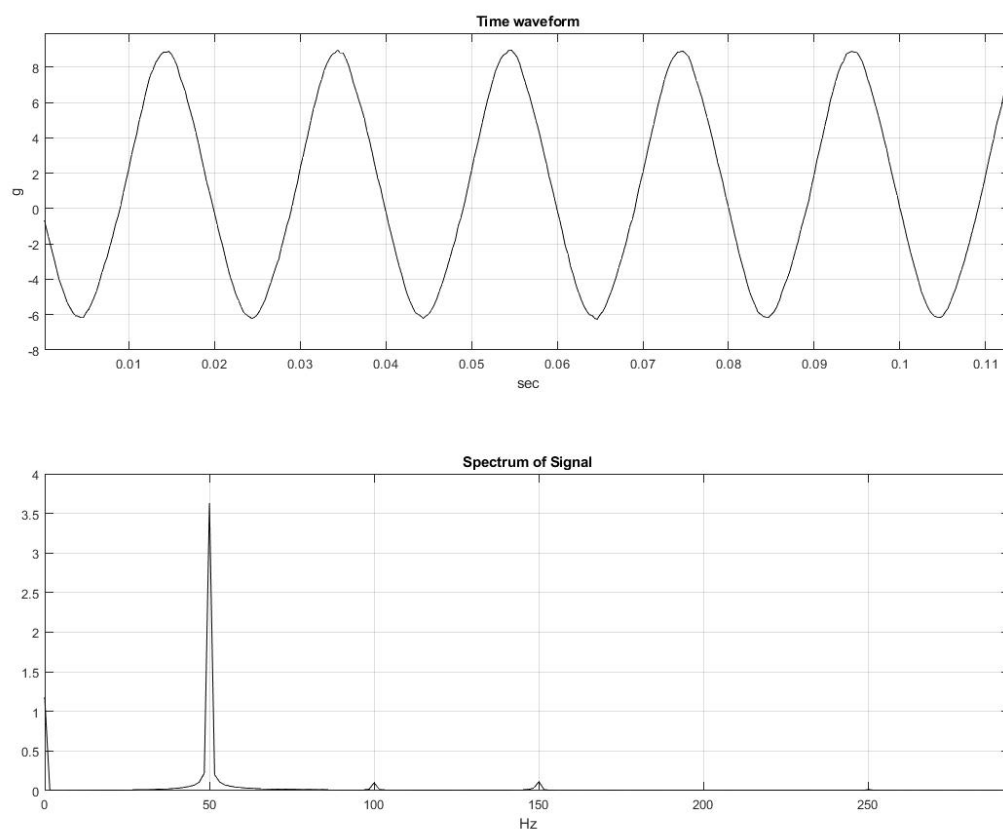


Εικόνα 6-7. Το σήμα απόκρισης στα 20 Hz

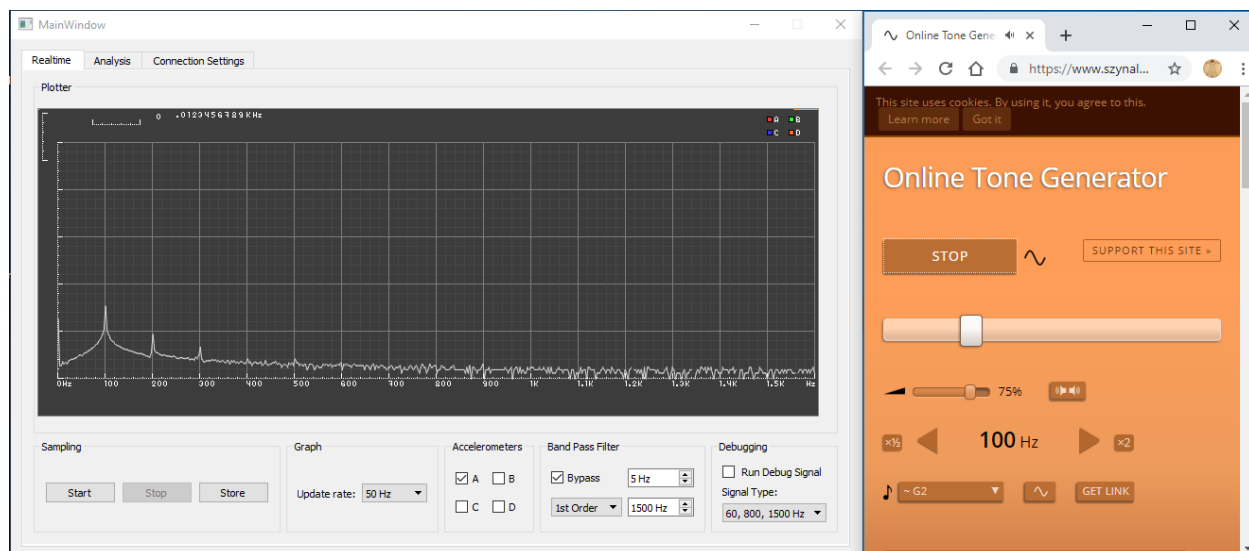
Η συχνότητα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω αυξάνεται σταδιακά. Το μετρούμενο σήμα για είσοδο 50 Hz παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-8 και Εικόνα 6-9, για είσοδο 100 Hz στην Εικόνα 6-10 και Εικόνα 6-11, για είσοδο 200 Hz στην Εικόνα 6-12 και Εικόνα 6-13, για είσοδο 400 Hz στην Εικόνα 6-14 και Εικόνα 6-15 και για είσοδο 600 Hz στην Εικόνα 6-16 και Εικόνα 6-17. Στα 600 Hz αρχίζουν να γίνονται αισθητά aliasing effects που σχετίζονται με τη χαμηλή συχνότητα δειγματοληψίας του επιταχυνσιομέτρου ( $F_s = 3200 \text{ Hz}$ ). Θεωρητικά, τα σήματα που μπορούν να μετρηθούν βάσει του θεωρήματος Nyquist είναι  $F_s/2 = 1600 \text{ Hz}$ . Στην πράξη όμως η κυματομορφή αλλοιώνεται για συχνότητες μεγαλύτερες από  $F_s/5$ . Το μετρούμενο σήμα, για σήμα εισόδου 1000 Hz παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-18 και Εικόνα 6-19. Στην Εικόνα 6-19 είναι εμφανής η αλλοίωση του χρονικού σήματος (ψαλιδισμός κορυφών). Το φάσμα του μετρούμενου σήματος όμως παρουσιάζει ικανοποιητική ακρίβεια, με την αιχμή να εμφανίζεται μια μικρή ολίσθηση στα 980 Hz περίπου έναντι των 1000 Hz.



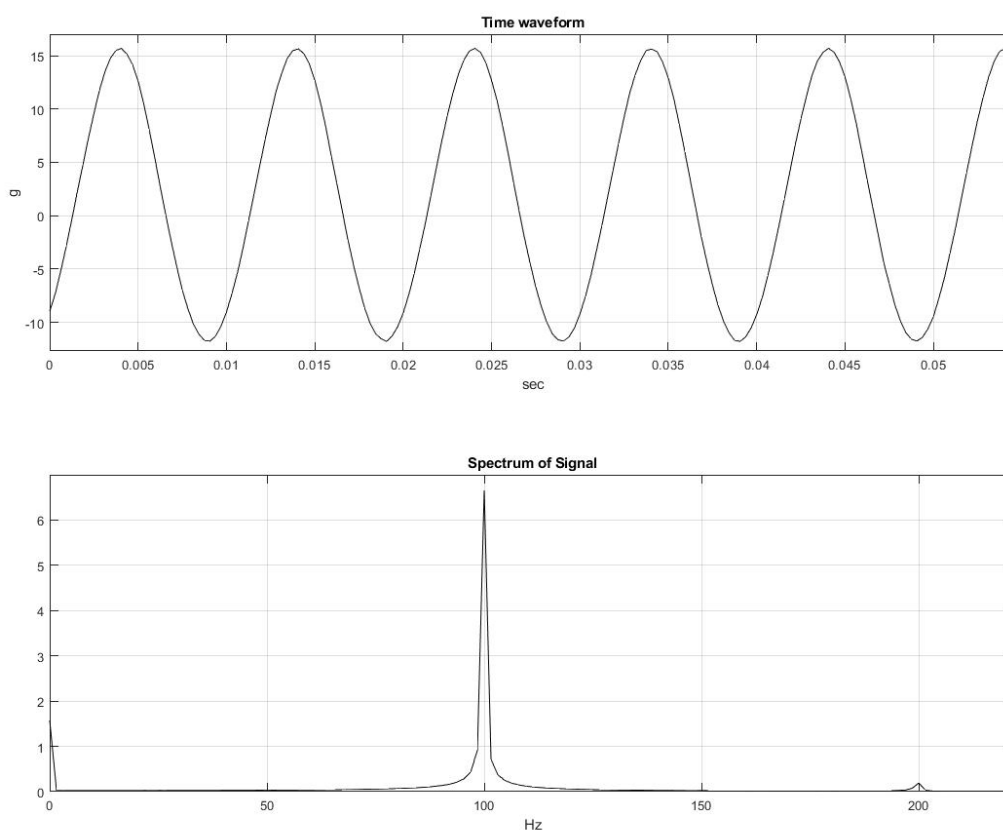
Εικόνα 6-8. Το σήμα διέγερσης στα 50 Hz



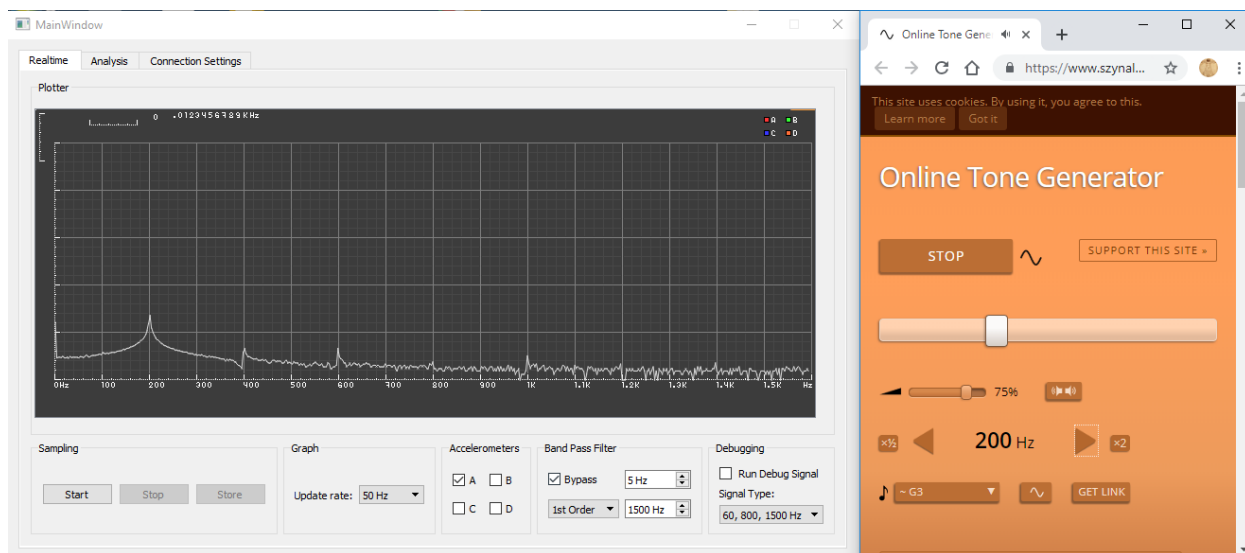
Εικόνα 6-9. Το σήμα απόκρισης στα 50 Hz



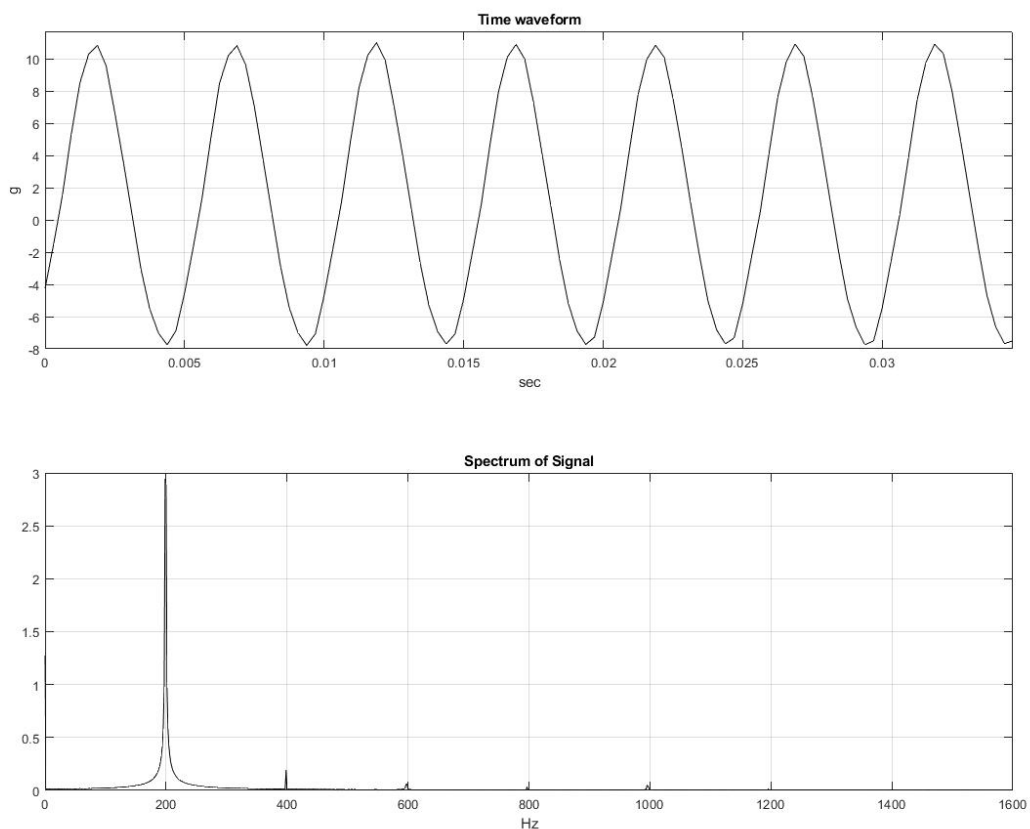
Εικόνα 6-10. Το σήμα διέγερσης στα 100 Hz



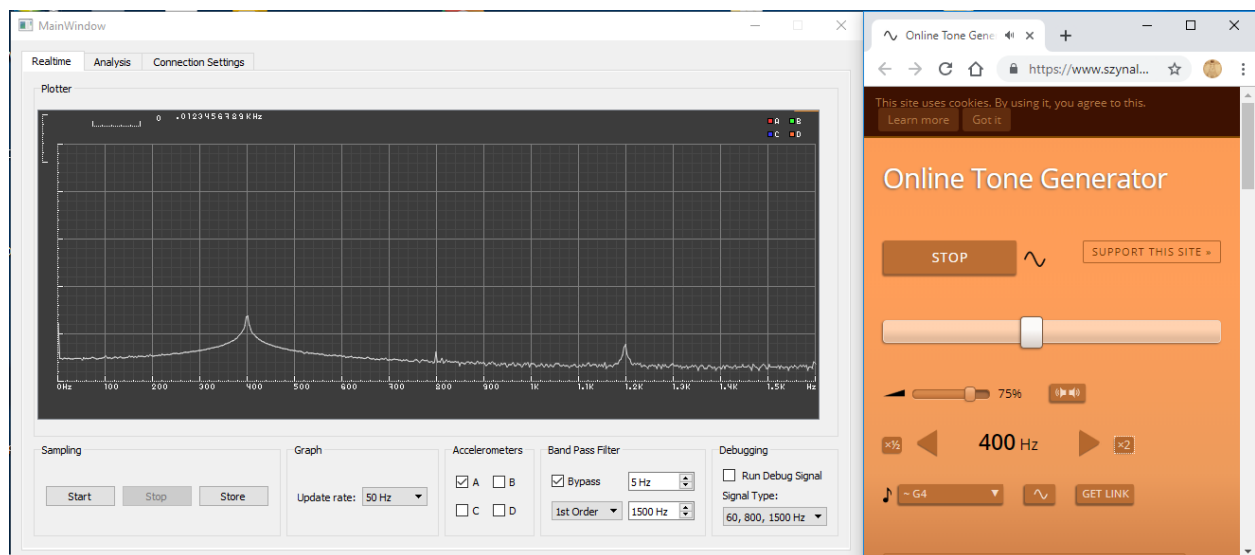
Εικόνα 6-11. Το σήμα απόκρισης στα 100 Hz



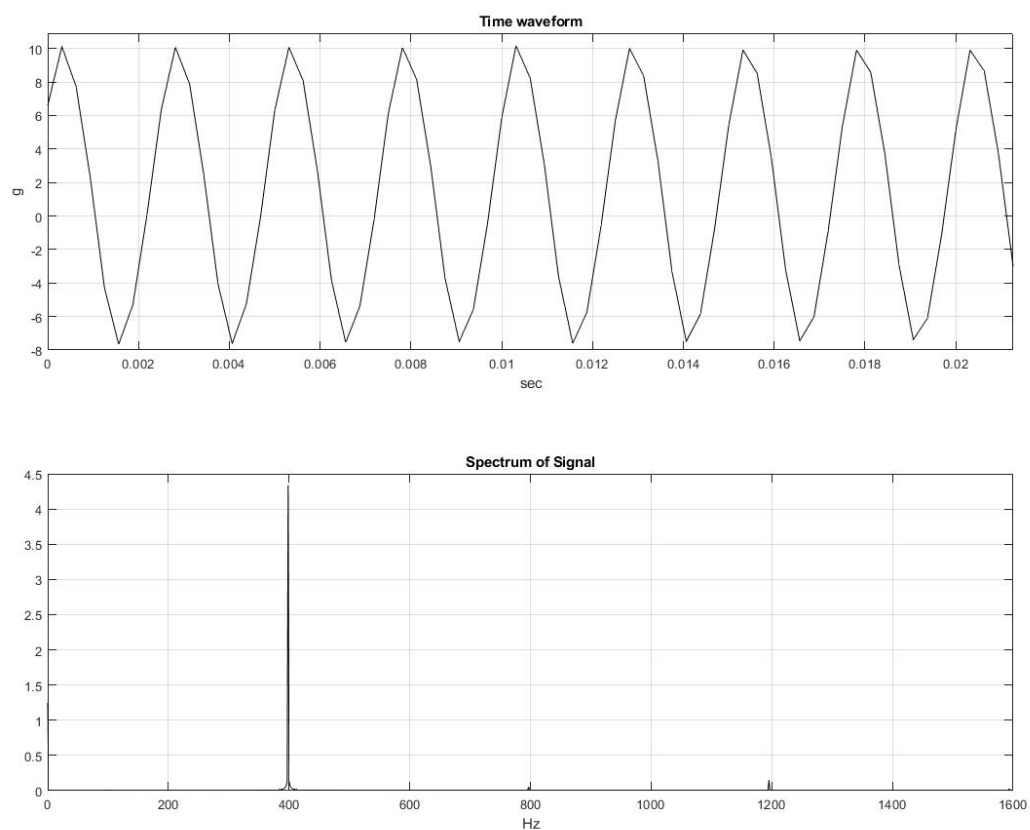
Εικόνα 6-12. Το σήμα διέγερσης στα 200 Hz



Εικόνα 6-13. Το σήμα απόκρισης στα 200 Hz

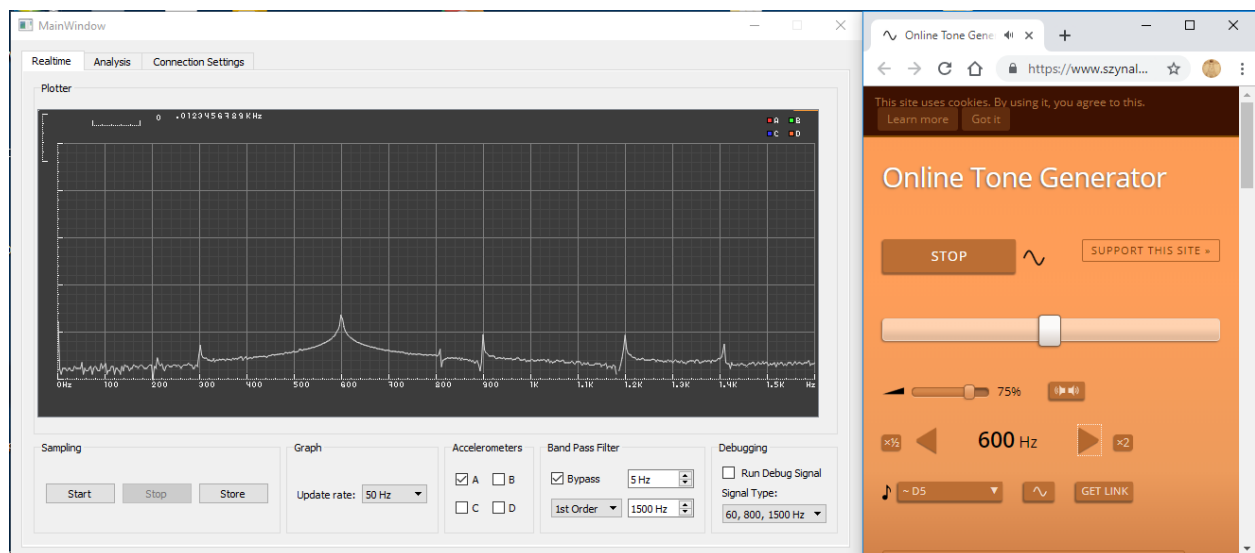


Εικόνα 6-14. Το σήμα διέγερσης στα 400 Hz

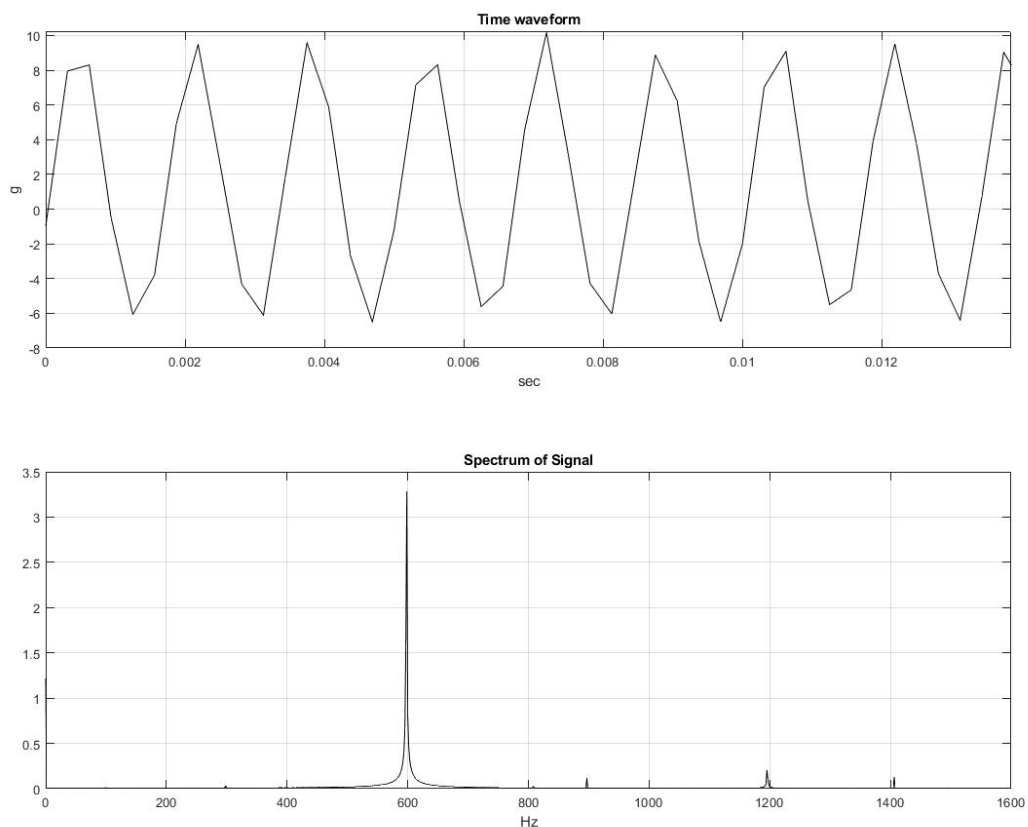


Εικόνα 6-15. Το σήμα απόκρισης στα 400 Hz

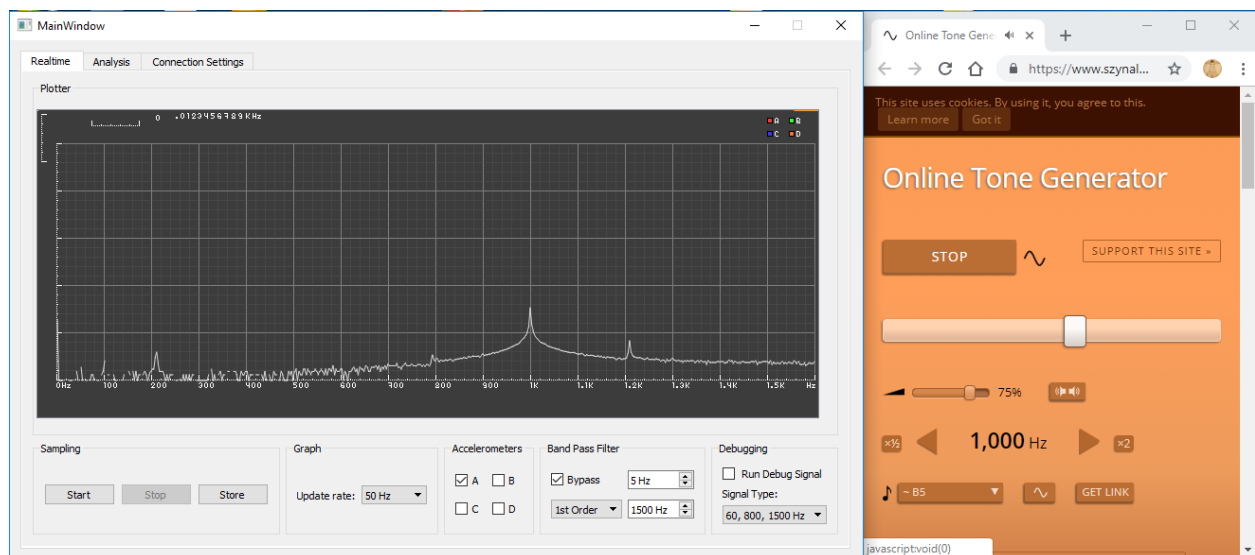




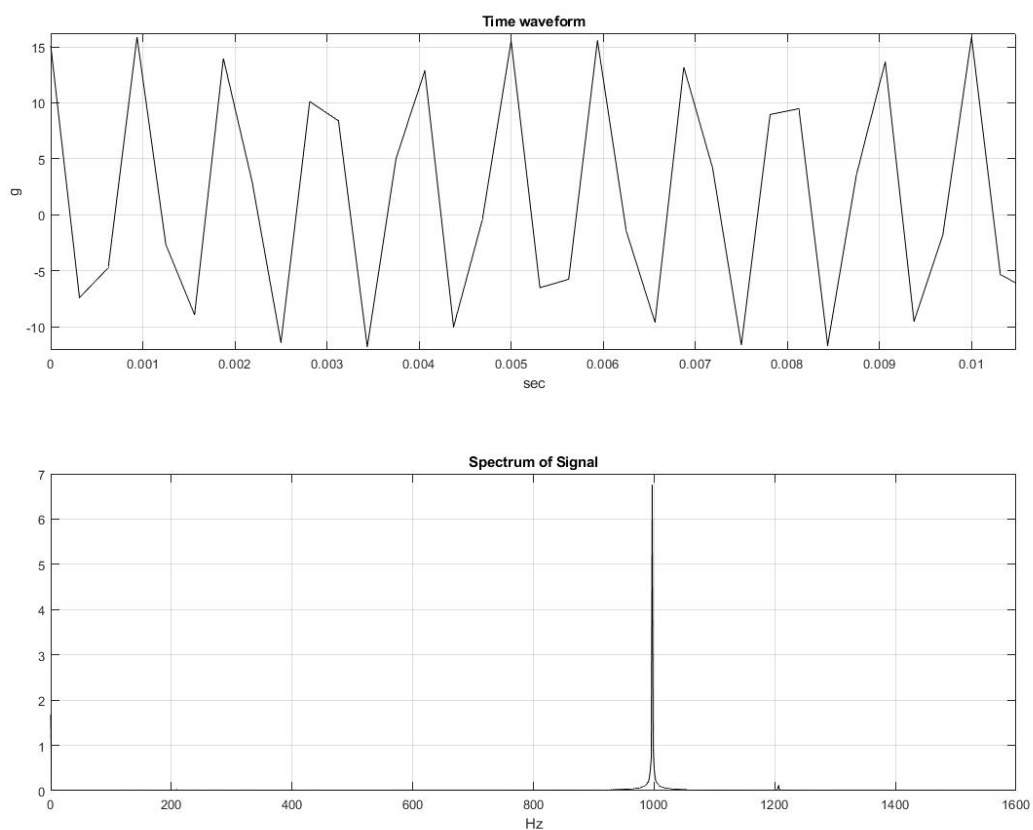
Εικόνα 6-16. Το σήμα διέγερσης στα 600 Hz



Εικόνα 6-17. Το σήμα απόκρισης στα 600 Hz



Εικόνα 6-18. Το σήμα διέγερσης στα 1000 Hz

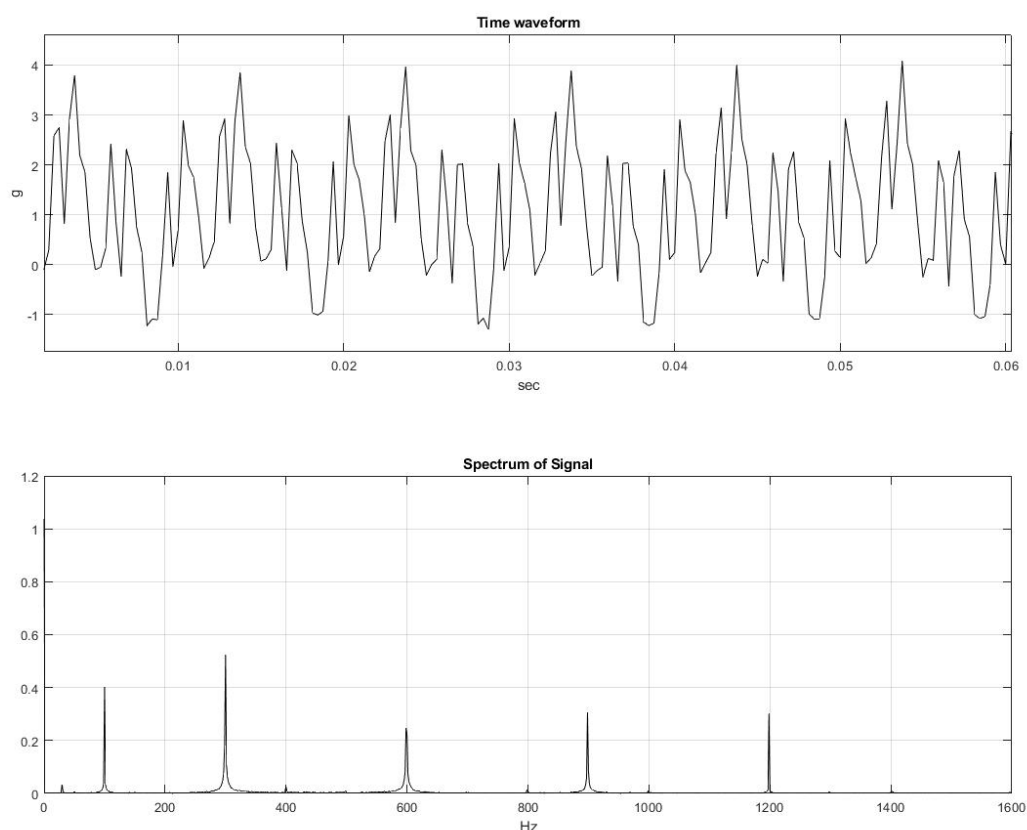


Εικόνα 6-19. Το σήμα απόκρισης στα 1000 Hz

### 6.3 Δοκιμή σε πιο Σύνθετα Σήματα

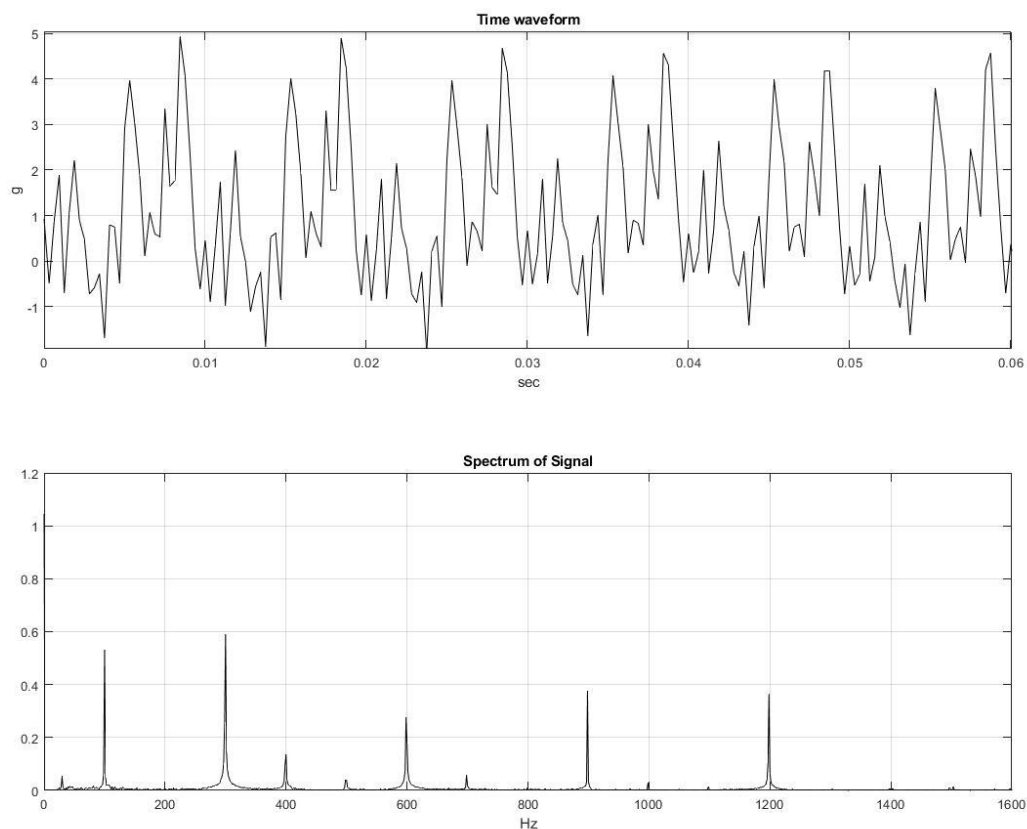
Οι πειραματικές μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο ήταν απαραίτητες για την πειραματική επαλήθευση του ωφέλιμου εύρους συχνοτήτων της μετρητικής διάταξης αλλά τα σήματα ήταν πολύ απλά και δε θα μπορούσαν να προέρχονται από πραγματικές μετρήσεις κραδασμών σε μηχανολογικές διατάξεις. Για το λόγο αυτό η μετρητική διάταξη ελέγχθηκε για δυο επιπλέον σύνθετα σήματα που εμφανίζουν περισσότερες από μια συχνότητες.

Το πρώτο σύνθετο σήμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-20. Το σήμα δημιουργήθηκε από υπέρθεση ημιτονοειδών σημάτων με συχνότητες 100, 300, 600, 900, 1200 Hz με διαφορετικά πλάτη ταλάντωσης. Ένα σήμα αυτού του είδους είναι πιο ρεαλιστικό για μια μηχανολογική εγκατάσταση, καθώς κραδασμοί που οφείλονται σε βλάβες αλλά και στη φυσιολογική λειτουργία της μηχανής διεγείρουν ιδιοσυχνότητες του συστήματος. Η χρονική κυματομορφή του σήματος στην Εικόνα 6-20 παρουσιάζει αλλοίωση λόγω των υψίσυχνων συνιστωσών του σήματος και της σχετικά χαμηλής συχνότητας δειγματοληψίας της διάταξης, όπως συζητήθηκε. Το φάσμα όμως του ίδιου μετρούμενου σήματος, πάλι στην Εικόνα 6-20, δεν παρουσιάζει πρακτικά διάχυση της ενέργειας ταλάντωσης. Οι αιχμές εμφανίζονται στις σωστές συχνότητες (γνωστό σήμα εισόδου). Επιπλέον δεν παρατηρείται σημαντικός μετρητικός θόρυβος.



Εικόνα 6-20. Κυματομορφή και φάσμα του σύνθετου σήματος.

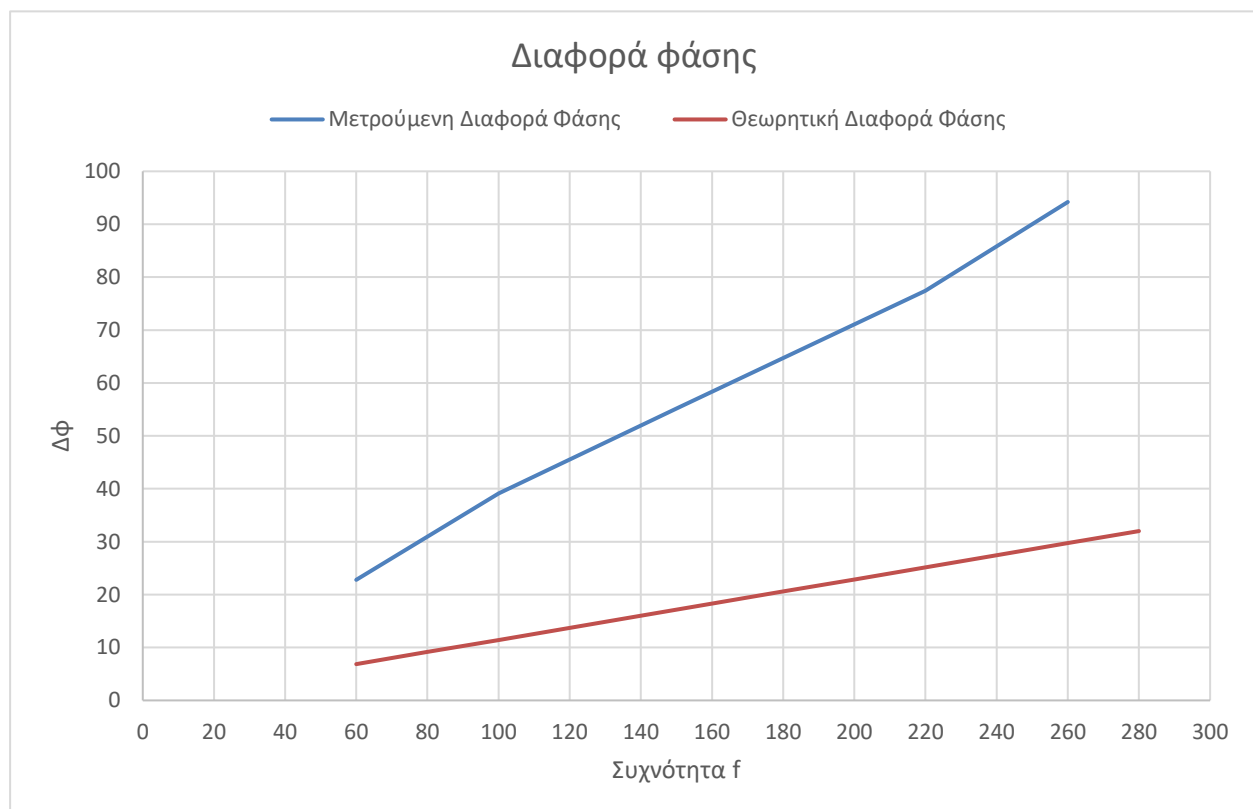
Για την επομένη δοκιμή της διατάξης χρησιμοποιήθηκε και πάλι σήμα εισόδου που προκύπτει από υπέρθεση ημιτονοειδών σημάτων συχνοτήτων 100, 300, 600, 900, 1200 Hz με διαφορετικά πλάτη ταλάντωσης. Αυτή τη φορά όμως, στο σήμα εισόδου προστέθηκε λευκός θόρυβος. Το μετρούμενο σήμα για αυτό το πείραμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-21. Στο χρονικό σήμα παρατηρούνται, όπως αναμένεται, ακόμα σημαντικότερες αλλοιώσεις συγκριτικά με το ίδιο σήμα εισόδου χωρίς θόρυβο (Εικόνα 6-20), που οφείλονται στο θόρυβο υψηλής συχνότητας. Το φάσμα όμως του μετρούμενου σήματος (Εικόνα 6-21) δεν παρουσιάζει σημαντική διάχυση με εξαίρεση μια αιχμή στα 400 Hz που δεν αντιστοιχεί σε κάποια πραγματική συχνότητα του γνωστού σήματος εισόδου. Γενικά, η συμπεριφορά του μετρητικού συστήματος και σε αυτή την περίπτωση κρίνεται επαρκής.



Εικόνα 6-21. Κυματομορφή και φάσμα του σύνθετου σήματος με πρόσθεση θορύβου.

## 6.4 Χρονισμός Ταυτόχρονων Μετρήσεων

Είναι σημαντικό να ελεγχθεί ο συγχρονισμός των μετρούμενων σημάτων μεταξύ δύο ή περισσότερων αισθητήρων. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονη μέτρηση της ίδιας ταλάντωσης χρησιμοποιώντας την πειραματική διάταξη παραγωγής κραδασμών που παρουσιάζεται προηγουμένως. Σύμφωνα με την Υποενότητα 5.3.8 αναμένεται μέγιστη χρονική διαφορά ενός δείγματος μεταξύ των δύο μετρήσεων το οποίο μεταφράζεται σε μία διαφορά φάσης που εξαρτάται από την συχνότητα του σήματος. Αυτή η θεωρητική διαφορά φάσης, συναρτήσει της συχνότητας του σήματος, απεικονίζεται στην κόκκινη καμπύλη του διαγράμματος Διάγραμμα 6-1. Η πραγματική μετρούμενη διαφορά φάσης μεταξύ δύο αισθητήρων απεικονίζεται στην μπλε καμπύλη στο Διάγραμμα 6-1.

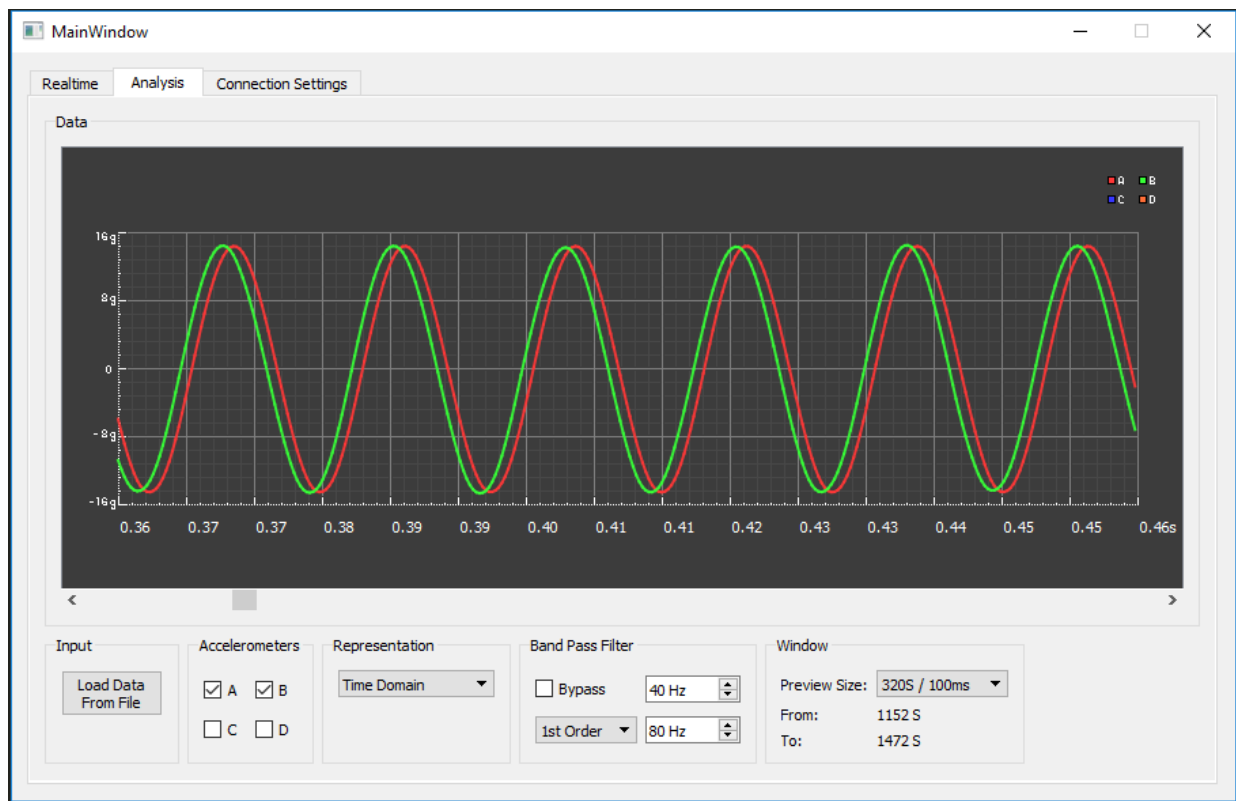


Διάγραμμα 6-1. Πειραματική και θεωρητική διαφορά φάσης.

Αυτό πιθανόν να οφείλεται σε κακό χρονισμό των στοιβών των επιταχυνσιομέτρων. Για το λόγο αυτό δεν συνιστάται η χρήση της μετρητικής διάταξης σε εφαρμογές που απαιτείται ο υπολογισμός της διαφοράς φάσης ταυτόχρονων μετρήσεων.

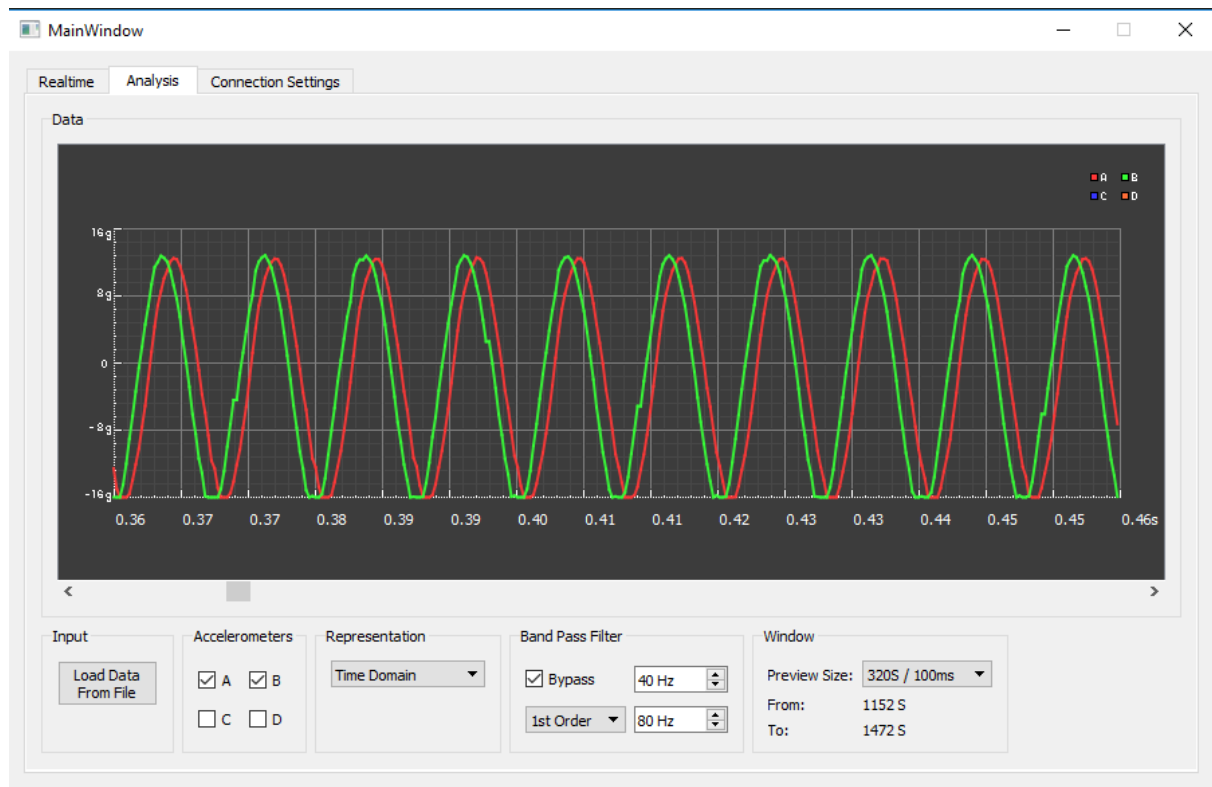
Ακολουθούν χρονικές κυματομορφές μέτρησης ταυτόχρονων δονήσεων στα 60 Hz Εικόνα 6-22. Διαφορά φάσης στα 60 Hz Εικόνα 6-22), στα 100 Hz (Εικόνα 6-23), στα 150 Hz (Εικόνα 6-24), στα 220 Hz (Εικόνα 6-25) και στα 260 Hz (Εικόνα 6-26) από δύο επιταχυνσιόμετρα.

Η μετρούμενη διαφορά φάσης στα 60Hz είναι 22,8 μοίρες όπως φαίνεται στην Εικόνα 5 22.



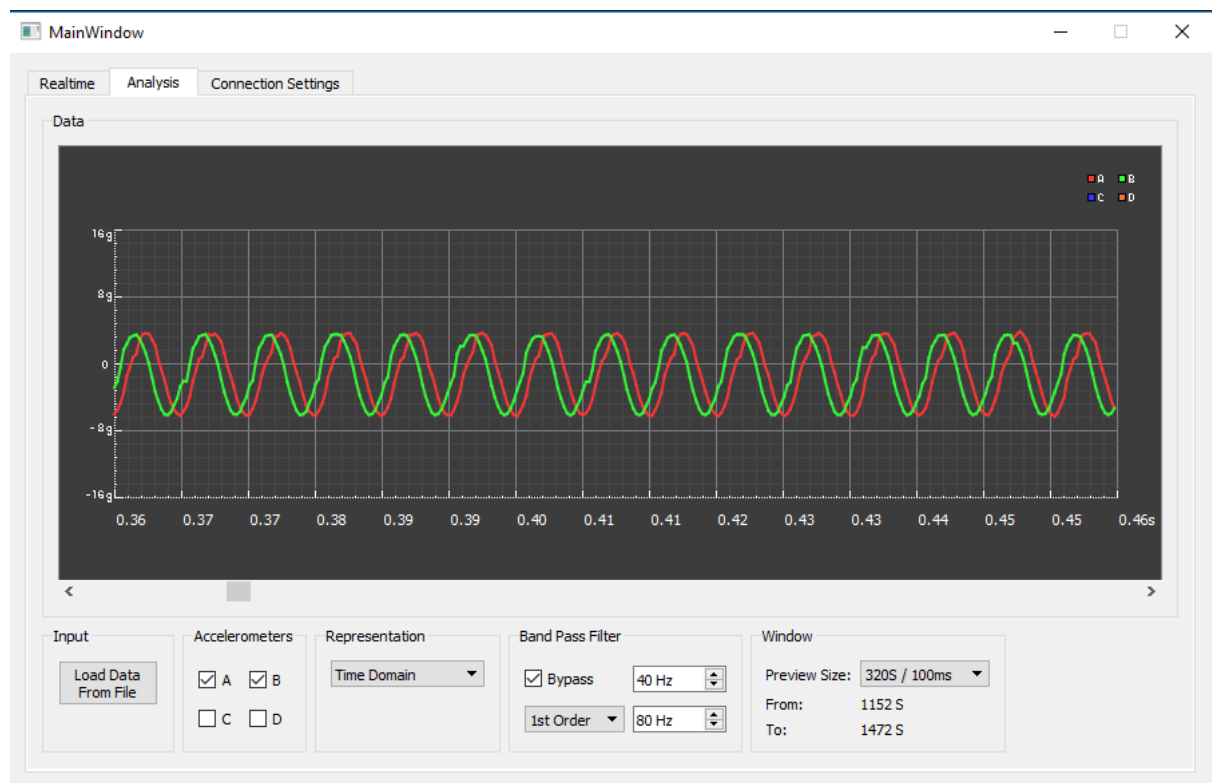
Εικόνα 6-22. Διαφορά φάσης στα 60 Hz

Η μετρούμενη διαφορά φάσης στα 100Hz είναι 39,1 μοίρες όπως φαίνεται στην Εικόνα 5 23.



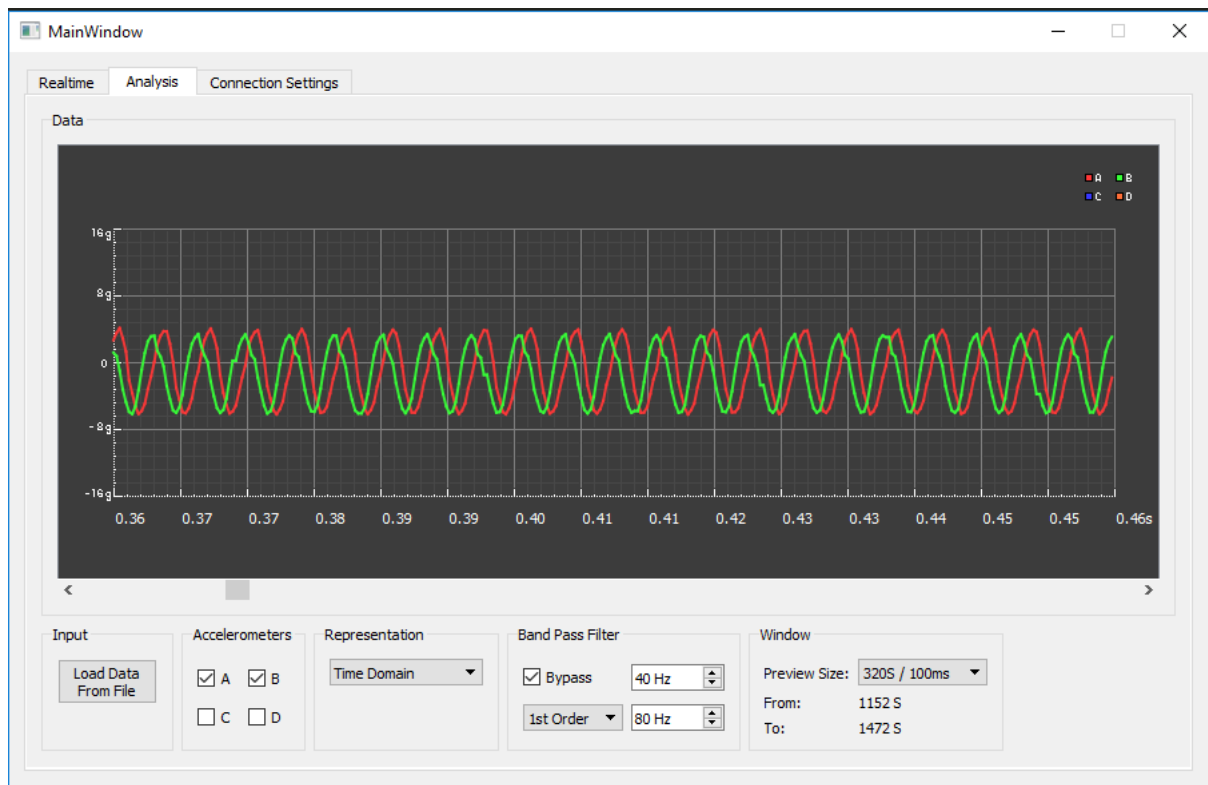
Εικόνα 6-23. Διαφορά φάσης στα 100 Hz

Η μετρούμενη διαφορά φάσης στα 150Hz είναι 55,1 μοίρες όπως φαίνεται στην Εικόνα 5 24.



Εικόνα 6-24. Διαφορά φάσης στα 150 Hz

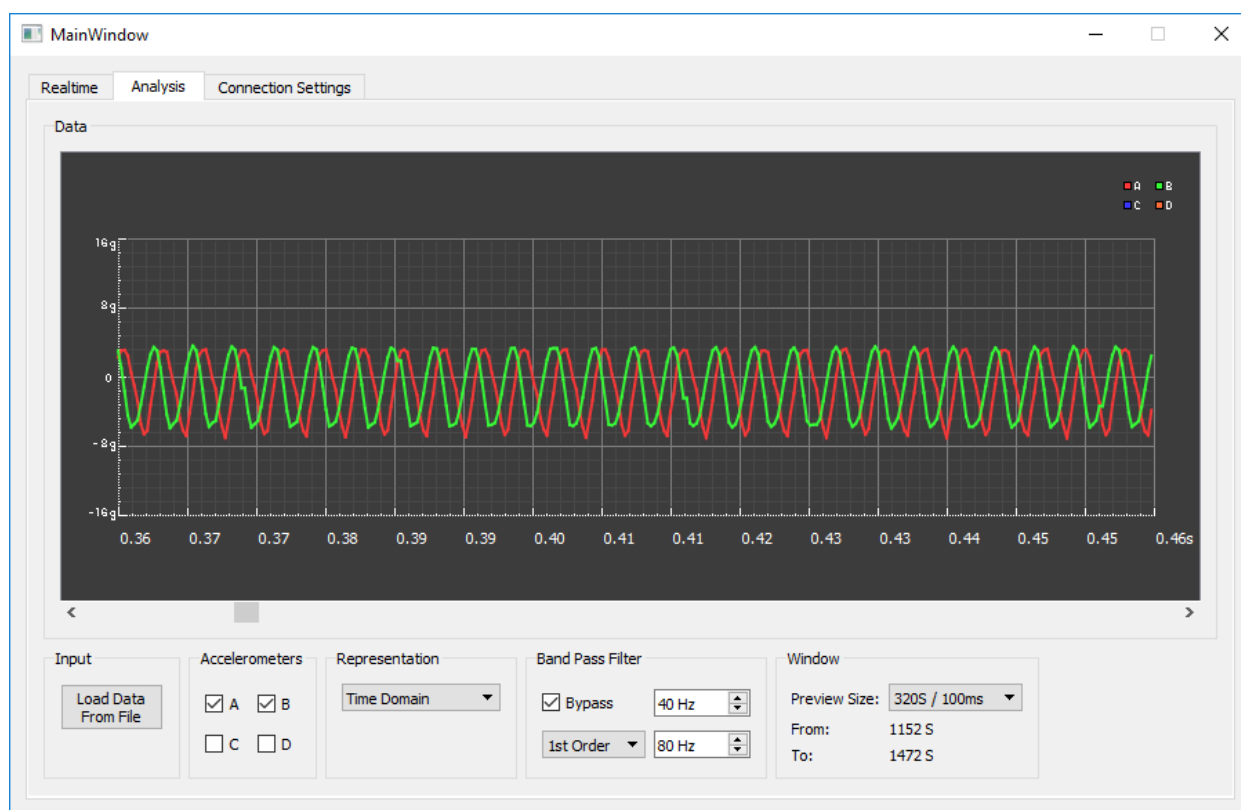
Η μετρούμενη διαφορά φάσης στα 220Hz είναι 77,4 μοίρες όπως φαίνεται στην Εικόνα 5 25.



Εικόνα 6-25. Διαφορά φάσης στα 220 Hz

Η μετρούμενη διαφορά φάσης στα 260Hz είναι 94,2 μοίρες όπως φαίνεται στην Εικόνα 5 26.





Εικόνα 6-26. Διαφορά φάσης στα 260 Hz

## 7. Συμπεράσματα

---

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια μετρητική διάταξη μέτρησης κραδασμών μηχανολογικών διατάξεων με σκοπό τη χρήση σε εφαρμογές διάγνωσης βλαβών σε μηχανολογικές εγκαταστάσεις. Το βασικό κίνητρο που οδήγησε στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας είναι το υψηλό κόστος αντίστοιχων συστημάτων μέτρησης κραδασμών που διατίθενται στο εμπόριο. Η προτεινόμενη μετρητική διάταξη αποτελείται από 4 επιταχυνσιόμετρα τύπου ADXL345 και ένα μικροελεγκτή τύπου ESP32 που στέλνει ασύρματα το μετρούμενο σήμα σε Η/Υ σε πραγματικό χρόνο. Ο χρήστης αλληλεπιδρά με το μετρητικό σύστημα μέσω του GUI που αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C++. Το συνολικό κόστος υλοποίησης του μετρητικού συστήματος είναι χαμηλότερο των 100 ευρώ.

Η αξιοπιστία του μετρητικού συστήματος ελέγχθηκε πειραματικά με τη χρήση της διάταξης παραγωγής σύνθετων κραδασμών η οποία υλοποιήθηκε. Οι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν δείχνουν ότι η διάταξη είναι αξιόπιστη για βλάβες που εμφανίζουν συχνότητες κάτω των 1600 Hz (ιδανικά κάτω των 1000 Hz). Αυτό το εύρος μετρούμενων συχνοτήτων καλύπτει ένα σημαντικό πλήθος εφαρμογών όπως για παράδειγμα η διάγνωση αζυγοσταθμίας, κακής ευθυγράμμισης και μηχανικής χαλαρότητας.

Μειονεκτήματα της συγκεκριμένης διάταξης είναι ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ταχύστροφες διατάξεις (πρακτικά άνω των 10000 RPM). Επιπλέον, το εύρος των μετρούμενων συχνοτήτων είναι περιοριστικό για τη διάγνωση βλαβών όπως η φθορά εδράσεων κύλισης, στις οποίες η ενέργεια κραδασμών που σχετίζεται άμεσα με τη βλάβη είναι μικρή (πολλές φορές στα επίπεδα του μετρητικού θορύβου) αλλά ο μηχανισμός της βλάβης είναι τέτοιος που μπορεί να διεγείρει υψηλές ιδιοσυχνότητες του μηχανολογικού συστήματος. Για να είναι δυνατή η χρήση του συστήματος σε τέτοιες εφαρμογές θα πρέπει να αντικατασταθούν τα επιταχυνσιόμετρα ώστε το ωφέλιμο εύρος μέτρησης να είναι της τάξης των 5000 Hz. Ένα ενδεικτικό κόστος αισθητήρων σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου 220 ευρώ (ADIS16228 Analog Devices) [8]. Τέλος δεν συνιστάται η χρήση της διάταξης σε εφαρμογές όπου απαιτείται ο υπολογισμός της διαφοράς φάσης ταυτοχρόνων μετρήσεων (πχ. ευθυγράμμιση αξόνων), καθώς οι μετρήσεις μεταξύ δυο η παραπάνω αισθητήρων δεν είναι συγχρονισμένες.

### 7.1 Μελλοντικές επεκτάσεις

Μια μελλοντική εργασία θα μπορούσε να περιλαμβάνει το συγχρονισμό των μετρήσεων μεταξύ δυο ή παραπάνω αισθητήρων.

Επιπλέον, θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα η υλοποίηση ενός συστήματος με ασύρματη επικοινωνία μεταξύ του μικροελεγκτή και των αισθητήρων, καθώς η ενσύρματη σύνδεση αισθητήρων σε μεγάλες μηχανολογικές εγκαταστάσεις είναι δυσχερής.

## 8. Βιβλιογραφία

---

- [1] Καλαϊτζάκη Κ., Κουτρούλη Ε. "Ηλεκτρικές Μετρήσεις και Αισθητήρες", 2010
- [2] Διαγνωστική βλαβών στρεφόμενου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού – Εργαστήριο Δυναμικής & Κατασκευών – ΕΜΠ
- [3] <https://powerplantmen.files.wordpress.com/2015/07/motor-with-pump-coupling1.jpg>
- [4] <https://www.sensorsmag.com/components/simple-steps-to-selecting-right-accelerometer>
- [5] <https://support.holmsecurity.com/hc/en-us/articles/212963869-What-is-the-difference-between-TCP-and-UDP->
- [6] [http://users.uoa.gr/~atzanis/MathGeo/Fourier\\_analysis.pdf](http://users.uoa.gr/~atzanis/MathGeo/Fourier_analysis.pdf)
- [7] <https://medium.com/@khademi/choosing-the-right-sensor-for-vibration-analysis-95c751a8ccc8>
- [8] <https://gr.mouser.com/>
- [9] <https://www.analog.com/en/products/adxl345.html>
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/ESP32>
- [11] <https://blog.mide.com/accelerometer-selection>
- [12] [https://en.wikipedia.org/wiki/Microelectromechanical\\_systems](https://en.wikipedia.org/wiki/Microelectromechanical_systems)